

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ

Τ. Ε. Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ

ΣΧΟΛΗ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ: ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

Επιβλέπων: ΠΕΤΡΟΣ Γ. ΒΕΡΝΑΔΟΣ, Ομότιμος Καθηγητής

Συνεπιβλέπουσα: ΕΡΙΕΤΤΑ Ι. ΖΟΥΝΤΟΥΡΙΔΟΥ, Εργ. Συνεργάτης

**Μελέτη εκμετάλλευσης ωκεάνιας θερμικής ενέργειας για την παραγωγή
ηλεκτρικής ενέργειας– Πλατφόρμες ΟΤΕC**

**Study exploitation Ocean thermal energy to generate electricity - Platforms
ΟΤΕC**

**Πτυχιακή Εργασία:
Κωνσταντάρκης Μηνάς (Α.Μ. 35067)
Μακρής Κωνσταντίνος (Α.Μ. 34818)**

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2014

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε αρχικά τον επιβλέπων Ομότιμο Καθηγητή του τμήματος Ηλεκτρολογίας κύριο Πέτρο Γ. Βερνάδο καθώς και την συνεπιβλέπουσα Εργαστηριακή συνεργάτη του τμήματος Ηλεκτρολογίας κυρία Εριέττα Ι. Ζουντουρίδου. Για την ευκαιρία που μας έδωσαν και την εμπιστοσύνη που έδειξαν στο πρόσωπο μας να ασχοληθούμε με αυτό το σύγχρονο και ενδιαφέρον θέμα που ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των Α.Π.Ε και αποτελεί την πρώτη εις βάθος ενασχόληση μας ως φοιτητές Ηλεκτρολόγοι Μηχανικοί Τ.Ε. με το συγκεκριμένο αντικείμενο.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε επίσης όλο το εκπαιδευτικό προσωπικό του Τμήματος Ηλεκτρολογίας - Σ.Τ.Εφ Τ.Ε.Ι Πειραιά για τις γνώσεις που μας έδωσαν κατά τη διάρκεια των προπτυχιακών μας σπουδών.

Τέλος οφείλουμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας για την αμέριστη στήριξη και υπομονή που έδειξαν καθ' όλη τη διάρκεια των προπτυχιακών μας σπουδών και εκπόνησης της πτυχιακής μας εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας είναι να παρουσιάσει τις εξελίξεις στη μετατροπή της ωκεάνιας θερμικής ενέργειας, ως φορέας ενέργειας τη συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τις προοπτικές που ανοίγονται στο μέλλον ως φορέας ενέργειας. Στόχος μας ήταν η πτυχιακή αυτή να παρουσιάσει τα ενδιαφέροντα και τα οφέλη που έχει η τεχνολογία αυτή όσον αφορά την ενεργειακή ανεξάρτηση από τους υδρογονάνθρακες, την πυρηνική ενέργεια και κάθε ρυπογόνου μορφής ενέργεια και την ένταξη σε μια οικονομία καθαρής ενέργειας όπως είναι αυτή που μπορούν να προσφέρουν οι Α.Π.Ε γενικότερα. Η πτυχιακή αυτή αναφέρεται στη συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και σε διάφορα παράγωγα οφέλη της μετατροπής της Ωκεάνιας Θερμικής Ενέργειας όπως είναι η παραγωγή υδρογόνου, αφαλάτωση και παραγωγή πόσιμοι νερού, κλιματισμός κ.λ.π.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται γενικά η μετατροπή ωκεάνιας θερμικής ενέργειας, η αρχή λειτουργίας της, η κατηγοριοποίηση σταθμών OTEC, οι διατάξεις των συστημάτων της, πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα της, άλλες εφαρμογές της και τέλος η μελέτη τεχνικής ετοιμότητας OTEC.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** παρουσιάζεται γενικότερα η θαλάσσια ενέργεια και τα πλεονεκτήματα που προσφέρει, οι επιπτώσεις της στο περιβάλλον, ενέργεια από κυματισμό, σταθερά και πλωτά συστήματα, στο σύστημα Wave Dragon, ενέργεια από παλίρροιες, τρόποι λειτουργίας και εγκατάστασης παραγωγής παλιρροιακής ενέργειας, η Υδροτουρμπίνα Davis, αρχή λειτουργίας των στροβίλων και τέλος παραγωγή ενέργειας από θαλάσσια ρεύματα.

Στο **τρίτο κεφάλαιο** γίνεται μια συνοπτική αναφορά στην ωσμωτική ενέργεια η αλλιώς ενέργεια από κλίση-αγωγιμότητα.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται αναλυτικά ως φορέας ενέργειας το υδρογόνο, η ιστορική διαδρομή της ανακάλυψης και της τεχνολογικής έρευνας του και αναλύονται οι φυσικές και χημικές του ιδιότητες του. Περιγράφεται η τρόποι παραγωγής του, η αποθήκευση και μεταφορά του, η χρησιμοποίηση του στην παραγωγή ενέργειας, γίνεται εισαγωγή στα δυο βασικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στη συνέχεια αναπτύσσει τη δυνατότητα να συνδυαστούν για παραγωγή υδρογόνου. Συγκεκριμένα αναπτύσσει το αιολικό και το ηλιακό σύστημα και προχωράει στην ανάλυση των υβριδικών αντίστοιχων συστημάτων για παραγωγή υδρογόνου. Τέλος γίνεται αναφορά στην δυνατότητα συνδυασμού υπεράκτιας αιολικής, ηλιακής

και ηλιοθερμικής ενέργειας.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** γίνεται μια εισαγωγή στην αφαλάτωση καθώς αναλύονται μερικές από τις συνήθεις μέθοδοι αφαλάτωσης όπως: Εξάτμιση με συμπίεση ατμών, Μηχανική συμπίεση ατμού και Ηλιακή απόσταξη.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

ΟΤΕC, Ενέργεια από κυματισμό, Ωσμωτική Ενέργεια, Τεχνολογία Υδρογόνου, Υπεράκτια αιολική ενέργεια, Ηλιακό σύστημα, Ηλιοθερμική ενέργεια, Τεχνολογίες Αφαλάτωσης.

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to present the developments in the conversion of ocean thermal energy as an energy carrier, the combined production of electricity from renewable energy systems and the prospects opened up in the future as an energy carrier . Our goal was the thesis is to present the interests and benefits of having this technology in terms of energy independence from oil and gas, nuclear energy and polluting every form of energy and the integration in a clean energy economy as one that can offer the ANA general. The thesis refers to the combined production of electricity from renewable energy systems and various derivatives benefits of conversion Ocean thermal energy such as hydrogen production , desalination and drinking water , air conditioning , etc.

The **first chapter** presents the general ocean thermal energy conversion , the operating principle , the categorization stations OTEC, the provisions of its systems , advantages - disadvantages of other applications and finally the study of technical preparedness OTEC.

The **second chapter** presents general marine energy and the advantages it offers, its impact on the environment , energy wave , fixed and floating systems , the system Wave Dragon, energy from tides , modes and tidal energy production facility , the Ydrotourmpina Davis, principle of operation of the turbine and finally producing energy from sea currents .

The **third chapter** is a brief reference to the osmotic effect of the otherwise energy - slope conductance .

The **fourth chapter** presents in detail as an energy carrier, hydrogen, history of discovery and technological research and analyze the physical and chemical properties. Describe the modes of production , storage and transportation , the use of energy production , an introduction to two key renewable energy systems and then develops the ability to combine to produce hydrogen . It develops the wind and the solar system , and proceeds to the analysis of hybrid respective systems for hydrogen production . Finally reference is made to the possibility of combining offshore wind , solar and solar thermal energy .

In **the fifth chapter** introduces desalination as analyzed some of the common methods of desalination as : Exhaust vapor compression , Mechanical vapor compression distillation and Solar .

KEY WORDS

OTEC, wave energy, Osmotic Power, Hydrogen Technology, Offshore Wind Energy, Solar System, Solar thermal energy, Desalination Technologies.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΩΚΕΑΝΙΑΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΟΤΕC)	
1.1	Αρχή λειτουργίας..... 10
1.2	Κατηγοριοποίηση σταθμών ΟΤΕC..... 11
1.3	Διάταξη συστήματος ανοικτού κύκλου ΟΤΕC..... 12
1.4	Διάταξη συστήματος κλειστού κύκλου ΟΤΕC..... 12
1.5	Διάταξη συστήματος υβριδικού κύκλου ΟΤΕC..... 13
1.6	Χωροθέτηση συστημάτων ΟΤΕC..... 14
1.7	Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα..... 15
1.8	Άλλες εφαρμογές ΟΤΕC..... 15
1.9	Οφέλη..... 16
1.10	Μειονεκτήματα..... 16
1.11	Κόστος συστήματος ΟΤΕC..... 16
1.12	Μελέτη τεχνικής ετοιμότητας (ΟΤΕC)..... 16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	
2.0.1	Πλεονεκτήματα..... 43
2.0.2	Επιπτώσεις στο περιβάλλον..... 43
2.1	Ενέργεια από κυματισμό..... 44
2.1.1	Σταθερά συστήματα..... 49
2.1.2	Πλωτά συστήματα..... 49
2.1.3	Wave dragon..... 50
2.1.3.1	Αρχές λειτουργίας..... 51
2.1.3.2	Σταθμός παραγωγής ενέργειας (Wave dragon)..... 51
2.1.3.3	Παράμετροι που επηρεάζουν την παραγωγή..... 51
2.1.4	Ενέργεια από κυματισμούς..... 52
2.1.5	Oyster wave power..... 58
2.1.6	Πλεονεκτήματα..... 58
2.2	Ενέργεια από παλίρροιες..... 58
2.2.1	Εγκαταστάσεις παραγωγής παλιρροιακής ενέργειας..... 62
2.2.2	Τρόπος λειτουργίας..... 63
2.2.3	Εγκαταστάσεις παραγωγής παλιρροιακής ενέργειας..... 64
2.2.4	Στρόβιλοι διοχέτευσης ροής..... 65
2.2.4.1	Οριζοντίου άξονα..... 66
2.2.4.2	Με άξονα κατακόρυφο στη ροή..... 67
2.2.4.3	Κατακόρυφου άξονα..... 68
2.2.5	Υδροτουρμπίνα Davis..... 68
2.2.6	Αρχή λειτουργίας των στροβίλων..... 73
2.2.7	Ενέργεια από θαλάσσια ρεύματα..... 79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΩΣΜΩΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	
3.1	Ενέργεια από κλίση – Αγωγιμότητα (ωσμωτική ενέργεια)..... 83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.

4.1	Υδρογόνο.....	86
4.1.1	Γενικά και ιστορικά στοιχεία	86
4.1.2	Φυσικές, χημικές και μαγνητικές ιδιότητες.....	90
4.2	Υδρογόνο ως φορέας ενέργειας.....	99
4.2.1	Ενέργεια και οικονομία	99
4.2.2	Παραγωγή-Αποθήκευση.....	101
4.2.3	Διανομή-Εμπόριο-κατανάλωση	102
4.3	Παραγωγή υδρογόνου.....	103
4.3.1	Ηλεκτρόλυση νερού	103
4.3.2	Θερμοχημική διάσπαση.....	107
4.3.3	Άλλες μελλοντικές μέθοδοι παραγωγής.....	109
4.3.4	Καινοτόμοι τρόποι παραγωγής.....	110
4.4	Αποθήκευση και Μεταφορά.....	116
4.4.1	Συμπίεση Υδρογόνου	117
4.4.2	Υδρογόνο σε υγρή μορφή.....	124
4.4.3	Υδρογόνο σε στερεά μορφή	132
4.4.4	Μεταφορά.....	133
4.5	Χρησιμοποίηση Υδρογόνου στην παραγωγή ενέργειας.....	138
4.5.1	Κύτταρο καυσίμου-Αρχή λειτουργίας.....	138
4.5.2	Τύποι κυττάρων καυσίμου	146
4.5.3	Ανάφλεξη	146
4.5.4	Μηχανή εμβόλων και αεριοστρόβιλοι.....	148
4.5.5	Άλλες θερμικές χρήσεις του υδρογόνου	152
4.5.6	Σύνδεση με το δίκτυο	153
4.6	Συνδυασμένα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε.....	155
4.6.1	Αιολικό σύστημα.....	155
	- Μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου	
	- Η αιολική ενέργεια και το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό	
	- Ενεργειακά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας	
	- Τύποι συλλογής της αιολικής ενέργειας	
	- Η δομή μιας ανεμογεννήτριας	
	- Ασύγχρονες γεννήτριες	
	- Σύγχρονες γεννήτριες	
	- Υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με παραγωγή H ₂	
	- Εφαρμογή στην Ελλάδα	
4.6.2	Υπεράκτια αιολική ενέργεια.....	193
4.6.3	Ηλιακό σύστημα.....	207
	- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	
	- Περιγραφή, χαρακτηριστικά και κατηγορίες φωτοβολταϊκών	
	- Φωτοβολταϊκό φαινόμενο-δημιουργία φωτορεύματος	
	- Υβριδικά συστήματα φωτοβολταϊκών στοιχείων με κυψέλες υδρογόνου	
	- Βέλτιστη διασύνδεση φωτοβολταϊκών συστοιχιών και PEM ηλεκτρολυτών σε υβριδικά συστήματα κατάλληλα για τροφοδότηση απομακρυσμένων περιοχών	

4.6.4 Ηλιοθερμική ενέργεια (Τεχνολογία Παραβολικών Κατόπτρων)	243
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ	
5.1 Εισαγωγή στην αφαλάτωση.....	262
5.2 Συνήθεις μέθοδοι αφαλάτωσης.....	262
5.3 Εξάτμιση με συμπίεση ατμών (Vapor Compression VC)	263
5.4 Μηχανική συμπίεση ατμού.....	265
5.5 Ηλιακή απόσταξη (Solar Distillation).....	266

ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η έννοια OTEC προτάθηκε αρχικά από Jules Verne στο βιβλίο του «20.000 λεύγες κάτω από τη θάλασσα», το οποίο δημοσιεύθηκε στη Γαλλία το 1869. Ο γάλλος φυσικός Ζακ Arsene Δ» Arsonval πρότεινε τυπικά την ιδέα το 1881. Ο μαθητής του, Γάλλος μηχανικός και επιχειρηματίας Δρ Georges Claude , υιοθέτησε την ιδέα και το 1930 έχτισε εγκαταστάσεις ανοιχτού κύκλου OTEC στον κόλπο Matanzas (Κούβα), όπου ένα σύστημα γεννητριών 22-KW χρησιμοποιήθηκε για να ανάψει μια σειρά λαμπτήρων, οι εγκαταστάσεις λειτούργησαν για μερικές ημέρες πρίν καταστραφούν από μια μεγάλη θύελλα. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '50 και της δεκαετίας του '60 έγιναν μια σειρά από σχέδια έρευνας και ανάπτυξης που συμπεριλάμβαναν σχεδιαστικές προτάσεις από την Energie de Mers ή αλλιώς "Ενέργεια από τη θάλασσα" (Club des Argonautes) και από το Εργαστήριο Μετατροπής θαλασσινού νερού στο Πανεπιστήμιο Berkley της Καλιφόρνιας. Γάλλοι ερευνητές το (1956) σχεδίασαν εγκαταστάσεις ανοικτού-κύκλου OTEC 3MW για το Αμπιτζάν στη δυτική ακτή της Αφρικής, αλλά οι εγκαταστάσεις δεν ολοκληρώθηκαν ποτέ λόγω του ανταγωνισμού με την ανέξοδη υδροηλεκτρική ενέργεια. Στις επόμενες δύο δεκαετίες η ομοσπονδιακή κυβέρνηση των ΗΠΑ ξεκίνησε διάφορα προγράμματα E&A (Έρευνας & Ανάπτυξης) που περιελάμβαναν δοκιμές απόδοσης, προσχέδια και εγκαταστάσεις επίδειξης. Σημαντικές προσπάθειες περιλάμβανε το προσχέδιο για πλωτές εγκαταστάσεις κλειστού κύκλου 40-MWe από το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Φυσικής του Πανεπιστημίου Johns Hopkins, τις δοκιμές απόδοσης εναλλακτών θερμότητας από το εθνικό εργαστήριο Argonne, και τις εγκαταστάσεις επίδειξης στη Χαβάη το (1979) που ονομαζόταν (mini-OTEC και otec-1), που παρήγαγε 53kW συνολικής ισχύος και 18kW πραγματικής.. Άλλες σημαντικές προσπάθειες E&A έγιναν κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου συμπεριλαμβανομένων των χερσαίων εγκαταστάσεων κλειστού-κύκλου 120KW συνολικής ηλεκτρικής ισχύος τις Toshiba & TEPC στο Τόκιο το (1982), στη Δημοκρατία του Ναούρου στον ειρηνικό ωκεανό, παράγοντας 31.5 KW πραγματικής κατά τη διάρκεια των συνεχών δοκιμών λειτουργικότητας και τις μελέτες που ολοκληρώθηκαν στο εργαστήριο φυσικής ενέργειας της Χαβάης (NELHA). Η NELHA το (1993) πραγματοποίησε εγκαταστάσεις ανοικτού-κύκλου OTEC στη Χαβάη στο σημείο Keahole παράγοντας 50 KW καθαρής ισχύος, που ξεπερνά το σχέδιο που τέθηκε από το ιαπωνικό σύστημα το (1982). Μια εγκατάσταση συνολικής ισχύος 210 KW με δυνατότητα ανοικτού-κύκλου OTEC με βάση την παράκτια περιοχή στο νησί της Χαβάης σχεδιάστηκε-χτίστηκε και υλοποιήθηκε με επιτυχία από τη NELHA (ΗΠΑ) για μια περίοδο 6 ετών (1993-1998) από την αμερικανική κυβέρνηση με καθαρή παραγωγή ισχύος 100 KW καθώς και για τη συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και πόσιμου νερού (Ντάνιελ 1999). Το πανεπιστήμιο Saga της (Ιαπωνίας) κατασκεύασε πειραματικά μοντέλα κλειστού-κύκλου συνολικής ισχύος 75 KW το (1984) και 9 KW το (1995) για το ίδιο το πανεπιστήμιο. Από το 1998, το εθνικό ίδρυμα ωκεάνιας τεχνολογίας (NIOT), η κυβέρνηση της Ινδίας και το πανεπιστήμιο Saga της Ιαπωνίας συμμετείχαν στο σχέδιο, την ανάπτυξη και την επίδειξη μιας πλωτής μονάδας OTEC συνολικής ισχύος 1 MW (του προγράμματος επίδειξης εγκαταστάσεων από την ακτή Tuticorin στο Ταμίλ Nadu, οι οποίες θα είναι οι πρώτες εγκαταστάσεις της τάξεως των MW όπου θα καθιερωθούν παγκοσμίως. Η μονάδα τοποθετήθηκε 60 χλμ από το Tuticorin, και εγκαταστάθηκε σε μια πλατφόρμα 68.5 μ, το Sagar Shakthi, το οποίο στεγάζει εδρευμένες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας κύκλου Rankine. Τα προγράμματα OTEC που σχεδιάστηκαν να περιλαμβάνουν μικρές εγκαταστάσεις για τη βάση του ναυτικού των ΗΠΑ στο νησί του Diego Garcia στον Ινδικό Ωκεανό το οποίο ανήκει

στη Βρετανία. Η OCEES INTERNATIONAL INC. συνεργάζεται με το Πολεμικό Ναυτικό των ΗΠΑ. σε ένα σχέδιο με προτεινόμενες εγκαταστάσεις OTEC των 13MW, οι οποίες θα αντικαθιστούσαν τις τρέχουσες μονάδες παραγωγής ενέργειας γεννητριών diesel, αυτές οι εγκαταστάσεις OTEC θα παρείχαν επίσης 1.25 εκατομμύρια γαλόνια ανά ημέρα πόσιμου νερού στη βάση. Μια ιδιωτική εταιρεία των ΗΠΑ πρότεινε να κατασκευάσει ένα εργοστάσιο OTEC 10 MW στο Γκούαμ. Η ομάδα Ανάπτυξης Εναλλακτικών Μορφών Ενέργειας της Lockheed Martin βρίσκεται σήμερα στο τελικό στάδιο σχεδιασμού ενός πιλοτικού συστήματος κλειστού-κύκλου OTEC 10 MW το οποίο θα αρχίσει να λειτουργεί στη Χαβάη μέχρι το 2012-2013. Αυτό το σύστημα έχει σχεδιαστεί να επεκταθεί εμπορικά σε 100 MW στο εγγύς μέλλον. Σήμερα, η τεχνολογία για την κατασκευή μιας εγκατάστασης OTEC είναι ώριμη και τα απαιτούμενα εξαρτήματα και ο εξοπλισμός διατίθενται στο εμπόριο, δεδομένου ότι αυτά χρησιμοποιούνται και για άλλες εφαρμογές. Ο λόγος για τον οποίο δεν έχουν κατασκευαστεί ακόμα εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ουσιαστικά οικονομικός (Cohen 1982 Avery και Wu 1994). Η ομοσπονδιακή κυβέρνηση κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '70 και της δεκαετίας του '80 εστίασε στην πυρηνική ενέργεια, η οποία άσκησε αρνητική επίδραση των διαθέσιμων πόρων που θα μπορούσαν να έχουν χρησιμοποιηθεί για την εμπορική ανάπτυξη των εγκαταστάσεων OTEC. Αργότερα, κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '90 η τιμή του πετρελαίου έπεσε σε τόσο χαμηλό κόστος περίπου \$10 το βαρέλι. Αυτή η κατάσταση, συν το γεγονός ότι δεν υπήρχε σημαντική ευαισθητοποίηση σε σχέση με την υπερθέρμανση του πλανήτη, έκανε την τεχνολογία OTEC και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λιγότερο ελκυστικές.

Τα πρόσφατα παγκόσμια γεγονότα έχουν δημιουργήσει ένα νέο ενδιαφέρον για την τεχνολογία OTEC (Tellado 2008). Κατ' αρχάς, η τιμή του πετρελαίου έχει αυξηθεί ιλιγγιώδως, φθάνει τα \$148 το βαρέλι το 2008. Υπάρχουν σοβαρές ανησυχίες σε σχέση με τη σταθερότητα της παραγωγής πετρελαίου σε εξαιρετικά αντιφατικές περιοχές όπως η Μέση Ανατολή και με τη δυνατότητα της παγκόσμιας παραγωγής πετρελαίου που έφτασε στο αποκορύφωμά της (γνωστή ως "Peak Hubbert", το οποίο μερικοί σχολιαστές είχαν ανακοινώσει για την περίοδο μεταξύ 2000 και 2010). Η αύξηση του κόστους πετρελαίου δημιούργησε αύξηση της ζήτησης και του κόστους των άλλων ορυκτών καυσίμων όπως ο άνθρακας και το φυσικό αέριο. Το πιο σημαντικό είναι ότι υπάρχει μια γενική ανησυχία σχετικά με την ενδεχόμενη συμβολή στην υπερθέρμανση του πλανήτη από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και από την καύση ορυκτών καυσίμων (από ανανεώσιμες ή μη ανανεώσιμες πηγές). Τόσο οι Ηνωμένες Πολιτείες όσο και η Ευρωπαϊκή Ένωση έχουν συζητήσει σοβαρά την επιβολή των φόρων επί των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι ο δεσμός «Ενέργειας-Νερού»: για την παραγωγή ενέργειας από μεγάλες ποσότητες νερού που απαιτούνται για την παραγωγή-διανομή μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Όλοι αυτοί οι παράγοντες έχουν προκαλέσει το ενδιαφέρον για αναβίωση της τεχνολογίας OTEC δεδομένου ότι δεν χρησιμοποιεί τα απολιθωμένα καύσιμα ή την πυρηνική ενέργεια και είναι διαθέσιμη σχεδόν όλη την ώρα (έναντι των παραγόντων διαθεσιμότητας 30% για την αιολική ενέργεια και του παράγοντα 40% για την ηλιακή ενέργεια), και επιτρέπει τη συμπαραγωγή του πόσιμου νερού, εάν αυτό επιδιώκεται. Οι Αρχιτέκτονες Μηχανικοί Dominic Michaelis, Alex Michaelis, μαζί με τον Trevor Cooper-Chadwick του Πανεπιστημίου του Σαουθάμπτον αναπτύσσουν σήμερα την πλωτή εξαγωγική ενεργειακή νήσο που θα αξιοποιήσει την ενέργεια από OTEC, καθώς και από τους ανέμους, τα θαλάσσια ρεύματα, τα κύματα και τον ήλιο. Το πρόγραμμα ενεργειακών νήσων που εκτελείται

στη Χαβάη χρηματοδοτείται και διευθύνεται από την αμερικανική κυβέρνηση. Για να επωμιστούν το σύνολο της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, με βάση τα στοιχεία του 2000, θα απαιτούνταν 52.971 ενεργειακά νησιά, καταλαμβάνοντας μια συνολική έκταση 111 X 111 χιλιομέτρων. Για πρώτη φορά, το υψηλό κόστος του πετρελαίου, η αστάθειά του και οι διακυμάνσεις του στην παγκόσμια αγορά έχουν δημιουργήσει τους όρους για να καταστήσουν εμπορικά βιώσιμες της εγκαταστάσεις OTEC, χωρίς την ανάγκη των κυβερνητικών επιχορηγήσεων. Οι συνεταίροι υπεράκτιων υποδομών έχουν υποβάλει πρόταση για την κατασκευή και τη λειτουργία ενός σταθμού παραγωγής OTEC στο Πουέρτο Ρίκο, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που βασισμένη στην ιδιωτική χρηματοδότηση.

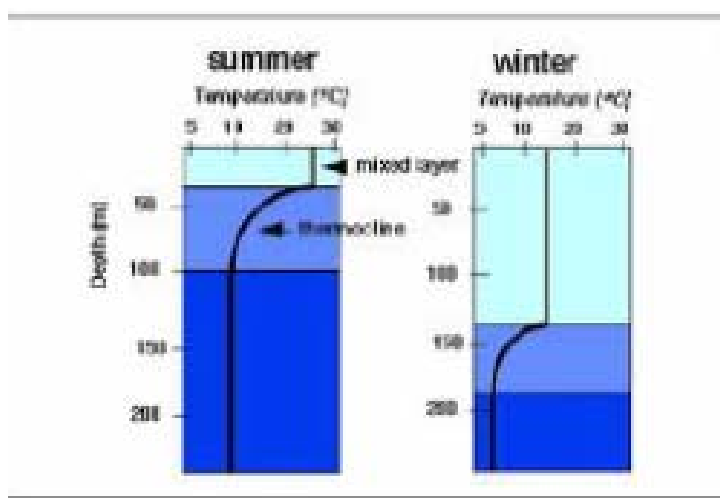
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1. ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΩΚΕΑΝΙΑΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (OTEC)

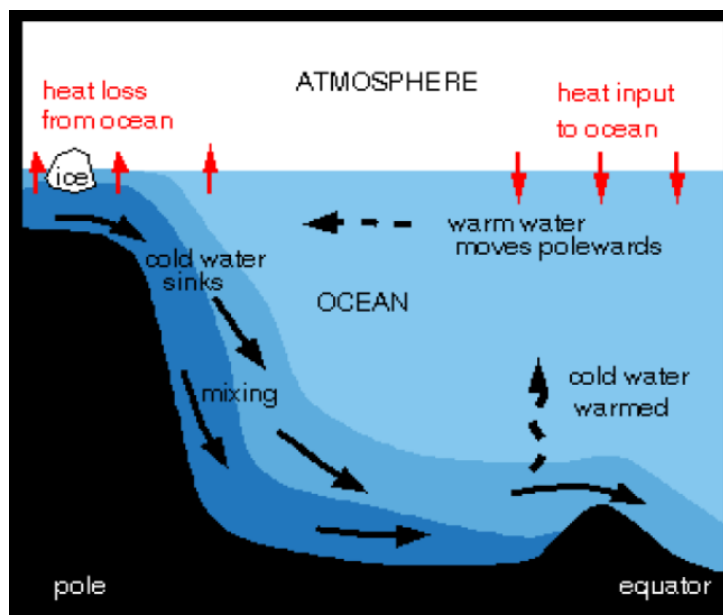
1.1 Αρχή λειτουργίας

Μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ωκεανών σε ηλεκτρική

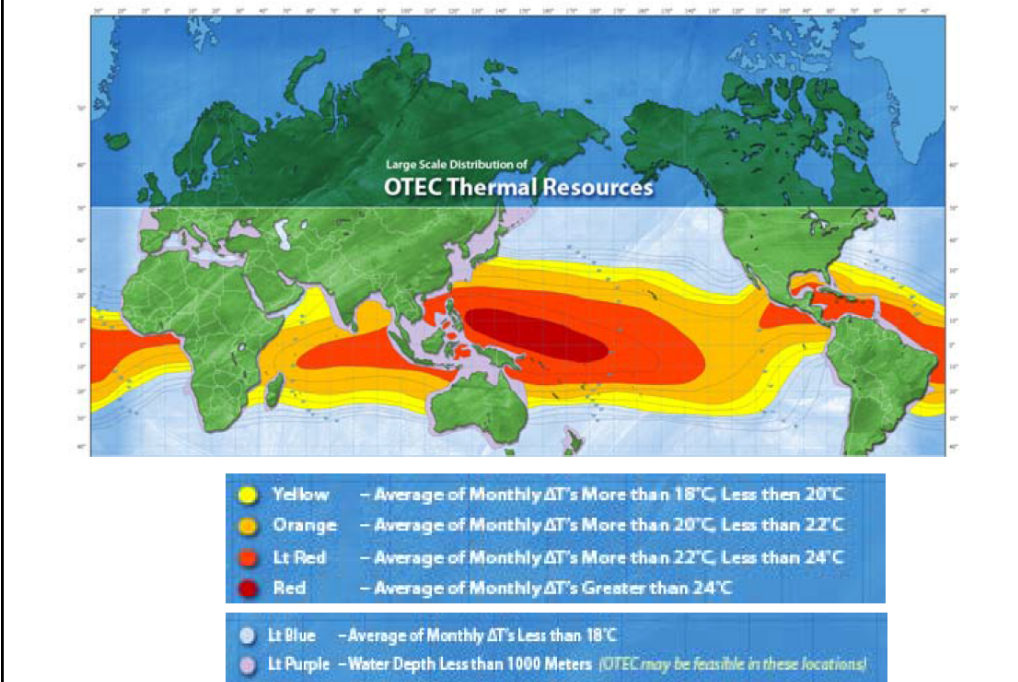
Συνίσταται στην εκμετάλλευση της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στα νερά του ωκεανού με την μορφή της διαφοράς θερμοκρασίας (θερμική κλίση-θερμοκλινές). Για να είναι εκμεταλλεύσιμη θα πρέπει η διαφορά θερμοκρασίας να είναι περίπου 20 °C, σε βάθος περίπου 1000 m. Οι ωκεανοί καλύπτουν το 70% της γήινης επιφάνειας και αποτελούν το μεγαλύτερο σύστημα συλλογής και αποθήκευσης ηλιακής ενέργειας (ισοδυναμεί με $250 \cdot 10^9$ βαρέλια πετρελαίου).



Σε πειραματικό στάδιο Μια εγκατάσταση 1MW απαιτεί ροή 1-4 m³/s από 5 σε 25°C. Δεδομένου ότι απαιτείται άντληση από μεγάλα βάθη: Απόδοση 2-3%. Στη Μεσόγειο η διαφορά θερμοκρασίας είναι μικρή. Η γεωγραφική θέση της Ελλάδας δεν ενδείκνυται, για την εγκατάσταση συστημάτων OTEC.



Διαφορά Θερμοκρασίας (°C) μεταξύ SWL και βάθους 1000 m



- Το θερμό νερό από την επιφάνεια της θάλασσας χρησιμοποιείται για να θερμάνει μια ποσότητα υγρής αμμωνίας που βρίσκεται σε ένα κλειστό δοχείο.
- Η αμμωνία μετατρέπεται σε αέριο και “διογκώνεται”, κινώντας ταυτόχρονα μια γεννήτρια η οποία αρχίζει να παράγει ρεύμα.
- Το ψυχρό νερό από τα βάθη της θάλασσας χρησιμοποιείται για να ψύξει την αμμωνία και έτσι ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

1.2 Κατηγοριοποίηση σταθμών OTEC

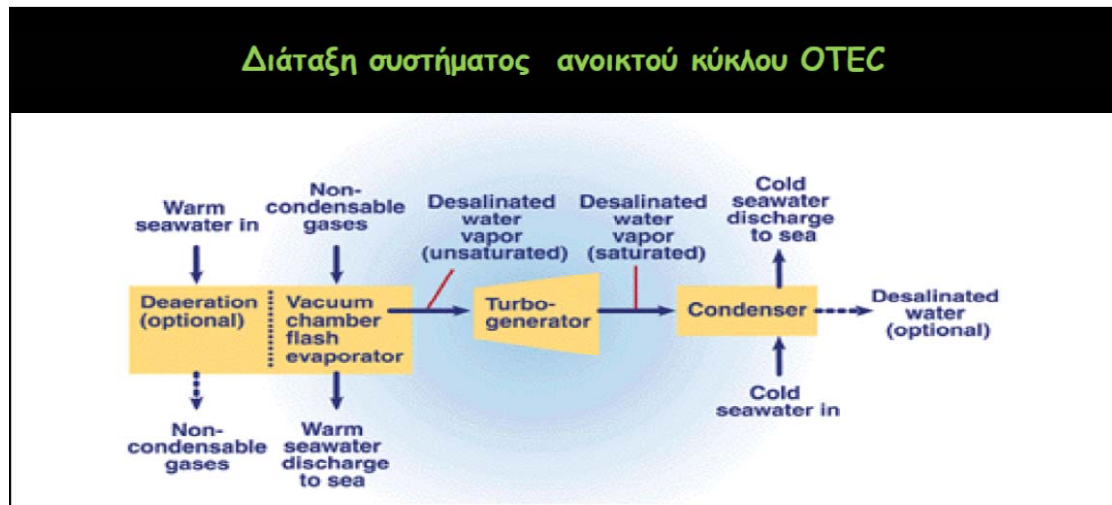
Βάσει του κύκλου λειτουργίας.

- Διάταξη συστήματος ανοικτού κύκλου OTEC
- Διάταξη συστήματος κλειστού κύκλου OTEC
- Διάταξη συστήματος υβριδικού κύκλου OTEC

Βάσει της τοποθεσίας.

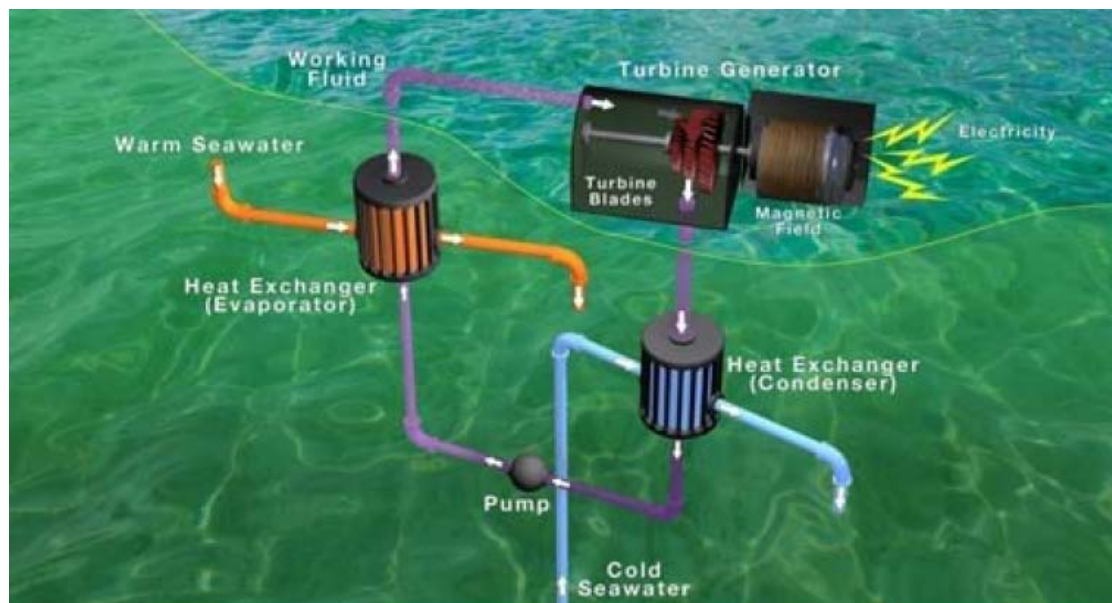
- Χερσαία ή παράκτια
- Πλατφόρμες
- Πλωτά σε μεγάλα βάθη των ωκεανών

1.3 Διάταξη συστήματος ανοικτού κύκλου OTEC



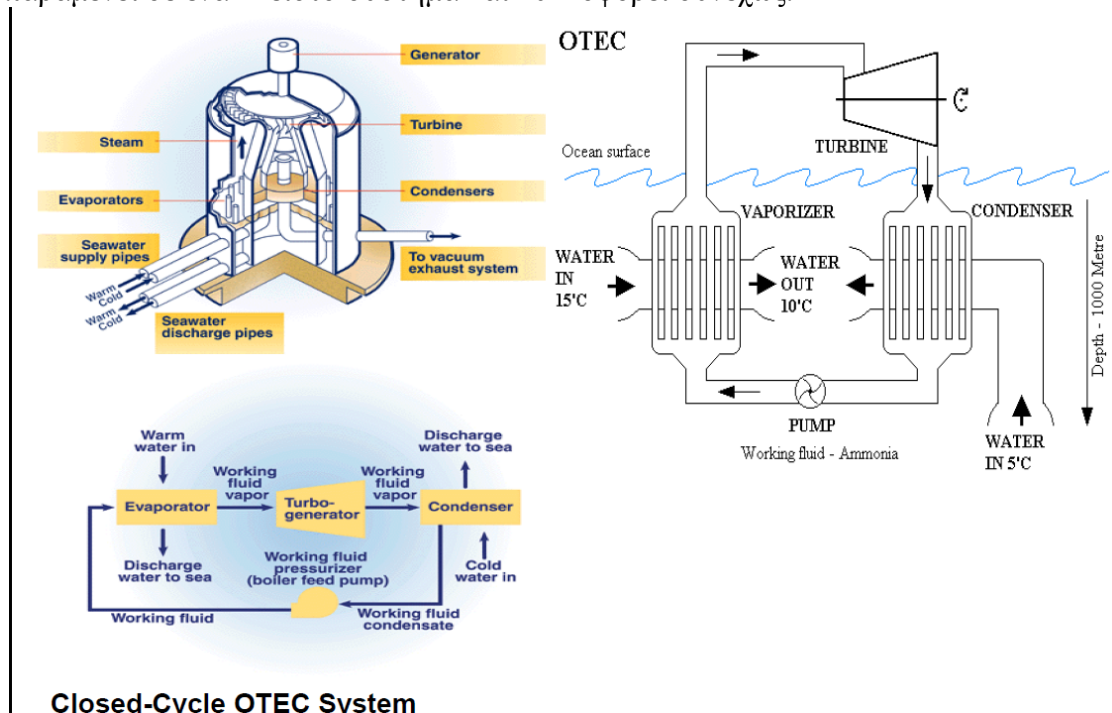
Σε ένα σύστημα ανοικτού κύκλου OTEC, ζεστό θαλασσινό νερό είναι το φέρον ρευστό. Το ζεστό θαλασσινό νερό εξατμίζεται μέσα σε θάλαμο κενού για να παράγει ατμό σε απόλυτη πίεση περίπου 2.4 (kPa). Ο ατμός επεκτείνεται μέσω ενός στρόβιλου χαμηλής πίεσης που συνδέεται με μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Ο ατμός που βγαίνει από τον στρόβιλο συμπυκνώνεται από το κρύο θαλασσινό νερό που αντλείται από βάθη των ωκεανών μέσω ενός σωλήνα κρύου νερού. Εάν ένας συμπυκνωτής επιφάνειας χρησιμοποιείται στο σύστημα, ο ατμός παραμένει χωρισμένος από το κρύο θαλασσινό νερό και παρέχει αφαλατωμένο νερό.

1.4 Διάταξη συστήματος κλειστού κύκλου OTEC

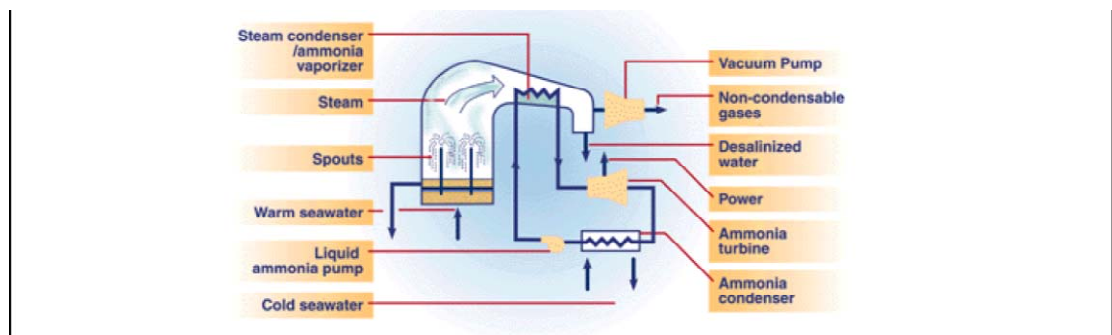


Ζεστό θαλασσινό νερό ατμοποιεί ένα προκαθορισμένο ρευστό, όπως η αμμωνία, το οποίο ρέει μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας (εξατμιστής). Ο ατμός διαστέλλεται σε μέτριες πιέσεις και γυρίζει ένα στρόβιλο που συνδέεται με μια γεννήτρια που παράγει ηλεκτρισμό. Ο ατμός στη συνέχεια συμπυκνώνεται σε έναν άλλο εναλλάκτη θερμότητας (συμπυκνωτής) με χρήση κρύου θαλασσινού νερού που αντλείται από τα

βάθη τωνωκεανών μέσω ενός σωλήνα κρύου νερού. Το συμπυκνωμένο φέρον υγρό διοχετεύεται και πάλι στον εξατμιστή για να επαναλάβει τον κύκλο. Το ρευστό παραμένει σε ένα κλειστό σύστημα και κυκλοφορεί συνεχώς.



1.5 Διάταξη συστήματος υβριδικού κύκλου OTEC

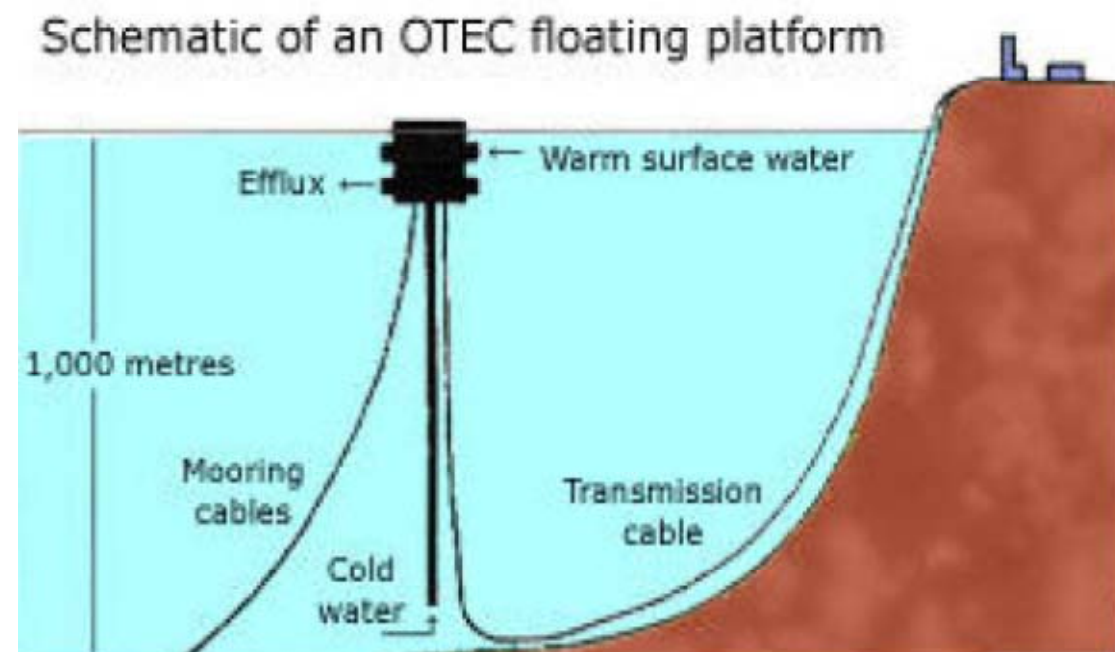


Συνδυάζει τα χαρακτηριστικά του κλειστού και ανοικτού κύκλου. Σε ένα υβριδικό σύστημα OTEC, ζεστό θαλασσινό νερό εισέρχεται σε ένα θάλαμο κενού όπου εξατμίζεται, στη διαδικασία του ανοικτού κύκλου. Ο ατμός ατμοποιεί το φέρον ρευστό το οποίο διέρχεται από έναν βρόγχο κλειστού κύκλου στην άλλη πλευρά του εξατμιστή αμμωνίας. Το υγρό που εξατμίζεται θέτει σε λειτουργία μια τουρμπίνα που παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Ο ατμός συμπυκνώνεται εντός του εναλλάκτη θερμότητας και παρέχει αφαλατωμένο νερό.

1.6 Χωροθέτηση συστημάτων OTEC



Χερσαία



Πλωτά σε μεγάλα βάθη των ωκεανών

1.7 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

Χερσαία ή παράκτια

- Δεν απαιτούν πολύπλοκα συστήματα πρόσδεσης, μεγάλου μήκους τροφοδοσίας και εκτεταμένη συντήρηση (όπως σε εγκαταστάσεις σε ανοιχτό ωκεανό).
- Δυνατότητα τοποθέτησης σε ασφαλείς από θύελλες και κυματισμούς περιοχές.
- Εύκολη πρόσβαση και δυνατότητα δημιουργίας χερσαίων εγκαταστάσεων μεταφοράς των 'προϊόντων' (ηλεκτρικής ενέργειας, αφαλατωμένου νερού)

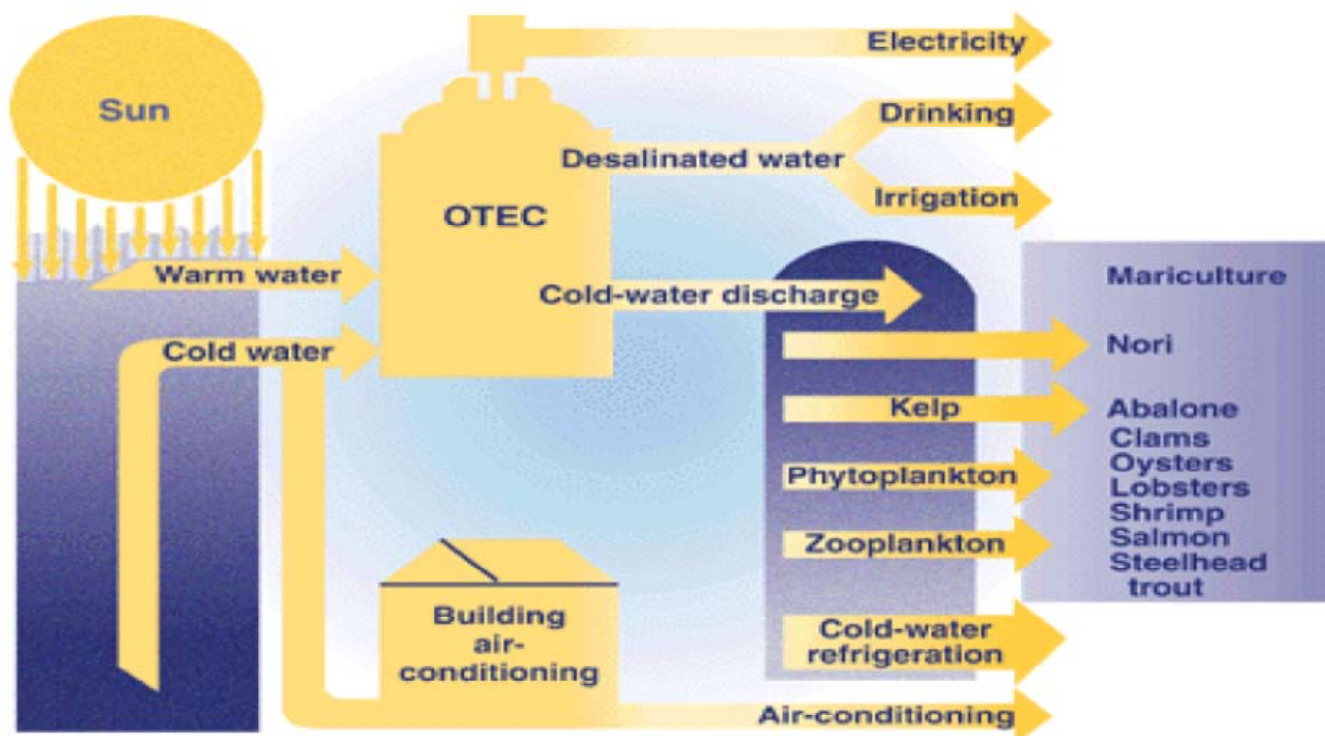
Πλατφόρμες σε υφάλους

- Αποφυγή έντονων κυματισμών
- Εύκολη πρόσβαση σε ψυχρά ύδατα
- Απρόβλεπτες καιρικές συνθήκες
- Δύσκολη σύνδεση με ξηρά
- Μεγάλο κόστος κατασκευής και λειτουργίας

Πλωτές εγκαταστάσεις

- Χαμηλότερο κόστος κατασκευής
- Δυσκολία μεταφοράς της παραγόμενης ενέργειας
- Ευάλωτη κατασκευή και δυσκολία ελλιμενισμού

1.8 Άλλες εφαρμογές OTEC



1.9 Οφέλη

Τα οικονομικά οφέλη είναι:

- Παραγωγή καυσίμων
- Παραγωγή αφαλατωμένου νερού
- Πόρος για τις χερσαίες επιχειρήσεις υδατοκαλλιέργειας
- Κλιματισμός των κτιρίων
- Σημαντικές δυνατότητες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο μέλλον με βέλτιστη σχέση κόστους- ωφέλειας

Τα μη οικονομικά οφέλη είναι:

- Προώθηση ανταγωνιστικότητας και διεθνούς εμπορίου
- Ενίσχυση ενεργειακής ανεξαρτησίας
- Περιορισμός των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου

Μονάδα 2MW έχει δυνατότητα παραγωγής 4300 m³ αφαλατωμένου νερού/ημέρα.

1.10 Μειονεκτήματα

Ανάσχυση του φυτοπλαγκτού από τον πυθμένα της θάλασσας στην επιφάνεια προβλήματα στην αλυσίδα του θαλάσσιου οικοσυστήματος Σε περίπτωση έντονων καιρικών συνθηκών, οι μονάδες ενός συστήματος OTEC, δεδομένης της πλωτής κατασκευής, δεν αντέχουν κατασκευαστικά.

1.11 Κόστος συστήματος OTEC

Το κόστος του πλωτών ενεργειακών νησιών παραμένει ασαφές. Η εκτίμηση του κόστους της πλατφόρμας είναι αρκετά δύσκολη δεδομένου ότι ο τρόπος δόμησής της είναι παρόμοιος με εκείνον μιας πετρελαϊκής πλατφόρμας.

1.12 Μελέτη προγράμματος τεχνικής ετοιμότητας OTEC που διεξήχθη από:

- Εθνική Υπηρεσία Ωκεανών και Ατμόσφαιρας
- Εθνική ωκεανογραφική Υπηρεσία
- Γραφείο διαχείρισης ωκεάνιων και παράκτιων πόρων
- Κέντρο απόκρισης παράκτιων ερευνών
- Πανεπιστήμιο του New Hampshire (Η.Π.Α)

I. ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ

Η μετατροπή ωκεάνιας θερμικής ενέργειας (OTEC) είναι μια τεχνολογία που χρονολογείται από τα τέλη του 1800 και κάνει χρήση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας και του βυθού του ωκεανού ώστε να οδηγήσει έναν κινητήρα θερμότητας, και να εξάγει την ενέργεια μέσω του κύκλου Rankine. Ενώ μικρής κλίμακας πιλοτικά εργοστάσια (μικρότερα του 1 MWe) έχουν δημιουργήσει ενέργεια με επιτυχία, ένας συνδυασμός από τεχνικά αλλά και οικονομικά στοιχεία που δυσκόλευαν την υλοποίηση τέτοιων προγραμμάτων περιόρισε τις επενδύσεις και το ενδιαφέρον για την OTEC. Ωστόσο, η μείωση των αποθεμάτων, και η αύξηση του

κόστους των ορυκτών καυσίμων, καθώς και η εξέλιξη της OTEC, και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, σε συνδυασμό με την εξασφάλιση ενεργειακής επάρκειας αναζωπύρωσαν το ενδιαφέρον για την τεχνολογία OTEC στις τροπικές περιοχές. Όντας ο κύριος οργανισμός έκδοσης αδειών για το OTEC, το γραφείο διαχείρισης θαλάσσιων και Παράκτιων Πόρων της NOAA(OCRM), σε συνεργασία με το παράκτιο ερευνητικό κέντρο αντιδράσεων (CRRC), πραγματοποίησε την πρώτη σειρά εργαστηριακών δοκιμών για να καθορίσει την τεχνική ετοιμότητα επτά σημαντικών συστατικών OTEC: 1) σωλήνας κρύου νερού (2) εναλλάκτες θερμότητας (3) διεπαφή πλατφορμών/σωλήνων (4) πλατφόρμα (5) καλώδιο τροφοδοσίας (6) σύστημα πρόσδεσης πλατφορμών και (7) αντλίες και στρόβιλοι. Το πρώτο εργαστήριο, που συζητήθηκε σε αυτήν την έκθεση, επιδίωξε να συγκεντρώσει τις πληροφορίες για την τεχνική ετοιμότητα OTEC και να αξιολογήσει τις προόδους στην τεχνολογία από την τελευταία σημαντική προσπάθεια, otec-1 το 1980. Η ποιοτική ανάλυση της τεχνικής ετοιμότητας του OTEC από εμπειρογνώμονες σε αυτό εργαστήριο δείχνουν ότι μια κλειστού κύκλου εγκατάσταση OTEC απόδοσης μικρότερης των 10MWe, είναι τεχνικά εφικτή χρησιμοποιώντας τον τρέχοντα σχεδιασμό, κατασκευές, και τεχνικές ανάπτυξης καθώς και υλικά της εποχής μας. Η τεχνική ετοιμότητα και δυνατότητα κλιμάκωσης μιας εγκατάστασης μεγαλύτερης των 100 MWe είναι λιγότερο σαφής. Οι συμμετέχοντες στο εργαστήριο κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η υπάρχουσα πλατφόρμα, πλατφόρμα ελλιμενισμού, οι αντλίες, οι στρόβιλοι (τουρμπίνες), καθώς και ο τρόπος εναλλαγής θερμότητας είναι γενικά επεκτάσιμες χρησιμοποιώντας modular σχεδίαση (δηλαδή αρκετά μικρότερες μονάδες για να επιτευχθεί η συνολική χωρητικότητα που απαιτείται). Ωστόσο, το καλώδιο τροφοδοσίας, η παροχή κρύου νερού και ο τρόπος ελέγχου της πλατφόρμας/σωλήνα παρουσιάζει κατασκευαστικά και αναπτυξιακά προβλήματα που απαιτούν περαιτέρω έρευνα για τη δημιουργία εγκατάστασης μεγαλύτερης από 100 MWe , ενώ η δημιουργία ενός μοντέλου πριν την υλοποίηση κρίνεται απαραίτητη. Η εμπειρία που αποκτάται κατά τη διάρκεια της κατασκευής, της επέκτασης και της λειτουργίας για εγκατεστημένη ισχύ μικρότερη των 10MWe θα βοηθήσει πολύ την κατανόηση των προκλήσεων που συνδέονται για εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη των 100MWe, και είναι ένα απαραίτητο βήμα στην εμπορευματοποίηση και την ανάπτυξη OTEC.

II. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο μειωμένος ανεφοδιασμός, και το αυξανόμενο κόστος, βασίζεται στην ενέργεια των ορυκτών καυσίμων που έχουν εντείνει την αναζήτηση των ανανεώσιμων εναλλακτικών λύσεων. Αν και οι παραδοσιακά ακριβότερες, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν πολλά κίνητρα, συμπεριλαμβανομένης της αυξανόμενης εθνικής ενεργειακής ασφάλειας, μείωσαν τις εκπομπές άνθρακα, τη συμμόρφωση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τους κανονισμούς ατμοσφαιρικής ποιότητας. Στα απομακρυσμένα νησιά όπου τα αυξανόμενα έξοδα αποστολής και οι αλλαγές των οικονομικών μεγεθών καθιστούν την παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα την πιο ακριβή στον κόσμο, σε αυτή την περίπτωση οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι ιδιαίτερα ελκυστικές. Πολλά νησιά, συμπεριλαμβανομένου του Γκουάμ και της Χαβάης, περιλαμβάνουν στρατηγικές στρατιωτικές βάσεις με υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις που θα επωφεληθούν σημαντικά από μια φθηνή και αξιόπιστη πηγή ενέργειας ανεξάρτητη από την οικονομία ορυκτών καυσίμων. Οι ωκεανοί είναι φυσικοί συλλέκτες της ηλιακής ενέργειας και απορροφούν καθημερινά ενέργεια

δισεκατομμυρίων Watt από τον ήλιο υπό μορφή ηλιακής ακτινοβολίας. Στα τροπικά γεωγραφικά πλάτη, το έντονο φως του ήλιου και οι μακρύτερες ημέρες οδηγούν σε σημαντική θέρμανση των ανώτερων στρωμάτων των ωκεανών από 35 έως 100 m, που παράγουν συγκριτικά θερμά ωκεάνια επιφανειακά ύδατα (27-29°C). Κάτω από αυτό το θερμό στρώμα η θερμοκρασία μειώνεται βαθμιαία σε έναν μέσο όρο περίπου 4,4°C. Όταν ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής εξετάζεται, αυτό το διαφορικό θερμοκρασίας αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ποσό πιθανής ενέργειας που, εάν εξάγεται, θα ήταν μια απολύτως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Μια μέθοδος εξαγωγής αυτής της ενέργειας είναι η μετατροπή ωκεάνιας θερμικής ενέργειας (OTEC). Οι εγκαταστάσεις OTEC εκμεταλλεύονται το κύκλο Rankine, μια διαδικασία που μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε κινητική μέσω των στρόβιλων. Οι στρόβιλοι μπορούν έπειτα να χρησιμοποιηθούν για να οδηγήσουν τις γεννήτριες, παράγοντας την ηλεκτρική ενέργεια. Υπάρχουν δύο σημαντικοί τρόποι μετατροπή ωκεάνιας θερμικής ενέργειας (OTEC):

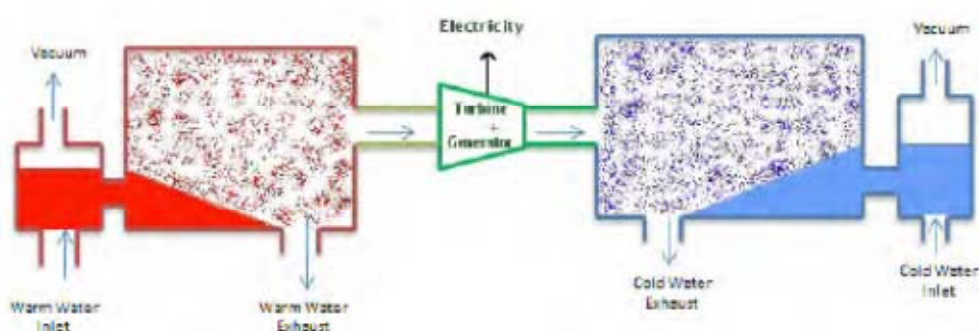
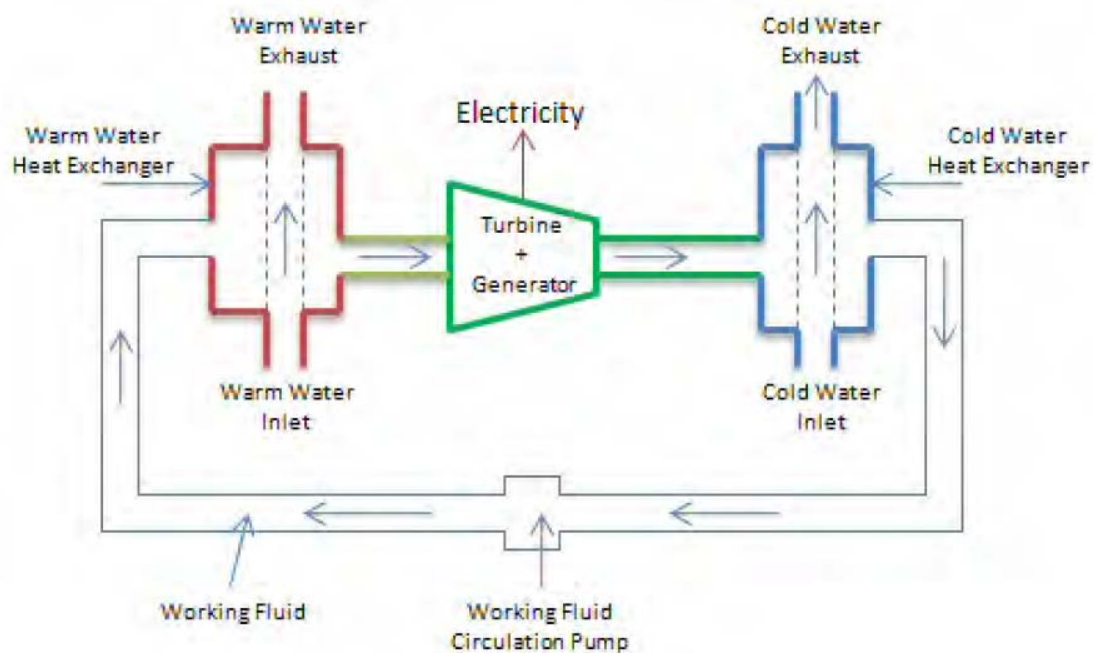


Figure 1: Principles of operation of an open-cycle OTEC Facility

- 1) Ανοικτός-κύκλος, και
- 2) κλειστός-κύκλος.

Στον ανοικτό-κύκλο OTEC το νερό της θάλασσας χρησιμοποιείται ως ρευστό λειτουργίας. Το θερμό επιφανειακό νερό εκτίθεται σε ένα κενό, αναγκάζοντας το να βράσει και να παραγάγει ατμό. Το κρύο νερό από τα βαθύτερα στρώματα του ωκεανού αντλείται μέσω ενός συμπυκνωτή, αναγκάζοντας τον ατμό να συμπυκνωθεί (σχήμα 1). Αυτή η συνεχής εξάτμιση και συμπύκνωση χρησιμοποιείται για να οδηγεί έναν στρόβιλο, που μετατρέπει τη θερμική σε μηχανική ενέργεια. Η διαδικασία ανοικτού-κύκλου έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα της παραγωγής γλυκού νερού ως υποπροϊόν.

Σε μια εγκατάσταση κλειστού-κύκλου, χρησιμοποιείται ένα ρευστό λειτουργίας με χαμηλό σημείο βρασμού (δηλ., αμμωνία) αντί του νερού της θάλασσας. Το θερμό και κρύο νερό περνούν μέσω των εναλλακτών θερμότητας και μεταφέρουν τη θερμότητα στο ρευστό λειτουργίας (αμμωνία), το οποίο ατμοποιείται έπειτα και συμπυκνώνεται όπως στην εγκατάσταση ανοικτού-κύκλου, όπου οδηγεί έναν στρόβιλο και μετατρέπει τη θερμική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια (σχήμα 2). Οι εγκαταστάσεις κλειστών-κύκλων είναι πιο σύνθετες, και είναι σημαντικά αποδοτικότερες με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη παραγωγή λόγω της μεγαλύτερης αποδοτικότητας του ρευστού λειτουργίας.



Η ανάπτυξη της OTEC χρονολογείται από τα τέλη του 1800, η πρώτη προσπάθεια στην κατασκευή μιας λειτουργικής εγκατάστασης OTEC εμφανίστηκε γύρω στο 1930 στην ακτή της Κούβας, και παρήγαγε καθαρά 22 κιλοβάτ (kWe) και η λειτουργία της κράτησε για 11 ημέρες προτού να καταστραφεί από μια θύελλα. Το επόμενο σημαντικό κύριο βήμα ήρθε το 1979 όταν προωθήθηκε ένα πρόγραμμα που ονομάστηκε «mini-OTEC», και σηματοδότησε την πρώτη επιτυχή λειτουργία μιας κλειών-ανακυκλώμενης εγκατάστασης OTEC. Το project mini-OTEC παρήγαγε πραγματική ισχύ 15 kWe για 3 μήνες πριν από το προγραμματισμένο κλείσιμο, και θεωρήθηκε ευρέως επιτυχές. Η επόμενη σημαντική πρόοδος σε OTEC ήρθε το 1980 - 1981 με την πειραματική εγκατάσταση με ονομασία otec-1. Αυτή η εγκατάσταση δεν σχεδιάστηκε για να παραγάγει ηλεκτρική ενέργεια, αλλά σχεδιάστηκε ως πλατφόρμα για να εξετάσει τις διάφορες τεχνολογίες OTEC. Το πρόγραμμα Otec-1 έφθασε σε διάφορα κύρια σημεία, συμπεριλαμβανομένης της επιτυχούς επέκτασης ενός μακριού σωλήνα κρύου νερού 670 m, και την πρόσδεση σε βάθος 1.370 m στο νερό. Στη συνέχεια, οι πολυάριθμες μικρής κλίμακας (μικρότερες του 1 MWe) πειραματικές εγκαταστάσεις έχουν κατασκευαστεί από την Ιαπωνία και την Ινδία, και μια χερσαία εγκατάσταση OTEC στο νησί «Hawai», με σχετική επιτυχία. Η χερσαία εγκατάσταση στο νησί «Hawai» λειτούργησε επιτυχώς από το 1993 ως το 1998, και παρήγαγε πραγματική ισχύ 103 KWe, καθώς επίσης εξακολουθεί να κατέχει το παγκόσμιο ρεκόρ για την παραγωγή OTEC (Vega L.A., 2002/2003).

1 kWe = 1.000 τζάουλ της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγονται ανά δευτερόλεπτο.

2 MWe = 1.000.000 τζάουλ της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγονται ανά δευτερόλεπτο.

Μια από τις σημαντικότερες εκτιμήσεις κατά τον προγραμματισμό μιας εγκατάστασης OTEC είναι η θέση της. Οι μεγάλες διαφορές στη θερμοκρασία, (> 20°C) απαιτούν μεταξύ της εισαγωγής κρύου νερού και την εισαγωγή θερμού νερού, και κατά συνέπεια, η εγκατάσταση πρέπει να βρεθεί σε μια περιοχή με πρόσβαση σε ζεστά επιφανειακά νερά και βαθιά, κρύα νερά. Μια εγκατάσταση OTEC μπορεί να είναι στο έδαφος εάν βρίσκεται δίπλα σε υφαλοκρηπίδα ή σε μικρό βάθος, Ωστόσο, το μεγάλο μήκος του σωλήνα εισαγωγής κρύου νερού που απαιτείται για να επιτευχθεί η απαιτούμενη διαφορά θερμοκρασίας μπορεί να το καταστήσει μη πρακτικό στις περισσότερες θέσεις. Εναλλακτικά υπάρχει δυνατότητα μιας υπεράκτιας, πλωτής και προσδεμένης εγκατάστασης με έναν κάθετο σωλήνα εισαγωγής κρύου νερού που μπορεί να είναι πρακτικότερος. Οι τεχνολογικές προόδους στην υπεράκτια βιομηχανία πετρελαίου επιτρέπουν την δυνατότητα πλωτών πλατφόρμων OTEC. Οι επιπλέονες πλατφόρμες μπορούν να εγκατασταθούν οπουδήποτε επάνω από μεγάλα θαλάσσια βάθη εφόσον υπάρχει η δυνατότητα πρόσδεσης επαρκώς, και το καλώδιο ισχύος μπορεί να φθάσει σε ένα χερσαίο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παρά το γεγονός ότι το επίκεντρο των OTEC εστιάζει στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγόμενη ενέργεια έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για πολυάριθμα παραπροϊόντα, συμπεριλαμβανομένης της αφαλάτωσης, των υδατοκαλλιεργειών, της παραγωγής υδρογόνου, και κλιματισμού, τα οποία θα συμβάλουν στην οικονομική βιωσιμότητα και περαιτέρω μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα. Οι εγκαταστάσεις OTEC είναι σύνθετες και στεγάζουν πολλά εξαρτήματα που λειτουργούν μαζί για την παραγωγή ενέργειας. Η ποσότητα και το μέγεθος αυτών των εξαρτημάτων ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης, ωστόσο, συνήθως αποτελούνται από: μια πλατφόρμα, που χρησιμοποιείται ως βάση για όλες τις λειτουργίες OTEC, ένα σωλήνα κρύου νερού, που χρησιμοποιείται για να αντλήσει κρύο νερό από τα κατώτερα θερμοκλινη στρώματα, ένα σωλήνα θερμού νερού, που χρησιμοποιείται για να αντλήσει θερμό νερό από τα επιφανειακά θερμοκλινη στρώματα, σωλήνες εκκένωσης ζεστού και κρύου νερού, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για να επιστρέψουν το κρύο και ζεστό νερό μετά από τη θερμότητα που έχει εξαχθεί, ρευστό εργασίας (αμμωνία), που χρησιμοποιείται ως μέσο μεταφοράς θερμότητας, οι εναλλάκτες θερμότητας (κλειστός-κύκλος μόνο), εξατμιστήρες και συμπυκνωτές, που χρησιμοποιούνται για να μεταφέρουν τη θερμότητα μεταξύ των κρύων και θερμών υδάτων και του ρευστού λειτουργίας μια διεπαφή πλατφορμών/σωλήνων, η οποία συνδέει τους κρύους και θερμούς υδροσωλήνες με την πλατφόρμα, ένα καλώδιο ισχύος, το οποίο μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια πίσω σε ένα χερσαίο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ένα σύστημα πρόσδεσης πλατφορμών, το οποίο εξασφαλίζει ότι η εγκατάσταση OTEC παραμένει σταθερή και στην ίδια θέση, αντλίες οι οποίες αντλούν το νερό μέσω των κρύων και θερμών υδροσωλήνων, στρόβιλοι και γεννήτριες, οι οποίες χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν τη θερμική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι προσδοκίες για OTEC ήταν υψηλές μετά από τη μετάβαση του ωκεάνιου θερμικού νόμου ενεργειακής μετατροπής του 1980 (OTECA), και βάση αυτού προβλέφθηκε να παραγάγει ισχύ μεγαλύτερη των 10.000MWe από OTEC μέχρι

το 1999. Ο συνδυασμός των οικονομικών και τεχνικών παραγόντων σκοπιμότητας έφερε την ανάπτυξη της τεχνολογίας σε μια σχεδόν στάσιμη κατάσταση στα μέσα της δεκαετίας του 1980, και η τεχνολογία δεν προχώρησε ποτέ μετά από το στάδιο πειραματικών εγκαταστάσεων. Πρόσφατα, η μειωμένη διαθεσιμότητα και το αυξανόμενο κόστος των ορυκτών καυσίμων, καθώς και η πρόοδος στην τεχνολογία OTEC, και το ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες εναλλακτικές λύσεις έχουν οδηγήσει για άλλη μια φορά σε μια αναβίωση του ενδιαφέροντος για OTEC ως πιθανή λύση στις ενεργειακές ανάγκες πολλών νήσων και εθνών του ισημερινού.

III. ΙΣΤΟΡΙΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Εν μέρει, λόγω του αυξανόμενου ενδιαφέροντος από τις ΗΠΑ. Το ναυτικό και η έκδοση διάφορων πρόσφατων συμβάσεων στη βιομηχανία αύξησε την έρευνα και την ανάπτυξη των εξαρτημάτων OTEC, το γραφείο NOAA της ωκεάνιας και παράκτιας διαχείρισης πόρων (OCRM), σε συνεργασία με το παράκτιο ερευνητικό κέντρο απόκρισης (CRRC), πραγματοποίησε τη πρώτη σε μία σειρά από εργαστηριακές μελέτες που ασχολήθηκαν με OTEC. Η πρώτη εργαστηριακή μελέτη, που συζητήθηκε σε αυτήν την έκθεση, επιδίωξε να συγκεντρώσει τις πληροφορίες για την τεχνική ετοιμότητα OTEC και να αξιολογήσει τις προόδους στην τεχνολογία από την τελευταία σημαντική προσπάθεια, otec-1 το 1980.

Προκειμένου να παρέχει στους συμμετέχοντες των εργαστηρίων κοινά θέματα για το σχέδιο μιας εγκατάστασης OTEC, η οργανωτική Επιτροπή (OC) επικεντρώθηκε στην πλωτή, κλειστού-κύκλου, προσδεμένης εγκατάστασης OTEC παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεταδιδόμενης στην ακτή μέσω υποθαλάσσιου καλωδίου. Η OC αναγνώρισε ότι η πρώτη εγκατάσταση OTEC που κατασκευάστηκε ήταν πιθανό να είναι $\leq 10\text{MWe}$, εντούτοις, εμπορικά επιτυχείς εγκαταστάσεις OTEC θα ήταν πιθανώς $\geq 100\text{MWe}$, όπου είναι και ο ζητούμενος στόχος της βιομηχανίας OTEC. Η OC επέλεξε για την εργαστηριακή αξιολόγηση την μέθοδο κλειστού-κύκλου δεδομένου ότι θεωρήθηκε στις πρώτες εγκαταστάσεις OTEC $\geq 100\text{MWe}$ πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα σχέδιο κλειστού-κύκλου λόγω της μεγαλύτερης αποδοτικότητάς του. Οι μελέτες στο εργαστήριο περιορίστηκαν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνική δυνατότητα πραγματοποίησης των πρόσθετων εφαρμογών για OTEC (δηλ., πόσιμο ύδωρ, και κλιματισμός από θαλασσινό νερό) δεν μελετήθηκε. Ενώ μια λειτουργική εγκατάσταση OTEC περιέχει πολλά εξαρτήματα, η OC αποφάσισε να περιορίσει την εφαρμογή σε επτά συστήματα: (1) πλατφόρμες (2) σύστημα πρόσδεσης πλατφορμών (3) διεπαφή πλατφορμών/σωλήνων (4) εναλλάκτες θερμότητας (5) αντλίες και στρόβιλοι (6) καλώδιο ισχύος και (7) σωλήνα κρύου νερού. Η μελέτη περιορίστηκε σε αυτά τα συστήματα επειδή αντιμετωπίστηκαν ως κρίσιμα και ενδεχομένως ως περιοριστικός τεχνικός παράγοντας στην επιτυχία των OTEC.

Πρέπει να καταστεί σαφές ότι αυτή η έκθεση είναι μια ποιοτική ανάλυση της κατάστασης της τεχνολογίας, και προορίζεται να ενημερώσει NOAA και OCRM. Αυτή η έκθεση δεν είναι μια λεπτομερής ανάλυση εφαρμοσμένης μηχανικής, ούτε

είναι μια ανεξάρτητη αξιολόγηση της τεχνολογίας. Η παρούσα έκθεση δεν λαμβάνει υπόψη τις οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις, και δεν αποτελεί μέρος της απόφασης και της διαδικασίας αδειοδότησης για OTEC από OCRM στις Ηνωμένες Πολιτείες.

IV. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΚΑΙ ΔΟΜΗ

Το εργαστήριο, που διοργανώθηκε στο πανεπιστήμιο του New Hampshire από τις 3 έως τις 5 Νοεμβρίου, το 2009, αποτελείτο από ολομέλειες όπου οι προσκεκλημένοι ομιλητές συζήτησαν την εμπειρία τους για πλατφόρμες OTEC και έδωσαν τις απόψεις τους σχετικά με την κατάσταση της τεχνολογίας. Επτά επιμέρους ομάδες συζήτησαν περαιτέρω τα βασικά συστήματα της τεχνολογίας: πλατφόρμες, σύστημα πρόσδεσης πλατφορμών, διεπαφή πλατφορμών/σωλήνων, εναλλάκτες θερμότητας, αντλίες και στρόβιλοι, καλώδιο Ισχύος και ο σωλήνας κρύου νερού. Η ημερήσια διάταξη εργαστηρίων (παράρτημα Α), οι συμμετέχοντες (παράρτημα Β), οι ερωτήσεις συζήτησης (παράρτημα Γ), και οι επιμέρους ομάδες (παράρτημα Δ) προσδιορίστηκαν και αναπτύχθηκαν από μια οργανωτική επιτροπή που αποτελείτο από τα μέλη της κυβέρνησης, του ακαδημαϊκού κόσμου και της βιομηχανίας.

Οι συμμετέχοντες εργαστηρίων χωρίστηκαν σε επτά ομάδες που βασίστηκαν επάνω στην πείρα τους. Κάθε επιμέρους ομάδα προσδιόρισε: την τεχνολογία κατάστασης προόδου, τις αλλαγές στην τεχνολογία από το 1980, ο κύκλος ζωής των δομικών στοιχείων της τεχνολογίας (σχέδιο, επεξεργασία και κατασκευή, επέκταση και εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση, παροπλισμός, εξαιρουμένων των περιβαλλοντικών επιπτώσεων), επεκτασιμότητα για εγκατεστημένη ισχύ $\geq 100\text{MWe}$, προκλήσεις, κίνδυνοι και τεχνικοοικονομική μελέτη, ανάγκες έρευνας και ανάπτυξης τους για το αντίστοιχο σύστημα OTEC. Αυτή η έκθεση συνοψίζει τις συζητήσεις της ομάδας για κάθε σύστημα OTEC, τις ερευνητικές προτάσεις, και τα γενικά συμπεράσματα σχετικά με την τεχνική ετοιμότητα για OTEC.

V. ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΕΚΘΕΣΕΙΣ ΤΗΣ ΟΜΑΔΑΣ

A. ΠΛΑΤΦΟΡΜΕΣ

Η ομάδα πλατφορμών εξέτασε την τεχνική ετοιμότητα της υπάρχουσας τεχνολογίας αυτών για μια εφαρμογή OTEC. Τα μέλη της ομάδας ήταν:

Andy Knox, NAVFAC Engineering Service Center
John Halkyard, John Halkyard & Associates
Ed Horton, Horton Deep Water Development
Jonathan Ross, OTEC International/Alion Science & Technology
Ian Simpson, American Bureau of Shipping
Rob Varley, Lockheed Martin

Τεχνολογίες κατάστασης προόδου:

Οι αλλαγές στις παράκτιες πλατφόρμες έχουν οδηγηθεί πρώτιστα από τη βιομηχανία πετρελαίου. Από τη δεκαετία του '80, έχουν υπάρξει βελτιωμένες μετεωρολογικές και ωκεανογραφικές μέθοδοι συλλογής δεδομένων, οι οποίες έχουν οδηγήσει σε πιο αξιόπιστα και ανθεκτικά στο καιρό σχέδια πλατφορμών. Επιπλέον, η βελτίωση των αναλυτικών εργαλείων επιτρέπουν βελτιστοποιημένη και οικονομικά αποδοτικότερη κατασκευή πλατφόρμας. Η ομάδα προσδιόρισε τρία σχέδια πλατφορμών ως τα πιο εφικτά για την εφαρμογή OTEC: ημικαταδύομενη πλατφόρμα, μέρος πλατφόρμας και πλατφόρμας μορφής (μονής εξέδρας). Και οι τρεις έχουν επικυρωθεί σε άλλους βιομηχανικούς τομείς (π.χ., εξόρυξης πετρελαίου ανοικτής θαλάσσης και αιολικών πάρκων) και δεν υπάρχει καμία σημαντική πρόσθετη κατασκευή, λειτουργία ή πρόκληση επέκτασης που συνδέεται με τη χρήση τους σε μια εφαρμογή OTEC.

Οι ημικαταδύομενες πλατφόρμες έχουν τις τυποποιημένες παράκτιες διαδικασίες επεξεργασίας εγκαταστάσεων γεώτρησης. Υπάρχουν λιγότερο κατάλληλες εγκαταστάσεις κατασκευής για τις ημικαταδύομενες πλατφόρμες και πλατφόρμες μορφής (μονής εξέδρας). Η πλατφόρμα μορφής (μονής εξέδρας), χρησιμοποιείται για την κατασκευή πλωτών εγκαταστάσεων παραγωγής αποθήκευσης και εκφόρτωσης (FPSO). Σε μερικές πλατφόρμες παρουσιάζονται οι περισσότερες δυσκολίες κατά την εγκατάσταση, επειδή απαιτείται εργασία σε βαθιά νερά. Είναι επίσης δυσκολότερος ο τρόπος λειτουργίας από τους άλλους δύο τύπους πλατφόρμων.

Οι διαδικασίες λειτουργίας και συντήρησης (O&M) για αυτές τις πλατφόρμες είναι καθιερωμένες, και περιλαμβάνουν χαρακτηριστικά τη συντήρηση των μηχανημάτων και την αφαίρεση της βιολογικής αύξησης στα καταδύομενα τμήματα. Η μετεγκατάσταση των πλατφόρμων μπορεί να παρουσιάσει μερικές δυσκολίες ειδικά με τη διαμόρφωση. Μερικές από τις πλατφόρμες πρέπει να αποσυναρμολογηθούν και να επανασυναρμολογηθούν εκ νέου για την μετεγκατάσταση. Ωστόσο, η μερική διαμόρφωση είναι ευνοϊκότερη για τη σύνδεση σωλήνων κρύου νερού επειδή υπάρχει λιγότερη κίνηση στην ένωση. Ο παροπλισμός των πλατφόρμων χρησιμοποιείται τακτικά σε άλλες βιομηχανίες και δεν πρέπει να είναι η αιτία σημαντικών προκλήσεων για τις εγκαταστάσεις OTEC. Συνολικά, ο κύκλος ζωής μιας πλατφόρμας για μια εγκατάσταση OTEC είναι απλός και έχει καθιερωμένες διαδικασίες.

Προκλήσεις, κίνδυνοι, και οικονομικός προγραμματισμός:

Υπάρχουν μερικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη χρήση διαθέσιμων τεχνολογιών πλατφόρμας για την εγκατάσταση OTEC. Ο ακόλουθος πίνακας συγκρίνει τους κινδύνους που συνδέονται με τις τρεις συνθέσεις πλατφόρμας..

Platform Type	Motion/ survivability risk	Arrangement difficulty	Cost	Technical Readiness
Semi-	Small	Medium	Medium	High

submersible				
Spar	Small	High	Medium-High	Medium
Ship shape/monohull	Medium	Low	Low	High

Ο σημαντικότερος οικονομικός παράγοντας για τις πλατφόρμες OTEC είναι το μέγεθος τους και η προσαρμοστικότητα τους στην εγκατάσταση. Οι πλατφόρμες πρέπει να στεγάσουν ένα σημαντικό ποσό εξοπλισμού για μια εγκατάσταση OTEC, και οι μεγαλύτερες πλατφόρμες αυξάνουν σημαντικά το κόστος και τη δυσκολία της κατασκευής και της επέκτασης.

Έρευνα και ανάπτυξη:

Επειδή οι πλατφόρμες έχουν καθιερωθεί, στην πλειοψηφία τους η έρευνα και η ανάπτυξη έχουν στόχο την αποτελεσματικότητα και το σχετικό κόστος. Η ανάπτυξη της απλούστερης κατασκευής με το χαμηλότερο κόστος και οι τεχνικές επέκτασης θα μειώσουν τις γενικές δαπάνες και θα βελτιώσουν την οικονομική δυνατότητα πραγματοποίησης των εγκαταστάσεων OTEC. Επειδή η τεχνολογία πλατφόρμων OTEC μεταφέρεται από άλλες βιομηχανίες, τα πρότυπα πρέπει να αναπτυχθούν ειδικά για τις πλατφόρμες στις εγκαταστάσεις OTEC.

B. ΠΡΟΣΔΕΣΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ

Η ομάδα πρόσδεσης πλατφορμών εξέτασε την τεχνική ετοιμότητα της υπάρχουσας τεχνολογίας πρόσδεσης πλατφορμών για μια εγκατάσταση OTEC. Τα μέλη της ομάδας ήταν:

Rick Driscoll, Florida Atlantic University Center for Ocean Energy Technology
Fred Arnold, NAVFAC Engineering Service Center
Helen Farr, NOAA Ocean Coastal Resource Management
Mark Greise, Sound & Sea Technology
Kunho Kim, American Bureau of Shipping, Energy Project Development
Gerritt Lang, NAVFAC Engineering Service Center
Pete Lunde, SBM Offshore, NV

Τεχνολογίες κατάστασης προόδου:

Η σημαντικότερη πρόοδος από το 1980 έως και σήμερα είναι η επίτευξη σημαντικής πρόοδος πρόσδεσης πλατφόρμας στον πυθμένα βαθύτερων υδάτων από άμμο και βραχώδη σημεία. Το 1980, το όριο βάθους ήταν έως 305 μ, αλλά μέσα στα προηγούμενα 10 έτη οι πρόοδοι στα συνθετικά υλικά έχουν επιτρέψει τις πολυάριθμες προσδέσεις σε βάθη μέχρι και 3.000 μ. Οι πρόοδοι στο λογισμικό έχουν επιτρέψει να δημιουργηθούν τα ακριβή πρότυπα για να διευκολύνουν τη βελτιστοποίηση των συστημάτων πρόσδεσης πλατφορμών, και η διαδεδομένη χρήση

του GPS και των υποβρύχιων ακουστικών συστημάτων (π.χ., SONAR) επιτρέπει την ακριβή τοποθέτηση των τμημάτων πρόσδεσης.

Αν υποθέσουμε ότι μια πλατφόρμα OTEC δεν είναι πολύ διαφορετική από τις πλατφόρμες που χρησιμοποιούνται σήμερα στην υπεράκτια βιομηχανία πετρελαίου, άρα και η τεχνολογία πρόσδεσης είναι ώριμη και έχει αποδειχθεί σε πιο δύσκολο και απαιτητικό περιβάλλον. Ο βασικός οδηγός θα είναι η βελτιστοποίηση ώστε να καταστήσει οικονομικά βιώσιμο το περιβάλλον στο οποίο αναπτύσσεται. Η ομάδα ανέφερε ότι η κατάλληλη τεχνολογία πρόσδεσης υπάρχει για πολλά μεγέθη πλοίων, φορτίων και τύπων πυθμένα, ωστόσο είναι πολύ συγκεκριμένος ο χώρος και το σύστημα πρόσδεσης θα πρέπει να είναι σχεδιασμένο και προσαρμοσμένο χρησιμοποιώντας τα υπάρχοντα εξαρτήματα (άγκυρες, πασσάλους). Οι γραμμές πρόσδεσης για όλα τα εξαρτήματα υπάρχουν αυτήν την περίοδο για βάθη των 3.000 μ. Ο ηλεκτρικός αγωγός μπορεί να ενσωματωθεί στη γραμμή πρόσδεσης προκειμένου να συνδυαστεί με το καλώδιο πρόσδεσης και ισχύος, εντούτοις αυτό παρουσιάζει ένα νέο σύνολο ζητημάτων και προκλήσεων σχεδίου που μπορεί να μην είναι οικονομικά βιώσιμο. Ο εξοπλισμός υπάρχει αυτήν την περίοδο για να επεκτείνει τα συστήματα πρόσδεσης, εντούτοις μπορεί να τροποποιηθεί βασισμένος στη θέση και τα οικονομικά. Τα μοντέλα λογισμικού υπάρχουν για τα συστήματα πρόσδεσης, εντούτοις θα πρέπει να τροποποιηθούν για να αντιμετωπίσουν τις περίπλοκες εγκαταστάσεις OTEC (δηλ., η ροή του ρευστού σε αγωγό έχει σημαντική επίπτωση στο μοντέλο). Η αύξηση της διαθεσιμότητας των GPS σε συνδυασμό με υψηλής ανάλυσης SONAR, έδωσε μια πιο λεπτομερή εικόνα του θαλάσσιου πυθμένα και επιτρέπει την ακριβή τοποθέτηση των αγκυροβολίων.

Το σχέδιο, η επεξεργασία, και η κατασκευή των τμημάτων πρόσδεσης πλατφορμών (άγκυρες, γραμμές πρόσδεσης, υλικού/απολήξεων, την ακεραιότητα των οργάνων ελέγχου) προσδιορίστηκαν είτε ως εμπορικά διαθέσιμα, ή απαιτούν ελάχιστη παραμετροποίηση. Το ποσό της προσαρμογής και της δυσκολίας μπορεί να αυξηθεί με την αύξηση του μεγέθους πλατφόρμας, το βάρος της, την κλίση πυθμένα και τα ειδικά χαρακτηριστικά του πυθμένα. Η κινητοποίηση και η επέκταση των τμημάτων πρόσδεσης προσδιορίστηκαν πολύ απλά χωρίς σημαντικές προκλήσεις, εντούτοις κάποια δευτερεύουσα τροποποίηση στον εξοπλισμό μπορεί να χρειαστεί. Η παρακολούθηση των στοιχείων επίδοσης κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης και της χρήσης θεωρήθηκε σχετικά απλή με μερικά προβλήματα και υψηλή αξιοπιστία.

Η λειτουργία της πρόσδεσης πλατφορμών δεν είναι πολύπλοκη και είναι πολύ αξιόπιστη ενώ η υπάρχουσα τεχνολογία είναι κατάλληλη. Η Συντήρηση του συστήματος πρόσδεσης πλατφόρμας είναι τεχνικά απλή, με επίκεντρο κυρίως τον περιορισμό των επιπτώσεων της θαλάσσιας ρύπανσης σχετικά με τον εξοπλισμό και την περιοδική αντικατάσταση / επισκευή των οργάνων ελέγχου ακεραιότητας.

Ο Παροπλισμός της πρόσδεσης πλατφόρμας ως σύστημα προσδιορίστηκε τεχνικά εφικτός και συνήθης, εντούτοις χρειάζεται αρκετή και δαπανηρή εργασία.

Προκλήσεις, κίνδυνοι, και οικονομικός προγραμματισμός:

Μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις με την πρόσδεση πλατφορμών είναι η αποτροπή θαλάσσιας ρύπανσης της γραμμής και του υλικού πρόσδεσης. Η υπερβολική θαλάσσια ρύπανση μπορεί να επηρεάσει στην ακεραιότητα των γραμμών πρόσδεσης, και να αυξήσει την έλξη με συνέπεια την υψηλότερη φόρτωση. Οι περισσότερες προσδέσεις πλατφορμών είναι κοντά στην ακτή, ενώ οι πλατφόρμες OTEC είναι πιθανό να είναι στα πολύ μεγάλα θαλάσσια βάθη και εκτίθενται σε δυσχερείς θαλάσσιες συνθήκες, οι οποίες μπορούν να παρουσιάσουν δυσκολία στο σχεδιασμό. Μια άλλη σημαντική πρόκληση θα είναι η απαίτηση να αποσυνδεθούν και να επανασυνδεθούν οι προσδέσεις σε περίπτωση ακραίων θυελλών.

Η κινητοποίηση και η επέκταση προσδιορίστηκαν ως το πιο δύσκολο μέρος του κύκλου ζωής της πρόσδεσης πλατφορμών. Τα πιθανά ζητήματα περιλαμβάνουν: ανικανότητα να επεκταθεί αποτελεσματικά και ακίνδυνα, σημαντική καθυστέρηση στο ξεκίνημα, συμπληρωματικές δαπάνες ή πλήρης διακοπή του συστήματος.

Ο οικονομικός προγραμματισμός περιλαμβάνει την ανάγκη για τα εφεδρικά συστήματα, τις συνθήκες περιοχών, τον καιρό, το ωκεάνιο βάθος, την πολυπλοκότητα εγκαταστάσεων, τις υλικές δαπάνες, τις απαιτήσεις απόδοσης, τον κίνδυνο και την ασφάλεια εγκαταστάσεων, τις δαπάνες εργασίας, την άδεια και τους κανονισμούς, την αφαίρεση, τις δαπάνες και τις απαιτήσεις παροπλισμού. Η εξοικονόμηση κόστους θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μέσω της βελτιστοποίησης πρόσδεσης (σε ένα σημείο έναντι πολλαπλών σημείων), του συντονισμού και της βελτιστοποίησης του σχεδίου πλατφορμών, λιγότερων αυστηρών απαιτήσεων κίνησης και επιβίωσης, αναφορών, μετριάζοντας τους υψηλούς παράγοντες δαπανών, και την δυνατότητα αξιόπιστης εγκατάστασης.

Έρευνα και ανάπτυξη:

Η ομάδα πρόσδεσης πλατφορμών ανέλυσε διάφορα ερευνητικά θέματα, τα οποία περιλαμβάνουν: Την προσαρμογή των κωδίκων και των προτύπων για να απεικονιστεί το σύστημα OTEC, τα συστήματα πρόσδεσης για τα υψηλά σημεία κλίσεων του πυθμένα, τις τεχνικές που απαιτούν τον ελάχιστο εξοπλισμό για την πρόσδεση και την εγκατάσταση καλωδίων ισχύος, βελτιστοποιημένα συστήματα στερέωσης για ηφαιστειακά πετρώματα, καινούρια πρότυπα και σχέδια σχετικά με τις ανάγκες OTEC.

C. ΔΙΕΠΑΦΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ/ΣΩΛΗΝΩΝ

Η ομάδα εξέτασε την τεχνική ετοιμότητα σύμφωνα με την υπάρχουσα τεχνολογία διεπαφής πλατφορμών/σωλήνων. Τα μέλη της ομάδας ήταν:

Dallas Meggitt, Sound & Sea Technology
Mark Brown, Sound & Sea Technology

Dennis Cooper, Lockheed Martin
Pat Grandelli, Makai Ocean Engineering
Dennis How, NAVFAC Engineering Service Center
Manuel Laboy, Offshore Infrastructure Associates, Inc.
Susan Skemp, FAU Center for Ocean Energy Technology

Τεχνολογίες κατάστασης προόδου:

Μια από τις σημαντικότερες προόδους από το 1980 είναι η εργασιακή εμπειρία στον ανοικτό βαθύ ωκεανό υδάτινου περιβάλλοντος και η μοντελοποίηση της προηγούμενης τεχνολογίας. Η τεχνολογία του αισθητήρα και της μοντελοποίησης έχουν ωριμάσει και δίνουν τώρα μια καλύτερη κατανόηση της συνεχούς φόρτωσης, που επιτρέπει τα βελτιστοποιημένα σχέδια. Οι πρόοδοι στην επιστήμη υλικών έχουν παραγάγει τα ελαφρύτερα, ισχυρότερα, και ανθεκτικότερα υλικά που μπορούν να ενσωματωθούν για τη διεπαφή πλατφορμών/σωλήνων, επιτρέποντας τους μεγαλύτερους σωλήνες να χρησιμοποιηθούν. Διάφορες πειραματικές εγκαταστάσεις OTEC έχουν κατασκευαστεί από το 1980, και ενώ οι περισσότερες είτε απέτυχαν είτε διακόπηκαν για διάφορους λόγους, οι διάφορες αποτυχίες επέφεραν την κατάλληλη εμπειρία, συμπεριλαμβανομένων των σημαντικών εκτιμήσεων σχεδίου και των σημείων αποτυχίας σχετικών με τη διεπαφή σωλήνων/πλατφορμών.

Η ομάδα διεπαφών σωλήνων/πλατφορμών κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η τεχνολογία για να δημιουργήσει μια διεπαφή κατάλληλη για μια εγκατάσταση $\geq 100\text{MWe}$ (CWP διαμέτρων $\sim 10 \mu$) δεν είναι διαθέσιμη σήμερα, αλλά η εμπειρία με τους μικρότερους σωλήνες διαμέτρου 1μ έχει καταδειχθεί τεχνολογικά ότι είναι πιο βιώσιμες. Υπάρχουν γενικά τρία αποδεκτά σχέδια διεπαφών σωλήνων πλατφορμών: ένας ευκίνητος σωλήνας που συνδέεται με έναν σημαντήρα επιφάνειας, μια σταθερή διεπαφή και μια διεπαφή με έναν αναρτήρα. Η παράκτια βιομηχανία πετρελαίου χειρίζεται συνήθως τις πολλαπλάσιες μετώπες διαμέτρου μέχρι 1μ σε βάθη ($> 305 \mu$), και η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία μπορεί πιθανώς να προσαρμοστεί σε OTEC και να κλιμακωθεί σε μεγαλύτερες διαμέτρους.

Το σχέδιο, η επεξεργασία και η κατασκευή μιας πλατφόρμας/διεπαφής σωλήνων για μια εγκατάσταση $\geq 100\text{MWe}$ προϋποθέτει σημαντικές δοκιμές και μοντελοποίηση, και μπορεί να χρειαστεί δύο έως τέσσερα έτη πριν να είναι έτοιμη για εγκατάσταση. Οι Σταθερές διεπαφές είναι ευκολότερες στο να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν, ενώ οι κινητές διεπαφές είναι πιο σύνθετες και δυσκολότερες στον σχεδιασμό και την κατασκευή τους. Η κατασκευή της διεπαφής δεν είναι τεχνικά δύσκολη και θα μπορούσε να ολοκληρωθεί γρήγορα, ωστόσο, η κινητοποίηση και η επέκταση είναι δυσκολότερες και εμφανίζουν αποτυχίες σε διάφορα προγράμματα OTEC. Η προσπάθεια που απαιτείται και η πιθανότητα επιτυχίας της κινητοποίησης και της επέκτασης εξαρτάται πολύ από τον τύπο και το μέγεθος σωλήνα κρύου νερού, τον τύπο πλατφορμών και τη διεπαφή. Ενώ υπάρχει κάποια εμπειρία για τους μικρότερους σωλήνες, που απαιτούν συνήθως μεγαλύτερες διεπαφές ($> 1\mu$ CWP) για την εγκατάσταση και δεν είναι σαφές ποιες πρόσθετες ανάγκες ή προβλήματα

ενδέχεται να προκύψουν. Το κάθετο χτίσιμο διεπαφών είναι ευκολότερο στην εγκατάσταση από το οριζόντιο. Το οριζόντιο χτίσιμο διεπαφών είναι δυσκολότερο για τις σταθερές διεπαφές. Η δυνατότητα να αποσυνδεθεί ο σωλήνας κρύου νερού προσθέτει πολυπλοκότητα και κόστος για τη διεπαφή.

Η λειτουργία και η συντήρηση είναι σχετικά εύκολη για μια σταθερή διεπαφή, αλλά ουσιαστικά χρειάζεται περισσότερο για τις κινητές διεπαφές. Η διεπαφή απαιτεί την περιοδική λίπανση και τον καθαρισμό, ενώ η κινητή διεπαφή απαιτεί τη συχνή επισκευή δεδομένου ότι έχει διάφορα σημεία σύνδεσης και καταπόνησης.

Η σταθερή διεπαφή έχει την υψηλότερη επεκτασιμότητα και ακολουθεί η αναρτήσιμη (gimballed). Η κινητή διεπαφή δεν είναι πιθανώς εφικτή για εγκαταστάσεις $\geq 100\text{MWe}$ λόγω του μεγέθους του σωλήνα κρύου νερού. Σύμφωνα με τις τρέχουσες τεχνολογίες σχεδιασμού και ανάπτυξης είναι πιθανόν επεκτάσιμες οι εγκαταστάσεις $\geq 100\text{MWe}$, ωστόσο σημειώνεται, ότι μια διεπαφή για επιτυχή εγκατάσταση $\leq 10\text{MWe}$ θα πρέπει να κατασκευαστεί και να αναπτυχθεί πριν επιχειρηθεί κάτι μεγαλύτερο, όπως απρόβλεπτες δυσκολίες που μπορεί να προκύψουν με την αύξηση του μεγέθους του σωλήνα.

Προκλήσεις, κίνδυνοι, και οικονομικός προγραμματισμός:

Υπάρχουν πολυάριθμες προκλήσεις για τη διεπαφή πλατφορμών/σωλήνων. Ο σημαντικότερος είναι η έλλειψη εμπειρίας με τις διεπαφές που συγκρατούν σωλήνες μεγαλύτερους από 1μ διάμετρο. Ένα σημαντικό μέρος του σχεδιασμού, της κατασκευής, και της μοντελοποίησης είναι η ανάπτυξη μιας διεπαφής για μια εγκατάσταση OTEC $\geq 100\text{MWe}$. Η μεγαλύτερη πρόκληση θα είναι να σχεδιαστεί μια διεπαφή που να είναι σε θέση να συνδέσει και να αποσυνδέσει ένα CWP, και να αντέχει τις δυνάμεις ενός ανοικτού ωκεάνιου περιβάλλοντος και φαινομένων καταιγίδας.

Οι κίνδυνοι που συνδέονται με τη διεπαφή πλατφορμών/σωλήνων περιλαμβάνουν την πλήρη αποτυχία, με συνέπεια την απώλεια του σωλήνα και των σημαντικών καθυστερήσεων παραγωγής, καθώς επίσης και τη μερική αποτυχία, με συνέπεια την υποβιβασμένη απόδοση λόγω της διαρροής. Εάν η διεπαφή αποτυγχάνει, θα είναι δύσκολο και ακριβό να επισκευαστεί επί τόπου, ειδικά εάν ο σωλήνας απολεσθεί.

Ο οικονομικός προγραμματισμός περιλαμβάνει: την επιλογή υλικού και την διαδικασία σχεδίου και επεξεργασίας όχι μόνο για τη διεπαφή, αλλά και για το σωλήνα κρύου νερού και την πλατφόρμα. Το τοπικό κλίμα όπως τα ρεύματα και ο σχεδιασμός των κυμάτων θα καθορίσουν την ολοκλήρωση του σχεδίου και θα παίξουν σημαντικό ρόλο για το κόστος. Οι ανταλλαγές μεταξύ της σχετικής κίνησης του CWP έναντι της πλατφόρμας και της πολυπλοκότητας του συστήματος θα επηρεάσουν επίσης το κόστος, καθώς και τη δυνατότητα σύνδεσης / αποσύνδεσης των CWP.

Έρευνα και ανάπτυξη:

Οι ανάγκες έρευνας και ανάπτυξης περιλαμβάνουν: διαμόρφωση των μορφών αποτυχίας, επεκταθείσα τηλεμετρία, πλευστότητα χαμηλότερου κόστους, διαμόρφωση συστημάτων OTEC, ωκεανογραφική συλλογή δεδομένων, εξαγωγή δεδομένων και επεξεργασία αυτών, ολοκλήρωση αλυσίδας προμηθειών, και τη βελτίωση στα σύνθετα υλικά.

Τα τμήματα των ομάδων CWP και διεπαφών σωλήνων/πλατφορμών συνεργάζονται και παρουσιάζουν μερικές δυσκολίες στο σχέδιο και την εγκατάσταση. Επειδή η διεπαφή πλατφορμών/σωλήνων για αναρτώμενους CWP έχει καταδειχθεί μόνο για τους σωλήνες διαμέτρων ≤ 1 μ, η εξελξιμότητα είναι ασαφής και υπάρχουν σημαντικές απορίες. Η έρευνα πρέπει να εστιάσει στην αύξηση μεγέθους της διεπαφής πλατφορμών/σωλήνων για να προσαρμόσει τους σωλήνες που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις ≥ 100 MWe. Οι συνθήκες των ανοικτών ωκεανών και τα βαθιά θαλάσσια ρεύματα προκαλούν πολλές πιέσεις στο CWP και στη διεπαφή, και μέχρι τα μεγέθη αυτών των εξαρτημάτων να γίνουν σημαντικά μεγαλύτερα οι εγκαταστάσεις χτίζονται και χρησιμοποιούνται επιτυχώς, αλλά θα παραμείνουν το μεγαλύτερο εμπόδιο στις επιτυχείς εγκαταστάσεις ≥ 100 MWeOTEC.

D. ΕΝΑΛΛΑΚΤΕΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η ομάδα εναλλακτών θερμότητας εξέτασε την τεχνική ετοιμότητα της υπάρχουσας τεχνολογίας εναλλακτών θερμότητας για μια εγκατάσταση OTEC. Τα μέλη της ομάδας ήταν:

Whitney Blanchard, NOAA Ocean and Coastal Resource Management
Avram Bar-Cohen, University of Maryland, Department of Mechanical Engineering

Desikan Bharathan, National Renewable Energy Laboratory
Yunho Hwang, University of Maryland, Department of Mechanical Engineering

Laurie Meyer, Lockheed Martin

C.B. Panchal, E3Tec Service, LLC

Nate Sinclair, NAVFAC Engineering Service Center

Τεχνολογίες κατάστασης προόδου:

Οι εναλλάκτες θερμότητας (HX) έχουν βελτιωθεί από πολλές απόψεις από τη δεκαετία του '80 και οδηγούνται πρώτιστα από άλλες βιομηχανίες (π.χ., αεροδιαστημική, εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, πετρελαίου, κρυογόνου, υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), γεωθερμικού). Τα τυπικά σχέδια HX του 1980 ήταν από απλό σωλήνα, κέλυφος και σωλήνα, πλάκα και πλαίσιο. Ο ανοξείδωτος χάλυβας χρησιμοποιήθηκε τυπικά. Έννοιες όπως ο ανοικτός κύκλος και ο υβριδικός των εγκαταστάσεων OTEC αναπτύχθηκαν στη δεκαετία του '80, αλλά οι HXs για αυτές τις εφαρμογές δεν σχεδιάστηκαν ή επικυρώθηκαν. Σήμερα οι HXs έχουν βελτιωμένους συντελεστές μεταφοράς θερμότητας, κυρίως λόγω της χρήσης νέων και τροποποιημένων υλικών. Το τιτάνιο είναι πιο οικονομικό και πιο αποδοτικό σήμερα,

τα πλαστικά έχουν αναπτυχθεί για τη χρήση ΗΧ, και οι τεχνικές αργίλιο-ανάμιξης έχουν βελτιωθεί. Οι βελτιώσεις επιφάνειας έχουν αναπτυχθεί. Οι πρακτικές επεξεργασίας έχουν βελτιωθεί επίσης: εξώθηση, συγκόλληση αργιλίου, τεχνικές ένωσης, ποιοτικός έλεγχος, ενοργάνωση, και επένδυση των διαδικασιών. Η περισσότερη από τη διαδικασία κατασκευής ΗΧ είναι αυτοματοποιημένη και, ως εκ τούτου, έχει βελτιώσει την ικανότητα για μεγάλους ΗxS

Οι ΗΧs έχουν επικυρωθεί για τις εφαρμογές κλειστών κύκλων και έχουν σχεδιαστεί για την εφαρμογή υβριδικών κύκλων. Συμπυκνωτές άμεσης επαφής είναι σήμερα σε λειτουργία για τις γεωθερμικές εφαρμογές. Οι εξατμιστήρες λάμψης έχουν καταδειχθεί και έχουν συνδυαστεί με τον κύκλο του ρευστού εργασίας των ΗΧs που έχουν αναπτυχθεί. Αυτή η συζήτηση εστιάζει στους εναλλάκτες θερμότητας για μια εγκατάσταση ΟΤΕC κλειστού κύκλου. Τα πιο κατάλληλα ρευστά εργασίας για εγκαταστάσεις ΟΤΕC είναι η προπυλενογλυκόλη και η αμμωνία, με έμφαση στην τελευταία, λόγω των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και της εκτενούς εμπειρίας από χρήση της σε παρόμοιες εφαρμογές. Το κέλυφος και ο σωλήνας, η πλάκα και το πλαίσιο, και η πλάκα αλουμινίου είναι οι τρεις τύποι ΗΧ και είναι κατάλληλοι και έτοιμοι για εγκαταστάσεις ΟΤΕC.

Η ομάδα συζήτησε τον κύκλο ζωής τριών διαφορετικών τύπων ΗΧs που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για μια εγκατάσταση ΟΤΕC: κέλυφος και σωλήνας, πλάκα και πλαίσιο και πτερύγιο πλάκας αλουμινίου. Το χρονικό διάστημα εμπορικής κατασκευής και για τους τρεις από αυτούς τους τύπους ΗΧs για χρήση ΟΤΕC είναι δύο έως τρία έτη.

Το κέλυφος και ο σωλήνας ΗΧs είναι συνήθως κατασκευασμένα από τιτάνιο, χάλυβα, άνθρακα, ανοξείδωτο χάλυβα, χαλκό-νικέλιο, ή αργίλιο. Η πολυπλοκότητα και το κόστος εγκατάστασης ενός ΗΧ ποικίλλει ανάλογα με το σχεδιασμό της πλατφόρμας, ένας ΗΧ που ενσωματώνεται στην πλατφόρμα θα πρέπει πιθανώς να εγκατασταθεί ενώ η πλατφόρμα είναι υπό κατασκευή. Το μέγεθος αυτών των ΗxS είναι σημαντικό λόγω του περιορισμένου χώρου σε μια πλατφόρμα ΟΤΕC. Το πολλαπλό σχέδιο για το κέλυφος και το σωλήνα ΗΧs εξαρτάται από τη διαμόρφωση πλατφορμών. Το μεγαλύτερο κέλυφος και οι σωληνώσεις ΗΧ που είναι διαθέσιμοι σήμερα μπορούν να αποτελέσουν εγκατάσταση 5MWe (καθαρής ισχύος ΟΤΕC), εντούτοις, αυτοί μπορούν να εγκατασταθούν σε ενότητες, δημιουργώντας τη μεγαλύτερη παραγωγή καθαρής ισχύος. Η κατασκευή του φλοιού και του σωλήνα ΗΧs έχουν σχετικά εντατική εργασία, αλλά η ενσωμάτωση τους σε εγκαταστάσεις ΟΤΕC είναι χαμηλή σε κόστος σε σύγκριση με τις εναλλακτικές λύσεις. Ο ΗΧ κατασκευάζεται αρχικά στην ακτή και μεταφέρεται έπειτα πλωτά στην εγκατάσταση ΟΤΕC. Υπάρχουν όμως κάποια προβλήματα με τη μεταφορά λόγω του μεγάλου μεγέθους του φλοιού και του σωλήνα των ΗΧs και απαιτείται ειδικός εξοπλισμός.

Η λειτουργία και η συντήρηση (O&M-Operations & Maintenance) του φλοιού και του σωλήνα ΗΧ είναι εύκολη και υπάρχουν δεδομένα απόδοσης για την επικύρωση των επιδόσεων. Οι ΗxS φθείρονται αργά και χρειάζονται κάποιες επισκευές.

Αντικαθίστανται μόλις ξεπεράσουν το χρόνο ζωής τους, που περιορίζεται συνήθως από την υλική υποβάθμιση (π.χ., διάβρωση, σκασίματα). Είναι απαραίτητο να γίνεται έλεγχος του HX για τις διαρροές. Κάποιο μέρος αυτού του ελέγχου γίνεται οπτικά, και επομένως, πρέπει να υπάρχει χώρος για το προσωπικό ώστε να ελέγξει τους HxS. Υπάρχουν ανιχνευτές στο νερό εξάτμισης για να ανιχνεύσουν την αμμωνία (δηλ., το ρευστό λειτουργίας). Η χλωρίωση είναι απαραίτητη για να μειωθεί η βιορύπανση στο «θερμό» (δηλ. εξάτμιστήρας) τμήμα νερού του HX. Υπάρχουν καθιερωμένες οδηγίες για την ασφάλεια προσωπικού κατά τον χειρισμό του φλοιού και του σωλήνα των HXs. Αυτές οι διαδικασίες O&M και οι οδηγίες/κώδικες προέρχονται από άλλες βιομηχανίες που χρησιμοποιούν το φλοιό και το σωλήνα HXs (π.χ., βιομηχανία μεταποίησης, βιομηχανία ψύξης, εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας). Αμερικανική Εταιρεία μηχανολόγων μηχανικών (ASME) ανέπτυξε το μεγαλύτερο μέρος αυτών των κωδικών.

Ο φλοιός και ο σωλήνας HXs μπορούν να αναβαθμιστούν εύκολα σε εγκαταστάσεις $\geq 100\text{MWe}$ με ένα αρθρωτό σχέδιο. Ο παροπλισμός αυτών των HXs έχουν εντατική εργασία και υπάρχουν περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που συνδέονται με την απελευθέρωση του ρευστού λειτουργίας. Ωστόσο, υπάρχουν πρότυπα του κλάδου για τον παροπλισμό. Υπάρχει υπολειμματική αξία στα μέταλλα και την αμμωνία καθώς και τα δύο μπορούν να ανακυκλωθούν.

Η πλάκα και το πλαίσιο HXs κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα ή τιτάνιο. Η κατασκευή είναι εύκολη επειδή αποτελείται από μια πλήρως αυτοματοποιημένη διαδικασία συγκόλλησης. Ένας περίπλοκος παράγοντας που υπάρχει είναι το μεγάλο μέγεθος πλάκας που έχει να κάνει με την πλάκα και το πλαίσιο των HXs που απαιτούνται για τις εγκαταστάσεις OTEC. Η εγκατάσταση των HxS σε εγκαταστάσεις OTEC είναι δύσκολη λόγω του σύνθετου συστήματος σωληνώσεων και των ακριβών βαλβίδων που απαιτούνται. Κάθε επιμέρους πλάκα και πλαίσιο του HX μεταφέρεται προς τη τοποθεσία OTEC έχουν όμως ένα μειονέκτημα, είναι λιγότερο εύκαμπτα από το φλοιό και το σωλήνα για εγκαταστάσεις OTEC επειδή απαιτούν περισσότερο εξαερισμό. Εντούτοις, το πλεονέκτημα είναι ότι η πλάκα και το πλαίσιο των HXs είναι λιγότερο ακριβά από το φλοιό και το σωλήνα. Με τις απαραίτητες σωληνώσεις και το σύστημα συλλέκτη, το κόστος των δύο τύπων HxS είναι ισοδύναμο.

Πολλές από τις διαδικασίες O&M για τη πλάκα και το πλαίσιο HXs είναι ίδιες με αυτές του φλοιού και του σωλήνα. Εντούτοις, υπάρχουν μερικές επιπλέον δυσκολίες. Η πλάκα και το πλαίσιο HXs δεν μπορούν να καταδυθούν επειδή οι φλάντζες δεν είναι πλήρως συγκολλημένες και πρέπει να παραμείνουν ξηρές. Οι HXs μπορούν να επισκευαστούν με την αντικατάσταση των μεμονωμένων πλακών. Η ασφάλεια προσωπικού είναι παρόμοια με αυτήν του φλοιού και του σωλήνα των HXs, αλλά έχει επιπλέον και τον περιορισμένο χώρο εισόδου. Επίσης η πλάκα και το πλαίσιο των HxS έχουν περιορισμένη επεκτασιμότητα. Σε κλίμακα μεγαλύτερη από 100MWe , ο αριθμός και το μέγεθος των πλακών που απαιτούνται αυξάνονται

σημαντικά. Ο παροπλισμός της πλάκας και του πλαισίου των HxS έχουν τις ίδιες διαδικασίες και ζητήματα με αυτά του φλοιού και του σωλήνα.

Το πτερύγιο πλάκας αλουμινίου HXs κατασκευάζεται από συγκολλημένο αλουμίνιο και χρησιμοποιείται κυρίως στην κρυογονική και υγροποιημένου φυσικού αερίου βιομηχανία. Έχουν ένα αρθρωτό σχέδιο παρόμοιο με αυτό του φλοιού και του σωλήνα, αλλά με χαμηλότερη παραγόμενη ισχύ εξόδου ανά μονάδα. Οφειλόμενη, εν μέρει, στην περιοχή επιφάνειας και στον περιορισμό αναλογίας όγκου, κάθε μονάδα διαθέτει ένα αποτελεσματικό ανώτερο όριο θερμοδυναμικής περίπου 2MWe, που απαιτεί τη χρήση πολλαπλών μονάδων για πλατφόρμες $\geq 2\text{MWe}$. Τα πτερύγια πλάκας αλουμινίου έχουν χαμηλότερο κόστος ενσωμάτωσης επειδή οι συγκολλημένες μονάδες αλουμινίου μπορούν να συναρμολογηθούν επί τόπου. Οι μονάδες μπορούν να χωρέσουν μέσα σε ένα τυποποιημένο μεταφορικό κιβώτιο, παρουσιάζοντας λιγότερα προβλήματα μεταφοράς.

Η O&M για το πτερύγιο πλάκας αλουμινίου των HXs είναι παρόμοια με αυτή του φλοιού-σωλήνα και της πλάκας-πλαισίου. Οι πρακτικές O&M για το πτερύγιο πλάκας αλουμινίου των HXs περιλαμβάνουν: Την παρακολούθηση διάβρωσης αλουμινίου και την ανάγκη για επισκευή εκτός τοποθεσίας. Το πτερύγιο πλάκας HXs είναι επεκτάσιμο, λόγω του αρθρωτού σχεδιασμού του. Υπάρχουν στοιχεία απόδοσης για την επικύρωση πτερύγιου πλάκας αλουμινίου HxS. Το Υπουργείο Ενέργειας (DOE), έχει τα δεδομένα δοκιμών για αυτούς τους HxS. Οι πρακτικές παροπλισμού για το πτερύγιο πλάκας είναι οι ίδιες με τους άλλους δύο τύπους HxS.

Προκλήσεις, κίνδυνοι, και οικονομικός προγραμματισμός:

Υπάρχουν κίνδυνοι που συνδέονται με τα ρευστά λειτουργίας που διαρρέουν από τους HXs λόγω των πιθανών περιβαλλοντικών ζημιών, και οι αρνητικές επιπτώσεις στην απόδοση του αεροστροβίλου. Πρέπει να είναι περισσότερα τα δεδομένα που συλλέγονται από τη βιορύπανση που προκαλούν οι HxS. Η μεγαλύτερη πρόκληση είναι το περιορισμένο οικονομικό κίνητρο για τους κατασκευαστές HXs για να βελτιστοποιήσουν το σχέδιο τους και την επεξεργασία για τις εγκαταστάσεις OTEC. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του «θερμού» και «κρύου» νερού ($\Delta\theta$) είναι σχετικά μικρή έναντι άλλων εφαρμογών για HXs. Η πρόκληση είναι να σχεδιαστεί ένας HX που μπορεί να χειριστεί τις μεγάλες ροές, και να έχει έναν υψηλό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, ώστε να ενσωματωθεί εύκολα σε μια εγκατάσταση OTEC.

Έρευνα και ανάπτυξη:

Η έρευνα και η ανάπτυξη HXs για μια εγκατάσταση OTEC στοχεύουν στο να βελτιώσουν τη μεταφορά θερμότητας χωρίς να υποστούν μεγάλη πτώση πίεσης. Οι βελτιώσεις στο σχέδιο ενός HX θα αυξήσουν την οικονομική αποτελεσματικότητα ολόκληρων των εγκαταστάσεων OTEC. Οι ερευνητικοί τομείς περιλαμβάνουν: υλικά, ενισχυμένη επιφάνεια και τεχνικές επεξεργασίας. Πολλές από αυτές τις περιοχές έχουν ήδη αποτελέσει το αντικείμενο πολλών ερευνών, αλλά οι εγκαταστάσεις OTEC

απαιτούν περαιτέρω βελτιώσεις και επικύρωση. Οι βελτιώσεις επιφάνειας θα αυξήσουν την επιφάνεια, του στροβιλισμού και της ανάμιξης, αυξάνοντας έτσι την ικανότητα μεταφοράς θερμότητας. Η έρευνα στα υλικά περιλαμβάνει τις μεγαλύτερες διαδικασίες εξαγωγής και τις ιδιότητες των κραμάτων αλουμινίου που στοχεύουν στη διάρκεια ζωής των πλατφόρμων OTEC, και στη χρήση των πλαστικών.

E. ΑΝΤΛΙΕΣ ΚΑΙ ΤΟΥΡΜΠΙΝΕΣ

Η ομάδα αντλιών και στροβίλων εξέτασε την τεχνική ετοιμότητα της υπάρχουσας τεχνολογίας αντλιών και στροβίλων για μια εγκατάσταση OTEC. Τα μέλη της ομάδας ήταν:

Michael Reed, Department of Energy
Alexandra DeVisser, NAVFAC Engineering Service Center
Leslie Kramer, Lockheed Martin Missiles and Fire Control
Donald MacDonald, NOAA Coastal and Ocean Resource Management
Peter Pandolfini, Johns Hopkins University, Applied Physics Lab
Orlando Ruiz, Offshore Infrastructure Associates, Inc.

Τεχνολογίες κατάστασης προόδου:

Έναντι των άλλων εξαρτημάτων της εγκατάστασης OTEC, η τεχνολογία αντλιών και στροβίλων είναι η πιο προηγμένη όσον αφορά την τεχνική ετοιμότητα. Δεν υπήρξαν τυχόν επαναστατικές καινοτομίες στο σχεδιασμό των αντλιών και των στροβίλων κατά τα τελευταία 30 χρόνια, εντούτοις, έχουν υπάρξει μερικές αλλαγές από τη δεκαετία του '80 που έχουν βελτιώσει την απόδοση συμπεριλαμβανομένης και της χρήσης των ελαφριών και κατώτερων υλικών τριβής. Ο ηλεκτρονικός έλεγχος που είναι τώρα διαθέσιμος μπορεί να εξετάσει την λειτουργικότητα και τη θέση των αντλιών και των στροβίλων, βοηθώντας στο να μειωθούν οι οικονομικές δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης (O&M).

Η βιομηχανία πετρελαίου έχει περισσότερα από 30 έτη εμπειρίας με τις αντλίες και τους στροβίλους στις σκληρές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως οι παράκτιες εγκαταστάσεις. Οι στροβίλοι αξονικής ροής είναι σε θέση να υποστηρίξουν μεγάλη παραγωγή εγκατεστημένης ισχύος (MWe) και αυτές οι μονάδες είναι διαθέσιμες στο εμπόριο. Το Toshiba (Τόκιο, Ιαπωνία), οι στροβιλοκίνητες μηχανές Rotoflow (Fairfield, CT), Mitsubishi (Κυπαρίσσι, Καλιφόρνιας), Elliott της Γερμανίας (Jeannette, PA) και Hitachi (Τόκιο, Ιαπωνία) κατασκευάζουν τους κατάλληλους στροβίλους. Για μια εγκατάσταση 10MWe, δύο ακτινικών στροβίλων ροής έχει αξιολογηθεί ότι από 7-8 MW φαινόμενης ισχύος θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν. Η αύξηση του αριθμού στροβίλων βελτιώνει την αξιοπιστία και την καθαρή παραγωγή ισχύος. Αυτό είναι σχετικά εύκολο να γίνει λόγω του αρθρωτού σχεδίου που χρησιμοποιείται στις εγκαταστάσεις OTEC.

Οι κρύες και θερμές υδραντλίες για μια εγκατάσταση OTEC έχουν σχεδιασμό πτερωτής αξονικής ροής και είναι τοποθετημένες στην πλατφόρμα. Αυτές οι αντλίες είναι ιδιαίτερα αποδοτικές (87-92%), και είναι διαθέσιμες στο εμπόριο από τους πολυάριθμους προμηθευτές. Μια εγκατάσταση 100 MWe θα απαιτούσε αντλίες ικανές να αποδώσουν περίπου 200 m³/s κρύου νερού και 400 m³/s κρύου νερού (Vega Λ. , 1995). Οι λύσεις πολλαπλών-αντλιών αυτού του μεγέθους διατίθενται στην αγορά, και θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε μια εγκατάσταση OTEC ≥ 100 MWe. Το σύστημα άντλησης του ρευστού λειτουργίας σε μια εγκατάσταση OTEC θα απαιτούσε αντλίες τροφοδότησης και αντλίες ανακύκλωσης. Για εγκατάσταση ≥ 100 MWe, χρειάζονται 8 αντλίες για το ρευστό λειτουργίας και 8 αντλίες ανακύκλωσης. Αυτές οι αντλίες είναι διαθέσιμες στο εμπόριο και έχουν σχετικά χαμηλό κόστος, εντούτοις, αυτές απαιτούν σημαντική συντήρηση. Υπάρχει μια μεγάλη βάση δεδομένων σχεδίου διαθέσιμη για αυτές τις αντλίες.

Οι στρόβιλοι για τις εφαρμογές OTEC είναι διαθέσιμοι στο εμπόριο. Τα υλικά που είναι κατάλληλα για αυτούς τους στρόβιλους περιλαμβάνουν το χάλυβα, χάλυβα-άνθρακα και το χρώμιο. Οι μεγάλοι στρόβιλοι είναι μια πρόκληση, εντούτοις, αυτό μπορεί να μετριαστεί με τη χρησιμοποίηση ενός αρθρωτού σχεδίου. Υπάρχουν καθιερωμένες πρακτικές κατασκευής για στρόβιλους από 5-10MWe (π.χ., με σφυρηλάτηση, με μηχανική κατεργασία και με χύτευση). Οι στρόβιλοι είναι πολύ προσαρμόσιμοι σε ένα περιβάλλον πλατφορμών και θα μπορούσαν εύκολα να ενσωματωθούν σε ένα σύστημα OTEC. Οι στρόβιλοι αμμωνίας είναι αξιόπιστοι, αλλά υπάρχουν λίγα στοιχεία κατά τη χρήση τους σε αυτή την κλίμακα. Υπάρχουν μερικοί κατασκευαστές των στρόβιλων αμμωνίας κυρίως για τη βιομηχανία ψύξης. Υπάρχει μια χρονική ανοχή από 18-24 μήνες για την παράδοση αυτών των στρόβιλων.

Οι διαδικασίες O&M για τους στρόβιλους αυτού του είδους είναι καθιερωμένες και δεν παρουσιάζουν τις οποιεσδήποτε πρόσθετες δυσκολίες. Η στερεότυπη επιθεώρηση απαιτείται μαζί με την περιοδική επισκευή. Υπάρχουν λίγες ανησυχίες ασφάλειας για το προσωπικό που εργάζεται στους στρόβιλους στις εγκαταστάσεις OTEC εντούτοις, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι μια διαρροή του ρευστού λειτουργίας (π.χ., αμμωνία) μπορεί να παρουσιάσει ζητήματα ασφάλειας. Μερικοί από τους ελέγχους μπορούν να γίνουν χρησιμοποιώντας τους ηλεκτρονικούς αισθητήρες χωρίς να επηρεάσουν την απόδοση των εγκαταστάσεων και την αποφυγή του πιθανού κινδύνου για το προσωπικό. Οι αντλίες και οι στρόβιλοι είναι πιθανό να διατηρήσουν τη διάρκεια ζωής των εγκαταστάσεων OTEC έως (30 έτη).

Οι στρόβιλοι θα ήταν πιθανό να εγκατασταθούν σε αρθρωτό σχέδιο για μια εγκατάσταση OTEC ≥ 100 MWe. Θα πρέπει να είναι αξιόπιστες, επειδή είναι μια πολύ καλά καθιερωμένη τεχνολογία που είναι ήδη σε χρήση σε παρόμοιες συνθήκες και επειδή είναι σχετικά εύκολη για την παροχή πλεονασμού. Χαρακτηριστικά εγκαθίσταται δύο φορές ο αριθμός στρόβιλων που απαιτούνται. Αυτός ο πλεονασμός επιτρέπει την κανονική συντήρηση χωρίς των συμβιβασμό της απόδοσης των

εγκαταστάσεων. Ο παροπλισμός των στροβίλων είναι απλός και τα πρωτόκολλα και οι διαδικασίες υπάρχουν. 85-90% των υλικών μπορούν να ανακυκλωθούν.

Οι αντλίες για μια εφαρμογή OTEC είναι επίσης διαθέσιμες με μια χρονική ανοχή από 12-18 μήνες. Η μέγιστη διάμετρος πτερωτής για μια αντλία είναι ~2.1 μ. Υπάρχει μια σειρά διαμορφωμένων σχεδίων διαθέσιμων από πολλούς προμηθευτές. Παρόμοια με τους στροβίλους OTEC, το σύστημα άντλησης θα χρησιμοποιούσε n+1 τον πλεονασμό. Τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία αντλιών είναι χάλυβας άνθρακα, ανοξείδωτος χάλυβας, χαλκός, και μονωτικό υλικό.

Η πρόσβαση στις αντλίες σε μια πλατφόρμα OTEC μπορεί να περιπλέξει και να αυξήσει το κόστος O&M επειδή σε μερικά σχέδια καταδύονται. Είναι κρίσιμο να έχει τις εφεδρικές αντλίες του ρευστού λειτουργίας διαθέσιμες στη εγκατάσταση. Η γενική απόδοση των εγκαταστάσεων στηρίζεται σε μεγάλο ποσοστό στην κατάλληλη λειτουργία των αντλιών και των στροβίλων. Οι αντλίες είναι εξελικτικές σε μια εγκατάσταση OTEC $\geq 100\text{MWe}$ επειδή μπορούν να εγκατασταθούν αρθρωτά. Οι αντλίες είναι επίσης ιδιαίτερα αξιόπιστες.

Προκλήσεις, κίνδυνοι, και οικονομικός προγραμματισμός:

Οι στροβίλοι έχουν τους χαμηλότερους λειτουργικούς κινδύνους, εντούτοις, εάν αποτύχουν εμποδίζουν πολύ την απόδοση των εγκαταστάσεων OTEC. Είναι σημαντικό να υπάρχουν εύκολα διαθέσιμα τα ανταλλακτικά για να διατηρήσουν τους στροβίλους και τις αντλίες. Υπάρχει κίνδυνος εμφάνισης ξένων αντικειμένων που μπορούν να βλάψουν τις λεπίδες στροβίλων. Ο ηλεκτρονικός έλεγχος πρέπει να είναι σε θέση να ανιχνεύσει οποιαδήποτε πιθανή εσωτερική ζημία. Ο οικονομικός προγραμματισμός συμβάλει στην αποδοτικότητα των στροβίλων και των αντλιών. Αυτήν την περίοδο, οι στροβίλοι και οι αντλίες είναι ~ 80-90% αποδοτικότεροι. Η βελτίωση της αποδοτικότητας θα οδηγήσει στην υψηλότερη καθαρή παραγωγή ισχύος της εγκατάστασης OTEC.

Έρευνα και ανάπτυξη:

Υπάρχουν λίγες ανάγκες ερευνάς και ανάπτυξης (E&A) αντλιών και στροβίλων για την εφαρμογή OTEC επειδή είναι διαθέσιμα στο εμπόριο. Οποιοσδήποτε βελτιώσεις θα μειώσουν το κόστος και θα επιτρέψουν στις εγκαταστάσεις να λειτουργήσουν αποτελεσματικότερα. Ο κύριος τομέας της έρευνας είναι η κατάσταση με βάση τη συντήρηση: τηλεπισκόπηση για την απόδοση στροβίλων και αντλιών. Άλλοι ερευνητικοί τομείς συνδέονται με τις ανοικτού κύκλου εγκαταστάσεις OTEC που αναπτύσσουν δραστηριότητες στις πολύ χαμηλότερες πιέσεις από τα συστήματα κλειστού κύκλου. Αυτό παρουσιάζει μοναδικές προκλήσεις για το σχέδιο αντλιών και στροβίλων. Η E&A απαιτείται για να βελτιώσει το στρόβιλο και τις αντλίες χαμηλότερης πίεσης.

Φ. ΚΑΛΩΔΙΟ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ

Η ομάδα των καλωδίων ισχύος κλήθηκε να εξετάσει την τεχνική ετοιμότητα της τεχνολογίας καλωδίων ισχύος για μια εγκατάσταση OTEC. Τα μέλη της ομάδας ήταν:

Matt Gove, NOAA Ocean Coastal Resource Management
Koeunyi Bae, Lockheed Martin Maritime Systems & Sensors
Warren Bartel, NAVFAC Engineering Service Center
Lee Brissey, Sound & Sea Technology
Steiner Dale, Florida State Univ, Ctr for Advanced Power Systems
Dave Tietje, Science Applications International Corp (SAIC)

Τεχνολογίες κατάστασης προόδου:

Μια από τις μεγαλύτερες προόδους από το 1980 στα καλώδια ισχύος συνδέεται με την παραγωγή και την εγκατάσταση των υποθαλάσσιων καλωδίων υψηλής τάσης. Υπάρχουν αυτήν την περίοδο 10 υποθαλάσσια καλώδια διέλευσης εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) που κυμαίνονται από 90 kV - 500 kV, και 20 συνεχούς ρεύματος (DC) μέχρι 500 kV σε λειτουργία, τα περισσότερα έχουν εγκατασταθεί κατά τα τελευταία 10 χρόνια. Η αύξηση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων έχει οδηγήσει σε μια καλύτερη κατανόηση της δυναμικής των καλωδίων, και οι συνδέσεις μέχρι 50 kV είναι κοινές. Σημαντική πρόοδος έχει σημειωθεί στην κατανόηση της δυναμικής καλωδίων, κυρίως από τις ανάγκες της υπεράκτιας κοινότητας εκμετάλλευσης γεωτρήσεων πετρελαίου και αιολικών πάρκων, οι οποίες χρησιμοποιούν παρόμοια μεγέθη καλωδίων. Οι συνδέσεις πλατφόρμας-καλωδίων είναι πλέον τυποποιημένες και στερεότερες μέχρι 50 kV.

Η ομάδα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η τεχνολογία για τη δημιουργία συστημάτων καλωδίων ισχύος (καλώδιο, μάτισμα, απολήξεις) υφίσταται και είναι κατάλληλη για χρήση σε εγκαταστάσεις OTEC, εντούτοις υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί. Ο πιο ξεχωριστός είναι ότι ενώ τα καλώδια είναι διαθέσιμα μέχρι 500 kV, υπάρχει μια μεγαλύτερη επιλογή στις χαμηλότερες τάσεις (< 100 kV) και το σχέδιο εγκαταστάσεων OTEC μπορεί να περιοριστεί από τη διαθεσιμότητα καλωδίων ισχύος. Τα καλώδια μήκους κάτω από 20 μίλια είναι πιθανό να είναι εναλλασσόμενου ρεύματος και χρησιμοποιούν ενιαία φάση > 69 kV, ή τριφασικά < 69 kV. Καλώδια μεγαλύτερα από 20 μίλια είναι πιθανό να είναι συνεχούς ρεύματος προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες μετάδοσης. Τα καλώδια (DC) είναι διαθέσιμα σήμερα μέχρι και 500 kV, εντούτοις έχουν το μειονέκτημα ότι απαιτούν μετατροπή μεταξύ του εναλλασσόμενου ρεύματος και του συνεχούς ρεύματος και στις δύο άκρες, με συνέπεια τη σημαντική ενεργειακή απώλεια. Οι κώδικες και τα πρότυπα υπάρχουν για την κατασκευή καλωδίων, συμπεριλαμβανομένου του ιδρύματος ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών μηχανικών (IEEE), διεθνούς ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (IEC), και αμερικανικού ιδρύματος πετρελαίου (API). Για την προστασία του καλωδίου κατά την εγκατάσταση και κατά τη διάρκεια 30 χρόνων λειτουργίας του, αναμενόμενη διάρκεια ζωής, θα είναι πιθανών από χάλυβα, προσθέτοντας ένα σημαντικό ποσό βάρους και πίεσης.

Για καλώδια λιγότερο από 500 kV, το σχέδιο και η επεξεργασία προσδιορίστηκαν είτε είναι διαθέσιμα στο εμπόριο, είτε έχουν απαίτηση της ελάχιστης προσαρμογής. Για καλώδια άνω των 500 kV, κανένα εμπορικό προϊόν δεν υπάρχει και θα χρειαστεί σημαντική προσπάθεια ώστε να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί ένα κατάλληλο καλώδιο. Για εγκαταστάσεις OTEC μεγαλύτερες από 10 MWe, το σχέδιο και η επεξεργασία της απόληξης καλωδίων από την πλευρά των πλατφόρμων θα απαιτήσουν ένα σύνθετο σχέδιο που θα είναι τεχνικά το πιο προκλητικό μέρος του συστήματος καλωδίων ισχύος. Η κινητοποίηση και η επέκταση του καλωδίου είναι δύσκολες, αλλά καλά κατανοητές. Το βάθος, τα χαρακτηριστικά θαλάσσιου πυθμένα, το βάρος του καλωδίου, και η απαραίτητη διαδρομή έχουν επιπτώσεις στη δυσκολία και στο κόστος της κινητοποίησης και της επέκτασης.

Η λειτουργία και η συντήρηση του καλωδίου είναι στερεότυπες και καλά κατανοητές. Η συντήρηση του συστήματος καλωδίων ισχύος περιλαμβάνει την περιοδική αφαίρεση θαλάσσιας αύξησης, την πλήρη επιθεώρηση καλωδίων, και την ετήσια συντήρηση των υποσταθμών χρησιμοποιώντας τους δύτες και τηλεχειριζόμενα υποβρύχια οχήματα (ROVs), όπου απαιτούνται. Σε περίπτωση που η ζημία στο καλώδιο εντοπιστεί, η επισκευή είναι δυνατή σε ρηγά ύδατα, και πολύ πιο δύσκολη σε μεγαλύτερα θαλάσσια βάθη (> 500 πόδια), τότε μπορεί να απαιτηθεί η αντικατάσταση καλωδίου.

Το σύστημα καλωδίων ισχύος θα είναι δύσκολο σε αυτή την κλίμακα σε μια εγκατάσταση OTEC 100MWe λόγω των ορίων δυναμικότητας και της δυνατότητας να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί μια διεπαφή απόληξης πλευρικά της πλατφόρμας. Εγκαταστάσεις των 10 MWe είναι απίθανο να χρησιμοποιήσουν τον ίδιο τύπο καλωδίων και τον σχεδιασμό με εγκαταστάσεις των 100 MWe, είναι πιθανόν να απαιτηθεί ένα απολύτως νέο σχέδιο. Το σχέδιο καλωδίων ισχύος επηρεάζεται επίσης από το σύστημα πρόσδεσης, οι μεμονωμένοι τύποι πρόσδεσης μπορούν να απαιτήσουν σημαντικά διαφορετικά συστήματα καλωδίων ισχύος.

Προκλήσεις, κίνδυνοι, και οικονομικός προγραμματισμός:

Ένας τομέας που προσδιορίζεται από την ομάδα ως πρόκληση είναι η διασύνδεση απόληξης καλωδίων από την πλευρά των πλατφορμών. Ενώ υπάρχουν πρότυπα καλωδίων για εγκαταστάσεις $\leq 10\text{MWe}$, τα μεγαλύτερα και βαρύτερα καλώδια ισχύος που απαιτούνται για εγκαταστάσεις OTEC $\geq 100\text{MWe}$ θα αυξήσουν την καταπόνηση, την κάμψη και την τάση με την ένταση στο καλώδιο και στη διασύνδεση καλωδίου-πλατφόρμας και θα θέσουν σημαντικές τεχνολογικές προκλήσεις εφαρμοσμένης μηχανικής. Η περαιτέρω ανάλυση και η διαμόρφωση απαιτούνται, εντούτοις, η ομάδα σημείωσε ότι το λογισμικό υπάρχει ήδη για να ολοκληρώσει αυτήν την ανάλυση. Επιπλέον, για τα πολύ μεγάλα βάθη στα οποία τα καλώδια θα βρεθούν μπορούν να παρουσιαστούν προκλήσεις όσον αφορά την υδροστατική πίεση, και τη πρόσθετη δοκιμή και διαμόρφωση που μπορεί να απαιτηθούν. Ο οικονομικός προγραμματισμός περιλαμβάνει το μέγεθος και τον τύπο καλωδίου που απαιτούνται, τις συνθήκες θαλάσσιου σχεδιασμού, τα χαρακτηριστικά

θαλάσσιου πυθμένα, το κόστος των υλικών, την συναλλαγματική ισοτιμία, καθώς και την απαιτούμενη δρομολόγηση καλωδίων.

Έρευνα και ανάπτυξη:

Η αρχική ερευνητική ανάγκη που προσδιορίστηκε από την ομάδα ήταν η ανάπτυξη ενός δυναμικού καλωδίου για μια εγκατάσταση OTEC > 10 MWe που είχε μηχανική αντοχή στην επαναλαμβανόμενη κάμψη και περισσότερες διηλεκτρικές ικανότητες. Απαιτούνται ελαφρύτερα υλικά για να μειώσουν το βάρος των αγωγών, το οποίο θα μειώσει επίσης την πίεση και τις πιέσεις στο καλώδιο.

G. ΣΩΛΗΝΕΣ ΚΡΥΟΥ ΝΕΡΟΥ

Η ομάδα σωλήνων κρύου νερού εξέτασε την τεχνική ετοιμότητα της υπάρχουσας τεχνολογίας σωλήνων κρύου νερού (CWP) για μια εγκατάσταση OTEC. Τα μέλη της ομάδας ήταν:

Roger Bagbey, Inspired Systems, LLC
Robert Bonner, NAVFAC, Engineering Services Center
Kerry Kehoe, NOAA Office of Ocean and Coastal Resource Management
Alan Miller, Lockheed Martin
James Roney, Consultant
Phil Sklad, Oak Ridge National Lab
William Tayler, NAVFAC, Shore Energy Office
Luis Vega, Hawaii Natural Energy Institute
James Anderson, Sea Solar Power
David Kaiser, NOAA Office of Ocean and Coastal Resource Management

Τεχνολογίες κατάστασης προόδου:

Στη δεκαετία του '80, τα υλικά που εξετάστηκαν για την κατασκευή CWP περιλάμβαναν: ίνες γυαλιού E-glass/ βινυλίου εστέρα, χάλυβα, ή και σκυρόδεμα, , και τυπικά είχαν ένα συνθετικό πυρήνα αφρού πρεσαρισμένου σχεδιασμού. Αυτήν την περίοδο, τα υλικά CWP περιλαμβάνουν: ίνες γυαλιού P-glass/βινυλίου εστέρα, υαλοβάμβακα, και σύνθετων ινών άνθρακα. Το σχέδιο έχει βελτιωθεί, τα ιδιόκτητα σχέδια έχουν αναπτυχθεί συμπεριλαμβανομένης της κοιλότητας των πρεσαρισμένων πυρήνων. Η επεξεργασία CWP θα περιλαμβάνει πιθανόν τη βοήθεια χύτευσης εν κενό με μεταφορά ρητίνης (VARTM) και μεγάλες διεργασίες προεξοχής. Η VARTM επιτρέπει πρεσαριστές κατασκευής πυρήνες ή και σταδιακής κατασκευής. Η μεγάλη διαδικασία προεξοχής επιτρέπει την κοίλη κατασκευή πυρήνων που εδώ οι βοήθειες μετριάζουν τα ζητήματα πίεσης στα βάθη της υδάτινης στήλης. Έχουν υπάρξει επίσης βελτιώσεις στα υπολογιστικά εργαλεία και στο δομικό έλεγχο των CWPs (π.χ., φωτογραφικές μηχανές, αισθητήρες, ρομποτικές συσκευές).

Το σχέδιο, η κατασκευή, και η επέκταση CWP για μια εγκατάσταση $\leq 10\text{MWe}$ είναι αρκετά καλά και γίνονται κατανοητά, εντούτοις έχουν ολοκληρωθεί επιτυχώς μόνο

σε εγκαταστάσεις ≤ 1 MW (π.χ., otec-1). Οι μέθοδοι επεξεργασίας που απαιτούνται για την κατασκευή ενός CWP (διαμέτρου ~ 7 μ) σε εγκαταστάσεις ≤ 10 MWe είναι διαθέσιμες σήμερα, και μπορούν πιθανώς να αναβαθμιστούν για να κατασκευάσουν έναν σωλήνα (διαμέτρου ~ 10 μ) κατάλληλο για μια εγκατάσταση ≥ 100 MWe. Ο CWP μπορεί να επεκταθεί επί τόπου με μια σταδιακή επεξεργασία ή ως ένας ολόκληρος σωλήνας. Στην τελευταία μέθοδο θα κατασκευάζονταν στην ακτή και θα ρυμουλκούνταν στην πλατφόρμα. Και οι δύο μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί και έχουν επικυρωθεί για έναν CWP (~ 7 μ) κατάλληλο για εγκαταστάσεις ≤ 10 MWe, εντούτοις έχουν επιδειχθεί με επιτυχία σωλήνες με πολύ μικρότερη κλίμακα ($<$ διαμέτρου 2 μ). Η κατασκευή και η επέκταση CWP για μια εγκατάσταση ≥ 100 MWe δεν έχουν επιχειρηθεί.

Οι μελέτες έχουν δείξει ότι η βιορύπανση στο εσωτερικό και στο εξωτερικό των CWP δεν θα επηρεάσουν σημαντικά στην απόδοση των εγκαταστάσεων OTEC (C.B. Panchal, 1984). Οι ομαλές εσωτερικές επιφάνειες CWP επιτυγχάνονται με επιστρώσεις και πρόσθετη άμβλυση βιορυπαντικών. Ο CWP έχει ως σκοπό να αυξήσει τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης, και με τις τρέχουσες γνώσεις μηχανικής και των μεθόδων αυτής μπορεί να προσεγγίσει τα 30 χρόνια ζωής. Η οπτική ινών θα χρησιμοποιηθεί για να ελέγξει την απόδοση του CWP και να ανιχνεύσει οποιαδήποτε ζημία. Η οπτική ινών είναι μια καλά-κατανοητή τεχνολογία που χρησιμοποιείται τακτικά στην ανοικτής θαλάσσης βιομηχανία πετρελαίου. Η ανοικτής θαλάσσης βιομηχανία πετρελαίου έχει επίσης την εμπειρία να επισκευάσει τις δομές σε βάθος. Υπάρχουν μέθοδοι ελέγχου για να αναλύσουν τη γήρανση, τον κορεσμό, και την κούραση.

Η προπαρασκευή έκτακτης ανάγκης είναι ένα βασικό ζήτημα για το CWP μιας εγκατάστασης OTEC. Το σχέδιο μπορεί να περιλάβει τη δυνατότητα να αποσυνδέσει το CWP από την πλατφόρμα πριν από ένα μεγάλο φαινόμενο θύελλας προκειμένου να αποτραπούν η ζημία και η απώλεια. Αυτό περιπλέκει σημαντικά το σχέδιο της διεπαφής πλατφορμών/σωλήνων και είναι πιθανό να αυξήσει την πολυπλοκότητα και το κόστος. Ο CWP από το σχέδιο otec-1 ανακτήθηκε επιτυχώς και επαναχρησιμοποιήθηκε από βάθος 1.371 μ το 1982, από αυτό προκύπτει ότι η αποκατάσταση και ο παροπλισμός (δηλ., διάθεση ή ανακύκλωση) του CWP θα χρησιμοποιήσει τις καθιερωμένες διαδικασίες που χρησιμοποιήθηκαν προηγουμένως σε εγκαταστάσεις OTEC, καθώς επίσης και της βιομηχανίας πετρελαίου, και δεν πρέπει να παρουσιάσει οποιοσδήποτε σημαντική τεχνολογική πρόκληση.

Προκλήσεις, κίνδυνοι, και οικονομικός προγραμματισμός:

Οι προκλήσεις και οι κίνδυνοι που συνδέονται με ένα CWP ≤ 10 MWe γίνονται αρκετά κατανοητοί. Η μεταφορά, η επέκταση, και η αποσύζευξη ενός σωλήνα μονών κομματιών είναι δύσκολες, και απαιτούνται να γίνουν στην ακτή. Αντιθέτως, τετμημένοι σωλήνες, είναι πιο εύκολο ν'αναπτυχθούν, ενώ υπάρχει κίνδυνος

αποτυχίας των πολλών ενώσεων που απαιτούνται. Οι CWP's είναι ευάλωτοι σε σοβαρές εκδηλώσεις καταιγίδας που μπορεί να υπερβεί τα όρια του σχεδιασμού, και να προκαλέσει ζημιές ή και βλάβες. Το αυξημένο μέγεθος των CWP που απαιτούνται για μια εγκατάσταση $\geq 100\text{MWe}$ επιφέρει ορισμένες προκλήσεις, κυρίως λόγω της έλλειψης εμπειρίας με σωλήνες σε αυτή την κλάση μεγέθους. Ενώ οι προηγούμενες πιλοτικές και πειραματικές εγκαταστάσεις OTEC έχουν κατασκευάσει επιτυχώς και έχουν επεκτείνει CWP's, υπάρχει μικρή εμπειρία με CWP's μεγαλύτερους από 2 μ.

Ο σημαντικότερος οικονομικός προγραμματισμός για CWP είναι τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία και στις τεχνικές επέκτασης. Η επέκταση CWP απαιτεί εξοπλισμό και εντατική εργασία και θα επηρεαστεί πολύ από το κόστος εργασίας, καυσίμων και εξοπλισμού.

Έρευνα και ανάπτυξη:

Η έρευνα και η ανάπτυξη σε CWP's για εγκατάσταση $\leq 10\text{MWe}$ και για εγκαταστάσεις $\geq 100\text{MWe}$ θα πρέπει να εξετάσουν την οικονομοτεχνική μελέτη υλικού και εξοπλισμού. Θα πρέπει να διεξαχθεί έρευνα για εναλλακτικά σχέδια (π.χ. εύκαμπτο CWP). Απαιτείται μια πλήρης επίδειξη των μεγάλων CWP (δηλ., κατάλληλη για εγκαταστάσεις $\geq 100\text{MWe}$) παραγωγής και αποπεράτωσης της εγκατάστασης. Επιπλέον, πρέπει να υπάρχει τουλάχιστον ενός έτους λειτουργίας σε CWP για εγκαταστάσεις $\leq 10\text{MWe}$ πριν από την κλιμάκωση σε εγκαταστάσεις $\geq 100\text{MWe}$.

Ο CWP και η διεπαφή του με την πλατφόρμα είναι τα πιο σύνθετα στοιχεία στις εγκαταστάσεις OTEC. Είναι ένα αποκλειστικό στοιχείο για τις εγκαταστάσεις OTEC, και τίποτα στην κλίμακα του ίδιου μεγέθους δεν έχει υλοποιηθεί σε ωκεάνιες περιβαλλοντικές συνθήκες. Υπάρχουν πολυάριθμοι κίνδυνοι που συνδέονται με αυτές τις τεχνολογίες. Πολλοί από αυτούς τους κινδύνους πρέπει να μελετηθούν περαιτέρω με στόχο την επικύρωση του CWP και του σχεδίου διεπαφών του.

VI. ΈΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΟΥ ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ

Κατά την ολοκλήρωση του εργαστηρίου, οι ομάδες συγκλήθηκαν εκ νέου να αναπτύξουν την ακόλουθη γενική λίστα έρευνας και ανάπτυξης που πρέπει να βελτιώσει την τεχνική ετοιμότητα των πλατφόρμων OTEC.

ΕΝΑΛΛΑΚΤΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

- Η ενισχυμένη μεταφορά θερμότητας μέσω μιας αύξησης στην περιοχή επιφάνειας, αναταραχή, που αναμιγνύει χωρίς πτώση πίεσης επικύρωσε την απόδοση.
- Πρόσδος στα υλικά (κράματα αργιλίου, πλαστικά, τιτάνιο χαμηλότερου κόστους)

- Βελτιωμένες τεχνικές επεξεργασίας (σύνδεση, συγκόλληση, ένωση, εξώθηση, κ.λπ.)

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

- Ανάπτυξη του δυναμικού καλωδίου μεγαλύτερη από 30 MWe.
- Ανάπτυξη μιας διεπαφής πλατφόρμα-καλωδίων που μπορεί να αντισταθεί στην επαναλαμβανόμενη κάμψη και να έχει τις καλύτερες διηλεκτρικές ικανότητες.
- Ελαφρύς αγωγός.

ΣΩΛΗΝΑΣ ΚΡΥΟΥ ΝΕΡΟΥ

- Βελτίωση της αποτελεσματικότητας του κόστους των υλικών / εξοπλισμού
- Πλήρης επίδειξη της παραγωγής, της παράδοσης και της εγκατάστασης σωλήνων

ΑΝΤΑΙΕΣ ΚΑΙ ΤΟΥΡΜΠΙΝΕΣ

- Χαμηλής πίεσης στροβίλων για τον ανοικτό κύκλο.
- Χαμηλότερο κόστος των συμπιεστών για τη διατήρηση του κενού (φυγοκεντρικού).
- Όρος-βασισμένος στην αντίληψη συντήρησης και βελτιστοποίηση απόδοσης στροβίλων.
- Όρος βασισμένος στη ανίχνευση και συντήρηση αντλιών.

ΠΡΟΣΔΕΣΕΙΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ

- Ερευνήστε είναι εύκαμπτος στα νέα παραδείγματα και τα σχέδια σχετικά με τις ανάγκες OTEC.
- Βελτιστοποίηση των προσδέσεων πλατφορμών για τις ανάγκες OTEC.
- Έρευνα αποτελεσματικότερης πρόσδεσης συστημάτων σε ηφαιστειακό βράχο.
- Έρευνα σε τεχνικές που απαιτούν τον ελάχιστο εξοπλισμό για την εγκατάσταση καλωδίων πρόσδεσης & δύναμης.
- Έρευνα αποτελεσματικότερης πρόσδεσης συστημάτων στα υψηλά στρώματα με σημεία κλίσεων.
- Προσαρμόστε τους κώδικες και τα πρότυπα για να απεικονίσετε τα συστήματα OTEC.

ΔΙΕΠΑΦΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΩΝ/ΣΩΛΗΝΩΝ

- Αναπτύξτε την πλευστότητα χαμηλότερου κόστους.
- Αναλυτική προσομοίωση συγκεκριμένη για OTEC.

- Βρείτε και προσαρμόστε τα υπάρχοντα εργαλεία τεχνολογιών και ανάλυσης στη δομικές ανάλυσης και την προσομοίωση.
- Καλύτερα να διαμορφώσει των τρόπων αποτυχίας.

ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ

- Τεχνικές κατασκευής χαμηλότερου κόστους (δηλ., καινοτομία, ποιοτικός έλεγχος).
- Αναπτύξτε τα πρότυπα OTEC βασισμένα στο κόστος και τον κίνδυνο.

ΓΕΝΙΚΑ

- Δοκιμή μεγάλης κλίμακας των υποσυστημάτων.
- Οι μελέτες ανταλλαγής πρέπει να διεξαχθούν σχετικά με τη θέση της παραγωγής ύδατος (χερσαίας εναντίον παράκτιας, παραγωγή ύδατος).
- Σύνταξη των προτύπων από άλλες βιομηχανίες και προσαρμογή σε OTEC.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η θαλάσσια (ωκεάνια, πελαγική) ενέργεια υπάρχει σε διάφορες μορφές στις θάλασσες και τους ωκεανούς. Αποτελεί μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας και μπορεί να ληφθεί με διάφορους τρόπους.

Δεδομένου ότι η πυκνότητα του νερού είναι 832 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του αέρα η κινητική ενέργεια από ένα θαλάσσιο ρεύμα 5 knots (2.36 m/s) ισοδυναμεί με αυτήν που παράγεται από ρεύμα αέρα με ταχύτητα 270 km/h

Ρευστοδυναμική:

- κυματισμός
- παλίρροιες
- θαλασσιά ρεύματα

Φυσικοχημικές ιδιότητες του νερού:

- θαλασσοθερμική
- οσμωτική

2.0.1 Πλεονεκτήματα

- Ανανεώσιμη ενέργεια φιλική προς το περιβάλλον
- Μειωμένη εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα
- Δεν παράγει κανενός είδους ρύπανση
- Μικρή οπτική όχληση
- Σύντομο χρονικό διάστημα απόσβεσης του κεφαλαίου

2.0.2 Επιπτώσεις στο περιβάλλον

- Η κατασκευή γίνεται στην ξηρά και στη συνέχεια εγκαθίσταται στη θάλασσα. Κατά την εγκατάσταση προκαλούνται: αιώρηση ιζημάτων, αύξηση κίνησης πλοίων, θόρυβος.
- Κατά την λειτουργία προκαλούνται: μεταβολές των ρευμάτων και των ιζημάτων, συνεχείς επισκέψεις για την παρακολούθηση εξοπλισμού.
- Επίδραση στον πυθμένα εξαιτίας των συσκευών και των καλωδίων και καταστροφή τοπικών βενθικών κοινοτήτων.
- Μείωση των ταχυτήτων ρεύματος και κατά συνέπεια εναπόθεση βαρύτερων ιζημάτων.
- Η διάβρωση και εναπόθεση ιζήματος προκαλεί διαταραχή του Οικοσυστήματος.
Αύξηση των οικοσυστημάτων οστρακοειδών. Για την αποτροπή της προσκόλλησης στις συσκευές χρησιμοποιούνται χημικά.

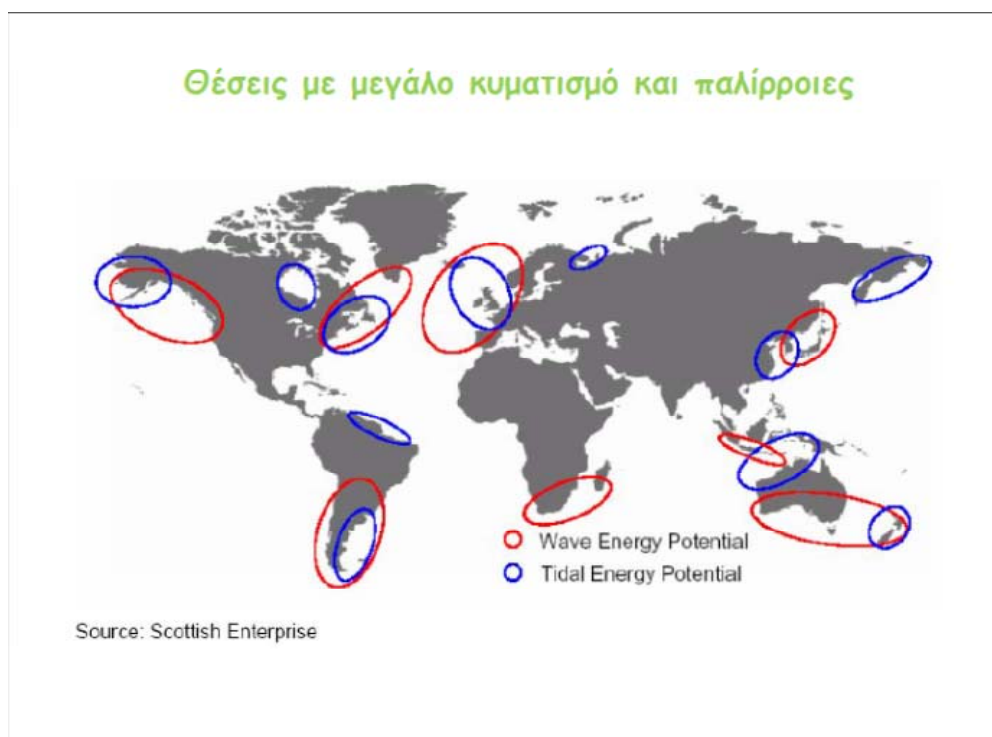
- Η λειτουργία επιδρά στα ψάρια: θάνατο από τη σύγκρουση (δεν τοποθετούνται στα μεταναστευτικά μονοπάτια), βλάβη στην ακοή, ρήξη οργάνων, αλλαγή στη συγκέντρωση πληθυσμού, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία απωθούν ή ελκύουν είδη που κινούνται βασισμένα στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της γης.
- Στα θαλάσσια θηλαστικά υπάρχει μικρή επιρροή: σύγκρουση (μονοπάτια μετανάστευσης) και έμμεσα από την κατανομή των θηραμάτων τους.
- Σύγκρουση πουλιών στις επιφανειακές συσκευές.
- Ο χρόνος ζωής εκτιμάται σε 20 χρόνια και στη συνέχεια μένει στο βυθό η βάση της κατασκευής και τα καλώδια.

2.1 Ενέργεια από κυματισμό

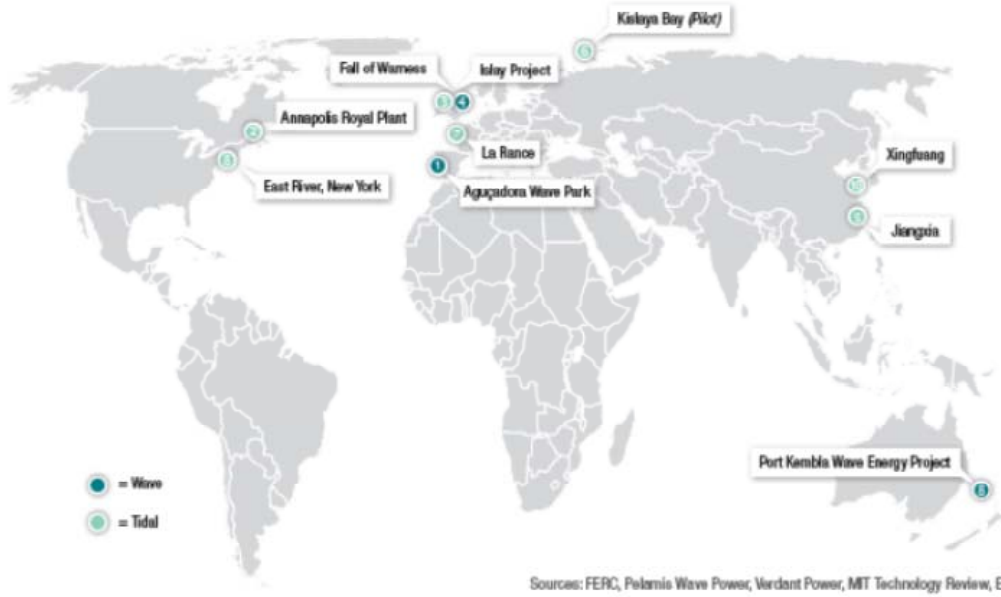
Παράγεται από την κίνηση των κυμάτων που προκαλείται από τους ανέμους. Η αξιοποίησή της θα συμβάλει σε μεγαλύτερη ποικιλία και ασφάλεια των ενεργειακών αποθεμάτων και υψηλότερα ποσοστά αξιοποίησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Εκτιμάται ότι μπορεί να καλύψει το 50% της παγκόσμιας ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια.

Τύποι συστημάτων κυματικής ενέργειας: Σταθερά συστήματα: Τοποθετούνται στις ακτές ή στα ρηγά νερά, έχουν ευκολότερη συντήρηση αλλά οι διαθέσιμες θέσεις είναι περιορισμένες.

Πλωτά συστήματα: Τοποθετούνται στην ανοικτή θάλασσα και στηρίζονται στην αρμονική κίνηση του πλωτού τμήματος που ανεβοκατεβαίνει ανάλογα με την κίνηση του κύματος.

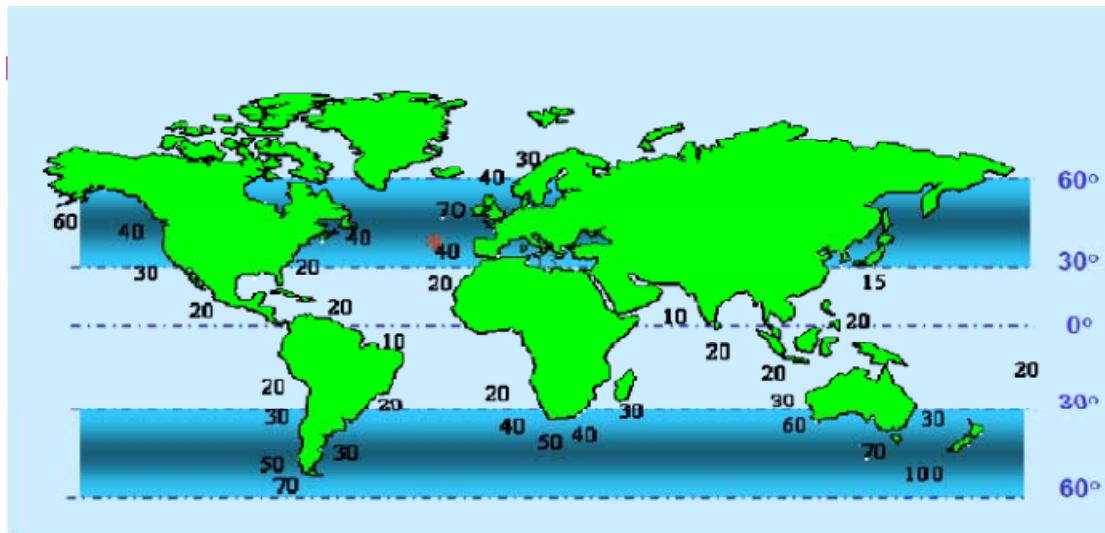


Σημεία ενδιαφέροντος για εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας από κυματισμό και παλίρροια

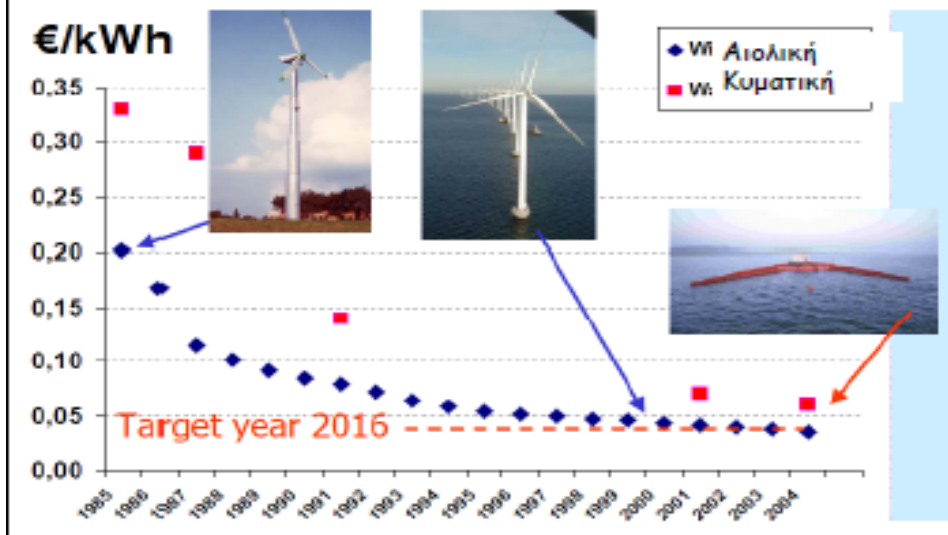


Κυματική ισχύς (kw/m)





Προβλεπόμενο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από κυματική και από αιολική ενέργεια



Σε λειτουργία

Σημείο No.	Όνομα	Τοποθεσία	Περιοχή	Κατασκευαστής	Χώρα	Χρόνος	Συσκευή	Ενεργειακή παραγωγή	Ενεργειακή ικανότητα	Πηγή πληροφοριών
0	Aguçadoura	5km υπεράκτια από Aguçadoura	-	Energias de Portugal	Πορτογαλία	2006	3 Pelamis P-750 machines	2.25MW	22.5MW	www.powertechology.com/projects/pelamis/
1	Billia Croo Test Site	2km υπεράκτια από Billia Croo	Orkney Islands	European Marine Energy Centre (EMEC)	Σκωτία	2003	-	-	-	www.emec.org.uk/wave_site.asp
2	Limpet 500	Portnahaven	Isle of Islay	Wavegen	Σκωτία	2000	Inclined oscillating water column	500KW	-	www.wavegen.co.uk/what_we_off_er_limpet_islay.htm
3	Nissum Bredning	Nissum Bredning Fjord	-	Wave Star Energy	Δανία	2006	20 floats	5.5KW	-	www.wavestarenergy.com/
4	Kvitsoy Pilot Project	Kvitsoy	Rogaland	Wave Energy	Νορβηγία	2007	SSG wave energy converter	-	200KW	www.wavessg.com/WAVESSGPProject.htm
5	Galway Bay Wave Energy Test Site	N side Galway Bay, 1.6 km East of An Spideal	Co. Galway	Marine Institute and Sustainable Energy Ireland	Ιρλανδία	2006	-	-	-	www.marine.ie/

Υπό κατασκευή

Σημείο No.	Όνομα	Τοποθεσία	Περιοχή	Κατασκευαστής	Χώρα	Χρόνος	Συσκευή	Προτεινόμενη Ενεργειακή παραγωγή	Ενεργειακή ικανότητα	Πηγή πληροφοριών
0	Santoña	4km υπεράκτια από Santoña	Cantabria	Iberdrola Renovables	Ισπανία	2008	10 PowerBuoy devices	-	1.39MW	www.iberdrolarenovables.es/
1	Wave Dragon Pembrokeshire	5km υπεράκτια από St. Anne's Head	Pembrokeshire	Wave Dragon	Ουαλία	2008	Wave Energy Converter	-	70MW	www.wavedragon.net/
2	Horn's Rev	14km υπεράκτια		Wave Star Energy	Δανία	2007	20+ floats	-	500kW	www.investindk.com/vis/Nyhed.asp?artikelID=18099
3	Mutriku Mutriku	Mutriku Harbour	Pais Vasco	Wavegen	Ισπανία	2008	Oscillating Water Column	-	300KW	www.wavegen.co.uk/news_mutriku.htm

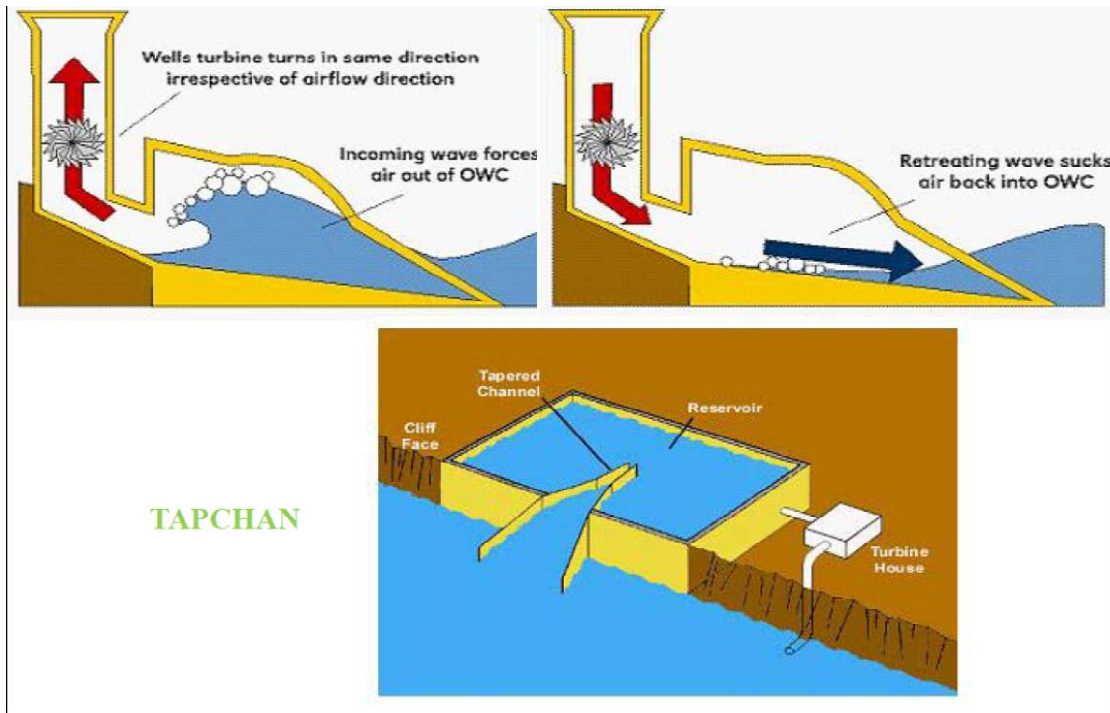
Εγκεκριμένα

Σημείο No.	Όνομα	Τοποθεσία	Περιοχή	Κατασκευαστής	Χώρα	Χρόνος	Συσκευή	Προτεινόμενη Ενεργειακή παραγωγή	Ενεργειακή ικανότητα	Πηγή πληροφοριών
0	Wave Hub test site - Hayle	16km υπεράκτια από Hayle	Cornwall	South West Regional Development Agency	Αγγλία	2007	-	-	-	http://download.southweststrda.org.uk
3	Siadar Wave Energy Project	350m υπεράκτια στο Siadar Bay	Isle of Lewis	inpower/Wavegen	Σκωτία	2009	Oscillating Water Column	4MW	4MW	www.npowerrenewables.com/siadar/index.asp

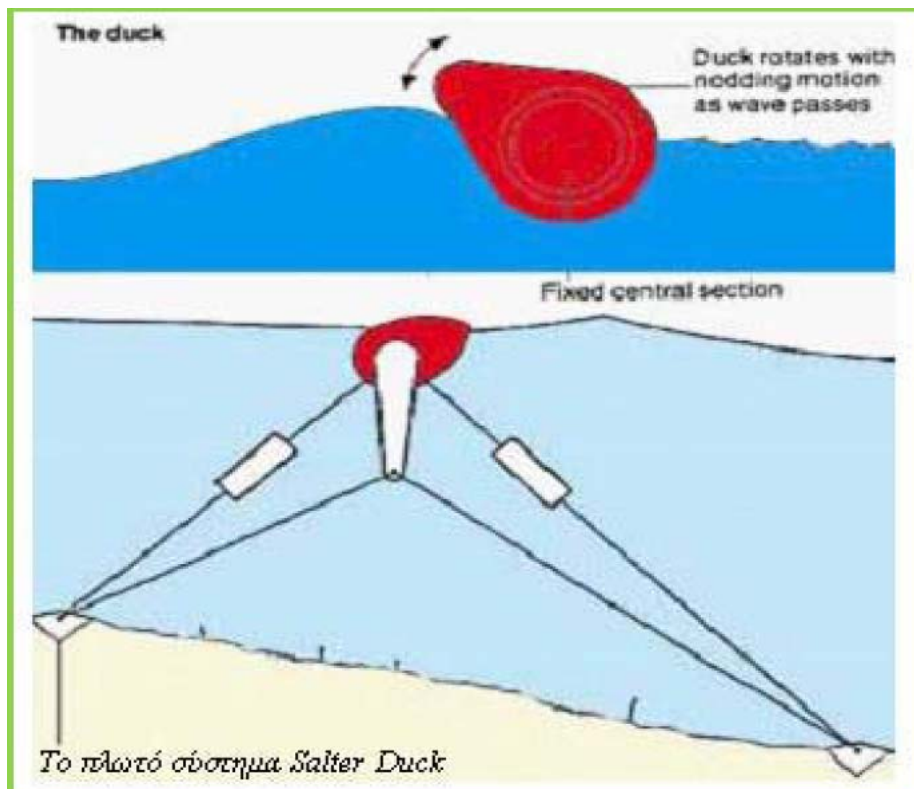
Υπό έγκριση

Σημείο No.	Όνομα	Τοποθεσία	Περιοχή	Κατασκευαστής	Χώρα	Χρόνος	Συσκευή	Προτεινόμενη Ενεργειακή παραγωγή	Ενεργειακή ικανότητα	Πηγή πληροφοριών
0	Faroes	-	Faroe Islands	Wavegen	Σκωτία	2007	Oscillating water column	-	-	www.wavegen.co.uk/what_we_offer_limpet_faroes.htm

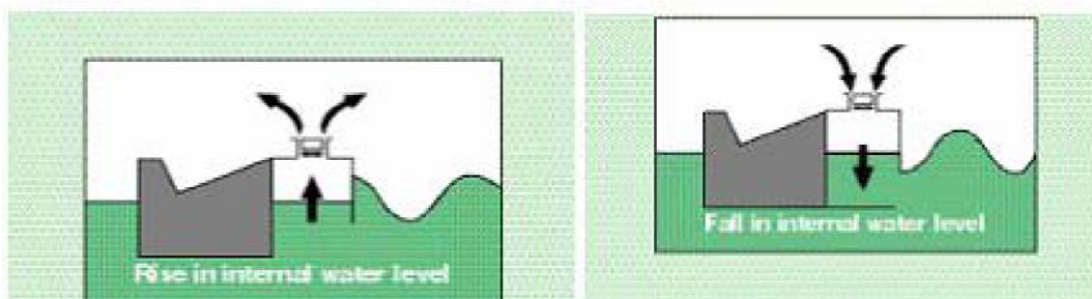
2.1.1 Σταθερά συστήματα



2.1.2 Πλωτά συστήματα



Mighty Whale



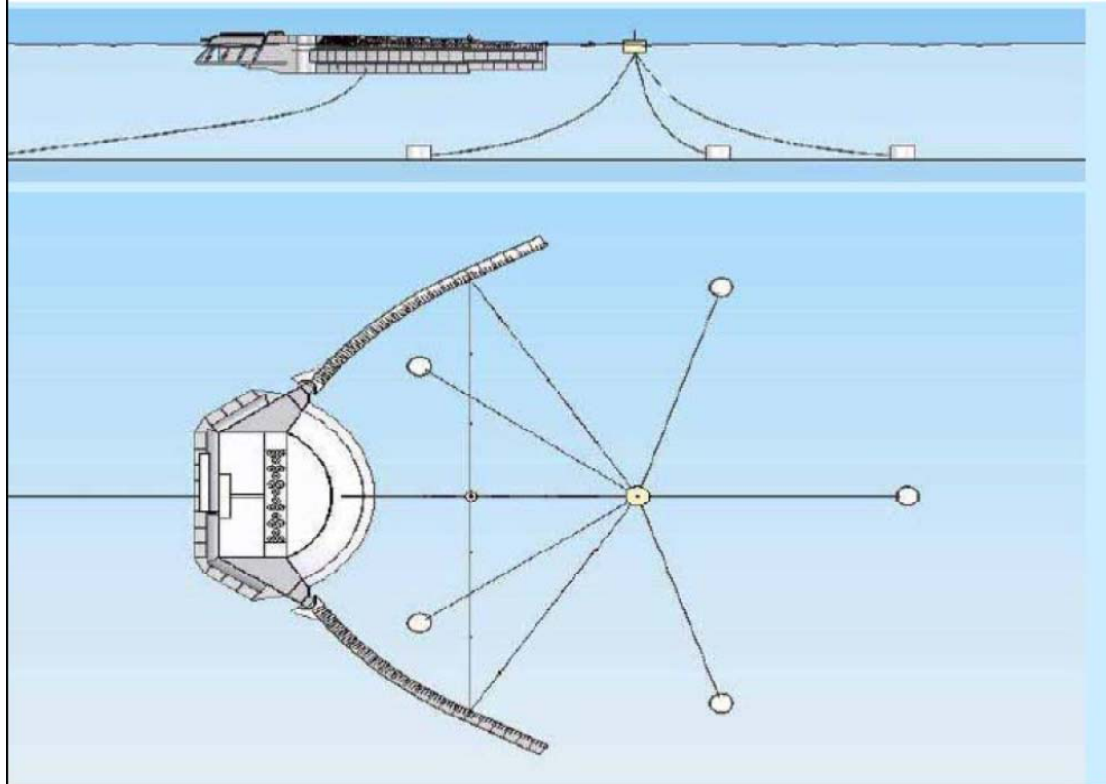
2.1.3. Wave dragon

Το Wave Dragon είναι μια πλωτή συσκευή που έχει σχεδιαστεί για να είναι ακινητοποιημένη. Δε μετατρέπει το κύμα σε ενέργεια με το να κινείται πάνω-κάτω, ή επιτρέποντας σε ορισμένα τμήματά του να μετακινούνται από την κίνηση των κυμάτων. Απλά χρησιμοποιεί το ενεργειακό δυναμικό του νερού που περνά μέσω των υπερχειλιστών στη δεξαμενή. Είναι εγκατεστημένο σε **νερά με βάθος μεγαλύτερο από 25 m** για να επωφελείται από τα κύματα του ωκεανού προτού αυτά χάσουν την ενέργειά τους, φθάνοντας στην παράκτια ζώνη.

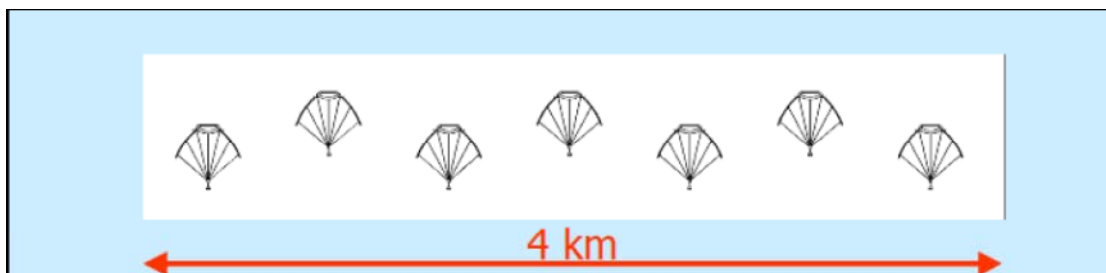
Ο σχεδιασμός με τη χρήση **διπλής κυρτής ράμπας και ανακλαστήρων κυμάτων**, μεγιστοποιεί την ποσότητα του νερού που υπερχειλίζει στη δεξαμενή του. Όταν το κύμα φθάνει στη ράμπα θραύεται και γεωμετρία του αλλάζει και ανυψώνεται. Η ράμπα αυτή είναι πολύ κοντή και απότομη ώστε να ελαχιστοποιήσει τις απώλειες ενέργειας που λαμβάνουν χώρα κάθε φορά που ένα κύμα θραύεται. Το ειδικό ελλειπτικό σχήμα της ράμπας βελτιστοποιεί τη ανύψωση αυτή. Το νερό που περνά από τους υπερχειλιστές, αποθηκεύεται προσωρινά δημιουργώντας μια υψομετρική διαφορά που επιτρέπει την παραγωγή ενέργειας μέσω της απελευθέρωσής του από τους στροβίλους. Το Wave Dragon έχει σχεδιαστεί με τους στροβίλους ως τα μοναδικά κινούμενα μέρη, μειώνοντας το κόστος συντήρησης και ελαχιστοποιώντας τις επιπτώσεις από τα φερτά υλικά του ωκεανού.

2.1.3.1. Αρχές λειτουργίας

Το Wave Dragon είναι ένας πλωτός, αγκυροβολημένος μετατροπέας ενέργειας που μπορεί να αναπτυχθεί σε μία ενιαία μονάδα ή σε συστοιχίες μονάδων και τοποθετείται στην επιφάνεια θάλασσας με βάθος πυθμένα μεγαλύτερο των 25m.



2.1.3.2. Σταθμός παραγωγής ενέργειας (Wave dragon)



7 μονάδες παρατεταγμένες σε μήκος 4km, με ισχύ παραγωγής 50 ÷ 80 MW κατάλαμβάνουν έκταση 3,2 km²

2.1.3.3. Παράμετροι που επηρεάζουν την παραγωγή

Υπερχείλιση:

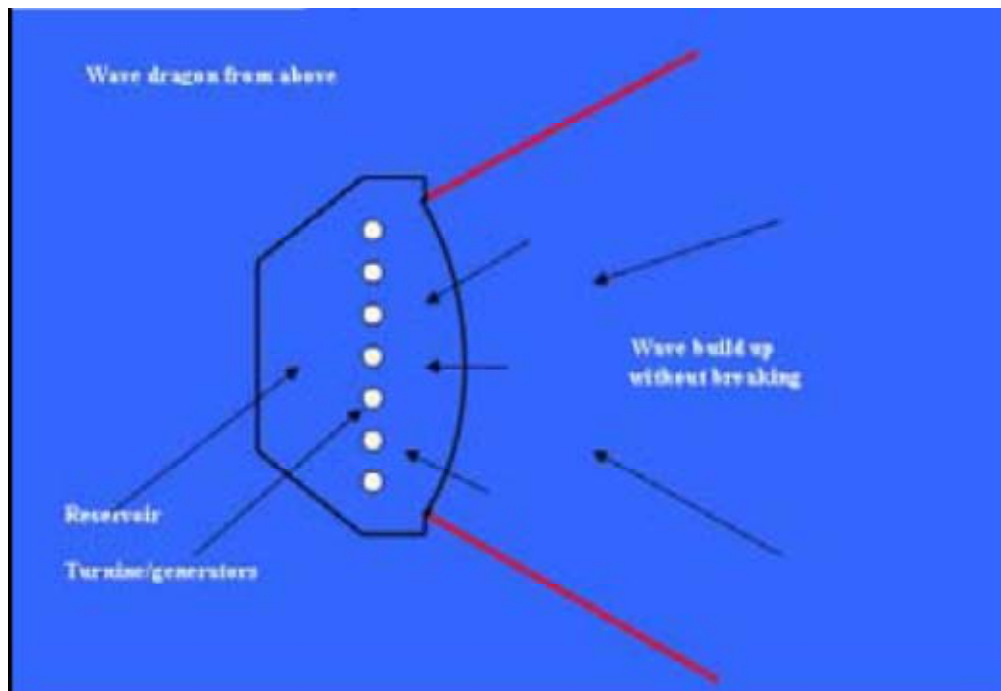
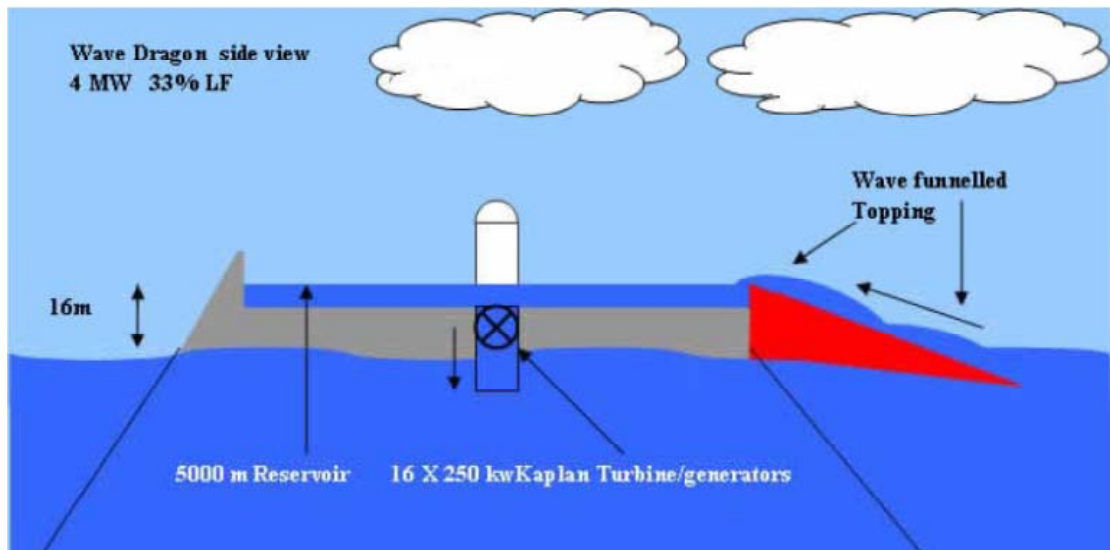
Ελεύθερο ύψος (ρυθμιζόμενο στο Wave Dragon) Πραγματικό ύψος κύματος
Φυσική διάσταση του μετατροπέα ενέργειας (ράμπες, ανακλαστήρες κλπ)

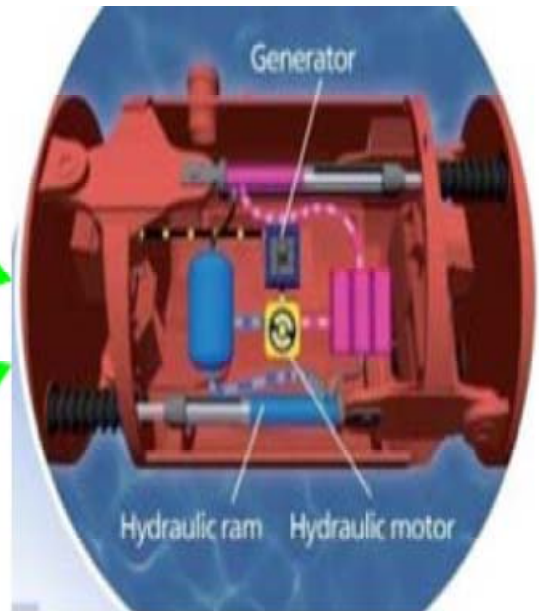
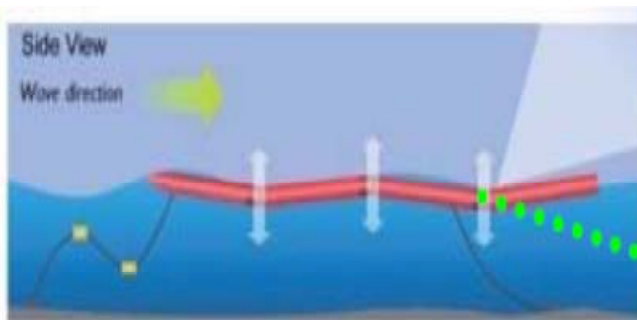
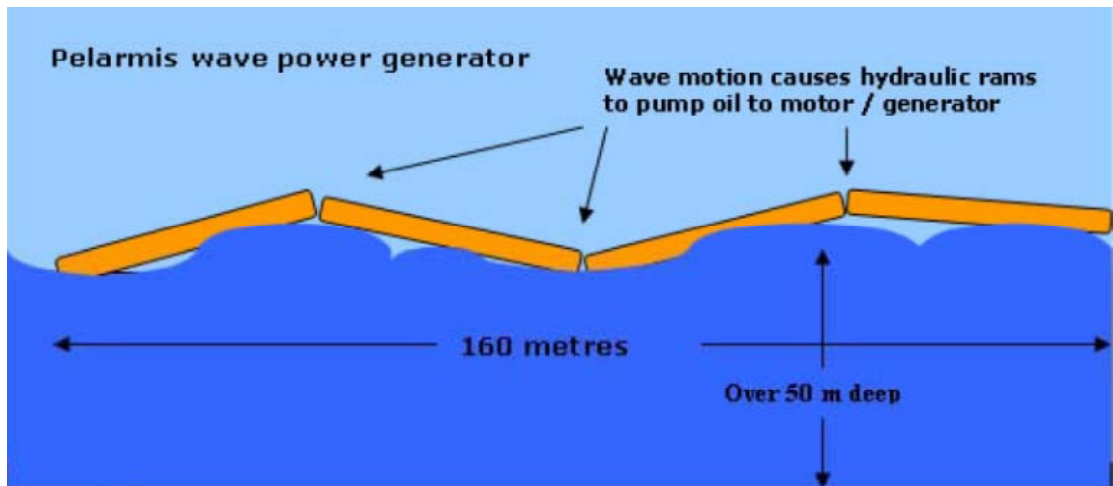
Εκροή νερού:

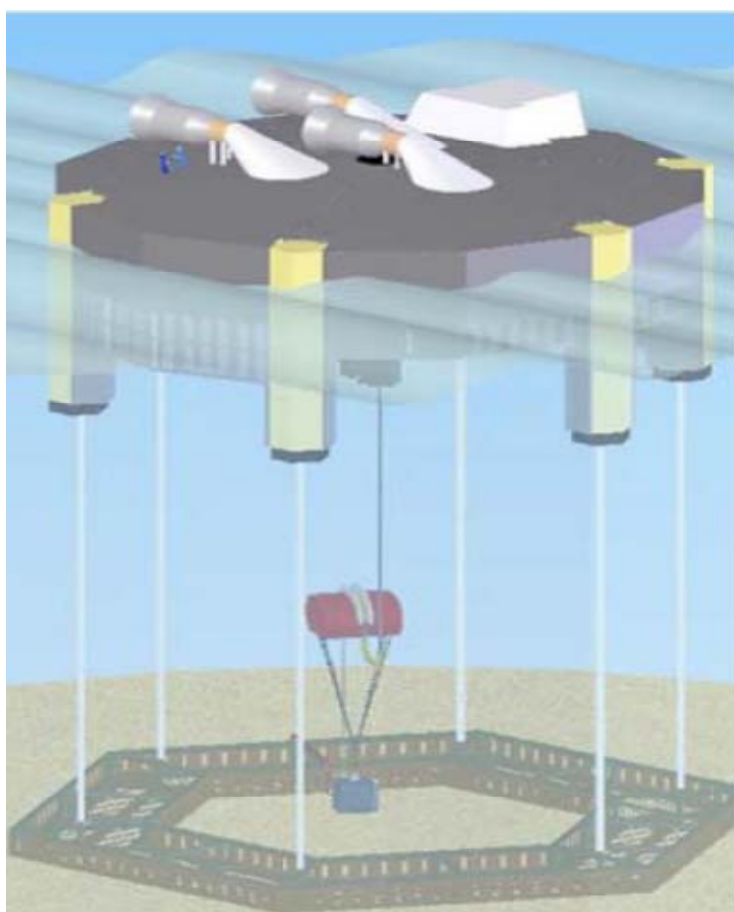
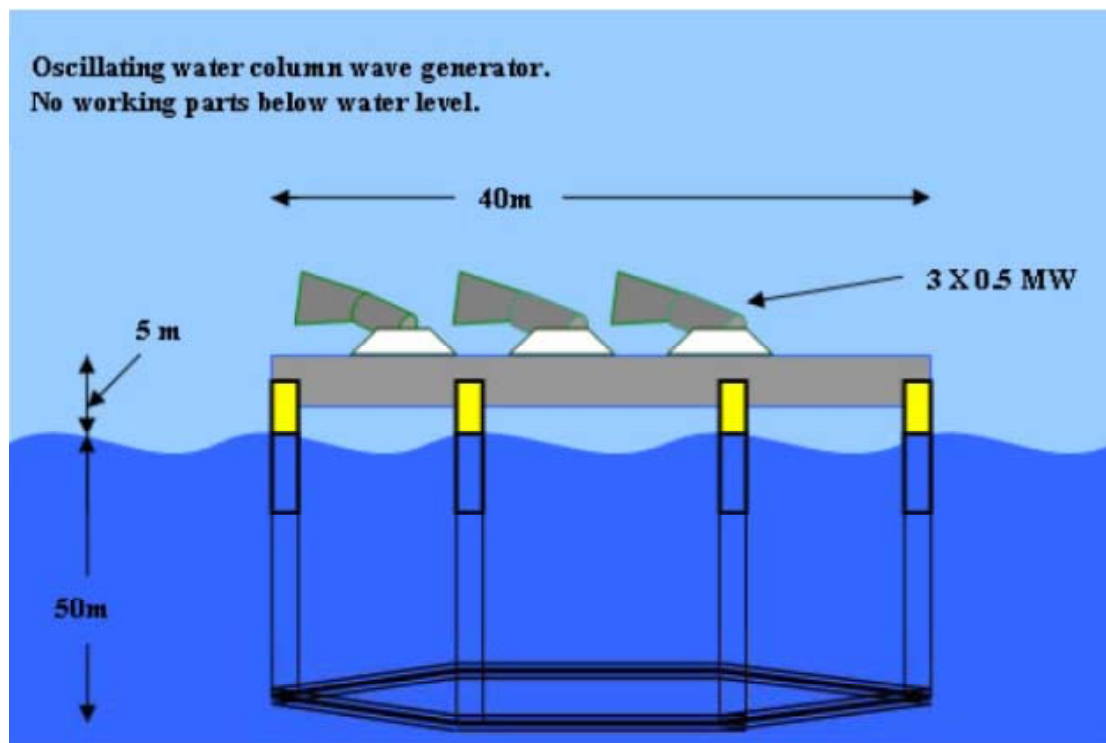
- Μέγεθος της δεξαμενής

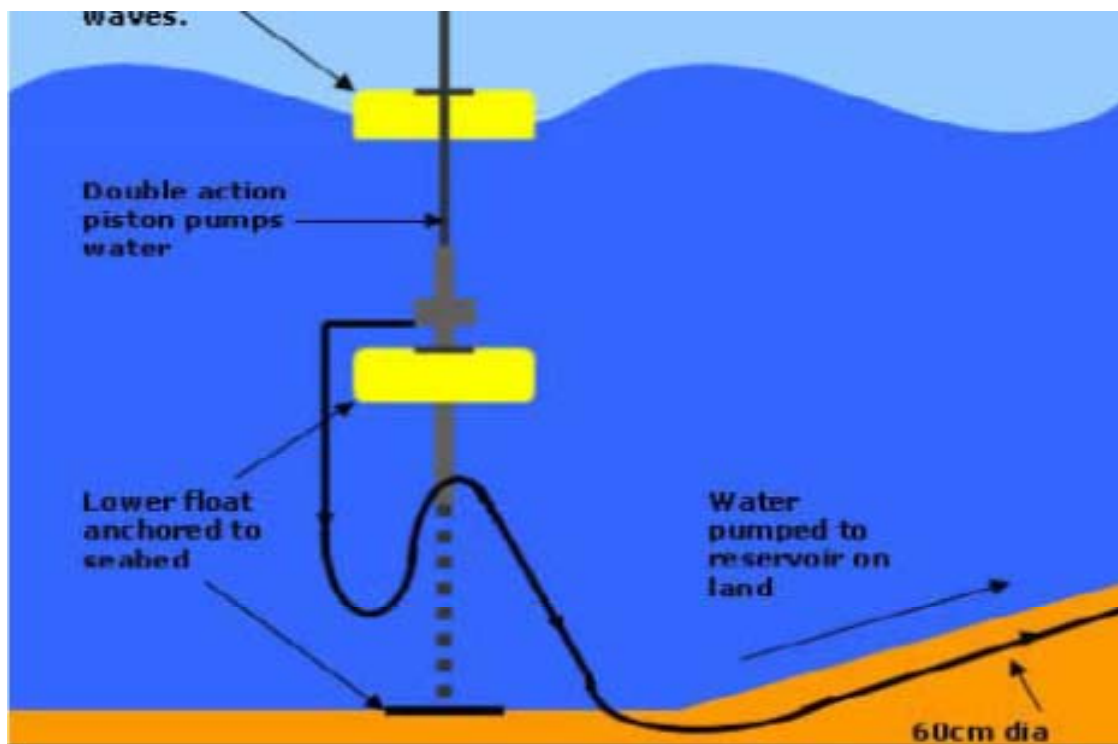
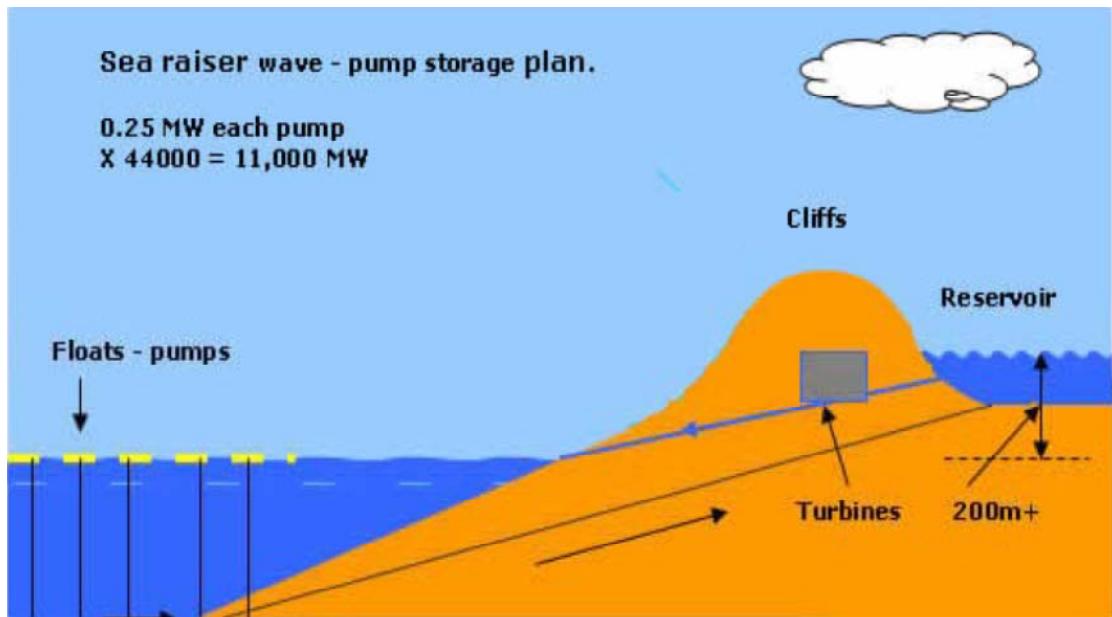
- Στρόβιλος σχεδιασμού
- Στρατηγική ανοίγματος/κλεισίματος του στροβίλου
- **Σύστημα πρόσδεσης**, με ελεύθερο ή περιορισμένο προσανατολισμό προς τα κύματα
- **Μέγεθος του μετατροπέα ενέργειας**
- **Κλίμα του κύματος**
- Ενέργεια στο μέτωπο του κύματος (kW/m)
- Κατανομή των υψών κύματος

2.1.4. Ενέργεια από κυματισμούς





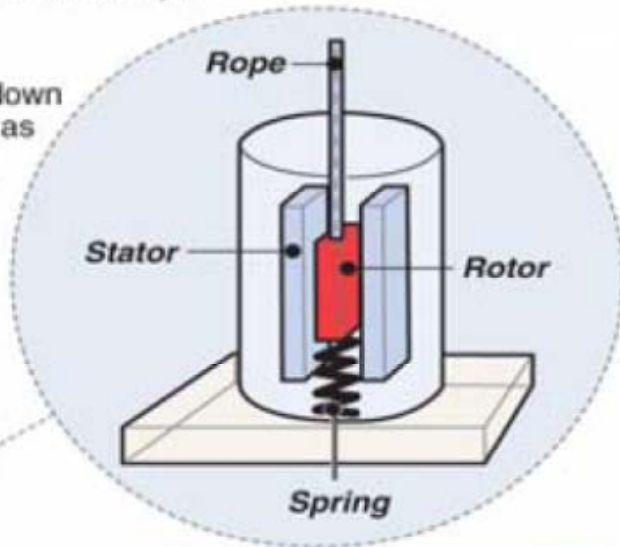
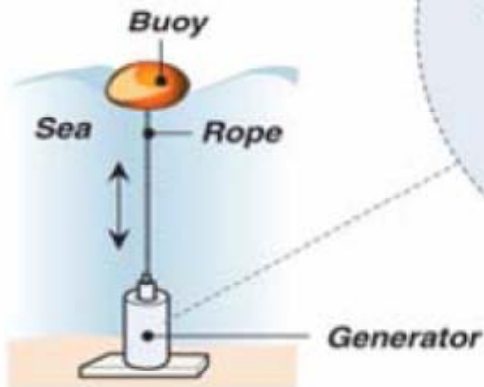




Swedish company Seabased AB has developed a simple way of converting ocean wave energy to electricity:

How it works

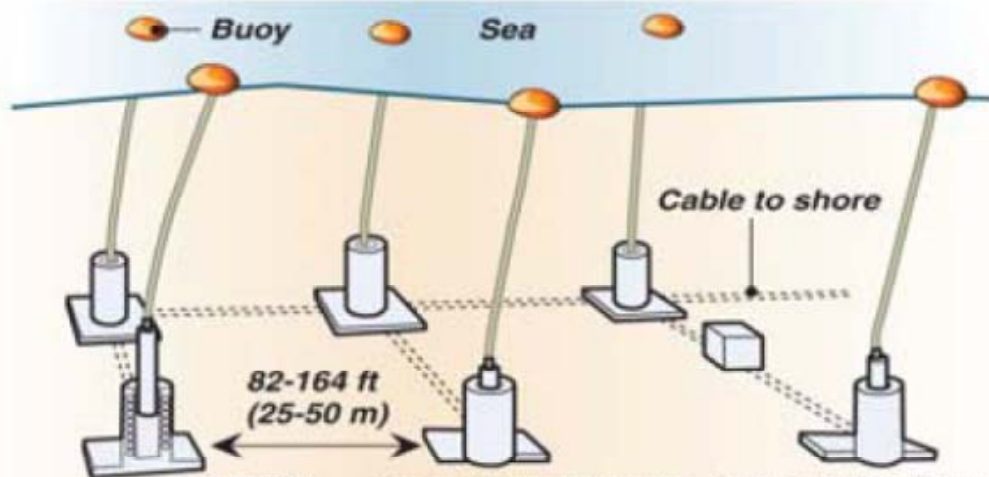
- 1 The rotor moves up and down at about the same speed as the wave; generates electricity at low wave amplitudes



- Ratio of yearly energy is typically two times higher than that of wind power
- Wave energy potentially as big as hydropower; up to 15,000 TWh yearly worldwide

- 2 Energy is transmitted via a standard underwater cable to a land-based converter station; energy generated then transmitted to the high-voltage grid

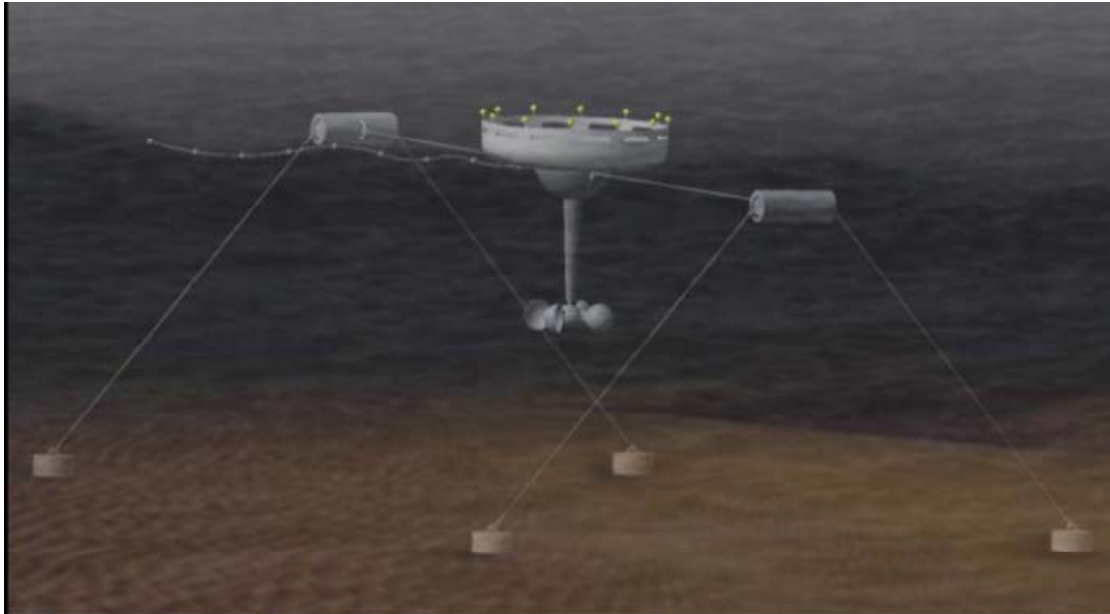
NOTE: TWh = Terawatts per hour



© 2009 MCT

Source: www.seabased.com

Graphic: Eeli Polli, Scott Bell



Η πλωτή διάταξη, συνδέεται με μια σχεδόν κατακόρυφη στήλη που περιέχει έναν άξονα και τερματίζει σε μια προπέλα. Οι μετακινήσεις των κυμάτων αλλάζουν τον προσανατολισμό του άξονα της στήλης από την κατακόρυφο, γεγονός που οδηγεί σε μια μετατόπιση του έλικα και τελικά προκαλεί την περιστροφή του. Η μορφή του έλικα έχει ως σκοπό να περιστραφεί μόνο σε μια κατεύθυνση, ανεξάρτητα από τις ποικίλες μετακινήσεις της στήλης.

2.1.5. Oyster wave power



Ανατρεπόμενη αρθρωτή διάταξη Τοποθετείται υποβρυχίως σε βάθος περίπου 10m και

Απόσταση που φτάνει τα 500 m από την ακτή. Η διάταξη, ταλαντεύεται εμπρός-πίσω λόγω της μεταφερόμενης κυματικής ενέργειας από και προς την ακτή. Η μετακίνηση του πτερυγίου λόγω των κρούσεων με τα κύματα, μετακινεί δύο υδραυλικά έμβολα που προωθούν το συμπιεσμένο νερό προς την ακτή για να το οδηγήσουν σε έναν συμβατικό υδροηλεκτρικό στρόβιλο.

2.1.6. Πλεονεκτήματα

Δυνατότητα πρόσβασης: ο ηλεκτρικός εξοπλισμός είναι χερσαίος και η υποβρύχια διάταξη είναι κοντά στην ακτή.

Αξιοπιστία-αντοχή: πρόκειται για μια απλή ταλαντευόμενη κίνηση και δεν είναι απαραίτητο να διακοπεί η λειτουργία του σε ακραίες καιρικές συνθήκες.

Υψηλός συντελεστή απόδοσης της κυματικής ενέργειας.

Εξελιξιμότητα: ήδη σχεδιάζεται μαζική παραγωγή του συστήματος με χαμηλότερο κόστος.

2.2. Ενέργεια από παλίρροιες

Εκμεταλλεύεται την άνοδο και την πτώση της στάθμης της θάλασσας που οφείλεται στην αλληλεπίδραση των πεδίων βαρύτητας Ήλιου, Γης και Σελήνης. Μέση περίοδος 24 ώρες.

Ανανεώσιμη ενέργεια

Υπερτερεί της αιολικής ή την ηλιακής όσον αφορά στην προβλεψιμότητα δεδομένου ότι η ροή νερού είναι τόσο αξιόπιστη όσο η τροχιά της σελήνης

Μεγάλη απόδοση

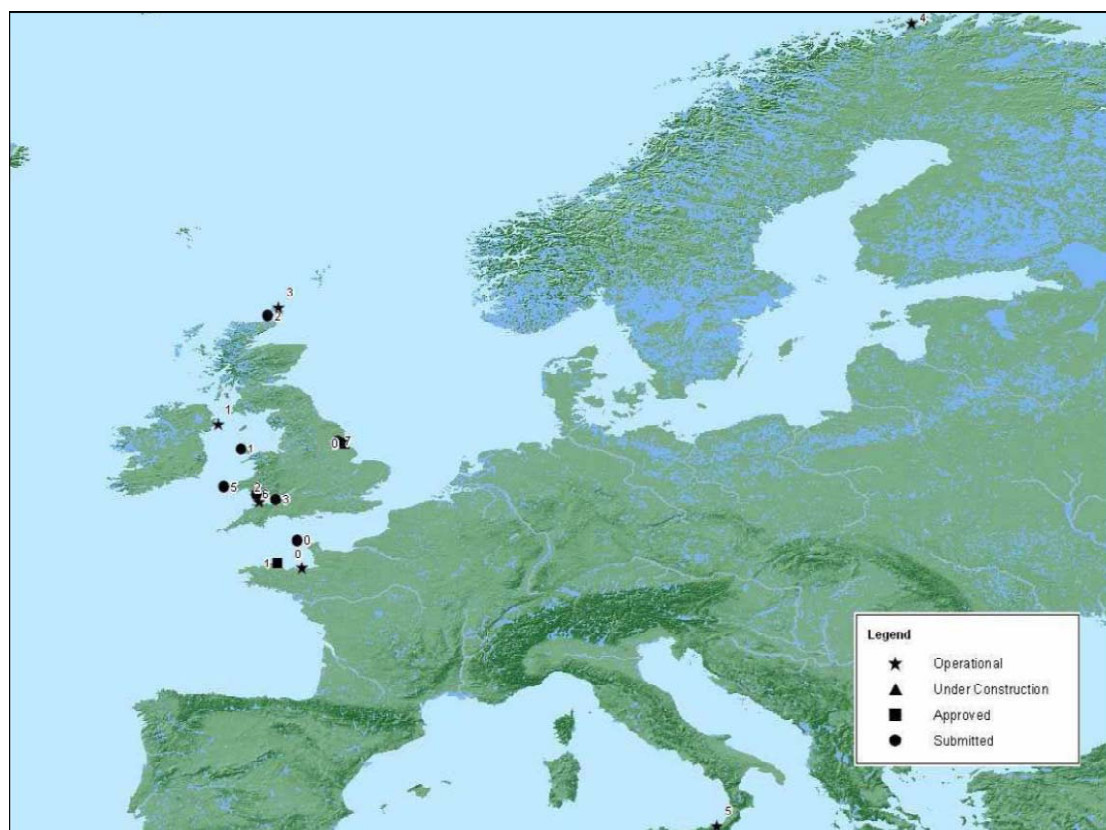
- Μικρό μέγεθος στροβίλων.
- Μηδενική οπτική- ακουστική όχληση αμελητέα χρήση λιπαντικών και εκπομπής CO₂.
- Σχεδιασμός ώστε να μην απειλείται η θαλάσσια ζωή

Έντονα φαινόμενα παλίρροιας

Χώρα	Τοποθεσία	Εύρος παλίρροιας (m)
Καναδάς	Bay of Fundy	16,2
Αγγλία	Severn Estuary	14,5
Γαλλία	Port of Ganville	14,7
Γαλλία	La Rance	13,5
Αργεντινή	Puerto Rio Gallegos	13,3
Ρωσία	Bay of Mezen (White Sea)	10
Ρωσία	Penzhinskaya Guba (Sea of Okhotsk)	13,4

Εγκατεστημένες μονάδες

Χώρα	Τοποθεσία	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Έκταση λεκάνης (km ²)	Μέση παλίρροια (m)
Γαλλία	La Rance	240	22	8,55
Ρωσία	Kislaya Guba	0,4	1,1	2,3
Καναδάς	Annapolis	18	15	6,4
Κίνα	Jiangxia	3,9	1,4	5,08



Σε λειτουργία

Σημείο No.	Όνομα	Τοποθεσία	Περιοχή	Κατασκευαστής	Χώρα	Χρόνος	Συσκευή	Ενεργειακή παραγωγή	Ενεργειακή ικανότητα	Πηγή πληροφοριών
0	Rance Power Station	Rance River	Bretagne	EDF	Γαλλία	1966	24 bulb type turbine generators	68MW	240MW	www.edfenergy.com
1	Sea Gen	Stangford Lough	Co Down	Marine Turbines Ltd	Βόρεια Ιρλανδία	2008	tidal energy convertor	1.2MW	-	www.marineturbines.com/18/projects/19/seagen/
2	Sea Flow	2km υπεράκτια Foreland Point, Lynmouth	Devon	Marine Turbines Ltd	Αγγλία	2003	1 tidal turbine	300kW	-	www.marineturbines.com/6/background/14/seaflow/
3	Fall of Warness Test Site	Eday	Orkney Islands	European Marine Energy Centre	Σκωτία	-	-	-	-	www.emec.org.uk/tidal_site.asp
4	Kvalsund Sound	Kvalsundet	Finnmark	Hammerfest Stroem	Νορβηγία	2003	-	-	-	http://www.hammerfeststrom.com/content/view/full/45/72/
5	Enermar	Straits of Messina	Sicily	Ponte di Archimede	Ιταλία	2001	-	80 kW	-	http://www.pontediarchimede.com

Εγκεκριμένα

Σημείο No.	Όνομα	Τοποθεσία	Περιοχή	Κατασκευαστής	Χώρα	Χρόνος	Συσκευή	Προτεινόμενη Ενεργειακή ικανότητα	Πηγή πληροφοριών
0	Humber Estuary	Upper Burcom κοντά στο Stallingborough	Lincolnshire	Pulse Tidal Ltd	Αγγλία	2008	Pulse generator	0.15MW	www.pulsetidal.com
1	Paimpol- Brehat	Υπεράκτια του Paimpol	Brittany	EDF	Γαλλία	2008	4-10 tidal turbines	4MW	http://press.edf.com/

Υπό έγκριση

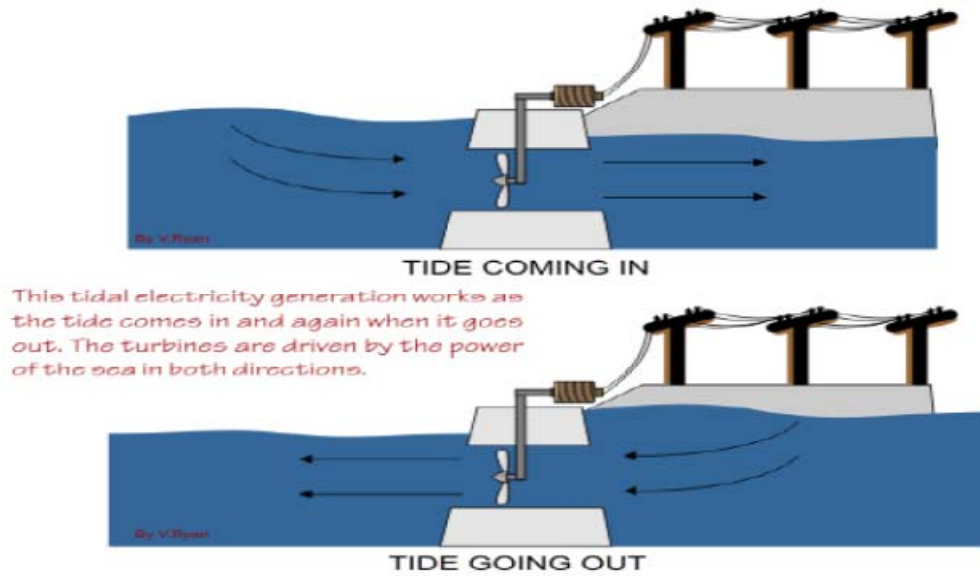
Σημείο No.	Όνομα	Τοποθεσία	Περιοχή	Κατασκευαστής	Χώρα	Χρόνος	Συσκευή	Ενεργειακή ικανότητα	Πηγή πληροφοριών
0	Alderney	Alderney Island	Channel Islands	Alderney Energy Renewable Ltd	Αγγλία	2007	Tidal turbines	-	www.reuk.co.uk/Alderney-Tidaland-Wave-Power.htm
1	Anglesey Skerries Tidal Stream Array	The Skerries	Anglesey Island	Marine Current Turbines and power renewables	Ουαλία	2008	Seven 1.5MW SeaGen turbines	10.5MW	www.marineturbines.com
2	Pentland Firth Tidal Energy Park	Caithness/Orkney Islands	North Scotland	Tocado	Σκωτία	2007	Turbines	10MW	http://www.tocado.com/?Projects:Master_Plan_P.FirIWC/SC/61/E7
3	Severn Barrage	Bristol Channel	Somerset/Glamorgan	Severn Tidal Power Group	Αγγλία/Ουαλία	2005	214 40MW turbines	17 billion kWh	http://www.reuk.co.uk/Severn-Barrage-Tidal-Power.h
5	DeltaStram Demonstration	Ramsey Sound	Pembrokeshire	Tidal Energy Limited	Ουαλία	2008	1 DeltaStream Unit	-	www.tidalenergyltd.com
6	Swansea Bay	1,61km από την ακτή της Swansea	Swansea	Tidal Electric	Ουαλία	2007	hydro-electric turbines 60MW	60MW	http://www.cprw.org.uk/pdfs/spring05_tidalenergy.p
7	Humber St Andrews	North Ferriby	Yorkshire and the Humber	Neptune Renewable Energy	Αγγλία	2009	Tidal turbines	-	http://news.bbc.co.uk/1/hi/Αγγλία/humber/7932388

2.2.1. Εγκαταστάσεις παραγωγής παλιρροιακής ενέργειας

Παλιρροιακά Φράγματα (Tidal barrage – lagoons)

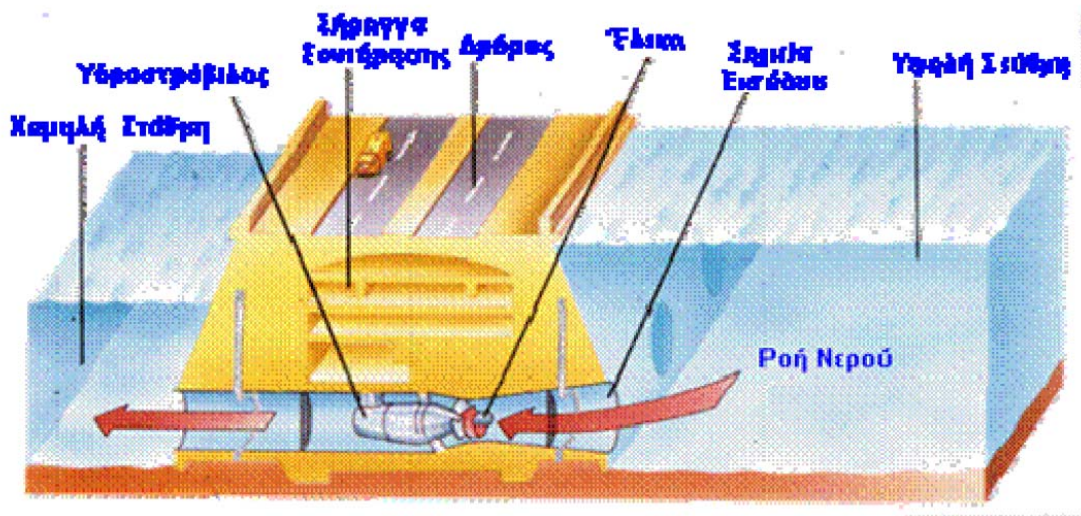
Κατασκευάζεται φράγμα κατά μήκος ενός κόλπου ή εκβολής ποταμού. Είσοδος νερού πίσω από το φράγμα κατά την πλημμυρίδα ελευθέρωση του νερού και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των στροβίλων κατά την άμπωτη.

- Μεγάλες αποδόσεις ανάλογα με το μέγεθος
- Υψηλό κόστος
- Μεγάλες επιπτώσεις στα παράκτια οικοσυστήματα
- Λειτουργία κατά το μισό παλιρροιακό κύκλο



1930: La Rance (240 MW), 1984: Σκωτία (20 MW), 2010: Ρωσία (0,5 MW)

2.2.2. Τρόπος λειτουργίας





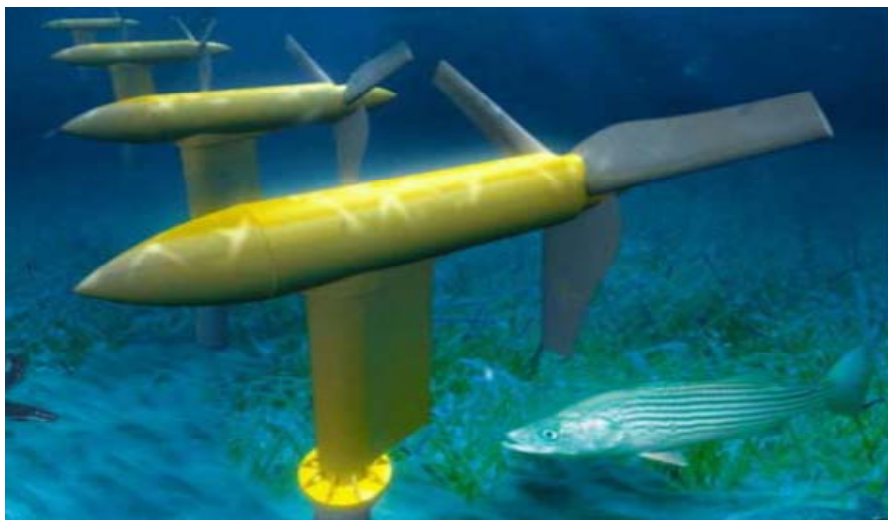
La Rance



2.2.3. Εγκαταστάσεις παραγωγής παλιρροιακής ενέργειας

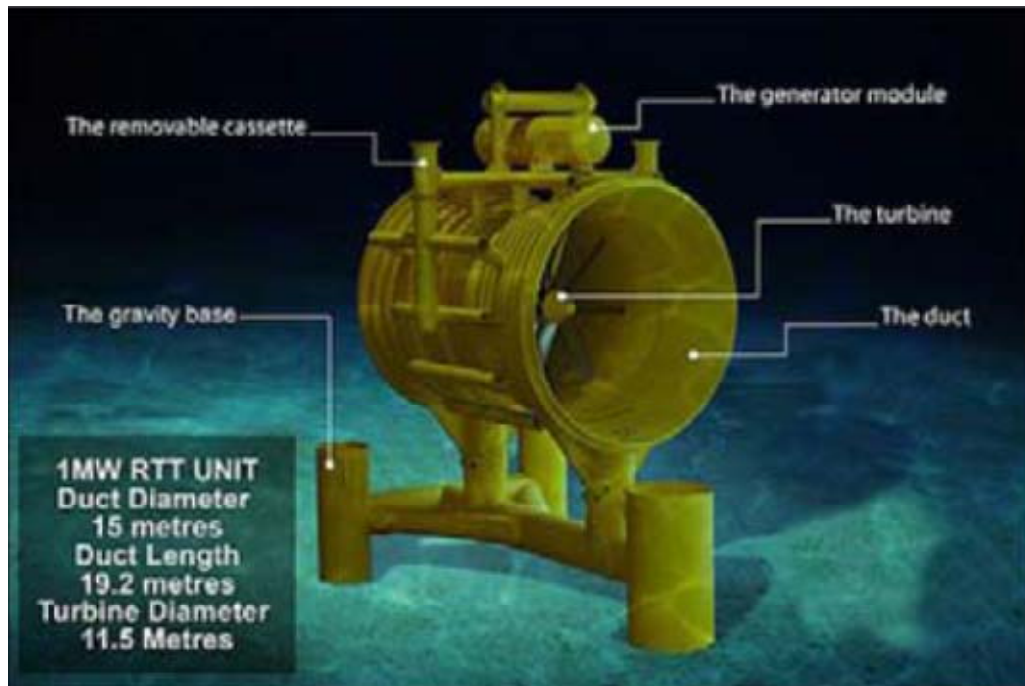
Υποβρύχια ρεύματα (Tidal stream)

- Αρχή λειτουργίας όμοια με τις ανεμογεννήτριες.
- Υποθαλάσσιος περιστρεφόμενος άξονας: σύνδεση με στρόβιλο μέσω μεγάλων, αργά κινούμενων λεπίδων.
- Σχετικά φθηνές εγκαταστάσεις.
- Περιορισμένη απόδοση.
- Δυσκολία συντήρησης



2.2.4. Στρόβιλοι διοχέτευσης ροής

Ένας venturi διαμορφωμένος αγωγός αυξάνει την ταχύτητα ροής του νερού, θέτει σε κίνηση την τουρμπίνα παράγοντας ενέργεια. Συνδέονται με “δωμάτιο ελέγχου” στην επιφάνεια.

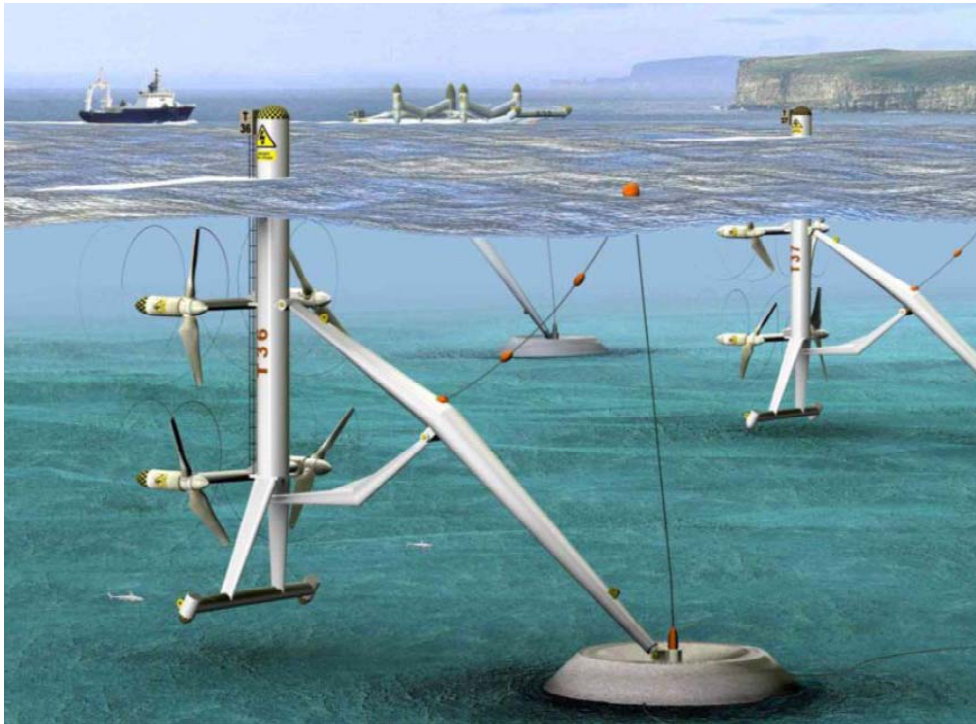


Πλεονεκτήματα

- Μεγαλύτερες αποδόσεις από τις κοινές υποβρύχιες τουρμπίνες.

Μειονεκτήματα

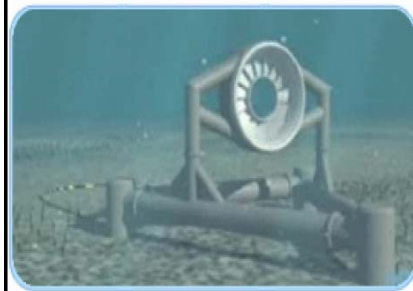
- Μεγάλο μέγεθος-δυσκολία κατά την τοποθέτηση και σε περίπτωση βλάβης.
- Δύσκολη συντήρηση.



2.2.4.1. Οριζοντίου άξονα



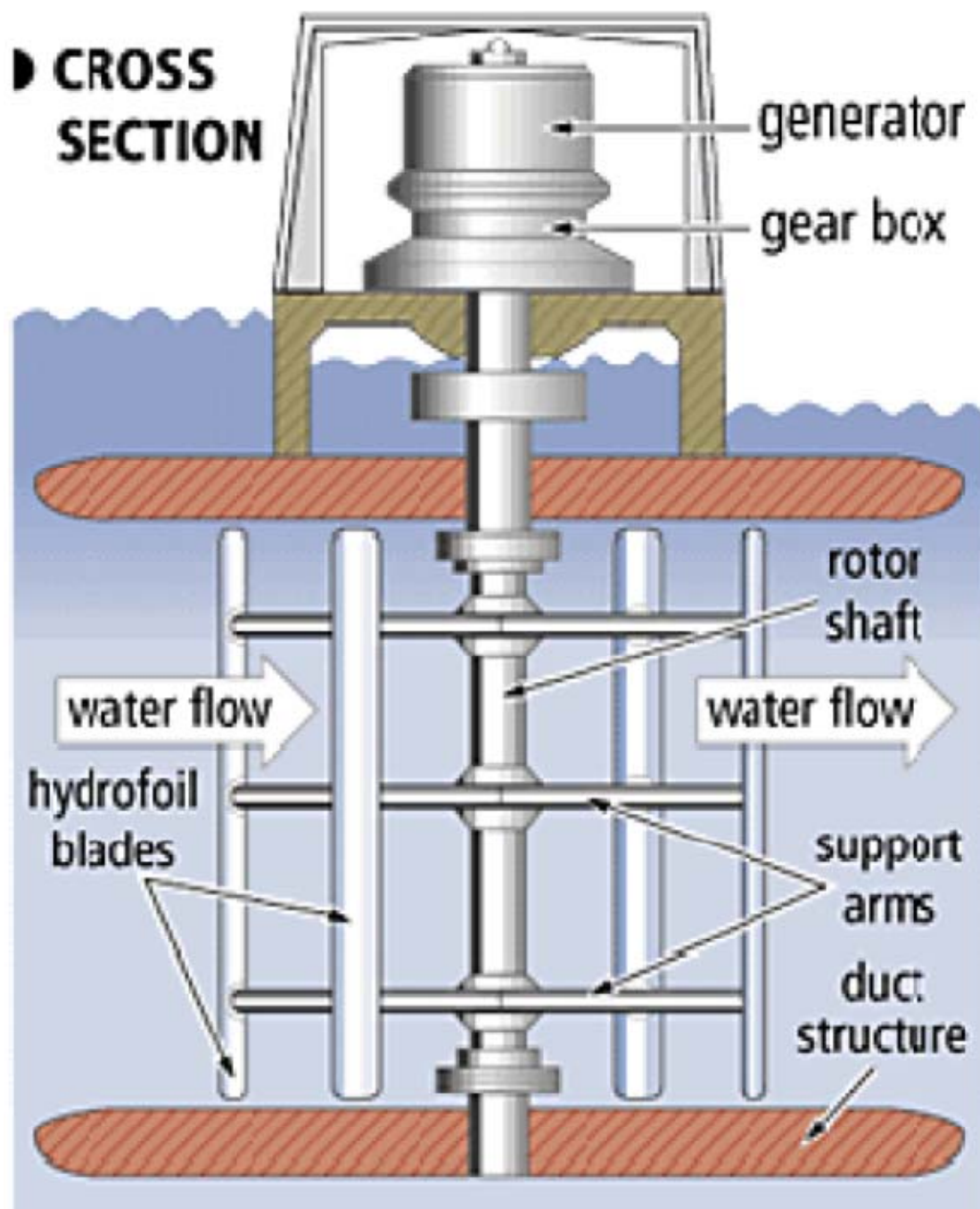
Οριζόντιου άξονα
(www.bluenergy.com)



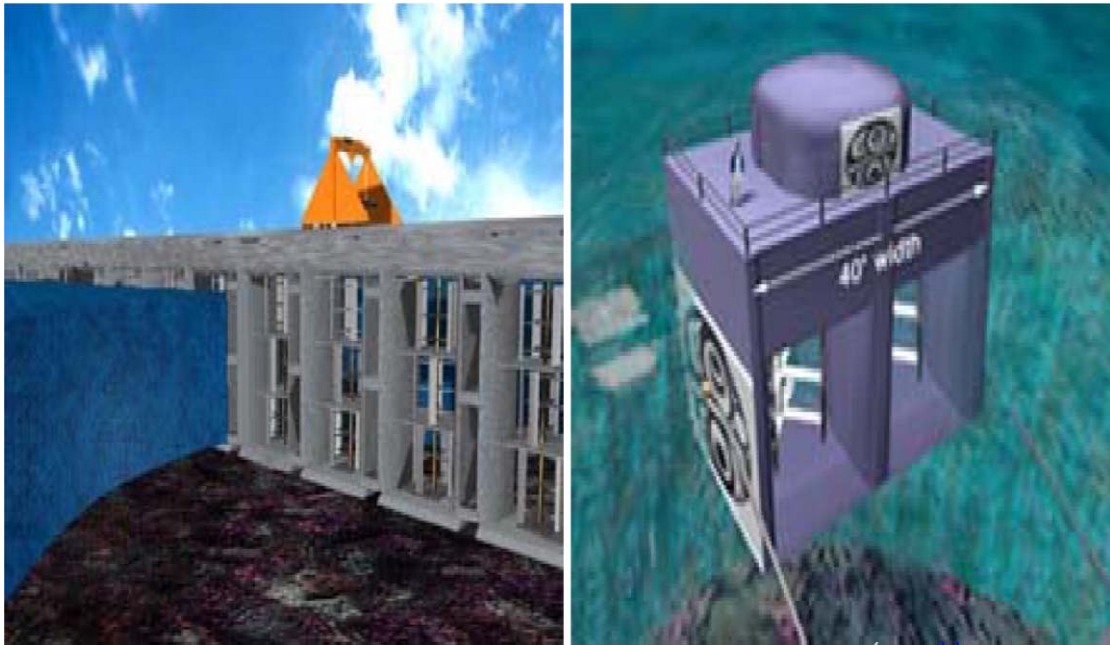
2.2.4.2. Με άξονα κατακόρυφο στη ροή

Πλεονεκτήματα

- Μεγαλύτερες αποδόσεις από τις κοινές υποβρύχιες τουρμπίνες.
- Μικρό μέγεθος που καθιστά εύκολη συντήρηση και επισκευή σε περίπτωση βλάβης.
- Μικρή ταχύτητα ροής αρκεί για την κίνηση τους.



2.2.4.3. Κατακόρυφου άξονα



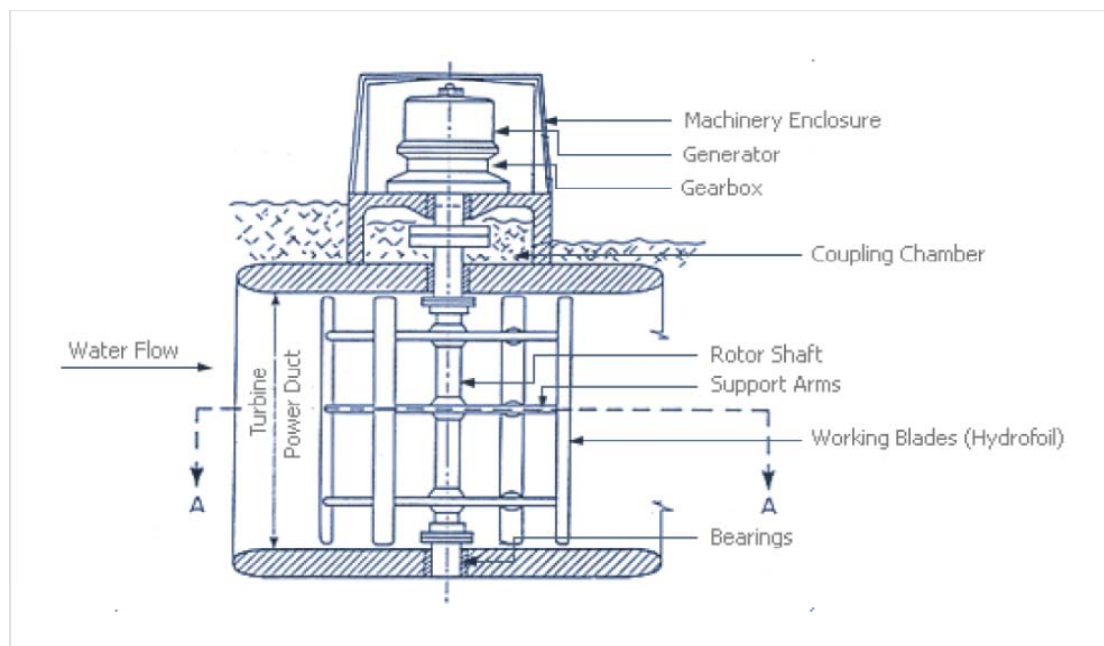
2.2.5. Υδροτουρμπίνα Davis

- Η Blue Energy Canada μετά από έρευνες και πειράματα κατέληξε στη βέλτιστη υδροτουρμπίνα κάθετου άξονα, την υδροτουρμπίνα Davis.ά
- 4 πτερύγια υδροολισθητήρων συνδέονται με άξονα που θέτει σε κίνηση την υδροτουρμπίνα.
- Το σύστημα του στροφέα εγκιβωτίζεται αποτελώντας ταυτόχρονα βάση της τουρμπίνας αλλά και κατευθύνει τη ροή διαμέσω του στροφέα.
- Η τουρμπίνα ελέγχεται από δωμάτιο που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του νερού.
- Οι υδροολισθητήρες υιοθετούν μια υδροδυναμική αρχή που αναγκάζει το στρόβιλο να κινηθεί γρηγορότερα από την ταχύτητα του εισερχόμενου νερού.
- Η/Υ ελέγχει και βελτιστοποιεί την κίνηση ώστε να είναι ομοιόμορφη κατά την πλημμυρίδα αλλά και την άμπωτη μεγιστοποιώντας έτσι την απόδοση.
- Όλα τα κομμάτια της υδροτουρμπίνας Davis είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους καθιστώντας έτσι εύκολη τη συντήρηση και επισκευή της.
- Η τουρμπίνα λειτουργεί καθ'όλη τη διάρκεια του κύκλου της παλίρροιας.

Η Blue Energy Canada χρησιμοποιεί τις υδροτουρμπίνες Davis σε σειρά, παραλλάσσοντας τα παλιρροϊκά φράγματα δημιουργώντας παλιρροϊακές γέφυρες.

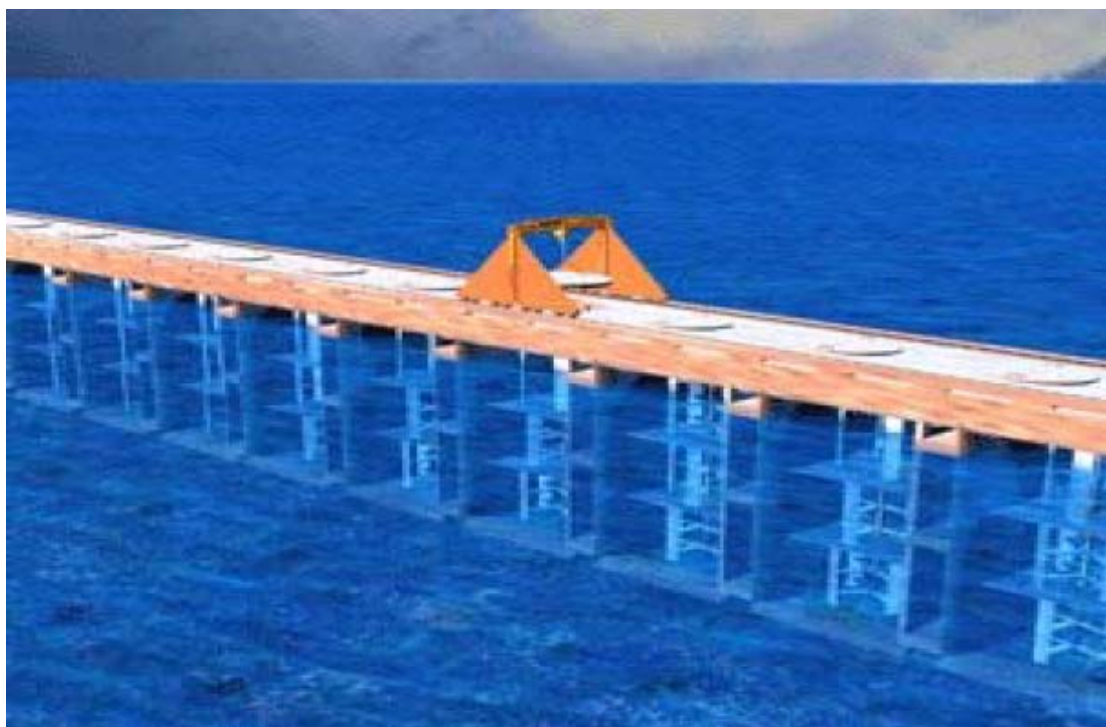
- Συνδιάζεται η κατασκευή γέφυρας που εξυπηρετεί μεταφορικούς σκοπούς αλλά και η παραγωγή ενέργειας.
- Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ελαχιστοποιούνται καθώς υπάρχει ελεύθερη ροή μεταξύ των στηριγμάτων της γέφυρας.

Υδροτουρμπίνα Davis



Η Blue Energy Canada χρησιμοποιεί τις υδροτουρμπίνες Davis σε σειρά, παραλλάσσοντας τα παλιρροϊκά φράγματα δημιουργώντας παλιρροϊακές γέφυρες.

- Συνδιάζεται η κατασκευή γέφυρας που εξυπηρετεί μεταφορικούς σκοπούς αλλά και η παραγωγή ενέργειας.
- Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ελαχιστοποιούνται καθώς υπάρχει ελεύθερη ροή μεταξύ των στηριγμάτων της γέφυρας.



- Blue Energy Canada Projects

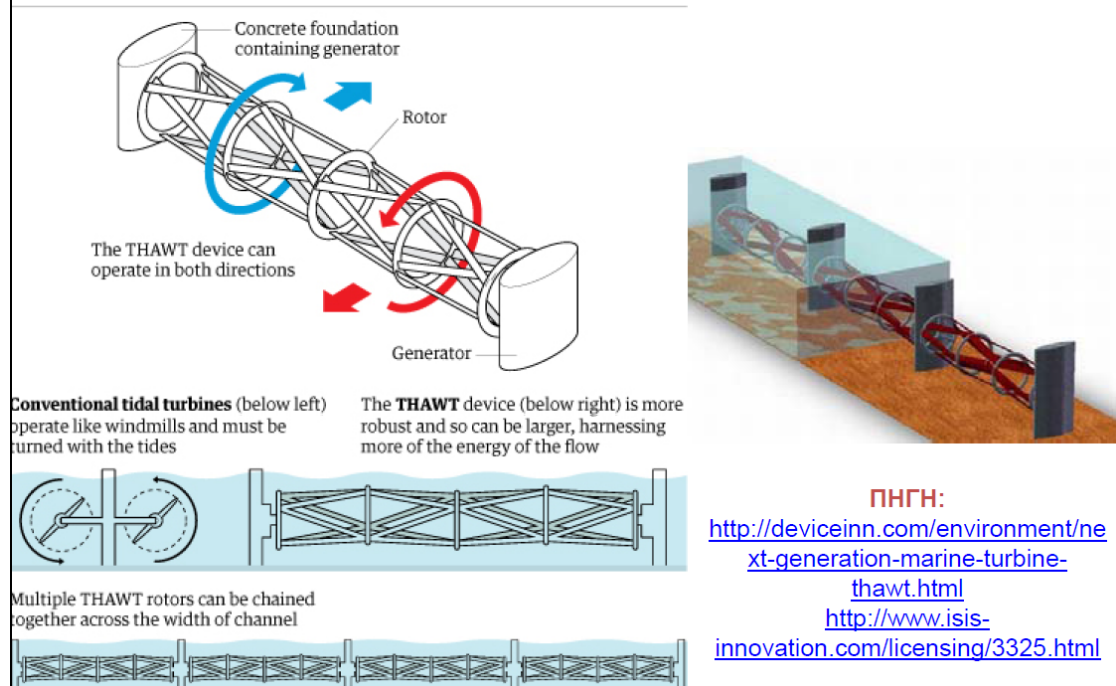




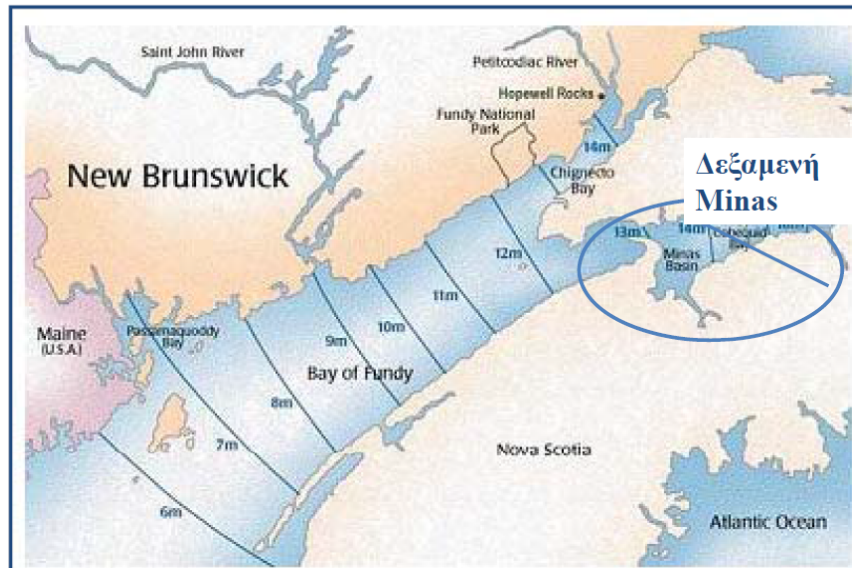
ΠΑΛΙΡΡΟΪΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Transverse Horizontal Axis Water Turbine THAWT

Next generation marine turbine



Ο κόλπος Fundy



Έχει το μεγαλύτερο παλιρροιακό δυναμικό στη Βόρεια Αμερική 100 δις τόνοι νερού εισρέουν και εκρέουν από τη Δεξαμενή Minas κάθε 6 ώρες

Ο Κόλπος Fundy σε υψηλή και χαμηλή παλίρροια

Η στάθμη της παλίρροιας, στη θέση του στροβίλου, κυμαίνεται έως και 17 m κάθε 6 ώρες



2.2.6. Αρχή λειτουργίας των στροβίλων

- εκμεταλλεύονται την αυξομείωση της θαλάσσιας στάθμης κατά την παλίρροια.
- έχουν περιοδική λειτουργία (όπως και η παλίρροια).
- λειτουργία παρόμοια με την αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι τουρμπινών



1) Στρόβιλος τύπου seaGen



2) Στρόβιλος Clean Current

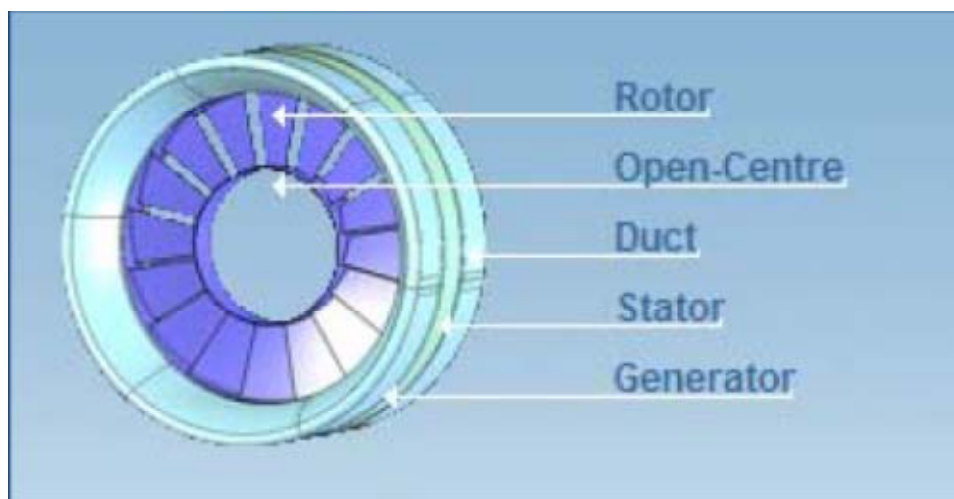
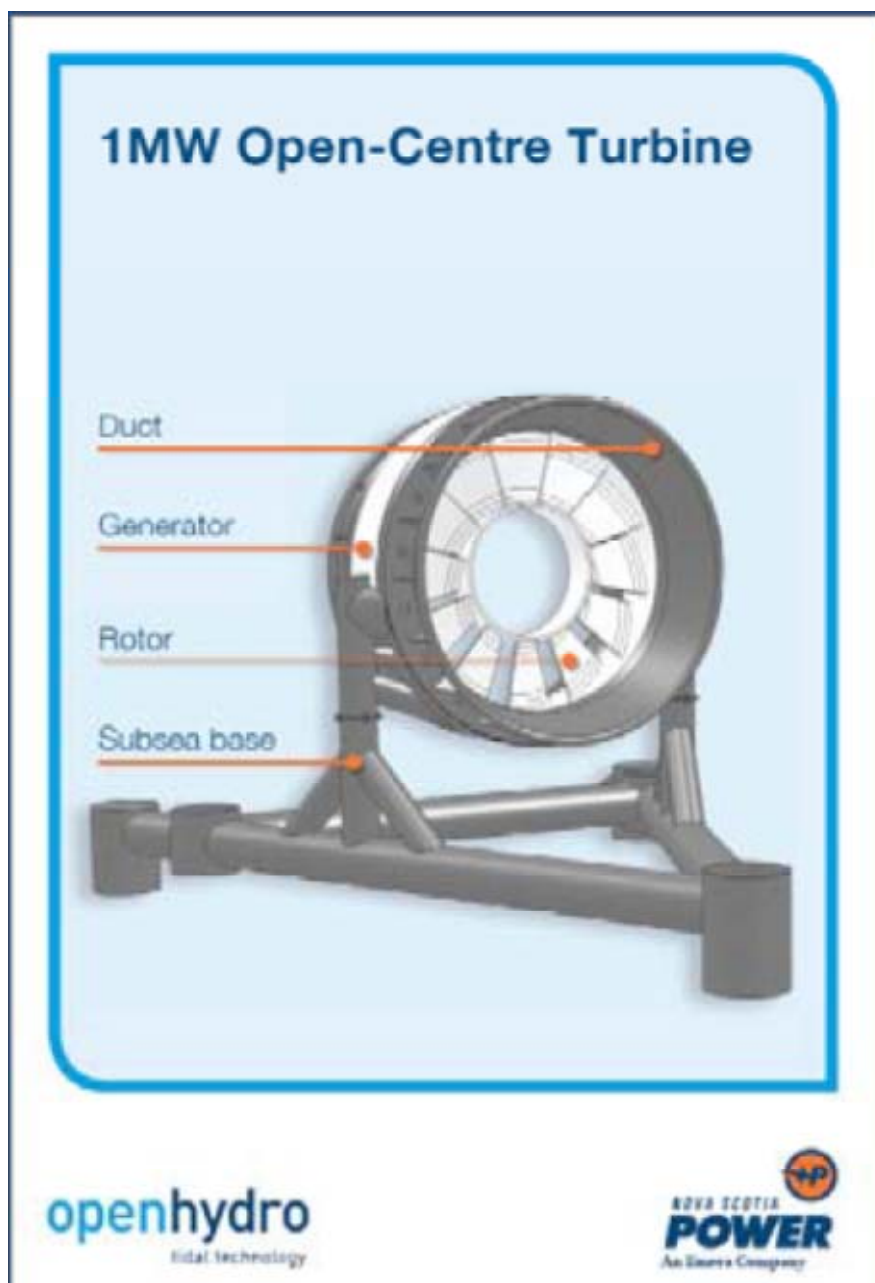


3) Στρόβιλος Open Hydro

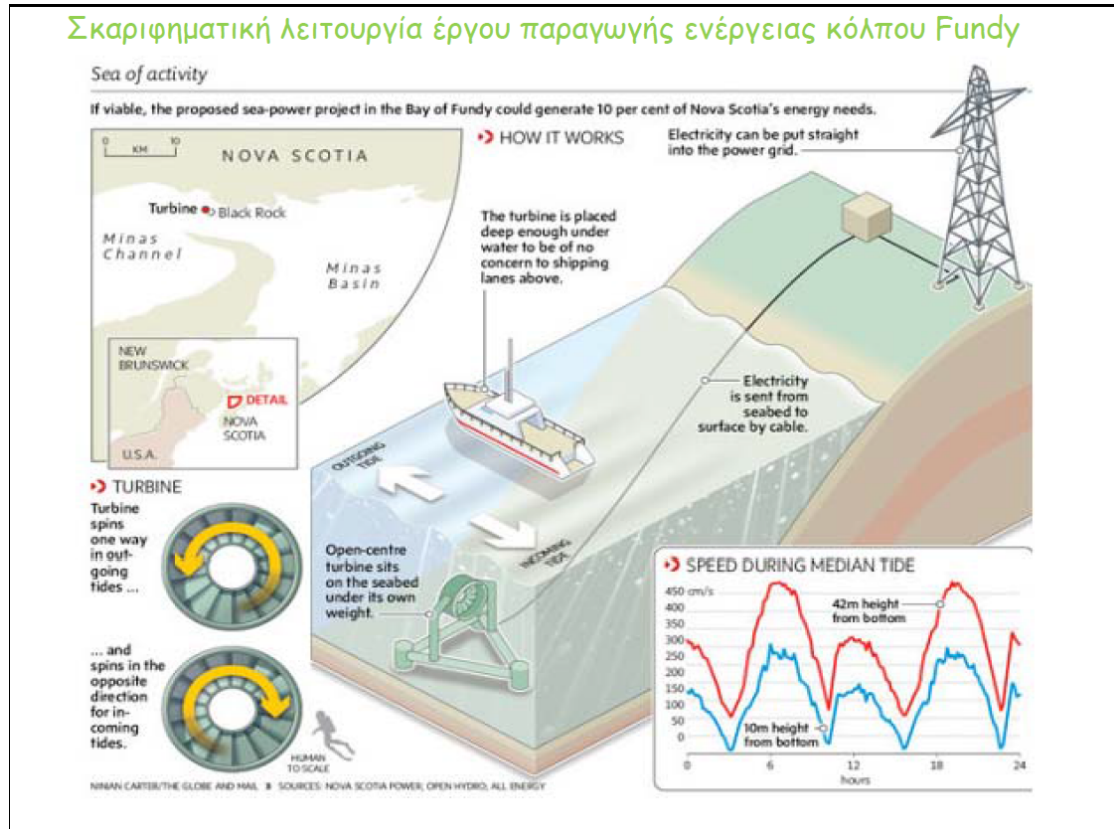
Χαρακτηριστικά στροβιλομηχανής:

Βάρος 400 ton

- Διάμετρος ~ 9,0 m
- Ισχύς 1,0 MW
- Παραμένει στη θέση της δια βαρύτητας
- Λειτουργεί με αμφίδρομη ροή
- Διαθέτει μόνο ένα κινούμενο μέρος
- Δεν διαθέτει κιβώτιο ταχυτήτων

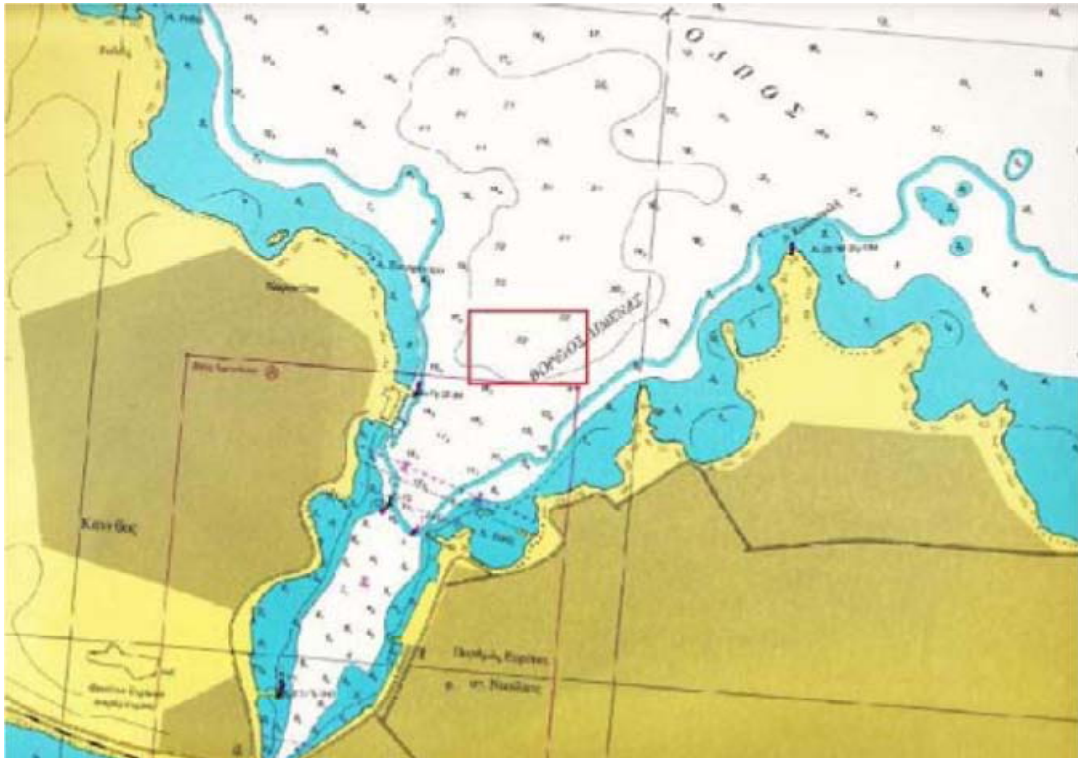


Σκαριφηματική λειτουργία έργου παραγωγής ενέργειας κόλπου Fundy



ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΡΘΜΟΥ ΕΥΡΗΠΟΥ

Βόρειος Ευβοϊκός, Ακτή Ξυλοφάναρο, τα βάθη κυμαίνονται από 18,0 έως 22,0μ. Για την απρόσκοπτη διέλευση των πλοίων απαιτείται βύθισμα 6,0μ και συνεπώς η διάμετρος του στροβίλου δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 12 0μ.



Το ενεργειακό δυναμικό για την περίπτωση ενός συστήματος οριζόντιου άξονα μπορεί να υπολογιστεί με την ίδια θεωρία που χρησιμοποιείται και για τις ανεμογεννήτριες, με εφαρμογή δηλαδή της εξίσωσης Bernoulli. Ο τύπος της ισχύος έχει την ακόλουθη τελική μορφή:

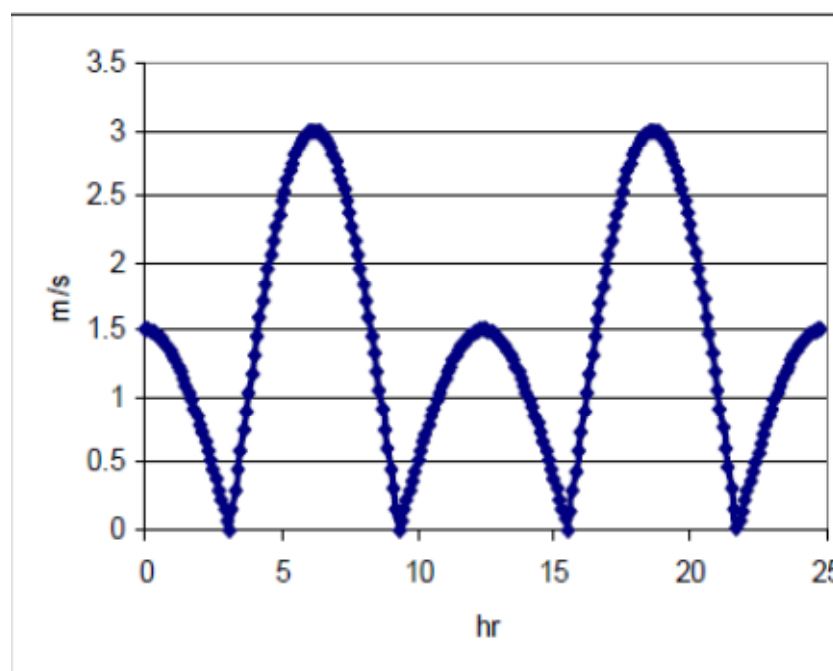
Όπου:

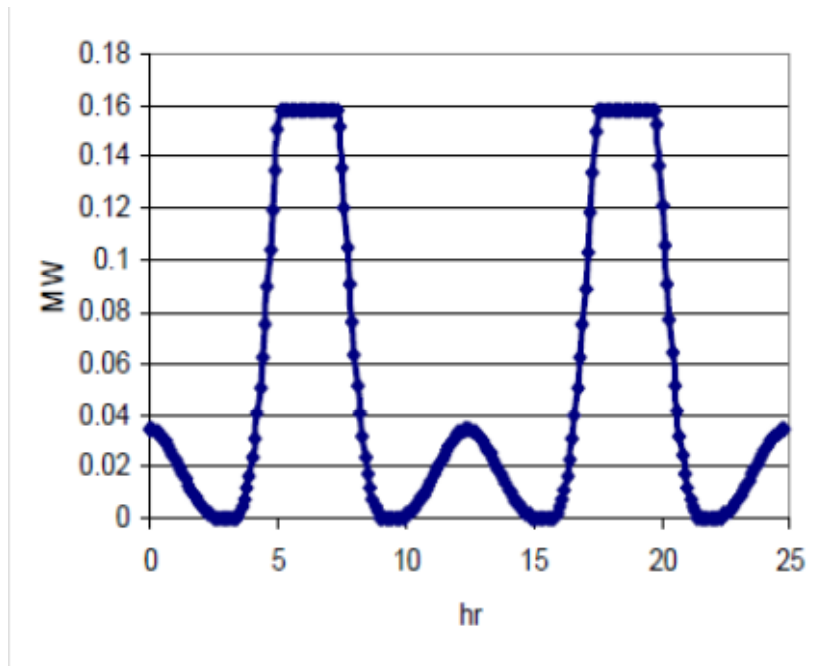
- P_{ntot} : η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (W)
- η : συνολικός βαθμός απόδοσης
- ρ : η πυκνότητα του νερού (1025 kg/m^3)
- u : η ταχύτητα κίνησης του νερού (m/s)
- A : η προσβαλλόμενη επιφάνεια (m^2)

$$P_{ntot} = \frac{1}{2} \eta \rho u^3 A$$

- Ως συνολικός συντελεστής απόδοσης ορίστηκε η τιμή 70%. Η διάμετρος του υδροστροβίλου 6m. Για ταχύτητα μεγαλύτερη από 2.5 m/s ο υδροστρόβιλος λειτουργεί με ονομαστική ισχύ P_{nom} ίση με 0,158 MW. Κάτω από την τιμή της ταχύτητας 0,5m/s δεν παράγει ενέργεια άρα και η ισχύς είναι μηδέν. Επιλέχθηκαν 4 στρόβιλοι με συνολικό ύψος έκαστου 9 m.

Μέγεθος	Τιμή
n_{tot} (%)	70
ρ (kg/m ³)	1025
D (m)	6
V_{max} (m/s)	2,5
V_{min} (m/s)	0,5
P_n (MW)	0,158
P_o (MW)	0
Συν. ύψος (m)	9
αριθμός στροβίλων	4
P_n tot (MW)	0,633
sum E (MWh/d)	5,118
E (MWh/yr)	1807,904





2.2.7. Ενέργεια από θαλάσσια ρεύματα

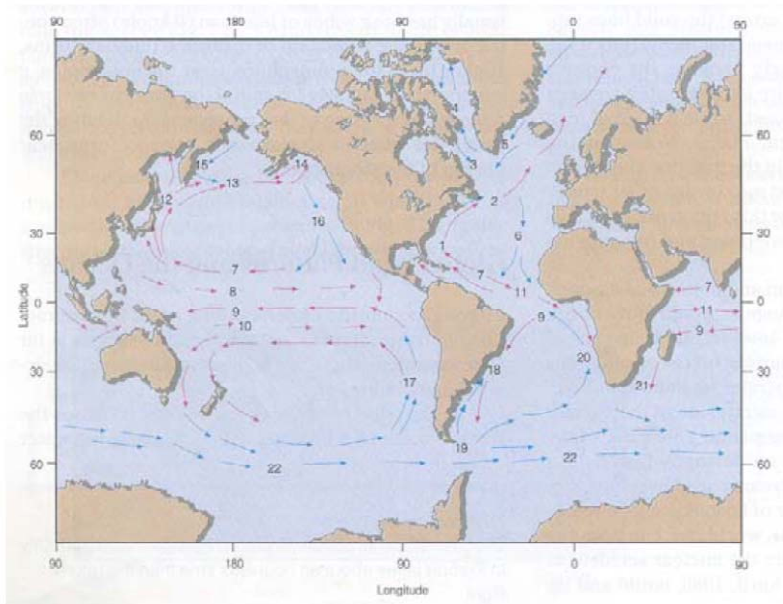
Δημιουργούνται από:

- Περιστροφή της γης
- Τριβή του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας
- Διαφορές πυκνότητας μεταξύ θαλασσίων στρωμάτων

Τρόπος λειτουργίας παρόμοιος με μία ανεμογεννήτρια. Κίνηση των ρευμάτων με τη φορά των δεικτών του ρολογιού στο Βόρειο Ημισφαίριο και αντίθετη στο Νότιο Ημισφαίριο.

ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΡΕΥΜΑΤΑ

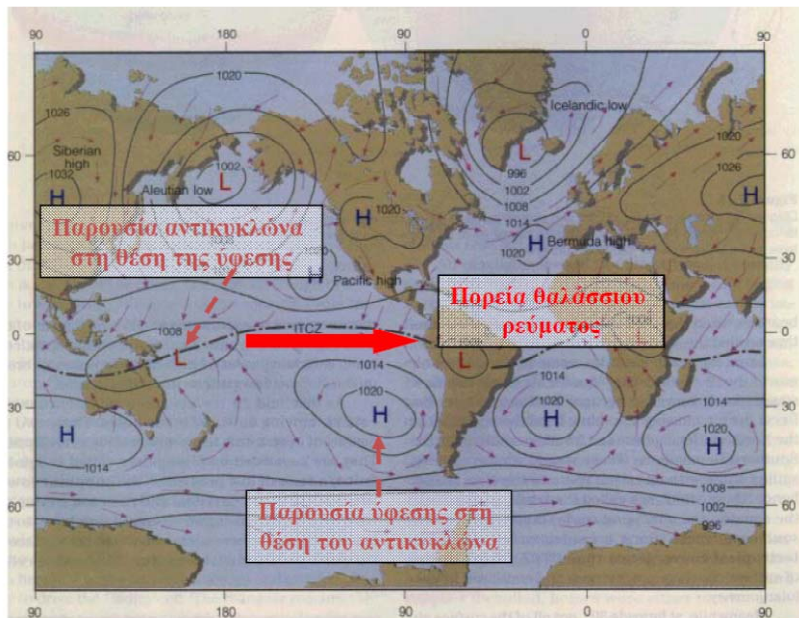
1. Gulf Stream
2. North Atlantic Drift
3. Labrador Current
4. West Greenland Drift
5. East Greenland Drift
6. Canary Current
7. North Equatorial Current
8. North Equatorial Countercurrent
9. South Equatorial Current
10. South Equatorial Countercurrent
11. Equatorial Countercurrent
12. Kuroshio Current
13. North Pacific Drift
14. Alaska Current
15. Oyashio Current
16. California Current
17. Peru Current
18. Brazil Current
19. Falkland Current
20. Benguela Current
21. Agulhas Current
22. West Wind Drift

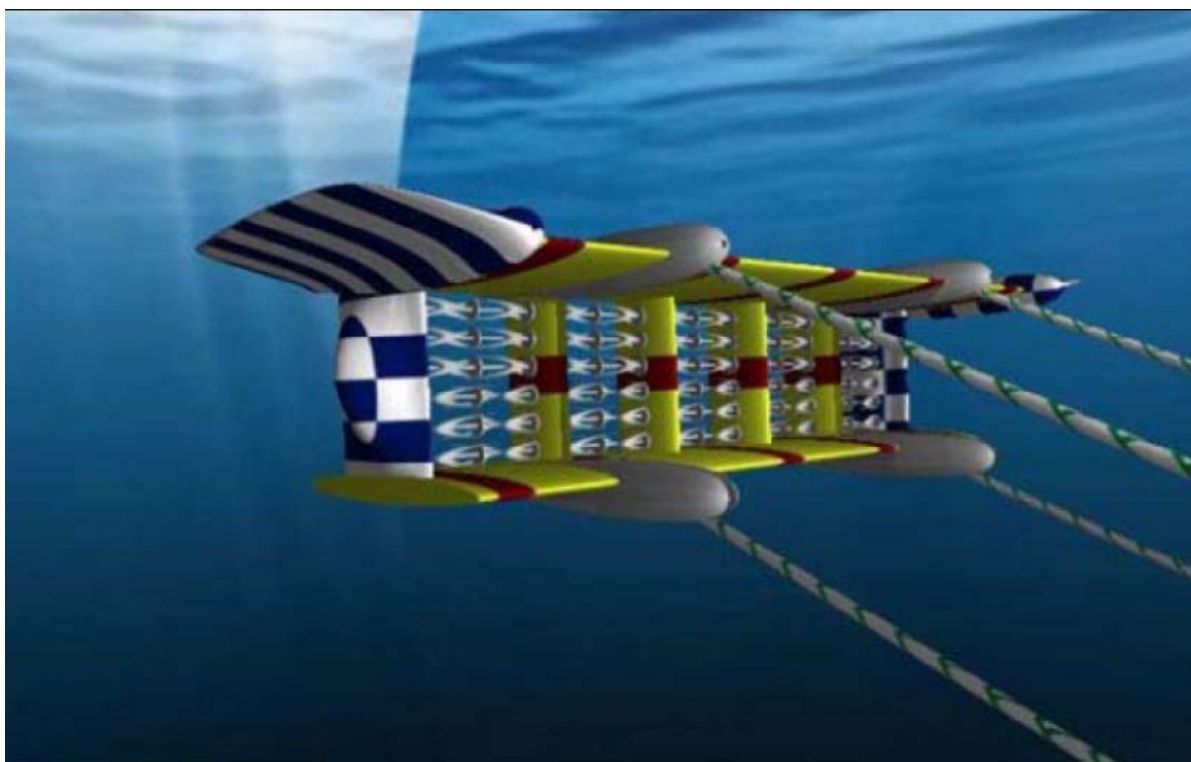
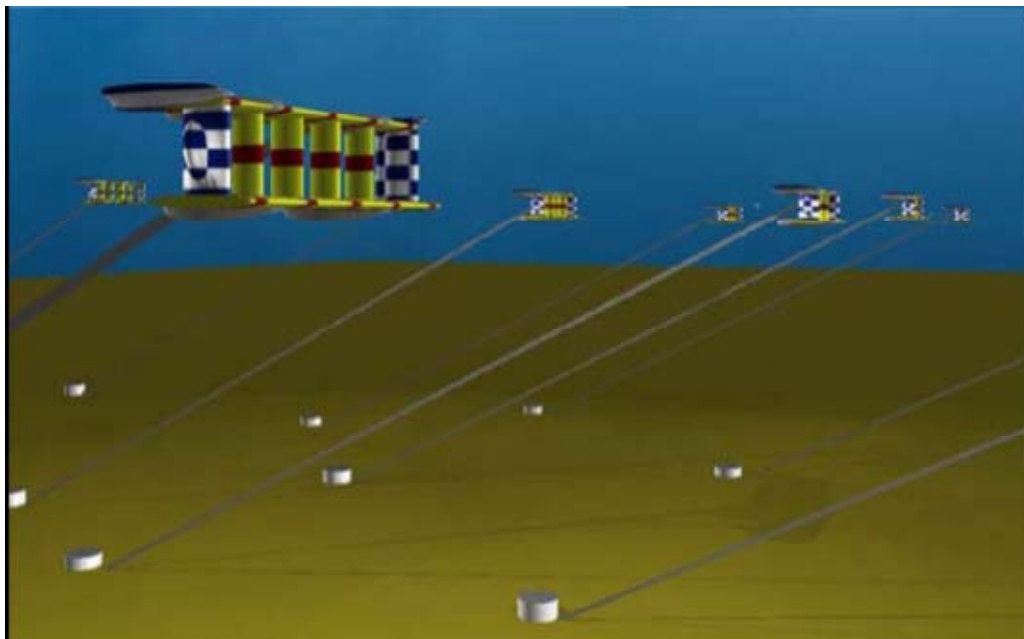


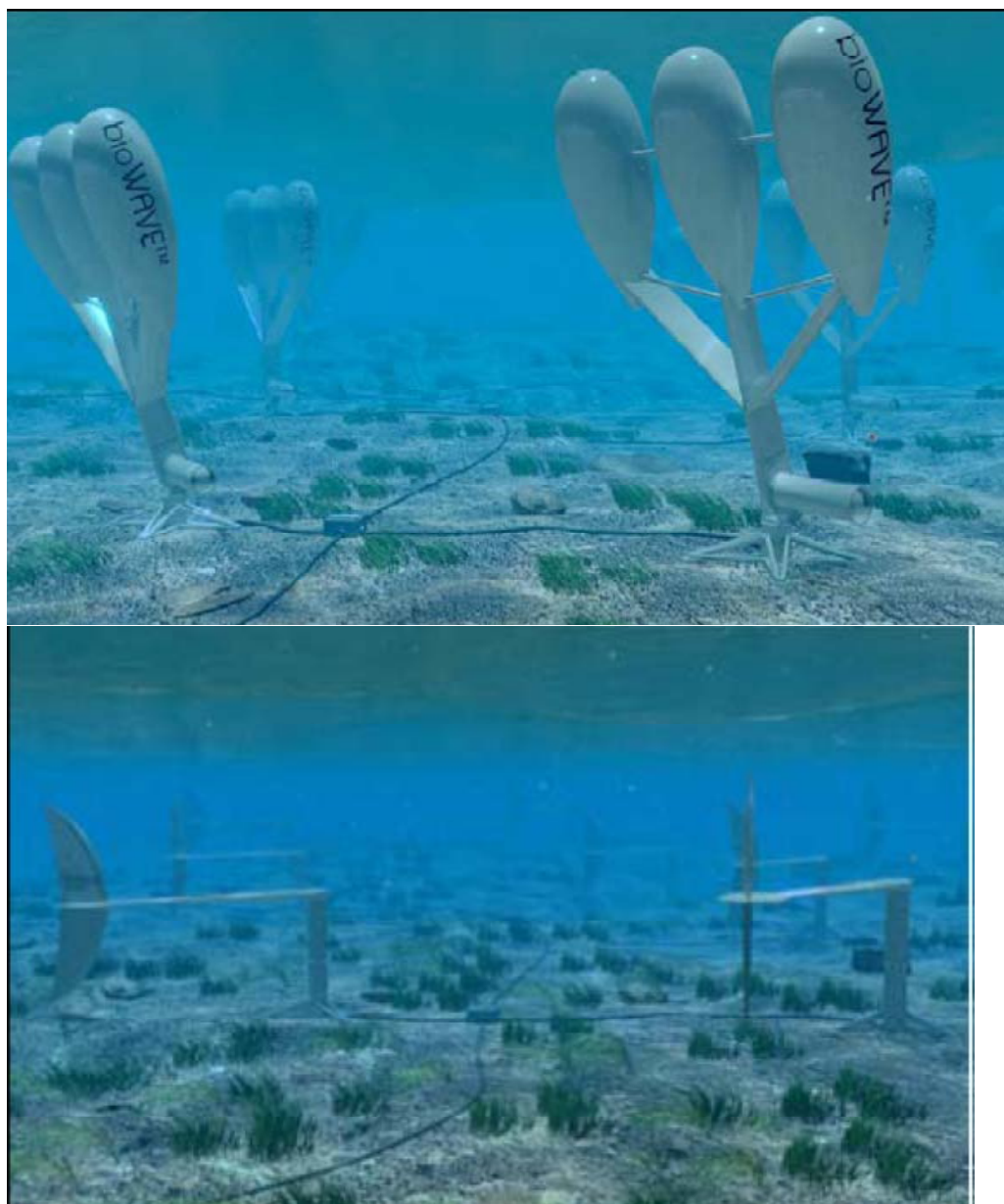
Πηγή: Ahrens, C. D., 1993, *Essentials of Meteorology, An Invitation to the Atmosphere*

ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ EL NINO

Συνήθης ατμοσφαιρική κυκλοφορία Ιανουαρίου και μεταβολές που ευθύνονται για το El nino



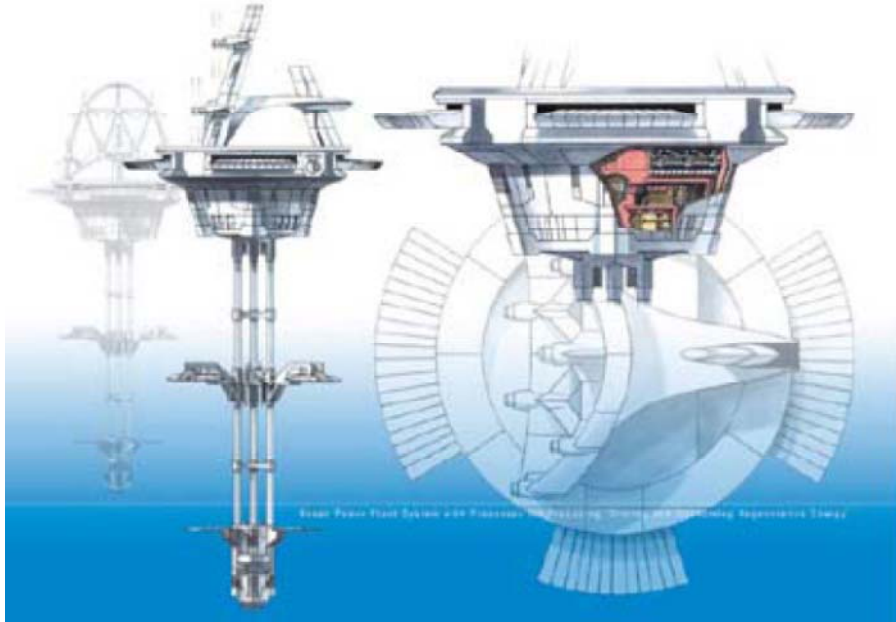




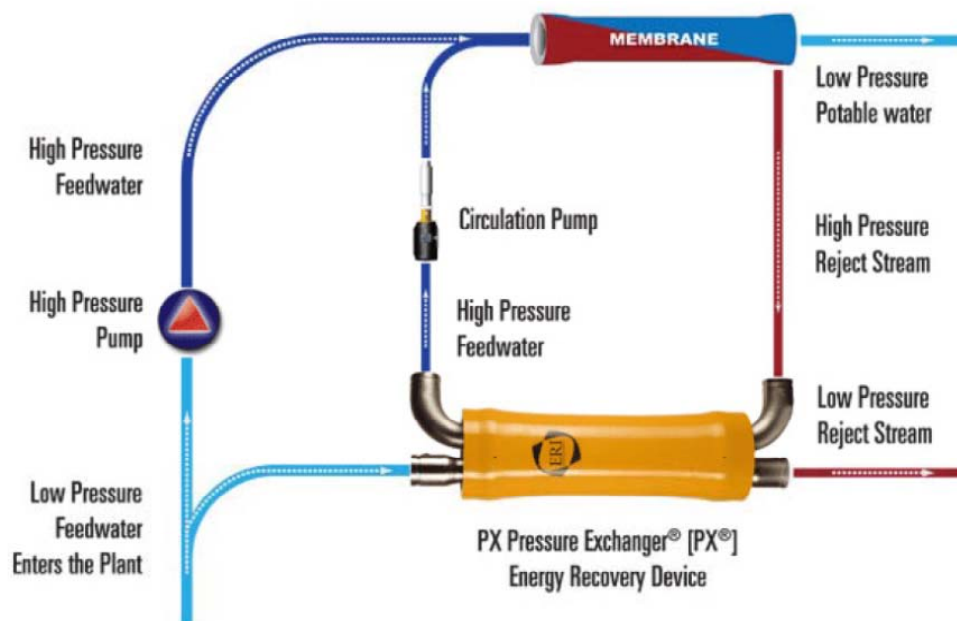
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3. ΩΣΜΩΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η διαφορά της συγκέντρωσης του νατρίου και καλίου κατά μήκος της κυτταρικής μεμβράνης δημιουργεί μια ηλεκτροχημική κλίση γνωστή ως δυναμικό των μεμβρανών. Σήμερα έχουν γίνει πολλά πειράματα και δοκιμές προκειμένου να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια αυτή και υπάρχουν αρκετές διατάξεις έτοιμες να κυκλοφορήσουν στο εμπόριο.

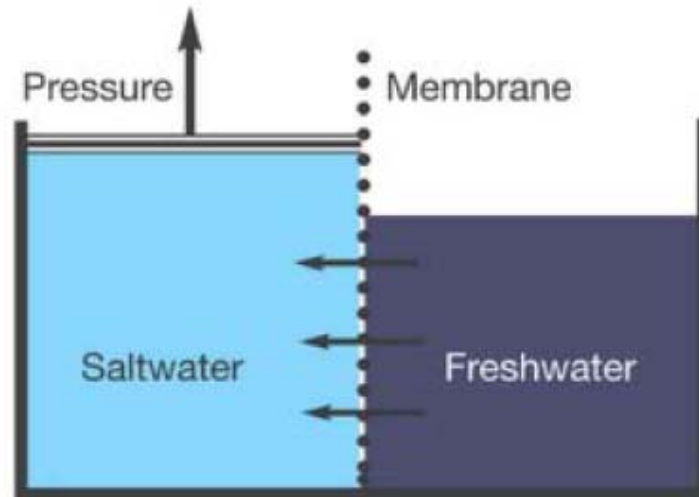


3.1. Ενέργεια από κλίση – Αγωγιμότητα (ωσμωτική ενέργεια)



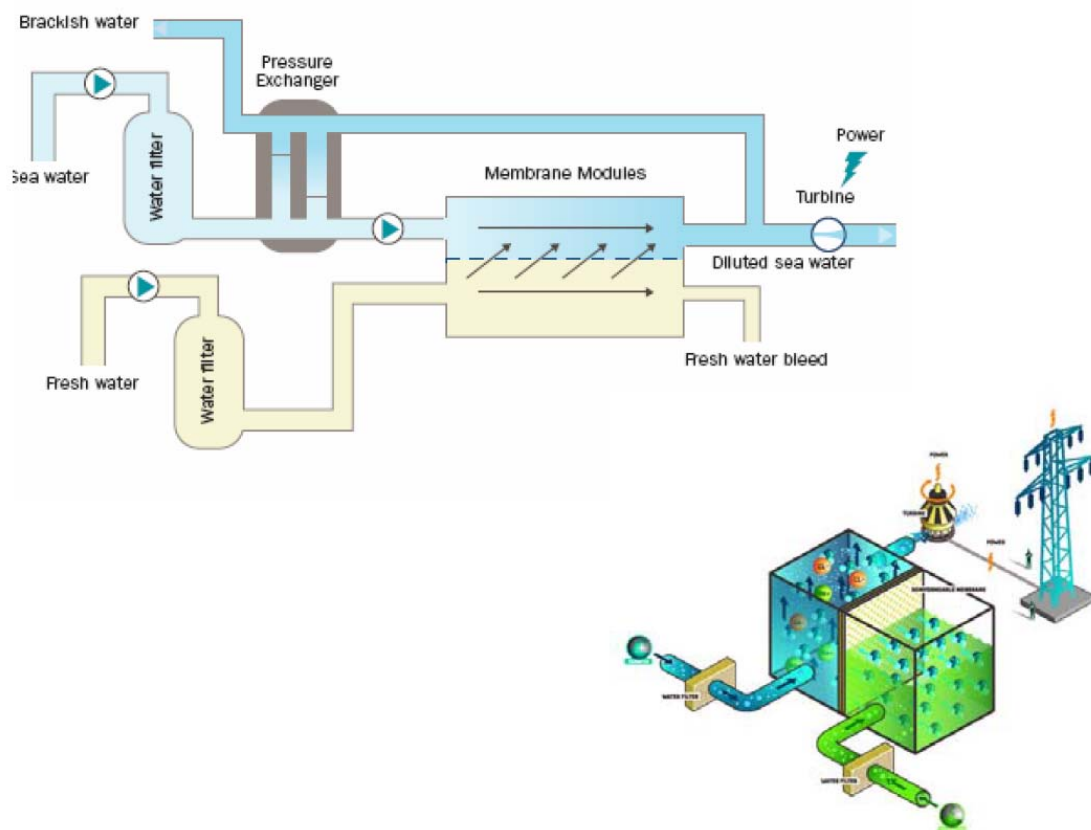
Θα μπορούσε να είναι κατάλληλη μορφή παραγωγής ενέργειας για μεγάλες πόλεις , κοντά σε εκβολές ποταμών ώστε να μην χρειάζεται μεταφορά γλυκού νερού από άλλη πηγή. Μία εγκατάσταση για την παραγωγή 25 MW έχει τις διαστάσεις ενός γηπέδου ποδοσφαίρου.

HOW DOES IT WORK?



Pressure retarded osmosis
(from Statkraft)

Η νέα τεχνολογία στηρίζεται στην αρχή της όσμωσης, και συγκεκριμένα στη διάχυση του νερού διαμέσω μίας ημιπερατής μεμβράνης. Γλυκό νερό και θαλασσινό νερό οδηγούνται σε ξεχωριστά δοχεία τα οποία διαχωρίζονται μέσω μίας τεχνητής μεμβράνης. Το γλυκό νερό διαπερνά τη μεμβράνη και «πιέζει» το θαλασσινό νερό . Η πίεση αυτή μπορεί να οδηγηθεί σε τουρμπίνα για την παραγωγή ενέργειας.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ.

4.1 Υδρογόνο

Ήδη από τις αρχές του 1950 έκανε δειλά την εμφάνισή του, με μορφή φιλοσοφικού στοχασμού το ενεργειακό πρόβλημα. Παρά το γεγονός ότι το 1950 τα εκτιμώμενα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα είχαν επάρκεια 20 χρόνων, επικρατούσε κάποια νηφαλιότητα σε σχέση με την ενεργειακή τροφοδότηση. Με την εμφάνιση της ενεργειακής κρίσης του 1973 άρχισε και η συνειδητοποίηση του ενεργειακού προβλήματος.

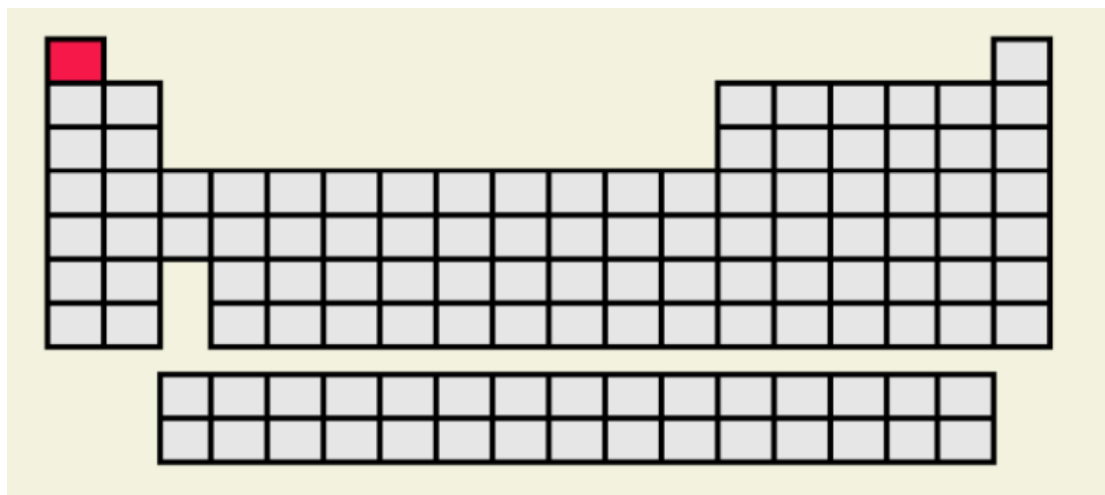
Μια πολλά υποσχόμενη στρατηγική αντιμετώπισης του ενεργειακού προβλήματος είναι η εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για συνδυασμένη παραγωγή ενέργειας και υδρογόνου. Αυτή η οικονομία «καθαρής ενέργειας»-υδρογόνου, στοχεύει στην όσο το δυνατόν συντομότερη αντικατάσταση των συμβατικών ορυκτών καυσίμων από το υδρογόνο. Τα οφέλη θα είναι πολλαπλά. Ενεργειακή αυτάρκεια, οικονομική ανεξάρτηση από την οικονομία των υδρογονανθράκων, ενεργειακή αποκέντρωση και προστασία του περιβάλλοντος.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι να παρουσιάσει τις εξελίξεις στην τεχνολογία του υδρογόνου, ως φορέα ενέργειας, την συνδυασμένη παραγωγή του από συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τις προοπτικές που ανοίγονται στο μέλλον από την οικονομία υδρογόνου. Στοχεύουμε η διπλωματική αυτή να είναι ακόμα μια ενίσχυση στις στρατηγικές για ταχύτερη ενεργειακή ανεξάρτηση από τους υδρογονάνθρακες και την είσοδο σε μια οικονομία καθαρής ενέργειας. Η διπλωματική εργασία απευθύνεται σε άτομα τα όποια αναζητούν μια συνολική εικόνα των τεχνικών λύσεων στην τεχνολογία υδρογόνου και την συνδυασμένη παραγωγή του από συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

4.1.1 Γενικά και ιστορικά στοιχεία

ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το υδρογόνο είναι ένα χημικό στοιχείο και το συμβολίζουμε με το αγγλικό γράμμα **H**. Στο περιοδικό σύστημα βρίσκεται στην πρώτη περίοδο, και στην πρώτη ομάδα. Βρίσκεται δηλαδή στην πρώτη θέση.



Το υδρογόνο είναι το στοιχείο με τη μεγαλύτερη αφθονία στο σύμπαν. Στη γη, η ποσότητα του υδρογόνου είναι πολύ μικρότερη από αυτήν του σύμπαντος. Σε σχέση με το συνολικό βάρος της γης, είναι περίπου σε αναλογία 0.12% προς όλο τον όγκο της γης και σε σχέση μόνο με την γήινη επιφάνεια σε ποσοστό 1.02% . Παρόλα αυτά κάθε έκτο άτομο στην γήινη επιφάνεια είναι άτομο υδρογόνου.

Είναι συστατικό στοιχείο του νερού σε αναλογία με τη μάζα του νερού 11.19% και σχεδόν όλων των οργανικών ενώσεων, οπότε υδρογόνο βρίσκουμε σε χημικές ενώσεις σχεδόν σε όλους τους ζωτικούς οργανισμούς. Παρόλα αυτά σε καθαρή μορφή δεν εμφανίζεται πάνω στην γη.

Το υδρογόνο είναι το ελαφρύτερο εκ των χημικών στοιχείων. Το συνηθέστερο ισότοπο, αποτελείται από ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο και ονομάζεται πρώτιο. Το πρώτιο έχει ατομική μάζα 1.008, το δευτέριο με ατομική μάζα 2.014 έχει ένα επιπρόσθετο νετρόνιο και το τρίτιο με ατομική μάζα 3.016, έχει δύο νετρόνια επιπλέον στον πυρήνα.



Σε κανονικές συνθήκες, δηλαδή συνθήκες όπως εμφανίζονται στην γη, δεν παρουσιάζεται το ατομικό υδρογόνο. Παρά ταύτα, εμφανίζεται ως δυατομικό μόριο H_2 σε μορφή άοσμου και άχρωμου αερίου.

ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το υδρογόνο ανακαλύφθηκε από τον Άγγλο χημικό και φυσικό Henry Cavendish το έτος 1766, όταν πειραματιζόταν με υδράργυρο και με διάφορα οξέα. Όταν ένωσε τα δύο αυτά στοιχεία, εμφανίστηκαν στο μείγμα μικρές φουσκάλες αερίου. Σε περαιτέρω ανάλυση του παραγόμενου αερίου, δεν μπόρεσε να το αναγνωρίσει ως κάποια από τις δύο ουσίες (υδράργυρος, οξέα). Παρότι υπέθεσε λάθος ότι το υδρογόνο ήταν συστατικό του υδράργυρου, μπόρεσε να περιγράψει καλά τις ιδιότητες του.



Henry Cavendish

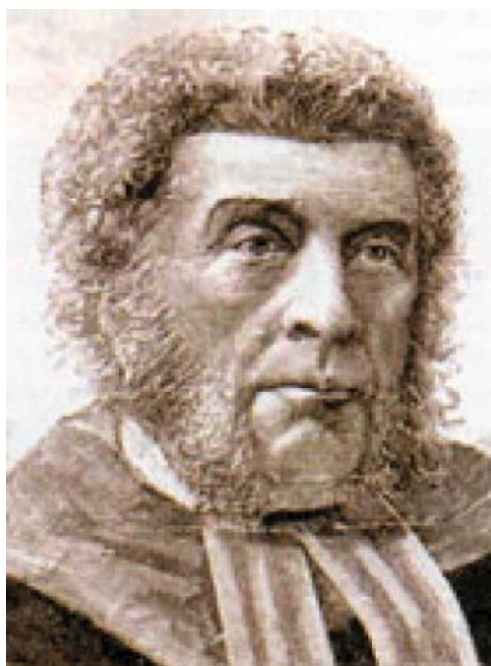
Μια πιο λεπτομερής ανάλυση πραγματοποιήθηκε από τον Antoine Lavoisier. Ο Γάλλος χημικός ανακάλυψε το αέριο στα 1787, παράλληλα με τον Cavendish, όταν ήθελε σε ένα πείραμά του να δείξει ότι σε χημικές αντιδράσεις δεν παράγεται ή χάνεται ποσότητα μάζας. Θέρμανε νερό σε ένα κλειστό δοχείο κι άφησε τον ατμό σε άλλο σημείο να υγροποιηθεί. Με αυτόν τον τρόπο διαπίστωσε ότι η μάζα του υγροποιημένου ατμού ήταν λίγο μικρότερη από την αρχική μάζα. Όμως δημιουργήθηκε ένα αέριο του οποίου η μάζα, αντιστοιχούσε στην εκλιπούσα μάζα. Έτσι ανακάλυψε ένα νέο αέριο και ταυτόχρονα απέδειξε και την θεωρία του για την αρχή διατήρησης της μάζας.



Antoine Lavoisier

Ο **Lavoisier** προχώρησε σε περαιτέρω εξέταση του αερίου με μια διαδικασία στην οποία έκαψε το αέριο. Το ονόμασε αρχικά «εύφλεκτο αέρα». Σε επόμενα πειράματα που έκανε, έδειξε ότι από το αέριο μπορεί και αντίστροφα να παραχθεί νερό. Το ονόμασε έτσι hydro-gene(υδρο-γόνο).

Στα 1839 ο Sir William Grove έδειξε την λειτουργικότητα ενός κυττάρου καυσίμου που χρησιμοποιούσε υδρογόνο. Το κύτταρο καυσίμου αποτελούνταν από θεϊκό οξύ και ηλεκτρόδιο πλατίνας.



Sir William Grove

Με την ανακάλυψη της δυναμοηλεκτρικής αρχής από τον Werner von Siemens στα 1866 και την περαιτέρω εξέλιξη των συμβατικών γαλβανικών στοιχείων, το κύτταρο καυσίμου έχασε αρχικά τη σημαντικότητά του στο τέλος του 19ου αιώνα.

ΧΡΟΝΟΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΑΝΑΚΑΛΥΨΕΩΝ

- 1766 Ανακάλυψη του «εύφλεκτου αερίου» (Cavendish)
- 1785 Βάφτιση «υδρογόνου» (Lavoisier)
- 1800 Πρώτη παραγωγή από ηλεκτρόλυση (Nicholson and Carlyle)
- 1839 Κύτταρο καυσίμου (Grove)
- 1898 Πρώτη υγροποίηση (Dewar)
- 1929 Παραγωγή καθαρού παρά-υδρογόνου
- 1931 Ανακάλυψη του δευτέρου (Urey)
- 1935 Σύνθεση του τρίτου (Rutherford)

4.1.2 Φυσικές, χημικές και μαγνητικές ιδιότητες

ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

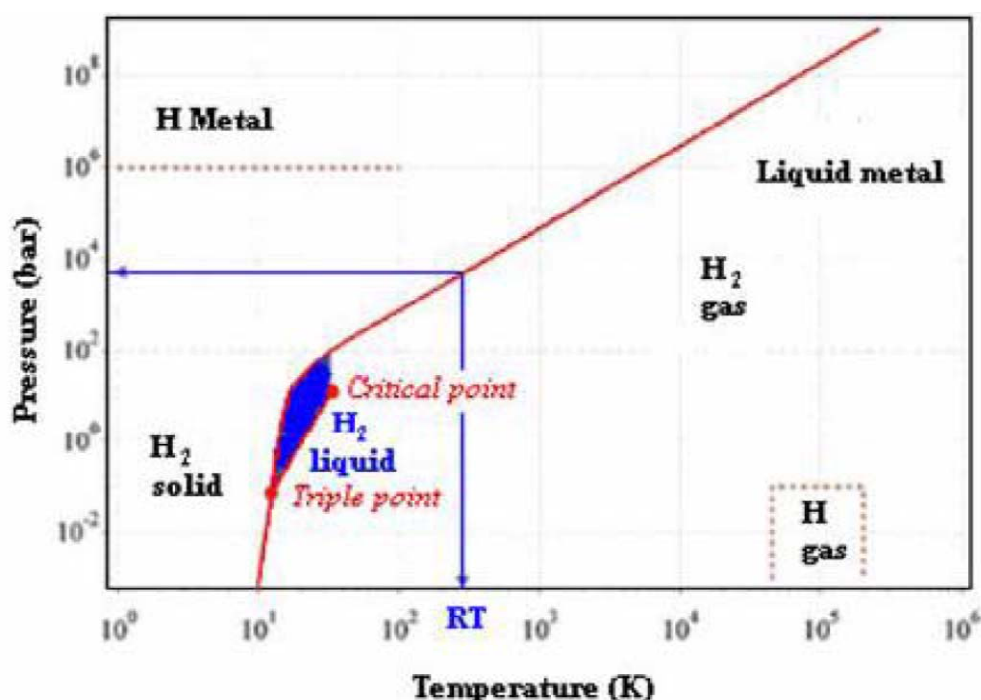
Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο εύρος θερμοκρασίας, ακόμα και σε πολύ υψηλές πιέσεις ως ιδανικό αέριο.

Στις κανονικές συνθήκες εκφράζεται ως αέριο και έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Εύφλεκτο
- Άχρωμο
- Άοσμο
- Άγευστο
- Μη δηλητηριώδες
- Μη οξειδωτικό
- Αμέταλλο
- Δυατομικό

Δεν είναι βλαβερό για την υγεία, όσο δεν αραιώνει πολύ το οξυγόνο του αέρα.

Διάγραμμα μετάβασης καταστάσεων



Σε θερμοκρασίες κάτω από 20.39 K (-252,76 °C), υγροποιείται το αέριο σε ένα καθαρό άχρωμο υγρό, το υγρό υδρογόνο. Μειώνοντας κι άλλο την θερμοκρασία στους 14 K (-259,2 °C), μετατρέπεται το υδρογόνο σε μια μορφή ζελέ η οποία έχει την ονομασία «slush», πριν φτάσει να παγώσει και να σχηματίσει ένα κρυσταλλικό εξαγωνικό στερεό στοιχείο, στο οποίο κάθε μόριο περιβάλλεται από 12 γειτονικά μόρια. Το «slush» έχει σε σχέση με το υγρό υδρογόνο μεγαλύτερη πυκνότητα, η οποία δικαιολογεί και την χρησιμοποίησή του στις διαστημικές αποστολές. Αντίθετα από το He(ήλιο), δεν παρουσιάζεται κατά την υγροποίηση του απλού υδρογόνου(πρώτιου) υπερευστότητα. Συνήθως το ισότοπο δευτέριο, μπορεί να γίνει υπέρυστο.

Το σημείο «Triple point» του υδρογόνου, είναι το σημείο στο οποίο εμφανίζονται και οι τρεις καταστάσεις(στερεά, υγρή, αέρια) του υδρογόνου. Το σημείο αυτό είναι ένα σημείο αναφοράς της διεθνούς θερμοκρασιακής κλίμακας. Κυμαίνεται σε μια θερμοκρασία από 13.8K 15 και πίεση 7.1kPa. Το κρίσιμο σημείο (Critical point) βρίσκεται στους 33.18K και 13.0bar.

Κάτω από μεγάλες πιέσεις, όπως π.χ. υπάρχουν σε αέριους πλανήτες, κατά πάσα πιθανότητα δημιουργείται υδρογόνο και γίνεται ηλεκτρικά αγωγίμο. Για αυτήν την κατάσταση δεν υπάρχουν πολλά πειραματικά δεδομένα διότι η παραγωγή στο εργαστήριο είναι πολύ δύσκολη και η κατάσταση αυτή πολύ βραχυχρόνια.

Παρόλα αυτά το 1996 μια ομάδα επιστημόνων στο Lawrence Livermore National Laboratory απρόσμενα απέδειξε την ύπαρξη του μεταλλικού υδρογόνου. Η κατάσταση αυτή διήρκησε περίπου 1μs. Υποθέτουμε ότι κάτω από υψηλή πίεση παραγόμενο μεταλλικό υδρογόνο μπορεί εν μέρει να παραμείνει σε αυτήν την κατάσταση, εάν ξαναβρεθεί σε περιβάλλον με κανονικές συνθήκες.

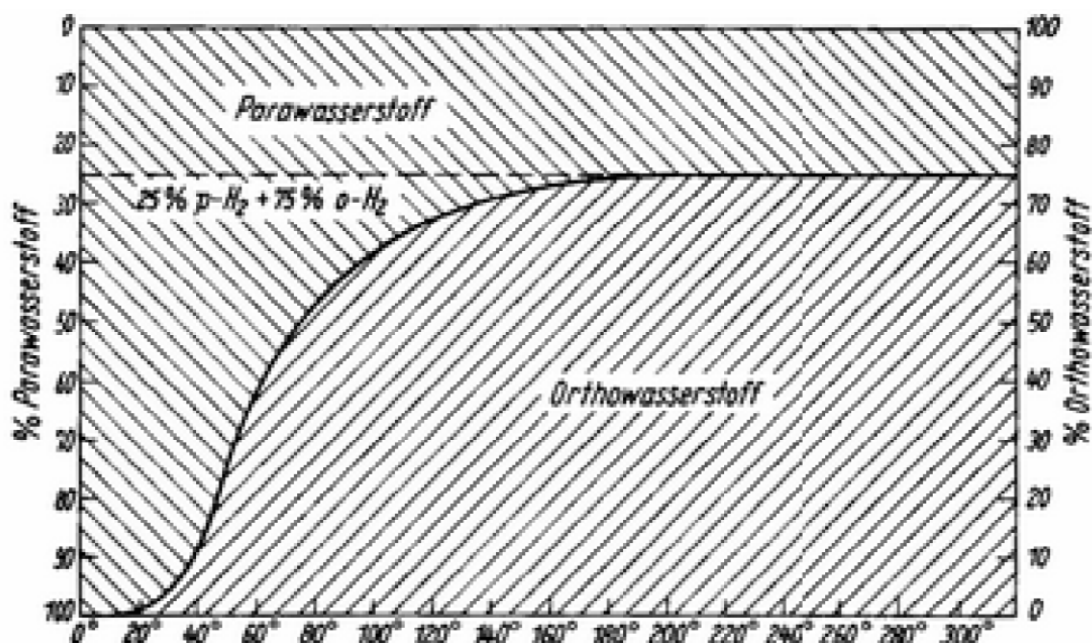
Εάν καταφέρουμε να αποδείξουμε την ορθότητα αυτής της υπόθεσης, σίγουρα θα είναι ένα πολύ ενδιαφέρον εργαλείο στο μέλλον.

ΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Κάτω από κανονικές συνθήκες το αέριο υδρογόνο είναι ένα μείγμα δύο μοριακών καταστάσεων, οι οποίες διαφέρουν από την κατεύθυνση των σπιν στον πυρήνα. Αυτές οι δύο μορφές ονομάζονται ορθο-υδρογόνο και παρα-υδρογόνο, και συμβολίζονται με $o-H_2$ και $p-H_2$. Στο ορθο-υδρογόνο τα σπιν μεταξύ των δύο ατόμων του μορίου έχουν την ίδια παράλληλη κατεύθυνση, ενώ στο παρα-υδρογόνο εμφανίζουν αντιπαράλληλη κατεύθυνση. Το ορθο-υδρογόνο είναι ελαφρώς μαγνητικό επειδή τα σπιν του μορίου βρίσκονται σε ίδια περιστροφική κατεύθυνση και παράγουν δυο ομόρροπα προστιθέμενα μαγνητικά πεδία, ενώ το παρα-υδρογόνο δεν είναι μαγνητικό. Το ορθο-υδρογόνο έχει μεγαλύτερη ενέργεια από τα δύο. Κατά την μετατροπή από ορθο-υδρογόνο σε παρα-υδρογόνο ελευθερώνονται σε κανονικές συνθήκες 0.08kJ/mol . Η τιμή αυτή εξαρτάται από την θερμοκρασία αλλά όχι από την πίεση. Οι φυσιολογικές ιδιότητες των δύο αυτών ειδών υδρογόνου διαφέρουν ελάχιστα. Έτσι για παράδειγμα το σημείο ζέσεως και τήξης του παρα-υδρογόνου βρίσκεται 0.1K κάτω από το σημεία ζέσεως και τήξης του ορθο-υδρογόνου. Περισσότερες διαφορές εμφανίζονται στην αποθήκευση θερμότητας και στην θερμική αγωγή. Αυτές οι διαφορές χρησιμοποιούνται και για την εύρεση του ποσοστού περιεκτικότητας ενός μείγματος.

Στο σημείο απόλυτης μηδενικής θερμοκρασίας 0K , εμφανίζεται μόνο το παρα-υδρογόνο. Υπό κανονικές συνθήκες βρίσκεται το 25% του υδρογόνου ως παρα-υδρογόνο και 75% ως ορθο-υδρογόνου.

Θεωρητικοί υπολογισμοί καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι το ποσοστό του ορθο-υδρογόνου δεν μπορεί να υπερβεί το παραπάνω ποσοστό.



Στην βιομηχανική παραγωγή υδρογόνου παίζει πολύ σημαντικό ρόλο η παραπάνω ισορροπία. Η αλλαγή των πυρήνων στον αντιπαράλληλο προσανατολισμό συμβαίνει στην ψύξη, με πολύ αργό ρυθμό, λόγω της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στους πυρήνες, η οποία είναι πολύ ασθενής. Για τον λόγο αυτό οι επιστήμονες προσπαθούν να επιταχύνουν την ισορροπία με χρήση καταλυτών όπως για παράδειγμα $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Με ακτινοβολία μπορούμε να παράγουμε ελεύθερα άτομα υδρογόνου και ιόντα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αυτά ως καταλύτες.

Ποκνότητα

Η πιο αξιοσημείωτη ιδιότητα του υδρογόνου είναι η μικρή του πυκνότητα που είναι 0.089886 kg/m^3 (στους 0 C και 1 bar). Στις περισσότερες χρήσεις λόγω της μικρής πυκνότητας του υδρογόνου χρειαζόμαστε να το συμπυκνώσουμε ή και να το υγροποιήσουμε. Το μοριακό υδρογόνο είναι 14.4 φορές ελαφρότερο από τον αέρα και γι αυτό εμφανίζει ισχυρές δυνάμεις πλευστότητας οι οποίες διαρκούν ως και τους 22 K , σημείο το οποίο βρίσκεται κοντά στο σημείο ζέσεως των 20.27 K . Η πυκνότητα υγρού υδρογόνου σε πίεση 1.013 bar είναι 0.07079 kg/l και η πυκνότητα του στερεού υδρογόνου είναι 0.0763 kg/l . Παρατηρούμε έτσι ότι το υγρό και το στερεό υδρογόνο, έχουν σχεδόν τον ίδιο λόγο πυκνότητας με το νερό όπως το αέριο υδρογόνο με τον αέρα.

Ιδιότητες Διάχυσης

Λόγω της μικρής μοριακής μάζας, μερικές θερμοδυναμικές ιδιότητες έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Το υδρογόνο σε θερμοκρασία δωματίου έχει την υψηλότερη ικανότητα διάχυσης, την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα και την υψηλότερη ταχύτητα διάχυσης όλων των αερίων. Χαμηλότερο ιξώδες παρουσιάζουν μόνο τριατομικά ή πολυατομικά πραγματικά αέρια. Ο συντελεστής διάχυσης του υδρογόνου στον αέρα είναι περίπου 4 φορές μεγαλύτερος από τον συντελεστή διάχυσης του αέρα σε αέρα. Η υψηλή ικανότητα διάχυσης του υδρογόνου το καθιστά ικανό να διαφεύγει από τα κιβώτια αποθήκευσης, από τα οποία δεν μπορούν να διαφύγουν άλλα αέρια. Για προεπιλεγμένες διατομές και ίδιες πιέσεις το ποσοστό διαρροής είναι αρκετά υψηλότερο από άλλα στοιχεία. Από άποψη τεχνικής ασφάλειας συμπεραίνουμε ότι σε περίπτωση που διαρρεύσει το υδρογόνο λόγω της μεγάλης άνωσης και διάχυσης που εμφανίζει, αναμειγνύεται με τον αέρα και δεν είναι πλέον εύφλεκτο. Αντιθέτως εάν σε αποκλεισμένο δοχείο με υδρογόνο εισέρθει αέρας, τότε μπορούν να δημιουργηθούν εύφλεκτα μείγματα.

Ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο είναι η ιδιαίτερα υψηλή ταχύτητα διάχυσης σε σίδηρο, πλατίνα και μερικά άλλα μεταβατικά μέταλλα, επειδή εμφανίζουν ευθραυστότητα λόγω του υδρογόνου. Σε συνδυασμό με μια υψηλή διαλυτότητα εμφανίζονται σε μερικά υλικά πολύ υψηλά ποσοστά διαπέρασης. Από αυτό αποκαλύπτονται τεχνικές χρησιμοποίησης αλλά και τεχνικά προβλήματα στην μεταφορά, αποθήκευση και επεξεργασία του υδρογόνου, διότι μόνο το υδρογόνο εμφανίζει αυτά τα χωρητικά όρια.

Διαλυτότητα

Η διαλυτότητα του υδρογόνου σε νερό είναι 1.6 mg/l. Το υδρογόνο διαλύεται ιδιαίτερα καλά σε μέταλλα όπως το παλλάδιο και ενώσεις παλλαδίου-ασημιού. Μικρές ακαθαρσίες επηρεάζουν πολύ την διαλυτότητα του.

Φαινόμενο Joule-Thomson

Ο ιδανικός τρόπος ψύξης αερίου χαρακτηρίζεται από μια ισενθαλπική αλλαγή κατάστασής του και δίνεται ως εξής:

$$dH = \left(\frac{\partial H}{\partial p} \right)_T dp + \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p dT = \varepsilon_T dp + c_p dT = 0$$

Με ενθαλπία $H=U+pV$, T =θερμοκρασία σε Kelvin και p =πίεση, c_p θερμική ποσότητα, ε_T το ισοθερμικό αποτέλεσμα συμπίεσης, δηλαδή το στοιχείο δεν παράγει έργο, δεν του προσφέρεται ούτε του αφαιρείται θερμότητα και η κινητική του ενέργεια παραμένει αμετάβλητη.

Η αλλαγή θερμοκρασίας στην ιδανική εκτόνωση δίνεται από τον εξής τύπο:

$$\mu = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_H = - \frac{\varepsilon_T}{c_p} = \frac{T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p - V}{c_p}$$

Για ιδανικά αέρια ο παραπάνω τύπος δίνει 0. Στα πραγματικά αέρια μπορεί λόγω των αλληλεπιδράσεων των μορίων του αερίου μεταξύ τους, μέρος της εσωτερικής ενέργειας να μετατραπεί σε δυναμική ενέργεια και λόγω αυτού να εμφανιστεί διαφορά θερμοκρασίας.

Για την περιγραφή ενός πραγματικού αερίου με χρήση της ισότητας αερίων Van-der-Waals

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v-b) = RT$$

($R=8.314 \text{ J}/(\text{mol K})$, για το υδρογόνο $a= 24.7 \text{ kPa dm}^6/\text{mol}^2$, $b = 0.0266 \text{ dm}^3/\text{mol}$.)
Αν θέσουμε την παραπάνω σχέση ίση με 0, τότε λαμβάνουμε την μέγιστη θερμοκρασία αλλαγής κατάστασης:

$$T_i = Rba^2$$

Μόνο κάτω από αυτήν τη θερμοκρασία στην εκτόνωση επιτυγχάνεται περαιτέρω ψύξη.

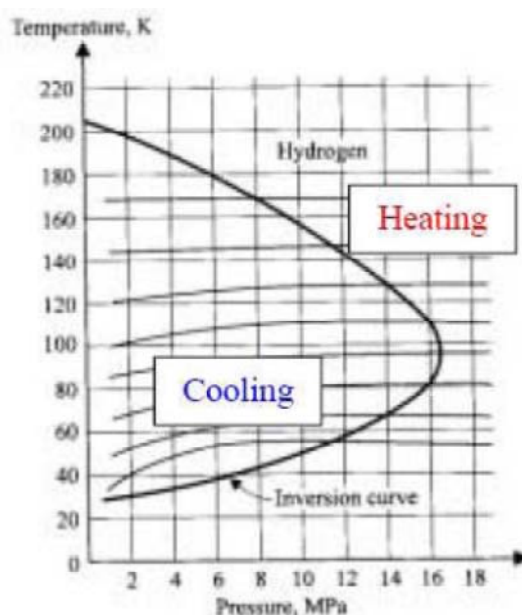


Figure 13 – The J-T inversion curve for hydrogen [17]

Διαφορετικά από το υπόλοιπο πλήθος των αερίων, αλλά όμοια με το ήλιο, το υδρογόνο παρουσιάζει σε συνθήκες περιβάλλοντος ένα αντίστροφο Joule-Thomson φαινόμενο και θερμαίνεται στην αδιαβατική εκτόνωση. Η εμφάνιση του φαινομένου είναι μικρή έτσι ώστε όταν το υδρογόνο εκτονωθεί κατά 20 MPa θερμαίνεται κατά 60C. Το φαινόμενο αυτό επιστρέφει κάτω από την θερμότητα αναστροφής κατάστασης των 203K στην αρχική του κατάσταση και μπορεί από εκεί και πέρα να οδηγήσει στην υγροποίηση του υδρογόνου με κατάλληλη πρόψυξη όπως για παράδειγμα με υγρό άζωτο.

ΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

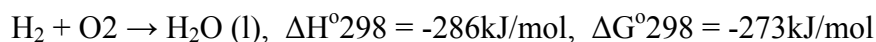
Το πρώτο τροχιακό ηλεκτρονίων περιέχει το μέγιστο 2 ηλεκτρόνια. Έτσι για το υδρογόνο υπάρχουν μόνο 3 πιθανές αντιδράσεις:

1. Απώλεια ενός ηλεκτρονίου (Οξειδωση) $\rightarrow H^+$
2. Προσθήκη ενός ηλεκτρονίου (Αναγωγή) $\rightarrow H^-$
3. Δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίων.

Στην τρίτη περίπτωση συμπεριλαμβάνονται ως αντιδρώντα στοιχεία και μη μεταλλικά στοιχεία όπως το αλογόνο, υδρογόνο, άζωτο και άνθρακας, όπως και μεταλλικά στοιχεία. Εκτός από την ένωση με ένα δεύτερο άτομο υδρογόνου, όλες οι άλλες ενώσεις ηλεκτρονιακών ζευγών με υδρογόνο, παρουσιάζουν ένα πολικό χαρακτήρα. Τα προϊόντα με τα αλκαλικά μέταλλα (1η κύρια ομάδα, Li, Na, K,...) και τις μεταλλικές γαίες (2η κύρια ομάδα, Be, Mg, Ca,...) είναι στοιχεία αλατικού τύπου υδριδίου, τα οποία εμφανίζουν ομοιοπολικές ή ιονικές ενώσεις. Η ηλεκτραρνητικότητα του υδρογόνου είναι 2,2 μετρημένη στην κλίμακα Pauling.

Σε υψηλές θερμοκρασίες και κατάλληλους καταλύτες το υδρογόνο αντιδρά με το άζωτο και παράγει αμμωνία NH_3 , σημαντικό ενδιάμεσο παράγωγο για πολλά χημικά προϊόντα, όπως π.χ λίπασμα. Με άνθρακα δημιουργεί μεθάνιο CH_4 .

Το υδρογόνο είναι εύφλεκτο αέριο, δηλαδή καίγεται με τον αέρα. Με οξυγόνο ως ενεργοποιητή αντίδρασης το υδρογόνο αντιδρά ως εξής:

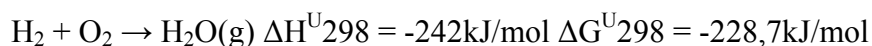


$$\Delta S^{\circ}298 = -163,3kJ/mol$$

(πολλές φορές χρησιμοποιούμε και kcal. Με 1 kcal=4,184kJ, το οποίο αντιστοιχεί σε ενθαλπία $\Delta H^{\circ}298 = -68,3$ kcal/mol). Ο εκθέτης "ο" συμβολίζει το νερό σε υγρή μορφή. Η ελεύθερη ενθαλπία G είναι μειωμένη κατά το μη χρήσιμο μηχανικό ποσοστό και συνδέεται με την παραγόμενη εντροπία ως εξής:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S.$$

Η κατώτερη ενθαλπία αντίδρασης παράγεται με ατμό νερού ως προϊόν. Τα ποσοστά για τις ενθαλπίες είναι μειωμένα κατά το ποσοστό ενέργειας εξάτμισης.



$$\Delta s^{\text{U}}_{298} = -44,6\text{kJ/mol}$$

Ανάφλεξη H₂/αέρα-μειγμάτων

Λόγω της υψηλής ενέργειας διάσπασης, η αντίδραση αυτή είναι πολύ αργή σε θερμοκρασία δωματίου. Πάνω από 550 οC, η ταχύτητα αυξάνεται έως και το σημείο όπου αναφλέγεται από μόνο του. Η αντίδραση μπορεί με χρήση καταλυτών όπως π.χ. (Palladium, Platin) να επιταχυνθεί ή και να γίνει ανάφλεξη.

Σε αέρα έχουμε τα εξής όρια ανάφλεξης:

Κάτω όριο ανάφλεξης(Lower flammability limit) σε H₂ vol% :

$$c_{\text{LFL}}(T) = c_{\text{LFL}}(300\text{K}) - \frac{3,14}{\Delta H}(T - 300\text{K}) = 0,04 - 0,013(T - 300\text{K})$$

Ανώτερο όριο ανάφλεξης(Upper flammability limit) σε H₂ vol% :

$$C_{\text{UFL}}(T) = 0,74 + 0,026(T - 300\text{K})$$

Η μικρότερη ενέργεια ανάφλεξης ενός στοιχειομετρικού μείγματος υδρογόνου αέρα είναι 0,02 mJ, η οποία είναι λίγο μικρότερη από αυτήν του μείγματος υδρογονανθράκων. Αυτό δεν συμβαίνει για αραιά ή πλούσια μείγματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις η ενέργεια ανάφλεξης είναι περίπου 10 mJ. Το στοιχειομετρικό μείγμα αέρα περιέχει 29,6% H₂.

Η θερμοκρασία της φλόγας είναι λόγω της θερμικής διάσπασης του υδρατμού περιορισμένη στους 2700 οC. Η ταχύτητα καύσης είναι αρκετά υψηλή.

Τα παραπάνω δεδομένα τιμών είναι κυρίως θεωρητικού τομέα και διαφέρουν πολύ σχετικά με το πείραμα. Έτσι για παράδειγμα η ανάφλεξη ενός μείγματος υδρογόνου-αέρα σε πολλά πειράματα επιτυγχάνεται πάνω από μία συγκέντρωση 6-8%.

<i>Vapor phase</i>		
Density, kg/m ³	1.338	1.331
Specific heat capacity		
C _p , J mol ⁻¹ K ⁻¹	24.49	24.60
C _v , J mol ⁻¹ K ⁻¹	13.10	13.2
Enthalpy, ^o J/mol	381.61	1447.4
Entropy, J mol ⁻¹ K ⁻¹	60.41	78.94
Viscosity, mPa s	1.13×10 ⁻³	1.11×10 ⁻³
Velocity of sound, m/s	355	357
Thermal conductivity,		
W m ⁻¹ K ⁻¹	16.94×10 ⁻³	16.5×10 ⁻³
Compressibility factor	0.906	0.906
Critical point		
Temperature, K	32.976	33.19
Pressure, MPa	1.29	1.325
Density, kg/m ³	31.43	30.12
Properties at STP (273.15 K, 101.3 kPa)		
Density, kg/m ³	0.0899	0.0899
Specific heat capacity		
C _p , J mol ⁻¹ K ⁻¹	30.35	28.59
C _v , J mol ⁻¹ K ⁻¹	21.87	20.3
Viscosity, mPa s	8.34×10 ⁻³	8.34×10 ⁻³
Velocity of sound, m/s	1246	1246
Thermal conductivity,		
W m ⁻¹ K ⁻¹	182.6×10 ⁻³	173.9×10 ⁻³
Dielectric constant	1.00027	1.000271
Compressibility factor	1.0005	1.00042
Prandtl number	0.6873	0.680

Συμβατική βιομηχανική χρησιμότητα

Το υδρογόνο χρησιμοποιείται σε μεγάλα ποσοστά στην πετροχημική βιομηχανία κυρίως για την αποθείωση των καυσίμων, βενζίνης. Η βιομηχανία λιπασμάτων παράγει με το υδρογόνο, το οποίο το παράγουν επί τόπου, αμμωνία. Η παραγωγή αθροιστικά σε όλο τον πλανήτη φτάνει τα 600 δισεκατομμύρια Nm³ τον χρόνο.

Η χρησιμοποίηση χοντρικά μοιράζεται ως εξής:

- Περίπου 50% για την σύνθεση αμμωνίας
- Περίπου 25% για τη διύλιση πετρελαίου
- Περίπου 25% για άλλες διάφορες χρήσεις(λιπάσματα, σύνθεση μεθανόλης, αεροδιαστημική, τεχνολογία ημιαγωγών, διάβρωση οστενιτικών χαλύβων)

Το 95% του υδρογόνου χρησιμοποιείται σε εσωτερικές διεργασίες και μόνο το 5% του υδρογόνου πάει στην αγορά. Σε πολλές διεργασίες και κυρίως στην χλωροαλκάλιο-ηλεκτρόλυση, παράγεται ως δευτερεύον προϊόν υδρογόνο, το οποίο τις περισσότερες φορές οδηγείται στην ατμόσφαιρα αχρησιμοποίητο.

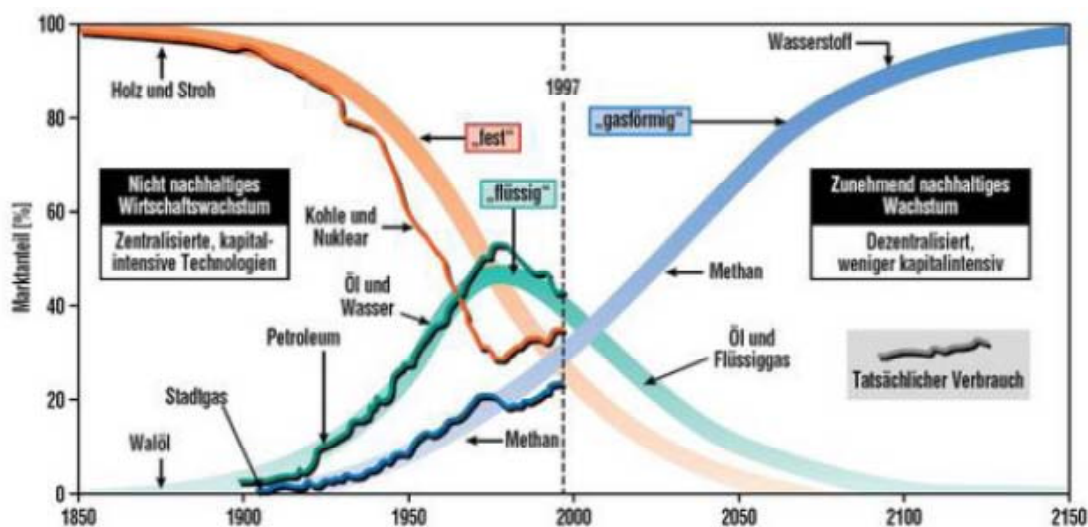
Η χρησιμοποίηση του υδρογόνου ως ενέργεια ακόμα δεν βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα, όμως είναι το κύριο μοτίβο μιας υδρογόνο-βιομηχανίας.

4.2 Υδρογόνο ως φορέας ενέργειας

4.2.1 Ενέργεια και οικονομία

Η πρόσβαση σε φτηνή ενέργεια, είναι το κύριο χαρακτηριστικό για την επιτυχία της βιομηχανικής ανάπτυξης. Ειδικότερα στη σύγχρονη κοινωνία που αναπτύσσεται ραγδαία χρησιμοποιώντας ως θεμελιώδη λίθο την ενέργεια.

Έως το 19ο αιώνα οι εταιρίες βασιζόνταν σε τοπικούς πόρους όπως ζωικά λίπη, ξύλο ή άχυρο, άνεμο και νερό. Από την εφεύρεση της ατμομηχανής και ειδικότερα τη χρησιμοποίηση για παραγωγή θερμότητας με καύση άνθρακα, ξεκίνησε η νέα εποχή της βιομηχανικής επανάστασης. Ταυτόχρονα ξεκίνησε για πρώτη φορά και η κατανάλωση φυσικών φορέων ενέργειας, που ήταν τότε το κάρβουνο. Στον 20ο αιώνα έγινε η μετάβαση από τους στερεούς φορείς ενέργειας(καύσιμα) σε υγρούς φορείς ενέργειας(καύσιμα) και κυρίως το πετρέλαιο και σύγχρονα σε αέριους φορείς ενέργειας, όπως π.χ το υγραέριο και μελλοντικά το υδρογόνο. Αυτές οι μεταβάσεις επιτεύχθηκαν με την εξέλιξη της τεχνολογίας, για την οικονομία και τη μείωση βλαβερών προϊόντων.



Γενική μετάβαση φορέων ενέργειας

Η μετάβαση ανάμεσα στις φάσεις των κυρίων φορέων ενέργειας από στερεό σε υγρό και ύστερα σε αέριο (όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα), συνοδεύεται από μια συνεχή μείωση του ποσοστού του άνθρακα. Για παράδειγμα, μια αύξηση των ατόμων υδρογόνου, ανά άτομο άνθρακα, από 0 (καθαρός άνθρακας) σε 8 (για H₂). Στη σημερινή κατανάλωση ενέργειας περίπου τα 2/3 των καταναλισκόμενων ατόμων, είναι άτομα υδρογόνου. Στην καύση άνθρακα παράγεται CO₂, ενώ σε **καύση** υδρογόνου παράγεται καθαρό νερό, οπότε έχουμε σταδιακή μείωση ενός από τους κύριους παράγοντες που ευθύνονται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το CO₂.

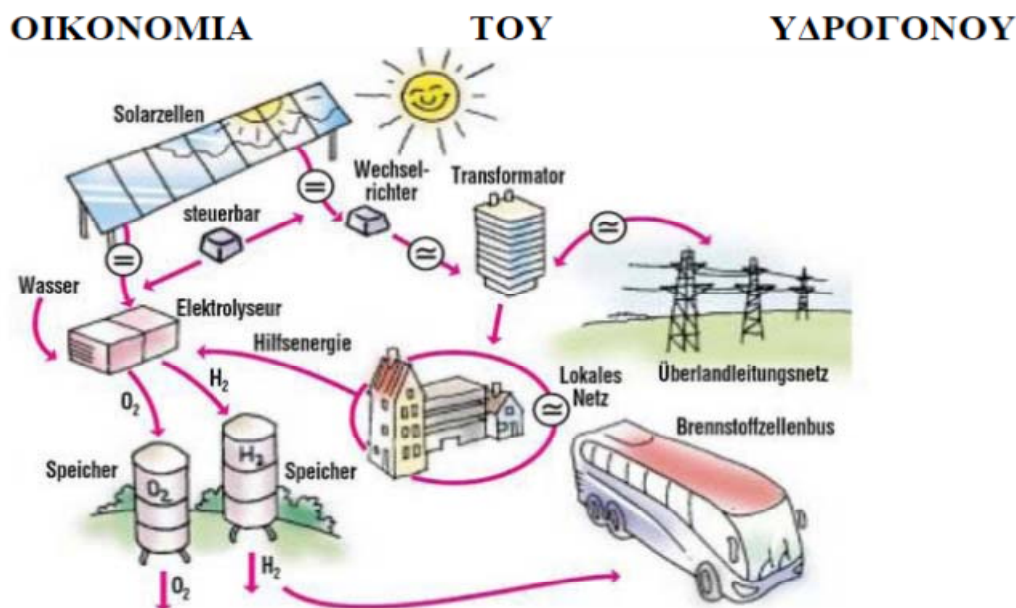
Η συνήθης εισηγμένη κατανάλωση ενέργειας από τα λιγότερο φιλικά προς το περιβάλλον ορυκτά καύσιμα, μειώνεται με κατεύθυνση τα φιλικότερα καύσιμα, αλλά προϋποθέτει αύξηση της διαδικασίας παραγωγής ενέργειας και περισσότερη χρησιμοποίηση των ανανεώσιμων πηγών, στις οποίες πηγές συμπεριλαμβάνονται η ηλιακή, η αιολική και η γεωθερμική ενέργεια.

Για μια πιο εντατική χρησιμοποίηση της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και ειδικότερα της ηλιακής ενέργειας είναι (λόγω του χρονικού ασυγχρονισμού, παραγωγής και ζήτησης) αναγκαία η ύπαρξη αποθηκευτικών φορέων ενέργειας.

Με την ύπαρξη αποθηκευτικών φορέων ενέργειας, καλύπτονται όχι μόνο κενά στην ζήτηση στα διάφορα χρονικά διαστήματα, αλλά και οι διάφορες οικονομικές αναταραχές. Έτσι δημιουργείται μια ευέλικτη αγορά ενέργειας, στην οποία η παραγωγή και η κατανάλωση αποκεντρώνεται και γίνεται πιο ήπια.

Το υδρογόνο είναι ένας χημικός φορέας ενέργειας, καθολικός στην παραγωγή του και στην χρησιμοποίησή του.

Σημείωση: Το υδρογόνο είναι ένας ευέλικτος παραγόμενος χημικός φορέας και όχι πηγή ενέργειας.



4.2.2 Παραγωγή-Αποθήκευση

ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Οι διαδικασίες παραγωγής έχουν αναπτυχθεί ιδιαίτερα κι έχουν καθιερωθεί στη βιομηχανία. Στην οικονομία του υδρογόνου μπορούμε όπως και στην οικονομία ηλεκτρικής ενέργειας, να κάνουμε το διαχωρισμό ανάμεσα στο οικολογικό H₂, το οποίο παράγεται με τη χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών όπως αυτή του ήλιου, της βιομάζας και του αέρα και το μη οικολογικό υδρογόνο, το οποίο παράγεται από ορυκτές πρώτες ύλες και με πυρηνική σχάση.

Το συνεχώς αυξανόμενο οικολογικό ποσοστό ενισχύει την αποκέντρωση του δικτύου διανομής λόγω του ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, βρίσκονται διάσπαρτες. Αυτή η αποκέντρωση έχει διάφορα πλεονεκτήματα:

- Μείωση των αναγκαίων μεταφορών από το σημείο παραγωγής έως τον καταναλωτή.
- Ταυτοποίηση του καταναλωτή με την τεχνολογία και
- Σταθεροποίηση της προμήθειας λόγω λιγότερων καταναλωτών στο δίκτυο.

Το μη οικολογικό υδρογόνο παράγεται κυρίως κεντρικά και συμπεριλαμβάνει και βαθμό απορρόφησης του CO₂. Για περίπου 20 χρόνια ακόμα η κεντρική παραγωγή θα γίνεται με την υπερθέρμανση ατμού από υγραέριο και θα παραμείνει ο φθηνότερος τρόπος παραγωγής υδρογόνου.

Σε μερικές χώρες κυρίως ΗΠΑ, Ιαπωνία και Γαλλία, ενσωματώνονται και επιταχύνονται διαδικασίες παραγωγής υδρογόνου με χημικές διαδικασίες ή υψηλής θερμοκρασίας ηλεκτρόλυση σε αντιδραστήρες διάσπασης καινούργιας γενιάς. Αυτός ο τρόπος έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του CO₂.

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ

Λόγω της μέχρι τώρα χρήσης, δεν συναντάμε μεγάλα αποθηκευτικά μέσα H₂ σε ανοιχτούς χώρους, αλλά συναντάμε αποθηκευτικά μέσα σε άλλους χώρους όπως πρατήρια. Μικρής κλίμακας αποθήκευση πραγματοποιείται στη σήμερον εποχή σε μικρού μεγέθους φιάλες υψηλής πίεσης(200-350bar). Λόγω της μικρής πυκνότητας που έχει το H₂, χρειάζεται σχετικά πολύ χώρο. Ειδικά σε περιπτώσεις μεταφοράς είναι απαραίτητη η συμπίεσή του, σε υγρή και στερεή μορφή και η αποθήκευσή του σε αυτές τις μορφές. Αυτό αποτελεί και τον κύριο τομέα εξέλιξης.

4.2.3 Διανομή-Εμπόριο-κατανάλωση

ΔΙΑΝΟΜΗ, ΥΠΟΔΟΜΗ, ΔΙΑΠΡΑΓΜΑΤΕΥΣΗ ΤΙΜΩΝ

Προς το παρόν δεν υπάρχει ακόμα ιδιαίτερη διανομή υδρογόνου σε ιδιώτες. Η διανομή του υδρογόνου γίνεται ακόμα και τώρα μέσω εξελεγμένων αγωγών, δίκτυο υγραερίου, σε καθαρή μορφή ή αναμειγμένο με άλλα εύφλεκτα αέρια.

Πρατήρια καυσίμων έχουν ήδη εξελιχθεί και παρέχουν αντλίες υδρογόνου. Σε αυτές διανέμεται συμπιεσμένο ή και υγρό υδρογόνο σε κινούμενα οχήματα. Τα πρατήρια εφοδιάζονται με βυτιοφόρα οχήματα ή έχουν τοπικό αναμορφωτή ή τοπικό ηλεκτρολύτη, οι οποίοι ανανεώνουν τα ενδιάμεσα αποθέματα.

Λόγω της χαμηλής πυκνότητας του υδρογόνου, η μεταφορά του είναι πάντα ασύμφορη, για το λόγο αυτό κατά δυνατότητα θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ήδη υπάρχοντα δίκτυα μεταφοράς.

ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ

Όπως είπαμε και πριν το μεγαλύτερο μέρος του υδρογόνου παράγεται επί τόπου και καταναλώνεται επίσης επί τόπου. Αυτό πραγματοποιείται σε μια εξειδικευμένη βιομηχανία με κατάλληλο προσωπικό.

Στα πρατήρια ανεφοδιάζονται τα οχήματα με υδρογόνο, στο σπίτι ένας αναμορφωτής ή ηλεκτρολύτης, παράγει το υδρογόνο, το οποίο χρησιμοποιείται για την περαιτέρω παραγωγή θερμότητας και ύστερα κινητικής δύναμης για την παραγωγή ρεύματος, ή θερμότητας για το σπίτι. Οι μπαταρίες και οι συσσωρευτές θα μπορούσαν να αντικατασταθούν με μικρά ανεφοδιαζόμενα μέσα υδρογόνου και κύτταρα καυσίμου. Το υδρογόνο είναι καθολικό στη χρησιμοποίησή του, λόγω του ότι μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για θερμική χρήση σε συμβατικούς κύκλους παραγωγής ή για την αποδοτική ηλεκτροχημική εφαρμογή σε κύτταρα καυσίμου.

Εάν το υδρογόνο χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο των ορυκτών καυσίμων των οχημάτων, ή αν χρησιμοποιηθούν στην αρχή τοπικές μεγάλες μονάδες κυττάρων καυσίμου για τη μετατροπή θερμότητας σε κινητική ενέργεια, θα εξαρτηθεί κυρίως από το γεγονός της μείωσης της τιμής των κυττάρων καυσίμου κι από το εάν μπορεί να αυξηθεί ο χρόνος ζωής για τις τοπικές μονάδες.

4.3 Παραγωγή υδρογόνου

Όπως αναφέραμε και στα παραπάνω το υδρογόνο εμφανίζεται στη γη σχεδόν μόνο σε χημικές ενώσεις. Έτσι το υδρογόνο δεν είναι πρωταρχική πηγή, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως χημικός αποθηκευτής ενέργειας.

Στα παρακάτω θα αναλύσουμε μερικές τρέχουσες διαδικασίες για την παραγωγή υδρογόνου, οι οποίες κυρίως διαχωρίζονται από την κατάσταση του υδρογόνου, δηλαδή αν βρίσκεται σε οργανική μορφή, ή σε ενώσεις άνθρακα(αναμόρφωση), ή σε μορφή νερού(ηλεκτρόλυση).

4.3.1 Ηλεκτρόλυση νερού

Υπό τον όρο ηλεκτρόλυση εννοούμε την διάσπαση μιας χημικής ένωσης κάτω από την επίδραση ηλεκτρικού ρεύματος.

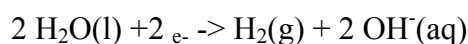
Η ηλεκτρόλυση είναι η αντίστροφη της διαδικασίας μιας μπαταρίας, της εκφόρτισης ενός συσσωρευτή ή της λειτουργίας ενός κυττάρου καυσίμου. Στην ηλεκτρόλυση μετατρέπεται η ηλεκτρική σε χημική ενέργεια. Ειδικά στην περίπτωση της διάσπασης νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο, αυτός είναι και ο σκοπός της ηλεκτρόλυσης. Η ηλεκτρόλυση δεν έχει παράγωγα CO₂, γεγονός το οποίο την κάνει πολύ φιλική ως διαδικασία παραγωγής υδρογόνου για αποθήκευση ανανεώσιμων ροών ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαδικασία αυτή είναι κυρίως φτηνή όταν υπάρχει φτηνή τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας και το παραγόμενο καθαρό οξυγόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκ περεταιίρω, παρά να ελευθερωθεί άσκοπα στον αέρα.

Η μορφή αυτής της μεταβολής από νερό σε υδρογόνο και οξυγόνο, αποδείχτηκε πρώτη φορά στα 1800 από τον γερμανό χημικό Johann Wilhelm Ritter. Το 1927 φτιάχτηκε η πρώτη μεγάλη εγκατάσταση από τη Norsk Hydro στη Νορβηγία.

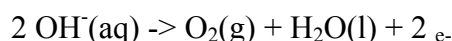
Την ηλεκτρόλυση τη διαχωρίζουμε σε χαμηλής θερμοκρασίας και υψηλής θερμοκρασίας, χαμηλής πίεσης(πίεση περιβάλλοντος) και υψηλής πίεσης ηλεκτρόλυση(έως και 3 MPa) . Σχετικά με την κατασκευή διαχωρίζουμε τους ηλεκτρολύτες σε Alkali, PEM και SOFC ηλεκτρολύτες.

Η παλαιότερη και πιο αξιόπιστη τεχνολογία είναι η αλκαλική ηλεκτρόλυση, η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλή τιμή ρεύματος και συχνά εφαρμόζεται σε συνδυασμό με υδρογεννήτριες ιδιαίτερα στη Νορβηγία και στην Ισλανδία. Η αντίδραση συμβαίνει μέσα σε ένα δοχείο το οποίο είναι γεμάτο από αγωγίμους ηλεκτρολύτες (άλατα, οξέα) και περιέχει 2 ηλεκτρόδια τα οποία διαρρέονται από συνεχές ρεύμα. Η διαδικασία παραγωγής δουλεύει σε 2 στάδια.

Στην κάθοδο:

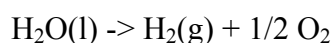


Και στην άνοδο:



(όπου l=υγρό, g=αέριο, aq=διάλυμα σε νερό)

Ουσιαστικά στη διαδικασία αυτή στην άνοδο απελευθερώνονται ηλεκτρόνια τα οποία απορροφούνται από την κάθοδο. Αυτές οι 2 διαδικασίες αποτελούν μαζί μια ολοκληρωμένη αντίδραση στην οποία είναι φανερή η διαδικασία διαχωρισμού, δηλαδή το νερό διασπάται στα 2 βασικά του συστατικά το υδρογόνο και το οξυγόνο.



Επειδή συνήθως το φυσικό νερό είναι κακώς αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος και περιέχει λίγα ιόντα, συνήθως το εμπλουτίζουμε γι αυτό το λόγο με οξέα, τα οποία αυξάνουν την ποιότητά του με οικονομικό τρόπο. Με μια σχεδόν ίδια αντίδραση κατά την παραγωγή χλωρίου παράγεται και ως δευτερεύον προϊόν υδρογόνο.

Σύμφωνα με την ελεύθερη ενθαλπία ΔG , την σταθερά Faraday $F=96487\text{As/mol}$ και τη σταθερά Avogadro $N_A=6,022 \text{E}23 \text{ l/mol}$ η ιδανική αντίστροφη τάση διάσπασης κυττάρου είναι σε κανονικές συνθήκες ($T_0=298,15\text{K}$, $p_0=101,3\text{kPa}$) 1,23 Volt.

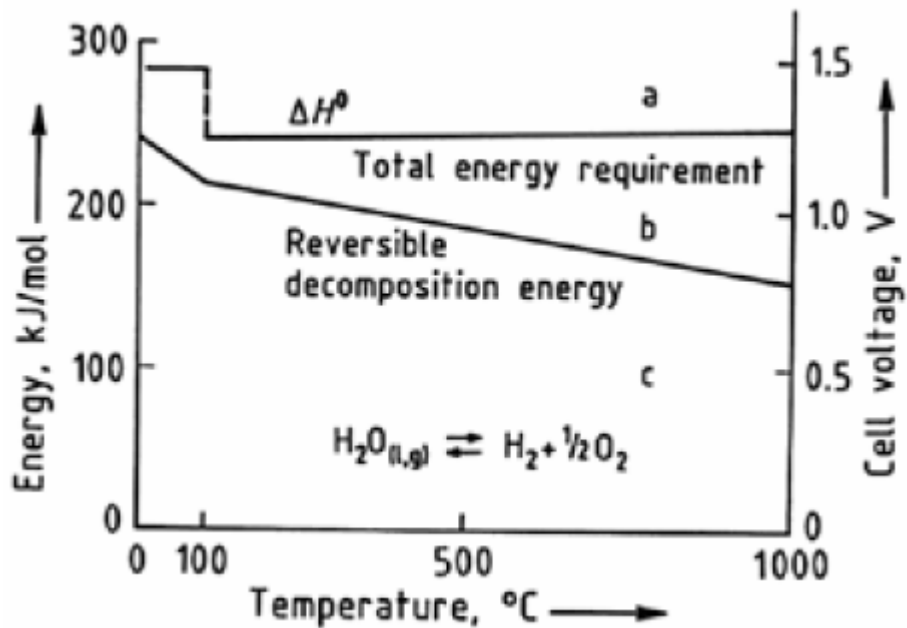
$$E_{\text{rev}} = \frac{\Delta G}{nF} = 1,23\text{V}$$

Επειδή στην ενεργειακή τεχνολογία δουλεύουμε συνήθως με την κατώτερη τιμή θέρμανσης των καύσιμων υλών, αυτή η διαδικασία επιτρέπει την καλύτερη σύγκριση με τις συμβατικές διεργασίες.

Εάν η αναγκαία θερμική ενέργεια $T\Delta s$ παρέχεται και ηλεκτρικό με ρεύμα, η θεωρητική τάση διάσπασης κυττάρου είναι τότε:

$$E_{\text{th}} = \frac{\Delta G + T\Delta s}{nF} = 1,48\text{V}$$

Η εξάρτηση από τη θερμοκρασία των θεωρητικών αυτών τιμών φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



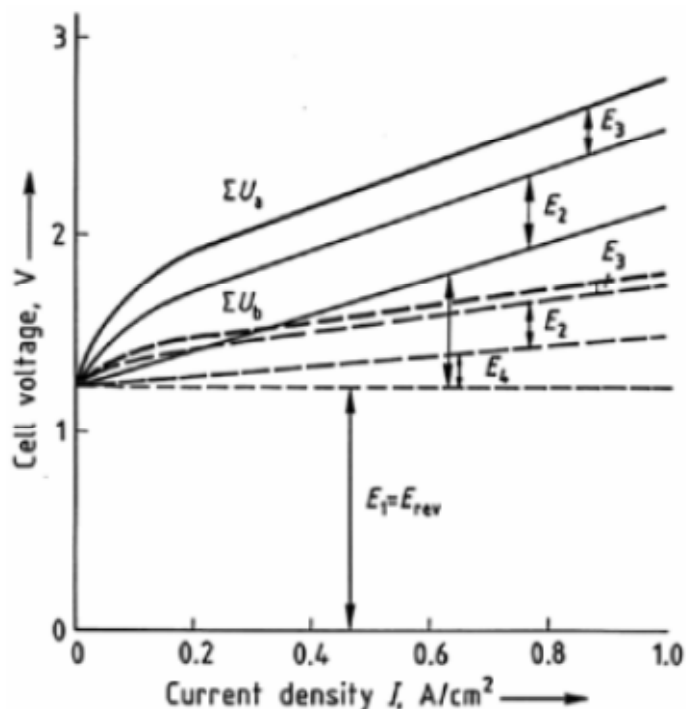
Θεωρητικά ιδανική διάσπαση κυττάρου

Λόγω των αναγκαίων απωλειών στα ηλεκτρόδια (E_2 , E_3) και των ωμικών απωλειών σε λειτουργία (E_4) εμφανίζεται μια περαιτέρω αναγκαία τάση. Σύμφωνα με αυτά μπορούμε να υπολογίσουμε την απόδοση ενός ηλεκτρολύτη ως εξής:

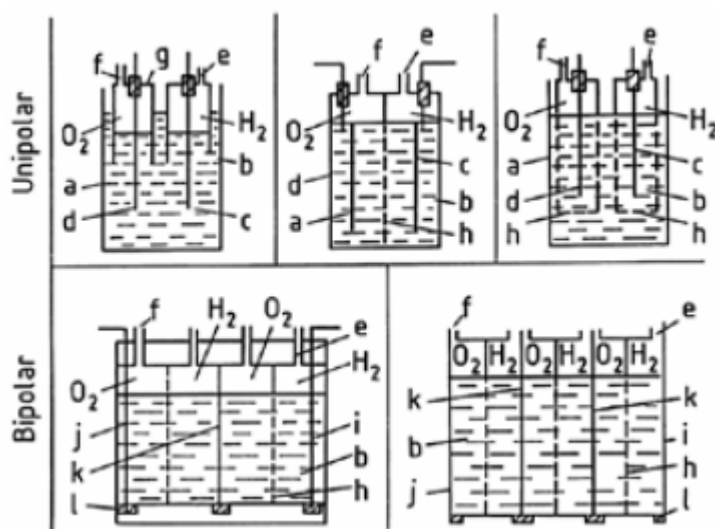
$$\eta_{\text{Elektrolyseur}} = \frac{E_{\text{th}}}{E_{\text{cell}}} = \frac{E_{\text{th}}}{E_{\text{th}} + E_2 + E_3 + E_4} = \frac{1,48\text{V}}{E_{\text{cell}}}$$

Διαφορετικά μπορούμε την απόδοση να την εκφράσουμε και ως το πηλίκο της ενέργειας προς την απόδοση.

$$\eta_{\text{Elektrolyseur}} = \frac{\Delta h_{\text{H}_2}}{P_{\text{elektrisch}}} = \frac{3,55\text{kWh}}{P_{\text{elektrisch}} \text{Nm}^3}$$



Διάσπαση κυττάρου σε σχέση με την πυκνότητα ρεύματος



α) τοίχος κυττάρου, β) ηλεκτρολύτης, γ) κάθοδος, δ) άνοδος, ε) εξαγωγή υδρογόνου, ς) εξαγωγή οξυγόνου, ζ) συγκεντρωτής αερίου, η) διάφραγμα, θ) εξωτερική κάθοδος, ι) εξωτερική άνοδος, κ) διπολικό ηλεκτρόδιο λ) μόνωση

Η συνήθης ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται για έναν ατμοσφαιρικό διπολικό αλκαλικό ηλεκτρολύτη, είναι από 4-4,5 kWh/Nm³ H₂, η οποία σύμφωνα με την παραπάνω σχέση αντιστοιχεί σε απόδοση περίπου 80%. Τυπικές συνθήκες λειτουργίας είναι από 70-90 °C, τάση διάσπασης κυττάρου από 1,85-2,05 V και πυκνότητα ρεύματος από 2-3 kA/m². Τα ποσοστά παραγωγής είναι από 20-5000 Nm³/h. Για ποσοστό παραγωγής περίπου με 500 Nm³/h, χρειάζονται 2 MW

ηλεκτρισμού. Τα αμέσως παραγόμενα ποσοστά καθαρότητας είναι 99,9% για H₂ και 99,8% για O₂.

Μεγαλύτερες μονάδες δημιουργούνται συνδυάζοντας μικρότερες μονάδες. Μια απ' τις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις υπάρχει στην Αίγυπτο στο φράγμα του Ασσουάν με παραγωγή 33.000 Nm³/h.



Norsk Hydro ηλεκτρολύτης περίπου 485Nm³/h.

Η διαθεσιμότητα είναι με 98% πολύ υψηλή. Για αξιόπιστη λειτουργία πρέπει να προσέξουμε τη συντήρηση και προστασία των ηλεκτροδίων, επειδή είναι ευαίσθητα σε πιθανές βλάβες. Ειδικά στην χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την ηλεκτρόλυση του νερού είναι σημαντικό να αποφύγουμε την καταστροφή των ηλεκτροδίων λόγω των διαταραχών της εισερχόμενης ισχύς του δικτύου. Αντιθέτως η μηχανική σταθερότητα όπως και η αποδοτικότητα της διαδικασίας ηλεκτρόλυσης μειώνονται ραγδαία. Ο χρόνος ζωής απλών ηλεκτροδίων σε μεταβαλλόμενα δίκτυα είναι λίγων ωρών. Για το λόγο αυτό οι ηλεκτρολύτες δουλεύονται συνήθως σε ονομαστικά φορτία. Στην άλλη περίπτωση όταν οι ηλεκτρολύτες είναι απενεργοποιημένοι τα ηλεκτρόδια διαβρώνονται εάν δεν εφαρμόζουμε τάση προστασίας. Αυτό απαιτεί αυτόνομη τροφοδοσία ενέργειας κάτι το οποίο σημαίνει περαιτέρω δαπάνες ενέργειας.

Με χρήση καταλυτών ιριδίου-διοξειδίου ως άνοδο, και πλατίνα ως κάθοδο, καθώς επίσης υπερφθοριομένων μεμβρανών οξειδίου ως ηλεκτρολύτη, επιτεύχθηκε πρόσφατα απόδοση 93%.

4.3.2 Θερμοχημική διάσπαση

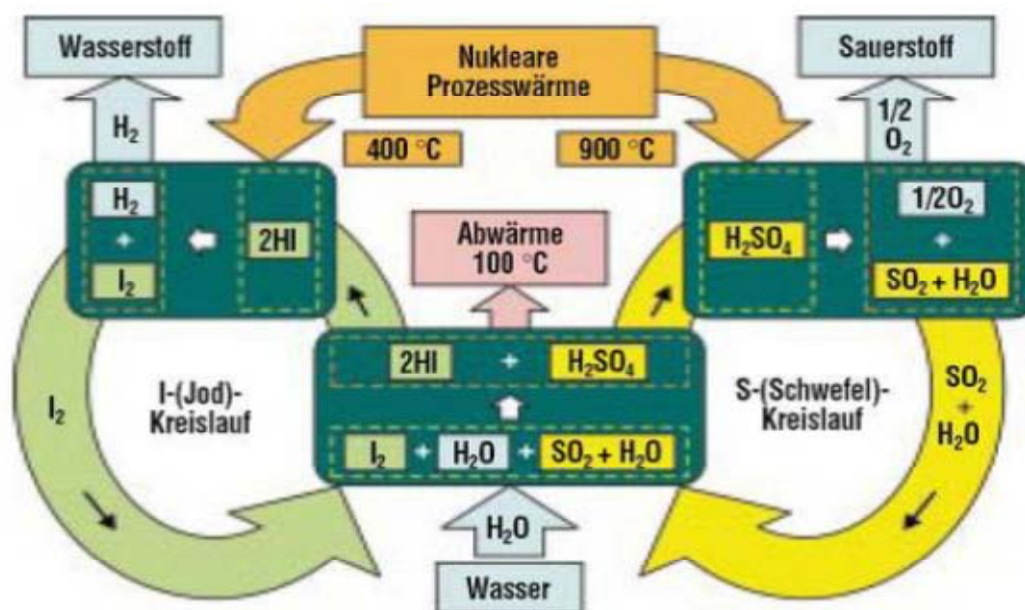
Η θερμοχημική διάσπαση βασίζεται στην διάσπαση των μορίων στα άτομα που το αποτελούν, λόγω επιρροής θερμότητας. Πάνω απ' την θερμοκρασία των 1700oC ολοκληρώνεται η απευθείας διάσπαση από υδρατμό σε υδρογόνο και οξυγόνο. Αυτό συμβαίνει για παράδειγμα σε ηλιακούς φούρνους. Τα παραγόμενα αέρια μπορούν με χρήση κεραμικών μεμβρανών να διαχωριστούν μεταξύ τους. Οι μεμβράνες αυτές

πρέπει να είναι διαπερατές για υδρογόνο αλλά όχι για οξυγόνο. Το μεγάλο πρόβλημα είναι ότι δημιουργούνται μεγάλες θερμοκρασίες και για το λόγο αυτό μόνο ακριβά υλικά με αντοχή στις θερμοκρασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Έτσι για το λόγο αυτό η διαδικασία αυτή δεν είναι οικονομικά ανταγωνίσιμη.

Μείωση της θερμοκρασίας της θερμικής διάσπασης κάτω απ' τους 900oC μπορεί να επιτευχθεί με συνδυασμό χημικών αντιδράσεων. Ήδη από το 1970 προτάθηκαν για τον συνδυαστικό κύκλο αντιδραστήρων υψηλής θερμοκρασίας, πολλές θερμοχημικές διαδικασίες, οι οποίες κατά ένα μέρος μπορούν να είναι και χρήσιμες για την συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία. Τον υψηλότερο βαθμό απόδοσης ακόμα καλύτερο και από αυτόν της αλκαλικής ηλεκτρόλυσης, όπως και το μεγαλύτερο δυναμικό για την περαιτέρω βελτίωση, έχει η διαδικασία του θειικού ιωδίου και η διαδικασία υδριδίου θείου.

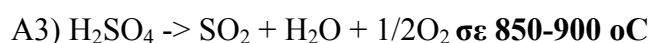
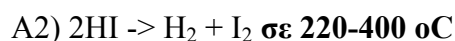
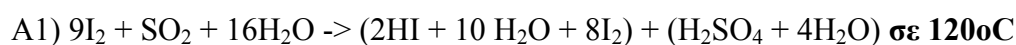
Διαδικασία θειικού οξέος ιωδίου

Το ιώδιο και το διοξείδιο του θείου αντιδρούν στους 120oC με νερό σε ιωδιούχο υδρογόνο και θειικό οξύ. Αφότου έχουμε τα παράγωγα διασπάμε το θειικό οξύ στους 900 oC σε οξυγόνο και διοξείδιο του θείου και από το ιωδιούχο υδρογόνο παράγεται στους 400 oC υδρογόνο και το παράγωγο ιώδιο.



Διαδικασία ιωδίου θείου

Η διαδικασία ιωδίου θείου χαρακτηρίζεται από τα εξής 3 στάδια:



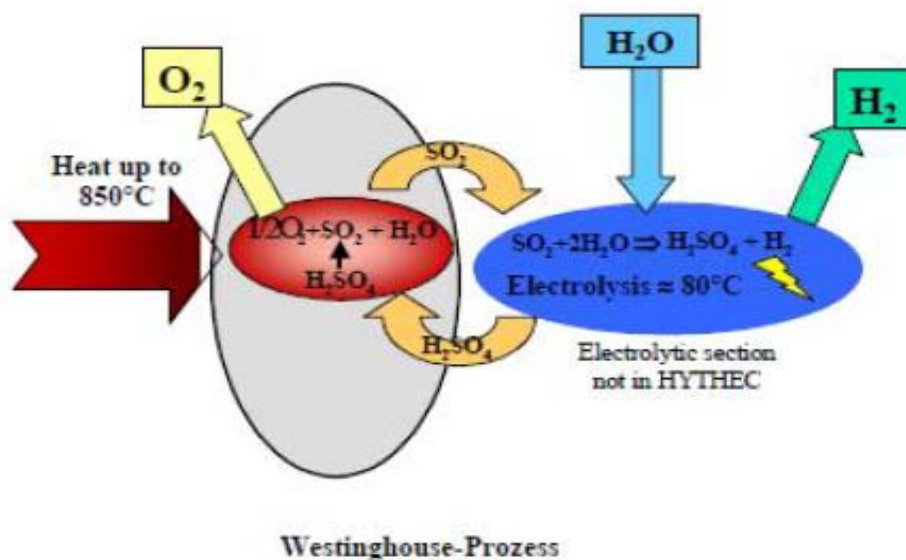
Η A1 είναι η εξώθερμη αντίδραση η οποία παράγει 2 μη αναμειγμένα παράγωγα στοιχεία, αραιωμένο θειικό οξύ και ένα υγρό μείγμα ιώδιο-υδρογόνου και ιωδίου. Το θειικό οξύ και το ιωδιούχο υδρογόνο διαχωρίζονται στις επόμενες 2 αντιδράσεις A2, A3 υπό την επίδραση θερμότητας. Υδρογόνο από A2 και οξυγόνο από A3 αποκόπτονται και τα υπόλοιπα παράγωγα ανακυκλώνονται στην A1.

Συνοπτικά χαρακτηρίζεται απ την παρακάτω αντίδραση:



Διαδικασία θειικού υδριδίου (Westinghouse Process)

Η διαδικασία αυτή περιέχει 2 στάδια. Διοξείδιο του θείου διαχωρίζεται ηλεκτροχημικά στο νερό, σε θειικό οξύ και υδρογόνο. Το παραγόμενο έτσι θειικό οξύ κατά την αέρια κατάσταση διαχωρίζεται θερμικά όπως και στη διαδικασία ιωδίου-θείου (μερική αντίδραση A3) σε οξυγόνο και διοξείδιο του θείου.



Τα στάδια αντίδρασης είναι έτσι τα εξής:



4.3.3 Άλλες μελλοντικές μέθοδοι παραγωγής

Φωτοχημική Παραγωγή

Η βάση της ιδέας είναι η απευθείας χρησιμοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας για την απορρόφηση πλουσίων σε ενέργεια φωτονίων, από αντιδρώντα στοιχεία. Για το σκοπό αυτό χρειαζόμαστε αγωγίμα υλικά στα οποία το κενό ενέργειας μέσα τους

είναι μεγάλο, οπότε μέσω της απορρόφησης κβάντων φωτός, να απορροφούνται απ το νερό ηλεκτρόνια, τα οποία οδηγούν στη διάσπαση του νερού. Με τη χρήση φωτοκαταλυτών επιδιώκεται να διευκολυνθούν οι διαδικασίες μεταβολής. Το κυρίως πρόβλημα είναι ότι πρέπει τα φωτοενεργά στοιχεία να είναι καταλυτικώς πολύ ενεργά και συγχρόνως να μένουν σταθερά σε μεγάλης διάρκειας επαφή με το νερό. Μελλοντικά φαίνεται ο συνδυασμός φωτο-θερμοχημικών διαδικασιών να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός.

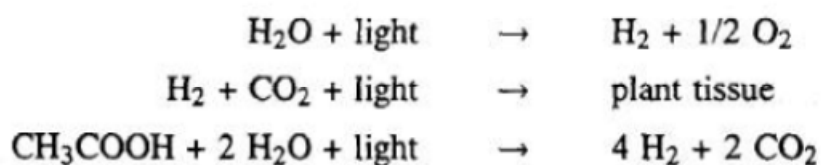
Φωτοβιολογική Παραγωγή

Στη φωτοβιολογική παραγωγή χρησιμοποιούμε διαδικασίες τις οποίες χρησιμοποιούν τα φυτά ή οι μικροοργανισμοί κατά την εκμετάλλευση του ηλιακού φωτός.

Διακρίνουμε:

- Φωτοβιολογική διάσπαση νερού και
- Την απομόνωση υδρογόνου από οργανικά υλικά

Οι μερικές αντιδράσεις της φωτοσύνθεσης είναι:



Μερικά βακτήρια ειδικά αναερόβια, χρησιμοποιούν το ηλιακό φως για την πρώτη μερική διάσπαση του νερού. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται για παράδειγμα τα *Cyano* και *Purple* βακτήρια. Οι βαθμοί απόδοσης κυμαίνονται το μέγιστο στο 10%.

4.3.4 Καινοτόμοι τρόποι παραγωγής

Το πρώτο βασικό κριτήριο για την επιλογή του βέλτιστου τρόπου παραγωγής υδρογόνου, είναι το κόστος παραγωγής. Υπάρχουν όμως και άλλα δυο σημαντικά κριτήρια που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις αποφάσεις μας για τον βέλτιστο τρόπο παραγωγής υδρογόνου. Το ένα είναι η φιλικότητα προς το περιβάλλον και το δεύτερο είναι η χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου. Ένας τρόπος παραγωγής με χρησιμοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μακροπρόθεσμα θα παρέχει οικονομικό κέρδος, καθώς τα ορυκτά καύσιμα εξαντλούνται ενώ και η συντήρηση των συστημάτων ανανεώσιμων μορφών ενέργειας είναι μικρή.

Έτσι πλέον αναπτύσσονται καινοτόμες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου προσανατολισμένες προς αυτό τον τριπλό στόχο. Δηλαδή παραγωγή υδρογόνου

1)οικονομική, 2)από εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και 3)φιλική προς το περιβάλλον. Παρακάτω αναφέρονται ορισμένοι τέτοιοι καινοτόμοι τρόποι.

1)**Ηλιακός αντιδραστήρας Hydrosol**: Η ελληνική ερευνητική ομάδα Hydrosol με επικεφαλής των Θανάση Κωνσταντόπουλο, ανέπτυξε ένα καινοτόμο θερμό-χημικό ηλιακό αντιδραστήρα για την παραγωγή υδρογόνου από διαχωρισμό του νερού. Ο ηλιακός αντιδραστήρας αποτελείται από συνδέσεις πολλαπλών μονολιθικών καναλιών τα οποία είναι κατασκευασμένα από ειδικά πυρίμαχα κεραμικά μικρο-τοιχώματα, (σαν κυψέλη μελισσών) και απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία. Τα μονολιθικά κανάλια έχουν επένδυση από υλικά τα οποία έχουν την ικανότητα να διαχωρίζουν το νερό, παγιδεύοντας το οξυγόνο και αφήνοντας να περάσει το υδρογόνο. Στο επόμενο βήμα τα υλικά που έχουν συγκρατήσει το οξυγόνο το απελευθερώνουν χρησιμοποιώντας ηλιακή ενέργεια. Ο κύκλος λειτουργίας του ηλιακού αντιδραστήρα είναι 1.συγκράτηση οξυγόνου->2.παραγωγή υδρογόνου->απελευθέρωση οξυγόνου. Έτσι έχουμε το θερμοχημικό διαχωρισμό του νερού σε οξυγόνο και υδρογόνο με χρήση μόνο της ηλιακής ενέργειας.

Ο ηλιακός αντιδραστήρας Hydrosol είναι μια πολλά υποσχόμενη λύση στην οικονομική και οικολογική παραγωγή υδρογόνου, καθώς έχει σχετικά υψηλό βαθμό απόδοσης(περίπου 28%), χρησιμοποιεί αποκλειστικά ανανεώσιμες πηγές ενέργειας(ηλιακή ενέργεια και νερό) και δεν παράγει ρυπογόνα καυσαέρια(πχ CO₂). Ακόμα βρίσκεται σε πιλοτική εφαρμογή, αλλά εκτιμάται ότι η ευρεία χρήση του θα ρίξει το υψηλό κόστος παραγωγής υδρογόνου, από τα 24 eurocent/kWh στο μέτριο κόστος των 10 eurocent/kWh. Για αυτήν την καινοτόμο εφαρμογή η ερευνητική ομάδα Hydrosol τιμήθηκε το 2007 με το βραβείο Καρτέσιου της ευρωπαϊκής ένωσης.



Ηλιακός αντιδραστήρας Hydrosol

2) **Τεχνητή φωτοσύνθεση για παραγωγή υδρογόνου:** Τα φυτά χρησιμοποιούν τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης για να παράγουν γλυκόζη ώστε να τραφούν. Η διαδικασία της φυσικής φωτοσύνθεσης εκτελείται σε 2 στάδια.

Στάδιο 1ο: τα μόρια της χλωροφύλλης απορροφούν φωτεινή ενέργεια, ενεργοποιούνται και αποβάλλουν ηλεκτρόνια, ιονίζονται. Ένα μέρος της ενέργειας των ενεργοποιημένων μορίων της χλωροφύλλης χρησιμοποιείται για να διασπαστούν μόρια του νερού σε O₂ και H₂ (οξυγόνο και υδρογόνο). Το O₂ ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα και το H₂ δεσμεύεται στους χλωροπλάστες.

Στάδιο 2ο: Κατά το δεύτερο στάδιο με μια σειρά χημικών ενώσεων παράγεται γλυκόζη, η οποία μεταφέρεται σε όλα τα μέρη του φυτού.

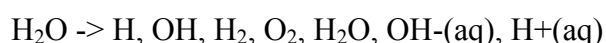
Οι επιστήμονες προσπαθούσαν να αντιγράψουν τη φυσική φωτοσύνθεση αλλά αντιμετώπιζαν προβλήματα καθότι ήταν ιδιαίτερα δύσκολο να βρεθούν υλικά κατάλληλα ώστε να επιτευχθεί ο κύκλος της φωτοσύνθεσης με ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης. Όμως οι εξελίξεις τα τελευταία χρόνια ήταν ραγδαίες. Δημιουργήθηκαν τεχνητά φύλλα με τη βοήθεια της νανοτεχνολογίας, τα οποία έχουν πολύ καλό βαθμό απόδοσης. Γενικά οι εκτιμήσεις είναι πολύ θετικές για την διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο με τη βοήθεια των τεχνητών φύλλων. Τα προβλήματα που έχουν να επιλύσουν οι επιστήμονες με τα τεχνητά φύλλα, είναι η χαμηλή ανθεκτικότητα των υλικών που τα αποτελούν, καθώς και ότι σε σύντομο χρονικό διάστημα πέφτει σημαντικά η απόδοσή τους.

Μια άλλη καινοτόμος εξέλιξη στο τομέα της τεχνητής φωτοσύνθεσης είναι με τη βοήθεια γενετικά τροποποιημένων ιών. Ερευνητές του MIT χαλιναγώγησαν έναν άκακο ιό για να δημιουργήσουν ένα σύστημα που διασπά το νερό και παράγει καύσιμο υδρογόνο με τη βοήθεια του ήλιου. Το νέο σύστημα χρησιμοποιεί έναν ιό των βακτηρίων που ονομάζεται βακτηριοφάγος M13.

Ο βακτηριοφάγος τροποποιήθηκε γενετικά έτσι ώστε η μία πλευρά του να συνδέεται σε μόρια ενός καταλύτη (οξειδίο του ιριδίου) και η άλλη πλευρά να συνδέεται σε μόρια μιας βιολογικής χρωστικής ουσίας (πορφυρίνες που περιέχουν ψευδάργυρο). Η ηλιακή ενέργεια απορροφάται από τα μόρια χρωστικής και διοχετεύεται μέσω του ιού στον καταλύτη, όπου χρησιμοποιείται για τη διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο.

Ραδιόλυση

Υπό την έννοια της ραδιόλυσης εννοούμε την αποσύνθεση μιας χημικής ένωσης κάτω από την επίδραση ιονισμένης ακτινοβολίας. Συνήθως υπό την έννοια της ραδιόλυσης απευθυνόμαστε στη ραδιόλυση του νερού. Η ραδιόλυση του νερού ολοκληρώνεται σε πολλά στάδια κατά τα οποία παράγονται πολλά διαφορετικά προϊόντα.



Σε βιολογικά συστήματα, η ραδιόλυση λόγω της υψηλής αντιδραστικότητας του OH είναι κύριος μηχανισμός της επιβλαβούς επίδρασης ραδιοενεργής ακτινοβολίας. Η ενέργεια από πυρηνική αντίδραση εμφανίζεται ως α , β ή γ ακτινοβολία ή μεταφέρεται από ουδέτερα παράγωγα διάσπασης. Η μεταφερόμενη ενέργεια μετρείται με το Linear Energy Transfer (LET). Το ποσοστό μετατροπής G εξαρτάται από το αποτελεσματικό LET και ορίζεται ως αριθμός των μετατρεπόμενων μορίων ανά 100eV απορροφημένης ενέργειας. 52

Στους σύγχρονους πυρηνικούς αντιδραστήρες ειδικότερα στους αντιδραστήρες βρασμού συμβαίνει αυθόρμητα μια αντίδραση ραδιόλυσης στο κυρίως σύστημα ψύξης. Το στοιχειομετρικό μείγμα αερίου το χαρακτηρίζουμε ως ραδιολυτικό αέριο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα ασφαλείας. Ως υπαίτιος για τη μεγάλη διακοπή στο γερμανικό πυρηνικό αντιδραστήρα Brunsbuttel στις 14 Δεκεμβρίου 2001, ήταν το ραδιολυτικό αέριο.

Σύντηξη Υδρογόνου με LASER

Η φυσική επιλογή της παραγωγής ενέργειας στο σύμπαν είναι η σύντηξη «ελαφρών» πυρήνων για την παραγωγή «βαρύτερων» στοιχείων με ταυτόχρονη έκλυση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας από τα παραγόμενα ταχέως κινούμενα νετρόνια. Αυτό ακριβώς συμβαίνει στο εσωτερικό του Ήλιου μας. Λόγω της τεράστιας βαρυτικής πίεσης τα άτομα του Υδρογόνου έρχονται τόσο κοντά, υπερνικώντας την ηλεκτροστατική τους άπωση λόγω του θετικού φορτίου τους, ώστε αρχίζουν να εμφανίζονται τεράστιες πυρηνικές συγκολλητικές δυνάμεις. Έτσι παράγεται ένα «βαρύτερο» από το Υδρογόνο στοιχείο το Ήλιο, ταυτόχρονα διαφεύγουν νετρόνια με σχετικιστικές ταχύτητες. Τα νετρόνια αυτά μεταφέρουν τεράστιες ποσότητες ενέργειας η οποία τελικά φτάνει μετά από ένα μακρόχρονο ταξίδι στην επιφάνεια του Ήλιου κάνοντάς τον βασική ενεργειακή πηγή της αστρικής γειτονιάς μας. Είναι εντυπωσιακό να αναφερθεί ότι η σύντηξη του Υδρογόνου που εμπεριέχεται σε ένα κυβικό χιλιόμετρο θαλασσινού νερού θα μας δώσει τόση ενέργεια όσο όλα τα γνωστά ενεργειακά αποθέματα του πλανήτη μας (Εικ. 1).



Η διαδικασία της σύντηξης πυρήνων είναι η αντίθετη από αυτήν της σχάσης βαρύτερων στοιχείων του περιοδικού πίνακα. Με την σχάση η οποία χρησιμοποιείται ευρύτατα τα τελευταία χρόνια παράγεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας στην περισσότερες προηγμένες τεχνολογικά χώρες του Πλανήτη μας. Όμως η σχάση, παρόλο που δεν επιβαρύνει (όπως και η σύντηξη) την ατμόσφαιρα με αέρια θερμοκηπίου, έχει σημαντικά προβλήματα, που συχνά κάνουν τις κοινωνίες να την αντιμετωπίζουν με σκεπτικισμό. Τα προβλήματα αυτά είναι κυρίως τα ραδιενεργά απόβλητα μεγάλου χρόνου ζωής και η διαχείριση τους, αλλά κυρίως ο κίνδυνος μη ελέγξιμου ατυχήματος διαρροής ραδιενέργειας στο περιβάλλον λόγω των αλυσιδωτών αντιδράσεων πυρηνικής σχάσης που μπορεί να προκληθεί είτε από ανθρώπινο λάθος είτε από αστοχία υλικών και συντήρησης στον αντιδραστήρα (π.χ. στο Τσερνομπίλ). Η σύντηξη, ευτυχώς, δεν παράγει ραδιενεργά απόβλητα, ούτε υπάρχει το πρόβλημα της αλυσιδωτής αντίδρασης αφού κάθε σφάλμα το μόνο που μπορεί να κάνει είναι να σταματήσει την αντίδραση. Όμως μέχρι σήμερα η παραγωγή ενέργειας από σύντηξη με θετικό ισοζύγιο έχει αποδειχθεί εξαιρετικά δύσκολη για τους επιστήμονες.

Δύο μόνο προσεγγίσεις θεωρείται ότι προσεγγίζουν τη σύντηξη σοβαρά, η μέθοδος του μαγνητικού περιορισμού (πρόγραμμα ITER) και η μέθοδος της αδρανειακής σύντηξης με LASER (National Ignition Facility – California USA και το Πρόγραμμα Ευρωπαϊκών Υποδομών HiPER).

Η Φυσική της αδρανειακής σύντηξης είναι πλέον γνωστή από το εσωτερικό των άστρων. Επιπρόσθετα η διαδικασία της παραγωγής ενέργειας από σύντηξη υδρογόνου έχει ήδη επιτευχθεί στη Γη αλλά με την υποβοήθηση γειτονικής σχάσης. Η επίδειξη της αρχής παραγωγής ενέργειας με θετικό ισοζύγιο από την αδρανειακή σύντηξη με LASER είναι κοντά όσο ποτέ και αναμένεται μέσα στην επόμενη διετία στο National Ignition Facility στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ.

Η απάντηση της Ευρώπης είναι το πρόγραμμα τους Ευρωπαϊκού οδικού χάρτη στον τομέα της ενέργειας, του HiPER (High Power laser Energy Research, www.hiperlaser.org). Το HiPER προχωράει ένα βήμα πέρα από την επίδειξη της αδρανειακής σύντηξης με LASER, χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση που θα επιτρέψει την παραγωγή ενέργειας από σύντηξη Υδρογόνου σε Βιομηχανική Κλίμακα. Ταυτόχρονα, το HiPER έχει ένα πλούσιο Πρόγραμμα βασικής Επιστήμης σε πλειάδα κλάδων της φυσικής και της τεχνολογίας. Οι τεράστιες πιέσεις και θερμοκρασίες που θα αναπτυχθούν ελκύουν το ενδιαφέρον εκατοντάδων επιστημονικών ομάδων από όλη της Ευρώπη αλλά και εκτός αυτής για την μελέτη φαινομένων που μέχρι τώρα δεν υπήρχε η δυνατότητα να προσεγγιστούν πειραματικά σε γήινο εργαστήριο.

Τέτοιοι κλάδοι της επιστήμης είναι:

- **Εργαστηριακή Αστροφυσική**
- **Συμπεριφορά της ύλης κάτω από τεράστιες πιέσεις και θερμοκρασίες**
- **Επιστήμη υλικών στον πολλά υποσχόμενο κλάδο της υπέρθερμης και υπέρπυκνης ύλης**
- **Πυρηνική Φυσική και Χημεία**
- **Ατομική φυσική**
- **Τυρβώδης ροές σε υπερηχητικές ταχύτητες**
- **Δέσμες σχετικιστικών σωματιδίων**
- **Φυσική Πλάσματος σε υψηλές ενέργειες**
- **Βασική φυσική σε υπερυψηλά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία (Κβαντικό Κενό)**

Το HiPER εντάχθηκε στον Ευρωπαϊκό οδικό χάρτη τον Οκτώβριο του 2006. Σε αυτό συμμετέχουν επίσημα 6 Ευρωπαϊκά Κράτη (Μεγάλη Βρετανία, Γαλλία, Ελλάδα, Τσεχία, Ιταλία, Ισπανία), και 25 Ερευνητικά Ινστιτούτα από 11 χώρες εντός και εκτός Ευρώπης. Το Μάιο του 2007 η πρόταση της 3ετούς προπαρασκευαστικής φάσης έγινε αποδεκτή από την Κοινότητα με συμμετοχή από χώρες όπως ΗΠΑ, Ιαπωνία, Νότιος Κορέα, Ρωσία, Κίνα και Καναδάς. Η προπαρασκευαστική φάση τελειώνει σε λίγους μήνες με εξαιρετικά θετικά αποτελέσματα. Θα ακολουθήσει μια τρίχρονη φάση λεπτομερούς σχεδιασμού μέχρι το 2014. Η τριετία αυτή θα συμπέσει με την τεχνολογική ολοκλήρωση και ωρίμανση των απαιτήσεων της σύντηξης με LASER. Κατόπιν θα αρχίσει η κατασκευαστική φάση για την υλοποίηση ενός σταθμού παραγωγής ενέργειας από αδρανειακή σύντηξη Υδρογόνου με LASER σε βιομηχανική κλίμακα.

Το ΤΕΙ Κρήτης είναι επικεφαλής του προγράμματος της Βασικής Επιστήμης.

4.4 Αποθήκευση και Μεταφορά

Το υδρογόνο σε σχέση με το βάρος του έχει μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα. Αυτό το κάνει μοναδικό καύσιμο, για παράδειγμα για την διαστημική τεχνολογία.

Η αποθήκευση του υδρογόνου όμως ειδικά σε περιορισμένο όγκο αποτελεί ακόμα και τώρα μια πρόκληση.

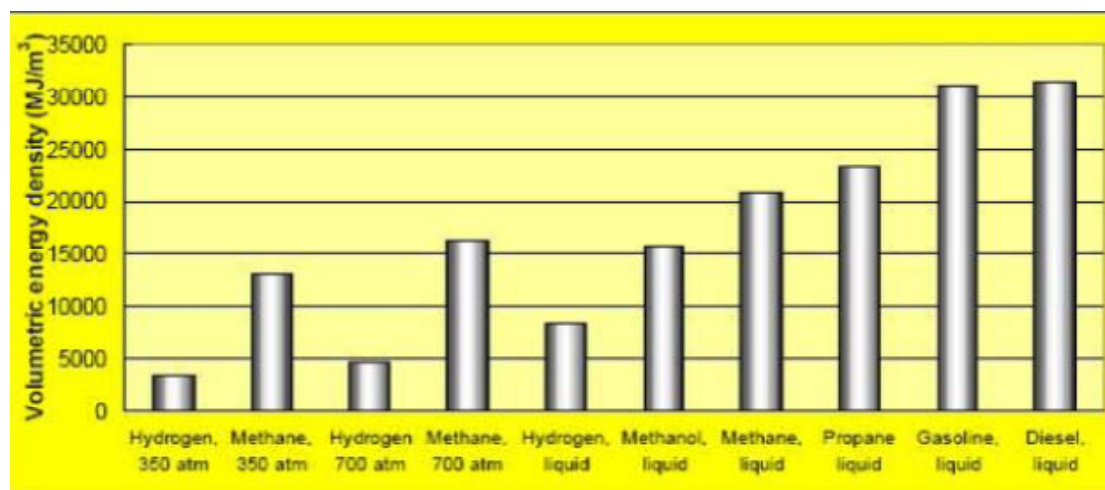


Figure 8 – Volumetric energy density of typical types of fuel (LHV)

Τόσο στην αποθήκευση όπως και στη μεταφορά του υδρογόνου εμφανίζονται πρακτικά προβλήματα. Το υδρογόνο είναι εκρηκτικό αέριο και επίσης εμφανίζει πολύ υψηλή ικανότητα διάχυσης, με αποτέλεσμα να διαφεύγει από τα μέσα αποθήκευσης ευκολότερα από τα υπόλοιπα αέρια και μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε ατυχήματα. Έτσι χρειάζεται μεγάλη έμφαση στην ασφαλή και ολοκληρωμένη αποθήκευση και

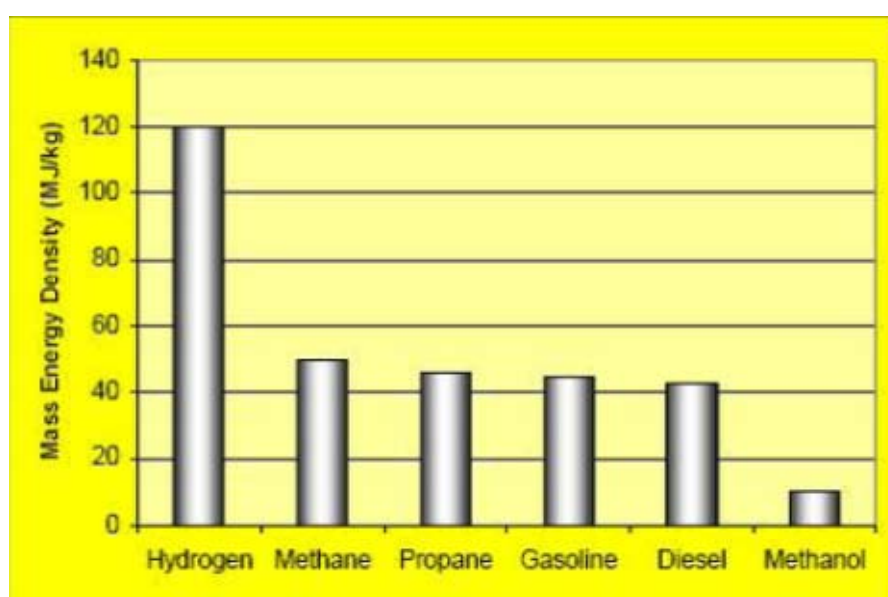


Figure 7 – Mass energy density of fuels (LHV)

μεταφορά, κάτι που συνεπάγεται υψηλό οικονομικό κόστος. Για να αποθηκεύσουμε υδρογόνο οικονομικά, σε σχέση με τον όγκο του, υπάρχουν στην πράξη 3 διαφορετικοί τρόποι:

Συμπύκνωση, υγροποίηση, φυσική ή χημική ένωση σε αποθηκευτικά υλικά.

4.4.1 Συμπίεση Υδρογόνου

Για να αποθηκεύσουμε το υδρογόνο αποτελεσματικά σε όγκο και βάρος, πρέπει να το συμπιέσουμε σε πίεση 20-100 MPa. Για πολλές χημικές διαδικασίες χρειαζόμαστε το υδρογόνο σε συμπυκνωμένη μορφή. Επειδή το υδρογόνο σε υψηλές πιέσεις δεν συμπεριφέρεται ως ιδανικό αέριο, αυτή η μορφή αποθήκευσης έχει φυσικούς περιορισμούς. Αντί της χρήσης της σχέσης Van der Waals, χρησιμοποιείται σε τεχνικές εφαρμογές ο λόγος συμπίεσης Z, ο οποίος περιγράφει την απόκλιση από το ιδανικό αέριο.

$$Z = \frac{pV}{RT}$$

Pressure (MPa)	0.1013	5	10	20	30	35	40	50	70	100
Z	1	1.032	1.065	1.132	1.201	1.236	1.272	1.344	1.489	1.702

Παράγοντας συμπίεσης Z σε 20oC

Κάτω από 15 MPa οι αποκλίσεις από το ιδανικό αέριο είναι μικρές. Έως περίπου 40 MPa μπορούμε να περιγράψουμε το αέριο πολύ ικανοποιητικά σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα. Οι αποκλίσεις από την εξίσωση πραγματικών αερίων Van der Waals είναι ως εκεί εξίσου μικρές.

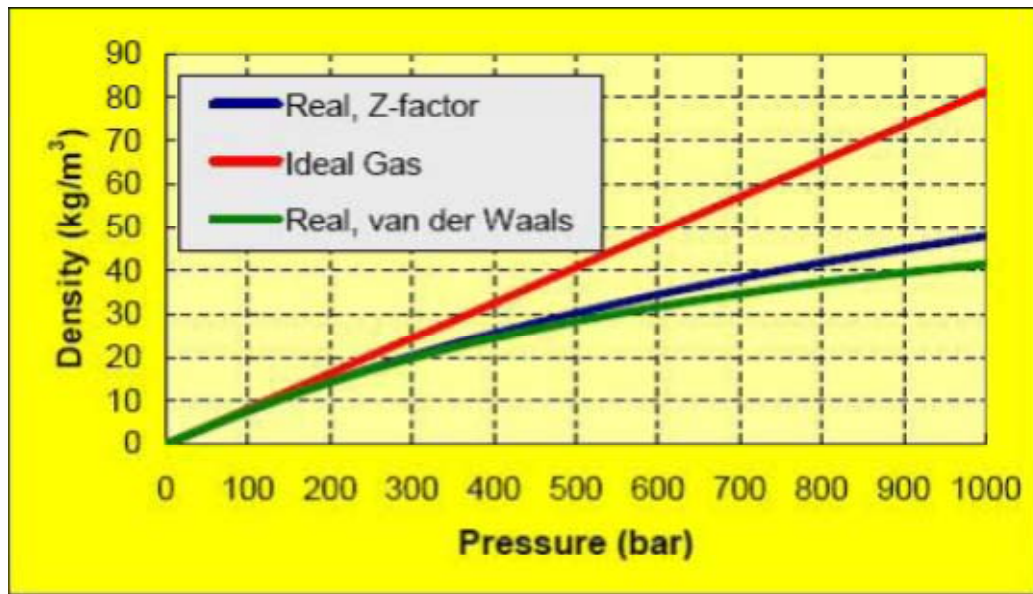


Figure 5 – Hydrogen density as a function of pressure

Αυτή η σχέση μπορεί να περιγραφεί εύκολα με το παρακάτω διάγραμμα πίεσης-ποσότητα ενέργειας.

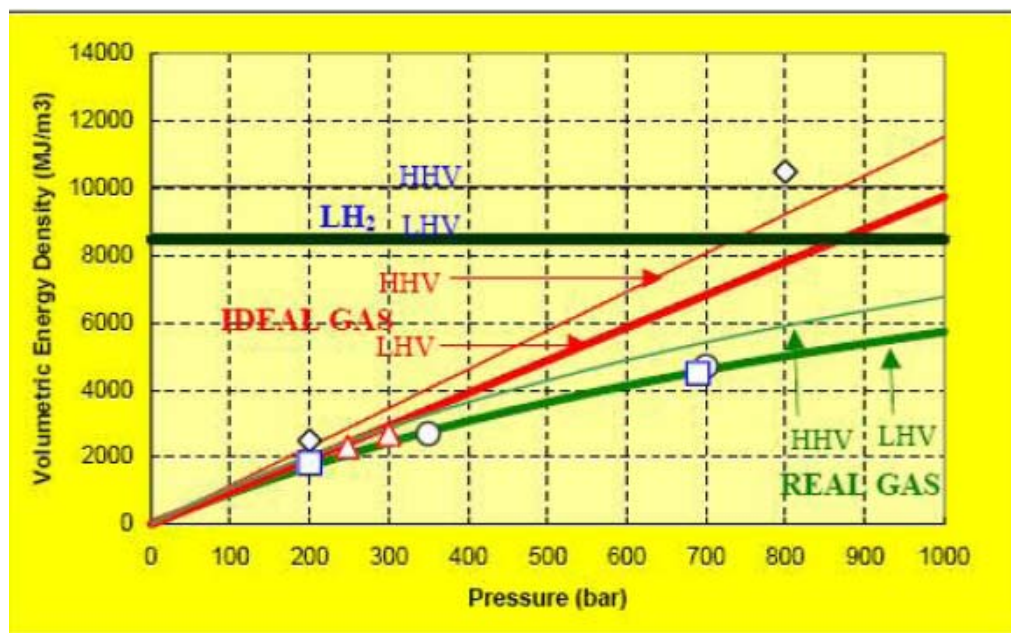


Figure 6 – Calculated values for the volumetric energy density of hydrogen (in continuous lines) plotted against reported values. LH₂ stands for liquid hydrogen.

Συμπύκνωση

Για τον υπολογισμό του έργου συμπύκνωσης χρειαζόμαστε την καταστατική εξίσωση του προσυμπυκνωμένου αερίου. Για απλούστευση του υπολογισμού του έργου, υποθέτουμε μια ιστροπική αδιαβατική διαδικασία.

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση και αν λάβουμε το υδρογόνο ως ιδανικό αέριο προκύπτει η παρακάτω σχέση.

$$W_{\Delta S=0,ideal} = \frac{\gamma}{\gamma-1} RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]$$

με T_1 : θερμοκρασία πριν τη συμπίκνωση και

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1.4$$

Επειδή η πραγματική συμπίκνωση είναι μη αντιστρεπτή διαδικασία, προσδιορίζεται η πραγματική απαιτούμενη ενέργεια με ιστροπικό βαθμό απόδοσης της συμπίκνωσης ναδιαβατικό ως εξής:

$$W = \frac{W_{\Delta S=0,ideal}}{\eta_{adiabatic}}$$

Το ναδιαβατικό παίρνει συνήθως τιμές από 0.75- 0.85. Εάν πολλαπλασιάσουμε σε αυτό το βαθμό απόδοσης και τον περιορισμένο βαθμό απόδοσης ενός ηλεκτρικού κινητήρα με περίπου 0.9 λαμβάνουμε το απαιτούμενο ποσό ισχύς.

Η πραγματική συμπίκνωση μπορεί να θεωρηθεί και ως μια παρεμβολή της ιδανικής συμπίκνωσης και της ισόθερμης συμπίκνωσης. Η ισόθερμη συμπίκνωση μπορεί να καθοριστεί ανάλογα με την καταστατική εξίσωση ως εξής:

Υπόθεση : ιδανικό αέριο

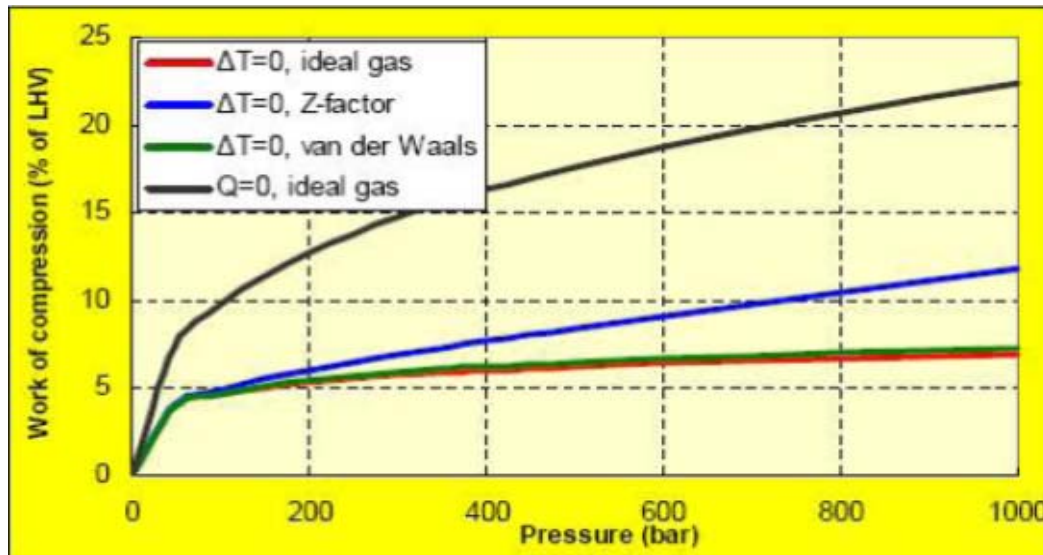
$$W_{\Delta T=0,ideal} = RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Υπόθεση: αέριο Van der Waals

$$W_{\Delta T=0,real} = RT \ln \frac{V_2 - b}{V_1 - b} + \frac{a}{V_2} - \frac{a}{V_1}$$

Υπόθεση: παράγοντας συμπίεσης

$$W_{\Delta T=0,Z} = ZRT \ln \frac{V_2}{V_1}$$



Έργο Συμπύκνωσης

Η πραγματική συμπύκνωση μπορεί να περιγραφεί βάσει μιας πολύτροπης αλλαγής κατάστασης:

$$W_{\text{polytropic}} = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Ο λόγος του ιδανικού έργου προς το πραγματικό έργο συμπύκνωσης καλείται ως πολυτροπική αποδοτικότητα.

$$\eta_p = \frac{W_{\Delta S=0,\text{ideal}}}{W_{\text{polytropic}}}$$

Από αυτό καθορίζεται ο πολυτροπικός εκθέτης ως εξής:

$$n = \frac{\eta_p \gamma}{1 + \eta_p \gamma - \gamma}$$

Η παραγόμενη θερμότητα στην ιδανική περίπτωση θα έπρεπε κατευθείαν να αποβάλλεται. Αυτό είναι σχεδόν αδύνατο, πρακτικά. Στην πραγματικότητα στην

τεχνική λύση του προβλήματος χρησιμοποιείται μια πολυεπίπεδη συμπίκνωση με ενδιάμεσες ψύξεις. Συνήθως τριεπίπεδη συμπίκνωση είναι η βέλτιστη και η πιο αποδοτική.

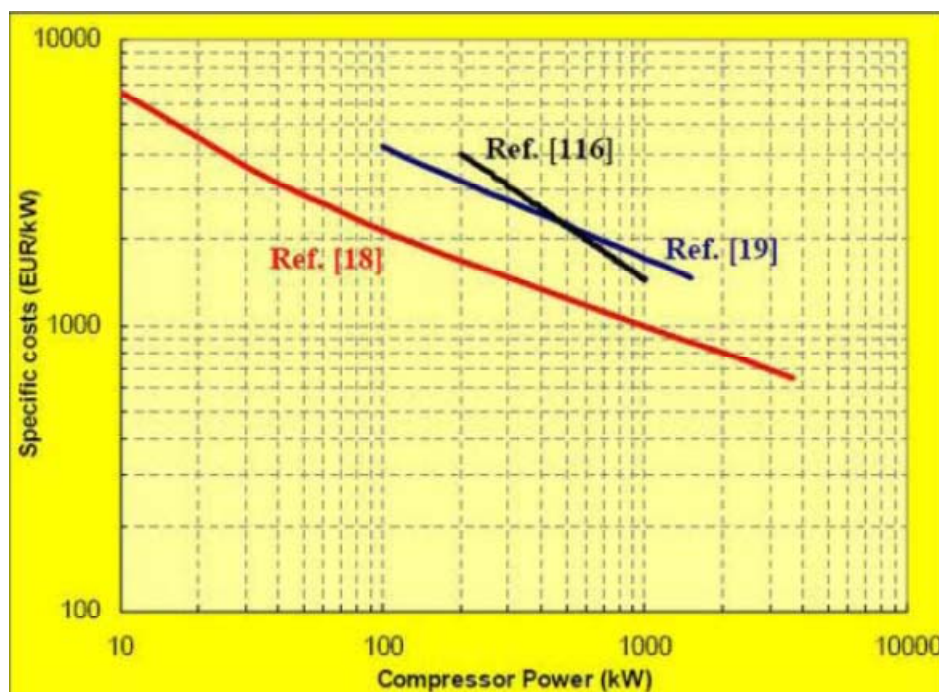
Συμπιεστής

Λόγω της μικρής μοριακής μάζας δεν χρησιμοποιούνται συμβατικοί συμπιεστές. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκαν ειδικοί συμπιεστές υδρογόνου.

Για πολύ μεγάλο όγκο (> 50.000 Nm³/h) όπως χρησιμοποιείται στην χημική βιομηχανία, χρησιμοποιούνται κυρίως ακτινωτοί υψηλής πίεσης αεριοστροβιλικοί συμπιεστές. Λόγω των περιορισμένων συνθηκών πίεσης χρησιμοποιούνται πολυεπίπεδοι συμπιεστές.

Για μικρότερη ροή όγκου χρησιμοποιούνται τρόμπες πιστονιού. Ανάλογα με τα στάνταρ καθαρότητας του υδρογόνου διαχωρίζουμε 3 τύπους:

1. Συμπιεστές πιστονιού με λίπανση λαδιού
2. Συμπιεστές πιστονιού με λίπανση νερού για περιπτώσεις που δεν επιτρέπονται ούτε μικρά ποσοστά λαδιού
3. Συμπιεστές πιστονιού χωρίς λίπανση για χρήση υψηλής καθαρότητας υδρογόνου.



Κόστη Συμπιεστών

Μικρότερες ροές όγκου μπορούν να συμπιεστούν και με συμπιεστές βίδας. Αυτοί χρησιμοποιούνται συνήθως σε εγκαταστάσεις υγροποίησης.

Μια συνήθως λιγότερο χρησιμοποιούμενη περίπτωση συμπύκνωσης είναι μέσω συμπίεσης της υγρής φάσης και στη συνέχεια εξάτμισή της. Αυτή η περίπτωση χρησιμοποιείται και σε μερικές μηχανές καύσης. Οι παραγόμενες πιέσεις κυμαίνονται περίπου στα 10 MPa.

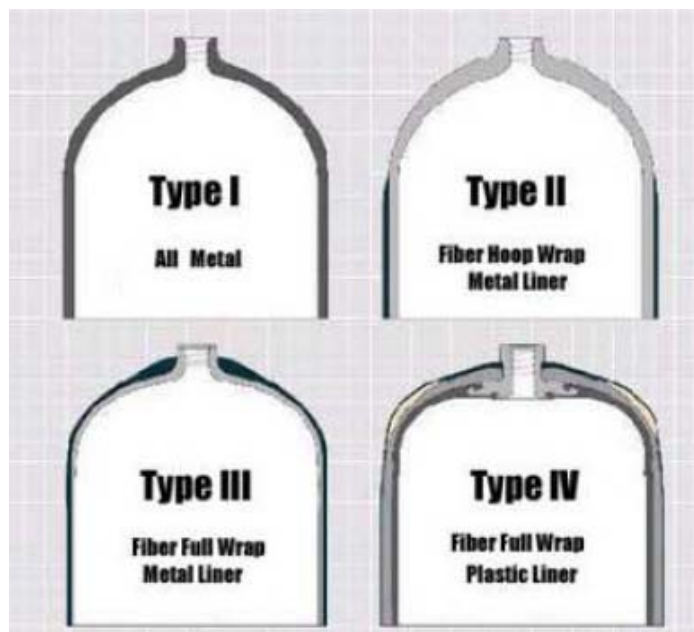
ΔΟΧΕΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΜΕΝΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Αυτή τη στιγμή η αποθήκευση του υδρογόνου ως συμπιεσμένο αέριο είναι η απλούστερη, η πιο διαδεδομένη και αποτελεσματική μέθοδος αποθήκευσης. Οι αποθηκευτές υδρογόνου είναι συνήθως κυλινδρικής μορφής κατασκευασμένοι από υψηλής αντοχής υλικά.



Μεγάλες δεξαμενές συμπιεσμένου υδρογόνου 5-7 MPa για βιομηχανικές εφαρμογές

Διαφορετικά από ότι οι στάσιμοι αποθηκευτές υδρογόνου, αναπτύσσονται και βελτιστοποιούνται οι αποθηκευτές υδρογόνου για εφαρμογές τροφοδοσίας, πχ αποθηκευτής υδρογόνου σε αυτοκίνητο. Ανάλογα με την ανάπτυξη κάθε μεθόδου, έχουμε την διαχώρισή τους στους εξής τύπους:



Τύπο Αποθηκευτών

Τύπος 1: Φτιαγμένος αποκλειστικά από συμπαγές μέταλλο.

Τύπος 2: Φτιαγμένος από μέταλλο μαζί με υλικό GRP/CFK.

Τύπος 3: Μεταλλικό δοχείο με εξωτερικό στρώμα υλικού CFK.

Τύπος 4: Το εσωτερικό δοχείο φτιαγμένο από συμπαγές πλαστικό και εξωτερικά CFK.

Η τωρινή έρευνα και ανάπτυξη των δοχείων αποθήκευσης υδρογόνου επικεντρώνεται κυρίως στην ασφάλεια, ιδιαίτερα των αποθηκευτικών τύπων 3 και 4. Αντίστοιχα επιλέγονται και τα κατάλληλα υλικά ώστε να ικανοποιούνται οι απαραίτητες προδιαγραφές.

Οι κατασκευαστές των δοχείων αποθήκευσης υδρογόνου που συνέβαλλαν ιδιαίτερα στην τεχνογνωσία τους είναι: Dynetek GmbH, COMAT (Γερμανία), Composites Aquitaine, CEA, Ullit (Γαλλία), Faber (Ιταλία), Quantum (ΗΠΑ).

Για τις εφαρμογές στα αυτοκίνητα μέχρι τώρα επιτυγχάνεται συμπίεση στον αποθηκευτή, της τάξης των 35 MPa με περίπου 10-20% επιπλέον περιθώριο για περιπτώσεις ανεφοδιασμών. Ο ανεφοδιασμός του αποθηκευτή υδρογόνου στα αυτοκίνητα γίνεται περίπου σε 3 λεπτά. Το υδρογόνο ψύχεται και συμπιέζεται επιτόπου, μέσα στον αποθηκευτή. Αντίθετα για τον ανεφοδιασμό δοχείων αποθήκευσης σε πίεση 70-80 MPa το υδρογόνο πρέπει να έχει προψυχθεί, διαφορετικά δεν γίνεται να επιτευχθεί συμπίεση στην παραπάνω τιμή πίεσης, μέσα στον αποθηκευτή.



Αποθηκευτές υδρογόνου Dynetek GmbH για λεωφορείο της εταιρίας MAN. 15 ενιαία δοχεία, μέγιστης πίεσης λειτουργίας 25MPa, συνολικού βάρους 960kg και όγκου 2,58 m³

4.4.2 Υδρογόνο σε υγρή μορφή

ΥΓΡΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ LH₂

Το σημείο βρασμού του υδρογόνου είναι 20,39K σε πίεση 101,3kPa για το ορθο-υδρογόνο και 20,26K για το παρα-υδρογόνο. Όπως άλλα αέρια(πχ άζωτο), το υδρογόνο σε υγροποιημένη μορφή έχει πλεονέκτημα σε αποτελεσματικότερη αποθήκευση και πιο εύχρηστη δυνατότητα τροφοδοσίας. Το υγρό υδρογόνο εκτός της αποθήκευσής του για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιείται ως προωθητικό πυραύλων, διαστημοπλοίων και σε ερευνητικά πειράματα.

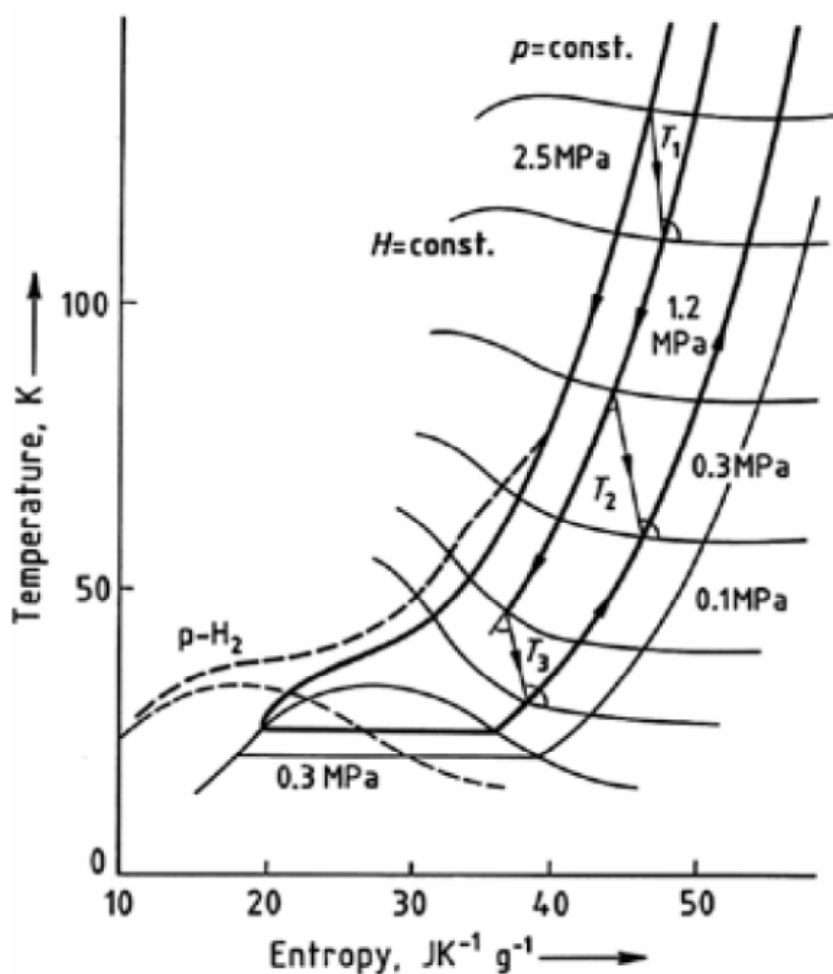
ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗ

Η υγροποίηση επιτυγχάνεται με ψύξη του υδρογόνου σε θερμοκρασία χαμηλότερη από αυτή του σημείου βρασμού και υπάρχουν διάφορες διαδικασίες για να επιτευχθεί. Είτε ψύχοντας το υδρογόνο σε εναλλάκτες θερμότητας, με τη βοήθεια ακόμα πιο ψυχρών μέσων(πχ υγρό ήλιο), είτε με μαγνητική ψύξη η οποία βασίζεται στο μαγνητοθερμικό φαινόμενο (Magnetocaloric Effect-MCE), είτε με εκτόνωση βάσει του φαινομένου Joule-Thomson.

Καθώς το υδρογόνο σε κανονικές συνθήκες έχει ένα αντίστροφο φαινόμενο Joule-Thomson(τα περισσότερα αέρια, σε κανονικές συνθήκες, ψύχονται όταν εκτονώνονται και θερμαίνονται όταν συμπιέζονται, αντίθετα από το υδρογόνο), πρέπει να ψυχθεί κάτω απ τη θερμοκρασία αντιστροφής του φαινομένου Joule-Thomson, περίπου στους 203K με τη βοήθεια ενός άλλου ψυκτικού μέσου(συνήθως του υγρού αζώτου). Η συνηθισμένη αρχική θερμοκρασία εκτόνωσης είναι το σημείο

βρασμού του αζώτου στους 77K και σε πίεση 0,1 MPa. Μέσα σε αυτή την περιοχή του διαγράμματος T(θερμοκρασίας)- s(εντροπίας) η ισενθαλπική μεταβολή έχει απότομη ανοδική κλίση, το οποίο συνεπάγεται ότι η εκτόνωση προκαλεί μεγάλη ψύξη.

Το μαγνητοθερμικό φαινόμενο βασίζεται στο γεγονός ότι αν εφαρμοστεί ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο σε ένα μαγνητικό υλικό, τα μαγνητικά χαρακτηριστικά του υλικού τροποποιούνται και αυτό προκαλεί μια αλλαγή στη θερμοκρασία του μαγνητικού υλικού. Έτσι ένας απομαγνητισμός κοντά στη θερμοκρασία Curie, όπου ο φερρομαγνητισμός αλλάζει σε παραμαγνητισμό, προκαλεί μια απώλεια θερμότητας. Η θερμοκρασία μειώνει περίπου 1K για κάθε T(Tesla).



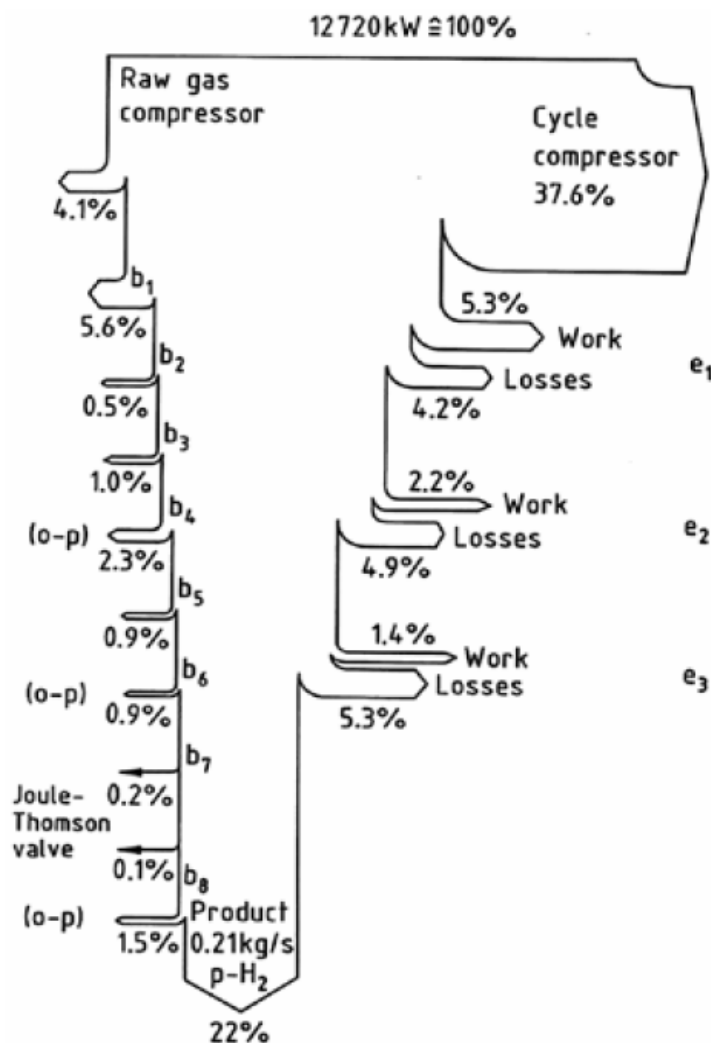
Ιδανική διαδικασία υγροποίησης στο διάγραμμα s-T.

Σαν βάση για την αξιολόγηση της πρακτικά εφαρμοσμένης τεχνολογίας, αναφέρεται η ακόλουθη ιδανική διαδικασία ρευστοποίησης:

1. Ισοθερμική συμπίεση του αερίου
2. Ισεντροπική εκτόνωση

Η απαραίτητη ενέργεια για να επιτευχθεί αυτή η διαδικασία είναι περίπου 11,8 MJ/kg και περιλαμβάνει εκτός απ την απώλεια της θερμότητας και την μετατροπή ο-ρ(ορθο-υδρογόνο σε παρα-υδρογόνο). Η τιμή της απαιτούμενης ενέργειας, εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες και την αρχική θερμοκρασία και την τελική αναλογία μετατροπής ο-ρ. Οι ιδανικές απώλειες θερμότητας με αυτή τη διαδικασία είναι 15 φορές περισσότερες από ότι με την υγροποίηση με τη βοήθεια του υγρού αζώτου.

Οι απώλειες που εμφανίζονται στην πραγματικότητα παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα:



Με τη χρησιμοποίηση τουρμπίνων συμπίεσης με απόδοση $\eta=0,8$ η συνολική απόδοση κυμαίνεται στο 0,21. Αυτό σημαίνει ότι η απαιτούμενη ενέργεια θα είναι περίπου 56 MJ/kg(98% παρα-υδρογόνο).

Στις μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις η αποδοτικότητα μπορεί να αυξηθεί από τα ακόλουθα μέτρα:

1. Χρησιμοποίηση υγρού αζώτου(LN2) για πρόψυξη
2. Υψηλής απόδοσης τουρμπίνες και συμπιεστές

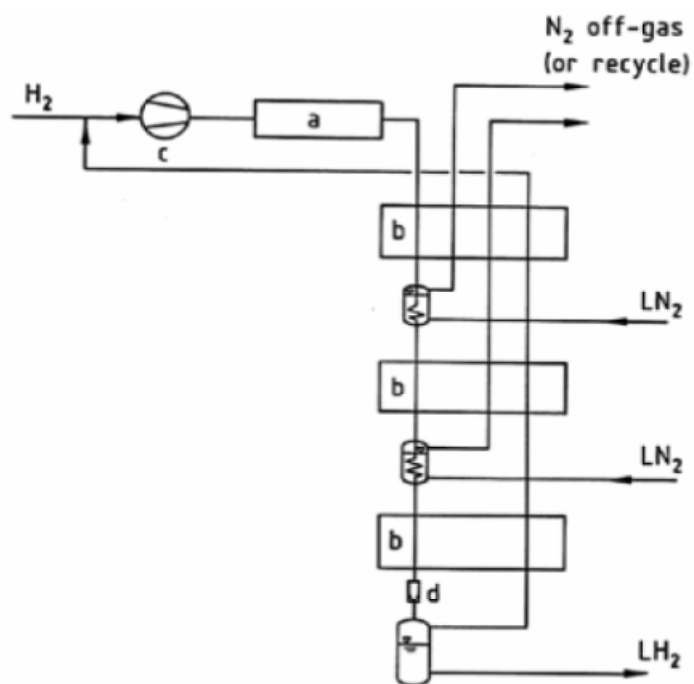
3. Βελτίωση στη μόνωση του περιβλήματος του δοχείου αποθήκευσης
4. Εναλλάκτες θερμότητας και αντιδραστήρες με μεγαλύτερη απόδοση

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗΣ

Αυτή τη στιγμή υπάρχουν λίγα συστήματα υγροποίησης υδρογόνου στον κόσμο. Το μεγαλύτερο σύστημα υγροποίησης με ικανότητα περίπου 60τόνους/μέρα λειτουργεί στις ΗΠΑ. Εξυπηρετεί κυρίως τις ανάγκες για τα καύσιμα των μηχανών των πυραύλων που χρησιμοποιούνται για τα διαστημικά ταξίδια.

Μερικά μικρότερα συστήματα υγροποίησης βρίσκονται στην Ευρώπη (πχ Ολλανδία). Εξυπηρετούν την τροφοδοσία βιομηχανιών υδρογόνου γενικά, την παραγωγή καυσίμων για τις μηχανές των πυραύλων για τα διαστημικά ταξίδια και κάποιες ερευνητικές εφαρμογές. Το μεγαλύτερο σύστημα υγροποίησης στην Ευρώπη έχει ικανότητα παραγωγής 5τόνους/μέρα.

Τα μεγάλα συστήματα χρησιμοποιούν τη διαδικασία Linde-Hampson, με την οποία στα ανώτερα επίπεδα το συμπιεσμένο υδρογόνο, εκτονώνεται στις τουρμπίνες. Τα μικρότερα συστήματα χρησιμοποιούν τη διαδικασία Linde με μικρότερα επίπεδα πίεσης γενικά.



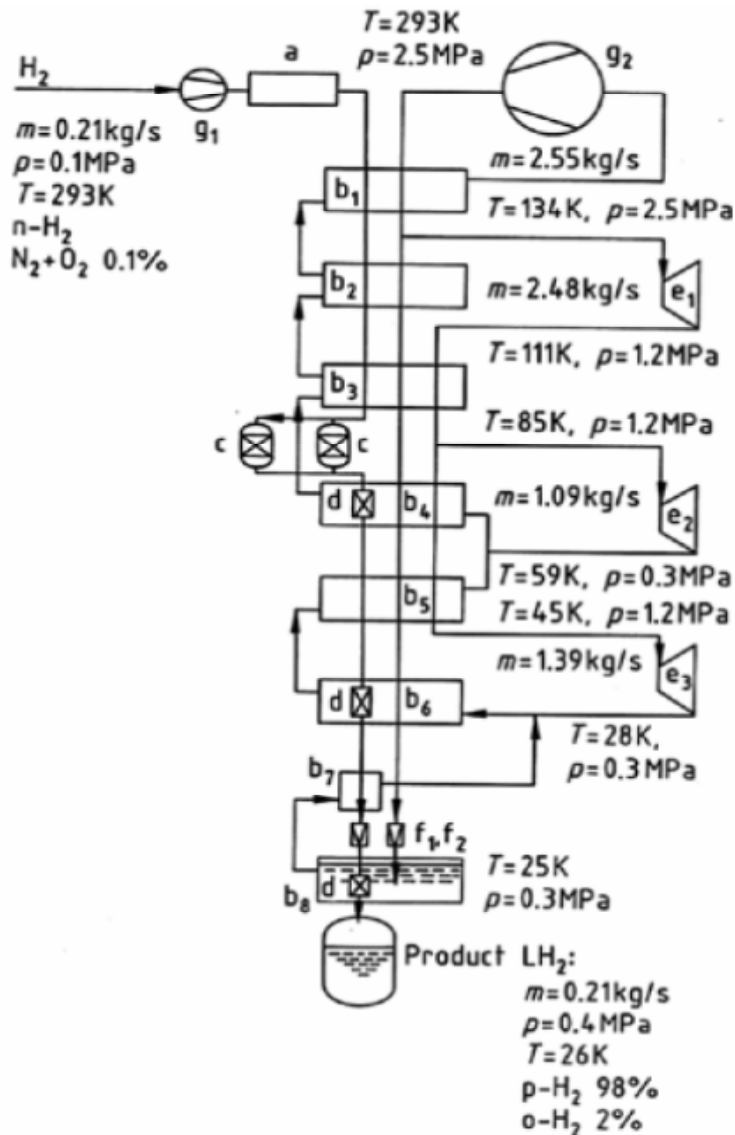
Διαδικασία Linde

- a) Προετοιμασία, προσρόφηση
- b) Εναλλάκτες θερμότητας
- c) Συμπιεστής υδρογόνου
- d) Βαλβίδες εκτόνωσης

Εάν καταναλωθεί άμεσα το LH₂, μπορεί να μην χρησιμοποιηθεί η μετατροπή ορθο-υδρογόνου σε παρα-υδρογόνο. Όλων των συστημάτων υγροποίησης είναι κοινό στοιχείο η ανάγκη ενός προεπιλεγμένου σταδίου καθαρισμού. Οι ακαθαρσίες οι οποίες παγώνουν κατά την απόψυξη θα μπλόκαραν τις σωληνώσεις. Το σύνηθες ποσοστό καθαρότητας >99,5%, μετά από ηλεκτρόλυση ή περίπου 99,9% μετά από στάδιο PSA ενός αναμορφωτή SMR αυξάνεται περισσότερο μετά από τα εξής βήματα:

- 1) Αδιαβατική καταλυτική απομάκρυνση από υδρογόνο, σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέσω ανασυνδέσεων. (μετά από ηλεκτρόλυση)
- 2) Στέγνωμα προσρόφησης (μετά από ηλεκτρόλυση)
- 3) Περαιτέρω καθαρισμός απορρόφησης για απομάκρυνση αζώτου, μεθανίου, αργού, μονοξειδίου του άνθρακα, σε θερμοκρασία LN₂.

Η παραγόμενη θερμότητα κατά την μετατροπή o-p πρέπει επίσης να απομακρυνθεί. Η μετατροπή τοποθετείται μέσω καταλυτών από οξείδιο του σιδήρου και προωθείται στα τελευταία στάδια εναλλαγής θερμότητας.



Διαδικασία Linde

- a) Προσροφητικό και καταλυτικό προκαθάρισμα
- b1-b8) Εναλλάκτες θερμότητας
- c) Προσροφητές στις θερμοκρασίες του LN₂
- d) Αντιδραστήρας μετατροπής ο-p
- e1-e3) Τουρμπίνες εκτόνωσης
- f1-f2) Τιμές εκτόνωσης 70
- g1) Συμπεστής
- g2) Ανακυκλωτικός συμπεστής για τον κύκλο ψύξης του H₂

ΨΥΓΕΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΓΡΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Υπάρχει μια διαφοροποίηση μεταξύ των αποθηκευτών υγρού υδρογόνου, σε αυτούς που είναι στάσιμοι και αυτούς που είναι κινητοί για απευθείας τροφοδοσία, συγκεκριμένα για τους κινητούς αποθηκευτές LH2 για τα αυτοκίνητα.



Αποθηκευτής LH2 χωρητικότητας 3800m³ στο διαστημικό κέντρο απογείωσης Kennedy στη Φλόριντα

Μια τυπική δομή ενός αποθηκευτή LH2, που χρησιμοποιούν τα οχήματα 750h της BMW παρουσιάζεται παρακάτω:

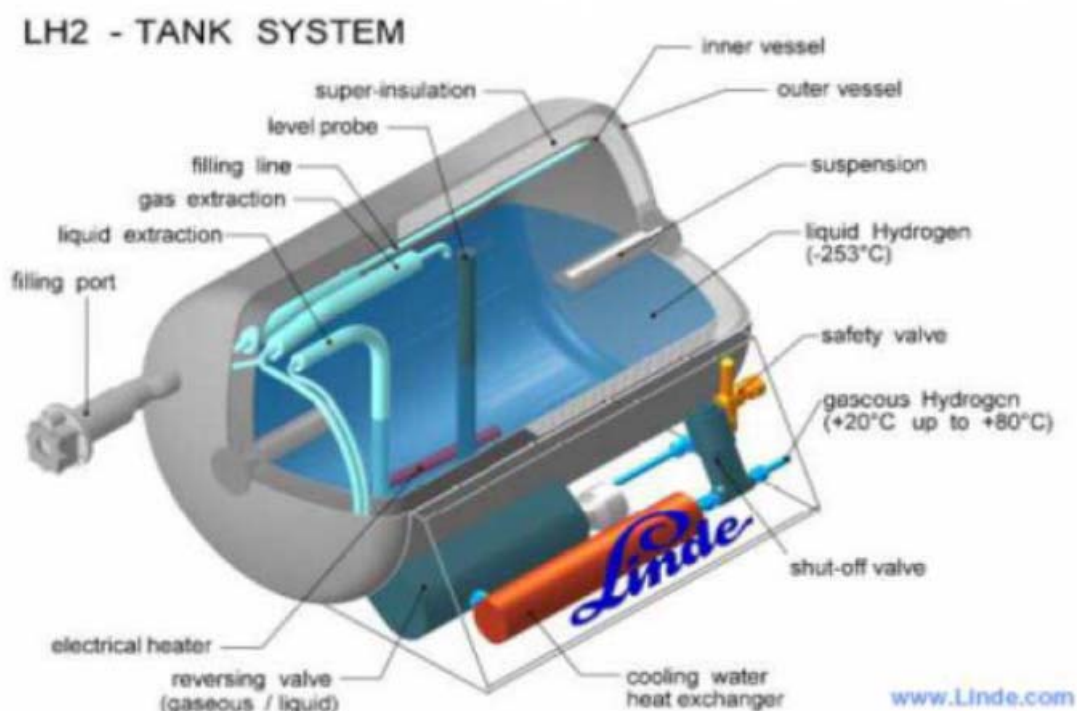


Figure 18 – Schematic representation of a cryogenic vessel – design and components
[Reference: Linde AG]

Η δεξαμενή αποθήκευσης του LH2 καλείται επίσης και κρυστάτης. Η δεξαμενή αποτελείται από μια φλοίδα διπλής επίστρωσης χάλυβα, άριστης ποιότητας. Μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής επίστρωσης υπάρχει αεροστεγές μονωτικό υλικό υψηλής ποιότητας. Αυτή η κατασκευαστική δομή περιορίζει τις απώλειες στο ελάχιστο, έτσι η δεξαμενή που παρουσιάζεται στο παραπάνω σχήμα, η οποία έχει χωρητικότητα 180λίτρα, έχει απώλειες περίπου 1,5% ανά μέρα, λόγω εξάτμισης και διαφυγής μέσω της βαλβίδας. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα 7kg υγρού υδρογόνου που δέχεται η δεξαμενή, θα διαφύγουν στο περιβάλλον μέσα σε 2 μήνες μη χρήσης της μηχανής.

Ο διαχειριστής της διαδικασίας εξάτμισης, προσπαθεί να περιορίσει αυτές τις απώλειες, ή να μεταφέρει το εξατμισμένο υδρογόνο ώστε να αποθηκευτεί αλλού, ή να χρησιμοποιήσει:

- ‘Θερμή ψύξη’ με τη χρήση ανασυνδυαστικού καταλύτη.
- Η δεξαμενή αποθήκευσης να βρίσκεται μέσα σε μια άλλη δεξαμενή με μεταλλικό υδρίδιο.
- Επαναυδροποίηση
- Απευθείας ενεργητική χρήση σε κυψέλες καυσίμου.

Οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες τοποθετούν γενικά σε υψηλό επίπεδο τις απαιτήσεις στο σχεδιασμό των υπόλοιπων εξαρτημάτων (πχ βαλβίδες, σωλήνες εξόδου, συσκευές μέτρησης).

4.4.3 Υδρογόνο σε στερεά μορφή

ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΕΣ ΣΤΕΡΕΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Για την αποθήκευση στερεού υδρογόνου χρησιμοποιούμε 2 διαφορετικές διαδικασίες. Την φυσική προσρόφηση και την χημική προσρόφηση. Με τη φυσική προσρόφηση τα μόρια του υδρογόνου προσροφούνται, συνδεδεμένα λόγω των δυνάμεων Van der Waals και ανεβαίνουν στην επιφάνεια.

Η χημική προσρόφηση περιλαμβάνει 3 βήματα:

- 1) Προσρόφηση των μορίων
- 2) Διαχωρισμός των μορίων
- 3) Τοποθέτηση των ατόμων στο δικτυωτό πλέγμα

Η αποθήκευση του υδρογόνου σε στερεά κατάσταση εκτός από το πλεονέκτημα της εξοικονόμησης όγκου, προσφέρει και το πλεονέκτημα της ασφάλειας καθώς το στερεό υδρογόνο αποθηκεύεται σε χαμηλή πίεση και μέτρια θερμοκρασία.

ΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΥΔΡΙΔΙΑ (MH)

Τα μεταλλικά υδρίδια έχουν βάση μεταλλικές ενώσεις, οι οποίες μπορούν μέσω χημειορόφησης, να αποθηκεύσουν όπως ένα σφουγγάρι, υδρογόνο. Μέσω μιας χημικής στερεής αντίδρασης αποθηκεύεται το υδρογόνο κάτω από πίεση και αποβολή θερμότητας.

Αντιθέτως για την απελευθέρωση H_2 , πρέπει να προσφέρουμε θερμότητα ή να μειώσουμε την πίεση. Αυτή η διαδικασία της φόρτωσης και εκφόρτωσης μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές, χωρίς να υπάρχει σημαντική απώλεια αποθήκευσης.

Η επιλογή των υλικών ή η προεργασία πρέπει να συγχρονιστεί έτσι ώστε το βάρος της αποθήκης να μείνει ελάχιστο και η θερμοδυναμική, η θερμοκρασία, η πίεση και η φόρτο και αποφορτοκινητική να παραμένει μέσα στα πραγματικά όρια.

Συγκρότημα ελαφρών μεταλλικών υδριδίων όπως τα alanates ή τα boranates απορροφούν έως και 5-8wt% σε 180°C και 0,1 MPa, αλλά το ποσοστό απελευθέρωσης είναι ακόμα πολύ αργό. Εδώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν καταλύτες όπως το Ti και το Zr. Έτσι αυτά τα υλικά είναι πολύ ενδιαφέρον για

συστήματα καυσίμων αυτοκινήτων γιατί η αυτοκινητοβιομηχανία απαιτεί ποσοστό πυκνότητας του συστήματος 7wt%.

Στην παράγραφο 17 της International Energy Agency IEA, παρατίθεται ένας πίνακας δεδομένων ο οποίος περιέχει πάνω από 2400 ενώσεις μεταλλικών υδριδίων. Ένα συμπέρασμα της ομάδας αυτής είναι ότι για αναστρέψιμη αποθήκευση σε χαμηλές έως και μέτριες θερμοκρασίες ενώσεων των ελαφρών μετάλλων, Na, Li και Al είναι οι καλύτεροι υποψήφιοι για στερεάς κατάστασης αποθηκευτικά μέσα.

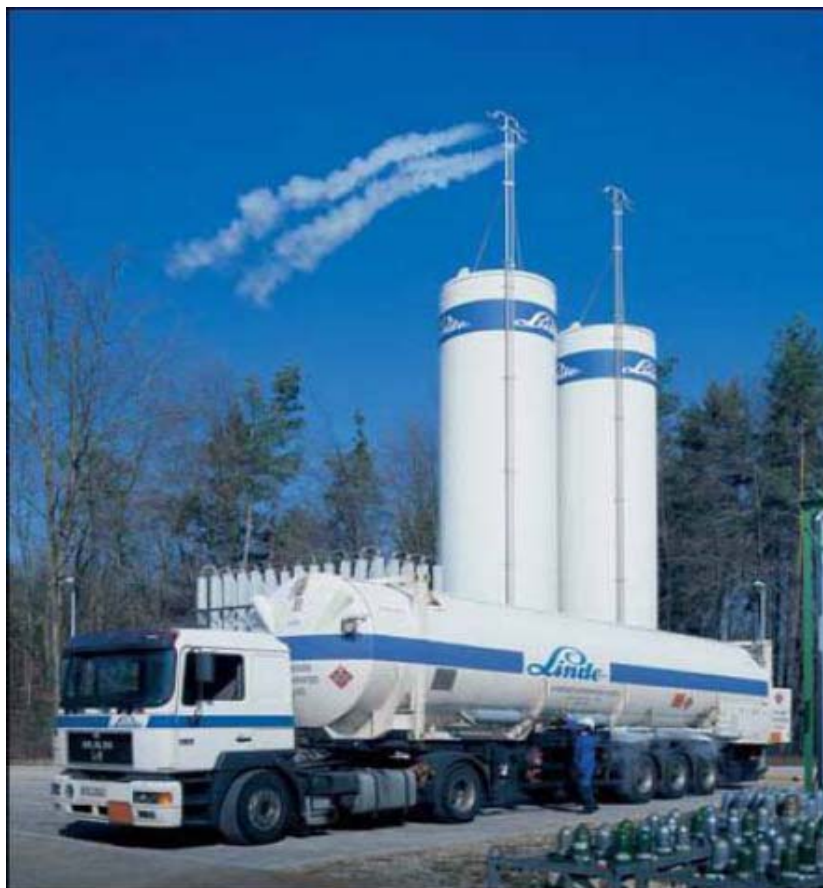
4.4.4 Μεταφορά

Υπάρχουν 2 βασικοί τρόποι μεταφοράς του υδρογόνου. Ο ένας είναι μέσω της μεταφοράς δεξαμενών αποθήκευσης σε μορφή LH₂(υγρό υδρογόνο) και ο άλλος με απευθείας συνεχής τροφοδοσία μέσω δικτύων αγωγών και σωληνώσεων σε μορφή CGH₂(συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο).

ΔΙΑΚΡΙΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ

Με διακριτό τρόπο το υδρογόνο μεταφέρεται στις καταστάσεις που περιγράψαμε πριν, δηλαδή είτε σε αποθηκευτές συμπιεσμένου υδρογόνου, είτε σε ψυγεία-αποθηκευτές υγρού υδρογόνου. Επειδή όμως οι ποσότητες μεταφοράς είναι σχετικά μικρές, η τροφοδοσία με αυτόν τον τρόπο είναι πολύ ακριβή.

Οι εταιρίες μεταφοράς και διανομής για οικονομικούς λόγους, προτιμούν την μεταφορά του υδρογόνου σε υγρή μορφή. Έτσι χρησιμοποιείται η δεξαμενή αποθήκευσης υγρού υδρογόνου LKW, η οποία είναι εξοπλισμένη με υπερμονωτικό αεροστεγές υλικό. Έχει βάρος σχεδόν 3,5 τόνους και μπορεί να μεταφέρει κάτι λιγότερο από 40 τόνους υγρού υδρογόνου. Αντίθετα οι συμβατικές δεξαμενές αποθήκευσης συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου, εκτός του ότι είναι βαρύτερες, έχουν περίπου 10 φορές μικρότερη χωρητικότητα από τις LKW.



Φορητό με δεξαμενή υγρού υδρογόνου

Στα πλαίσια του προγράμματος της ΝΑΣΑ ταξιδεύουν ήδη μικρά φορητά πλοία και φορητά αυτοκίνητα με LH₂. Η κατασκευή τους βασίστηκε στα ντεπόζιτα LNG (υγρό υγραέριο). Φορητά πλοία μεταφοράς LH₂, έχουν διπλό πάτωμα και μεγάλα κυλινδρικά ντεπόζιτα. Λόγω του ότι το LH₂ σε ίδια ενεργειακή ποσότητα χρειάζεται 2,5 φορές περισσότερο χώρο από το LNG, απαιτούνται αναλόγως μεγαλύτερα ντεπόζιτα. Προβλήματα είναι οι απώλειες εξάτμισης και οι απώλειες κατά την μεταφορά από το ένα ντεπόζιτο στο άλλο (έως και 10%).

Στα πλαίσια της φάσης III.0-4 του EQHHPP κατασκευάστηκε ένα σύστημα μεταφοράς με Multi-Layer-Vacuum υπέρ-απομόνωση. Στα αρχικά στάδια έχουν σχεδιαστεί κοντέινερ μήκους 15m και εν συνεχεία προγραμματίζεται η σχεδίαση κοντέινερ, μήκους 25m (70-110 m³). Τα κοντέινερ αυτά έχουν σχεδιαστεί για μεταφορά πάνω σε φορητά και νοτιοαμερικανικούς και ιαπωνικούς σιδηροδρόμους. Η αυτονομία (μηδενική απώλεια προϊόντος λόγω απελευθέρωσης του υδρογόνου στην ατμόσφαιρα) του συστήματος κοντέινερ για ένα ποσοστό πληρότητας 90% υγρού προϊόντος, είναι σχεδιασμένη για 30 μέρες. Η μεταφορά με σύγχρονα κοντέινερ στο κατάστρωμα των πλοίων μπορεί να γίνει σε περιορισμένη ποσότητα αυτή τη στιγμή. Μακροπρόθεσμα για μεταφορά μεγαλύτερων όγκων θα χρειαστούν νέες τεχνολογίας κοντέινερ. Με το σχέδιο αυτό στόχος είναι η μείωση του κόστους μεταφοράς στο μισό του ήδη υπάρχοντος.



Λεξαμενόπλοιο LH₂

ΣΥΝΕΧΕΣ ΔΙΚΤΥΟ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΜΕ ΣΩΛΗΝΩΣΕΙΣ

Η τροφοδοσία υδρογόνου μέσω ειδικών σωλήνων υψηλής πίεσης, για αποστάσεις κάποιων εκατοντάδων km, είναι μια δοκιμασμένη διαδικασία για περισσότερο από 50 χρόνια. Για παράδειγμα το δίκτυο σωληνώσεων που χρησιμοποιούν τα χημικά εργοστάσια Huels στην περιοχή Ruhr, λειτουργεί από το 1938, έχει μήκος 215km, διάμετρο σωλήνων 168-273mm, με πίεση μεταφοράς 2,5MPa και δεν έχει προκληθεί ποτέ κανένα ατύχημα. Επίσης στη Leuna λειτουργεί ένα δίκτυο σωλήνων, νεότερης κατασκευής, βάσει της διαδικασίας Linde, με μήκος 50km και πίεση 2MPa. Στο Βέλγιο και στη Γαλλία υπάρχει ένα δίκτυο σωληνώσεων από το 1966, μήκους 290km, με πίεση 6,5-10MPa. Στο Ρότερνταμ επίσης υπάρχει δίκτυο σωληνώσεων μεταφοράς H₂, μήκους περίπου 50km. Στις ΗΠΑ υπάρχουν αρκετά δίκτυα σωληνώσεων. Στο Huston λειτουργεί ένα δίκτυο από το 1969, μήκους 232km, διάμετρο σωλήνων 114-220mm και πίεση μέχρι 5,8MPa. Στη Louisiana, στη Νέα Ορλεάνη λειτουργεί ένα δίκτυο 96km. Στον Καναδά, στην επαρχία Αλμπέρτα, υπάρχει ένα δίκτυο 22km μακριών σωληνώσεων, το οποίο αποτελεί το πρώτο βήμα για μεγαλύτερα δίκτυα σωληνώσεων με πολλαπλές συνδέσεις παραγωγών και καταναλωτών. Όλα αυτά τα συστήματα διαχείρισης υδρογόνου από απόσταση λειτουργούνε έως τώρα με ασφάλεια σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και ξηρή κατάσταση αερίου.

Έρευνες στην Ιαπωνία και τα πρώτα αποτελέσματα του ευρωπαϊκού πρότζεκτ NATURALHY έδειξαν ότι για την μεταφορά υδρογόνου σε μορφή αερίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και το ήδη υπάρχον σύστημα σωληνώσεων υγραερίου της κάθε μία χώρας. Επειδή το υδρογόνο είναι ισχυρώς διαχεόμενο και διαπερνά ορισμένα μέταλλα, μπορούν σε μερικά μόνο τμήματα των σωληνώσεων να μεταφερθούν μείγματα από υγραέριο και υδρογόνο. Ειδικά οι πιο παλιές σωληνώσεις δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν των υψηλότερων απαιτήσεων. Επειδή οι σωληνώσεις αυτές στον επόμενο καιρό πρέπει να αντικατασταθούν, μπορούμε κατευθείαν με ένα λίγο

μεγαλύτερο κόστος να τις εκσυγχρονίσουμε και να τις καταστήσουμε κατάλληλες και για μεταφορά υδρογόνου.



Παράδειγμα γερμανικού δικτύου υγραερίου

Η μικρή πυκνότητα του υδρογόνου καθιστά αναγκαία μεγαλύτερη διάθεση όγκου, η οποία σε σύγκριση με το υγραέριο απαιτεί μεγαλύτερο έργο συμπίκνωσης. Οι απώλειες αθροίζονται περίπου στο 10% για ένα μήκος σωληνώσεως των 1000km.

Στο διαστημικό κέντρο Kennedy χρησιμοποιούνται ήδη σωληνώσεις για LH2 παρότι είναι μόνο το πολύ μέχρι 100m μήκος. Σωληνώσεις για το LH2 είναι λόγω της πολύπλοκης μόνωσης κατάλληλες έως 50km.



Δίκτυο σωληνώσεων υδρογόνου

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΤΩΝ

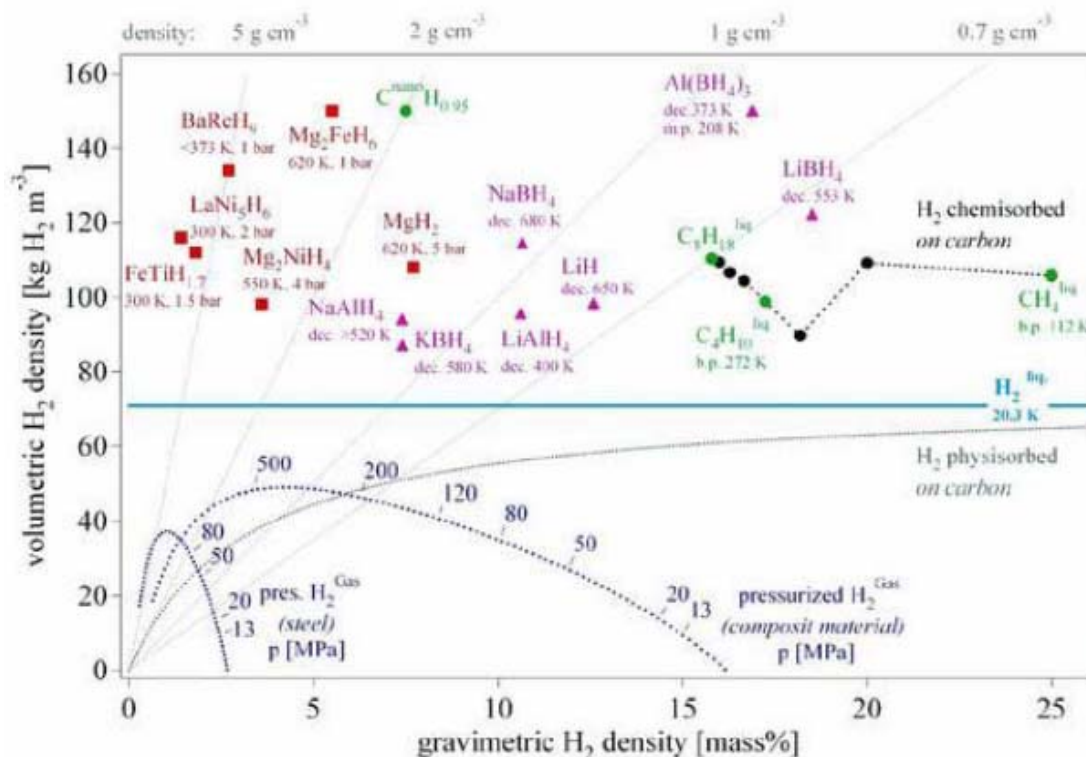
Οι αποθηκευτές υδρογόνου σε μορφή συμπιεσμένου αερίου (CGH₂) είναι εύκολα διαθέσιμοι και εύχρηστοι. Οι υψηλές πιέσεις όμως απαιτούν ειδική προσοχή στο θέμα της ασφάλειας του συμπιεσμένου αερίου υδρογόνου. Στη βελτίωση των αποθηκευτών CGH₂ μπορεί να συμβάλει η εμπειρία μας σε αποθήκευση συμπιεσμένων αερίων, καθώς υπάρχει διαθέσιμη υποδομή.

Από την άλλη το LH₂ έχει υψηλότερη ογκομετρική πυκνότητα αποθήκευσης από το CGH₂. Όμως επειδή δεν υπάρχει μεγάλη εμπειρία σε μεταφορά κρυογονικών υγρών, υπάρχει αυξημένη πιθανή επικινδυνότητα. Τα μοντέρνα υλικά πάντως συμβάλλουν στην ασφαλή αποθήκευση και μεταφορά, καθότι στους αποθηκευτές LH₂, το υδρογόνο βρίσκεται σε σχετικά χαμηλή πίεση, λίγο μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική.

Για την υγροποίηση του υδρογόνου, απαιτείται περίπου 30% της ενέργειας που περιλαμβάνει, δηλαδή το διπλάσιο ποσό ενέργειας από αυτήν που απαιτείται για αποθήκευση σε συμπιεσμένη μορφή σε περίπου 350bar. Αν κανείς όμως συμπεριλάβει το συνολικό ενεργειακό κόστος αποθήκευσης, μεταφοράς και διανομής του υδρογόνου, τότε η υγρή μορφή τροφοδοσίας είναι η βέλτιστη επιλογή. Παρότι η μετατροπή σε υγρό κοστίζει περισσότερο σε ενέργεια, η εξοικονόμηση ενεργειακών δαπανών από την τροφοδοσία υπερκαλύπτει το κόστος, σε σχέση με την αντίστοιχη του συμπιεσμένου αερίου υδρογόνου.

Η στερεά κατάσταση αποθήκευσης είναι μακράν η ελκυστικότερη δυνατότητα αποθήκευσης του υδρογόνου, αλλά προς το παρόν υπάρχουν τεχνικές δυσκολίες στην

ευρεία εφαρμογή της, ειδικά για εφαρμογή στις μηχανές των αυτοκινήτων και απαιτεί μια ειδική θερμική επεξεργασία.



Ογκομετρική/Βαρυμετρική πυκνότητα των δεξαμενών υδρογόνου στους διάφορους τύπους αποθήκευσης

4.5 Χρησιμοποίηση Υδρογόνου στην παραγωγή ενέργειας

4.5.1 Κύτταρο καυσίμου-Αρχή λειτουργίας

ΚΥΤΤΑΡΟ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Τα ενεργειακά συστήματα για να αυξήσουν την απόδοσή τους, χρειάζεται να περιλαμβάνουν τον ελάχιστο απαραίτητο αριθμό κύκλων μετατροπής ενέργειας και αυτοί οι κύκλοι να έχουν τον υψηλότερο δυνατό συντελεστή απόδοσης.

Με το κύτταρο καυσίμου, ανοίγει ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών στην άμεση μετατροπή της χημικής ενέργειας του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια, καθώς ο συντελεστής απόδοσης είναι πολύ υψηλός και τα καυσαέρια είναι φιλικά προς το περιβάλλον.

Μια ουσιαστική διαφορά του κυττάρου καυσίμου από τις συμβατικές ηλεκτρικές πηγές, είναι η δυνατότητα τροφοδοσίας μέσω εξωτερικής παροχής καυσίμου. Αντίθετα στις μπαταρίες και στους συσσωρευτές είναι δεδομένο το εύρος της ηλεκτρικής ικανότητας.

Επίσης σε σχέση με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την σύζευξη θερμικών μηχανών και ηλεκτρογεννητριών, η απόδοση των κυττάρων καυσίμου δεν υπόκειται στον περιορισμό Carnot. Κατά συνέπεια δεν είναι απαραίτητη η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγιστοποίηση της απόδοσης.

Το 1950 ξεκίνησε στην Αγγλία κι έπειτα στην Γερμανία και τις ΗΠΑ, η συστηματική μελέτη των αρχών λειτουργίας του κυττάρου υδρογόνου-οξυγόνου. Στις δεκαετίες '60 και '70 τα κύτταρα καυσίμου χρησιμοποιήθηκαν ως ενεργειακοί μετατροπείς στα υποβρύχια και στα διαστημικά ταξίδια. Το σύστημα κύτταρων καυσίμου που χρησιμοποιούνταν είχε αλκαλικούς ηλεκτρολύτες και λειτουργούσε με καύσιμα καθαρό νερό και οξυγόνο. Τα συστήματα αυτά είχαν μια απόδοση λειτουργίας γύρω στα 100kW. Από την πρώτη εφαρμογή των αλκαλικών κυττάρων καυσίμων(AFC) το 1963, με τα προγράμματα Gemini έχουν πραγματοποιηθεί χιλιάδες ώρες λειτουργίας και η τωρινή απόδοση έχει φτάσει περίπου στο 60%. Ήδη το 1985 η Siemens προμήθευσε με AFC ισχύς 17,5kW έναν ηλεκτροκίνητο μεταφορέα και ένα υποβρύχιο με ένα σύστημα ισχύς 100kW. Επιπλέον, ανεπτυγμένα συστήματα αυτού του τύπου άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα από τη δεκαετία του '70.

Κατά τα μέσα της δεκαετίας του '70 τα αλκαλικά κύτταρα καυσίμου, αντικαταστάθηκαν από κύτταρα καυσίμου φωσφορικού οξέος(PAFC). Τα κύτταρα φωσφορικού οξέος ήταν κατάλληλα για τις στάσιμες εφαρμογές των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και για την ικανοποίηση του φορτίου ακμής στις πόλεις με πυκνή ανάπτυξη. Παράλληλα η ανάπτυξη προωθήθηκε από την αναμόρφωση στη χρήση των υδρογονανθράκων. Στην Ιαπωνία επιτεύχθηκε μεγάλη αύξηση της ισχύος των κυττάρων καυσίμου από 100kW που ήταν σε 2MW, δίνοντας μια νέα ώθηση στην ανάπτυξή τους.

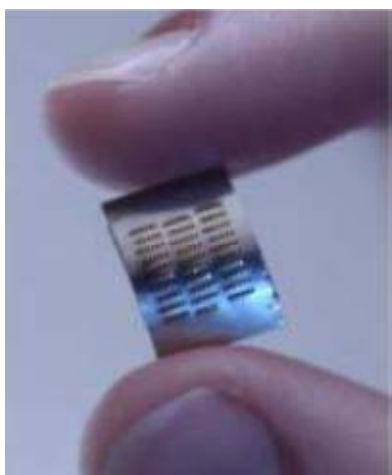
Στη δεκαετία του '80 η ανάπτυξη προωθήθηκε περισσότερο με τα κύτταρα καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, που υπόσχονταν μεγαλύτερη απόδοση. Αυτά ήταν τα κύτταρα καυσίμου με τηγμένα ανθρακικά άλατα(MCFC) και τα κύτταρα καυσίμου στερεών οξειδίων(SOFC).

Οι μεμβράνες αναπτύχθηκαν επίσης τη δεκαετία του '80 και οι βελτιωμένοι καταλύτες έφεραν τα κύτταρα καυσίμου μεμβρανών στο προσκήνιο τη δεκαετία του '90. Οι πολυμερείς μεμβράνες επιτρέπουν χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.



Σταθερό κύτταρο καυσίμου

Επίσης αναπτύσσονται και κύτταρα καυσίμου μικρού μεγέθους, ικανά να τοποθετηθούν σε ηλεκτρικές συσκευές όπως κινητά τηλέφωνα, lap-top, ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές κτλ, αντικαθιστώντας τις μπαταρίες.



Κύτταρο καυσίμου μεθανόλης μικροϋπολογιστών

Έτσι λοιπόν η χρήση του κυττάρου καυσίμου εκτείνεται από τις στάσιμες εφαρμογές στην τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μέχρι την αντικατάσταση των μπαταριών. Στην τεχνολογία των κυττάρων καυσίμων διεθνώς διατίθενται υψηλά οικονομικά κεφάλαια, με κέντρο των προσπαθειών ανάπτυξης να βρίσκονται οι κινητές εφαρμογές των κυττάρων καυσίμου. Ιδιαίτερα χρήσιμο στις κινητές εφαρμογές είναι το κύτταρο καυσίμου πολυμερής μεμβράνης (PEMFC), το οποίο αντιπροσωπεύει τη βάση για μια νέα τεχνολογία κίνησης οχημάτων, υψηλής απόδοσης και φιλικής στο περιβάλλον εκπομπής καυσαερίων. Έτσι οι

αυτοκινητοβιομηχανίες δαπανούν μεγάλα ποσά, της τάξης αρκετών εκατομμυρίων ευρώ, για έρευνα και ανάπτυξη των κυττάρων καυσίμου(γερμανική NIP, ευρωπαϊκή JTI). Για να έχει όμως ευρεία εφαρμογή στην αγορά αυτοκινήτου θα πρέπει να μειωθεί ακόμα περισσότερο η τιμή των συστημάτων κυττάρων καυσίμου.

Στον τομέα των στάσιμων εφαρμογών των κυττάρων καυσίμου, οι παγκόσμιες προσπάθειες επικεντρώνονται κυρίως στο να επεκταθεί η διάρκεια ζωής τους. Στις στάσιμες εφαρμογές τα κύτταρα καυσίμου, αντιμετωπίζουν τις αντίστοιχες εφαρμογές που χρησιμοποιούν ως καύσιμο, φυσικό αέριο. Η πρόοδος στις εφαρμογές των στάσιμων κυττάρων καυσίμου είναι πολύ υψηλή τα τελευταία χρόνια κι έτσι εκτιμάται ότι σύντομα θα φτάσουν σε ανταγωνιστικό οικονομικό επίπεδο, εκτός των άλλων πλεονεκτημάτων που ήδη διαθέτουν. Υπάρχουν ουσιαστικά δύο γραμμές ανάπτυξης, ανάλογα με τα μεγέθη των συστημάτων. Το σύστημα μεγάλου μεγέθους, που χρησιμοποιεί συμπαραγωγή ηλεκτρισμού-θερμότητας με ισχύ από 200kW έως κάποια MW και το σύστημα μικρού μεγέθους, ισχύς από 1-5kW, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος των σπιτιών. Αρχικά στα συστήματα μεγάλου μεγέθους χρησιμοποιούνταν κύτταρα καυσίμου φωσφορικού οξέος(PAFC), αλλά μετά την πρόοδο στην ανάπτυξη τους, χρησιμοποιούνται επίσης και τα κύτταρα καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων(MCFC) και τα κύτταρα καυσίμου στερεών οξειδίων(SOFC).

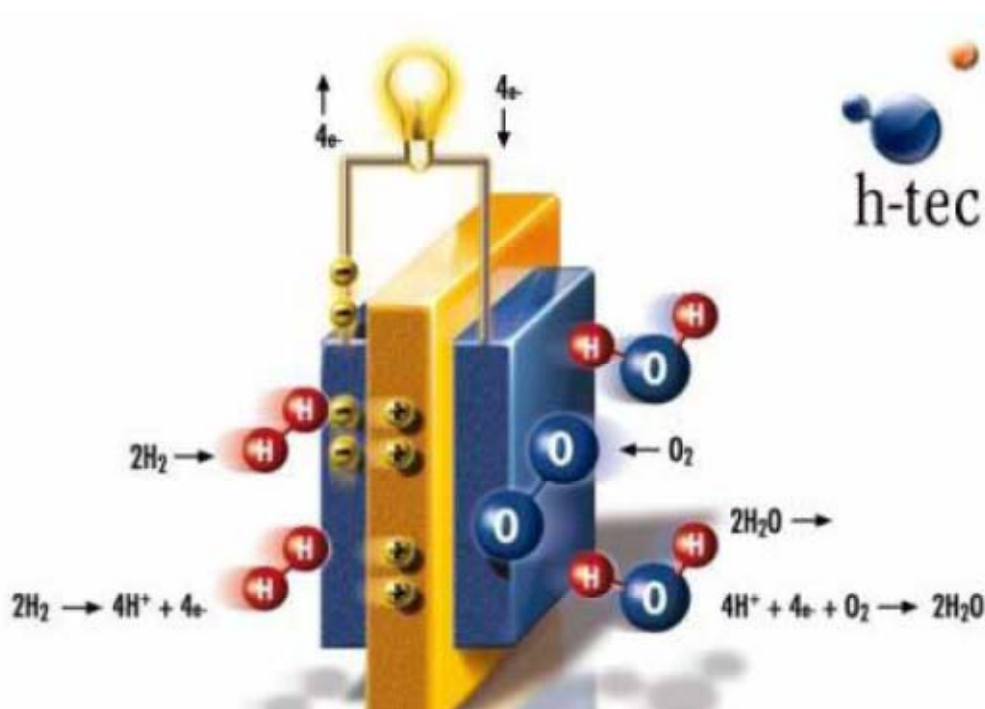
Ήδη έχουν επιτευχθεί σημαντικά αποτελέσματα στα κύτταρα καυσίμου για την αντικατάσταση των μπαταριών στον χώρο των τηλεπικοινωνιών. Με παρεχόμενη ισχύ από 1-500W καλύπτουν ένα πλήθος εφαρμογών. Για παράδειγμα μικρά κύτταρα καυσίμου ισχύς 10W χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία κινητών τηλεφώνων. Σε αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιούνται τα κύτταρα καυσίμου πολυμερής μεμβράνης(PEMFC).

Οι τομείς εφαρμογής διαφέρουν ως προς την απόδοση και την υποδομή που απαιτείται για την λειτουργία των κυττάρων καυσίμου. Έτσι ανάλογα με τον τομέα εφαρμογής, γίνεται και η κατάλληλη επιλογή του κυττάρου καυσίμου, που θα χρησιμοποιηθεί.

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Στα κύτταρα καυσίμου από την αντίδραση υδρογόνου-οξυγόνου, παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα και νερό. Για μια απευθείας μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική, τα αντιδρώντα στοιχεία(υδρογόνο, οξυγόνο), δεν πρέπει να έρθουν σε επαφή άμεσα, γιατί τότε θα συμβεί κανονική καύση ή εκρηκτική αντίδραση. Αν όμως τα αντιδρώντα στοιχεία διαχωρίζονται μεταξύ τους, από τους ηλεκτρολύτες, η αντίδραση υδρογόνου-οξυγόνου γίνεται ελεγχόμενα κι έτσι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ελεύθερα τόσο το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα όσο και η παραγόμενη θερμότητα. Η αρχή δομής όλων των κυττάρων καυσίμου είναι ίδια: δυο ηλεκτρόδια χωρίζονται από τους ηλεκτρολύτες. Οι ηλεκτρολύτες παρέχουν ιόντα, τα οποία λειτουργούν ως μονωτές σε σχέση με τα ηλεκτρόνια. Στο ένα ηλεκτρόδιο, την

άνοδο, παρέχεται το υδρογόνο, το οποίο με τη διαδικασία της οξείδωσης, διαχωρίζεται σε ιόντα υδρογόνου(πρωτόνια) και ανιόντα(ηλεκτρόνια). Τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται στην άνοδο(αρνητικό ηλεκτρόδιο). Στο άλλο ηλεκτρόδιο, την κάθοδο(θετικό ηλεκτρόδιο), γίνεται η αναγωγή του οξυγόνου. Η άνοδος και η κάθοδος συνδέονται μεταξύ τους μέσω των ηλεκτρολυτών. Τα ιόντα υδρογόνου διαπερνούν τον ηλεκτρολύτη, ενώ τα ηλεκτρόνια που εμποδίζονται από τον ηλεκτρολύτη αναγκάζονται να διασχίσουν το εξωτερικό κύκλωμα και τελικά να ενωθούν με τα ιόντα και το οξυγόνο στην κάθοδο, παράγοντας νερό. Η κίνηση των ηλεκτρονίων στο εξωτερικό κύκλωμα παράγει ηλεκτρικό ρεύμα.



Αρχή λειτουργίας κυττάρου καυσίμου

Στο κύτταρο καυσίμου οι αντιδράσεις που συμβαίνουν κατά σειρά είναι:

Αντίδραση στην άνοδο: $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$

Αντίδραση στην κάθοδο: $4H^+ + O_2 + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

Συνολική αντίδραση: $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \Delta H$

Από τον ηλεκτρολύτη αγωγό ιόντων εξαρτάται πώς θα συμβεί τα 2 ιονισμένα αντιδρώντα, να μετακινηθεί το ένα προς το άλλο, να αντιδράσουν, να κλείσει ο κύκλος και να απελευθερωθεί το παράγωγο της αντίδρασης H_2O , κατά την οξείδωση. Κινητήρια δύναμη είναι οι χημικές ιδιότητες των μερικών αντιδράσεων. Χωρίς την αγωγή ιόντων στον ηλεκτρολύτη σταματάει η αντίδραση.

Παρόμοια όπως και με τον ηλεκτρολύτη, μπορεί με τη βοήθεια της θερμοδυναμικής, να καθοριστεί η μέγιστη τάση ενός κυττάρου καυσίμου, όπως και ο θεωρητικός

μέγιστος ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης. Η ουδέτερη θερμική και η ενθαλπική διάσπαση κυττάρου καυσίμου είναι η παρακάτω:

$$U_{th} = \frac{\Delta H^{\circ}_O}{nF} = \frac{T\Delta s + \Delta G^{\circ}_O}{nF} = 1,48V$$

Σε πολλές περιπτώσεις ιδιαίτερα στα κύτταρα καυσίμου μεσαίων και υψηλών θερμοκρασιών, στα οποία το παραγόμενο H₂O εμφανίζεται στην αέρια φάση, η ενθαλπική τάση διάσπασης κυττάρου συνδυάζεται με την κατώτερη τιμή θέρμανσης του υδρογόνου (-241,8 kJ/mol). Έτσι προκύπτει μια τιμή της τάξης του 1,25V. Λόγω του ότι στην ενεργειακή τεχνολογία συνήθως εργαζόμαστε με την κατώτερη τιμή θέρμανσης καυσίμων υλών, αυτή η διαδικασία επιτρέπει μια καλύτερη σύγκριση με άλλες σύγχρονες διαδικασίες.

Η μέγιστη εφικτή τάση κυττάρου ονομάζεται αναστρέψιμη τάση κυττάρου V_{rev} και προκύπτει από την ελεύθερη ενθαλπία αντίδρασης ΔG της αντίδρασης κυττάρου, η οποία σε σχέση με την αντίδραση ενθαλπίας είναι μειωμένη κατά το ποσοστό $T\Delta S$. Η ελεύθερη ενθαλπία αντίδρασης της ολικής αντίδρασης αντιστοιχεί έτσι στο ηλεκτρικό έργο, το οποίο αποδίδεται σε μέγιστη τιμή από το κύτταρο καυσίμου, όταν τα αντιδρώντα και το παραγόμενο H₂O προσφέρονται και απορροφώνται στην ίδια θερμοκρασία και στην ίδια πίεση. Στην σταθερή κατάσταση αυτό το αντιστρέψιμο έργο αντίδρασης αντιστοιχεί σε $\Delta G_O = -237,3$ kJ/mol για υγρό H₂O, και $\Delta G_U = -228,6$ kJ/mol για παραγόμενο H₂O σε αέρια μορφή.

Με αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε μόνο την αντιστρέψιμη τάση κυττάρου στην σταθερή κατάσταση.

$$U_{rev} = \frac{\Delta G^{\circ}_O}{nF} = 1,23V$$

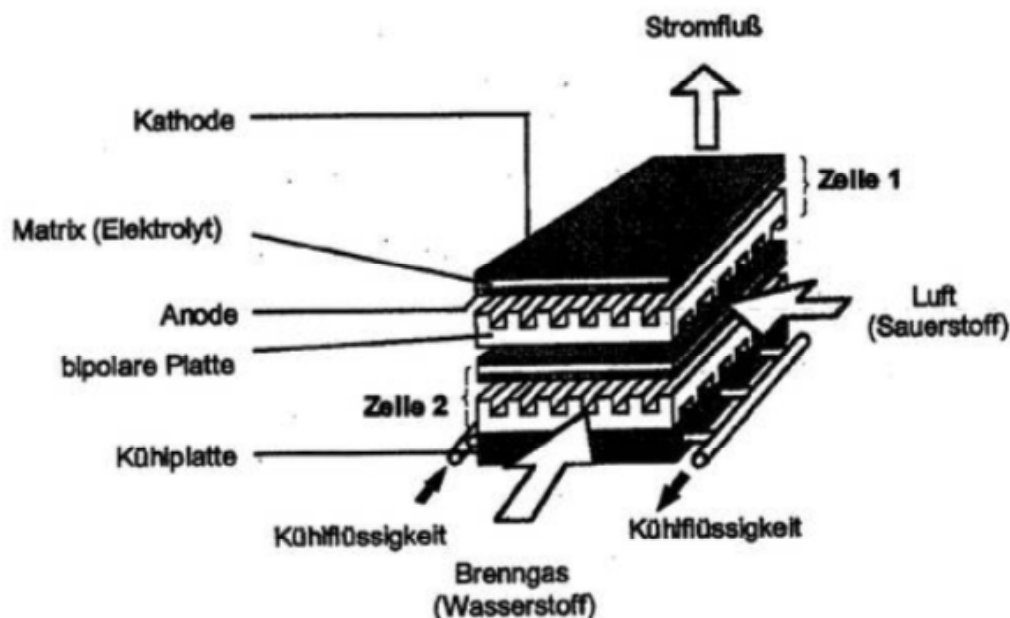
Ο ιδανικός βαθμός απόδοσης ενός κυττάρου καυσίμου υπολογίζεται από την ελεύθερη ενθαλπία αντίδρασης.

$$\eta_{max} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = 1 - T \frac{\Delta S}{\Delta H}$$

Σε κανονικές συνθήκες ο βαθμός απόδοσης είναι $\eta_{max} = 83,3\%$. Εάν το παραγόμενο H₂O βρίσκεται σε μορφή αερίου ο βαθμός απόδοσης είναι 94,5%.

Τα κύτταρα καυσίμου παράγουν όπως και όλα τα γαλβανικά στοιχεία, συνεχές ρεύμα. Όπως φαίνεται παραπάνω οι τάσεις παραμένουν μικρές και όταν καταναλώνεται ρεύμα από μικρούς καταναλωτές, παρουσιάζεται περαιτέρω μείωση τάσης, σε σχέση με την σταθερή τάση. Πρακτικές τάσεις κυττάρου κυμαίνονται μεταξύ 0,6-0,9V. Για να καταφέρουμε μεγαλύτερες τάσεις και ισχύεις συνδέουμε περισσότερα κύτταρα, σε σειρά μεταξύ τους. Λόγω της στοιβαγμένης μορφής τους αυτή η δομή ονομάζεται

‘stack’. Μέσα στο ‘stack’ τα κύτταρα καυσίμου ενώνονται μεταξύ τους, διηλεκτρικά, με διπολική πλάκα. Στην διπολική πλάκα είναι ενσωματωμένα κανάλια αερίων για την παροχή αερίου και κανάλια για την απομάκρυνση του νερού. Ένα παράδειγμα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Συνήθης κατασκευή ενός stack

Όπως αναφέραμε και παραπάνω η πραγματική ρυθμιζόμενη τάση είναι λόγω των διαδικασιών που διενεργούνται στο εσωτερικό του κυττάρου καυσίμου, ακόμα και χωρίς ρεύμα, χαμηλότερη από την ισχύουσα τάση κυττάρου σε πίεση και θερμοκρασία. Σε περίπτωση ροής ρεύματος η μείωση τάσης που θα υπάρξει υπολογίζεται από την τάση που το διαπερνά, τάση αντίδρασης στην κάθοδο και στην περιοχή της ανόδου όπως και στην τάση αντίστασης στην μεμβράνη. Γενικά οι υπερτάσεις και οι απώλειες, μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες, στην άνοδο συγκριτικά με την κάθοδο.

Η απόδοση τάσης η_T χαρακτηρίζει τη σχέση της τάσης κυττάρου καυσίμου στο σημείο λειτουργίας U με την αντίστοιχη τάση αναστροφής U_{rev} .

$$\eta_u = \frac{U}{U_{rev}}$$

Η απώλεια τάσης ΔV προκύπτει από την κατανομή της διαφοράς τάσης αναστροφής ΔU_{rev} , της τάσης διαπερατότητας ΔU_D , της τάσης αντίστασης ΔU_R , και την τάση συγκέντρωσης ΔU_{Diff} .

$$\Delta U = \Delta U_{rev} + \Delta U_D + \Delta U_R + \Delta U_{Diff}$$

Παρατηρούμε αμέσως ακόμα και στην κατάσταση χωρίς ρεύμα ότι η τάση V_R του κυττάρου καυσίμου, εμφανίζεται αρκετά κάτω από την τάση αντιστροφής του

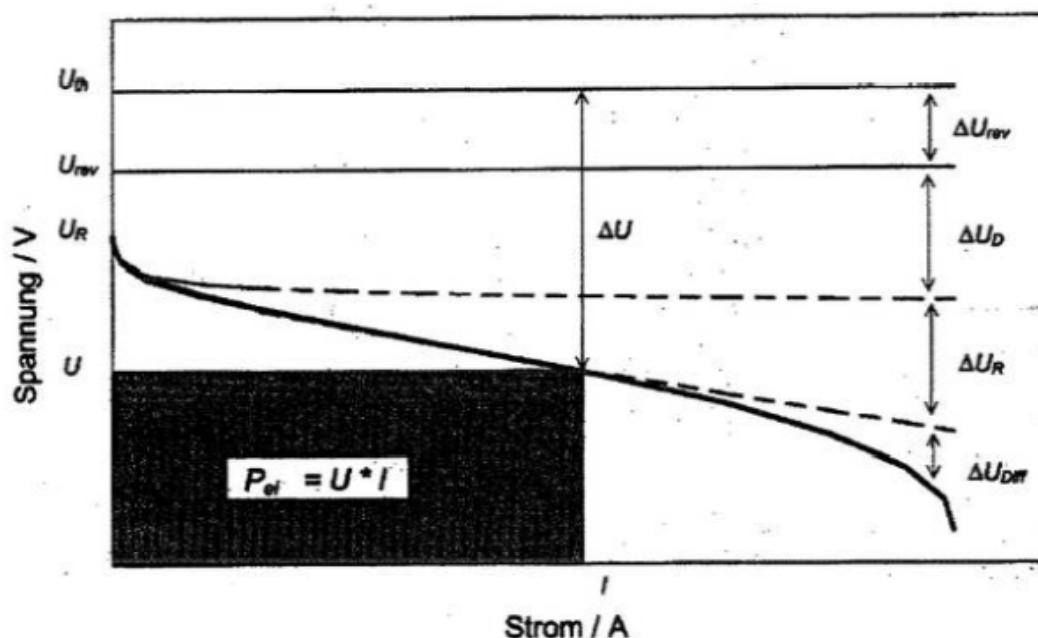
κυττάρου καυσίμου των 1,23V. Για αυτή την απόκλιση ευθύνεται συνήθως η δημιουργία ενός μείγματος στην μεριά της καθόδου. Αυτό το μείγμα εξειδικεύεται λόγω του ότι στην κάθοδο, ταυτόχρονα μειώνεται το οξυγόνο και οξειδώνεται η πλατίνα.

Σε μια μικρή περαιτέρω φόρτιση του κυττάρου καυσίμου, παρουσιάζονται σε μικρές πυκνότητες ρεύματος, περαιτέρω απώλειες τάσης, οι οποίες εμφανίζονται λόγω της διαπερατότητας των ηλεκτρονίων μέσω των ορίων των φάσεων του ηλεκτρολύτη και του ηλεκτροδίου. Αν συνεχίσουμε να αυξάνουμε περαιτέρω το ρεύμα, τα όρια αρχίζουν να ορίζονται περισσότερο από τις ωμικές απώλειες και γι αυτό σε αυτή την περιοχή η συσχέτιση ανάμεσα στην τάση και το ρεύμα είναι σχεδόν γραμμικά ανάλογη του ωμικού νόμου.

Σε υψηλά ρεύματα εμφανίζεται η κορυφή της γραμμής πάντα τότε, όταν συνεχίζεται η παροχή των αντιδρώντων με μικρότερη ταχύτητα από ότι συμβαίνει η ηλεκτροχημική αντίδραση. Πάνω από το ηλεκτρόδιο εμφανίζεται λόγω αυτού μια μικρή συγκέντρωση, η οποία χαρακτηρίζεται ως απώλεια τάσης ΔU_{Diff} .

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης ενός κυττάρου καυσίμου μπορεί γενικά να υπολογιστεί για ένα συγκεκριμένο λειτουργίας και συγκεκριμένη θερμοκρασία και πίεση από τον παρακάτω τύπο:

$$\eta_{ges} = \eta_{max} \eta_u = \frac{U n F}{\Delta H(T,p)}$$



Σχηματική αναπαράσταση μιας γραμμής ρεύματος/τάσης

Η συνέχεια της γραμμής στο σχήμα 46 εξαρτάται κυρίως από τον τρόπο λειτουργίας του κυττάρου καυσίμου και επηρεάζεται από την θερμοκρασία λειτουργίας, την πίεση, το βαθμό χρησιμότητας του καυσίμου στη μεριά της ανόδου και την παροχή

οξυγόνου στη μεριά της καθόδου. Επίσης συνυπολογίζεται και ο βαθμός απόδοσης ρεύματος του Faraday nF στο συνολικό βαθμό απόδοσης ενός κυττάρου καυσίμου. Η απόδοση του ρεύματος συμβολίζει πολύ μικρό ποσό ρεύματος του στοιχείου Ni του αντιδρώντος i και υπολογίζεται ως εξής:

$$\eta_{Li} = \frac{i}{nFN_i}$$

4.5.2 Τύποι κυττάρων καυσίμου

Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι κυττάρων καυσίμου, που συνήθως είναι ταξινομημένοι ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται. Οι ηλεκτρολύτες καθορίζουν κυρίως τον τρόπο με τον οποίο θα γίνει η ιοντική αντίδραση.

Υπάρχουν οι εξής τύποι κυττάρων καυσίμου:

1) Κύτταρα καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας.

A) αλκαλικά κύτταρα καυσίμου

B) κύτταρα καυσίμου πολυμερών ηλεκτρολυτών

Γ) απευθείας μεθανολικά κύτταρα καυσίμου

2) Κύτταρα καυσίμου μεσαίων θερμοκρασιών

A) κύτταρα καυσίμου φωσφορικών οξέων

3) Κύτταρα καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών

A) κύτταρα καυσίμου τηγμένου άνθρακα

B) κύτταρα καυσίμου κεραμικών οξέων

4.5.3 Ανάφλεξη

Το υδρογόνο όπως όλα τα καύσιμα αέρια μπορεί να καεί με οξυγόνο. Η θερμική ενέργεια που απελευθερώνεται με την καύση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση ή μέσω κύκλων ενεργειακών μετατροπών να μετατραπεί σε μηχανική ή ηλεκτρική ενέργεια.

Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται κατά την καύση του υδρογόνου με τον αέρα, μπορεί να παραχθεί υψηλό ποσοστό οξειδίων του αζώτου, NO και NO₂. Για τον περιορισμό της παραγωγής των οξειδίων του αζώτου, υπάρχουν διάφορες στρατηγικές. Με τη βοήθεια των καταλυτών, στους καταλυτικούς καυστήρες το υδρογόνο καίγεται σε μικρότερες θερμοκρασίες.



Φλόγα υδρογόνου



Λέβητας με καταλύτη Brenner H₂

Τα χαρακτηριστικά του υδρογόνου σχετικά με τη χρήση του ως καύσιμο αέριο ή γενικά ως καύσιμο, είναι:

- Η απομακρυσμένη δεξαμενή καυσίμου
- Η χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης του στοιχειομετρικού μείγματος
- Μικρές αποστάσεις στη μηχανή
- Η υψηλή θερμοκρασία ανάφλεξης συμπίεσης

- Το μεγάλο εύρος φλόγας στο στοιχειομετρικό μείγμα
- Η υψηλή διάχυση
- Η πολύ μικρή πυκνότητα

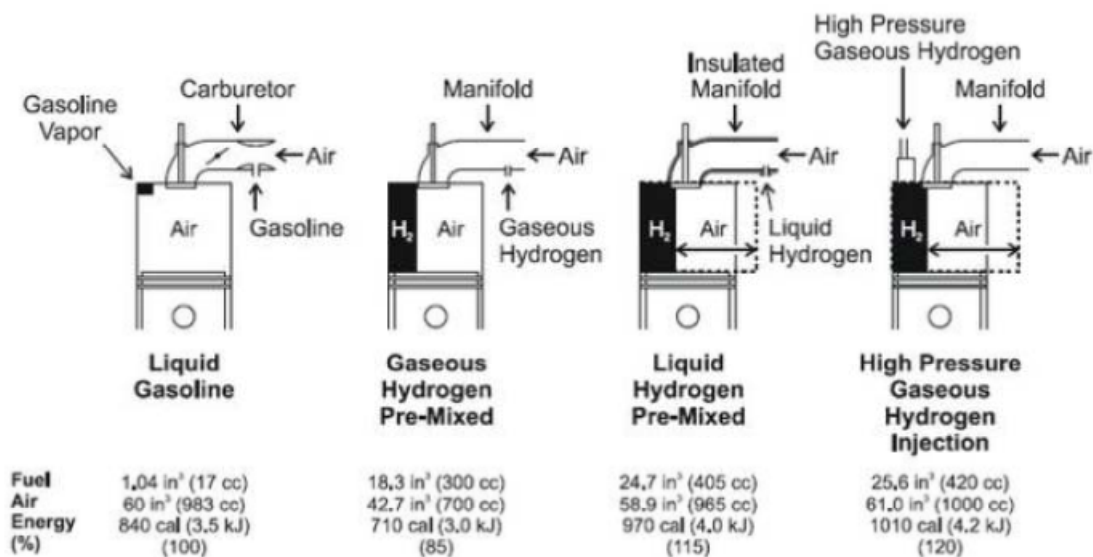
Η απομακρυσμένη δεξαμενή καυσίμων έχει ως συνέπεια ότι το μείγμα υδρογόνου-αέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα στη μηχανή καύσης. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να τροποποιούμε το μείγμα καυσίμου-αέρα όπως το θέλουμε. Ειδικής σημασίας είναι τα φτωχά σε υδρογόνο μείγματα. Ακόμα όμως και στα φτωχά μείγματα το υδρογόνο καίγεται πλήρως και παράγονται μόνο μικρές ποσότητες οξειδίων του αζώτου.

Για ένα στοιχειομετρικό μείγμα 2 mol H₂ χρειάζονται 1 mol O₂. Ο αέρας αποτελείται περίπου από 79% N₂ και 21% O₂. Αυτό σημαίνει ότι 1mol ατμοσφαιρικού οξυγόνου συνοδεύεται από $79/21=3,76$ mol αζώτου. Για την πλήρη καύση 2 mol H₂ απαιτούνται 4,76 mol αέρα(1mol O₂+3,76mol N₂). Άρα στο συνολικό μείγμα των 6,76mol(2mol H₂, 1mol O₂, 3,76mol N₂) περιλαμβάνονται 2mol H₂, το οποίο αντιστοιχεί σε ογκομετρικό ποσοστό 29,6%.

4.5.4 Μηχανή εμβόλων και αεριοστρόβιλοι

ΜΗΧΑΝΗ ΕΜΒΟΛΩΝ

Η αναλογία μαζών αέρα/καυσίμου= $137,33\text{g}/4\text{g} = 34,3$ η οποία είναι πάνω από 2 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των συμβατικών καυσίμων. Η ποσότητα του H₂ που θα μπει στο μείγμα μπορεί να κυμαίνεται σε μια αναλογία μαζών από 0,2-180.



Προϋποθέσεις αποστάσεων σε διαφορετικά μείγματα καυσίμων σε μια μηχανή εμβόλων

Η χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης εγγυάται την αξιόπιστη ανάφλεξη και στο φτωχό σε υδρογόνο μείγμα. Παρόλα αυτά η χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης έχει και μειονεκτήματα, καθώς αν υπάρχουν στη μηχανή κάποιες επιφάνειες με σχετικά υψηλή θερμοκρασία, μπορεί να πυροδοτηθεί αυτόματη μη ελεγχόμενη ανάφλεξη.

Λόγω των μικρών αποστάσεων στη μηχανή, οι φλόγες φτάνουν πιο κοντά στα τοιχώματα απ' ότι στις συμβατικές μηχανές. Αυτό το γεγονός μπορεί να οδηγήσει μια φλόγα να περάσει απ' τις βαλβίδες και να προκαλέσει σπινθήρες και πιθανόν επικίνδυνες καταστάσεις.



Η μηχανή BMW 750h

Η υψηλή θερμοκρασία ανάφλεξης υπό συμπίεση, επιτρέπει συμπίεση σε υψηλές πιέσεις. Η υψηλή ταχύτητα καύσης δίνει τη δυνατότητα να προσεγγιστεί ο ιδανικός κύκλος με στοιχειομετρικά μείγματα. Με τα φτωχά σε υδρογόνο μείγματα το ποσοστό φλογών πλησιάζει το αντίστοιχο των συμβατικών καυσίμων. Η υψηλή

ικανότητα διάχυσης του υδρογόνου συμβάλλει στην καλύτερη ανάμειξή του με τον αέρα.

Η χαμηλή πυκνότητα του υδρογόνου αυξάνει τις απαιτήσεις χωρητικότητας της δεξαμενής καυσίμου, πράγμα που αποτελεί πρακτικό πρόβλημα για τα αυτοκίνητα.

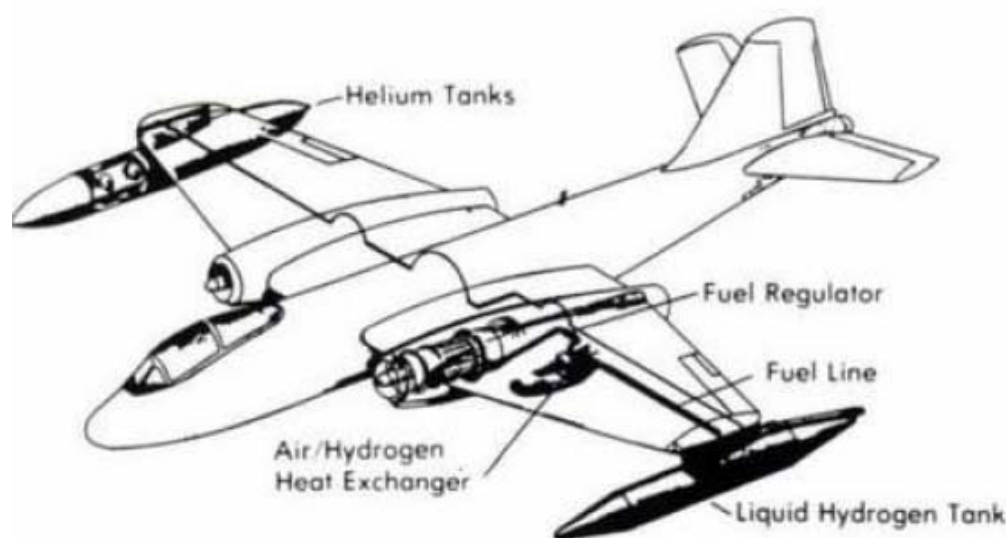
ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΟΙ

Οι αεριοστρόβιλοι μπορούν να εξοπλιστούν έτσι ώστε να λειτουργούν με καύσιμο το υδρογόνο. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε στα αεροπλάνα, είτε σε απομακρυσμένους μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα χαρακτηριστικά ενός αεριοστρόβιλου υδρογόνου είναι τα εξής:

- Αντλία τροφοδοσίας καυσίμου
- Ρυθμιστής καυσίμου
- Εναλλάκτες θερμότητας
- Θάλαμος καύσης

Πρέπει να αναπτυχθούν ολοκληρωμένα συστήματα προώθησης και έγχυσης του καυσίμου. Ειδικά η μεγαλύτερη σημασία για την ασφάλεια πρέπει να δοθεί στις αντλίες καυσίμου, στις βαλβίδες λειτουργίας και στον ρυθμιστή καυσίμου. Η επεξεργασία καυσίμου στον θάλαμο καύσης και τα ακροφύσια εγχύσεων πρέπει να προσαρμοστούν στα χαρακτηριστικά του υδρογόνου.



Το

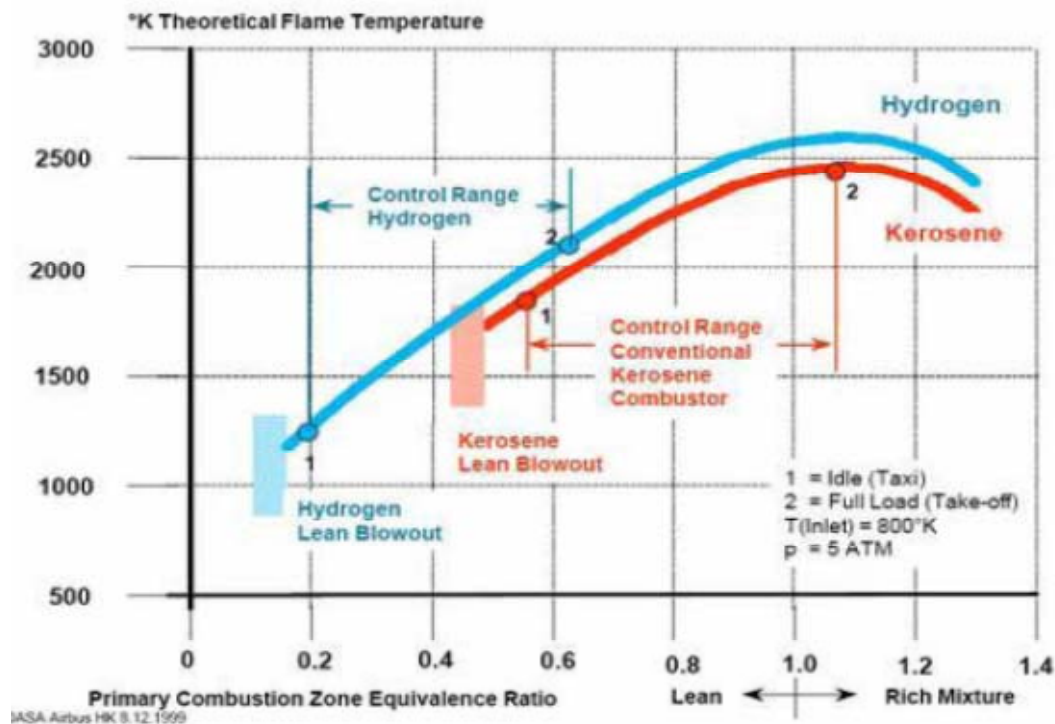
τροποποιημένο B-57 για δοκιμή τουρμπίνων υδρογόνου, 1956

Στις ΗΠΑ την δεκαετία του '50 έγιναν πολλές δοκιμές πτήσεις και λειτουργίας αεροπλάνων με καύσιμο υγρό υδρογόνο. Αντίστοιχες δοκιμές έγιναν και στην ΕΣΣΔ. Μετά από αρκετές δοκιμές το 1988, η Tupolev παρουσίασε την πρώτη ολοκληρωμένη έκδοση αεροπλάνου υδρογόνου. Προκειμένου να προωθηθεί ακόμα περισσότερο η ανάπτυξη στον συγκεκριμένο τομέα, η Tupolev και η Daimler-Chrysler ανέπτυξαν μια συνεργασία με την ονομασία Cryoplane.

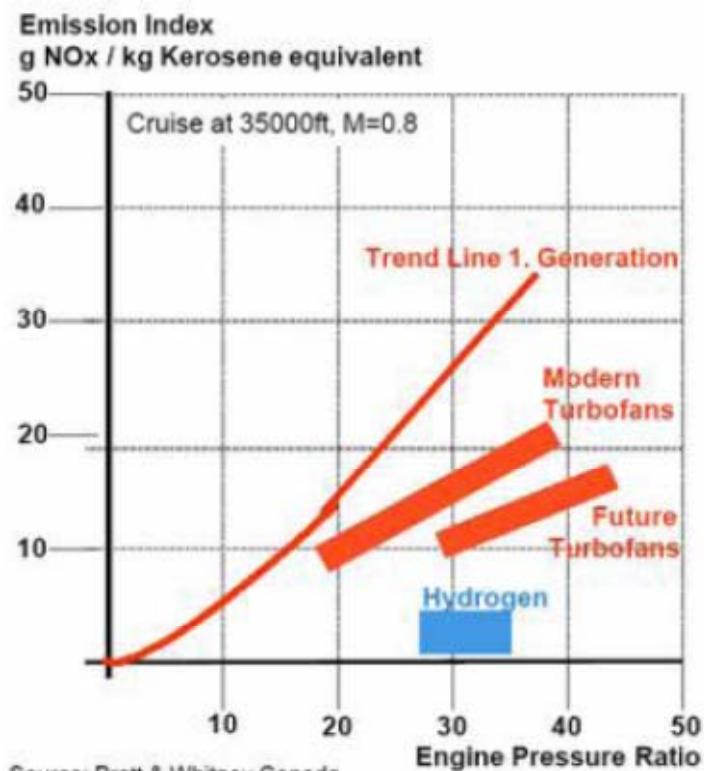


Cryoplane

Αντίστοιχα με τις μηχανές εμβόλων υπάρχει η δυνατότητα να ελέγχεται η θερμοκρασία καύσης και κατ' επέκταση και τα παραγόμενα οξείδια του αζώτου σε ένα φτωχό σε υδρογόνο μείγμα αέρα/H₂.



Θερμοκρασία σε σχέση με το μείγμα

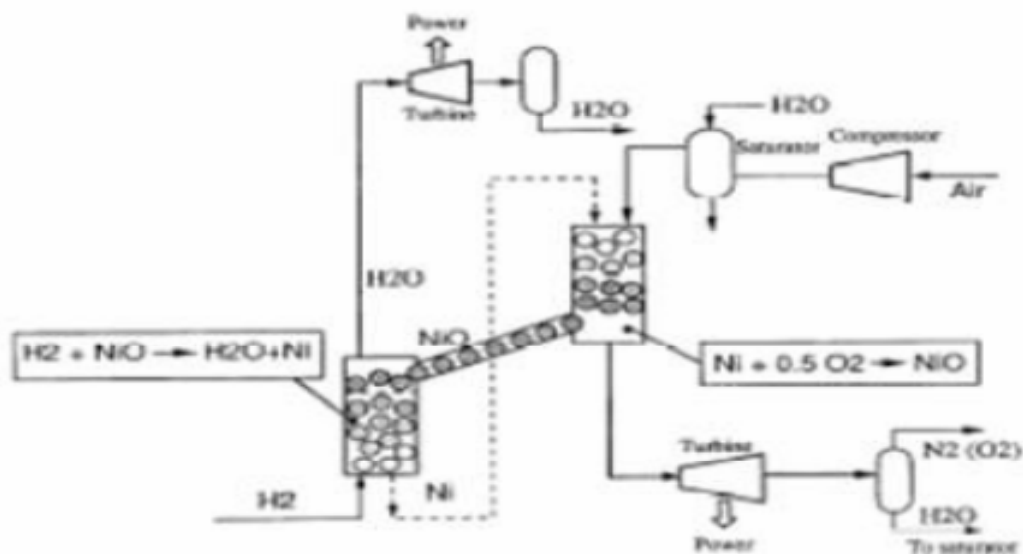


Εκπομπή οξειδίων αζώτου σε σχέση με τη συμπίεση

4.5.5 Άλλες θερμικές χρήσεις του υδρογόνου

Στους καυστήρες πυραύλων μπορεί να καεί ένα μείγμα από υδρογόνο, οξυγόνο και νερό. Το νερό περιορίζει την ανάπτυξη υψηλής θερμοκρασίας ενώ παράλληλα, ο παραγόμενος ατμός μπορεί να διοχετευθεί σε έναν στρόβιλο ατμού και να χρησιμοποιηθεί η κινητική του ενέργεια. Παρόλα αυτά ο συνολικός βαθμός απόδοσης αυτού του κύκλου μετατροπής είναι αρκετά μικρός, λόγω της σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας παραγωγής του ατμού καθώς και λόγω της ενεργειακά δαπανηρής, κατασκευής του οξυγόνου.

Αντί για την απευθείας αντίδραση του οξυγόνου με το υδρογόνο, μπορεί για καλύτερη απόδοση να εφαρμοστεί μια αντίδραση 2 σταδίων. Στο πρώτο στάδιο το υδρογόνο αντιδρά με ένα μεταλλικό οξείδιο, παράγοντας μέταλλο και ατμό. Ο ατμός διοχετεύεται σε έναν υδροστρόβιλο. Την ίδια στιγμή το μέταλλο αντιδρά με οξυγόνο, παράγοντας πάλι οξείδιο του μετάλλου σε μορφή θερμού αερίου, το οποίο με τη σειρά του διοχετεύεται σε έναν άλλο στρόβιλο. Έτσι η συνολική απόδοση του συστήματος βελτιώνεται αισθητά.



Σχηματική αναπαράσταση ενός κύκλου καύσης υδρογόνου για παραγωγή ενέργειας

Υπάρχουν κι άλλες παραλλαγές με χρήση κι άλλων βοηθητικών καυσίμων, όπως φυσικό αέριο, αλλά η αρχή λειτουργίας του κύκλου καύσης είναι η ίδια. Η Ευρωπαϊκή Ένωση με το πρόγραμμα NATURALHY μελετάει την τροφοδοσία του διαθέσιμου δικτύου φυσικού αερίου με Hythane(μείγμα υδρογόνου, φυσικού αερίου) και γενικά μελετάει τις αναλογίες προσμίξεων του υδρογόνου στα συμβατικά καύσιμα και τις αποδόσεις τους.

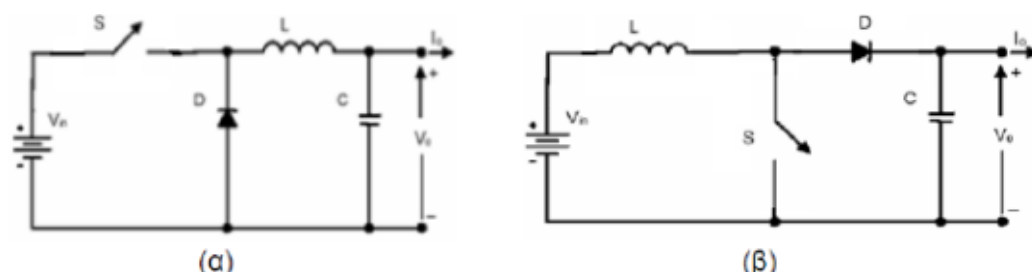
4.5.6 Σύνδεση με το δίκτυο

Ένα ηλεκτρικό υποσύστημα είναι απαραίτητο για να μεταφέρει και να μετατρέψει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια συστοιχία κυψελών καυσίμου στους καταναλωτές. Το συγκεκριμένο υποσύστημα αποτελείται από ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος, που μετατρέπουν τη συνεχή τάση που παράγεται από την συστοιχία των κυψελών καυσίμου, είτε σε συνεχή τάση άλλου επιπέδου είτε σε εναλλασσόμενη τάση οποιασδήποτε συχνότητας ανάλογα με τις απαιτήσεις των φορτίων.

Γίνεται αντιληπτό ότι, τα χαρακτηριστικά και το είδος των μετατροπέων που συνδέονται στην έξοδο των κυψελών καυσίμου εξαρτώνται άμεσα από τις προδιαγραφές του φορτίου, οι οποίες πέραν του επιπέδου και της μορφής της τάσης, περιλαμβάνουν την ποιότητα ισχύος, το αρμονικό περιεχόμενο καθώς και την αντοχή σε μεταβατικά φαινόμενα.

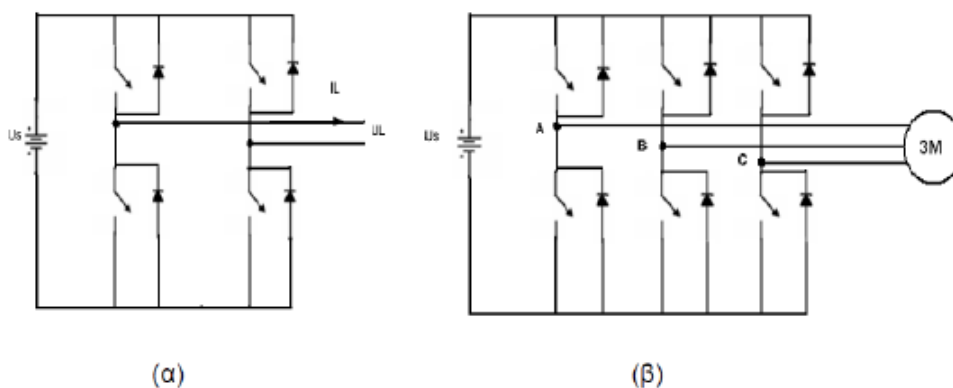
Το ηλεκτρικό δυναμικό μιας κυψέλης μεταβάλλεται έντονα με τις μεταβολές του ρεύματος φορτίου και εξαρτάται από τη θερμοκρασία της κυψέλης καθώς και την παροχή καυσίμου και οξυγόνου. Η διακύμανση της ηλεκτρικής τάσης στην περιοχή λειτουργίας της κυψέλης είναι της τάξης του 30 έως 40 % επί της ονομαστικής της

τιμής. Ελάχιστα είδη φορτίων μπορούν να έχουν ανοχή σε τέτοιες μεγάλες διακυμάνσεις. Επομένως κρίνεται επιβεβλημένη η ύπαρξη μιας βαθμίδας για τη ρύθμιση και σταθεροποίηση της παραγόμενης τάσεως από τη συστοιχία κυψελών καυσίμου. Ανάλογα με τις εφαρμογές, μπορεί να απαιτείται υποβιβασμός ή και ανύψωση της τάσεως εξόδου. Κάποιοι τυπικοί ηλεκτρονικοί μετατροπείς παρουσιάζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχ. 4: Ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση με: (α) υποβιβασμό τάσης, (β) ανύψωση τάσης.

Οι κυψέλες καυσίμου, όπως έχει ήδη αναφερθεί, παράγουν συνεχή τάση, αλλά τα περισσότερα φορτία απαιτούν τροφοδοσία εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μετά από τον μετατροπέα συνεχής τάσης συνδέεται ένας αντιστροφέας, ο οποίος μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη κατάλληλης ενεργούς τιμής και συχνότητας με χρήση κατάλληλων μεθόδων ελέγχου. Η εναλλασσόμενη τάση που δημιουργείται μπορεί να είναι μονοφασική ή τριφασική. Η τοπολογία τέτοιων μετατροπέων παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχ. 5: Ηλεκτρονικοί μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη: (α) μονοφασικός αντιστροφέας, (β) τριφασικός αντιστροφέας

Η μονάδα ελέγχου είναι απαραίτητη σε τέτοιου είδους συστήματα όχι μόνο για τον έλεγχο των παραμέτρων που αφορούν τις κυψέλες καυσίμου, όπως είναι η παροχή καυσίμου και οξυγόνου, η θερμοκρασία, η υγρασία κ.τ.λ., αλλά και ηλεκτρολογικών παραμέτρων, όπως είναι η τάση, το ρεύμα και η ισχύς εξόδου των μετατροπέων.

Σχ. 6: Σχηματική αναπαράσταση συστήματος σύνδεσης των κυψελών καυσίμου με το δίκτυο και με τοπικά φορτία.

4.6 ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ Α.Π.Ε.

4.6.1 ΑΙΟΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

- Μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου
- Η αιολική ενέργεια και το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό
- Ενεργειακά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας
- Τύποι συλλογής της αιολικής ενέργειας
- Η δομή μιας ανεμογεννήτριας
- Ασύγχρονες γεννήτριες
- Σύγχρονες γεννήτριες
- Υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με παραγωγή Η₂
- Εφαρμογή στην Ελλάδα

Μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου

Η χαμηλότερη περιοχή της ατμόσφαιρας, στην οποία βρίσκονται και οι περισσότερες κατασκευές, ονομάζεται ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Εκεί, η κίνηση του ανέμου επιβραδύνεται από δυνάμεις τριβής και μεγάλα εμπόδια στην επιφάνεια της γης καθώς και από φαινόμενα που οφείλονται στο στροβιλισμό. Ο στροβιλισμός, ο οποίος μπορεί να είναι μηχανικής ή και θερμικής προέλευσης, προκαλεί απότομες μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων και πλατών, γνωστές ως ριπές.

Από μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου σε διάφορα ύψη από το έδαφος, διαπιστώνουμε ότι η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται συναρτήσει του ύψους από το έδαφος:

- στην περιοχή υπάρχουν διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή στροβιλισμός
- ο στροβιλισμός διαδίδεται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων

Προκειμένου να διαχωριστούν οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου που οφείλονται στο στροβιλισμό από τις πιο αργές, που οφείλονται σε μακρομετεωρολογικά φαινόμενα, χρησιμοποιείται το μέγεθος της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου, V , που δίνεται από την εξίσωση.

$$V = \frac{1}{T} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} v(t) dt$$

Όπου:

$v(t)$: η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου

T : το χρονικό διάστημα στο οποίο γίνεται η ολοκλήρωση ώστε να υπολογιστεί η μέση τιμή

Η ενεργειακή φασματική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου έχει δύο περιοχές . Η περιοχή χαμηλών συχνοτήτων του φάσματος αντιστοιχεί στα μακρομετεωρολογικά φαινόμενα . Σε αυτήν περιλαμβάνονται οι μεταβολές του ανέμου που οφείλονται σε αλλαγές του καιρού από μέρα σε μέρα έως εβδομάδα (συνοπτικές μεταβολές) και οι μεταβολές του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας που οφείλονται σε θερμοκρασιακές διαφορές ανάμεσα στη στεριά και τη θάλασσα (ημερήσιες μεταβολές).

Η πλευρά των υψηλών συχνοτήτων αντιστοιχεί στα μικρομετεωρολογικά φαινόμενα και οι μεταβολές οφείλονται στο στροβιλισμό . Ο στροβιλισμός παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και στην απόδοση των ανεμογεννητριών , καθώς και στην ποιότητα της ηλεκτρικής ισχύος στο τροφοδοτούμενο δίκτυο.

Η αιολική ενέργεια και το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό

Ο υπολογισμός του τεχνικά αξιοποιήσιμου αιολικού δυναμικού είναι μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία ακόμα και αν ληφθεί υπόψη μόνο η διαθεσιμότητα του ανέμου και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιούμε. Η μέση μηνιαία ή ετήσια ταχύτητα ανέμου και ο βαθμός απόδοσης των ανεμογεννητριών δεν αρκούν για τον υπολογισμό. Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε ακριβώς την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου κατά την διάρκεια του έτους.

Πολλές φορές η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του χρόνου παριστάνεται με την βοήθεια της κατανομής Weibull. Η συνάρτηση Weibull δίνεται από την εξίσωση:

$$p(V) = \frac{k}{V} \left(\frac{V}{C} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{V}{C} \right)^k}$$

Όπου:

p(V): η συχνότητα εμφάνισης της ταχύτητας του ανέμου V

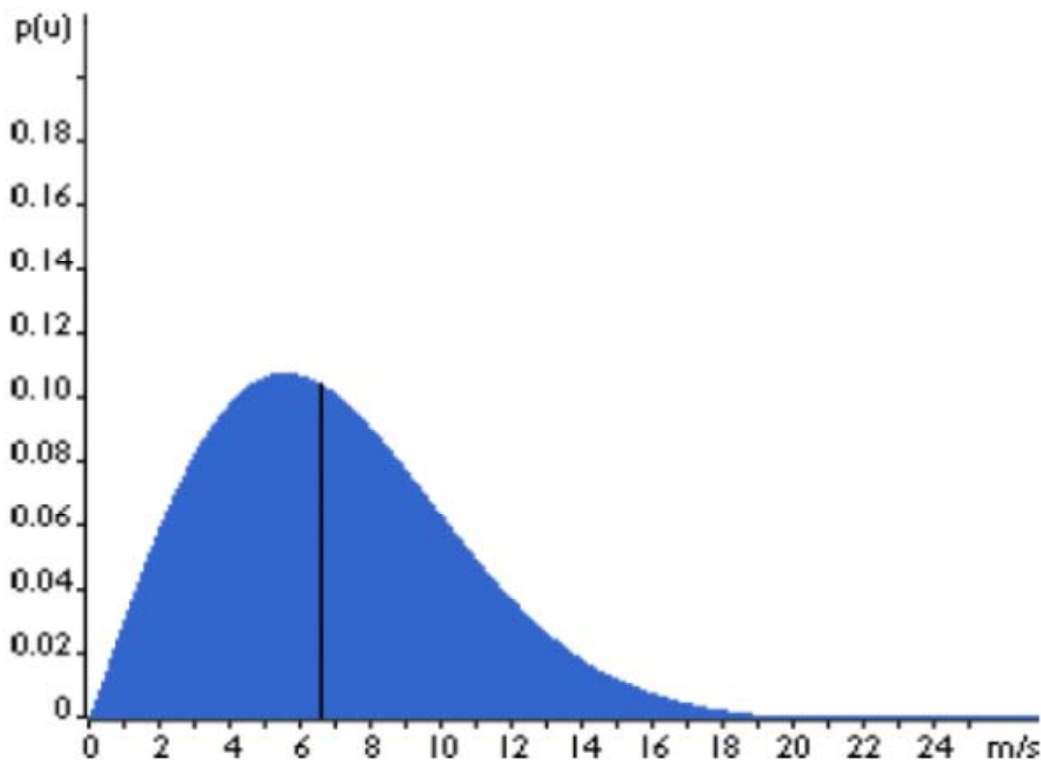
C: παράμετρος κλίμακας ή χαρακτηριστική ταχύτητα του ανέμου

k: παράμετρος μορφής

Η ισχύς του ανέμου ορισμένης ταχύτητας είναι:

$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot u^3$$

- ρ είναι η πυκνότητα του αέρα
- A είναι η επιφάνεια από όπου διέρχεται ο άνεμος
- u είναι η ταχύτητα του ανέμου



Σχήμα 1 . Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ταχυτήτων ανέμου

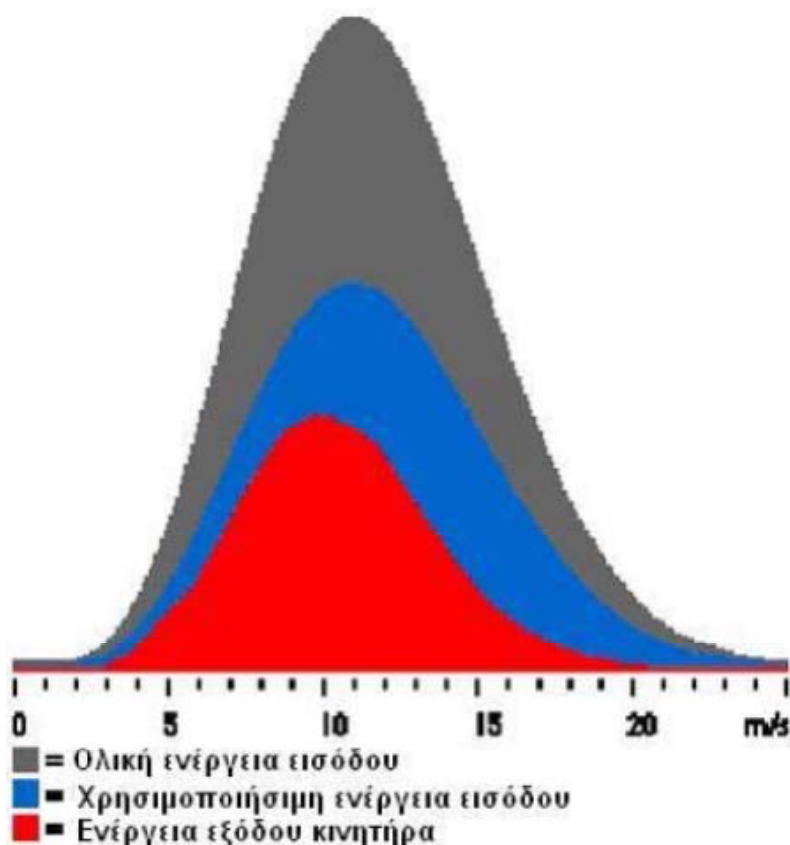
Από το σχήμα 1 φαίνεται ότι οι υψηλές ταχύτητες του ανέμου σπανίζουν, αλλά η συνεισφορά τους στην παραγόμενη ενέργεια είναι πολύ μεγάλη. Για τον υπολογισμό της αιολικής ισχύος δεν λαμβάνουμε υπόψη την μέση ταχύτητα αλλά πολλαπλασιάζουμε κάθε πιθανότητα μιας ορισμένης ταχύτητας ανέμου (από την Weibull) με την ισχύ που παράγεται σε αυτή την ταχύτητα. Έτσι σχηματίζεται η θεωρητική κατανομή της αιολικής ισχύος για κάθε ταχύτητα (σχήμα 2, γκρι καμπύλη). Μια ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να παραλάβει όλη αυτή την ισχύ γιατί τότε ο αέρας που θα περνούσε πίσω από την έλικα της ανεμογεννήτριας δεν θα απομακρύνονταν διότι θα είχε μηδενική κινητική ενέργεια στην έξοδο.

Έτσι, δεν θα παραλάμβανε καθόλου ενέργεια επειδή ο στάσιμος αέρας στην έξοδο δεν θα επέτρεπε να εισαχθεί νέος. Στην αντίθετη περίπτωση θα διέρχονταν ο αέρας χωρίς καμία αντίσταση και δεν θα παράγονταν έργο. Έχει αποδειχτεί ότι μια ιδανική ανεμογεννήτρια θα πρέπει να μειώσει την αρχική ταχύτητα του αέρα κατά τα 2/3 της. Επιπλέον σύμφωνα με τον νόμο του Albert Betz (1919): Η μέγιστη μηχανική ισχύς που μπορεί να παραχθεί από αιολική είναι ίση με το 59,3% αυτής.

Όπως αναφέραμε, αν πολλαπλασιαστεί η ισχύς ανέμου για κάθε ταχύτητα με την αντίστοιχη πιθανότητα εμφάνισης αυτής της ταχύτητας τότε προκύπτει η γκρι καμπύλη του σχήματος 2. Έτσι κάτω από την γκρι καμπύλη φαίνεται η θεωρητική

ισχύς ανά m^2 ροής αέρα (δεχόμενοι μια μέση ταχύτητα $7m/s$ και παράμετρο μορφής της Weibull 2).

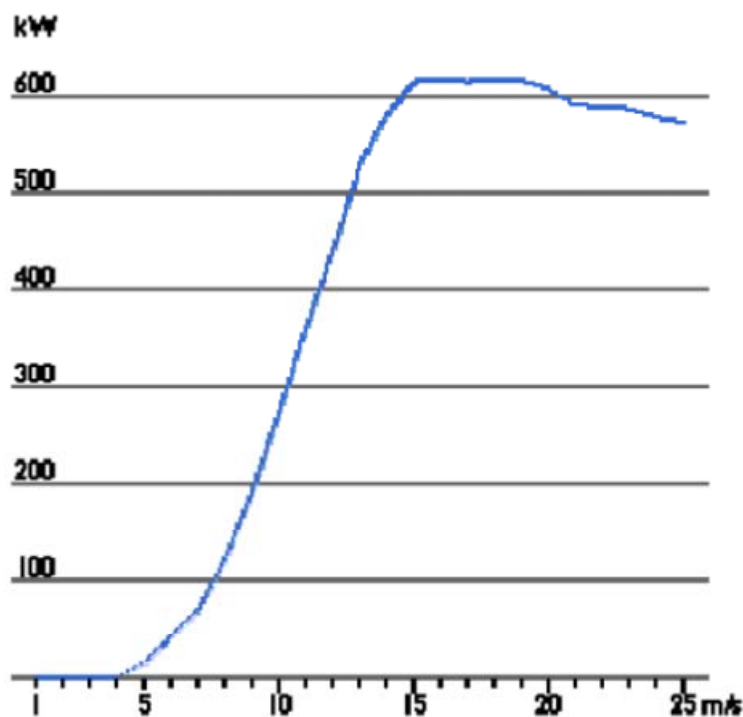
Η περιοχή κάτω από την μπλε καμπύλη αποτελεί το 59,3% της θεωρητικής, ενώ η κόκκινη περιοχή εκφράζει την πραγματική ηλεκτρική ισχύ που παράγεται από την ανεμογεννήτρια.



Σχήμα 2. Συνάρτηση πυκνότητας ισχύος ανέμου και ανεμογεννήτρια

Συγκρίνοντας την μορφή των σχημάτων 1 και 2 συμπεραίνουμε ότι το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτρια κατά την διάρκεια ενός έτους παραλαμβάνεται σε ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες της μέσης (γι' αυτό άλλωστε δεν μπορούμε να υπολογίσουμε το αιολικό δυναμικό από την μέση ταχύτητα).

Για να γίνει ο προσδιορισμός της κόκκινης περιοχής πρέπει να λάβουμε υπόψη την καμπύλη ισχύος (power curve) της ανεμογεννήτριας. Η καμπύλη αυτή καθορίζει την απόδοση της ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου και είναι διαφορετική για κάθε ανεμογεννήτρια. Μια τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας 600 kW ιδανικής κατασκευής φαίνεται στο σχήμα 3.



Σχήμα 3. Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας

Για τον προσδιορισμό της μέσης ετήσιας ισχύος (σύμφωνα με την μέθοδο Cliff) πρέπει να πολλαπλασιαστούν οι αντίστοιχες τιμές των σχημάτων 1 και 3 που ισχύουν για κάθε ταχύτητα ανέμου και να αθροιστούν τα γινόμενα. Δηλαδή με τον πολλαπλασιασμό της πιθανότητας εμφάνισης μιας ταχύτητας ανέμου (σχήμα 1) με την ισχύ που αποδίδει η ανεμογεννήτρια σε αυτή την ταχύτητα (σχήμα 3) προσδιορίζεται η συνεισφορά της κάθε ταχύτητας του ανέμου στην μέση ετήσια ισχύ της ανεμογεννήτριας. Στην συνέχεια το άθροισμα αυτών των γινομένων (μέση ετήσια ισχύς) πολλαπλασιάζεται με την διαθεσιμότητα της ανεμογεννήτριας και με τις 8760 ώρες του έτους. Η διαθεσιμότητα των σύγχρονων ανεμογεννητριών είναι τουλάχιστον 98%.

Επιπλέον πρέπει να λάβουμε υπόψη την μέση θερμοκρασία της περιοχής που εξετάζουμε, διότι κάθε καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας έχει υπολογιστεί για 15°C. Μια αύξηση της θερμοκρασίας θα οδηγούσε σε μείωση της πυκνότητας του αέρα άρα και της ισχύος της ανεμογεννήτριας, διότι τότε μετατοπίζεται η καμπύλη 3 προς τα κάτω σύμφωνα με τη σχέση ισχύος της ανεμογεννήτριας :

$$P' = 0,5 \cdot \rho \cdot u^3 \cdot A \cdot C_f$$

- C_f : ένας συντελεστής άνωσης (χαρακτηριστικός για κάθε ανεμογεννήτρια)
- ρ : η πυκνότητα του αέρα
- A : η επιφάνεια από όπου διέρχεται ο άνεμος

- u: η ταχύτητα του ανέμου

Ο συντελεστής άνωσης ή συντελεστής αεροδυναμικής απόδοσης C_f εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας που έχει ο άνεμος λίγο πριν τον ανεμοκινητήρα, το οποίο μετατρέπεται σε μηχανικό έργο στο δρομέα. Δίνεται από τη σχέση:

$$C_f = 4a(1-a)^2$$

όπου a , συντελεστής που ισούται με:

$$a = \frac{V_1 - V_0}{V_1}$$

V_1, V_0 : οι ταχύτητες του ανέμου αρκετά πριν και κοντά στο δρομέα

Παραγωγή του C_f ως προς a δίνει τη μέγιστη τιμή του η οποία είναι:

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} = 59\%$$

Αυτό είναι το όριο του Betz που αναφέρθηκε παραπάνω. Ο συντελεστής C_f είναι συνάρτηση της γεωμετρίας των πτερυγίων και του λόγου ταχύτητας προς την ταχύτητα του αέρα, λ , που ορίζεται από την εξίσωση:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V}$$

όπου

ω : γωνιακή ταχύτητα των πτερυγίων

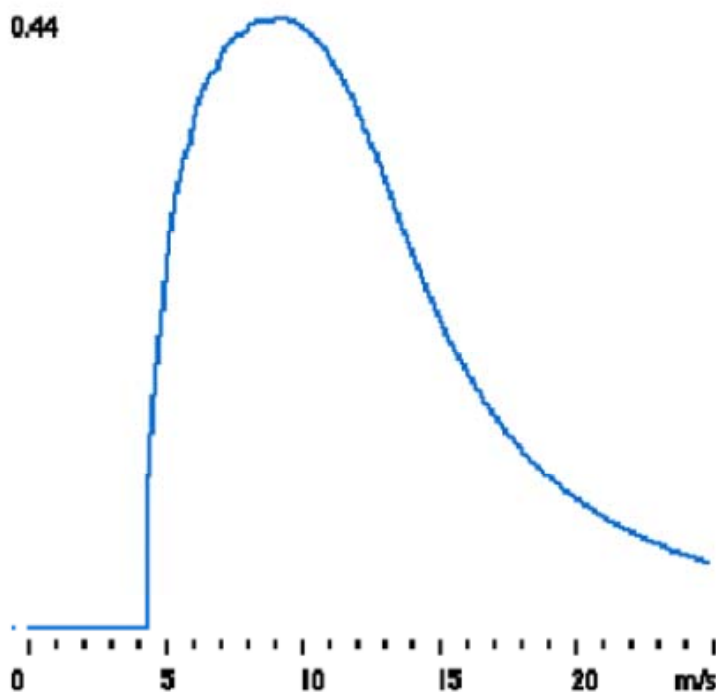
R : ακτίνα των πτερυγίων

V : μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος του άξονα του δρομέα

Το διάγραμμα 3 είναι δεδομένο από τον κατασκευαστή. Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε με μεγάλη ακρίβεια την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή εγκατάστασης των ανεμογεννητριών. Επιπλέον είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η μέση ετήσια παραγόμενη ενέργεια μιας ανεμογεννήτριας συναρτήσει της μέσης ταχύτητας του ανέμου για διάφορες τιμές της παραμέτρου μορφής. Η καμπύλη αυτή εξάγεται με βάση την μέθοδο Cliff και συνήθως δίνεται μαζί με τα υπόλοιπα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας.

Ενεργειακά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας

Για να προσδιοριστεί ο βαθμός απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου, πρέπει να διαιρεθεί κάθε ισχύς της αντίστοιχης καμπύλης 3 με την θεωρητική ισχύ του ανέμου σε αυτή την ταχύτητα. Έτσι προκύπτει ο βαθμός απόδοσης του σχήματος 4. Ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος μιας ανεμογεννήτριας που εξαρτάται από την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου κατά την διάρκεια του έτους, τον τόπο εγκατάστασής της και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της είναι ο συντελεστής εκμετάλλευσής της. Ο συντελεστής αυτός εκφράζει το λόγο της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας προς αυτήν που θα παράγονταν, αν η ανεμογεννήτρια λειτουργούσε στην ονομαστική ισχύ της συνεχώς κατά την διάρκεια του έτους. Ο συντελεστής εκμετάλλευσης εκφράζει πόσο αξιοποιείται η ανεμογεννήτρια στον τόπο εγκατάστασής της.



Σχήμα 4 . Βαθμός απόδοσης ανεμογεννήτριας

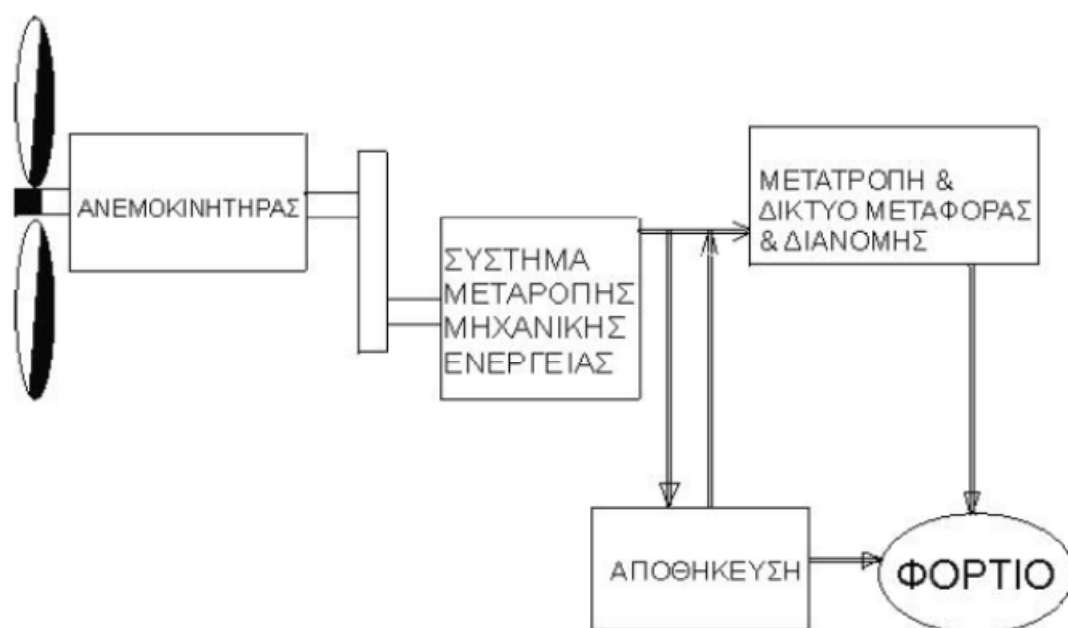
Είναι προφανές ότι κάθε ανεμογεννήτρια μπορεί να είναι βελτιστοποιημένη ώστε να αποδίδει καλύτερα σε ένα εύρος ταχυτήτων. Μεταβάλλοντας μεγέθη όπως το ύψος της ή την γωνία και τη γεωμετρία των πτερυγίων ή το μέγεθος των πτερυγίων ή το μέγεθος της γεννήτριας

μεταβάλλεται η ενεργειακή συμπεριφορά της. Αλλάζοντας τα δύο τελευταία μεγέθη μεταβάλλεται η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας, ενώ το ύψος της επηρεάζει μόνο την ταχύτητα του ανέμου. Γενικά οι ανεμογεννήτριες πρέπει να έχουν τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης στις ταχύτητες ανέμου που παράγεται η περισσότερη ενέργεια ετησίως (δηλαδή στο εύρος των συχνότερων υψηλών ταχυτήτων).

Για δεδομένο μέγεθος έλικα, όσο πιο μεγάλη είναι η γεννήτρια και όσο μεγαλύτερες οι ταχύτητες του ανέμου (αυτό επιτυγχάνεται αυξάνοντας το ύψος του ρότορα), τόσο πιο πολύ ενέργεια θα παράγεται, όμως συγχρόνως δεν θα αποδίδει ικανοποιητικά σε μικρές και μέσες ταχύτητες. Αντίθετα για την ίδια έλικα, όσο μικρότερη είναι η γεννήτρια τόσο καλύτερα θα αποδίδει σε αδύναμους ανέμους αλλά δεν θα αποδίδει ικανοποιητικά σε μεγάλες ταχύτητες.

Οι μικρές ανεμογεννήτριες παράγουν μικρά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας, όμως δεν απαιτούν ισχυρό δίκτυο, παράγουν σχετικά πιο σταθερή ισχύ (διότι αποδίδουν καλύτερα σε μικρότερες ταχύτητες), απαιτούν μικρότερο κόστος θεμελίωσης και είναι αισθητικά πιο αποδεκτές από τους κατοίκους. Τέλος τα αιολικά πάρκα είναι προφανώς πιο αξιόπιστα όταν έχουν πολλές μικρές ανεμογεννήτριες.

Με βάση τα παραπάνω φαίνεται ότι μια μεγάλη ανεμογεννήτρια δεν είναι πάντα η καλύτερη λύση λόγω της οικονομίας κλίμακας, αλλά εξαρτάται από την ταχύτητα των ανέμων και τις ανάγκες μας σε ηλεκτρική ενέργεια. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι οι ανεμογεννήτριες παραλαμβάνουν περίπου μέσα σε 2-3 μήνες λειτουργίας όλη την ενέργεια που απαιτήθηκε για να κατασκευαστούν, ενώ οι παραθαλάσσιες ανεμογεννήτριες απαιτούν ακόμα λιγότερο χρόνο.



Σχήμα 5. Σχηματική αναπαράσταση εγκατάστασης εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας

Παραδείγματα εκμετάλλευσης της παραγόμενης ενέργειας επί τόπου είναι αυτό της παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση του νερού που μπορεί να αποθηκευτεί, μεταφερθεί, και να καεί ως αέριο καύσιμο με μηδαμινή επιβάρυνση του περιβάλλοντος .

Στη δεύτερη που είναι και πιο ευρέως διαδεδομένη είναι αυτή της μετατροπής της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια λόγω της εύκολης μεταφοράς αλλά και της δυνατότητας που έχει να μετατρέπεται σε οποιαδήποτε άλλη μορφή θέλουμε. Βέβαια οι μεγάλες διακυμάνσεις της ενέργειας του ανέμου με το χρόνο πολλές φορές έχουν χρονική ασυμφωνία με την ζήτηση ενέργειας με αποτέλεσμα την αναγκαιότητα της αποθήκευσης της ενέργειας για τις χρονικές στιγμές στις οποίες η ισχύς του ανέμου πέφτει κάτω από ένα όριο.

Τύποι συλλογής της αιολικής ενέργειας

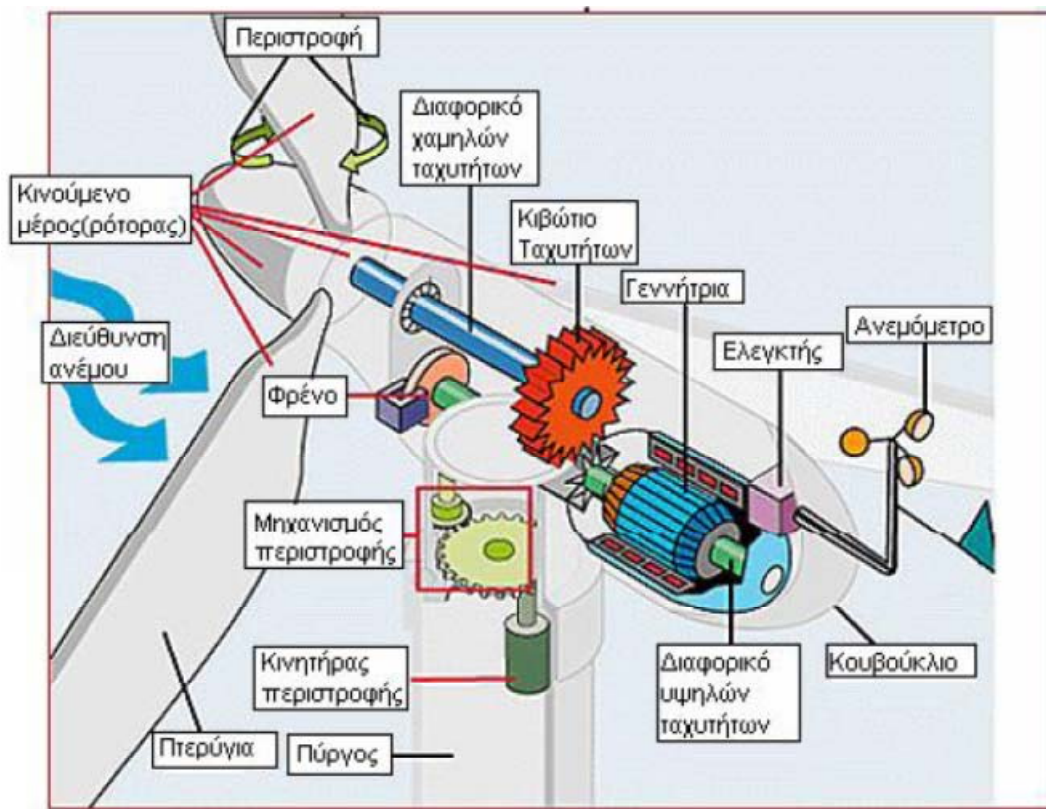
Μέχρι σήμερα έχουν επινοηθεί και λειτουργήσει από αρχαιότατων χρόνων περισσότεροι τύποι ανεμομηχανών από οποιαδήποτε άλλο τύπο εφεύρεσης. Οι ανεμοκινητήρες μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον προσανατολισμό των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου σε:

- 1) Οριζοντίου άξονα (Head on) στους οποίους ο άξονας περιστροφής του δρομέα είναι παράλληλος προς την κατεύθυνση του ανέμου.
- 2) Οριζοντίου άξονα (Cross Wind) στους οποίους ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της Γης αλλά κάθετος στην κατεύθυνση του ανέμου.
- 3) Κάθετου άξονα στους οποίους ο άξονας περιστροφής είναι κάθετος στην επιφάνεια της γης όπως και στην ροή του ανέμου (Savonius, Darrieus, Giromill κ.α) .

Επίσης έχουν επινοηθεί και άλλοι τύποι ανεμομηχανών όπως αυτοί του ηλιακού φωτός, Venturi, με διάχυτο ή συγκεντρωτή, αεροτομή και Magnus κ.α.

Η δομή μιας ανεμογεννήτριας

Τα βασικά δομικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας που απεικονίζεται στο σχήμα 6 είναι τα εξής :



Σχήμα 6: Βασικά δομικά στοιχεία ανεμογεννήτριας

- 1. Κουβούκλιο:** Το κουβούκλιο περιέχει όλα τα βασικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας, συμπεριλαμβανομένου του κιβωτίου ταχυτήτων, και της ηλεκτρικής γεννήτριας. Πρόσβαση στο εσωτερικό της ανεμογεννήτριας επιτρέπεται μέσω του πύργου. Αριστερά από το κουβούκλιο φαίνονται στο σχήμα 6, τα κινούμενα μέρη της ανεμογεννήτριας (τα πτερύγια και η κεφαλή).
- 2. Πτερύγια:** Τα πτερύγια ‘συλλαμβάνουν’ τον αέρα και μεταφέρουν την ισχύ του στην κεφαλή του ρότορα. Σε μια μοντέρνα ανεμογεννήτρια 1000kW κάθε πτερύγιο έχει μήκος 27 m και είναι σχεδιασμένο περίπου όπως ένα φτερό αεροπλάνου.
- 3. Κεφαλή:** Η κεφαλή του ρότορα είναι συνδεδεμένη με το διαφορικό χαμηλής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 7: Κουβούκλιο ανεμογεννήτριας

4. Διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων: Το διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων συνδέει την κεφαλή του ρότορα με το κιβώτιο ταχυτήτων. Σε ανεμογεννήτρια 1000 kW ο ρότορας περιστρέφεται σχετικά αργά, περίπου 19 με 30 περιστροφές ανά λεπτό (rpm). Το διαφορικό περιέχει σωλήνες για το υδραυλικό σύστημα ώστε να μπορεί να λειτουργήσει το αεροδυναμικό φρένο.

5. Κιβώτιο ταχυτήτων: Το κιβώτιο ταχυτήτων έχει το διαφορικό χαμηλών στροφών από αριστερά και μεταφέρει την κίνηση στο διαφορικό υψηλών στροφών (από δεξιά) κάνοντάς το να περιστρέφεται με ταχύτητα 50 φορές μεγαλύτερη από αυτή του διαφορικού χαμηλών στροφών.

6. Διαφορικό υψηλών ταχυτήτων: Το διαφορικό υψηλών ταχυτήτων περιστρέφεται περίπου με 1500 στροφές ανά λεπτό (rpm) και οδηγεί την ηλεκτρική γεννήτρια. Το διαφορικό είναι εξοπλισμένο με ένα δισκόφρενο σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Το μηχανικό φρένο χρησιμοποιείται σε περίπτωση που το αεροδυναμικό φρένο υποστεί βλάβη ή η ανεμογεννήτρια επισκευάζεται.

7. Ηλεκτρική γεννήτρια: Η ηλεκτρική γεννήτρια είναι μια σύγχρονη ή μια ασύγχρονη γεννήτρια. Στις τελευταίες ανεμογεννήτριες η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς είναι μεταξύ 600 και 3000 kW.

8. Μηχανισμός περιστροφής: Ο μηχανισμός περιστροφής χρησιμοποιεί ηλεκτρικές μηχανές (κινητήρας περιστροφής) για να στρέφει το κουβούκλιο απέναντι στον

άνεμο. Ο μηχανισμός περιστροφής ελέγχεται από ηλεκτρονικό ελεγκτή ο οποίος αντιλαμβάνεται τη διεύθυνση του ανέμου χρησιμοποιώντας τον ανεμοδείκτη.

9. Ηλεκτρονικός ελεγκτής: Περιέχει ένα υπολογιστή που παρακολουθεί διαρκώς την κατάσταση της ανεμογεννήτριας και ελέγχει τον μηχανισμό περιστροφής. Σε κάθε περίπτωση επιλοκής, π.χ. υπερθέρμανση του κιβωτίου ταχυτήτων ή της γεννήτριας, σταματά αυτόματα την ανεμογεννήτρια και καλεί τον υπολογιστή του ελεγκτή της ανεμογεννήτριας μέσω μιας τηλεφωνικής σύνδεσης.

10. Ανεμόμετρο και ανεμοδείκτης: Το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης χρησιμοποιούνται για να μετρούν την ένταση και τη διεύθυνση του ανέμου. Τα ηλεκτρικά σήματα του ανεμόμετρου χρησιμοποιούνται από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή της ανεμογεννήτριας για να αρχίσει την λειτουργία της όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια ελάχιστη τιμή. Ο υπολογιστής σταματά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας αυτόματα αν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί ένα ανώτατο όριο προκειμένου να προστατεύσει την ανεμογεννήτρια και το περιβάλλον αυτής. Τα σήματα του ανεμοδείκτη χρησιμοποιούνται από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή της ανεμογεννήτριας για να στρέφει αυτήν απέναντι στον άνεμο, μέσω του μηχανισμού περιστροφής.

11. Πύργος: Ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζει το κουβούκλιο και τα κινούμενα μέρη της. Γενικά είναι πλεονέκτημα ο πύργος να είναι ψηλός, αφού οι ταχύτητες του ανέμου αυξάνονται όσο απομακρύνεται από το έδαφος. Μια σύγχρονη ανεμογεννήτρια 1000 kW θα έχει ένα πύργο μεταξύ 50 και 80 μέτρων (το ύψος ενός κτιρίου 17 έως 27 ορόφων).

12. Μονάδα ψύξης: Η μονάδα ψύξης περιέχει ένα ηλεκτρικό ανεμιστήρα που χρησιμοποιείται για να ψύχει την ηλεκτρική γεννήτρια. Επιπλέον περιέχει μια μονάδα ψύξης με λάδι η οποία χρησιμοποιείται για να ψύχει το λάδι στο κιβώτιο ταχυτήτων. Μερικές ανεμογεννήτριες έχουν υδρόψυκτες γεννήτριες.

13. Υδραυλικό σύστημα: Το υδραυλικό σύστημα χρησιμοποιείται για να επαναφέρει τα αεροδυναμικά φρένα της ανεμογεννήτριας.

Μορφή πτερυγίων

Τα πτερύγια σε μεγάλες ανεμογεννήτριες περιστρέφονται κατά μήκος του άξονά τους. Το πτερύγιο δέχεται τον άνεμο κατά μήκος του υπό διαφορετικές γωνίες. Η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται προς τη βάση του πτερυγίου. Οι πολύ μεγάλες γωνίες δεν έχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Προκειμένου να υπάρχει ενιαία γωνία πρόσπτωσης κατά μήκος του πτερυγίου, το πτερύγιο έχει μορφή περιστροφική.

Ο μηχανισμός περιστροφής της ανεμογεννήτριας

Ο μηχανισμός περιστροφής της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται για να στρέφει το δρομέα της ανεμογεννήτριας απέναντι στον αέρα. Η ανεμογεννήτρια λέγεται ότι έχει σφάλμα περιστροφής, αν ο δρομέας δεν είναι κάθετος στη διεύθυνση του ανέμου. Το

σφάλμα περιστροφής συνεπάγεται ότι θα αξιοποιείται από την ανεμογεννήτρια μικρότερο μέρος της ενέργειας του ανέμου. Αν όμως αυτό ήταν το μόνο που συνέβαινε, τότε ο έλεγχος περιστροφής θα ήταν ένας εξαιρετικός τρόπος ελέγχου της ισχύος εισόδου στο ρότορα της ανεμογεννήτριας.

Εκείνο το μέρος του ρότορα, όμως, που βρίσκεται πλησιέστερα στη διεύθυνση από την οποία φυσάει θα δέχεται μεγαλύτερη δύναμη απ' ότι το υπόλοιπο μέρος του ρότορα. Απ' τη μια αυτό συνεπάγεται ότι ο ρότορας θα έχει την τάση να στρέφεται απέναντι στον αέρα αυτόματα. Απ' την άλλη, σημαίνει ότι τα πτερύγια θα γέρνουν μπρος και πίσω σε μια ταλαντωτική κίνηση σε κάθε περιστροφή του ρότορα. Οι ανεμογεννήτριες που λειτουργούν με σφάλμα περιστροφής δέχονται μεγαλύτερα φορτία κόπωσης απ' ότι ανεμογεννήτριες που είναι στραμμένες σε μια διεύθυνση κάθετη στον αέρα.

Κιβώτια ταχυτήτων

Η ενέργεια της περιστροφής του δρομέα της ανεμογεννήτριας μεταφέρεται στην γεννήτρια μέσω του άξονα χαμηλών ταχυτήτων, του κιβωτίου ταχυτήτων και του άξονα υψηλών ταχυτήτων. Στην περίπτωση που γινόταν χρήση μιας ηλεκτρικής τριφασικής γεννήτριας, απευθείας συνδεδεμένης με το τριφασικό δίκτυο η οποία είχε ένα, δύο, ή τρία ζεύγη πόλων, τότε η γεννήτρια αυτή θα έπρεπε να περιστρέφεται από 1000 ως 3000 στροφές ανά λεπτό. Αν υποθεθεί ότι ο ρότορας της ανεμογεννήτριας έχει διάμετρο 43 μέτρα τότε θα έπρεπε να περιστρέφεται με δυο φορές την ταχύτητα του ήχου. Ένα ακόμη ενδεχόμενο είναι να κατασκευαστεί μια αργόστροφη γεννήτρια με πολλά ζεύγη πόλων. Αν όμως η γεννήτρια αυτή συνδεόταν απευθείας με το δίκτυο, θα έπρεπε να έχει 100 ζεύγη πόλων για να φτάνει μια αξιοπρεπή ταχύτητα των 30 στροφών ανά λεπτό. Ένα ακόμα πρόβλημα είναι ότι η μάζα του ρότορα πρέπει να είναι ανάλογη στο μέγεθος της ροπής το οποίο δέχεται. Έτσι λοιπόν μια απευθείας οδηγούμενη γεννήτρια θα έπρεπε να είναι σε κάθε περίπτωση βαριά, γεγονός που σημαίνει υψηλό κόστος. Η πρακτική λύση είναι η χρήση ενός κιβωτίου ταχυτήτων.



Σχήμα 8 .Κιβώτιο ταχυτήτων ανεμογεννήτριας κατά την κατασκευή του

Το κιβώτιο ταχυτήτων σε μια ανεμογεννήτρια δεν «αλλάζει» ταχύτητες. Συνήθως έχει ένα λόγο ταχυτήτων ανάμεσα στην περιστροφή του δρομέα και της γεννήτριας. Για μια μηχανή 600 ή 750kW, ο λόγος ταχυτήτων είναι περίπου 1 προς 50.

Πύργοι στήριξης

Οι πύργοι των ανεμογεννητριών στηρίζουν το κουβούκλιο και τον ρότορα, μπορεί να είναι είτε χαλύβδινοι σωληνοειδείς πύργοι είτε δικτυωτοί πύργοι.

Χαλύβδινοι σωληνοειδείς πύργοι: Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες έχουν τέτοιου είδους πύργους, είναι κωνικοί, η διάμετρος τους δηλαδή αυξάνει προς τη βάση, προκειμένου να είναι ευσταθείς και να μειωθεί το χρησιμοποιούμενο υλικό.



Σχήμα 9: Ανεμογεννήτριες με χαλύβδινους σωληνοειδείς πύργους

Δικτυωτοί πύργοι: Οι πύργοι αυτοί κατασκευάζονται με χαλύβδινα δικτυώματα. Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι το μειωμένο κόστος, αφού απαιτεί το μισό υλικό απ' ότι ο προηγούμενος. Το βασικό μειονέκτημά τους είναι η εμφάνισή τους. Για αισθητικούς λόγους οι πύργοι αυτοί έχουν εκλείψει.



Σχήμα 10. Ανεμογεννήτρια με δικτυωτό πύργο

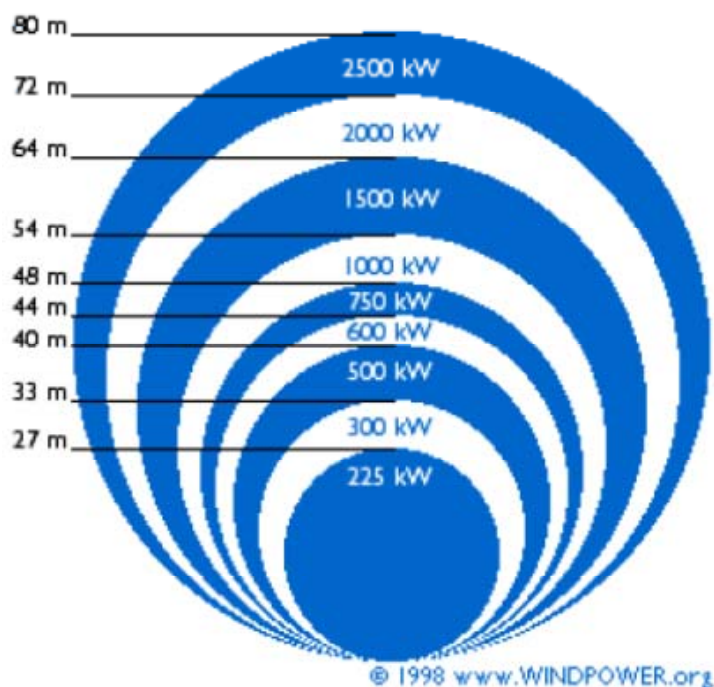
Το μέγεθος των ανεμογεννητριών

Η ισχύς εξόδου αυξάνεται όσο αυξάνει η επιφάνεια που καλύπτει ο δρομέας της ανεμογεννήτριας. Όταν ένας αγρότης αναφέρεται στην έκταση που καλλιεργεί, θα περιγράψει την έκταση που καλλιεργεί σε τετραγωνικά μέτρα, σε στρέμματα. Με μια ανεμογεννήτρια είναι περίπου το ίδιο, μόνο που στην καλλιέργεια η επιφάνεια αναφέρεται σε οριζόντιο επίπεδο ενώ στην ανεμογεννήτρια σε κάθετο.

Η επιφάνεια του δίσκου που καλύπτει ο ρότορας, καθώς και η ταχύτητα του ανέμου, φυσικά, καθορίζει την ενέργεια που παράγει η ανεμογεννήτρια.

Το παρακάτω σχήμα 11 δίνει μια εικόνα των συνήθων μεγεθών των ανεμογεννητριών:

Μια τυπική ανεμογεννήτρια 600kW θα έχει διάμετρο ρότορα 44m. Αν διπλασιαστεί η διάμετρος του ρότορα, τετραπλασιάζεται η επιφάνεια που καλύπτει. Αυτό σημαίνει ότι τετραπλασιάζεται και η ισχύς εξόδου.



Σχήμα 11

Η διάμετρος του ρότορα μπορεί να διαφέρει λίγο από τα μεγέθη που δίνονται στο σχήμα, γιατί αρκετοί κατασκευαστές προσαρμόζουν τις μηχανές τους στις αιολικές συνθήκες κάθε περιοχής: Μια μεγάλη ανεμογεννήτρια, απαιτεί περισσότερη ισχύ (ισχυρότερους ανέμους) για να περιστραφεί. Αν λοιπόν εγκατασταθεί μια ανεμογεννήτρια σε μια περιοχή με χαμηλό αιολικό δυναμικό θα μεγιστοποιηθεί η ετήσια ενεργειακή παραγωγή αν για δεδομένο μέγεθος του ρότορα χρησιμοποιηθεί μια μικρότερη γεννήτρια (ή αντίστροφα για δεδομένη ισχύ γεννήτριας χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερος δρομέας). Για μηχανή 600 kW το μέγεθος του ρότορα

μπορεί να κυμαίνεται από 39m ως 48m. Ο λόγος για τον οποίο θα αυξηθεί η παραγωγή ενέργειας από μια σχετικά μικρότερη μηχανή σε περιοχές με χαμηλό αιολικό δυναμικό είναι ότι η ανεμογεννήτρια θα δουλεύει για περισσότερες ώρες κατά τη διάρκεια του χρόνου.

ΑΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες στον κόσμο χρησιμοποιούν τριφασικές ασύγχρονες γεννήτριες με κλωβό. Αυτός ο τύπος γεννήτριας παρόλο που δεν χρησιμοποιείται ευρέως, είναι πολύ διαδεδομένος εκτός από την βιομηχανία των ανεμογεννητριών, και στα μικρά υδροηλεκτρικά.

Το περίεργο με αυτού του είδους τη γεννήτρια είναι ότι αρχικά είχε σχεδιαστεί ως ηλεκτρικός κινητήρας. Για την ακρίβεια το ένα τρίτο της παγκόσμιας ηλεκτρικής κατανάλωσης χρησιμοποιείται για τη λειτουργία ασύγχρονων κινητήρων μέσα σε εργοστάσια, αντλίες, ανελκυστήρες, και άλλες εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική. Ένας λόγος επιλογής του κινητήρα αυτού είναι η αξιοπιστία του και ότι είναι σχετικά φθηνός. Η γεννήτρια έχει ακόμα κάποια χαρακτηριστικά που είναι χρήσιμα για τις ανεμογεννήτριες. Έχει αυξημένη δυνατότητα ολίσθησης, και μια ικανότητα υπερφόρτωσης.

Η ασύγχρονη γεννήτρια με κλωβό έχει ένα δρομέα ο οποίος τη διαφοροποιεί από τη σύγχρονη γεννήτρια. Ο δρομέας αποτελείται από μεταλλικές ράβδους (συνήθως αλουμινίου) που ενώνονται ηλεκτρικά με αλουμινένιους δακτυλίους. Ένα ισχυρό πλεονέκτημα αυτού του τύπου δρομέα είναι ότι προσαρμόζεται αυτόματα στα ζεύγη πόλων του στάτη.

Αν ο δρομέας περιστρέφεται ακριβώς στην σύγχρονη ταχύτητα τότε το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο περιστρέφεται με ακριβώς την ίδια ταχύτητα, δεν υπάρχουν φαινόμενα επαγωγής, και δεν αλληλεπιδρά με το στάτη. Αν η ταχύτητα υπερβεί την σύγχρονη ταχύτητα τότε ο δρομέας περιστρέφεται γρηγορότερα από το μαγνητικό πεδίο με συνέπεια να παρέχεται στο δίκτυο ηλεκτρικό ρεύμα.

Η ταχύτητα της ασύγχρονης γεννήτριας μεταβάλλεται με την εφαρμοζόμενη περιστροφική δύναμη. Στην πράξη, η διαφορά μεταξύ της περιστροφικής ταχύτητας στη μέγιστη ισχύ και στη χαμηλή είναι πολύ μικρή, της τάξης του 1 %. Η διαφορά αυτή σε ποσοστό της σύγχρονης ταχύτητας καλείται ολίσθηση της γεννήτριας. Γι' αυτό μια γεννήτρια με δυο ζεύγη πόλων θα περιστρέφεται αργά στις 1500 rpm όταν είναι συνδεδεμένη με δίκτυο συχνότητας 50 Hz. Αν η γεννήτρια παράγει τη μέγιστη ισχύ της θα λειτουργεί στις 1515 rpm. Η παρακάτω σχέση είναι ο ορισμός της ολίσθησης μιας ασύγχρονης μηχανής. Το μέγεθος s εκφράζει την ποσοστιαία διαφορά της ταχύτητας του δρομέα από την σύγχρονη ταχύτητα του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Στην κατάσταση ηρεμίας $n = 0$ και επομένως $s = 1$, ενώ για $n = n_s$ ή $s = 0$. Αν ο δρομέας στραφεί γρηγορότερα από το στρεφόμενο πεδίο ($n > n_s$), τότε η ολίσθηση γίνεται αρνητική και είναι η περίπτωση της λειτουργίας της μηχανής ως γεννήτρια.

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα είναι ότι η γεννήτρια θα αυξάνει ή θα μειώνει ελαφρώς τις στροφές όταν η περιστροφική δύναμη μεταβάλλεται. Αυτό έχει ως συνέπεια μικρότερη καταπόνηση στο κιβώτιο ταχυτήτων, και αυτός είναι ένας από τους σοβαρότερους λόγους για τη χρήση ασύγχρονης γεννήτριας παρά σύγχρονης σε ανεμογεννήτριες που είναι άμεσα συνδεδεμένες με το δίκτυο.

Στην ασύγχρονη γεννήτρια, ο στάτης πρέπει πριν λειτουργήσει να μαγνητιστεί από το δίκτυο. Υπάρχει η δυνατότητα να λειτουργήσει η ασύγχρονη γεννήτρια σε αυτόνομο δίκτυο, όμως, πρέπει να παρέχονται πυκνωτές που να δίνουν το απαραίτητο ρεύμα μαγνήτισης. Επίσης είναι απαραίτητο ο δρομέας να έχει έναν εναπομείναν μαγνητισμό όταν εκκινήσει η γεννήτρια. Σε άλλη περίπτωση θα χρειαστεί μπαταρία και ηλεκτρονικά ισχύος, ή μια μικρή ντιζελογεννήτρια για να εκκινήσει το σύστημα. Μια ασύγχρονη μηχανή με δακτυλιοφόρο δρομέα (wound rotor) έχει ένα στάτη παρόμοιο με την ασύγχρονη μηχανή με κλωβό αλλά ένα δρομέα ο οποίος φέρει αυλακώσεις μέσα στις οποίες τοποθετείται ένα τύλιγμα όμοιο με το τύλιγμα του στάτη. Το τύλιγμα του δρομέα συνδέεται ηλεκτρικά με το περιβάλλον (π.χ. αντιστάσεις) διαμέσου “slip rings” (δακτυλίου) και “brushes” (ψήκτρες). Έτσι γίνεται δυνατός ο εξωτερικός έλεγχος των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του ρότορα και με τον τρόπο αυτό επηρεάζεται η τάση του.

Στο δρομέα σχεδόν πάντα οι 3 φάσεις συνδέονται σε αστέρα και τα 3 άκρα τους συνδέονται με τους τρεις δακτυλίου. Οι δακτύλιοι μέσω των ψηκτρών συνδέονται με ένα εξωτερικό κύκλωμα, π.χ. με τρεις ωμικές αντιστάσεις συνδεδεμένες σε αστέρα, ή είναι βραχυκυκλωμένοι. Εντούτοις δε δίνεται ισχύς στους δακτυλίου. Ο μοναδικός τους στόχος είναι να επιτρέψουν στην αντίσταση να τοποθετηθεί σε σειρά με τα τυλίγματα του δρομέα κατά την εκκίνηση. Τέτοια διάταξη ομαλής εκκίνησης υπάρχει στις γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (optislip). Ο άλλος τύπος γεννήτριας με δακτυλιοφόρο δρομέα, ο διπλά τροφοδοτούμενος, παρουσιάζεται σε επόμενο κεφάλαιο. Τοποθετώντας την αντίσταση σε σειρά με τα τυλίγματα του δρομέα όχι μόνο μειώνεται το ρεύμα εκκίνησης, αλλά αυξάνεται και η ροπή εκκίνησης. Η ολίσθηση του δρομέα αλλάζει

τροποποιώντας τη συνολική αντίσταση του ρότορα μέσω ενός μετατροπέα που συνδέεται στον άξονα του ρότορα. Ο στάτης της γεννήτριας συνδέεται κατευθείαν στο δίκτυο. Αυτή η αντίσταση αποκόβεται όταν η μηχανή έχει ξεκινήσει, ώστε να μοιάζει ο δρομέας ηλεκτρικά με το δρομέα σε μηχανή κλωβού.

Το βασικό πλεονέκτημα είναι η ελαχιστοποίηση του φορτίου στις ανεμογεννήτριες κατά τη διάρκεια των ριπών του ανέμου . Μέσω αυτού του συστήματος η γεννήτρια έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει την ολίσθησή της (σε ένα μικρό εύρος τιμών) και να οδηγηθεί στη βέλτιστη ολίσθηση , εξασφαλίζοντας μικρότερες ταλαντώσεις στη ροπή εισόδου και στην ισχύ εξόδου . Τα κύρια μειονεκτήματα της γεννήτριας με δακτυλιοφόρο δρομέα είναι ότι είναι πιο ακριβή και όχι τόσο στιβαρή όσο η γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού , το εύρος στο οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα περιορίζεται στο 0 – 10% καθώς εξαρτάται από το μέγεθος της μεταβλητής αντίστασης του στάτη , ο έλεγχος της πραγματικής και αέργου ισχύος που επιτυγχάνεται δεν είναι αρκετά ικανοποιητικός , ένα ποσοστό ισχύος καταναλώνεται στη μεταβλητή αντίσταση του δρομέα .

ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι πιο πολύπλοκη και ακριβότερη σε σχέση με μια αντίστοιχη επαγωγική . Εμφανίζει όμως ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι της επαγωγικής : δεν απαιτεί άεργο ρεύμα μαγνήτισης .

Σε γενικές γραμμές η λειτουργία των σύγχρονων μηχανών έχει ως εξής: Όλες οι τριφασικές γεννήτριες χρησιμοποιούν ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο δημιουργείται από τρεις ηλεκτρομαγνήτες. Καθένας από τους τρεις ηλεκτρομαγνήτες είναι συνδεδεμένος με μια φάση του ηλεκτρικού δικτύου. Καθένας από τους ηλεκτρομαγνήτες μετατρέπεται διαδοχικά από Νότιος σε Βόρειος πόλος και αντίστροφα. Η μεταβολή αυτή του μαγνητισμού αντικατοπτρίζει ακριβώς τη μεταβολή της τάσης της κάθε φάσης. Όταν η μια φάση βρίσκεται στο μέγιστο, οι άλλες δυο διαρρέονται από ρεύμα αντίθετης διεύθυνσης στη μισή τάση. Αφού οι μαγνήτες είναι τοποθετημένοι ανά 120 μοίρες, το μαγνητικό πεδίο θα κάνει μια πλήρη περιστροφή ανά κύκλο. Η σύγχρονη μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια αν επιβληθεί στον δρομέα ρεύμα ώστε να τον εξαναγκάσει στην κυκλική κίνηση, αντί να τον περιστρέφει το ρεύμα του δικτύου. Πρέπει συνεπώς να υπάρχει ένας ισχυρός μαγνήτης για να παράγεται αρκετό ρεύμα. Όσο περισσότερη δύναμη εφαρμόζεται στο δρομέα τόσο περισσότερο ρεύμα παράγεται, η γεννήτρια όμως συνεχίζει να λειτουργεί στην ίδια ταχύτητα η οποία προσδιορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου και τους πόλους της μηχανής.

Υπάρχει επίσης η δυνατότητα να αποσυνδεθεί η γεννήτρια από το δίκτυο, και να προκύψει ένα ανεξάρτητο τριφασικό δίκτυο. Εάν όμως αποσυνδεθεί η γεννήτρια από το δίκτυο, θα πρέπει να διατηρηθεί σταθερή περιστροφική ταχύτητα προκειμένου να παραχθεί εναλλασσόμενο ρεύμα με σταθερή συχνότητα. Επομένως, με τέτοιου είδους γεννήτρια θα πρέπει συνήθως να χρησιμοποιείται έμμεση σύνδεση με το δίκτυο. Στην πράξη, σύγχρονες γεννήτριες με μόνιμους μαγνήτες δεν χρησιμοποιούνται πολύ. Υπάρχουν αρκετοί λόγοι γι' αυτό. Ένας είναι ότι οι μόνιμοι μαγνήτες τείνουν να απομαγνητιστούν όταν λειτουργούν κάτω από ισχυρά μαγνητικά πεδία όπως αυτά της

γεννήτριας. Ένας άλλος είναι ότι ισχυροί μαγνήτες φτιάχνονται από σπάνια μέταλλα π.χ. Νεοδύνιο, και είναι πολύ ακριβοί. Συνήθως οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν σύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούν στον δρομέα ηλεκτρομαγνήτες που λειτουργούν με συνεχές ρεύμα το οποίο παρέχεται από το δίκτυο. Αφού όμως το δίκτυο παρέχει εναλλασσόμενο ρεύμα, πρέπει να προηγηθεί ένα στάδιο μετατροπής του εναλλασσομένου σε συνεχές ρεύμα.

Η ταχύτητα μιας γεννήτριας που είναι άμεσα συνδεδεμένη με το τριφασικό δίκτυο είναι σταθερή, προσδιορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου, και από τα ζεύγη πόλων του στάτη. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες με σύγχρονες μηχανές χρησιμοποιούν γεννήτριες με δύο ή τρία ζεύγη πόλων. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται αυτές οι σχετικά υψηλής ταχύτητας γεννήτριες είναι η οικονομία σε μέγεθος και κόστος. Η μέγιστη δύναμη την οποία μπορεί να 'αντέξει' η γεννήτρια εξαρτάται από το μέγεθος του δρομέα. Για δεδομένη ισχύ εξόδου υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μεταξύ μιας αργόστροφης, μεγάλης και άρα ακριβής γεννήτριας, ή μιας υψηλόστροφης και άρα φθηνότερης μικρότερης γεννήτριας.

ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟ ΜΕ ΠΑΡΑΓΩΓΗ Η₂

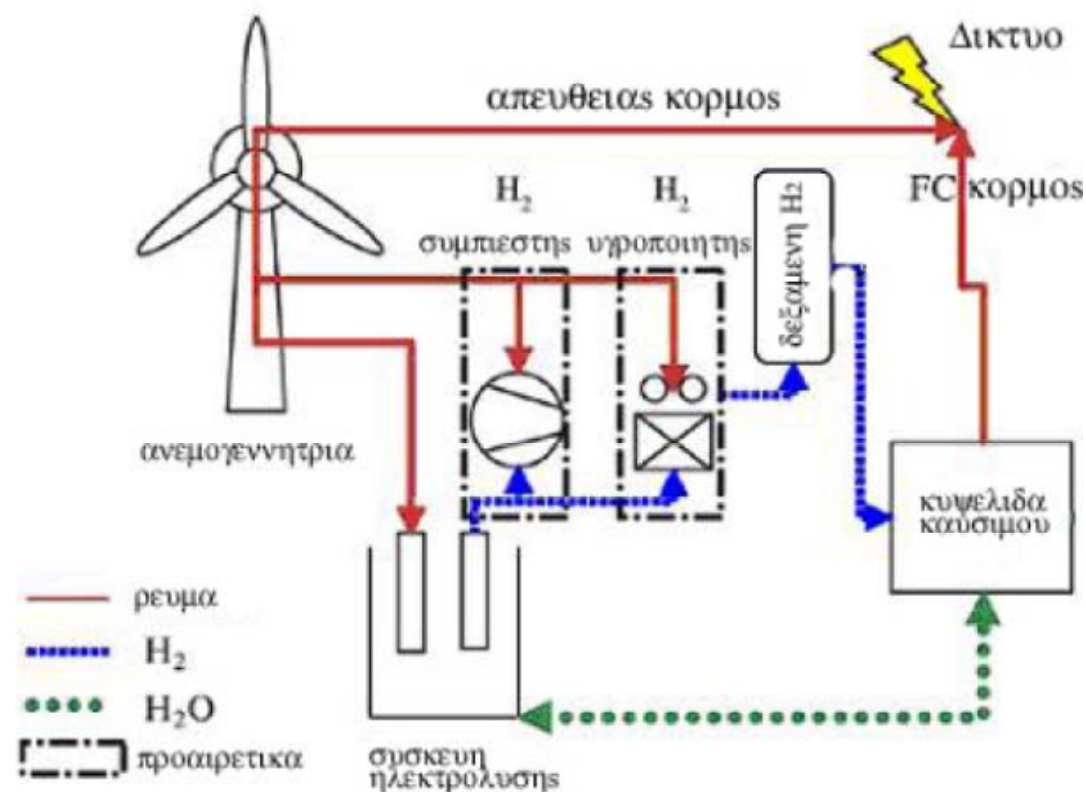
Εισαγωγή

Στο σύστημα που θα περιγραφεί, περιλαμβάνονται, ανεμογεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος, συσκευή ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή Η₂, στοιχεία στα οποία θα είναι δυνατή η αποθήκευση του παραγόμενου Η₂ και συστοιχίες κυψελίδων καυσίμου στις οποίες θα παράγεται ηλεκτρική ενέργεια από καύσιμο Η₂. Ένα τέτοιο σύστημα πρέπει να εξεταστεί από πολλές πλευρές, όπως το κόστος, η απόδοση, η αξιοπιστία, και η δυνατότητα απόκρισής του σε απότομες μεταβολές. Πολύ σημαντικός επομένως είναι ο σωστός σχεδιασμός και η καλή προσομοίωση του συστήματος ελέγχου.

Η αρχή λειτουργίας ενός τέτοιου υβριδικού συστήματος είναι η εξής. Εάν η ανεμογεννήτρια παράγει αρκετή ισχύ, το σύστημα υποστηρίζεται εξολοκλήρου από αυτή. Στην περίπτωση που η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας ξεπερνάει την επιθυμητή, η πλεονάζουσα ισχύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου, το οποίο μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί όταν υπάρξει ανάγκη, στις κυψελίδες καυσίμου. Σε περίπτωση χαμηλού ανέμου, ένα μέρος της ισχύος μπορεί να συμπληρωθεί από την ενέργεια που προέρχεται από τις κυψελίδες καυσίμου.

Περιγραφή του υβριδικού συστήματος

Ένα τυπικό υβριδικό σύστημα που περιλαμβάνει ανεμογεννήτρια, συσκευή ηλεκτρόλυσης, αποθηκευτικούς χώρους για το παραγόμενο H₂ και κυψελίδες καυσίμου απεικονίζεται σε απλοποιημένη μορφή στο παρακάτω σχήμα:



Σχηματική αναπαράσταση υβριδικού συστήματος που διαθέτει ανεμογεννήτρια, συσκευή ηλεκτρόλυσης και κυψελίδα καυσίμου, καθώς και δεξαμενή αποθήκευσης H₂. Η ισχύς μπορεί να διοχετευτεί στο ηλεκτρικό δίκτυο είτε κατευθείαν από την ανεμογεννήτρια, είτε μέσω της κυψελίδας καυσίμου.

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από την ανεμογεννήτρια διακλαδίζεται. Το ένα μέρος της φτάνει κατευθείαν στην κατανάλωση ενώ το δεύτερο τροφοδοτεί τη συσκευή ηλεκτρόλυσης νερού για παραγωγή υδρογόνου, το οποίο στη συνέχεια θα αποθηκευτεί σε δεξαμενές, σε συμπιεσμένη ή υγρή μορφή. Η δεξαμενή αποθήκευσης H₂ είναι συνδεδεμένη με συστοιχίες κυψελίδων καυσίμου. Σε περίπτωση υπολειμματικής της ανεμογεννήτριας, το αποθηκευμένο H₂ διοχετεύεται από τη δεξαμενή στη συστοιχία των κυψελίδων. Σε αυτές ενώνεται με το υπάρχον O₂ των κυψελίδων, 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.

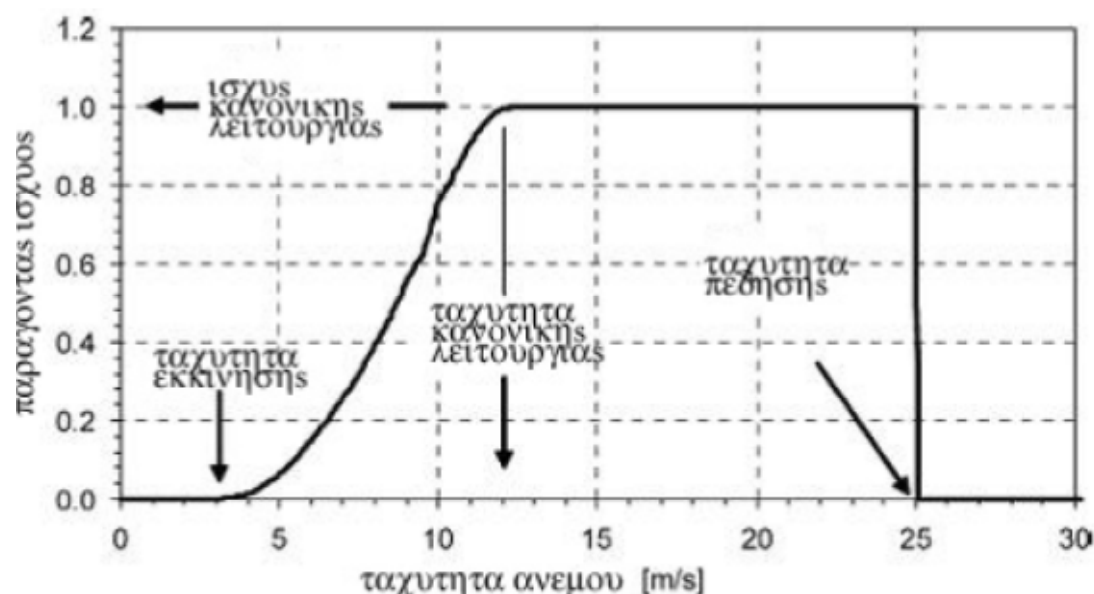
Επίσης, το σύστημα διαθέτει ένα εσωτερικό κύκλωμα το οποίο τροφοδοτεί την συσκευή ηλεκτρόλυσης με εφεδρική ηλεκτρική ενέργεια (10 % της ενέργειας που απαιτείται για την κανονική λειτουργία της συσκευής) από τη συστοιχία των

κυψελίδων 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 κυψελίδες καυσίμου. Τα βασικά στοιχεία ενός τέτοιου συστήματος θα δοθούν εκτενώς παρακάτω.

Τα λειτουργικά μέρη του υβριδικού συστήματος

α) Η ανεμογεννήτρια

Για ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα και κατάλληλου μεγέθους, ανάλογα φυσικά και με τις ενεργειακές απαιτήσεις κάθε περιοχής. Προκειμένου να γίνει σωστή επιλογή του μεγέθους, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη της ενέργειας εξόδου για μια τυπική ανεμογεννήτρια με ταχύτητα εκκίνησης 3 m/s, ταχύτητα κανονικής λειτουργίας τα 12 m/s, και ταχύτητα πέδησης τα 25 m/s. Μια τέτοια χαρακτηριστική καμπύλη απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα.

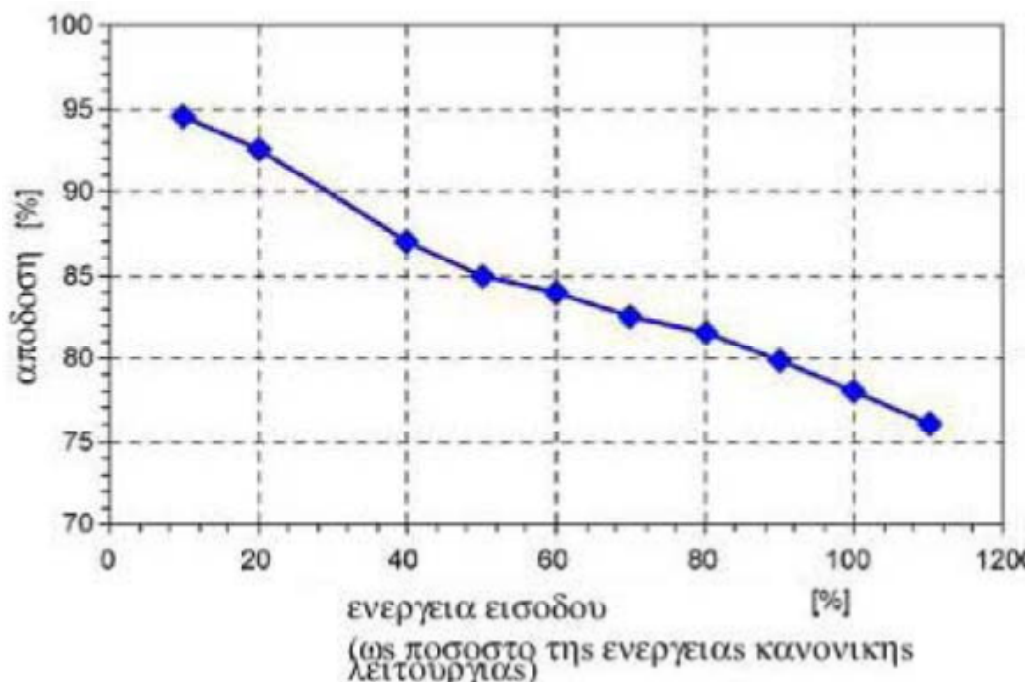


Σχ.5.2 Καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας σαν συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου.

β) Η συσκευή ηλεκτρόλυσης

Στο εμπόριο πλέον υπάρχουν λειτουργικά συστήματα που δουλεύουν σε πιέσεις της τάξης των 30 bar. Πρόκειται για συσκευές ηλεκτρόλυσης οι οποίες λειτουργούν με αλκαλικά ηλεκτρολυτικά διαλύματα και περιλαμβάνουν όλο τον απαραίτητο εξοπλισμό για τη διαχείριση και τον έλεγχο του παραγόμενου σ' αυτές υδρογόνου. Η συμπίεση του υδρογόνου κατά τη διάρκεια της παραγωγής του είναι σχεδόν αντιστρέψιμη διαδικασία και επιτυγχάνεται με πολύ μικρότερο κόστος από ότι αν

χρησιμοποιούνται συμπίεστες για αυτό. Η καμπύλη στο παρακάτω σχήμα δείχνει μια εκτίμηση της απόδοσης μιας υψηλής πίεσης συσκευής ηλεκτρόλυσης, η οποία ορίζεται ως ο λόγος της ενέργειας που περικλείεται στο παραγόμενο υδρογόνο προς την ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του.



Τυπική απόδοση συσκευής ηλεκτρόλυσης υψηλής πίεσης (30 bar), ως συνάρτηση της ενέργειας εισόδου της συσκευής

Οι ανορθωτές οι οποίοι ενεργοποιούν τη συσκευή έχουν χρόνο απόκρισης της τάξης των 200 ms. Αυτός ο χρόνος είναι περισσότερο από ικανοποιητικός για τη διαχείριση της ενέργειας που στέλνει η ανεμογεννήτρια στη συσκευή. Όπου είναι απαραίτητο μπορεί να χρησιμοποιηθούν σφόνδυλοι, ή υπερπυκνωτές προκειμένου να γίνει σωστή διαχείριση στα peaks της ενέργειας που αποδίδει η ανεμογεννήτρια.

γ) Αποθήκευση Υδρογόνου

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές μέθοδοι με ποικίλα χαρακτηριστικά για την αποθήκευση του υδρογόνου. Αυτή μπορεί να γίνει είτε σε υδρίδια μετάλλων, είτε με υγροποίηση του παραγόμενου υδρογόνου, είτε με συμπίεση σε υψηλή πίεση όταν πρόκειται για αέριο υδρογόνο. 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 ασφάλειας. Για μεγάλες ποσότητες όμως, τα σημερινά υδρίδια μετάλλων είναι αρκετά βαριά και αρκετά ακριβά. Σ' αυτές τις περιπτώσεις λοιπόν η υγροποίηση ή η συμπίεση του αερίου υδρογόνου φαίνεται να είναι οι πιο κατάλληλες διαδικασίες. Το υγροποιημένο H₂ φαίνεται να είναι πλεονεκτικότερο όσον αφορά το χώρο αποθήκευσης και τα θέματα ασφάλειας, ενώ η συμπίεση της αερίάς του μορφής είναι σίγουρα πολύπλοκη διαδικασία. Η υγροποίησή του συμβαίνει στους 20 K, και 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.

Το συμπιεσμένο H₂, 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 H₂ 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).

δ) Κυψελίδες Καυσίμου

Οι κυψελίδες καυσίμου λειτουργούν με ποικίλους ηλεκτρολύτες και παρουσιάζουν διαφορές στο φάσμα των ενεργειών, στις αποδόσεις και στα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Σε εφαρμογές μέχρι 100 kW μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυψελίδα καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), οι οποίες λειτουργούν σε θερμοκρασίες παρόμοιες με του περιβάλλοντος. Τέτοιες κυψελίδες χρησιμοποιούνται σήμερα ως προωστικές σε αυτοκίνητα και λεωφορεία, διότι αποκρίνονται άμεσα σε απότομες αλλαγές (καλύτερα από τους ήδη υπάρχοντες ντιζελοκινητήρες). Οι κυψελίδες PEMFC ειδικά για στάσιμες εφαρμογές μπορούν να φτάσουν σε αποδόσεις ίσως και του 50 %. Για εφαρμογές της τάξης του 100 – 250 kW και περισσότερων οι SOFC (solid oxide FC) προτιμώνται που λειτουργούν σε θερμοκρασίες γύρω στους 600 με 1000 K και μπορούν να φτάσουν σε ηλεκτρική απόδοση γύρω στο 60 %. Παρομοίως, οι κυψελίδες τιγμένου άνθρακα (MCFC) ίσως να μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αυτά. Ωστόσο, αυτά απαιτούν διοξείδιο του άνθρακα σαν φορέα του φορτίου και κάτι τέτοιο συνεπάγεται ότι το CO₂ θα πρέπει να παρέχεται εξωτερικά για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Το πραγματικό δυναμικό βέβαια των κυψελίδων καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών, αποκαλύπτεται όταν αυτά συνδυαστούν με ανεμογεννήτριες σε ηλεκτροπαραγωγή. Επίσης από MCFC ή SOFC μπορεί να παραχθεί ατμός εξαιρετικά υψηλής θερμοκρασίας (πάνω από 400 οC) ο οποίος εκτονώνεται σε γεννήτρια αερίων φτάνοντας σε απόδοση το 85 %. Ένα τέτοιο σενάριο εξετάζεται για κυψελίδες άνω των 250 kW.

Συνολική απόδοση υβριδικών συστημάτων ανεμογεννήτριας – H₂

Κατά τη διαδικασία παραγωγής και συμπίεσης του H₂ υπάρχουν ενεργειακές απώλειες. Η ηλεκτρόλυση του νερού, σε εμπορικό επίπεδο, έχει απόδοση που αγγίζει

το 74 %. Ωστόσο σε πειραματικό επίπεδο φαίνεται να είναι εφικτή μέχρι και 80 % (σε κάποιες βιβλιογραφίες δίνονται και τιμές γύρω στο 90 %, αυτές όμως αναφέρονται μάλλον στην κβαντική απόδοση της ηλεκτρόλυσης και όχι στη συνολική). Η απόδοση για τη συμπίεση, και για ενδεικτική τιμή πίεσης τα 350 bar, και για αδιαβατική συμπίεση είναι γύρω στο 88 %, ενώ για ισόθερμη 83 %. Τέλος η μετατροπή ξανά σε ηλεκτρική ενέργεια, σε εμπορικά επίπεδα, έχει απόδοση περίπου 60 %. Εάν υπολογιστεί η συνολική απόδοση για τη διαδικασία ηλεκτρόλυσης, συμπίεση και κυψελίδας καυσίμου, αυτή βρίσκεται να είναι γύρω στο 51 %. Αυτό σημαίνει ότι από την ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε, το 51 % τελικά λήφθηκε στην έξοδο.

Θα αναφερθούν κάποια υβριδικά συστήματα με διάφορους συνδυασμούς των στοιχείων που προαναφέρθηκαν παραπάνω και θα εξεταστεί για αυτά η συνολική απόδοσή τους. Μία μικρή εγκατάσταση η οποία αποτελείται από μια ανεμογεννήτρια 250 kW και PEMFC κυψελίδες καυσίμου, μία ενδιάμεση η οποία περιλαμβάνει μία ανεμογεννήτρια 600 kW και MCFC κυψελίδες καυσίμου, και μία μεγάλη με ανεμογεννήτρια των 1250 kW και SOFC κυψελίδες καυσίμου. Δοκιμάζονται διάφοροι συνδυασμοί κυψελίδων καυσίμου, συσκευών ηλεκτρόλυσης και δεξαμενών αποθήκευσης υδρογόνου, και λαμβάνονται ετήσιες μετρήσεις για κάθε έναν από αυτούς προκειμένου να υπολογιστεί η σταθερά σ για κάθε σύστημα. Έτσι μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για την ενεργειακή συμπεριφορά της κάθε συσκευής και την περίοδο που το σύστημα βγαίνει εκτός λειτουργίας.

Στον πίνακα συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τα τρία σενάρια που συζητήθηκαν. Η ολική απόδοση του συστήματος είναι ικανοποιητική και κυμαίνεται από 40 έως 70 %, και εξαρτάται επίσης και από το μέγεθος της εγκατάστασης.

Πίνακας

Μέγεθος των επιμέρους συσκευών και ενεργειακή συμπεριφορά των διαφόρων εγκαταστάσεων

Μέγεθος (kW) ανεμογεννήτριας	250	250	600	600	1250	1250
Βαθμός υβριδοποίησης σ	0	2	0	2	0	2
Τύπος Κυψελίδας καυσίμου	PEMFC	PEMFC	MCFC	MCFC	SOFC	SOFC
Σταθερή ισχύ παρεχόμενη από τις FC (kW)	42	30	128	88	400	185
Ισχύς παρεχόμενη από την WT απευθείας στο δίκτυο (kW)	0	60	0	176	0	370
Μέγεθος (kW) συσκευής ηλεκτρολύσης	250	250	600	440	1250	800
Συνολική (%) απόδοση συστήματος	37.8	51.9	47.8	63.5	72	64.4

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

- Με κατάλληλη επιλογή των επιμέρους συσκευών ενός τέτοιου συστήματος, (ανεμογεννήτρια, συσκευή ηλεκτρολύσης, κυψελίδες καυσίμου, συμπιεστών ή υγροποιητών) καθώς και του βαθμού υβριδοποίησης, μπορεί κανείς να επιτύχει ικανοποιητικές αποδόσεις.
- Στο σύστημα αυτό οι κυψελίδες καυσίμου είναι αυτές που πάντα παρέχουν σταθερή ισχύ στο δίκτυο ανεξαρτήτως της έντασης του ανέμου ή της πιθανής άπνοιας σε κάποιες περιόδους. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη H₂ στη δεξαμενή υδρογόνου. Για αυτό το λόγο είναι αναγκαία η βελτίωση της απόδοσης της ηλεκτρολύσης του νερού και η μείωση του κόστους της προκειμένου να λειτουργήσει ενισχυτικά στη συνολική απόδοση του συστήματος.
- Τέλος μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλα ενισχυτικά μέσα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στο υβριδικό σύστημα(πχ μπαταρίες) ώστε με τον καταλληλότερο τρόπο χρησιμοποίησής τους, να επιτευχθεί ο βέλτιστος βαθμός απόδοσης του υβριδικού συστήματος.

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Παραγωγή υδρογόνου από αιολική ενέργεια στο Λαύριο

Το υδρογόνο προβλέπεται να αποτελέσει στο μέλλον σημαντικό εναλλακτικό καύσιμο στον τομέα των μεταφορών. Ο τρόπος παραγωγής του καθορίζει τις ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα που παράγονται, οι οποίες μηδενίζονται όταν η παραγωγή του γίνει από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το ΚΑΠΕ σε συνεργασία με Ευρωπαϊκούς φορείς υλοποίησε μία πιλοτική εγκατάσταση για παραγωγή, αποθήκευση και εμφιάλωση υδρογόνου από αιολική ενέργεια. Η εγκατάσταση αναπτύχθηκε στο πάρκο δοκιμών ανεμογεννητριών του ΚΑΠΕ στο Λαύριο Αττικής και αποτελείται από τα εξής βασικά τμήματα:

- ανεμογεννήτρια Enercon E-40 ισχύος 500 kW,
- μονάδα αλκαλικής ηλεκτρόλυσης ισχύος 25 kW, με ονομαστική παραγωγή 5 Nm³/h H₂ στα 20 bar,
- μονάδα αποθήκευσης 40 Nm³ υδρογόνου σε δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων (υπεύθυνος φορέας, FIT, Κύπρος)
- συμπιεστή υδρογόνου ενός σταδίου από τα 18 bar στα 220 bar, με σταθμό εμφιάλωσης υδρογόνου (υπεύθυνος φορέας, ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ)
- κεντρικό σύστημα αυτόματου ελέγχου και καταγραφής δεδομένων Παρουσιάζονται τα επιμέρους τμήματα του εξοπλισμού και η διαδικασία ανέγερσης της εγκατάστασης καθώς και η εμπειρία που αποκτήθηκε από την όλη διαδικασία. Επιπλέον παρουσιάζονται τα πρώτα αποτελέσματα από την λειτουργία της εγκατάστασης.

Γενικές πληροφορίες

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η χρήση των συμβατικών καυσίμων στις μεταφορές και την ηλεκτροπαραγωγή επιβαρύνει ανεπανόρθωτα το περιβάλλον. Το υδρογόνο μελετάται σαν ένα εναλλακτικό καύσιμο – ακριβέστερα ενεργειακό διάνυσμα – το οποίο μακροπρόθεσμα θα επιτρέψει αφενός την απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και αφετέρου θα συμβάλει στην προστασία του περιβάλλοντος. Όσον αφορά την διαθεσιμότητα του υδρογόνου, αυτό δεν υπάρχει μεν ελεύθερο στην φύση αλλά μπορεί να προέλθει από ενώσεις που αφθονούν στην φύση όπως το νερό και οι υδρογονάνθρακες. Για να «σπάσουν» οι δεσμοί αυτών των ενώσεων και να παραχθεί υδρογόνο, χρειάζεται να καταναλωθεί ενέργεια. Αυτή η ενέργεια μπορεί να προέλθει από πλήθος πηγών ενέργειας – γεγονός το οποίο και αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα του υδρογόνου – όπως τα ορυκτά καύσιμα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), η πυρηνική ενέργεια κ.α.

Σε περίπτωση που το υδρογόνο προέλθει από ορυκτά καύσιμα, όπως κατεξοχήν συμβαίνει σήμερα στα διυλιστήρια, εκλύεται διοξείδιο του άνθρακα κατά την παραγωγή του, ενώ η πυρηνική ενέργεια έχει να αντιμετωπίσει πλήθος θεμάτων (ασφάλειας, διαχείρισης αποβλήτων, κ.α.). Η παραγωγή υδρογόνου από ΑΠΕ έχει μηδενικές εκπομπές και είναι συνεπώς περιβαλλοντικά συμφέρουσα, ενώ δίνει την δυνατότητα για την παραγωγή υδρογόνου σε οποιαδήποτε χώρα, ακόμα και σε τοπικό επίπεδο, και όχι μόνο σε χώρες με πλούσιο υπέδαφος ή υψηλή τεχνογνωσία. Όμως ο ηλεκτρισμός είναι το πλέον καθαρό και ευέλικτο ενεργειακό διάλυμα, με τον ηλεκτρισμό από ΑΠΕ να έχει το υψηλότερο κόστος. Εφόσον η παραγωγή υδρογόνου και κατόπιν η χρήση του σε κινητήρες ή κυψέλες καυσίμου έχει μεγάλο ενεργειακό κόστος (συνολικός βαθμός απόδοσης για παραγωγή – αποθήκευση - χρήση περίπου 30%) είναι προφανές ότι η παραγόμενη από ΑΠΕ ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να χρησιμοποιείται για την κάλυψη της ζήτησης. Σε περίπτωση πλεονάζουσας ενέργειας από ΑΠΕ, η ενέργεια αυτή μπορεί να αποθηκευτεί στην μορφή υδρογόνου και να χρησιμοποιηθεί κατόπιν στις μεταφορές ή για επαν-ηλεκτροδότηση. Τέτοιες λύσεις μπορούν να εφαρμοστούν μεσοπρόθεσμα σε μη-διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά δίκτυα όπως αυτά των νησιών, ενώ μακροπρόθεσμα προβλέπεται να υλοποιούνται εγκαταστάσεις ΑΠΕ με κύριο σκοπό την παραγωγή υδρογόνου.

Στη διάρκεια των τελευταίων είκοσι χρόνων, έχουν μελετηθεί διάφορα συστήματα παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ιδιαίτερα σε συνδυασμό με φωτοβολταϊκά κελιά. Η πρώτη αυτόνομη εγκατάσταση παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια τέθηκε σε λειτουργία το 2003 στο νησί Utsira της Νορβηγίας¹. Αποτελείται από μια ανεμογεννήτρια Enercon E-40 των 600 kW, μια αλκαλική μονάδα ηλεκτρόλυσης της Norsk Hydro ισχύος 48 kW που παράγει 10 Nm³/h υδρογόνο, ένα συμπιεστή 6 kW και μια δεξαμενή 12 m³ για αποθήκευση του υδρογόνου στα 200 bar, έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου των 55 kW και μια κυψέλη καυσίμου PEM των 10 kW. Μια δεύτερη αυτόνομη εγκατάσταση παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια μπήκε σε λειτουργία πρόσφατα στα νησιά Shetland². Αποτελείται από 2 ανεμογεννήτριες Proven LTD των 15 kW, μια αλκαλική μονάδα ηλεκτρόλυσης της AccaGen μέγιστης ισχύος 15 kW στα 55 bar, δεκαέξι κυλίνδρους των 50 l συνολικής ικανότητας 44 Nm³ H₂ και μια κυψέλη καυσίμου PEM της Plug-Power ισχύος 5 kW DC.

Στα πλαίσια του πενταετούς Ευρωπαϊκού προγράμματος RES2H₂, που ξεκίνησε το 2001, το ΚΑΠΕ σε συνεργασία με άλλους Ευρωπαϊκούς φορείς, σχεδίασε και υλοποίησε μία πιλοτική εγκατάσταση για παραγωγή, αποθήκευση και εμφιάλωση υδρογόνου από αιολική ενέργεια. Μια δεύτερη εγκατάσταση στα Κανάρια Νησιά, που προβλέπεται στα πλαίσια του ίδιου έργου, με χρήση του υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου, δεν έχει υλοποιηθεί ακόμα, εξαιτίας διαφόρων προβλημάτων.

Στην Ελλάδα, η μονάδα παραγωγής του υδρογόνου εγκαταστάθηκε στο Επιδεικτικό Αιολικό Πάρκο του ΚΑΠΕ κοντά στην Κερατέα, συνολικής εγκαταστημένης ισχύος 3 MW. Η εταιρεία ΡΟΚΑΣ ΑΒΕΕ ανέλαβε την προμήθεια και εγκατάσταση του

συμπιεστή υδρογόνου, του σταθμού πλήρωσης φιαλών και του δικτύου υδρογόνου. Το Frederick Institute of Technology (FIT) σχεδίασε και εγκατέστησε την μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου σε μεταλλοϋδρίδια. Το ΚΑΠΕ ανέλαβε την μελέτη και εγκατάσταση της μονάδας ηλεκτρόλυσης, την ηλεκτρολογική εγκατάσταση και σύνδεση με την ανεμογεννήτρια, το κεντρικό σύστημα ελέγχου και τα περιφερειακά συστήματα.

Η κατασκευή ολοκληρώθηκε και όλα τα τμήματα του εξοπλισμού δοκιμάστηκαν ξεχωριστά στο διάστημα από Μάιο έως Σεπτέμβριο του 2005. Η εγκατάσταση τέθηκε σε λειτουργία τον Οκτώβριο και εγκαινιάστηκε από τον Υπουργό Ανάπτυξης κo Σιούφα στις 19 Νοεμβρίου του 2005.

Το παραγόμενο υδρογόνο θα προωθηθεί στην υπάρχουσα μη-ενεργειακή αγορά υδρογόνου, ενώ ποσότητες του θα χρησιμοποιηθούν για την τροφοδοσία μικρο-οχήματος τύπου «golf cart» το οποίο είναι ηλεκτρικό και χρησιμοποιεί κυψέλη καυσίμου για την αύξηση της αυτονομίας του και το οποίο θα χρησιμοποιείται για την μεταφορά ατόμων με ειδικές ανάγκες που επισκέπτονται τις εγκαταστάσεις του ΚΑΠΕ.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ «ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ»

Το σύστημα αποτελείται βασικά από τρεις ενότητες:

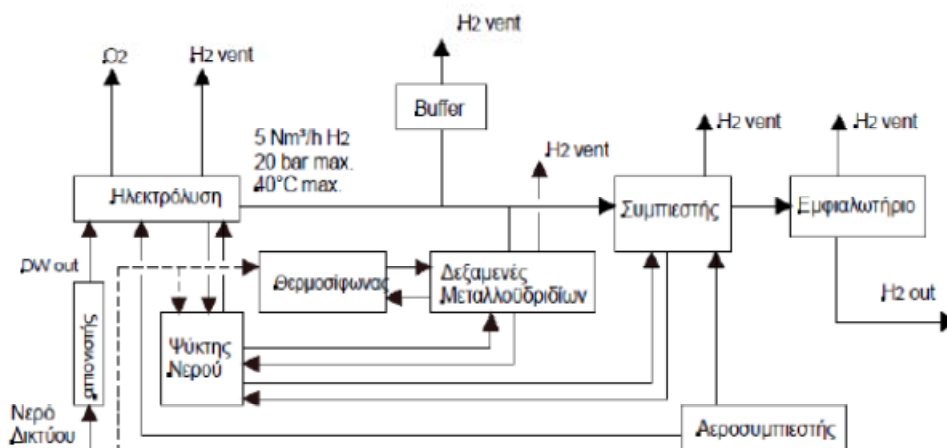
- την χημική εγκατάσταση παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου με τα απαραίτητα περιφερειακά
- τον κεντρικό ηλεκτρολογικό πίνακα, που περιλαμβάνει την σύνδεση με την ανεμογεννήτρια και την παροχή ρεύματος σε όλους τους χρήστες
- το κεντρικό σύστημα ελέγχου και καταγραφής δεδομένων

Μια 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.

Ένα απλό διάγραμμα της χημικής εγκατάστασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 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



Σχήμα 1. Απλό διάγραμμα της εγκατάστασης υδρογόνου στο αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ

Μονάδα Ηλεκτρόλυσης

Η μονάδα αλκαλικής ηλεκτρόλυσης κατασκευάστηκε από την Casale Chemicals, Ελβετία, και έχει ονομαστική παραγωγή 0.45 kg/h (5 Nm³/h) υδρογόνου υπό πίεση 19 barg. Το ηλεκτρολυτικό υδρογόνο καθαρότητας 99.98 κ.ο. περνάει από καταλυτικό αντιδραστήρα για την καύση του οξυγόνου σε επίπεδα κάτω των 10 ppm και από ξηραντήρα, για να κατέβει το ατμοσφαιρικό σημείο δρόσου του υδρογόνου στους -40°C. Η μονάδα μπορεί να απορροφήσει τις αλλαγές ηλεκτρικής ισχύος μιας ανεμογεννήτριας μέσα σε ένα εύρος από 15 έως 100% της ονομαστικής της ισχύος σε ένα δευτερόλεπτο. Η λειτουργία της ηλεκτρόλυσης για μεγάλα χρονικά διαστήματα με ισχύ χαμηλότερη του 15%, δημιουργεί προβλήματα στην καθαρότητα του παραγόμενου υδρογόνου.

Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι 80°C και ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται υδατικό διάλυμα KOH 30% κ.β. Το νερό του δικτύου, που διοχετεύεται στην ηλεκτρόλυση, περνάει από μια στήλη εναλλαγής ιόντων έτσι ώστε η αγωγιμότητά του να πέσει στα 5 μS/cm.

Οι τεχνικές προδιαγραφές ήταν πολύ αυστηρές όσον αφορά την ασφάλεια του συστήματος, και η μονάδα έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σύμφωνα με όλους τους κανόνες ασφαλείας. Σε περίπτωση οποιασδήποτε ανωμαλίας, η μονάδα σταματάει τη λειτουργία της αυτομάτως, κάνει αποσυμπίεση και γεμίζει το σύστημα με άζωτο. Τα μετρητικά ασφαλείας είναι διπλά, με το βασικό σύστημα να λειτουργεί χωρίς την παρέμβαση ανθρώπου ή λογισμικού. Όλες οι βάνες είναι πνευματικού

τύπου, έτσι ώστε να ελαττωθεί στο ελάχιστο ο ηλεκτρικός εξοπλισμός στο πεδίο. Όλος ο ηλεκτρικός εξοπλισμός στο πεδίο είναι σχεδιασμένος και κατασκευασμένος σύμφωνα με τις προδιαγραφές που ισχύουν για ζώνες με πιθανή παρουσία εύφλεκτων αερίων.

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης είναι κατασκευασμένη για λειτουργία σε εξωτερικό χώρο, αλλά χρειάζεται προστασία από τον ήλιο, οπότε προστατεύεται από ένα κουβούκλιο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Σε πρώτο πλάνο και κάτω, φαίνεται η δεξαμενή απιονισμένου νερού και λίγο ψηλότερα φαίνονται τα δοχεία διαχωρισμού αερίου/ηλεκτρολύτη για το υδρογόνο και το οξυγόνο. Στο βάθος δεξιά, φαίνεται η στήλη απιονισμού του νερού. Στο κάτω μέρος βρίσκονται οι συνδέσεις του νερού και στο πάνω μέρος οι συνδέσεις των αερίων.



Εικόνα 1. Η αλκαλική μονάδα ηλεκτρόλυσης 25 kW, δυνατότητας παραγωγής 0.45 kg/h

Δεξαμενές Μεταλλοϋδριδίων

Οι δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων σχεδιάστηκαν από το Frederick Institute of Technology (FIT), Κύπρος, και κατασκευάστηκαν από την Labtech SA, Βουλγαρία. Το σύστημα αποθήκευσης αποτελείται από 6 κυλινδρικές δεξαμενές από ατσάλι, που περιέχουν ένα κράμα μετάλλου τύπου AB5, με προσμείξεις $La_{1-x}Ce_xNi$. Κατά τη διάρκεια της εξωθερμικής προσρόφησης υδρογόνου, οι δεξαμενές ψύχονται από κρύο νερό. Για να μπορέσουν να εκροφήσουν το υδρογόνο, χρειάζεται ζεστό νερό στους $75^{\circ}C$, από έναν απλό θερμοσίφωνα ισχύος 4 kW. Η πίεση εκρόφησης σχεδιασμού είναι 14 bar και αντιστοιχεί σε μια θερμοκρασία $50-60^{\circ}C$, και οι δεξαμενές χρειάζονται 5-15 λεπτά προθέρμανσης πριν αρχίσουν να αποδίδουν το υδρογόνο με την ονομαστική ροή των 0.45 kg/h υδρογόνου.

Η κάθε δεξαμενή έχει ονομαστική ικανότητα προσρόφησης 0.62 κιλών υδρογόνου ($7 Nm^3$) οπότε η εγκατάσταση έχει συνολική ικανότητα αποθήκευσης 3.7 κιλών υδρογόνου ($42 Nm^3$). Η ειδική ικανότητα προσρόφησης του μεταλλικού κράματος είναι 1.28% κ.β. και της πλήρους δεξαμενής είναι 0.66% κ.β., λαμβάνοντας υπόψη το βάρος των κυλίνδρων. Η ενθαλπία σχηματισμού του μεταλλοϋδριδίου είναι $\Delta H_f = 28 kJ/mol H_2$, και η απαιτούμενη θερμική ισχύς για την εκρόφηση του υδρογόνου στην ονομαστική ροή είναι περίπου 2 kW.

Τα μεταλλοϋδρίδια δεν πρέπει να έρθουν σε επαφή με τον αέρα ούτε με νερό, γιατί μπορεί να αντιδράσουν εκρηκτικά. Η παρουσία μικρών ποσοτήτων οξυγόνου και νερού μέσα στο υδρογόνο μπορεί να οδηγήσει στην σταδιακή μείωση της ικανότητας αποθήκευσης των μεταλλοϋδριδίων.

Οι έξι δεξαμενές διαθέτουν χειροκίνητη βάνα αποκλεισμού, αλλά λειτουργούν όλες μαζί σαν μία μοναδική δεξαμενή, με τη βοήθεια αυτόματης βάνας εισόδου και αυτόνομης βάνας εξόδου. Οι δεξαμενές πρέπει να ψύχονται συνεχώς κατά τη διάρκεια της προσρόφησης υδρογόνου, καθώς και για λίγο διάστημα μετά το πέρας της προσρόφησης, μέχρι να σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία του μεταλλοϋδριδίου.

Κατά τη διάρκεια της πλήρωσης, η πίεση στο κενό διάστημα των μεταλλοϋδριδίων είναι ίση με την πίεση του κυκλώματος. Όσο τα μεταλλοϋδρίδια δεν είναι γεμάτα, η πίεση ισορροπίας των μεταλλοϋδριδίων είναι χαμηλότερη από την πίεση του κενού διαστήματος. Όταν οι δύο αυτές πιέσεις γίνονται ίσες, το μεταλλικό κράμα δεν θα μπορεί να απορροφήσει περισσότερο υδρογόνο, αλλά η στιγμή αυτή της εξισορρόπησης δε μπορεί να προβλεφθεί εύκολα. Έτσι, το επίπεδο πλήρωσης των μεταλλοϋδριδίων υπολογίζεται με ολοκλήρωμα ως προς το χρόνο της ροής.

Συμβατική δεξαμενή υδρογόνου

Μια μικρή συμβατική δεξαμενή υδρογόνου σχεδιάστηκε για να διευκολύνει τη λειτουργία του συμπιεστή. Η συσκευή ηλεκτρόλυσης είναι ο μόνος χρήστης ηλεκτρικής ισχύος της διάταξης που μπορεί να απορροφήσει μεγάλες μεταβολές ισχύος. Όταν η ισχύς μειώνεται, μειώνεται ανάλογα και η παραγωγή υδρογόνου. Ο συμπιεστής υδρογόνου μπορεί να δεχθεί ένα εύρος πιέσεων στην είσοδο, από 10 bar

έως 18 bar αλλά αν η πίεση του υδρογόνου πέσει κάτω από το χαμηλό όριο, ο συμπιεστής σταματάει αυτομάτως τη λειτουργία του. Η συμπιεζόμενη ροή του υδρογόνου εξαρτάται από την πίεση εισόδου, αλλά και από την πίεση εξόδου. Η ροή είναι μεγαλύτερη όταν η διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου είναι μικρή, όπως για παράδειγμα στην αρχή της διαδικασίας πλήρωσης μιας φιάλης, και μικρότερη όταν η διαφορά πίεσης είναι μεγάλη, όπως όταν η φιάλη είναι σχεδόν γεμάτη. Επειδή δεν ενδείκνυται από τον κατασκευαστή η έναρξη/στάση του συμπιεστή περισσότερο από τρεις φορές την ώρα, σχεδιάστηκε μια μικρή συμβατική δεξαμενή για να επιτρέψει στο συμπιεστή να λειτουργεί για αρκετό χρονικό διάστημα, ακόμα και αν η παραγωγή υδρογόνου διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα για πολλή ώρα.

Η συμβατική δεξαμενή αποτελείται από 8 κυλίνδρους των 50 λίτρων, που μπορούν να αποθηκεύσουν περίπου 0.3 κιλά υδρογόνου ανάμεσα στα 10 και τα 19 bar. Η ποσότητα αυτή είναι αρκετή για περίπου 40 λεπτά λειτουργίας του συμπιεστή.

Συμπιεστής Υδρογόνου

Ο συμπιεστής υδρογόνου τριπλού μεταλλικού διαφράγματος έχει μόνο ένα στάδιο συμπίεσης, χάρη στην μέση πίεση παροχής της ηλεκτρόλυσης. Κατασκευάστηκε από την PDC Machines Inc., ΗΠΑ και ολόκληρη η ηλεκτρολογική του εγκατάσταση είναι αντικρηκτικού τύπου. Ο μεταλλικός σκελετός και οι σωληνώσεις είναι από ατσάλι SS316, και είναι τοποθετημένος πάνω σε αντικραδασμικές βάσεις από καουτσούκ.

Έχει ονομαστική ικανότητα 0.45 kg/h H₂ (5 Nm³/h) για πίεση εισόδου 14 bar στους 40°C και για πίεση εξόδου 220 bar στους 65°C. Μπορεί να ανεχτεί ένα εύρος πίεσης στην είσοδο από 10 έως 18 bar, με αντίστοιχα μειωμένη ή αυξημένη ροή, οπότε η λειτουργία τείνει να «σταθεροποιηθεί» στη μέση τιμή των 14 bar. Ο ηλεκτρικός κινητήρας έχει ισχύ 5.6 kW (7.5 hp).

Η μονάδα έχει σχεδιαστεί και κατασκευαστεί σύμφωνα με πολύ αυστηρές τεχνικές προδιαγραφές ασφαλείας για ζώνες με πιθανή παρουσία εύφλεκτων αερίων. Οι βάνες ελέγχου είναι πνευματικές και σε περίπτωση μη κανονικής λειτουργίας τίθεται αυτομάτως εκτός λειτουργίας μέσω των κατάλληλων οργάνων μέτρησης.

Ο συμπιεστής φαίνεται στην Εικόνα 2, πριν γίνουν οι συνδέσεις με το υπόλοιπο σύστημα και κατασκευαστεί ένα κουβούκλιο προστασίας από τον ήλιο, όπως για την ηλεκτρόλυση.



Εικόνα 2. Ο συμπιεστής υδρογόνου

Σταθμός πλήρωσης φιαλών

Ο σταθμός αποτελείται από έναν σωλήνα με τρεις αναμονές σύνδεσης για μεμονωμένες φιάλες ή διατάξεις φιαλών. Πρόκειται για μια διάταξη υψηλής πίεσης, που περιλαμβάνει απαγωγή, καθώς και τα απαραίτητα ασφαλιστικά και όργανα μέτρησης. Στην παρούσα φάση, έχουν συνδεθεί δύο μεμονωμένες φιάλες και μια συστοιχία 12 φιαλών. Ο σταθμός αυτός μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την πλήρωση της δεξαμενής υδρογόνου οχημάτων.

Κάθε φιάλη έχει όγκο 50 λίτρων και χωρητικότητα 0.8 kg H₂ (9 Nm³), οπότε η μέγιστη αποθηκευόμενη ποσότητα υδρογόνου υπό υψηλή πίεση είναι 11 κιλά (126 Nm³). Το παραγόμενο υδρογόνο είναι υψηλής καθαρότητας (99.999% κ.ο.), και έχει προβλεφθεί η ακριβής ανάλυσή του, προκειμένου να διερευνηθεί η επίπτωση διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας της εγκατάστασης στην καθαρότητα του υδρογόνου.

Περιφερειακά

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης, οι δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων και ο συμπιεστής υδρογόνου απαιτούν ψύξη με κρύο νερό. Η σωστή ψύξη είναι ουσιαστικό στοιχείο για την ασφαλή λειτουργία της εγκατάστασης. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί απευθείας το

νερό δικτύου, όμως, το σύστημα αυτό σχεδιάστηκε για να μπορεί να εγκατασταθεί και σε περιοχές δύσβατες, οπότε η παρουσία δικτύου δεν είναι εγγυημένη. Επίσης, η ελάχιστη πίεση νερού που απαιτείται για την σωστή τροφοδοσία των μηχανημάτων είναι περίπου 3 bar, και στην περιοχή του αιολικού πάρκου η πίεση πέφτει απροειδοποίητα κάτω από αυτό το όριο. Άλλωστε, και οι διακοπές παροχής νερού δεν είναι πολύ σπάνιες. Έτσι, σχεδιάστηκε ένα κλειστό σύστημα ψύξης νερού, που αυξάνει την ασφάλεια της εγκατάστασης. Ο βιομηχανικός ψύκτης νερού τύπου ACN είναι ρυθμισμένος για να αποθηκεύει νερό στους 9-13°C. Η πίεση στο κύκλωμα ρυθμίζεται με τη βοήθεια μιας βάνας bypass του κυκλοφορητή. Η ηλεκτρική ισχύς που καταναλώνει ο ψύκτης καταγράφεται με τη βοήθεια ενός ισχυομέτρου. Η ονομαστική ισχύς είναι 5.5 kW, αλλά όταν δεν δουλεύει ο ψυκτικός συμπιεστής πέφτει στο 1 kW περίπου.

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης και ο συμπιεστής υδρογόνου διαθέτουν βάνες ελέγχου πνευματικού τύπου, που δέχονται σήμα μέσω πεπιεσμένου αέρα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και άζωτο από τις φιάλες που είναι συνδεδεμένες στο σύστημα για αυτόματη αδρανοποίηση, αλλά η κατανάλωση αζώτου για τις ανάγκες ελέγχου κρίθηκε υπερβολική, οπότε εγκαταστάθηκε ξεχωριστό κύκλωμα πεπιεσμένου αέρα.

Το κύκλωμα πεπιεσμένου αέρα αποτελείται από τον αεροσυμπιεστή με ενσωματωμένο αεροφυλάκιο 150 λίτρων, τον ξηραντή καταψυκτικού τύπου, φίλτρα, και τις σωληνώσεις από χαλκό, με αναμονές σύνδεσης για την ηλεκτρόλυση και τον συμπιεστή υδρογόνου. Ο εμβολοφόρος, λιπαινόμενος αεροσυμπιεστής είναι μονοφασικός, με ισχύ κινητήρα 2.2 kW. Έχει ονομαστική πίεση λειτουργίας 10 bar και παροχή 225 l/min στα 10 bar. Η ισχύς του ψυκτικού συμπιεστή είναι 0.139 kW. Η καθαρότητα του πεπιεσμένου αέρα για πνευματικά συστήματα είναι σύμφωνη με τις προδιαγραφές κατά ISO 8573.1 class 1.4.1, δηλαδή σωματίδια έως 0.01 μm, λάδια έως 0.01 mg/m³ και σημείο δρόσου 3°C. Ο πεπιεσμένος αέρας στο αεροφυλάκιο διατηρείται υπό πίεση 6-8 bar με κατάλληλους διακόπτες πίεσης.

Κεντρικός Ηλεκτρολογικός Πίνακας Ισχύος και Ελέγχου

Ο κεντρικός ηλεκτρολογικός πίνακας τροφοδοτείται από την ανεμογεννήτρια Enercon στα 400 V, και έχει διαστασιοποιηθεί για 100 KW. Από τον πίνακα αυτόν τροφοδοτούνται όλοι οι χρήστες ηλεκτρικής ενέργειας της εγκατάστασης υδρογόνου, ακόμα και το κλιματιστικό της αίθουσας ελέγχου. Μέσα στο ίδιο πεδίο βρίσκεται και το σύστημα ελέγχου, που βασίζεται σε ένα Programmable Logic Controller (PLC) Simatic S7 της εταιρείας Siemens. Το PLC λαμβάνει σήματα από διάφορα όργανα μέτρησης (πίεσης, θερμοκρασίας, ροής, ανάλυσης αερίων, ρεύματος, τάσης, και ηλεκτρικής ενέργειας) και στέλνει τα απαραίτητα σήματα για τον έλεγχο της εγκατάστασης. Επικοινωνεί με έναν υπολογιστή, στον οποίο καταγράφονται τα δεδομένα, και από τον οποίο στέλνονται οι κατάλληλες διαταγές για τη λειτουργία του συστήματος.

ΠΡΩΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Τα διάφορα τμήματα της εγκατάστασης τέθηκαν σε λειτουργία ξεχωριστά, για να ελεγχθεί η σωστή λειτουργία τους πριν ενσωματωθούν στο ολοκληρωμένο σύστημα.

Οι δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων εγκαταστάθηκαν και ενεργοποιήθηκαν τον Μάιο του 2005. Για τη μεταφορά στο πάρκο, οι δεξαμενές με το μεταλλικό κράμα ήταν αδρανοποιημένες με αργό. Πριν την ενεργοποίηση, αφαιρέθηκε το αργό με τη βοήθεια μιας αντλίας κενού, και κατόπιν ξεκίνησε η ενεργοποίησή τους με υδρογόνο υπό πίεση, με συνεχή κυκλοφορία κρύου νερού. Η πρώτη πλήρωση των δεξαμενών, δηλαδή η ενεργοποίησή τους, γίνεται συνήθως με υδρογόνο υπό πίεση υψηλότερη της συνηθισμένης πίεσης λειτουργίας. Για αυτόν το λόγο, δεν ήταν δυνατή η χρήση του υδρογόνου της ηλεκτρόλυσης, και η πλήρωση έγινε από φιάλες υδρογόνου υψηλής πίεσης. Η τελική πίεση των δεξαμενών στους 30°C περίπου ήταν 20 bar. Η συνολική ποσότητα υδρογόνου που αποθηκεύτηκε ήταν 40 Nm³ H₂, όπως μετρήθηκε με βάση τη διαφορά πίεσης των φιαλών υδρογόνου. Η ποσότητα αυτή του υδρογόνου έχει μείνει αποθηκευμένη έκτοτε στις δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων, και κατά διαστήματα μετράται η πίεση στις μεμονωμένες δεξαμενές, που εξαρτάται από την θερμοκρασία περιβάλλοντος, και κυμαίνεται μεταξύ 17 και 20 bar.

Η μονάδα ηλεκτρόλυσης παραδόθηκε από τον κατασκευαστή τον Μάρτιο, σε τρία τμήματα, τη μονάδα ηλεκτρόλυσης αυτή καθαυτή, το πεδίο παροχής ισχύος και το πεδίο ελέγχου. Τα δύο πεδία εγκαταστάθηκαν στην αίθουσα ελέγχου, και έγιναν όλες οι συνδέσεις με την ηλεκτρόλυση και με το κεντρικό σύστημα ελέγχου.

Η λειτουργία της μονάδας ελέγχθηκε πλήρως από τον ίδιο τον κατασκευαστή πριν από την παράδοση, και κυρίως όλα τα συστήματα ελέγχου. Τα πρώτα αποτελέσματα λειτουργίας της μονάδας σε διάφορες θερμοκρασίες, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Στον πίνακα αναγράφονται το επιβαλλόμενο ρεύμα λειτουργίας I, η αντίστοιχη συνεχής τάση, η ωριαία παραγωγή υδρογόνου, η θερμοκρασία ηλεκτρόλυσης, η πίεση λειτουργίας, και η απόδοση της ηλεκτρόλυσης ως προς τη χαμηλή (LHV) και την υψηλή (HHV) θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου.

I (A)	U (V)	Nm ³ /h H ₂	T (°C)	P (bar)	Eff% LHV	Eff% HHV
180	97	3.52	33	3.4	60.5	70.9
180	94	3.52	45	10.7	62.4	73.1
186	91	3.64	54	14	64.5	75.6
187	90	3.66	60	17.5	65.3	76.4
188	88	3.68	63	18.4	66.7	78.2
260	88	5.14	76	10.6	67.3	78.9
282	88	5.59	78	10.8	67.5	79.1
285	86	5.65	80	10.8	69.1	81.0

Πίνακας 1. Πρώτα αποτελέσματα λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης 25 kW

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, η μονάδα ηλεκτρόλυσης παράγει έως και 10% περισσότερο υδρογόνο από την ονομαστική ικανότητα των 5 Nm³/h. Η απόδοση της ηλεκτρόλυσης υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας είναι περίπου 69% ως προς τη

χαμηλή θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου. Μια προσεκτική ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η ενώ η αύξηση της θερμοκρασίας επιφέρει μια αύξηση της απόδοσης της ηλεκτρόλυσης, η αύξηση της πίεσης δεν έχει μεγάλη επίδραση στην απόδοση. Η απόδοση της αλκαλικής αυτής μονάδας προηγμένης τεχνολογίας είναι υψηλή ακόμα και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, οπότε η επίδραση της αυξημένης θερμοκρασίας είναι περιορισμένη.

Τα πρώτα αποτελέσματα από τη λειτουργία του συστήματος είναι πολύ καλά. Στην εγκατάσταση έχουν προβλεφθεί μετρήσεις που επιτρέπουν μια ολοκληρωμένη εκτίμηση της συνολικής ηλεκτρικής κατανάλωσης του συστήματος για την παραγωγή υδρογόνου. Με βάση τις πρώτες εκτιμήσεις, η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση για την παραγωγή του περιβαλλοντικά φιλικού υδρογόνου και την εμφιάλωση σε φιάλες στα 200 bar είναι περίπου 6 - 6.4 kWh/Nm³ υδρογόνου. Η κατανάλωση αυτή αντιστοιχεί σε μια απόδοση 47%-50% (LHV) ή 55%-58% (HHV) του συνολικού συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης κρύου νερού για την ψύξη των μηχανημάτων. Η συνολική εγκατάσταση παρουσιάζεται στην εικόνα 3.



Εικόνα 3. Γενική άποψη της εγκατάστασης αιολικής ενέργειας – υδρογόνου στο αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μια πρωτοποριακή μονάδα παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου από αιολική ενέργεια σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο Αιολικό Πάρκο του ΚΑΠΕ στο Λαύριο. Η κατασκευή μιας τέτοιας μονάδας, παρόλα τα πρακτικά προβλήματα υλοποίησης που προκύπτουν από την εμπλοκή πλήθους διαφορετικών φορέων, ολοκληρώθηκε επιτυχώς, ακριβώς χάρη στην άψογη συνεργασία όλων των φορέων. Τα πρώτα αποτελέσματα λειτουργίας είναι πολύ ενθαρρυντικά, και αποδεικνύουν ότι η μονάδα έχει πολύ υψηλή απόδοση, όπως είχε σχεδιαστεί.

Η μονάδα αυτή είναι στην αιχμή της τεχνολογίας όσον αφορά τις τεχνολογίες και την κλίμακα τους. Η εμπειρία που θα αποκτηθεί είναι σημαντική για την Ελλάδα χάρη

στην προοπτική να εγκατασταθούν αντίστοιχα συστήματα στα ελληνικά νησιά, παράγοντας καύσιμα για τις μεταφορές τοπικά και δημιουργώντας νέες θέσεις εργασίας.

4.6.2 ΥΠΕΡΑΚΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

ΥΠΕΡΑΚΤΙΟΙ ΑΙΟΛΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ

Η εγκατάσταση αιολικών σταθμών γνωρίζει μεγάλη ανάπτυξη την τελευταία δεκαετία στην Ευρώπη και τον υπόλοιπο κόσμο.

Ειδικά για τους υπεράκτιους αιολικούς σταθμούς:

Πλεονεκτήματα:

- Μεγάλες διαθέσιμες εκτάσεις
- Μακριά από κατοικημένες περιοχές
- Μεγαλύτερο αιολικό δυναμικό
- Λιγότερη ατμοσφαιρική τύρβη
- Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των Α/Γ

Βασικό μειονέκτημα:

- το υψηλό κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης

Υπεράκτιοι Αιολικοί σταθμοί – Ευρωπαϊκοί στόχοι

Σύμφωνα με την EWEA Μέχρι το 2020 η αιολική ενέργεια θα φθάσει τα 230 GW. Τα 40 GW θα είναι από υπεράκτιους αιολικούς σταθμούς. Μέχρι το 2030 θα φτάσει 150 GW από υπεράκτιους αιολικούς σταθμούς.

40 GW από Υπεράκτιους αιολικούς σταθμούς σημαίνει 28%. Ετήσια αύξηση των σταθμών που εγκαθίστανται.

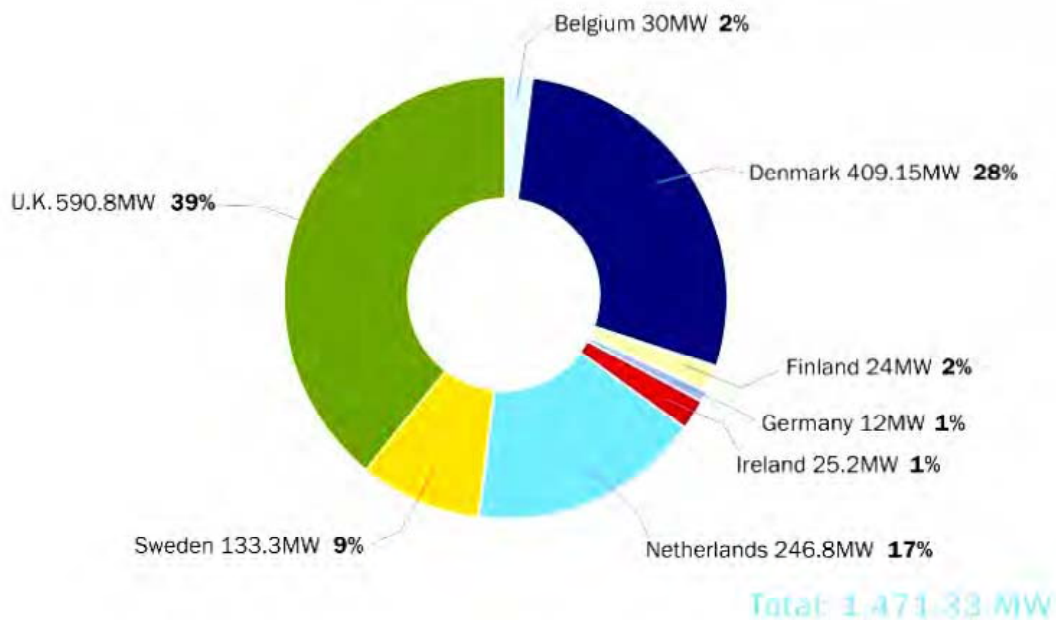
Με άλλα λόγια:

2008 - 366MW/έτος -> 2020 - 6.900MW/έτος

Υπεράκτιοι αιολικοί σταθμοί ισχύος 100GW έχουν ήδη προταθεί.

Υπεράκτιοι αιολικοί σταθμοί – Σημερινή κατάσταση

Τέλος 2008: 1.5 GW Υπεράκτια – 8 EU χώρες

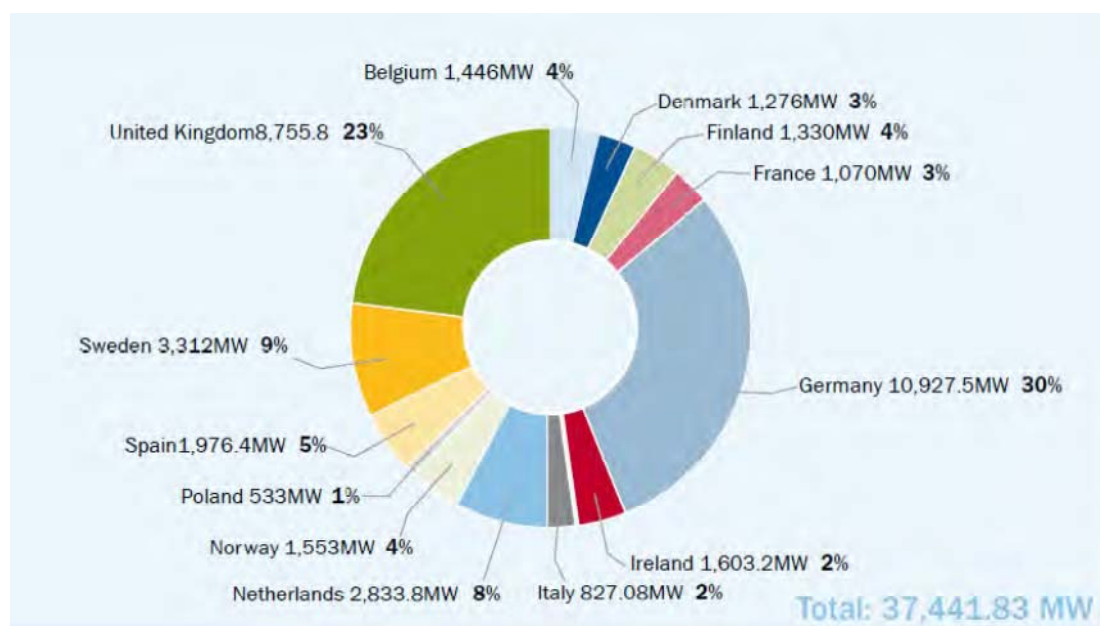


366MW το 2008

Σύνολο: 1.471,33MW

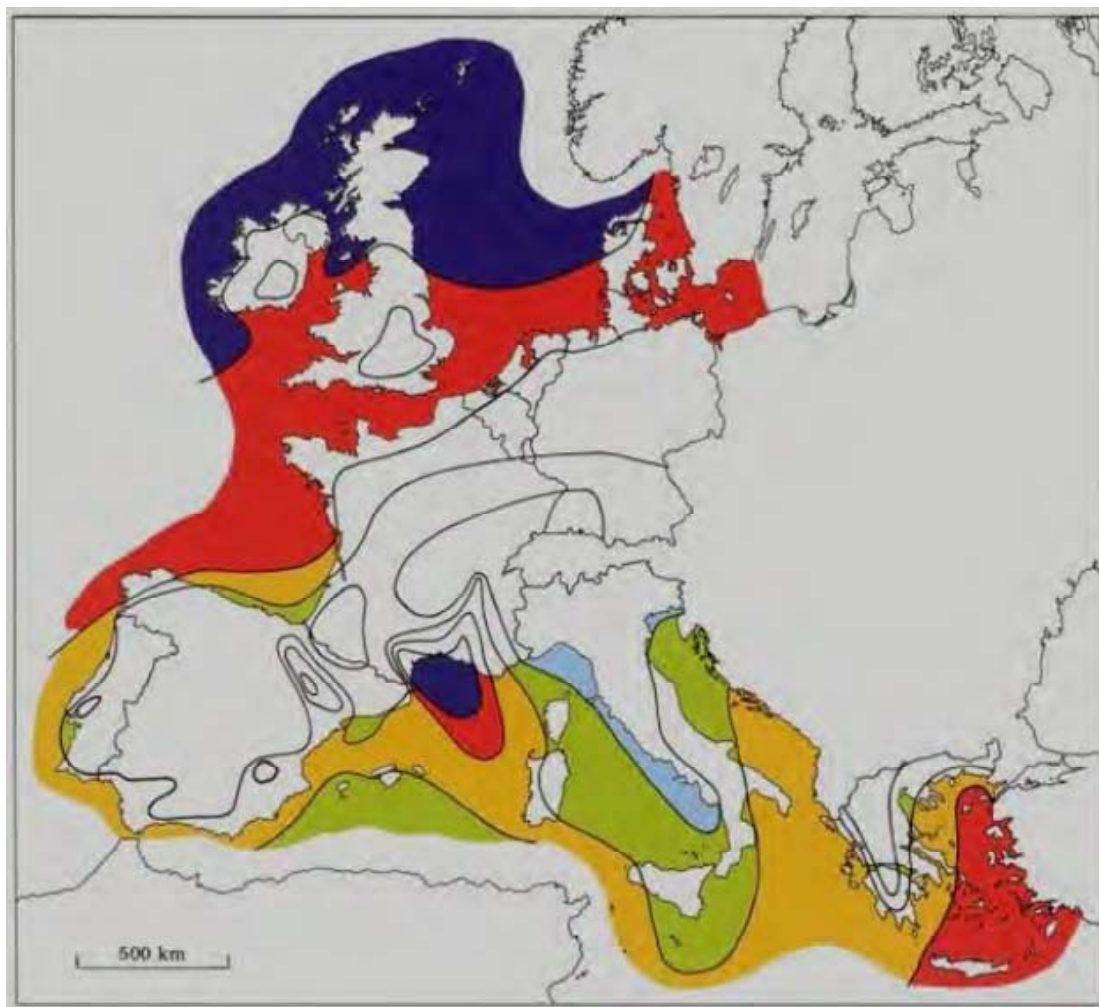
Υπεράκτιοι αιολικοί σταθμοί – Το μέλλον

Τέλος 2015: 37 GW Υπεράκτια – 13 EU χώρες



Σύνολο: 37.441,83MW

Το Υπεράκτιο Αιολικό Δυναμικό

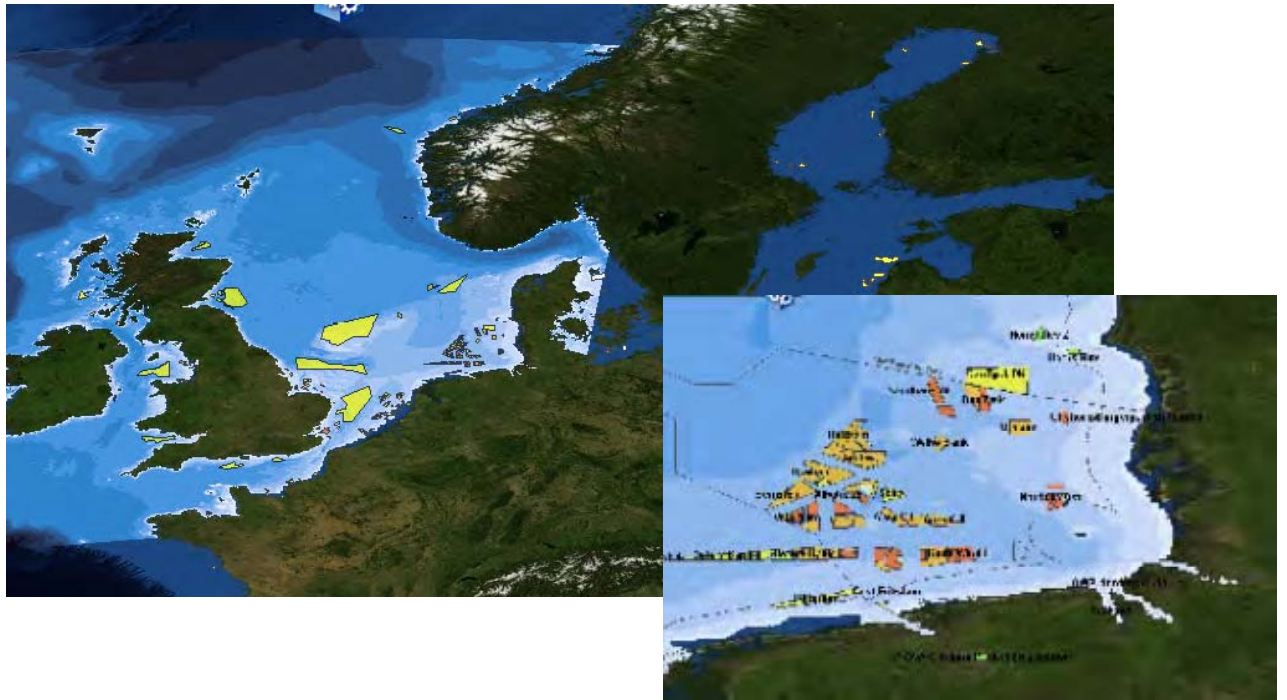


Υπεράκτιοι Αιολικοί σταθμοί – Δυνατότητες

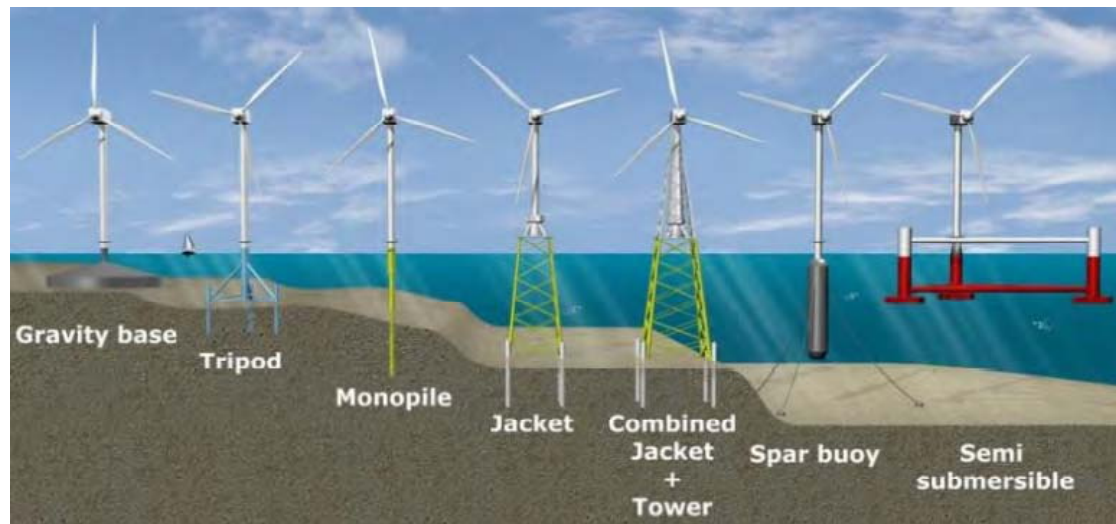
Σύμφωνα με την European Environment Agency (EEA):

- 1) Το υπεράκτιο αιολικό δυναμικό που είναι οικονομικά αξιοποιήσιμο, φθάνει να καλύψει το 80% της Ευρωπαϊκής ζήτησης για το 2030.
- 2) Το υπεράκτιο αιολικό δυναμικό που είναι τεχνικά αξιοποιήσιμο, είναι 7 φορές μεγαλύτερο από την Ευρωπαϊκή ζήτηση το 2030.

Υπεράκτιοι αιολικοί σταθμοί στην Ευρώπη



Τρόποι στήριξης υπεράκτιων Ανεμογεννητριών



Σήμερα	Μέλλον
Μικρά βάθη	Μεγάλα βάθη

Τρόποι στήριξης υπεράκτιων Ανεμογεννητριών

Gravity base: Χρήση έως 40m:

+ Μικρός θόρυβος, προσιτό κόστος.

- Προβληματική η μεταφορά για μεγάλες Α/Γ, απαιτείται προετοιμασία του βυθού, βαρέως τύπου εξοπλισμός για την μετακίνηση.



Monopile: Χρήση έως 30m ή περισσότερο:

+ Εύκολη κατασκευή, μεγάλη εμπειρία.

- Θόρυβος, περιορισμοί από το είδος του βυθού και το βάρος της Α/Γ.



Τρόποι στήριξης υπεράκτιων Ανεμογεννητριών

Tripod: Χρήση έως 30m ή περισσότερο:

+ Μεγάλη αντοχή, κατάλληλος για μεγάλες, βαριές Α/Γ.

- Δύσκολη η κατασκευή, δυσκολίες λόγω βάρους στην μεταφορά.



Jacket: Χρήση από 40m και πάνω:

- + Μικρός θόρυβος, κατάλληλος για μεγάλες, βαριές Α/Γ.
- Μεγάλος κόστος, επίδραση από το κύμα, μεγάλα φορτία, κοπωτικά φορτία, μεγάλος χρόνος εγκατάστασης.



Τρόποι στήριξης υπεράκτιων Ανεμογεννητριών

Spar buoy: Χρήση από 120-700m:

- + Κατάλληλο για μεγάλα βάθη, λιγότερος χάλυβας.
- Μεγάλο κόστος, μικρή εμπειρία στις Α/Γ.



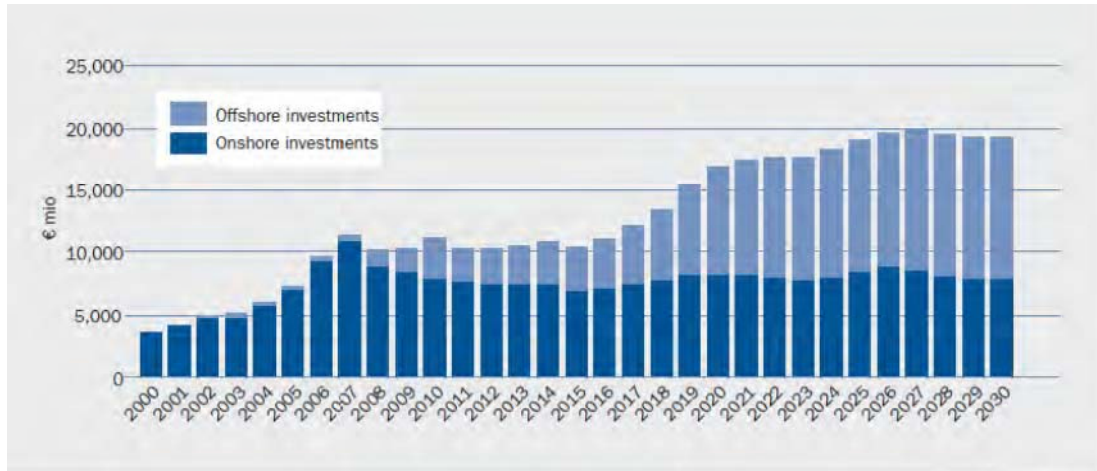
Semi-submersible: 100m και πάνω:

- + Κατάλληλο για μεγάλα βάθη, λιγότερος χάλυβας.



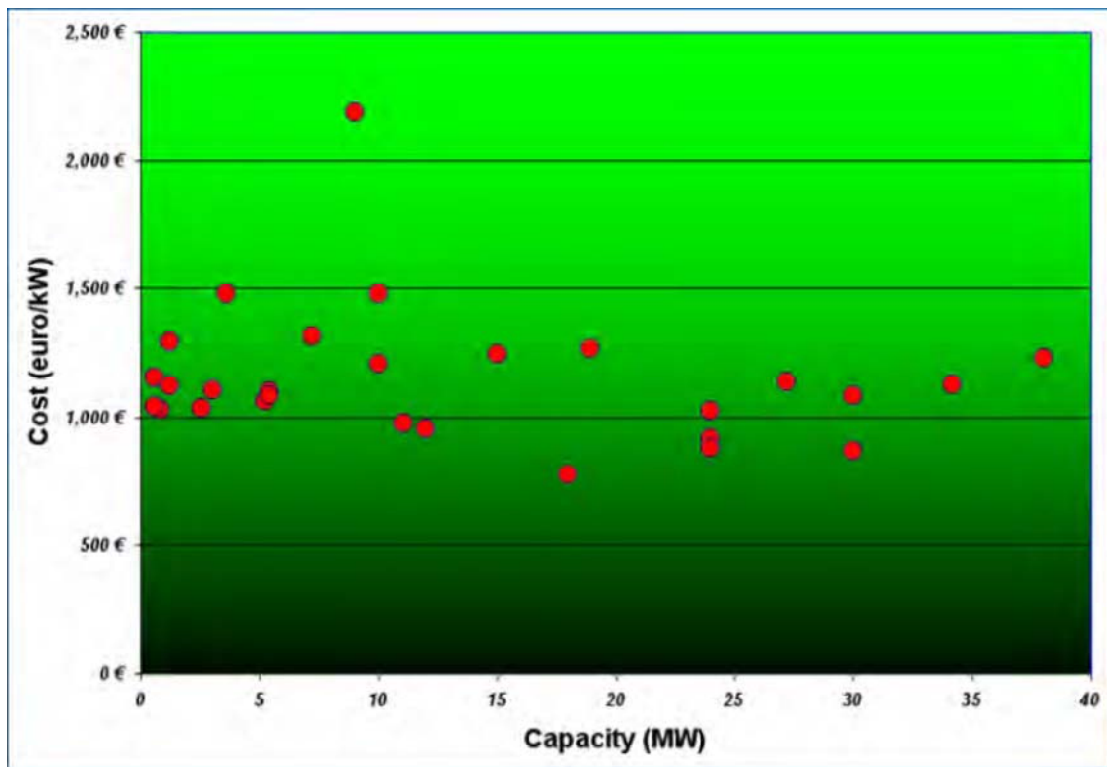
- Μεγάλο κόστος, μικρή εμπειρία στις Α/Γ.

Αιολική Ενέργεια – Οικονομικά στοιχεία

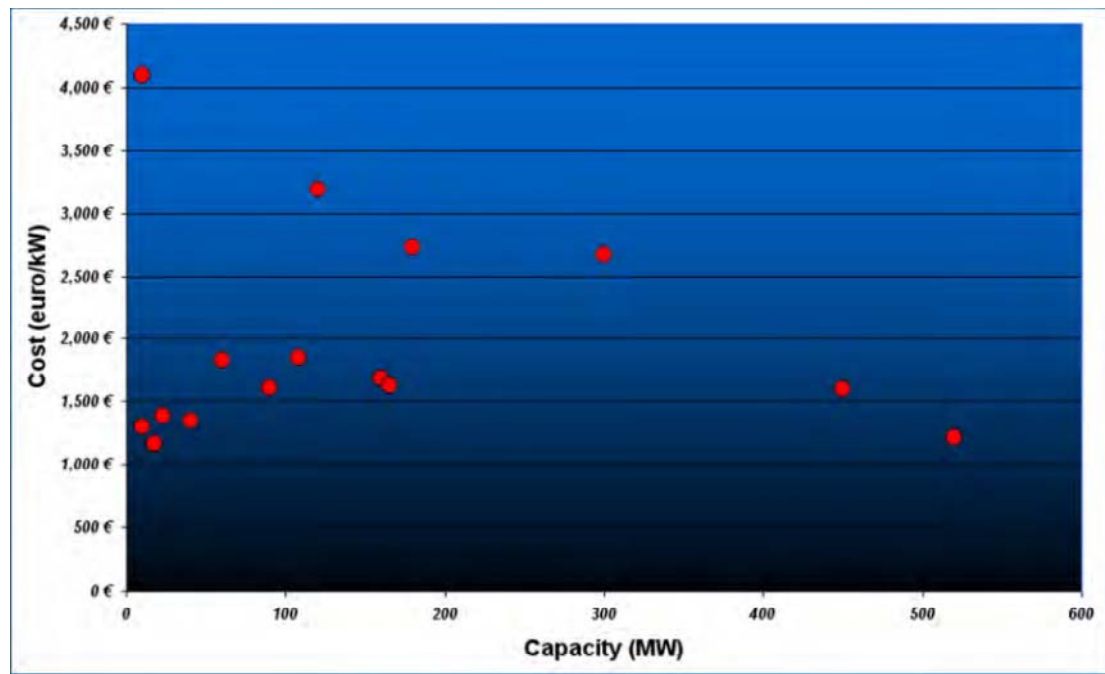


Source EWEA, 2007

Κόστος εγκατάστασης αιολικών πάρκων (Ελλάδα)



Κόστος εγκατάστασης υπεράκτιων (Ευρώπη)



Ανάλυση του κόστους

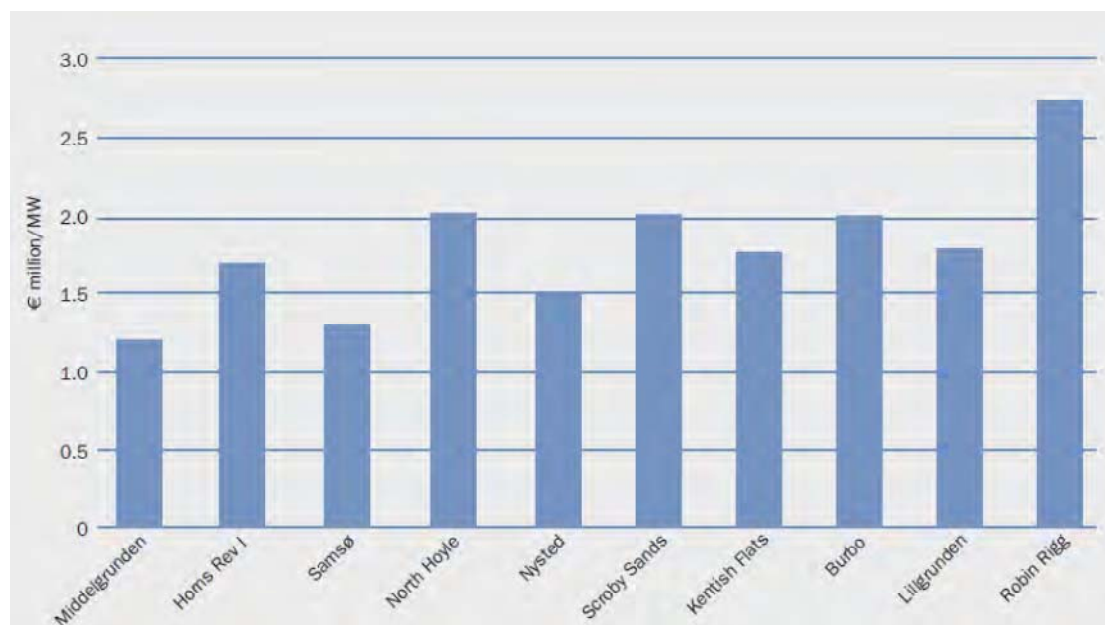
Τρεις διαφορετικές απόψεις:

Εκτίμηση κόστους εγκατάστασης υπεράκτιων αιολικών σταθμών €/kW.

Αντικείμενο	EWEA	RODSAND II	Ernst&Young
Ανεμογεννήτριες	815	1329	1725
Ηλεκτρικά	355	-	690
Θεμελιώσεις	350	400	805
Άλλα	160	-	40
Σύνολο	1680	2077	3680

Ανάλυση του κόστους

Κόστος εγκατάστασης υπεράκτιων αιολικών σταθμών στη Δανία €million/MW.



Ανάλυση του κόστους

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των υπεράκτιων αιολικών σταθμών είναι σχεδόν διπλάσιο των αιολικών σταθμών στην ξηρά.

Εκτίμηση κόστους λειτουργίας & συντήρησης υπεράκτιων αιολικών σταθμών €/MWh.

Αντικείμενο	ONSHORE	OFFSHORE
Συντήρηση Α/Γ	7	19
Κόστος δικτύου	2	3
Ασφάλιση	3	4
Μίσθωση γης	2	2
Απομάκρυνση	1	6
Σύνολο	16	34

Ανάλυση του κόστους

Πέρα από το αυξημένο κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας και συντήρησης, σημαντικές δυσκολίες παρουσιάζουν:

- Η διαχείριση της διαδικασίας μεταφοράς, αποθήκευσης και συναρμολόγησης των μηχανών.
- Η διαχείριση των εργοταξίων για την κατασκευή και μεταφορά των θεμελιώσεων.
- Η διαμόρφωση κατάλληλων χώρων ελλιμενισμού των σκαφών, κοντά στην περιοχή εγκατάστασης που να διαθέτουν κάποιες στοιχειώδεις υποδομές υποστήριξης και να έχουν πρόσβαση από χερσαία μέσα μεταφοράς.

Ανάλυση του κόστους

Η μεταφορά και ανέγερση των μηχανών και των θεμελιώσεών τους, απαιτεί τη χρήση ειδικού τύπου κατασκευών όπως:

- Πλωτοί γερανοί με δυνατότητα ανύψωσης μεγάλου βάρους και όγκου σε μεγάλο ύψος.
- Φορηγίδες μεταφοράς των τμημάτων των μηχανών, πχ των πτερυγίων και της ατράκτου.



Ανάλυση του κόστους

Αυξημένο κόστος παρουσιάζει η διαδικασία σχεδιασμού και αδειοδότησης των υπεράκτιων αιολικών σταθμών.

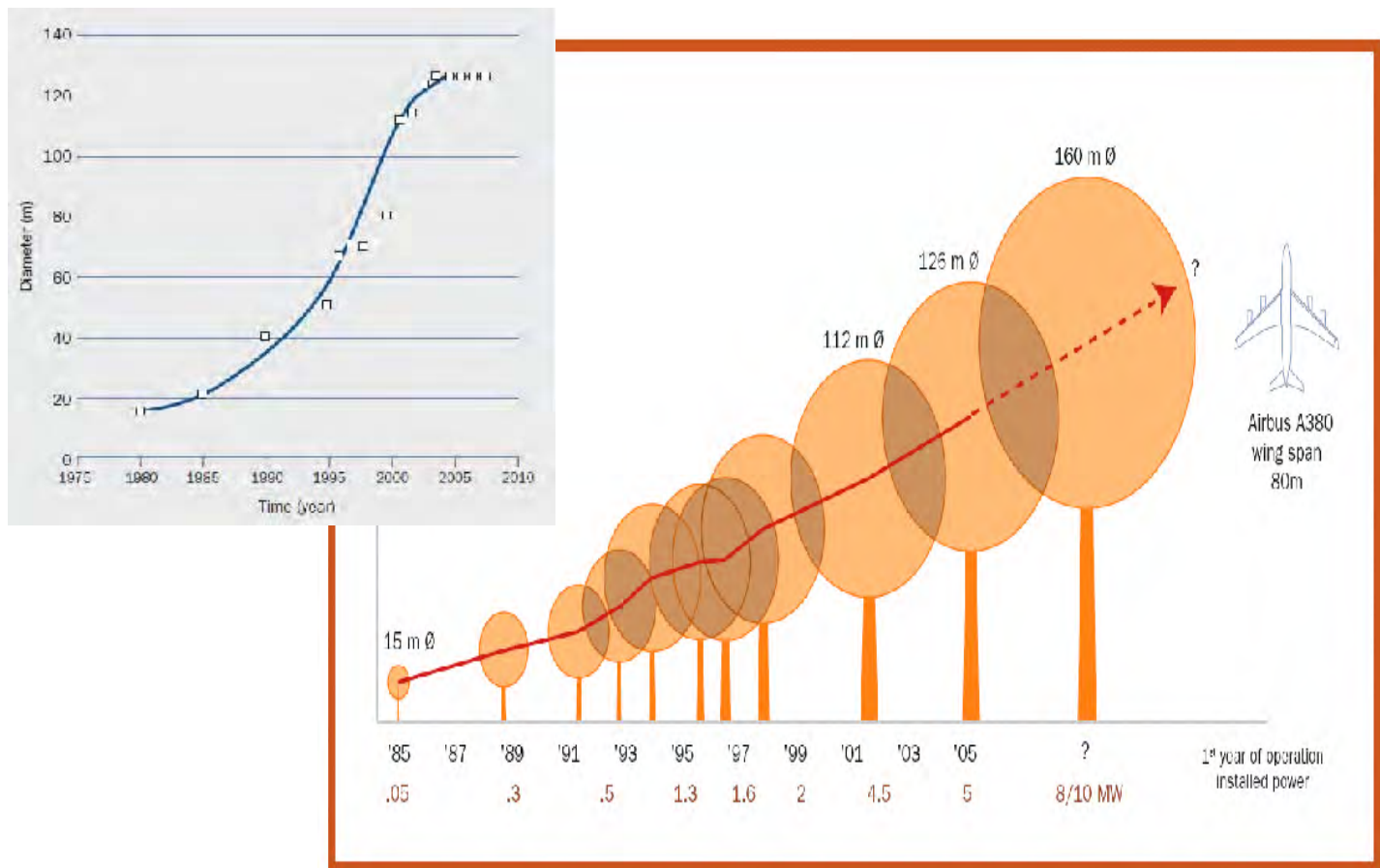
Απαιτείται πιο εκτεταμένη και εξειδικευμένη έρευνα σχετικά με την επίδραση των σταθμών στη θαλάσσια ζωή και τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Ειδικά για τη Μεσόγειο, οι μελέτες έχουν ιδιαίτερη δυσκολία.

- Τουρισμός
- Αλιεία
- Μεγάλα βάθη
- Πυκνοκατοικημένα παράλια
- Κλειστή θάλασσα
- Έντονη ναυσιπλοΐα

Το μέλλον

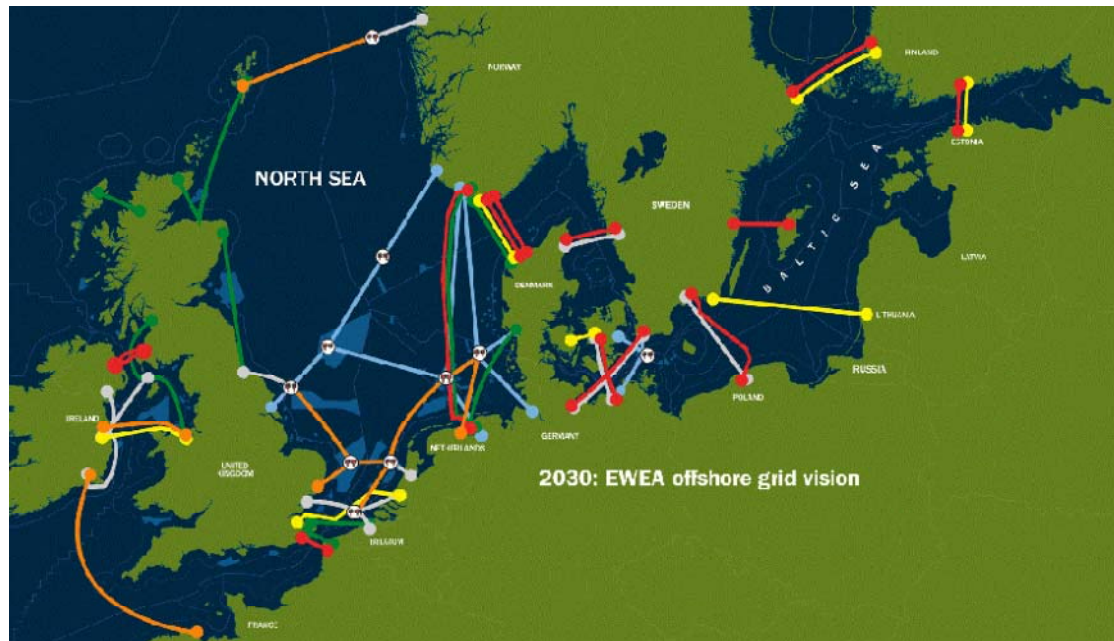
Το μέγεθος των Α/Γ αυξάνει συνεχώς.



2008

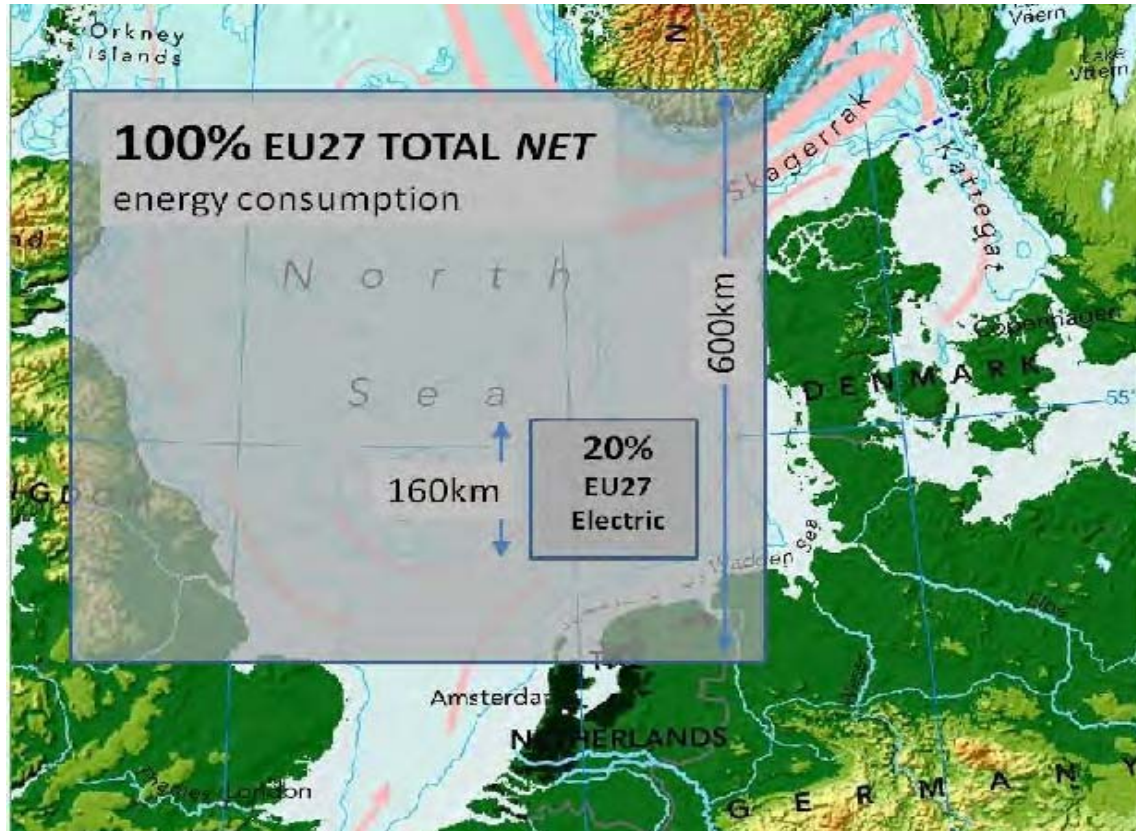
Το μέλλον

Ενίσχυση και επέκταση των δικτύων.



Το μέλλον

Ο χώρος υπάρχει

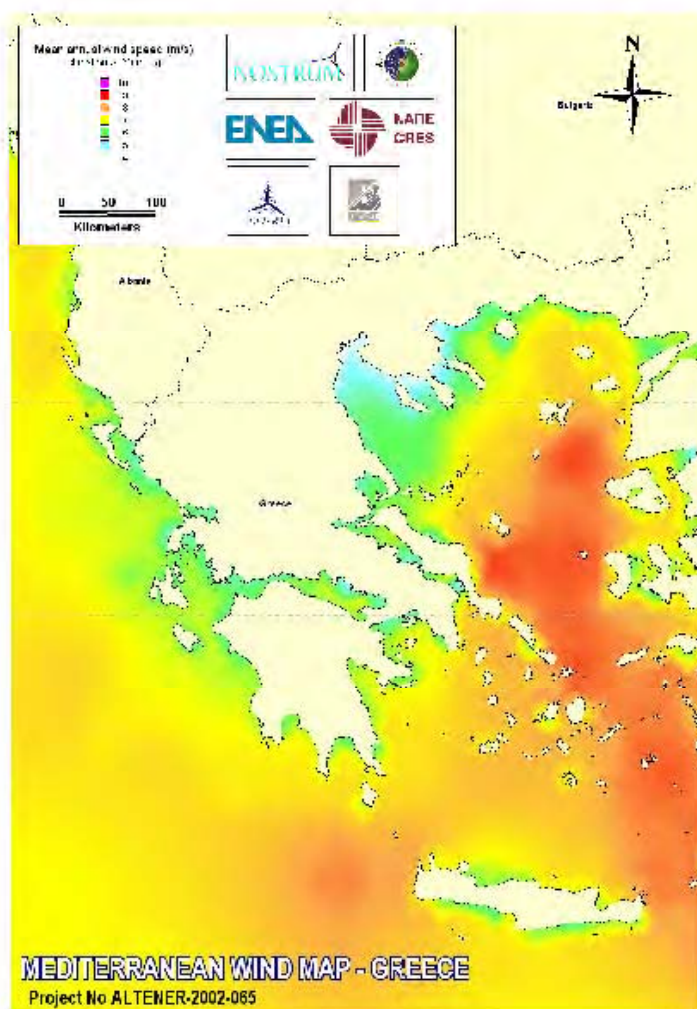


Οι βασικές τεχνολογικές προκλήσεις

- Οικονομικότερες στηρίξεις – θεμελιώσεις.
- Κατασκευή πολύ μεγάλων ανεμογεννητριών.
 - ✓ Μείωση των αναπτυσσόμενων φορτίων
 - ✓ Αύξηση της απόδοσης
 - ✓ «Μεγέθυνση» των ανεμογεννητριών
- Σημαντική μείωση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης.

Η Ελληνική αγορά

Το υπεράκτιο αιολικό δυναμικό της Ελλάδας είναι πολύ σημαντικό.



υπάρχουσα τεχνολογία).

Η Ελληνική αγορά

Με την τεχνολογία που αναπτύσσεται όμως διπλασιάζονται οι δυνατότητες.

Απόσταση: >3km

Βάθος: < 50m

Διαθέσιμη έκταση: 3544km²

Σχεδιαζόμενες δράσεις

Στο πλαίσιο του ΕΣΠΑ – Συνεργασία

Το ΚΑΠΕ σε συνεργασία με το ΕΛΚΕΘΕ και το ΕΜΠ Και τις εταιρείες: ΕΛΙΚΑ, ΕΝΤΕΚΑ, ΕΧΕΡΓΙΑ, ΡΟΚΑΣ, ΤΕΡΝΑ, JASPER.

Έχει υποβάλλει πρόταση για τη δημιουργία ενός Εθνικού Προγράμματος Αξιοποίησης του Υπεράκτιου Αιολικού Δυναμικού του Αιγαίου.

Σχεδιαζόμενες δράσεις

Στόχοι της πρότασης:

- Η καταγραφή του αιολικού και του κυματικού δυναμικού.
- Ο σχεδιασμός διασυνδέσεων νησιών και μελλοντικών υπεράκτιων αιολικών σταθμών.
- Η δημιουργία σχεδιαστικών εργαλείων για πλωτές ανεμογεννήτριες – υποστήριξη της εγχώριας βιομηχανίας.
- Η διερεύνηση τεχνο-οικονομικών θεμάτων σχετικά με την κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση των υπεράκτιων αιολικών σταθμών.

Συμπεράσματα

- *Το υπεράκτιο αιολικό δυναμικό είναι μεγάλο.*
- *Το κόστος των υπεράκτιων αιολικών σταθμών είναι μεγαλύτερο από αυτό των σταθμών στη στεριά.*
- *Το κόστος της θεμελίωσης, του δικτύου σύνδεσης καθώς και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι αυτά που κάνουν τη μεγάλη διαφορά.*
- *Η Ελλάδα διαθέτει υπεράκτιο αιολικό δυναμικό – Μπορεί να το αξιοποιήσει κυρίως μέσω τεχνολογιών μεγάλου βάθους.*

4.6.3 ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

- Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία
- Περιγραφή, χαρακτηριστικά και κατηγορίες φωτοβολταϊκών
- Φωτοβολταϊκό φαινόμενο-δημιουργία φωτορεύματος
- Υβριδικά συστήματα φωτοβολταϊκών στοιχείων με κυψέλες υδρογόνου
- Βέλτιστη διασύνδεση φωτοβολταϊκών συστοιχιών και PEM ηλεκτρολυτών σε υβριδικά συστήματα κατάλληλα για τροφοδότηση απομακρυσμένων περιοχών.

ΗΛΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Η Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι εκπομπή στον χώρο ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας υπό μορφή κυμάτων που ονομάζονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι συγχρονισμένα ταλαντούμενα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία τα οποία ταλαντώνονται σε κάθετα επίπεδα μεταξύ τους και κάθετα προς την διεύθυνση διάδοσης. Διαδίδονται στο κενό με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα

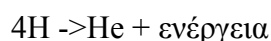
του φωτός αλλά και μέσα στην ύλη με ταχύτητα λίγο μικρότερη απ' την ταχύτητα του φωτός.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα παράγονται από επιταχυνόμενα ηλεκτρικά φορτία. Δημιουργούνται επίσης όταν ένα ηλεκτρόνιο κάποιου ατόμου χάνει μέρος της ενέργειάς του και μεταπίπτει σε χαμηλότερη τροχιά ή ενεργειακή στάθμη κοντά στον πυρήνα. Αυτό έχει ως συνέπεια να δημιουργηθεί μια ταλάντωση που διαδίδεται πλέον στο χώρο με τη μορφή ενός ταυτόχρονα ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Τα δύο αυτά πεδία είναι, αφενός μεν, κάθετα μεταξύ τους, αφετέρου και κάθετα με τη διεύθυνση διάδοσης του παραγόμενου κύματος, του λεγόμενου ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσκρούσει σε κάποιο άτομο τα δύο συνδυαζόμενα αυτού πεδία μπορούν να προσφέρουν μεταφερόμενη ενέργεια σε ένα ηλεκτρόνιο με αποτέλεσμα να το εξαναγκάσουν να μεταπηδήσει αυτό σε ανώτερη ενεργειακή στάθμη.

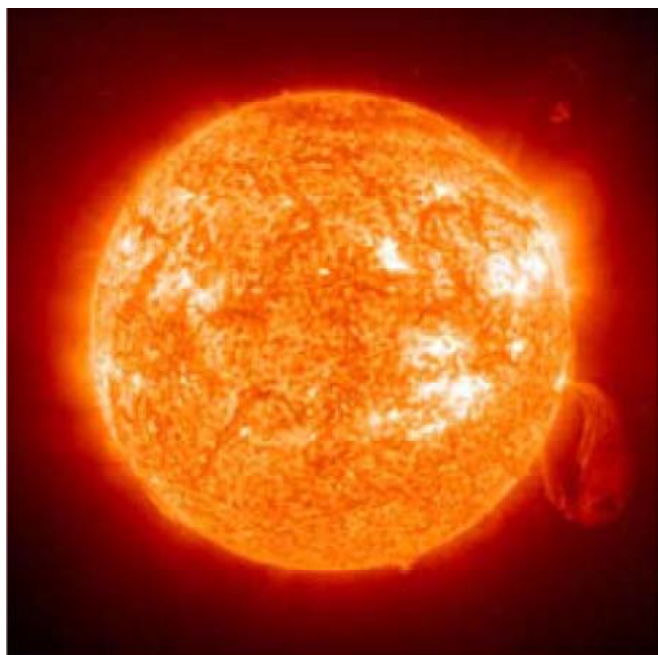
Το σύμπαν είναι διάχυτο από ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Το φως που εκπέμπεται από τα άστρα είναι μέρος του συνολικού φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που συναντάται στο σύμπαν. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ανάλογα με την συχνότητα των κυμάτων της και αντίστοιχα την ενέργεια που μεταφέρει χωρίζεται σε περιοχές. Αυτές είναι τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, οι υπέρυθρες ακτίνες, το ορατό φως, οι υπεριώδεις ακτίνες, οι ακτίνες X και οι ακτίνες γάμμα.

Ο ήλιος και η ακτινοβολία του

Ο ήλιος είναι ένα τυπικό αστέρι μεσαίου μεγέθους, που αποτελείται κατά 74% από υδρογόνο, κατά 25% από ήλιο και 1% από άλλα στοιχεία. Το υδρογόνο αποτελεί το κύριο καύσιμο για τις θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που παράγουν την ενέργεια που ακτινοβολεί, ενώ το ήλιο προέρχεται κυρίως από τα προϊόντα της πυρηνικής σύντηξης του υδρογόνου, βάσει της αντίδρασης:



Εκτιμάται πως σε 4 με 5 δισεκατομμύρια έτη, με την εξάντληση των αποθεμάτων υδρογόνου και τη μεταστοιχειώσή τους σε ήλιο και κατόπιν σε βαρύτερα στοιχεία, θα αρχίσει να διαστέλλεται σχηματίζοντας έναν κόκκινο γίγαντα.



Ο Ήλιος

Υπολογίζεται ότι για κάθε γραμμάριο υδρογόνου που μετατρέπεται σε ήλιο εκλύεται ενέργεια ίση με $1,67 \cdot 10^5$ kWh. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία απομακρύνεται ακτινικά από τον ήλιο προς το διάστημα και άρα η ένταση J της ακτινοβολίας, μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης:

$$J = P/4\pi d^2$$

Όπου,

P : ολική εκπεμπόμενη ισχύς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας απ την επιφάνεια του ήλιου

d : η απόσταση από τον ήλιο, στην οποία μετράται η ένταση

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ, ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ

Περιγραφή φωτοβολταϊκών συστημάτων

Το ελάχιστο τμήμα κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος καλείται φωτοβολταϊκό στοιχείο (cell) ή κύτταρο ή κυψελίδα. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι μια ημιαγωγική διάταξη (απλή επαφή p-n ή σύνθετη) ή μια επαφή μετάλλου με ημιαγωγό ή οργανικό διάλυμα, που μετατρέπει την απορροφούμενη στο χώρο της επαφής τους, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα σύνολο από φωτοβολταϊκά στοιχεία, που αποτελούν μια ολοκληρωμένη μονάδα, τοποθετημένα σε ένα μεταλλικό πλαίσιο συνδεδεμένα, σε σειρά ή παράλληλα, ώστε η συνολική τάση να είναι ικανή να καλύψει απαιτήσεις φόρτισης αποτελεί τη βασική δομική μονάδα

κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος και ονομάζεται φωτοβολταϊκό πλαίσιο(module). Με την ίδια λογική ένα σύνολο πλαισίων ηλεκτρολογικά συνδεδεμένων μεταξύ τους αποτελούν φωτοβολταϊκή συστοιχία (array). Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μιας συστοιχίας, μπορεί να είναι τοποθετημένα είτε σε μια ενιαία μηχανική κατασκευή είτε σε σύνθετη αποτελούμενη από μικρότερα ολοκληρωμένα τμήματα (panels). Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο διαμορφώνεται στο εργοστάσιο και αποτελεί τη μονάδα η οποία διατίθεται στο εμπόριο. Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια μπορεί να περιλαμβάνει ένα μόνο πλαίσιο, μία έως και περισσότερες συστοιχίες, οπότε μπορεί να αναφέρεται και ως φωτοβολταϊκό πάρκο του σταθμού. Εν κατακλείδι, τα κύρια μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι:

1. Η φωτοβολταϊκή γεννήτρια ή φωτοβολταϊκός συλλέκτης
2. Οι διατάξεις προσαρμογής μέσω των οποίων η φωτοβολταϊκή γεννήτρια συνδέεται είτε με το ηλεκτρικό δίκτυο διανομής είτε με τις καταναλώσεις και τις διατάξεις αποθήκευσης όταν πρόκειται για αυτόνομη εγκατάσταση.

Χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται έναντι των άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με βάση τα επόμενα χαρακτηριστικά τους.

Θετικά:

1. Άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, σε μικρή ή μεγάλη ισχύ
2. Δυνατότητα σταδιακής υλοποίησης του συστήματος
3. Μηδενικές εκπομπές ρύπων κατά τη λειτουργία τους
4. Αθόρυβη λειτουργία
5. Ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης
6. Μεγάλη αξιοπιστία
7. Μεγάλη διάρκεια ζωής
8. Αποδεκτή αισθητική παρουσία

Αρνητικά:

1. Υψηλό οικονομικό κόστος

Κατηγορίες φωτοβολταϊκών συστημάτων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μπορούν να αξιοποιηθούν σε πλήθος ηλεκτρικών εφαρμογών και καλύπτουν ευρεία περιοχή ισχύος(από τη χρήση καταναλωτικών

προϊόντων έως και την τροφοδοσία νησιών ή μεγάλων κτιριακών συγκροτημάτων). Τα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται σε 2 βασικές κατηγορίες: τα απομονωμένα(stand alone) ή εκτός δικτύου(off grid) και τα συνδεδεμένα στο δίκτυο(grid connected). Τα απομονωμένα φωτοβολταϊκά συστήματα διακρίνονται επίσης σε αυτόνομα και υβριδικά. Στα υβριδικά φωτοβολταϊκά συστήματα η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται από το συνδυασμό φωτοβολταϊκής συστοιχίας με άλλες πηγές ενέργειας, δηλαδή Α.Π.Ε ή πηγές συμβατικών καυσίμων.

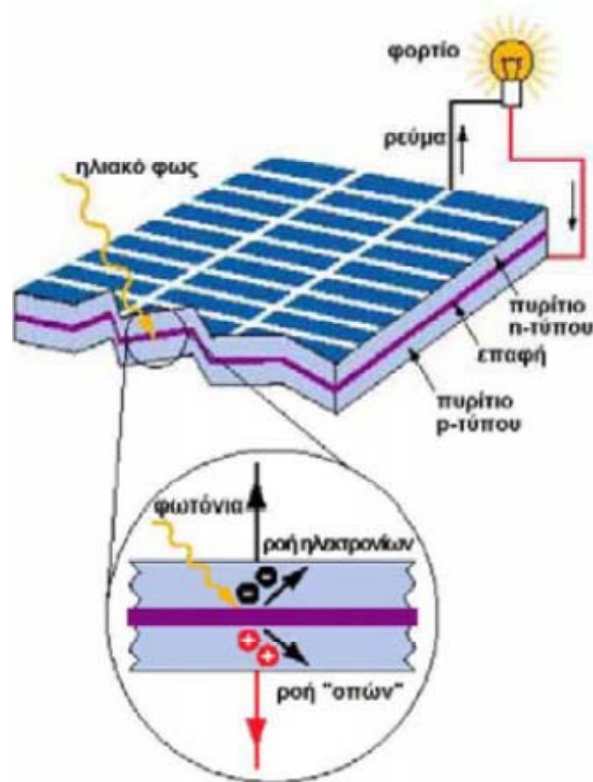
Ηλιακά κύτταρα

Το κύριο συστατικό κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι τα φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία ή φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες. Τα στοιχεία αυτά είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου που καθώς δέχονται στην επιφάνειά τους την ηλιακή ακτινοβολία εκδηλώνουν μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην μπροστά και πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής και την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται, ένα ηλιακό στοιχείο μπορεί να δώσει τάση 0,5-1,0V και πυκνότητα ρεύματος 20-40mA ανά cm² της επιφάνειάς του. Εφόσον η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων βασίζεται στον σχηματισμό δίοδου μεταξύ δύο ημιαγωγών υλικών, κρίνεται σκόπιμο να γίνει σύντομη περιγραφή της δομής της ύλης των ημιαγωγών υλικών και της δίοδου p-n που αποτελεί τη βάση της κατασκευής των πιο διαδεδομένων εμπορικά φωτοβολταϊκών στοιχείων, αυτών του πυριτίου(Si).

ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ - ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΦΩΤΟΡΕΥΜΑΤΟΣ

Τι είναι το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο εκφράζει τον μηχανισμό της απ' ευθείας μετατροπής του ηλιακού φωτός σε ηλεκτρικό ρεύμα, χρησιμοποιώντας τη μεταφορά της ενέργειας προσπιπτόντων φωτονίων στα υπάρχοντα ηλεκτρόνια μέσα σε ένα ημιαγωγό υλικό. Η βάση της φωτοβολταϊκής μετατροπής επομένως είναι η απορρόφηση φωτονίων κατάλληλης ενέργειας από το αντίστοιχο υλικό. Δηλαδή τα ηλιακά στοιχεία, που είναι δίοδοι ημιαγωγού, δέχονται ηλιακή ακτινοβολία με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού κι έχουν τη δυνατότητα να την απορροφήσουν σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσουν ένα ηλεκτρόνιο. Έτσι δημιουργείται περίσσεια ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών που κυκλοφορούν στο στερεό και στην περιοχή της ένωσης p-n και δέχονται την επίδραση ηλεκτροστατικού πεδίου. Έτσι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα 2 τμήματα της δίοδου(πηγή ηλεκτρικού ρεύματος).



Πως δημιουργείται το φωτόρευμα

Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στις δύο όψεις του φωτιζόμενου δίσκου, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Κατά τον τρόπο αυτό, όταν ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο δέχεται κατάλληλη ακτινοβολία δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα, το φωτόρευμα I_{ϕ} . Το ρεύμα αυτό είναι ανάλογο με τα απορροφούμενα από το στοιχείο φωτόνια και υπό βασικές προϋποθέσεις η πυκνότητά του δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_{\phi} = e \cdot g \cdot (L_n + L_p)$$

όπου

e : το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου

g : ο ρυθμός δημιουργίας φορέων από τα φωτόνια της ακτινοβολίας

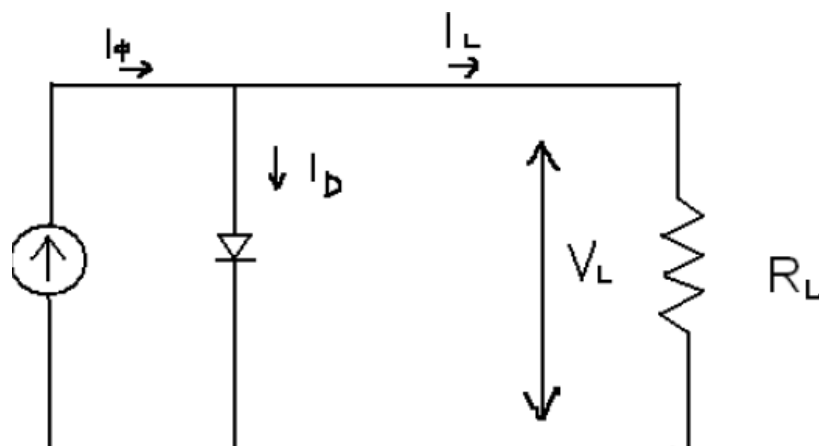
L_n : το μέσο μήκος διάχυσης των ηλεκτρονίων

L_p : το μέσο μήκος διάχυσης των οπών¹⁴⁸

Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Με στόχο την εκτίμηση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών και της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αποτελείται από μια πηγή

ρεύματος που ελέγχεται από μία δίοδο και περιγράφεται από το πολύ απλοποιημένο διάγραμμα του σχήματος:



Σε συνθήκες ανοιχτού κυκλώματος, θα αποκατασταθεί η ισορροπία, όταν η τάση που θα αναπτυχθεί ανάμεσα στις 2 όψεις του στοιχείου θα δημιουργεί ένα αντίθετο ρεύμα που θα αντισταθμίζει το φωτόρευμα.

Δηλαδή θα ισχύει η σχέση:

$$I_\phi = I_0 [\exp(eV / \gamma kT) - 1]$$

όπου

e: στοιχειώδες φορτίο του ηλεκτρονίου

k: σταθερά του Boltzman

T: η απόλυτη θερμοκρασία

γ : ένας συντελεστής που παίρνει συνήθως τιμές μεταξύ 1 και 2, ανάλογα με τη δίοδο

I_0 : ανάστροφο ρεύμα κόρου

Το πηλίκο kT/e είναι γνωστό και ως V_t , που ονομάζεται θερμική τάση και εξαρτάται από την θερμοκρασία. Το I_0 είναι συνήθως μικρότερο από $1\mu A$ ενώ το ρεύμα ορθής πόλωσης είναι πολύ μεγαλύτερο της τάξης των mA.

Από τη σχέση αυτή βρίσκουμε ότι η τιμή της τάσης ανοιχτοκύκλωσης του στοιχείου V_{oc} (open circuit Voltage) θα είναι:

$$V_{oc} = (\gamma kT/e) \ln [(I_\phi/I_0)-1]$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η τιμή του I_ϕ είναι πολύ μεγαλύτερη από το I_0 και επομένως η παραπάνω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$V_{oc} = (\gamma kT/e) \cdot \ln(I_\phi/I_0)$$

Η σχέση αυτή δείχνει τη λογαριθμική μεταβολή της τάσης ανοιχτού κυκλώματος συναρτήσει του φωτορεύματος, δηλαδή την ένταση της ακτινοβολίας στις 2 όψεις του στοιχείου το ρεύμα I_{sc} (short circuit current) θα ισούται με το παραγόμενο φωτόρευμα:

$$I_{sc} = I_{\phi}$$

Όταν όμως το κύκλωμα του φωτοβολταϊκού στοιχείου κλείσει διαμέσου μιας εξωτερικής αντίστασης R_L , το ρεύμα θα πάρει μια μικρότερη τιμή I_L που βρίσκεται λύνοντας την εξίσωση:

$$I_L = (I_{\phi} - I_0) [\exp(e \cdot I_L \cdot R_L / \gamma k T) - 1]$$

Προφανώς θα υπάρχει κάποια τιμή της αντίστασης (δηλαδή του φορτίου του κυκλώματος) για την οποία η ισχύς που παράγει το φωτοβολταϊκό στοιχείο θα γίνεται μέγιστη. Στις συνθήκες αυτές, θα αντιστοιχεί μια τάση V_m , η οποία δίνεται από τη λύση της εξίσωσης:

$$(I_{\phi} - I_0) + 1 = [1 + (e V_m / \gamma k T)] \exp(e V_m / \gamma k T)$$

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος $P_m = I_m \cdot V_m$ προς το γινόμενο της έντασης βραχυκυκλώματος και της τάσης ανοιχτοκύκλωσης $I_{sc} \cdot V_{oc}$ ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης (fill factor). Δηλαδή:

$$FF = I_m \cdot V_m / I_{sc} \cdot V_{oc}$$

Οι 3 παραπάνω παράμετροι, δηλαδή FF , I_{sc} , V_{oc} είναι τα κυριότερα μεγέθη για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς και της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων και καθορίζουν την απόδοσή τους. Ο συντελεστής απόδοσης η ορίζεται από τη σχέση:

$$\eta = P_m / H \cdot A = I_m \cdot V_m / H \cdot A = FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc} / H \cdot A$$

όπου

H : η ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου

A : το εμβαδόν του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Όπως βλέπουμε για την πραγματοποίηση αυξημένων αποδόσεων, επιδιώκεται οι τιμές των FF , I_{sc} , V_{oc} να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερες.

Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Η κυψέλη αποτελεί τη στοιχειώδη μονάδα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος όπου η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από ομάδες φωτοβολταϊκών κυψελών που είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους σε σειρά ή

παράλληλα ώστε να δίνουν την επιθυμητή τάση εξόδου. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορούν να συνδεθούν για να αποτελέσουν μια φωτοβολταϊκή συστοιχία. Στο εμπόριο κυκλοφορούν πολλά είδη πλαισίων από διάφορα υλικά. Το ζητούμενο είναι το γινόμενο τάσης-ρεύματος δηλαδή η ισχύς να γίνει το μέγιστο δυνατό. Ως στόχο οι κατασκευαστές θέτουν τη μέγιστη απόδοση έχοντας φτάσει και το 30% στο εργαστήριο. Αισθητά μειωμένη απόδοση παρουσιάζουν τα διαθέσιμα στο εμπόριο πλαίσια.

Απαραίτητα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου

1. Ισχύς αιχμής(Pa), σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία. Αντιστοιχεί στην μέγιστη ηλεκτρική ισχύ όταν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο δεχτεί ακτινοβολία με πυκνότητα ισχύος 1 ήλιου, δηλαδή 1kW/m²
2. Ανοιχτοκυκλωμένη τάση(Voc), σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
3. Ένταση ρεύματος βραχυκυκλώσεως(Isc), σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
4. Τάση(Vm), στις συνθήκες μέγιστης απόδοσης, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
5. Ένταση ρεύματος(Im), στις συνθήκες μέγιστης απόδοσης, σε συμβατική θερμοκρασία και ακτινοβολία.
6. Συντελεστής πλήρωσης(FF), που ορίζεται ως $(V_m I_m)/(V_{oc} I_{sc})$
7. Συντελεστής απόδοσης (η), σε συμβατική θερμοκρασία και συντελεστής διόρθωσης της απόδοσης(β).
8. Συντελεστής κάλυψης(PF).
9. Διηλεκτρική αντοχή, δηλαδή η ελάχιστη τάση που προκαλεί ηλεκτρική διάσπαση ανάμεσα στα ηλιακά στοιχεία και στο μεταλλικό περίβλημα του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών πλαισίων

Οι βασικές διαφοροποιήσεις των υπάρχουσών τεχνολογιών φωτοβολταϊκών πλαισίων αφορούν στο υλικό κατασκευής, την ικανότητα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική και το κόστος. Οι συχνότερα απαντώμενες τεχνολογίες επεξηγούνται ακολούθως.

Πλάισια μονοκρυσταλλικού πυριτίου(Single-crystal silicon ή c-Si)

Το βασικό ημιαγωγικό υλικό κατασκευής τους είναι το κρυσταλλικό πυρίτιο, το οποίο μορφοποιείται σε μεγάλα φύλλα. Το πάχος του υλικού είναι σχετικά

μεγάλο(300μm). Το κόστος κατασκευής χαρακτηρίζεται υψηλό καθώς προέρχεται από πυρίτιο υψηλής καθαρότητας. Η απόδοσή τους κυμαίνεται μεταξύ 13% και 18%.

Πλαίσια πολυκρυσταλλικού πυριτίου(Multicrystalline silicon ή mc-Si)

Παρέχουν τη δυνατότητα κατασκευής μεγάλων επιφανειών. Συνήθως κόβονται σε στοιχεία τετραγωνικής μορφής. Αποτελούνται από λεπτά στρώματα, πάχους 10-50μm. Γενικά, όσο μεγαλύτερες οι διαστάσεις των μονοκρυσταλλικών περιοχών του πολυκρυσταλλικού φωτοβολταϊκού στοιχείου, τόσο υψηλότερη η απόδοσή τους. Αυτή κυμαίνεται από 10% έως 14%. Αν και με μειωμένη απόδοση, έχουν μέτριο κόστος σε σχέση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες.

Πλαίσια άμορφου πυριτίου(Amorphous ή thin film silicon ή a-Si)

Σε αυτή την κατηγορία χρησιμοποιείται η τεχνολογία λεπτών επιστρώσεων ή υμενίων. Τα πλαίσια αυτά διαφέρουν σημαντικά από τα κρυσταλλικά. Το άμορφο πυρίτιο δεν παρουσιάζει κρυσταλλική δομή και μπορεί να εφαρμοστεί σαν μια λεπτή αγωγίμη μεμβράνη πάνω σε διαφορετικά υλικά. Εξαιτίας της μικρής χρησιμοποιούμενης μάζας υλικού, το κόστος κατασκευής καθίσταται χαμηλό και ο απαιτούμενος χρόνος λίγο. Ωστόσο τα πλαίσια άμορφου πυριτίου, υστερούν σε απόδοση, η οποία κυμαίνεται μεταξύ του 4% και 8%. Σήμερα η τεχνολογία αυτή χρησιμοποιείται για την παρασκευή σύνθετων φωτοβολταϊκών στοιχείων, με διαδοχικές ενώσεις 2 ή 3 στρωμάτων με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα έτσι ώστε να αξιοποιείται μεγαλύτερο τμήμα του ηλιακού φάσματος. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η κατασκευή εύκαμπτων, σταθερής μορφής και ασυνήθιστου μεγέθους πλαισίων.

Υβριδικά πλαίσια

Τα λεγόμενα υβριδικά πλαίσια συνδυάζουν τις τεχνολογίες των άμορφων και των μονοκρυσταλλικών, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα των 2 τεχνολογιών. Έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης ανά απαιτούμενη επιφάνεια. Από την άλλη πλευρά το αρκετά υψηλότερο κόστος τους σε σχέση με τις προηγούμενες τεχνολογίες αποτελεί το βασικό τους μειονέκτημα.

Πλαίσια τεχνολογίας ομάδας III-IV

Το βασικό υλικό κατασκευής τους ανήκει στην τρίτη ή τέταρτη ομάδα του περιοδικού πίνακα. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται, όπως το αρσενιούχο γάλλιο, έχουν απόδοση γύρω στο 25%. Εκτός όμως από την υψηλή τους απόδοση παρουσιάζουν και υψηλό κόστος.

Η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο παρουσιάζει τα δικά του τεχνικά χαρακτηριστικά(απόδοση, τάση, ισχύ κλπ) που διαμορφώνονται από τα αντίστοιχα μεγέθη των χωριστών ηλιακών στοιχείων που περιέχει, όπως αναφέρονται στις προηγούμενες παραγράφους. Ο συντελεστής απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου(ηπ) εκφράζει τον λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που παράγει το φωτοβολταϊκό πλαίσιο(Pπ), προς την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του, S:

$$n_{\pi} = P_{\pi} / H \cdot S$$

Αν E η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια και Π η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που πέφτει στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε ισοδύναμη μορφή η προηγούμενη σχέση γράφεται:

$$n_{\pi} = E / \Pi d S$$

Ισχύει ακόμα η σχέση:

$$n_{\pi} = n \cdot PF$$

όπου

n: η μέση απόδοση των ηλιακών στοιχείων

PF: ο συντελεστής κάλυψης του πλαισίου

Ο PF ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ενεργού επιφάνειας των ηλιακών στοιχείων, δηλαδή της επιφάνειας όπου γίνεται η απορρόφηση προς τη συνολική επιφάνεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Η τιμή του εξαρτάται από το σχήμα και την πυκνότητα τοποθέτησης των ηλιακών στοιχείων στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και κυμαίνεται από 0,78 έως 0,98.

Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας ή διαφορετικά η μεταβολή της έντασης ή της πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται στην επιφάνειά του το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά και του έτους, καθιστά την τροφοδοσία του μη σταθερή. Αυτή αυξομειώνεται μεταξύ της μηδενικής και μιας μέγιστης τιμής. Επομένως η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς του πλαισίου εξαρτάται από την χρονική μεταβολή της έντασης της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στην επιφάνειά του. Επίσης διαπιστώνεται ότι η ένταση της ακτινοβολίας δεν επηρεάζει πρακτικά την τάση λειτουργίας, σε αντίθεση με την θερμοκρασία.

Θερμοκρασία φωτοβολταϊκού πλαισίου-θερμοκρασία περιβάλλοντος

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια λειτουργούν καλύτερα σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, όταν δηλαδή η θερμοκρασία τους δεν υπερβαίνει τη συμβατικά σχεδιαζόμενη θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία είναι οι 25°C. Η θερμοκρασία τους όμως αυξάνεται λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών. Ένας λόγος ακόμα για την αύξηση της θερμοκρασίας είναι η μετατροπή, μέσα σε αυτά, της ηλιακής ενέργειας σε θερμική. Έτσι έχει αποδειχθεί ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του φωτοβολταϊκού πλαισίου ελαττώνει τελικά την αποδιδόμενη από αυτό μέγιστη ισχύ κατά περίπου 0,3%.

Επίδραση της σκόνης

Η επίδραση της ρύπανσης και της σκόνης του περιβάλλοντος στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων δεν είναι καθόλου αμελητέα. Αντιθέτως, χρησιμοποιώντας ένα αδιάστατο συντελεστή υπεισέρχεται και αυτή η παράμετρος στον υπολογισμό της μέγιστης απόδοσης. Ο προαναφερθείς συντελεστής παίρνει την τιμή 0,8 για περιβάλλον με υψηλό επίπεδο ρύπανσης και την τιμή 1 για περιβάλλον χωρίς ρύπανση. Πάντως η κλίση με την οποία τοποθετούνται τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ευνοεί τον καθαρισμό της επιφάνειάς τους από την βροχή και τον αέρα και κατά συνέπεια περιορίζεται η επίδραση του συγκεκριμένου παράγοντα. Στις περιπτώσεις όμως που τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται με οριζόντια κλίση, συνίσταται ο περιοδικός καθαρισμός τους.

Αντιστροφείας τάσης

Ο αντιστροφείας τάσης χρησιμοποιείται τόσο στα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο όσο και τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Αντιστροφείας τάσης για συστήματα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο

Ο αντιστροφείας είναι το πιο σημαντικό στοιχείο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος μετά από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια. Καθορίζει την τάση του συστήματος από την πλευρά του συνεχούς ρεύματος και αρμοδιότητά του είναι να μετατρέπει το συνεχές ρεύμα που παράγεται από την ηλιακή κυψέλη σε εναλλασσόμενο συχνότητας 50Hz που προσαρμόζεται στο δίκτυο. Εξαιτίας της σύνδεσης με το δίκτυο πρέπει ο αντιστροφείας να ανταποκρίνεται εξίσου καλά στα χαρακτηριστικά του δικτύου και στην απόδοση της ηλιακής γεννήτριας και πρέπει να ικανοποιούνται διάφορες ρυθμίσεις.

Αντιστροφείας τάσης για αυτόνομα συστήματα

Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου αντιστροφεία εξαρτάται από τις ειδικές συνθήκες υπό τις οποίες οφείλει να λειτουργεί. Ο αντιστροφείας αυτός πρέπει να έχει υψηλή απόδοση, περίπου 90%, στα μερικά φορτία και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή 5-10% της ονομαστικής ισχύος. Η εκπλήρωση της παραπάνω προϋπόθεσης σε συνδυασμό με

την έξοδο της τάσης με καμπυλοειδή μορφή και την αντοχή σε μικρής διάρκειας υπερφορτίσεις επιτυγχάνεται από λίγους αναστροφείς.

ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

Στις περισσότερες περιπτώσεις μη συνδεδεμένων στο δίκτυο φωτοβολταϊκών συστημάτων απαιτείται αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με συσσωρευτές(μπαταρίες). Η μπαταρία είναι η πιο συμβατική μορφή αποθήκευσης ενέργειας για ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, γιατί επιτρέπεται η απευθείας σύνδεσή της με τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια χωρίς οποιαδήποτε μετατροπή αφού παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά του συνεχούς ρεύματος. Η ενέργεια που αποθηκεύεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιόδους χωρίς ή με ανεπαρκή ηλιακή ακτινοβολία, όπως κατά τη διάρκεια της νύχτας ή των συννεφιασμένων ημερών. Το βασικό μειονέκτημά της είναι η διάρκεια ζωής της, η οποία είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη από εκείνη των υπολοίπων στοιχείων του συστήματος. Οι πιο σημαντικοί τύποι μπαταριών είναι οι μπαταρίες μολύβδου οξέος και νικελίου καδμίου. Υπάρχουν βέβαια και εναλλακτικές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας. Για την επιλογή μπαταρίας που θα χρησιμοποιηθεί σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα εξετάζεται αν πληρούνται τα ακόλουθα κριτήρια:

1. υψηλός βαθμός απόδοσης
2. ικανότητα κύκλων (αφού θα υπάρξουν και βαθιές εκφορτίσεις των μπαταριών)
3. μεγάλη διάρκεια ζωής

Συνίσταται ικανότητα μεγαλύτερη των 700 ονομαστικών κύκλων.

Μπαταρίες μολύβδου οξέος

Ακόμη και μετά από 100 χρόνια οι μπαταρίες μολύβδου οξέος αποτελούν το 99% των επιλογών για ηλιακά συστήματα αποθήκευσης παραγωγής ισχύος. Η διαθεσιμότητα τα τελευταία χρόνια των AGM μπαταριών και οι πραγματικές βαθιές κύκλου μπαταρίες αφήνουν λίγα περιθώρια στη χρήση άλλου τύπου μπαταριών. Ανάλογα με το είδος του συστήματος στο οποίο ενσωματώνονται, η διάρκεια ζωής του κυμαίνεται από 2-3 χρόνια.

Μπαταρίες νικελίου - καδμίου

Τα μειονεκτήματά τους συνοψίζονται ακολούθως:

1. Υψηλό κόστος
2. Υψηλό κόστος που αφορά τα απόβλητα καδμίου που είναι ιδιαίτερος επιβλαβή
3. Χαμηλή αποδοτικότητα(65-80%)
4. Όχι σταθερή τάση και καμπύλες φόρτισης

Αν και υπήρξε μια στροφή της τεχνολογίας του αιώνα προς την κατεύθυνση αυτή, είναι σαφές ότι οι μπαταρίες νικελίου καδμίου υπερέρχουν σε διάρκεια αλλά όχι σε κύκλους. Αυτό τις καθιστά χρήσιμες σε συστήματα έκτακτης ανάγκης/εφεδρείας, αλλά όχι σε ημερήσιου κύκλου ηλιακά συστήματα.

Μπαταρίες νικελίου - σιδήρου

Το βασικό πλεονέκτημά τους είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής τους.

Τα κυριότερα μειονεκτήματά τους είναι:

1. Χαμηλή αποδοτικότητα(θεωρητικά από 60-65%)
2. Υψηλός βαθμός αυτοεκφόρτισης
3. Μπορεί να μειώσουν την ολική αποδοτικότητα του φωτοβολταϊκού συστήματος έως και 25%.

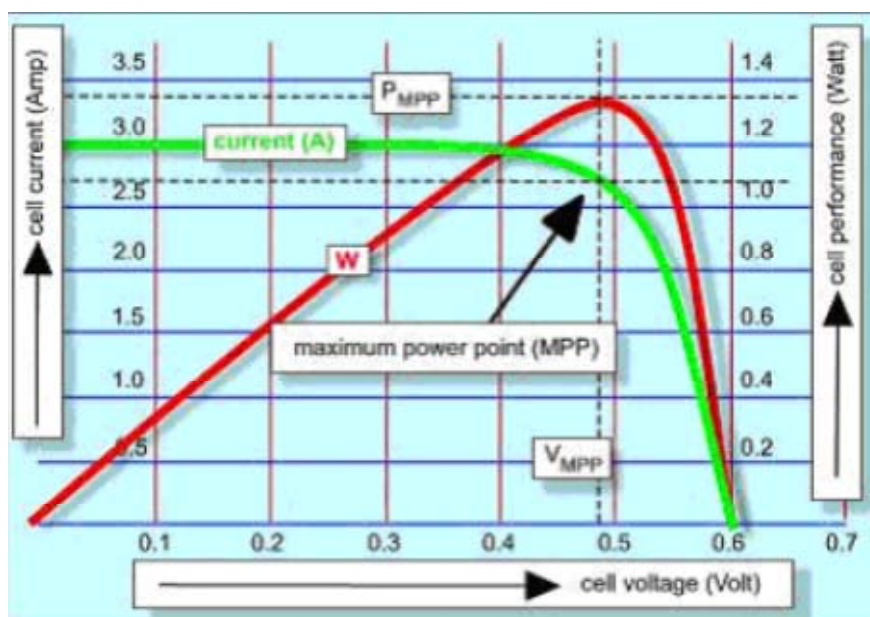
Αυτό σημαίνει ότι η τάση εξόδου ποικίλει, αρκετά περισσότερο υπό φορτίο. Γενικώς, αν εξαιρέσουμε τον ντόρο που συμβαίνει σχετικά με την μεγάλη διάρκεια ζωής και τους χιλιάδες κύκλους, αυτού του είδους οι μπαταρίες είναι ανεπαρκής επιλογή για εφαρμογές ηλιακών συστημάτων.

Ελεγκτής φόρτισης

Γενικά ο ελεγκτής φόρτισης-εκφόρτισης εποπτεύει τη διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης ώστε να απομονώνει το σύστημα αποθήκευσης, αφενός από το σύστημα παραγωγής της ενέργειας, στην περίπτωση της υπερφόρτισης και αφετέρου από το σύστημα κατανάλωσης, στην περίπτωση υπερεκφόρτισης. Και στις 2 περιπτώσεις, η διακοπή αυτή προκαλείται όταν η τάση στα άκρα του συσσωρευτή ξεπεράσει, προς τα άνω και αντίστοιχα προς τα κάτω, ορισμένα όρια τάσης, όπου ενεργοποιούνται οι ηλεκτρικοί διακόπτες. Μία μονάδα ελέγχου φόρτισης-εκφόρτισης, περιλαμβάνει σύνολο ολοκληρωμένων συστημάτων ή μικροελεγκτές που ελέγχουν ηλεκτρικούς διακόπτες ισχύος. Σε κάθε περίπτωση, στο κύκλωμα παρεμβάλλεται μία διόδος, για την προστασία του συστήματος αποθήκευσης από εκφόρτιση.

Παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος(Maximum power point tracker, MPPT)

Η ηλεκτρονική διάταξη αναζήτησης και παρακολούθησης μέγιστης ισχύος μεγιστοποιεί την ενέργεια εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας κάνοντάς την να λειτουργεί στο σημείο αυτό. Αν η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση περιλαμβάνει μετατροπέα DC-DC για την προσαρμογή της τάσης εξόδου στην τάση εισόδου του συστήματος των συσσωρευτών, η διάταξη MPPT ενσωματώνεται σε αυτόν. Λειτουργεί σε πολύ υψηλές συχνότητες(20-50kHz), γεγονός που εξασφαλίζει υψηλή απόδοση και μικρό μέγεθος μετασχηματιστών. Η χρησιμοποίηση συστήματος MPPT επιβάλλεται, ιδιαίτερα στην περίπτωση που δεν περιλαμβάνεται συσσωρευτής.



Χαρακτηριστική καμπύλη εντοπισμού του MPPT

Βοηθητικά συστήματα

Κάθε φωτοβολταϊκό σύστημα περιλαμβάνει και:

1. διόδους αντεπιστροφής(blocking diodes) για να μην επιτρέπεται η αντιστροφή του ρεύματος στα φωτοβολταϊκά πλαίσια.
2. διόδους διέλευσης(bypass diodes) για να εξασφαλιστεί η λειτουργία του συστήματος σε περίπτωση μερικής σκίασης.

ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Εισαγωγή

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας(Α.Π.Ε) έχουν, στην πλειονότητά τους, ως γενεσιουργό αιτία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, την ηλιακή ακτινοβολία και κατά συνέπεια χαρακτηρίζονται, σε μικρό ή μεγάλο βαθμό, από στοχαστικότητα κατά τη λειτουργία τους. Περίοδοι μερικής ή ολικής συννεφιάς, για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και χρονικά διαστήματα νηνεμίας για τις ανεμογεννήτριες, δημιουργούν την ανάγκη αποθήκευσης ενέργειας και χρησιμοποίησης συμβατικής πηγής προκειμένου να διασφαλιστεί η κάλυψη της ενέργειας ζήτησης μιας εφαρμογής. Η διαθεσιμότητα των Α.Π.Ε μπορεί να αναβαθμιστεί με σύνθετα συστήματα(Υβριδικά Συστήματα) που χαρακτηρίζονται από τον συνδυασμό των πηγών αυτών μεταξύ τους ή και με συμβατικές πηγές ενέργειας και σε πολλές περιπτώσεις αποθήκευσης ενέργειας. Η διερεύνηση του βαθμού κάλυψης της ενέργειας ζήτησης μιας εφαρμογής, από ένα φωτοβολταϊκό υβριδικό σύστημα, με βάση το ηλιακό δυναμικό της περιοχής

εγκατάστασης της εφαρμογής οδηγεί στην επιλογή του καταλληλότερου συνδυασμού προς το σχεδιασμό του συστήματος αυτού.

Τι είναι υβριδικό σύστημα

Υπάρχουν πολλοί ορισμοί για τα υβριδικά συστήματα. Ας θεωρήσουμε τον ακόλουθο:

Υβριδικό σύστημα καλείται ένα σύνολο από μονάδες που συνεργάζονται μεταξύ τους προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες ή/και μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Κατά κύριο λόγο, τα υβριδικά συστήματα είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, αλλά μπορούν επίσης να δουλεύουν και ανεξάρτητα από αυτό, τροφοδοτώντας ξεχωριστούς αποδέκτες από ένα ή περισσότερα σπίτια/αγροικίες, μικρές βιομηχανικές ζώνες έως και μεγάλες τοπικές κοινωνίες. Τα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο υβριδικά συστήματα επιτρέπουν στο πλεόνασμα ενέργεια να επιστρέφει πίσω στο δίκτυο, όταν η ποσότητα που παράγεται είναι μεγαλύτερη από την ζήτηση των καταναλωτών σε συνδυασμό με τα τοπικά αποθηκευτικά συστήματα. Προφανώς, ο κύριος σκοπός που εξυπηρετούν τα υβριδικά συστήματα είναι να προμηθεύουν με ενέργεια απομονωμένες, μη συνδεδεμένες με το δίκτυο περιοχές όπου το κόστος σύνδεσης και διανομής σε τόσο μακρινές αποστάσεις είναι πολύ υψηλό.

Σίγουρα τα υβριδικά συστήματα είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος για την αύξηση της διαθεσιμότητας ενέργειας, χρησιμοποιώντας διαφορετικές πρωταρχικές πηγές, κατάλληλα συστήματα αποθήκευσης καθώς και προηγμένα ηλεκτρονικά ισχύος για έλεγχο και επιτήρηση των διαδικασιών.

Γιατί τα υβριδικά συστήματα

Τις τελευταίες δεκαετίες, παρατηρείται μια ταχύτατη εξάπλωση των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Αυτές οι πηγές είναι φιλικές προς το περιβάλλον και έχουν ως βάση τους τον ήλιο, τον άνεμο, τη βιομάζα κ.α, χωρίζονται δε, σε 2 κατηγορίες: τις ελεγχόμενες και τις μη ελεγχόμενες. Με τον όρο ελεγχόμενες πηγές ενέργειας είναι αυτές που παρέχουν την δυνατότητα ελέγχου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως ο άνθρακας. Είναι προφανές ότι η παραγωγή ενέργειας από μη ελεγχόμενες πηγές είναι απρόβλεπτη και ανεξάρτητη από την ανθρώπινη δράση. Ο ήλιος και άνεμος είναι μη ελεγχόμενες πηγές.

Έτσι ενώ, η ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει να μπορεί να παραχθεί ακριβώς τη στιγμή που τη χρειαζόμαστε, η προϋπόθεση αυτή δεν πληρείται από τον ήλιο και τον άνεμο. Για το λόγο αυτό, θεωρείται επιβεβλημένη η κατασκευή ειδικών υβριδικών συστημάτων για την αποφυγή ελλειμμάτων ενέργειας με τη χρήση όλου του διαθέσιμου ηλιακού και αιολικού δυναμικού. Ουσιαστικά αυτό συμβαίνει, με τον

συνδυασμό δύο ή και περισσότερων πηγών ενέργειας με επιπρόσθετα στοιχεία ελέγχου. Η μία, τουλάχιστον, εκ των πηγών είναι αναγκαίο να είναι ελεγχόμενη.

Οι επιστήμονες και οι κατασκευαστές αναζητούν τρόπους για να συνδυάσουν τεχνολογίες, έτσι ώστε να βελτιώσουν την αποδοτικότητα του εξοπλισμού παραγωγής. Ακολουθούν χαρακτηριστικά παραδείγματα υβριδικών συστημάτων:

1. κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου σε συνδυασμό με αεριοστρόβιλο
2. ανεμογεννήτριες με συσσωρευτές και εφεδρική ντιζελογεννήτρια

Τα υβριδικά συστήματα περιλαμβάνουν δύο ή και παραπάνω πηγές ενέργειας με σκοπό να επιτυγχάνεται μια ισορροπία μεταξύ δυνατών και αδύναμων σημείων αυτών. Έτσι, πολλά τέτοια συστήματα είναι ήδη εμπορικά διαθέσιμα, άλλα υπό ανάπτυξη κι άλλα δεν είναι υλοποιήσιμα.

Πλεονεκτήματα υβριδικών συστημάτων φωτοβολταϊκών με κυψέλες υδρογόνου

Ιδιαίτερη έμφαση έχει δοθεί τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη και την εφαρμογή των συστημάτων κυψελών καυσίμου, για ακαδημαϊκούς και βιομηχανικούς λόγους. Οι κυψέλες καυσίμου θεωρούνται συνεχείς χημικοί αντιδραστήρες που μετατρέπουν το καύσιμο, μέσω της οξείδωσης, σε ηλεκτρική ενέργεια. Εν αντιθέσει με μια μπαταρία, οι κυψέλες δεν χρειάζονται επαναφόρτιση. Σε γενικές γραμμές, η τεχνολογία των κυψελών πλεονεκτεί έναντι της συμβατικής στα ακόλουθα σημεία:

1. υψηλή απόδοση, ιδιαίτερα κατά την συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας(που μπορεί να χρησιμοποιηθεί).
2. κατάλληλη για οικιακές εφαρμογές
3. σχεδόν μηδενικά επίπεδα έκλυσης ρυπογόνων αερίων

Τα πλεονεκτήματα αυτά οφείλονται στο ότι οι περιορισμοί που επιβάλλονται από τον 2ο θερμοδυναμικό νόμο κατά την παραγωγή ενέργειας από κυψέλες καυσίμου είναι λιγότερο αυστηροί από αυτούς που αφορούν τα συμβατικά συστήματα ενέργειας. Το σημαντικότερο μειονέκτημα της τεχνολογίας του υδρογόνου είναι ότι αυτό δεν απαντάται ελεύθερο στη γη. Όμως, επιτρεπτή είναι και η χρήση διάφορων υδρογονούχων καυσίμων.

Από την άλλη μεριά, μια ώριμη και οικονομική πια, τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελεί η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών στοιχείων, η οποία χαρακτηρίζεται από μηδενική εκπομπή ρύπων, αλλά κι από μικρές σχετικά αποδόσεις. Ωστόσο αυτό αντισταθμίζεται από το μηδενικό κόστος της ηλιακής ενέργειας. Το κυριότερο μειονέκτημα της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας είναι η περιορισμένη διαθεσιμότητα της ηλιακής ενέργειας εξαιτίας της γεωγραφικής θέσης της περιοχής και των καιρικών συνθηκών.

Είναι προφανές πως η ηλιακή ενέργεια δεν μπορεί να αποθηκευτεί, εκτός εάν μετατραπεί σε άλλον τύπο ενέργειας.

Επιπλέον, η ακριβής πρόβλεψη της ηλιακής ακτινοβολίας δεν είναι εφικτή μακροπρόθεσμα.

Με σκοπό να ξεπεραστούν οι προαναφερθέντες περιορισμοί προέκυψε η ιδέα του συνδυασμού των Α.Π.Ε με την τεχνολογία του υδρογόνου. Συστηματικές μελέτες τέτοιων καινοτόμων συστημάτων εμφανίστηκαν στην αρχή της δεκαετίας του '90. Ο όρος «υβριδικό σύστημα» αναφέρεται σε όλα τα συστήματα που συνδυάζουν διαφορετικές ενεργειακές τεχνολογίες (Α.Π.Ε, υδρογόνου, βιομάζας κτλ) με σκοπό να καλυφθούν οι ηλεκτρικές και οι θερμικές απαιτήσεις (φορτία) του καταναλωτή.

Εξάλλου, η παραγωγή υδρογόνου από Α.Π.Ε κι η χρήση του σε κυψέλες καυσίμου έχει ως μοναδικά παράγωγα προϊόντα το νερό και θερμότητα. Κι ενώ βραχυπρόθεσμα το υδρογόνο παράγεται κυρίως από το φυσικό αέριο, μακροπρόθεσμα η ενέργεια από τον ήλιο θα αποδειχθεί ιδιαιτέρως σημαντικής στην οικονομία του υδρογόνου.

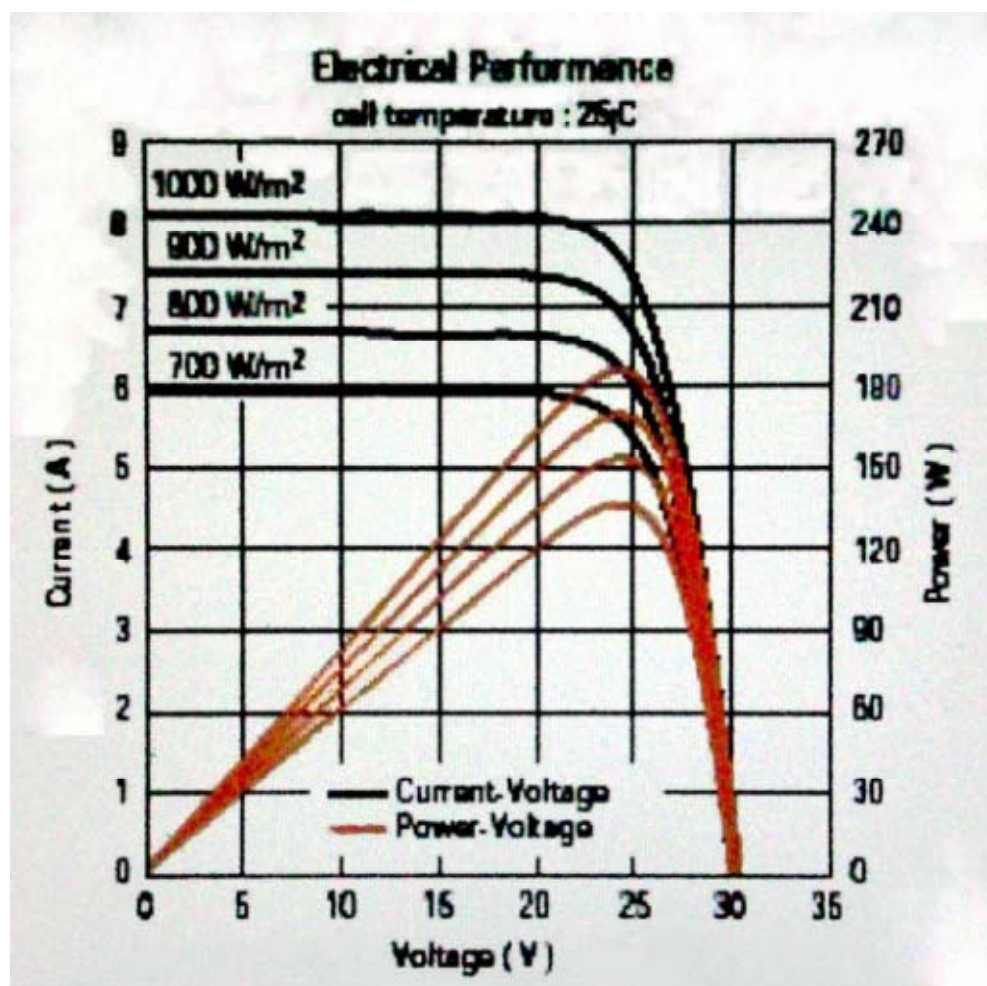
Σε μικρή κλίμακα, μια φωτοβολταϊκή συστοιχία συνοδευόμενη από έναν ηλεκτρολύτη και μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου αποτελεί ένα ευέλικτο σύστημα που μπορεί να εγκατασταθεί σε κάθε τοποθεσία.

Καταμερισμός φορτίου σε υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών με κυψέλες υδρογόνου

Σε ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα στο οποίο τα φωτοβολταϊκά πάνελς παρέχουν την μέγιστη ισχύ στο φορτίο, η επιπλέον απαιτούμενη ενέργεια παράγεται από μια κυψέλη καυσίμου (PEM). Για την επίτευξη ενός κοινού επιπέδου τάσεων, που προέρχεται από τις 2 πηγές είναι απαραίτητη η χρήση 2 μετατροπέων. Ο καταμερισμός φορτίου αναλύεται υπό στατικές αλλά και δυναμικές συνθήκες.

Λειτουργία φωτοβολταϊκού πλαισίου στο σημείο μέγιστης ισχύος

Η ισχύς και το ρεύμα εξόδου ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου συναρτῆσει της τάσης εξόδου φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Χαρακτηριστικές I-V και P-V ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου

Η χαρακτηριστική ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου δίνεται από τη σχέση:

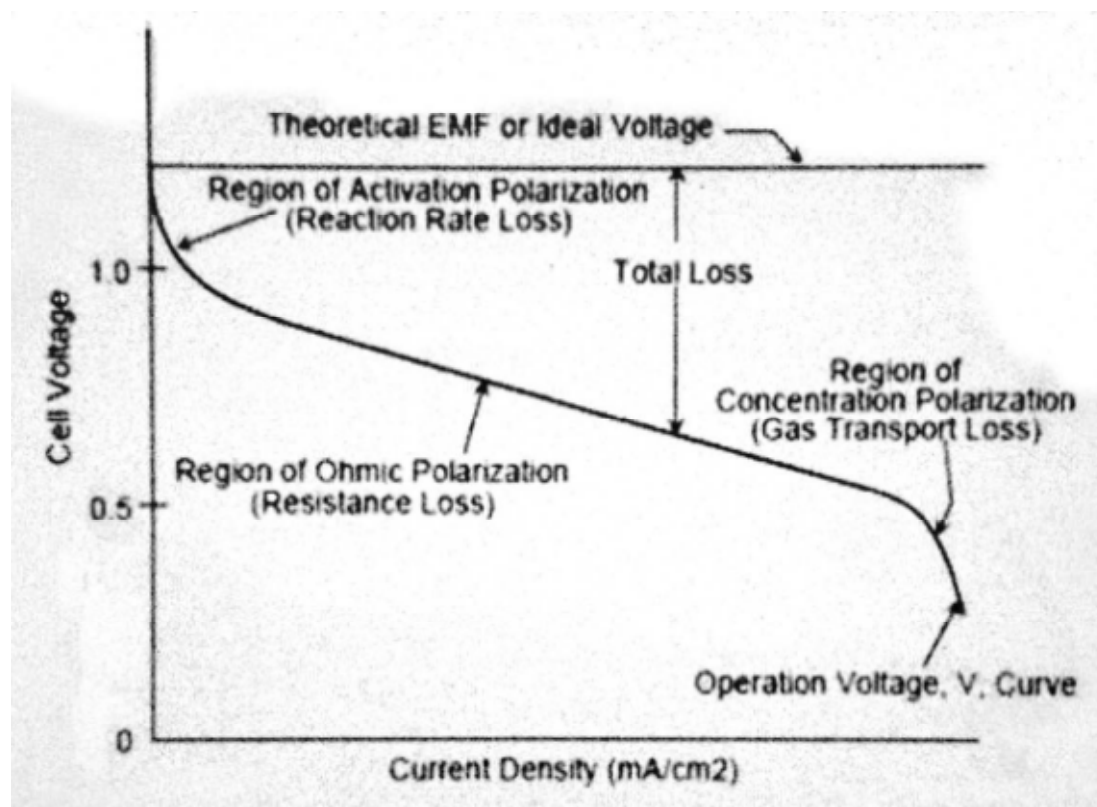
$$I = I_{sc} - I_{sat}[\exp(\alpha V) - 1]$$

όπου $\alpha = q/(AKT)$

Οι παράμετροι α και I_{sat} δίνονται στα κατασκευαστικά δεδομένα. Καθώς το επίπεδο ηλιοφάνειας μεταβάλλεται, το σημείο λειτουργίας μέγιστης ισχύος μετατοπίζεται. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι εντοπισμού του MPP, οι περισσότερες από τις οποίες χρησιμοποιούν μικροεπεξεργαστές. Μια απλή μέθοδος, που πρόσφατα προτάθηκε, επιτυγχάνει τον εντοπισμό με μέτρηση του ρεύματος βραχυκύκλωσης I_{sc} και προσαρμογή του ενεργού ρεύματος φορτίου στην τιμή $K_0 \cdot I_{sc}$. Το K_0 είναι ένας συντελεστής περίπου ίσος με 0,9. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο εισαγωγικό κεφάλαιο για τα φωτοβολταϊκά συστήματα η συσκευή εντοπισμού του MPP ενσωματώνεται στον μετατροπέα DC-DC, που ανυψώνει την τάση προερχόμενη από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε υψηλότερο επίπεδο.

PEM κυψέλες καυσίμου ως πηγή ενέργειας

Σε αντίθεση με μια μπαταρία, η κυψέλη μπορεί να παρέχει ηλεκτρική ισχύ συνεχώς εφόσον τροφοδοτείται με υδρογόνο. Η θεωρητική και η πραγματική V-I χαρακτηριστική μιας αυτόνομης κυψέλης υδρογόνου παριστάνεται στο επόμενο διάγραμμα:

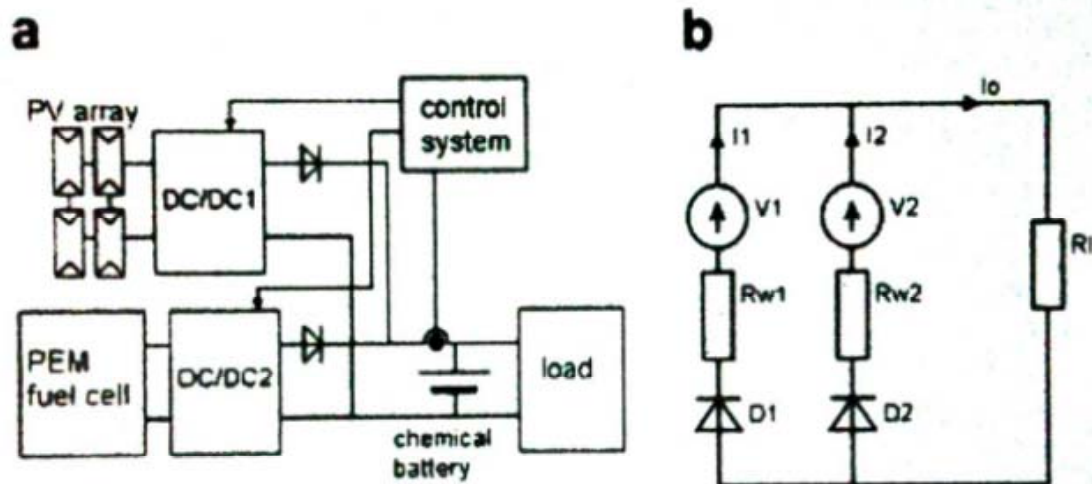


V-I χαρακτηριστική μιας κυψέλης καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου έχει 3 περιοχές λειτουργίας και πιο συγκεκριμένα την πόλωση ενεργοποίησης, την ωμική πόλωση και την πόλωση συγκέντρωσης. Η πόλωση ενεργοποίησης μπορεί να θεωρηθεί ως η χωρίς φορτίο περιοχή, όπου παρατηρείται μεγάλη πτώση τάσης για μικρή αύξηση της έντασης του ρεύματος εξόδου. Στην ωμική πόλωση, όπου η κυψέλη λειτουργεί κανονικά, η τάση εξόδου πέφτει γραμμικά με μία μικρή κλίση για μεγάλο εύρος τιμών του ρεύματος εξόδου. Η πόλωση συγκέντρωσης μπορεί να θεωρηθεί ως η περιοχή υπερφόρτισης, η οποία αφορά υψηλές τιμές της έντασης του ρεύματος εξόδου. Στις κυψέλες εμπορίου, τα υπάρχοντα ηλεκτρονικά στοιχεία εμποδίζουν την κυψέλη να λειτουργεί στην περιοχή της υπερφόρτισης. Πολλές κυψέλες καυσίμου συνδέονται εν σειρά για της επίτευξη μια υψηλής DC τάσης στην έξοδο. Η PEM κυψέλη καυσίμου λειτουργεί κανονικά στην περιοχή ωμικής πόλωσης και παρέχει το επιθυμητό ποσό ισχύος. Με βάση τη χαρακτηριστική της, επιτρέπει υψηλότερη ένταση ρεύματος με μικρή μείωση της τάσης εξόδου. Αυτή η μείωση της τάσης δεν αποτελεί πρόβλημα καθώς μπορεί να αντισταθμιστεί με τη χρήση ενός ενισχυτή.

Παρατηρήσεις επί της λειτουργίας υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκού με κυψέλες υδρογόνου

Ο στόχος είναι το υβριδικό σύστημα να λαμβάνει ενέργεια(ισχύ) από τη συστοιχία φωτοβολταϊκών πλαισίων και την PEM κυψέλη καυσίμου και να τροφοδοτεί ένα δεδομένο DC φορτίο με συγκεκριμένη τάση.



α) κυκλωματικό διάγραμμα του υβριδικού pv-fc συστήματος, β) ηλεκτρικό ισοδύναμο κύκλωμα

Στο προηγούμενο σχήμα δίνεται το σχηματικό κυκλωματικό διάγραμμα του υβριδικού συστήματος και το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα.

Στην καρδιά του συστήματος ελέγχου βρίσκεται ένας μικροεπεξεργαστής. Ο έλεγχος είναι τέτοιος ώστε τα φωτοβολταϊκά πλαίσια να παρέχουν τη μέγιστη ισχύ ανάλογα με το επικρατές επίπεδο ηλιοφάνειας, ενώ η κυψέλη καυσίμου παρέχει την υπόλοιπη ισχύ. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται κατάλληλα σε σειρά και παράλληλα ώστε η τάση εξόδου να είναι περίπου ίση με αυτή της κυψέλης καυσίμου. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του άνωθεν συστήματος είναι η μεγιστοποίηση του χρόνου λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της ζήτησης καυσίμου. Με τη βοήθεια του συστήματος ελέγχου η έξοδος παραμένει σταθερή ανεξάρτητα από την ηλιακή ακτινοβολία. Στο ακόλουθο διάγραμμα διασαφηνίζεται η διαφορά στην παραγωγή ενέργειας μεταξύ φωτοβολταϊκών συστημάτων και υβριδικών συστημάτων. Όπως γίνεται αντιληπτό τους μήνες μέγιστης ηλιοφάνειας το φορτίο καλύπτεται εξ ολοκλήρου από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες το μεγαλύτερο κομμάτι ισχύος προσφέρει η κυψέλη καυσίμου.

Επιπρόσθετα το κόστος της παραγόμενης ενέργειας μειώνεται, αν και εκ πρώτης όψεως εξαιτίας του εξοπλισμού το κόστος είναι αυξημένο. Κι αυτό γιατί οι συνολικές ετήσιες ώρες λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι σχεδόν διπλάσιες με τη χρήση υβριδικού συστήματος. Ως εκ τούτου, ο υπολογισμός των συνολικών ωρών

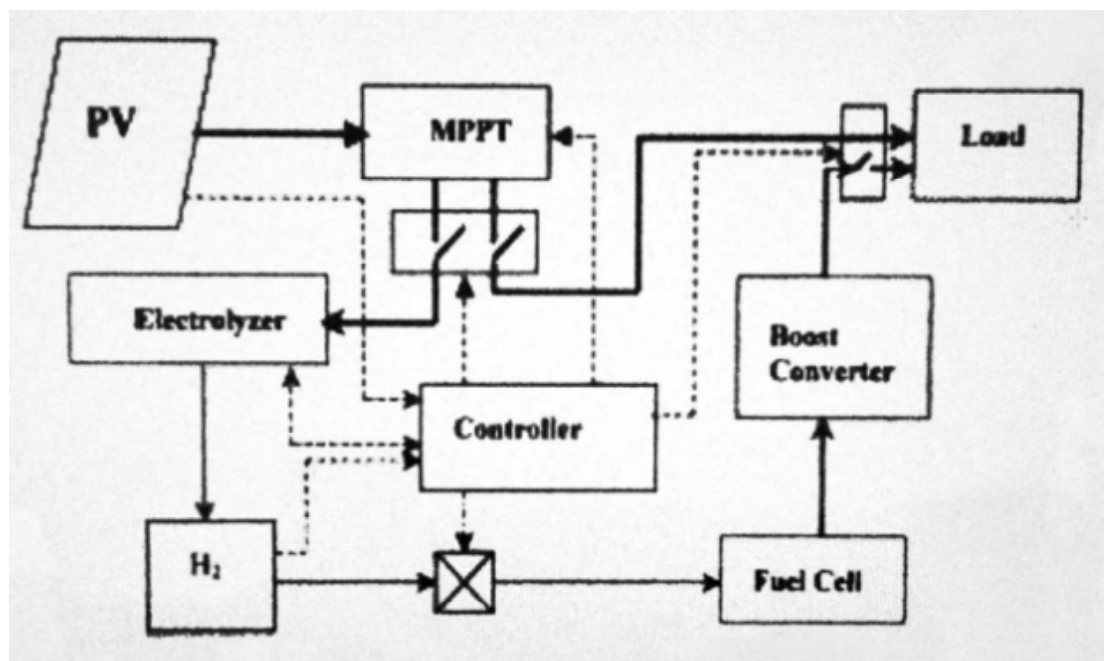
λειτουργίας μέσω μετεωρολογικών και στατιστικών δεδομένων της περιοχής εγκατάστασης καθίσταται ιδιαίτερα σημαντικός.

Περιγραφή και ανάλυση υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκού με κυψέλες υδρογόνου

Το υβριδικό σύστημα που περιγράφεται στην ενότητα αυτή έχει ονομαστική ισχύ 2,24kW. Ένας ηλεκτρολύτης που συνοδεύει τη φωτοβολταϊκή συστοιχία χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου. Ο εντοπισμός του MPP επιτυγχάνεται με μια στατιστική τεχνική που εφαρμόζουμε σε δεδομένα για να ορισθεί η βέλτιστη μαθηματική έκφραση που περιγράφει τη λειτουργική σχέση μεταξύ μιας απόκρισης και μιας ή περισσοτέρων ανεξάρτητων μεταβλητών εισόδου. Όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα κι εδώ, ο ελεγκτής διασφαλίζει συνεχή παραγωγή ισχύος κατά την διάρκεια της ημέρας, αλλά και της νύχτας. Για την προστασία των ηλεκτροδίων μια νέα συσκευή αποθήκευσης υδρογόνου χρησιμοποιείται για την απομόνωση του ηλεκτρολύτη από το κελί ηλεκτρόλυσης και ο εμπλουτισμός με άζωτο για την προστασία των ηλεκτροδίων από διάβρωση.

Περιγραφή του συστήματος

Το προτεινόμενο σύστημα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Τα κύρια συστατικά μέλη του είναι: ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου Solarex τύπου MSX-56, ένα κελί ηλεκτρολύτη(Unipolar Stuart), μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου, μια συστοιχία κυψελών καυσίμου PEM και ένα 72 dc V, 31 A φορτίο.



Απομονωμένο υβριδικό pv-fc σύστημα

Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί την κατάσταση του συστήματος κι ελέγχει τη ροή ισχύος και υδρογόνου.

Φωτοβολταϊκό υποσύστημα

Το σύστημα παραγωγής ενέργειας με τη βοήθεια φωτοβολταϊκών στοιχείων, έχει 2 τύπους εφαρμογής: έναν τοπικό απομονωμένο κι έναν διασυνδεδεμένο με το δίκτυο. Συστήματα πρώτου τύπου λειτουργούν ανεξάρτητα, όπου το τοπικό φορτίο καλύπτεται από την ισχύ των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Ωστόσο, η ισχύς εξόδου εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία και την θερμοκρασία. Έτσι, ένα αποθηκευτικό σύστημα πρέπει να μεταφέρει την ζητούμενη ενέργεια σε περιπτώσεις χαμηλών επιπέδων ακτινοβολίας καθώς και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Η θερμοκρασία της επιφάνειας του πάνελ κυμαίνεται μεταξύ των 14 και 60°C κατά τη διάρκεια του έτους. Η τάση και η ένταση ρεύματος του MPP, V_m , I_m αντίστοιχα καθορίζονται βάσει:

1. της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του πάνελ.
2. της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του πάνελ.

Η καθορισμένη ένταση ρεύματος του MPP τροφοδοτείται στο μοντέλο του ηλεκτρολύτη για να υπολογιστεί η ποσότητα υδρογόνου που παράγεται. Το υδρογόνο συμπληρώνεται με την απαιτούμενη ποσότητα αέρα για την ορθή λειτουργία της κυψέλης καυσίμου.

Υποσύστημα ηλεκτρολύτη

Το κελί Unipolar Stuart είναι ένα υψηλής απόδοσης, χαμηλής συντήρησης κι αξιόπιστο κελί. Κάθε ηλεκτρόδιο ανάλογα με την πολικότητά του παράγει υδρογόνο(κάθοδος) ή οξυγόνο(άνοδος). Ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από ένα αριθμό απομονωμένων μεταξύ τους κελιών. Η τάση του κελιού υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας κυμαίνεται από 1.7-1.9V. Η κυκλοφορία του ηλεκτρολύτη διευκολύνεται από τα αέρια H₂ και O₂. Η θερμοκρασία λειτουργίας του ηλεκτρολύτη δεν ξεπερνά τους 70°C κι έτσι μειώνονται οι περιορισμοί που σχετίζονται με το υλικό. Το υδρογόνο που παράγεται είναι 99,9% καθαρό. Η αποδοτικότητα φτάνει το 100% και ο ρυθμός παραγωγής υδρογόνου είναι:

$$X_{H_2} = 5,18 \cdot e^{-6} I_e \text{ moles/s}$$

όπου I_e : η ένταση ρεύματος μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Το υδρογόνο αποθηκεύεται σε πίεση 3 bar σε μια δεξαμενή με σκοπό να τροφοδοτήσει την κυψέλη καυσίμου σε περιπτώσεις χαμηλής ηλιοφάνειας και να καλύψει την απαιτούμενη από το φορτίο ισχύ.

Υποσύστημα κυψέλης υδρογόνου

Ένα σημαντικό γεγονός επηρεάζει την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης και θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν κατά το σχεδιασμό του συστήματος. Αυτό συμβαίνει μετά τη δύση του ηλίου, όταν η ένταση ρεύματος στον ηλεκτρολύτη πέφτει στο μηδέν, που σημαίνει ότι η τάση εκεί πρέπει να διατηρείται σε συγκεκριμένα επίπεδα. Για να ξεπεραστεί αυτή η αντιξοότητα, η προτεινόμενη συσκευή αποθήκευσης έχει σχεδιαστεί με σκοπό να τον απομονώνει από το κελί ηλεκτρόλυσης και να τον εμπλουτίζει με άζωτο για να προστατεύσει τα ηλεκτρόδια από τη διάβρωση.

Η PEM συστοιχία καυσίμου χρησιμοποιεί μια μεμβράνη πολυμερούς ως ηλεκτρολύτη. Με έναν τέτοιο στερεό ηλεκτρολύτη πολυμερούς, η απώλεια ηλεκτρολύτη δεν είναι σημαντική σε ό,τι αφορά τη ζωή της συστοιχίας. Στο συγκεκριμένο σύστημα ο αέρας χρησιμοποιείται ως οξειδωτικό, η πίεση που επικρατεί στην κυψέλη είναι η ατμοσφαιρική κι η θερμοκρασία αγγίζει τους 70°C. Η πυκνότητα ρεύματος έχει επιλεγεί στα 400mA/cm². Αυτό οδηγεί στη χρήση 90 κυψελών καυσίμου προς το σχηματισμό της συστοιχίας. Σε ατμοσφαιρική πίεση, η εξίσωση του Nernst αναφέρεται στην ηλεκτρική συμπεριφορά της κυψέλης καυσίμου:

$$V_o = E_o + (RT/2F) \cdot \ln[(X_{H_2} X_{O_2})^{0,5} / X_{H_2O}]$$

Όπου:

V_o : η ανάστροφη τάση ανοιχτού κυκλώματος για κυψέλη

E_o : πρότυπη ανάστροφη τάση κυψέλης

X_i : τα moles κάθε ουσίας

Η τάση της κυψέλης υπό φορτίο επηρεάζεται από ωμικές απώλειες, την πόλωση ανόδου και καθόδου και την θερμοκρασία. Θεωρώντας αμελητέες τις απώλειες πόλωσης, η τάση του κελιού υπό φορτίο είναι:

$$V = V_o - iAR - b \cdot \log(iA)$$

Όπου:

i : η πυκνότητα ρεύματος

A : η επιφάνεια της κυψέλης

R : η ωμική αντίσταση

b : η κλίση Tafel

Η κλίση Tafel οφείλει το όνομά της στο Γερμανό χημικό Julius Tafel που διατύπωσε την ομώνυμη εξίσωση για τον ρυθμό μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης. Η κλίση Tafel

μετράται πειραματικά, μπορεί όμως και να υπολογιστεί και θεωρητικά υποθέτοντας μεταφορά ενός μόνο ηλεκτρονίου όπου:

$$kT/e < b$$

όπου το b ορίζεται ως $b = kT/ea$

με

k : σταθερά του Boltzmann

T : η απόλυτη θερμοκρασία

e : το φορτίο του ηλεκτρονίου

a : συντελεστής μεταφοράς, με τιμή μεταξύ του 0 και 1.

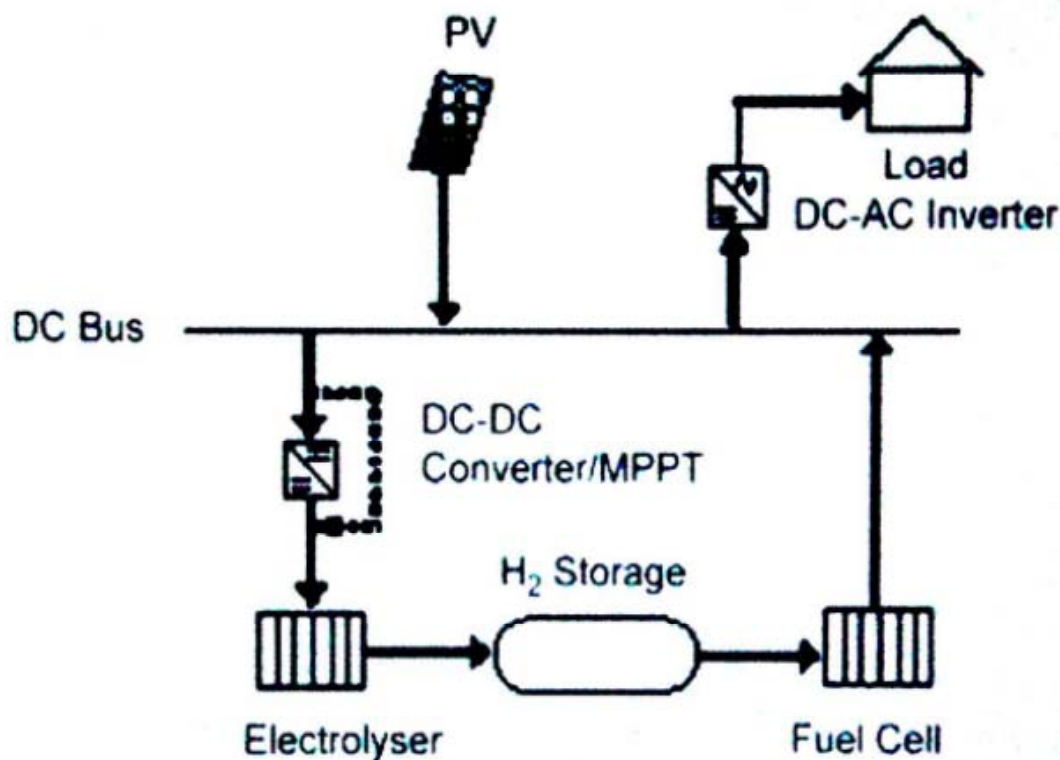
Παρατηρήσεις – Αποτελέσματα

1. ο ηλεκτρολύτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή H_2 κατά την διάρκεια που τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, παράγουν πλεονάζουσα ισχύ.
2. το παραχθέν H_2 μπορεί να αποθηκευτεί σε μια δεξαμενή για τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε περιπτώσεις ασθενούς ηλιοφάνειας ή κατά τη διάρκεια της νύχτας.
3. η αντλία που πιθανόν θα χρησιμοποιηθεί για άρδευση μπορεί να λειτουργεί τη νύχτα για ελαχιστοποίηση των απωλειών νερού.

Βέλτιστη διασύνδεση φωτοβολταϊκών συστοιχιών και PEM ηλεκτρολυτών σε υβριδικά συστήματα κατάλληλα για τροφοδότηση απομακρυσμένων περιοχών

Δεδομένων των πλεονεκτημάτων ενός υβριδικού PV-fc συστήματος, η βέλτιστη σύνδεση είναι απαραίτητη για τη μεταφορά μέγιστης ισχύος αλλά και για χαμηλότερο κόστος ανά μονάδα ισχύος. Η θεωρητική ανάλυση των απαιτούμενων συνθηκών για την απευθείας βέλτιστη σύνδεση μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας και μια συστοιχίας PEM καθώς επίσης και ο βαθμός μεταφοράς μέγιστης ενέργειας που επιτυγχάνεται με την απευθείας σύνδεση αναλύονται παρακάτω. Η στρατηγική κλειδί είναι η εύρεση του σε σειρά-παράλληλου συνδυασμού των φωτοβολταϊκών πλαισίων και των συστοιχιών ηλεκτρολύτη, από τον οποίο προκύπτει το υψηλότερο επίπεδο μεταφοράς ενέργειας για περισσότερο από ένα χρόνο. Στη συνέχεια οι θεωρητικές προβλέψεις συγκρίνονται με πραγματικά αποτελέσματα πειραμάτων που διεξήχθησαν για μια φωτοβολταϊκή συστοιχία 300W συζευγμένη με 5 συστοιχίες PEM 50W.

Σε ένα συμβατικό υβριδικό PV-fc σύστημα ένας DC μετατροπέας και μια συσκευή ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος(MPPT) χρησιμοποιούνται για να διασφαλίσουν βέλτιστη μεταφορά ισχύος μεταξύ των φωτοβολταϊκών πλαισίων και του ηλεκτρολύτη.



Συμβατικό pv-fc σύστημα για παροχή ενέργειας σε απομακρυσμένη περιοχή χρησιμοποιώντας ένα DC-DC μετατροπέα/MPPT και την εναλλακτική απευθείας σύζευξης(διακεκομμένη γραμμή)

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της απευθείας σύζευξης είναι η αποφυγή του σημαντικού κόστους του ηλεκτρονικού συστήματος σύζευξης, βελτιώνοντας έτσι το συνολικό κόστος του υβριδικού συστήματος εν συγκρίσει με τα αντίστοιχα συστήματα πετρελαίου ή ντίζελ με μπαταρίες.

Στην παρούσα περίπτωση, στο σύστημα που περιγράφεται, το σύνολο της εξόδου του φωτοβολταϊκού υποσυστήματος τροφοδοτεί τον ηλεκτρολύτη για την παραγωγή υδρογόνου και η κυψέλη καυσίμου ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του φορτίου. Μια εναλλακτική δυνατότητα, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους, θα ήταν η απευθείας τροφοδοσία του φορτίου από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία και μόνο το πλεόνασμα ενέργειας θα χρησιμοποιούνταν για την παραγωγή υδρογόνου.

Θεωρητική προσέγγιση απευθείας σύνδεσης με βέλτιστο συνδυασμό I – V χαρακτηριστικών

P-V χαρακτηριστικές

Για τον συνδυασμό ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου με έναν ηλεκτρολύτη πρώτα απ' όλα χρειάζεται να γνωρίζουμε τις I-V χαρακτηριστικές των πλαισίων. Η γενική εξίσωση που περιγράφει τη σχέση μεταξύ ρεύματος και τάσης για ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι:

$$I = I_{ph} - I_d - (V_d / R_p) = I_{ph} - I_r \cdot \exp\{[(q \cdot (V + I \cdot R_s)) / AkT] - 1\} - [(V + I \cdot R_s) / R_p]$$

Όπου:

I : η ένταση ρεύματος στην έξοδο του φωτοβολταϊκού στοιχείου

V: η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου

I_{ph} : το φωτόρευμα

I_d : το ρεύμα διόδου

I_r : το ανάστροφο ρεύμα κόρου

q: το φορτίου του ηλεκτρονίου

A: παράγοντας ιδανικότητας(για το άμορφο πυρίτιο έχει την τιμή 1, ενώ για το κρυσταλλικό έχει την τιμή 2)

k : η σταθερά του Boltzmann

T: η θερμοκρασία λειτουργίας του φωτοβολταϊκού στοιχείου σε Kelvin

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να απλουστευτεί παραλείποντας την παράλληλη αντίσταση R_p και την εν σειρά αντίσταση R_s . Αν υποθέσουμε ότι στη συστοιχία είναι συνδεδεμένα n_s φωτοβολταϊκά στοιχεία σε σειρά και n_p παράλληλα συνδεδεμένα στοιχεία η εξίσωση λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$I = n_p \cdot I_{ph} - n_p \cdot I_r \{ \exp[(q/Akt) \cdot V/n_s] - 1 \} \text{ εξίσωση ρεύματος εξόδου}$$

Χρησιμοποιώντας αυτή την εξίσωση, προκύπτουν οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου για διάφορες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας λειτουργίας. Το φωτόρευμα I_{ph} είναι ανάλογο με το επίπεδο της ηλιακής ακτινοβολίας και επίσης εξαρτάται από τη θερμοκρασία λειτουργίας σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$I_{ph}(G_{as} \cdot T) = I_{sc}(T_s) \cdot (G_a / G_{as}) \cdot [1 + K_o \cdot (T - T_s)]$$

Το φωτόρευμα θεωρείται ανεπηρέαστο από τις αλλαγές της τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Το G_a της προηγούμενης εξίσωσης είναι η ηλιακή ακτινοβολία και το T_a η θερμοκρασία λειτουργίας του στοιχείου, η οποία εξαρτάται από τα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας. Οι υπόλοιποι όροι είναι σταθεροί:

$I_{sc}(T_s)$: ρεύμα βραχυκύκλωσης σε πρότυπες συνθήκες δοκιμής(Standard Test Condition, STC)

G_{as} : πρότυπη ακτινοβολία($1000W/m^2$)

K_o : θερμοκρασιακός συντελεστής βραχυκυκλώματος

T_s : πρότυπη θερμοκρασία(25°C)

Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι περίπου ανάλογη με την ηλιακή ακτινοβολία και δίνεται από την σχέση:

$$T = T_a + C_t \cdot G_a$$

όπου η σταθερά C_t έχει την τιμή:

$$C_t = [\text{NOCT}(\text{°C}) - 20] / (800 \text{ W/m}^2)$$

Ως NOCT(°C) θεωρούμε την κανονική θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία δίνεται στα κατασκευαστικά δεδομένα. Η ισχύς στην έξοδο της συστοιχίας υπολογίζεται ως εξής:

$$P = V \cdot I = n_p \cdot I_{ph} \cdot V - n_p \cdot I_r \cdot V \cdot \{ \exp[(q/AkT) \cdot V / n_s] - 1 \}$$

Η τάση V_{max} του μεγίστου σημείου λειτουργίας(MPP) μπορεί να υπολογιστεί από την επόμενη διαφορική εξίσωση, θέτοντας $dp/dV = 0$:

$$dp/dV = n_p \cdot I_{ph} + n_p \cdot (dI_{ph}/dV) \cdot V - n_p \cdot I_r \cdot \{ \exp[(q/AkT) \cdot V / n_s] + V \cdot \exp[(q/AkT) \cdot V / n_s] \cdot (q/AkT) \cdot (1 / n_s) \} + n_s \cdot I_r$$

Για δεδομένη τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας το δημιουργούμενο φωτόρρευμα είναι σταθερό. Έτσι στο σημείο μέγιστης ισχύος:

$$\exp[(q/AkT) \cdot V_{max} / n_s] \cdot [(q/AkT) \cdot V_{max} / n_s + 1] = (I_{ph} + I_r) / I_r$$

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει η V_{max} ως συνάρτηση των I_{ph} και I_r . Άπαξ και βρεθεί η V_{max} για δεδομένη τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας εύκολα υπολογίζεται το I_{max} μέσω της προαναφερθείσας εξίσωσης για το ρεύμα εξόδου.

Η παραπάνω θεωρητική ανάλυση εφαρμόστηκε σε ηλιακά πάνελς(BP275) σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή σε STC, δηλαδή ένα μέσο ηλιακό φάσμα σε αέρια μάζα 1,5 , κανονικοποιημένη ακτινοβολία 1000W/m² και θερμοκρασία φωτοβολταϊκών στοιχείων 25°C.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2

χαρακτηριστικά του Φ/β πλαισίου

(36 cells connected in series)

Model type = BP 275

Peak power $P_{max} = 75 \text{ W}$

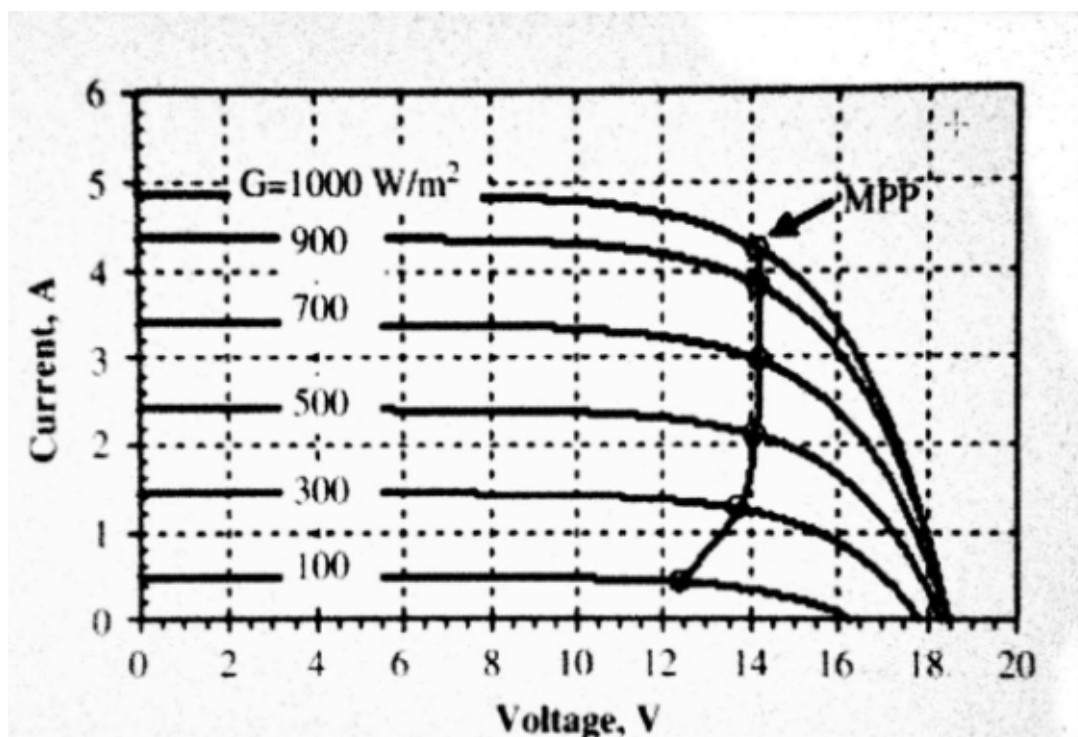
Peak power voltage $V_{max} = 17 \text{ V}$

Peak power current $I_{max} = 4.45 \text{ A}$

Short circuit current $I_{sc} = 4.75 \text{ A}$

Open circuit voltage $V_{oc} = 21.4 \text{ V}$

Βάσει των προηγούμενων εξισώσεων για τα V_{max} και I_{max} και για διάφορα επίπεδα ακτινοβολίας προκύπτει η ευθεία(σχεδόν) των σημείων μέγιστης ισχύος(MPPT), που απεικονίζεται στο γνωστό γράφημα των χαρακτηριστικών I-V. Οι χαρακτηριστικές αυτές έχουν την ίδια μορφή(αλλά διαφορετικές τιμές) για κάθε τύπο πάνελ.



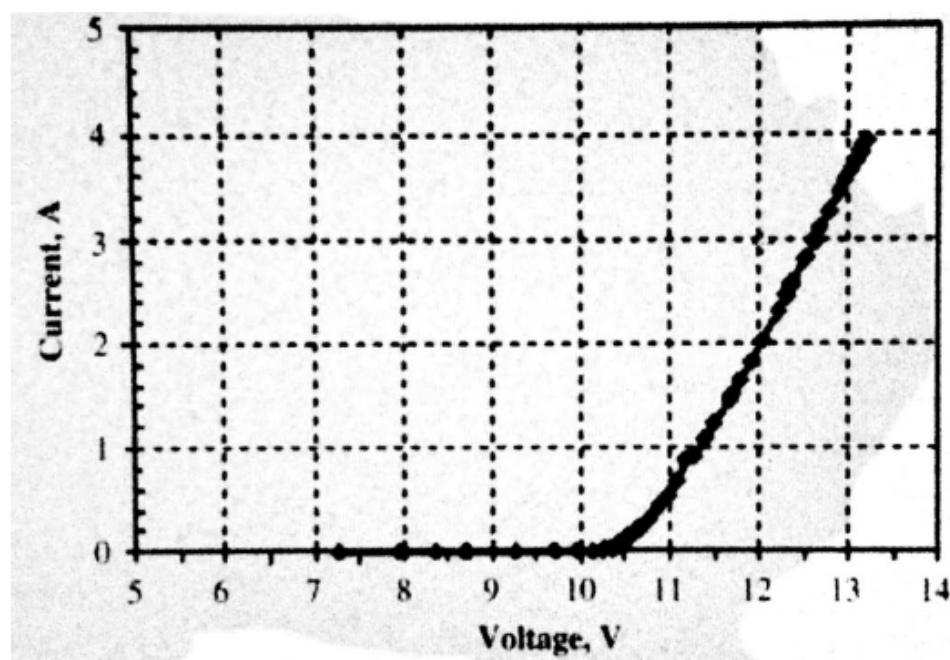
Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης φωτοβολταϊκού πλαισίου για διαφορετικά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας

Χαρακτηριστικά του PEM ηλεκτρολύτη

Για να ερευνηθεί η βέλτιστη σύζευξη του φορτίου του ηλεκτρολύτη με την έξοδο των φωτοβολταϊκών πάνελς χρησιμοποιήθηκαν h-tec 50W StaXX7 μονάδες PEM ηλεκτρολύτη κάθε μία αποτελούμενη από στοίβα 7 κυψελών PEM σε σειρά. Τα χαρακτηριστικά αυτού του τύπου ηλεκτρολύτη δίνονται στον επόμενο πίνακα:

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.3
<u>χαρακτηριστικά του PEM ηλεκτρολύτη</u>
<u>Model type=StaXX7 (h-tec)</u>
<u>Electrode area=7 cells of 16 cm² each</u>
Power = 50W at 14 V DC
Permissible voltage = 10.5-14.0 V DC
Permissible current = 0-4.0 A DC
H ₂ production = 230 cm ³ /min

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται η πειραματική χαρακτηριστική ρεύματος τάσης για αυτό το είδος ηλεκτρολύτη



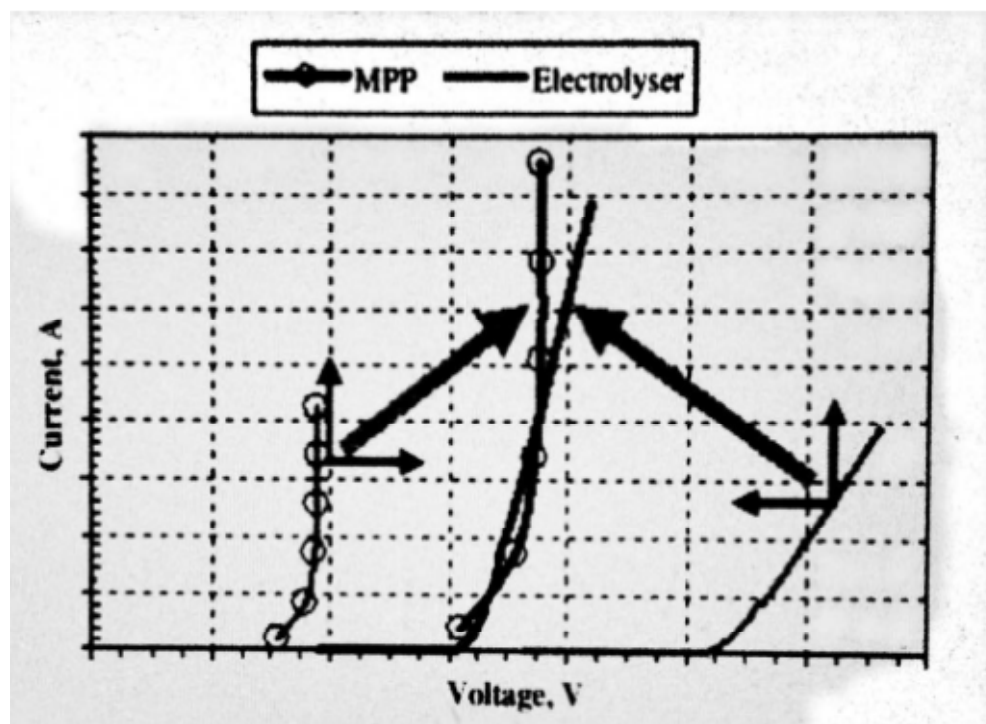
Μετρηθείσα I-V χαρακτηριστική του PEM ηλεκτρολύτη

Όπως συμβαίνει και με τα φωτοβολταϊκά πάνελς έτσι και για διαφορετικούς PEM ηλεκτρολύτες οι I-V χαρακτηριστικές έχουν γενικά παρόμοια μορφή, αλλά διαφορετικές τιμές, δηλαδή η ένταση ρεύματος είναι σχεδόν μηδέν μέχρι να φτάσουμε σε μια συγκεκριμένη τάση μετά την οποία αυξάνει σχεδόν γραμμικά.

Βέλτιστος συνδυασμός φωτοβολταϊκής συστοιχίας με PEM ηλεκτρολύτη

Για να μεγιστοποιηθεί η μεταφορά ενέργειας μεταξύ μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας απευθείας συζευγμένης με έναν PEM ηλεκτρολύτη, ιδανικά θα πρέπει η I-V χαρακτηριστική του ηλεκτρολύτη να ακολουθεί όσο το δυνατόν πιο κοντά την ευθεία των MPP της φωτοβολταϊκής συστοιχίας.

Το στοιχείο κλειδί της στρατηγικής που προτείνεται είναι οι ποικίλοι εναλλακτικοί τρόποι σύνδεσης εν σειρά/ παράλληλα για κάθε ξεχωριστό κελί τόσο της φωτοβολταϊκής συστοιχίας όσο και του PEM ηλεκτρολύτη έτσι ώστε οι 2 καμπύλες να προκύψουν όσο γίνεται πιο κοντά. Για παράδειγμα η MPP καμπύλη μπορεί να μετακινηθεί οριζόντια στον άξονα των τάσεων χωρίς αλλαγή στον κάθετο άξονα προσθέτοντας φωτοβολταϊκά στοιχεία εν σειρά στη συστοιχία. Ή η MPP γραμμή επεκτείνεται στον κάθετο άξονα των ρευμάτων προσθέτοντας φωτοβολταϊκά στοιχεία παράλληλα. Αντίστοιχη μετακίνηση συμβαίνει και στην καμπύλη λειτουργίας του PEM ηλεκτρολύτη, δηλαδή μετακίνηση οριζόντια προσθέτοντας κελιά σε σειρά και επέκταση κάθετα προσθέτοντας κελιά παράλληλα. Με αυτές τις αλλαγές και στα 2 υποσυστήματα είναι δυνατόν να πετύχουμε ταύτιση της I-V χαρακτηριστικής του ηλεκτρολύτη με την ευθεία των MPP της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, όπως φαίνεται στο σχήμα που έπεται.



Προσπάθεια ταύτισης της ευθείας των μεγίστων σημείων ισχύος του φωτοβολταϊκού πλαισίου με την I-V χαρακτηριστική PEM ηλεκτρολύτη αλλάζοντας τους σειριακούς-παράλληλους συνδυασμούς τόσο στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο όσο και στον ηλεκτρολύτη

Ιστόγραμμα συχνότητας ηλιακών δεδομένων

Η διαφορά στην μεταφορά ενέργειας μεταξύ μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας και μιας συστοιχίας PEM ηλεκτρολυτών σε συνθήκες MPP και σε πραγματικές συνθήκες ποικίλει ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία. Έτσι για να υπολογιστεί η συνολική διαφορά σε ετήσια βάση είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε τον αριθμό των ωρών ανά έτος κατά τις οποίες η ηλιακή ακτινοβολία βρίσκεται εντός δεδομένων επιπέδων. Ένα σύνολο δεδομένων για τη μέση ωριαία ακτινοβολία σε μια οριζόντια επιφάνεια για το έτος το 2005 στο αεροδρόμιο της Μελβούρνης διατίθενται από την αυστραλιανή κυβέρνηση. Αυτά τα δεδομένα μετατρέπονται για μια επιφάνεια στραμμένη προς βορρά 40° από τον οριζόντιο άξονα διότι αυτή είναι η βέλτιστη γωνία με βάση το γεωγραφικό πλάτος της Μελβούρνης. Η εξίσωση που μας εξυπηρετεί στην μετατροπή των δεδομένων σε ολική ηλιακή ακτινοβολία κεκλιμένη επιφάνειας $G_{G,tilt}$ δίνεται από τη σχέση:

$$G_{G,tilt} = G_{div,tilt} + G_{diff,tilt} + G_{ref,tilt}$$

Όπου:

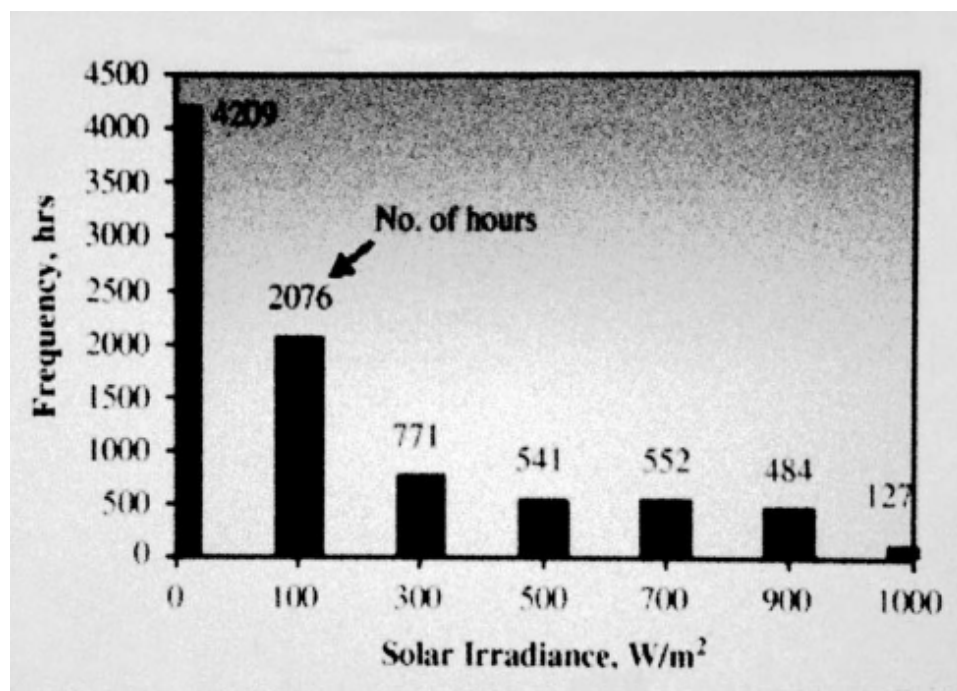
$G_{div,tilt}$: η απευθείας ηλιακή ακτινοβολία στην κεκλιμένη

$G_{diff,tilt}$: επιφάνεια η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία

$G_{ref,tilt}$: η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία

Οι προαναφερθείσες επιμέρους συνιστώσες υπολογίζονται από γνωστές σχέσεις.

Στο επόμενο ιστόγραμμα καταγράφεται το σύνολο των ωρών στη διάρκεια των οποίων η ηλιακή ακτινοβολία παίρνει ορισμένες τιμές. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της συνολικής διαθέσιμης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πάνελς και το ποσό αυτής που μπορεί να μεταφερθεί απευθείας στον ηλεκτρολύτη. Έτσι, μπορούν να ευρεθούν οι ενεργειακές απώλειες από την απευθείας ζεύξη.



Ιστόγραμμα συχνότητας ηλιακής ακτινοβολίας(αεροδρόμιο Μεμβούρης 2005)

Εφαρμογή της θεωρητικής ανάλυσης για την εκτίμηση των ενεργειακών απωλειών από την απευθείας ζεύξη

Βελτιώνοντας τη σύζευξη μεταξύ φωτοβολταϊκής συστοιχίας και PEM ηλεκτρολύτη

Η μέγιστη χρήση της ισχύος εξόδου του φωτοβολταϊκού πλαισίου από τον ηλεκτρολύτη είναι απαραίτητη για να καταστήσουμε ένα pv-fc σύστημα πιο αποτελεσματικό και λιγότερο ακριβό. Στα περισσότερα σύγχρονα τέτοιου είδους συστήματα, μια συσκευή ελέγχου ισχύος και διατήρησης τάσης τοποθετείται συνήθως μεταξύ του φωτοβολταϊκού πλαισίου και του ηλεκτρολύτη. Η βέλτιστη συμπεριφορά και το ελάχιστον ανά μονάδα κόστος πραγματοποιείται λειτουργώντας τον ηλεκτρολύτη στο MPP των φωτοβολταϊκών πάνελς. Είναι σαφές, πως αν η βέλτιστη σύνδεση μπορούσε να επιτευχθεί χωρίς τη χρήση παρεμβαίνοντος εξοπλισμού, όπως DC-DC μετατροπέας και ελεγκτής ισχύος, τα pv-fc συστήματα θα γίνονταν πιο ελκυστικά από οικονομικής άποψης αφού το κόστος των ηλεκτρονικών που προαναφέραμε θα μπορούσε να αποφευχθεί. Έτσι θα υπολογίσουμε τώρα πόσο

κοντά στη βέλτιστη σύνδεση μπορούμε να φτάσουμε με την κατάλληλη απευθείας ζεύξη, λειτουργώντας το φωτοβολταϊκό πλαίσιο στο MPP.

Το ποσό της απώλειας ισχύος ΔP_j εξαιτίας της απευθείας σύνδεσης της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με τον PEM ηλεκτρολύτη σε σχέση με το MPP δίνεται από την επόμενη σχέση:

$$\Delta P_j = P_j^{\text{mPV}} - P_j^{\text{EL}}$$

Όπου:

$P_{j\text{mPV}}$: είναι το MPP της εξόδου του φωτοβολταϊκού σε ηλιακή ακτινοβολία $G = G_j$

$P_{j\text{EL}}$: είναι η ισχύς στην έξοδο του ηλεκτρολύτη προερχόμενη από τα φωτοβολταϊκά πάνελς σε $G = G_j$

$j : 1,2,3,4,5,\dots,N$ αναφέρεται στα διαφορετικά επίπεδα ηλιακής ακτινοβολίας

Με αυτόν τον τρόπο, για έναν ολόκληρο χρόνο οι συνολικές ηλεκτρικές ενεργειακές απώλειες εν συγκρίσει με τη μέγιστη μεταφορά ενέργειας είναι:

$$\Delta E = \sum_{j=1}^N (P_j^{\text{mPV}} - P_j^{\text{EL}}) \cdot f_j$$

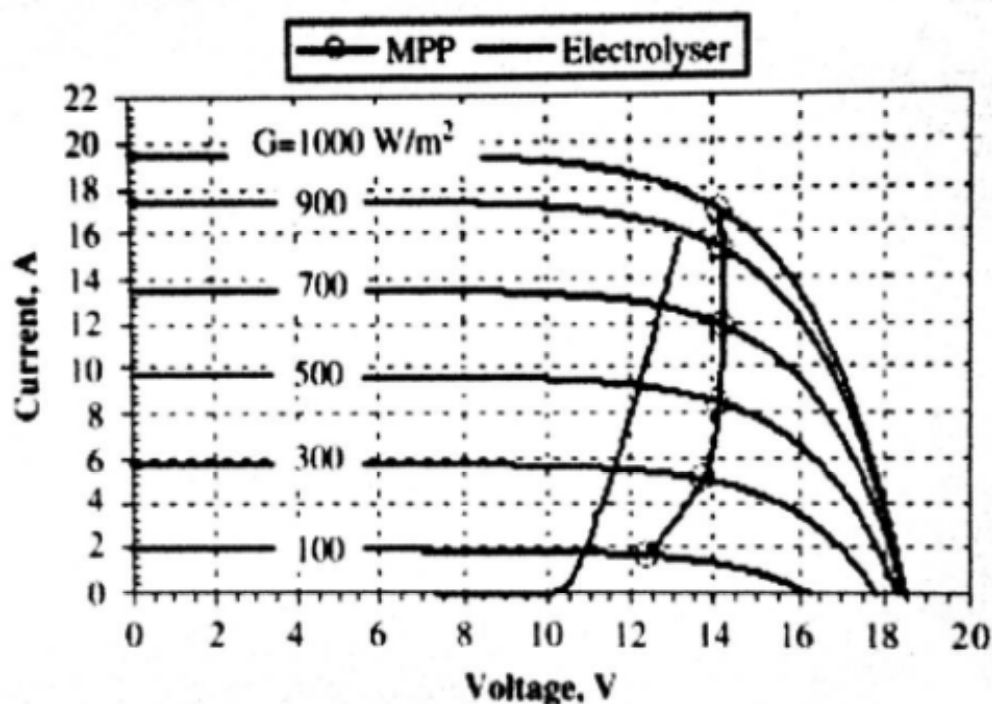
Εδώ f_j είναι ο αριθμός των ωρών μέσα σε ένα χρόνο κατά τις οποίες η ακτινοβολία βρίσκεται μεταξύ $(G_j - 0,5\Delta G)$ και $(G_j + 0,5\Delta G)$. Το $\Delta G = 200 \text{ W/m}^2$ για $j=2,\dots,6$. Το f_1 είναι ο αριθμός των ωρών κατά τις οποίες το $G=0 \text{ W/m}^2$ ενώ το f_7 οι ώρες όπου $G \geq 1000 \text{ W/m}^2$ (βλέπε ιστόγραμμα παραπάνω).

Έτσι το ποσοστό των ετήσιων απωλειών ενέργειας $\Delta E\%$ εν συγκρίσει με τον τέλειο συνδυασμό βασισμένο στο MPP είναι:

$$\Delta E\% = \{ \sum_{j=1}^N (P_j^{\text{mPV}} - P_j^{\text{EL}}) \cdot f_j \} \cdot 100 / \{ \sum_{j=1}^N (P_j^{\text{mPV}} \cdot f_j) \}$$

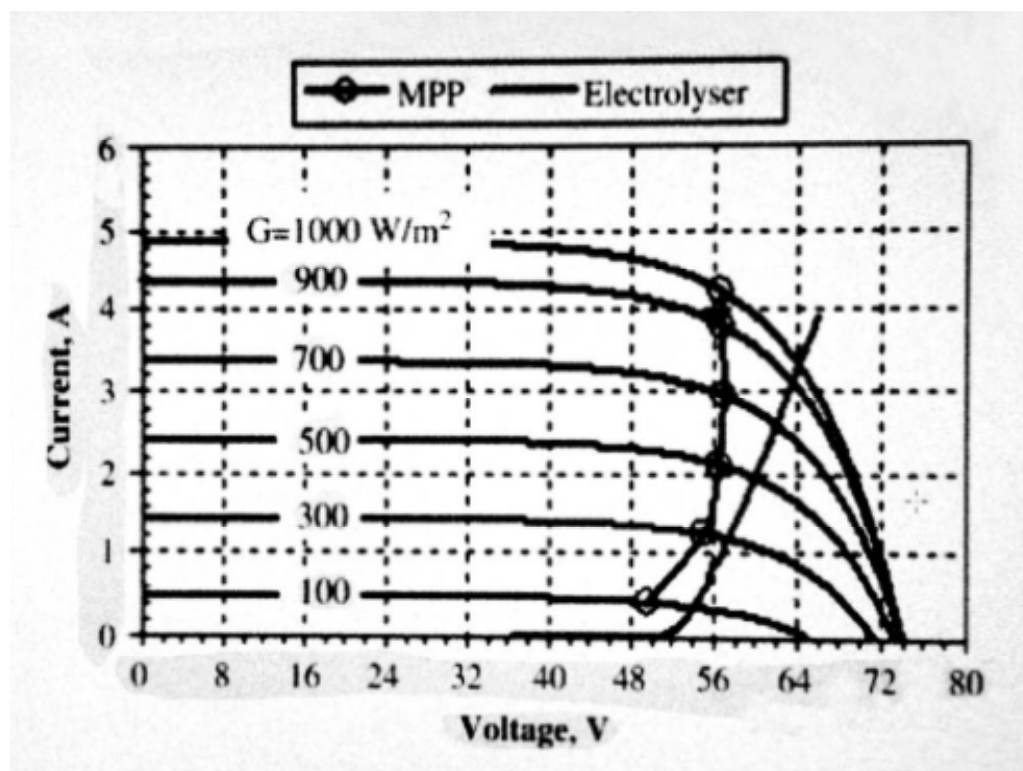
Τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια παράλληλα – τέσσερις συστοιχίες ηλεκτρολύτη παράλληλα

Όταν τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα παράλληλα είναι απευθείας συζευγμένα με τέσσερις συνδεδεμένα παράλληλα συστοιχίες ηλεκτρολύτη, η γραμμή λειτουργίας του ηλεκτρολύτη φαίνεται παρακάτω:



Τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα παράλληλα είναι απευθείας συζευγμένα με τέσσερις συνδεδεμένα παράλληλες συστοιχίες ηλεκτρολύτη

Αυτός ο συνδυασμός δίνει υψηλό επίπεδο μεταφοράς ενέργειας όταν η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 700W/m² ή λιγότερη. Στην περίπτωση αυτή περισσότερο από 91% της διαθέσιμης ισχύος μεταφέρεται στον ηλεκτρολύτη για τιμές της ακτινοβολίας από 100 έως 700 W/m². Όμως για τιμές πάνω από 900W/m² και πάνω τα φωτοβολταϊκά πάνελς θα μεταφέρουν ισχύ μεγαλύτερη από την ενδεικνυόμενη τιμή για τον ηλεκτρολύτη, γεγονός που μπορεί να βλάψει τον ηλεκτρολύτη.



Τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε σειρά – πέντε συστοιχίες ηλεκτρολύτη σε σειρά

Ένα άλλο παράδειγμα αποτελεί συνδυασμός αυτός με τον οποίον το 94% της διαθέσιμης ισχύος μεταφέρεται στη συστοιχία ηλεκτρολυτών όταν τα επίπεδα ακτινοβολίας κυμαίνονται μεταξύ των 100 και 700 W/m². Κι όπως δείχνει το επόμενο διάγραμμα η ευθεία λειτουργίας του ηλεκτρολύτη περνά πολύ κοντά από την γραμμή των MPP της φωτοβολταϊκής συστοιχίας για ακτινοβολία 300W/m².

Τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα εν σειρά είναι απευθείας συζευγμένα με πέντε συνδεδεμένες εν σειρά συστοιχίες ηλεκτρολύτη

Βέλτιστος συνδυασμός

Για να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός, ποικίλοι εν σειρά/παράλληλοι συνδυασμοί φωτοβολταϊκής συστοιχίας και ηλεκτρολύτη ερευνήθηκαν (παραπάνω πίνακας). Για τον κάθε συνδυασμό παρουσιάστηκαν τα ποσοστά της διαθέσιμης ισχύς από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία που μεταφέρεται στον ηλεκτρολύτη για διάφορες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς επίσης και τις ετήσιες ενεργειακές απώλειες οφειλόμενες στην απευθείας σύνδεση.

Για το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πλαίσιο(BP275) και τη συστοιχία του ηλεκτρολύτη(StarXX7) ο βέλτιστος συνδυασμός είναι 4 φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά(δίνοντας 300W συνολικά) απευθείας συζευγμένα με πέντε συστοιχίες ηλεκτρολυτών εν σειρά(συνολικά 250W). Το ποσοστό των συνολικών ετήσιων απωλειών συγκρινόμενο με την κατάσταση MPP είναι μόνο 5,3%. Αυτό το

αποτέλεσμα υπερτερεί κι αν συγκριθεί με ηλεκτρονικά συστήματα MPPT όπου οι ενεργειακές απώλειες είναι γύρω στα 10%.

Παρατηρήσεις

Στην παρούσα φάση τα υβριδικά συστήματα φωτοβολταϊκών-υδρογόνου για την τροφοδότηση απομακρυσμένων περιοχών δεν είναι ανταγωνιστικά από οικονομικής άποψης σε σχέση με τα συμβατικά. Αν τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να σχεδιαστούν με απευθείας σύζευξη της ενεργειακής πηγής με τον ηλεκτρολύτη αποφεύγεται το κόστος των ηλεκτρονικών που χρησιμοποιούνται για την μετατροπή της τάσης και την ανίχνευση του MPP. Έτσι, οι προοπτικές να γίνουν πιο ανταγωνιστικά συστήματα που συνδυάζουν την τεχνολογία του υδρογόνου με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ενισχύονται.

4.6.4 ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΒΟΛΙΚΩΝ ΚΑΤΟΠΤΡΩΝ)

Ηλιοθερμική Τεχνολογία Ηλεκτροπαραγωγής-Μια νέα μορφή αξιοποίησης του ηλιακού δυναμικού

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια ραγδαία ανάπτυξη στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εντατικοποιείται η εκμετάλλευση των πηγών αυτών με σκοπό την αποτροπή της επαπειλούμενης κλιματικής αλλαγής, η οποία προκαλείται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Η κυριότερη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς στον τομέα αυτόν τα περιθώρια μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι πολύ μεγάλα. Μια τέτοια πηγή ενέργειας με τεράστια αποθέματα είναι ο ήλιος. Η γη δέχεται περισσότερη ενέργεια από τον ήλιο σε μια ώρα από όσο καταναλώνει ο πληθυσμός της σε έναν ολόκληρο χρόνο. Παρόλα αυτά, η ηλιακή ενέργεια καταλαμβάνει στις μέρες μας ένα πολύ μικρό ποσοστό στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα. Όπως συνεπάγεται από τα παραπάνω, η μαζική εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας είναι μονόδρομος και η ευρεία ενσωμάτωσή της στο ηλεκτρικό δίκτυο θα αποτελέσει ένα σημαντικό βήμα στον αγώνα για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και την αποφυγή της κλιματικής αλλαγής.

Μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που κάνει χρήση της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι η ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής (CSP-Concentrating Solar Power), η οποία βρίσκει εφαρμογή στους ηλιοθερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής αποτελούν μία νέα μορφή αξιοποίησης του ηλιακού δυναμικού για ηλεκτροπαραγωγή, μετά τα φωτοβολταϊκά. Ενώ μέχρι πρόσφατα τα φωτοβολταϊκά συστήματα ήταν απόλυτα κυρίαρχα στον τομέα της ηλιακής ενέργειας,

τα τελευταία χρόνια η ηλιοθερμική τεχνολογία έχει συγκεντρώσει εκτενή έρευνα γνωρίζοντας μεγάλη ανάπτυξη.

Η γενική αρχή λειτουργίας των ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής είναι η συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από κατάλληλα κάτοπτρα προς παραγωγή υψηλών θερμοκρασιών και η εκμετάλλευση της συλλεγόμενης θερμότητας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Βέβαια, η ιδέα της συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας για τη δημιουργία υψηλών θερμοκρασιών με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι γνωστή εδώ και πάνω από έναν αιώνα. Για πρώτη φορά όμως αξιοποιήθηκε εμπορικά στις ΗΠΑ μετά την πετρελαική κρίση της δεκαετίας του '70. Τη δεκαετία του 1980 κατασκευάστηκε το SEGS (Solar Electric Generating System), ο πρώτος ηλιοθερμικός σταθμός μεγάλης κλίμακας στην έρημο Mojave της Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Στη συνέχεια ακολούθησε μια μακρά περίοδος χωρίς να κατασκευαστούν νέοι σταθμοί. Κύριοι λόγοι ήταν τόσο η κυριαρχία στην αγορά των φθηνών συμβατικών καυσίμων, όπως το φυσικό αέριο, όσο και το υψηλό κόστος της ηλιοθερμικής τεχνολογίας, κάτι που έκανε αυτές τις επενδύσεις λιγότερο ελκυστικές. Όμως, με τη συνεχή έρευνα στην οποία βοήθησε και η εμπειρία από τη λειτουργία του SEGS οι προοπτικές της τεχνολογίας βελτιώνονταν συνεχώς. Είναι χαρακτηριστικό ότι το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των σταθμών του SEGS έχει μειωθεί τουλάχιστον κατά ένα τρίτο από τα πρώτα χρόνια λειτουργίας τους. Επιπρόσθετα, η βιομηχανία παραγωγής των συστατικών μερών αυτών των σταθμών αποκτούσε καλύτερη τεχνογνωσία παράγοντας διαρκώς βελτιωμένα και φθηνότερα εξαρτήματα. Ταυτόχρονα, η υπερθέρμανση του πλανήτη, η οποία στο μεγαλύτερο βαθμό οφείλεται στην καύση ορυκτών καυσίμων, σε συνδυασμό με τις συχνές διακυμάνσεις στις τιμές των ορυκτών καυσίμων επανέφερε το ενδιαφέρον και κατέστησε ελκυστικές τις επενδύσεις στην ηλιοθερμική τεχνολογία. Πλέον, τα τελευταία χρόνια, έχει καταστεί υπό προϋποθέσεις μια οικονομικά βιώσιμη τεχνολογία, η οποία δημιουργεί μεγάλες προσδοκίες. Αρκετοί εμπορικοί σταθμοί είναι υπό λειτουργία ενώ ακόμη περισσότεροι βρίσκονται στο στάδιο της κατασκευής ή του προγραμματισμού. Το πλέον θετικό είναι το γεγονός πως τέτοια έργα εξασφαλίζουν επαρκή χρηματοδότηση και έλκουν μεγάλες επενδύσεις. Σύμφωνα με ένα αισιόδοξο σενάριο, το οποίο προϋποθέτει μεγάλη ανάπτυξη αυτής της βιομηχανίας και υψηλά επίπεδα ενεργειακής απόδοσης, κάτι που είναι εφικτό, οι ηλιοθερμικοί σταθμοί θα είναι σε θέση να παράγουν το 7% των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών μέχρι το 2030 και το 25% μέχρι το 2050.

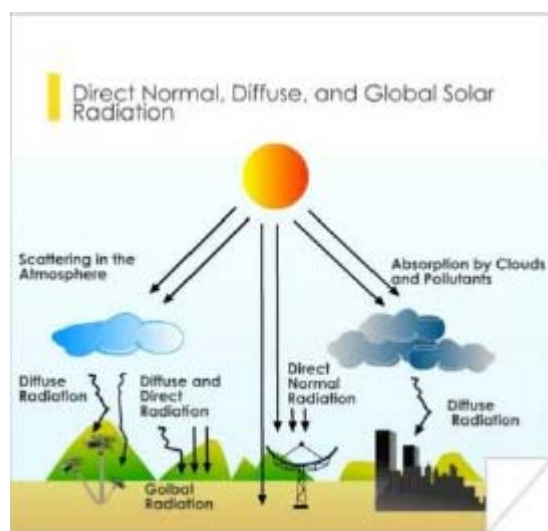
Ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής

Γενικά χαρακτηριστικά της ηλιοθερμικής τεχνολογίας ηλεκτροπαραγωγής

Σε γενικές γραμμές, οι ηλιοθερμικοί σταθμοί παράγουν θερμότητα και εν συνεχεία ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας εκατοντάδες κατάλληλα κάτοπτρα για να συγκεντρώσουν τις ακτίνες του ήλιου σε σημεία όπου αναπτύσσεται πολύ υψηλή

θερμοκρασία, συνήθως μεταξύ 400οC και 1000οC. Η λειτουργία των ηλιοθερμικών σταθμών είναι απλή. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται από κάτοπτρα και αποδίδεται σε ένα μέσο μεταφοράς θερμότητας όπως συνθετικό λάδι, υγροποιημένο άλας, μείγμα νερού-ατμού, αέρας κ.α. Τα μέσα αυτά οδηγούνται στη συνέχεια σε εναλλάκτες θερμότητας αποδίδοντας την ενέργεια που έχει απορροφηθεί σε μείγμα νερού-ατμού προς παραγωγή ατμού. Όταν ως μέσο μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται το μείγμα νερού-ατμού, τότε αυτό οδηγείται κατευθείαν στον στρόβιλο και δεν παρεμβάλλεται εναλλάκτης. Εάν ο ηλιοθερμικός σταθμός αποτελείται από μηχανές Stirling (θα εξεταστούν αναλυτικά παρακάτω), τότε κάποιο αέριο παίζει το ρόλο του μέσου μεταφοράς θερμότητας και οδηγείται κατευθείαν στους κυλίνδρους της μηχανής, προς παραγωγή μηχανικής ενέργειας.

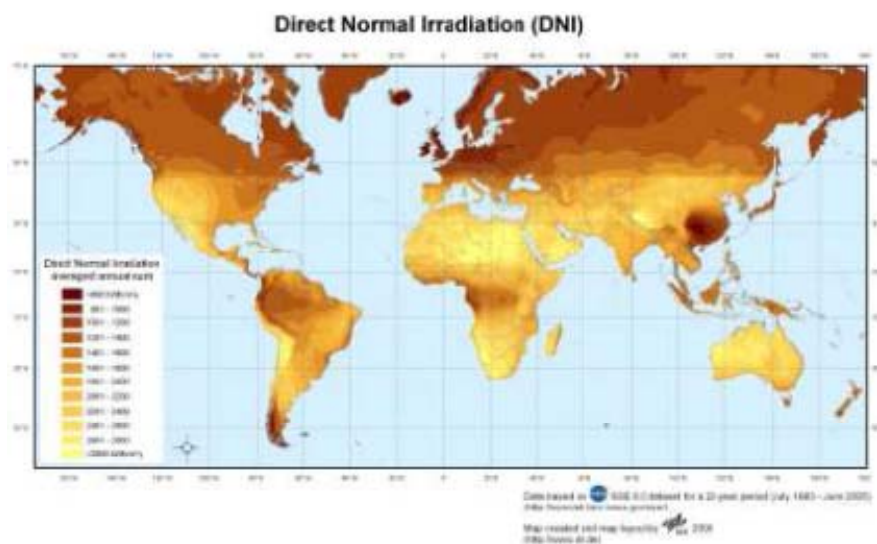
Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της ηλιοθερμικής τεχνολογίας είναι ότι, σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα που χρησιμοποιούν και τη διάχυτη ακτινοβολία για να παράγουν ηλεκτρισμό, τα ηλιοθερμικά συστήματα χρησιμοποιούν μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία καθώς η διάχυτη δεν μπορεί να συγκεντρωθεί. Αυτή η ηλιακή ακτινοβολία είναι η συνιστώσα του ηλιακού φωτός που δεν διαχέεται από σύννεφα, αέρια και σκόνες στην ατμόσφαιρα και φτάνει στην επιφάνεια της γης απευθείας από τον ήλιο σε δέσμες παράλληλων ακτίνων.



Σχήμα 2.1 Άμεση, διάχυτη και ολική ηλιακή ακτινοβολία [4]

Έτσι, είναι προφανές ότι η κατασκευή ενός ηλιοθερμικού σταθμού θα αποτελεί μια αποδοτική και συμφέρουσα λύση για τις χώρες με μεγάλη ηλιοφάνεια και ειδικά με υψηλό δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (Direct Normal Irradiation- DNI). Το δυναμικό DNI σε κάθε περιοχή του πλανήτη φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. Κατάλληλες περιοχές είναι αυτές οι οποίες δέχονται τουλάχιστον 1650kWh άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας ανά τετραγωνικό μέτρο ετησίως. Οι ιδανικότερες τοποθεσίες για την εγκατάσταση ηλιοθερμικών σταθμών δέχονται περισσότερες από 2000kWh/m² ετησίως. Συνεπώς, κατάλληλες τοποθεσίες για εκμετάλλευση αυτής της τεχνολογίας είναι οι μεσογειακές χώρες της Ευρώπης, οι νοτιοδυτικές περιοχές των

ΗΠΑ, η κεντρική και νότια Αμερική, η Βόρεια και Νότια Αφρική, η Εγγύς και η Μέση Ανατολή, το Ιράν, οι ερημικές πεδιάδες της Ινδίας, το Πακιστάν, η πρώην Σοβιετική Ένωση, η Κίνα και η Αυστραλία και αποτελούν τη λεγόμενη «ηλιακή ζώνη» (sun belt). Για την Ελλάδα ειδικότερα οι περιοχές που Ηλιοθερμική τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής μπορούν να φιλοξενήσουν ανάλογα έργα ΑΠΕ με υψηλή ενεργειακή απόδοση είναι οι περιοχές της Κρήτης, της Ρόδου και της Νοτιοανατολικής Πελοποννήσου.



Σχήμα 2.2 Δυναμικό άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας παγκοσμίως

Βέβαια, το ηλιακό δυναμικό κάποιων ιδιαίτερα ηλιόλουστων περιοχών ξεπερνά κατά πολύ την τοπική ζήτηση. Έτσι, θα υπάρχει η δυνατότητα, εφόσον κάτι τέτοιο κρίνεται οικονομικά συμφέρον, να εξάγεται ενέργεια από σταθμούς που βρίσκονται στις χώρες αυτές προς άλλες χώρες με υψηλή κατανάλωση ενέργειας αλλά χαμηλό δυναμικό DNI. Εάν οι χώρες της ηλιακής ζώνης εκμεταλλευτούν την ηλιακή τους ενέργεια κατά αυτόν τον τρόπο, θα συνεισφέρουν τα μέγιστα στην προστασία του παγκόσμιου κλίματος. Ήδη, έχει αναπτυχθεί μια διεθνής πρωτοβουλία, το πρόγραμμα DESERTEC, γενική ιδέα του οποίου είναι η ικανοποίηση μεγάλου ποσοστού της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από την αξιοποίηση της άφθονης ηλιακής ενέργειας στις ερήμους του πλανήτη. Χώρες όπως η Γερμανία ήδη εξετάζουν σοβαρά το ενδεχόμενο να εισάγουν «ηλιακή» ηλεκτρική ενέργεια από τη βόρεια Αφρική και τη νότια Ευρώπη για να κάνουν τον ενεργειακό τους τομέα περισσότερο βιώσιμο. Βεβαίως, για κάθε νέο αναπτυξιακό έργο η ικανοποίηση της εγχώριας ζήτησης θα είναι η πρώτη προτεραιότητα.

Υπάρχουν διάφορα σχήματα κατόπτρων που χρησιμοποιούνται στους ηλιοθερμικούς σταθμούς για τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας, όπως και διάφορες εκδοχές στη διαδικασία παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, όμως όλοι οι ηλιοθερμικοί σταθμοί λειτουργούν με την ίδια βασική αρχή. Η ηλιακή ενέργεια που συλλέγεται μετατρέπεται σε θερμική και, εν συνεχεία, σε ηλεκτρική ενέργεια. Η εν λόγω τεχνολογία ενδείκνυται για μεγάλης κλίμακας παραγωγή ηλεκτρισμού και, έτσι, το

τυπικό μέγεθος των σταθμών αυτών είναι μεταξύ 50 και 280 MW, με προοπτική να κατασκευαστούν και ακόμη μεγαλύτεροι σταθμοί.

Τα βασικά επιμέρους τμήματα από τα οποία αποτελείται ένας ηλιοθερμικός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι:

- οι συλλέκτες ή συγκεντρωτήρες (collectors)
- ο δέκτης (receiver)
- το μέσο μεταφοράς ή/και αποθήκευσης της θερμότητας, και
- το σύστημα μετατροπής της ενέργειας (power conversion system).

Οι συλλέκτες με το δέκτη και το μέσο μεταφοράς της θερμότητας απαρτίζουν το *ηλιακό πεδίο* του σταθμού, όπου γίνεται η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας και η συλλογή της θερμικής ενέργειας. Το σύστημα μετατροπής της ενέργειας είναι ένας κύκλος ισχύος όπου παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια, ενώ περιέχει και το σύστημα ψύξης του κύκλου.

Διακρίνονται 4 κύριες τεχνολογίες ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής:

- a. Η τεχνολογία παραβολικών κατόπτρων (Parabolic Trough systems),
- b. Η τεχνολογία ηλιακού πύργου, ή αλλιώς κεντρικού δέκτη (Power Tower/Central Receiver systems),
- c. Η τεχνολογία παραβολικών δίσκων (Parabolic Dish systems),
- d. Η τεχνολογία κατόπτρων Fresnel (Linear Fresnel Reflector systems).

Σταθμός ηλιοθερμικής τεχνολογίας είναι και ο σταθμός τεχνολογίας «καμινάδας». Διαφοροποιείται από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες ως προς το ότι δεν γίνεται συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε μέσο μεταφοράς θερμότητας, αλλά γίνεται εκμετάλλευση της θερμότητας για θέρμανση αέρα και κίνηση αυτού μέσω της καμινάδας/πύργου. Στην παρούσα εργασία θα μελετήσουμε τις τεχνολογίες συγκέντρωσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Με βάση τις παραπάνω τεχνολογίες γίνεται και η κυριότερη διάκριση των ηλιοθερμικών σταθμών.

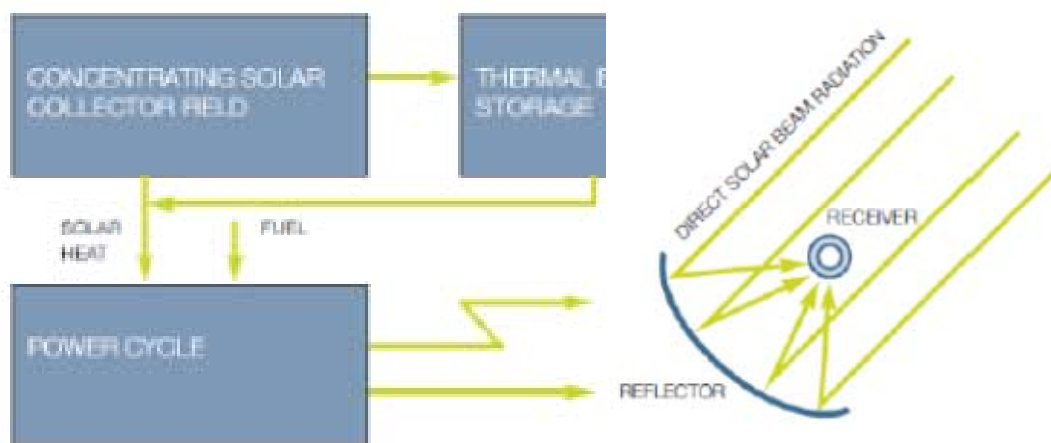
Εκτός της κλασικής λειτουργίας όπου η μόνη πηγή ενέργειας είναι η ηλιακή ενέργεια (solar-only solar thermal power plants) υπάρχει και η δυνατότητα *υβριδικής λειτουργίας* των ηλιοθερμικών σταθμών, όπου χρησιμοποιείται η καύση ορυκτών καυσίμων (π.χ. φυσικό αέριο) όταν η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί. Ανάλογα με το ποσοστό διεύθυνσης του συμβατικού καυσίμου στην παραγωγή του σταθμού γίνεται λόγος για βοηθητική ή κύρια λειτουργία του εγκατεστημένου συμβατικού λέβητα. Μια ιδιαίτερα σημαντική λειτουργία, η οποία εφαρμόζεται κυρίως στους σταθμούς που εκμεταλλεύονται αποκλειστικά την ηλιακή ενέργεια (solar-only) ή περιλαμβάνουν και βοηθητική λειτουργία συμβατικού λέβητα, είναι η *αποθήκευση θερμικής ενέργειας*, η οποία επεκτείνει τον ετήσιο χρόνο λειτουργίας του σταθμού (σε πολλές περιπτώσεις κατά 100%) αυξάνοντας κατακόρυφα το συντελεστή

χρησιμοποίησης. Με την υπάρχουσα τεχνολογία, η αποθήκευση θερμότητας είναι πολύ φθηνότερη και πιο αποδοτική από την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και, καθώς, οι ηλιοθερμικοί σταθμοί παράγουν σε πρώτο στάδιο θερμότητα, η αποθήκευση της ενέργειας σε αυτή τη μορφή είναι μια ιδανική λύση. Οι δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις, δηλαδή οι σταθμοί με υβριδική λειτουργία και οι αμιγώς ηλιοθερμικοί σταθμοί με αποθήκευση θερμικής ενέργειας αποτελούν τις δύο κυρίαρχες τάσεις για την μεγάλης κλίμακας ηλεκτροπαραγωγή με την εν λόγω τεχνολογία. Κι αυτό διότι εγγυώνται σταθερή ισχύ χωρίς διακοπές και κατανομημένη παροχή ισχύος ανάλογα με τη ζήτηση, δηλαδή αυξάνουν την αξιοπιστία του συστήματος. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι είναι κατάλληλοι για την κάλυψη τόσο του φορτίου βάσης όσο και της αιχμής.

Τα κυριότερα συγκριτικά πλεονεκτήματα που παρέχουν οι ηλιοθερμικοί σταθμοί έναντι άλλων υφιστάμενων συστημάτων ΑΠΕ (π.χ. φωτοβολταϊκά) είναι η δυνατότητα απλής και οικονομικής αποθήκευσης της ενέργειας καθώς και η δυνατότητα περιορισμού αλλά και χρονικής κατανομής της ισχύος εξόδου τους, παρέχοντας ευελιξία στο Διαχειριστή του Συστήματος.

Ανασκόπηση των κύριων τεχνολογιών ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής.

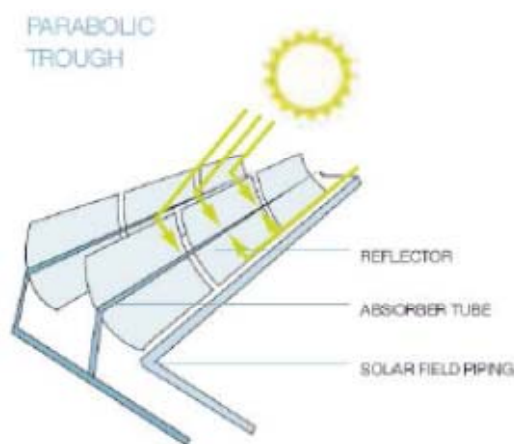
Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί λειτουργούν όπως και οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με μόνη διαφορά την πρωτεύουσα πηγή θερμότητας, η οποία είναι η ενέργεια του ήλιου αντί για τη θερμότητα από την καύση κάποιου ορυκτού καυσίμου. Η λειτουργία των ηλιοθερμικών σταθμών είναι απλή. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία συγκεντρώνεται από καθρέπτες και αποδίδεται σε ένα κατάλληλο μέσο μεταφοράς θερμότητας όπως είναι το συνθετικό λάδι, το υγροποιημένο άλας, το μείγμα νερού-ατμού, ο αέρας κ.α. Τα μέσα αυτά οδηγούνται στη συνέχεια σε εναλλάκτες θερμότητας (εάν ως μέσο μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται το μείγμα νερού-ατμού δεν παρεμβάλλεται εναλλάκτης) αποδίδοντας την ενέργεια που έχει απορροφηθεί σε μείγμα νερού-ατμού προς παραγωγή υπέρθερμου, κορεσμένου ατμού. Στους υβριδικούς σταθμούς υπάρχει και η εφεδρεία του ορυκτού καυσίμου όταν η ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται με τις γνωστές, μέχρι τώρα μεθόδους, όπως για παράδειγμα με ατμοστρόβιλο, με αεριοστρόβιλο ή με κινητήρα κύκλου Stirling. Η ηλιακή θερμική ενέργεια που συλλέγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας μπορεί επίσης να αποδοθεί σε μονάδες αποθήκευσης θερμαίνοντας κατάλληλα υγρά ή στερεά μέσα όπως τηγμένα άλατα, κεραμικά, σκυρόδεμα ή μίγματα αλάτων εναλλασσόμενης φάσης. Τη νύχτα, αυτή η θερμότητα μπορεί να εξάγεται από το μέσο αποθήκευσης έτσι ώστε να συνεχίζεται η ηλεκτροπαραγωγή του σταθμού [3].



Σχήμα 2.3 Σχηματικό διάγραμμα ενός ηλιοθερμικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής [3]

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας σε συγκεκριμένα εστιακά σημεία όπου και αναπτύσσονται οι επιθυμητές υψηλές θερμοκρασίες (στη διπλανή εικόνα

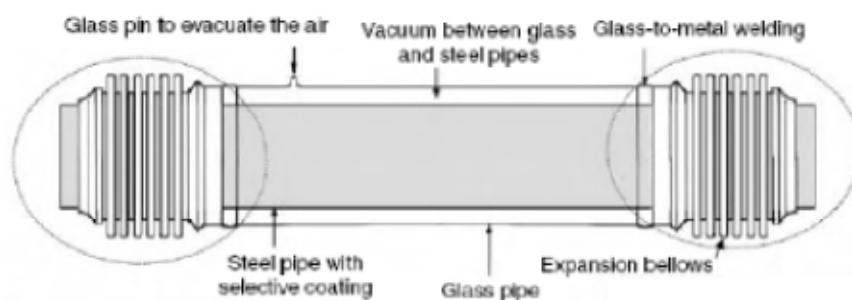
απεικονίζεται η συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από ένα συγκεντρωτικό κάτοπτρο). Τα συστήματα συγκεντρωτικών κατόπτρων που χρησιμοποιούνται στους ηλιοθερμικούς σταθμούς είναι συστήματα είτε σημειακής είτε γραμμικής εστίασης. Τα συστήματα γραμμικής εστίασης συγκεντρώνουν την ακτινοβολία περίπου 100 φορές και επιτυγχάνουν θερμοκρασίες λειτουργίας μέχρι 550oC, ενώ τα συστήματα που εστιάζουν σε σημείο συγκεντρώνουν περισσότερο από 1000 φορές την ακτινοβολία με αποτέλεσμα οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται να ξεπερνούν τους 1000oC. Τέσσερις είναι οι επικρατούσες τεχνολογίες που παρουσιάζουν και εμπορικό ενδιαφέρον: τα κυλινδρο-παραβολικά κάτοπτρα και τα γραμμικά συστήματα Fresnel, που εφαρμόζουν γραμμική εστίαση καθώς και οι κεντρικοί δέκτες και οι παραβολικοί δίσκοι που εφαρμόζουν σημειακή εστίαση. Τα συστήματα με κεντρικό δέκτη ονομάζονται αλλιώς και ηλιακοί πύργοι.



Τεχνολογία Παραβολικών Κατόπτρων (Parabolic Trough systems)

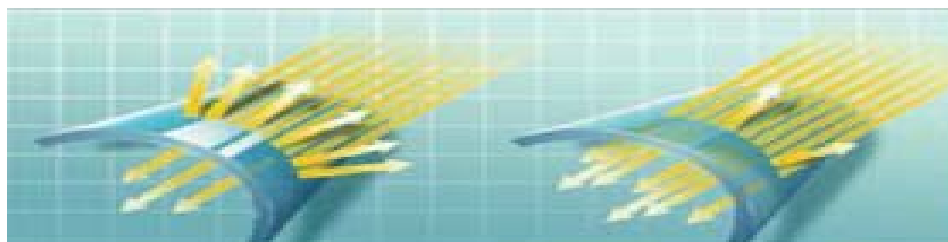
Αυτή είναι η πιο ώριμη από τις προαναφερθείσες τεχνολογίες και αυτό αποδεικνύεται και από την εμπορική της εφαρμογή έως τώρα. Η συλλογή και η συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας πραγματοποιείται σε έναν υπαίθριο χώρο μεγάλης έκτασης

που καλείται ηλιακό πεδίο. Το ηλιακό πεδίο αυτών των σταθμών αποτελείται από μακριές παράλληλες σειρές από πανομοιότυπα συγκολλητικά στοιχεία, για τα οποία χρησιμοποιούνται κοίλα κάτοπτρα (όπως φαίνεται στη διπλανή εικόνα [3]). Οι σειρές των κατόπτρων στηρίζονται στο έδαφος μέσω ατσάλινων βάσεων ή βάσεων αλουμινίου. Στους εμπορικούς σταθμούς έως τώρα για την επιφάνεια των κατόπτρων χρησιμοποιείται κυρίως θερμοπλαστικό γυαλί πάχους 4mm, το οποίο είναι και αρκετά βαρύ αλλά και ακριβό. Σύγχρονες εφαρμογές σκοπεύουν να μειώσουν το βάρος και το κόστος χρησιμοποιώντας νέες τεχνικές και υλικά όπως είναι το στιλβωμένο αλουμίνιο αντί για το γυαλί. Οι παράλληλες σειρές των κατόπτρων είναι διατεταγμένες με προσανατολισμό Βορρά- Νότου και περιστρέφονται ακολουθώντας την πορεία του ήλιου από Ανατολή προς Δύση. Τα παραβολικά κάτοπτρα συγκεντρώνουν την ηλιακή ακτινοβολία στους σωλήνες απορρόφησης (absorber tubes, βλ. και παραπάνω σχήμα), που αποτελούν τους δέκτες και βρίσκονται κατά μήκος της εστιακής ευθείας των καναλιών. Οι δέκτες είναι σχεδιασμένοι ώστε να απορροφούν όσο το δυνατόν μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας που εστιάζεται σε αυτούς. Για το σκοπό αυτό, οι σωλήνες είναι κατασκευασμένοι από ατσάλι και έχουν μια ειδική μαύρη επίστρωση ενώ περιβάλλονται από προστατευτικό γυάλινο κυλινδρικό περίβλημα. Ο ενδιάμεσος χώρος είναι αερόκενος διότι το κενό αέρος μειώνει σημαντικά την απώλεια θερμότητας δια συναγωγής. Στο δέκτη γίνεται η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμική. Στην επόμενη εικόνα απεικονίζεται ο σωλήνας απορρόφησης και τα κύρια στοιχεία του.



Σχήμα 2.4 Σωλήνας απορρόφησης [9]

Μια αντι-ανακλαστική επίστρωση μπορεί να προστεθεί στο γυάλινο περίβλημα για περαιτέρω αύξηση της απόδοσης του δέκτη.



Σχήμα 2.5 Σωλήνας από βοριοπυριτικό γυαλί χωρίς αντι-ανακλαστική επίστρωση (αριστερά) και με αντι-ανακλαστική επίστρωση (δεξιά)

Τα παραβολικά κανάλια είναι εφοδιασμένα με σύστημα παρακολούθησης της τροχιάς του ήλιου από την ανατολή στη δύση κατά τη διάρκεια της ημέρας, έτσι ώστε οι ακτίνες του ήλιου να εστιάζονται συνεχώς στο γραμμικό δέκτη. Η ημερήσια τροχιά του ήλιου θα πρέπει να είναι κάθετη στα παραβολικά κανάλια έτσι ώστε στρεφόμενα τα κάτοπτρα γύρω από τον άξονα του (νοητού) κυλίνδρου να διατηρούν την εστίαση στο δέκτη. Οι εποχιακές αλλαγές της γωνίας της ηλιακής ακτινοβολίας παράλληλα με το κανάλι δεν απαιτεί ιχνηλάτηση, διότι απλά η συγκέντρωση της ακτινοβολίας θα μετατοπίζεται κατά μήκος του δέκτη. Για το λόγο αυτό η σχεδίαση με παραβολικά κανάλια δεν απαιτεί σύστημα παρακολούθησης με δεύτερο άξονα.

Σε αυτούς τους σταθμούς, επιτυγχάνεται συγκέντρωση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας από 70 έως 100 φορές στους σωλήνες απορρόφησης, όπου και αναπτύσσονται θερμοκρασίες μεταξύ 350 και 550 OC. Στους δέκτες αλλά και σε ένα γενικευμένο δίκτυο σωληνώσεων κυκλοφορεί ένα θερμοαγωγό υγρό (heat transfer fluid-HTF) το οποίο απορροφά τη θερμότητα, τη μεταφέρει με τη βοήθεια αντλιών, και την αποδίδει μέσα από εναλλάκτες θερμότητας στο θερμοδυναμικό κύκλο λειτουργίας ενός τυπικού ατμοστροβίλου. Κατά τη λειτουργία του ηλιοθερμικού σταθμού, το συνθετικό έλαιο εισέρχεται συνήθως στο ηλιακό πεδίο με θερμοκρασία τάξεως 290oC και εξέρχεται από αυτό σε θερμοκρασία που αγγίζει τους 390oC. Στη συνέχεια το ψυγμένο πλέον θερμοαγωγό υγρό επανακυκλοφορεί στο δίκτυο σωληνώσεων του ηλιακού πεδίου. Στο θερμοδυναμικό κύκλο, η απορροφημένη θερμότητα αποδίδεται σε μείγμα νερού-ατμού προς παραγωγή υπέρθερμου ατμού σε υψηλή πίεση. Ο υπέρθερμος ατμός (πίεσης 90-100 bar και θερμοκρασίας 370-375oC) εκτονώνεται σε στροβιλογεννήτρια προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στη συνέχεια συμπυκνώνεται μέσω κατάλληλων συστημάτων ψύξης, οδηγούμενος εκ νέου στους εναλλάκτες (κύκλος Rankine). Το σύστημα ψύξης τέτοιων σταθμών μπορεί να είναι είτε υδρόψυκτο με την κατασκευή πύργου ψύξης είτε αερόψυκτο με τη χρήση ανεμιστήρων.

Σε περίπτωση που ο ηλιοθερμικός σταθμός διαθέτει και μονάδα αποθήκευσης, τότε το μέσο μεταφοράς της θερμότητας, μέσω εναλλακτών (εάν απαιτούνται), μπορεί να αποδώσει την απορροφηθείσα θερμική ενέργεια στο μέσο αποθήκευσης, όπως είναι στις περισσότερες εφαρμογές το υγροποιημένο άλας.

Στους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων ως μέσο μεταφοράς θερμότητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνθετικό έλαιο, μείγμα νερού-ατμού, υγροποιημένο άλας κ.α. Μέχρι σήμερα στην πλειονότητα των περιπτώσεων χρησιμοποιείται κατάλληλο συνθετικό έλαιο με μεγάλη αγωγιμότητα της θερμότητας. Το συνθετικό έλαιο μπορεί να θερμανθεί ασφαλώς μέχρι τους 400oC. Αυτή η μέγιστη θερμοκρασία θέτει ένα όριο στην απόδοση μετατροπής του κύκλου λειτουργίας του στροβίλου, η οποία αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας της θερμής πηγής. Για θερμοκρασίες του θερμοαγωγού υγρού μέχρι 600oC χρησιμοποιείται ο ατμοστροβίλος με απόδοση που φτάνει μέχρι και το 41% ενώ για υψηλότερες θερμοκρασίες ο αεριοστροβίλος μπορεί να είναι πιο αποδοτικός [14]. Έτσι, για αύξηση της απόδοσης, η βιομηχανία επενδύει

στην έρευνα για προηγμένα θερμοαγωγά υγρά. Κάποιες εναλλακτικές προτάσεις είναι η άμεση παραγωγή ατμού μέσα στους σωλήνες απορρόφησης καθώς και η χρήση τηγμένου άλατος ως ρευστό λειτουργίας (working fluid). Η χρήση τηγμένου άλατος επιτρέπει μεγαλύτερη απόδοση του κύκλου λειτουργίας σε σχέση με το συνθετικό έλαιο καθώς η δική του μέγιστη θερμοκρασία ασφαλείας φτάνει τους 560 οC. Από την άλλη, η άμεση παραγωγή ατμού (συστήματα DSG-Direct Steam Generation) μέσα στους σωλήνες απορρόφησης του ηλιακού πεδίου εξαλείφει την ανάγκη ύπαρξης των θερμικών εναλλακτών, καθώς ο παραγόμενος ατμός οδηγείται απευθείας στον αμμοστρόβιλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους του σταθμού καθώς και την αύξηση της απόδοσής του κατά 15-20% κυρίως διότι παρακάμπτονται οι απώλειες των εναλλακτών. Από την άλλη όμως απαιτούνται αυστηρότερες τεχνικές προδιαγραφές έτσι ώστε να ελεγχθεί η ποιότητα του παραγόμενου και μεταφερόμενου ατμού κατά μήκος του δικτύου σωληνώσεων του σταθμού. Οι παραπάνω εναλλακτικές προτάσεις έχουν ήδη υιοθετηθεί κυρίως από πειραματικούς σταθμούς που βρίσκονται υπό κατασκευή [3].

Στους σταθμούς αυτούς συνηθίζεται, εκτός της εγκατάστασης μονάδας αποθήκευσης, η εγκατάσταση συμβατικού λέβητα που βοηθά την ομαλή λειτουργία του σταθμού. Ειδικότερα ο λέβητας αυτός επιτρέπει:

Τη βελτίωση της απόδοσης του σταθμού και την επέκταση της λειτουργίας του ακόμη και μετά τη δύση του ήλιου,

τη διατήρηση της συνεχούς και ομαλής λειτουργίας του σταθμού σε μικρές περιόδους συννεφιάς ή υψηλών ταχυτήτων ανέμου,

στον ηλιοθερμικό σταθμό να αποδίδει την ονομαστική του ισχύ σε όσο το δυνατόν μικρότερο χρονικό διάστημα τις πρώτες πρωινές ώρες, και

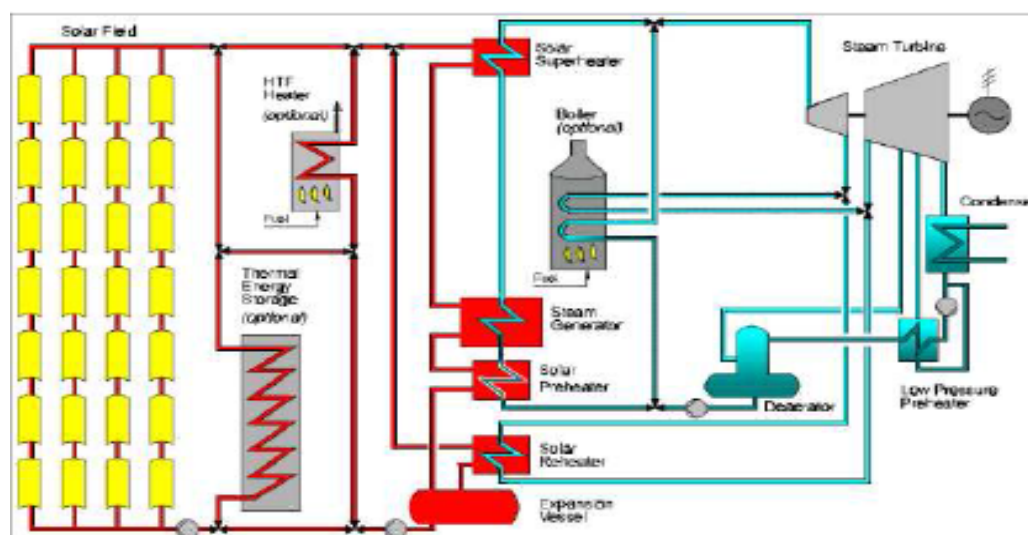
να διατηρείται η λειτουργικότητα των συστημάτων που συνθέτουν τον σταθμό σε περίοδο του έτους που θα μπορούσε να ήταν καταστροφικές για αυτά, όπως είναι οι πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, ιδίως κατά την περίοδο του χειμώνα, με κίνδυνο καταστροφής του συνθετικού ελαίου (Heat Transfer Fluid) ή των υδροποιημένων αλάτων των δεξαμενών αποθήκευσης.

Πρέπει να σημειωθεί ότι σήμερα έχουν κατασκευαστεί και λειτουργούν ηλιοθερμικοί σταθμοί παραβολικών κατόπτρων (Μαρόκο, Αλγερία, Αίγυπτος) που χρησιμοποιούν τον συμβατικό λέβητα για παραγωγή ατμού, συμπληρωματικά με το ηλιακό πεδίο. Σε αυτούς τους σταθμούς (Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS)) ο συμβατικός λέβητας έχει ικανότητα παραγωγής ατμού συγκρίσιμη με αυτή που προέρχεται από το ηλιακό πεδίο και παίζει ρόλο κύριας και όχι συμπληρωματικής λειτουργίας. Ένας τέτοιος σταθμός εκμεταλλεύεται το συνδυασμένο κύκλο αεριοστρόβιλου και αμμοστρόβιλου. Η καύση φυσικού αερίου τροφοδοτεί τον αεριοστρόβιλο ενώ η απαγόμενη θερμότητα στην έξοδο του αεριοστρόβιλου μαζί με

τη συλλεγόμενη θερμική ισχύ από το ηλιακό πεδίο παράγουν ατμό που τροφοδοτεί τον ατμοστρόβιλο.

Βοηθητικός καυστήρας μικρότερης ισχύος εγκαθίσταται συνήθως και στον κύκλο ισχύος του ηλιοθερμικού σταθμού έτσι ώστε να λειτουργήσει σε περίπτωση βλάβης του κεντρικού θερμικού εναλλάκτη ελαίου-νερού για μην διακοπεί απότομα η λειτουργία της γεννήτριας.

Στο σχηματικό διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζεται ο κύκλος λειτουργίας ενός ηλιοθερμικού σταθμού με παραβολικά κάτοπτρα εφοδιασμένου με (προαιρετικό) σύστημα αποθήκευσης θερμότητας και (προαιρετικούς) βοηθητικούς καυστήρες συμβατικού καυσίμου.



Σχήμα 2.6 Γενικό λειτουργικό διάγραμμα ενός ηλιοθερμικού σταθμού παραβολικών κατόπτρων Πηγή: ECOSTAR [9]

Οι απαιτούμενες εκτάσεις γης για την εγκατάσταση των σταθμών παραβολικών κατόπτρων κυμαίνονται περίπου από 18-40 m²/kW και εξαρτώνται από την ένταση της άμεσης ακτινοβολίας στο χώρο εγκατάστασης του ηλιοθερμικού σταθμού, αλλά και από το μέγεθος της αποθήκης που θα επιλεγεί να εγκατασταθεί. Εάν εγκατασταθεί μονάδα αποθήκευσης, το ηλιακό πεδίο υπερδιαστασιολογείται ώστε η μονάδα αποθήκευσης να «φορτίζεται» όταν ο σταθμός λειτουργεί στην ονομαστική του ισχύ.

Η πλειονότητα των εν λειτουργία ηλιοθερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής έχει υιοθετήσει την τεχνολογία των παραβολικών κατόπτρων για διάφορους λόγους. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αυτού του είδους των σταθμών παγκοσμίως ξεπερνάει το 1GW το έτος 2011 [18]. Πρόκειται για συστήματα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο τα οποία παράγουν ηλεκτρική ισχύ μεγάλης κλίμακας. Από το 1984 ως το 1991, στη νότια Καλιφόρνια, κατασκευάστηκαν και διασυνδέθηκαν στο δίκτυο εννέα σταθμοί

(SEGS) αυτού του τύπου, που ήταν και οι πρώτοι εμπορικοί ηλιοθερμικοί σταθμοί μεγάλης κλίμακας. Το SEGS (Solar Energy Generating System) είναι ένα σύμπλεγμα εννέα σταθμών με συνολική ισχύ εξόδου 354 MW. Αποτελεί προς το παρόν το μεγαλύτερο σύστημα ηλιακής ενέργειας γενικότερα. Το ηλιακό πεδίο ολόκληρου του συστήματος SEGS περιλαμβάνει πάνω από 2 εκατομμύρια τετραγωνικά μέτρα επιφάνειας παραβολικών κατόπτρων ενώ όλο το SEGS εκτείνεται σε πάνω από 6.400 στρέμματα γης. Μετά από αρκετά χρόνια η κατασκευή νέων σταθμών συνεχίστηκε με το έργο Nevada Solar One της εταιρείας Acciona στην κοιλάδα El Dorado στη Νεβάδα των ΗΠΑ. Ο σταθμός αυτός με παραβολικά κάτοπτρα, ο οποίος ξεκίνησε τη λειτουργία του το 2007, έχει εγκατεστημένη ονομαστική ισχύ 64 MW και παράγει περίπου 130 GWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως, με ένα συντελεστή χρησιμοποίησης περίπου 23%. Ο σταθμός είναι εφοδιασμένος με βοηθητικό συμβατικό λέβητα. Η συνολική επιφάνεια των κατόπτρων του φτάνει τις 357.000 τ.μ. ενώ ο σταθμός καταλαμβάνει 1.600 στρέμματα γης.

Το πρώτο σύστημα αυτού του τύπου στην Ευρώπη είναι το Andasol Solar Power Station στην επαρχία της Granada, στην Ανδαλουσία της Ισπανίας. Η γερμανική εταιρεία Solar Millennium έχει ολοκληρώσει την κατασκευή δύο όμοιων σταθμών μεγέθους 50 MW ο καθένας, με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας 7.5 ωρών σε μείγμα τηγμένων αλάτων. Ο Andasol 1 συνδέθηκε στο δίκτυο το 2008, ο Andasol 2 το 2009. Ένας παρόμοιος σταθμός, ο Andasol 3 έχει σχεδόν ολοκληρωθεί και υπολογίζεται να συνδεθεί με το δίκτυο μέσα στο 2011. Το ηλιακό πεδίο καθενός σταθμού απαρτίζεται από 624 συλλέκτες παραβολικών κατόπτρων διατεταγμένων σε 156 βρόχους με συνολική επιφάνεια κατόπτρων 510.120 τ.μ. Κάθε σταθμός καταλαμβάνει 2000 στρέμματα γης. Ο σταθμός Andasol 1 εκτιμάται ότι έχει μια ετήσια ηλεκτρική παραγωγή 179GWh. Επίσης είναι ο πρώτος σταθμός ο οποίος περιλαμβάνει δύο δεξαμενές αποθήκευσης τηγμένων αλάτων για αποθήκευση θερμότητας.

Εντός του 2009 ξεκίνησε η λειτουργία άλλων δύο σταθμών στην Ισπανία. Ο σταθμός Ibersol Ciudad Real μεγέθους 50MW κατασκευάστηκε από την εταιρεία Iberdrola Renovables στο Puertollano της Ισπανίας και ξεκίνησε τη λειτουργία του το Μάιο του 2009. Διαθέτει 576 συλλέκτες παραβολικών κατόπτρων διατεταγμένους σε 216 βρόχους των 4 συλλεκτών. Ο σταθμός περιλαμβάνει σύστημα αποθήκευσης της θερμότητας σε δύο δεξαμενές τηγμένων αλάτων. Επιπλέον, ο σταθμός Alvarado 1 μεγέθους 50MW κατασκευάστηκε στην Extremadura της Ισπανίας από την ισπανική εταιρεία Acciona, η οποία κατασκεύασε και το σταθμό Nevada Solar One στις ΗΠΑ. Ο Alvarado 1 χρησιμοποιεί την ίδια τεχνολογία με τον Nevada One, καλύπτει 1300 στρέμματα γης, διαθέτει 184.320 τμήματα κατόπτρων (modules) στοιχισμένα σε σειρές ενώ η κατασκευή του ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2009.

Το 2010 ολοκληρώθηκε η κατασκευή ενός ακόμη μεγάλου έργου στην Ισπανία, του ηλιοθερμικού συστήματος ηλεκτροπαραγωγής Solnova. Αποτελείται από τρεις σταθμούς (Solnova 1, 3 και 4) μεγέθους 50MW έκαστος και βρίσκεται στην

τοποθεσία Sanlucar de Mayor στη Σεβίλλη. Στους σταθμούς αυτούς έχει προβλεφθεί αυξημένος χώρος μεταξύ των παράλληλων σειρών των κατόπτρων έτσι ώστε να μειωθούν οι απώλειες λόγω σκίασης και να διευκολυνθεί η λειτουργία και η συντήρηση. Η συνολική επιφάνεια κατόπτρων του Solnova 1 είναι 260.000 τ.μ. και η συνολική έκταση γης που καταλαμβάνει είναι 1200 στρέμματα. Ο Solnova 1 δύναται να παράγει περίπου 115GWh ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως με συνολική απόδοση του σταθμού στο 19% περίπου. Σε συνθήκες χαμηλής ηλιοφάνειας, συμμετέχει στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ κατά 12-15% ένας βοηθητικός λέβητας φυσικού αερίου.

Εντός του 2010 ολοκληρώθηκε η κατασκευή πλήθους ηλιοθερμικών σταθμών παραβολικών κατόπτρων στην Ισπανία φανερώνοντας τόσο την ανάπτυξη και ωρίμανση της συγκεκριμένης τεχνολογίας όσο και την κατεύθυνση της Ισπανικής κυβέρνησης προς μια στρατηγική ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και επένδυσης πάνω στη συγκεκριμένη τεχνολογία. Τέτοιοι σταθμοί είναι ο Extresol Solar Power Station (Extresol 1&2) μεγέθους 100MW καθώς και οι σταθμοί Central Solar Termoelectrica La Dehesa, Central Solar Termoelectrica La Florida, PL. Termoelectrica de Palma del Rio II και Termoelectrica de Majadas όλοι μεγέθους 50MW.

Επιπλέον, ήδη λειτουργούν και ορισμένοι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου (ISCC). Ο μεγαλύτερος από αυτούς είναι και ο μοναδικός στις ΗΠΑ και έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία Florida Power & Light Company. Ο σταθμός Martin Next Generation Solar Energy Center, ισχύος 75MW, που βρίσκεται στη Φλόριδα των ΗΠΑ αποτελεί τμήμα του συμβατικού θερμοηλεκτρικού σταθμού φυσικού αερίου Martin County Power Plant, ο οποίος είναι ο μεγαλύτερος θερμοηλεκτρικός σταθμός των ΗΠΑ με εγκατεστημένη ισχύ 3705MW. Η συλλεγόμενη θερμότητα διοχετεύεται στον υπάρχοντα ατμοηλεκτρικό σταθμό και έχει δυνατότητα συμμετοχής στην τελική παραγωγή ως και 18MW ηλεκτρικής ισχύος. Ο σταθμός αυτός βρίσκεται σε λειτουργία από το Νοέμβριο του 2010 [23]. Άλλοι δύο παρόμοιοι σταθμοί στο Μαρόκο και την Αίγυπτο οι οποίοι βρίσκονται σε λειτουργία είναι, αντίστοιχα, οι σταθμοί Beni Mathar Plant και Kuraymat Plant, ισχύος 20MW και οι δύο.

Ακόμη περισσότεροι σταθμοί βρίσκονται υπό κατασκευή, με την Ισπανία και τις ΗΠΑ να διατηρούν την πρωτοκαθεδρία στο χώρο. Πάνω από 20 σταθμοί αυτού του τύπου είναι υπό κατασκευή στην Ισπανία, ενδεικτικό των τάσεων που δημιουργήσε στην αγορά η θέσπιση υψηλής εγγυημένης τιμής αγοράς της ενέργειας από αυτούς τους σταθμούς, από την Ισπανική κυβέρνηση. Στη μεγάλη πλειοψηφία τους οι νέοι σταθμοί θα είναι ισχύος 50MW. Από τα τέλη του 2010 έχουν ξεκινήσει οι εργασίες για την κατασκευή του μεγαλύτερου ηλιακού σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, του Blythe Solar Power Plant. Το έργο αυτό, που κατασκευάζεται από την εταιρεία Solar Trust of America στην κομητεία του Riverside στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, θα αποτελείται από τέσσερις σταθμούς ισχύος 242MW έκαστος, με συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ 968MW. Εκτιμάται ότι τα έργα θα διαρκέσουν έξι χρόνια ενώ ο σταθμός θα καλύπτει μια συνολική έκταση 28000 στρεμμάτων. Ένας

δεύτερος μεγάλος ηλιοθερμικός σταθμός παραβολικών κατόπτρων που βρίσκεται υπό κατασκευή στις ΗΠΑ είναι ο σταθμός Solana της εταιρείας Abengoa με μέγεθος 280 MW. Θα κατασκευαστεί στην Αριζόνα των ΗΠΑ και υπολογίζεται να ξεκινήσει τη λειτουργία του το 2012. Επιπλέον, δύο ακόμη σταθμοί τεχνολογίας ISCC βρίσκονται υπό κατασκευή σε Αλγερία και Σαουδική Αραβία. Συνολικά, πάνω από 2 GW εγκατεστημένης ισχύος τέτοιων σταθμών είναι υπό κατασκευή ενώ μελέτες για περισσότερα από 15 GW έχουν ανακοινωθεί παγκοσμίως.



Σχήμα 2.7 Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί παραβολικών κατόπτρων Andasol 1 (μπροστά) και Andasol 2 (πίσω) στην Ισπανία. Ο σταθμός παραγωγής ισχύος και το σύστημα αποθήκευσης θερμότητας βρίσκονται στο κέντρο καθενός ηλιακού πεδίου [26]

Τα πλεονεκτήματα εγκατάστασης ενός σταθμού παραβολικών κατόπτρων είναι:

- Το μέγεθος των σταθμών αυτών είναι στην πλειονότητα των περιπτώσεων μεγαλύτερο των 40 MW, με τον μεγαλύτερο σταθμό σε λειτουργία να είναι της τάξεως των 80 MW.
- Έχουν μεγάλο αριθμό ωρών εμπορικής λειτουργίας με παραγωγή περισσότερων των 12.000 GWh.
- Η θερμοκρασία λειτουργίας τους μπορεί να προσεγγίσει τους 500°C (οι σταθμοί που είναι σε εμπορική λειτουργία λειτουργούν σε θερμοκρασίες τάξεως 400°C).
- Αποδεδειγμένη ετήσια απόδοση τάξεως 14%-16% (καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας προς ηλιακή ενέργεια).
- Εμφανίζουν ικανοποιητικό βαθμό χρήσης γης, εν συγκρίσει με τις άλλες τεχνολογίες ηλιοθερμικών σταθμών παραγωγής.
- Δίνουν τη δυνατότητα αποθήκευσης της πλεονάζουσας θερμικής ενέργειας.

- Υπάρχουν αποδεδειγμένα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας.

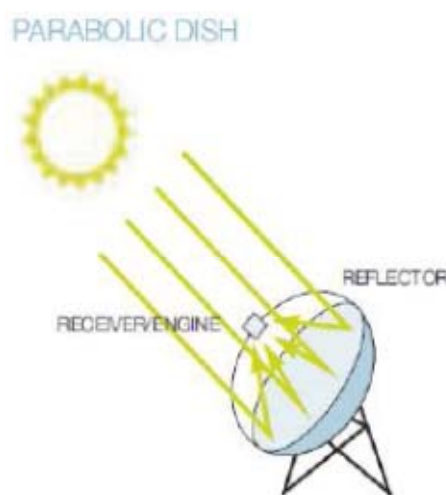
Τα μειονεκτήματα ενός σταθμού παραβολικών κατόπτρων είναι:

- Η μέχρι σήμερα εμπορική λειτουργία σταθμών που χρησιμοποιούν συνθετικό έλαιο με θερμοκρασία που αγγίζει τους 400 οC οδηγεί σε παραγωγή ατμού «μέτριας» ποιότητας.
- Το υψηλό κόστος εγκατάστασης.

Τεχνολογία Παραβολικών Δίσκων (Parabolic Dish systems)

Τα συστήματα αυτού του τύπου χρησιμοποιούν για τη συγκέντρωση της ηλιακής ακτινοβολίας ένα μεγάλο, αντανακλαστικό, παραβολικό δίσκο. Ο δίσκος συγκεντρώνει την ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται στο εστιακό του σημείο, όπου βρίσκεται ο δέκτης (όπως φαίνεται στη διπλανή εικόνα. Η συγκεντρωμένη ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται από το δέκτη προκειμένου να θερμανθεί ένα ρευστό ή ένα αέριο σε θερμοκρασία περίπου 750οC. Όταν χρησιμοποιείται αέριο στις έως τώρα εφαρμογές, αυτό είναι συνήθως ήλιο ή υδρογόνο. Μια θερμική μηχανή εκμεταλλεύεται αυτή τη θερμότητα για να παρέχει μηχανική κίνηση σε μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Στην περίπτωση των παραβολικών δίσκων η θερμική μηχανή είναι συνήθως ένας ειδικός τύπος μηχανής που καλείται μηχανή Stirling και η οποία έχει ιδιαίτερα υψηλή απόδοση. Θεωρητικά η απόδοση μιας τέτοιας μηχανής μπορεί να φτάσει και το 40% αλλά στην πράξη οι μηχανές Stirling σήμερα επιτυγχάνουν ένα βαθμό μετατροπής της ενέργειας κοντά στο 30%. Αντί για μηχανή τύπου Stirling, είναι επίσης δυνατή η εγκατάσταση ενός μικρού αεριοστρόβιλου.

Οι τυπικές διαστάσεις ενός παραβολικού δίσκου είναι από 5 έως 10 μ. σε διάμετρο με επιφάνεια κατόπτρων από 40 έως 120 τ.μ., αν και έχουν κατασκευαστεί δίσκοι επιφάνειας ως και 400 τ.μ. Διάφοροι περιορισμοί των υλικών μπορεί να θέτουν ένα άνω όριο στο μέγεθος του δίσκου, αν και έχει ανακοινωθεί η κατασκευή δίσκων διαμέτρου ως και 15μ. οι οποίοι θα παράγουν μέχρι και 50kW ηλεκτρικής ισχύος. Προς το παρόν, οι μηχανές Stirling που χρησιμοποιούνται παράγουν ως και 25kW. Οι μικροί αεριοστρόβιλοι μπορούν να παράγουν μεγαλύτερη ισχύ αλλά με σημαντικά μικρότερη απόδοση από τις μηχανές Stirling.



Όπως συμβαίνει και με τους συλλέκτες στους σταθμούς παραβολικών κατόπτρων και ηλιακού πύργου, τα ηλιακά αυτά «πίατα» πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν την τροχιά του ήλιου έτσι ώστε να επιτύχουν μέγιστη απόδοση. Ο

μηχανισμός παρακολούθησης πρέπει να είναι δύο αξόνων και καθώς έχει να κινήσει ένα ιδιαίτερα βαρύ πλαίσιο έχει αρκετά υψηλό κόστος. Μια μεταλλική βάση στηρίζει ένα μεταλλικό κγκλίδωμα πάνω στο οποίο είναι στερεωμένοι πολλοί μεμονωμένοι κοίλοι καθρέπτες οι οποίοι σχηματίζουν ολόκληρο τον παραβολικό δίσκο. Οι καθρέπτες αυτοί μπορεί να είναι είτε από γυαλί είτε από στιλβωμένο μέταλλο και έχουν σχήμα κυκλικό ή τετράγωνο.

Κάθε μονάδα παραβολικού δίσκου είναι ένα ξεχωριστό σύστημα με δική του θερμική μηχανή και αυτόνομη παραγωγή ηλεκτρισμού. Ως εκ τούτου η εν λόγω τεχνολογία είναι άκρως δομοστοιχειωτής φύσης, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλη για διεσπαρμένη παραγωγή. Αρκετοί δοκιμαστικοί παραβολικοί δίσκοι έχουν λειτουργήσει επιτυχημένα τα τελευταία δέκα χρόνια, με ποικίλα μεγέθη από 10kW (εταιρεία Schlaich, Bergemann and Partner), 25kW (εταιρεία SAIC) μέχρι και πάνω από 100kW (το «Big Dish» του Εθνικού Πανεπιστημίου της Αυστραλίας-ANU). Εξαιτίας του μεγέθους τους αλλά και της δομοστοιχειωτής τους φύσης, οι παραβολικοί δίσκοι είναι κατάλληλοι για αποκεντρωμένη παραγωγή ισχύος και για απομονωμένα, αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

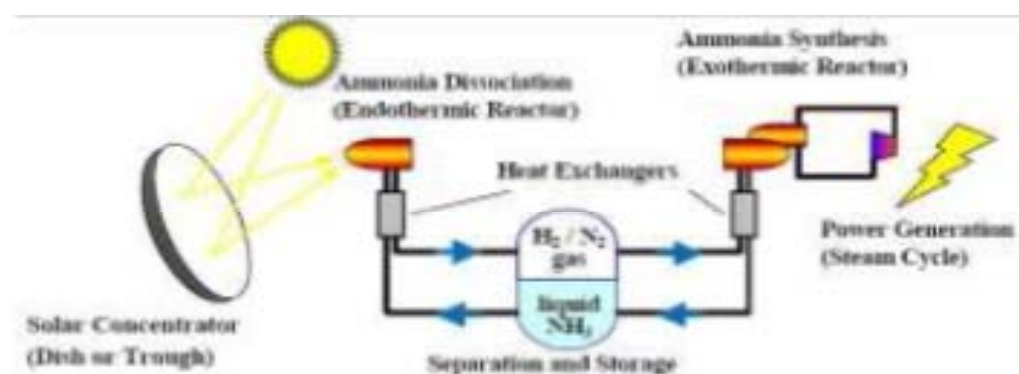


Σχήμα 2.13 Έξι παραβολικοί δίσκοι με μηχανές Stirling σε λειτουργία στο ερευνητικό κέντρο Plataforma Solar de Almeria της Ισπανίας. Κάθε δίσκος παράγει 10kW ηλεκτρικής ισχύος.

Στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος EURO-DISH, ένας οικονομικά αποδοτικός δίσκος 10kW με κινητήρα Stirling (Dish-Stirling engine) για αποκεντρωμένη ηλεκτροπαραγωγή αναπτύχθηκε από μια ευρωπαϊκή κοινοπραξία με εταιρους από το χώρο της βιομηχανίας και της έρευνας. Αντίθετα, η σχεδίαση που προωθείται από την εταιρεία Stirling Energy Systems (SES) καλείται “SunCatcher” και είναι ένα σύστημα 25kW που αποτελείται από ένα δίσκο διαμέτρου 38 ποδιών

στον οποίο εδράζονται 82 κοίλα κάτοπτρα, διαστάσεων 3 επί 4 πόδια το καθένα. Η γεννήτρια οδηγείται από έναν τετρακύλινδρο παλινδρομικό κινητήρα κύκλου Stirling, παράγοντας 25kW σε κάθε παραβολικό δίσκο. Το 2008, η εταιρεία SES επιχείρησε να καταγράψει ρεκόρ στην απόδοση μετατροπής ηλιακής ενέργειας σε παρεχόμενη ηλεκτρική ενέργεια, επιτυγχάνοντας καθαρή απόδοση 31,25% στο Νέο Μεξικό των ΗΠΑ [3]. Το Μάρτιο του 2010 τέθηκε σε πλήρη λειτουργία το Maricopa Solar, το πρώτο παγκοσμίως εμπορικό ηλιοθερμικό πάρκο με παραβολικούς δίσκους στην Αριζόνα των ΗΠΑ από την εταιρεία SES. Έχει συνολική εγκατεστημένη ισχύ 1,5MW και αποτελείται από 60 παραβολικούς δίσκους SunCatcher.

Η τεχνολογία του Big Dish εισάγεται στην αγορά από την εταιρεία Wizard Power. Το μοντέλο αυτό που έχει επιφάνεια 500m², χρησιμοποιεί ένα σύστημα αποθήκευσης της θερμότητας που βασίζεται στη θερμοχημική διαδικασία της διάσπασης και σύνθεσης της αμμωνίας (ενδόθερμη και εξώθερμη αντίδραση, αντίστοιχα). Με τον τρόπο αυτό, ο δίσκος λειτουργεί και τη νύχτα ή υπό άσχημες καιρικές συνθήκες, τροφοδοτώντας συνεχώς το φορτίο βάσης ή βάσει ζήτησης το φορτίο αιχμής. Η εταιρεία Wizard Power προτίθεται να κατασκευάσει ένα ηλιοθερμικό πάρκο 100MW κοντά στην πόλη Whyalla της νότιας Αυστραλίας.



Σχήμα 2.14 Σύστημα αποθήκευσης της θερμότητας σε ενδόθερμη θερμοχημική διαδικασία [44]

Τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας δίσκων Stirling είναι:

- Οι νεότερες μονάδες αυτού του τύπου εμφανίζουν υψηλή απόδοση μετατροπής, μέχρι 31,5%, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επιτυγχάνονται στο εσωτερικό των μηχανών.
- Δεν έχουν ανάγκη συστήματος ψύξης, όπως συμβαίνει στις άλλες τεχνολογίες όπου εγκαθίσταται ατμοστρόβιλος, κάτι που οφείλεται στο ότι το θερμαινόμενο αέριο προκαλεί κίνηση μέσω της διαστολής του.

Μειονεκτήματα της τεχνολογία αυτής είναι ότι:

- Εμφανίζουν μικρή εγκατεστημένη ισχύ ανά παραβολικό δίσκο που κυμαίνεται από 3-25 kW.

- Εμφανίζουν προβλήματα αξιοπιστίας ενώ είναι σε ερευνητικό στάδιο η δυνατότητα λειτουργία τους παράλληλα με συμβατική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής.

Είναι γεγονός ότι, πρόσφατα, επενδύσεις σε αυτή την τεχνολογία έχουν συναντήσει προβλήματα στη χρηματοδότηση καθώς ακόμη δεν έχει αποδεδειγμένη τιμή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ελκυστική για τους επενδυτές, με αποτέλεσμα να παρατηρείται μια στασιμότητα στη συγκεκριμένη αγορά.

Συστήματα Αποθήκευσης Θερμικής Ενέργειας (Thermal Energy Storage-TES)

Σε αντίθεση με τα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία μετατρέπουν απευθείας την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, τα ηλιοθερμικά συστήματα παράγουν σε πρώτη φάση θερμική ενέργεια, η οποία χρησιμοποιείται στη συνέχεια σε ένα συμβατικό στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την αποθήκευση της ενέργειας στο στάδιο της θερμότητας, μια διαδικασία η οποία είναι σχετικά απλή και φτηνή. Η δυνατότητα αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας δίνει στην ηλιοθερμική τεχνολογία ένα σημαντικότατο πλεονέκτημα έναντι άλλων τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως τα φωτοβολταϊκά και τα αιολικά συστήματα, τα οποία δεν έχουν ακόμη αναπτύξει ανταγωνιστικά συστήματα αποθήκευσης. Κι αυτό διότι η αποθήκευση θερμικής ενέργειας είναι απλή ως τεχνολογία και σε σύγκριση με την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ πιο αποδοτική αλλά και φθηνότερη. Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί με εγκαταστάσεις αποθήκευσης θα μπορούν να ξεπεράσουν τις δυσκολίες της διακοπτόμενης φύσης της ηλιακής ενέργειας και να διασφαλίσουν αξιόπιστη λειτουργία και αυξημένη ποιότητα παρεχόμενης ισχύος (χωρίς έντονες διακυμάνσεις) σε συνθήκες συννεφιάς αλλά και λειτουργία ακόμη και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Ένα άλλο πλεονέκτημα που παρέχει η αποθήκευση της θερμότητας στους σταθμούς αυτούς είναι η δυνατότητα χρονικής μετατόπισης της παρεχόμενης ηλεκτρικής ισχύος τους από τη φυσική αιχμή της ηλιοφάνειας στην αιχμή της ζήτησης όπου, σε μια ευέλικτη αγορά, η ηλεκτρική ενέργεια πωλείται ακριβότερα, αυξάνοντας έτσι τα περιθώρια κέρδους του σταθμού. Επιπλέον, η αποθήκευση καθιστά δυνατή τη σχεδόν ακαριαία διανομή της ισχύος ανάλογα με τη ζήτηση (on demand), έτσι ώστε να ικανοποιούνται αναμενόμενες και μη καταναλώσεις φορτίου. Σημαντικό είναι και το γεγονός ότι παρέχεται στο Διαχειριστή του Συστήματος η ευελιξία να ρυθμίζει τη διείσδυση και των άλλων ΑΠΕ περιορίζοντας, αν χρειάζεται, την ισχύ εξόδου των ηλιοθερμικών σταθμών. Τα παραπάνω πλεονεκτήματα της θερμικής αποθήκευσης έχουν σαν αποτέλεσμα έναν αρκετά υψηλότερο συντελεστή χρησιμοποίησης και ένα μειωμένο χρόνο απόσβεσης της επένδυσης.

Η γενική ιδέα της αποθήκευσης της θερμικής ενέργειας είναι ότι η θερμότητα από τον ήλιο που συλλέγεται κατά τη διάρκεια της ημέρας αντί να χρησιμοποιηθεί εξ ολοκλήρου για άμεση ηλεκτροπαραγωγή μπορεί να αποθηκευτεί σε ορισμένα μέσα

αποθήκευσης, όπως για παράδειγμα τηγμένα άλατα. Στους ηλιοθερμικούς σταθμούς με σύστημα αποθήκευσης θερμότητας υπερδιαστασιολογείται το ηλιακό πεδίο έτσι ώστε ο σταθμός κατά τη διάρκεια της ηλιοφάνειας να μπορεί να βρίσκεται σε πλήρη λειτουργία και ταυτόχρονα να αποθηκεύει το πλεόνασμα ηλιακής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια της νύχτας ή σε συνθήκες συννεφιάς η θερμότητα αποδίδεται από το μέσο στο οποίο βρίσκεται αποθηκευμένη μέσω εναλλάκτη θερμότητας στο μέσο μεταφοράς θερμότητας του σταθμού προκειμένου να διατηρηθεί η λειτουργία του στροβίλου. Οι ηλιοθερμικοί σταθμοί με αποκλειστική χρήση ηλιακής ενέργειας (solar-only) λειτουργούν ιδανικά για να καλύψουν τις μεγάλες αιχμές ζήτησης τα μεσημέρια των θερινών μηνών σε περιοχές με σημαντικές καταναλώσεις κλιματισμού. Με ενσωματωμένη τη θερμική αποθήκευση αυτοί οι σταθμοί μπορούν να λειτουργούν περισσότερο, ικανοποιώντας ακόμη και το φορτίο βάσης.

Οι διαφορετικές διατάξεις ηλιοθερμικών σταθμών απαιτούν ανάλογες λύσεις θερμικής αποθήκευσης προσαρμοσμένες στη συγκεκριμένη τεχνολογία του εκάστοτε σταθμού. Για την εφαρμογή, δηλαδή, του κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη το μέσο μεταφοράς θερμότητας, η θερμοκρασία και η πίεση λειτουργίας, το μέγεθος του σταθμού και ο όγκος του τροφοδοτούμενου φορτίου. Έτσι υπάρχει μια ποικιλία τεχνολογιών αποθήκευσης, υλικών και μεθόδων λειτουργίας έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι διαφορετικές απαιτήσεις κάθε σταθμού.

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες. Έμμεση αποθήκευση σημαίνει ότι το μέσο αποθήκευσης δεν θερμαίνεται απευθείας από τους συλλέκτες. Σε αυτά τα συστήματα από τους συλλέκτες θερμαίνεται άμεσα το ρευστό μεταφοράς της θερμότητας, συνήθως συνθετικό έλαιο, το οποίο στη συνέχεια διέρχεται από εναλλάκτες θερμότητας για να θερμάνει τελικά έμμεσα το μέσο αποθήκευσης. Τα μέσα αποθήκευσης που χρησιμοποιούνται είναι υλικά με υψηλή θερμική χωρητικότητα όπως συμπιεσμένος ατμός, σκυρόδεμα, μια ποικιλία από υλικά αλλαγής φάσης και κυρίως τηγμένα άλατα, όπως για παράδειγμα νιτρικό νάτριο και νιτρικό κάλιο. Έμμεση αποθήκευση εφαρμόζεται όταν το μέσο μεταφοράς της θερμότητας είναι πολύ ακριβό (όπως το συνθετικό έλαιο) ή δύσκολο να αποθηκευτεί (όπως ο αποπιεσμένος ατμός). Το πλεονέκτημα της έμμεσης μεθόδου είναι το χαμηλό κόστος του μέσου αποθήκευσης, ενώ μειονέκτημα αποτελεί το υψηλό κόστος του εναλλάκτη θερμότητας αλλά και οι απώλειες θερμότητας σε αυτόν.

Στην άμεση αποθήκευση το μέσο μεταφοράς της θερμότητας αποθηκεύεται απευθείας σε θερμικά μονωμένες δεξαμενές, παίζοντας ταυτόχρονα και το ρόλο του μέσου αποθήκευσης. Για να εφαρμοστεί ένα τέτοιο σύστημα αποθήκευσης θα πρέπει το μέσο μεταφοράς της θερμότητας να είναι οικονομικό και να έχει υψηλή θερμική χωρητικότητα προκειμένου να μειωθεί το κόστος της δεξαμενής. Πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η σταθερή θερμοκρασία του θερμού μέσου τόσο στη μεταφορά όσο και στην αποθήκευση της θερμότητας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι επικρατούσες εφαρμογές θερμικής αποθήκευσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή στην αφαλάτωση

Ως η καταλληλότερη λύση για την αντιμετώπιση της λειψυδρίας, θεωρείται η χρήση μονάδων αφαλάτωσης θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού η οποία αρχίζει να υιοθετείται από διάφορες χώρες όλο και περισσότερο. Με τον όρο ‘‘αφαλάτωση’’ εννοούμε οποιαδήποτε διεργασία αφαίρεσης αλάτων από μια αλατούχα ουσία και κυρίως από αλατούχα ύδατα. Άρα η αφαλάτωση είναι μια μέθοδος ανάκτησης πόσιμου νερού από θαλασσινό νερό, υφάλμυρα ποτάμια ή λίμνες. Τεχνολογίες αφαλάτωσης είναι σε χρήση σε όλο τον κόσμο εξυπηρετώντας διάφορους σκοπούς, συμπεριλαμβανομένης της παροχής πόσιμου νερού για οικιακή και δημόσια χρήση, βιομηχανικές εργασίες και σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης νερό για τους πρόσφυγες και για στρατιωτικές επιχειρήσεις. Αφαλάτωση χρησιμοποιείται ακόμα σε πολλά ποντοπόρα πλοία και σε υποβρύχια. Η αφαλάτωση εφαρμόζεται κυρίως σε περιοχές με ξηρό κλίμα , άνυδρες με πρόσβαση όμως σε θαλασσινό νερό. Έτσι η εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης σε πολλές άνυδρες και με ελάχιστη ποσότητα διαθέσιμου νερού περιοχές είναι ζωτικής σημασίας για την οικονομική τους ανάπτυξη. Συγκεκριμένα η αφαλάτωση είναι μια σημαντική πηγή νερού σε άνυδρες περιοχές της Μέσης Ανατολής (Περσικός Κόλπος, Βόρεια Αφρική) τα νησιά της Καραϊβικής και άλλες περιοχές όπου η φυσική διαθεσιμότητα του πόσιμου νερού δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση και όπου οι παραδοσιακές επιλογές ύδρευσης ή η μεταφορά νερού από άλλες περιοχές έχουν χαρακτηριστεί αδύνατες ή αντιοικονομικές.

Στις μέρες μας λειτουργούν περίπου 15.000 μονάδες αφαλάτωσης σε όλο τον κόσμο, κυρίως στη Μέση Ανατολή, αλλά και στις Η.Π.Α., τη Δυτική Ευρώπη και την Ιαπωνία. Αυτός ο αριθμός όλο και συνεχίζει να αυξάνεται καθώς οι ερευνητές εργάζονται για την βελτίωση της διαδικασίας.

5.2 Συνήθεις μέθοδοι αφαλάτωσης

Δεν μπορούμε να πούμε ότι υπάρχει μια συγκεκριμένη μέθοδος αφαλάτωσης η οποία να θεωρείται η καλύτερη και πιο αξιόπιστη. Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από τεχνολογίες αφαλάτωσης που απομακρύνουν αποτελεσματικά τα άλατα από το αλμυρό νερό παράγοντας ένα ρεύμα ύδατος με χαμηλή συγκέντρωση άλατος (ρεύμα προϊόντος) και ένα άλλο με υψηλή συγκέντρωση των υπόλοιπων αλάτων (άλμη ή συμπύκνωμα). Οι περισσότερες από αυτές τις τεχνολογίες κατατάσσονται σε 2 κατηγορίες : στις μεθόδους εξάτμισης και στις μεθόδους μεμβρανών.

Αναλυτικότερα οι διεργασίες αφαλάτωσης διακρίνονται:

- Στις μεθόδους αλλαγής φάσης, όπου απαιτείται θερμότητα και παρατηρείται αλλαγή της φυσικής κατάστασης. Αυτές είναι η εξάτμιση και η κρυστάλλωση η οποία δεν χρησιμοποιείται ευρέως. Όσον αφορά την εξάτμιση οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι η Πολυβάθμια Εξάτμιση (Multi-Effect Evaporation ή Distillation - ME ή MED), η Πολυβάθμια Εκτόνωση (Multi-Stage Flash Distillation - MSF), η Εξάτμιση με Συμπίεση Ατμών (Vapor Compression - VC) και η Ηλιακή Απόσταξη (Solar Distillation)
- Στις μεθόδους μιας φάσης (υγρή) ή μεθόδους που χρησιμοποιούν μεμβράνες, για τον διαχωρισμό του νερού από τα άλατα και τις προσμίξεις που έχει. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν η Αντίστροφη Όσμωση (Reverse Osmosis - RO), η Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis - ED) και η Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis Reversal - EDR).

Η μέθοδος της εξάτμισης χρησιμοποιείται σήμερα μόνο στις πετρελαιοπαραγωγούς χώρες της Μέσης Ανατολής που διαθέτουν άφθονους ενεργειακούς πόρους, ενώ στις υπόλοιπες χώρες χρησιμοποιείται κυρίως η μέθοδος της αντίστροφης όσμωσης που είναι πιο οικονομική (Δαγκαλίδης 2009).

Εκτός από τις μεθόδους που βασίζονται στην εξάτμιση και στις μεμβράνες υπάρχουν και άλλες μέθοδοι που βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο ή καταλήγουν να είναι οικονομικά ασύμφορες όπως: η *ιοντοανταλλαγή* (*Ion - Exchange Methods*), το *πάγωμα* (*Freezing*) και οι *υβριδικές μέθοδοι* (Methane hydrate crystallization).

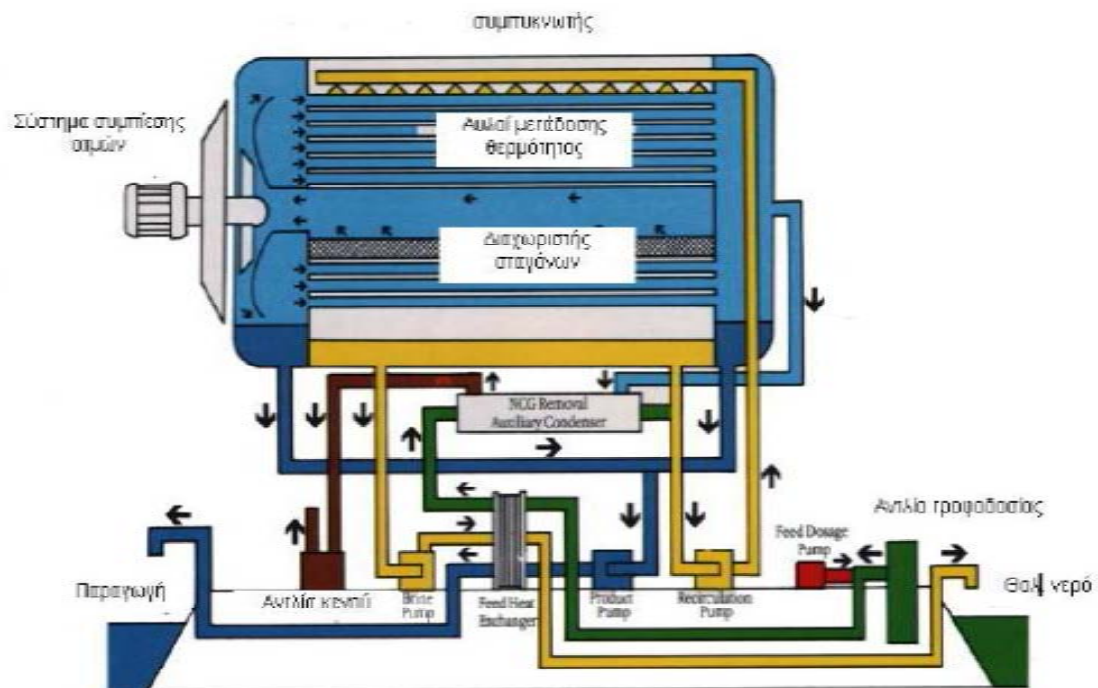
5.3 Εξάτμιση με συμπίεση ατμών (Vapor Compression VC)

Η τεχνολογία αυτή συνήθως χρησιμοποιείται για μικρού και μεσαίου μεγέθους μονάδες αφαλάτωσης και παράγει μέχρι και 3000m³ / ημέρα (π.χ. θέρετρα, βιοτεχνίες, απομακρυσμένες περιοχές). Είναι απλούστερη από τις προηγούμενες και πιο αποτελεσματική. Η μέθοδος της συμπίεσης του ατμού αναφέρεται στη διαδικασία απόσταξης κατά την οποία ο ατμός που εξατμίζεται από το θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό λαμβάνεται από μια διάταξη θερμότητας που το συμπιέζει. Οι δυο κύριες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την συμπίεση του ατμού ώστε να παραχθεί αρκετή θερμότητα για την εξάτμιση του θαλασσινού νερού, είναι η μηχανική συμπίεση ατμού MVC (με ένα μηχανικό συμπιεστή) που συνήθως λειτουργεί με ηλεκτρισμό και η θερμική συμπίεση ατμού TVC (με εκτοξευτήρα ατμού).

Το κρύο νερό της θάλασσας ψεκάζεται πάνω στους σωλήνες από τους οποίους περνά ατμός, θερμαίνεται και στη συνέχεια εξατμίζεται με τη βοήθεια αεροσυμπιεστή που δημιουργεί υποπίεση. Ο συμπιεστής αυτός μαζεύει τους υδρατμούς του καθαρού νερού και τους εκτοξεύει με πίεση μέσα στους σωλήνες όπου έρχονται σε επαφή με το ψυχρό θαλασσινό νερό συμπυκνώνονται και λαμβάνονται ως προϊόν.

Η μέθοδος αυτή λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, οπότε δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη πηγής θερμότητας και αυτή είναι η βασική διαφορά της από τις

προηγούμενες δυο μεθόδους. Η εξάτμιση δηλαδή προκαλείται αποκλειστικά και μόνο από την χαμηλή πίεση.



5.4 Μηχανική συμπίεση ατμού

Η τεχνολογία της συμπίεσης ατμού βασίζεται σε μια απλή αρχή. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους αφαλάτωσης όπου η θερμότητα μεταφέρεται άμεσα στο νερό τροφοδοσίας, εδώ φτάνουμε σε ψηλότερες θερμοκρασίες με αύξηση της πίεσης του συστήματος. Ένα συνηθισμένο τέτοιο σύστημα αποτελείται από έναν συμπιεστή, έναν εξατμιστή και έναν εναλλάκτη θερμότητας.

Μέρος του ατμού που δημιουργείται στον εξατμιστή οδηγείτε στον συμπιεστή όπου και συμπιέζετε, αυξάνοντας έτσι την θερμοκρασία συμπύκνωσης της. Αυτός ο πεπιεσμένος ατμός επιστρέφεται στον εξατμιστή μέσω σωληνώσεων, οι οποίες δουλεύουν και σαν εναλλάκτες θερμότητας μεταξύ του ατμού και του διαλύματος τροφοδοσίας. Καθώς ο ατμός συμπυκνώνεται και φεύγει από το σύστημα σαν καθαρό νερό, οι σωληνώσεις θερμαίνονται, αυξάνοντας έτσι την θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας και προκαλώντας έτσι την παραγωγή περισσότερου ατμού. Ο συμπιεστής, πέρα από το γεγονός ότι οδηγεί στην αύξηση της πίεσης του εξατμισμένου ατμού (και κατά συνέπεια στην θερμοκρασία συμπύκνωσης του), μειώνει την πίεση του νερού τροφοδοσίας, ρίχνοντας έτσι και το σημείο βρασμού του.

Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που εισάγετε χρησιμοποιείται από των συμπιεστή, είτε πρόκειται για μηχανική είτε για θερμική συμπίεση ατμού. Είναι επίσης μια πρόσθετη πηγή θερμότητας, για την εκκίνηση και για να αντισταθμίζει πιθανές θερμικές απώλειες.

Τέλος, για να αυξηθεί η απόδοση του συστήματος, χρησιμοποιείται ένας εναλλάκτης για προθέρμανση του διαλύματος τροφοδοσίας, ο οποίος εκμεταλλεύεται την θερμότητα που βρίσκεται στην κατά τα άλλα άχρηστη άλμη και στο απόσταγμα εξόδου.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα ενός συστήματος μηχανικής συμπίεσης ατμού είναι:

Το μικρό του μέγεθος, δεν έχει απαιτήσεις εγκατάστασης, η καλή του απόδοση, η ενεργειακή του ανεξαρτησία, δεν επηρεάζεται από την αλατότητα του νερού τροφοδοσίας, η εύκολη μετακίνησή του, η μη ανάγκη ύπαρξης ψύξης και η ικανότητα να δουλεύει με μηχανή βενζίνης ή πετρελαίου. Βέβαια το σημαντικότερο πλεονέκτημα του MVC είναι ότι ξανά χρησιμοποιεί την θερμότητα αντί να την αφήνει να πάει χαμένη, καταργώντας έτσι την ανάγκη για ψήκτρα. Ένα τέτοιο σύστημα είναι παρόμοιο με ένα σφόνδυλο, δηλαδή μικρή μηχανική κατανάλωση ενέργειας (όπως το έργο συμπιεστή) που χρησιμεύει στο να διατηρήσει την κυκλοφορία ενός μεγάλου ποσού ενέργειας.

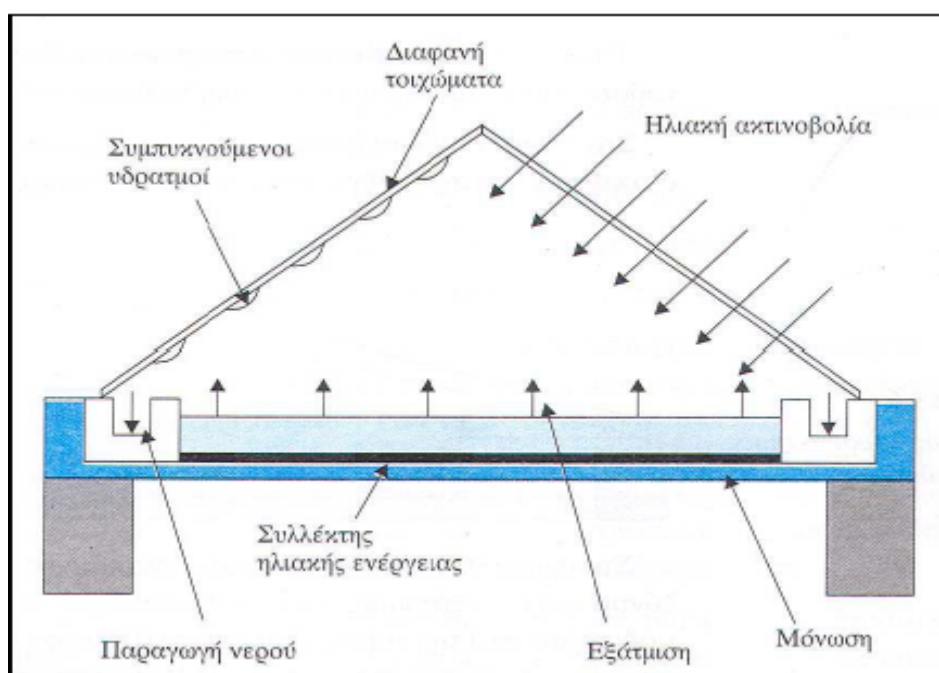
5.5 Ηλιακή απόσταξη (Solar Distillation)

Αυτή η τεχνική που χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια για την αφαλάτωση εμπίπτει γενικά σε δυο κατηγορίες, σε αυτή που λαμβάνει και χρησιμοποιεί την θερμική ενέργεια του ήλιου και σε αυτή που χρησιμοποιεί φωτοβολταϊκά για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Οι συσκευές αυτής της κατηγορίας αναπαράγουν ουσιαστικά τον υδρολογικό κύκλο σε πολύ μικρότερη κλίμακα. Ο βασικός σχεδιασμός ενός ηλιακού αποστακτήρα είναι παρόμοιος με το σχεδιασμό ενός θερμοκηπίου. Οι ακτίνες του ήλιου εισέρχονται από μια κεκλιμένη διάφανη οροφή και θερμαίνουν το θαλασσινό νερό που βρίσκεται σε μια λεκάνη στο πάτο.

Το νερό αυτό εξατμίζεται και ανεβαίνει στην κεκλιμένη γυάλινη συνήθως οροφή, συμπυκνώνεται πάλι σχηματίζοντας ένα λεπτό στρώμα το οποίο ρέει προς τη βάση και συλλέγεται. Η λεκάνη που περιέχει το θαλασσινό νερό είναι καλυμμένη με κάποιο φωτοαπορροφητικό υλικό, συνήθως χρωστική μαύρου χρώματος ή διάφορα πολυμερή υλικά.

Οι συσκευές αυτές δεν είναι πολύ αποτελεσματικές αφού χρησιμοποιούν μόνο το 50% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και παράγουν μόνο 4 λίτρα ανά μέρα καθαρό νερό ανά τετραγωνικό μέτρο εδάφους. Έτσι είναι σημαντικό να χρησιμοποιηθούν φτηνά υλικά κατασκευής για την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης. Το νερό που παράγεται δεν είναι απαλλαγμένο από μικροοργανισμούς αφού δεν βράζει σε μεγάλες θερμοκρασίες άρα χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία. Ως εκ τούτου η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε μονάδες μικρής δυναμικότητας ή για οικιακή χρήση.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Βίκυ Τσουκαλά και Νίκος Μαμάσης, «Εισαγωγή στην ενεργειακή τεχνολογία», Τομέας Υδάτινων Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2010. Ανάκτηση από: http://itia.ntua.gr/~nikos/energy/ene_thal_10_2.pdf
- [2] «Technical Readiness of Ocean Thermal Energy Conversion (OTEC)», National Oceanic and Atmospheric Administration National Ocean Service Office of Ocean and Coastal Resource Management, Coastal Response Research Center, University of New Hampshire. Ανάκτηση από: <http://coastalmanagement.noaa.gov/otec/docs/otectech1109.pdf>
- [3] Διπλωματική Εργασία των φοιτητών του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών: Λάμπρου Ευάγγελος και Σιακούλης Ορέστης, «Τεχνολογία και Συνδυασμένα Συστήματα Παραγωγής Υδρογόνου». Ανάκτηση από: <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/4041/1/Texnologia%20ydrogonou.pdf>
- [4] Σύντηξη Υδρογόνου με LASER. Ανάκτηση από: http://dide.ker.sch.gr/emekerkyra/Kaberidis_eisigish_23-3-2012.pdf
- [5] Παναγιώτης Χαβιαρόπουλος Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός και Κυριάκος Ρώσσης Δρ. Μηχανολόγος Μηχανικός, «Υπεράκτιοι Αιολικοί Σταθμοί», Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ CRES), Αθήνα 2009. Ανάκτηση από: http://www.iene.gr/energyweek09/articlefiles/ea/2ndSession/2_K_ROSSIS.pdf
- [6] Διπλωματική Εργασία του φοιτητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου: Αντώνιος Α. Μαντήκος, «Προσομοίωση Ηλιοθερμικού Σταθμού Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Τεχνολογίας Παραβολικών Κατόπτρων», Αθήνα 2011. Ανάκτηση από: http://artemis.cslab.ntua.gr/el_thesis/artemis.ntua.ece/DT2011-0251/DT2011-0251.pdf
- [7] Πασίσης Β. Ιωάννης Μεταπτυχιακός, «Αφαλάτωση νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας», Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών-Τμήμα αξιοποίησης φυσικών πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Αθήνα 2011. Ανάκτηση από: http://dspace.aua.gr/xmlui/bitstream/handle/10329/5720/Pasisis_I.pdf?sequence=1

- [8] Πτυχιακή Εργασία της φοιτήτριας Συσκάκη Καλλιόπη, «Τεχνολογίες Αφαλάτωσης Νερού», Τ.Ε.Ι Κρήτης-Τμήμα Μηχανολογίας, Ηράκλειο 2013. Ανάκτηση από:
<http://nefeli.lib.teicrete.gr/browse/stef/mhx/2013/SyskakiKalliopi/attached-document-1382025641-644833-4479/SyskakiKalliopi2013.pdf>