



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

**ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ
ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:
ΜΙΧΑΛΑΚΟΠΟΥΛΟΣ Σ. ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
ΚΑΘ. ΠΑΠΑΝΤΩΝΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2010

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	11
ABSTRACT	14
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	20
1.1 Νερό	20
1.1.1 Γενικά στοιχεία για το νερό	20
1.1.2 Το παγκόσμιο πρόβλημα της λειψυδρίας	21
1.1.3 Η κατάσταση στην Ελλάδα	23
1.1.4 Μέθοδοι αντιμετώπισης της λειψυδρίας.....	25
1.1.5 Α.Π.Ε. και ο ρόλος τους στο πρόβλημα της λειψυδρίας	27
1.2 Υδρογόνο	29
1.2.1. Γενικά στοιχεία για το υδρογόνο	29
1.2.2. Το υδρογόνο ως φορέας ενέργειας – Οικονομία του υδρογόνου.....	31
1.2.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης υδρογόνου ως καύσιμο.	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο – ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ.....	35
2.1 Εισαγωγή	35
2.1.1 Γενικά και ιστορικά στοιχεία για την αφαλάτωση.....	35
2.1.2 Αρχές λειτουργίας	35
2.1.3 Η αφαλάτωση σε παγκόσμιο επίπεδο	37
2.2 Μέθοδοι αφαλάτωσης.....	39
2.2.1 Γενικά.....	39
2.2.2 Άμεση απόσταξη πολλαπλών βαθμίδων (MSF).....	41
2.2.3 Απόσταξη πολλαπλής επίδρασης (MED).....	42
2.2.4 Απόσταξη με συμπίεση ατμών (VC)	43
2.2.5 Ηλιακή απόσταξη (SD)	44
2.2.6 Πάγωμα (Freezing)	46
2.2.7 Ηλεκτροδιάλυση (ED)	46
2.3 Αντίστροφη ώσμωση (RO).....	48
2.3.1 Αρχή λειτουργίας	48
2.3.2 Συστήματα ανάκτησης ενέργειας	50
2.4 Σύγκριση των μεθόδων αφαλάτωσης.....	53

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο – ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ	57
3.1 Εισαγωγή	57
3.2 Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου	60
3.2.1 Γενικά.....	60
3.2.2 Ανασχηματισμός ατμού του φυσικού αερίου (GSR) και μετασχηματισμός φυσικού αερίου με ηλιακή θερμότητα (SMR)	62
3.2.3 Αεριοποίηση άνθρακα (CGF)	64
3.2.4 Αεριοποίηση βιομάζας (BGF) και πυρόλυση βιομάζας (BPY).....	65
3.2.5 Φωτοβιολογική παραγωγή και φωτοηλεκτρόλυση	68
3.3 Ηλεκτρόλυση νερού	70
3.3.1 Γενικά.....	70
3.3.2 Αρχή λειτουργίας	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ^ο – ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	78
4.1 Εισαγωγή	78
4.2 Αιολική ενέργεια.....	86
4.2.1 Άνεμος	86
4.2.2 Ανεμογεννήτριες	89
4.3 Υβριδικά συστήματα	95
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ^ο – ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ, ΠΑΡΑΓΩΓΗ Η ₂ & Α.Π.Ε.....	99
5.1 Εισαγωγή	99
5.2 Παρουσίαση μελετών/εφαρμογών συστημάτων Α.Π.Ε. & αφαλάτωσης RO	100
5.2 Παρουσίαση μελετών/εφαρμογών συστημάτων Α.Π.Ε. & παραγωγής υδρογόνου.....	105
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ^ο – ΑΝΑΛΥΣΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	115
6.1 Περιγραφή του συστήματος υπό μελέτη	115
6.2 Περιγραφή της ενεργειακής διαχείρισης του συστήματος.....	118
6.3 Περιγραφή του υπολογιστικού κώδικα	119
6.3.1 Γενικά.....	119
6.3.2 Λογικό διάγραμμα.....	121
6.4 Δεδομένα εισόδου	123
6.4.1 Γενικά.....	123
6.4.2 Ταχύτητα ανέμου	123
6.4.3 Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας.....	125
6.4.4 Χαρακτηριστικά μονάδας αντίστροφης ώσμωσης	126
6.4.5 Χαρακτηριστικά μονάδας ηλεκτρόλυσης.....	128
6.4.6 Χαρακτηριστικά συστήματος αντλησιοταμίευσης	130

Περιεχόμενα

6.4.7 Χαρακτηριστικά πληθυσμού και κατανάλωσης νερού	134
6.4.8 Οικονομικά δεδομένα	137
6.5 Περιγραφή λειτουργίας προγράμματος & Στόχοι προσομοίωσης.....	142
6.5.1 Περιγραφή λειτουργίας προγράμματος.....	142
6.5.2 Στόχοι προσομοίωσης	144
6.6 Τεχνοοικονομικοί δείκτες αξιολόγησης	145
6.6.1 Τεχνικά μεγέθη.....	145
6.6.2 Οικονομικά μεγέθη	150
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ^ο – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	157
7.1 Εισαγωγή	157
7.2 Παρουσίαση παραμέτρων και σταθερών δεδομένων.....	158
7.3 Παρουσίαση διαγραμμάτων λειτουργίας	160
7.3.1 Ετήσια διαγράμματα λειτουργίας.....	161
7.3.2 Μηνιαία διαγράμματα λειτουργίας.....	168
7.3.3 Εβδομαδιαία διαγράμματα λειτουργίας.....	172
7.3.3 Ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας.....	175
7.3.4 Καμπύλες διάρκειας.....	177
7.4 Παρουσίαση αθροιστικών μεγεθών και τεχνοοικονομικών δεικτών αξιολόγησης	180
7.4.1 Παρουσίαση αθροιστικών και τεχνικών μεγεθών	180
7.4.2 Παρουσίαση οικονομικών μεγεθών και δεικτών.....	182
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 ^ο – ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ	186
8.1 Σύνοψη	186
8.2 Συμπεράσματα.....	187
8.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	190
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	192
Υπολογιστικός κώδικας «HYDRO_DES»	192
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	204

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

Περιεχόμενα σχημάτων και διαγραμμάτων:

Σχήμα 1.1 Διασπορά υδάτινων πόρων της Γης	20
Σχήμα 1.2 Κράτη με δυνατότητα παραγωγής πόσιμου νερού	21
Σχήμα 1.3 Πληθυσμοί χωρίς πρόσβαση σε πόσιμο νερό	22
Σχήμα 1.4 Πληθυσμοί με δυνατότητα κάλυψης υγιεινής	22
Σχήμα 1.5 Υδροδότηση στα νησιά του Αιγαίου έως το 2001	25
Σχήμα 1.6 Εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης στα νησιά του Αιγαίου	26
Σχήμα 1.7 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	28
Σχήμα 1.8 Το υδρογόνο στον περιοδικό πίνακα	29
Σχήμα 1.9 Υδρογόνο παραγόμενο από Α.Π.Ε. – το ιδανικό καύσιμο	31
Σχήμα 2.1 Αναπαράσταση ενός τυπικού συστήματος αφαλάτωσης	36
Σχήμα 2.2 Εγκατεστημένη δυναμικότητα παγκοσμίως	37
Σχήμα 2.3 Λόγος ζήτησης και προσφοράς πόσιμου νερού στις Ευρωπαϊκές χώρες	38
Σχήμα 2.4 Εγκατεστημένη δυναμικότητα στην Ευρώπη	38
Σχήμα 2.5 Ποσοστό παγκοσμίως εγκατεστημένων μονάδων αφαλάτωσης που βασίζονται σε διεργασίες μεμβρανών και σε θερμικές διεργασίες για το έτος 2006	40
Σχήμα 2.6 Δυναμικότητα παγκοσμίως εγκατεστημένων μονάδων αφαλάτωσης που βασίζονται σε διεργασίες μεμβρανών και σε θερμικές διεργασίες για το έτος 2006	40
Σχήμα 2.7 Αρχή λειτουργίας MSF	41
Σχήμα 2.8 Πολλαπλή μονάδα MSF στη Σαουδική Αραβία - 1983	41
Σχήμα 2.9 Αρχή λειτουργίας MED	42
Σχήμα 2.10 Μονάδα MED στη Λιβύη - 2005	43
Σχήμα 2.11 Αρχή λειτουργίας VC	43
Σχήμα 2.12 Μονάδα VC στην Σαρδηνία - 2000	44
Σχήμα 2.13 Αρχή λειτουργίας SD	45
Σχήμα 2.14 Μονάδα SD στην Αυστραλία	45
Σχήμα 2.15 Αρχή λειτουργίας Freezing	46
Σχήμα 2.16 Αρχή λειτουργίας ED	47
Σχήμα 2.17 Μονάδα EDR (Electro Dialysis Reverse)	47
Σχήμα 2.18 Διαμόρφωση μεμβράνης RO	48
Σχήμα 2.19 Το φαινόμενο της ώσμωσης και η επίτευξη της αντίστροφης ώσμωσης	49
Σχήμα 2.20 Διάγραμμα ροής ενός συστήματος αφαλάτωσης RO	49
Σχήμα 2.21 Μέθοδος RO με εναλλάκτη πίεσης	50
Σχήμα 2.22 Αρχή λειτουργίας εναλλάκτη πίεσης	51
Σχήμα 2.23 Μέθοδος RO με στρόβιλο Pelton	51
Σχήμα 2.24 Μέθοδος RO με turbocharger	52
Σχήμα 2.25 Μονάδα RO στο Ισραήλ - 2008	53
Σχήμα 2.26 Σύγκριση μεθόδων ED και RO	54
Σχήμα 2.27 Καταμερισμός κόστους εγκατάστασης μονάδας RO	55

Περιεχόμενα

Σχήμα 3.1 Η ανάπτυξη της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου	57
Σχήμα 3.2 Χρήση H ₂ σήμερα	58
Σχήμα 3.3 Προέλευση H ₂ σήμερα	58
Σχήμα 3.4 Αγωγοί μεταφοράς και διανομής υδρογόνου σε Benelux, Northern France και Ruhrgebiet της Air Liquide	59
Σχήμα 3.5 Μέθοδοι παραγωγής H ₂ και χρήση	60
Σχήμα 3.6 Διεργασίες παρασκευής υδρογόνου	62
Σχήμα 3.7 Μονάδα Pressure Swing Absorption (PSA)	63
Σχήμα 3.8 Μονάδα αεριοποίησης και επιλογές	65
Σχήμα 3.9 Διάγραμμα της διαδικασίας πυρόλυσης βιομάζας (BPY)	66
Σχήμα 3.10 Αναπαράσταση λειτουργίας φωτοηλεκτροχημικού στοιχείου Tandem	69
Σχήμα 3.11 Μονάδα ηλεκτρόλυσης 250 kW _{el} της CASALE στην Ελβετία	73
Σχήμα 3.12 Αρχή λειτουργίας της ηλεκτρόλυσης	74
Σχήμα 3.13 Αλκαλικός ηλεκτρολύτης	74
Σχήμα 3.14 Ηλεκτρολύτης τύπου PEM	75
Σχήμα 3.15 Εργαστηριακή συσκευή ηλεκτρόλυσης	75
Σχήμα 3.16 Διάγραμμα εγκατάστασης ηλεκτρόλυσης	76
Σχήμα 4.1 Παγκόσμια παραγωγή ενέργειας – 2006	78
Σχήμα 4.2 Ποσοστό ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. για τα Ευρωπαϊκά Κράτη – 2006, 2010	79
Σχήμα 4.3 Εφαρμογές ηλιακής ενέργειας	80
Σχήμα 4.4 Τυπική διάταξη ενός υδροηλεκτρικού έργου	81
Σχήμα 4.5 Ο κύκλος των βιοκαυσίμων	82
Σχήμα 4.6 Τυπική γεωθερμική εγκατάσταση	83
Σχήμα 4.7 Υποθαλάσσια διάταξη στροβίλων	84
Σχήμα 4.8 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παγκοσμίως – 2006	85
Σχήμα 4.9 Εγκατεστημένη ισχύς Α.Π.Ε. στην Ελλάδα – 2007	85
Σχήμα 4.10 Κατεύθυνση κυρίων ανέμων στο Αιγαίο – Μελέτμια	86
Σχήμα 4.11 Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα	87
Σχήμα 4.12 Χάρτης αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα	88
Σχήμα 4.13 Χάρτης αιολικού δυναμικού της Ευρώπης	89
Σχήμα 4.14 Διάγραμμα εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής από Α/Γ	90
Σχήμα 4.15 Συντελεστής ισχύος συναρτήσει ταχύτητας ακροπτερυγίου	91
Σχήμα 4.16 Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα	92
Σχήμα 4.17 Κύρια μέρη ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα	93
Σχήμα 4.18 Καμπύλη ισχύος ανέμου και Α/Γ	94
Σχήμα 4.19 Υβριδικό σύστημα με Α/Γ, Φ/Β, γεννήτριες diesel και μπαταρίες	96
Σχήμα 4.20 Υβριδικό σύστημα με Α/Γ, Φ/Β και μπαταρίες	96
Σχήμα 4.21 Υβριδικό σύστημα με Α/Γ και αντλησιοταμίευση	97
Σχήμα 5.1 Συνδυασμοί συστημάτων Α.Π.Ε. και μεθόδων αφαλάτωσης	99
Σχήμα 5.2 Συνδυασμός συστημάτων Α.Π.Ε. και παραγωγής υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης	100
Σχήμα 5.3 Ταχύτητα ανέμου, παροχή νερού, συγκέντρωση άλατος και ειδική κατανάλωση	101
Σχήμα 5.4 Προσομοίωση φορτίου αφαλάτωσης, παραγόμενης ισχύος από Φ/Β και από μπαταρίες, παραγόμενου νερού, για τις 2 πρώτες εβδομάδες του Ιανουαρίου	102

Περιεχόμενα

Σχήμα 5.5 Μονάδα αφαλάτωσης (δεξιά) και εγκατεστημένο αιολικό πάρκο 900W (αριστερά) από το ΚΑΠΕ.....	103
Σχήμα 5.6 Η Υδριάδα ρυμουλκούμενη στην Ηρακλεία.....	104
Σχήμα 5.7 Μονάδα αφαλάτωσης στη Μήλο.....	104
Σχήμα 5.8 Εγκατάσταση υβριδικού συστήματος Α/Γ και εκμετάλλευσης τεχνολογιών H ₂ στο νησί Utsira της Νορβηγίας.....	105
Σχήμα 5.9 Διάγραμμα εγκατάστασης υβριδικού συστήματος στο νησί Utsira.....	106
Σχήμα 5.10 Διαθεσιμότητα υβριδικού συστήματος Utsira – Μάρτιος 2005 έως 2006.....	107
Σχήμα 5.11 Παράδειγμα λειτουργίας υβριδικού συστήματος Utsira.....	107
Σχήμα 5.12 Παράδειγμα λειτουργίας υβριδικού συστήματος Utsira.....	108
Σχήμα 5.13 PURE project – Unst, Shetland.....	109
Σχήμα 5.14 Διάγραμμα της εγκατάστασης υδρογόνου στο Αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ.....	110
Σχήμα 5.15 Γενική άποψη της μονάδας αιολικής ενέργειας – H ₂ στο αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ.....	111
Σχήμα 6.1 Απεικόνιση υβριδικού συστήματος αφαλάτωσης και παραγωγής υδρογόνου από Α/Γ υπό μελέτη.....	117
Σχήμα 6.2 Λογικό διάγραμμα του υπολογιστικού κώδικα.....	122
Σχήμα 6.3 Ταχύτητα ανέμου συναρτήσεωρών του έτους από 1/9 έως 2/3.....	123
Σχήμα 6.4 Ταχύτητα ανέμου συναρτήσεωρών του έτους από 2/3 έως 31/8.....	124
Σχήμα 6.5 Καμπύλη διάρκειας παροχής ταχύτητας ανέμου.....	124
Σχήμα 6.6 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος ENERCON E – 33.....	125
Σχήμα 6.7 Χαρακτηριστικό εύρος λειτουργίας μονάδας αφαλάτωσης.....	126
Σχήμα 6.8 Μονάδα αφαλάτωσης ENERCON EDS SW.....	127
Σχήμα 6.9 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος – παροχής νερού μονάδας αφαλάτωσης.....	128
Σχήμα 6.10 Μονάδα ηλεκτρόλυσης INERCON.....	128
Σχήμα 6.11 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος – παραγωγής H ₂ μονάδας ηλεκτρόλυσης.....	130
Σχήμα 6.12 Αδιάστατη μεταβολή πληθυσμού τυπικού νησιού.....	135
Σχήμα 6.13 Αδιάστατη διακύμανση ωριαίας κατανάλωσης νερού.....	137
Σχήμα 6.14 Κόστη επένδυσης μονάδων ηλεκτρόλυσης από διάφορους κατασκευαστές.....	139
Σχήμα 7.1 Ετήσια παραγωγή και κατανάλωση ισχύος των υποσυστημάτων.....	162
Σχήμα 7.2 Ετήσια παροχή παραγόμενου πόσιμου νερού και υδρογόνου.....	163
Σχήμα 7.3 Ετήσια παροχή άντλησης πόσιμου νερού και κατανάλωση πληθυσμού.....	165
Σχήμα 7.4 Ετήσια ποσότητα νερού στον άνω ταμιευτήρα.....	166
Σχήμα 7.5 Ετήσια ποσότητα νερού στην κάτω δεξαμενή.....	167
Σχήμα 7.6 Μηνιαία ταχύτητα ανέμου.....	168
Σχήμα 7.7 Μηνιαία παραγωγή και κατανάλωση ισχύος των υποσυστημάτων.....	169
Σχήμα 7.8 Μηνιαία παροχή παραγόμενου πόσιμου νερού και υδρογόνου.....	170
Σχήμα 7.9 Μηνιαία παροχή άντλησης πόσιμου νερού και κατανάλωση πληθυσμού.....	170
Σχήμα 7.10 Μηνιαία ποσότητα νερού στον άνω ταμιευτήρα.....	171
Σχήμα 7.11 Μηνιαία ποσότητα νερού στην κάτω δεξαμενή.....	172
Σχήμα 7.12 Εβδομαδιαία ταχύτητα ανέμου.....	173
Σχήμα 7.13 Εβδομαδιαία παραγωγή και κατανάλωση ισχύος των υποσυστημάτων.....	173
Σχήμα 7.14 Εβδομαδιαία παροχή παραγόμενου πόσιμου νερού και υδρογόνου.....	173
Σχήμα 7.15 Εβδομαδιαία παροχή άντλησης πόσιμου νερού και κατανάλωση πληθυσμού.....	174
Σχήμα 7.16 Εβδομαδιαία ποσότητα νερού στον άνω ταμιευτήρα.....	174

Περιεχόμενα

Σχήμα 7.17 Εβδομαδιαία ποσότητα νερού στην κάτω δεξαμενή	174
Σχήμα 7.18 Ημερήσια ταχύτητα ανέμου.....	175
Σχήμα 7.19 Ημερήσια παραγωγή και κατανάλωση ισχύος των υποσυστημάτων	176
Σχήμα 7.20 Ημερήσια παροχή παραγόμενου πόσιμου νερού και υδρογόνου	176
Σχήμα 7.21 Ημερήσια παροχή άντλησης πόσιμου νερού και κατανάλωση πληθυσμού	176
Σχήμα 7.22 Ημερήσια ποσότητα νερού στον άνω ταμιευτήρα.....	177
Σχήμα 7.23 Ημερήσια ποσότητα νερού στην κάτω δεξαμενή	177
Σχήμα 7.24 Καμπύλη διάρκειας ταχύτητας ανέμου	178
Σχήμα 7.25 Καμπύλη διάρκειας παραγωγής και κατανάλωσης ισχύος των υποσυστημάτων	178
Σχήμα 7.26 Καμπύλη διάρκειας παροχής παραγόμενου πόσιμου νερού και υδρογόνου	178
Σχήμα 7.27 Καμπύλη διάρκειας παροχής άντλησης πόσιμου νερού και κατανάλωσης πληθυσμού	179
Σχήμα 7.28 Καμπύλη διάρκειας ποσότητας νερού στον άνω ταμιευτήρα	179
Σχήμα 7.29 Καμπύλη διάρκειας ποσότητας νερού στην κάτω δεξαμενή	179
Σχήμα 7.30 Ετήσια κατανομή παραγόμενης αιολικής ενέργειας.....	182
Σχήμα 7.31 Κατανομή συνολικού κόστους επένδυσης.....	184

Περιεχόμενα πινάκων:

Πίνακας 1.1 Συγκεντρωτικός πίνακας Δαπανών & Μεταφερόμενων Ποσοτήτων νερού ανά έτος Κυκλάδων & Δωδεκανήσων	24
Πίνακας 1.2 Επιπλέον εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης στα νησιά του Αιγαίου και του Ιονίου.....	27
Πίνακας 1.3 Ιδιότητες υδρογόνου σε συνθήκες 1 atm και 0 °C	30
Πίνακας 2.1 Σύγκριση των μεθόδων αφαλάτωσης	54
Πίνακας 2.2 Μεγέθη μεθόδων αφαλάτωσης και κόστη παραγωγής νερού.....	55
Πίνακας 3.1 Παραγωγή H ₂ στα Ευρωπαϊκά Κράτη	59
Πίνακας 3.2 Εφαρμογές παραγωγής υδρογόνου με αξιοποίηση βιομάζας.....	67
Πίνακας 3.3 Ηλεκτρολυτικές μονάδες παραγωγής H ₂ παγκοσμίως.....	72
Πίνακας 3.4 Συγκριτικά στοιχεία μεθόδων ηλεκτρόλυσης	72
Πίνακας 5.1 Συγκεντρωτικός πίνακας με τα κόστη παραγωγής ισχύος και νερού για διάφορα εναλλακτικά συστήματα	102
Πίνακας 5.2 Τεχνικά δεδομένα PURE project.....	109
Πίνακας 6.1 Συστήματα αφαλάτωσης ENERCON	126
Πίνακας 6.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά μονάδας ηλεκτρόλυσης INERGON	129
Πίνακας 6.3 Συνιστώμενες τιμές ταχύτητας και διαμέτρου στον σωλήνα κατάθλιψης	131
Πίνακας 6.4 Τυποποιημένες διάμετροι χαλύβδινων σωληνώσεων κατά DIN 2440	133
Πίνακας 6.5 Εκτίμηση ημερήσιας κατανάλωσης του πληθυσμού	136
Πίνακας 7.1 Τιμές παραμέτρων εισόδου	159
Πίνακας 7.2 Μεταβαλλόμενα δεδομένα εισόδου	159
Πίνακας 7.3 Σταθερά μεγέθη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης	160
Πίνακας 7.4 Ετήσια αθροιστικά τεχνικά μεγέθη	182
Πίνακας 7.5 Ετήσια αθροιστικά οικονομικά μεγέθη και δείκτες αξιολόγησης.....	183

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ:

Ενεργειακή προσομοίωση και τεχνοοικονομική μελέτη υβριδικού υδροηλεκτρικού συστήματος αφαλάτωσης και παραγωγής H_2 .

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η ενεργειακή προσομοίωση και η τεχνοοικονομική μελέτη ενός ημιαυτόνομου υβριδικού υδροηλεκτρικού συστήματος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού και παραγωγής υδρογόνου, ως εναλλακτική πηγή ενέργειας. Αυτό το σύστημα έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης του πόσιμου νερού με χρήση αντλησιοταμίευσης.

Η μέθοδος της αφαλάτωσης του θαλασσινού νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αποτελεί μια πρώτης τάξεως λύση στην εκτεταμένη ανομβρία που αντιμετωπίζουν τα άνυδρα νησιά. Επίσης, το παγκόσμιο ενδιαφέρον για το υδρογόνο ως φορέα ενέργειας έχει αυξηθεί ραγδαία τα τελευταία χρόνια, ως αποτέλεσμα της μελλοντικής μείωσης των παγκόσμιων αποθεμάτων σε πετρέλαιο και φυσικό αέριο και της περιβαλλοντικής ρύπανσης που προκαλείται από τα ορυκτά καύσιμα.

Το υπό μελέτη υβριδικό σύστημα συνίσταται από δύο όμοιες μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης και δύο επίσης όμοιες μονάδες ηλεκτρόλυσης PEM, οι οποίες τροφοδοτούνται αποκλειστικά από ένα υποσύστημα εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συγκεκριμένα Αιολικής Ενέργειας. Το υποσύστημα εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας αποτελείται από συστοιχία ανεμογεννητριών. Το βασικό πλεονέκτημα των μονάδων αφαλάτωσης και ηλεκτρόλυσης είναι ότι έχουν μεταβλητό σημείο λειτουργίας, γεγονός το οποίο εξυπηρετεί στην καλύτερη εκμετάλλευση της μεταβαλλόμενης αιολικής ισχύος. Το όλο σύστημα συμπληρώνεται από μία διάταξη αντλησιοταμίευσης που λειτουργεί ως μέσο αποθήκευσης του πόσιμου νερού. Μόνο η τροφοδότηση της αντλίας του αντλιοστασίου γίνεται από το τοπικό δίκτυο ηλεκτροδότησης και εκεί έγκειται ο χαρακτηρισμός όλου του συστήματος ημιαυτόνομου και όχι πλήρως αυτόνομου. Παράλληλα μπορεί να χαρακτηριστεί και υβριδικό γιατί συνδυάζει ουσιαστικά τέσσερις (4) διαφορετικές τεχνολογίες, δηλαδή ανεμογεννήτριες, μονάδες αφαλάτωσης και μονάδες ηλεκτρόλυσης τροφοδοτούμενες από τις Α/Γ, και αντλησιοταμίευση του πόσιμου ύδατος τροφοδοτούμενη από το τοπικό δίκτυο.

Βασικό μέρος της εργασίας αποτέλεσε η προσομοίωση του πλήρους συστήματος. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε υπολογιστικός κώδικας σε γλώσσα FORTRAN με χρονικό βήμα προσομοίωσης τα δέκα λεπτά και έχοντας ως δεδομένα εισόδου χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων για ένα ολόκληρο έτος. Οι εν λόγω χρονοσειρές προέρχονται από ανεμολογικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο νησί της Ίου από την 1η Σεπτεμβρίου 1999 έως την 31η Αυγούστου 2000. Ο υπολογιστικός κώδικας είναι σε θέση προσομοιώσει τη λειτουργία του συστήματος, προκαθορισμένης από τον χρήστη, διαστασιολόγησης για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα διάρκειας ενός έτους. Επίσης, εξάγει τις τιμές διάφορων υπολογιζόμενων ενεργειακών και τεχνοοικονομικών μεγεθών, βάσει των οποίων αξιολογείται το συγκεκριμένο

Περίληψη

σύστημα. Ως παράμετροι αυτής της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκαν κυρίως η εγκατεστημένη ισχύς ανεμογεννητριών - μονάδας αφαλάτωσης – μονάδας ηλεκτρόλυσης – αντλίας, η χωρητικότητα δεξαμενής πόσιμου νερού και ο πληθυσμός.

Από την προσομοίωση του συστήματος, καταλήγουμε σε γενικά συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των υποσυστημάτων του τόσο στη λειτουργία και την απόδοση του όσο και στη μεταξύ τους συνεργασία. Παράλληλα, αξιολογείται το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού και H_2 , προτείνεται ο συνδυασμός των παραμέτρων εκείνων για τις οποίες εξασφαλίζεται πλήρης αυτονομία στην ύδρευση ενός τυπικού απομακρυσμένου νησιού, και υποδεικνύονται ορισμένοι ενδεικτικοί τρόποι αξιοποίησης του υδρογόνου, ως εναλλακτικό καύσιμο. Τέλος, εξετάζεται αν και υπό ποιες προϋποθέσεις, η εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος, αποτελεί μια λειτουργικά και οικονομικά βιώσιμη λύση για τις περιοχές που πλήττονται από λειψυδρία.

ABSTRACT

DIPLOMA THESIS TITLE:

Energy simulation and technoeconomical study of an hybrid hydroelectric desalination and hydrogen production system.

The subject of this diploma thesis refers to the energy simulation and the technoeconomical study of an semiautonomous hybrid hydroelectric system for water desalination and hydrogen production, to be used as an alternative energy source. This system is capable of storing the produced water using a pumped-storage subsystem.

Desalinating seawater using renewable energy sources is an excellent solution for the waterless islands that face an extended drought. In addition, as a result of the future reduction of the global oil and gas reserve and of the environmental pollution produced by fossil fuels, there is lately an abrupt increase in the worldwide interest in hydrogen as an energy carrier.

The considered hybrid system consists of two similar reverse osmosis desalination units and two other similar PEM electrolyzers. These units are powered exclusively by one subsystem which exploits renewable energy sources, in particular Wind Energy. This subsystem consists of a series of wind turbines. The fact that the desalination and electrolysis units use a flexible operating point is their main advantage, fact that helps the subsystems to utilize the fluctuating wind power more efficiently. The whole system is complimented by a pumped-storage arrangement, which works as means of water storage. Only the pumps are supplied by the local electricity grid, and that is the reason why the system is described as semiautonomous, and not fully autonomous. In addition, this system can also be characterized as hybrid, because of the combination of four (4) different technologies, namely wind turbines, desalination units, electrolyzers and pumped-storage.

The simulation of the whole system constituted a fundamental part of this thesis. To this effect, a computational code was developed using FORTRAN. This program uses a time step of 10 minutes and, as input data, timeseries of meteorological data during a whole year. These timeseries come from wind measurements conducted on Ios Island from September 1st 1999 to August 31st 2000. The numerical code is capable of simulating the function of the whole system for one year, which has specific dimensioning defined by user. Furthermore, it exports the rates of different energy and technoeconomical values, which are used to evaluate the specific system. The main parameters used in this simulation were the installed power of wind turbines – desalination units – electrolysis units – pumps, the capacity of the potable water reservoir and the population.

By simulating this system, we reach in general conclusions as far as how the subsystems affect, not only its function and efficiency, but also the collaboration among them. In the same time, we estimate the cost of the produced drinkable water and hydrogen, we present the parameter combination for a typical remote island to be totally water sufficient and autonomous, and we

Abstract

indicate some suggestive ways for hydrogen exploitation, as an alternative fuel. In the end, it is being studied if and under which circumstances the application of a system like this represents a viable solution for the arid regions, both functional and economical.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το εκτεταμένο πρόβλημα λειψυδρίας που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στη νησιωτική Ελλάδα, καθώς και η ανάγκη σε παγκόσμιο επίπεδο για απεξάρτηση από την εκμετάλλευση ορυκτών καυσίμων, λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων τους, αποτέλεσαν την αιτία για τον καθορισμό του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στην προσπάθεια κάλυψης των παραπάνω δύο στόχων, προτάθηκε ένα καινοτόμο υβριδικό σύστημα αποτελούμενο από δύο βασικά μέρη. Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης, διάταξη άντλησης και ταμειυτήρων, ενώ το δεύτερο, μονάδες ηλεκτρόλυσης PEM. Και τα δύο μέρη τροφοδοτούνται αποκλειστικά από συστοιχία ανεμογεννητριών, πλην των αντλιών. Το παραγόμενο πόσιμο νερό αποθηκεύεται σε ταμειυτήρα, ενώ το παραγόμενο υδρογόνο προορίζεται για επιτόπια άμεση χρήση. Κατά αυτό τον τρόπο, ο συνδυασμός αυτών των δύο υποσυστημάτων δύναται να συνεισφέρει σε μία πρωτοποριακή ολοκληρωμένη προσέγγιση της διαχείρισης των υδατικών πόρων και να ανακουφίσει τις νησιωτικές τοπικές οικονομίες εξασφαλίζοντας ένα βαθμό αυτάρκειας, αυτοτέλειας και αυτονομίας, ενισχύοντας παράλληλα την ενεργειακή αποκέντρωση.

Μέχρι σήμερα πλήθος μελετών έχουν προτείνει τέτοιου είδους συστήματα. Παρ' όλα αυτά, η πλειοψηφία αυτών έχει περιοριστεί στη μελέτη συστημάτων παραγωγής πόσιμου νερού με αφαλάτωση από Αιολική ενέργεια και στη μελέτη παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση από Αιολική ενέργεια, ξεχωριστά. Κρίθηκε, λοιπόν, καινοτόμο για τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας να μελετηθεί ένας συνδυασμός αυτών των δύο τεχνολογιών. Έτσι, το προτεινόμενο σύστημα αποτελεί μία ολοκληρωμένη λύση για τα νησιά στο τρίπτυχο ηλεκτρισμός / νερό / μεταφορές.

Έχοντας ως στόχο την τεχνοοικονομική αξιολόγηση του προτεινόμενου υβριδικού συστήματος αφαλάτωσης και ηλεκτρόλυσης, αναπτύχθηκε υπολογιστικός κώδικας ο οποίος προσομοιώνει ενεργειακά το ημιαυτόνομο αυτό σύστημα, με χρονικό βήμα δέκα λεπτών. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα όχι μόνο να προκύψουν κάποια συγκεντρωτικά αποτελέσματα που βοηθούν στην αξιολόγηση του συστήματος αλλά και να παρακολουθηθεί η αλληλεπίδραση των υποσυστημάτων κατά τη διάρκεια ενός έτους. Μάλιστα, προκειμένου να αποκτηθεί μια ολοκληρωμένη άποψη για τη λειτουργία των υποσυστημάτων, παρουσιάζεται η προσομοίωση ενός συστήματος, με προσεγγιστικές τιμές παραμέτρων, αντιπροσωπευτικών για την πλήρη κάλυψη τις κατανάλωσης πόσιμου νερού ενός τυπικού άνδρου νησιού του Αιγαίου πληθυσμιακά της τάξεως της Μήλου, της Σίφνου, της Τήνου ή της Άνδρου (4000÷6000 κάτοικοι).

Με βάση την πλήρη κάλυψη των αναγκών σε πόσιμο νερό και ύδρευση του πληθυσμού και σε δεύτερο βαθμό την παραγωγή υδρογόνου, θα εξετασθεί τελικά αν το υβριδικό αυτό σύστημα αποτελεί μία ανταγωνίσιμη, λειτουργικά και οικονομικά, λύση για περιοχές όπως τα νησιά του Αιγαίου.

Στο σημείο αυτό, με την παράδοση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους που διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στην ολοκλήρωσή της, ξεκινώντας με τον κ. Δημήτριο Παπαντώνη, καθηγητή και Πρόεδρο της σχολής

Πρόλογος

Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π, καθώς και επιβλέπων αυτής της εργασίας, για την ανάθεση του θέματος, αλλά κυρίως, για το χρόνο που αφιέρωσε, τις συμβουλές του και τις υποδείξεις του για τη σύνταξη και ολοκλήρωση της εργασίας, καθώς και για τις πολύτιμες γνώσεις που αποκόμισα καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Επίσης ευχαριστώ θερμά, τον κ. Ιωάννη Αναγνωστόπουλο, επίκουρο καθηγητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. για τις χρήσιμες συμβουλές του σχετικά με τη διπλωματική μου εργασία, τον κ. Γεώργιο Κάραλη, Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π. για την πολύτιμη βοήθειά και την καθοδήγηση του και τον κ. Μάνο Ζούλια, Δρ. Χημικό Μηχανικό Ε.Μ.Π. για την βιβλιογραφική υπόδειξη.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω αυτή την εργασία στην οικογένειά μου και τους στενούς μου φίλους, για την πνευματική υποστήριξη στο τελευταίο στάδιο των προπτυχιακών σπουδών μου.

Ιούνιος 2010,

Θανάσης Μιχαλακόπουλος

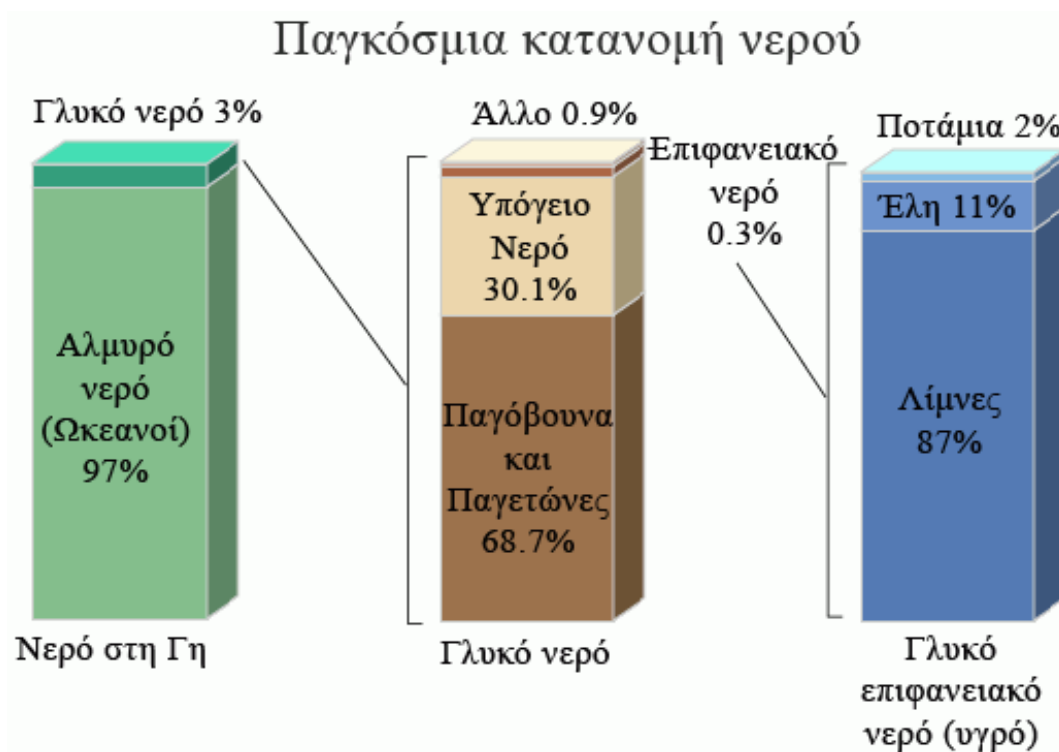
thanos_mech@yahoo.gr

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Νερό

1.1.1 Γενικά στοιχεία για το νερό

Αναμφίβολα, το **νερό** αποτελεί το πιο βασικό συστατικό της ζωής του πλανήτη, αλλά και την κινητήρια δύναμη για την ανθρώπινη εξέλιξη. Όμως, το γλυκό νερό αποτελεί μόλις το 3% του συνολικού υδάτινου αποθέματος, από το οποίο το 30,1% είναι τα υπόγεια ύδατα και μόνο το 0,3% βρίσκεται στην επιφάνεια της γης (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Διασπορά υδάτινων πόρων της Γης

Τα υπόγεια και τα επιφανειακά ύδατα, λοιπόν, αποτελούν την μέχρι σήμερα την πρώτη επιλογή για παροχή πόσιμου νερού. Τις τελευταίες δεκαετίες, όμως, παρατηρείται μια διαρκής μείωση των αποθεμάτων αυτών, η οποία έχει αντίκτυπο στην ζωή εκατομμυρίων ανθρώπων στον πλανήτη.

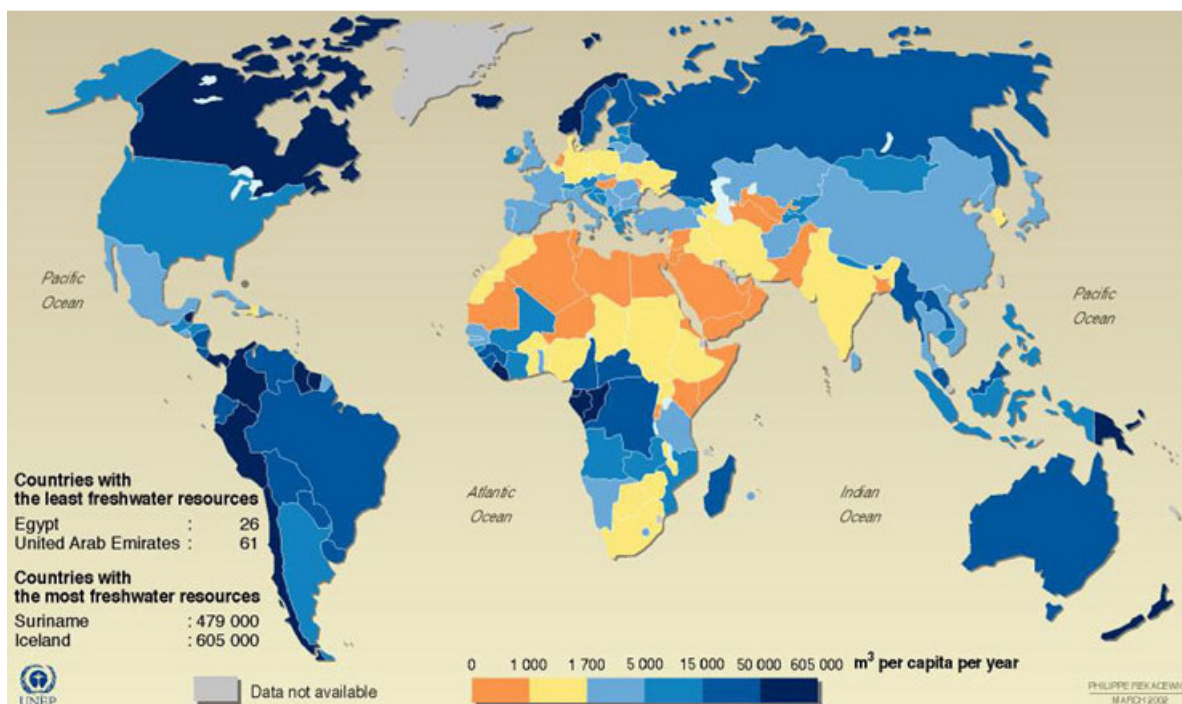
1.1.2 Το παγκόσμιο πρόβλημα της λειψυδρίας

Νερό. Όσοι το έχουμε, θεωρούμε την ύπαρξή του λίγο έως πολύ δεδομένη. Όμως μια γρήγορη ματιά ανά τον κόσμο και κυρίως η ανάγνωση των στοιχείων που αφορούν τις μετρήσεις αποθεμάτων φρέσκου νερού παγκοσμίως, αποδεικνύουν ότι τα τελευταία μειώνονται δραματικά. Όπως προκύπτει, η διαθεσιμότητα του πόσιμου νερού δεν επαρκεί για να καλύψει τις ανάγκες της σύγχρονης εποχής και διαρκώς μειώνεται.

Τα κυριότερα αίτια αυτής της μείωσης συνοψίζονται στα εξής:

- Ραγδαία αύξηση του πληθυσμού της γης
- Μαζική κατανάλωση
- Φαινόμενο της παγκόσμιας θέρμανσης, ή αλλιώς φαινόμενο του θερμοκηπίου
- Κατάχρηση των φυσικών πόρων
- Μόλυνση του νερού

Για αυτό το λόγο, το νερό αποτελεί στρατηγικής σημασίας αγαθό σε όλη την υφήλιο και αιτία για πολλές πολιτικές διενέξεις. Πολλοί έχουν προβλέψει ότι το καθαρό νερό θα γίνει το **πετρέλαιο του μέλλοντος** καθιστώντας χώρες όπως τον Καναδά και την Ισλανδία, με τα πλεονάζοντα αποθέματα νερού, ανάμεσα στις πιο πλούσιες του πλανήτη (Σχήμα 1.2).

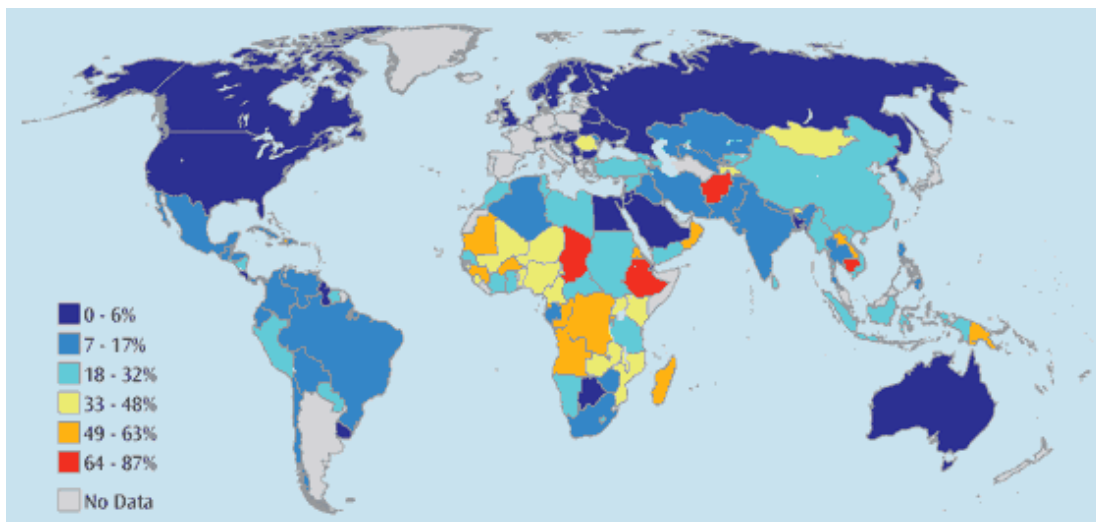


Σχήμα 1.2 Κράτη με δυνατότητα παραγωγής πόσιμου νερού

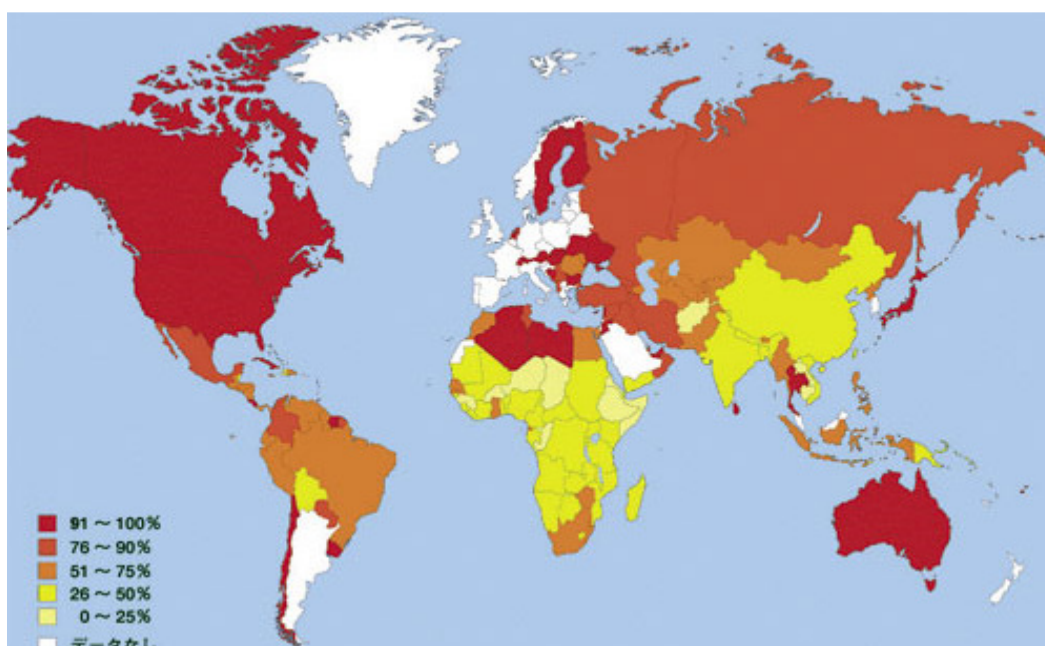
Σύμφωνα με την έρευνα της UNESCO που πραγματοποιήθηκε το 2003 για τα παγκόσμια αποθέματα νερού, στα επόμενα 20 χρόνια η ποσότητα του νερού που αναλογεί στον καθένα προβλέπεται να μειωθεί κατά 30%. Περισσότεροι από 1 δισεκατομμύριο άνθρωποι, ή αλλιώς 1

Κεφάλαιο 1^ο – Εισαγωγή

στους 5 που ζουν σε αναπτυσσόμενα κράτη, στερούνται ασφαλές πόσιμο νερό. Ως **τυπική πρόσβαση** σε πόσιμο νερό θεωρείται η επάρκεια τουλάχιστον 20 λίτρων ανά άτομο ανά ημέρα από ασφαλή πηγή σε απόσταση 1 χιλιομέτρου από τον τόπο κατοικίας του (Σχήμα 1.3). Επίσης, 40% από τους ανθρώπους που ζουν στη γη δεν έχουν επαρκές νερό ακόμα και για υποτυπώδη υγιεινή (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.3 Πληθυσμοί χωρίς πρόσβαση σε πόσιμο νερό



Σχήμα 1.4 Πληθυσμοί με δυνατότητα κάλυψης υγιεινής

Περισσότεροι από 2,2 εκατομμύρια άνθρωποι πέθαναν το 2000 από ασθένειες που σχετίζονται με την κατανάλωση μολυσμένου νερού ή με ξηρασία. Το 2004, σε μια έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τη φιλανθρωπική οργάνωση WaterAid αναφέρεται ότι στη Βρετανία ένα παιδί πεθαίνει κάθε 15 δευτερόλεπτα από ασθένειες που σχετίζονται με το νερό. Το

πόσιμο νερό - τώρα πολυτιμότερο από κάθε άλλη φορά στην ιστορία λόγω της εντατικής χρησιμοποίησης του στη γεωργία, στη σύγχρονη βιομηχανία και στην παραγωγή ενέργειας - χρειάζεται καλύτερη διαχείριση και λογική χρήση εάν δεν επιθυμούμε να ζήσουμε τραγικές καταστάσεις στο μέλλον.

Παρακάτω συνοψίζονται κάποιες άμεσες **επιπτώσεις** της έντονης λειψυδρίας στον πληθυσμό:

- Αύξηση ασθενειών και θανάτων
- Μεταβολή παραγωγικότητας
- Μείωση βιοποικιλότητας
- Διατάραξη της λειτουργίας του οικοσυστήματος
- Μετανάστευση πληθυσμών
- Ανάπτυξη διαμαχών για τον έλεγχο των υδάτινων αποθεμάτων
- Ερημοποίηση περιοχών
- Φτώχεια

Όπως είναι αντιληπτό, η διαχείριση του προβλήματος αποτελεί πολύ υψηλής σημασίας θέμα για την ανθρωπότητα και θα πρέπει να αντιμετωπιστεί καταλλήλως για την αποφυγή μη αντιστρεπτών καταστάσεων.

1.1.3 Η κατάσταση στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα, αν και ακόμα το πρόβλημα δεν είναι ίδιου μεγέθους με άλλες περιοχές του πλανήτη, οι ενδείξεις δείχνουν ότι είναι πολύ πιθανό στο άμεσο μέλλον να αντιμετωπίσουμε σοβαρό πρόβλημα λειψυδρίας. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στην άσκοπη χρήση, στην πληθυσμιακή αύξηση αλλά και στην επαναλαμβανόμενη τα τελευταία χρόνια μείωση των βροχοπτώσεων.

Πιο συγκεκριμένα, η **λειψυδρία στα νησιά του Αιγαίου** αποτελεί μία δυσάρεστη πραγματικότητα λόγω της ιδιαιτερότητας και των περιορισμένων υδάτινων πόρων που παρουσιάζουν τα οικοσυστήματα αυτά. Το εν λόγω πρόβλημα καθίσταται εντονότερο από την άναρχη τουριστική ανάπτυξη που παρατηρείτε σε αυτά τα νησιά. Συνοπτικά, το πρόβλημα της λειψυδρίας ανάγεται στις εξής παραμέτρους:

- Στα μικρού μεγέθους βροχομετρικά ύψη. Η Αμοργός παρουσιάζει μόλις 350mm βροχόπτωσης ανά έτος.
- Οι υπόγειοι υδροφορείς δεν έχουν υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού, διότι είναι περιορισμένοι και συνδέονται με την θάλασσα. Το θαλασσινό νερό, που εισέρχεται στα υπόγεια ύδατα λόγω εντατικής άντλησης, αλλοιώνει την ποιότητα και καταστρέφει τον υπόγειο υδροφόρα.
- Στο εντονότατο νησιωτικό ανάγλυφο, το οποίο συνεπάγεται υψηλές κλίσεις. Οι ροές είναι χειμαρικές και το νερό διοχετεύεται με μεγάλη ταχύτητα προς τη θάλασσα.
- Στην αμυδρή φυτοκάλυψη, που έχει ως αποτέλεσμα το νερό να μην συγκρατείται, να ρέει και να χάνεται.

- Στην έντονη εξάτμιση, που οφείλεται στους ισχυρούς ανέμους και στην συνεχή ηλιοφάνεια.
- Στη μεγάλη απώλεια του μεταφερόμενου νερού στα δίκτυα ύδρευσης, απώλεια που οφείλεται στην παλαιότητα του δικτύου και κατά κάποιες εκτιμήσεις ξεπερνά το 30 % του μεταφερόμενου νερού.

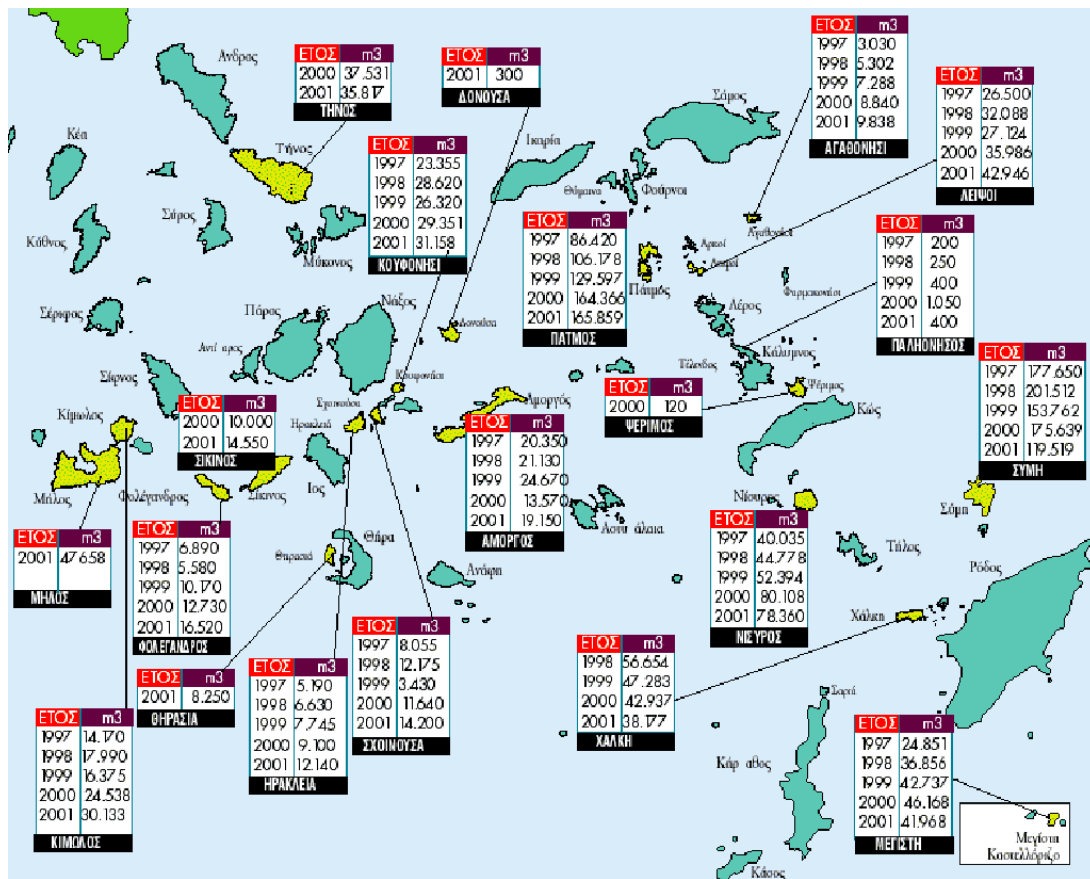
Περίπου σε 20 νησιά των Κυκλάδων και της Δωδεκανήσου αναμένεται αύξηση των ελλειμμάτων νερού από 25-40% στα επόμενα χρόνια, ενώ συνολικά παρά τη μεταφορά περίπου 11.000.000 m³ τα τελευταία 9 έτη, το πρόβλημα οξύνεται αφού συνολικά το ετήσιο υδατικό έλλειμμα στις Κυκλάδες (σε 20 χρόνια) υπολογίζεται γύρω στα 1.300.000 m³ και στα Δωδεκάνησα 1.600.000 m³ εφόσον δεν υπάρξει μέριμνα για μείωση του ελλείμματος με κατασκευή έργων ή λήψη διαχειριστικών μέτρων.

Σύμφωνα με μελέτη του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στα **άνυδρα νησιά** συγκαταλέγονται τα κυκλαδονήσια Αμοργός, Κουφονήσι, Κίμωλος, Ηρακλεία, Σχοινούσα, Φολέγανδρος, Τήνος, Σίκινος, Θηρασία, Δονούσα, Μήλος και από τα Δωδεκάνησα Αγαθονήσι, Λειψοί, Μεγίστη, Νίσυρος, Πάτμος, Σύμη, Χάλκη, Κάλυμνος, Λέρος και Ψέριμος. Προς το παρόν, το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με μεταφορά νερού με δεξαμενόπλοια από την ηπειρωτική Ελλάδα (Ελευσίνα, Λαύριο) ή από γειτονικά νησιά όπου υπάρχουν υδάτινα αποθέματα και γεωτρήσεις (Ρόδος).

Η αλήθεια είναι ότι αυτή η λύση δεν είναι καθόλου συμφέρουσα αφού το κόστος της μεταφοράς είναι αρκετά υψηλό. Συγκεκριμένα, το 2009, σύμφωνα με το υπουργείο Αιγαίου, το κόστος ανερχόταν στα 8,32 €/m³ για τις Κυκλάδες, ενώ για τα Δωδεκάνησα στα 5,05 €/m³. Όπως προκύπτει από τα στατιστικά του υπουργείου Αιγαίου, παρατηρείτε αύξηση της τάξεως του 30-35% στον συνολικό όγκο μεταφερόμενου νερού και αύξηση περίπου 40% στις δαπάνες του κράτους για τη μεταφορά του μέσα σε 10 χρόνια (Πίνακας 1.1). Όσον αφορά το κάθε νησί ξεχωριστά, το σχήμα 1.5 από το Υπουργείο Αιγαίου, είναι αντιπροσωπευτικό της διακύμανσης της μεταφοράς.

ΕΤΟΣ	Ν.Α. ΚΥΚΛΑΔΩΝ			Ν.Α. ΔΩΔΕΚΑΝΗΣΟΥ			ΣΥΝΟΛΑ	
	Ποσότητες κ.μ	Δαπάνες € (με ΦΠΑ)	Δαπάνη ανά κ.μ.	Ποσότητες κ.μ	Δαπάνες € (με ΦΠΑ)	Δαπάνη ανά κ.μ.	Ποσότητες κ.μ	Δαπάνες €
2002	329.343	2.561.278	7,78	617.745	3.109.358	5,03	947.088	5.670.637
2003	336.777	2.772.718	8,23	605.019	3.214.680	5,31	941.796	5.987.398
2004	338.812	2.787.235	8,23	759.737	4.034.203	5,31	1.098.549	6.821.438
2005	464.562	4.006.916	8,63	969.676	5.082.935	5,24	1.434.238	9.089.852
2006	567.719	4.677.686	8,24	1.005.338	4.905.044	4,88	1.573.057	9.582.730
2007	697.117	5.802.509	8,32	1.101.628	5.403.900	4,91	1.798.745	11.206.409
2008	687.731	5.721.921	8,32	1.141.724	5.765.706	5,05	1.829.455	11.487.628
2009	429.075	3.569.904	8,32	826.910	4.175.895	5,05	1.255.985	7.745.799
2010*	59.769	575.713	9,63	95.345	9053169	9,49	155.114	1.480.883
ΣΥΝ.	3.910.905	32.475.884		7.123.122	36.596.894		11.034.027	69.072.778

Πίνακας 1.1 Συγκεντρωτικός πίνακας Δαπανών & Μεταφερόμενων Ποσοτήτων νερού ανά έτος Κυκλάδων & Δωδεκανήσων



Σχήμα 1.5 Υδροδότηση στα νησιά του Αιγαίου έως το 2001

Η λύση, όμως, αυτή που έχει επιλεχθεί, δεν αποτελεί την βέλτιστη, αφού το μόνο που κατορθώνεται είναι να καλυφθεί η ζήτηση μόνο για μια συγκεκριμένη περίοδο, και με όχι οικονομικό τρόπο. Έτσι δεν δημιουργούνται οι υποδομές για επίλυση του προβλήματος σε βάθος χρόνου. Ως στόχος, λοιπόν, πρέπει να τεθεί η ανεύρεση μιας οικονομικά συμφέρουσας λύσης που θα καθιστά την μεταφορά νερού με υδροφόρες ως επιλογή ανάγκης και όχι ως επικρατούσα λύση του προβλήματος.

1.1.4 Μέθοδοι αντιμετώπισης της λειψυδρίας

«Λύσεις αντιμετώπισης υπάρχουν, αναφέρονται σε όλα τα εγχειρίδια Υδρογεωλογίας», τονίζει μεταξύ άλλων ο Δρ Τσιφτής Ευάγγελος, Υδρογεωλόγος πρ. Υπ. Αιγαίου. Συνεπώς είναι κατανοητό, πως είναι αναγκαίο να παρθούν αποφάσεις από τοπικούς φορείς και περιβαλλοντικές οργανώσεις, προκειμένου να εξοικονομηθεί νερό και να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της λειψυδρίας. Οι προτεινόμενες λύσεις για τέτοιες περιπτώσεις είναι οι εξής:

- Υδρογεωτρήσεις όπου ενδείκνυται.
- Κατασκευή λιμνοδεξαμενών και φραγμάτων.
- Φράγματα ανάσχεσης, για εμπλουτισμό των υδροφόρων.
- Κατασκευή μονάδων αφαλάτωσης.

- Βελτίωση των υποδομών με αντικατάσταση των πεπαλαιωμένων δικτύων για περιορισμό των απωλειών.
- Ενημέρωση καταναλωτών για ορθότερη χρήση του νερού.
- Κατασκευή παράλληλου δικτύου κατώτερης ποιότητας νερού για χρήσεις στις οποίες δεν απαιτείται άριστης ποιότητας νερό.
- Επεξεργασία των λυμάτων και ανακύκλωση του νερού εξόδου του βιολογικού καθαρισμού για δευτερεύουσες χρήσεις (πότισμα, καθαριότητα, οικοδομικές εργασίες, πλυντήρια αυτοκινήτων, χρήση στα λιμάνια κ.λπ.).
- Τέλος ως ακριβότερη λύση ανάγκης, μεταφορά νερού με πλοία από το πλησιέστερο γειτονικό νησί με περίσσεια νερού.

Στην παρούσα εργασία, από τις παραπάνω μεθόδους, θα ασχοληθούμε αναλυτικότερα μόνο με την μελέτη μονάδων αφαλάτωσης και συγκεκριμένα **μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης**. Μέχρι σήμερα, η κατασκευή νέων μονάδων αφαλάτωσης στα νησιά του Αιγαίου δεν ακολουθούσε το μέγεθος της ζήτησης. Στο σχήμα 1.6 δίνεται μια λίστα με τις εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης σε νησιά του Αιγαίου, καθώς και ημερήσια δυνατή παραγωγή με το έτος εγκατάστασης και το λειτουργικό κόστος ανά κυβικό μέτρο παραγόμενου νερού. Επίσης ακολουθεί ο πίνακας 1.2 με όσες μονάδες δεν προαναφέρθηκαν. Παρατηρούμε ότι μόνο πέντε μονάδες έχουν κατασκευαστεί από το 2005 και έπειτα (Πόρος 2006, Παξοί 2007, Σίφνος 2007, Μήλος 2007, Ηρακλειά 2008).

Στην παρακάτω λίστα θα πρέπει να προσθέσουμε μονάδες αφαλάτωσης που είναι υπό κατασκευή στη Μύκονο και επιπλέον, μονάδες για τις οποίες δεν έχουμε επαρκή στοιχεία στα ακόλουθα νησιά: Κω, Πάτμο, Σκιάθο, Σύμη, Καστελλόριζο, Αίγινα [Karagiannis, Soldatos, 2006].

Εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης στο Αιγαίο

Μονάδα	Έτος κατασκευής (αρχικά)	Δυναμότητα (m ³ /hr)	Λειτουργικό κόστος ΗΟ
Σύρος 1n (Ερμούπολη)	1992	800	1,25
Σύρος 2n (Ερμούπολη)	1997	800	1,25
Σύρος 3n (Ερμούπολη)	2001	2x250	1,00
Σύρος 4n (Ανω Σύρος)	2000	250	0,50
Σύρος 5n (Ανω Σύρος)	2002	500	0,50
Σύρος 6n (Ερμούπολη)	2002	4x500	1,00
Σύρος 7n (Ανω Σύρος)	2005	2x500	0,40
Σκοινούσσα	2004	100	0,70
Μύκονος (Κόρφος) νέα	2001	3x650	0,50
Πάρος (Νάουσα)	2001	1.200	0,50
Τήνος (Παλαιά)	2001	500	0,62
Τήνος (Νέα)	2005	500	0,62
Σαντορίνη 1n (Οία)	1994	220	2,00
Σαντορίνη 2n (Οία)	2000	320	2,00
Σαντορίνη 3n (Οία)	2002	160	2,00
Σίφνος	2002	500	3,50
Ομηρούπολη (Δήμος), Χίος	2000	600	0,30
Ομηρούπολη (Δήμος), Χίος	2005	3x1.000	0,26
Ομηρούπολη (Δήμος), Χίος	2005	500	0,26
Νίσυρος (Παλαιά)	1991	300	
Νίσυρος (Νέα)	2002	350	0,66
Λέρος (ΔΕΥΑ)	2001	200	0,13
Ποσειδωνία (Δήμος) 2	2002	2x250	0,56
Ποσειδωνία (Δήμος) 2	2005	2x500	0,45
Σίφνος (Δήμος)	2007	250	
Ιος (Δήμος)	2003	1.000	
Οινούσσες (Δήμος)	2005	500	

Παραγωγή από μονάδες συμβατικής αφαλάτωσης

Μονάδα	m ³
Νίσυρος	67.366
Σαντορίνη	72.040
Ιος	107.354
Σίφνος	45.427
Πάρος	206.778
Σύρος	649.805
Μύκονος	386.346
Κίμωλος	27.754
Χίος	366.836

Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για αφαλάτωση



Σχήμα 1.6 Εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης στα νησιά του Αιγαίου

Νησί	Περιοχή	Δυνατή παραγωγή (m ³ /ημέρα)	Έτος εγκατάστασης
Μύκονος	Κόρφος	1200 (2 μονάδες)	1989
		2250 (3 μονάδες)	2001
Μήλος	Μήλος	2600	2007
Ηρακλειά	Πλωτή μονάδα	70	2008
Μεγίστη	Μεγίστη	50	1990
Ιθάκη	Ιθάκη	620	1981
		520	2003
Παξοί	Παξοί	330	2005
		150	2005
		250	2007
Πόρος	Πόρος	1000	2006

Πίνακας 1.2 Επιπλέον εγκατεστημένες μονάδες αφαλάτωσης στα νησιά του Αιγαίου και του Ιονίου

Το υπουργείο Εμπορικής Ναυτιλίας, Αιγαίου και Νησιωτικής πολιτικής προκήρυξε πρόσκληση το 2008 προς κάθε ενδιαφερόμενο για υποβολή προτάσεων αντιμετώπισης του προβλήματος της λειψυδρίας στα νησιά με μέγιστη τιμή πώλησης του νερού τα 2,5 €/m³. Η πρόσκληση αυτή, δείχνει την πρόθεση της πολιτείας να λύσει μακροπρόθεσμα το πρόβλημα της λειψυδρίας και αποτελεί ελπίδα για το μέλλον των άνυδρων νησιών. Μάλιστα, ήδη, βρίσκονται υπό μελέτη μονάδες αφαλάτωσης σε αρκετά νησιά του Αιγαίου.

1.1.5 Α.Π.Ε. και ο ρόλος τους στο πρόβλημα της λειψυδρίας

Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε.) αποτελεί ένα αποτελεσματικό μέτρο για τις ανθρώπινες κοινωνίες σε παγκόσμιο επίπεδο, προκειμένου αυτές να αντικαταστήσουν τη χρησιμοποίηση των ορυκτών καυσίμων σαν κύρια μέσα μαζικής παραγωγής της ενέργειας τους και να μειώσουν τις επιπτώσεις που προκαλούνται από αυτά στη κλιματική ισορροπία του πλανήτη. Επιπλέον, στο επίπεδο των διαφόρων κρατών που δεν διαθέτουν πλούσια φυσικά αποθέματα σε ορυκτά καύσιμα (π.χ. πετρέλαιο), οι Α.Π.Ε. αποτελούν την καλύτερη λύση προκειμένου αυτά να στηρίξουν από μόνα τους τις ενεργειακές τους οικονομίες, χωρίς να χρειάζεται να εξαρτιούνται ενεργειακά από άλλα κράτη – παραγωγούς και προμηθευτές τους σε ορυκτές πρώτες ύλες.

Τέλος, οι Α.Π.Ε. θεωρούνται, τουλάχιστον μέχρι σήμερα, ως η μόνη πρακτικά εφαρμόσιμη εναλλακτική λύση έναντι της μαζικής χρήσης της πυρηνικής ενέργειας, μιας και τα αδιέξοδα που προκύπτουν από την εκτεταμένη χρησιμοποίηση αυτής είναι ως γνωστόν πολλά (π.χ. χρησιμοποίησή της για μη ειρηνικούς σκοπούς, ενδεχόμενα πυρηνικά ατυχήματα, μη ύπαρξη ολοκληρωμένου σχεδίου ασφαλούς και μακροπρόθεσμης διαχείρισης των πυρηνικών αποβλήτων της κ.λπ.).



Σχήμα 1.7 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Στο πρόβλημά μας, το **κόστος παραγωγής νερού** από μια μονάδα αφαλάτωσης αποτελεί ίσως, τον πιο σημαντικό παράγοντα στην απόφαση για την εγκατάσταση της. Έτσι, λαμβάνοντας υπ' όψη ότι αρκετά μεγάλο μέρος του κόστους παραγωγής νερού από μια μονάδα αφαλάτωσης διαμορφώνεται από τον τρόπο τροφοδότησής της, η επιλογή τρόπου ηλεκτροδότησης αποτελεί ένα επίσης σημαντικό θέμα προς μελέτη. Η πρώτη σκέψη για την εξυπηρέτηση της αφαλάτωσης είναι η σύνδεση της με μια συμβατική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, αν το νησί είναι διασυνδεδεμένο με το δίκτυο ή αυτόνομο. Όμως αυτή η λύση δεν αποτελεί την ενδεδειγμένη για τους εξής λόγους:

- Η πλειονότητα των νησιών που αντιμετωπίζουν πρόβλημα λειψυδρίας, δεν είναι διασυνδεδεμένα ή έχουν εγκατεστημένες μονάδες ισχύος που δεν επαρκούν για τις ενεργειακές ανάγκες μιας μονάδας αφαλάτωσης.
- Τις τελευταίες δεκαετίες σε παγκόσμιο επίπεδο, κρίνεται επιτακτική η σταδιακή **απεξάρτηση** της ηλεκτροπαραγωγής από τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, άνθρακα). Άλλωστε, όχι μόνο τα αποθέματα αυτών των συμβατικών πηγών έχουν αρχίσει να εξαντλούνται με αποτέλεσμα να αυξάνεται και το κόστος τους, αλλά και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς που χρησιμοποιούν τέτοιου είδους καύσιμα, είναι δύσκολα αντιστρέψιμες και επηρεάζουν τη ζωή όλου του πλανήτη.

Έτσι, ειδικά όταν θέλουμε να καλύψουμε τις ενεργειακές ανάγκες μιας μικρής σχετικά και αποκεντρωμένης περιοχής όπως ένα νησί, ενδείκνυται να στραφούμε προς την **επιλογή ανανεώσιμων μορφών/πηγών ενέργειας**, ενός συνεχώς εξελισσόμενου κλάδου που αποτελεί το παρόν και το μέλλον στην ηλεκτροπαραγωγή. Την σκέψη αυτή ενισχύουν τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά της Ελλάδος και ιδιαίτερα των νησιών, όπου οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (άνεμος, ηλιακή ακτινοβολία) είναι άφθονες και καθιστούν την εκμετάλλευσή τους ιδιαίτερα χρήσιμη και αποδοτική σε πολλούς τομείς.

Κλείνοντας, αναφέρουμε συνοπτικά κάποια πλεονεκτήματα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας [Ζερβός, 2007]:

- Πρακτικά ανεξάντλητες πηγές
- Συμβάλλουν στην ενεργειακή αυτάρκεια της χώρας
- Απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα
- Χαμηλό λειτουργικό κόστος
- Σχετικά μικρή διάρκεια κατασκευής
- Δημιουργία θέσεων εργασίας
- Φιλικές προς το περιβάλλον

1.2 Υδρογόνο

«Το νερό θα είναι μια μέρα καύσιμη ύλη. Το υδρογόνο και το οξυγόνο, από τα οποία συντίθεται, αν χρησιμοποιηθούν ξεχωριστά θα προσφέρουν μια ανεξάντλητη πηγή θερμότητας και φωτός».

Ιούλιος Βερν, *Το Νησί του Μυστηρίου*, 1874.

1.2.1. Γενικά στοιχεία για το υδρογόνο

Η λέξη **υδρογόνο** (hydrogen) προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις «ὔδωρ» + «γεννώ», δηλαδή δηλώνει την βασική χημική ιδιότητά του να καίγεται σχηματίζοντας *ύδωρ*, δηλαδή νερό. Το χημικό στοιχείο υδρογόνο (**H**) (ή ακριβέστερα **διυδρογόνο**), στη συνηθισμένη διατομική στοιχειακή του μορφή, είναι ένα άχρωμο, άοσμο, άγευστο, εξαιρετικά εύφλεκτο αμέταλλο, διατομικό αέριο, με ατομικό αριθμό 1, ατομική μάζα 1,00794amu, χημικό τύπο **H₂**, μοριακή μάζα 2,01588 amu. Είναι επίσης, το ελαφρύτερο χημικό στοιχείο και κατέχει την πρώτη θέση στον περιοδικό πίνακα των στοιχείων (Σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.8 Το υδρογόνο στον περιοδικό πίνακα

Το υδρογόνο είναι το πιο απλό και πιο άφθονο στοιχείο στον κόσμο και αποτελεί περίπου το **90%** της συνολικής μάζας του σύμπαντος. Παρ' όλα αυτά, το υδρογόνο βρίσκεται σπάνια μόνο του στη φύση, καθώς συμμετέχει σε ενώσεις με άλλα στοιχεία. Έτσι, πολύ λίγο αέριο

υδρογόνο υπάρχει στη γήινη ατμόσφαιρα. Μπορεί να συνδυαστεί χημικά με σχεδόν κάθε άλλο στοιχείο και έτσι μπορεί να δώσει περισσότερες ενώσεις από οποιοδήποτε άλλο στοιχείο. Στις ενώσεις αυτές συγκαταλέγονται το νερό, η αμμωνία, τα οξέα, τα υδροξείδια, διάφοροι υδρογονάνθρακες όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο και μεγάλο ποσοστό των υπόλοιπων οργανικών ενώσεων. Το να παραχθεί υδρογόνο από αυτές τις ενώσεις είναι μια από τις προκλήσεις της χρησιμοποίησης του υδρογόνου ως **καύσιμο** σε μηχανές εσωτερικής καύσης και κυψέλες καυσίμου (fuel cells), με τις οποίες μπορούν λειτουργήσουν οχήματα με μηδενικές εκπομπές ρύπων.

Παρακάτω ακολουθούν συνοπτικά οι φυσικές ιδιότητες και οι ιδιότητες καύσης του υδρογόνου σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας 1 atm και 0 °C αντίστοιχα (Πίνακας 1.3).

ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	H₂
Πυκνότητα [kg/m ³]	0.09
Σχετική πυκνότητα αέρα	0.07
Σημείο βρασμού [°C]	-252.7
Συντελεστής διάχυσης στον αέρα [cm ² /s]	0.61
Κινηματικό ιξώδες [10 ⁻⁶ m ² /s]	106
Υψηλότερη θερμαντική αξία [MJ/Nm ³]	12.7
Υψηλότερη θερμαντική αξία [MJ/kg]	141
Χαμηλότερη θερμαντική αξία [MJ/Nm ³]	10.8
Χαμηλότερη θερμαντική αξία [MJ/kg]	120
Μοριακή μάζα [kg/mol]	2.016
Σταθερά αερίου [J/kg.K]	4.124
Μοριακός όγκος [Nm ³ /mol]	22.43
Σταθερά συμπίεσης	1.0006
Ειδική χωρητικότητα C _p [kJ/kg.K]	14.2
Ειδική χωρητικότητα C _v [kJ/kg.K]	10.08
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΥΣΗΣ	H₂
Θερμοκρασία αυτανάφλεξης [°C]	530
Όρια ανάφλεξης [vol.%]	4.0-75.0
Όρια έκρηξης [vol.%]	13-65
Ελάχιστη ενέργεια ανάφλεξης [mJ]	0.02
Θερμοκρασία φλόγας [°C]	2.086
Ταχύτητα φλόγας [cm/s]	346
Δείκτης Wobbe [MJ/Nm ³]	48.34

Πίνακας 1.3 Ιδιότητες υδρογόνου σε συνθήκες 1 atm και 0 °C

Ο δείκτης Wobbe χρησιμοποιείται για να συγκρίνει την παραγωγή ενέργειας διαφορετικών αερίων στη διάρκεια της καύσης σε μια συσκευή. Εάν δύο καύσιμα έχουν τους ίδιους δείκτες Wobbe για δεδομένες συνθήκες πίεσης, η ενεργειακή παραγωγή θα είναι επίσης ίδια. Χαρακτηριστικά, παραλλαγές μέχρι 5% επιτρέπονται δεδομένου ότι αυτές δεν θα ήταν αξιοπρόσεχτες από τον καταναλωτή.

1.2.2. Το υδρογόνο ως φορέας ενέργειας – Οικονομία του υδρογόνου

Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως **φορέας ενέργειας (energy carrier)**. Μάλιστα αυτή τη στιγμή γίνονται σημαντικές προσπάθειες, κυρίως στα ιδιαίτερα ανεπτυγμένα κράτη, για τη μετατροπή της προσαρμοσμένης στα συμβατικά καύσιμα υποδομής σε υποδομή με βάση το υδρογόνο. Ενδεικτικά η Ισλανδία προβλέπει υποδομή πλήρως βασισμένη στο υδρογόνο μέχρι το 2030 - 2040, ενώ μέχρι το 2030 στόχος του Υπουργείου Οικονομίας των ΗΠΑ είναι η αντικατάσταση του 10% της ενεργειακής κατανάλωσης από ενέργεια προερχόμενη από υδρογόνο.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα για το πώς το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί ενέργεια είναι οι λεγόμενες **κυψέλες καυσίμου (fuel cells)**, στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το υδρογόνο. Η τάση κατανάλωσης καυσίμων όλο και μικρότερης περιεκτικότητας σε άνθρακα είναι ιστορικά εμφανής. Το υδρογόνο, απαλλαγμένο από άνθρακα, μπορεί να προσφέρει αρκετή ενέργεια για καθημερινές χρήσεις, όπως η ηλεκτροδότηση κτιρίων ή η κίνηση μεταφορικών μέσων. Συγκεκριμένα, το υδρογόνο που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) είναι σύμφωνα με περιβαλλοντολόγους το **ιδανικό καύσιμο**, αφού δεν υπάρχει περιβαλλοντικό κόστος στην παραγωγή και χρήση του υδρογόνου, όταν χρησιμοποιείται αιολική ή ηλιακή ενέργεια (Σχήμα 1.9).



Σχήμα 1.9 Υδρογόνο παραγόμενο από Α.Π.Ε. – το ιδανικό καύσιμο

Ειδικά για τις επίγειες μεταφορές, η σύγκριση υδρογόνου με τα συμβατικά καύσιμα παρουσιάζει ενδιαφέρον [Steinberger, 2008]:

- 1 Nm³ υδρογόνου αντιστοιχεί σε 0,34 lt βενζίνης
- 1 lt υγροποιημένου υδρογόνου αντιστοιχεί σε 0,27 lt βενζίνης
- 1 kg υδρογόνου αντιστοιχεί σε 2,75 kg βενζίνης, 2,1 kg φυσικού αερίου κλπ

Αν η μελλοντικής κλίμακας μαζική παραγωγή του υδρογόνου βασιστεί σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.), οι διαδικασίες της οικονομίας του θα αποτελέσουν μια καθαρή από ρύπους, κυκλική διαδικασία, η οποία θα σχηματίζει τον λεγόμενο **ανανεώσιμο κύκλο του υδρογόνου**.

Τέλος, αξίζει να αναφερθούμε στην επονομαζόμενη «**Οικονομία του υδρογόνου**». Με τον όρο αυτό ονομάζουμε την υποδομή που χρειάζεται να αναπτυχθεί προκειμένου να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου, η οποία θα είναι βασισμένη στο υδρογόνο και θα περιλαμβάνει τις έννοιες της παραγωγής, αποθήκευσης και χρήσης του.

1.2.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης υδρογόνου ως καύσιμο.

Στις μέρες μας υπάρχει ένας σαφής προσανατολισμός προς την κατεύθυνση του υδρογόνου, ο οποίος οφείλεται στους παρακάτω λόγους:

- Έχει **πολύ χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης**. Το ποσό ενέργειας που απαιτείται για να αναφλέξει το υδρογόνο είναι περίπου ένα μέγεθος λιγότερο από αυτό που απαιτείται για τη βενζίνη. Αυτό επιτρέπει στις μηχανές υδρογόνου να εξασφαλίσουν γρήγορη ανάφλεξη. Δυστυχώς, η χαμηλή αυτή ενέργεια σημαίνει ότι τα αέρια μπορούν να χρησιμεύσουν ως πηγές ανάφλεξης, κάτι το οποίο δημιουργεί προβλήματα πρόωρης ανάφλεξης. Η παρεμπόδιση αυτού είναι μια από τις προκλήσεις που συνδέονται με τη λειτουργία μιας μηχανής με υδρογόνο.
- Το υδρογόνο έχει **μικρή απόσταση απόσβεσης**, μικρότερη από τη βενζίνη. Κατά συνέπεια, είναι δυσκολότερο να αποσβησθεί μια φλόγα υδρογόνου από μια φλόγα βενζίνης.
- Το υδρογόνο έχει μια σχετικά **υψηλή θερμοκρασία αυτανάφλεξης**. Αυτό έχει σημαντικές επιπτώσεις όταν συμπιέζεται ένα μίγμα με υδρογόνο. Στην πραγματικότητα, η θερμοκρασία αυτανάφλεξης είναι ένας σοβαρός παράγοντας στον καθορισμό ποιας αναλογίας συμπίεσης μια μηχανή μπορεί να χρησιμοποιήσει, δεδομένου ότι η άνοδος της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της συμπίεσης συσχετίζεται με την αναλογία συμπίεσης.
- Το υδρογόνο έχει **υψηλή ταχύτητα ανάφλεξης** στις στοιχειομετρικές αναλογίες. Υπό αυτούς τους όρους, η ταχύτητα ανάφλεξης υδρογόνου είναι σχεδόν ένα μέγεθος υψηλότερη από αυτή της βενζίνης. Αυτό σημαίνει ότι οι μηχανές υδρογόνου μπορούν να πλησιάσουν περισσότερο το θερμοδυναμικό ιδανικό κύκλο μηχανών.
- Το υδρογόνο έχει τον **υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο** ανά μονάδα βάρους από οποιοδήποτε άλλο γνωστό καύσιμο, 120,7 kJ/gr και περίπου τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό της συμβατικής βενζίνης.
- Κάνει «**καθαρή καύση**». Όταν καίγεται με οξυγόνο παράγει μόνο νερό και θερμότητα. Όταν καίγεται με τον ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος αποτελείται περίπου από 68% άζωτο, παράγονται επίσης μερικά οξείδια του αζώτου, σε αμελητέο ωστόσο βαθμό.

- Για το λόγο ότι κάνει καθαρή καύση, δεν συμβάλλει στη μόλυνση του περιβάλλοντος. Το ποσό του νερού που παράγεται κατά τη καύση είναι τέτοιο, ώστε να θεωρείται επίσης αμελητέο και επομένως μη ικανό να επιφέρει κάποια κλιματολογική αλλαγή δεδομένης ακόμα και μαζικής χρήσης.

Όσων αφορά τώρα τα μειονεκτήματα του υδρογόνου έναντι των υπολοίπων συμβατικών πηγών ενέργειας, τα περισσότερα από αυτά έχουν να κάνουν με την σχετικά πρόσφατη στροφή της έρευνας προς την αξιοποίηση του υδρογόνου ως καύσιμο. Άμεσο αποτέλεσμα είναι, να μην έχουν ακόμα εξελιχθεί οι κατάλληλες τεχνικές, ώστε να είναι ικανό το υδρογόνο να αξιοποιηθεί σε μαζική κλίμακα στη πράξη. Συνοπτικά, τα μειονεκτήματα αυτά έχουν ως εξής:

- Το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει σήμερα το υδρογόνο σαν καύσιμο, αλλά και γενικότερα σαν βιομηχανικό προϊόν, είναι αυτό της αποτελεσματικής και ασφαλούς αποθήκευσής του. Δεδομένου του ότι το υδρογόνο είναι πολύ ελαφρύ, η συμπίεση μεγάλης ποσότητας σε μικρού μεγέθους δεξαμενή είναι δύσκολη λόγω των υψηλών πιέσεων που χρειάζονται για να επιτευχθεί η υγροποίηση. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης υπό ανάπτυξη περιλαμβάνουν δεξαμενές με αέριο υδρογόνο που συμπιέζεται μέχρι 10.000 λίβρες ανά τετραγωνική ίντσα, υγρό υδρογόνο που ψύχεται σε -423°F (-253°C) σε μονωμένες δεξαμενές, και τη χημική ένωση υδρογόνου με ένα άλλο υλικό (όπως τα υδρίδια μετάλλων).
- Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει το υδρογόνο σαν καύσιμο παραγωγής ενέργειας είναι και το γεγονός, ότι το παγκόσμιο δίκτυο διανομής του προς το παρόν δεν υφίσταται, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μαζική κλίμακα και από όλες τις χώρες του κόσμου. Επιπλέον, λόγω της ανυπαρξίας του δικτύου διανομής του, το κόστος ανεφοδιασμού του υδρογόνου σε παγκόσμια κλίμακα παραμένει ακόμα υψηλό, μιας και οι διάφορες τεχνολογίες παραγωγής του μέσω ΑΠΕ δεν έχουν εξελιχθεί ακόμα σε ικανοποιητικό βαθμό. Το γεγονός όμως αυτό αναμένεται να αλλάξει στο μέλλον, όσο η κατανάλωσή του σαν καύσιμο θα αρχίσει να αυξάνεται και όσο η παραγωγή του από Α.Π.Ε. θα γίνεται όλο και φθηνότερη.
- Υπάρχει, επίσης, το ζήτημα της προέλευσης της ενέργειας που δαπανάται για την παραγωγή του. Αν, για παράδειγμα, χρησιμοποιηθεί ενέργεια προερχόμενη από ανθρακούχα ορυκτά, το συνολικό περιβαλλοντολογικό όφελος είναι πρακτικά αρνητικό (συνυπολογίζοντας και την ενέργεια συμπίεσης / διαχείρισης).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ

2.1 Εισαγωγή

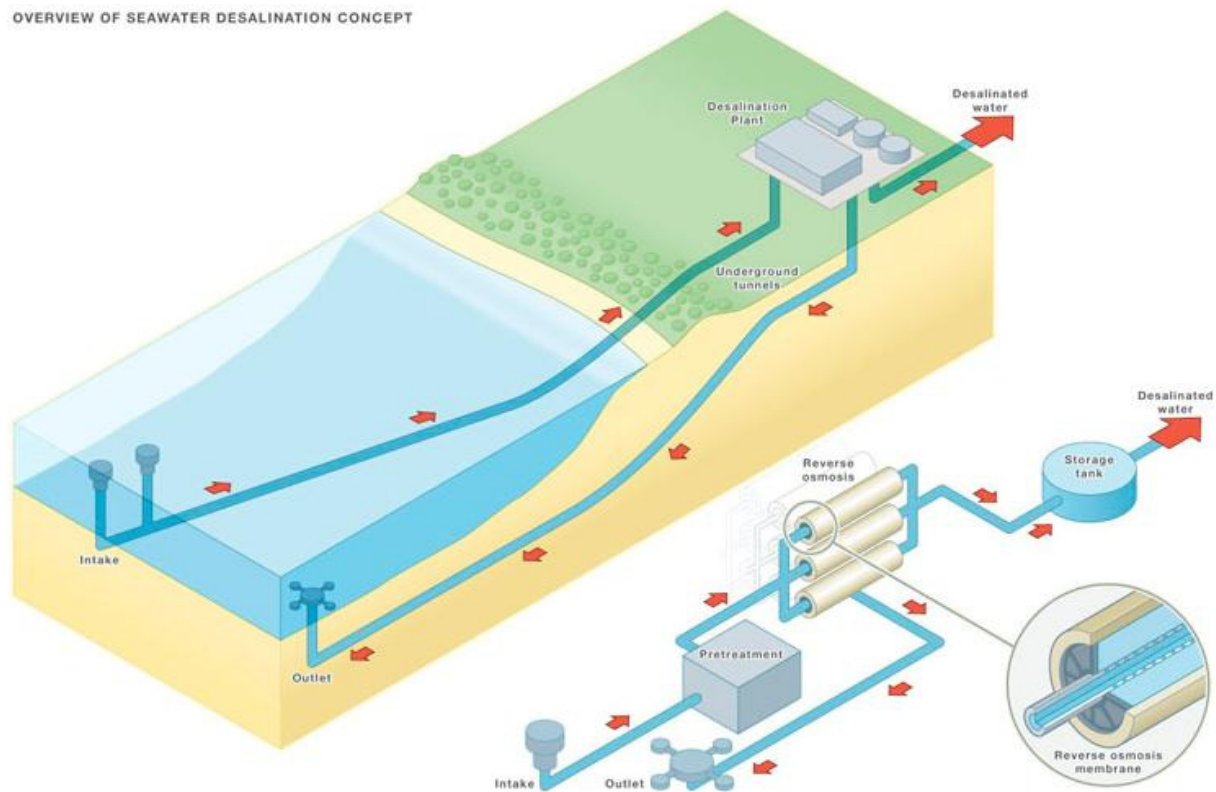
2.1.1 Γενικά και ιστορικά στοιχεία για την αφαλάτωση

Γενικά με τον όρο «αφαλάτωση» χαρακτηρίζεται η οποιαδήποτε διεργασία αφαίρεσης αλάτων από μια αλατούχα ουσία και κυρίως από αλατούχα ύδατα. Έτσι κατ' επέκταση, η αφαλάτωση είναι μια μέθοδος ανάκτησης πόσιμου νερού από θαλασσινό νερό, υφάλμυρα ποτάμια και λίμνες. Εφαρμόζεται κυρίως σε περιοχές με ξηρό κλίμα, φτωχές σε πόσιμο νερό και με πρόσβαση όμως σε θαλασσινό νερό. Η αφαλάτωση άρχισε να αναπτύσσεται κατά τον 20^ο αιώνα με την εμφάνιση λειψυδρίας σε πολλές περιοχές της Γης. Όπως είναι γνωστό το 97,3% περίπου των παγκόσμιων αποθεμάτων νερού βρίσκεται στη θάλασσα αναμιγμένο σε μεγάλες αναλογίες με διάφορα διαλυμένα άλατα σε τέτοια μορφή που η χρήση του, είτε ως πόσιμο, είτε ακόμα και για βιομηχανικές διεργασίες καθίσταται αδύνατη.

Ιστορικά η ιδέα της αφαλάτωσης ανάγεται στους αρχαίους Έλληνες ναυτικούς που την εφάρμοζαν κατά τον 4^ο π.Χ. αιώνα διά εξατμίσεως του θαλασσινού νερού που την περιγράφει και ο Αριστοτέλης. Επίσης περιγραφή αφαλάτωσης αναφέρεται ως πραγματεία από Άραβα συγγραφέα του 8^{ου} μερικής αιώνα που βασίζεται στην απόσταξη του νερού. Δέκα αιώνες αργότερα, με την ανάπτυξη των ατμοκίνητων πλοίων (της ατμοπλοΐας) η αναγκαιότητα μεγάλης ποσότητας ύδατος στη χρήση των ατμομηχανών κατέστησε επιτακτική ανάγκη την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού ώστε να μη προκαλείται ταχύτατη διάβρωση αυτών. Πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας αφαλάτωσης νερού δόθηκε στην Αγγλία το 1869. Η σπουδαιότητα αυτής της ανακάλυψης διαφάνηκε από το γεγονός ότι τον ίδιο αμέσως χρόνο οι Άγγλοι εγκατέστησαν τη πρώτη μεγάλη μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού ύδατος στο Άντεν για τις ανάγκες του στόλου τους. Ο πρώτος μεγάλος εργοστασιακός σταθμός αφαλάτωσης θαλασσινού ύδατος για εμπορική και βιομηχανική χρήση εγκαταστάθηκε στην Αρούμπα (τότε Ολλανδικές Αντίλλες) το 1930.

2.1.2 Αρχές λειτουργίας

Αν και έχει αναπτυχθεί ποικιλία μέθοδοι αφαλάτωσης, οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω, η βασική διαδικασία και τα επί μέρους στάδια όλου του συστήματος παραμένουν ίδια. Σε αυτή την ενότητα, θα γίνει προσπάθεια να περιγραφεί ένα τυπικό σύστημα αφαλάτωσης (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1 Αναπαράσταση ενός τυπικού συστήματος αφαλάτωσης

Αρχικά λοιπόν, το θαλασσινό νερό συλλέγεται μέσω δικτύου σωληνώσεων, ενώ συγχρόνως αφαιρούνται σωματίδια προκειμένου να έχει καλύτερη απόδοση η διαδικασία αλλά και να βελτιωθεί η ποιότητα του νερού (*Intake*). Στη συνέχεια, το ρεύμα θαλασσινού νερού διέρχεται από μια διαδικασία, η οποία προηγείται της αφαλάτωσης, όπου φιλτράρεται ή/και επεξεργάζεται χημικά αναλόγως τη μέθοδο αφαλάτωσης (*Pretreatment*). Το νερό μετά από αυτό το στάδιο είναι έτοιμο για να «περάσει» από το κύριο μέρος της εγκατάστασης (*Desalination*). Εδώ, το σύστημα αφαλάτωσης διαχωρίζει το ρεύμα εισόδου σε ένα ρεύμα με αφαλατωμένο νερό και σε ένα ρεύμα με συμπυκνωμένη άλμη (*Brine*).

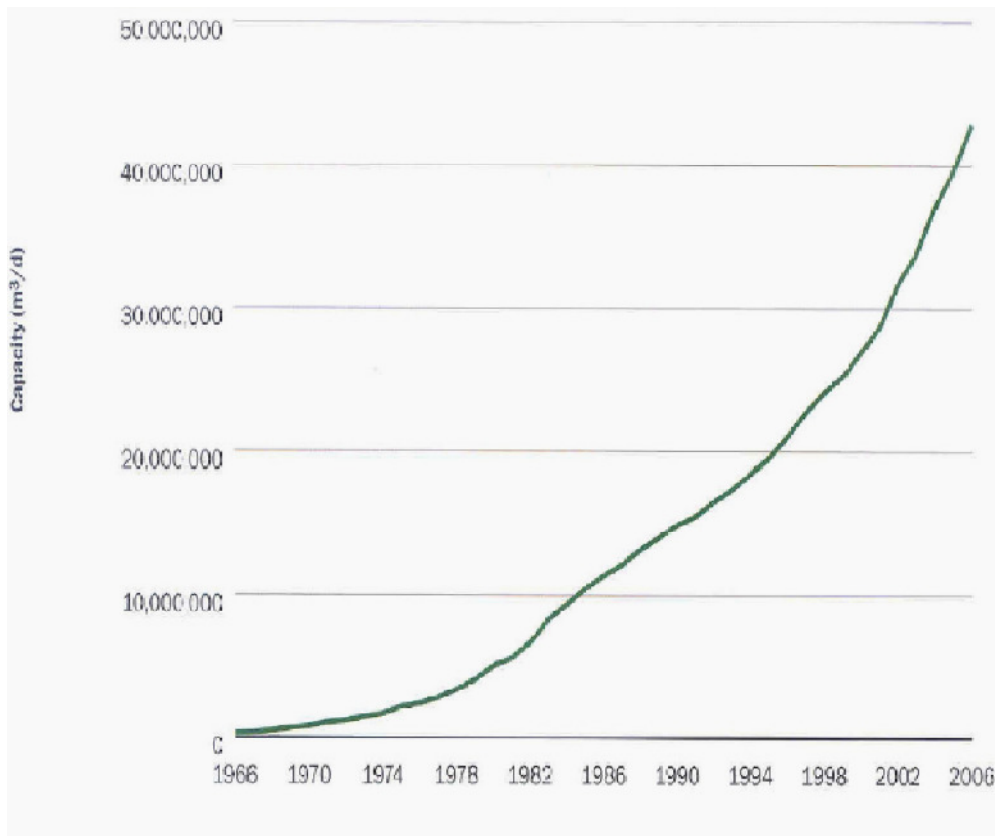
Η μέθοδος με την οποία διαχωρίζεται το ρεύμα θαλασσινού νερού ποικίλει. Έχουν αναπτυχθεί αρκετές διεργασίες αφαλάτωσης, των οποίων στοιχεία θα αναλυθούν στην αντίστοιχη ενότητα. Στην αναπαράστασή μας, βλέπουμε την μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης (*Reverse Osmosis*). Αξίζει να αναφέρουμε επίσης, ότι η απόρριψη αυτής της άλμης στη θάλασσα (*Outlet*), είναι πιθανόν να έχει επιπτώσεις στη θαλάσσια χλωρίδα και πανίδα. Συνεπώς, η εκμετάλλευση της είναι αναγκαία (π.χ. παραγωγή άλατος).

Στη συνέχεια, το αφαλατωμένο νερό επεξεργάζεται εκ νέου, για να ικανοποιηθούν κάποιες απαιτήσεις ποιότητας, προκειμένου να είναι κατάλληλο για χρήση (*Post Treatment*). Τέλος, πολλές φορές, το παραγόμενο νερό αποθηκεύεται σε δεξαμενές στην περίπτωση που η εκμετάλλευση του δεν απαιτείται να είναι άμεση (*Storage Tank*).

2.1.3 Η αφαλάτωση σε παγκόσμιο επίπεδο

Η αφαλάτωση θαλάσσιου νερού είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στη Μέση Ανατολή και στην Καραϊβική. Επιπλέον τα τελευταία χρόνια βρίσκει εκτεταμένη εφαρμογή και σε περιοχές όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Βόρεια Αφρική, η Σιγκαπούρη, η Ιβηρική Χερσόνησος, η Αυστραλία, η Ινδία και η Κίνα. Χώρες που εμφανίζουν ραγδαία πληθυσμιακή αύξηση και αναπτυσσόμενη βιομηχανία, έχουν ξεκινήσει να επενδύουν σε μονάδες αφαλάτωσης για την παραγωγή πόσιμου νερού.

Το 1995 υπήρχαν παγκοσμίως πάνω από 11.000 μονάδες αφαλάτωσης, από τις οποίες τα δύο τρίτα βρίσκονται στη Μέση Ανατολή, κυρίως στη Σαουδική Αραβία, με συνολική απόδοση 7,4 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα νερού το χρόνο. Μερικές χώρες που αντιμετωπίζουν σημαντικό πρόβλημα έλλειψης νερού, όπως το Ισραήλ, έχουν αναπτύξει καλλιέργειες σε ξηρό περιβάλλον, με εξαιρετικά περιορισμένα αποθέματα νερού, που είχαν υψηλή περιεκτικότητα σε αλάτι.

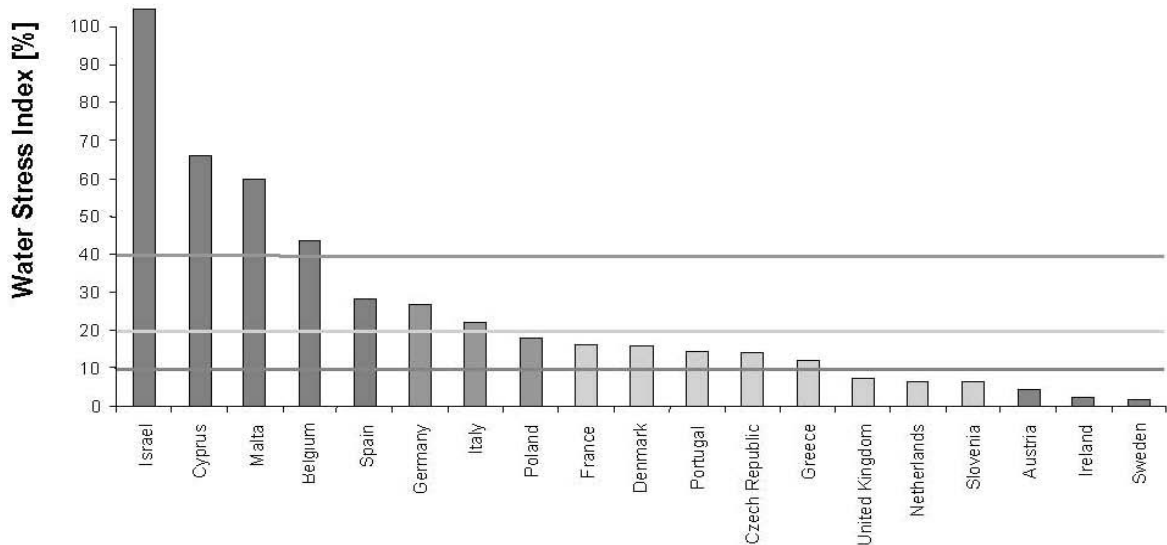


Σχήμα 2.2 Εγκατεστημένη δυναμικότητα παγκοσμίως

Στο σχήμα 2.2 παρατηρούμε την εγκατεστημένη δυναμικότητα παραγωγής πόσιμου νερού παγκοσμίως, όπως επίσης και την αλματώδη ανάπτυξη που έχουν γνωρίσει αυτές οι εφαρμογές το τελευταίο διάστημα. Στις μέρες μας, λειτουργούν περίπου 13.600 μονάδες αφαλάτωσης παγκοσμίως. Το 11% αυτών των μονάδων εγκαταστάθηκαν τα τελευταία χρόνια (πριν το 2000). Το 38% αυτών βρίσκονται στον Περσικό Κόλπο και το 17% στις ΗΠΑ.

Κεφάλαιο 2^ο – Αφαλάτωση

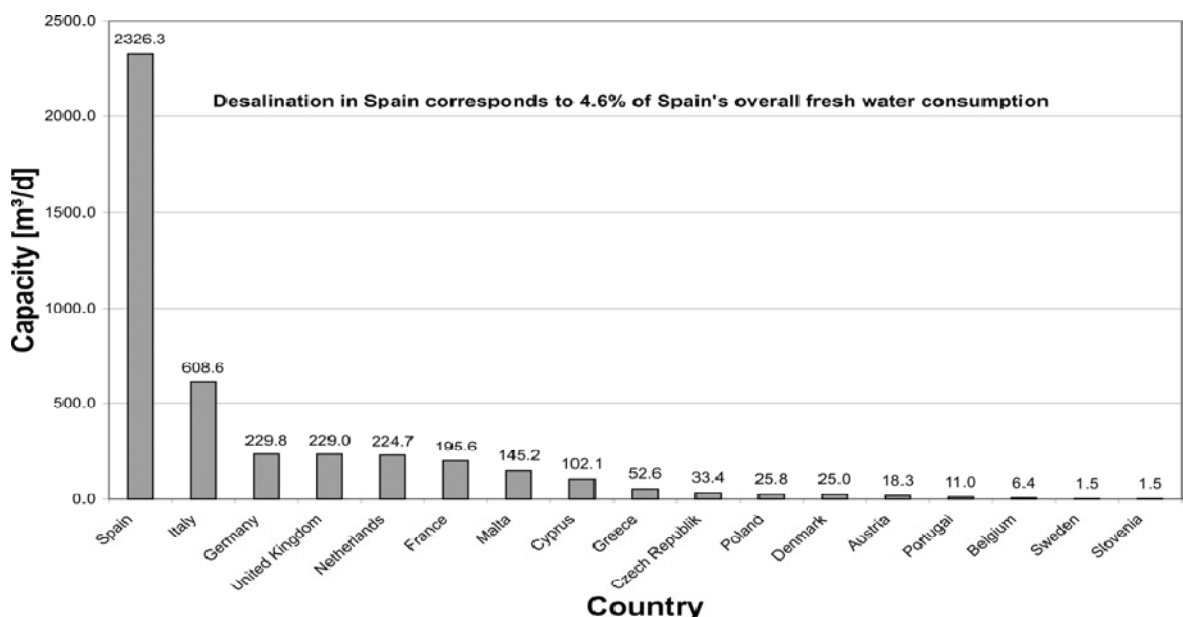
Η έλλειψη πόσιμου νερού, όχι μόνο σε άνυδρες περιοχές, ουσιαστικά είναι η διαφορά προσφοράς και ζήτησης (Σχήμα 2.3). Μία τιμή πάνω από το 40% υποδηλώνει έντονο πρόβλημα έλλειψης νερού, ενώ το 10% θεωρείται ως το κατώτατο όριο [Fritzmann, 2006].



Σχήμα 2.3 Λόγος ζήτησης και προσφοράς πόσιμου νερού στις Ευρωπαϊκές χώρες

Η μείωση των αποθεμάτων νερού οφείλεται στη ρύπανση και στην χωρίς μέτρο εκμετάλλευση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτινων πόρων. Από την άλλη πλευρά, η αύξηση του πληθυσμού, ο νέος τρόπος ζωής που επιβάλλει μεγαλύτερη κατανάλωση αλλά και η αύξηση της βιομηχανικής και αγροτικής δραστηριότητας, είναι οι αιτίες για μεγαλύτερες ανάγκες σε νερό. Οι χώρες με αυξημένο λόγο ζήτησης και προσφοράς (>10%) αναμένονται να πρωταγωνιστήσουν σε παγκόσμιο επίπεδο στα συστήματα αφαλάτωσης τα επόμενα χρόνια, και ανάμεσά τους βρίσκεται και η Ελλάδα.

Στο παρακάτω σχήμα 2.4 αποτυπώνεται η δυναμικότητα παραγωγής αφαλατωμένου νερού στις Ευρωπαϊκές χώρες, λαμβάνοντας υπόψη μονάδες αφαλάτωσης άνω των 700 m³/d [Fritzmann, 2006].



Σχήμα 2.4 Εγκατεστημένη δυναμικότητα στην Ευρώπη

2.2 Μέθοδοι αφαλάτωσης

2.2.1 Γενικά

Οι προηγμένες μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού αποτελούν την πλέον δόκιμη λύση για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ποιότητας αλλά και της επάρκειας νερού. Τις τελευταίες δεκαετίες, λόγω και του αυξημένου ενδιαφέροντος, έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι αφαλάτωσης.

Οι μέθοδοι αφαλάτωσης μπορούν να ταξινομηθούν, ανάλογα τον μηχανισμό διαχωρισμού, σε αυτές όπου το μέσο αλλάζει φάση εκμεταλλευόμενο κάποια πηγή θερμότητας (θερμικές διεργασίες) και σε αυτές που μέσω μεμβρανών γίνεται ο διαχωρισμός του θαλασσινού νερού.

Παρακάτω παρουσιάζονται επιγραμματικά οι μέθοδοι που εφαρμόζονται:

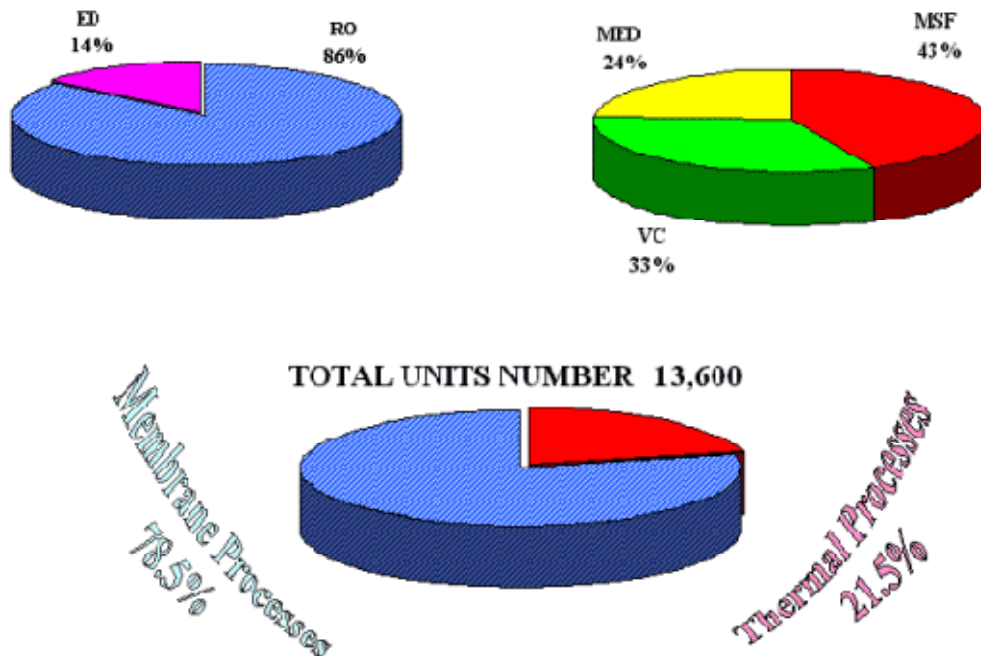
- **Αλλαγής φάσης ή θερμικές διεργασίες (Phase-change or thermal processes)**
 - Άμεση απόσταξη πολλαπλών βαθμίδων (Multiple Stage Flashing – MSF)
 - Απόσταξη πολλαπλής επίδρασης (Multiple Effect Distillation – MED)
 - Απόσταξη με συμπίεση ατμών (Vapor Compression – VC)
 - Ηλιακή απόσταξη (Solar Distillation)
 - Πάγωμα (Freezing)
 - Ύγρανση/Αφύγρανση (Condensation/Evaporation)

- **Διεργασίες Μεμβρανών (Membrane based processes)**
 - Αντίστροφη Ώσμωση (Reverse Osmosis – RO)
 - Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis – ED)
 - Νανόφιλτρα (Nanofiltration – NF)

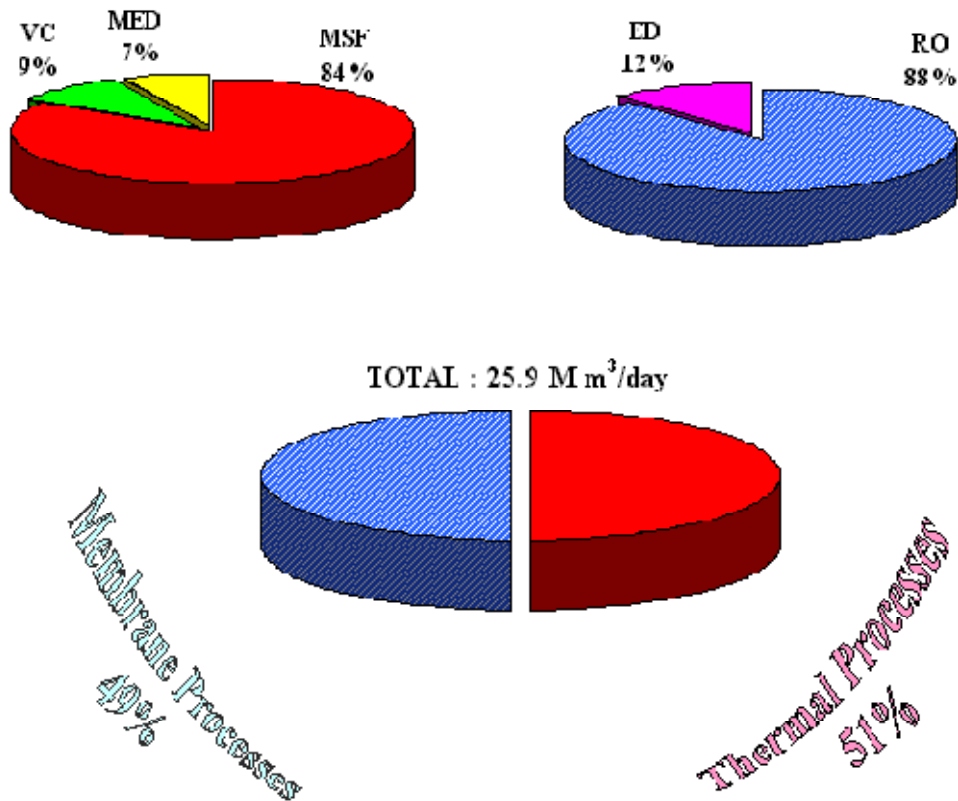
Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι η πολυβάθμια εκτόνωση (MSF) και η αντίστροφη ώσμωση (RO), καθεμιά απ' τις οποίες παράγει το 43% του παγκόσμιου προϊόντος. Παρότι όμως αυτές οι μέθοδοι έχουν την ίδια παραγωγή, η RO χρησιμοποιείται στο 68% των περιπτώσεων και μια τυπική μονάδα έχει μέση παραγωγή 1200 m³/ημέρα, ενώ η MSF χρησιμοποιείται σε ποσοστό μόλις 9% και μια τυπική μονάδα έχει μέση παραγωγή 8800 m³/ημέρα. Συνολικά, η MSF και η RO παράγουν συνολικά το 86% της παγκόσμιας ποσότητας αφαλατωμένου νερού, η ηλεκτροδιάλυση (ED) το 6%, η συμπίεση ατμών (VC) το 4% και η πολυβάθμια εξάτμιση (MED) το 4%. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις MSF απαντώνται στον Περσικό Κόλπο, ενώ στον υπόλοιπο κόσμο κυριαρχεί η RO. Τα Μεσογειακά κράτη, ανάμεσά τους και η Ελλάδα, στράφηκαν προς την RO τις δυο τελευταίες δεκαετίες.

Τα παραπάνω επαληθεύονται και από τα παρακάτω σχήματα 2.5 και 2.6:

Κεφάλαιο 2^ο – Αφαλάτωση

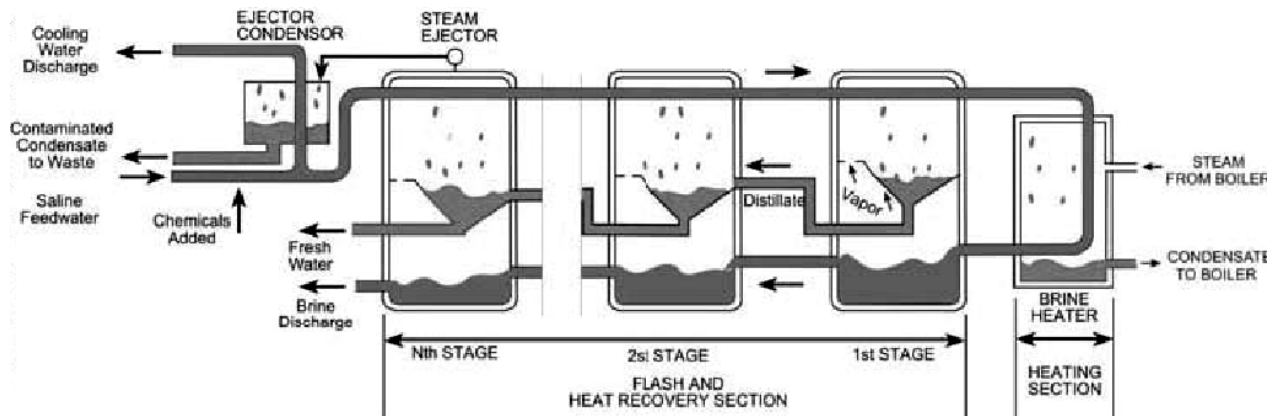


Σχήμα 2.5 Ποσοστό παγκοσμίως εγκατεστημένων μονάδων αφαλάτωσης που βασίζονται σε διεργασίες μεμβρανών και σε θερμικές διεργασίες για το έτος 2006



Σχήμα 2.6 Δυναμικότητα παγκοσμίως εγκατεστημένων μονάδων αφαλάτωσης που βασίζονται σε διεργασίες μεμβρανών και σε θερμικές διεργασίες για το έτος 2006

2.2.2 Άμεση απόσταξη πολλαπλών βαθμίδων (MSF)



Σχήμα 2.7 Αρχή λειτουργίας MSF

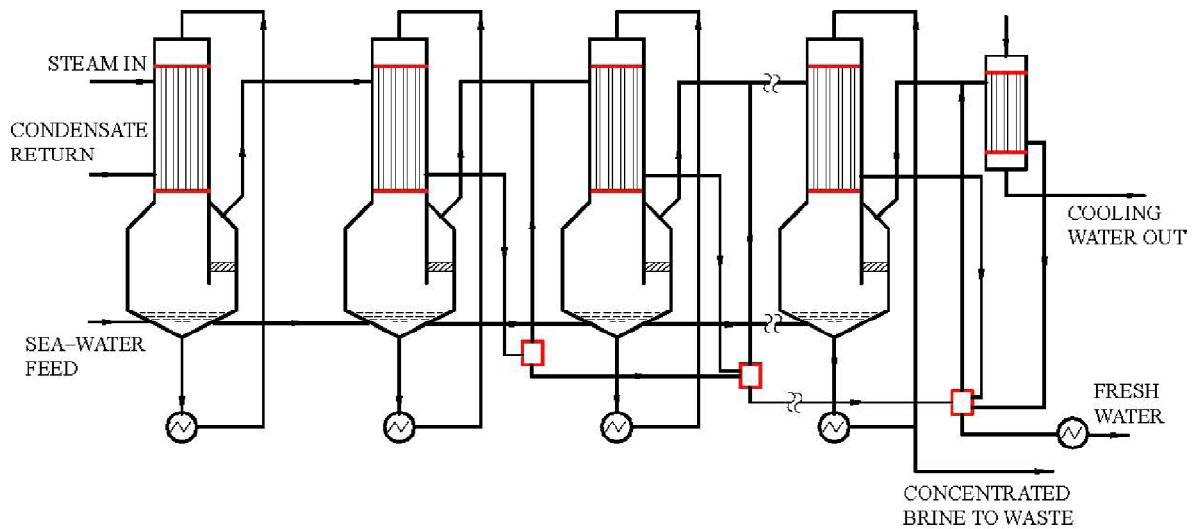
Η άμεση απόσταξη πολλαπλών βαθμίδων (MSF - Σχήμα 2.7) βασίζεται στη δημιουργία ατμού από το θαλασσινό νερό, η οποία οφείλεται σε μια απότομη μείωση της πίεσης όταν το ρεύμα του θαλασσινού νερού εισέρχεται σε έναν θάλαμο κενού [Kalogirou, 2005]. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται, έχοντας χαμηλότερη πίεση από θάλαμο σε θάλαμο. Η μέθοδος απαιτεί εξωτερική τροφοδοσία ατμού θερμοκρασίας περίπου 100 °C. Η απόδοση της περιορίζεται, λόγω του μέγιστου της θερμοκρασίας που επιτρέπεται, εξ' αιτίας της συγκέντρωσης άλατος.

Η χρήση αυτής της μεθόδου ενδείκνυται όταν υπάρχει απαίτηση για μεγάλη ημερήσια παραγωγή νερού, υψηλής ποιότητας και είναι διαθέσιμη κάποια πηγή θερμότητας. Εκτός των συμβατικών πηγών, έχουν χρησιμοποιηθεί ηλιακοί συλλέκτες ως πηγή θερμότητας. Ένα από τα κυριότερα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι το γεγονός ότι η ατμοποίηση προέρχεται από ρεύμα θαλασσινού νερού τροφοδοσίας και όχι από τις θερμαινόμενες επιφάνειες στις οποίες η εξάτμιση προκαλεί σχηματισμό στρωμάτων επικάλυψης και επομένως σταδιακή μείωση των συντελεστών μετάδοσης θερμότητας [Σταματόπουλος, 2007]. Μειονέκτημα της μεθόδου η αργή εκκίνηση και η αυξημένη ειδική κατανάλωση ενέργειας.



Σχήμα 2.8 Πολλαπλή μονάδα MSF στη Σαουδική Αραβία - 1983

2.2.3 Απόσταξη πολλαπλής επίδρασης (MED)



Σχήμα 2.9 Αρχή λειτουργίας MED

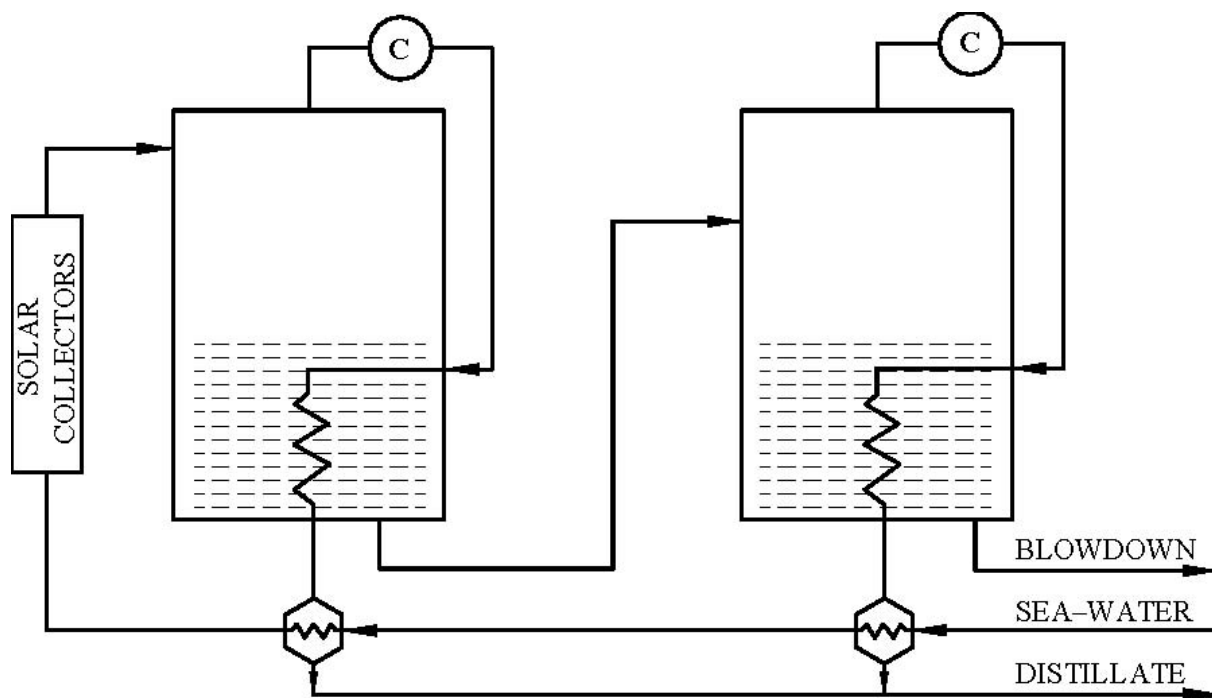
Η **απόσταξη πολλαπλής επίδρασης** (MED – Σχήμα 2.9) είναι η παλαιότερη μέθοδος αφαλάτωσης και με μεγάλο θερμικό βαθμό απόδοσης. Σε αυτή τη μέθοδο ο ατμός περνάει μέσα από σωλήνες, ενώ το κρύο θαλασσινό νερό ψεκάζεται πάνω τους δημιουργώντας ένα πολύ λεπτό στρώμα νερού, το οποίο εξατμίζεται άμεσα. Έτσι, μέρος του ατμού συμπυκνώνεται και συλλέγεται σαν καθαρό νερό, ενόσω συνεχίζουν στην επόμενη βαθμίδα ο υπόλοιπος ατμός μαζί με το υπόλοιπο θαλασσινό νερό που απέμεινε από την ατμοποίηση. Και στη μέθοδο αυτή, σε κάθε θάλαμο υπάρχει αντλία κενού που υποβοηθά την εξάτμιση, με βαθμιαία μειούμενη πίεση σε κάθε βαθμίδα, που ισούται με την πίεση κορεσμού στην αντίστοιχη θερμοκρασία του κάθε θαλάμου. Αυτό έχει σαν όφελος να επιτρέπει την λειτουργία τόσο σε υψηλή όσο και σε χαμηλή θερμοκρασία, συχνά δε, η μέγιστη θερμοκρασία βρασμού μπορεί να είναι μέχρι και 55 °C, έτσι ώστε να αποφεύγεται η διάβρωση και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί χαμηλού επιπέδου απορριπτόμενη θερμότητα από άλλες θερμικές διεργασίες. Στη μέθοδο αυτή συχνά χρησιμοποιούνται και συμπιεστές (μηχανικοί ή θερμικοί), ενώ οι παραλλαγές της προκύπτουν απ' την οριζόντια ή κάθετη διάταξη των σωλήνων ατμού (Σχήμα 2.10) και τη φορά του ατμού σε σχέση με την άλμη (ομορροή, αντιρροή ή παράλληλη).

Όπως και στη μέθοδο MSF, απαιτείται ποσότητα ατμού, κάτι το οποίο προϋποθέτει γειτονική θερμοηλεκτρική μονάδα ή ηλιακούς συλλέκτες. Έχει μικρότερη κατανάλωση ισχύος σε σχέση με την MSF και συγχρόνως υψηλότερο λόγο απόδοσης. Ως μειονέκτημα θα μπορούσαμε να αναφέρουμε, την εξάτμιση που γίνεται στις επιφάνειες συναλλαγής θερμότητας και καθιστά την διεργασία επιρρεπή στο σχηματισμό στρωμάτων επικάλυψης [Σταματόπουλος, 2007].



Σχήμα 2.10 Μονάδα MED στη Λιβύη - 2005

2.2.4 Απόσταξη με συμπίεση ατμών (VC)



Σχήμα 2.11 Αρχή λειτουργίας VC

Στην απόσταξη με **συμπίεση ατμών** (RO - Σχήμα 2.11), η θερμότητα για την ατμοποίηση του θαλασσινού νερού προέρχεται από τη συμπίεση του ατμού. Η μέθοδος εκμεταλλεύεται την αρχή σύμφωνα με την οποία, η μείωση της θερμοκρασίας σημείου βρασμού επιτυγχάνεται μειώνοντας την πίεση. Για την συμπύκνωση του ατμού, που θα προσδώσει θερμότητα προκειμένου να ατμοποιηθεί το θαλασσινό νερό, χρησιμοποιείται ένας συμπιεστής. Έτσι δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη πηγής θερμότητας. Ο συμπιεστής δημιουργεί κενό στον ατμοποιητή και στη συνέχεια συμπιέζει τον ατμό, προερχόμενο από τον ατμοποιητή, και τον συμπυκνώνει μέσα στη συστοιχία σωλήνων. Το θαλασσινό νερό ψεκάζεται στην επιφάνεια των σωλήνων και ατμοποιείται μερικώς, παράγοντας περισσότερο ατμό.

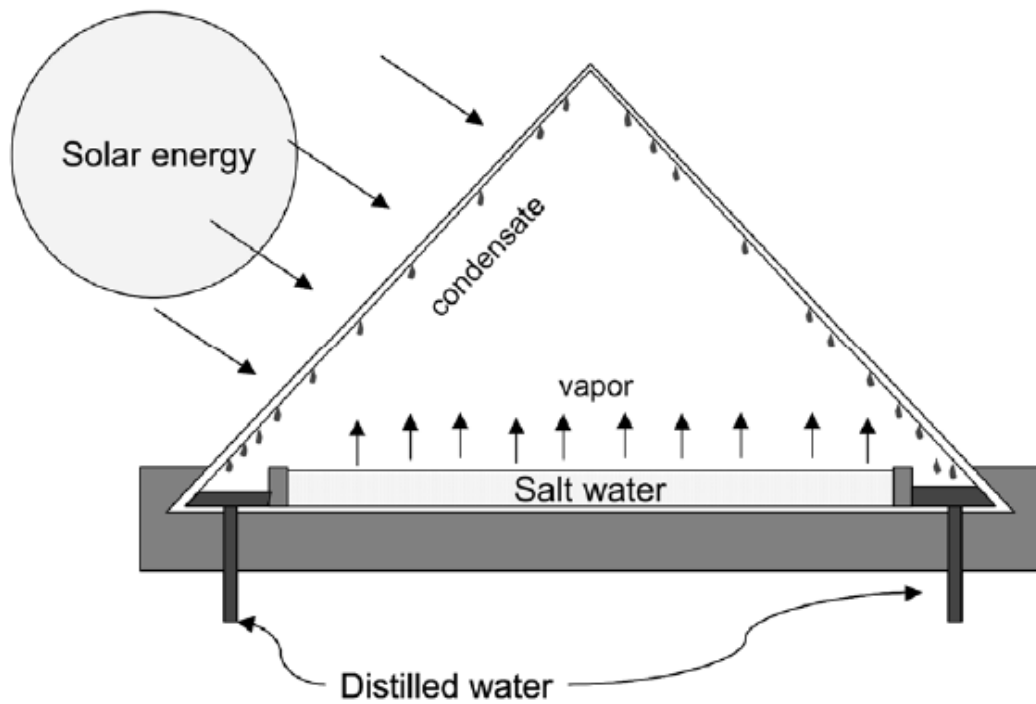
Αποτελεί μια μέθοδο απλή, αξιόπιστη και αποδοτική η οποία απαιτεί μόνο ισχύ. Έχοντας μεγάλης ισχύος συμπιεστή, η διαδικασία γίνεται σε θερμοκρασίες μικρότερες των 70 °C, οπότε αποφεύγεται σ'ένα βαθμό η διάβρωση. Χρησιμοποιείται για μεσαίου μεγέθους μονάδες αφαλάτωσης (~3000 m³/day), ενώ έχει χαμηλότερη ειδική ενεργειακή κατανάλωση σε σχέση με τις προηγούμενες μεθόδους.



Σχήμα 2.12 Μονάδα VC στην Σαρδηνία - 2000

2.2.5 Ηλιακή απόσταξη (SD)

Η **ηλιακή απόσταξη** (SD – Σχήμα 2.13) αποτελεί κομμάτι του υδρολογικού κύκλου και βασίζεται στην αρχή του θερμοκηπίου. Το θαλασσινό νερό διοχετεύεται μέσω σωλήνων στο εσωτερικό του ηλιακού συλλέκτη, όπου θερμαίνεται από τις ακτίνες του ήλιου και παράγεται ατμός. Στη συνέχεια, ο ατμός συμπυκνώνεται σε μια ψυχρή επιφάνεια και το συμπύκνωμα συλλέγεται ως πόσιμο νερό.



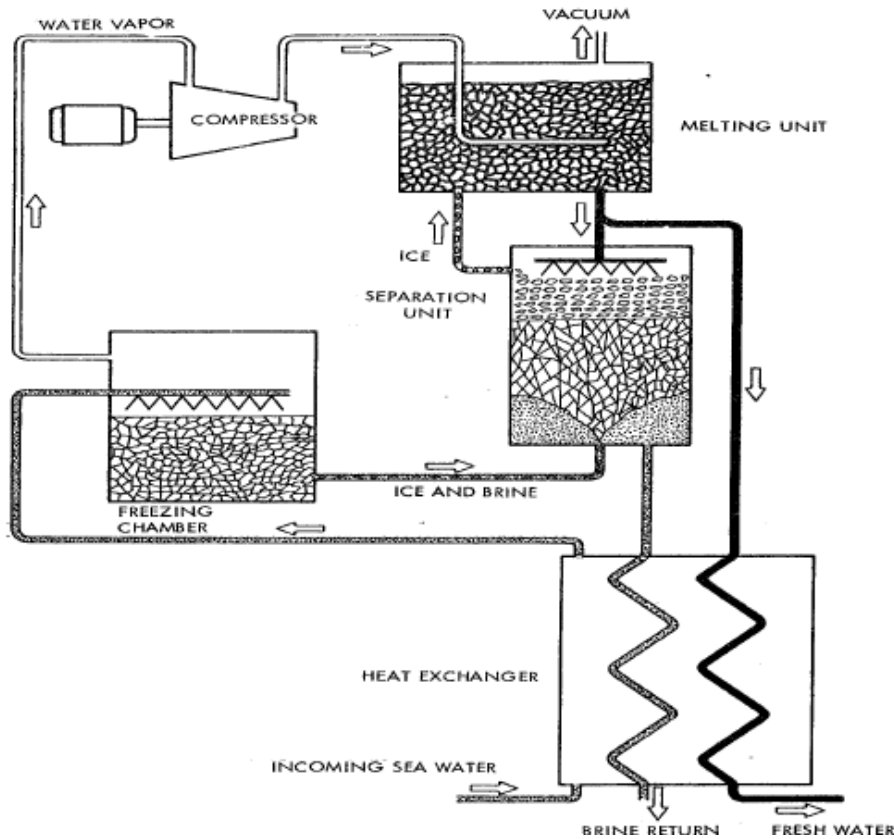
Σχήμα 2.13 Αρχή λειτουργίας SD

Η ηλιακή απόσταξη εφαρμόζεται σε περιοχές με υψηλά ποσοστά ηλιοφάνειας κατά τη διάρκεια του έτους, αλλά μειονεκτήματα της μεθόδου είναι υψηλές απαιτήσεις σε ενέργεια και η χαμηλή απόδοση της. Μία τέτοια εγκατάσταση έχει ελάχιστο ή μηδενικό κόστος λειτουργίας και δύναται να παράγει περίπου 3,5 λίτρα καθαρό νερό ανά m^2 εδάφους, και μάλιστα νερό όχι απαλλαγμένο από μικροοργανισμούς, πράγμα που σημαίνει ότι χρειάζεται και περαιτέρω επεξεργασία.



Σχήμα 2.14 Μονάδα SD στην Αυστραλία

2.2.6 Πάγωμα (Freezing)



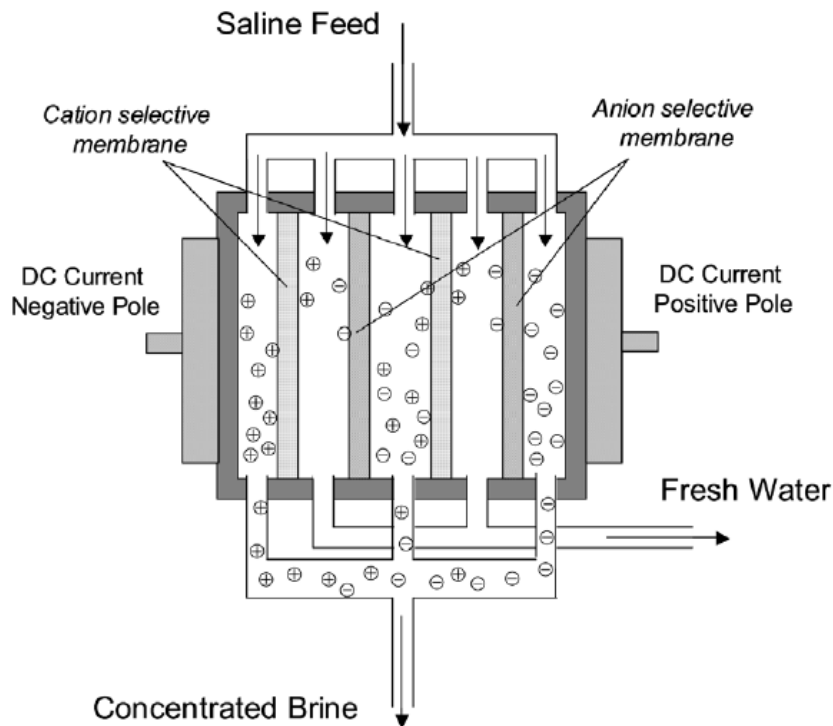
Σχήμα 2.15 Αρχή λειτουργίας Freezing

Η μέθοδος του **παγώματος** (Σχήμα 2.15) στηρίζεται στο φαινόμενο του όταν το αλμυρό νερό ψύχεται, δημιουργούνται κρύσταλλοι πάγου απαλλαγμένοι από άλατα. Κύριο πλεονέκτημα αυτής της διεργασίας είναι ότι λειτουργεί σε αρκετά χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με τις προηγούμενες.

Παρακάτω θα ασχοληθούμε με τις διεργασίες μεμβρανών και ειδικότερα με την μέθοδο αντίστροφης ώσμωσης.

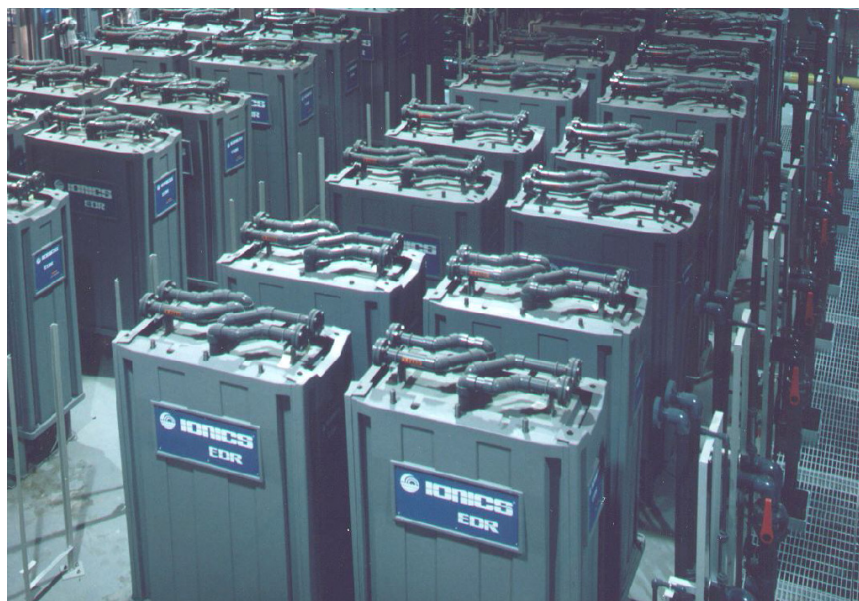
2.2.7 Ηλεκτροδιάλυση (ED)

Η **ηλεκτροδιάλυση** (ED – Σχήμα 2.16) πραγματοποιείται, μειώνοντας την αλατότητα του νερού με μεταφορά ιόντων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μεμβρανών, υπό την επιρροή ηλεκτρικού πεδίου. Το αλμυρό νερό τροφοδοσίας περιέχει διαλυμένα άλατα με θετικά και αρνητικά ιόντα. Τα ιόντα θα μετακινηθούν προς το αντίθετο φορτισμένο ηλεκτρόδιο περνώντας μέσα από μεμβράνες. Η κίνηση των ιόντων μειώνει τη συγκέντρωση άλατος στο νερό τροφοδοσίας του θαλάμου στο οποίο προϋπήρχαν ενώ αυξάνει την συγκέντρωση στους γειτονικούς θαλάμους. Δεκάδες τέτοιοι θάλαμοι συναποτελούν μια μονάδα ηλεκτροδιάλυσης και δημιουργούν εναλλασσόμενα τμήματα καθαρού νερού και άλμης.



Σχήμα 2.16 Αρχή λειτουργίας ED

Πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η χρήση επιλεκτικών μεμβρανών που επιτρέπουν σε ωφέλιμα ιόντα, όπως το ασβέστιο, να παραμένουν στο παραγόμενο νερό. Επιπλέον, για την αποφυγή δημιουργίας στρωμάτων επικάλυψης, αντιστρέφεται η φορά της διεργασίας, αντιστρέφοντας τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος κάθε 20 min. Έτσι προλαμβάνεται η συσσώρευση ποσότητας άλατος στις μεμβράνες [Kalogirou, 2005]. Η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως για υφάλμυρο νερό, ενώ η απαίτηση για συνεχές ρεύμα καθιστά τα φωτοβολταϊκά ιδανική λύση για τη λειτουργία της μεθόδου.



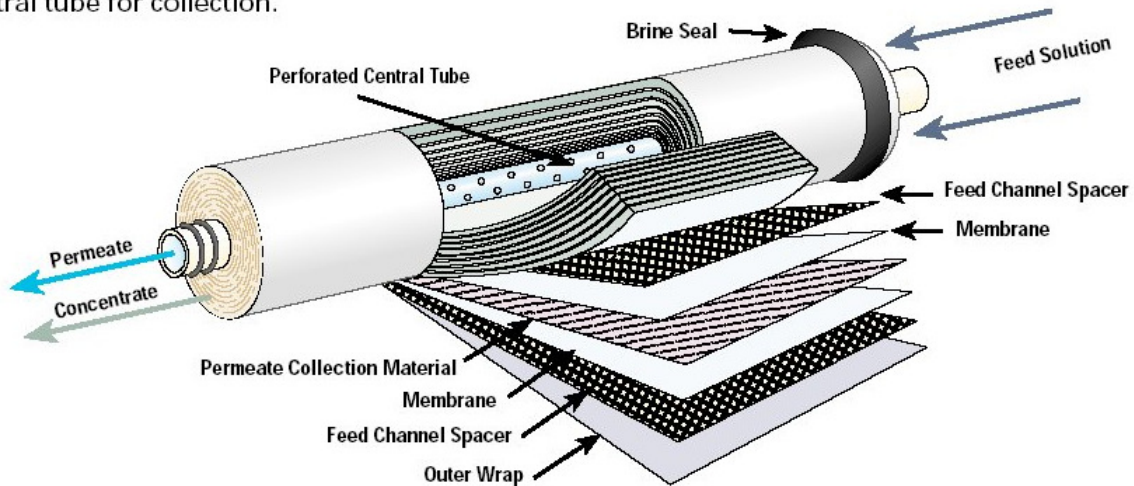
Σχήμα 2.17 Μονάδα EDR (Electro Dialysis Reverse)

2.3 Αντίστροφη ώσμωση (RO)

2.3.1 Αρχή λειτουργίας

Η μέθοδος της **αντίστροφης ώσμωσης** (RO – Σχήμα 2.18) αποτελεί την πιο διαδεδομένη διεργασία αφαλάτωσης που χρησιμοποιεί μεμβράνες.

The spiral membrane is constructed of one or more membrane envelopes wound around a perforated central tube. The permeate passes through the membrane into the envelope and spirals inward to the central tube for collection.

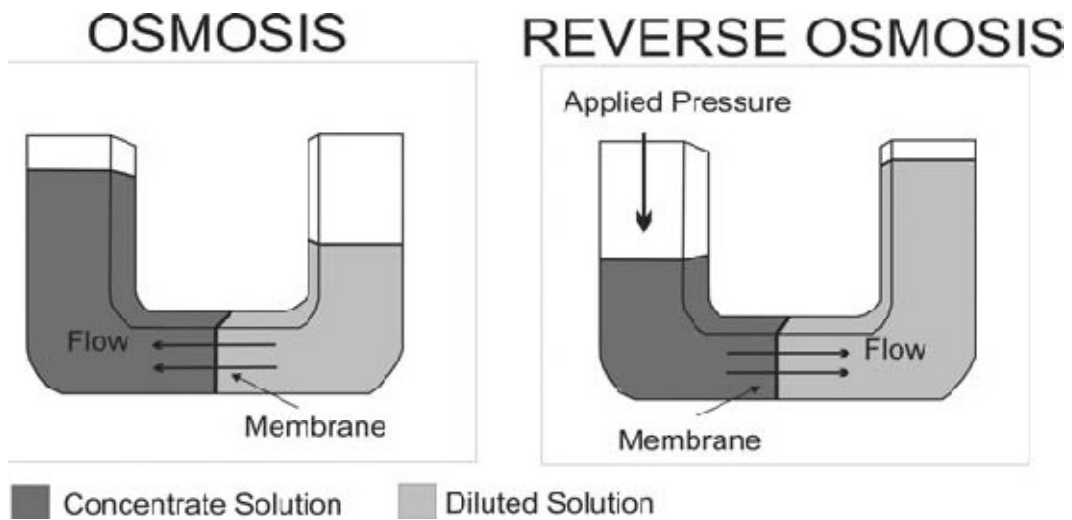


The illustration above represents a simplified spiral-wound membrane element. Recovery can be as high as 90% and systems may be capable of chemical cleaning in place (CIP).

Σχήμα 2.18 Διαμόρφωση μεμβράνης RO

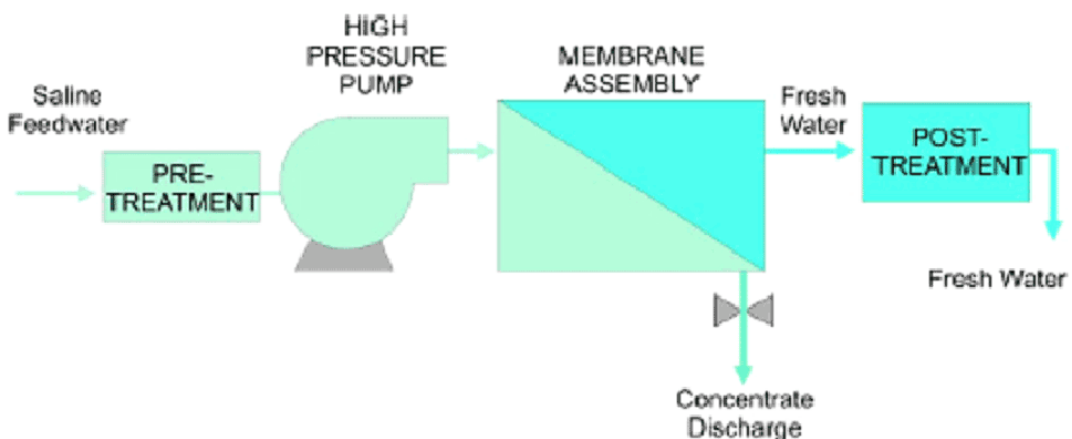
Η μέθοδος βασίζεται στην επιλεκτική διαπερατότητα ορισμένων πολυμερών. Ενώ είναι πολύ διαπερατά στο νερό, καθιστούν δύσκολη τη διέλευση διαφόρων ουσιών. Εφαρμόζοντας διαφορά πίεσης δια μέσου της μεμβράνης, το ρεύμα του θαλασσινού νερού αναγκάζεται να διέλθει από τη μεμβράνη. Σε αυτό το σημείο, πρέπει να τονιστεί ότι η εφαρμοζόμενη πίεση είναι αναγκαίο να υπερβαίνει την ωσμωτική πίεση που δημιουργείται εκατέρωθεν της μεμβράνης προκειμένου να είναι δυνατή η διέλευση του θαλασσινού νερού τροφοδοσίας. Σε θαλασσινού νερού εφαρμογές, η απαιτούμενη πίεση συνήθως κυμαίνεται από 55 έως 68 bar [Fritzmann, 2006].

Το φαινόμενο της **ώσμωσης** (Σχήμα 2.19) εμφανίζεται όταν μια ημιπερατή μεμβράνη χωρίζει δύο υδάτινα ρεύματα διαφορετικής συγκέντρωσης. Σε μηδενική διαφορά πίεσης και θερμοκρασίας ανάμεσα στις δύο πλευρές, η φορά ροής είναι από αυτή της μικρότερης σε αυτή της μεγαλύτερης συγκέντρωσης, μέχρι να ισοσταθμιστούν οι συγκεντρώσεις τους. Αυτή η διαδικασία, συνεχίζεται μέχρι η διαφορά πίεσης ανάμεσα στις δύο πλευρές να πάρει μια συγκεκριμένη τιμή που εξαρτάται από την αντίστοιχη διαφορά συγκεντρώσεων και ονομάζεται ωσμωτική πίεση, Π.



Σχήμα 2.19 Το φαινόμενο της ώσμωσης και η επίτευξη της αντίστροφης ώσμωσης

Στη μέθοδο αυτή, γίνεται προσπάθεια να αντιστραφεί το φαινόμενο, εφαρμόζοντας διαφορά πίεσης μεγαλύτερη της ωσμωτικής Π , έτσι ώστε να αλλάξει κατεύθυνση η ροή από την πλευρά της μεγαλύτερης συγκέντρωσης προς αυτή της μικρότερης. Η πίεση που εφαρμόζεται στη πλευρά τροφοδοσίας είναι συνεχώς αυξανόμενη, καλύπτοντας την ωσμωτική. Έτσι προκύπτει ρεύμα εξόδου αμελητέας συγκέντρωσης σε σχέση με το ρεύμα εισόδου. Η μονάδα αποτελείται από συστοιχία μεμβρανών για την παραγωγή καλύτερου ποιοτικά προϊόντος. Στο σχήμα 2.20 δίνεται μια γενική απεικόνιση ενός συστήματος αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης. Το ρεύμα θαλασσινού νερού αφού προεπεξεργάζεται (πχ. αφαίρεση μικροαντικειμένων, άμμου), αντλείται σε υψηλή πίεση για να είναι σε θέση να διαπεράσει την συστοιχία των μεμβρανών. Έτσι, προκύπτουν δύο ρεύματα από τα οποία το ρεύμα της άλμης απορρίπτεται, εφόσον δεν υπάρχει μέσο εκμετάλλευσής του, και το ρεύμα του πόσιμου νερού, το οποίο αφού επεξεργαστεί τελικώς, είναι διαθέσιμο για χρήση.



Σχήμα 2.20 Διάγραμμα ροής ενός συστήματος αφαλάτωσης RO

2.3.2 Συστήματα ανάκτησης ενέργειας

Την επιτυχία της η μέθοδος την οφείλει, κατά πολύ, στο χαμηλό σχετικά κόστος αλλά και στις χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Αυτό επιτεύχθηκε, με την εφαρμογή και την ανάπτυξη ορισμένων συστημάτων ανάκτησης ενέργειας. Τα συστήματα αυτά γενικά, εκμεταλλεύονται την απομένουσα ενέργεια του ρεύματος της άλμης, που διαφορετικά θα απορριπτόταν, και συμβάλει στην παροχή της απαιτούμενης πίεσης από την αντλία. Έτσι, μειώνεται η ισχύς της αντλίας ανύψωσης της πίεσης του ρεύματος τροφοδοσίας και συγχρόνως η ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας.

Τα **συστήματα ανάκτησης ενέργειας** (Energy Recovery systems - ER) που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές αντίστροφης ώσμωσης μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες [Fritzmann, 2006]:

- **«Εναλλάκτες» πίεσης** (Pressure exchangers), οι οποίοι μεταφέρουν άμεσα πίεση από την άλμη σε μέρος του ρεύματος τροφοδοσίας (Σχήμα 2.21).
- **Συστήματα στροβίλων** (Turbine systems), οι οποίοι μετατρέπουν την ενέργεια της ρεύματος της άλμης σε μηχανική, είτε τροφοδοτώντας την αντλία σαν συμπλήρωμα, είτε άμεσα το ρεύμα τροφοδοσίας.

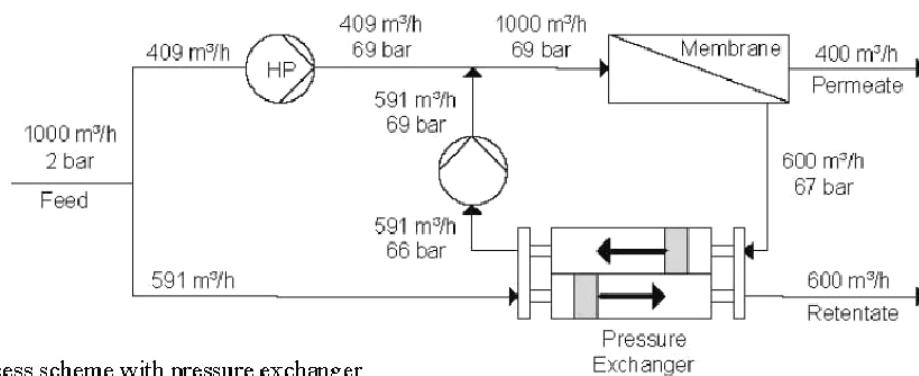
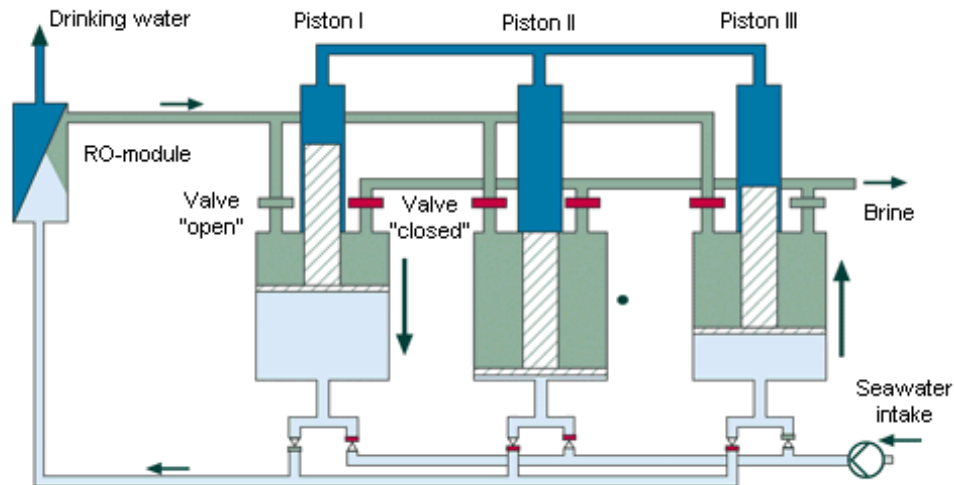


Fig. 32. Process scheme with pressure exchanger

Σχήμα 2.21 Μέθοδος RO με εναλλάκτη πίεσης

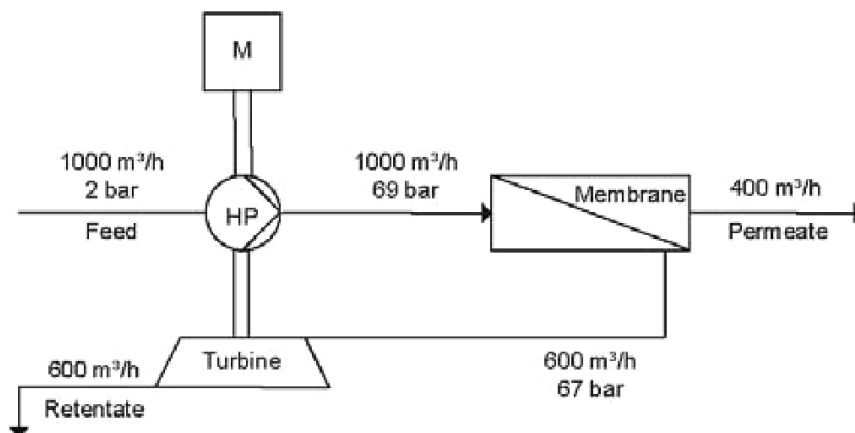
Η γενική αρχή λειτουργίας των **εναλλακτών πίεσης** σύμφωνα με το σχήμα 2.22 έχει ως εξής: Το εισερχόμενο θαλασσινό νερό υψηλής πίεσης πιέζει το πιστόνι III, το οποίο με τη σειρά του μεταφέρει υδραυλικά την πίεση αυτή στο πιστόνι I και συγχρόνως απορρίπτει ένα μέρος άλμης, μέσω μίας ανοικτής βάννας. Στη συνέχεια, το πιστόνι I ωθεί το θαλασσινό νερό στις μεμβράνες αντίστροφης ώσμωσης. Μια άλλη βάννα ανοίγει, και επιτρέπει στο υψηλής πίεσης ρεύμα άλμης, που παράγεται από τις μεμβράνες, να εισαχθεί στο πιστόνι I και να συμβάλει στην κίνηση του.



Σχήμα 2.22 Αρχή λειτουργίας εναλλάκτη πίεσης

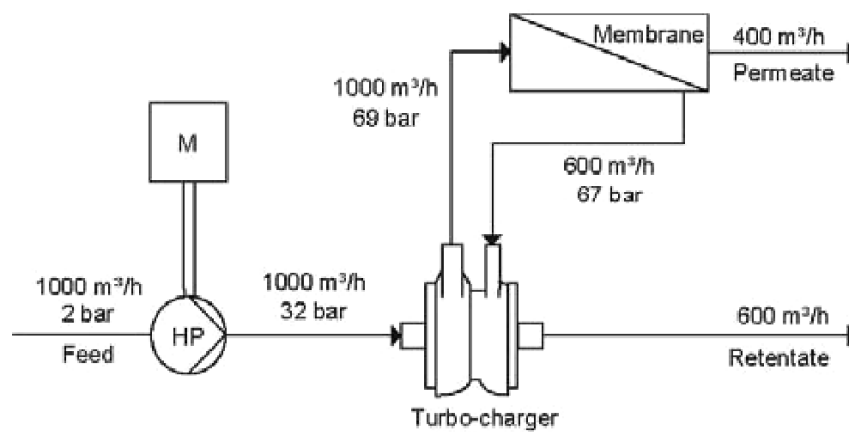
Με αυτό το τρόπο, το ρεύμα τροφοδοσίας αυξάνει την πίεση του. Χρησιμοποιώντας εναλλάκτες πίεσης, μόνο ένα μέρος της συνολικής τροφοδοσίας χρειάζεται ανύψωση της πίεσης του από την αντλία.

Από την άλλη στα **συστήματα στροβίλων**, η αντλία υψηλής πίεσης έχει να κάνει με το σύνολο του ρεύματος τροφοδοσίας. Τα συστήματα αυτά περιέχουν είτε ένα στρόβιλο Pelton, είτε ένα σύστημα συνεργασίας αντλίας-στροβίλου (turbocharger).



Σχήμα 2.23 Μέθοδος RO με στρόβιλο Pelton

Στο σύστημα ανάκτησης ενέργειας με **στρόβιλο Pelton** (Σχήμα 2.23), το απορριπτόμενο ρεύμα άλμης υψηλής πίεσης εισέρχεται στο στρόβιλο μέσω ενός ακροφυσίου. Η πίεση του ρεύματος μεταφέρεται στον ρότορα του στροβίλου, που με τη σειρά του μεταφέρει ισχύ στην αντλία υψηλής πίεσης μέσω της κοινής τους ατράκτου. Η άλμη απορρίπτεται σε πίεση ίση με την ατμοσφαιρική.



Σχήμα 2.24 Μέθοδος RO με turbocharger

Οι **turbochargers** αποτελούνται από μια αντλία και ένα στρόβιλο συνδεδεμένα σε ένα κιβώτιο. Τόσο η αντλία όσο και ο στρόβιλος περιέχουν μία απλή βαθμίδα ρότορα. Η υδραυλική ενέργεια του ρεύματος της άλμης μετατρέπεται σε μηχανική από τον ρότορα του στροβίλου. Στη συνέχεια, η αντλία ξαναμετατρέπει την ενέργεια σε πίεση με την οποία τροφοδοτεί το ρεύμα του θαλασσινού νερού. Η διεργασία παρουσιάζεται στο σχήμα 2.24, όπου η αντλία υψηλής πίεσης αυξάνει την πίεση της τροφοδοσίας σε μια μέση τιμή και στη συνέχεια αυξάνεται περαιτέρω από το σύστημα ανάκτησης ενέργειας – turbocharger.

Συγκριτικά, οι turbochargers αποτελούν την επικρατούσα τεχνολογία στο χώρο αυτό, παρόλο που οι εναλλάκτες πίεσης έχουν αρκετά πλεονεκτήματα όσων αφορά την απόδοση της μονάδας. Οι εναλλάκτες πίεσης διατηρούν τον βαθμό απόδοσης τους ανεξάρτητα από οποιεσδήποτε αλλαγές μπορούν να συμβούν λόγω χρόνων λειτουργίας της μονάδας ή συντήρησης, σε αντίθεση με τους στρόβιλους που με μια τέτοια αλλαγή, μπορεί να μεταβάλει το σημείο λειτουργίας τους και να λειτουργούν με μειωμένη απόδοση (εκτός του κανονικού σημείου λειτουργίας). Όμως, οι εναλλάκτες πίεσης απαιτούν κάποιο πρόσθετο εξοπλισμό, όπως κυκλοφορητές. Έτσι αυξάνονται τα κόστη εξοπλισμού και συντήρησης. Επίσης, ο τρόπος λειτουργίας τους αυξάνει την αλατότητα του ρεύματος με αποτέλεσμα μεγαλύτερη ωσμωτική πίεση.

Συμπερασματικά, η εφαρμογή συστημάτων ανάκτησης πίεσης, έχει ως αποτέλεσμα την μείωση ειδικής ενεργειακής κατανάλωσης της μονάδας. Σε μονάδες εφοδιασμένες με συστήματα ανάκτησης ενέργειας η ενεργειακή απαίτηση κυμαίνεται στις αρκετά χαμηλές τιμές των 2-4 kWh/m³ για θαλασσινό νερό [Fritzmann, 2006].



Σχήμα 2.25 Μονάδα RO στο Ισραήλ - 2008

2.4 Σύγκριση των μεθόδων αφαλάτωσης

Κατά τη μελέτη εγκατάστασης μιας μονάδας αφαλάτωσης, πρέπει να εξετάζονται διαφορές παράμετροι, για να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος. Οι παράμετροι αυτές είναι (Καλογιριου, 2005):

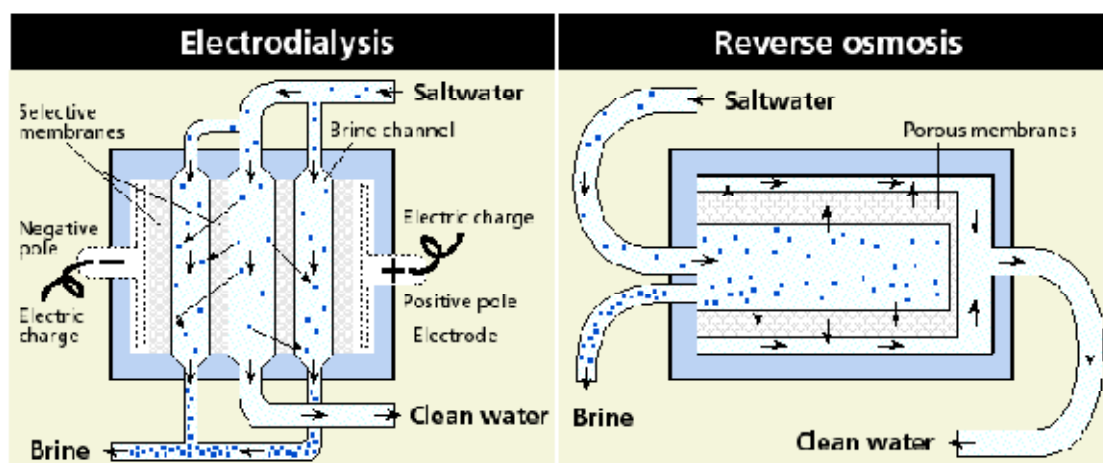
- Ενεργειακές απαιτήσεις / πηγές ενεργειακής τροφοδοσίας μονάδας
- Μέγεθος παραγωγής
- Ποιότητα πόσιμου νερού / ποιότητα νερού τροφοδοσίας (θαλασσινό, υφάλμυρο)
- Απαιτήσεις επεξεργασίας θαλασσινού νερού
- Κόστος επένδυσης και εξοπλισμού
- Διαθεσιμότητα χώρου

Αναμφίβολα, η ειδική ενεργειακή κατανάλωση μιας μεθόδου ίσως αποτελεί τον πιο σημαντικό παράγοντα για την επιλογή μεθόδου αφαλάτωσης. Στον πίνακα 2.1, δίνονται κάποια στοιχεία σχετικά με τις απαιτήσεις σε μορφές ενέργειας των μεθόδων. Εύκολα μπορούν εξαχθούν κάποια γενικά συμπεράσματα.

Μέθοδος	Νερό Τροφοδοσίας	Μορφή / Τύπος Ενέργειας	Κατανάλωση Ενέργειας	Κόστος Εξοπλισμού €/ (m ³ /ημέρα)
MSF	Θαλασσινό	Θερμική / Ηλεκτρική	290 kJ/kg 3-5 kWh/m ³	900-1800
MED	Θαλασσινό	Θερμική / Ηλεκτρική	270 kJ/kg 2,5-3 kWh/m ³	800-1600
VC	Θαλασσινό	Ηλεκτρική	8-15 kWh/m ³	1000-2400
SD	Θαλασσινό	Θερμική	2330 kJ/kg	800-1000
RO	Θαλασσινό / Υφάλμυρο	Ηλεκτρική	<10 kWh/m ³ <5 kWh/m ³ με ανάκτηση ενέργειας	800-2000 (including membrane replacement every 5 years aprox.)
ED	Υφάλμυρο	Ηλεκτρική	2-6 kWh/m ³	1000-5000

Πίνακας 2.1 Σύγκριση των μεθόδων αφαλάτωσης

Όπως έχουμε προαναφέρει, οι διεργασίες αλλαγής φάσης (MSF, MED) απαιτούν για την λειτουργία τους επιπλέον παροχή ατμού. Εδώ είναι αναγκαία η παραγωγή ατμού, που συνήθως γίνεται με την θερμότητα ενός θερμοηλεκτρικού σταθμού. Σχετικά με την τροφοδοσία της αφαλάτωσης με μεθόδους που δεν απαιτούν παροχή ατμού, όπως η αντίστροφης ώσμωσης και η ηλεκτροδιάλυση, οι επιλογές ποικίλουν.



Σχήμα 2.26 Σύγκριση μεθόδων ED και RO

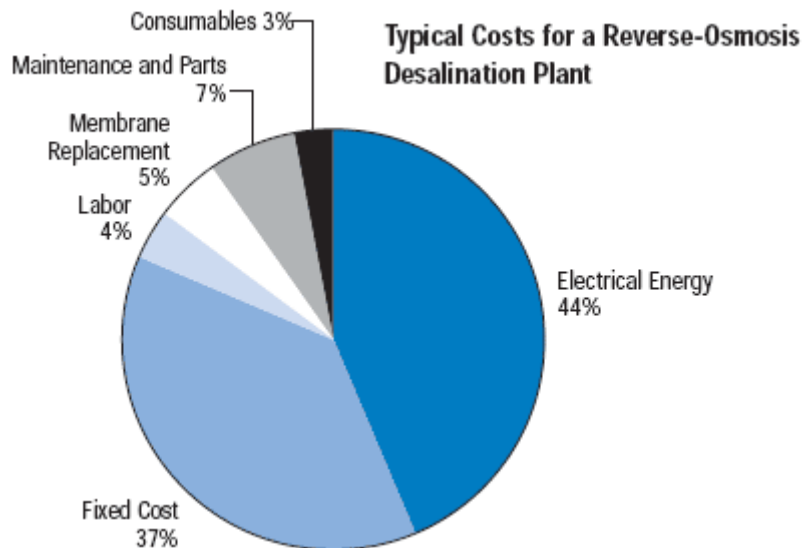
Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης παρατηρείται να είναι η επικρατέστερη μεταξύ των άλλων, αφού έχει τη χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση αλλά και μπορεί να συνεργαστεί με τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες Α.Π.Ε., όπως είναι τα φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες. Η εφαρμογή των μελετών αυτού του επιστημονικού χώρου, αποτελεί ιδανική λύση για πολλά από τα νησιά του Αιγαίου, που παρουσιάζεται, ακόμα και σήμερα, έντονο το φαινόμενο της λειψυδρίας και συγχρόνως το αιολικό και ηλιακό δυναμικό αφθονεί.

Σχετικά με το κόστος παραγωγής νερού, σύμφωνα με έρευνα [Karagiannis, Soldatos, 2007], ο πίνακας 2.2 δείχνει την διακύμανση του κόστους παραγωγής σε σχέση με το είδος της μεθόδου. Τα στοιχεία έχουν προκύψει από διάφορες εφαρμογές.

Desalination method	Size of plant (m ³ /day)	Cost (€ /m ³)
MED	<100	2-8
	12.000-55.000	0,76-1,56
	>91.000	0,42-0,81
MSF	23.000-528.000	0,42-1,40
VC	1000-1200	1,61-2,13
RO	<100	1,2-15
	250-4800	0,56-3,14
	15.000-320.000	0,36-0,53

Πίνακας 2.2 Μεγέθη μεθόδων αφαλάτωσης και κόστη παραγωγής νερού

Από τον πίνακα, αντιλαμβανόμαστε ότι μια μονάδα αφαλάτωσης κρίνεται συμφέρουσα όσο μεγαλύτερη είναι. Γενικά, μικρού μεγέθους μονάδες παρουσιάζουν αρκετά υψηλό κόστος. Η μέθοδος της αντίστροφης ώσμωσης είναι αρκετά ανταγωνιστική, ειδικά σε μεγάλου μεγέθους εγκαταστάσεις, σε σχέση με τις θερμικές διεργασίες. Μάλιστα, τα στοιχεία για την αντίστροφη ώσμωση δείχνουν πολύ μικρή διακύμανση του κόστους στα μεγάλα μεγέθη μονάδων. Στο σχήμα 2.27 παρατηρούμε μία τυπική κατανομή του κόστους επένδυσης σε μία μονάδα RO.



Σχήμα 2.27 Καταμερισμός κόστους εγκατάστασης μονάδας RO

Τέλος, να επισημάνουμε ότι ο παράγοντας του κόστους παραγωγής νερού είναι ο πλέον κρίσιμος για την απόφαση της εγκατάστασης μιας μονάδας, αφού αποτελεί το σημείο σύγκρισης με την υφιστάμενη κατάσταση παροχής νερού στην περιοχή και συγκεκριμένα στον ελληνικό χώρο όπου χρησιμοποιούνται υδροφόρες με κόστος μεταφοράς νερού της τάξης των 5-8 €/m³.

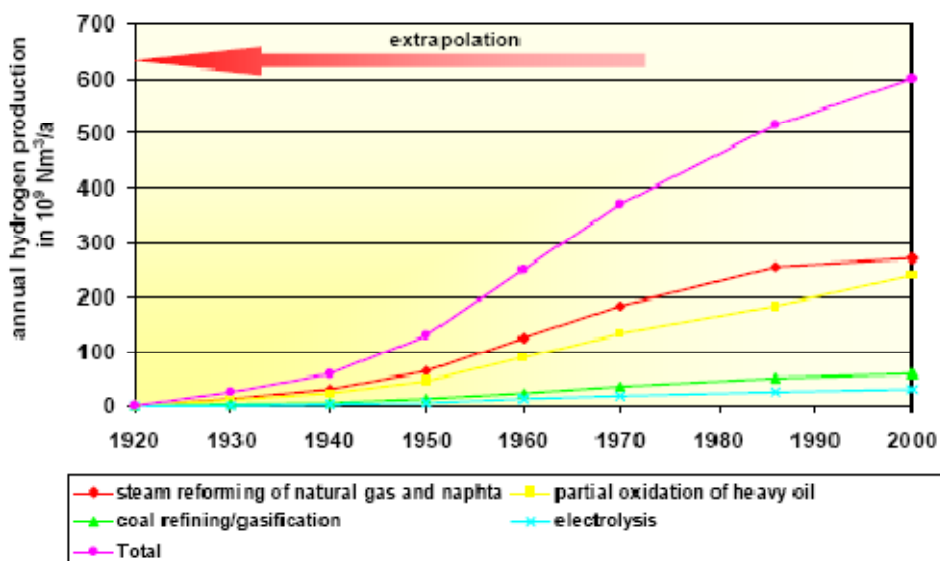
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Το **υδρογόνο** είναι ένας υψηλής ποιότητας δευτερογενής ενεργειακός μεταφορέας, όχι ένα πρωτογενές καύσιμο και μπορεί να παραχθεί από πρωτογενείς ενεργειακές πηγές, όπως η θερμική ή η ηλεκτρική ενέργεια. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από ευρεία ποικιλία μεθόδων, συμπεριλαμβανομένων των ορυκτών καυσίμων, της πυρηνικής ενέργειας, της βιομάζας και άλλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (άνεμος, ήλιος).

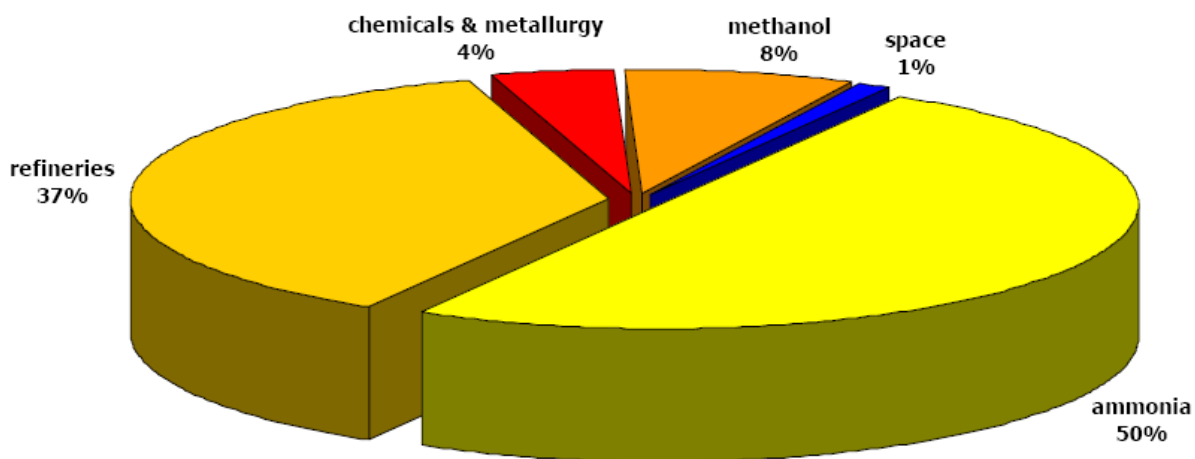
Διάφορες τεχνολογίες για την παραγωγή υδρογόνου χρησιμοποιούνται δεκαετίες τώρα. Η πρώτη ηλεκτρολυτική εγκατάσταση κλίμακας MW τέθηκε σε λειτουργία στη Νορβηγία το 1929, χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια από εγκαταστάσεις υδροπαραγωγής. Ένα δίκτυο σωληνώσεων υδρογόνου στη γερμανική περιοχή Ruhrgebiet υπάρχει από τη δεκαετία του '30. Η βιομηχανική παραγωγή του υδρογόνου άρχισε στην αρχή του προηγούμενου αιώνα. Τα ιστορικά στοιχεία του όγκου παραγωγής υδρογόνου ή το αντίστοιχο μερίδιο των συγκεκριμένων τεχνολογιών παραγωγής δεν είναι διαθέσιμα για αυτήν την πρώιμη φάση βιομηχανικής παραγωγής υδρογόνου.

Η τρέχουσα ετήσια παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου ανέρχεται σε περίπου $600 \times 10^9 \text{ Nm}^3$ το χρόνο (6.500 PJ/a), το οποίο είναι ισοδύναμο με μόνο 1.5% της παγκόσμιας πρωτογενούς ζήτησης ενέργειας. Η ετήσια αύξηση της παραγωγής αυτής υπολογίζεται περίπου στο 10%. Σχεδόν το μισό από το υδρογόνο χρησιμοποιείται για μη ενεργειακές εφαρμογές στη χημική βιομηχανία (κυρίως για την παραγωγή αμμωνίας), περίπου 30% στη βιομηχανία πετρελαίου για τον καθαρισμό καυσίμων και την παραγωγή συνθετικών καυσίμων (έμμεση ενεργειακή χρήση) και το υπόλοιπο (κυρίως μολυσμένο υδρογόνο από τις βιομηχανικές διαδικασίες) χρησιμοποιείται άμεσα για την παραγωγή θερμότητας στη βιομηχανία (Σχήμα 3.2).



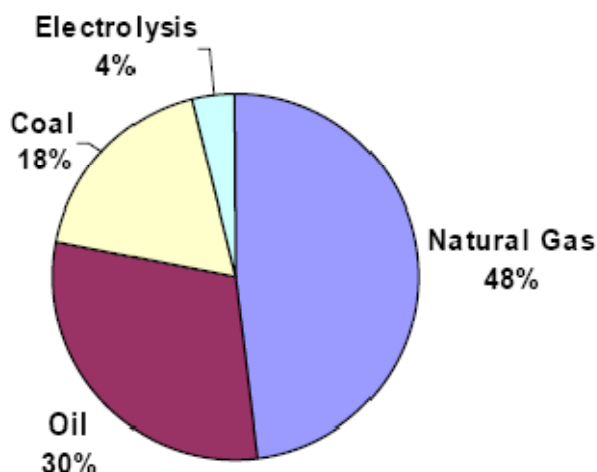
Σχήμα 3.1 Η ανάπτυξη της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου

Κεφάλαιο 3^ο – Παραγωγή υδρογόνου



Σχήμα 3.2 Χρήση H₂ σήμερα

Σήμερα περίπου 70% του υδρογόνου παράγεται άμεσα με τον ανασχηματισμό ατμού του φυσικού αερίου και από τη μερική οξείδωση του βαρίου πετρελαίου (Σχήμα 3.3). Το υπόλοιπο είναι παραπροϊόν από τη βιομηχανία πετρελαίου, την πετροχημική βιομηχανία και άλλες βιομηχανίες. Δεδομένου ότι ένα μεγάλο μερίδιο του υδρογόνου χρησιμοποιείται εσωτερικά και δεν κυκλοφορεί εμπορικά στην αγορά, οποιαδήποτε στοιχεία όσον αφορά τη συνολική παραγωγή υδρογόνου είναι προσεγγιστικές εκτιμήσεις με μια σχετική αβεβαιότητα. Ιστορικά στοιχεία όσον αφορά την παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου υπάρχουν έως το 1986 ενώ τα στοιχεία για τη Γερμανία είναι προσιτά έως το 1976. Αυτά τα στοιχεία δείχνουν ότι υπήρξε μικρή διαφοροποίηση με την πάροδο του χρόνου στις κύριες πηγές από τις οποίες το υδρογόνο παρήχθη.



Σχήμα 3.3 Προέλευση H₂ σήμερα

Πιο συγκεκριμένα, σχεδόν 50% του υδρογόνου παράγεται από τον ανασχηματισμό ατμού του φυσικού αερίου (gas steam reforming – GSR), ο οποίος είναι ο οικονομικότερος τρόπος για την παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλες κλίμακες. Για να συμμορφωθεί με τους βασικούς περιβαλλοντικούς στόχους (προστασία κλίματος, απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα), μια μελλοντική οικονομία του υδρογόνου θα πρέπει να βασιστεί σε διαφορετικές επιλογές παραγωγής υδρογόνου.

Κεφάλαιο 3^ο – Παραγωγή υδρογόνου

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθούμε στην δυναμικότητα των Ευρωπαϊκών Κρατών μέχρι σήμερα και στο υπάρχον δίκτυο διανομής υδρογόνου στην Βόρεια Ευρώπη της Air Liquide [Steinberger, 2008]. Η συνολική παραγωγή της Ευρώπης αντιστοιχεί μόλις στο 12% τις παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου.

Country	Number of Production Sites	Total Production [x10 ⁹ Nm ³ /yr]	Share in Total Production [%]
Austria	3	1.0	2.0
Belgium	11	1.9	3.9
Denmark	0		
Finland	8	3.7	7.6
France	20	5.0	10.2
Germany	41	18.5	37.8
Greece	5	0.1	0.2
Ireland	1	0.8	1.6
Italy	27	3.3	6.8
Luxemburg	0		
The Netherlands	11	6.9	14.1
Portugal	4	1.5	3.1
Spain	18	1.9	3.9
Sweden	11	0.4	0.8
United Kingdom	15	3.9	8.0
EU Total	173	48.9	100

Πίνακας 3.1 Παραγωγή H₂ στα Ευρωπαϊκά Κράτη



Σχήμα 3.4 Αγωγοί μεταφοράς και διανομής υδρογόνου σε Benelux, Northern France και Ruhrgebiet της Air Liquide

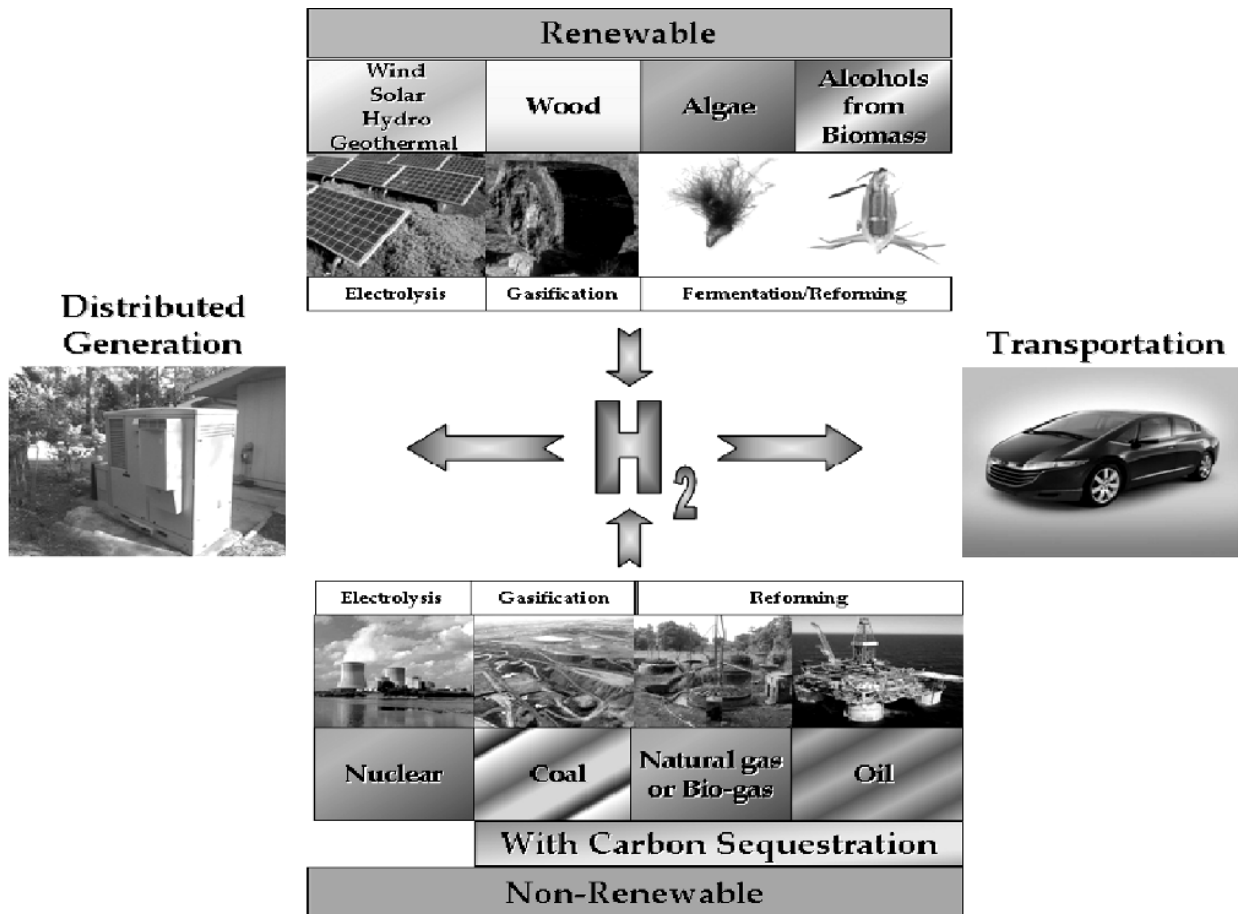
3.2 Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου

3.2.1 Γενικά

Μέχρι τώρα κάναμε μία γενική αναφορά στις ιδιότητες και την οικονομία του υδρογόνου. Όπως είδαμε, η οικονομία του υδρογόνου αποτελείται συνοπτικά από τους εξής επί μέρους βασικούς τομείς:

- Παραγωγή
- Διανομή
- Αποθήκευση
- Χρήση

Στην παρούσα ενότητα, θα αναφερθούμε σε διάφορες εμπορικές και μη μεθόδους παραγωγής του υδρογόνου. Το παρακάτω σχήμα 3.5 δείχνει τις διαδικασίες για την παραγωγή από πρωτογενή πηγές ενέργειας και την ροή του προς την κατανάλωση [Zoulias, 2008]. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σημερινές τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου, λαμβάνοντας υπόψη τις μελλοντικές προοπτικές τους για βελτίωση.

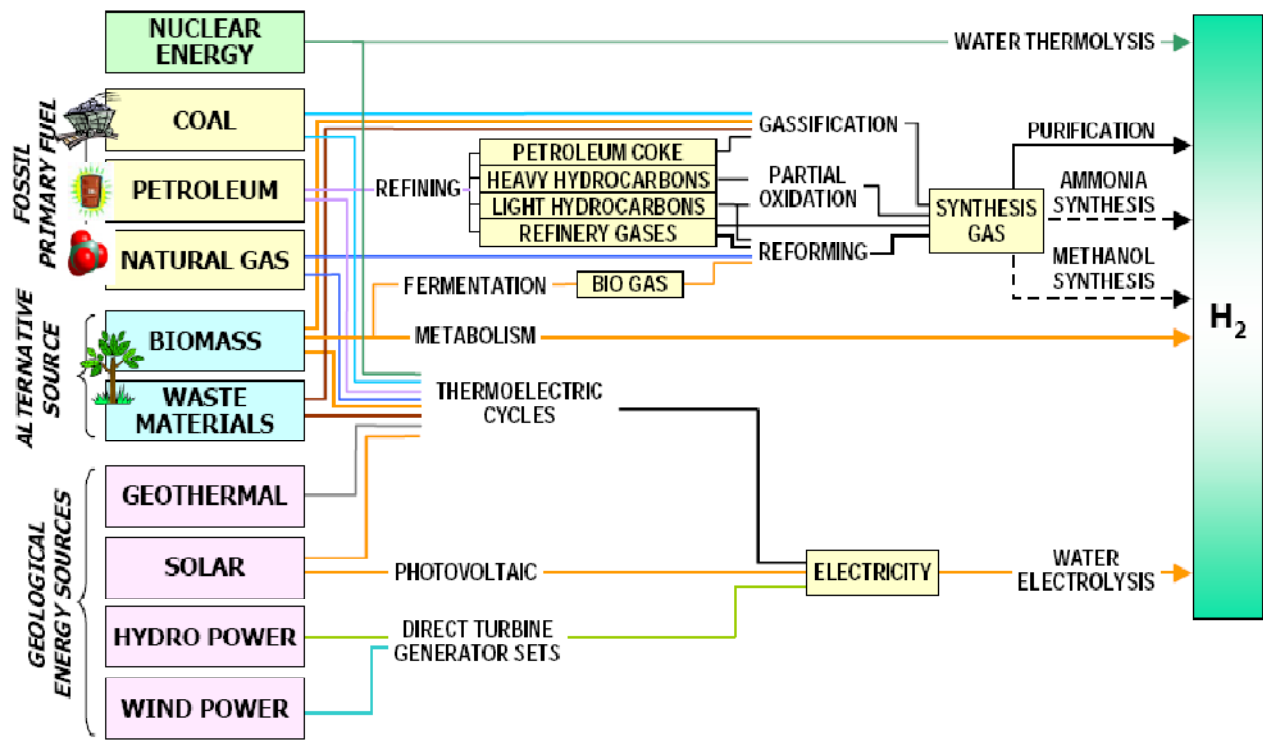


Σχήμα 3.5 Μέθοδοι παραγωγής H₂ και χρήση

Συνοπτικά, οι μέθοδοι παραγωγής του υδρογόνου χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, με τις παρακάτω υποκατηγορίες:

- **Θερμοχημικές:**
 - Ανασχηματισμός ατμού του φυσικού αερίου (Gas Steam Reforming – GSR)
 - Μετασχηματισμός φυσικού αερίου με ηλιακή θερμότητα (Solar Methane Reforming – SMR)
 - Μερική οξείδωση πετρελαίου (Heavy Oil Partial Oxidation – OPO)
 - Αεριοποίηση άνθρακα (Coal Gasification – CGF)
 - Αεριοποίηση βιομάζας (Biomass Gasification – BGF)
 - Πυρόλυση βιομάζας (Biomass Pyrolysis – BPY)
 - Θερμική διάσπαση υψηλής θερμοκρασίας με χρήση ηλιακής ενέργειας (Solar High Temperature – SHT)
 - Θερμική διάσπαση υψηλής θερμοκρασίας με χρήση πυρηνικής ενέργειας (Nuclear High Temperature – NHT)
- **Ηλεκτρολυτικές**
 - Ηλεκτρόλυση νερού (Water Electrolysis – WEG)
 - **Ηλεκτρόλυση νερού με χρήση αιολικής ενέργειας (Water Electrolysis with Wind – WEW)**
 - Ηλεκτρόλυση νερού με χρήση πυρηνικής ενέργειας (Water Electrolysis with Nuclear – WEN)
- **Φωτολυτικές**
 - Φωτοβιολογική παραγωγή
 - Φωτοηλεκτρόλυση

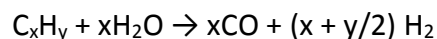
Οι περισσότερες από τις παραπάνω διεργασίες συνοψίζονται και στο σχήμα 3.6 [Φούντη, 2007]. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε περιληπτικά στις πιο σημαντικές από αυτές, λαμβάνοντας υπόψη τις μελλοντικές προοπτικές τους για βελτίωση, και ειδικότερα στην μέθοδο της ηλεκτρόλυσης που αποτελεί αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.



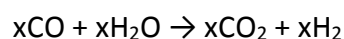
Σχήμα 3.6 Διεργασίες παρασκευής υδρογόνου

3.2.2 Ανασχηματισμός ατμού του φυσικού αερίου (GSR) και μετασχηματισμός φυσικού αερίου με ηλιακή θερμότητα (SMR)

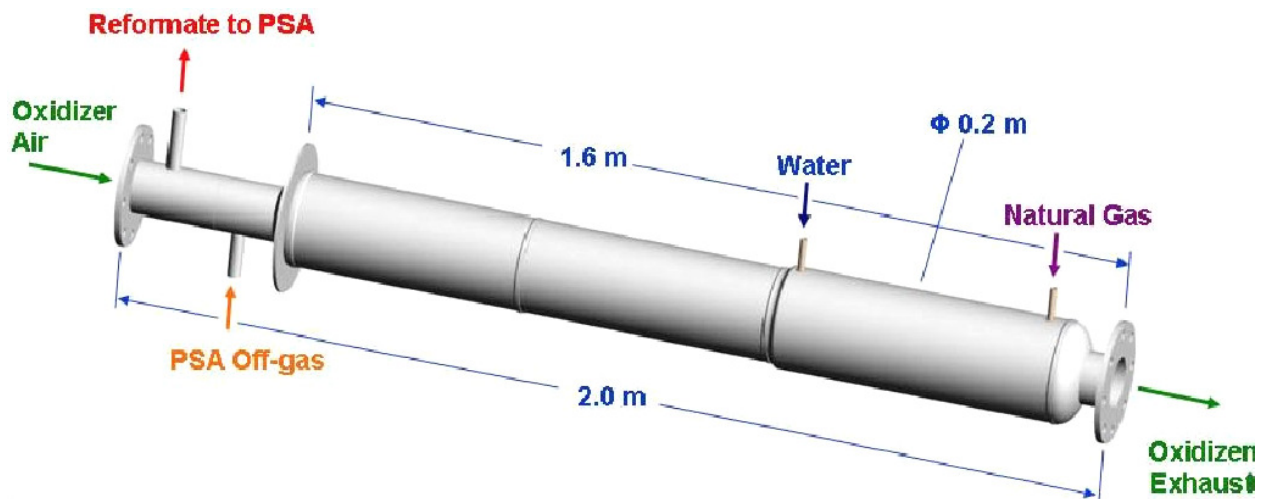
Ο **ανασχηματισμός ατμού του φυσικού αερίου** (Gas Steam Reforming – GSR) είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη διαδικασία για την παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλες ποσότητες. Το φυσικό αέριο αντιδρά με τον ατμό σε μεγάλες θερμοκρασίες (> 800 °C) παρουσία καταλύτη νικελίου, Ni. Το προϊόν αντίδρασης (**syngas**) είναι ένα μίγμα υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα:



Το μίγμα υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα (syngas) από τον μεταρρυθμιστή ψύχεται και οδηγείται σε έναν αντιδραστήρα μετατόπισης νερού-αερίου στον οποίο το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με ατμό παρουσία καταλύτη και παράγει υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα.



Για να επιτευχθεί καθαρό υδρογόνο, το αέριο καθαρίζεται τελικά σε μια μονάδα απορρόφησης ταλάντευσης πίεσης (PSA), η οποία επιτυγχάνει παραγωγή υδρογόνου υψηλής καθαρότητας (99.99%)(Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7 Μονάδα Pressure Swing Absorption (PSA)

Μια νέα ιδέα που αποκαλείται «ενισχυμένη προσρόφηση διαδικασία αντίδρασης» (SERP) στοχεύει στην ανάπτυξη μιας οικονομικώς πιο αποδοτικής διαδικασίας GSR. Ο ατμός και το μεθάνιο οδηγούνται σε θερμοκρασία 440-550 °C μέσα σε αντιδραστήρα που περιέχει μίγμα του ανασχηματισμένου καταλύτη και ενός προσροφητικού για την αφαίρεση του διοξειδίου του άνθρακα από τη ζώνη αντίδρασης. Το όφελος από αυτήν την διαδικασία είναι η παραγωγή του υδρογόνου σε υψηλή καθαρότητα (~90% H₂) απευθείας από τον αντιδραστήρα, οδηγώντας κατά συνέπεια σε μείωση ή ακόμα και εξάλειψη των επόμενων βημάτων καθαρισμού του υδρογόνου.

Σήμερα, υδρογόνο παράγεται βιομηχανικά σε μεγάλης κλίμακας μεταρρυθμιστές ατμού της τάξεως των 100.000 Nm³/h σε υψηλές πιέσεις (20-40 bars). Η αποκεντρωμένη επιτόπια παραγωγή π.χ. σε ένα πρατήριο υδρογόνου ή σε μια κατοικημένη περιοχή απαιτεί μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις GSR με ποσό παραγωγής μεταξύ 1.000 και 4.000 Nm³/h. Δεδομένου ότι η GSR είναι καθιερωμένη και ώριμη τεχνολογία, η δυνατότητα για τεχνική βελτίωση της είναι περιορισμένη. Η σημερινή απόδοση της διαδικασίας είναι 74% και το 2050 αναμένεται να φτάσει το 81%. Τα πιο πρόσφατα στοιχεία προτείνουν τις κύριες δαπάνες στα 45 €/m³.d για τις μεγάλες εγκαταστάσεις με μία μείωση της τάξης του 10% για το 2050. Οι O&M δαπάνες (Operation & Maintenance – Λειτουργίας & Συντήρησης) είναι στο 2% του κόστους επένδυσης.

Προχωρώντας παρακάτω και για την εκπλήρωση των παγκόσμιων ενεργειακών και περιβαλλοντικών στόχων, μια μελλοντική οικονομία του υδρογόνου είναι απαραίτητο να βασιστεί σε διαφορετικούς τρόπους παραγωγής υδρογόνου, χρησιμοποιώντας καθαρότερους τρόπους παραγωγής, π.χ. ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μια ιδέα που κερδίζει έδαφος είναι η **ηλιακή διαδικασία ανασχηματισμού του φυσικού αερίου** (Solar Methane Reforming – SMR), με την οποία επιτυγχάνεται μείωση της κατανάλωσης καυσίμων μέχρι και 40% σε σχέση με τον παραδοσιακό ανασχηματισμό φυσικού αερίου, αφού η απαιτούμενη θερμότητα παρέχεται από την ηλιακή ενέργεια.

Η ηλιακή διαδικασία ανασχηματισμού του φυσικού αερίου δεν έχει εφαρμοστεί ακόμα σε βιομηχανική παραγωγή και δεν προβλέπεται να γίνει κάτι τέτοιο μέχρι το 2020. Ουσιαστικά, το κόστος για την ηλιακή διαδικασία ανασχηματισμού του ατμού είναι το κόστος της GSR συν το κόστος του ηλιακού μέρους του αναμορφωτήρα.

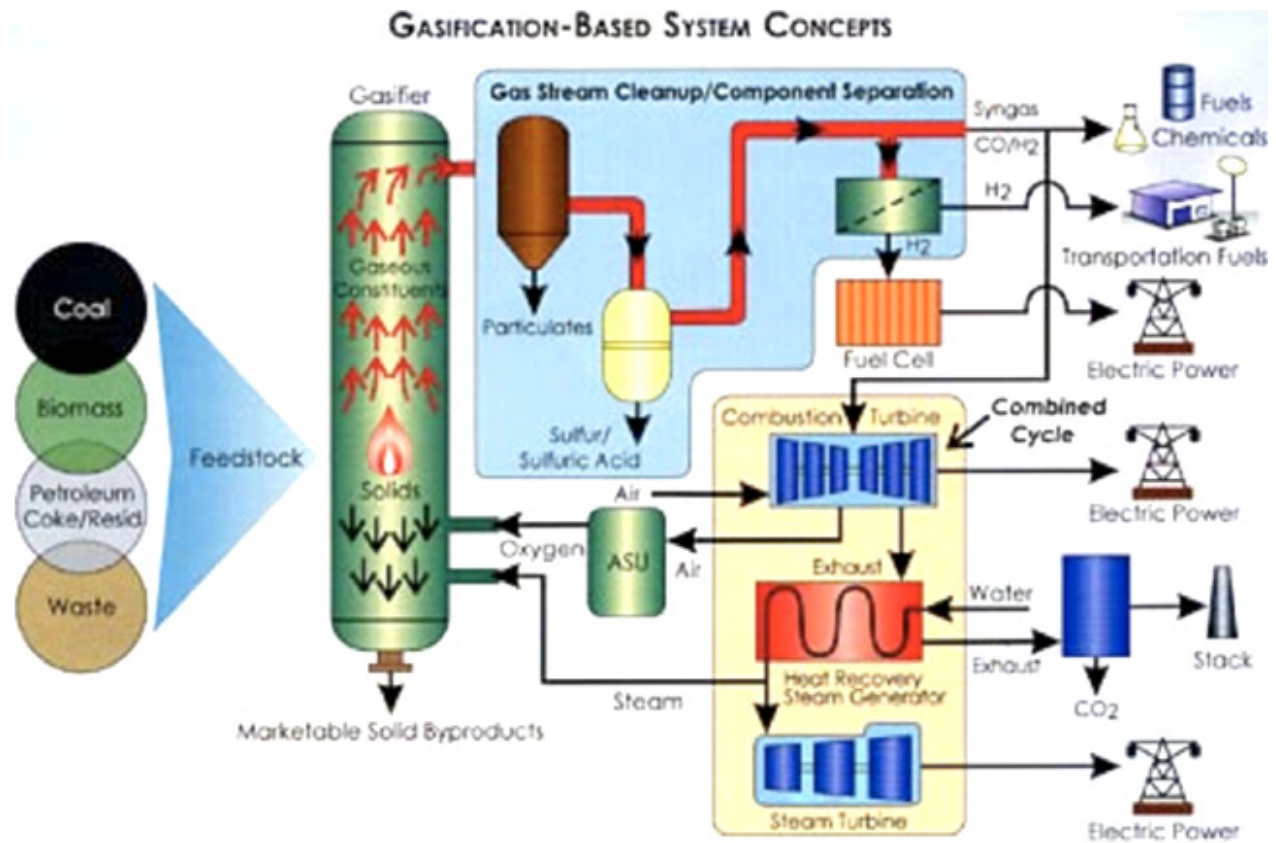
3.2.3 Αεριοποίηση άνθρακα (CGF)

Ακριβώς όπως ο ανασχηματισμός του φυσικού αερίου, η **αεριοποίηση άνθρακα** (Coal Gasification – CGF) είναι μια γνωστή διαδικασία. Εντούτοις, πρόσφατα αυτή η τεχνολογία αναπτύχθηκε προκειμένου να παραχθούν αποτελεσματικά υδρογόνο ή/και ηλεκτρισμός στις εγκαταστάσεις αεριοποίησης (IGCC). Τα βασισμένα στην αεριοποίηση συστήματα είναι σε θέση να εκμεταλλευτούν όλα τα βασισμένα στον άνθρακα προϊόντα πετροχημικής βιομηχανίας, συμπεριλαμβανομένου του λιγνίτη, του κοκ πετρελαίου, της βιομάζας, των επιβλαβών αποβλήτων κλπ.

Αυτήν την περίοδο, υπάρχουν δεκαεπτά εγκαταστάσεις IGCC, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 4.000 MW, που αναπτύσσουν δραστηριότητες παγκοσμίως, από τις οποίες πέντε χρησιμοποιούν μόνο λιγνίτη. Σε ένα σύστημα IGCC, βασισμένα σε άνθρακα αέρια πετροχημικής βιομηχανίας μετατρέπονται στον εξαερωτή, παρουσία οξυγόνου (και ατμού) σε υψηλές θερμοκρασίες και μέτρια πίεση, στα syngas. Η χημεία της αεριοποίησης είναι αρκετά σύνθετη και περιλαμβάνει πολλές χημικές αντιδράσεις. Οι περισσότερες μονάδες IGCC είναι εξοπλισμένες με μονάδα χωρισμού αέρα (ASU) που παράγει το απαιτούμενο οξυγόνο για τη διαδικασία αεριοποίησης.

Αν και αυτή η μονάδα είναι μάλλον πιο ακριβή, η χρήση του καθαρού οξυγόνου (99%) αυξάνει την απόδοση της αεριοποίησης. Μόλις καθαριστούν αρκετά τα syngas, διάφορες επιλογές υπάρχουν για τη χρησιμοποίησή τους, όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω συνδυασμένου κύκλου ή η παραγωγή υδρογόνου (Σχήμα 3.8). Για την παραγωγή υδρογόνου, τα syngas καθοδηγούνται στον αντιδραστήρα νερού-αερίου όπου το CO αντιδρά με ατμό για να παράγει H₂ και CO₂. Στη συνέχεια γίνεται εύκολα ο διαχωρισμός των δύο προϊόντων.

Η απόδοση της διαδικασίας είναι 59% σήμερα και αναμένεται να αυξηθεί ελάχιστα ως το 2050 και να φτάσει το 60%. Μια σημαντική αύξηση της γενικής απόδοσης αναμένεται με την αντικατάσταση της συμβατικής διαδικασίας επεξεργασίας syngas με αντιδραστήρα χωρισμού μεμβρανών υδρογόνου στο απώτερο μέλλον. Οι δαπάνες επένδυσης για το σύστημα αεριοποίησης είναι 120 €/m³.d, οι οποίες είναι σημαντικά υψηλότερες από τις δαπάνες για την GSR ή την OPO. Αυτό το κόστος αντισταθμίζεται όμως από τη χαμηλή τιμή του άνθρακα, γεγονός που κάνει την αεριοποίηση την πιο οικονομική επιλογή για παραγωγή υδρογόνου σήμερα.



Σχήμα 3.8 Μονάδα αεριοποίησης και επιλογές

3.2.4 Αεριοποίηση βιομάζας (BGF) και πυρόλυση βιομάζας (BPY)

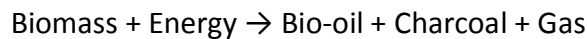
Οι τεχνολογίες της παραγωγής υδρογόνου από τη βιομάζα είναι η αεριοποίηση και η πυρόλυση. Η μείωση της ζήτησης καυσίμων παραμένει μια σημαντική ανησυχία για τον μελλοντικό ενεργειακό εφοδιασμό. Μεσοπρόθεσμα, η παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα μπορεί να είναι η πιο εφαρμόσιμη και βιώσιμη «καθαρή» επιλογή για την παραγωγή υδρογόνου. Η **αεριοποίηση βιομάζας** (Biomass Gasification – BGF), εντούτοις, είναι ακόμα σε φάση επίδειξης. Αυτήν την περίοδο μόνο ένας μικρός αριθμός εγκαταστάσεων επίδειξης είναι σε ισχύ και πολλά ζητήματα πρέπει ακόμα να αντιμετωπιστούν προτού η τεχνολογία μπορέσει να φθάσει σε επαρκή τεχνική απόδοση και ως εκ τούτου να γίνει οικονομικά ανταγωνιστική. Η παραγωγή του υδρογόνου είναι χαμηλή από τη βιομάζα δεδομένου ότι η περιεκτικότητά της σε υδρογόνο είναι χαμηλή και επίσης το ενεργειακό της περιεχόμενο είναι χαμηλό επειδή η βιομάζα περιέχει οξυγόνο σε ποσοστό 40%. Η διαθεσιμότητα της βιομάζας είναι φυσικά ένα κρίσιμο θέμα στην ανάπτυξη μακροπρόθεσμων σεναρίων. Μια προσεγγιστική εκτίμηση προτείνει ότι η συνολική διαθεσιμότητα βιομάζας στις 25 χώρες της Ε.Ε. είναι περίπου 6.600 PJ/a, συμπεριλαμβανομένων των δασικών και βιομηχανικών ξύλινων υπολοίπων, του άχυρου και των ενεργειακών συγκομιδών. Η διαθεσιμότητα βιομάζας στις χώρες της ΕΕ-15 θα ανέλθει σε 7.000 PJ/a το 2050.

Η αεριοποίηση είναι η μετατροπή της βιομάζας σε ένα μίγμα αερίου από τη μερική οξείδωση της βιομάζας σε υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 850-950 °C. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από την αεριοποίηση προϊόντων με την ίδια διαδικασία του ανασχηματισμού ατμού και της αντίδρασης νερού-αερίου. Δεδομένου ότι τα προϊόντα της αεριοποίησης είναι κυρίως αέρια, αυτή η διαδικασία είναι ευνοϊκότερη για την παραγωγή υδρογόνου από την πυρόλυση. Τα σημαντικότερα προβλήματα της αεριοποίησης βιομαζών είναι ο σχηματισμός της πίσσας και η τέφρα, τα οποία όμως μπορούν να υπερνικηθούν με κατάλληλο σχέδιο αντιδραστήρων και χρήση πρόσθετων ουσιών ή/και καταλυτών.

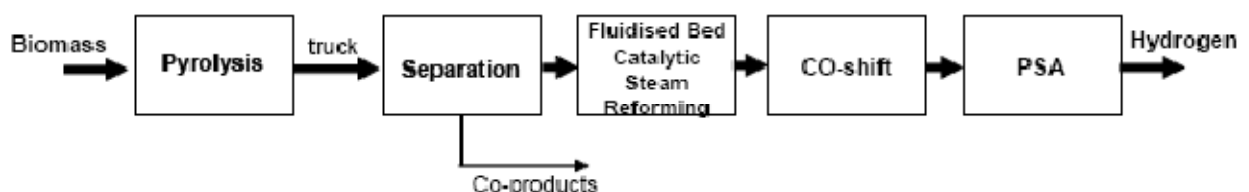
Μια επιλογή αεριοποίησης είναι βασισμένη σε έναν χαμηλής πίεσης, έμμεσα-θερμαινόμενο εξαερωτή, στον οποίο η θερμότητα, η απαραίτητη για την ενδοθερμική αντίδραση αεριοποίησης, παρέχεται π.χ. από την καυτή άμμο που κυκλοφορεί μεταξύ του καυστήρα και του σωλήνα αεριοποίησης. Μετά από τον καθαρισμό, τα syngas ψύχονται έτσι ώστε να μπορούν να συμπιεστούν στην πίεση που απαιτείται για τη μονάδα προσρόφησης ταλάντευσης πίεσης (PSA). Μετά από την συμπίεση, το αέριο που προέρχεται από τον εξαερωτή (ατμός) ανασχηματίζεται και περνάει μέσω ενός αντιδραστήρα νερού-αερίου για να παραγάγει H₂ και CO₂. Τέλος, το υδρογόνο καθαρίζεται στη PSA πριν από την αποθήκευση και τη διανομή του.

Αυτή τη στιγμή υπάρχουν μικρές εγκαταστάσεις αεριοποίησης βιομαζών με απόδοση 69-70%.. Υποτίθεται ότι το μέγεθος μιας μελλοντικής εφαρμογής μεγάλης κλίμακας είναι περίπου 25 MWth, το οποίο αναμένεται να επιτύχει μια απόδοση 72% για το 2030. Τα στοιχεία όσον αφορά τις δαπάνες επένδυσης ενός μελλοντικού εμπορικού συστήματος αεριοποίησης βιομάζας διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης. Οι δαπάνες επένδυσης για μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις ανέρχονται σε περίπου 300 €/m³.d, ενώ για μία μεγάλης κλίμακας εγκατάσταση το κόστος εκτιμάται στα 150 €/m³.d.

Όμως εκτός από την αεριοποίηση, μια ακόμη μέθοδος που εξετάζεται είναι και η **πυρόλυση βιομάζας** (Biomass Pyrolysis – BPy). Αντί της άμεσης αεριοποίησης, μια γρήγορη πυρόλυση βιομάζας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραγάγει ένα υγρό ενδιάμεσο προϊόν αποκαλούμενο **bio-oil**, από το οποίο μπορεί να παραχθεί υδρογόνο με ανασχηματισμό του ατμού μετά από έναν διαχωρισμό παραπροϊόντων. Η βιομάζα αρχικά ξεραίνεται και έπειτα μετατρέπεται σε bio-oil από την πολύ γρήγορη έκθεση στα θερμάμενα μόρια σε ρευστοποιημένο περιβάλλον:



Ο προσροφητικός άνθρακας και τα αέρια που παράχθηκαν καίγονται για να παρέχουν θερμότητα στον αντιδραστήρα, ενώ το bio-oil ψύχεται και συμπυκνώνεται. Ο καταλυτικός ανασχηματισμός ατμού του bio-oil πραγματοποιείται σε θερμοκρασία 750-850 °C σε καταλύτη βασισμένο στο νικέλιο, Ni.



Σχήμα 3.9 Διάγραμμα της διαδικασίας πυρόλυσης βιομάζας (BPy)

Η έννοια της γρήγορης πυρόλυσης που συνδυάζεται με τον ανασχηματισμό ατμού αναμένεται να έχει πλεονεκτήματα σε σχέση με την παραδοσιακή αεριοποίηση και την τεχνολογία μετατόπισης νερού-αερίου. Το bio-oil είναι πολύ ευκολότερο να μεταφερθεί από τη στερεή βιομάζα, προσφέροντας έτσι δυνατότητα να παραχθεί σε μικρότερες εγκαταστάσεις πιο κοντά στις πηγές βιομάζας, με συνέπεια χαμηλότερα κόστη αποθεμάτων. Το bio-oil στέλνεται έπειτα με φορτηγά στη μονάδα παραγωγής υδρογόνου (Σχήμα 3.9). Είναι πιο οικονομικό να παραχθεί το bio-oil σε μακρινές θέσεις και να μεταφερθεί έπειτα, δεδομένου ότι η ενεργειακή του πυκνότητά είναι μεγαλύτερη από της βιομάζας. Ένα δεύτερο πλεονέκτημα είναι η πιθανή παραγωγή και αποκατάσταση παραπροϊόντων υψηλής αξίας από το bio-oil. Το μέρος που προέρχεται από λιγνίτη μπορεί να χωριστεί από το bio-oil και να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο φαινολών στις κόλλες φαινόλης-φορμαλδεΐδης, ενώ το μέρος που προέρχεται από υδατάνθρακες ανασχηματίζεται καταλυτικά για να παράγει υδρογόνο.

Αυτή τη στιγμή, το ποσό υγρών που παράγονται από βιομάζα και είναι διαθέσιμα για ανασχηματισμό είναι μάλλον περιορισμένο, αλλά ένας βιώσιμος τρόπος να αυξηθεί η παραγωγή του υδρογόνου σε ένα εργοστάσιο βασισμένο στη βιομάζα είναι ο ανασχηματισμός του υγρού της πυρόλυσης με το φυσικό αέριο.

Σύμφωνα με τα σχεδιαστικά στοιχεία συστημάτων, επιτυγχάνεται μια απόδοση 45% για τα σύγχρονα συστήματα πυρόλυσης βιομάζας, ενώ στο μέλλον η απόδοση αναμένεται να φτάσει στο 49%. Οι δαπάνες επένδυσης ανέρχονται στα 100 €/m³.d, με μια μείωση της τάξης του 50% για το 2050. Τα λειτουργικά κόστη ανά έτος ανέρχονται στο 6% των δαπανών επένδυσης. Στον πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι υφιστάμενες εφαρμογές παραγωγής υδρογόνου που χρησιμοποιούν ως πρωτογενή πηγή ενέργειας την βιομάζα.

Εφαρμογή	Μέγεθος εγκατάστασης	Τοποθεσία
BIOSYN, Inc. gasification Process	10 t/h βιομάζας Επιδεικτική εφαρμογή	St-Juste de Bretennieres, Quebec, Canada.
Fast Internal Circulation Fluidized Bed Process	2 MW electrical Επιδεικτική εφαρμογή	Gussing, Burgenland
FERCO Silva Gas process	200 t/day βιομάζας	power plant in Burlington, Vermont
MTCI process	20 t/day βιομάζας Ανάπτυξη τεχνολογίας	Baltimore, MD
RENUGAS process	12 t/day βιομάζας Ανάπτυξη τεχνολογίας	Chicago
Chemrec Process	20 t/day ξηρής στερεάς ύλης 3 MWth πιλοτική μονάδα με στόχο την αύξηση κλίμακας μεγέθους σε 300 t/day	Pitea, Sweden
SVZ Schwarze Pumpe Μετατροπή αεριοποιητών άνθρακα σε βιομάζα	Τρεις μονάδες 14, 35 και 15 t/h τροποποιημένων αεριοποιητών άνθρακα	Germany

Πίνακας 3.2 Εφαρμογές παραγωγής υδρογόνου με αξιοποίηση βιομάζας

3.2.5 Φωτοβιολογική παραγωγή και φωτοηλεκτρόλυση

Η τρίτη και τελευταία γενική κατηγορία μεθόδων παραγωγής του υδρογόνου, βασίζεται στην παραγωγή αυτού μέσω της διαδικασίας της φωτόλυσης. Ο ένας τρόπος για να το πετύχουμε αυτό, είναι να χρησιμοποιήσουμε την ιδιότητα που εμφανίζουν ορισμένοι μικροοργανισμοί (κυρίως άλγη και κυανοβακτήρια) να παράγουν αυτούσια υδρογόνο μέσω του φυσικού φωτοσυνθετικού τους κύκλου που αποτελεί μέρος του αναερόβιου μηχανισμού παραγωγής της ενέργειάς τους. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία ονομάζεται και **φωτοβιολογική παραγωγή** του υδρογόνου. Μέσω κατάλληλης εκμετάλλευσης της ποσότητας του υδρογόνου που παράγεται από τη μεθοδολογία αυτή, μπορούμε να παράγουμε υδρογόνο με αποδοτικότητα παραγωγής που προσεγγίζει το 25%.

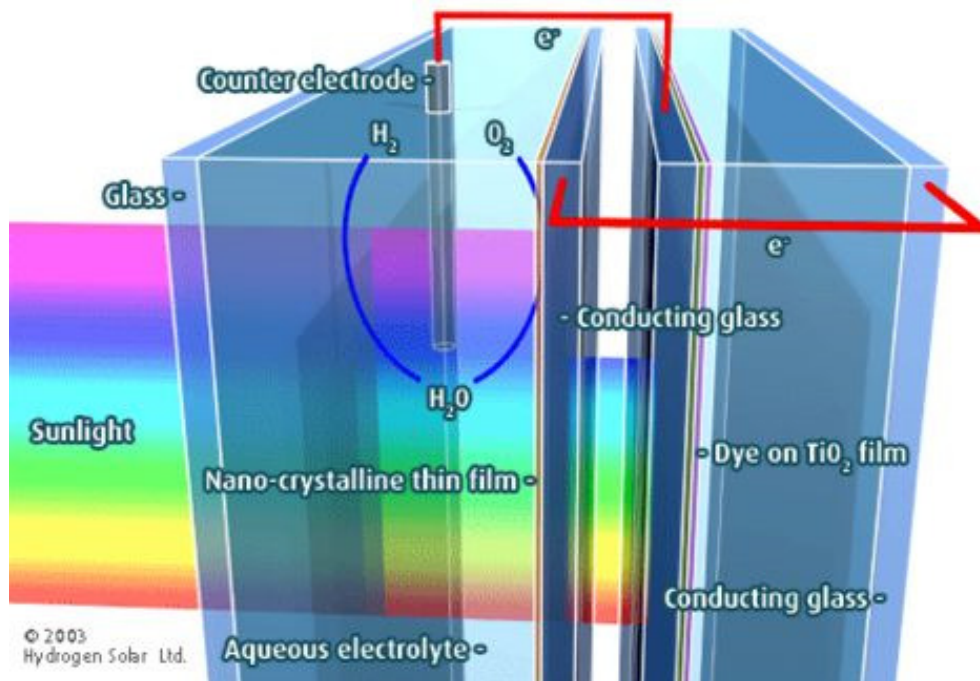
Η φωτοβιολογική μέθοδος παραγωγής του υδρογόνου παρουσιάζει ωστόσο και ένα σημαντικό μειονέκτημα το οποίο συνίσταται στο γεγονός ότι παράλληλα με το υδρογόνο, οι μικροοργανισμοί που χρησιμοποιούνται κατά τη φωτοσύνθεσή τους, παράγουν και ορισμένες ποσότητες από οξυγόνο. Το οξυγόνο αυτό, σε μεγάλες ποσότητες, δρα καταστρεπτικά πάνω στους υπόλοιπους αναερόβιους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς που υπάρχουν πάνω στη Γη. Αυτός είναι και ένας λόγος για τον οποίο γίνονται προσπάθειες για τη δημιουργία νέων γενετικών μορφών περισσότερο ανθεκτικών στο οξυγόνο.

Παρόλα αυτά, για μικρής και μεσαίας κλίμακας παραγωγή του υδρογόνου, η φωτοβιολογική παραγωγή μπορεί να εφαρμοστεί δίχως ιδιαίτερα προβλήματα. Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι η βιόσφαιρα χρησιμοποιεί ένα πολύ μικρό ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή υδρογόνου (μικρότερο του 0,5% της συνολικής φωτοσυνθετικής διαδικασίας) σε ποσά τα οποία είναι συγκρίσιμα με αυτά που χρειάζονται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μας.

Ο δεύτερος τρόπος παραγωγής υδρογόνου μέσω φωτόλυσης, επιτυγχάνεται μέσω της διαδικασίας της υδρόλυσης του νερού (ο όρος υδρόλυση χρησιμοποιείται για να περιγράψει την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης του νερού από ολοκληρωμένα ηλιακά συστήματα). Η συγκεκριμένη διαδικασία ονομάζεται και **φωτοηλεκτρόλυση** του νερού. Κατά τη διαδικασία αυτή, ολοκληρωμένα συστήματα πολυάριθμων ηλιακών συλλεκτών συνδεδεμένων σε σειρά, εκμεταλλεύονται τις ακτίνες του ηλίου και παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, την οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούν για να υδρολύσουν το νερό και να παράγουν υδρογόνο. Τα ολοκληρωμένα συστήματα ηλιακών συλλεκτών που χρησιμοποιούνται γι' αυτό το σκοπό, παρουσιάζουν αρκετά ικανοποιητική απόδοση, η οποία θεωρητικά προσεγγίζει και το 40%. Στην πράξη όμως, η απόδοση αυτή δεν υπερβαίνει συνήθως το 25-30%.

Μια σημαντική κατηγορία ολοκληρωμένων ηλιακών συστημάτων που αναπτύχθηκε τα τελευταία σχετικά χρόνια και η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υδρογόνου μέσω της υδρόλυσης του νερού, αποτελεί η κατηγορία των λεγομένων **φωτοηλεκτροχημικών στοιχείων** ή **στοιχείων Graetzel – Tandem (photoelectrochemical - PEC cells ή Graetzel – Tandem cells)**. Τα φωτοηλεκτροχημικά στοιχεία αποτελούν ολοκληρωμένες ηλιακές διατάξεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που συγκροτούνται από πολυάριθμους επίπεδους ηλιακούς συλλέκτες, οι οποίοι έχουν την ικανότητα να αξιοποιούν τις προσπίπτουσες πάνω στις επιφάνειές τους ηλιακές ακτίνες και να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Οι επίπεδες επιφάνειες των ηλιακών τους συλλεκτών περιέχουν στο εσωτερικό τους ένα υψηλά πορώδες λεπτό υμένιο από TiO_2 συνήθως, το οποίο είναι νανοδομημένο με διαστάσεις κόκκων που δεν υπερβαίνουν

τα 2÷20 nm περίπου. Το πολύ πορώδες αυτό λεπτό υμένιο, βρίσκεται σε επαφή με την ποσότητα νερού μιας ηλεκτρολυτικής διάταξης, που επίσης περιέχεται στο εσωτερικό των φωτοηλεκτροχημικών στοιχείων και από το οποίο παράγεται το επιθυμητό υδρογόνο μέσω της υδρόλυσής του από την ηλιακή ενέργεια που έχει απορροφήσει το φωτοηλεκτροχημικό στοιχείο και η οποία έχει μετατραπεί πρώτα σε ηλεκτρική.



Σχήμα 3.10 Αναπαράσταση λειτουργίας φωτοηλεκτροχημικού στοιχείου Tandem

Ένα στοιχείο PEC κατασκευάζεται από πολύ φτηνά υλικά. Η απόδοση του είναι περίπου 11% αλλά μπορεί να αυξηθεί μειώνοντας το κόστος κατασκευής ακόμα περισσότερο ή διευρύνοντας το φάσμα απορρόφησης του. Επιπλέον, υπερτερεί των φωτοβολταϊκών στοιχείων λόγω της μικρότερης υπέρτασης η οποία εμφανίζεται στην άνοδο κατά την ηλεκτρόλυση του νερού.

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε πιο αναλυτικά με την μέθοδο της ηλεκτρόλυσης του νερού για την παραγωγή υδρογόνου.

3.3 Ηλεκτρόλυση νερού

3.3.1 Γενικά

Ως γνωστόν, το νερό κατά τη διαδικασία της **ηλεκτρόλυσης** διασπάται στα δύο στοιχεία που το αποτελούν, δηλαδή το υδρογόνο και το οξυγόνο. Η ηλεκτρόλυση του νερού προς παραγωγή υδρογόνου, πραγματοποιείται μέσα σε ειδικές διατάξεις που ονομάζονται διατάξεις ηλεκτρόλυσης και απαιτεί την ταυτόχρονη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος. Το βασικό πλεονέκτημα που προκύπτει κατά την ηλεκτρόλυση του νερού προς παραγωγή υδρογόνου, είναι ότι το υδρογόνο που παράγεται χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερα υψηλές τιμές «καθαρότητας» και επομένως δύναται να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Η ηλεκτρόλυση του νερού, για την παραγωγή υδρογόνου, μέσω της χρησιμοποίησης του ηλεκτρικού ρεύματος που προέρχονταν από το κλασικό δίκτυο ηλεκτρισμού, σαν μέθοδος, βρήκε ευρεία απήχηση από τις αρχές του 1900 μέχρι και τη δεκαετία του 1950 περίπου. Μετά τη δεκαετία του '50 όμως, λόγω των διαφόρων φθηνότερων μεθόδων που ανακαλύφθηκαν για την παραγωγή του υδρογόνου (κυρίως της καταλυτικής αναμόρφωση φυσικού αερίου), η ηλεκτρόλυση του νερού εγκαταλείφθηκε στο μεγαλύτερο μέρος της, με αποτέλεσμα στις μέρες μας, μόνο ένα σχετικά μικρό ποσοστό της συνολικής ποσότητας του παραγόμενου υδρογόνου σε παγκόσμια κλίμακα να παράγεται πλέον με αυτόν τον τρόπο. Η εφαρμογή της ηλεκτρόλυσης του νερού για παραγωγή υδρογόνου χρησιμοποιείται σήμερα συνήθως όταν υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις σε υδρογόνο υψηλής καθαρότητας και οι ποσότητες αυτού που απαιτούνται δεν είναι εξαιρετικά μεγάλες, και όταν απαιτείται επιτόπια παραγωγή υδρογόνου.

Όμως τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σταδιακά μια σταδιακή αύξηση του παγκόσμιου ενδιαφέροντος για την παραγωγή του υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, κυρίως εξαιτίας της σύγχρονης δυνατότητας κατασκευής ολοκληρωμένων συστημάτων αποτελούμενων από ηλεκτρολυτικές διατάξεις νερού, οι οποίες λειτουργούν μέσω της παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με τη βοήθεια διαφόρων Α.Π.Ε. (κυρίως της ηλιακής και αιολικής ενέργειας). Τα ολοκληρωμένα αυτά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω διαφόρων Α.Π.Ε. παρουσιάζουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα σε σχέση με τα παραδοσιακά ηλεκτρολυτικά συστήματα: η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν, παράγεται χωρίς κάποιο σημαντικό κόστος, μιας και βασίζεται όπως είπαμε στην παραγωγή της από διάφορες Α.Π.Ε. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η εφαρμογή τους για την μαζική παραγωγή του υδρογόνου να γίνεται πολύ φθηνότερα από την κλασική μέθοδο παραγωγής του υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης (παραγωγή με χρησιμοποίηση της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου) και να εφαρμόζεται σταδιακά όλο και περισσότερο. Άλλο ένα πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το ότι το παραγόμενο οξυγόνο μπορεί επίσης να εκμεταλλευτεί για βιομηχανική ή άλλη χρήση.

Από την άλλη μεριά βέβαια, το κόστος κυρίως των υλικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αυτών των ολοκληρωμένων ηλεκτρολυτικών συστημάτων παραγωγής υδρογόνου μέσω Α.Π.Ε., είναι προς το παρόν ακόμα αρκετά υψηλό ώστε η παραγωγή αυτού μέσω των συγκεκριμένων διατάξεων να μπορεί να υποσκελίσει τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής του μέσω π.χ. των ορυκτών καυσίμων, με αποτέλεσμα η παραγωγή υδρογόνου μέσω

ολοκληρωμένων ηλεκτρολυτικών διατάξεων να μην χρησιμοποιείται τόσο μαζικά ακόμα όσο αυτές.

Τρεις διαφορετικές παραλλαγές της διαδικασίας έχουν αναπτυχθεί για τον ηλεκτρολυτικό διαχωρισμό νερού:

- Οι **αλκαλικοί** ηλεκτρολύτες νερού είναι σε εμπορική χρήση για πολλά χρόνια και λειτουργούν στην ατμοσφαιρική πίεση, σε χαμηλή πίεση (0-8 bar) ή σε πίεση μέχρι 30 bar.
- Οι ηλεκτρολύτες **μεμβρανών ανταλλαγής πρωτονίων** (Proton Exchange Membrane - PEM) (αντίστροφη αντίδραση της κυψέλης καυσίμου PEM) χρησιμοποιούν οργανική μεμβράνη αντί αλκαλικού διαλύματος, το οποίο οδηγεί σε σημαντική μείωση όγκου. Οι ηλεκτρολύτες PEM έχουν υψηλότερη απόδοση όταν λειτουργούν σε σημαντικά υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος συγκρινόμενοι με τους προηγμένους αλκαλικούς ηλεκτρολύτες (αλλά οι δαπάνες για το σύστημα είναι ακόμα πολύ υψηλές).
- Η **υψηλής θερμοκρασίας ηλεκτρόλυση ατμού** (High Temperature Steam Electrolyser) γίνεται μεταξύ 700 και 1000 °C. Το νερό που διαχωρίζεται, εισάγεται από την πλευρά της καθόδου ως ατμός, ο οποίος διαμορφώνει ένα μίγμα ατμού υδρογόνου κατά τη διάρκεια του ηλεκτρολυτικού διαχωρισμού. Ο διαχωρισμός του ατμού απαιτεί θεωρητικά λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια από το διαχωρισμό του νερού. Η ενέργεια που απαιτείται για την εξάτμιση νερού μπορεί να παρασχεθεί από τη θερμική ενέργεια και επιτρέπει έτσι τη χρήση διάφορων πηγών ενέργειας. Η κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη της διαδικασίας ηλεκτρόλυσης υψηλής θερμοκρασίας στη δεκαετία του '80 ήταν η χρησιμοποίηση της θερμότητας των αποβλήτων από τους υψηλής θερμοκρασίας πυρηνικούς αντιδραστήρες για την παραγωγή υδρογόνου, αλλά οι περισσότερες ερευνητικές δραστηριότητες μειώθηκαν σημαντικά από τότε.

Η ηλεκτρόλυση είναι εφαρμόσιμη από λίγα Nm³/h έως 10.000 Nm³/h, και συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποκεντρωμένη επιτόπια παραγωγή υδρογόνου καθώς επίσης και για συγκεντρωμένες μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις. Η επιτόπια παραγωγή υδρογόνου μπορεί να χρησιμοποιήσει την υπάρχουσα ηλεκτρική υποδομή και έχει το πλεονέκτημα ότι καμία πρόσθετη υποδομή για τη διανομή υδρογόνου δεν απαιτείται. Λόγω της ευελιξίας τους σε λειτουργία (έναρξη και διακοπή κατόπιν παραγγελίας) οι ηλεκτρολύτες μπορούν να υποστηρίξουν τη διαχείριση φορτίων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και να διευκολύνουν έτσι την ενσωμάτωση των κυμαινόμενων πηγών ενέργειας. Στον πίνακα 3.3 δίνονται μερικές από τις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση.

Κεφάλαιο 3^ο – Παραγωγή υδρογόνου

Location	Manufacturer	H ₂ Capacity	
		(MW)	(m ³ /h)
Assuan (Egypt)	Brown Boveri	158,400	33.000
Nangal (India)	De Nora	144,000	30.000
Rjukan (Norway)	Norsk Hydro	133,920	27.900
Ghomfjord (Norway)	Norsk Hydro	130,080	27.100
Trail (Canada)	Trail	72,960	15.200
Cuzco (Perú)	Lurgi	21,600	4.500
Huntsville (U.S.A.)	Electrolyser Corp.	2,568	535

Πίνακας 3.3 Ηλεκτρολυτικές μονάδες παραγωγής H₂ παγκοσμίως

Η ηλεκτρόλυση νερού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παραγάγει υδρογόνο από μερικά kW ως εκατοντάδες MW. Η ενεργειακή απόδοση ξεκινάει από 70% το 2000 και αναμένεται να φτάσει το 80% το 2050. Τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης (O&M) για την ηλεκτρόλυση, αν εξαιρέσουμε το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι μικρά δεδομένου ότι οι εγκαταστάσεις ηλεκτρόλυσης είναι καλά αυτοματοποιημένες. Η επανεργοποίηση ηλεκτροδίων πραγματοποιείται κανονικά κάθε πέντε έως επτά έτη για τους αλκαλικούς ηλεκτρολύτες. Τα ετήσια κόστη λειτουργίας και συντήρησης ανέρχονται σε 2% των δαπανών επένδυσης. Στον παρακάτω πίνακα 3.4 δίνονται ορισμένα συγκριτικά τεχνικά στοιχεία των τριών προαναφερθεισών μεθόδων ηλεκτρόλυσης.

Technical data

type	Temperature of operation	Pressure of operation	Electric consumption	Energy Efficiency	Life duration	State of development
Alcaline	50 - 100 °C	3 - 30 bars	4-5 kWh / Nm ³ of H ₂	75 - 90 %	15 - 20 years	marketed
PEM	80 - 100 °C	1- 70 bars	6 kWh / Nm ³ of H ₂	80 - 90 %	150 000 hours (≅17 years)	development
High temp. steam	800 - 1000 °C	??	3-3.5 kWh / Nm ³ of H ₂	80 - 90 %	??	research

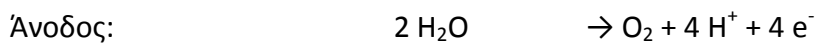
Πίνακας 3.4 Συγκριτικά στοιχεία μεθόδων ηλεκτρόλυσης



Σχήμα 3.11 Μονάδα ηλεκτρόλυσης 250 kW_{ei} της CASALE στην Ελβετία

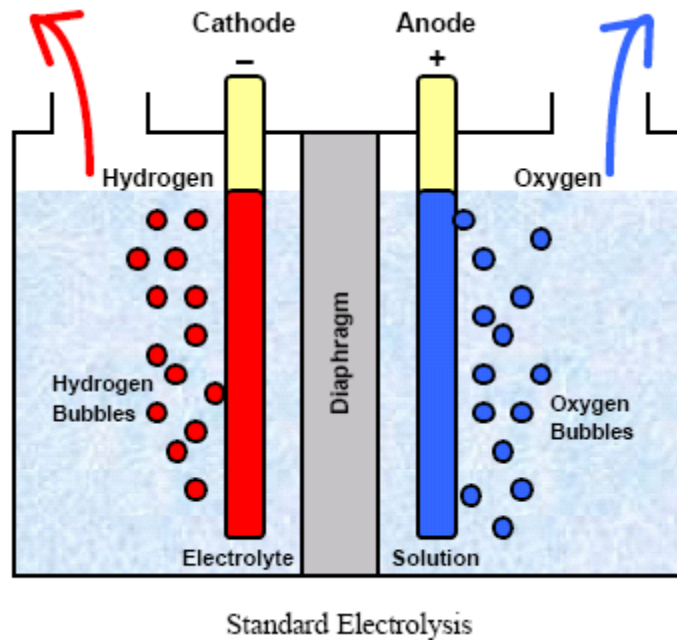
3.3.2 Αρχή λειτουργίας

Σε αυτή την ενότητα, θα γίνει προσπάθεια να περιγραφεί ένα τυπικό σύστημα ηλεκτρόλυσης. Το νερό μπορεί να ηλεκτρολυθεί με συνεχές ρεύμα (DC) με την παρουσία ενός κατάλληλου ηλεκτρολύτη, προκαλώντας τα θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου να κινηθούν στην αρνητικά φορτισμένη κάθοδο, όπου δημιουργείται το υδρογόνο. Ομοίως, το οξυγόνο σχηματίζεται στη θετικά φορτισμένη άνοδο (Σχήμα 3.12).



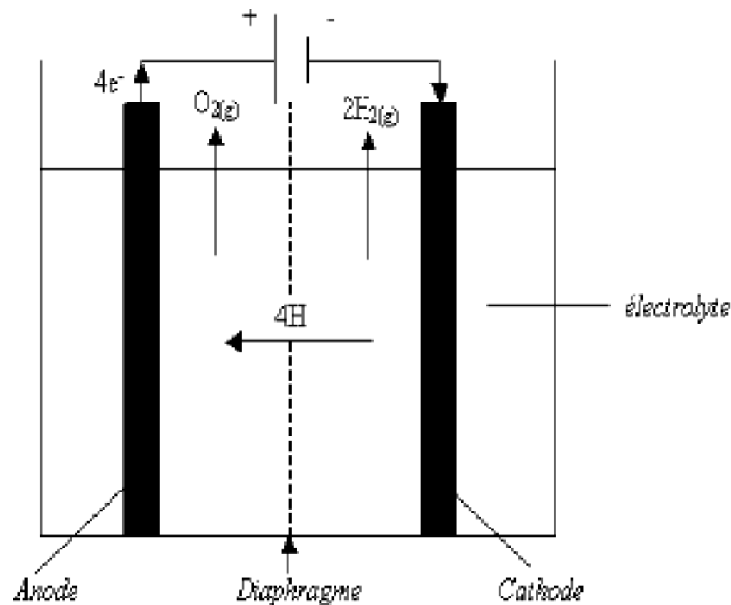
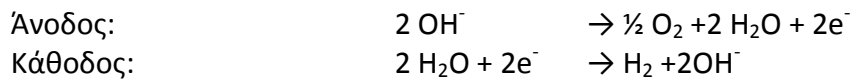
Ανεξαρτήτως της τεχνολογίας, η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης είναι η ίδια και καταλήγει στην ίδια τελική αντίδραση, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Όμως σε κάθε ηλεκτρόδιο υπάρχει διαφορά μεταξύ αλκαλικών συστημάτων και PEM.

Κεφάλαιο 3^ο – Παραγωγή υδρογόνου



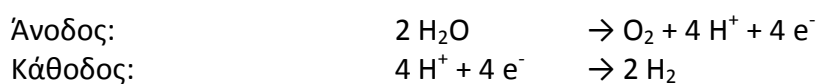
Σχήμα 3.12 Αρχή λειτουργίας της ηλεκτρόλυσης

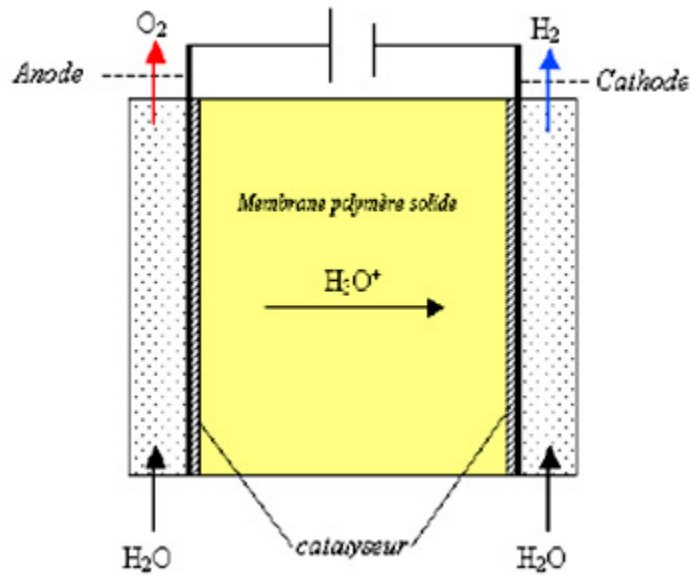
Σε αλκαλικό σύστημα οι αντιδράσεις είναι (Σχήμα 3.13):



Σχήμα 3.13 Αλκαλικός ηλεκτρολύτης

Ενώ σε PEM οι αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια είναι (Σχήμα 3.14):





Σχήμα 3.14 Ηλεκτρολύτης τύπου PEM

Θεωρητικά, 1,23 Volt εφαρμοζόμενης τάσης αρκούν για τη διεξαγωγή της ηλεκτρόλυσης. Πρακτικά, χρειάζεται περισσότερη τάση (1,55-1,65 V). Η απόδοση της ηλεκτρόλυσης ορίζεται ως το λόγο του 1,23 V προς την τάση όπου χρησιμοποιείται.

Με τάση 1,60 V έχουμε απόδοση:

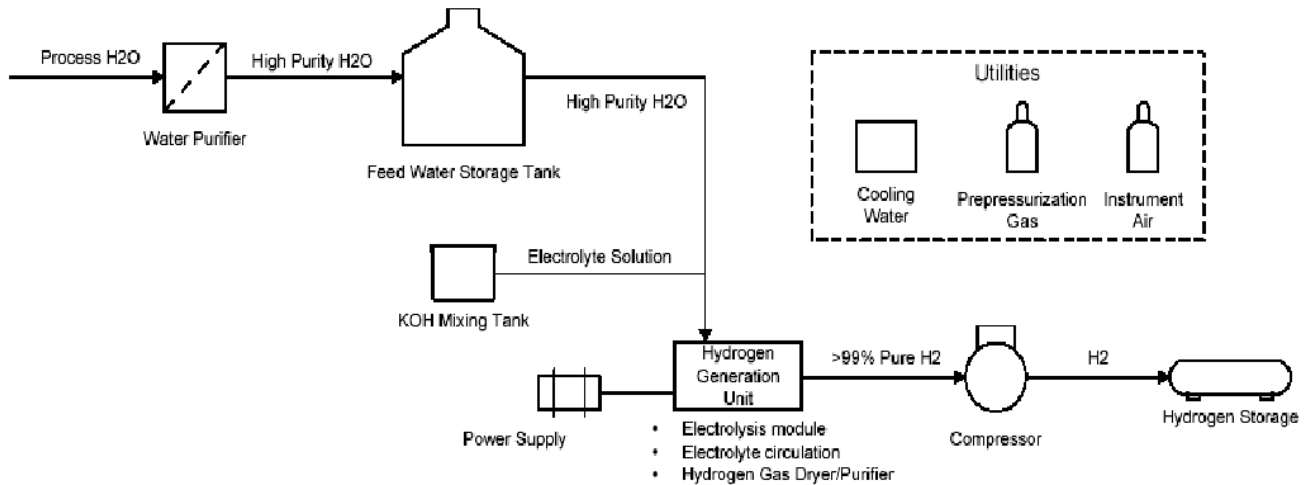
$$\eta_{\text{Electrolysis}} = \frac{1,23 \text{ V}}{1,60 \text{ V}} = 0,77 = 77\%$$



Σχήμα 3.15 Εργαστηριακή συσκευή ηλεκτρόλυσης

Κεφάλαιο 3^ο – Παραγωγή υδρογόνου

Στο σχήμα 3.16 παρουσιάζεται ένα τυπικό διάγραμμα για την παραγωγή υδρογόνου από ηλεκτρόλυση. Ο κάθε ηλεκτρολύτης έχει διαφορετικές απαιτήσεις όσον αφορά την καθαρότητα του νερού. Μερικές μονάδες έχουν δικό τους σύστημα καθαρισμού νερού ενώ άλλες χρειάζονται εξωτερική μονάδα απιονισμού ή μονάδα αντίστροφης ώσμωσης. Οι εταιρίες παρέχουν ολοκληρωμένα συστήματα τα οποία τοποθετούνται ανά τεμάχιο (module) για λόγους οικονομίας χώρου και απλότητας. Σε μερικές μονάδες περιλαμβάνεται συμπίεση του υδρογόνου στα 30 bar ή και παραπάνω.



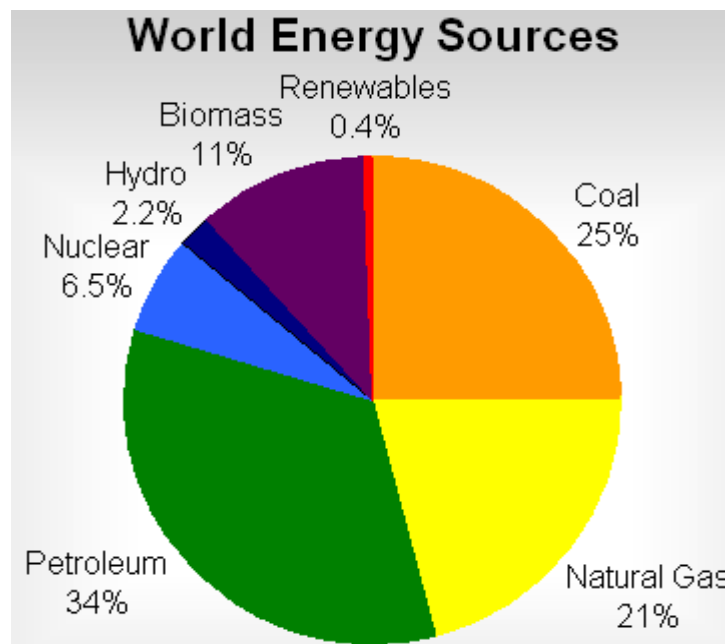
Σχήμα 3.16 Διάγραμμα εγκατάστασης ηλεκτρόλυσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο – ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

4.1 Εισαγωγή

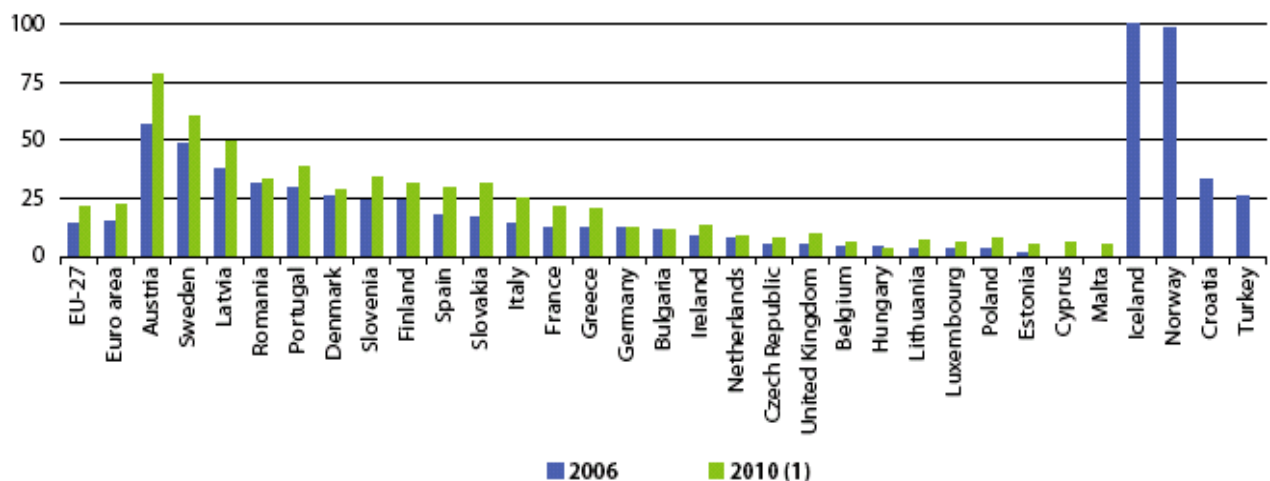
Τις τελευταίες δεκαετίες, ειδικότερα τα τελευταία έξι περίπου χρόνια, εμφανίζονται ως μείζονα θέματα, η κάλυψη της συνεχώς αυξανόμενης ενεργειακής ζήτησης, η ανάγκη για ενεργειακή απεξάρτηση και αποκέντρωση, και οι επιπτώσεις της ενεργειακής δραστηριότητας στο περιβάλλον.

Τον προηγούμενο αιώνα, η παραγωγή ενέργειας βασίστηκε στην καύση ορυκτών καυσίμων λόγω του αρκετά χαμηλού κόστους τους. Όμως, η ανεξέλεγκτη άντληση τους έχει οδηγήσει σήμερα σε μια επικείμενη εξάντληση των αποθεμάτων. Ίσως το πιο σημαντικό μειονέκτημα των συμβατικών πηγών ενέργειας, είναι οι επιπτώσεις που έχει στο περιβάλλον η εκμετάλλευση και η χρήση τους. Πλέον, η αυξανόμενη μόλυνση του περιβάλλοντος επηρεάζει τη ζωή κάθε ανθρώπου. Γεγονότα σε παγκόσμιο επίπεδο όπως η αύξηση της θερμοκρασίας, η μείωση των βροχοπτώσεων, η μείωση των υδάτινων αποθεμάτων, τα μη αναμενόμενα καιρικά φαινόμενα, αποτελούν τα ορατά αποτελέσματα της ενεργειακής δραστηριότητας και φιλοσοφίας του προηγούμενων χρόνων. Είναι κατανοητό, λοιπόν, ότι πρέπει να ενισχυθούν άλλες, αναξιοποίητες μέχρι σήμερα, λύσεις για την παραγωγή ενέργειας, αφού μια μείωση της ζήτησης κρίνεται απίθανη λόγω του νέου τρόπου ζωής των ανθρώπων. Επιπλέον, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον αντίκτυπο που έχει η εκμετάλλευση κάθε πηγής ενέργειας στο περιβάλλον. Ακόμα, η βελτίωση των υπάρχουσών εγκαταστάσεων και η δημιουργία περιβαλλοντικής πολιτικής κρίνεται αναγκαία. Το παρακάτω σχήμα 4.1 μας δίνει μία ιδέα για την ποσοστιαία κατανομή των ενεργειακών πηγών παγκοσμίως στο τέλος του 2006.



Σχήμα 4.1 Παγκόσμια παραγωγή ενέργειας – 2006

Η απαίτηση για, όσο το δυνατόν μεγαλύτερη, απεξάρτηση από τις συμβατικές πηγές ενέργειας, αλλά και η προσπάθεια για μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος, οδηγούν στη χρήση **ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε.)** ή αλλιώς **ήπιων μορφών ενέργειας** που δίνουν σε μεγάλο βαθμό λύση στα παραπάνω θέματα. Πηγές ενέργειας όπως η αιολική, η ηλιακή και η υδάτινη χαρακτηρίζονται ως ανανεώσιμες αφού πρακτικά είναι ανεξάντλητες, ανανεώνονται συνεχώς και είναι άμεσα εκμεταλλεύσιμες από τον άνθρωπο. Οι Ευρωπαϊκές χώρες καταβάλουν τα τελευταία χρόνια σημαντική προσπάθεια ώστε να αυξήσουν το μερίδιο ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε., όπως υποδεικνύεται και από το σχήμα 4.2.



(1) Indicative targets for 2010 are not available for Croatia, Turkey, Iceland and Norway.

Σχήμα 4.2 Ποσοστό ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε. για τα Ευρωπαϊκά Κράτη – 2006, 2010

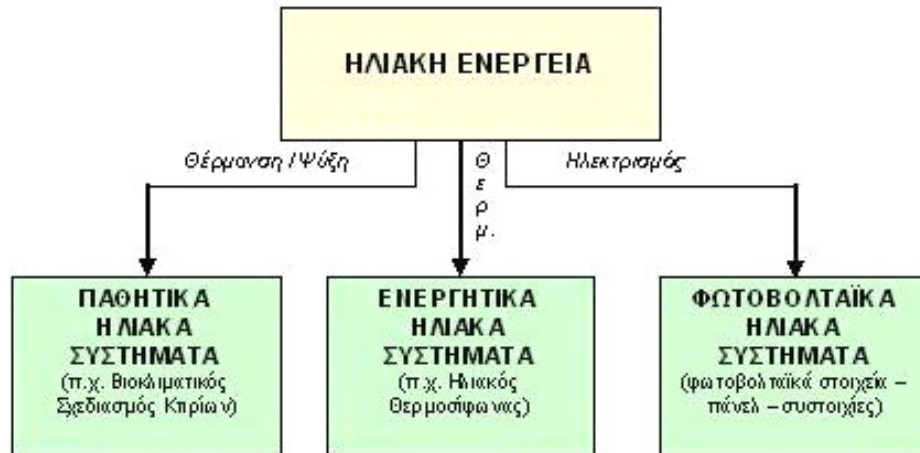
Οι Α.Π.Ε., έχοντας ξεπεράσει τα μειονεκτήματα του παρελθόντος, κρίνονται πλέον ανταγωνιστικές για την παραγωγή ενέργειας. Η μαζικότερη παραγωγή, και εκτεταμένη έρευνα στο χώρο, έχουν οδηγήσει σε μείωση του κόστους παραγωγής και αύξηση της απόδοσης των συστημάτων. Η τάση για εφαρμογή πειραματικών μελετών τεχνολογιών Α.Π.Ε., θα συμβάλλουν στην απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, θα συνεισφέρουν στην ενεργειακή αυτάρκεια και ανάπτυξη απομονωμένων μέχρι σήμερα περιοχών. Τέλος, θα δημιουργηθούν νέες θέσεις εργασίας και το σημαντικότερο θα αντικατασταθούν οι ρυπογόνοι τρόποι παραγωγής ενέργειας, με φιλικά προς το περιβάλλον συστήματα.

Τα κυριότερα είδη ήπιων μορφών ενέργειας περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω:

- **Αιολική ενέργεια**
(Βλ. ενότητα 4.2)
- **Ηλιακή ενέργεια**

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων άμεσων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως, η θερμότητα καθώς και διάφορες ακτινοβολίες.

Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της.



Σχήμα 4.3 Εφαρμογές ηλιακής ενέργειας

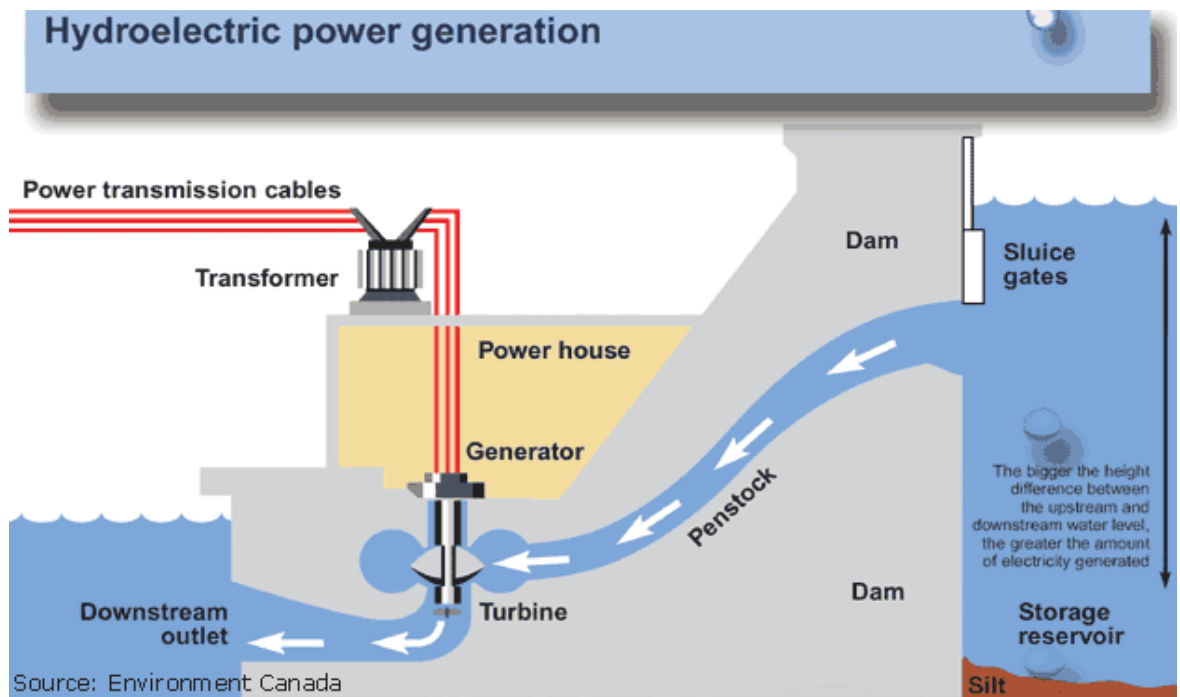
Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών (σχήμα 4.3): τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, και τα φωτοβολταϊκά συστήματα (Φ/Β). Τα παθητικά και τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.

- **Υδροηλεκτρική ενέργεια**

Υδροηλεκτρική Ενέργεια χαρακτηρίζεται η ενέργεια η οποία στηρίζεται στην εκμετάλλευση της μηχανικής ενέργειας του νερού των ποταμών και της μετατροπής της σε ηλεκτρική ενέργεια με τη βοήθεια υδροστροβίλων και ηλεκτρογεννητριών.

Η ενέργεια αυτή διαχέεται στη φύση από δίνες και ρεύματα, καθώς το νερό ρέει καταφορικά σε ρυάκια, χείμαρρους και ποτάμια μέχρι να φτάσει στη θάλασσα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του αποθηκευμένου νερού και όσο ψηλότερα βρίσκεται, τόσο περισσότερη είναι η ενέργεια που περιέχει.

Το σύνολο των έργων, εγκαταστάσεων και εξοπλισμού μέσω των οποίων μετατρέπεται η υδραυλική ενέργεια σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική, ονομάζεται Υδροηλεκτρικό έργο (ΥΗΕ) (Σχήμα 4.4). Τα Μικρά Υδροηλεκτρικά έργα (ΜΥΗΕ) είναι κυρίως "συνεχούς ροής", δηλαδή δεν περιλαμβάνουν σημαντική περισυλλογή νερού και επομένως δεν απαιτείται η κατασκευή μεγάλων φραγμάτων και ταμιευτήρων, αν και όπου αυτά υπάρχουν ήδη και μπορούν να χρησιμοποιηθούν εύκολα είναι επιβλητικά. Αποτελεί την πιο διαδεδομένη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας.



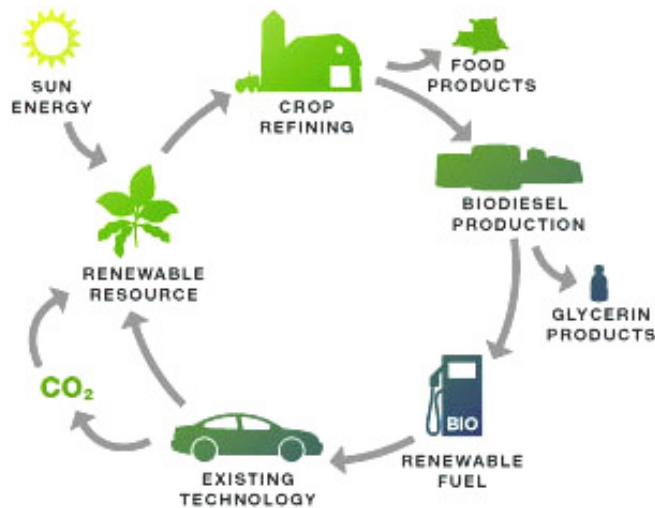
Σχήμα 4.4 Τυπική διάταξη ενός υδροηλεκτρικού έργου

- **Βιομάζα και βιοκαύσιμα**

Η **βιομάζα** (biomass) με την ευρύτερη έννοια του όρου περιλαμβάνει οποιοδήποτε υλικό προέρχεται από ζωντανούς οργανισμούς. Πιο συγκεκριμένα, η βιομάζα αποτελεί μία δεσμευμένη και αποθηκευμένη μορφή της ηλιακής ενέργειας και είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών. Κατ' αυτήν, η χλωροφύλλη των φυτών μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια με μια σειρά διεργασιών, χρησιμοποιώντας ως βασικές πρώτες ύλες διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα καθώς και νερό και ανόργανα συστατικά από το έδαφος.

Ειδικότερα, η βιομάζα για ενεργειακούς σκοπούς, περιλαμβάνει κάθε τύπο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή στερεών, υγρών και/ ή αέριων καυσίμων. Στην πράξη υπάρχουν δύο τύποι βιομάζας. Πρώτον, οι υπολειμματικές μορφές (τα κάθε είδους φυτικά υπολείμματα και ζωικά απόβλητα και τα απορρίμματα) και δεύτερον, η βιομάζα που παράγεται από ενεργειακές καλλιέργειες.

Από τη στιγμή που σχηματίζεται η βιομάζα, μπορεί πλέον κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας. Η βιομάζα αποτελεί μια σημαντική, ανεξάντλητη και φιλική προς το περιβάλλον πηγή ενέργειας, η οποία είναι δυνατό να συμβάλλει σημαντικά στην ενεργειακή επάρκεια, αντικαθιστώντας τα συνεχώς εξαντλούμενα αποθέματα ορυκτών καυσίμων (πετρέλαιο, άνθρακας, φυσικό αέριο κ.ά.). Η χρήση της βιομάζας ως πηγής ενέργειας δεν είναι νέα. Σ' αυτήν εξάλλου, συγκαταλέγονται τα καυσόξυλα και οι ξυλάνθρακες που, μέχρι το τέλος του περασμένου αιώνα, κάλυπταν το 97% των ενεργειακών αναγκών της χώρας.



Σχήμα 4.5 Ο κύκλος των βιοκαυσίμων

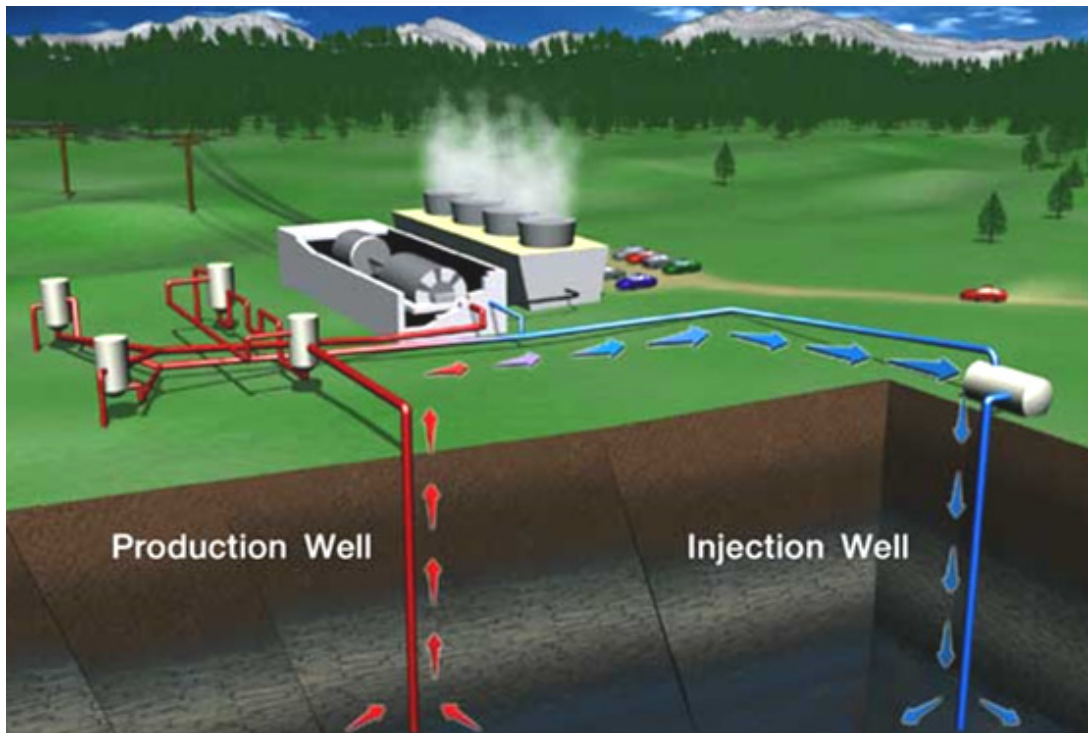
Σήμερα, ο όρος **βιοκαύσιμα** (biofuels) χρησιμοποιείται συνήθως για υγρά καύσιμα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον τομέα των μεταφορών. Τα πιο συνηθισμένα στο εμπόριο είναι το βιοντίζελ, μεθυλεστέρας ο οποίος παράγεται κυρίως από ελαιούχους σπόρους (ηλίανθος, ελαιοκράμβη, κ.ά) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε μόνο του ή σε μίγμα με πετρέλαιο κίνησης σε πετρελαιοκινητήρες και η βιοαιθανόλη η οποία παράγεται από σακχαρούχα, κυταρινούχα κι αμυλούχα φυτά (σιτάρι, καλαμπόκι, σόργο, τεύτλα, κ.ά.) και χρησιμοποιείται είτε ως έχει σε βενζινοκινητήρες που έχουν υποστεί μετατροπή είτε σε μίγμα με βενζίνη σε κανονικούς βενζινοκινητήρες είτε τέλος να μετατραπεί σε ETBE (πρόσθετο βενζίνης).

Τα βιοκαύσιμα είναι φιλικότερα προς το περιβάλλον από τα συμβατικά καύσιμα γιατί έχουν λιγότερες εκπομπές και χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πρώτες ύλες. Συμβάλλουν στη μείωση των εισαγωγών και στην ενεργειακή αυτονομία της χώρας.

- **Γεωθερμία**

Όπως προκύπτει από τα ηφαίστεια, τις θερμές πηγές και από μετρήσεις σε γεωτρήσεις, το εσωτερικό της γης βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία, η οποία υπερβαίνει τους 5000 °C στον πυρήνα. Η θερμότητα αυτή που περιέχεται στο εσωτερικό της γης αποτελεί την γεωθερμική ενέργεια και είναι τόσο μεγάλη, ώστε μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ανεξάντλητη μορφή ενέργειας για τα ανθρώπινα μέτρα.

Γεωθερμία ή Γεωθερμική ενέργεια ονομάζουμε τη φυσική θερμική ενέργεια της Γης που διαρρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια. Η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται με δύο τρόπους: πρώτον, με αγωγή από το εσωτερικό προς την επιφάνεια με ρυθμό 0,04 - 0,06 W/m² και δεύτερον, με ρεύματα μεταφοράς που περιορίζονται όμως στις ζώνες κοντά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, λόγω ηφαιστειακών και υδροθερμικών φαινομένων. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται γεωθερμικά πεδία, και εκεί η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας είναι εξαιρετικά συμφέρουσα.



Σχήμα 4.6 Τυπική γεωθερμική εγκατάσταση

Ανάλογα με το θερμοκρασιακό της επίπεδο μπορεί να έχει διάφορες χρήσεις:

Η Υψηλής Ενθαλπίας (>150 °C) χρησιμοποιείται συνήθως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ισχύς τέτοιων εγκαταστάσεων το 1979 ήταν 1.916 MW με παραγόμενη ενέργεια 12×10^6 kWh/yr.

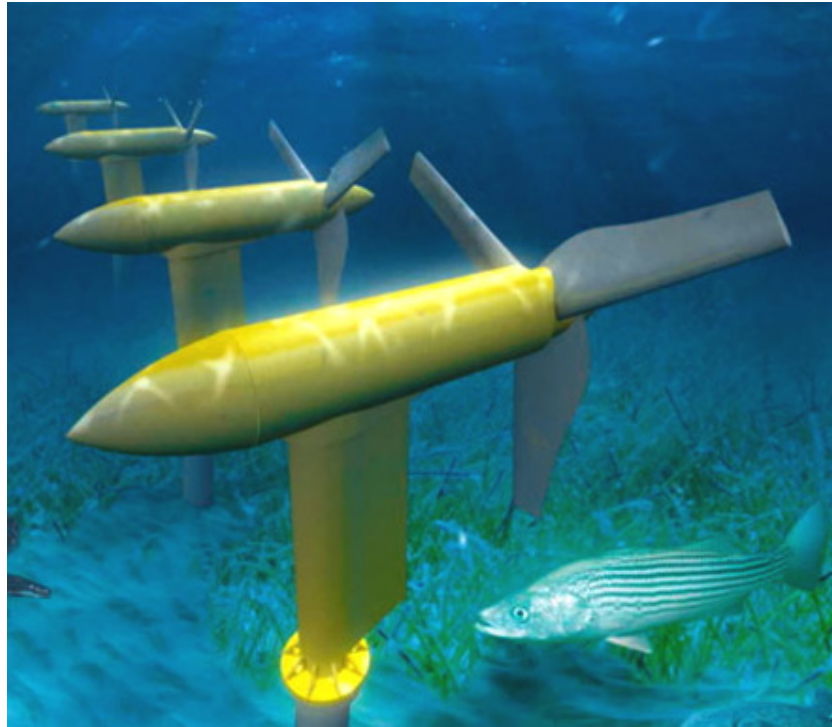
Η Μέσης Ενθαλπίας (80 έως 150 °C) που χρησιμοποιείται για θέρμανση ή και ξήρανση ξυλείας και αγροτικών προϊόντων καθώς και μερικές φορές και για την παραγωγή ηλεκτρισμού (π.χ. με κλειστό κύκλωμα φρέον που έχει χαμηλό σημείο ζέσεως).

Η Χαμηλής Ενθαλπίας (25 έως 80 °C) που χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρων, για θέρμανση θερμοκηπίων, για ιχθυοκαλλιέργειες, για παραγωγή γλυκού νερού.

- **Ενέργεια ωκεανών**

Οι ωκεανοί μπορούν να μας προσφέρουν τεράστια ποσά ενέργειας. Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι για να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια της θάλασσας. Πρώτον, αξιοποιούμε την κινητική ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων και ρευμάτων (Σχήμα 4.7). Δεύτερον, από τις παλίρροιες (μικρές και μεγάλες) όπου εκμεταλλευόμαστε τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Στη συνέχεια το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει, και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από ένα υδροστρόβιλο, παράγοντας ηλεκτρισμό. Η διαφορά μεταξύ της στάθμης του νερού κατά την άμπωτη και την πλημμυρίδα πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 μέτρα. Έχει εφαρμοστεί επιτυχώς στην Αγγλία, τη Γαλλία, τη Ρωσία και αλλού. Επίσης τρίτον, μπορεί να αξιοποιηθεί η θερμική ενέργεια των

ωκεανών με την εκμετάλλευση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του θερμότερου επιφανειακού νερού και του ψυχρότερου νερού του πυθμένα. Η διαφορά αυτή πρέπει να είναι τουλάχιστον 3,5 °C ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού.



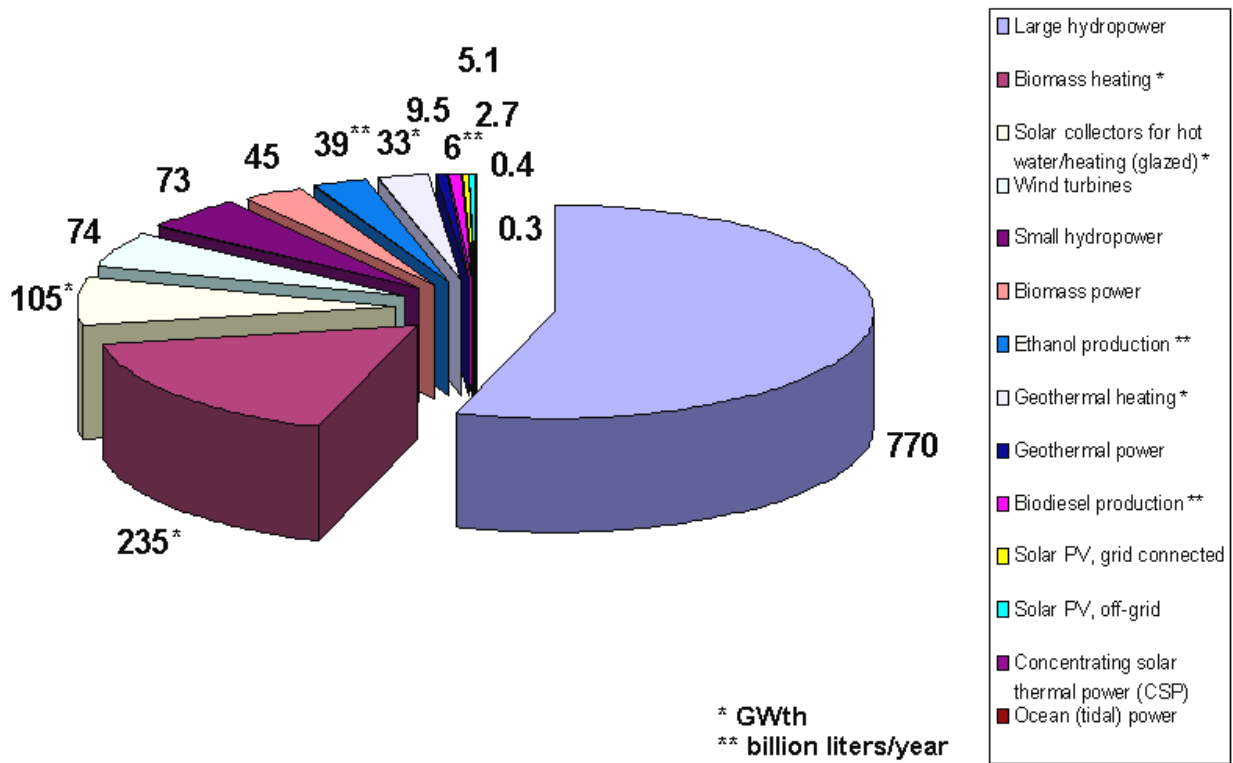
Σχήμα 4.7 Υποθαλάσσια διάταξη στροβίλων

Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση της ενέργειας των ωκεανών, εκτός από «καθαρή» και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, με τα γνωστά ευεργετήματα, είναι το σχετικά μικρό κόστος κατασκευής των απαιτούμενων εγκαταστάσεων, η μεγάλη απόδοση (40-70 KW ανά μέτρο μετώπων κύματος) και η δυνατότητα παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση από το άφθονο θαλασσινό νερό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο. Στα μειονεκτήματα αναφέρεται το κόστος μεταφοράς της ενέργειας στη στεριά.

Αφού ολοκληρώσαμε την επισκόπησή μας στις σημαντικότερες Α.Π.Ε., παρατηρούμε στο παρακάτω σχήμα 4.8 το μερίδιο που κατέχει η κάθε μορφή ενέργειας ξεχωριστά, σε παγκόσμια κλίμακα, καθώς και την ετήσια παραγωγή τους.

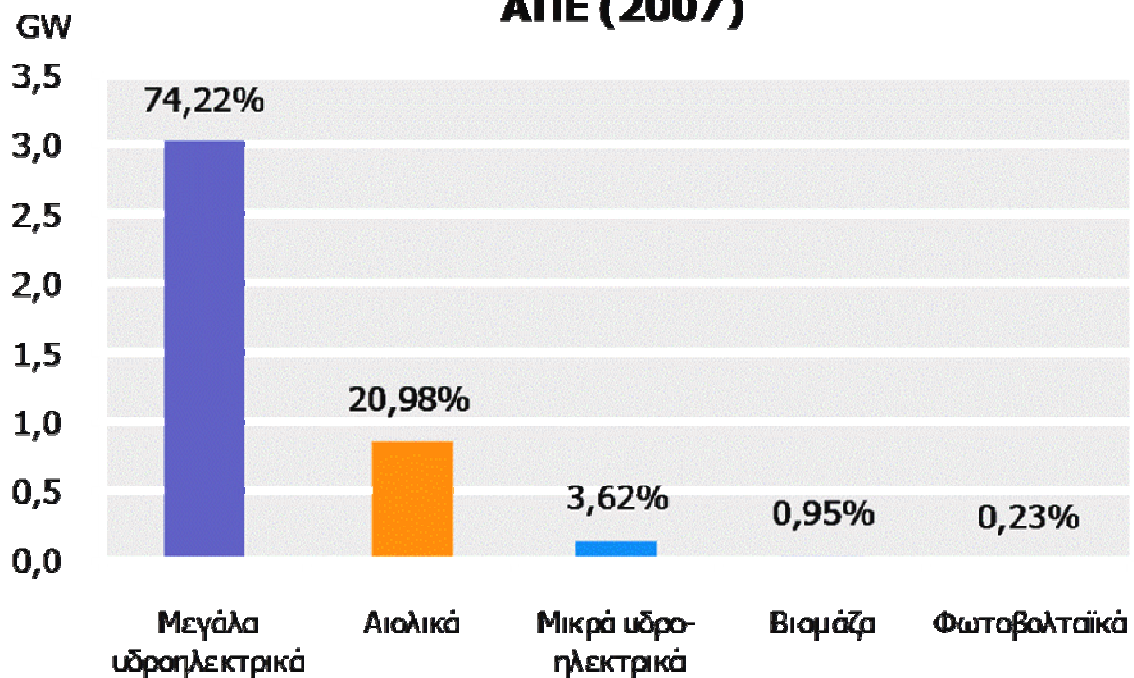
Τέλος, αξίζει να αναφερθούμε στην **υπάρχουσα κατάσταση στην Ελλάδα**. Το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας προανήγγειλε πραγματοποίηση επενδύσεων ύψους 16 δισ. ευρώ σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έως το 2020, οι οποίες θα αυξήσουν την εγκατεστημένη ισχύ των Α.Π.Ε. από 4.500 MW που είναι σήμερα σε 15.000 MW, καλύπτοντας το 40% της κατανάλωσης ηλεκτρισμού της χώρας από Α.Π.Ε. Αυτό το σχέδιο επενδύσεων συμπεριλήφθηκε στην έκθεσή του για την επίτευξη των στόχων της Ε.Ε. για 20% συμμετοχή των Α.Π.Ε. στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας, 20% εξοικονόμηση ενέργειας και 20% μείωση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου έως το 2020. Στο σχήμα 4.9 παρατηρείται η εγχώρια εγκατεστημένη ισχύς Α.Π.Ε., όπως διαμορφώθηκε στο τέλος του 2007.

Renewable Energy, end of 2006 (GW)



Σχήμα 4.8 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παγκοσμίως – 2006

Ελλάδα: Εγκατεστημένη Ισχύς ΑΠΕ (2007)

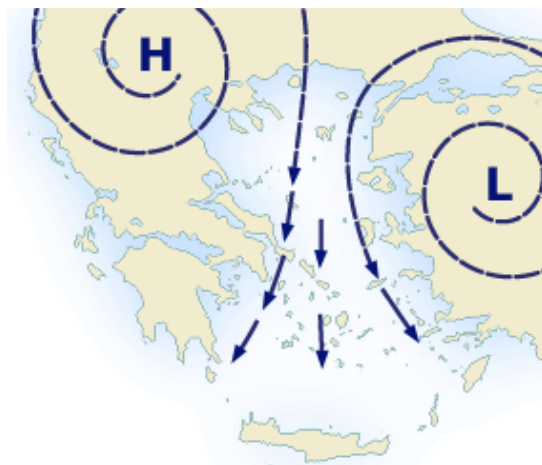


Σχήμα 4.9 Εγκατεστημένη ισχύς Α.Π.Ε. στην Ελλάδα – 2007

4.2 Αιολική ενέργεια

4.2.1 Άνεμος

Οι **άνεμοι**, δηλαδή οι μεγάλες μάζες αέρα που μετακινούνται με ταχύτητα από μία περιοχή σε κάποια άλλη, οφείλονται στην ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της Γης από την ηλιακή ακτινοβολία κυρίως και στην περιστροφή της Γης. Η κινητική ενέργεια των ανέμων είναι τόση που, με βάση τη σημερινή τεχνολογία εκμετάλλευσής της, θα μπορούσε να καλύψει πάνω από δύο φορές τις ανάγκες της ανθρωπότητας σε ηλεκτρική ενέργεια. Συγκεκριμένα, περίπου 2% της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει στη γη μετατρέπεται σε αιολική. Ειδικότερα, είναι αποτέλεσμα των θερμοκρασιακών διαφορών που δημιουργούνται στην Τροπόσφαιρα είτε λόγω γεωγραφικού πλάτους είτε λόγω διαφορετικής θερμοκρασίας της επιφάνειας της Γης. Επιπλέον η αδράνεια, λόγω περιστροφής της Γης, τείνει να στρέψει τον ψυχρό αέρα που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια της. Η συνολική ισχύς των ανέμων στη Γη υπολογίζεται σε $3,6 \times 10^9$ MW. Παράλληλα, η αιολική ενέργεια χαρακτηρίζεται από το πλεονέκτημα ότι παρέχει άμεσα μηχανική ενέργεια. Στην τεχνική ορολογία αυτό χαρακτηρίζεται ως «αναβαθμισμένη» μορφή ενέργειας γιατί η μηχανική ενέργεια δύναται να μετατραπεί σε οποιαδήποτε άλλη μορφή ενέργειας με ικανοποιητικότατο βαθμό απόδοσης.

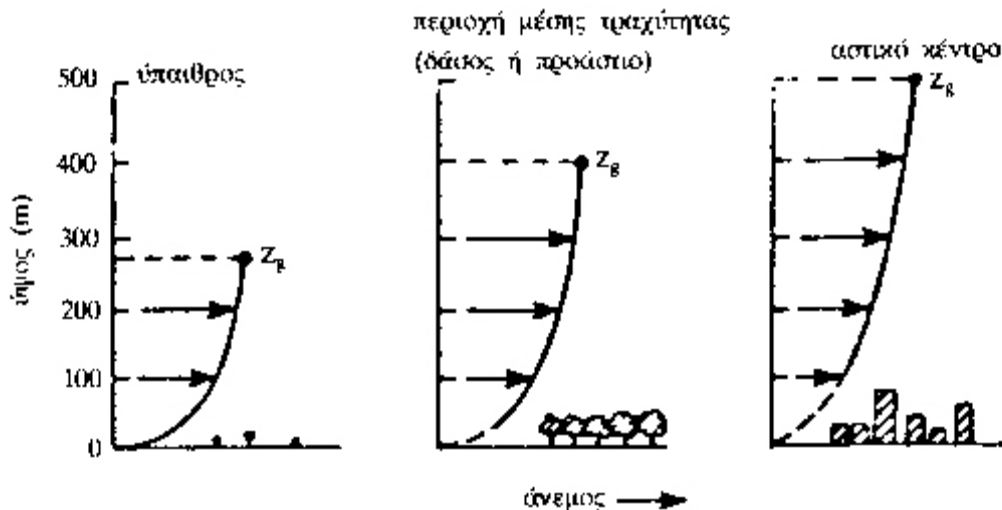


Σχήμα 4.10 Κατεύθυνση κυρίων ανέμων στο Αιγαίο – Μελέτμια

Όπως θα αναφέρουμε και παρακάτω, το κύριο χαρακτηριστικό του ανέμου είναι η **ταχύτητα** του. Άλλωστε, ένδειξη για το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής αποτελεί η μέση ταχύτητα του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός έτους. Όμως, επειδή η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου μεταβάλλεται ανάλογα με το ύψος, για να είναι συγκρίσιμα τα μεγέθη διαφορετικών περιοχών, είτε πρέπει να λαμβάνονται μετρήσεις στο ίδιο ύψος, είτε να ανάγονται στο ίδιο ύψος σύμφωνα με τον **εκθετικό νόμο**:

$$V_2 = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^a$$

Όπου V_2 η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z_2 , V_1 η μετρούμενη ταχύτητα σε ύψος z_1 . Ο εκθέτης α είναι ενδεικτικός της επιφάνειας του εδάφους. Για παράδειγμα, για ανοιχτά πεδία είναι $\alpha=0,17$, για μικρές πόλεις με μικρές κατασκευές είναι $\alpha=0,20$, ενώ για μεγάλες πόλεις με μεγάλες κατασκευές $\alpha=0,25$ [Μπεργελές, 2005]. Τα παραπάνω συνοψίζονται και στο επόμενο σχήμα 4.11.



Σχήμα 4.11 Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα

Προφανώς ο εκθετικός νόμος, χρησιμοποιείται και για την αναγωγή της μετρούμενης ταχύτητας στο ύψος της ανεμογεννήτριας (Α/Γ), αφού σε αυτό το ύψος γίνεται η εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου, όπου έχουμε διαφορετικά δεδομένα σε σχέση με το ύψος μέτρησης.

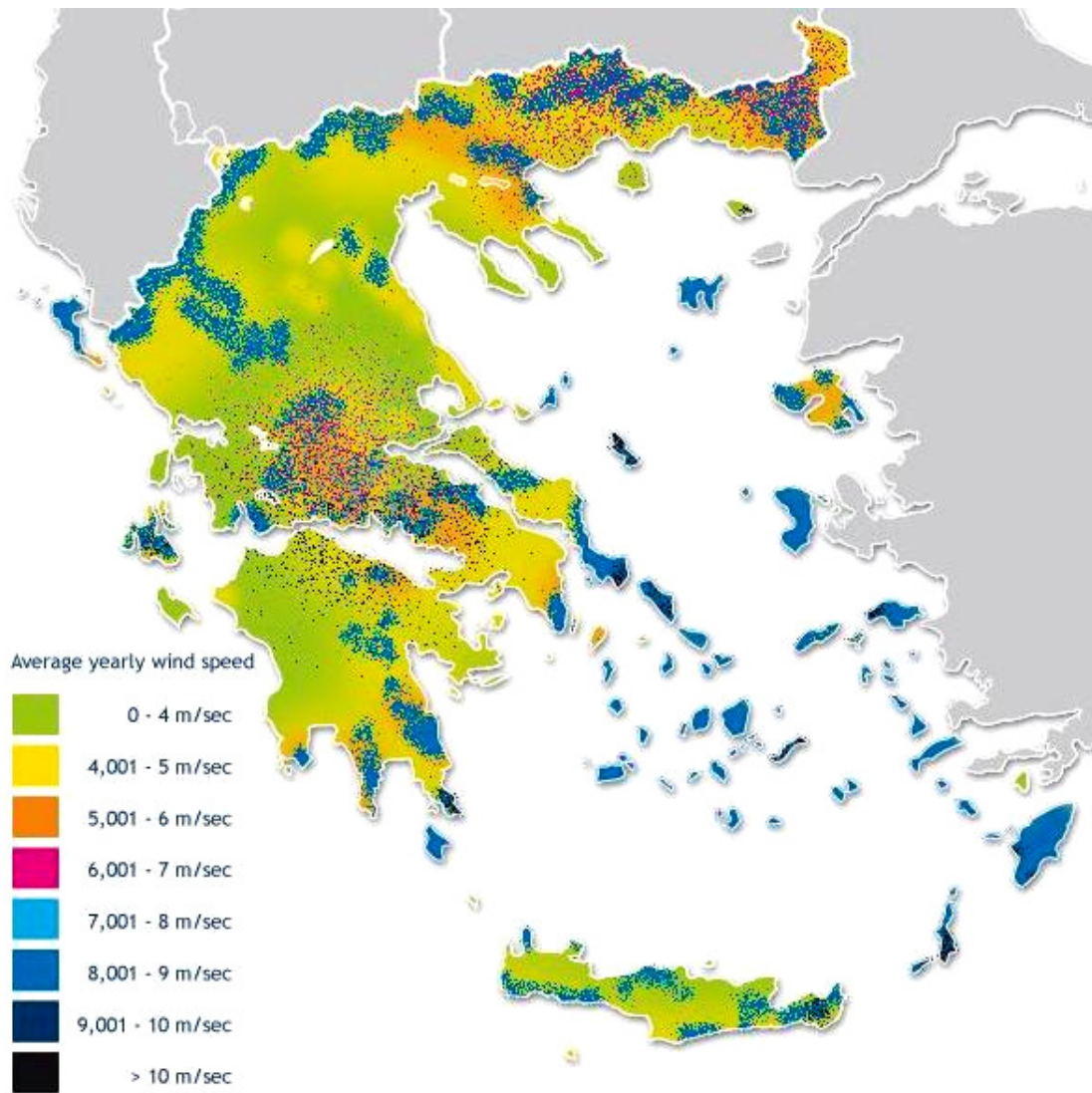
Η **ενέργεια** που μεταφέρεται από τον άνεμο είναι κινητική και ορίζεται ως:

$$E = \frac{1}{2} mV^2$$

Αν αντικαταστήσουμε την μάζα με τη σχέση της πυκνότητας, $\dot{m} = \rho AV$, όπου \dot{m} η μάζα του αέρα που διέρχεται από μια επιφάνεια A ανά δευτερόλεπτο και ρ η πυκνότητα του αέρα, τότε προκύπτει η κινητική ενέργεια του ανέμου ανά δευτερόλεπτο ή αλλιώς η **ισχύς** του ανέμου:

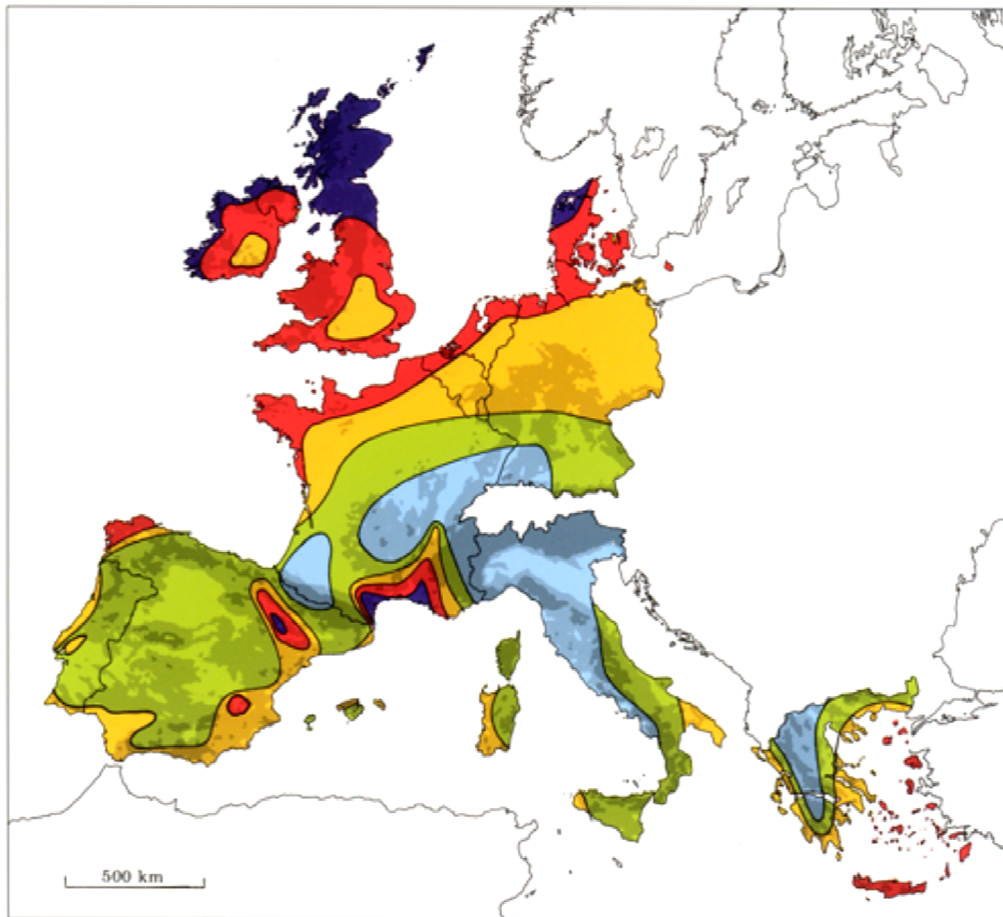
$$P = \dot{E} = \frac{1}{2} \rho AV^3$$

Παρατηρούμε ότι, η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη της επιφάνειας που διέρχεται ο άνεμος (δηλαδή, την επιφάνεια που καλύπτουν τα πτερύγια της Α/Γ), και ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του. Τέλος, να πούμε ότι η ισχύς του ανέμου μπορεί να είναι εκμεταλλεύσιμη μόνο κατά ένα ποσοστό, λόγω των σημαντικών απωλειών κατά τη διαδικασία της δέσμευσης της από την Α/Γ.



Σχήμα 4.12 Χάρτης αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι μια χώρα με μεγάλη ακτογραμμή και τεράστιο πλήθος νησιών. Ως εκ τούτου, οι ισχυροί άνεμοι που πνέουν κυρίως στις νησιωτικές και παράλιες περιοχές προσδίδουν ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα. Το **εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό** εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 14% του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας αυτή τη στιγμή. Στον παραπάνω και παρακάτω χάρτη, παρουσιάζεται το αιολικό δυναμικό της Ελλάδας και της Ευρώπης, αντίστοιχα, αναλυτικά.



Wind resources ¹ at 50 metres above ground level for five different topographic conditions										
	Sheltered terrain ²		Open plain ³		At a sea coast ⁴		Open sea ⁵		Hills and ridges ⁶	
	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}	$m s^{-1}$	Wm^{-2}
Dark Blue	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
Red	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
Orange	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
Yellow	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0- 8.5	400- 700
Light Blue	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

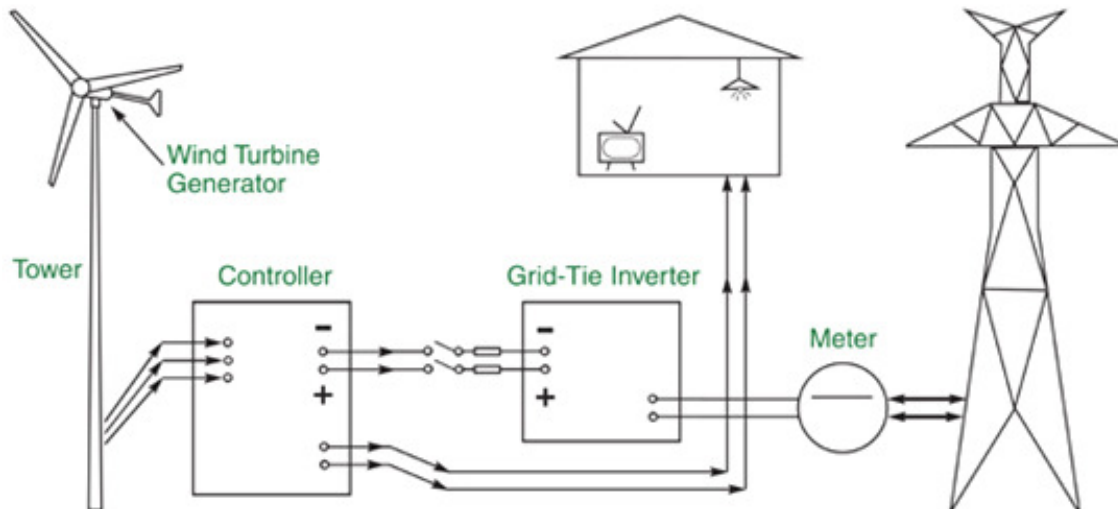
Σχήμα 4.13 Χάρτης αιολικού δυναμικού της Ευρώπης

4.2.2 Ανεμογεννήτριες

Η αξιοποίηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου γίνεται μέσω των **ανεμογεννητριών**. Η κινητική ενέργεια, λοιπόν, μετατρέπεται σε μηχανικό έργο με τη βοήθεια μιας αεροδυναμικής διάταξης. Αυτό το μηχανικό έργο μπορεί να γίνει εκμεταλλεύσιμο επί τόπου (άντληση), και έτσι να αποφευχθούν οι απώλειες από τη μετατροπή του σε άλλη μορφή ενέργειας. Το σύνηθες όμως, είναι να μετατρέπεται το μηχανικό έργο σε ηλεκτρική ενέργεια, λόγω της εύκολης μεταφοράς της στον τόπο κατανάλωσης και της ικανότητας αποθήκευσης της (μπαταρίες, σύστημα αντλησιοταμίευσης). Βέβαια, το μηχανικό έργο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή επί τόπου υδρογόνου που μπορεί να αποθηκευθεί ή να μεταφερθεί και να καεί ως αέριο καύσιμο. Η παραπάνω λύση αποτελεί τη βέλτιστη πρόταση

αξιοποίησης λόγω του ότι δεν έχει καμία επίπτωση στο περιβάλλον, αφού κατά την καύση του υδρογόνου παράγεται μόνο νερό σε μορφή υδρατμών [Μπεργελές, 2005].

Η αρχή λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και η αλληλουχία των βημάτων για την παραγωγή μέχρι την αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας, χονδρικά, για ένα τυπικό αυτόνομο ή/και μη σύστημα (Σχήμα 4.14) έχουν ως εξής:



Σχήμα 4.14 Διάγραμμα εγκατάστασης ηλεκτροπαραγωγής από Α/Γ

- Καθώς ο άνεμος αλληλεπιδρά με τα πτερύγια και τον δρομέα της Α/Γ προκαλείται μια ροπή.
- Η σχετικά χαμηλή συχνότητα περιστροφής του δρομέα αυξάνεται μέσω ενός μετατροπέα στροφών, του οποίου ο άξονας εξόδου περιστρέφει μια γεννήτρια (generator).
- Το μεταβλητής συχνότητας ρεύμα που παράγει η γεννήτρια, μετατρέπεται σε συνεχές (DC) μέσω ενός μετατροπέα (rectifier) και προαιρετικά φορτίζει μπαταρίες, που αποτελούν το πιο κλασικό μέσο αποθήκευσης και συμβάλουν στη σταθερότητα του συστήματος.
- Στη συνέχεια, ένας άλλος μετατροπέας (inverter) μετατρέπει το ανορθωμένο συνεχές ρεύμα, αποφορτίζοντας τις μπαταρίες όποτε χρειάζεται, σε ορισμένης τάσης και συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα (AC), το οποίο είναι άμεσα αξιοποιήσιμο από το τοπικό σύστημα ή/και το δίκτυο.

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες οφείλουν την κίνηση των πτερυγίων τους στην άνωση που ασκείται πάνω τους από τον άνεμο. Σε αυτή την ιδέα στηρίχθηκε η ανάπτυξη των ανεμογεννητριών γενικά και ειδικότερα των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα, οι οποίες έχουν γνωρίσει την μεγαλύτερη εμπορική ανάπτυξη. Μια τυπική ανεμογεννήτρια σήμερα είναι οριζοντίου άξονα με ισχύ από 600 kW έως 3000 kW.

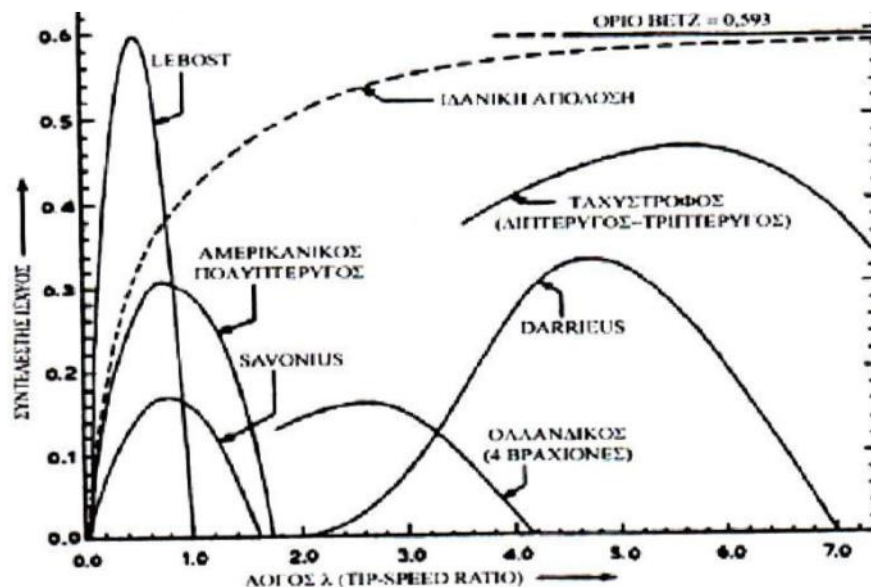
Σημαντικό χαρακτηριστικό κάθε ανεμογεννήτριας αποτελεί ο **συντελεστής ισχύος** C_p :

$$C_p = \frac{P}{1/2 \rho A V^3} \Leftrightarrow P = C_p 1/2 \rho A V^3$$

που ορίζεται ως ο λόγος της ισχύος που αποδίδεται από την ανεμογεννήτρια P προς την ισχύ του ανέμου που διέρχεται από την επιφάνεια A . Ο συντελεστής ισχύος C_p εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της Α/Γ και αποτελεί συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας ακροπτερυγίου λ . Η **ταχύτητα ακροπτερυγίου** ορίζεται από τη σχέση:

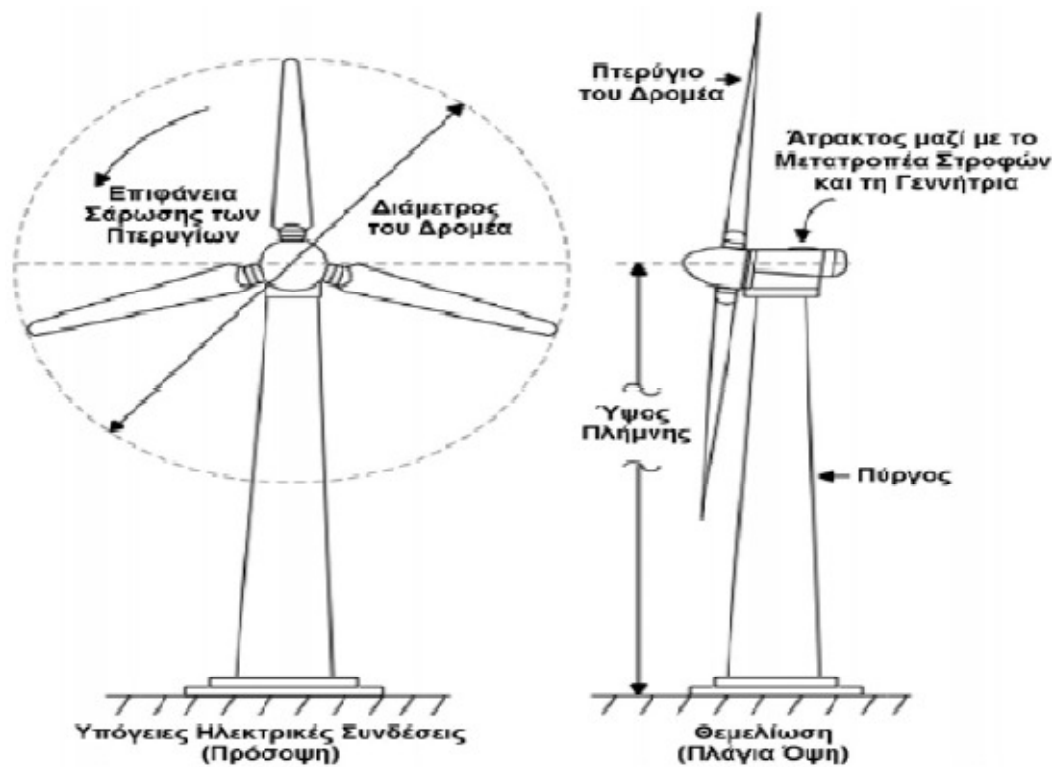
$$\lambda = \frac{\omega R}{V}$$

Όπου ω είναι η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα και R η ακτίνα του. Η βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής σχεδίασης των πτερυγίων των σύγχρονων μηχανών, έχει οδηγήσει σε υψηλότερους συντελεστές ισχύος και μεγαλύτερη ενεργειακή παραγωγή για δεδομένη ταχύτητα ανέμου. Όπως φαίνεται από τη σχέση του συντελεστή ισχύος, η αποδιδόμενη ισχύς είναι ανάλογη του κύβου της στιγμιαίας ταχύτητας του ανέμου. Για να υπολογίσουμε, λοιπόν, την ισχύ που παράγει μια συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια, χρειαζόμαστε μόνο την στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του δρομέα. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο συντελεστής ισχύος είναι $C_{p,max} = \frac{16}{27} = 59\%$ και ονομάζεται **όριο του Betz**. Συνεπώς, η αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού από την ανεμογεννήτρια μπορεί να γίνει μόνο μέχρι ένα ποσοστό της τάξης του 59%. Η μέγιστη τιμή αυτή, στην πράξη, δεν μπορεί να επιτευχθεί λόγω διαφόρων απωλειών κατά την αξιοποίηση της ενέργειας του ανέμου και ένα τυπικό εύρος τιμών του συντελεστή είναι 20-40%. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μεταβολές του συντελεστή ισχύος για διάφορους τύπους Α/Γ συναρτήσει της ταχύτητας ακροπτερυγίου.



Σχήμα 4.15 Συντελεστής ισχύος συναρτήσει ταχύτητας ακροπτερυγίου

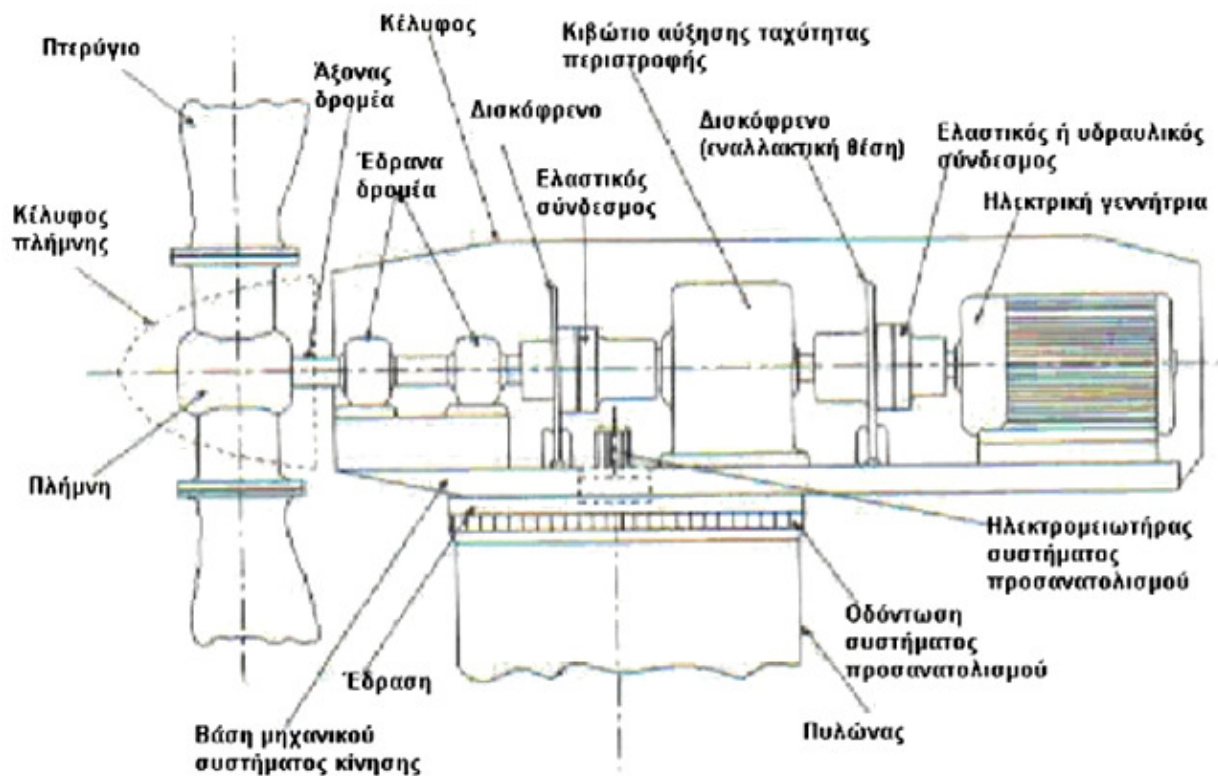
Οι ανεμογεννήτριες ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τη προσανατολισμό του άξονα, δηλαδή σε **οριζόντιου** και **κατακόρυφου** άξονα. Έχοντας μεγαλύτερη, κατά πολύ, ανάπτυξη, θα δώσουμε παρακάτω, συνοπτικά, κάποια χαρακτηριστικά των Α/Γ οριζόντιου άξονα.



Σχήμα 4.16 Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα

Τα κύρια μέρη των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα είναι ο δρομέας, το σύστημα αύξησης στροφών και μετάδοσης ισχύος (κιβώτιο ταχυτήτων), το σύστημα πέδησης (δισκόφρενο), τα έδρανα του άξονα και οι ελαστικοί σύνδεσμοι, η ηλεκτρική γεννήτρια, το σύστημα προσανατολισμού, ο πύργος στήριξης και η θεμελίωση (Σχήμα 4.17).

Ο δρομέας είναι ίσως το πιο βασικό ζήτημα στη σχεδίαση του όλου συστήματος. Αποτελείται από την πλήμνη και τα πτερύγια. Το πτερύγιο έχει αεροδυναμικό σχήμα και μπορεί να είναι ενιαίο ή να διαθέτει ακροπτερύγιο. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (αριθμός πτερυγίων, κατανομή πλάτους, επιλογή αεροτομής, συστροφή) προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση της αεροδυναμικής σχεδίασης. Το κιβώτιο ταχυτήτων παραλαμβάνει την κινητική ενέργεια από την άτρακτο χαμηλής ταχύτητας και την μεταφέρει στην άτρακτο υψηλής ταχύτητας με ένα λόγο μετάδοσης περίπου 50:1. Η ηλεκτρική γεννήτρια μπορεί να είναι ασύγχρονη ή σύγχρονη γεννήτρια. Γενικά προτιμούνται οι ασύγχρονες γεννήτριες λόγω της απλότητας κατασκευής, αν και οι ασύγχρονες έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε αδύνατα δίκτυα [Ζερβός, 2007]. Το σύστημα προσανατολισμού είναι ένας σερβοκινητήρας ο οποίος ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου και αναγκάζει το δρομέα να παρακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου και να παραμένει κάθετος σε αυτήν. Ο πύργος της ανεμογεννήτριας στηρίζει τη νασέλλα και το δρομέα. Μπορεί να είναι τύπου δικτυώματος, σωληνωτός και σπανιότερα σκυρόδεμα. Η θεμελίωση γίνεται με σπλισμένο σκυρόδεμα πάνω στο οποίο τοποθετείται με βίδες ο πύργος. Ο πύργος έχει σχήμα κώνου που εξυπηρετεί στην αύξηση της αντοχής και στην εξοικονόμηση υλικών με τη διάμετρο να αυξάνεται όσο πλησιάζουμε τη βάση. Μεγάλης σημασίας έχει η γείωση που πρέπει να έχει η μεταλλική κατασκευή της ανεμογεννήτριας.

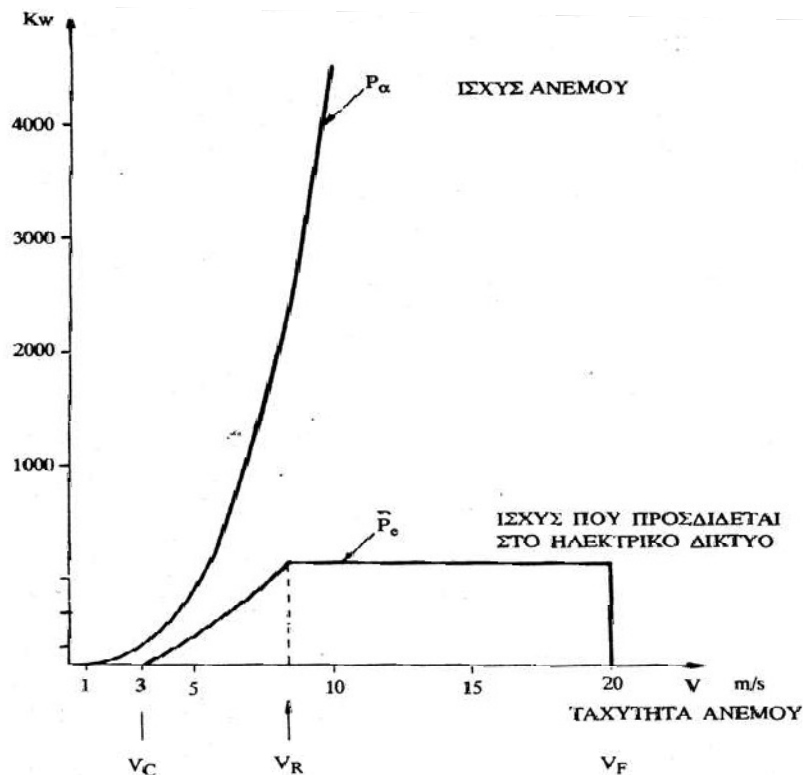


Σχήμα 4.17 Κύρια μέρη ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα

Η παραγωγή ισχύος μιας Α/Γ μεταβάλλεται με την ταχύτητα του ανέμου και κάθε μηχανή χαρακτηρίζεται από την καμπύλη ισχύος της, η οποία εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και το σχεδιασμό της. Η **καμπύλη ισχύος** χαρακτηρίζεται από τρεις τιμές ταχύτητας:

- V_C – Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας
- V_F – Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας
- V_R – Ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας

Το σχήμα 4.18 είναι χαρακτηριστικό της παραγόμενης ισχύος από την Α/Γ σε σχέση με την ταχύτητα και την ισχύ του ανέμου. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι μια ανεμογεννήτρια ξεκινάει να παράγει ισχύ στην ταχύτητα έναρξης λειτουργίας V_C , σταματάει τη λειτουργία της για λόγους ασφαλείας σε ταχύτητες μεγαλύτερες της ταχύτητας διακοπής λειτουργίας V_F , ενώ παράγει την ονομαστική της ισχύ για ταχύτητες μεγαλύτερες της ονομαστικής V_R . Γνωρίζοντας έτσι, την στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου μπορούμε να πούμε πόση ισχύ μπορεί να παράγει μια Α/Γ, μέσω της καμπύλης ισχύος της.



Σχήμα 4.18 Καμπύλη ισχύος ανέμου και Α/Γ

Μια Α/Γ δεν μπορεί να αξιοποιήσει όλη την ετήσια ενέργεια του ανέμου για τους εξής λόγους [Μπεργελές, 2005]:

- Αποδίδει ισχύ μόνο όταν η ισχύς του ανέμου είναι μεγαλύτερη από τις απώλειες κενού φορτίου (τριβές, άξονα, μειωτήρα, γεννήτριας). Έτσι, σε περιόδους με ταχύτητες μικρότερες της V_C , η ενέργεια του ανέμου μένει ανεκμετάλλευτη, αφού δεν είναι σε θέση δώσει ροπή στον δρομέα.
- Για ταχύτητες μεγαλύτερης της ονομαστικής, επιδιώκεται να διατηρηθεί η παραγόμενη ισχύς σταθερή, αλλάζοντας τη γωνία κλίσης των πτερυγίων ή με τα μεταπτερύγια ή με την αλλαγή της γωνιακής θέσης του δρομέα ως προς τον άνεμο ή την αλλαγή της γωνιακής ταχύτητας του δρομέα, ανάλογα φυσικά με την γεννήτρια που έχει το σύστημα. Άρα για ταχύτητες μεγαλύτερες της V_R χάνεται ένα ποσό του αιολικού δυναμικού.
- Για υψηλές ταχύτητες ανέμου, η Α/Γ παύει να λειτουργεί για λόγους ασφαλείας. Συνεπώς, η ενέργεια του ανέμου σε αυτές τις περιπτώσεις μένει τελείως αναξιοποίητη.
- Κατά τη διάρκεια της κανονικής λειτουργίας έχουμε αεροδυναμικές απώλειες (συντελεστής ισχύος).
- Κατά τη λειτουργία έχουμε ακόμα μηχανικές απώλειες στον άξονα, στον μειωτήρα και στη γεννήτρια. Ένα ποσοστό της τάξεως του 10% της ονομαστικής ισχύος της μηχανής είναι αντιπροσωπευτικό των μηχανικών απωλειών.

Θα πρέπει να τονίσουμε ότι, εκτός των απωλειών ενέργειας του ανέμου, παρατηρούνται απώλειες της παραγόμενης ενέργειας από την ανεμογεννήτρια κατά τη μεταφορά (καλώδια) αλλά και την μετατροπή του ηλεκτρικού ρεύματος (αναστροφείς, συστήματα ελέγχου) έτσι ώστε να μπορεί να εκμεταλλευτεί με ασφάλεια και αξιοπιστία από τα φορτία.

4.3 Υβριδικά συστήματα

Η διακύμανση της παραγόμενης ενέργειας των αιολικών μηχανών, λόγω της στοχαστικότητας του ανέμου, αλλά και η, σχεδόν συγκεκριμένης διάρκειας κατά την διάρκεια της ημέρας, παραγωγή ενέργειας των φωτοβολταϊκών συστημάτων, αποτελούν εμπόδιο στην εκτεταμένη εκμετάλλευση της αιολικής και ηλιακής ενέργειας σε μη διασυνδεδεμένα νησιά [Ζερβός, 2007].

Ένα ηλεκτρικό σύστημα χαρακτηρίζεται από την παραγωγή (προσφορά) και την κατανάλωση (ζήτηση) ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια έχει το χαρακτηριστικό να μη μπορεί να αποθηκεύεται σε μεγάλες ποσότητες, αφού κάτι τέτοιο αυξάνει αρκετά το κόστος. Αυτό σημαίνει ότι η προσφορά πρέπει να βρίσκεται σε συνεχή ισορροπία με τη ζήτηση. Όπως προαναφέραμε, όμως, τόσο οι ανεμογεννήτριες όσο και τα φωτοβολταϊκά δεν είναι σε θέση να ικανοποιήσουν την απαίτηση αυτή, για το λόγο ότι στηρίζονται σε μη προβλέψιμα μετεωρολογικά δεδομένα.

Το πρόβλημα είναι ακόμα πιο έντονο σε μικρά αυτόνομα συστήματα, όπως πολλά ελληνικά νησιά, όπου η ζήτηση παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις. Η έλλειψη τοπικής βιομηχανίας που να καταναλώνει σημαντική ενέργεια τη νύχτα, καθώς και η κατακόρυφη αύξηση της ζήτησης τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω του τουρισμού και της εκτεταμένης χρήσης κλιματιστικών συσκευών, προκαλούν έντονες ανομοιομορφίες στο προφίλ της ζήτησης [Ζερβός, 2007].

Να τονίσουμε σε αυτό το σημείο, ότι ένα σύστημα αφαλάτωσης παρουσιάζει παρόμοια διακύμανση στη ζήτηση ενέργειας, αφού οι ανάγκες σε πόσιμο νερό, σε ημερήσιο επίπεδο, ουσιαστικά παρουσιάζονται την ημέρα, και σε μηνιαίο επίπεδο, παρουσιάζουν ραγδαία αύξηση τους καλοκαιρινούς μήνες, λόγω του τουρισμού και της αύξησης της θερμοκρασίας.

Η ανομοιομορφία της ζήτησης τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και του έτους, αλλά και η στοχαστικότητα παραγωγής ενέργειας από τις Α/Γ και τα Φ/Β, καθιστούν την εγκατάσταση τους σ' ένα μη διασυνδεδεμένο νησί, μη αποδοτική και συνεπώς ασύμφορη οικονομικά. Έτσι, λοιπόν, απαιτείται ο συνδυασμός τεχνολογιών ή/και η χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

Ο συνδυασμός διαφορετικών τεχνολογιών παραγωγής ή/και εκμετάλλευσης, είτε συμβατικών, είτε ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ονομάζεται **υβριδικό σύστημα**. Τέτοια συστήματα, μελετώνται ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, στην κατεύθυνση για παραγωγή ενέργειας από φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες αλλά και συγχρόνως, για αξιόπιστη και ασφαλής προσφορά ενέργειας στον καταναλωτή. Πρόκληση, λοιπόν, αποτελεί η απαλοιφή των μειονεκτημάτων των τεχνολογιών Α.Π.Ε. και η αύξηση της διείσδυσης τους, με εφαρμογή υβριδικών συστημάτων ή/και με συνδυασμό τους με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

Επιγραμματικά, αναφέρουμε κάποια συστήματα αποθήκευσης ενέργειας:

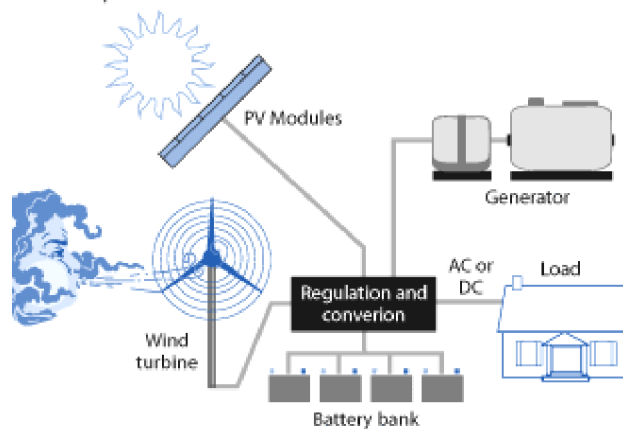
- Μπαταρίες (batteries)
- Σύστημα αντλησιοταμίευσης (pumped-storage system)
- Σφόνδυλος (Flywheel)
- Συμπιεσμένος αέρας (Compressed air)
- Υπεραγώγιμο πηνίο (superconducting coil)

Από αυτά, τα πρώτα δύο, δηλαδή οι μπαταρίες και η αντλησιοταμίευση, εφαρμόζονται κατά κόρον στα υβριδικά συστήματα που εξετάζουμε.

Μια ευρύτατα εφαρμοσμένη τεχνολογία είναι η παράλληλη χρήση αιολικών συστημάτων με μηχανές εσωτερικής καύσης diesel (Σχήμα 4.19). Σε τέτοια συστήματα οι αιολικές μηχανές λειτουργούν ως εφεδρεία και η χρήση τους αποσκοπεί στην εξοικονόμηση καυσίμου και στη μείωση της ρύπανσης που προκαλείται, αλλά όχι στην μείωση της εγκατεστημένης ισχύος των μηχανών diesel. Είναι γεγονός, ότι σε πολλά νησιά της Ελλάδας, είναι εγκατεστημένες μηχανές diesel για την κάλυψη της ζήτησης. Συνεπώς, η εγκατάσταση Α/Γ ή/και Φ/Β θα οδηγήσει σ' ένα ποσοστό στην απεξάρτηση του νησιού από την αγορά καυσίμου.

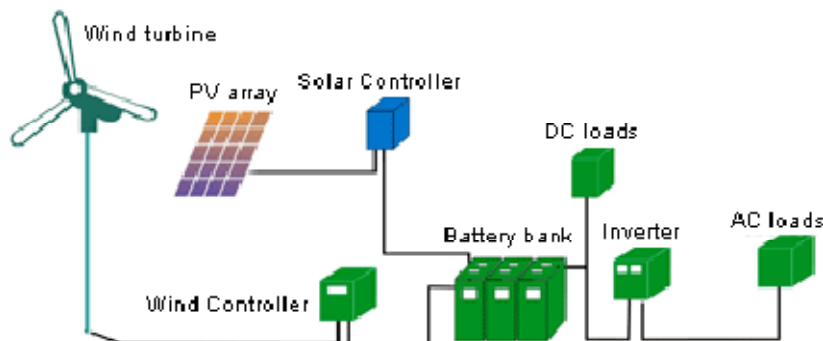
Hybrid Power Systems

Combine multiple sources to deliver non-intermittent electric power



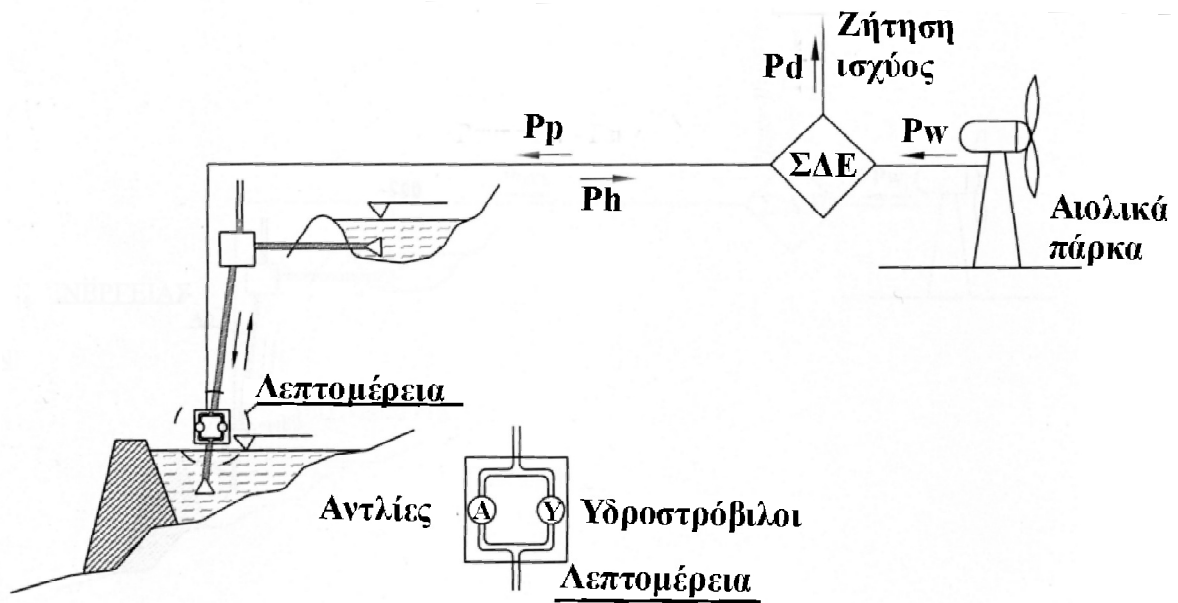
Σχήμα 4.19 Υβριδικό σύστημα με Α/Γ, Φ/Β, γεννήτριες diesel και μπαταρίες

Ακόμα, υπάρχουν τύποι υβριδικών συστημάτων που συνδυάζουν μόνο τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Σχήμα 4.20). Παραδείγματα τέτοιων εφαρμογών είναι ο συνδυασμός Α/Γ με Φ/Β με ή χωρίς σύστημα αποθήκευσης, Α/Γ και Φ/Β με αφαλάτωση, ενώ η παράλληλη χρήση μικρών υδροηλεκτρικών μπορεί να αυξήσει την αξιοπιστία του συστήματος, λόγω της προβλέψιμης λειτουργίας και της γρήγορης απόκρισης τους. Σε περιπτώσεις εφαρμογής υβριδικών συστημάτων γίνεται βελτιστοποίηση στη διαστασιολόγηση των μονάδων, και δίνεται έμφαση στο σύστημα ελέγχου.



Σχήμα 4.20 Υβριδικό σύστημα με Α/Γ, Φ/Β και μπαταρίες

Παράλληλα, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης μπορούν να λειτουργήσουν εξαιρετικά συνδυαζόμενα με αιολικά πάρκα ή/και με θερμικά συστήματα, αποθηκεύοντας πάντα περίσσεια παραγόμενης ενέργειας ή ενέργειας που δεν μπορεί να απορροφηθεί. Η φιλοσοφία λειτουργίας του συστήματος αντλησιοταμίευσης είναι απλή. Η περίσσεια ενέργειας τροφοδοτεί τις αντλίες, μέσω των οποίων το εργαζόμενο μέσο (νερό) ανυψώνεται διά των σωληνώσεων ανόδου από την κάτω δεξαμενή στην άνω, δίνοντάς μας έτσι τη δυνατότητα αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας με τη μορφή δυναμικής ενέργειας. Όταν κάποια άλλη χρονική στιγμή χρειαζόμαστε ενέργεια, το νερό από την πάνω δεξαμενή αφήνεται να οδεύσει μέσω των σωληνώσεων καθόδου προς την κάτω δεξαμενή, διερχόμενο δε μέσω των υδροστροβίλων παράγει την επιθυμητή ενέργεια. Σχηματικά, ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης συνδυαζόμενο με αιολικά πάρκα φαίνεται στο σχήμα 4.21:



Σχήμα 4.21 Υβριδικό σύστημα με Α/Γ και αντλησιοταμίευση

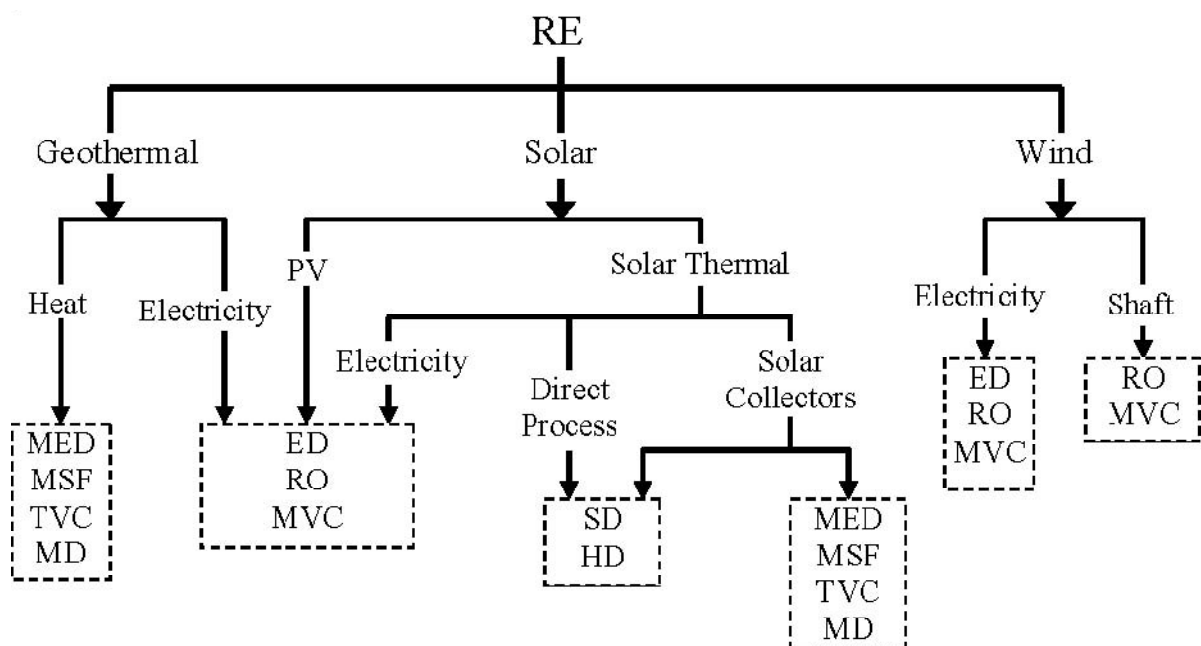
Φυσικά η διαδικασία αυτή της μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδραυλική (άντληση) και στη συνέχεια εκ νέου μετατροπή της σε ηλεκτρική (λειτουργία υδροστροβίλου) συνοδεύεται από απώλειες. Οι συνολικές απώλειες ενέργειας σε ένα κύκλο άντλησης-παραγωγής ενέργειας φθάνει στο 23% περίπου για εγκαταστάσεις μεγάλου μεγέθους. Όπως είναι αναμενόμενο, οι συνολικές απώλειες είναι αναλογικά μεγαλύτερες όσο το μέγεθος των μηχανών γίνεται μικρότερο. Μια τυπική τιμή των απωλειών είναι το 30% [Παπαντώνης, 2004].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο – ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ, ΠΑΡΑΓΩΓΗ H₂ & Α.Π.Ε.

5.1 Εισαγωγή

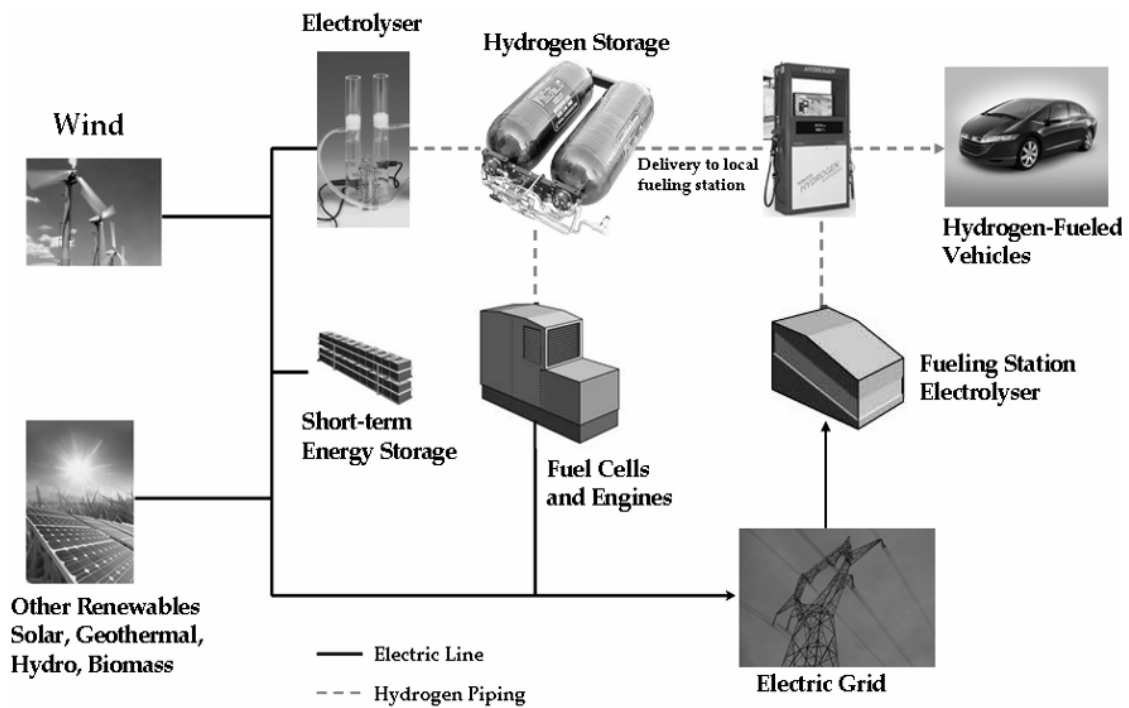
Οι μονάδες αφαλάτωσης, οι μονάδες παραγωγής υδρογόνου και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.), αποτελούν τρεις διαφορετικές τεχνολογίες, οι οποίες όμως μπορούν να συνεργασθούν. Η συνεργασία τους στηρίζεται στην τροφοδοσία της αφαλάτωσης και της παραγωγής υδρογόνου με την ενέργεια που παράγουν συστήματα που εκμεταλλεύονται τις Α.Π.Ε. Αυτή η ενέργεια μπορεί να είναι θερμική, ηλεκτρική ή μηχανική αναλόγως τη μέθοδο της αφαλάτωσης, της παραγωγής υδρογόνου και των διαθέσιμων πηγών ενέργειας.

Οι δυνατοί συνδυασμοί τεχνολογιών ΑΠΕ και μεθόδων αφαλάτωσης δίνονται στο παρακάτω σχήμα 5.1. Η γενικότερη τάση στο συνδυασμού μεθόδων αφαλάτωσης και Α.Π.Ε., είναι η συνεργασία τεχνολογιών παραγωγής θερμικής ενέργειας (ηλιακοί συλλέκτες, γεωθερμία) με θερμικές μεθόδους (MSF, ME, SD), ενώ τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας (Α/Γ, Φ/Β) συνδυάζονται με μεθόδους που απαιτούν ηλεκτρική ή μηχανική ισχύ (RO, ED, VC).



Σχήμα 5.1 Συνδυασμοί συστημάτων Α.Π.Ε. και μεθόδων αφαλάτωσης

Παράλληλα και ένα οποιοδήποτε υβριδικό σύστημα Α.Π.Ε μπορεί να συνεργαστεί με μία ηλεκτρολυτική μονάδα παραγωγής υδρογόνου σύμφωνα με το σχήμα 5.2. Επιπλέον, η παραγωγή υδρογόνου με τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης τροφοδοτούμενη από Α.Π.Ε. έχει ως αποτέλεσμα έναν πεντακάθαρο κλειστό κύκλο του υδρογόνου με μηδαμινές περιβαλλοντικές επιπτώσεις [Zoulias, 2008].



Σχήμα 5.2 Συνδυασμός συστημάτων Α.Π.Ε. και παραγωγής υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης

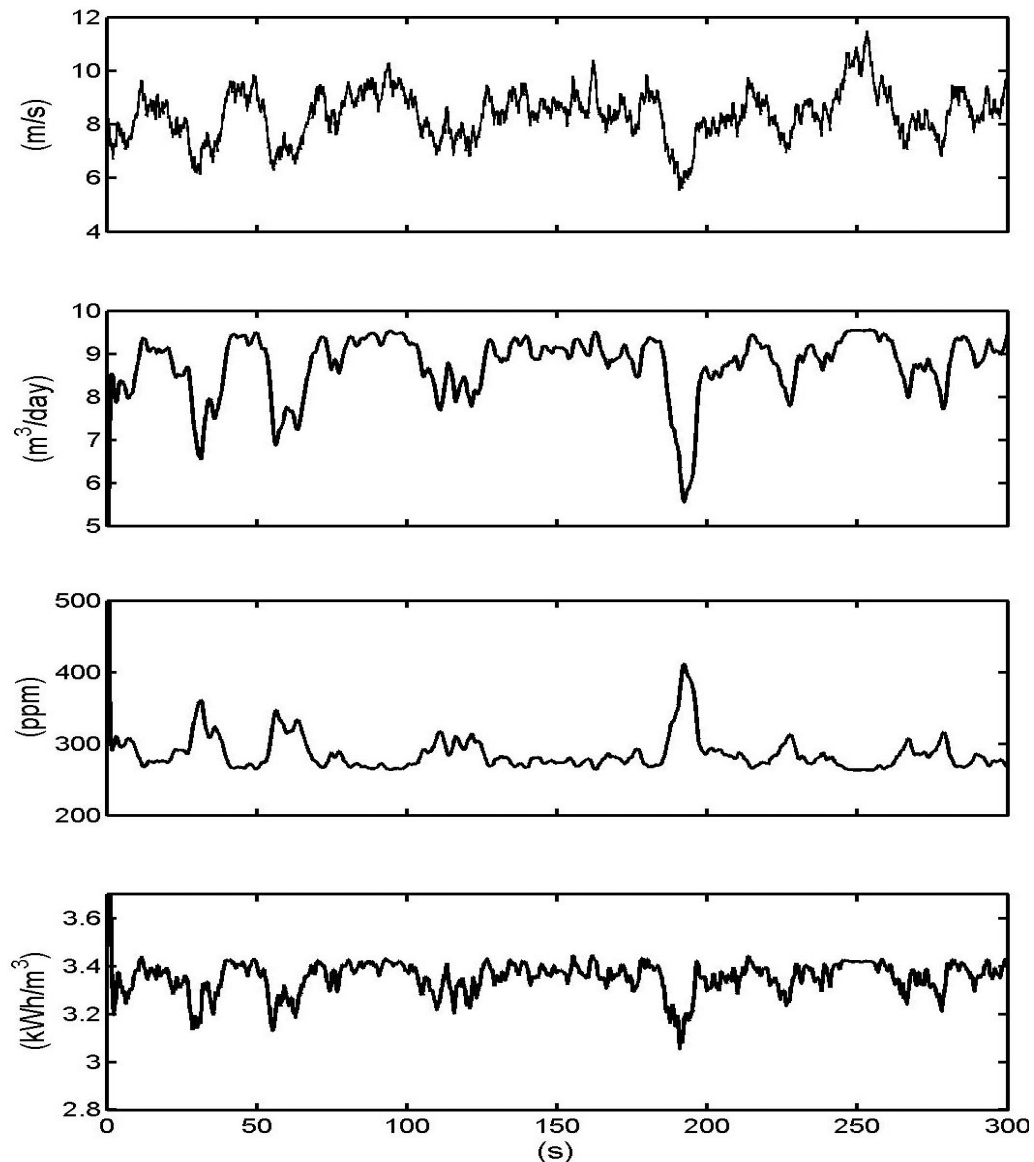
Βέβαια, δεν αποτελούν όλοι οι συνδυασμοί, αποδοτικά οικονομικά συμφέροντα αλλά και πρακτικά εφαρμόσιμα συστήματα. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι κάποιοι συνδυασμοί να παρουσιάζουν περισσότερο ενδιαφέρον για έρευνα και να αποτελούν την πρώτη επιλογή για πιθανή εγκατάσταση.

Στην επόμενη υποενότητα γίνεται μια σύντομη παρουσίαση μελετών και εφαρμογών για μονάδες αφαλάτωσης και μονάδες παραγωγής υδρογόνου τροφοδοτούμενες από Α/Γ ή/και Φ/Β. Τέλος, να σημειώσουμε ότι και άλλοι συνδυασμοί αφαλάτωσης – ΑΠΕ ερευνώνται και μάλιστα δείχνουν ενθαρρυντικές προοπτικές για το μέλλον, αλλά κρίθηκε ότι η ανάλυση τους ξεφεύγει από τα όρια της διπλωματικής εργασίας.

5.2 Παρουσίαση μελετών/εφαρμογών συστημάτων Α.Π.Ε. & αφαλάτωσης RO

A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries [Marcos S. Miranda, David Infield, 2002]

Μοντέλο προσομοίωσης συστήματος με σύστημα ανάκτησης ενέργειας Clark rump, τροφοδοτούμενο αποκλειστικά από Α/Γ χωρίς μπαταρίες. Η αφαλάτωση λειτουργεί ανάλογα με τη παρεχόμενη ισχύ από την Α/Γ, ενώ χρησιμοποιείται λογική ελέγχου με σκοπό την μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας και του παραγόμενου νερού. Τέλος υπολογίζεται μια μέση τιμή για την ενεργειακή κατανάλωση της τάξεως των 3,4 kWh/m³. Το παρακάτω σχήμα είναι ενδεικτικό της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.3 Ταχύτητα ανέμου, παροχή νερού, συγκέντρωση άλατος και ειδική κατανάλωση

Designing cost-effective seawater reverse osmosis system under optimal energy options [Asmerom M. Gilau, Mitchell J. Small, 2007]

Σε αυτή τη δημοσίευση, διερευνάται ένα μοντέλο προσομοίωσης, συστήματος αφαλάτωσης RO τροφοδοτούμενο από Α/Γ ή/και Φ/Β. Μέσω κάποιων παρεμβάσεων στο σύστημα αφαλάτωσης (πιο αποδοτικές μεμβράνες, χρήση στροβίλου για ανάκτηση ενέργειας), η ειδική ενεργειακή κατανάλωση μειώνεται στην τιμή των 2,33 kWh/m³, ενώ το κόστος παραγόμενου νερού προκύπτει για τις Α/Γ 0,5 €/ m³ και για τα Φ/Β 1 €/ m³.

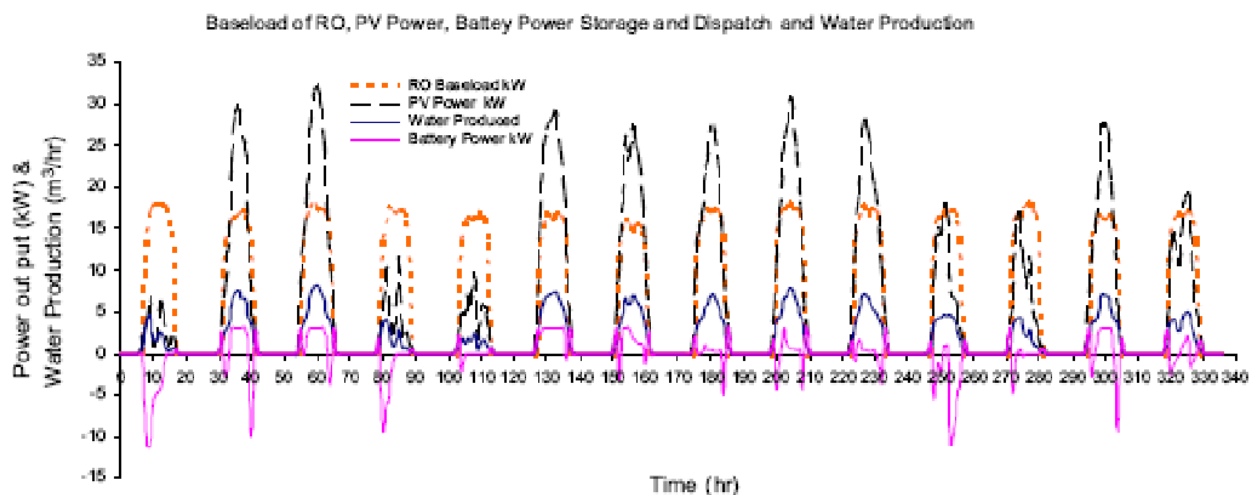
Summary of power and water costs for different energy options

Energy options	W_B	W_PV_B	W_D_B	W_PV_D_B	W_D	W_PV_D	PV	D	PV_B
Power cost (\$/kWh)	0.18	0.18	0.26	0.27	0.29	0.30	0.30	0.40	0.40
Water cost (\$/m ³)	0.53	0.57	0.74	0.74	0.79	0.82	0.82	1.04	1.05

Note: W_B: wind and battery; W_PV_B: wind, photovoltaic, and battery; W_D_B: wind diesel battery; W_PV_D_B: wind, photovoltaic, diesel and battery; W_D: wind and diesel; W_PV_D: wind, photovoltaic, and diesel; PV: photovoltaic; D: diesel only; and PV_B: photovoltaic and battery.

Πίνακας 5.1 Συγκεντρωτικός πίνακας με τα κόστη παραγωγής ισχύος και νερού για διάφορα εναλλακτικά συστήματα

Μελετώνται διάφορα σενάρια υβριδικών συστημάτων αφαλάτωσης όπως με Α/Γ ή/και Φ/Β ή/και γεννήτρια Diesel, με ή χωρίς σύστημα αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες), και υπολογίζεται η μεταβολή ορισμένων σημαντικών μεγεθών για μια επένδυση, όπως το κόστος παραγωγής νερού (Πίνακας 5.1), ενώ αναπαριστάται η παραγωγή ενέργειας και νερού σε σχέση με το χρόνο (Σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.4 Προσομοίωση φορτίου αφαλάτωσης, παραγόμενης ισχύος από Φ/Β και από μπαταρίες, παραγόμενου νερού, για τις 2 πρώτες εβδομάδες του Ιανουαρίου

Autonomous reverse osmosis units driven by RE sources experiences and lessons learned [E. Tzen, D. Theofilloyianakos, Z. Kologios, 2007]

Αναφορά στο υπό λειτουργία σύστημα αφαλάτωσης δυναμικότητας 3,1 m³/day, το οποίο λαμβάνει ισχύ από υβριδικό σύστημα Α/Γ ισχύος 900 W και Φ/Β ισχύος 3.96 kWp (Σχήμα 5.5), που έχει εγκατασταθεί στο Λαύριο από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) το 2004. Γίνεται παρουσίαση των μετρήσεων που έχουν ληφθεί στα χρόνια λειτουργίας του, αλλά και περιγράφονται προβλήματα που παρουσιάστηκαν, το πώς αντιμετωπίστηκαν, και τι επιπτώσεις είχαν αυτές οι αλλαγές στη λειτουργία του συστήματος. Τέλος, γίνεται αναφορά σε παρόμοιες εγκαταστάσεις στον κόσμο.



Σχήμα 5.5 Μονάδα αφαλάτωσης (δεξιά) και εγκατεστημένο αιολικό πάρκο 900W (αριστερά) από το ΚΑΠΕ

Συνδυασμός παραγωγής ηλεκτρισμού και πόσιμου νερού με αφαλάτωση από αιολική ενέργεια. Εφαρμογή στη Νίσυρο [Χρ. Σταματόπουλος, 2007].

Μεταπτυχιακή εργασία που μελετά την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού και νερού με αφαλάτωση από Α/Γ. Η καινοτομία της εργασίας έγκειται στη μηχανική σύνδεση της Α/Γ με την αντλία της αφαλάτωσης, έτσι ώστε να αποφευχθούν οι απώλειες κατά την μετατροπή της ενέργειας. Εξετάζεται ως πιθανός τόπος εγκατάστασης, η νήσος Νίσυρος και αξιολογείται οικονομικά η επένδυση. Η επένδυση κρίνεται συμφέρουσα δεδομένου κάποιων ετήσιων αυξήσεων στην τιμή πώλησης του νερού (1,4 €/m³) και ταυτόχρονης διάθεσης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.

ΥΔΡΙΑΔΑ – Πλωτή Αυτόνομη Οικολογική & Αποδοτική Μονάδα Αφαλάτωσης [Ν. Νικητάκος, 2007].

Η Υδριάδα αποτέλεσε την πρώτη παγκοσμίως πλωτή μονάδα αφαλάτωσης, τροφοδοτούμενης αποκλειστικά από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η οποία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε εξ' ολοκλήρου στην Ελλάδα. Η Υδριάδα έχει τεθεί σε λειτουργία από το καλοκαίρι του 2007, στο νησί της Ηρακλείας. Η υλοποίηση του έργου διήρκεσε 4 χρόνια και κόστισε περί τα 2.800.000€. Στην μονάδα είναι ενσωματωμένη μία ανεμογεννήτρια για την παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας αφαλάτωσης του θαλασσίου ύδατος. Πρόκειται για ανεμογεννήτρια, με ρυθμιζόμενη γωνία πτερυγίων, μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής και δυνατότητα αυτόνομης λειτουργίας. Επίσης, η μονάδα είναι εφοδιασμένη και με φωτοβολταϊκά στοιχεία, για επικουρική αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, αν αυτό χρειαστεί. Στους τρεις ορόφους του πλωτήρα, είναι εγκατεστημένα η μονάδα αφαλάτωσης ώσμωσης, το κέντρο ελέγχου του συστήματος, για τοπική και απομακρυσμένη λειτουργία, και η δεξαμενή αποθήκευσης του πόσιμου νερού. Η συγκεκριμένη μονάδα μπορεί να αποδώσει περίπου 70 m³/day πόσιμο νερό, αρκετό για 300 άτομα.



Σχήμα 5.6 Η Υδριάδα ρυμουλκούμενη στην Ηρακλεία

Μονάδα αφαλάτωσης στη Μήλο [Αιολική Μήλου, 2008].

Η μονάδα της Μήλου, δυναμικότητας 2.240 m³/d, έχει σχεδιαστεί ώστε να καλύπτει πλήρως, τόσο τις βραχυπρόθεσμες ανάγκες του νησιού σε νερό, καλύπτοντας μάλιστα και τις καλοκαιρινές αιχμές του συστήματος, όσο και τις μακροπρόθεσμες ανάγκες του σε ορίζοντα εικοσαετίας, με πρόβλεψη επέκτασής της το 2015 κατά 1.120 m³/d, με το σκεπτικό των πανομοιότυπων δομικών μονάδων (modular units) που επεκτείνουν τη δυναμικότητα, συνδεόμενες μεταξύ τους. Η μονάδα αντίστροφης ώσμωσης αντισταθμίζει την απαιτούμενη για τη λειτουργία της ηλεκτρική ενέργεια από ίση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία προέρχεται από μια ανεμογεννήτρια ισχύος 600 kW, εξασφαλίζοντας με αυτόν τον τρόπο μηδενική επιβάρυνση στο περιβάλλον και ταυτόχρονα υψηλής ποιότητας πόσιμο νερό σε χαμηλή τιμή. Η μονάδα λειτουργεί σε τέσσερις (4) ημιαυτόνομες συστοιχίες των 560 m³/d, προσδίδοντας έτσι στο σύστημα σημαντική λειτουργική ευελιξία, μεγιστοποιώντας παράλληλα τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία της. Μαζί με την επέκταση των δύο (2) συστοιχιών των 560 m³/d πρόκειται να εγκατασταθεί και νέα Α/Γ ισχύος 850 kW. Το έργο είναι προϋπολογισμού 3.500.000€.



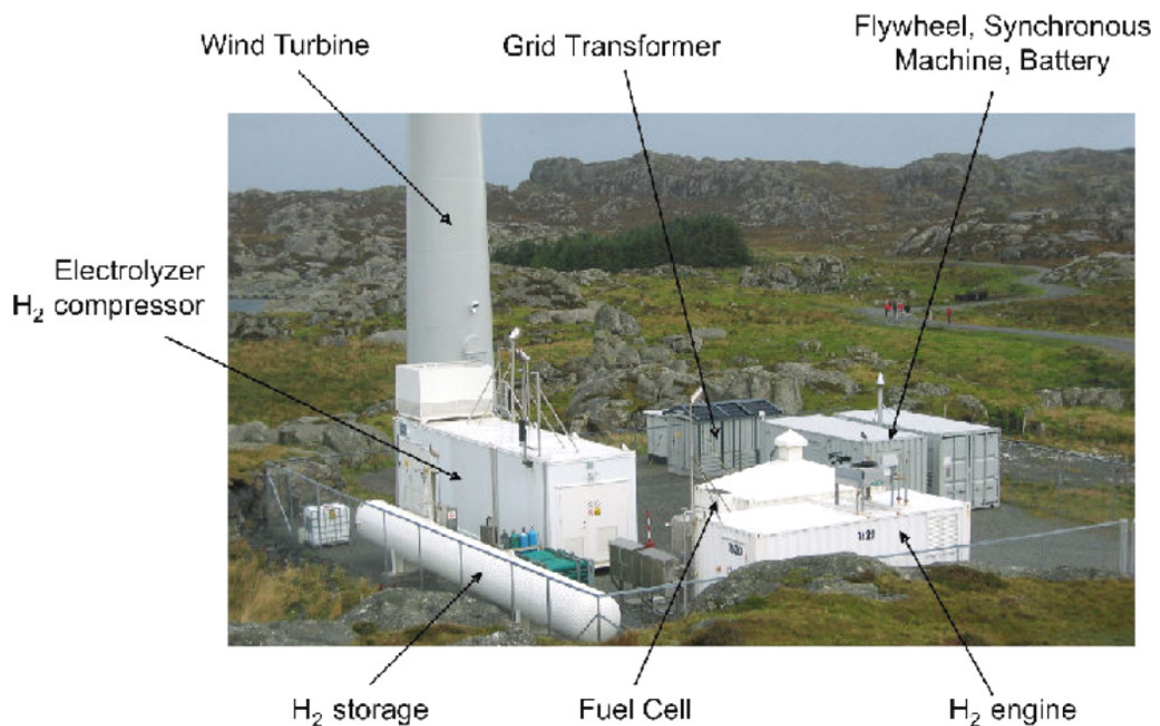
Σχήμα 5.7 Μονάδα αφαλάτωσης στη Μήλο

5.2 Παρουσίαση μελετών/εφαρμογών συστημάτων Α.Π.Ε. & παραγωγής υδρογόνου

Utsira – Demonstrating the renewable hydrogen society [Torgeir Nakken, Erik Frantzen, Elisabet F. Hagen, Hilde Strøm, 2006]

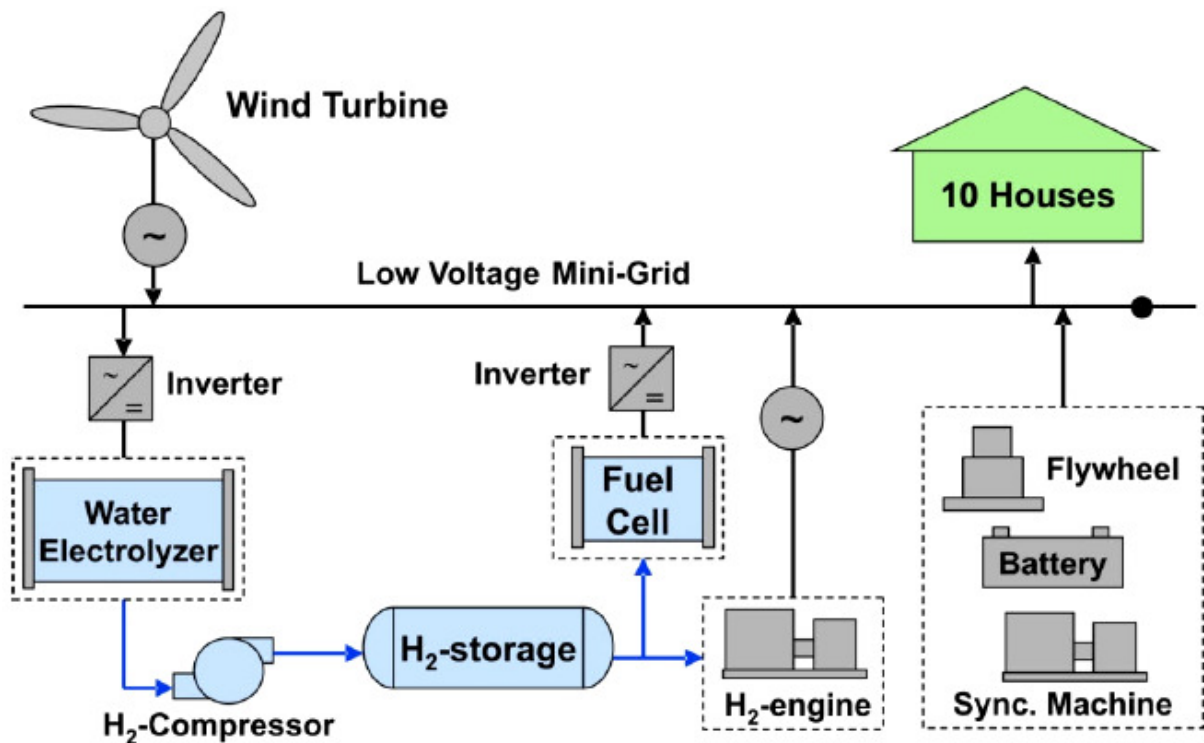
Το μικρό νησί UTSIRA στη Νορβηγία με 250 μόνο μόνιμους κατοίκους, είναι σήμερα στην πρωτοπορία της τεχνολογίας για την παραγωγή υδρογόνου από αιολική ενέργεια. Έχει εγκαταστήσει το πρώτο σύστημα παραγωγής υδρογόνου για την παροχή ενέργειας στα σπίτια μέσω κυψελών καυσίμου, ενώ επιπλέον έχει ξεκινήσει την κατασκευή ενός μεγάλου αιολικού πάρκου 50 MW μέσα στη θάλασσα και πρόσφατα εγκαινίασε την πρώτη πλωτή ανεμογεννήτρια εμπορικού μεγέθους.

Στο νησί Utsira λοιπόν, τέθηκε σε λειτουργία η πρώτη αυτόνομη εγκατάσταση παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια το χειμώνα 2004/2005. Αποτελείται από μια ανεμογεννήτρια Epercon 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 (2400 Nm³), και έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης υδρογόνου των 55 kW και μια κυψέλη καυσίμου PEM των 10 kW, τα τελευταία χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ισχύος όταν η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας δεν επαρκεί για την κάλυψη του φορτίου. Επίσης διαθέτει έναν σφόνδυλο ικανότητας αποθήκευσης ενέργειας 5 kWh και μία σύγχρονη μηχανή ισχύος 100 kVA, που χρησιμοποιούνται για τη σταθεροποίηση της τάσης και της συχνότητας του δικτύου (Σχήμα 5.8).



Σχήμα 5.8 Εγκατάσταση υβριδικού συστήματος Α/Γ και εκμετάλλευσης τεχνολογιών H₂ στο νησί Utsira της Νορβηγίας

Κατά τη διάρκεια του πρώτου έτους της επίδειξης ο βασικός στόχος ήταν η αρμονική λειτουργία των επιμέρους συνιστωσών του συστήματος και η εξασφάλιση της ποιότητας και της αξιοπιστίας της διανεμημένης ισχύος. Κατά το σχεδιασμό του συστήματος πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας τις μετρημένες χρονοσειρές ανέμου και ζήτησης ισχύος.



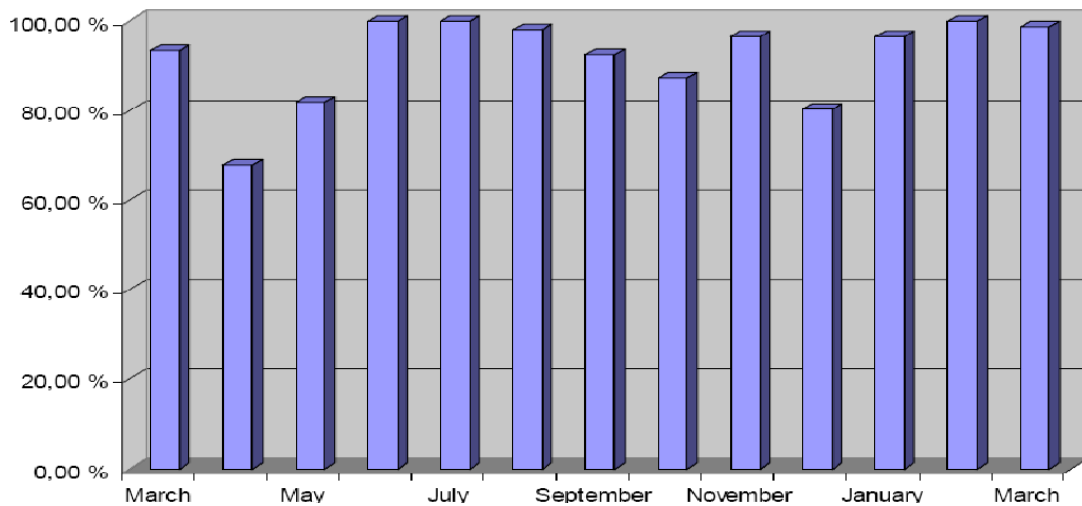
Σχήμα 5.9 Διάγραμμα εγκατάστασης υβριδικού συστήματος στο νησί Utsira

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, ο ετήσιος χρόνος λειτουργίας του ηλεκτρολύτη και της μηχανής καύσης υδρογόνου ήταν 2000 και 1000 ώρες αντίστοιχα, ενώ ο αριθμός των εκκινήσεων ήταν περίπου 100 και στις δύο περιπτώσεις. Μετά από ένα χρόνο λειτουργίας του συστήματος ο ετήσιος χρόνος λειτουργίας του ηλεκτρολύτη ήταν 1500 ώρες, της μηχανής καύσης υδρογόνου 500 ώρες και ο αριθμός των εκκινήσεων περίπου 300. Είναι λοιπόν προφανές ότι κατά τη φάση του σχεδιασμού η αιολική ισχύς είχε υποεκτιμηθεί.

Τα πιο σημαντικά επιτεύγματα κατά το πρώτο έτος της λειτουργίας είναι:

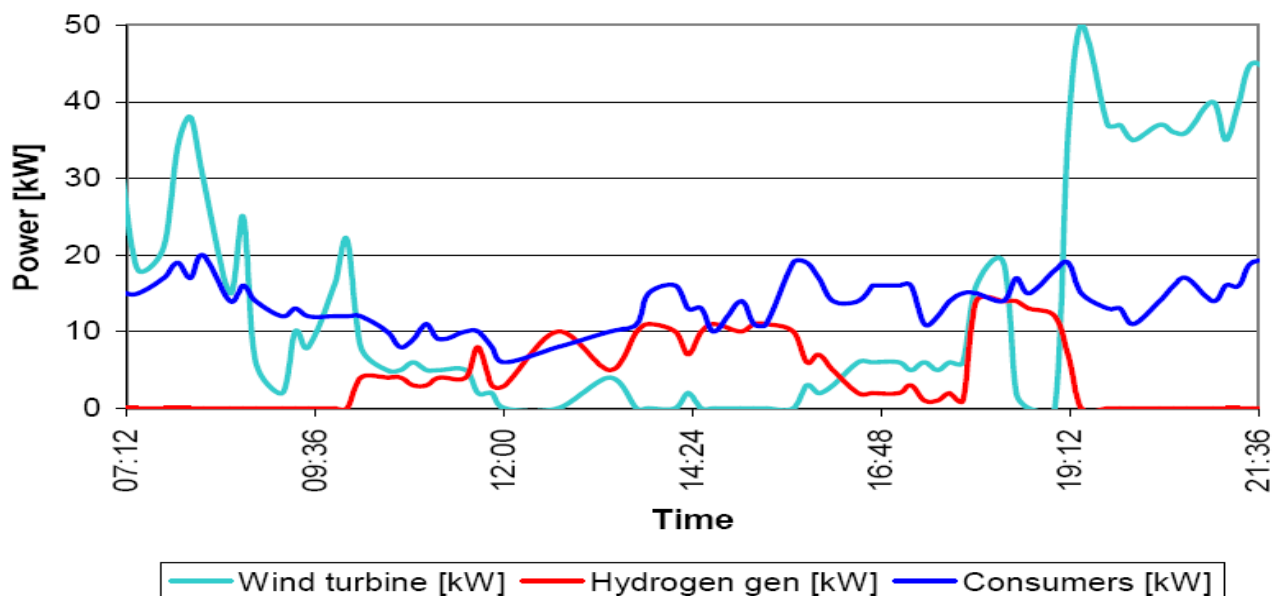
- Πάνω από οκτώ μήνες σε αυτόνομη λειτουργία.
- Διαθεσιμότητα κοντά στο 100% (Σχήμα 5.10).
- Πολύ καλή λειτουργικότητα.
- Πολύ καλή ποιότητα ισχύος, ευχαριστημένοι οι κάτοικοι της κοινότητας.
- Κανένα ατύχημα.
- Συνεισφορά στις τοπικές δραστηριότητες και στον τουρισμό.

Κεφάλαιο 5^ο – Αφαλάτωση, παραγωγή H₂ και Α.Π.Ε.



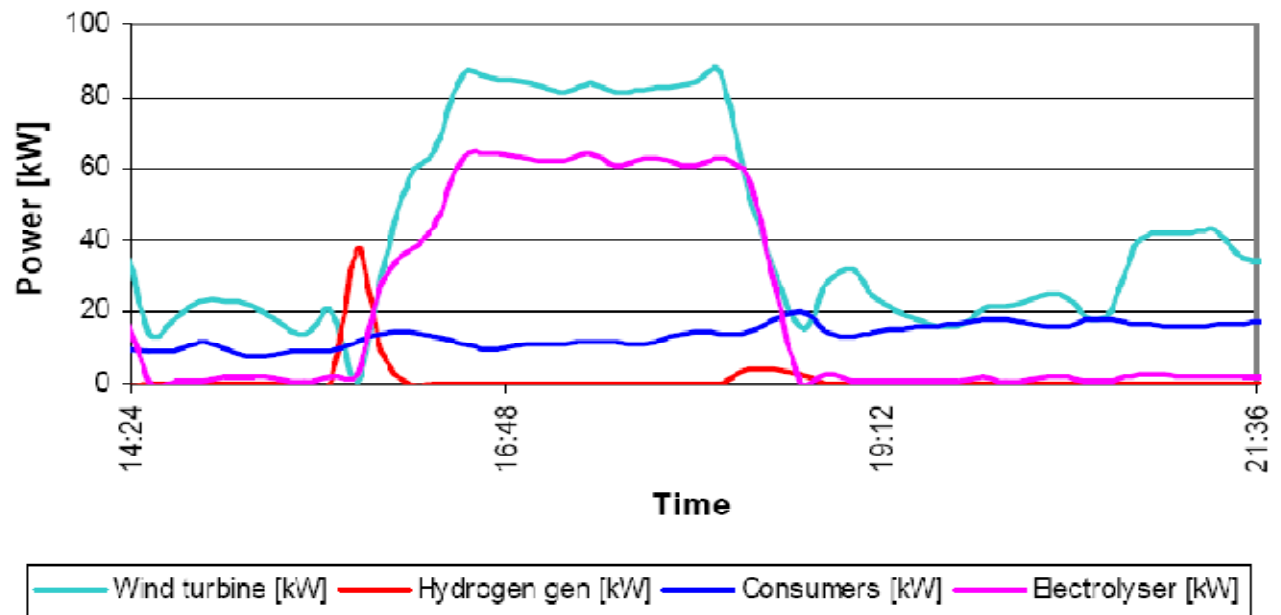
Σχήμα 5.10 Διαθεσιμότητα υβριδικού συστήματος Utsira – Μάρτιος 2005 έως 2006

Η απόκλιση της διαθεσιμότητας από το 100% οφείλεται σε σφάλματα του συστήματος και σε αυτές τις περιπτώσεις οι καταναλωτές συνδέονται στο ηπειρωτικό δίκτυο. Παραδείγματα της λειτουργίας του υβριδικού συστήματος δίνονται σχηματικά παρακάτω.



Σχήμα 5.11 Παράδειγμα λειτουργίας υβριδικού συστήματος Utsira

Στο σχήμα 5.11 παρατηρούμε ότι τις στιγμές εκείνες που η ισχύς από τις Α/Γ ελαττώνεται και δεν μπορεί να καλύψει την ζήτηση, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης υδρογόνου λειτουργεί και εξισορροπεί το φορτίο κατανάλωσης. Επίσης στο σχήμα 5.12 παρατηρούμε ότι τις στιγμές εκείνες που η ισχύς από τις Α/Γ υπερκαλύπτει την ζήτηση, μπαίνει σε λειτουργία η ηλεκτρόλυση για την μετατροπή της περίσσειας ενέργειας σε υδρογόνο για μελλοντική χρήση. Αντίστοιχα πάλι, όποτε χρειαστεί η μηχανή εσωτερικής καύσης υδρογόνου καλύπτει την κατανάλωση του οικιστικού δικτύου.



Σχήμα 5.12 Παράδειγμα λειτουργίας υβριδικού συστήματος Utsira

The PURE Project - An Autonomous, Hybrid and Distributed Wind Hydrogen System For Islands [Daniel Akil-D'Halluin, Elizabeth Johnson, Ross Gazey, Boris Collard, Vincenzo Ortisi, Carla Urso, Mohamed Cherif Latreche, 2009]

Το PURE Project αποτελεί ένα αυτόνομο, μικρού μεγέθους, υβριδικό σύστημα εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας – υδρογόνου και ήταν ένα κοινό πρόγραμμα της UNST (κοινότητα των νήσων Shetland), της siGEN και της AccaGen SA για την «PURE» κοινότητα των Shetland νησιών, υποστηριζόμενο από την E.E. Το πρόγραμμα στοχεύει να επιδείξει πώς η αιολική ενέργεια και η τεχνολογία υδρογόνου μπορεί να συνδυαστεί για να παρέχει τις ενεργειακές ανάγκες για μια απομακρυσμένη αγροτική/βιομηχανική περιοχή. Το σύστημα PURE υλοποιήθηκε για να εξετάσει και να αναδείξει τις ασφαλείς και αποτελεσματικές μακροπρόθεσμες χρήσεις του υδρογόνου, αποθηκεύοντας το παράλληλα. Το υδρογόνο αυτό παράγεται από ηλεκτρόλυση του νερού, τροφοδοτούμενη από Α/Γ, και αποδίδει την αποθηκευμένη του ενέργεια, σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω κυψελών καυσίμου. Το όλο σύστημα διαθέτει κέντρο ελέγχου για τοπική και απομακρυσμένη λειτουργία. Τα βασικά τεχνικά στοιχεία του συστήματος παρατίθενται κατωτέρω (Πίνακας 5.2).

Η μεγάλη και ουσιαστική διαφορά μεταξύ του PURE Project και άλλων υβριδικών συστημάτων παραγωγής υδρογόνου έγκειται στην μικρή του κλίμακα και το χαμηλό κόστος επένδυσης με τα οποία διαστασιολογήθηκε και αναπτύχθηκε. Το συνολικό έργο κοστολογείται περίπου 400.000 £ και σε αυτό συμπεριλαμβάνονται η τεχνοοικονομική μελέτη, ο σχεδιασμός, το κόστος εξοπλισμού και η εγκατάσταση.

Key components	Key data
Wind turbine	500 kW
Electrolyser	25 kW operating at 25 bar
Hydrogen storage	40 N m ³ in MH tanks
1-stage H ₂ compressor	at 220 bar
1 filling station	220-bar bottles

Πίνακας 5.2 Τεχνικά δεδομένα PURE project



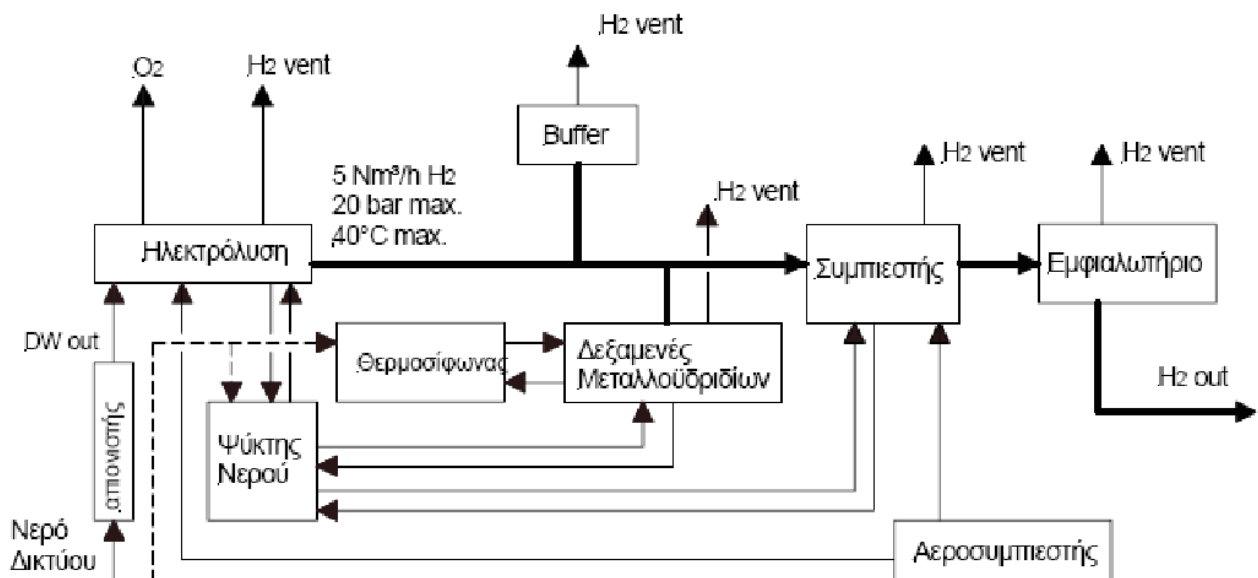
Σχήμα 5.13 PURE project – Unst, Shetland

Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια [Ε. Βαρκαράκη, Ε. Ζούλιας, Ν. Λυμπερόπουλος, Γ. Καραγιώργης, Χ. Χριστοδούλου, Ε. Καλύβας, 2005]

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. Μια μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού των 25 kW είναι συνδεδεμένη στην έξοδο 400 V μίας 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. Η μονάδα αλκαλικής ηλεκτρόλυσης κατασκευάστηκε από την Casale Chemicals, Ελβετία, και έχει ονομαστική παραγωγή 0.45 kg/h (5 Nm³/h) υδρογόνου καθαρότητας 99,98 κ.ο. υπό πίεση 19 bar. Τα πρώτα αποτελέσματα λειτουργίας είναι πολύ ενθαρρυντικά, και αποδεικνύουν ότι η μονάδα έχει πολύ υψηλή απόδοση, όπως είχε σχεδιαστεί.

Με βάση τις πρώτες μετρήσεις, η μονάδα ηλεκτρόλυσης παράγει έως και 10% περισσότερο υδρογόνο από την ονομαστική ικανότητα των 5 Nm³/h. Η απόδοση της ηλεκτρόλυσης αποκλειστικά υπό ονομαστικές συνθήκες λειτουργίας είναι περίπου 69% ως προς τη χαμηλή θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου (LHV). Η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση για την παραγωγή του περιβαλλοντικά φιλικού υδρογόνου και την εμφιάλωση σε φιάλες στα 200 bar είναι περίπου 6,4 kWh/Nm³ H₂, που αντιστοιχεί σε μια απόδοση 47% (ως προς την LHV) του συνολικού συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης κρύου νερού για την ψύξη των μηχανημάτων.



Σχήμα 5.14 Διάγραμμα της εγκατάστασης υδρογόνου στο Αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ

Η εγκατάσταση τέθηκε σε λειτουργία τον Οκτώβριο 2005 και χρησιμοποιείται για πειραματικούς σκοπούς, προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά και απόδοση της ηλεκτρόλυσης, του συμπιεστή, των μεταλλοϋδριδίων και του ολοκληρωμένου συστήματος. Στο τέλος του 2008, στο σύστημα προστέθηκε και μια κυψέλη καυσίμου τύπου PEM, με ονομαστική ισχύ 7.5 kW, που μπορεί να δίνει στο δίκτυο έως 6 kW συνεχούς ισχύος. Το έργο αποτελεί κομμάτι του Ευρωπαϊκού project RES2H2 σε συνεργασία με το project της Ισπανίας.



Σχήμα 5.15 Γενική άποψη της μονάδας αιολικής ενέργειας – H₂ στο αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ

Υδρογόνο στα Νησιά – Ελληνικό Νησί Υδρογόνου «H2ellenic Island» – Μήλος [Ε. Ζούλιας 2005, Ν. Λυμπερόπουλος 2006]

Το Ελληνικό Νησί Υδρογόνου «H2ellenic Island» πρόκειται για μία πρόταση για «έργο – φάρο» που θα υποβληθεί στα πλαίσια του Initiative for Growth της Ε.Ε. Η Ελληνική ερευνητική κοινότητα στην προσπάθεια να συμμετέχει η Ελλάδα στην προβλεπόμενη χρηματοδότηση, θεωρεί σκόπιμο να υποβάλει πρόταση για σημαντικής κλίμακας εθνικό έργο, του οποίου η πρόταση να προετοιμαστεί έγκαιρα και στο έργο να συμμετέχει μεγάλος αριθμός φορέων από διάφορους τομείς οικονομικής δραστηριότητας, καλύπτοντας πολλές τεχνολογικές λύσεις.

Επισημαίνεται ότι στόχος του έργου θα είναι η παραγωγή του υδρογόνου αποκλειστικά από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.), ώστε κάποια στιγμή να επέλθει η ενεργειακή ανεξάρτηση των νησιών από τα ορυκτά καύσιμα, με αντίστοιχα οφέλη όσον αφορά την προστασία του περιβάλλοντος.

Το έργο αφορά Ελληνικό μη – διασυνδεδεμένο νησί με τα εξής χαρακτηριστικά:

- πληθυσμός έως 5.000 άτομα
- μέγιστη ηλεκτρική ισχύς ζήτησης 10MW
- ικανό δυναμικό σε ΑΠΕ (κυρίως αιολική, ηλιακή, γεωθερμική ενέργεια) και υπάρχουσες εγκαταστάσεις ΑΠΕ
- μόνιμες οικονομικές δραστηριότητες πέραν του τουρισμού, όπως βιομηχανική ή αλιευτική δραστηριότητα
- τοπικούς φορείς με ευαισθησία στον τομέα ενέργεια / περιβάλλον και κατά προτίμηση με πρότερη σχετική δραστηριότητα.

Η Μήλος καλύπτει τις παραπάνω προϋποθέσεις και αποτελεί το υποψήφιο Ελληνικό Νησί H₂, μετά από ενημέρωση και αποδοχή του εγχειρήματος από τις τοπικές αρχές και την τοπική κοινωνία.

Το έργο θα αφορά την ανάπτυξη, εφαρμογή και διάδοση τεχνολογιών παραγωγής, αποθήκευσης, διανομής και χρήσης υδρογόνου σε όλους τους τομείς της ενέργειας, δηλαδή την ηλεκτροδότηση, την θέρμανση και τις μεταφορές. Στόχος του έργου θα είναι η κάλυψη ουσιαστικού μέρους των ανωτέρω τομέων με ενέργεια που θα προέλθει από τεχνολογίες υδρογόνου, και συγκεκριμένα.

- το 10% της ηλεκτρικής ενέργειας
- το 5% της ενέργειας για θέρμανση
- το 5% της ενέργειας για μεταφορές

Όσον αφορά την παραγωγή υδρογόνου, αυτή θα καλυφθεί από:

- πλεονάζουσα ενέργεια από υπάρχουσες εγκαταστάσεις ΑΠΕ (αιολική, ηλιακή, γεωθερμία) μέσω ηλεκτρόλυσης
- ενέργεια από πρόσθετες παρόμοιες εγκαταστάσεις ΑΠΕ που θα υλοποιηθούν στα πλαίσια του έργου με βασικό σκοπό την παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης
- βιοκαύσιμα, μέσω αναμόρφωσης σε κεντρικές ή αποκεντρωμένες μονάδες ή σε κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν με αυτό το καύσιμο / φορέα υδρογόνου (τα βιοκαύσιμα προβλέπεται να εισαχθούν στο νησί)

Η αποθήκευση υδρογόνου θα καλυφθεί κυρίως από δεξαμενές αποθήκευσης του υδρογόνου σε αέρια μορφή και σε πιέσεις των 16 bar (δεξαμενές για αποθήκευση από 1.000 έως 10.000 Nm³ H₂) ή σε φιάλες υδρογόνου των 200 bar, πίεση για την οποία θα απαιτηθεί η εγκατάσταση συμπιεστών.

Όσον αφορά την ενεργειακή χρήση του υδρογόνου αυτή θα αφορά τις εξής διαδικασίες:

- Συμπαράγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας (ΣΗΘ) μέσω χρήσης H₂ σε H/Z με καύσιμο υδρογόνο ή, κυρίως, σε κυψέλες καυσίμου τύπου PEM, DMFCs, SOFCs ή PAFC.
- Η ΣΗΘ δύναται να καλυφθεί και από βιοκαύσιμα σε συνδυασμό με κατάλληλου τύπου κυψελών καυσίμου / μονάδων αναμόρφωσης.
- Μεταφορές, μέσω χρήσης οχημάτων ειδικών χρήσεων (συλλογή απορριμμάτων, ξενοδοχεία), λεωφορείων υδρογόνου, καθώς και σκαφών για θαλάσσιες μεταφορές (βάρκες, καΐκια) τα οποία θα τροφοδοτούνται με καύσιμο υδρογόνο ή βιοκαυσίμα.

Ενδεικτικά μεγέθη για το προτεινόμενο έργο όσον αφορά τις τεχνολογίες που θα εφαρμοστούν παρουσιάζονται κατωτέρω:

- νέες εγκαταστάσεις Α.Π.Ε. εγκατεστημένης ισχύος 3MW (αιολικά, γεωθερμία, εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης βιοαερίου από ΧΥΤΑ)
- 3MW εγκατεστημένη ισχύς σε ηλεκτρολυτικές μονάδες με εκτιμώμενη ετήσια παραγωγή υδρογόνου της τάξης των 1.600.000 Nm³ ετησίως
- υποδομές για την αποθήκευση (20.000 έως 40.000 Nm³ H₂) και διανομή υδρογόνου και βιοκαυσίμων

Κεφάλαιο 5^ο – Αφαλάτωση, παραγωγή H₂ και Α.Π.Ε.

- 500kW κυψέλες καυσίμου με καύσιμο υδρογόνο ή βιοκαύσιμα
- 1 λεωφορείο, ειδικά οχήματα και βάρκες υδρογόνου ή βιοκαυσίμου με ΚΕΚ η κυψέλες καυσίμου

Ο ενδεικτικός προϋπολογισμός του έργου, συμπεριλαμβανομένων των δράσεων Ε&Α, επίδειξης, εκπαίδευσης, διάδοσης, κλπ καθώς και του ανωτέρω εξοπλισμού εκτιμάται ότι θα ανέλθει σε περίπου 20 εκατομμύρια ευρώ.

Πέραν από την εφαρμογή τεχνολογιών υδρογόνου, έμφαση θα πρέπει να δοθεί σε μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας στο νησί καθώς και στην μέγιστη απευθείας χρήση (διείσδυση) των Α.Π.Ε. για θέρμανση, ηλεκτροδότηση ή μεταφορές. Τέλος, δεν θα πρέπει να υποτιμηθεί η ποσότητα πόσιμου (απιονισμένου) νερού που θα απαιτείται για την παραγωγή των ποσοτήτων υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης, η οποία μπορεί να οδηγήσει στην ανάγκη εγκατάστασης μονάδων αφαλάτωσης από Α.Π.Ε. Αντίστοιχα μπορεί να διερευνηθεί η δυνατότητα ηλεκτρόλυσης θαλασσινού νερού (τεχνολογία ηλεκτρόλυσης χλωριούχου αλκαλίου).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο – ΑΝΑΛΥΣΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

6.1 Περιγραφή του συστήματος υπό μελέτη

Η ανάγκη εξασφάλισης φρέσκου νερού και το εκτεταμένο πρόβλημα λειψυδρίας που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στη νησιωτική Ελλάδα, καθώς και η ανάγκη σε παγκόσμιο επίπεδο για απεξάρτηση από την εκμετάλλευση ορυκτών καυσίμων, λόγω των περιβαλλοντικών επιπτώσεων τους, αποτέλεσαν την αιτία για τον καθορισμό του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τα νησιά του Αιγαίου έχουν τώρα πιο πολύ από ποτέ ανάγκη για ολοκληρωμένες λύσεις στο τρίπτυχο **ηλεκτρισμός / νερό / μεταφορές**. Μέχρι σήμερα, έχουν μελετηθεί, όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, αρκετά ξεχωριστά συστήματα που βασίζονται σε αυτή τη λογική. Προς αυτή την κατεύθυνση, προσανατολίζεται και το ολοκληρωμένο σύστημα που προτείνεται από την εργασία αυτή, συνδυάζοντας τεχνολογίες αφαλάτωσης και παραγωγής υδρογόνου.

Το προτεινόμενο, λοιπόν, σύστημα αποτελείται από μια μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης Enercon EDS SW 1200 και μία μονάδα ηλεκτρόλυσης Inergon Hydro PEM electrolyser. Αυτές οι δύο μονάδες τροφοδοτούνται αποκλειστικά από την ενέργεια που παράγουν δύο ανεμογεννήτριες Enercon E – 33. Το σύστημα που μελετάται είναι ημιαυτόνομο, δηλαδή δεν απαιτεί παροχή ενέργειας από το δίκτυο ηλεκτροδότησης της περιοχής, παρά μόνο η αντλητική διάταξη, και έχει ως σκοπό από την μία πλευρά την κάλυψη του συνόλου ή ενός μέρους των αναγκών σε πόσιμο νερό μιας περιοχής και από την άλλη την παραγωγή υδρογόνου, ικανό να καλύψει ουσιαστικό μέρος των ενεργειακών αναγκών κυρίως στις μεταφορές, αλλά και στην ηλεκτροδότηση και θέρμανση της περιοχής. Πιθανές, λοιπόν, περιοχές στις οποίες μπορεί να υλοποιηθεί το προτεινόμενο σύστημα είναι περιοχές όπως τα νησιά του Αιγαίου, που πλήττονται από έλλειψη πόσιμου νερού ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες, και η ηλεκτροδότηση τους βασίζεται σε τοπικές μονάδες παραγωγής ισχύος μικρού μεγέθους, βασισμένες στο πετρέλαιο. Προϋποθέσεις είναι να υπάρχει ικανό αιολικό δυναμικό, να υπάρχουν μόνιμες οικονομικές δραστηριότητες πέραν του τουρισμού, όπως βιομηχανική ή αλιευτική δραστηριότητα για την καλύτερη αξιοποίηση των τεχνολογιών υδρογόνου, και να υπάρχουν τοπικοί φορείς με ευαισθησία στον τομέα ενέργεια / περιβάλλον.

Η **καινοτομία** του συστήματος έγκειται στο γεγονός ότι αυτές οι δύο ξεχωριστές τεχνολογίες συνδυάζονται και μελετώνται σε ένα σύστημα μαζί, το οποίο έχει μεταβλητό σημείο λειτουργίας ώστε να ακολουθά την διακύμανση της παραγόμενης αιολικής ενέργειας. Η πλειοψηφία των μελετών και εφαρμογών έως τώρα αφορούσε ξεχωριστές εγκαταστάσεις συστημάτων αφαλάτωσης από Α.Π.Ε. και παραγωγής υδρογόνου από Α.Π.Ε., οι οποίες είχαν «περιορισμένα» σταθερά σημεία λειτουργίας. Σε αυτή την διπλωματική εργασία θα μελετήσουμε ένα κοινό σύστημα όπου και οι δύο τεχνολογίες συνδυάζονται και τροφοδοτούνται από την ίδια πηγή αιολικής ενέργειας, την οποία μπορούμε να την εκμεταλλευτούμε στο έπακρο σύμφωνα με τα μεγάλα εύρη λειτουργίας των μονάδων αντίστροφης ώσμωσης και ηλεκτρόλυσης. Επίσης σε αυτά τα ουσιαστικά τρία υποσυστήματα

(αφαλάτωση, ηλεκτρόλυση, Α/Γ), θα προσθέσουμε ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης, το οποίο αποθηκεύει το παραγόμενο πόσιμο νερό που περισσεύει από την επιτόπια κατανάλωση. Αυτό το υποσύστημα αποτελείται από την κάτω δεξαμενή, μία αντλητική διάταξη σταθερού σημείο λειτουργίας, δίκτυο σωληνώσεων και τον άνω ταμιευτήρα πόσιμου νερού.

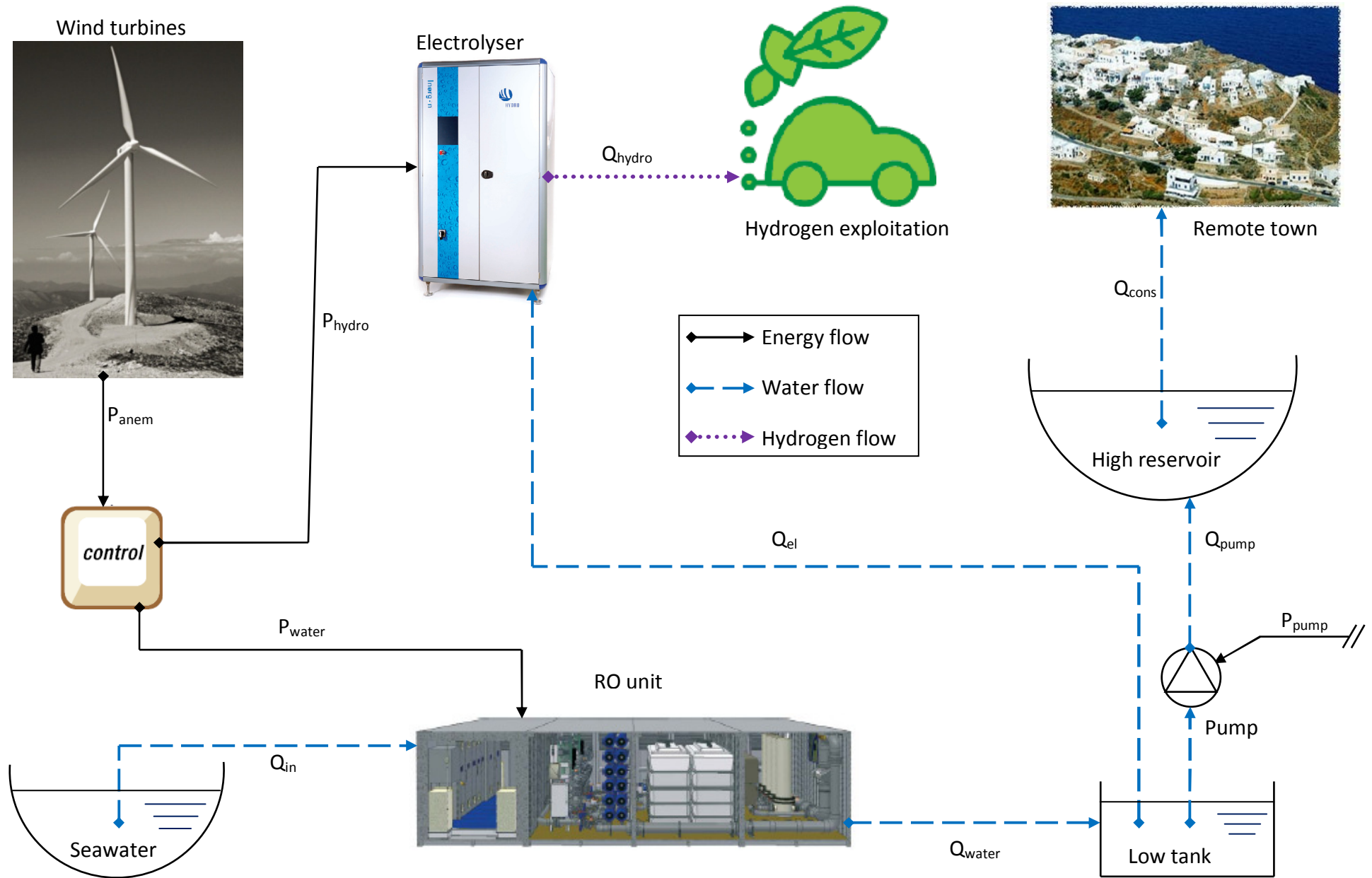
Το σύστημα μας, όπως είναι διακριτό από το παρακάτω σχεδιάγραμμα (Σχήμα 6.1), διαιρείται στα εξής επιμέρους υποσυστήματα:

- Αιολικό πάρκο
- Μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης
- Μονάδας ηλεκτρόλυσης / παραγωγής υδρογόνου
- Αντλητική διάταξη

Τα γενικά χαρακτηριστικά των υποσυστημάτων έχουν περιγραφεί εκτενώς σε προηγούμενα κεφάλαια. Επίσης στο σημείο αυτό να τονίσουμε ότι, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες δεν είναι άμεσα αξιοποιήσιμη, λόγω μη συμβατής ποιότητας. Έτσι, μέχρι τον πίνακα ελέγχου, όπου καθορίζονται οι απαιτήσεις των υποσυστημάτων και διαμοιράζεται η παραγόμενη ενέργεια, παρεμβάλλονται διάφορες ηλεκτρικές συσκευές (μετατροπείς, ανορθωτές), προκειμένου η παρεχόμενη ισχύς να χαρακτηρίζεται από ποιότητα που θα καθιστά τη λειτουργία της αφαλάτωσης, της ηλεκτρόλυσης και της άντλησης του συστήματος ασφαλή. Βέβαια, στην διπλωματική εργασία αυτή, τέτοιες συσκευές τις αντιμετωπίζουμε ως κομμάτι των υποσυστημάτων και η επιρροή τους περιορίζεται σε μια ελάχιστη μείωση του βαθμού απόδοσης των υποσυστημάτων.

Στις υποενότητες που θα ακολουθήσουν, θα γίνει ανάλυση της λογικής λειτουργίας που προτείνεται και του υπολογιστικού κώδικα που δημιουργήθηκε για να προσομοιωθεί το σύστημα. Τα υποσυστήματα, αντιμετωπίζονται ως κλειστές ενεργειακές μονάδες, λαμβάνοντας υπ' όψη μόνο τα δεδομένα εισόδου και εξόδου τους. Αναλύονται κυρίως δύο ειδών ροές, όπως φαίνεται στο σχήμα απεικόνισης του συστήματος, της ενέργειας και του ύδατος. Συνεπώς, το σύστημα μελετάται καθαρά σε ενεργειακό επίπεδο, ενώ μέσω των ενεργειακών χαρακτηριστικών της μονάδας αφαλάτωσης και ηλεκτρόλυσης, γίνεται αντιστοίχιση παρεχόμενης ενέργειας – παραγόμενου πόσιμου νερού – παραγόμενου υδρογόνου. Επίσης, γίνεται μία μελέτη της διαδικασίας της άντλησης με επιλογή διαμέτρου σωληνώσεων. Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται το γεγονός ότι η ανάλυση της μετέπειτα χρήσης του υδρογόνου κρίθηκε πως ξέφευγε από το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας και δεν αναπτύχθηκε εκτενώς.

Κεφάλαιο 6° – Ανάλυση & προσομοίωση υβριδικού συστήματος



Σχήμα 6.1 Απεικόνιση υβριδικού συστήματος αφαλάτωσης και παραγωγής υδρογόνου από Α/Γ υπό μελέτη

6.2 Περιγραφή της ενεργειακής διαχείρισης του συστήματος

Σε αυτό το σημείο θα γίνει μία αρχική περιγραφή της ενεργειακής διαχείρισης του συστήματος υπό μελέτη. Εκτενέστερη ανάλυση της φιλοσοφίας λειτουργίας θα γίνει με την περιγραφή του υπολογιστικού κώδικα που κατασκευάστηκε. Έστω σε μία δεδομένη χρονική στιγμή πνέει άνεμος ταχύτητας V_{anem} , ο οποίος μας προσδίδει ισχύ P_{anem} μέσω των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών, και οι ενεργειακές απαιτήσεις της αφαλάτωσης και της ηλεκτρόλυσης είναι P_{water} και P_{hydro} αντίστοιχα, τότε διακρίνονται εύκολα οι εξής περιπτώσεις:

1. $P_{anem} < \{P_{water}, P_{hydro}\}$

Σε αυτή την περίπτωση, η προσφερόμενη ισχύς από τις Α/Γ δεν επαρκεί για να καλύψει ούτε την αφαλάτωση ούτε την ηλεκτρόλυση, συνεπώς αυτή η ισχύς μένει ανεκμετάλλευτη.

2. $P_{hydro} < P_{anem} < P_{water}$

Τώρα η αιολική ισχύς είναι αρκετή ώστε να θέσει σε λειτουργία την ηλεκτρόλυση, όμως δεν είναι αρκετά μεγάλη ώστε να λειτουργήσει η αφαλάτωση που τίθεται σαν πρώτη προτεραιότητα. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης τροφοδοτείται με φρέσκο νερό από την κάτω δεξαμενή που βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας και παράγει $1 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2$ για κάθε λίτρο νερού σε πλήρη λειτουργία. Το παραγόμενο υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί επί τόπου είτε τροφοδοτώντας οχήματα που λειτουργούν με υδρογόνο, τα οποία θα διαθέτουν δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου τύπου μεταλλοϋδριδίων χαμηλής πίεσης πληρώσεως είτε μέσω ενός συμπιεστή να εμφυσώνεται. Σε αυτό το σημείο τονίζεται το γεγονός ότι πάντα $P_{hydro} < P_{water}$.

3. $\{P_{water}, P_{hydro}\} < P_{anem} < P_{water} + P_{hydro}$

Στην περίπτωση που η ισχύς των Α/Γ είναι μεγαλύτερη από την ζητούμενη ισχύ της μονάδας αφαλάτωσης και ηλεκτρόλυσης αλλά μικρότερη από το άθροισμά τους, ώστε να καλύψει και τα δύο υποσυστήματα, τότε δίνεται προτεραιότητα στην μονάδα αφαλάτωσης. Το παραγόμενο φρέσκο νερό αποθηκεύεται προσωρινά στην κάτω δεξαμενή χωρητικότητας 80 m^3 . Μόλις εκείνη γεμίσει τότε τίθεται σε λειτουργία η αντλία, η οποία στέλνει το πόσιμο νερό ψηλά στον άνω ταμιευτήρα χωρητικότητας 140.000 m^3 από όπου τροφοδοτείται ο πληθυσμός.

4. $P_{water} + P_{hydro} < P_{anem}$

Τότε οι ανάγκες της αφαλάτωσης και ηλεκτρόλυσης καλύπτονται πλήρως από τις Α/Γ. Οποιαδήποτε ενέργεια περισσέψει, παραμένει ανεκμετάλλευτη και απορρίπτεται, *Prej.*

Γενικά σε οποιαδήποτε περίπτωση ο άνω ταμιευτήρας γεμίσει ή είναι γεμάτος, τότε η μονάδα αφαλάτωσης διακόπτει την λειτουργία της και η διαθέσιμη περίσσεια ισχύος μένει ανεκμετάλλευτη και απορρίπτεται. Επιπλέον γίνεται κατανοητό ότι, οι μονάδες αντίστροφης ώσμωσης και ηλεκτρόλυσης στηρίζονται αποκλειστικά σε μονάδες παραγωγής ισχύος που δεν είναι σε θέση να παρέχουν σταθερή ποσότητα ισχύος κάθε χρονική στιγμή. Η διαστασιολόγηση λοιπόν, των αλληλεπιδρόμενων συνιστωσών ενός τέτοιου ημιαυτόνομου συστήματος, είναι ιδιαίτερα σημαντική και θα πρέπει να γίνει με στόχο την κάλυψη 100% των ενεργειακών αναγκών της αφαλάτωσης και μετέπειτα της ηλεκτρόλυσης. Εξάλλου, κύριος στόχος της προσομοίωσης είναι η πλήρης κάλυψη των αναγκών σε πόσιμο νερό των κατοίκων της περιοχής και σε δεύτερο επίπεδο η παραγωγή υδρογόνου προς χρήση επί τόπου.

6.3 Περιγραφή του υπολογιστικού κώδικα

6.3.1 Γενικά

Ο κώδικας «HYDRO_DES», που δημιουργήθηκε για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας, αποτελεί μια προσπάθεια για την ενεργειακή και τεχνοοικονομική προσομοίωση του ημιαυτόνομου συστήματος που περιγράφηκε προηγουμένως. Ουσιαστικά, είναι το βασικό μέρος της εργασίας και αναπτύχθηκε σε γλώσσα FORTRAN 90, εκ του μηδενός. Σχετικά με τις δυνατότητες του, είναι σε θέση να διαστασιολογεί και να αναλύει σε τεχνοοικονομικό επίπεδο με μεγάλη ανάλυση, συστήματα αποτελούμενα από μονάδες αφαλάτωσης και μονάδες παραγωγής υδρογόνου, οι οποίες τροφοδοτούνται αποκλειστικά από ανεμογεννήτριες. Ο χρήστης μπορεί, λοιπόν, εισάγοντας τα ανεμολογικά και δημογραφικά δεδομένα μιας περιοχής, αλλά και δίνοντας τα χαρακτηριστικά των επί μέρους υποσυστημάτων (ονομαστικές ισχύεις, βαθμοί απόδοσης, χωρητικότητες ταμιευτήρων κλπ), να αποκτήσει μια πρώτη άποψη για το αν το σύστημα, των δοθέντων χαρακτηριστικών, ικανοποιεί τις ανάγκες της συγκεκριμένης περιοχής σε πόσιμο νερό και αν κρίνεται η εγκατάσταση του συστήματος, οικονομικά, συμφέρουσα.

Σε γενικές γραμμές, ο υπολογιστικός κώδικας μπορεί να διαιρεθεί στα εξής κομμάτια:

- Εισαγωγή δεδομένων: χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος Α/Γ, αφαλατωτήρα, ηλεκτρολύτη, τεχνικοί και οικονομικοί παράμετροι, προφίλ κατανάλωσης και πληθυσμού, χρονοσειρές ανέμου.
- Υπολογισμός συνολικών καταναλώσεων του πληθυσμού ανά 10 min για ένα έτος.
- Υπολογισμός παραγόμενης ισχύος από Α/Γ από τις χρονοσειρές ανέμου, βήματος 10min, με τη βοήθεια υπορουτίνας γραμμικής παρεμβολής επί της χαρακτηριστικής καμπύλης ισχύος των Α/Γ.
- Ακολουθεί η ενεργειακή διαχείριση του συστήματος, όπως περιγράφηκε ανωτέρω, και υπολογίζονται διάφορα μεγέθη ανά χρονικό βήμα 10 min.

- Μετά την ολοκλήρωση του χρονικού διαστήματος προσομοίωσης, το οποίο είναι ένα έτος, υπολογίζονται ορισμένα ετήσια αθροιστικά μεγέθη και διάφοροι δείκτες αξιολόγησης. Ακολουθεί καταχώριση όλων των αποτελεσμάτων.

Μία σημαντική διαφοροποίηση αυτής της μελέτης σε σχέση με άλλες αντίστοιχες διπλωματικές εργασίες, είναι το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές χρονοσειρές ανέμου, σε αντίθεση με την συνήθη χρήση μεθόδων πιθανοτήτων, για την ενεργειακή προσομοίωση του συστήματος. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από ανεμολογικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο νησί της Ίου από την 1^η Σεπτεμβρίου 1999 έως την 31^η Αυγούστου 2000. Με την εισαγωγή χρονοσειρών δίνεται η δυνατότητα της ακριβούς παρακολούθησης της μεταβολής οποιωνδήποτε μεγεθών κατά τη διάρκεια του έτους και να ληφθούν αποφάσεις σχετικά με τη λογική και τη φιλοσοφία λειτουργίας του συστήματος. Από την άλλη μεριά όμως, ορισμένες μελέτες έχουν δείξει ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις δύο μεθόδους [Κάραλης, 2007].

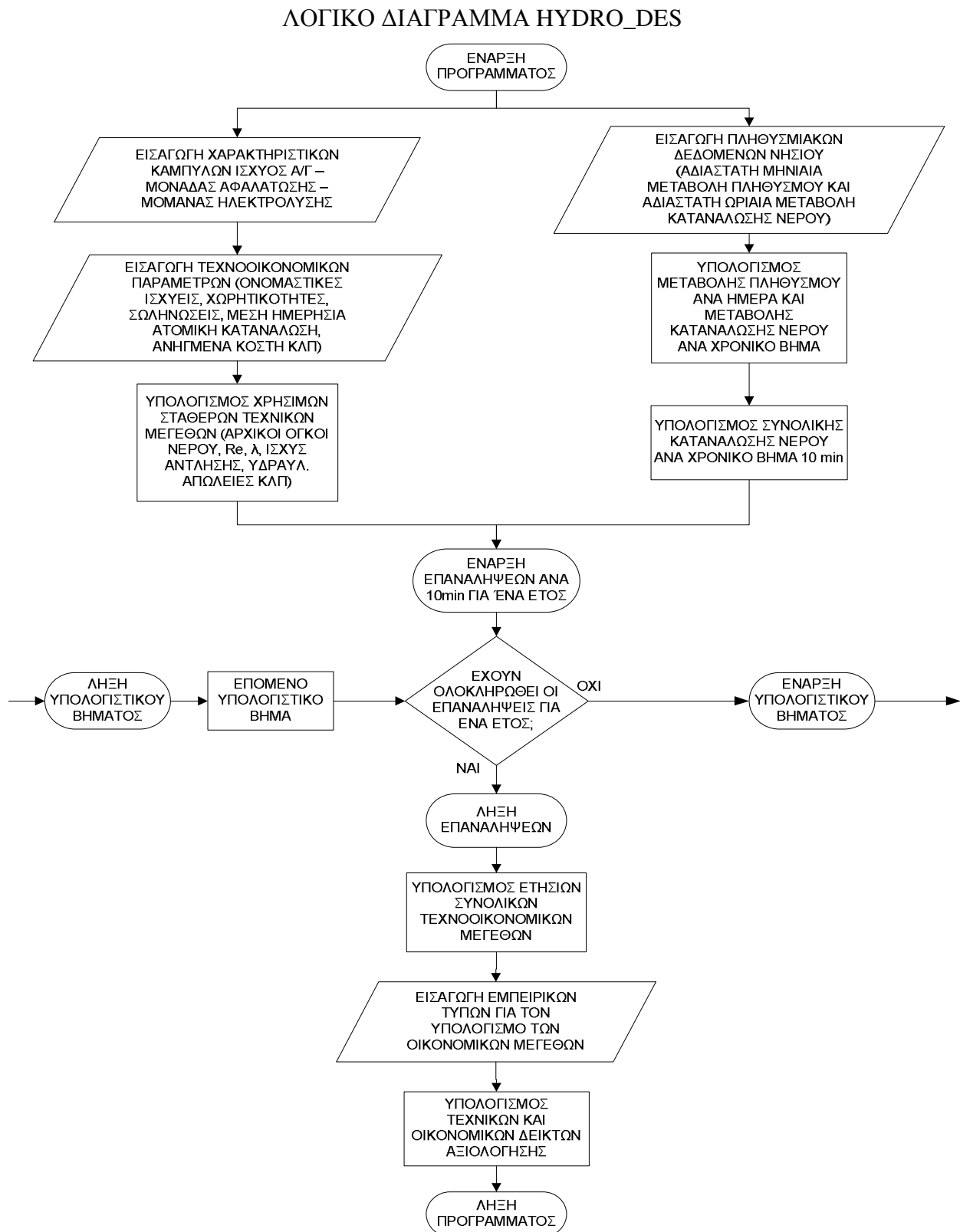
Ο υπολογιστικός κώδικας που αναπτύχθηκε, αποτελείται από ένα σημαντικό πλήθος παραμέτρων και δίνει την δυνατότητα επιπλέον εκτενούς παραμετρικής ανάλυσης, δηλαδή την επανάληψη της παραπάνω διαδικασίας αλλάζοντας κάθε φορά την τιμή των κύριων παραμέτρων του συστήματος. Έτσι μπορούμε να εντοπίσουμε τις παραμέτρους για τις οποίες παίρνουμε τα βέλτιστα αποτελέσματα. Οι **κύριοι παράμετροι**, στις οποίες θα μπορούσε να βασιστεί μία παραμετρική ανάλυση είναι:

- οι εγκατεστημένες ισχύεις ανεμογεννητριών - μονάδας αφαλάτωσης – μονάδας ηλεκτρόλυσης – αντλίας,
- οι χωρητικότητες των δεξαμενών ,
- το μήκος και η διάμετρος των σωληνώσεων,
- οι τιμές πώλησης νερού – υδρογόνου
- και ο πληθυσμός.

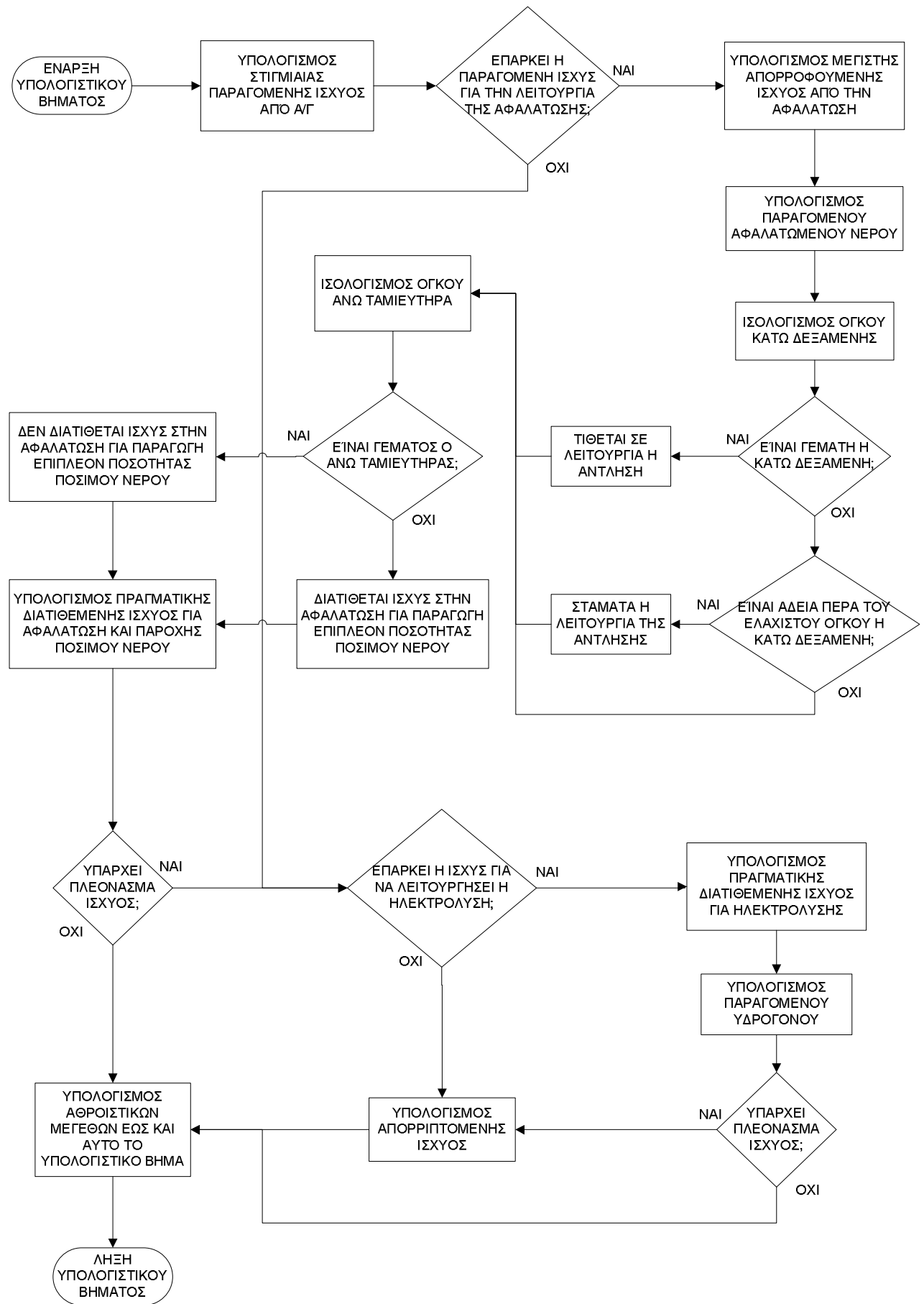
Κλείνοντας την εισαγωγική αυτή υποενότητα, εκτιμάται πως μία εκτενής παραμετρική ανάλυση θα μπορούσε να αποτελέσει το αντικείμενο για περαιτέρω έρευνα, η οποία ξεφεύγει δυστυχώς από τα όρια αυτής της παρούσας μελέτης. Επίσης, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι ο κώδικας επιδέχεται βελτίωσης, επέκτασης ή και αλλαγών. Μάλιστα, θεωρείται ότι με κάποιες αλλαγές, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συστήματα διαφορετικής δομής και λογικής. Ας ελπίσουμε, ότι θα αποτελέσει τη βάση και το εργαλείο για περαιτέρω έρευνα.

6.3.2 Λογικό διάγραμμα

Το λογικό διάγραμμα του προγράμματος αναπτύχθηκε με την βοήθεια της εφαρμογής MICROSOFT VISIO.



Κεφάλαιο 6^ο – Ανάλυση & προσομοίωση υβριδικού συστήματος



Σχήμα 6.2 Λογικό διάγραμμα του υπολογιστικού κώδικα

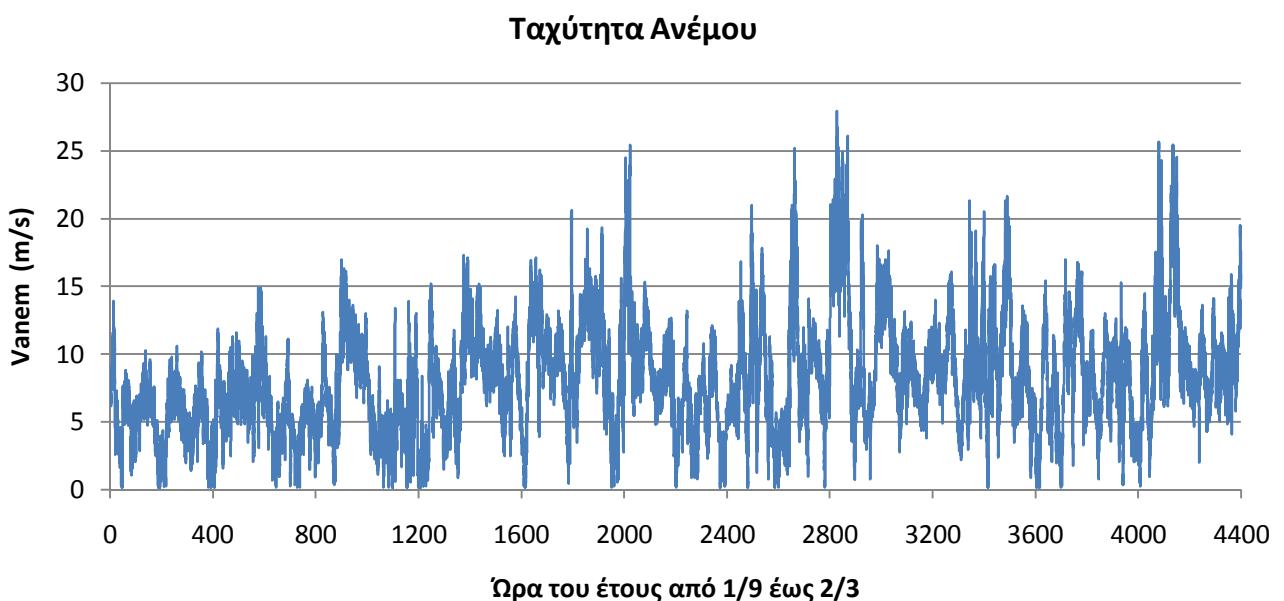
6.4 Δεδομένα εισόδου

6.4.1 Γενικά

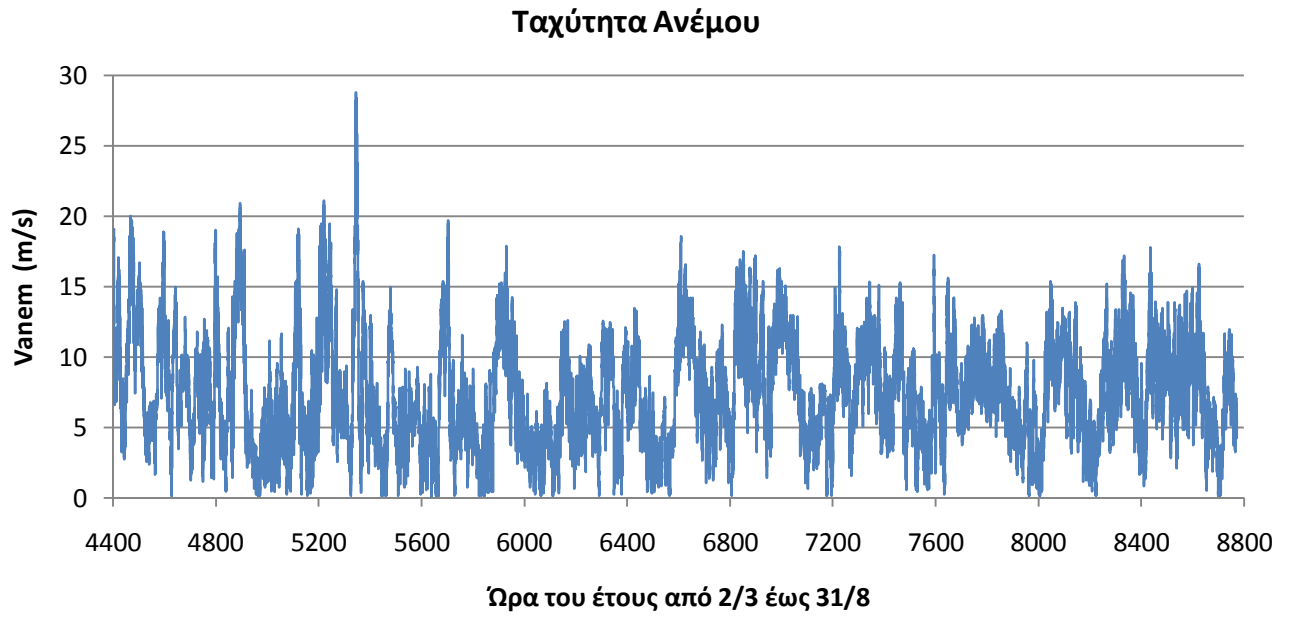
Στην παρούσα υποενότητα, θα γίνει αναφορά στα δεδομένα που απαιτούνται και τους υπολογισμούς που γίνονται, πριν εκτελεστεί η φιλοσοφία λειτουργίας του συστήματος. Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι η προσομοίωση έχει διάρκεια ενός έτους με χρονικό βήμα δέκα λεπτών. Αυτό σημαίνει ότι έχει γίνει διακριτοποίηση του έτους σε $NSTEP = 52633$ χρονικά διαστήματα (συγκεκριμένα 365,5 ημέρες). Οπότε τα στιγμιαία μεγέθη X , θα ακολουθούν τον εξής συμβολισμό $X(L)$, όπου $L = 1, 2, \dots, 52633$, το δεκάλεπτο του έτους. Για την ευκολότερη οπτική κατανόηση των σχημάτων που θα ακολουθήσουν, έχουν χρησιμοποιηθεί οι ώρες του έτους στον άξονα του χρόνου και όχι τα χρονικά βήματα (δεκάλεπτα).

6.4.2 Ταχύτητα ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου $VANEM(L)$ είναι το βασικό μέγεθος για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες και δίνεται σε μονάδες m/s. Η ταχύτητα του ανέμου που θα χρησιμοποιηθεί, έχει προκύψει από μετρήσεις σε ιστίο που πραγματοποιήθηκαν στο νησί της Ίου από την 1^η Σεπτεμβρίου 1999 έως την 31^η Αυγούστου 2000. Η μέση ταχύτητα του ανέμου για το έτος στην περιοχή είναι 7,77 m/s. Στα επόμενα σχήματα παρατηρούμε τις εν λόγω χρονοσειρές του ανέμου, στο πρώτο από την 1^η Σεπτεμβρίου έως την 2^η Μαρτίου (0 – 4400 ώρες) για το πρώτο εξάμηνο και από την 2^η Μαρτίου έως 31^η Αυγούστου (4400 – 8772 ώρες) για το δεύτερο εξάμηνο.

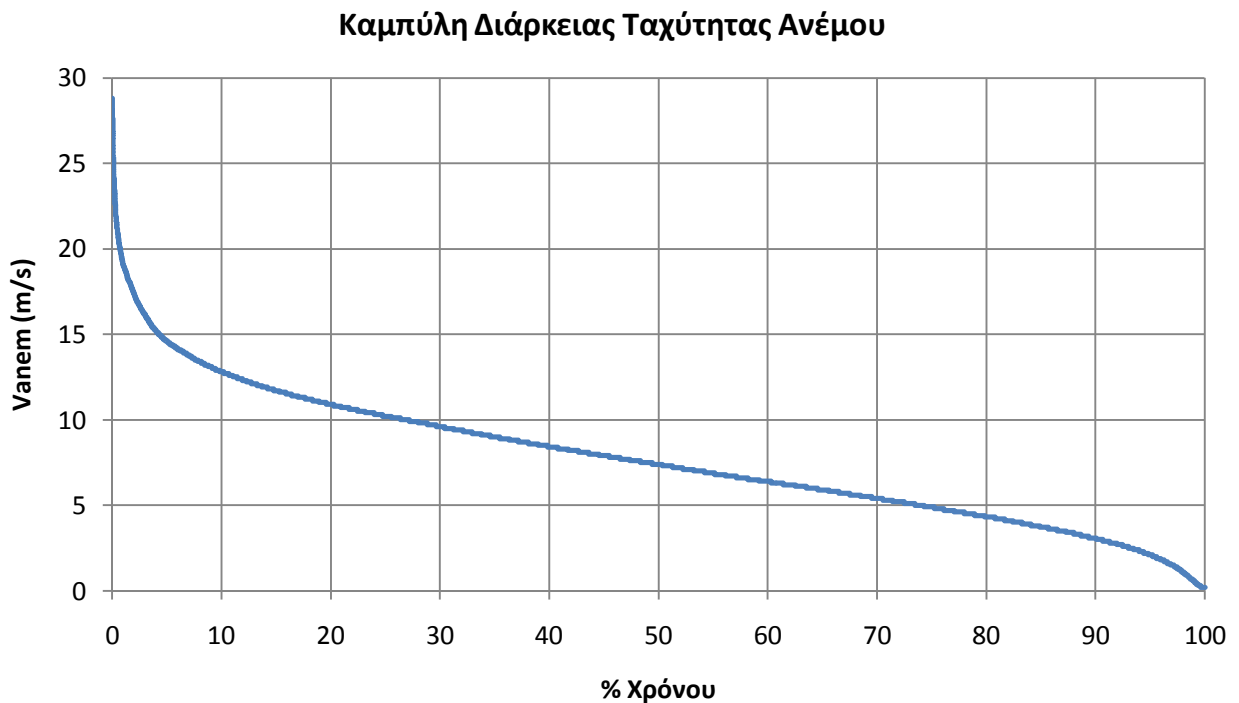


Σχήμα 6.3 Ταχύτητα ανέμου συναρτήσει ωρών του έτους από 1/9 έως 2/3



Σχήμα 6.4 Ταχύτητα ανέμου συναρτήσει ωρών του έτους από 2/3 έως 31/8

Στο σχήμα που ακολουθεί, παρατηρούμε και την καμπύλη διάρκειας της ταχύτητας του ανέμου για αυτό το έτος.



Σχήμα 6.5 Καμπύλη διάρκειας παροχής ταχύτητας ανέμου

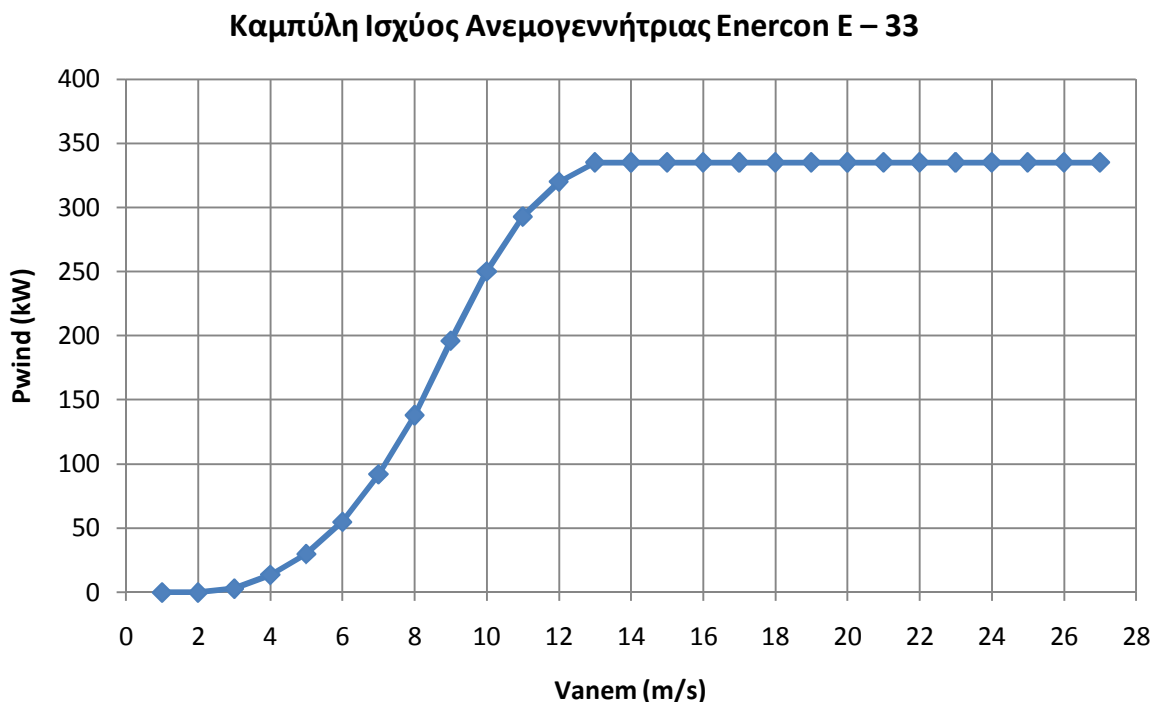
6.4.3 Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας

Επιλέχθηκε μια πρότυπη ανεμογεννήτρια και μέσω της καμπύλης ισχύος της, υπολογίζεται η παραγόμενη ισχύς ανά χρονικό βήμα. Αναλυτικότερα, για μια δεδομένη ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του δρομέα $VANEM(L)$, έχουμε αντιστοιχία με μια συγκεκριμένη τιμή της παραγόμενης ισχύος $PWIND(L)$ από την μία ανεμογεννήτρια, που προκύπτει μέσω γραμμικής παρεμβολής, στην καμπύλη ισχύος της μίας εκ των δύο όμοιων ανεμογεννητριών που έχουμε επιλέξει να εγκαταστήσουμε. Βέβαια, η τιμή αυτή δεν αποτελεί την πραγματική παρεχόμενη ισχύ προς τα υπόλοιπα υποσυστήματα μας, λόγω διαφόρων απωλειών κατά τη μεταφορά της στις μονάδες. Έτσι, αν θεωρήσουμε $WINDEFF$, τον συνολικό βαθμό απόδοσης του αιολικού μας πάρκου, και $NANEM$, τον αριθμό εγκατεστημένων Α/Γ, τότε η **συνολική παραγόμενη ισχύς** ανά δεκάλεπτο από το αιολικό πάρκο σε kW θα είναι:

$$PANEM(L) = PWIND(L) * NANEM * WINDEFF$$

Η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο **ENERCON E – 33**, ονομαστικής ισχύος 335 kW, ύψους δρομέα 44 – 50 m και διαμέτρου 33,4 m, με την καμπύλη ισχύος του σχήματος 6.6. Η ειδική κατασκευή της συγκεκριμένης Α/Γ μας επιτρέπει την άνετη μεταφορά της με πλοία και την αποδοτική εγκατάσταση της ακόμα και στις πιο δυσπρόσιτες περιοχές με την βοήθεια μόλις ενός μεσαίου μεγέθους γερανού. Το γεγονός αυτό, καθιστά το συγκεκριμένο μοντέλο ENERCON E – 33, μία πρώτης τάξεως επιλογή για τα άνυδρα νησιά του Αιγαίου.

Όσον αφορά τον **β.α.**, $WINDEFF$, επιλέγεται τιμή 0,96, ενώ ο **αριθμός των Α/Γ**, $NANEM$, είναι 2.



Σχήμα 6.6 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος ENERCON E – 33

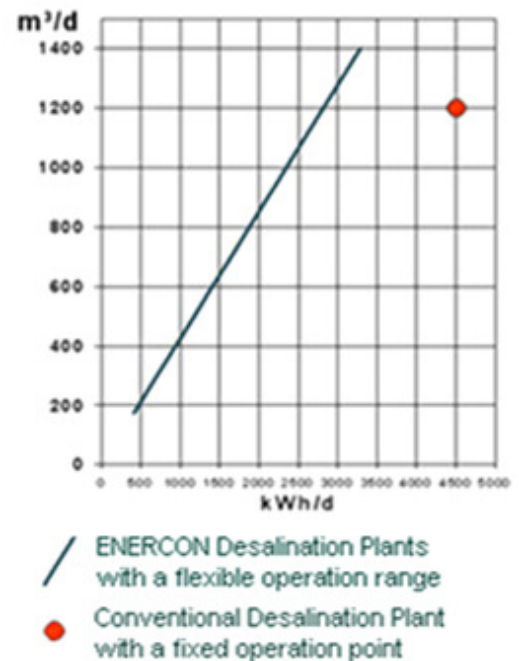
6.4.4 Χαρακτηριστικά μονάδας αντίστροφης ώσμωσης

Η μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης που επιλέχθηκε, είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να εκμεταλλεύεται στο μέγιστο την παρεχόμενη ισχύ από τις ανεμογεννήτριες. Δεν έχει σταθερό σημείο λειτουργίας και η παραγωγή πόσιμου νερού μπορεί να κυμαίνεται από το 12,5% έως το 100% της ονομαστικής δυναμικότητάς της, μεταβάλλοντας την ταχύτητα των πιστονιών της. Αυτό έχει κυρίως δύο πλεονεκτήματα: Πρώτον, είναι δυνατή η λειτουργία της μέσα σε χρονικά μεταβαλλόμενη παροχή ισχύος, όπως παρέχεται από το αιολικό μας πάρκο. Δεύτερον, η παραγωγή μπορεί να διακυμανθεί ανάλογα με την ζήτηση νερού χωρίς να χρειαστεί να διακοπεί η λειτουργία της. Τα πλεονεκτήματα αυτά, καθιστούν το συγκεκριμένο μοντέλο αντίστροφης ώσμωσης, μία εξαιρετική επιλογή για την διασύνδεσή της με σύστημα Α/Γ.

Ουσιαστικά πρόκειται για το μοντέλο **ENERCON EDS SW 1200**, ονομαστικής παροχής 1400 m³/day (58,33 m³/hr) πόσιμου νερού και ονομαστικής ισχύος 135,4 kW, όπως φαίνεται και από το διπλανό σχήμα. Τα 1400 m³/day πόσιμου νερού αντιστοιχούν σε κατανάλωση 3250 kWh/day, δηλαδή 135,4 kW. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο της αφαλάτωσης, πλέον, οι σύγχρονες μονάδες αφαλάτωσης με μέθοδο αντίστροφης ώσμωσης και σύστημα ανάκτησης ενέργειας, έχουν ειδική κατανάλωση ενέργειας της τάξεως 2 – 4 kWh/m³. Στη δικιά μας περίπτωση, η **ειδική κατανάλωση ενέργειας** των μοντέλων της ENERCON είναι μόλις:

$$\frac{3250}{1400} = 2,32 \text{ kWh/m}^3.$$

Η εταιρεία ENERCON προσφέρει πολλές μονάδες διαφορετικής δυναμικότητας, όπως φαίνεται από τον επόμενο πίνακα, για την κάλυψη διαφορετικών αναγκών. Η αύξηση της δυναμικότητας βασίζεται στην προσθήκη επιπλέον μεμβρανών αντίστροφης ώσμωσης.

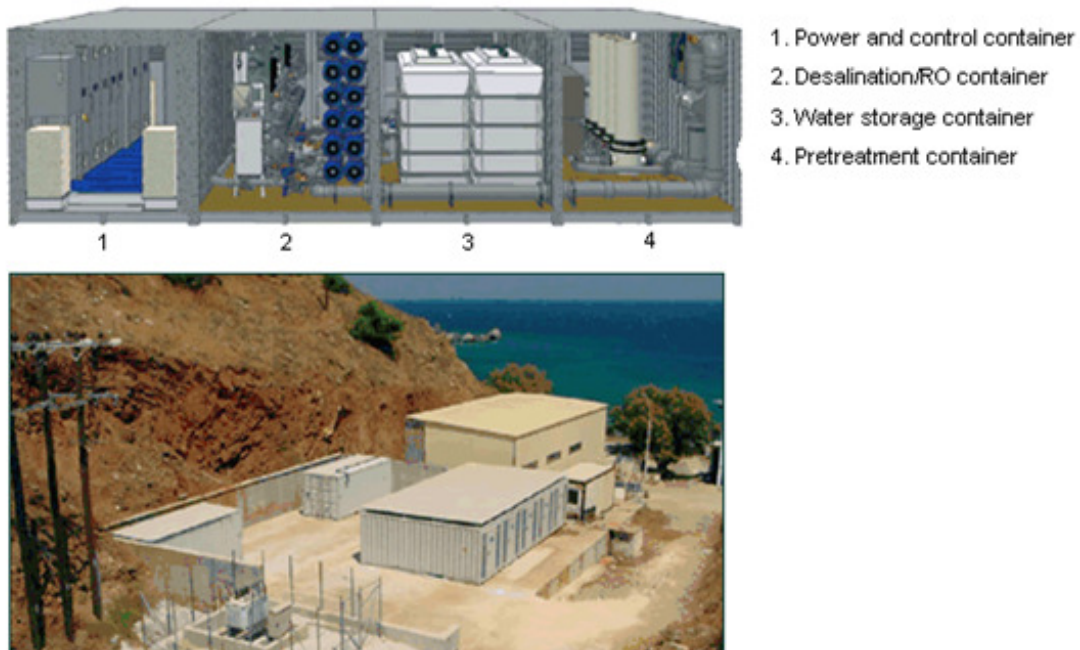


Σχήμα 6.7 Χαρακτηριστικό εύρος λειτουργίας μονάδας αφαλάτωσης

Type	Type of water	Capacity in m ³ /day	Number of RO units	Number of 20'' Containers	Pumps per RO unit
EDS SW 300	Seawater	175 - 350	1	4	1
EDS SW 600	Seawater	175 - 700	2	4	1
EDS SW 900	Seawater	175 - 1050	3	5	1
EDS SW 1200	Seawater	175 - 1400	4	5	1
EDS BW 600	Brackish	350 - 700	1	4	1
EDS BW 1200	Brackish	350 - 1400	2	5	1
EDS BW 1800	Brackish	350 - 2100	3	6	1
EDS BW 2400	Brackish	350 - 2800	4	7	1

Πίνακας 6.1 Συστήματα αφαλάτωσης ENERCON

Η μονάδα αυτή, εκτός του πολύ χρήσιμου μεταβλητού σημείου λειτουργίας, είναι εξοπλισμένη με ενσωματωμένο σύστημα ανάκτησης ενέργειας με πιστόνια, ακριβώς όπως περιγράφηκε σε προηγούμενη υποενότητα. Επίσης, είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και διαθέτει σύστημα ελέγχου εξ' αποστάσεως. Επιπλέον, μία τέτοια μονάδα αντίστροφης ώσμωσης είναι κατασκευασμένη και διαιρεμένη σε 4 ή 5 containers, όπως φαίνεται και από το επόμενο σχήμα, για πιο άνετη μεταφορά και ευκολότερη εγκατάσταση κατά βούληση στην περιοχή. Έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μην χρειάζεται ανέγερση νέων κτιρίων για την στέγαση και προστασία της.

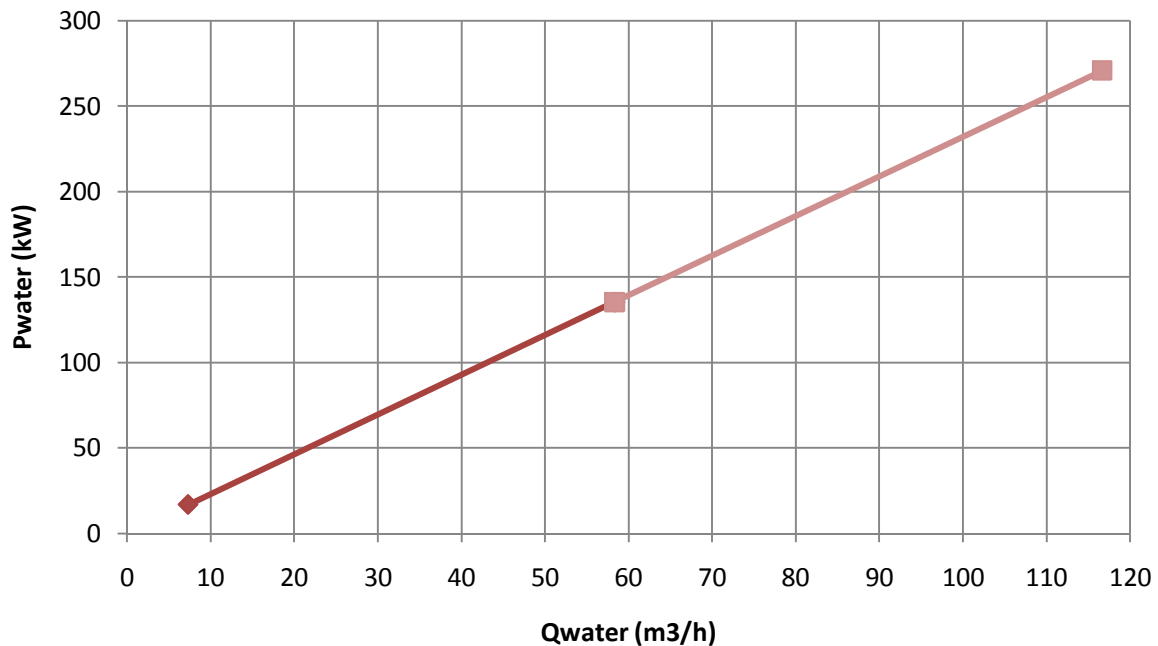


Σχήμα 6.8 Μονάδα αφαλάτωσης ENERCON EDS SW

Στη προσομοίωση μας χρησιμοποιήθηκαν δύο όμοιες μονάδες ENERCON EDS SW 1200, συνδεδεμένες εν σειρά, για διπλασιασμό της παραγωγής και καλύτερη κάλυψη της ζήτησης φρέσκου νερού. Έτσι, επιτυγχάνεται ο μέγιστος βαθμός εκμετάλλευσης της μονάδας. Στο εξής, θα λογίζονται και οι δύο μονάδες σαν ένα ενιαίο σύστημα αφαλάτωσης με **ονομαστική παροχή** $2800 \text{ m}^3/\text{day}$ ($116,66 \text{ m}^3/\text{hour}$) πόσιμου νερού και **ονομαστική ισχύς** $270,8 \text{ kW}$. Στο παρακάτω σχήμα 6.9 παρατηρούμε την τελική χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος – παροχής της διπλής μονάδας αντίστροφης ώσμωσης, όπως την θέσαμε. Με διαφορετικό χρώμα φαίνεται το εύρος λειτουργίας της πρώτης και της δεύτερης μονάδας, που στο εξής θα θεωρούνται μία ενιαία.

Έτσι λοιπόν, από την συνολική στιγμιαία διαθέσιμη αιολική ισχύ $PANEM(L)$, ένα κομμάτι της παρέχεται στην μονάδα αφαλάτωσης, που έχει προτεραιότητα έναντι της ηλεκτρόλυσης. Με δεδομένη την διατιθέμενη ισχύ $PWATER(L)$ πλέον, μέσω της παρακάτω καμπύλης και με τη βοήθεια γραμμικής παρεμβολής μεταξύ του ανώτατου και κατώτατου σημείου λειτουργίας, προκύπτει η στιγμιαία παροχή πόσιμου νερού $QWATER(L)$ σε m^3/hr , όπου L το χρονικό βήμα. Το φρέσκο νερό αποθηκεύεται προσωρινά σε προσκείμενη δεξαμενή, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια.

Καμπύλη Ισχύος – Παροχής Αφαλατωτήρα



Σχήμα 6.9 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος – παροχής νερού μονάδας αφαλάτωσης

6.4.5 Χαρακτηριστικά μονάδας ηλεκτρόλυσης

Όσον αφορά τη μονάδα παραγωγής υδρογόνου, επιλέχθηκε μία μονάδα ηλεκτρόλυσης η οποία χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά ευέλικτο σημείο λειτουργίας, όπως ακριβώς συμβαίνει και με την μονάδα αφαλάτωσης. Χρησιμοποιήθηκε ο **INERGON PEM ELECTROLYSER** της NORSK HYDRO, με ονομαστική παραγωγή 10 Nm³/hr σε πίεση 30 bar, χωρίς συμπιεστή.

Ο συγκεκριμένος ηλεκτρολύτης βασίζεται στην τεχνολογία μεμβρανών ανταλλαγής πρωτονίων (PEM), η οποία είναι η αντίστροφη αντίδραση της κυψέλης καυσίμου PEM, και μπορεί να λειτουργήσει από το 5% έως το 100% της ονομαστικής του παροχής. Το μεγάλο εύρος λειτουργίας του, τον καθιστά κατάλληλο για διασύνδεση με τροφοδότηση μεταβλητής παροχής ισχύος, όπως στην περίπτωση που εξετάζεται με τις Α/Γ, και για εφαρμογή σε σταθμούς εφοδιασμού υδρογόνου επί τόπου. Έτσι, μεγιστοποιείται ο βαθμός εκμετάλλευσής του. Η **ειδική κατανάλωση ενέργειας** αυτής της μονάδας είναι μόλις 4,4 kWh/ Nm³. Είναι ειδικά σχεδιασμένη ώστε να λειτουργεί αυτόνομα και η παραγωγή υδρογόνου της να μπορεί να ελεγχθεί, είτε μέσω εξωτερικού σήματος, επί τόπου ή εξ' αποστάσεως, είτε αυτόματα, μετρώντας την πίεση στον αγωγό εξόδου. Όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός είναι συναρμολογημένος μέσα στην καμπίνα της μονάδας.



Σχήμα 6.10 Μονάδα ηλεκτρόλυσης INERGON

Για λόγους ασφαλείας, η καμπίνα της μονάδας ηλεκτρόλυσης είναι εξοπλισμένη με ανιχνευτή καπνού, θερμοκρασίας και διαρροής υδρογόνου. Σε περίπτωση είτε διαρροής, είτε υπερθέρμανσης, το σύστημα αδρανοποιείται αυτομάτως. Επιπλέον, ο εργονομικός και ασφαλής σχεδιασμός του καθιστά δυνατή την τοποθέτησή του σε οποιοδήποτε περιβάλλον και συνθήκες.

Συνολικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μονάδας ηλεκτρόλυσης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

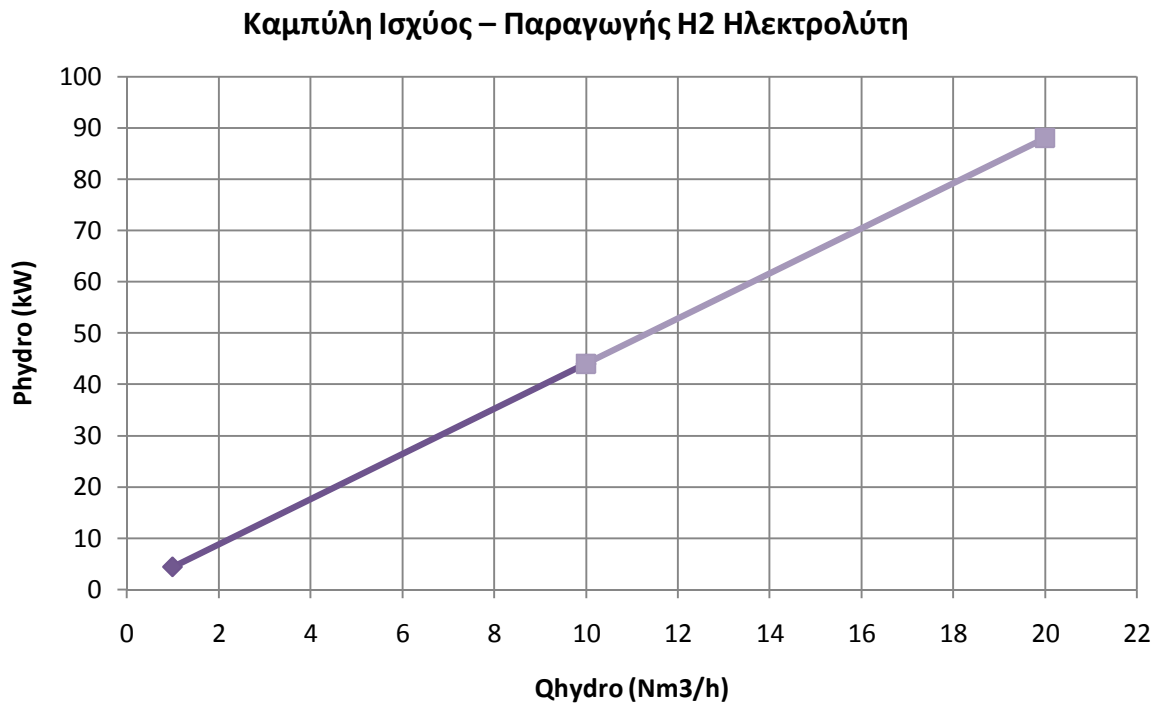
Parameter	Value	Units
Hydrogen maximum output capacity	10	Nm ³ /h
Oxygen maximum output capacity	5	Nm ³ /h
Power consumption	4.4	kWh/Nm ³
Hydrogen gas purity	99.9 +/- 0.1	% (balance is O ₂)
Hydrogen outlet pressure	30	bar g
Electrolyte	Pure water	
Operation	5–100	% of full capacity
Feed water consumption	1	l/Nm ³
Hydrogen gas purity after purification	< 5 ppm	O ₂ in H ₂

Πίνακας 6.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά μονάδας ηλεκτρόλυσης INERGON

Στη προσομοίωση μας χρησιμοποιήθηκαν, παρόμοια με την μονάδα αφαλάτωσης, δύο όμοιες μονάδες INERGON PEM ELECTROLYSER, συνδεδεμένες εν σειρά, για διπλασιασμό της παραγωγής υδρογόνου και κυρίως, για μεγαλύτερη εκμετάλλευση της παρεχόμενης αιολικής ισχύος. Στο εξής, θα λογίζονται και οι δύο μονάδες σαν ένα ενιαίο σύστημα ηλεκτρόλυσης με **ονομαστική παροχή 20 Nm³/hr υδρογόνου και ονομαστική ισχύς 88 kW**. Στο παρακάτω σχήμα 6.11 παρατηρούμε την τελική χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος – παροχής της διπλής μονάδας ηλεκτρόλυσης, όπως την θέσαμε. Επίσης, με διαφορετικό χρώμα φαίνεται το εύρος λειτουργίας της πρώτης και της δεύτερης μονάδας, που στο εξής θα θεωρούνται μία ενιαία και αυτές.

Συνεπώς, από την συνολική στιγμιαία διαθέσιμη αιολική ισχύ *PANEM(L)*, ένα κομμάτι της παρέχεται στην μονάδα αφαλάτωσης *PWATER(L)* πρωτίστως, και δευτερευόντως, το υπόλοιπο παρέχεται στην μονάδα ηλεκτρόλυσης. Με δεδομένη την διατιθέμενη ισχύ *PHYDRO(L)* για ηλεκτρόλυση πλέον, μέσω της παρακάτω καμπύλης και με τη βοήθεια γραμμικής παρεμβολής μεταξύ του ανώτατου και κατώτατου σημείου λειτουργίας, προκύπτει η στιγμιαία παραγωγή υδρογόνου *QHYDRO(L)* σε m³/hr, όπου L το χρονικό βήμα.

Το παραγόμενο υδρογόνο προορίζεται κυρίως για επί τόπου χρήση, τροφοδοτώντας οχήματα (scooter, αυτοκίνητα, σκάφη, ακόμα και minibus, ισχύος από 0,5 έως 5kW) που λειτουργούν με κυψέλες υδρογόνου PEM. Αυτά τα οχήματα διαθέτουν δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου τύπου μεταλλοϋδριδίων χαμηλής πίεσης πληρώσεως. Διαφορετικά μπορεί μέσω ενός συμπίεστη να εμφυαλώνεται για μελλοντική χρήση.



Σχήμα 6.11 Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος – παραγωγής H₂ μονάδας ηλεκτρόλυσης

6.4.6 Χαρακτηριστικά συστήματος αντλησιοταμίευσης

Όσον αφορά το υποσύστημα της αντλησιοταμίευσης, όπως έχουμε προαναφέρει, το παραγόμενο πόσιμο νερό αποθηκεύεται προσωρινά στην κάτω δεξαμενή, η οποία μόλις γεμίσει, διοχετεύει την ποσότητα νερού στον άνω ταμιευτήρα. Ο άνω ταμιευτήρας είναι κατάλληλου μεγέθους, ώστε να μην αδειάζει ποτέ. Από αυτόν τον ταμιευτήρα υδροδοτείται απευθείας ολόκληρη η περιοχή.

Επιπλέον, το **καθαρό ύψος άντλησης** θεωρήθηκε σταθερό και ίσο με $ALTITUDE = 250\ m$, σαν ένα τυπικό υψόμετρο όπου θα βρίσκεται ο άνω ταμιευτήρας για να υδροδοτεί την παράκτια πόλη του νησιού. Το **συνολικό μήκος των σωληνώσεων** θεωρήθηκε ίσο με $LENGTH = 2000\ m$, από την κάτω δεξαμενή έως τον άνω ταμιευτήρα. Να σημειώσουμε εδώ ότι η μελέτη αυτή, συμπεριλαμβάνει και υπολογισμούς που έχουν να κάνουν με τη διάμετρο των σωληνώσεων.

Οι **χωρητικότητες των ταμιευτήρων** διαστασιολογήθηκαν μετά από διάφορες δοκιμές ως εξής:

Η **κάτω δεξαμενή** είναι συνολικού μεγέθους $VLOW = 80\ m^3$, έτσι ώστε να αποφύγουμε παραπάνω από 5 εκκινήσεις της αντλίας ανά ημέρα ($PUMPSTARTAVE < 5$). Επίσης, ορίστηκε ένα ελάχιστο όριο πληρώσεως του κάτω ταμιευτήρα $VPERCLOW = 10\%$ της συνολικής χωρητικότητας του, κάτω από την οποία τίθεται σε λειτουργία η άντληση. Επίσης ορίζεται και ο αρχικός όγκος νερού που υπάρχει στην δεξαμενή, ο οποίος θεωρείται ίσος με τον ελάχιστο επιτρεπτό, δηλαδή:

$$VLINIT = VLOW * VPERCLOW \Rightarrow$$

$$VLINIT = 80 * 0,10 = 8 \text{ m}^3$$

Ο **άνω ταμιευτήρας** είναι μέγιστης χωρητικότητας $VHIGH = 140.000 \text{ m}^3$, με σκοπό να καλύπτει 100% τις καταναλώσεις του πληθυσμού του νησιού. Για την αρχή της προσομοίωσης ορίζεται το αρχικό ποσοστό πλήρωσης $VPERCHIGH = 25\%$, οπότε η αρχική ποσότητα νερού στον άνω ταμιευτήρα είναι ίση με:

$$VHINIT = VHIGH * VPERCHIGH \Rightarrow$$

$$VHINIT = 140.000 * 0,25 = 35.000 \text{ m}^3$$

Για την επιλογή της διαμέτρου των σωληνώσεων, τονίζεται ότι ερευνήθηκε κυρίως ο αγωγός κατάθλιψης καθώς το μήκος του αγωγού αναρρόφησης θεωρήθηκε αμελητέο σε σχέση με τις κατάθλιψης. Η **σταθερή παροχή πόσιμου νερού** διακινούμενη από την κάτω δεξαμενή στον άνω ταμιευτήρα εκτιμήθηκε ίση με $PUMPSUPPLY = 117 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0325 \text{ m}^3/\text{s}$, ένα «κλικ» δηλαδή μεγαλύτερη από την ον. παροχή της μονάδας αφαλάτωσης που είναι $116,7 \text{ m}^3/\text{h}$.

Οι διάμετροι σε μία σωλήνωση καθορίζονται με οικονομοτεχνικά κριτήρια. Στην περίπτωση μίας απλής αντλητικής εγκατάστασης, αρκεί η εφαρμογή απλούστερων κριτηρίων, όπως για παράδειγμα ο καθορισμός της μέσης ταχύτητας στην σωλήνωση συναρτήσει της παροχής. Ο παρακάτω πίνακας μας παρέχει τις συνιστώμενες τιμές της ταχύτητας και της εσωτερικής διαμέτρου στον σωλήνα κατάθλιψης, σύμφωνα με την διακινούμενη παροχή [Παπαντώνης, 1998].

Q (m ³ /h)	2,5	7,0	21	56	140	270	660	2050
c (m/sec)	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,9
DN (mm)	25	40	65	100	150	200	300	500

Πίνακας 6.3 Συνιστώμενες τιμές ταχύτητας και διαμέτρου στον σωλήνα κατάθλιψης

Η συνιστώμενη μέση ταχύτητα της ροής του πόσιμου νερού, σύμφωνα με γραμμική παρεμβολή στον παραπάνω πίνακα προκύπτει ίση με $2,15 \text{ m/s}$ και, παρομοίως, η συνιστώμενη εσωτερική διάμετρος ίση με $136,3 \text{ mm}$. Όμως οι διάμετροι των σωλήνων είναι τυποποιημένες. Στον πίνακα 6.4 δίνονται οι ονομαστικές εξωτερικές τυποποιημένες διαμέτροι χαλύβδινων σωληνώσεων κατά DIN 2440, καθώς και οι αντίστοιχες τιμές του πάχους τους. Παρατηρούμε πώς η τελική επιλογή θα γίνει ανάμεσα στην σωλήνωση DN 125, εξωτερικής διαμέτρου $139,65 \text{ mm}$ κατά μέσο όρο, πάχους $4,85 \text{ mm}$ και λόγου μάζας προς μήκος $16,7 \text{ kg}$ ανά μέτρο εγκατεστημένης σωλήνωσης, και στην σωλήνωση DN 150, εξωτερικής διαμέτρου $165,2 \text{ mm}$, πάχους $4,85 \text{ mm}$ και λόγου μάζας προς μήκος $19,8 \text{ kg/m}$ αντίστοιχα:

- **DN 125:**

Διερευνώντας την πρώτη περίπτωση, υπολογίζουμε την πρώτα την εσωτερική διάμετρο και έπειτα την μέση ταχύτητα της ροής. Επίσης θα μας χρειαστεί και η συνολική μάζα των εγκατεστημένων σωληνώσεων, καθώς πρόκειται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην κοστολόγησή τους:

$$DIN = 139,65 - 2 * 4,85 = 129,95 \text{ mm}$$

$$V_{WATER} = \frac{PUMPSUPPLY}{\pi * \frac{DIN^2}{4}} \Rightarrow$$

$$V_{WATER} = \frac{0,0325}{3,14159 * \frac{0,12995^2}{4}} = 2,45 \text{ m/s}$$

$$TUBEWEIGHT = TUBEMETER * LENGTH \Rightarrow$$

$$TUBEWEIGHT = 16,7 * 2000 = 33.400 \text{ kg}$$

Παρατηρούμε πως η ταχύτητα του νερού μέσα στις σωληνώσεις είναι παραπάνω από την συνιστάμενη τιμή. Υψηλή ταχύτητα ροής ενδέχεται να προκαλέσει προβλήματα θορύβου. Επίσης, μικρότερη διάμετρος σωλήνωσης συνεπάγεται μεγαλύτερες υδραυλικές απώλειες και επομένως μεγαλύτερη απώλεια ισχύος, κάτι το οποίο θέλουμε να το αποφύγουμε για έργα με μεγάλο χρόνο λειτουργίας.

- **DN 150:**

Σε αυτή την περίπτωση, έχουμε τα εξής:

$$DIN = 165,2 - 2 * 4,85 = 155,5 \text{ mm}$$

$$V_{WATER} = \frac{PUMPSUPPLY}{\pi * \frac{DIN^2}{4}} \Rightarrow$$

$$V_{WATER} = \frac{0,0325}{3,14159 * \frac{0,1555^2}{4}} = 1,71 \text{ m/s}$$

$$TUBEWEIGHT = TUBEMETER * LENGTH \Rightarrow$$

$$TUBEWEIGHT = 19,8 * 2000 = 39.600 \text{ kg}$$

Παρατηρούμε πως η ταχύτητα του νερού τώρα μέσα στις σωληνώσεις είναι χαμηλότερη της προτεινόμενης τιμής. Η μεγαλύτερη διάμετρος μας εξασφαλίζει σταθερότητα και μικρότερες υδραυλικές απώλειες, άρα μικρότερες απώλειες ισχύος, ειδικά σε μακρύ χρονικό διάστημα. Όμως, το βάρος του εγκατεστημένου χάλυβα είναι μεγαλύτερο, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι αυξάνεται το κόστος εγκατάστασης των σωληνώσεων.

DIN 2440		Outside Dia. of Black / Galvanized Tube				Wall thickness		Weight of Black / Galvanized Tube	
SIZE		Minimum		Maximum				Plain Ends	Screwed & Socketed
INCH	NB (mm)	Inches	mm	Inches	mm	Inches	mm	Kg./Mtr.	Kg./Mtr.
1/2"	15	0.827	21.0	0.858	21.8	0.104	2.65	1.22	1.23
3/4"	20	1.043	26.5	1.075	27.3	0.104	2.65	1.58	1.59
1"	25	1.311	33.3	1.346	34.2	0.128	3.25	2.44	2.46
1 1/4"	32	1.654	42.0	1.689	42.9	0.128	3.25	3.14	3.17
1 1/2"	40	1.886	47.9	1.921	48.8	0.128	3.25	3.61	3.65
2"	50	2.350	59.7	2.394	60.8	0.144	3.65	5.10	5.17
2 1/2"	65	2.965	75.3	3.016	76.6	0.144	3.65	6.51	6.63
3"	80	3.465	88.0	3.524	89.5	0.159	4.05	8.47	8.64
4"	100	4.453	113.1	4.528	115.0	0.177	4.50	12.10	12.4
5"	125	5.453	138.5	5.543	140.8	0.191	4.85	16.20	16.7
6"	150	6.453	163.9	6.555	166.5	0.191	4.85	19.20	19.8

Πίνακας 6.4 Τυποποιημένες διαμέτρους χαλύβδινων σωληνώσεων κατά DIN 2440

Σύμφωνα με τα οικονομοτεχνικά κριτήρια της εγκατάστασής υπό μελέτη, θα προτιμηθεί η **χαλύβδινη σωλήνωση τύπου DN 150** τελικά. Η διαφορά στο κόστος επένδυσής από την άλλη επιλογή, βασισμένη στην διαφορά μάζα τους, δεν είναι σημαντική και εμάς μας ενδιαφέρει κυρίως να γίνει το σύστημά μας αποδοτικότερο, ελαττώνοντας τις απώλειες ισχύος όσο το δυνατόν περισσότερο. Επιπλέον, επιλέχθηκε μία **μέση τιμή της απόλυτης τραχύτητας** της εσωτερικής επιφάνειας των χαλύβδινων σωληνών ίση με $ROUGH = 0,02 \text{ mm}$.

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι υδραυλικές απώλειες του συστήματος. Σε αυτό το σημείο, αναφέρεται η **πυκνότητα** και η **κινηματική συνεκτικότητα** του νερού, όπως πάρθηκαν από πίνακες για θερμοκρασία νερού $15 \text{ }^\circ\text{C}$, $WATERDENS = 999 \text{ kg/m}^3$ και $VISC = 1,147 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ αντίστοιχα. Στη συνέχεια, εκτιμήθηκε ο **αριθμός Reynolds, REY**, της ροής του νερού ίσος με:

$$REY = \frac{V_{WATER} * DIN}{VISC} \Rightarrow$$

$$REY = \frac{1,71 * 0,1555}{1,147 * 10^{-6}} = 232006,4$$

Ο **συντελεστής αντίστασης λ, FRICTION**, της τυρβώδους ροής μέσα στο δίκτυο σωληνώσεων υπολογίστηκε με την εμπειρική σχέση του Jain:

$$\frac{1}{\sqrt{FRICTION}} = 1,14 - 2 * \log \left(\frac{21,25}{REY^{0,9}} + \frac{ROUGH}{DIN} \right) \Rightarrow$$

$$FRICTION = \frac{1}{\left[1,14 - 2 * \log \left(\frac{21,25}{REY^{0,9}} + \frac{ROUGH}{DIN} \right) \right]^2} \Rightarrow$$

$$FRICITION = \frac{1}{\left[1,14 - 2 * \log \left(\frac{21,25}{232006,4^{0,9}} + \frac{0,00002}{0,1555} \right) \right]^2} = 0,01625$$

Οπότε, οι **υδραυλικές γραμμικές απώλειες**, DHF , των σωλήνων εκτιμώνται ως εξής:

$$DHF = \frac{FRICITION * LENGTH * VWATER^2}{2 * 9,81 * Din} \Rightarrow$$

$$DHF = \frac{0,01625 * 2000 * 1,71^2}{2 * 9,81 * 0,1555} = 31,19 \text{ m}\Sigma Y$$

Όπως έχει προαναφερθεί, η διακίνηση του πόσιμου νερού από την κάτω δεξαμενή στον άνω ταμειευτήρα γίνεται με τη βοήθεια μίας αντλίας. Η παροχή της αντλίας, στο κανονικό σημείο λειτουργίας της άντλησης, εκτιμήθηκε ίση με $PUMPSUPPLY = 117 \text{ m}^3/h$, με ένα τυπικό **βαθμό απόδοσης της αντλίας** ίσο με $PUMPEFF = 82\%$. Η **ισχύς της αντλίας** υπολογίζεται ως εξής:

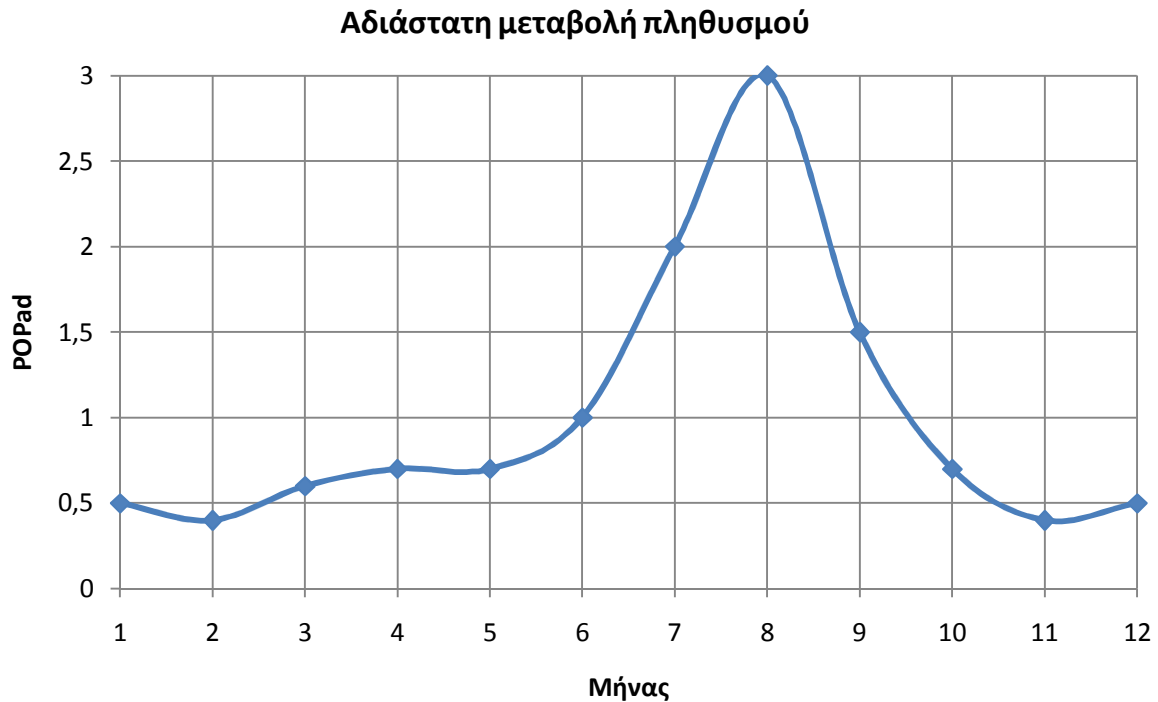
$$PUMPPOWER = \frac{[9,81 * WATERDENS * (ALTITUDE + DHF) * PUMPSUPPLY]}{(PUMPEFF * 3600 * 1000)}$$

$$\Rightarrow PUMPPOWER = \frac{[9,81 * 999 * (250 + 31,19) * 117]}{(0,82 * 3600 * 1000)} = 109,22 \text{ kW}$$

Συνοψίζοντας τους παραπάνω υπολογισμούς, με αυτόν τον τρόπο διαστασιολογήθηκε το υποσύστημα αντλησιοταμίευσης, με την άνω και κάτω δεξαμενή, το δίκτυο σωληνώσεων και την αντλία. Όλοι οι παραπάνω υπολογισμοί είναι ενσωματωμένοι και μέσα στον υπολογιστικό κώδικα.

6.4.7 Χαρακτηριστικά πληθυσμού και κατανάλωσης νερού

Για την ολοκληρωμένη εκτίμηση της λειτουργίας του συστήματος αφαλάτωσης, κρίθηκε σκόπιμο να δημιουργηθεί ένα προφίλ κατανάλωσης ενός πληθυσμού διάρκειας ενός έτους, και να εξετασθεί εάν καλύπτονται οι ανάγκες του σε πόσιμο νερό. Έτσι θεωρήθηκε ένα νησί με **μέσο όρο πληθυσμού** ίσο με $POPUL = 5000 \text{ pers}$ (άτομα). Προφανώς, ο πληθυσμός ενός μικρού νησιού δεν παραμένει σταθερός κατά τη διάρκεια ενός έτους αλλά μεταβάλλεται έντονα. Συνεπώς, θεωρήθηκε ότι ο συνολικός πληθυσμός της περιοχής αυξάνεται ραγδαία κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (διπλασιάζεται τον Ιούλιο και τριπλασιάζεται τον Αύγουστο), γεγονός που είναι χαρακτηριστικό των ελληνικών νησιών. Άλλωστε, οι μήνες του καλοκαιριού, αποτελούν περίοδο αιχμής της ζήτησης του νερού, κάτι που αποδεικνύεται από την αυξημένη μεταφορά νερού στα νησιά. Στο παρακάτω σχήμα 6.12 παρατηρείται η **αδιάστατη μεταβολή του πληθυσμού**, $POPAD$, συνάρτηση των μηνών του έτους.



Σχήμα 6.12 Αδιάστατη μεταβολή πληθυσμού τυπικού νησιού

Να σημειωθεί ότι στην προσομοίωσή μας, ότι θεωρήθηκε πως η μεταβολή του πληθυσμού γίνεται από το μέσο του ενός μήνα έως το μέσο του επόμενου μήνα. Δηλαδή στις 15 του μήνα Αυγούστου (όγδοος μήνας) θα έχουμε πληθυσμό:

$$POP(8) = POPAD(8) * POPUL = 3 * 5000 = 15000 \text{ pers}$$

Ενώ στις 15 του μήνα Ιανουάριου (πρώτος μήνας) θα έχουμε πληθυσμό:

$$POP(1) = POPAD(1) * POPUL = 0,5 * 5000 = 2500 \text{ pers}$$

Βέβαια στην προσομοίωσή μας, σαν πρώτος μήνας λογίζεται ο Σεπτέμβριος, οπότε οι αλλαγές είναι προφανής και θα φανούν και στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Έτσι λοιπόν, μέσω της παραπάνω καμπύλης και με τη βοήθεια γραμμικής παρεμβολής, ο υπολογιστικός κώδικας υπολογίζει τον **πληθυσμό της περιοχής ανά ημέρα**, $POP(K)$, ως εξής:

$$POP(K) = POPAD(K) * POPUL, \text{ όπου } K = 1,2, \dots, 366, \text{ οι ημέρες του έτους}$$

Όσον αφορά την κατανάλωση νερού, αρχικά υπολογίστηκε εκτός του υπολογιστικού κώδικα η ημερήσια κατανάλωση νερού ανά άτομο. Στην υποθετική περίπτωση μόνιμου σταθερού πληθυσμού 5000 ατόμων, θεωρήθηκε πως κάθε κατοικία στεγάζει 2,5 κατοίκους, άρα έχουμε 2000 κατοικίες. Επιπλέον εκτιμήθηκαν ορισμένοι άλλοι χώροι και οι καταναλώσεις τους, ώστε να δοθεί μία προσεγγιστική τιμή για τις ολικές ανάγκες σε νερό για μία ολοκληρωμένη και αυτάρκη κοινότητα. Έτσι το υποθετικό μας σενάριο περιλαμβάνει, εκτός από της κατοικίες, επιπλέον γραφεία, super market, ξενοδοχεία, νοσοκομείο, σχολεία.

Οπότε σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα 6.5 έχουμε:

Καταναλωτές	Αριθμός	Κατανάλωση Μονάδας (m ³ /day)	Συνολική Κατανάλωση (m ³ /day)
Κατοικίες	2000	0,65	1300
Γραφεία	100	0,12	12
Εργαζόμενοι σε Super Market	40	0,4	16
Δωμάτια Ξενοδοχείων	130	0,75	97,5
Νοσοκομειακές Κλίνες	40	1	40
Μαθητές σε σχολεία	180	0,065	11,7
SUM (m³/day)			1477,2
AVERAGE (m³/day)			0,2954

Πίνακας 6.5 Εκτίμηση ημερήσιας κατανάλωσης του πληθυσμού

Όπως προκύπτει, η ημερήσια συνολική κατανάλωση πόσιμου νερού για 5000 κατοίκους θα είναι 1477,2 m³/day. Άρα η **ημερήσια κατανάλωση πόσιμου νερού ανά άτομο, CONSDAY**, εύκολα προκύπτει:

$$CONSDAY = \frac{1477,2}{5000} = 0,2954 \text{ m}^3/\text{day}$$

Αυτή είναι και η τελική τιμή, η οποία εισάγεται στις παραμέτρους της προσομοίωσης. Στη συνέχεια, ο υπολογιστικός κώδικας υπολογίζει και την **ωριαία κατανάλωση ανά άτομο, CONSHOUR**:

$$CONSHOUR = \frac{CONSDAY}{24} \Rightarrow$$

$$CONSHOUR = \frac{0,2954}{24} = 0,0123 \text{ m}^3/\text{h}$$

Προφανώς και εδώ, η ωριαία κατανάλωση δεν παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας αλλά κυμαίνεται πολύ. Η τυπική **αδιάστατη διακύμανση της ωριαίας κατανάλωσης, CONSAD**, που χρησιμοποιήθηκε, παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα 6.13. Έτσι λοιπόν, μέσω της παρακάτω καμπύλης και με τη βοήθεια γραμμικής παρεμβολής, ο υπολογιστικός κώδικας υπολογίζει την ατομική **κατανάλωση νερού ανά υπολογιστικό βήμα, CONS(L)**, δηλαδή ανά δεκάλεπτο ως εξής:

$$CONS(L) = CONSAD(L) * CONSHOUR, \text{ όπου } L = 1,2, \dots, 144, \text{ τα δεκάλεπτα της ημέρας}$$



Σχήμα 6.13 Αδιάστατη διακύμανση ωριαίας κατανάλωσης νερού

Μετέπειτα, το πρόγραμμα βρίσκει την συνολική κατανάλωση, $QCONS(M)$, σε πόσιμο νερό ολόκληρου του πληθυσμού ανά υπολογιστικό βήμα. Αυτό επιτυγχάνεται απλά πολλαπλασιάζοντας τον ημερήσιο πληθυσμό $POP(K)$, όπου $K = 1, 2, \dots, 366$, οι ημέρες του έτους, με την στιγμιαία κατανάλωση ανά άτομο $CONS(L)$, όπου $L = 1, 2, \dots, 144$, τα δεκάλεπτα της ημέρας. Έτσι, προκύπτει η ολική στιγμιαία κατανάλωση της περιοχής $QCONS(M)$ σε m^3/h , όπου $M = 1, 2, \dots, 52704$, το δεκάλεπτο του έτους. Δηλαδή:

$$QCONS(M) = POP(K) * CONS(L)$$

Επισημαίνεται σε αυτό το σημείο πως οι ανεμολογικές μετρήσεις είναι 52633 και αντιστοιχούν σε 365,5 ημέρες. Όμως, ο υπολογιστικός κώδικας υπολόγισε 52704 στιγμιαίες καταναλώσεις που αντιστοιχούν σε 366 ημέρες (το έτος 2000 ήταν δίσεκτο). Οπότε, όσες καταναλώσεις περισσεύουν, δεν θα ληφθούν υπόψη.

6.4.8 Οικονομικά δεδομένα

Στο σημείο αυτό, θα δοθούν διάφοροι εμπειρικοί τύποι υπολογισμού του κόστους των επί μέρους συστημάτων. Σε κάθε υποσύστημα, δίνονται σχέσεις για το «**κόστος επένδυσης**» (investment cost), το οποίο αποτελεί το κόστος κατά την έναρξη λειτουργίας και περιλαμβάνει το κόστος αγοράς του εξοπλισμού και το κόστος εγκατάστασής του, αλλά και για το «**κόστος συντήρησης και λειτουργίας**» (operation and maintenance cost – O&M), το οποίο είναι τα πάγια έξοδα που έχει το σύστημα για κάθε έτος λειτουργίας. Ακόμα, σε κάποια υποσυστήματα υπολογίζονται διάφορα άλλα κόστη, τα οποία αναλόγως της φύσεως τους εντάσσονται στο κόστος επένδυσης ή στο κόστος συντήρησης και λειτουργίας. Τα κόστη του όλου συστήματος

θα αποτελέσουν το άθροισμα των αντίστοιχων των υποσυστημάτων, ενώ το κόστος διασύνδεσης των υποσυστημάτων μεταξύ τους θεωρείται ότι εμπεριέχεται στα επί μέρους κόστη επένδυσης.

Η οικονομική ανάλυση που γίνεται με τον κώδικα, δεν μπορεί να χαρακτηριστεί λεπτομερής και απόλυτα ακριβής, κυρίως λόγω του ότι τα οικονομικά δεδομένα αλλάζουν διαρκώς στις μέρες μας. Ο βασικός στόχος είναι να δώσει μια εικόνα για την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης, και τη δυνατή τιμή πώλησης του παραγόμενου πόσιμου νερού και του υδρογόνου.

Οι εμπειρικοί τύποι που δίνονται παρακάτω προέρχονται από διάφορες βιβλιογραφικές πηγές και από το διαδίκτυο. Τα αποτελέσματα τους επηρεάζονται από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των υποσυστημάτων, τα οποία είτε εισάγονται από τον χρήστη είτε υπολογίζονται στο τέλος της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις ακόλουθες σχέσεις είναι σε Euro (€). Οι εμπειρικοί τύποι είναι πλήρως παραμετροποιημένοι και επιδέχονται αλλαγών σε περίπτωση νέας επανεκτίμησης των οικονομικών δεικτών.

- **Κόστος ανεμογεννητριών**

Το κόστος επένδυσης για το αιολικό πάρκο υπολογίζεται ως εξής:

$$WINDINVEST = WINDINVESTAD * WINDPOWERTOT$$

$$\Rightarrow WINDINVEST = 1200 * 670 = 804.000 \text{ €}$$

Όπου, $WINDPOWERTOT = 670 \text{ kW}$, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς Α/Γ και $WINDINVESTAD = 1200 \text{ €/kW}$, το ανηγμένο κόστος επένδυσης του αιολικού πάρκου το οποίο κυμαίνεται συνήθως από 1000 έως 1400€ ανά εγκατεστημένο kW, ανάλογα με το μέγεθος του αιολικού πάρκου. Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας είναι σταθερό και ίσο με:

$$WINDMAINT = TOTALMAINTAD * WINDINVEST$$

$$\Rightarrow WINDMAINT = 0,02 * 804.000 = 16.080 \text{ €}$$

Όπου, $TOTALMAINTAD = 0,02$, ο γενικός συντελεστής κόστους συντήρησης και λειτουργίας.

- **Κόστος μονάδας αντίστροφης ώσμωσης**

Το κόστος επένδυσης για την αφαλάτωση δίνεται από τον παρακάτω εμπειρικό τύπο, ειδικά για τις μονάδες αντίστροφης ώσμωσης:

$$DESALINVEST = DESALINVESTAD * DESALCAP^{0,9}$$

$$\Rightarrow DESALINVEST = 7200 * 116,7^{0,9} = 522.030 \text{ €}$$

Όπου, $DESALCAP = 116,7 \text{ m}^3/\text{h}$, η ονομαστική παροχή πόσιμου νερού της μονάδας υψωμένη σε δύναμη. Ο εκθέτης μπορεί να πάρει τιμές από 0,85 έως 0,9. Επίσης, $DESALINVESTAD = 7200$, είναι ένας συντελεστής του κόστους επένδυσης της μονάδας αφαλάτωσης, που έχει προκύψει εμπειρικά και κυμαίνεται από 7000 έως 7200. Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας θα είναι:

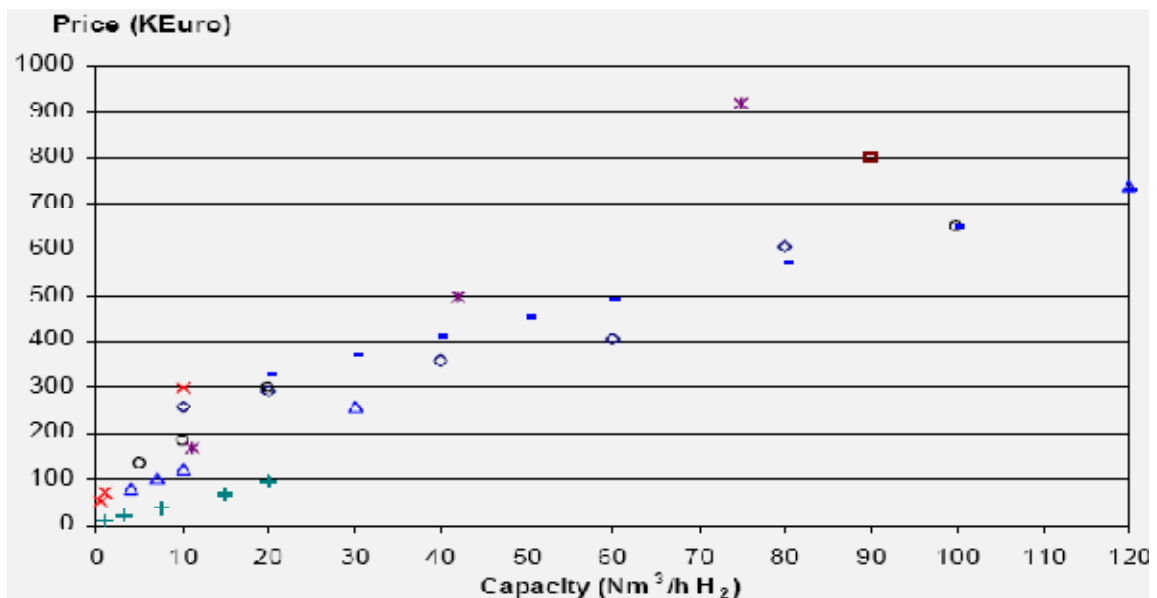
$$DESALMAINT = DESALMAINTAD * DESALINVEST$$

$$\Rightarrow DESALMAINT = 0,08 * 522.031 = 41.762 \text{ €}$$

Όπου, $DESALMAINTAD = 0,08$, ο συντελεστής κόστους συντήρησης και λειτουργίας, μέσα στον οποίο συμπεριλαμβάνονται τα κόστη αλλαγής μεμβρανών ανά τακτά διαστήματα, [Fritzmann κλπ, 2006].

- **Κόστος μονάδας ηλεκτρόλυσης**

Όσον αφορά το κόστος επένδυσης της μονάδας παραγωγής υδρογόνου, το παρακάτω σχήμα δείχνει ορισμένες τιμές αγοράς και εγκατάστασης μονάδων ηλεκτρόλυσης που παρέχουν διάφοροι κατασκευαστές.



Σχήμα 6.14 Κόστη επένδυσης μονάδων ηλεκτρόλυσης από διάφορους κατασκευαστές

Από αυτό το διάγραμμα προκύπτει ο παρακάτω προσεγγιστικός εμπειρικός τύπος:

$$ELECTRINVEST = 80.000 + ELECTRINVESTAD * ELECTRCAP$$

$$\Rightarrow ELECTRINVEST = 80.000 + 8.000 * 20 = 240.000 \text{ €}$$

Όπου, $ELECTRCAP = 20 \text{ Nm}^3/\text{h}$, η ονομαστική παραγωγή υδρογόνου της μονάδας και $ELECTRINVESTAD = 8.000 \text{ €/Nm}^3/\text{h}$, ένας συντελεστής του κόστους επένδυσης της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας θα είναι:

$$ELECTRMAINT = ELECTRMAINTAD * ELECTRINVEST$$

$$\Rightarrow ELECTRMAINT = 0,05 * 240.000 = 12.000 \text{ €}$$

Όπου, $ELECTRMAINTAD = 0,05$, ο συντελεστής κόστους συντήρησης και λειτουργίας, μέσα στον οποίο συμπεριλαμβάνονται τα κόστη αλλαγής ηλεκτροδίων ανά τακτά διαστήματα.

- **Κόστος συστήματος αντλησιοταμίευσης**

Στο υποσύστημα αυτό έχουμε δύο δεξαμενές, οι οποίες μπορούν είτε να κατασκευασθούν από τσιμέντο, είτε να γίνει εκσκαφή. Στην πρώτη περίπτωση, θα πρέπει να εκτιμηθεί η συνολική ποσότητα μπετόν που θα χρειαστεί και στην συνέχεια να υπολογιστεί το ύψος της επένδυσης για τις δεξαμενές, λαμβάνοντας υπόψη την τιμή του μπετόν ανά m^3 που είναι $220 - 250 \text{ €/m}^3$, στην οποία τιμή συμπεριλαμβάνεται και το κόστος του υλικού και τα εργατικά. Στην περίπτωση της εκσκαφής, το κόστος για τις χωματοργικές εργασίες και την ανέρχεται από $9 - 25 \text{ €/m}^3$ συνολικού όγκου εκσκαφής, ανάλογα με την ποιότητα του εδάφους, την απόσταση που πρέπει να διανυθεί για εκφόρτωση, την κλίση και φυσικά το μέγεθος.

Για την εργασία μας, προτιμήθηκε οι ταμιευτήρες να εκσκαφτούν, σύμφωνα με ένα κόστος $TANKINVESTAD = 10 \text{ €/m}^3$, λόγω της μεγάλης χωρητικότητας. Σύμφωνα με την μέθοδο της εκσκαφής λοιπόν, το κόστος κατασκευής των ταμιευτήρων ανέρχεται σε:

$$TANKINVEST = TANKINVESTAD * (VLOW + VHIGH)$$

$$\Rightarrow TANKINVEST = 10 * (80 + 140.000) = 1.400.800 \text{ €}$$

Για το δίκτυο σωληνώσεων, έχει ήδη υπολογιστεί η συνολική μάζα εγκατεστημένου χάλυβα, $TUBEWEIGHT = 39.600 \text{ kg}$, οπότε σύμφωνα με τον παρακάτω εμπειρικό τύπο για το κόστος επένδυσης σωληνώσεων έχουμε:

$$TUBEINVEST = 2,5 * STEELCOST * TUBEWEIGHT$$

$$\Rightarrow TUBEINVEST = 2,5 * 0,7 * 39.600 = 69.300 \text{ €}$$

Όπου $STEELCOST = 0,7 \text{ €/kg}$, η τιμή πώλησης του κιλού του χάλυβα.

Όσον αφορά το σύστημα άντλησης, προτιμήθηκε να εγκατασταθούν δύο (2) αντλίες για την ομαλή και ασφαλή λειτουργία της αντλητικής διάταξης, μία κύρια αντλία και άλλη μία παρόμοια εφεδρική. Αυτό γίνεται για την διασφάλιση της συνέχειας της λειτουργίας της άντλησης, σε περίπτωση διακοπής της πρώτης αντλίας. Έτσι λοιπόν, το κόστος επένδυσης των αντλιών είναι ίσο με:

$$PUMPINVEST = 2 * PUMPINVESTAD * PUMPPOWER$$

$$\Rightarrow PUMPINVEST = 2 * 400 * 109,22 = 87.376 \text{ €}$$

Όπου $PUMPINVESTAD = 400 \text{ €/kW}$, ένας συντελεστής του κόστους επένδυσης επί της συνολικής ισχύος εγκατεστημένων αντλιών.

Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης της αντλησιοταμίευσης. Συνοπτικά τα ετήσια πάγια κόστη λειτουργίας και συντήρησης (O&M) υπολογίζονται από τον υπολογιστικό κώδικα ως εξής:

Κόστος O&M ταμιευτήρων:

$$TANKMAINT = TOTALMAINTAD * TANKINVEST$$

$$\Rightarrow TANKMAINT = 0,02 * 1.400.800 = 28.016 \text{ €}$$

Κόστος O&M σωληνώσεων:

$$TUBEMAINT = TOTALMAINTAD * TUBEINVEST$$

$$\Rightarrow TUBEMAINT = 0,02 * 69.300 = 1.386 \text{ €}$$

Κόστος O&M αντλιών:

$$PUMPMaint = TOTALMAINTAD * PUMPINVEST$$

$$\Rightarrow PUMPMaint = 0,02 * 87.376 = 1.747 \text{ €}$$

Όπου, $TOTALMAINTAD = 0,02$, ο γενικός συντελεστής κόστους συντήρησης και λειτουργίας, όπως προαναφέρθηκε.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημάνουμε το επιπλέον ετήσιο κόστος λειτουργίας της αντλίας, λόγω ιδιοκατανάλωσης ενέργειας από το δίκτυο ηλεκτροδότησης του νησιού. Η τιμή πώλησης της κιλοβατώρας για βιομηχανική χρήση δίνεται από την Δ.Ε.Η. αυτή τη στιγμή περίπου: $ENERGYCOST = 0,11 \text{ €/kWh}$, για την εγκατεστημένη ισχύ άντλησης που διαθέτουμε. Οπότε το κόστος κατανάλωσης ενέργειας της αντλίας θα είναι:

$$PUMPCOST = ENERGYCOST * PPUMPSUM$$

$$\Rightarrow PUMPCOST = 0,11 * 530.403 = 58.344 \text{ €}$$

Όπου $PPUMPSUM = 530.403 \text{ kWh}$, οι συνολικές απαιτήσεις σε ηλεκτρικό ρεύμα από την αντλία για όλη την διάρκεια της προσομοίωσης.

Ολοκληρώνοντας, το συνολικό κόστος επένδυσης του συστήματος προκύπτει αθροίζοντας τα κόστη επένδυσης των υποσυστημάτων:

$$TOTALINVEST = WINDINVEST + DESALINVEST + ELECTRINVEST + \\ +TANKINVEST + TUBEINVEST + PUMPINVEST$$

Αντίστοιχα υπολογίζεται και το συνολικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης από το πρόγραμμα:

$$TOTALMAINT = WINDMAINT + DESALMAINT + ELECTRMAINT + \\ +TANKMAINT + TUBEMAINT + PUMPMMAINT + PUMPCOST$$

6.5 Περιγραφή λειτουργίας προγράμματος & Στόχοι προσομοίωσης

6.5.1 Περιγραφή λειτουργίας προγράμματος

Σε αυτή την υποενότητα, αναλύεται η λογική με την οποία προτείνεται να λειτουργήσει το σύστημα, και αποτελεί το βασικό μέρος του υπολογιστικού κώδικα. Η ανάλυση που γίνεται, είναι σε καθαρά ενεργειακό επίπεδο και έχει ως στόχο να δώσει μια εικόνα για την ροή της ενέργειας, του ύδατος και του υδρογόνου στο σύστημα. Επίσης, η λογική λειτουργίας εκτελείται σε κάθε χρονικό βήμα του κώδικα, που εδώ έχει οριστεί τα δέκα λεπτά. Επειδή οι υποπεριπτώσεις του κώδικα είναι πολύπλοκες, έγινε προσπάθεια η ανάλυση να αρκαστεί σε απλή περιγραφή της φιλοσοφίας και όχι να γίνει εκτενής αναφορά στους διάφορους υπολογισμούς που εκτελούνται στο πρόγραμμα.

Αρχικά, το πρόγραμμα ανοίγει όλα τα αρχεία που πρόκειται να χρησιμοποιήσει. Διαβάζει από τα αρχεία *WIND_TURB.DAT* και *DESALIN_UNIT+ELECTROLYSER.DAT*, τις χαρακτηριστικές καμπύλες των μονάδων, και από το *PARAMETERS.TXT* τις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος. Στη συνέχεια, υπολογίζει την συνολικά εγκατεστημένη ισχύς αιολικών *WINDPOWERTOT*, τους αρχικούς όγκους νερού στην άνω και κάτω δεξαμενή, *VHINIT* και *VLINIT* αντίστοιχα. Υπολογίζει την μέση ταχύτητα του νερού, *VWATER*, τον αριθμό Reynolds, *REY*, και τον συντελεστή αντίστασης, *FRICTION*. Ακολουθώντας, βρίσκει τις γραμμικές απώλειες τις σωλήνωσης, *DHF*, την ισχύ της αντλίας, *PUMPPOWER*, το συνολικό βάρος των χαλυβδοσωλήνων, *TUBEWEIGHT*, και την μέση κατανάλωση πόσιμου νερού ανά ώρα και ανά άτομο, *CONSHOUR*. Ύστερα αυτά τα σταθερά μεγέθη, αποθηκεύονται στο αρχείο *OUTPUT_DATA.TXT*.

Συνεχίζοντας, ο υπολογιστικός κώδικας διαβάζει από τα αρχεία *POPUL_FLUCTUATION.DAT* και *CONSUMPTION_FLUCT.DAT*, τις αδιάστατες μεταβολές του πληθυσμού ανά μήνα για ένα έτος και της ωριαίας κατανάλωσης νερού ανά ώρα για μία μέρα, αντίστοιχα. Έτσι υπολογίζει πρώτον, τον τυπικό πληθυσμό ανά ημέρα, *POP*, και δεύτερον, την τυπική κατανάλωση ανά 10 min, *CONS*. Πολλαπλασιάζοντας τον πληθυσμό της κάθε μέρας με την ημερήσια διακύμανση της κατανάλωσης, προκύπτει η συνολική κατανάλωση αφαλατωμένου ύδατος ανά χρονικό βήμα, *QCONS*. Όλα αυτά τα μεγέθη τελικά συγκεντρώνονται και αποθηκεύονται στο αρχείο *TOTAL_CONSUMPTIONS.DAT*.

Σε αυτό το σημείο ξεκινούν οι επαναλήψεις του υπολογιστικού βήματος. Σε κάθε επανάληψη το πρόγραμμα διαβάζει την ταχύτητα του ανέμου από το αρχείο *IOSANEM.DAT* και την συνολική κατανάλωση *QCONS* από το *TOTAL_CONSUMPTIONS.DAT*. Με δεδομένη την ταχύτητα του ανέμου *VANEM* και καλώντας μία υπορουτίνα γραμμικής παρεμβολής, λογαριάζουμε την αποδιδόμενη ισχύ *PWIND* από την ανεμογεννήτρια. Όπως προαναφέρθηκε, η συνολική ισχύς από το αιολικό είναι $PANEM = PWIND * NANEM * WINDEFF$.

Συνεχίζοντας, ο κώδικας κάνει έλεγχο αν η *PANEM* επαρκεί για να λειτουργήσει την αφαλάτωση και ποια η θεωρητική παραγωγή νερού, *QDES*, σε αυτό το σημείο, με την βοήθεια και πάλι της υπορουτίνας γραμμικής παρεμβολής στην χαρακτηριστική καμπύλη της. Ύστερα, γίνεται ο εξής ισολογισμός όγκου νερού που αποθηκεύεται στην κάτω δεξαμενή $VOL1 = (QWATER/6) - (QPUMP/6)$, δηλαδή ο προσδιδόμενος όγκος νερού σε αυτό το βήμα, *VOL1*, είναι ο όγκος που παράγεται από την μονάδα αφαλάτωσης, *QWATER/6*, μείον τον όγκο νερού που η αντλία στέλνει στον άνω ταμιευτήρα, *QPUMP/6*. Αυτός ο όγκος συν τον προϋπάρχοντα μας δίνουν τον όγκο της κάτω δεξαμενής, δηλαδή $VOLLOW = VOLLOW + VOL1$. Μόλις αυτή η ποσότητα νερού πέσει κάτω από τον ελάχιστο όγκο, *VLINIT*, τότε σταματάει να λειτουργεί η αντλία, και όταν φτάσει τον μέγιστο όγκο, *VLOW*, επαναξεκινάει η άντληση. Επίσης, οι συνολικές ενάρξεις της αντλητικής διάταξης μετρώνται από τον μετρητή, *PUMPSTART*.

Επόμενο βήμα είναι ο ισολογισμός όγκου αφαλατωμένου νερού που αποθηκεύεται στον άνω ταμιευτήρα, που ομοίως με προηγούμενως, είναι $VOL2 = (QPUMP/6) - (QCONS/6)$, δηλαδή ο προσδιδόμενος όγκος νερού σε αυτό το βήμα, *VOL2*, είναι ο όγκος που αντλείται από την αντλητική διάταξη, *QPUMP/6*, μείον τον όγκο νερού που καταναλώνεται, *QCONS/6*. Αυτός ο όγκος συν τον προϋπάρχοντα μας δίνουν τον όγκο του άνω ταμιευτήρα, δηλαδή $VOLHIGH = VOLHIGH + VOL2$. Εάν αυτή η ποσότητα νερού γίνει μεγαλύτερη από τον μέγιστο όγκο, *VHIGH*, τότε η πραγματική ισχύς αφαλάτωσης, *PWATER*, και η πραγματική παραγωγή νερού, *QWATER*, μηδενίζονται. Σε διαφορετική περίπτωση, η πραγματική παραγωγή νερού, *QWATER*, είναι ίση με την θεωρητική *QDES*, και η πραγματική κατανάλωση ισχύος της αφαλάτωσης, *PWATER*, ισούται με την θεωρητική, *PDES*. Υποσημειώνεται εδώ πως οι παροχές *QCONS*, *QWATER*, *QPUMP* διαιρούνται διά του έξι (6) για να παραστήσουν τον μεταφερόμενο όγκο ύδατος σε ένα υπολογιστικό βήμα, το οποίο είναι 10 λεπτά, και οι παροχές μετρώνται σε m^3/h .

Στη συνέχεια, το πρόγραμμα λογαριάζει την διαθέσιμη ισχύ για την μονάδα ηλεκτρόλυσης, η οποία ισούται με $HYDROP = PANEM - PWATER$, δηλαδή είναι η διαφορά της αιολικής ισχύος από την ισχύ της αφαλάτωσης σε αυτό το υπολογιστικό βήμα. Προφανώς, γίνεται αντιληπτό πως έτσι δίδεται μία προτεραιότητα στην διαδικασία αφαλάτωσης, κάτι το οποίο έχει επισημανθεί ξανά. Μετά λοιπόν, προσδιορίζεται η παραγωγή υδρογόνου, *QHYPDRO*, και η ακριβής καταναλισκόμενη ισχύς για την ηλεκτρόλυση, *PHYDRO*, χρησιμοποιώντας την ρουτίνα γραμμικής παρεμβολής στην χαρακτηριστική καμπύλη της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Εάν παρέμεινε ανεκμετάλλευτη ισχύς, αυτή υπολογίζεται ως $PREJ = PANEM - PWATER - PHYDRO$, και αποτελεί την απορριπτόμενη ενέργεια.

Στο τέλος της επανάληψης κάθε υπολογιστικού βήματος, προσδιορίζονται ορισμένα αθροιστικά μεγέθη έως και εκείνη την χρονική στιγμή λειτουργίας, καθώς και οι συνολικές ώρες λειτουργίας κάθε υποσυστήματος. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζεται η συνολική και η μέση κατανάλωση αφαλατωμένου νερού της περιοχής, *QCONS* και *QCONSSUM* αντίστοιχα. Προσδιορίζεται η μέση ταχύτητα του ανέμου, *VANEMAVE*, η συνολική παραγόμενη αιολική ενέργεια, *PANEMSUM* σε *kWh*, και η μέση αιολική ισχύς, *PANEMAVE* σε *kW*. Παρομοίως

υπολογίζονται: η συνολική καταναλισκόμενη ενέργεια σε kWh , η μέση απαιτούμενη ισχύς σε kW , η συνολική παροχή νερού ή υδρογόνου σε m^3 ή Nm^3 και η μέση παροχή νερού ή υδρογόνου σε m^3/h ή Nm^3/h για την μονάδα αντίστροφης ώσμωσης, την μονάδα παραγωγής υδρογόνου και την αντλία. Επιπλέον, υπολογίζονται ο συνολικός αριθμός των ενάρξεων της αντλίας, *PUMPSTART*, και ο αριθμός ενάρξεων ανά ημέρα, *PUMPSTARTAVE*, ο οποίος δεν θέλουμε να είναι πολύ μεγάλος. Σύμφωνα επίσης με την ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου, η οποία είναι $H2DENS = 3 kWh/Nm^3$, υπολογίζεται το ετήσιο συνολικό θεωρητικό ενεργειακό περιεχόμενο του παραγόμενου υδρογόνου, *H2ENERGYSUM* σε kWh , και η μέση ημερήσια θεωρητική ισχύς που μπορεί να καλύψει, *H2ENERGYAVE* σε kW .

Παράλληλα, αθροίζονται οι ώρες λειτουργίας και βρίσκεται ο βαθμός εκμετάλλευσής των υποσυστημάτων για τις ανεμογεννήτριες, *WINDHOUR* και *WINDPERC*, για την αφαλάτωση, *DESHOUR* και *DESPERC*, για την ηλεκτρόλυση, *ELECTRHOUR* και *ELECTRPERC*, ενώ για την άντληση, *PUMPHOUR* και *PUMPPERC*. Στο τέλος καταχωρούνται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε δύο (2) αρχεία. Στο *SIMULATION_POWER.DAT* αποθηκεύονται τα χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη που έχουν να κάνουν με την ροή ισχύος του συστήματος, δηλαδή τα εξής: *L*, *TOTALHOURS*, *VANEM*, *PANEM*, *PWATER*, *PPUMP*, *PHYDRO* και *PREJ*. Στο *SIMULATION_PRODUCT.DAT* αποθηκεύονται τα χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη που έχουν να κάνουν με την ροή του ύδατος και του υδρογόνου του συστήματος, δηλαδή τα εξής: *L*, *TOTALHOURS*, *QWATER*, *VOLUMLOW*, *VOLUMHIGH*, *QPUMP* και *QHYDRO*.

Έπειτα από την ολοκλήρωση των επαναλήψεων, καταχωρούνται και τα ετήσια αθροιστικά μεγέθη στο αρχείο *ANNUAL_RESULTS.TXT*. Μετά, υπολογίζονται τα κόστη επένδυσης και τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη υποενότητα. Τελικά, προσδιορίζονται ορισμένοι τεχνοοικονομικοί δείκτες αξιολόγησης, οι οποίοι θα αναλυθούν στην συνέχεια. Κλείνοντας, όλα τα οικονομικά αποτελέσματα καταχωρούνται στο αρχείο *ECONOMICAL_RESULTS.TXT*. Στο τέλος παρατίθεται η υπορουτίνα γραμμικής παρεμβολής *INTER*, η οποία χρησιμοποιήθηκε.

6.5.2 Στόχοι προσομοίωσης

Η προσομοίωση του συστήματος που επιδιώκεται με την ανάπτυξη και την εκτέλεση του υπολογιστικού κώδικα, έχει ως κύριο στόχο την ανάλυση και μελέτη της συμπεριφοράς του, αλλά και την αξιολόγηση της προτεινόμενης διαστασιολόγησης του. Κύριος σκοπός του συστήματος είναι η πλήρης κάλυψη των αναγκών σε φρέσκο νερό μίας περιοχής και η επιπρόσθετη παραγωγή υδρογόνου, ως εναλλακτικό καύσιμο. Μάλιστα, επιλέχθηκε χρονικό βήμα προσομοίωσης, τα 10 λεπτά, έτσι ώστε να είναι πιο λεπτομερής η μελέτη της μεταβολής των διαφόρων μεγεθών κατά τη διάρκεια ενός έτους. Αρκετά ενδιαφέρον είναι το πως ικανοποιούνται οι ενεργειακές ανάγκες της αφαλάτωσης και της ηλεκτρόλυσης, πως καλύπτονται οι ανάγκες σε πόσιμο νερό του πληθυσμού, και πως αλληλεπιδρούν τα διάφορα υποσυστήματα. Επίσης, η προσεκτική μελέτη των διαγραμμάτων που απεικονίζουν σημαντικά χρονικά μεταβαλλόμενα μεγέθη, θα βοηθήσει στο να αντιληφθούμε σε ποια χρονική περίοδο του έτους εμφανίζονται ανάγκες που μπορούν να ικανοποιηθούν οριακά με τον συγκεκριμένο συνδυασμό τιμών παραμέτρων, να καταγραφεί η διακύμανση της πλήρωσης των δεξαμενών, αλλά και να διαπιστωθεί το πόσο συχνή είναι η χρήση του συστήματος αντιληπτοαμείωσης. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα διαγράμματα

Θα δοθούν στο επόμενο κεφάλαιο, όπου θα γίνει η περιγραφή μιας απλής εκτέλεσης του κώδικα για ένα συγκεκριμένων χαρακτηριστικών σύστημα.

Ακόμα, με σκοπό την αξιολόγηση του συστήματος που χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες προτεινόμενες τιμές παραμέτρων, επιλέχθηκε ο κώδικας να εξαγάγει τα αποτελέσματα διάφορων τεχνικών δεικτών, ενδεικτικών της λειτουργίας και της αποδοτικότητας του συγκεκριμένου συστήματος. Οι συγκεκριμένες προτεινόμενες τιμές των κυρίων παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, όπως η εγκατεστημένη ισχύς ανεμογεννητριών - μονάδας αφαλάτωσης – μονάδας ηλεκτρόλυσης – αντλίας και η χωρητικότητα της άνω δεξαμενής πόσιμου νερού, αποτελούν προσωπικές επιλογές, ύστερα από μία τυπική παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε. Έτσι προέκυψε ένα βελτιστοποιημένο σύστημα (όχι κατά ανάγκη και το βέλτιστο) το οποίο όμως επιδέχεται περαιτέρω βελτιστοποίησης. Παράλληλα, η ανάγνωση της τιμής των δεικτών προσφέρει μια άμεση εποπτεία για την απόδοση του όλου συστήματος, τη λειτουργία και την απόδοση των υποσυστημάτων, αλλά και τη καταλληλότητα ή μη του συγκεκριμένου συνδυασμού τιμών παραμέτρων.

Όμως, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, ο κώδικας περιλαμβάνει και οικονομικής φύσεως ανάλυση και αξιολόγηση. Η οικονομική ανάλυση που επιλέχθηκε, αν και δεν μπορεί να χαρακτηριστεί απόλυτα ακριβής, αφού στηρίζεται σε εμπειρικούς τύπους, εντούτοις, είναι σε θέση να δώσει μια γενικότερη άποψη για την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης αλλά και να γίνει κατανοητό αν ένα τέτοιο έργο, με εκτενέστερη μελέτη, είναι ελκυστικό για να εφαρμοστεί ή όχι. Εκτός των παραπάνω, σημαντικό πλεονέκτημα του κώδικα αποτελεί η δυνατότητα για παραμετρική ανάλυση του συστήματος, που μπορεί να πραγματοποιηθεί σε εκτενέστερη μελέτη, η οποία δεν συμπεριλήφθηκε στα πλάνα της παρούσας εργασίας. Οι δείκτες αξιολόγησης που αφορούν τα επιμέρους συστήματα, θα δείξουν αν ήταν ορθή ή όχι, η ενσωμάτωσή τους και αν συμβάλλουν στην βελτίωση της απόδοσης του συστήματος. Τέλος, οι οικονομικοί δείκτες, θα υποδείξουν αν το σύστημα μπορεί να υπολογίζεται ως οικονομικά βιώσιμη και ελκυστική πρόταση για την συγκεκριμένη περιοχή, συγκριτικά με την επικρατούσα πρακτική (π.χ. μεταφορά νερού με πλοία, άλλες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου).

6.6 Τεχνοοικονομικοί δείκτες αξιολόγησης

Εκτός των ενεργειακών μεγεθών ανά 10 min που αναλύθηκαν στις προηγούμενες ενότητες, των οποίων η παρουσίαση θα δώσει μια εικόνα τις διακυμάνσεώς τους κατά τη διάρκεια ενός έτους, στην συγκεκριμένη ενότητα ορίζονται κάποια επιπλέον μεγέθη που προκύπτουν από τα ωριαία ενεργειακά και ποσοτικά μεγέθη στο τέλος των επαναλήψεων, και χρησιμοποιούνται για την τεχνοοικονομική αξιολόγηση του συστήματος. Παρακάτω έγινε διαχωρισμός σε τεχνικά και οικονομικά μεγέθη, ορισμένα από τα οποία έχουν ήδη προαναφερθεί.

6.6.1 Τεχνικά μεγέθη

Στο σημείο αυτό θα δοθούν οι ορισμοί των χαρακτηριστικών για την απόδοση του συστήματος μεγεθών. Στην αρχή δίνονται τα αθροιστικά μεγέθη και στην συνέχεια οι δείκτες αξιολόγησης.

Τα αποτελέσματα των αθροιστικών μεγεθών αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό των δεικτών αξιολόγησης, οι οποίοι είναι ενδεικτικοί, της αποδοτικότητας του όλου συστήματος αλλά και της λειτουργίας των υποσυστημάτων, για ένα συγκεκριμένο συνδυασμό τιμών των παραμέτρων του συστήματος. Επαναλαμβάνεται πως η άθροιση θα γίνει για L χρονικά βήματα, όπου $L = 1, 2, \dots, 52633$, το δεκάλεπτο του έτους.

1. Μέση ταχύτητα πνέοντος ανέμου:

$$VANEMAVE = \frac{1}{L} * \sum_{L=1}^{52633} VANEM, \quad [m/s]$$

2. Ετήσια συνολική παραγωγή ενέργειας από τις Α/Γ:

$$PANEMSUM = \frac{1}{6} * \sum_{L=1}^{52633} PANEM, \quad [kWh]$$

3. Ετήσια συνολική απορροφόμενη ενέργεια από την αφαλάτωση:

$$PWATERSUM = \frac{1}{6} * \sum_{L=1}^{52633} PWATER, \quad [kWh]$$

4. Ετήσια συνολική απορροφόμενη ενέργεια από την αντλία:

$$PPUMPSUM = \frac{1}{6} * \sum_{L=1}^{52633} PPUMP, \quad [kWh]$$

5. Ετήσια συνολική απορροφόμενη ενέργεια από την ηλεκτρόλυση:

$$PHYDROSUM = \frac{1}{6} * \sum_{L=1}^{52633} PHYDRO, \quad [kWh]$$

6. Ετήσια συνολική απορριπτόμενη ανεκμετάλλευτη ενέργεια:

$$PREJSUM = \frac{1}{6} * \sum_{L=1}^{52633} PREJ, \quad [kWh]$$

7. Μέση παραγωγή ισχύος από τις Α/Γ:

$$PANEMAVE = \frac{1}{L} * \sum_{L=1}^{52633} PANEM, \quad [kW]$$

8. Μέση απορρόφηση ισχύος από την αφαλάτωση:

$$PWATERAVE = \frac{1}{L} * \sum_{L=1}^{52633} PWATER, \quad [kW]$$

9. Μέση απορρόφηση ισχύος από την αντλία:

$$PPUMPAVE = \frac{1}{L} * \sum_{L=1}^{52633} PPUMP, \quad [kW]$$

10. Μέση απορρόφηση ισχύος από την ηλεκτρόλυση:

$$PHYDROAVE = \frac{1}{L} * \sum_{L=1}^{52633} PHYDRO, \quad [kW]$$

11. Μέση απορριπτόμενη ανεκμετάλλευτη ισχύος:

$$PREJAVE = \frac{1}{L} * \sum_{L=1}^{52633} PREJ, \quad [kW]$$

12. Ετήσια συνολική κατανάλωση πόσιμου νερού πληθυσμού:

$$QCONSSUM = \frac{1}{6} * \sum_{L=1}^{52633} QCONS, \quad [m^3]$$

13. Ετήσια συνολική παραγωγή πόσιμου νερού από την αφαλάτωση:

$$QWATERSUM = \frac{1}{6} * \sum_{L=1}^{52633} QWATER, \quad [m^3]$$

14. Ετήσια συνολική διακινούμενη παροχή νερού από την αντλία:

$$QPUMPSUM = \frac{1}{6} * \sum_{L=1}^{52633} QPUMP, \quad [m^3]$$

15. Ετήσια συνολική παραγωγή υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση:

$$QHYDROSUM = \frac{1}{6} * \sum_{L=1}^{52633} QHYDRO, \quad [Nm^3]$$

16. Ετήσιο συνολικό θεωρητικό ενεργειακό περιεχόμενο του παραγόμενου υδρογόνου:

$$H2ENERGYSUM = QHYDROSUM * H2DENS, \quad [kWh]$$

17. Μέση κατανάλωση πόσιμου νερού πληθυσμού:

$$QCONSAVE = \frac{1}{L} * \sum_{L=1}^{52633} QCONS, \quad [m^3/h]$$

18. Μέση παραγωγή πόσιμου νερού από την αφαλάτωση:

$$QWATERAVE = \frac{1}{L} * \sum_{L=1}^{52633} QWATER, \quad [m^3/h]$$

19. Μέση διακινούμενη παροχή νερού από την αντλία:

$$QPUMPAVE = \frac{1}{L} * \sum_{L=1}^{52633} QPUMP, \quad [m^3/h]$$

20. Μέση παραγωγή υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση:

$$QHYDROAVE = \frac{1}{L} * \sum_{L=1}^{52633} QHYDRO, \quad [Nm^3/h]$$

21. Μέσο θεωρητικό ενεργειακό περιεχόμενο του παραγόμενου υδρογόνου:

$$H2ENERGYAVE = QHYDROAVE * H2DENS, \quad [kW]$$

22. Αριθμός ενάρξεων αντλίας ανά ημέρα:

$$PUMPSTARTAVE = \frac{6 * 24}{L} * PUMPSTART, \quad [\text{ενάρξεις/day}]$$

23. Ώρες λειτουργίας:

Σε κάθε χρονικό βήμα, ελέγχεται αν οι Α/Γ παράγουν, ή αν οι μονάδες αντίστροφης ώσμωσης και ηλεκτρόλυσης, και οι αντλίες καταναλώνουν, ενέργεια, και ανάλογα γίνεται αντιληπτό ότι βρίσκονται σε λειτουργία. Έτσι, τα παρακάτω μεγέθη, στο τέλος των επαναλήψεων, μας δίνουν τις ώρες λειτουργίας του κάθε υποσυστήματος σε ώρες, [hours]. Οι ώρες λειτουργίας προκύπτουν αθροίζοντας τα χρονικά βήματα λειτουργίας και διαιρώντας με το έξι (6):

- Ώρες λειτουργίας ανεμογεννητριών: $WINDHR = \frac{1}{6} * \sum_{L=1}^{52633} WINDHOUR$
- Ώρες λειτουργίας αφαλάτωσης: $DESHR = \frac{1}{6} * \sum_{L=1}^{52633} DESHOUR$
- Ώρες λειτουργίας άντλησης: $PUMPHR = \frac{1}{6} * \sum_{L=1}^{52633} PUMPHOUR$
- Ώρες λειτουργίας ηλεκτρόλυσης: $ELECTRHR = \frac{1}{6} * \sum_{L=1}^{52633} ELECTR HOUR$

24. Ποσοστό διάρκειας ετήσιας λειτουργίας:

Εδώ παρουσιάζονται το ποσοστό διάρκειας λειτουργίας των υποσυστημάτων, που υπολογίζονται αθροίζοντας όλα τα χρονικά βήματα λειτουργίας και διαιρώντας με τα συνολικά βήματα:

- Ποσοστό λειτουργίας ανεμογεννητριών: $WINDHRPERC = \frac{1}{L} * \sum_{L=1}^{52633} WINDHOUR$
- Ποσοστό λειτουργίας αφαλάτωσης: $DESHRPERC = \frac{1}{L} * \sum_{L=1}^{52633} DESHOUR$
- Ποσοστό λειτουργίας άντλησης: $PUMPHRPERC = \frac{1}{L} * \sum_{L=1}^{52633} PUMPHOUR$
- Ποσοστό λειτουργίας ηλεκτρόλυσης: $ELECTRHRPERC = \frac{1}{L} * \sum_{L=1}^{52633} ELECTR HOUR$

25. Ποσοστό εκμετάλλευσης ενέργειας:

Το πρόγραμμα προσδιορίζει το ποσοστό εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας από τα υποσυστήματα αφαλάτωσης και παραγωγής υδρογόνου:

- Ποσοστό εκμετάλλευσης ενέργειας από την αφαλάτωση:

$$DESPERC = \frac{PWATERSUM}{PANEMSUM}$$

- Ποσοστό εκμετάλλευσης ενέργειας από την ηλεκτρόλυση:

$$ELECTRPERC = \frac{PHYDROSUM}{PANEMSUM}$$

26. Ολικό ποσοστό εκμετάλλευσης ενέργειας:

$$TOTPERC = \frac{PWATERSUM + PHYDROSUM}{PANEMSUM}$$

27. Λόγος ετήσιου παραγόμενου και διακινούμενου όγκου νερού στον άνω ταμιευτήρα προς την χωρητικότητα του ταμιευτήρα:

$$VTR = \frac{QPUMPSUM}{VHIGH}$$

28. Λόγος ετήσιου παραγόμενου νερού προς την συνολική κατανάλωση νερού

$$WCR = \frac{QPUMPSUM}{QCONSSUM}$$

6.6.2 Οικονομικά μεγέθη

Η εγκατάσταση και η λειτουργία ενός συστήματος όπως το προτεινόμενο αποτελεί μια επένδυση. Δεν θα μπορούσε, λοιπόν, να μην αξιολογηθεί οικονομικά. Άλλωστε, ένα έργο δεν πρέπει μόνο να ικανοποιεί το σκοπό λειτουργίας του αλλά να είναι οικονομικά, προσοδοφόρο για τον επενδυτή και συμφέρον για τον καταναλωτή. Στην υποενοότητα αυτή θα παρουσιαστούν οι δείκτες που θα χρησιμοποιηθούν για την οικονομική αξιολόγηση του.

Στην οικονομική ανάλυση που ακολουθεί, λαμβάνονται υπόψη δαπάνες και έσοδα τα οποία είναι μετρήσιμα με καθαρά οικονομικούς όρους. Δεν συνυπολογίζονται αυτά που σχετίζονται με κοινωνικές ή άλλες επιπτώσεις, όπως για παράδειγμα η παράλληλη ανάπτυξη τουριστικής δραστηριότητας, η οποία μπορεί να αποδειχτεί αρκετά σημαντική παράλα αυτά. Πριν προχωρήσουμε στην παρουσίαση των οικονομικών δεικτών, σωστό θα ήταν να αναφέρουμε κάποια βασικά στοιχεία οικονομικής ανάλυσης που λήφθηκαν υπόψη κατά την αξιολόγηση της προσομοίωσης [Παπαντώνης, 2001].

- **Χρονική διάρκεια έργου, *NYEARS*:**

Η διάρκεια ζωής των υποσυστημάτων κυμαίνεται από 15 χρόνια έως 30 χρόνια. Στο τέλος της διάρκειας ζωής του έργου αποφασίζεται, είτε η ανανέωση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, είτε η πλήρης ανακατασκευή του έργου. Στην ανάλυση μας θεωρούμε ότι η χρονική διάρκεια, *n*, του έργου είναι:

$$NYEARS = 20 \text{ έτη}$$

- **Προεξοφλητικό επιτόκιο, *RRATE*:**

Το προεξοφλητικό επιτόκιο (discount rate) λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της παρούσας αξίας ενός χρηματικού ποσού, που θα δαπανηθεί ή θα εισπραχθεί στο μέλλον και χρησιμοποιείται στην ανάλυση της οικονομικής βιωσιμότητας μίας τέτοιας επένδυσης. Συνήθως, λαμβάνεται υψηλότερο από το επιτόκιο δανεισμού έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη διάφορες αβεβαιότητες κατά τη διάρκεια ζωής και λειτουργίας του έργου. Πρόκειται για μακροοικονομικό μέγεθος και κατά την προσομοίωση θεωρήθηκε ότι:

$$RRATE = 10\%$$

- **Πληθωρισμός, *FLA*:**

Ως πληθωρισμός (inflation) χαρακτηρίζεται το φαινόμενο αύξησης ή μείωσης των τιμών των αγαθών και των υπηρεσιών με το πέρασμα του χρόνου κατά μη ομοιόμορφο τρόπο. Πρόκειται για μακροοικονομικό μέγεθος που εξαρτάται τόσο από την κατάσταση της εθνικής οικονομίας όσο και από τις διεθνείς εξελίξεις. Εξαιτίας αυτού, η εξέλιξη του πληθωρισμού σε βάθος εικοσαετίας, που είναι η διάρκεια ζωής του έργου, είναι δύσκολο προβλεφθεί με ακρίβεια. Στην ανάλυση μας λαμβάνουμε:

$$FLA = 5\%$$

- **Αναγωγή σε παρούσα αξία:**

Λόγω των επιτοκίων, η σημερινή, παρούσα αξία A_0 , ενός ποσού A_N , που θα δαπανηθεί ή θα εισπραχθεί μετά από $NYEARS$ χρόνια δίνεται από τη σχέση:

$$A_0 = \frac{A_N}{(1 + RRATE)^{NYEARS}}$$

Έτσι λοιπόν, ορίζεται ο συντελεστής παρούσας αξίας R :

$$R = \frac{1}{(1 + RRATE)^{NYEARS}}$$

Η διάρκεια ζωής του έργου παίζει σημαντικότερο ρόλο στην οικονομική αξιολόγηση και τα ποσά που θα εισπραχθούν και θα δαπανηθούν μετά από $NYEARS$ χρόνια πρέπει να είναι άμεσα συγκρίσιμα. Έτσι λοιπόν στο εξής, τα ποσά ανάγονται σε παρούσα αξία στον υπολογισμό του ετήσιου κόστους λειτουργίας αλλά και των ετήσιων εσόδων, που θα γίνει παρακάτω.

Πλέον έχουμε γνωστά ό, τι χρειάζεται για να εφαρμόσουμε ορισμένα κριτήρια οικονομικής βιωσιμότητας. Στη συνέχεια θα γίνει η παρουσίαση των οικονομικών δεικτών αξιολόγησης και των κριτηρίων οικονομικής βιωσιμότητας:

1. **Κόστος παραγόμενου νερού – Κόστος παραγόμενου υδρογόνου:**

Τα μεγέθη αυτά προκύπτουν ως ο λόγος των συνολικών ετήσιων δαπανών προς τον όγκο του πόσιμου νερού και τον όγκο υδρογόνου που αναμένεται να παραχθεί και να αξιοποιηθεί σε ένα έτος, $QPUMPSUM$ [m³] και $QHYDROSUM$ [Nm³] αντίστοιχα. Ως ετήσιες δαπάνες λαμβάνεται το άθροισμα των λειτουργικών δαπανών και δαπανών συντήρησης, $TOTALMAINT$, και της ετήσιας απόσβεσης A ή $ANNUALDEPR$.

Η **ετήσια σταθερή απόσβεση** (annual depreciation) προκύπτει από την απαίτηση το συνολικό κόστος επένδυσης, $TOTALINVEST$, να είναι ίσο προς την παρούσα αξία των χρηματικών ποσών A , κατά τη διάρκεια ζωής της επένδυσης, $NYEARS$, δηλαδή:

$$TOTALINVEST = \sum_{i=1}^{NYEARS} \frac{A}{(1 + RRATE)^i} = A * \frac{1 - (1 + RRATE)^{-NYEARS}}{RRATE}$$

$$\Rightarrow ANNUALDEPR = A = \frac{TOTALINVEST * RRATE}{1 - (1 + RRATE)^{-NYEARS}}$$

Σε αυτό το σημείο, θα πρέπει να αναφερθεί το γεγονός ότι οι ετήσιες δαπάνες, δηλαδή το άθροισμα του ετήσιου κόστους συντήρησης και λειτουργίας, και της ετήσιας σταθερής απόσβεσης, $TOTALMAINT + ANNUALDEPR$, δεν είναι το ίδιο για την παραγωγή νερού και για την παραγωγή υδρογόνου. Το κόστος συντήρησης και

λειτουργίας για την παραγωγή του υδρογόνου αφορά κυρίως τα υποσυστήματα της ηλεκτρόλυσης και των ανεμογεννητριών, ενώ οι ετήσιες δαπάνες για την παραγωγή ύδατος αφορούν κυρίως τα υποσυστήματα αφαλάτωσης και αντλησιοταμίευσης, όπως επίσης και τις ανεμογεννήτριες που είναι κοινές.

Έτσι λοιπόν, προτείνεται να θέσουμε ένα «**λόγο κόστους ηλεκτρόλυσης προς αφαλάτωση – COSTRATIO**», το οποίο ουσιαστικά αντιπροσωπεύει την αναλογία της συνολικού κόστους για την παραγωγή υδρογόνου προς την παραγωγή νερού, έτσι ώστε να γίνει ένας ικανοποιητικός επιμερισμός των δαπανών. Προσδιορίζεται, λοιπόν, το ποσό του κόστους των Α/Γ που αντιστοιχεί στην διαδικασία παραγωγής υδρογόνου, αθροίζεται με το κόστος της μονάδας ηλεκτρόλυσης και διαιρείται με το συνολικό κόστος επένδυσης του έργου:

$$COSTRATIO = \frac{\left(\frac{ELECTRINVEST}{DESALINVEST + TANKINVEST} \right) * WINDINVEST + ELECTRINVEST}{TOTALINVEST}$$

$$\Rightarrow COSTRATIO = \frac{\left(\frac{240.000}{522.030 + 1.400.800} \right) * 804.000 + 240.000}{3.123.506} = 10,9\%$$

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού προκύπτει από τη σχέση:

$$WATERCOST = \frac{(ANNUALDEPR + TOTALMAINT) * (1 - COSTRATIO)}{QPUMPSUM}, \quad [€/m^3]$$

Το αποτέλεσμα του συγκεκριμένου δείκτη θα αποτελέσει συγκρίσιμο μέγεθος με την υπάρχουσα κατάσταση στην περιοχή. Η επένδυση θα κριθεί συμφέρουσα και ελκυστική, κατ' αρχήν, αν το ειδικό αυτό κόστος είναι χαμηλότερο του αντίστοιχου της, μέχρι σήμερα, τροφοδοσίας της περιοχής με πόσιμο νερό, η οποία γίνεται με υδροφόρες. Στην συνέχεια θα συγκριθεί με άλλα αντίστοιχα συστήματα.

Παράλληλα, το κόστος παραγωγής υδρογόνου προκύπτει αντίστοιχα από τη σχέση:

$$HYDROCOST = \frac{(ANNUALDEPR + TOTALMAINT) * COSTRATIO}{QHYPDROSUM}, \quad [€/Nm^3]$$

Επίσης, αυτός ο οικονομικός δείκτης θα συγκριθεί με άλλα αντίστοιχα συστήματα παραγωγής υδρογόνου.

2. Λόγος εσόδων προς έξοδα (Benefit to Cost Ratio – BCR)

Ο λόγος εσόδων προς τα έξοδα εκφράζει το πηλίκο του αθροίσματος, B_0 , των εσόδων καθ' όλη τη διαχειριστική περίοδο $NYEARS$ ετών, προς το άθροισμα των εξόδων, C_0 , (και τα δύο μεγέθη ανάγονται σε παρούσα αξία):

$$BCR = \frac{B_0}{C_0} = \frac{\sum_{J=0}^{N\text{YEARS}} \frac{B_J}{(1 + RRATE)^J}}{C_0 + \sum_{J=1}^{N\text{YEARS}} \frac{C_J}{(1 + RRATE)^J}}$$

Όπου B_J , τα ετήσια έσοδα κατά το έτος J μετά την έναρξη της επένδυσης. Ως ετήσια έσοδα του έργου έχουμε τα έσοδα από την πώληση του παραγόμενου πόσιμου νερού και τα έσοδα από την πώληση του παραγόμενου υδρογόνου. Έτσι, αν $PRICEWATER$ και $PRICEHYDRO$, η **τιμή πώλησης** του κυβικού πόσιμου νερού και του κυβικού υδρογόνου αντίστοιχα στην περιοχή, τότε τα ετήσια έσοδα του πρώτου χρόνου υπολογίζονται από τη σχέση:

$$B_0 = WATERINC + HYDROINC \Rightarrow$$

$$B_0 = QPUMPSUM * PRICEWATER + QHYDROSUM * PRICEHYDRO$$

Ενώ για τα επόμενα χρόνια J , θεωρούμε την παραγωγή ύδατος και υδρογόνου όμοια και συμπεριλαμβάνουμε στην τιμή πώλησης τον πληθωρισμό, FLA . Συνεπώς, για κάθε χρόνο έχουμε:

$$B_J = B_{J-1} * (1 + FLA)$$

Αντίστοιχα, τα ετήσια έξοδα C_J , αποτελούν τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας, $TOTALMAINT$, που ορίστηκαν σε προηγούμενη υποενότητα, ενώ περιλαμβάνουμε και το κόστος επένδυσης του έργου $TOTALINVEST$ κατά την έναρξη λειτουργίας του. Λαμβάνοντας υπ' όψη και την τιμή του πληθωρισμού:

$$C_0 = TOTALINVEST + TOTALMAINT$$

$$C_1 = TOTALMAINT * (1 + FLA) \dots$$

$$C_J = C_{J-1} * (1 + FLA)$$

Έτσι, για να είναι οικονομικά βιώσιμη η επένδυση θα πρέπει ο λόγος εσόδων προς έξοδα – BCR να είναι μεγαλύτερος της μονάδας, δηλαδή να προκύπτουν μεγαλύτερα τα έσοδα από τα έξοδα. Ο δείκτης αυτός πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή, καθώς μία επένδυση με υψηλότερη τιμή BCR δεν αντιστοιχεί πάντα σε μεγαλύτερο όφελος, δεδομένου ότι δεν αποδίδει την τάξη των μεγεθών. Το αποτέλεσμα του θα πρέπει να κρίνεται ανάλογα με την εξέλιξη των εσόδων και εξόδων, και η καθαρή τιμή του δεν είναι ενδεικτική των καθαρών οφελών. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιούμε τον δείκτη NPV , που θα ορισθεί παρακάτω [Παπαντώνης, 2007].

3. Καθαρή παρούσα αξία (Net Present Value – $RNPV$)

Η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης εκφράζεται από την διαφορά της παρούσας αξίας του αθροίσματος των εσόδων μείον την παρούσα αξία του αθροίσματος των εξόδων. Χρησιμοποιώντας τα μεγέθη που ορίστηκαν στον προηγούμενο δείκτη, η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$RNPV = B_0 - C_0 \Rightarrow$$

$$RNPV = \left[\sum_{J=0}^{NYEARS} \frac{B_J}{(1 + RRATE)^J} \right] - \left[C_0 + \sum_{J=1}^{NYEARS} \frac{C_J}{(1 + RRATE)^J} \right]$$

Για να είναι η επένδυση οικονομικά βιώσιμη θα πρέπει η τιμή της καθαρής παρούσας αξίας $CNPV$ να είναι θετική. Έργα με αρνητική παρούσα αξία, προφανώς, πρέπει να απορρίπτονται. Ο δείκτης χρησιμεύει για κατάταξη διαφόρων εναλλακτικών λύσεων κατά σειρά οικονομικής βιωσιμότητας, με πιο αποδοτικό να είναι αυτό με την υψηλότερη τιμή καθαρής παρούσας αξίας.

4. Διάρκεια αποπληρωμής (*Quittance – QUITT*)

Εκφράζει το πλήθος των ετών που απαιτούνται ώστε τα αναμενόμενα καθαρά έσοδα (έσοδα μείον τα λειτουργικά έξοδα) να αποπληρώσουν το ποσό της επένδυσης. Υπολογίζεται συνήθως χωρίς την αναγωγή των διαφόρων ποσών σε παρούσα αξία. Έτσι, ορίζεται ως εξής:

$$QUITT = \frac{TOTALINVEST}{WATERINC + HYDROINC - TOTALMAINT}$$

Η διάρκεια αποπληρωμής δεν πρέπει να ξεπερνά τα 7-8 έτη για να κριθεί ένα έργο οικονομικά βιώσιμο. Το κριτήριο αυτό δεν μπορεί να κατατάξει κατά σειρά οικονομικής απόδοσης παρόμοιες επενδύσεις, αφού δεν λαμβάνει υπόψη την απόδοση της επένδυσης καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου.

5. Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (*Internal Rate of Return – RIRR*)

Στο κριτήριο του λόγου εσόδων προς έξοδα (BCR) και της καθαρής παρούσας αξίας ($RNPV$) τα διάφορα μεγέθη ανάγονται στην παρούσα αξία τους, ώστε να είναι συγκρίσιμα από οικονομικής πλευράς. Στην αναγωγή τους σημαντικό ρόλο παίζει η τιμή του προεξοφλητικού επιτοκίου, $RRATE$. Όσο η τιμή του επιτοκίου $RRATE$ αυξάνει, τόσο μειώνεται η τιμή των BCR και $RNPV$ και κινδυνεύει η επένδυση να αποδειχθεί ως μη οικονομικά βιώσιμη. Ως εσωτερική απόδοση μίας επένδυσης ορίζεται η τιμή του επιτοκίου $RIRR$, για την οποία η καθαρή παρούσα αξία γίνεται μηδενική. Δεδομένου ότι η τιμή του επιτοκίου $RRATE$ είναι ένα μέγεθος μακροοικονομικό και ενδέχεται να μεταβληθεί κατά τη διάρκεια ζωής του έργου, το κριτήριο του εσωτερικού συντελεστή απόδοσης εκφράζει το πόσο κινδυνεύει να ανατραπεί η οικονομική βιωσιμότητα ενός έργου, λόγω μεταβολής των επιτοκίων. Ορίζεται ως εξής:

$$RNPV_{RRATE=RIRR} = 0 \Leftrightarrow$$

$$\left[\sum_{J=0}^{NYEARS} \frac{B_J}{(1 + RIRR)^J} \right] = \left[C_0 + \sum_{J=1}^{NYEARS} \frac{C_J}{(1 + RIRR)^J} \right]$$

Από τη σύγκριση της τιμής του *RIRR*, με το επίσημο επιτόκιο της αγοράς *RRATE*, συμπεραίνεται η αποδοτικότητα (αν ο *RIRR* είναι μεγαλύτερος) ή μη του σχεδίου επένδυσης (αν ο *RIRR* είναι μικρότερος). Ο υπολογισμός του γίνεται με δοκιμές. Σε περίπτωση εναλλακτικών σχεδίων, επιλέγεται το σχέδιο που εμφανίζει τον υψηλότερο *RIRR*.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

7.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ετήσιας προσομοίωσης του συστήματος για μια συγκεκριμένη διαστασιολόγηση του υβριδικού συστήματος αφαλάτωσης και παραγωγής υδρογόνου, εγκατεστημένη σε συγκεκριμένο νησί, όπως επίσης και οι διάφοροι δείκτες αξιολόγησης. Ο στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η ανάλυση και η διερεύνηση της λειτουργίας του συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Σχετικά με την επιλογή των τιμών των βασικών παραμέτρων, θεωρήθηκε σκόπιμο να επιλεγθεί για παρουσίαση ένας ολοκληρωμένος συνδυασμός, που καλύπτει τις ανάγκες σε πόσιμο νερό και δίνει σαφή εικόνα για την αλληλεπίδραση των υποσυστημάτων.

Έτσι λοιπόν, στις επόμενες ενότητες, αφού δοθούν οι τιμές των παραμέτρων του προτεινόμενου συστήματος, παραθέτονται τα διαγράμματα στα οποία παρουσιάζεται η χρονική μεταβολή των πιο χαρακτηριστικών για τη λειτουργία του συστήματος, μεγεθών. Μάλιστα, προκειμένου να διαμορφωθεί σαφέστερη αντίληψη της λειτουργίας του συστήματος για το συγκεκριμένο συνδυασμό τιμών παραμέτρων, τα διαγράμματα που δίνονται είναι ετήσια, μηνιαία, εβδομαδιαία, και ημερήσια. Προς το τέλος, παρουσιάζονται οι τιμές των αθροιστικών μεγεθών καθώς και οι τιμές των τεχνοοικονομικών δεικτών αξιολόγησης.

Προτού όμως προχωρήσουμε, θα πρέπει να δώσουμε κάποια στοιχεία σχετικά με τις χρονοσειρές μετεωρολογικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά και την περιοχή για την οποία εξετάζουμε την εφαρμογή του συστήματος. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, έγινε χρήση χρονοσειρών ταχύτητας ανέμου, οι οποίες προέκυψαν από μετρήσεις στο νησί της Ίου, όπως έχει προαναφερθεί. Θεωρήθηκε ότι οι συγκεκριμένες χρονοσειρές είναι αντιπροσωπευτικές για κάθε νησί των Κυκλάδων. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα να γίνει προσομοίωση του συστήματος για διάφορα νησιά στην περιοχή των Κυκλάδων, όπου παρατηρείται ιδιαίτερα οξυμένο το πρόβλημα της λειψυδρίας. Ασφαλώς, ο κώδικας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για διαφορετικές περιοχές, εισάγοντας αντίστοιχες χρονοσειρές.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονίσουμε ότι στην παρούσα εργασία, η μελέτη ενός νησιού περιορίζεται στην χρήση κατάλληλων χρονοσειρών, στην εισαγωγή του μέσου πληθυσμού του, και στην εκτίμηση της διαστασιολόγησης του υποσυστήματος αντλησιοταμίευσης. Δεν λαμβάνονται υπ' όψη, λοιπόν, διάφοροι άλλοι παράγοντες που ενδεχομένως επηρεάζουν την απόφαση για εγκατάσταση του συστήματος ή όχι. Συνεπώς η επιλογή του, υπό μελέτη, νησιού των Κυκλάδων θα βασίζεται στην τιμή του μέσου πληθυσμού του. Η μηνιαία αδιάστατη διακύμανση του πληθυσμού θεωρείται παρόμοια για όλα τα νησιά.

7.2 Παρουσίαση παραμέτρων και σταθερών δεδομένων

Σε αυτό το σημείο, πλέον, θα γίνει η παρουσίαση όλων των αρχικών παραμέτρων και μεγεθών που χρησιμοποιήθηκαν και βρίσκονται στο αρχείο *PARAMETERS.TXT*, όπως επίσης θα παρουσιαστούν και τα άμεσα μεγέθη που προκύπτουν από την επεξεργασία των αρχικών σταθερών δεδομένων και παραμένουν σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, τα οποία αποθηκεύονται στο *OUTPUT_DATA.TXT*. Επιπλέον, παρατίθενται τα μεταβαλλόμενα δεδομένα εισόδου, όπως θα δούμε στη συνέχεια.

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΗ	ΤΙΜΗ	ΜΟΝΑΔΑ
PARAMETERS.TXT				
TECHNICAL				
1	Χρονικά βήματα (10λεπτα)	NSTEP	-	52633
2	Αριθμός ανεμογεννητριών	NANEM	-	2
3	Ονομαστική ισχύς ανεμογεννήτριας	WINDPOWER	kW	335
4	Βαθμός απόδοσης αιολικού πάρκου	WINDEFF	-	0,96
5	Ονομαστική παροχή μονάδας αφαλάτωσης	DESALCAP	m ³ /h	116,7
6	Ονομαστική παροχή μονάδας ηλεκτρόλυσης	ELECTRCAP	Nm ³ /h	20
7	Χωρητικότητα άνω ταμιευτήρα	VHIGH	m ³	140000
8	Χωρητικότητα κάτω δεξαμενής	VLOW	m ³	80
9	Αρχικό ποσοστό πλήρωσης άνω ταμιευτήρα	VPERCHIGH	-	0,25
10	Ελάχιστο ποσοστό πλήρωσης κάτω δεξαμενής	VPERCLOW	-	0,1
11	Παροχή αντλίας	PUMPSUPPLY	m ³ /h	117
12	Βαθμός απόδοσης αντλίας	PUMPEFF	-	0,82
13	Ύψος άντλησης	ALTITUDE	m	250
14	Μήκος σωληνώσεων	LENGTH	m	2000
15	Εσωτερική διάμετρος σωλήνων	DIN	m	0,1555
16	Τραχύτητα χαλυβδοσωλήνων	ROUGH	m	0,00002
17	Μάζα χάλυβα ανά μονάδα μήκους σωλήνα	TUBEMETER	kg/m	19,8
18	Πυκνότητα νερού (15 °C)	WATERDENS	kg/m ³	999
19	Κινηματική συνεκτικότητα νερού (15 °C)	VISC	m ² /s	0,000001147
20	Ενεργειακό περιεχόμενο H ₂ ανά μονάδα όγκου	H2DENS	kWh/Nm ³	3
21	Μέσος πληθυσμός νησιού	POPUL	persons	5000
22	Μέση κατανάλωση νερού ανά ημέρα και κάτοικο	CONSDAY	m ³ /day	0,295

ECONOMICAL				
23	Κόστος Α/Γ ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος	WINDINVESTAD	€/kW	1200
24	Συντελεστής κόστους μονάδας αφαλάτωσης	DESALINVESTAD	-	7200
25	Κόστος αντλίας ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος	PUMPINVESTAD	€/kW	400
26	Κόστος χάλυβα ανά μονάδα μάζας	STEELCOST	€/kg	0,7
27	Κόστος εκσκαφής δεξαμενών ανά μονάδα όγκου	TANKINVESTAD	€/m ³	10
28	Συντελεστής κόστους μονάδας ηλεκτρόλυσης ανά κυβικό Η ₂	ELECTRINVESTAD	€/Nm ³ /h	8000
29	Συντελεστής κόστους συντήρησης και λειτουργίας γενικός	TOTALMAINTAD	-	0,02
30	Συντελεστής κόστος συντήρησης και λειτουργίας μονάδας αφαλάτωσης	DESALMAINTAD	-	0,08
31	Συντελεστής κόστος συντήρησης και λειτουργίας μονάδας ηλεκτρόλυσης	ELECTRMAINTAD	-	0,05
32	Τιμή αγοράς της κιλοβατώρας	ENERGYCOST	€/kWh	0,11
33	Χρονική διάρκεια έργου	NYEARS	years	20
34	Προεξοφλητικό επιτόκιο	RRATE	-	0,1
35	Πληθωρισμός	FLA	-	0,05
36	Τιμή πώλησης πόσιμου νερού ανά μονάδα όγκου	PRICEWATER	€/m ³	1,2
37	Τιμή πώλησης υδρογόνου ανά μονάδα όγκου	PRICEHYDRO	€/m ³	1,1

Πίνακας 7.1 Τιμές παραμέτρων εισόδου

Επί της παρούσης, κρίνεται σκόπιμο να υπενθυμιστούν από πού προέρχονται τα μεταβαλλόμενα δεδομένα εισόδου. Αυτά αφορούν τις ανεμολογικές μετρήσεις, τις χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας της πρότυπης ανεμογεννήτριας, της μονάδας αντίστροφης ώσμωσης, και της μονάδας ηλεκτρόλυσης, όπως επίσης της αδιάστατες καμπύλες διακύμανσης του ετήσιου πληθυσμού και της ημερήσιας κατανάλωσης.

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΑΡΧΕΙΟ
ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΙΣΟΔΟΥ		
1	Ανεμολογικά δεδομένα	IOSANEM.DAT
2	Χαρακτηριστική καμπύλη ισχύος Α/Γ	WIND_TURB.DAT
3	Χαρακτηριστική καμπύλη μονάδας αφαλάτωσης	DESALIN_UNIT+ELECTROLYSER.DAT
4	Χαρακτηριστική καμπύλη μονάδας ηλεκτρόλυσης	DESALIN_UNIT+ELECTROLYSER.DAT
5	Αδιάστατη μεταβολή πληθυσμού	POPUL_FLUCTUATION.DAT
6	Αδιάστατη μεταβολή κατανάλωσης	CONSUMPTION_FLUCT.DAT

Πίνακας 7.2 Μεταβαλλόμενα δεδομένα εισόδου

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα μεγέθη εκείνα τα οποία προέκυψαν άμεσα από την επεξεργασία των παραμέτρων εισόδου και παρέμειναν σταθερά σε όλη τη διάρκεια της υπολογιστικής προσομοίωσης.

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΗ	ΜΟΝΑΔΑ	ΤΙΜΗ
OUTPUT DATA.TXT				
1	Ολική εγκατεστημένη ισχύς A/Γ	WINDPOWERTOT	kW	670
2	Αρχική ποσότητα νερού στον άνω ταμιευτήρα	VHINIT	m ³	35000
3	Ελάχιστη ποσότητα νερού στην κάτω δεξαμενή	VLINIT	m ³	8
4	Μέση ταχύτητα ροής νερού	VWATER	m/s	1,711
5	Αριθμός Reynolds	REY	-	232006,42
6	Συντελεστής αντίστασης	FRICTION	-	0,0162
7	Ισχύς αντλίας	PUMPPOWER	kW	109,22
8	Υδραυλικές απώλειες	DHF	m	31,19
9	Μάζα εγκατεστημένων χαλυβδοσωλήνων	TUBEWEIGHT	kg	39600
10	Μέση ωριαία κατανάλωση νερού ανά ώρα και κάτοικο	CONSHOUR	m ³ /h	0,0123

Πίνακας 7.3 Σταθερά μεγέθη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης

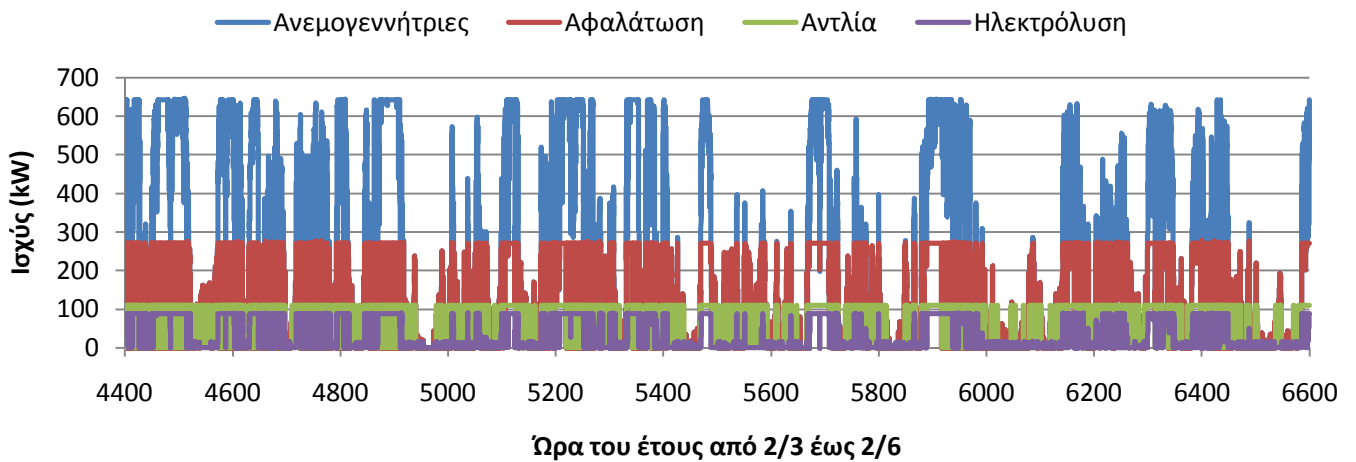
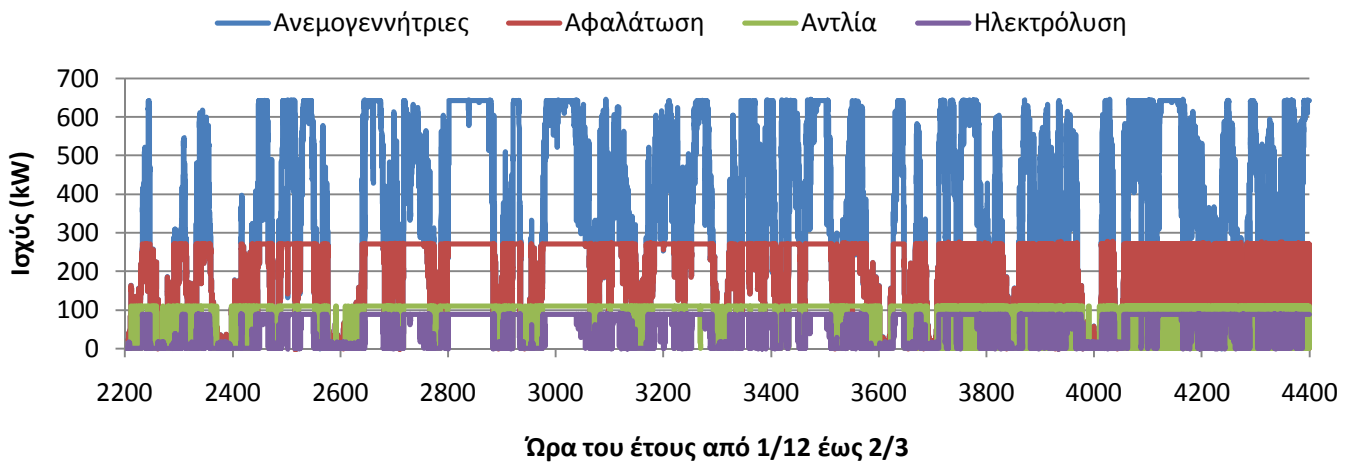
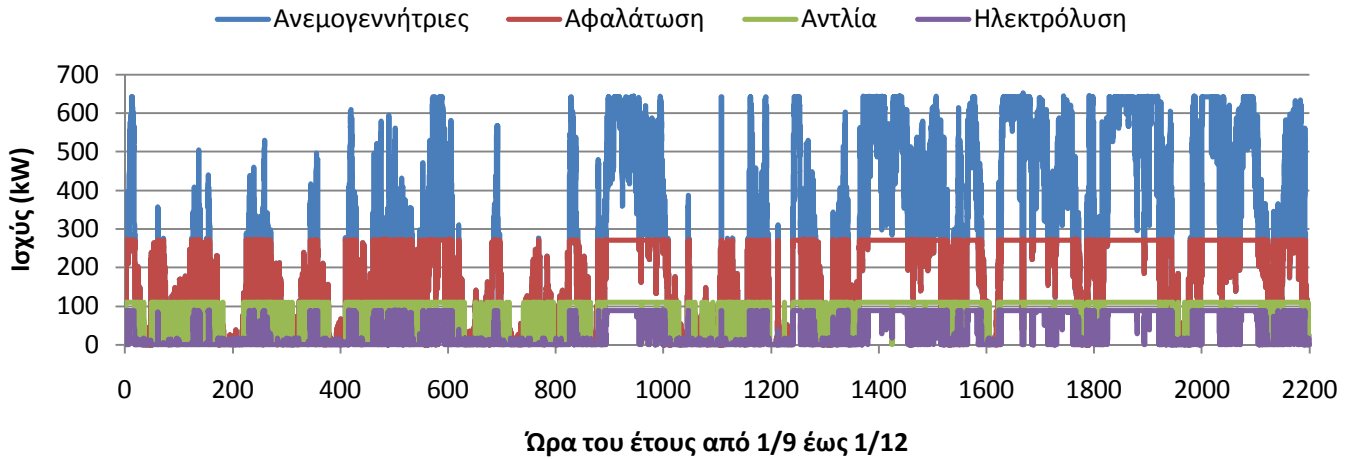
Τέλος, η τιμή του μόνιμου πληθυσμού, θα μπορούσε να πει κανείς ότι αντιστοιχεί σε ένα νησί με μέγεθος σαν την Μήλο, την Σίφνο, την Τήνο, την Άνδρο ή την Πάτμο όπου υπάρχει εντονότατο πρόβλημα λειψυδρίας, ενώ η τιμή πώλησης του νερού (1,2 €/m³) κρίνεται άκρως ανταγωνιστική και σε σχέση με το κόστος μεταφοράς νερού της τάξης των 5-8 €/m³ με υδροφόρες, και σε σχέση με αντίστοιχα συστήματα αντίστροφης ώσμωσης. Αξίζει να αναφερθεί ότι η μέγιστη επιτρεπτή τιμή πώλησης που περιείχε πρόσφατη πρόσκληση του υπουργείου για υποβολή προτάσεων για την αντιμετώπιση του προβλήματος της λειψυδρίας στα άνυδρα νησιά του Αιγαίου ήταν καθορισμένη στα 2,5 €/m³.

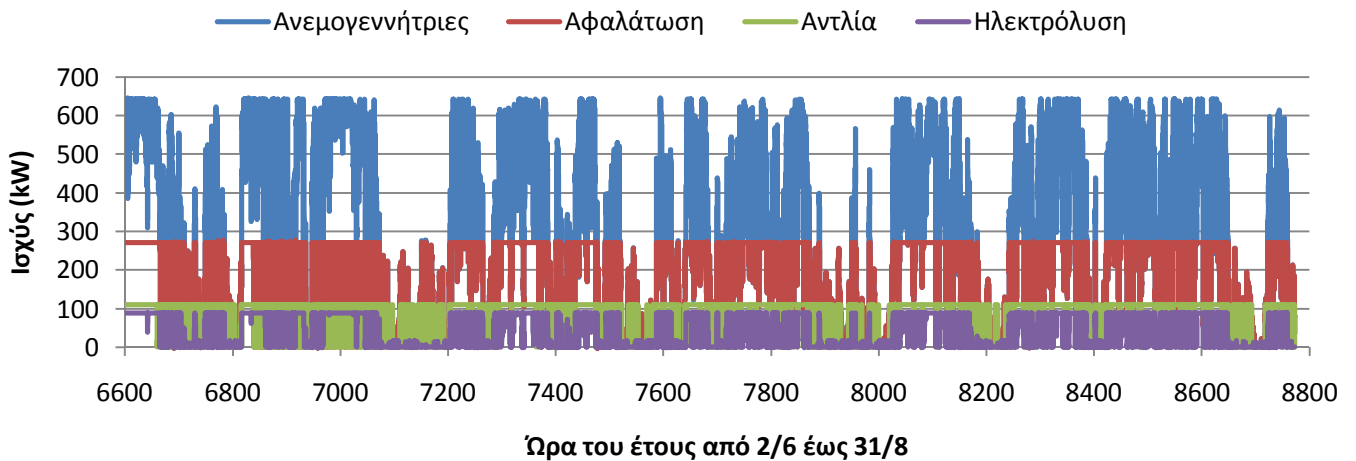
7.3 Παρουσίαση διαγραμμάτων λειτουργίας

Στην ενότητα αυτή θα γίνει η παρουσίαση των διαγραμμάτων λειτουργίας του συστήματος. Τα διαγράμματα που δίνονται είναι **ετήσια**, όμως θα επιλεγθούν και κάποια **μηνιαία**, **εβδομαδιαία**, και **ημερήσια** διαγράμματα για βαθύτερη κατανόηση της προσομοίωσης, και των χρονικά μεταβαλλόμενων μεγεθών. Επίσης στο τέλος θα δοθούν οι **καμπύλες διάρκειας** των μεγεθών αυτών συναρτήσει του χρόνου επί τοις εκατό.

7.3.1 Ετήσια διαγράμματα λειτουργίας

Στο πρώτο διάγραμμα παρατηρείται η παραγόμενη αιολική ισχύς από τις ανεμογεννήτριες, η κατανάλωσή της από την μονάδα αντίστροφης ώσμωσης και την μονάδα ηλεκτρόλυσης, όπως επίσης η κατανάλωση ισχύος της άντλησης από το τοπικό δίκτυο ηλεκτροδότησης.

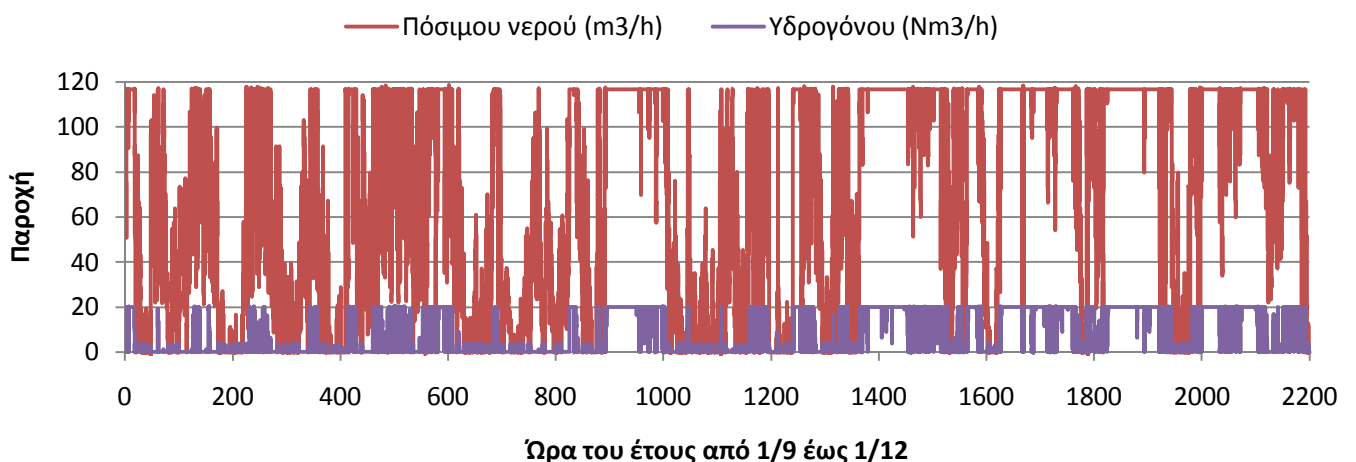




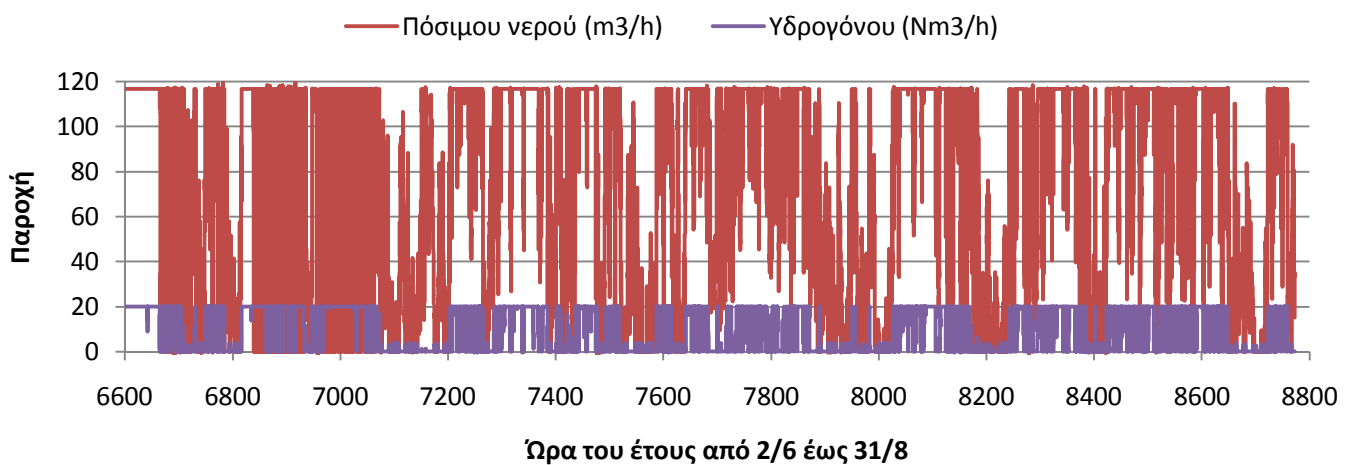
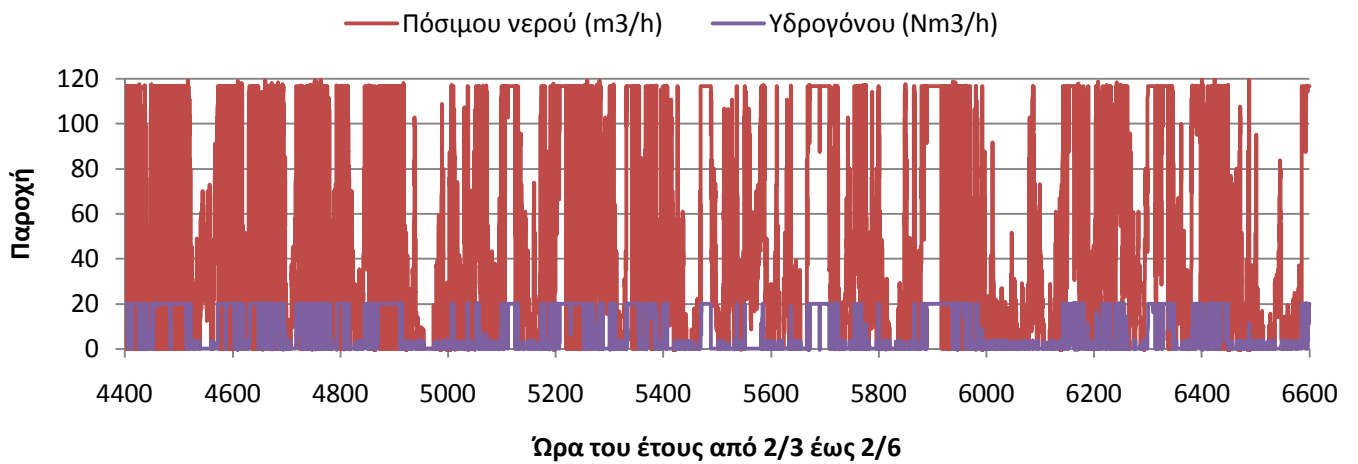
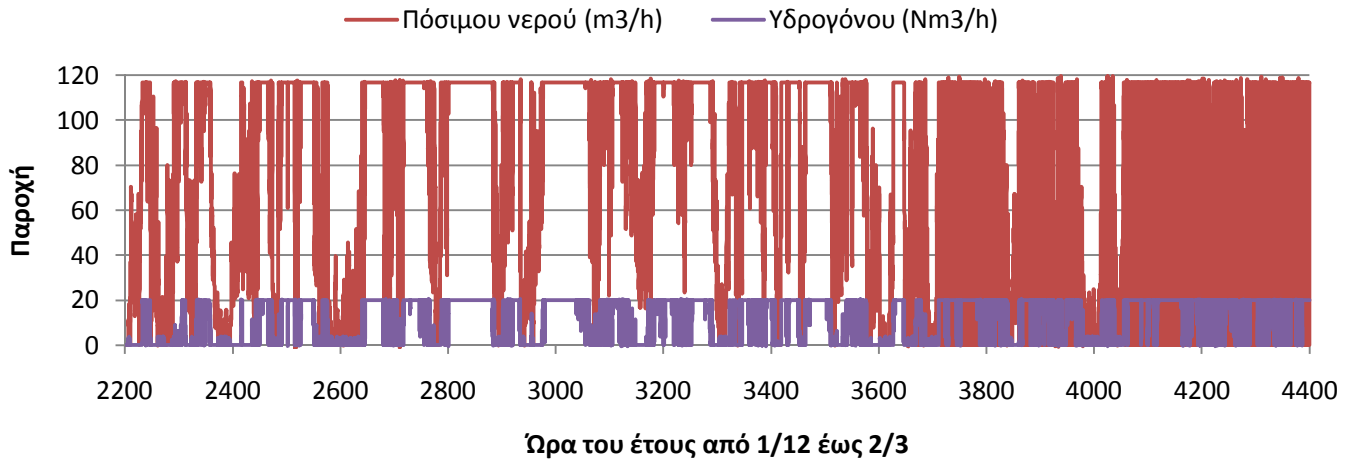
Σχήμα 7.1 Ετήσια παραγωγή και κατανάλωση ισχύος των υποσυστημάτων

Εύκολα από το σχήμα 7.1 παρατηρεί κανείς πόσο έντονα μεταβάλλεται η παραγόμενη αιολική ισχύς από τις Α/Γ στη διάρκεια του έτους. Επίσης, διακρίνεται πώς η μονάδα αφαλάτωσης «παρακολουθεί» την διαθέσιμη αιολική ισχύ, γεγονός το οποίο οφείλεται στο μεταβλητό σημείο λειτουργίας της. Επιπλέον, όπου υπάρχει πλεόνασμα ισχύος ή δεν λειτουργεί η αφαλάτωση, την διαθέσιμη ισχύ εκμεταλλεύεται η μονάδα ηλεκτρόλυσης, μεταβλητού σημείου λειτουργίας επίσης.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η παραγωγή αφαλατωμένου ύδατος από την αφαλάτωση, και η παραγωγή υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση, ουσιαστικά δηλαδή οι παροχές των δύο (2) προϊόντων του συστήματος. Και σε αυτό το διάγραμμα (Σχήμα 7.2) παρατηρούνται χρονικές περιόδους όπου οι μονάδες αφαλάτωσης και ηλεκτρόλυσης δουλεύουν στο ονομαστικό τους σημείο λειτουργίας, ενώ αντίστοιχα υπάρχουν διαστήματα, όπου οι παροχές αυξομειώνονται έντονα.

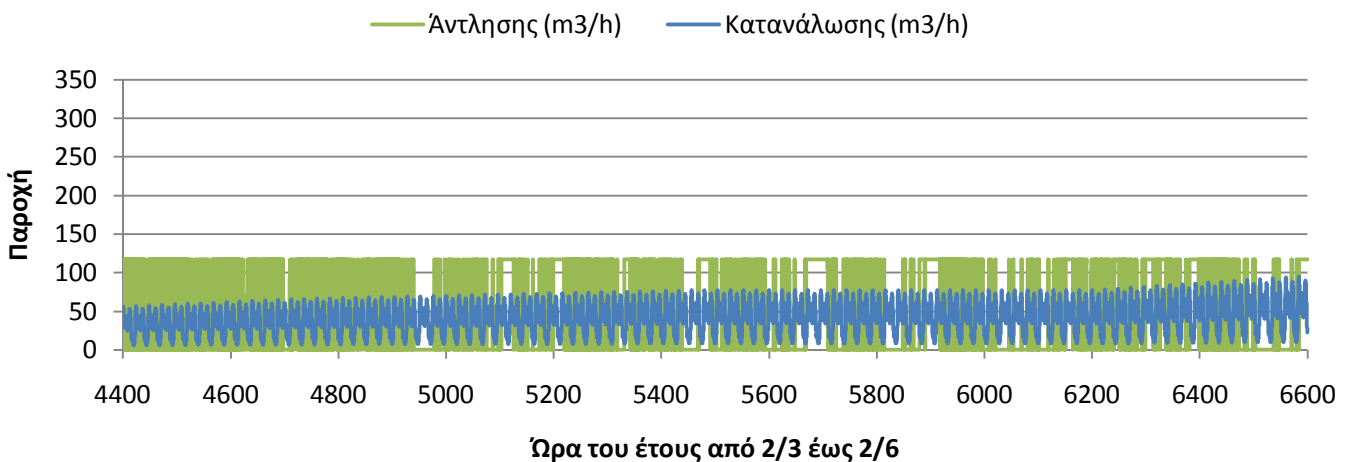
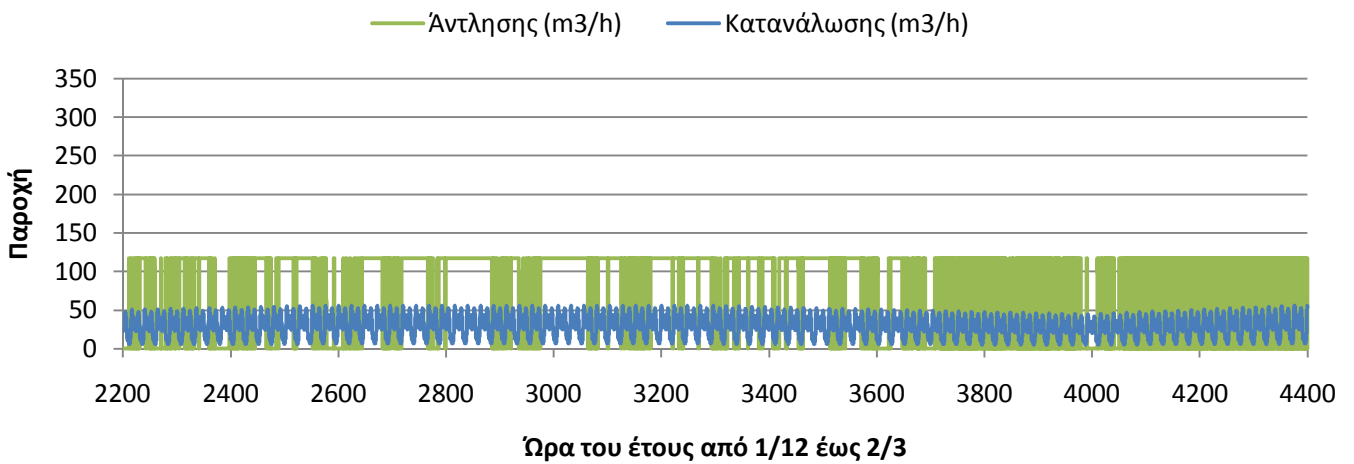
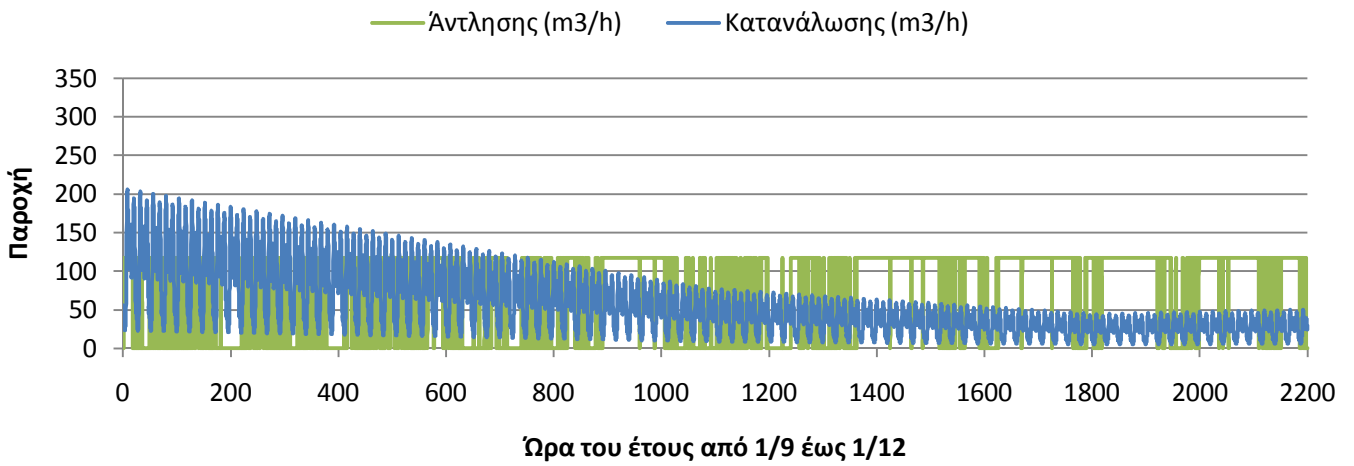


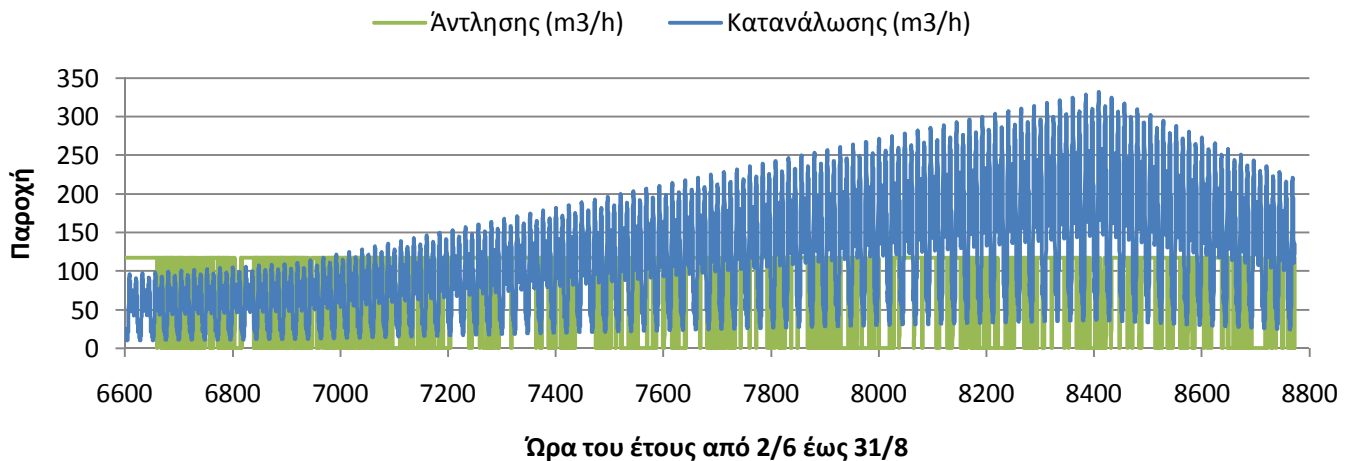
Κεφάλαιο 7^ο – Αποτελέσματα προσομοίωσης λειτουργίας συστήματος



Σχήμα 7.2 Ετήσια παροχή παραγόμενου πόσιμου νερού και υδρογόνου

Ακολουθεί το διάγραμμα που μας παρουσιάζει την παροχή της αντλίας προς τον άνω ταμιευτήρα με την παροχή της κατανάλωσης του πληθυσμού από τον ίδιο ταμιευτήρα.





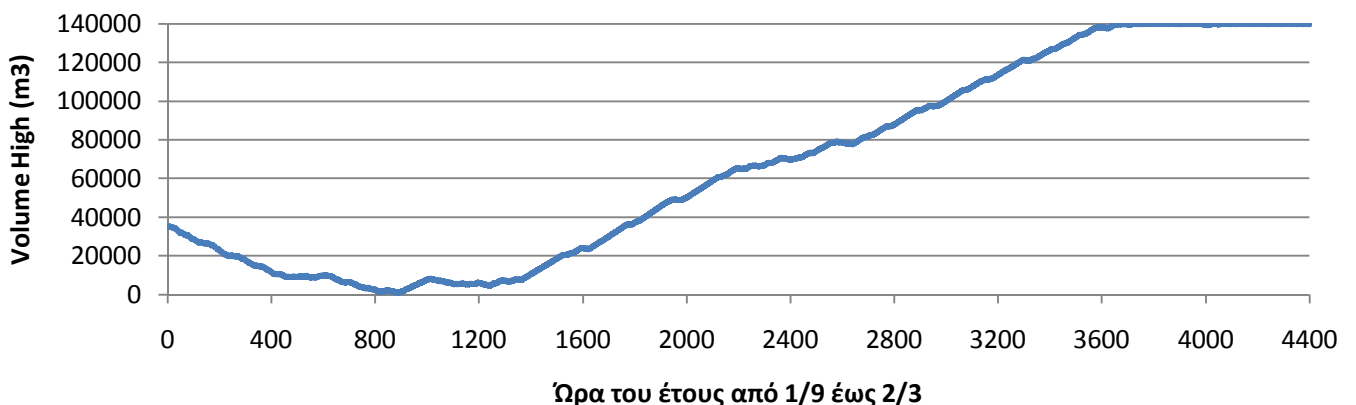
Σχήμα 7.3 Ετήσια παροχή άντλησης πόσιμου νερού και κατανάλωση πληθυσμού

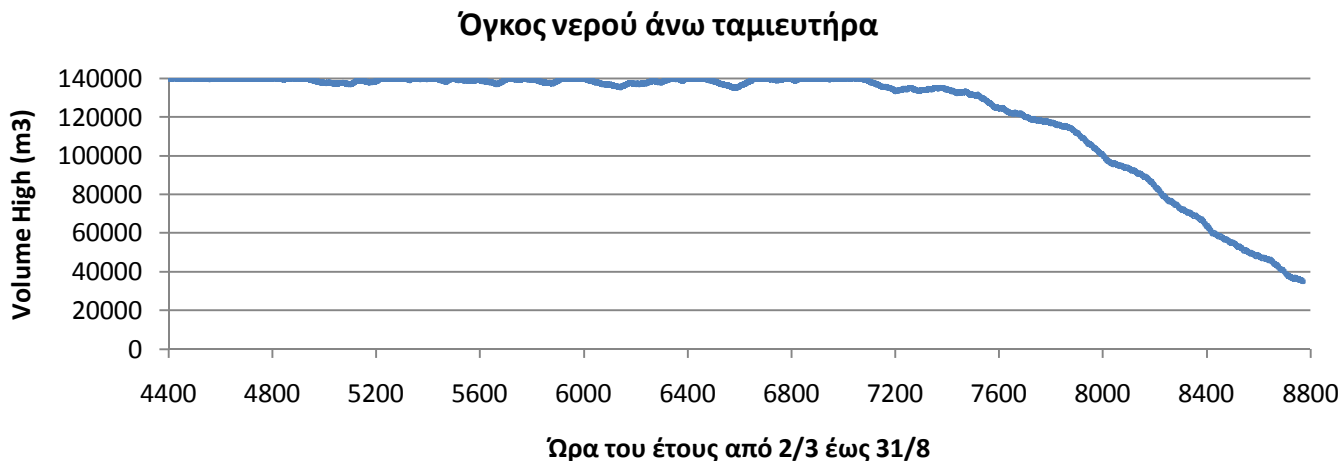
Από τα παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα 7.3) διακρίνεται αφενός η σταθερή παροχή της αντλίας και αφετέρου η μεγάλη διακύμανση της συνολικής κατανάλωσης του πληθυσμού, η οποία σχεδόν πενταπλασιάζεται την περίοδο αιχμής στα μέσα του Αυγούστου σε σχέση με την χειμερινή περίοδο. Για αυτό έχουμε φροντίσει με έναν ταμιευτήρα ανάλογης χωρητικότητας ώστε να μην παρατηρείται έλλειψη νερού σε καμία στιγμή, όπως θα δούμε και από το επόμενο σχήμα.

Από το διάγραμμα παρατηρούμε πως στην χρονική στιγμή $t = 888$ hours ή αλλιώς στο χρονικό βήμα $NSTEP = 5328$, έχουμε τον ελάχιστο όγκο πόσιμου νερού στη δεξαμενή ίσο με $VOLUMHIGH_{min} = 1070,7 \text{ m}^3$. Ο όγκος αυτός αντιστοιχεί στο 0,77% της συνολικής χωρητικότητας του άνω ταμιευτήρα σε φρέσκο νερό:

$$\frac{VOLUMHIGH_{min}}{VHIGH} = \frac{1070,7}{140000} = 0,77\%$$

Όγκος νερού άνω ταμιευτήρα



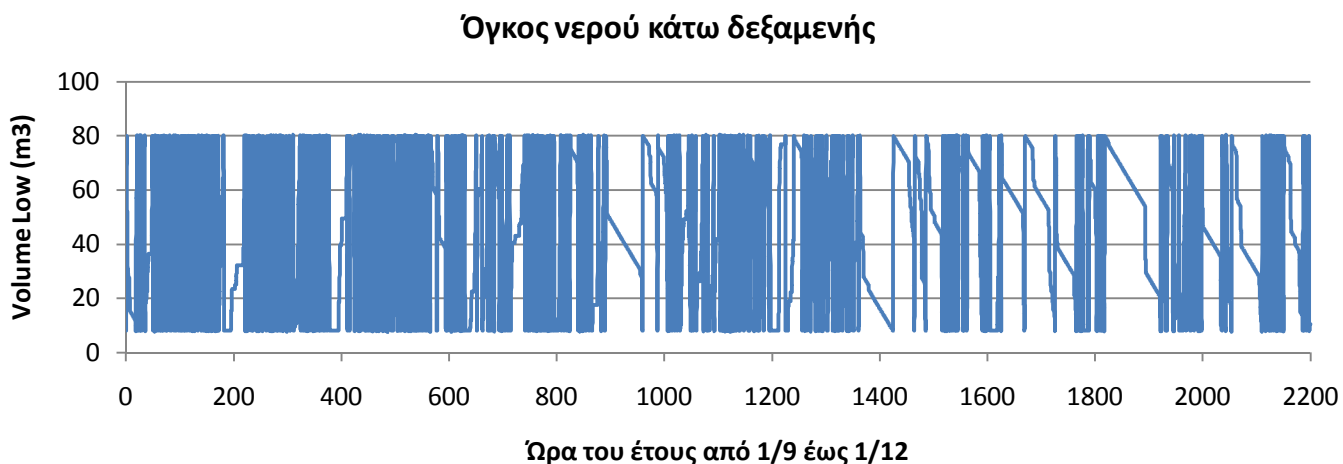


Σχήμα 7.4 Ετήσια ποσότητα νερού στον άνω ταμιευτήρα

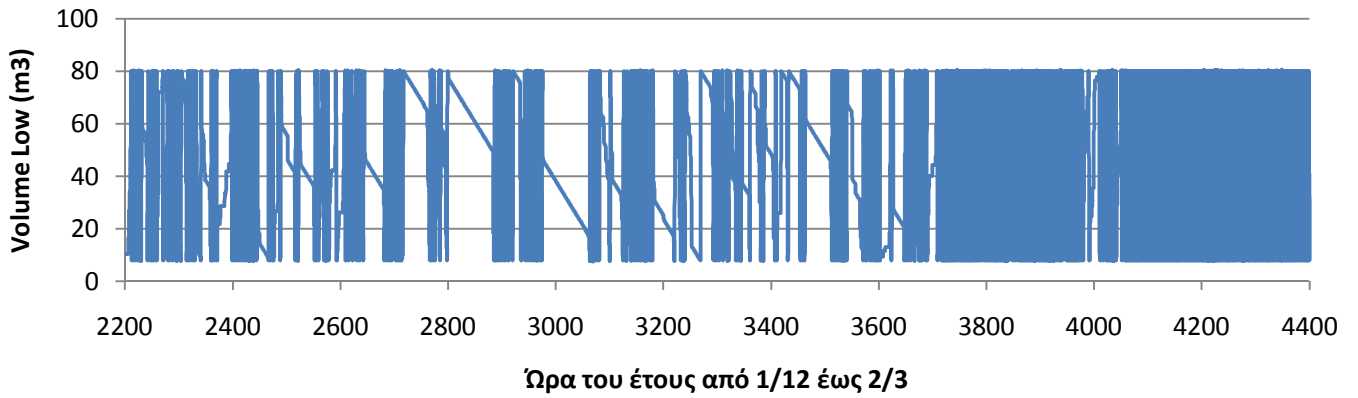
Επιπλέον σύμφωνα με την προτεινόμενη διαστασιολόγηση, διαπιστώνουμε πως στο τέλος της προσομοίωσης, ο εναπομένον όγκος νερού είναι 34917 m^3 , δηλαδή ίδιος σχεδόν με την αρχική ποσότητα νερού στον άνω ταμιευτήρα που ήταν $V_{HINIT} = 35000 \text{ m}^3$. Κάτι το οποίο σημαίνει προφανώς ότι το όλο σύστημα μπορεί να επαναλάβει την ετήσια λειτουργία του ξανά και ξανά, επιστρέφοντας κάθε έτος στο ίδιο εναρκτήριο σημείο λειτουργίας, με την προϋπόθεση ότι οι υπόλοιπες παράμετροι παραμένουν σταθερές.

Παράλληλα στο παρακάτω σχήμα 7.5 βλέπουμε τον όγκο νερού, όπως αυτός διακυμάνθηκε στην κάτω δεξαμενή. Όπως έχει προαναφερθεί, σημαντικό στοιχείο στην προσομοίωση είναι ο αριθμός εκκινήσεων της αντλητικής διάταξης κάθε φορά που πληρώνεται η κάτω δεξαμενή με φρέσκο νερό. Οι εκκινήσεις της αντλίας είναι $PUMPSTART = 1688$, δηλαδή οι εκκινήσεις ανά ημέρα θα είναι $PUMPSTARTAVE = 4,6 \text{ starts/day}$, αριθμός αρκετά ικανοποιητικός:

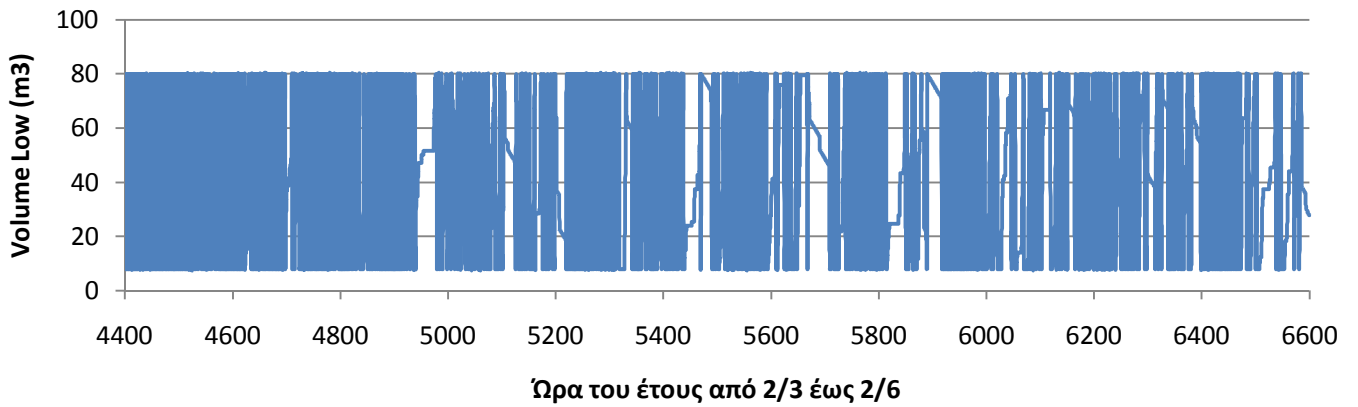
$$PUMPSTARTAVE = \frac{PUMPSTART * 6 * 24}{L} = \frac{1688 * 6 * 24}{52633} = 4,6 \text{ starts/day}$$



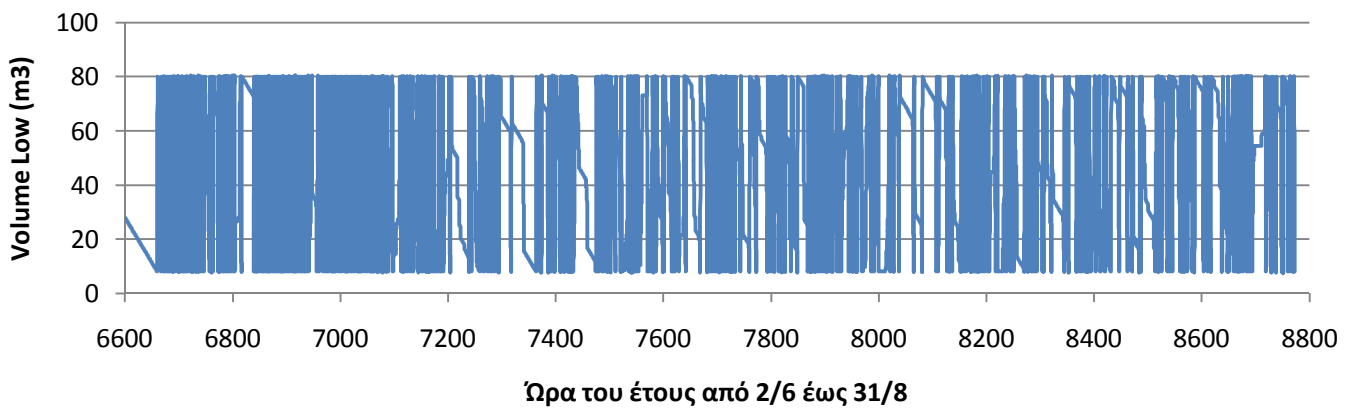
Όγκος νερού κάτω δεξαμενής



Όγκος νερού κάτω δεξαμενής



Όγκος νερού κάτω δεξαμενής

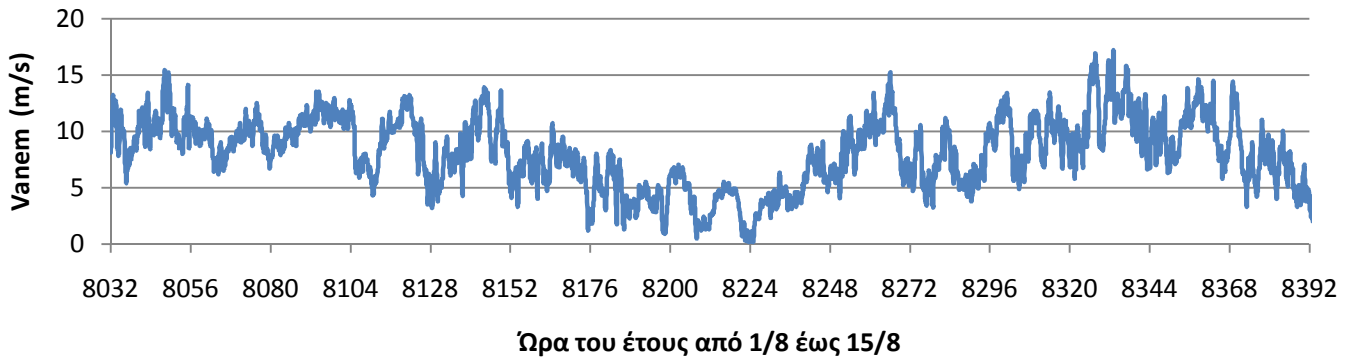


Σχήμα 7.5 Ετήσια ποσότητα νερού στην κάτω δεξαμενή

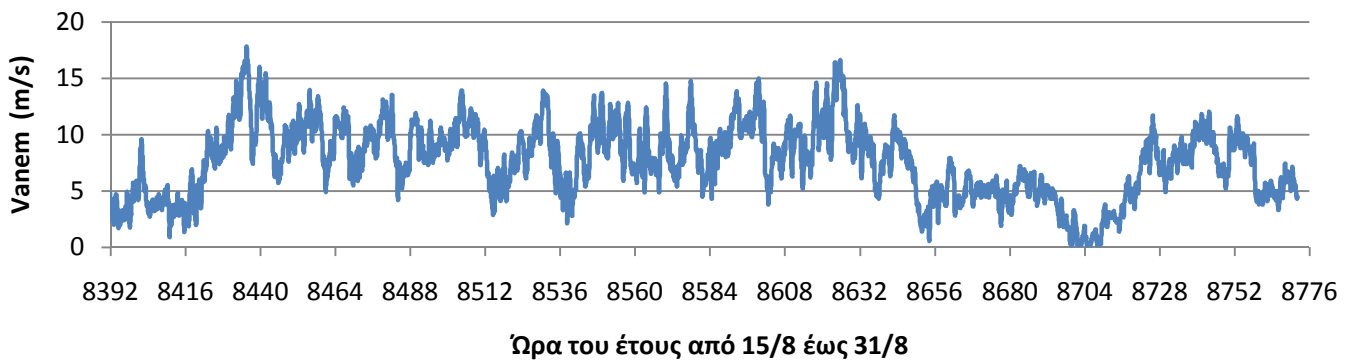
7.3.2 Μηνιαία διαγράμματα λειτουργίας

Επιλέχθηκε ο μήνας με τις μεγαλύτερες ανάγκες σε πόσιμο νερό κατά τη διάρκεια του έτους, ο Αύγουστος με μέγιστη κατανάλωση νερού 331,88 m³/h. Ο μήνας Αύγουστος θεωρείται πως ξεκινάει στις 8032 ώρες του χρόνου και λήγει στις 8772 ώρες, δηλαδή σε υπολογιστικά βήματα από το 48192 έως το 52633. Τα διαγράμματα είναι ανά 24ωρο στον άξονα του χρόνου.

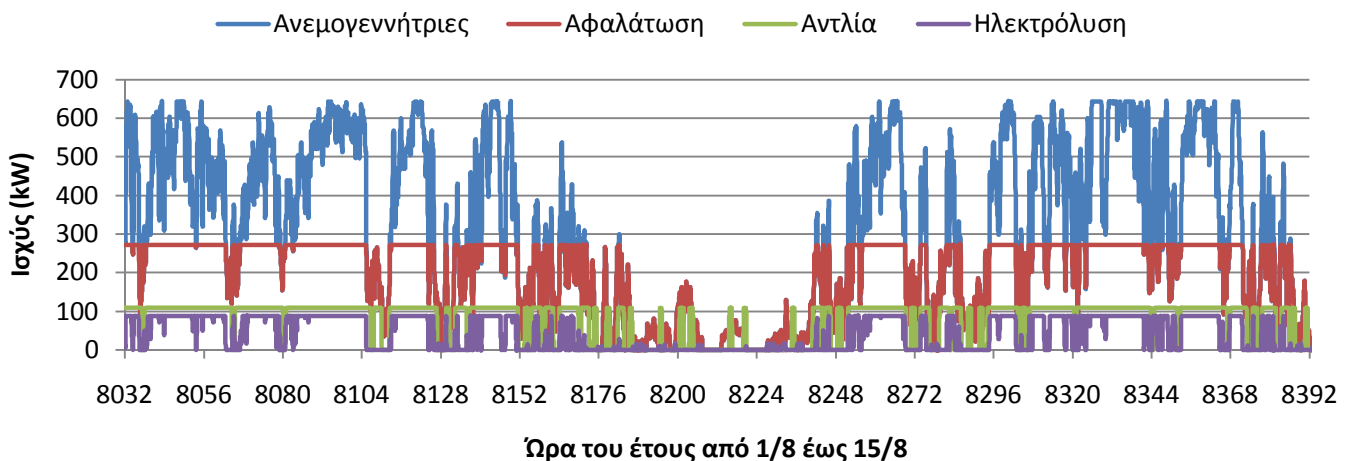
Ταχύτητα Ανέμου

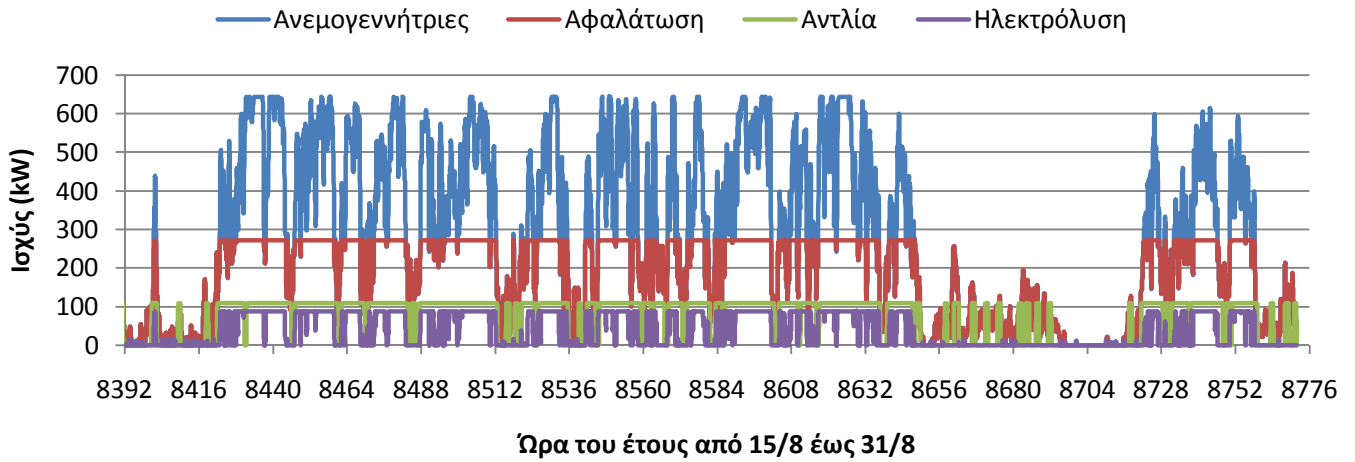


Ταχύτητα Ανέμου



Σχήμα 7.6 Μηνιαία ταχύτητα ανέμου

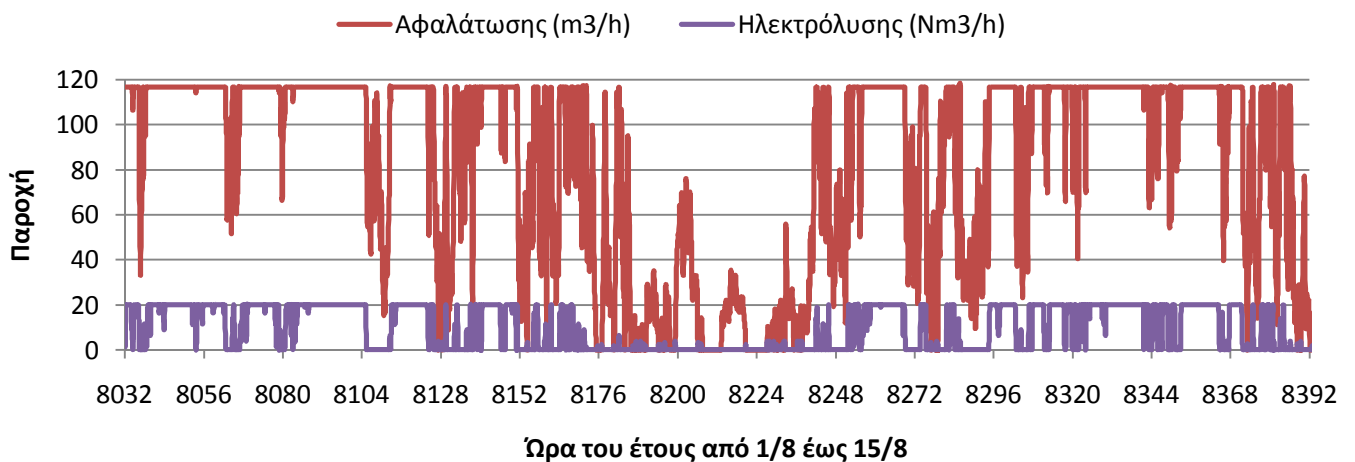


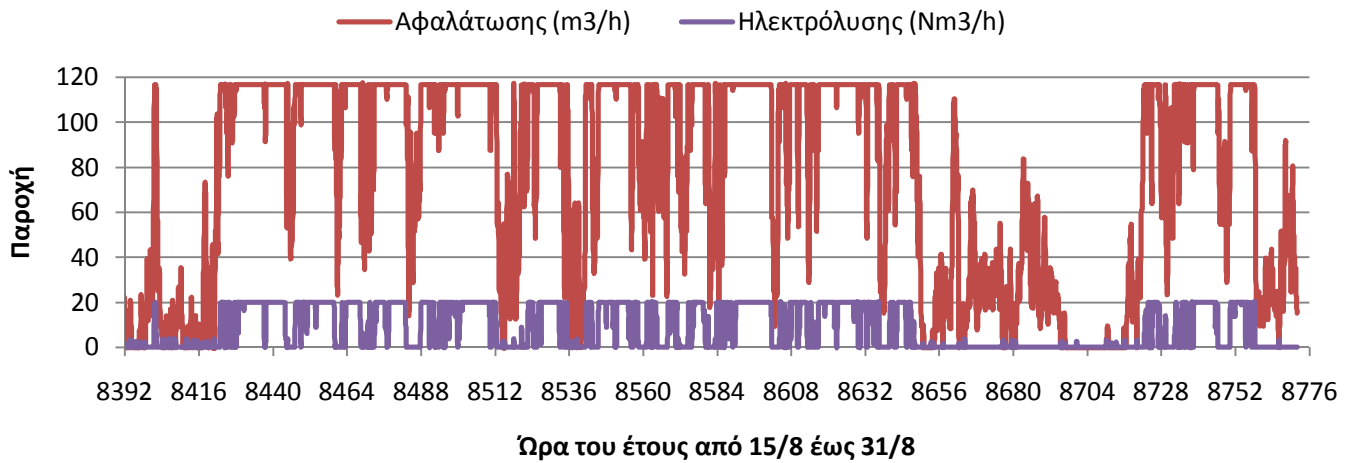


Σχήμα 7.7 Μηνιαία παραγωγή και κατανάλωση ισχύος των υποσυστημάτων

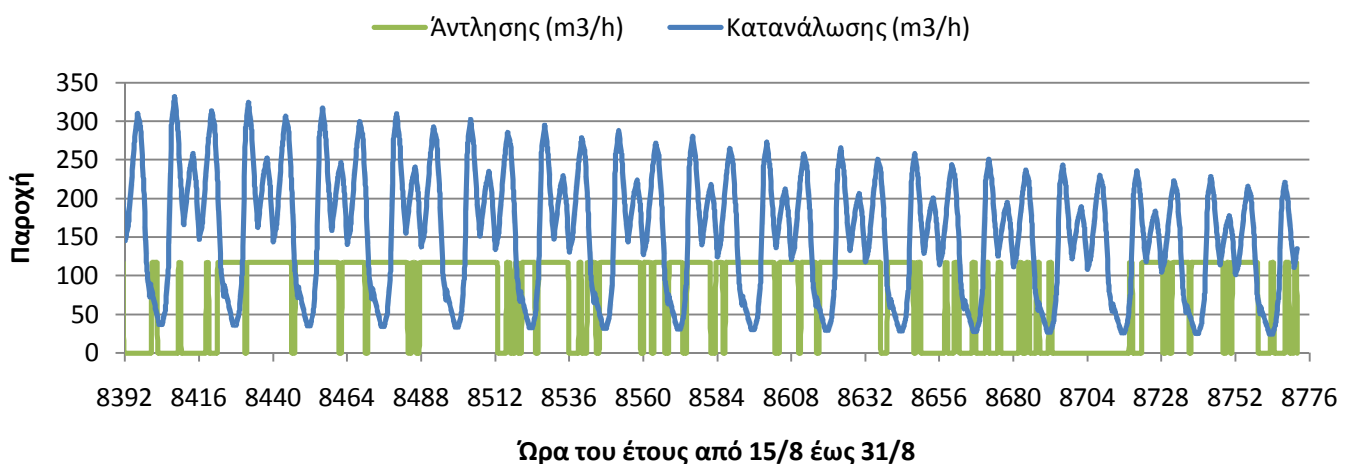
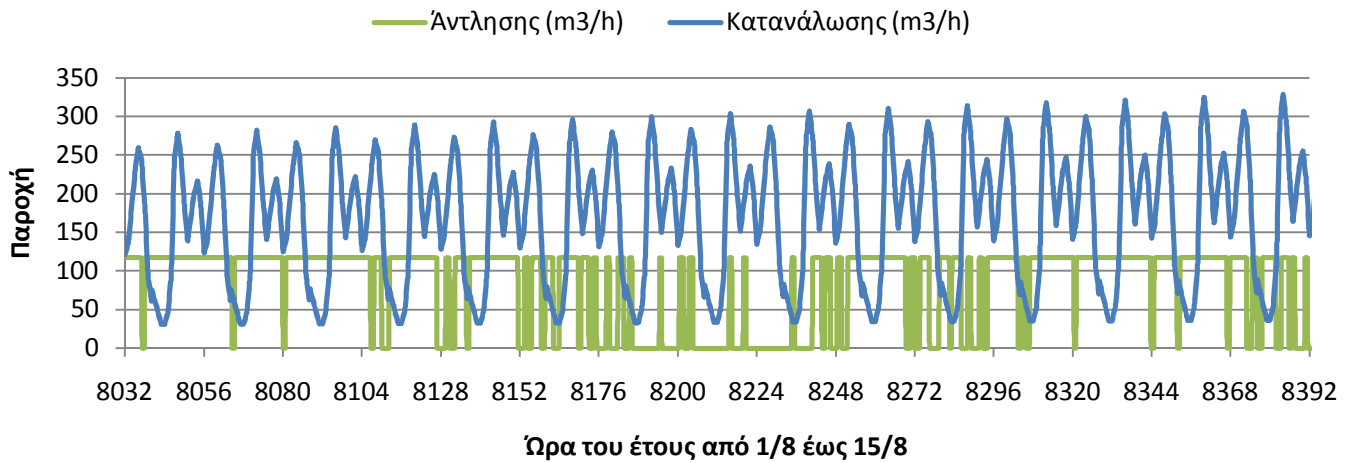
Όπως παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα ανέμου και ισχύος, στις περισσότερες ημέρες του Αυγούστου η αιολική ισχύς υπερκαλύπτει τις ανάγκες της αφαλάτωσης και της ηλεκτρόλυσης. Βέβαια υπάρχουν και μερικές ημέρες όπου λόγω άπνοιας, η αιολική ισχύς κυμαίνεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Έτσι προφανώς στις περιόδους που δεν επαρκεί η ισχύς για να λειτουργήσει η μονάδα αντίστροφης ώσμωσης, δεν παράγεται φρέσκο νερό και συνεπώς δεν χρειάζεται να λειτουργεί η αντλητική διάταξη.

Στο επόμενο σχήμα 7.8, διακρίνεται αντίστοιχα η παραγωγή πόσιμου νερού και υδρογόνου για την περίοδο που εξετάζουμε. Παρατηρούνται και εδώ τα σημεία πλήρους και ελάχιστης λειτουργίας των υποσυστημάτων.



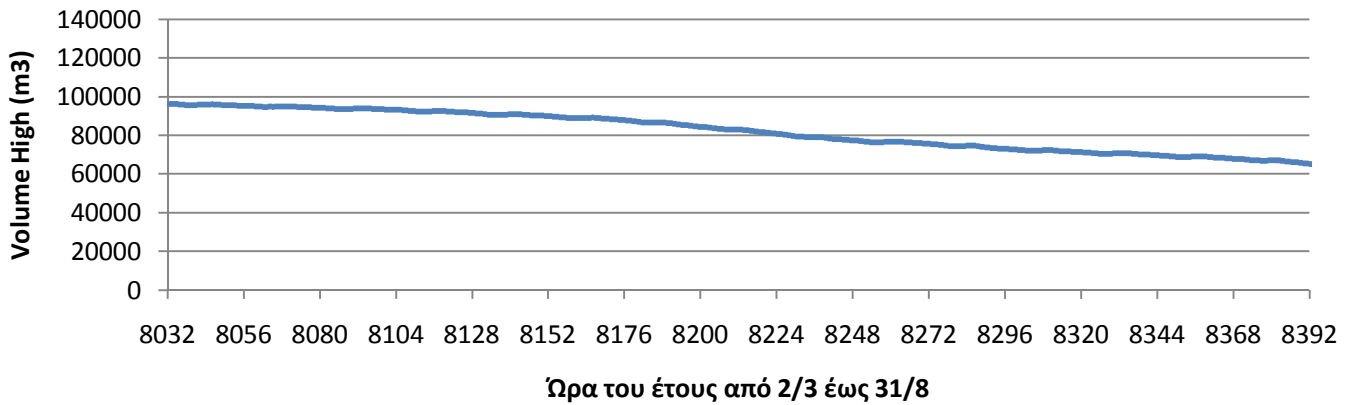


Σχήμα 7.8 Μηνιαία παροχή παραγόμενου πόσιμου νερού και υδρογόνου

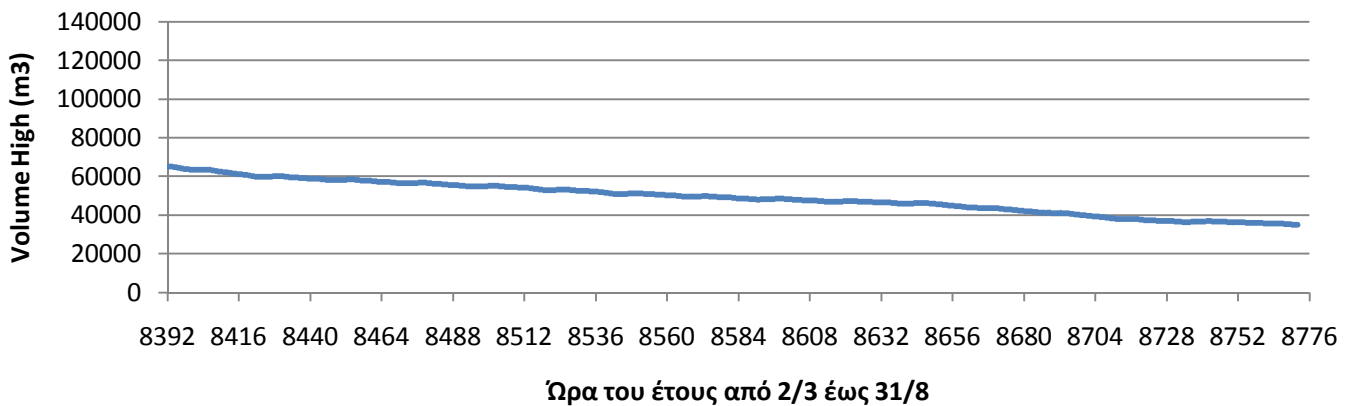


Σχήμα 7.9 Μηνιαία παροχή άντλησης πόσιμου νερού και κατανάλωση πληθυσμού

Όγκος νερού άνω ταμιευτήρα



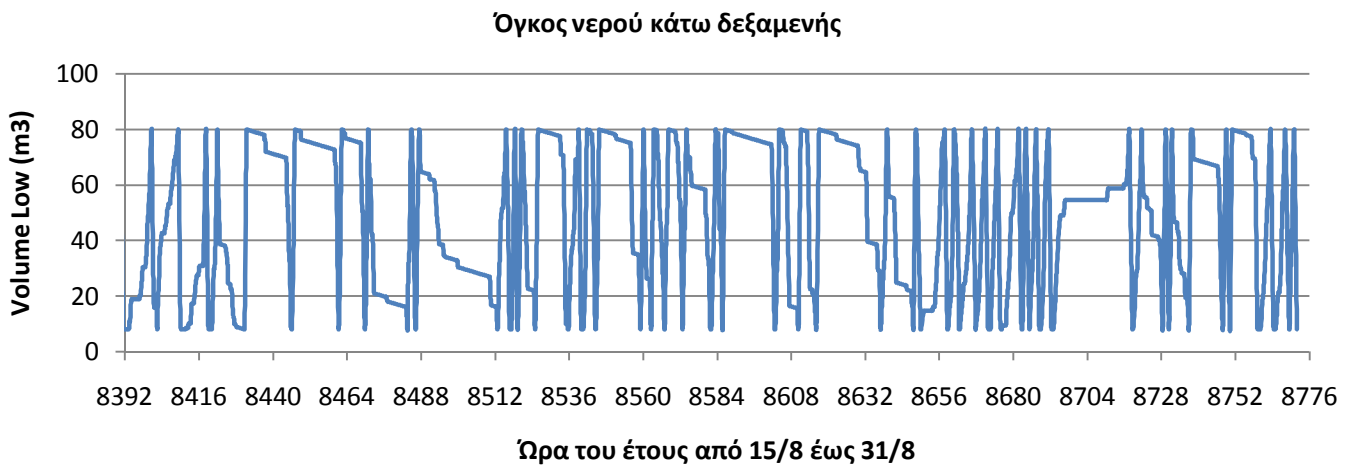
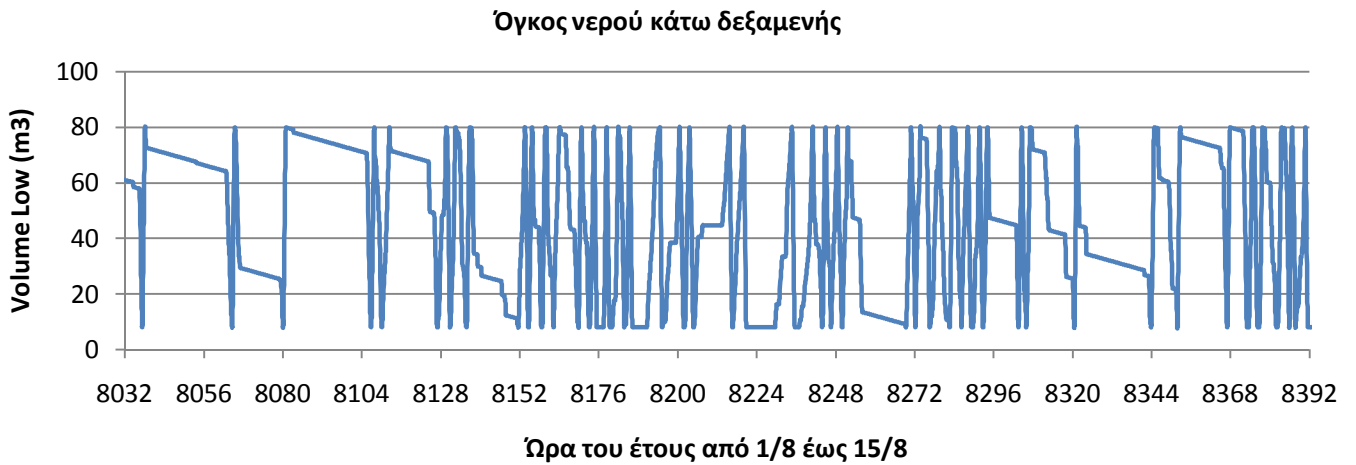
Όγκος νερού άνω ταμιευτήρα



Σχήμα 7.10 Μηνιαία ποσότητα νερού στον άνω ταμιευτήρα

Όπως προκύπτει από την μηνιαία προσομοίωση, η αιχμή της ζήτησης αφαλατωμένου ύδατος για τον Αύγουστο είναι ίση με $QCONS_{max} = 331,88 \text{ m}^3/h$, ενώ η μέση κατανάλωση από τον άνω ταμιευτήρα προς τον πληθυσμό είναι $\overline{QCONS} = 161,55 \text{ m}^3/h$. Από την άλλη πλευρά, η μέση παροχή του αντλούμενου νερού προς τον άνω ταμιευτήρα για την ίδια περίοδο είναι $\overline{QPUMP} = 78,7 \text{ m}^3/h$. Αυτό σημαίνει πως οι καταναλώσεις ικανοποιούνται συμπληρωματικά από το αποταμιευμένο νερό της δεξαμενής, πράγμα το οποίο οδηγεί στην μείωση της ποσότητας του αποθηκευμένου νερού, που παρατηρείται στο άνωθεν σχήμα. Αυτό συμβαίνει κυρίως διότι αυτό τον μήνα έχουμε τον μέγιστο πληθυσμό στο νησί, ύψους 15000 ατόμων.

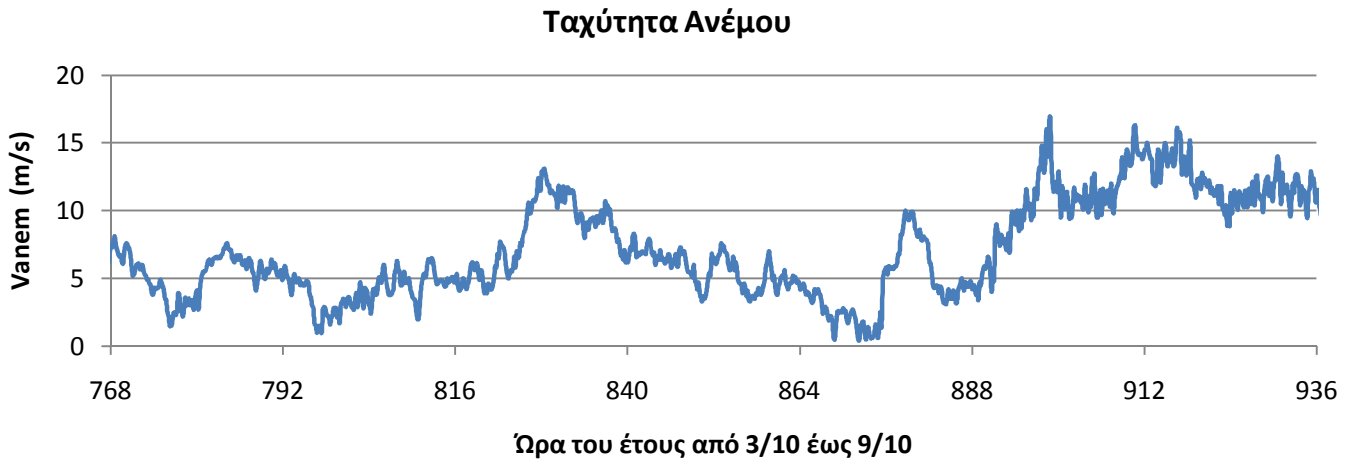
Επιπλέον στο παρακάτω σχήμα 7.11, διακρίνεται η διακύμανση της ποσότητας του φρέσκου νερού στην κάτω δεξαμενή. Όπως φαίνεται ο όγκος του νερού δεν πέφτει ποτέ κάτω από τον ελάχιστο επιτρεπτό που έχουμε θέσει, ίσο με $VLINIT = 8 \text{ m}^3$.



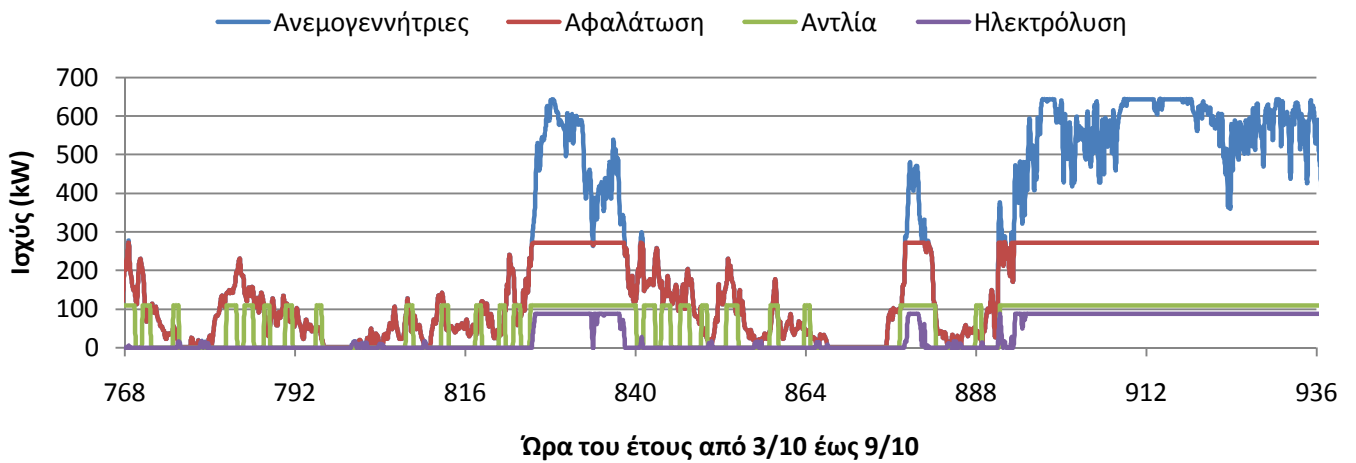
Σχήμα 7.11 Μηνιαία ποσότητα νερού στην κάτω δεξαμενή

7.3.3 Εβδομαδιαία διαγράμματα λειτουργίας

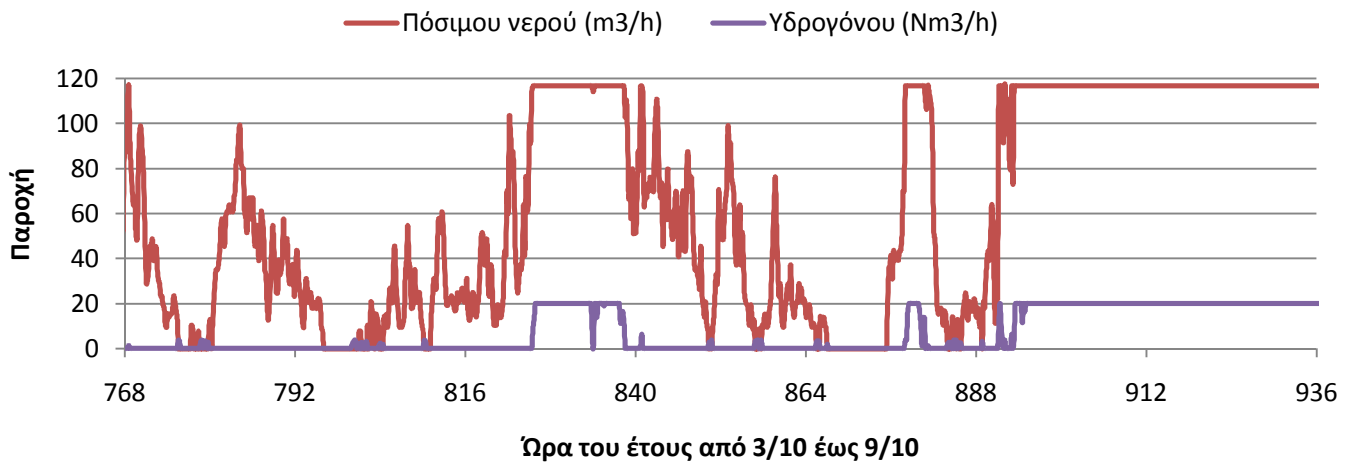
Παρακάτω παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για μια αντιπροσωπευτική εβδομάδα του Οκτωβρίου, και δίνονται κάποια γενικά συμπεράσματα. Η εβδομάδα αυτή χαρακτηρίζεται από διαστήματα με άπνοια και από τα χαμηλότερα επίπεδα πληρώσεως του άνω ταμιευτήρα. Το χρονικό διάστημα τοποθετείτε από τις 3/10 ημέρα Κυριακή, έως και τις 9/10 ημέρα Σάββατο. Σε ώρες του έτους της προσομοίωσης αυτό είναι από 768 έως 936 ώρες (υπολογιστικά βήματα $4608 \div 5616$). Τα διαγράμματα είναι ανά 24ωρο στον άξονα του χρόνου.



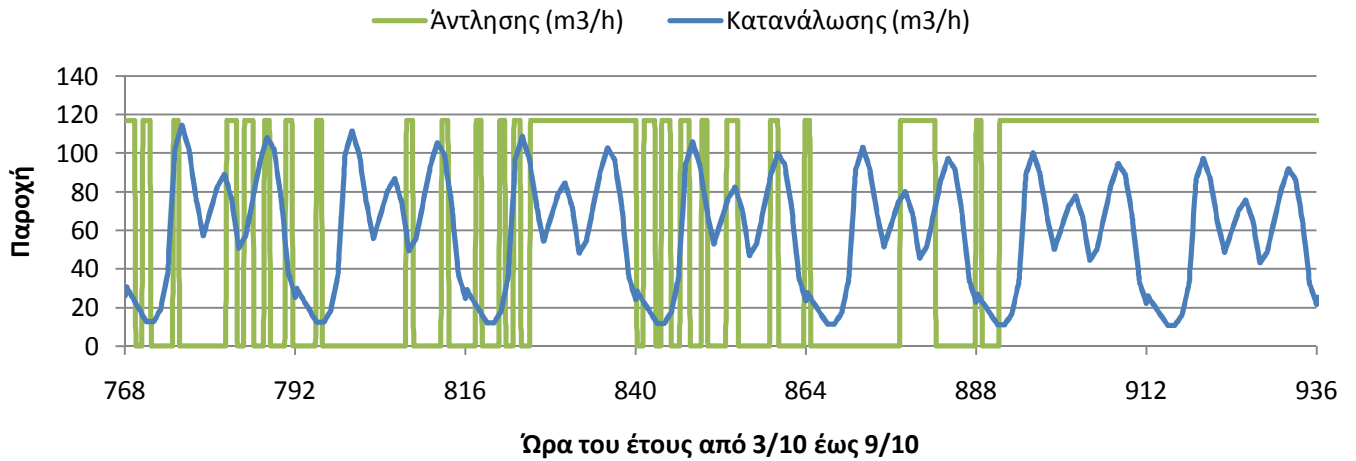
Σχήμα 7.12 Εβδομαδιαία ταχύτητα ανέμου



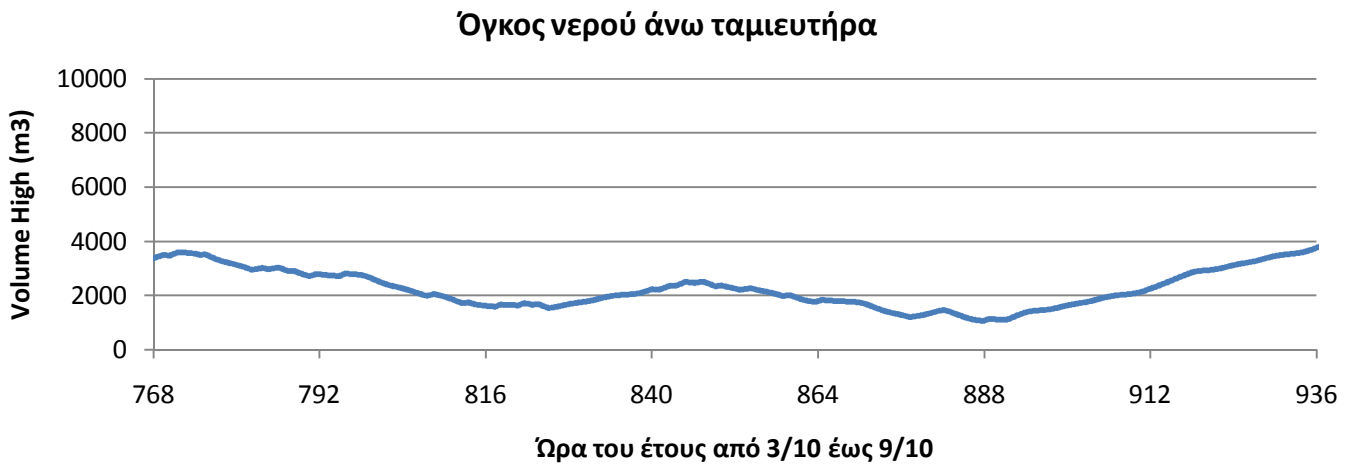
Σχήμα 7.13 Εβδομαδιαία παραγωγή και κατανάλωση ισχύος των υποσυστημάτων



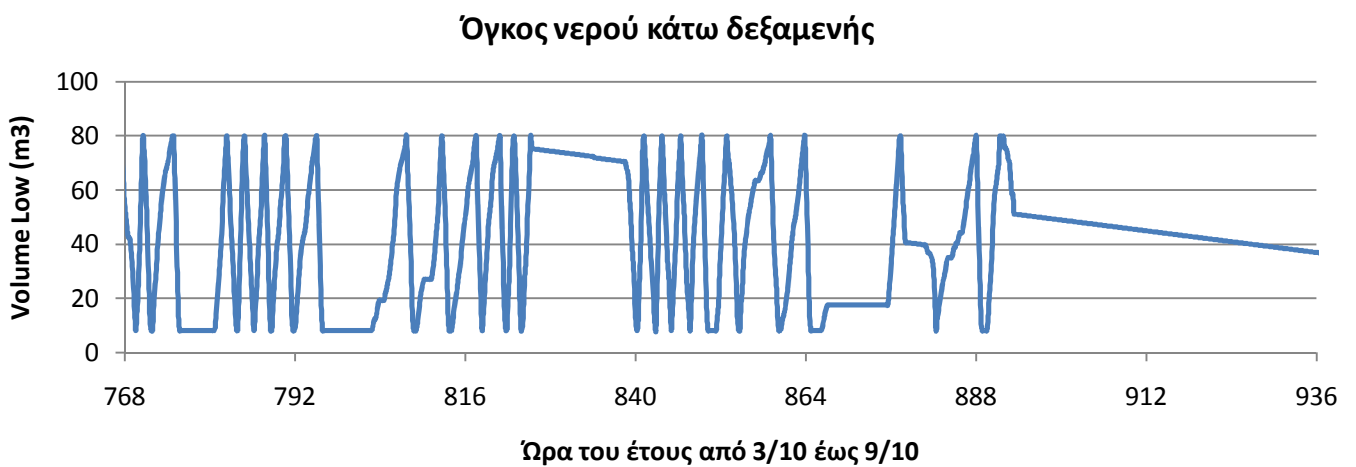
Σχήμα 7.14 Εβδομαδιαία παροχή παραγόμενου πόσιμου νερού και υδρογόνου



Σχήμα 7.15 Εβδομαδιαία παροχή άντλησης πόσιμου νερού και κατανάλωση πληθυσμού



Σχήμα 7.16 Εβδομαδιαία ποσότητα νερού στον άνω ταμιευτήρα



Σχήμα 7.17 Εβδομαδιαία ποσότητα νερού στην κάτω δεξαμενή

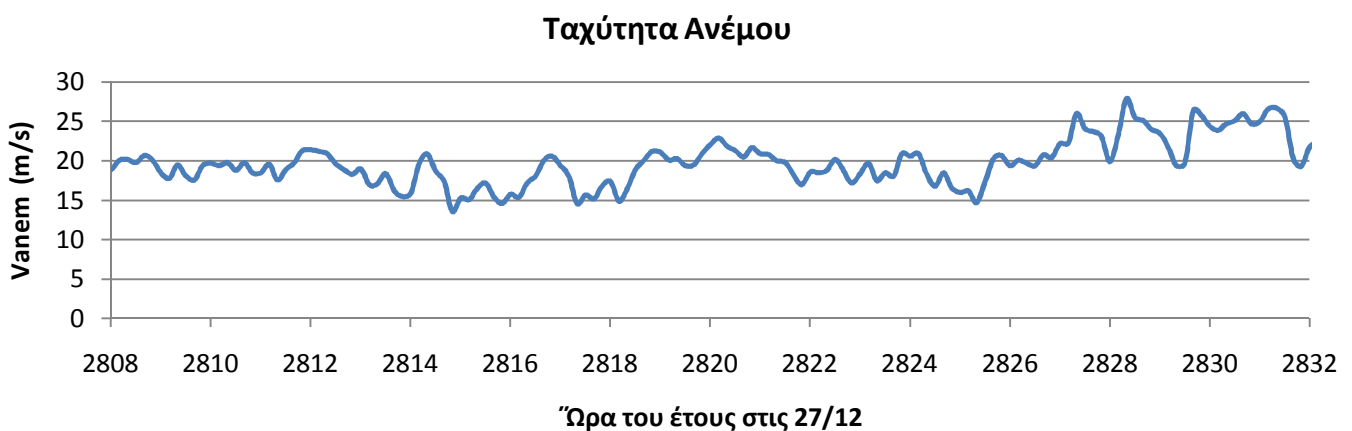
Για την εβδομάδα αυτή, παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα λειτουργίας ότι λόγω σχετικά μεγάλων και συχνών διαστημάτων άπνοιας, η διαθέσιμη αιολική ισχύς κυμάνθηκε σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Έτσι, σχεδόν όση διαθέσιμη ισχύς υπάρχει, καταναλώνεται από την μονάδα αφαλάτωσης για την παραγωγή φρέσκου νερού. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης αυτή την περίοδο εργάζεται ελάχιστα.

Επίσης, διακρίνουμε ότι λόγω της αυξημένης συνεχόμενης ζήτησης νερού για την κάλυψη των αναγκών του πληθυσμού, η στάθμη του άνω ταμιευτήρα βρίσκεται στα χαμηλότερα επίπεδα του έτους. Στο χρονικό σημείο για $t = 888 \text{ hours}$ έχουμε τον ελάχιστο όγκο πόσιμου νερού στη δεξαμενή ίσο με $VOLUMHIGH_{min} = 1070,7 \text{ m}^3$. Ο όγκος αυτός αντιστοιχεί στο 0,77% της συνολικής χωρητικότητας του άνω ταμιευτήρα σε φρέσκο νερό.

Επιπλέον, στις τελευταίες δύο (2) μέρες της εβδομάδας παρατηρείται αύξηση του αιολικού δυναμικού, με συνέπεια να δουλεύουν όλα τα υποσυστήματα στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας τους. Έτσι, νερό αντλείται διαρκώς από την κάτω δεξαμενή και ο άνω ταμιευτήρας αρχίζει να επαναπληρώνεται.

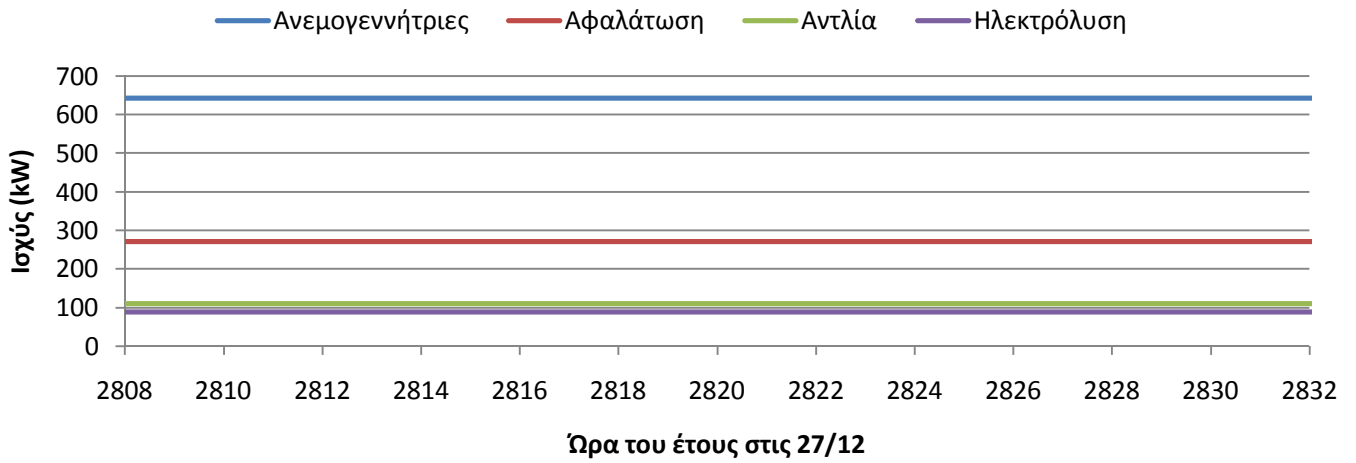
7.3.3 Ημερήσια διαγράμματα λειτουργίας

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για μια αντιπροσωπευτική ημέρα του Δεκεμβρίου, και δίνονται κάποια γενικά συμπεράσματα. Η ημέρα αυτή χαρακτηρίζεται από τον μεγαλύτερο μέσο όρο ταχύτητας του αέρα που πνέει στο νησί, εντάσεως $\overline{VANEM} = 19,78 \text{ m/s}$. Έτσι θα παρατηρήσουμε πως τα υποσυστήματα δουλεύουν διαρκώς στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας των. Το χρονικό διάστημα τοποθετείτε στις 27/12 ημέρα Δευτέρα. Σε ώρες του έτους της προσομοίωσης αυτό είναι από 2808 έως 2832 ώρες (υπολογιστικά βήματα 16848÷16992). Τα διαγράμματα είναι ανά 2ωρο στον άξονα του χρόνου.

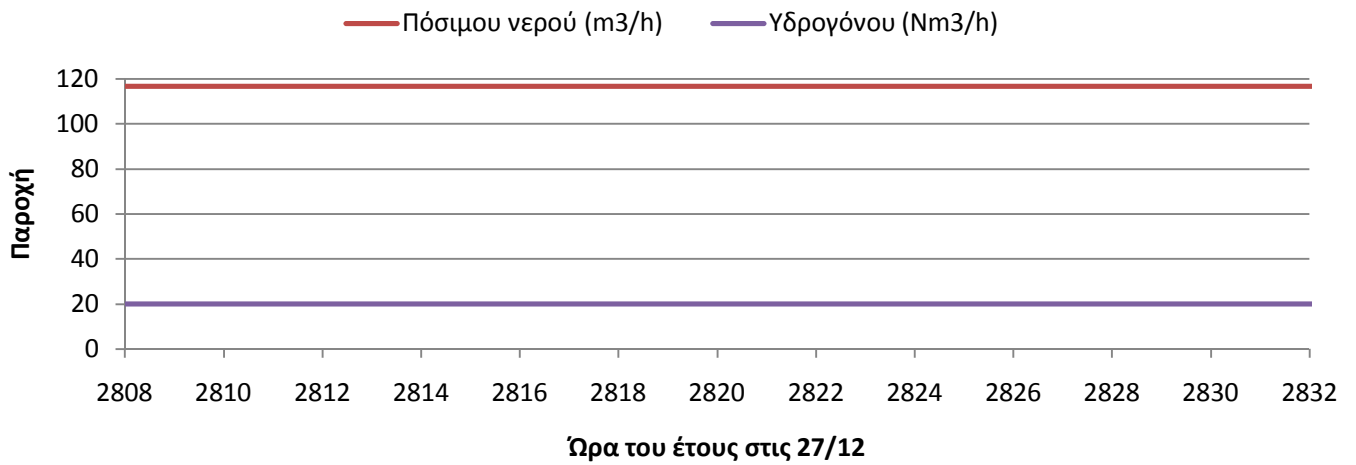


Σχήμα 7.18 Ημερήσια ταχύτητα ανέμου

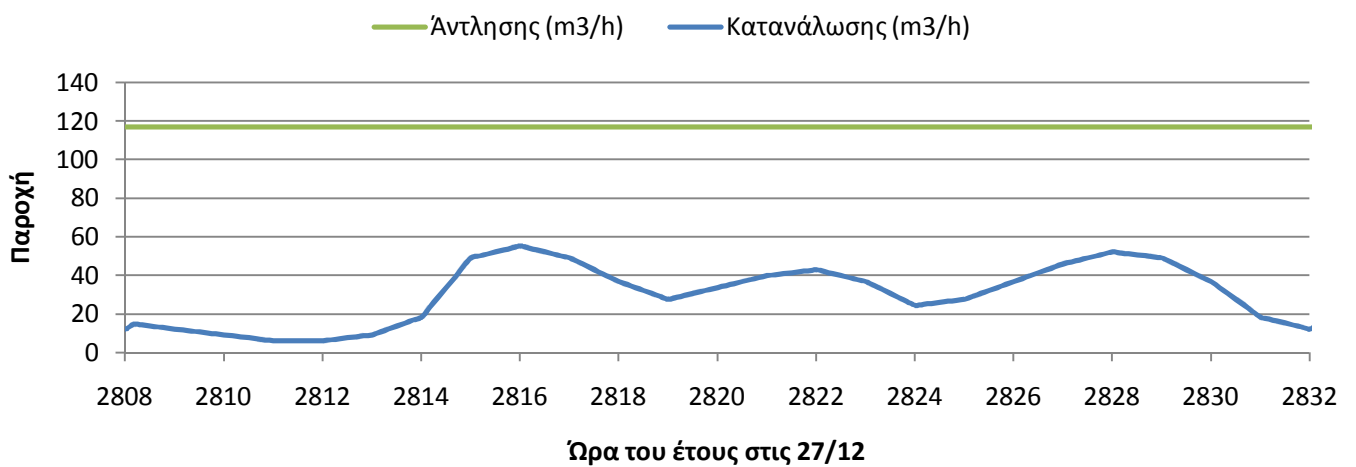
Κεφάλαιο 7^ο – Αποτελέσματα προσομοίωσης λειτουργίας συστήματος



Σχήμα 7.19 Ημερήσια παραγωγή και κατανάλωση ισχύος των υποσυστημάτων

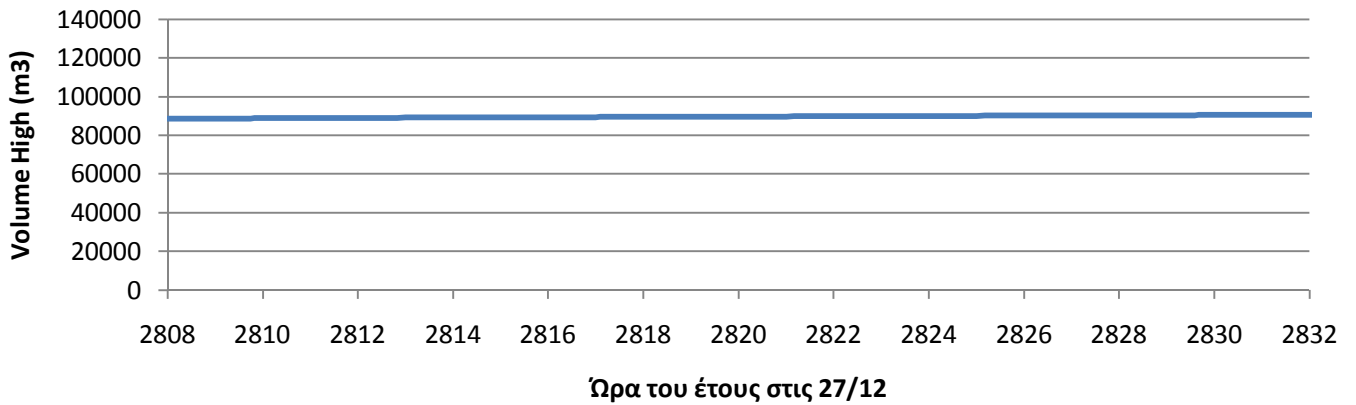


Σχήμα 7.20 Ημερήσια παροχή παραγόμενου πόσιμου νερού και υδρογόνου



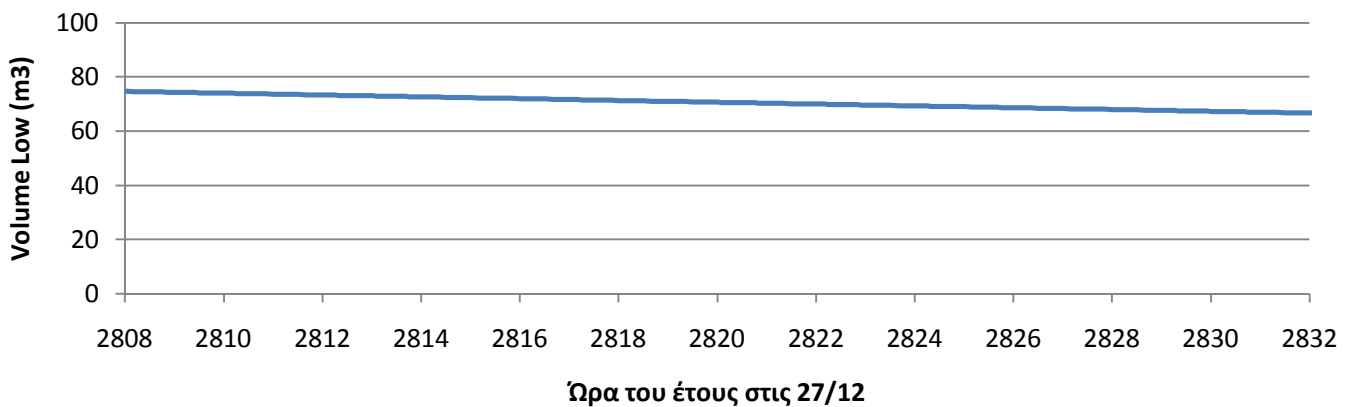
Σχήμα 7.21 Ημερήσια παροχή άντλησης πόσιμου νερού και κατανάλωση πληθυσμού

Όγκος νερού άνω ταμιευτήρα



Σχήμα 7.22 Ημερήσια ποσότητα νερού στον άνω ταμιευτήρα

Όγκος νερού κάτω δεξαμενής



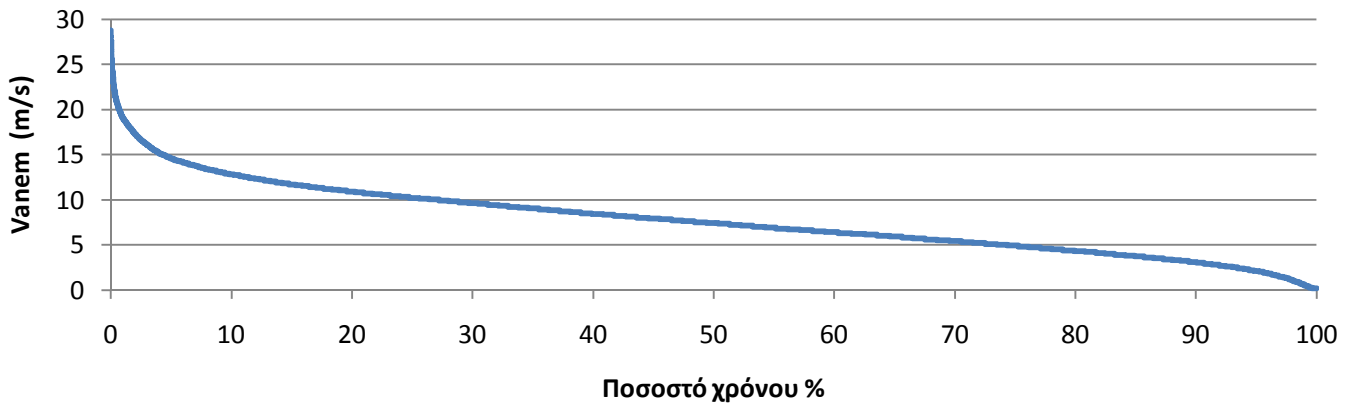
Σχήμα 7.23 Ημερήσια ποσότητα νερού στην κάτω δεξαμενή

Όπως παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα, η άντληση λειτουργεί διαρκώς διότι η παραγωγή πόσιμου νερού είναι σταθερή και δεν επιτρέπει στην κάτω δεξαμενή να αδειάσει σε μικρό χρονικό διάστημα. Επίσης παρατηρούμε ότι οι καταναλώσεις του πληθυσμού κυμαίνονται σε χαμηλά, σε σχέση με άλλες περιόδους, επίπεδα. Συνεπώς ο άνω ταμιευτήρας αποθηκεύει την περίσσεια νερού.

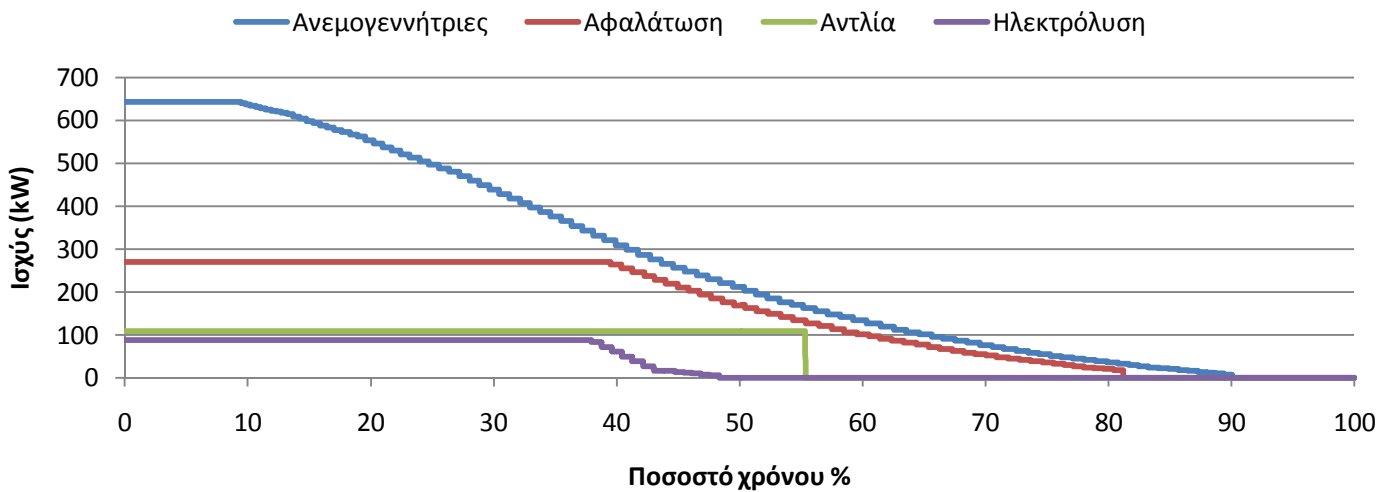
7.3.4 Καμπύλες διάρκειας

Στα παρακάτω σχήματα δίνονται οι καμπύλες διάρκειας των μεγεθών που αναλύθηκαν παραπάνω.

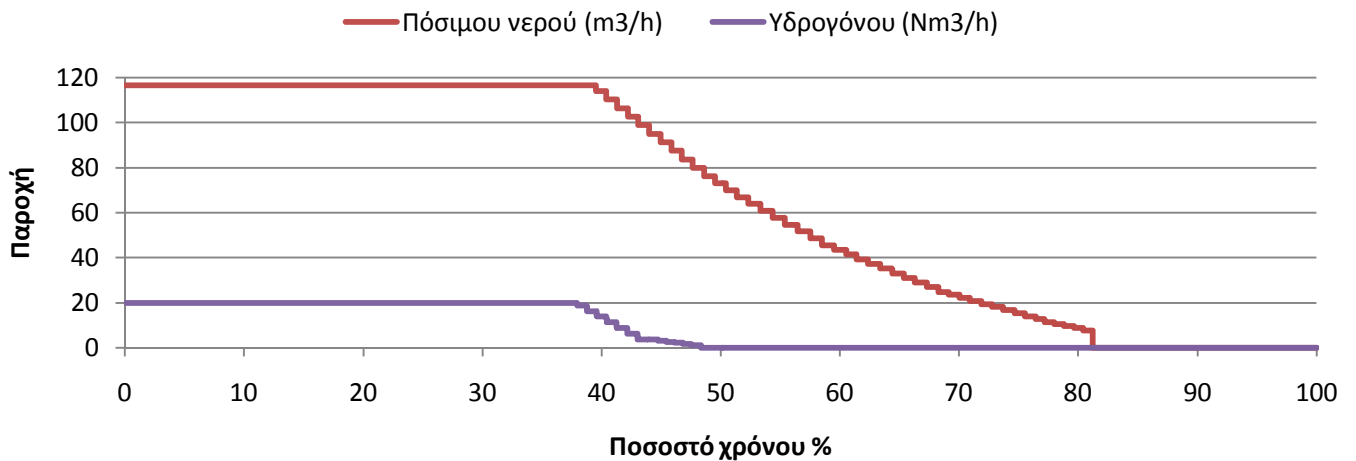
Ταχύτητα Ανέμου



Σχήμα 7.24 Καμπύλη διάρκειας ταχύτητας ανέμου

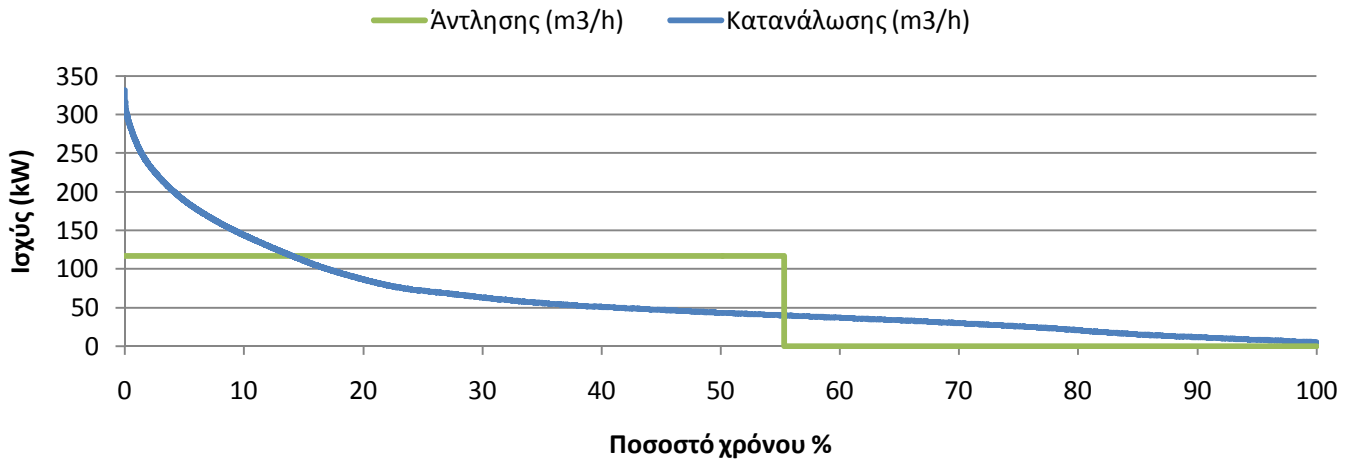


Σχήμα 7.25 Καμπύλη διάρκειας παραγωγής και κατανάλωσης ισχύος των υποσυστημάτων

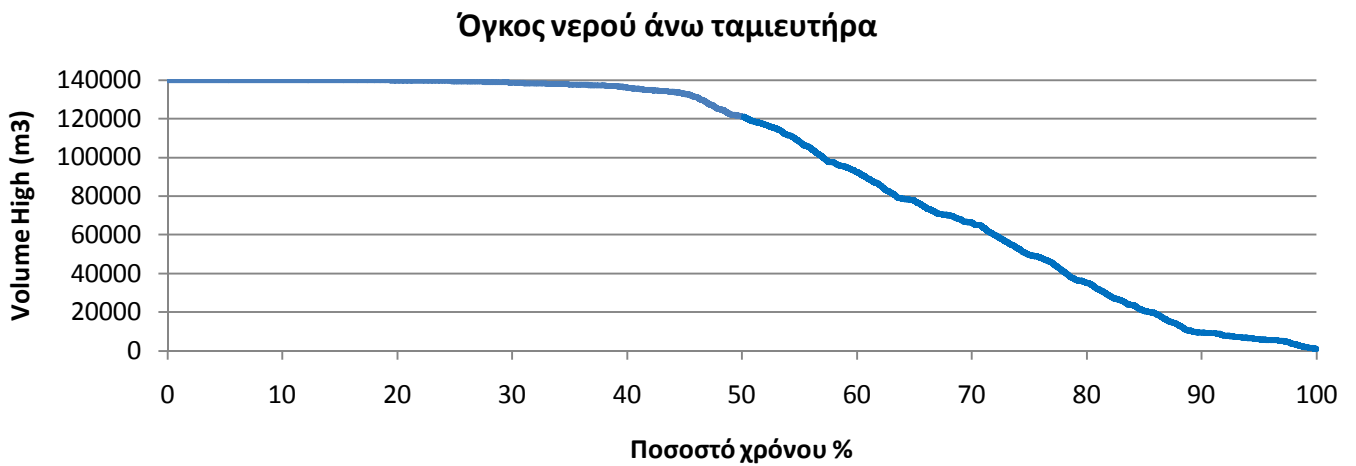


Σχήμα 7.26 Καμπύλη διάρκειας παροχής παραγόμενου πόσιμου νερού και υδρογόνου

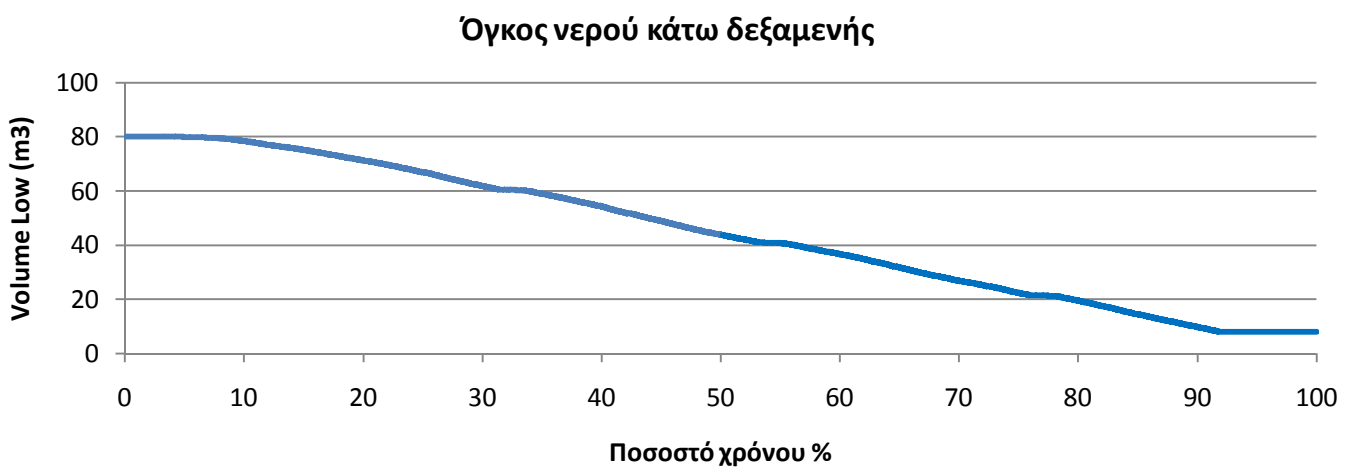
Κεφάλαιο 7^ο – Αποτελέσματα προσομοίωσης λειτουργίας συστήματος



Σχήμα 7.27 Καμπύλη διάρκειας παροχής άντλησης πόσιμου νερού και κατανάλωσης πληθυσμού



Σχήμα 7.28 Καμπύλη διάρκειας ποσότητας νερού στον άνω ταμιευτήρα



Σχήμα 7.29 Καμπύλη διάρκειας ποσότητας νερού στην κάτω δεξαμενή

Συνοπτικά, μπορούμε να επισημάνουμε παρατηρώντας την καμπύλη διάρκειας παραγωγής και κατανάλωσης ισχύος των υποσυστημάτων, πως επιτυγχάνεται ένα αρκετά καλό επίπεδο εκμετάλλευσης της διαθέσιμης αιολικής ισχύος. Οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν περίπου στο 90% του χρόνου, ενώ η μονάδα αντίστροφης ώσμωσης περίπου 80%. Ακολουθεί η μονάδα ηλεκτρόλυσης στο 50% περίπου της ετήσιας λειτουργίας, ενώ η αντλία, που είναι ανεξάρτητη της αιολικής ισχύος, λειτουργεί για το 55% του έτους.

Παράλληλα, αξίζει να αναφερθούμε στο γεγονός ότι όπως φαίνεται από το σχήμα 7.28 η ποσότητα του πόσιμου νερού στον άνω ταμιευτήρα είναι περίπου η μέγιστη για το 40% του χρόνου.

7.4 Παρουσίαση αθροιστικών μεγεθών και τεχνοικονομικών δεικτών αξιολόγησης

Στη συγκεκριμένη ενότητα δίνονται συγκεντρωμένα σε πίνακες το σύνολο των τιμών των αθροιστικών μεγεθών και των δεικτών αξιολόγησης, που ορίστηκαν στο 6^ο κεφάλαιο. Η μελέτη των τιμών θα μας δώσει μια ικανοποιητική εποπτεία της λειτουργίας και της απόδοσης του συστήματος για τον συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων σχεδιασμού.

7.4.1 Παρουσίαση αθροιστικών και τεχνικών μεγεθών

Στον παρακάτω πίνακα 7.4 δίνονται τα εξής ετήσια αθροιστικά μεγέθη. Από τον πίνακα παρατηρούμε συνοπτικά όλα τα ενδιαφέροντα μεγέθη. Ο μέσος αριθμός εκκινήσεων της αντλίας είναι μόλις 4,62 την ημέρα, στόχος μας ήταν να είναι κάτω από τις 5 εκκινήσεις ανά ημέρα.

Επιπλέον, η διαστασιολόγηση που προτείνεται σχετικά με την δυναμικότητα της αφαλάτωσης και την κάλυψη της εν λόγω κατανάλωσης του πληθυσμού χαρακτηρίζεται ακριβής διότι ο λόγος συνολικού παραγόμενου νερού προς την συνολική κατανάλωση νερού είναι 1,06. Δηλαδή ο συγκεκριμένος συνδυασμός παραμέτρων καλύπτει το 106% των αναγκών σε πόσιμο νερό.

Παράλληλα, οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν στο 90% του έτους και η αφαλάτωση εκμεταλλεύεται το 57% της ισχύος, ενώ το 13,5% πηγαίνει στην παραγωγή υδρογόνου. Έτσι επιτυγχάνεται ένας ικανοποιητικός συνολικός βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης περίπου ίσος με 70%.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέση περιεχόμενη ισχύς του παραγόμενου υδρογόνου. Όπως έχει προαναφερθεί, το παραγόμενο υδρογόνο προορίζεται κυρίως για επί τόπου χρήση, τροφοδοτώντας οχήματα κυψέλων H₂ PEM (scooter, αυτοκίνητα, σκάφη, ακόμα και minibus, ισχύος από 0,5 έως 5 kW αντίστοιχα). Αυτά τα οχήματα διαθέτουν δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου τύπου μεταλλοϋδριδίων χαμηλής πίεσης πλήρωσης. Διαφορετικά μπορεί μέσω

Κεφάλαιο 7^ο – Αποτελέσματα προσομοίωσης λειτουργίας συστήματος

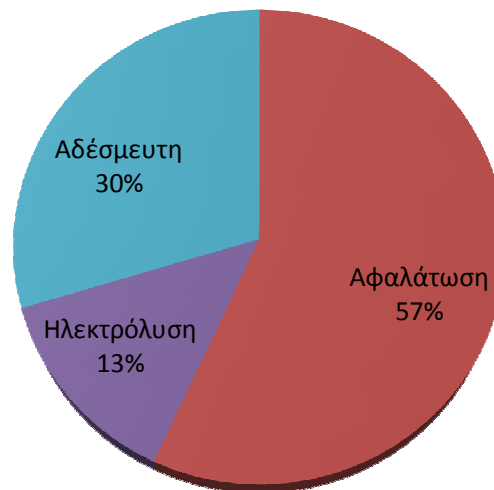
ενός συμπιεστή να εμφανίζεται το H₂ για μελλοντική χρήση. Οπότε με μέση περιεχόμενη ισχύ παραγόμενου υδρογόνου ίση με 25 kW, υπάρχει εν γένει η δυνατότητα τις πλήρους κάλυψης των ενεργειακών αναγκών ορισμένων οχημάτων.

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΗ	ΜΟΝΑΔΑ	ΤΙΜΗ
ANNUAL_RESULTS.TXT				
CONCLUDING ANNUAL RESULTS				
1	Συνολική κατανάλωση νερού πληθυσμού	QCONSSUM	m ³	533.553,06
2	Μέση κατανάλωση νερού πληθυσμού	QCONSAVE	m ³ /h	60,823
3	Μέση ταχύτητα ανέμου	VANEMAVE	m/s	7,769
4	Συνολική παραγόμενη αιολική ενέργεια	PANEMSUM	kWh	2.387.633,50
5	Μέση παραγόμενη αιολική ισχύς	PANEMAVE	kW	272,18
6	Συνολική ενέργεια αφαλάτωσης	PWATERSUM	kWh	1.356.331,88
7	Μέση ισχύς αφαλάτωσης	PWATERAVE	kW	154,62
8	Συνολική παραγωγή νερού	QWATERSUM	m ³	584.309,81
9	Μέση παροχή νερού	QWATERAVE	m ³ /h	66,61
10	Συνολικός αριθμός εκκινήσεων αντλίας	PUMPSTART	-	1.688
11	Μέσος αριθμός ημερήσιων εκκινήσεων αντλίας	PUMPSTARTAVE	per day	4,62
12	Συνολική ενέργεια άντλησης	PPUMPSUM	kWh	530.403,81
13	Σταθερή ισχύς άντλησης	PPUMP	kW	109,22
14	Μέση ισχύς άντλησης	PPUMPAVE	kW	60,46
15	Συνολική αντλούμενη ποσότητα νερού	QPUMPSUM	m ³	567.957,0
16	Μέση αντλούμενη ποσότητα νερού	QPUMPAVE	m ³ /h	64,745
17	Συνολική ενέργεια ηλεκτρόλυσης	PHYDROSUM	kWh	322.806,03
18	Μέση ισχύς ηλεκτρόλυσης	PHYDROAVE	kW	36,79
19	Συνολική παραγωγή υδρογόνου	QHYDROSUM	Nm ³	73.362,61
20	Μέση παραγωγή υδρογόνου	QHYDROAVE	Nm ³ /h	8,363
21	Συνολικό ενεργειακό περιεχόμενο παραγόμενου υδρογόνου	H2ENERGYSUM	kWh	220.087,83
22	Μέση περιεχόμενη ισχύς παραγόμενου υδρογόνου	H2ENERGYAVE	kW	25,09
23	Συνολική απορριπτόμενη ενέργεια	PREJSUM	kWh	708.270,56
24	Μέση απορριπτόμενη ισχύς	PREJAVE	kW	80,74
HOURS OF FUNCTION				
25	Συνολικές ώρες λειτουργίας ανεμογεννητριών	WINDHR	hours	7.898,0
26	Ποσοστό χρόνου λειτουργίας ανεμογεννητριών	WINDHRPERC	-	0,9
27	Συνολικές ώρες λειτουργίας αφαλάτωσης	DESHR	hours	7.121,83
28	Ποσοστό χρόνου λειτουργίας αφαλάτωσης	DESHRPERC	-	0,812
29	Συνολικές ώρες λειτουργίας αντλίας	PUMPHR	hours	4.854,33
30	Ποσοστό χρόνου λειτουργίας αντλίας	PUMPHRPERC	-	0,553
31	Συνολικές ώρες λειτουργίας ηλεκτρόλυσης	ELECTRHR	hours	4.241,83
32	Ποσοστό χρόνου λειτουργίας ηλεκτρόλυσης	ELECTRHRPERC	-	0,484

POWER EXPLOITATION				
33	Βαθμός εκμετάλλευσης αφαλάτωσης	DESPERC	-	0,568
34	Βαθμός εκμετάλλευσης ηλεκτρόλυσης	ELECTRPERC	-	0,135
35	Συνολικός βαθμός απόδοσης	TOTPERC	-	0,703
REST				
36	Λόγος συνολικού παραγόμενου νερού προς την χωρητικότητα του άνω ταμιευτήρα	VTR	-	4,06
37	Λόγος συνολικού παραγόμενου νερού προς την συνολική κατανάλωση νερού	WCR	-	1,06

Πίνακας 7.4 Ετήσια αθροιστικά τεχνικά μεγέθη

Συνολική αιολική ενέργεια: 2.387,6 MWh



Σχήμα 7.30 Ετήσια κατανομή παραγόμενης αιολικής ενέργειας

7.4.2 Παρουσίαση οικονομικών μεγεθών και δεικτών

Στον παρακάτω πίνακα 7.5 δίνονται τα εξής ετήσια οικονομικά μεγέθη και ορισμένοι δείκτες αξιολόγησης της επένδυσης της εγκατάστασης.

Ουσιαστικά υπολογίζεται το συνολικό κόστος επένδυσης του συστήματος περίπου ίσο με 3.124.000 €, με το κόστος της κατασκευής των ταμιευτήρων να αποτελεί το 44% του συνόλου. Επίσης, προβλέπονται περίπου 160.000 € ετήσια κόστη συντήρησης και λειτουργίας της εγκατάστασης, με το 36% να αποτελεί το κόστος κατανάλωσης ενέργειας της αντλίας.

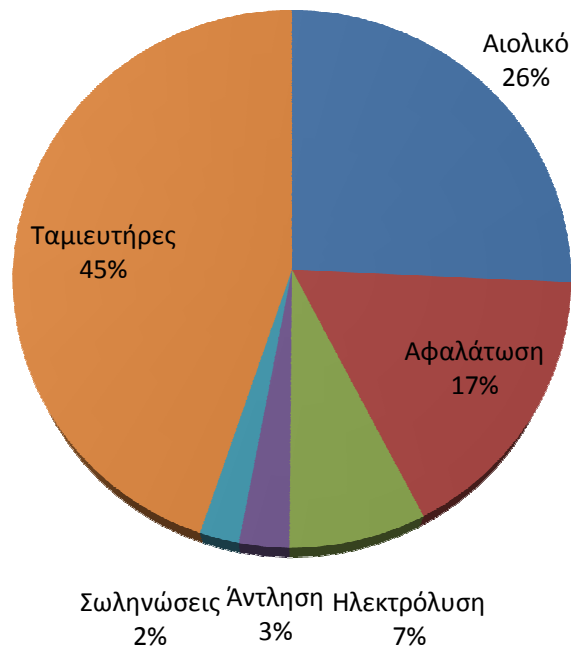
Στη συνέχεια, σύμφωνα με τον οικονομικό έλεγχο που πραγματοποιήθηκε, η επένδυση κρίνεται οικονομικά βιώσιμη και αποδοτική αφού οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης είναι ικανοποιητικοί. Για παράδειγμα ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης IRR του έργου υπολογίζεται περίπου ίσος με 24,7% και ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης βρίσκεται γύρω στα 5,2 έτη.

Κεφάλαιο 7^ο – Αποτελέσματα προσομοίωσης λειτουργίας συστήματος

Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται πως ως τιμή πώλησης του αφαλατωμένου νερού έχει ορισθεί τα 1,1 €/m³, ενώ η τιμή πώλησης του υδρογόνου 1,2 €/Nm³ αντίστοιχα. Επισημαίνεται ότι το κόστος παραγωγής του νερού (0,826 €/m³) είναι ιδιαίτερα ελκυστικό σε σύγκριση με το κόστος της μεταφοράς νερού με υδροφόρες στα νησιά (περίπου 7 €/m³).

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΗ	ΜΟΝΑΔΑ	ΤΙΜΗ
ECONOMICAL_RESULTS.TXT				
INVESTMENT COSTS				
1	Κόστος επένδυσης αιολικού πάρκου	WINDINVEST	€	804.000
2	Κόστος επένδυσης μονάδας αφαλάτωσης	DESALINVEST	€	522.030,9
3	Κόστος επένδυσης μονάδας παραγωγής υδρογόνου	ELECTRINVEST	€	240.000
4	Κόστος επένδυσης αντλητικής διάταξης	PUMPINVEST	€	87.375,73
5	Κόστος επένδυσης σωληνώσεων	TUBEINVEST	€	69.300
6	Κόστος επένδυσης ταμιευτήρων	TANKINVEST	€	1.400.800
7	Συνολικό κόστος επένδυσης	TOTALINVEST	€	3.123.507
O&M COSTS				
8	Κόστος συντήρησης και λειτουργίας αιολικού πάρκου	WINDMAINT	€	16.080
9	Κόστος συντήρησης και λειτουργίας μονάδας αφαλάτωσης	DESALMAINT	€	41.762,47
10	Κόστος συντήρησης και λειτουργίας μονάδας παραγωγής υδρογόνου	ELECTRMAINT	€	12.000
11	Κόστος συντήρησης και λειτουργίας αντλητικής διάταξης	PUMPMAINT	€	1.747,515
12	Κόστος συντήρησης και λειτουργίας σωληνώσεων	TUBEMAINT	€	1.386
13	Κόστος συντήρησης και λειτουργίας ταμιευτήρων	TANKMAINT	€	28.016
14	Κόστος κατανάλωσης ενέργειας αντλίας	PUMPCOST	€	58.344,42
15	Συνολικό κόστος συντήρησης και λειτουργίας	TOTALMAINT	€	159.336,4
ECONOMICAL INDICATORS				
16	Ετήσια απόσβεση έργου	ANNUALDEPR	€	366.885,9
17	Αναλογία συνολικού κόστους παραγωγής υδρογόνου	COSTRATIO	-	0,109
18	Κόστος παραγωγής πόσιμο νερού	WATERCOST	€/m ³	0,826
19	Κόστος παραγωγής υδρογόνου	HYDROCOST	€/Nm ³	0,782
20	Ετήσια έσοδα πωλήσεως πόσιμο νερού	WATERINC	€	681.548,4
21	Ετήσια έσοδα πωλήσεως υδρογόνου	HYDROINC	€	80.698,88
22	Λόγος εσόδων προς έξοδα	BCR	-	1,882
23	Καθαρή παρούσα αξία	RNPV	€	4.544.124
24	Χρόνος αποπληρωμής	QUITT	years	5,181
25	Εσωτερικός βαθμός απόδοσης	RIRR	-	0,247

Συνολικός προϋπολογισμός έργου: 3.123.507€



Σχήμα 7.31 Κατανομή συνολικού κόστους επένδυσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο – ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Στο παρών κεφάλαιο θα γίνει μία προσπάθεια ανακεφαλαίωσης των όσων έχουν αναλυθεί εκτενέστερα έως τώρα στα προηγούμενα κεφάλαια. Η ανακεφαλαίωση αυτή χωρίζεται στην σύνοψη της εργασίας και στα συμπεράσματα. Κλείνοντας παρουσιάζονται κάποιες προτάσεις που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν και να επεκτείνουν την παρούσα μελέτη.

8.1 Σύνοψη

Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτέλεσε η ενεργειακή προσομοίωση και η τεχνοοικονομική μελέτη ενός ημιαυτόνομου υβριδικού υδροηλεκτρικού συστήματος αφαλάτωσης θαλασσινού νερού και παραγωγής υδρογόνου, ως εναλλακτική πηγή ενέργειας, το οποίο σύστημα έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης του πόσιμου νερού με χρήση αντλησιοταμίευσης. Συγκεκριμένα, τα υποσυστήματα αντίστροφης ώσμωσης και ηλεκτρόλυσης τροφοδοτούνται αποκλειστικά από ανεμογεννήτριες, ενώ η αντλητική διάταξη από το τοπικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Σκοπός του συστήματος αφαλάτωσης είναι η εξ' ολοκλήρου κάλυψη των αναγκών ύδρευσης ενός τυπικού άνυδρου νησιού του Αιγαίου.

Ουσιαστικά, η εργασία αυτή μπορεί να διαχωριστεί σε δύο μέρη, το θεωρητικό και το υπολογιστικό. Αναλυτικότερα:

- Στα πέντε πρώτα κεφάλαια πραγματοποιήθηκε η **θεωρητική θεμελίωση της εργασίας**.
 - Αρχικά στο **1^ο κεφάλαιο**, δόθηκαν ορισμένα εισαγωγικά στοιχεία για το νερό, το πρόβλημα της λειψυδρίας παγκοσμίως και την κατάσταση στην Ελλάδα, ενώ παράλληλα έγινε μια σύντομη αναφορά στις ιδιότητες του υδρογόνου και στους λόγους που το κάνουν ελκυστικό ως φορέα ενέργειας.
 - Στη συνέχεια στο **2^ο κεφάλαιο**, έγινε εκτενής αναφορά στην λειτουργία της αφαλάτωσης, στις μεθόδους αφαλάτωσης και ειδικότερα στην μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης, η οποία είναι καταλληλότερη για το προτεινόμενο σύστημα. Στο τέλος επιχειρείται μία σύγκριση μεταξύ των.
 - Αντιστοίχως, το **3^ο κεφάλαιο** αναφέρεται σε όλες τις τεχνολογίες για την παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα. Παρουσιάστηκε η διαδικασία παραγωγής καθώς και τα ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά των βασικότερων μεθόδων, δίνοντας έμφαση στην μέθοδο της ηλεκτρόλυσης.
 - Έπειτα, κρίθηκε χρήσιμο στο **4^ο κεφάλαιο** να γίνει μία συνοπτική παρουσίαση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ορισμένων υβριδικών συστημάτων. Συνάμα, έγινε εκτενής αναφορά στην Αιολική ενέργεια που απασχολεί το σύστημα προς μελέτη, με παράλληλη παράθεση θεωρητικών στοιχείων και εξισώσεων λειτουργίας.

- Κλείνοντας το θεωρητικό μέρος, στο **5^ο κεφάλαιο** πραγματοποιήθηκε μια ανασκόπηση των κυριότερων μελετών που έχουν δημοσιευθεί, αλλά και των εφαρμογών ορισμένων συστημάτων αφαλάτωσης και παραγωγής υδρογόνου που τροφοδοτούνται από τεχνολογίες εκμετάλλευσης Α.Π.Ε.
- Τα επόμενα δύο κεφάλαια συγκρότησαν ουσιαστικά το **κύριο μέρος της παρούσας εργασίας**, αφού το θέμα της έχει να κάνει με την υπολογιστική προσομοίωση που αναπτύχθηκε.
 - Στο **6^ο κεφάλαιο** δόθηκε αναλυτική περιγραφή του υπολογιστικού κώδικα και της φιλοσοφίας του. Επίσης, αναλύθηκαν όλα τα δεδομένα και οι παράμετροι τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στο πρόγραμμα.
 - Το **7^ο κεφάλαιο** περιλαμβάνει ουσιαστικά την πρακτική εφαρμογή του υπολογιστικού κώδικα για ένα τυπικό νησί μεσαίων αναγκών ύδρευσης, προσεγγιστικών παραμέτρων. Συμπεριλήφθησαν όλα τα χρήσιμα διαγράμματα λειτουργίας για ένα έτος, ενδεικτικά της προσομοίωσης, και παρατίθενται οι τιμές του συνόλου των δεικτών αξιολόγησης του συστήματος.

Η πραγματοποιηθείσα μελέτη είχε ως στόχο την διερεύνηση για το αν ένα τέτοιο υβριδικό σύστημα, συνδυάζοντας τεχνολογίες αφαλάτωσης και παραγωγής υδρογόνου, μπορεί να αποτελέσει τη λύση κυρίως στο πρόβλημα της λειψυδρίας για ένα νησί του Αιγαίου, ικανοποιώντας πλήρως τις ανάγκες σε πόσιμο νερό που παρουσιάζονται στο νησί, υπό κόστος παραγωγής πόσιμο νερού το οποίο θα καθιστά τη λειτουργία του προτιμότερη, συγκριτικά με τη μεταφορά νερού με υδροφόρες, και ελκυστική για πιθανούς επενδυτές. Παράλληλα, το υποσύστημα αυτό πλαισιώθηκε με μία μονάδα παραγωγής υδρογόνου δίνοντας μία περισσότερο ολοκληρωμένη λύση στο τρίπτυχο **ηλεκτρισμός / νερό / μεταφορές** για τα νησιά, συνδυάζοντας ελκυστικές, καινοτόμες και παράλληλα οικονομικά βιώσιμες τεχνολογίες αιχμής.

8.2 Συμπεράσματα

Προτού προχωρήσουμε στα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του συστήματος, θα αναφέρουμε κάποια τελικά σχόλια για τον υπολογιστικό κώδικα, η ανάπτυξη του οποίου αποτέλεσε το βασικό μέρος της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Ο υπολογιστικός κώδικας που δημιουργήθηκε είναι σε θέση να προσομοιώσει τη λειτουργία του συστήματος που προτάθηκε από την εργασία, απαιτώντας από τον χρήστη μόνο την εισαγωγή των τιμών των παραμέτρων σχεδιασμού του συστήματος όπως οι τιμές πώλησης νερού – υδρογόνου και ο πληθυσμός. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής διαφορετικών χρονοσειρών ανέμου για τη μελέτη του συστήματος για άλλη περιοχή ή/και νησί. Επιπλέον, εάν κριθεί σκόπιμο, μπορούν να εισαχθούν διαφορετικές αδιάστατες καμπύλες μεταβολής ωριαίας κατανάλωσης και μηνιαίου πληθυσμού όπως επίσης να εισαχθούν διαφορετικές χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας των υποσυστημάτων. Το χρονικό και υπολογιστικό βήμα της εκτέλεσης είναι τα 10 λεπτά, γεγονός που καθιστά την προσομοίωση εξαιρετικά ακριβή. Σε κάθε βήμα, σύμφωνα με την ενεργειακή διαχείριση που έχει προταθεί,

υπολογίζονται τα ενεργειακά μεγέθη των υποσυστημάτων που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία διαγραμμάτων λειτουργίας. Μετά το πέρας 52633 υπολογιστικών επαναλήψεων (365,5 ημέρες), υπολογίζονται τα ενεργειακά αθροιστικά μεγέθη, από τα οποία προκύπτουν οι τιμές των τεχνοοικονομικών δεικτών αξιολόγησης της εφαρμογής.

Σχετικά με την χρονική απόκριση στην εξαγωγή των αποτελεσμάτων, αυτή κυμαίνεται γύρω στα 5 sec, μετρούμενη σε υπολογιστή μέτριας υπολογιστικής ισχύος. Αυτή κρίνεται αρκετά ικανοποιητική, ειδικά αν ληφθεί υπόψη το μεγάλο πλήθος τιμών και επαναλήψεων του υπολογιστικού βήματος. Ακόμα, θεωρείται πως υπάρχει η δυνατότητα επέκτασης της εφαρμογής του προγράμματος, κάνοντας ορισμένες προσθήκες και βελτιώσεις, ώστε να μπορεί να εξυπηρετήσει διάφορους συνδυασμούς Α.Π.Ε.

Εν γένει, η ανάπτυξη του υπολογιστικού κώδικα εκτιμάται πως εκπλήρωσε τον αρχικό στόχο, αφού δημιουργήθηκε ένας κώδικας με σχετικά γρήγορη απόκριση, ο οποίος εξάγει υπολογιστικά ορθά αποτελέσματα, και μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μελέτη παρόμοιων συστημάτων, λόγω της ευκολίας επεκτασιμότητας του, όπως επίσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για βελτιστοποίηση.

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας εξήχθησαν ποικίλα συμπεράσματα, τα οποία αναφέρονται και στο κύριο μέρος της μελέτης και μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα:

- Η φιλοσοφία της ενεργειακής διαχείρισης που ακολουθήθηκε κατά την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του συστήματος, είχε ως στόχο την καλύτερη δυνατή αξιοποίηση της αιολικής ισχύος με προτεραιότητα την αντίστροφη ώσμωση του ύδατος και μετέπειτα την ηλεκτρόλυση για παραγωγή H_2 (βλ. Κεφάλαιο 6^ο). Η συγκεκριμένη φιλοσοφία της λειτουργίας αποδείχτηκε ορθή και η αλληλεπίδραση των υποσυστημάτων κρίθηκε σωστή, μετά από παρατήρηση των διαγραμμάτων λειτουργίας και αφού οι τιμές των δεικτών αξιολόγησης προέκυψαν θετικές.
- Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το κόστος παραγωγής πόσιμου νερού με την μέθοδο της αντίστροφης ώσμωσης γενικά έχει αποδειχθεί πως κυμαίνεται από 0,56 έως 3,14 €/m³ για συστήματα παρόμοιας δυναμικότητας (βλ. Πίνακα 2.2). Το κόστος παραγωγής αφαλατωμένου νερού του παρόντος συστήματος προέκυψε ίσο με 0,826 €/m³. Η τιμή αυτή είναι αρκετά χαμηλότερη του κόστους μεταφοράς νερού με υδροφόρες (8 €/m³ για τις Κυκλάδες και 5 €/m³ για τα Δωδεκάνησα, βλ. Πινάκα 1.1), όπως σήμερα γίνεται στα νησιά, και επιπλέον είναι εξαιρετικά ανταγωνιστική του κόστους παραγωγής των ήδη εγκατεστημένων μονάδων στο Αιγαίο, οι οποίες χαρακτηρίζονται από κόστος παραγωγής από 0,7 έως 2 €/m³ περίπου (βλ. Σχήμα 1.6).
- Η ποσότητα της παραγωγής υδρογόνου (8,4 Nm³/h κατά μ.ό.), μέσω της μεθόδου της ηλεκτρόλυσης, επιτρέπει, όπως προκύπτει από τα ετήσια αθροιστικά αποτελέσματα (βλ. Πίνακα 7.4), αυτονομία σε ένα πολύ ικανοποιητικό αριθμό οχημάτων (5-10 διαφορετικά οχήματα περίπου). Η μελέτη αξιοποίησής του μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο για περαιτέρω έρευνα, η οποία όμως κρίθηκε πως ξεφεύγει από τα όρια αυτής της εργασίας. Εν γένει, ο συνδυασμός αφαλάτωσης με παραγωγή H_2 στον παρών σύστημα κρίνεται επιτυχημένος.

- Όπως ήταν αναμενόμενο, το υποσύστημα της αφαλάτωσης λειτουργεί στο 81,2% του χρόνου, ενώ το υποσύστημα της ηλεκτρόλυσης στο 48,4%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αφαλάτωση έχει προτεραιότητα έναντι της ηλεκτρόλυσης, σύμφωνα με την ενεργειακά διαχείριση που έχει εφαρμοσθεί. Το σύστημα λειτουργεί στο 90% του έτους και εκμεταλλεύεται το 70,3% της αιολικής ισχύος. Επομένως, το σύστημα διαστασιολογήθηκε και παραμετροποιήθηκε επιτυχώς, λειτουργώντας σχεδόν διαρκώς σε υψηλή απόδοση.
- Σύμφωνα με τον προτεινόμενο συνδυασμό παραμέτρων, οι οικονομικοί δείκτες αξιολόγησης χαρακτήρισαν το σύστημα άκρως προσοδοφόρο και οικονομικά ελκυστικό προς επένδυση. Η διάρκεια αποπληρωμής προέκυψε μόνο 5 σχεδόν έτη, ενώ ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης IRR υπολογίστηκε περίπου 24,7% και ο λόγος εσόδων προς έξοδα BCR ίσος με 1,88. Όλοι αυτοί και οι υπόλοιποι οικονομικοί δείκτες (βλ. Πίνακα 7.5) προσδιορίστηκαν με βάση τιμή πώλησης νερού 1,2 €/m³ και υδρογόνου 1,1 €/Nm³. Αναμφίβολα, με διαφορετικές τιμές πώλησης των προϊόντων, οι οικονομικοί δείκτες μεταβάλλονται ανάλογα. Σε αυτό το σημείο αξίζει να τονισθεί το γεγονός ότι σε περασμένη πρόσκληση ενδιαφέροντος του Υπουργείου, η μέγιστη επιτρεπτή τιμή πώλησης του πόσιμου νερού είχε καθοριστεί στα 2,5 €/m³.
- Το κόστος επένδυσης του συγκεκριμένου έργου εκτιμήθηκε περίπου 3.124.000 € με ετήσια κόστη συντήρησης και λειτουργίας 159.300 €, όπου σε χρονικό ορίζοντα εικοσαετίας προκύπτει η ετήσια απόσβεση της δαπάνης ίση με 366.900 €. Από την άλλη τα ετήσια έσοδα από την πώληση του νερού και του υδρογόνου είναι 681.500 € και 80.700 € αντίστοιχα, συνολικά δηλαδή σχεδόν 762.200 €. Επιπλέον, η καθαρή παρούσα αξία NPV του συστήματος ανέρχεται στα 4.544.100 €. Εύκολα αντιλαμβάνεται κανείς ότι το παρών σύστημα, έτσι όπως έχει σχεδιαστεί, αποτελεί μία άκρως ελκυστική και συμφέρουσα επένδυση. Ειδικά αν ληφθεί υπόψη τα οφέλη που αποκομίζει μία ολόκληρη κοινότητα από την λειτουργία του, δηλαδή πλήρης αυτονομία στην ύδρευση και παροχή εναλλακτικού καυσίμου (H₂) για άμεση χρήση.
- Επιπλέον, από την μελέτη της οικονομίας του υδρογόνου, έγινε σαφές ότι η εισαγωγή H₂ ως ενεργειακού φορέα στην Ελλάδα θα απαιτήσει πιο γρήγορες τεχνολογικές εξελίξεις στις τεχνολογίες υδρογόνου και πρόσθετες πολιτικές και μέτρα για την προώθηση της χρήσης του, παρέχοντας επιπλέον κίνητρα για τη μετάβαση σε μια οικονομία βασισμένη στο υδρογόνο. Το προτεινόμενο σύστημα είναι σε θέση να αποτελέσει κίνητρο και βάση για την περαιτέρω διάδοση της χρήσης του H₂.
- Μία εφαρμογή ενός τέτοιου πρωτοποριακού συστήματος σε ένα νησί, πέρα από την δεδομένη ενίσχυση της ενεργειακής αυτοτέλειας του και την ανακούφιση της οικονομίας του, μπορεί να επιφέρει επιπλέον έμμεσα οφέλη, όπως την ανάπτυξη ενεργειακού τουρισμού ως ένα νησί που καλύπτει πλήρως τις υδατικές του ανάγκες με νερό που έχει αφαλατωθεί με χρήση αιολικής ενέργειας και κάνει εκτεταμένη χρήση δημοτικών και μη οχημάτων υδρογόνου.

8.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Ολοκληρώνοντας αυτή την μελέτη, παρουσιάζονται παρακάτω ορισμένες προτάσεις, οι οποίες θα μπορούσαν να επεκτείνουν και να βελτιώσουν πιθανώς την εργασία:

- Επέκταση των απαιτούμενων προς ικανοποίηση αναγκών και σε ανάγκες για άρδευση, με χρήση διαφορετικών καμπυλών ζήτησης.
- Ενσωμάτωση και άλλων Α.Π.Ε. στο υβριδικό σύστημα, όπως εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας με χρήση φωτοβολταϊκών.
- Ενσωμάτωση υποσυστήματος αποθήκευσης ενέργειας, έτσι ώστε να καταστεί η λειτουργία της αντλήσης επίσης αυτόνομη.
- Επέκταση της μελέτης προς την κατεύθυνση της χρήσης του υδρογόνου μετά την παραγωγή (δηλαδή διανομή, αποθήκευση, χρήση).
- Παραμετρική ανάλυση και μελέτη βελτιστοποίησης, κάνοντας χρήση κατάλληλου λογισμικού.
- Ανάπτυξη και βελτίωση του υπολογιστικού κώδικα σε γραφικό περιβάλλον με δυνατότητα άμεσης οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων και των διαγραμμάτων λειτουργίας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Υπολογιστικός κώδικας «HYDRO_DES»

```

C
C
C   NUMERICAL SIMULATION
C   HYBRID HYDROELECTRIC DESALINATION AND HYDROGEN PRODUCTION SYSTEM
C   MICHALAKOPOULOS ATHANASIOS
C   ATHENS 2010
C
C
C   -----
C   -----
C
C   PROGRAM HYDRO_DES
C   COMMON/A/WIND(100),WINDP(100),DESP(100),DESQ(100),H2P(100),
1  H2Q(100),TDAYS(100),POPAD(100),THOUR(100),TIMES(100),CONSD(100)
C
C   WIND, VANEM           = WIND VELOCITY
C   WINDP, PWIND          = WINDTURBINE POWER
C   PANEM                 = TOTAL WINDTURBINE POWER
C   DESP, PDES, PWATER    = DESALINATION POWER
C   DESQ, QDES, QWATER    = WATER SUPPLY
C   VOLUMHIGH, VOLUMLOW  = WATER VOLUME IN HIGH AND LOW TANK
C   VOL2, VOL1            = WATER VOLUME TO HIGH AND LOW TANK
C   H2P, PHYDRO           = ELECTROLYSIS POWER
C   H2Q, QHYDRO           = H2 PRODUCTION
C   H2ENERGY              = H2 ENERGY
C   TDAYS                 = DAYS
C   THOURS, THOUR, TOTALHOURS = HOURS
C   TIMES                 = TIME STEPS (10 MIN)
C   POPAD                 = DIMENSIONLESS POPULATION
C   POP                   = POPULATION PER HOUR
C   CONSD                  = DIMENSIONLESS CONSUMPTION
C   CONSDAY, CONSHOUR, CONS = CONSUMPTION PER DAY, HOUR, STEP
C   QCONS                 = TOTAL CONSUMPTION PER TIME STEP
C   -----
C
C   OPEN(10,FILE='IOSANEM.DAT')
C   OPEN(12,FILE='WIND_TURB.DAT')
C   OPEN(14,FILE='DESALIN_UNIT+ELECTROLYSER.DAT')
C   OPEN(16,FILE='PARAMETERS.TXT')
C   OPEN(18,FILE='POPUL_FLUCTUATION.DAT')
C   OPEN(20,FILE='CONSUMPTION_FLUCT.DAT')
C
C   OPEN(1,FILE='OUTPUT_DATA.TXT')
C   OPEN(2,FILE='POPULATION_PER_DAY.DAT')
C   OPEN(3,FILE='CONSUMPTION_PER_STEP.DAT')
C   OPEN(4,FILE='TOTAL_CONSUMPTIONS.DAT')
C   OPEN(55,FILE='SIMULATION_POWER.DAT')
C   OPEN(56,FILE='SIMULATION_PRODUCT.DAT')
C   OPEN(7,FILE='ANNUAL_RESULTS.TXT')
C   OPEN(8,FILE='ECONOMICAL_RESULTS.TXT')
C
C   INPUT WINDTURBINE POWER CURVE-----
C
C   READ(12,*)
C   WRITE(*,*)'WINDTURBINE CURVE'
C   NW=11
C   DO 150 K=1,NW

```


Παράρτημα

```
      READ(12,*) I,WIND(I),WINDP(I)
      WRITE(*,*) I,WIND(I),WINDP(I)
150  CONTINUE
C
C      INPUT DESALINATION UNIT POWER - DRINKABLE WATER SUPPLY CURVE-----
C
      READ(14,*)
      WRITE(*,*) 'DESALINATION UNIT CURVE'
      ND=2
      DO 250 K=1,ND
      READ(14,*) I,DESP(I),DESQ(I)
      WRITE(*,112) I,DESP(I),DESQ(I)
250  CONTINUE
C
112  FORMAT(I2,F7.1,F8.3)
C
C      INPUT ELECTROLYSER POWER - HYDROGEN PRODUCTION CURVE-----
C
      READ(14,*)
      WRITE(*,*) 'ELECTROLYSER CURVE'
      NH=2
      DO 350 K=1,NH
      READ(14,*) I,H2P(I),H2Q(I)
      WRITE(*,*) I,H2P(I),H2Q(I)
350  CONTINUE
C
C      READING PARAMETERS-----
C
      READ(16,*)
      READ(16,*)
      READ(16,*) NSTEP
      READ(16,*) NANEM
      READ(16,*) WINDPOWER
      READ(16,*) WINDEFF
      READ(16,*) DESALCAP
      READ(16,*) ELECTRCAP
      READ(16,*) VHIGH
      READ(16,*) VLOW
      READ(16,*) VPERCHIGH
      READ(16,*) VPERCLOW
      READ(16,*) PUMPSUPPLY
      READ(16,*) PUMPEFF
      READ(16,*) ALTITUDE
      READ(16,*) LENGTH
      READ(16,*) DIN
      READ(16,*) ROUGH
      READ(16,*) TUBEMETER
      READ(16,*) WATERDENS
      READ(16,*) VISC
      READ(16,*) H2DENS
      READ(16,*) POPUL
      READ(16,*) CONSDAY
      READ(16,*)
      READ(16,*) WINDINVESTAD
      READ(16,*) DESALINVESTAD
      READ(16,*) PUMPINVESTAD
      READ(16,*) STEELCOST
      READ(16,*) TANKINVESTAD
      READ(16,*) ELECTRINVESTAD
      READ(16,*) TOTALMAINTAD
      READ(16,*) DESALMAINTAD
      READ(16,*) ELECTRMaintAD
      READ(16,*) ENERGYCOST
      READ(16,*) NYEARS
      READ(16,*) RRATE
      READ(16,*) FLA
      READ(16,*) PRICEWATER
      READ(16,*) PRICEHYDRO
C
C      -----
C
```

!TECHNICAL
!1 TIME STEP = 10 MINUTES

!ECONOMICAL

Παράρτημα

```

C      WINDPOWERTOT=NANEM*WINDPOWER
      VHINIT=VHIGH*VPERCHIGH
      VLINIT=VLOW*VPERCLOW
      VWATER=(PUMPSUPPLY*4)/(3600*3.14159*(DIN**2))
      REY=(VWATER*DIN)/VISC
      FRICTION=1/((1.14-2*LOG10((21.25/(REY**0.9))+(ROUGH/DIN)))**2)
      DHF=(FRICTION*LENGTH*(VWATER**2))/(2*9.81*DIN)
      PUMPPOWER=(9.81*WATERDENS*(ALTITUDE+DHF)*PUMPSUPPLY)/
1     (PUMPEFF*3600*1000)
      TUBEWEIGHT=TUBEMETER*LENGTH
      CONSHOUR=CONSDAY/24

C
C     REGISTER OUTPUT DATA-----
C
      WRITE(*,*)'-----'
      WRITE(*,*)'OUTPUT DATA'
      WRITE(*,212)'TOTAL TURBINE POWER INSTALLED (kW) = ',WINDPOWERTOT
      WRITE(*,212)'INITIAL WATER IN HIGH TANK (m3) = ',VHINIT
      WRITE(*,212)'INITIAL WATER IN LOW TANK (m3) = ',VLINIT
      WRITE(*,212)'WATER VELOCITY (m/s) = ',VWATER
      WRITE(*,212)'REYNOLDS = ',REY
      WRITE(*,212)'FRICTION COEFFICIENT = ',FRICTION
      WRITE(*,212)'PUMP POWER (kW) = ',PUMPPOWER
      WRITE(*,212)'HYDRAULIC LOSS (m) = ',DHF
      WRITE(*,212)'STEEL TUBING WEIGHT (kg) = ',TUBEWEIGHT
      WRITE(*,212)'AV CONSUM PER HOUR-PERS. (m3/h.per) = ',CONSHOUR
      WRITE(*,*)'-----'

C
C     -----
C
      WRITE(1,*)'OUTPUT DATA'
      WRITE(1,212)'TOTAL TURBINE POWER INSTALLED (kW) = ',WINDPOWERTOT
      WRITE(1,212)'INITIAL WATER IN HIGH TANK (m3) = ',VHINIT
      WRITE(1,212)'INITIAL WATER IN LOW TANK (m3) = ',VLINIT
      WRITE(1,212)'WATER VELOCITY (m/s) = ',VWATER
      WRITE(1,212)'REYNOLDS = ',REY
      WRITE(1,212)'FRICTION COEFFICIENT = ',FRICTION
      WRITE(1,212)'PUMP POWER (kW) = ',PUMPPOWER
      WRITE(1,212)'HYDRAULIC LOSS (m) = ',DHF
      WRITE(1,212)'STEEL TUBING WEIGHT (kg) = ',TUBEWEIGHT
      WRITE(1,212)'AV CONSUM PER HOUR-PERS. (m3/h.per) = ',CONSHOUR

C
212  FORMAT(A38,F12.4)
C
C     INPUT TYPICAL ANNUAL DIMENSIONLESS POPULATION PER MONTH CURVE----
C
      READ(18,*)
      WRITE(*,*)'DIMENSIONLESS POPULATION CURVE'
      NP=13
      DO 450 K=1,NP
      READ(18,*)I,TDAYS(I),POPAD(I)
      WRITE(*,312)I,TDAYS(I),POPAD(I)
450  CONTINUE
C
312  FORMAT(I3,F8.1,F8.2)
C
      NDAYS=0
      WRITE(2,*)'DAY ', 'TOT.POPULATION(pers) '
      DO 550 K=1,366
      NDAYS=NDAYS+1
      XO=NDAYS
      CALL INTER(NP,TDAYS,POPAD,XO,YO,A1) !SUBROUT. LINEAR INTERCESSION
      POP=YO*POPUL
      WRITE(2,412)NDAYS,POP !TYPICAL POPULATION PER DAY
550  CONTINUE
C
412  FORMAT(I5,F8.1)
C
      CLOSE(2)

```

Παράρτημα

```
C
C      INPUT TYPICAL DAILY DIMENSIONLESS CONSUMPTION PER HOUR CURVE-----
C
      READ(20,*)
      WRITE(*,*) 'DIMENSIONLESS CONSUMPTION CURVE'
      NC=24
      DO 650 K=1,NC
      READ(20,*) I,THOUR(I),CONSAD(I)
      TIMES(I)=THOUR(I)*6
      WRITE(*,512) I,THOUR(I),CONSAD(I)
650  CONTINUE
C
512  FORMAT(I3,F7.1,F7.2)
C
      NTIMES=0
      WRITE(3,*) 'HOUR ', 'STEP ', 'CONSUMPTION(m3/h) '
      DO 750 K=1,144
      NHOURL=(NTIMES/6)+1
      NTIMES=NTIMES+1
      XO=NTIMES
      CALL INTER(NC,TIMES,CONSAD,XO,YO,A1)!SUBROUT. LINEAR INTERCESSION
      CONS=YO*CONSHOURL
      WRITE(3,612)NTIMES,NHOURL,CONS          !TYPICAL CONSUMPTION PER STEP
750  CONTINUE
C
612  FORMAT(I5,I5,F14.8)
C
      CLOSE(3)
C
C      CALCULATE TOTAL WATER REQUIREMENTS PER STEP-----
C
      WRITE(4,*) ' A/A ', 'Step ', 'Hour ', 'Day ', 'Tot.Popul(pers) '
1    , 'Consum(m3/h.pers) ', 'Tot.Consumpt(m3/h) '
      OPEN(2,FILE='POPULATION_PER_DAY.DAT')
      READ(2,*)
      M=0
C
      DO 850 K=1,366
      READ(2,*)NDAYS,POP
      OPEN(3,FILE='CONSUMPTION_PER_STEP.DAT')
      READ(3,*)
C
          DO L=1,144
          M=M+1
          READ(3,*)NTIMES,NHOURL,CONS
          QCONS=POP*CONS
          WRITE(4,712)M,NTIMES,NHOURL,NDAYS,POP,CONS,QCONS
          ENDDO
C
      CLOSE(3)
850  CONTINUE
      CLOSE(4)
C
712  FORMAT(I6,I6,I6,I6,F10.1,F14.6,F11.3)
C
C      NUMERICAL STEP WHICH CALCULATES THE AVAILABLE TOTAL WIND POWER,
C      THE PRODUCED FRESH WATER AND HYDROGEN, DEPENDING ON THE WIND-----
C
C
      WRITE(55,*) 'A/A ', 'TotalHours ', 'Vanem(m/s) ', 'Panem(kW) ',
1    'Pwater(kW) ', 'Ppump(kw) ', 'Phydro(kW) ', 'Prej(kW) '
C
      WRITE(56,*) 'A/A ', 'TotalHrs ', 'Qwater(m3/h) ', 'Volum Lo(m3) '
1    , 'Volum Hi(m3) ', 'Qpump(m3/h) ', 'Qhydro(Nm3/h) '
C
      OPEN(4,FILE='TOTAL_CONSUMPTIONS.DAT')
      READ(4,*)
      READ(10,*)
```

Παράρτημα

```
C      VOLHIGH=VHINIT
      VOLLOW=VLINIT
C
      QPUMP=0.
      PPUMP=0.
      QWATER=0.
      PWATER=0.
C
C      -----
C
      QCONSSUM=0.
      VANEMSUM=0.
      PANEMSUM=0.
      PWATERSUM=0.
      QWATERSUM=0.
C
      PUMPSTART=0.
      PPUMPSUM=0.
      QPUMPSUM=0.
      PHYDROSUM=0.
      QHYDROSUM=0.
C
      PREJSUM=0.
C
C      -----
C
      WINDHOUR=0.
      DESHOUR=0.
      PUMPHOUR=0.
      ELECTRHOUR=0.
C
C      START OF CALCULATIONS PER STEP-----
C
      DO 950 L=1,NSTEP
      READ(10,*)VANEM
      READ(4,*)M,NTIMES,NHOUR,NDAYS,POP,CONS,QCONS
C
      TOTALHOURS=(L/6.)      !HOOR CALCULATION: 1 STEP=10 MIN= 1/6 HOUR
C
C      -----
C
      IF(VANEM.LE.WIND(1))GO TO 812
      IF(VANEM.GE.WIND(NW))GO TO 813
      XO=VANEM
      CALL INTER(NW,WIND,WINDP,XO,YO,A1) !SUBROUT. LINEAR INTERCESSION
      PWIND=Y0
      GO TO 814
812  PWIND=0.
      GO TO 814
813  PWIND=WINDP(NW)
814  CONTINUE
      PANEM=PWIND*NANEM*WINDEFF      !FINAL POWER AVAILABLE FROM WINDTURB
C
C      -----
C
      IF(PANEM.LE.DESP(1))GO TO 822
      IF(PANEM.GE.DESP(ND))GO TO 823
      X0=PANEM
      CALL INTER(ND,DESP,DESQ,X0,YO,A1) !SUBROUT. LINEAR INTERCESSION
      QDES=Y0
      PDES=X0
      GO TO 824
822  QDES=0.
      PDES=0.
      GO TO 824
823  QDES=DESQ(ND)      !THEORITICAL POTABLE WATER SUPPLY
      PDES=DESP(ND)      !DESALINATION POWER REQUIRED
824  CONTINUE
C
```

Παράρτημα

```

C -----
C
VOL1=(QWATER/6)-(QPUMP/6)          !WATER EQUILIBRIUM IN LOW TANK
VOLLOW=VOLLOW+VOL1
C
IF (VOLLOW.LE.VLINIT)GO TO 832
IF (VOLLOW.GE.VLOW)GO TO 833
VOLUMLOW=VOLLOW
GO TO 834
832 VOLUMLow=VLINIT
QPUMP=0.
PPUMP=0.
GO TO 834
833 VOLUMLOW=VLOW          !WATER VOLUME REMAINING IN LOW TANK
VOLLOW=VLOW
QPUMP=PUMPSUPPLY          !WATER PUMP SUPPLY
PPUMP=PUMPPOWER          !PUMP POWER
PUMPSTART=PUMPSTART+1    !NUMBER OF PUMP START-UPS
GO TO 834
834 CONTINUE
C -----
C
VOL2=(QPUMP/6)-(QCONS/6)          !WATER EQUILIBRIUM IN HIGH TANK
VOLHIGH=VOLHIGH+VOL2
C
IF (VOLHIGH.LE.VHIGH)GO TO 842
IF (VOLHIGH.GE.VHIGH)GO TO 843
842 VOLUMHIGH=VOLHIGH
PWATER=PDES
QWATER=QDES
GO TO 844
843 VOLUMHIGH=VHIGH          !WATER VOLUME REMAINING IN HIGH TANK
VOLHIGH=VHIGH
PWATER=0.
QWATER=0.          !DESALINATION POWER REQUIRED
GO TO 844          !FINAL POTABLE WATER SUPPLY
844 CONTINUE
C -----
C
HYDROP=PANEM-PWATER          !AVAILABLE ELECTROLYSER POWER
C
IF (HYDROP.LE.H2P(1))GO TO 852
IF (HYDROP.GE.H2P(NH))GO TO 853
X0=HYDROP
CALL INTER (NH,H2P,H2Q,X0,Y0,A1) !SUBROUT. LINEAR INTERCESSION
QHYDRO=Y0
PHYDRO=X0
GO TO 854
852 QHYDRO=0.
PHYDRO=0.
GO TO 854
853 QHYDRO=H2Q(NH)          !FINAL PRODUCTION H2
PHYDRO=H2P(NH)          !ELECTROLYSIS POWER REQUIRED
GO TO 854
854 CONTINUE
C -----
C
PREJ=PANEM-PWATER-PHYDRO          !UNUSED REJECTED POWER
C
CALCULATE ANNUAL RESULTS-----
C
QCONSSUM=QCONSSUM+(QCONS/6.)
QCONSAVE=(QCONSSUM*6.)/L
C
VANEMSUM=VANEMSUM+VANEM
VANEMAVE=VANEMSUM/L
PANEMSUM=PANEMSUM+(PANEM/6.)

```

Παράρτημα

```
PANEMAVE=(6.*PANEMSUM)/L
PWATERSUM=PWATERSUM+(PWATER/6.)
PWATERAVE=(6.*PWATERSUM)/L
QWATERSUM=QWATERSUM+(QWATER/6.)
QWATERAVE=(6.*QWATERSUM)/L
C
PUMPSTARTAVE=(PUMPSTART*6.*24)/L
PPUMPSUM=PPUMPSUM+(PPUMP/6.)
PPUMPAVE=(6.*PPUMPSUM)/L
QPUMPSUM=QPUMPSUM+(QPUMP/6.)
QPUMPAVE=(6.*QPUMPSUM)/L
C
PHYDROSUM=PHYDROSUM+(PHYDRO/6.)
PHYDROAVE=(6.*PHYDROSUM)/L
QHYDROSUM=QHYDROSUM+(QHYDRO/6.)
QHYDROAVE=(QHYDROSUM*6.)/L
C
H2ENERGYSUM=QHYDROSUM*H2DENS
H2ENERGYAVE=(H2ENERGYSUM*6.)/L
C
PREJSUM=PREJSUM+(PREJ/6.)
PREJAVE=(6.*PREJSUM)/L
C
C
CALCULATE HOURS OF SUBSYSTEM FUNCTION-----
C
IF (PWIND.NE.0.) THEN
WINDHOUR=WINDHOUR+1.
WINDHR=WINDHOUR/6.
WINDHRPERC=WINDHOUR/L
ENDIF
C
IF (PWATER.NE.0.) THEN
DESHOUR=DESHOUR+1.
DESHR=DESHOUR/6.
DESHRPERC=DESHOUR/L
ENDIF
C
IF (PPUMP.NE.0.) THEN
PUMPHOUR=PUMPHOUR+1.
PUMPHR=PUMPHOUR/6.
PUMPHRPERC=PUMPHOUR/L
ENDIF
C
IF (PHYDRO.NE.0.) THEN
ELECTRHOUR=ELECTRHOUR+1.
ELECTRHR=ELECTRHOUR/6.
ELECTRHRPERC=ELECTRHOUR/L
ENDIF
C
C
CALCULATE POWER EXPLOITATION-----
C
DESPERC=PWATERSUM/PANEMSUM
ELECTRPERC=PHYDROSUM/PANEMSUM
TOTPERC=(PWATERSUM+PHYDROSUM)/PANEMSUM
C
C
REST OF-----
C
VTR=QPUMPSUM/VHIGH                !WATER VOL TO TANK VOL RATIO
WCR=QPUMPSUM/QCONSSUM             !WATER PRODUCED TO WATER REQUIRED
C
REGISTER SIMULATION RESULTS-----
C
WRITE(55,912)L,TOTALHOURS,VANEM,PANEM,PWATER,PPUMP,PHYDRO,PREJ
C
WRITE(56,1012)L,TOTALHOURS,QWATER,VOLUMLOW,VOLUMHIGH,QPUMP,QHYDRO
C
950 CONTINUE
C
C
END OF CALCULATIONS PER STEP-----
C
```

Παράρτημα

```

912  FORMAT(I5,F10.2,F9.1,F10.2,F10.2,F10.2,F10.2,F10.2)
C
1012 FORMAT(I5,F10.2,F11.3,F12.3,F12.3,F10.2,F10.2)
C
C   REGISTER ANNUAL RESULTS-----
C
WRITE(7,*) 'CONCLUDING ANNUAL RESULTS'
WRITE(7,1112) 'QCONSSUM      (m3)      =', QCONSSUM
WRITE(7,1112) 'QCONSAVE      (m3/h)     =', QCONSAVE
WRITE(7,*)
WRITE(7,1112) 'VANEMAVE       (m/s)      =', VANEMAVE
WRITE(7,1112) 'PANEMSUM       (kWh)      =', PANEMSUM
WRITE(7,1112) 'PANEMAVE       (kW)       =', PANEMAVE
WRITE(7,1112) 'PWATERSUM      (kWh)      =', PWATERSUM
WRITE(7,1112) 'PWATERAVE      (kW)       =', PWATERAVE
WRITE(7,1112) 'QWATERSUM      (m3)       =', QWATERSUM
WRITE(7,1112) 'QWATERAVE      (m3/h)     =', QWATERAVE
WRITE(7,*)
WRITE(7,1112) 'PUMPSTART      =', PUMPSTART
WRITE(7,1112) 'PUMPSTARTAVE  (daily)    =', PUMPSTARTAVE
WRITE(7,1112) 'PPUMPSUM      (kWh)      =', PPUMPSUM
WRITE(7,1112) 'PPUMP        (kW)       =', PUMPPOWER
WRITE(7,1112) 'PPUMPAVE      (kW)       =', PPUMPAVE
WRITE(7,1112) 'QPUMPSUM      (m3)       =', QPUMPSUM
WRITE(7,1112) 'QPUMPAVE      (m3/h)     =', QPUMPAVE
WRITE(7,*)
WRITE(7,1112) 'PHYDROSUM      (kWh)      =', PHYDROSUM
WRITE(7,1112) 'PHYDROAVE      (kW)       =', PHYDROAVE
WRITE(7,1112) 'QHYDROSUM      (Nm3)      =', QHYDROSUM
WRITE(7,1112) 'QHYDROAVE      (Nm3/h)    =', QHYDROAVE
WRITE(7,1112)
WRITE(7,1112) 'H2ENERGYSUM    (kWh)      =', H2ENERGYSUM
WRITE(7,1112) 'H2ENERGYAVE    (kW)       =', H2ENERGYAVE
WRITE(7,1112)
WRITE(7,1112) 'PREJSUM       (kWh)      =', PREJSUM
WRITE(7,1112) 'PREJAVE       (kW)       =', PREJAVE
WRITE(7,*)
WRITE(7,*) 'HOURS OF FUNCTION'
WRITE(7,1112) 'WINDHR        (hours)    =', WINDHR
WRITE(7,1112) 'WINDHRPERC      =', WINDHRPERC
WRITE(7,1112)
WRITE(7,1112) 'DESHR         (hours)    =', DESHR
WRITE(7,1112) 'DESHRPERC     =', DESHRPERC
WRITE(7,1112)
WRITE(7,1112) 'PUMPHR         (hours)    =', PUMPHR
WRITE(7,1112) 'PUMPHRPERC     =', PUMPHRPERC
WRITE(7,1112)
WRITE(7,1112) 'ELECTRHR      (hours)    =', ELECTRHR
WRITE(7,1112) 'ELECTRHRPERC  =', ELECTRHRPERC
WRITE(7,*)
WRITE(7,*) 'POWER EXPLOITATION'
WRITE(7,1112) 'DESPERC          =', DESPERC
WRITE(7,1112) 'ELECTRPERC     =', ELECTRPERC
WRITE(7,1112) 'TOTPERC          =', TOTPERC
WRITE(7,*)
WRITE(7,*) 'REST'
WRITE(7,1112) 'VTR              =', VTR
WRITE(7,1112) 'WCR              =', WCR
C
1112 FORMAT(A25,F12.3)
C
C   CALCULATE ECONOMICAL RESULTS-----
C
WINDINVEST=WINDPOWERTOT*WINDINVESTAD
DESALINVEST=(DESALCAP**0.9)*DESALINVESTAD
ELECTRINVEST=80000+ELECTRCAP*ELECTRINVESTAD
PUMPINVEST=2*PUMPPOWER*PUMPINVESTAD
TUBEINVEST=2.5*STEELCOST*TUBEWEIGHT
TANKINVEST=(VLOW+VHIGH)*TANKINVESTAD
C

```

Παράρτημα

```

TOTALINVEST=WINDINVEST+DESALINVEST+ELECTRINVEST+PUMPINVEST
1 +TUBEINVEST+TANKINVEST !TOTAL PLANT INVESTMENT
C
WINDMAINT=WINDINVEST*TOTALMAINTAD
DESALMAINT=DESALINVEST*DESALMAINTAD
ELECTRMAINT=ELECTRINVEST*ELECTRMAINTAD
PUMPMAINT=PUMPINVEST*TOTALMAINTAD
TUBEMAINT=TUBEINVEST*TOTALMAINTAD
TANKMAINT=TANKINVEST*TOTALMAINTAD
PUMPCOST=PPUMPSUM*ENERGYCOST
C
TOTALMAINT=WINDMAINT+DESALMAINT+ELECTRMAINT+PUMPMAINT+TUBEMAINT
1 +TANKMAINT+PUMPCOST !TOTAL PLANT O&M COSTS
C
C
C
-----
ANNUALDEPR=(TOTALINVEST*RRATE)/(1-((1+RRATE)**(-NYEARS)))
C
COSTRATIO=((ELECTRINVEST/(DESALINVEST+TANKINVEST))*WINDINVEST+
1 ELECTRINVEST)/TOTALINVEST !COST RATIO
C
WATERCOST=((ANNUALDEPR+TOTALMAINT)*(1-COSTRATIO))/QPUMPSUM
HYDROCOST=((ANNUALDEPR+TOTALMAINT)*COSTRATIO)/QHYDROSUM
C
WATERINC=QPUMPSUM*PRICEWATER !ANNUAL INCOME FROM WATER SALE
HYDROINC=QHYDROSUM*PRICEHYDRO !ANNUAL INCOME FROM HYDROGEN SALE
C
C
CALCULATE ECONOMICAL PARAMETERS-----
C
B0=0
C0=0
ANNUALEXP=TOTALMAINT
ANNUALINC=WATERINC+HYDROINC
C
DO 1050 L=1,NYEARS
ANNUALEXP=(1+FLA)*ANNUALEXP
ANEXP=ANNUALEXP*(1+RRATE)**(-L)
C0=C0+ANEXP
C
ANNUALINC=(1+FLA)*ANNUALINC
ANINC=ANNUALINC*(1+RRATE)**(-L)
B0=B0+ANINC
C
1050 CONTINUE
C
C0=C0+TOTALINVEST
C
BCR=B0/C0 !BENEFIT TO COST RATIO
RNPV=B0-C0 !NET PRESENT VALUE
QUITT=TOTALINVEST/(WATERINC+HYDROINC-TOTALMAINT) !QUITTANCE
C
C
CALCULATE IRR-----
C
DO 1150 RR=0.01,1,0.0001
B0=0
C0=0
ANNUALEXP=TOTALMAINT
ANNUALINC=WATERINC+HYDROINC
C
DO L=1,NYEARS
ANNUALEXP=(1+FLA)*ANNUALEXP
ANEXP=ANNUALEXP*(1+RR)**(-L)
C0=C0+ANEXP
C
ANNUALINC=(1+FLA)*ANNUALINC
ANINC=ANNUALINC*(1+RR)**(-L)
B0=B0+ANINC
ENDDO
C
C0=C0+TOTALINVEST

```


Παράρτημα

```

RIPV=B0-C0
C
IF (RIPV.GT.-10000.AND.RIPV.LT.10000) THEN
RIRR=RR                                ! INTERNAL RATE OF RETURN
ENDIF
C
1150 CONTINUE
C
C REGISTER ECONOMICAL RESULTS-----
C
WRITE(8,*) 'CONCLUDING ECONOMICAL RESULTS '
WRITE(8,*) 'INVESTMENT COSTS '
WRITE(8,1212) 'WINDINVEST (EU) =', WINDINVEST
WRITE(8,1212) 'DESALINVEST (EU) =', DESALINVEST
WRITE(8,1212) 'ELECTRINVEST (EU) =', ELECTRINVEST
WRITE(8,1212) 'PUMPINVEST (EU) =', PUMPINVEST
WRITE(8,1212) 'TUBEINVEST (EU) =', TUBEINVEST
WRITE(8,1212) 'TANKINVEST (EU) =', TANKINVEST
WRITE(8,*)
WRITE(8,1212) 'TOTALINVEST (EU) =', TOTALINVEST
WRITE(8,*)
WRITE(8,*) 'O&M COSTS '
WRITE(8,1212) 'WINDMAINT (EU) =', WINDMAINT
WRITE(8,1212) 'DESALMAINT (EU) =', DESALMAINT
WRITE(8,1212) 'ELECTRMAINT (EU) =', ELECTRMAINT
WRITE(8,1212) 'PUMPMMAINT (EU) =', PUMPMMAINT
WRITE(8,1212) 'TUBEMAINT (EU) =', TUBEMAINT
WRITE(8,1212) 'TANKMAINT (EU) =', TANKMAINT
WRITE(8,1212) 'PUMPCOST (EU) =', PUMPCOST
WRITE(8,*)
WRITE(8,1212) 'TOTALMAINT (EU) =', TOTALMAINT
WRITE(8,*)
WRITE(8,*) 'ECONOMICAL INDICATORS '
WRITE(8,1212) 'ANNUALDEPR (EU) =', ANNUALDEPR
WRITE(8,1212) 'COSTRATIO (-) =', COSTRATIO
WRITE(8,1212) 'WATERCOST (EU/m3) =', WATERCOST
WRITE(8,1212) 'HYDROCOST (EU/Nm3) =', HYDROCOST
WRITE(8,*)
WRITE(8,1212) 'WATERINC (EU) =', WATERINC
WRITE(8,1212) 'HYDROINC (EU) =', HYDROINC
WRITE(8,*)
WRITE(8,1212) 'BCR (-) =', BCR
WRITE(8,1212) 'RNPV (EU) =', RNPV
WRITE(8,1212) 'QUITT (years) =', QUITT
WRITE(8,1212) 'RIRR (-) =', RIRR
C
1212 FORMAT (A22,F12.3)
C
C -----
C
STOP
END
C
C -----
C
C -----
C
SUBROUTINE INTER(NPI,X,Y,XO,YO,A1)
C
C LINEAR INTERCESSION SUBROUTINE-----
C
C YPOROUTINA GRAMMIKON PAREMBOLON STHN SYNARTHSH Y=f(X)
C
C OTAN H METABLHTH X(I) EINAI SYNEXOS AYXOYSA-----
C
C
DIMENSION X(100),Y(100)
C
NPI1=NPI-1
IF (XO.LT.X(1)) GOTO 11
IF (XO.GT.X(NPI)) GOTO 12
K=0

```

Παράρτημα

```
10 K=K+1
C
  IF (X(K).EQ.0.)GOTO 10
  IF (XO.GT.X(K))GOTO 10
  IF (K.EQ.1)GO TO 20
  A1=(Y(K)-Y(K-1))/(X(K)-X(K-1))
  B1=Y(K-1)-A1*X(K-1)
  YO=A1*XO+B1
  GOTO 13
20 CONTINUE
  A1=(Y(K)-Y(K+1))/(X(K)-X(K+1))
  B1=Y(K+1)-A1*X(K+1)
  YO=Y(1)
  GOTO 13
C
11 A1=(Y(2)-Y(1))/(X(2)-X(1))
  B1=Y(2)-A1*X(2)
  YO=A1*XO+B1
  GOTO 13
12 A1=(Y(NPI)-Y(NPI1))/(X(NPI)-X(NPI1))
  B1=Y(NPI)-A1*X(NPI)
  YO=A1*XO+B1
13 CONTINUE
C
  RETURN
  END
C
C
C -----
C -----
C
C
```


ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία

1. Ζερβός Α., «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας», Ε.Μ.Π., 2007
2. Μαθιουλάκης Δ., Αναγνωστόπουλος Ι., Τουζόπουλος Δ., «Βιομηχανική Ρευστομηχανική», Ε.Μ.Π., 2005
3. Μπεργελές Γ., «Ανεμοκινητήρες», Εκδόσεις Συμεών, 2005
4. Παπαντώνης Δ., «Υδροδυναμικές Μηχανές, Αντλίες – Υδροστρόβιλοι», Εκδόσεις Συμεών, 2004
5. Παπαντώνης Δ., «Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα», Εκδόσεις Συμεών, 2007
6. Παπαντώνης Δ., «Υδροδυναμικές Εγκαταστάσεις», Εκδόσεις Συμεών, 1998
8. Zoulias E., Lympferopoulos N., «Hydrogen-based Autonomous Power Systems», Springer, 2008

Διδακτορικές Διατριβές

8. Ζέρβας Π., «Σχεδιασμός, Ανάπτυξη και Βελτιστοποίηση Υβριδικής Μονάδας Ισχύος Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας – Τεχνολογιών Υδρογόνου», 2009

Μεταπτυχιακές Εργασίες

9. Καραχάλιου Π., «Τεχνολογίες αφαλάτωσης και προοπτικές εφαρμογής στον ελληνικό χώρο», 2010
10. Σταματόπουλος Χ., «Συνδυασμός Παραγωγής Ηλεκτρισμού και Πόσιμου Νερού με Αφαλάτωση από Αιολική Ενέργεια, Εφαρμογή στη Νίσυρο», 2007

Διπλωματικές Εργασίες

11. Παλαιολούγκα Ε., Φράγκος Π., «Η Οικονομία του Υδρογόνου», 2009

Βιβλιογραφία

12. Παλιεράκης Γ., «Αφαλάτωση με χρήση Ηλιακών Συλλεκτών», 2007
13. Σπύρου Ι., «Ανάπτυξη Αλγορίθμου για Προσομοίωση και Βέλτιστο Σχεδιασμό Αυτόνομου Συστήματος Αφαλάτωσης Τροφοδοτούμενο από Υβριδικό Σύστημα Α.Π.Ε. με Αντλησιοταμίευση», 2009

Δημοσιεύσεις

14. Γενική Γραμματεία Αιγαίου και Νησιωτικής Πολιτικής, «Δημόσια Διαβούλευση: Υλοποίηση μονάδων αφαλάτωσης σε νησιά των νομών Δωδεκανήσου και Κυκλάδων», 2010
15. Aklil-D'Halluin D., Johnson E., Gazey R., Collard B., Ortisi V., Urso C., Latreche M.C., «*The PURE® Project - An Autonomous, Hybrid and Distributed Wind Hydrogen System For Islands*», 2009
16. Fritzmann C., «*State-of-the-art of reverse osmosis desalination*», 2006
17. Gilau A., Small M.J., «*Designing cost-effective seawater reverse osmosis system under optimal energy options*», 2007
18. Kaldellis J.K., Kondili E.M., «*The water shortage problem in the Aegean archipelago islands: cost-effective desalination prospects*», 2007
19. Kalogirou S., «*Seawater desalination using renewable energy sources*», 2005
20. Karagiannis I.C., Soldatos P.G., «*Current status of water desalination in the Aegean Islands*», 2006
21. Miranda M.S., Infield D., «*A wind-powered seawater reverse-osmosis system without batteries*», 2002
22. Nakken T., Frantzen E., Hagen E.F., Strøm H., «*Utsira – Demonstrating the renewable hydrogen society*», 2006
23. Spyrou I., Anagnostopoulos J., «*Design study of a stand-alone desalination system powered by renewable energy sources and a pumped storage unit*», 2009
24. Steinberger R., «*Hydrogen and Fuel Cells Technology, State of the Art, and Applications*», 2008
25. Tzen E., Theofiloyianakos D. Kologios Z., «*Autonomous reverse osmosis units driven by RE sources experiences and lessons learned*», 2007

Παρουσιάσεις

26. Βαρκαράκη Ε., «Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια», 2^ο Εθνικό Συνέδριο Τεχνολογιών Υδρογόνου, 2005
27. Ζούλιας Ε., Λυμπερόπουλος Ν., «Υδρογόνο στα Νησιά – Ελληνικό Νησί Υδρογόνου “H2ellenic Island”», Μήλος 2005 – 2006
28. Μανωλάκος Δ., «Συστήματα Αφαλάτωσης στο Νησιωτικό χώρο», Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2009
29. Κάραλης Γ., Ζούλιας Ε., «Πιλοτικό πρόγραμμα με μονάδα αφαλάτωσης και παραγωγή υδρογόνου από ΑΠΕ στην Ίο», Ημερίδα «Ενέργεια – Ανακύκλωση – Αστικό Περιβάλλον», 2008
30. Μαρνέλλος Γ., «Η Οικονομία του Υδρογόνου», Πτολεμαΐδα, 2007
31. Νικητάκος Ν., «ΥΔΡΙΑΔΑ – Πλωτή Αυτόνομη Οικολογική & Αποδοτική Μονάδα Αφαλάτωσης», 2007
32. Τσίφτης Ε., «Αντιμετώπιση Υδρευτικών Προβλημάτων των Νησιών του Αιγαίου», Συμπόσιο Αιγαίο – Νερό - Βιώσιμη Ανάπτυξη, 2001
33. Φούντη Μ., Βουρλιωτάκης Γ., «Οικονομία και Τεχνολογία Υδρογόνου», Θεωρία Καύσης και Συστήματα Καύσης, 2007

Ιστοσελίδες

34. <http://www.cres.gr/>
35. <http://en.wikipedia.org/>
36. <http://www.enercon.de/>
37. <http://www.hydroelectrolysers.com/>
38. <http://www.hydro.com/>
39. <http://old.eyploia.gr/>
40. <http://www.ypai.gr/>
41. <http://www.tropical.gr/>

