



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Ρευστών

---

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ανάλυση και Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού Υβριδικού Υδροηλεκτρικού –  
Αιολικού Σταθμού, με δύο παράλληλα Συστήματα Αποθήκευσης  
Ενέργειας: Αντλησιοταμίευση και Παραγωγή Υδρογόνου με  
Ηλεκτρόλυση



**ΙΩΑΝΝΑ ΜΠΑΡΟΥΝΗ**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ

Αθήνα, Ιούλιος 2011

# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Τομέας Ρευστών

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ανάλυση και Βελτιστοποίηση Σχεδιασμού Υβριδικού Υδροηλεκτρικού –  
Αιολικού Σταθμού, με δύο παράλληλα Συστήματα Αποθήκευσης  
Ενέργειας: Αντλησιοταμίευση και Παραγωγή Υδρογόνου με  
Ηλεκτρόλυση

**ΙΩΑΝΝΑ ΜΠΑΡΟΥΝΗ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΙΩΑΝΝΗΣ ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ**

Αθήνα, Ιούλιος 2011

## Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ανάλυση και βελτιστοποίηση υβριδικού (ΥΒΣ) υδροηλεκτρικού – αιολικού σταθμού παραγωγής ενέργειας στο μη – διασυνδεδεμένο σύστημα της Λέσβου, με δύο παράλληλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας: αντλησιοταμίευση και παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση. Πρωτεύον αποθηκευτικό σύστημα του σταθμού θεωρείται η αντλησιοταμίευση λόγω της υπάρχουσας σχετικής τεχνογνωσίας, της υψηλής απόδοσης του συστήματος και της ικανότητάς του να διαχειρίζεται μεγάλα ποσά ενέργειας. Δευτερεύον αποθηκευτικό σύστημα αποτελεί η παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση, λόγω της μη τεχνολογικής της ωριμότητας, του υψηλού κόστους και του σχετικά χαμηλού βαθμού απόδοσής της. Η ηλεκτρόλυση του νερού για παραγωγή υδρογόνου επιλέχθηκε, ωστόσο, να ενταχθεί στον υπό εξέταση ΥΒΣ λόγω της επικείμενης ανάπτυξης της τεχνολογίας των διατάξεων ηλεκτρόλυσης, με συνεπακόλουθη μείωση του κόστους της, άλλα και λόγω του παγκόσμιου ενδιαφέροντος για το υδρογόνο ως το καύσιμο του μέλλοντος. Η ετήσια λειτουργία του προτεινόμενου ΥΒΣ προσομοιώνεται με τη χρήση υπολογιστικού κώδικα και εξάγονται αποτελέσματα τόσο για τις ενεργειακές, όσο και για τις οικονομικές του επιδόσεις. Επίσης, με τη χρήση λογισμικού βελτιστοποίησης, επιλέγεται η βέλτιστη διαστασιολόγηση των κύριων συνιστωσών του σταθμού με σκοπό την επίτευξη συγκεκριμένων οικονομικών ή/και ενεργειακών στόχων. Τα αποτελέσματα της εργασίας δείχνουν ότι ο προτεινόμενος ΥΒΣ αυξάνει τη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού, ενώ σαν επένδυση προκύπτει εξαιρετικά ελκυστική. Αξιοσημείωτο συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι με κατάλληλη τροποποίηση της κείμενης νομοθεσίας για τους ΥΒΣ, επιτρέπεται μεγαλύτερη παραγωγή υδρογόνου, γεγονός θετικό για την οικονομικότητα του υπό εξέταση σταθμού, χωρίς να επηρεάζονται αρνητικά οι ενεργειακές του επιδόσεις.

## **Abstract**

The subject of this diploma thesis is the analysis and optimization of a hybrid hydroelectric - wind power station in the non - interconnected Greek island of Lesbos, with two parallel systems of energy storage: pumped storage and hydrogen production by electrolysis. Primary storage system is the pumped storage because of the relevant existing know - how, the high performance of the system and its ability to manage large amounts of energy. Secondary storage system is the production of hydrogen by electrolysis, in the absence of its technological maturity, its high cost and its relatively low performance. Nevertheless, the water electrolysis for hydrogen production was chosen to be incorporated in the examined station due to the imminent development of the electrolyzers' technology, with a consequent reduction of their cost, but also because of the global interest in hydrogen, which is considered to be the fuel of the future. The annual operation of the proposed station is simulated by a calculating code, which extracts results for both its energy and financial performance. Also, by using optimization software, the optimal sizing of the main components of the station is selected, in order to achieve specific economic and/or energy goals. The results of the thesis show that the proposed station increases the penetration of Renewable Energy Sources (RES) in the energy balance of the island, while the investment appears to be extremely attractive. A remarkable conclusion of the thesis is that if the existing legislation for hybrid stations was modified, a greater production of hydrogen would be allowed, which is beneficial for the economy of the station, without adversely affecting its energy performance.

## Περιεχόμενα

Λίστα Συμβόλων .....	8
Πρόλογος.....	14
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> : Εισαγωγή.....	18
1.1 Η ενεργειακή κατάσταση σήμερα και στο μέλλον.....	18
1.2 Η ανάγκη της αποθήκευσης ενέργειας από ΑΠΕ.....	25
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : Η αντλησιοταμίευση .....	31
2.1 Υβριδικός σταθμός αιολικών και αντλησιοταμίευσης .....	31
2.2 Γιατί προτείνεται η αντλησιοταμίευση ως μέσο αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας....	40
2.3 Υβριδικοί σταθμοί με αιολικά και αντλησιοταμίευση στην Ελλάδα .....	42
2.3.1 Ο ΥΒΣ στην Ικαρία .....	42
2.3.2 Αδειοδοτημένοι ΥΒΣ από τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) .....	44
2.3.3 Μελέτες ένταξης ΥΒΣ με αιολικά και αντλησιοταμίευση .....	45
2.4 Ο ΥΒΣ με αιολικά και αντλησιοταμίευση στη νήσο El Hierro στα Κανάρια.....	46
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : Το Υδρογόνο.....	48
3.1 Γενικά για το Υδρογόνο .....	48
3.1.1 Φυσικές Ιδιότητες του Υδρογόνου.....	48
3.1.2 Χημικές ιδιότητες του Υδρογόνου .....	49
3.2 Γιατί H <sub>2</sub> .....	50
3.3 Τεχνολογίες Παραγωγής Υδρογόνου .....	51
3.3.1 Εισαγωγικά στοιχεία .....	51
3.3.2 Ηλεκτρόλυση του νερού.....	55
3.4 Γιατί προτείνεται το υδρογόνο σε συνδυασμό με τις ΑΠΕ.....	61
3.5 Αποθήκευση, Διανομή, Ασφάλεια H <sub>2</sub> .....	63
3.5.1 Εισαγωγικά στοιχεία .....	63
3.5.2 Αποθήκευση .....	64
3.5.3 Μεταφορά και διανομή H <sub>2</sub> .....	65
3.5.4 Ασφάλεια χρήσης .....	67
3.6 Κυψέλες Καυσίμου .....	70
3.7 Μελέτες και υφιστάμενα συστήματα ΑΠΕ-παραγωγής υδρογόνου .....	74
3.7.1 Το νησί Utsira.....	74
3.7.2 Οι νήσοι Shetland.....	78
3.7.3 Το Λαύριο.....	79

3.7.4 Η Μήλος.....	81
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> : Ανάλυση και Μοντελοποίηση λειτουργίας του προτεινόμενου ΥΒΣ.....	85
4.1 Σύνθεση και λειτουργία του προτεινόμενου ΥΒΣ.....	85
4.2 Η περίπτωση εφαρμογής .....	89
4.3 Περιγραφή του Υπολογιστικού Κώδικα.....	93
4.3.1 Εισαγωγή δεδομένων και προκαταρκτικοί υπολογισμοί.....	93
4.3.2 Εγγυημένη Ισχύς ΥΒΣ που αποζημιώνεται και Γραμμή Εγγυημένης Ισχύος.....	104
4.3.3 Κόστος του προτεινόμενου ΥΒΣ.....	106
4.3.4 Έναρξη της προσομοίωσης .....	108
4.3.5 Τέλος έτους και Ετήσια αποτελέσματα .....	126
4.3.6 Οικονομικοί δείκτες .....	127
4.3.7 Λογικό Διάγραμμα .....	131
4.4 Βελτιστοποίηση.....	139
4.4.1 Εισαγωγή.....	139
4.4.2 Εξελικτικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης .....	139
4.4.3 Το λογισμικό βελτιστοποίησης <i>EASY</i> .....	141
Κεφάλαιο 5 <sup>ο</sup> : Αποτελέσματα της προσομοίωσης.....	144
5.1 Εισαγωγή.....	144
5.2 Αποτελέσματα του Σεναρίου 1Α.....	147
5.2.1 Αποτελέσματα βέλτιστων σταθμών του Σεναρίου 1Α με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR).....	147
5.2.2 Αποτελέσματα επιλεγμένων βέλτιστων σταθμών του Σεναρίου 1Α με διπλό στόχο: τη μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR) και της ετήσιας καθαρής ποσότητας παραγόμενης ενέργειας .....	163
5.2.3 Διαγράμματα ετήσιας λειτουργίας επιλεγμένων βέλτιστων σταθμών του Σεναρίου 1Α .....	172
5.3 Αποτελέσματα βέλτιστων σταθμών του Σεναρίου 1Β με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR).....	182
5.4 Αποτελέσματα του Σεναρίου 2Α.....	193
5.4.1 Αποτελέσματα βέλτιστων σταθμών του Σεναρίου 2Α με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR).....	193
5.4.2 Διαγράμματα ετήσιας λειτουργίας του βέλτιστου σταθμού πώλησης του υδρογόνου προς 8 ευρώ/kg του Σεναρίου 2Α.....	205
5.5 Αποτελέσματα βέλτιστων σταθμών του Σεναρίου 2Β με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR).....	208
5.6 Σύγκριση των σεναρίων .....	219

Κεφάλαιο 6 <sup>ο</sup> : Ανακεφαλαίωση, Συμπεράσματα και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα .....	227
6.1 Ανακεφαλαίωση .....	227
6.2 Συμπεράσματα.....	229
6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	230
Βιβλιογραφία.....	232
Παράρτημα: Λίστα Μεταβλητών του Κώδικα HYPSSOS.....	236

## Λίστα Συμβόλων

*A*: συντελεστής ασφαλείας για τη διαδικασία της παραγωγής ενέργειας από τους υδροστροβίλους

*B*: συντελεστής ασφαλείας για τη διαδικασία της άντλησης

*B.A.H*: βαθμός απόδοσης της υδροστροβλικής παραγωγή

*B.A.P*: βαθμός απόδοσης της διαδικασίας άντλησης

*B.A.TOT*: συνολικός βαθμός απόδοσης της διαδικασίας άντλησης – παραγωγής

*CC*: εγγυημένη ισχύς του ΥΒΣ που αποζημιώνεται

*C<sub>EP</sub>*: κόστος επιφανειακής προστασίας των αγωγών

*C<sub>FORM</sub>*: κόστος έργων πολιτικού μηχανικού

*C<sub>FW</sub>*: συντελεστής χρησιμοποίησης (capacity factor) του αιολικού πάρκου

*C<sub>H2</sub>*: κόστος της διάταξης ηλεκτρόλυσης

*C<sub>HME1</sub>*: κόστος υποσταθμού

*C<sub>HME2</sub>*: κόστος σύνδεσης στο δίκτυο

*C<sub>INST</sub>*: κόστος μεταφοράς και εκσκαφών για τους σωλήνες

*C<sub>LEIT</sub>*: συνολικό λειτουργικό κόστος του ΥΒΣ

*C<sub>LEIT1</sub>*: κόστος συντήρησης, λογαριασμοί, μισθοί προσωπικού κτλ

*C<sub>LEIT2</sub>*: κόστος ασφάλισης

*C<sub>MELET</sub>*: κόστος μελετών και επίβλεψης

*C<sub>OTHERS</sub>*: λοιπά κόστη (αγορά γης, δρόμοι κτλ.)

*C<sub>PIPE</sub>*: κόστος των αγωγών

*C<sub>PROD</sub>*: κόστος παραγόμενης ενέργειας

*C<sub>PUMP</sub>*: κόστος αντλιών

*C<sub>RAF</sub>*: κόστος των συγκολλήσεων των σωληνώσεων

*C<sub>RESERV</sub>*: κόστος άνω ταμιευτήρα

*C<sub>STAT</sub>*: συνολικό κόστος εξοπλισμού του σταθμού

*C<sub>TOTAL</sub>*: συνολικό κόστος κατασκευής του σταθμού

*C<sub>TURGEN</sub>*: κόστος υδροστροβίλων και γεννητριών

*C<sub>WIND</sub>*: κόστος ανεμογεννητριών

*C<sub>YL</sub>*: κόστος υλικού των σωληνώσεων

*DZ<sub>MEAN</sub>*: μέση διαφορά στάθμης των δύο ταμιευτήρων

*DZ<sub>MIN</sub>*: ελάχιστη διαφορά στάθμης των δύο ταμιευτήρων



$DZ_{VOLR}$ : διαφορά μέγιστης – ελάχιστης επιτρεπόμενης στάθμης του άνω ταμιευτήρα

$E_{AVAILABLE}$ : διαθέσιμη ποσότητα αποθηκευμένης ενέργειας στον άνω ταμιευτήρα στην αρχή της ημέρας

$E_D$ : ημερήσια ποσότητα ενέργειας που πρέπει να αγοραστεί από το δίκτυο για την άντληση (δήλωση φορτίου)

$E_{ESTIM}$ : ημερήσια εκτιμώμενη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από τους υδροστροβίλους του ΥΒΣ (ήδη αποθηκευμένη ποσότητα ενέργειας στον άνω ταμιευτήρα και πρόβλεψη αιολικής παραγωγής του πρώτου δωδεκάωρου της ημέρας)

$E_G$ : ημερήσια ποσότητα εγγυημένης ενέργειας

$E_{G,LOSS}$ : ημερήσιες ενεργειακές απώλειες λόγω των γεννητριών

$E_{H,TOT}$ : ημερήσια ποσότητα ενέργειας που παράγεται από τους υδροστροβίλους

$E_{H2,LOSS}$ : ημερήσιες ενεργειακές απώλειες που οφείλονται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης

$E_{KATEN}$ : ειδική κατανάλωση ενέργειας της διάταξης ηλεκτρόλυσης

$E_{OFFER}$ : ημερήσια προσφορά ενέργειας από τον ΥΒΣ

$E_{P,LOSS}$ : ημερήσιες ενεργειακές απώλειες λόγω των αντλιών

$E_{P,PURCH}$ : ημερήσια ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο για άντληση

$E_{P,TOT}$ : ημερήσια ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται από τις αντλίες

$E_{SCHED}$ : ημερήσια ποσότητα ενέργειας που πρέπει να παράγει ο ΥΒΣ βάσει της εγγυημένης ενέργειας

$E_{WFIRST}$ : εκτιμώμενη ποσότητα ενέργειας που πρόκειται να παραχθεί από το αιολικό πάρκο του ΥΒΣ κατά τη διάρκεια του πρώτου δωδεκάωρου της ημέρας

$E_{W,G}$ : ημερήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο

$E_{W,H2}$ : ημερήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης

$E_{W,LOSS}$ : ημερήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που απορρίπτεται

$E_{W,P}$ : ημερήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο

$E_{W,TOT}$ : ημερήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που παράγεται από το αιολικό πάρκο του ΥΒΣ

$E_{EPEIS}$ : ετήσια ποσότητα ενέργειας που ο ΥΒΣ δεν παρήγαγε παρά τη δέσμευσή του

$E_{H,LOSS}$ : ημερήσιες ενεργειακές απώλειες λόγω των υδροστροβίλων

$E_{YBS,TOT}$ : ημερήσια ποσότητα ενέργειας που παρήγαγε ο ΥΒΣ (υδροστροβίλοι και αιολικά)

$F_1, F_2$ : δείκτες του βαθμού πληρότητας του άνω ταμιευτήρα

$F_{LOAD}$ : ποσοστό φόρτισης κάθε υδροστροβίλου το τρέχον δεκάλεπτο

*g*: επιτάχυνση της βαρύτητας  
*H*: ονομαστικό ύψος των αντλιών και των υδροστροβίλων  
*INC24<sub>H</sub>*: ημερήσια έσοδα από την πώληση της ενέργειας των υδροστροβίλων  
*INC24<sub>H2</sub>*: ημερήσια έσοδα από την πώληση του υδρογόνου  
*INC24<sub>TOT</sub>*: ημερήσια καθαρά έσοδα του ΥΒΣ  
*INC24<sub>W</sub>*: ημερήσια έσοδα από την πώληση της αιολικής ενέργειας  
*IRR*: εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης  
*IVOL*: συντελεστής που δείχνει κατά πόσο ο όγκος του νερού στον άνω ταμιευτήρα είναι μέσα στα επιτρεπόμενα όρια  
*N<sub>ELEC</sub>*: πλήθος συστοιχιών κελιών ηλεκτρόλυσης  
*N<sub>ELECOF</sub>*: πλήθος εν λειτουργία συστοιχιών κελιών ηλεκτρόλυσης το τρέχον δεκάλεπτο  
*N<sub>EPEIS</sub>*: ετήσια πλήθος φορών που ο ΥΒΣ δεν κατάφερε να προσφέρει ποσότητες ενέργειας παρά τη δέσμευσή του  
*n<sub>G</sub>*: ονομαστικός βαθμός απόδοσης γεννήτριας  
*n<sub>G,x(N)</sub>*: βαθμός απόδοσης γεννήτριας το τρέχον δεκάλεπτο  
*N<sub>H</sub>*: ονομαστική ισχύς υδροστροβίλου  
*n<sub>H,x(N)</sub>*: βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου το τρέχον δεκάλεπτο  
*n<sub>H2</sub>*: βαθμός απόδοσης της διάταξης ηλεκτρόλυσης  
*n<sub>M</sub>*: ονομαστικός βαθμός απόδοσης κινητήρα  
*N<sub>P</sub>*: ονομαστική ισχύς αντλίας  
*n<sub>P</sub>*: ονομαστικός βαθμός απόδοσης αντλίας  
*N<sub>P,TOT</sub>*: συνολική ονομαστική ισχύς των αντλιών  
*N<sub>POPE</sub>*: πλήθος εν λειτουργία αντλιών το τρέχον δεκάλεπτο  
*N<sub>PUMPS</sub>*: πλήθος αντλιών  
*NPV*: καθαρή παρούσα αξία  
*N<sub>T,TOT</sub>*: συνολική ονομαστική ισχύς των υδροστροβίλων  
*N<sub>TOPEF</sub>*: πλήθος εν λειτουργία υδροστροβίλων το τρέχον δεκάλεπτο  
*N<sub>TURBS</sub>*: πλήθος υδροστροβίλων  
*N<sub>W</sub>*: ονομαστική ισχύς ανεμογεννήτριας  
*n<sub>W</sub>*: βαθμός απόδοσης ανεμογεννήτριας  
*N<sub>W,TOT</sub>*: συνολική ονομαστική ισχύς ανεμογεννητριών  
*N<sub>WGEN</sub>*: πλήθος ανεμογεννητριών  
*OUT24<sub>P</sub>*: ημερήσια έξοδα για την αγορά ενέργειας από το δίκτυο για άντληση

$P_{APOM}$ : τελική ωριαία προσφορά ισχύος του ΥΒΣ μετά τον περιορισμό φόρτισης  
 $P_{BOT,i}$ : τεχνικό ελάχιστο των μονάδων βάσεως  
 $P_{C,i}$ : ωριαία ισχύς μονάδων βάσεως  
 $P_{D,i}$ : ωριαία ισχύς αντλιοστασίου με χρήση ενέργειας από το δίκτυο  
 $PE$ : εκτιμώμενος μέσος βαθμός απόδοσης της διαδικασίας άντλησης  
 $P_{E,i}$ : ωριαία προσφορά ισχύος από τον ΥΒΣ  
 $P_{ELEC}$ : συνολική ονομαστική ισχύς των εν λειτουργία συστοιχιών κελιών ηλεκτρόλυσης  
 $P_{Gloss,x}$ : απώλειες ισχύος δεκαλέπτου λόγω των γεννητριών  
 $P_{H,x}$ : συνολική ισχύς λειτουργίας των ενταγμένων υδροστροβίλων το τρέχον δεκάλεπτο  
 $P_{H,x}(N)$ : ισχύς λειτουργίας δεκαλέπτου ενός υδροστροβίλου  
 $P_{HCT}$ : τεχνικό ελάχιστο των υδροστροβίλων  
 $P_{Hloss,x}$ : απώλειες ισχύος δεκαλέπτου λόγω των υδροστροβίλων  
 $P_{HLP}$ : άθροισμα των ωριαίων ισχύων που εκτείνονται πάνω από τη γραμμή εγγυημένης ισχύος  
 $P_{HN,TOT}$ : συνολική ονομαστική ισχύς των εν λειτουργία υδροστροβίλων το τρέχον δεκάλεπτο  
 $P_L$ : ωριαίο φορτίο ζήτηση του έτους αναφοράς  
 $P_{LIMIT}$ : ισχύς από την οποία άγεται η γραμμή εγγυημένης ισχύος  
 $P_{min,conv}$ : ελάχιστη απαιτούμενη εγκατεστημένη συμβατική ισχύς  
 $P_{P,x}$ : συνολική ισχύς λειτουργίας των ενταγμένων αντλιών το τρέχον δεκάλεπτο  
 $P_{P,x}(N)$ : ισχύς λειτουργίας δεκαλέπτου μιας αντλίας  
 $P_{Ploss,x}$ : απώλειες ισχύος δεκαλέπτου λόγω των αντλιών  
 $P_{PMIN}$ : τεχνικό ελάχιστο των αντλιών  
 $P_{PN,TOT}$ : συνολική ονομαστική ισχύς των εν λειτουργία αντλιών το τρέχον δεκάλεπτο  
 $P_{TOP}$ : μέγιστο ωριαίο φορτίο ζήτησης του έτους αναφοράς  
 $P_{W,G}$ : αιολική ισχύς δεκαλέπτου που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο  
 $P_{W,H2}$ : αιολική ισχύς δεκαλέπτου που διοχετεύεται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης  
 $P_{W,P}$ : αιολική ισχύς δεκαλέπτου που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο  
 $P_{W,REST,x}$ : αιολική ισχύς δεκαλέπτου που περισσεύει μετά την κατά προτεραιότητα διάθεσή της είτε απευθείας στο δίκτυο είτε στο αντλιοστάσιο  
 $P_{W,TOT}$ : μέση ημερήσια προβλεπόμενη αιολική παραγωγή  
 $P_{W,x}$ : αιολική ισχύς δεκαλέπτου

$P_{WMEAN}$ : μέση ωριαία προβλεπόμενη αιολική παραγωγή  
 $P_{Wout,i}$ : ωριαία ισχύς αιολικών πάρκων εκτός ΥΒΣ  
 $P_{H2loss,x}$ : απώλειες ισχύος δεκαλέπτου λόγω της διάταξης ηλεκτρόλυσης  
 $Q_{DI}$ : επιτόκιο δανείου  
 $Q_{ELEC}$ : ετήσιος συντελεστής αναπροσαρμογής της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας  
 $Q_{EQUI}$ : ίδια κεφάλαια (ως ποσοστό της αρχικής επένδυση)  
 $Q_H$ : ονομαστική ισχύς υδροστροβίλου  
 $Q_{H,TOT}$ : συνολική παροχή δεκαλέπτου των υδροστροβίλων  
 $Q_{H,x}(N)$ : παροχή δεκαλέπτου ενός υδροστροβίλου  
 $Q_{H2}$ : ημερήσια ποσότητα υδρογόνου που παράγει ο ΥΒΣ  
 $Q_{INFL}$ : μέσο ποσοστό πληθωρισμού  
 $Q_{IRR}$ : συντελεστής επικαιροποίησης  
 $Q_{LIFE}$ : διάρκεια ζωής της επένδυσης  
 $Q_{LIFLO}$ : χρόνος αποπληρωμής δανείου  
 $Q_{LOAN}$ : δάνειο (ως ποσοστό της αρχικής επένδυσης)  
 $Q_P$ : ονομαστική ισχύς αντλίας  
 $Q_{P,TOT}$ : συνολική παροχή δεκαλέπτου των αντλιών  
 $Q_{P,x}(N)$ : παροχή δεκαλέπτου μιας αντλίας  
 $Q_{SUBS}$ : κρατική επιχορήγηση (ως ποσοστό της αρχικής επένδυσης)  
 $Q_{TAX}$ : συντελεστής φορολογίας  
 $Q_{TAXTA}$ : φορολογία τοπικής αυτοδιοίκησης  
 $SMALL$ : ένας μικρός αριθμός  
 $TE$ : εκτιμώμενος μέσος βαθμός απόδοσης της διαδικασίας παραγωγής ενέργειας από τους υδροστροβίλους  
 $TRF_{CC}$ : τιμή αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος  
 $TRF_H$ : τιμή πώλησης της KWh των υδροστροβίλων  
 $TRF_P$ : τιμή αγοράς της KWh από το δίκτυο για άντληση  
 $TRF_W$ : τιμή πώλησης της KWh των αιολικών  
 $TRF_{H2}$ : τιμή πώλησης του κιλού υδρογόνου  
 $V_{FR}$ : ποσοστό πλήρωσης του άνω ταμιευτήρα  
 $V_{MN}$ : ελάχιστος επιτρεπόμενος όγκος νερού στον άνω ταμιευτήρα  
 $V_{MX}$ : μέγιστος επιτρεπόμενος όγκος νερού στον άνω ταμιευτήρα  
 $V_R$ : όγκος νερού στον άνω ταμιευτήρα το τρέχον δεκάλεπτο

$V_{REMAIN}$ : όγκος νερού στον άνω ταμιευτήρα κατά τον οποίο είναι περισσότερος ή λιγότερος ο όγκος νερού στο τέλος του έτους σε σχέση με τον όγκο νερού στην αρχή του έτους

$V_{TOT}$ : ωφέλιμη χωρητικότητα άνω ταμιευτήρα

$W_G$ : η παραγόμενη αιολική ισχύς δεκαλέπτου ανά εγκατεστημένο KW

$Y.BAL$ : λόγος των ετήσιων εσόδων προς το κόστος εγκατάστασης του ΥΒΣ

$Y.E_{H,TOT}$ : ετήσια ποσότητα ενέργειας που παρήγαγαν οι υδροστρόβιλοι

$Y.E_{NET}$ : ετήσια καθαρή ποσότητα ενέργειας που παρήγαγε ο ΥΒΣ

$Y.E_{PURCH}$ : ετήσια ποσότητα ενέργειας που αγόρασε ο ΥΒΣ από το δίκτυο για άντληση

$Y.E_{W,EXP}$ : ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που αξιοποιήθηκε

$Y.E_{W,G}$ : ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύτηκε απευθείας στο δίκτυο

$Y.E_{W,H2}$ : ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύτηκε στη διάταξη ηλεκτρόλυσης

$Y.E_{W,LOSS}$ : ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που απορρίφθηκε

$Y.E_{W,P}$ : ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύτηκε στο αντλιοστάσιο

$Y.E_{W,TOT}$ : ετήσια αιολική παραγωγή

$Y.INC$ : ετήσια έσοδα ΥΒΣ

$Y.INC_{TOT}$ : τελικά ετήσια έσοδα ΥΒΣ

$Y.Q_{H2}$ : ετήσια ποσότητα υδρογόνου που παρήγαγε ο ΥΒΣ

$Y.E_G$ : ετήσια ποσότητα εγγυημένης ενέργειας

$Z_{ADD}$ : συντελεστής πλήρωσης του άνω ταμιευτήρα

$\Gamma$ : συντελεστής ασφαλείας που εκφράζει την πιθανότητα αξιοποίησης της αιολικής παραγωγής

$\Delta.A.W$ : δείκτης αξιοποίησης της αιολικής παραγωγής

$\zeta_{P,PUMP}$ : συντελεστής απωλειών του αγωγού κατάθλιψης

$\zeta_{P,TUR}$ : συντελεστής απωλειών του αγωγού προσαγωγής

$N_{H2}$ : ονομαστική ισχύς της μιας συστοιχίας κελιών ηλεκτρόλυσης

$N_{H2,TOT}$ : συνολική εγκατεστημένη ισχύς των συστοιχιών κελιών ηλεκτρόλυσης

$P$ : πυκνότητα του νερού

$\Sigma_{AIOM}$ : συντελεστής του περιορισμού φόρτισης

## Πρόλογος

Η παραγωγή και χρήση ενέργειας είναι έννοιες άμεσα συνυφασμένες με την επιβίωση και την πρόοδο του ανθρώπινου γένους από αρχαιοτάτων χρόνων. Στις μέρες μας, ο δυτικός τρόπος ζωής, η αλματώδης εξέλιξη των αναπτυσσόμενων χωρών και η πληθυσμιακή έκρηξη, έχουν συντελέσει σε αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις. Προκειμένου να ικανοποιηθούν αυτές οι απαιτήσεις, έχουμε οδηγηθεί στην υπερεκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων, η εκτεταμένη καύση των οποίων, οδήγησε με τη σειρά της, στην επικείμενη εξάντλησή τους και σε μια σειρά καταστρεπτικών επιπτώσεων για τον άνθρωπο και τον πλανήτη.

Τη λύση στο ενεργειακό πρόβλημα καλούνται να δώσουν η ορθολογική χρήση της ενέργειας και μεγαλύτερη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο. Οι ΑΠΕ συγκεντρώνουν μια πληθώρα πλεονεκτημάτων έναντι της συμβατικής παραγωγής ενέργειας, με κυριότερα τον ανεξάντλητο χαρακτήρα τους και τη φιλική προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο εκμετάλλευσή τους. Ωστόσο, η παραγωγή ενέργειας από ορισμένες ΑΠΕ, εξαρτάται από μεγέθη στοχαστικά, όπως η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιοφάνεια για την περίπτωση της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας αντίστοιχα. Κατά συνέπεια, δεν επιτυγχάνεται πάντα η επιθυμητή χρονική σύμπτωση της προσφοράς και της ζήτησης ενέργειας και οι μονάδες ΑΠΕ δεν μπορούν να θεωρηθούν απολύτως αξιόπιστες και να ενταχθούν αβλεπτεί σε ένα ενεργειακό σύστημα. Η ιδιαιτερότητα αυτή των ΑΠΕ περιορίζει λοιπόν την επιτρεπόμενη εγκατεστημένη ισχύ των αντίστοιχων μονάδων (π.χ. αιολικό πάρκο) και συνεπάγεται απόρριψη ποσοτήτων ενέργειας από αυτές, ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή και αδιάκοπη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές. Το πρόβλημα αυτό είναι εντονότερο σε αυτόνομα ενεργειακά συστήματα, όπως είναι αυτά των περισσότερων ελληνικών νησιών, εξαιτίας του ανομοιόμορφου προφίλ ζήτησης ενέργειας που παρουσιάζουν. Συγκεκριμένα, η απουσία βιομηχανικών μονάδων που θα μπορούσαν να απορροφούν ενέργεια κατά τις νυχτερινές ώρες σε συνδυασμό με την κατακόρυφη αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω του τουρισμού και της εκτεταμένης χρήσης των κλιματιστικών, δημιουργούν έντονες κοιλάδες και αιχμές στην καμπύλη ζήτησης φορτίου που αποτρέπουν την μεγάλη διείσδυση μονάδων ΑΠΕ. Από την

άλλη μεριά, τα ελληνικά νησιά ενδείκνυνται για εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ, όπως τα αιολικά και φωτοβολταϊκά πάρκα, λόγω του πλούσιου αιολικού δυναμικού τους και της μεγάλης ηλιοφάνειας σε αυτά, καθώς και του υψηλού κόστους παραγωγής ενέργειας που εμφανίζουν σε σύγκριση με το ηπειρωτικό δίκτυο.

Για να επιτευχθεί λοιπόν, η μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ σε αυτόνομα ενεργειακά συστήματα συνίσταται ο συνδυασμός τους με διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης, δηλαδή η διαμόρφωση Υβριδικών Σταθμών. Έτσι, όταν υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας από ΑΠΕ, που δεν μπορεί να συμμετάσχει στην κάλυψη του φορτίου λόγω των επιβεβλημένων περιορισμών, δεν απορρίπτεται αλλά αποθηκεύεται υπό μορφή άλλης ενέργειας. Σε περίπτωση απώλειας των ΑΠΕ, η αποθηκευμένη ενέργεια μετατρέπεται εκ νέου σε ηλεκτρική και αποδίδεται ελεγχόμενα στο δίκτυο. Συνεπώς, αίρεται το μειονέκτημα της μη προβλεπόμενης και διακοπτόμενης παραγωγής από ΑΠΕ και μπορεί να επιτραπεί η περισσότερο εκτεταμένη εγκατάσταση των αντίστοιχων μονάδων. Εναλλακτικά, το πλεόνασμα ενέργειας από ΑΠΕ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή πόσιμου νερού που εκλείπει από πολλά ελληνικά νησιά ή υδρογόνου με την προοπτική να αποτελέσει το καύσιμο για τις μεταφορές.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση και βελτιστοποίηση του σχεδιασμού υβριδικού υδροηλεκτρικού - αιολικού σταθμού παραγωγής στο μη-διασυνδεδεμένο δίκτυο της Λέσβου, με δύο παράλληλα συστήματα αποθήκευσης: αντλησιοταμίευση και παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση. Κατά την αντλησιοταμίευση αντλείται νερό με χρήση του πλεονάσματος αιολικής ενέργειας από έναν ταμιευτήρα σε δεύτερο ευρισκόμενο σε υψηλότερη στάθμη, δηλαδή συντελείται η αποθήκευση της αιολικής ενέργειας υπό μορφή υδραυλικής ενέργειας. Όταν παραστεί η ανάγκη, το νερό ακολουθεί την αντίθετη πορεία, διέρχεται μέσα από υδροστροβίλους συζευγμένους με γεννήτριες και η δυναμική ενέργειά του μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η παραγωγή υδρογόνου γίνεται με διάταξη ηλεκτρόλυσης νερού που επίσης αξιοποιεί ποσά αιολικής ενέργειας που ενδεχομένως θα απορρίπτονταν. Το παραγόμενο υδρογόνο θεωρείται ότι θα πωλείται για τη χρήση του ως εναλλακτικό καύσιμο στα οχήματα του νησιού. Πρωτεύον αποθηκευτικό σύστημα του ΥΒΣ θεωρείται η αντλησιοταμίευση, διότι είναι μια τεχνολογία ώριμη και ικανή να διαχειριστεί τεράστια ποσά ενέργειας με πρακτικά μηδενικούς χρόνους απόκρισης τόσο των αντλιών, όσο και των υδροστροβίλων. Επιπλέον, η συνολική

κυκλική διαδικασία της άντλησης – παραγωγής έχει υψηλό βαθμό απόδοσης της τάξεως του 70%. Η αποθήκευση της αιολικής ενέργειας υπό μορφή υδρογόνου αποτελεί, συνεπώς, το δευτερεύον αποθηκευτικό σύστημα του ΥΒΣ, διότι πρόκειται για μια τεχνολογία με υψηλό κόστος και σχετικά χαμηλό βαθμό απόδοσης (~60%). Το υδρογόνο ενσωματώθηκε, ωστόσο, στον ΥΒΣ της εργασίας εξαιτίας των προοπτικών μείωσης του κόστους και αύξησης του βαθμού απόδοσης της διαδικασίας παραγωγής του από ηλεκτρόλυση τα προσεχή χρόνια. Άλλωστε, υπάρχει ένα αυξανόμενο παγκόσμιο ενδιαφέρον γύρω από το υδρογόνο και το συνδυασμό του με τις ΑΠΕ, με πολλούς επιστήμονες να το θεωρούν το καύσιμο του μέλλοντος και να οραματίζονται μια καινούργια παγκόσμια οικονομία, την «οικονομία του υδρογόνου».

Συγκεκριμένα η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

- Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

Αναλύονται οι σημερινές ενεργειακές πολιτικές και οι αρνητικές τους επιπτώσεις στην ανθρωπότητα και τον πλανήτη. Αναδεικνύονται οι ΑΠΕ ως η λύση στα προβλήματα που απορρέουν από τις συμβατικές μεθόδους ηλεκτροπαραγωγής. Τονίζεται η ανάγκη της αποθήκευσης της ενέργειας που προέρχεται από ΑΠΕ. Αναφέρονται μέθοδοι ενεργειακής αποθήκευσης.

- Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

Εξηγείται η τεχνολογία της αντλησιοταμίευσης σε συνδυασμό με την αιολική ενέργεια και δίνονται παραδείγματα από υπάρχουσες εφαρμογές.

- Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

Γίνεται η γνωριμία με το υδρογόνο ως στοιχείο και ως φορέα ενέργειας. Εξηγείται η διαδικασία της παραγωγής του με τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης του νερού, τροφοδοτούμενη από αιολική ενέργεια. Δίνονται παραδείγματα από υπάρχουσες εφαρμογές παραγωγής υδρογόνου από ΑΠΕ.

- Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

Γίνεται η ανάλυση και η μοντελοποίηση του προτεινόμενου ΥΒΣ. Εξηγείται η πολιτική της διαχείρισής του μέσα από τη λεπτομερή περιγραφή του υπολογιστικού κώδικα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας του.



Γίνεται εκτενής αναφορά στο λογισμικό βελτιστοποίησης *EASY*, που χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση του προτεινόμενου ΥΒΣ, με στόχο την εύρεση του οικονομικά ή/και ενεργειακά βέλτιστου σταθμού.

- Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

Δίνονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης του σχεδιασμού του ΥΒΣ, ως προς οικονομικούς αλλά και ενεργειακούς στόχους, για τέσσερα διακριτά σενάρια λειτουργίας του.

- Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

Γίνεται η ανακεφαλαίωση της εργασίας και η αποτίμηση των αποτελεσμάτων. Προτείνονται σχετικά ζητήματα για περαιτέρω έρευνα.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ιωάννη Αναγνωστόπουλο, επίκουρο καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. και επιβλέπων αυτής της εργασίας για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος αλλά και για την άριστη συνεργασία μας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό Γεώργιο Κάραλη και τον επιστημονικό συνεργάτη του Ε.Μ.Π., Αντώνη Σαλιάγκα που πρόθυμα μου παρείχαν βιβλιογραφικό υλικό, το οποίο με βοήθησε ιδιαίτερος στην καλύτερη κατανόηση των τεχνολογιών που πραγματεύεται η εργασία μου. Ακόμη, οφείλω να ευχαριστήσω θερμά την κα Έλλη Βαρκαράκη, Δρ. Χημικό Μηχανικό και υπεύθυνη της μονάδας αιολικών-υδρογόνου του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργεια (ΚΑΠΕ), που με τηλεφωνικές συζητήσεις και παροχή, κατά τα άλλα δυσεύρετων, δημοσιεύσεων, με βοήθησε σημαντικά να εξοικειωθώ με την παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση από αιολική ενέργεια. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κυριάκο Γιαννάκογλου, καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π., για την άδεια χρήσης του λογισμικού βελτιστοποίησης *EASY*, το οποίο αποτέλεσε πολύτιμο εργαλείο για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της εργασίας.

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή

### 1.1 Η ενεργειακή κατάσταση σήμερα και στο μέλλον

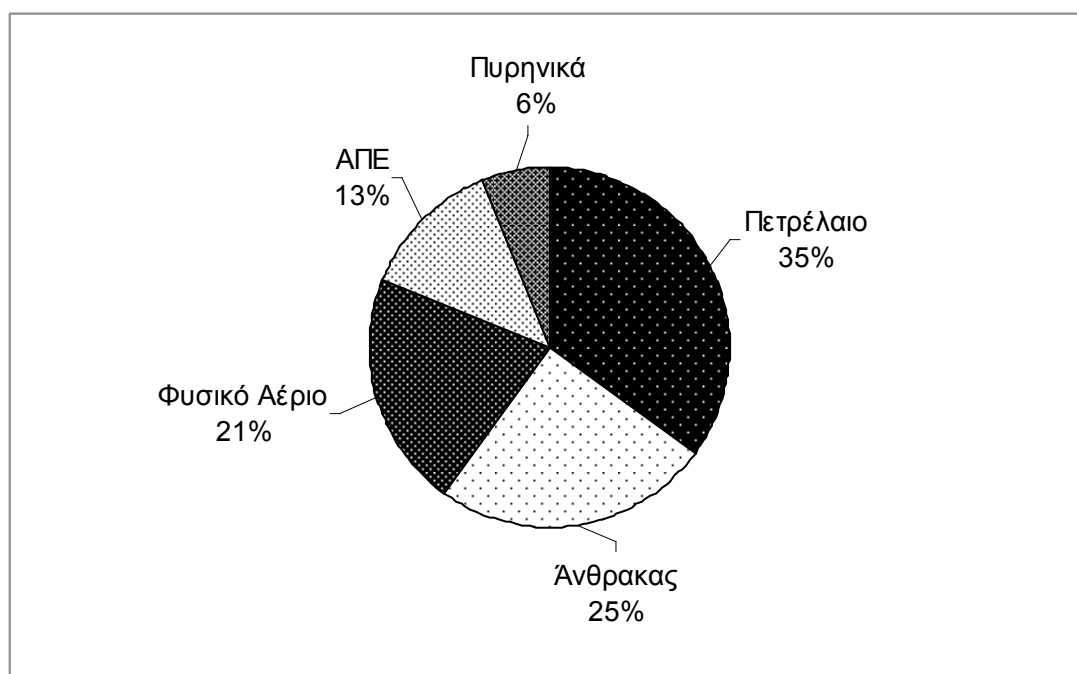
Η ενέργεια επηρεάζει κάθε πτυχή της ζωής μας. Χρειαζόμαστε ενέργεια για να ζεστάνουμε, να δροσίσουμε και να φωτίσουμε τα σπίτια μας, όπως επίσης για να μαγειρέψουμε και να ψύξουμε τη τροφή μας. Η ενέργεια τροφοδοτεί τα αυτοκίνητα μας και τα άλλα μέσα μεταφοράς. Ενέργεια χρειάζονται οι βιομηχανίες μας, τα γραφεία μας και οι άλλοι χώροι εργασίας μας. Σήμερα, στις βιομηχανικές κοινωνίες μας σχεδόν όλη αυτή η ενέργεια παράγεται κύρια από ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, άνθρακα και φυσικό αέριο) και σε μικρότερο βαθμό από υδροηλεκτρικά έργα και πυρηνική ενέργεια.

Η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση εικοσαπλασιάστηκε από το 1850 έως σήμερα, δεκαπλασιάστηκε από το 1900 και τετραπλασιάστηκε από το 1950. Η δραματική αυτή αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης βοήθησε στην οικονομική ανάπτυξη και στην βελτίωση του βιοτικού επιπέδου ενός σημαντικού τμήματος, αλλά όχι ολόκληρου, του πληθυσμού του πλανήτη. Το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης κατά την τελευταία εκατονταετία έγινε στις αναπτυγμένες βιομηχανικά ώρες, που αποτελούν το 20% περίπου του παγκόσμιου πληθυσμού. Παράλληλα κατά την ίδια περίοδο υπήρξε μια τεράστια ανάπτυξη της επιστημονικής και τεχνικής γνώσης. Από το τέλος της δεκαετίας του '60 άρχισαν να αναγνωρίζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της βιομηχανικής επανάστασης και ιδιαίτερα των επιπτώσεων που προκαλεί η καύση των ορυκτών καυσίμων. Οι ενεργειακές κρίσεις της δεκαετίας του '70 ώθησαν την ανάπτυξη διάφορων τεχνικών που καθιστούν πιο αποδοτική τη χρήση ενέργειας και άρχισε να δίνεται έμφαση στην παραγωγή ενέργειας από τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Η ηλιακή, η αιολική, η υδροδυναμική ενέργεια, η βιομάζα και η γεωθερμία, που αναβαθμίστηκαν τις τελευταίες δύο δεκαετίες στην παγκόσμια ενεργειακή σκηνή, βαπτίστηκαν με τον όρο «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας».

Η πτώση των τιμών του πετρελαίου κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '80 και του μεγαλύτερου μέρους της δεκαετίας του '90 δυσκόλεψε για οικονομικούς λόγους την

ανάπτυξη και εισαγωγή σε μεγάλη κλίμακα των ΑΠΕ και της εξοικονόμησης ενέργειας. Παρά το γεγονός ότι η συνειδητοποίηση των περιβαλλοντικών προβλημάτων της χρήσης των ορυκτών καυσίμων απέκτησε μια άλλη διάσταση κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, η οικονομική παράμετρος εμπόδισε την ανάπτυξή τους.

Σήμερα τα ορυκτά καύσιμα παρέχουν το 81% της παγκόσμιας ενεργειακής προσφοράς. Μεταξύ των ορυκτών καυσίμων, το πετρέλαιο παρέχει το μεγαλύτερο ποσοστό, περίπου το 35%, ο άνθρακας παρέχει το 25% και το φυσικό αέριο το 21%. Οι ΑΠΕ παρέχουν περίπου το 13%, αλλά το μεγαλύτερο μέρος είναι υπό τη μορφή παραδοσιακής χρήσης της βιομάζας (καυσόξυλα) στον αναπτυσσόμενο κόσμο. Οι νέες μορφές των ΑΠΕ (υδροηλεκτρικά, αιολική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια, σύγχρονες μορφές βιοενέργειας) συνεισφέρουν μόνο στο 1/3 της συνολικής προσφοράς των ΑΠΕ και το μεγαλύτερο ποσοστό από αυτές είναι υπό τη μορφή μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων. Η πυρηνική ενέργεια, τέλος, παρέχει το υπόλοιπο 6% (Σχήμα 1.1).



*Σχήμα 1.1: Ποσοστό Συνεισφοράς των Ενεργειακών Πηγών στην Παγκόσμια Κατανάλωση Ενέργειας*

Το ένα τρίτο του παγκόσμιου πληθυσμού (περίπου 2 δισεκατομμύρια άνθρωποι) ακόμη και σήμερα βασίζονται για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών στην

χρήση του καυσόξυλου και των άλλων παραδοσιακών πηγών ενέργειας. Οι άνθρωποι αυτοί δεν έχουν πρόσβαση στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, δεν καταναλώνουν πετρέλαιο ή φυσικό αέριο. Αυτός είναι ένας από τους βασικότερους λόγους που οι πληθυσμοί αυτοί συνεχώς γίνονται πτωχότεροι. Από την άλλη μεριά, οι πλουσιότεροι πολίτες του πλανήτη καταναλώνουν όλο και μεγαλύτερες ποσότητες ορυκτών καυσίμων, υδροηλεκτρικής και πυρηνικής ενέργειας για να ικανοποιήσουν τις ολοένα αυξανόμενες ανάγκες τους.

Οι προβλέψεις διάφορων διεθνών οργανισμών δείχνουν ότι αν οι τρέχουσες ενεργειακές τάσεις παραμείνουν αμετάβλητες η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση θα αυξάνεται με ρυθμό περίπου 1,7 με 2% περίπου το χρόνο τις επόμενες δεκαετίες. Η Διεθνής Οργάνωση Ενέργειας (IEA) στο Σενάριο Αναφοράς της World Energy Outlook 2006 προβλέπει ότι στην περίοδο 2004-2030 η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση θα αυξηθεί κατά 53%, η κατανάλωση φυσικού αερίου κατά 68%, η κατανάλωση πετρελαίου κατά 41% και η κατανάλωση άνθρακα κατά 60%. Τα ορυκτά καύσιμα θα καλύψουν το 83% της συνολικής αύξησης σύμφωνα με αυτό το σενάριο. Οι ΑΠΕ θα αυξηθούν κατά 59%, ενώ η χρήση της πυρηνικής ενέργειας προβλέπεται να αυξηθεί το 2030 κατά 21% περίπου (Πίνακας 1.1).

	1980	2004		2030		Αύξηση 2004-2030
<b>Άνθρακας</b>	1785	2773	24,7%	4441	26,0%	60%
<b>Πετρέλαιο</b>	3107	3940	35,2%	5575	32,6%	41%
<b>Φυσικό Αέριο</b>	1237	2302	20,5%	3869	22,6%	68%
<b>Πυρηνική</b>	186	714	6,4%	861	5,0%	21%
<b>ΑΠΕ:</b>	946	1475	13,2%	2349	13,8%	59%
Βιομάζα	765	1176	10,5%	1645	9,6%	40%
Υδροηλεκτρικά	148	242	2,2%	408	2,4%	69%
Άλλες ΑΠΕ	33	57	0,5%	296	1,7%	51%
<b>Σύνολο</b>	5536	11204		17095		53%

*Πίνακας 1.1: Πρωτογενής Κατανάλωση Ενέργειας Παγκοσμίως (Μtoe)*

Άλλες προβλέψεις υποδεικνύουν ότι αν οι υπάρχουσες ενεργειακές πολιτικές και τάσεις συνεχιστούν, η παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση θα διπλασιαστεί μέχρι το

2025 και θα τριπλασιαστεί μέχρι το 2050, συνεχίζοντας να αυξάνεται και στο δεύτερο μισό του αιώνα. Το μεγαλύτερο τμήμα αυτής της αύξησης αναμένεται να σημειωθεί στις αναπτυσσόμενες χώρες, δεδομένου του υψηλού ρυθμού αύξησης του πληθυσμού τους και τα πολύ χαμηλά επίπεδα της σημερινής ενεργειακής τους κατανάλωσης.

Ωστόσο, ένα ενεργειακό μέλλον στηριζόμενο σε υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης και στην εντατική χρήση των ορυκτών καυσίμων παρουσιάζει μια σειρά από προβλήματα και προκλήσεις για την ανθρωπότητα. Τα κυριότερα από αυτά είναι:

- Το φαινόμενο του θερμοκηπίου

Οι ενεργειακές δραστηριότητες, κύρια η καύση των ορυκτών καυσίμων, παράγουν το 78% των ανθρωπογενών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και το 23% των εκπομπών μεθανίου. Τα αέρια αυτά είναι οι κύριοι υπεύθυνοι για την επιδείνωση του φυσικού φαινομένου του θερμοκηπίου, την υποβάθμιση της ποιότητας της ατμόσφαιρας και τη σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας της Γης. Έτσι, συνιστούν σοβαρή απειλή για μια γενικότερη κλιματική μεταβολή ικανή να διαταράξει την οικολογική ισορροπία του πλανήτη. Να σημειωθεί ότι η μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια της Γης αυξήθηκε κατά 0,6 °C κατά τον τελευταίο αιώνα, ενώ το 2005 ήταν το θερμότερο έτος των τελευταίων 1000 ετών. Εάν οι υπάρχοντες ρυθμοί αύξησης της ενεργειακής κατανάλωσης συνεχιστούν με την ενεργειακή προσφορά να βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, τότε οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα θα αυξηθούν κατά 2 με 2,5 φορές έως το 2050 και κατά 2,5 με 3,5 φορές έως το 2100. Σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες εκτιμήσεις ( International Panel for Climate Change) μια τέτοια εξέλιξη θα οδηγήσει σε αύξηση της θερμοκρασίας από 1,4 έως 5,8 °C με καταστροφικές επιπτώσεις για τον πλανήτη.

- Η ατμοσφαιρική ρύπανση

Η καύση των ορυκτών καυσίμων προκαλεί ρύπανση του αέρα η οποία βλάπτει τη δημόσια υγεία και διαταράσσει τα οικοσυστήματα. Οι ενεργειακές δραστηριότητες προκαλούν το 85% των ανθρωπογενών εκπομπών διοξειδίου του θείου, το 45% των εκπομπών σωματιδίων, το 41% των εκπομπών μολύβδου, το 40% των εκπομπών υδρογονανθράκων και το 20% των εκπομπών οξειδίων του νατρίου στην ατμόσφαιρα. Οι αέριοι αυτοί ρύποι προκαλούν με τη σειρά τους την όξινη βροχή και

το αστικό νέφος. Η καύση των ορυκτών καυσίμων είναι επίσης μια σημαντική πηγή καρκινογόνων τοξικών χημικών. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η ρύπανση του αέρα προκαλεί το θάνατο 500.000 ανθρώπων ετησίως, ενώ στην Ευρωπαϊκή Ένωση οι εκπομπές των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής προκαλούν ζημιές κόστους 70 δισεκατομμυρίων ευρώ ετησίως στην ανθρώπινη υγεία, στα κτήρια και στην αγροτική παραγωγή.

- Οι κίνδυνοι ασφάλειας

Οι βιομηχανικές χώρες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις εισαγωγές πετρελαίου και η εξάρτηση αυτή αυξάνεται συνεχώς. Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) προβλέπει ότι οι εισαγωγές πετρελαίου στις χώρες του ΟΟΣΑ θα αυξηθούν από 54% που ήταν το 1997 σε 70% το 2020, εάν οι τρέχουσες ενεργειακές τάσεις συνεχιστούν. Οι οικονομίες των χωρών αυτών είναι άμεσα εξαρτημένες από τη τιμή του πετρελαίου και από τους παράγοντες που την επηρεάζουν. Οι Δυτικές χώρες ξοδεύουν δεκάδες δισεκατομμύρια δολάρια κάθε χρόνο για να προστατεύσουν τον εφοδιασμό του πετρελαίου από τη Μέση Ανατολή. Σύμφωνα με προβλέψεις του Δ.Ο.Ε. το ποσοστό των παγκόσμιων προμηθειών πετρελαίου από τις χώρες του Περσικού Κόλπου θα αυξηθεί από 26% που ήταν το 1997 σε 41% το 2020. Δεδομένης της πολιτικής αστάθειας της περιοχής οι χώρες που εισάγουν πετρέλαιο θα έχουν να αντιμετωπίσουν μεγαλύτερους κινδύνους ασφάλειας στον εφοδιασμό τους και οικονομικής σταθερότητας.

- Τα υψηλά κόστη ενεργειακών επενδύσεων

Η κατασκευή σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, δικτύων αγωγών μεταφοράς πετρελαίου και φυσικού αερίου και άλλων εγκαταστάσεων ενεργειακής προσφοράς είναι υψηλής έντασης κεφαλαίου. Οι αναλύσεις δείχνουν ότι αν η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας συνεχίσει να αυξάνεται με ρυθμό 2% το έτος, θα χρειαστούν ενεργειακές επενδύσεις της τάξης των 11 με 13 τρισεκατομμυρίων δολαρίων για το διάστημα 2000 με 2020 και των 25 με 35 τρισεκατομμυρίων για το διάστημα 2020 με 2050. Αυτό το επίπεδο επενδύσεων είναι δύο με τέσσερις φορές υψηλότερο από το αντίστοιχο της περιόδου 1990-2000. Ωστόσο τα υψηλά αυτά ενεργειακά κόστη είναι δυσβάσταχτα για τις αναπτυσσόμενες χώρες και ένα σημαντικό τμήμα των αναπτυγμένων χωρών.

- Η μείωση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων

Τα αποδεδειγμένα αποθέματα πετρελαίου παγκοσμίως στο τέλος του 2004 ανέρχονταν σε 1.186 δις βαρέλια, ενώ η κατανάλωση το 2004 ανήλθε σε 29,5 δις βαρέλια (BP-Ιούνιος 2005). Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) στην έκδοσή του World Energy Outlook 2004 με προβλέψεις για το ενεργειακό μέλλον, εκτιμά ότι η κατανάλωση πετρελαίου θα αυξάνεται κατά μέσο όρο 1,6% το χρόνο και ότι τα τελικά αποθέματα πετρελαίου (νέες ανακαλύψεις, νέες τεχνολογίες εξόρυξης κτλ.) θα είναι της τάξης των 2.600 δις βαρελιών, υπερδιπλάσια δηλαδή των σημερινών γνωστών αποθεμάτων. Οι παραδοχές αυτές οδηγούν σε μια εκτίμηση ότι το πετρέλαιο θα διαρκέσει 60 περίπου χρόνια. Άρα το θεμελιώδες καύσιμο πάνω στο οποίο στηρίζεται όλη η οικονομία θα έρθει σε ορατό χρονικό διάστημα στη τελική πτωτική του φάση. Το γεγονός αυτό θα έχει τεράστιες επιπτώσεις στην οικονομία, στην κοινωνία, στην πολιτική και στην γεωπολιτική. Η πορεία για το φυσικό αέριο προδιαγράφεται αντίστοιχη, ενώ τα αποθέματα άνθρακα μπορούν να διαρκέσουν εκατοντάδες χρόνια, αν και η χρήση τους είναι προβληματική λόγω των περιβαλλοντικών προβλημάτων που προκαλούν.

- Η άνιση κατανομή

Η κατανάλωση ενέργειας και ιδιαίτερα η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας είναι άνισα κατανεμημένα στον πλανήτη. Συγκεκριμένα, η κατά κεφαλή κατανάλωση ηλεκτρισμού στις χώρες του ΟΟΣΑ ήταν το 1996 13 φορές μεγαλύτερη απ' ότι στις χώρες της Ανατολικής Ασίας, 26 φορές μεγαλύτερη απ' ότι στις χώρες της Νότιας Ασίας και 63 φορές μεγαλύτερη απ' ότι στις χώρες της Αφρικής κάτω από τη Σαχάρα. Κατά συνέπεια, οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου είναι επίσης άνισα κατανεμημένες στον πλανήτη. Το 20% του παγκόσμιου πληθυσμού που ζει στις χώρες με τη μεγαλύτερη κατά κεφαλή κατανάλωση ενέργειας παράγει το 63% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από την καύση ορυκτών καυσίμων. Σε αντίθεση, το 20% του παγκόσμιου πληθυσμού που ζει στις χώρες με τη μικρότερη κατά κεφαλή κατανάλωση ενέργειας παράγει μόνο το 2% των εκπομπών. Συμπερασματικά, οι συμβατικές ενεργειακές πολιτικές δίνουν αυξανόμενη έμφαση στην ενεργειακή κατανάλωση των πλουσιότερων πολιτών (τόσο στις βιομηχανικές όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες), παρά στην παροχή σύγχρονων ενεργειακών πηγών και βελτιωμένων ενεργειακών υπηρεσιών στους πτωχότερους πολίτες.

Έχει καταστεί λοιπόν σαφές ότι οι τρέχουσες ενεργειακές τάσεις δεν οδηγούν σε μια βιώσιμη ενεργειακά ανάπτυξη. Ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον είναι δυνατό να συμβεί μόνο εάν θα στηριχτεί πολύ περισσότερο στην χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και στην Ορθολογική Χρήση της Ενέργειας. Η ΟΧΕ θα μπορούσε να ελαττώσει την κατανάλωση ενέργειας, να μειώσει τις επενδυτικές απαιτήσεις και να βελτιώσει τις ενεργειακές υπηρεσίες στα πτωχότερα κράτη. Το πέρασμα από τα ορυκτά καύσιμα στις ΑΠΕ θα μπορούσε να αντιμετωπίσει όλα τα προβλήματα του ενεργειακού μέλλοντος που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα κύρια πλεονεκτήματα των ΑΠΕ είναι τα εξής:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους εξαντλήσιμους πόρους (κυρίως ορυκτά καύσιμα).
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής αυτάρκειας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε τοπικό, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο.
- Είναι διάσπαρτες γεωγραφικά και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, παρέχοντας τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή).
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των ΑΠΕ έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών τόσο σε μεγάλη όσο και σε μικρή κλίμακα εφαρμογών, ενώ έχουν μικρή διάρκεια κατασκευής, επιτρέποντας έτσι τη γρήγορη ανταπόκριση της προσφοράς προς τη ζήτηση ενέργειας.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών.



- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

Καθοριστική για το μέλλον των ΑΠΕ είναι η δεσμευτική απόφαση που πήραν το Μάρτιο του 2007 οι αρχηγοί κρατών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οποία προβλέπει:

- Μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου κατά 20% σε σχέση με τις εκπομπές του 1990.
- Μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά 20% σε σχέση με την προβλεπόμενη κατανάλωση το 2020.
- Το 20% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας το 2020 να προέρχεται από ΑΠΕ.

## **1.2 Η ανάγκη της αποθήκευσης ενέργειας από ΑΠΕ**

Στο προηγούμενο υποκεφάλαιο φάνηκε ο ρόλος που οι ΑΠΕ καλούνται να παίξουν τα προσεχή χρόνια στην παγκόσμια ενεργειακή σκηνή, προκειμένου να περιοριστούν οι βλαβερές επιπτώσεις των σημερινών ενεργειακών πολιτικών και να οδηγηθούμε σε ένα βιώσιμο ενεργειακά μέλλον.

Ωστόσο η χρήση των ΑΠΕ, παρά την πληθώρα των πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει έναντι των συμβατικών τρόπων παραγωγής ενέργειας, διατηρεί ένα σημαντικό μειονέκτημα. Πρόκειται για το μειονέκτημα της χρονικής αναντιστοιχίας της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ και της ζήτησης ενέργειας από τους καταναλωτές. ΑΠΕ όπως ο άνεμος και ο ήλιος είναι μεγέθη στοχαστικά και η παραγωγή ενέργειας από αυτά είναι χρονικά μεταβαλλόμενη και συνεπώς ανίκανη να παρακολουθήσει την καμπύλη ζήτησης φορτίου ενός δικτύου. Κατά συνέπεια, η ενέργεια από ΑΠΕ μπορεί να μην είναι διαθέσιμη όταν απαιτείται ή να υπάρχει πλεόνασμα αυτής το οποίο να απορρίπτεται. Έτσι, η επιτρεπόμενη διείσδυση των ΑΠΕ στα ενεργειακά ισοζύγια των δικτύων είναι περιορισμένη προκειμένου να διασφαλίζεται η εύρυθμη και ασφαλής λειτουργία τους. Επίσης, είναι αναγκαία η ύπαρξη συμβατικών μονάδων σε κατάσταση θερμής εφεδρείας, ικανών να καλύψουν τη ζήτηση σε ικανοποιητικό χρόνο πριν το σύστημα οδηγηθεί σε ασταθή λειτουργία και black out, σε περίπτωση απώλειας των ΑΠΕ.

Το πρόβλημα αυτό είναι ακόμα πιο έντονο σε αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα, όπως είναι αυτά πολλών ελληνικών νησιών όπου το αιολικό δυναμικό είναι πλούσιο αλλά ένα σημαντικό μέρος του μένει ανεκμετάλλευτο επειδή 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.

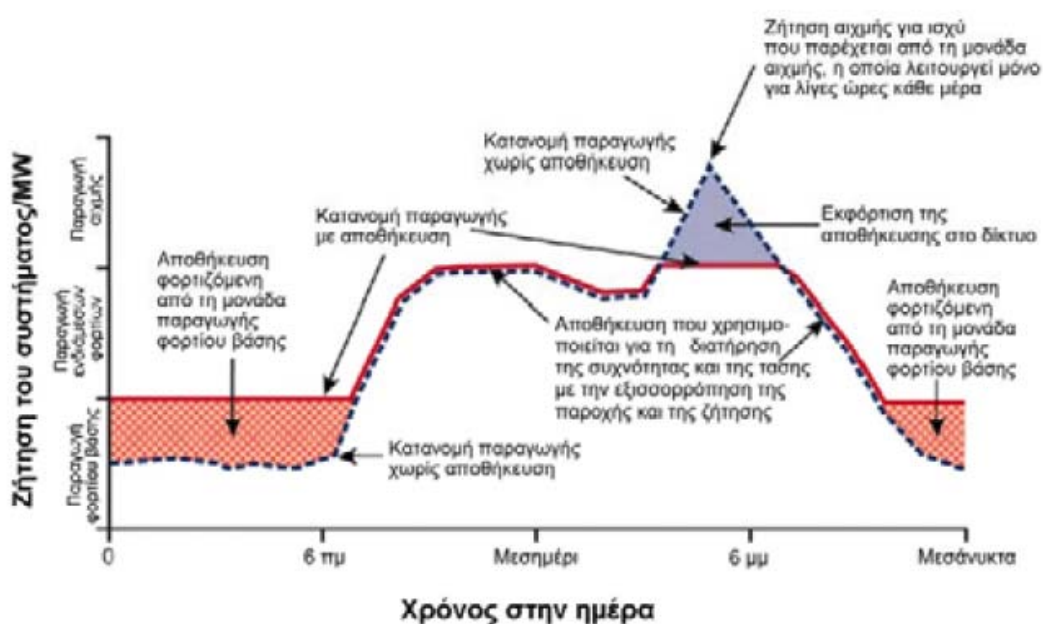
Προκύπτει, έτσι, η ανάγκη συνδυασμού μονάδων ΑΠΕ και συστημάτων ενεργειακής αποθήκευσης, ώστε να αποθηκεύεται η χρονικά μεταβαλλόμενη παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ υπό μορφή άλλης ενέργειας και να μετατρέπεται εκ νέου σε ηλεκτρική όταν αυτό απαιτείται σε περιόδους απώλειας των ΑΠΕ, π.χ. σε περιόδους μηδενικής ηλιοφάνειας ή πολύ μικρής ταχύτητας ανέμου. Επίσης, η προς αποθήκευση ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την εξυπηρέτηση άλλων σκοπών, εκτός από την ηλεκτροδότηση, όπως είναι η τροφοδοσία μονάδας αφαλάτωσης νερού ή η τροφοδοσία διάταξης ηλεκτρόλυσης νερού με προϊόντα πόσιμο νερό και καύσιμο υδρογόνο αντίστοιχα. Πρόκειται για τα ονομαζόμενα υβριδικά συστήματα ή Υβριδικούς Σταθμούς Παραγωγής (ΥΒΣ) που καταφέρνουν να άρουν το μειονέκτημα των ΑΠΕ προσδίδοντας τους χαρακτηριστικά λειτουργίας συμβατικών μονάδων και επιτρέποντας τη μεγαλύτερη διείσδυσή τους.

Σύμφωνα με το Ν.3468/2006 Υβριδικός Σταθμός είναι κάθε σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που:

- α) Χρησιμοποιεί μία, τουλάχιστον, μορφή ΑΠΕ.
- β) Η συνολική ενέργεια που απορροφά από το Δίκτυο, σε ετήσια βάση, δεν υπερβαίνει το 30% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για την πλήρωση του συστήματος αποθήκευσης του σταθμού αυτού.
- γ) Η μέγιστη ισχύς παραγωγής των μονάδων του σταθμού ΑΠΕ δεν μπορεί να υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων αποθήκευσης του σταθμού αυτού, προσαυξημένη κατά ποσοστό μέχρι 20%.

Η ενεργειακή αποθήκευση μπορεί να προσφέρει τα ακόλουθα (Σχήμα 1.2):

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



Σχήμα 1.2: Η αρχή της ενεργειακής αποθήκευσης

(Πηγή: ΚΑΠΕ, «Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ»)

- Η αποθήκευση μπορεί επίσης να διαδραματίσει έναν ευέλικτο και πολυπαραγοντικό ρόλο στο δίκτυο παροχής ηλεκτρισμού, όσον αφορά στην αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων. Ως παραγωγική πηγή, η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιφέρει εξοικονόμηση στις λειτουργικές δαπάνες ή την επένδυση κεφαλαίων. Τέτοια παραδείγματα είναι η στρεφόμενη εφεδρεία για την προσωρινή υποστήριξη της παραγωγής, η ρύθμιση της συχνότητας για τις αυτόνομες μονάδες, η αναβολή εγκατάστασης νέων μονάδων παραγωγής. Επίσης, τα βάσει στρατηγικής εγκατεστημένα συστήματα αποθήκευσης μπορούν να αυξήσουν τη

χρησιμοποίηση του υπάρχοντος εξοπλισμού μεταφοράς και διανομής (M&Δ) και έτσι να μετατοπιστεί ή εξαλειφθεί η ανάγκη για δαπανηρές προσθήκες M&Δ.

- Η ενεργειακή αποθήκευση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της έντασης στις μεμονωμένες γραμμές μεταφοράς που είναι κοντά στη μέγιστη ονομαστική με τη μείωση του φορτίου αιχμής του υποσταθμού. Μεταξύ των ειδικών οφελών για τη M&Δ είναι η ευστάθεια των γραμμών μεταφοράς για σύγχρονη λειτουργία ώστε να αποτραπεί η καθίζηση του συστήματος, η ρύθμιση της στάθμης ώστε να μην ξεφεύγει από το 5% της καθορισμένης τιμής και η αναβολή της κατασκευής ή αναβάθμισης των γραμμών μεταφοράς και διανομής, μετασχηματιστών, συστοιχιών πυκνωτών και υποσταθμών. Καθώς εξελίσσεται η αναδόμηση του συστήματος, μπορούν να ανακύψουν ευκαιρίες για τους χειριστές των ανεξάρτητων συστημάτων προκειμένου να εφαρμόσουν την αποθήκευση για να βοηθήσουν στην εξισορρόπηση των περιφερειακών φορτίων.

- Τέλος, η ενεργειακή αποθήκευση μπορεί να εξυπηρετήσει τους πελάτες ως μια επιλογή ελεγχόμενης διαχείρισης από μέρους της ζήτησης που επίσης μπορεί να παράσχει ανταποδοτικές υπηρεσίες, περιλαμβανομένων της ποιότητας ισχύος σε βυθίσεις ή κυματισμούς που διαρκούν λιγότερο από πέντε δευτερόλεπτα, της αδιάλειπτης τροφοδοσίας με ηλεκτρικό ρεύμα σε διακοπές λειτουργίας που διαρκούν περίπου για δέκα λεπτά και της μείωσης της ζήτησης αιχμής ώστε να μειωθούν οι λογαριασμοί του ηλεκτρισμού.

Έχουν αναπτυχθεί ή τελούν υπό ανάπτυξη διάφορες τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης για εφαρμογές ηλεκτρικής ισχύος. Έτσι, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί στις ακόλουθες μορφές:

- Σε χημική μορφή (μπαταρίες)
- Σε μηχανική μορφή υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας (σφόνδυλος)
- Σε μορφή ηλεκτροστατικού πεδίου, λόγω διαφορετικού ηλεκτρικού φορτίου στους οπλισμούς (υπέρ-πυκνωτές)
- Σε μορφή πεπιεσμένου αέρα (συστήματα αποθήκευσης ενέργειας πεπιεσμένου αέρα)
- Σε υδραυλική μορφή (συστήματα αντλησιοταμίευσης)

- Σε μορφή υδρογόνου (διάταξη ηλεκτρόλυσης νερού, κυψέλες καυσίμου)

Οι διατάξεις ενεργειακής αποθήκευσης είναι προφανώς διαφορετικών τύπων, αφού απαντούν σε συγκεκριμένα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, τα οποία ποικίλουν σημαντικά ανάλογα με τις εφαρμογές και τις ανάγκες. Επομένως, μια συγκριτική μελέτη των τεχνολογιών αυτών καθίσταται δύσκολη, δεδομένου ότι, μεταξύ των άλλων, τα επίπεδα ανάπτυξής τους διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό. Ωστόσο, οι διατάξεις αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να διαιρεθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την κλίμακα αποθήκευσης και την εφαρμογή τους:

1) Διατάξεις βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε καταναεμημένες εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής (όταν δηλαδή η παραγωγή λαμβάνει χώρα κοντά ή στην ίδια τη θέση της ζήτησης) και έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται στα αιτήματα για μικρά χρονικά διαστήματα. Επίσης, χρησιμοποιούνται σε μικρής κλίμακας συστήματα και είναι κατάλληλες για εφαρμογές ποιότητας ισχύος. Οι διατάξεις αυτές εφαρμόζονται για να βελτιώσουν την ποιότητα ισχύος στα ηλεκτρικά συστήματα και συγκεκριμένα για να διατηρήσουν σταθερή την τάση κατά την ενεργειακή συνεισφορά, σε περιπτώσεις βυθίσεων ή κυματισμών που διαρκούν για λίγα δευτερόλεπτα ή λεπτά. Στην κατηγορία των διατάξεων βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας εντάσσονται οι σφόνδυλοι, οι υπέρ-πυκνωτές και τα υπεραγωγία μαγνητικά συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης.

2) Διατάξεις μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας, οι οποίες είναι κυρίως μεγάλες, κεντρικές εγκαταστάσεις και έχουν την ικανότητα να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια για μεγάλες χρονικές περιόδους. Χρησιμοποιούνται σε μεγάλης κλίμακας συστήματα και είναι κατάλληλες για εφαρμογές εξομάλυνσης φορτίων, καθώς και για αποθέματα αιολικής ενέργειας υψηλής χωρητικότητας. Οι διατάξεις αυτές μπορούν να αποθηκεύουν και να παρέχουν την ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια ωρών ή ημερών, και να συντελούν ειδικότερα στη διαχείριση της ενέργειας, τη ρύθμιση της συχνότητας και τη διαχείριση της συμφόρησης στο δίκτυο. Στην κατηγορία των διατάξεων μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας ανήκουν οι μπαταρίες, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, τα συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα και οι τεχνολογίες ενεργειακής αποθήκευσης υδρογόνου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αναλυθεί εκτενέστερα η αποθήκευση της αιολικής ενέργειας υπό μορφή υδραυλικής ενέργειας (αντλησιοταμίευση) και υδρογόνου (ηλεκτρόλυση του νερού) στα δύο επόμενα κεφάλαια αντίστοιχα.

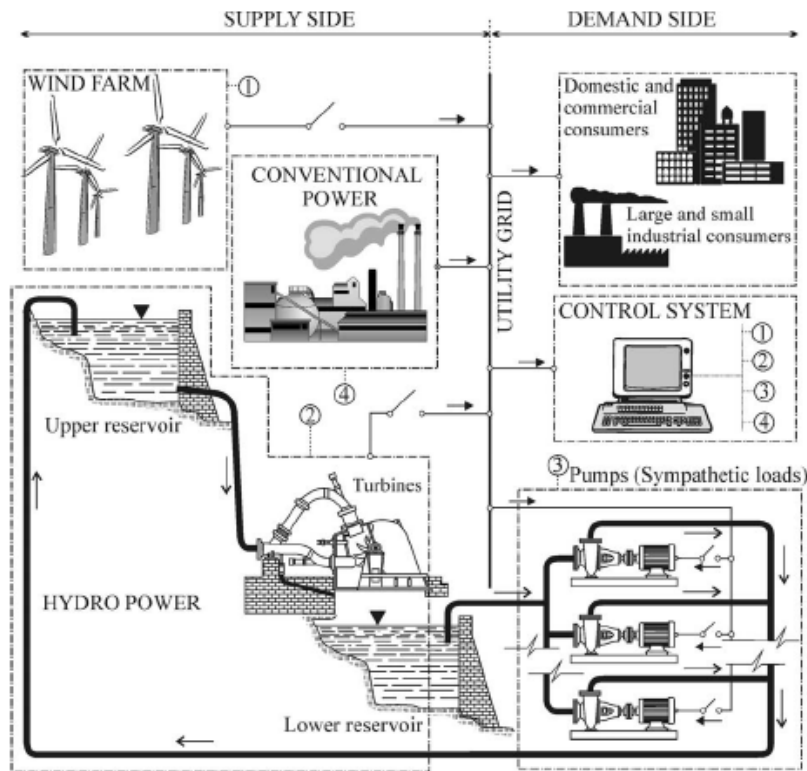
## **Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Η αντλησιοταμίευση**

### **2.1 Υβριδικός σταθμός αιολικών και αντλησιοταμίευσης**

Τα συστήματα αντλησιοταμίευσης σε συνδυασμό με αιολικές μηχανές (ΥΒΣ) (Σχήμα 2.1) σε αυτόνομα ηλεκτρικά δίκτυα, έχουν σκοπό την αποθήκευση της πλεονάζουσας αιολικής ενέργειας που θα απορριπτόταν λόγω των περιορισμών που θέτουν τα τεχνικά ελάχιστα των εγκατεστημένων συμβατικών μονάδων και η μέγιστη στιγμιαία επιτρεπόμενη συμμετοχή των αιολικών στην κάλυψη της ζήτησης για την εξασφάλιση της αδιάκοπτης και ασφαλούς ηλεκτροδότησης του δικτύου. Η αποθήκευση της ενέργειας επιτυγχάνεται με την άντληση νερού από έναν ταμιευτήρα σε δεύτερο ευρισκόμενο σε υψηλότερη στάθμη. Στην συνέχεια και όταν αυτό απαιτηθεί, η αποθηκευμένη υδροδυναμική ενέργεια μετατρέπεται εκ νέου σε ηλεκτρική μέσω υδροστροβίλων, με το νερό να μετακινείται από τον άνω στον κάτω ταμιευτήρα. Έτσι, η στοχαστική παραγωγή ενέργειας των αιολικών μηχανών μετατρέπεται σε παροχή εγγυημένης ενέργειας από τους υδροστροβίλους του ΥΒΣ.

Ο σχεδιασμός και η λειτουργία ενός τέτοιου υβριδικού συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το υφιστάμενο νομοθετικό πλαίσιο (Ν.3468/2006 και 3734/2009), την τιμολόγηση της παραγόμενης ενέργειας και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του αυτόνομου δικτύου.

Μια τέτοια εφαρμογή συμβάλλει στην μεγαλύτερη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού και στη μείωση της λειτουργίας των συμβατικών πετρελαϊκών μονάδων. Οι έντονες περικοπές της αιολικής ενέργειας περιορίζονται με την ύπαρξη του αποθηκευτικού συστήματος και ως εκ τούτου επιτυγχάνεται καλύτερη διαχείριση και διείσδυση της αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό σύστημα. Παράλληλα, η αξιοπιστία του ηλεκτρικού συστήματος αυξάνεται με την ένταξη των υδροστροβίλων, που αποτελούν μονάδες ελεγχόμενης παραγωγής ενέργειας με δυνατότητα άμεσης απόκρισης.



Σχήμα 2.1: ΥΒΣ με αιολικό πάρκο και σύστημα αντλιοσταμείευσης (Πηγή: «Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands», C. Buena, J.A. Carta)

Ένα σύστημα αντλιοσταμείευσης αποτελείται, λοιπόν, από τις εξής συνιστώσες:

- Αντλητικό συγκρότημα και κινητήρες

Οι αντλίες αποτελούν μια κατηγορία στροβιλομηχανών και ειδικότερα ανήκουν στις εργοστροβιλομηχανές και ορίζονται ως οι μηχανές μέσω των οποίων γίνεται εναλλαγή της μηχανικής ενέργειας (η οποία προσδίνεται από έναν κινητήρα στην στρεφόμενη άτρακτο και από αυτή στην πτερωτή) σε ενέργεια ρευστού. Σκοπός των αντλιών είναι η διακίνηση υγρών από μια δεξαμενή σε μια άλλη που βρίσκεται σε μεγαλύτερη συνήθως στάθμη από την πρώτη. Οι αντλίες προσδίδουν ενέργεια στο υγρό η οποία αντιστοιχεί στην ενεργειακή αναβάθμιση του υγρού μεταξύ άνω και κάτω δεξαμενής και στην ενέργεια που δαπανάται λόγω υδραυλικών απωλειών στη σωλήνωση μέσω της οποίας γίνεται η διακίνηση του υγρού.

Τα κύρια μέρη μιας αντλίας είναι:

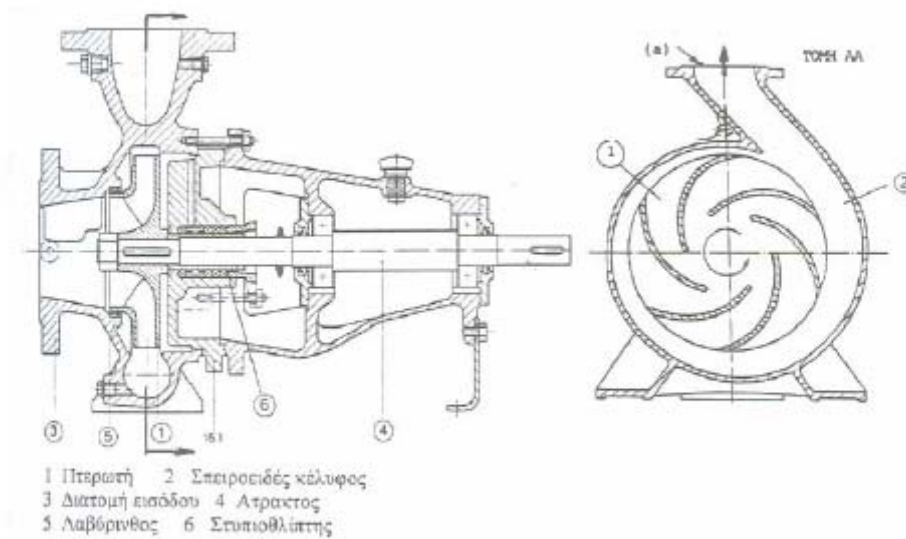


- Το τμήμα εισόδου, που εξασφαλίζει την οδήγηση του ρευστού από τη διατομή εισόδου της μηχανής μέχρι τη διατομή εισόδου της περωτής.
- Η περωτή, ένα στρεφόμενο τμήμα της μηχανής, στο οποίο λαμβάνει χώρα η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ενέργεια του ρευστού.
- Το τμήμα εξόδου, ρόλος του οποίου είναι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

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

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

Η διαμόρφωση της αντλίας του Σχήματος 2.2 αποτελεί την πλέον συνήθη διαμόρφωση αντλίας γενικής χρήσεως. Όμως ανάλογα με τις εφαρμογές συναντώνται και άλλες διαμορφώσεις αντλιών, όπως οι αντλίες in - line, οι αντλίες διπλής αναρρόφησης και οι αντλίες βαθέων φρεάτων.



Σχήμα 2.2: Τυπική διαμόρφωση συνήθους αντλίας

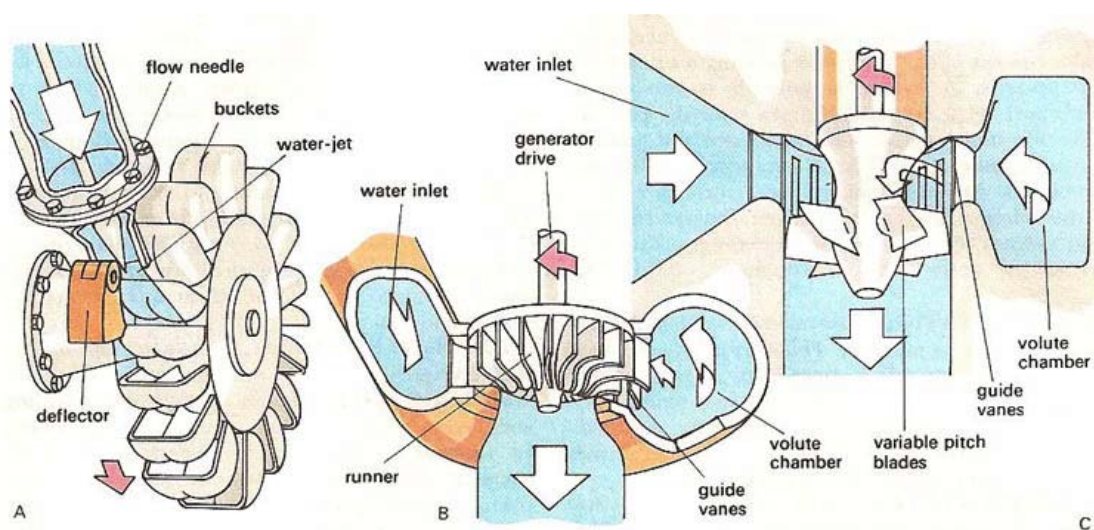
Για την περίπτωση ΥΒΣ με αιολικά και αντλησιοταμίευση ενδείκνυται η χρήση αντλιών μεταβλητών στροφών και συνεπώς μεταβλητής παροχής, οι οποίες μπορούν να παρακολουθούν τη στοχαστική αιολική παραγωγή με μεγαλύτερη ευελιξία σε σύγκριση με τις αντλίες σταθερών στροφών. Μάλιστα, στη βιβλιογραφία [Δημοσιεύσεις 11,12] υπάρχουν αποτελέσματα προσομοιώσεων ΥΒΣ με αντλίες μεταβλητών στροφών, σύμφωνα με τα οποία, η χρήση αντλιών μεταβλητών στροφών μπορεί να συνεισφέρει και στον έλεγχο της συχνότητας του συστήματος.

- Υδροστρόβιλο ή υδροστρόβιλους και γεννήτριες

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

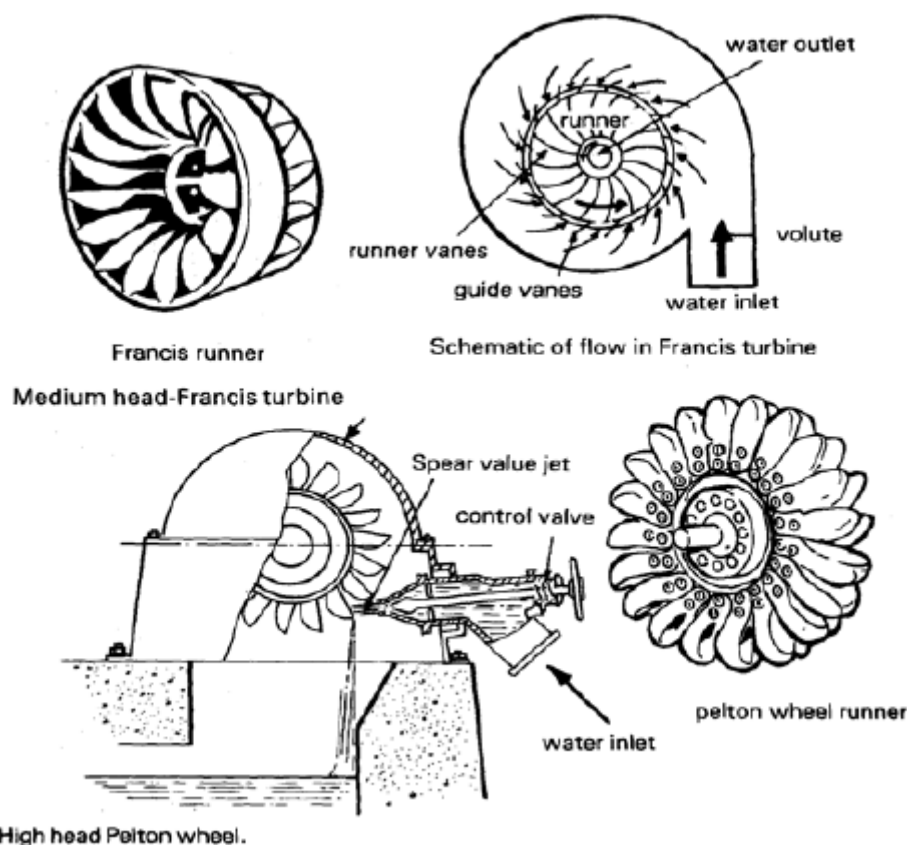
Οι υδροστρόβιλοι διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τους υδροστροβίλους ολικής προσβολής και τους υδροστροβίλους μερικής προσβολής. Στους πρώτους, η λειτουργία του δρομέα είναι αξονοσυμμετρική και για το λόγο αυτό το τμήμα εισόδου πρέπει να περιβάλλει το δρομέα, ώστε να εξασφαλίζονται αξονοσυμμετρικές συνθήκες. Αντίθετα, στους υδροστροβίλους μερικής προσβολής κάθε χρονική στιγμή μόνο ένα τμήμα του δρομέα τροφοδοτείται και συμμετέχει στην ενεργειακή μετατροπή. Οι υδροστρόβιλοι ολικής προσβολής χαρακτηρίζονται και ως υδροστρόβιλοι αντιδράσεως, καθώς η ροή μέσω του δρομέα γίνεται με παράλληλη μεταβολή της στατικής πίεσης. Αντίστοιχα, οι υδροστρόβιλοι μερικής προσβολής χαρακτηρίζονται και ως δράσεως, δεδομένου ότι η λειτουργία γίνεται υπό ομοιόμορφη στατική πίεση.

Ο μόνος τύπος υδροστροβίλου δράσεως που έχει επικρατήσει είναι ο υδροστρόβιλος Pelton, για μεγάλες τιμές της υδραυλικής πτώσης, ενώ η παραλλαγή του, δηλαδή ο υδροστρόβιλος Turgo αποτελεί σήμερα μια πολύ σπάνια επιλογή. Οι υδροστρόβιλοι αντιδράσεως που έχουν επικρατήσει είναι ο τύπος Francis, για μεσαίες τιμές της υδραυλικής πτώσης ( $H = 50 - 500$  m περίπου), ο υδροστρόβιλος τύπου Deriaz διαγώνιας ροής, καθώς και διάφορες διαμορφώσεις υδροστροβίλων αξονικής ροής, οι οποίοι είναι κατάλληλοι για μικρές τιμές της υδραυλικής πτώσης ( $H < 50$  m περίπου), όπως: Kaplan, βολβοειδής (bubl), σωληνωτός (tube), δακτυλίου (Straflo) κτλ. Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζονται οι υδροστρόβιλοι τύπου Pelton, Francis και Kaplan.



Σχήμα 2.3: Υδροστρόβιλοι τύπου Pelton (A), Francis (B) και Kaplan (C)

Τα κύρια μέρη που διακρίνονται σε έναν υδροστροβίλο είναι το τμήμα εισόδου, ο δρομέας και το τμήμα εξόδου. Στη συνέχεια δίνεται μια περιγραφή των δύο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων τύπων υδροστροβίλου, που είναι ο Pelton και ο Francis (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Οι δύο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι τύποι υδροστροβίλων (Pelton, Francis)

### Υδροστροβίλος Pelton

Τμήμα εισόδου:

Το τμήμα εισόδου αποτελείται από ένα ή περισσότερα ακροφύσια, τροφοδοσίας σκοπός των οποίων είναι η μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του ρευστού σε κινητική, μέσω του σχηματισμού μιας δέσμης κυκλικής διατομής. Η ρύθμιση της παροχής επιτυγχάνεται μέσω βελόνης, η οποία μετακινείται κατά τον άξονα του ακροφυσίου, συνήθως με υδραυλικό σύστημα εμβόλου. Με τη μετακίνηση της

βελόνης μεταβάλλεται η διατομή διέλευσης της παροχής, η διάμετρος της δέσμης και άρα μεταβάλλεται αντίστοιχα η παροχή. Το σώμα του ακροφυσίου κατασκευάζεται συνήθως από χυτοχάλυβα ενώ το άκρο της βελόνης από ανοξείδωτο χάλυβα και αντικαθίσταται μετά από ορισμένες ώρες λειτουργίας λόγω της μηχανικής διάβρωσης που υφίσταται από την υψηλή ταχύτητα της ροής και την ύπαρξη σωματιδίων μέσα στο νερό (π.χ. άμμος).

Δρομέας:

Ο δρομέας Pelton φέρει κατά την περιφέρεια σκαφίδια των οποίων η διαμόρφωση είναι κυπελλοειδής. Ο δρομέας κατασκευάζεται είτε ολόσωμος είτε τα σκαφίδια είναι ανεξάρτητα και προσαρμόζονται στον δρομέα μέσω κοχλίωσης και κωνικής ασφάλειας. Λόγω των πολύ ισχυρών δυνάμεων που δέχονται τα σκαφίδια και της διάβρωσης που υφίστανται από τη ροή, κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα. Φυσικά, σε περίπτωση ολόσωμου δρομέα, αυτός κατασκευάζεται εξολοκλήρου από ανοξείδωτο χάλυβα. Κάθε δέσμη από τα ακροφύσια τροφοδοσίας, προσπίπτει στον δρομέα, δίνοντας σε αυτόν μια ώθηση κατά την περιφερειακή διεύθυνση που δημιουργεί την κινητήρια ροπή. Κάθε χρονική στιγμή λειτουργεί ένα μόνο τμήμα του δρομέα (2 – 3 σκαφίδια), τα οποία εναλλάσσονται διαδοχικά (μερική προσβολή).

Τμήμα εξόδου:

Το τμήμα εξόδου συλλέγει το νερό που πέφτει από τον υδροστροβίλο χάριν στη βαρύτητα, αφού έχει γίνει η μετατροπή της κινητικής του ενέργειας σε μηχανική και το οδηγεί στη διώρυγα απαγωγής και στη συνέχεια στη φυσική κοίτη του ποταμού ή στον κάτω ταμιευτήρα.

### Υδροστροβίλος Francis

Τμήμα εισόδου:

Το τμήμα εισόδου πρέπει να εξασφαλίζει την οδήγηση της ροής από τη διατομή εισόδου μέχρι τη διατομή του δρομέα με την κατά το δυνατόν ομοιόμορφη τροφοδοσία του δρομέα κατά την περιφέρεια. Οι απαιτήσεις αυτές ικανοποιούνται κατασκευάζοντας το τμήμα εισόδου με τη μορφή σπειροειδούς κελύφους. Για την επίτευξη της μεταβολής της ισχύος εξόδου του υδροστροβίλου μέσω της μεταβολής

της παροχής, υπάρχουν τα ρυθμιστικά πτερύγια, τα οποία τοποθετούνται ανάντη του δρομέα και περιστρέφονται μέσω μηχανισμού. Κατά συνέπεια, η στεφάνη των ρυθμιστικών πτερυγίων αποτελεί το όργανο ρύθμισης του σημείου λειτουργίας του υδροστροβίλου.

Δρομέας:

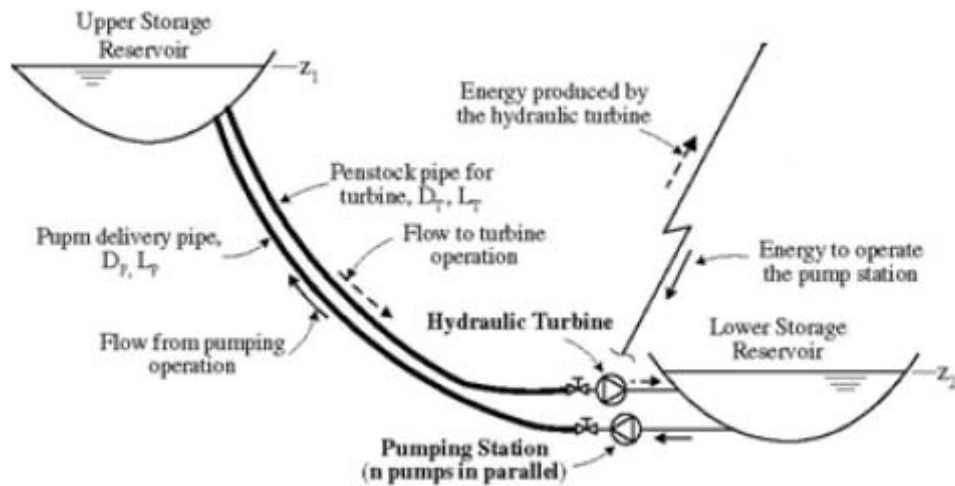
Τα πτερύγια του δρομέα Francis εκτείνονται μεταξύ της πλήμνης και της στεφάνης στις οποίες και είναι πακτωμένα. Τις περισσότερες φορές τα πτερύγια του δρομέα έχουν τη δυνατότητα περιστροφής, γεγονός που επιτρέπει στον υδροστροβίλο να λειτουργεί με καλό βαθμό απόδοσης σε εκτεταμένες περιοχές λειτουργίας. Συνήθως το πλήθος των πτερυγίων επιλέγεται περιττό, ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος συντονισμού λόγω του άρτιου πλήθους των ρυθμιστικών πτερυγίων.

Τμήμα εισόδου:

Η μέση ταχύτητα της ροής στην περιοχή της διατομής εξόδου του δρομέα είναι σημαντική, της τάξεως των 6 – 10 m/sec. Για τον λόγο αυτό, σκοπός του τμήματος εξόδου είναι η οδήγηση του νερού στη διάφυγα απαγωγής με ταυτόχρονη επιβράδυνσή του, έτσι ώστε η ταχύτητα εξόδου να είναι 1 – 2,5 m/sec.

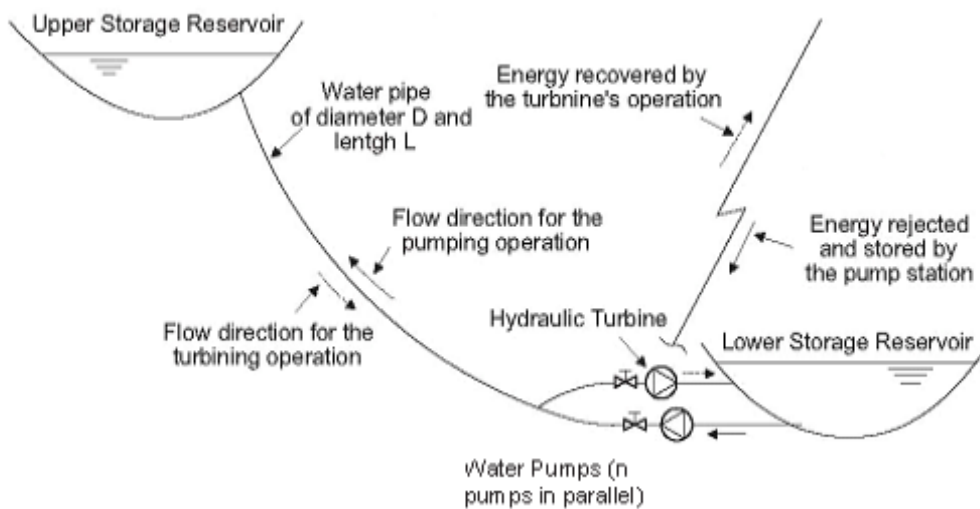
Για την περίπτωση ΥΒΣ με αντλησιοταμίευση είναι απαραίτητο να έχουμε υψηλές τιμές υδραυλικής πτώσης, γεγονός που συνεπάγεται την επιλογή υδροστροβίλου Pelton.

- Δύο ταμιευτήρες τοποθετημένους σε ικανή υψομετρική διαφορά μεταξύ τους
- Δύο αγωγοί για την μετακίνηση των νερών από και προς τους ταμιευτήρες (Σχήμα 2.5)



Σχήμα 2.5: Σύστημα αντλησιοταμίευσης με διπλό αγωγό

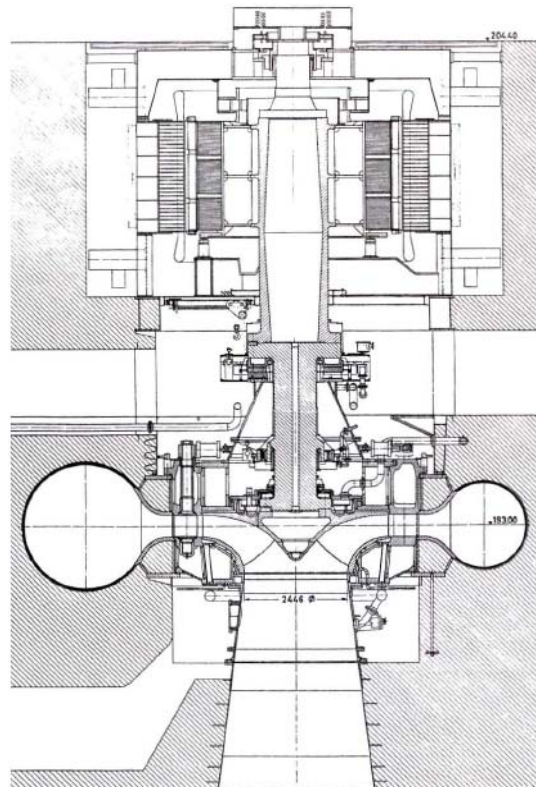
Υπάρχει ωστόσο και η δυνατότητα της χρήσης μονού αγωγού με διακλάδωση (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6: Σύστημα αντλησιοταμίευσης με μονό αγωγό και διακλάδωση

Τέλος, υπάρχει και η περίπτωση της χρήσης μονού αγωγού και αναστρέψιμης υδροδυναμικής μηχανής (Σχήμα 2.7), στροβιλοαντλία όπως συνήθως ονομάζεται και ηλεκτρική μηχανή που λειτουργεί ως γεννήτρια ή ως κινητήρας. Η αναστρέψιμη υδροδυναμική μηχανή έχει τη δυνατότητα λειτουργίας ως αντλίας και ως υδροστροβίλου με την αναστροφή της φοράς περιστροφής της περρωτής του δρομέα

και της φοράς της ροής. Η σύνθεση αυτή είναι πιο οικονομική από τις προηγούμενες και ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός που απαιτεί καταλαμβάνει αισθητά μικρότερο χώρο. Όμως, η μηχανή αυτή δεν λειτουργεί στο κανονικό σημείο λειτουργίας των αντίστοιχων αντλιών και στροβίλων και έτσι γίνονται συμβιβασμοί στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης. Άλλωστε, στη βιβλιογραφία προσομοιώσεις ΥΒΣ με αναστρέψιμες μηχανές έχουν δείξει ότι τα ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματά τους είναι κατώτερα των ΥΒΣ με διπλό αγωγό και ανεξάρτητες αντλίες- υδροστροβίλους.



*Σχήμα 2.7: Αναστρέψιμη υδροηλεκτρική μονάδα*

## **2.2 Γιατί προτείνεται η αντλιοσταμείωση ως μέσο αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας**

Η αντλιοσταμείωση ενδείκνυται για την αποθήκευση της περίσσειας αιολικής ενέργειας διότι συγκεντρώνει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:



- Ο μοναδικός περιορισμός για το ποσό της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί είναι η χωρητικότητα του άνω ταμιευτήρα, ενώ δεν υπάρχει χρονικός περιορισμός για συνεχιζόμενη αποθήκευση.
- Η απόκριση του συστήματος τόσο για την άντληση, όσο και για την παραγωγή των υδροστροβίλων είναι πολύ γρήγορη. Συγκεκριμένα, οι αντλίες έχουν πρακτικά μηδενικό χρόνο έναρξης λειτουργίας και οι υδροστροβίλοι μπορούν να φτάσουν σε συνθήκες λειτουργίας πλήρους φορτίου σε 1 – 1,5 λεπτό, γεγονός που επιτρέπει την άμεση κάλυψη της ζήτησης σε ώρες αιχμής.
- Υπάρχει τεχνογνωσία και εμπειρία στο συγκεκριμένο τομέα καθώς έχουν κατασκευαστεί ήδη δύο αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά έργα στη χώρα μας, ο ΥΗΣ Σφηκιάς στον Αλιάκμονα και ο ΥΗΣ σταθμός Θησαυρού στο Νέστο. Στα έργα αυτά, αντλείται νερό κατά τη διάρκεια της νύχτας (μειωμένα τιμολόγια κατανάλωσης) με χρήση περίσσειας ενέργειας από το δίκτυο και αποδίδεται σε αυτό κατά τη διάρκεια της ημέρας με συμφερότερους όρους.
- Το κόστος παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις και αντιστοιχεί ουσιαστικά στις αποσβέσεις του έργου. Το λειτουργικό κόστος μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι μικρό.
- Η διάρκεια ζωής ενός έργου αντλησιοταμίευσης είναι μεγάλη, της τάξεως των 20 ετών, ενώ μπορεί να επιμηκυνθεί με ανανέωση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού.

Ωστόσο, ένα έργο αντλησιοταμίευσης παρουσιάζει και τα παρακάτω μειονεκτήματα:

- Έχει υψηλό κόστος κατασκευής (δαπάνες μελετών, έργα πολιτικού μηχανικού, κόστος αντλιών, υδροστροβίλων και υποσυστημάτων αυτών, κόστος λοιπού ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού).

- Η κατασκευή ενός έργου αντλησιοταμίευσης υπόκειται σε τοπογραφικούς περιορισμούς. Συνεπώς, της κατασκευής του προηγείται μια μακρά περίοδος συλλογής και επεξεργασίας γεωλογικών και λοιπών στοιχείων.

Συμπερασματικά, η μέθοδος της αντλησιοταμίευσης είναι ένας ιδανικός τρόπος αποθήκευσης της περίσσειας αιολικής ενέργειας, παρά τις δυσκολίες της κατασκευής ενός τέτοιου έργου, οι οποίες αντισταθμίζονται από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου να διαχειρίζεται τεράστια ποσά ενέργειας και να αποκρίνεται άμεσα στις απαιτήσεις του δικτύου και στην παραλαβή αιολικής ενέργειας.

## **2.3 Υβριδικοί σταθμοί με αιολικά και αντλησιοταμίευση στην Ελλάδα**

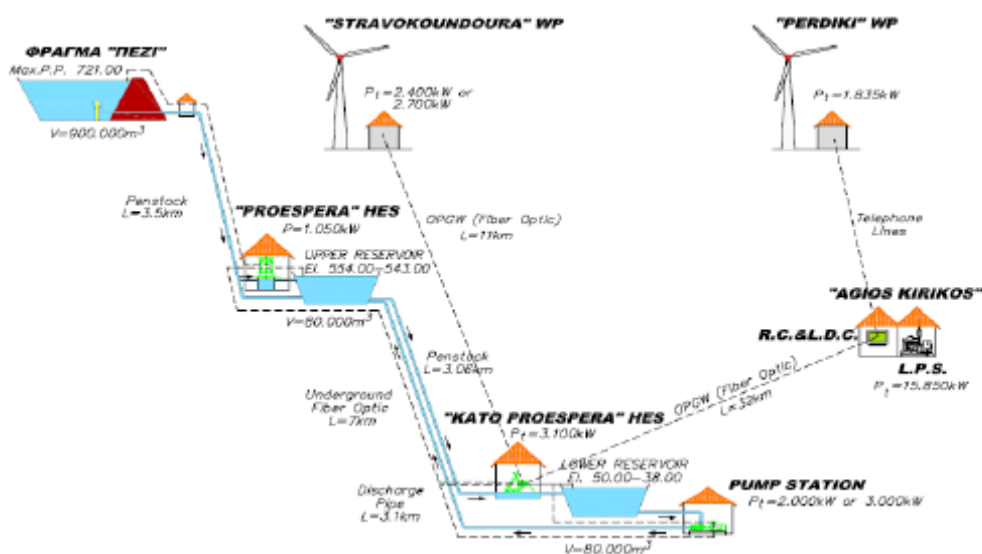
### **2.3.1 Ο ΥΒΣ στην Ικαρία**

Το Υβριδικό Έργο (ΥΒΕ) της Ικαρίας, έργο της ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε., του οποίου η κατασκευή έχει ήδη δρομολογηθεί από τη Δ/ση Υδροηλεκτρικής Παραγωγής (ΔΥΗΠ, πρώην ΔΑΥΕ) της ΔΕΗ Α.Ε., θα αποτελέσει τον πρώτο Υβριδικό (αιολικό – αντλησιοταμιευτικό – υδροηλεκτρικό) Σταθμό (ΥΒΣ) στην Ελλάδα.

Ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου ΥΒΕ, που το διαφοροποιεί από έναν συνήθη ΥΒΣ, είναι ότι εκτός από τις δύο δεξαμενές που εξυπηρετούν τις ανάγκες της αντλησιοταμίευσης για την απορρόφηση της αιολικής παραγωγής, υφίσταται και ένας τρίτος ταμιευτήρας, στα ανάντη της άνω δεξαμενής αντλησιοταμίευσης, η περίσσεια υδάτων του οποίου εισρέει στην τελευταία μέσω ενός επιπλέον ΜΥΗΣ. Η διαμόρφωση δηλαδή του ΥΒΕ της Ικαρίας επιτρέπει την αξιοποίηση δύο μορφών ΑΠΕ, της αιολικής, μέσω της αντλησιοταμίευσης, και της υδροηλεκτρικής, μέσω της εκμετάλλευσης των διαθέσιμων υδάτων του ταμιευτήρα.

Το σύστημα παραγωγής της Ικαρίας, περιλαμβανομένου του ΥΒΕ, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.8. Περιλαμβάνει τον τοπικό σταθμό παραγωγής Αγίου Κήρυκου (ΤΣΠ) που καταναλώνει μαζούτ και υφιστάμενα ή αδειοδοτημένα Α/Π εκτός του ΥΒΕ, των

οποίων η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται σε 1835 KW. Επίσης λαμβάνονται υπόψη Φ/Β σταθμοί συνολικής ισχύος 1040 KW.



Σχήμα 2.8: Εσωτερική διαμόρφωση του ΥΒΣ και λοιπές μονάδες παραγωγής του συστήματος της Ικαρίας για το έτος 2012

Όσον αφορά το ΥΒΕ, ο υφιστάμενος σχεδιασμός του περιλαμβάνει το Α/Π Στραβοκουνδούρας, εγκατεστημένης ισχύος 2,7 MW, το αντλιοστάσιο Κάτω Προεσπέρας που αποτελείται από 8 αντλίες σταθερών στροφών των 250 KW (ονομαστική ηλεκτρική ισχύς κινητήρων), δύο (2) δεξαμενές και έναν ταμιευτήρα, τον ταμιευτήρα Πεζίου, συνολικού όγκου 900.000 m<sup>3</sup> περίπου, η περίσσεια υδάτων του οποίου θα αξιοποιείται, και τις δύο μικρότερου μεγέθους δεξαμενές Προεσπέρας και Κάτω Προεσπέρας, με εκμεταλλεύσιμο όγκο νερών περίπου 80.000 m<sup>3</sup>, που θα εξυπηρετούν τις ανάγκες της αντλησιοταμίευσης για την απορρόφηση της αιολικής παραγωγής. Επίσης περιλαμβάνει τον ΜΥΗΣ Προεσπέρας με έναν υδροστρόβιλο, τύπου Pelton, ισχύος 1,05 MW που θα αξιοποιεί μόνο την περίσσεια νερών του ταμιευτήρα Πεζίου (αφού πρώτα ικανοποιηθούν οι υποχρεώσεις για ύδρευση, οικολογική παροχή και άρδευση) και τον ΜΥΗΣ Κάτω Προεσπέρας, με δύο υδροστρόβιλους, τύπου Pelton, ισχύος 2x1,55 MW, που θα αξιοποιεί τόσο την περίσσεια νερών του ταμιευτήρα Πεζίου, όσο και τα νερά που προέρχονται από αντλησιοταμίευση. Η λειτουργία των δύο ΜΥΗΣ διέπεται και από υποχρεώσεις που τίθενται στην περιβαλλοντική αδειοδότηση του έργου και έχουν σκοπό την εξασφάλιση της αρδευτικής επάρκειας του ταμιευτήρα. Συγκεκριμένα, δεν

επιτρέπεται η λειτουργία του ΜΥΗΣ Προεσπέρας την θερινή περίοδο (Μαΐου-Οκτωβρίου), ενώ το υπόλοιπο διάστημα τίθενται απαιτήσεις ελάχιστης στάθμης νερού στον ταμιευτήρα Πεζίου.

Αποτελέσματα προσομοιώσεων της λειτουργίας του ΥΒΣ της Ικαρίας σύμφωνα με το υπάρχον θεσμικό πλαίσιο δείχνουν ότι το έργο αυξάνει σημαντικά την αιολική διείσδυση στο νησί και συνεπώς μειώνει αισθητά την κατανάλωση συμβατικής ενέργειας (περί το 30-40%). Επίσης, διευκολύνει τη λειτουργία των συμβατικών μονάδων παραγωγής, ενώ οι επιπτώσεις του ΥΒΣ στη λειτουργία των λοιπών Α/Π είναι αμελητέες.

### **2.3.2 Αδειοδοτημένοι ΥΒΣ από τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ)**

Η ΡΑΕ με αποφάσεις της του έτους 2010 έχει εκχωρήσει τις παρακάτω άδειες παραγωγής σε ΥΒΣ με αιολικά και αντλησιοταμίευση:

- Χορήγηση άδειας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από υβριδικό σταθμό ισχύος 90,1MW (Αιολικά Πάρκα) – 75MW (Υδροστρόβιλοι), στις θέσεις «Κουτρούλια & Άνω Λίμνη» του Δήμου Μαλίων του Νομού Ηρακλείου, «Καλή Συκιά» του Δήμου Φοίνικα του Νομού Ρεθύμνου, «Σπίνα» του Δήμου Βουκολίων και Καντάνου του Νομού Χανίων, «Λαμπινή» του Δήμου Φοίνικα και Λάμπης του Νομού Ρεθύμνου, «Πλακάκια» των Δήμων Βουκολίων, Πλατανιά και Μουσούρων του Νομού Χανίων, στην εταιρεία «ΥΔΡΟΑΙΟΛΙΚΗ ΚΡΗΤΗΣ ΑΝΩΝΥΜΗ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ με το δ.τ. ΥΔΡΟΑΙΟΛΙΚΗ ΚΡΗΤΗΣ Α.Ε.»
- Χορήγηση άδειας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από υβριδικό σταθμό ισχύος 18MW (Αιολικά Πάρκα) – 12MW (Υδροστρόβιλοι), στις θέσεις «Βοσκερό» και «Βουκολιά» του Δήμου Κρουσώνα, του Νομού Ηρακλείου, στην εταιρεία «ΑΙΟΛΙΚΟ ΒΟΣΚΕΡΟΥ Α.Ε.»
- Χορήγηση άδειας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από υβριδικό σταθμό ισχύος 5,1MW (Αιολικά Πάρκα) – 5MW (Υδροστρόβιλοι), στη θέση «Στρογγυλή Κορυφή»

του Δήμου Μουσούρων, του Νομού Χανίων, στην εταιρεία «ΑΙΟΛΙΚΗ ΜΟΥΣΟΥΡΩΝ Α.Ε.»

- Χορήγηση άδειας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από υβριδικό σταθμό ισχύος 18,4 MW (Αιολικά Πάρκα) – 15 MW (Υδροστρόβιλοι), στις θέσεις «Βίγλα Πλάκες», «Αετός» και «Φράγμα Ερεσού» του Δήμου Ερεσού-Αντίσσης του Νομού Λέσβου, στην εταιρεία «ΑΙΟΛΙΚΗ ΟΛΥΜΠΙΟΥ ΕΥΒΟΙΑΣ Α.Ε.»

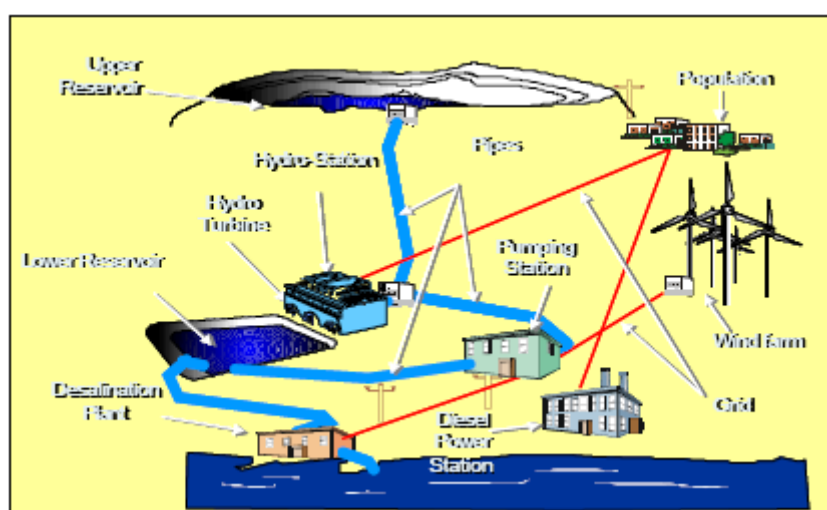
### **2.3.3 Μελέτες ένταξης ΥΒΣ με αιολικά και αντλησιοταμίευση**

Η πολιτική διαχείρισης ενός ΥΒΣ με αιολικό πάρκο και αντλησιοταμίευση έχει αποτελέσει αντικείμενο πολλών μελετών και έχουν προταθεί διάφορα σχήματα για την ενσωμάτωση ενός τέτοιου σταθμού στην κάλυψη της ζήτησης ενός δικτύου. Στις μελέτες αυτές ανήκουν οι διδακτορικές διατριβές των Γ. Κάραλη [Διδακτορικές διατριβές 1] και Δ. Κατσαπρακάκη [Διδακτορικές διατριβές 2] καθώς και μελέτες των Δ. Παπαντώνη και Ι. Αναγνωστόπουλου, σχετικά με το σχεδιασμό του αντλιοστασίου ενός συστήματος αντλησιοταμίευσης [Δημοσιεύσεις 2], αλλά και τη βελτιστοποίηση του όλου συστήματος [Δημοσιεύσεις 4]. Ενδεικτικά, έχει εξεταστεί πότε θα πρέπει να εντάσσονται οι υδροστρόβιλοι κατά τη διάρκεια της ημέρας, κατά πόσο το αιολικό πάρκο του ΥΒΣ θα πρέπει να παρέχει πρωτογενή ενέργεια στο δίκτυο, ποιά θα πρέπει να είναι η τιμολόγηση της ενέργειας που προσφέρει ο ΥΒΣ τόσο από τους υδροστρόβιλους, όσο και από τα αιολικά του, πώς ο ΥΒΣ θα επηρεάσει τα λοιπά αιολικά πάρκα του δικτύου, κατά πόσο πρέπει να επιτρέπεται η χρήση ενέργειας από το δίκτυο για πλήρωση του άνω ταμιεύτηρα κ.α..

Στην παρούσα διπλωματική εργασία υιοθετείται η πολιτική διαχείρισης που προτείνεται από τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) και περιλαμβάνεται στον πιο πρόσφατο Νόμο για τις ΑΠΕ. Η εν λόγω πολιτική διαχείρισης αναπτύσσεται σε επόμενο κεφάλαιο.

## 2.4 Ο ΥΒΣ με αιολικά και αντλησιοταμίευση στη νήσο El Hierro στα Κανάρια

Το νησί El Hierro στα Κανάρια (Ισπανία) έχει έκταση 276 km<sup>2</sup> και πληθυσμό περίπου 10.000 κατοίκων. Το νησί δεν είναι ηλεκτρικά διασυνδεδεμένο με το ηπειρώτικο δίκτυο ή το δίκτυο κάποιου άλλου νησιού. Οι ηλεκτρικές του ανάγκες καλύπτονται από συμβατικούς θερμικούς σταθμούς diesel συνολικής ονομαστικής ισχύος 8.285 MW. Στο νησί έχει ξεκινήσει η κατασκευή ενός ΥΒΣ με αιολικά και αντλησιοταμίευση (Σχήμα 2.9), στα πλαίσια μιας προσπάθειας ολικής απεξάρτησής του από τα ορυκτά καύσιμα.



Σχήμα 2.9: Ο υπό κατασκευή ΥΒΣ στο El Hierro

Οι κύριες συνιστώσες του ΥΒΣ καθώς και τα ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα της προσομοίωσης της ετήσιας λειτουργίας του, φαίνονται στους Πίνακες 2.1 και 2.2 αντίστοιχα

Wind farm	9,35 MW
Pumping station	6 MW
Minihydro power station (Pelton turbines)	9,9 MW
Diesel power station (existing)	8,28 MW
Desalination plant	5 – 10 m <sup>3</sup> /d
Upper reservoir	200.000 m <sup>3</sup>
Lower reservoir	200.000 m <sup>3</sup>

Πίνακας 2.1: Κύριες συνιστώσες του ΥΒΣ στο El Hierro

Overall investment costs	23 – 25 Meuro (including cost of land)
Yearly produced electrical energy from the wind park (directly to grid)	9.800 MWh
Yearly produced electrical energy from hydro station	17.300 MWh
Estimated yearly income due to wind energy sale	615.500 euro (0,062806 euro/KWh)
Estimated yearly income due to hydro energy sale	1.104.200 euro (0,063827 euro/KWh)
Estimated yearly income	1.720.000 euro
Exploitation costs (a function of the KWh produced)	475.000 euro
Insurance costs	2% of the income
Tax on economic activities	0,72 euro/KW
Payback period	18 – 19 years
Net present value (5% discount rate)	511.000 euro
Internal rate of return	6%

*Πίνακας 2.2: Κύρια ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα της προσομοίωσης της ετήσιας λειτουργίας του ΥΒΣ στο El Hierro*

Ο Πίνακας 2.3 συνοψίζει τα περιβαλλοντικά οφέλη από την ένταξη του εν λόγω ΥΒΣ στο ενεργειακό σύστημα του El Hierro.

Total electricity produced	37.100 MWh/year
Share of power demand covered by renewables	70%
Fuel savings	8.791 tons/year
Avoided pollutant emissions CO <sub>2</sub>	30.548 tons/year
Avoided pollutant emissions SO <sub>2</sub>	174 tons/year
Avoided pollutant emissions NO <sub>x</sub>	633 tons/year

*Πίνακας 2.3: Περιβαλλοντικά οφέλη από την ένταξη του ΥΒΣ στο ενεργειακό σύστημα του El Hierro.*

## **Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Το Υδρογόνο**

### **3.1 Γενικά για το Υδρογόνο**

Το υδρογόνο είναι το πιο άφθονο χημικό στοιχείο στον Γαλαξία και το ελαφρύτερο στοιχείο που υπάρχει στη φύση. Είναι ένα αμέταλλο με ατομικό αριθμό 1 και ατομικό βάρος 1,008, αποτελεί το πρώτο στοιχείο του περιοδικού πίνακα και συμβολίζεται με H. Σε συνήθη θερμοκρασία περιβάλλοντος, το υδρογόνο βρίσκεται πάντα σε αέρια φάση, στην οποία σαν υλικό είναι άχρωμο, άοσμο και εύφλεκτο. Κατά την καύση του με οξυγόνο σχηματίζεται νερό. Η ονομασία του δόθηκε από τον Γάλλο χημικό Antoine Lavoisier και προέρχεται από δύο λέξεις της αρχαίας ελληνικής το «ύδωρ» και το «γίγνομαι».

Η παρουσία ελεύθερου αερίου υδρογόνου στην ατμόσφαιρα παραμένει χαμηλή εξαιτίας της συνεχούς διαφυγής των μορίων του προς το διάστημα. Καθώς υπεισέρχεται στη σύσταση των πολυάριθμων οργανικών ενώσεων, το υδρογόνο συναντάται σε όλους τους φυτικούς και ζωικούς ιστούς, καθώς και στο πετρέλαιο και στο φυσικό αέριο. Έτσι, όπως και ο άνθρακας, σχηματίζει τεράστιο αριθμό ενώσεων αφού ενώνεται με όλα τα χημικά στοιχεία εκτός από τα ευγενή αέρια.

#### **3.1.1 Φυσικές Ιδιότητες του Υδρογόνου**

Όπως συμβαίνει με τα μόρια των περισσότερων αερίων, το μόριο του αερίου υδρογόνου είναι διατομικό. Κάθε άτομο υδρογόνου αποτελείται από ένα πυρήνα γύρω από τον οποίο περιφέρεται ένα ηλεκτρόνιο. Σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, δηλαδή πίεση 1 atm (101.325 kPa ) και θερμοκρασία 0°C ( 273.15 K), το υδρογόνο είναι αέριο, άχρωμο, άγευστο, άοσμο και εύφλεκτο με πυκνότητα περίπου 10 φορές μικρότερη από αυτή του αέρα.

Στη φύση το υδρογόνο απαντάται με τη μορφή 3 ισοτόπων του. Η διάκριση μεταξύ των ισοτόπων του υδρογόνου αιτιολογείται από το γεγονός ότι παρουσιάζουν διαφορές στις ιδιότητές τους. Μέχρι σήμερα εκτός των παραπάνω ισοτόπων έχουν



παραχθεί σε εργαστηριακή κλίμακα κι άλλα ισότοπα του υδρογόνου τα οποία περιλαμβάνουν μέχρι και 6 νετρόνια στον πυρήνα του ατόμου τους.

Οι φυσικές ιδιότητες του υδρογόνου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1 που ακολουθεί.

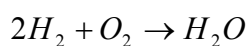
Φυσικές ιδιότητες	
Κατάσταση ύλης	αέριο
Σημείο τήξεως	-259,14°C (14,02 K)
Θερμότητα τήξεως	0,117 kJ/mol
Σημείο ζέσεως	-252,87°C (20,29 K)
Θερμότητα εξατμίσεως	0,904 kJ/mol
Τριπλό σημείο	-259,36°C (13,8 K), 7,042 kPa
Κρίσιμο σημείο	-240,19°C (32,97 K), 1,293 MPa
Ειδική θερμοχωρητικότητα	28,836 J/(mol*K)
Τάση ατμών	209 Pa στους -250,16°C (23 K)
Ταχύτητα ήχου	1310 m/s στους 27°C (300,16 K)
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	$4 \cdot 10^{-4}$ $\mu$ S
Θερμική αγωγιμότητα	180.5 mW/(m*K) στους 27°C

Πίνακας 3.1: Φυσικές ιδιότητες του Υδρογόνου

### 3.1.2 Χημικές ιδιότητες του Υδρογόνου

Τα μόρια του υδρογόνου δίστανται σε απλά άτομα ( $H_2 \rightarrow 2H$ ) εφόσον παρασχεθεί ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση των 104kcal/mol. Το ατομικό υδρογόνο είναι εξαιρετικά δραστικό από χημικής απόψεως. Ενώνεται με τα περισσότερα χημικά στοιχεία, σχηματίζοντας υδρίδια, όπως π.χ. το υδρίδιο του νατρίου (NaH) ή ανάγει τα οξείδια των μετάλλων, επαναφέροντας τα αντίστοιχα μέταλλα στην ελεύθερη κατάσταση. Το μοριακό υδρογόνο είναι δυνατό να αντιδράσει με πολλά χημικά στοιχεία και ενώσεις, αλλά στη συνήθη θερμοκρασία οι ταχύτητες των αντίστοιχων αντιδράσεων είναι τόσο μικρές ώστε να θεωρούνται αμελητέες. Σε υψηλές θερμοκρασίες οι ρυθμοί μεταβάλλονται.

Το υδρογόνο όταν θερμαίνεται πάνω από φλόγα, αντιδρά σε συνθήκες περιβάλλοντος βίαια με το οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα και δίνει σαν προϊόντα νερό και θερμότητα σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Η αντίδραση αυτή, η οποία προφανώς αποτελεί μία αντίδραση οξείδωσης του υδρογόνου με το ατμοσφαιρικό οξυγόνο, είναι εξώθερμη και η θερμότητα που παράγεται ισούται περίπου με 285.83 kJ/mol παραγόμενου νερού. Ακόμη, το υδρογόνο μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να σχηματίσει και δεσμούς ιοντικής φύσης με ορισμένα στοιχεία. Μια άλλη κατηγορία δεσμών που μπορεί να σχηματίσει το υδρογόνο με άτομα άλλων χημικών στοιχείων και η οποία συναντιέται μόνο σε αυτό, είναι οι λεγόμενοι δεσμοί υδρογόνου. Τέτοια στοιχεία είναι τα: O, S, N, F και Cl.

Το υδρογόνο επίσης απορροφάται από πολλά στοιχεία μετάπτωσης σχηματίζοντας υδρίδια μεταλλικής κατασκευής, δηλαδή μια μορφή κράματος. Να αναφερθεί στις χημικές ιδιότητες του υδρογόνου τέλος, ότι όταν αυτό βρεθεί κάτω από πολύ μεγάλη πίεση και θερμοκρασία μπορεί να συμπεριφερθεί σαν μέταλλο, αντανακλώντας το φως και να γίνει αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος.

### 3.2 Γιατί H<sub>2</sub>;

Όπως έγινε σαφές στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, οι σημερινές ενεργειακές πολιτικές δεν οδηγούν σε ένα βιώσιμο μέλλον. Οι νέες πηγές και φορείς ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να εγγυηθούν ένα αειφόρο, ασφαλές και φιλικό προς το περιβάλλον ενεργειακό σύστημα. Το υδρογόνο εμφανίζει μία σειρά σχετικών πλεονεκτημάτων:

- Ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού:

Το υδρογόνο είναι ένας μη ρυπογόνος φορέας ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από πρωτογενής πηγές, από πυρηνική ενέργεια αλλά και από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτή η ποικιλότητα των μεθόδων παραγωγής συνδράμει στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κεντρικές και αποκεντρωμένες ή αυτόνομες εφαρμογές για παραγωγή ενέργειας.

- Προστασία του περιβάλλοντος:

Η χρήση του συνοδεύεται από πολύ χαμηλές (καύση) έως και μηδενικές εκπομπές ρύπων (κυψέλες καυσίμου).

- Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου:

Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από πηγές χωρίς την καύση άνθρακα (ανανεώσιμες) ή από ορυκτά καύσιμα εφαρμόζοντας μεθόδους κατακράτησης και αποθήκευσης του άνθρακα (Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS).

- Οικονομική ανάπτυξη:

Η ανάπτυξη της αγοράς ενεργειακών συστημάτων που χρησιμοποιούν το υδρογόνο συνεπάγεται την οικονομική ανάπτυξη και την αειφορία κυρίως σε αναπτυσσόμενες χώρες.

### **3.3 Τεχνολογίες Παραγωγής Υδρογόνου**

#### **3.3.1 Εισαγωγικά στοιχεία**

Το υδρογόνο ( $H_2$ ) υπάρχει σχεδόν παντού, αλλά δυστυχώς είναι δύσκολο να βρεθεί στη φύση ως ξεχωριστό στοιχείο, αντ' αυτού συνδέεται με χημικό δεσμό με το οξυγόνο στο νερό και με τον άνθρακα σε υδρογονάνθρακες. Το υδρογόνο που υφίσταται δεσμευμένο στο νερό και σε οργανικές ενώσεις αποτελεί περισσότερο από το 70% της γήινης επιφάνειας (Dunn, 2002). Αυτό το άχρωμο, άοσμο, και άγευστο χημικό στοιχείο αποτελεί μία χρήσιμη "πρώτη ύλη" για ποικίλες βιομηχανικές δραστηριότητες και ένα σημαντικότερο καύσιμο που επαρκεί να τροφοδοτήσει το σύνολο των δραστηριοτήτων της κοινωνίας, από τις ανάγκες για ηλεκτρικό στα σπίτια, στις επιχειρήσεις, στη βιομηχανία ακόμα και ως καύσιμο στις μεταφορές.

Σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ, η παγκόσμια ετήσια παραγωγική ικανότητα του  $H_2$  προσεγγίζει σήμερα τα 400 δισεκατομμύρια  $m^3$ . Αυτή η ποσότητα ισοδυναμεί με 360 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου, ή με το 10% της παγκόσμιας παραγωγής πετρελαίου το 1999. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ποσότητας υδρογόνου παράγεται στις πετροχημικές βιομηχανίες, χρησιμοποιώντας

κυρίως υδρατμούς για την αναμόρφωση του φυσικού αερίου. Το υδρογόνο καταναλώνεται συνήθως επιτόπου και δεν πωλείται στην αγορά. Χρησιμοποιείται κυρίως ως πρώτη ύλη για τον εξευγενισμό του πετρελαίου (π.χ. υδρογονοαποθείωση) και για την παρασκευή λιπασμάτων, πλαστικών, διαλυτών, και άλλων βιομηχανικών προϊόντων. Μόνο το 5% του υδρογόνου μπορεί να χαρακτηριστεί ως "εμπορικό προϊόν" και να μεταφερθεί αλλού σε υγρή ή σε αέρια μορφή (Dunn, 2002).

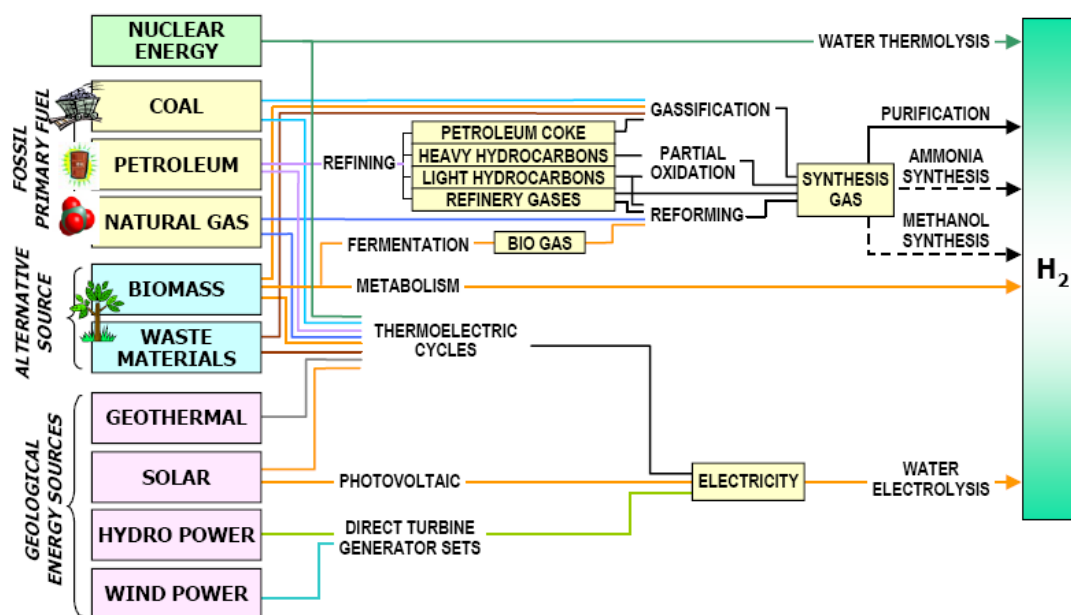
Το υδρογόνο αποτελεί έναν υψηλής ποιότητας δευτερεύων ενεργειακό φορέα και δεν πρέπει να θεωρείται ως πρωτογενής πηγή ενέργειας. Επομένως, πρέπει να παραχθεί από μία άλλη πρώτη ύλη, γεγονός που θέτει προκλήσεις και πολυπλοκότητα, αλλά συγχρόνως προσφέρει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ένα διαφοροποιημένο ενεργειακό μίγμα που θα μειώσει την εξάρτηση από τις εισαγωγές πετρελαίου, θα μειώσει τις εκπομπές αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και θα αποτελεί ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από μία ποικιλία ευρέως διαθέσιμων πρώτων υλών συμπεριλαμβανομένων των διάφορων ορυκτών καυσίμων και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με χρήση διαφορετικών τεχνολογιών ανά περίπτωση.

Οι βασικές τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου περιλαμβάνουν:

- Την αεριοποίηση του άνθρακα (με προαιρετικές την συμπαραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την δέσμευση του άνθρακα)
- Την αναμόρφωση του φυσικού αερίου με ατμό (με προαιρετική τη δέσμευση και αποθήκευση του άνθρακα)
- Την αεριοποίηση της βιομάζας
- Τις πυρηνικές διεργασίες (θερμοχημική διεργασία Θείου – Ιωδίου υψηλών θερμοκρασιών, συμβατική ηλεκτρόλυση του νερού και ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες)
- Την ηλεκτρόλυση με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (με προαιρετική την συμπαραγωγή)

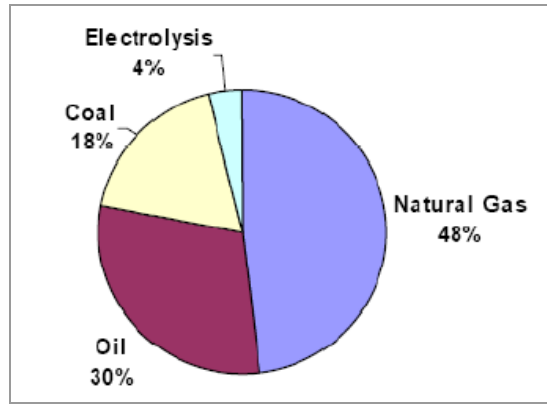
Κάθε μία από τις παραπάνω τεχνολογίες βρίσκεται σε ένα διαφορετικό στάδιο ανάπτυξης και κάθε μία διακρίνεται από τις διαφορετικές τεχνικοοικονομικές

προκλήσεις. Η διαθεσιμότητα των πρώτων υλών, η ωριμότητα της τεχνολογίας, οι εφαρμογές και η ζήτηση της αγοράς, ο τρόπος διαχείρισης και το κόστος δύναται να επηρεάσουν την απόφαση για την βέλτιστη επιλογή τεχνολογίας για παραγωγή υδρογόνου. Μια επισκόπηση των διαφόρων πρώτων υλών και των τεχνολογιών που σχετίζονται με την παραγωγή υδρογόνου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1.



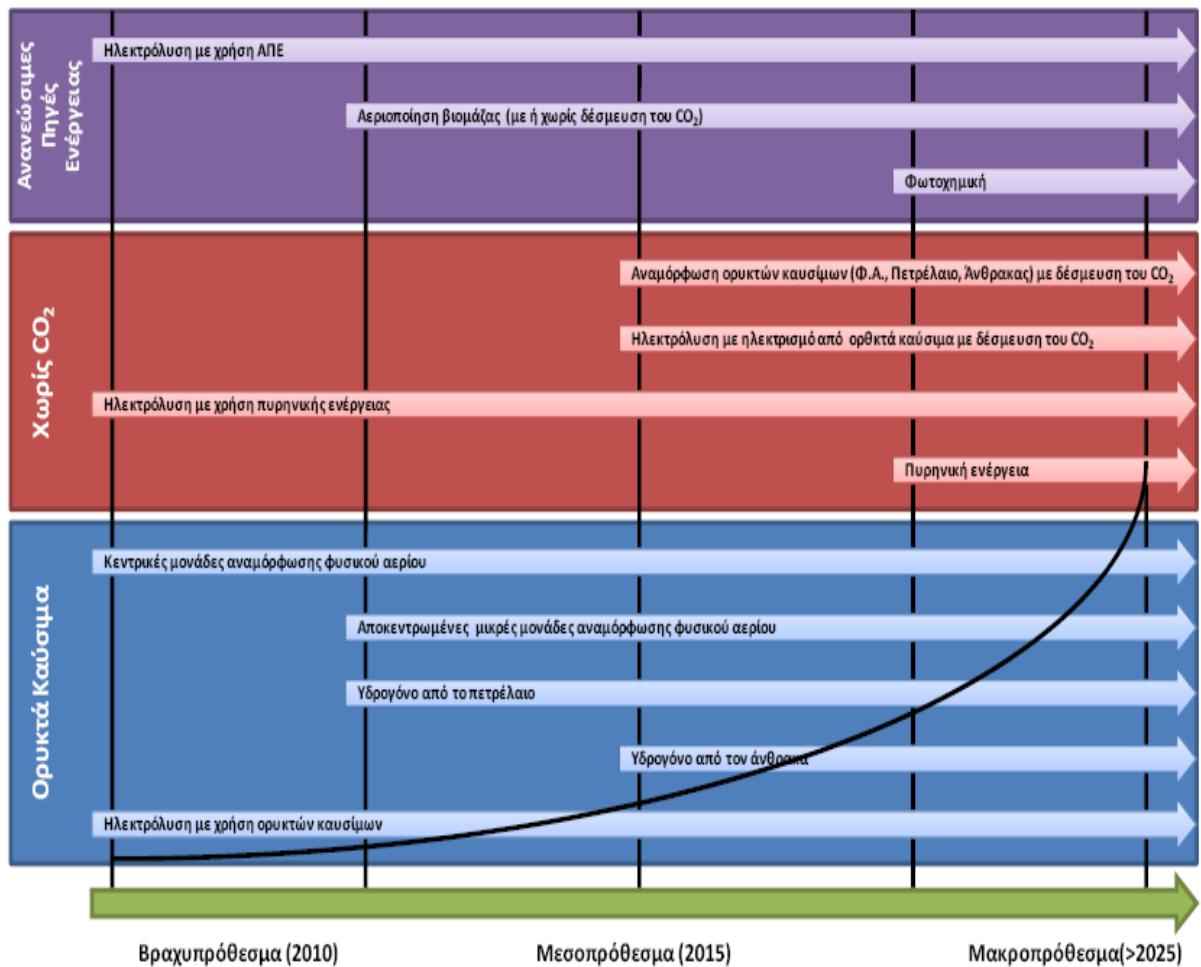
Σχήμα 3.1: Οι οδοί για το H<sub>2</sub> (Πηγή: Μ. Φούντη, Γ. Βουρλιωτάκης)

Στην αγορά είναι ήδη διαθέσιμες διάφορες τεχνολογίες για τη βιομηχανική παραγωγή του υδρογόνου. Η πρώτη εμπορική τεχνολογία, που χρονολογείται από τις αρχές της δεκαετίας του '20, είναι η ηλεκτρόλυση του νερού (Marban et al., 2007). Εντούτοις, στη δεκαετία του '60, η βιομηχανική παραγωγή του υδρογόνου άρχισε να μετατοπίζεται προς την χρήση του φυσικού αερίου, το οποίο αποτελεί σήμερα την κυριότερη πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Προέλευση H<sub>2</sub> σήμερα

Γενικά, όλες οι πιθανές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου μπορούν να ταξινομηθούν σε βραχυπρόθεσμες (2010), μεσοπρόθεσμες (2010–2020) και μακροπρόθεσμες (2020 – 2030) τεχνολογίες (Σχήμα 3.3).

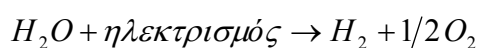


Σχήμα 3.3: Βραχυ-, Μέσο-, και Μακροπρόθεσμες τεχνολογίες παραγωγής H<sub>2</sub> (Πηγή: TEE)

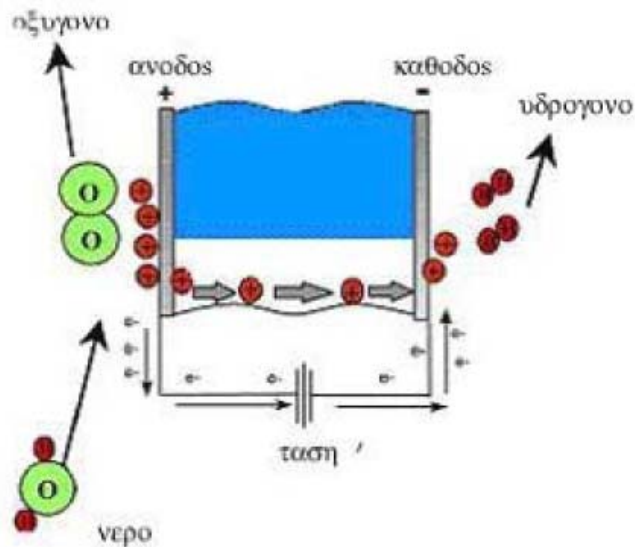
Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα αναλύσουμε την παραγωγή του υδρογόνου με τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης του νερού, η οποία μπορεί να συνδυαστεί με την αιολική ενέργεια και να προσφέρει το παραγόμενο υδρογόνο ως το μέσο αποθήκευσης της πλεονάζουσας ανανεώσιμης ενέργειας.

### 3.3.2 Ηλεκτρόλυση του νερού

Μια ελπιδοφόρος και ιστορική μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου είναι η ηλεκτρόλυση του νερού, μια ηλεκτροχημική διεργασία, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για τον διαχωρισμό του νερού στα συστατικά του, σε υδρογόνο και οξυγόνο, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση.



Μία συσκευή ηλεκτρόλυσης αποτελείται από δύο χώρους μέσα στους οποίους βρίσκονται τα ηλεκτρόδια και οι οποίοι είτε επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους, είτε μπορεί να παρεμβάλλεται μια διαχωριστική μεμβράνη (μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων-PEM συσκευές ηλεκτρόλυσης). Σε κάθε συσκευή μπορεί να διαφέρει το υλικό των ηλεκτροδίων που διαθέτουν και το οποίο δεν είναι απαραίτητο να είναι το ίδιο και στα δύο, καθώς και η σύσταση του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν. Η αρχή της ηλεκτρόλυσης είναι η ίδια για όλες τις συσκευές. Εάν η συσκευή χρησιμοποιείται για ηλεκτρόλυση  $H_2O$ , τότε στις εξόδους της παράγεται αέριο  $H_2$  και  $O_2$ . Μια παραστατική απεικόνιση μιας τέτοιας διαδικασίας δίνεται στο Σχήμα 3.4.



Σχήμα 3.4: Διαδικασία ηλεκτρόλυσης σε συσκευή ηλεκτρόλυσης νερού (Πηγή: B. Γιαννέτα)

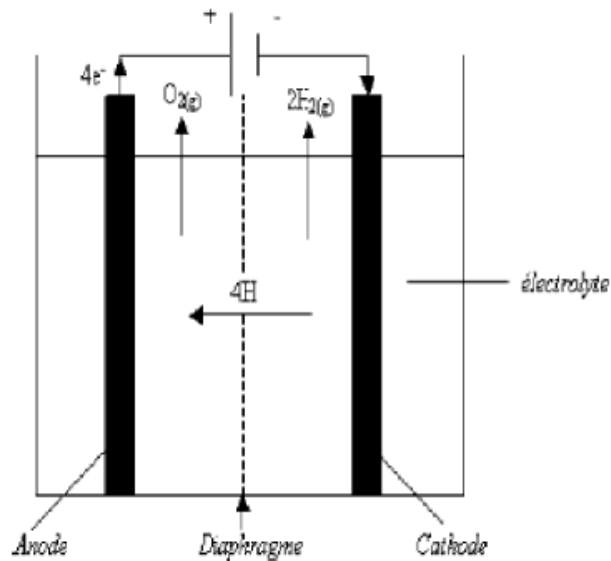
Σήμερα, περίπου 4% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου παράγεται από την ηλεκτρόλυση του νερού (Berry, 2004). Αυτή η διεργασία είναι ήδη οικονομικά αποδοτική για την παραγωγή υπέρ-καθαρού υδρογόνου σε μικρές ποσότητες, εντούτοις, εξακολουθεί να παραμένει ακριβή για εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας, λόγω κυρίως της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία κοστίζει αυτήν την περίοδο τρεις έως πέντε φορές περισσότερο έναντι των αντίστοιχων πρώτων υλών ορυκτών καυσίμων.

Η συνολική ενέργεια που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση του νερού αυξάνεται ελάχιστα με τη θερμοκρασία, ενώ η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια μειώνεται. Μια διεργασία ηλεκτρόλυσης σε υψηλές θερμοκρασίες πιθανόν να είναι προτιμητέα όταν υπάρχει διαθέσιμη θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας.

### Αλκαλική ηλεκτρόλυση

Οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης (Σχήμα 3.5) χρησιμοποιούν ένα υδατικό διάλυμα KOH ως ηλεκτρολύτη (Floch et al., 2007). Η αλκαλική ηλεκτρόλυση είναι η καταλληλότερη για σταθερές εφαρμογές που διεξάγονται σε πιέσεις μέχρι 25 bar. Οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης έχουν εμπορευματοποιηθεί εδώ και πολύ καιρό.



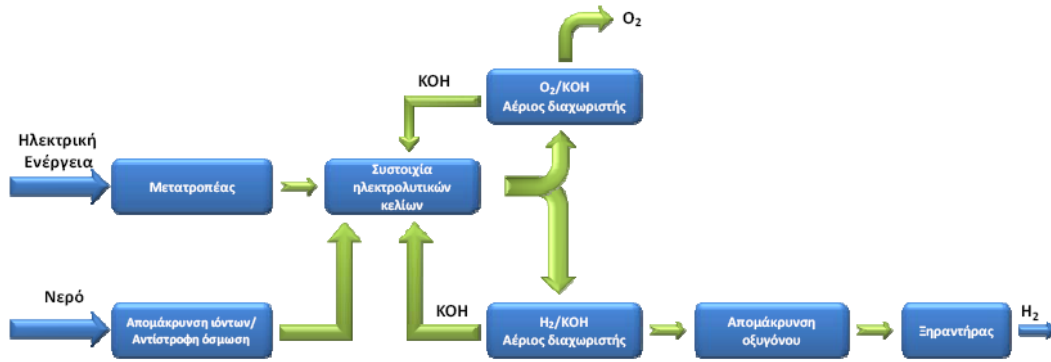


Σχήμα 3.5: Συσκευή αλκαλικής ηλεκτρόλυσης (Πηγή: Α. Μιχαλακόπουλος)

Οι ακόλουθες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται μέσα στην κυψέλη αλκαλικής ηλεκτρόλυσης:



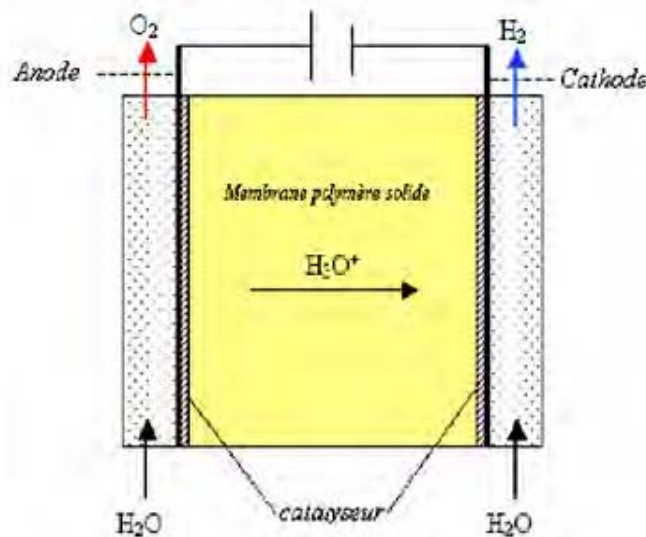
Συνήθως, οι εμπορικές διατάξεις ηλεκτρόλυσης αποτελούνται από ένα πλήθος ηλεκτρολυτικών κυψελών σε μορφή συστοιχίας. Οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης περιέχουν τα κύρια συστατικά που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.6. Οι σημαντικότερες προκλήσεις για το μέλλον είναι να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης με το χαμηλότερο κόστος αλλά με υψηλότερη ενεργειακή απόδοση (Floch et al., 2007).



Σχήμα 3.6: Διάγραμμα ροής μίας αλκαλικής συσκευής ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή  $H_2$  (Πηγή: TEE)

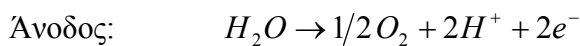
### Ηλεκτρόλυση σε πολυμερικής μεμβράνης ηλεκτρολύτες (PEM)

Στην περίπτωση αυτή ο ηλεκτρολύτης είναι μια οργανική πολυμερική μεμβράνη, στην οποία τα πρωτόνια που παράγονται στην άνοδο μεταφέρονται στην κάθοδο.



Σχήμα 3.7: Συσκευή PEM ηλεκτρόλυσης (Πηγή: Α. Μιχαλακόπουλος)

Οι ακόλουθες ηλεκτροχημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται μέσα στην κυψέλη PEM ηλεκτρόλυσης (Σχήμα 3.7):



Κάθοδος:  $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

Οι PEM συσκευές ηλεκτρόλυσης μπορούν να σχεδιαστούν για να λειτουργούν σε πιέσεις μέχρι αρκετές εκατοντάδες bar, και είναι κατάλληλες τόσο για σταθερές όσο και για κινητές εφαρμογές (Grigoriev et al., 2006). Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των PEM σε σχέση με τις αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης είναι ευελιξία τους όσον αφορά την λειτουργία τους σε ένα μεγάλο εύρος δυναμικότητων, η ασφάλεια τους λόγω της απουσίας του ηλεκτρολύτη KOH, η συνεκτικότερη κατασκευή λόγω των υψηλότερων πυκνοτήτων ισχύος που είναι δυνατό να επιτευχθούν και οι υψηλότερες πιέσεις λειτουργίας (καμία ανάγκη για περαιτέρω συμπίεση).

Λόγω όμως του σχετικά υψηλού κόστους, της χαμηλής δυναμικότητας, της μικρής απόδοσης και της σύντομης διάρκειας ζωής, οι συσκευές ηλεκτρόλυσης τύπου PEM, οι οποίες είναι διαθέσιμες σήμερα, δεν είναι τόσο ώριμες εμπορικά όσο οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης. Αναμένεται ότι η απόδοση των συσκευών ηλεκτρόλυσης PEM μπορεί να αυξηθεί σημαντικά εάν βελτιστοποιηθούν οι διεργασίες παρασκευής των υλικών από τα οποία αποτελείται και ο σχεδιασμός των συστοιχιών (Grigoriev et al., 2006).

### **Ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες**

Η υψηλής θερμοκρασίας ηλεκτρόλυση του ατμού βασίζεται στην αντίστροφη λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας (Herring et al., 2007). Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για να διαχωριστεί το νερό στους 1000°C είναι αρκετά χαμηλότερη από την ηλεκτρόλυση στους 100°C. Αυτό σημαίνει ότι μια υψηλής θερμοκρασίας συσκευή ηλεκτρόλυσης μπορεί να λειτουργήσει σε σημαντικά υψηλότερες αποδόσεις από μια διάταξη ηλεκτρόλυσης που λειτουργεί σε χαμηλές θερμοκρασίες. Μια χαρακτηριστική τεχνολογία αυτής της κατηγορίας είναι η κυψέλη ηλεκτρόλυσης στερεού ηλεκτρολύτη (SOEC).

Γενικά, η ηλεκτρόλυση είναι δυνατό να κλιμακωθεί από λίγα Nm<sup>3</sup>/h σε αρκετές

δεκάδες χιλιάδες Nm<sup>3</sup>/h, έτσι ώστε να δύναται να χρησιμοποιηθεί σε αποκεντρωμένες εφαρμογές παραγωγής υδρογόνου καθώς επίσης και για μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου. Σήμερα, η απόδοση των συμβατικών συσκευών ηλεκτρόλυσης είναι περίπου 40–50% (Schuckert, 2005). Άλλες βιβλιογραφικές πηγές αναφέρουν υψηλότερες τιμές απόδοσης, οι οποίες μπορούν να αποδοθούν στις διαφορές μεταξύ των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας και των εργαστηριακών συνθηκών. Η απόδοση είναι μια βασική παράμετρος για την ηλεκτρόλυση, καθώς το κόστος καθορίζεται κατά ένα μεγάλο μέρος από το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Η βέλτιστη στην πράξη απόδοση θα μπορούσε να είναι υψηλότερη από 85%, αλλά οι εμπορικές συσκευές επιτυγχάνουν αποδόσεις μεταξύ 55–75%. Οι αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης είναι οι πιο κοινές συσκευές για την ηλεκτρόλυση του νερού, εντούτοις, νέες συσκευές ηλεκτρόλυσης, οι οποίες βασίζονται στην αντίστροφη λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου εισέρχονται αυτήν την περίοδο στην αγορά. Το τρέχον κόστος ηλεκτρόλυσης υπερβαίνει τα 20 €/GJ, αλλά το κόστος θα ήταν δυνατό να μειωθεί περαιτέρω, κάτω από 13 €/GJ (συμπεριλαμβανομένου και του κόστους συμπίεσης) κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών, υποθέτοντας ένα κόστος ηλεκτρικής ενέργειας στα 23 €/MWh και 80% απόδοση της διεργασίας. Η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας σε ώρες εκτός αιχμής και σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας μπορεί να μειώσει περαιτέρω τις δαπάνες, αν και το κόστος CCS αναμένεται να αυξήσει το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, το οξυγόνο ως παραπροϊόν της ηλεκτρόλυσης του νερού μπορεί να επηρεάσει τα οικονομικά της διεργασίας εάν υπάρχει μια επαρκής ζήτηση οξυγόνου σε κοντινές βιομηχανίες.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων συσκευών ηλεκτρόλυσης.

		Υψηλής πίεσης αλκαλικές συσκευές ηλεκτρόλυσης				Συσκευές ηλεκτρόλυσης τύπου PEM		SOEC
		Τεχνολογία αιχμής (SotA)		Μακροπρόθεσμος στόχος (LTT)		Τεχνολογία αιχμής	Μακροπρόθεσμος στόχος	Μακροπρόθεσμος στόχος
Τεχνικά Χαρακτηριστικά								
Παραγωγή Υδρογόνου	Nm <sup>3</sup> /h	5-50000		5-50000		10	30	>10000
Απαιτήσεις σε ηλεκτρική ενέργεια	kW/kW <sub>H2</sub>	1,43		1,3		2		1,07
Απαιτήσεις σε ατμό	kW/kW <sub>H2</sub>							0,2
Πίεση	bar	30		100		1,4	400	
Απόδοση (H <sub>2</sub> LHV)	%	70		80		50		79
Διάρκεια ζωής	yr	20		20				20
Διάρκεια ζωής συστοιχίας	yr					3-4	5	9
Οικονομικά στοιχεία								
		<5MWel		>55MWel				
		SotA	LTT	SotA	LTT			
Κόστος Επένδυσης								
Συσκευή ηλεκτρόλυσης	€ <sub>2000</sub> /kW <sub>H2</sub>	525	450	420	360			
Πλήρες σύστημα	€ <sub>2000</sub> /kW <sub>H2</sub>	600	510	480	410	1565		1000

Πίνακας 3.2: Τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων συσκευών ηλεκτρόλυσης (Πηγή: TEE)

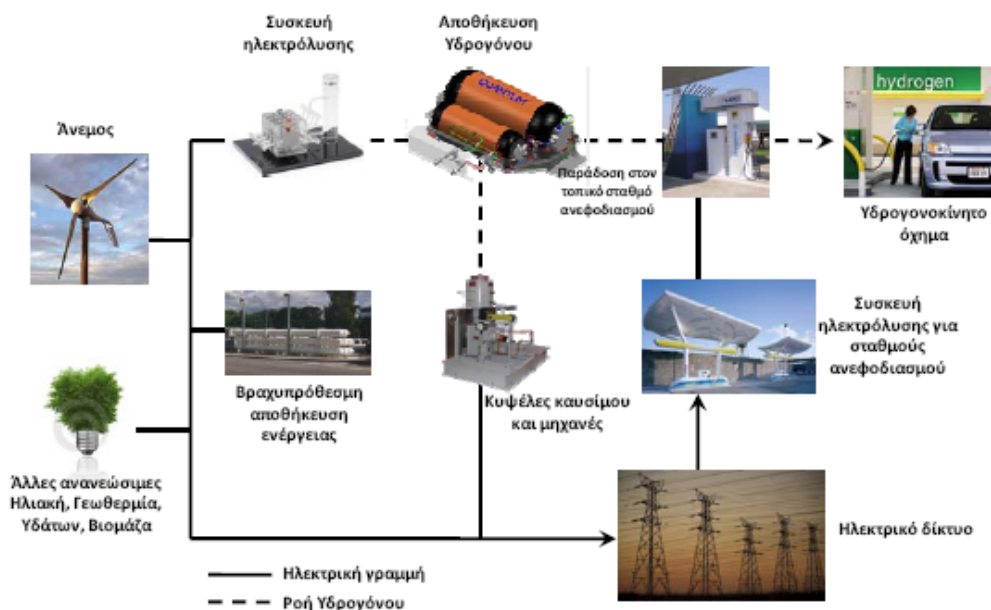
### 3.4 Γιατί προτείνεται το υδρογόνο σε συνδυασμό με τις ΑΠΕ

Ενώ η ηλεκτρόλυση του νερού είναι η ακριβότερη διεργασία παραγωγής υδρογόνου σήμερα, κυρίως λόγω της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας, το συνολικό κόστος αναμένεται να μειωθεί λαμβάνοντας υπόψη την υψηλή απόδοση των νέων συστημάτων και την ένταξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες είναι δυνατό να συνδυαστούν με την ηλεκτρόλυση του νερού (Zoulias et al., 2006). Το κόστος της ηλεκτρόλυσης που βασίζεται στην ηλιακή και αιολική ενέργεια είναι ακόμα υψηλό, αλλά αναμένεται να μειωθεί στο μισό κατά τη διάρκεια της επόμενης

δεκαετίας. Επιπλέον, επειδή το υδρογόνο παράγεται επιτόπου και κατά παραγγελία, δεν απαιτείται ούτε η μεταφορά του ούτε και η αποθήκευση του, καθιστώντας το υδρογόνο που παράγεται από την ηλεκτρόλυση οικονομικά βιώσιμο και ανταγωνιστικό. Τα οικονομικά μεγέθη είναι δυνατό να βελτιωθούν επίσης με την αναμενόμενη μελλοντική μαζική παραγωγή (οικονομίες κλίμακας) των μικρών συσκευών ηλεκτρόλυσης, οι οποίες θα δύνανται να κλιμακώνονται από μικρές σε μεγάλες μονάδες με σχετικά απλό τρόπο, θα χρησιμοποιούν λιγότερο ακριβή ενέργεια (και υδροηλεκτρική) τις ώρες αιχμής, και θα επιτυγχάνουν αποδόσεις της τάξης του 70–85%.

Η ηλεκτρόλυση από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι δυνατό να οδηγήσει σε έναν καθαρό κύκλο υδρογόνου (Σχήμα 3.8). Υδρογόνο από την ηλιακή και την αιολική ενέργεια θα μπορούσε να καλύψει μελλοντικές ενεργειακές απαιτήσεις, αν και το κόστος παράδοσης της ενέργειας μπορεί να είναι υψηλότερο σε σχέση με την περίπτωση παραγωγής υδρογόνου με την μέθοδο SMR.

Σε βάθος χρόνου, το υδρογόνο θα παρέχει επίσης ένα ιδεατό μέσο αποθήκευσης για ανανεώσιμη ενέργεια. Το υδρογόνο αναμένεται να επιτρέψει την ένταξη στο ενεργειακό σύστημα, ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με μη-μόνιμη παροχή (ήλιος, άνεμος) (Zoulias et al., 2006). Κατά συνέπεια, μπορούμε να οραματιστούμε ένα φωτοβολταϊκό ηλιακό πάνελ ή μια ανεμογεννήτρια συνδεδεμένα με μία αντιστρεπτής λειτουργίας κυψέλη καυσίμου/κυψέλη ηλεκτρόλυσης, που χρησιμοποιεί ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας για να παραγάγει  $H_2$  κατά τη διάρκεια της ημέρας (ή σε ανέμους με υψηλή ταχύτητα), και να καταναλώνει το υδρογόνο κατά τη διάρκεια της νύχτας (ή απουσία αέρα) για να παραγάγει ηλεκτρική ενέργεια. Παρά την αναμφισβήτητη μειωμένη απόδοση αυτού του συστήματος, είναι σαφές ότι θα αποτελούσε μία αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 3.8: Ηλεκτρόλυση που τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Πηγή: TEE)

### 3.5 Αποθήκευση, Διανομή, Ασφάλεια H<sub>2</sub>

#### 3.5.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Το ενδιαφέρον για το υδρογόνο ως πιθανό ενεργειακό φορέα έχει αυξηθεί σημαντικά την τελευταία δεκαετία, εξαιτίας των ραγδαίων εξελίξεων στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου που παράγουν ενέργεια και νερό ως παραπροϊόν. Επομένως, η ανάπτυξη της παραπάνω τεχνολογίας αναμένεται να αποτελέσει καθοριστικό παράγοντα στη μετάβαση σε ένα μελλοντικό σύστημα βιώσιμης ενέργειας με μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ειδικά στον τομέα των μεταφορών όπου οι περισσότεροι από τους μεγαλύτερους κατασκευαστές οχημάτων παγκοσμίως επενδύουν σε προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης οχημάτων με κυψέλες καυσίμου (Von Helmholt and Eberle, 2007 και Mehta and Cooper, 2003). Η ανάγκη για παγκόσμια αλλαγή από ορυκτά καύσιμα σε H<sub>2</sub> απαιτεί την αντιμετώπιση μιας σειράς προκλήσεων που εμφανίζονται κατά τα διάφορα στάδια των τεχνολογιών H<sub>2</sub>.

Αν και η παραγωγή, η αποθήκευση και οι τεχνολογίες μεταφοράς υδρογόνου

χρησιμοποιούνται εμπορικά στην χημική και πετρελαιοχημική βιομηχανία, οι παραπάνω τεχνολογίες θεωρούνται ακριβές για περαιτέρω χρήση σε ενεργειακές εφαρμογές. Η εμπορικά βιώσιμη τεχνολογία αποθήκευσης υδρογόνου θεωρείται ως μια από τις πιο κρίσιμες προκλήσεις από τεχνολογική άποψη, στην αποδοτική χρήση του υδρογόνου ως ενεργειακό φορέα (Edwards et al., 2007, Crabtree et al., 2004, Harris et al., 2004, Kikkinides, 2008). Το H<sub>2</sub> περιέχει περισσότερη ενέργεια κατά βάρος από κάθε άλλη ουσία. Δυστυχώς όμως, επειδή είναι το πιο ελαφρύ χημικό στοιχείο του περιοδικού πίνακα, έχει επίσης και πολύ χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα όγκου (Πίνακας 3.3).

Καύσιμο	Ενεργειακή πυκνότητα κατά βάρος (kWh/kg)	Ενεργειακή πυκνότητα κατ'όγκο (kWh/lt)
Βενζίνη	12,7	8,7
Diesel	12,6	10,6
Λιγνίτης	8,2	7,6
Φυσικό αέριο	13,9	2,6
Υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG)	13,9	5,6
Υδρογόνο-αέριο	33,3	0,53
Υδρογόνο-υγρό	33,3	2,37
Μεθανόλη	5,6	4,4

*Πίνακας 3.3: Ενεργειακές πυκνότητες διαφόρων καυσίμων (Kikkinides, 2008)*

### 3.5.2 Αποθήκευση

Είναι αναμενόμενο ότι η οικονομία του υδρογόνου απαιτεί δύο τύπους συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου, έναν για στατικές εφαρμογές και έναν για κινητές εφαρμογές (οχήματα). Κάθε σύστημα έχει τις δικούς του περιορισμούς και απαιτήσεις. Ωστόσο, είναι αποδεδειγμένο ότι οι κινητές εφαρμογές είναι πολύ πιο απαιτητικές αντιμετωπίζοντας τις παρακάτω ανάγκες (Agrawal et al., 2005, Edwards et al., 2007):

- Υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο υδρογόνου ανά μονάδα όγκου, εξαιτίας περιορισμών χώρου και βάρους, ειδικά στην αυτοκινητοβιομηχανία.
- Χαμηλές πιέσεις λειτουργίας για λόγους ασφαλείας.



- Θερμοκρασία λειτουργίας από  $-50^{\circ}\text{C}$  ως  $150^{\circ}\text{C}$ .
- Υψηλούς ρυθμούς φόρτισης και από-φόρτισης του υδρογόνου για εφοδιασμό των οχημάτων σε σύντομους χρόνους.
- Σχετικά χαμηλό κόστος του συστήματος αποθήκευσης.

Οι προαναφερθείσες απαιτήσεις επιβάλλουν την αντιμετώπιση αρκετών επιστημονικών και τεχνολογικών προκλήσεων για την ανάπτυξη αποτελεσματικών συστημάτων αποθήκευσης σε κινητές εφαρμογές. Δυστυχώς, μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου που να ανταποκρίνονται σε όλα τα παραπάνω κριτήρια. Οι στατικές εφαρμογές, από την άλλη, δεν έχουν περιορισμούς βάρους και χώρου, μπορούν να λειτουργήσουν σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες και έχουν την επιπλέον ικανότητα να αντισταθμίζουν τους χαμηλούς ρυθμούς αντίδρασης.

Οι σύγχρονες εμπορικά εφαρμόσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης  $\text{H}_2$  έχουν επικεντρωθεί σε δοχεία υψηλής πίεσης (250-700 bar) ή σε υγρό υδρογόνο σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες (20-30 K). Αποθήκευση του υδρογόνου σε εξαντλημένους ταμειυτήρες υδρογονανθράκων αποτελεί μια πιθανή εναλλακτική λύση, αποδοτική σε κόστος, αλλά μόνο για στατικές εφαρμογές (Taylor et al., 1986; Venter et al., 1997; Stone et al., 2005). Η χρήση προηγμένων υλικών για την αποθήκευση του υδρογόνου που περιλαμβάνουν προσροφητές, μεταλλικά και χημικά υδρίδια κλπ, μπορεί να αποτελέσει μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική λύση, ωστόσο, η ανάγκη για μεγάλες ποσότητες των υλικών αυτών σε συνδυασμό με το κόστος καθώς και ζητήματα αντιστρεπτότητας και κυκλικής σταθερότητας περιορίζουν προς το παρόν την παραπάνω μέθοδο σε εφαρμογές μικρής κλίμακας.

### 3.5.3 Μεταφορά και διανομή $\text{H}_2$

Το υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες ποσότητες μέσω υπόγειων αγωγών (αέριο υδρογόνο) ή με δεξαμενόπλοια (υγρό υδρογόνο). Επί του παρόντος, η μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών χρησιμοποιείται είτε σε σύνδεση μεταξύ της παραγωγής και των γύρω χώρων χρήσης (μέχρι 10 χλμ.) ή σε πιο εκτεταμένα δίκτυα

(περίπου 200 χλμ.). Το Σχήμα 3.9 παρουσιάζει το υπάρχον δίκτυο διανομής υδρογόνου στη Βόρεια Ευρώπη της εταιρίας Air Liquide (Steinberger,2008), ενώ ο Πίνακας 3.4 ένα κατάλογο των κυριότερων υφιστάμενων αγωγών υδρογόνου (Pottier et al., 1995). Για την κατασκευή των αγωγών υδρογόνου, είναι αναγκαία η χρήση του χάλυβα που είναι ανθεκτικός ως προς την ευθραυστότητα κατά την χρήση υδρογόνου υπό πίεση, ιδίως για το πολύ καθαρό υδρογόνο (περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 99,5%). Εμβολοφόροι συμπίεστές αερίου που χρησιμοποιούνται για το φυσικό αέριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για το υδρογόνο χωρίς σημαντικές τροποποιήσεις του σχεδιασμού. Ωστόσο, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην σφράγιση (για την αποφυγή διαρροών του υδρογόνου) και την επιλογή των βασικών υλικών για τα μέρη που υπόκεινται σε μηχανική κόπωση. Η χρήση των φυγοκεντρικών συμπίεστών για το υδρογόνο δημιουργεί περισσότερα προβλήματα που οφείλονται στην εξαιρετική ελαφρότητα του υδρογόνου.

Κατά κανόνα, η μετάδοση του υδρογόνου μέσω αγωγών απαιτεί μεγαλύτερη διάμετρο σωληνώσεων και μεγαλύτερη δύναμη συμπίεσης από τους αντίστοιχους του φυσικού αερίου για την ίδια απόδοση ενέργειας. Ωστόσο, λόγω των χαμηλότερων απωλειών πίεσης στην περίπτωση του υδρογόνου, οι σταθμοί συμπίεσης μπορούν να είναι τοποθετημένοι δύο φορές μακρύτερα μεταξύ τους. Σε οικονομικό επίπεδο, σε περισσότερες από τις μελέτες διαπιστώθηκε ότι το κόστος της μεταφοράς του υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα είναι μεγαλύτερο περίπου 1,5 – 1,8 φορές του κόστους της μεταφοράς φυσικού αερίου.



Σχήμα 3.9: Αγωγοί μεταφοράς και διανομής υδρογόνου σε Benelux, Northern France και Ruhrgebiet της Air Liquide (Πηγή: Α. Μιχαλακόπουλος)

Τοποθεσία	Έτος λειτουργίας	Διάμετρος (mm)	Μήκος (km)	Πίεση (MPa)	Καθαρότητα
AGEC, Alberta, Canada	Από το 1987	273	3,7	3,79	99,9%
AirLiquide, France	Από το 1966	Διάφορες	290	6,48-10	Καθαρό και παραγόμενο
AirProducts, Houston, TX	Από το 1969	114-324	100	0,35-5,5	Καθαρό
AirProducts, Louisiana	Από το 1990	102-305	48	3,45	
Chemische Werke Huls	Από το 1938	168-273	215	to 2,5	Παραγόμενο
Cominco, B.C., Canada	Από το 1964	5	0,6	>30	62-100%
Gulf Petroleum Canada		168,3	16		93,5
Hawkeye Chemical, Iowa	Από το 1987	152	3,2	2,75	
ICI Bilingham, U.K.			15	30	Pure
Philips Petroleum	Από το 1986	203	20,9	12	

Πίνακας 3.4: Αγωγοί μεταφοράς υδρογόνου (Πηγή: TEE)

Προς αντιμετώπιση της ζήτησης της κατανάλωσης, το υδρογόνο μπορεί να μεταφέρεται και να διανέμεται σε περιφερειακό επίπεδο, είτε ως αέριο είτε ως υγρό, με αγωγούς ή σε ειδικές περιπτώσεις, σε δοχεία με οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές. Αέριο και υγρό υδρογόνο κατά την μεταφορά υπόκειται σε αυστηρές ρυθμίσεις που να διασφαλίζουν τη δημόσια ασφάλεια, οι οποίες σε ορισμένες χώρες είναι πολύ περιοριστικές.

Μεταφορά αερίου ή υγρού υδρογόνου σε ασυνεχή τρόπο πραγματοποιείται και σήμερα από την περιστασιακή χρήση ή για χρήστες με χαμηλό όγκο. Το κόστος της ασυνεχούς μεταφοράς είναι πολύ υψηλό (αυτό μπορεί να φθάνει μέχρι και 2-5 φορές το κόστος παραγωγής).

### 3.5.4 Ασφάλεια χρήσης

Όπως κάθε άλλο καύσιμο ή φορέας ενέργειας, το υδρογόνο ενέχει κινδύνους, αν δεν

χρησιμοποιείται σωστά ή δεν ελέγχεται. Ο κίνδυνος του υδρογόνου, ως εκ τούτου, πρέπει να εξεταστεί σε σχέση με τα κοινά καύσιμα όπως η βενζίνη, το προπάνιο ή το φυσικό αέριο.

Επειδή το υδρογόνο έχει το μικρότερο μόριο από όλα τα αέρια, έχει μια μεγαλύτερη τάση να διαφεύγει μέσα από μικρά ανοίγματα σε σχέση με άλλα υγρά ή αέρια καύσιμα. Με βάση τις ιδιότητες του υδρογόνου, όπως η πυκνότητα, το ιξώδες, και το συντελεστή διάχυσης στον αέρα, η ροπή του υδρογόνου να διαρρέει μέσα από τις οπές ή στις αρθρώσεις των αγωγών καυσίμου χαμηλής πίεσης μπορεί να είναι μόνο 1,26 – 2,8 φορές γρηγορότερη από τη διαρροή φυσικού αερίου μέσα από την ίδια οπή. Επειδή το φυσικό αέριο έχει πάνω από τρεις φορές την πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου, διαρροή φυσικού αερίου θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη απελευθέρωση ενέργειας από μια διαρροή υδρογόνου.

Για πολύ μεγάλες διαρροές από δεξαμενές υψηλής πίεσης, η έκταση της διαρροής περιορίζεται από την ταχύτητα του ήχου. Λόγω της υψηλότερης ταχύτητας του ήχου ( $1.308 \text{ ms}^{-1}$ ) στο υδρογόνο, αρχικά θα ξεφύγει πολύ πιο γρήγορα από ό,τι το φυσικό αέριο (ταχύτητα του ήχου του φυσικού αερίου είναι  $449 \text{ ms}^{-1}$ ). Και πάλι, επειδή το φυσικό αέριο έχει περισσότερες από τρεις φορές την πυκνότητα της ενέργειας από το υδρογόνο, η διαρροή φυσικού αερίου θα περιέχει πάντα περισσότερη ενέργεια.

Ορισμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής είναι επιρρεπείς σε αστοχία λόγω ευθραυστότητας εξαιτίας του υδρογόνου. Ωστόσο, οι περισσότερες άλλες κατασκευές, δεξαμενές, σωλήνες και τα άλλα υλικά δεν είναι επιρρεπή σε αστοχία ευθραυστότητας λόγω του υδρογόνου. Ως εκ τούτου, με την κατάλληλη επιλογή των υλικών, οι κίνδυνοι για την ασφάλεια από αστοχία ευθραυστότητας λόγω του υδρογόνου θα μπορούσαν να αποφευχθούν.

Σε περίπτωση που θα παρουσιαστεί διαρροή για οποιονδήποτε λόγο, το υδρογόνο θα διαλυθεί στον αέρα πολύ πιο γρήγορα από οποιοδήποτε άλλο καύσιμο, μειώνοντας έτσι γρήγορα τα επίπεδα επικινδυνότητας.

Το μείγμα υδρογόνου/αέρα μπορεί να καεί σε σχετικά ευρεία αναλογία όγκων, μεταξύ 4% και 75% του υδρογόνου στον αέρα. Τα άλλα καύσιμα έχουν πολύ

χαμηλότερο εύρος ευφλεκτότητας: το φυσικό αέριο 5,3 – 15%, το προπάνιο 2,1 – 10%, και η βενζίνη 1 – 7,8%. Ωστόσο, η περιοχή ευφλεκτότητας έχει μικρή πρακτική αξία. Σε πολλές πραγματικές καταστάσεις διαρροής, η βασική παράμετρος που καθορίζει εάν μια διαρροή θα αναφλεγεί είναι το κατώτερο όριο ευφλεκτότητας, και το κατώτατο όριο ευφλεκτότητας υδρογόνου είναι 4 φορές υψηλότερο από εκείνο της βενζίνης, 1,9 φορές υψηλότερο από αυτό του προπανίου, και ελαφρώς μικρότερο από αυτό του φυσικού αέριου.

Το υδρογόνο έχει πολύ χαμηλή ενέργεια ανάφλεξης (0,02 MJ), περίπου μία τάξη μεγέθους χαμηλότερη από άλλα καύσιμα. Η ενέργεια ανάφλεξης είναι συνάρτηση του λόγου καυσίμου/αέρα, και για το υδρογόνο πρέπει να φθάσει τουλάχιστον περίπου στο 25-30%. Στο χαμηλότερο όριο ευφλεκτότητας, του υδρογόνου η ενέργεια ανάφλεξης είναι συγκρίσιμη με εκείνη του φυσικού αερίου (Swain et al., 1992). Το υδρογόνο έχει ταχύτητα φλόγας επτά φορές πιο γρήγορη από ότι το φυσικό αέριο ή η βενζίνη. Μια φλόγα υδρογόνου ως εκ τούτου είναι πιο πιθανό να προχωρήσει σε μια ανάφλεξη ή ακόμη και μια έκρηξη από άλλα καύσιμα. Ωστόσο, η πιθανότητα μιας έκρηξης εξαρτάται με ένα πολύπλοκο τρόπο από την ακριβή αναλογία καυσίμου/αέρα, τη θερμοκρασία και ιδιαίτερα τη γεωμετρία του κλειστού χώρου. Έκρηξη του υδρογόνου στην ανοικτή ατμόσφαιρα είναι εξαιρετικά απίθανη.

Το κάτω όριο του λόγου καυσίμου/αέρα για την εκρηκτικότητα του υδρογόνου είναι 13 – 18%, το οποίο είναι δύο φορές υψηλότερο από εκείνο του φυσικού αερίου και 12 φορές υψηλότερο από εκείνο της βενζίνης. Επειδή το κατώτατο όριο ευφλεκτότητας είναι 4%, μια έκρηξη είναι δυνατή μόνο υπό τα πιο απίθανα σενάρια, π.χ., το υδρογόνο θα πρέπει πρώτα να συσσωρεύεται και να φθάσει σε συγκέντρωση 13% σε κλειστό χώρο χωρίς ανάφλεξη, και μόνο τότε μια πηγή ανάφλεξης θα πρέπει να ενεργοποιηθεί. Σε περίπτωση που συμβεί μια έκρηξη, το υδρογόνο έχει τη χαμηλότερη εκρηκτική ενέργεια ανά μονάδα αποθηκευμένης ενέργειας, και μία δεδομένη ποσότητα υδρογόνου θα έχει 22 φορές λιγότερο εκρηκτική ενέργεια από τον ίδιο όγκο γεμάτο με ατμούς βενζίνης.

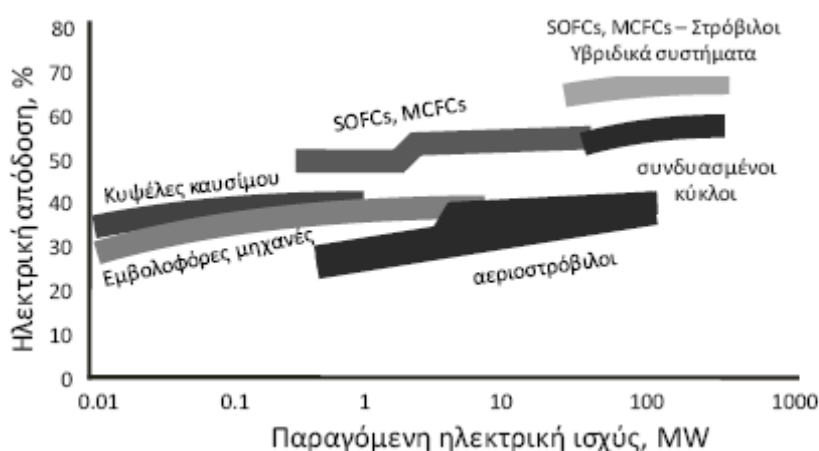
Η φλόγα του υδρογόνου είναι σχεδόν αόρατη, το οποίο μπορεί να είναι επικίνδυνο επειδή οι άνθρωποι στην περιοχή που γειτνιάζει με μια φλόγα υδρογόνου μπορεί να μην γνωρίζουν καν ότι υπάρχει φωτιά. Αυτό μπορεί να διορθωθεί με την προσθήκη

χημικών ουσιών που θα παρέχουν την απαραίτητη φωτεινότητα. Οι καπνοί και η αιθάλη από μια πυρκαγιά βενζίνης αποτελούν κίνδυνο για οποιονδήποτε εισπνεύσει τον καπνό, ενώ οι πυρκαγιές υδρογόνου παράγουν μόνο υδρατμούς (εφόσον δεν αρχίσουν να καίγονται δευτερογενή υλικά).

Το υγρό υδρογόνο παρουσιάζει μια άλλη σειρά ζητημάτων ασφάλειας, όπως ο κίνδυνος εγκαυμάτων λόγω του κρύου, καθώς και την αυξημένη διάρκεια διαρροής ενός κρυογενικού καυσίμου. Σαν συμπέρασμα το υδρογόνο παρουσιάζει ανάλογη επικινδυνότητα με το φυσικό αέριο ή την βενζίνη. Εάν η οικονομία του υδρογόνου πρόκειται να γίνει πραγματικότητα η αντίληψη του κοινού ότι το υδρογόνο είναι ανασφαλές πρέπει να αλλάξει.

### 3.6 Κυψέλες Καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου θεωρούνται ως η βέλτιστη τεχνολογία μετατροπής ενέργειας για την μεγιστοποίηση της απόδοσης σε παραγόμενη ισχύ, με χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο (Boudghene Stambouli et al., 2002). Οι σημερινές κυψέλες καυσίμου επιτυγχάνουν αποδόσεις της τάξης των 40-55% ως προς την κατώτερη θερμογόνο δύναμη (LHV) ανεξάρτητα από το μέγεθός τους, ενώ οι υβριδικοί κύκλοι αεριοστρόβιλων – κυψελών καυσίμου είναι δυνατό να υπερβούν το 70% με βάση την LHV (Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10: Συγκριτική απόδοση (%LHV) των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος (Πηγή TEE)

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές διατάξεις που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια των καυσίμων άμεσα σε ηλεκτρική, παρακάμπτοντας τους θερμοδυναμικούς περιορισμούς που διέπουν τις συμβατικές θερμικές μηχανές. Αποτελούνται από τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος βρίσκεται σε άμεση επαφή με δύο πορώδη ηλεκτρόδια. Όλοι οι τύποι κυψελών καυσίμου συνδυάζουν το υδρογόνο και το οξυγόνο για να παράγουν συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, νερό και θερμότητα. Ανάλογα με τον τύπο του ηλεκτρολύτη οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να ταξινομηθούν σε:

- Κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) (ή κυψέλες καυσίμου πολυμερικού ηλεκτρολύτη PEFCs), οι οποίες αποτελούνται από μία πολυμερική μεμβράνη αγωγό ιόντων  $H^+$ , ως ηλεκτρολύτη. Μέσω αυτής της μεμβράνης τα πρωτόνια που παρήχθησαν στην άνοδο μεταφέρονται στην κάθοδο, η οποία είναι εκτεθειμένη σε ατμοσφαιρικό αέρα. Στην κάθοδο τα πρωτόνια ηλεκτρο-οξειδώνονται προς σχηματισμό νερού σε χαμηλές θερμοκρασίες.
- Κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη (SOFC), που χρησιμοποιούν κεραμικές μεμβράνες αγωγούς ιόντων οξυγόνου ως ηλεκτρολύτη. Το υδρογόνο ηλεκτρο-οξειδώνεται στην άνοδο από τα ανιόντα οξυγόνου,  $O_2^-$ , που προέρχονται από την αναγωγή που λαμβάνει χώρα στην πλευρά της καθόδου, του οξυγόνου της ατμόσφαιρας σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC), με χρήση τηγμένου ανθρακικού άλατος (σε μήτρες  $LiAlO_2$ ) ως ηλεκτρολύτη, ο οποίος άγει ανιόντα  $CO_3^{2-}$  που παράγονται στην κάθοδο, η οποία είναι εκτεθειμένη σε μίγματα  $O_2/CO_2$ . Τα συγκεκριμένα ανιόντα ηλεκτρο-οξειδώνουν το  $H_2$  στην άνοδο σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC), με συμπυκνωμένο διάλυμα  $KOH$  (σε μήτρες ασβέστου) ως ηλεκτρολύτη, το οποίο άγει ανιόντα  $OH^-$  που παράγονται στην κάθοδο, η οποία είναι εκτεθειμένη σε μίγμα  $O_2/H_2O$ . Τα ανιόντα  $OH^-$  στην συνέχεια ηλεκτρο-οξειδώνουν το  $H_2$  (καύσιμο) στην άνοδο σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες, και

- Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) με συμπυκνωμένο διάλυμα  $H_3PO_4$  (σε μήτρες καρβιδίου του πυριτίου) ως ηλεκτρολύτη, το οποίο άγει κατιόντα  $H^+$  που παράγονται στην άνοδο. Τα πρωτόνια οδεύουν προς την κάθοδο, η οποία εκτίθεται σε ατμοσφαιρικό αέρα, όπου ηλεκτρο-οξειδώνονται προς παραγωγή νερού σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες.

Στον Πίνακα 3.5 φαίνονται οι αποδόσεις και τα κόστη των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου.

	PEMFC	SOFC	PAFC	AFC
Δυναμικό Λειτουργίας, V	0,59 - 0,73	0,63 - 0,75	0,64 - 0,72	0,64 - 0,82
Πυκνότητα ρεύματος λειτουργίας, A/cm <sup>2</sup>	0,40 - 0,90	0,32 - 0,67	0,16 - 0,31	0,09 - 0,24
Πυκνότητα ισχύος, W/cm <sup>2</sup>	0,27 - 0,56	0,22 - 0,46	0,11 - 0,21	0,06 - 0,18
Απόδοση συστοιχίας, % HHV	36,5 - 50,0	42,0 - 64,5	40,5 - 54,4	42,5 - 49,5
Απόδοση συστήματος, % HHV	23,0 - 31,5	27,0 - 41,5	26,0 - 35,0	27,0 - 32,0
Συνολική απόδοση, % HHV	63,5 - 81,5	67,0 - 71,0	74,0 - 87,0	~87,0
Διάρκεια ζωής, kh	7 - 21	15 - 59	30 - 53	4 - 8
Διάρκεια ζωής, χρόνια	0,7 - 2,4	1,7 - 6,7	3,5 - 6,1	0,5 - 0,9
Απενεργοποίηση, mV/χρόνο	13,1 - 74,5	28,0 - 73,6	14,9 - 39,4	78,8 - 254,0
Απενεργοποίηση, %/χρόνο	2 - 11	4 - 10	2 - 6	11 - 35
Κόστος συστοιχίας, ευρώ/kW <sub>e</sub>	300 - 900	200 - 600		150 - 600
Κόστος συστήματος, ευρώ/ kW <sub>e</sub>	530 - 1130	680 - 1080	2500 - 5000	375 - 825
Λιανική τιμή, ευρώ/ kW (στόχος)	220 - 440	510 - 970	660 - 1100	120 - 230

Πίνακας 3.5: Αποδόσεις και κόστη κυψελών καυσίμου τύπου PEMFC, SOFC, PAFC και AFC μέχρι 5kW (Πηγή: TEE)

Ανεξάρτητα από το συγκεκριμένο τύπο κυψελών καυσίμου, τα αέρια καύσιμα (συνήθως υδρογόνο) και τα οξειδωτικά αέρια μίγματα (συνήθως ατμοσφαιρικός αέρας) τροφοδοτούνται συνεχώς στην άνοδο και στην κάθοδο, αντίστοιχα. Τα αέρια ρεύματα των αντιδρώντων δεν αναμιγνύονται, δεδομένου ότι τα διαχωρίζει ο ηλεκτρολύτης. Η ηλεκτροχημική καύση του υδρογόνου και η ηλεκτροχημική



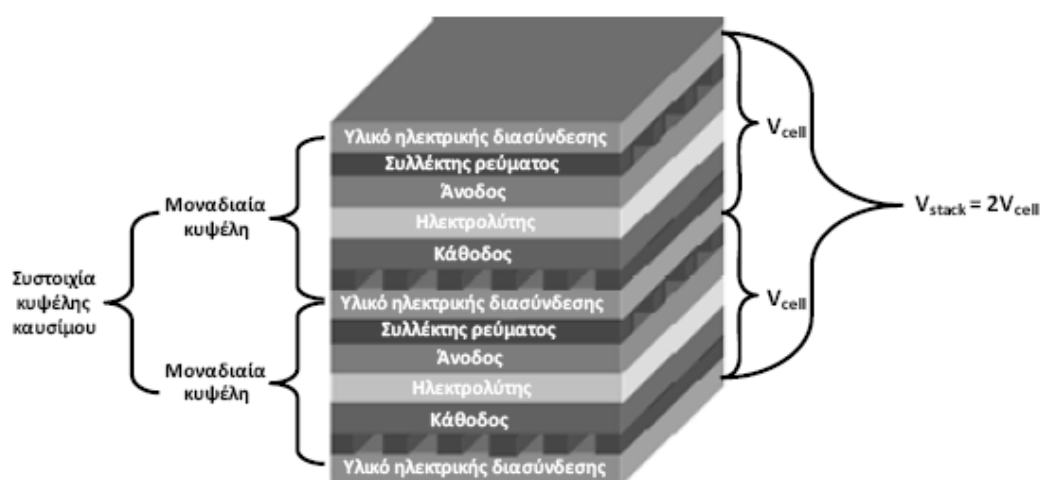
αναγωγή του οξυγόνου, πραγματοποιούνται στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, το πορώδες των οποίων παρέχει την απαραίτητη επιφάνεια για αυτές τις αντιδράσεις προκειμένου να ενισχυθούν καθώς επίσης και για να διευκολύνουν τη μεταφορά μάζας των αντιδρώντων/προϊόντων από/προς τον ηλεκτρολύτη προς/από την αέρια φάση.

Σε συνθήκες κλειστού κυκλώματος, οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις περιλαμβάνουν διάφορα διαδοχικά βήματα, συμπεριλαμβανομένης της προσρόφησης/εκρόφησης, της επιφανειακής διάχυσης των αντιδρώντων ή των προϊόντων και της μεταφοράς φορτίου προς ή από το ηλεκτρόδιο. Η μεταφορά φορτίου περιορίζεται σε ένα στενό (σχεδόν μονοδιάστατο) όριο τριών φάσεων (trb) μεταξύ της αέριας φάσης, του ηλεκτρολύτη και του ηλεκτροδίου-καταλύτη.

Εκτός από τον ρόλο τους ως καταλύτες, τα ηλεκτρόδια συλλέγουν (άνοδος) ή παρέχουν (κάθοδος) ηλεκτρόνια που συμμετέχουν στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, οπότε θα πρέπει να αποτελούνται από υλικά με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η συνεχής παροχή (ή άντληση) ηλεκτρονίων, είναι απαραίτητη για την εξέλιξη των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων, έχοντας ως αποτέλεσμα μια σταθερή ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο προς την κάθοδο. Συγχρόνως, ο ηλεκτρολύτης, με τη μεταφορά των αντιδρώντων υπό μορφή ιοντικών ειδών, ολοκληρώνει το κύκλωμα των κυψελών καυσίμου. Η ηλεκτρο-καύση του υδρογόνου διατηρεί μια διαφορά στο χημικό δυναμικό του ηλεκτρο-ενεργού είδους (το αγωγιμο ιόν) μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, το οποίο αποτελεί την ωθούσα δύναμη για την ιοντική ροή μέσω του ηλεκτρολύτη, η οποία εκφράζεται με το δυναμικό ανοικτού κυκλώματος ή διαφορετικά με την ηλεκτρεγερτική δύναμή του (emf).

Ένας συλλέκτης ρεύματος, ολοκληρώνει τη δομή μιας κυψέλης καυσίμου, ο οποίος έρχεται σε επαφή με τα πορώδη ηλεκτρόδια, διευκολύνοντας τη μεταφορά των ηλεκτρονίων. Στις πραγματικές διατάξεις κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούνται αγωγιμες διασυνδέσεις για να ενώσουν ηλεκτρικά τις μοναδιαίες κυψέλες καυσίμου, προκειμένου να αυξηθεί η αναπτυσσόμενη τάση, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3.11 για την κλασική επίπεδη διάταξη συστοιχίας κυψέλης καυσίμου (το καύσιμο και το

οξειδωτικό διαρρέουν τα σχηματιζόμενα κανάλια του συλλέκτη ρεύματος με διασταυρούμενη ροή). Αυτές οι αγωγίμες διασυνδέσεις χρησιμεύουν για τον διαχωρισμό των ρευμάτων του καυσίμου και του οξειδωτικού, έτσι ώστε να μην επιτρέπουν τελικά την ανάμιξη και την διέλευση των αερίων μιγμάτων εκατέρωθεν του ηλεκτρολύτη. Επιπλέον, διαμορφώνουν την απαιτούμενη διάταξη για την διάχυση των αντιδρώντων αερίων σε όλη την επιφάνεια των ηλεκτροδίων (US DOE, 2002; IEA, 2005; Pehnt et al., 2004; Larminie et al., 2003; Srinivasan, 2006; Acres , 2001).



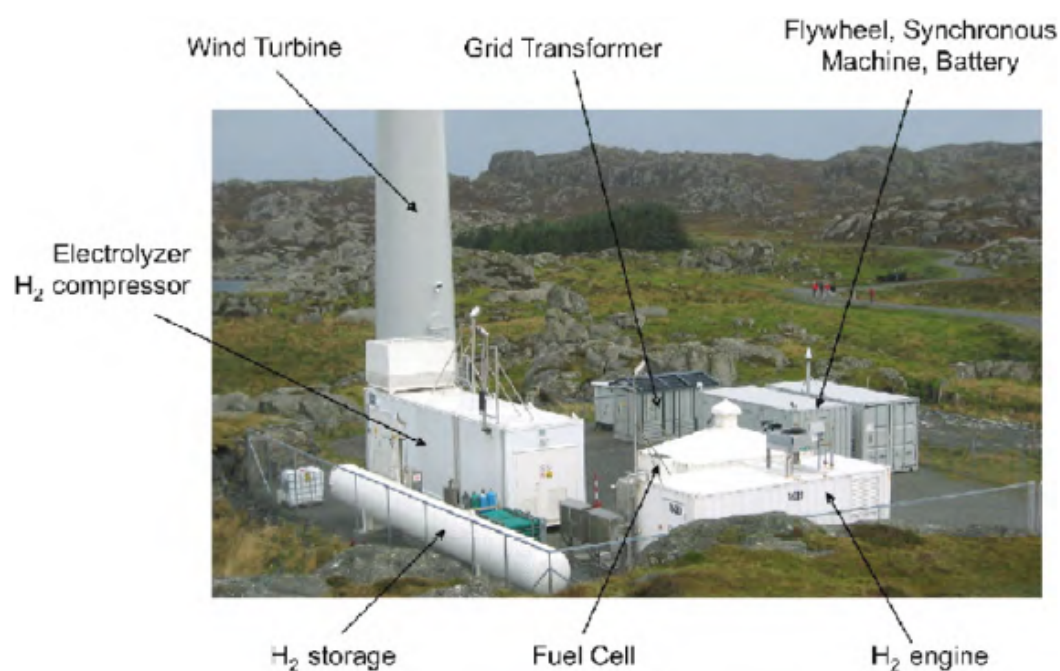
Σχήμα 3.11: Απεικόνιση της δομής μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου επίπεδης γεωμετρίας (Πηγή TEE)

### 3.7 Μελέτες και υφιστάμενα συστήματα ΑΠΕ-παραγωγής υδρογόνου

#### 3.7.1 Το νησί Utsira

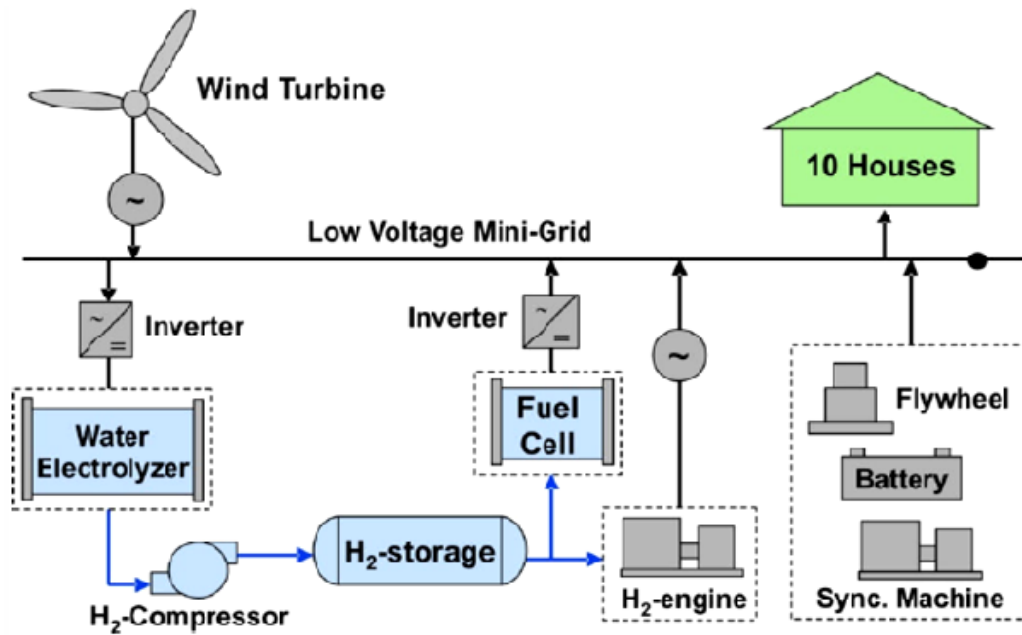
Το μικρό νησί Utsira στη Νορβηγία με 250 μόνο μόνιμους κατοίκους, είναι σήμερα στην πρωτοπορία της τεχνολογίας για την παραγωγή υδρογόνου από αιολική ενέργεια. Έχει εγκαταστήσει το πρώτο σύστημα παραγωγής υδρογόνου για την παροχή ενέργειας στα σπίτια μέσω κυψελών καυσίμου, ενώ επιπλέον έχει ξεκινήσει 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 Enercon E – 40 των 600 KW, μια αλκαλική μονάδα ηλεκτρόλυσης της Norsk Hydro ισχύος 48 KW που παράγει 10 Nm<sup>3</sup>/h υδρογόνο, ένα συμπιεστή 6 KW, μια δεξαμενή 12 m<sup>3</sup> για αποθήκευση του υδρογόνου στα 200 bar (2400 Nm<sup>3</sup>), 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 (Σχήματα 3.12 και 3.13).



*Σχήμα 3.12: Εγκατάσταση υβριδικού συστήματος Α/Γ και εκμετάλλευσης τεχνολογιών H<sub>2</sub> 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.

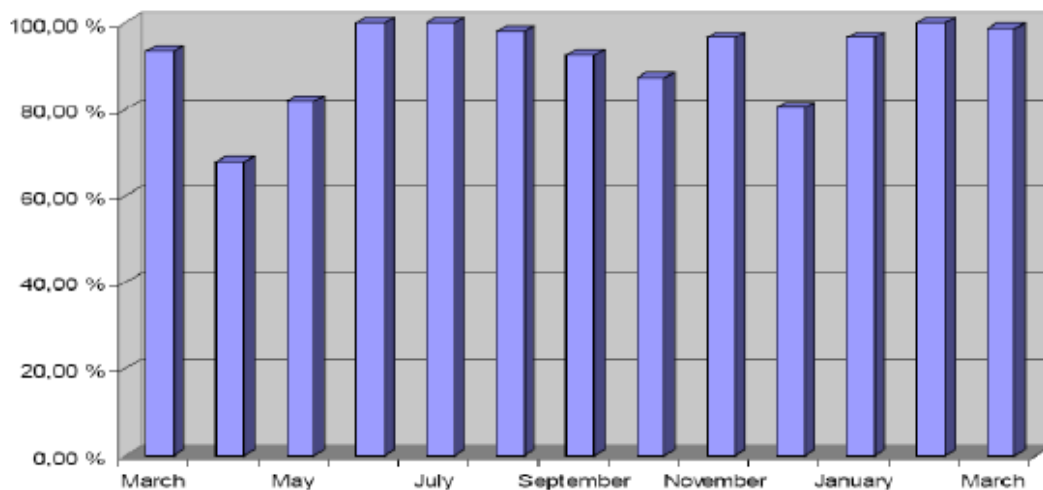


Σχήμα 3.13: Διάγραμμα εγκατάστασης υβριδικού συστήματος στο νησί Utsira

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.

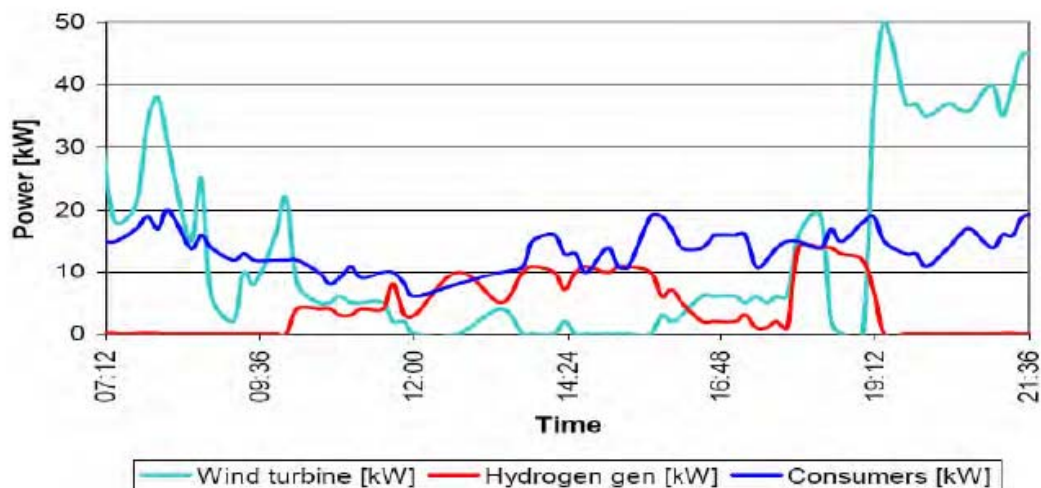
Τα πιο σημαντικά επιτεύγματα κατά το πρώτο έτος της λειτουργίας είναι:

- Πάνω από οκτώ μήνες σε αυτόνομη λειτουργία
- Διαθεσιμότητα κοντά στο 100% (Σχήμα 3.14)
- Πολύ καλή λειτουργικότητα
- Πολύ καλή ποιότητα ισχύος, ευχαριστημένοι οι κάτοικοι της κοινότητας
- Κανένα ατύχημα
- Συνεισφορά στις τοπικές δραστηριότητες και στον τουρισμό



Σχήμα 3.14: Διαθεσιμότητα υβριδικού συστήματος Utsira – Μάρτιος 2005 έως 2006

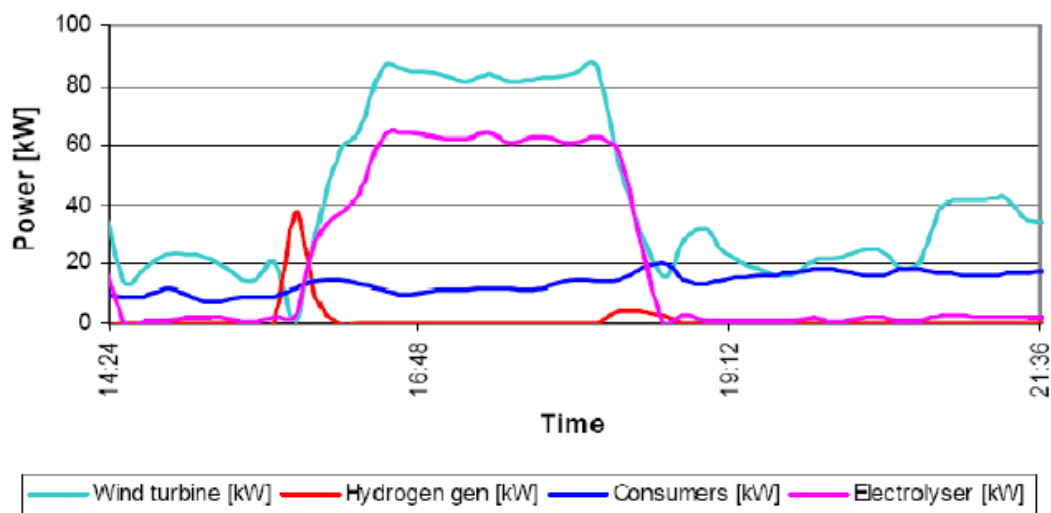
Η απόκλιση της διαθεσιμότητας από το 100% οφείλεται σε σφάλματα του συστήματος και σε αυτές τις περιπτώσεις οι καταναλωτές συνδέονται στο ηπειρωτικό δίκτυο. Παραδείγματα της λειτουργίας του υβριδικού συστήματος δίνονται σχηματικά παρακάτω.



Σχήμα 3.15: Παράδειγμα λειτουργίας υβριδικού συστήματος Utsira

Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 3.15 φαίνεται 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 3.16 φαίνεται 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 3.16: Παράδειγμα λειτουργίας υβριδικού συστήματος Utsira

### 3.7.2 Οι νήσοι Shetland

Το «PURE Project» αποτελεί ένα αυτόνομο, μικρού μεγέθους, υβριδικό σύστημα εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας – υδρογόνου (Σχήμα 3.17) 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 Ε.Ε.



Σχήμα 3.17: PURE project – Unst, Shetland

Το πρόγραμμα στοχεύει να επιδείξει πώς η αιολική ενέργεια και η τεχνολογία υδρογόνου μπορούν να συνδυαστούν για να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες για μια απομακρυσμένη αγροτική/βιομηχανική περιοχή. Το πρόγραμμα PURE υλοποιήθηκε για να εξετάσει και να αναδείξει τις ασφαλείς και αποτελεσματικές μακροπρόθεσμες χρήσεις του υδρογόνου. 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 στον Πίνακα 3.6.

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

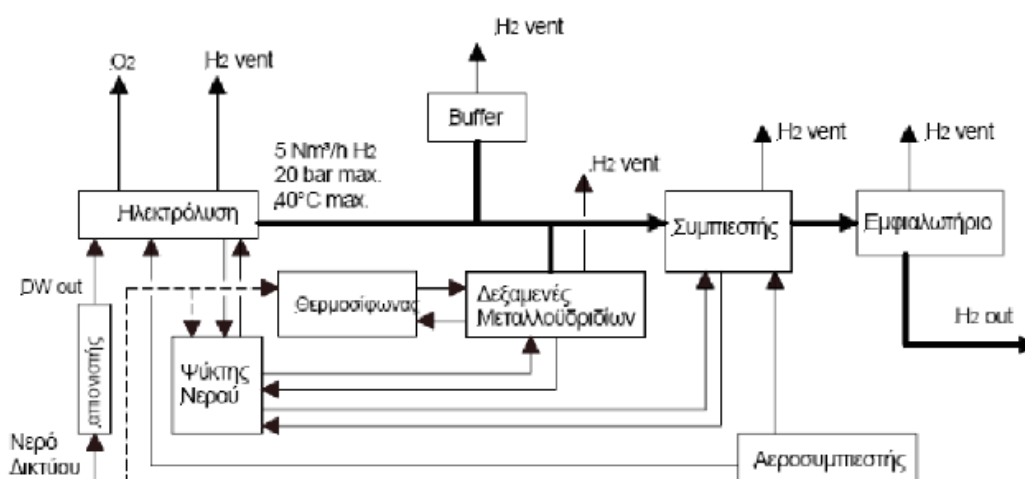
*Πίνακας 3.6: Τεχνικά δεδομένα PURE project*

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.

### **3.7.3 Το Λαύριο**

Το ΚΑΠΕ σε συνεργασία με Ευρωπαϊκούς φορείς υλοποίησε μία πιλοτική εγκατάσταση για παραγωγή, αποθήκευση και εμφιάλωση υδρογόνου από αιολική ενέργεια. Η εγκατάσταση (Σχήματα 3.18 και 3.19) 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 Epercon E – 40 των 500 KW. Η ηλεκτρόλυση παράγει 5 Nm<sup>3</sup>/h υδρογόνου στα 19 bar, που περνάει από επιπλέον καθαρισμό και είτε αποθηκεύεται σε δεξαμενές μεταλλοϋδριδίων ικανότητας 40 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>, 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 Nm<sup>3</sup>H<sub>2</sub>/h) 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 Nm<sup>3</sup>/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/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>, που αντιστοιχεί σε μια απόδοση 47% (ως προς την LHV) του συνολικού συστήματος, συμπεριλαμβανομένης της κατανάλωσης κρύου νερού για την ψύξη των μηχανημάτων.



Σχήμα 3.18: 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 3.19: Γενική άποψη της μονάδας αιολικής ενέργειας – H<sub>2</sub> στο αιολικό πάρκο του ΚΑΠΕ*

### **3.7.4 Η Μήλος**

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 έγκαιρα πρόταση για σημαντικής κλίμακας εθνικό έργο, στο οποίο 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 ΑΠΕ, 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 υπονήφιο Ελληνικό Νησί H<sub>2</sub>, 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. 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 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>) 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 H<sub>2</sub> 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 βιοκαύσιμα.

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

- νέες εγκαταστάσεις ΑΠΕ 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 Nm<sup>3</sup>
- υποδομές για την αποθήκευση (20.000 έως 40.000 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>) και διανομή υδρογόνου και βιοκαυσίμων
- 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 E&A, 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 ΑΠΕ 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 ΑΠΕ. Αντίστοιχα μπορεί να διερευνηθεί η δυνατότητα ηλεκτρόλυσης θαλασσινού νερού (τεχνολογία ηλεκτρόλυσης χλωριούχου αλκαλίου).

## **Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>: Ανάλυση και Μοντελοποίηση λειτουργίας του προτεινόμενου ΥΒΣ**

### **4.1 Σύνθεση και λειτουργία του προτεινόμενου ΥΒΣ**

Στην εργασία αυτή μελετάται η εγκατάσταση ενός Υβριδικού Υδροηλεκτρικού – Αιολικού σταθμού παραγωγής, με δύο παράλληλα Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας: Αντλιοσταμείωση και Παραγωγή Υδρογόνου με Ηλεκτρόλυση, σε ένα αυτόνομο ενεργειακό σύστημα. Ένας τέτοιος σταθμός συντίθεται από ένα πλήθος ανεμογεννητριών, υδροστροβίλων και γεννητριών, αντλιών και κινητήρων, συστοιχιών κελιών ηλεκτρόλυσης, καθώς και δύο ταμιευτήρες σε ικανή υψομετρική διαφορά μεταξύ τους και δύο αγωγούς διακίνησης των νερών (Σχήμα 4.1).

Η φιλοσοφία της λειτουργίας του ΥΒΣ συνοψίζεται στα παρακάτω:

- Η αιολική παραγωγή του σταθμού μπορεί να διοχετευτεί στο αντλιοστάσιο, ώστε να εξυπηρετηθεί η αντλιοσταμείωση, δηλαδή η αποθήκευση της αιολικής ενέργειας υπό μορφή υδροδυναμικής ενέργειας, στον άνω ταμιευτήρα του συστήματος. Έτσι, αξιοποιείται σημαντικό μέρος της στοχαστικής παραγωγής των αιολικών, το οποίο ενδεχομένως θα απορριπτόταν, λόγω των επιβεβλημένων περιορισμών. Η αποθήκευση αυτή της αιολικής ενέργειας, δίνει τη δυνατότητα για μεγαλύτερη διαστασιολόγηση του αιολικού πάρκου και συνεπώς μεγαλύτερη διείσδυση της αιολικής ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα του συστήματος.
- Όταν δημιουργηθεί η ανάγκη από το δίκτυο, το νερό διοχετεύεται στους υδροστροβίλους, η δυναμική του ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική και τέλος διοχετεύεται στον κάτω ταμιευτήρα του σταθμού. Έτσι, επιτυγχάνεται η παροχή ελεγχόμενης και συνεπώς εγγυημένης ενέργειας από τον ΥΒΣ. Να σημειωθεί ότι λόγω της χρήσης διπλού αγωγού για τη διακίνηση των νερών, επιτρέπεται η ταυτόχρονη παραγωγή και άντληση. Με τον τρόπο αυτό αξιοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό η αιολική παραγωγή του σταθμού, σε σύγκριση με τη διαμόρφωσή του με μόνο αγωγό.

- Για την αιολική παραγωγή του ΥΒΣ, υπάρχει ακόμη η δυνατότητα της απευθείας διοχέτευσής της στο δίκτυο, για την κάλυψη του φορτίου ζήτησης, σε συνδυασμό με τους υδροστροβίλους. Πρόκειται λοιπόν, για ακόμη μια ποσότητα αιολικής ενέργειας που αξιοποιείται, συμβάλλοντας στο στόχο για μείωση της συμβατικής παραγωγής ενέργειας και μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα.
- Η αιολική παραγωγή του σταθμού μπορεί τέλος να διοχετευτεί στη διάταξη ηλεκτρόλυσης για να εξυπηρετηθεί η παραγωγή υδρογόνου, το οποίο θεωρείται ότι πωλείται από τον ΥΒΣ για να χρησιμοποιηθεί στον τομέα των μεταφορών. Έτσι, μειώνεται περαιτέρω η απορριπτόμενη αιολική παραγωγή του ΥΒΣ και επιπλέον το παραγόμενο υδρογόνο αποτελεί ένα εναλλακτικό καύσιμο, ικανό να συνεισφέρει στην απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, με όλα τα οικονομικά οφέλη που συνεπάγονται, συμβάλλοντας στην περιβαλλοντική αναβάθμιση του τύπου εγκατάστασης του σταθμού.
- Τέλος, επιτρέπεται η λειτουργία του αντλιοστασίου, με χρήση ενέργειας από το δίκτυο, κατά τη διάρκεια προσυμφωνημένων ωρών χαμηλής ζήτησης φορτίου (νυχτερινές ώρες), ώστε να πληρώνεται ο άνω ταμιευτήρας, επικουρικά με τη χρήση αιολικής ενέργειας. Η άντληση ενέργειας από το δίκτυο συμβαίνει μόνο όταν προβλέπεται αυξημένη ζήτηση φορτίου την επόμενη ημέρα, στην οποία ο ΥΒΣ δεν μπορεί να ανταποκριθεί με τα δικά του μέσα (ήδη αποθηκευμένη ενέργεια στον άνω ταμιευτήρα, προβλεπόμενη αιολική παραγωγή). Έτσι, εξομαλύνεται η καμπύλη ζήτησης φορτίου, καθώς αποκόπτονται οι νυχτερινές κοιλάδες της (με τη νυχτερινή άντληση) όπως και οι ημερήσιες αιχμές της (με την απόδοση της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε για άντληση πίσω στο δίκτυο από τους υδροστροβίλους κατά τις ώρες υψηλής ζήτησης)

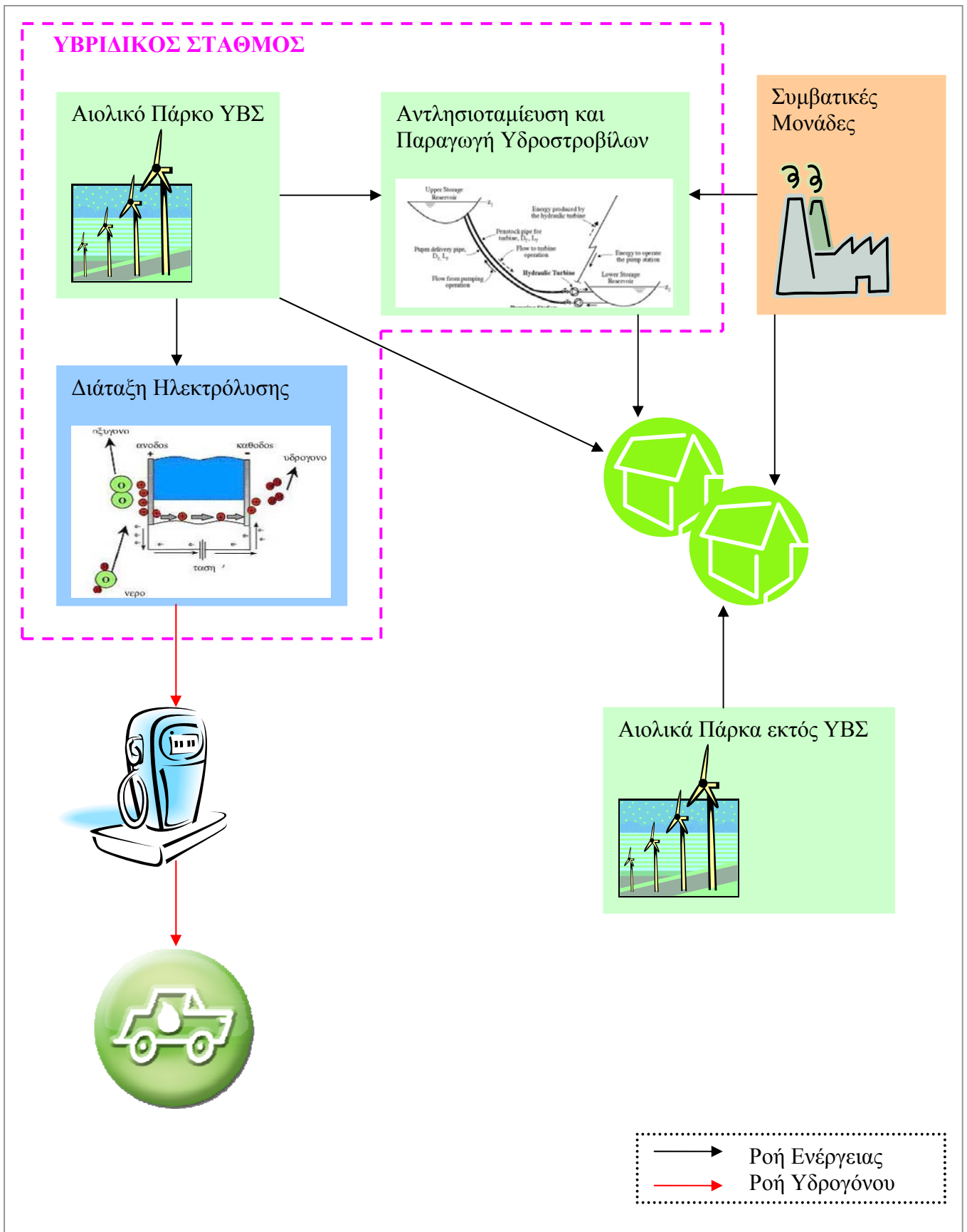
Ο εν λόγω σταθμός συνδυάζει λοιπόν, την αιολική ενέργεια με την τεχνολογία της αντλησιοταμίευσης και εκείνη της ηλεκτρόλυσης του νερού, όπως αυτές περιγράφηκαν στο 2<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο αντίστοιχα.

Πρωτεύον αποθηκευτικό σύστημα του σταθμού, δηλαδή με προτεραιότητα στην παραλαβή αιολικής ενέργειας, είναι εκείνο της αντλησιοταμίευσης. Το γεγονός αυτό

οφείλεται στο ότι η κυκλική διαδικασία άντλησης/παραγωγής παρέχει τη δυνατότητα διαχείρισης τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας, με πολύ γρήγορες αποκρίσεις, τόσο των αντλιών, όσο και των υδροστροβίλων και με ένα συνολικό βαθμό απόδοσης της τάξεως του 70%. Άλλωστε, η αντλησιοταμίευση είναι μια τεχνολογικά ώριμη μέθοδος ενεργειακής αποθήκευσης, με ναι μεν υψηλό κόστος εγκατάστασης, αλλά χαμηλό λειτουργικό κόστος και μεγάλη διάρκεια ζωής.

Η αποθήκευση της αιολικής ενέργειας υπό μορφή υδρογόνου αποτελεί το δευτερεύον αποθηκευτικό σύστημα του ΥΒΣ. Αυτό αποδίδεται στο ότι η παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση είναι μια ακριβή τεχνολογία με βαθμό απόδοσης της τάξεως του 60%. Επιπλέον, η καύση του υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου χαρακτηρίζεται επίσης από υψηλά κόστη, χαμηλό βαθμό απόδοσης και περιορισμένη διάρκεια ζωής (ώρες λειτουργίας). Επιπρόσθετα, στην Ελλάδα δεν υπάρχουν έργα υδρογόνου με στόχο την κάλυψη ενεργειακών αναγκών, ούτε προβλέπεται η κατασκευή τους από την υπάρχουσα νομοθεσία. Ωστόσο, το υδρογόνο επιλέχθηκε να μελετηθεί ως μέσο αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας, με την προοπτική της μείωσης του κόστους και της αύξησης της απόδοσης των αντίστοιχων τεχνολογιών τα προσεχή χρόνια. Άλλωστε, υπάρχει ένα παγκόσμιο, συνεχώς αυξανόμενο, ενδιαφέρον γύρω από το υδρογόνο, ως φορέα ενέργειας και καύσιμο του μέλλοντος. Μάλιστα, όσον αφορά τα ελληνικά δεδομένα, η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) και το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) στηρίζουν το έργο «Ελληνικό Νησί Υδρογόνου». Επίσης, η Ελληνική Τεχνολογική Πλατφόρμα Υδρογόνου\* και Κυψελών Καυσίμου προτείνει χαρακτηριστικά «...στα παραδείγματα Συστημάτων Υβριδικών Σταθμών, όπου αναφέρονται αποκλειστικά Υδραυλικοί Ταμιευτήρες και Αντλίες – Υδροστροβίλοι, είναι σκόπιμο να αναφερθούν και συστήματα Υδρογόνου & Κυψελών Καυσίμου ως δυνατότητες.».

*\* Η Ελληνική Τεχνολογική Πλατφόρμα Υδρογόνου και Κυψελών Καυσίμου, η οποία δημιουργήθηκε μετά από πρωτοβουλία του Υπουργού Ανάπτυξης έχει στόχο να συνεισφέρει στην προώθηση της οικονομίας Υδρογόνου για βιώσιμη ανάπτυξη της χώρας με τη χρήση υπάρχουσών πηγών ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Στην Ελληνική Πλατφόρμα Υδρογόνου συμμετέχουν όλοι οι φορείς (ερευνητικά κέντρα, πανεπιστήμια, βιομηχανία, ανεξάρτητες αρχές, μη κερδοσκοπικοί οργανισμοί) που ασχολούνται με το υδρογόνο και τις κυψέλες καυσίμου στη χώρα.*



Σχήμα 4.1 Απεικόνιση του Προτεινόμενου ΥΒΣ, ενταγμένου σε ένα σύστημα με συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας και αιολικά πάρκα



## 4.2 Η περίπτωση εφαρμογής

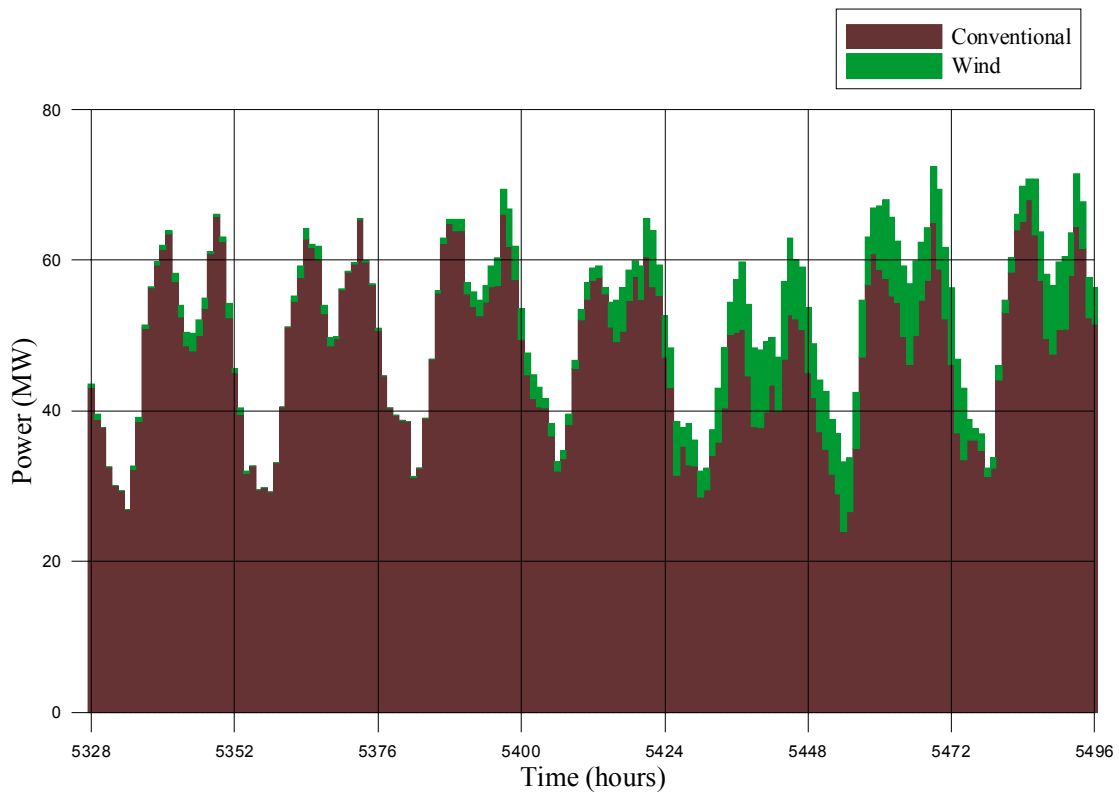
Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η εγκατάσταση ενός ΥΒΣ, όπως αυτός του υποκεφαλαίου 4.1, στο νησί της Λέσβου.

Η Λέσβος είναι Ελληνικό νησί στο βορειοανατολικό Αιγαίο (Σχήμα 4.2). Είναι το τρίτο σε μέγεθος ελληνικό νησί μετά την Κρήτη και την Εύβοια, με έκταση 1.636 τ.χλμ. και ακτογραμμή 370 χλμ. Το νησί έχει πληθυσμό 90.634 κατοίκους. Διοικητικά ανήκει στην Περιφέρεια Βορείου Αιγαίου και στο Νομό Λέσβου. Πρωτεύουσα του νησιού, καθώς και του ομώνυμου Νομού Λέσβου, είναι η Μυτιλήνη, κτισμένη στο νοτιοανατολικό άκρο του νησιού.



Σχήμα: 4.2: Το νησί της Λέσβου (Πηγή: [www.ct.aegean.gr](http://www.ct.aegean.gr))

Η Λέσβος δεν είναι ηλεκτρικά διασυνδεδεμένη με την ηπειρωτική Ελλάδα, ούτε με κάποιο άλλο νησί. Γι' αυτό χαρακτηρίζεται ως Μη Διασυνδεδεμένο Νησί ή Αυτόνομο Σύστημα. Οι ηλεκτρικές ανάγκες του νησιού καλύπτονται από τις εγκατεστημένες συμβατικές μονάδες και αιολικά πάρκα, όπως ενδεικτικά φαίνεται για μια τυπική εβδομάδα στο Σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3: Κάλυψη της ζήτησης μια τυπική εβδομάδα

Ο προτεινόμενος ΥΒΣ αποτελείται από:

- ανεμογεννήτριες
- τρεις πανομοιότυπους υδροστροβίλους τύπου Pelton
- έντεκα πανομοιότυπες αντλίες μεταβλητών στροφών
- πέντε συστοιχίες κελιών ηλεκτρόλυσης νερού αλκαλικού τύπου για παραγωγή υδρογόνου.
- δύο ταμιευτήρες (θεωρώντας ότι ο ένας προϋπάρχει και δεν χρειάζεται να κατασκευαστεί) και
- δύο αγωγούς διακίνησης των νερών.

Αναλυτικότερα, η συνολική ονομαστική ισχύς των υδροστροβίλων είναι 15 MW (5 MW έκαστος), ενώ η ισχύς του αντλιοστασίου και της διάταξης ηλεκτρόλυσης θα αποφασιστούν με κριτήριο την επίτευξη ενός οικονομικού ή/και ενεργειακού στόχου του συστήματος. Συγκεκριμένα, το επιτρεπόμενο εύρος τιμών για την ονομαστική ισχύ της μιας αντλίας είναι από 500 έως 3.000 KW, δηλαδή η συνολική ονομαστική ισχύς του αντλιοστασίου επιτρέπεται να κυμαίνεται στο εύρος τιμών 5.500 – 33.000

KW. Όσον αφορά τη διάταξη ηλεκτρόλυσης, το επιτρεπόμενο εύρος τιμών για την ονομαστική ισχύ της μιας συστοιχίας κελιών είναι από 0 έως 6.000 KW, δηλαδή η συνολική ονομαστική ισχύς της διάταξης ηλεκτρόλυσης επιτρέπεται να κυμαίνεται στο εύρος τιμών 0 – 30.000 KW. Αναφορικά με τις ανεμογεννήτριες, είναι έκαστη ονομαστικής ισχύος 800 KW, αλλά το πλήθος τους θα αποτελέσει επίσης μεταβλητή παράμετρο του συστήματος, με επιτρεπόμενο εύρος τιμών 7 – 38, με στόχο την οικονομική ή/και ενεργειακή βελτιστοποίησή του. Τέλος, στη βελτιστοποίηση του συστήματος θα αποφασιστεί και η ωφέλιμη χωρητικότητα του άνω ταμιευτήρα, στην οποία επιτρέπονται τιμές από 100.000 – 900.000m<sup>3</sup>.

Η 24ωρη λειτουργία του σταθμού, συνοπτικά, περιλαμβάνει τα εξής:

- Ο Διαχειριστής του Μη Διασυνδεδεμένου Νησιού απαιτεί από τον Διαχειριστή του ΥΒΣ ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας για το επόμενο 24ώρο, εφόσον κρίνει ότι το χρειάζεται, ώστε σε συνδυασμό με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής να μπορεί να καλυφθεί αξιόπιστα το προβλεπόμενο φορτίο ζήτησης.
- Ο Διαχειριστής του ΥΒΣ λαμβάνοντας υπόψη την ποσότητα των νερών στον άνω ταμιευτήρα του στο τέλος της ημέρας, καθώς και την προβλεπόμενη αιολική παραγωγή του για το πρώτο 12ωρο του επόμενου 24ώρου, κάνει προσφορά ενέργειας, τουλάχιστον ίση με την εγγυημένη ενέργεια. Εφόσον προβλέπει ότι τα ήδη υπάρχοντα νερά στον άνω ταμιευτήρα του καθώς και η προβλεπόμενη αιολική συνεισφορά δεν επαρκούν για την κάλυψη της εγγυημένης ενέργειας του επόμενου 24ώρου, τότε ο Διαχειριστής του ΥΒΣ θα κάνει δήλωση φορτίου για απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο ώστε να αντλήσει την απαιτούμενη ποσότητα νερού. Στην περίπτωση αυτή, προκειμένου να αποφευχθεί η ανεξέλεγκτη απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο, δεν επιτρέπεται στον Διαχειριστή του ΥΒΣ να κάνει προσφορά ενέργειας μεγαλύτερη από την εγγυημένη ενέργεια.
- Η προσφορά ενέργειας και η δήλωση φορτίου μεταφράζονται σε αντίστοιχα προγράμματα παραγωγής και άντλησης. Συγκεκριμένα η προσφερόμενη ενέργεια του ΥΒΣ προσαρμόζεται στην ημερήσια καμπύλη φορτίου, έτσι ώστε να αποκόπτονται/εξομαλύνονται οι αιχμές της ζήτησης. Φυσικά, η παραγωγή από τους

υδροστροβίλους υπόκειται σε περιορισμούς ώστε να μείνει ανεπηρέαστη η παραγωγή από τα αιολικά πάρκα εκτός ΥΒΣ και να λειτουργούν εύρυθμα οι μονάδες βάσεως. Αντίστοιχα η άντληση από το δίκτυο για εξασφάλιση της εγγυημένης ενέργειας προσαρμόζεται στην κοιλάδα της καμπύλης φορτίου κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης.

- Για την απορρόφηση της προβλεπόμενης αιολικής παραγωγής του επόμενου 24ώρου του ΥΒΣ εξετάζονται δύο περιπτώσεις

1) Η απορρόφηση της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ προγραμματίζεται να γίνει κατά προτεραιότητα από το αντλιοστάσιο για να εξυπηρετηθεί η αντλιοσταμείωση. Η ποσότητα της αιολικής παραγωγής που λόγω τεχνικών περιορισμών είναι αδύνατο να παραλειφθεί από τις αντλίες δοκιμάζεται να διοχετευτεί απευθείας στο δίκτυο, ώστε σε συνδυασμό με την υδροστροβλική παραγωγή να καλυφθεί η προσφορά ενέργειας. Το ποσό εκείνο της αιολικής ενέργειας που ενδεχομένως εξακολουθεί να περισσεύει διοχετεύεται στα κελιά ηλεκτρόλυσης για παραγωγή υδρογόνου. Το παραγόμενο υδρογόνο αποτελεί προϊόν προς πώληση του ΥΒΣ και προορίζεται για τον τομέα των μεταφορών.

2) Η απορρόφηση της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ προγραμματίζεται να γίνει κατά προτεραιότητα απευθείας από το δίκτυο. Η ποσότητα της αιολικής παραγωγής που λόγω τεχνικών περιορισμών ή κάλυψης της προσφοράς ενέργειας του ΥΒΣ είναι αδύνατο να διοχετευτεί στο δίκτυο, δοκιμάζεται να παραλειφθεί από τις αντλίες, εφόσον αυτό είναι δυνατό (τεχνικό ελάχιστο αντλιοστασίου, βαθμός πλήρωσης άνω ταμιευτήρα). Το ποσό εκείνο της αιολικής ενέργειας που ενδεχομένως εξακολουθεί να περισσεύει διοχετεύεται στα κελιά ηλεκτρόλυσης για παραγωγή υδρογόνου.

Τα συστήματα που συνθέτουν τον προτεινόμενο ΥΒΣ αντιμετωπίζονται ως κλειστές ενεργειακές μονάδες, λαμβάνοντας υπόψη μόνο τα δεδομένα εισόδου και εξόδου τους. Συνεπώς, η εξέταση του ΥΒΣ επικεντρώνεται στη ροή ενέργειας και τη ροή υδρογόνου.

### 4.3 Περιγραφή του Υπολογιστικού Κώδικα

Ο υπολογιστικός κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη του προτεινόμενου συστήματος είναι ο κώδικας *HYPPOS* (HYbrid Power Systems Operation Simulator) του Εργαστηρίου Υδροδυναμικών Μηχανών του Ε.Μ.Π., γραμμένος σε γλώσσα Fortran. Ο κώδικας αυτός προσομοιώνει τη λειτουργία υβριδικού σταθμού με αιολικά και αντλησιοταμίευση, αλλά αναπτύχθηκε περαιτέρω ώστε να περιλαμβάνει και την προσομοίωση της παραγωγής υδρογόνου από διάταξη ηλεκτρόλυσης νερού, καθώς επίσης και να αναλύει τα σχετικά οικονομικά δεδομένα ώστε να εξάγονται συμπεράσματα για την οικονομική βιωσιμότητα του έργου.

Η προσομοίωση της λειτουργίας του ΥΒΣ χωρίζεται σε δεκάλεπτα διαστήματα ελέγχου, ίσα με τη συχνότητα ανάλυσης ανεμολογικών δεδομένων, και κατά τα οποία ο αλγόριθμος επιλέγει το βέλτιστο τρόπο λειτουργίας των μονάδων του σταθμού. Τα ενεργειακά και οικονομικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την εκάστοτε σύνθεση του σταθμού υπολογίζονται σε ωριαία, ημερήσια και ετήσια βάση.

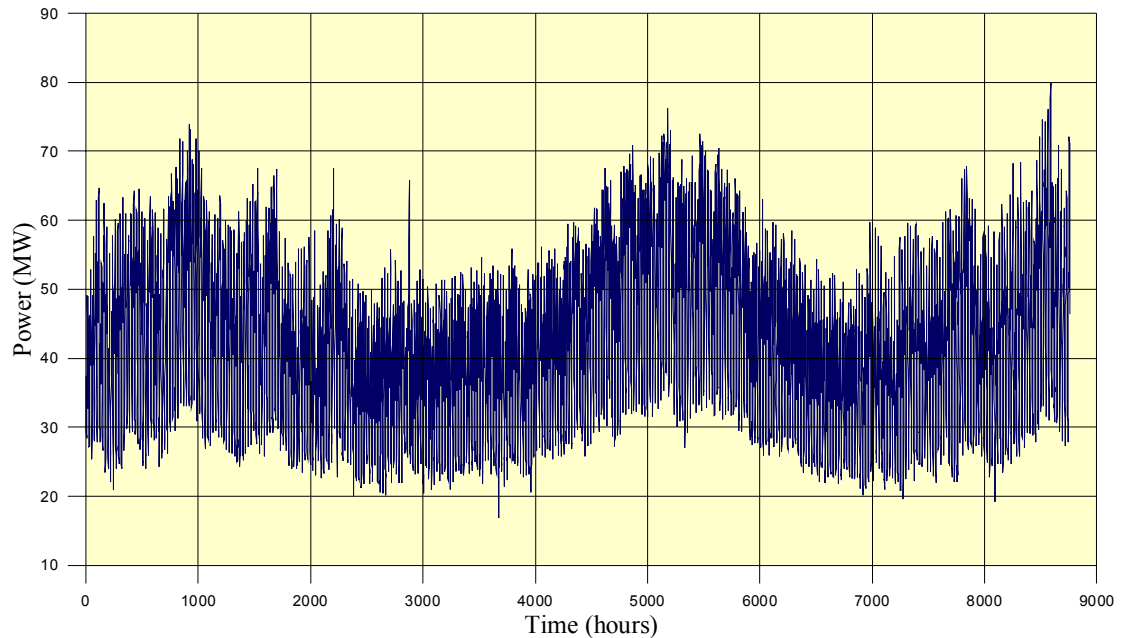
Επιπλέον, προκειμένου να επιτευχθεί η αριθμητική βελτιστοποίηση σχεδιασμού του υπό εξέταση συστήματος, σύμφωνα με κάποιο κριτήριο - στόχο, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό βελτιστοποίησης *EASY* (Evolutionary Algorithm System), εκτενής περιγραφή του οποίου ακολουθεί σε επόμενο υποκεφάλαιο.

Αναλυτικότερα, η διάρθρωση του υπολογιστικού κώδικα φαίνεται στα υποκεφάλαια 4.3.1 – 4.3.6 και το λογικό του διάγραμμα στο 4.3.7.

#### 4.3.1 Εισαγωγή δεδομένων και προκαταρκτικοί υπολογισμοί

❖ Αρχικά εισάγονται τα απαραίτητα δεδομένα του δικτύου του νησιού, όπως αυτό λειτουργεί πριν την ένταξη του ΥΒΣ. Έτσι, οι κύριες πληροφορίες που δίνονται στο σημείο αυτό είναι:

- Η καμπύλη ζήτησης φορτίου,  $P_L$ , του νησιού σε συνάρτηση με τον χρόνο σε ώρες,  $i$ , η οποία αναφέρεται στο έτος 2012 και έχει προκύψει με προεκβολή παλαιότερων ετών (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.4: Ετήσια Καμπύλη ζήτησης φορτίου της Λέσβου

Επίσης εντοπίζεται το μέγιστο ωριαίο φορτίο ζήτησης του έτους αναφοράς (2012),  $P_{TOP}$ :

$$P_{TOP} = 80MW .$$

- Η κάλυψη του φορτίου ζήτησης από τα αιολικά πάρκα,  $P_{Wout,i}$  και τις εγκατεστημένες θερμικές μονάδες,  $P_{C,i}$ , για κάθε ώρα,  $i$ , του έτους. Συγκεκριμένα:

$$P_{Wout,i} = P_L \cdot X/100/1000$$

,όπου  $X$  η επιτρεπόμενη αιολική διείσδυση ως ποσοστό του φορτίου ζήτησης και

$$P_{C,i} = P_L/1000 - P_{Wout,i}$$

Ως ολικό τεχνικό ελάχιστο των μονάδων βάσεως για κάθε ώρα του έτους, θα χρησιμοποιείται η τιμή,  $P_{BOT,i}$ :

$$P_{BOT,i} = 18000KW$$

Τα μεγέθη  $P_L$ ,  $P_{C,i}$  και  $P_{Wout,i}$  αθροίζονται για κάθε ώρα, ώστε να προκύψει το ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού πριν την ένταξη του ΥΒΣ.

❖ Στη συνέχεια προσδιορίζονται οι ώρες 1:00μ.μ.-9:00π.μ. ως οι ώρες χαμηλής ζήτησης κατά τις οποίες επιτρέπεται στο Διαχειριστή του ΥΒΣ να χρησιμοποιεί ενέργεια από το δίκτυο προκειμένου να λειτουργήσουν οι αντλίες και να πληρωθεί ο άνω ταμιευτήρας σε ικανοποιητικό βαθμό, ώστε να είναι σε θέση ο ΥΒΣ να ανταπεξέλθει στις ενεργειακές απαιτήσεις της επόμενης ημέρας.

❖ Επίσης, δίνονται οι τιμολογήσεις των ενεργειών που πωλούνται και αγοράζονται από τον ΥΒΣ. Εξετάζονται δύο τιμολογιακές πολιτικές που η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας έχει προτείνει για τη Λέσβο και την Κρήτη αντιστοίχως.

Τιμολογιακή πολιτική Α (Λέσβος):

Τιμή πώλησης της ενέργειας των υδροστροβίλων, $TRF_H$	0,125 €/KWh
Τιμή πώλησης της ενέργειας των αιολικών, $TRF_W$	0,1125 €/KWh
Τιμή αγοράς ενέργειας από το δίκτυο, $TRF_P$	0,10 €/KWh

Πίνακας 4.1: Τιμολογιακή πολιτική Α

Τιμολογιακή πολιτική Β (Κρήτη):

Τιμή πώλησης της ενέργειας των υδροστροβίλων, $TRF_H$	0,236 €/KWh
Τιμή πώλησης της ενέργειας των αιολικών, $TRF_W$	0,168 €/KWh
Τιμή αγοράς ενέργειας από το δίκτυο, $TRF_P$	0,186 €/KWh

Πίνακας 4.2: Τιμολογιακή πολιτική Β

Η τιμή πώλησης του παραγόμενου υδρογόνου,  $TRF_{H_2}$ , θα αποτελέσει αντικείμενο παραμετρικής μελέτης. Συγκεκριμένα, θα εξεταστούν οι περιπτώσεις πώλησής του από 1 έως 10 ευρώ/kg, με βήμα το 1 ευρώ.

❖ Έπειτα, εισάγονται τα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών που θα συγκροτούν το αιολικό πάρκο του προτεινόμενου ΥΒΣ. Ειδικότερα, θα χρησιμοποιηθούν ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος,  $N_W = 800KW$ , το πλήθος των οποίων,  $N_{WGEN}$ , θα αποτελέσει αντικείμενο βελτιστοποίησης. Επίσης, μετά την επιλογή του πλήθους των ανεμογεννητριών υπολογίζεται, σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση, η προβλεπόμενη παραγόμενη ενέργεια από το αιολικό πάρκο του ΥΒΣ σε δεκάλεπτη βάση,  $P_{W,x}$ , χρησιμοποιώντας διαθέσιμες αδιάστατες τιμές αιολικής παραγωγής για κάθε δεκάλεπτο,  $x$ , του έτους:

$$P_{W,x} = W_G \cdot N_{WGEN} \cdot N_W \cdot n_W$$

,όπου:

$W_G$ , η παραγόμενη ισχύς δεκαλέπτου ανά εγκατεστημένο KW (Για την ακρίβεια η διαθέσιμη χρονοσειρά παραγωγής των ανεμογεννητριών μπορεί να προσαρμοστεί σε μεγαλύτερο μέγεθος ανεμογεννητριών, ώστε η τελική παράμετρος προς βελτιστοποίηση να είναι το γινόμενο ( $N_{WGEN} \cdot N_W$ )),

$N_{WGEN}$ , το πλήθος των ανεμογεννητριών,

$N_W = 800KW$ , η ονομαστική ισχύς των ανεμογεννητριών και

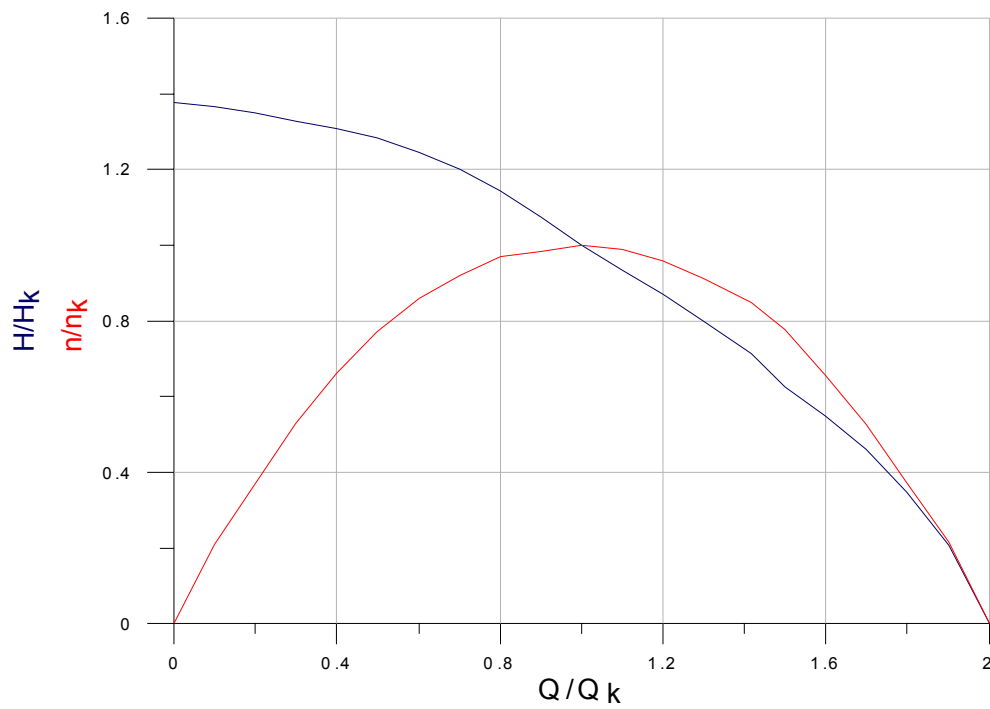
$n_W = 0,9$ , ο βαθμός απόδοσης του αιολικού πάρκου

Έπειτα, με τα κατάλληλα αθροίσματα μέσα από επαναληπτικές διαδικασίες υπολογίζονται η προβλεπόμενη μέση αιολική παραγωγή κάθε ώρας,  $P_{WMEAN}$ , η προβλεπόμενη ημερήσια,  $P_{W,TOT}$  και ετήσια αιολική παραγωγή,  $Y.E_{W,TOT}$ , του ΥΒΣ.

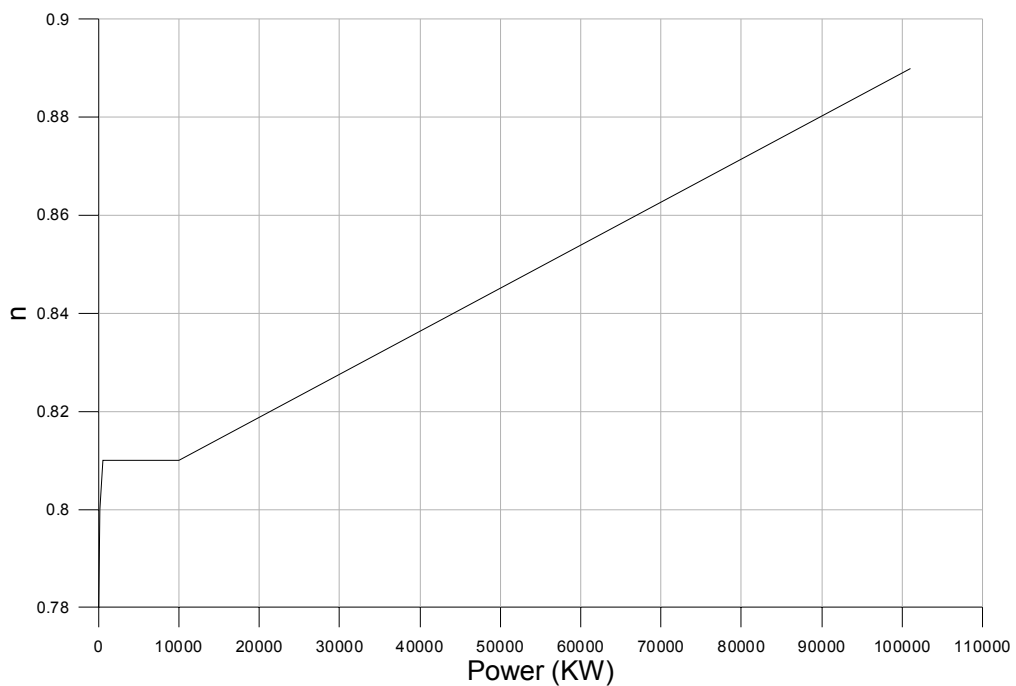
❖ Στο σημείο αυτό με την κλήση μιας υπορουτίνας εισάγονται τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά (αδιάστατες χαρακτηριστικές καμπύλες και βαθμοί απόδοσης) εμπορικά διαθέσιμων αντλιών, υδροστροβίλων, γεννητριών και κινητήρων, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στην εύρεση του σημείου λειτουργίας



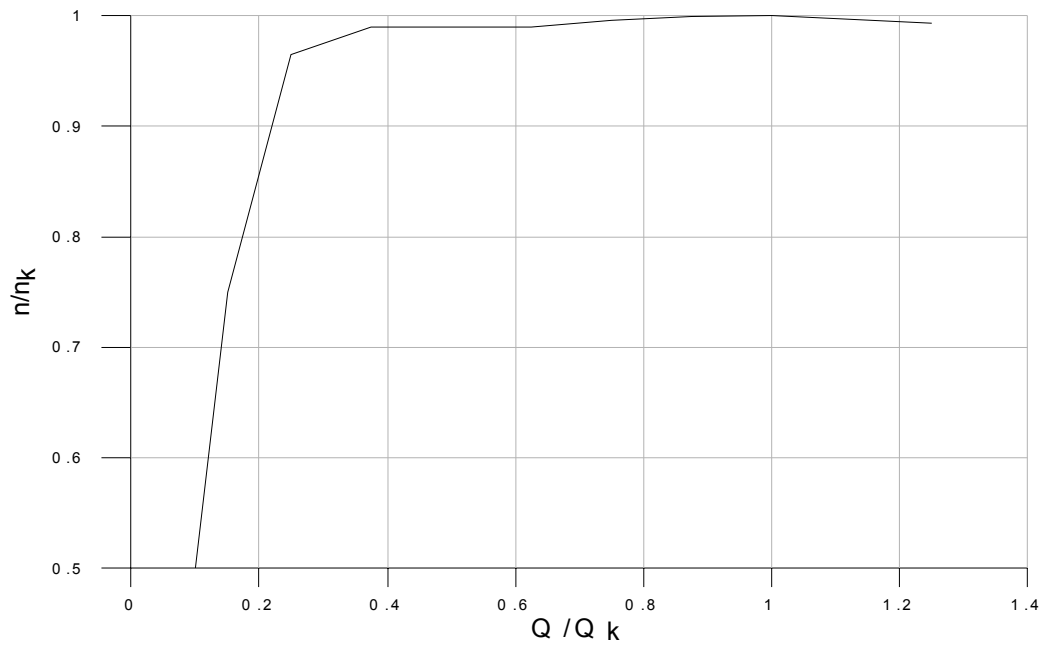
των μηχανών που θα συνθέσουν τον ΥΒΣ. Ακολουθούν τα σχετικά Σχήματα 4.5 – 4.10.



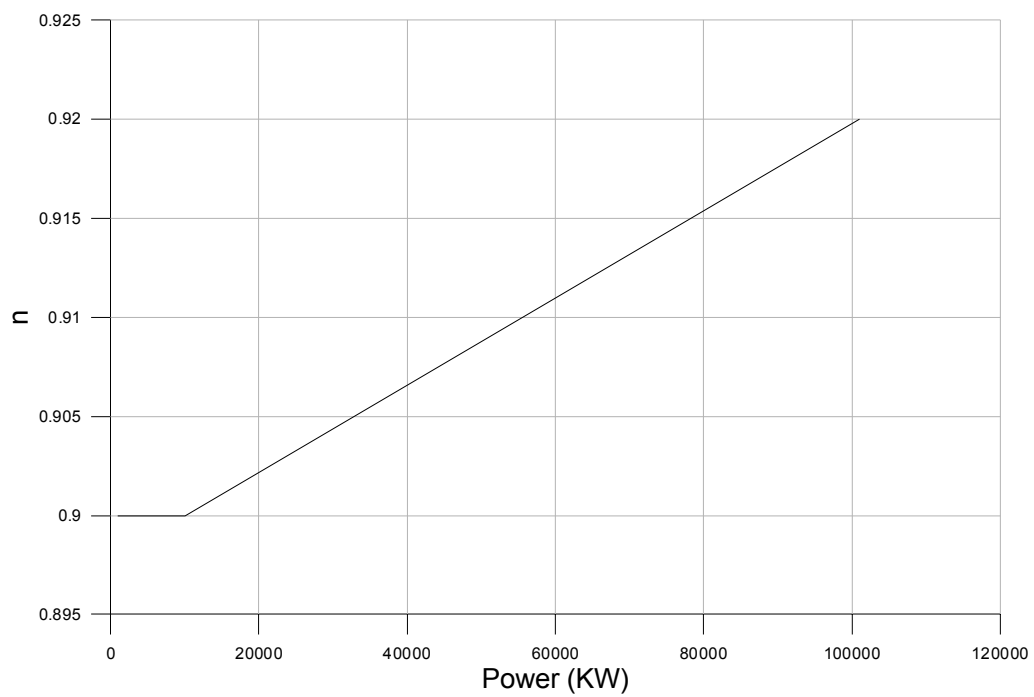
Σχήμα 4.5: Αδιάστατες καμπύλες λειτουργίας αντλιών για ειδικό αριθμό στροφών  $n_q=2300$



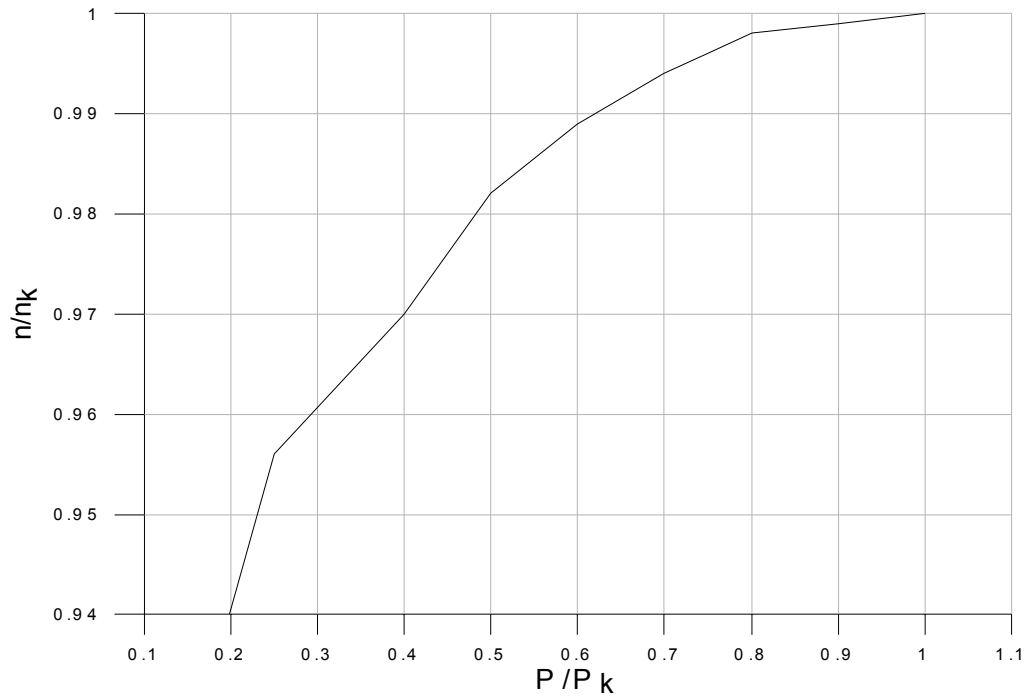
Σχήμα 4.6: Βαθμός απόδοσης αντλιών συναρτήσει της ονομαστικής ισχύος



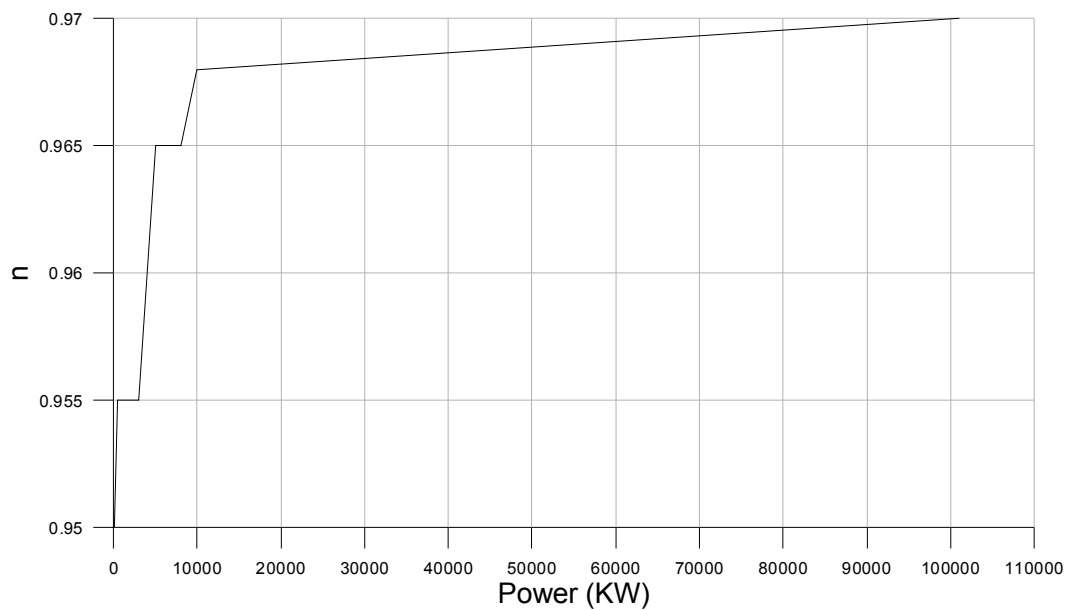
Σχήμα 4.7: Αδιάστατες καμπύλες λειτουργίας υδροστροβίλων τύπου Pelton



Σχήμα 4.8: Βαθμός απόδοσης υδροστροβίλων τύπου Pelton συναρτήσει της ονομαστικής ισχύος



Σχήμα 4.9: Αδιάστατη καμπύλη λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας



Σχήμα 4.10: Βαθμός απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας συναρτήσει της ονομαστικής ισχύος

❖ Στη συνέχεια ορίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά των αντλιών και των κινητήρων που θα τις οδηγούν. Πιο αναλυτικά, το πλήθος των πανομοιότυπων αντλιών μεταβλητών στροφών που θα χρησιμοποιηθούν είναι  $N_{PUMPS} = 11$ , η ονομαστική ισχύς των οποίων,  $N_P$ , θα αποτελέσει αντικείμενο βελτιστοποίησης.

Αφού επιλεγεί η ονομαστική ισχύς λειτουργίας των αντλιών, υπολογίζονται οι βαθμοί απόδοσης των αντλιών,  $n_p$ , και των κινητήρων,  $n_M$ , χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες καμπύλες ισχύος - βαθμού απόδοσης. Επίσης, υπολογίζεται η κανονική παροχή των αντλιών,  $Q_p$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_p = N_p \cdot 10^3 \cdot n_p \cdot n_M / (g \cdot \rho \cdot H)$$

,όπου:

$g = 9,81 m/s^2$ , η επιτάχυνση της βαρύτητας,

$\rho = 1000 kg/m^3$ , η πυκνότητα του νερού και

$H = 420m$ , το ονομαστικό ύψος των αντλιών

Τελικά έχει βρεθεί το κανονικό σημείο λειτουργίας των αντλιών. Τέλος, υπολογίζονται η ελάχιστη και η μέγιστη ισχύς του αντλιοστασίου καθώς και τα όρια της περιοχής ισχύος που δεν μπορεί να απορροφηθεί από τις αντλίες λόγω των τεχνικών τους ελαχίστων.

Επιλέχθηκαν αντλίες μεταβλητών στροφών και συνεπώς μεταβλητής παροχής, διότι έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν τις μεταβολές της διαθέσιμης για άντληση αιολικής παραγωγής σε πραγματικό χρόνο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιπλέον απορρόφηση αιολικής παραγωγής μέχρι την ονομαστική ισχύ των ενταγμένων αντλιών σε περίπτωση υποεκτίμησης της προβλεπόμενης παραγωγής των αιολικών. Στην αντίθετη περίπτωση υπερεκτίμησης της προβλεπόμενης αιολικής παραγωγής, η ισχύς άντλησης μειώνεται έως τα τεχνικά ελάχιστα των ενταγμένων αντλιών, ώστε να περιορίζεται η φόρτιση του συστήματος. Από την άλλη μεριά, οι αντλίες σταθερών στροφών λειτουργούν μόνο στην ονομαστική τους ισχύ, πράγμα που οδηγεί στην βηματική απορρόφηση αιολικής παραγωγής, με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται η μέγιστη εκμετάλλευσή της.

❖ Ακολουθεί ένα παρόμοιο κομμάτι υπολογιστικού κώδικα που ασχολείται με τους υδροστροβίλους και τις γεννήτριες που αυτοί κινούν. Έτσι, το πλήθος των πανομοιότυπων υδροστροβίλων τύπου Pelton που θα χρησιμοποιηθούν είναι  $N_{TURBS} = 3$ , ονομαστικής ισχύος,  $N_H = 5000KW$  και με ολικό τεχνικό ελάχιστο  $P_{HCT} = 0,25 \cdot N_H$ . Με δεδομένη την ονομαστική ισχύ των υδροστροβίλων,

υπολογίζονται στη συνέχεια οι βαθμοί απόδοσης των υδροστροβίλων,  $n_H$  και των γεννητριών,  $n_G$ , χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες καμπύλες ισχύος - βαθμού απόδοσης. Επίσης, υπολογίζεται η κανονική παροχή των υδροστροβίλων,  $Q_H$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_H = N_H \cdot 10^3 / (g \cdot \rho \cdot H \cdot n_H \cdot n_G)$$

,όπου:

$H = 420m$ , το ονομαστικό ύψος κάθε υδροστροβίλου

Τελικά έχει βρεθεί το κανονικό σημείο λειτουργίας των υδροστροβίλων.

❖ Μετά την επιλογή των αντλιών και των υδροστροβίλων ακολουθεί η επιλογή των τεχνικών χαρακτηριστικών της διάταξης ηλεκτρόλυσης. Συνεπώς, θα χρησιμοποιηθούν  $N_{ELEC} = 5$  πανομοιότυπες συστοιχίες κελιών ηλεκτρόλυσης αλκαλικού τύπου με ειδική κατανάλωση ενέργειας  $E_{KATEN} = 5 KWH/Nm^3 H_2$ . Η απόδοση λειτουργίας υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την κατώτερη θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου  $LHV$  (Low Heating Value) που είναι ίση με  $LHV = 3 KWH/Nm^3 H_2$ . Ο όρος θερμογόνος δύναμη καυσίμου εκφράζει το ποσό της ενέργειας το οποίο αποδίδεται από την καύση μιας μοναδιαίας ποσότητάς του. Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη υπολογίζεται όταν θεωρείται ότι το νερό που παράγεται κατά την καύση είναι σε φάση ατμού. Έτσι, ο βαθμός απόδοσης (ο οποίος θα θεωρηθεί σταθερός για κάθε ισχύ λειτουργίας),  $n_{H_2}$ , της διάταξης ηλεκτρόλυσης είναι:

$$n_{H_2} = (3 KWH/Nm^3 H_2) / (5 KWH/Nm^3 H_2) = 60\%$$

Η ονομαστική ισχύς κάθε συστοιχίας κελιών ηλεκτρόλυσης,  $N_{H_2}$ , θα αποτελέσει αντικείμενο βελτιστοποίησης. Το τεχνικό ελάχιστο θα είναι ίσο με το 20% της ονομαστικής ισχύος τους.

❖ Ακολουθεί η παράθεση των κύριων τεχνικών χαρακτηριστικών των σωληνώσεων και των ταμιευτήρων του ΥΒΣ. Όσον αφορά τους αγωγούς που συνδέουν τους δύο

ταμιευτήρες, δίνονται στοιχεία όπως: ο συντελεστής αντίστασης, το μήκος, το πάχος και η εσωτερική τους διάμετρος.

Ο προτεινόμενος ΥΒΣ είναι διπλού αγωγού ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ταυτόχρονης παραγωγής και άντλησης, κι επομένως να επιτυγχάνεται ικανοποιητικός βαθμός αξιοποίησης της παραγωγής του αιολικού πάρκου του ΥΒΣ. Άλλωστε, η ελαχιστοποίηση της απορριπτόμενης αιολικής ενέργειας του ΥΒΣ είναι γεγονός θετικό τόσο για την οικονομικότητα του έργου όσο και για τον επιδιωκόμενο στόχο της αυξημένης διείσδυσης ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού.

Αναφορικά με τους ταμιευτήρες ορίζονται:

- Η μέση διαφορά στάθμης των δύο ταμιευτήρων:

$$DZ_{MEAN} = 420m \text{ και}$$

- Η ελάχιστη διαφορά στάθμης των δύο ταμιευτήρων:

$$DZ_{MIN} = 410m$$

Όσον αφορά στον άνω ταμιευτήρα, η ωφέλιμη χωρητικότητά του,  $V_{TOT}$ , θα αποτελέσει αντικείμενο βελτιστοποίησης. Ωστόσο, ο ελάχιστος επιτρεπόμενος όγκος νερού στον άνω ταμιευτήρα είναι:

$$V_{MN} = 25000m^3$$

Κι επομένως ο μέγιστος επιτρεπόμενος, εφόσον έχει επιλεγεί η ωφέλιμη χωρητικότητα, θα υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_{MX} = V_{MN} + V_{TOT}$$

Η διαφορά μέγιστης και ελάχιστης επιτρεπόμενης στάθμης του άνω ταμιευτήρα είναι:

$$DZ_{VOLR} = 20m$$

Ο τρέχων όγκος νερού,  $V_R$ , για την έναρξη της προσομοίωσης λαμβάνει την αρχική τιμή:

$$V_R = V_{TOT} / 2,$$

δηλαδή θεωρείται ότι ο ταμιευτήρας είναι πληρωμένος στο μισό της συνολικής του δυναμικότητας.

Ακόμη, ορίζεται η μεταβλητή  $V_{FR}$  που θα αναπαριστά το ποσοστό πλήρωσης του άνω ταμιευτήρα σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_{FR} = V_R / V_{TOT}$$

Τέλος, ορίζεται σύμφωνα με την παρακάτω σχέση, ένας συντελεστής πλήρωσης του άνω ταμιευτήρα,  $Z_{ADD}$ , ο οποίος δείχνει την μεταβολή της στάθμης του ταμιευτήρα σε μέτρα ως προς τη μέση για συγκεκριμένο όγκο νερού που προστίθεται ή αφαιρείται.

$$Z_{ADD} = (V_R - 0,5) \cdot DZ_{VOLR}$$

Τα  $V_R$ ,  $V_{FR}$  και  $Z_{ADD}$  θα υπολογίζονται αργότερα μέσα στο σώμα του βρόχου με βήματα δέκα λεπτά, μετά τον προγραμματισμό της λειτουργίας των υδροστροβίλων και των αντλιών, ώστε οι τιμές τους να χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς του επόμενου δεκαλέπτου. Στο σημείο αυτό παίρνουν τιμές για το πρώτο δεκάλεπτο του έτους.

❖ Στη συνέχεια και εν όψει της έναρξης προσομοίωσης του συστήματος, ορίζονται ορισμένες βοηθητικές μεταβλητές που σκοπεύουν να κρατήσουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε όσο το δυνατόν περισσότερο ασφαλή και ρεαλιστικά επίπεδα. Έτσι, ορίζονται:

- Ο εκτιμώμενος μέσος ολικός βαθμός απόδοσης της παραγωγής των υδροστροβίλων:

$$TE = 0,83$$

- Ο εκτιμώμενος μέσος βαθμός απόδοσης της διαδικασίας άντλησης:

$$PE = 0,735$$

- Ο συντελεστής ασφαλείας για τη διαδικασία της υδροστροβλικής παραγωγής:

$$A = 1,08$$

- Ο συντελεστής ασφαλείας για τη διαδικασία της άντλησης:

$$B = 1,1 \text{ και}$$

- Ο συντελεστής ασφαλείας που εκφράζει την πιθανότητα αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας:

$$\Gamma = 0,8$$

#### **4.3.2 Εγγυημένη Ισχύς ΥΒΣ που αποζημιώνεται και Γραμμή Εγγυημένης Ισχύος**

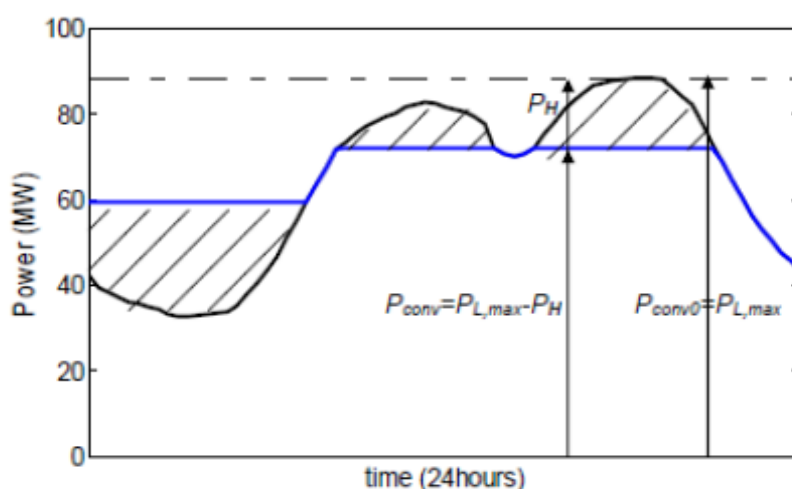
❖ Σύμφωνα με το ισχύον θεσμικό πλαίσιο προβλέπεται αποζημίωση διαθεσιμότητας ισχύος του ΥΒΣ, με βάση την εγγυημένη ισχύ των μονάδων ελεγχόμενης παραγωγής του και το κόστος νέου συμβατικού σταθμού αντίστοιχης ισχύος, με το σκεπτικό ότι η παροχή εγγυημένης ισχύος και ενέργειας από τον ΥΒΣ επιτρέπει την αποφυγή επένδυσης σε συμβατικό σταθμό παραγωγής αντίστοιχης ικανότητας για την κάλυψη των αιχμών.

Η τιμολόγηση της διαθεσιμότητας ισχύος των ΥΒΣ θα πρέπει να αντανακλά το πραγματικά αποφευγόμενο κόστος διαθεσιμότητας ισχύος συμβατικών μονάδων. Υπό την έννοια αυτή, για ΥΒΣ μεγάλου μεγέθους, μπορεί να μην αποζημιώνεται το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος των στροβίλων τους, εάν δεν προκύπτει δυνατότητα ισόποσης μείωσης της εγκατεστημένης συμβατικής παραγωγής του νησιού. Αυτό μπορεί να συμβαίνει διότι μεγάλη περικοπή της αιχμής της καμπύλης φορτίου απαιτεί την παροχή αντίστοιχα υψηλών ποσοτήτων ενέργειας, οι οποίες θα πρέπει να μπορούν να αντληθούν κατά τις νυχτερινές ώρες χαμηλού φορτίου (τις μέρες χωρίς αέρα), χωρίς να δημιουργείται νέα (και υψηλότερη από την ημερήσια) νυχτερινή αιχμή.



Για να υπολογιστεί η μέγιστη ισχύς ΥΒΣ (capacity credit) που συνίσταται να αποζημιωθεί σε κάθε νησί, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία. Για κάθε μέρα υπολογίζεται η ελάχιστη απαιτούμενη συμβατική ισχύς με βάση την οριζόντια ευθεία που εξισώνει το εμβαδόν (δηλαδή την ενέργεια) που περικλείεται από την ημερήσια καμπύλη φορτίου και την ευθεία αυτή, με το αντίστοιχο περικλειόμενο εμβαδόν κάτωθεν της ευθείας αυτής, πολλαπλασιασμένο με έναν τυπικό συντελεστή απόδοσης του κύκλου άντλησης – παραγωγής (π.χ. 70%) (Σχήμα 4.11). Εξισώνονται δηλαδή, η ενέργεια αιχμής που θα μπορούσε να προσφερθεί με αυτή που θα μπορούσε να αντληθεί. Η μέγιστη ισχύς που υπολογίζεται από όλες τις υπολογιζόμενες ημερήσιες οριζόντιες ευθείες για ένα έτος αποτελεί την ελάχιστη απαιτούμενη εγκατεστημένη συμβατική ισχύ. Συνεπώς, η μέγιστη ισχύς ΥΒΣ,  $CC$ , που θα πρέπει να αποζημιώνεται, θα ισούται με τη διαφορά της ετήσιας αιχμής  $P_{TOP}$ , και της ελάχιστης απαιτούμενης εγκατεστημένης συμβατικής ισχύος  $P_{min,conv}$ :

$$CC = P_{TOP} - P_{min,conv}$$



Σχήμα 4.11: Ημερήσια καμπύλη ζήτησης φορτίου και γραμμή που εξισώνει την προσφερόμενη από τον ΥΒΣ ενέργεια και την ενέργεια άντλησης από το δίκτυο (Πηγή Σ. Παπαευθυμίου κ.α. 2009)

Στον υπολογιστικό κώδικα που χρησιμοποιείται η εγγυημένη ισχύς του ΥΒΣ,  $CC$ , και η τιμή της αποζημίωσής της,  $TRF_{CC}$ , για κάθε έτος αποτελούν δεδομένα.

Συγκεκριμένα:

$CC = 15MW$  και

$TRF_{CC} = 165 \text{ ευρώ}/KW$  , για την τιμολογιακή πολιτική A, ενώ

$TRF_{CC} = 127 \text{ ευρώ}/KW$  , για την τιμολογιακή πολιτική B.

❖ Μετά τον υπολογισμό του  $CC$ , υπολογίζεται η ισχύς,  $P_{LIMIT}$ , από την οποία, στα διαγράμματα φορτίου – χρόνου άγεται η γραμμή της εγγυημένης ισχύος. Ο ΥΒΣ θα πρέπει να είναι σε θέση να παραλάβει κάθε χρονική στιγμή τις αιχμές του φορτίου που εκτείνονται πάνω από την γραμμή αυτή. Η ισχύς  $P_{LIMIT}$  ισούται με το μέγιστο φορτίο μείον τη συνολική ονομαστική ισχύ των υδροστροβίλων του ΥΒΣ.

$$P_{LIMIT} = P_{TOP} - N_{T,TOT} = (80 - 15)MW = 65MW$$

#### 4.3.3 Κόστος του προτεινόμενου ΥΒΣ

❖ Έπειτα, καλείται η υπορουτίνα στην οποία υπολογίζονται το κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος του προτεινόμενου ΥΒΣ. Όσον αφορά το κόστος κατασκευής, υπολογίζονται το κόστος των ανεμογεννητριών, του άνω ταμιευτήρα, των υδροστροβίλων και των γεννητριών, των αντλιών και των κινητήρων, των αγωγών και της διάταξης ηλεκτρόλυσης. Επίσης, λαμβάνονται υπόψη το κόστος του υποσταθμού, το κόστος της σύνδεσης του ΥΒΣ με το δίκτυο, το κόστος των έργων πολιτικού μηχανικού και το κόστος μελετών και επίβλεψης. Τα εργατικά, μεταφορικά και απρόβλεπτα κόστη είναι ενσωματωμένα στα προηγούμενα. Στο λειτουργικό κόστος συμπεριλαμβάνονται μεταξύ άλλων, το κόστος της συντήρησης, οι αμοιβές του προσωπικού, η ιδιοκατανάλωση ρεύματος και το κόστος της ασφάλισης του ΥΒΣ. Οι συσχετίσεις έχουν προκύψει από στατιστικά δεδομένα της βιβλιογραφίας (Δ. Παπαντώνης, Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα) και κοστολογήσεις πραγματικών ή σχεδιαζόμενων μονάδων από κατασκευαστικές εταιρίες. Αναλυτικά έχουμε:

-Κόστος ανεμογεννητριών:

$$C_{WIND} = 1500 \cdot N_{WGEN} \cdot N_w$$

-Κόστος διάταξης ηλεκτρόλυσης:

$$C_{H2} = 1300 \cdot N_{ELEC} \cdot N_{H2}$$

-Κόστος άνω ταμιευτήρα:

$$C_{RESERV} = 420 \cdot V_{TOT}^{0,7}$$

-Κόστος υδροστροβίλων και γεννητριών:

$$C_{TURGEN} = N_{TURBS} \cdot 700 \cdot N_H^{0,95}$$

-Κόστος αντλιών:

$$C_{PUMP} = N_{PUMPS} \cdot 600 \cdot N_P^{0,95}$$

-Κόστος αγωγών:

$$C_{PIPE} = C_{YL} + C_{EP} + C_{RAF} + C_{INST}$$

,όπου:

$C_{YL}$ , το κόστος υλικού,

$C_{EP}$ , το κόστος της επιφανειακής προστασίας,

$C_{RAF}$ , το κόστος των συγκολλήσεων και

$C_{INST}$ , το κόστος της μεταφοράς και των εκσκαφών

-Κόστος υποσταθμού:

$$C_{HME1} = (200000 + 20 \cdot N_{T,TOT} + 10 \cdot N_{P,TOT} + 10 \cdot N_{W,TOT} + 10 \cdot N_{H2,TOT}) \cdot 2$$

,όπου:

$N_{P,TOT}$ , η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του αντλιοστασίου,

$N_{T,TOT}$ , η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των υδροστροβίλων και

$N_{W,TOT}$ , η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του αιολικού πάρκου του ΥΒΣ

$N_{H2,TOT}$ , η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των συστοιχιών ηλεκτρόλυσης

-Κόστος σύνδεσης στο δίκτυο:

$$C_{HME2} = 10^6 \cdot [1 + (N_{P,TOT} / 1000 - 20) / 100]$$

-Κόστος έργων πολιτικού μηχανικού:

$$C_{FORM} = 1000 \cdot (N_{T,TOT} + N_{P,TOT} + N_{WTOT} + N_{H2,TOT})^{0,6}$$

-Συνολικό κόστος του εξοπλισμού του σταθμού:

$$C_{STAT} = C_{WIND} + C_{H2} + C_{RESERV} + C_{RTURGEN} \\ + C_{PUMP} + C_{PIPE} + C_{HME1} + C_{HME2} + C_{FORM}$$

-Κόστος μελετών και επίβλεψης:

$$C_{MELET} = 0,05 \cdot C_{STAT}$$

-Λοιπά κόστη (αγορά γης, δρόμοι, κα):

$$C_{OTHERS} = 0,02 \cdot C_{STAT}$$

-Συνολικό Κόστος κατασκευής του σταθμού:

$$C_{TOTAL} = C_{STAT} + C_{MELET} + C_{OTHERS}$$

-Λειτουργικό κόστος:

$$C_{LEIT} = C_{LEIT1} + C_{LEIT2}$$

,όπου

$C_{LEIT1} = 0,01 \cdot C_{TOTAL}$ , το κόστος λειτουργίας (προσωπικό, συντήρηση, λογαριασμοί κτλ.) και

$C_{LEIT2} = 0,01 \cdot C_{TOTAL}$ , το κόστος της ασφάλισης

#### 4.3.4 Έναρξη της προσομοίωσης

Στο σημείο αυτό ξεκινά η προσομοίωση της λειτουργίας του ΥΒΣ για το χρονικό διάστημα ενός έτους. Συγκεκριμένα, ξεκινά ένας επαναληπτικός βρόχος που προσομοιώνει τη λειτουργία του ΥΒΣ για κάθε ημέρα του έτους. Αργότερα, μέσα στο σώμα αυτού του βρόχου, θα ξεκινήσει ένας νέος εσωτερικός βρόχος στον οποίο θα προσομοιώνεται η λειτουργία του σταθμού σε ωριαία βάση. Τέλος, μέσα στον ωριαίο βρόχο θα περιέχεται ένας ακόμη επαναληπτικός βρόχος που θα αφορά στη λειτουργία του ΥΒΣ σε δεκάλεπτη βάση. Σε κάθε κλάσμα του χρόνου (ημέρα, ώρα, δεκάλεπτο)

γίνονται διαφορετικοί υπολογισμοί και λαμβάνονται αποφάσεις για την μετέπειτα λειτουργία του σταθμού.

### **Έναρξη Ημερήσιου βρόχου**

❖ Για την υπό εξέταση ημέρα του έτους υπολογίζεται η εγγυημένη ενέργεια του ΥΒΣ, δηλαδή η ποσότητα της ενέργειας που ο Διαχειριστής του δικτύου έκρινε ότι χρειάζεται ώστε σε συνδυασμό με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής να μπορεί να καλυφθεί αξιόπιστα το προβλεπόμενο φορτίο ζήτησης. Πρόκειται για το άθροισμα των ωριαίων ποσοτήτων ενέργειας,  $P_{HLP}$ , που αντιστοιχούν στο εμβαδόν που περικλείεται μεταξύ της γραμμής εγγυημένης ισχύος που άγεται από την τιμή της  $P_{LIMIT}$  και των κορυφών ισχύος στην καμπύλη ζήτησης φορτίου,  $P_L$ . Δηλαδή για κάθε ώρα της ημέρας πραγματοποιείται ο εξής υπολογισμός:

$$P_{HLP} = P_L - P_{LIMIT}$$

Οι ωριαίες τιμές  $P_{HLP}$ , εφόσον είναι θετικές, αθροίζονται και αποτελούν την ημερήσια εγγυημένη ενέργεια  $E_G$ . Ωστόσο, εάν για κάποια ώρα συμβεί  $P_{HLP} < P_{HCT}$ , όπου  $P_{HCT}$  το ολικό τεχνικό ελάχιστο των υδροστροβίλων, τότε στο παραπάνω άθροισμα η  $P_{HLP}$  θα δώσει τη θέση της στο  $P_{HCT}$ .

Ακόμη, στο μέγεθος  $Y.E_G$  αθροίζονται τα ημερήσια  $E_G$ , ώστε στο τέλος των επαναλήψεων να προκύψει η ετήσια εγγυημένη ενέργεια που απαιτήθηκε από τον ΥΒΣ.

Επίσης, υπολογίζεται η ποσότητα της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη σε υδραυλική μορφή στον άνω ταμιευτήρα, όπως αυτή διαμορφώθηκε στο τέλος της προηγούμενης ημέρας.

$$E_{AVAILABLE} = (V_R - V_{MN}) \cdot g \cdot \rho \cdot DZ_{MIN} / 3,6 \cdot 10^6$$

,όπου:

$V_R$ , ο τρέχων όγκος νερού στον άνω ταμιευτήρα,

$V_{MN}$ , ο ελάχιστος επιτρεπόμενος όγκος νερού στον άνω ταμιευτήρα και  $DZ_{MIN} = 410m$ , η ελάχιστη δυνατή διαφορά στάθμης άνω με κάτω ταμιευτήρα

❖ Έτσι, ελέγχεται εάν ο ΥΒΣ μπορεί να ανταπεξέλθει στις ενεργειακές ανάγκες της εν λόγω ημέρας,  $E_{SCHED}$ , χρησιμοποιώντας αποκλειστικά την ήδη αποθηκευμένη του ενέργεια,  $E_{AVAILABLE}$ . Αρχικά υπολογίζεται η απαιτούμενη ενέργεια από τον ΥΒΣ:

$$E_{SCHED} = (E_G / TE) \cdot B$$

Αν προκύψει  $E_{SCHED} > E_{AVAILABLE}$ , υπολογίζεται το πόσο της ενέργειας,  $E_D$ , που ο ΥΒΣ θα πρέπει να προμηθευτεί από το δίκτυο κατά τις συμφωνημένες ώρες χαμηλής ζήτησης, ώστε να θέσει σε λειτουργία το αντλιοστάσιό του και τελικά να είναι σε θέση να προσφέρει την απαιτούμενη από το Διαχειριστή του δικτύου, εγγυημένη ενέργεια. Έτσι:

$$E_D = ((E_{SCHED} - E_{AVAILABLE}) / PE) \cdot B$$

Δηλαδή, πραγματοποιείται η δήλωση φορτίου, όπως αυτή περιγράφηκε στο υποκεφάλαιο 4.2.

❖ Στη συνέχεια υπολογίζεται η εκτιμώμενη ποσότητα ενέργειας που πρόκειται να παραχθεί από το αιολικό πάρκο του ΥΒΣ κατά τη διάρκεια του πρώτου δωδεκάωρου της ημέρας,  $E_{WFIRST}$ , ως το άθροισμα των ποσοτήτων  $P_{WMEAN}$  των ωρών 1:00π.μ - 12:00 που είναι μεγαλύτερες ή ίσες του ολικού τεχνικού ελαχίστου του αντλιοστασίου,  $P_{PMIN}$ . Η ποσότητα της ενέργειας αυτής πρόκειται να διοχετευτεί στο αντλιοστάσιο, οπότε πολλαπλασιάζεται με τον βαθμό απόδοσης της διαδικασίας της άντλησης,  $PE$ , και τον συντελεστή ασφαλείας  $\Gamma$ . Επομένως, η νέα αυτή ποσότητα ενέργειας, αντιπροσωπεύει την υδραυλική ενέργεια που είναι σε θέση να εξασφαλίσει το αιολικό πάρκο του ΥΒΣ στο πρώτο δωδεκάωρο της ημέρας. Τέλος, η ποσότητα αυτή θα προστεθεί στη ήδη αποθηκευμένη υδραυλική ενέργεια και το άθροισμά τους,  $E_{ESTIM}$ , θα πολλαπλασιαστεί με τον βαθμό απόδοσης της υδροστροβιλικής παραγωγής, ενώ επιπλέον θα διαιρεθεί και με έναν συντελεστή ασφαλείας.

$$E_{ESTIM} = TE \cdot (E_{AVAILABLE} + E_{WFIRST}) / A$$

Συμπερασματικά, έχει πλέον προκύψει η εκτιμώμενη ποσότητα της ενέργειας που ο ΥΒΣ θα είναι σε θέση να διοχετεύσει στο δίκτυο την εν λόγω ημέρα. Η ποσότητα αυτή συγκρίνεται ακολούθως με την ποσότητα  $E_G$  και η μεγαλύτερη εξ' αυτών θα αποτελέσει την ημερήσια προσφορά ενέργειας του ΥΒΣ,  $E_{OFFER}$ , εφόσον όπως έχει αναφερθεί στο υποκεφάλαιο 4.2, ο Διαχειριστής του ΥΒΣ οφείλει να κάνει προσφορά ενέργειας τουλάχιστον ίση με την εγγυημένη ενέργεια.

❖ Ακολουθεί έλεγχος που εξασφαλίζει ότι η προσφορά ενέργειας δεν υπερβαίνει τη μέγιστη δυνατή προσφορά ενέργειας που μπορεί να κάνει ο Διαχειριστής του ΥΒΣ, δηλαδή στην περίπτωση που ο άνω ταμιευτήρας είναι πληρωμένος έως τη μέγιστη στάθμη του. Ακόμη ελέγχεται αν η προσφορά ενέργειας μπορεί να ικανοποιηθεί από τους υδροστροβίλους, βάση του τεχνικού του ελαχίστου. Στη περίπτωση που αυτό δεν είναι εφικτό η προσφορά ενέργειας,  $E_{OFFER}$ , μηδενίζεται. Επίσης, στην περίπτωση που έχει πραγματοποιηθεί και δήλωση φορτίου, εξασφαλίζεται ότι η προσφορά ενέργειας δεν υπερβαίνει την εγγυημένη ενέργεια. Δηλαδή τίθεται:

$$E_{OFFER} = E_G$$

❖ Έπειτα εξετάζεται το ενδεχόμενο να έχει υποβληθεί από το Διαχειριστή του ΥΒΣ δήλωση φορτίου για άντληση κατά τις προσυμφωνημένες ώρες. Στην περίπτωση αυτή, μέσα από επαναληπτικές διαδικασίες, υπολογίζεται η ωριαία ισχύς λειτουργίας του αντλιοστασίου,  $P_{D,i}$ , με απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο, αποκλειστικά για τις ώρες χαμηλής ζήτησης, εξασφαλίζοντας ότι αυτή βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας του αντλιοστασίου. Δηλαδή, η δήλωση φορτίου μεταφράζεται σε ωριαίο πρόγραμμα άντλησης κατά τις επιτρεπόμενες ώρες.

❖ Στη συνέχεια εξετάζεται το ενδεχόμενο να έχει γίνει προσφορά ενέργειας από το Διαχειριστή του ΥΒΣ, μετά ασφαλώς από απαίτηση του Διαχειριστή του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή, μέσα από επαναληπτικές διαδικασίες, υπολογίζεται η ωριαία ισχύς προσφοράς του ΥΒΣ,  $P_{E,i}$ , εξασφαλίζοντας ότι αυτή δεν λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια πιθανής άντλησης με ενέργεια από το δίκτυο, ότι βρίσκεται μέσα στα

επιτρεπτά όρια λειτουργίας των υδροστροβίλων και ότι δεν αποκλείει τις συμβατικές μονάδες από την από κοινού κάλυψη του φορτίου. Δηλαδή, η προσφορά ενέργειας μεταφράζεται σε ωριαίο πρόγραμμα παραγωγής ενέργειας από τον ΥΒΣ.

### **Έναρξη Ωριαίου βρόχου**

Αρχικά εξετάζεται το ενδεχόμενο να έχει γίνει προσφορά ενέργειας την εν λόγω ώρα ( $P_{E,i} > SMALL$ , όπου  $SMALL$  ένας πολύ μικρός αριθμός). Αμέσως καλείται η υπορουτίνα που εξετάζει τη λειτουργία των υδροστροβίλων, στην οποία μέσα από επαναληπτικές διαδικασίες επιλέγεται το πλήθος των υδροστροβίλων,  $N_{TOPEP}$ , που θα μπορούσαν να ενταχθούν την συγκεκριμένη ώρα, ώστε να καλυφθεί η προσφορά ενέργειας. Προφανώς, επιλέγεται ο ελάχιστος αριθμός υδροστροβίλων που μπορεί να ανταπεξέλθει στη ζήτηση της εν λόγω ώρας και υπολογίζεται η συνολική ονομαστική τους ισχύς,  $P_{HN,TOT}$ , καθώς και το συνολικό τεχνικό τους ελάχιστο,  $P_{HCT}$ . Στην παρούσα φάση η χρήσιμη πληροφορία από την κλήση της υπορουτίνας των υδροστροβίλων είναι μόνο το συνολικό τεχνικό τους ελάχιστο, το οποίο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί στο αμέσως επόμενο κομμάτι του κώδικα που εκτελεί τον «περιορισμό φόρτισης». Άλλωστε, το πλήθος των προς ένταξη υδροστροβίλων αποφασίζεται στον επαναληπτικό βρόχο με βήμα τα δέκα λεπτά.

Η «περιορισμός φόρτισης» είναι η πιθανή ανάγκη μείωσης της συνολικής (υδροστροβίλοι και αιολικά ΥΒΣ απευθείας στο δίκτυο) προσφερόμενης ισχύος του ΥΒΣ,  $P_{E,i}$ , ώστε να εξασφαλίζεται η εύρυθμη λειτουργία των ήδη ενταγμένων μονάδων βάσεως και κυρίως των αιολικών πάρκων εκτός ΥΒΣ. Στη διαδικασία αυτή συμμετέχει ο συντελεστής,  $\Sigma_{ΑΠΟΜ}$ , του οποίου η τιμή καθορίζει αν και κατά πόσο θα χρειαστεί να μειωθεί η ωριαία προσφορά ισχύος του ΥΒΣ. Έτσι, αν για τη συγκεκριμένη ώρα, οι μονάδες βάσης λειτουργούν στο τεχνικό τους ελάχιστο ή αν η διαφορά μεταξύ της ισχύος λειτουργίας των μονάδων βάσεως και του τεχνικού τους ελαχίστου, δεν υπερβαίνει το τεχνικό ελάχιστο ενός υδροστροβίλου, τότε ο συντελεστής  $\Sigma_{ΑΠΟΜ}$  μηδενίζεται. Διαφορετικά, υπολογίζεται συναρτήσεως της ισχύος λειτουργίας των μονάδων βάσεως, της ονομαστικής ισχύος των εν λειτουργία υδροστροβίλων και της ισχύος λειτουργίας των αιολικών πάρκων εκτός ΥΒΣ. Συγκεκριμένα:



$$\Sigma_{\text{ΑΠΟΜ}} = (0,3 \cdot \sum P_{C,i} + P_{\text{HN,TOT}} - P_{\text{Wout},i}) / (1,3 \cdot P_{\text{HN,TOT}})$$

Σε κάθε περίπτωση, η τελική συνολική ωριαία συνεισφορά στην κάλυψη του φορτίου ζήτησης από τον ΥΒΣ,  $P_{\text{ΑΡΟΜ}}$ , προκύπτει πολλαπλασιάζοντας το συντελεστή,  $\Sigma_{\text{ΑΠΟΜ}}$ , με την ονομαστική ισχύ των ενταγμένων υδροστροβίλων,  $P_{\text{HN,TOT}}$ , ενώ πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το συνολικό τους τεχνικό ελάχιστο,  $P_{\text{HCT}}$ . Δηλαδή:

$$P_{\text{ΑΠΟΜ}} = \Sigma_{\text{ΑΠΟΜ}} \cdot P_{\text{HN,TOT}} \text{ και } P_{\text{ΑΠΟΜ}} \geq P_{\text{HCT}}$$

Οι μονάδες βάσης θα λειτουργούν πλέον στην εξής ωριαία ισχύ,  $P_{C,i}$ :

$$P_{C,i} = (P_L - P_{\text{ΑΡΟΜ}}) / 1000 - P_{\text{Wout},i}$$

Τα αιολικά πάρκα εκτός ΥΒΣ παραμένουν ανεπηρέαστα, εξακολουθώντας να προσφέρουν ισχύ  $P_{\text{Wout},i}$ .

Τα μεγέθη  $P_L$ ,  $P_{\text{ΑΡΟΜ}}$ ,  $P_{C,i}$  και  $P_{\text{Wout},i}$  αθροίζονται για κάθε ώρα, ώστε στο τέλος των επαναλήψεων να προκύψει το νέο, μετά την ένταξη του ΥΒΣ, ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού.

### **Έναρξη Δεκάλεπτου βρόχου**

Στο σημείο αυτό ξεκινά ο βρόχος που αφορά στα δεκάλεπτα της υπό εξέτασης ώρας και ημέρας και πριν την έναρξη των υπολογισμών λαμβάνουν τιμή οι εξής δείκτες του βαθμού πλήρωσης του άνω ταμιευτήρα:

$-F_1$ :

$$F_1 = 0 \text{ όταν } IVOL \geq 1$$

$$F_1 = 1 \text{ όταν } IVOL < 1$$

$-F_2$ :

$$F_2 = 0 \text{ όταν } IVOL = -1$$

$$F_2 = 1 \text{ όταν } IVOL \neq -1$$

,όπου  $IVOL$  ένας συντελεστής που δείχνει κατά πόσο ο όγκος νερού στον άνω ταμιευτήρα βρίσκεται μέσα στα επιτρεπτά όριά του. Συγκεκριμένα:

$$IVOL = 1 \text{ όταν } V_R \geq V_{MX} \text{ και}$$

$$IVOL = -1 \text{ όταν } V_R \leq V_{MN}$$

$IVOL = 0$  σε κάθε άλλη περίπτωση

Ο  $IVOL$  λαμβάνει τιμή αργότερα μέσα στο σώμα του δεκάλεπτο βρόχου, μετά τον προγραμματισμό λειτουργίας των υδροστροβίλων και του αντλιοστασίου, βάση του όγκου νερού,  $V_R$ , στον άνω ταμιευτήρα που υπολογίζεται ότι θα είναι διαθέσιμος για το επόμενο δεκάλεπτο.

❖ Αρχικά εξετάζεται το ενδεχόμενο το εν λόγω δεκάλεπτο να πραγματοποιείται άντληση με χρήση ενέργειας από το δίκτυο ή/και να μην πραγματοποιείται προσφορά ενέργειας από τον ΥΒΣ προς το δίκτυο ( $P_{D,i} > 0$  ή/και  $P_{E,i} < SMALL$ ). Τότε, η ισχύς των υδροστροβίλων για το τρέχον δεκάλεπτο,  $P_{H,x}$ , τίθεται ίση με μηδέν. Η ισχύς,  $P_{P,x}$ , στην οποία το αντλιοστάσιο θα μπορούσε ιδανικά να λειτουργεί το δεκάλεπτο αυτό, δίνεται από την ακόλουθη σχέση που λαμβάνει υπόψη την ισχύ άντλησης με ενέργεια από το δίκτυο και την ισχύ άντλησης με ενέργεια από το αιολικό πάρκο του ΥΒΣ, όταν ο άνω ταμιευτήρας έχει περιθώριο να παραλάβει νερό.

$$P_{P,x} = P_{D,i} + (P_{W,x} \cdot F_1)$$

❖ Στο σημείο αυτό καλείται η υπορουτίνα που εξετάζει τη λειτουργία του αντλιοστασίου, στην οποία μέσα από επαναληπτικές διαδικασίες επιλέγεται το πλήθος των αντλιών,  $N_{POPE}$ , που πρέπει να ενταχθούν το συγκεκριμένο δεκάλεπτο, ώστε να εκμεταλλευτούν την αιολική παραγωγή του ΥΒΣ και την ενέργεια από το δίκτυο που πιθανώς ο Διαχειριστής του ΥΒΣ έχει κρίνει ότι χρειάζεται. Επιπλέον υπολογίζεται η συνολική ονομαστική ισχύς των αντλιών που τέθηκαν σε λειτουργία,  $P_{PN,TOT}$ , βάση των διαθέσιμων για λειτουργία αντλιών και των τεχνικών τους χαρακτηριστικών. Η τελική ισχύς αντλιοστασίου,  $P_{P,x}$ , θα λάβει τότε την μικρότερη τιμή μεταξύ της τιμής που ήδη έχει και της  $P_{PN,TOT}$ . Επίσης, η τιμή της ισχύος κάθε

ενταγμένης αντλίας,  $P_{P,x}(N)$ , υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση, έτσι ώστε οι στροφές της να προσαρμοστούν στην ισχύ  $P_{P,x}$ .

$$P_{P,x}(N) = N_P \cdot (P_{P,x} / P_{PN,TOT})$$

Ομοίως θα προσαρμοστεί και η παροχή των εν λειτουργία αντλιών:

$$Q_{P,x}(N) = Q_P \cdot (P_{P,x} / P_{PN,TOT})$$

❖ Στη συνέχεια υπολογίζεται η αιολική ισχύς του ΥΒΣ που θα χρησιμοποιείται για άντληση,  $P_{W,P}$ , ως η διαφορά της ισχύος των αντλιών το εν λόγω δεκάλεπτο και του μέρους αυτής που θα προέρχεται από το δίκτυο. Δηλαδή:

$$P_{W,P} = P_{P,x} - P_{D,i}$$

Επιπλέον τίθεται ίση με μηδέν η ποσότητα της αιολικής ισχύος του ΥΒΣ που θα αποστέλλεται απευθείας στο δίκτυο το υπό εξέταση δεκάλεπτο,  $P_{W,G}$ , όπως άλλωστε υπαγορεύει η τρέχουσα κατάσταση λειτουργίας του ΥΒΣ (πραγματοποιείται άντληση από το δίκτυο ή/και δεν πραγματοποιείται προσφορά ενέργειας).

❖ Επιπρόσθετα, υπολογίζεται η ποσότητα της αιολικής ισχύος που θα μπορούσε το τρέχον δεκάλεπτο να καταναλώνεται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης,  $P_{ELEC}$ , ως η διαφορά της συνολικής παραγόμενης αιολικής ισχύος του ΥΒΣ και της ποσότητας εκείνης που χρησιμοποιείται για άντληση. Δηλαδή:

$$P_{ELEC} = P_{W,x} - P_{W,P}$$

Έτσι, ακολουθεί η κλήση της υπορουτίνας που εξετάζει τη λειτουργία της διάταξης ηλεκτρόλυσης στην οποία αποφασίζεται πόσες συστοιχίες κελιών ηλεκτρόλυσης θα ενταχθούν,  $N_{ELECOP}$ , ενώ υπολογίζεται η πραγματική συνολική τους ισχύς λειτουργίας,  $P_{ELEC}$ , η τιμή της οποίας περνά στο μέγεθος  $P_{W,H2}$ , ώστε πλέον αυτή να αντιπροσωπεύει την ποσότητα αιολικής ισχύος που χρησιμοποιείται για παραγωγή υδρογόνου το τρέχον δεκάλεπτο.

❖ Στη συνέχεια εξετάζεται το ενδεχόμενο το εν λόγω δεκάλεπτο να πραγματοποιείται προσφορά ενέργειας από τον ΥΒΣ προς το δίκτυο ( $P_{E,i} > SMALL$ ).

Στο σημείο αυτό καλείται για ακόμη μια φορά η υπορουτίνα που εξετάζει τη λειτουργία των υδροστροβίλων και γίνονται οι σχετικοί υπολογισμοί σε δεκάλεπτη, πλέον, βάση. Οι κύριες πληροφορίες που προκύπτουν από την εκτέλεση της υπορουτίνας αυτής είναι το πλήθος των υδροστροβίλων,  $N_{TOPE}$ , που θα ενταχθούν το συγκεκριμένο δεκάλεπτο, η συνολική ονομαστική τους ισχύς,  $P_{HN,TOT}$ , και το συνολικό τεχνικό τους ελάχιστο  $P_{HCT}$ .

❖ Ακολούθως ελέγχεται αν ο ΥΒΣ κατάφερε να εξασφαλίσει στο δίκτυο το συμφωνημένο ποσό ενέργειας το συγκεκριμένο δεκάλεπτο. Επίσης μετρώνται οι φορές (τα δεκάλεπτα),  $N_{EPEIS}$ , που ο ΥΒΣ αποτυγχάνει να τηρήσει την προσφορά ενέργειας λόγω άδειου ταμιευτήρα ( $F_2 = 0$ ), ενώ αθροίζονται στο μέγεθος  $E_{EPEIS}$ , τα ποσά της ενέργειας που συνολικά, παρά τη δέσμευσή του, δεν κατάφερε να διοχετεύσει στο δίκτυο σε ετήσια βάση.

❖ Στο σημείο αυτό αποφασίζεται η διαχείριση της αιολικής παραγωγής δεκαλέπτου,  $P_{W,x}$ , του ΥΒΣ. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 4.2 εξετάζονται δύο περιπτώσεις διαχείρισης της αιολικής ενέργειας του σταθμού, οι οποίες αναλύονται παρακάτω.

#### -Περίπτωση 1<sup>η</sup>

Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ διοχετεύεται κατά προτεραιότητα στην άντληση, εφόσον υπάρχουν διαθέσιμες για λειτουργία αντλίες και ο άνω ταμιευτήρας δεν είναι πληρωμένος έως τη μέγιστη στάθμη του ( $IVOL < 1$ ). Έτσι, η τιμή του μεγέθους  $P_{W,x}$ , δίνεται στο μέγεθος  $P_{P,x}$  (ισχύς αντλιοστασίου το τρέχον δεκάλεπτο), θεωρώντας ότι οι αντλίες μπορούν να αξιοποιήσουν το σύνολο της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής. Εάν ωστόσο ισχύει  $F_1 < SMALL$ , δηλαδή εάν ο άνω ταμιευτήρας είναι γεμάτος, τότε το μέγεθος  $P_{P,x}$  θα λάβει τη μικρότερη τιμή μεταξύ αυτής που ήδη έχει και της ποσότητας  $P_{HCT} / TE / PE$ . Στη συνέχεια καλείται η υπορουτίνα που εξετάζει τη λειτουργία του αντλιοστασίου, στην οποία γίνονται οι σχετικοί υπολογισμοί σε δεκάλεπτη, πλέον, βάση και οριστικοποιείται το ακριβές ποσό αιολικής ισχύος που

μπορούν να παραλάβουν οι αντλίες,  $P_{P,x}$ . Η τιμή του μεγέθους  $P_{P,x}$  θα δοθεί στο μέγεθος  $P_{W,P}$ , το οποίο αντιπροσωπεύει την αιολική ισχύ που χρησιμοποιείται για άντληση σε κάθε δεκάλεπτο. Η αιολική παραγωγή που περίσσεψε από την κατά προτεραιότητα διάθεσή της στο αντλιοστάσιο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{W,REST,x} = P_{W,x} - P_{P,x}$$

Η ποσότητα αυτή της αιολικής παραγωγής θα δοκιμαστεί να σταλεί απευθείας στο δίκτυο, καλύπτοντας μέρος της προσφοράς ενέργειας του ΥΒΣ,  $P_{APOM}$ , για το τρέχον δεκάλεπτο. Έτσι, η ισχύς λειτουργίας των υδροστροβίλων,  $P_{H,x}$ , για το εν λόγω δεκάλεπτο θα προκύψει από την παρακάτω σχέση:

$$P_{H,x} = (P_{APOM} - P_{W,REST,x}) \cdot F_2$$

Εάν ωστόσο η διαφορά της παρένθεσης της παραπάνω σχέσης προκύψει μικρότερη από το τεχνικό ελάχιστο των υδροστροβίλων, τότε θα αντικατασταθεί από αυτό. Τέλος, η αιολική ισχύς δεκαλέπτου που θα διοχετευτεί στο δίκτυο,  $P_{W,G}$ , θα δίνεται από τη σχέση:

$$P_{W,G} = P_{APOM} \cdot F_2 - P_{H,x}$$

### -Περίπτωση 2<sup>η</sup>

Η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ διοχετεύεται κατά προτεραιότητα απευθείας στο δίκτυο. Δηλαδή, ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία από εκείνη της 1<sup>ης</sup> περίπτωσης. Αρχικά, η δεκάλεπτη προσφορά του ΥΒΣ,  $P_{APOM}$ , κατανέμεται στην υδροστροβιλική παραγωγή δεκαλέπτου,  $P_{H,x}$ , και στην αιολική παραγωγή δεκαλέπτου που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο,  $P_{W,G}$ , εάν αυτό είναι δυνατό. Στη συνέχεια, η υπόλοιπη αιολική παραγωγή δοκιμάζεται να απορροφηθεί από το αντλιοστάσιο.

Για κάθε περίπτωση διαχείρισης της αιολικής παραγωγής, το ποσό της αιολικής ισχύος που δεν αξιοποιήθηκε στην άντληση λόγω τεχνικών περιορισμών ή δεν στάλθηκε απευθείας στο δίκτυο λόγω κάλυψης της προσφοράς ενέργειας, αποτελεί

την αιολική ισχύ,  $P_{ELEC}$ , που μπορεί να σταλεί στη διάταξη της ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση.

$$P_{ELEC} = P_{W,x} - P_{W,G} - P_{W,P}$$

Έτσι καλείται η υπορουτίνα που εξετάζει τη λειτουργία της διάταξης ηλεκτρόλυσης και γίνονται οι σχετικοί υπολογισμοί. Συνεπώς, αποφασίζεται πόσα κελιά ηλεκτρόλυσης θα ενταχθούν,  $N_{ELECOP}$ , ενώ υπολογίζεται η πραγματική συνολική τους ισχύς λειτουργίας,  $P_{ELEC}$ , η τιμή της οποίας περνά στο μέγεθος  $P_{W,H2}$ , ώστε πλέον αυτό να αντιπροσωπεύει την ποσότητα αιολικής ισχύος που χρησιμοποιείται για παραγωγή υδρογόνου το τρέχον δεκάλεπτο.

❖ Στο σημείο αυτό υπολογίζονται ορισμένα ημερήσια μεγέθη ως το άθροισμα των επιμέρους δεκάλεπτων ποσοτήτων του 24ώρου. Έτσι υπολογίζονται:

- Η ημερήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για άντληση,

$E_{W,P}$ :

$$E_{W,P} = \sum_1^{144} (P_{W,P} \cdot DT),$$

,όπου  $DT = (1/6)h$

- Η ημερήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο,

$E_{W,G}$ :

$$E_{W,G} = \sum_1^{144} (P_{W,G} \cdot DT),$$

- Η ημερήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που τροφοδοτεί τη διάταξη ηλεκτρόλυσης,  $E_{W,H2}$ :

$$E_{W,H2} = \sum_1^{144} (P_{W,H2} \cdot DT) \text{ και}$$

- Η ποσότητα της απορριπτόμενης αιολικής ενέργειας της τρέχουσας ημέρας,  $E_{W,LOSS}$ , ως το άθροισμα των ποσοτήτων αιολικής ενέργειας κάθε δεκαλέπτου, που δεν μπόρεσαν να διοχετευτούν στην άντληση ή στη διάταξη ηλεκτρόλυσης λόγω τεχνικών περιορισμών ή στο δίκτυο λόγω κάλυψης της προσφοράς ενέργειας. Δηλαδή:

$$E_{W,LOSS} = \sum_1^{144} ((P_{W,x} - P_{W,P} - P_{W,G} - P_{W,H2}) \cdot DT)$$

Επίσης υπολογίζεται η συνολική ημερήσια αιολική παραγωγή,  $E_{W,TOT}$ , σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{W,TOT} = P_{W,TOT} \cdot 6 \cdot DT$$

❖ Στη συνέχεια και ενώ οι κυρίως υπολογισμοί έχουν ολοκληρωθεί, γίνονται ορισμένοι λεπτομερέστεροι υπολογισμοί για την περιγραφή της λειτουργίας των ενταγμένων μηχανών.

Όσον αφορά τους εν λειτουργία υδροστροβίλους, μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία υπολογίζονται η ισχύς λειτουργίας,  $P_{H,x}(N)$ , και το ποσοστό φόρτισης,  $F_{LOAD}$ , κάθε ενός από αυτούς, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις.

$$P_{H,x}(N) = ((P_{H,x} - P_{HCT}) / (P_{HN,TOT} - P_{HCT})) \cdot (1 - CT(N)) + CT(N) \cdot N_H$$

$$F_{LOAD} = P_{H,x}(N) / N_H$$

Με βάση τα στοιχεία αυτά υπολογίζονται ακριβέστερα ο βαθμός απόδοσης του κάθε υδροστροβίλου,  $n_{H,x}(N)$ , χρησιμοποιώντας την αδιάστατη καμπύλη λειτουργίας των υδροστροβίλων τύπου Pelton, ο βαθμός απόδοσης της γεννήτριας του,  $n_{G,x}(N)$ , χρησιμοποιώντας την αδιάστατη καμπύλη λειτουργίας των γεννητριών, καθώς και οι απώλειες ισχύος του δεκαλέπτου που οφείλονται σε αυτή. Οι συνολικές απώλειες ισχύος λόγω των γεννητριών,  $P_{Gloss,x}$ , το τρέχον δεκάλεπτο, υπολογίζονται ως το άθροισμα των επιμέρους απωλειών σε κάθε μία από αυτές:

$$P_{Gloss,x} = \sum_1^N (P_{H,x}(N) \cdot (1 - n_{G,x}(N)) / n_{G,x}(N))$$

Ενώ οι αντίστοιχες ημερήσιες ενεργειακές απώλειες,  $E_{G,LOSS}$ , υπολογίζονται ως το άθροισμα των επιμέρους δεκάλεπτων ενεργειακών απωλειών:

$$E_{G,LOSS} = \sum_1^{144} (P_{Gloss,x} \cdot DT)$$

Επίσης υπολογίζεται η διακινούμενη παροχή νερού μέσα από κάθε υδροστρόβιλο,  $Q_{H,x(N)}$ , σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$Q_{H,x}(N) = P_{H,x}(N) \cdot 10^3 / g \cdot \rho \cdot (DZ_{MEAN} + Z_{ADD} - \zeta_{P,TUR}) \cdot n_{H,x}(N) \cdot n_{G,x}(N)$$

,όπου  $\zeta_{P,TUR}$ , ο συντελεστής απωλειών του αγωγού προσαγωγής

Ενώ η συνολικά διακινούμενη παροχή νερού μέσα από τους υδροστρόβιλους,  $Q_{H,TOT}$ , υπολογίζεται ,προφανώς, ως το άθροισμα των επιμέρους παροχών των υδροστρόβιλων:

$$Q_{H,TOT} = \sum_1^N Q_{H,x}(N)$$

Οι απώλειες ισχύος λόγω των υδροστρόβιλων,  $P_{Hloss,x}$ , το τρέχον δεκάλεπτο, υπολογίζονται ως το άθροισμα των επιμέρους απωλειών σε κάθε έναν από αυτούς:

$$P_{Hloss,x} = \sum_1^N \left( \frac{P_{H,x}(N) \cdot (1 - n_{H,x}(N) \cdot n_{G,x}(N))}{(n_{H,x}(N) \cdot n_{G,x}(N))} + \zeta_{P,TUR} \cdot \rho \cdot g \cdot Q_{H,x}(N) \cdot 10^{-3} \right)$$

Ενώ οι αντίστοιχες ημερήσιες ενεργειακές απώλειες,  $E_{H,LOSS}$ , υπολογίζονται ως το άθροισμα των επιμέρους δεκάλεπτων ενεργειακών απωλειών:

$$E_{H,LOSS} = \sum_1^{144} (P_{Hloss,x} \cdot DT)$$



Τέλος, το ποσό της ενέργειας που παράγεται από τους υδροστροβίλους την τρέχουσα ημέρα,  $E_{H,TOT}$ , υπολογίζεται ως το άθροισμα των αντίστοιχων δεκάλεπτων ποσοτήτων:

$$E_{H,TOT} = \sum_1^{144} (P_{H,x} \cdot DT)$$

Όσον αφορά τις εν λειτουργία αντλίες, υπολογίζεται η διακινούμενη παροχή νερού μέσα από κάθε μια,  $Q_{P,x(N)}$ , σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$Q_{P,x}(N) = P_{P,x}(N) \cdot 10^3 / g \cdot \rho \cdot (DZ_{MEAN} + Z_{ADD} + \zeta_{P,PUMP}) / n_{P,x}(N) / n_{M,x}(N)$$

,όπου

$\zeta_{P,PUMP}$ , ο συντελεστής απωλειών του αγωγού κατάθλιψης

$n_{P,x}(N)$ , ο βαθμό απόδοσης της αντλίας το τρέχον δεκάλεπτο

$n_{M,x}(N)$ , ο βαθμός απόδοσης του κινητήρα το τρέχον δεκάλεπτο

Ενώ η συνολικά διακινούμενη παροχή νερού μέσα από τις αντλίες,  $Q_{P,TOT}$  υπολογίζεται ,προφανώς, ως το άθροισμα των επιμέρους παροχών των αντλιών:

$$Q_{P,TOT} = \sum_1^N Q_{P,x}(N)$$

Οι απώλειες ισχύος λόγω των αντλιών,  $P_{Ploss,x}$ , το τρέχον δεκάλεπτο, υπολογίζονται ως το άθροισμα των επιμέρους απωλειών σε κάθε μία από αυτές:

$$P_{Ploss,x} = \sum_1^N (P_{P,x}(N) \cdot (1 - n_{P,x}(N) \cdot n_{M,x}(N)) + \zeta_{P,PUMP} \cdot \rho \cdot g \cdot Q_{P,x}(N) \cdot 10^{-3})$$

Επίσης υπολογίζονται οι αντίστοιχες ημερήσιες ενεργειακές απώλειες,  $E_{P,LOSS}$ , ως το άθροισμα των επιμέρους δεκάλεπτων ενεργειακών απωλειών:

$$E_{P,LOSS} = \sum_1^{144} (P_{Ploss,x} \cdot DT)$$

Τέλος, υπολογίζεται η ημερήσια ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται στην αντλίες,  $E_{P,TOT}$ , ως το άθροισμα των αντίστοιχων δεκάλεπτων ποσοτήτων:

$$E_{P,TOT} = \sum_1^{144} (P_{P,x} \cdot DT)$$

Όσον αφορά τα εν λειτουργία κελιά ηλεκτρόλυσης, υπολογίζονται οι απώλειες ισχύος σε αυτά το τρέχον δεκάλεπτο,  $P_{H2loss,x}$  και οι αντίστοιχες ημερήσιες ενεργειακές απώλειες,  $E_{H2,LOSS}$ , σύμφωνα με τις ακόλουθες σχέσεις:

$$P_{H2loss,x} = P_{ELEC} \cdot (1 - \eta_{H2})$$

$$E_{H2,LOSS} = \sum_1^{144} (P_{H2loss,x} \cdot DT)$$

❖ Στο σημείο αυτό υπολογίζεται η τιμή της ημερήσιας ποσότητας ενέργειας που ο ΥΒΣ αγοράζει από το δίκτυο κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης,  $E_{P,PURCH}$ , ως το άθροισμα των αντίστοιχων δεκάλεπτων ποσοτήτων:

$$E_{P,PURCH} = \sum_1^{144} (P_{D,i} \cdot DT)$$

❖ Ακολουθούν υπολογισμοί που αφορούν τον άνω ταμιευτήρα του ΥΒΣ. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται ο όγκος νερού στον άνω ταμιευτήρα που θα είναι διαθέσιμος για το επόμενο δεκάλεπτο,  $V_R$ , ως το άθροισμα του όγκου νερού που ήδη υπάρχει στον άνω ταμιευτήρα και της ποσότητας  $((Q_{P,x} - Q_{H,x}) \cdot DT \cdot 3600)$ , δηλαδή της διαφοράς του όγκου που οι αντλίες έστειλαν στον άνω ταμιευτήρα και εκείνου που οι υδροστρόβιλοι αξιοποίησαν και τελικά έστειλαν στον κάτω ταμιευτήρα το τρέχον δεκάλεπτο.

Ακόμη υπολογίζονται οι συντελεστές πλήρωσης του άνω ταμιευτήρα  $V_{FR}$  και  $Z_{ADD}$  και λαμβάνει τιμή ο συντελεστής  $IVOL$ , όπως αυτά ορίστηκαν νωρίτερα.

❖ Ακολουθεί το κομμάτι του κώδικα που εξασφαλίζει την τήρηση του περιορισμού λειτουργίας των αντλιών, σύμφωνα με τον οποίο όταν μια αντλία τεθεί εκτός λειτουργίας είναι σε θέση να επανεκκινήσει μετά την πάροδο μιας ώρας. Έτσι, σε κάθε δεκάλεπτο εντοπίζονται οι αντλίες που πρέπει να παραμείνουν εκτός λειτουργίας καθώς και εκείνες που είναι διαθέσιμες για επανεκκίνηση.

#### ***Δεκάλεπτα αποτελέσματα***

Η προσομοίωση της λειτουργίας του ΥΒΣ για το υπό εξέταση δεκάλεπτο έχει τελειώσει και καταχωρούνται σε αρχεία τα μεγέθη  $P_{APOM}$ ,  $P_{H,x}$ ,  $P_{W,G}$ ,  $P_{P,x}$ ,  $P_{W,x}$  και  $P_{ELEC}$  του εν λόγω δεκαλέπτου.

#### ***Ωριαία αποτελέσματα***

Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η προσομοίωση της λειτουργίας του ΥΒΣ για κάθε δεκάλεπτο της υπό εξέταση ώρας ο έλεγχος περνά και πάλι στον ωριαίο βρόχο. Καταχωρούνται σε αρχεία τα μεγέθη  $P_L$ ,  $P_L - P_{APOM}$ ,  $P_L - P_{APOM} + P_{D,i}$ ,  $V_{FR}$  και  $P_{LIMIT}$  της υπό εξέτασης ώρας. Ακολουθεί η προσομοίωση για την επόμενη ώρα της υπό εξέταση ημέρας.

#### ***Επιπλέον υπολογισμοί στο σώμα του Ημερήσιου βρόχου και Ημερήσια αποτελέσματα***

Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η προσομοίωση της λειτουργίας του ΥΒΣ για κάθε ώρα της υπό εξέταση ημέρας, ο έλεγχος περνά και πάλι στον ημερήσιο βρόχο προκειμένου να τυπωθούν ορισμένα αθροίσματα που πραγματοποιούνταν κατά το ρου του κώδικα και να γίνουν ορισμένοι επιπλέον υπολογισμοί.

❖ Έτσι τα κυριότερα ημερήσια μεγέθη που υπολογίζονται στο σημείο αυτό και καταχωρούνται σε αρχεία είναι:

- Ο δείκτης αξιοποίησης της αιολικής παραγωγής,  $\Delta.A.W$ :

$$\Delta.A.W = 1 - E_{W,LOSS} / E_{W,TOT}$$

- Ο βαθμός απόδοσης της υδροστροβλικής παραγωγής,  $B.A.H$ :

$$B.A.H = E_{H,TOT} / (E_{H,LOSS} + E_{H,TOT})$$

- Ο βαθμός απόδοσης της διαδικασίας άντλησης,  $B.A.P$ :

$$B.A.P = E_{P,TOT} / (E_{P,LOSS} + E_{P,TOT})$$

- Ο συνολικός βαθμός απόδοσης της διαδικασίας παραγωγής από τους υδροστροβίλους και άντλησης,  $B.A.TOT$ :

$$B.A.TOT = B.A.H \cdot B.A.P$$

- Η ημερήσια συνολική (υδροστροβίλοι και αιολικά απευθείας στο δίκτυο) προσφερόμενη ενέργεια από τον ΥΒΣ,  $E_{ΥΒΣ,TOT}$ :

$$E_{ΥΒΣ,TOT} = E_{H,TOT} + E_{W,G}$$

- Η ποσότητα υδρογόνου σε kg,  $Q_{H2}$ , που παρήγαγε ο ΥΒΣ:

$$Q_{H2} = (E_{W,H2} / E_{KATEN}) \cdot 0,09$$

- Τα έσοδα του ΥΒΣ,  $INC24_H$ , από την πώληση της ενέργειας που παρήγαγαν οι υδροστροβίλοι του στο δίκτυο:

$$INC24_H = TRF_H \cdot E_{H,TOT}$$

- Τα έσοδα του ΥΒΣ,  $INC24_W$ , από την πώληση της αιολικής ενέργειας που διοχετεύτηκε απευθείας στο δίκτυο:

$$INC24_W = TRF_W \cdot E_{W,G}$$

- Τα έξοδα του ΥΒΣ,  $OUT24_P$ , από την αγορά ενέργειας από το δίκτυο για άντληση:

$$OUT24_P = TRF_P \cdot E_{P,PURCH}$$

- Τα έσοδα του ΥΒΣ,  $INC24_{H2}$ , από την πώληση του υδρογόνου:

$$INC24_{H2} = TRF_{H2} \cdot Q_{H2}$$

- Τα καθαρά έσοδα του ΥΒΣ,  $INC24_{TOT}$ :

$$INC24_{TOT} = INC24_W + INC24_H + INC24_{H2} - INC24_P$$

❖ Προτού τελειώσει η προσομοίωση της λειτουργίας του ΥΒΣ για την υπό εξέταση ημέρα και ξεκινήσει η προσομοίωση για την επόμενη, ανανεώνονται οι τιμές στα ακόλουθα ετήσια μεγέθη που υπολογίζονται ως το άθροισμα των αντίστοιχων ημερήσιων ποσοτήτων του έτους:

- Τα έσοδα του ΥΒΣ,  $Y.INC$ :

$$Y.INC = \sum_1^{365} (E24_{TOT} / 1000^2)$$

- Η ποσότητα ενέργειας,  $Y.E_{PURCH}$ , που ο ΥΒΣ αγοράζει από το δίκτυο:

$$Y.E_{PURCH} = \sum_1^{365} (E_{P,PURCH} / 1000^2)$$

- Η ποσότητα ενέργειας,  $Y.E_{H,TOT}$ , που παράγουν οι υδροστρόβιλοι του ΥΒΣ:

$$Y.E_{H,TOT} = \sum_1^{365} (E_{H,TOT} / 1000^2)$$

- Η ποσότητα αιολικής ενέργειας του ΥΒΣ,  $Y.E_{W,G}$ , που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο:

$$Y.E_{W,G} = \sum_1^{365} (E_{W,G}/1000^2)$$

- Η ποσότητα αιολικής ενέργειας του ΥΒΣ,  $Y.E_{W,P}$ , που χρησιμοποιείται για άντληση:

$$Y.E_{W,P} = \sum_1^{365} (E_{W,P}/1000^2)$$

- Η ποσότητα αιολικής ενέργειας του ΥΒΣ,  $Y.E_{W,H2}$ , που διοχετεύεται στην διάταξη ηλεκτρόλυσης:

$$Y.E_{W,H2} = \sum_1^{365} (E_{W,H2}/1000^2)$$

- Η ποσότητα αιολικής ενέργειας του ΥΒΣ,  $Y.E_{W,LOSS}$ , που απορρίπτεται:

$$Y.E_{W,LOSS} = \sum_1^{365} (E_{W,LOSS}/1000^2) \text{ και}$$

- Η ποσότητα του παραγόμενου υδρογόνου,  $Y.Q_{H2}$ :

$$Y.Q_{H2} = \sum_1^{365} Q_{H2}$$

#### 4.3.5 Τέλος έτους και Ετήσια αποτελέσματα

Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η προσομοίωση της λειτουργίας του ΥΒΣ για κάθε ημέρα του έτους υπολογίζονται και τυπώνονται τα εξής ετήσια μεγέθη:

- Τα τελικά έσοδα του ΥΒΣ,  $Y.INC_{TOT}$ , ως το άθροισμα του  $Y.INC$ , της αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος, όπως αυτή αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 4.3.2 και της αποζημίωσης ή της χρέωσης για την πιθανή ποσότητα όγκου νερού στον άνω ταμιευτήρα,  $V_{REMAIN}$ , του άνω ταμιευτήρα στο τέλος του έτους που ξεπερνά ή υπολείπεται αντίστοιχα του όγκου νερού στην έναρξη του έτους:

$$Y.INC_{TOT} = \sum_1^{365} (INC_{24_{TOT}} / 1000^2) + CC \cdot TRF_{CC} / 1000^2 + TE \cdot ((V_R - V_{REMAIN}) \cdot g \cdot \rho \cdot (DZ_{MEAN} + Z_{ADD})) / (TRF_H / 1000^2)$$

- Ο λόγος,  $Y.BAL$ , των ετήσιων εσόδων προς το κόστος εγκατάστασης του ΥΒΣ:

$$Y.BAL = YINC_{TOT} / (C_{TOTAL} \cdot 1000^2)$$

- Η συνολική αιολική παραγωγή του ΥΒΣ,  $Y.E_{W,EXP}$ , που αξιοποιήθηκε, καθώς και ο συντελεστής χρησιμοποίησης (Capacity Factor) του αιολικού πάρκου,  $CF_W$ :

$$Y.E_{W,EXP} = Y.E_{W,G} + Y.E_{W,P} + Y.E_{W,H2}$$

$$CF_W = (Y.E_{W,EXP} \cdot 10^6) / (N_{W,TOT} \cdot 8760) = 33\%$$

- Η καθαρή ποσότητα ενέργειας,  $Y.E_{NET}$ , που παρήγαγε ο ΥΒΣ:

$$Y.E_{NET} = Y.E_{H,TOT} + Y.E_{W,G} - Y.E_{PURCH}$$

#### 4.3.6 Οικονομικοί δείκτες

Τέλος, ακολουθεί το κομμάτι του κώδικα που εξετάζει την οικονομική βιωσιμότητα του εγχειρήματος της εγκατάστασης του προτεινόμενου ΥΒΣ στο νησί της Λέσβου. Με την κλήση της αντίστοιχης υπορουτίνας υπολογίζονται οι οικονομικοί δείκτες: καθαρή παρούσα αξία, κόστος παραγόμενης ενέργειας, εσωτερικός συντελεστής

απόδοσης και η περίοδος αποπληρωμής κεφαλαίου. Στις αντίστοιχες σχέσεις συμμετέχουν τα παρακάτω μεγέθη:

-Διάρκεια ζωής της επένδυσης:

$$Q_{LIFE} = 20 \text{ έτη}$$

-Ετήσιος συντελεστής αναπροσαρμογής της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας:

$$Q_{ELEC} = 0,02$$

-Συντελεστής επικαιροποίησης:

$$Q_{IRR} = 0,08$$

-Μέσο ποσοστό πληθωρισμού:

$$Q_{INFL} = 0,03$$

-Συντελεστής φορολογίας:

$$Q_{TAX} = 0,2$$

-Φορολογία τοπικής αυτοδιοίκησης:

$$Q_{TAXTA} = 0,02$$

-Δάνειο (ως ποσοστό της αρχικής επένδυσης):

$$Q_{LOAN} = 0,4$$

-Χρόνος αποπληρωμής δανείου:

$$Q_{LIFLO} = 15 \text{ έτη}$$

-Επιτόκιο δανείου:

$$Q_{DI} = 0,01$$

-Κρατική επιχορήγηση (ως ποσοστό της αρχικής επένδυσης):

$$Q_{SUBS} = 0,30$$



-Ίδια κεφάλαια (ως ποσοστό της αρχικής επένδυσης):

$$Q_{EQUI} = 1 - Q_{LOAN} - Q_{SUBS} = 0,3$$

❖ Καθαρή Παρούσα Αξία (*NPV*)

Το κριτήριο αυτό αποτελεί ένα ευρύτατα εφαρμοζόμενο μέτρο οικονομικής αποδοτικότητας για την αξιολόγηση των σχεδίων επένδυσης. Η καθαρή παρούσα αξία γνωστή μετά αρχικά *NPV* (Net Present Value) εκφράζει την αξία σε χρηματικές μονάδες, που προκύπτει από την προεξόφληση στο παρόν όλων των καθαρών χρηματοροών κάθε έτους (διαφορά των μελλοντικών ταμειακών εισροών ή εσόδων και εκροών ή εξόδων) για ολόκληρο τον χρονικό ορίζοντα του σχεδίου επένδυσης.

Η καθαρή παρούσα αξία είναι αξιόπιστη μέθοδος αξιολόγησης γιατί μετατρέπει τις μελλοντικές ροές αξιών του σχεδίου επένδυσης σε παρούσες αξίες, δηλαδή αυτές που ισχύουν τη στιγμή παίρνεται η απόφαση. Η ίδια η τιμή της *NPV* δεν έχει κάποια συγκεκριμένη σημασία. Αυτό που ενδιαφέρει είναι αν είναι θετική ή αρνητική. Γενικά αν η *NPV* είναι θετική, αυτό σημαίνει ότι η αποδοτικότητα είναι μεγαλύτερη από το επιτόκιο προεξόφλησης και το σχέδιο επένδυσης είναι αποδεκτό. Αν η *NPV* είναι αρνητική, σημαίνει ότι η αποδοτικότητα είναι μικρότερη από το επιτόκιο προεξόφλησης και το σχέδιο απορρίπτεται. Αν η *NPV* είναι μηδέν, η αποδοτικότητα είναι οριακή. Η *NPV* στον υπολογιστικό κώδικα υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$NPV = (1 - Q_{TAX}) \cdot \left( AINCOM \cdot (1 + Q_{ELEC}) \cdot (1 - Q_{TAXTA}) \cdot term1 - Q_{LOAN} \cdot term3 - \right) - Q_{EQUI}$$

$$- AIOPERT \cdot (1 + Q_{INFL}) \cdot term2$$

,όπου:

$$term1 = \left( 1 - \left( (1 + Q_{ELEC}) / (1 + Q_{IRR}) \right)^{Q_{LIF}} \right) / (Q_{IRR} - Q_{ELEC})$$

$$term2 = \left( 1 - \left( (1 + Q_{INFL}) / (1 + Q_{IRR}) \right)^{Q_{LIF}} \right) / (Q_{IRR} - Q_{INFL})$$

$$term3 = (1 - Q_{DI} / (1 + Q_{IRR}))^{Q_{LFO}}$$

$$AINCOM = (Y \cdot INC_{TOT} \cdot 1000^2) / C_{TOTAL}$$

$$AIOPERT = C_{LEIT} / C_{TOTAL}$$

❖ Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (*IRR*)

Ο εσωτερικός συντελεστής απόδοσης γνωστός με τα αρχικά *IRR* (Internal Rate of Return) είναι το υπολογιζόμενο επιτόκιο (εσωτερική αποδοτικότητα) με το οποίο η παρούσα αξία των ταμειακών εισροών είναι ίση με την παρούσα αξία των ταμειακών εκροών. Δηλαδή η άθροιση των καθαρών χρηματοροών όλου του χρονικού ορίζοντα του σχεδίου επένδυσης είναι ίση με το μηδέν. Με άλλα λόγια, είναι ένα μοναδικό επιτόκιο που κάνει την προηγούμενη *NPV* να είναι μηδέν.

Από τη σύγκριση της τιμής του *IRR* με το επίσημο επιτόκιο της αγοράς, *I*, συμπεραίνεται η αποδοτικότητα (αν ο *IRR* είναι μεγαλύτερος) ή μη του σχεδίου επένδυσης (αν ο *IRR* είναι μικρότερος). Σε περίπτωση εναλλακτικών σχεδίων επιλέγεται εκείνο που έχει τον υψηλότερο *IRR*.

❖ Περίοδος Αποπληρωμής Κεφαλαίου (*pay-back period*)

Η τιμή του κριτηρίου αυτού εκφράζει τον αριθμό των ετών που απαιτούνται για την ανάκτηση του αρχικού επενδεδυμένου κεφαλαίου μέσω του αθροιστικού (για μια σειρά ετών) καθαρού κέρδους της επένδυσης. Για να δώσει το κριτήριο αυτό αξιόπιστα αποτελέσματα πρέπει η επιχείρηση να παρουσιάζει σχετικά ομοιόμορφο ύψος ετήσιου καθαρού κέρδους. Σε αντίθετη περίπτωση, πρέπει να αφαιρούνται διαδοχικά από την τιμή του κόστους επένδυσης τα ετήσια καθαρά κέρδη μέχρι την επανείσπραξη του ποσού που αντιστοιχεί στο κόστος επένδυσης. Το καθαρό κέρδος υπολογίζεται στην περίπτωση αυτή μετά την αφαίρεση των φόρων. Οποσδήποτε για να είναι αποδεκτό σύμφωνα με αυτό το κριτήριο ένα επενδυτικό σχέδιο, πρέπει ο χρόνος αποπληρωμής του να είναι πολύ μικρότερος από το χρονικό ορίζοντα λειτουργίας της επένδυσης. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα που χαρακτηρίζει το κριτήριο του χρόνου αποπληρωμής είναι ότι παρέχει, γρήγορα και εύκολα, χρήσιμες ενδεικτικές πληροφορίες σχετικά με τον κίνδυνο ανάληψης μιας επενδυτικής δραστηριότητας και τη ρευστότητα που αυτή συνεπάγεται. Η ρευστότητα που εξασφαλίζει η γρήγορη ανάκτηση των κεφαλαίων επιτρέπει στον επενδυτή να εκμεταλλευτεί άλλες επενδυτικές ευκαιρίες. Τα κυριότερα μειονεκτήματα που παρουσιάζει είναι ότι δεν λαμβάνει υπόψη τη χρονική αξία του χρήματος, αμελεί το ύψος των χρηματοροών μετά το χρόνο αποπληρωμής και εμφανίζει ως πλεονεκτικότερα βραχύβια και μικρής κλίμακας επενδυτικά σχέδια.

#### ❖ Κόστος Παραγόμενης Ενέργειας

Το κόστος της παραγόμενης ενέργειας από τον ΥΒΣ, σε *ευρώ/KWh*, υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

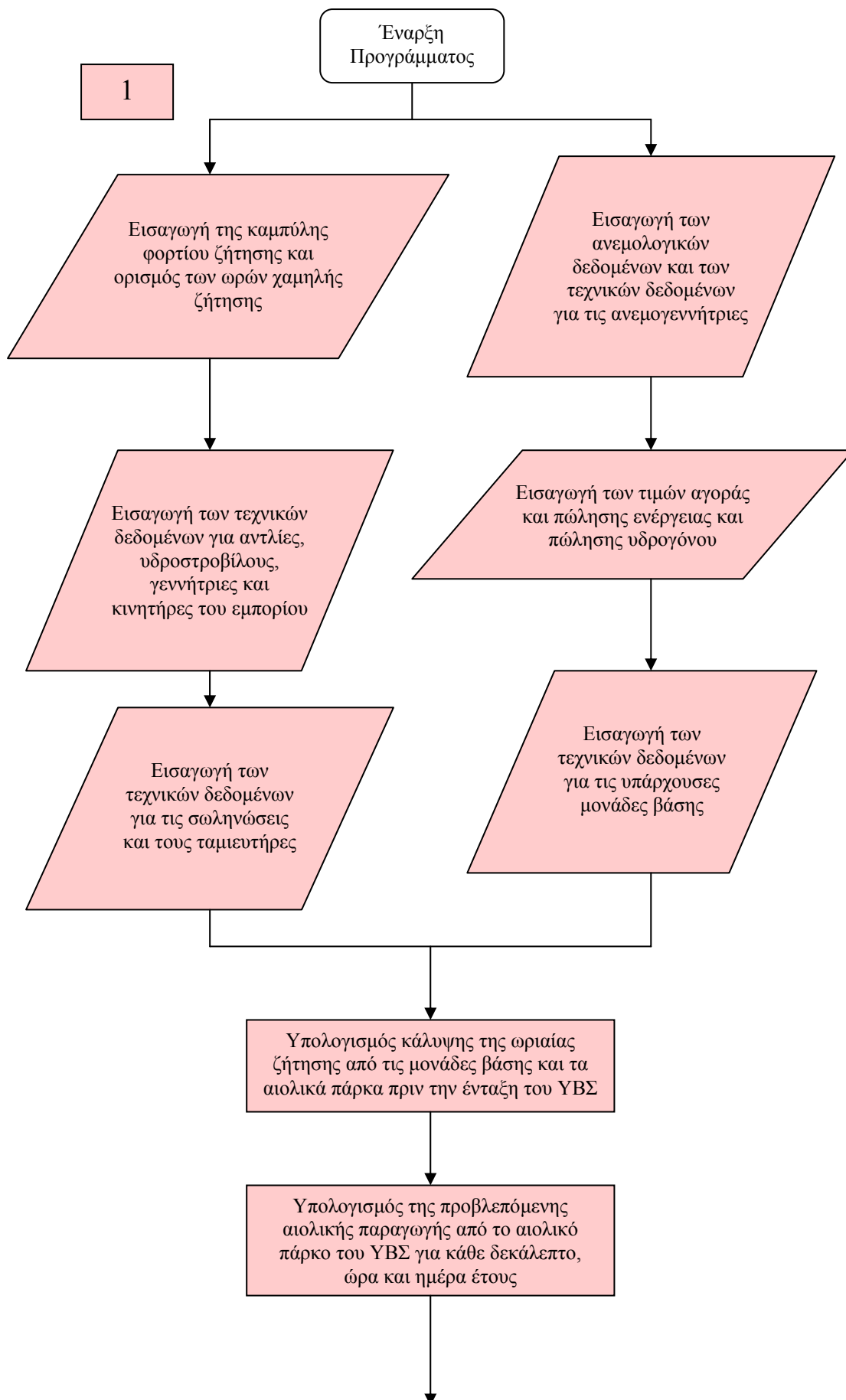
$$C_{PROD} = (C_{TOTAL} \cdot term + C_{LEIT}) / (Y \cdot E_{NET} \cdot 1000^2)$$

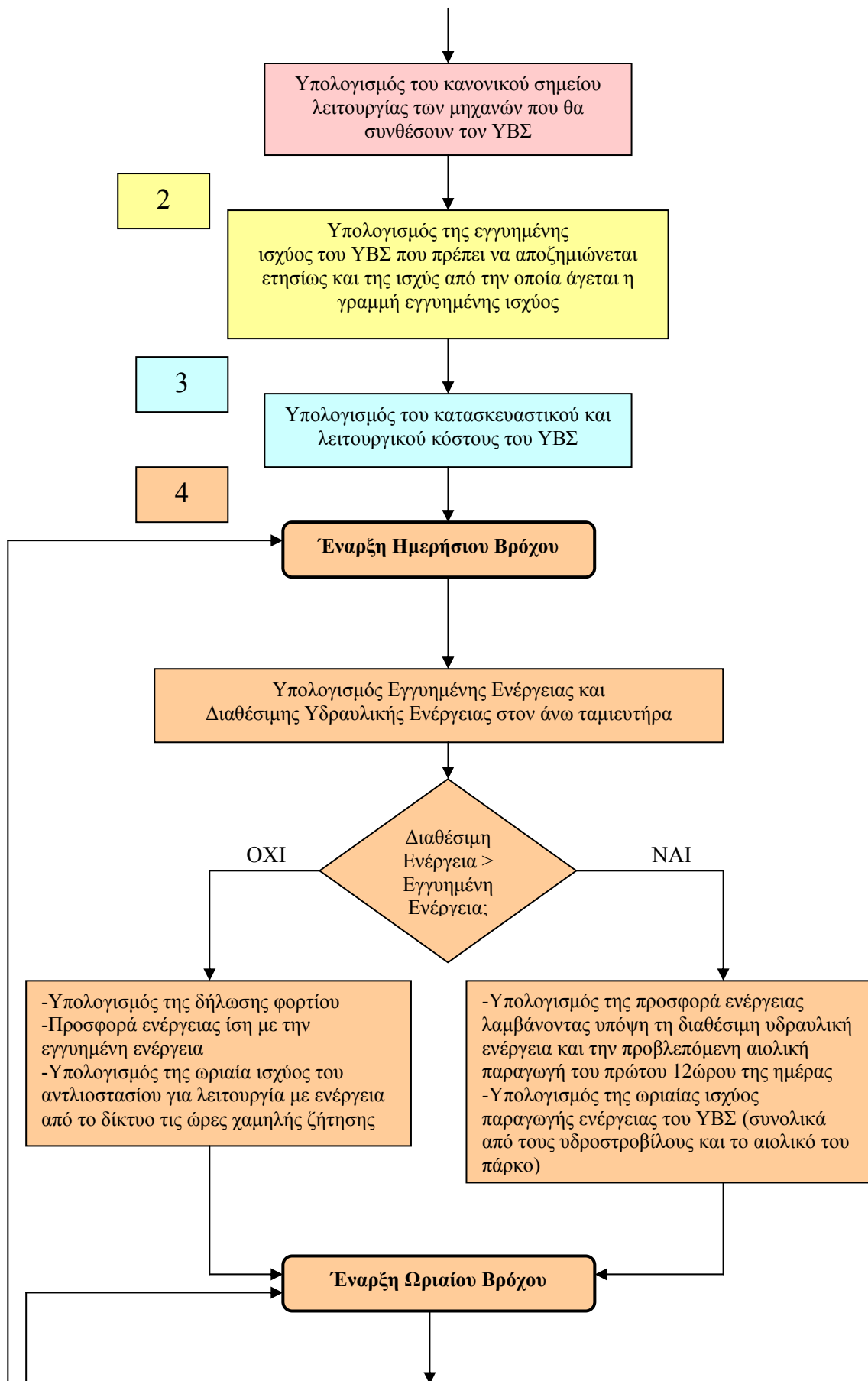
,όπου:

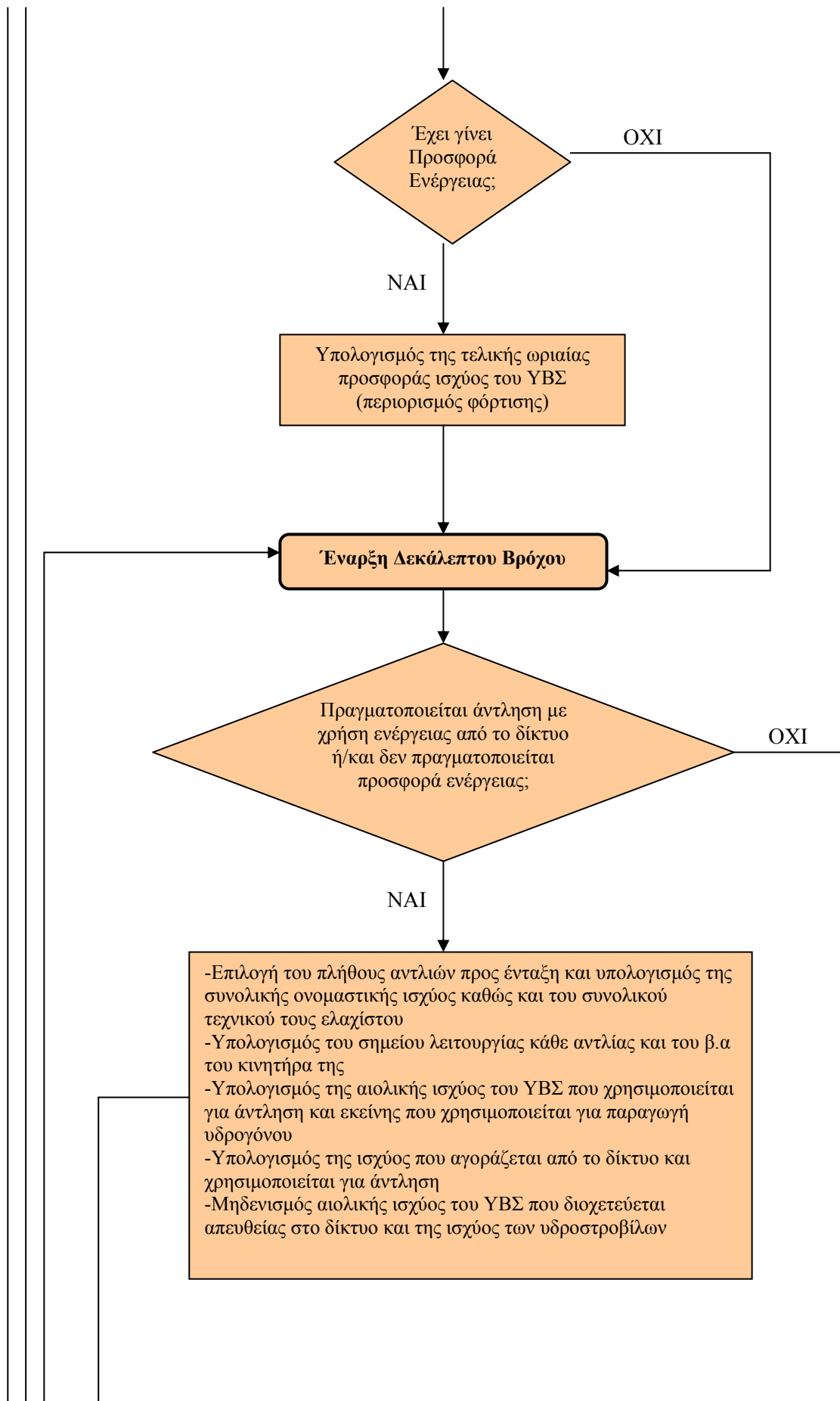
$$term = Q_{IRR} / (1 - (1 + Q_{IRR})^{-Q_{LIFE}})$$

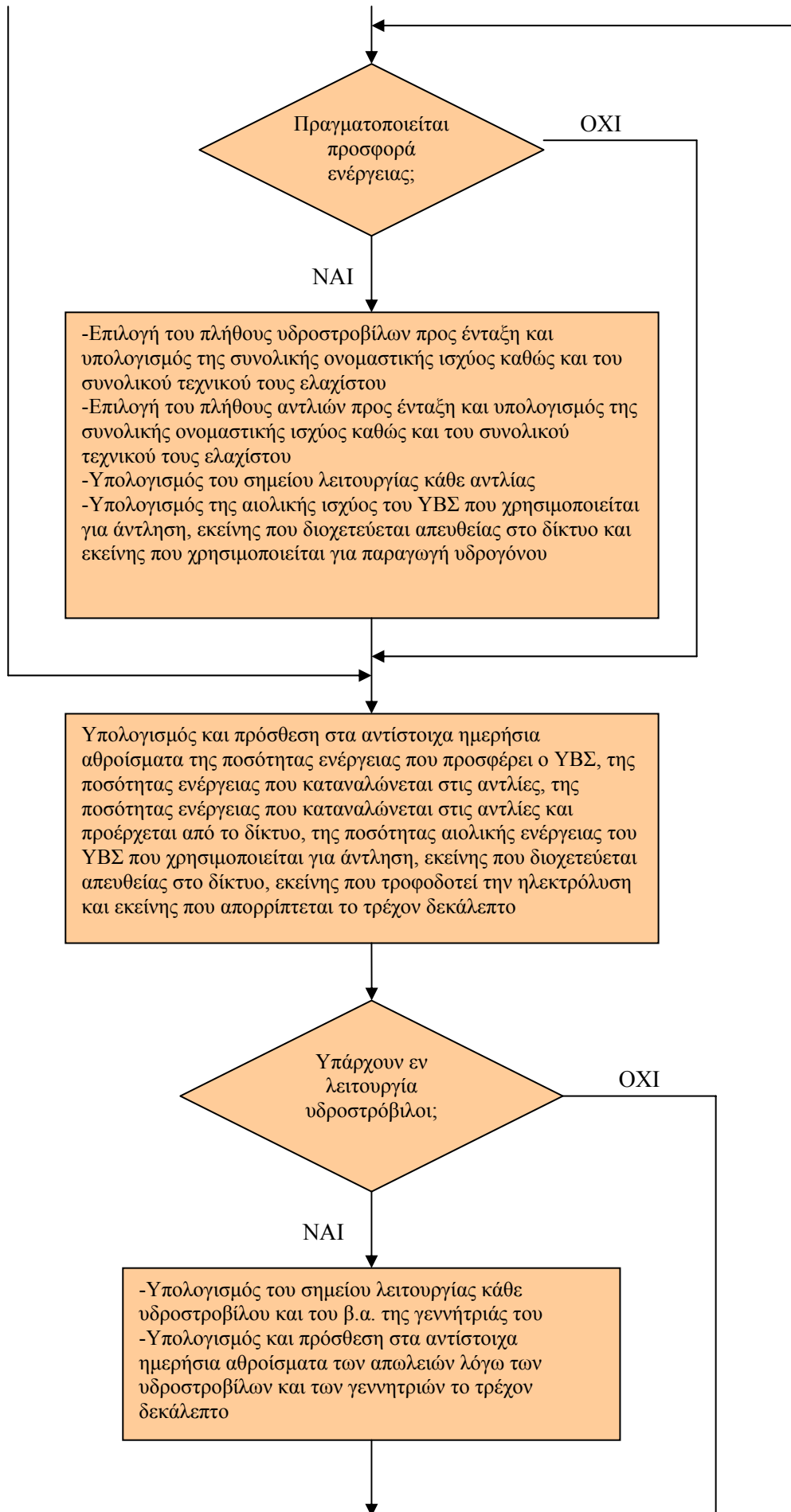
#### 4.3.7 Λογικό Διάγραμμα

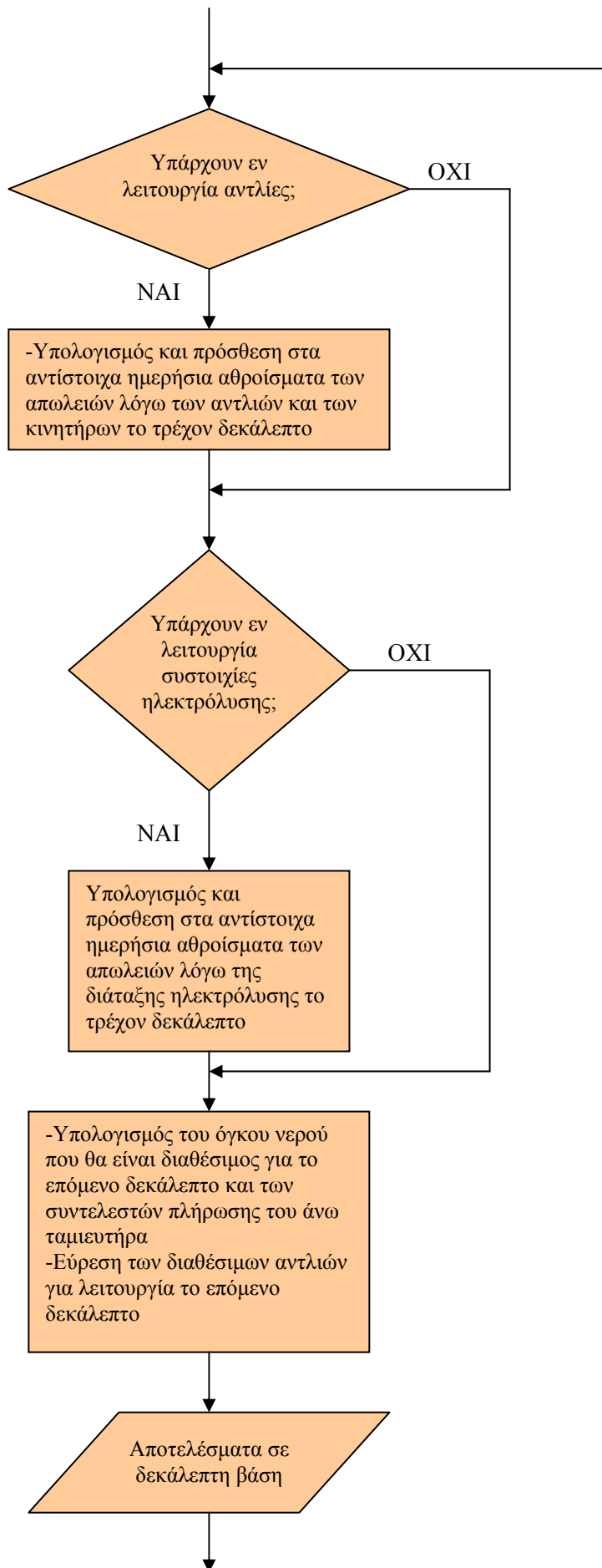
Ακολουθεί το Λογικό Διάγραμμα του κώδικα που περιγράφηκε (Σχήμα 4.12), στο οποίο περιλαμβάνονται οι κυρίως υπολογισμοί.



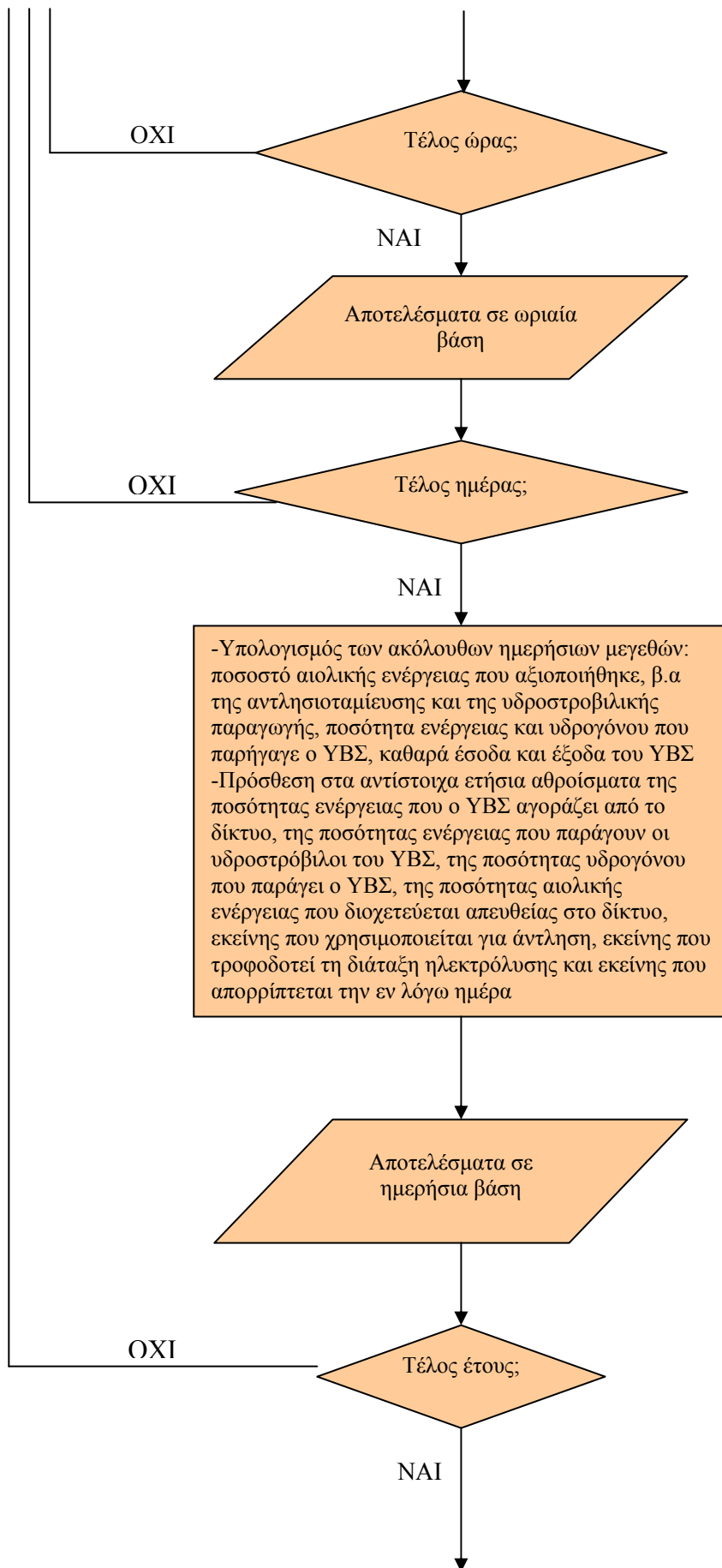


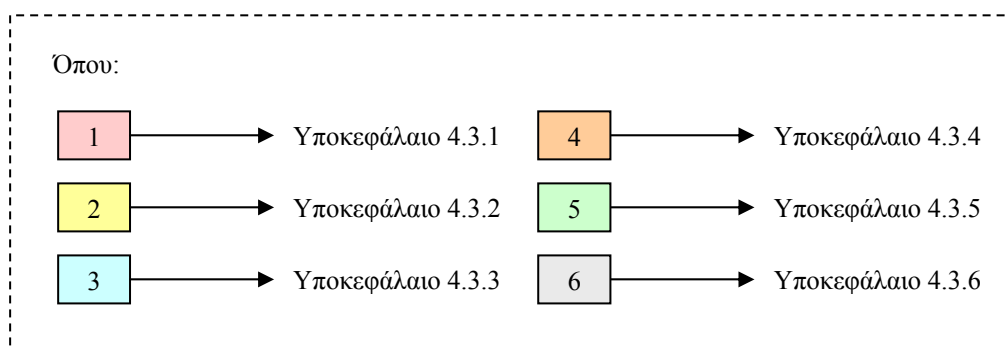
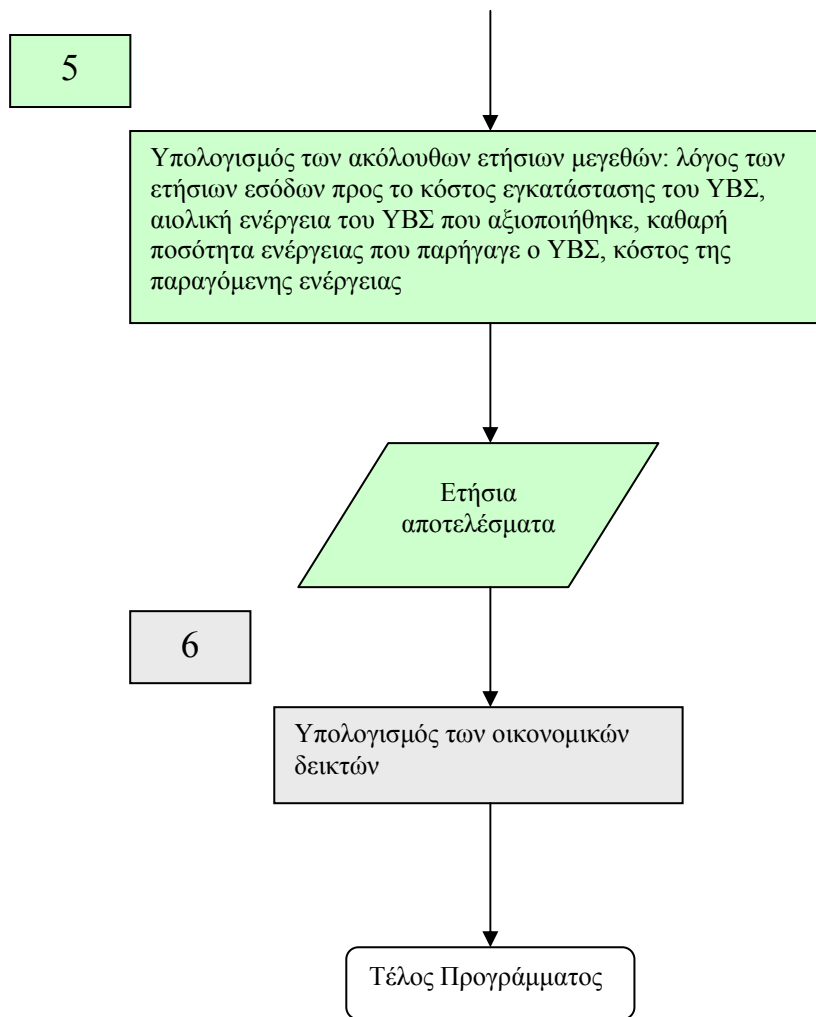












Σχήμα 4.12: Λογικό Διάγραμμα του κώδικα

## 4.4 Βελτιστοποίηση

### 4.4.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ορισμένα μεγέθη του προτεινόμενου ΥΒΣ θα αποτελέσουν παραμέτρους του συστήματος με σκοπό την εύρεση του οικονομικά ή/και ενεργειακά βέλτιστου σταθμού. Τα μεγέθη αυτά υπενθυμίζεται ότι είναι, το πλήθος των ανεμογεννητριών, η ονομαστική ισχύς κάθε αντλίας και συστοιχίας κελιών ηλεκτρόλυσης, και η ωφέλιμη χωρητικότητα του άνω ταμιευτήρα. Ο συνδυασμός των κατάλληλων τιμών των μεγεθών αυτών, προκειμένου να ικανοποιηθεί ο εκάστοτε οικονομικός ή/και ενεργειακός στόχος, γίνεται με τη χρήση του λογισμικού βελτιστοποίησης *EASY*, το οποίο χρησιμοποιεί εξελικτικούς αλγόριθμους.

Έτσι, στα δύο επόμενα υποκεφάλαια δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο των εξελικτικών αλγορίθμων και περιγράφονται οι δυνατότητες και η χρήση του λογισμικού *EASY*.

### 4.4.2 Εξελικτικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης είναι υπολογιστικές τεχνικές που στοχεύουν στην εύρεση της βέλτιστης λύσης ενός προβλήματος. Αναπτύχθηκαν κυρίως κατά τη δεκαετία του '90 και η λογική της μεθόδου τους στηρίζεται στις αρχές της εξέλιξης των ειδών, όπως αυτές διατυπώθηκαν για πρώτη φορά από το Δαρβίνο το 1859. Βασικό στοιχείο που οδήγησε στη γρήγορη και ευρεία επικράτηση τους ήταν αφενός το ενδιαφέρον, μη-μαθηματικό υπόβαθρο τους, η ευκολία με την οποία προσαρμόζονται σε κάθε νέο πρόβλημα αρκεί να υπάρχει προγραμματισμένο λογισμικό αξιολόγησης κάθε υποψήφιας λύσης και, κυρίως, η δυνατότητά τους να μην εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα τους είναι ότι, πρακτικά, σε ένα νέο πρόβλημα η χρήση τους είναι γενικά άμεση χωρίς παρεμβάσεις στη διαδικασία βελτιστοποίησης, κάτι που όμως επιβραδύνει το ρυθμό σύγκλισης. Έτσι, βασικό τους μειονέκτημα είναι η απαίτηση μεγάλου αριθμού αξιολογήσεων για τον εντοπισμό της βέλτιστης λύσης.

Σύμφωνα με τη δαρβινική θεωρία, κατά τη διάρκεια της ζωής, εξαιτίας του αγώνα για την ύπαρξη, γίνεται μια επιλογή των ατόμων κάθε είδους, μια φυσική επιλογή, που έχει ως αποτέλεσμα την επιβίωση του καλύτερου. Σύμφωνα με την αρχή αυτή («αγώνας για την ύπαρξη»), θα επιζήσουν οι οργανισμοί που έχουν ορισμένα πλεονεκτήματα, ενώ οι υπόλοιποι θα εξαφανιστούν βαθμιαία. Συνεπώς, οι καλύτεροι οργανισμοί που επιβιώνουν συγκεντρώνουν και τις περισσότερες πιθανότητες να διαιωνισθούν. Έτσι, τα χαρακτηριστικά των γονιδίων των επιτυχημένων ατόμων μεταφέρονται, με την πάροδο των γενεών, σε μεγαλύτερο αριθμό απογόνων. Ο συνδυασμός καλών χαρακτηριστικών από επιτυχημένους γονείς ενδεχομένως παράγει απογόνους με χαρακτηριστικά καλύτερα από αυτά των γονέων. Με τον τρόπο αυτό οι φυσικοί πληθυσμοί εξελίσσονται και προσαρμόζονται στο εκάστοτε περιβάλλον.

Σε αναλογία με τη θεωρία του Δαρβίνου, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι διαμορφώνουν πληθυσμούς ατόμων (λύσεων) που εξελίσσονται παράλληλα. Κατά την εξέλιξη που είναι η βασική διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης λύσης, ένας πληθυσμός  $\mu$  υποψήφιων λύσεων (γονείς κατά τη γενετική ορολογία) εξελίσσεται στον πληθυσμό  $\lambda$  απογόνων. Αυτοί οι απόγονοι είναι νέες λύσεις, που προκύπτουν από τους  $\mu$  γονείς, έχοντας ενδεχομένως καλύτερα χαρακτηριστικά. Αυτό συνεχίζεται, γενιά με γενιά, μέχρι την ικανοποίηση κάποιου κριτηρίου σύγκλισης, όπως α) το να μη βελτιώνεται περαιτέρω η λύση για ένα αριθμό αξιολογήσεων ή γενεών, β) το να έχει ομογενοποιηθεί ο πληθυσμός ή/και γ) η ανάλωση του υπολογιστικού χρόνου που επέτρεπε ο χρήστης.

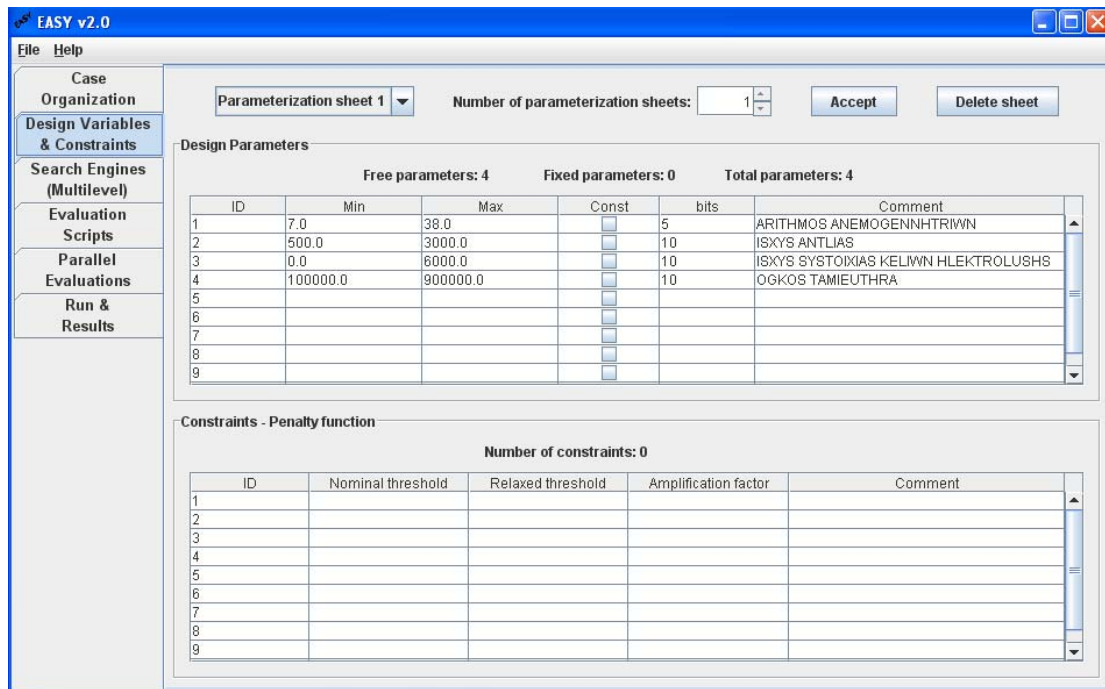
Η παραπάνω παρουσίαση του τι συμβαίνει σε έναν εξελικτικό αλγόριθμο μπορεί να θεμελιωθεί αυστηρότερα. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε γενιά  $g$  ενός εξελικτικού αλγόριθμου μπορούμε να θεωρήσουμε ότι συνυπάρχουν τρία διακριτά σύνολα ατόμων. Έτσι, υπάρχει το σύνολο των γονιών  $S^{g,\mu}$  με  $\mu$  μέλη, των απογόνων  $S^{g,\lambda}$  και των επίλεκτων ή ελίτ ατόμων  $S^{g,\epsilon}$ . Γίνεται εύκολα αντιληπτό το γιατί, σε έναν αλγόριθμο που βασίζεται στην εξέλιξη, υπάρχουν σύνολα γονέων και απογόνων, σε κάθε γενιά. Το σύνολο  $S^{g,\epsilon}$  αποθηκεύει τα επίλεκτα – καλύτερα άτομα (υποψήφιες λύσεις) που έχουν προκύψει από τη διαδικασία της εξέλιξης μέχρι τη γενιά. Ο σκοπός της ύπαρξης του συνόλου είναι διπλός. Ένας λόγος είναι ότι, οποτεδήποτε σταματήσει η εξέλιξη, το σύνολο  $S^{g,\epsilon}$  περιέχει την ή τις βέλτιστες λύσεις. Ένας ακόμα λόγος, είναι ότι κατά την εξέλιξη, χρησιμοποιείται πληροφορία από το σύνολο για

την ενίσχυση των καλών χαρακτηριστικών των μελών της νέας γενιάς που θα προκύψει. Αυτή η ενίσχυση αποτελεί τον λεγόμενο ελιτισμό στους εξελικτικούς αλγόριθμους.

#### 4.4.3 Το λογισμικό βελτιστοποίησης *EASY*

Ο *EASY* (Evolutionary Algorithm System) αποτελεί ένα, γενικού σκοπού και υψηλής εμπιστοσύνης, λογισμικό που χρησιμοποιείται για την αναζήτηση βέλτιστων λύσεων σε απλών ή πολλαπλών στόχων προβλήματα, με ή χωρίς συναρτήσεις περιορισμών. Το λογισμικό είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού C++, με περιβάλλον χρήσης σε γλώσσα Java. Αναπτύχθηκε και διατέθηκε στην αγορά από την ερευνητική ομάδα του εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Παρά το όνομα του λογισμικού, οι δυνατότητές του δεν περιορίζονται μόνο σε επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης αποκλειστικά μέσω εξελικτικών αλγορίθμων, αλλά επεκτείνονται και σε μεθόδους που χρησιμοποιούν την παράγωγο της συνάρτησης κόστους του προβλήματος (gradient based).

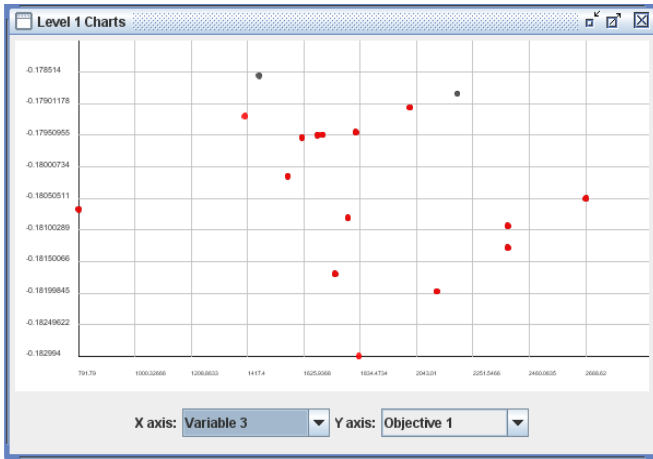
Αναφορικά με τη χρήση του λογισμικού είναι εύκολη, όπως άλλωστε υπαινίσσεται και το ίδιο του το όνομα. Ο χρήστης πρέπει, αρχικά, με κάποιες καθορισμένες ενέργειες, όπως είναι η δημιουργία συγκεκριμένου τύπου αρχείων, να ορίσει τον τρόπο επικοινωνίας μεταξύ του *EASY* και του προγράμματος (υπολογιστικός κώδικας) που θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των λύσεων. Ακόμα, ορίζονται οι μεταβλητές του υπολογιστικού κώδικα σε ειδικό αρχείο καθώς και ο/οι στόχος/οι της βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια, το μόνο που πρέπει να κάνει ένας αρχάριος χρήστης είναι να ορίσει το εύρος τιμών των μεταβλητών – παραμέτρων, στο οποίο ο *EASY* θα αναζητήσει τις πιθανές βέλτιστες λύσεις, καθώς και τον βαθμό ακρίβειας αναζήτησης της τιμής κάθε μεταβλητής (Σχήμα 4.13). Άλλωστε, είναι προεπιλεγμένες οι πιο τυπικές επιλογές των υπόλοιπων χαρακτηριστικών βελτιστοποίησης.



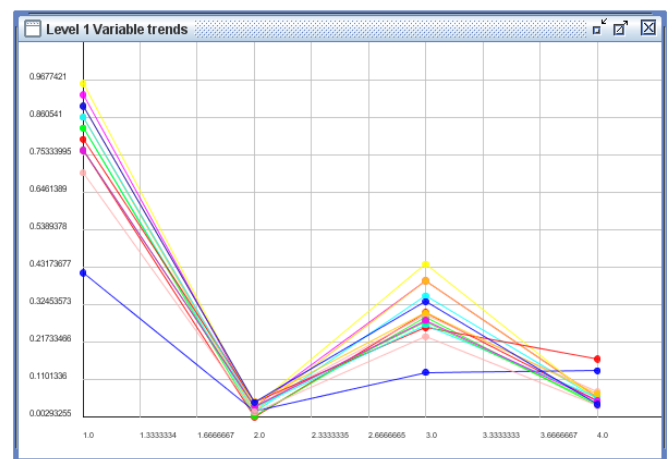
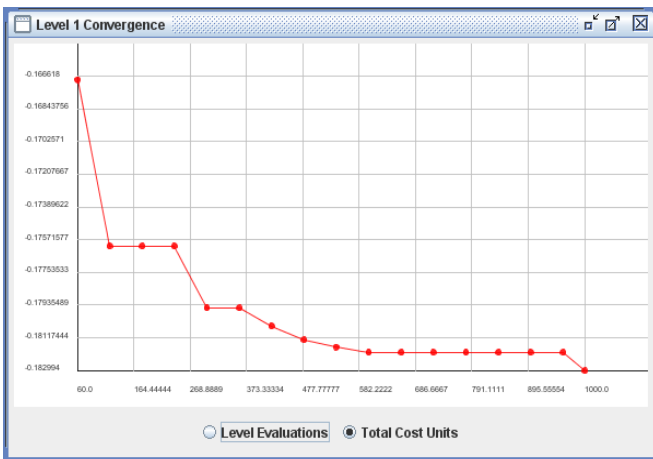
Σχήμα 4.13: Ορισμός εύρους τιμών μεταβλητών

Έπειτα, έχοντας ορίσει τις συνθήκες βελτιστοποίησης, ο *EASY* είναι σε θέση να αρχίσει να αναζητά τις βέλτιστες λύσεις βάσει της φιλοσοφίας των εξελικτικών αλγορίθμων. Κατά τη διάρκεια της αναζήτησης των λύσεων, που κυμαίνεται γύρω στις 10.000 – 50.000 αξιολογήσεις ανάλογα με τον επιλεγμένο βαθμό ακρίβειας και του εύρους των τιμών των μεταβλητών, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να παρακολουθεί την πορεία σύγκλισης προς τη βέλτιστη λύση μέσω κάποιων διαγραμμάτων και πινάκων (Σχήμα 4.14). Με την παρατήρηση της σύγκλισης, είναι πιθανή η απόφαση για αλλαγή κάποιων επιλογών ώστε να επιταχυνθεί η σύγκλιση.

Μετά από έναν αριθμό επαναλήψεων, παρατηρείται σύγκλιση σε ένα συγκεκριμένο συνδυασμό τιμών μεταβλητών, που δίνει τη βέλτιστη τιμή του στόχου, και η αναζήτηση σταματά.



ID	1	2	3	4	5	6	7
Variable 1	31.000014	33.00001	33.00001	36.000004...	34.000007...	34.000007...	20.00000
Variable 2	507.331375	539.10075	514.66275	575.75749...	546.432	578.20125	548.8757
Variable 3	1829.91	2117.3039...	1741.9379...	2381.232	2381.232	1788.858	791.79
Variable 4	138318.64	143792.8	128934.48	146138.8	146920.8	159433.04	208700.0
Objective 1	-0.182994	-0.18196	-0.181676	-0.181261	-0.18091	-0.180782	-0.18065



Σχήμα 4.14: Διαγράμματα και πίνακες αποτελεσμάτων κατά τη διάρκεια της αναζήτησης των λύσεων

## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>: Αποτελέσματα της προσομοίωσης

### 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ετήσιας λειτουργίας του προτεινόμενου ΥΒΣ για τέσσερα σενάρια λειτουργίας. Τα σενάρια αυτά διαμορφώνονται με το συνδυασμό των δύο περιπτώσεων διαχείρισης της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ και των δύο τιμολογήσεων πώλησης/αγοράς ενέργειας από τον ΥΒΣ και αποζημίωσης διαθεσιμότητας ισχύος, όπως αυτά εξηγήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι, τα εξεταζόμενα σενάρια διαμορφώνονται ως εξής:

- Σενάριο 1Α

Το σενάριο αυτό προκύπτει από τη σύνθεση της 1<sup>ης</sup> περίπτωσης διαχείρισης της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ και της τιμολογιακής πολιτικής Α. Δηλαδή, η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ διοχετεύεται κατά προτεραιότητα στο αντλιοστάσιο και οι τιμολογήσεις των αγοροπωλησιών ενέργειας από τον ΥΒΣ και της αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος είναι οι ακόλουθες:

Τιμή διαθεσιμότητας ισχύος	165 €/KW/έτος
Τιμή πώλησης της ενέργειας των υδροστροβίλων	0,125 €/KWh
Τιμή πώλησης της ενέργειας των αιολικών	0,1125 €/KWh
Τιμή αγοράς ενέργειας από το δίκτυο	0,10 €/KWh

*Πίνακας 5.1: Τιμολογιακή πολιτική Α*

- Σενάριο 1Β

Το σενάριο αυτό προκύπτει από τη σύνθεση της 1<sup>ης</sup> περίπτωσης διαχείρισης της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ και της τιμολογιακής πολιτικής Β. Δηλαδή, η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ διοχετεύεται και πάλι κατά προτεραιότητα στο αντλιοστάσιο, ενώ οι τιμολογήσεις των αγοροπωλησιών ενέργειας από τον ΥΒΣ και της αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος είναι οι ακόλουθες:



Τιμή διαθεσιμότητας ισχύος	127 €/KW/έτος
Τιμή πώλησης της ενέργειας των υδροστροβίλων	0,236 €/KWh
Τιμή πώλησης της ενέργειας των αιολικών	0,168 €/KWh
Τιμή αγοράς ενέργειας από το δίκτυο	0,186 €/KWh

*Πίνακας 5.2: Τιμολογιακή πολιτική Β*

Στο σενάριο αυτό εξετάστηκε επιπρόσθετα και η περίπτωση της εφαρμογής του περιορισμού που τίθεται από τη νομοθεσία για τους ΥΒΣ, σύμφωνα με την οποία, η μέγιστη ισχύς των μονάδων ΑΠΕ (αιολικό πάρκο στην περίπτωσή μας) δεν μπορεί να υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων αποθήκευσης του σταθμού αυτού, προσαυξημένη κατά ποσοστό μέχρι 20%. Ο περιορισμός αυτός θα εφαρμοστεί αποκλειστικά για το πρωτεύον αποθηκευτικό σύστημα (το αντλιοστάσιο), καθώς η εν λόγω νομοθεσία δεν προβλέπει την περίπτωση του υδρογόνου, ως αποθηκευτικού μέσου ΥΒΣ. Άλλωστε, από την Ελληνική Τεχνολογική Πλατφόρμα Υδρογόνου & Κυψελών Καυσίμου προτείνεται αύξηση της μονάδος ΑΠΕ άνω του 1,2 της δυναμικότητας του ΥΒΣ, εάν αυτός περιλαμβάνει μονάδα παραγωγής υδρογόνου.

- Σενάριο 2Α

Το σενάριο αυτό προκύπτει από τη σύνθεση της 2<sup>ης</sup> περίπτωσης διαχείρισης της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ και της τιμολογιακής πολιτικής Α. Δηλαδή, η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ διοχετεύεται κατά προτεραιότητα στο δίκτυο και οι τιμολογήσεις των αγοροπωλησιών ενέργειας από τον ΥΒΣ και της αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος είναι εκείνες του Πίνακα 5.1.

- Σενάριο 2Β

Το σενάριο αυτό προκύπτει από τη σύνθεση της 2<sup>ης</sup> περίπτωσης διαχείρισης της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ και της τιμολογιακής πολιτικής Β. Δηλαδή, η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ διοχετεύεται και πάλι κατά προτεραιότητα στο δίκτυο, ενώ οι τιμολογήσεις των αγοροπωλησιών ενέργειας από τον ΥΒΣ και της αποζημίωσης της διαθεσιμότητας ισχύος είναι εκείνες του Πίνακα 5.2.

Για κάθε σενάριο λειτουργίας εξετάστηκαν δέκα περιπτώσεις μεταβάλλοντας την τιμή πώλησης του παραγόμενου υδρογόνου από 1 έως 10 ευρώ/kg με βήμα το 1 ευρώ. Για κάθε περίπτωση ο ΥΒΣ βελτιστοποιήθηκε ως προς τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης (IRR) της επένδυσης με χρήση του προγράμματος βελτιστοποίησης *EASY*. Ειδικά για το σενάριο 1A (με και χωρίς τον περιορισμό του 20%) και για επιλεγμένες τιμές πώλησης του υδρογόνου, έγινε βελτιστοποίηση διπλού στόχου ως προς τον IRR και την ετήσια καθαρή ποσότητα παραγόμενης ενέργειας από τον ΥΒΣ. Οι παράμετροι του συστήματος που το πρόγραμμα της βελτιστοποίησης ανέλαβε σε κάθε περίπτωση να βρει την βέλτιστη τιμή τους με στόχο τη μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης ή/και της ετήσιας καθαρής ποσότητας ενέργειας είναι:

- Ο αριθμός των ανεμογεννητριών ονομαστικής ισχύος 800 KW η κάθε μια (εύρος επιτρεπόμενων τιμών 7 – 38, δηλαδή επιτρεπόμενο εύρος συνολικής εγκατεστημένης ισχύος του αιολικού πάρκου 5.600 – 30.400 KW)
- Η ωφέλιμη χωρητικότητα του άνω ταμιευτήρα (εύρος επιτρεπόμενων τιμών 100.000 – 900.000 m<sup>3</sup>)
- Η ονομαστική ισχύς κάθε μιας από τις έντεκα πανομοιότυπες αντλίες (εύρος επιτρεπόμενων τιμών 500 – 3.000 KW, δηλαδή επιτρεπόμενο εύρος συνολικής εγκατεστημένης ισχύος του αντλιοστασίου 5.500 – 33.000 KW)
- Η ονομαστική ισχύς κάθε μίας από τις πέντε πανομοιότυπες συστοιχίες της διάταξης ηλεκτρόλυσης (εύρος επιτρεπόμενων τιμών 0 – 6.000 KW, δηλαδή επιτρεπόμενο εύρος συνολικής εγκατεστημένης ισχύος της διάταξης ηλεκτρόλυσης 0 – 30.000 KW)

Με άλλα λόγια, επιχειρείται η βέλτιστη διαστασιολόγηση του ΥΒΣ με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του IRR ή/και της ετήσιας καθαρής ποσότητας ενέργειας που παράγει ο σταθμός.

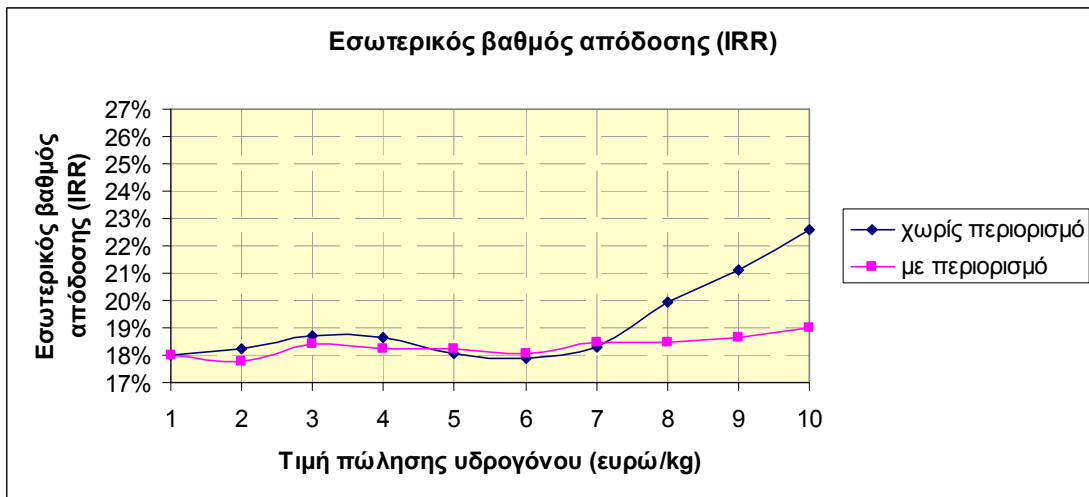
Τα υπόλοιπα μεγέθη (διαστασιολογήσεις, κόστη κτλ) παραμένουν σταθερά σε κάθε υπό εξέταση σταθμό, όπως αυτά δόθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Υπενθυμίζεται ότι η εγκατεστημένη ισχύς των υδροστροβίλων και εγγυημένη ισχύς του ΥΒΣ είναι 15 MW, ενώ ο συντελεστής χρησιμοποίησης (Capacity Factor) του αιολικού πάρκου 33%.

Συνεπώς εξετάστηκαν συνολικά 40 ΥΒΣ (10 σε κάθε σενάριο) και τα αποτελέσματα από τη βελτιστοποίησή τους με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του IRR θα δοθούν υπό μορφή διαγραμμάτων για κάθε σενάριο χωριστά και με παράμετρο την τιμή πώλησης του παραγόμενου υδρογόνου. Τα αποτελέσματα αυτά θα αφορούν στη διαστασιολόγηση του βέλτιστου σε κάθε περίπτωση σταθμού και στις ετήσιες ενεργειακές και οικονομικές επιδόσεις του. Σκοπός της εν λόγω προσέγγισης και παρουσίασης των αποτελεσμάτων είναι η εύρεση της επίδρασης της τιμής πώλησης του υδρογόνου στην ενεργειακή και οικονομική συμπεριφορά των σταθμών κάθε σεναρίου, δεδομένου ότι στον ελλαδικό χώρο δεν υφίστανται παρόμοιοι σταθμοί και η ελληνική νομοθεσία δεν προβλέπει ακόμα την ένταξή τους. Τα αποτελέσματα από τις επιλεγμένες βελτιστοποιήσεις διπλού στόχου θα δοθούν με τη μορφή των διαγραμμάτων «μέτωπα Pareto», ενώ η διαστασιολόγηση και οι οικονομικές και ενεργειακές επιδόσεις των αντίστοιχων σταθμών θα δοθούν υπό τη μορφή πινάκων. Σκοπός της παρουσίασης αυτής των αποτελεσμάτων, είναι η ανάδειξη της ανταγωνιστικότητας μεταξύ του οικονομικού και ενεργειακού στόχου. Τέλος, στα σενάρια 1Α και 2Α και για επιλεγμένες τιμές πώλησης του υδρογόνου, δίνονται επιπλέον διαγράμματα που απεικονίζουν τη λειτουργία του σταθμού για κάθε ημέρα του έτους αναφοράς. Σκοπός των διαγραμμάτων αυτών είναι ο έλεγχος της εσωτερικής λειτουργίας του σταθμού αλλά και της συνεργασίας του με το δίκτυο.

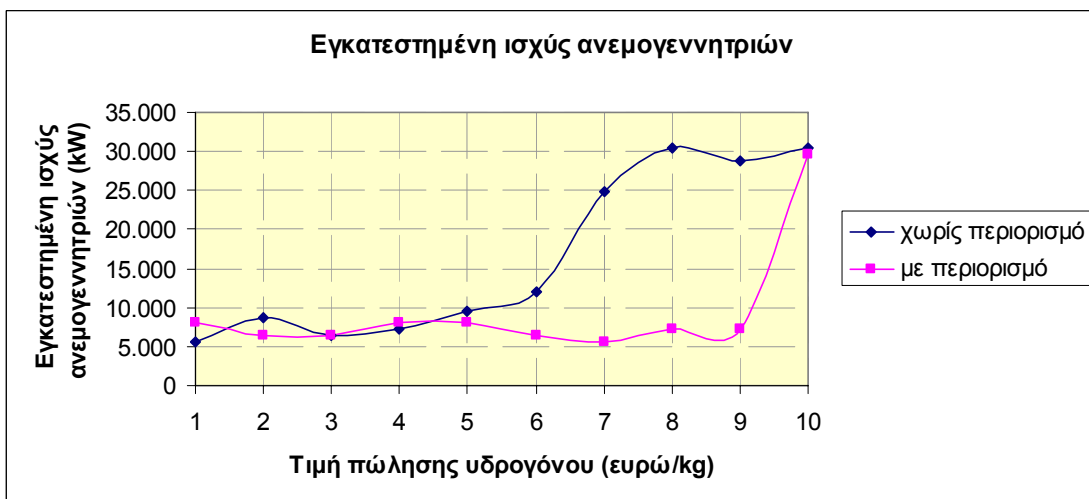
## **5.2 Αποτελέσματα του Σεναρίου 1Α**

### **5.2.1 Αποτελέσματα βέλτιστων σταθμών του Σεναρίου 1Α με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR)**

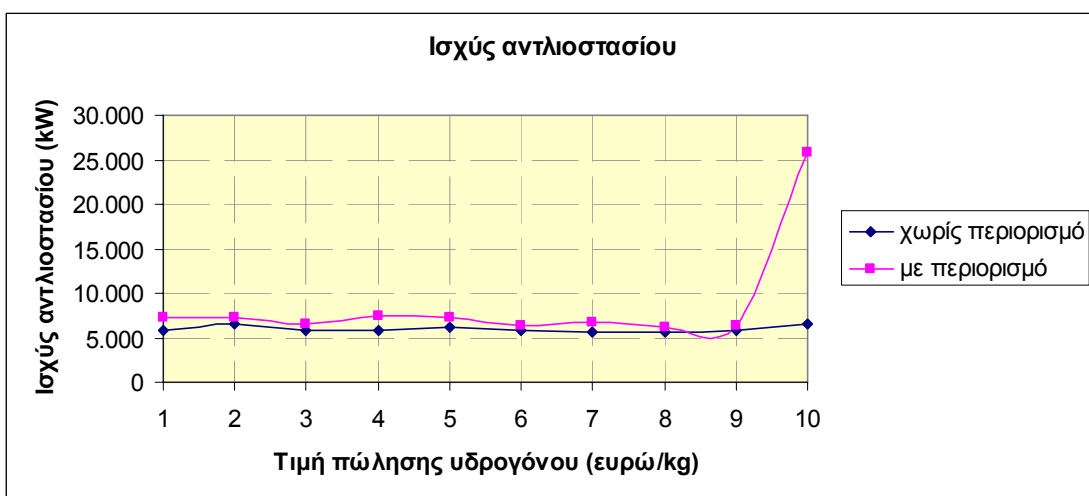
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται η διαμόρφωση και τα ετήσια αποτελέσματα των δέκα βέλτιστων ΥΒΣ του σεναρίου 1Α (με και χωρίς τον περιορισμό του 20%), ως προς τη μεγιστοποίηση του IRR και για τιμή πώλησης του υδρογόνου από 1 έως 10 ευρώ/kg. Αμέσως μετά ακολουθεί ο σχολιασμός τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων.



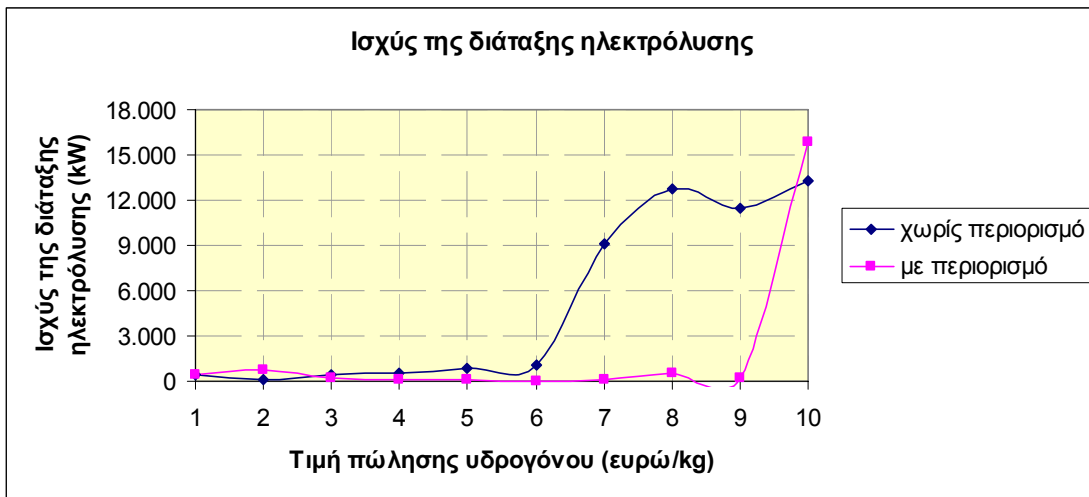
Σχήμα 5.1: Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR)



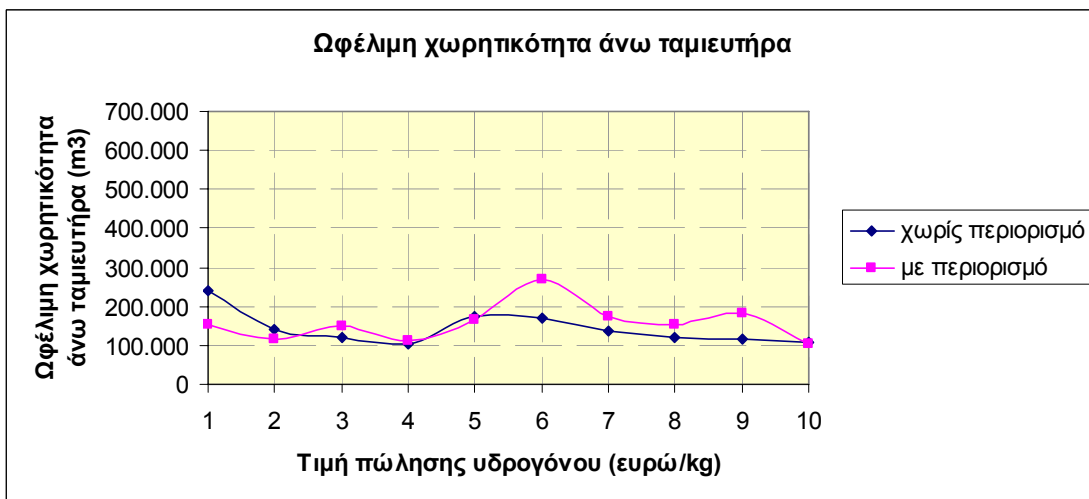
Σχήμα 5.2: Εγκατεστημένη ισχύς ανεμογεννητριών



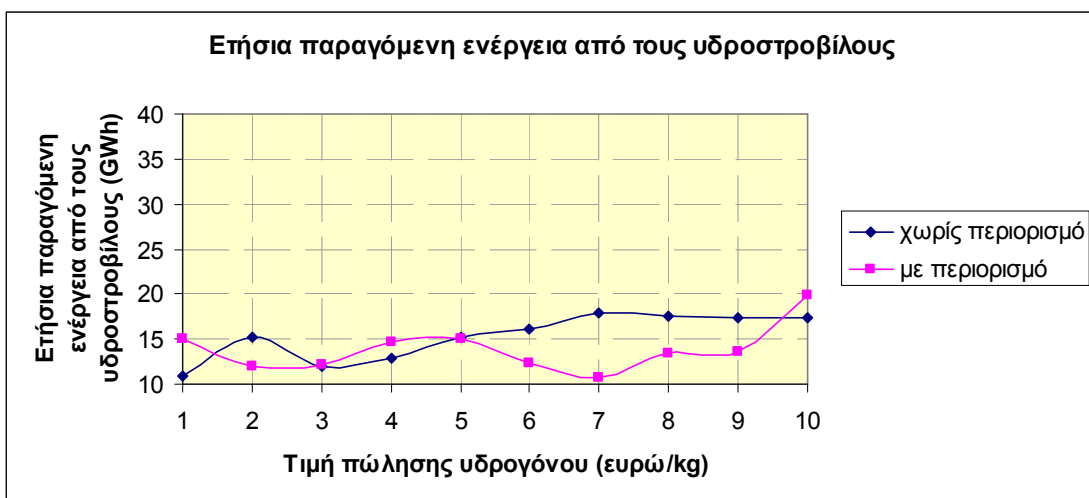
Σχήμα 5.3: Ισχύς αντλιοστασίου



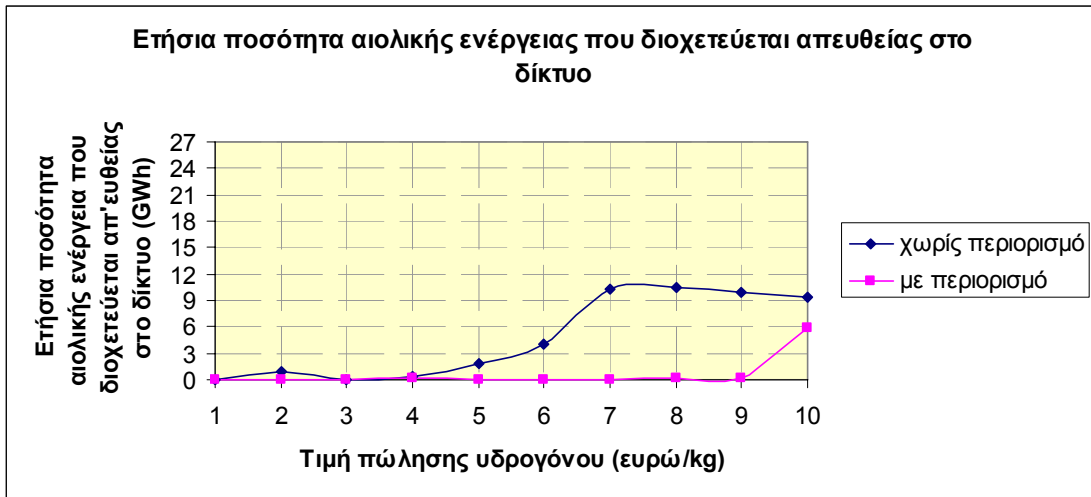
Σχήμα 5.4: Ισχύς της διάταξης ηλεκτρόλυσης



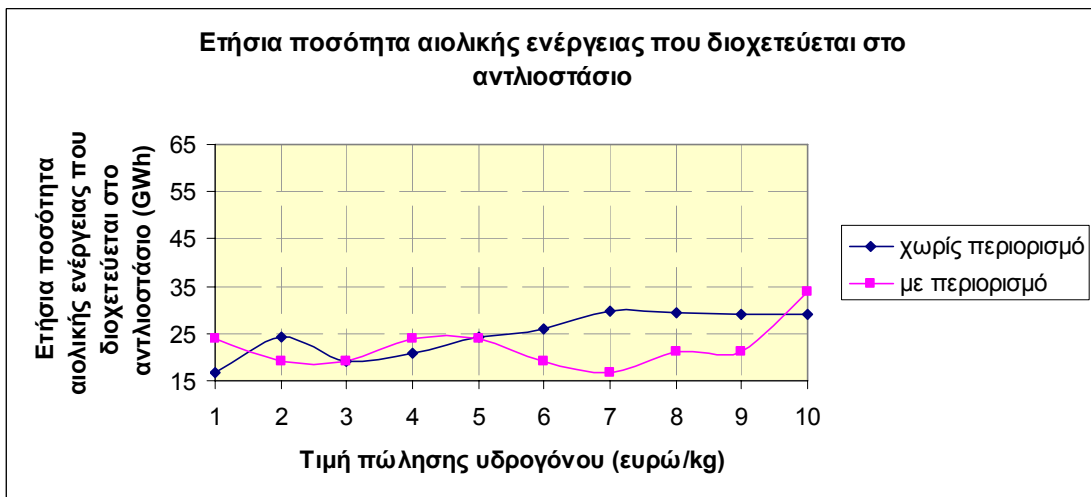
Σχήμα 5.5: Ωφέλιμη χωρητικότητα άνω ταμιευτήρα



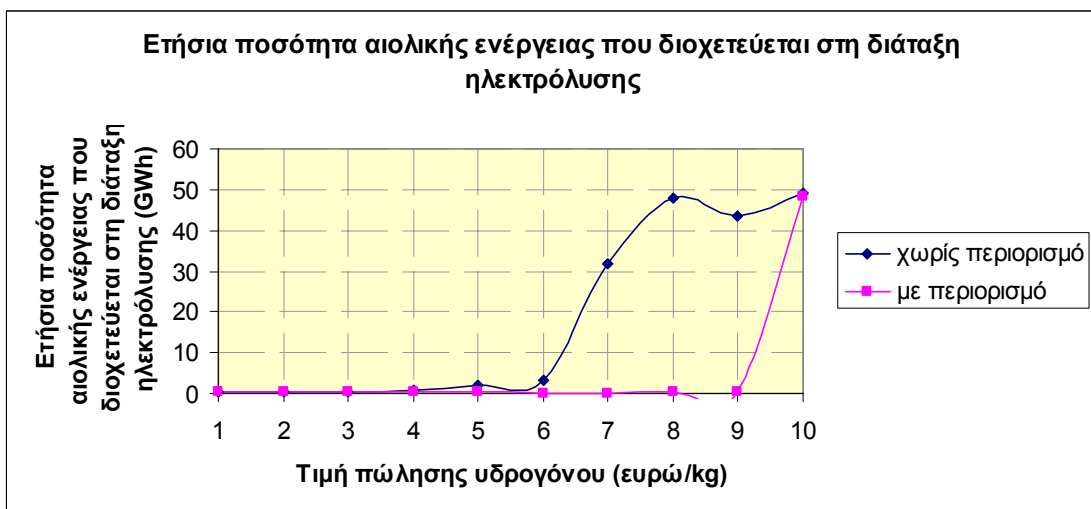
Σχήμα 5.6: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια από τους υδροστροβίλους



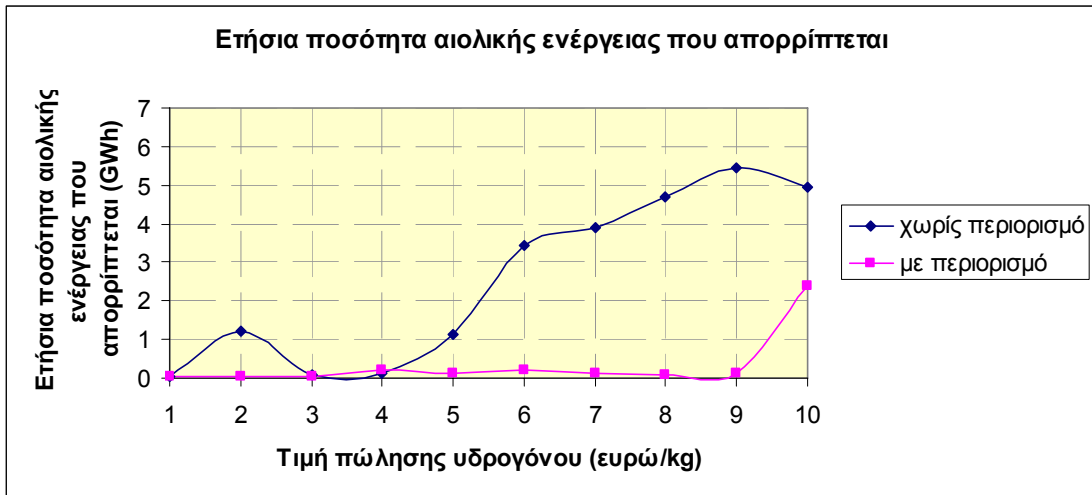
Σχήμα 5.7: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας → απευθείας στο δίκτυο



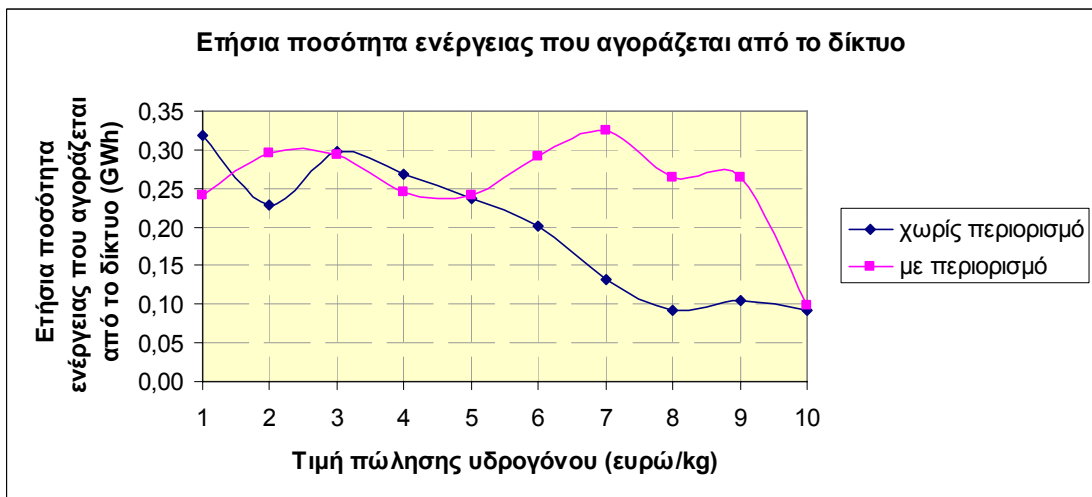
Σχήμα 5.8: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας → στο αντλιοστάσιο



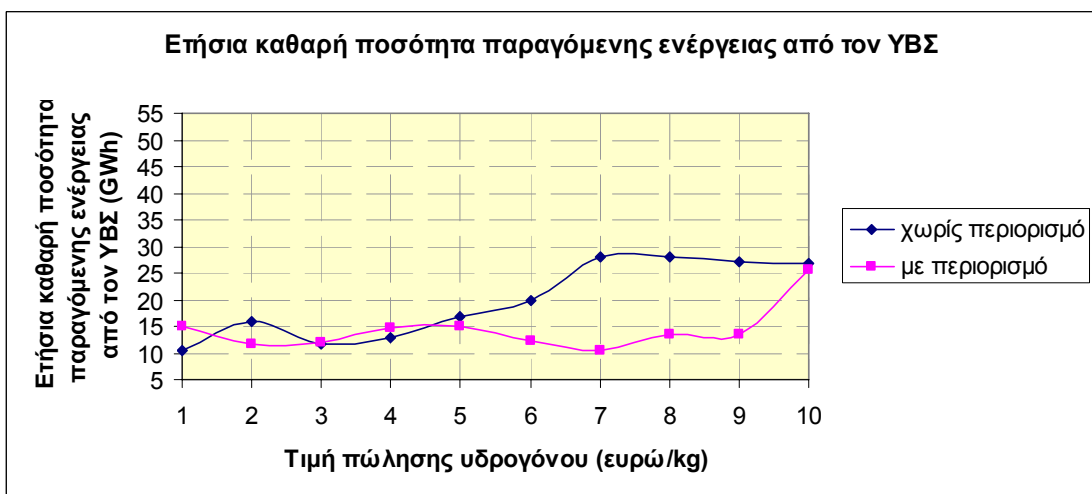
Σχήμα 5.9: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας → στη διάταξη ηλεκτρόλυσης



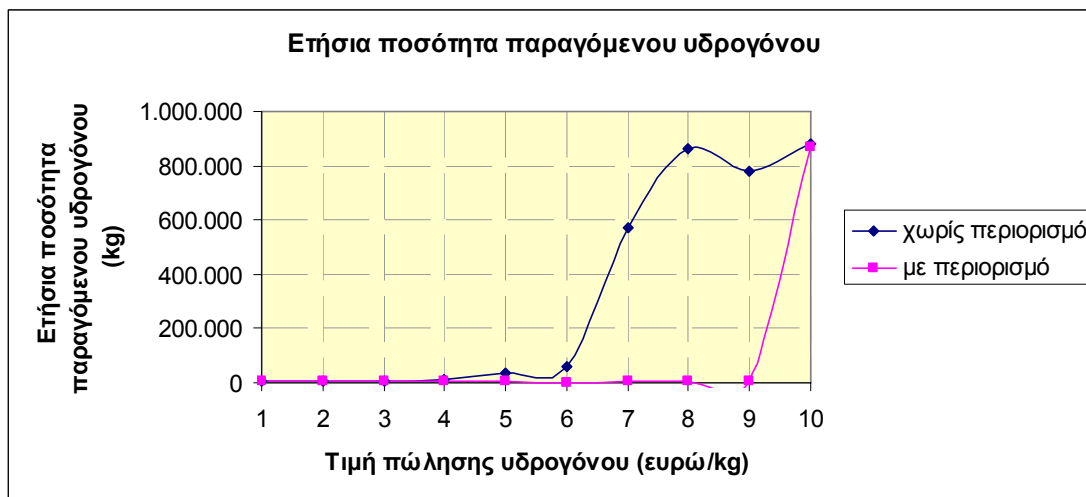
Σχήμα 5.10 : Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που απορρίπτεται



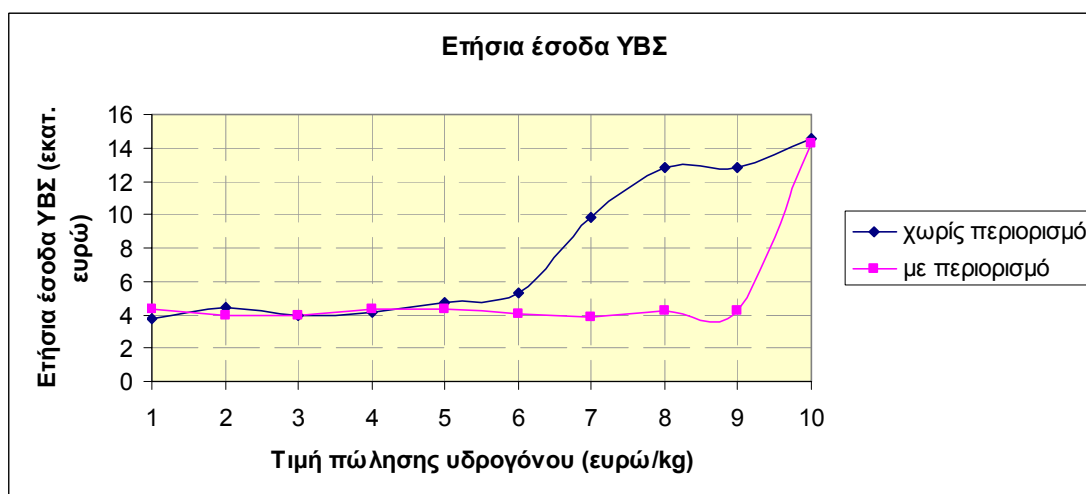
Σχήμα 5.11: Ετήσια ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο



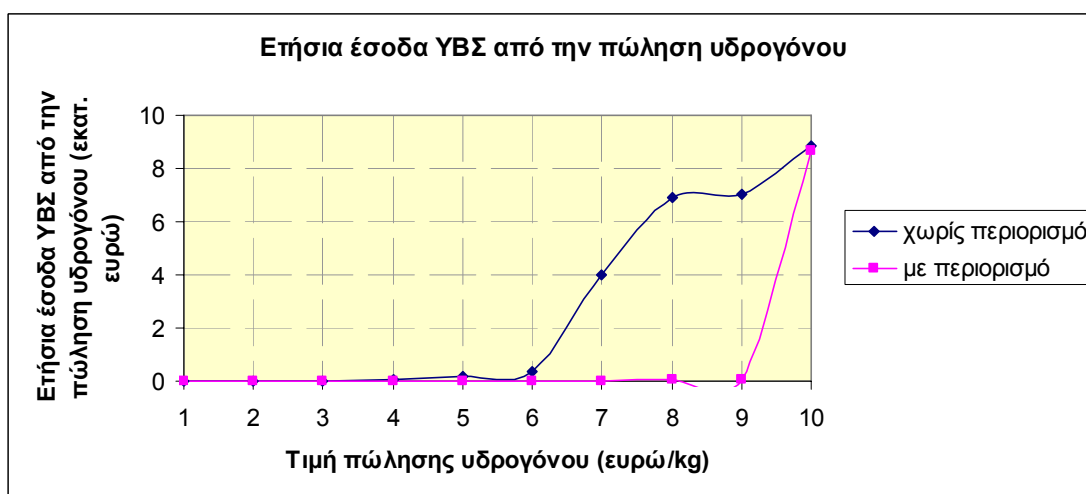
Σχήμα 5.12: Ετήσια καθαρή ποσότητα παραγόμενης ενέργειας από τον ΥΒΣ



Σχήμα 5.13: Ετήσια ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου

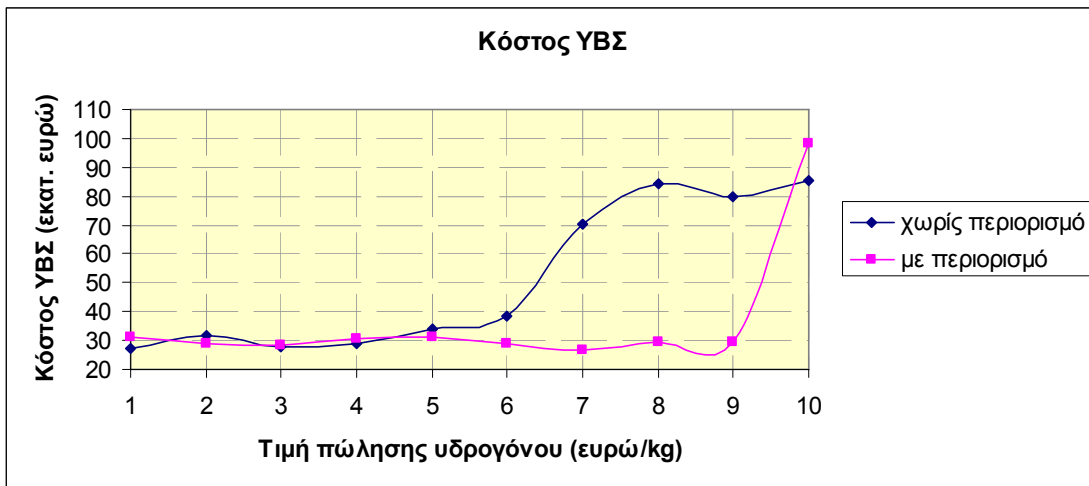


Σχήμα 5.14: Ετήσια έσοδα ΥΒΣ

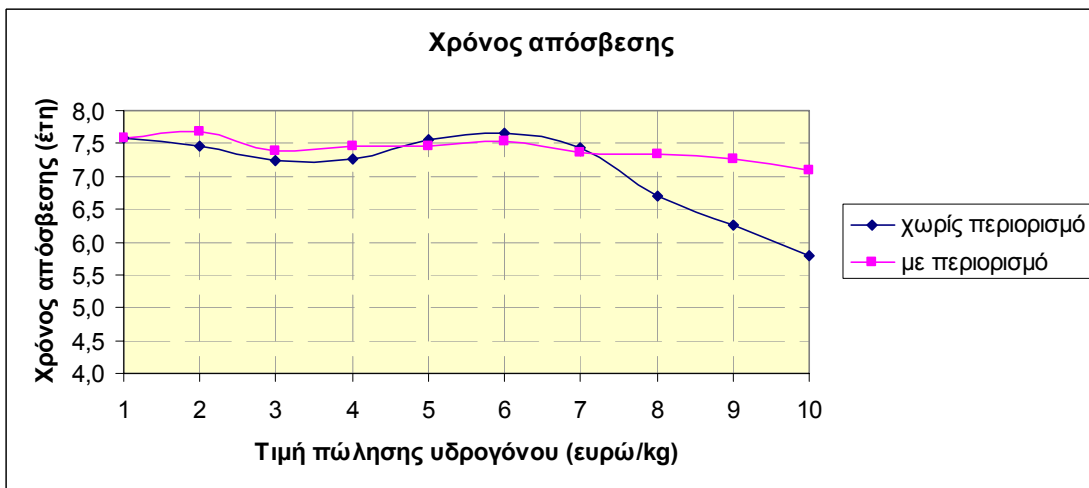


Σχήμα 5.15: Ετήσια έσοδα ΥΒΣ από την πώληση υδρογόνου

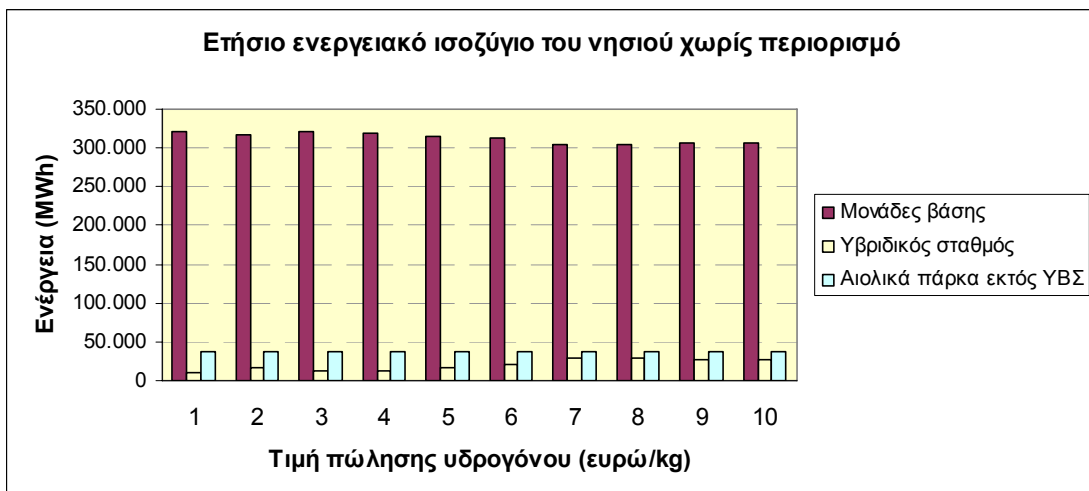




Σχήμα 5.16: Κόστος ΥΒΣ



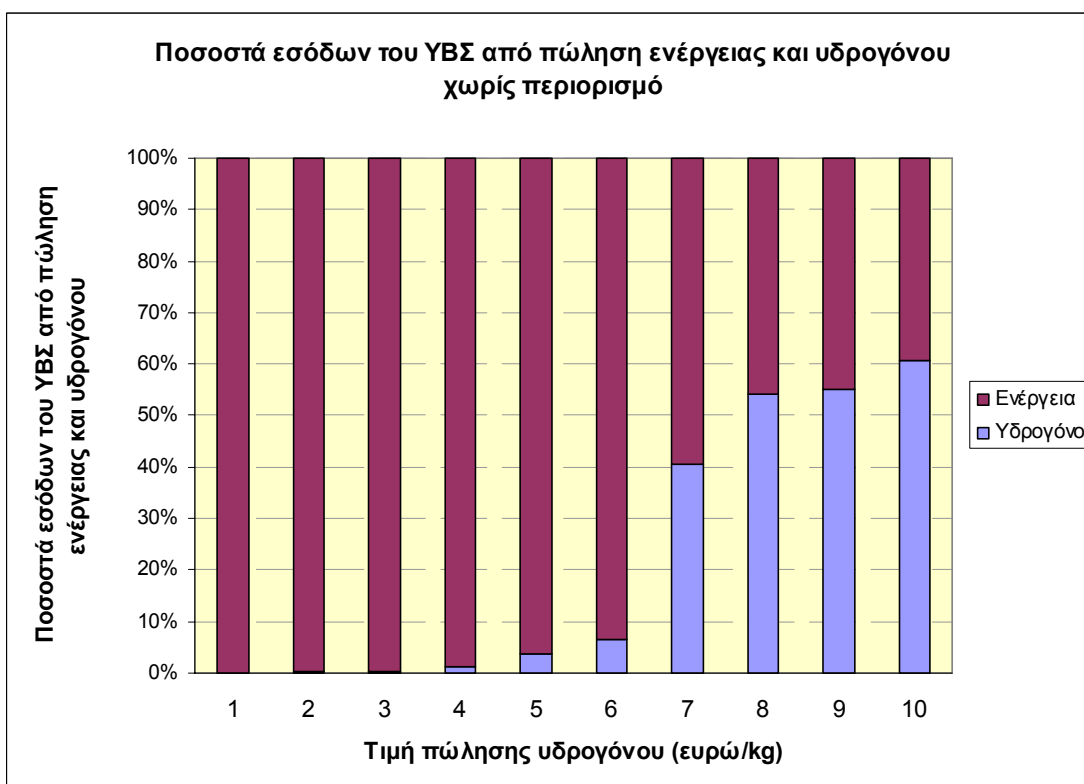
Σχήμα 5.17: Χρόνος απόσβεσης



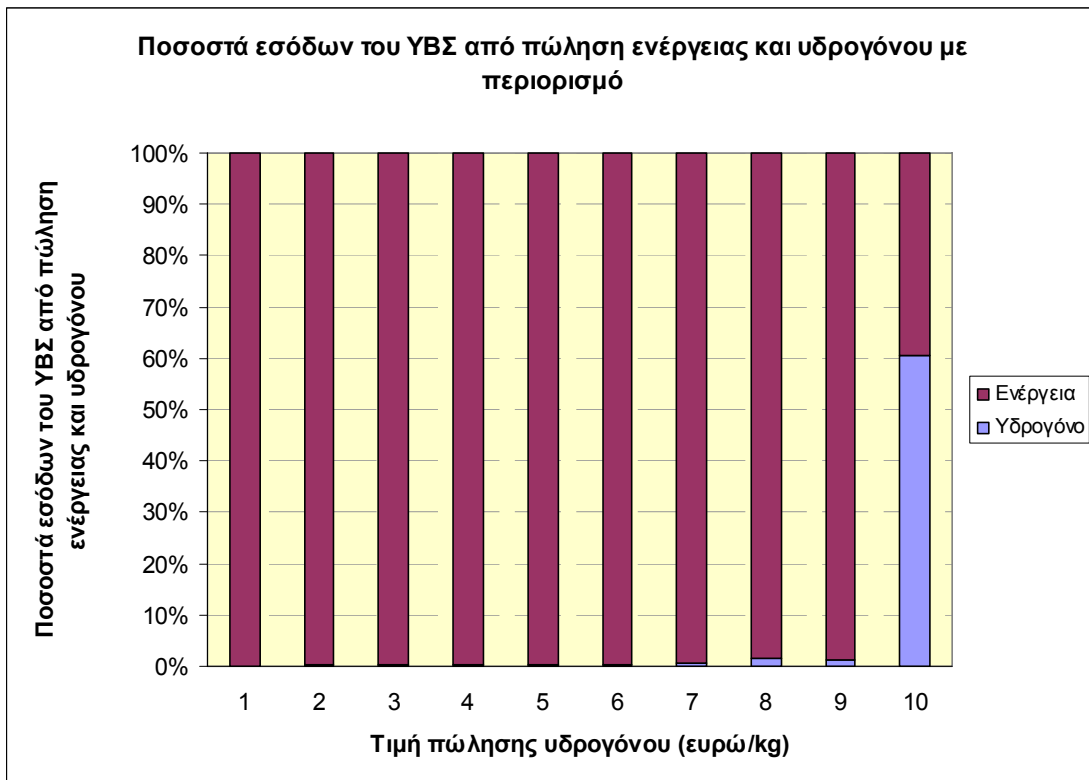
Σχήμα 5.18: Ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού χωρίς περιορισμό



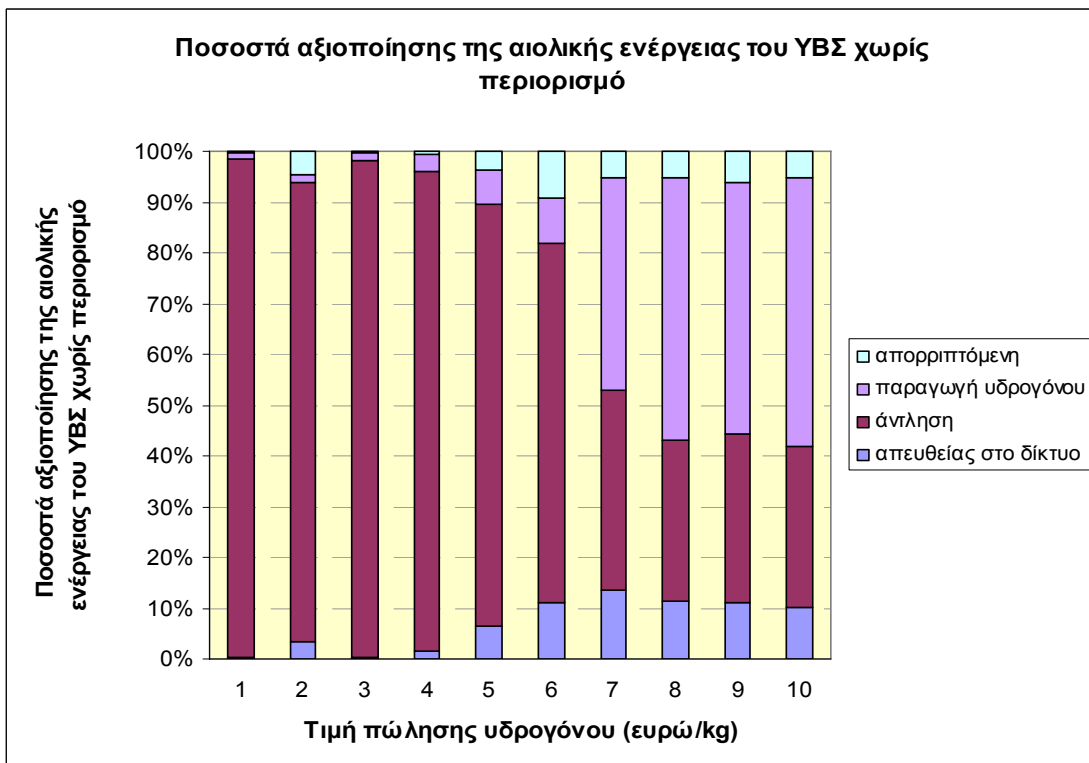
Σχήμα 5.19: Ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού με περιορισμό



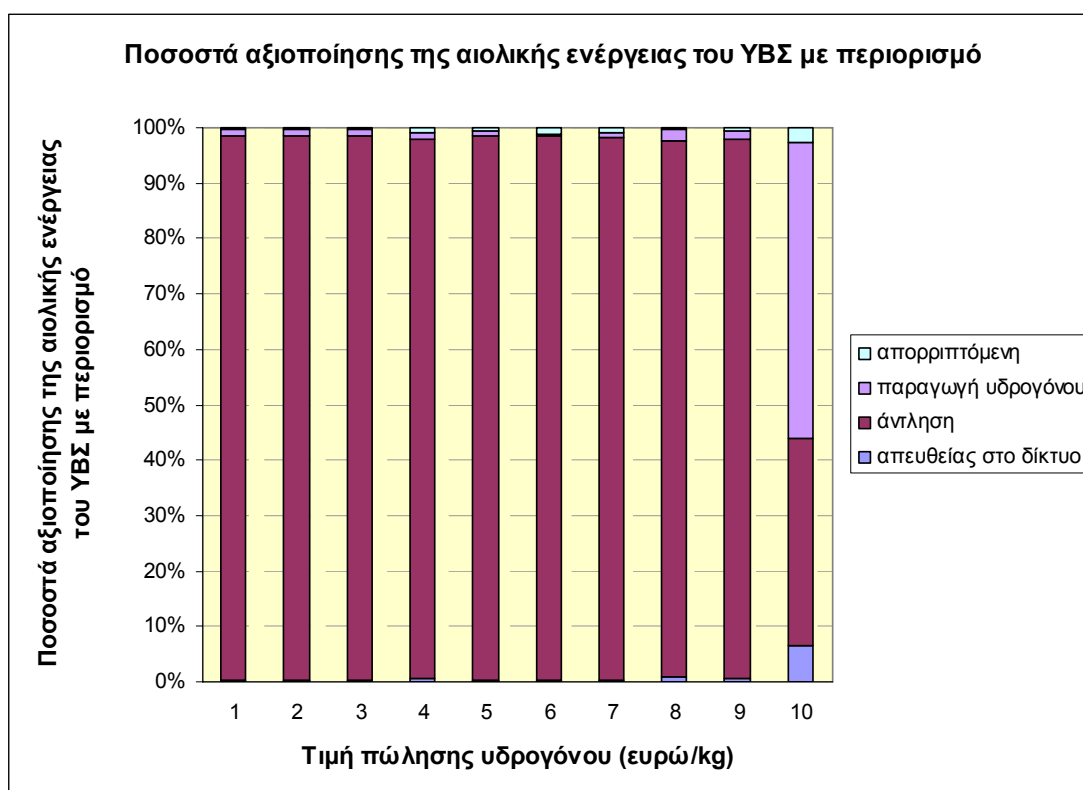
Σχήμα 5.20: Ποσοστά εσόδων του ΥΒΣ από πώληση ενέργειας και υδρογόνου χωρίς περιορισμό



*Σχήμα 5.21: Ποσοστά εσόδων του ΥΒΣ από πώληση ενέργειας και υδρογόνου με περιορισμό*



*Σχήμα 5.22: Ποσοστά αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας του ΥΒΣ χωρίς περιορισμό*



Σχήμα 5.23: Ποσοστά αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας του ΥΒΣ με περιορισμό

### Σχολιασμός – Συμπεράσματα

#### Χωρίς περιορισμό

Στο σενάριο αυτό παρατηρείται μια σχετική ομοιομορφία στη διαστασιολόγηση και τη συμπεριφορά των σταθμών, έως την τιμή πώλησης του υδρογόνου 6 ευρώ/kg. Για πώλησή του προς 7 ευρώ/kg και πάνω, οι σταθμοί διαμορφώνονται διαφορετικά, λειτουργώντας ουσιαστικά ως σταθμοί αιολικών – υδρογόνου. Φυσικά, για αυτές τις υψηλές τιμές πώλησης του υδρογόνου δεν ικανοποιείται ο περιορισμός του 20%.

Από κατασκευαστικής σκοπιάς, οι βέλτιστοι σταθμοί του σεναρίου λειτουργίας 1Α (χωρίς περιορισμό) συντίθενται με αιολικό πάρκο εγκατεστημένης ισχύος 5.6000 – 30.4000 KW, με την τιμή της να αυξάνει με την αύξηση της τιμής πώλησης του υδρογόνου (Σχήμα 5.2). Ενδιαφέρον προκαλεί το γεγονός ότι για την τιμή πώλησης υδρογόνου 1 ευρώ/kg το λογισμικό βελτιστοποίησης επέλεξε τον ελάχιστο

επιτρεπόμενο αριθμό αιολικών μηχανών (7), ενώ για τη μέγιστη τιμή πώλησής του, 10 ευρώ/kg, το μέγιστο δυνατό (38). Το γεγονός αυτό δείχνει καθαρά την επίδραση της τιμής πώλησης του υδρογόνου στη δαστασιολόγηση και την οικονομικότητα του έργου. Είναι σαφές ότι όσο η τιμή πώλησης του υδρογόνου αυξάνει, συμφέρει η εγκατάσταση περισσότερων ανεμογεννητριών ώστε να προωθηθεί η παραγωγή του. Το συμπέρασμα αυτό θα ενισχυθεί στη συνέχεια και από την εξέταση των υπόλοιπων σχημάτων. Επίσης, είναι απόλυτα αναμενόμενη η παρατήρηση ότι την καμπύλη της εγκατεστημένης ισχύος των αιολικών παρακολουθεί η καμπύλη της ετήσιας αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο με τιμές στο εύρος 0,03 – 9,4 GWh (Σχήμα 5.7). Αντίστοιχα, με αύξηση της τιμής πώλησης του υδρογόνου και συνεπακόλουθη αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών, σημειώνεται αύξηση της ετήσιας ποσότητας αιολικής ενέργειας που απορρίπτεται (0,05 – 4,9 GWh) (Σχήμα 5.10), αλλά και η αναμενόμενη μείωση της ετήσιας ποσότητας ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο (0,09 – 0,30 GWh) (Σχήμα 5.11). Να σημειωθεί ότι η ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που μένει αναξιοποίητη και απορρίπτεται δεν ξεπερνά σε καμία περίπτωση (καμία τιμή πώλησης υδρογόνου) το 10% της συνολικής ετήσιας παραγόμενης αιολικής ενέργειας του ΥΒΣ (Σχήμα 5.22).

Όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ του αντλιοστασίου, αυτή κυμαίνεται μεταξύ 5.600 – 6.600 KW και οι διακυμάνσεις στην τιμή της βρίσκονται σε αντιστοιχία με τις διακυμάνσεις της καμπύλης των εγκατεστημένων αιολικών (Σχήμα 5.3). Η καμπύλη της ετήσιας ποσότητας αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο κυμαίνεται από 17 - 29 GWh και αυξάνει σταδιακά με την αύξηση της τιμής πώλησης του υδρογόνου, ουσιαστικά με την αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών (Σχήμα 5.8). Την καμπύλη αυτή, όπως είναι λογικό, παρακολουθούν και οι καμπύλες της ετήσιας ποσότητας παραγόμενης ενέργειας από τους υδροστροβίλους (Σχήμα 5.6) και της ετήσιας καθαρής ποσότητας παραγόμενης ενέργειας από τον ΥΒΣ (Σχήμα 5.12) που σταδιακά αυξάνουν από 11 έως 17,5 GWh και από 11 έως 27 GWh αντίστοιχα, με την αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών που οφείλεται στην αύξηση της τιμής πώλησης του υδρογόνου.

Από την άλλη μεριά, η εγκατεστημένη ισχύς της διάταξης ηλεκτρόλυσης (500 – 13.000 KW) αυξάνει, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο, με την αύξηση της τιμής πώλησης του υδρογόνου (Σχήμα 5.4). Η αύξηση αυτή όμως είναι περισσότερο

ραγδαία για τις τιμές πώλησης του υδρογόνου από 7 έως 10 ευρώ/kg, για τις οποίες παρατηρείται και ραγδαία αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών, ενώ είναι αρκετά πιο μετριοπαθής για χαμηλότερες τιμές πώλησής του. Την καμπύλη της εγκατεστημένης ισχύος της διάταξης ηλεκτρόλυσης παρακολουθεί πιστά η καμπύλη της ετήσιας αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται σε αυτήν, με την τιμή της να κυμαίνεται από 0,23 – 49 GWh και να εκτοξεύεται για τιμές πώλησης του υδρογόνου από 7 ευρώ/kg και πάνω (Σχήμα 5.9). Ανάλογη προφανώς προκύπτει και η καμπύλη της ετήσιας ποσότητας παραγόμενου υδρογόνου με παραγωγή 4.000 – 57.000 kg για τιμές πώλησης του υδρογόνου από 1 έως 6 ευρώ/kg και 570.000 – 880.000 kg για τιμές από 7 έως 10 ευρώ/kg (Σχήμα 5.13). Για τις υψηλές αυτές τιμές πώλησης του υδρογόνου παρατηρούνται και τα επικρατέστερα ποσοστά (>42%) χρήσης της αιολικής ενέργειας για την παραγωγή του έναντι της διοχέτευσής της στο αντλιοστάσιο (<38%) ή απευθείας στο δίκτυο (<13%) (Σχήμα 5.22). Άλλωστε, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (Σχήμα 5.1) των ΥΒΣ που εξετάστηκαν αυξάνει επίσης ραγδαία για τιμές πώλησης υδρογόνου από 7 έως 10 ευρώ/kg, που σημαίνει ότι στο εν λόγω σενάριο το υδρογόνο ως προϊόν του ΥΒΣ γίνεται ανταγωνιστικό του έτερου προϊόντος του, δηλαδή της ενέργειας των υδροστροβίλων, από την τιμή πώλησής του 7 ευρώ/kg και πάνω. Για τις τιμές αυτές παρατηρείται επίσης μεγάλη αύξηση του κόστους του ΥΒΣ (Σχήμα 5.16) λόγω της απότομης αύξησης των εγκατεστημένων αιολικών και συστοιχιών ηλεκτρόλυσης, αλλά και ανάλογη αύξηση των εσόδων του από την πώληση υδρογόνου (Σχήμα 5.15) καθώς και σημαντική συνεισφορά (>40%) των εσόδων αυτών στα συνολικά ετήσια έσοδα του σταθμού (Σχήμα 5.20).

Η ωφέλιμη χωρητικότητα του άνω ταμιευτήρα κυμαίνεται σε ένα εύρος τιμών 100.000 - 250.000 m<sup>3</sup>, ακολουθώντας μια γενικά πτωτική τάση όσο η τιμή πώλησης του υδρογόνου αυξάνει (Σχήμα 5.5). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι ο ΥΒΣ με τιμή πώλησης υδρογόνου 10 ευρώ/kg διαστασιολογήθηκε από το λογισμικό βελτιστοποίησης με τον μικρότερο δυνατό ταμιευτήρα. Αυτό συνέβη διότι το υδρογόνο στην περίπτωση αυτή προσφέρει στον ΥΒΣ περισσότερα έσοδα σε σχέση με την πώληση ενέργειας (> 60%) (Σχήμα 5.20) και εφόσον η βελτιστοποίηση έγινε με οικονομικό κριτήριο, ο ταμιευτήρας που εξυπηρετεί την πώληση ενέργειας και αποτελεί μια από τις ακριβότερες συνιστώσες του έργου, δεν κρίνεται σκόπιμο να είναι μεγαλύτερος.

Όσον αφορά στο ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού παρατηρείται μια ελαφρά υποχώρηση της συμμετοχής των μονάδων βάσεως με ταυτόχρονη ενίσχυση εκείνης του ΥΒΣ, με την αύξηση της τιμής πώλησης του υδρογόνου (Σχήμα 5.18). Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ του αιολικού πάρκου του ΥΒΣ για υψηλές τιμές πώλησης του υδρογόνου. Τα αιολικά πάρκα εκτός ΥΒΣ προσφέρουν σταθερό ποσό ενέργειας ετησίως, καθώς η πολιτική διαχείρισης του ΥΒΣ προέβλεπε η λειτουργία τους να μένει ανεπηρέαστη μετά την ένταξή του.

Από οικονομικής σκοπιάς, οι δέκα υβριδικοί σταθμοί που εξετάστηκαν στο σενάριο λειτουργίας 1Α (χωρίς περιορισμό) εμφανίζουν πολύ ενθαρρυντικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης των ΥΒΣ, η μεγιστοποίηση του οποίου αποτέλεσε τον στόχο της βελτιστοποίησής τους, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 18 – 22% καθιστώντας τις επενδύσεις στα εν λόγω έργα ιδιαίτερα ελκυστικές (Σχήμα 5.1). Όπως ήταν αναμενόμενο, ο IRR αυξάνει με την αύξηση της τιμής πώλησης του υδρογόνου, ενώ, όπως προαναφέρθηκε, σημαντική αύξησή του σημειώνεται για τιμές πώλησης του υδρογόνου από 7 ευρώ/kg και πάνω. Εξίσου βιώσιμες προκύπτουν οι επενδύσεις και βάσει του κριτηρίου του χρόνου απόσβεσης, το οποίο κυμαίνεται από 5,5 – 7,5 χρόνια, με την τιμή του εύλογα να ελαττώνεται με την αύξηση της τιμής πώλησης του υδρογόνου (Σχήμα 5.17). Η μείωση αυτή είναι ακόμη πιο έντονη όσο η τιμή πώλησης του υδρογόνου αυξάνεται από τα 7 έως τα 10 ευρώ/kg.

### Με περιορισμό

Οι δέκα ΥΒΣ του σεναρίου 1Α που υπόκεινται στον περιορισμό του 20% (εγκατεστημένη ισχύς αιολικών  $\leq 1,2 \cdot$  εγκατεστημένη ισχύς αντλιοστασίου), διαστασιολογούνται διαφορετικά και παρουσιάζουν εντελώς διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τους αντίστοιχους ΥΒΣ του ίδιου σεναρίου, στους οποίους δεν επιβλήθηκε ο περιορισμός αυτός. Για την ακρίβεια, οι σταθμοί του περιορισμού για πώληση του υδρογόνου έως 9 ευρώ/kg, διαστασιολογούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι, επί της ουσίας, ΥΒΣ αιολικών – αντλησιοταμίευσης, όπως συμβαίνει στους σταθμούς χωρίς περιορισμό για πώληση του υδρογόνου έως 6 ευρώ/kg. Η παραγωγή και πώληση υδρογόνου κερδίζει έδαφος και αποτελεί αξιόλογο κομμάτι

των δραστηριοτήτων, αποκλειστικά, του ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου προς 10 ευρώ/kg.

Αναλυτικότερα, μέχρι την τιμή πώλησης του υδρογόνου προς 9 ευρώ/kg και με σκοπό τη μεγιστοποίηση του IRR, ο επιβεβλημένος περιορισμός συγκρατεί την εγκατεστημένη ισχύ των αιολικών μέχρι τα 8.000 KW (Σχήμα 5.2). Με άλλα λόγια, η σταδιακή αύξηση της τιμής πώλησης του υδρογόνου από 7 έως 9 ευρώ/kg δεν συνεπάγεται την αντίστοιχη αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών, ώστε να προωθηθεί η παραγωγή του, όπως στην περίπτωση των αντίστοιχων ΥΒΣ χωρίς τον περιορισμό. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι για πώληση του υδρογόνου μέχρι 9 ευρώ/kg, η αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών που αναπόφευκτα, λόγω του περιορισμού, θα σήμαινε και αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος του αντλιοστασίου, δεν κρίνεται ως οικονομικά συμφέρουσα λύση. Αντίθετα, για πώληση του υδρογόνου προς 10 ευρώ/kg, η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών εκτοξεύεται στα 29.600 KW, πλησιάζοντας την εγκατεστημένη ισχύ του αιολικού πάρκου του αντίστοιχου σταθμού χωρίς περιορισμό και υποδεικνύοντας ότι, παρά τον περιορισμό, η παραγωγή υδρογόνου έγινε μια συμφέρουσα επιλογή για τον σταθμό. Να σημειωθεί ότι το λογισμικό βελτιστοποίησης εξαντλεί, σε κάθε περίπτωση, το όριο του περιορισμού για τα εγκατεστημένα αιολικά, επιλέγοντας την τιμή τους περίπου 1,2 φορές μεγαλύτερη από εκείνη της εγκατεστημένης ισχύος του αντλιοστασίου.

Για πώληση του υδρογόνου έως 9 ευρώ/kg, η σχετικά μικρή εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών οδηγεί σε ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο μικρότερη των 0,2 GWh (Σχήμα 5.7). Για πώληση του υδρογόνου προς 10 ευρώ/kg, στο δίκτυο διοχετεύονται ετησίως περίπου 6 GWh. Σε κάθε περίπτωση η αντίστοιχη συνεισφορά των αιολικών στο δίκτυο, χωρίς τον περιορισμό, είναι μεγαλύτερη. Από την άλλη μεριά, στους ΥΒΣ με περιορισμό, η ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που απορρίπτεται (Σχήμα 5.10) είναι μικρότερη από εκείνη των αντίστοιχων σταθμών χωρίς περιορισμό, αντιπροσωπεύοντας πάντα ποσοστό μικρότερο του 2,5 % της συνολικής ετήσιας αιολικής παραγωγής (Σχήμα 5.23). Στα ίδια ή σε ελαφρώς υψηλότερα επίπεδα με εκείνα των σταθμών χωρίς περιορισμό, κυμαίνεται η ετήσια ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο, η οποία για καμία τιμή πώλησης του υδρογόνου δεν ξεπερνά τις 0,3 GWh (Σχήμα 5.11).



Αναφορικά με την εγκατεστημένη ισχύ του αντλιοστασίου και για πώληση του υδρογόνου έως 9 ευρώ/kg, αυτή κυμαίνεται σε ελαφρώς υψηλότερα επίπεδα από τους αντίστοιχους σταθμούς χωρίς περιορισμό (Σχήμα 5.3). Όμως, στον ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου προς 10 ευρώ/kg, η ισχύς του αντλιοστασίου εκτοξεύεται περίπου στα 26.000 KW, σε αντίθεση με το αντλιοστάσιο ονομαστικής ισχύος περίπου 6.500 KW του αντίστοιχου σταθμού χωρίς περιορισμό. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην επιβολή του περιορισμού, ο οποίος δεσμεύει την ισχύ των αιολικών να είναι το πολύ κατά 20% μεγαλύτερη από αυτή του αντλιοστασίου, σε συνδυασμό με τα αυξημένα αιολικά για την εν λόγω τιμή πώλησης του υδρογόνου. Για τον ίδιο λόγο, η ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο, είναι η μεγαλύτερη παρατηρούμενη του σεναρίου (με και χωρίς περιορισμό) για τον ΥΒΣ με περιορισμό που πωλεί το υδρογόνο προς 10 ευρώ/kg, αγγίζοντας τις 33,7 GWh (Σχήμα 5.8).

Όπως ήταν αναμενόμενο, οι καμπύλες της ετήσιας ποσότητας ενέργειας που παράγουν οι υδροστρόβιλοι (Σχήμα 5.6) και εκείνη της ετήσιας καθαρής ποσότητας ενέργειας που παράγει συνολικά ο ΥΒΣ (Σχήμα 5.12), παρακολουθούν πιστά την καμπύλη της ετήσιας ποσότητας αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο. Η μεγαλύτερη υδροστροβιλική παραγωγή του σεναρίου (με και χωρίς περιορισμό) είναι περίπου 20 GWh και σημειώνεται για τον ΥΒΣ με περιορισμό που πωλεί το υδρογόνο προς 10 ευρώ/kg.

Σχετικά με την ωφέλιμη χωρητικότητα του άνω ταμιευτήρα, αυτή για τις περισσότερες τιμές πώλησης του υδρογόνου είναι ελαφρώς μεγαλύτερη ή ίση με τις αντίστοιχες τιμές της χωρητικότητας για τους σταθμούς χωρίς περιορισμό (Σχήμα 5.5). Αυτό αποδίδεται στα σχετικώς μεγαλύτερα αντλιοστάσια των σταθμών με περιορισμό, που όπως εξηγήθηκε νωρίτερα, οφείλονται στη δεσμευμένη τους ισχύ από την ισχύ των αιολικών.

Όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ της διάταξης ηλεκτρόλυσης (Σχήμα 5.4), αυτή παραμένει μικρότερη από 530 KW για πώληση του υδρογόνου μέχρι 9 ευρώ/kg παράγοντας ετησίως ποσότητα υδρογόνου μικρότερη από 6.300 kg (Σχήμα 5.13), ενώ αυξάνεται απότομα περίπου στα 16.000 KW για πώλησή του προς 10 ευρώ/kg με αντίστοιχη ετήσια παραγωγή 867.000 kg υδρογόνου. Με ανάλογο τρόπο, η ετήσια

ποσότητα αιολικής ενέργειας που τροφοδοτεί τη διάταξη ηλεκτρόλυσης (Σχήμα 5.9) δεν ξεπερνά τις 0,5 GWh (~1,5% της ετήσιας αιολικής παραγωγής (Σχήμα 5.23)) για πώληση του υδρογόνου μέχρι 9 ευρώ/kg, ενώ αγγίζει τις 48 GWh (>50% της ετήσιας αιολικής παραγωγής) για την υψηλότερη τιμή πώλησής του. Για τους σταθμούς πώλησης του υδρογόνου έως 9 ευρώ/kg, οι σταθμοί του σεναρίου που δεν υπόκεινται στον περιορισμό, διαστασιολογούνται με μεγαλύτερες διατάξεις ηλεκτρόλυσης, οι οποίες προφανώς καταναλώνουν περισσότερη αιολική ενέργεια ετησίως και παράγουν μεγαλύτερα ποσά υδρογόνου. Για πώληση του υδρογόνου προς 10 ευρώ/kg, οι δυο σταθμοί, με και χωρίς περιορισμό, παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά ως προς την παραγωγή υδρογόνου, γεγονός που υποστηρίζεται και από τα ίδια περίπου μεγέθους αιολικά τους πάρκα.

Αναφορικά με το ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού (Σχήμα 5.19), αυτό διαμορφώνεται ανάλογα με εκείνο των αντίστοιχων σταθμών χωρίς περιορισμό. Οι σταθμοί με περιορισμό, ωστόσο, στις περισσότερες των περιπτώσεων, επιτρέπουν μεγαλύτερη συνεισφορά του ΥΒΣ στην κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων, αφού όπως προαναφέρθηκε διαστασιολογούνται ως ΥΒΣ αιολικών – αντλησιοταμίευσης και έτσι εξυπηρετούν κατά προτεραιότητα την παραγωγή ενέργειας, παρά την παραγωγή υδρογόνου.

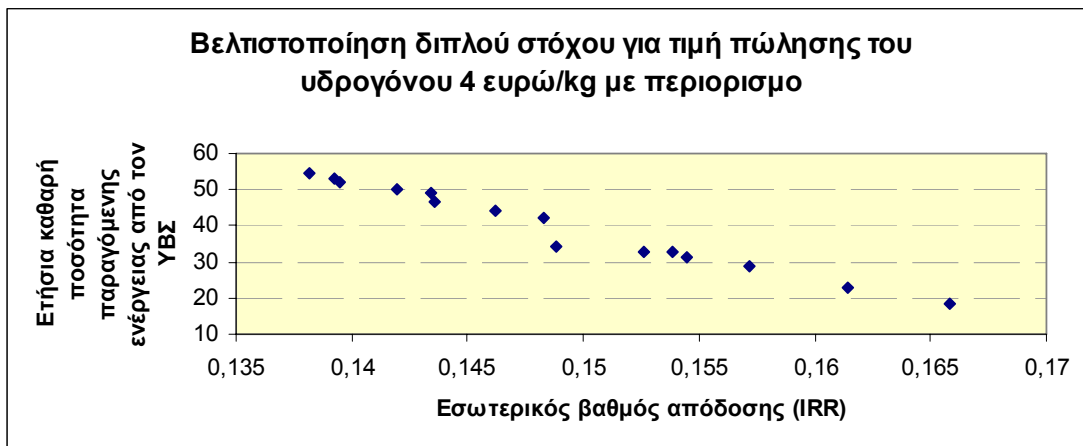
Από οικονομικής σκοπιάς, οι ΥΒΣ που υπόκεινται στον περιορισμό και για πώληση του υδρογόνου έως 7 ευρώ/kg παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα με τα αντίστοιχα των σταθμών χωρίς περιορισμό. Με περαιτέρω όμως αύξηση της τιμής πώλησης του υδρογόνου, οι σταθμοί με περιορισμό εμφανίζουν χειρότερους οικονομικούς δείκτες (Σχήματα 5.1, 5.17), χωρίς, ωστόσο, να παύουν να είναι ελκυστικές επενδύσεις. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ο επιβεβλημένος περιορισμός δεν επέτρεψε την εκτεταμένη παραγωγή υδρογόνου, η οποία εκτόξευσε τα έσοδα των σταθμών χωρίς περιορισμό για τις τέσσερις υψηλότερες τιμές πώλησής του. Ως συμφερότερη επένδυση μεταξύ των σταθμών με περιορισμό αναδεικνύεται ο ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου προς 10 ευρώ/kg, με εσωτερικό βαθμό απόδοσης (IRR) 19% και χρόνο απόσβεσης 7 χρόνια. Ο ίδιος σταθμός είχε αναδειχθεί, με οικονομικά κριτήρια, ως ο καλύτερος και στην περίπτωση μη επιβολής περιορισμού, με IRR 22,6% και χρόνο απόσβεσης 5,7 χρόνια. Τα ετήσια έσοδα τόσο από την πώληση υδρογόνου, όσο και από την πώληση ενέργειας κυμαίνονται στα ίδια περίπου επίπεδα

για τους δύο αυτούς σταθμούς (Σχήματα 5.20, 5.21). Παρ' όλα αυτά, το κόστος του σταθμού των 10 ευρώ/kg με περιορισμό (Σχήμα 5.16) είναι κατά 13 εκατ. ευρώ υψηλότερο από εκείνο του αντίστοιχου σταθμού χωρίς περιορισμό, λόγω του μεγαλύτερου αντλιοστασίου του, που του επέβαλε ο περιορισμός προκειμένου να αυξήσει τα αιολικά του. Με τον τρόπο αυτό εξηγούνται οι φτωχότεροι οικονομικοί δείκτες του σε σχέση με τον βέλτιστο, από οικονομικής σκοπιάς, σταθμό της περίπτωσης χωρίς περιορισμό.

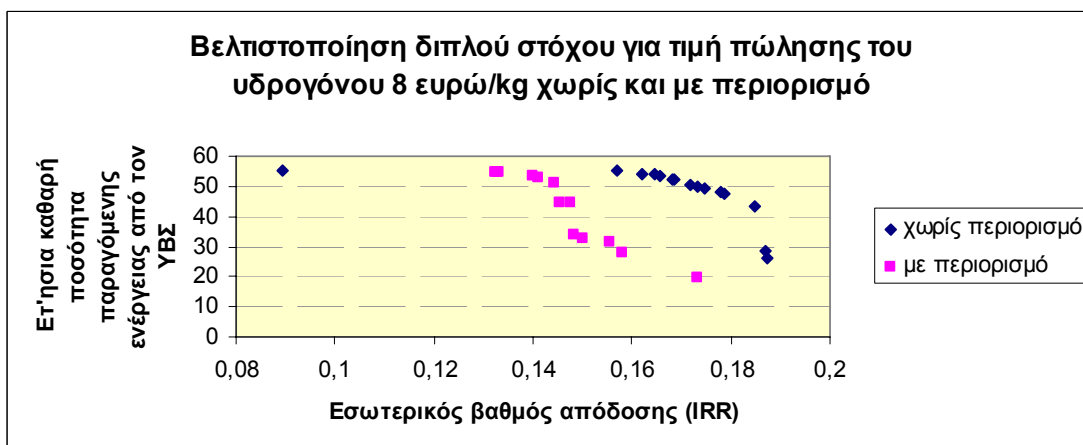
### **5.2.2 Αποτελέσματα επιλεγμένων βέλτιστων σταθμών του Σεναρίου 1Α με διπλό στόχο: τη μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR) και της ετήσιας καθαρής ποσότητας παραγόμενης ενέργειας**

Στα Σχήματα 5.24 και 5.25 φαίνονται τα «μέτωπα Pareto» που προέκυψαν από τη βελτιστοποίηση διπλού στόχου για τον ΥΒΣ με περιορισμό και τιμή πώλησης του υδρογόνου 4 ευρώ/kg, καθώς και για τους ΥΒΣ χωρίς και με περιορισμό και τιμή πώλησης του υδρογόνου 8 ευρώ/kg. Να σημειωθεί ότι ο σταθμός που πωλεί το υδρογόνο προς 4 ευρώ/kg προέκυψε σχεδόν ίδιος, με και χωρίς περιορισμό, από πλευράς διαμόρφωσης, συνεπώς και από πλευράς ενεργειακών και οικονομικών επιδόσεων. Οι δύο στόχοι της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR) και της ετήσιας καθαρής ποσότητας ενέργειας που παράγει ο ΥΒΣ.

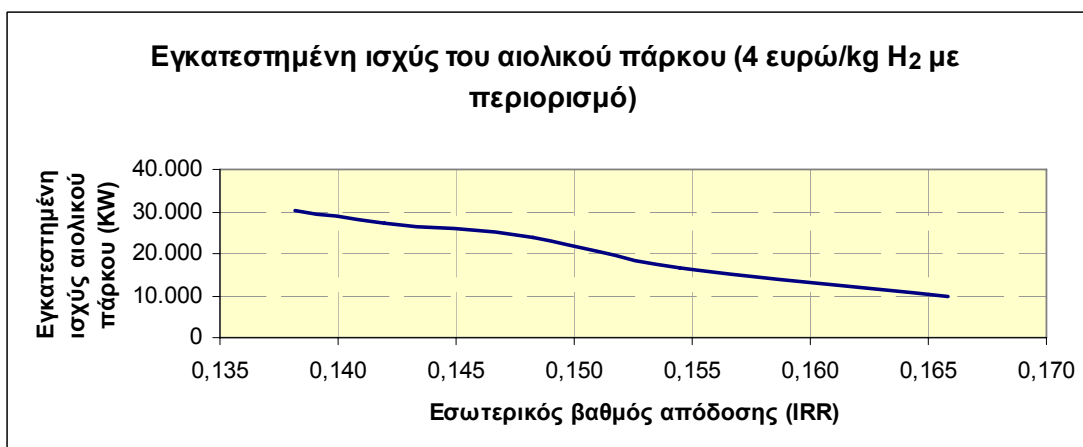
Στα Σχήματα 5.26 – 5.43 φαίνεται η διαμόρφωση και οι ετήσιες ενεργειακές και οικονομικές επιδόσεις των σταθμών των Σχημάτων 5.24 και 5.25, συναρτήσεως του IRR. Αμέσως μετά ακολουθεί ο σχολιασμός τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων.



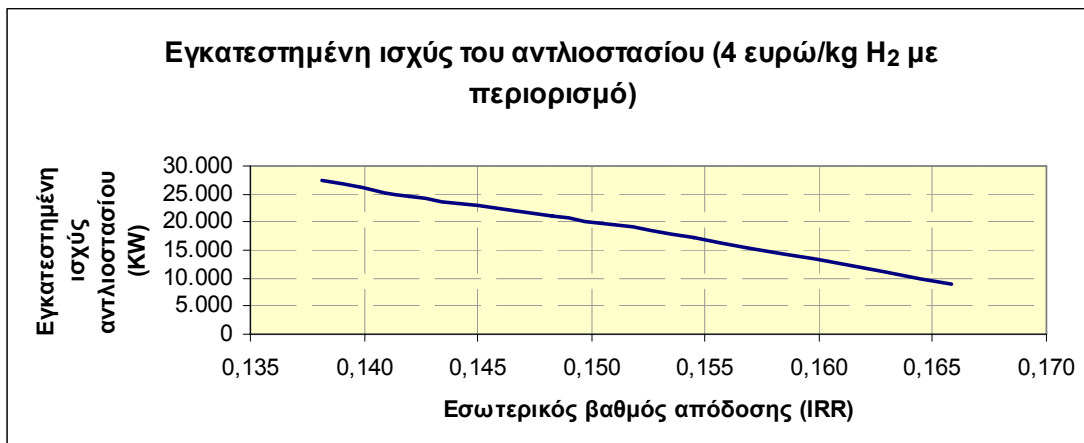
Σχήμα 5.24: Βελτιστοποίηση διπλού στόχου για τιμή πώλησης του υδρογόνου 4 ευρώ/kg με περιορισμό



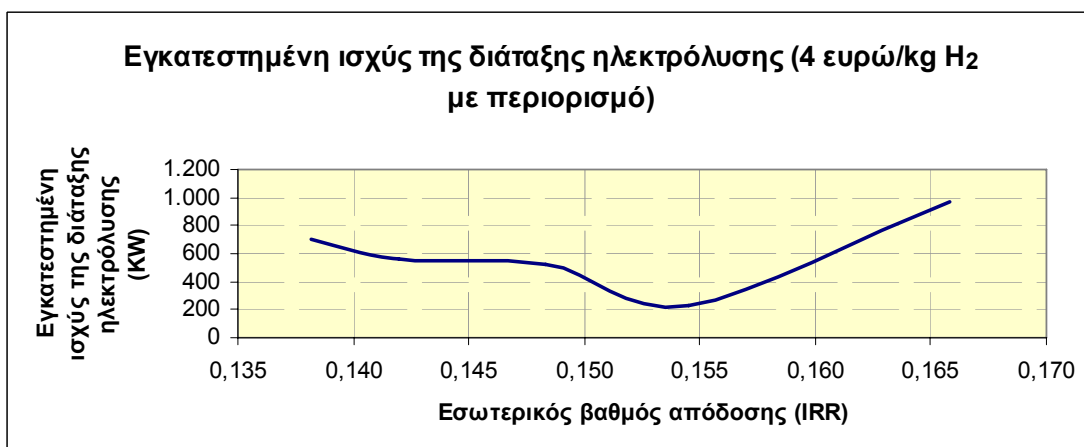
Σχήμα 5.25: Βελτιστοποίηση διπλού στόχου για τιμή πώλησης του υδρογόνου 8 ευρώ/kg χωρίς και με περιορισμό



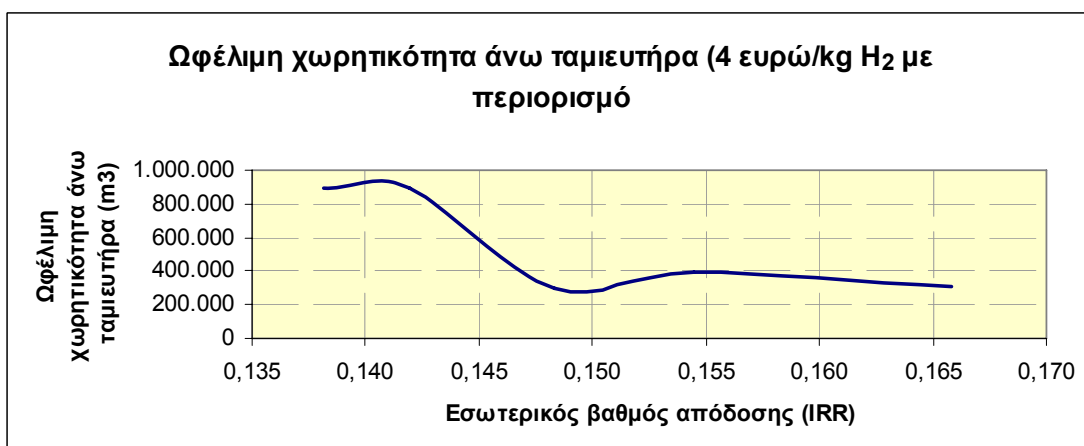
Σχήμα 5.26: Εγκατεστημένη ισχύς του αιολικού πάρκου (4 ευρώ/kg H<sub>2</sub> με περιορισμό)



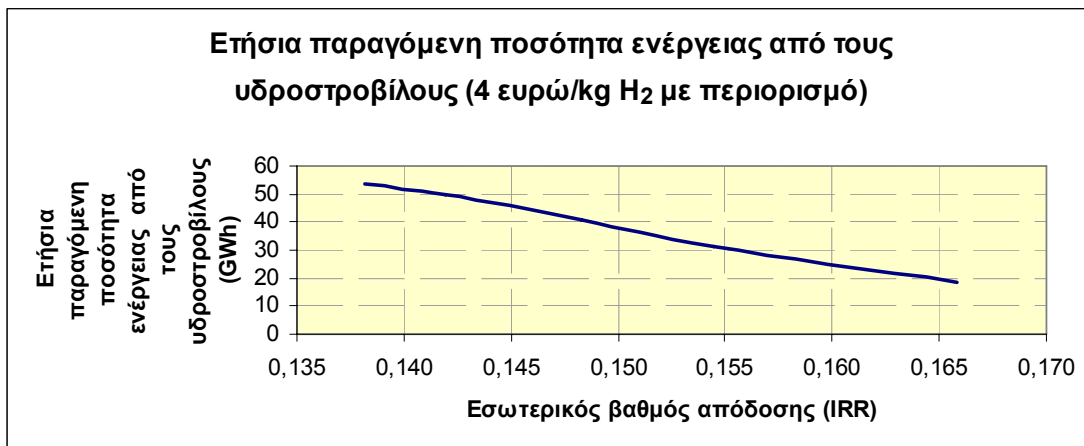
Σχήμα 5.27: Εγκατεστημένη ισχύς του αντλιοστασίου (4 ευρώ/kg H<sub>2</sub> με περιορισμό)



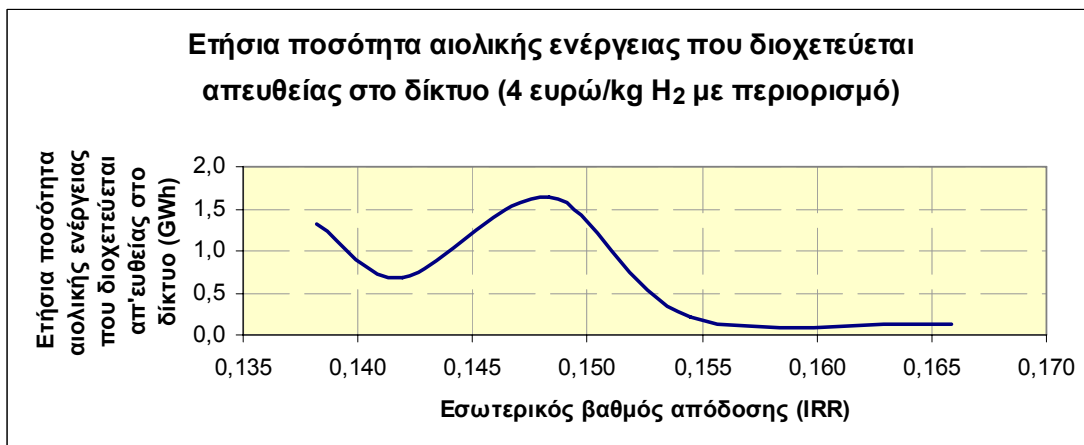
Σχήμα 5.28: Εγκατεστημένη ισχύς της διάταξης ηλεκτρόλυσης (4 ευρώ/kg H<sub>2</sub> με περιορισμό)



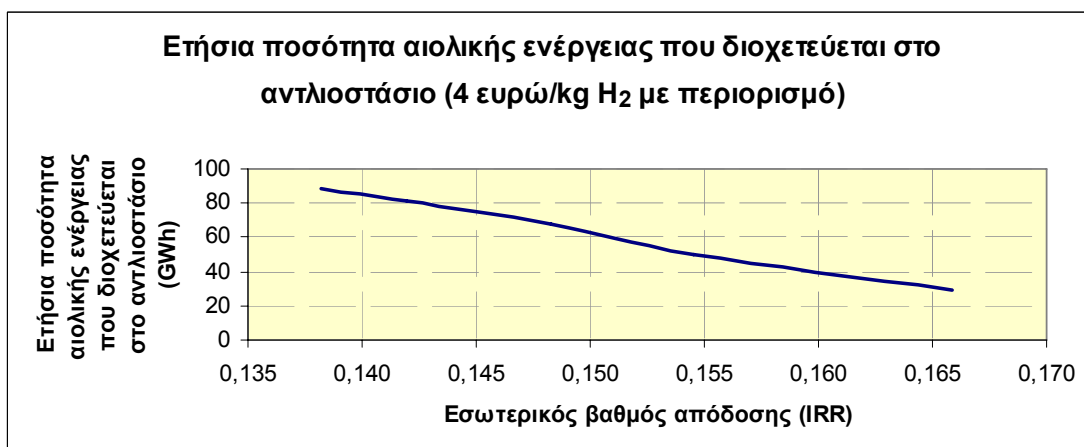
Σχήμα 5.29: Ωφέλιμη χωρητικότητα άνω ταμειυτήρα (4 ευρώ/kg H<sub>2</sub> με περιορισμό)



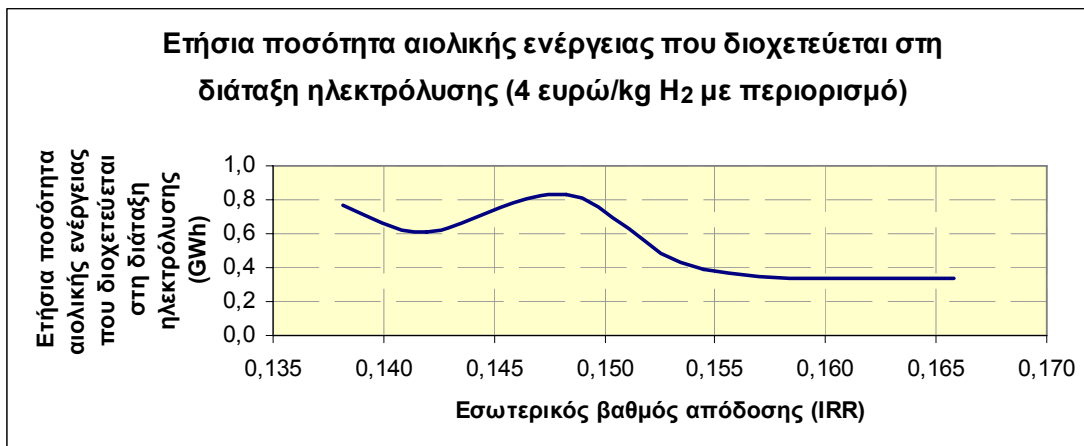
Σχήμα 5.30: Ετήσια παραγόμενη ποσότητα ενέργειας από τους υδροτροβίλους (4 ευρώ/kg H<sub>2</sub> με περιορισμό)



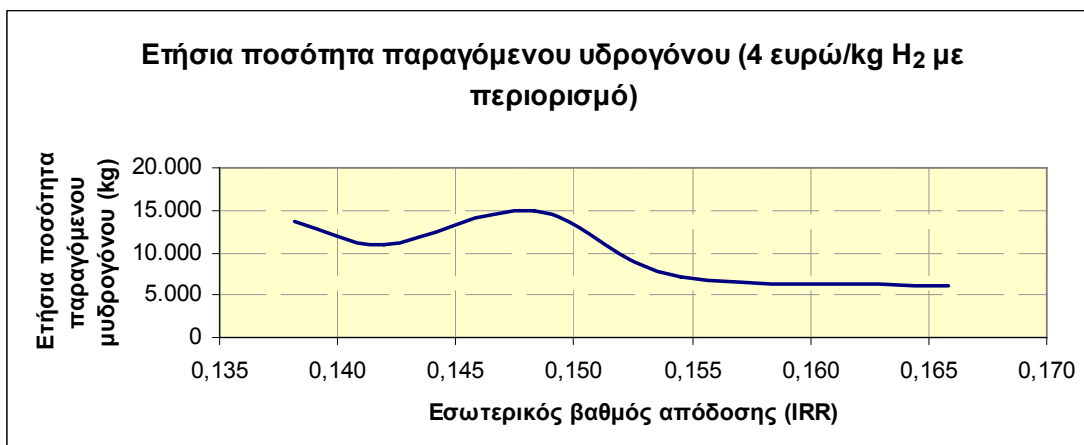
Σχήμα 5.31: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο (4 ευρώ/kg H<sub>2</sub> με περιορισμό)



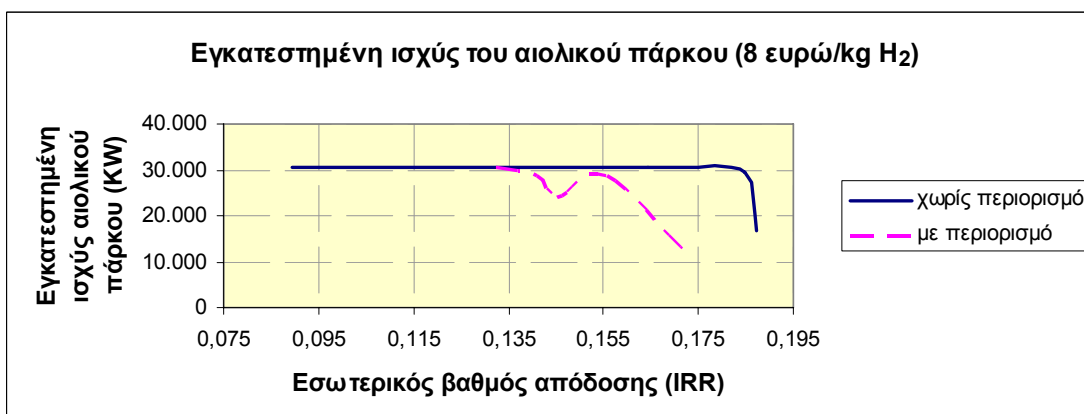
Σχήμα 5.32: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο (4 ευρώ/kg H<sub>2</sub> με περιορισμό)



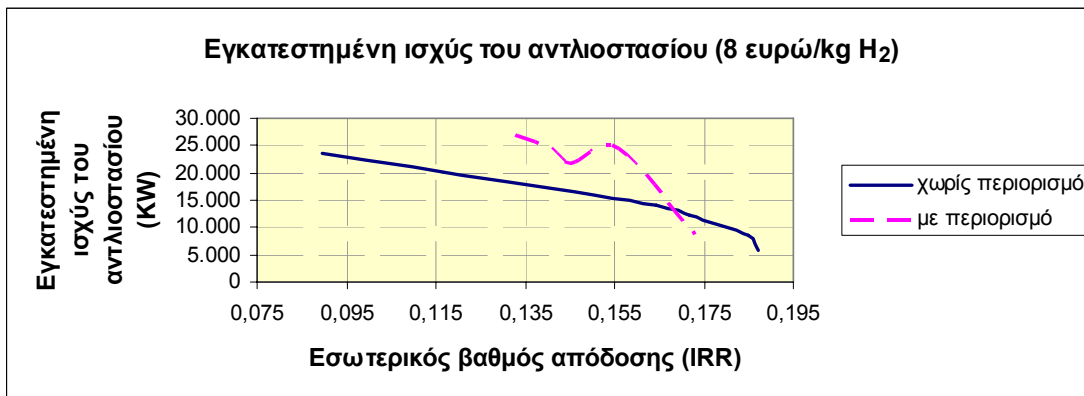
Σχήμα 5.33: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης (4 ευρώ/kg H<sub>2</sub> με περιορισμό)



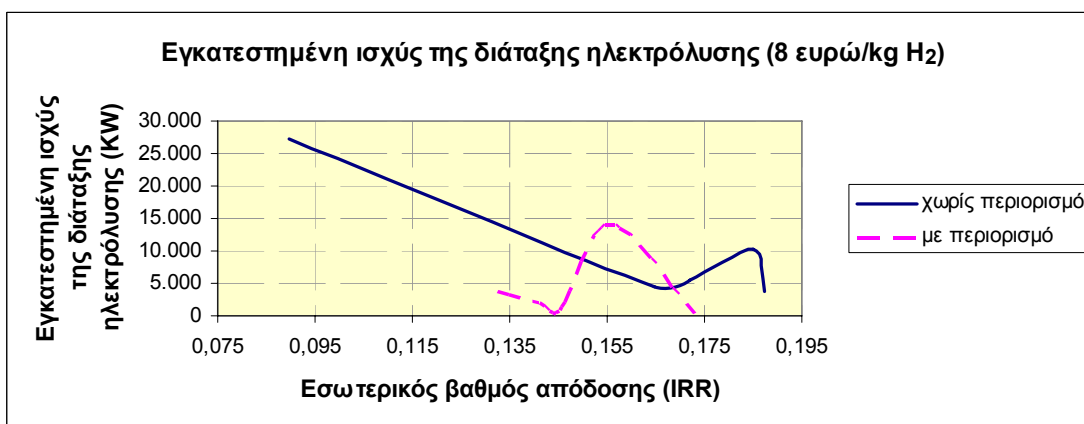
Σχήμα 5.34: Ετήσια ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου (4 ευρώ/kg H<sub>2</sub> με περιορισμό)



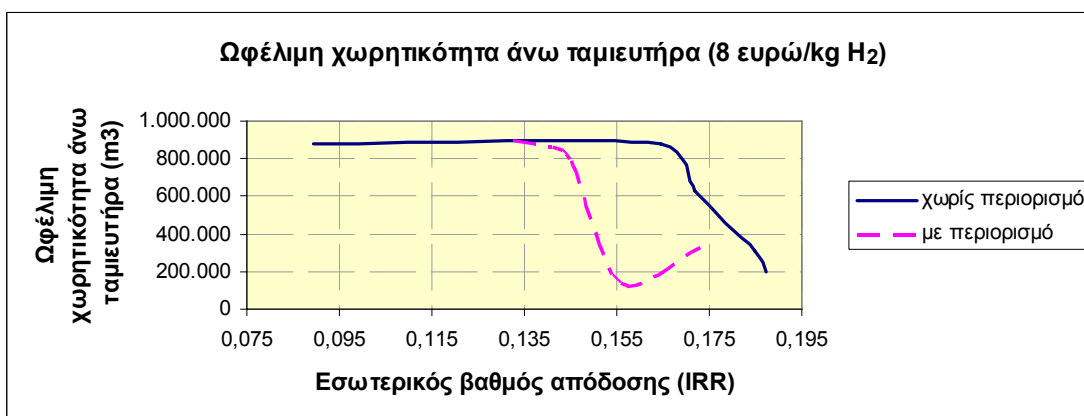
Σχήμα 5.35: Εγκατεστημένη ισχύς του αιολικού πάρκου (8 ευρώ/kg H<sub>2</sub>)



Σχήμα 5.36: Εγκατεστημένη ισχύς του αντλιοστασίου (8 ευρώ/kg H<sub>2</sub>)

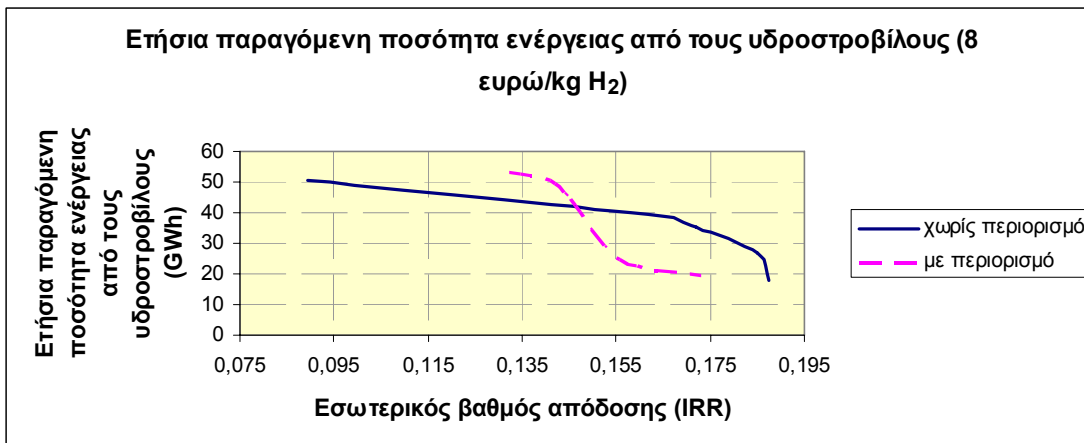


Σχήμα 5.37: Εγκατεστημένη ισχύς της διάταξης ηλεκτρόλυσης (8 ευρώ/kg H<sub>2</sub>)

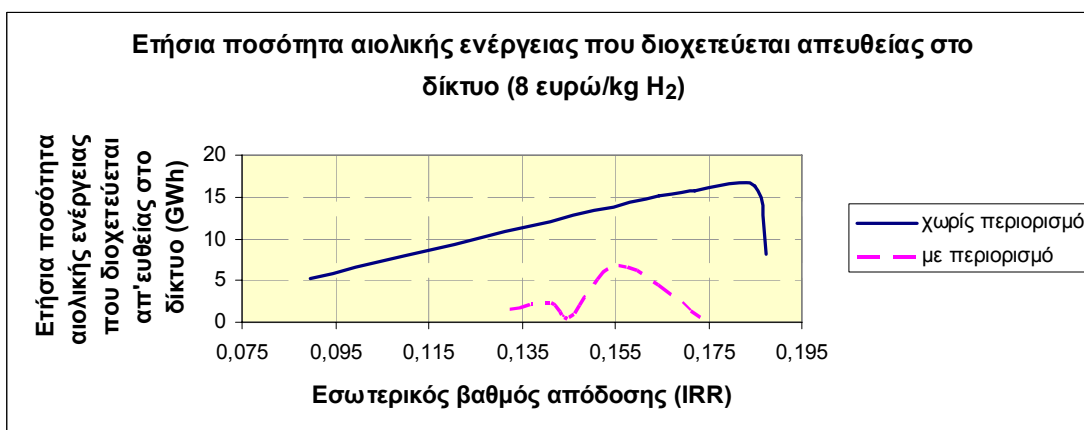


Σχήμα 5.38: Ωφέλιμη χωρητικότητα άνω ταμιευτήρα (8 ευρώ/kg H<sub>2</sub>)

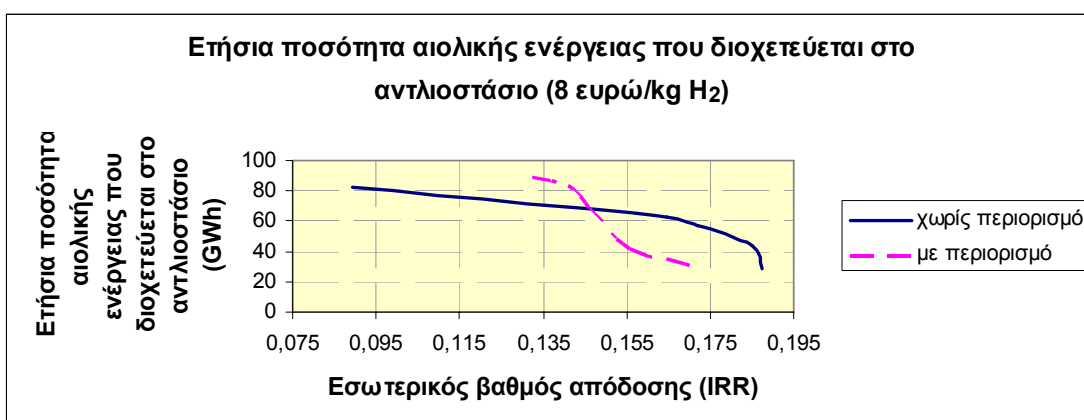




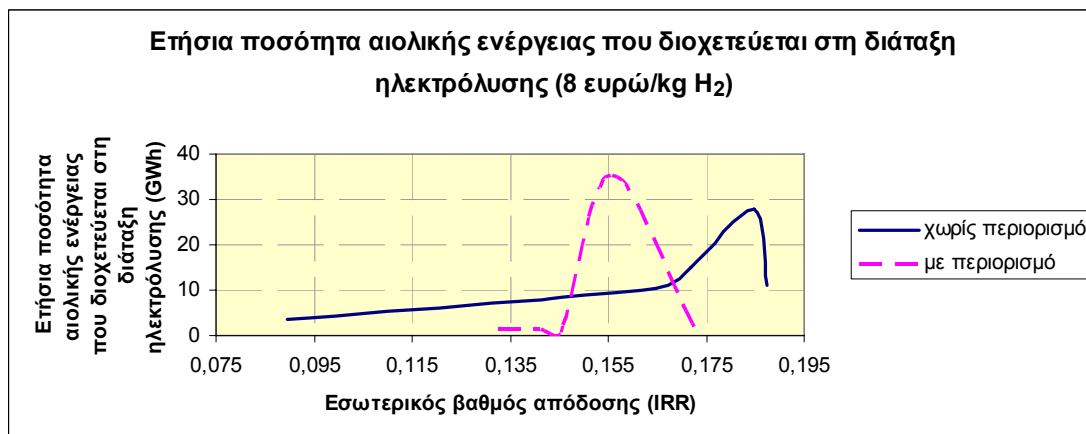
Σχήμα 5.39: Ετήσια παραγόμενη ποσότητα ενέργειας από τους υδροτροβίλους (8 ευρώ/kg H<sub>2</sub>)



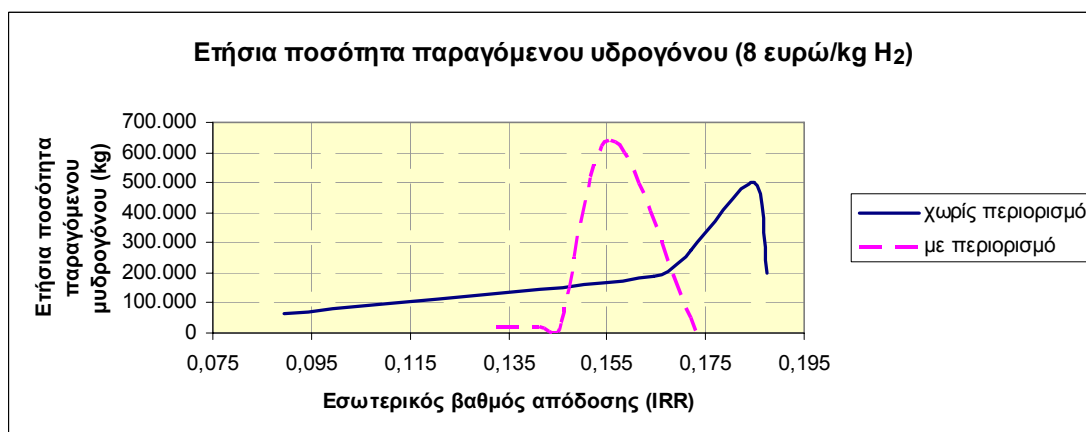
Σχήμα 5.40: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο (8 ευρώ/kg H<sub>2</sub>)



Σχήμα 5.41: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο (8 ευρώ/kg H<sub>2</sub>)



Σχήμα 5.42: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης (8 ευρώ/kg H<sub>2</sub>)



Σχήμα 5.43: Ετήσια ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου (8 ευρώ/kg H<sub>2</sub>)

### Σχολιασμός – Συμπεράσματα

Όπως φαίνεται στα «μέτωπα Pareto» (Σχήματα 5.24, 5.25), η μεγιστοποίηση του IRR και της ετήσιας καθαρής παραγόμενης ενέργειας από τον ΥΒΣ, είναι στόχοι ανταγωνιστικοί μεταξύ τους. Αύξηση του IRR συνεπάγεται μείωση της ετήσιας καθαρής ποσότητας ενέργειας και το αντίστροφο. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τα σχήματα 5.26 – 5.43 στα οποία φαίνεται ότι η μεγιστοποίηση του IRR ωθεί προς σχετικά μικρές διαστασιολογήσεις σταθμών που συνεπώς θα έχουν σχετικά χαμηλό κόστος κατασκευής, αλλά θα παράγουν σχετικά μικρά ποσά ενέργειας. Από την άλλη μεριά, η μεγιστοποίηση της ετήσια καθαρής παραγόμενης ενέργειας ωθεί σε

σχετικά μεγάλους σταθμούς, με σχετικά μεγάλη παραγωγή ενέργειας, αλλά και σχετικά υψηλό κόστος κατασκευής, το οποίο επιδρά αρνητικά στον IRR

Στα «μέτωπα Pareto», ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ακραίες λύσεις, δηλαδή οι ΥΒΣ με τον υψηλότερο IRR και τη χαμηλότερη ετήσια καθαρή ποσότητα παραγόμενης ενέργειας και το αντίστροφο.

Συγκεκριμένα, για την περίπτωση πώλησης του υδρογόνου προς 4 ευρώ/kg, η υψηλότερη τιμή της ετήσιας καθαρής ενέργειας είναι 54,8 GWh, ενώ ο ίδιος σταθμός έχει τον χειρότερο IRR, ο οποίος είναι περίπου 13,8%. Συνεπώς, θεωρώντας απορριπτέους τους σταθμούς με IRR μικρότερο του 11%, φαίνεται ότι για πώληση του υδρογόνου προς 4 ευρώ/kg, η βελτιστοποίηση διπλού στόχου δίνει οικονομικά αποδεκτούς σταθμούς. Η υψηλότερη τιμή του IRR, που μπορεί να επιτευχθεί όταν επιδιώκεται η βελτιστοποίηση σχεδιασμού του σταθμού ως προς οικονομικά αλλά και ενεργειακά κριτήρια, είναι ίσος με 16,6%, δηλαδή χαμηλότερος κατά δύο ποσοστιαίες μονάδες από τον IRR του ίδιου σταθμού στη βελτιστοποίηση οικονομικού στόχου. Προφανώς, η πτώση του IRR οφείλεται στην αλλαγή των κριτηρίων, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την χαμηλότερη παρατηρούμενη ετήσια καθαρή ποσότητα ενέργειας που αντιστοιχεί στο σταθμό αυτό, η οποία είναι ίση με 18,2 GWh και κατά 3,6 GWh μεγαλύτερη από εκείνη του οικονομικά βέλτιστου σταθμού πώλησης του υδρογόνου προς 4 ευρώ/kg.

Για την περίπτωση πώλησης του υδρογόνου προς 8 ευρώ/kg με περιορισμό, προκύπτουν και πάλι οικονομικά αποδεκτοί σταθμοί, με τον χαμηλότερο δείκτη IRR να είναι ίσος με 13,2% και να αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη ετήσια καθαρή ποσότητα ενέργειας, η οποία είναι ίση με 54,9 GWh. Η υψηλότερη τιμή του IRR είναι 17,3 % και αντιστοιχεί στη μικρότερη ετήσια καθαρή ποσότητα ενέργειας, η οποία είναι ίση με 19,6 GWh.

Από την άλλη μεριά, για την περίπτωση πώλησης του υδρογόνου προς 8 ευρώ/kg χωρίς περιορισμό, ο σταθμός με τον χαμηλότερο IRR (8%) και την υψηλότερη τιμή της καθαρής ετήσιας ενέργειας (55,5 GWh), δεν είναι οικονομικά αποδεκτός. Πρόκειται για ένα σταθμό διαστασιολογημένο με πολύ μεγάλες συνιστώσες, οι οποίες αυξάνουν την παραγωγή της ενέργειας αλλά και το αρχικό κόστος του σταθμού. Είναι

,ωστόσο, ο μόνος από τους σταθμούς που έδωσε το λογισμικό βελτιστοποίησης με IRR εκτός των αποδεκτών ορίων για να πραγματοποιηθεί η επένδυση. Ο υψηλότερος IRR είναι 18,7% και συναντάται στο σταθμό με τη μικρότερη τιμή ετήσιας καθαρής ποσότητας ενέργειας (25,9 GWh).

### **5.2.3 Διαγράμματα ετήσιας λειτουργίας επιλεγμένων βέλτιστων σταθμών του Σεναρίου 1Α**

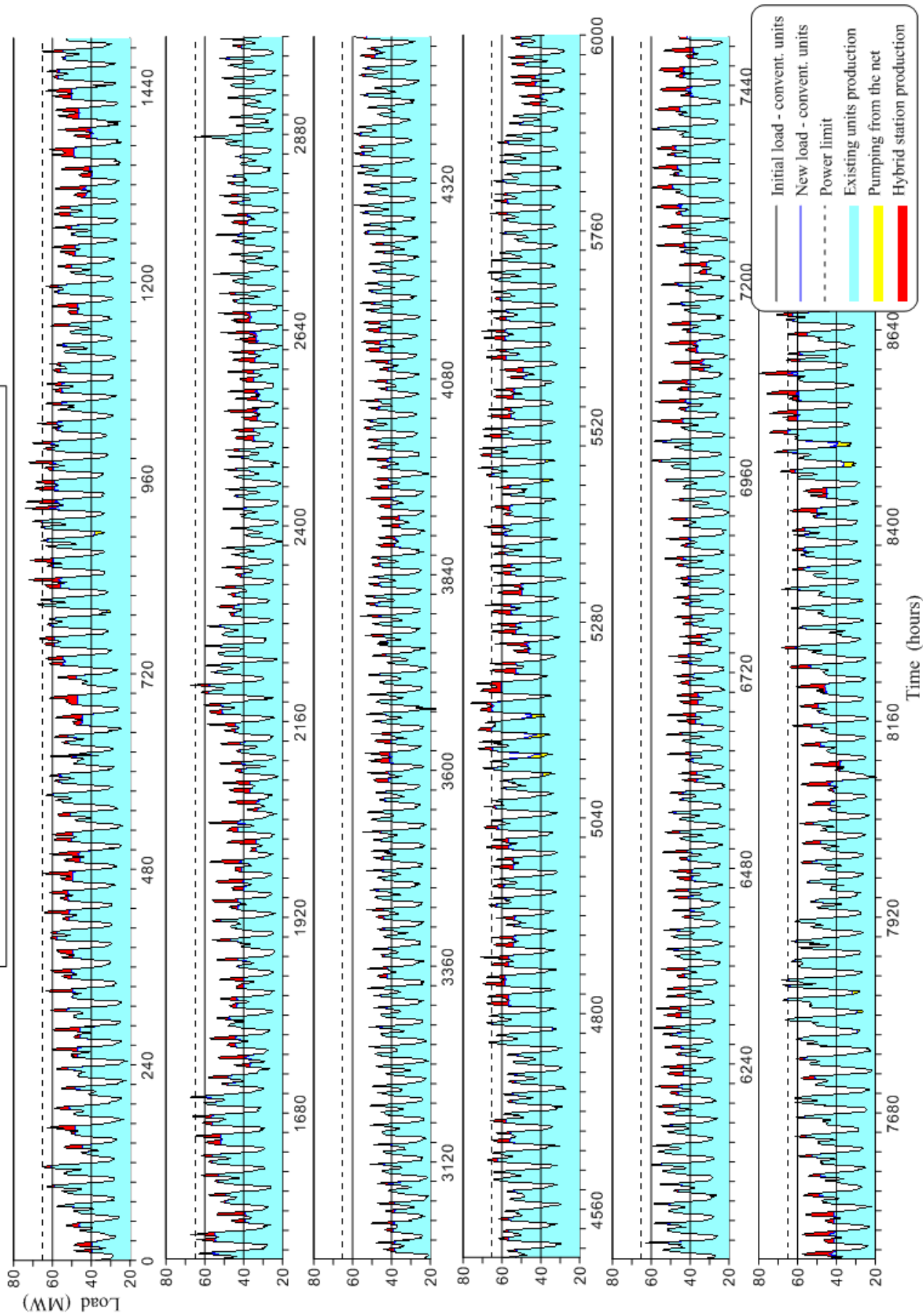
Στα σχήματα 5.44 – 5.46 φαίνεται η ετήσια καμπύλη ζήτησης φορτίου του νησιού, πριν και μετά την ένταξη του ΥΒΣ, για τις περιπτώσεις πώλησης του υδρογόνου προς 3 ευρώ/kg με περιορισμό και 8 ευρώ/kg χωρίς και με περιορισμό, αντίστοιχα. Να σημειωθεί ότι ο σταθμός που πωλεί το υδρογόνο προς 3 ευρώ/kg προέκυψε σχεδόν ίδιος, με και χωρίς περιορισμό, από πλευράς διαμόρφωσης, συνεπώς και από πλευράς ενεργειακών και οικονομικών επιδόσεων.

Στα σχήματα αυτά διακρίνεται η κάλυψη του φορτίου από τον ΥΒΣ και τις λοιπές μονάδες του νησιού (συμβατικές και αιολικά πάρκα ως σύνολο), καθώς και οι ποσότητες ενέργειας που ο ΥΒΣ χρησιμοποιεί από το δίκτυο για άντληση. Επίσης, φαίνεται η γραμμή της εγγυημένης ισχύος, η οποία άγεται από την τιμή 65 MW, όπως υπολογίστηκε στο υποκεφάλαιο 4.3.2. Παρατηρείται ότι η ζήτηση του νησιού λίγες μόνο φορές υπερβαίνει τη γραμμή αυτή και ότι όταν αυτό συμβαίνει τα ποσά ενέργειας που αντιστοιχούν στο περικλειόμενο εμβαδόν από την καμπύλη ζήτησης φορτίου και τη γραμμή αυτή, προσφέρονται από τον ΥΒΣ.

Και στις τρεις υπό εξέταση περιπτώσεις, φαίνεται ότι η ένταξη του ΥΒΣ αποκόπτει τις αιχμές της καμπύλης ζήτησης, ενώ δεν δημιουργεί νέες – νυχτερινές αιχμές, αφού ο ΥΒΣ δεν χρησιμοποιεί μεγάλα ποσά ενέργειας από το δίκτυο για άντληση. Συγκεκριμένα, η εξομάλυνση της καμπύλης ζήτησης φορτίου είναι αισθητά μεγαλύτερη για το σταθμό πώλησης του υδρογόνου προς 8 ευρώ/kg χωρίς περιορισμό (Σχήμα 5.46). Ο σταθμός αυτός έχει κατά πολύ μεγαλύτερο, σε ισχύ, αιολικό πάρκο από τους άλλους δύο σταθμούς που εξετάζονται εδώ και υπόκεινται στον περιορισμό. Έτσι, έχει τη δυνατότητα για μεγαλύτερη έγχυση αιολικής

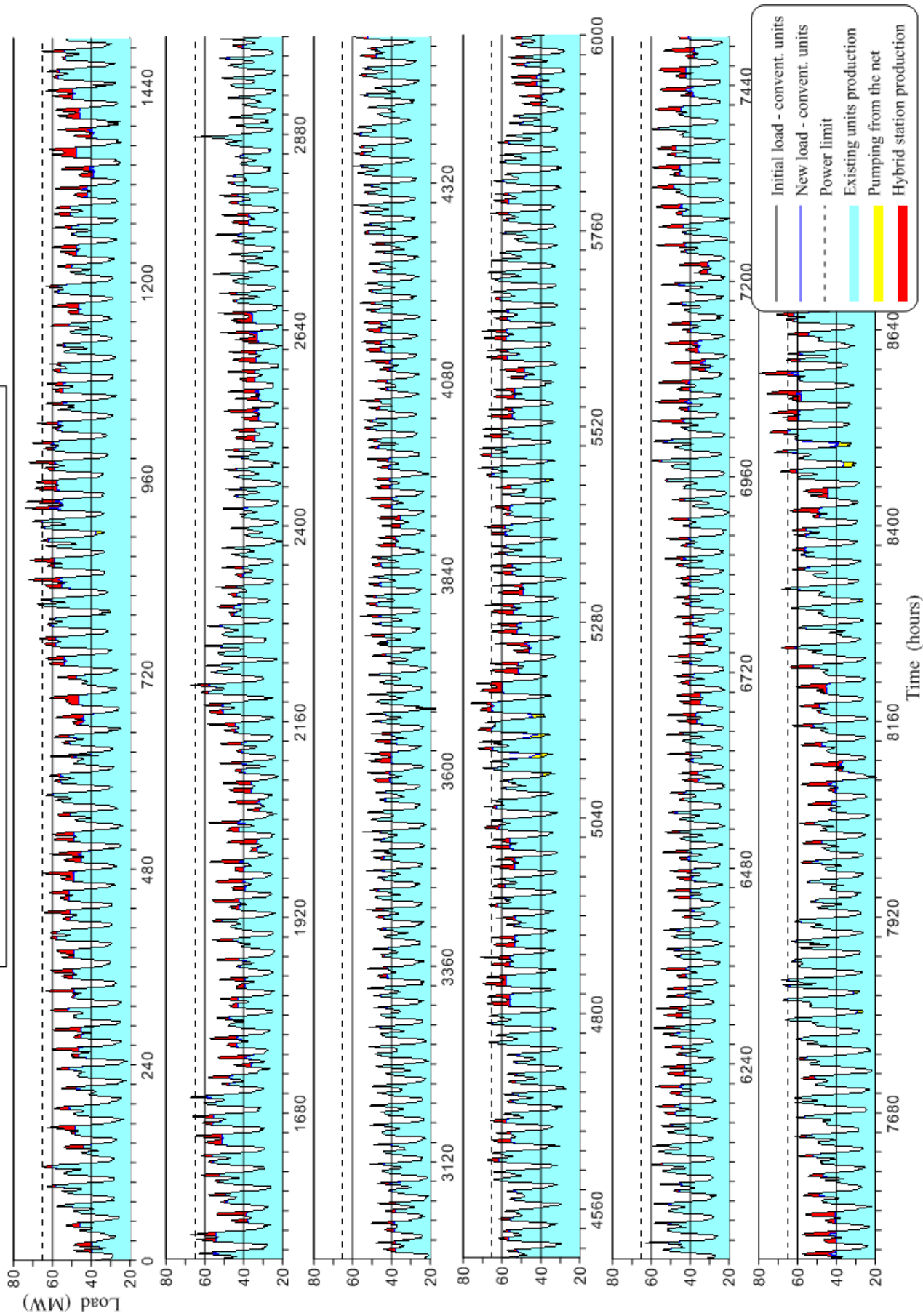
ενέργειας απευθείας στο δίκτυο, αλλά και στο αντλιοστάσιο, ώστε να εξυπηρετείται η αντλησιοταμίευση και τελικά η παραγωγή ενέργειας από τους υδροστροβίλους.

### Scenario 1A - With Constraint - 3 euro/kg H<sub>2</sub>



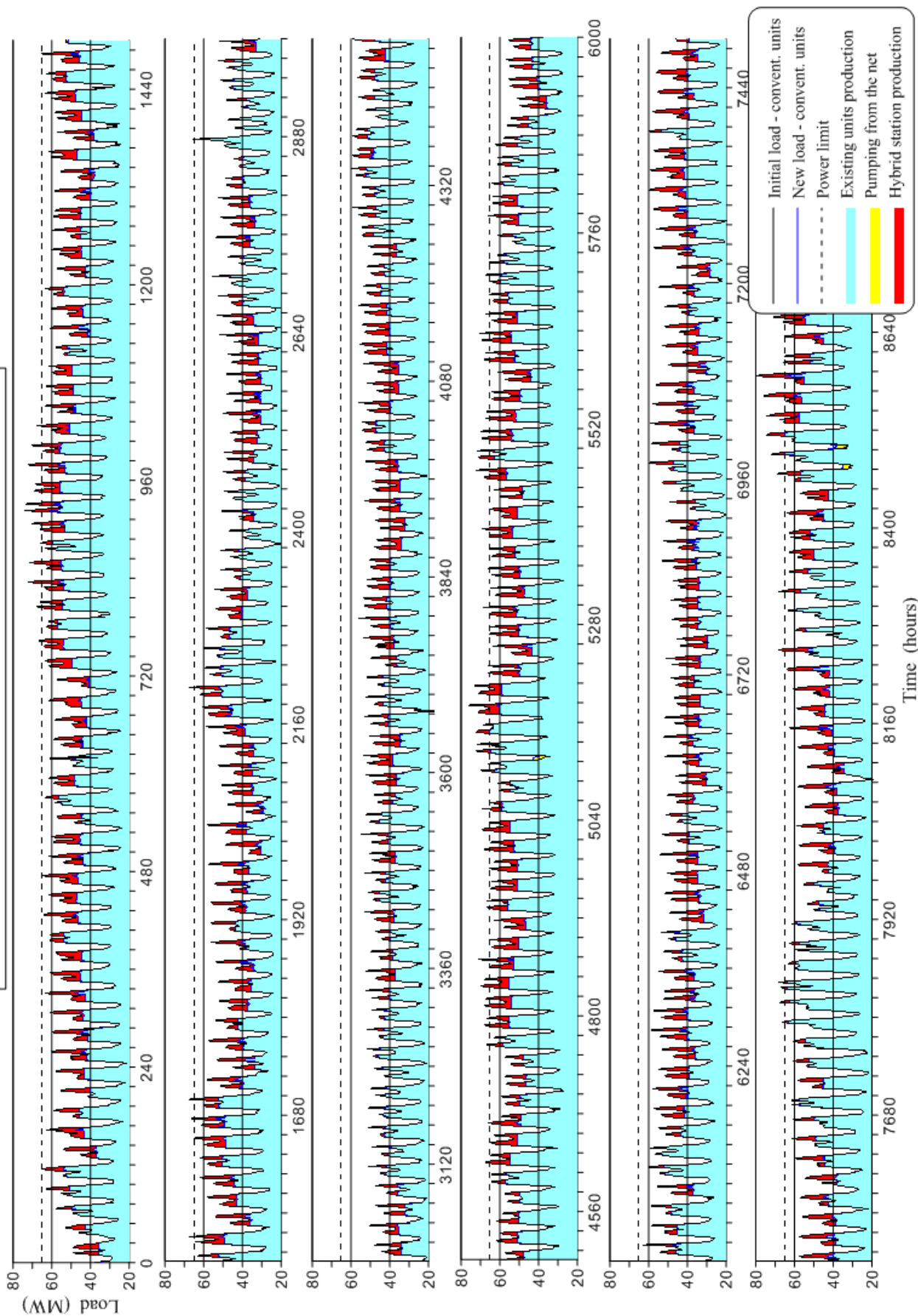
Σχήμα 5.44: Ετήσια καμπύλη φορτίου πριν και μετά την ένταξη του ΥΒΣ (3 ευρώ/kg H<sub>2</sub> με περιορισμό)

Scenario 1A - With Constraint - 8 euro/kg H<sub>2</sub>



Σχήμα 5.45: Ετήσια καμπύλη φορτίου πριν και μετά την ένταξη του ΥΒΣ (8 ευρώ/kg H<sub>2</sub> με περιορισμό)

### Scenario 1A - Without Constraint - 8 euro/kg H<sub>2</sub>



Σχήμα 5.46: Ετήσια καμπύλη φορτίου πριν και μετά την ένταξη του ΥΒΣ (8 ευρώ/kg H<sub>2</sub> χωρίς περιορισμό)



Στα διαγράμματα των σχημάτων 5.47 – 5.49 φαίνεται η ετήσια εσωτερική λειτουργία του ΥΒΣ, για τις περιπτώσεις πώλησης του υδρογόνου προς 3 ευρώ/kg με περιορισμό και 8 ευρώ/kg χωρίς και με περιορισμό, αντίστοιχα.

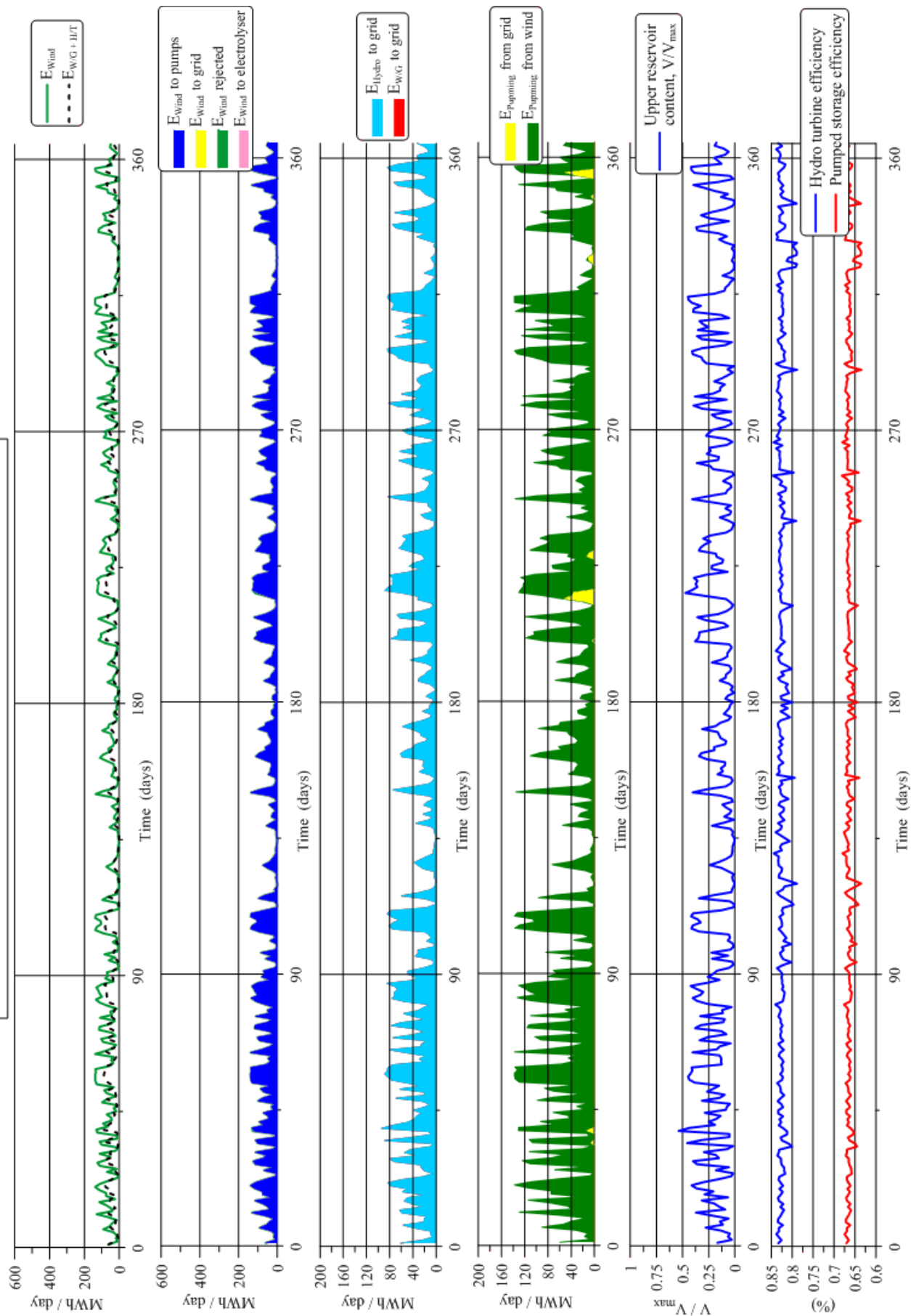
Όσον αφορά στο 1<sup>ο</sup> διάγραμμα, αυτό απεικονίζει την αιολική παραγωγή του ΥΒΣ και τη συνολική συνεισφορά του σταθμού στην κάλυψη της ζήτησης (αιολική ενέργεια απευθείας στο δίκτυο και υδροστρόβιλοι). Στο 2<sup>ο</sup> διάγραμμα απεικονίζονται τα ποσά της αιολικής ενέργειας που διοχετεύονται απευθείας στο δίκτυο, στο αντλιοστάσιο και στη διάταξη ηλεκτρόλυσης, καθώς και η απορριπτόμενη ποσότητα αιολικής ενέργειας. Στο 3<sup>ο</sup> διάγραμμα φαίνεται η συνεισφορά της ενέργειας των υδροτροβίλων και του μέρους της αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο, στην κάλυψη της προσφοράς ενέργειας του σταθμού. Στο 4<sup>ο</sup> διάγραμμα φαίνεται η ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται στην άντληση και το κατά πόσο αυτή προέρχεται από τα αιολικά και το δίκτυο. Στο 5<sup>ο</sup> διάγραμμα απεικονίζονται οι διακυμάνσεις του βαθμού πλήρωσης του άνω ταμιευτήρα, ενώ στο 6<sup>ο</sup> και τελευταίο διάγραμμα φαίνονται οι βαθμοί απόδοσης της υδροτροβλικής παραγωγής και της συνολικής διαδικασίας άντλησης/παραγωγής.

Έτσι, για τους δύο σταθμούς, που υπόκεινται στον περιορισμό τα διαγράμματα αυτά είναι παρόμοια (Σχήματα 5.47, 5.48). Πρόκειται για σταθμούς που, όπως έχει προαναφερθεί, έχουν διαστασιολογηθεί ως ΥΒΣ αιολικών – αντλησιοταμίευσης, γεγονός που επιβεβαιώνεται κι εδώ. Καταρχάς, η ημερήσια ποσότητα ενέργειας που προσφέρει ο ΥΒΣ παρακολουθεί τις διακυμάνσεις της αιολικής παραγωγής, υποδεικνύοντας ότι ο βαθμός αξιοποίησης των αιολικών είναι υψηλός. Η αιολική παραγωγή των σταθμών αυτών διοχετεύεται κατά κύριο λόγο στις αντλίες, άλλωστε αυτό επιβάλλει το σενάριο λειτουργίας τους και ο επιβεβλημένος περιορισμός. Αμελητέα, σε βαθμό που να μην διακρίνονται στο σχήμα, ποσά αιολικής ενέργειας διοχετεύονται απευθείας στο δίκτυο και στη διάταξη ηλεκτρόλυσης ή απορρίπτονται. Κατά συνέπεια, η προσφορά ενέργειας του ΥΒΣ καλύπτεται ουσιαστικά από την υδροτροβλική παραγωγή. Η αντλησιοταμίευση πραγματοποιείται με αιολική ενέργεια, ενώ σπάνια χρησιμοποιείται ενέργεια από το δίκτυο. Η τιμή του βαθμού πλήρωσης του άνω ταμιευτήρα παρακολουθεί τις διακυμάνσεις της αιολικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για άντληση, ενώ δεν ξεπερνά για καμία ημέρα του έτους το 50%. Ενδεχομένως, λοιπόν, οι εν λόγω σταθμοί θα μπορούσαν να έχουν

διαστασιολογηθεί με μικρότερους ταμιευτήρες. Τέλος, οι σταθμοί αυτοί παρουσιάζουν υψηλό βαθμό απόδοσης της υδροστροβλικής παραγωγής, περί το 82% και τον αναμενόμενο βαθμό απόδοσης της όλης διαδικασίας άντλησης/παραγωγής, 65%.

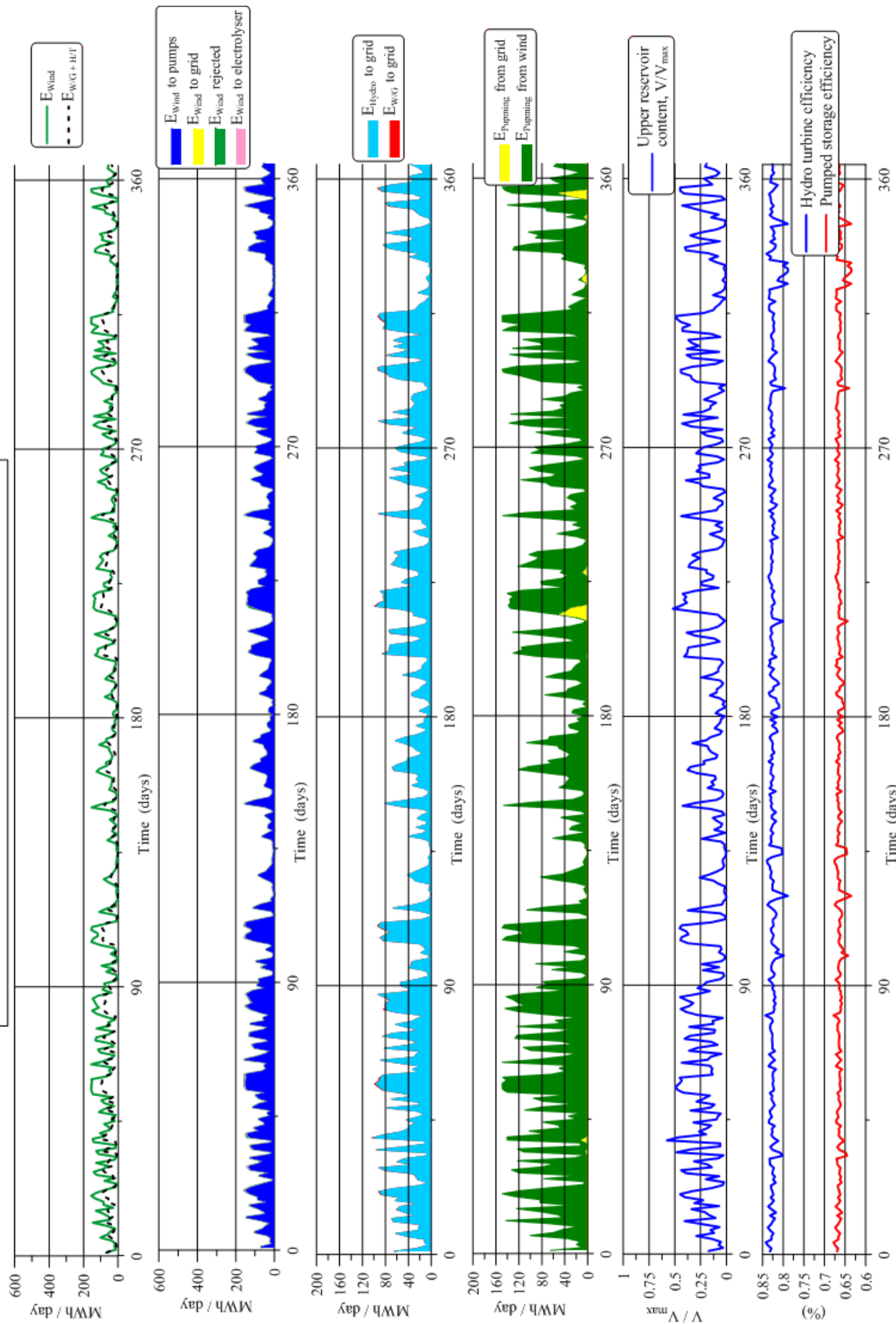
Όσον αφορά τον σταθμό πώλησης του υδρογόνου προς 8 ευρώ/kg χωρίς περιορισμό, αυτός παρουσιάζει διαφορετική ετήσια εσωτερική λειτουργία (Σχήμα 5.49), σε σχέση με τους δύο προηγούμενους σταθμούς, καθώς, όπως έχει ήδη αναφερθεί, έχει διαστασιολογηθεί έτσι ώστε να εξυπηρετεί κατά προτεραιότητα την παραγωγή υδρογόνου. Συγκεκριμένα, η αιολική παραγωγή είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της υδροστροβλικής παραγωγής, αφού το μεγαλύτερο μέρος της διοχετεύεται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης. Η υδροστροβλική παραγωγή παρακολουθεί τις διακυμάνσεις της αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο, ενώ στην κάλυψη της προσφοράς ενέργειας του ΥΒΣ συμμετέχει σημαντικά και η αιολική ποσότητα ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο. Η ποσότητα αιολικής ενέργειας που απορρίπτεται είναι αυξημένη σε σχέση με τους σταθμούς που υπόκεινται στον περιορισμό, αλλά εξακολουθεί να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Η άντληση πραγματοποιείται και πάλι με χρήση αιολικής ενέργειας, με ελάχιστα ποσά ενέργειας να απαιτούνται ετησίως από το δίκτυο για να την υποστηρίξουν. Ο βαθμός πλήρωσης του άνω ταμιευτήρα παρακολουθεί τις διακυμάνσεις της αιολικής ενέργειας που καταναλώνεται στο αντλιοστάσιο, ενώ η τιμή του αγγίζει το 100% αρκετές φορές το χρόνο. Τέλος, ο βαθμός απόδοσης της υδροστροβλικής παραγωγής κυμαίνεται περί το 82% και εκείνος της όλης διαδικασίας άντλησης – παραγωγής περί το 65%.

### Scenario 1A - With Constraint - 3 euro/kg H<sub>2</sub>



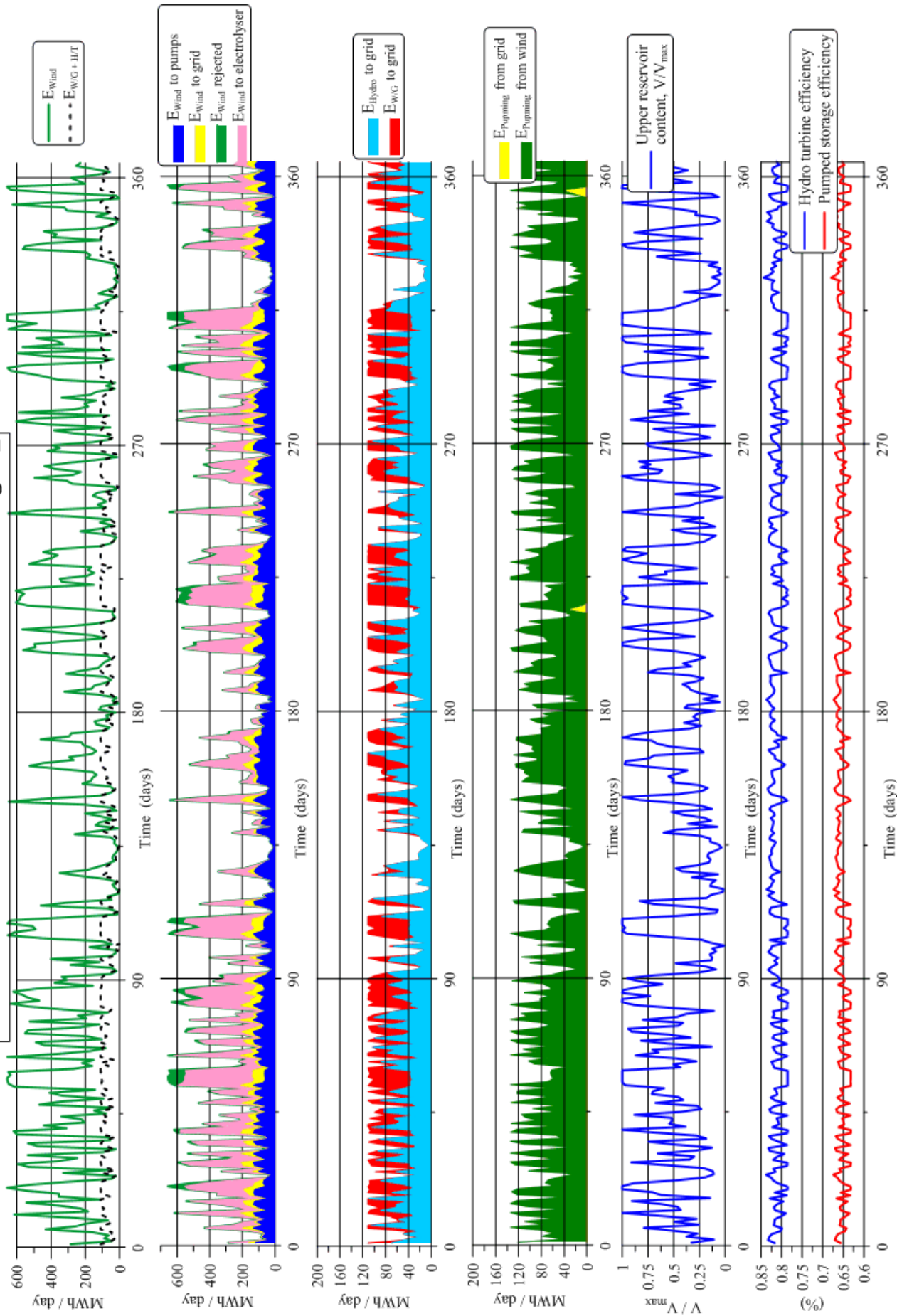
Σχήμα 5.47: Ετήσια διαγράμματα λειτουργίας του σταθμού (3 ευρώ/kg H<sub>2</sub> με περιορισμό)

### Scenario 1A - With constraint - 8 euro/kg H<sub>2</sub>



Σχήμα 5.48: Ετήσια διαγράμματα λειτουργίας του σταθμού H<sub>2</sub> με περιορισμό (8 ευρώ/kg H<sub>2</sub>)

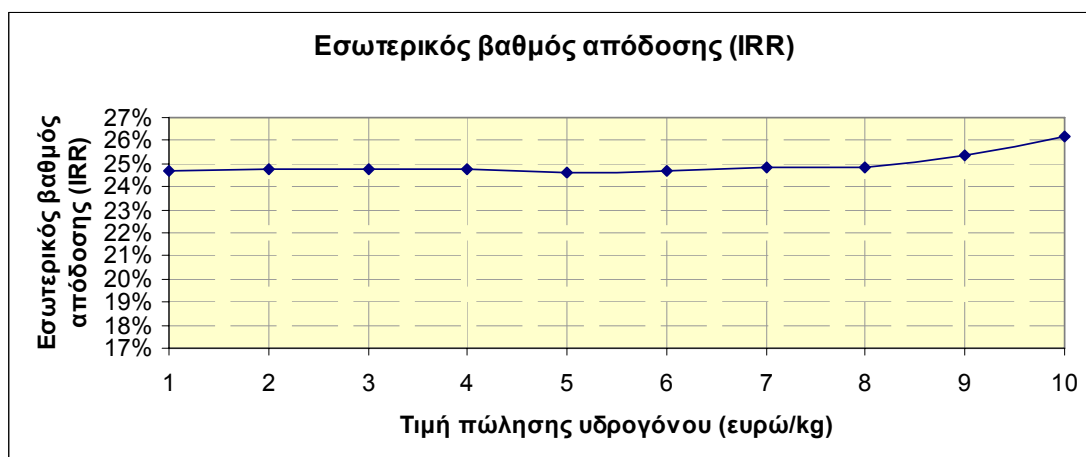
### Scenario 1A - Without Constraint - 8 euro/kg H<sub>2</sub>



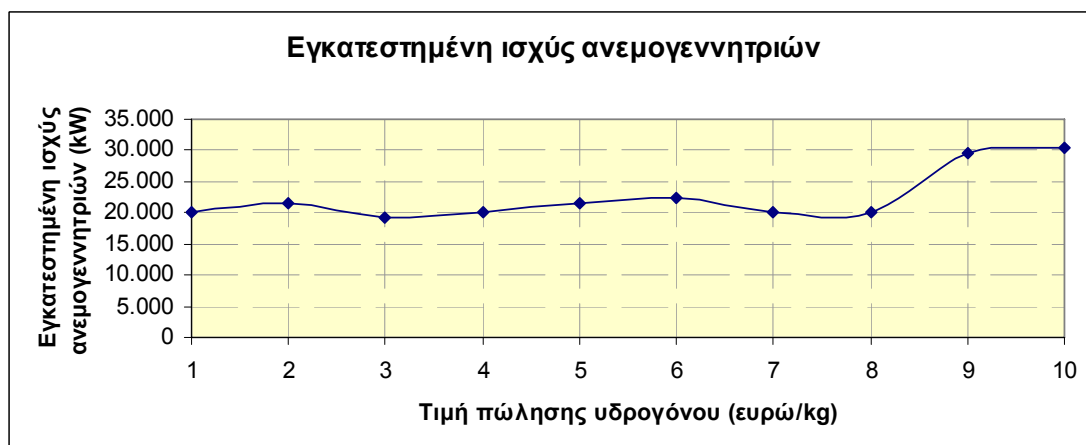
Σχήμα 5.49: Ετήσια διαγράμματα λειτουργίας του σταθμού (8 ευρώ/kg H<sub>2</sub> χωρίς περιορισμό)

### 5.3 Αποτελέσματα βέλτιστων σταθμών του Σεναρίου 1B με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR)

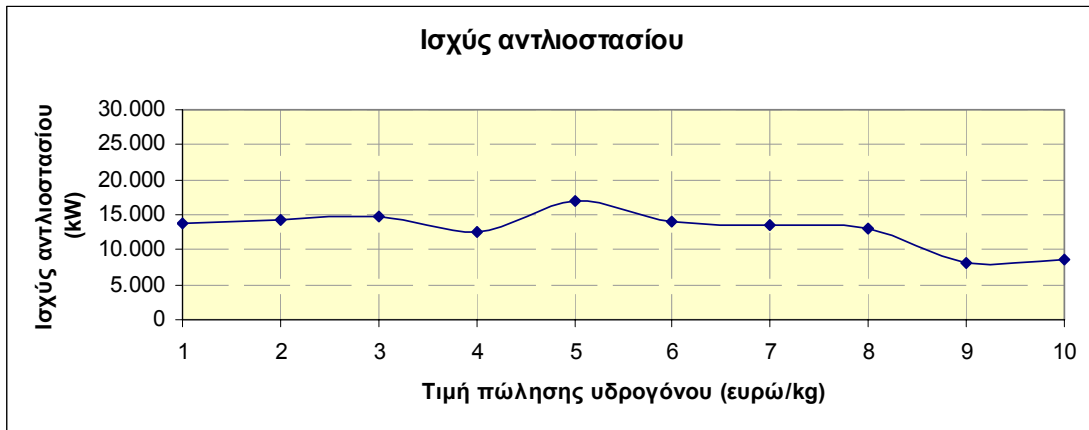
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η διαμόρφωση και τα ετήσια αποτελέσματα των δέκα βέλτιστων ΥΒΣ του σεναρίου 1B για τιμή πώλησης του υδρογόνου από 1 έως 10 ευρώ/kg. Αμέσως μετά ακολουθεί ο σχολιασμός τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων.



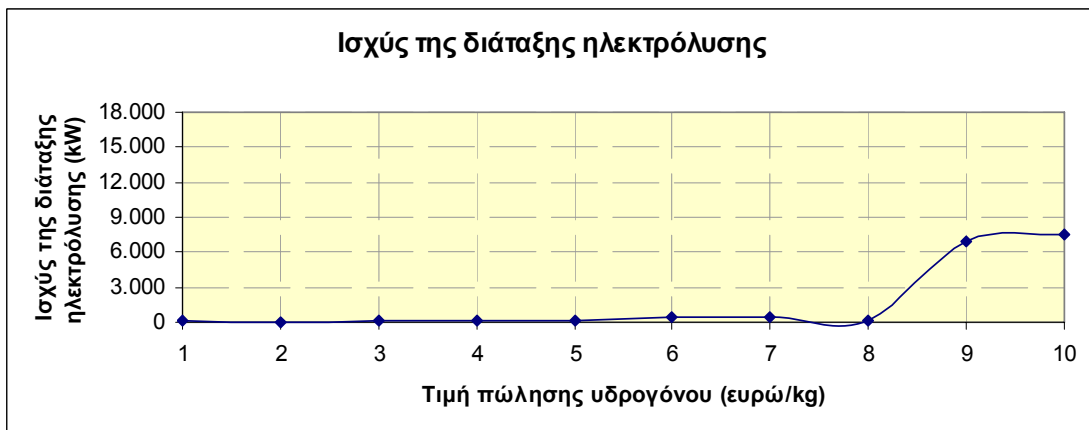
Σχήμα 5.50: Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR)



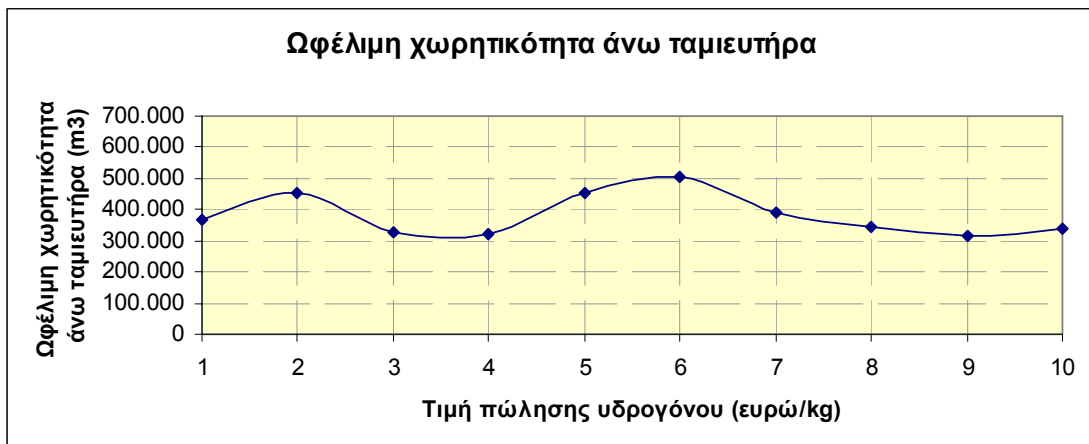
Σχήμα 5.51: Εγκατεστημένη ισχύς ανεμογεννητριών



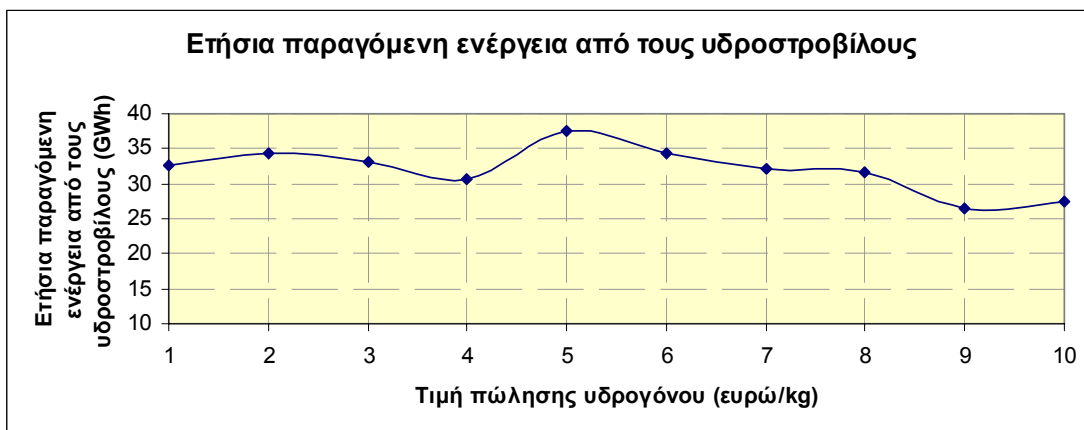
Σχήμα 5.52: Ισχύς αντλιοστασίου



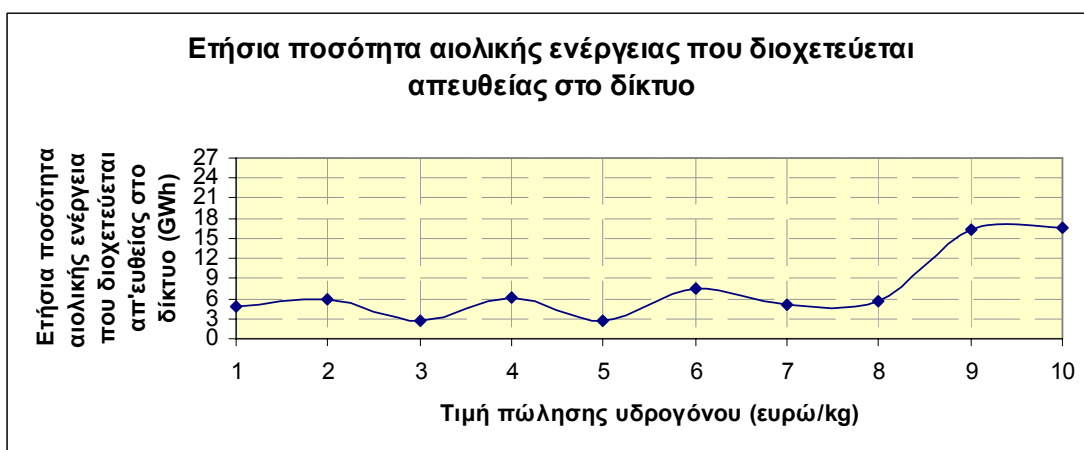
Σχήμα 5.53: Ισχύς της διάταξης ηλεκτρόλυσης



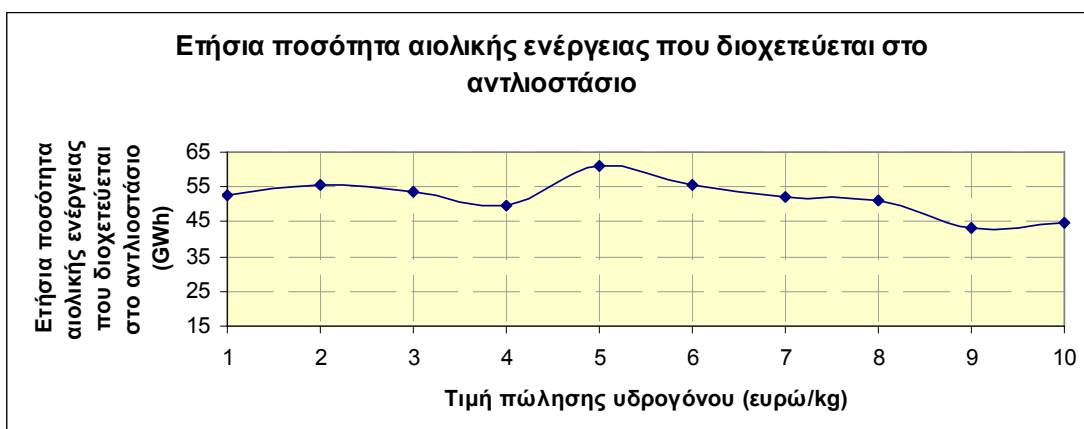
Σχήμα 5.54: Ωφέλιμη χωρητικότητα άνω ταμιευτήρα



Σχήμα 5.55: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια από τους υδροστροβίλους

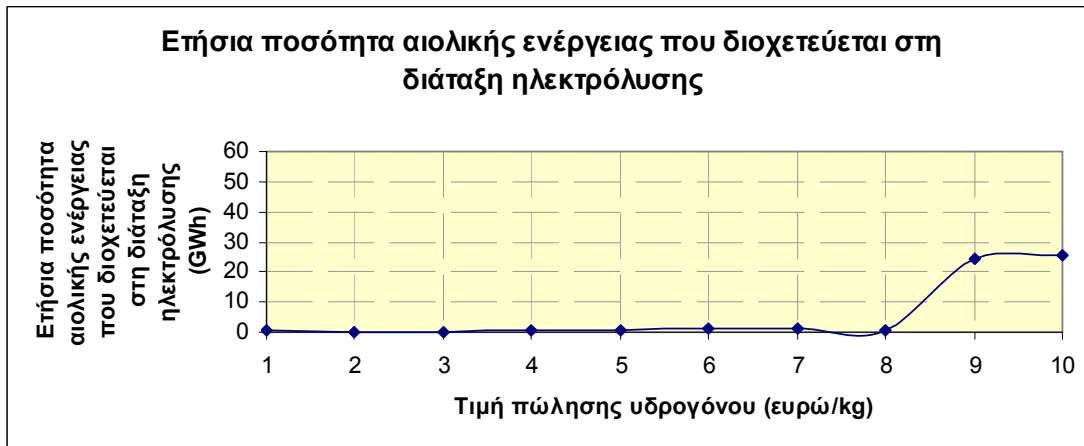


Σχήμα 5.56: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο

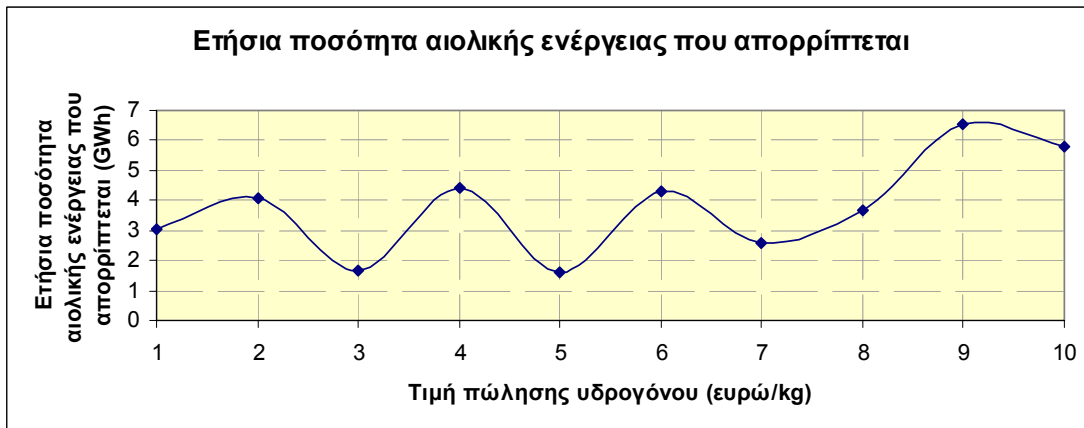


Σχήμα 5.57: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο

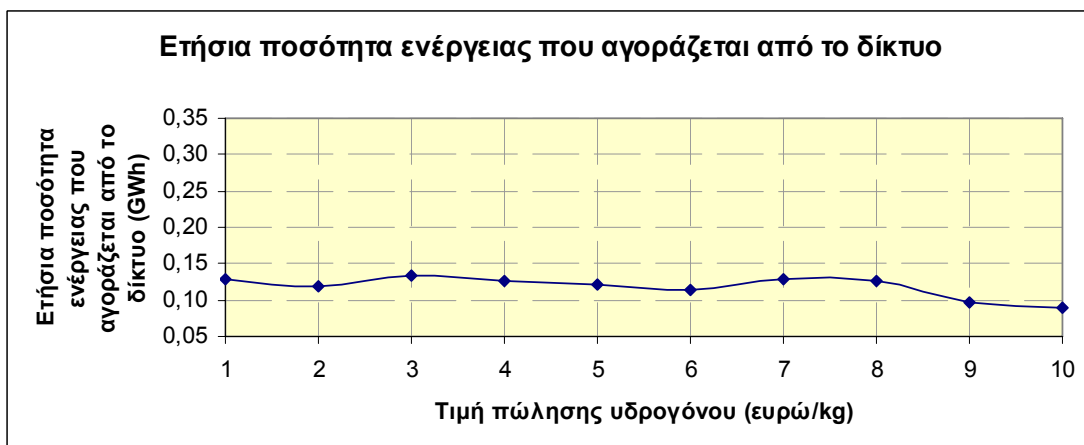




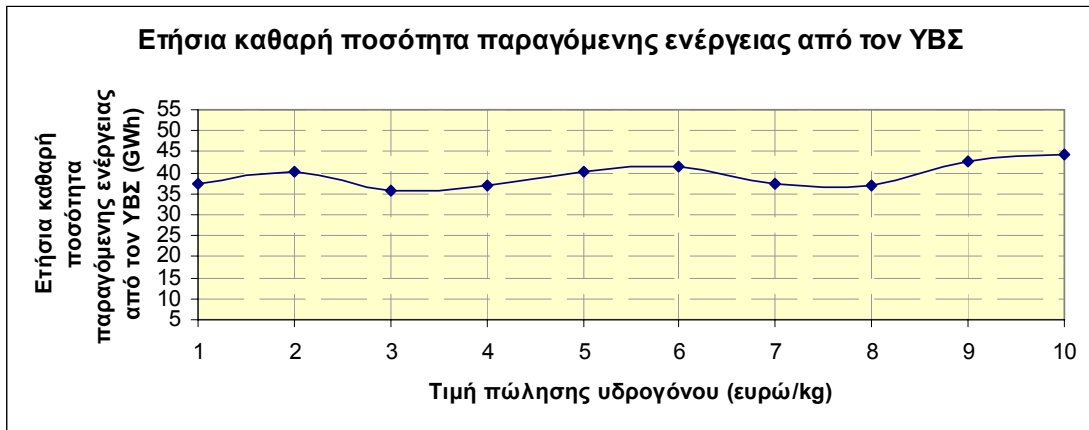
Σχήμα 5.58: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης



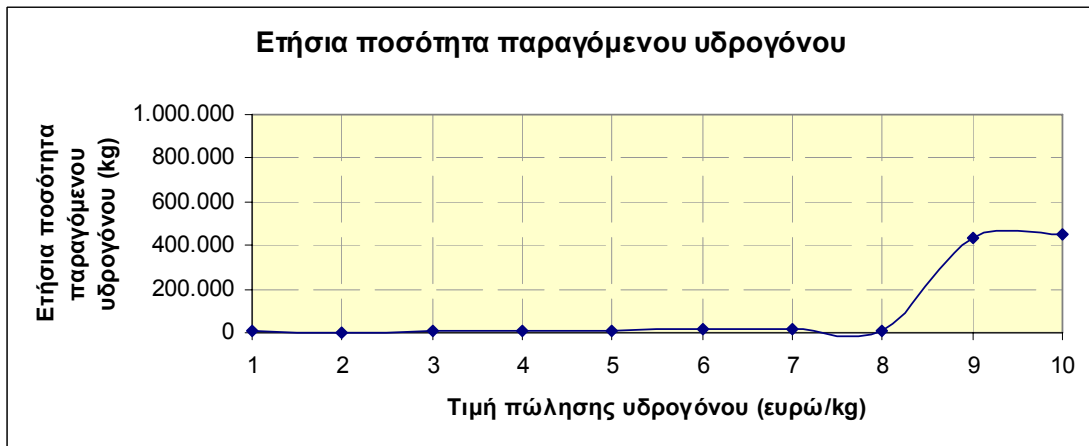
Σχήμα 5.59 : Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που απορρίπτεται



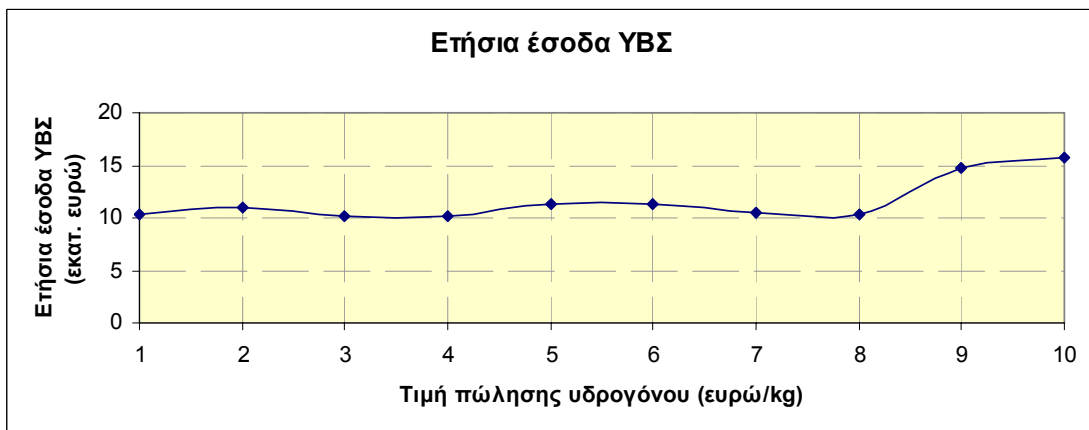
Σχήμα 5.60: Ετήσια ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο



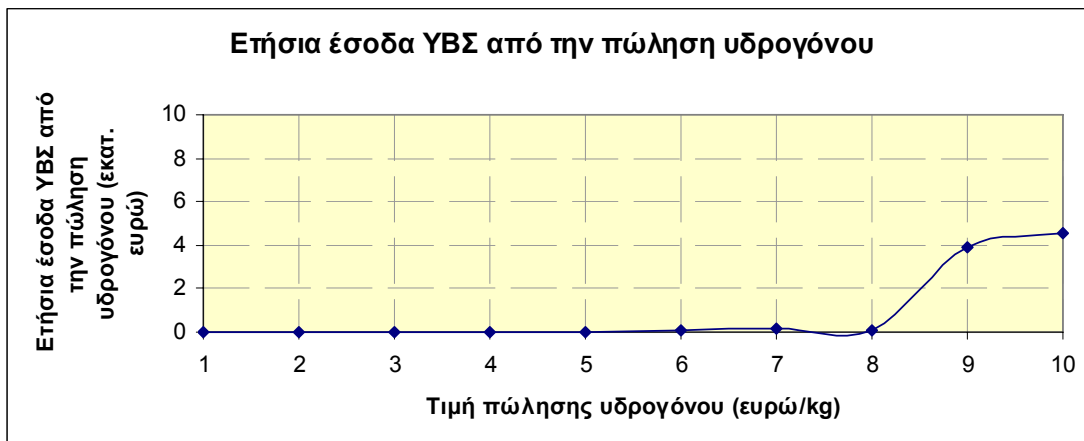
Σχήμα 5.61: Ετήσια καθαρή ποσότητα παραγόμενης ενέργειας από τον ΥΒΣ



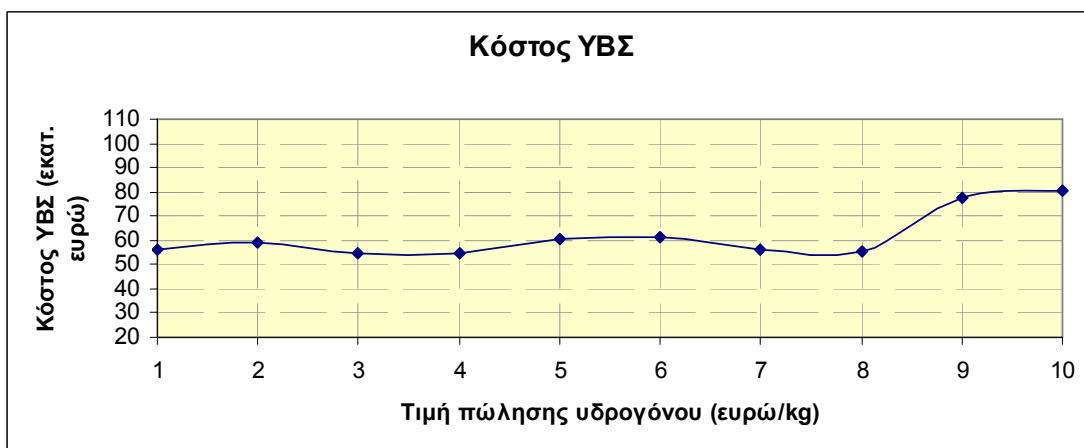
Σχήμα 5.62: Ετήσια ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου



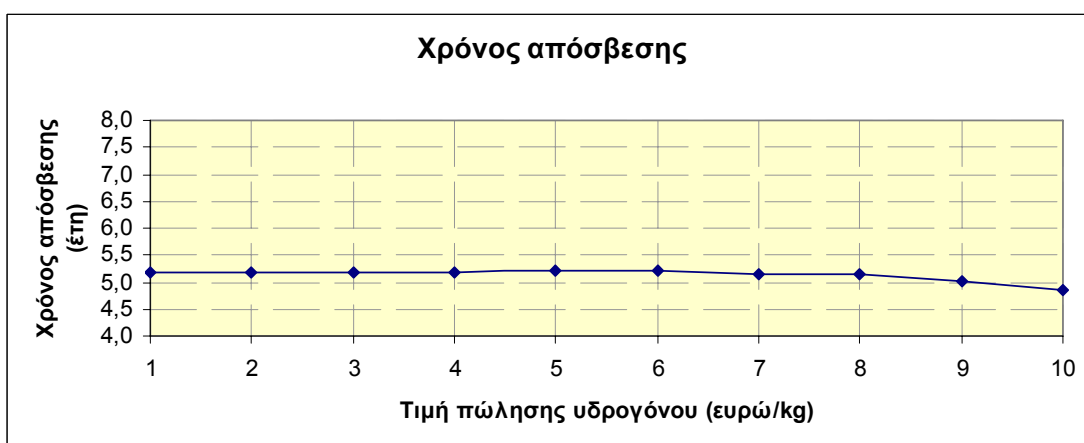
Σχήμα 5.63: Ετήσια έσοδα ΥΒΣ



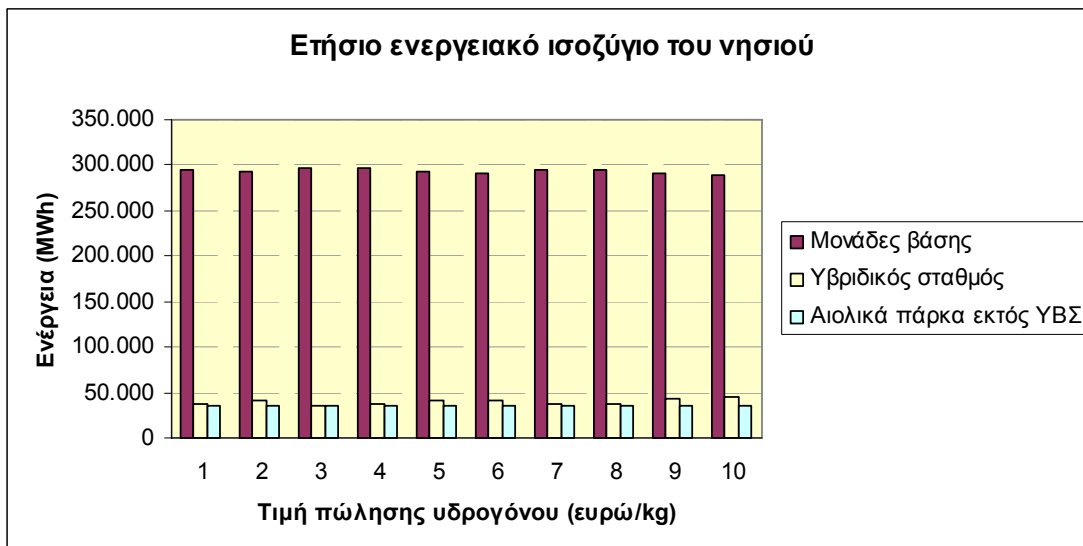
Σχήμα 5.64: Ετήσια έσοδα ΥΒΣ από την πώληση υδρογόνου



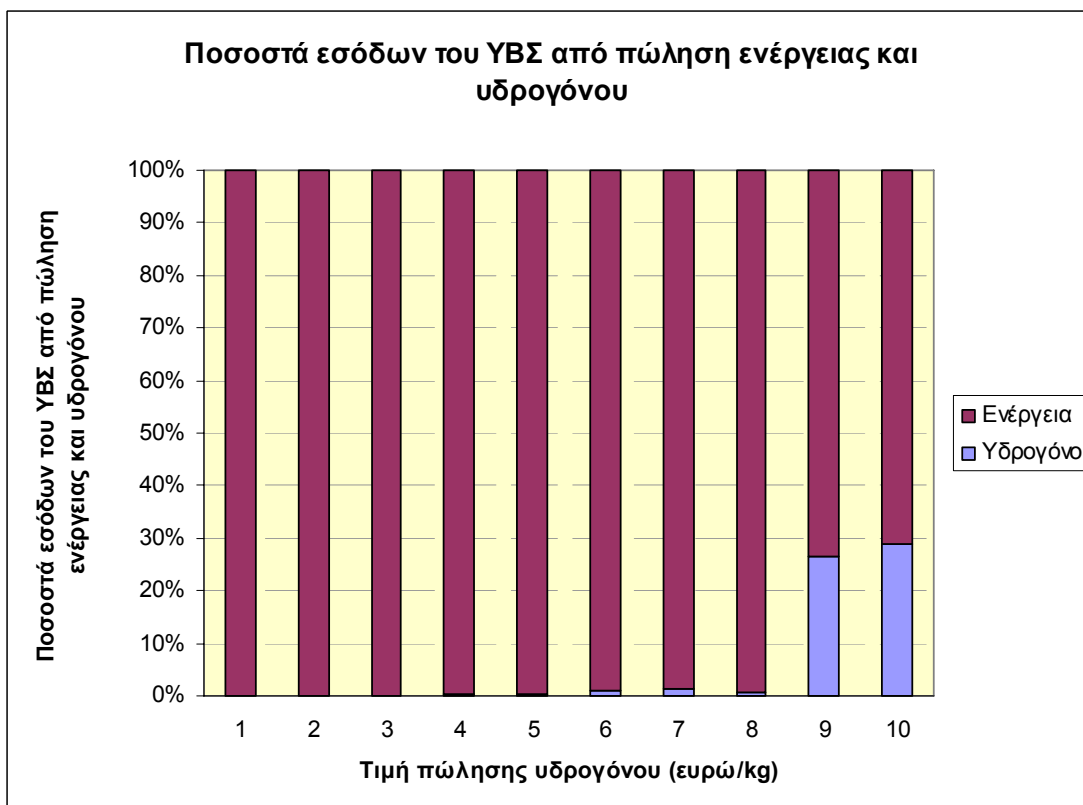
Σχήμα 5.65: Κόστος ΥΒΣ



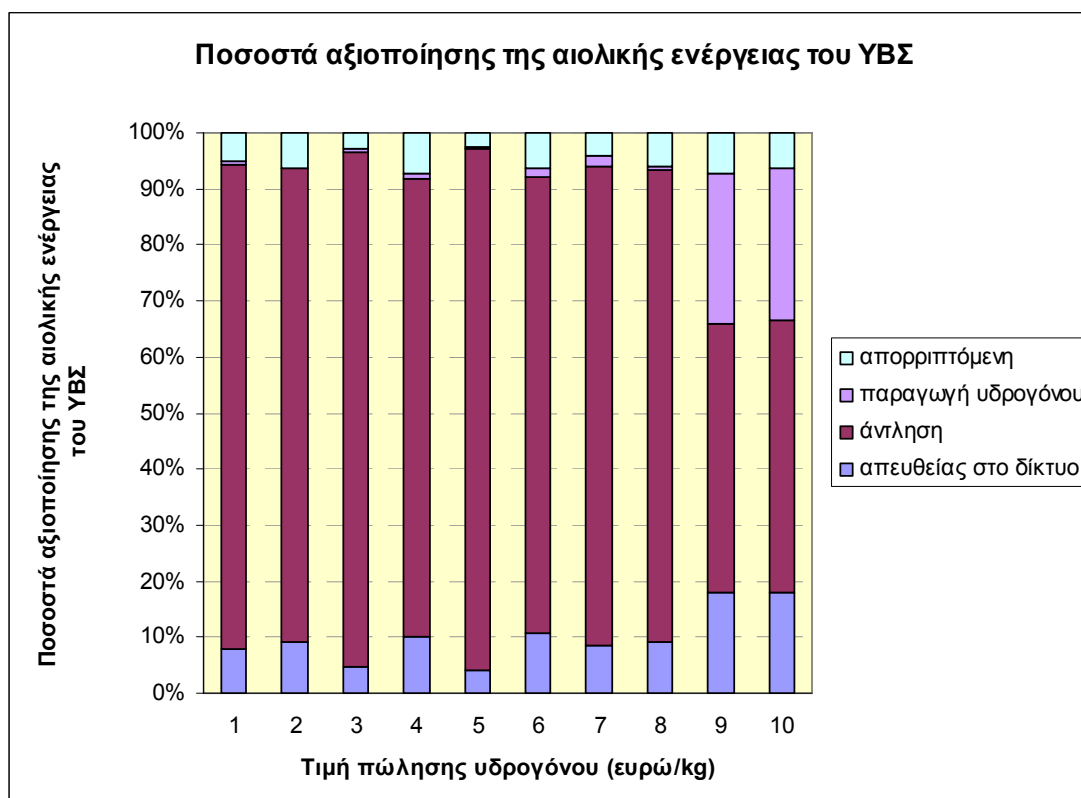
Σχήμα 5.66: Χρόνος απόσβεσης



Σχήμα 5.67: Ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού



Σχήμα 5.68: Ποσοστά εσόδων του ΥΒΣ από πώληση ενέργειας και υδρογόνου



Σχήμα 5.69: Ποσοστά αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας του ΥΒΣ

### Σχολιασμός – Συμπεράσματα

Στο σενάριο αυτό παρατηρείται μια σχετική ομοιομορφία στη διαστασιολόγηση και τη συμπεριφορά των σταθμών, έως την τιμή πώλησης του υδρογόνου 8 ευρώ/kg. Οι συγκεκριμένοι σταθμοί δεν επιτρέπουν την εκτεταμένη παραγωγή υδρογόνου, σε αντίθεση με τους σταθμούς πώλησής του προς 9 και 10 ευρώ/kg.

Από κατασκευαστικής σκοπιάς, οι βέλτιστοι σταθμοί του σεναρίου λειτουργίας 1B συντίθενται με αιολικό πάρκο εγκατεστημένης ισχύος από 20.000 – 30.400 KW, με την τιμή της να κυμαίνεται περί τα 20.000 KW ( $\pm 2.000$ ) για τιμές πώλησης του υδρογόνου από 1 έως 8 ευρώ/kg και να αυξάνεται απότομα στα 29.600 και 30.400 KW για πώληση του υδρογόνου 9 και 10 ευρώ/kg αντίστοιχα (Σχήμα 5.51). Τις αιχμές και τις κοιλάδες της καμπύλης των εγκατεστημένων αιολικών ακολουθεί πιστά η καμπύλη της ετήσιας ποσότητας αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο με τιμές περί τις 5 GWh ( $\pm 3$ ), για τιμές πώλησης του υδρογόνου από 1 έως 8

ευρώ/kg και απότομη αύξηση σε περισσότερες από 16 GWh για πώληση του υδρογόνου 9 και 10 ευρώ/kg (Σχήμα 5.56). Ομοίως διαμορφώνεται και η καμπύλη της ετήσιας ποσότητας αιολικής ενέργειας που απορρίπτεται, η οποία σε καμία περίπτωση (καμία τιμή πώλησης του υδρογόνου) δεν ξεπερνά τις 7 GWh (Σχήμα 5.59), αντιπροσωπεύοντας πάντα ποσοστό μικρότερο του 8% της ετήσιας αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ (Σχήμα 5.69). Η ετήσια ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο αυξάνεται με την μείωση της εγκατεστημένης ισχύος του αιολικού πάρκου και μειώνεται με την αύξησή της (Σχήμα 5.60). Συγκεκριμένα, κυμαίνεται περίπου μεταξύ των τιμών 0,11 – 0,13 GWh για τιμή πώλησης του υδρογόνου 1 έως 8 ευρώ/kg, δηλαδή για εγκατεστημένα αιολικά 20.000 KW ( $\pm 2.000$ ), ενώ πέφτει κάτω από τις 0,10 GWh για τις δύο υψηλότερες τιμές πώλησης του υδρογόνου, δηλαδή για τα δύο μεγαλύτερα αιολικά πάρκα του υπό εξέταση σεναρίου.

Όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ του αντλιοστασίου, αυτή διαμορφώνεται γύρω από τα 15.000 KW για τιμή πώλησης του υδρογόνου έως 8 ευρώ/kg ενώ μειώνεται αισθητά στα 8.000 και 8.500 KW στους ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου 9 και 10 ευρώ/kg αντίστοιχα (Σχήμα 5.52). Με ανάλογο τρόπο, η ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο κυμαίνεται μεταξύ 50 – 60 GWh για τις πρώτες οκτώ τιμές πώλησης του υδρογόνου, ενώ πέφτει απότομα κάτω από τις 42 GWh για τις δύο υψηλότερες τιμές πώλησής του (Σχήμα 5.57). Την καμπύλη της εγκατεστημένης ισχύος του αντλιοστασίου παρακολουθεί και η καμπύλη της ετήσιας ποσότητας παραγόμενης ενέργειας από τους υδροστροβίλους, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 30 - 37 GWh για πώληση του υδρογόνου από 1 έως 8 ευρώ/kg, ενώ μειώνεται περίπου στις 27 GWh για πώληση του υδρογόνου 9 και 10 ευρώ/kg (Σχήμα 5.55). Η ετήσια καθαρή ποσότητα παραγόμενης ενέργειας από τον ΥΒΣ (Σχήμα 5.61), μέχρι την τιμή πώλησης υδρογόνου 8 ευρώ/kg παρακολουθεί την αντίστοιχη καμπύλη των υδροστροβίλων παίρνοντας τιμές στο διάστημα 36 – 40 GWh. Με την περαιτέρω ωστόσο αύξηση της τιμής πώλησης του υδρογόνου, αυξάνεται και η καθαρή ποσότητα ενέργειας παρά τη μείωση της υδροστροβιλικής παραγωγής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην απότομη αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών και την συνεπακόλουθη αύξηση της ετήσιας ποσότητας αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο, για τιμές πώλησης του υδρογόνου 9 και 10 ευρώ/kg.

Η ισχύς της διάταξης ηλεκτρόλυσης παραμένει σε χαμηλά επίπεδα (30 – 500 KW) για τιμή πώλησης του υδρογόνου έως 8 ευρώ/kg, ενώ εκτοξεύεται απότομα στα περίπου 7.000 και 7.500 KW για τιμή πώλησής του 9 και 10 ευρώ/kg αντίστοιχα (Σχήμα 5.53). Η διαμόρφωση αυτή της καμπύλης της ισχύος της διάταξης ηλεκτρόλυσης είναι σύμφωνη με την καμπύλη των εγκατεστημένων αιολικών που επίσης, όπως προαναφέρθηκε, παρουσιάζει απότομη αύξηση για τις δύο ακριβότερες τιμολογήσεις του παραγόμενου υδρογόνου. Την πορεία της καμπύλης της ισχύος της διάταξης ηλεκτρόλυσης ακολουθούν, όπως είναι λογικό, οι καμπύλες της ετήσιας ποσότητας αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται σε αυτήν (Σχήμα 5.58), καθώς και η καμπύλη της ετήσιας ποσότητας του παραγόμενου υδρογόνου (Σχήμα 5.62). Έτσι, για τις τιμές πώλησης του υδρογόνου από 1 έως 8 ευρώ/kg, η αιολική ενέργεια που ετησίως χρησιμοποιείται για την παραγωγή του είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερη ή ίση της 1 GWh και η αντίστοιχη ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου έως 19.000 kg. Αντίθετα, για τιμές πώλησης υδρογόνου 9 και 10 ευρώ/kg, καταναλώνονται ετησίως από τη διάταξη ηλεκτρόλυσης περισσότερες από 24 GWh αιολικής ενέργειας με παραγωγή υδρογόνου μεγαλύτερη από 430.000 kg.

Η αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών, η μείωση της ισχύος του αντλιοστασίου και η αύξηση της ισχύος της διάταξης ηλεκτρόλυσης για πώληση του υδρογόνου από 9 ευρώ/kg και πάνω, υποδεικνύουν την κρίσιμη τιμή πώλησης του υδρογόνου για το σενάριο αυτό. Με άλλα λόγια, η πώληση του υδρογόνου προς 9 και 10 ευρώ/kg καθιστούν την παραγωγή και πώλησή του ως την πιο κερδοφόρα λειτουργία του ΥΒΣ, εκτοπίζοντας την παραγωγή και πώληση ενέργειας που μέχρι και την τιμή πώλησης του υδρογόνου 8 ευρώ/kg παρέμενε η πλέον συμφέρουσα. Άλλωστε, για τις υψηλές αυτές τιμές πώλησης του υδρογόνου παρατηρούνται και τα μεγαλύτερα ποσοστά αξιοποίησης αιολικής ενέργειας για την παραγωγή του (>26% της ετήσιας αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ) (Σχήμα 5.69). Προς την ίδια κατεύθυνση συνηγορεί και η καμπύλη της ωφέλιμης χωρητικότητας του άνω ταμιευτήρα (Σχήμα 5.54), η οποία ακολουθεί τις αιχμές και τις κοιλάδες της καμπύλης των εγκατεστημένων αιολικών μέχρι την τιμή πώλησης υδρογόνου 8 ευρώ/kg. Στη συνέχεια (9 και 10 ευρώ/kg υδρογόνου), παρά την απότομη αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών, μειώνεται η χωρητικότητα του ταμιευτήρα, αφού τα επιπλέον αιολικά επιλέχθηκαν, πλέον, από το λογισμικό της βελτιστοποίησης με σκοπό να εξυπηρετήσουν την ηλεκτρόλυση και όχι την αντλησιοταμίευση. Αυτό προφανώς συμβαίνει διότι η

βελτιστοποίηση των υπό εξέταση σταθμών γίνεται με οικονομικό και όχι ενεργειακό κριτήριο.

Όσον αφορά στο ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού (Σχήμα 5.67), διαμορφώνεται σχεδόν παρόμοιο για κάθε τιμή πώλησης του υδρογόνου με τις μονάδες βάσης να έχουν τη μικρότερη συμμετοχή (~ 290.000 MWh) και τον ΥΒΣ τη μεγαλύτερη (~ 440.000 MWh), για τον ΥΒΣ με τιμή πώλησης του υδρογόνου 10 ευρώ/kg. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο εν λόγω σταθμός έχει το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο από τους δέκα σταθμούς του σεναρίου και συνεπώς τη δυνατότητα να στέλνει περισσότερη αιολική ενέργεια απευθείας στο δίκτυο. Να σημειωθεί ότι η ετήσια υδροστροβιλική παραγωγή για τον εν λόγω σταθμό είναι η μικρότερη μεταξύ των σταθμών του σεναρίου κι αυτό γιατί η ισχύς του αντλιοστασίου του είναι επίσης η μικρότερη παρατηρούμενη του σεναρίου, ώστε να δίνεται προτεραιότητα στην παραγωγή υδρογόνου.

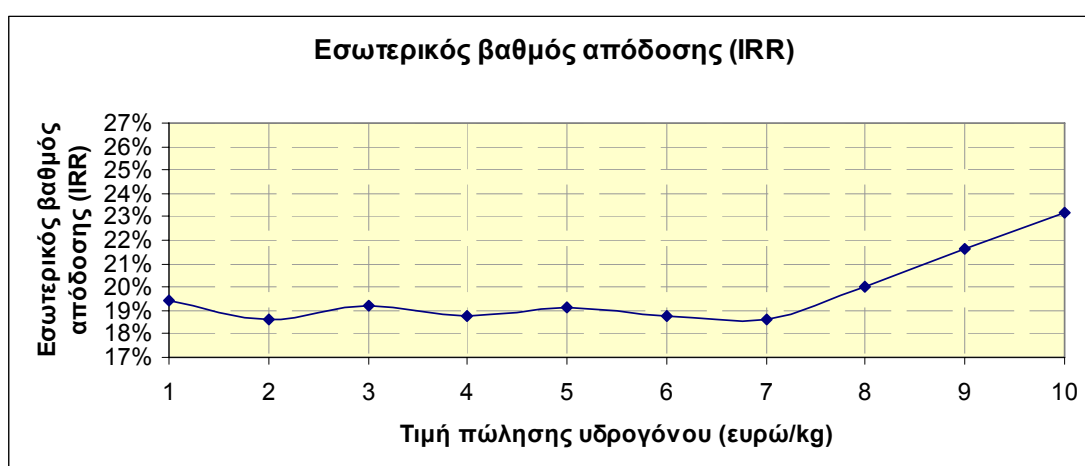
Από οικονομικής σκοπιάς, οι δέκα υβριδικοί σταθμοί που εξετάστηκαν στο σενάριο 1B εμφανίζονται ως πολύ αξιόλογες επενδύσεις. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) των ΥΒΣ κυμαίνεται από 24,7% έως 26%, με εμφανή αύξησή του για τις δύο ακριβότερες τιμολογήσεις του υδρογόνου (Σχήμα 5.50). Ομοίως, ο χρόνος απόσβεσης των ΥΒΣ προκύπτει στο στενό εύρος τιμών των 4,8 έως 5,2 χρόνων, με πτωτική τάση από την τιμή πώλησης υδρογόνου 9 ευρώ/kg και πάνω (Σχήμα 5.66). Επίσης, για πώληση του υδρογόνου 9 και 10 ευρώ/kg σημειώνεται απότομη αύξηση των ετήσιων εσόδων του ΥΒΣ (Σχήμα 5.63) με την πώληση υδρογόνου να αποφέρει έσοδα ύψους 4 και 4,5 εκατ. ευρώ αντίστοιχα (Σχήμα 5.64), ποσά που αντιπροσωπεύουν το 26% και το 29% αντίστοιχα των συνολικών εσόδων του ΥΒΣ (Σχήμα 5.68). Να σημειωθεί ότι για τιμή πώλησης του υδρογόνου έως και 8 ευρώ/kg, η περιορισμένη παραγωγή και πώλησή του συμμετέχει στα ετήσια έσοδα του σταθμού με ποσοστό μικρότερο του 2%. Το κόστος του ΥΒΣ (Σχήμα 5.65) μεταβάλλεται σύμφωνα με την μείωση ή την αύξηση του εγκατεστημένου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (κυρίως των ανεμογεννητριών) με εμφανώς ακριβότερους σταθμούς για τις δύο υψηλότερες τιμές πώλησης του υδρογόνου. Συγκεκριμένα, για πώληση του υδρογόνου έως 8 ευρώ/kg, το κόστος των ΥΒΣ κυμαίνεται μεταξύ των 54 – 61 εκατ. ευρώ, ενώ για τιμές πώλησης 9 και 10 ευρώ/kg εκτοξεύεται περίπου στα 78 και 80 εκατ. ευρώ αντίστοιχα.



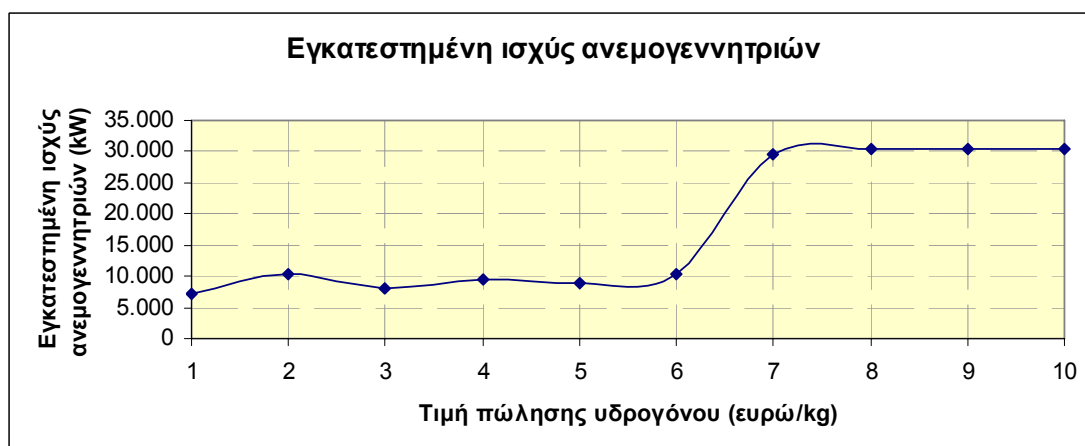
## 5.4 Αποτελέσματα του Σεναρίου 2Α

### 5.4.1 Αποτελέσματα βέλτιστων σταθμών του Σεναρίου 2Α με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR)

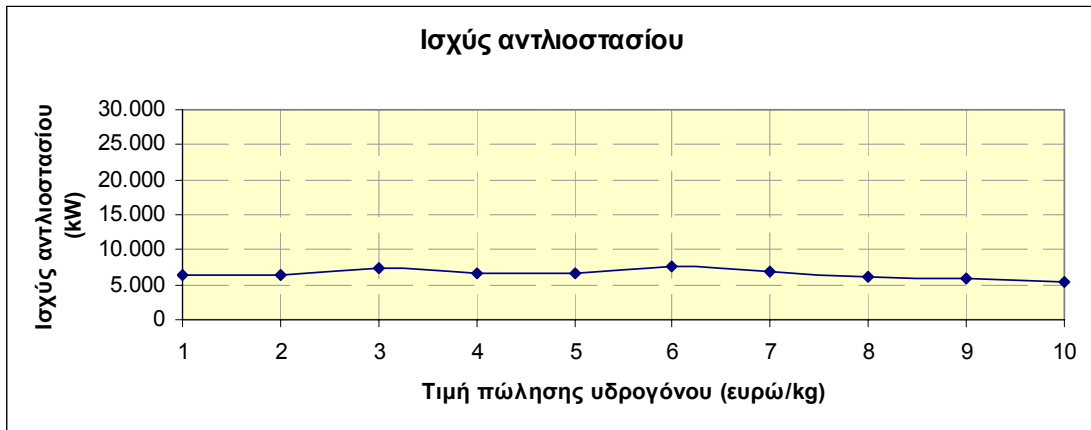
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η διαμόρφωση και τα ετήσια αποτελέσματα των δέκα βέλτιστων ΥΒΣ του σεναρίου 2Α για τιμή πώλησης του υδρογόνου από 1 έως 10 ευρώ/kg. Αμέσως μετά ακολουθεί ο σχολιασμός τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων.



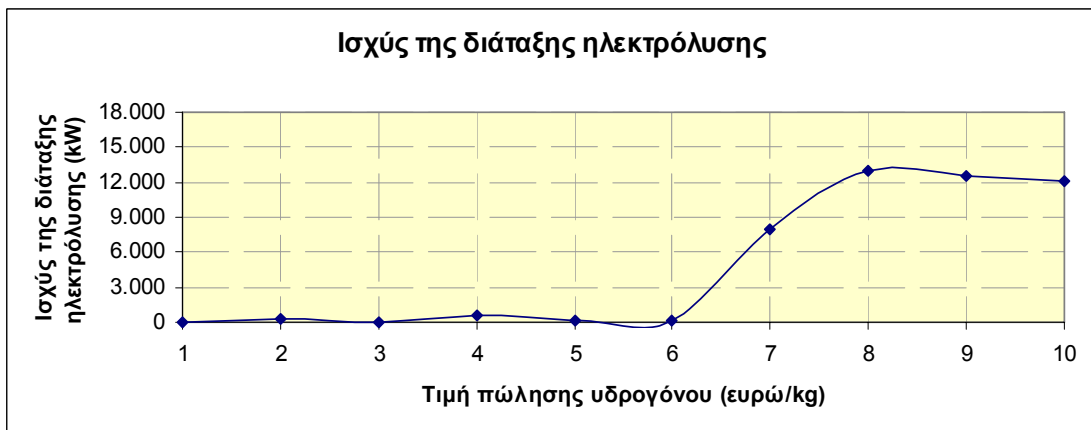
Σχήμα 5.70: Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR)



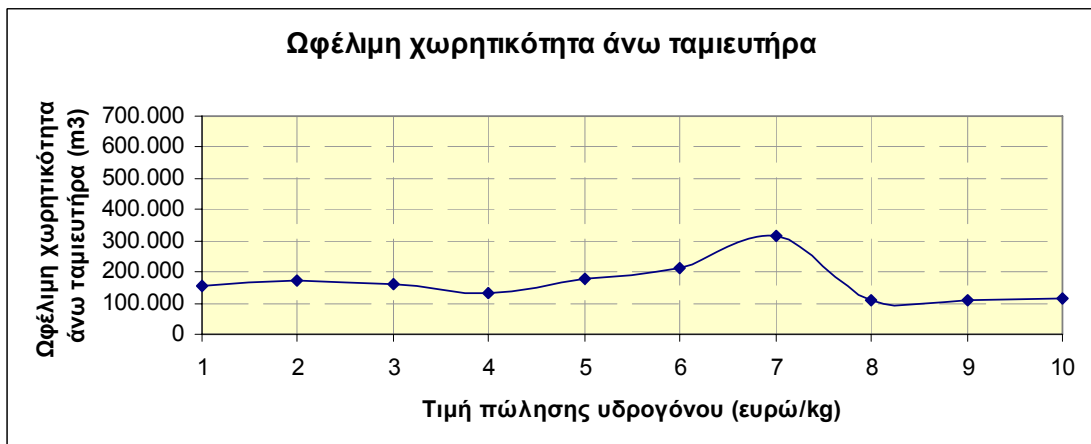
Σχήμα 5.71: Εγκατεστημένη ισχύς ανεμογεννητριών



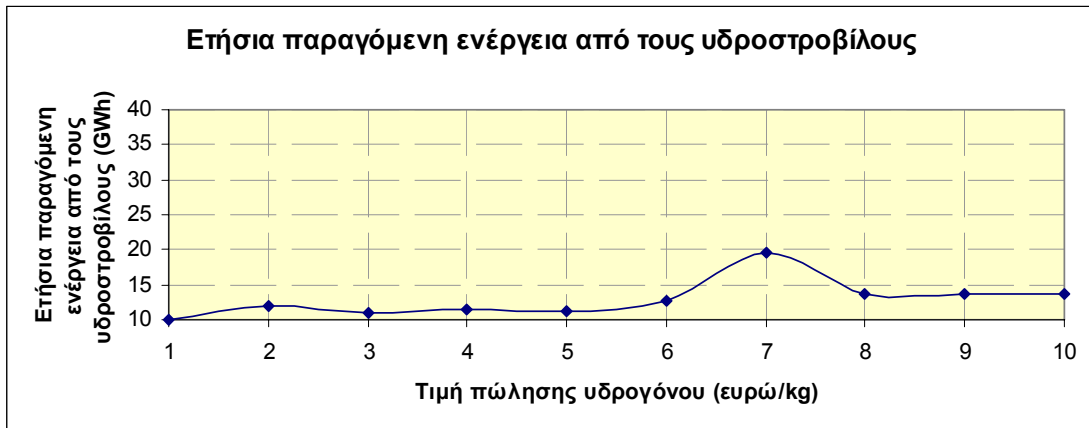
Σχήμα 5.72: Ισχύς αντλιοστασίου



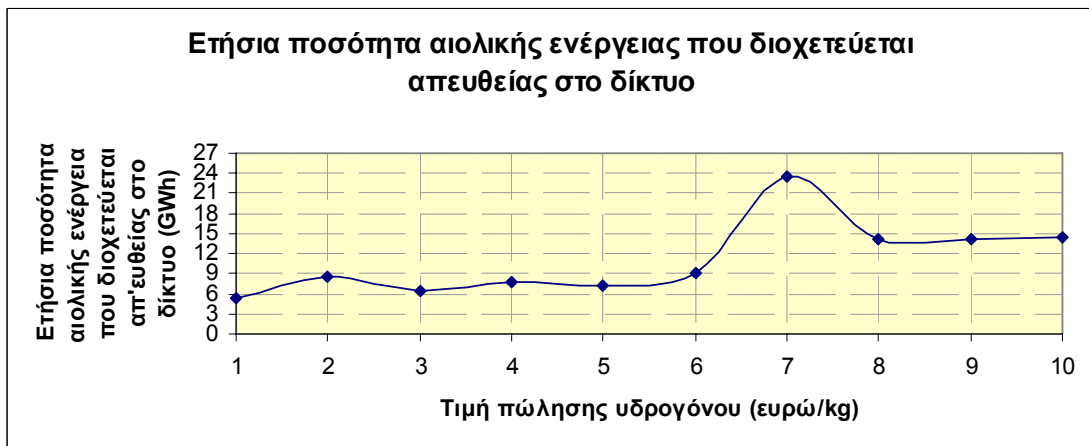
Σχήμα 5.73: Ισχύς της διάταξης ηλεκτρόλυσης



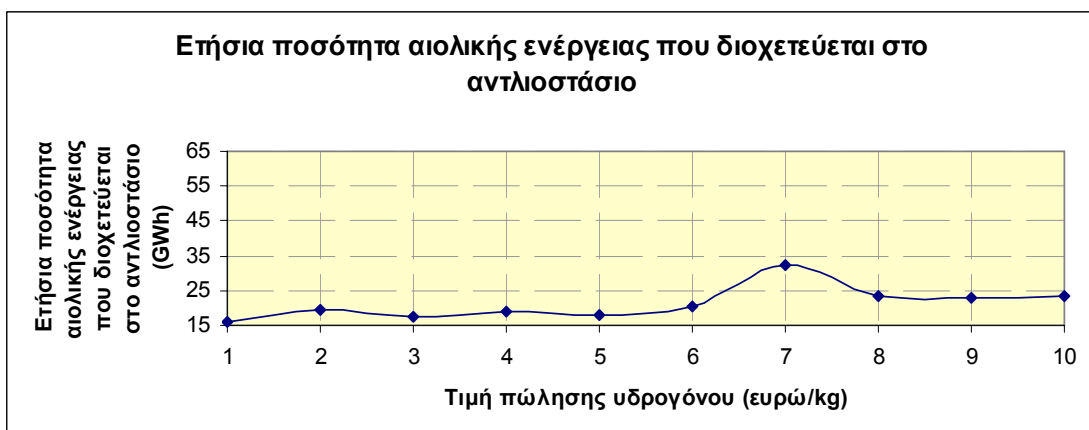
Σχήμα 5.74: Ωφέλιμη χωρητικότητα άνω ταμιευτήρα



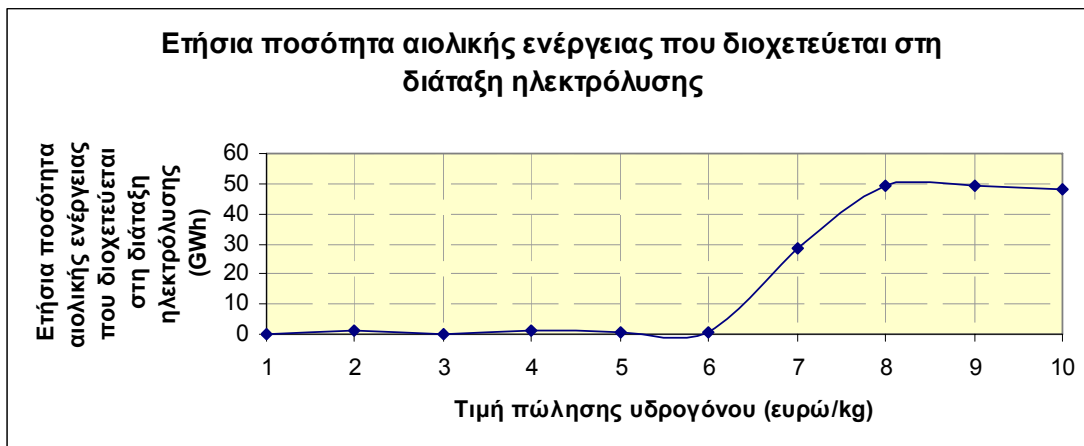
Σχήμα 5.75: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια από τους υδροστροβίλους



Σχήμα 5.76: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο



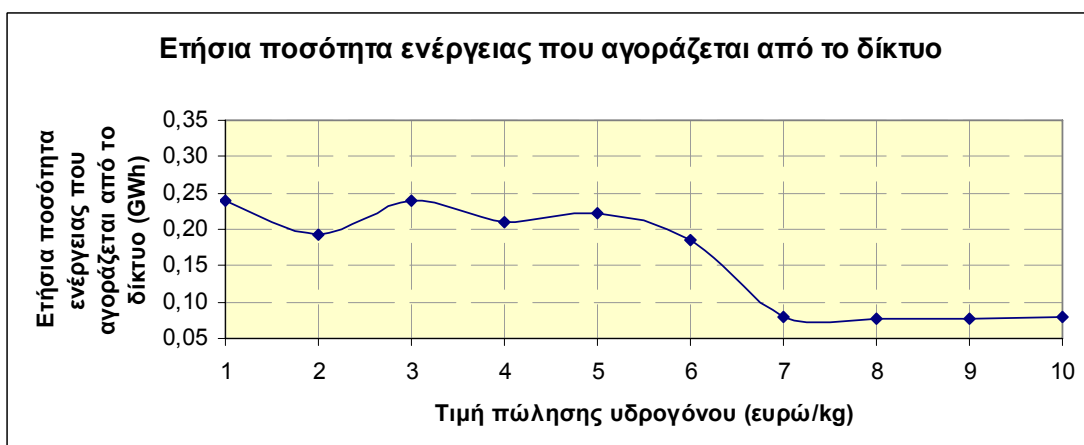
Σχήμα 5.77: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο



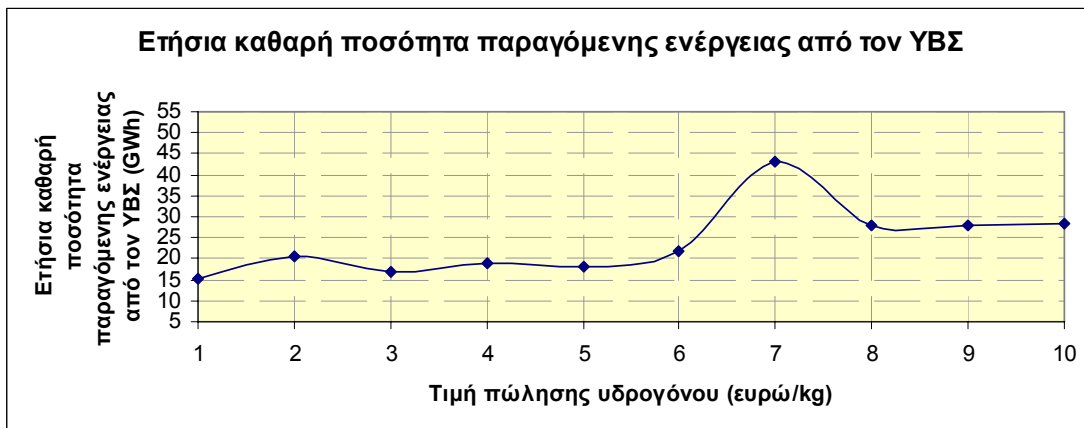
Σχήμα 5.78: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης



Σχήμα 5.79 : Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που απορρίπτεται



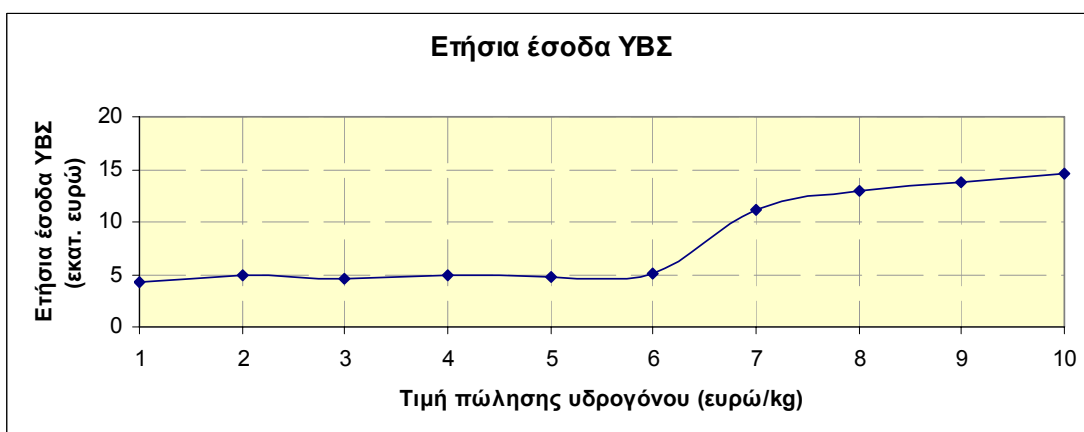
Σχήμα 5.80: Ετήσια ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο



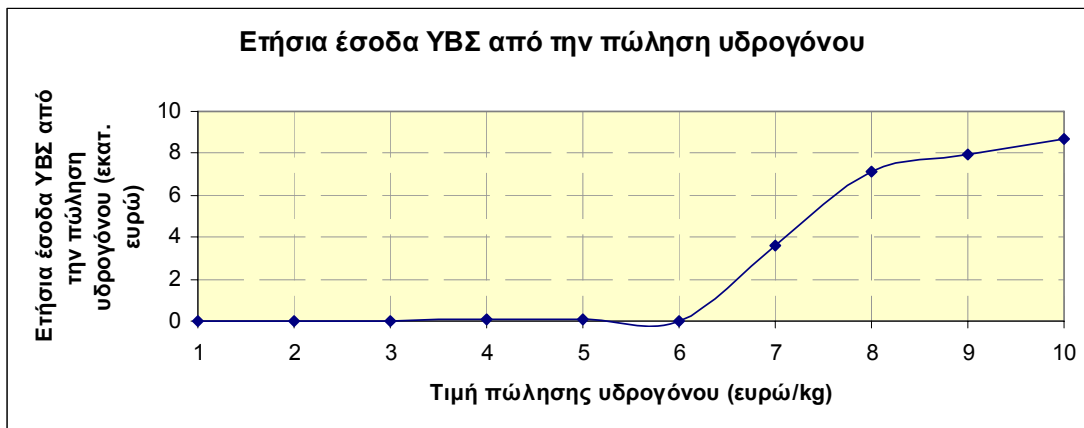
Σχήμα 5.81: Ετήσια καθαρή ποσότητα παραγόμενης ενέργειας από τον ΥΒΣ



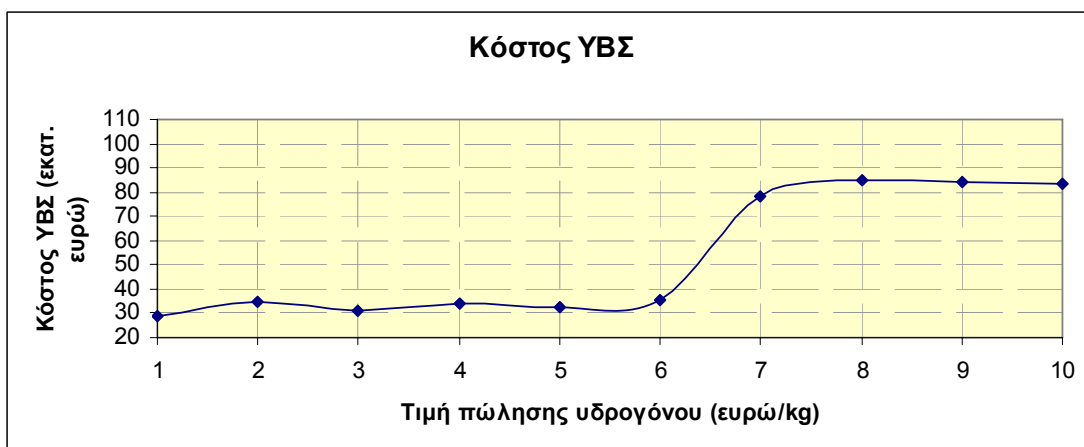
Σχήμα 5.82: Ετήσια ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου



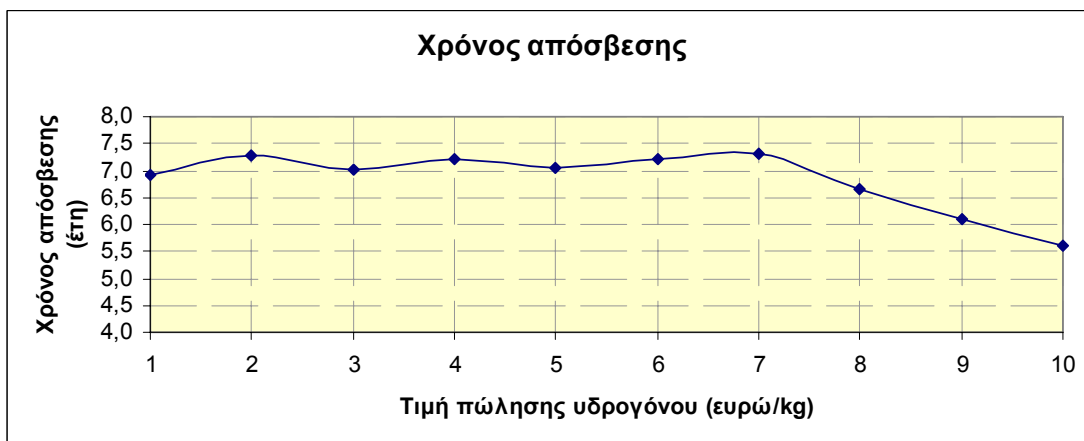
Σχήμα 5.83: Ετήσια έσοδα ΥΒΣ



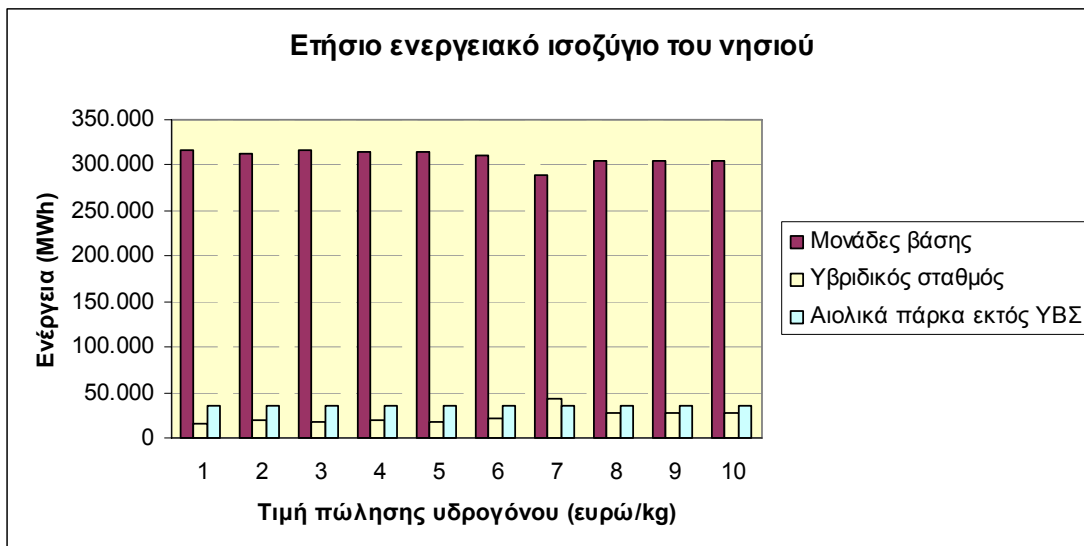
Σχήμα 5.84: Ετήσια έσοδα ΥΒΣ από την πώληση υδρογόνου



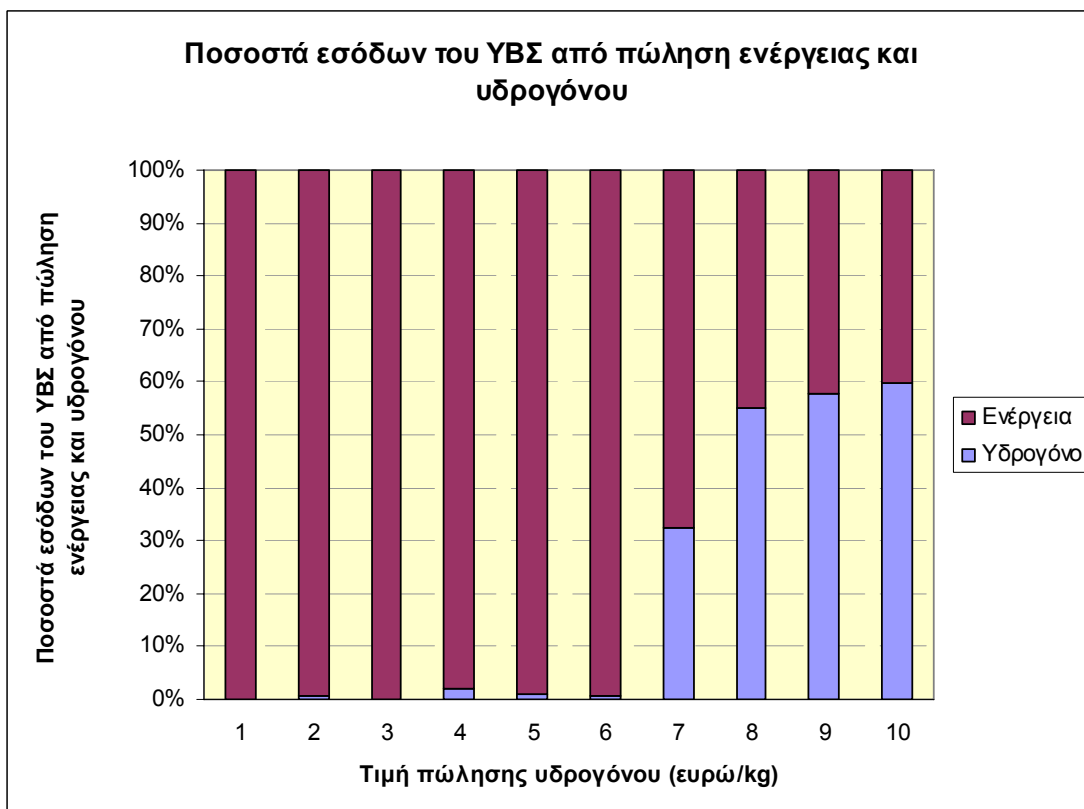
Σχήμα 5.85: Κόστος ΥΒΣ



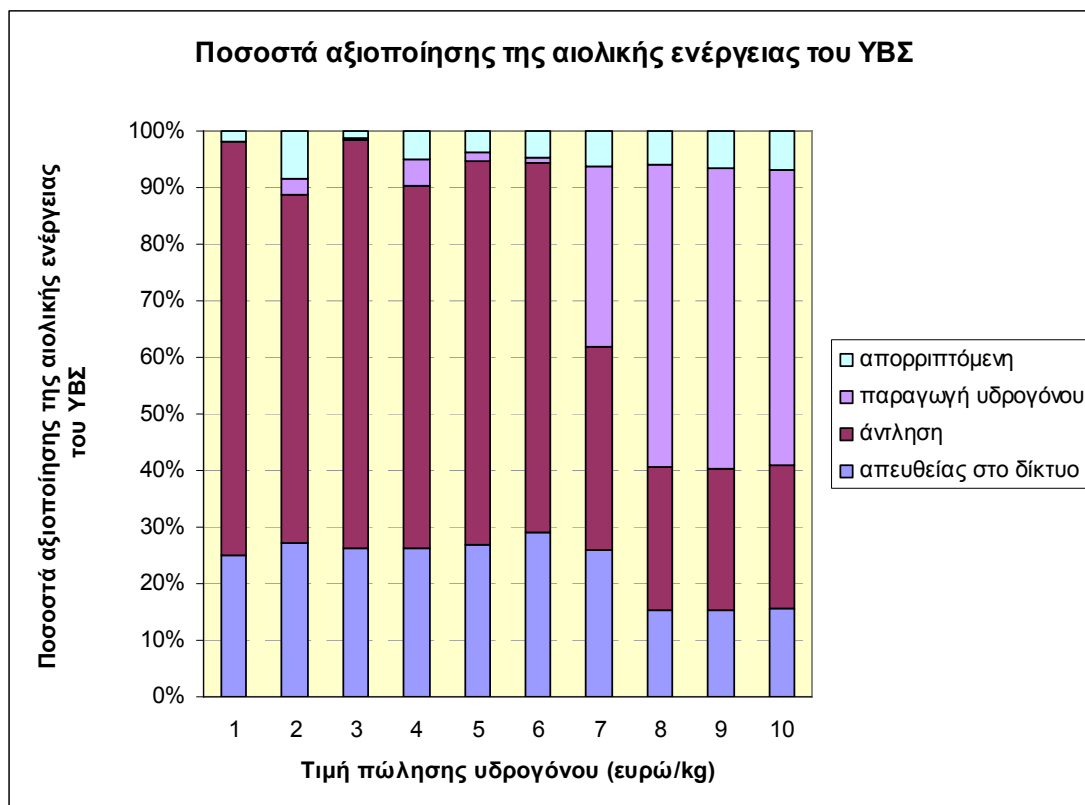
Σχήμα 5.86: Χρόνος απόσβεσης



Σχήμα 5.87: Ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού



Σχήμα 5.88: Ποσοστά εσόδων του ΥΒΣ από πώληση ενέργειας και υδρογόνου



Σχήμα 5.89: Ποσοστά αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας του ΥΒΣ

### Σχολιασμός – Συμπεράσματα

Στο σενάριο αυτό παρατηρείται μια σχετική ομοιομορφία στη διαστασιολόγηση και τη συμπεριφορά των σταθμών, έως την τιμή πώλησης του υδρογόνου 6 ευρώ/kg. Οι σταθμοί αυτοί διαστασιολογούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγουν ετησίως περιορισμένες ποσότητες υδρογόνου. Για πώλησή του προς 7 ευρώ/kg η παραγωγή υδρογόνου κερδίζει έδαφος ως προς την παραγωγή ενέργειας, ενώ γίνεται η κύρια δραστηριότητα των σταθμών που το πωλούν προς 8 έως 10 ευρώ/kg.

Από κατασκευαστικής σκοπιάς, οι βέλτιστοι σταθμοί του σεναρίου λειτουργίας 2Α συντίθενται με αιολικό πάρκο εγκατεστημένης ισχύος από 7.200 – 30.400 KW, με την τιμή της να κυμαίνεται περί τα 9.000 KW ( $\pm 1.500$ ) για τιμές πώλησης του υδρογόνου από 1 έως 6 ευρώ/kg, να αυξάνεται απότομα στα 29.600 KW για πώληση του υδρογόνου προς 7 ευρώ/kg και να σταθεροποιείται στα 30.400 KW για τους ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου από 8 έως 10 ευρώ/kg (Σχήμα 5.71). Η καμπύλη της ετήσιας



ποσότητας αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο (Σχήμα 5.76) ακολουθεί τις κοιλιάδες και τις βυθίσεις της καμπύλης των εγκατεστημένων αιολικών μέχρι την τιμή πώλησης του υδρογόνου 6 ευρώ/kg με τιμές στο εύρος 5,5 – 10 GWh. Για τιμή όμως πώλησης του υδρογόνου 7 ευρώ/kg, που συνεπάγεται απότομη αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών, το ετήσιο ποσό αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο αγγίζει τις 23,5 GWh. Με την περαιτέρω ωστόσο αύξηση της τιμής πώλησης του παραγόμενου υδρογόνου και την συνεπακόλουθη αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών παρατηρείται μείωση και σταθεροποίηση της ετήσιας ποσότητας αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο περί την τιμή των 14 GWh. Φαίνεται, λοιπόν, ότι στο σενάριο αυτό η πώληση του υδρογόνου προς 7 ευρώ/kg οδηγεί στη διαμόρφωση ενός ιδιαίτερου ΥΒΣ. Το συμπέρασμα αυτό σύντομα θα επιβεβαιωθεί και από την εξέταση των υπόλοιπων σχημάτων. Από την άλλη μεριά, η καμπύλη της ετήσιας ποσότητας αιολικής ενέργειας που απορρίπτεται (Σχήμα 5.79) διαμορφώνεται ανάλογα με την καμπύλη της εγκατεστημένης ισχύος του αιολικού πάρκου. Να σημειωθεί ότι σε καμία περίπτωση δεν ξεπερνά τις 6,5 GWh, αντιπροσωπεύοντας πάντα ποσοστό μικρότερο του 8% της συνολικής ετήσιας αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ (Σχήμα 5.89). Η ετήσια ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο (Σχήμα 5.80) αυξάνεται με την μείωση της ισχύος των ανεμογεννητριών και μειώνεται με την αύξηση της. Συγκεκριμένα, κυμαίνεται περίπου μεταξύ των τιμών 0,19 – 0,24 GWh για τιμή πώλησης του υδρογόνου 1 έως 6 ευρώ/kg, δηλαδή για εγκατεστημένη αιολική ισχύς 9.000 KW ( $\pm 1.500$ ), ενώ πέφτει περίπου στις 0,08 GWh για τις τέσσερις υψηλότερες τιμές πώλησης του υδρογόνου, δηλαδή για τα τέσσερα μεγαλύτερα αιολικά πάρκα του υπό εξέταση σεναρίου.

Όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ του αντλιοστασίου, αυτή κυμαίνεται περίπου μεταξύ των τιμών 6.300 – 7.600 KW για πώληση του υδρογόνου έως 7 ευρώ/kg, ενώ ακολουθεί πτωτική τάση με την περαιτέρω αύξηση της τιμής πώλησής του, φτάνοντας τα 5.500 KW για πώληση του υδρογόνου προς 10 ευρώ/kg (Σχήμα 5.72). Η ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο (Σχήμα 5.77) κυμαίνεται μεταξύ 16 - 21 GWh για τις πρώτες έξι τιμές πώλησης του υδρογόνου, παρακολουθώντας ουσιαστικά την καμπύλη των εγκατεστημένων αιολικών. Για την τιμή πώλησης του υδρογόνου 7 ευρώ/kg σημειώνεται απότομη αύξηση στις 32 GWh της ετήσιας ποσότητας αιολικής ενέργειας που απορροφάται από το αντλιοστάσιο, αύξηση η οποία συνάδει και με την απότομη αύξηση των

εγκατεστημένων αιολικών για την εν λόγω τιμή πώλησης του υδρογόνου. Για τις τρεις επόμενες ωστόσο τιμές πώλησής του, δηλαδή στους ΥΒΣ με μόνο 800 KW αιολικών επιπλέον σε σχέση με τον ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου προς 7 ευρώ/kg, η καμπύλη της ετήσιας ποσότητας αιολικής ενέργειας που αξιοποιείται στην αντλησιοταμίευση μειώνεται και σταθεροποιείται περί τις 23 GWh. Ανάλογα διαμορφώνεται, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο, και η καμπύλη της ετήσιας ποσότητας ενέργειας που παράγεται από τους υδροστροβίλους (Σχήμα 5.75). Έτσι, η ετήσια υδροστροβιλική παραγωγή κυμαίνεται μεταξύ 10 – 13 GWh για πώληση του υδρογόνου έως 6 ευρώ/kg, αυξάνει απότομα στις 23,5 GWh για την τιμή 7 ευρώ/kg και τέλος σταθεροποιείται περί τις 13,6 GWh για τους ΥΒΣ με τις τρεις υψηλότερες τιμολογήσεις του υδρογόνου. Με παρόμοιο τρόπο διαμορφώνεται, όπως είναι φυσικό, και η καμπύλη της ετήσιας καθαρής ποσότητας ενέργειας που παράγεται από τους υπό εξέταση ΥΒΣ του σεναρίου (Σχήμα 5.81). Συγκεκριμένα, η ετήσια καθαρή ποσότητα ενέργειας που προσφέρεται στο δίκτυο από τους ΥΒΣ με τιμή πώλησης του υδρογόνου έως 6 ευρώ/kg βρίσκεται στο εύρος τιμών 15 – 22 GWh, εκτοξεύεται στις 43 GWh για πώληση του υδρογόνου προς 7 ευρώ/kg και τέλος σταθεροποιείται περί τις 28 GWh για πώληση του υδρογόνου από 8 έως 10 ευρώ/kg. Στο σημείο αυτό είναι και πάλι εμφανής η ιδιομορφία του ΥΒΣ που τιμολογεί το υδρογόνο στα 7 ευρώ/kg.

Η ισχύς της διάταξης ηλεκτρόλυσης (Σχήμα 5.73) παραμένει σε χαμηλά επίπεδα (0 – 560 KW) για πώληση του παραγόμενου υδρογόνου έως 6 ευρώ/kg και αυξάνεται απότομα στα 7.000 και 13.000 KW για πώλησή του προς 7 και 8 ευρώ/kg αντίστοιχα. Στη συνέχεια, για τιμή πώλησης του υδρογόνου 9 και 10 ευρώ/kg, η ισχύς της διάταξης ηλεκτρόλυσης υποχωρεί ελαφρά στα 12.600 και 12.100 KW αντίστοιχα, παρά την αύξηση, έστω και κατά 800 KW, των εγκατεστημένων αιολικών. Άξια προσοχής είναι η περίπτωση του ΥΒΣ που τιμολογεί το υδρογόνο στο 1 ευρώ/kg, καθώς στο σταθμό αυτό το λογισμικό βελτιστοποίησης απέκλεισε την παραγωγή υδρογόνου επιλέγοντας μηδενική εγκατεστημένη ισχύς της διάταξης ηλεκτρόλυσης. Προφανώς και εφόσον η βελτιστοποίηση του σταθμού έγινε με οικονομικό κριτήριο, η παραγωγή υδρογόνου κρίθηκε ασύμφορη για την πώληση του σε τόσο χαμηλή τιμή. Την πορεία της καμπύλης της ισχύος της διάταξης ηλεκτρόλυσης ακολουθούν, όπως είναι λογικό, οι καμπύλες της ετήσιας ποσότητας αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται σε αυτήν (Σχήμα 5.78) καθώς και η καμπύλη της ετήσιας ποσότητας του παραγόμενου υδρογόνου (Σχήμα 5.82). Έτσι, η ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας

που χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου και για τιμή πώλησής του έως 6 ευρώ/kg, κυμαίνεται μεταξύ 0 – 0,5 GWh (<4% της συνολικής ετήσιας αιολικής παραγωγής (Σχήμα 5.89)) με αντίστοιχη παραγωγή 0 – 17.000 kg υδρογόνου. Για τιμή πώλησης του υδρογόνου 7 ευρώ/kg χρησιμοποιούνται ετησίως 29 GWh (~32% της συνολικής ετήσιας αιολικής παραγωγής) ενώ παράγονται 517.000 kg υδρογόνου. Ακολουθώντας, για πώληση του υδρογόνου προς 8 έως 10 ευρώ/kg η ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που καταναλώνεται από τη διάταξη ηλεκτρόλυσης μειώνεται σταδιακά από τις 49,5 έως τις 48,2 GWh (~52% της συνολικής ετήσιας αιολικής παραγωγής) με την αντίστοιχη ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου να μειώνεται από 891.000 έως τα 868.000 kg.

Σχετικά με την ωφέλιμη χωρητικότητα του άνω ταμιευτήρα (Σχήμα 5.74), αυτή παρακολουθεί σε γενικές γραμμές την εγκατεστημένη ισχύ των αιολικών μέχρι την τιμή πώλησης του υδρογόνου 7 ευρώ/kg παίρνοντας τιμές από 156.000 έως 314.000 m<sup>3</sup>. Για περαιτέρω αύξηση της τιμής πώλησης του υδρογόνου και παρά την αύξηση, έστω και κατά 800 KW, των εγκατεστημένων αιολικών, η ωφέλιμη χωρητικότητα του άνω ταμιευτήρα μειώνεται περί τα 110.000 m<sup>3</sup>. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για πώληση του υδρογόνου από 8 ευρώ/kg και πάνω, τα εγκατεστημένα αιολικά προκύπτουν αυξημένα για να εξυπηρετούν την παραγωγή υδρογόνου κι όχι την αντλιοσταμείωση. Το συμπέρασμα αυτό υποστηρίζουν η μείωση της ισχύος του αντλιοστασίου καθώς και οι αυξημένες ισχύεις της διάταξης ηλεκτρόλυσης για τις εν λόγω τιμές πώλησης του υδρογόνου. Με άλλα λόγια, για τις τρεις υψηλότερες τιμές πώλησης του υδρογόνου είναι συμφερότερη η παραγωγή του έναντι της παραγωγής ενέργειας, με κριτήριο πάντα τη μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης των υπό εξέταση ΥΒΣ. Άλλωστε, για πώληση του υδρογόνου από 8 ευρώ/kg και πάνω το μεγαλύτερο ποσοστό (55% έως 60%) των ετήσιων εσόδων των σταθμών οφείλονται σε αυτό (Σχήμα 5.88).

Αναφορικά με το ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού, αυτό διαμορφώνεται σχετικά παρόμοιο για κάθε τιμή πώλησης του υδρογόνου (Σχήμα 5.87). Η μεγαλύτερη συμμετοχή του ΥΒΣ έναντι αυτής των μονάδων βάσεως στην κάλυψη του ετήσιου φορτίου φαίνεται να σημειώνεται για τον ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου προς 7 ευρώ/kg

Σχετικά λοιπόν με τον ΥΒΣ που τιμολογεί το υδρογόνο στα 7 ευρώ/kg είναι σαφές ότι δεν υπάρχει καθαρή εικόνα ως προς το ποιό προϊόν του (ενέργεια ή υδρογόνο) είναι το πλέον προσοδοφόρο και επομένως προς ποιά κατεύθυνση πρέπει να κινηθεί η διαστασιολόγηση των συνιστωσών του. Έτσι, για το σταθμό αυτό και σε σχέση με τους ΥΒΣ που πωλούν το υδρογόνο φθηνότερα από αυτόν, παρατηρείται αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών (Σχήμα 5.71), της ωφέλιμης χωρητικότητας του ταμιευτήρα (Σχήμα 5.74) αλλά και της διάταξης ηλεκτρόλυσης (Σχήμα 5.73), προκειμένου να ενισχυθεί τόσο η παραγωγή ενέργειας όσο και η παραγωγή υδρογόνου. Το γεγονός αυτό αποτυπώνεται καθαρά και στην αύξηση για τον εν λόγω σταθμό, σε σχέση με αυτούς που τιμολογούν φθηνότερα το υδρογόνο, της ετήσιας υδροστροβιλικής παραγωγής (Σχήμα 5.75), της ετήσιας αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο (Σχήμα 5.77) και απευθείας στο δίκτυο (Σχήμα 5.76) αλλά και εκείνης που διοχετεύεται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης (Σχήμα 5.78).

Από οικονομικής σκοπιάς, οι ΥΒΣ του σεναρίου 2Α παρουσιάζουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) των ΥΒΣ κυμαίνεται από 18,6% έως 23%, με εμφανή αύξησή του για τις τρεις ακριβότερες τιμολογήσεις του υδρογόνου (Σχήμα 5.70). Ο χρόνος απόσβεσης των επενδύσεων κυμαίνεται από 6 έως 7,3 χρόνια, με αισθητή μείωση του για τις τρεις ακριβότερες τιμολογήσεις του παραγόμενου υδρογόνου (Σχήμα 5.86). Επίσης, για πώληση του υδρογόνου από 7 ευρώ/kg και πάνω παρατηρείται ραγδαία αύξηση των ετήσιων συνολικών εσόδων των σταθμών (Σχήμα 5.84) αλλά και ειδικότερα των εσόδων που προέρχονται από την πώληση υδρογόνου (Σχήμα 5.84). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο ΥΒΣ που τιμολογεί το υδρογόνο στα 10 ευρώ/kg έχει συνολικά ετήσια έσοδα ύψους 14,5 εκατ. ευρώ, με τα έσοδα από την πώληση του υδρογόνου να συμμετέχουν στο ποσό αυτό κατά 60% (Σχήμα 5.88). Το κόστος του ΥΒΣ μεταβάλλεται σύμφωνα με την μείωση ή την αύξηση του εγκατεστημένου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού με εμφανώς ακριβότερους σταθμούς για τις τέσσερις υψηλότερες τιμές πώλησης του υδρογόνου (Σχήμα 5.85). Συγκεκριμένα, για πώληση του υδρογόνου έως 6 ευρώ/kg το κόστος των ΥΒΣ κυμαίνεται μεταξύ των 30 – 36 εκατ. ευρώ, ενώ για τιμές πώλησής του από 7 έως 10 ευρώ/kg εκτοξεύεται πάνω από τα 78 εκατ. ευρώ.

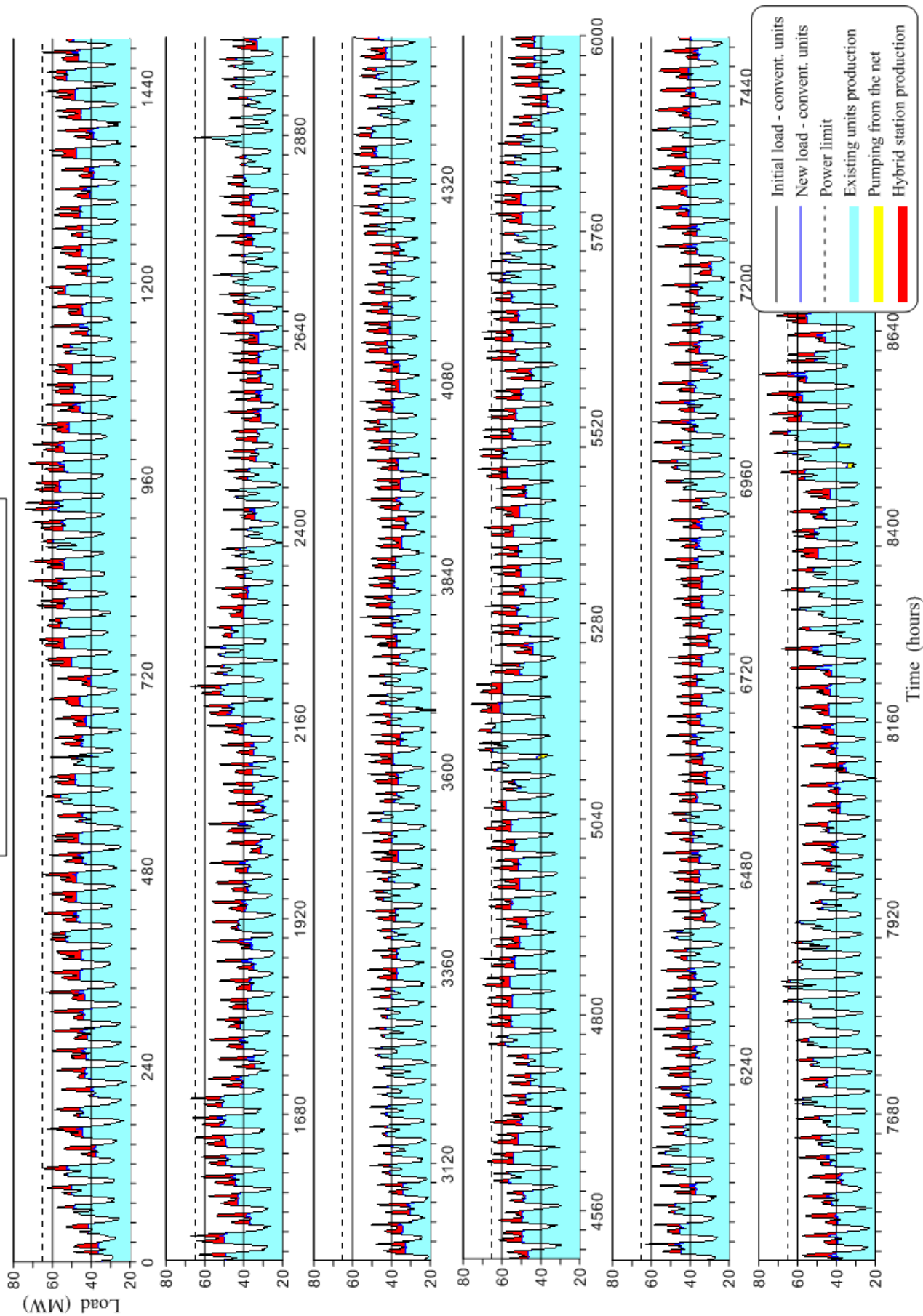
#### 5.4.2 Διαγράμματα ετήσιας λειτουργίας του βέλτιστου σταθμού πώλησης του υδρογόνου προς 8 ευρώ/kg του Σεναρίου 2Α

Στα Σχήματα 5.90 και 5.91 δίνονται διαγράμματα της ετήσιας λειτουργίας του ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου προς 8 ευρώ/kg, με δυνατότητα εποπτείας των απεικονιζόμενων μεγεθών για κάθε ημέρα του έτους.

Στο Σχήμα 5.90 φαίνεται ότι η ένταξη του ΥΒΣ αποκόπτει τις αιχμές του φορτίου, εξομαλύνοντας την καμπύλη ζήτησης φορτίου του νησιού. Επίσης, ελάχιστες φορές ετησίως σημειώνεται άντληση με χρήση ενέργειας από το δίκτυο, χωρίς να δημιουργούνται νέες – νυχτερινές αιχμές.

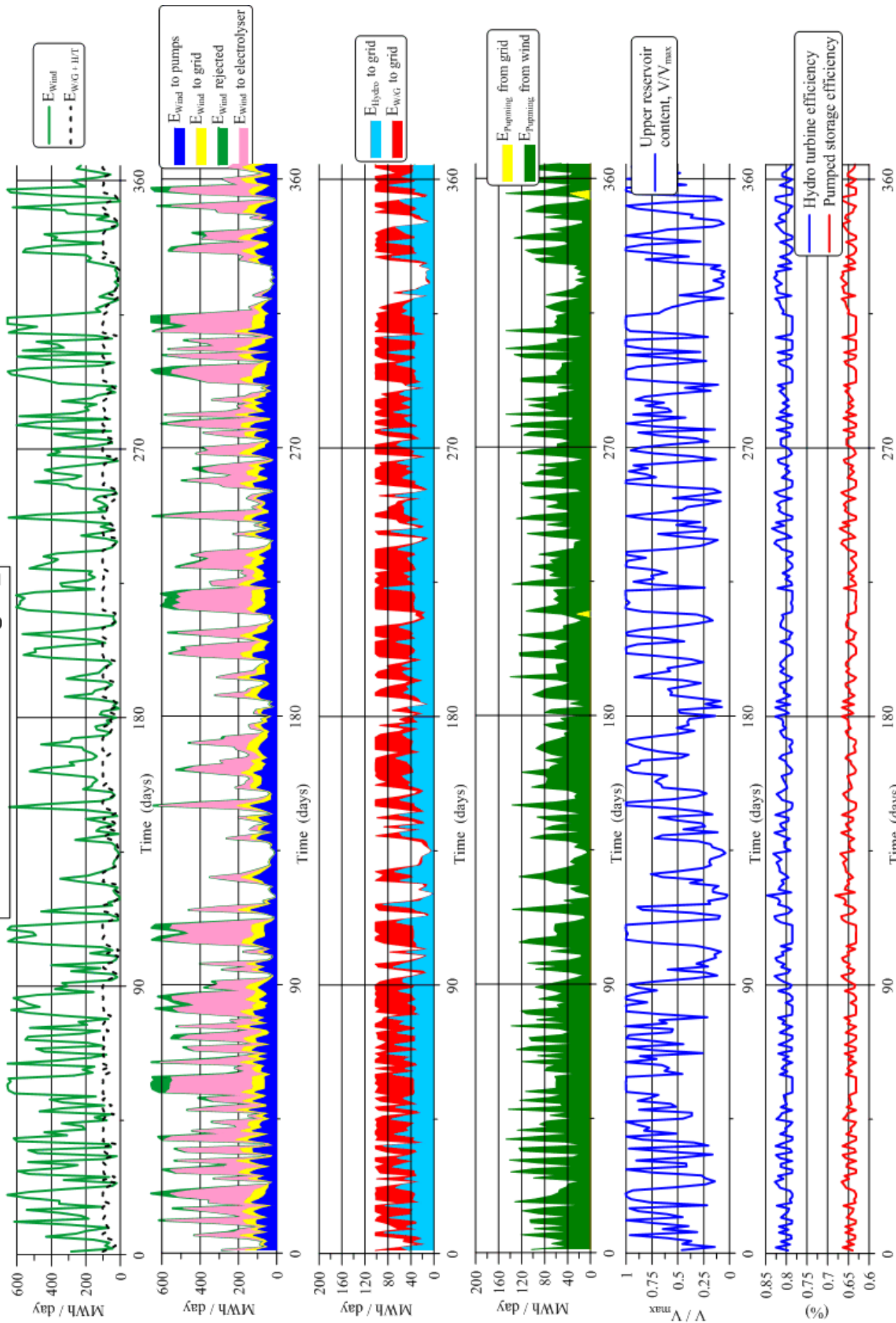
Στο Σχήμα 5.91 φαίνεται ότι η αιολική παραγωγή του ΥΒΣ είναι κατά πολύ μεγαλύτερη της υδροστροβλικής παραγωγής, αφού το μεγαλύτερο μέρος της αιολικής ενέργειας διοχετεύεται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης για παραγωγή υδρογόνου. Η προσφορά ενέργειας του ΥΒΣ φαίνεται ότι καλύπτεται σχεδόν εξίσου από την υδροστροβλική παραγωγή και την ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο. Το ποσό της αιολικής ενέργειας που καταναλώνεται στο αντλιοστάσιο, είναι αυτό που εξυπηρετεί την αντλησιοταμίευση, καθώς η χρήση ενέργειας από το δίκτυο για άντληση σημειώνεται σπανίως και αντιπροσωπεύει αμελητέες ποσότητες της συνολικής ενέργειας για άντληση. Ο βαθμός πλήρωσης του άνω ταμιευτήρα παρακολουθεί, όπως ήταν αναμενόμενο, τις διακυμάνσεις της αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο, ενώ αγγίζει συχνά το 100%. Θα μπορούσε, λοιπόν, ο σταθμός αυτός να διαστασιοποιηθεί με μεγαλύτερο ταμιευτήρα, αλλά τότε δεν θα προέκυπτε ο βέλτιστος ΥΒΣ ως προς τη μεγιστοποίηση του IRR. Με άλλα λόγια, ο ταμιευτήρας είναι ο μικρότερος δυνατός ώστε να προωθείται η παραγωγή του υδρογόνου, που για την τιμή πώλησης του υδρογόνου προς 8 ευρώ/kg είναι περισσότερο κερδοφόρα δραστηριότητα για τον ΥΒΣ, σε σύγκριση με την παραγωγή ενέργειας. Τέλος, ο βαθμός απόδοσης της παραγωγής ενέργειας από τους υδροστροβίλους και της συνολικής διαδικασίας άντλησης – παραγωγής κυμαίνονται περί το 80% και 65% αντίστοιχα.

Scenario 2A - 8 euro/kg H<sub>2</sub>



Σχήμα 5.90: Ετήσια καμπύλη φορτίου πριν και μετά την έναρξη του ΥΒΣ (8 ευρώ/kg H<sub>2</sub>)

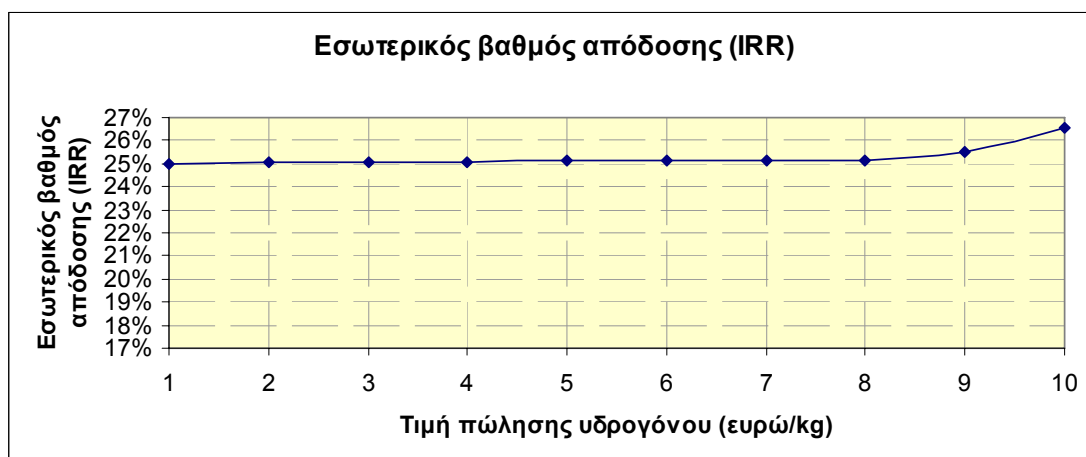
### Scenario 2A - 8 euro/kg H<sub>2</sub>



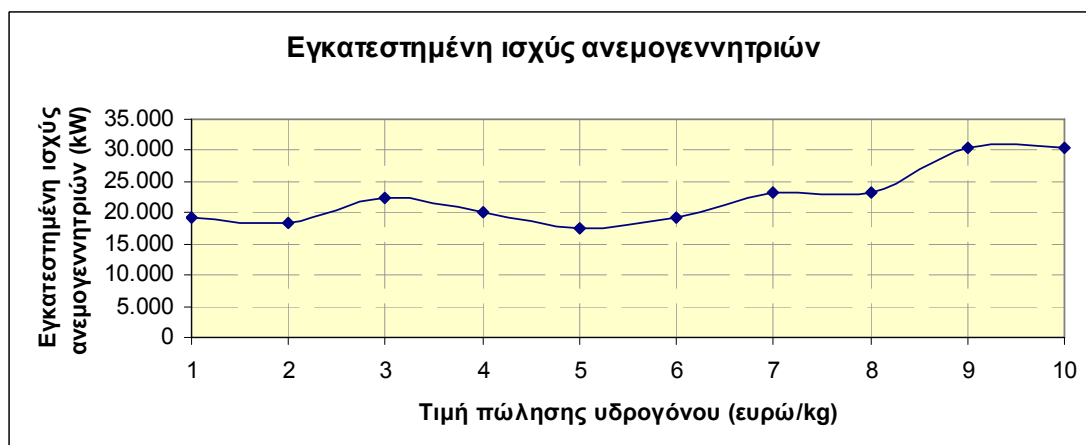
Σχήμα 5.91: Ετήσια διαγράμματα λειτουργίας του σταθμού (8 ευρώ/kg H<sub>2</sub>)

### 5.5 Αποτελέσματα βέλτιστων σταθμών του Σεναρίου 2B με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR)

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η διαμόρφωση και τα ετήσια αποτελέσματα των δέκα βέλτιστων ΥΒΣ του σεναρίου 1B για τιμή πώλησης του υδρογόνου από 1 έως 10 ευρώ/kg. Αμέσως μετά ακολουθεί ο σχολιασμός τους και η εξαγωγή συμπερασμάτων.

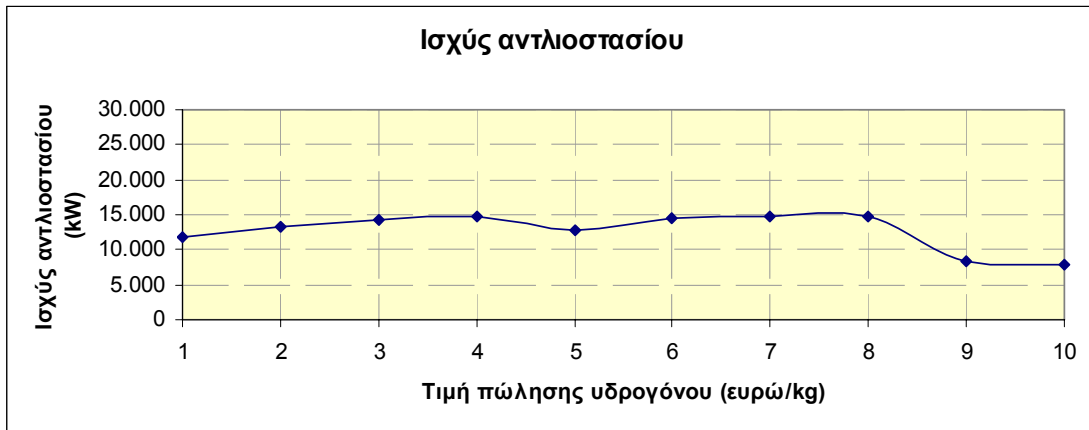


Σχήμα 5.92: Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR)

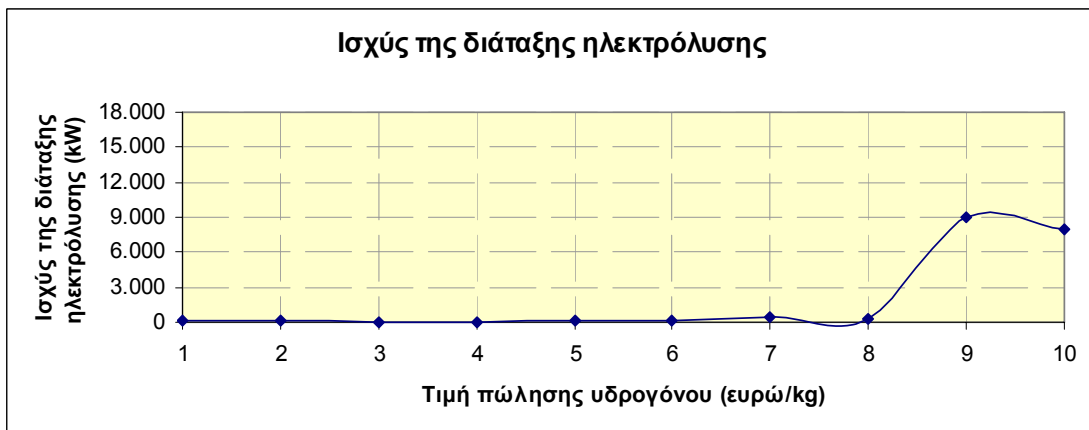


Σχήμα 5.93: Εγκατεστημένη ισχύς ανεμογεννητριών

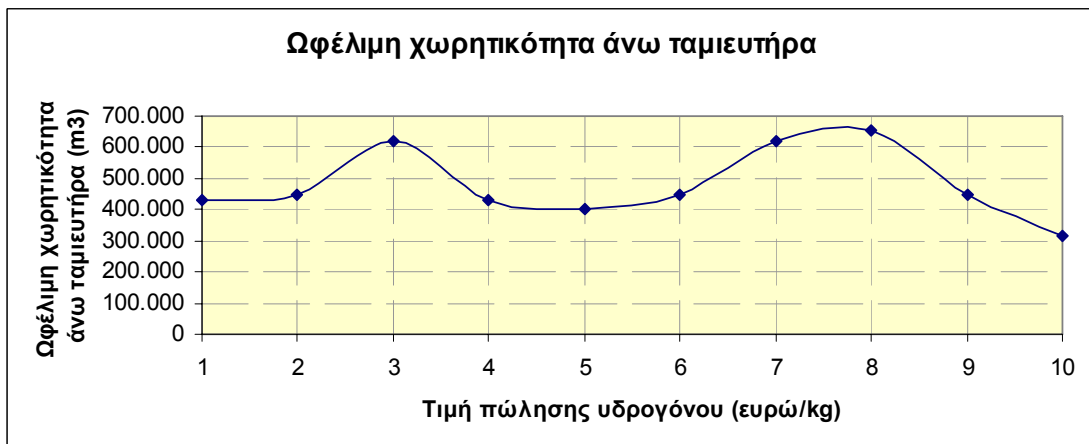




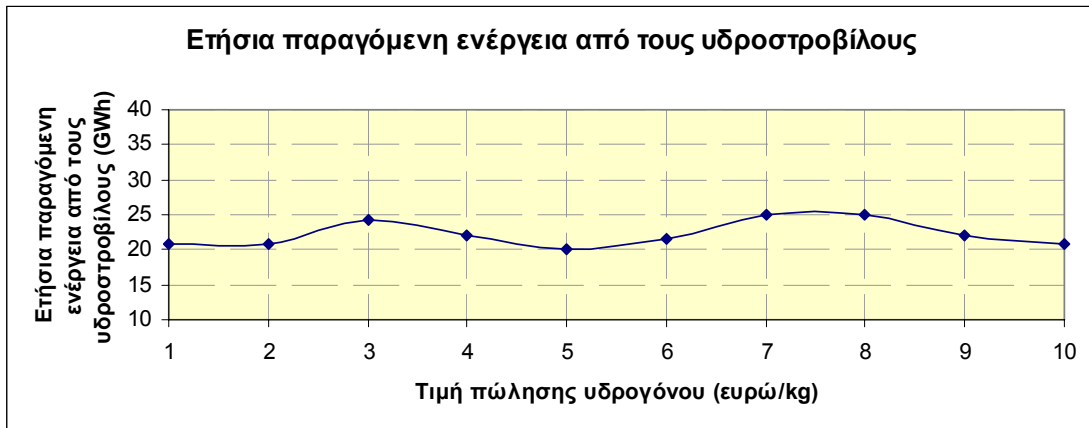
Σχήμα 5.94: Ισχύς αντλιοστασίου



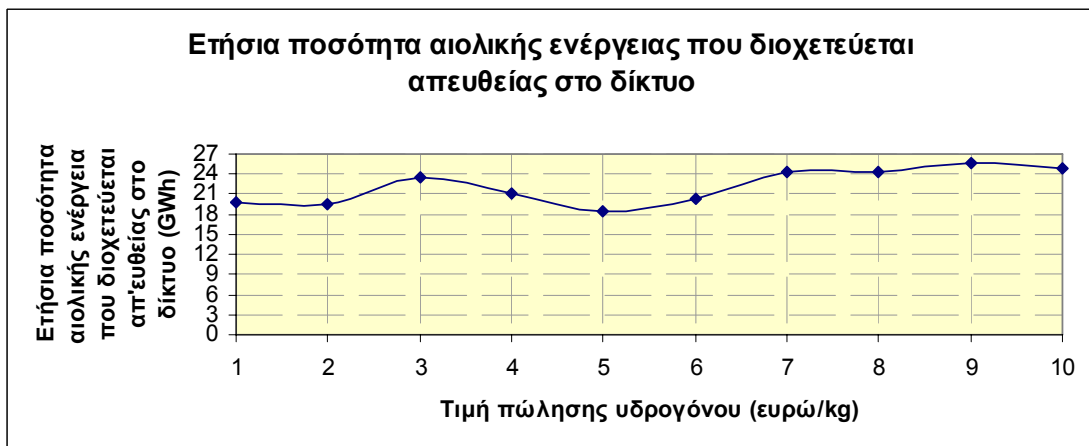
Σχήμα 5.95: Ισχύς της διάταξης ηλεκτρόλυσης



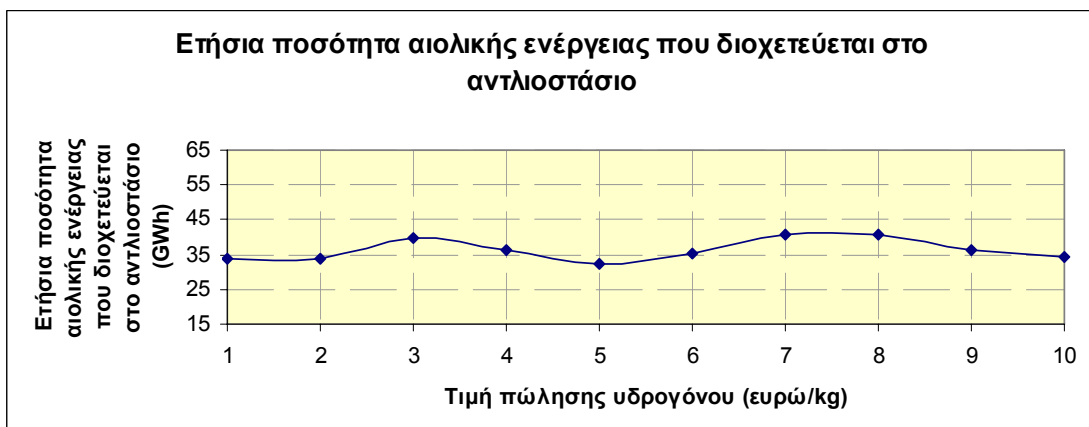
Σχήμα 5.96: Ωφέλιμη χωρητικότητα άνω ταμιευτήρα



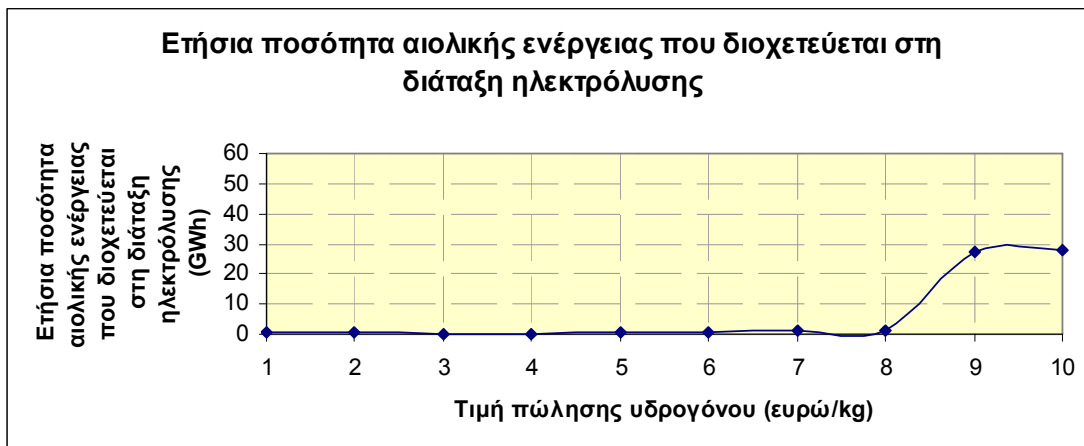
Σχήμα 5.97: Ετήσια παραγόμενη ενέργεια από τους υδροστροβίλους



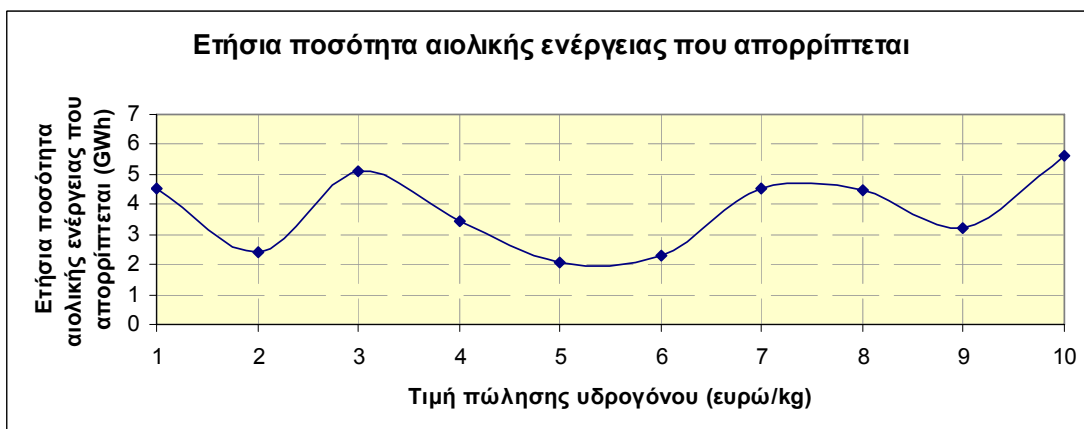
Σχήμα 5.98: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο



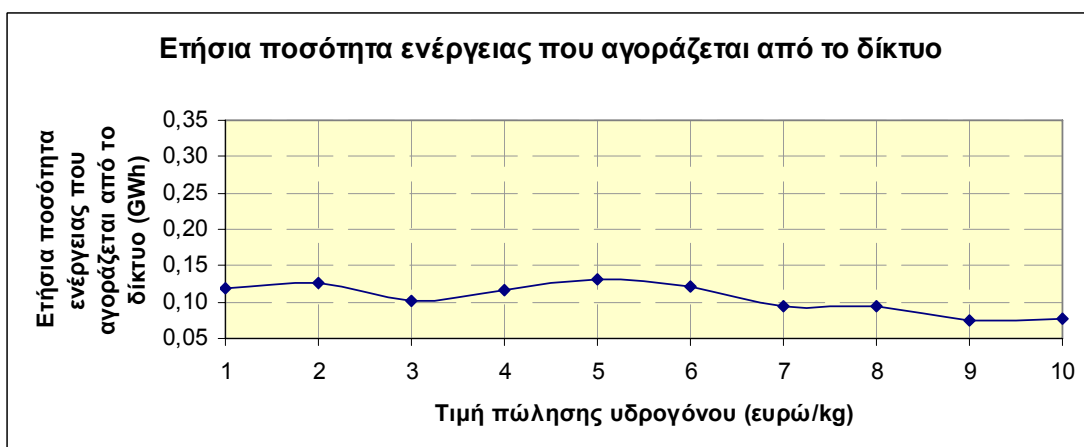
Σχήμα 5.99: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο



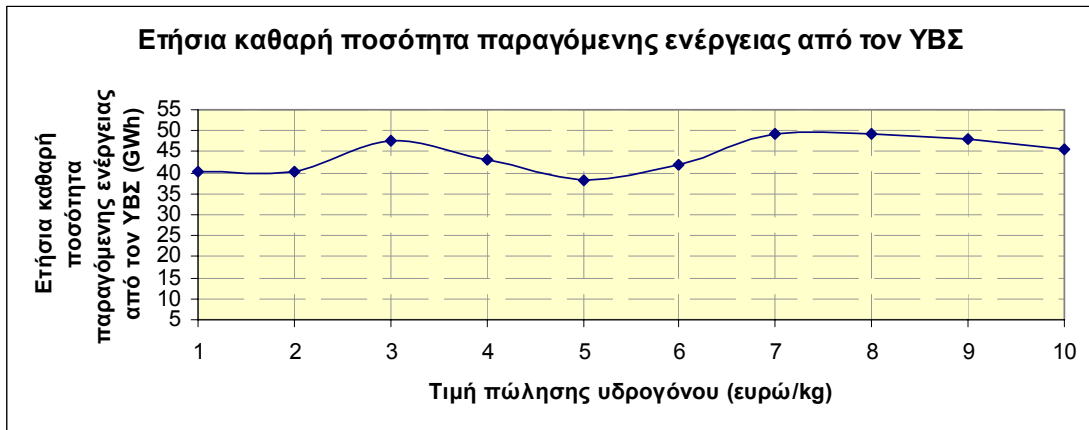
Σχήμα 5.100: Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης



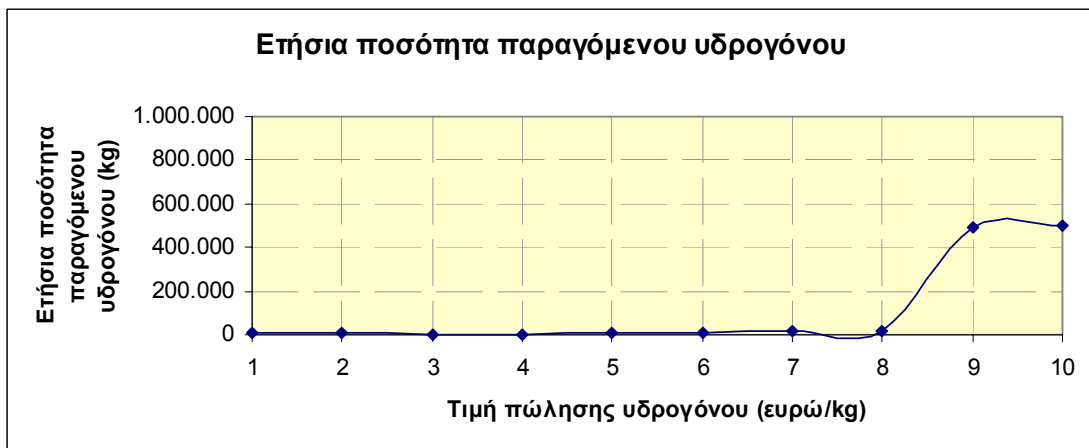
Σχήμα 5.101 : Ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που απορρίπτεται



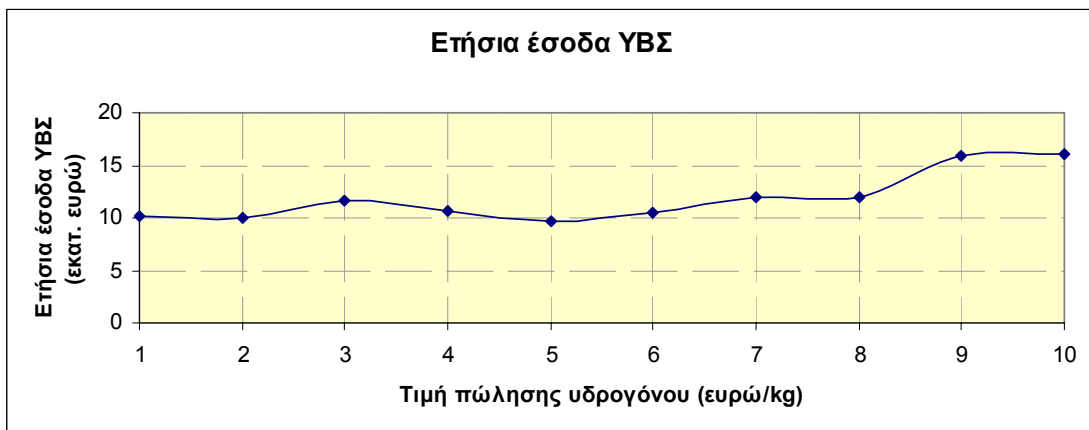
Σχήμα 5.102: Ετήσια ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο



Σχήμα 5.103: Ετήσια καθαρή ποσότητα παραγόμενης ενέργειας από τον ΥΒΣ



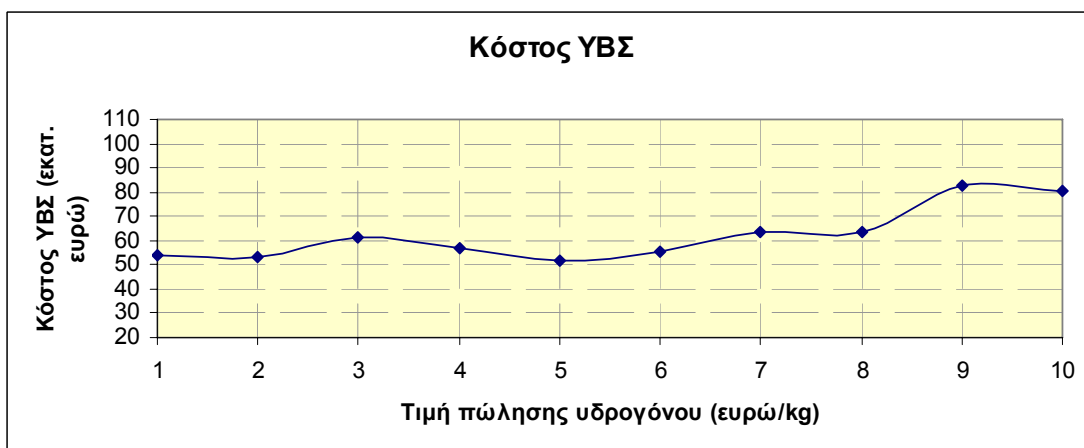
Σχήμα 5.104: Ετήσια ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου



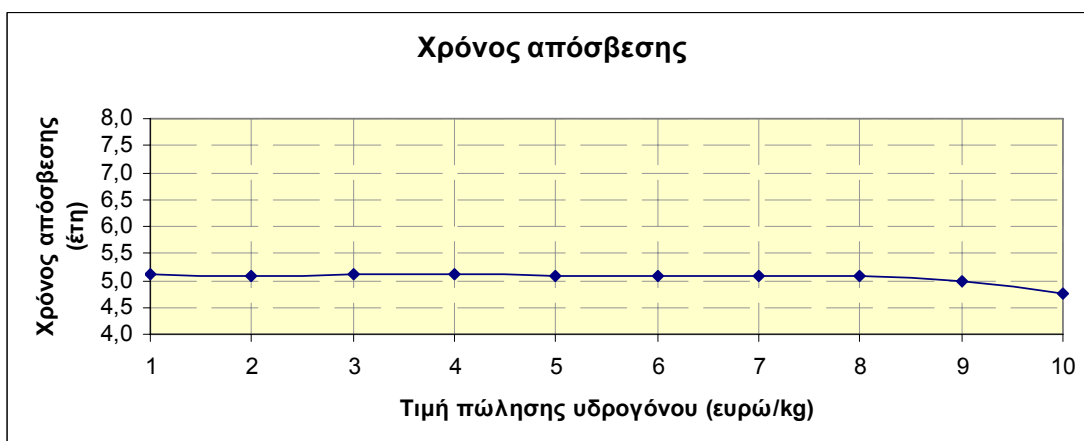
Σχήμα 5.105: Ετήσια έσοδα ΥΒΣ



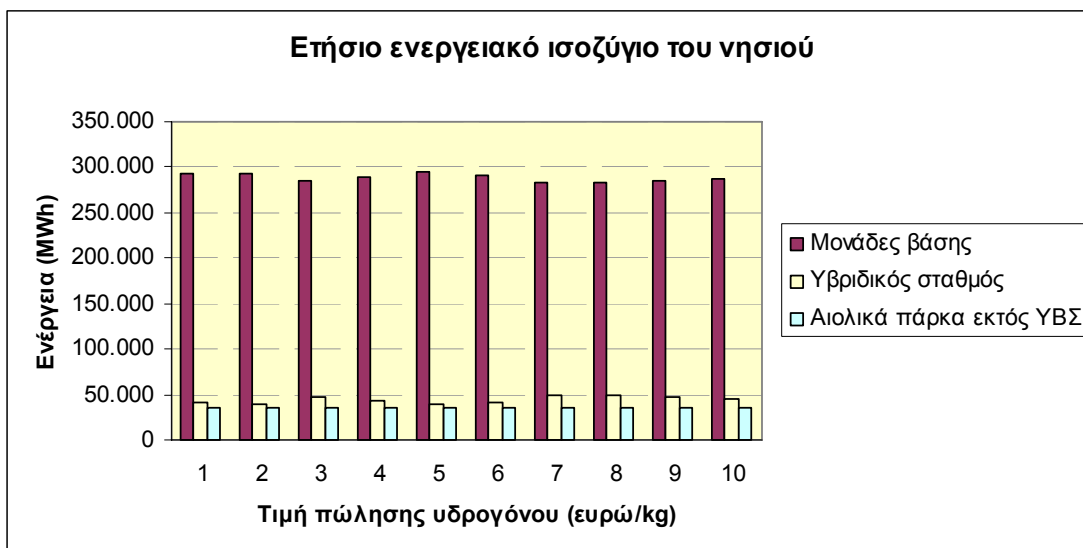
Σχήμα 5.106: Ετήσια έσοδα ΥΒΣ από την πώληση υδρογόνου



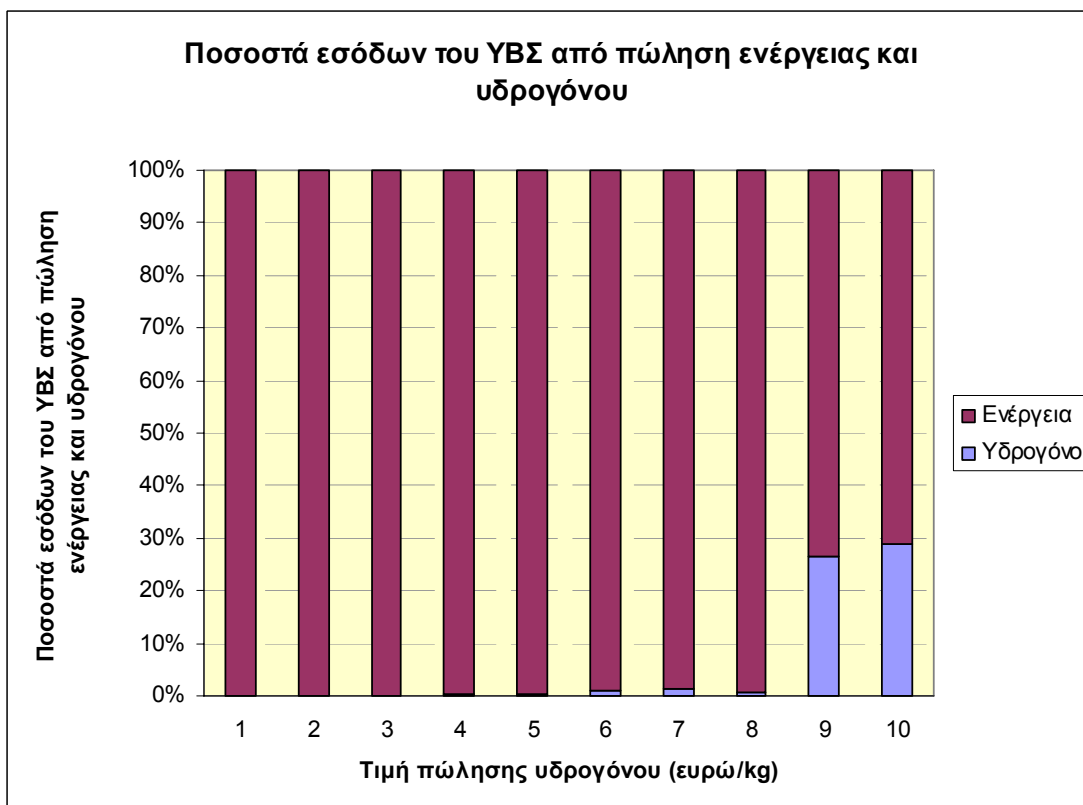
Σχήμα 5.107: Κόστος ΥΒΣ



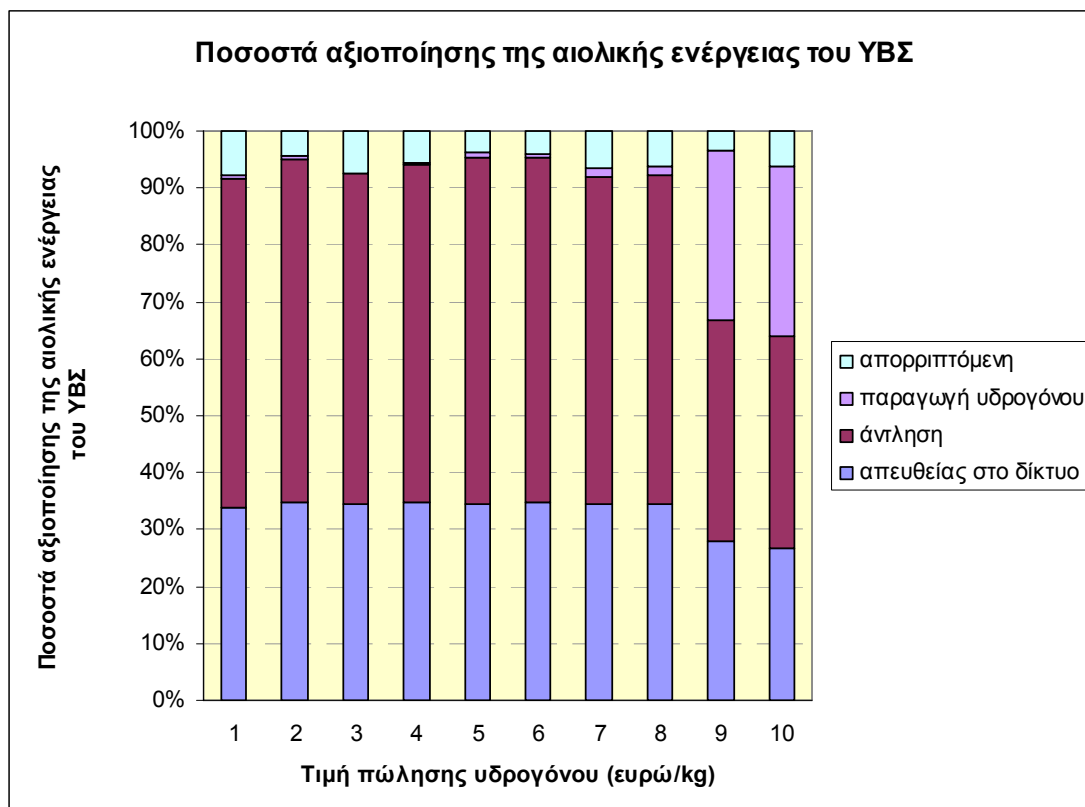
Σχήμα 5.108: Χρόνος απόσβεσης



Σχήμα 5.109: Ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού



Σχήμα 5.110: Ποσοστά εσόδων του ΥΒΣ από πώληση ενέργειας και υδρογόνου



Σχήμα 5.111: Ποσοστά αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας του ΥΒΣ

### Σχολιασμός – Συμπεράσματα

Στο σενάριο αυτό παρατηρείται μια σχετική ομοιομορφία στη διαστασιολόγηση και τη συμπεριφορά των σταθμών, έως την τιμή πώλησης του υδρογόνου 7 ευρώ/kg. Οι σταθμοί αυτοί διαστασιολογούνται με τέτοιο τρόπο ώστε να παράγουν ετησίως περιορισμένες ποσότητες υδρογόνου. Για πώλησή του προς 9 και 10 ευρώ/kg, η παραγωγή υδρογόνου ενισχύεται με την κατάλληλη διαστασιολόγηση των συνιστωσών των αντίστοιχων σταθμών.

Από κατασκευαστικής σκοπιάς, οι βέλτιστοι σταθμοί του σεναρίου λειτουργίας 2B συντίθενται με αιολικό πάρκο του οποίου η εγκατεστημένη ισχύς είναι 19.200 – 23.200 KW για τιμές πώλησης του υδρογόνου από 1 έως 8 ευρώ/kg ,ενώ αυξάνεται απότομα στα 30.400 KW για πώληση του υδρογόνου 9 και 10 ευρώ/kg (Σχήμα 5.93). Την καμπύλη των εγκατεστημένων αιολικών παρακολουθεί πιστά η καμπύλη της ετήσιας ποσότητας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο (Σχήμα 5.98) και σε

γενικές γραμμές εκείνη της ετήσιας ποσότητας αιολικής ενέργειας που απορρίπτεται (Σχήμα 5.101). Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση του ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου προς 9 ευρώ/kg, ο οποίος εμφανίζει αιολικές απώλειες κατά 2,4 GWh λιγότερες από τον ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου προς 10 ευρώ/kg, παρά το γεγονός ότι περιλαμβάνουν το ίδιο πλήθος αιολικών μηχανών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη διαστασιολόγηση, από το λογισμικό της βελτιστοποίησης, των ταμιευτήρων των δύο σταθμών, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Σε κάθε περίπτωση (κάθε τιμή πώλησης του υδρογόνου) πάντως, η ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που απορρίπτεται δεν ξεπερνά τις 6 GWh, αντιπροσωπεύοντας ποσοστό μικρότερο του 8% της ετήσιας αιολικής παραγωγής (Σχήμα 5.111). Η ετήσια ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο για να εξυπηρετήσει την αντλιοσταμείωση μειώνεται με την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος του αιολικού πάρκου και αυξάνεται με τη μείωση της (Σχήμα 5.102). Συγκεκριμένα, κυμαίνεται μέσα στο στενό εύρος τιμών των 0,09 έως 0,13 GWh για πώληση του υδρογόνου έως 8 ευρώ/kg, δηλαδή για εγκατεστημένη ισχύς αιολικών 19.200 – 23.200 KW και σταθεροποιείται περί τις 0,07 GWh για τις δύο ακριβότερες τιμολογήσεις του υδρογόνου που αντιστοιχούν στα δύο μεγαλύτερα αιολικά πάρκα του σεναρίου.

Όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ του αντλιοστασίου, αυτή κυμαίνεται περίπου από 12.800 – 14.800 KW για πώληση του υδρογόνου έως 8 ευρώ/kg, ενώ μειώνεται απότομα στα 8.000 KW περίπου για τις δύο υψηλότερες τιμές πώλησής του (Σχήμα 5.94). Η ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο παρακολουθεί τις διακυμάνσεις της εγκατεστημένης ισχύος του αντλιοστασίου παίρνοντας τιμές από 32,5 έως 41 GWh (Σχήμα 5.99). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι για τις δύο ακριβότερες τιμολογήσεις του υδρογόνου δεν παρατηρείται ιδιαίτερα απότομη πτώση της ετήσιας αιολικής ενέργειας που καταναλώνεται από το αντλιοστάσιο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι παρά την υψηλή τιμή πώλησης του υδρογόνου που οδήγησε στην απότομη αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών, η παραγωγή και πώληση ενέργειας εξακολουθεί να αποφέρει το μεγαλύτερο ποσοστό (~70%) των εσόδων στους εν λόγω σταθμούς (Σχήμα 5.110). Τις ίδιες διακυμάνσεις με την αιολική ενέργεια που απορροφάται από τις αντλίες παρουσιάζει, όπως ήταν αναμενόμενο, και η ετήσια ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας από τους υδροστροβίλους (Σχήμα 5.97) καθώς και η ετήσια ποσότητα καθαρής ενέργειας που παράγεται από τους ΥΒΣ (Σχήμα 5.103). Συγκεκριμένα, η ετήσια υδροστροβιλική



παραγωγή κυμαίνεται από 20 - 25 GWh και η ετήσια καθαρή ποσότητα ενέργειας που εγχέεται στο δίκτυο από 38 - 50 GWh.

Η ισχύς της διάταξης ηλεκτρόλυσης παραμένει σε χαμηλά επίπεδα (0 – 410 KW) για τιμή πώλησης του υδρογόνου έως 8 ευρώ/kg, ενώ εκτοξεύεται απότομα στα περίπου 9.000 και 8.000 KW για τιμή πώλησής του 9 και 10 ευρώ/kg αντίστοιχα (Σχήμα 5.95). Ανάλογα διαμορφώνονται και η καμπύλη της ετήσιας ποσότητας ενέργειας που διοχετεύεται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης (Σχήμα 5.100), καθώς και εκείνη της ετήσιας ποσότητας του παραγόμενου υδρογόνου (Σχήμα 5.104). Έτσι, για πώληση του υδρογόνου έως 8 ευρώ/kg, η διάταξη ηλεκτρόλυσης καταναλώνει ετησίως 0 – 1,1 GWh (< 2% της συνολικής ετήσιας αιολικής παραγωγής (Σχήμα 5.111)) παράγοντας 0 – 20.000 kg υδρογόνου. Για πώληση του υδρογόνου προς 9 και 10 ευρώ/kg, η ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για ηλεκτρόλυση αυξάνεται κατακόρυφα πάνω από τις 27 GWh (>30% της συνολικής ετήσιας αιολικής παραγωγής), δίνοντας περισσότερα από περίπου 494.000 kg υδρογόνου. Ενδιαφέρον παρουσιάζει στο σημείο αυτό η περίπτωση του ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου προς 3 ευρώ/kg, καθώς το λογισμικό βελτιστοποίησης επέλεξε για τον σταθμό αυτό να μην εγκαταστήσει διάταξη ηλεκτρόλυσης. Αντιθέτως, επέλεξε ο σταθμός αυτός να έχει περισσότερες ανεμογεννήτριες σε σχέση με τους ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου προς 2 και 4 ευρώ/kg και με αυτές να εξυπηρετεί αποκλειστικά την παραγωγή και πώληση ενέργειας. Προφανώς, το αναμενόμενο μίγμα των αυξημένων ανεμογεννητριών και της αυξημένης ισχύος της διάταξης ηλεκτρόλυσης, ως προς τον σταθμό πώλησης του υδρογόνου προς 2 ευρώ/kg, θα έδινε φτωχότερα οικονομικά αποτελέσματα από την επιλογή της μη παραγωγής υδρογόνου. Το συμπέρασμα αυτό ενισχύεται από το γεγονός ότι ο ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου προς 4 ευρώ/kg έχει μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ διάταξης ηλεκτρόλυσης και μόλις δύο περισσότερες ανεμογεννήτριες από τον σταθμό των 2 ευρώ/kg. Δηλαδή, το κόστος από την απαιτούμενη αύξηση των αιολικών και της ισχύος της διάταξης ηλεκτρόλυσης, ώστε να αυξηθεί και η παραγωγή υδρογόνου, δεν μπορεί να εξισορροπηθεί από τα έσοδα του ΥΒΣ για πώληση του υδρογόνου προς 3 και 4 ευρώ/kg.

Σχετικά με την ωφέλιμη χωρητικότητα του άνω ταμιευτήρα (Σχήμα 5.96), αυτή παρακολουθεί τις βυθίσεις και τις κοιλάδες της καμπύλης της εγκατεστημένης ισχύος του αιολικού πάρκου μέχρι την τιμή πώλησης του υδρογόνου 8 ευρώ/kg, παίρνοντας

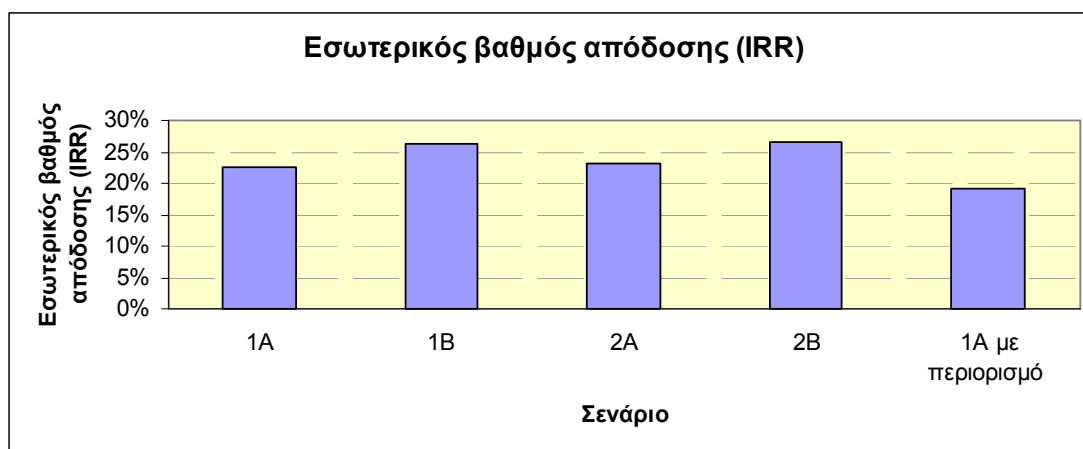
τιμές από 400.000 – 650.000 m<sup>3</sup>. Για περαιτέρω ωστόσο αύξηση της τιμής πώλησης του υδρογόνου, που συνεπάγεται και αύξηση των εγκατεστημένων αιολικών, η ωφέλιμη χωρητικότητα του άνω ταμιευτήρα μειώνεται έως τα 300.000 m<sup>3</sup>. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στους ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου προς 9 και 10 ευρώ/kg τα επιπλέον εγκατεστημένα αιολικά επιλέχθηκαν από το πρόγραμμα της βελτιστοποίησης προκειμένου να ενισχυθεί η παραγωγή υδρογόνου και όχι η παραγωγή ενέργειας. Στη διαπίστωση αυτή οδηγούν επίσης η μείωση της ισχύος του αντλιοστασίου καθώς και η απότομη αύξηση της ισχύος της διάταξης ηλεκτρόλυσης για τις εν λόγω τιμές πώλησης του υδρογόνου.

Αναφορικά με το ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού, αυτό δεν παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις μεταξύ των σταθμών του σεναρίου (Σχήμα 5.109). Μεγαλύτερη διείσδυση του ΥΒΣ (~ 49.000 MWh) στην κάλυψη του ετήσιου φορτίου με συνεπακόλουθη μείωση της παραγωγής των μονάδων βάσεως (~ 284.000 MWh), παρατηρείται για το ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου προς 8 ευρώ/kg. Αμέσως καλύτερα αποτελέσματα προς την κατεύθυνση της αύξησης της συμμετοχής του ΥΒΣ στην κάλυψη του φορτίου, δίνει ο ΥΒΣ πώλησης του υδρογόνου προς 3 ευρώ/kg. Πρόκειται για το σταθμό με μηδενική παραγωγή υδρογόνου και συνεπώς τη δυνατότητα αξιοποίησης της αιολικής παραγωγής του αποκλειστικά για την παραγωγή ενέργειας.

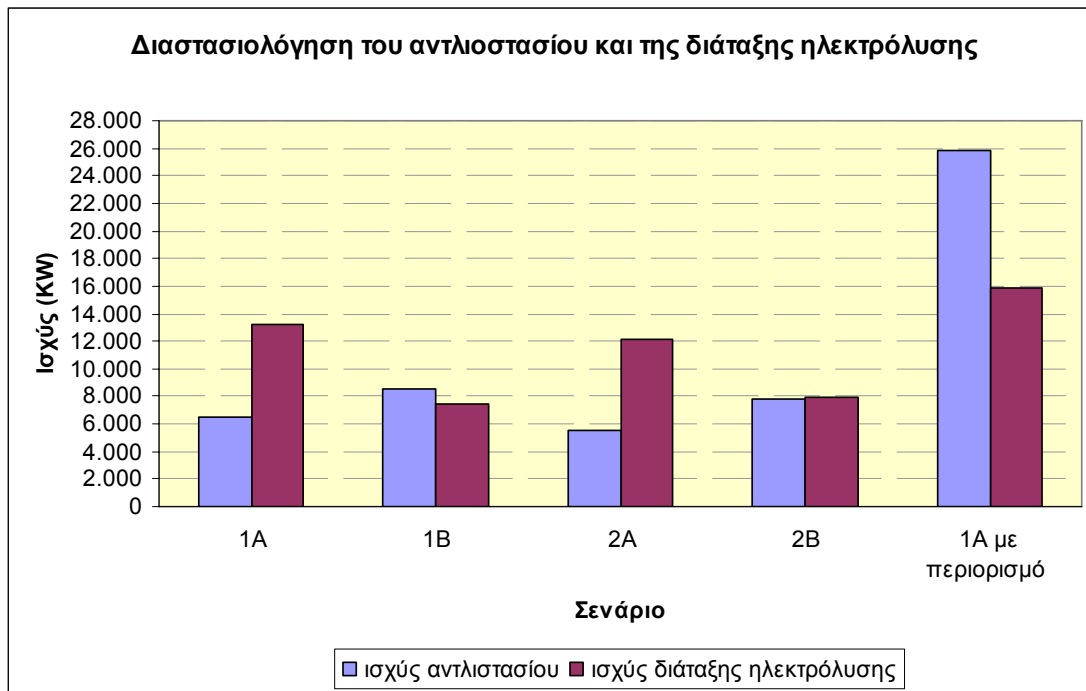
Από οικονομικής σκοπιάς, οι δέκα ΥΒΣ του σεναρίου 2B παρουσιάζουν ιδιαίτερος καλά χαρακτηριστικά. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR) είναι περίπου σταθερός και ίσος με 25% για πώληση του υδρογόνου έως 8 ευρώ/kg, ενώ αυξάνεται στο 25,5% και 26,6% για πώλησή του προς 9 και 10 ευρώ/kg αντίστοιχα (Σχήμα 5.92). Ο χρόνος απόσβεσης κυμαίνεται από 4,8 έως 5,1 χρόνια, με τις χαμηλότερες τιμές να σημειώνονται για τις δύο υψηλότερες τιμές πώλησης του υδρογόνου (Σχήμα 5.108). Τα ετήσια έσοδα των ΥΒΣ (Σχήμα 5.105) έως 8 ευρώ/kg κυμαίνονται από 9,7 – 12 εκατ. ευρώ, με τα έσοδα από την πώληση του υδρογόνου να συμμετέχουν το πολύ κατά 1% (Σχήμα 5.110). Για πώληση ωστόσο του υδρογόνου προς 9 και 10 ευρώ/kg, τα ετήσια έσοδα ανέρχονται περί τα 16 εκατ. ευρώ, με την πώληση του υδρογόνου να αποφέρει ετησίως 4,4 εκατ. ευρώ (~ 28% επί των συνολικών εσόδων) και 5 εκατ. ευρώ (~32% επί των συνολικών εσόδων) αντίστοιχα.

## 5.6 Σύγκριση των σεναρίων

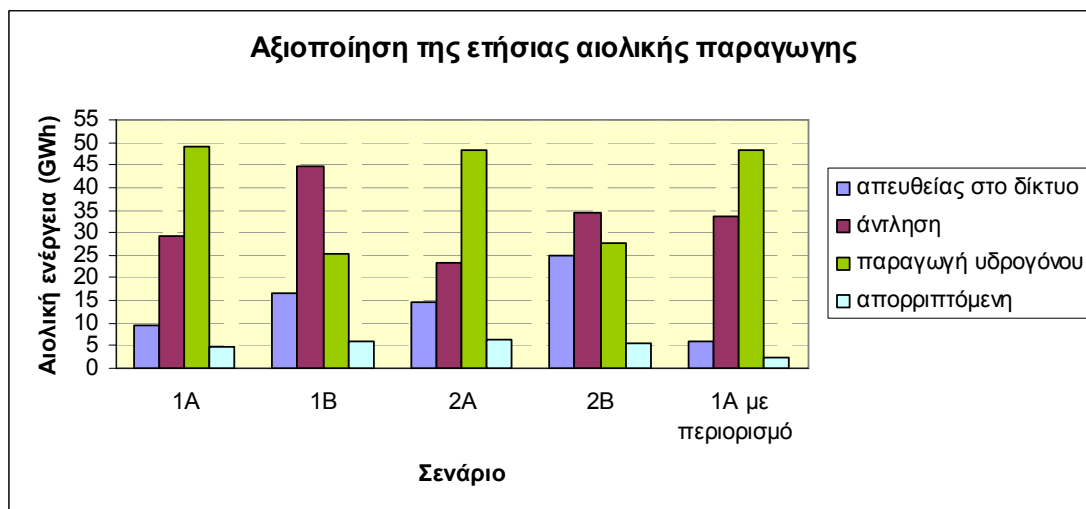
Τα σεναρία λειτουργίας που εξετάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους θα συγκριθούν για την εξαγωγή περαιτέρω συμπερασμάτων. Συγκεκριμένα, θα συγκριθούν μεταξύ τους οι βέλτιστοι, από πλευράς εσωτερικού βαθμού απόδοσης, ΥΒΣ κάθε σεναρίου. Ο σταθμός που παρουσιάζει το μεγαλύτερο εσωτερικό βαθμό απόδοσης για κάθε σενάριο, συμβαίνει να είναι ο ΥΒΣ που τιμολογεί το υδρογόνο προς 10 ευρώ/kg. Επίσης, κοινός παρονομαστής αυτών των ΥΒΣ είναι η εγκατεστημένη ισχύς του αιολικού πάρκου (30.400 KW) και συνεπώς η συνολική ετήσια αιολική παραγωγή (~ 92,5 KWh). Σύγκριση θα πραγματοποιηθεί και μεταξύ των βέλτιστων σταθμών του σεναρίου 1A χωρίς περιορισμό και 1A με περιορισμό, στην κοινή βάση πώλησης του υδρογόνου προς 10 ευρώ/kg. Τα Σχήματα 5.112 – 5.119 συνοψίζουν τα χαρακτηριστικά των εν λόγω σταθμών και βάσει αυτών γίνονται οι παρατηρήσεις που ακολουθούν. Όπου χρησιμοποιείται η έκφραση σενάριο 1A πρόκειται για την περίπτωση του σεναρίου 1A χωρίς περιορισμό.



Σχήμα 5.112: Εσωτερικός βαθμός απόδοσης (IRR)



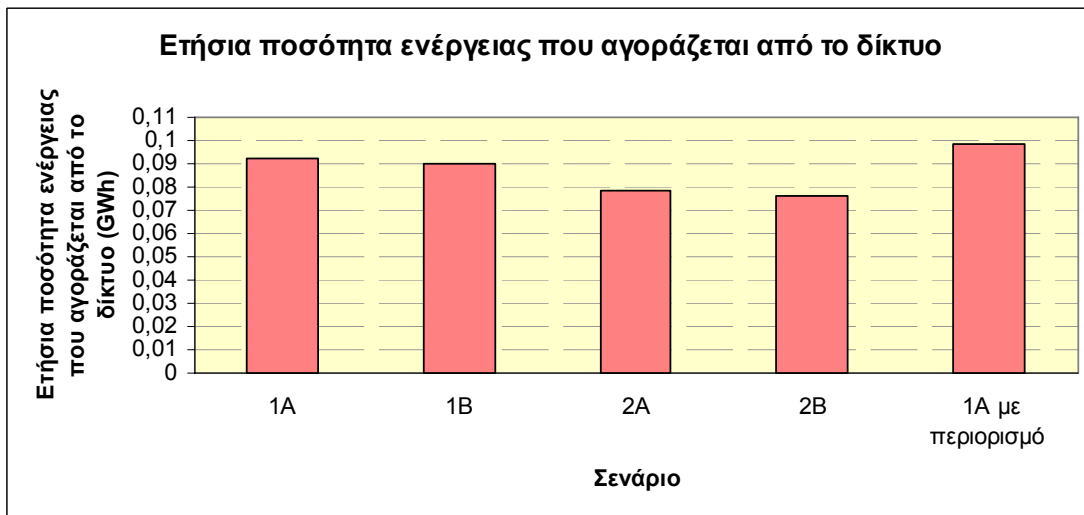
Σχήμα 5.113: Διαστασιολόγηση του αντλιοστασίου κα της διάταξης ηλεκτρόλυσης



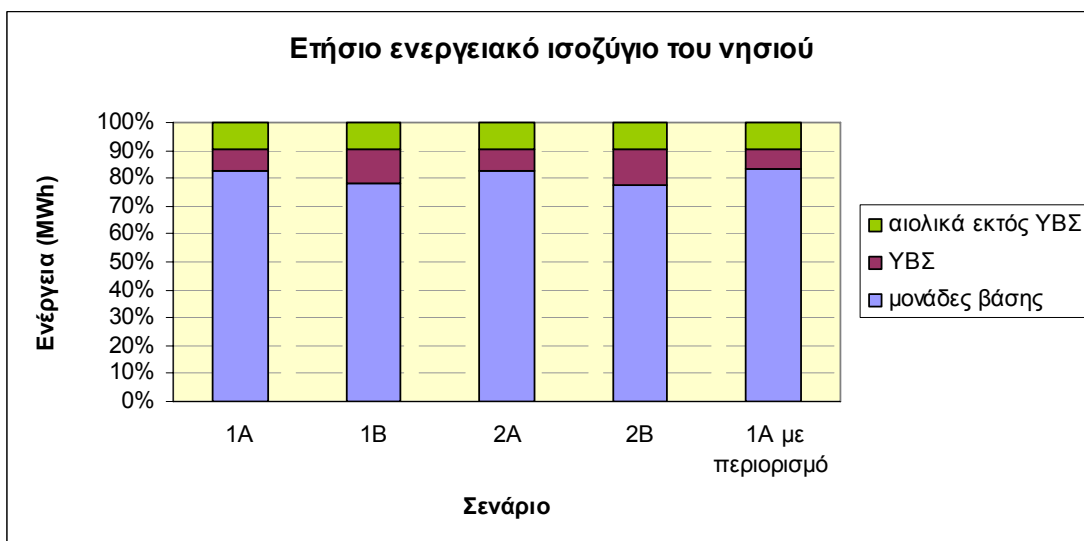
Σχήμα 5.114: Αξιοποίηση της ετήσιας αιολικής παραγωγής



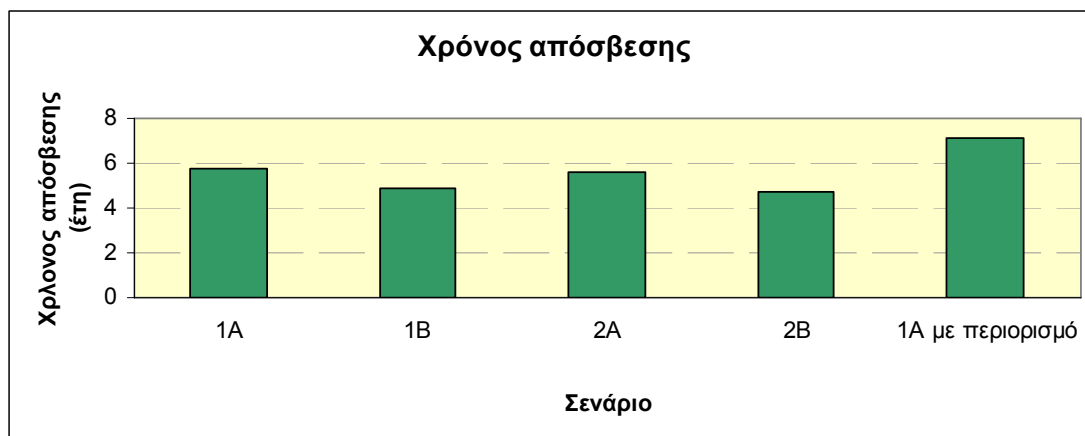
Σχήμα 5.115: Ετήσια ποσότητα ενέργειας που παράγεται από τους υδροστροβίλους



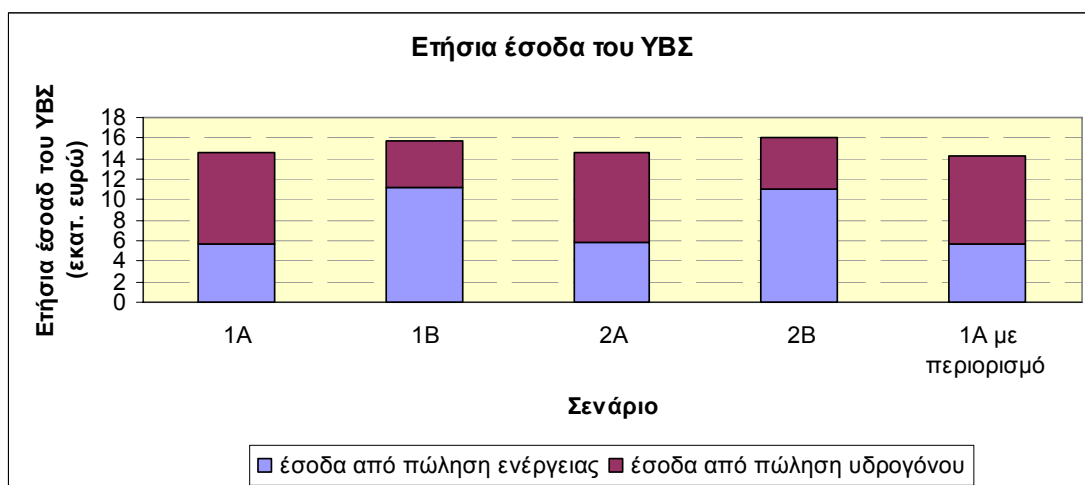
Σχήμα 5.116: Ετήσια ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο



Σχήμα 5.117: Ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού



Σχήμα 5.118: Χρόνος απόσβεσης



Σχήμα 5.119: Ετήσια έσοδα του ΥΒΣ

**Σχολιασμός – Συμπεράσματα για τη σύγκριση των βέλτιστων σταθμών των σεναρίων 1A, 2A, 1B και 2B**

Όσον αφορά την αξιοποίηση της ετήσιας αιολικής παραγωγής, και οι τέσσερις βέλτιστοι ΥΒΣ απορρίπτουν ποσά μικρότερα από 6,5 GWh (<7% της συνολικής αιολικής παραγωγής) (Σχήμα 5.114).

Η ποσότητα της ετήσιας αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο (Σχήμα 5.114) είναι μικρότερη για τα σεναρία λειτουργίας 1A και 2A, καθώς στα σεναρία αυτά οι ΥΒΣ πωλούν την αιολική ενέργεια κατά 0,0555 ευρώ φθηνότερα σε σχέση με τους ΥΒΣ των σεναρίων 1B και 2B. Να σημειωθεί ωστόσο, ότι οι σταθμοί

2A και 2B διοχετεύουν περισσότερη αιολική ενέργεια στο δίκτυο σε σχέση με του σταθμούς 1A και 1B αντίστοιχα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην πολιτική διαχείρισης της αιολικής ενέργειας των σταθμών (1: προτεραιότητα στο αντλιοστάσιο, 2: προτεραιότητα στο δίκτυο). Έτσι, στην ποσότητα της αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο συμπεραίνουμε ότι επιδρά τόσο η τιμολογιακή όσο και η ενεργειακή πολιτική των ΥΒΣ. Τη μεγαλύτερη ποσότητα ετήσιας αιολικής ενέργειας απευθείας στο δίκτυο (~ 21 GWh) διοχετεύει ο ΥΒΣ 2B του οποίου το σενάριο άλλωστε προβλέπει την κατά προτεραιότητα διάθεση της αιολικής παραγωγής στο δίκτυο.

Σχετικά με την ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο (Σχήμα 5.114), εξακολουθούν να έχουν προβάδισμα οι ΥΒΣ της τιμολογιακής πολιτικής B, καθώς οι σταθμοί αυτοί πωλούν την ενέργεια που παράγεται από τους υδροστροβίλους κατά 0,111 ευρώ ακριβότερα σε σχέση με τους ΥΒΣ 1A και 2A. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από την ετήσια υδροστροβλική παραγωγή (Σχήμα 5.115), η οποία όπως ήταν αναμενόμενο παρουσιάζεται αυξημένη για τους ΥΒΣ των σεναρίων 1B και 2B. Αξιοσημείωτο όμως είναι το γεγονός ότι οι σταθμοί 1A και 1B έχουν διαστασιολογηθεί με μεγαλύτερα αντλιοστάσια (Σχήμα 5.113) και καταναλώνουν ετησίως σε αυτά μεγαλύτερα ποσά αιολικής ενέργειας (Σχήμα 5.114), σε σχέση με τους σταθμούς 2A και 2B αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει διότι τα σενάρια λειτουργίας 1A και 1B δίνουν προτεραιότητα στο αντλιοστάσιο, ενώ τα 2A και 2B στο δίκτυο, σχετικά με τη διάθεση της αιολικής παραγωγής. Και πάλι λοιπόν είναι εμφανής η επίδραση της ενεργειακής και τιμολογιακής πολιτικής στη λειτουργία και τις επιδόσεις των σταθμών. Το μεγαλύτερο ποσό ετήσιας αιολικής ενέργειας στο αντλιοστάσιο (~45 GWh) διοχετεύει ο ΥΒΣ 1B, του οποίου άλλωστε το σενάριο λειτουργίας υπαγορεύει την κατά προτεραιότητα κατανάλωση της αιολικής ενέργειας από τις αντλίες. Ο ίδιος σταθμός, όπως είναι φυσικό παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη ετήσια υδροστροβλική παραγωγή (~ 28 GWh).

Αναφορικά με την ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης (Σχήμα 5.114), αυτή προκύπτει μεγαλύτερη για τους ΥΒΣ των σεναρίων 1A και 2A. Οι ίδιοι σταθμοί εμφανίζουν προφανώς και τις μεγαλύτερες ισχύεις για τη διάταξη ηλεκτρόλυσης (Σχήμα 5.113), οι οποίες μάλιστα είναι κατά πολύ μεγαλύτερες των αντίστοιχων ισχύων του αντλιοστασίου. Αντίθετα, οι ΥΒΣ 1B

και 2B παρουσιάζουν πιο μετριοπαθή κατανάλωση αιολικής ενέργειας στη διάταξη ηλεκτρόλυσης, η ισχύς της οποίας δεν διαφέρει σημαντικά από την ισχύ του αντλιοστασίου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη υψηλότερη τιμολόγηση της ενέργειας στους σταθμούς που υιοθετούν την τιμολογιακή πολιτική B. Στους σταθμούς αυτούς λοιπόν, δεν κρίθηκε αναγκαία η εγκατάσταση μεγαλύτερων διατάξεων ηλεκτρόλυσης για τη βελτίωση των οικονομικών τους επιδόσεων. Το συμπέρασμα αυτό αντικατοπτρίζεται και στα ετήσια έσοδα των σταθμών (Σχήμα 5.119), στα οποία συμμετέχει περισσότερο η πώληση του υδρογόνου για τους σταθμούς 1A και 2A και περισσότερο η πώληση ενέργειας για τους 1B και 2B. Τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ της διάταξης ηλεκτρόλυσης (~13.000 KW) παρουσιάζει ο ΥΒΣ 1A, με τη μέγιστη παρατηρούμενη κατανάλωση αιολικής ενέργειας σε αυτήν (~49 GWh) που του αποφέρει τα μέγιστα έσοδα από πώληση υδρογόνου, ύψους περίπου 9 εκατ. ευρώ.

Όσον αφορά την ετήσια ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες της αντλησιοταμίευσης (Σχήμα 5.116), αυτή σε κάθε περίπτωση προκύπτει μικρότερη από 0,1 GWh. Συγκεκριμένα για τους σταθμούς 1A και 1B κυμαίνεται περί τις 0,090 GWh, ενώ για τους 2A και 2B περί τις 0,077 GWh.

Από οικονομικής σκοπιάς, και οι τέσσερις ΥΒΣ παρουσιάζουν πολύ ελκυστικά χαρακτηριστικά με εσωτερικό βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο του 22% (Σχήμα 5.112) και χρόνο απόσβεσης μικρότερο από πέντε έτη (Σχήμα 5.118). Ωστόσο, πιο ελκυστικές επενδύσεις παρουσιάζονται εκείνες των ΥΒΣ που τιμολογούν πιο ακριβά την παραγόμενη ενέργεια, δηλαδή οι ΥΒΣ των σεναρίων 1B και 2B. Τους καλύτερους οικονομικούς δείκτες εμφανίζει ο ΥΒΣ 2B, με εσωτερικό βαθμό απόδοσης 26% και χρόνο απόσβεσης στα 4,8 έτη.

Ο ίδιος σταθμός (του σεναρίου 2B) παρουσιάζει και τα καλύτερα ενεργειακά αποτελέσματα, αφού επιτρέπει τη μεγαλύτερη διείσδυση του ΥΒΣ (~ 46.000 MWh) στο ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού (Σχήμα 5.117).



### ***Σχολιασμός – Συμπεράσματα για τη σύγκριση των βέλτιστων σταθμών των σεναρίων 1Α και 1Α με περιορισμό***

Προτού συγκριθούν οι βέλτιστοι σταθμοί των σεναρίων 1Α και 1Α με περιορισμό με βάση τα σχήματα, πρέπει να αναφερθεί ότι ο σταθμός 1Α έχει διαστασιοποιηθεί από το λογισμικό της βελτιστοποίησης με αιολικό πάρκο μεγαλύτερο κατά 800KW από εκείνο του σταθμού 1Α με περιορισμό.

Όσον αφορά την εγκατεστημένη ισχύ του αντλιοστασίου (Σχήμα 5.113), αυτή είναι κατά 19.400 KW μεγαλύτερη για το σταθμό που υπόκειται στον περιορισμό, αφού η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών του πρέπει να είναι το πολύ κατά 1,2 φορές μεγαλύτερη από την ισχύ του αντλιοστασίου του. Για τον λόγο αυτό η ετήσια αιολική ενέργεια που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο (Σχήμα 5.114), αλλά και η ετήσια ποσότητα ενέργειας που παράγεται από τους υδροτροβίλους (Σχήμα 5.115) είναι επίσης μεγαλύτερες κατά 4,5 GWh και 2,3 GWh αντίστοιχα για τον σταθμό με περιορισμό. Ωστόσο, η ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο (Σχήμα 5.114) είναι κατά 3,54 GWh μικρότερη για τον ΥΒΣ με περιορισμό, ώστε τελικά οι δύο σταθμοί να συνεισφέρουν εξίσου στο ετήσιο ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού (Σχήμα 5.117). Εφόσον διοχετεύουν στο δίκτυο τα ίδια περίπου ποσά ενέργειας, οι δύο σταθμοί παρουσιάζουν και τα ίδια περίπου έσοδα από την πώληση ενέργειας (Σχήμα 5.119). Ελαφρώς υψηλότερα έσοδα από την πώληση ενέργειας παρουσιάζει ο σταθμός χωρίς περιορισμό, ο οποίος πωλεί περισσότερη ενέργεια υδροτροβίλων, η οποία τιμολογείται ακριβότερα από την αιολική ενέργεια που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο.

Αναφορικά με την εγκατεστημένη ισχύ της διάταξης ηλεκτρόλυσης (Σχήμα 5.113), αυτή είναι κατά 2.580 KW μεγαλύτερη για τον ΥΒΣ που υπόκειται στον περιορισμό, προκειμένου να καταφέρει να αυξήσει τα έσοδά του από την πώληση του υδρογόνου και συνεπώς τον εσωτερικό βαθμό απόδοσής του, τον οποίο κρατάει σε χαμηλά επίπεδα η επιβολή του περιορισμού καθώς οδηγεί σε αυξημένο κόστος του σταθμού. Η ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα για του δύο σταθμούς (Σχήμα 5.114). Συνεπώς παράγουν περίπου την ίδια ποσότητα υδρογόνου ετησίως, η πώληση του οποίου αποφέρει κέρδη της τάξεως των 8,7 εκατ. ευρώ σε κάθε σταθμό (Σχήμα 5.119).

Η ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που απορρίπτεται (Σχήμα 5.114) είναι κατά 2,5 GWh μικρότερη για τον σταθμό που υπόκειται στον περιορισμό, λόγω της μεγαλύτερης διαστασιολόγησης του αντλιοστασίου και της διάταξης ηλεκτρόλυσης, σε σχέση με το σταθμό χωρίς περιορισμό. Η ετήσια ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο για άντληση είναι και για τους δύο σταθμούς μικρότερη από 0,1 GWh (Σχήμα 5.116).

Τέλος, οι οικονομικοί δείκτες της επένδυσης είναι αποδεκτοί και για τους δύο υπό εξέταση σταθμούς, αλλά και ελαφρώς καλύτεροι για τον σταθμό χωρίς περιορισμό, λόγω του χαμηλότερου αρχικού του κόστους. Συγκεκριμένα ο IRR (Σχήμα 5.112) και ο χρόνος απόσβεσης (Σχήμα 5.118) για τον σταθμό χωρίς περιορισμό είναι 22,5% και 7,8 χρόνια αντίστοιχα. Για τον σταθμό με περιορισμό τα αντίστοιχα μεγέθη είναι 19% και 7,1 χρόνια.

Συμπερασματικά, από οικονομικής σκοπιάς και οι δύο σταθμοί προκύπτουν ως ελκυστικές επενδύσεις, αλλά προτιμότερη επιλογή για έναν επενδύτη είναι αυτή του σταθμού που δεν υπόκειται στον περιορισμό. Από ενεργειακής πλευράς, οι δύο σταθμοί έχουν συγκρίσιμες επιδόσεις, ενώ ανάλογη είναι και η συμπεριφορά τους ως προς την παραγωγή υδρογόνου.

## **Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Ανακεφαλαίωση, Συμπεράσματα και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα**

### **6.1 Ανακεφαλαίωση**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύθηκε αρχικώς η σημερινή παγκόσμια ενεργειακή πολιτική, η οποία βασίζεται στην εκμετάλλευση των αναλώσιμων ορυκτών καυσίμων και τονίστηκαν οι επιζήμιες επιπτώσεις της στο κλίμα, στα οικοσυστήματα, στην υγεία και στην οικονομική ευμάρεια του ανθρώπου.

Η ορθολογική χρήση της ενέργειας και η αυξημένη συμμετοχή των ΑΠΕ στην παγκόσμια κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, αναδείχτηκαν ως οι λύσεις για την αναχαίτιση και ανατροπή των καταστρεπτικών αυτών επιπτώσεων και τη διαμόρφωση ενός ενεργειακά και οικονομικά βιώσιμου μέλλοντος του πλανήτη.

Στη συνέχεια αναφέρθηκαν τα πλεονεκτήματα που συγκεντρώνουν οι ΑΠΕ έναντι της συμβατικής παραγωγής ενέργειας, αλλά και το μειονέκτημά τους της χρονικής αναντιστοιχίας προσφοράς και ζήτησης ενέργειας. Το μειονέκτημα αυτό, έγινε σαφές ότι πλήττει περισσότερο τα ιδιαίτερα ,από άποψη ζήτησης φορτίου, αυτόνομα ενεργειακά συστήματα, περιορίζοντας σημαντικά τη διείσδυση των ΑΠΕ στην κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών. Για την άρση του μειονεκτήματος των ΑΠΕ προτάθηκε η συνδυασμένη χρήση τους με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, οδηγώντας στη δημιουργία ΥΒΣ παραγωγής ενέργειας.

Σε μεγαλύτερο βάθος εξετάστηκαν η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας υπό μορφή υδραυλικής ενέργειας, με τη μέθοδο της αντλησιοταμίευσης και υπό μορφή υδρογόνου, με τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης του νερού. Ακολούθως, προτάθηκε η εγκατάσταση ενός ΥΒΣ στη Λέσβο, ο οποίος να συνδυάζει τα ανωτέρω αποθηκευτικά συστήματα με αιολική ενέργεια. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκε η ετήσια λειτουργία ενός σταθμού αποτελούμενο από ένα αιολικό πάρκο, δύο ταμιευτήρες νερού, αντλιοστάσιο και υδροστροβίλους, για την αποθήκευση και εκ

νέου παραγωγή ενέργειας και μια διάταξη ηλεκτρόλυσης, για την παραγωγή και πώληση υδρογόνου που θεωρήθηκε ότι θα χρησιμοποιηθεί στο τομέα των μεταφορών.

Η πολιτική διαχείρισης του εν λόγω σταθμού διαμορφώθηκε σύμφωνα με την πιο πρόσφατη νομοθεσία για τις ΑΠΕ και η τιμολόγηση των αγοραπωλησιών ποσοτήτων ενέργειας από και προς το δίκτυο υπαγορεύτηκε από τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ). Η τιμή πώλησης του παραγόμενου υδρογόνου αποτέλεσε παράμετρο του συστήματος, καθώς, η παραγωγή και πώλησή του από ΥΒΣ είναι μια διαδικασία που δεν έχει ακόμα ενσωματωθεί στην ελληνική νομοθεσία.

Έτσι, διαμορφώθηκαν δύο πολιτικές διαχείρισης της αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ (κατά προτεραιότητα στο αντλιοστάσιο και κατά προτεραιότητα στο δίκτυο) και δύο τιμολογιακές πολιτικές (πρόταση ΡΑΕ για Λέσβο και πρόταση ΡΑΕ για Κρήτη). Η σύνθεση αυτών των πολιτικών έδωσε τέσσερα σενάρια λειτουργίας του προτεινόμενου ΥΒΣ, οι ενεργειακές και οικονομικές επιδόσεις των οποίων μελετήθηκαν για τιμή πώλησης του υδρογόνου από 1 έως 10 ευρώ/kg. Η διαστασιολόγηση των εν λόγω σταθμών έγινε από κατάλληλο λογισμικό βελτιστοποίησης, με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR) της επένδυσης. Στο πρώτο σενάριο εξετάστηκε επίσης και η περίπτωση επιβολής του περιορισμού που θέτει ο Νόμος 3468/2006, σύμφωνα με τον οποίο η μέγιστη ισχύς παραγωγής των μονάδων του σταθμού ΑΠΕ δεν μπορεί να υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων αποθήκευσης του σταθμού αυτού, προσαυξημένη κατά ποσοστό μέχρι 20%. Ο περιορισμός αυτός εφαρμόστηκε μόνο για την αντλησιοταμίευση και όχι για την παραγωγή υδρογόνου, καθώς ο εν λόγω νόμος δεν προβλέπει την παραγωγή του από ΥΒΣ. Στο ίδιο σενάριο και για επιλεγμένες τιμές πώλησης του υδρογόνου το λογισμικό της βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε και για βελτιστοποίηση διπλού στόχου: μεγιστοποίηση του εσωτερικού βαθμού απόδοσης και της καθαρής ποσότητας ενέργειας που παράγει ο ΥΒΣ.

## 6.2 Συμπεράσματα

Τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Τα αποτελέσματα για κάθε σενάριο και κάθε τιμή πώλησης του υδρογόνου προέκυψαν ιδιαιτέρως ενθαρρυντικά. Οι ΥΒΣ παρουσίασαν πολύ ελκυστικούς οικονομικούς δείκτες και πολύ ικανοποιητική αξιοποίηση της πρωτογενούς αιολικής παραγωγής.
- Παρόλα αυτά, σε κάθε σενάριο λειτουργίας η παραγωγή του υδρογόνου ενισχυόταν και κέρδιζε έδαφος έναντι της παραγωγής ενέργειας από τους υδροστροβίλους από μια συγκεκριμένη και σε κάθε περίπτωση μεγαλύτερη των 6 ευρώ/kg, τιμή πώλησής του.
- Βέλτιστος σταθμός, από ενεργειακής και οικονομικής σκοπιάς, αναδείχθηκε ο ΥΒΣ που διοχετεύει την αιολική του ενέργεια κατά προτεραιότητα στο δίκτυο, υιοθετεί τις τιμολογήσεις ενέργειας της Κρήτης και πωλεί το υδρογόνο προς 10 ευρώ/kg.
- Αξιοσημείωτη είναι ωστόσο και η περίπτωση δύο σταθμών που από το λογισμικό της βελτιστοποίησης διαστασιολογήθηκαν με μηδενική εγκατεστημένη ισχύ της διάταξης ηλεκτρόλυσης. Πρόκειται για σταθμούς πώλησης του υδρογόνου προς 1 και 3 ευρώ/kg, στους οποίους κρίθηκε οικονομικά ασύμφορη η παραγωγή του.
- Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει και η περίπτωση των σταθμών, οι οποίοι υπόκεινται στον περιορισμό που τίθεται από την υπάρχουσα νομοθεσία. Οι σταθμοί αυτοί διαστασιολογήθηκαν από το λογισμικό της βελτιστοποίησης με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτρέπεται η ουσιαστική παραγωγή υδρογόνου μόνο για την περίπτωση πώλησής του προς 10 ευρώ/kg.
- Όσον αφορά τη βελτιστοποίηση διπλού στόχου, αυτή έδειξε ότι τα δύο επιλεγμένα κριτήρια βελτιστοποίησης των σταθμών είναι μεταξύ τους ανταγωνιστικά. Συγκεκριμένα η μεγιστοποίηση του IRR απαιτεί μικρό κόστος επένδυσης, δηλαδή

μικρού μεγέθους σταθμούς, με αναπόφευκτα μικρή ποσότητα ετήσιας καθαρής παραγόμενης ενέργειας. Από την άλλη μεριά, η μεγιστοποίηση της ετήσιας καθαρής παραγόμενης ενέργειας επιβάλλει μεγάλους σταθμούς, δηλαδή σταθμούς με μεγάλη παραγωγή ενέργειας και μοιραία μεγάλο αρχικό κόστος επένδυσης.

- Για επιλεγμένους σταθμούς, ο τρόπος που η ένταξή τους επηρεάζει την καμπύλη ζήτησης φορτίου του νησιού καθώς και τα αποτελέσματα της ετήσιας εσωτερικής λειτουργίας τους δόθηκαν σε αναλυτικά διαγράμματα, τα οποία παρέχουν εποπτεία των αντίστοιχων μεγεθών για κάθε ημέρα του έτους. Από τα διαγράμματα αυτά φάνηκε, επιπρόσθετα, η συνεισφορά του προτεινόμενου ΥΒΣ στην εξομάλυνση της καμπύλης ζήτησης φορτίου, ο τρόπος που διαχειρίζεται την πρωτογενή αιολική παραγωγή του και οι υψηλοί βαθμοί απόδοσης της υδροστροβλικής παραγωγής αλλά και της συνολικής διαδικασίας άντλησης – παραγωγής.

### **6.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**

Οι ΑΠΕ και ο συνδυασμός τους με συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης είναι ένα ζήτημα εξαιρετικά επίκαιρο. Το παγκόσμιο ενδιαφέρον κερδίζει ολοένα, επίσης, το υδρογόνο ως το καύσιμο του μέλλοντος. Η παρούσα διπλωματική εργασία φώτισε μια μικρή πτυχή των θεμάτων αυτών και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα είναι επιβεβλημένες. Ορισμένα θέματα που θα μπορούσαν να απασχολήσουν την επιστημονική κοινότητα είναι τα ακόλουθα:

- Οικονομοτεχνική μελέτη της ένταξης οχημάτων υδρογόνου στην ελληνική αγορά και μέτρηση των αποφευγόμενων εκπομπών ρύπων από τη χρήση τους
- Εξέταση ΥΒΣ με αποθήκευση της πλεονάζουσας παραγωγής ΑΠΕ υπό μορφή υδρογόνου και εκ νέου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου για την κάλυψη του φορτίου ζήτησης
- Σύνθεση ΥΒΣ με συνδυασμό αιολικού πάρκου, φωτοβολταϊκών και παραγωγής υδρογόνου

- Εξέταση του ενδεχόμενου ηλεκτρικής διασύνδεσης αυτόνομων συστημάτων με εγκατεστημένους ΥΒΣ, ώστε να επιτραπεί η μεγαλύτερη διαστασιολόγησή τους και συνεπώς η έγχυση ενέργειας ΑΠΕ στο ηπειρωτικό δίκτυο

## **Βιβλιογραφία**

### **Βιβλία**

1. Δ. Παπαντώνης, «ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΑΝΤΛΙΕΣ – ΥΔΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ», Εκδόσεις Συμεών, 2004
2. Δ. Παπαντώνης, «ΜΙΚΡΑ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΕΡΓΑ», Εκδόσεις Συμεών, 2001
3. Α. Ζερβός, «ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2007
4. ΚΑΠΕ, «Οδηγός Τεχνολογιών Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ», 2001
5. Κ. Χ. Γιαννάκογλου, «Μέθοδοι Βελτιστοποίησης στην Αεροδυναμική», Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2005

### **Διδακτορικές Διατριβές**

1. Γ. Κάραλης, «Ανάπτυξη και ανάλυση συστημάτων ανεμοκινητήρων και αντλησιοταμιευτήρων», 2007
2. Δ. Κατσαπρακάκης, «Μεγιστοποίηση Διείσδυσης Αιολικών Πάρκων σε Απομονωμένα Ενεργειακά Συστήματα», 2006

### **Μεταπτυχιακή Εργασία**

1. Β. Γιαννέτα, «ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ», 2005

### **Διπλωματικές Εργασίες**

1. Γ. Πλευράκης, «Μελέτη Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ με Υδρογόνο στον Αη Στράτη»
2. Α. Σαλιάγκας, «Συνδυασμένη χρήση αιολικής ενέργειας υδρογόνου και κυψελών καυσίμου για την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια της νήσου Σέριφος», 2003
3. Α. Μιχαλακόπουλος, «ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΡΟΣΟΜΕΙΩΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΥΔΡΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ», 2010
4. Α. Σαγάνη, «Η Ανάγκη Αποθήκευσης Ενέργειας – Μέθοδοι Αποθήκευσης και Εφαρμογές», 2009



5. Ι. Σπύρου, «Ανάπτυξη Αλγορίθμου για Προσομοίωση και Βέλτιστο Σχεδιασμό Αυτόνομου Συστήματος Αφαλάτωσης Τροφοδοτούμενο από Υβριδικό Σύστημα Α.Π.Ε. με Αντλησιοταμίευση», 2009

6. Σ. Πόντικας, «ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΤΛΗΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΑΠΟΡΡΙΠΤΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ», 2004

### **Εργασία του ΤΕΕ/ΤΚΜ**

Σ. Βουτετάκης, Ε. Κικκινίδης, Γ. Μαρνέλλος, Λ. Ντζιαχρήστος,

Ι. Παναπακίδης, «Υπάρχουσες τεχνολογίες και τελικές χρήσεις του "καυσίμου του μέλλοντος" - H<sub>2</sub>», 2010

### **Ερευνητικό Έργο**

Δ. Παπαντώνης, Ι. Αναγνωστόπουλος, Μ. Παπαδόπουλος, Σ. Παπαθανασίου, Ε.

Καραμάνου, Σ. Παπαευθυμίου, «ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΖΗΤΗΜΑΤΩΝ ΕΝΤΑΞΗΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΣΤΑ ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΝΗΣΙΑ», 2008

### **Δημοσιεύσεις**

1. G. Caralis, A. Zervos, «Prospects of Wind and Pumped Storage systems' integration in Greek islands»

2. John S. Anagnostopoulos, Dimitris E. Papantonis, «Pumping station design for a pumped-storage wind-hydro power plant», 2007

3. Σ. Παπαευθυμίου, Ε. Καραμάνου, Σ. Παπαθανασίου, Μ. Παπαδόπουλος, Σ. Ροντήρης, Ι. Δρυμωνίτης, «Αρχές Διαχείρισης Υβριδικών Σταθμών: Εφαρμογή στο Σύστημα της Ικαρίας»

4. J. Anagnostopoulos, D. Papantonis: «Simulation and size optimization of a pumped-storage power plant for the recovery of wind-farms rejected energy», Elsevier, Renewable Energy, 2008

5. N. Lymberopoulos, E. Varkaraki, M. Zoulias, E. Kalyvas, C. Christodoulou, G. Karagiorgis, K. Stolzenburg, A. Poullikkas, «Hydrogen as an Alternative Product for Wind Park Developers», CRES

6. N. Lymberopoulos, E. Varkaraki, M. Zoulias, P. Vionis, P. Chaviaropoulos, D. Agoris, «First steps in Hydrogen production from wind energy in Greece», CRES - High Voltage Laboratory, University of Patras
7. Ν. Λυμπερόπουλος, Ε. Βαρκαράκη, Ε. Ζούλιας, «ΜΟΝΑΔΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ», Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
8. Dr. E. Varkaraki, Dr. N. Lymberopoulos, Dr. E. Zoulias, «DECENTRALISED PRODUCTION OF "GREEN" HYDROGEN USING WIND ENERGY», CRES
9. GONZALO PIERNAVIEJA, JAVIER PARDILLA, JULIETA SCHALLENBERG, CELIA BUENO, «EL HIERRO: 100% RES AN INNOVATIVE PROJECT FOR ISLANDS' ENERGY SELF-SUFFICIENCY»
10. C. Buena, J.A. Carta, «Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands»
11. Jon Are Suul, Kjetil Uhlen, «Variable speed pumped storage hydropower for integration of wind energy in isolated grids – case description and control strategies»
12. J. Simond, A. Sapin, «Expected benefits of adjustable pumped storage in the European network»
13. Ελληνική Τεχνολογική Πλατφόρμα Υδρογόνου & Κυψελών Καυσίμου, «ΘΕΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ΣΤΗ ΔΗΜΟΣΙΑ ΔΙΑΒΟΥΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ «ΒΑΣΙΚΩΝ ΑΡΧΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ, ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΤΙΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ (ΥΒΣ ) ΣΕ ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΝΗΣΙΑ (ΜΝΣ)»», 2008
14. Torgeir Nakken, Erik Frantzen, Elisabet F. Hagen, Hilde Strom, «Utsira – Demonstrating the renewable hydrogen society», 2006
15. Daniel Akilil – D'Halluin, Elizabeth Johnson, Ross Gazey, Boris Collard, Vincenzo Ortisi, Carla Urso, Mohamed Cherif Latreche, «The PURE Project - An Autonomous, Hybrid and Distributed Wind Hydrogen System For Islands», 2009
16. » Ε. Βαρκαράκη, Ε. Ζούλιας, Ν. Λυμπερόπουλος, Γ. Καραγιώργης, Χ. Χριστοδούλου, Ε. Καλύβας, «Υλοποίηση και πρώτα αποτελέσματα από μονάδα παραγωγής υδρογόνου από αιολική ενέργεια», 2005
17. Ε. Ζούλιας 2005, Ν. Λυμπερόπουλος, «Υδρογόνο στα Νησιά – Ελληνικό Νησί Υδρογόνου 'H2ellenic Island' – Μήλος», 2006
18. ΑΠΟΦΑΣΗ Ρ.Α.Ε. ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 1335/2010
19. ΑΠΟΦΑΣΗ Ρ.Α.Ε. ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 1336/2010

20. ΑΠΟΦΑΣΗ Ρ.Α.Ε. ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 1337/2010

21. ΑΠΟΦΑΣΗ Ρ.Α.Ε. ΥΠ' ΑΡΙΘΜ. 1339/2010

### **Παρουσίαση**

Μ. Φούντη, Γ. Βουρλιωτάκης, «ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ και ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ»

### **Νομοθεσία**

Νόμος 3468/2006: «Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συμπαγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης και λοιπές διατάξεις», ΦΕΚ 129 τ.Α, 27.6.2006.

### **Ιστοσελίδες**

1. [www.ct.aegean.gr](http://www.ct.aegean.gr)
2. [www.cres.gr](http://www.cres.gr)
3. [www.rae.gr](http://www.rae.gr)

## **Παράρτημα: Λίστα Μεταβλητών του Κώδικα HYPSSOS**

- AAAA: βοηθητική μεταβλητή
- AAM1: μονάδα χρόνου, ως ποσοστό του έτους, σε ώρες
- ADPP: χρόνος απόσβεσης της επένδυσης
- AIRR: εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης
- ALAMD: βοηθητική μεταβλητή για την αποδοτική κατανομή ισχύος μεταξύ των υδροστροβίλων
- ALFA: συντελεστής ασφαλείας για την παραγωγή
- AQH, AQP, AQV: βοηθητικές μεταβλητές (γινόμενα σταθερών όρων)
- ASUM: ημερήσιο άθροισμα των δεκάλεπτων τιμών ισχύος λειτουργίας του αιολικού πάρκου
- BAKSW: ημερήσιος δείκτης απωλειών του αιολικού πάρκου
- BANTM: ημερήσιος ολικός βαθμός απόδοσης άντλησης – παραγωγής υδροστροβίλων
- BAPOH: ημερήσιος βαθμός απόδοσης συστήματος προσαγωγής και υδροστροβίλων
- BAPOP: ημερήσιος βαθμός απόδοσης άντλησης
- BARAG: βάρος σωλήνα
- BETA: συντελεστής ασφαλείας για μέγιστη προγραμματισμένη παραγωγή
- BLO(I0,I1): ωριαία παραγωγή μονάδων βάσεως
- BMON(M): ονομαστική ισχύς των μονάδων βάσεως
- BMTEL(M): τεχνικό ελάχιστο μονάδων βάσεως
- CAPCRED, CAPCRP: ετήσια εγγυημένη ισχύς ΥΒΣ
- CAPCRT: ετήσια αποζημίωση της διαθεσιμότητας ισχύος του ΥΒΣ
- CMVSP: ποσοστό δυνατής υπέρβασης των κανονικών στροφών των αντλιών μεταβλητών στροφών
- COEP: κόστος επιφανειακής προστασίας σωλήνων
- COFORM: κόστος έργων πολιτικού μηχανικού
- COH2: κόστος διάταξης ηλεκτρόλυσης
- COHME: κόστος υποσταθμού και διασύνδεσης στο δίκτυο
- COINST: κόστος μεταφοράς και εκσκαφών για τους σωλήνες
- COLEIT: ετήσιο λειτουργικό κόστος του ΥΒΣ
- COMAIN: κόστος των κυρίων συνιστωσών του ΥΒΣ

COMELET: κόστος μελετών και επίβλεψης  
COPIPE: συνολικό κόστος σωλήνων  
COPUMP: κόστος αντλιών και μεταστροφών  
CORAF: κόστος συγκολλήσεων των σωλήνων  
CORESERV: κόστος άνω ταμιευτήρα  
COSTAT: κόστος του ΥΒΣ  
COSTMWh: κόστος αγοράς MWh από τον ΥΒΣ  
COSTPROD: κόστος παραγόμενης MWh από τον ΥΒΣ  
COTHERS: λοιπά κόστη (δρόμοι, αγορά γης κτλ.)  
COTOTAL: συνολικό κόστος της επένδυσης  
COTURGEN: κόστος υδροστροβίλων και γεννητριών  
COWIND: κόστος του αιολικού πάρκου  
COYL: κόστος υλικού των σωλήνων  
CT(N): συντελεστής τεχνικού ελαχίστου των υδροστροβίλων  
CTELEC: συντελεστής τεχνικού ελαχίστου της μιας συστοιχίας κελιών ηλεκτρόλυσης  
CTVSP: συντελεστής τεχνικού ελαχίστου των αντλιών μεταβλητών στροφών  
DELTA: συντελεστής ασφαλείας για την άντληση  
DEN: πυκνότητα του νερού  
DEPRES: περίοδος απόσβεσης του ΥΒΣ  
DHF: διόρθωση συντελεστή απωλειών σωλήνωσης ανάλογα με τη διακινούμενη παροχή  
DHFX: βοηθητική μεταβλητή  
DINP: εσωτερική διάμετρος σωλήνα άντλησης  
DINT: εσωτερική διάμετρος σωλήνα παραγωγής  
DPP: ωριαία ισχύς άντλησης με χρήση ενέργειας από το δίκτυο  
DT: χρονικό βήμα προσομοίωσης της λειτουργίας του ΥΒΣ (10 λεπτά)  
DTT: ωριαία ισχύς παραγωγής υδροστροβίλων  
DZHN: ονομαστικό ύψος υδροστροβίλων  
DZMEAN: μέση διαφορά στάθμης άνω και κάτω ταμιευτήρα  
DZMIN: ελάχιστη διαφορά στάθμης άνω και κάτω ταμιευτήρα  
DZPN: ονομαστικό ύψος αντλιών  
DZVOLR: διαφορά μέγιστης – ελάχιστης στάθμης ταμιευτήρα  
E24H: ημερήσια έσοδα ΥΒΣ από την πώληση της ενέργειας των υδροστροβίλων

E24H2: ημερήσια έσοδα ΥΒΣ από την πώληση υδρογόνου

E24P: ημερήσια έξοδα ΥΒΣ από την αγορά ενέργειας από το δίκτυο για άντληση

E24T: συνολικά ημερήσια έσοδα ΥΒΣ

E24TOT: συνολικά ημερήσια έσοδα ΥΒΣ λαμβάνοντας υπόψη και την αποθηκευμένη ενέργεια στον άνω ταμιευτήρα

E24W: ημερήσια έσοδα ΥΒΣ από την πώληση αιολικής ενέργειας απευθείας στο δίκτυο

EADD: ημερήσια ποσότητα ενέργειας που ζητείται από το δίκτυο για άντληση

EAVAIL: διαθέσιμη ποσότητα ενέργειας στον άνω ταμιευτήρα στην αρχή της ημέρας

EESTIM: συνολική ποσότητα ενέργειας που προβλέπεται ότι μπορεί να παραχθεί από τον ΥΒΣ την επόμενη ημέρα

EGLOS: ημερήσιες ενεργειακές απώλειες λόγω των γεννητριών

EGN(N): βαθμός απόδοσης γεννήτριας (προκύπτει με γραμμική παρεμβολή)

EGXN: βαθμός απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας

EH2N: βαθμός απόδοσης της μιας συστοιχίας κελιών ηλεκτρόλυσης

EHGROS: εκτιμώμενος μέσος βαθμός απόδοσης της παραγωγής των υδροστροβίλων

EHLOS: ημερήσιες ενεργειακές απώλειες λόγω των υδροστροβίλων

EHN(N): βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου (προκύπτει με γραμμική παρεμβολή)

EHPRO: ημερήσια ποσότητα ενέργειας που παράγεται από τους υδροστροβίλους

EHXN(N): βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου

EHYBR: ημερήσια ποσότητα ενέργειας που ο ΥΒΣ διοχετεύει στο δίκτυο (υδροστροβίλοι και αιολικά απευθείας στο δίκτυο)

EKN(N): βαθμός απόδοσης γεννήτριας (προκύπτει με γραμμική παρεμβολή)

ENEEDS: ημερήσια εγγυημένη ενέργεια που πρέπει να παράγει ο ΥΒΣ

ENET: ετήσια καθαρή ποσότητα ενέργειας που παράγει ο ΥΒΣ

ENETF: η ετήσια καθαρή ποσότητα ενέργειας που παράγει ο ΥΒΣ ως ποσοστό της ετήσιας αιολικής παραγωγής του ΥΒΣ

EPABS: ημερήσια ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται από τις αντλίες

EPEIS: ετήσια ποσότητα ενέργειας που ο ΥΒΣ δεν κατάφερε, παρά τη δέσμευσή του, να προσφέρει

EPGROS: εκτιμώμενος μέσος βαθμός απόδοσης της άντλησης

EPLOS: ημερήσιες ενεργειακές απώλειες λόγω των αντλιών

EPN(N): βαθμός απόδοσης αντλίας (προκύπτει με γραμμική παρεμβολή)

EPROTOT: ημερήσια ποσότητα ενέργειας που ο ΥΒΣ διοχετεύει στο δίκτυο (υδροστροβίλοι και αιολικά απευθείας στο δίκτυο)

EPROVI: ημερήσια προσφερόμενη ενέργεια από τον ΥΒΣ

EPROVMX: μέγιστη δυνατή ημερήσια προσφορά ενέργειας (ταμιευτήρας γεμάτος μέχρι τη μέγιστη επιτρεπόμενη στάθμη του)

EPURCH: ημερήσια ποσότητα ενέργειας που ο ΥΒΣ αγοράζει από το δίκτυο για άντληση

EPXNV: βαθμός απόδοσης αντλίας μεταβλητών στροφών

EQCONS: ημερήσια ποσότητα υδραυλικής ενέργειας που αξιοποιείται από τους υδροστροβίλους

EQHX: βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου για παροχή QHX

EQSTOR: ημερήσια ποσότητα υδραυλικής ενέργειας που αποταμιεύεται μέσω της άντλησης στον άνω ταμιευτήρα

ERESER: ημερήσιος συσχετισμός αποθηκευμένης ενέργειας στον άνω ταμιευτήρα και πιθανών εσόδων από αυτή

ESCHED: ημερήσια ποσότητα ενέργειας που πρέπει να υπολογίσει ότι χρειάζεται να παράγει ο ΥΒΣ, ώστε να προκύψει το αν χρειάζεται ή όχι να κάνει δήλωση φορτίου

ESUM: βοηθητική μεταβλητή

EWDROP, EWLOS: ημερήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που απορρίπτεται

EW2: ημερήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στη διάταξη ηλεκτρόλυσης

EWPRO1: ημερήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο

EWPRO2: ημερήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο

FACTOR: συντελεστής διόρθωσης παροχής των αντλιών

FLOAD: ποσοστό φόρτισης υδροστροβίλου

FPPX, FPPZ: συντελεστής πλήρωσης άνω ταμιευτήρα

G: επιτάχυνση της βαρύτητας

GAMA: ποσοστό της πραγματικής επί της προβλεπόμενης αιολικής παραγωγής

GREAT: ένας πολύ μεγάλος αριθμός

II: ώρα του χρόνου

IIIX: τρέχουσα ώρα του χρόνου

IPIPES: πλήθος σωλήνων

IPOPE(N): δείκτης για το αν μια αντλία λειτουργεί ή όχι το τρέχον δεκάλεπτο  
ITOPE(N): δείκτης για το αν ένας υδροστροβίλος λειτουργεί ή όχι το τρέχον δεκάλεπτο  
IVOL: δείκτης για τον βαθμό πληρότητας του άνω ταμιευτήρα  
IVSP(N): δείκτης για το αν μια αντλία είναι μεταβλητών στροφών ή όχι  
IWEEK1, IWEEK2: βοηθητικές μεταβλητές  
LDAYS: αριθμός ημερών για τις οποίες προσομοιώνεται η λειτουργία του ΥΒΣ  
LENP: μήκος σωλήνα  
LPSTAR: πρώτη ώρα χαμηλής ζήτησης που επιτρέπεται η άντληση με χρήση ενέργειας από το δίκτυο  
LPSTOP: τελευταία ώρα χαμηλής ζήτησης που επιτρέπεται η άντληση με χρήση ενέργειας από το δίκτυο  
M: τρέχον δεκάλεπτο ημέρας  
MBASE: πλήθος μονάδων βάσεως  
MBSF(M): σειρά ένταξης μονάδων βάσεως  
NEPEIS: ετήσιο πλήθος φορών που ο ΥΒΣ δεν κατάφερε, παρά τη δέσμευσή του, να προσφέρει ποσά ενέργειας  
NELEC: πλήθος συστοιχιών κελιών ηλεκτρόλυσης  
NELECO: πλήθος εν λειτουργία συστοιχιών κελιών ηλεκτρόλυσης το τρέχον δεκάλεπτο  
NFSTOP: πλήθος αντλιών που βρίσκονται σε φάση αναμονής για επανεκκίνηση  
NLGE: πλήθος σημείων στο διάγραμμα αδιάστατου φορτίου – βαθμού απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας  
NPARAM: δείκτης για το αν θα γίνει ή όχι παραμετρική μελέτη ως προς κάποιο μέγεθος  
NPG: πλήθος δεδομένων για μέγιστους βαθμούς απόδοσης σύγχρονων γεννητριών στο αρχείο MECHDAT  
NPLT(NT) πλήθος σημείων στο διάγραμμα αδιάστατης παροχής – βαθμού απόδοσης υδροστροβίλου  
NPOPE: πλήθος εν λειτουργία αντλιών το τρέχον δεκάλεπτο  
NPPP: πλήθος δεδομένων για βαθμό απόδοσης αντλιών στο αρχείο MECHDAT  
NPPT(L): πλήθος δεδομένων για βαθμό απόδοσης υδροστροβίλων στο αρχείο MECHDAT  
NPREAD: παράμετρος επιλογής απλών ή αναστρέψιμων αντλιών



NPUMPS: πλήθος αντλιών  
NPUREM: πλήθος αντλιών που παραμένουν σε λειτουργία το τρέχον δεκάλεπτο  
NPYP(N): δείκτης είδους αντλιών (απλές - αναστρέψιμες)  
NRSTA, NREND: αρχή και τέλος των επαναλήψεων κατά την παραμετρική εκτέλεση του κώδικα  
NTOPER: πλήθος των εν λειτουργία υδροστροβίλων το τρέχον δεκάλεπτο  
NTREAD: παράμετρος επιλογής του τύπου των υδροστροβίλων  
NTURBS: πλήθος υδροστροβίλων  
NTUREM: πλήθος υδροστροβίλων που παραμένουν διαθέσιμοι το τρέχον δεκάλεπτο (π.χ. σε περίπτωση αναστρέψιμων μηχανών)  
NTYP(N): δείκτης για τον τύπο του υδροστροβίλου  
NVSP: παράμετρος επιλογής του τύπου των αντλιών  
NWGEN: πλήθος ανεμογεννητριών  
PAPOM: ωριαία ισχύς προσφοράς του ΥΒΣ μετά τον περιορισμό φόρτισης  
PAPOMT: μέγεθος που συσχετίζει την μεταβλητή PAPOM με τη στάθμη του άνω ταμιευτήρα  
PAPOMX: βοηθητική μεταβλητή  
PAXPH, PAXPV, PAXTH, PAXTV: πάχη σωλήνα  
PBOT(I0,I1): τεχνικό ελάχιστο μονάδων βάσεως  
PDI, PDIMN(L): ωριαία ισχύς άντλησης με χρήση ενέργειας από το δίκτυο κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης  
PEI, PEIMN(L): ωριαία ισχύς προσφοράς του ΥΒΣ πριν τον περιορισμό φόρτισης  
PELEC: ισχύς λειτουργίας δεκαλέπτου της διάταξης ηλεκτρόλυσης  
PGAP1, PGAP2: άκρα της περιοχής ισχύος που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το αντλιοστάσιο λόγω των τεχνικών ελαχίστων των αντλιών  
PGLOSX: δεκάλεπτες απώλειες ισχύος λόγω των γεννητριών  
PH2ON: ονομαστική ισχύς της μιας συστοιχίας ηλεκτρόλυσης  
PH2SON: συνολική ονομαστική ισχύς της διάταξης ηλεκτρόλυσης  
PHCT: τεχνικό ελάχιστο υδροστροβίλου  
PHCT50: τεχνικό ελάχιστο υδροστροβίλου με συντελεστή τεχνικού ελαχίστου 50%  
PHCTMIN: τελικό: τεχνικό ελάχιστο υδροστροβίλου  
PHIGH: μέγιστο ωριαίο φορτίο ζήτησης της τρέχουσας ημέρας  
PHLOSX: δεκάλεπτες απώλειες ισχύος λόγω των υδροστροβίλων

PHLP: ημερήσιο άθροισμα των ωριαίων ισχύων ζήτησης φορτίου που είναι μεγαλύτερες από την ισχύ από την οποία άγεται η γραμμή εγγυημένης ισχύος

PHN: ονομαστική ισχύς υδροστροβίλου

PHNAL: συνολική ονομαστική ισχύς των ενταγμένων υδροστροβίλων το τρέχον δεκάλεπτο

PHX: συνολική ισχύς λειτουργίας των ενταγμένων υδροστροβίλων το τρέχον δεκάλεπτο

PHXN(N): ισχύς λειτουργίας του ενός υδροστροβίλου το τρέχον δεκάλεπτο

PI:  $\pi$

PLIM1, PLIM2: βοηθητικές μεταβλητές

PLIMIT: ισχύς από την οποία άγεται η γραμμή εγγυημένης ισχύος

PLOAD(I0,I1): ωριαίο φορτίο ζήτησης για κάθε ημέρα του έτους

PLOW: το μικρότερο ωριαίο φορτίο ζήτησης της τρέχουσας ημέρας, μεταξύ των ωρών κατά τις οποίες επιτρέπεται άντληση με χρήση ενέργειας από το δίκτυο

PPBAS: ωριαία ισχύς λειτουργίας των μονάδων βάσεων πριν την ένταξη του ΥΒΣ

PPBAS: ωριαία ισχύς λειτουργίας των μονάδων βάσεων μετά την ένταξη του ΥΒΣ

PPINST: συνολική εγκατεστημένη ισχύς αντλιοστασίου

PPLOSX: δεκάλεπτες απώλειες ισχύος λόγω των αντλιών

PPMAX: μέγιστη ισχύς αντλιοστασίου

PPMIN: ελάχιστη ισχύς αντλιοστασίου

PPN(N): ονομαστική ισχύς της μιας αντλίας

PPX: συνολική ισχύς λειτουργίας των εν λειτουργία αντλιών το τρέχον δεκάλεπτο

PPXNV: ισχύς λειτουργίας της μιας αντλίας το τρέχον δεκάλεπτο

PSTAR, PSTOP: βοηθητικές μεταβλητές

PTOP: μέγιστο ωριαίο φορτίο ζήτησης του έτους

PTREF: εγκατεστημένη ισχύς ΥΒΣ

PWNXT (J,I): μέση ωριαία αιολική ισχύς του αιολικού πάρκου του ΥΒΣ (προκύπτει από το μέσο όρο των δεκάλεπτων ισχύων της εκάστοτε ώρας)

PWREST(I1): διαθέσιμη αιολική ισχύς δεκαλέπτου μετά την πρώτη επιλογή διάθεσής της

PWX: αιολική ισχύς δεκαλέπτου που διοχετεύεται στο αντλιοστάσιο

PWXO: αιολική ισχύς δεκαλέπτου

PWXP: αιολική ισχύς δεκαλέπτου που διοχετεύεται απευθείας στο δίκτυο

QCONS: ημερήσια παροχή νερού που διέρχεται από τους υδροστροβίλους

QHN(N): κανονική παροχή υδροστροβίλου  
QHx: συνολική παροχή υδροστροβίλων το τρέχον δεκάλεπτο  
QHxN(N): παροχή ενός υδροστροβίλου το τρέχον δεκάλεπτο  
QPN(N): κανονική παροχή αντλίας  
QPVS(N), QPXNV: παροχή μιας αντλίας το τρέχον δεκάλεπτο  
QPX: συνολική παροχή αντλιών το τρέχον δεκάλεπτο  
QSTOR: ημερήσια παροχή νερού που διέρχεται από τις αντλίες  
QUANH2: ημερήσια ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου  
QVDIOR: συντελεστής διόρθωσης της παροχής δεκαλέπτου των αντλιών  
RELGE(I): βαθμός απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας συναρτήσει του αδιάστατου φορτίου  
REPGI(I): μέγιστος βαθμός απόδοσης σύγχρονης γεννήτριας συναρτήσει της ονομαστικής της ισχύος  
REPP(I): μέγιστος βαθμός απόδοσης αντλίας συναρτήσει της ονομαστικής της ισχύος  
RETL: βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου συναρτήσει της αδιάστατης παροχής  
RETP: μέγιστος βαθμός απόδοσης υδροστροβίλου συναρτήσει της ονομαστικής του ισχύος  
RLGE: αδιάστατο φορτίο σύγχρονης γεννήτριας  
RPGI(I): ισχύς σύγχρονης γεννήτριας  
RPP(I): ισχύς αντλίας  
RPT(L,I): ισχύς υδροστροβίλου  
RQT(NT,I): αδιάστατη παροχή υδροστροβίλου  
RRR: προεξοφλητικό επιτόκιο  
RTMT(L): τεχνικό ελάχιστο παροχής υδροστροβίλου  
SMALL: ένας πολύ μικρός αριθμός  
SUM01, SUM1: ετήσιο φορτίο ζήτησης  
SUM02: ετήσια κάλυψη της ζήτησης από τις συμβατικές μονάδες πριν την ένταξη του ΥΒΣ  
SUM03: ετήσια κάλυψη της ζήτησης από τα αιολικά πάρκα πριν την ένταξη του ΥΒΣ  
SUM2: ετήσια κάλυψη της ζήτησης από τις συμβατικές μονάδες μετά την ένταξη του ΥΒΣ  
SUM3: ετήσια κάλυψη της ζήτησης από τον ΥΒΣ  
SUM4: ετήσια κάλυψη της ζήτησης από τα αιολικά πάρκα εκτός ΥΒΣ μετά την ένταξη του ΥΒΣ

SUMPEI: ημερήσια ποσότητα ενέργειας που παράγεται από τον ΥΒΣ μετά τον περιορισμό φόρτισης

SYN30A: ποσοστό επί της 100 της ετήσιας υδροστροβλικής παραγωγής ως προς την ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε για άντληση

TAFSTOP(N): άθροισμα των δεκαλέπτων κατά τα οποία μια αντλία παραμένει σε φάση αναμονής για επανεκκίνηση

TERM: βοηθητική μεταβλητή

TINY: ένας πάρα πολύ μικρός αριθμός

TRFH: τιμή πώλησης της KWh του υδροστροβίλου

TRFH2: τιμή πώλησης του kg του υδρογόνου

TRFP: τιμή αγοράς της KWh από το δίκτυο για άντληση

TRFW: τιμή πώλησης της KWh του αιολικού πάρκου

VOLFR: ποσοστό πλήρωσης του άνω ταμιευτήρα

VOLR: όγκος διαθέσιμου νερού στον άνω ταμιευτήρα στην αρχή κάθε δεκαλέπτου

VOLR0: όγκος διαθέσιμου νερού στον άνω ταμιευτήρα στην αρχή του έτους

VOLRMN: ελάχιστος επιτρεπόμενος όγκος νερού στον άνω ταμιευτήρα

VOLRMX: μέγιστος επιτρεπόμενος όγκος νερού στον άνω ταμιευτήρα

VOLTOT: ωφέλιμη χωρητικότητα άνω ταμιευτήρα

VONEG: ετήσιο άθροισμα των δεκαλέπτων όγκων νερού οι οποίοι είναι μικρότεροι από τον ελάχιστο επιτρεπόμενο που ενδεχομένως προκύπτουν κατά την προσομοίωση

WFIRST, WSECOND: προβλεπόμενη αιολική παραγωγή του πρώτου και του δεύτερου δωδεκάωρου της τρέχουσας ημέρας

WINDP(I,J,M2) προβλεπόμενη αιολική παραγωγή κάθε δεκαλέπτου του έτους

WINGEN (M) προβλεπόμενη αιολική παραγωγή κάθε δεκαλέπτου του έτους ανά εγκατεστημένο KW ανεμογεννητριών

WLO(I0,I1): ωριαία παραγωγή αιολικής ενέργειας από τα αιολικά πάρκα εκτός ΥΒΣ

WLOS24: απορριπτόμενη αιολική ισχύς του ΥΒΣ στη μονάδα χρόνου AAM1

WSUM(I): μέση ημερήσια αιολική ισχύς του αιολικού πάρκου του ΥΒΣ

WSUME: ημερήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που παράγεται από τον ΥΒΣ

WSUMTOT: ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που παράγεται από τον ΥΒΣ

WTLOSS: βαθμός απόδοσης ανεμογεννήτριας

WTREF: εγκατεστημένη ισχύς του αιολικού πάρκου του ΥΒΣ

WTSIZE: ονομαστική ισχύς της κάθε ανεμογεννήτριας

X, X1: βοηθητικές μεταβλητές

XWLO(I0,I1): ωριαία ισχύς των αιολικών πάρκων εκτός ΥΒΣ

YEARBCO: λόγος των ετήσιων εσόδων προς το συνολικό κόστος κατασκευής του ΥΒΣ

YEARDEP: περίοδος απόσβεσης

YHPROD: ετήσια ποσότητα ενέργειας που παράγεται από τους υδροστροβίλους

YINCOM: ετήσια έσοδα του ΥΒΣ

YNEEDS: ετήσια ποσότητα εγγυημένης ενέργειας

YPURCH: ετήσια ποσότητα ενέργειας που αγοράστηκε από το δίκτυο για άντληση

YQUANH2: ετήσια ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου από τον ΥΒΣ

YWH2: ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύτηκε στη διάταξη ηλεκτρόλυσης

YWH2INCOME: ετήσια έσοδα του ΥΒΣ από την πώληση υδρογόνου

YWLOS: ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που απορρίφθηκε

YWPROD: ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύτηκε απευθείας στο δίκτυο

YWPUMP: ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που διοχετεύτηκε στο αντλιοστάσιο

YWTOT: ετήσια ποσότητα αιολικής ενέργειας που αξιοποιήθηκε

ZADD: συντελεστής που δείχνει τη μεταβολή της στάθμης του άνω ταμιευτήρα σε μέτρα ως προς τη μέση για συγκεκριμένο όγκο νερού που προστίθεται ή αφαιρείται

ZPIPEP, ZPIPET: συντελεστές αντίστασης σωλήνων

