



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

ΑΡΒΑΝΙΤΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ  
ΦΛΩΡΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ  
ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΣΤΑΘΑΤΟΣ ΗΛΙΑΣ

ΠΑΤΡΑ 2014

©2014 - All rights reserved

©2014 , Copyright υπό Αρβανιτάκη Κωνσταντίνο και Φλώρο Παναγιώτη

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μελέτη με θέμα «ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΑΣΥΡΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΔΙΚΤΥΑ», έγινε στα πλαίσια της Πτυχιακής εργασίας μας με την επίβλεψη του καθηγητή κ. Ηλία Σταθάτου.

Ευχαριστούμε θερμά την κα. Ελένη Σερίφη Ηλεκτρολόγο Μηχανικό για τα δεδομένα που μας παρέδωσε όσον αφορά το πάρκο κεραιών και τις συζητήσεις που είχαμε για το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και τον αρμόδιο υπάλληλο της ΕΡΤ για τα στατιστικά στοιχεία που μας παρείχε.

Τέλος, ευχαριστούμε θερμά την κα Μαρία Τουραπούλη Οικονομολόγο, απόφοιτη του Πανεπιστημίου Πατρών για τις συμβουλές και τη βοήθεια που μας παρείχε για τον Υπολογισμό του Κόστους της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

ΠΑΤΡΑ 2014

ΑΡΒΑΝΙΤΑΚΗΣ ΚΩΝ/ΝΟΣ  
ΦΛΩΡΟΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία εξετάζεται ένα βελτιωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα που αποθηκεύει την ενέργεια σε επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές οξειδοαναγωγικής δράσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή ο τρόπος δημιουργίας ηλεκτρικού ρεύματος από την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στα ηλιακά κύτταρα. Επίσης, δίνονται στοιχεία για τα είδη των ηλιακών κυττάρων που υπάρχουν, και το πως συγκροτείται μια Φ/Β συστοιχία από αυτές τις στοιχειώδεις μονάδες. Τέλος, γίνεται αναφορά στα μέρη μιας Φ/Β εγκατάστασης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται εκτεταμένη παρουσίαση μιας νέας τεχνολογίας επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών που ονομάζονται οξειδοαναγωγικοί συσσωρευτές. Αναφέρονται τα πλεονεκτήματά τους και αναλύεται σε μεγάλο εύρος η απόδοσή τους και τα χαρακτηριστικά τους. Τέλος, πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ αυτών και των συμβατικών συσσωρευτών μολύβδου.

Στο τρίτο κεφάλαιο μελετάται η εφαρμογή στο Πάρκο Κεραιών στη θέση Αέρας του όρους Πάρνηθα, του οποίου τα συστήματα πρώτου τομέα προτεραιότητας απαιτούν αδιάλειπτη παροχή ενέργειας θα υποστηριχθούν ενεργειακά από ένα υβριδικό Φ/Β σύστημα. Σε αυτό το σημείο μελετώνται τρία σενάρια υπολογισμού της Φ/Β εγκατάστασης. Στο πρώτο εξετάζεται η απόδοση του συστήματος με 2 κλίσεις των συλλεκτών κατά τη διάρκεια του έτους, στο δεύτερο εξετάζεται η περίπτωση της μιας και μοναδικής κλίσης και στο τρίτο γίνεται μια μελέτη βελτίωσης της απόδοσης με μια επαναληπτική μέθοδο εκμεταλλευόμενοι τις μέσες ημερήσιες ανά μήνα τιμές του φορτίου και της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η οικονομοτεχνική ανάλυση του έργου καθώς και η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κόστους του συστήματος η οποία βασίζεται στη διάρκεια ζωής του, λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική αξία του χρήματος.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> .....	3
ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ .....	3
1.1 Εισαγωγή.....	3
1.2 Φωτοβολταϊκά Κύτταρα.....	3
1.2.1 Απόδοση των Φ/Β κυττάρων .....	4
1.2.2 Τύποι Φ/Β κυττάρων .....	5
1.3 Το κύτταρο Φωτοσύνθεσης.....	6
1.4 Το κύτταρο CIS .....	7
1.5 Από το κύτταρο στο Φ/Β πλαίσιο .....	8
1.5.1 Χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων .....	9
1.5.2 Τρόποι στήριξης των Φ/Β πλαισίων και η ρύθμιση της κλίσης.....	11
1.5.3 Τεχνική Περιγραφή .....	12
1.6 Η Φ/Β συστοιχία (PV array) .....	13
1.7 Η Μονάδα αποθήκευσης.....	14
1.8 Ελεγκτές φόρτισης .....	14
1.9 Συνδέσεις δικτύου και ανεξάρτητα συστήματα .....	16
1.10 Πλεονεκτήματα, Μειονεκτήματα και Εφαρμογές.....	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> .....	19
ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΙΚΟΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ.....	19
2.1 Εισαγωγή.....	19
2.2 Η οξειδοαναγωγική μπαταρία βαναδίου (VRB) .....	20
2.3 Πλεονεκτήματα της μπαταρίας βαναδίου για εφαρμογές έκτακτης ανάγκης.....	21
2.4 Απόδοση της μπαταρίας Βαναδίου σε εφεδρικό σύστημα έκτακτης ανάγκης .....	22
2.5.Κόστος.....	31
2.6 Ερευνητική εργασία για τις μπαταρίες Βαναδίου, ανάπτυξη και προγράμματα .....	33
2.7 Σύγκριση συσσωρευτών Βαναδίου με μπαταρίες μολύβδου.....	33
2.8 Εμπορικές Χρήσεις .....	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> .....	37
Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ.....	37
3.1. Αντικείμενο της μελέτης .....	37
3.1.1. Φορτίο .....	38
3.1.2. Εκτίμηση των μέσων ημερήσιων καταναλώσεων που θα τροφοδοτεί το σύστημα.....	39

3.1.3. Ηλιακά Δεδομένα .....	40
3.1.4. Σχεδιασμός Φωτοβολταϊκής Εγκατάστασης.....	40
3.1.5. Κλίση των συλλεκτών .....	42
3.2. Πρώτη περίπτωση-Μέθοδος εποχιακής αποθήκευσης .....	42
3.2.1. Η απαιτούμενη ισχύς αιχμής για δύο κλίσεις.....	42
3.2.2 Η απαιτούμενη ισχύς αιχμής για μια κλίση όλο το έτος .....	44
3.2.3 Αριθμός και διάταξη των πλαισίων.....	46
3.3 Δεύτερη περίπτωση-Βελτιστοποιημένη Εγκατάσταση .....	47
3.3.1. Διαδικασία Βελτιστοποίησης .....	47
3.3.2. Μηνιαίο Φορτίο.....	47
3.3.3 Κλίση των Φ/Β πλαισίων .....	47
3.3.4 Επίδραση της θερμοκρασίας στο συντελεστή απόδοσης του Φ/Β πλαισίου .....	48
3.3.5 Η επιφάνεια της συστοιχίας .....	49
3.3.6 Υπολογισμός Βέλτιστης Φ/Β Επιφάνειας .....	52
3.3.7 Αριθμός και διάταξη των πλαισίων.....	56
3.4 Συσσωρευτές.....	56
3.5. Λοιπές διατάξεις.....	57
3.6. Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος.....	57
3.7. Έκταση του Φωτοβολταϊκού πάρκου.....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> .....	58
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ .....	58
Εισαγωγή.....	58
4.1 Βασικοί οικονομικοί όροι .....	58
4.2 Η αξία του χρήματος σε ορισμένη χρονική στιγμή.....	60
4.3 Υπολογισμός κόστους ενός Φ/Β συστήματος.....	61
4.4 Η καθαρή παρούσα αξία .....	61
4.5 Προϋπολογισμός Κόστους της Φ/Β εγκατάστασης .....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> .....	67
ΑΝΑΛΥΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	69
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....	71
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ .....	78

# ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 0.1 Γενικά

Με την αυξανόμενη δημόσια ευαισθητοποίηση σε ζητήματα όπως η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας και η μείωση της ποιότητας της ατμόσφαιρας των πόλεων, η κοινωνική πίεση στις κυβερνήσεις και τη βιομηχανία για να καθαρίσει το περιβάλλον, θα αναδείξει την αναπόφευκτη στροφή από τα παραδοσιακά συμβατικά καύσιμα στην ανανεώσιμη ενέργεια. Δυστυχώς, εντούτοις οποιαδήποτε νέα τεχνολογία για να κερδίσει την ευρεία αποδοχή, πρέπει όχι μόνο να είναι ανταγωνιστική τεχνικά και περιβαλλοντικά, αλλά και οικονομικά με τα υπάρχοντα συστήματα.

Οι πρόσφατες έρευνες και η ανάπτυξη στους τομείς της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας έχουν οδηγήσει στην εξαιρετική μείωση του κόστους, που θα επιτρέψει σε αυτές τις τεχνολογίες να ανταγωνιστούν την παραδοσιακή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο εγγύς μέλλον. Ήδη στην Αυστραλία, οι γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας καταβάλλουν μια τιμή ασφαλιστρού για την αποκαλούμενη "πράσινη" ενέργεια, που δίνει στους καταναλωτές την ευκαιρία να υποστηρίξουν τη βαθμιαία εισαγωγή της ανανεώσιμης ενέργειας στο υπάρχον δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα συνδυασμένα συστήματα ηλιακής ενέργειας και του πετρελαίου ντίζελ συνιστούν πλέον μία οικονομική πραγματικότητα η οποία συμβάλλει στην μείωση της εξάρτησης από το πετρέλαιο στα αυτόνομα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνολογία φωτοβολταϊκών και συγχρόνων γεννητριών των μηχανών εσωτερικής καύσεως (ΜΕΚ) επιτρέπει την διείσδυση της ηλιακής ενέργειας στα συστήματα αυτά σε ποσοστά που υπερβαίνουν κατά πολύ το 10% της κατανάλωσης ενέργειας το οποίο θεωρείται όριο χαμηλής διείσδυσης των ΑΠΕ .

## 0.2 Σκοπός – Μέρη της εργασίας

Αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η παρουσίαση μίας νέας βελτιωμένης υβριδικής τεχνολογίας Φωτοβολταϊκών με αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας.

Το προτεινόμενο σύστημα αντιμετωπίζει ριζικά τα δύο βασικά προβλήματα των συστημάτων ΑΠΕ: α) το πρόβλημα της ευστάθειας του συστήματος και της ποιότητας του παραγόμενου ρεύματος, με αδιάλειπτη παροχή σταθερής ισχύος και στην περίπτωση που υπάρχει διακοπή ηλεκτροδότησης από τη Δ.Ε.Η. και β) το πρόβλημα της εγγυημένης ισχύος που τίθεται λόγω της στοχαστικής φύσεως των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας . Η επίτευξη εγγυημένης ισχύος και συνθηκών πλήρους ευστάθειας αποτελεί και το ουσιαστικό στοιχείο ενός βελτιωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος.

Στην παρούσα πτυχιακή εξετάζεται ένα βελτιωμένο φωτοβολταϊκό σύστημα που αποθηκεύει την ενέργεια σε επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές οξειδοαναγωγικής δράσης.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή ο τρόπος δημιουργίας ηλεκτρικού ρεύματος από την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στα ηλιακά κύτταρα. Δίνονται επίσης στοιχεία για τα είδη των ηλιακών κυττάρων που υπάρχουν, και το πως συγκροτείται μια Φ/Β συστοιχία από αυτές τις στοιχειώδεις μονάδες. Τέλος γίνεται αναφορά στα μέρη μιας Φ/Β εγκατάστασης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια εκτεταμένη παρουσίαση μιας νέας τεχνολογίας επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών που ονομάζονται οξειδοαναγωγικοί συσσωρευτές. Αναφέρονται τα πλεονεκτήματά τους και αναλύεται σε μεγάλο εύρος η απόδοσή τους και τα χαρακτηριστικά τους δεδομένου ότι δεν είναι γνωστοί στο ευρύ κοινό. Τέλος γίνεται μια σύγκριση μεταξύ αυτών και των συμβατικών συσσωρευτών μολύβδου.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται σε μια εφαρμογή και θεωρείται το βασικότερο στην παρούσα εργασία. Πρόκειται για ένα Πάρκο Κεραιών στη θέση Αέρας του όρους Πάρνηθα, του οποίου τα συστήματα πρώτου τομέα προτεραιότητας που απαιτούν αδιάλειπτη παροχή ενέργειας θα υποστηριχθούν ενεργειακά από ένα υβριδικό Φ/Β σύστημα. Σε αυτό το σημείο μελετώνται τρία σενάρια υπολογισμού της Φ/Β εγκατάστασης. Στο πρώτο εξετάζεται η απόδοση του συστήματος με 2 κλίσεις των συλλεκτών κατά τη διάρκεια του έτους, στο δεύτερο εξετάζεται η περίπτωση της μιας και μοναδικής κλίσης και στο τρίτο γίνεται μια μελέτη βελτίωσης της απόδοσης με μια επαναληπτική μέθοδο εκμεταλλευόμενοι τις μέσες ημερήσιες ανά μήνα τιμές του φορτίου και της ηλιακής ακτινοβολίας.

Στη συνέχεια ακολουθεί το τέταρτο κεφάλαιο, στο οποίο παρουσιάζεται η οικονομοτεχνική ανάλυση του έργου. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κόστους του συστήματος βασίζεται στη διάρκεια ζωής του, λαμβάνοντας υπόψη τη χρονική αξία του χρήματος.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας παραθέτουμε ορισμένες σκέψεις και συμπεράσματα για την μελέτη που εκπονήσαμε.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ

### 1.1 Εισαγωγή

Ο ήλιος απελευθερώνει ενέργεια από την οποία εκτιμάται ότι αυτή που φτάνει στη γη στη διάρκεια, ενός έτους, είναι 10.000 φορές περισσότερη από την ενέργεια που χρησιμοποιεί σήμερα η ανθρωπότητα. Αν μπορούσαμε να εκμεταλλευτούμε ένα μικρό μόνο ποσοστό από την ενέργεια αυτή, θα είχαμε λύσει το ενεργειακό πρόβλημα της ανθρωπότητας. Ένα από τα κύρια προβλήματα της ηλιακής ενέργειας είναι το ότι αυτή φτάνει στη γη με πολύ μικρή πυκνότητα. Έτσι, π.χ. με τον ήλιο στο ζενίθ, μόνο περίπου  $1 \text{ kWatt/m}^2$  πέφτει στην επιφάνεια της γης, στη στάθμη της θάλασσας.

Στην πράξη το ηλιακό φως εκπέμπεται ουσιαστικά κατά μικρά πακέτα ενέργειας που λέγονται φωτόνια. Τα φωτόνια περιέχουν διαφορετικά ποσά ενέργειας ανάλογα με το μήκος κύματος του ηλιακού φάσματος. Το γαλάζιο χρώμα ή το υπεριώδες π.χ. έχουν περισσότερη ενέργεια, από το κόκκινο ή το υπέρυθρο. Όταν λοιπόν τα φωτόνια προσκρούσουν σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο (που είναι ουσιαστικά ένας «ημιαγωγός»), άλλα ανακλώνται, άλλα το διαπερνούν και άλλα απορροφώνται από το φωτοβολταϊκό. Αυτά τα τελευταία φωτόνια είναι που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Τα φωτόνια αυτά αναγκάζουν τα ηλεκτρόνια, μιας κατάλληλης δομής υλικού να μετακινηθούν σε άλλη θέση και ως γνωστόν ο ηλεκτρισμός δεν είναι τίποτε άλλο παρά κίνηση ηλεκτρονίων. Σ' αυτήν την απλή αρχή της φυσικής λοιπόν βασίζεται μια, από τις πιο εξελιγμένες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού στις μέρες μας.

Με τη χρήση της ηλιακής ενέργειας καλύπτουμε την ανάγκη σε ενέργεια και την ανάγκη να προστατέψουμε το περιβάλλον. Κάθε kWh που παράγεται από τον ήλιο ή από άλλες ήπιες πηγές ενέργειας συνεπάγεται την αποφυγή της έκλυσης ενός τουλάχιστον κιλού διοξειδίου τον άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Η στροφή στις καθαρές πηγές ενέργειας αποτελεί τη μόνη διέξοδο για την αποτροπή των κλιματικών αλλαγών που απειλούν σήμερα τον πλανήτη.

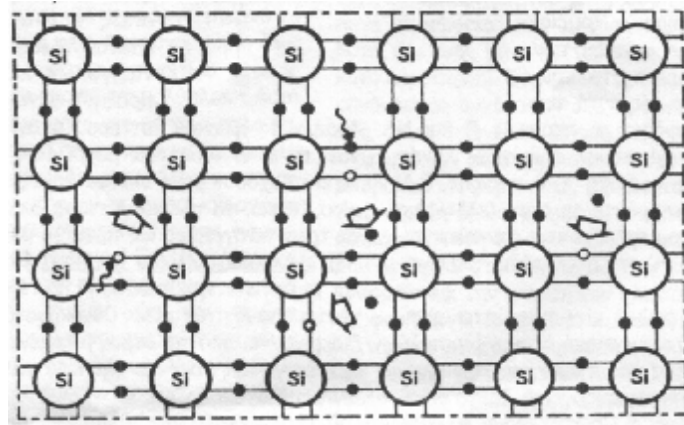
Όσον αφορά το κόστος της ηλιακής ενέργειας, στην περίπτωση που το κριτήριο είναι αυστηρά οικονομικό τότε η απάντηση είναι πως άλλοτε συμφέρει και άλλοτε όχι. Η ηλιακή ενέργεια είναι πιο συμφέρουσα στα νησιά όπου η παραγωγή ηλεκτρισμού από συμβατικές πηγές είναι ιδιαίτερα ακριβή. Όμως προφανώς τα κριτήρια δεν πρέπει να είναι μόνο οικονομικά. Στην καθημερινή μας ζωή κάνουμε επιλογές που δεν υπολογίζουν ούτε το κόστος ούτε το χρόνο απόσβεσης. Όταν επιλέγουμε π.χ. ένα ακριβότερο καταναλωτικό αγαθό σε σχέση με ένα φθηνότερο που δεν ικανοποιεί το γούστο μας, το κριτήριο είναι αισθητικό και όχι οικονομικό.

### 1.2 Φωτοβολταϊκά Κύτταρα

Τα Φ/Β κύτταρα (PV cells) είναι ενώσεις p-n υπό μορφή λεπτών δίσκων, τετράγωνων, εξάγωνων ή και οκτάγωνων πλακετών.

Τα Φ/Β κύτταρα αξιοποιούν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο κατά το οποίο έχουμε την ανάπτυξη μιας διαφοράς δυναμικού (τάσης) μεταξύ των ακροδεκτών του Φ/Β κυττάρου η οποία αντιστοιχεί στην ορθή πόλωση της διόδου p-n όταν προσπίπτει φως (φωτόνια) στην επιφάνειά του.

Το υλικό που χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά για την παραγωγή τάσης στα φωτοβολταϊκά κύτταρα είναι το πυρίτιο. Το καθαρό (κρυσταλλικό) πυρίτιο είναι ημιαγωγός, ένας κρύσταλλος δηλαδή όπου τα άτομά του έχουν κανονική γεωμετρική διάταξη στο χώρο και ενώνονται με χημικούς δεσμούς. Με την παροχή ενέργειας π.χ. με την πρόσπτωση φωτός, μπορούν να αποσπασθούν ηλεκτρόνια από τα άτομα. Για το πυρίτιο, το έργο εξαγωγής ηλεκτρονίων από τα άτομα είναι περίπου 1.2 eV ( $5 \times 10^{26}$  kWh).



Σχήμα 1.1: Δομή του κρυστάλλου πυριτίου

Η ενέργεια ενός φωτονίου εξαρτάται από το χρώμα του, ή αλλιώς από το ισοδύναμο μήκος κύματος του φωτονίου. Όσο μικρότερο είναι αυτό το μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη η ενέργεια του φωτονίου. Για παράδειγμα, τα ιώδη (μοβ) φωτόνια έχουν περισσότερη ενέργεια από τα κόκκινα. Η συνολική ισχύς της ακτινοβολίας υπολογίζεται από τον αριθμό των φωτονίων, που φθάνουν στην επιφάνεια συλλογής τους στη μονάδα του χρόνου, επί την ενέργεια ενός φωτονίου (για μονοχρωματική ακτινοβολία). Όταν απορροφάται ένα φωτόνιο, η ενέργειά του μεταβιβάζεται σε ένα μόνο ηλεκτρόνιο, άσχετα με την ποσότητά της. Το μόνο κριτήριο για την απορρόφηση αυτής της ενέργειας είναι να είναι ίση ή μεγαλύτερη της ενέργειας διέγερσης και εν προκειμένω εξαγωγής του ηλεκτρονίου.

Τα ηλιακά κύτταρα δεν κατασκευάζονται από καθαρό πυρίτιο. Το βασικό κρυσταλλικό υλικό έχει νοθευτεί σκόπιμα, δηλαδή ξένα άτομα που έχουν ή ένα ηλεκτρόνιο λιγότερο από το πυρίτιο στην εξωτερική στοιβάδα τους (βόριο ή αλουμίνιο για νοθεία τύπου p) ή ένα περισσότερο (φώσφορος ή αρσενικό για νοθεία τύπου n). Προκαλείται έτσι διαταραχή της κατανομής των χημικών (ομοιοπολικών) δεσμών μεταξύ των γειτονικών ατόμων στο κρυσταλλικό πυρίτιο. Με αυτή την κατανομή και εφόσον οι περιοχές p και n συνορεύουν, η πρόσπτωση φωτονίων ικανής ενέργειας στην περιοχή της επαφής p-n αποδεσμεύει ηλεκτρόνια και οπές (ελλείψεις ηλεκτρονίων) που συλλέγονται σαν ηλεκτρικά φορτία (-) και (+) στα ηλεκτρόδια του ηλιακού κυττάρου.

### 1.2.1 Απόδοση των Φ/Β κυττάρων

Το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου είναι περίπου 1,1 eV και επειδή τα 2/3 των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας έχουν ενέργεια μεγαλύτερη των 1,1 eV, με θεωρητικούς υπολογισμούς βρίσκεται ότι ο μεγαλύτερος θεωρητικός βαθμός απόδοσης των κυττάρων του πυριτίου είναι της τάξης του 22%, ενώ οι εμπορικές μορφές Φ/Β κυττάρων σήμερα έχουν βαθμό απόδοσης της τάξης του 15%. Αυτή η απόδοση δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από το πόσο πλούσια σε φωτόνια είναι η ακτινοβολία με ευνοϊκή ενέργεια για το ενεργειακό

διάκενο του Φ/Β κυττάρου, δηλαδή δεν εξαρτάται μόνο από την ισχύ της ακτινοβολίας αλλά και από την ενέργεια των φωτονίων της.

Το ηλεκτρικό ρεύμα που προκύπτει, από ενεργειακή άποψη εκμεταλλεύεται ένα πολύ μικρό ποσοστό της προσπίπτουσας στο ηλιακό κύτταρο φωτεινής ενέργειας. Τούτο οφείλεται σε δύο λόγους:

- 1) Μόνο το 50% κατά μέγιστο, της ηλιακής ενέργειας του ηλιακού φάσματος μπορεί να αξιοποιηθεί από τα υπάρχοντα ηλιακά κύτταρα.
- 2) Η απόδοση περιορίζεται από παράγοντες όπως η ανάκλαση, η επανασύνδεση ηλεκτρονίων οπών κλπ. Στην πράξη, η συνολική απόδοση ενός ηλιακού κυττάρου σπάνια ξεπερνάει το 16%. Αποδόσεις μέχρι 40% μπορούν να επιτευχθούν μόνο υπό συνθήκες εργαστηρίου.

### 1.2.2 Τύποι Φ/Β κυττάρων

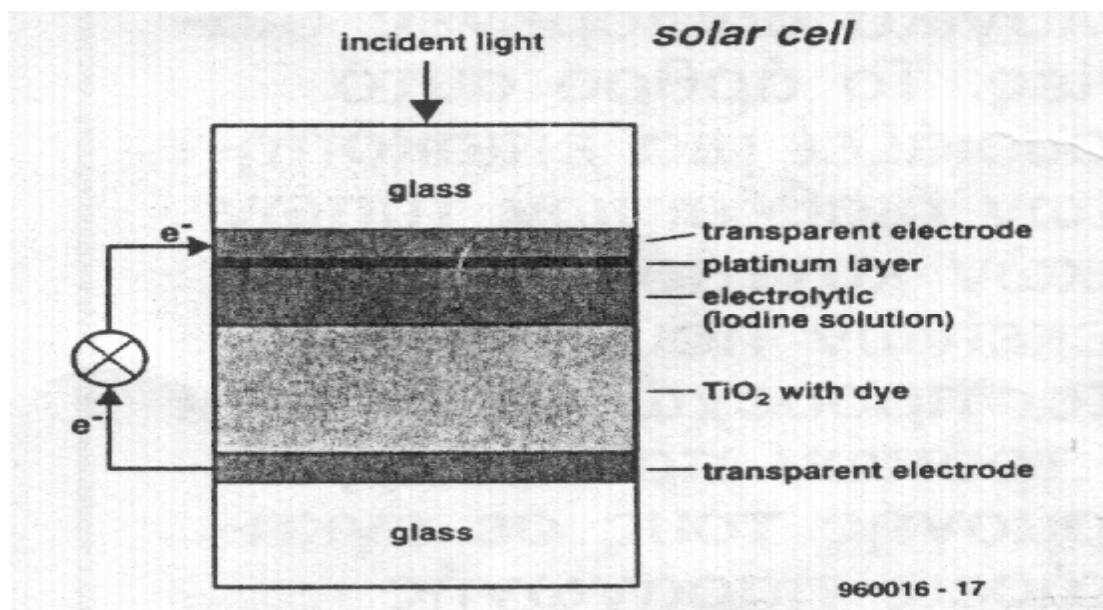
Γενικά, τα ηλιακά κύτταρα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ως προς το υλικό τους:

- 1) **Μονοκρυσταλλικού πυριτίου**, που έχουν και τη μεγαλύτερη απόδοση (12 – 15%). Παράγονται από λεπτές φέτες μονοκρυστάλλου και διακρίνονται από τις στρογγυλεμένες ή σπασμένες γωνίες τους και την λεία γαλαζοπράσινη επιφάνειά τους.
- 2) **Πολυκρυσταλλικού πυριτίου**, που παράγονται από πυρίτιο που κόβεται κατά τμήματα. Με την ελεγχόμενη ψύξη αυτών των τμημάτων δημιουργούνται μεγάλες κρυσταλλώσεις στη δομή του, με κάθετο προσανατολισμό ως προς την επιφάνεια. Μετά την κοπή σε φέτες, η επιφάνεια είναι σαν οπάλιο. Τα πολυκρυσταλλικά κύτταρα μπορούν να θεωρηθούν σαν παράλληλη διάταξη μονοκρυστάλλων. Η απόδοσή τους είναι λίγο μικρότερη (10 – 13%).
- 3) **Άμορφου πυριτίου**, που είναι το ευρύτερα χρησιμοποιημένο υλικό για ηλιακά κύτταρα. Αποτελούνται από monosilane ( $\text{SiH}_4$ ) που έχει αναπτυχθεί σε πολύ λεπτά στρώματα πάνω σε μια γυάλινη επιφάνεια. Η παραγωγή τους είναι απλή και οικονομικά αποδοτική. Το στρώμα του πυριτίου είναι εντελώς άμορφο, δηλαδή δεν έχει πλέον κρυσταλλική δομή. Σαν αποτέλεσμα, η απόδοση είναι το πολύ 7%. Εντούτοις, τα κύτταρα άμορφου πυριτίου έχουν εξαπλωθεί σε πολλές εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης (ρολόγια χεριού, υπολογιστές τσέπης) κυρίως επειδή είναι χαμηλού κόστους. Υπάρχει ένα πρόβλημα μακροχρόνιας σταθερότητας, επειδή σε αντίθεση με τα προηγούμενα δύο είδη, η απόδοσή τους υποβαθμίζεται με τον χρόνο, αν και τώρα πλέον όχι τόσο γρήγορα όσο παλαιότερα.

Το κύριο μειονέκτημα των ηλιακών κυττάρων είναι ότι η καθαρότητα του χρησιμοποιημένου πυριτίου πρέπει να είναι υψηλού βαθμού. Αυτό αποτελεί τροχοπέδη στην εκμετάλλευσή του αν και οι πηγές της πρώτης ύλης είναι πρακτικά ανεξάντλητες. Εκτός αυτού, το πυρίτιο δεν είναι τοξικό, είναι οικολογικά καθαρό και επεξεργάζεται εύκολα. Αναφορικά με την καθαρότητά του, η εσκεμμένη νόθευση δεν ξεπερνά το 1ppb (1 ξένο άτομο σε 1 δισεκατομμύριο άτομα πυριτίου). Η παραγωγή πυριτίου τέτοιας καθαρότητας είναι ακριβή και πολύπλοκη. Αυτό έχει αντίκτυπο όχι μόνο στο κόστος αλλά και στον μικρό όγκο της παραγωγής καθαρού κρυσταλλικού πυριτίου. Για παράδειγμα, ένας σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 1 Giga – Watt θα απαιτούσε το  $\frac{1}{4}$  της παγκόσμιας παραγωγής πυριτίου. Έτσι παρόλο ότι το πυρίτιο είναι σχεδόν ανεξάντλητη σαν πρώτη ύλη και παρόλο ότι δεν είναι τοξικό και επεξεργάζεται εύκολα η χρήση του περιορίζεται από την καθαρότητα του κρυστάλλου.

### 1.3 Το κύτταρο Φωτοσύνθεσης

Πριν τρία χρόνια περίπου ο καθηγητής Graetzel, ένας ερευνητής του Τεχνικού Πανεπιστημίου της Λωζάννης, πρότεινε ένα ηλιακό κύτταρο που δεν βασίζεται στο πυρίτιο για την μετατροπή της ενέργειας. Αντ' αυτού χρησιμοποιεί για την ενεργειακή μετατροπή μια φωτοσυνθετική μεμβράνη, ακριβώς όπως κάνουν τα φυτά! Από το περσινό καλοκαίρι, οι ερευνητές στο Ινστιτούτο Εφαρμοσμένων Φωτοβολταϊκών (Institute for Applied Photovoltaic-INAP), στο Gelsenkirchen της Γερμανίας, ασχολούνται με πειράματα που θα επιτρέψουν την μαζική παραγωγή αυτής της διάταξης μετατροπής (παραγωγής) ενέργειας. Το κύτταρο, το οποίο αναφέρεται επίσης σαν χλωροφύλλη, βαφή ή νάνο-ηλιακό κύτταρο, βασίζεται στη φθηνή ημιαγώγιμη βαφή διοξείδιο του τιτανίου ( $\text{TiO}_2$ ) η οποία τυπώνεται, σε μορφή πάστας και κατόπιν στερεοποιείται σε ένα γυάλινο φορέα και εμβαπτίζεται σε διάλυμα ρουθηνίου (ruthenium dye) που καλύπτει τα σωματίδια του διοξειδίου του τιτανίου με ένα μονομοριακό στρώμα. Ένας υγρός ηλεκτρολύτης, (iodine/iodide) ψεκάζεται επάνω στην όλη διάταξη, που στη συνέχεια καλύπτεται με ένα φύλλο πλατίνας, που δρα σαν καταλύτης. Τέλος, η κατασκευή γίνεται «σάντουιτς», προσθέτοντας άλλο ένα γυάλινο στρώμα, με επίσης διαφανές ηλεκτρόδιο.



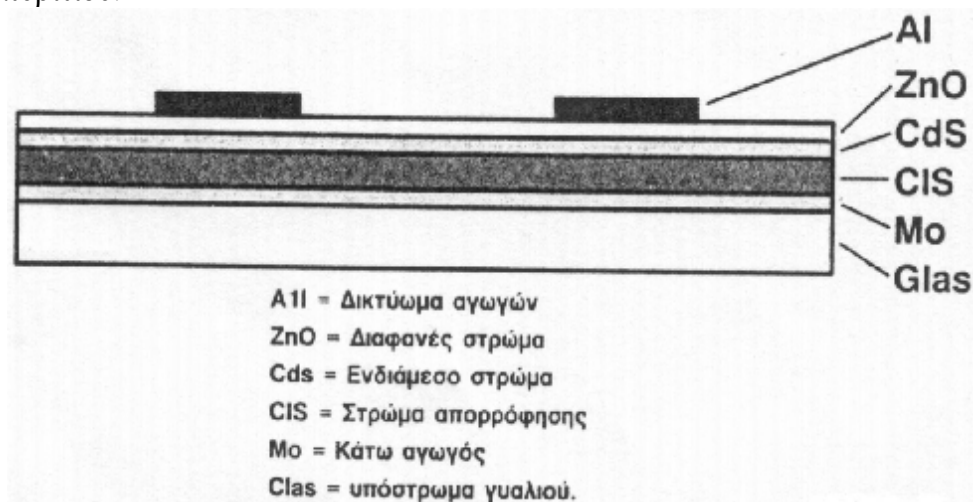
Σχήμα 1.2: Δομή ενός κυττάρου

Ας σημειωθεί ότι πειράματα με χλωροφύλλη έχουν αρχίσει να γίνονται από τη δεκαετία του '70. Το φως ενεργοποιεί το μονομοριακό στρώμα ρουθηνίου, προκαλώντας έκλυση ηλεκτρονίων που συλλαμβάνονται από το διοξείδιο του τιτανίου. Οι «οπές» που δημιουργήθηκαν από τα εκλυθέντα ηλεκτρόνια καταλαμβάνονται από άλλα, προερχόμενα από το διάλυμα iodine, που με τη σειρά του προσελκύει ηλεκτρόνια από το υπερκείμενο διαφανές ηλεκτρόδιο. Κατά συνέπεια, η απορρόφηση του φωτός και ο διαχωρισμός των ηλεκτρικών φορέων γίνονται σε διαφορετικά στρώματα. Επειδή δεν υπάρχουν «οπές» στο στρώμα διοξειδίου του τιτανίου, δεν συμβαίνει επανασύνδεση φορέων. Έτσι τα ηλεκτρόνια ταξιδεύουν ελεύθερα προς το διαφανές ηλεκτρόδιο. Η πορεία για τη μαζική παραγωγή των κυττάρων χλωροφύλλης έχει πολλά εμπόδια και αποτυχίες. Για παράδειγμα, η βαφή που χρησιμοποιείται μέχρι τώρα (η καρδιά του στοιχείου) είναι κάπως ασταθής και αποσυντίθεται σε μια δεκαετία. Αν και τα παράγωγα ρουθηνίου και οσμίου είναι σπάνια, ακριβά και

απαιτούνται σε μεγάλη καθαρότητα, η ποσότητά που απαιτείται είναι ευτυχώς ελάχιστη ανά στοιχείο. Ένα δεύτερο πρόβλημα είναι το διάλυμα ιωδίνης (iodine), που είναι πολύ επιθετικό και τείνει να οξειδώσει τα συγκολλητικά και πλαστικά μέρη. Παρά τα προβλήματα αυτά, οι ερευνητές του INAP ελπίζουν να μπορούν να παράγουν τα πρώτα πρωτότυπα αυτών των κυττάρων με επιφάνεια 100 τετρ. εκατοστών και συνολική απόδοση 10% περίπου μέχρι το τέλος αυτού του χρόνου. Αν αυτός ο στόχος επιτευχθεί, η πρώτη μαζική παραγωγή προβλέπεται μέσα στο έτος 2005.

## 1.4 Το κύτταρο CIS

Μία ακόμη εναλλακτική λύση προς το φωτοβολταϊκό κύτταρο πυριτίου βασίζεται σε τεχνολογία χαλκού – ινδίου – σεληνίου ή χαλκού – ινδίου – σουλφιδίου (CIS). Η ανάπτυξη αυτών των κυττάρων έχει φτάσει στο σημείο όπου η Siemens ετοιμάζεται ήδη για μαζική παραγωγή. Να σημειωθεί όμως ότι τα κύτταρα CIS δεν είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Τα παράγωγα του σεληνίου είναι τοξικά, και το ίνδιο είναι τοξικό, σπάνιο και ακριβό. Στο Ινστιτούτο Hahn Meitner (HMI) του Βερολίνου έχει αρχίσει έρευνα με σκοπό την αντικατάσταση του σεληνίου από θείο και του ινδίου από μολυβδαίνιο – σουλφίδιο, βολφράμιο – σουλφίδιο και βολφράμιο – σελήνιο. Τα κύτταρα CIS έχουν θεωρητική απόδοση 28%, αλλά στην πράξη μόνο 12%. Τα βιομηχανικά παραγόμενα κύτταρα μπορεί να φθάσουν απόδοση 16% περίπου, οπότε γίνονται εφάμιλλα των μονοκρυσταλλικών κυττάρων πυριτίου.



Σχήμα 1.3: Δομή ενός κυττάρου CIS

Οι μέθοδοι παραγωγής είναι απλές και γνωστές από την εναπόθεση (από εξάχνωση) στρωμάτων πάνω σε γυαλί. Ένα στρώμα μολυβδαίνιου εναποτίθεται σε ένα φορέα από γυαλί, σχηματίζοντας έτσι το πίσω ηλεκτρόδιο. Το πρόσθιο ηλεκτρόδιο αποτελείται από διαφανές, αγωγίμο οξείδιο ψευδαργύρου. Στη συνέχεια έρχεται ένα Φώτο – ενεργό στρώμα CIS αποτελούμενο από μερικές λεπτές επικαλύψεις ινδίου, χαλκού και τελικά, θείου. Με τη στερέωση όλων αυτών δημιουργείται το όλο κρυσταλλικό, Φώτο – ενεργό και απορροφητικό σύστημα του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Χάρη στη μεγάλη τους απορροφητικότητα, τα κύτταρα CIS μπορούν να κρατηθούν πολύ λεπτά. Το υλικό είναι πολύ σταθερό και φασματικά συμβατό με το φως. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των κυττάρων CIS είναι ότι το στρώμα CIS πρέπει να καλυφθεί από ένα στρώμα πολύ τοξικού καδμίου – σουλφιδίου. Το υλικό αυτό αναπτύσσει το ηλεκτρικό πεδίο που είναι απαραίτητο για την αποδέσμευση των

ηλεκτρονίων. Όταν οι ερευνητές καταφέρουν να βρουν ένα υποκατάστατο, ή να νοθεύουν το ίδιο το στρώμα CIS, τα κύτταρα CIS θα ανταγωνίζονται σοβαρά τα κύτταρα πυριτίου. Η μαζική παραγωγή κυττάρων επιφάνειας ενός τετραγωνικού μέτρου δεν είναι πάντως πρόβλημα, σε καμία περίπτωση.

## 1.5 Από το κύτταρο στο Φ/Β πλαίσιο

Ένα μόνο ηλιακό κύτταρο παρέχει περίπου 0.6 V τάσης, ανεξάρτητα από το μέγεθός του. Τα κύτταρα από άμορφο πυρίτιο παρέχουν λίγο μεγαλύτερη τάση, 0.8V. Υπό κανονικές συνθήκες, δηλαδή με το τυπικό μέγεθος ενός ηλιακού κυττάρου (10 X 19 cm) η ισχύς εξόδου είναι σχετικά χαμηλή, μόλις 1.2 έως 1.4 W. Συνεπώς, για την παροχή μεγαλύτερων τάσεων ή ποσών ισχύος, περισσότερα ηλιακά κύτταρα πρέπει να συνδέονται συνήθως σε σειρά ώστε να αποτελέσουν τα πλαίσια (panels). Για την αύξηση της τάσης εξόδου, τα ηλιακά κύτταρα συνδέονται σε σειρά, όπως οι μπαταρίες σε ένα φακό χειρός. Οι συμβατικές συστοιχίες ηλιακών κυττάρων παρέχουν τάση εξόδου χωρίς φορτίο μεταξύ 15 και 22 V, πράγμα που σημαίνει ότι αποτελούνται από περίπου 40 ηλιακά κύτταρα σε σύνδεση σειράς.

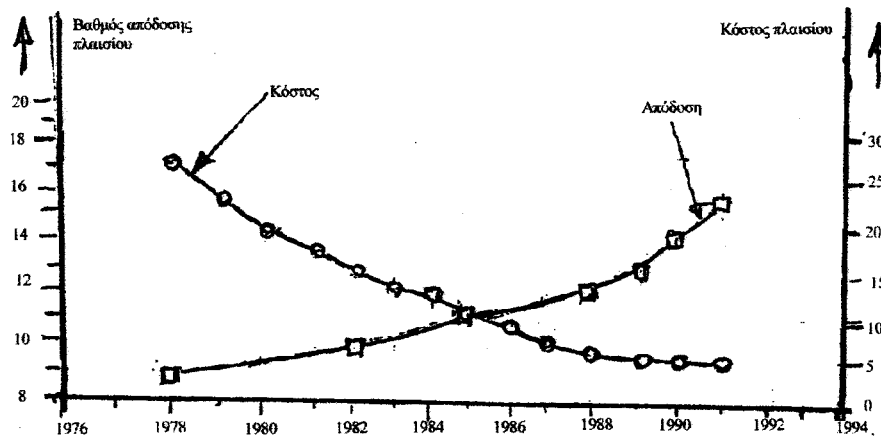
Η επιφάνεια της συστοιχίας καθορίζει το ρεύμα εξόδου, που συνήθως αναφέρεται σαν ρεύμα βραχυκύκλωσης της εξόδου, (δηλαδή με τάση εξόδου 0 V). Οι διαθέσιμοι τύποι συστοιχιών ποικίλουν από μικρές διατάξεις άμορφου πυριτίου με ρεύμα εξόδου της τάξης των  $\mu\text{A}$ , μέχρι διατάξεις με επιφάνεια ενός τετραγωνικού μέτρου, με μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, που παρέχουν ρεύμα βραχυκύκλωσης εξόδου περισσότερο από 5 A. Τελείως ίδιες συστοιχίες μπορούν να συνδεθούν παράλληλα, για την αύξηση του ρεύματος εξόδου. Σε αυτή την περίπτωση, η τάση εξόδου είναι αυτή του ενός μόνο κυττάρου (ή συστοιχίας, κατά περίπτωση). Τέλος, είναι δυνατόν να γίνει συνδυασμός συνδέσεων σειράς και παράλληλης.

Θεωρητικά, με 20 ηλιακά κύτταρα σε σειρά μπορούμε να φορτίσουμε μια μπαταρία 12 V. Στην πράξη όμως, χρειάζονται κάπως περισσότερα. Η τάση εξόδου ενός ηλιακού κυττάρου δεν είναι σταθερή. Μειώνεται με τη θερμοκρασία και την μείωση του ηλιακού φωτός. Το φαινόμενο αυτό είναι εμφανέστερο στα κύτταρα πολυκρυσταλλικού πυριτίου, από ότι στα αντίστοιχα του μονοκρυσταλλικού. Ως εκ τούτου, πριν σχεδιαστεί μια εγκατάσταση ηλιακών κυττάρων θα πρέπει να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά της, ανά κύτταρο ή συστοιχία.

Για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης, το σύστημα παροχής ηλιακής ισχύος πρέπει να λειτουργεί στο σημείο μέγιστης ισχύος (MPP, Maximum Power Point), όπου η παρεχόμενη ηλεκτρική ισχύς εξόδου μεγιστοποιείται. Το σημείο MPP μεταβάλλεται με την ένταση του φωτισμού και τη θερμοκρασία των ηλιακών κυττάρων.

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σχηματίζουν μια συμμετρική υαλοκατασκευή: Τηκόμενο συγκολλητικό φύλλο, ηλιακά κύτταρα, τηκόμενο συγκολλητικό φύλλο, γυαλί. Το πλαίσιο στήριξης της διάταξης είναι από ανοξείδωτο ατσάλι .

Στο παρακάτω σχέδιο απεικονίζεται χρονολογικά η αξιόλογη εξέλιξη των Φ/Β σχετικά με την αύξηση της αποδοτικότητας τους και την μείωση του κόστους παραγωγής τους.



#### Η εξέλιξη των εμπορικών Φ/Β πλαισίων

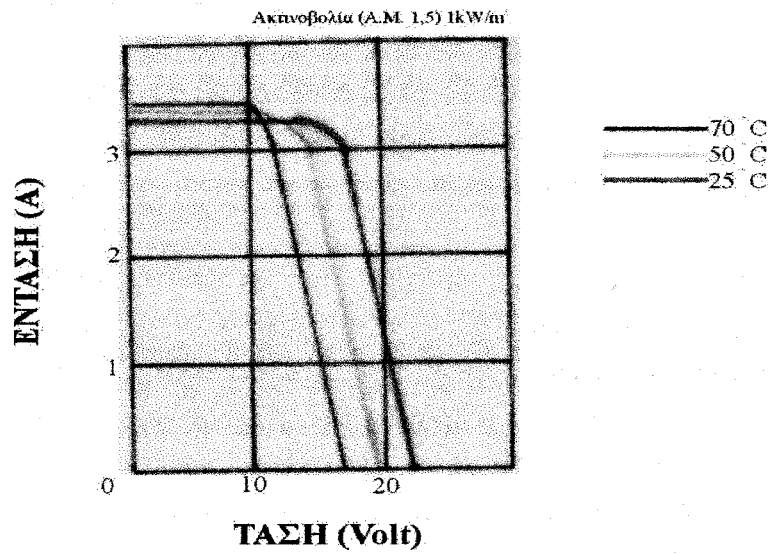
Σχήμα 1.4: Η εξέλιξη των εμπορικών Φ/Β πλαισίων ως προς την απόδοση

### 1.5.1 Χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων

Ενδεικτικά παρατίθενται τα χαρακτηριστικά κάποιων Φ/Β πλαισίων, ενώ άλλες κατηγορίες Φ/Β πλαισίων μπορεί να έχουν μια μικρή απόκλιση ως προς τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους.

Συνήθη φωτοβολταϊκά πλαίσια, αποτελούνται από 36 μονοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα πυριτίου ημιτετραγωνικού σχήματος, διαστάσεων 135 / 110 mm αντίστοιχα, συνδεδεμένα σε σειρά και συναρμολογημένα μεταξύ τους με έλασμα. Χάρη στην υψηλή τους πυκνότητα και τις σχετικά μικρές διαστάσεις τους, τα πλαίσια αυτά είναι ιδιαίτερα πρακτικά για κάθε είδους εφαρμογές. Το παραγόμενο ρεύμα είναι ανάλογο με την ηλιακή ακτινοβολία. Θερμοκρασίες λειτουργίας: -40 έως +95 °C. Προστασία από την υγρασία 100%. Βάρος 8.5/ 5.8 kg. Διακύμανση εξόδου +/-10% Το κάθε πλαίσιο διακρίνεται από το δικό του αύξοντα αριθμό και χαρακτηρίζεται από τα εξής ηλεκτρικά χαρακτηριστικά:

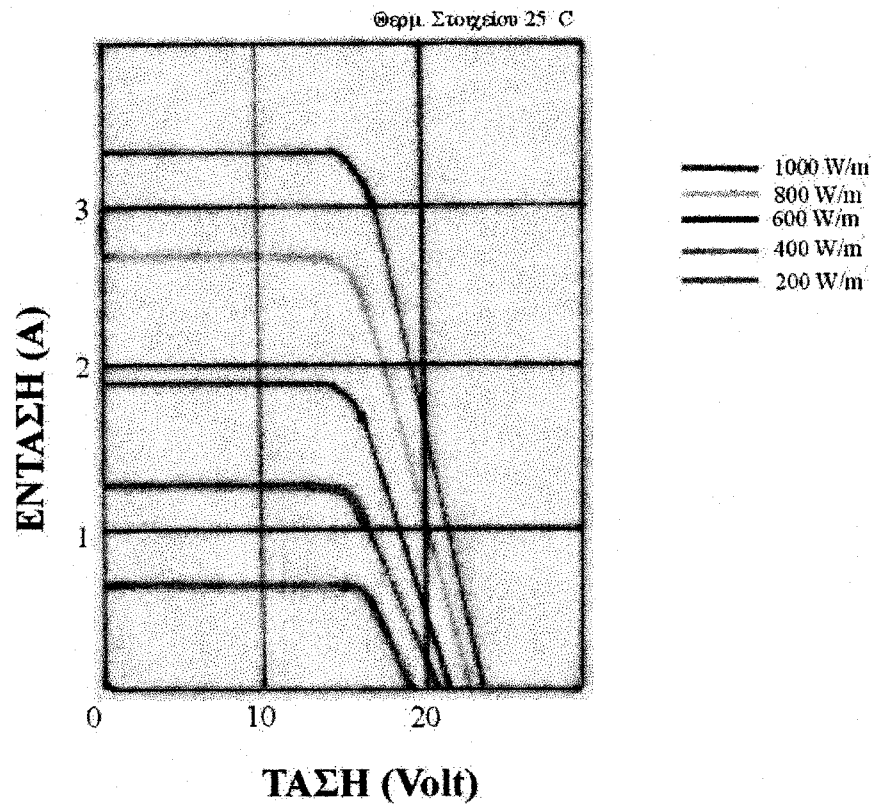
Ισχύς (μέγιστη)	(W)
Ένταση (βραχυκύκλωση)	(A)
Τάση (ανοικτού κυκλώματος)	(V)
Τάση (με μέγιστη ισχύ)	(V)
Ένταση (με μέγιστη ισχύ)	(A)
Ονομ. θερμ. λειτουργίας κυψέλης.	( $^{\circ}C$ )
Διαφορά τάσης / θερμοκρασία.	(mV/ $^{\circ}C$ )



Σχήμα 1.5: Χαρακτηριστική Τάσης – Έντασης για Φ/Β πλαίσια συναρτήσει της θερμοκρασίας στοιχείων.



Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η μεταβολή της έντασης του ρεύματος ως προς την τάση, συναρτήσει της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.



Πηγή: «ΕΝΕΡΓΟΤΕΚ ΕΠΕ»

Σχήμα 1.6: Χαρακτηριστική Τάσης – Έντασης για Φ/Β πλαίσια συναρτήσει της έντασης ηλιακής ακτινοβολίας.

### 1.5.2 Τρόποι στήριξης των Φ/Β πλαισίων και η ρύθμιση της κλίσης

Στις μόνιμες Φ/Β συστοιχίες η στήριξη και η ρύθμιση της κλίσης μπορεί να γίνουν με δύο μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος υλοποιείται με μεταλλικές ή ξύλινες κατασκευές έτσι ώστε η κλίση να είναι δυνατόν να ρυθμίζεται (συνήθως δύο φορές το χρόνο) χειροκίνητα, επεμβαίνοντας κατάλληλα κάθε φορά στην κατασκευή. Η δεύτερη μέθοδος υλοποιείται αυτόματα με ειδικά συστήματα παρακολούθησης του ήλιου (tracking arrays) ως προς ένα ή δύο άξονες..

Κατά την μελέτη της κατασκευής ενός τύπου στήριξης πρέπει να λαμβάνουμε σοβαρά υπόψη μας τις δυσμενέστερες καιρικές συνθήκες (π.χ. ένταση ανέμων, χιονόπτωση, θαλάσσιο περιβάλλον, κλπ.). Οι στηρίξεις των Φ/Β πρέπει γενικά να εξασφαλίζουν:

- α) Άριστη αντοχή στις τοπικές καιρικές συνθήκες.
- β) Εύκολη ρύθμιση της κλίσης των συστοιχιών .
- γ) Άνετη εργασία για τις συνδεσμολογίες των πλαισίων.

- δ) Εύκολη πρόσβαση για τον καθαρισμό της επιφάνειας των πλαισίων, την επιθεώρηση τους και την διεξαγωγή μετρήσεων ελέγχου.
- ε) Άνετο Αερισμό της πίσω επιφάνειάς τους με σκοπό να κρατηθεί η θερμοκρασία τους όσο το δυνατόν χαμηλότερη .

### 1.5.3 Τεχνική Περιγραφή

Τα ηλιακά κύτταρα συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους με ελαστική ταινία. Με τη χρήση της τελευταίας τεχνολογίας στην κατασκευή, επιτυγχάνεται μεγάλη διάρκεια ζωής (τυπικά περισσότερο από 30 χρόνια).

Η όλη κατασκευή του Φ/Β πλαισίου είναι ειδικά σχεδιασμένη για υψηλή αντοχή σε μηχανικές καταπονήσεις και εγκατάσταση σε περιβάλλον δυσμενών κλιματολογικών συνθηκών, αποτελούμενο από «στρώματα» διαφορετικών στρώσεων υλικών (επικαλύψεις), καθένα από τα οποία λειτουργεί προστατευτικά. Τα στοιχεία που συγκροτούν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο ενθυλακώνονται σε λεπτό διαφανές στρώμα EVA. Η εμπρόσθια επιφάνεια καλύπτεται από ενισχυμένο λευκό γυαλί διαύγειας νερού και η οπίσθια με ειδικό φιλμ PVF.

Το μεταλλικό πλαίσιο είναι κατασκευασμένο από ανοδιωμένο κράμα αλουμινίου και περιβάλλει το «φωτοβολταϊκό φύλλο». Μεταξύ των δύο παρεμβάλλεται ελαστικό παρέμβυσμα βουτυλίου και σιλικόνης, προσδίδοντας ελευθερία μικροκινήσεων και προστασία από θερμικές συστολοδιαστολές.

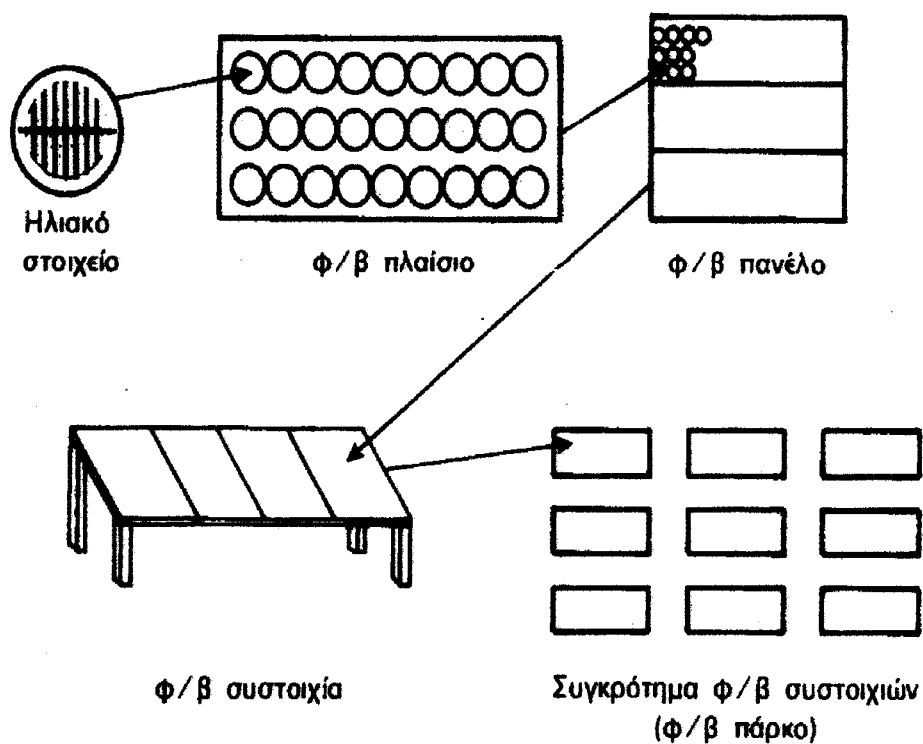
Η όλη κατασκευή είναι στιβαρή και ιδιαίτερα ανθεκτική στην υγρασία, σε ατμόσφαιρα υψηλής περιεκτικότητας σε άλμη, σε δυνατές κρούσεις χαλαζόπτωσης, σε θερμικές καταπονήσεις, στη βροχή, στα χιόνια και στον παγετό, στο θαλασινό αμμόδη άνεμο, στα ραμφίσματα και πατήματα πουλιών και δεν παρουσιάζει σκιάσεις. Επιπλέον αντέχουν σε ταχύτητες ανέμου πάνω από 200 Km / h διατηρώντας έτσι την υψηλή απόδοσή της για πολλά χρόνια.

Συνδέοντας έναν αριθμό πλαισίων, περίπου 3 έως 4, στην ίδια κατασκευή δημιουργούμε το φωτοβολταϊκό πάνελ.

Το πλαίσιο του πάνελ είναι από ανοδιωμένο αλουμίνιο. Το πάνελ καλύπτεται με κρύσταλλο 3 mm πάχους, που παρέχει αποτελεσματική προστασία από περιβαλλοντικές και μηχανικές επιδράσεις. Το κρύσταλλο χαρακτηρίζεται από υψηλή διαφάνεια για άμεση και διάχυτη πρόσπτωση του φωτός. Το πίσω μέρος του πάνελ είναι μόνιμα σφραγισμένο με λευκή Tedlar, που παρέχει άριστη προστασία κατά της διείσδυσης υγρασίας και της σκουριάς από θαλασινό νερό.

## 1.6 Η Φ/Β συστοιχία (PV array)

Σε πολλές εφαρμογές η ισχύς που παρέχει ένα εμπορικό Φ/Β πλαίσιο (36W έως 63W) είναι ανεπαρκής για την κάλυψη των φορτίων, τότε αναγκαζόμαστε να συνδέσουμε πολλά Φ/Β πλαίσια σε σειρά ή παράλληλα ή μικτά, ώστε να επιτύχουμε την επιθυμητή εγκατεστημένη ισχύ της Φ/Β γεννήτριας με ονομαστική τάση 12V, 24V, 48V, ή και υψηλότερη. Στο σχήμα φαίνονται, ένα Φ/Β κύτταρο, ένα Φ/Β πλαίσιο, μια Φ/Β συστοιχία και ένα Φ/Β συγκρότημα.



Σχήμα 1.7: Από το ηλιακό κύτταρο στη συγκρότηση Φ/Β πάρκου

## 1.7 Η Μονάδα αποθήκευσης

Επειδή μπορεί να μην υπάρχει συγχρονισμός προσφοράς της ηλιακής ακτινοβολίας με τη ζήτηση του φορτίου, εκτός από την ηλιακή συστοιχία χρειάζεται και μια διάταξη αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιούνται οι μπαταρίες, που υπάρχουν σε διάφορα σχήματα και δομές. Υπάρχουν μπαταρίες ειδικού τύπου, όπως οι γλωρίου – ψευδαργύρου, οι θείου – σιδήρου, οι λιθίου, οι νικελίου – σιδήρου, οι αργύρου – ψευδαργύρου, οι θείου – νατρίου, ορισμένες από τις οποίες είναι ακόμη υπό ανάπτυξη. Από τους γνωστότερους τύπους είναι οι μπαταρίες μολύβδου, οι NiCd και οι NiMH.

Αυτές οι μπαταρίες διακρίνονται για την πολύ σταθερή χωρητικότητά τους, τις πολύ χαμηλές σχετικά απώλειές τους και τη μακροζωία τους, παρά τις επανειλημμένες φορτοεκφορτίσεις, ενώ η συντήρησή τους δεν έχει μεγάλες απαιτήσεις. Οι πλάκες των μπαταριών μολύβδου για ηλιακές συστοιχίες νοθεύονται με σελήνιο ή ασβέστιο, αντί για το αντιμόνιο των μπαταριών μολύβδου των αυτοκινήτων. Αυτές οι ειδικές μπαταρίες έχουν πολλαπλά επαναλήψιμη λειτουργία υπό βαθιά εκφόρτιση, άριστη απόδοση φόρτισης, μικρό ρεύμα αυτοεκφόρτισης, αντέχουν στις υπερφορτίσεις και στις ολικές εκφορτίσεις και δυστυχώς, είναι ακριβές! Οι μπαταρίες βέβαια μπορούν να συνδεθούν σε σειρά και παράλληλα, εφόσον είναι όλες του ίδιου τύπου, και έχουν την ίδια χωρητικότητα, πολική τάση και κατάσταση φόρτισης.

## 1.8 Ελεγκτές φόρτισης

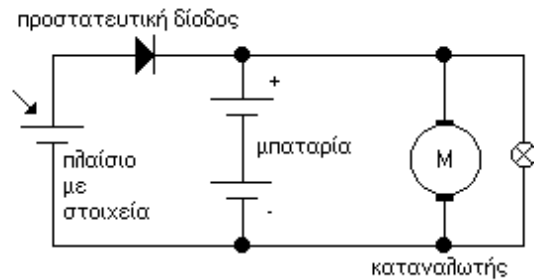
Το τρίτο στοιχειώδες τμήμα σε ένα σύστημα ηλιακής ενέργειας είναι ένας ελεγκτής φόρτισης, που εξασφαλίζει την βελτιστοποιημένη μεταφορά ισχύος από τις συλλέκτριες επιφάνειες προς τις μπαταρίες. Τα απλούστερα ηλιακά συστήματα δεν διαθέτουν καθόλου ελεγκτή φόρτισης. Αντ' αυτού υπάρχει μόνο μια διόδος σε σειρά με τον αγωγό φόρτισης, που προστατεύει τις μπαταρίες από υπερφόρτιση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.8. Η ίδια διόδος αποτρέπει την εκφόρτιση των μπαταριών μέσα από τα ηλιακά κύτταρα, όταν δεν υπάρχει αρκετός φωτισμός για τη διατήρηση της τάσης εξόδου τους. Δυστυχώς η παρεμβολή της διόδου προστασίας εισάγει ενδεχομένως σημαντικές απώλειες, που μπορούν να ελαχιστοποιηθούν χρησιμοποιώντας διόδο Schottky, που έχει τάση ορθής φοράς 0.3 ως 0.4 V και για μεγαλύτερα ρεύματα 0.7 V.

Μία πολύ καλύτερη λύση του προβλήματος είναι ένα ειδικό κύκλωμα προστασίας από την ανάστροφη τάση. Το κύκλωμα βασίζεται σε ένα MOSFET ισχύος, που έχει πτώση τάσης κορεσμού λιγότερη από 0.1 V.

Τα πραγματικά συστήματα ελέγχου είναι τριών ειδών: σειράς, παράλληλα και MPP (μεγιστοποιημένης παροχής ισχύος). Η αρχή λειτουργίας των σταθεροποιητών σειράς είναι η χρησιμοποίηση ενός διακόπτη ή μια σταθεροποιητικής διάταξης (ρυθμιζόμενη αντίσταση ή τρανζίστορ) που παρεμβάλλεται στο δρόμο του ρεύματος και με αυτό τον τρόπο το ρεύμα ελέγχεται ή και διακόπτεται. Ο σταθεροποιητής σειράς απαιτεί πολύ σταθερή τάση τροφοδοσίας, που παρέχεται από τις μπαταρίες. Αν υπάρχει ηλεκτρονόμος στο κύκλωμα, τροφοδοτείται και αυτός από τις μπαταρίες. Ο ηλεκτρονόμος έχει αμελητέα αντίσταση επαφών, αλλά καταναλίσκει ρεύμα. Το τρανζίστορ σαν διακόπτης δεν καταναλίσκει ρεύμα, αλλά έχει υπολογίσιμη τάση κορεσμού, που εισάγει αντίστοιχες απώλειες ισχύος. Εκτός αυτού, το τρανζίστορ ή το FET θα πρέπει να διεγείρεται με σχετικά χαμηλό σήμα οδήγησης. Ο παράλληλος σταθεροποιητής βραχυκυκλώνει ή απλά φορτώνει

την έξοδο της ηλιακής συστοιχίας μέσω ενός τρανζίστορ – διακόπτη, όταν ανιχνεύεται από το σταθεροποιητή υπερβολική τάση εξόδου στα άκρα της μπαταρίας.

Επειδή με αυτή τη σταθεροποίηση η ενέργεια κατασπαταλείται σε θερμότητα, ο παράλληλος σταθεροποιητής χρησιμοποιείται μόνο σε πολύ μικρές διατάξεις ηλιακών κυττάρων. Το πλεονέκτημα του παράλληλου σταθεροποιητή είναι ότι απαιτεί σχεδόν μηδενική ισχύ όταν δεν λειτουργεί. Στην πραγματικότητα, ο σταθεροποιητής δαπανά ενέργεια μόνο όταν περισσεύει από τα ηλιακά κύτταρα.



Σχήμα 1.8 Δίοδος για την προστασία των μπαταριών

Παρόμοια με τον σταθεροποιητή σειράς, και ο παράλληλος έχει μια δίοδο στο κύκλωμα ρεύματος, που και αυτή εισάγει κάποια απώλεια τάσης. Ακόμη και οι φθινοί ελεγκτές φόρτισης που υπάρχουν σήμερα, βασίζονται στη χαρακτηριστική τάσης/ρεύματος. Η λειτουργία τους έχει τρεις φάσεις: Κανονική φόρτιση, μέχρι μια μπαταρία μολύβδου να αρχίσει να παράγει αέρια (14.4 V). Πλήρης φόρτιση (14.9V) και συντηρητική φόρτιση (13.5 έως 13.8V).

Η φάση πλήρους φόρτισης δημιουργήθηκε ειδικά για τα ηλιακά κύτταρα. Με τον ακριβή και προσεκτικό έλεγχο της φάσης μετάβασης από την υγρή στην αέρια κατάσταση των υγρών της μπαταρίας, οι δημιουργούμενες φυσαλίδες στο υγρό της προκαλούν αρκετή ανατάραξη σε αυτό, (αφού συνήθως οι μπαταρίες μένουν ακίνητες). Αυτό επιμηκύνει τη ζωή των μπαταριών. Τα μειονεκτήματα των σταθεροποιητών σειράς και παράλληλου είναι προφανή: Το πλεόνασμα της ενέργειας δαπανάται σαν άχρηστη θερμότητα.

Σε αντίθεση, ο σταθεροποιητής MPP (μεγιστοποιημένης παροχής ισχύος), σχεδιάστηκε για να αξιοποιεί κατά το μέγιστο τη διαθέσιμη ενέργεια από τα ηλιακά κύτταρα. Το μειονέκτημά του είναι η ελαφρά μείωση της απόδοσης και η κυκλωματική πολυπλοκότητά του: Η τάση και το ρεύμα υπολογίζονται συνέχεια για να επιτευχθεί ο αντισταθμιστικός έλεγχος. Στην πράξη, τα πλεονεκτήματα των σταθεροποιητών MPP είναι σημαντικά μόνο σε μεγάλες εγκαταστάσεις ηλιακής ενέργειας, με ισχύ εξόδου τουλάχιστον 200 W. Ένας καλός φορτιστής σε ένα σύστημα ηλιακής ενέργειας θα πρέπει να έχει σύστημα προστασίας από βαθιά εκφόρτιση, που διακόπτει το ρεύμα φορτίου όταν η μπαταρία έχει εκφορτιστεί μέχρι τα 11 V (προκειμένου για μπαταρία 12 V). Η διακοπή γίνεται μέσω ηλεκτρονόμου ή τρανζίστορ.

## 1.9 Συνδέσεις δικτύου και ανεξάρτητα συστήματα

Βασικά διακρίνουμε τρεις τύπους φωτοβολταϊκών συστημάτων: Αυτά που προορίζονται για σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο πόλεως και αυτά που παρέχουν ισχύ σε φορτία χωρίς να υπάρχει σύνδεση με το δίκτυο πόλεως, τα οποία μπορεί να είναι αυτόνομα ή υβριδικά.

Από οικονομική άποψη, τα ηλιακά συστήματα για σύνδεση στο δίκτυο δεν φαίνονται οικονομικά συμφέροντα. Το κόστος μίας kWh (1kW παρεχόμενο επί μία ώρα) είναι περίπου 1€ έως 1,6€ και βέβαια αυτό είναι πολύ μεγαλύτερο από το ακριβότερο τιμολόγιο της ΔΕΗ, που παράγει ηλεκτρισμό από καύση άνθρακα, πετρελαίου και από υδατοπτώσεις. Τα ηλιακά συστήματα που συνδέονται στο δίκτυο είναι οικονομικά βιώσιμα μόνο μέσω μεγάλων κρατικών επιχορηγήσεων και ακόμη και τότε, ο χρόνος απόσβεσης του αρχικού κόστους είναι πολύ μεγάλος.

Η παραγωγή όμως φωτοβολταϊκής ενέργειας δεν έχει ξεπεράσει το πρώιμο στάδιό της. Οι τιμές των ηλιακών πλαισίων και των παρελκόμενων τους, όπως είναι οι ζεύκτες προς το δίκτυο πόλεως, μειώνονται συνεχώς, ενώ η απόδοση των ηλιακών κυττάρων αυξάνει. Βραχυπρόθεσμα δεν προβλέπεται τέλος σε αυτή τη διαδικασία, επειδή νέες τεχνολογίες, όπως η χλωροφύλλη και τα κύτταρα CIS παρέχουν ελπίδες για οικονομικά και αποδοτικά ηλιακά κύτταρα.

Τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα της αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας είναι τεκμηριωμένα πλέον πέρα από κάθε αμφιβολία. Οι ισχυρισμοί ότι η κατασκευή των ηλιακών κυττάρων απαιτεί περισσότερη δαπάνη ενέργειας από αυτή που θα ανακτηθεί από τον ήλιο καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους έχουν αποδειχθεί το ίδιο εσφαλμένοι με τις ιστορίες περί τοξικών αποβλήτων κατά την παραγωγή και την καταστροφή των ηλιακών κυττάρων. Η πραγματικότητα είναι ότι η ηλιακή ενέργεια δεν καταναλίσκει πολύτιμες πηγές ενέργειας, δεν μολύνει το περιβάλλον και δεν συμβάλλει στο φαινόμενο θερμοκηπίου. Εκτός αυτών, συμβάλλει και στην αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας.

Οι ηλιακές συστοιχίες που τροφοδοτούν αποδοτικά με ηλεκτρισμό το υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο είναι σπάνιες και δεν προβλέπεται να αυξηθούν στο άμεσο μέλλον. Για τα επόμενα χρόνια, η συνήθης εφαρμογή των φωτοβολταϊκών θα είναι στα απομονωμένα συστήματα, που τροφοδοτούν ένα ή περισσότερα πραγματικά φορτία. Τέτοια φορτία μπορεί να είναι μια λάμπα στο στέγαστρο του κήπου, ένα ψυγείο στο τροχόσπιτο, ένας πομποδέκτης για καταστάσεις ανάγκης σε μια απομακρυσμένη τοποθεσία, όπως ένα ορειβατικό καταφύγιο ή ένας αναμεταδότης σε δορυφόρο ή για φάρους στα διάφορα ακρωτήρια. Υπάρχουν όμως και αρκετά μεγαλύτερες εφαρμογές όπως γίνεται στη διεθνή βιβλιογραφία ξεκινώντας από τα πιλοτικά προγράμματα έως προγράμματα ιδιωτικής πρωτοβουλίας π.χ. σε Η.Π.Α.

Είναι φανερό ότι τα στοιχεία αυτών των εφαρμογών πρέπει να προβλέπονται για ορισμένες απαιτήσεις τάσης και ρεύματος κατανάλωσης, ενώ θα πρέπει να έχει προνοηθεί η αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος. Η σχεδίαση ενός τέτοιου απομονωμένου συστήματος παροχής ισχύος είναι προσανατολισμένη στο χρήστη, που σημαίνει ότι το όλο σύστημα είναι χρήσιμο ειδικά σε όσους δεν έχουν πρόσβαση στο δίκτυο πόλεως. Σε αυτή την περίπτωση, οι περιβαλλοντικοί λόγοι έρχονται σε δεύτερη μοίρα.

## 1.10 Πλεονεκτήματα, Μειονεκτήματα και Εφαρμογές

Τα πλεονεκτήματα:

Όταν τα Φ/Β εκτεθούν στην ηλιακή ακτινοβολία, μετατρέπουν ένα ποσοστό της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Το πόσο ακριβώς είναι αυτό το ποσοστό εξαρτάται από την τεχνολογία που χρησιμοποιούμε. Ανάμεσα στα λεγόμενα μονοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα (τα πιο συνηθισμένα της αγοράς), στα πολυκρυσταλλικά, και στα άμορφα, τα τελευταία έχουν χαμηλότερη απόδοση είναι όμως σημαντικά φθηνότερα. Η επιλογή του είδους των Φ/Β είναι συνάρτηση των αναγκών μας, του διαθέσιμου χώρου ή ακόμα και της οικονομικής μας ευχέρειας. Όλα τα Φ/Β πάντως παρουσιάζουν πλεονεκτήματα που αφορούν σε:

- Μηδενική ρύπανση.
- Αθόρυβη λειτουργία.
- Αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής (που φθάνει τα 30 χρόνια).
- Απεξάρτηση από την τροφοδοσία καυσίμων για, τις απομακρυσμένες περιοχές.
- Δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες.
- Ελάχιστη συντήρηση.

Τα μειονεκτήματα τους σχετίζονται με το σχετικά υψηλό κόστος αγοράς και την έλλειψη επιδοτήσεων στον καταναλωτή. Παρόλα αυτά, ήδη το κλίμα φαίνεται να αλλάζει. Στη Γερμανία και την Αυστρία π.χ. το κόστος έπεσε κατά 40% σε λίγους μόνο μήνες, ενώ και στη χώρα μας αρχίζουν να δίνονται κάποιες επιδοτήσεις.

Τα Φωτοβολταϊκά είναι κατάλληλα για διάφορες εφαρμογές όπως είναι:

- Ραδιοσταθμούς και αναμεταδότες.
- Συστήματα τηλεπικοινωνιών.
- Ηλεκτροδότηση εξοχικών κατοικιών.
- Ηλεκτροδότηση απομονωμένων οικισμών.
- Δημοτικός φωτισμός.
- Ηλεκτροδότηση εργασιών υπαίθρου.
- Αυτόματα καταγραφικά.
- Φάροι, πλωτοί φανοί, φανοί αεροναυσιπλοΐας.
- Αντλητικά συγκροτήματα, αρδεύσεις, υδρεύσεις.
- Ιχθυοκαλλιέργειες, κτηνοτροφικές μονάδες.
- Γεωργικές εκμεταλλεύσεις.
- Επαγγελματικά αλιευτικά σκάφη.
- Αφαλατώσεις.
- Σιδηροδρομικές σημάνσεις.
- Τροχόσπιτα, κάμπινγκ.
- Σκάφη αναψυχής.
- Ορειβατικά καταφύγια.
- Συστήματα καθοδικής προστασίας.
- Διαφημιστικές φωτιζόμενες πινακίδες.
- Κυκλοφορητές ηλιακών συλλεκτών θερμού νερού.
- Υπαίθριες καντίνες.
- Σταθμούς παραγωγής ισχύος για την ικανοποίηση μεγαλύτερων φορτίων ή και για διοχέτευση στο δημόσιο δίκτυο ηλεκτροδότησης.

Τα Φ/Β μπορούν γενικά να χρησιμοποιηθούν και σε οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή απαιτεί ισχύ της τάξεως μερικών mW έως και MW, είναι όμως πλέον κατάλληλα και οικονομικά αποδεκτά όταν εφαρμόζονται σε απομονωμένες περιοχές και σε χώρες του Τρίτου κόσμου.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

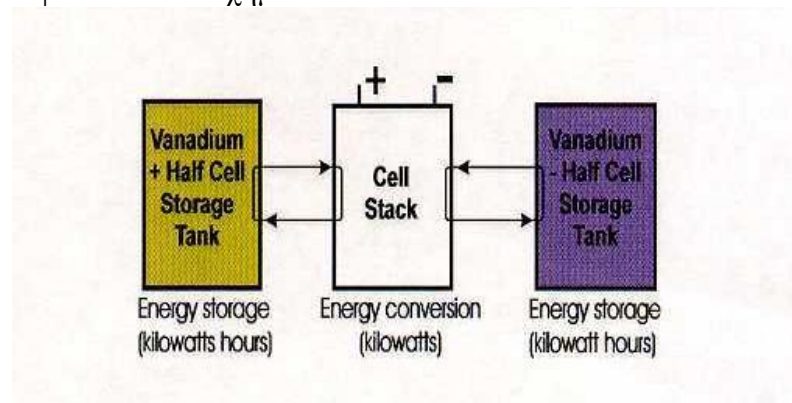
### ΟΞΕΙΔΟΑΝΑΓΩΓΙΚΟΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ ΒΑΝΑΔΙΟΥ

#### 2.1 Εισαγωγή

Η συνεχής και αξιόπιστη ισχύς είναι απαραίτητη σε εφαρμογές όπως οι τηλεπικοινωνίες και η τεχνολογία πληροφοριών, προκειμένου να προστατεύσει το ευαίσθητο και υψηλής τεχνολογίας υλικό που διαθέτουν. Για την παροχή αδιάλειπτης ισχύος έχουν ενσωματώσει την τεχνολογία μπαταριών ώστε να εγγυώνται την ομαλή τροφοδοσία ισχύος σε περίπτωση διακοπής ρεύματος. Σε τέτοια συστήματα χρησιμοποιούνται συνήθως μπαταρίες μολύβδου (lead-acid).

Ένας νέος τύπος μπαταρίας, η οξειδοαναγωγική μπαταρία βαναδίου (VRB) είναι υπό ανάπτυξη στο πανεπιστήμιο της Νότιας Νέας Ουαλίας και παρέχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μπαταρίες. Αυτό το σύστημα αποθηκεύει όλη την ενέργεια σε ηλεκτρολύτες, οι οποίοι ανακυκλώνονται μέσα στη μπαταρία. Οι ηλεκτρολύτες μπορούν να επαναφορτιστούν απεριόριστο αριθμό φορές με ηλεκτρική ενέργεια, ή εναλλακτικά το σύστημα μπορεί να επαναφορτιστεί άμεσα με άδειασμα από τις δεξαμενές του αφόρτιστου ηλεκτρολύτη και εφοδιασμό τους με ήδη φορτισμένο.

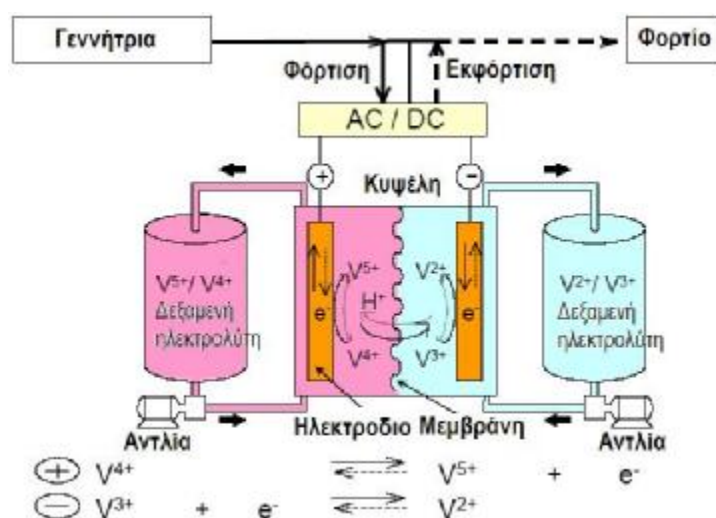
Οι συσσωρευτές Redox, οι οποίοι εναλλακτικά ονομάζονται και συσσωρευτές ροής (flow batteries) είναι ένα ηλεκτροχημικό σύστημα που επιτρέπει στην ενέργεια να αποθηκευτεί σε δύο διαλύματα που περιέχουν διαφορετικά οξειδοαναγωγικά ζεύγη με διαφορετικές ηλεκτροχημικές ιδιότητες. Τα διαλύματα αποθηκεύονται χωριστά το ένα από το άλλο και παρέχουν μια ηλεκτρεγερτική δύναμη ικανή να προκαλέσει τις αντιδράσεις οξειδοαναγωγής που απαιτούνται για να φορτίσουν και να εκφορτίσουν τις κυψέλες. Αντίθετα από τις συμβατικές μπαταρίες, ο συσσωρευτής Redox αποθηκεύει την ενέργεια στα διαλύματα, ούτως ώστε η ικανότητα του συστήματος να καθορίζεται από το μέγεθος των δεξαμενών των ηλεκτρολυτών, ενώ η ισχύς των συστημάτων καθορίζεται από το μέγεθος των κυψελίδων. Ο συσσωρευτής Redox φαίνεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Συσσωρευτής οξειδοαναγωγικής δράσης.

## 2.2 Η οξειδοαναγωγική μπαταρία βαναδίου (VRB)

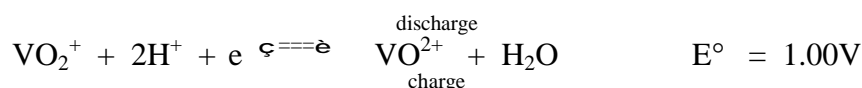
Από όλους τους συσσωρευτές τύπου Redox που είναι υπό ανάπτυξη μέχρι σήμερα, η οξειδοαναγωγική μπαταρία βαναδίου, ή αλλιώς σύστημα VRB, έχει παρουσιάσει μέγιστη χωρητικότητα και υψηλές ενεργειακές αποδοτικότητες πάνω από 80% σε μεγάλες εγκαταστάσεις και μεγάλο κύκλο ζωής. Όπως διευκρινίζεται στο Σχήμα 2.2 η οξειδοαναγωγική μπαταρία ροής βαναδίου χρησιμοποιεί τα οξειδοαναγωγικά ζεύγη  $V^{5+}/V^{4+}$  και  $V^{3+}/V^{2+}$  στο θειικό οξύ ως θετικούς και αρνητικούς ηλεκτρολύτες ημι-κυψελίδων αντίστοιχα.



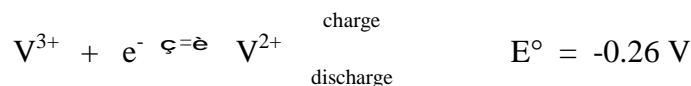
Σχήμα 2.2: Διάταξη συσσωρευτού τύπου Redox με Vanadium.

Η αντίδραση φόρτισης-εκφόρτισης που λαμβάνει χώρα στο οξειδοαναγωγικό κύτταρο βαναδίου είναι:

Στο θετικό ηλεκτρόδιο:

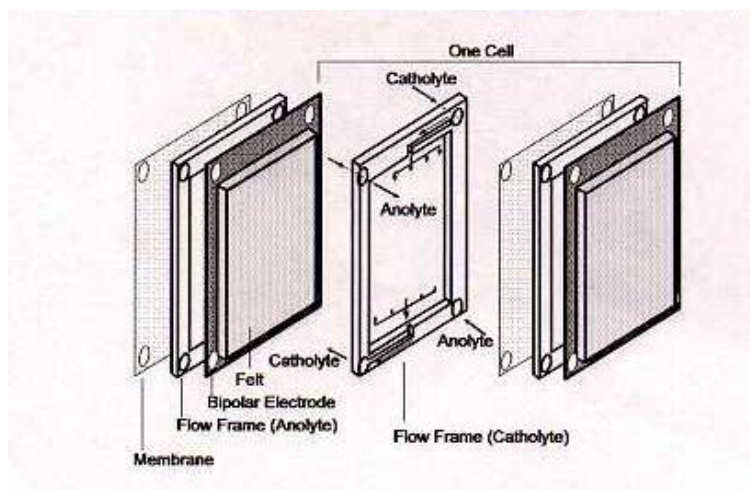


Στο αρνητικό ηλεκτρόδιο:



Το τυποποιημένο δυναμικό μιας κυψέλης  $E^\circ$  είναι 1,26 βολτ για συγκεντρώσεις 1 mole ανά λίτρο και σε 25 °C, αλλά υπό τις πραγματικές συνθήκες, η ανοιχτή τάση κυψέλης είναι 1,4 βολτ σε 50% κατάσταση φόρτισης και 1,6 βολτ σε 100% κατάσταση φόρτισης. Τυπικά, ο ηλεκτρολύτης για την μπαταρία βαναδίου είναι 2 M θειικό άλας βαναδίου σε 2,5 M  $H_2SO_4$ , το θειικό άλας βαναδίου (αρχικά 1M  $V^{3+}$  + 1M  $V^{4+}$  που προέρχεται από τη χημική μείωση ή την ηλεκτρολυτική διάλυση της σκόνης  $V_2O_5$ ).

Τα βασικά συστατικά της οξειδοαναγωγικής κυψέλης φαίνονται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Βασικά συστατικά της μπαταρίας VRB

### 2.3 Πλεονεκτήματα της μπαταρίας βαναδίου για εφαρμογές έκτακτης ανάγκης

Πολλά συστήματα UPS χρησιμοποιούν τις lead-acid μπαταρίες με ή χωρίς βοηθητική γεννήτρια diesel. Λόγω της κακής απόδοσης και του σύντομου κύκλου ζωής της lead-acid μπαταρίας αν χρησιμοποιείται κάτω από το μέγιστο βάθος εκφόρτισης της, υπάρχει μια βαριά εξάρτηση από τη γεννήτρια diesel για την πιο μακροπρόθεσμη ηλεκτρική παραγωγή σε περίπτωση διακοπής ρεύματος. Με ένα χαμηλό κόστος, και μια πιο αποδοτική μπαταρία, εντούτοις, η σημαντική μείωση ή η πλήρης αντικατάσταση της γεννήτριας diesel θα μπορούσε να είναι δυνατή στο εγγύς μέλλον.

Τα περισσότερα από τα πλεονεκτήματα της μπαταρίας βαναδίου οφείλονται στο χωρισμό της ίδιας κυψέλης σε δύο ημι-κυψελίδες ώστε να αποφεύγονται τα προβλήματα της παράλληλης νόθευσης των δύο ηλεκτρολυτών ημι-κυψελίδων κατά τη διάρκεια μακροπρόθεσμης χρήσης. Αυτό σημαίνει ότι οι ηλεκτρολύτες έχουν μια απεριόριστη ζωή, πράγμα που σημαίνει και λιγότερα τοξικά απόβλητα.

Τα σημαντικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της μπαταρίας βαναδίου για αυτήν την εφαρμογή είναι:

- Χαμηλό κόστος για μεγάλες ικανότητες αποθήκευσης. Το κόστος ανά kWh μειώνεται όσο αυξάνεται η χωρητικότητα ενεργειακής αποθήκευσης, χαρακτηριστικές προβαλλόμενες δαπάνες μπαταριών για 8 ή περισσότερες ώρες αποθήκευσης είναι της τάξης των 150 US\$ ανά kWh
- Τα υπάρχοντα συστήματα μπορούν να αναβαθμιστούν εύκολα και η πρόσθετη ικανότητα αποθήκευσης μπορεί να επιτευχθεί εύκολα με την αλλαγή των δεξαμενών και των όγκων του ηλεκτρολύτη
- Η τάση φόρτισης/εκφόρτισης των μπαταριών μπορεί να επιλεγεί με τη χρησιμοποίηση κυψελών που έχουν ακροδέκτες. Αυτό παρέχει την δυνατότητα να αλλάξουν οι συνθήκες λειτουργίας ώστε να προστατευθεί ο ευαίσθητος εξοπλισμός από τις μεγάλες διακυμάνσεις τάσης και να επιτραπεί η λειτουργία μέσα σε ένα στενό παράθυρο τάσης για τη φόρτιση και την εκφόρτιση
- Η χωρητικότητα και η κατάσταση φόρτισης του συστήματος μπορούν να ελεγχθούν εύκολα, με τη σύνδεση στους ελεύθερους ακροδέκτες μιας κυψέλης.

- Εύκολη συντήρηση
- Ευελιξία

Άλλα πλεονεκτήματα της μπαταρίας Βαναδίου είναι:

- Υψηλές ενεργειακές αποδοτικότητες μεταξύ 80 και 90% στις μεγάλες εγκαταστάσεις.
- Αμελητέα έκλυση υδρογόνου κατά τη διάρκεια της φόρτισης
- Μπορούν να εκφορτιστούν πλήρως χωρίς να προκληθεί ζημιά στην μπαταρία
- Όλες οι κυψέλες τροφοδοτούνται με το ίδιο διάλυμα και επομένως έχουν την ίδια κατάσταση φόρτισης
- Κανένα πρόβλημα παράλληλης νόθευσης των διαλυμάτων οπότε αυτά έχουν απεριόριστη ζωή
- Μεγάλος κύκλος ζωής
- Μπορούν και ηλεκτρικά να επαναφορτιστούν και μηχανικά να ανεφοδιαστούν με καύσιμα

## 2.4 Απόδοση της μπαταρίας Βαναδίου σε εφεδρικό σύστημα έκτακτης ανάγκης

Ένα εργαστηριακό πρότυπο μπαταρίας έκτακτης ανάγκης VRB σχεδιάστηκε και λειτούργησε στο πανεπιστήμιο του Σύδνεϋ. Η VRB συγκρίθηκε με ένα σύστημα μπαταριών Νικελίου-Καδμίου χωρητικότητας 160 Ahr . Η μπαταρία φαίνεται στο Σχήμα 2.4 και περιέχει 19 κυψέλες.



Σχήμα 2.4: Εφεδρικό σύστημα μπαταριών βαναδίου αμυντικής έκτακτης ανάγκης.

Το σύστημα χρησιμοποιεί επίσης μια μικρή εξωτερική κυψέλη που δίνει την ανοιχτή τάση μεταξύ των θετικών και αρνητικών ηλεκτρολυτών. Οι δεξαμενές αποθήκευσης ηλεκτρολυτών είναι κατασκευασμένες από ανθεκτικό πλαστικό και ο όγκος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται είναι 83 λίτρα ανά σειρά ημι-κυψελίδων. Οι δύο δεξαμενές διαχωρίζονται μέσω ενός κοινού τοιχώματος.

Η μεμβράνη που χρησιμοποιείται σε αυτήν την μπαταρία είναι μεμβράνη Selemon AMV . Αυτή η μπαταρία εξετάστηκε έπειτα σε διάφορα ρεύματα για να καθοριστεί η απόδοσή της.

Ο πίνακας 2.1 συνοψίζει τις αποδόσεις που λαμβάνονται σε διάφορα σταθερά ρεύματα φόρτισης/εκφόρτισης.

Οι αποδόσεις που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1 δεν είναι τόσο υψηλές όπως αναμένονται και αυτό είναι κυρίως λόγω των χαμηλότερων από τις αναμενόμενες τάσεων λόγω της χρήσης ανενεργού αισθητήρα και της μεμβράνης AMV.

Current (A)	Energy Efficiency (%)	Coulombic Efficiency (%)	Voltage Efficiency (%)
40	77.0	95.8	80.9
50	77.4	98.0	79.0
60	73.8	96.8	76.2

Πίνακας 2.1: Αποδόσεις σε διάφορα σταθερά ρεύματα φόρτισης/εκφόρτισης.

Η μέση αντίσταση των κυψελίδων υπολογίστηκε με την πραγματοποίηση μιας δοκιμής πόλωσης στην μπαταρία. Η μπαταρία φορτίζεται αρχικά σε ένα επίπεδο 50% της κατάστασης φόρτισης (SOC) προτού να πραγματοποιηθεί η δοκιμή. Μόλις επιτευχθεί αυτό το επίπεδο η μπαταρία φορτίζεται και εκφορτίζεται για χρονικά διαστήματα 1 min και με διαφορετικά ρεύματα όπως φαίνεται στον πίνακα 2.2.

Current (A)	Charge Stack (V)	Discharge Stack (V)
20	26.9	24.6
30	27.5	24.0
40	28.1	23.4
50	28.7	22.8
60	29.3	22.1

Πίνακας 2.2: Αποτελέσματα της δοκιμής πόλωσης για τη μπαταρία που εκτελούνται σε μια τάση ανοιχτού κυκλώματος 25.8V σε περίπου 50% κατάσταση φόρτισης.

Από την κλίση των χαρακτηριστικών καμπυλών τάσης - ρεύματος υπολογίζονται οι μέσες ειδικές αντιστάσεις κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης σε 4,74 Ohm/cm<sup>2</sup> και 4,89 Ohm/cm<sup>2</sup> αντίστοιχα. Από τις ειδικές αντιστάσεις είναι εμφανές ότι οι χαμηλές τάσεις είναι αποτέλεσμα μιας υψηλότερης από την αναμενόμενη μέσης ειδικής αντίστασης της κυψέλης. Η ειδική αντίσταση κυψελών οφείλεται κυρίως στη φυσική των ηλεκτροδίων και των μεμβρανών. Η αντίσταση των ηλεκτροδίων είναι μεταξύ 0,7 - 1,3 Ohm/cm<sup>2</sup> και η μεμβράνη Selemion AMV έχει μια ειδική αντίσταση μεταξύ 1,5 - 3,0 Ohm/cm<sup>2</sup>.

Η μπαταρία αυτή βελτιώθηκε περαιτέρω όσον αφορά τα υλικά των ηλεκτροδίων και της μεμβράνης και οι μετρήσεις παρατίθενται στους πίνακες 2.3 και 2.4 αντίστοιχα. Από την κλίση των χαρακτηριστικών καμπυλών τάσης - ρεύματος υπολογίζονται οι μέσες ειδικές αντιστάσεις κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης σε 2,90 Ohm/cm<sup>2</sup> και 3,13 Ohm/cm<sup>2</sup> αντίστοιχα.

Current (A)	Energy Efficiency (%)	Coulombic Efficiency (%)	Voltage Efficiency (%)
60	78.3	94.6	82.8
100 Cycle1	68.0	94.0	72.3
100 Cycle2	70.8	96.1	73.0
100 Cycle3	73.1	98.7	74.0

Πίνακας 2.3: Αποδόσεις σε διάφορα σταθερά ρεύματα φόρτισης/εκφόρτισης.

Current (A)	Charge Stack (V)	Discharge Stack (V)
20	27.4	25.1
30	27.8	24.8
40	28.1	24.4
50	28.5	23.9
60	28.9	23.6

Πίνακας 2.4: Αποτελέσματα της δοκιμής πόλωσης για τη μπαταρία που εκτελούνται σε μια τάση ανοιχτού κυκλώματος 26.3V σε περίπου 50% κατάσταση φόρτισης.

Οι μέσες ειδικές αντιστάσεις των κυψελών που υπολογίστηκαν από τα στοιχεία στον πίνακα 2.4 ήταν 2,90 Ohm/cm<sup>2</sup> για τη φόρτιση και 3,13 Ohm/cm<sup>2</sup> για την εκφόρτιση. Αυτές οι νέες ειδικές αντιστάσεις είναι σημαντικά χαμηλότερες λόγω της χρήσης της χαμηλότερης αντίστασης νέας μεμβράνης Selemion. Υπό αυτήν τη μορφή, η μπαταρία κατέχει τις υψηλότερες γενικές ενεργειακές αποδόσεις που αναμένεται να βελτιωθούν περαιτέρω με την  
χρησιμοποίηση της μπαταρίας.

#### Ανάλυση της απόδοσης μπαταρίας:

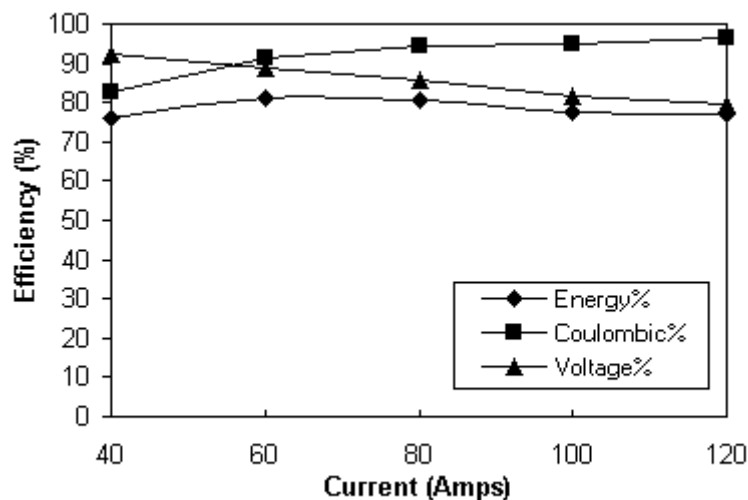
Η απόδοση του συστήματος VRB εξετάστηκε κάτω από 2 κύριους τρόπους λειτουργίας. Ο πρώτος περιέλαβε τη χρησιμοποίηση όλων των κυψελών στο σύστημα μπαταριών. Αυτό απαιτήθηκε για τον προσδιορισμό των γενικών αποδόσεων, τις μετρήσεις αντίστασης και τις δοκιμές αυτοεκφόρτισης. Ο δεύτερος τρόπος περιέλαβε τη χρησιμοποίηση μέρους των κυψελών, παραδείγματος χάριν φορτίζοντας το συσσωμάτωμα κυψελών έως τη 17<sup>η</sup> κυψέλη και εκφορτίζοντας το συσσωμάτωμα κυψελών έως τη 19<sup>η</sup> κυψέλη. Αυτός ο τρόπος χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές που απαιτούσαν την τάση μπαταριών να διατηρείται μέσα σε συγκεκριμένα όρια.

Η απόδοση του συστήματος μπαταριών ερευνήθηκε σε μια σειρά ρευμάτων 40 - 120 A με το ανώτερο ρεύμα 120 A να είναι το μέγιστο παρεχόμενο ρεύμα από την παροχή ισχύος. Ο πίνακας 2.5 κατωτέρω συνοψίζει τις αποδόσεις που λαμβάνονται σε κάθε ρεύμα. Σε αυτές τις δοκιμές τα ρεύματα φόρτισης και εκφόρτισης ήταν σταθερά σε κάθε αντίστοιχο ρεύμα και κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου δοκιμής.

Current (A)	Energy Efficiency (%)	Coulombic Efficiency (%)	Voltage Efficiency (%)
40	76.10	82.55	92.18
60	80.98	91.38	88.62
80	80.82	94.52	85.51
100	77.37	94.68	81.72
120	76.90	96.40	79.78

Πίνακας 2.5: Συνολικές αποδόσεις μπαταριών σε διάφορα σταθερά ρεύματα φόρτισης/εκφόρτωσης.

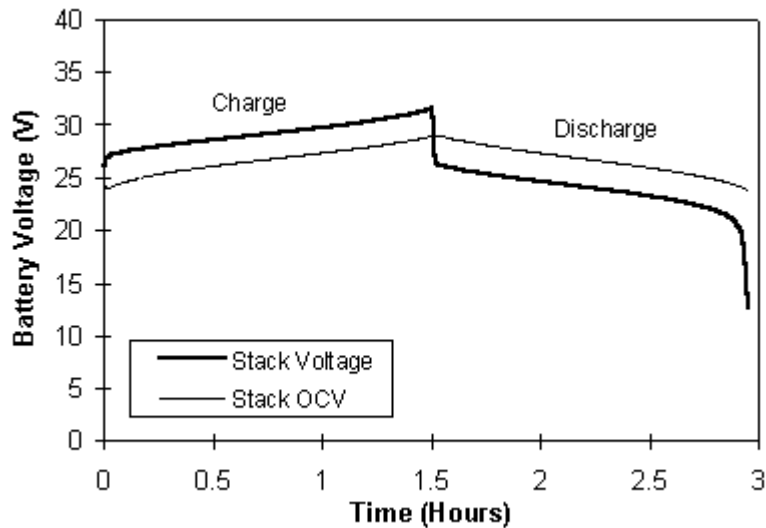
Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.5 φαίνονται επίσης υπό μορφή σχεδιαγράμματος στο Σχήμα 2.5. Το Σχήμα 2.5 δείχνει ότι όπως αναμενόταν, η αποδοτικότητα coulomb αυξάνεται και η αποδοτικότητα τάσης μειώνεται με την αύξηση του ρεύματος δίνοντας μια μέγιστη γενική ενεργειακή αποδοτικότητα πάνω από 80% σε ρεύματα της τάξης των 60-80 Ah.



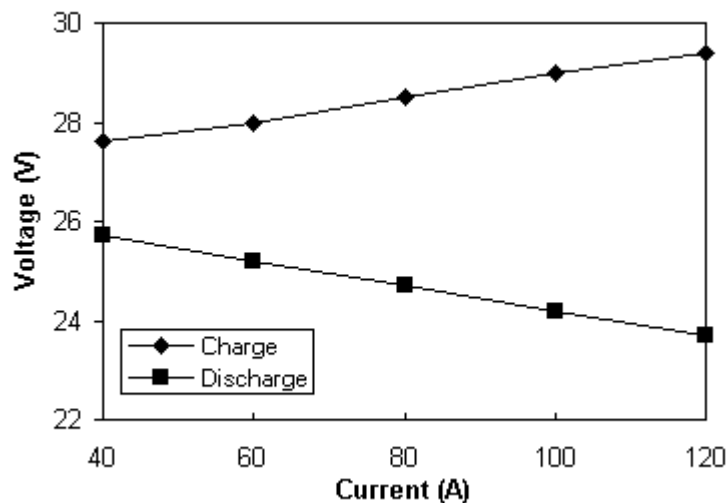
Σχήμα2.5: Συνολικά σχεδιαγράμματα απόδοσης μπαταριών.

Ένα τυπικό σχεδιάγραμμα τάσης της μπαταρίας κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης σε 100 A και το αντίστοιχο σχεδιάγραμμα μηδενικής ροής ρεύματος ( zero Current Value, 0CV) φαίνονται στο σχήμα 2.6. Το σχεδιάγραμμα 0CV του σχήματος 2.6 παρουσιάζει την τάση της μπαταρίας για μηδενική ροή ρεύματος και αντιπροσωπεύει έτσι την ιδανική πορεία τάσης με μηδενικές απώλειες. Η πραγματική τάση της μπαταρίας, εντούτοις, περιέχει τις αποκλίσεις από το ιδεατό λόγω των απωλειών αντίστασης και πόλωσης στην μπαταρία. Μια υψηλότερη τάση απαιτείται έτσι κατά τη διάρκεια της φάσης φόρτισης και μια χαμηλότερη τάση είναι διαθέσιμη κατά τη διάρκεια της φάσης εκφόρτισης. Είναι επομένως σημαντικό η αντίσταση του συστήματος μπαταριών να ελαχιστοποιείται, για να επιτρέψει τη μέγιστη χρησιμοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας.

Οι εσωτερικές αντιστάσεις των μεμονωμένων μπαταριών υπολογίστηκαν όπως περιγράφονται ανωτέρω και μια δοκιμή πόλωσης πραγματοποιήθηκε επίσης για να καθορίσει την τελική ολική αντίσταση για την μπαταρία 2 τμημάτων που συνδέεται και υδραυλικά και ηλεκτρικά. Το σχεδιάγραμμα της προκύπτουσας πόλωσης φαίνεται στο σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.6: Ολική τάση μπαταριών και τάση μπαταριών ανοιχτού κυκλώματος σε ένα σταθερό ρεύμα φόρτισης/εκφόρτισης 100 Amps



Σχήμα 2.7: Διάγραμμα πολικότητας για το συνολικό σύστημα μπαταριών

Οι μέσες ειδικές αντιστάσεις κυψελών του συνολικού συστήματος μπαταριών σε κατάσταση φόρτισης 50% για τους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης υπολογίστηκαν ως  $3,66 \text{ Ohm/cm}^2$



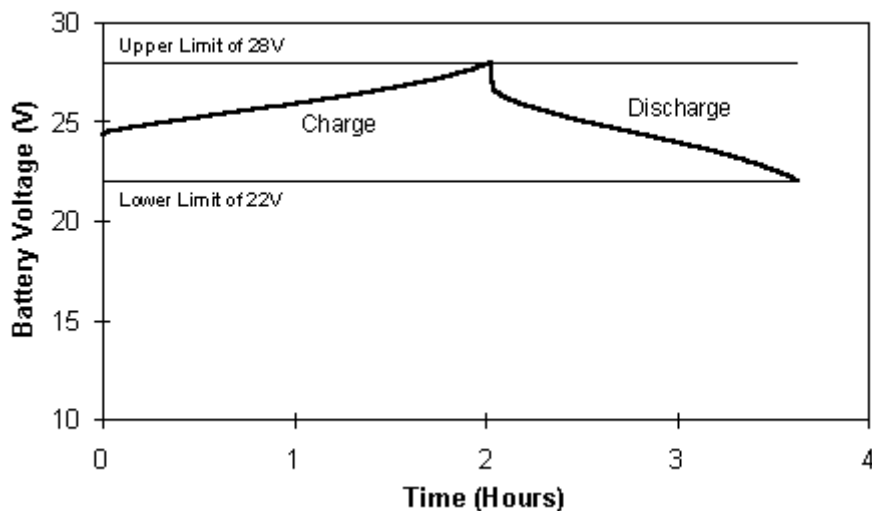
και  $3,84 \text{ Ohm/cm}^2$  αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές είναι θετικές σε σύγκριση με τις θεωρητικές τιμές  $3,60 \text{ Ohm/cm}^2$  για τον κύκλο φόρτισης και  $3,75 \text{ Ohm/cm}^2$  για τον κύκλο εκφόρτισης, που υπολογίζονται για ένα παράλληλο σύστημα από τις μεμονωμένες ειδικές αντιστάσεις μπαταριών που μετριοούνται προηγουμένως.

Χρησιμοποίηση των ανοιχτών κυψελών:

Οι ανοιχτές κυψέλες είναι κυψέλες που επιτρέπουν στο ρεύμα να μεταφερθεί εντός ή εκτός της μπαταρίας και σε άλλα σημεία εκτός από τα 2 τελικά ηλεκτρόδια. Οι ανοιχτές κυψέλες χρησιμοποιούν έναν εσωτερικό συλλέκτη χαλκού για να επιτρέπουν την ανταλλαγή των υψηλών ρευμάτων. Μια ανοιχτή κυψέλη ενσωματώθηκε σε κάθε τμήμα της μπαταρίας στην κυψέλη no.17. Οι ανοιχτές κυψέλες συνδέθηκαν επίσης σε παράλληλο δίκτυο, επομένως το συνολικό συσσωμάτωμα κυψελών θα μπορούσε να φορτιστεί ή να εκφορτιστεί σε 17 ή 19 κυψέλες. Ο κύριος σκοπός σχεδιασμού των ανοιχτών κυψελών ήταν να επιτρέψει τη φόρτιση σε 17 κυψέλες και την εκφόρτιση σε 19 κυψέλες ώστε να περιοριστεί έτσι η διαφορά μεταξύ των τάσεων φόρτισης και εκφόρτισης.

Η δοκιμή των ανοιχτών κυψελών έγινε με φόρτιση της μπαταρίας σε 17 κυψέλες στα υψηλά σταθερά ρεύματα, εξασφαλίζοντας ότι η συνολική τάση των μπαταριών δεν υπερέβη τα 28 V. Η μπαταρία εκφορτίστηκε έπειτα σε 19 κυψέλες έως ότου η συνολική της τάση έφθασε στα 22 V.

Ένα χαρακτηριστικό σχεδιάγραμμα τάσης για την σε 17 κυψέλες φόρτιση - σε 19 κυψέλες εκφόρτιση, σε κύκλο σταθερού ρεύματος 100 A φαίνεται στο σχήμα 2.8. Τα όρια ανώτερης και κατώτερης τιμής τάσης παρουσιάζονται επίσης στο σχήμα, που δίνει έμφαση στα όρια που κυμάνθηκε η διαφορά τάσης.



Σχήμα 2.8: Σχεδιάγραμμα τάσης φόρτισης/εκφόρτισης σε 17/19 κύτταρα σε 100A.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του κύκλου φόρτισης/εκφόρτισης που είναι αμέσως ορατό, είναι η διαφορά στη διάρκεια του χρόνου φόρτισης με αυτόν της εκφόρτισης. Ενώ αυτό θα υποδήλωνε μια χαμηλή αποδοτικότητα coulomb, είναι σημαντικό να λάβει κανείς υπόψη ότι κατά τη διάρκεια του κύκλου φόρτισης μόνο 17 κυψέλες απασχολούνται για να φορτίσουν την μπαταρία, επομένως, επιβάλλεται μια χαμηλότερη τάση. Οι κυψέλες 18 και 19 σε κάθε τμήμα είναι σε ανοικτό κύκλωμα κατά τη διάρκεια της φόρτισης, κατά συνέπεια ο χρόνος φόρτισης που χρησιμοποιεί 17 κυψέλες θα είναι προφανώς μεγαλύτερος από όταν χρησιμοποιούνται και οι 19. Ομοίως, αναμένεται ότι το ρεύμα εξόδου θα είναι μικρότερο κατά την εκφόρτιση σε 19 κυψέλες από ότι θα ήταν εκφορτίζοντας 17. Εντούτοις, η τάση θα είναι υψηλότερη και μέσα στα προκαθορισμένα όρια. Αντί για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας coulomb αυτής της μπαταρίας επομένως, ο καλύτερος δείκτης της απόδοσής του είναι η γενική ενεργειακή αποδοτικότητα που ήταν σε αυτήν την περίπτωση μέχρι 79%.

Τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται στα τέσσερα διαφορετικά ρεύματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2.6. ο οποίος δείχνει ότι στα σταθερά ρεύματα εκφόρτισης κάτω από 100 A το σύστημα επιτυγχάνει και υπερβαίνει τη χωρητικότητα 160 Ahr του συστήματος νικελίου/καδμίου που χρησιμοποιείται προς το παρόν ως βοηθητική μπαταρία. Πρέπει να σημειωθεί εντούτοις, ότι στο σύστημα μπαταριών VRB οι αριθμοί χωρητικότητας που δίνονται στον πίνακα 2.5 δεν είναι για μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία αλλά για μια μπαταρία που έχει φορτιστεί σε ένα σταθερό ρεύμα έως ότου έχει επιτευχθεί το ανώτερο όριο 28 V. Από το σχήμα 2.8 και τον πίνακα 2.6 φαίνεται ότι απαιτούνται περίπου 2 ώρες για να φορτίσουν την μπαταρία μέχρι την χωρητικότητα 92,5%, σε ένα σταθερό ρεύμα 100 A. Σε 120 A η φόρτιση της μπαταρίας διαρκεί μόνο 1,5 ώρες μέχρι το 90,5% της χωρητικότητάς της, μη υπερβαίνοντας το ανώτερο όριο 28 V.

Το πλεονέκτημα αυτού του τύπου μπαταρίας είναι αμέσως προφανές στο χρόνο φόρτισης που απαιτείται για να φορτίσει το σύστημα. Ιδανικά, ένα σύστημα παροχής ηλεκτρικού ρεύματος που μπορεί να χειριστεί τα υψηλότερα ρεύματα θα φόρτιζε την μπαταρία σε λιγότερο από 1 ώρα. Είναι σημαντικό να σημειωθεί εντούτοις, ότι μια γεννήτρια λειτουργεί σε μια σταθερή τάση φόρτισης δηλ. καθώς η τάση της μπαταρίας πλησιάζει στο ανώτερο όριο τάσης της γεννήτριας το ρεύμα ελαττώνεται για να συνεχίζεται αργά η φόρτιση. Για να έχουμε τα οφέλη της γρήγορης φόρτισης του συστήματος VRB, συστήνεται μια παροχή συνεχούς ρεύματος φόρτισης.

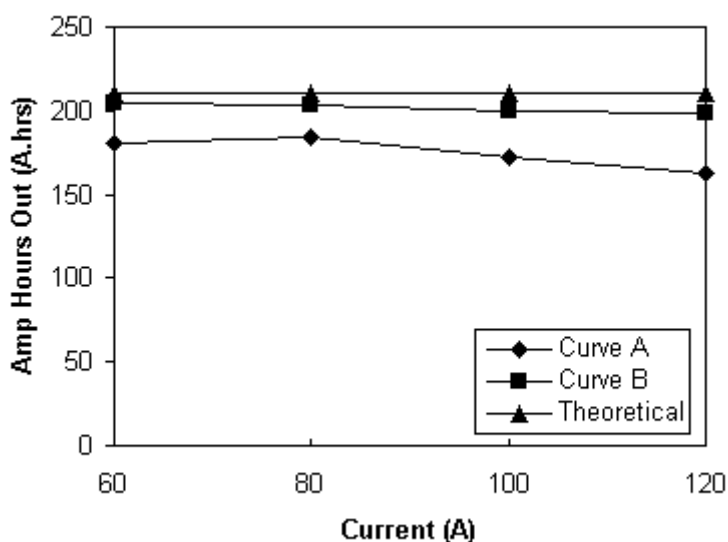
Current (A)	SOC at end of charge to 28V 17 cells (%)	SOC at end of discharge to 22V 19 cells (%)	Amp Hours Out (A.hr)	Capacity * Utilised (%)
60	96.0	6.7	170.7	81.0
80	94.8	8.5	168.8	80.0
100	92.5	11.8	159.4	75.6
120	90.5	17.5	145.7	69.1

Πίνακας 2.6: Αποτελέσματα που επιτυγχάνονται με διαφορετικά σταθερά ρεύματα κατά τη χρησιμοποίηση των ανοιχτών κυψελών στα όρια τάσης 22 V και 28 V.

\* Θεωρητική μέγιστη χωρητικότητα = 210,8 A.hr για συσσωμάτωμα 19 κυψελών και 83L διαλύματος βαναδίου 1.8M.

Το συνολικό σύστημα μπαταριών φορτίστηκε σε 17 κυψέλες σε 120 A. Μόλις φορτίστηκε η μπαταρία στη μέγιστη δυνατή κατάσταση φόρτισης για αυτό το ρεύμα, το ρεύμα φόρτισης μειώθηκε σε 100 A. Αυτή η μέθοδος συνεχίστηκε μέχρι το τελικό ρεύμα φόρτισης να φτάσει τα 40 A. Σε αυτό το στάδιο η μπαταρία είχε φθάσει σε κατάσταση φόρτισης επάνω από 98 %, ενώ ο συνολικός χρόνος φόρτισης ήταν περίπου 2 ώρες.

Τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται για την εκφόρτιση του συστήματος μπαταριών σε 19 κυψέλες με διαφορετικά σταθερά ρεύματα εκφόρτισης σε ένα χαμηλότερο όριο τάσης μπαταρίας 22 V, συνοψίζονται στον πίνακα 2.7.

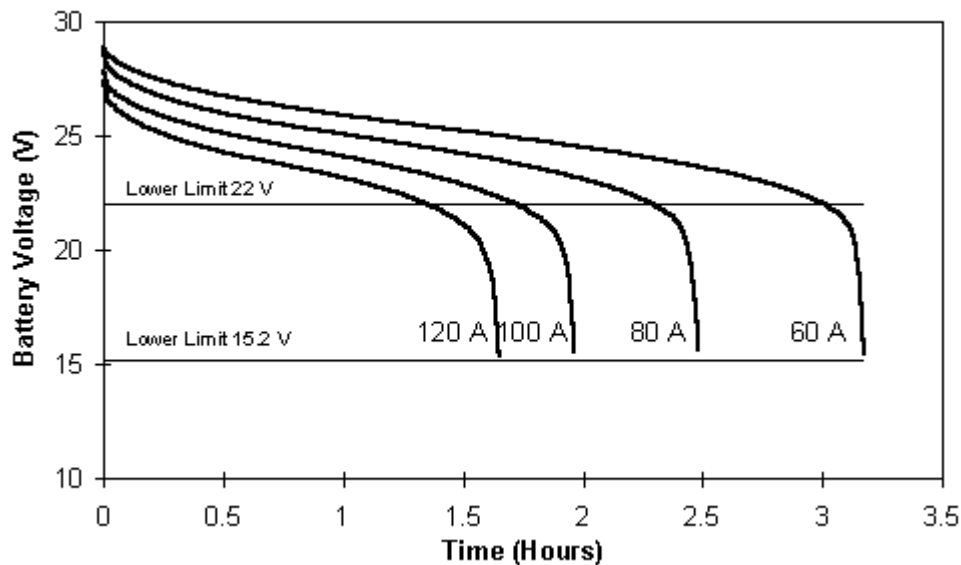


Σχήμα 2.9: Amp.hours. εξόδου σε συνάρτηση του ρεύματος εκφόρτισης για το συνολικό σύστημα μπαταριών που εκφορτίζεται από SOC 98% σε ένα όριο ελάχιστης τάσης 22V. Καμπύλη (α) για μια αντίσταση κυψελών 3,8 Ohm/cm<sup>2</sup>, (β) για μια αντίσταση κυψελών 2 Ohm/cm<sup>2</sup>

Τα σχεδιαγράμματα εκφόρτισης παρουσιάζονται μαζί στο σχήμα 2.10

Σε όλα τα ρεύματα που παρουσιάζονται στον πίνακα 2.7 τα Ahrs εξόδου υπερέβησαν τα 160 Ahrs προτού να φθάσει η μπαταρία στο όριο 22 V. Τα Ahrs εξόδου είναι μια άμεση συνέπεια του πόσο χαμηλά η μπαταρία θα μπορούσε να εκφορτιστεί. Σε 120 A η αντίσταση της μπαταρίας είναι τέτοια που όταν επιτυγχάνεται το όριο 22 V η μπαταρία εκφορτίζεται σε SOC μόνο 19%.

Εάν η αντίσταση της μπαταρίας είναι μικρότερη, μπορεί να εκφορτιστεί σε μεγαλύτερο βάθος πριν από το όριο 22 V. Στην πραγματικότητα, εάν υποθέσουμε μια αντίσταση κυψελών 2,0 Ohm/cm<sup>2</sup> (που τώρα είναι εύκολα επιτεύξιμη με τα διαθέσιμα υλικά), στο χαμηλότερο όριο 22 V και εκφόρτιση στα 120 A, το OCV της μπαταρίας θα ήταν 25,04 V, που αντιστοιχεί σε SOC 17% στο τέλος της εκφόρτισης. Ομοίως, σε 60 A ένα SOC 4% θα επιτυγχανόταν στο τέλος της εκφόρτισης που αντιστοιχεί στη χρησιμοποίηση του 90% της χωρητικότητας υποθέτοντας παρόμοιες απώλειες coulomb όπως στον πίνακα 2.6. Το προβαλλόμενο Amp.hours συναρτήσει του ρεύματος εκφόρτισης για μια μπαταρία με μια αντίσταση κυψελών 2 Ohm/cm<sup>2</sup> δίνεται στο σχήμα 10,καμπύλη (β).



Σχήμα. 2.10: Σχεδιαγράμματα τάσης εκφόρτισης για το πλήρως φορτισμένο σύστημα μπαταριών παρουσιάζοντας τα 22 V και την ολική εκφόρτιση στο όριο των 15,2V.

Discharge Current (A)	SOC Start (%)	Stack Voltage at Beginning of Discharge (V)	SOC Finish (%)	Amphours Out (A.hr)	Capacity* Utilised (%)
60	98.80	28.84	6.20	181.02	85.88
80	98.80	28.64	9.41	183.70	87.15
100	98.12	27.83	13.19	172.43	81.81
120	98.30	27.34	19.1	162.14	76.92

Πίνακας 2.7: Αποτελέσματα επιτευχθέντα κατά την εκφόρτιση του συνολικού συστήματος μπαταριών σε 19 κυψέλες από πλήρη φόρτιση σε ένα όριο ελάχιστης τάσης μπαταριών 22 V. \* Θεωρητική μέγιστη χωρητικότητα = 210,8 A.hr για 19 κυψέλες και 83L διαλύματος βαναδίου 1.8M.

Το συσσωμάτωμα κυψελών φορτίστηκε σε 19 κυψέλες σε ένα ρεύμα 20 A. Σε SOC 85% η τάση φόρτισης μπαταριών σε 20 A ήταν 28,97 V. Η τάση μετρήθηκε επίσης σε 17 κυψέλες και βρέθηκε να είναι 25,89 V. Η τάση ανοιχτού κυκλώματος του συσσωματώματος των 17 και των 19 κυψελών σε SOC 17% ήταν 22,42 V και 25,06 V αντίστοιχα. Αυτό δίνει έμφαση

πάλι στις διαφορετικές τάσεις που μπορούν να ληφθούν σε ίδιο SOC με τη χρησιμοποίηση της ανοιχτής κυψέλης.

Η μέση ειδική αντίσταση κυψελών που υπολογίστηκε σε SOC 50% κατά τη διάρκεια της φόρτισης ήταν  $1,89 \text{ Ohm/cm}^2$ . Αυτή η ειδική αντίσταση κυψελών δείχνει ότι είναι δυνατόν να επιτύχουμε χαμηλότερες ειδικές αντιστάσεις με τα διαθέσιμα σήμερα υλικά.

## 2.5.Κόστος

Οι τέσσερις φάσεις του σχεδίου εμπορευματοποίησης των μπαταριών κατά τη διάρκεια των πρώτων έξι ετών είναι:

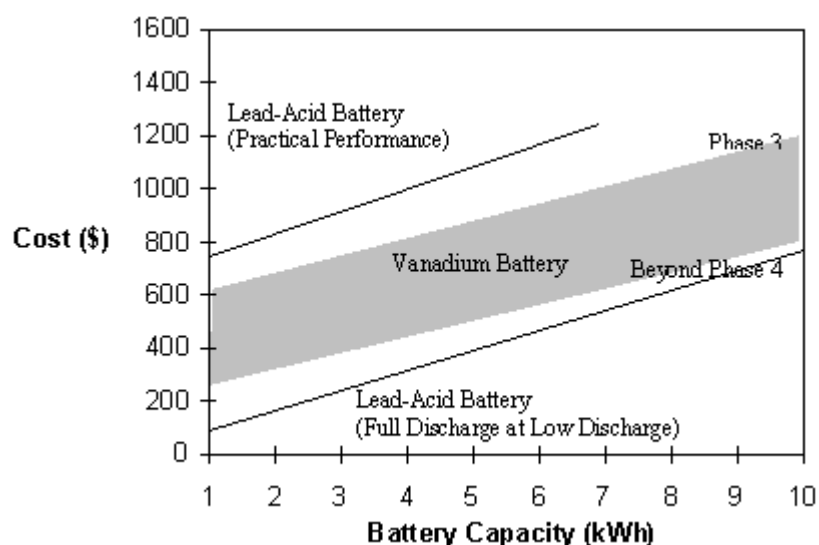
- Φάση 1 - Αξιολόγηση της βιωσιμότητας
- Φάση 2 - Πρωτότυπο 1,5 MWh
- Φάση 3 - Επιχείρηση επίδειξης
- Φάση 4 – Εμπορική Παραγωγή

Ο πίνακας 2.8 παρουσιάζει ένα σχέδιο για τη μείωση του κόστους των συσσωματωμάτων κυψελών από \$879 σε \$133 ανά kW.

Με τη βελτίωση της διαδικασίας παραγωγής το κόστος του ηλεκτρολύτη αναμένεται να μειωθεί όπως φαίνεται στον πίνακα 2.8.

Οι δαπάνες στους πίνακες 2.8 και 2.9 δεν περιλαμβάνουν τις δαπάνες των βοηθητικών συστημάτων όπως η υδραυλική εγκατάσταση, οι αντλίες, οι δεξαμενές, ο εξοπλισμός μετατροπής ισχύος και ο ελεγκτής μπαταριών.

Μια κατά προσέγγιση σύγκριση του κόστους ανά εγκατεστημένο kW της αποθήκευσης μπαταριών βαναδίου έναντι της μπαταρίας οξέων μολύβδου για μια γκάμα ωρών αποθήκευσης παρουσιάζεται στο σχήμα 2.11.



Σχήμα 2.11: Κόστος μπαταριών συναρτήσει της χωρητικότητας μπαταριών

	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Beyond
Current density (A/m <sup>2</sup> ) for > 80% overall battery efficiency)	500	500	1500	2000
Power density (kW/m <sup>2</sup> )	0.66	0.6	2.0*	2.6
Electrode area (m <sup>2</sup> )	1.5	1.5	0.5	0.38
Area graphite felt (m <sup>2</sup> )	3.0	3.0	1.0	0.76
Cost of graphite felt (\$/m <sup>2</sup> ) (include activation)	105	105	105	105
Total cost of graphite felt (\$)	315	315	105	80
Cost of conducting plastic (\$)	44	44	16	10
Area of membrane (m <sup>2</sup> ) (20% excess)	1.8	1.8	0.6	0.46
Cost of membrane (\$)	250	100	75	50
Total cost of membrane (\$)	450	180	45	23
Cost of flow frames (\$)	70	20	20	20
Total Stack material cost (\$)	879	559	186	133

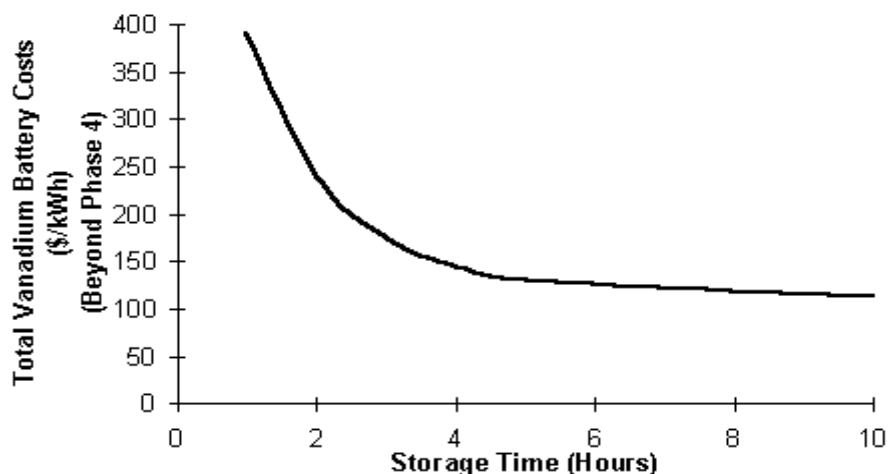
\* Achieved in small cells at UNSW and during Phase 3 this technology will be scaled

Πίνακας 2.8: Κόστος (\$/kW) μιας μπαταρίας 100 kW

	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Beyond
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> energy density (kg/kWh)	6.0	6.0	6.0	6.0
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> price (\$/kg)	7.2	7.2	6.5	4.0*
Conversion (V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> > electrolyte) cost (\$/kg)	1.08	0.72	0.65	0.60
Electrolyte Cost (\$/kWh)	49.7	47.5	42.9	26.4

Πίνακας 2.9: Κόστος ηλεκτρολυτών (\$/kWh)

Οι συνολικές δαπάνες μπαταριών βαναδίου σε \$/kWh μειώνονται με τον αυξανόμενο χρόνο αποθήκευσης όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12.



Σχήμα 2.12: Συνολικές δαπάνες μπαταριών βαναδίου συναρτήσει του χρόνου αποθήκευσης.

## 2.6 Ερευνητική εργασία για τις μπαταρίες Βαναδίου, ανάπτυξη και προγράμματα

Απομένει ένα ευρύ φάσμα ερευνητικών προγραμμάτων να λάβουν χώρα σχετικά με τους συσσωρευτές VRB σε περιοχές που καλύπτουν:

- Βασικές ηλεκτροχημικές μελέτες των ενώσεων βαναδίου σε μια γκάμα από ηλεκτρολύτες για τον καθορισμό της κινητικότητας και των μηχανισμών των οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων ζευγών βαναδίου.
- Κινητικές μελέτες της θερμικής αντίδρασης αποσύνθεσης του  $V_2O_5$  σε ένα ευρύ φάσμα των θερμοκρασιών για να προσδιοριστούν τα όρια σταθερότητας των ηλεκτρολυτών βαναδίου
- Κινητικές & μηχανιστικές μελέτες της σκόνης  $V_2O_5$  για να βελτιστοποιήσει την παραγωγή ηλεκτρολυτών
- Ηλεκτροκατάλυση των από γραφίτη ηλεκτροδίων για την αυξανόμενη απόδοση κυψελών
- Μελέτες των διαδικασιών ηλεκτρώσμωσης και διάχυσης των ιόντων στις μεμβράνες ιονικής ανταλλαγής
- Μαθηματική μοντελοποίηση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης και των απωλειών ενεργειακής άντλησης των διπολικών κυψελών.
- Θερμική μοντελοποίηση των οξειδοαναγωγικών κυψελών σε μια περιοχή συνθηκών λειτουργίας και περιβαλλοντικών θερμοκρασιών για την πρόβλεψη των διακυμάνσεων θερμοκρασίας των κυψελών
- Μελέτες για εναλλακτική χρήση ηλεκτρολυτών.
- Μέθοδοι ελέγχου της κατάστασης φόρτισης για τα οξειδοαναγωγικά κύτταρα
- Χημική αναγέννηση των οξειδοαναγωγικών ζευγών βαναδίου - κινητικές μελέτες των αντιδράσεων αναγέννησης.

## 2.7 Σύγκριση συσσωρευτών Βαναδίου με μπαταρίες μολύβδου

Στα Φωτοβολταϊκά συστήματα των οποίων ο σχεδιασμός περιλαμβάνει τη σύζευξη με μπαταρίες, συνήθως χρησιμοποιούνται μπαταρίες μολύβδου. Αν και διάφορες άλλες μπαταρίες ήταν υπό ανάπτυξη για πολλά έτη, μόνο οι μπαταρίες μολύβδου και νικελίου-καδμίου έχουν μέχρι σήμερα επιτύχει εκτεταμένες εμπορικές εφαρμογές. Πιο πρόσφατα οι μπαταρίες με συνθετικό ιόντων λιθίου και νικελίου έχουν προκύψει σαν οι καλύτερες εναλλακτικές λύσεις υψηλής ενεργειακής πυκνότητας, εντούτοις, έχουν πολύ υψηλό κόστος αγοράς, που αποτελεί σημαντικό παράγοντα περιορισμού της χρήσης τους. Έτσι τελικά χρησιμοποιούνται μόνο για μικρές φορητές εφαρμογές. Οι μπαταρίες μολύβδου θέτουν ορισμένους περιορισμούς στο σχεδιασμό φωτοβολταϊκών συστημάτων. Παραδείγματος χάριν, για να έχουν μακροζωία, οι μπαταρίες μολύβδου συνήθως χρησιμοποιούνται μεταξύ 25 και 75% της κατάστασης φόρτισής τους (SOC). Κατά συνέπεια μόνο 50% της πραγματικής χωρητικότητάς τους χρησιμοποιείται και η μπαταρία δεν μπορεί να αφηθεί σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης για εκτεταμένες περιόδους.

Σε μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση με μπαταρίες μολύβδου, η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση απαιτεί πρόσθετα φωτοβολταϊκά πάνελ που χρησιμοποιούνται μόνο όταν απαιτείται μια επιπλέον φόρτιση της μπαταρίας. Αυτή η πρόσθετη φόρτιση εκτελείται περιοδικά για να διατηρήσει την εξίσωση κυψελών, εντούτοις μεγάλα ποσά υδρογόνου ελευθερώνονται με

συνέπεια την απώλεια ύδατος και την ανάγκη για ένα κατάλληλα αεριζόμενο δωμάτιο μπαταριών. Η συντήρηση του συστήματος μπαταριών μολύβδου για το έλεγχο των επιπέδων και της κατάστασης των μεμονωμένων κυψελίδων πραγματοποιείται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Το lead-acid σύστημα χρειάζεται την επαρκή εκκαθάριση μεταξύ των σειρών των μπαταριών. Τα πρωτόκολλα εγκατάστασης μπαταριών για την εγκατάσταση και τη συντήρηση καλύπτονται από τις οδηγίες AS 3011.1 (1992b) και AS 2676.1 (1992a) αντίστοιχα.

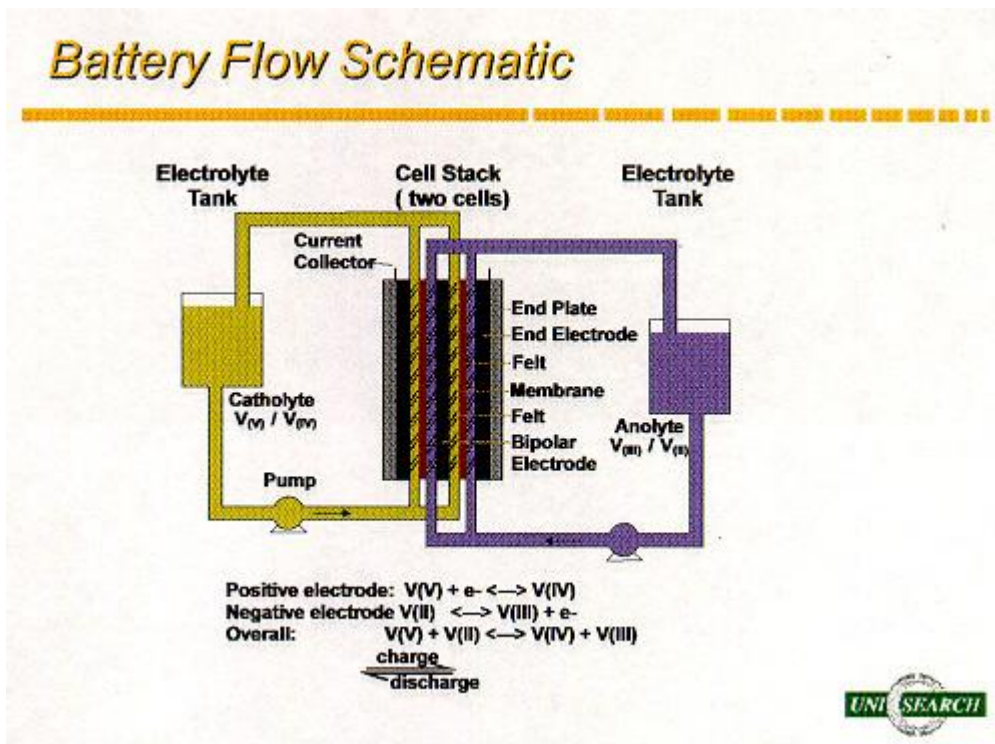
Από όλες τις νέες τεχνολογίες μπαταριών που βρίσκονται αυτήν την περίοδο υπό ανάπτυξη σε όλο τον κόσμο, ο οξειδοαναγωγικός συσσωρευτής εμφανίζεται να προσφέρει τη μέγιστη υπόσχεση ως σύστημα χαμηλού κόστους, υψηλής αποδοτικότητας για μεγάλης κλίμακας ενεργειακή αποθήκευση. Η οξειδοαναγωγική μπαταρία βαναδίου που αναπτύσσεται τελευταία έχει πολλά χαρακτηριστικά γνωρίσματα που την κάνουν ιδανική για έναν μεγάλο αριθμό εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένης της αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας.

Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιήσει 100% της χωρητικότητάς του και να αφηθεί χωρίς κίνδυνο πλήρως εκφορτισμένο ή σε οποιαδήποτε κατάσταση φόρτισης για οποιαδήποτε περίοδο. Η χρήση των διαλυμάτων για την αποθήκευση της ενέργειας υπερνικά πολλούς περιορισμούς σε σχέση με το χρόνο ζωής αντίθετα από τις συμβατικές μπαταρίες. Οι οξειδοαναγωγικές μπαταρίες μπορούν έτσι να εκφορτιστούν πλήρως χωρίς ζημιά, μπορούν να αποθηκευτούν απεριόριστα σε οποιαδήποτε κατάσταση φόρτισης με αμελητέα αυτοεκφόρτιση ή ανάστροφη απώλεια χωρητικότητας, και δεν υπάρχει κανένα πρόβλημα που να συνδέεται με τη διάχυση ηλεκτρολύτη, ούτε με βραχυκυκλώματα λόγω διεύθυνσης μετάλλων στο διαχωριστή.

Το σύστημα Vanadium Redox Battery (VRB) είναι ένα οξειδοαναγωγικό σύστημα μπαταρίας που μπορεί να δώσει ευελιξία στον καθορισμό ορισμένων παραμέτρων σχεδίου που αντιμετωπίζονται από τους μηχανικούς συστημάτων Φ/Β όπως συζητούνται από Largent et al (1993). Στο σύστημα VRB που διευκρινίζεται στο σχήμα 2.13, η ενέργεια αποθηκεύεται στον ηλεκτρολύτη. Η παραγωγή ισχύος καθορίζεται από το σύνολο των κυψελίδων της μπαταρίας και η χωρητικότητα από τον όγκο του ηλεκτρολύτη. Οι ηλεκτρολύτες αντλούνται από τις δεξαμενές αποθήκευσης ηλεκτρολυτών μέσω των αντίστοιχων ημι-κυψελίδων στο σύνολο των κυψελίδων της μπαταρίας. Δεδομένου ότι ο ίδιος ηλεκτρολύτης διοχετεύεται σε όλες τις ημι-κυψελίδες, δεν απαιτείται επιπλέον ενέργεια και επομένως ανάγκη για επιπρόσθετα φωτοβολταϊκά. Το σύστημα μπαταριών δεν είναι απαραίτητο να υπερφορτωθεί και δεν υπάρχει το πρόβλημα έκλυσης μεγάλων ποσών υδρογόνου.

Με τα διαθέσιμα σήμερα υλικά, η ζωή των κυψελίδων των μπαταριών αναμένεται να είναι απεριόριστη, ενώ ο ηλεκτρολύτης έχει ένα κύκλο ζωής 5 έως 7 έτη. Το κόστος αντικατάστασης επομένως περιλαμβάνει μόνο την αντικατάσταση του ηλεκτρολύτη που αποτελεί ουσιαστικά ανακυκλώσιμο υλικό. Στη lead-acid εγκατάσταση οι μπαταρίες αντικαθίστανται εξολοκλήρου όταν συμπληρωθεί ο κύκλος ζωής τους.





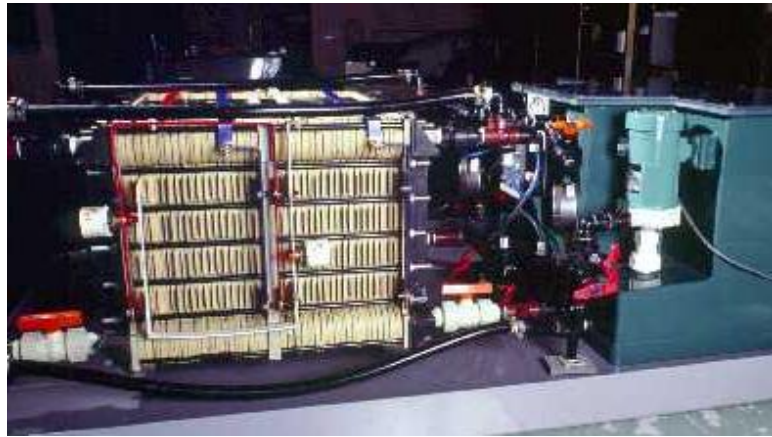
Σχήμα 2.13: Σχηματικό διάγραμμα του οξειδοαναγωγικού συστήματος μπαταριών βαναδίου.

## 2.8 Εμπορικές Χρήσεις

Στις εμπορικές χρήσεις συγκαταλέγεται η κατασκευή και επίδειξη των συστημάτων VRB σε υπαίθριες δοκιμές, συμπεριλαμβανομένου του σχεδίου και της εγκατάστασης του πρώτου VRB που χρησιμοποιήθηκε σε ένα ηλιακό σπίτι επίδειξης στην Ταϊλάνδη (σχήμα 2.14), ενός εφεδρικού συστήματος έκτακτης ανάγκης για τα υποβρύχια (σχήμα 2.15) και ενός αυτοκινήτου γκολφ τροφοδοτούμενου με μπαταρία βαναδίου (σχήμα 2.16).



Σχήμα 2.14: Η μπαταρία βαναδίου τροφοδότησε το ηλιακό σπίτι επίδειξης στην Ταϊλάνδη



Σχήμα 2.15: Βοηθητική μπαταρία έκτακτης ανάγκης για τα υποβρύχια



Σχήμα 2.16: Η μπαταρία βαναδίου τροφοδότησε το ηλεκτρικό αυτοκίνητο γκολφ

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

## Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στις Φωτοβολταϊκές εφαρμογές που απαιτούν ενεργειακή αποθήκευση, η επιλογή του συστήματος ενεργειακής αποθήκευσης είναι πρωταρχικής σημασίας. Οι ηλεκτρικές παράμετροι του συστήματος αποθήκευσης περιορίζουν και διαμορφώνουν το φωτοβολταϊκό σύστημα. Η παρεχόμενη ισχύς στο φορτίο καθορίζει το μέγιστο μέγεθος του ηλεκτρικού φορτίου που μπορεί να ικανοποιηθεί, η ικανότητα ενεργειακής αποθήκευσης καθορίζει τη διάρκεια παροχής ισχύος στο φορτίο και η αποδοτικότητα ενεργειακής μετατροπής καθορίζει το ποσό των πρόσθετων Φ/Β πάνελ που απαιτούνται για την αποκατάσταση της ενέργειας που χάνεται στη μετατροπή. Επιπλέον, η αξιοπιστία του συστήματος αποθήκευσης καθορίζει εάν το Φ/Β σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια κρίσιμη εφαρμογή και ο σχεδιασμός συντήρησης καθορίζει πότε το προσωπικό πρέπει να επισκεφτεί την περιοχή της Φ/Β εγκατάστασης προς επιθεώρηση.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε μια συγκεκριμένη εφαρμογή της Φ/Β τεχνολογίας και θα προσδιορίσουμε το μέγεθος της Φ/Β γεννήτριας κάνοντας δύο αναλύσεις .

Στην πρώτη περίπτωση θα μελετήσουμε την εγκατάσταση αφ' ενός μεν για δύο διαφορετικές κλίσεις κατά τη διάρκεια του έτους εκμεταλλευόμενοι τις μέγιστες τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, αφ' ετέρου δε για μία σταθερή κλίση καθ' όλο το έτος, την πλέον συμφέρουσα. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις το σύστημα θα είναι υπολογισμένο να λειτουργεί για τις δυσμενέστερες συνθήκες ηλιοφάνειας, μέθοδος που χρησιμοποιείται συνήθως για μεγάλα γεωγραφικά πλάτη ή για εποχιακή αποθήκευση.

Στη δεύτερη περίπτωση θα προσδιορίσουμε το μέγεθος του Φ/Β συστήματος και της μπαταρίας βάσει μιας μεθόδου βελτιστοποίησης υπολογίζοντας δύο άκρες τιμές Φ/Β επιφάνειας και την μεταξύ αυτών ευρισκόμενη βέλτιστη τιμή. Θα καταλήξουμε σε μια προτεινόμενη λύση του προβλήματος για το οποίο θα δώσουμε και το αντίστοιχο μέγεθος μπαταριών και την επιφάνεια οικοπέδου που θα καλύπτει η εγκατάσταση και στο επόμενο κεφάλαιο όλη την οικονομική ανάλυση της πρότασης.

### 3.1. Αντικείμενο της μελέτης

Αντικείμενο της μελέτης μας είναι ο σχεδιασμός ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, συνδεδεμένου στο δίκτυο για την τροφοδοσία έξι (6) ραδιοτηλεοπτικών πυλώνων (5 πυλώνων κύριων και 1 εφεδρικών συστημάτων ακτινοβολίας) και φωτισμού ασφαλείας για εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους στο Πάρκο Κεραιών στη θέση Αέρας του όρους Πάρνηθα.

Οι προδιαγραφές-απαιτήσεις του συστήματος όπως αυτές αναφέρονται στη μελέτη του παρασχεθέντος παραρτήματος «Κανονισμός Διαχείρισης & Λειτουργίας Πάρκου Κεραιών στη θέση Αέρας του όρους Πάρνηθα» και εξαιτίας της ευαισθησίας του εξοπλισμού ορίζονται ως εξής:

- Συνέχεια της παροχής ηλεκτρικής ισχύος.
- Ποιότητα της παροχής ηλεκτρικής ισχύος.
- Αδιάλειπτη παροχή ισχύος, όπου απαιτείται και
- Απαλλαγή του καταναλωτή από πιθανές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, αφού ο εξοπλισμός μπορεί να θεωρηθεί ως «υψηλής ευαισθησίας».
- Συνεχής παρακολούθηση του συστήματος τροφοδοσίας, μέσω του κέντρου 24ωρης Παρακολούθησης και Ελέγχου.

Όπως αναλυτικά καθορίζεται το υπό εξέταση Πάρκο Κεραιών αποτελείται σε βασικές γραμμές από:

- 5 ίδιους πυλώνες κύριων συστημάτων ακτινοβολίας,
- 1 πυλώνα εφεδρικών συστημάτων ακτινοβολίας,
- το κεντρικό κτίριο εγκαταστάσεων,
- το ασυρματικό σύστημα λήψης προγραμμάτων,
- τον λοιπό ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, κυρίως για τις εσωτερικές ηλεκτρολογικές εγκαταστάσεις,
- τον λοιπό εξωτερικό εξοπλισμό (κυρίως φωτισμός) και
- τον υποσταθμό ηλεκτροδότησης.

Διευκρινίζεται ότι η Φ/Β εγκατάσταση θα τροφοδοτεί το παραπάνω φορτίο μόνο σε περίπτωση διακοπής ηλεκτροδότησης από τη Δ.Ε.Η. Ο ρόλος της προτεινόμενης εγκατάστασης λοιπόν είναι να λειτουργεί επικουρικά για να εξασφαλίζει την συνέχεια παροχής ισχύος στο φορτίο

Βέβαια σε πρώτη φάση διερευνήσαμε το σενάριο τροφοδοσίας ολόκληρου του Πάρκου Κεραιών εξολοκλήρου με φωτοβολταϊκά για να καταδειχθεί ότι το μέγεθος της Φ/Β εγκατάστασης που προέκυψε ήταν απαγορευτικά μεγάλο λόγω κόστους και έκτασης που θα καταλάμβανε. Έπειτα από υπολογισμούς καταλήξαμε στη μελέτη μιας υβριδικής Φ/Β εγκατάστασης για την παροχή ισχύος στο φορτίο, μόνο όταν αυτή δεν εξασφαλίζεται από το δίκτυο πόλεως, γι' αυτό και απαιτείται η χρήση μπαταριών παρόλο που είναι ένα φωτοβολταϊκό σύστημα διασυνδεδεμένο με το δίκτυο.

### 3.1.1. Φορτίο

Η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση θα παρέχει συνολικό φορτίο **200 kW**. Αυτό το φορτίο αντιστοιχεί στους έξι ραδιοτηλεοπτικούς πυλώνες και τον εφεδρικό φωτισμό που προαναφέραμε και αναλύεται ως εξής:

#### α. Πυλώνες

Κάθε πυλώνας θα διαθέτει έξι (6) ραδιοφωνικούς και δύο (2) τηλεοπτικούς σταθμούς. Έκαστος από αυτούς απαιτεί περί τα 2 kW εγκατεστημένης ισχύος.

Λαμβάνοντας υπόψη τη δυσχερέστερη περίπτωση, η εγκατεστημένη ισχύς ανάγεται σε 16 kW και λαμβάνοντας υπόψη ένα χείριστο συντελεστή ισχύος, προσδιορίστηκε η φαινόμενη ισχύς στα 25 kW.

Άρα για το σύνολο των εγκατεστημένων πυλώνων, έξι ίδιων προδιαγραφών απαιτούνται περί τα  $6 \times 25 = 150$  kW.

#### β. Φωτισμός Ασφαλείας

Εκτιμάται ότι ο εφεδρικός φωτισμός που θα απαιτηθεί θα αφορά σε πολύ μεγάλο ποσοστό φωτισμό ασφαλείας για εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους και θα ανέρχεται στα **30-50 kVA**. Μέσω του φωτισμού αυτού θα υπάρξει δυνατότητα οπτικής επαφής του προσωπικού φύλαξης, δηλαδή του τεχνικού ασφαλείας και του φύλακα του πάρκου, με τους επιλεγμένους εκείνους χώρους στους οποίους διεξάγονται οι κύριες δραστηριότητες του Πάρκου Κεραιών.

### 3.1.2. Εκτίμηση των μέσων ημερήσιων καταναλώσεων που θα τροφοδοτεί το σύστημα

Η προτεινόμενη υβριδική φωτοβολταϊκή εγκατάσταση σχεδιάστηκε για να τροφοδοτεί το σύνολο των 6 ραδιοτηλεοπτικών πυλώνων καθώς και το κύκλωμα του φωτισμού ασφαλείας σε περιπτώσεις διακοπής ηλεκτρικής τροφοδοσίας από τη Δ.Ε.Η.

Από τα στατιστικά στοιχεία των επτά τελευταίων ετών που αναφέρουν τις διακοπές ρεύματος στην περιοχή της Πάρνηθας, στους ήδη εγκατεστημένους πομπούς της ΕΡΤ, τα οποία ευγενικώς μας χορήγησε η αρμόδια υπηρεσία, προκύπτει, λόγω της ιδιαιτερότητας της τοποθεσίας (πυρκαγιές) αλλά και της αύξησης του φορτίου λόγω κλιματιστικών τους καλοκαιρινούς μήνες, ότι οι διακοπές ρεύματος το καλοκαίρι είναι συχνότερες και μεγαλύτερης διάρκειας από αυτές του χειμώνα [ Πίνακες στο Παράρτημα].

Αναλυτικότερα, οι διακοπές ρεύματος κατά μέσο όρο είναι της τάξης των 30 λεπτών ημερησίως κατά τους χειμερινούς μήνες και της 1 ώρας ημερησίως κατά τους θερινούς μήνες. Η μέγιστη δε διακοπή ηλεκτροδότησης που έχει αναφερθεί ήταν διάρκειας 4 ωρών περίπου τους καλοκαιρινούς μήνες λόγω πυρκαγιάς. Διευκρινίζουμε ότι ως χειμερινοί μήνες εδώ θεωρούνται οι μήνες από Οκτώβριο έως Απρίλιο και ως θερινοί μήνες από Μάιο έως Σεπτέμβριο.

Οι εκτιμήσεις των παραπάνω ημερήσιων χειμερινών και καλοκαιρινών καταναλώσεων φαίνονται στον Πίνακα 3.1. Αθροιστικά βλέπουμε από τον ίδιο πίνακα ότι η συνολική μέση ημερήσια κατανάλωση είναι 100kWh το χειμώνα και 200kWh το καλοκαίρι.

Κατανάλωση	Χειμώνας	Καλοκαίρι
1. Πυλώνες	0.5h x 150kW = 75kWh/ημέρα	1h x 150kW = 150kWh/ημέρα
2. Φωτισμός Ασφαλείας	0.5h x 50kW = 25kWh/ημέρα	1h x 50kW = 50kWh/ημέρα
<b>Σύνολο</b>	<b>100kWh/ημέρα</b>	<b>200kWh/ημέρα</b>

Πίνακας 3.1 Μέση ημερήσια ηλεκτρική κατανάλωση που θα τροφοδοτεί το σύστημά μας

### 3.1.3. Ηλιακά Δεδομένα

Στον παρακάτω Πίνακα 3.2 είναι συγκεντρωμένες οι τιμές της μέσης ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους για την περιοχή της Πάρνηθας για τρεις διαφορετικές κλίσεις του συλλέκτη, καθώς και η μέση θερμοκρασία του αέρα στην ίδια περιοχή.

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Κλίση 30°	2,9	3,3	4,3	5,0	6,0	6,1	6,7	6,8	5,7	4,5	3,5	2,8
Κλίση 45°	3,2	3,5	4,3	4,8	5,4	5,4	6,0	6,3	5,6	4,7	3,8	3,1
Κλίση 60°	3,2	3,4	4,1	4,3	4,6	4,5	5,0	5,5	5,2	4,7	3,9	3,2
θερμοκρασία	10.5	11.6	12.9	17.1	21.9	26.6	29.3	29.2	25.3	20.0	16.3	12.5

Πίνακας 3.2 Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/ημέρα), για διαφορετικές κλίσεις του συλλέκτη και μέση θερμοκρασία του αέρα (°C) κατά τη διάρκεια του έτους.

### 3.1.4. Σχεδιασμός Φωτοβολταϊκής Εγκατάστασης

Το προτεινόμενο Υβριδικό Σύστημα δίδεται στο Σχήμα 3.1 και αποτελείται από δυο φωτοβολταϊκές συστοιχίες (1) και από συσσωρευτή τεχνολογίας Redox (3). Η φωτοβολταϊκή συστοιχία παράγει ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο φορτίζει τον συσσωρευτή Redox (3). Η διάταξη περιέχει και μονάδες μετατροπής ισχύος για την μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο (6).

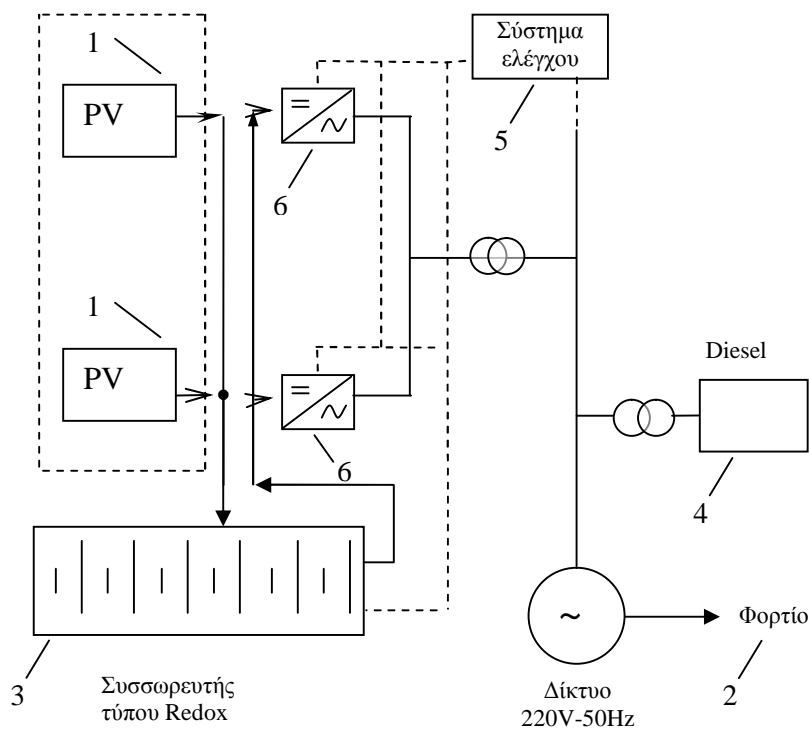
Η εκφόρτιση του συσσωρευτή Redox παρέχει ισχύ στο φορτίο (2) για χρονικό διάστημα που εξαρτάται από το μέγεθος της αποθήκης του Redox που είναι οι δεξαμενές αποθήκευσης του ηλεκτρολύτη (3).

Το προτεινόμενο Υβριδικό Σύστημα είναι καινοτόμο γιατί συνίσταται στην ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών, που ήδη υπάρχουν, όπως σύγχρονες γεννήτριες με μετατροπείς ισχύος (inverters) καθώς και συσσωρευτή νέας τεχνολογίας τύπου Redox, που αποθηκεύει χημικά ενέργεια σε μεγάλες ποσότητες. Η ισχύς του συσσωρευτή καθορίζεται ανεξάρτητα από την αποθηκευόμενη ενέργεια, με την κατάλληλη επιλογή της συστοιχίας των κυψελών (cell stacks) όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Αυτή η ισχύς είναι και η εγγυημένη ισχύς του Υβριδικού Συστήματος. Ταυτόχρονα το σύστημα διαθέτει την ικανότητα να ανταποκριθεί σε όλες τις απαιτήσεις του διαχειριστή του συστήματος σε ότι αφορά τα θέματα ευστάθειας και ποιότητας της παραγόμενης ισχύος, είτε σε παράλληλη λειτουργία είτε σε αυτόνομη λειτουργία με τη Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ). Έναντι μίας ισοδύναμου ΜΕΚ από πλευράς εγγυημένης ισχύος, το προτεινόμενο σύστημα διαθέτει αυξημένη ικανότητα παραγωγής άεργων φορτίων φθάνοντας έως και το  $\pm 100\%$  της ονομαστικής ισχύος των κυψελών του συσσωρευτή Redox.

Η παραγόμενη ενέργεια από φωτοβολταϊκή συστοιχία (1) φορτίζει τον συσσωρευτή Redox (3). Η ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στο Redox καταγράφεται σε ένα όργανο και η ένδειξη του μπορεί να μεταφερθεί σε απόσταση έτσι ώστε να υπάρχει απομακρυσμένη παρακολούθηση. Έτσι ο διαχειριστής του συστήματος γνωρίζει το περιεχόμενη της αποθηκευμένης ενέργειας και δρα ανάλογα.

Η εκφόρτιση του συσσωρευτή Redox προς το φορτίο γίνεται μέσω του Μετατροπέα διπλής κατεύθυνσης (DC/AC Inverter) (6). Κατά την διάρκεια εκφόρτισης του Redox η αποθήκη αδειάζει, ενώ παράλληλα μπορεί να φορτίζει από το ρεύμα που παράγει η φωτοβολταϊκή συστοιχία κ.ο.κ. Κατά την εκφόρτιση το ρεύμα υπό σταθερή ισχύ (την ισχύ του cell stack) διοχετεύεται μέσω του δικτύου στον τοπικό υποσταθμό της ΔΕΗ (4), μειώνοντας αντίστοιχα την κατανάλωση συμβατικού καυσίμου. Όταν η αποθήκη του Redox γεμίσει και υπάρχει περίσσεια από την φωτοβολταϊκή συστοιχία τότε το ρεύμα διοχετεύεται στο δίκτυο.

Από την παραπάνω λειτουργία του προτεινόμενου Υβριδικού συστήματος προκύπτει ότι με τον συσσωρευτή Redox μπορούμε να υποκαταστήσουμε την εγκατεστημένη συμβατική ισχύ, όπως επίσης να υποκαταστήσουμε συμβατικό καύσιμο με ενέργεια που παρέχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Το προτεινόμενο υβριδικό σύστημα μπορεί να θεωρηθεί σαν μία ηλεκτρογεννήτρια που παράγει σταθερή ισχύ, αυτή που καθορίζεται από την επιλογή του cell stack, και χρησιμοποιεί ως καύσιμο ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ.



Σχήμα 3.1 : Διάταξη προτεινόμενου καινοτομικού υβριδικού συστήματος

Εξ' αιτίας της ευαισθησίας του εξοπλισμού πρέπει να υπάρχει προστασία από υπερτάσεις , και υψηλή αξιοπιστία του συστήματος. Πρέπει να εξασφαλίζεται αδιάλειπτη παροχή ισχύος

και να υπάρχει αντικεραυνική προστασία η οποία έχει ήδη πραγματοποιηθεί από το πάρκο κεραιών.

Στην εγκατάστασή υπάρχει μια καινοτομία η οποία είναι απόρροια του είδους του συσσωρευτή. Η μπαταρία μας έχει το πλεονέκτημα να μπορεί να φορτίζεται αλλά και να εκφορτίζεται υπό οποιαδήποτε τάση. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που είναι εγκατεστημένο επάνω στη μπαταρία, το οποίο προσαρμόζει αυτόματα την είσοδο ή την έξοδο της μπαταρίας σε οποιοδήποτε ζεύγος στηλών της ούτως ώστε να επιλέγεται η επιθυμητή τάση φόρτισης/εκφόρτισης κάθε φορά.

### 3.1.5. Κλίση των συλλεκτών

Εφ' όσον η τοποθεσία βρίσκεται στο Βόρειο ημισφαίριο ο προσανατολισμός των πλαισίων θα είναι πάντα προς το Νότο. Όσον αφορά την κλίση αυτών από τον πίνακα 3.2. παρατηρούμε ότι η κλίση των 30 μοιρών πλεονεκτεί επί 7 μήνες (από Μάρτιο μέχρι Σεπτέμβριο), ενώ η κλίση των 45 μοιρών πλεονεκτεί 1 μόνο μήνα (Φεβρουάριο), ενώ των 60 μοιρών πλεονεκτεί για 4 μήνες (Οκτώβριο, Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο).

Μπορούμε να επιλέξουμε την κλίση 30 μοιρών για τους μήνες από Μάρτιο μέχρι Σεπτέμβριο και 60 μοίρες για τους μήνες από Οκτώβριο έως Φεβρουάριο, δεδομένου ότι η διαφορά μεταξύ των 60 και των 45 μοιρών για το μήνα Φεβρουάριο είναι πολύ μικρή. Η κατασκευή λοιπόν των στηριγμάτων των φωτοβολταϊκών πλαισίων θα είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την εύκολη αλλαγή της κλίσης τους δύο φορές το χρόνο, εργασία που μπορεί να γίνεται και από το προσωπικό ασφαλείας του Πάρκου Κεραιών.

Εναλλακτικά θα δοθεί απάντηση και για την περίπτωση μιας και μόνο σταθερής κλίσης των Φ/Β συλλεκτών.

## 3.2. Πρώτη περίπτωση-Μέθοδος εποχιακής αποθήκευσης

### 3.2.1. Η απαιτούμενη ισχύς αιχμής για δύο κλίσεις

Από τον πίνακα 3.2 παρατηρούμε ότι τη μικρότερη μέση τιμή ημερήσιας ακτινοβολίας για τους χειμερινούς μήνες την έχει ο Ιανουάριος με 3,2 kWh και για τους θερινούς μήνες (με αυξημένη ηλεκτρική κατανάλωση 200kWh όμως) την έχει ο Σεπτέμβριος με 5,7 kWh.

Από τον πίνακα 3.2 παρατηρούμε επίσης τις μέσες τιμές θερμοκρασίας του αέρα κατά τους μήνες Ιανουάριο και Σεπτέμβριο που είναι αντίστοιχα 10,5 και 25,3 °C. Η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων θα είναι κατά 30 °C περίπου υψηλότερη, δηλαδή 40,5 και 55,3 °C αντίστοιχα το οποίο μεταφράζεται σε δύο συντελεστές διόρθωσης θερμοκρασίας ίσους με 0.93 και 0.86 περίπου.

Ο δε συντελεστές διόρθωσης ρύπανσης για την περιοχή, δεδομένου ότι είναι δασική περιοχή και εξαρτάται κυρίως από τη γύρη, τα φύλλα δέντρων, τα περιττώματα πουλιών κ.λπ. είναι περίπου 0.90.

Θα υπολογίσουμε την ιδανικά απαιτούμενη ισχύ αιχμής της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης μας για τους χειμερινούς και τους θερινούς μήνες αντίστοιχα .

$$P_a \text{ (kWp)} = \frac{E \text{ (kWh/d)} \times 1 \text{ (kW/m}^2\text{)}}{H \text{ (kWh/m}^2 \cdot \text{d)} \times \sigma_q \times \sigma_r} \quad (3.1)$$



Όπου:

$E$  (kWh/d) είναι η μέση ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του φ/β πλαισίου

$H$  (kWh/m<sup>2</sup>.d) είναι η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που πέφτει στην επιφάνεια του φ/β πλαισίου

$P_a$  (kWp) είναι η ιδανική ισχύς αιχμής του Φ/Β πλαισίου

$I$  (kW/m<sup>2</sup>) είναι η ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ενός ηλίου

$\sigma_\theta$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης για τη θερμοκρασία, και

$\sigma_p$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης για τη ρύπανση.

Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση και λύνοντας ως προς την ιδανικά απαιτούμενη ισχύ αιχμής της φ/β εγκατάστασης, βρίσκουμε για το μήνα Ιανουάριο:

$$P_{αχ} = \frac{100 \times I}{3,2 \times 0,93 \times 0,90} = 37,3 \text{ kWp}$$

Ομοίως για το μήνα Σεπτέμβριο βρίσκουμε:

$$P_{αθ} = \frac{200 \times I}{5,7 \times 0,86 \times 0,90} = 45,3 \text{ kWp}$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι η μεγαλύτερη ισχύς που καλούμαστε να ικανοποιήσουμε πριν λάβουμε υπόψη μας το σύνολο των απωλειών που υπεισέρχονται είναι για το μήνα Σεπτέμβριο 45,3 kWp.

Για να καταλήξουμε σε αξιόπιστη εκτίμηση της ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας όμως, πρέπει να υπολογίσουμε και τις απώλειες των επιμέρους στοιχείων της εγκατάστασής μας, τα οποία φαίνονται στο σχήμα 3.2 και είναι:

- Οι αναστροφείς συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα (DC/AC) για τον οποίο έχουμε ένα συντελεστή απόδοσης περίπου 90%.
- Ο συσσωρευτής Βαναδίου ο οποίος έχει πολύ χαμηλές απώλειες, όπως έχει αναφερθεί αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο, οπότε μας δίνει συντελεστή απόδοσης περίπου 95%
- Το ηλεκτρονικό κύκλωμα της ίδιας της μπαταρίας που δρα σαν διάταξη εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT), το οποίο μας δίνει και ένα πολύ καλό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 95%.
- Τέλος υπολογίζουμε και ένα 95% συντελεστή απόδοσης για τους αγωγούς του δικτύου.

Όλα τα παραπάνω μας οδηγούν σε ένα συντελεστή απόδοσης του συνόλου της εγκατάστασης που είναι:

$$a = 0,90 \times 0,95 \times 0,95 \times 0,95 = 0,77$$

Επομένως η απαιτούμενη ισχύς αιχμής της φ/β συστοιχίας μας για την μέγιστη απαίτηση φορτίου πρέπει να είναι τουλάχιστον:

$$P_{ολ} = \frac{Paq}{a} = \frac{45,3}{0,77} = 58,83 \text{ kWp}$$

### 3.2.2 Η απαιτούμενη ισχύς αιχμής για μια κλίση όλο το έτος

Από τον πίνακα 3.2 παρατηρούμε ότι τη μικρότερη μέση τιμή ημερήσιας ακτινοβολίας για τους χειμερινούς μήνες την έχει ο Δεκέμβριος με 2,8 kWh και για τους θερινούς μήνες (με αυξημένη ηλεκτρική κατανάλωση 200kWh όμως) την έχει ο Σεπτέμβριος με 5,7 kWh.

Από τον ίδιο πίνακα παρατηρούμε επίσης τις μέσες τιμές θερμοκρασίας του αέρα κατά τους μήνες Δεκέμβριο και Σεπτέμβριο που είναι αντίστοιχα 12,5 και 25,3 °C. Η θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων θα είναι κατά 30 °C περίπου υψηλότερη, δηλαδή 42,5 και 55,3 °C αντίστοιχα το οποίο μεταφράζεται σε δύο συντελεστές διόρθωσης θερμοκρασίας ίσους με 0.90 και 0.86 περίπου.

Ο δε συντελεστές διόρθωσης ρύπανσης για την περιοχή, δεδομένου ότι είναι δασική περιοχή και εξαρτάται κυρίως από τη γύρη, τα φύλλα δέντρων, τα περιττώματα πουλιών κ.λπ. είναι περίπου 0.90.

Θα υπολογίσουμε την ιδανικά απαιτούμενη ισχύ αιχμής της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης μας για τους χειμερινούς και τους θερινούς μήνες αντίστοιχα .

$$P_a \text{ (kWp)} = \frac{E \text{ (kWh/d)} \times 1 \text{ (kW/m}^2\text{)}}{H \text{ (kWh/m}^2\text{.d)} \times \sigma_q \times \sigma_r} \quad (3.2)$$

Όπου:

E (kWh/d) είναι η μέση ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του φ/β πλαισίου

H (kWh/m<sup>2</sup>.d) είναι η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας που πέφτει στην επιφάνεια του φ/β πλαισίου

P<sub>a</sub> (kWp) είναι η ιδανική ισχύς αιχμής του φ/β πλαισίου

1 (kW/m<sup>2</sup>) είναι η ηλιακή ακτινοβολία με πυκνότητα ενός ηλίου

σ<sub>θ</sub> είναι ο συντελεστής διόρθωσης για τη θερμοκρασία, και

σ<sub>ρ</sub> είναι ο συντελεστής διόρθωσης για τη ρύπανση.

Εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση και λύνοντας ως προς την ιδανικά απαιτούμενη ισχύ αιχμής της Φ/Β εγκατάστασης, βρίσκουμε για το μήνα Ιανουάριο:

$$P_{αχ} = \frac{100 \times 1}{2,8 \times 0,93 \times 0,90} = 42,6 \text{ kWp}$$

Ομοίως για το μήνα Σεπτέμβριο βρίσκουμε:

$$P_{αθ} = \frac{200 \times 1}{5,7 \times 0,86 \times 0,90} = 45,3 \text{ kWp}$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι η μεγαλύτερη ισχύς που καλούμαστε να ικανοποιήσουμε πριν λάβουμε υπόψη μας το σύνολο των απωλειών που υπεισέρχονται είναι για το μήνα Σεπτέμβριο 45,3 kWp.

Για να καταλήξουμε σε αξιόπιστη εκτίμηση της ισχύος της φωτοβολταϊκής συστοιχίας όμως, πρέπει να υπολογίσουμε και τις απώλειες των επιμέρους στοιχείων της εγκατάστασής μας, τα οποία φαίνονται στο σχήμα 3.2 και είναι:

- Οι αναστροφείς συνεχούς σε εναλλασσόμενο ρεύμα (DC/AC) για τον οποίο έχουμε ένα συντελεστή απόδοσης περίπου 90%.
- Ο συσσωρευτής Βαναδίου ο οποίος έχει πολύ χαμηλές απώλειες, όπως έχει αναφερθεί αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο, οπότε μας δίνει συντελεστή απόδοσης περίπου 95%
- Το ηλεκτρονικό κύκλωμα της ίδιας της μπαταρίας που δρα σαν διάταξη εντοπισμού του σημείου μέγιστης ισχύος (MPPT), το οποίο μας δίνει και ένα πολύ καλό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 95%.
- Τέλος υπολογίζουμε και ένα 95% συντελεστή απόδοσης για τους αγωγούς του δικτύου.

Όλα τα παραπάνω μας οδηγούν σε ένα συντελεστή απόδοσης του συνόλου της εγκατάστασης που είναι:

$$\alpha = 0,90 \times 0,95 \times 0,95 \times 0,95 = 0,77$$

Επομένως η απαιτούμενη ισχύς αιχμής της Φ/Β συστοιχίας μας για την μέγιστη απαίτηση φορτίου πρέπει να είναι τουλάχιστον:

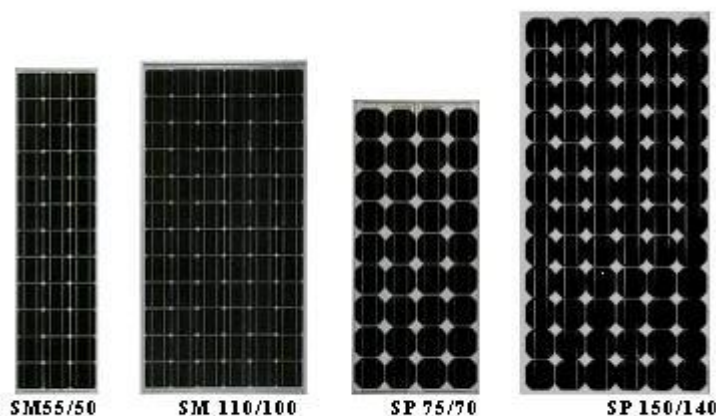
$$P_{ολ} = \frac{P_{αχ}}{\alpha} = \frac{45,3}{0,77} = 58,83 \text{ kWp}$$

Παρατηρούμε ότι είτε επιλέξουμε τη λύση των δύο κλίσεων κατά τη διάρκεια του έτους για τους ηλιακούς συλλέκτες, είτε επιλέξουμε τη λύση της μιας κλίσης, η απαιτούμενη ισχύς αιχμής της Φ/Β συστοιχίας μας για την μέγιστη απαίτηση φορτίου είναι η ίδια.

Οι λόγοι κόστους κατασκευής μιας αρθρωτής βάσης στήριξης των Φ/Β πλασιών λοιπόν για την αλλαγή της κλίσης των, μας οδηγούν να επιλέξουμε τη λύση της μιας και μοναδικής κλίσης.

### 3.2.3 Αριθμός και διάταξη των πλαισίων

Μετά από έρευνα αγοράς καταλήξαμε στη χρησιμοποίηση των πλαισίων **SP 150** της εταιρίας Shell-Solar ( πρώην Siemens ), που φαίνονται στο σχήμα 3.2 και έχουν ισχύ αιχμής 150 kWp και τάση πλαισίου 24 V.



Σχήμα 3.2 : Τύποι πλαισίων της Shell-Solar, μεταξύ των οποίων και το πλαίσιο SP 150 που επιλέξαμε για την εφαρμογή μας

Επομένως για να καλύψουμε την ελάχιστη ισχύ αιχμής των 58,83 kWp χρειαζόμαστε:

$$\frac{58830}{150} = 393 \text{ πλαίσια}$$

Αυτά τα πλαίσια θα τοποθετηθούν σε κλάδους των 10 πλαισίων, ούτως ώστε η τάση εξόδου κάθε κλάδου (και παράλληλα της συστοιχίας) να είναι  $10 \times 24 = 240 \text{ V}$  και συνολικά θα υπάρχουν 40 κλάδοι συνδεδεμένοι παράλληλα, που μας ανεβάζουν τον τελικό αριθμό των χρησιμοποιούμενων πλαισίων σε 400.

Η ονομαστική ισχύς της Φ/Β συστοιχίας λοιπόν τελικά θα είναι:

$$400 \times 150 = 60 \text{ kWp}$$

Τέλος δεδομένου ότι ο αριθμός 400 των πλαισίων είναι αρκετά μεγάλος, θα χωρίσουμε τη συστοιχία σε δύο υποσυστοιχίες των 200 πλαισίων η καθεμία όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.1.

### 3.3 Δεύτερη περίπτωση-Βελτιστοποιημένη Εγκατάσταση

Η μεθοδολογία που ακολουθήσαμε παραπάνω για τον υπολογισμό του μεγέθους της Φ/Β εγκατάστασης είναι ιδιαίτερα αποδοτική όταν εφαρμόζεται σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη.

Δεδομένου ότι η δική μας εφαρμογή μελετάται για την Ελλάδα και συγκεκριμένα για την τοποθεσία της Πάρνηθας, όπου το γεωγραφικό πλάτος είναι περίπου  $38^{\circ}$ , θα προσπαθήσουμε να εφαρμόσουμε μια μέθοδο βελτιστοποίησης του συστήματος προσαρμοσμένη στη συγκεκριμένη μελέτη.

#### 3.3.1. Διαδικασία Βελτιστοποίησης

Με την έννοια βελτιστοποίηση σε μια Φ/Β εγκατάσταση εννοούμε την εύρεση του καταλληλότερου συνδυασμού Φ/Β γεννήτριας και συστήματος αποθήκευσης ενέργειας ούτως ώστε να αποφύγουμε κάποια υπέρμετρη επιλογή πάνω από το απαραίτητο, η οποία θα είχε και το ανάλογο κόστος.

Θα χρησιμοποιήσουμε μια μέθοδο βελτιστοποίησης εκμεταλλευόμενοι τις μέσες ημερήσιες ανά μήνα τιμές του φορτίου και της ηλιακής ακτινοβολίας.

Με αυτή τη μέθοδο θα προσεγγίσουμε το βέλτιστο συνδυασμό της επιφάνειας της Φ/Β συστοιχίας και της χωρητικότητας των συσσωρευτών, ούτως ώστε να ελαχιστοποιήσουμε το κόστος συναρτήσει της διάρκειας ζωής αυτών των τμημάτων.

Ιδιαίτερο βάρος βέβαια θα δοθεί στο βέλτιστο μέγεθος της Φ/Β συστοιχίας, αφού στην περίπτωση μας τα εξαιρετικά χαρακτηριστικά ( μέγιστο βάθος εκφόρτισης 100% και απεριόριστο κύκλο ζωής ) του συσσωρευτή Βαναδίου που επιλέξαμε ως αποθηκευτική μονάδα, ήδη αποτελούν μια βελτίωση του συστήματος.

#### 3.3.2. Μηνιαίο Φορτίο

Το πρώτο βήμα του σχεδιασμού μιας βέλτιστης Φ/Β εγκατάστασης είναι η ανάλυση του φορτίου και η εύρεση του μέσου μηνιαίου προφίλ του. Τα φορτία που καλείται να ικανοποιήσει το σύστημα που μελετάμε είναι αυτά που αναγράφονται παραπάνω στον Πίνακα 3.1 σε ημερήσια βάση.

#### 3.3.3 Κλίση των Φ/Β πλαισίων

Στον Πίνακα 3.2 παραπάνω μπορούμε να δούμε τη μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/ημέρα), για διαφορετικές κλίσεις του συλλέκτη και τη μέση θερμοκρασία του αέρα ( $^{\circ}\text{C}$ ) κατά τη διάρκεια του έτους.

Θα επιλέξουμε μια και μόνο κλίση των 30 μοιρών για όλη τη διάρκεια του έτους.

Συγκεντρώνουμε λοιπόν τα ηλιακά δεδομένα σε ένα καινούριο πίνακα ( Πίνακας 3.3 ) ο οποίος μας δίνει τη μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/ημέρα), για κλίση του συλλέκτη 30 μοιρών, καθώς και τη μέση θερμοκρασία του αέρα ( $^{\circ}\text{C}$ ) κατά τη διάρκεια του έτους.

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
Κλίση 30 <sup>0</sup>	2,9	3,3	4,3	5	6	6,1	6,7	6,8	5,7	4,5	3,5	2,8
θερμοκρασία	10.5	11.6	12.9	17.1	21.9	26.6	29.3	29.2	25.3	20.0	16.3	12.5

Πίνακας 3.3 Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία (kWh/ημέρα), για μονή ( 30<sup>0</sup>) και για διπλή ( 30<sup>0</sup> και 60<sup>0</sup>) κλίση του συλλέκτη και μέση θερμοκρασία του αέρα (°C) κατά τη διάρκεια του έτους.

### 3.3.4 Επίδραση της θερμοκρασίας στο συντελεστή απόδοσης του Φ/Β πλαισίου

Ξέρουμε ήδη ότι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος επιδρά στην απόδοση των Φ/Β πλαισίων και είναι μια παράμετρος που πρέπει οπωσδήποτε να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό του συστήματος.

Πιο συγκεκριμένα, ο βαθμός απόδοσης των Φ/Β πλαισίων μεταβάλλεται ανάλογα με τη θερμοκρασία, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma_e = \sigma_r * \sigma_{\theta i} \quad (3..3)$$

όπου  $\sigma_r$  είναι ο συντελεστής απόδοσης των πλαισίων σε 25 °C και  $\sigma_{\theta i}$  είναι ο συντελεστής θερμοκρασίας.

Για το συντελεστή θερμοκρασίας  $\sigma_{\theta i}$  ισχύει:

$$\sigma_{\theta i} = 1 - \beta [T_{ci} - T_r] \quad (3.4)$$

όπου:  $\beta = 0,0045$  (°C<sup>-1</sup>),

$$T_{ci} = T_i + 30^0C, \quad (3.5)$$

$T_i$  = μέση θερμοκρασία το μήνα, και

$T_r = 25^0C$  η ιδανική θερμοκρασία περιβάλλοντος

Οπότε τελικά προκύπτει ότι ο βαθμός απόδοσης των Φ/Β πλαισίων δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_e = \sigma_r * \sigma_{\theta i} = \sigma_r [1 - \beta [T_{ci} - T_r]] \quad (3.6)$$

Χρησιμοποιώντας τις τιμές του πίνακα 3.3 που μας δίνουν τη μέση θερμοκρασία του αέρα στην περιοχή της Πάρνηθας για κάθε μήνα και εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση, λαμβάνουμε τις τιμές του συντελεστή θερμοκρασίας  $\sigma_{\theta i}$  για κάθε μήνα, οι οποίες αναγράφονται στον παρακάτω πίνακα 3.4.

	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ
θερμοκρασία	10.5	11.6	12.9	17.1	21.9	26.6	29.3	29.2	25.3	20.0	16.3	12.5
Συντελ. εστής θερμοκρασίας	0,93	0,925	0,919	0,9	0,879	0,858	0,845	0,846	0,863	0,888	0,904	0,921

Πίνακας 3.4 Μέση θερμοκρασία του αέρα (°C) κατά τη διάρκεια του έτους και ο αντίστοιχος συντελεστής θερμοκρασίας  $\sigma_{\theta i}$ .

Για το συγκεκριμένο σχεδιασμό μετά από έρευνα αγοράς καταλήξαμε στη χρησιμοποίηση των πλαισίων **SP 150** της εταιρίας Shell-Solar ( πρώην Siemens ), που φαίνονται παραπάνω στο σχήμα 3.2 και των οποίων τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, όπως και τα τεχνικά χαρακτηριστικά φαίνονται παρακάτω στον Πίνακα 3.5.

Τύπος πλαισίου	Shell SM50	Shell SM55	Shell SM110 12	Shell SM110 24	Shell SP70	Shell SP75	Shell SP140	Shell SP150
Μέγιστη Ισχύς (W)	50	55	110	110	70	75	140	150
Τάση σημείου Λειτουργίας (V)	15.9	17.4	17.5	35.0	16.5	17.0	33	34.0
Τάση ανοικτού κυκλώματος (V)	19.8	21.7	21.7	43.5	21.4	21.7	42.8	43.4
Ένταση βραχυκυκλώματος (I)	3.35	3.45	6.9	3.45	4.7	4.8	4.7	4.8
Ονομαστική τάση (V)	12	12	12	24	12	12	24	24
Μήκος (mm)	1219	1293	1316	1316	1200	1200	1619.4	1619.4
Πλάτος (mm)	329	329	660	660	527	527	814	814
Βάθος (mm)	34	34	54	54	56	56	54	54
Βάρος (Kg)	5.2	5.5	11.5	11.5	7.6	7.6	14.8	14.8

Πίνακας 3.5 Ηλεκτρικά και Τεχνικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων για την εγκατάσταση Φ/Β πλαισίων

Τα ηλιακά κύτταρα που απαρτίζουν το πλαίσιο **SP 150**, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.2 έχουν οκταγωνική μορφή και τέτοια διάταξη ώστε να καλύπτεται σχεδόν πλήρως η επιφάνεια του πλαισίου, οπότε θεωρούμε με πολύ μικρό περιθώριο σφάλματος ότι το σύνολο της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του συλλέκτη είναι εκμεταλλεύσιμο.

Μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε το βαθμό απόδοσης του Φ/Β πλαισίου σύμφωνα με τον τύπο:

$$P_{\text{peak}} \text{ (W)} = A_{\text{πλαίσιο}} \text{ (m}^2\text{)} * 1000 \text{ (W/m}^2\text{)} * \sigma_r \quad (3.7)$$

$$\text{Όπου: } P_{\text{peak}} = 150 \text{ W}$$

$$A_{\text{πλαίσιο}} = 1619,4 * 814 = 1318191,6 \text{ mm}^2 = 1,318 \text{ m}^2$$

Λύνοντας την παραπάνω σχέση ως προς τον συντελεστή ισχύος  $\sigma_r$  και αντικαθιστώντας, έχουμε:

$$\sigma_r = \frac{P_{\text{peak}} \text{ (W)}}{A_{\text{module}} \text{ (m}^2\text{)} * 1000 \text{ (W/m}^2\text{)}} = \frac{150}{1,318 * 1000} = 0,114 \quad (3.8)$$

### 3.3.5 Η επιφάνεια της συστοιχίας

Σε αυτό το σημείο θα προχωρήσουμε στον υπολογισμό του πιο σημαντικού μέρους στο σχεδιασμό μιας Φ/Β εγκατάστασης, το οποίο δεν είναι άλλο από την επιφάνεια της Φ/Β συστοιχίας.

Το συνολικό εμβαδόν  $A$  των Φ/Β πλαισίων με συντελεστή απόδοσης  $\sigma_r$ , που μπορεί να μας παρέχει ηλεκτρική ενέργεια  $E$ , δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$A(m^2) = \frac{E \text{ (kWh/d)}}{H \text{ (kWh/m}^2 \cdot \text{d)} \times \sigma_q \times \sigma_r \times \sigma_r \times \sigma_d} \quad (3.9)$$

Το μέγεθος της επιφάνειας που θα μας δώσει ο παραπάνω τύπος δεν είναι το καλύτερο δυνατό για την εγκατάστασή μας. Το βέλτιστο μέγεθος θα κυμαίνεται μεταξύ μιας κατώτερης  $A_{κατ}$  και μιας ανώτερης  $A_{αν}$  τιμής.

Ως κατώτερη τιμή της επιφάνειας  $A_{κατ}$  θεωρούμε εκείνη η οποία με βάση την ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια του έτους, μπορεί να καλύπτει ενεργειακά το φορτίο, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών του συστήματος, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με τη θεώρηση ότι η περίσσεια ενέργειας των ημερών μεγάλης ηλιοφάνειας θα μεταφέρεται στις ανήλιες ημέρες.

Ένα τέτοιο σύστημα θα απαιτούσε θεωρητικά άπειρη χωρητικότητα αποθήκευσης και με μια τέτοια θεώρηση η κατώτερη επιφάνεια μπορεί να υπολογιστεί από τον τύπο:

$$A_{κατ} = \frac{\frac{1}{12} * \sum_{i=1}^{12} (L_{id} + \frac{L_i - L_{id}}{\sigma_B})}{(s_w * s_T * s_{vR} * s_k)} \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{12} * \sum_{i=1}^{12} (H_T)_i * s_r * s_{qi} * s_d * s_p$$

Όπου:

$L_{id}$ : το μέσο μηνιαίο φορτίο για το μήνα  $i$  κατά τις ώρες που υπάρχει πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας. Δεδομένου ότι το δικό μας φορτίο τροφοδοτείται αποκλειστικά από το συσσωρευτή Βαναδίου και όχι από τη Φ/Β συστοιχία απευθείας, αυτός ο όρος θα είναι μηδέν,  $L_{id} = 0$ .

$L_i$ : το μέσο μηνιαίο φορτίο

$\sigma_B$ : ο μέσος βαθμός απόδοσης της μπαταρίας

$\sigma_w$ : οι απώλειες καλωδίων και συνδέσεων του συστήματος

$\sigma_T$ : ο συντελεστής προσαρμογής της Φ/Β συστοιχίας στη μονάδα ισχύος του συστήματος (ρυθμιστής τάσης REGULATOR). Στην περίπτωσή μας δεν χρησιμοποιείται τέτοιο υλικό, οπότε ο  $\sigma_T$  είναι 1

$\sigma_{vR}$ : ο βαθμός απόδοσης του ρυθμιστή φόρτισης εκφόρτισης. Όπως προαναφέραμε η Μπαταρία Βαναδίου φορτίζεται/εκφορτίζεται υπό οποιαδήποτε τάση χρησιμοποιώντας ενσωματωμένο δικό της ηλεκτρονικό ρυθμιστή

$\sigma_k$ : ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα DC/AC

$\sigma_r$ : ο βαθμός απόδοσης των Φ/Β πλαισίων όταν δέχονται ακτινοβολία ίση με 1000 ( $W/m^2$ ) και σε θερμοκρασία 25  $^{\circ}C$

$\sigma_{th}$ : ο συντελεστής θερμοκρασιακής διόρθωσης του βαθμού απόδοσης των Φ/Β πλαισίων



$\sigma_p$ : ο συντελεστής ρύπανσης της Φ/Β συστοιχίας

$\sigma_d$ : ο συντελεστής γήρανσης της Φ/Β συστοιχίας.

Ως ανώτερη τιμή της επιφάνειας  $A_{av}$  θεωρούμε εκείνη η οποία με βάση την ηλιακή ακτινοβολία κατά τη διάρκεια του έτους, μπορεί να καλύπτει ενεργειακά το φορτίο, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών του συστήματος, ακόμα και το χειρότερο μήνα από άποψη ηλιακής ακτινοβολίας και ζήτησης φορτίου.

Ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να κρατάει τον συσσωρευτή πάντα σε πλήρη κατάσταση φόρτισης, εκτός από τις περιπτώσεις συνεχόμενων ανήλιων ημερών.

Η ανώτερη επιφάνεια σε μια τέτοια περίπτωση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$A_{av} = \max \frac{\left( L_{id} + \frac{L_i - L_{id}}{\sigma_B} \right)}{\left( s_w * s_T * s_{vR} * s_k \right)} \frac{1}{\left( H_T \right)_i * s_r * s_{qi} * s_d * s_p} \quad (3.11)$$

Θα υπολογίσουμε τώρα την κατώτερη και την ανώτερη επιφάνεια του συστήματός μας για την μια και μόνο κλίση των 30 μοιρών καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Οι τιμές που χρησιμοποιούμε για τους υπολογισμούς μας είναι:

Το  $L_{id}$  όπως αναφέραμε και προηγουμένως έχει τιμή μηδέν, διότι δεν τροφοδοτούμε το φορτίο απευθείας από τη συστοιχία.

Το  $L_i$  όπως βλέπουμε από τον πίνακα 1 έχει τιμή 100 kWh για τους μήνες από Οκτώβριο έως Απρίλιο και 200 kWh για τους μήνες από Μάιο έως Σεπτέμβριο.

Επίσης για τους συντελεστές απωλειών έχουμε τις τιμές :  $\sigma_B = 0,95$ ,  $\sigma_w = 0,95$ ,  $\sigma_T = 1$ ,  $\sigma_{vR} = 0,95$ ,  $\sigma_k = 0,90$ ,  $\sigma_r = 0,114$ ,  $\sigma_{\theta i}$ ,  $\sigma_p = 0,9$ ,  $\sigma_d = 0,95$ , και για το συντελεστή  $\sigma_{\theta i}$  τις αντίστοιχες τιμές για κάθε μήνα τις παίρνουμε από τον πίνακα 3.4.

Ακόμα, τις τιμές για τη μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία  $H_{Ti}$  τις παίρνουμε από τον πίνακα 3.3.

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στον τύπο που δίνει την κατώτερη επιφάνεια συλλεκτών, βρίσκουμε ότι η τιμή αυτής της επιφάνειας για τη συστοιχία μας είναι:

$$A_{κατ} = 444,95m^2$$

Για την ανώτερη επιφάνεια κάναμε δύο υπολογισμούς. Ο ένας είναι για το μήνα Σεπτέμβριο οπότε έχουμε τη χαμηλότερη ακτινοβολία για υψηλή ζήτηση φορτίου όμως (200kWh) και ο δεύτερος είναι για το μήνα Δεκέμβριο οπότε αν και η ζήτηση φορτίου είναι χαμηλότερη (100kWh), έχουμε τη χαμηλότερη ακτινοβολία όλου του έτους.

Οι τιμές που βρήκαμε για την ανώτερη επιφάνεια συστοιχίας για τις δύο παραπάνω περιπτώσεις είναι:

$$A_{av} = 540,58m^2 \text{ για το μήνα Σεπτέμβριο, και}$$

$$A_{av} = 515,58m^2 \text{ για το μήνα Δεκέμβριο.}$$

Επιλέγουμε λοιπόν τη μεγαλύτερη από τις δύο τιμές, η οποία είναι αυτή του μήνα Σεπτεμβρίου.

Η βέλτιστη επιφάνεια της συστοιχίας, όπως θα υπολογιστεί παρακάτω, θα έχει μία τιμή μεταξύ των τιμών  $A_{κατ}$  και  $A_{av}$  που υπολογίσαμε. Για τον εντοπισμό της θα χρησιμοποιήσουμε μια επαναληπτική διαδικασία, σαρώνοντας με κάποιο βήμα τις τιμές

μεταξύ  $A_{κατ}$  και  $A_{αν}$  και ελέγχοντας κάθε φορά την κατάσταση της στάθμης των συσσωρευτών κατά τη διάρκεια του έτους, ώστε αυτή να μην πέφτει σε State Of Charge (SOC) κάτω από 50%. Η τιμή της επιφάνειας συστοιχίας για την οποία η στάθμη της μπαταρίας Βαναδίου θα βρίσκεται μόλις πάνω από το 50%, θα επιλέγεται και σαν τη βέλτιστη επιφάνεια της Φ/Β συστοιχίας.

### 3.3.6 Υπολογισμός Βέλτιστης Φ/Β Επιφάνειας

Για τον υπολογισμό της βέλτιστης επιφάνειας  $A_{βελ}$  της Φ/Β συστοιχίας μπορούμε να κάνουμε την παραδοχή ο συσσωρευτής μας να μην εκφορτίζεται περισσότερο από 50%, όπως αναφέρεται και στην προηγούμενη παράγραφο. Την παραδοχή αυτή την κάνουμε καθαρά (σαν εναλλακτικό σενάριο) για λόγους επάρκειας ενέργειας για το φορτίο μας, αφού λόγοι καλής λειτουργίας και μακροζωίας δεν τίθενται για το συγκεκριμένο τύπο συσσωρευτή.

Η τάση εξόδου της Φ/Β γεννήτριας θα είναι 240 Volt. Λαμβάνοντας υπόψη τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του πλαισίου που επιλέξαμε (πίνακας 3.5), προκύπτει ότι κάθε κλάδος της συστοιχίας μας πρέπει να αποτελείται από 10 πλαίσια.

$$240V/24V = 10 \text{ Φ/Β πλαίσια}$$

Από τον πίνακα 3.5 επίσης παρατηρούμε ότι το κάθε πλαίσιο έχει επιφάνεια  $1619,4 * 814 = 1318191,6 \text{ mm}^2 = 1,318 \text{ m}^2$

$$\text{Κάθε κλάδος λοιπόν θα καταλαμβάνει χώρο } 10 * 1,318 = \mathbf{13,18 \text{ m}^2}.$$

Αυτή η επιφάνεια είναι και το βήμα που θα χρησιμοποιήσουμε στην επαναληπτική διαδικασία για την εύρεση της βέλτιστης επιφάνειας, ξεκινώντας από την κατώτερη επιφάνεια που έχουμε ήδη υπολογίσει και είναι  $444,95 \text{ m}^2$ .

Μπορούμε λοιπόν να ξεκινήσουμε την επαναληπτική διαδικασία αρχίζοντας από την  $A_{κατ} = 448,12 \text{ m}^2$  έως την  $A_{αν} = 553,56 \text{ m}^2$  με βήμα προσαύξησης  $13,18 \text{ m}^2$ .

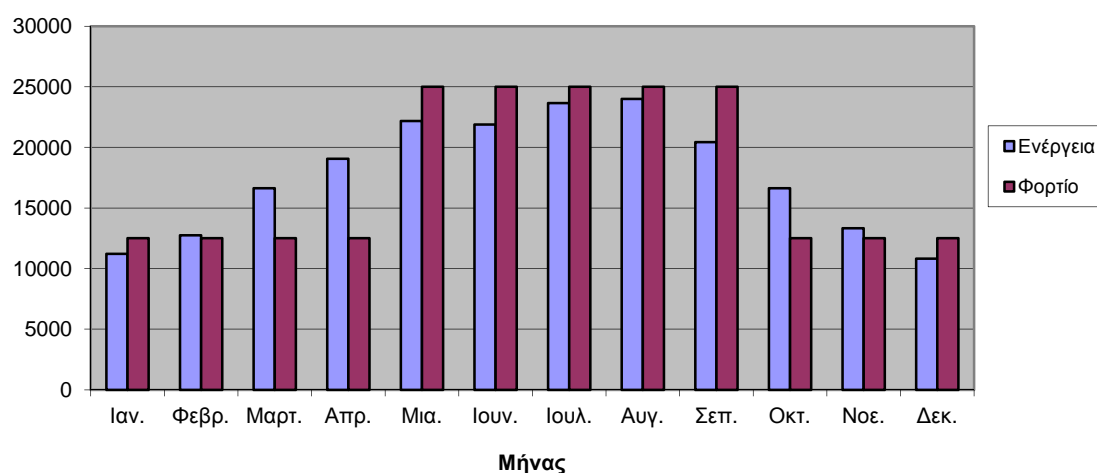
Για την επεξεργασία αυτή χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα excel 2002 το οποίο μας βοηθά να υπολογίσουμε εύκολα και γρήγορα τη βέλτιστη επιφάνεια και μας δίνει και τα αντίστοιχα ραβδογράμματα της παραγόμενης ενέργειας, του φορτίου και της κατάστασης φόρτισης του συσσωρευτή, συναρτήσει του χρόνου.

Έχουμε πραγματοποιήσει 9 επαναληπτικές δοκιμές ξεκινώντας από την κατώτερη τιμή επιφάνειας και καταλήγοντας στην ανώτερη υπολογισθείσα τιμή. Από αυτές παραθέτουμε τις 3 σημαντικότερες που αναφέρονται στην κατώτερη τιμή της φωτοβολταϊκής επιφάνειας  $448,12 \text{ m}^2$  πίνακας 3.6, στην βέλτιστη φωτοβολταϊκή επιφάνεια  $487,66 \text{ m}^2$  πίνακας 3.7, καθώς και στη μέγιστη φωτοβολταϊκή επιφάνεια  $553,56 \text{ m}^2$  πίνακας 3.8, ενώ όλες οι υπόλοιπες δοκιμές παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

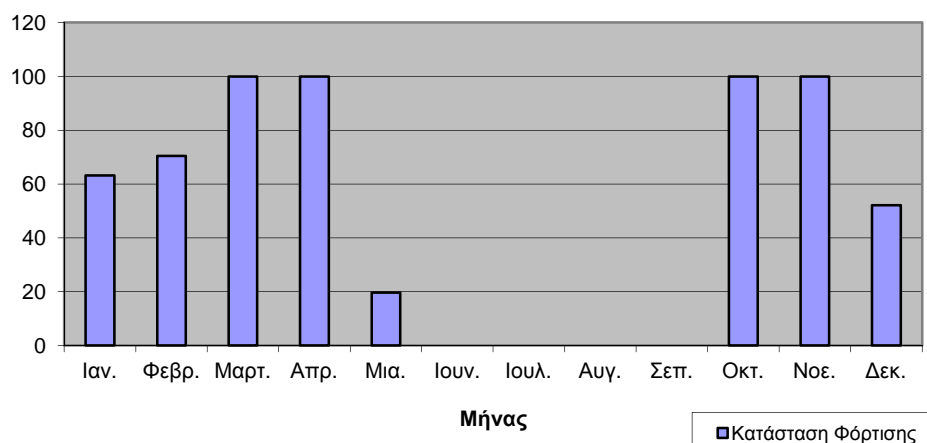
Πίνακας 3.6:  $A=448.12 \text{ m}^2$  Κατώτερη τιμή  $\Phi/B$  επιφάνειας

Μήνας	$H_t$ (Wh/m <sup>2</sup> d)	Μηνιαίες Τιμές Ενέργειας (Ah)			Στάθμη Συσσωρευτών (Ah)		
		Παραγόμενη Ενέργεια	Φορτίο	Διαφορά	Αρχή Μήνα	Τέλος Μήνα	Κατάσταση Φόρτισης (%)
Ιαν.	2900	11208,60	12500	-1291,40	3510,00	2218,60	63,21
Φεβρ.	3300	12754,62	12500	254,62	2218,60	2473,22	70,46
Μαρτ.	4300	16619,65	12500	4119,65	2473,22	3510,00	100,00
Απρ.	5000	19045,10	12500	6545,10	3510,00	3510,00	100,00
Μια.	6000	22181,94	25000	-2818,06	3510,00	691,94	19,71
Ιουν.	6100	21868,26	25000	-3131,74	691,94	0,00	0,00
Ιουλ.	6700	23643,93	25000	-1356,07	0,00	0,00	0,00
Αυγ.	6800	23996,83	25000	-1003,17	0,00	0,00	0,00
Σεπ.	5700	20434,27	25000	-4565,73	0,00	0,00	0,00
Οκτ.	4500	16636,46	12500	4136,46	0,00	3510,00	100,00
Νοε.	3500	13331,57	12500	831,57	3510,00	3510,00	100,00
Δεκ.	2800	10822,10	12500	-1677,90	3510,00	1832,10	52,20

Διάγραμμα Παραγόμενης Ενέργειας και Φορτίου

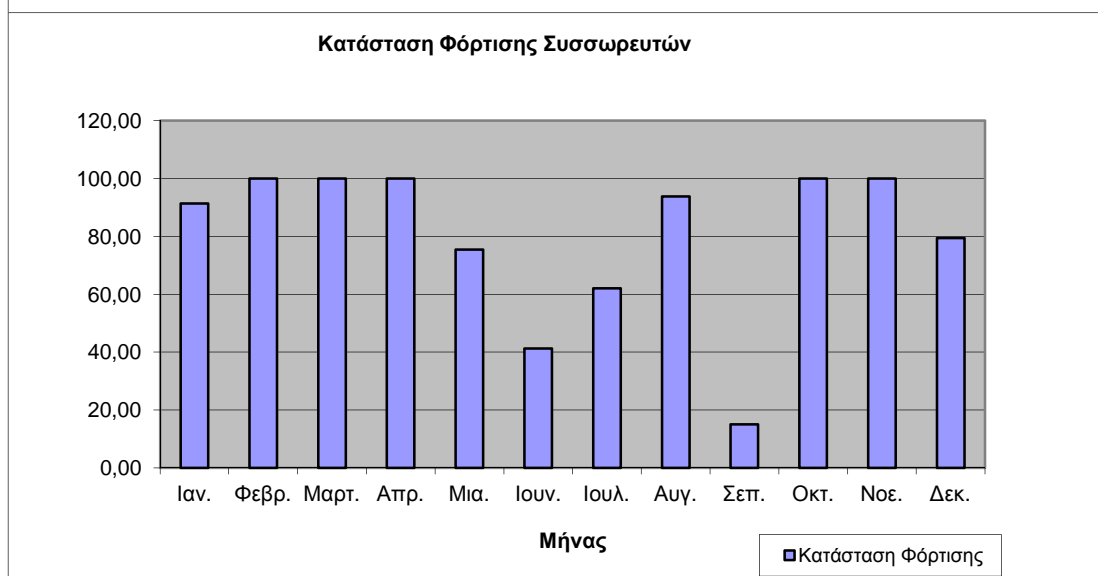
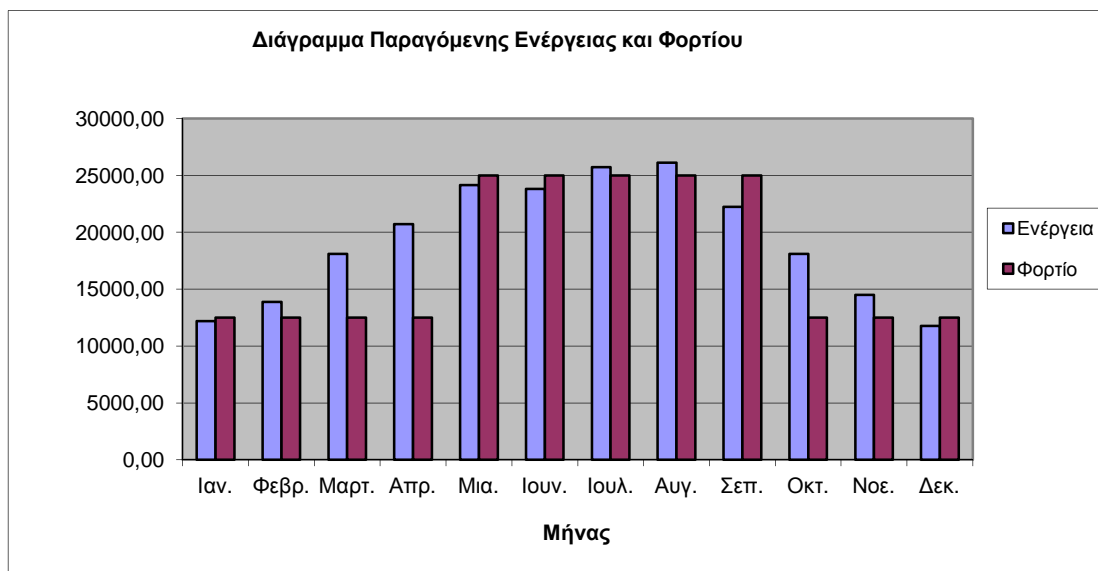


Κατάσταση Φόρτισης Συσσωρευτών



Πίνακας 3.7:  $A=487.66 \text{ m}^2$  Βέλτιστη τιμή  $\Phi/B$  επιφάνειας

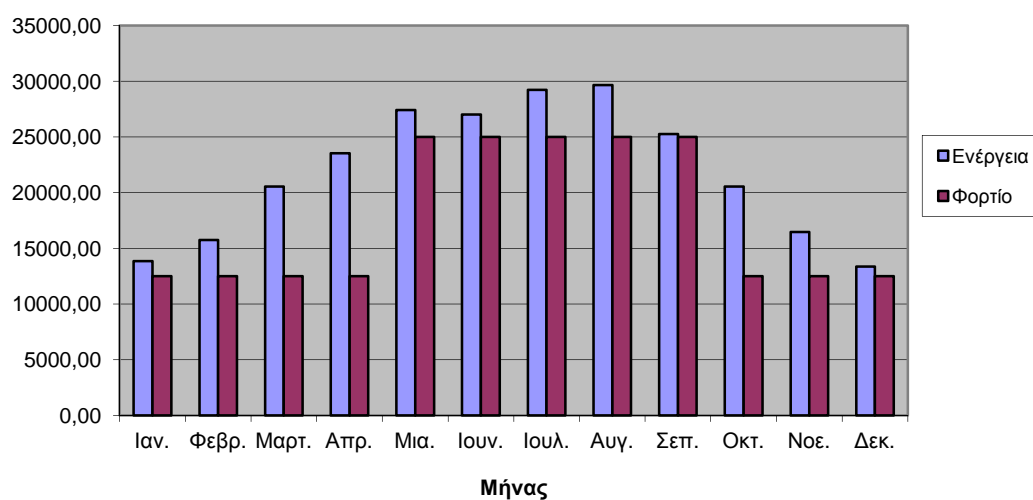
Μήνας	$H_t$ (Wh/m <sup>2</sup> d)	Μηνιαίες Τιμές Ενέργειας (Ah)			Στάθμη Συσσωρευτών (Ah)		
		Παραγόμενη Ενέργεια	Φορτίο	Διαφορά	Αρχή Μήνα	Τέλος Μήνα	Κατάσταση Φόρτισης (%)
Ιαν.	2900	12197,60	12500	-302,40	3510,00	3207,60	91,38
Φεβρ.	3300	13880,02	12500	1380,02	3207,60	3510,00	100,00
Μαρτ.	4300	18086,09	12500	5586,09	3510,00	3510,00	100,00
Απρ.	5000	20725,55	12500	8225,55	3510,00	3510,00	100,00
Μια.	6000	24139,17	25000	-860,83	3510,00	2649,17	75,47
Ιουν.	6100	23797,81	25000	-1202,19	2649,17	1446,98	41,22
Ιουλ.	6700	25730,16	25000	730,16	1446,98	2177,14	62,03
Αυγ.	6800	26114,19	25000	1114,19	2177,14	3291,33	93,77
Σεπ.	5700	22237,30	25000	-2762,70	3291,33	528,63	15,06
Οκτ.	4500	18104,38	12500	5604,38	528,63	3510,00	100,00
Νοε.	3500	14507,89	12500	2007,89	3510,00	3510,00	100,00
Δεκ.	2800	11776,99	12500	-723,01	3510,00	2786,99	79,40



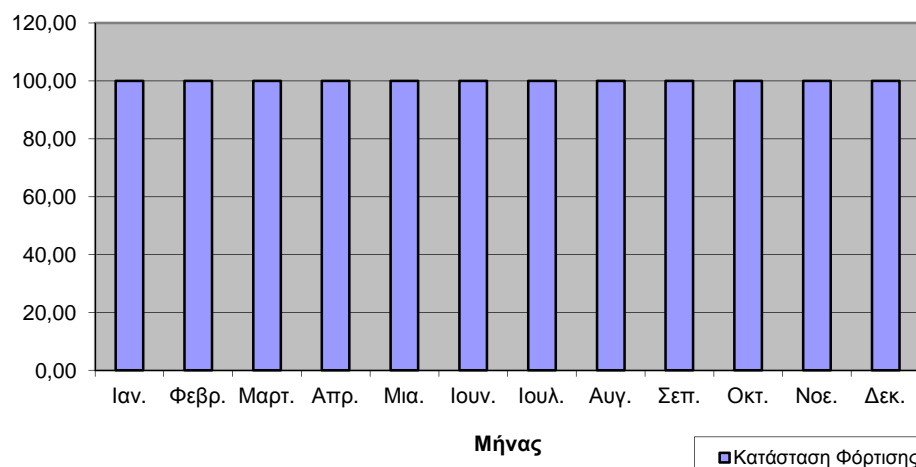
Πίνακας 3.8:  $A=553.56 \text{ m}^2$  Ανώτερη τιμή Φ/Β επιφάνειας

Μήνας	$H_t$ (Wh/m <sup>2</sup> d)	Μηνιαίες Τιμές Ενέργειας (Ah)			Στάθμη Συσσωρευτών (Ah)		
		Παραγόμενη Ενέργεια	Φορτίο	Διαφορά	Αρχή Μήνα	Τέλος Μήνα	Κατάσταση Φόρτισης (%)
Ιαν.	2900	13845,92	12500	1345,92	3510,00	3510,00	100,00
Φεβρ.	3300	15755,70	12500	3255,70	3510,00	3510,00	100,00
Μαρτ.	4300	20530,16	12500	8030,16	3510,00	3510,00	100,00
Απρ.	5000	23526,30	12500	11026,30	3510,00	3510,00	100,00
Μια.	6000	27401,22	25000	2401,22	3510,00	3510,00	100,00
Ιουν.	6100	27013,73	25000	2013,73	3510,00	3510,00	100,00
Ιουλ.	6700	29207,21	25000	4207,21	3510,00	3510,00	100,00
Αυγ.	6800	29643,14	25000	4643,14	3510,00	3510,00	100,00
Σεπ.	5700	25242,34	25000	242,34	3510,00	3510,00	100,00
Οκτ.	4500	20550,92	12500	8050,92	3510,00	3510,00	100,00
Νοε.	3500	16468,41	12500	3968,41	3510,00	3510,00	100,00
Δεκ.	2800	13368,47	12500	868,47	3510,00	3510,00	100,00

Διάγραμμα Παραγόμενης Ενέργειας και Φορτίου



Κατάσταση Φόρτισης Συσσωρευτών



### 3.3.7 Αριθμός και διάταξη των πλαισίων

Ο αριθμός πλαισίων που αντιστοιχεί στην  $A_{κατ}$  είναι:

$444,95/1,318 = 337,6 = 338$  πλαίσια, που σημαίνει ότι θα υπάρχουν

$338/10 = 33,8 = 34$  σειρές κλάδων.

Ο τελικός αριθμός των πλαισίων θα είναι λοιπόν:

$34*10 = 340$  πλαίσια, των οποίων η συνολική επιφάνεια είναι:

$340*1,318 = 448,12 \text{ m}^2$ .

Αντίστοιχα, αριθμός πλαισίων που αντιστοιχεί στην  $A_{αν}$  είναι:

$540,58/1,318 = 410,15 = 411$  πλαίσια, που σημαίνει ότι θα υπάρχουν

$411/10 = 41,1 = 42$  σειρές κλάδων.

Ο τελικός αριθμός των πλαισίων θα είναι λοιπόν:

$42*10 = 420$  πλαίσια, των οποίων η συνολική επιφάνεια είναι:

$420*1,318 = 553,56 \text{ m}^2$ .

Τελικά, ο αριθμός πλαισίων που αντιστοιχεί στην  $A_{βελ}$  είναι:

$487.66/1.318=370$  πλαίσια , διαταγμένα σε  $370/10=37$  σειρές πλαισίων.

### 3.4 Συσσωρευτές

Προκειμένου να επιλέξουμε τον κατάλληλο συσσωρευτή για την εγκατάστασή μας πρέπει να υπολογίσουμε τη χωρητικότητά του ώστε να μπορεί να μας παρέχει ηλεκτρική ισχύ για το μέγιστο αριθμό συνεχόμενων ημερών που μπορεί να υπάρξουν στην περιοχή χωρίς ηλιοφάνεια, οπότε η φ/β συστοιχία μας δεν θα παράγει ενέργεια.

Για την περιοχή της Πάρνηθας και σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία προερχόμενα από το Αστεροσκοπείο Αθηνών, το μέγιστο διάστημα συνεχόμενων ανήλιων ημερών για το χειμώνα είναι 7 και για το καλοκαίρι είναι 3.

Τα παραπάνω στοιχεία μας υποχρεώνουν σε μια χωρητικότητα αποθήκευσης:

$$C_{\chi} = 7 \times 100 \text{ kWh} = 700 \text{ kWh}$$

για τους χειμερινούς μήνες, και

$$C_{\theta} = 3 \times 200 \text{ kWh} = 600 \text{ kWh}$$

για τους καλοκαιρινούς μήνες.

Από έρευνα αγοράς επιλέξαμε τη μπαταρία Βαναδίου 200 kW/800 kWh η οποία τελευταία φαίνεται να έχει χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές, με τις παρακάτω προδιαγραφές:

- Αριθμός ενοτήτων στηλών (Number of stack modules) = 8 στήλες των 25 kW
- Διαμόρφωση στηλών (Stack configuration) = 3 υποστήλες ανά στήλη
- Επιφάνεια ηλεκτροδίων (Electrode area) =  $4000 \text{ cm}^2$
- Όγκος ηλεκτρολυτών (Electrolyte volume) =  $23 \text{ m}^3$
- Συγκέντρωση βαναδίου ηλεκτρολυτών (Electrolyte vanadium concentration) = 1,8 mol/l
- Τάση συστήματος (System voltage) = 500 V
- Ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης (Charge and discharge current) = 400 Amps

- Βάθος εκφόρτισης = 100%
- Συντελεστής απόδοσης = 95%

Η χωρητικότητα του παραπάνω συσσωρευτή (800 kWh) είναι ικανή να τροφοδοτεί το φορτίο μας των 200 kW για 4 συνεχόμενες ώρες σε περίπτωση διακοπής ηλεκτροδότησης από τη Δ.Ε.Η. καλύπτοντας έτσι και το πιο δυσχερές σενάριο που αναφέρεται παραπάνω στην ενότητα γ.

Το εκτιμώμενο κόστος δαπάνης για την αγορά είναι περίπου \$100 ανά kW για τη μπαταρία και περίπου \$15/ kWh για τον ηλεκτρολύτη.

### 3.5. Λοιπές διατάξεις

Χάριν των ιδιαίτερων πρωτοποριακών χαρακτηριστικών του συσσωρευτή Βαναδίου, ο οποίος φορτίζεται/εκφορτίζεται σε οποιαδήποτε τάση και λειτουργεί και σαν ένας πολύ αξιόπιστος μετασχηματιστής σταθερού ρεύματος (DC/DC) δεν χρειάζεται να συμπεριλάβουμε διάταξη MPPT ούτε ρυθμιστή φόρτισης μπαταριών στο σύστημά μας.

Συμπεριλαμβάνουμε μόνο δύο αντιστροφείς τάσης με συντελεστή απόδοσης 0.9 όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2, για τη μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο.

### 3.6. Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος

Για να είναι ολοκληρωμένη η εγκατάστασή μας πρέπει να υπάρχει και ένα Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος (H/Z) καυσίμου σαν ασφαλιστική δικλείδα, ούτως ώστε να καλύψει τις ενεργειακές μας ανάγκες σε μια εξαιρετική περίπτωση απώλειας ηλεκτρικής ενέργειας, όπως βλάβη του συστήματος, και σύγχρονη πτώση του δικτύου της Δ.Ε.Η. για διάστημα μεγαλύτερο των 4 ωρών κ.λπ.

Το H/Z θα μπορεί να λειτουργεί είτε αυτόνομα είτε σε συνεργασία με τη Φ/Β συστοιχία. Προτείνεται μια γεννήτρια εσωτερικής καύσεως Diesel, ισχύος 200kW.

### 3.7. Έκταση του Φωτοβολταϊκού πάρκου

Τα Φ/Β πλαίσια τοποθετούνται σε 74 πάνελ καθένα από τα οποία περιέχει πέντε πλαίσια και έχει διαστάσεις  $161,9 * (5 * 81,4) = 65893,3 \text{ cm}^2$ .

Για τον υπολογισμό της έκτασης που θα καταλάβουν αυτά τα πάνελ υποθέτουμε ότι θα τα τοποθετήσουμε σε 3 σειρές με καθορισμένη-υπολογισμένη απόσταση μεταξύ τους, τόση ώστε να μη σκιάζει κάθε σειρά την επόμενη. Η κλίση τους θα είναι  $30^0$ , ο προσανατολισμός τους προς το νότο και η συνολική έκταση του χώρου που θα καταλαμβάνουν, υπολογίζοντας και περιφερειακό δρόμο πρόσβασης σ' αυτά, θα είναι περίπου  $1400 \text{ m}^2$ .

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΟΣΤΟΥΣ

### Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάσαμε την τεχνική μελέτη του προτεινόμενου υβριδικού Φ/Β συστήματος. Είναι απαραίτητη όμως και η οικονομική ανάλυση για την ολοκλήρωση κάθε μελέτης.

Προκειμένου να προχωρήσουμε στην οικονομική ανάλυση μιας μελέτης όμοιας με την παρούσα, είναι αναγκαίο να εισάγουμε ορισμένους οικονομικούς όρους, όσον αφορά την πρόβλεψη της εξέλιξης του πληθωρισμού, των επιτοκίων δανεισμού και των αντίστοιχων καταθέσεων χρημάτων σε τράπεζες, καθώς και τον ανατοκισμό και τον αποπληθωρισμό μιας χρηματικής ποσότητας.

### 4.1 Βασικοί οικονομικοί όροι

#### α) Δανεισμός με ετήσιο ανατοκισμό

Έστω ότι  $P$  είναι το αρχικό ποσό που απαιτείται για την κατασκευή του υπό μελέτη έργου τη δεδομένη στιγμή που αυτή θα ξεκινήσει. Εάν δεν υπάρχουν κεφάλαια που να μπορούν να καλύψουν αυτό το ποσό, υπάρχει η δυνατότητα δανεισμού του ποσού  $P$ , με χρόνο αποπληρωμής  $N$  έτη και με ετήσιο επιτόκιο  $\varepsilon\%$ . Επομένως στο τέλος του πρώτου έτους το αρχικό ποσό  $P$  θα αυξηθεί κατά το ποσό τόκου  $P*\varepsilon$  και η οφειλή θα ανέρχεται στο ποσό  $S_1$  το οποίο θα είναι:

$$S_1 = P + P*\varepsilon = P(1 + \varepsilon) \quad (4.1)$$

Θεωρώντας ότι οι τόκοι υπολογίζονται κάθε έτος, στο τέλος του δεύτερου έτους η οφειλή θα είναι:

$$S_2 = S_1(1 + \varepsilon) = P(1 + \varepsilon)^2 \quad (4.2)$$

Αντίστοιχα δε, στο τέλος των  $N$  ετών η συνολική οφειλή θα είναι

$$S = P(1 + \varepsilon)^N \quad (4.3)$$

όπου το  $S$  αντιστοιχεί στο αρχικό ποσό  $P$  συν τους τόκους  $N$  ετών και είναι το ποσό που πρέπει να εξοφληθεί μετά από  $N$  έτη.



### β) Επένδυση με ετήσιο ανατοκισμό

Στην περίπτωση που επενδυθεί ένα κεφάλαιο  $P'$  με ετήσιο επιτόκιο  $\varepsilon'$  % για διάρκεια  $N$  ετών, τότε με τη λήξη του χρονικού διαστήματος το κεφάλαιο θα έχει ανέλθει σε:

$$S' = P' (1 + \varepsilon')^N \quad (4.4)$$

όπου το  $S'$  αντιστοιχεί στο αποδιδόμενο κεφάλαιο μετά το τέλος των  $N$  ετών.

### γ) Ετήσια επένδυση σταθερού ποσού $\Delta$ με ετήσιο ανατοκισμό

Στην περίπτωση επένδυσης ενός σταθερού ποσού  $\Delta$  στο τέλος κάθε έτους και για αριθμό ετών  $N$ , με ετήσιο επιτόκιο  $\varepsilon'$  %, τότε στο τέλος της περιόδου των  $N$  ετών το συνολικό ποσό  $S'$  που θα έχει συσσωρευτεί θα είναι:

$$S' = \Delta \frac{(1 + \varepsilon')^N - 1}{\varepsilon'} \quad (4.5)$$

### δ) Εξόφληση δανείου με ετήσιες επενδύσεις και ετήσιο ανατοκισμό

Στην περίπτωση δανεισμού ενός ποσού  $P$  για χρονικό διάστημα  $N$  ετών, με ετήσιο επιτόκιο  $\varepsilon$ , υπολογίζουμε την ετήσια δόση  $\Delta$  που πρέπει να επενδύεται με ετήσιο επιτόκιο  $\varepsilon'$ , ώστε στο τέλος των  $N$  ετών να έχει συγκεντρωθεί το ποσό

$P(1 + \varepsilon)^N$ , δηλαδή το ποσό που θα πρέπει να επιστραφεί στο δανειστή τότε.

Η επένδυση των ετήσιων δόσεων  $\Delta$  για  $N$  έτη με επιτόκιο  $\varepsilon'$  θα μας αποφέρει με το πέρας των  $N$  ετών συνολικό ποσό:

$$S' = \Delta \frac{(1 + \varepsilon')^N - 1}{\varepsilon'}$$

Από την άλλη πλευρά, το ποσό που θα απαιτείται για την εξόφληση του δανείου του ποσού  $P$  θα είναι:

$$S = P(1 + \varepsilon)^N$$

Άρα θα πρέπει να ισχύει:

$$P(1 + \varepsilon)^N = \Delta \frac{(1 + \varepsilon')^N - 1}{\varepsilon'}$$

Δηλαδή λύνοντας ως προς την ετήσια δόση  $\Delta$  θα πρέπει:

$$\Delta = P(1 + \varepsilon)^N \frac{\varepsilon'}{(1 + \varepsilon')^N - 1} \quad (4.6)$$

Στην περίπτωση που τα δύο επιτόκια, επένδυσης  $\varepsilon'$  και δανεισμού  $\varepsilon$ , είναι ίσα, τότε η σχέση 4.6 γίνεται:

$$\Delta = P(1 + \varepsilon)^N \frac{\varepsilon}{(1 + \varepsilon)^N - 1} = P \frac{\varepsilon}{(1 + \varepsilon)^N - 1} + P \cdot \varepsilon = \Delta_1 + \Delta_2 \quad (4.7)$$

όπου, το  $\Delta_1$  δίδεται από τη σχέση (4.5) για ποσό  $S' = P$  και επιτόκιο  $e' = e$  και αντιπροσωπεύει τη δόση που πρέπει να κατατίθεται στο τέλος κάθε έτους ώστε μετά από  $N$  έτη να συμπληρωθεί το ποσό  $P$  για να εξοφληθεί το χρέος μόνο χωρίς τους τόκους του, και το  $\Delta_2$  είναι ο ετήσιος τόκος του ποσού  $P$ .

Τελικά συμπεραίνουμε ότι η ετήσια δόση αποτελείται από δύο όρους, το χρεολύσιο  $\Delta_1$  και τον τόκο  $\Delta_2$ , γι' αυτό και ονομάζεται τοκοχρεολύσιο.

## 4.2 Η αξία του χρήματος σε ορισμένη χρονική στιγμή

Μια άλλη παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν έχουμε να υπολογίσουμε χρηματικά ποσά είναι η αξία του χρήματος για κάθε χρονική στιγμή.

Εάν  $PW$  είναι η σημερινή αξία ενός χρηματικού ποσού, η αντίστοιχη αγοραστική αξία χρημάτων μετά από  $N$  έτη και με ετήσιο πληθωρισμό  $d$ , θα αντιπροσωπεύεται από το μέγεθος  $FW$ , όπου:

$$FW = PW * (1+d)^N \quad (4.8)$$

Επίσης αν  $A$  είναι η αξία ενός αγαθού στην αρχή του παρόντος έτους και είναι γνωστό ότι η ετήσια αύξηση της τιμής του είναι κατά ένα ποσοστό  $i$ , τότε η αξία του ίδιου αγαθού μετά από  $N$  έτη θα είναι  $C_N$ , όπου:

$$C_N = A * (1+i)^N \quad (4.9)$$

Ας υπολογίσουμε τώρα τι αντιπροσωπεύει αυτή η αξία σήμερα, λαμβάνοντας υπόψη τον ετήσιο πληθωρισμό  $d$ , οπότε παίρνουμε για την παρούσα αξία του  $C_N$  τον ακόλουθο τύπο:

$$PW_{CN} = \frac{A(1+i)^N}{(1+d)^N} \quad (4.10)$$

Ας υποθέσουμε τώρα ότι υπάρχει μια υποχρέωση ετήσιων πληρωμών της τάξης των  $A$  € κάθε χρόνο για τα προσεχή  $N$  χρόνια. Ας θεωρήσουμε επίσης ότι η υποχρέωση αυτή αυξάνεται κατά ποσοστό  $i$  κάθε χρόνο, ενώ ο ετήσιος πληθωρισμός αυξάνεται κατά ποσοστό  $d$ . Σε αυτή την περίπτωση η παρούσα αξία του αθροίσματος των πληρωμών για  $N$  έτη  $PWA_{(N,i,d)}$  δίδεται από τη σχέση:

$$PWA_{(N,i,d)} = \frac{A}{(d-i)} \left[ 1 - \left( \frac{1+i}{1+d} \right)^N \right], \text{ εάν } i \neq d \quad (4.11)$$

$$\text{και } PWA_{(N,i,d)} = AN(1+i) \quad \text{εάν } i = d \quad (4.12)$$

### 4.3 Υπολογισμός κόστους ενός Φ/Β συστήματος

Προκειμένου να κατασκευασθεί μια Φ/Β εγκατάσταση πρέπει να δαπανηθεί ένα ορισμένο ποσό. Αυτό ονομάζεται «**κόστος εγκατάστασης**» του Φ/Β σταθμού και συμβολίζεται με  $C_s$ .

Το κόστος κατασκευής λοιπόν αποτελείται συνήθως από δύο όρους, εκ των οποίων θεωρούμε ότι ο πρώτος είναι ανεξάρτητος από το μέγεθος της Φ/Β συστοιχίας και συμβολίζεται  $C_t$ , ενώ ο δεύτερος εξαρτάται από την επιφάνεια της Φ/Β συστοιχίας και συνεπώς από το μέγεθος της εγκατάστασης και συμβολίζεται  $C_A A_C$ .

Το κόστος εγκατάστασης λοιπόν του Φ/Β σταθμού δίδεται από τη σχέση:

$$C_s = C_A A_C + C_t \quad (4.13)$$

Εάν το παραπάνω ποσό  $C_s$  του κόστους εγκατάστασης έχει προέλθει από κάποιο δάνειο, τότε ο φορέας που την εγκατέστησε θα επιβαρύνεται κάθε χρόνο με το τοκοχρεολύσιο μαζί με άλλες δαπάνες.

Οι δαπάνες αυτές ονομάζονται γενικά «**ετήσιες σταθερές δαπάνες**» και δεν εξαρτώνται από το μέγεθος της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας  $E$  του σταθμού.

Σε αυτές τις δαπάνες δε, περιλαμβάνονται οι τόκοι, οι αποσβέσεις, τα ασφάλιστρα, η συντήρηση (ένα μέρος αυτής) κ.λπ.

Εκτός από τις παραπάνω σταθερές δαπάνες, υπάρχουν και κάποιες άλλες που ονομάζονται «**ετήσιες μεταβλητές δαπάνες**» και εξαρτώνται από το μέγεθος της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας  $E$  του σταθμού, όπως φόροι, συντήρηση (ένα μέρος αυτής) κ.λπ.

Τέλος υπάρχει άλλη μία δαπάνη που ονομάζουμε «**μέσο ετήσιο συνολικό κόστος ανά κιλοβατώρα**», η οποία ισούται με το πηλίκο των ετήσιων σταθερών δαπανών  $C_s$  προς την ετήσια αποδιδόμενη ενέργεια  $E$  (kWh). Το μέσο ετήσιο κόστος συμβολίζεται με  $U$  και μετράται σε € kWh. Είναι δηλαδή:

$$U = \frac{C_s}{E} \text{ (€ kWh)} \quad (4.14)$$

### 4.4 Η καθαρή παρούσα αξία

Ονομάζουμε καθαρή παρούσα αξία του Φ/Β συστήματος και τη συμβολίζουμε ως NPV, τη διαφορά μεταξύ των συνολικών ετήσιων χρηματικών απολαβών που υπάρχουν λόγω εξοικονόμησης ενέργειας από το Φ/Β σύστημα ( $P_{sl}$ ), ως προς κάποια συμβατική πηγή ενέργειας, και του κόστους του Φ/Β συστήματος ως προς το χρόνο ζωής του ( $C_{sl}$ ), αναγόμενη σε σημερινές τιμές. Δηλαδή:

$$(NPV) = P_{sl} - C_{sl} \quad (4.15)$$

Όπως μπορούμε να καταλάβουμε εύκολα εάν η παραπάνω σχέση μας δίνει αρνητική τιμή, η εγκατάσταση δεν είναι συμφέρουσα.

Ακολουθώντας θεωρώντας ότι:

- $N$  είναι ο χρόνος ζωής της εγκατάστασης σε έτη

- $C_f$  είναι η τιμή της παραγόμενης ενέργειας
- $L_s$  είναι η ενέργεια που εξοικονομείται
- $d$  είναι ο ετήσιος πληθωρισμός και
- $i$  είναι η αύξηση της τιμής της ενέργειας κατά έτος

τότε το σύνολο των ετήσιων απολαβών από την εξοικονόμηση ενέργειας μας δίδεται από τον τύπο:

$$P_{sl} = \frac{C_f L_s}{(d-i)} \left[ 1 - \left( \frac{1+i}{1+d} \right)^N \right] \quad (4.16)$$

Δεδομένου ότι το κόστος συντήρησης κάθε χρόνο είναι αμελητέο, θεωρούμε σαν κόστος του Φ/Β συστήματος μόνο το αρχικό κόστος της επένδυσης. Οπότε:

$$(NPV) = \frac{C_f L_s}{(d-i)} \left[ 1 - \left( \frac{1+i}{1+d} \right)^N \right] - C_s \quad (4.17)$$

Σε περίπτωση που η (NPV) έχει θετική τιμή, η εγκατάσταση είναι συμφέρουσα. Στις περισσότερες εφαρμογές υπάρχει ένα χρονικό διάστημα μικρότερο από το χρόνο ζωής του συστήματος η καθαρή παρούσα αξία των απολαβών εξοφλεί την αρχική επένδυση. Αυτό το διάστημα λέγεται χρόνος αποπληρωμής και βρίσκεται όταν η (NPV) γίνει μηδέν.

Ένα παράδειγμα υπολογισμού του χρόνου αποπληρωμής είναι εάν θεωρήσουμε ότι:

- το καύσιμο που εξοικονομείται είναι το πετρέλαιο
- η τιμή του πετρελαίου ανά λίτρο είναι  $C_d$  (€/lt)
- η ηλεκτρική του ενέργεια είναι  $q$  (W/lt)
- ο βαθμός απόδοσης του συστήματος πετρελαίου είναι  $h$

Σε αυτή την περίπτωση η τιμή της παραγόμενης ενέργειας δίνεται από τον τύπο:

$$C_f = \frac{C_d}{h * q} \quad (4.18)$$

Επίσης θεωρώντας ότι οι ηλεκτρικές ανάγκες του χρήστη είναι  $L_t$ , και η Φ/Β εγκατάσταση καλύπτει ένα ποσοστό  $f$  από αυτές, τότε:

$$L_s = f L_t \quad (4.19)$$

οπότε η σχέση (4.17) γίνεται:

$$\frac{f C_d L_t}{h q (d-i)} \left[ 1 - \left( \frac{1+i}{1+d} \right)^N \right] = C_s \quad (4.20)$$

την οποία εάν τη λύσουμε ως προς  $N$  μας δίνει:

$$N = \frac{\ln \left[ 1 - \frac{hqC_s}{fL_t C_d} (d - i) \right]}{\ln \left( \frac{1+i}{1+d} \right)} \quad (4.21)$$

Η τελευταία σχέση είναι πολύ σημαντική γιατί μας επιτρέπει να υπολογίσουμε το χρόνο αποπληρωμής, ένα πολύ βασικό κριτήριο επιλογής ενός Φ/Β συστήματος, συναρτήσει των γνωστών μεγεθών η, q, C<sub>s</sub>, C<sub>d</sub>, f, L<sub>t</sub> και των πιθανολογούμενων μεγεθών i και d.

## 4.5 Προϋπολογισμός Κόστους της Φ/Β εγκατάστασης

Αφού ολοκληρώσαμε το σχεδιασμό της Φ/Β εγκατάστασης έχουμε πλέον όλα τα αναγκαία τεχνικά στοιχεία για να προχωρήσουμε σε έναν πρώτο προϋπολογισμό κόστους, ώστε να παρουσιάσουμε μια εικόνα της απαιτούμενης δαπάνης για την πραγματοποίηση του Φ/Β σταθμού. Οι τιμές μονάδας για τον κάθε παράγοντα κόστους της εγκατάστασης έχουν βρεθεί μετά από έρευνα αγοράς και ισχύουν για το έτος 2005.

### 1. Φ/Β πλαίσια

Τα Φ/Β πλαίσια που θα χρησιμοποιήσουμε είναι ισχύος 150 Wp και είναι κατασκευασμένα από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Οι διαστάσεις κάθε πλαισίου είναι:

$$1619,4 * 814 = 1318191,6 \text{ mm}^2 = 1,318 \text{ m}^2$$

και η τιμή του κάθε πλαισίου είναι: 500€ εάν πρόκειται να αγορασθεί ένας μεγάλος αριθμός από αυτά, όπως συμβαίνει στην περίπτωσή μας.

Εμείς θα χρησιμοποιήσουμε 370 πλαίσια, οπότε το συνολικό τους κόστος θα είναι: **370 \* 590 = 218 300 €**

### 2. Συσσωρευτής

Η μπαταρία που θα χρησιμοποιήσουμε είναι μια οξειδοαναγωγική μπαταρία Βαναδίου με χαρακτηριστικά 200 kW ισχύ και 800 kWh χωρητικότητα.

Το εκτιμώμενο κόστος δαπάνης για την αγορά της είναι περίπου €100 ανά kW για τη μπαταρία και περίπου €15/ kWh για τον ηλεκτρολύτη.

Το κόστος του συσσωρευτή λοιπόν ανέρχεται σε:

$$200 * 100 = 20000 \text{ € για τη μπαταρία και}$$

$$800 * 15 = 12000 \text{ € για τον ηλεκτρολύτη}$$

Άρα το συνολικό κόστος αρχικής εγκατάστασης του συσσωρευτή είναι:

$$20000 + 12000 = 32000 \text{ €}.$$

Επειδή όμως ο χρόνος ζωής του ηλεκτρολύτη είναι περίπου 7 χρόνια αυτό σημαίνει ότι στη διάρκεια των 30 ετών που υποθέσαμε σαν χρόνο ζωής της εγκατάστασης, θα αλλαχθεί ο ηλεκτρολύτης άλλες 3 φορές.

Αυτό σημαίνει ότι επιπλέον  $3 * 12000 = 36000 \text{ €}$  πρέπει να προστεθούν στο κόστος αγοράς του συσσωρευτή, τα οποία ανεβάζουν το τελικό κόστος εγκατάστασής του στο ποσό: **32000 + 36000 = 68000 €**

### 3. Ηλεκτρονικά ισχύος

Οι ηλεκτρονικές συσκευές ισχύος που θα χρησιμοποιήσουμε στη Φ/Β εγκατάσταση είναι μια κεντρική μονάδα ελέγχου και μετρήσεων, αντιστροφείς τάσης DC/AC καθώς και ηλεκτρικές συνδέσεις, καλωδιώσεις και κουτιά διακοπών που έχουν συνολικά ένα κόστος της τάξης των **15000 €**.

### 4. Κόστος κατασκευής κτιρίων

Οι ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος και το σύστημα ελέγχου και μετρήσεων πρόκειται να στεγασθεί σε ήδη υπάρχον κτίριο που χρησιμοποιείται για τα αντίστοιχα κυκλώματα του Πάρκου Κεραιών.

Επίσης υπάρχει ήδη πρόβλεψη για την εγκατάσταση του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους από τη μελέτη του Πάρκου Κεραιών.

Απαιτείται λοιπόν μόνο η κατασκευή μιας μεταλλικής αποθήκης έκτασης 30 τ.μ. περίπου για τη στέγαση του συσσωρευτή. Στον ίδιο χώρο θα μπορεί να φυλάσσεται και τυχόν υλικό συντήρησής του όπως και της Φ/Β συστοιχίας.

Δεδομένου ότι το κόστος μιας τέτοιας κατασκευής είναι περίπου 400 € ανά τ.μ. το σύνολο της δαπάνης θα είναι:

$$30 * 400 = 12000 \text{ €}.$$

### 5. Κόστος μηχανικού (μελέτη - σχεδίαση)

Το κόστος μηχανικού αντιστοιχεί περίπου στο 6% του συνολικού κόστους του Φ/Β σταθμού, το οποίο είναι 277300 € άρα θα ανέρχεται σε:

$$277300 * 6\% = 16638 \text{ €}.$$

### 6. Συνολικό κόστος κατασκευής του Φ/Β σταθμού

Αφού αναφέραμε το κόστος όλων των επιμέρους μεγεθών της Φ/Β εγκατάστασης μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό κόστος κατασκευής, σε τιμές 2005, αθροίζοντας τα στοιχεία που έχουμε ήδη αναφέρει.

Το κόστος κατασκευής λοιπόν, το οποίο με άλλα λόγια είναι το ολικό κεφάλαιο που πρέπει να δαπανηθεί για την κατασκευή μιας τέτοιου μεγέθους και χρήσης Φ/Β εγκατάστασης είναι:

**Κόστος Κατασκευής ..... 329.938 ευρώ**

## Ετήσια Έξοδα

Υπολογίζοντας τη ζωή του Φ/Β συστήματος να είναι περίπου 30 χρόνια και της μπαταρίας επίσης το ίδιο, και θεωρώντας ότι το παραπάνω ποσό προέρχεται από δάνειο με ετήσιο επιτόκιο  $\epsilon=6\%$ , ενώ το αντίστοιχο επιτόκιο επενδύσεων είναι  $2\%$  τότε η σταθερή ετήσια δόση  $\Delta$  για την εξόφληση του δανείου θα δίδεται από τον τύπο (4.6) και θα είναι:

$$\Delta = 47346 \text{ €}$$

Η εγκατάστασή μας όμως είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο μέσω του τοπικού υποσταθμού Δ.Ε.Η. Μέσω αυτού λοιπόν μπορούμε να πωλούμε την πλεονάζουσα ενέργεια από τη Φ/Β μας συστοιχία στη Δ.Ε.Η.

Στον πίνακα 4.7 έχουμε καταγράψει την παραγόμενη ενέργεια ανά μήνα από το Φ/Β σταθμό που προτείνουμε. Εκεί επίσης μπορούμε να δούμε και το αντίστοιχο φορτίο ανά μήνα που καλούμαστε να τροφοδοτήσουμε.

Αθροίζοντας τις μηνιαίες παραγόμενες και τα μηνιαία φορτία, υπολογίζουμε τα αντίστοιχα ετήσια μεγέθη, τα οποία είναι:

$$\begin{aligned} \text{Ετήσια παραγόμενη ενέργεια από Φ/Β} &= 231297,15 \text{ Ah και} \\ \text{Ετήσιο φορτίο} &= 212500 \text{ Ah .} \end{aligned}$$

Έχουμε μια περίσσεια ενέργειας λοιπόν της τάξης των  $18797,15 \text{ Ah}$ .

Αυτή η ενέργεια αν μετατραπεί σε κιλοβατώρες θεωρώντας την τάση ίση με  $240 \text{ V}$ , ισοδυναμεί με **4511 kWh**.

Το παραπάνω ποσό ενέργειας μπορεί να πωλείται στη Δ.Ε.Η. στην τιμή των  $0.0605 \text{ €/kWh}$  που είναι αυτή που ορίζεται από τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας για την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας από σταθμούς αυτό-παραγωγών και ανεξάρτητων παραγωγών, σύμφωνα με τους νόμους 2244/94 και 2773/99.

Το χρηματικό όφελος από αυτή την πώληση είναι:

$4511 * 0,0605 = 273 \text{ €}$  ετησίως, το οποίο μπορεί να αφαιρεθεί από την ετήσια δόση  $\Delta=47346\text{€}$  που υπολογίσαμε παραπάνω.

Ακολούθως μπορούμε να υπολογίσουμε το κόστος της μονάδας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας  $U$  σε  $\text{€/kWh}$ , διαιρώντας τα ετήσια έξοδα  $\Delta$  σε  $\text{€}$  με την ετήσια παραγόμενη ενέργεια σε  $\text{kWh}$ .

$$U (\text{€/kWh}) = \frac{47346\text{€}}{55511\text{kWh} / \text{έτοV}} = 0,853 \text{ €/kWh}$$

Το κόστος της μονάδας ενέργειας είναι αρκετά χαμηλό για εφαρμογή Φ/Β εγκατάστασης. Πρέπει να λάβουμε υπόψη μας βέβαια ότι δεν υπήρχε στη μελέτη μας οικονομική επιβάρυνση για την αγορά και εγκατάσταση του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους, για την αντικεραυνική προστασία, για το κτίριο στέγασης του συστήματος ελέγχου και των ηλεκτρονικών ισχύος,

για το οικόπεδο και για την περιφραξη του. Αυτά είχαν ήδη προβλεφθεί για τις ανάγκες του Πάρκου Κεραιών.

Σε οποιαδήποτε περίπτωση, και έχοντας υπόψη ότι το κράτος επιβαρύνεται με 1000-1500 ευρώ για φορτίο 3-4 kWp όσο αφορά την κατανάλωση των κλιματιστικών στις ώρες αιχμής, και ακόμα ότι υπάρχει το χρόνιο πρόβλημα των 4000 ελληνικών νησιών που κοστίζουν 2000-3000 ευρώ για το αντίστοιχο φορτίο, το αποτέλεσμα της μελέτης μας κάθε άλλο παρά αρνητικό θα μπορούσε να θεωρηθεί.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### ΑΝΑΛΥΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της βέλτιστης Φ/Β εγκατάστασης η οποία θα ικανοποιεί τα απαιτούμενα φορτία για τη λειτουργία του πάρκου κεραιών στη θέση Αέρας του όρους Πάρνηθα, κατά τις περιπτώσεις βραχυχρόνιας διακοπής ρεύματος της ΔΕΗ. Η μέθοδος βασίζεται στη σύγκριση της μέσης μηνιαίας ενέργειας που παρέχει ο φωτοβολταϊκός σταθμός με το μέσο μηνιαίο φορτίο. Στη μέθοδο αυτή ο συντελεστής μετατροπής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας έχει μια σταθερή ετήσια τιμή. Αυτή ισούται με το μέσο όρο που λαμβάνεται για κάθε μήνα, αφού ληφθεί υπόψη η μηνιαία μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.

Μια δεύτερη παράμετρος βελτίωσης της λειτουργίας της Φ/Β εγκατάστασης είναι η χρησιμοποίηση της οξειδοαναγωγικής μπαταρίας Βαναδίου σαν αποθήκη ενέργειας, η οποία διαθέτει πολύ καλά χαρακτηριστικά, όσον αφορά το μέγιστο βάθος εκφόρτισης, το κόστος αγοράς, το χρόνο φόρτισης, τη χωρητικότητα και τον κύκλο ζωής της.

Η χρήση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας αντιμετωπίζει δύο βασικά προβλήματα. Το πρώτο είναι η αξιοπιστία του συστήματος και το δεύτερο είναι η αδιάλειπτη παροχή ενέργειας.

Η αξιοπιστία ενός Φ/Β σταθμού είναι δύσκολο να καθοριστεί. Ο λόγος είναι ότι εξαρτάται από πολλούς απρόβλεπτους και στοχαστικούς παράγοντες, όπως οι κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στην εκάστοτε περιοχή.

Η αδιάλειπτη παροχή ενέργειας σχετίζεται άμεσα και με το γεγονός ότι η ζήτηση του φορτίου δε συμπίπτει χρονικά με την ύπαρξη ηλιακής ακτινοβολίας που μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια.

Στο σύστημά μας έχουμε δώσει ιδιαίτερο βάρος στην επιλογή της μπαταρίας, της οποίας η χωρητικότητα και τα χαρακτηριστικά επηρεάζουν εξαιρετικά το βαθμό στον οποίο η Φ/Β μας εγκατάσταση μπορεί να καλύψει τις απαιτήσεις του φορτίου.

Επιπλέον δεδομένου ότι το φορτίο που καλούμαστε να ικανοποιήσουμε δεν είναι ομαλά κατανομημένο κατά τη διάρκεια της ημέρας, αλλά εξαρτάται από τυχαίους παράγοντες που μπορεί να οδηγήσουν σε μια διακοπή ηλεκτροδότησης από τη Δ.Ε.Η. είναι απαραίτητο να υπάρχει πάντα αποθηκευμένη ενέργεια που να μπορεί να το καλύψει.

Σε αυτό το ζητούμενο κινήθηκε και ο τρόπος επιλογής και υπολογισμού του συστήματός μας. Με την επαναληπτική μέθοδο βελτίωσης που χρησιμοποιήσαμε και ελέγχοντας τις τιμές της παραγόμενης ενέργειας, της ζήτησης φορτίου και της στάθμης των συσσωρευτών σε μηνιαία βάση, καταλήξαμε στο βέλτιστο μέγεθος Φ/Β συστοιχίας, το οποίο σε συνάρτηση με την αποθήκη ενέργειας, και μας εξασφαλίζει επαρκή αποθέματα ενέργειας για την κάλυψη του φορτίου.

Έχουμε επιτύχει λοιπόν με το Φ/Β σταθμό που προτείνουμε την αδιάλειπτη παροχή ενέργειας στο φορτίο, αποφεύγοντας κάποια υπερδιαστατοποίηση και το παρελκόμενο κόστος αυτής. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το γεγονός ότι το συνολικό πλεονάζον ποσό ενέργειας ανά έτος είναι μικρό, της τάξης των 4511 kWh. Επιπλέον οφείλουμε να

σημειώσουμε ότι το συγκεκριμένο ποσό ενέργειας διοχετεύεται στο δίκτυο μέσω του τοπικού υποσταθμού Δ.Ε.Η. και από την πώλησή του προκύπτει ένα μικρό χρηματικό όφελος.

Σαν οικονομικό κριτήριο στην επιλογή της εγκατάστασης, χρησιμοποιήσαμε το κόστος του συστήματος συναρτήσει της διάρκειας ζωής του, το οποίο βέβαια είναι υψηλό σαν κόστος αρχικής εγκατάστασης και μικρό σαν κόστος λειτουργίας, αντίθετα με τα συμβατικά συστήματα.

Υποθέτοντας ότι το σύνολο της δαπάνης για την εγκατάσταση του Φ/Β σταθμού θα προέλθει από δανεισμό με ετήσιο επιτόκιο 6% και διαιρώντας τα ετήσια έξοδα Δ σε € με την ετήσια παραγόμενη ενέργεια σε kWh καταλήξαμε σε ένα κόστος κιλοβατώρας της τάξης των 0,853 €/kWh, το οποίο είναι θετικό γενικά για συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Περισσότερη σημασία από το συγκεκριμένο κόστος έχει όμως το γεγονός ότι εξασφαλίζεται μ' αυτή την εγκατάσταση η αξιοπιστία μιας Δημόσιας Επιχείρησης Κοινής Ωφέλειας, η οποία παρουσιάζει μια συνέχεια και όχι διακοπές στην υπηρεσία της προς τους πολίτες.

Τελειώνοντας θεωρούμε ότι με τα σημερινά δεδομένα και την πολιτική που ακολουθείται στον τομέα της ενέργειας, η Φ/Β εγκατάσταση που προτείνουμε δείχνει να είναι μια αρκετά ελκυστική πρόταση αφού επιλύει σε μεγάλο βαθμό το πρόβλημα της αξιόπιστης παροχής ενέργειας με λογικό κόστος.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. PERFORMANCE OF 170 GRID CONNECTED PV PLANTS IN NORTHERN GERMANY-ANALYSIS OF YIELDS AND OPTIMIZATION POTENTIALS, B.DECKER and U.JAHN, Solar Energy Vol.59, Nos.4-6, pp.127-133, 1997
2. Alexandre de Lemos Pereira, “Modular supervisory controller for hybrid power systems”, Risø-R-1202(EN), IAU 00-A-891, Risø National Laboratory, Roskilde, June 2000
3. “Optimizing Wind and Diesel Systems with VRB Energy Storage,” Mark Kuntz, VRB Power Systems, Inc., Presentation at the Wind Diesel Workshop 2004, Anchorage, Alaska, 28-30 September 2004
4. “Simulation model for sizing of stand-alone solar PV system with interconnected array”, N.D. Kaushika, Nalin K. Gautam, Kshitiz Kaushik, Solar Energy Materials and Solar Cells 85 (2005) 499-519
5. “Energy Yield Simulations of Interconnected Solar PV Arrays”, Narendra D. Kaushika and Nalin K. Gautam, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 18, NO.1, MARCH 2003
6. Local energy management through mathematical modeling and optimization, David Craft, Doctor of Philosophy, Massachusetts Institute of Technology, September 2004
7. “Dynamic Battery Model for Photovoltaic Applications”, D. Guasch and S. Silvestre, PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS : RESEARCH AND APPLICATIONS 2003; 11:193-206
8. “STAND-ALONE PV MODULAR POWER CONDITIONING STATION”, X Vallve – E Feixas, 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 11-15 April 1994
9. “DESIGN OF HYBRID-PHOTOVOLTAIC POWER GENERATOR, WITH OPTIMIZATION OF ENERGY MANAGEMENT”, M. MUSELLI, G. NOTTON and A. LOUCHE, Solar Energy Vol.65, No.3, pp. 143-157, 1999
10. “ANALYSIS OF LOW POWER STAND ALONE HYBRID PHOTOVOLTAIC-WIND SYSTEMS FOR TELECOMMUNICATIONS”, M. Alonso, F. Chenlo, L. Arribas, L. Ramirez and J. Navarro, 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 1-5 May 2000, Glaskow, UK
11. “OPERATIONAL EXPERIENCE OF A RESIDENTIAL PHOTOVOLTAIC HYBRID SYSTEM”, ART J. PETERSON Jr., RICHARD PEREZ, BRUCE BAILEY and KURT ELSHOLZ, Solar Energy Vol.65, No.3, pp. 227-235, 1999
12. “ ‘ARES’ – A REFINED SIMULATION PROGRAM FOR THE SIZING AND OPTIMIZATION OF AUTONOMOUS HYBRID ENERGY SYSTEMS”, T.R MORGAN, R.H. MARSHALL and B.J. BRINKWORTH, Solar Energy Vol.59, Nos.4-6, pp. 205-215, 1997

13. Περράκη Β. Σημειώσεις: «Φυσική, τεχνολογία και χρήση Φ/Β στοιχείων» ΠΑΤΡΑ 2004
14. Κ. Καγκαράκη «Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία», Αθήνα 1992
15. ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, τεύχος πρώτο, Αρ. Φύλλου 168, 7 Οκτωβρίου 1994
16. ΕΦΗΜΕΡΙΣ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ, τεύχος πρώτο, Αρ. Φύλλου 286, 22 Δεκεμβρίου 1997
17. 'Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας', Μήλιας Αργείτης Ιωάννης, Πάτρα 1996
18. "Investigation of V(V)/V(IV) system for use in positive half-cell of a redox battery", E. Sum, M. Rychcik and M. Skyllas-Kazacos, J. Power Sources, **16**, 85-95 (1985)
19. "Status of the Vanadium Battery Development Programme", C. Menictas, D.R. Hong, Z.H. Yan, J. Wilson, M. Kazacos and M. Skyllas-Kazacos, Proceedings, Electrical Engineering Congress, Sydney, November 1994
20. C. Menictas, D.R. Hong, M. Kazacos and M. Skyllas-Kazacos, "Vanadium Battery Solar Demonstration House", Proceedings of the Solar '94 Conference, Sydney, Australia, Vol 2 (1994) 611

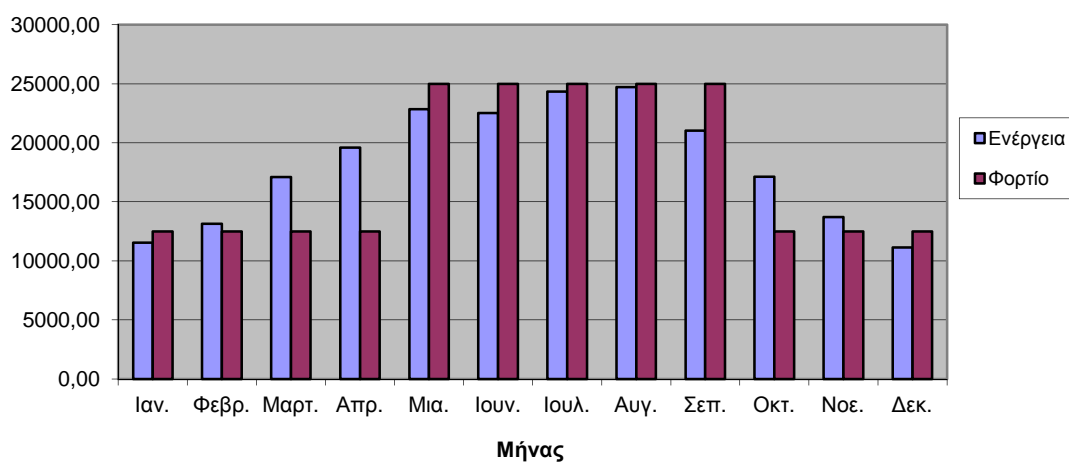
## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι**

**ΠΙΝΑΚΕΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ  
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ**

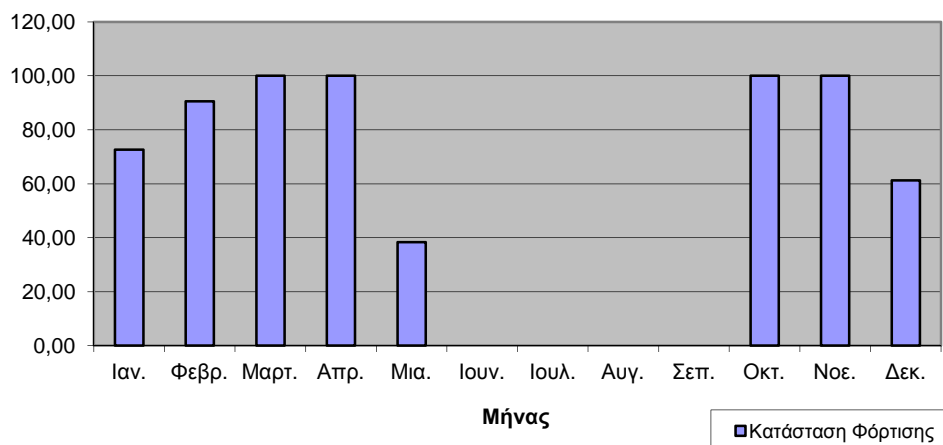
Πίνακας 3.9: A = 461,3 m<sup>2</sup>

Μήνας	H <sub>i</sub> (Wh/m <sup>2</sup> d)	Μηνιαίες Τιμές Ενέργειας			Στάθμη Συσσωρευτών		
		Παραγόμενη Ενέργεια	Φορτίο	Διαφορά	Αρχή Μήνα	Τέλος Μήνα	Κατάσταση Φόρτισης (%)
Ιαν.	2900	11538,27	12500	-961,73	3510,00	2548,27	72,60
Φεβρ.	3300	13129,75	12500	629,75	2548,27	3178,02	90,54
Μαρτ.	4300	17108,46	12500	4608,46	3178,02	3510,00	100,00
Απρ.	5000	19605,25	12500	7105,25	3510,00	3510,00	100,00
Μια.	6000	22834,35	25000	-2165,65	3510,00	1344,35	38,30
Ιουν.	6100	22511,44	25000	-2488,56	1344,35	0,00	0,00
Ιουλ.	6700	24339,34	25000	-660,66	0,00	0,00	0,00
Αυγ.	6800	24702,62	25000	-297,39	0,00	0,00	0,00
Σεπ.	5700	21035,28	25000	-3964,72	0,00	0,00	0,00
Οκτ.	4500	17125,76	12500	4625,76	0,00	3510,00	100,00
Νοε.	3500	13723,68	12500	1223,68	3510,00	3510,00	100,00
Δεκ.	2800	11140,40	12500	-1359,61	3510,00	2150,40	61,26

Διάγραμμα Παραγόμενης Ενέργειας και Φορτίου

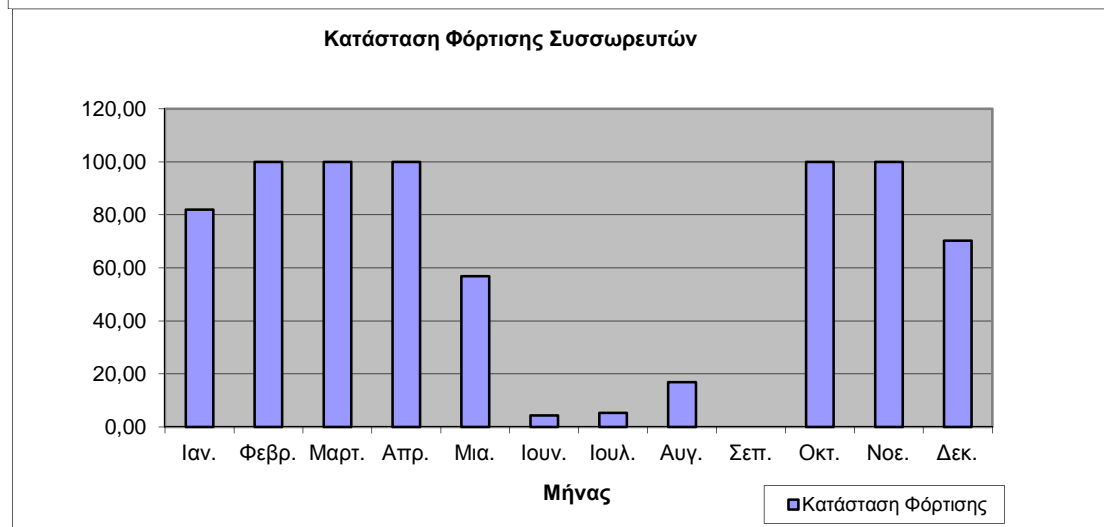
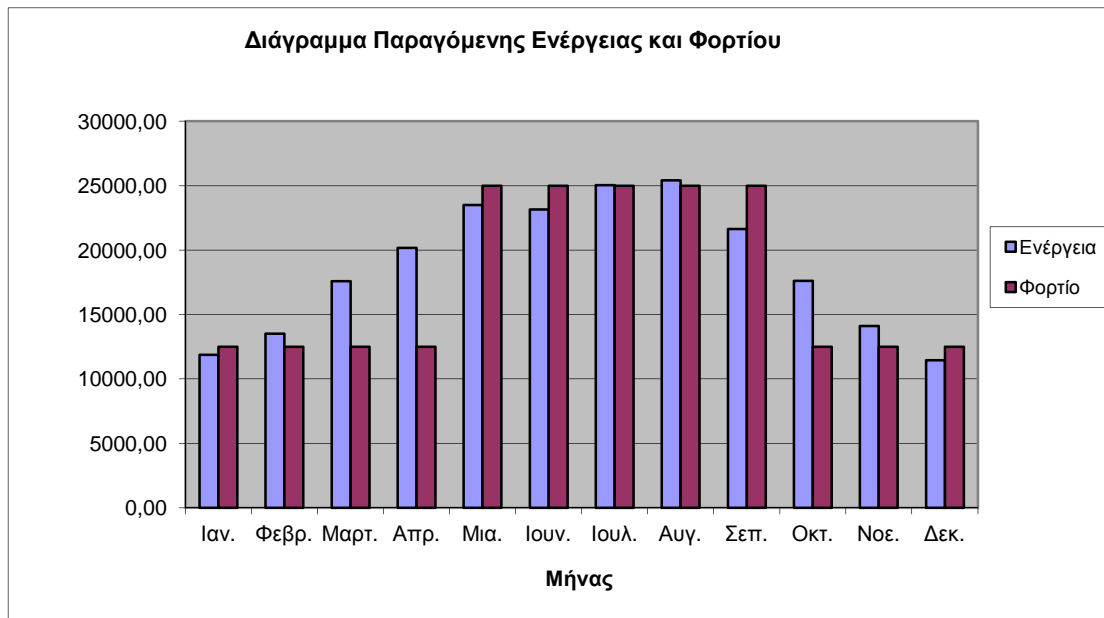


Κατάσταση Φόρτισης Συσσωρευτών



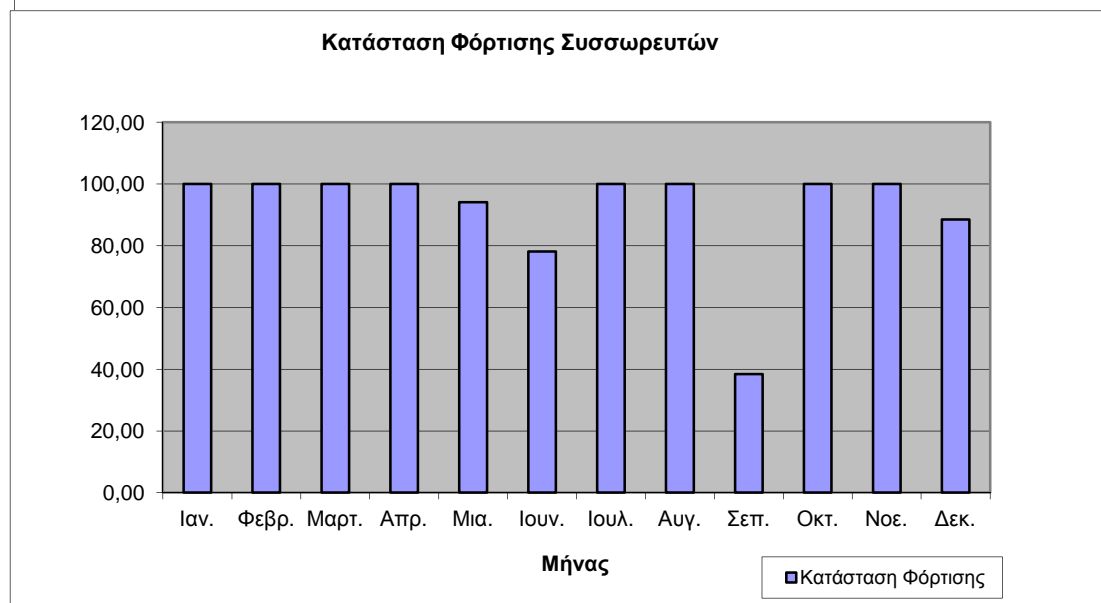
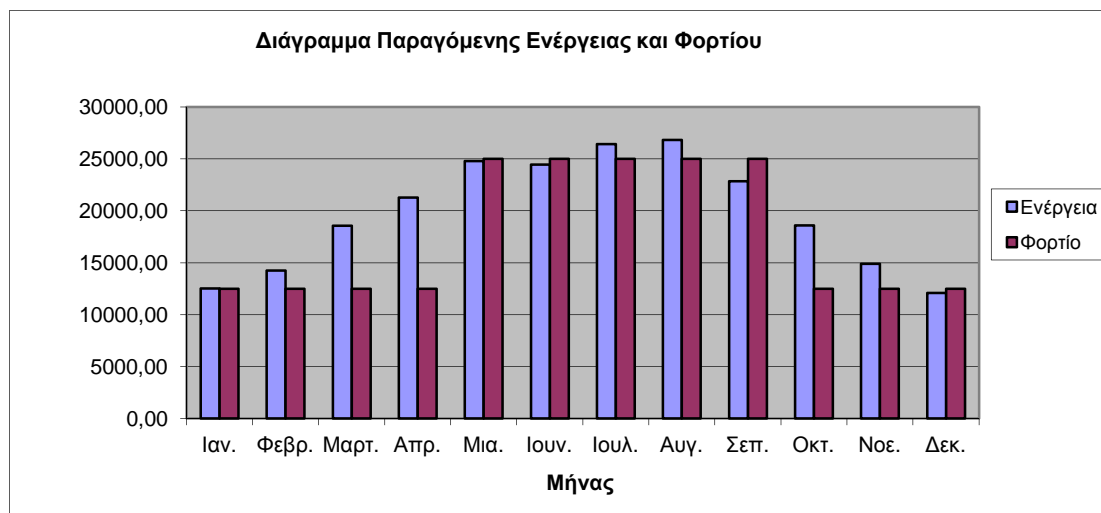
Πίνακας 3.10 : A = 474,48 m<sup>2</sup>

Μήνας	H <sub>t</sub> (Wh/m <sup>2</sup> d)	Μηνιαίες Τιμές Ενέργειας			Στάθμη Συσσωρευτών		
		Παραγόμενη Ενέργεια	Φορτίο	Διαφορά	Αρχή Μήνα	Τέλος Μήνα	Κατάσταση Φόρτισης (%)
Ιαν.	2900	11867,93	12500	-632,07	3510,00	2877,93	81,99
Φεβρ.	3300	13504,89	12500	1004,89	2877,93	3510,00	100,00
Μαρτ.	4300	17597,28	12500	5097,28	3510,00	3510,00	100,00
Απρ.	5000	20165,40	12500	7665,40	3510,00	3510,00	100,00
Μια.	6000	23486,76	25000	-1513,24	3510,00	1996,76	56,89
Ιουν.	6100	23154,62	25000	-1845,38	1996,76	151,38	4,31
Ιουλ.	6700	25034,75	25000	34,75	151,38	186,14	5,30
Αυγ.	6800	25408,40	25000	408,40	186,14	594,54	16,94
Σεπ.	5700	21636,29	25000	-3363,71	594,54	0,00	0,00
Οκτ.	4500	17615,07	12500	5115,07	0,00	3510,00	100,00
Νοε.	3500	14115,78	12500	1615,78	3510,00	3510,00	100,00
Δεκ.	2800	11458,69	12500	-1041,31	3510,00	2468,69	70,33



Πίνακας 3.11 : A = 500,84 m<sup>2</sup>

Μήνας	H <sub>t</sub> (Wh/m <sup>2</sup> d)	Μηνιαίες Τιμές Ενέργειας			Στάθμη Συσσωρευτών		
		Παραγόμενη Ενέργεια	Φορτίο	Διαφορά	Αρχή Μήνα	Τέλος Μήνα	Κατάσταση Φόρτισης (%)
Ιαν.	2900	12527,26	12500	27,26	3510,00	3510,00	100,00
Φεβρ.	3300	14255,16	12500	1755,16	3510,00	3510,00	100,00
Μαρτ.	4300	18574,90	12500	6074,90	3510,00	3510,00	100,00
Απρ.	5000	21285,70	12500	8785,70	3510,00	3510,00	100,00
Μια.	6000	24791,58	25000	-208,42	3510,00	3301,58	94,06
Ιουν.	6100	24440,99	25000	-559,01	3301,58	2742,57	78,14
Ιουλ.	6700	26425,57	25000	1425,57	2742,57	3510,00	100,00
Αυγ.	6800	26819,98	25000	1819,98	3510,00	3510,00	100,00
Σεπ.	5700	22838,30	25000	-2161,70	3510,00	1348,30	38,41
Οκτ.	4500	18593,69	12500	6093,69	1348,30	3510,00	100,00
Νοε.	3500	14899,99	12500	2399,99	3510,00	3510,00	100,00
Δεκ.	2800	12095,29	12500	-404,71	3510,00	3105,29	88,47

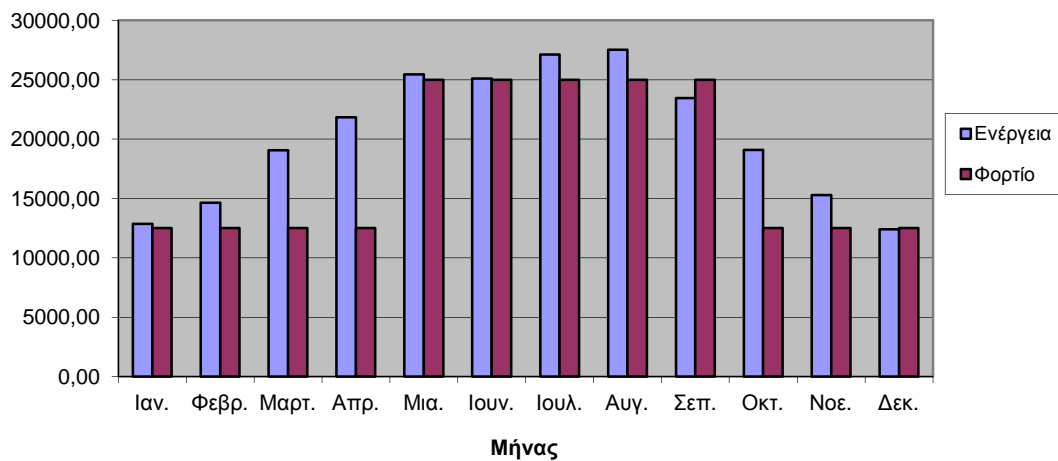




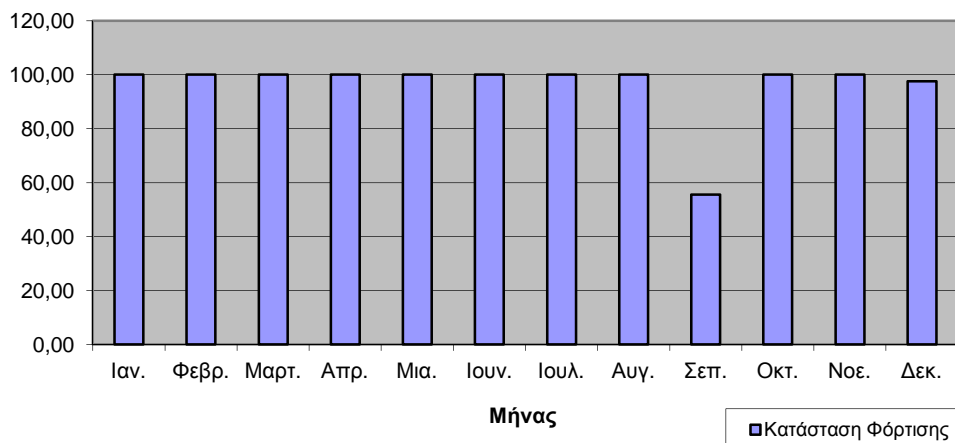
Πίνακας 3.12 : A=514.02 m<sup>2</sup>

Μήνας	H <sub>i</sub> (Wh/m <sup>2</sup> d)	Μηνιαίες Τιμές Ενέργειας			Στάθμη Συσσωρευτών		
		Παραγόμενη Ενέργεια	Φορτίο	Διαφορά	Αρχή Μήνα	Τέλος Μήνα	Κατάσταση Φόρτισης (%)
Ιαν.	2900	12856,93	12500	356,93	3510,00	3510,00	100,00
Φεβρ.	3300	14630,29	12500	2130,29	3510,00	3510,00	100,00
Μαρτ.	4300	19063,72	12500	6563,72	3510,00	3510,00	100,00
Απρ.	5000	21845,85	12500	9345,85	3510,00	3510,00	100,00
Μια.	6000	25443,99	25000	443,99	3510,00	3510,00	100,00
Ιουν.	6100	25084,18	25000	84,18	3510,00	3510,00	100,00
Ιουλ.	6700	27120,98	25000	2120,98	3510,00	3510,00	100,00
Αυγ.	6800	27525,77	25000	2525,77	3510,00	3510,00	100,00
Σεπτ.	5700	23439,31	25000	-1560,69	3510,00	1949,31	55,54
Οκτ.	4500	19082,99	12500	6582,99	1949,31	3510,00	100,00
Νοε.	3500	15292,10	12500	2792,10	3510,00	3510,00	100,00
Δεκ.	2800	12413,58	12500	-86,42	3510,00	3423,58	97,54

Διάγραμμα Παραγόμενης Ενέργειας και Φορτίου



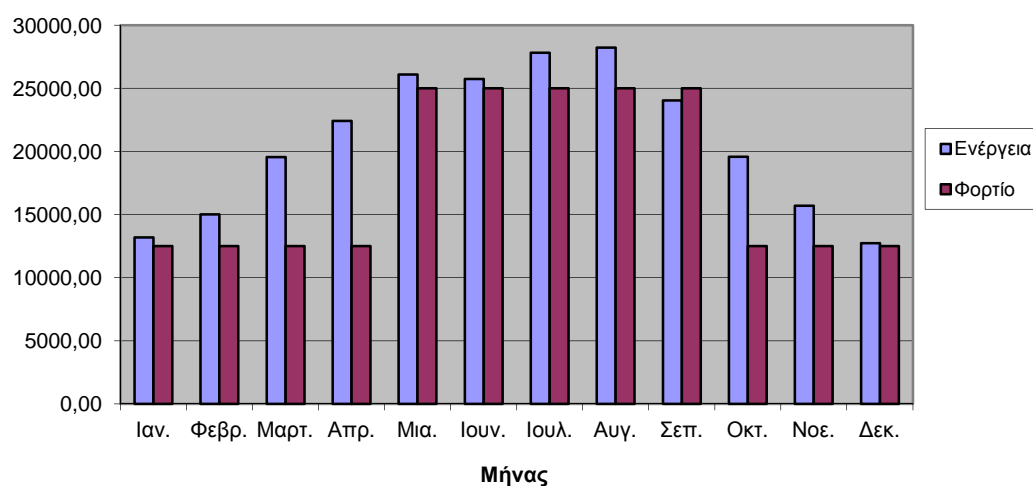
Κατάσταση Φόρτισης Συσσωρευτών



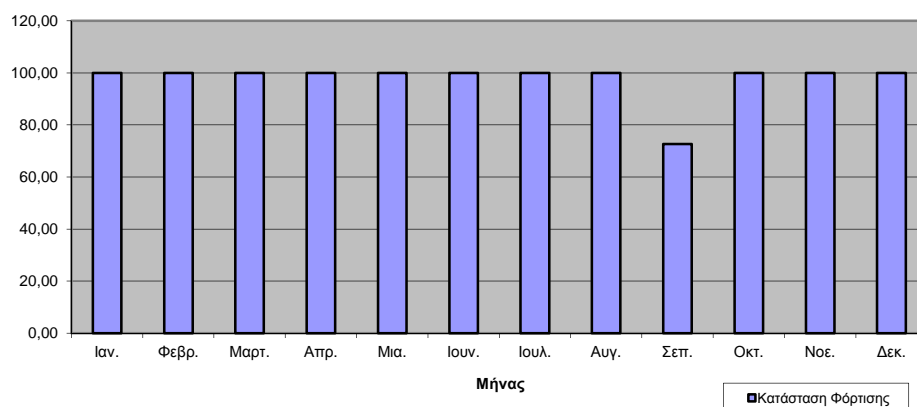
Πίνακας 3.13 : A=527.2 m<sup>2</sup>

Μήνας	H <sub>i</sub> (Wh/m <sup>2</sup> d)	Μηνιαίες Τιμές Ενέργειας			Στάθμη Συσσωρευτών		
		Παραγόμενη Ενέργεια	Φορτίο	Διαφορά	Αρχή Μήνα	Τέλος Μήνα	Κατάσταση Φόρτισης (%)
Ιαν.	2900	13186,59	12500	686,59	3510,00	3510,00	100,00
Φεβρ.	3300	15005,43	12500	2505,43	3510,00	3510,00	100,00
Μαρτ.	4300	19552,53	12500	7052,53	3510,00	3510,00	100,00
Απρ.	5000	22406,00	12500	9906,00	3510,00	3510,00	100,00
Μια.	6000	26096,40	25000	1096,40	3510,00	3510,00	100,00
Ιουν.	6100	25727,36	25000	727,36	3510,00	3510,00	100,00
Ιουλ.	6700	27816,39	25000	2816,39	3510,00	3510,00	100,00
Αυγ.	6800	28231,56	25000	3231,56	3510,00	3510,00	100,00
Σεπτ.	5700	24040,32	25000	-959,68	3510,00	2550,32	72,66
Οκτ.	4500	19572,30	12500	7072,30	2550,32	3510,00	100,00
Νοε.	3500	15684,20	12500	3184,20	3510,00	3510,00	100,00
Δεκ.	2800	12731,88	12500	231,88	3510,00	3510,00	100,00

Διάγραμμα Παραγόμενης Ενέργειας και Φορτίου



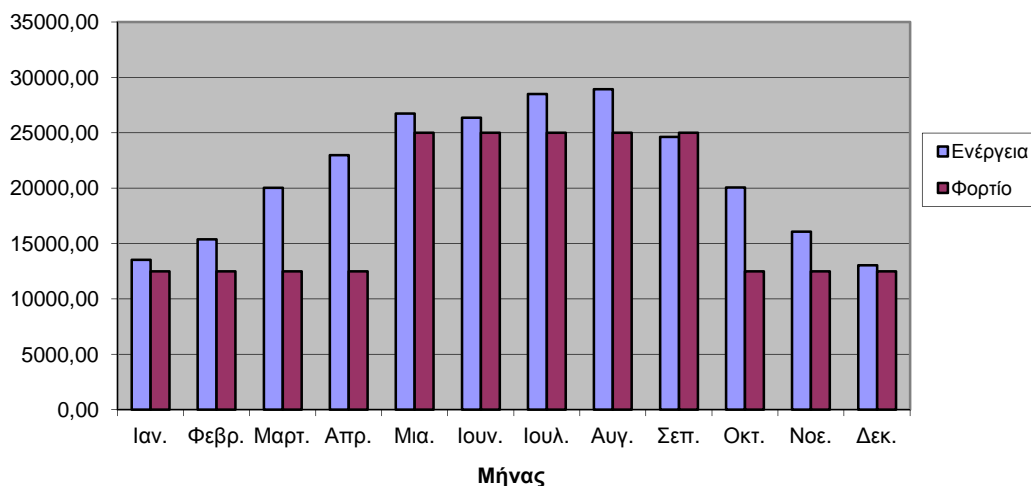
Κατάσταση Φόρτισης Συσσωρευτών



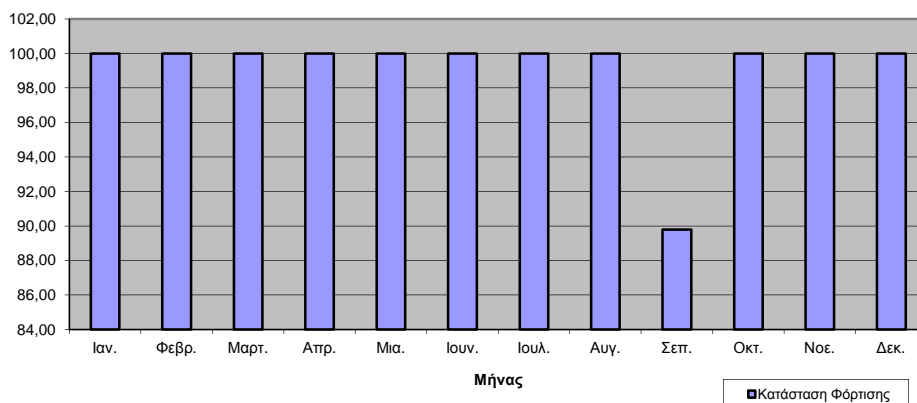
Πίνακας 3.14 : A=540.38 m<sup>2</sup>

Μήνας	H <sub>t</sub> (Wh/m <sup>2</sup> d)	Μηνιαίες Τιμές Ενέργειας			Στάθμη Συσσωρευτών		
		Παραγόμενη Ενέργεια	Φορτίο	Διαφορά	Αρχή Μήνα	Τέλος Μήνα	Κατάσταση Φόρτισης (%)
Ιαν.	2900	13516,25	12500	1016,25	3510,00	3510,00	100,00
Φεβρ.	3300	15380,57	12500	2880,57	3510,00	3510,00	100,00
Μαρτ.	4300	20041,34	12500	7541,34	3510,00	3510,00	100,00
Απρ.	5000	22966,15	12500	10466,15	3510,00	3510,00	100,00
Μια.	6000	26748,81	25000	1748,81	3510,00	3510,00	100,00
Ιουν.	6100	26370,54	25000	1370,54	3510,00	3510,00	100,00
Ιουλ.	6700	28511,80	25000	3511,80	3510,00	3510,00	100,00
Αυγ.	6800	28937,35	25000	3937,35	3510,00	3510,00	100,00
Σεπ.	5700	24641,33	25000	-358,67	3510,00	3151,33	89,78
Οκτ.	4500	20061,61	12500	7561,61	3151,33	3510,00	100,00
Νοε.	3500	16076,31	12500	3576,31	3510,00	3510,00	100,00
Δεκ.	2800	13050,18	12500	550,18	3510,00	3510,00	100,00

Διάγραμμα Παραγόμενης Ενέργειας και Φορτίου



Κατάσταση Φόρτισης Συσσωρευτών



## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ**

**ΠΙΝΑΚΕΣ ΔΙΑΚΟΠΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΔΟΤΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΤΤΙΚΗ ΕΤΗ  
1996-2002**

<b>Έτος 1996</b>			
<b>ΜΗΝΑΣ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΗΜΕΡΩΝ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΩΡΩΝ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ</b>
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	4	2h 57'	2h 43'
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	4	9'	4'
ΜΑΡΤΙΟΣ	1	1h 7'	1h 7'
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	1	4'	4'
ΜΑΙΟΣ	2	44'	41'
ΙΟΥΝΙΟΣ	2	3h 10'	3h 2'
ΙΟΥΛΙΟΣ	2	9'	5'
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	0	0	0
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	0	0	0
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	1	2'	2'
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	2	7h 31'	7h 23'
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	1	5'	5'

<b>Έτος 1997</b>			
<b>ΜΗΝΑΣ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΗΜΕΡΩΝ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΩΡΩΝ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ</b>
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	2	12'	8'
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	3	18'	5'
ΜΑΡΤΙΟΣ	2	1h 2'	1h
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	0	0	0
ΜΑΙΟΣ	0	0	0
ΙΟΥΝΙΟΣ	2	9'	5'
ΙΟΥΛΙΟΣ	3	6'	4'
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	1	7'	7'
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	0	0	0
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	2	48'	43'
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	1	1'	1'
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	4	40'	30'

**Έτος 1998**

<b>ΜΗΝΑΣ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΗΜΕΡΩΝ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΩΡΩΝ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ</b>
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	0	0	0
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	1	30'	30'
ΜΑΡΤΙΟΣ	1	2h 50'	2h 50'
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	2	5h 09'	4h 20'
ΜΑΙΟΣ	2	4h	3h 58'
ΙΟΥΝΙΟΣ	0	0	0
ΙΟΥΛΙΟΣ	3	4h	2h 21'
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	3	7h 48'	4h 03'
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	1	30'	30'
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	0	0	0
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	0	0	0
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	2	1h 04'	37'

**Έτος 1999**

<b>ΜΗΝΑΣ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΗΜΕΡΩΝ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΩΡΩΝ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ</b>
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	1	1'	1'
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	1	1'	1'
ΜΑΡΤΙΟΣ	0	0	0
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	0	0	0
ΜΑΙΟΣ	0	0	0
ΙΟΥΝΙΟΣ	1	4h 53'	4h 53'
ΙΟΥΛΙΟΣ	2	1h 24'	46'
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	1	45'	45'
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	4	5h 26'	4h 34'
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	1	10'	10'
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	2	5h 18'	5h 16'
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	0	0	0

**Έτος 2000**

<b>ΜΗΝΑΣ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΗΜΕΡΩΝ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΩΡΩΝ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ</b>
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	1	4'	4'
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	0	0	0
ΜΑΡΤΙΟΣ	1	1'	1'
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	0	0	0
ΜΑΙΟΣ	0	0	0
ΙΟΥΝΙΟΣ	2	4h 15'	4h 14'
ΙΟΥΛΙΟΣ	0	0	0
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	0	0	0
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	1	1'	1'
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	2	2h 41'	2h 40'
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	1	2'	2'
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	0	0	0

**Έτος 2001**

<b>ΜΗΝΑΣ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΗΜΕΡΩΝ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΩΡΩΝ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ</b>
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	4	2h 43'	1h 55'
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	3	34'	15'
ΜΑΡΤΙΟΣ	1	2h 24'	2h 24'
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	0	0	0
ΜΑΙΟΣ	0	0	0
ΙΟΥΝΙΟΣ	2	2h 50'	2h 40'
ΙΟΥΛΙΟΣ	3	15'	5'
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	3	5h 45'	3h 30'
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	4	6h 43'	5h 23'
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	2	1h 55'	1h 50'
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	2	6h 50'	6h 23'
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	4	55'	40'

<b>Έτος 2002</b>			
<b>ΜΗΝΑΣ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΗΜΕΡΩΝ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΣΥΝΟΛΟ ΩΡΩΝ ΔΙΑΚΟΠΗΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ</b>	<b>ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣ</b>
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	2	8'	5'
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	0	0	0
ΜΑΡΤΙΟΣ	0	0	0
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	2	4h 58'	4h 46'
ΜΑΙΟΣ	0	0	0
ΙΟΥΝΙΟΣ	2	4h 31'	3h 57'
ΙΟΥΛΙΟΣ	3	24'	9'
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	0	0	0
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	4	4h 47'	4h 14'
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	0	0	0
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	1	2'	2'
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	1	8'	8'