

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΜΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ



ΔΑΡΖΕΝΤΑΣ ΕΚΤΩΡ
ΔΙΟΜΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:
Ι. ΚΑΤΣΙΓΙΑΝΝΗΣ

ΧΑΝΙΑ 2018

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	4
Abstract.....	5
Κεφάλαιο 1	6
Εισαγωγή.....	6
1.1 Εισαγωγικά.....	6
1.2 Ιστορική εξέλιξη	7
1.2.1 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο και Ιστορική Εξέλιξη.....	8
1.3 Ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θεωρία των ενεργειακών ζωνών των κρυσταλλικών στερεών....	8
1.3.1 Ενδογενείς ημιαγωγοί.....	9
1.3.2 Ημιαγωγοί προσμίξεων.....	10
Ημιαγωγοί τύπου n.....	10
Ημιαγωγοί τύπου p.....	11
1.4 Ελληνικό νομικό πλαίσιο εγκατάστασης ΦΒ συστημάτων	11
1.5 Net-metering.....	15
Τρόποι ανάπτυξης φωτοβολταϊκών συστημάτων από αυτοπαραγωγούς με ενεργειακό συμψηφισμό.....	16
Οι βασικοί όροι και προϋποθέσεις για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων αυτοπαραγωγής με ενεργειακό συμψηφισμό.....	18
Κόστος σύνδεσης του φωτοβολταϊκού συστήματος αυτοπαραγωγής με το Δίκτυο Χαμηλής Τάσης	18
1.6 Σκοπός.....	19
Κεφάλαιο 2	20
Το φωτοβολταϊκό κύτταρο	20
2.1 Θεωρία φωτοβολταϊκών κυττάρων.....	20
2.2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα.....	21
2.3 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κυττάρων	21
2.4 Συγκεντρωτικά ΦΒ (CPV)	28
Κατηγορίες των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών (CPV)	30
Μονοκύτταρα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά (CPV)	30
Γραμμικός συγκεντρωτής	30
Εξάρτηση της παραγόμενης ισχύος εν συναρτήσει της κλίσης των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών (CPV)	31
2.5 Υβριδικά ΦΒ συστήματα νερού	32
2.5.1 Έμμεση Ψύξη (με εξάτμιση).....	32
Σωλήνες θερμότητας	33
2.5.2 Άμεση ψύξη (Μέθοδος υδρόψυξης)	34

2.5.3 Υβριδικά ΦΒ συστήματα νερού	35
Κεφάλαιο 3	36
Στοιχεία Φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	36
3.1 Βαθμός Απόδοσης	36
3.1.1 Υπολογισμός θερμοκρασιακού Συντελεστή σθ και Συντελεστή Ρύπανσης σρ:	40
3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση.....	40
3.2.1 Συντελεστής γήρανσης n_g, m	41
3.2.2 Οπτικές ενεργειακές απώλειες.....	42
3.2.3 Θερμοκρασία ΦΒ κυψέλης.....	42
3.2.4 Συντελεστής απωλειών στη δίοδο αντεπιστροφής	42
3.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα.....	43
Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα.....	43
Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα.....	43
3.3 Καυτό μπορεί εύκολα να βρεθεί από τις καμπύλες I-V των πλαισίων.....	44
μπύλες I – V και P - V του φωτοβολταϊκού.....	44
3.4 Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές.....	45
3.4.1 Συσσωρευτές μολύβδου – οξέος:.....	46
3.4.2 Ηλεκτρικό ισοδύναμο στοιχείου συσσωρευτή.....	47
3.4.3 Μοντέλο τάσης συσσωρευτή	48
3.4.4 Κατάσταση φόρτισης συσσωρευτή – Ενέργεια φόρτισης σε kWh	50
3.5 Φορτιστές.....	50
3.5.1 Μετατροπέας συνεχούς τάσης (DC-DC converter).....	50
3.5.2 Μονάδα ελέγχου	51
Σύστημα εντοπισμού μέγιστης ισχύος– Maximum Power Point trackers (MPPT).....	52
Έμμεσοι ανιχνευτές MPP	52
Άμεσοι ανιχνευτές MPP	52
3.6 Αντιστροφείς (DC/AC Inverters).....	53
Κεφάλαιο 4	55
Μοντελοποίηση συστήματος ψύξης φ/β πλαισίου μέσω ψεκαστών	55
4.1 Εισαγωγή.....	55
4.2 Περιγραφή του συστήματος.....	56
4.2 Μεταφορά θερμότητας στο Φ/β πλαίσιο	56
Χαρακτηριστικά συστήματος:.....	57
4.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης.....	60
4.3.1 Μηνιαία Ανάλυση	60
.....	68
4.3.2 Μέγιστης θερμοκρασίας ημερήσια ανάλυση	69
Κεφάλαιο 5	72

5.1 Συμπεράσματα.....	72
6.2 Πιθανές επεκτάσεις	72
Βιβλιογραφία	73

Περίληψη

Τη σήμερον ημέρα ο πλανήτης έχει επηρεαστεί αρνητικά από τις ανθρώπινες δραστηριότητες που σχετίζονται με την παραγωγή και κατανάλωση μη ανανεώσιμης ενέργειας. Είναι γεγονός πως η ραγδαία εξέλιξη της ανθρώπινης κοινωνίας έχει επιφέρει μόνιμες αλλαγές στο φυσικό περιβάλλον καθώς και στους οργανισμούς που ζουν σε αυτό. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια ένα μεγάλο ποσοστό ανθρώπων έχει ευαισθητοποιηθεί στο συγκεκριμένο θέμα και έχει στραφεί προς την εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την σωστή χρήση της τεχνολογίας, με αποτέλεσμα να επιβαρύνεται λιγότερο ο πλανήτης. Επιπρόσθετα έχουν θεσμοθετηθεί ευνοϊκοί νόμοι που αφορούν την χρήση πράσινης ενέργειας. Αυτή χωρίζεται σε ηλιακή, αιολική, γεωθερμική και υδροδυναμική ενέργεια.

Όσον αφορά την ηλιακή ενέργεια, τα τελευταία χρόνια ένα μέσο αξιοποίησης είναι η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Βέβαια αυτή η τεχνολογία δεν είναι ακόμα αρκετά ώριμη έτσι ώστε να ανταπεξέλθει πλήρως στις ενεργειακές απαιτήσεις των σύγχρονων ανθρώπινων αναγκών. Με την πάροδο του χρόνου έχει εμφανιστεί μια ποικιλία διαφορετικών τεχνολογιών φωτοβολταϊκών κυττάρων οι οποίες εφαρμόζονται ανάλογα με τις ανάγκες του ανθρώπου και τις συνθήκες του περιβάλλοντος. Παρόλα αυτά η απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια παραμένει μικρή. Ένας βασικός παράγοντας μεταβολής της απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού κυττάρου, είναι η θερμοκρασία. Σε χώρες με θερμό κλίμα και ειδικότερα τους καλοκαιρινούς μήνες, η θερμοκρασία υπερβαίνει τα όρια βέλτιστης απόδοσης των φωτοβολταϊκών με αποτέλεσμα την μείωση της παραγωγής ενέργειας. Μελετώντας την συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών με τα χρόνια ανακαλύφθηκαν και εφαρμόστηκαν αρκετοί τρόποι ψύξης των φωτοβολταϊκών κυττάρων είτε ενεργητικά είτε παθητικά. Στην εργασία αναλύεται ένα παθητικό σύστημα ψύξης που συνδυάζεται με έναν συγκεκριμένο αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων που έχουν τεθεί σε λειτουργία μαζί με ψεκαστές όπου είναι προγραμματισμένοι να ενεργοποιούνται σε συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ενός έτους αναλυθήκαν λεπτομερώς για κάθε μήνα, συγκρίνοντας τα κόστη και τα οφέλη, το ίδιο έγινε και για την ημέρα με την υψηλότερη θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία.

Abstract

Today, the planet has been adversely affected by human activities related to the production and consumption of non-renewable energy. It is a fact that the rapid evolution of human society has brought about permanent changes in the natural environment as well as in the organisms living in it. However, in recent years, a substantial proportion of people have become aware of this issue and have turned to exploiting renewable energy sources and using technology properly, making it less burdensome for the planet. Additionally, favorable laws have been set up regarding the use of green energy. It is divided into solar, wind, geothermal and hydrodynamic energy.

Regarding solar power, in recent years a means of exploiting is the technology of photovoltaics. Of course, this technology is not yet matured to cope fully with the energy requirements of modern human needs. Over time, a variety of different photovoltaic cell technologies have been developed that are applied according to human needs and environmental conditions.

However, the solar energy conversion efficiency to electricity remains low. A key factor in changing the performance of a photovoltaic cell is temperature. In countries with a hot climate and especially during the summer months, the temperature exceeds the optimum efficiency limits of photovoltaics, resulting in a reduction in energy production. By studying the behavior of photovoltaics over the years, several ways of cooling photovoltaic cells have been discovered and applied either actively or passively. In this Thesis, a passive cooling system is used, analyzed and represented by a specific number of photovoltaic panels that have been commissioned together with sprinkler system, where they were programmed to be activated at specific temperature values of the solar cell surface.

The results of the one-year simulation were analyzed in detail for each month respectively, comparing the costs and benefits, the same was done for the day with the maximum temperature and solar radiation.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικά

Η ενέργεια με την οποία τροφοδοτείται ο πλανήτης μας προέρχεται σχεδόν εξ ολοκλήρου από τον Ήλιο. Παρόλα αυτά η ενέργεια χαρακτηρίζεται, τόσο στη θεωρία όσο και στη πράξη, περισσότερο ως μια λογιστική έννοια που δίνει τη δυνατότητα πρόβλεψης της εξέλιξης ή της κίνησης ενός συστήματος. Ορίζεται σαν το ποσό του έργου που απαιτείται προκειμένου το σύστημα να πάει από μια αρχική κατάσταση σε μια τελική. Ακριβώς πόση ενέργεια περιέχεται σε ένα σύστημα μπορεί να υπολογιστεί παίρνοντας το άθροισμα ή το ολοκλήρωμα ενός αριθμού ειδικών εξισώσεων, καθεμιά από τις οποίες δίνει την ενέργεια που έχει αποθηκευτεί κατά έναν ιδιαίτερο τρόπο.

Ανάλογα με τον τρόπο που έχει αποκτηθεί, ανταλλαχθεί ή αποθηκευτεί, μπορεί να αναλυθεί σε κατηγορίες.

Μηχανική ενέργεια

Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια

Πυρηνική ενέργεια

Θερμική ενέργεια

Χημική ενέργεια

Βαρυτική ενέργεια

Γενικά, η παρουσία της ενέργειας ανιχνεύεται από έναν παρατηρητή κάθε φορά που υπάρχει αλλαγή στις ιδιότητες ενός αντικειμένου ή ενός συστήματος.

Η κυριότερη ιδιότητά της είναι ότι η συνολική ενέργεια ενός απομονωμένου (κλειστού) συστήματος είναι σταθερή, πρόταση που έχει αποδειχθεί από πλήθος πειραμάτων και χαρακτηρίζεται ως μία από τις πλέον θεμελιώδεις αρχές διατήρησης της φυσικής. Πλέον, η συζήτηση για την ενέργεια έχει πάρει μια διαφορετική μορφή, για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), το Περιβάλλον καθώς και την Αειφόρο ανάπτυξη.

Στην σύγχρονη εποχή χρησιμοποιείται κυρίως το πετρέλαιο το οποίο επέφερε αλλαγές στην βιομηχανία αλλά και στην καθημερινή ζωή. Αυτά τα δυο είδη σε συνδυασμό και με άλλους ορυκτούς πόρους (π.χ. λιγνίτης) οδήγησαν την ανάπτυξη της ανθρωπότητας στο σημείο που έχει φτάσει σήμερα. Εκτιμάται ότι τα συμβατικά καύσιμα καλύπτουν το 85% περίπου της καταναλισκόμενης ενέργειας στις αναπτυγμένες χώρες και το 55% στις υπό ανάπτυξη χώρες.

Όμως οι ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η καύση ορυκτών καυσίμων και η αποψίλωση των δασών, έχουν προκαλέσει αύξηση της ατμοσφαιρικής συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα κατά περίπου 35% από την αρχή της εποχής της εκβιομηχάνισης. Εκτιμάται πως στις μέρες μας με το αυξανόμενο ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας αυτές οι πηγές ενέργειας δεν θα είναι επαρκείς να ανταπεξέλθουν στις ανάγκες του ανθρώπου καθώς τα αποθέματά τους δεν είναι ανεξάντλητα. Έτσι απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα θεωρείται αναγκαία για την επίλυση του ενεργειακού προβλήματος και της μόλυνσης του πλανήτη. Οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες οι οποίες είναι ανεξάντλητες και παράλληλα φιλικές προς το περιβάλλον. Έτσι οι ΑΠΕ θεωρούνται από πολλούς μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Γη.[2]

1.2 Ιστορική εξέλιξη

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο αφορά τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Πρόκειται για την απορρόφηση της ενέργειας του φωτός από τα ηλεκτρόνια των ατόμων του Φ/Β στοιχείου και την απόδραση των ηλεκτρονίων αυτών από τις κανονικές τους θέσεις με αποτέλεσμα την δημιουργία ρεύματος. Το ηλεκτρικό πεδίο που προϋπάρχει στο Φ/Β στοιχείο οδηγεί το ρεύμα στο φορτίο.

Η πρώτη γνωριμία του ανθρώπου με το φωτοβολταϊκό φαινόμενο έγινε το 1839 όταν ο Γάλλος φυσικός Edmond Becquerel (1820 - 1891) ανακάλυψε το φωτοβολταϊκό φαινόμενο κατά την διάρκεια πειραμάτων του με μια ηλεκτρολυτική επαφή φτιαγμένη από δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Το 1876 ο Adams (1836 - 1915) και ο φοιτητής του Day παρατήρησαν ότι μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο (Se) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως. Το 1918 ο Πολωνός Czochralski (1885 - 1953) πρόσθεσε την μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si) με την σχετική έρευνα του και η οποία μάλιστα χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμα και σήμερα. Το 1949 όταν οι Mott και Schottky ανέπτυξαν την θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Στο μεταξύ η κβαντική θεωρία είχε ξεδιπλωθεί. Ο δρόμος πλέον για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές είχε ανοίξει. Το πρώτο ηλιακό κελί ήταν γεγονός στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους Chapin, Fuller και Pearson. Η απόδοση του της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας ήταν αρχικά χαμηλή. Ως βαθμός απόδοσης εκφράζεται το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο φωτοβολταϊκό στοιχείο.

Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία, που σχεδιάστηκαν τον 19ο αιώνα, δεν είχαν παρά 1-2% απόδοση, ενώ το 1954 τα εργαστήρια Bell Laboratories δημιούργησαν τα πρώτα Φ/Β στοιχεία πυριτίου με απόδοση 6%. Τέσσερα χρόνια μετά, το 1958 η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων προσαρτάται στον χώρο των διαστημικών εφαρμογών όταν τοποθετήθηκε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα στον δορυφόρο Vanguard I (εικόνα 1). Το σύστημα αυτό λειτούργησε επιτυχώς για 8 ολόκληρα χρόνια και ήταν ένα από τα πρώτα φωτοβολταϊκά συστήματα. Από το χρονικό αυτό σημείο και μετά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα άρχισαν να ενσωματώνονται σταδιακά σε διάφορες εφαρμογές και η τεχνολογία να βελτιώνεται συνεχώς. Το 1962 η μεγαλύτερη ΦΒ εγκατάσταση στον κόσμο γίνεται στην Ιαπωνία από την Sharp, σε έναν φάρο. Η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος είναι 242Wp.

Τα φωτοβολταϊκά ξεκίνησαν λοιπόν να κάνουν την εμφάνιση τους αλλά λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής η εφαρμογή τους ήταν δυνατή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις αυτόνομων συστημάτων. Η έρευνα όμως προχωρούσε και η απόδοση των ΦΒ συνεχώς βελτιωνόταν. Στην πορεία του χρόνου όλο και αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης: η αύξηση της απόδοσης, έστω και κατά μια ποσοστιαία μονάδα, θεωρείται επίτευγμα στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Στην σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13 – 19%, ο οποίος, συγκρινόμενος με την απόδοση άλλου συστήματος (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.), παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλός. Με την προοδευτική αύξηση όμως του βαθμού απόδοσης, δημιουργήθηκαν ειδικές συσκευές – οι αναστροφείς (inverters) - που σκοπό έχουν να μετατρέψουν την έξοδο συνεχούς τάσης της Φ/Β συστοιχίας σε εναλλασσόμενη τάση. Με τον τρόπο αυτό, το Φ/Β σύστημα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει μια σύγχρονη εγκατάσταση (κατοικία, θερμοκήπιο, μονάδα παραγωγής κλπ.) που χρησιμοποιεί κατά κανόνα συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος(AC). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η βασική δομική μονάδα κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος. Ομάδες φωτοβολταϊκών στοιχείων, συνδεδεμένων σε σειρά ή παράλληλα ώστε να δίνουν την επιθυμητή τάση εξόδου, συνιστούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, που επίσης μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους σε σειρά ή παράλληλα για να αποτελέσουν φωτοβολταϊκή συστοιχία. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από ημιαγωγίμα υλικά. Η καταλληλότητα ενός ημιαγωγού για χρησιμοποίηση σε φωτοβολταϊκά στοιχεία

εξαρτάται από το ενεργειακό κενό μεταξύ των περιοχών σθένους και αγωγιμότητας. Το εύρος του ενεργειακού κενού καθορίζει τη διαφορά δυναμικού που θα δημιουργηθεί, ενώ όσο μικρότερο είναι το κενό, τόσο περισσότερα είναι τα ζεύγη φορτίων που μπορούν να δημιουργηθούν και άρα η ένταση του παραγομένου ρεύματος. Το ζητούμενο είναι το γινόμενο αυτών των δύο μεγεθών,

διαφορά δυναμικού (τάση) και ένταση ρεύματος, δηλαδή η ισχύς, να είναι το μέγιστο δυνατό. Λόγω του ενεργειακού του διακένου, ο πιο κατάλληλος ημιαγωγός για παραγωγή ρεύματος από τη μετατροπή

της ηλιακής ενέργειας είναι το αρσενιούχο γάλλιο (θεωρητική δυνατότητα απόδοσης μέχρι και 31%).

Εντούτοις, το πιο κοινό υλικό που χρησιμοποιείται είναι το πυρίτιο, λόγω του χαμηλού του κόστους και της προχωρημένης τεχνολογίας που το συνοδεύει, που οφείλεται στην ευρεία χρήση του στη βιομηχανία των ηλεκτρονικών. Άλλο πλεονέκτημά του πυριτίου είναι ότι μπορεί να βρεθεί πάρα πολύ εύκολα στην φύση, είναι το δεύτερο σε αφθονία υλικό που υπάρχει στον πλανήτη μετά το οξυγόνο. Το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και ο χαλαζίτης αποτελούν το 28% του φλοιού της γης. Το πυρίτιο είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον, ενώ μπορεί εύκολα να λιώσει και να μορφοποιηθεί. Επίσης είναι σχετικά εύκολο να μετατραπεί στην μονοκρυσταλλική του μορφή. Οι ηλεκτρικές του ιδιότητες μπορούν να διατηρηθούν μέχρι και στους 125°C , κάτι που επιτρέπει την χρήση του σε ιδιαίτερα δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτός είναι και ο λόγος που τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου ανταπεξέρχονται σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Είναι ίσως και

το μοναδικό υλικό που παράγεται με τόσο μαζικό τρόπο. Το πυρίτιο σήμερα αποτελεί την πρώτη ύλη για το 90% της αγοράς των φωτοβολταϊκών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται διάφορες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κυττάρων.[2]

1.2.1 Το Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο και Ιστορική Εξέλιξη

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο ανακαλύφθηκε το 1839 από τον Alexandre-Edmond Becquerel και αφορά τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Συνοπτικά πρόκειται για την απορρόφηση της ενέργειας του φωτός από τα ηλεκτρόνια των ατόμων του Φ/Β στοιχείου και την απόδραση των ηλεκτρονίων αυτών από τις κανονικές τους θέσεις με αποτέλεσμα την δημιουργία ρεύματος. Το ηλεκτρικό πεδίο που προϋπάρχει στο Φ/Β στοιχείο οδηγεί το ρεύμα στο φορτίο και έτσι έχουμε την μετατροπή ηλιακής σε ηλεκτρική ενέργεια.

Για να προκύψει το φ/β φαινόμενο απαιτείται η δημιουργία μιας διάταξης τεχνητών ημιαγωγών (συνήθως από πυρίτιο) οι οποίοι ενώνονται με σκοπό να δημιουργήσουν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα σε σειρά. Οι ημιαγωγοί αυτοί απορροφούν φωτόνια από την ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν μια ηλεκτρική τάση.

Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν ο Adams (1836 - 1915) και ο φοιτητής του Day παρατήρησαν ότι μια ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος παραγόταν από το σελήνιο (Se) όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως.

Το 1918 ο Πολωνός Jan Czochralski (1885 - 1953) πρόσθεσε την μέθοδο παραγωγής ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού πυριτίου (Si) με την σχετική έρευνα του και η οποία μάλιστα χρησιμοποιείται βελτιστοποιημένη ακόμα και σήμερα.

Μια σημαντική ανακάλυψη έγινε επίσης το 1949 όταν οι Mott και Schottky ανέπτυξαν την θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Στο μεταξύ η κβαντική θεωρία είχε ξεδιπλωθεί. Ο δρόμος πλέον για τις πρώτες πρακτικές εφαρμογές είχε ανοίξει. Το πρώτο ηλιακό κελί ήταν γεγονός στα εργαστήρια της Bell το 1954 από τους Chapin, Fuller και Pearson με απόδοση 6%. [2]

1.3 Ηλεκτρική αγωγιμότητα και η θεωρία των ενεργειακών ζωνών των κρυσταλλικών στερεών

Υποθέτουμε ότι έχουμε ένα πλέγμα με βασική του μονάδα ένα θετικό φορτίο και θέλουμε λύνοντας την εξίσωση Σρέντιγκερ να βρούμε τις ενεργειακές στάθμες τις οποίες μπορεί να καταλάβει ένα

ηλεκτρόνιο σε αυτό το σύστημα. Αυτό προσομοιώνει ακριβώς έναν πραγματικό κρύσταλλο, αφού στα πολυηλεκτρονικά άτομα, τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στοιβάδας χρειάζονται πολύ μικρή ενέργεια για να ιονιστούν και επομένως μέσα σε έναν κρύσταλλο που υπάρχει ένας τόσος μεγάλος αριθμός των και ασκούνται τόσες πολλές δυνάμεις, μπορούν να θεωρηθούν ασύνδετα με το άτομο. Το ηλεκτρόνιο θα δέχεται ένα περιοδικό δυναμικό. Κοντά στο θετικό φορτίο θα αυξάνει κατά απόλυτη τιμή το δυναμικό, ενώ μακριά του να μειώνεται. Λόγω της περιοδικότητας του πλέγματος, θα είναι περιοδικό και το δυναμικό.

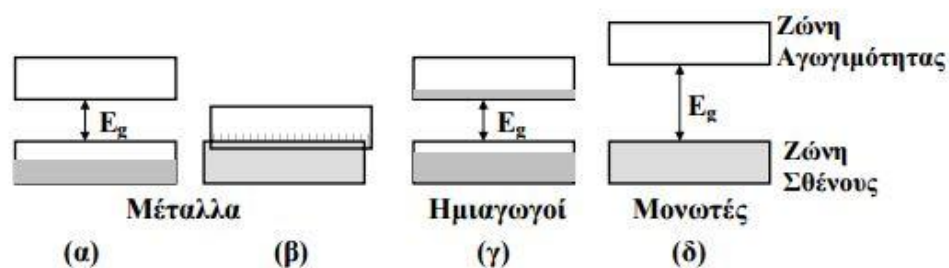
Λύνοντας την εξίσωση Σρέντιγκερ με αυτό το περιοδικό δυναμικό προκύπτει το ενεργειακό φάσμα που εμφανίζει η διάταξη έναντι των ηλεκτρονίων. Το ενεργειακό φάσμα φαίνεται να έχει περιοχές ενεργείας (ενεργειακές ζώνες - εμφανίζονται δηλαδή πολλές ενεργειακές στάθμες πολύ κοντά) στις οποίες το ηλεκτρόνιο μπορεί να βρεθεί (και περιοχές στις οποίες δεν μπορεί να βρεθεί (ενεργειακά χάσματα). Επίσης παρατηρείται ότι όσο πηγαίνουμε σε υψηλότερες ενέργειες, τα ενεργειακά χάσματα μειώνονται. Αν θέσουμε υπό τάση τα άκρα ενός κρυστάλλου, θέτουμε ουσιαστικά τον κρύσταλλο εντός ενός ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό το πεδίο ασκεί δύναμη στα ηλεκτρόνια, όμως αν κινηθούν θα αποκτήσουν μεγαλύτερη ενέργεια και αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, γιατί ενδεχομένως η ενέργεια που θα αποκτήσουν να είναι κατειλημμένη από άλλα ηλεκτρόνια και αυτό αντιτίθενται στην απαγορευτική αρχή του Pauli. Επομένως βλέπουμε ότι το σε ποια ενεργειακή ζώνη βρίσκονται τα ηλεκτρόνια υψηλότερης ενέργειας, το αν είναι πλήρως κατειλημμένη ή όχι και το πόσο μεγάλο είναι το ενεργειακό χάσμα που χωρίζει αυτή τη ζώνη (σθένους) από την επόμενη (αγωγιμότητας) παίζει καθοριστικό ρόλο στην ηλεκτρική συμπεριφορά του υλικού μας.

Τα υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την συμπλήρωση των ενεργειακών τους ζωνών:

Μονωτής : Ορίζεται το στερεό το οποίο διαθέτει πλήρως γεμάτες και πλήρες άδειες ζώνες, με ενεργειακό χάσμα, μεταξύ ανώτερης κατειλημμένης και της επόμενης άδειας, μεγαλύτερο, από ≈ 5.2 eV(δεν επιτρέπουν να περάσει φορτίο ρεύματος)

Ημιαγωγός : Ορίζεται το στερεό το οποίο είναι στο απόλυτο μηδέν, έχει ενεργειακό χάσμα E_g από κλάσμα του eV , μέχρι ≈ 5.2 eV(περνάει επιλεκτικά φορτίο ρεύματος).

Μέταλλα : Ορίζονται τα στερεά τα οποία διαθέτουν μερικές συμπληρωμένες ενεργειακές ζώνες(επιτρέπουν σε όλο το φορτίο ρεύματος να περάσει).



Εικόνα 1.1: Πιθανά ενεργειακά διαγράμματα ενός κρυστάλλου. (α) Μερικώς συμπληρωμένη ζώνη. (β) Δυο ζώνες επικαλυπτόμενες. (γ) Μια σχεδόν συμπληρωμένη ζώνη διαχωριζόμενη από μια σχεδόν κενή ζώνη με μικρό ενεργειακό χάσμα. (δ) Μια πλήρης και μια κενή ζώνες, διαχωριζόμενες από μεγάλο ενεργειακό χάσμα.

1.3.1 Ενδογενείς ημιαγωγοί

Οι ημιαγωγοί οι οποίοι δεν έχουν καμία πρόσμιξη ονομάζονται ενδογενής. Οι πλέον συνηθισμένοι ημιαγωγοί σε ηλεκτρονικές διατάξεις είναι το γερμάνιο (Ge) και το πυρίτιο (Si). Το άτομο του

Γερμάνιού έχει 32 πρωτόνια και 32 ηλεκτρόνια. Έτσι τα ηλεκτρόνια σθένους που βρίσκονται στην εξωτερική στοιβάδα είναι 4. Κάθε άτομο γερμανίου συνεισφέρει κάθε ένα από τα 4 ηλεκτρόνια σε αντίστοιχο διπλανό άτομο και έτσι δημιουργούνται ομοιοπολικοί δεσμοί που συγκρατούν τα άτομα μεταξύ τους στο κρυσταλλικό πλέγμα.

Όταν η θερμοκρασία του ημιαγωγού είναι κοντά στο απόλυτο μηδέν τα ηλεκτρόνια σθένους συγκρατούνται στους ομοιοπολικούς αυτούς δεσμούς, ενώ όταν η θερμοκρασία αυξηθεί είναι δυνατό να μεταπηδήσουν ορισμένα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας ξεπερνώντας το ενεργειακό χάσμα. Έτσι δημιουργούνται ελεύθερα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας και αντίστοιχες οπές στη ζώνη σθένους με φορτία (h^+) η κάθε μια. Όταν στον ημιαγωγό εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο θα συμβεί όχι μόνο μετακίνηση των ηλεκτρονίων της ζώνης αγωγιμότητας αλλά ταυτόχρονα και οπών σε αντίθετη φορά.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του πυριτίου είναι τα εξής:

Μπορεί να βρεθεί πάρα πολύ εύκολα στην φύση. Είναι το δεύτερο σε αφθονία υλικό που υπάρχει στον πλανήτη μετά το οξυγόνο. Το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) (ή κοινώς η άμμος) και ο χαλαζίτης αποτελούν το 28% του φλοιού της γης. Είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον. Μπορεί εύκολα να λιώσει και να μορφοποιηθεί. Επίσης είναι σχετικά εύκολο να μετατραπεί στην μονοκρυσταλλική του μορφή.

Οι ηλεκτρικές του ιδιότητες μπορούν να διατηρηθούν μέχρι και στους $125^\circ C$ κάτι που επιτρέπει την χρήση του πυριτίου σε ιδιαίτερα δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτός είναι και ο λόγος που τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου ανταπεξέρχονται σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

Πολύ σημαντικό στοιχείο, που συνέβαλε στην γρήγορη ανάπτυξη των φωτοβολταϊκών στοιχείων τα τελευταία χρόνια, ήταν η ήδη αναπτυγμένη τεχνολογία, στην βιομηχανία της επεξεργασίας του πυριτίου, στον τομέα της ηλεκτρονικής (υπολογιστές, τηλεοράσεις κλπ.). Το 2007 μάλιστα ήταν η πρώτη χρονιά που υπήρχε μεγαλύτερη ζήτηση (σε τόνους κρυσταλλικού πυριτίου) στην αγορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σχέση με αυτήν των ημιαγωγών της ηλεκτρονικής.

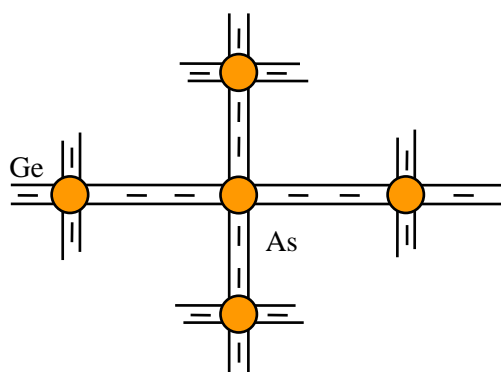
Μια κατηγοριοποίηση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία θα μπορούσε να γίνει με βάση το πάχος του υλικού που χρησιμοποιείται.[2]

1.3.2 Ημιαγωγοί προσμίξεων

Ημιαγωγοί τύπου n

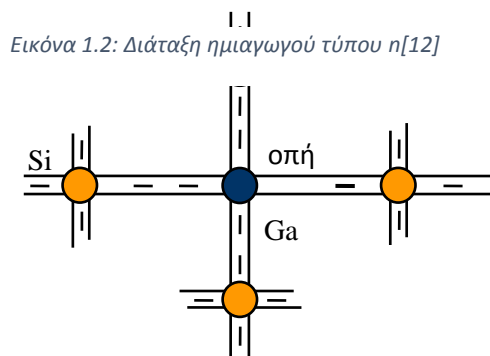
Αν σε ένα ενδογενή ημιαγωγό, όπως το Ge, προστεθεί μικρή ποσότητα πεντασθενούς στοιχείου π.χ αρσενικού (As), τα 4 ηλεκτρόνια σθένους του As θα δημιουργήσουν με τα αντίστοιχα 4 των γειτονικών ατόμων του Ge ομοιοπολικούς δεσμούς και θα μείνει αδέσμευτο το 5^ο ηλεκτρόνιο του ατόμου του As (Εικόνα 1.2) που μπορεί να απομακρυνθεί σχετικά εύκολα λόγω της θερμικής κίνησης, ακόμη και σε χαμηλή θερμοκρασία.

Το άτομο του αρσενικού λέγεται **δότης**. Αυξάνοντας τον αριθμό των δοτών σ' ένα ημιαγωγό γερμανίου, αυξάνουμε τον αριθμό των ελεύθερων ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός μικρού ρεύματος, όταν ο ημιαγωγός βρεθεί σε ηλεκτρικό πεδίο. Οι ημιαγωγοί του τύπου αυτού καλούνται [12]



Ημιαγωγοί τύπου p

Αν ένα τρισθενές στοιχείο, όπως π.χ. το γάλλιο, εισαχθεί στον ημιαγωγό Si τότε τα τρία ηλεκτρόνια σθένους του Ga δημιουργούν ομοιοπολικούς δεσμούς με τα τρία ηλεκτρόνια σθένους τριών γειτονικών ατόμων Si, ενώ αυτό δεν συμβαίνει με το 4^ο γειτονικό άτομο του Si (Εικόνα 1.3). [12]



Εικόνα 1.3: Διάταξη ημιαγωγού τύπου p[12]

Η θέση του ηλεκτρονίου που «λείπει» για να συμπληρωθεί ο ομοιοπολικός δεσμός είναι μία οπή στο κρυσταλλικό πλέγμα και μπορεί να καλυφθεί από ένα ηλεκτρόνιο σθένους ενός γειτονικού ατόμου Si που θα μεταπηδήσει στη θέση αυτή. Οι προσμίξεις αυτές των οποίων τα άτομα αποδίδουν οπές στο κρυσταλλικό πλέγμα και συνεπώς δέχονται ηλεκτρόνια ονομάζονται ημιαγωγοί τύπου p (αποδέκτες). Στους ημιαγωγούς αυτού του τύπου ο αριθμός των οπών είναι κατά πολύ μεγαλύτερος αυτού που διαθέτει ο ενδογενής ημιαγωγός.[12]

1.4 Ελληνικό νομικό πλαίσιο εγκατάστασης ΦΒ συστημάτων

Όλα ξεκίνησαν από το πρωτόκολλο του Κιότο και άλλες διεθνείς συμφωνίες που ακολούθησαν κάτω από την πίεση των περιβαλλοντικών προβλημάτων. Η ουσιαστική ώθηση για τα φωτοβολταϊκά όπως και για τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δόθηκε μέσα από κυβερνητικά προγράμματα με την μορφή επιδοτήσεων των δραστηριοτήτων παραγωγής ενέργειας (κυρίως ηλεκτρικής) με την χρήση "πράσινων" τεχνολογιών (ΑΠΕ). Η περισσότερα γνωστή από αυτές είναι η ευνοϊκή τιμολόγηση της ενέργειας που παράγεται από Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, γνωστή και ως feed-in-tariff.[4]

Ένα ΦΒ σύστημα μπορεί να εγκατασταθεί σύμφωνα με τις κοινές υπουργικές αποφάσεις (ΚΥΑ) ΦΕΚ/1079/Β/04.06.2009, ΦΕΚ 1557/Β/22.09.2010 και ΦΕΚ 2317/Β/10.08.2012, παρέχεται η δυνατότητα εγκατάστασης σταθερών ΦΒ συστημάτων σε κτιριακές εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται για κατοικία ή στέγαση πολύ μικρών επιχειρήσεων και κυρίως σε δώματα και

στέγες, νομίμως υφισταμένων κτιρίων, όπως αυτά ορίζονται στην παρ. 1 του άρθρου 23 του ν.4067/2012 (Νέου Οικοδομικού Κανονισμού – ΝΟΚ), σε στέγαστρα, στις όψεις και την κύρια όψη του κτιρίου και σε χώρους βοηθητικής χρήσης (όπως αποθήκες, χώροι στάθμευσης, κλπ.), όπως αυτά ορίζονται στο άρθρο 2 του ΝΟΚ, καθώς και σε σκίαστρα όπως αυτά ορίζονται στην παρ.6 του άρθρου 11 του ν.1577/1985, καθώς και στο ΝΟΚ. Η ανωτέρω εγκατάσταση των ΦΒ συστημάτων επιτρέπεται εφόσον δεν αντίκειται στις διατάξεις του ΝΟΚ και σε ειδικότερους όρους δόμησης που ισχύουν για την περιοχή. Η τοποθέτηση των ανωτέρω συστημάτων επιτρέπεται επίσης σε κτίρια στα οποία έχουν εκτελεστεί αυθαίρετες κατασκευές ή αυθαίρετες αλλαγές χρήσης των περιπτώσεων δ, ε και στ της παρ. 2 του άρθρου 23 του ν.4014/2011 (Α' 209), όπως ισχύει, για το χρονικό διάστημα διατήρησής τους και έχει περαιωθεί η σχετική διαδικασία.» Ευνόητο είναι ότι οι βοηθητικοί χώροι πρέπει να βρίσκονται εντός του ιδίου οικοπέδου, όπου και το κυρίως κτίριο, άλλως δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως τέτοιοι. Διευκρινίζεται ότι για την εγκατάσταση του ΦΒ συστήματος μπορεί να επιλεγεί οποιοσδήποτε από τους ανωτέρω χώρους ή και συνδυασμός αυτών. Σε καμία περίπτωση δεν επιτρέπεται επίγεια εγκατάσταση ΦΒ συστήματος στο πλαίσιο του Ειδικού Προγράμματος (π.χ. σε ακάλυπτο χώρο οικοπέδου).

Δικαίωμα ένταξης στο πρόγραμμα των ΦΒ συστημάτων έχουν φυσικά πρόσωπα μη επιτηδευματίες, φυσικά ή νομικά πρόσωπα επιτηδευματίες που κατατάσσονται στις πολύ μικρές επιχειρήσεις, Νομικά Πρόσωπα Δημοσίου Δικαίου (Ν.Π.Δ.Δ.), καθώς και τα μη κερδοσκοπικού χαρακτήρα Νομικά Πρόσωπα Ιδιωτικού Δικαίου (Ν.Π.Ι.Δ.), τα οποία έχουν την πλήρη κυριότητα ή την επικαρπία ή την ψιλή κυριότητα υπό την απαραίτητη προϋπόθεση συναίνεσης του επικαρπωτή, του χώρου στον οποίο εγκαθίσταται το ΦΒ σύστημα και τα οποία χρησιμοποιούν το κτίριο ως κατοικία τους ή ως στέγαστρο της δραστηριότητάς τους.

Απαραίτητη προϋπόθεση για εγκατάσταση ΦΒ συστήματος είναι η ύπαρξη ενεργού παροχής ρεύματος στο όνομα του κυρίου του Φωτοβολταϊκού συστήματος (φυσικού/νομικού προσώπου) στο κτίριο όπου εγκαθίσταται. Επιπλέον, όταν το κτίριο επί του οποίου εγκαθίσταται το Φωτοβολταϊκό σύστημα χρησιμοποιείται ως κατοικία, απαραίτητη προϋπόθεση σύμφωνα με την ΚΥΑ είναι, μέρος των θερμικών αναγκών του σε ζεστό νερό να καλύπτεται από χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (π.χ. ύπαρξη ηλιακού θερμοσίφωνα, ηλιοθερμικών). Η αίτηση σύνδεσης υποβάλλεται στην τοπική μονάδα Δικτύου (Περιοχή).

Το κόστος των έργων σύνδεσης με το δίκτυο ανέρχεται σε 800 € πλέον ΦΠΑ, στις περιπτώσεις που η απόσταση του ακινήτου επί του οποίου τοποθετείται το Φωτοβολταϊκό σύστημα από την έδρα της μονάδας ΔΕΗ είναι σχετικά μικρή (εκτιμώμενος χρόνος μετάβασης και επιστροφής μικρότερος των δύο ωρών) και δεν απαιτείται η αντικατάσταση του καλωδίου παροχής, ή 1000 € πλέον ΦΠΑ, στις περιπτώσεις που είτε η πιο πάνω απόσταση είναι μεγαλύτερη, είτε απαιτείται αντικατάσταση του καλωδίου παροχής.[5]

Η ενεργοποίηση της σύνδεσης του Φωτοβολταϊκού συστήματος πραγματοποιείται από την αρμόδια Περιοχή του Δικτύου της ΔΕΗ μετά

Την παραλαβή αντιγράφου της Σύμβασης Συμψηφισμού από τον Προμηθευτή ή τον δικαιούχο
Την υποβολή Υπεύθυνης Δήλωσης Μηχανικού κατάλληλης ειδικότητας με τα αναγκαία συνημμένα σε αυτή

Την υποβολή Υπεύθυνης Δήλωσης του κυρίου του Φωτοβολταϊκού συστήματος με την οποία θα δεσμεύεται ότι δεν θα προβεί σε οποιαδήποτε τροποποίηση στην εγκατάσταση του Φωτοβολταϊκού συστήματος.

Η τιμή της παραγόμενης ενέργειας από το ΦΒ σύστημα ορίζεται με την Υ.Α.Π.Ε./Φ1/2302/16934 (ΦΕΚ 2317/Β/10.08.2012) για τις νέες συμβάσεις συμψηφισμού που συνάπτονται από τη δημοσίευση του ως άνω ΦΕΚ και εφεξής.

Η τιμή στην οποία συνομολογείται η Σύμβαση Συμψηφισμού αναπροσαρμόζεται κάθε έτος κατά ποσοστό 25% του δείκτη τιμών καταναλωτή του προηγούμενου έτους, όπως αυτό καθορίζεται από την ΕΣΥΕ. Εάν η τιμή που προκύπτει με την ανωτέρω αναπροσαρμογή, είναι μικρότερη της μέσης

Οριακής Τιμής του Συστήματος, όπως αυτή διαμορφώνεται κατά το προηγούμενο έτος, προσαυξημένης κατά 40%, η τιμολόγηση γίνεται με βάση τη μέση Οριακή Τιμή του Συστήματος του προηγούμενου έτους, προσαυξημένη κατά τον αντίστοιχο ως άνω συντελεστή.

Στην περίπτωση που η ενεργοποίηση της σύνδεσης του ΦΒ συστήματος γίνει μετά την παρέλευση 6 μηνών από τη σύναψη Σύμβασης Συμψηφισμού, τότε ως τιμή αναφοράς θα λαμβάνεται η τιμή που αντιστοιχεί στο μήνα και το έτος που πραγματοποιείται η ενεργοποίηση της σύνδεσης του ΦΒ συστήματος, σύμφωνα με το ΦΕΚ 2317/10.08.2012.

Η τιμή της παραγόμενης ενέργειας από το ΦΒ σύστημα ορίζεται με την Υ.Α.Π.Ε./Φ1/2302/16934 (ΦΕΚ 2317/Β/10.08.2012) για τις νέες συμβάσεις συμψηφισμού που συνάπτονται από τη δημοσίευση του ως άνω ΦΕΚ και εφεξής.

Η τιμή στην οποία συνομολογείται η Σύμβαση Συμψηφισμού αναπροσαρμόζεται κάθε έτος κατά ποσοστό 25% του δείκτη τιμών καταναλωτή του προηγούμενου έτους, όπως αυτό καθορίζεται από την ΕΣΥΕ. Εάν η τιμή που προκύπτει με την ανωτέρω αναπροσαρμογή, είναι μικρότερη της μέσης Οριακής Τιμής του Συστήματος, όπως αυτή διαμορφώνεται κατά το προηγούμενο έτος, προσαυξημένης κατά 40%, η τιμολόγηση γίνεται με βάση τη μέση Οριακή Τιμή του Συστήματος του προηγούμενου έτους, προσαυξημένη κατά τον αντίστοιχο ως άνω συντελεστή.

Στην περίπτωση που η ενεργοποίηση της σύνδεσης του ΦΒ συστήματος γίνει μετά την παρέλευση 6 μηνών από τη σύναψη Σύμβασης Συμψηφισμού, τότε ως τιμή αναφοράς θα λαμβάνεται η τιμή που αντιστοιχεί στο μήνα και το έτος που πραγματοποιείται η ενεργοποίηση της σύνδεσης του ΦΒ

Μήνας/Έτος	Τιμή (ευρώ/kWh)
Φεβρουάριος 2013	0,125
Αύγουστος 2013	0,125
Φεβρουάριος 2014	0,12
Αύγουστος 2014	0,12
Φεβρουάριος 2015	0,115
Αύγουστος 2015	0,115
Φεβρουάριος 2016	0,11
Αύγουστος 2016	0,11
Φεβρουάριος 2017	0,105
Αύγουστος 2017	0,1
Φεβρουάριος 2018	0,095
Αύγουστος 2018	0,09
Φεβρουάριος 2019	0,085
Αύγουστος 2019	0,08

Πίνακας 1.1: Τιμή που εφαρμόζεται για τις συμβάσεις συμψηφισμού ανάλογα με την ημερομηνία [5]

συστήματος, σύμφωνα με το ΦΕΚ 2317/10.08.2012. [5]

Σύμφωνα με το ΦΕΚ 1103/Β/2.5.2013 η τιμή που εφαρμόζεται για τις συμβάσεις συμψηφισμού που υπογράφονται μετά την 1/6/2013 καθορίζεται ανάλογα με την ημερομηνία ενεργοποίησης του σταθμού και σύμφωνα με τον πίνακα 1.1

Ο λογιστικός συμψηφισμός της αξίας της παραγόμενης ενέργειας από το ΦΒ σύστημα γίνεται με πίστωση από την παραγόμενη ενέργεια Φωτοβολταϊκού συστήματος που εμφανίζεται στο λογαριασμό ρεύματος του κυρίου του Φωτοβολταϊκού συστήματος. Ουσιαστικά ο λογαριασμός ρεύματος επέχει θέση τιμολογίου αγοράς. Το ποσό αυτό της πίστωσης συμψηφίζεται με τις χρεώσεις που προκύπτουν από τη Σύμβαση Προμήθειας ηλεκτρικού ρεύματος. Στην περίπτωση που ο συνολικός λογαριασμός ρεύματος είναι πιστωτικός, τότε το ποσό πιστώνεται στον τραπεζικό λογαριασμό του κυρίου του Φωτοβολταϊκού συστήματος στην ημερομηνία λήξης του λογαριασμού ρεύματος.

Η Σύμβαση Συμψηφισμού που υπογράφεται μεταξύ του Προμηθευτή και του κυρίου του ΦΒ συστήματος έχει διάρκεια ισχύος 25 έτη, με έναρξη ισχύος την ημερομηνία ενεργοποίησης της σύνδεσης του Φωτοβολταϊκού συστήματος.

Η Σύμβαση Συμψηφισμού λύνεται:

Αυτοδικαίως με την παρέλευση του διαστήματος των 25 ετών

Αυτοδικαίως στη περίπτωση αλλαγής Προμηθευτή. Στην περίπτωση αυτή συνάπτεται νέα Σύμβαση Συμφηφισμού για το υπολειπόμενο εκ των 25 ετών διάστημα, με το νέο Προμηθευτή.

Αυτοδικαίως μετά τη λύση της Σύμβασης Προμήθειας ή της Σύμβασης Σύνδεσης.

Μετά από καταγγελία του Προμηθευτή, στην περίπτωση πλημμελούς εκπλήρωσης των όρων της Σύμβασης Συμφηφισμού από τον κύριο του Φωτοβολταϊκού συστήματος, κατόπιν έγγραφης ειδοποίησής του, προκειμένου ο αντισυμβαλλόμενος να συμμορφωθεί με τις υποχρεώσεις του (περίοδος αποκατάστασης) και άπρακτης παρέλευσης προθεσμίας 15 ημερών.

Μετά από καταγγελία του κυρίου του Φωτοβολταϊκού συστήματος χωρίς την επίκληση κάποιου σπουδαίου λόγου, κατόπιν υποβολής σχετικού εγγράφου και εντός διαστήματος 15 ημερών από την επίδοση του εγγράφου.

Μετά από καταγγελία του κυρίου του Φωτοβολταϊκού συστήματος, σε περίπτωση οριστικής διακοπής της λειτουργίας του Φωτοβολταϊκού συστήματος.

Σε περίπτωση μεταβολής στο πρόσωπο του κυρίου του Φωτοβολταϊκού συστήματος λόγω μεταβίβασης της σχετικής ιδιοκτησίας του στο κτίριο όπου βρίσκεται εγκατεστημένο το Φωτοβολταϊκό σύστημα, ο νέος κύριος υπεισέρχεται αυτοδικαία στα δικαιώματα και τις υποχρεώσεις του μεταβιβάζοντος που απορρέουν από τη Σύμβαση Συμφηφισμού.

Επίσης δεν επιτρέπεται η επαύξηση της ισχύος του Φ/Β συστήματος μετά την ενεργοποίηση της σύνδεσης. Αιτήσεις επαύξησης ισχύος μη λειτουργούντων συστημάτων με Προσφορά Σύνδεσης, συνεπάγονται ακύρωση της Προσφοράς και έκδοση νέας Προσφοράς κατά τα ισχύοντα.

Εάν σε ακίνητο υπάρχει συγκυριότητα κατά ποσοστό 50% εξ αδιαιρέτου, την ένταξη στο Ειδικό Πρόγραμμα μπορεί να ζητήσει οποιοσδήποτε από τους δύο συγκύριους, με την έγγραφη σύμφωνη γνώμη του άλλου συγκύριου. Στην περίπτωση που το ακίνητο έχουν κατά κυριότητα περισσότεροι του ενός συνιδιοκτήτες, (δηλαδή υπάρχει συγκυριότητα), την ένταξη στο Ειδικό Πρόγραμμα μπορεί να ζητήσει ένας εκ των συγκυριών, θα πρέπει όμως να προσκομίσει την έγγραφη σύμφωνη γνώμη των υπολοίπων συγκυριών.

Σύμφωνα με τους όρους του Προγράμματος τα Φωτοβολταϊκά συστήματα τοποθετούνται σε σταθερά και συγκεκριμένα σημεία των κτιρίων.

Στις πέργκολες ως αυτές ορίζονται στο Άρθρο 2 παρ. 60 του ΝΟΚ, δεν επιτρέπεται η επικάλυψη από οποιοδήποτε υλικό μόνιμο ή προσωρινό.

Σε κοινόκτητους ή κοινόχρηστους χώρους πολυκατοικιών επιτρέπεται η εγκατάσταση ενός και μόνο συστήματος. Η εγκατάσταση Φωτοβολταϊκού συστήματος από ιδιοκτήτη διαμερίσματος στο στέγαστρο της βεράντας του, μπορεί να γίνει αποδεκτή, εάν το στέγαστρο δεν ανήκει στους κοινόκτητους χώρους και εφόσον η τοποθέτηση του δεν αντίκειται στον κανονισμό της πολυκατοικίας.

Οι αποθήκες ή οι χώροι στάθμευσης αποτελούν βοηθητικούς χώρους του κυρίως κτιρίου, στο οποίο υπάρχει ενεργή παροχή ρεύματος (με τον αριθμό παροχής της οποίας συσχετίζεται το Φωτοβολταϊκό σύστημα), η εγκατάσταση Φωτοβολταϊκού συστήματος είναι ανεξάρτητη από την ηλεκτροδότηση ή μη του χώρου αυτού.

Όταν η υφιστάμενη παροχή του κτιρίου είναι μονοφασική, ενώ για τη σύνδεση του Φωτοβολταϊκού συστήματος απαιτείται τριφασική παροχή (τριφασική παροχή απαιτείται για ισχύ άνω των 5 kW και μέχρι 10 kW), είναι υποχρεωτική μόνο η αλλαγή του καλωδίου της παροχής (από μονοφασικό σε τριφασικό). Το κόστος αντικατάστασης του υφιστάμενου μονοφασικού καλωδίου παροχής και το κόστος εγκατάστασης κιβωτίου διακλάδωσης, συμπεριλαμβάνεται στο τυπικό κόστος σύνδεσης. Επομένως, πέραν της αντικατάστασης του καλωδίου παροχής, δεν απαιτείται η επαύξηση ισχύος της υφιστάμενης παροχής κατανάλωσης.

Μια μικρή επιχείρηση δεν μπορεί να εγκαταστήσει περισσότερα από ένα φωτοβολταϊκό σύστημα. Διευκρινίζεται ότι ο χώρος όπου εγκαθίσταται το ΦΒ σύστημα θα πρέπει να χρησιμοποιείται για τη στέγαση της δραστηριότητας της πολύ μικρής επιχείρησης. Ως «πολύ μικρή επιχείρηση» ορίζεται η επιχείρηση η οποία απασχολεί λιγότερους από 10 εργαζομένους και της οποίας ο κύκλος εργασιών ή το σύνολο του ετήσιου ισολογισμού δεν υπερβαίνει τα 2 εκατ. Ευρώ.

Η Υπεύθυνη Δήλωση Εγκαταστάτη Ηλεκτρολόγου, ήτοι το υπ' αριθμ.13 δικαιολογητικό στο έντυπο αίτησης, η οποία απαιτείται για την ενεργοποίηση του Φωτοβολταϊκού συστήματος, καθώς και της σχετικής τεκμηρίωσης που τη συνοδεύει (σχέδια, μελέτες, περιγραφή μεθόδου αποφυγής νησιδοποίησης, ρυθμίσεις προστασιών κλπ.), υπογράφεται από Διπλωματούχους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς ή Πτυχιούχους Ηλεκτρολόγους Μηχανικούς ή Μηχανικούς παρεμφερών ειδικοτήτων με τα αντίστοιχα επαγγελματικά δικαιώματα, όπως Μηχανολόγοι, Μηχανικοί κλπ.

Ο κύριος του Φωτοβολταϊκού Συστήματος, αναλαμβάνει τις ακόλουθες υποχρεώσεις:

Να έχει συνάψει και να διατηρεί τη Σύμβαση Σύνδεσης και τη Σύμβαση Προμήθειας που αναφέρεται στο όνομα του.

Να μην προβαίνει σε μεταβολές της ισχύος του ΦΒ Συστήματος, χωρίς προηγούμενη ενημέρωση του Διαχειριστή Δικτύου και του Προμηθευτή.

Να μην παρεμβαίνει στην εγκατάσταση και λειτουργία του ΦΒ Συστήματος, πλην των απαραίτητων εργασιών συντήρησης και αποκατάστασης βλαβών.

Να ενημερώνει άμεσα και επιμελώς τον Προμηθευτή για οποιαδήποτε διακοπή της λειτουργίας του ΦΒ Συστήματος για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των πέντε (5) ημερών, που δεν οφείλεται σε γεγονός ανωτέρας βίας.

Να ενημερώνει άμεσα και επιμελώς τον Προμηθευτή για κάθε θέμα που επηρεάζει την ομαλή εκπλήρωση των υποχρεώσεων από την Σύμβαση Συμψηφισμού.

Σε περιπτώσεις υποβολής αιτημάτων ακύρωσης σύνδεσης εγκαταστάσεων ΦΒ συστημάτων από τους ενδιαφερόμενους, εφόσον το αίτημα ακύρωσης της σύνδεσης υποβληθεί μετά την υπογραφή της Σύμβασης Σύνδεσης και πριν την κατασκευή εργασιών στην παροχή, επιστρέφεται μέρος του ποσού προκειμένου να ανακτηθούν οι δαπάνες στις οποίες προέβη ο ΔΕΔΔΗΕ μέχρι το στάδιο της ακύρωσης. Στις περιπτώσεις που το αίτημα ακύρωσης υποβληθεί μετά την κατασκευή της παροχής (ανεξαρτήτως εάν έχει ή όχι τοποθετηθεί ο μετρητής) το καταβληθέν ποσό δεν επιστρέφεται.[5]

1.5 Net-metering

Ο συμψηφισμός παραγόμενης-καταναλισκόμενης ενέργειας (γνωστός με τον όρο net-metering) αποτελεί ένα από τα εργαλεία προώθησης της αυτοπαραγωγής και ιδιοκατανάλωσης με ΑΠΕ και εφαρμόζεται σε διάφορες χώρες, κυρίως για εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών. Το net-metering επιτρέπει στον καταναλωτή να καλύψει ένα σημαντικό μέρος των ιδιοκαταναλώσεών του, ενώ παράλληλα του δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει το δίκτυο για έμμεση αποθήκευση της πράσινης ενέργειας. Ο όρος "net" προκύπτει από το γεγονός ότι η χρέωση/πίστωση του καταναλωτή αφορά στη διαφορά μεταξύ καταναλισκόμενης και παραγόμενης ενέργειας σε μία ορισμένη χρονική περίοδο.

Η ανάπτυξη φωτοβολταϊκών συστημάτων από αυτοπαραγωγούς θεσπίστηκε με την ΥΑ ΑΠΕΗΛ/Α/Φ1/οικ.24461 (ΦΕΚ Β' 3583/31.12.2014) και αφορά στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων για την κάλυψη ιδίων αναγκών από καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας, με εφαρμογή ενεργειακού συμψηφισμού. Με το Ν.4414/2016 (ΦΕΚ 149Α/9.8.2016) η αυτοπαραγωγή με ενεργειακό συμψηφισμό επεκτάθηκε και σε άλλες τεχνολογίες και συγκεκριμένα στις μικρές ανεμογεννήτριες, σταθμούς βιομάζας/βιοαερίου/βιορευστών, μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς και σταθμούς συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας (Σ.Η.Θ.Υ.Α.). Στον παρόντα οδηγό δίνεται έμφαση στα φωτοβολταϊκά, μιας και υπάρχει ήδη ενεργό πρόγραμμα για αυτή την τεχνολογία. Οι λεπτομέρειες για τις λοιπές τεχνολογίες θα καθοριστούν στο προσεχές μέλλον από τους αρμόδιους φορείς. Μέχρι την έκδοση σχετικής υπουργικής απόφασης, το net metering μπορεί να υλοποιείται μόνο στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών.

Ως ενεργειακός συμψηφισμός νοείται ο συμψηφισμός της παραχθείσας από το φωτοβολταϊκό σταθμό ενέργειας με την καταναλωθείσα ενέργεια στις εγκαταστάσεις του αυτοπαραγωγού. Αφορά σε φωτοβολταϊκό σταθμό ο οποίος εγκαθίσταται στον ίδιο ή όμορο χώρο με την εγκατάσταση κατανάλωσης, που συνδέεται στο Δίκτυο μέσω της αυτής παροχής.

Ειδικά για αυτοπαραγωγούς που είναι νομικά πρόσωπα δημοσίου ή ιδιωτικού δικαίου που επιδιώκουν κοινωφελείς ή άλλους δημοσίου ενδιαφέροντος σκοπούς γενικής ή τοπικής εμβέλειας καθώς και για εγγεγραμμένους στο Μητρώο Αγροτών και Αγροτικών Εκμεταλλεύσεων του Ν.3874/2010 (Α' 151) για εγκαταστάσεις αγροτικών εκμεταλλεύσεων όπως ορίζονται στο Ν.3874/2010 ή και αγροτικών χρήσεων, επιτρέπεται, με βάση το Ν.4414/2016, η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών και σταθμών μικρών ανεμογεννητριών για την κάλυψη ιδίων αναγκών τους και με εφαρμογή εικονικού ενεργειακού συμψηφισμού.

Ως εικονικός ενεργειακός συμψηφισμός νοείται ο συμψηφισμός της παραχθείσας από το φωτοβολταϊκό σταθμό ενέργειας με την καταναλωθείσα ενέργεια στις εγκαταστάσεις κατανάλωσης του αυτοπαραγωγού, εκ των οποίων τουλάχιστον η μία είτε δεν βρίσκεται στον ίδιο ή όμορο χώρο με το φωτοβολταϊκό σταθμό ή βρίσκεται στον ίδιο ή όμορο χώρο αλλά δεν συνδέεται με την εσωτερική ηλεκτρική εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού σταθμού (δεν συνδέεται ηλεκτρικά), δηλαδή ο φωτοβολταϊκός σταθμός και η εγκατάσταση κατανάλωσης τροφοδοτούνται από διαφορετικές παροχές. Αφορά σε φωτοβολταϊκό σταθμό ο οποίος εγκαθίσταται στην ίδια Περιφερειακή Ενότητα με τις εγκαταστάσεις κατανάλωσης με τις οποίες αντιστοιχίζεται και οι οποίες συνδέονται στο Διασυνδεδεμένο Δίκτυο. Στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά, ο φωτοβολταϊκός σταθμός θα εγκαθίσταται στην ίδια Περιφερειακή Ενότητα και στο ίδιο ηλεκτρικό σύστημα με τις εγκαταστάσεις κατανάλωσης με τις οποίες αντιστοιχίζεται.

Σε κάθε περίπτωση εικονικού ενεργειακού συμψηφισμού επιτρέπεται ο συμψηφισμός απορροφηθείσας και εγχυθείσας ενέργειας που αντιστοιχούν αποκλειστικά σε παροχές του ίδιου επιπέδου τάσης. Ο αυτοπαραγωγός θα πρέπει να υποβάλλει δήλωση στον Διαχειριστή του Δικτύου (ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε.) με τις παροχές κατανάλωσης οι οποίες υπεισέρχονται στον εικονικό ενεργειακό συμψηφισμό. Ο αυτοπαραγωγός μπορεί να τροποποιεί τις παροχές κατανάλωσης που υπεισέρχονται στον εικονικό ενεργειακό συμψηφισμό κατά τη διάρκεια της Σύμβασης Εικονικού Ενεργειακού Συμψηφισμού (Σ.Ε.Ε.Σ.), δηλαδή με μεταγενέστερες δηλώσεις του να προσθέτει ή και να αφαιρεί παροχές κατανάλωσης. Τόσο η παροχή του φωτοβολταϊκού σταθμού όσο και οι αντίστοιχες συμψηφιζόμενες παροχές κατανάλωσης θα πρέπει να είναι επ' ονόματι του ίδιου φυσικού ή νομικού προσώπου και να εκπροσωπούνται υποχρεωτικά από τον ίδιο προμηθευτή.

Οι λεπτομέρειες εφαρμογής του εικονικού ενεργειακού συμψηφισμού καθορίζονται στην ΥΑ ΑΠΕΝΛ/Α/Φ1/οικ.175067 (ΦΕΚ 1547Β, 5.5.2017). Με βάση αυτή την υπουργική απόφαση, η εκκαθάριση του ενεργειακού συμψηφισμού γίνεται πλέον ανά τριετία (μέχρι τη δημοσίευση της εν λόγω υπουργικής απόφασης γινόταν σε ετήσια βάση).[9]

Τρόποι ανάπτυξης φωτοβολταϊκών συστημάτων από αυτοπαραγωγούς με ενεργειακό συμψηφισμό

Στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα (ηπειρωτική χώρα και διασυνδεδεμένα με αυτήν νησιά)

α) Η ισχύς κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μπορεί να ανέρχεται μέχρι 20 κιλοβάτ (kWp) ή μέχρι 50% της συμφωνημένης ισχύος της εγκατάστασης κατανάλωσης (σε kVA), εφόσον το τελευταίο μέγεθος υπερβαίνει τα 20 kWp.

β) Ειδικά για νομικά πρόσωπα, δημοσίου ή ιδιωτικού δικαίου, που επιδιώκουν κοινωφελείς ή άλλου δημοσίου συμφέροντος σκοπούς, γενικής ή τοπικής εμβέλειας, η ισχύς κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μπορεί να ανέρχεται έως και στο 100% της συμφωνημένης ισχύος κατανάλωσης.

γ) Σε κάθε περίπτωση η μέγιστη ισχύς ενός φωτοβολταϊκού συστήματος που θα εγκατασταθεί δεν μπορεί να υπερβαίνει το όριο των 500 kWp.[9]

Πίνακας 1.2 Διασυνδεδεμένο σύστημα[9]

Διασυνδεδεμένο Σύστημα				
Επίπεδο τάσης	Τυποποιημένο μέγεθος παροχής	Συμφωνημένη Ισχύς (ΣΙ) παροχής (kVA)	Μέγιστη επιτρεπτή ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος αυτοπαραγωγής (kWp)	
			Φυσικά ή νομικά πρόσωπα	ΝΠΙΔ ή ΝΠΔΔ, κοινωφελούς ή άλλου δημοσίου συμφέροντος σκοπού
Χαμηλή τάση	03	8	5	5
	05	12	5	5
	1	15	15	15
	2	25	20	25
	3	35	20	35
	4	55	27,5	55
	5	85	42,5	85
	6	135	67,5	100
7	250	100	100	
Μέση τάση	-	-	50%*ΣΙ και μέχρι 500 kWp	100%*ΣΙ και μέχρι 500 kWp

Ειδικώς στην Πελοπόννησο και στο τμήμα της Εύβοιας νοτίως του Αλιβερίου, καθώς και στα νησιά Άνδρο και Τήνο, η μέγιστη ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος περιορίζεται επί του παρόντος στα 20 kWp.

Β. Στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ)

α) Στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά, η ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων μπορεί να ανέρχεται μέχρι 10 kWp και ειδικά στην Κρήτη μέχρι 20 kWp ή μέχρι 50% της συμφωνημένης ισχύος της εγκατάστασης κατανάλωσης (σε kVA), εφόσον το τελευταίο μέγεθος υπερβαίνει τα 10 kWp ή για την Κρήτη τα 20 kWp.

β) Ειδικά για νομικά πρόσωπα, δημοσίου ή ιδιωτικού δικαίου, που επιδιώκουν κοινωφελείς ή άλλου δημοσίου συμφέροντος σκοπούς, γενικής ή τοπικής εμβέλειας, η ισχύς κάθε φωτοβολταϊκού συστήματος μπορεί να ανέρχεται έως και στο 100% της συμφωνημένης ισχύος κατανάλωσης.

γ) Η μέγιστη ισχύς ενός φωτοβολταϊκού συστήματος που θα εγκατασταθεί στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά δεν μπορεί να υπερβαίνει το όριο των 50 kWp για την Κρήτη και των 20 kWp για τα λοιπά Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά. Εξαιρέση αποτελούν οι περιπτώσεις εγκατάστασης φωτοβολταϊκών σταθμών από νομικά πρόσωπα δημοσίου ή ιδιωτικού δικαίου, που επιδιώκουν κοινωφελείς ή άλλους δημοσίου ενδιαφέροντος σκοπούς, γενικής ή τοπικής εμβέλειας, στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά εκτός της Κρήτης, όπου η ισχύς δεν μπορεί να υπερβαίνει το ανώτατο όριο των 100 kWp, και ειδικά για την Κρήτη, δεν μπορεί να υπερβαίνει το ανώτατο όριο των 300 kWp.[9]

Πίνακας 1.3 Μη διασυνδεδεμένο σύστημα στα νησιά[9]

Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά						
Επίπεδο τάσης	Τυποποιημένο μέγεθος παροχής	Συμφωνημένη Ισχύς (ΣΙ) παροχής (kVA)	Μέγιστη επιτρεπτή ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος αυτοπαραγωγής (kWp)			
			Φυσικά ή νομικά πρόσωπα		ΝΠΙΔ ή ΝΠΔΔ, κοινοφελούς ή άλλου δημοσίου συμφέροντος σκοπού	
			Κρήτη	Λοιπά ΜΔΝ	Κρήτη	Λοιπά ΜΔΝ
Χαμηλή τάση	03	8	5	5	5	5
	05	12	5	5	5	5
	1	15	15	10	15	15
	2	25	20	12,5	25	25
	3	35	20	17,5	35	35
	4	55	27,5	20	55	55
	5	85	42,5	20	85	85
	6	135	50	20	100	100
7	250	50	20	100	100	
Μέση τάση	-	-	50	20	100%*ΣΙ και μέχρι 300 kWp	100

Οι βασικοί όροι και προϋποθέσεις για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων αυτοπαραγωγής με ενεργειακό συμψηφισμό

- Οι βασικοί όροι και προϋποθέσεις για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων αυτοπαραγωγής με ενεργειακό συμψηφισμό, έχουν ως ακολούθως:
- Η ύπαρξη ενεργού μόνιμης παροχής ρεύματος στο όνομα του αυτοπαραγωγού μέσω της οποίας τροφοδοτείται η εγκατάσταση κατανάλωσής του.
- Το φωτοβολταϊκό σύστημα αντιστοιχίζεται αποκλειστικά με έναν μετρητή κατανάλωσης, δηλαδή με τον μετρητή της εγκατάστασης κατανάλωσης την οποία τροφοδοτεί (δεν ισχύει στις περιπτώσεις εικονικού ενεργειακού συμψηφισμού).
- Το φωτοβολταϊκό σύστημα εγκαθίσταται στον ίδιο ή όμορο χώρο με την εγκατάσταση κατανάλωσης προς την οποία αντιστοιχίζεται (δεν είναι επιτρεπτός ο συμψηφισμός με καταναλώσεις του ίδιου φυσικού ή νομικού προσώπου σε άλλες θέσεις εγκατάστασης, με εξαίρεση τις κατηγορίες αυτοπαραγωγών για τους οποίους ισχύει ο εικονικός ενεργειακός συμψηφισμός).
- Ο ενδιαφερόμενος έχει τη νόμιμη χρήση του χώρου εγκατάστασης του συστήματος.
- Ο ενδιαφερόμενος έχει εξοφλήσει πλήρως τους λογαριασμούς ηλεκτρικής ενέργειας του οικείου Προμηθευτή (ή έχει ενταχθεί σε καθεστώς ρύθμισης οφειλών).[9]

Κόστος σύνδεσης του φωτοβολταϊκού συστήματος αυτοπαραγωγής με το Δίκτυο Χαμηλής Τάσης

Για ισχύ φωτοβολταϊκού συστήματος μέχρι 55 kWp, η σύνδεση θα κοστίζει 300 €, εφόσον δεν απαιτείται η αντικατάσταση του υφιστάμενου μετρητή κατανάλωσης, άλλως η σύνδεση θα κοστίζει 370 €, προκειμένου για μονοφασικές παροχές ή 390 € προκειμένου για τριφασικές παροχές. Για ισχύ φωτοβολταϊκού συστήματος άνω των 55 kWp και μέχρι 100 kWp, η σύνδεση θα κοστίζει 450 €, ενώ η σύνδεση στη Μέση Τάση 650 €. Στο ανωτέρω κόστος περιλαμβάνεται και το κόστος

ελέγχου του μετρητή παραγωγής καθώς και των μετασχηματιστών έντασης, όπου απαιτούνται. Το κόστος αυτό ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι δεν απαιτούνται έργα δικτύου για τη σύνδεση.[9]

Πίνακας 1.3 Κόστος σύνδεσης αυτοπαραγωγής σε σχέση με το δίκτυο χαμηλής τάσης[9]

Επίπεδο τάσης σύνδεσης των εγκαταστάσεων των χρηστών	Είδος παροχής	Ισχύς φωτοβολταϊκού (kWp)	Κόστος σύνδεσης (€)	
			Χωρίς αντικατάσταση του υφιστάμενου μετρητή κατανάλωσης	Με αντικατάσταση του υφιστάμενου μετρητή κατανάλωσης
ΧΤ	Μονοφασική (03,05)	≤5	300	370
	Τριφασική	≤55	300	390
	Τριφασική	55-100	450	
ΜΤ	Τριφασική	≤500	650	

1.6 Σκοπός

Σκοπός της εργασίας είναι η αναφορά σε μια πληθώρα τεχνολογιών ΦΒ κυττάρων, τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματά τους, στα στοιχεία που αποτελούν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, στους τρόπους εξέλιξης των απλών φ/β συστημάτων σε πιο οικονομικά και ταυτόχρονα πιο αποδοτικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών απαιτεί χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας για βέλτιστη απόδοση παραγωγής ενέργειας. Έτσι, γίνεται αναφορά σε τεχνολογίες ψύξης ΦΒ συστημάτων. Τέλος, εφαρμόστηκε βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός θεωρητικού οικιακού φωτοβολταϊκού συστήματος με υπολογισμό της μεταβολής της θερμότητας όταν σε αυτό ενσωματωθεί ένα σύστημα υδροψεκασμού το οποίο θα ψύχει τα ΦΒ κελιά. Το σύστημα αυτό θα τροφοδοτείται με νερό είτε από το δημόσιο δίκτυο παροχής νερού του νομού Χανίων, είτε από τον ΟΑΔΥΚ, είτε από συλλογή βρόχινου νερού.

Κεφάλαιο 2

Το φωτοβολταϊκό κύτταρο

2.1 Θεωρία φωτοβολταϊκών κυττάρων

Όπως προαναφέρθηκε το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων στην βιομηχανία είναι το πυρίτιο. Είναι ίσως και το μοναδικό υλικό που παράγεται με τόσο μαζικό τρόπο. Οι μεγάλες (συγκριτικά) αποδόσεις των φωτοβολταϊκών πλαισίων πυριτίου στο εμπόριο δίνουν και ένα σημαντικό πλεονέκτημα στο συγκεκριμένο υλικό. Το πυρίτιο σήμερα αποτελεί την πρώτη ύλη για το 90% της αγοράς των φωτοβολταϊκών.

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από ένα ή περισσότερα πάνελ (ή πλαίσια, ή όπως λέγονται συχνά στο εμπόριο, «κρύσταλλα») φωτοβολταϊκών στοιχείων (ή «κυψελών», ή «κυττάρων»), μαζί με τις απαραίτητες συσκευές και διατάξεις για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην επιθυμητή μορφή.

Το φωτοβολταϊκό στοιχείο είναι συνήθως τετράγωνο, με πλευρά 120-160mm. Δυο τύποι πυριτίου χρησιμοποιούνται για την δημιουργία φωτοβολταϊκών στοιχείων: το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο, ενώ το κρυσταλλικό πυρίτιο διακρίνεται σε μονοκρυσταλλικό ή πολυκρυσταλλικό. Το άμορφο και το κρυσταλλικό πυρίτιο παρουσιάζουν τόσο πλεονεκτήματα, όσο και μειονεκτήματα, και κατά τη μελέτη του φωτοβολταϊκού συστήματος γίνεται η αξιολόγηση των ειδικών συνθηκών της εφαρμογής (κατεύθυνση και διάρκεια της ηλιοφάνειας, τυχόν σκιάσεις κλπ.) ώστε να επιλεγεί η κατάλληλη τεχνολογία.

Στο εμπόριο διατίθενται φωτοβολταϊκά πάνελ – τα οποία δεν είναι παρά πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους, επικαλυμμένα με ειδικές μεμβράνες και εγκιβωτισμένα σε γυαλί με πλαίσιο από αλουμίνιο – σε διάφορες τιμές ονομαστικής ισχύος, ανάλογα με την τεχνολογία και τον αριθμό των φωτοβολταϊκών κυψελών που τα αποτελούν. Έτσι, ένα πάνελ 36 κυψελών μπορεί να έχει ονομαστική ισχύ 70-85 W, ενώ μεγαλύτερα πάνελ μπορεί να φτάσουν και τα 200 W ή και παραπάνω.

Η κατασκευή μιας γεννήτριας κρυσταλλικού πυριτίου μπορεί να γίνει και από ερασιτέχνες, μετά από την προμήθεια των στοιχείων. Το κόστος δεν γίνεται να είναι χαμηλότερο από την αγορά έτοιμης γεννήτριας, καθώς η προμήθεια ποιοτικών στοιχείων είναι πολύ δύσκολη. Εκτός από το πυρίτιο χρησιμοποιούνται και άλλα υλικά για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων, όπως το Κάδμιο - Τελλούριο (CdTe) και ο ινδοδισεληνιούχος χαλκός. Σε αυτές τις κατασκευές, η μορφή του στοιχείου διαφέρει σημαντικά από αυτή του κρυσταλλικού πυριτίου, και έχει συνήθως τη μορφή λωρίδας πλάτους μερικών χιλιοστών και μήκους αρκετών εκατοστών. Τα πάνελ συνδέονται μεταξύ τους και δημιουργούν τη φωτοβολταϊκή συστοιχία, η οποία μπορεί να περιλαμβάνει από 2 έως και αρκετές εκατοντάδες φωτοβολταϊκές γεννήτριες.

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από μια Φ/Β συστοιχία είναι συνεχούς ρεύματος (DC), και για το λόγο αυτό οι πρώτες χρήσεις των φωτοβολταϊκών αφορούσαν εφαρμογές DC τάσης: κλασικά παραδείγματα είναι ο υπολογιστής τσέπης («κομπιουτεράκι») και οι δορυφόροι. Με την προοδευτική αύξηση όμως του βαθμού απόδοσης, δημιουργήθηκαν ειδικές συσκευές – οι αναστροφείς (inverters) - που σκοπό έχουν να μετατρέψουν την έξοδο συνεχούς τάσης της Φ/Β συστοιχίας σε εναλλασσόμενη τάση. Με τον τρόπο αυτό, το Φ/Β σύστημα είναι σε θέση να τροφοδοτήσει μια σύγχρονη εγκατάσταση (κατοικία, θερμοκήπιο, μονάδα παραγωγής κλπ.) που χρησιμοποιεί κατά κανόνα συσκευές εναλλασσόμενου ρεύματος(AC).[2]

2.2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Τεχνολογία φιλική στο περιβάλλον: δεν προκαλούνται ρύποι από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, διατίθεται παντού και δεν στοιχίζει απολύτως τίποτα. Με την κατάλληλη γεωγραφική κατανομή, κοντά στους αντίστοιχους καταναλωτές ενέργειας, τα Φ/Β συστήματα μπορούν να εγκατασταθούν χωρίς να απαιτείται ενίσχυση του δικτύου διανομής
- Η λειτουργία του συστήματος είναι ολοσχερώς αθόρυβη. Έχουν σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής: οι κατασκευαστές εγγυώνται τα «κρύσταλλα» για 20-30 χρόνια λειτουργίας. Υπάρχει πάντα η δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης, ώστε να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες ανάγκες των χρηστών.
- Μπορούν να εγκατασταθούν πάνω σε ήδη υπάρχουσες κατασκευές, όπως είναι π.χ. η στέγη ενός σπιτιού ή η πρόσοψη ενός κτιρίου.
- Διαθέτουν ευελιξία στις εφαρμογές: τα Φ/Β συστήματα λειτουργούν άριστα τόσο ως αυτόνομα συστήματα, όσο και ως αυτόνομα υβριδικά συστήματα όταν συνδυάζονται με άλλες πηγές ενέργειας (συμβατικές ή ανανεώσιμες) και συσσωρευτές για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας.

Επιπλέον, ένα μεγάλο πλεονέκτημα του Φ/Β συστήματος είναι ότι μπορεί να διασυνδεθεί με το δίκτυο ηλεκτροδότησης (διασυνδεδεμένο σύστημα), καταργώντας με τον τρόπο αυτό την ανάγκη για εφεδρεία και δίνοντας επιπλέον τη δυνατότητα στον χρήστη να πωλήσει τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια στον διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου, όπως ήδη γίνεται στο Φράιμπουργκ της Γερμανίας. Ως μειονέκτημα θα μπορούσε να καταλογίσει κανείς στα φωτοβολταϊκά συστήματα το κόστος τους, το οποίο, παρά τις τεχνολογικές εξελίξεις παραμένει ακόμη αρκετά υψηλό. Μια γενική ενδεικτική τιμή είναι 1000 ευρώ ανά εγκατεστημένο κιλοβάτ (kW) ηλεκτρικής ισχύος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μια τυπική οικιακή κατανάλωση απαιτεί από 1,5 έως 3,5 κιλοβάτ, το κόστος της εγκατάστασης δεν είναι αμελητέο. Το ποσό αυτό, ωστόσο, μπορεί να αποσβεστεί σε περίπου 5-6 χρόνια και το Φ/Β σύστημα θα συνεχίσει να παράγει δωρεάν ενέργεια για τουλάχιστον άλλα 25 χρόνια. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα είναι πολλά, και το ευρύ κοινό έχει αρχίσει να στρέφεται όλο και πιο πολύ στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στα φωτοβολταϊκά ειδικότερα, για την κάλυψη ή την συμπλήρωση των ενεργειακών του αναγκών.[2]

2.3 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών κυττάρων

Το υλικό που χρησιμοποιείται περισσότερο για την κατασκευή φωτοβολταϊκών στοιχείων στην βιομηχανία είναι το πυρίτιο. Είναι ίσως και το μοναδικό υλικό που παράγεται με τόσο μαζικό τρόπο. Οι μεγάλες (συγκριτικά) αποδόσεις των φωτοβολταϊκών πλαισίων πυριτίου στο εμπόριο δίνουν και ένα σημαντικό πλεονέκτημα στο συγκεκριμένο υλικό. Το πυρίτιο σήμερα αποτελεί την πρώτη ύλη για το 90% της αγοράς των φωτοβολταϊκών.



Εικόνα 2.1: Το πυρίτιο στην πιο συνηθισμένη του κρυσταλλική μορφή

Το πυρίτιο (λατινικά *silicium* και αγγλικά *silicon*) είναι το χημικό στοιχείο με χημικό σύμβολο Si, ατομικό αριθμό 14. Παράχθηκε για πρώτη φορά στην πιο συνηθισμένη του κρυσταλλική μορφή το 1854 από τον Χενρύ Έτιεν Σαιντέ-Κλαιρ Ντεβίλλ. Ηλεκτρόλυσε μη καθαρό μικτό χλωρίδιο νατρίου και αργιλίου, που περιείχε περίπου 10% πυρίτιο. Έτσι ήταν ικανός να λάβει ελαφρώς μη καθαρή (την κρυσταλλική) αλλομορφή του πυριτίου το 1854. Αργότερα αναπτύχθηκαν πιο αποτελεσματικές οικονομικά μέθοδοι για την απομόνωση πυριτίου σε αρκετές αλλομορφές του, με πιο πρόσφατά παραχθείσα αλλομορφή το σιλικένιο.

Επίσης, το πυρίτιο είναι το όγδοο (8ο) κατά μάζα σε αφθονία χημικό στοιχείο στο σύμπαν, αλλά σπανίως βρίσκεται σε χημικά καθαρή στοιχειακή μορφή στη φύση. Η πιο συνηθισμένη μορφή του στη διαστρική σκόνη, σε αστεροειδείς, δορυφόρους και πλανήτες είναι το διοξείδιο του πυριτίου (SiO) και διάφορες άλλες πυριτικές ενώσεις. Πάνω από το 90% του φλοιού της Γης αποτελείται από πυριτιούχα ορυκτά, γεγονός που το καθιστά το δεύτερο κατά μάζα σε αφθονία χημικό στοιχείο στον πλανήτη μας μετά από το οξυγόνο.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του πυριτίου είναι το ότι είναι σε μεγάλη διαθεσιμότητα στην φύση. Είναι το δεύτερο σε αφθονία υλικό που υπάρχει στον πλανήτη μετά το οξυγόνο. Το διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂) (ή κοινώς η άμμος) και ο χαλαζίτης αποτελούν το 28% του φλοιού της γης. Επίσης, είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον. Μπορεί εύκολα να λιώσει και να μορφοποιηθεί αλλά και είναι σχετικά εύκολο να μετατραπεί στην μονοκρυσταλλική του μορφή.

Οι ηλεκτρικές του ιδιότητες μπορούν να διατηρηθούν μέχρι και στους 125°C κάτι που επιτρέπει την χρήση του πυριτίου σε ιδιαίτερα δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες. Αυτός είναι και ο λόγος που τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου ανταπεξέρχονται σε ένα ιδιαίτερα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών.

Πολύ σημαντικό στοιχείο, που συνέβαλε στην γρήγορη ανάπτυξη τα φωτοβολταϊκά στοιχεία τα τελευταία χρόνια, ήταν η ήδη αναπτυγμένη τεχνολογία, στην βιομηχανία της επεξεργασίας του πυριτίου, στον τομέα της ηλεκτρονικής (υπολογιστές, τηλεοράσεις κλπ). Το 2007 μάλιστα ήταν η πρώτη χρονιά που υπήρχε μεγαλύτερη ζήτηση (σε τόνους κρυσταλλικού πυριτίου) στην αγορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων σε σχέση με αυτήν των ημιαγωγών της ηλεκτρονικής.

Μια κατηγοριοποίηση για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία θα μπορούσε να γίνει με βάση το πάχος του υλικού που χρησιμοποιείται.[2]

Φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου (SingleCrystalline Silicon,sc-Si)

Το πάχος των κυττάρων αυτών είναι γύρω στα 0,3 χιλιοστά. Η απόδοση τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15 - 18% για το πλαίσιο. Εργαστηριακά έχουν επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερες αποδόσεις έως και 24,7% [10]. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία χαρακτηρίζονται από το πλεονέκτημά της καλύτερης σχέσης απόδοσης/επιφάνειας ή "ενεργειακής πυκνότητας". Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι το υψηλό κόστος κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Βασικές τεχνολογίες παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone). Αμφότερες βασίζονται στην ανάπτυξη ράβδου πυριτίου. Το μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό στοιχείο υψηλότερης απόδοσης στο εμπόριο σήμερα, είναι της



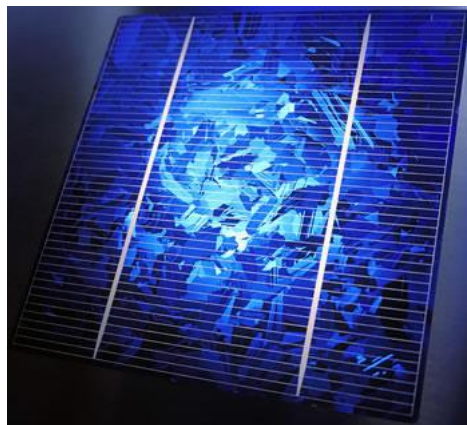
Εικόνα 2.2: Πλάισιο SunPower

SunPower με απόδοση πλαισίου 24.1%. Είναι το μοναδικό που έχει τις μεταλλικές επαφές στο πίσω μέρος του πάνελ αποκομίζοντας έτσι μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπίδρασης με την ηλιακή ακτινοβολία.[4]

Φωτοβολταϊκά στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου (MultiCrystalline Silicon, mc-Si)

Το πάχος τους είναι επίσης περίπου 0,3 χιλιοστά. Η μέθοδος παραγωγής τους είναι φθηνότερη από αυτήν των μονοκρυσταλλικών γι' αυτό και η τιμή τους είναι λίγο χαμηλότερη. Οπτικά μπορούμε να παρατηρήσουμε τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Όσο μεγαλύτερες είναι σε έκταση οι μονοκρυσταλλικές περιοχές τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση για τα πολυκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά κύτταρα.

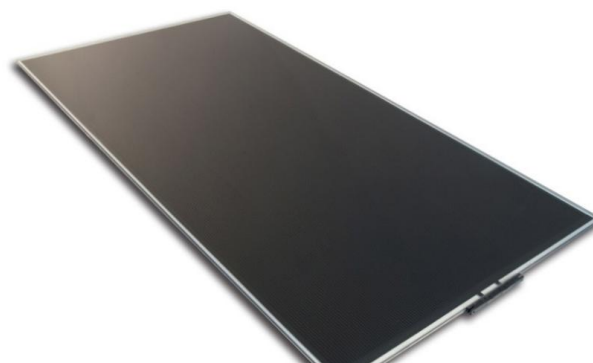
Σε εργαστηριακές εφαρμογές έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20% ενώ στο εμπόριο τα πολυκρυσταλλικά στοιχεία διατίθενται με αποδόσεις από 13 έως και 15% για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής είναι η μέθοδος κατευθυντικής στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση") και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.[4]



Εικόνα 2.3: Πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Φωτοβολταϊκά στοιχεία Δισεληνοϊνδιούχου χαλκός (CuInSe₂/CIS, με προσθήκη γάλλιου CIGS)

Ο Δισεληνοϊνδιούχος Χαλκός έχει εξαιρετική απορροφητικότητα στο προσπίπτον φως αλλά παρόλα αυτά η απόδοση του με τις σύγχρονες τεχνικές κυμαίνεται στο 11% (πλαίσιο). Εργαστηριακά έγινε εφικτή απόδοση στο επίπεδο του 18,8%, που είναι και η μεγαλύτερη που έχει επιτευχθεί μεταξύ των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών λεπτής επιστρώσεως. Με την πρόσμιξη γάλλιου CIGS η απόδοση του μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο. Το πρόβλημα είναι ότι το ίνδιο υπάρχει σε περιορισμένες ποσότητες στην φύση. Στα επόμενα χρόνια πάντως αναμένεται το κόστος του να είναι αρκετά χαμηλότερο.[4]



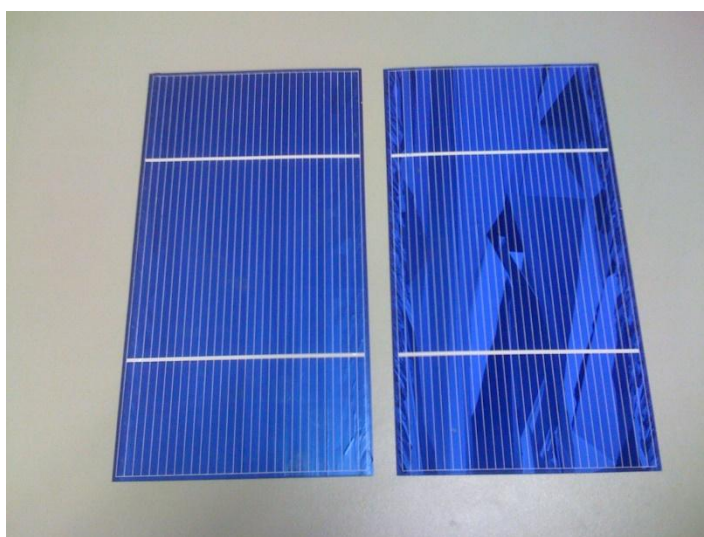
Εικόνα 2.3: Πλαίσιο Δισεληνοϊνδιούχου χαλκού

Φωτοβολταϊκά στοιχεία Φιλμ πυριτίου (Amorphous ή Thin film Silicon, a-Si)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αυτά, έχουν αισθητά χαμηλότερες αποδόσεις σε σχέση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες. Πρόκειται για ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού (πυρίτιο στην περίπτωση μας) πάνω σε υπόστρωμά υποστήριξης χαμηλού κόστους, όπως γυαλί ή αλουμίνιο. Λόγω της μικρότερης ποσότητας πυριτίου που χρησιμοποιείται η τιμή τους είναι γενικότερα αρκετά χαμηλότερη.

Ο χαρακτηρισμός άμορφο φωτοβολταϊκό προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο με τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου και το γεγονός ότι δεν υπάρχει κρυσταλλική συμμετρία σε μικροεπίπεδο. Οι επιδόσεις που επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκά thin films πυριτίου, κυμαίνονται για το πλαίσιο από 6 έως 8%, ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις ακόμα και 14%. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά για το φωτοβολταϊκό στοιχείο a-Si είναι ότι δεν επηρεάζεται πολύ από υψηλές θερμοκρασίες. Επίσης, πλεονεκτεί στην αξιοποίηση της απόδοσης του σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά, όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία (συννεφιά).

Το μειονέκτημά των άμορφων πλαισίων είναι η χαμηλή τους ενεργειακή πυκνότητα, κάτι που σημαίνει ότι για να παράγουμε την ίδια ενέργεια χρειαζόμαστε σχεδόν διπλάσια επιφάνεια σε σχέση με τα κρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία, καθώς και η υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους αμέσως μετά την έκθεσή τους σε ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά την διάρκεια ζωής των άμορφων πλαισίων, αφού δεν υπάρχουν στοιχεία από παλιές εγκαταστάσεις γιατί η τεχνολογία είναι σχετικά καινούρια. Παρόλα αυτά οι κατασκευαστές πλέον δίνουν εγγυήσεις απόδοσης 20 ετών. Το πάχος του πυριτίου είναι περίπου 0,0001 χιλιοστά ενώ το υπόστρωμά μπορεί να είναι από 1 έως 3 χιλιοστά.[4]



Εικόνα 2.4: Πλαίσιο ταινίας πυριτίου

Φωτοβολταϊκά στοιχεία Τελουριούχου Καδμίου (CdTe)

Το Τελουριούχο Κάδμιο έχει ενεργειακό διάκενο γύρω στο 1eV, το οποίο του δίνει σοβαρά πλεονεκτήματα, όπως την δυνατότητα να απορροφά το 99% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Οι σύγχρονες τεχνικές όμως προσφέρουν αποδόσεις πλαισίου γύρω στο 6-8%. Στο εργαστήριο η απόδοση στα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχει φθάσει το 16%. Μελλοντικά αναμένεται το κόστος του να πέσει αρκετά. Σημαντικότερος κατασκευαστής για φωτοβολταϊκά στοιχεία CdTe, είναι η First Solar. Τροχοπέδη για την χρήση του αποτελεί το γεγονός ότι το κάδμιο, σύμφωνα με κάποιες έρευνες, είναι καρκινογόνο, με αποτέλεσμα να προβληματίζει το ενδεχόμενο της εκτεταμένης χρήσης του. Ήδη η Greenpeace έχει εναντιωθεί στην χρήση του. Επίσης προβληματίζει ή έλλειψη του Τελλουρίου. Σημαντικότερη χρήση του είναι ή ενθυλάκωση του στο γυαλί ως δομικό υλικό στα φωτοβολταϊκά πλαίσια που ενσωματώνονται στα κτίρια (BIPV Building Integrated Photovoltaic).[4]



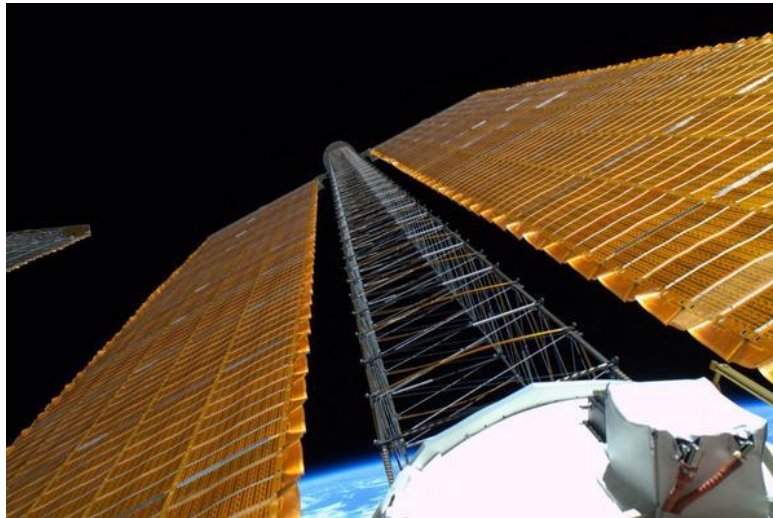
Εικόνα 2.5: Παραγωγή πλαισίων Τελουριούχου Καδμίου (CdTe)

Φωτοβολταϊκά στοιχεία Αρσενιούχου Γαλλίου (GaAs)

Το Γάλλιο είναι παραπροϊόν της ρευστοποίησης άλλων μετάλλων, όπως το αλουμίνιο και ο ψευδάργυρος και είναι πιο σπάνιο ακόμα και από τον χρυσό. Το Αρσένιο δεν είναι σπάνιο, αλλά έχει το μειονέκτημά ότι είναι δηλητηριώδες. Το αρσενιούχο γάλλιο έχει ενεργειακό διάκενο 1,43eV, που είναι ιδανικό για την απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας.

Η απόδοση του στην μορφή πολλαπλών συνενώσεων (multijunction), είναι η υψηλότερη που έχει επιτευχθεί και αγγίζει το 29%. Επίσης τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs είναι εξαιρετικά ανθεκτικά στις υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που επιβάλλει σχεδόν την χρήση τους σε εφαρμογές ηλιακών συγκεντρωτικών συστημάτων (solar concentrators). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία GaAs έχουν το πλεονέκτημά ότι αντέχουν σε πολύ υψηλές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας και έχουν πολύ υψηλή απόδοση, γι' αυτό ενδείκνυνται για διαστημικές εφαρμογές. Μεγάλο μειονέκτημά αυτής της

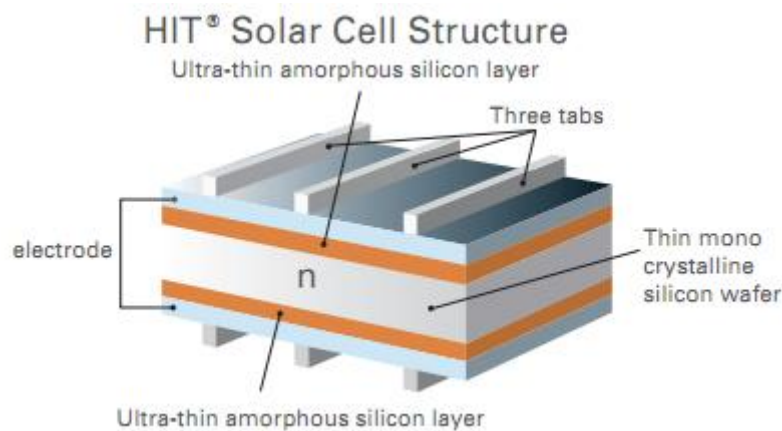
τεχνολογίας είναι το υπερβολικό κόστος του μονοκρυσταλλικού GaAs.[4]



Εικόνα 2.6: Φωτοβολταϊκά πλαίσια Αρσενιούχου Γαλλίου σε δορυφόρο

Φωτοβολταϊκά στοιχεία ετεροεπαφών HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer)

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο ετεροεπαφής αποτελείται από στρώσεις υλικών διαφόρων τεχνολογιών. Τα πιο γνωστά τέτοια φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούνται από δύο στρώσεις άμορφου πυριτίου, ενώ ενδιάμεσα υπάρχει μια στρώση μονοκρυσταλλικού πυριτίου.



Εικόνα 2.7: Τεχνολογία φωτοβολταϊκών στοιχείων ετεροεπαφών HIT

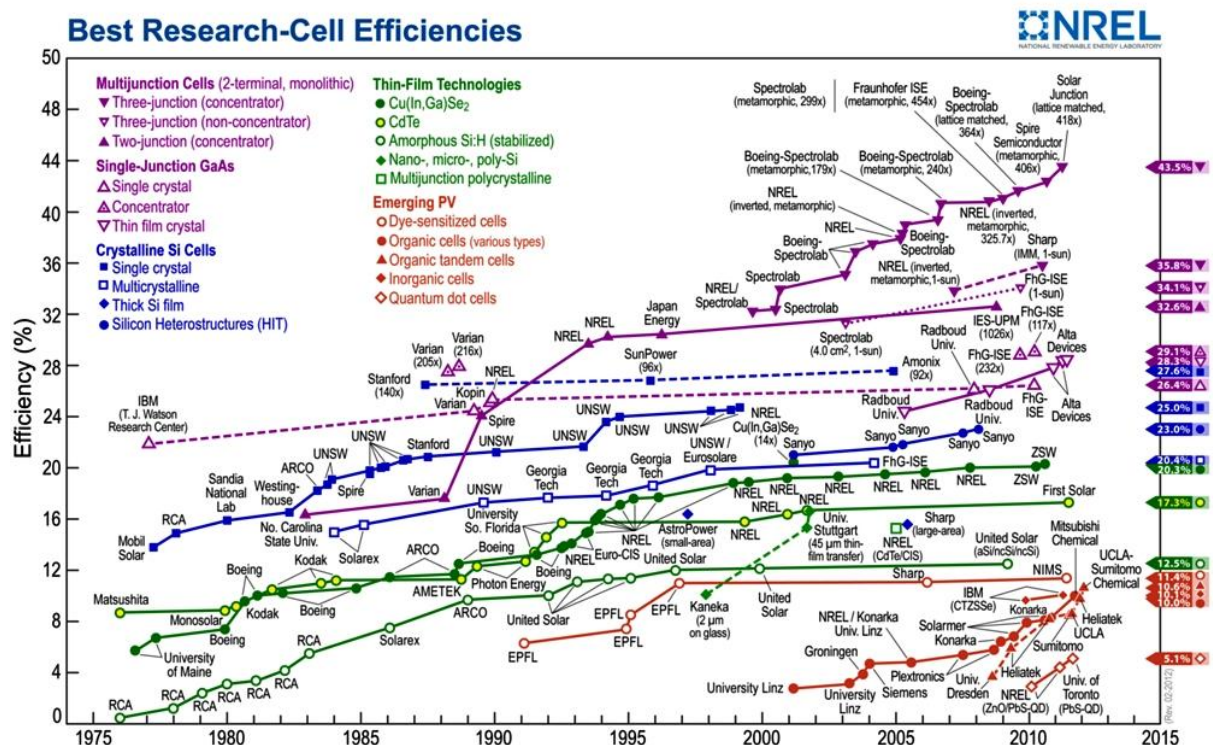
Κατασκευάζεται από την Sanyo Solar. Μεγάλο πλεονέκτημά αυτής της τεχνολογίας είναι ο υψηλός βαθμός απόδοσης του πλαισίου που φτάνει σε εμπορικές εφαρμογές στο 17,2%, το οποίο σημαίνει ότι χρειαζόμαστε μικρότερη επιφάνεια για να έχουμε την ίδια εγκατεστημένη ισχύ. Τα αντίστοιχα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν απόδοση 19,7%. Άλλα πλεονεκτήματα για αυτά τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι η υψηλή τους απόδοση σε μεγάλες θερμοκρασίες αλλά και η μεγάλη τους απόδοση στην διαχεόμενη ακτινοβολία. Φυσικά, αφού προσφέρει τόσα πολλά, αυτό το φωτοβολταϊκό είναι και ακριβότερο σε σχέση με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά πλαίσια.[4]

Φωτοβολταϊκά πλαίσια εύκαμπτης βάσης

Μία τελείως νέα τεχνολογία αποτελεί το πρωτοποριακό προϊόν spheral Solar, που βασίζεται σε υλικό, που αντίθετα με τα συμβατικά φωτοβολταϊκά κύτταρα, δεν επικάθεται σε άκαμπτη βάση πυριτίου, αλλά είναι φτιαγμένο από χιλιάδες πάμφθηνα σφαιρίδια πυριτίου, εγκλωβισμένα ανάμεσα σε δύο φύλλα αλουμινίου. Τα σφαιρίδια κατασκευάζονται από υπολείμματα πυριτίου που προκύπτουν από τη βιομηχανία των chips των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Κάθε σφαιρίδιο, λειτουργεί ως ανεξάρτητο μικροσκοπικό φωτοβολταϊκό κύτταρο απορροφώντας την ηλιακή ακτινοβολία και μετατρέποντάς την σε ηλεκτρισμό. Τα φύλλα αλουμινίου εξασφαλίζουν στο υλικό τη φυσική αντοχή που χρειάζεται, το κάνουν εύκαμπτο αλλά και ελαφρύ, ενώ ταυτόχρονα παίζουν το ρόλο ηλεκτρικής επαφής. Η γεμάτη φυσαλίδες επιφάνεια που δημιουργούν τα σφαιρίδια επιτρέπει μεγαλύτερη απορρόφηση ηλιακού φωτός, χαρίζοντας στο υλικό αποδοτικότητα της τάξης του 11%. Μπορεί να καλύψει οποιοδήποτε σχήματος επιφάνειες, αυξάνοντας κατά πολύ τις επιφάνειες όπου μπορεί να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια και δίνοντας στους αρχιτέκτονες τη δυνατότητα να σχεδιάσουν κτήρια με καμπύλες που θα μπορούν να είναι επενδεδυμένα με φωτοβολταϊκά, χωρίς να απαιτούνται ενισχυμένες κατασκευές για την στήριξή τους.

Άλλες τεχνολογίες

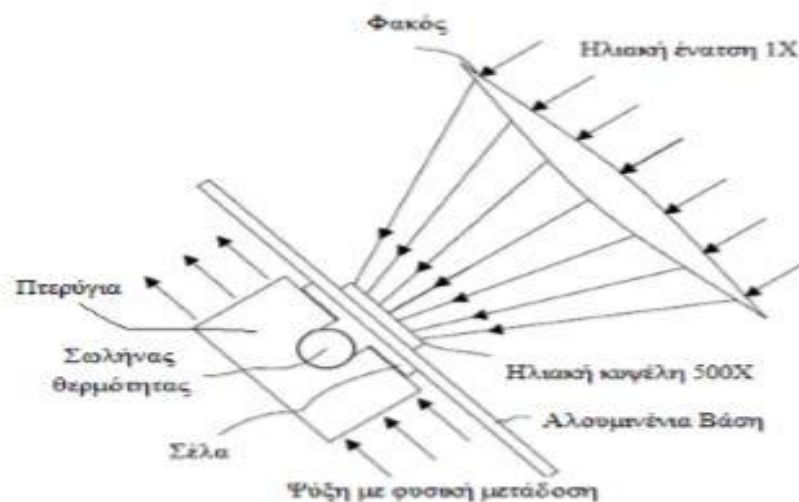
Η τεχνολογία των φωτοβολταϊκών εξελίσσεται με ραγδαίους ρυθμούς και διάφορα εργαστήρια στον κόσμο παρουσιάζουν νέες πατέντες. Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων που φαίνεται να ξεχωρίζουν και μελλοντικά πιθανώς να γίνει ευρεία η χρήση τους, είναι τα Νανοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου (nc-Si), καθώς και τα Οργανικά/Πολυμερή στοιχεία. Τα ηλιακά κύτταρα ενδιάμεσης ζώνης (Intermediate band solar cell) χρησιμοποιούν “quantum dots” για αύξηση της επιφάνειας συλλογής και του εύρους ακτινοβολίας.[4]



Εικόνα 2.8: Μετατροπή απόδοσης φωτοβολταϊκών κελιών σε σχέση με τον χρόνο[14]

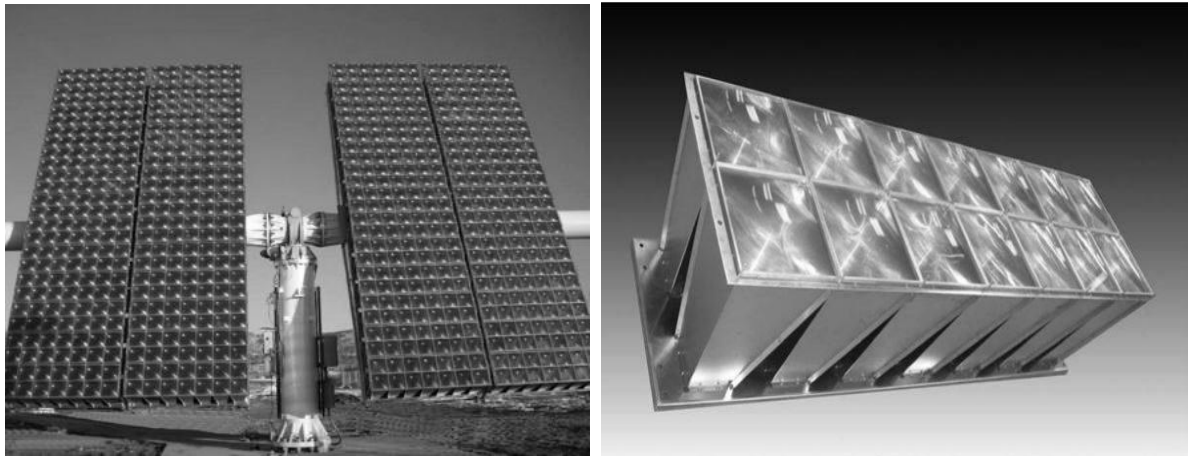
2.4 Συγκεντρωτικά ΦΒ (CPV)

Τα συμβατικά φωτοβολταϊκά συστήματα (PV) λειτουργούν με ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ενός ηλίου, όπου ένταση ηλιακής ακτινοβολίας ενός ηλίου είναι περίπου 1000 W/m^2 , με ολόκληρη την επιφάνεια των φωτοβολταϊκών να καλύπτεται με ηλιακές κυψέλες. Το υλικό των ΦΒ είναι ακριβό, έτσι το κόστος ολόκληρου του συστήματος είναι αρκετά υψηλό. Σαν εναλλακτική λύση, τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά (CPV) χρησιμοποιούν οπτικά στοιχεία χαμηλότερου κόστους όπως οι καθρέφτες, μίνι-αντανάκλασης ή ο φακός Fresnel όπου συγκεντρώνουν ηλιακή ένταση από 200 έως 1000 ήλιους, με συνέπεια να έχουμε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα με 200 έως 1000 φορές λιγότερο υλικό ημιαγωγών πυριτίου. Τα τετραγωνικά μέτρα του πυριτίου αντικαθίστανται με τετραγωνικά μέτρα φακών ή ανακλαστήρων χαμηλότερου κόστους τα οποία είναι και αρκετά αποδοτικότερα από τα συμβατικά ηλιακά κύτταρα πυριτίου. Η συγκεντρωμένη ηλιακή ενέργεια που παραδίδεται στην ηλιακή κυψέλη είναι από 20 έως 75 W/cm^2 . Η ενέργεια που δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρική πρέπει να απελευθερωθεί για να αποτρέψει την υπερβολική θέρμανση των κυττάρων και για να αυξήσει την αποδοτικότητα τους. Επομένως, η ψύξη ηλιακών κυψελών είναι ένα αναπόσπαστο τμήμα του συστήματος συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών. Πρώτον γιατί η απόδοση των ηλιακών κυψελών είναι εξαρτώμενη της θερμοκρασίας των κυψελών διότι με μείωση της θερμοκρασίας έχουμε αύξηση της απόδοσης. Δεύτερον, γιατί το ηλιακό κύτταρο πρέπει να κρατηθεί κάτω από το σημείο τήξης της βάσης στην οποία στηρίζεται για να μην οδηγήσει το συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό σε αποτυχία και τρίτον, η αξιοπιστία και η διάρκεια ζωής της ηλιακής κυψέλης είναι συνάρτηση του αριθμού θερμικών κύκλων και του μεγέθους της θερμότητας που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της. Μια σχηματική αναπαράσταση των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών με έναν σωλήνα θερμότητας παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα. Το ηλιακό κύτταρο τοποθετείται πάνω σε μια αλουμινένια βάση. Η ηλιακή ακτινοβολία πριν φθάσει στην ηλιακή κυψέλη έχει γίνει 500 φορές μεγαλύτερη μέσω του φακού Fresnel. Η συγκεντρωμένη ροή χτυπά τη ηλιακή κυψέλη, παράγοντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια. Η θερμική ενέργεια που παράγεται περνά από την κυψέλη μέσω της σέλας, και από εκεί στον σωλήνα θερμότητας, έπειτα διανέμεται από το σωλήνα θερμότητας σε μια σειρά πτερυγών, όπου και αφαιρείται με φυσική μετάδοση.[15]



Εικόνα 2.9 Φωτοβολταϊκό σύστημα συγκέντρωσης με φακούς Fresnel[15].

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται ένα συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό τύπου GEN 1 της εταιρίας EMCORE. Όπως φαίνεται στα αριστερά της εικόνας, το σύστημα της EMCORE αποτελείται από πολλές ηλιακές κυψέλες, όπου η καθεμία έχει επιφάνεια 1cm². Κάθε κυψέλη σφραγίζεται σε ένα κιβώτιο και τοποθετείται σε μια αλουμινένια βάση πάχους 0,5cm. Όπως φαίνεται στη δεξιά εικόνα,



Εικόνες 2.10, 2.11 Φωτοβολταϊκό συγκεντρωτικό σύστημα ΦΒ της EMCORE

οι κυψέλες τοποθετούνται σε ένα σύστημα δύο αξόνων όπου η κατεύθυνση τους είναι πάντα προς τον ήλιο. Τα ηλιακά πάνελ ακολουθούν τον ήλιο με περιστροφή γύρω από έναν κάθετο άξονα. Τα κύτταρα περιστρέφονται και γύρω από έναν οριζόντιο άξονα. Αυτό βοηθάει στη σχεδίαση των σωλήνων θερμότητας, εφόσον ο σωλήνας θερμότητας είναι οριζόντιος για όλες τις συνθήκες λειτουργίας, απλοποιώντας έτσι τη σχεδίαση τους.

Οι απαιτήσεις ψύξης των κυψελών δίνονται στον πίνακα πιο κάτω. Η ψύξη γίνεται με φυσική μετάδοση θερμότητας, δεδομένου ότι η εξαναγκασμένη μετάδοση απαιτεί ανεμιστήρα, και η ισχύς που απαιτείται για να τροφοδοτήσει τον ανεμιστήρα μειώνει την συνολική απόδοση του συστήματος.[15]

Διαστάσεις κελιού	1 cm x 1 cm
Συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας	Περίπου 500 ήλιοι
Απαγωγή θερμότητας σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας	Περίπου 40 W
Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ σωλήνα θερμότητας και περιβάλλοντος σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας	25 °C
Διάρκεια ζωής	20 με 30 χρόνια
Τρόπος ψύξης	Παθητική

Πίνακας 2.1 Απαιτήσεις ψύξης των ΦΒ κυψελών συγκέντρωσης[15]

Ενώ η φυσική μετάδοση επιτρέπει την παθητική αφαίρεση της θερμότητας, η απαγωγή θερμότητας με φυσική μετάδοση είναι από 10 έως 100 φορές χειρότερη από την ψύξη με εξαναγκασμένη μετάδοση. Όσο αυξάνεται το μέγεθος του αποδέκτη θερμότητας (ψήκτρα), αυξάνονται και οι απώλειες μετάδοσης θερμότητας με αποτέλεσμα να πέφτει η απόδοση του συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού. Επειδή η φυσική μεταφορά απαιτεί μεγάλο αποδέκτη θερμότητας, οι απώλειες αυτές αναμένεται να είναι σημαντικές. Οι σωλήνες θερμότητας παρέχουν μια μέθοδο για να προσδώσουν ισοθεμικά τη θερμότητα σε όλα τα πτερύγια, αυξάνοντας έτσι την απόδοση του συστήματος.[15]

Κατηγορίες των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών (CPV)

Από έρευνα που έγινε από τους Royne, Dey και Mills [2005], βρέθηκε ότι υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες κυττάρων CPV:

- Με μονό κύτταρο
- Με γραμμικό συγκεντρωτή
- CPV υψηλής πυκνότητας

Η ψύξη μέσω σωλήνων θερμότητας είναι κατάλληλη για την κατηγορία μονοκύτταρων CPV για υψηλό λόγο συγκέντρωσης, π.χ., για 1.000 ήλιους, και σε CPV με γραμμικούς συγκεντρωτές για χαμηλό λόγο συγκέντρωσης, πχ για 30 ήλιους. Ο πίνακας 4.2 συνοψίζει την έρευνα που έχει γίνει για την ψύξη των CPV μέσω σωλήνων θερμότητας.[17]

Μονοκύτταρα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά (CPV)

Οι Beach και White [1981] χρησιμοποίησαν έναν σωλήνα θερμότητας χαλκού με συγκολλημένα διαμήκη πτερύγια χαλκού για να αφαιρέσουν θερμότητα περίπου εφτακοσίων ήλιων, χρησιμοποιώντας το νερό ή την ακετόνη σαν ρευστό εργασίας. Το σύστημα ήταν ένας θερμοσίφωνας με λέβητα, και εξετάστηκε σε κάθετη διάταξη. Η αφαίρεση θερμότητας έγινε με φυσική μεταφορά. Η διαφορά θερμοκρασία μεταξύ της κυψέλης και του περιβάλλοντος ήταν περίπου 30°C. Σε μελέτη που πραγματοποίησε ο Farahat [2004] συγκρίνοντας το σωλήνα θερμότητας και την εξαναγκασμένη ψύξη με νερό για τα μονοκύτταρα συστήματα, κατέληξε στο συμπέρασμά ότι το σύστημα ψύξης με σωλήνες θερμότητας ήταν καλύτερο.[17]

Πίνακας 2.2 Συγκεντρωτικά στοιχειά μεθόδων ψύξης που εφαρμόστηκαν στις κατηγορίες των CPV

Έρευνα που έγινε από τους	Υλικό σωλήνα θερμότητας	Ρευστό εργασίας	Ηλιακή ακτινοβολία	Τύπος CPV	Αποτελέσματα
Akbarzadeh και Wadowski (1996)	Χαλκός	Φρέον R-11	20 ήλιων	Γραμμικός Συγκεντρωτής	Η θερμοκρασία κρατήθηκε κάτω από τους 46°C
Feldman, Kenney, και Edenburn (1981)	Από αλουμίνιο ο σωλήνας θερμότητας και τα ενσωματωμένα πτερύγια	Βενζόλη	24 ήλιων	Γραμμικός Συγκεντρωτής	Η ταχύτητα του ανέμου απαιτείται να είναι 1 m/s ή υψηλότερη
Beach και White (1981)	Από χαλκό ο σωλήνας θερμότητας και τα συγκολλημένα πτερύγια	Ακετόνη ή νερό	Μέχρι 700 ήλιους	Μονοκύτταρος	Εξετάστηκε η κάθετη διάταξη μόνο και η θερμοκρασία μεταξύ σωλήνα θερμότητας και αέρα ήταν περίπου 30°C

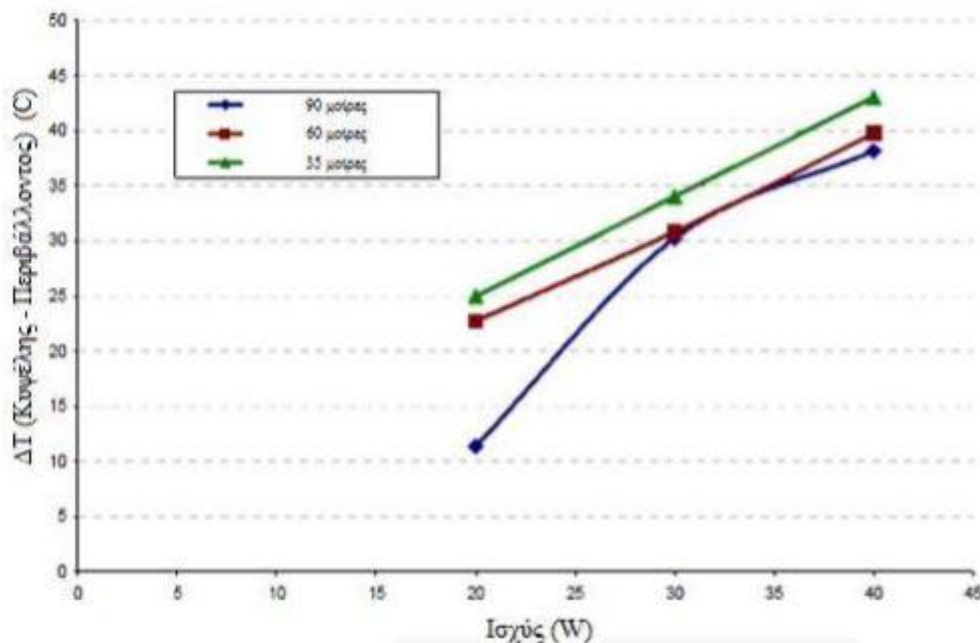
Γραμμικός συγκεντρωτής

Οι Feldman, Kenney, και Edenburn [1981] εξέτασαν την ψύξη με σωλήνες θερμότητας σε έναν γραμμικό συγκεντρωτή με λόγο συγκέντρωσης περίπου εικοσιτεσσάρων ήλιων. Ο σωλήνας θερμότητας ήταν μια θερμοσιφωνική διάταξη ειδικής κατασκευής, με βενζόλιο ως ρευστό

εργασίας. Η θερμότητα απορροφήθηκε από δύο πιάτα αλουμινίου με κατακόρυφα πτερύγια. Η θερμοκρασία του τμήματος εξάτμισης υπερέβη τη θερμοκρασία αντοχής του δηλαδή τους 140°C για ταχύτητες ανέμου μικρότερες από 1 m/s. Οι Akbarzadeh και Wadowski [1996] έψυξαν έναν γραμμικό συγκεντρωτή με μια θερμοσιφωνική διάταξη από χαλκό, με λόγο συγκέντρωσης περίπου είκοσι ήλιων. Το ρευστό εργασίας ήταν η ψυκτική ουσία R-11 (τριχλωρομονοφθορομεθάνιο), λόγω της σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας του, τους 40°C. Η ψύξη έγινε με φυσική μεταφορά. Το υλικό, το μέγεθος, και ο προσανατολισμός πτερυγίων δεν διευκρινίστηκαν.[17]

Εξάρτηση της παραγόμενης ισχύος εν συναρτήσει της κλίσης των συγκεντρωτικών φωτοβολταϊκών (CPV)

Στα πειράματα που έγιναν για να βρεθεί η επιρροή της κλίσης του ΦΒ συστήματος συγκέντρωσης θα πρέπει η κλίση να μεταβάλλεται κατά την διάρκεια της ημέρας. Επομένως τα πάνελ του συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού τοποθετήθηκαν σε ένα σύστημα δύο αξόνων και ολόκληρο το σύστημα περιστρεφόταν από την ανατολή προς την δύση κατά τη διάρκεια της ημέρας, με σκοπό να είναι πάντα προσανατολισμένο προς τον ήλιο. Με αυτήν την διάταξη, ο σωλήνας θερμότητας ήταν πάντα οριζόντιος. Οι μετρήσεις έγιναν για τρεις διαφορετικές γωνίες του συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού, όπου οι γωνίες αντιπροσωπεύουν την διάρκεια μιας ημέρας, έτσι 35° είναι η κλίση που θα έχει αργά το μεσημέρι, 60° αντιπροσωπεύει το πρωί ή το βράδυ και 90° θεωρείτε το χάραμα ή το σούρουπο. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 4.6. Το στοιχειώδες συγκεντρωτικό φωτοβολταϊκό κύτταρο είχε επιφάνεια 1cm², επομένως για ισχύ 40 W η ισοδύναμη ροή θερμότητας θα είναι 40 W/cm². Όπως είναι φυσικό, η διαφορά θερμοκρασία ΔT μεταξύ της κυψέλης και του περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη για κλίση 35° (μεσημέρι), όπου η αλουμινένια βάση είναι σχεδόν οριζόντια, αυξάνοντας παράλληλα την ποσότητα θερμότητας που απορροφάται. Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας που μετρήθηκε ήταν 43°C και η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του σωλήνα θερμότητας με το περιβάλλον ήταν μικρότερη από 25°C, καλύπτοντας έτσι τις απαιτήσεις του παρακάτω πίνακα.[17]



2.5 Υβριδικά ΦΒ συστήματα νερού

Η θερμοκρασία μεταξύ της ηλιακής κυψέλης και του περιβάλλοντος, χωρίς το σύστημα ψύξης (σωλήνα θερμότητα και πτερύγια) βρέθηκε ότι είναι 110°C σε σχέση με τους 40°C περίπου που είχαμε με ψύξη. Γίνεται λοιπόν εμφανές ότι υπάρχει ανάγκη για ψύξη του συγκεντρωτικού φωτοβολταϊκού και αυτό διότι στην επιφάνεια της ηλιακής κυψέλης φθάνει πολλαπλάσια ηλιακή ακτινοβολία λόγω των φακών που χρησιμοποιούν τα συγκεκριμένα ΦΒ συστήματα για να αυξήσουν την ηλιακή ένταση, με αποτέλεσμα οι ηλιακές κυψέλες να απορροφούν μεγάλα ποσά θερμότητας.

Το μεγαλύτερο μέρος της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τα ΦΒ δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό αλλά σε θερμότητα η οποία συντελεί στην αύξηση της θερμοκρασίας τους και μείωση της ηλεκτρικής τους απόδοσης. Έτσι ένα σημαντικό κομμάτι της ηλιακής ενέργειας όχι μόνο δεν εκμεταλλεύεται αλλά παράλληλα συντελεί στην μείωση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης των Φ/Β. Έτσι, η ψύξη τους καθίσταται σημαντική.

Η ψύξη χωρίζεται σε δύο κατηγορίες:

Ψύξη με χρήση αέρα:

Η φυσική ή βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα, αν και είναι απλή και οικονομική, για την απομάκρυνση της θερμότητας δεν αποτελεί πρακτική λύση για χώρες όπως η Ελλάδα, αφού η θερμοκρασία του αέρα τους περισσότερους μήνες του χρόνου είναι μεγαλύτερη από 20°C αλλά και γιατί ο αέρας έχει μικρή πυκνότητα με αποτέλεσμα η ψύξη να μην είναι αποδοτική. Από την άλλη, το νερό ως ψυκτικό μέσο, με την χρήση εναλλάκτη θερμότητας στη πίσω επιφάνεια του ΦΒ, είναι πιο αποδοτικό αφού το νερό του δικτύου έχει μια σταθερή θερμοκρασία γύρω στους 20°C όλο το έτος, αποτελεί όμως μια διαδικασία ακριβότερη από την απαγωγή θερμότητας με την χρήση αέρα.

Ψύξη με χρήση νερού:

Η ψύξη με νερό γίνεται με δύο τρόπους, ο πρώτος τρόπος είναι με (έμμεση) ψύξη μέσω εξάτμισης με σωλήνες θερμότητας (heatpipes) και ο δεύτερος τρόπος είναι με άμεση ψύξη.

Η ψύξη με την χρήση σωλήνων θερμότητας εφαρμόζεται κυρίως στα συγκεντρωτικά συστήματα συγκέντρωσης ΦΒ (CPV), στα οποία έγινε αναφορά στο Κεφάλαιο 2(2.4).

Η φυσική ή βεβιασμένη κυκλοφορία αέρα, αν και είναι απλή και οικονομική, για την απομάκρυνση της θερμότητας δεν αποτελεί πρακτική λύση για χώρες όπως η Ελλάδα, αφού η θερμοκρασία του αέρα τους περισσότερους μήνες του χρόνου είναι μεγαλύτερη από 20°C αλλά και γιατί ο αέρας έχει μικρή πυκνότητα με αποτέλεσμα η ψύξη να μην είναι αποδοτική. Από την άλλη το νερό ως ψυκτικό μέσο, με την χρήση εναλλάκτη θερμότητας στη πίσω επιφάνεια του ΦΒ, είναι πιο αποδοτικό αφού το νερό του δικτύου έχει μια σταθερή θερμοκρασία γύρω στους 20 °C όλο το έτος, αποτελεί όμως μια διαδικασία ακριβότερη από την απαγωγή θερμότητας με την χρήση αέρα.[16]

2.5.1 Έμμεση Ψύξη (με εξάτμιση)

Η μέθοδος της ψύξης με εξάτμιση είναι βασισμένη στη θεωρία του σωλήνα θερμότητας. Σε αυτήν την μέθοδο, η ψύξη της ΦΒ κυψέλης γίνεται με ελεγχόμενη κυκλοφορία αερίου που ρέει μέσα από τους σωλήνες θερμότητας. Το σχήμα του ΦΒ πάνελ είναι τετραγωνικής ή κυλινδρικής μορφής. Το επιλεγμένο ψυκτικό ρευστό απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της παραγόμενης θερμότητας και εξατμίζεται. Τέλος, θα συμπυκνωθεί μέσα στο συμπυκνωτή και θα επιστρέψει σε υγρή μορφή στην ΦΒ κυψέλη μέσω των σωλήνων θερμότητας όπου και θα εξατμιστεί ξανά.

Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Με την αύξηση της θερμοκρασίας, αυξάνεται η ποσότητα των ατμών που συμπυκνώνονται στον συμπυκνωτή. Στις περισσότερες εφαρμογές χρησιμοποιείται ο σωλήνας θερμότητας κυλινδρικής γεωμετρίας, αλλά ανάλογα τις απαιτήσεις μπορεί να έχουμε

και σωλήνες θερμότητας τετραγωνικής ή ορθογώνιας γεωμετρίας. Ο σωλήνας θερμότητας είναι μια συσκευή με πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα, και χρησιμοποιείται για τη μεταφορά θερμότητας από μια θέση σε μια άλλη με μικρή απόκλιση της θερμοκρασίας.

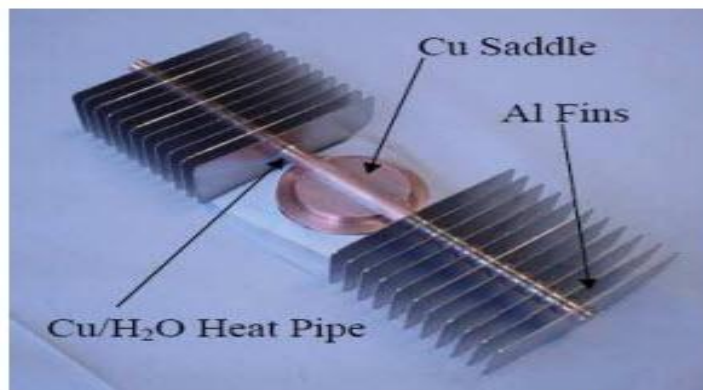
Αποτελείται από τρία τμήματα τα οποία είναι:

1. Τμήμα εξάτμισης.
2. Τμήμα συμπυκνωτών.
3. Αδιαβατικό τμήμα που διαχωρίζει το τμήμα εξάτμισης και το τμήμα του συμπυκνωτή.

Η σχεδίαση και ο αριθμός των σωλήνων θερμότητας εξαρτώνται από την απαιτούμενη ποιότητα της θερμότητας που πρέπει να μεταφερθεί και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.[16]

Σωλήνες Θερμότητας

Οι σωλήνες θερμότητας μεταφέρουν την θερμότητα του ρευστού εργασίας σε δύο φάσεις. Ο σωλήνας θερμότητας είναι βασικά ένας σφραγισμένος σωλήνας, συνήθως κατασκευασμένος από θερμοαγώγιμο υλικό (π.χ. χαλκός ή αλουμίνιο). Η εισαγωγή θερμότητας ατμοποιεί το υγρό ρευστό εργασίας μέσα από το τμήμα εξάτμισης. Ο ατμός, που φέρνει τη λανθάνουσα θερμότητα της εξάτμισης, ρέει προς το πιο ψυχρό τμήμα των συμπυκνωτών. Στο συμπυκνωτή, ο ατμός υγροποιείται και απορροφάτε από ένα πορώδες υλικό απελευθερώνοντας θερμική ενέργεια. Σε υγρή μορφή ξανά, το ψυκτικό μέσο κατευθύνεται από το πορώδες απορροφητικό υλικό προς τη μεριά του σωλήνα θερμότητας με την υψηλότερη θερμοκρασία (βάση ψήκτρας). Η διαδικασία αλλαγής φάσης και η διφασική κυκλοφορία συνεχίζονται εφ' όσον διατηρείται η διαφορά



Εικόνα 2.13 Μέρη από τα οποία αποτελείται ο σωλήνας θερμότητας

θερμοκρασίας μεταξύ του τμήματος εξάτμισης και του συμπυκνωτή. Οι σωλήνες θερμότητας είναι μια ιδανική συσκευή για τα συστήματα CPV. Οι σωλήνες θερμότητας είναι παθητικές θερμικές συσκευές όπου η θερμότητα μεταφέρεται σε μεγάλες αποστάσεις με πολύ χαμηλή πτώση τη θερμοκρασίας. Οι σωλήνες θερμότητας είναι επίσης μετασηματιστές ροής θερμότητας. Παίρνουν τη θερμότητα σε πολύ υψηλή ροή (από την πίσω πλευρά της ηλιακής κυψέλης του CPV) και τη μεταφέρουν σε έναν αποδέκτη θερμότητας (ψήκτρα) με σημαντικά χαμηλότερη ροή θερμότητας (φυσική μεταφορά στο περιβάλλον). Επειδή ο σωλήνας θερμότητας λειτουργεί σχεδόν ισοθερμικά, το τμήμα του αποδέκτη θερμότητας θα λειτουργεί πολύ αποτελεσματικά. Η χαρακτηριστική αντίσταση διάδοσης του αποδέκτη θερμότητας εξουδετερώνεται και επομένως, ο αποδέκτης θερμότητας μπορεί να έχει μικρότερο μέγεθος και κόστος.[17]

Κατασκευαστικά στοιχεία των σωλήνων θερμότητας

Οι σωλήνες θερμότητας κατασκευάζονται από μια μεγάλη ποικιλία υλικών τόσο για το εξωτερικό περίβλημα όσο και για το εσωτερικό μέρος, ανάλογα με το ρευστό εργασίας. Τα υλικά κατασκευής και το ρευστό εργασίας πρέπει να είναι συμβατά, αυτό σημαίνει ότι το ρευστό λειτουργίας δεν

πρέπει να διαβρώνει και να ενώνεται χημικά με τα μεταλλικά μέρη του σωλήνα θερμότητας και ειδικά του τμήματος που ελευθερώνει το μη-συμπυκνωμένο αέριο (NCG). Εάν δημιουργηθεί NCG, μια ποσότητα του θα μπλοκαρισθεί στο τμήμα συμπύκνωσης και η απόδοση του σωλήνα θερμότητας θα μειωθεί με την πάροδο του χρόνου.[17]

Υλικά σωλήνων θερμότητας

Για τη περιοχή θερμοκρασιών που μας ενδιαφέρουν (από -20 μέχρι 100°C), το δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά του εξωτερικού περιβλήματος και των εσωτερικών τοιχωμάτων είναι ο χαλκός και το αλουμίνιο. Ο χαλκός έχει υψηλότερη πυκνότητα και θερμική αγωγιμότητα από το αλουμίνιο, αλλά είναι ακριβότερος. Ένα πλεονέκτημά του χαλκού είναι ότι ακόμα και αν η επιφάνεια του σκονιστεί η σκουριάσει συνεχίζει να έχει υψηλή αξιοπιστία. Πλεονέκτημά του αλουμινίου είναι ότι απομακρύνει εύκολα ποσότητες θερμότητας από το εσωτερικό του με χαμηλό κόστος.[17]

Ρευστά λειτουργίας βάση των υλικών του σωλήνα θερμότητας

Η επιλογή του ρευστού εργασίας εξαρτάται από την επιλογή του υλικού των τοιχωμάτων και των αυλακιών. Αυτό γίνεται για να αυξηθεί η διάρκεια ζωής του σωλήνα θερμότητας. Οι σωλήνες θερμότητας για την ψύξη των CPV κατασκευάζονται για λειτουργία περίπου 30 ετών. Η μη συμβατότητα μεταξύ των δύο υλικών αναμένεται να δημιουργήσει διάβρωση και μη-συμπυκνωμένα αέρια (NCG), επίσης τα προϊόντα διάβρωσης που παράγονται στα αυλάκια του σωλήνα θερμότητας εμποδίζουν την καλή λειτουργία του και σε ακραίες καταστάσεις μπορεί να έχουμε διαρροή.

Οι συνδυασμοί για βέλτιστη λειτουργία, συνάρτηση της θερμοκρασίας είναι:

- Χαλκός/νερό
- Αλουμίνιο/αμμωνία

Ωστόσο, και με τα δύο ρευστά έχουμε πιθανά προβλήματα. Το νερό παγώνει στους 0°C, και έτσι μεταφέρεται πολύ μικρή ισχύς σε θερμοκρασίες κάτω από 30°C. Τα συστήματα χαλκού/νερού πρέπει να σχεδιαστούν ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες σε περίπτωση που παγώσει το νερό. Η λειτουργία τους για θερμοκρασίες πάνω από 30°C δεν αποτελεί πρόβλημα, διότι το σύστημα θερμαίνεται πριν αρχίσει να λειτουργεί. Από την άλλη η αμμωνία έχει υψηλή πίεση ατμού. Η απόδοση των σωλήνων θερμότητας με χρήση αμμωνίας ως ρευστό εργασίας πέφτει σε θερμοκρασίες πάνω από τους 80°C.[17]

Σχεδίαση συστημάτων σωλήνων θερμότητας

Στην ενότητα αυτή αναλύεται η κατασκευαστική δομή των σωλήνων θερμότητας χαλκού/νερού. Η ηλιακή κυψέλη τοποθετείται σε μια αλουμινένια βάση.

Η θερμότητα διαβιβάζεται από την ηλιακή κυψέλη μέσω της αλουμινένιας βάσης σε έναν θερμοσωλήνα νερού/χαλκού. Οι σωλήνες θερμότητας μεταβιβάζουν ισοθερμικά τη θερμότητα σε μια σειρά αλουμινένιων πτερυγίων και η θερμότητα μεταφέρεται από τα πτερύγια στον αέρα με φυσική μεταφορά.[17]

2.5.2 Άμεση ψύξη (Μέθοδος υδρόψυξης)

Η θερμότητα είναι ο λόγος για την αύξηση της θερμοκρασίας των φωτοβολταϊκών κυψελών και της μείωσης της αποδοτικότητας τους. Σε ορισμένα φωτοβολταϊκά πάνελ η θερμότητα αφαιρείται από έναν αποδέκτη θερμότητας (ψήκτρα) και διαχέεται στην ατμόσφαιρα. Μια άλλη λύση για την απαγωγή της θερμότητας είναι να ψυχθούν οι φωτοβολταϊκές κυψέλες με τη βοήθεια νερού, ώστε να κρατηθεί η θερμοκρασία λειτουργίας τους μέσα σε κάποια όρια και παράλληλα να αυξηθεί η απόδοσή τους. Σε μια τέτοια περίπτωση, γίνεται εκμετάλλευση του ζεστού νερού που παράγεται από έναν συλλέκτη. Μια τέτοια διάταξη είναι ο συλλέκτης ΦΒ/Θ (PVT), ο οποίος είναι σε γενικές γραμμές ένας ηλιακός - θερμικός συλλέκτης με τις φωτοβολταϊκές κυψέλες να βρίσκονται συνδεδεμένες πάνω στη επιφάνεια ενός πάνελ. Τα κύρια πλεονεκτήματα του συλλέκτη ΦΒ/Θ είναι:

1. Μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας, λόγω του χαμηλότερου κόστους συσκευασίας και καλύτερη εκμετάλλευση της διαδικασίας μετατροπής της ενέργειας.
2. Με την ψύξη των φωτοβολταϊκών κυψελών και διατήρηση της θερμοκρασίας σε συγκεκριμένη θερμοκρασία λειτουργίας, αυξάνεται η αποδοτικότητά τους.
3. Χρησιμοποίηση της παραχθείσας θερμότητας για θέρμανση νερού ή άλλου μέσου ψύξης.

2.5.3 Υβριδικά ΦΒ συστήματα νερού

Το σύστημα που χρησιμοποιεί υγρό σαν ψυκτικό μέσο, καλείται υβριδικό. Μετασχηματίζει την ακτινοβολία του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια και ταυτόχρονα απορροφά τη θερμότητα από το πάνελ του ΦΒ. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται η θερμοκρασία του ΦΒ, επομένως αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης, και η θερμότητα που παράγεται μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη ενός μέρους των θερμικών απαιτήσεων ενός κτηρίου ή μιας βιομηχανικής εγκατάστασης. Ολόκληρη η εγκατάσταση μπορεί να περιλαμβάνει και ένα σύστημα που να μπορεί να καταγράφει και να ελέγχει τη θερμοκρασία εισόδου του νερού. Το κρύο νερό μπορεί να αποθηκευτεί σε μια δεξαμενή και μέσω μιας αντλίας να γίνει η κυκλοφορία του νερού για την ψύξη του ΦΒ. Μια άλλη δεξαμενή χρησιμοποιείται για να αποθηκευτεί το ζεστό νερό που προέρχεται από τον εναλλάκτη θερμότητας. Το κρύο νερό εισάγεται στην πρώτη δεξαμενή από το δίκτυο της ύδρευσης, έτσι θα πρέπει η θερμοκρασία της πρώτης δεξαμενής να βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα για την καλύτερη ψύξη του ΦΒ.



Εικόνα 2.14 Υβριδικά ΦΒ συστήματα νερού

Κεφάλαιο 3

Στοιχεία Φωτοβολταϊκών συστημάτων

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, που παράγει ηλεκτρική ενέργεια για να εξυπηρετήσει τη ζήτηση κάποιων φορτίων, αποτελείται από πολλές επιμέρους μονάδες. Εδώ γίνεται μια επισκόπηση των δύο βασικών φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αυτά είναι το αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα, στην κατηγορία του οποίου ανήκει και το υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα, καθώς και το διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα.

3.1 Βαθμός Απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης εκφράζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στο φωτοβολταϊκό στοιχείο. Τα πρώτα φωτοβολταϊκά στοιχεία, που σχεδιάστηκαν τον 19ο αιώνα, δεν είχαν παρά 1-2% απόδοση, ενώ το 1954 τα εργαστήρια Bell Laboratories δημιούργησαν τα πρώτα Φ/Β στοιχεία πυριτίου με απόδοση 6%. Στην πορεία του χρόνου όλο και αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης: η αύξηση της απόδοσης, έστω και κατά μια ποσοστιαία μονάδα, θεωρείται επίτευγμα στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Στην σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13 – 19%, ο οποίος, συγκρινόμενος με την απόδοση άλλου συστήματος (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.), παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλός. Αυτό σημαίνει ότι το φωτοβολταϊκό σύστημα καταλαμβάνει μεγάλη επιφάνεια προκειμένου να αποδώσει την επιθυμητή ηλεκτρική ισχύ. Ωστόσο, η απόδοση ενός δεδομένου συστήματος μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών σε ηλιοστάτη. Οι προϋποθέσεις αξιοποίησης των Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα είναι από τις καλύτερες στην Ευρώπη, αφού η συνολική ενέργεια που δέχεται κάθε τετραγωνικό μέτρο επιφάνειας στην διάρκεια ενός έτους κυμαίνεται από 1400 έως 1800 kWh.[2]

Η απόδοση ενεργειακής μετατροπής (βαθμός απόδοσης) του ΦΒ στοιχείου καθορίζεται από την σχέση:

$$n_c = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{I_m V_m}{P_{in}} = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{P_{in}} \quad (3.1)$$

και ορίζεται ως το πηλίκο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος P_m που αποδίδεται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο προς την ισχύ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας $P_{in} = E * S$.

Επειδή αναφερόμαστε σε απόδοση Φ/Β στοιχείου το εμβαδό S αντιστοιχεί στην ενεργό επιφάνεια του Φ/Β μη λαμβάνοντας υπόψη την επιφάνεια της μεταλλικής σχάρας του.

Σύμφωνα λοιπόν με προηγούμενη ανάλυση η απόδοση αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας E και μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Πολλές φορές, όταν γνωρίζουμε την ονομαστική τιμή της απόδοσης στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC) και θέλουμε την απόδοση σε διαφορετική θερμοκρασία, για κάθετη πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιούμε την σχέση:

$$n_c = n_T * n_{c,STC} \quad (3.2)$$

Όπου,

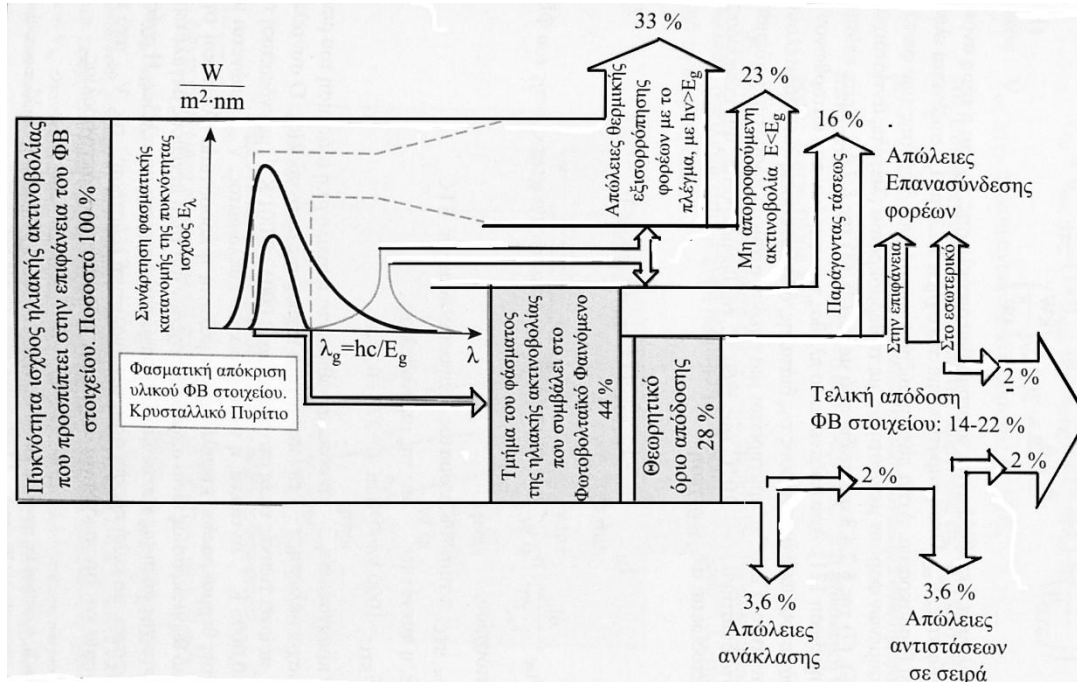
$$n_T = 1 + \gamma_{mp} * (\theta_c - \theta_{STC}) \quad (3.3)$$

(Συντελεστής ή παράγων θερμοκρασίας του Φ/Β στοιχείου)

$$\gamma_{mp} = \frac{dP}{P_m * dT} \quad (3.4)$$

(ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος του Φ/Β στοιχείου n_c, STC , ονομαστική τιμή απόδοσης στις πρότυπες συνθήκες δοκιμής)

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα Sankey που περιγράφει την ροή ενέργειας κατά την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια και προσδιορίζει την τελική απόδοση του ΦΒ στοιχείου. Το συγκεκριμένο διάγραμμα αναφέρεται σε κρυσταλλικό πυρίτιο, περιγράφει όμως και την γενικότερη συμπεριφορά των ΦΒ στοιχείων ανεξάρτητα από το υλικό παρασκευής και τον τύπο του.



Εικόνα 3.1 :Διάγραμμα ροής ενέργειας κατά την μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια (διάγραμμα Sankey)

Η απόδοση της Φ/Β μετατροπής ορίζεται ως η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά κύτταρα που χωρίζονται από την επικείμενη ενέργεια των φωτονίων και μετρείται σε σχέση με τις πρότυπες καταστάσεις δοκιμής (STC). Οι πρότυπες καταστάσεις δοκιμής συνδυάζουν την ακτινοβολία μια θερινής μέρας, την θερμοκρασία κυττάρου μιας χειμερινής μέρας και το ηλιακό ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μιας ανοιξιάτικης μέρας. Αυτές οι καταστάσεις μέτρησης δεν αντιπροσωπεύουν φυσικά την πραγματική λειτουργία του φωτοβολταϊκού. Για το βέλτιστο σχεδιασμό των Φ/Β συστημάτων είναι επιθυμητό να μετρηθούν οι μακροπρόθεσμες αποδόσεις τους στην περιοχή εγκατάστασης. Η εκτίμηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών κυττάρων απαιτεί την μέτρηση του ρεύματος ως λειτουργία της ηλεκτρικής τάσης, της θερμοκρασίας, της έντασης της ταχύτητας του ανέμου και της ακτινοβολίας του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ο συντελεστής ωμικών απωλειών στη γραμμή σύνδεσης του φ/β συστήματος με το δίκτυο : επιλέγουμε τέτοια διάμετρο καλωδίου ώστε οι ωμικές αντιστάσεις των καλωδίων να είναι της τάξης του 2%.

Η ισχύς που παράγεται από το φ/β στοιχείο και αποδίδεται στην αντίσταση R_L (φορτίο καταναλωτή) είναι:

$$P_L = V_L * I_L = R_L * I_L^2 \quad (3.5)$$

Η αποδιδόμενη ισχύς γίνεται μέγιστη για μια ορισμένη τιμή της αντίστασης $R_L = R_m$, που αντιστοιχεί στο Σημείο Μέγιστης Ισχύος.

Ο συντελεστής γήρανσης του φ/β στοιχείου: τα φ/β στοιχεία με την πάροδο του χρόνου παρουσιάζουν σημάδια φθοράς, τα οποία οδηγούν σε ελάττωση της συνολικής τους ισχύος. Τα σύγχρονα φ/β πλαίσια έχουν ένα βαθμό μείωσης της απόδοσης τους της τάξης του 0,8% ετησίως (οι κατασκευαστές δηλώνουν ότι εξασφαλίζουν το 80% της αποδοτικότητάς τους μετά την παρέλευση 25ετίας).

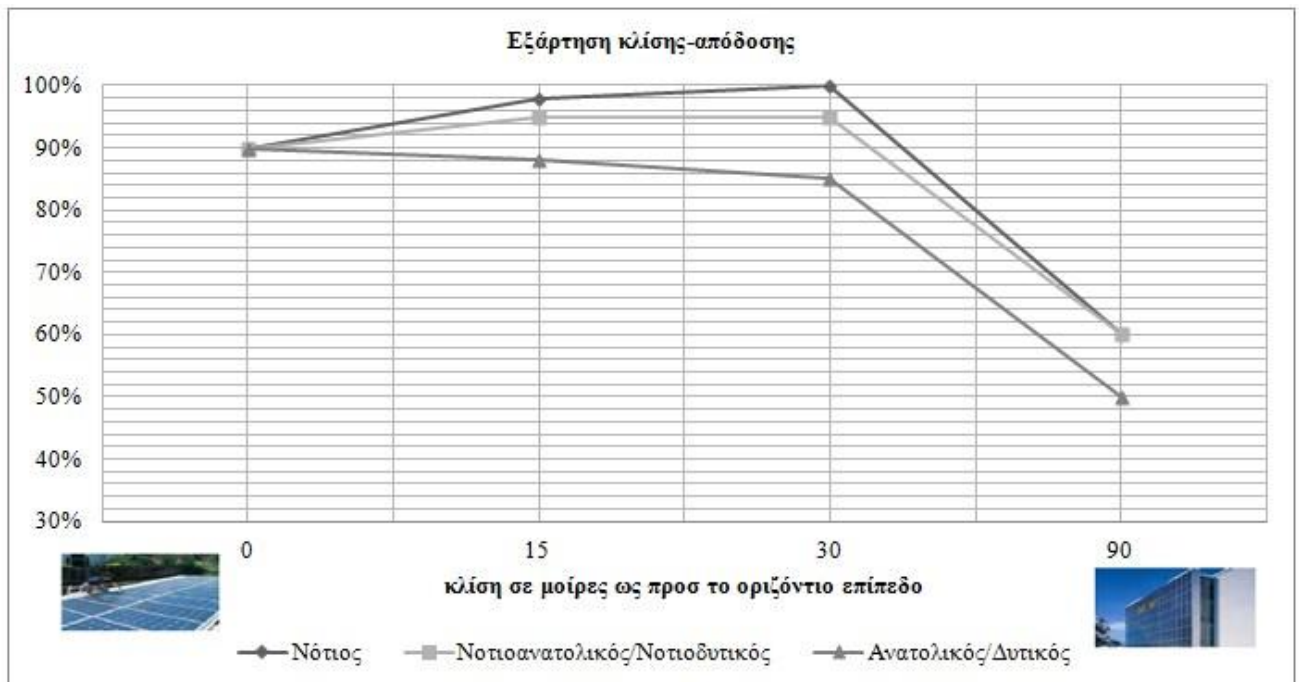
Οπτικές ενεργειακές απώλειες:

οι οπτικές απώλειες οφείλονται σε πολλούς παράγοντες. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι:
η διαφοροποίηση ανακλαστικότητας του φ/β πλαισίου σε σχέση με την αντίστοιχη σε εργαστηριακές συνθήκες ελέγχου, με μέση ετήσια τιμή των απωλειών αυτών ~3%,
οι απώλειες διαφοροποίησης της πόλωσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με μέση ετήσια απώλεια ~2%,
η καθαρότητα του πλαισίου με ~1,5% μέση ετήσια απώλεια. Ένας αντιπροσωπευτικός μέσος ετήσιος συντελεστής οπτικών απωλειών κυμαίνεται ανάλογα με την καθαρότητα της επιφάνειας του φ/β πλαισίου από 7%~10%.

Η δίοδος αντεπιστροφής: εμποδίζει την εκφόρτιση του ηλεκτρικού συσσωρευτή διαμέσου του φ/β πλαισίου, όταν αυτό δεν φωτίζεται κατά τις νυχτερινές ώρες. Είναι εγκατεστημένη στο πλαίσιο από τον κατασκευαστή σε όλα τα πλαίσια, ανεξαρτήτως εάν αυτά θα χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απευθείας στο δίκτυο ή θα την αποθηκεύσουν σε συσσωρευτές.

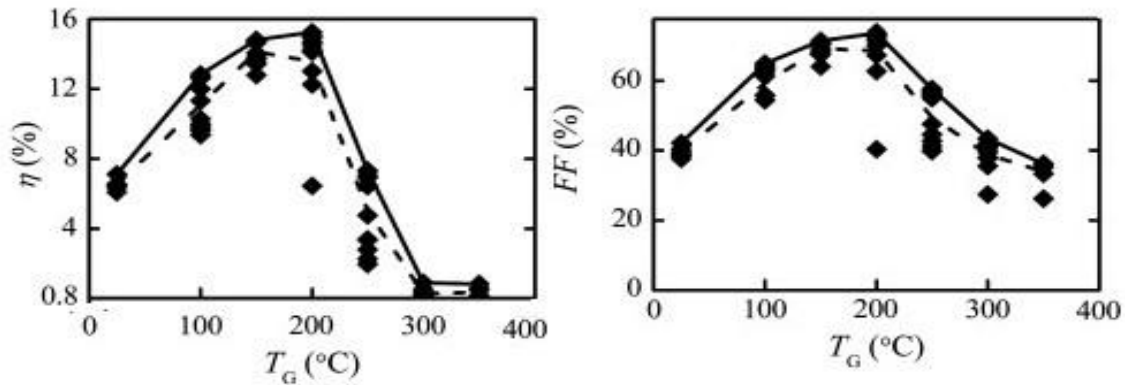
Έτσι θα πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη ανεξάρτητα της μικρής τιμής της ~1%.

Γωνία: Είναι απαραίτητη η τοποθέτηση συλλεκτών στην κατάλληλη γωνία σύμφωνα με την γωνία πρόσπτωσης του φωτός. Για μεγαλύτερη απόδοση των στοιχείων είναι καλύτερο η κλίση να μην μένει σταθερή όλο τον χρόνο. Για την Αθήνα μια καλή λύση είναι να τοποθετούνται οι συλλέκτες υπό κλίση 60° τους χειμερινούς μήνες και 30° τους θερινούς. [16]



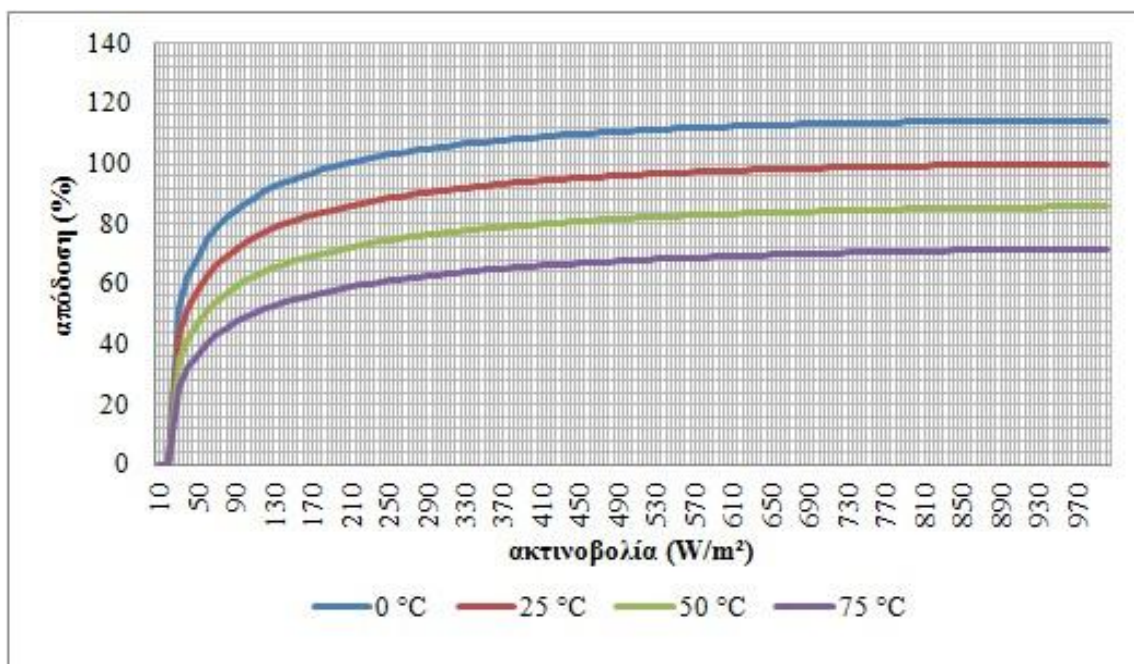
Εικόνα 3.2 Βέλτιστη γωνία κλίσης Φ/Β για μέγιστη απόδοση ισχύος ανάλογα με το προσανατολισμό και την κλίση.

Η θερμοκρασία: επιδρά αρνητικά στην απόδοση των φωτοβολταϊκών. Με την αύξηση της προκαλείται αύξηση της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να πραγματοποιούνται περισσότερες επανασυνδέσεις φορέων. Έτσι εκδηλώνεται ισχυρότερο ρεύμα διαρροής διαμέσου της διόδου, που συνεπάγεται μείωση της Voc και του FF.



Εικόνα 3.3, 3.4 Εξάρτηση απόδοσης η (%) και παράγοντα πλήρωσης FF(%) Φ/Β στοιχείου από θερμοκρασία

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας: Αυξανόμενης της ηλιακής έντασης έχουμε γραμμική αύξηση του παραγομένου φωτορεύματος και λογαριθμική αύξηση της τάσης της ανοικτοκυκλωμένης φ/β κυψέλης.



Εικόνα 3.5 Καμπύλη απόδοσης Φ/Β – εξάρτηση από ακτινοβολία για διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος

Για μεγιστοποίηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών γεννητριών γενικότερα και την αντιμετώπιση του προβλήματος της μικρής πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας μπορούν να εφαρμοστούν οι παρακάτω μέθοδοι:

Τοποθέτηση ηλιακών στοιχείων σε κινητά πλαίσια που περιστρέφονται και παρακολουθούν συνεχώς της πορεία του ήλιου ώστε να δέχονται κάθετα τη δέσμη της ηλιακής ακτινοβολίας.

Συγκέντρωση ηλιακής ακτινοβολίας με φακούς ή κάτοπτρα και η εστίασή της πάνω στα ηλιακά στοιχεία (απαιτείται και τεχνητή ψύξη). Υποδοχή της ακτινοβολίας και στις δύο όψεις του φωτοβολταϊκού στοιχείου με διαμόρφωση και των δύο ηλεκτροδίων του σε μορφή σχάρας.

Ανάλυση της ηλιακής ακτινοβολίας με πρίσματα ή φίλτρα και κατεύθυνση των διαφορετικών δεσμών σε διαφορετικά φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευασμένα από ημιαγωγούς με το κατάλληλο ενεργειακό διάκενο για την κάθε δέση. Τοποθέτηση πολλών φωτοβολταϊκών στοιχείων στη σειρά με βαθμιαία μειούμενο ενεργειακό διάκενο.[10]

3.1.1 Υπολογισμός θερμοκρασιακού Συντελεστή $\sigma\theta$ και Συντελεστή Ρύπανσης $\sigma\rho$:

Σε συμβατική θερμοκρασία ο $\sigma\theta$ είναι ίσος με την μονάδα ενώ για τα συνηθισμένα ηλιακά στοιχεία πυριτίου του εμπορίου μειώνεται κατά περίπου 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας πάνω από αυτή. Αν ο συντελεστής απόδοσης του στοιχείου σε μια συμβατική θερμοκρασία είναι n , η τιμή του σε διαφορετική θερμοκρασία θ θα είναι :

$$n\theta = n * \sigma\theta \quad (3.6)$$

Όπου $\sigma\theta$ είναι ένας αδιάστατος συντελεστής της θερμοκρασιακής διόρθωσης της απόδοσης. Πιο συγκεκριμένα, για τον ακριβή υπολογισμό του θερμοκρασιακού συντελεστή χρησιμοποιούμε τον παρακάτω τύπο:

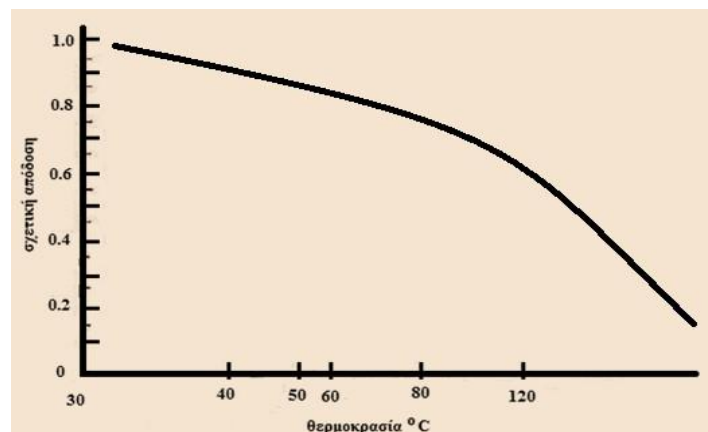
$$\sigma\theta = 1,00 - (\theta - 20) * 0,005 \quad (3.7)$$

όπου,

θ_{OC} είναι η μέση θερμοκρασία του αέρα τις φωτεινές ώρες της ημέρας .

Όσον αφορά τον συντελεστή ρύπανσης ή καθαρότητας- $\sigma\rho$, εξαρτάται από την περιοχή(βιομηχανική ,αστική κτλ.) και από την κλίση του πάνελ- όσο μικρότερη η κλίση τόσο περισσότερη σκόνη επικάθεται.

Στη συγκεκριμένη μελέτη δεδομένου ότι η κλίση των Φ/β θα είναι 30° θεωρούμε ότι ο συντελεστής καθαρότητας είναι 0,9 και τους χειμερινούς μήνες φτάνει το 0,92. [16]



Εικόνα 3.6: Εξάρτηση απόδοσης Φ/β στοιχείου από θερμοκρασία

3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση

Ο στιγμιαίος συντελεστής απόδοσης ενός ΦΒ πλαισίου, εμβαδού S , προσδιορίζεται από το πηλίκο της αποδιδόμενης μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος P_m προς την προσπίπτουσα στο πλαίσιο ισχύ της

ηλιακής ακτινοβολίας E·S, όπου E η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του πλαισίου:

$$n_m = \frac{P_m}{E \cdot S} \quad (3.8)$$

Εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες των υλικών κατασκευής του, την θερμοκρασία των ΦΒ κυψελών και την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Η απόδοση τους είναι μικρότερη της αντίστοιχης της ΦΒ κυψέλης (ΦΒ στοιχείο) εργαστηριακής παραγωγής επειδή:

η μη πλήρης κάλυψη της επιφάνειας του από ΦΒ κυψέλες, η οποία καθορίζεται από τον παράγοντα κάλυψης (PF–Packing Factor), που αποτελεί το πηλίκο της πραγματικής επιφάνειας των ΦΒ κυψελών προς την επιφάνεια του ΦΒ πλαισίου.

η ανομοιογένεια των ΦΒ κυψελών που συνθέτουν το ΦΒ πλαίσιο και

η ανακλαστικότητα του υαλοπίνακα του πλαισίου.

Η υψηλή θερμοκρασία των ΦΒ στοιχείων του πλαισίου και η εισχώρηση υγρασίας στο εσωτερικό του με αποτέλεσμα την αλλοίωση της δομής της κυψελίδας καθώς και η ρύπανση της επιφάνειας του, όπως π.χ. από τη σκόνη, μειώνουν την ενεργειακή απόδοση του. Εν συντομία οι κυριότερες απώλειες που συντελούν στην μείωση του στιγμιαίου συντελεστή απόδοσης n_m του ΦΒ πλαισίου είναι:

- η γήρανση του ΦΒ πλαισίου
- οι απώλειες οπτικού δρόμου θερμοκρασίας κυψελίδας
- οι απώλειες στη δίοδο αντεπιστροφής.

Ο συντελεστής απόδοσης n_m μπορεί να αποδοθεί και ως γινόμενο των επιμέρους στιγμιαίων συντελεστών ενεργειακών απωλειών από την σχέση:

$$n_m = n_{καθ} \cdot n_R \cdot n_{Li} \cdot n_S \cdot n_P \cdot n_T \cdot n_D \cdot n_{m.STC} \quad (3.9)$$

Όπου,

$n_{καθ}$: Συντελεστής καθαρότητας υαλοπίνακα ΦΒ πλαισίου

n_R : Συντελεστής απόκλισης λόγω διαφοροποίησης της ανακλαστικότητας σε γωνίες πρόσπτωσης διάφορες της καθέτου του ΦΒ πλαισίου

n_{Li} : Συντελεστής απόκλισης στην περιοχή χαμηλών τιμών πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας

n_S : Συντελεστής φασματικής απόκλισης λόγω διαφορετικού φάσματος σε σχέση με το φάσμα AM1,5 (STC)

n_P : Συντελεστής απόκλισης εξαιτίας της πόλωσης της ηλιακής ακτινοβολίας

n_T : Συντελεστής απόκλισης της απόδοσης του ΦΒ πλαισίου εξαιτίας της διαφοροποίησης της θερμοκρασίας της κυψέλης σε σχέση με την θερμοκρασία αναφοράς 25 °C

n_D : Συντελεστής απωλειών στη δίοδο αντεπιστροφής

$n_{m.STC}$: Συντελεστής απόδοσης ΦΒ πλαισίου σε πρότυπες συνθήκες (STC)

Η τελική τιμή του συντελεστή απόδοσης καθορίζεται και από τον παράγοντα γήρανσης του ΦΒ πλαισίου $n_{γ,m}$. [19]

3.2.1 Συντελεστής γήρανσης $n_{γ,m}$

Αφορά στη μείωση της απόδοσης των ΦΒ πλαισίων στο χρόνο ζωής τους και εκφράζεται συνήθως με το ποσοστό γήρανσης ανά έτος χρήσης. Προσδιορίζει την ελάττωση της απόδοσής τους άρα και της ισχύος αιχμής και οφείλεται κυρίως σε υπερθερμάνσεις των ΦΒ κυψελών που καταστρέφουν την δομή του υλικού τους. [19]

3.2.2 Οπτικές ενεργειακές απώλειες

Αποτελούν όλες εκείνες τις απώλειες που καθορίζονται από την απόκλιση της απόδοσης σε σχέση με τις πρότυπες συνθήκες, λόγω των παρακάτω αιτιών:

- Διαφοροποίηση ανακλαστικότητας ΦΒ πλαισίου σε σχέση με την αντίστοιχη σε STC.
- Επίδραση διαφοροποίησης φάσματος ακτινοβολίας σε σχέση με το AM1,5 (STC)
- Απώλειες διαφοροποίησης της πόλωσής
- Απώλειες χαμηλών τιμών πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας
- Καθαρότητα όψεως του ΦΒ πλαισίου[19]

3.2.3 Θερμοκρασία ΦΒ κυψέλης

Περιγράφει τη διαφοροποίηση της απόδοσης του ΦΒ πλαισίου, λόγω της διαφορετικής θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψέλης σε σχέση με την θερμοκρασία της στις πρότυπες συνθήκες (STC) και δίνεται από την ίδια σχέση που χρησιμοποιείται στην περίπτωση μεμονωμένου ΦΒ στοιχείου:

$$n_T = 1 + Y_{mp}(\theta_c - \theta_{STC}) \quad (3.10)$$

όπου,

$Y_{mp} = \frac{dP}{P_{m*at}}$, ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος του ΦΒ στοιχείου θ_c , , θερμοκρασία κυψέλης θεωρούμενη ίδια για όλες τις κυψέλες.

Μια αναλυτική έκφραση για την εξάρτηση της θερμοκρασίας της κυψέλης από τις συνθήκες περιβάλλοντος, είναι:

$$\theta_c = \theta_\alpha + \frac{G_t}{G_{STC}} (T_1 e^{Bws} + T_2 + \Delta\theta) \quad (3.11)$$

όπου,

θ_α : η θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα

G_t : η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του ΦΒ πλαισίου

B: εμπειρικός συντελεστής

Ws: η ταχύτητα του ανέμου

T_2, T_1 : εμπειρικοί συντελεστές που υπολογίζονται βάση τις οριακές τιμές της θερμοκρασίας της κυψέλης σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες ανέμου αντίστοιχα και

$\Delta\theta$: η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της κυψέλης και της πίσω επιφάνειας του ΦΒ πλαισίου.[19]

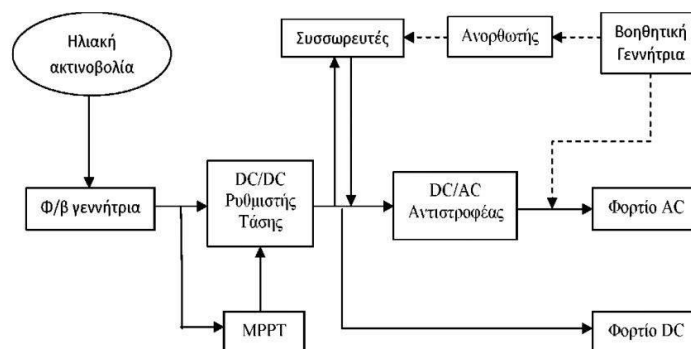
3.2.4 Συντελεστής απωλειών στη δίοδο αντεπιστροφής

Περιγράφει τις απώλειες που προέρχονται από την δίοδο αντεπιστροφής που τοποθετείται για να αποτρέπεται η εκφόρτιση του συσσωρευτή διαμέσου της ΦΒ συστοιχίας όταν αυτή δεν φωτίζεται.[19]

3.3 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα

Οι αυτόνομες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, αποτελούν ίσως τις πληρέστερες εφαρμογές της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας. Είναι εγκαταστάσεις που λειτουργούν αυτοδύναμά για την τροφοδότηση καθορισμένων καταναλώσεων χωρίς να συνδέονται με κεντρικά ηλεκτρικά δίκτυα διανομής από τα οποία θα μπορούσαν να αντλούν συμπληρωματική ενέργεια ή να στέλνουν την περίσσεια της παραγόμενης. Είναι η ιδανικότερη λύση για περιοχές που βρίσκονται μακριά από το κεντρικό δίκτυο και η διασύνδεσή τους με αυτό θα απαιτούσε τεράστια οικονομικά κεφάλαια. Ειδικότερα για τον Ελλαδικό χώρο, ο οποίος έχει πολυάριθμα μικρά νησιά και μικρούς οικισμούς, τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα έχουν πολλές εφαρμογές, ενώ υπάρχουν ακόμα πολλές δυνατότητες ανάπτυξης. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το απλοποιημένο διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος. Αποτελείται από φωτοβολταϊκή γεννήτρια, η οποία είναι η βασικότερη μονάδα του συστήματος, αφού εκεί γίνεται η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Περιλαμβάνει συσσωρευτές για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και για την χρησιμοποίησή της όταν η παραγωγή είναι ανεπαρκής. Μπορεί να υπάρχει μια βοηθητική γεννήτρια (συνήθως ντηζελογεννήτρια), η οποία τίθεται σε λειτουργία όταν είναι αναγκαίο, να έχουμε δηλαδή υβριδικό φωτοβολταϊκό σύστημα. Βοηθητική γεννήτρια μπορεί να είναι επίσης και μια ανεμογεννήτρια. Τα υβριδικά συστήματα μπορούν επίσης να αποτελέσουν λογική προσέγγιση σε καταστάσεις όπου οι περιστασιακές αιχμές ζήτησης είναι σημαντικά υψηλότερες από τη ζήτηση φορτίου βάσης. Τέλος, μονάδες ενός αυτόνομου συστήματος είναι και διατάξεις για την μετατροπή της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία σε μορφή κατάλληλη για την τροφοδότηση των φορτίων,



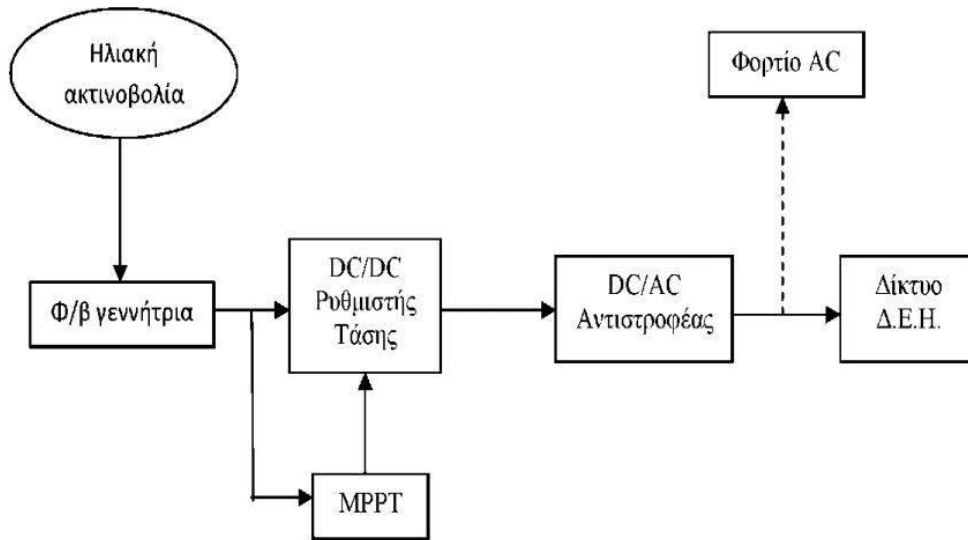
Εικόνα 3.7: Διάγραμμα Αυτόνομου Φωτοβολταϊκού συστήματος

οι οποίες περιέχουν έναν DC/DC μετατροπέα σε συνδυασμό με έναν ανιχνευτή μέγιστης ισχύος (MPPT) και έναν DC/AC αντιστροφέα. [20]

Διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα

Μια διαφορετική εφαρμογή της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας αποτελούν τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα, στα οποία η ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτείται στο δίκτυο. Υπάρχουν δύο διαφορετικές υλοποιήσεις, ανάλογα με το αν τροφοδοτείται κάποιο φορτίο απευθείας από το σύστημα ή αν όχι (Σχήμα 3.2). Στο διασυνδεδεμένο σύστημα το δίκτυο ενεργεί όπως μια μπαταρία απεριόριστης ικανότητας αποθήκευσης. Επομένως, η συνολική αποδοτικότητα ενός διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι καλύτερη από την αποδοτικότητα ενός αυτόνομου συστήματος, αφού το δίκτυο έχει πρακτικά απεριόριστη ικανότητα αποθήκευσης και επομένως η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί πάντοτε να αποθηκεύεται. Αντιθέτως στις

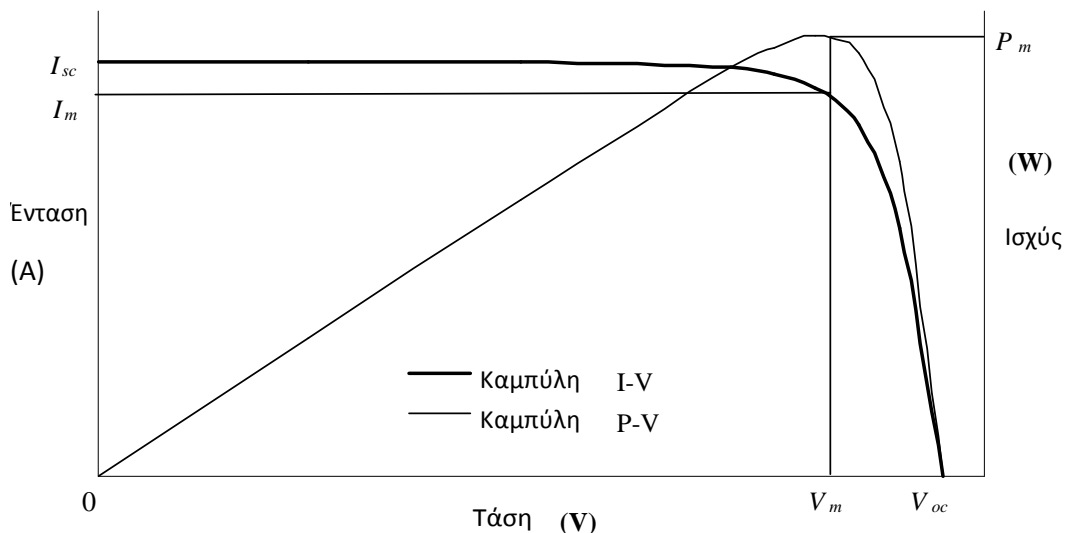
αυτόνομες εφαρμογές οι συσσωρευτές θα είναι ενίοτε πλήρως φορτισμένοι, όποτε η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει με κάποιο τρόπο να αποβάλλεται. [20]



Εικόνα 3.8 Διάγραμμα Διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος

3.3 Καμπύλες $I - V$ και $P - V$ του φωτοβολταϊκού

Ως πηγή ηλεκτρικής ενέργειας το φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει μια αρκετά ασυνήθιστη συμπεριφορά. Σε αντίθεση με τις περισσότερες κοινές ηλεκτρικές πηγές οι οποίες διατηρούν περίπου σταθερή τάση στη περιοχή της κανονικής τους λειτουργίας, η τάση των φωτοβολταϊκών στοιχείων μεταβάλλεται μη γραμμικά σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος που δίνουν στο κύκλωμα, έστω και αν η ακτινοβολία που δέχονται παραμένει σταθερή. Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας αλλά μεταβαλλόμενες τιμές της αντίστασης του κυκλώματος ανάμεσα στις ακραίες καταστάσεις ανοιχτοκύκλωσης και βραχυκύκλωσης, η τάση και η ένταση του ρεύματος παίρνουν ενδιάμεσες τιμές από μηδέν μέχρι άπειρο. Παράλληλα μεταβάλλεται ομαλά και η ισχύς που παράγει το στοιχείο, με μέγιστη P_m σε ένα ορισμένο ζεύγος τιμών τάσης και έντασης $V_m - I_m$. Το ζεύγος αυτό όπως αναφέρθηκε σε συνδυασμό με τις τιμές $V_{oc} - I_{sc}$ καθορίζουν τον συντελεστή απόδοσης του στοιχείου. Επομένως, είναι πολύ σημαντικό η αντίσταση του κυκλώματος που τροφοδοτείται από το φωτοβολταϊκό στοιχείο να έχει κατάλληλη τιμή ώστε στις συγκεκριμένες συνθήκες ακτινοβολίας να παράγεται από το στοιχείο η μεγαλύτερη δυνατή ηλεκτρική ισχύς.



Εικόνα 3.10: Καμπύλες I-V και P-V ενός ΦΒ στοιχείου πυριτίου.

3.4 Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές

Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες) παρέχουν την δυνατότητα αποταμίευσης της ηλεκτρικής ενέργειας, μετατρέποντάς την σε χημική, για να την αποδώσουν οποιαδήποτε στιγμή χρειαστεί στην αρχική της μορφή δίνοντας έτσι την λύση στο πρόβλημα της συχνής ασυμφωνίας ζήτησης και παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι αποτέλεσμα μιας αυθόρμητης χημικής αλλαγής (δηλαδή μιας αντίδρασης redox με αρνητική ελεύθερη ενέργεια) μέσα στο συσσωρευτή. Η δομική ηλεκτροχημική μονάδα του συσσωρευτή είναι το στοιχείο (cell) που συνίσταται από μια θετική και μια αρνητική πλάκα, βυθισμένες σε ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη και περιέχονται σε ένα δοχείο. Για κάθε εφαρμογή είναι απαραίτητα τα χαρακτηριστικά του συσσωρευτή που θα καθορίσουν τις απαιτήσεις στις ηλεκτροδιακές αντιδράσεις και θα ορίσουν το σχέδιο του κελιού. Το ενεργό υλικό από την θετική και την αρνητική πλάκα είναι ένας συνδυασμός υλικών τα οποία είναι και οι βασικοί συντελεστές της ηλεκτροχημικής αντίδρασης μέσα στη κυψελίδα. Η ποσότητα του ενεργού υλικού μέσα στη μπαταρία είναι ανάλογη της χωρητικότητάς της.

Τα πιο συνηθισμένα είδη συσσωρευτών:

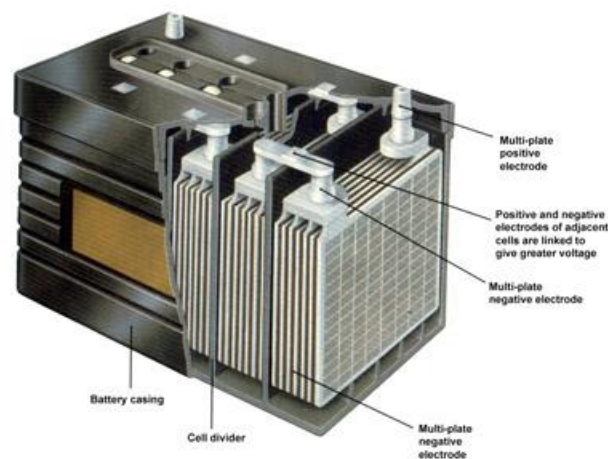
- **Lead-Acid** (μολύβδου – οξέος: αυτοκίνητα, επικουρικά συστήματα αναμονής, βιομηχανία)
- **Nickel-Cadmium** (νικελίου – καδμίου: επικουρικά συστήματα αναμονής, βιομηχανία, εκκίνηση μηχανών αεροπλάνων, φωτισμός τραιίνων)
- **Nickel-Iron** (νικελίου – σιδήρου)
- **Nickel-Hybrid** (νικελίου – υβριδίου)
- **Pb-Sd** (μολύβδου - αντιμονίου).
- **Λιθίου**
- **Αργύρου-Ψευδαργύρου**(μικρές φορητές πηγές ενέργειας όπως φακοί, ραδιόφωνα, παιχνίδια)
- **Redox** (με υψηλό βαθμό απόδοσης και υψηλό αριθμό κύκλων λειτουργίας (16.000) για μεγάλα συστήματα, επαναφορτίζονται και ηλεκτρικά αλλά και μηχανικά ενώ μπορούν να εκφορτιστούν τελείως χωρίς πρόβλημα).

Συγκεκριμένα για τα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπου οι ανάγκες της κατανάλωσης δε συμβαδίζουν συχνά με τις ώρες παραγωγής και την παραγόμενη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, περισσότερο κατάλληλοι είναι οι συσσωρευτές που μπορούν να υποστούν βαθιά εκφόρτιση χωρίς να

αλλοιώνεται η χωρητικότητά τους και να μειώνεται διαρκώς ο χρόνος ζωής τους. Οι συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται είναι επαναφορτιζόμενοι και κατηγοριοποιούνται ως δευτερογενείς συσσωρευτές (μολύβδου) σε αντιδιαστολή με τους πρωτογενείς οι οποίοι έχουν ήδη αποθηκευμένη χημική ενέργεια και δεν μπορούν να επαναφορτιστούν (λιθίου). Στους επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές ανήκουν εκτός από τους μολύβδου-οξέος και οι νικελίου-καδμίου, νικελίου-σιδήρου και ορισμένοι λιθίου επαναφορτιζόμενοι.

3.4.1 Συσσωρευτές μολύβδου – οξέος:

Στην περίπτωση συσσωρευτή μολύβδου το ενεργό υλικό είναι συνδυασμός διοξειδίου του μολύβδου στην θετική πλάκα (PbO_2) και μεταλλικό πορώδη μόλυβδο στην αρνητική (Pb) και αντιδρούν σε διάλυμα θεικού οξέος (H_2SO_4) κατά την λειτουργία του συσσωρευτή. Ο ηλεκτρολύτης αυτός αποτελεί το αγώγιμο μέσο που επιτρέπει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω της ιοντικής ανταλλαγής ή της ανταλλαγής ηλεκτρονίων επάνω στις πλάκες. Σε άλλα είδη συσσωρευτών μπορεί να είναι και σε μορφή gel. Στην μπαταρία νικελίου (Ni) ο ηλεκτρολύτης είναι για παράδειγμα διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH). Σε υγρό διάλυμα συνήθως απαιτείται αναπλήρωση του νερού καθώς εμφανίζεται φαινόμενο εξαέρωσης.



Εικόνα 3.11: Συσσωρευτής μολύβδου - οξέος

Στο συσσωρευτή μολύβδου το πλέγμα είναι ένα πλαίσιο από κράμα μολύβδου το οποίο υποστηρίζει το ενεργό υλικό πάνω στις πλάκες και είναι αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος. Χαρακτηριστική επίδραση στις επιδόσεις του συσσωρευτή καθώς και αύξηση της μηχανικής αντοχής έχει η χρησιμοποίηση κραμάτων όπως το αντιμόνιο και το ασβέστιο (Sb, Ca).

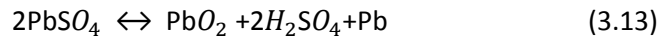
Οι πλάκες ή ηλεκτρόδια συνίστανται από το πλέγμα και από το ενεργό υλικό. Μέσα σε μια κυψελίδα υπάρχουν πολλές αρνητικές και θετικές πλάκες συνδεδεμένες παράλληλα και το μεταξύ τους πάχος έχει καθοριστική επίδραση στα χαρακτηριστικά του συσσωρευτή.

Ο διαχωριστής είναι το απομονωτικό μέσο μεταξύ των πλακών του συσσωρευτή και εμποδίζει την επαφή μεταξύ των αντίθετα φορτισμένων ηλεκτροδίων. Έτσι αποτρέπεται η δημιουργία βραχυκυκλώματος λόγω των διαχεόμενων υλικών στο κάτω μέρος των πλακών.

Τέλος οι πόλοι είναι οι εξωτερικές θετικές και αρνητικές συνδέσεις του συσσωρευτή όπου ενώνεται ένα φορτίο ή το φωτοβολταϊκό σύστημα.

Αρχή λειτουργίας:

Οι πλάκες του αφόρτιστου συσσωρευτή καλύπτονται από θεικό μόλυβδο $PbSO_4$. Κατά το στάδιο της φόρτισης διασπάται ο θεικός μόλυβδος και σχηματίζεται οξείδιο του μολύβδου στις πλάκες των θετικών ηλεκτροδίων και μεταλλικός μόλυβδος στις πλάκες των αρνητικών:

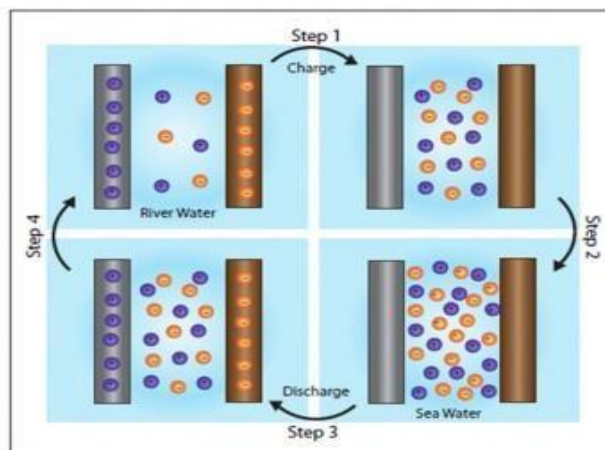


Κατά την εκφόρτιση και τροφοδότηση των φορτίων/φωτοβολταϊκών, ο Pb οξειδώνεται στις πλάκες των αρνητικών ηλεκτροδίων προς ιόντα Pb^{2+} δίνοντας ηλεκτρόνια στο εξωτερικό κύκλωμα ενώ στις θετικές πλάκες ο Pb^{4+} ανάγεται προς Pb^{2+} , παίρνοντας ηλεκτρόνια από το εξωτερικό κύκλωμα.

Τα προϊόντα των δύο αντιδράσεων ενώνονται με θειικά ιόντα από το διάλυμα του ηλεκτρολύτη και σχηματίζουν ξανά θειικό μόλυβδο πάνω στις πλάκες. Έτσι, καταναλώνεται θειικό οξύ και αραιώνεται το διάλυμα στο στοιχείο. Με την φόρτιση τα θειικά ιόντα επιστρέφουν στο διάλυμα και η περιεκτικότητα αποκαθίσταται στην κανονική τιμή.

Το ρεύμα είναι ένα μέτρο του ρυθμού με το οποίο εκφορτίζεται ο συσσωρευτής. Το ρεύμα και το δυναμικό είναι συσχετισμένα αλλά η ικανότητα να μεταφερθεί υψηλό ρεύμα χωρίς μείωση του δυναμικού εξαρτάται από πόσο ταχείες είναι οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μεταφοράς και από το σωστό σχεδιασμό του ενεργού υλικού ώστε να υπάρχουν πολλά ηλεκτροαρνητικά σωματίδια στο σημείο όπου γίνεται η μεταφορά ηλεκτρονίων.

Τέλος, μπορούμε να χωρίσουμε τους συσσωρευτές μολύβδου και σε δύο επιμέρους κατηγορίες, στους ανοιχτούς και στους σφραγισμένους (με βαλβίδα εξαέρωσης). Ο συσσωρευτής που επιλέχθηκε για το σύστημα ανήκει στην δεύτερη κατηγορία και χρησιμοποιεί συγκεκριμένα απορροφητικό γυαλί ματ το οποίο περικλείει όλο το οξύ και ονομάζεται τύπου AGM. Αντί για γυαλί ορισμένοι συσσωρευτές περιέχουν ένα μίγμα θειικού οξέος και καλά χωρισμένου πυριτίου δημιουργώντας ένα ειδικό gel και είναι οι τύπου GEL. Οι AGM λειτουργούν καλύτερα σε υψηλότερες θερμοκρασίες λόγω του λιγότερου οξέος που περιέχουν που οδηγεί σε μικρότερη απώλεια νερού όταν ανοίγουν οι βαλβίδες και εκτονώνεται το αέριο υδρογόνο και οξυγόνο που δημιουργούνται κατά τις υπερφορτίσεις του συσσωρευτή.



Εικόνα 3.12: Ηλεκτροχημικές καταστάσεις φόρτισης συσσωρευτή

3.4.2 Ηλεκτρικό ισοδύναμο στοιχείου συσσωρευτή

Χωρητικότητα : ορίζεται το φορτίο που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα συσσωρευτή και αναφέρεται σε μονάδες Ampere-hours(Ah) και σχετίζεται με το μέγεθός του. Η ονομαστική χωρητικότητα του κάθε ηλεκτροδίου υπολογίζεται από το βάρος του ενεργού υλικού ,w, μέσω του νόμου του Faraday:

$$C = \frac{wnF}{M} \quad (3.14)$$

Όπου,

M: η γραμμομοριακή μάζα του ενεργού υλικού

n: ο αριθμός των ανταλλασσόμενων ηλεκτρονίων

F: η σταθερά του Faraday (~96000Cb)

Η χωρητικότητα του συσσωρευτή καθορίζεται από το ηλεκτρόδιο με την μικρότερη χωρητικότητα. Η πραγματική χωρητικότητα του κάθε ηλεκτροδίου και επομένως του συσσωρευτή εξαρτάται από το πόσο ενεργό υλικό μπορεί να καταναλωθεί κατά την εκφόρτιση και αυτό ορίζεται πειραματικά. Το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που αποθηκεύεται σε ένα συσσωρευτή μετρείται σε Watt-hours (Wh).

Ενεργειακή απόδοση: ορίζεται ως το πηλίκο της ενέργειας που προσδίδεται κατά την εκφόρτιση προς την ενέργεια που απαιτείται για μια πλήρη φόρτιση και έχει τιμές γύρω στο 70-80%.

Απόδοση φόρτισης ορίζεται ως τις αμπερώρες εκφόρτισης προς τις αμπερώρες για μια πλήρη φόρτιση και κυμαίνεται στο 95% για τις μπαταρίες μολύβδου. Η διαφορά στην τιμή της ενεργειακής από την απόδοση φόρτισης οφείλεται στο ότι οι συσσωρευτές αποφορτίζονται σε χαμηλότερη τάση από ότι όταν φορτίζονται.

Οι μαθηματικές σχέσεις που διέπουν την λειτουργία του συσσωρευτή αφορούν στα βασικά χαρακτηριστικά της που είναι ο ρυθμός φόρτισης- εκφόρτισης (State-Of-Charge) και η τάση εξόδου.

Ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης ορίζεται ως ο λόγος της χωρητικότητας (Ah) προς τον χρόνο φόρτισης ή εκφόρτισης (hours). Αναφέρεται σε C/n ή n-ωριαίος ρυθμός που είναι το ρεύμα που εκφορτίζει την ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή C σε n αριθμό ωρών.

Βάθος εκφόρτισης (depth of charge) – DOD είναι το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει αφαιρεθεί από έναν πλήρως φορτισμένο συσσωρευτή ενώ η κατάσταση φόρτισης (state of charge) – SOC είναι το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει απομείνει. Φυσικά ισχύει: $SOC = 100 - DOD$ Κύκλος ζωής (cycle of life) είναι το μέτρο που δείχνει πόσους κύκλους μπορεί μια μπαταρία να αποδώσει πριν την καταστροφή της. Κύκλος θεωρείται μια βαθιά εκφόρτιση ακολουθούμενη από μια πλήρη φόρτιση του συσσωρευτή. Για έναν επαναφορτιζόμενο συσσωρευτή είναι βασικό κατά τον κύκλο των φορτίσεων/ εκφορτίσεων να γίνεται αναδόμηση του ενεργού υλικού σε κατάλληλη στάθμη ώστε να παρέχει επιπλέον εκφόρτιση. Το ενεργό υλικό πρέπει να έχει την σωστή χημική σύσταση, μορφολογία και κατανομή στο κελί. Ο κύκλος ζωής πολύ συχνά σχετίζεται με το ποσοστό κάθε εκφόρτισης και αυτό υπονοεί ότι όταν γίνεται πλήρης εκφόρτιση του συσσωρευτή πολλές φορές καταστρέφονται τα ηλεκτρόδια.

3.4.3 Μοντέλο τάσης συσσωρευτή

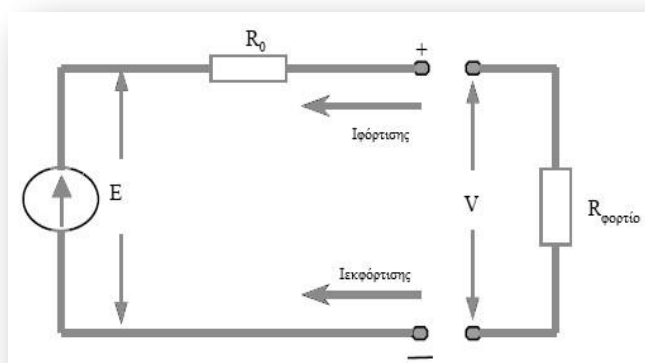
Αρχική φόρτιση: SOC1(%) υποδεικνύει την διαθέσιμη φόρτιση.

Μέγιστη κατάσταση φόρτισης: SOCm (Wh)

Αριθμός κελιών συσσωρευτή σε σειρά: ns

Παράγοντας ικανότητας φόρτισης/αποφόρτισης συσσωρευτή: K

Ποσοστό αυτοεκφόρτισης συσσωρευτή: D (h^{-1})



Εικόνα 3.13 Κύκλωμα συσσωρευτή

Οι τελευταίες δύο παράμετροι είναι καθαρά εμπειρικοί και εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του συσσωρευτή.

Η κατάσταση φόρτισης (%) έχει εντελώς γραμμική σχέση με την τάση ανοιχτοκύκλωσης στα άκρα του συσσωρευτή. Η αρχική φόρτιση (SOC1) υπολογίζεται από το ρεύμα ανοιχτού κυκλώματος. Η τάση στα άκρα του συσσωρευτή δίνεται από:

$$V_{bat} = V_1 - I_{bat} \cdot R_1 \quad (3.15)$$

Όπου τα V_1 και R_1 δίνονται από διαφορετικές εξισώσεις με βάση την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή. Το ρεύμα του συσσωρευτή έχει θετικές τιμές όταν είναι σε κατάσταση φόρτισης και αρνητικές όταν είναι σε κατάσταση αποφόρτισης.

Ένα απλοποιημένο μοντέλο του συσσωρευτή περιγράφεται παρακάτω:

Η τάση ακροδεκτών είναι:

$$V = V_0 + AX + CX / (D - X) \quad (3.16)$$

A, C, D είναι συντελεστές που περιγράφουν την καμπύλη μείωσης της τάσης και υπολογίζονται πειραματικά. Όταν ο συσσωρευτής φορτίζεται η παραπάνω σχέση γίνεται: [1]

$$V = V_0 + AX + \frac{C(D - X)}{X} \quad (3.17)$$

Όπου,

V_0 : η τάση ακροδεκτών για μηδενική ένταση (HEΔ)

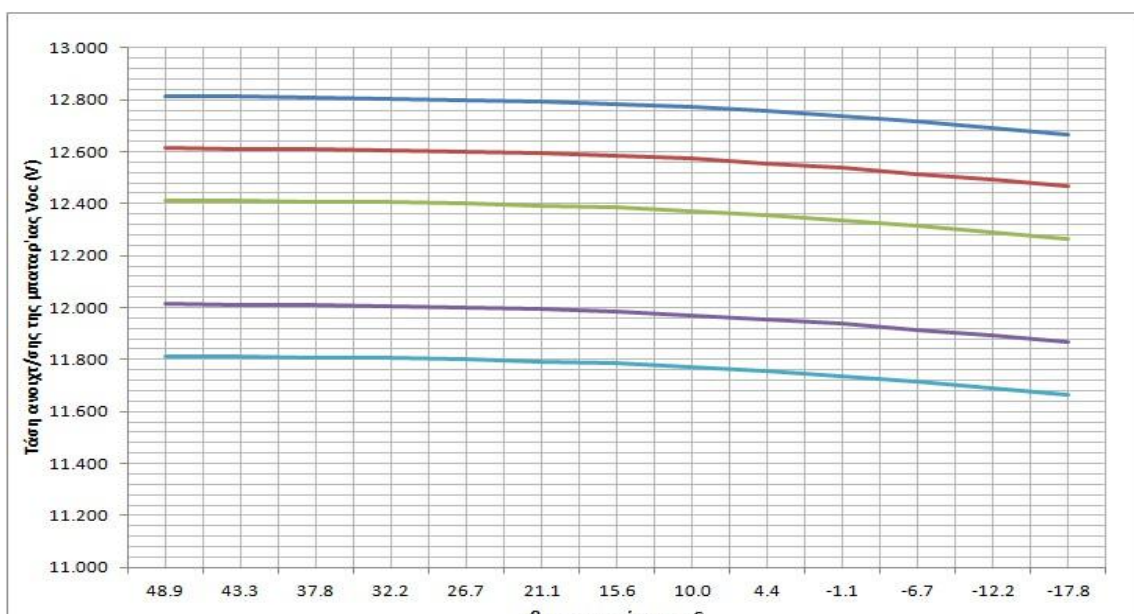
$X = q_{max} \cdot [q_{out} / q_{max}(I)]$ είναι η κανονικοποιημένη ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου q_{out} με την οποία γίνεται η εκφόρτιση του συσσωρευτή σε μια ορισμένη ένταση I. $q_{max}(I)$: η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου του συσσωρευτή με ρεύμα εκφόρτισης I. Πειραματικά προσδιορίζεται ως το σημείο στο οποίο αρχίζει η απότομη μείωση της τάσης και του οποίου η υπέρβαση απαγορεύεται.

q_{max} : η μέγιστη αποθηκευμένη ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου (ονομαστικές Ah) που αντιστοιχεί στο φορτίο που λαμβάνεται αν η εκφόρτιση γίνει με πολύ μικρή ένταση $I \approx 0$. $q_{out} = \int I dt = q_{max} - q_1 - q_2$, η ποσότητα του ηλεκτρικού φορτίου που λαμβάνεται κατά την εκφόρτιση.

A: αρχική γραμμική μεταβολή της εσωτερικής τάσης του συσσωρευτή με την κατάσταση της φόρτισης.

C, D: παράμετροι που αντανakλούν την ευκρίνεια της πτώσης τάσης στο τέλος της εκφόρτισης (γόνατο καμπύλης). Το C θα είναι πάντα αρνητικό κατά την εκφόρτιση. Το D έχει θετικές τιμές και αντικατοπτρίζει με μεγάλη ακρίβεια την μέγιστη ικανότητα εκφόρτισης. Το μοντέλο τάσης χαρακτηρίζεται από τις 4 παραμέτρους που αναφέραμε V_0 , A, C, D.

Αυτές μπορούν επίσης να υπολογιστούν με την μη-γραμμική μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων αν την εφαρμόσουμε στις καμπύλες που δίνουν οι κατασκευαστές. Τέλος, αυτές οι παράμετροι καλό είναι να υπολογίζονται ξεχωριστά για την εκφόρτιση και την φόρτιση του συσσωρευτή. Από την



Εικόνα 3.14 Εξάρτηση Voc από θερμοκρασία

άλλη οι παράμετροι k , c , q_{\max} μπορούν να τεθούν ίδιες και στις δύο διεργασίες.

3.4.4 Κατάσταση φόρτισης συσσωρευτή – Ενέργεια φόρτισης σε kWh

Την φόρτιση του συσσωρευτή μπορούμε να την υπολογίσουμε: μέσω του ρεύματος φόρτισης ως εξής:

$$\text{Ενέργεια φόρτισης}(Ah) = I_{\text{φόρτισης}} \times t_{\text{φόρτισης}} \times (\text{ώρες φόρτισης}) \quad (3.18)$$

Δυστυχώς, υπάρχουν δύο προβλήματα με αυτό. Σε όλους πρακτικά τους συσσωρευτές, το ρεύμα αποφόρτισης δεν είναι σταθερό αλλά μειώνεται καθώς αποφορτίζονται, συνήθως με μη-γραμμικό τρόπο. Δεύτερον, αυτή η μέθοδος εξαρτάται από την εκφόρτιση του συσσωρευτή για να μάθουμε πόση φόρτιση περιείχε. Στις περισσότερες εφαρμογές ο χρήστης (ή το σύστημα) πρέπει να γνωρίζει πόσο φορτίο είναι στο κελί χωρίς να χρειαστεί να αποφορτιστεί. Δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί άμεσα η πραγματική φόρτιση καθώς δεν γίνεται να ελέγξουμε το πραγματικό φορτίο στην είσοδό του λόγω της κουλομπικής απόδοσης του συσσωρευτή (Coulombic efficiency). Οι απώλειες του συσσωρευτή κατά την διάρκεια του κύκλου φόρτισης - εκφόρτισης σημαίνουν ότι θα αποδώσει λιγότερο φορτίο κατά την αποφόρτιση σε σχέση με αυτό που μπήκε.

Η Coulombic απόδοση ή αποδοχή φόρτισης είναι ένα μέτρο της χρήσιμης ενέργειας που είναι διαθέσιμη κατά την εκφόρτιση συγκρινόμενη με την ενέργεια που χρειάζεται για να φορτίσει το κελί. Εξαρτάται και από την θερμοκρασία και από την κατάσταση φόρτισης (SOC%).

Αυτός είναι ο συνήθης τρόπος για να καθοριστεί η κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών μολύβδου-οξέος. Εξαρτάται από την μέτρηση των μεταβολών του βάρους των δραστικών χημικών ουσιών. Καθώς ο συσσωρευτής εκφορτίζεται ο ενεργός ηλεκτρολύτης, θειικό οξύ, καταναλώνεται και η συγκέντρωση του θειικού οξέος σε νερό μειώνεται. Αυτό με τη σειρά του μειώνει την πυκνότητα του διαλύματος σε άμεση αναλογία με την κατάσταση φόρτισης. Το πραγματικό βάρος του ηλεκτρολύτη μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί ως ένδειξη της κατάστασης φόρτισης του συσσωρευτή. Οι μετρήσεις παραδοσιακά γίνονται με τη χρήση ενός υδρομέτρου αναρρόφησης αλλά η μέθοδος είναι αργή και άβολη πρακτικά. Σήμερα οι μετρήσεις αυτές γίνονται με αισθητήρες που δίνουν μια ψηφιακή μέτρηση του ειδικού βάρους του ηλεκτρολύτη.

μέσω της τάσης του συσσωρευτή του κελιού ή της απομένουσας χωρητικότητας:

Τα αποτελέσματα εξαρτώνται από το πραγματικό επίπεδο τάσης, την θερμοκρασία, το ρυθμό αποφόρτισης και την καταπόνηση των κελιών του συσσωρευτή. Γι' αυτό δεν είναι και τόσο ακριβής σαν μέθοδος.

3.5 Φορτιστές

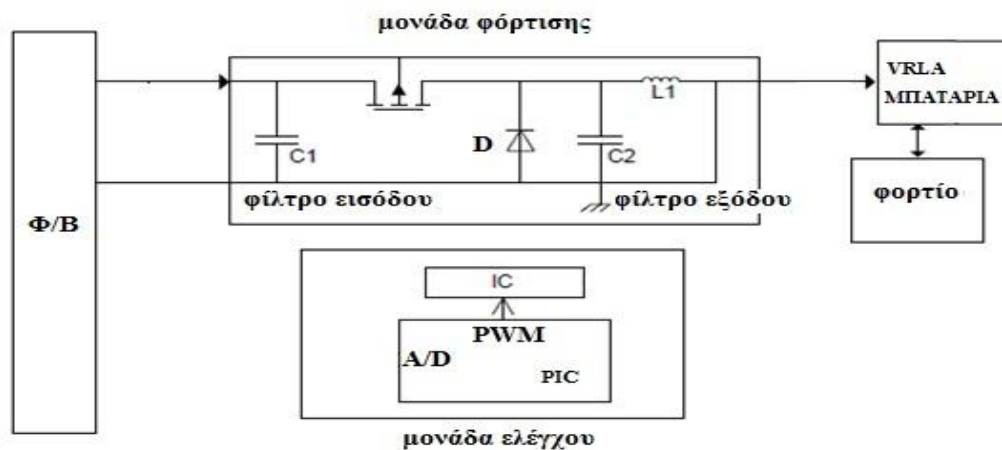
Η μονάδα φόρτισης στο αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα περιλαμβάνει έναν DC/DC μετατροπέα ελεγχόμενο από διαμορφωμένου εύρους/πλάτους παλμούς (μέθοδος PWM). Ο μετατροπέας αποτελείται από δύο διακόπτες και δύο φίλτρα εισόδου-εξόδου. Οι παλμοί ελέγχου παράγονται από την μονάδα ελέγχου η οποία αποτελείται από έναν μικροεπεξεργαστή (PIC microcontroller – programmable interface circuit) και ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (IC).

3.5.1 Μετατροπέας συνεχούς τάσης (DC-DC converter)

Ένας DC/DC μετατροπέας χρησιμοποιείται σε φωτοβολταϊκές διατάξεις και για να βελτιώσει το ταίριασμα μεταξύ της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και του φορτίου, αυξάνοντας την ισχύ εξόδου της σε κάθε περίπτωση ακτινοβολίας και θερμοκρασίας (maximum power point tracker). Ο DC/DC

μετατροπέας αποτελεί μέρος της μονάδας φόρτισης προκειμένου να αυξήσει την αποδοτικότητα του συστήματος με το να ταιριάζει την τάση τροφοδοσίας με την τάση που απαιτούν τα φορτία. Λειτουργεί όπως ένας απλός μετατροπέας που μπορεί είτε να αυξάνει είτε να μειώνει την τάση (buck-boost converter). Αποτελείται από έναν αριθμό στοιχείων και διακοπών που συνδέονται έτσι ώστε τα περιοδικά σήματα διακοπών να ελέγχουν την δυναμική μεταφορά της ισχύος από την είσοδο προς την έξοδο και να παράγουν την επιθυμητή DC μετατροπή. Στην έξοδο υπάρχει ένα χαμηλοπερατό φίλτρο που ελέγχει την διακύμανση της τάσης εξόδου ώστε να μην ξεπερνά το 3%. Οι δύο βασικές τοπολογίες μετατροπέων DC/DC είναι υποβιβασμού και ανύψωσης και αναλόγως μετατρέπουν την DC τάση από ένα επίπεδο στο άλλο με την εναλλαγή του βαθμού χρησιμοποίησης του διακόπτη – δ (duty cycle: $D = t_{on} / T$, όπου t_{on} είναι ο χρόνος που άγει ο διακόπτης και T η διακοπτική συχνότητα). Μεταβάλλοντας το δ , το εύρος των παλμών αλλάζει και εφαρμόζεται η μέθοδος ελέγχου διαμορφωμένου εύρους παλμών. Ο μετατροπέας λειτουργεί σε συνεχή αγωγή (CCM – continuous conduction mode) καθώς πρέπει να εξυπηρετεί συνεχώς την μεταφορά της ισχύος από το φωτοβολταϊκό πλαίσιο προς τα φορτία.

3.5.2 Μονάδα ελέγχου



Εικόνα 3.19: Διάγραμμα της μονάδας ελέγχου

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου η μονάδα ελέγχου περιλαμβάνει έναν μικροεπεξεργαστή (PIC) και ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα και σκοπός της είναι η παραγωγή των παλμών PWM που ελέγχουν την λειτουργία του μετατροπέα.

Ο μικροεπεξεργαστής επιτρέπει την καταγραφή της τάσης από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία και δουλειά του είναι να υπολογίζει την τιμή της στο μέγιστο σημείο ισχύος εφαρμόζοντας έναν αλγόριθμο (VMPPT – Voltage control Maximum Power Point Tracking):

- Καταγραφή της αναλογικής τιμής τάσης από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια
- Μετατροπή αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (A/D)
- Εφαρμογή του αλγορίθμου VMPPT
- Αποστολή κατάλληλου σήματος τάσης στο ολοκληρωμένο κύκλωμα (V_{ref}) έτσι ώστε να επιτραπεί ο έλεγχος του δ (χρόνος χρησιμοποίησης) της μεθόδου PWM.

Μετά την παραγωγή του σήματος PWM από τον μικροεπεξεργαστή είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η μέση τιμή του μέσω ενός χαμηλοπερατού φίλτρου (Low Pass Filter – LPF). Αυτός είναι ο πιο απλός και ανέξοδος τρόπος υπολογισμού. Το PWM σήμα έχει διορθωθεί όμως το εύρος των παλμών παίρνει διάφορες τιμές αναλόγως του σημείου λειτουργίας της φωτοβολταϊκής γεννήτριας. Το χαμηλοπερατό φίλτρο είναι ένας απλός συνδυασμός αντίστασης και πυκνωτή (RC) με τον πυκνωτή παράλληλα συνδεδεμένο στο φορτίο. Ο πυκνωτής μπλοκάρει τα σήματα χαμηλής συχνότητας και τα αναγκάζει να περνούν μέσα από την αντίσταση φορτίου.

Η συχνότητα αποκοπής :

$$A(f) = \frac{1}{\sqrt{1+\varepsilon^2 c_n^2 \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}} \quad (3.34)$$

Σύστημα εντοπισμού μέγιστης ισχύος– Maximum Power Point trackers (MPPT)

Στις υλοποιήσεις των ρυθμιστών φόρτισης συσσωρευτών με κύριο μέλημα τους την προστασία του συσσωρευτή από υπερφόρτιση όπως και την προστασία του συσσωρευτή από υπερβολική εκφόρτιση, η ισχύς που τροφοδοτεί το φωτοβολταϊκό δεν είναι για όλες τις συνθήκες λειτουργίας η μέγιστη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μεταφορά ισχύος από τη γεννήτρια στο συσσωρευτή και το φορτίο είναι αποδοτική μόνο για ορισμένες τιμές από μια σχετικά μεγάλη περιοχή τιμών των παραμέτρων λειτουργίας, όπως το μέγεθος του φορτίου, του συσσωρευτή, τη θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών κυττάρων, την πυκνότητα ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, τον βαθμό γήρανσης των φωτοβολταϊκών κυττάρων, κλπ. Έτσι παρουσιάζονται απώλειες οι οποίες κυμαίνονται από πολύ μικρές ως 10% κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ηλιόλουστης ημέρας. Η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι να χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα παρακολούθησης του σημείου μέγιστης ισχύος (maximum power point tracker)

Η τεχνολογία της ανίχνευσης της μέγιστης ισχύος, άρχισε να χρησιμοποιείται σχετικά πρόσφατα στις εφαρμογές των φωτοβολταϊκών και είναι χαρακτηριστικό κάθε καλού αντιστροφέα για σύνδεση με το δίκτυο ή φορτιστή συσσωρευτών. Σήμερα χρησιμοποιούνται πολλές τεχνικές για την εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος. Οι τεχνικές ομαδοποιούνται σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

Έμμεσοι ανιχνευτές MPP

Οι έμμεσοι ανιχνευτές προσεγγίζουν το σημείο μέγιστης λειτουργίας με βάση απλές υποθέσεις και έμμεσες μετρήσεις. Κατά βάση υπάρχουν τρεις μέθοδοι:

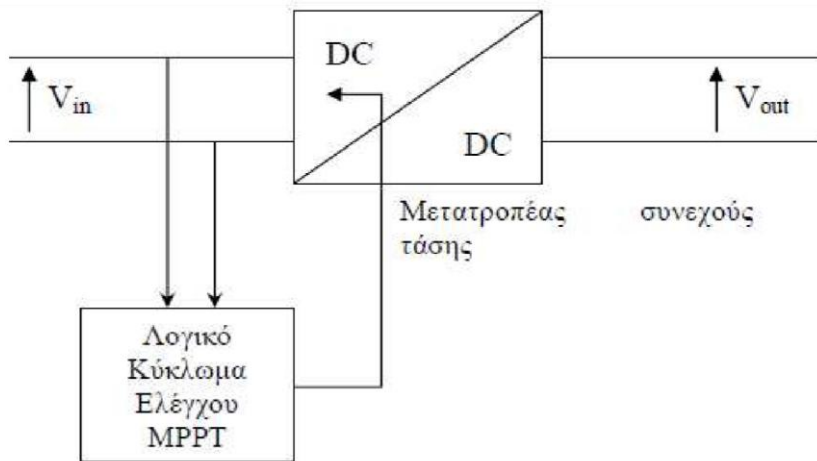
Η τάση λειτουργίας ρυθμίζεται ανάλογα με την εποχή του χρόνου. Μεγαλύτερες τιμές τάσης στο σημείο μέγιστης ισχύος αναμένονται τον χειμώνα, όπου οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές, ενώ το καλοκαίρι οι τιμές της τάσης είναι μικρότερες. Ρυθμίζεται η τάση ανάλογα με την θερμοκρασία που αναπτύσσει το πλαίσιο.

Κάνει χρήση του γεγονότος ότι στα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία ο λόγος τάσης στη μέγιστη ισχύ προς την τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι σταθερός. Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο το οποίο παραμένει ανοιχτοκυκλωμένο τοποθετείται δίπλα από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες για να μετράτε συνεχώς η τάση ανοιχτοκύκλωσης αυτού. Η τάση των παραγωγικών φωτοβολταϊκών στοιχείων ρυθμίζεται κάθε στιγμή στο σημείο που εξασφαλίζει τη μέγιστη ισχύ [6].

Άμεσοι ανιχνευτές MPP

Η λειτουργία τους βασίζεται στη συνεχή παρακολούθηση των τιμών της τάσης και έντασης εξόδου των φωτοβολταϊκών γεννητριών, προκαλώντας ανά τακτά χρονικά διαστήματα μια διαταραχή της τάσης εξόδου αυτής. Αν διαπιστωθεί ότι με την ανύψωση της τάσης αυξάνεται η ισχύς που παρέχει η γεννήτρια τότε αυξάνουν την τάση προς τα πάνω ώσπου να έρθει μια ισορροπία και αυτό είναι το σημείο μέγιστης λειτουργίας.

Για να επιτευχθεί η λειτουργία στο σημείο μέγιστης ισχύος χρησιμοποιείται κύκλωμα DC/DC μετατροπέα, ανύψωσης-υποβιβασμού τάσης, στα άκρα της ηλεκτρονικής συσκευής στην οποία εισέρχεται η ισχύς του φωτοβολταϊκού. Ένα απλό σχεδιάγραμμα DC/DC μετατροπέα που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση της μέγιστης ισχύος εξόδου της φωτοβολταϊκής γεννήτριας φαίνεται στην εικόνα 3.20:



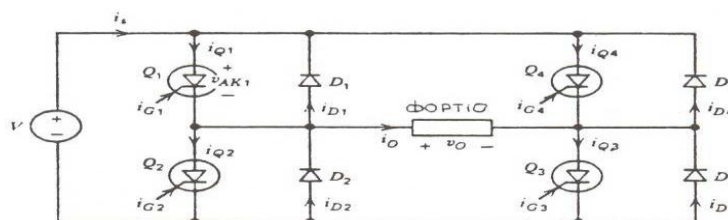
Εικόνα 3.20: Απλοποιημένη διάταξη MPPT

Μερικές από τις τεχνικές MPPT είναι οι ακόλουθες:

1. Διαταραχή και Παρατήρηση (Perturb and Observe)
2. Στοιχειώδης αγωγιμότητα (Incremental Conductance)
3. Με βάση την τάση ανοιχτού κύκλου ως ποσοστό (Open Voltage, OV)
4. Με βάση το ρεύμα βραχυκύκλωσης ως ποσοστό (Short Current, SC)
5. Έλεγχος με συσχέτιση της κυμάτωσης (Ripple Correlation Control, RCC)
6. Σάρωση ρεύματος (Current Sweep)
7. DC Link Capacitor Droop Control (DC LCDC)
8. Μεγιστοποίηση ρεύματος ή τάσης φορτίου
9. dP/dV ή dP/dI Feedback control
10. Έλεγχος με ασαφή λογική (Fuzzy Logic)
11. Νευρωνικά Δίκτυα.

3.6 Αντιστροφείς (DC/AC Inverters)

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η τάση που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια είναι ακατάλληλη για την άμεση σύνδεση στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ή στη δικιά μας περίπτωση σε ένα A/C κινητήρα αντλίας. Ο ρόλος του αντιστροφέα είναι η μετατροπή της συνεχούς τάσης που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία σε εναλλασσόμενη, κατάλληλης τιμής και συχνότητας. Ένας από τους πιο καθιερωμένους αντιστροφείς, που χρησιμοποιείται σε απλές εφαρμογές (φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετημένα στην ίδια κατεύθυνση και σε ίδια γωνία), είναι ο μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας που φαίνεται στο σχήμα. [20]



Εικόνα 3.23 Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας.[20]

Οι αντιστροφείς DC/AC μπορεί να είναι μονοφασικοί ή τριφασικοί. Όταν η είσοδος είναι μια πηγή τάσης, ονομάζονται αντιστροφείς πηγής τάσης (VSI) ενώ όταν είναι μια πηγή έντασης ονομάζονται αντιστροφείς πηγής έντασης (CSI). Ο χαρακτηρισμός του αντιστροφέα δεν σχετίζεται απαραίτητα με την ενεργειακή πηγή του συστήματος, αλλά με την τοπολογία. Έτσι είναι δυνατόν να αλλάξει η μορφή της πηγής με τη χρήση παθητικών στοιχείων. Οι αντιστροφείς πηγής τάσης έχουν μια χωρητικότητα παράλληλα συνδεδεμένη στην πηγή, ενώ οι αντιστροφείς πηγής έντασης ένα πηνίο σε σειρά με την πηγή. Για ισχύ πάνω από 5 kW συνηθίζεται η χρήση τριφασικών αντιστροφέων.[20]

Κεφάλαιο 4

Μοντελοποίηση συστήματος ψύξης Φ/β πλαισίου μέσω ψεκαστήρων

4.1 Εισαγωγή

Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των Φ/Β πλαισίων. Η επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση μπορεί να επηρεάσει τις τιμές του ρεύματος και της τάσης των Φ/Β πλαισίων. Αυτό μπορεί εύκολα να βρεθεί από τις καμπύλες I-V των πλαισίων (Εικόνα 3.10). Ως αποτέλεσμα της γραμμικής μείωσης της απόδοσης της ισχύς, που παράγεται, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία. Η απόδοση κάποιων τύπων Φ/β κελιών εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία λειτουργίας. Για τα κρυσταλλικά πυριτίου η μείωση στην απόδοση μετατροπής της ενέργειας είναι ~0.4-0.5% για κάθε βαθμό Κελσίου. Επομένως, μειώνοντας την θερμοκρασία λειτουργίας των Φ/β κελιών, βελτιώνεται η απόδοση της λειτουργίας των πλαισίων και παράλληλα αυξάνεται η προστασία των κελιών από θερμικές ζημιές.

Μια πληθώρα ερευνητών έχουν δουλέψει στην ψύξη πλαισίων με διάφορες τεχνικές. Ο πιο απλός και φυσικός τρόπος είναι με κυκλοφορία αέρα. Για να αυξηθεί η επαγωγή θερμότητας, χρησιμοποιούνται μεταλλικά πτερύγια τα οποία αυξάνουν την επιφάνεια μεταφοράς θερμότητας.

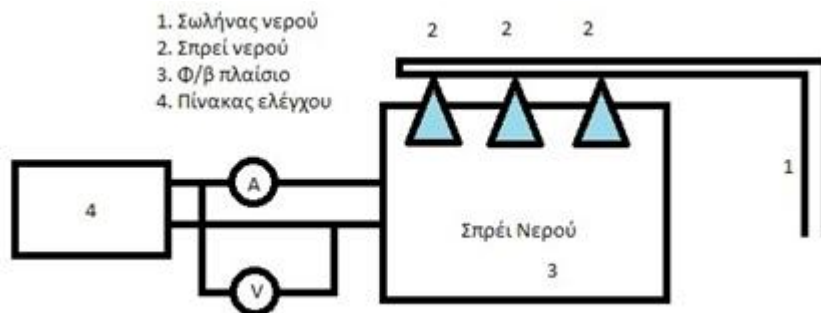
Ο Endenburgh δημιούργησε μια συσκευή φτιαγμένη από πτερύγια γραμμικής διάταξης για όλες τις διαθέσιμες επιφάνειες επαγωγής θερμότητας η οποία χρησιμοποιήθηκε για να ψύχονται τα κελία παθητικά. Ως ένα καλό μέσο ψύξης, το νερό έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για Φ/β ψύξη με διάφορες τεχνικές. Το νερό επίσης είναι κατάλληλο και υβριδικά Φ/β συστήματα.

Ο Krauter εξέτασε την μέθοδο στην οποία τα Φ/β πλαίσια ψύχονται με νερό άνωθεν των πλαισίων. Με την επιπρόσθετη μεταφορά θερμότητας μέσω εξάτμισης, ισχυρίστηκε ότι είναι εφικτό να μειωθεί η θερμοκρασία των κελιών μέχρι και 22°C με συνολικό όφελος 8-9%. Η Abdolzadeh και ο Ameri χρησιμοποίησαν σπρέι νερού για να ψύξουν τα πλαίσια και πέτυχαν αύξηση της απόδοσης των κελιών από 3,26 έως 12,5%. Ο Korzadeh παρατήρησε ότι όταν μια λεπτή συνεχόμενη στρώση νερού κυλάει πάνω από την επιφάνεια των πλαισίων τότε υπάρχει καλύτερη ηλεκτρική απόδοση επειδή μειώνεται η ανάκλαση του φωτός και η θερμοκρασία της επιφάνειας.

Για να αποφευχθεί η πρόσθετη ενέργεια κατανάλωσης από το σύστημα ψύξης, η Furusima και Nawata αναφέρθηκαν σε ένα μοντέλο με το νερό να παρέχεται από το σύστημα ύδρευσης και έτσι το σύστημα ψύξης δεν είχε πρόσθετες ενεργειακές απαιτήσεις. Ο Wilson μελέτησε την “gravity-fed” τεχνολογία όπου το νερό μεταφέρθηκε από μέρη με υψηλότερη δυναμική ενέργεια σε μέρη με χαμηλότερη δυναμική ενέργεια λόγω της βαρύτητας. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης έδειξαν 32°C μείωση που είχε ως αποτέλεσμα 12.8% αύξηση στην ηλεκτρική απόδοση.

Η ενεργητική ψύξη Φ/β πλαισίων είναι αποδοτική. Όμως εάν ληφθούν υπόψη οι πρόσθετες ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος τότε δεν υπάρχει κάποιο όφελος στην συνολική αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Οι υβριδικές τεχνολογίες φαίνεται να αντιμετωπίζουν το πρόβλημα που αναφέρθηκε παραπάνω εκμεταλλευόμενες την θερμότητα του νερού εξόδου του συστήματος. Όμως το γεγονός ότι τα υβριδικά συστήματα έχουν υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας για να παρέχουν ωφέλιμη θερμότητα, έχει ως αποτέλεσμα το όφελος της ψύξης να είναι περιορισμένο. Επιπλέον όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική επένδυση τόσο μεγαλύτερο το τελικό όφελος στην θερμική ενέργεια παρά στην ηλεκτρική. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι τα υβριδικά Φ/β-θερμικά συστήματα δεν είναι μια αποδοτική τεχνολογία όσον αφορά τον σκοπό της μελέτης. Επομένως μια απλούστερη μέθοδος για να ψυχθούν τα Φ/β πλαίσια χωρίς πρόσθετες ενεργειακές απαιτήσεις είναι πιο εφικτή.[1]

4.2 Περιγραφή του συστήματος



Εικόνα 4.1: Σχηματικό διάγραμμα της διασταύρωσης Φ/β-ψυκτικού συστήματος

Στο Σχήμα 4.1 το Φ/β πλαίσιο ψύχεται από ψεκαστήρες οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με το δίκτυο παροχής. Επιπρόσθετα μέσω τις βαρύτητας το νερό κυλάει άνωθεν του Φ/β πλαισίου σχηματίζοντας ένα λεπτό στρώμα νερού, το οποίο στη συνέχεια θα μπορούσε να συλλέγεται σε μια δεξαμενή για επιπλέον εκμετάλλευση του νερού.

4.2 Μεταφορά θερμότητας στο Φ/β πλαίσιο

Όταν το νερό κυλάει άνωθεν ενός κεκλιμένου Φ/β πλαισίου, ο υπολογισμός της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του νερού και του πλαισίου είναι περίπλοκος. Εκτός από την μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας και μεταγωγής πρέπει να συμπεριλάβουμε την εξάτμιση του νερού.

Η ενεργειακή ισορροπία είναι:

$$G = Q_e + Q_c + Q_r + \Delta U \quad (4.1)$$

Όπου,

Το G είναι η ενέργεια που προέρχεται από την ηλιακή ακτινοβολία (J), το ΔU είναι η διαφορά της εσωτερικής ενέργειας (J), και τα Q_e, Q_c, Q_r είναι οι θερμικές απώλειες που οφείλονται στην εξάτμιση (J), στην μεταγωγή (J) και στην ακτινοβολία (J) αντίστοιχα.

Ο μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας λόγω της παραλλαγής της θερμοκρασίας στο μέσο νερό-στερεό είναι περίπλοκος. Έχει χρησιμοποιηθεί δισδιάστατο μοντέλο σταθερής κατάστασης (steady-state model) και έχουν ληφθεί υπόψη οι ακόλουθες προϋποθέσεις για να απλοποιηθούν οι υπολογισμοί:

Από την ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει στο Φ/β πλαίσιο, 16% μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, 5% ανακλάται και το υπόλοιπο μετατρέπεται σε θερμότητα.

Θεωρούμε ότι η μάζα του νερού έχει ομοιόμορφη κατανομή πάνω στο Φ/β πλαίσιο και το νερό θερμαίνεται στην ίδια θερμοκρασία με το πλαίσιο (T_c).

Παραλείπεται η θερμοκρασιακή αύξηση του νερού λόγω ηλιακής ακτινοβολίας.

Δεν έχουν συμπεριληφθεί οι απώλειες της επαγωγικής θερμότητας και της ακτινοβολίας στο πίσω μέρος του πλαισίου.

Ο αέρας που κυλάει στο μέσο νερού – αέρα στην ουσία επιταχύνει το ρυθμό εξάτμισης του νερού. Έτσι, η θερμική μεταγωγή του αέρα μπορεί να μετρηθεί σε συνδυασμό με την εξάτμιση του νερού. Ο Smith et al. προέβλεψαν τον υπολογισμό της ροής μεταφοράς θερμότητας εξάτμισης από την ακόλουθη εξίσωση, όπου υπολογίζεται κατά προσέγγιση πόση λανθάνουσα θερμότητα έχει αφαιρεθεί από το Φ/β πλαίσιο λόγω της εξάτμισης του νερού (w/m^2):[1]

$$q_e = (0.0638 + 0.0669U)(P_w - P_a) \quad (4.2)$$

Όπου,

Η πίεση κορεσμού του νερού είναι όπως ακολουθεί:

$$\log\left(\frac{P_s}{1000}\right) = 30.59051 - 8.2 \log(T_a + 273.16) + 0.00248(T_a + 273) - \frac{3142.31}{T_a + 273} \quad (4.3)$$

Η μερική πίεση των υδρατμών του περιβάλλοντος είναι:

$$P_a = \varphi P_s \quad (4.4)$$

Η μερική πίεση των υδρατμών του νερού είναι:

$$P_w = \exp\left[20.386 - \frac{5132}{0.5(T_{w,in} + T_c)}\right] * 133 \quad (4.5)$$

Όπου $T_{w,in}$ η θερμοκρασία νερού εισόδου (°C).

Έτσι,

Η συνολική μεταφορά θερμότητας μέσω της εξάτμισης του νερού μπορεί να εκφραστεί:

$$Q_e = A_{cell} q_e \quad (4.6)$$

Όπου A_{cell} η επιφάνεια των κελιών (m^2).

Η μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας μπορεί να εκφραστεί:

$$\Delta U = \frac{m_{water} C_p (T_{w,out} - T_{w,in})}{3600} = \frac{m_{water} C_p (T_c - T_{w,in})}{3600} \quad (4.7)$$

Όπου το $T_{w,out}$ είναι η θερμοκρασία νερού εξόδου (°K)

Έτσι,

Η θερμοκρασία των Φ/Β κελιών όταν περνάει μια στρώση νερού από πάνω υπολογίζεται κατά προσέγγιση από τον παρακάτω τύπο:

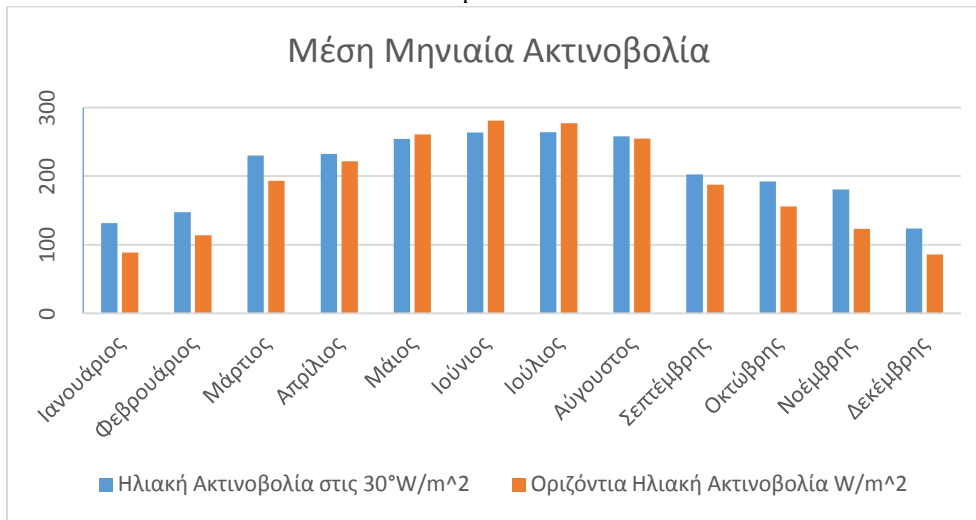
$$\alpha I A_{cell} (1 - n) = A_{cell} (0.0638 + 0.0669U)(P_w - P_a) + \frac{m_{water} C_p (T_c - T_{w,in})}{3600} \quad (4.8)[1]$$

Για τον προσδιορισμό της ημερίσιας πυκνότητας της ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται η χρονοσειρά στις 29 Ιουλίου 2009, στα Χανιά καθώς παρατηρήθηκε ως η θερμότερη ημέρα καθώς και με την υψηλότερη ακτινοβολία (Εικόνα 4.2):

Χαρακτηριστικά συστήματος:

- Συνολική επιφάνεια Φ/β συστοιχίας: $57.6 m^2$
- Ονομαστική ισχύς συστήματος: 10 KW
- Μάζα νερού παροχής: 100 kg/h
- Συνολικός συντελεστής απωλειών (fPV): 0.8

- Τάση πλαισίου: 24V
- α: 0.95
- TSTC: 25
- Θερμοκρασιακό συντελεστή C_p : -0.004



Εικόνα 4.2: Καμπύλη ακτινοβολίας στη διάρκεια του έτους 2009 στα Χανιά

Πίνακας 4.2: Πίνακας ωριαίων δεδομένων περιβάλλοντος, 29 Ιουλίου 2009 στα Χανιά

Ημέρα έτους	Ώρα Μέτρησης	Θερμοκρασία (°C)	Σχετική υγρασία (%)	Ταχύτητα ανέμου (m/s)	Θερμ. νερού εισόδου (°C)	Οριζόντια ακτινοβολία (W/m2)	Ακτινοβολία στις 30° κλίση (W/m2)	Θερμοκρασία Κυτάρου (°C)
210	1	23.9	54.45	1.337	23	0	0	29.88
210	2	23.85	55.27	1.26	23	0	0	29.81
210	3	23.44	55.5	1.567	23	0	0	29.30
210	4	23.16	55.99	1.778	23	0	0	28.95
210	5	23.19	55.59	1.7	23	0	0	28.99
210	6	22.86	58.62	0.968	23	5.78	0	28.76
210	7	23.4	60.91	1.416	23	114.5	77	32.83
210	8	25.13	61.29	1.026	23	224.9	199	38.44
210	9	25.89	58.77	1.464	23	410.8	377	45.20
210	10	26.31	55.94	1.924	23	640.3	617	52.90
210	11	26.81	55.54	2.138	23	749	746	56.92
210	12	26.08	62.52	2.861	23	824	835	58.35
210	13	26.04	61.77	2.313	23	824	837	58.30
210	14	26.36	62.04	2.557	23	799	808	57.92
210	15	26.41	61.64	2.893	23	702	697	54.95
210	16	27.18	58.46	2.039	23	613.1	591	53.13
210	17	26.86	58.8	1.992	23	376.7	349	45.35
210	18	26.89	54.99	1.484	23	191.6	176	39.60
210	19	26.78	52.28	1.477	23	95.6	78	36.46
210	20	25.48	59.2	0.927	23	6.287	0	32.05
210	21	25.1	56.85	1.261	23	0	0	31.38
210	22	25.01	55.68	1.751	23	0	0	31.26
210	23	24.82	56.6	2.319	23	0	0	31.03
210	24	25.09	54.01	1.621	23	0	0	31.36

Η ισχύς εξόδου μιας ΦΒ συστοιχίας PPV (kW) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση (4.9):

$$PPV = f_{PV} * P_{STC} * \frac{G_T}{G_{STC}} * (1 + (T_c - T_{STC}) * C_T) \quad (4.9)$$

Όπου,

f_{PV} : είναι ο συνολικός συντελεστής απωλειών της ΦΒ συστοιχίας,

P_{STC} : είναι η ονομαστική ισχύς της ΦΒ συστοιχίας (σε kWp) κάτω από Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής (ΠΣΔ),

G_T : είναι η πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας (σε kW/m²),

G_{STC} : είναι η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας κάτω από ΠΣΔ (1 kW/m²), T_c είναι η θερμοκρασία σε °C των ΦΒ στοιχείων,

T_{STC} : η θερμοκρασία κάτω από ΠΣΔ (25°C),

C_T : είναι ο θερμοκρασιακός συντελεστής των ΦΒ στοιχείων (/°C), ο οποίος δείχνει τον τρόπο που μεταβάλλεται η απόδοση του ΦΒ στοιχείου σε σχέση με τη θερμοκρασία λειτουργίας του. Στους περισσότερους τύπους ΦΒ στοιχείων παρατηρείται μείωση της απόδοσής τους όταν η θερμοκρασία τους αυξάνεται.

Έχει χρησιμοποιηθεί πολυκρυσταλλικό Φ/β πλαίσιο το οποίο έχει θερμοκρασιακό συντελεστή C_p - 0.004

Ο συνολικός συντελεστής απωλειών f_{PV} προσμετρά τις διαφοροποιήσεις ανάμεσα στην ονομαστική επίδοση και την πραγματική επίδοση ενός ΦΒ πλαισίου, και λαμβάνει υπόψη απώλειες όπως η κάλυψη του πλαισίου από σκόνη και η ηλικία του πλαισίου. Τυπικές τιμές συντελεστών απωλειών για το ΦΒ πλαίσιο είναι 0.90 λόγω κάλυψης του πλαισίου από σκόνη, 0.90 λόγω γήρανσης και 0.99 λόγω λοιπών απωλειών, επομένως η τιμή του f_{PV} που θεωρείται στην παρούσα διατριβή λαμβάνεται ίση με 0.80, που είναι ίση με το γινόμενο των τριών παραπάνω συντελεστών.

Η θερμοκρασία T_c μπορεί να υπολογιστεί από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα T_a (σε °C) και την πυκνότητα ισχύος της οριζόντιας ηλιακής ακτινοβολίας G (σε kW/m²) χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση (4.10):

$$T_c = T_a + \frac{(NOCT-20)}{0.8} * G \quad (4.10)$$

Όπου,

NOCT είναι η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του ΦΒ στοιχείου.

Η NOCT αποτελεί τη συμβατική θερμοκρασία λειτουργίας ενός ΦΒ στοιχείου σε συνθήκες ανοιχτοκύκλωσης, υπό πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας ίση με 0.8 kW/m², θερμοκρασία περιβάλλοντος αέρα 20°C και ταχύτητα ανέμου 1 m/s. Τυπική τιμή της NOCT είναι οι 48°C.

Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι ο συνολικός συντελεστής απωλειών f_{PV} δεν ταυτίζεται με το συντελεστή απόδοσης του ΦΒ πλαισίου. Η ακολουθούμενη μεθοδολογία υπολογισμού της ισχύος εξόδου PPV μιας ΦΒ συστοιχίας λαμβάνει υπόψη την ονομαστική ισχύ του ΦΒ πλαισίου κάτω από ΠΣΔ και όχι την επιφάνεια που αυτό καταλαμβάνει. Δύο ΦΒ πλαίσια που καταλαμβάνουν την ίδια επιφάνεια και έχουν διαφορετικούς συντελεστές απόδοσης θα έχουν και διαφορετική ονομαστική ισχύ, επομένως δεν είναι απαραίτητη η γνώση του συντελεστή απόδοσης του ΦΒ πλαισίου. Ένα επιπλέον σημαντικό στοιχείο που χρειάζεται να τονιστεί είναι ότι οι ΦΒ συστοιχίες που μοντελοποιούνται στην παρούσα διατριβή περιλαμβάνουν ανιχνευτή σημείου μέγιστης ισχύος. Η ύπαρξη της διάταξης αυτής αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για να δώσει η εξίσωση (4.9) ακριβή αποτελέσματα. [21]

Στην εξίσωση (4.9), η μόνη παράμετρος που μεταβάλλεται σε ωριαία βάση είναι η πυκνότητα ισχύος της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας, G_T . Ο υπολογισμός της G_T βασίζεται στις μετρήσεις της πυκνότητας ισχύος της οριζόντιας ηλιακής

ακτινοβολίας G που έχουν ληφθεί σε μια περιοχή, λαμβάνοντας όμως υπόψη και το γεγονός ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η GT δεν είναι ίση με την G, καθώς το επίπεδο της ΦΒ συστοιχίας δεν ταυτίζεται συνήθως με το οριζόντιο επίπεδο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό της GT με μια πολύπλοκη μεθοδολογία που λαμβάνει υπόψη:

Την τρισδιάστατη γεωμετρία που περιγράφει την κίνηση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας και λαμβάνει υπόψη τον προσανατολισμό της ΦΒ συστοιχίας.

Την μεταβαλλόμενη ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο ανώτατο σημείο της γήινης ατμόσφαιρας κατά τη διάρκεια του χρόνου.

Τον τρόπο μετάδοσης της ηλιακής ακτινοβολίας εντός της γήινης ατμόσφαιρας.

4.3 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Το σύστημα που αναλύθηκε με τα κλιματικά δεδομένα κατά την διάρκεια ενός ολόκληρου χρόνου και συγκεκριμένα το 2009 στα Χανιά. Για την ανάλυση της ημέρας μέγιστης θερμοκρασίας επιλέχθηκε η 29^η Ιουλίου για τις υψηλές θερμοκρασίες καθώς και την υψηλή ηλιακή ακτινοβολία της. Η μελέτη επικεντρώθηκε στην απόδοση των πλαισίων σε σχέση με την θερμοκρασία και την κατανάλωση νερού καθώς και πως επιδρά ο ψεκασμός νερού στην θερμοκρασία του Φ/β και ουσιαστικά στην απόδοση. Η ανάλυση έγινε σε συστοιχία 40 Φ/β πλαισίων.

4.3.1 Μηνιαία Ανάλυση

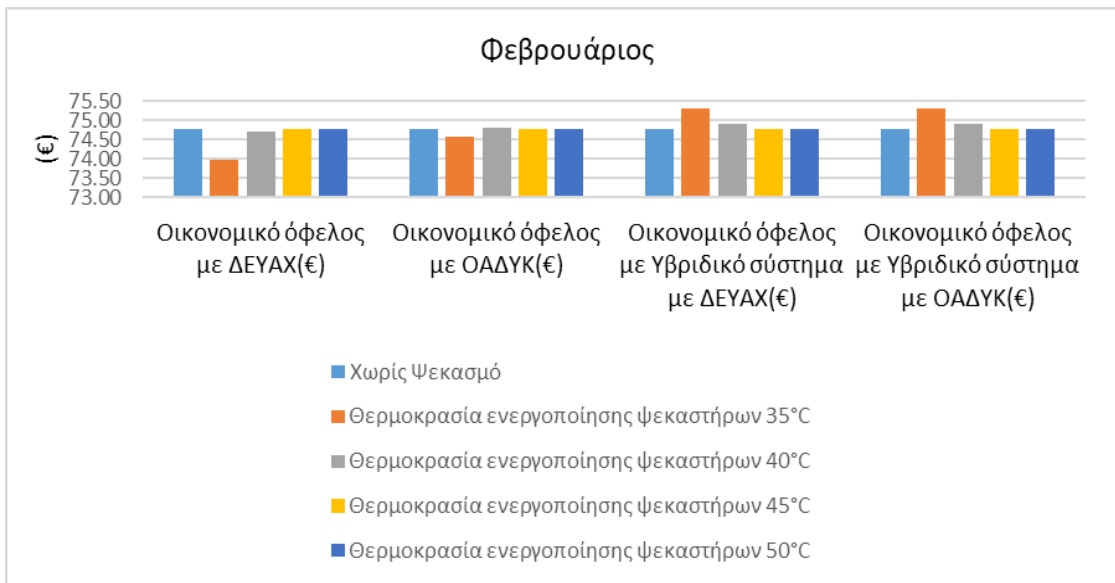
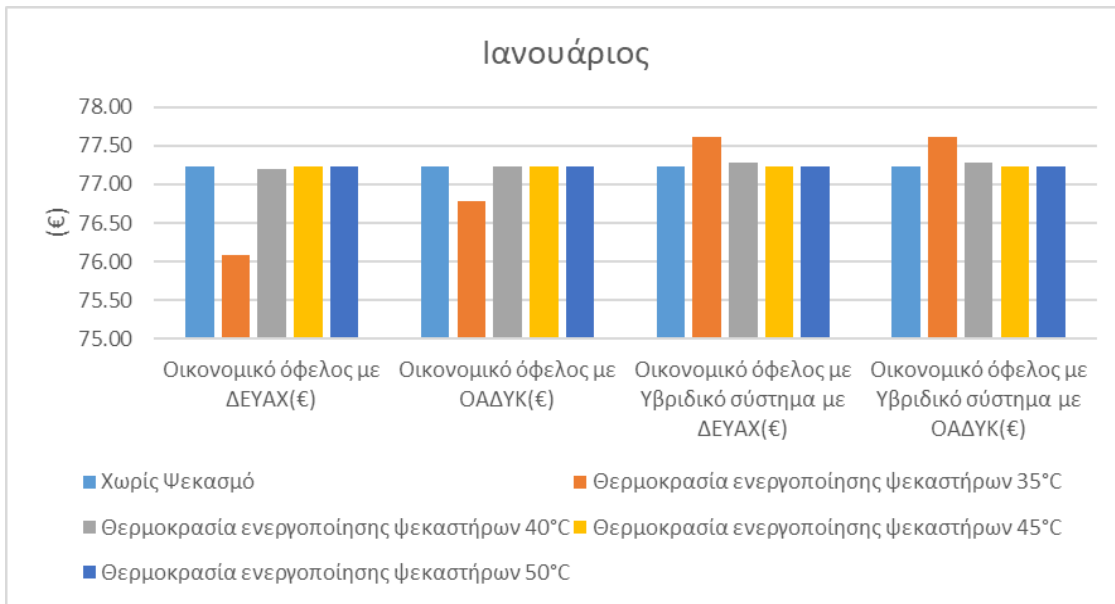
Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ανάλυση για κάθε μήνα του έτους για τα παρακάτω σενάρια τα οποία σχετίζονται με την επιλογή πάροχου νερού, ανάμεσα σε ΔΕΥΑΧ (με τιμή κόστους: 0.37€/m³) , ΟΑΔΥΚ (με τιμή κόστους: 0.2€/m³) και βρόχινου νερού θεωρώντας ότι υπάρχει μια δεξαμενή διαστάσεων 14.5(m²)*2(m)=29(m³) με επιφάνεια συλλογής νερού 100 (m²) χωρίς αποθέματα νερού από περσινά έτη, επιπλέον έχει παραληφθεί η εξάτμιση του νερού από την δεξαμενή.

Επίσης, δεν λήφθηκε υπόψη το κόστος της εγκατάστασης του συστήματος ψύξης, της δεξαμενής καθώς και οι ρυθμίσεις που αφορούν τον συμψηφισμό παραγόμενης-καταναλισκόμενης ενέργειας (net-metering).

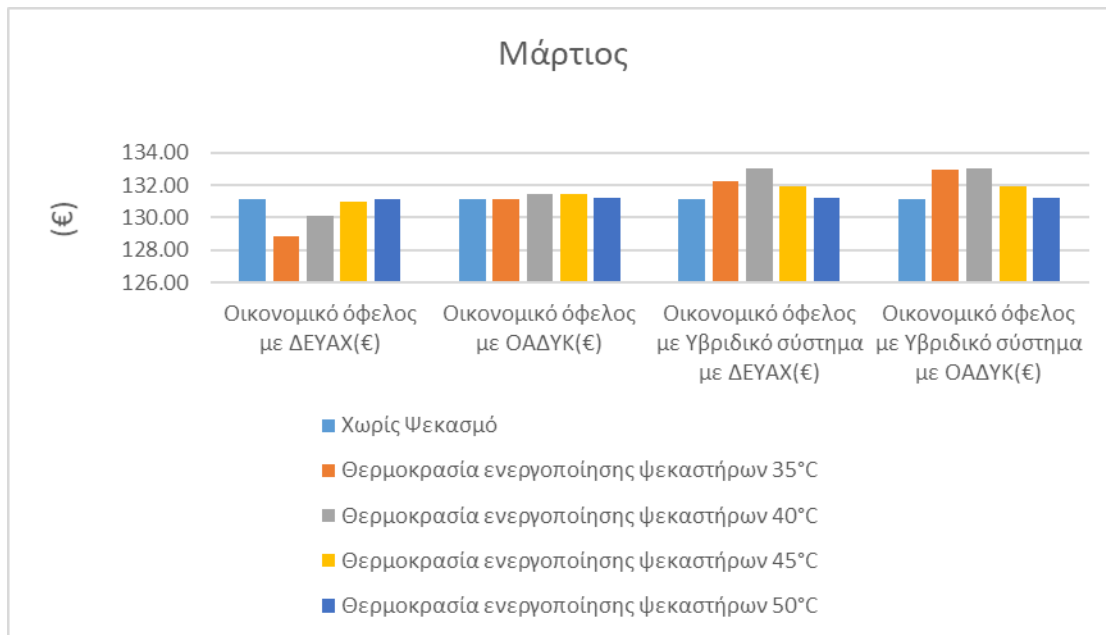
Σαν τιμή κιλοβατώρας (KWh) θεωρήθηκε η τιμή 0.1€/KWh.

Παρακάτω αναφέρεται η θερμοκρασία ενεργοποίησης των ψεκαστήρων (εικόνες 4.3 – 4.14) και φαίνονται αναλυτικά τα οικονομικά οφέλη ανά μήνα, το συνολικό νερό κατανάλωσης (m³) ανά μήνα και ανά θερμοκρασία ενεργοποίησης ψεκαστήρων T>35 ,T>40 ,T>45 ,T>50 °C αντίστοιχα (εικόνα 4.15) :

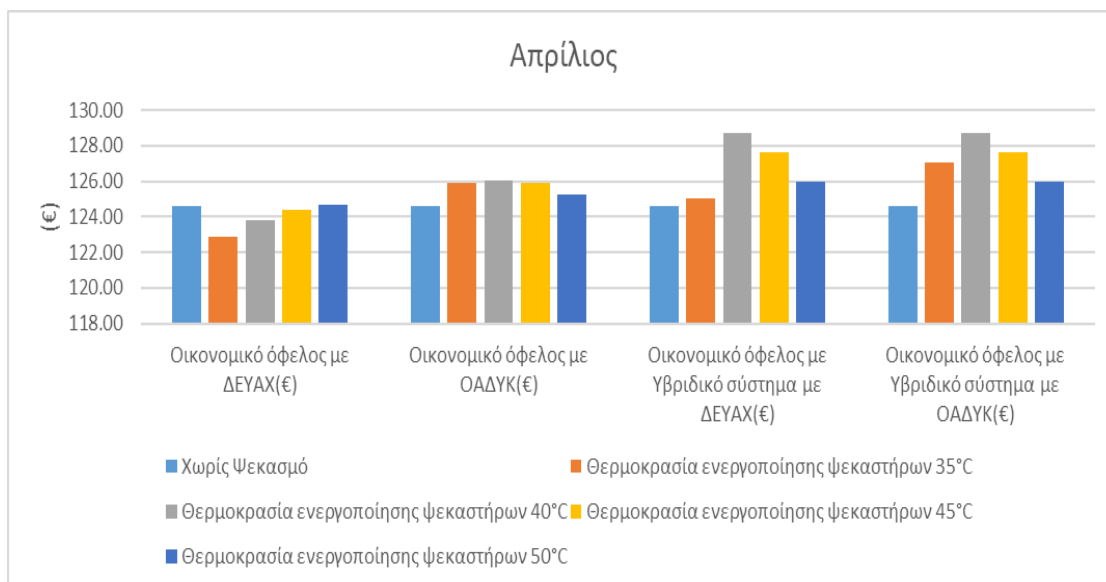
1. Χρήση νερού μόνο από την ΔΕΥΑΧ
2. Χρήση νερού μόνο από τον ΟΑΔΥΚ
3. Χρήση βρόχινου νερού
4. Συνδυαστική χρήση νερού από την ΔΕΥΑΧ και βρόχινου νερού (Υβριδικό σύστημα)
5. Συνδυαστική χρήση νερού από την ΟΑΔΥΚ και βρόχινου νερού (Υβριδικό σύστημα)



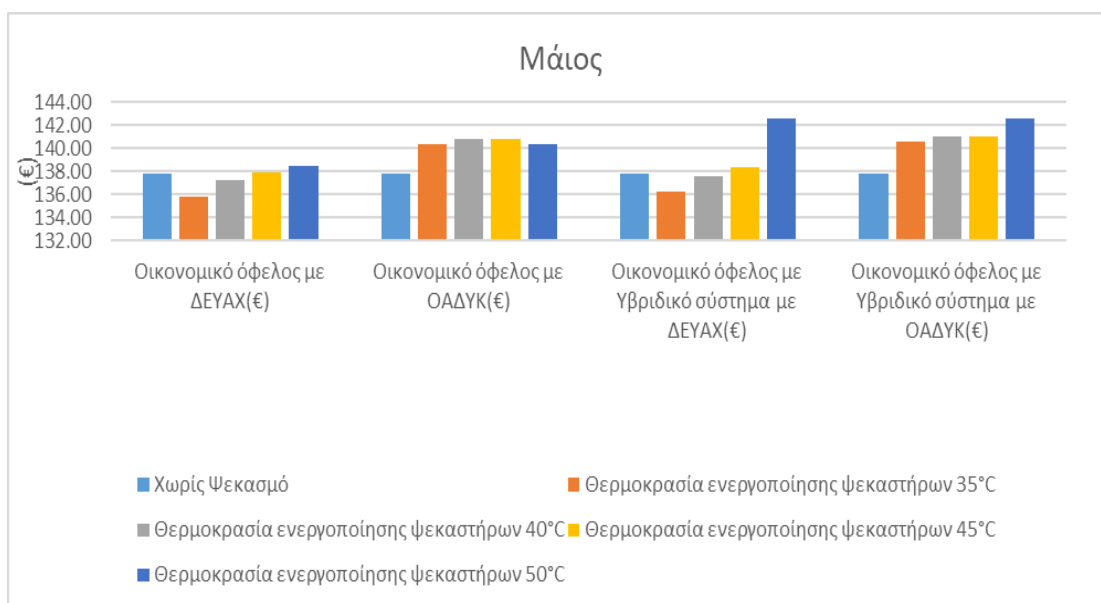
Εικόνα 4.4 Οικονομικό όφελος Φεβρουαρίου



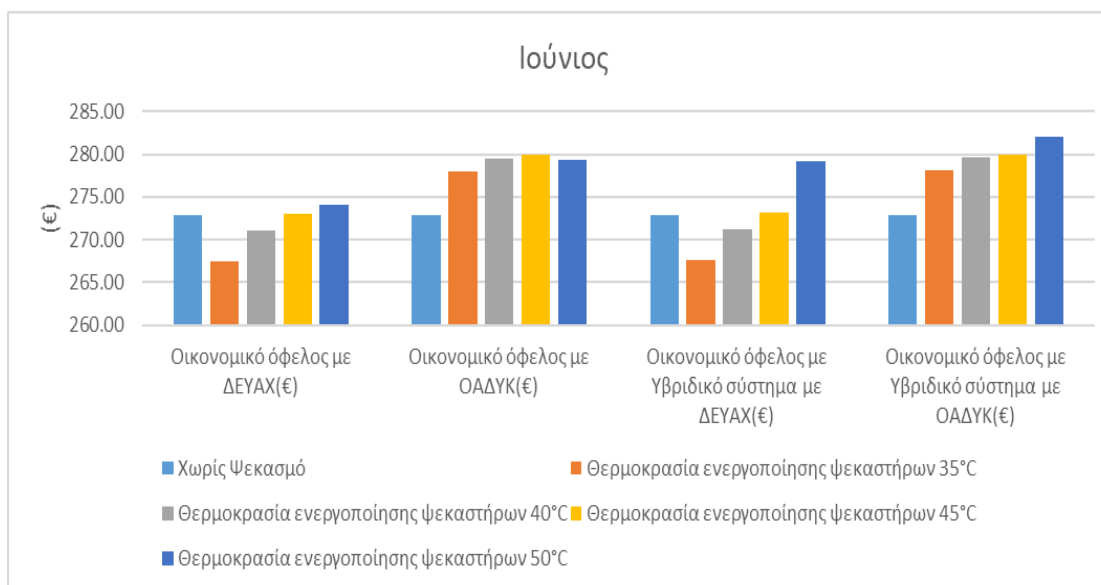
Εικόνα 4.5 Οικονομικό όφελος Μαρτίου



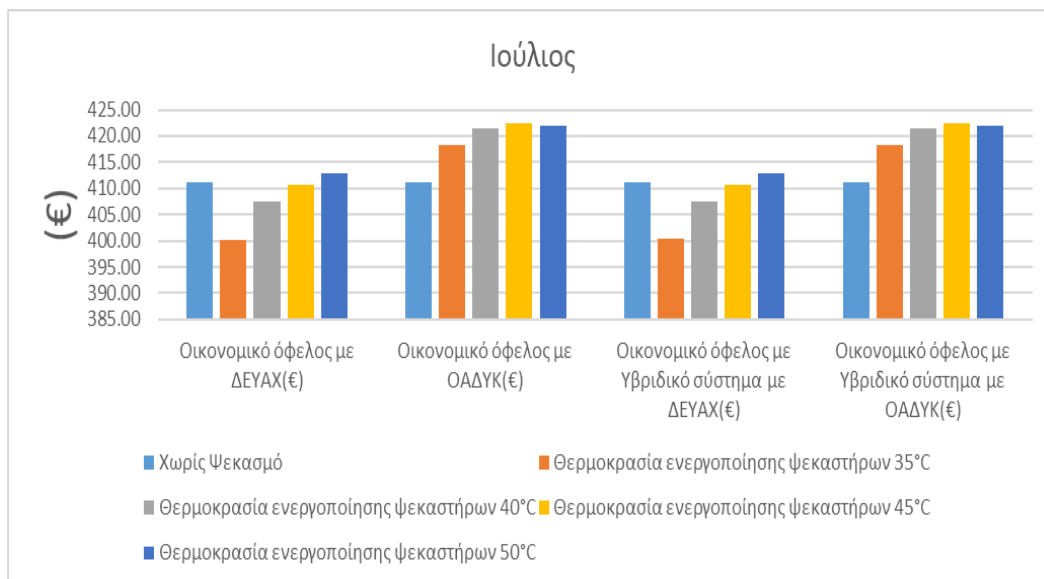
Εικόνα 4.6 Οικονομικό όφελος Απριλίου



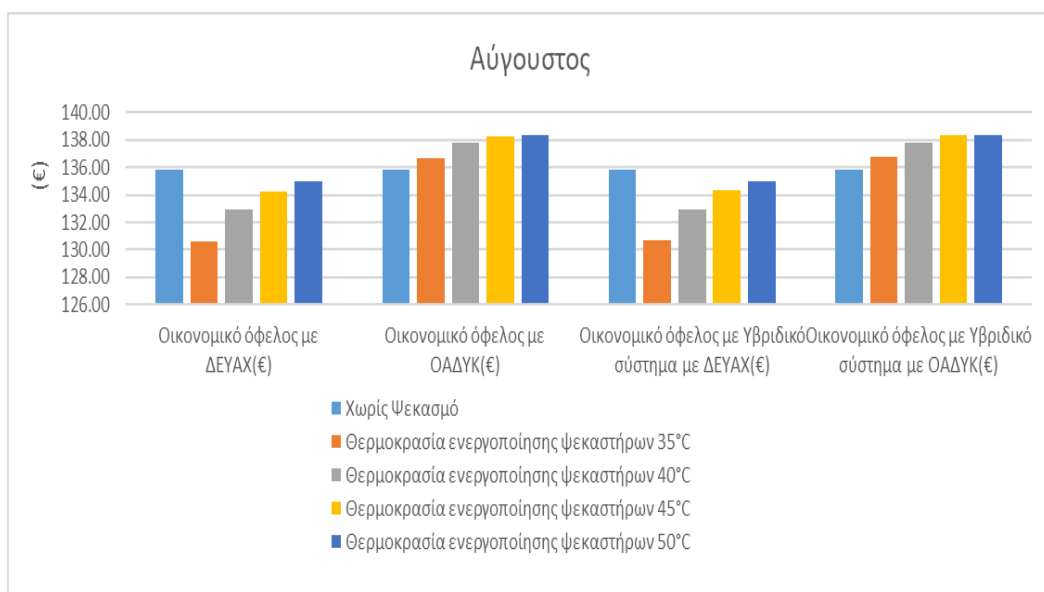
Εικόνα 4.7 Οικονομικό όφελος Μαΐου



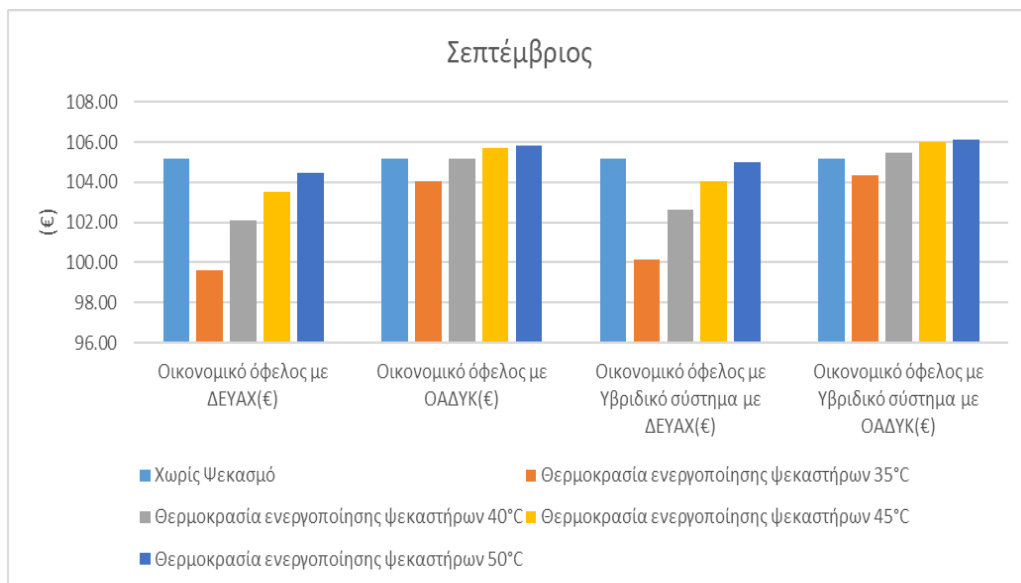
Εικόνα 4.8 Οικονομικό όφελος Ιουνίου



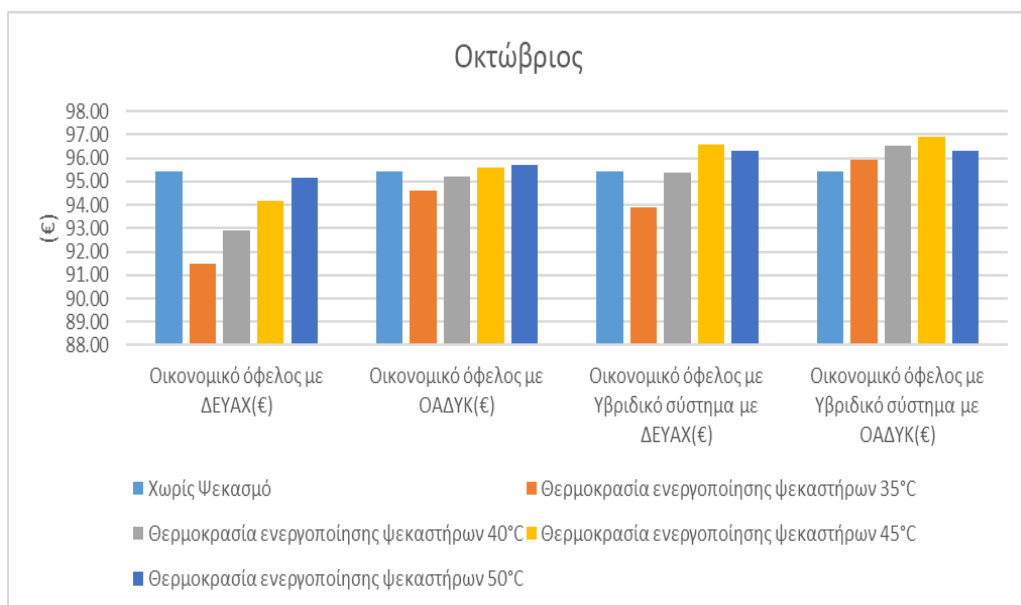
Εικόνα 4.9 Οικονομικό όφελος Ιουλίου



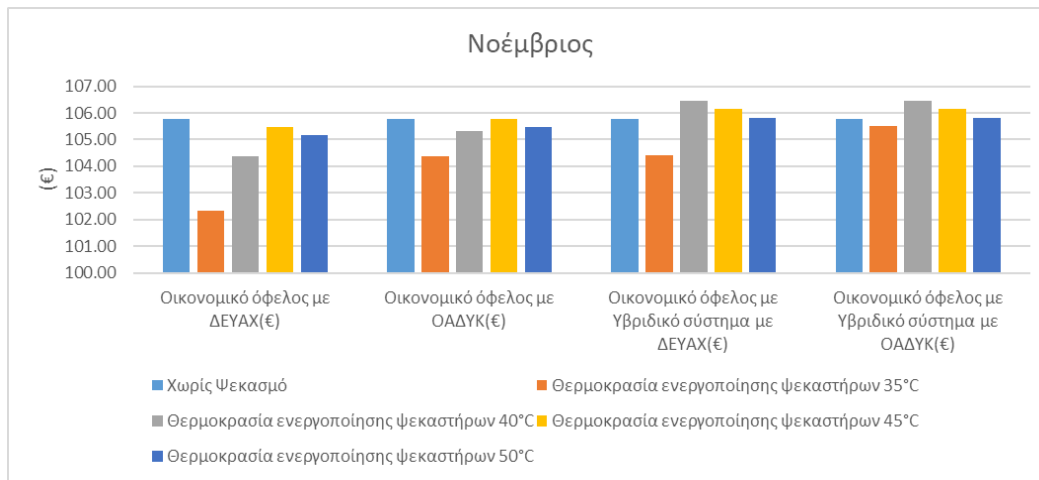
Εικόνα 4.10 Οικονομικό όφελος Αυγούστου



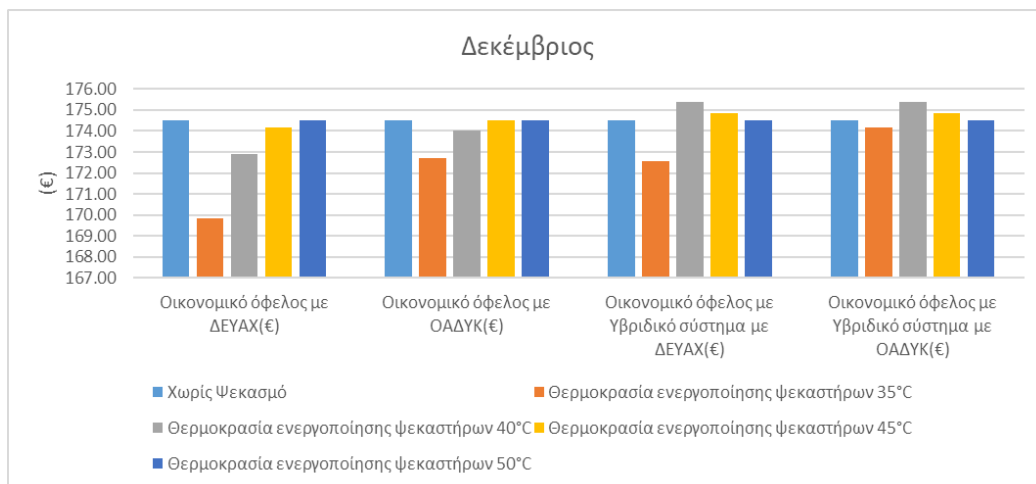
Εικόνα 4.11 Οικονομικό όφελος Σεπτεμβρίου



Εικόνα 4.12 Οικονομικό όφελος Οκτωβρίου

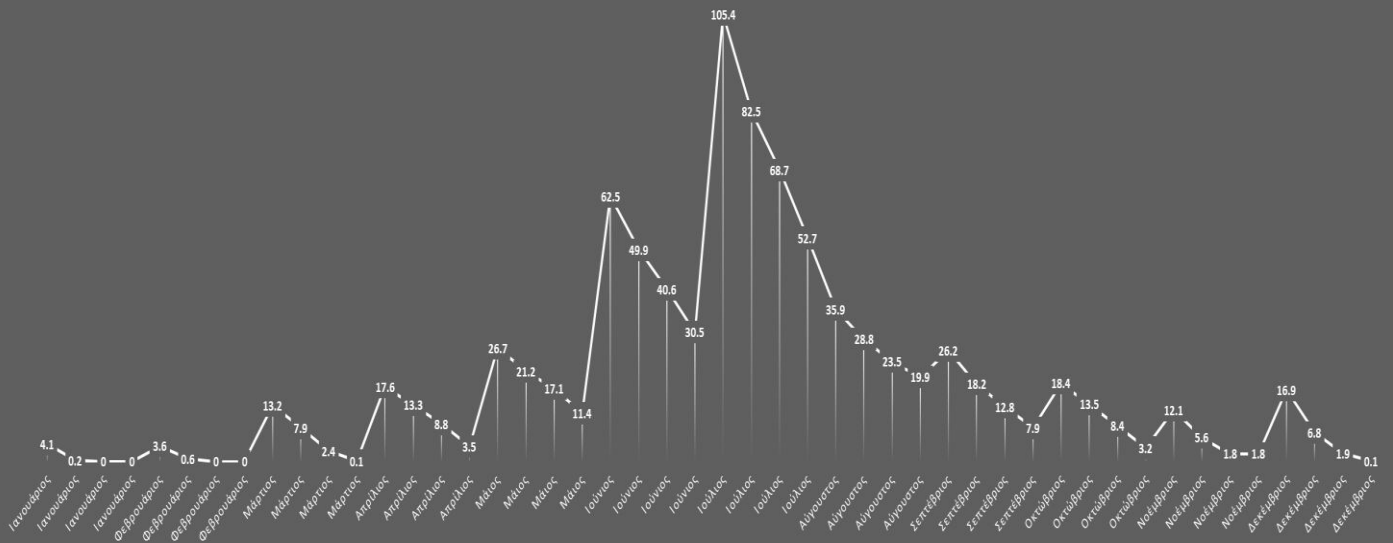


Εικόνα 4.13 Οικονομικό όφελος Νοεμβρίου



Εικόνα 4.14 Οικονομικό όφελος Δεκεμβρίου

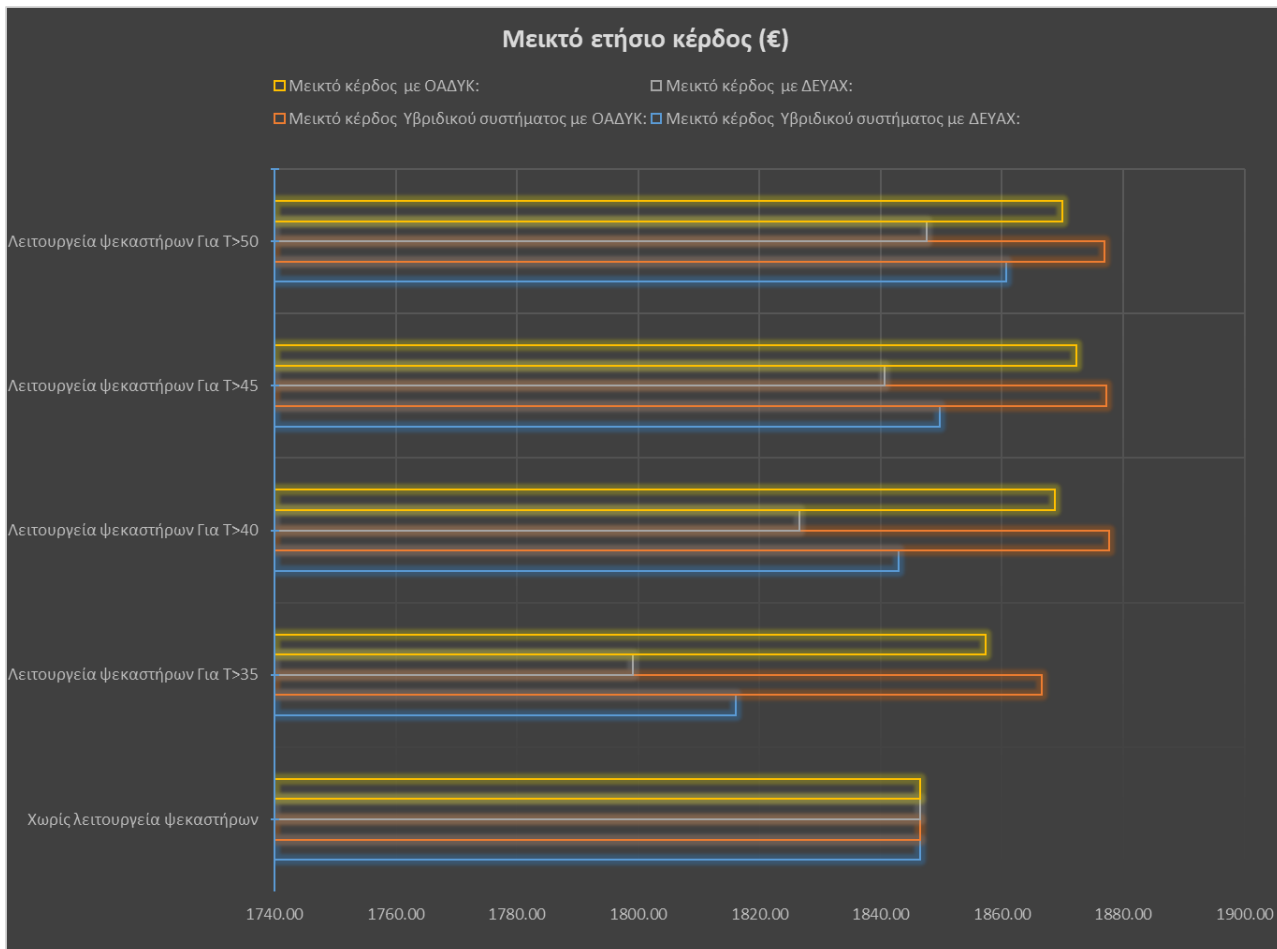
ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΝΕΡΟ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ (Μ³)



Εικόνα 4.15 Συνολικό νερό κατανάλωσης (m³) ανά μήνα και ανά θερμοκρασία ενεργοποίησης ψεκαστήρων T>35 , T>40 , T>45 , T>50 αντίστοιχα.

Πίνακας:4.3 Σύγκριση λειτουργίας ψεκαστήρων

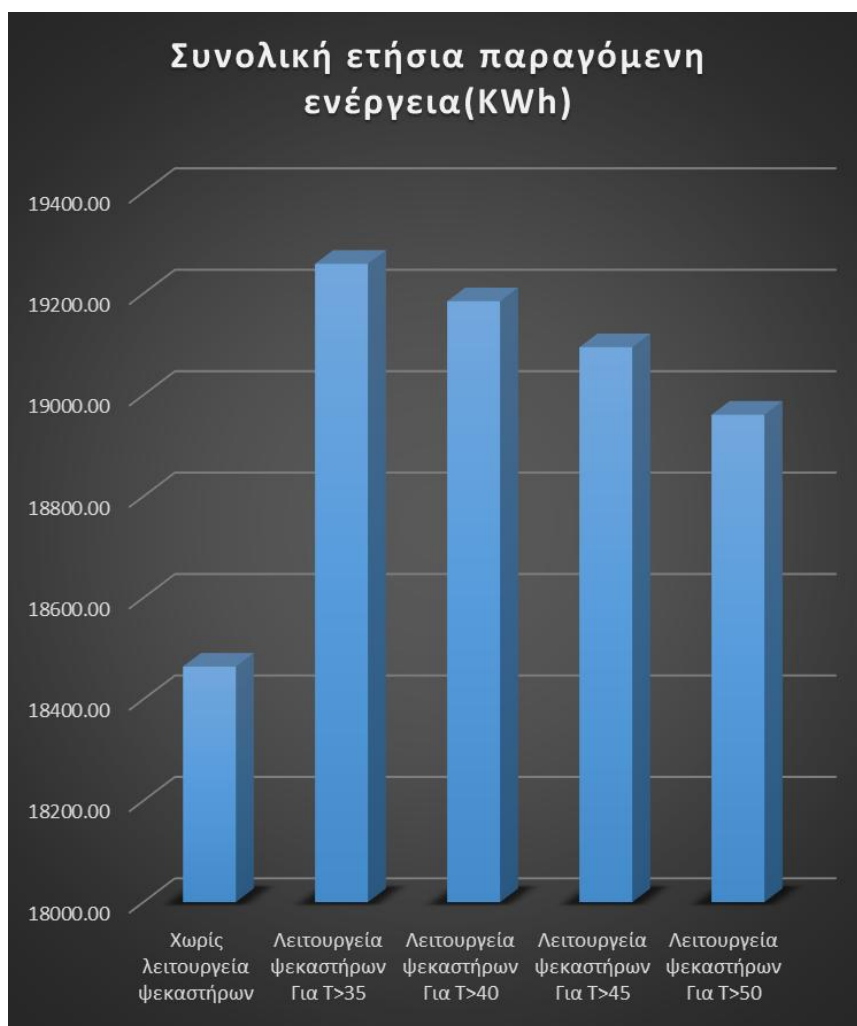
	Ώρες λειτουργίας ψεκαστήρων/χρόνο:	Συνολικό νερό κατανάλωσης:(m ³)
Λειτουργία ψεκαστήρων Για T>35	2413	342.6
Λειτουργία ψεκαστήρων Για T>40	1718	248.5
Λειτουργία ψεκαστήρων Για T>45	1265	186
Λειτουργία ψεκαστήρων Για T>50	874	131.1



Εικόνα 4.20 Μεικτό ετήσιο κέρδος(€)

Πίνακας:4.4 Συνολικό καθαρό κέρδος(€)

	Συνολικό καθαρό κέρδος (€)			
	Υβριδικό σύστημα με ΔΕΥΑΧ:	Υβριδικού συστήματος με ΟΑΔΥΚ:	μόνο με ΔΕΥΑΧ:	μόνο με ΟΑΔΥΚ:
Λειτουργία ψεκαστήρων Για T>35	-30.44	20.04	-47.33	10.91
Λειτουργία ψεκαστήρων Για T>40	-3.50	31.21	-19.9	22.35
Λειτουργία ψεκαστήρων Για T>45	3.35	30.74	-5.84	25.78
Λειτουργία ψεκαστήρων Για T>50	14.21	30.5	1.16	23.44



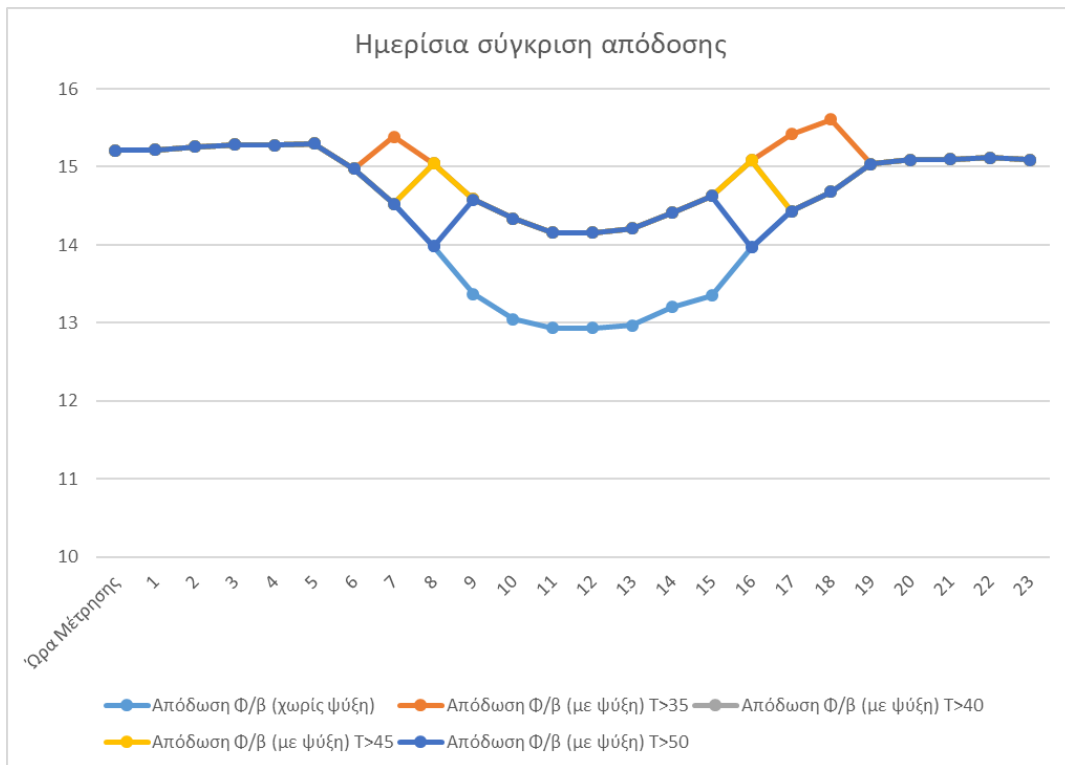
Εικόνα:4.16 Συνολική ετήσια παραγόμενη ενέργεια(KWh)

4.3.2 Ανάλυση λειτουργίας κατά την ημέρα μέγιστης θερμοκρασίας

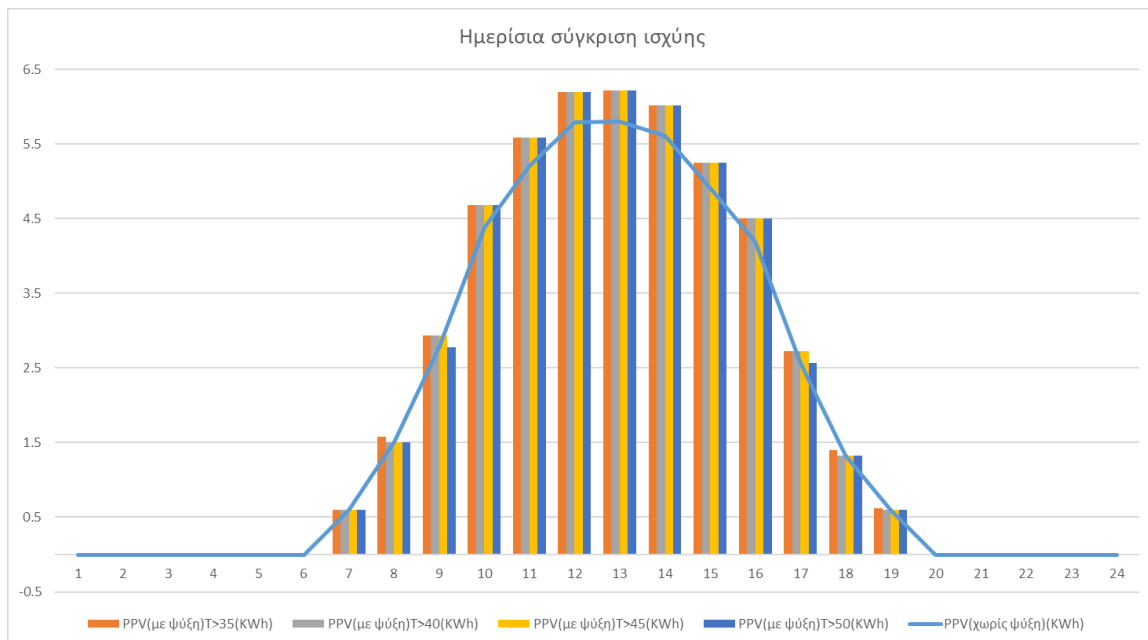
Αν και η ισχύς του Φ/β πλαισίου αυξάνεται με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας (Εικόνα 4.18), η απόδοσή του πέφτει με την αύξηση της θερμοκρασίας (Εικόνα 4.19). Έτσι, όταν η θερμοκρασία είναι κάτω από 35°C η απόδοση του Φ/β πλαισίου είναι ικανοποιητική και οι ψεκαστήρες είναι απενεργοποιημένοι. Όταν όμως η θερμοκρασία του πλαισίου υπερβαίνει τους 35°C, 40°C, 45°C και 50°C αντίστοιχα, τότε οι ψεκαστήρες ενεργοποιούνται και το Φ/β πλαίσιο ψύχεται (Εικόνα 4.1).

Στο συγκεκριμένο σύστημα ψύξης το νερό παρέχεται από το κεντρικό δίκτυο ύδρευσης. Από την Εικόνα 4.19 παρατηρείται μέγιστη μείωση της θερμοκρασίας, στις 13:00 το μεσημέρι, της τάξης των 17.5°C. Αυτή η μεταφορά θερμότητας από το πλαίσιο στο νερό επιδρά στην αύξηση της συνολικής απόδοσης του Φ/β συστήματος(Εικόνα 4.17) κατά 1.3%. Η ψύξη διατηρεί την θερμοκρασία του Φ/β πλαισίου κάτω από 43°C έτσι η απόδοση του Φ/β συστήματος παραμένει σταθερή στο 14.5% για το διάστημα 10:00-18:00 την συγκεκριμένη μέρα. Επιπλέον η ψύξη αυξάνει την παραγόμενη ισχύ με διαφορά κατά μέσο όρο 10.8W.

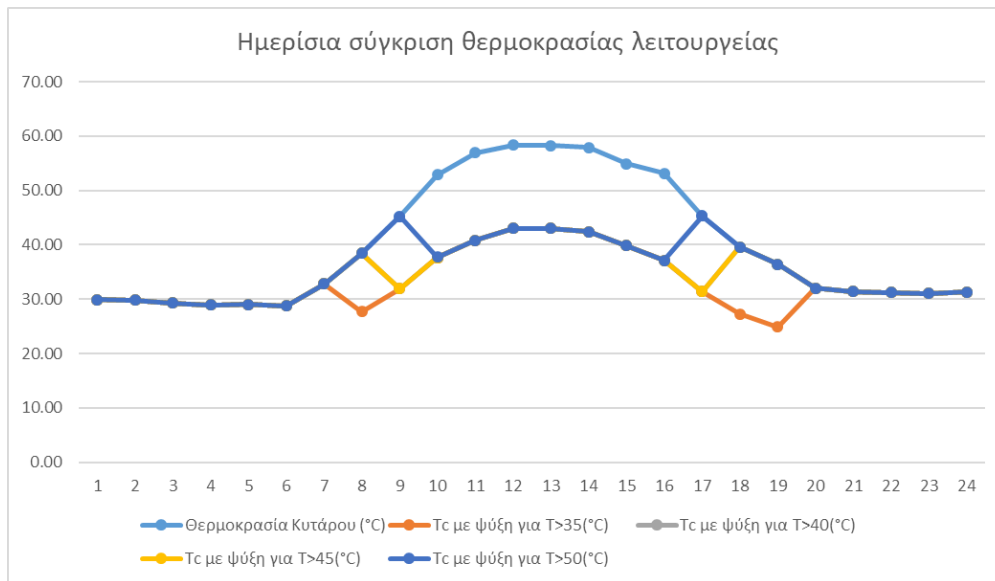
Συνοψίζοντας, το σύστημα ψύξης έχει την δυνατότητα να μειώσει την θερμοκρασία λειτουργίας των φ/β κελιών κατά 15.8°C. Επιπροσθέτως, η ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια του Φ/β συστήματος θα έχει αύξηση 70.5 Wh κερδίζοντας έτσι αύξηση 6.2% στην ισχύ του συστήματος την συγκεκριμένη μέρα.



Εικόνα:4.17: Διάγραμμα Απόδοσης Φ/β 29/07/2009



Εικόνα 4.18: Διάγραμμα Ισχύος Φ/β 29/07/2009



Εικόνα 4.19: Διάγραμμα Θερμοκρασίας Λειτουργείας Φ/β 29/07/2009

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα προσομοίωσης

Ημέρα έτους	Όρα μέτρησης	Tc με ψύξη για T>35(°C)	Tc με ψύξη για T>40(°C)	Tc με ψύξη για T>45(°C)	Tc με ψύξη για T>50(°C)	PPV(χωρίς ψύξη)(KWh)	PPV(με ψύξη)T>35(KWh)	PPV(με ψύξη)T>40(KWh)	PPV(με ψύξη)T>45(KWh)	PPV(με ψύξη)T>50(KWh)	Απόδοση Φ/β (χωρίς ψύξη)	Απόδοση Φ/β (με ψύξη) T>35	Απόδοση Φ/β (με ψύξη) T>40	Απόδοση Φ/β (με ψύξη) T>45	Απόδοση Φ/β (με ψύξη) T>50
210	1	29.88	29.88	29.88	29.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.21	15.21	15.21	15.21	15.21
210	2	29.81	29.81	29.81	29.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.22	15.22	15.22	15.22	15.22
210	3	29.30	29.30	29.30	29.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.26	15.26	15.26	15.26	15.26
210	4	28.95	28.95	28.95	28.95	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.28	15.28	15.28	15.28	15.28
210	5	28.99	28.99	28.99	28.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.28	15.28	15.28	15.28	15.28
210	6	28.76	28.76	28.76	28.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.30	15.30	15.30	15.30	15.30
210	7	32.83	32.83	32.83	32.83	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	14.97	14.97	14.97	14.97	14.97
210	8	27.70	38.44	38.44	38.44	1.51	1.51	1.51	1.51	1.51	14.52	15.38	14.52	14.52	14.52
210	9	31.96	31.98	31.98	45.20	2.77	2.93	2.93	2.93	2.77	13.98	15.04	15.04	15.04	13.98
210	10	37.70	37.70	37.70	37.75	4.39	4.69	4.69	4.69	4.68	13.37	14.58	14.58	14.58	14.58
210	11	40.80	40.80	40.80	40.80	5.21	5.59	5.59	5.59	5.59	13.05	14.34	14.34	14.34	14.34
210	12	43.08	43.08	43.08	43.08	5.79	6.20	6.20	6.20	6.20	12.93	14.15	14.15	14.15	14.15
210	13	43.01	43.01	43.01	43.01	5.80	6.21	6.21	6.21	6.21	12.94	14.16	14.16	14.16	14.16
210	14	42.39	42.39	42.39	42.39	5.61	6.01	6.01	6.01	6.01	12.97	14.21	14.21	14.21	14.21
210	15	39.85	39.85	39.85	39.85	4.91	5.24	5.24	5.24	5.24	13.20	14.41	14.41	14.41	14.41
210	16	37.15	37.15	37.15	37.15	4.20	4.50	4.50	4.50	4.50	13.35	14.63	14.63	14.63	14.63
210	17	31.43	31.43	31.43	45.35	2.56	2.72	2.72	2.56	2.56	13.97	15.09	15.09	15.09	13.97
210	18	27.24	39.60	39.60	39.60	1.33	1.40	1.33	1.33	1.33	14.43	15.42	14.43	14.43	14.43
210	19	24.92	36.46	36.46	36.46	0.60	0.62	0.60	0.60	0.60	14.68	15.61	14.68	14.68	14.68
210	20	32.05	32.05	32.05	32.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.04	15.04	15.04	15.04	15.04
210	21	31.38	31.38	31.38	31.38	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.09	15.09	15.09	15.09	15.09
210	22	31.26	31.26	31.26	31.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.10	15.10	15.10	15.10	15.10
210	23	31.03	31.03	31.03	31.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.12	15.12	15.12	15.12	15.12
210	24	31.36	31.36	31.36	31.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	15.09	15.09	15.09	15.09	15.09

Κεφάλαιο 5

5.1 Συμπεράσματα

Τα βασικά συμπεράσματα της Εργασίας είναι τα ακόλουθα:

1. Η ενσωμάτωση συστήματος ψύξης σε φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας δεν είναι προσοδοφόρα καθώς το κόστος του νερού είναι παραπάνω από το όφελος στην απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
2. Παρατηρήθηκε ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας ενεργοποίησης των ψεκαστών είχε αποτέλεσμα και στην απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου και στην μείωση κατανάλωσης του νερού.
3. Οι υπολογισμοί μηνιαίων οφελών κατά κύριο λόγο στα υβριδικά συστήματα κατέγραψαν μια σχετική αύξηση τους καλοκαιρινούς μήνες με την ανάλογη θερμοκρασία ενεργοποίησης των ψεκαστών.
4. Για τα κλιματικά δεδομένα των Χανίων, η συνολική παραγόμενη ενέργεια (kWh) εμφανίζει μια αρκετά μεγάλη αύξηση στους παρακάτω μήνες Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο και τον Αύγουστο κυμαίνεται πάλι σε πιο σταθερά επίπεδα.
5. Το σύστημα που παρατηρήθηκε να έχει το μεγαλύτερο καθαρό όφελος είναι το υβριδικό σύστημα με παροχή από το δίκτυο του ΟΑΔΥΚ, με θερμοκρασία ενεργοποίησης ψεκαστών 40°C. Συγκεκριμένα για συστοιχία 40 Φ/β, επιφάνειας 1.44 m² με συνολική επιφάνεια Φ/β συστοιχίας 57.6 m², ονομαστική ισχύς συστήματος 10 KW και μάζα νερού παροχής 100 m³/h παρατηρήθηκε καθαρό όφελος 31.21€ χωρίς να λάβουμε υπόψη το κόστος της εγκατάστασης του συστήματος ψύξης, της δεξαμενής καθώς και τις ρυθμίσεις που αφορούν τον συμψηφισμό παραγόμενης-καταναλισκόμενης ενέργειας (net-metering).
6. Από το σχεδιάγραμμα της εικόνας 4.16 παρατηρείται η άμεση σχέση θερμοκρασίας λειτουργίας-παραγόμενης ενέργειας Φ/Β, καθώς είναι ξεκάθαρο πως όταν η θερμοκρασία εκκίνησης λειτουργίας των ψεκαστών είναι χαμηλότερη τότε η θερμοκρασία του Φ/Β είναι και αυτή αντίστοιχα χαμηλότερη και έτσι η παραγόμενη ενέργεια από αυτό είναι πιο υψηλή.
7. Από τη εικόνα 4.15 μπορεί να παρατηρηθεί ότι τον μήνα Ιούλιο σε όλες τις περιπτώσεις ενεργοποίησης ψεκαστών υπήρχε η μεγαλύτερη κατανάλωση νερού.
8. Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι το χειρότερο οικονομικά σενάριο ήταν η περίπτωση χρήσης θερμοκρασίας ενεργοποίησης ψεκαστών στους 35°C με πάροχο την ΔΕΥΑΧ, καθώς το κόστος του νερού ξεπερνούσε κατά 47.33€ το κέρδος της ψύξης του συστήματος.

5.2 Πιθανές επεκτάσεις

Η Εργασία αυτή θα μπορούσε να επεκταθεί στις ακόλουθες κατευθύνσεις:

1. Το νερό το οποίο ψύχει τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν αποθηκεύεται και έτσι κοστίζει όσο η τιμή του κάθε πάροχου. Στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιούμε την πίεση του νερού από το δίκτυο για να ψύξουμε τα πλαίσια. Εάν εγκατασταθεί πιεστικό σύστημα το οποίο θα αντλεί νερό από δεξαμενή τότε θα σταματήσει η κατανάλωση του νερού και το κόστος του νερού θα αντικατασταθεί από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της αντλίας πίεσης του νερού. Μια πιθανή μελέτη πάνω στην σχέση κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας (από την αντλία πίεσης νερού) με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (από το ΦΒ σύστημα το οποίο θα έχει αυξημένη απόδοση λόγω της ψύξης).
2. Η μελέτη έγινε σε σχετικά μικρή κλίμακα (που θα μπορούσε να αφορά μια μικρή επιχείρηση ή κάποια οικία), οπότε θα ήταν χρήσιμη η επέκτασή της σε μεγαλύτερη κλίμακα (π.χ., σε ένα φωτοβολταϊκό πάρκο).

Βιβλιογραφία

1. Passive cooling technology for photovoltaic panels for domestic houses. Shenyi Wu Chenguang Xiong
2. <https://el.wikipedia.org>
3. <http://www.solar-systems.gr/>
4. <http://www.selasenergy.gr/history.php>
5. <http://www.aveco.gr/a/pv/roofs/faq>
6. Thermal Management and Engineering Economics in CPV Design. Phil Blumenfeld Principal Mechanical Engineer Emcore Corp. Albuquerque NM James Foresi, Yei Lang, John Nagyvary Emcore Corp.
7. Resolve "Inconsistency of Flat Scissors", Old New Solar Cells Working in the US. Yoichiro Hata, ITIT MONOist
8. Measurement and analysis of evaporation from an inactive outdoor swimming pool. Charles C. Smith George Löf Randy Jones
9. HELAPCO Net Metering, May 2017
10. Σχεδιασμός και ανάπτυξη αυτόνομου συστήματος φωτισμού με φωτοβολταϊκό και διάταξης καταγραφής επιδόσεων λειτουργίας. Ερασμία Α. Καραλέξη Αθήνα, Μάρτιος 2012
11. Μέθοδοι βελτίωσης του βαθμού απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Μέτρηση του βαθμού απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων συναρτήσει της θερμοκρασίας Ζαφειρίου Λάζαρος Αποστόλου Αριστοτέλης Χατζηαθανασίου Βασίλειος Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2010.
12. ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΓΙΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ Περράκη Βασιλική, Πάτρα, Ιούνιος 2011
13. Μελέτη ημιαγωγών, Ντρίβας Ν
14. NREL (February 2012 edition)
15. Μελέτη Φωτοβολταϊκού Συστήματος Για Την Τροφοδοσία Θερμαντικών-Ψυκτικών Εγκαταστάσεων Εργοστασίου, Σταματίνα Ε. Πετρή, Κωνσταντίνος Θ. Δέρβος, Αθήνα, Δεκέμβριος 2014
16. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΥΒΡΙΔΙΚΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ/ΘΕΡΜΙΚΑ ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ, Τρυπαναγνωστόπουλος , Σ. Τσελεπής , Μ. Σουλιώτης , J. K. Τοπι, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πάτρας
17. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΥΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΑΔΕΙΟΔΟΤΗΣΗΣ”, Λουλούδας Α., : Ιωαννίδης Γ. Αναπ. Καθηγητής, Αθήνα, Οκτώβριος 2013
18. ΣΥΝΘΕΤΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΗΛΙΑΚΩΝ ΣΥΣΚΕΥΩΝ, ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΥ Ι. ΑΝΤΙΓΟΝΗ, ΤΡΥΠΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΣ Ι, Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος Φυσικής Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2013
19. Εξωτερικές συνθήκες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, Γκεβοργκιάν Αρμέν, Δρ. Νεκτάριος Βιδάκης, Ηράκλειο, Ιούνιος 2014
20. ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΓΙΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ», ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ ΑΘΑΝΑΣΙΑ, Περράκη Βασιλική, Πάτρα, Ιούνιος 2011
21. Ιωάννη Α. Κατσίγιαννη, “Βελτιστοποίηση δομής και οικονομική αξιολόγηση απομονωμένου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας “Χανιά , Ιούνιος 2008