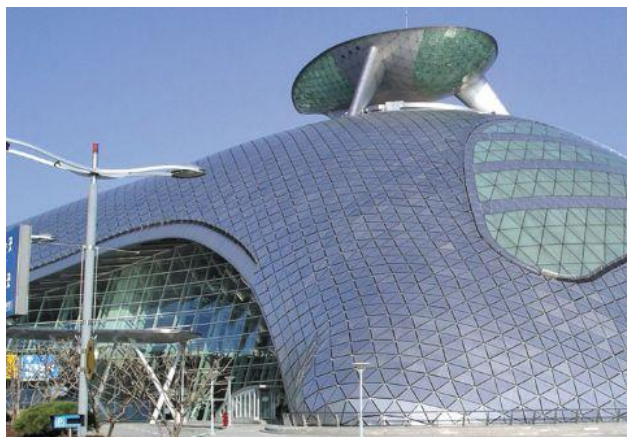




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



Διπλωματική Εργασία

Σχεδίαση φωτοβολταϊκών συστημάτων ενσωματωμένων σε κτίρια

Ασημάκης Γιαννόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής: Κουτρούλης Ευτύχιος (Αναπλ. Καθηγητής)

Μέλη Επιτροπής: Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος (Καθηγητής)

Σταυρακάκης Γεώργιος (Καθηγητής)

Χανιά 2018

Πρόλογος

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Κουτρούλη Ευτύχιο για την βοήθειά του και την συνεχή καθοδήγησή του, καθώς επίσης και τους καθηγητές κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο και κ. Σταυρακάκη Γεώργιο για την συμμετοχή τους στην επιτροπή.

Φυσικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδερφό μου, που ήταν αρωγοί σε όλη αυτή τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Χρυσό Γρηγόρη για την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε αλλά ιδιαίτερη αναφορά και ευχαριστήρια θα ήθελα να κάνω στον μεταπτυχιακό φοιτητή κ. Μαλισόβα Αθανάσιο, του οποίου η βοήθεια και η στήριξη συνέβαλε καταλυτικά στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους του φίλους που μου συμπαραστάθηκαν όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Σε μια εποχή που η οικονομική κρίση έχει κάνει αισθητή την παρουσία της, που το περιβάλλον μολύνεται ολοένα και περισσότερο, ο άνθρωπος βρίσκεται σε μια διαρκή αναζήτηση τρόπων ικανών να ξεπεράσει την αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας τέτοιος τρόπος είναι και η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Η φωτοβολταϊκή τεχνολογία αποτελεί μια ώριμη και ταυτόχρονα μια περιζήτητη λύση τα τελευταία χρόνια. Υπάρχουν όμως εφαρμογές της που ακόμα δεν είναι ευρέως διαδεδομένες. Μια τέτοια εφαρμογή που αναμένεται να κυριαρχήσει μελλοντικά είναι η ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίρια.

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται αναλυτικά η δημιουργία ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος ενσωματωμένου σε κτίριο με στόχο την πλήρη κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου του καταναλωτή. Η διαστασιολόγηση του συστήματος αφορά την πλήρη κάλυψη του φορτίου παράλληλα με την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος για μια χρονική διάρκεια 20 ετών. Η βελτιστοποίηση του εν λόγω συστήματος πραγματοποιήθηκε με την χρήση των γενετικών αλγορίθμων οι οποίοι ξεχωρίζουν για την απόδοσή τους σ' αυτή την κατηγορία προβλημάτων.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	12
2.1 Ηλιακή ακτινοβολία	12
2.1.1 Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας.....	13
2.1.2 Μορφές μετατροπής της ηλιακής ενέργειας	15
2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	15
2.2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία.....	16
2.2.2 Κατηγορίες και χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων	18
2.2.3 Χαρακτηριστικά λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων	20
2.2.4 Προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων.....	23
3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ.....	26
3.1 Περιγραφή δομικών στοιχείων των συσσωρευτών	26
3.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών	28
3.3 Τρόποι Σύνδεσης των Συσσωρευτών	30
3.4 Τύποι Συσσωρευτών	31
3.4.1 Συσσωρευτές Μολύβδου	32
3.4.2 Συσσωρευτές Νικελίου - Καδμίου	34
3.4.3 Συσσωρευτές Λιθίου.....	35
4. ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ & ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ DC/AC	37
4.1 Ρυθμιστές φόρτισης συσσωρευτών	37
4.2 Μετατροπείς ισχύος DC/AC	41
5. ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ	43
5.1 Ανάλυση της λύσης του προβλήματος με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων .	43
5.2 Αρχικοποίηση αλγορίθμου	44
5.3 Μοντελοποίηση του προβλήματος.....	46
5.4 Πράξη Διασταύρωσης.....	51
5.5 Πράξη Μετάλλαξης	52
5.6 Η λειτουργία των αλγορίθμων “dyn_bnd” και “repair”	53
5.7 Συνθήκες τερματισμού εκτέλεσης του Γενετικού Αλγορίθμου	54
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	55
6.1 Παραδείγματα εφαρμογής σε κατοικίες.....	55
6.2 Σενάρια υπολογισμού	60
6.3 Αποτελέσματα.....	64
6.4 Διαγράμματα.....	69

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ	79
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι γνωστό, ότι στην πάροδο των τελευταίων 100 χρόνων η παγκόσμια οικονομία αναπτύχθηκε σε πολύ μεγάλο βαθμό. Κύριος παράγοντας αυτής της μεγάλης και σταθερής ανάπτυξης ήταν η χρήση των ορυκτών καυσίμων, όπως για παράδειγμα το φυσικό αέριο, ο λιθάνθρακας, το πετρέλαιο κ.α. Αναμενόμενο όμως ήταν, ότι η υπερβολική και παράλληλα αλόγιστη χρήση όλων αυτών των πηγών ενέργειας επέφερε προβλήματα στο περιβάλλον όπως μεγάλες ξηρασίες, άνοδο της στάθμης της θάλασσας κ.α. Ο συνδυασμός, των αποτελεσμάτων αυτών και της μεγάλης ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας είχε σαν αποτέλεσμα αναπτυγμένες χώρες και διάφοροι οργανισμοί να προχωρήσουν σε έρευνες για την αξιοποίηση και εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) [5].

Τα τελευταία χρόνια γίνεται όλο και πιο επιτακτική η ανάγκη για χρήση των ΑΠΕ. Τι είναι όμως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και από που προέρχονται; Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι μορφές ενέργειας που προκύπτουν από φυσικές πηγές όπως ο Ήλιος, ο άνεμος, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Η ανάγκη τους κρίνεται επιτακτική διότι πρόκειται για «ήπιες» και «φιλικές» μορφές ενέργειας προς το περιβάλλον. Με τον όρο «ήπιες» εννοούμε ότι για την εκμετάλλευσή τους δεν χρειάζονται ενεργητικές παρεμβάσεις όπως γίνεται στην εκμετάλλευση των ορυκτών καυσίμων (εξόρυξη, άντληση κ.α.). Όσον αφορά τον όρο «φιλικές» προς το περιβάλλον εννοούμε ότι δεν απελευθερώνουν διοξείδιο του άνθρακα, υδρογονάνθρακες ή γενικότερα τοξικά απόβλητα, πράγμα το οποίο γίνεται με τις υπόλοιπες μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται. Έτσι έχει γίνει πλέον κοινώς αποδεκτό ότι οι ΑΠΕ αποτελούν μια αφετηρία για την μείωση, αν όχι την πλήρη επίλυση, των ενεργειακών προβλημάτων [9].

Μία μορφή ΑΠΕ είναι η δέσμευση της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με χρήση κατάλληλων διατάξεων που ονομάζονται φωτοβολταϊκά στοιχεία. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούν μια κατηγορία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που στόχο έχουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς βέβαια αυτό να συνοδεύεται από εκπομπές ρυπογόνων ουσιών. Δύο κύρια χαρακτηριστικά που ωθούν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια στις

πρώτες επιλογές χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η αθόρυβη λειτουργία τους και η μεγάλη διάρκεια ζωής τους.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα τα διακρίνουμε σε δύο κατηγορίες, στα απομονωμένα ή αλλιώς εκτός δικτύου συστήματα και στα συνδεδεμένα στο δίκτυο. Τα συστήματα που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο έχουν ως στόχο να δίνουν όλη την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αντίθετα τα απομονωμένα ή εκτός δικτύου συστήματα έχουν ως βασικό χαρακτηριστικό τους το ότι παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να είναι συνδεδεμένα στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο. Μια κατηγορία των απομονωμένων ή εκτός δικτύου συστημάτων είναι όταν η παραγόμενη ενέργεια καλύπτει εξολοκλήρου τις ανάγκες της εγκατάστασης, οπότε τότε το σύστημα ονομάζεται αυτόνομο. Στην περίπτωση που στην παραγωγή ενέργειας συμμετέχει και άλλη πηγή ΑΠΕ (π.χ. ανεμογεννήτρια) τότε το σύστημα ονομάζεται υβριδικό.

Τα πρώτα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα εφαρμόστηκαν για την ηλεκτροδότηση αγροτικών περιοχών. Στη συνέχεια άρχισαν να αξιοποιούνται σε μικρά συστήματα φωτισμού που υπήρχαν σε μεγαλύτερα συστήματα (π.χ. νοσοκομεία, σχολεία). Επίσης χρήση βρίσκουν και σε απομακρυσμένες κατοικίες στα οποία η επέκταση του δικτύου έχει μεγαλύτερο κόστος από την εγκατάσταση ενός αυτόνομου συστήματος. Μια άλλη χρήση τους είναι, σαν εφεδρικά συστήματα σε περιοχές που συμβαίνουν διακοπές ρεύματος μεγάλης διάρκειας. Με το πέρασμα των χρόνων και εκτιμώντας παράλληλα την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων, σε συνδυασμό με την επικείμενη οικονομική κρίση που πλήττει τις περισσότερες χώρες, η χρήση τους καταλαμβάνει ολοένα και μεγαλύτερο έδαφος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα όλο και περισσότερες κατοικίες, οργανισμοί, κτίρια κ.α. να προχωρούν στην αξιοποίηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων.



Σχήμα 1.1 Παράδειγμα φωτοβολταϊκού συστήματος ενσωματωμένου σε επιφάνεια κτιρίου.



Σχήμα 1.2 Παράδειγμα φωτοβολταϊκού συστήματος ενσωματωμένου στην οροφή κτιρίου.

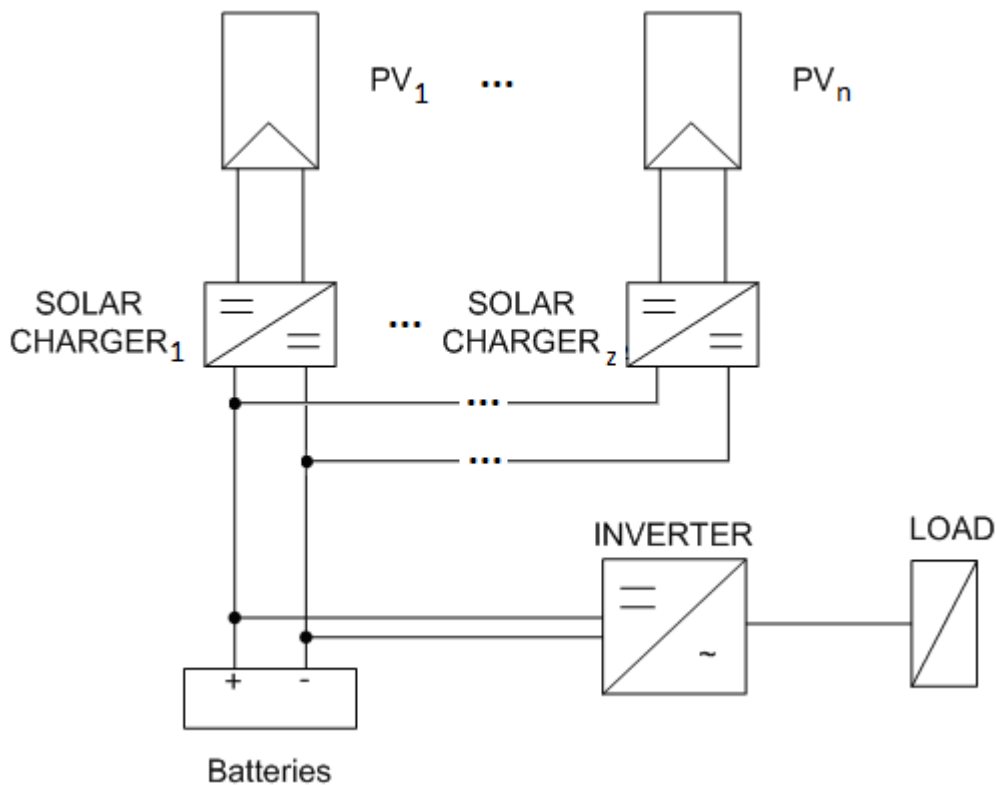
Σ' αυτό το σημείο, θα αποτελούσε μεγάλη παράλειψη αν δεν αναφέραμε ότι η καλπάζουσα εξέλιξη της τεχνολογίας μας έχει οδηγήσει στην χρήση των φωτοβολταϊκών στοιχείων και σε άλλους τομείς όπως για παράδειγμα τα ηλιακά αυτοκίνητα. Εν κατακλείδι, συμπεραίνουμε ότι το εύρος των εφαρμογών των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι αρκετά μεγάλο και συνεχώς επεκτεινόμενο.

Σημαντική εφαρμογή της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας αποτελεί η ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε κτίρια. Στην περίπτωση αυτή, η αξιοποίηση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε στέγες ή ανάλογες διαθέσιμες επιφάνειες των κτιρίων (Σχ. 1.1-1.2). Ένας άλλος τρόπος είναι η χρήση εύκαμπτων φωτοβολταϊκών πλαισίων, η εγκατάσταση των οποίων είναι σχετικά εύκολη και οικονομική. Επίσης μπορούν να τοποθετηθούν φωτοβολταϊκά πλαίσια και ως δομικά στοιχεία αυξάνοντας έτσι την οικονομική απόδοση του συστήματος λόγω της μείωσης του κόστους των οικοδομικών υλικών. Τέλος, μπορούν να εγκατασταθούν διάφανα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε προσόψεις, οροφές και παράθυρα κτιρίων.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη λογισμικού για τον βέλτιστο σχεδιασμό ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος ενσωματωμένου σε κτίριο, για την πλήρη τροφοδότηση του με ηλεκτρική ενέργεια και με όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος για μια χρονική διάρκεια 20 ετών. Το αυτόνομο φωτοβολταϊκό μας σύστημα θα περιλαμβάνει τα παρακάτω στοιχεία:

- ✓ Τα **φωτοβολταϊκά πλαίσια** που μετατρέπουν την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια.
- ✓ Τους **ηλεκτρικούς συσσωρευτές** (μπαταρίες) διότι απαιτείται η αποθήκευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας για το λόγο ότι η παραγωγή της δεν συμπίπτει πάντα χρονικά με την κατανάλωσή της.
- ✓ Τον **ρυθμιστή φόρτισης** που είναι υπεύθυνος για την σωστή φόρτιση και αποφόρτιση των συσσωρευτών του συστήματος.
- ✓ Τον **αντιστροφέα** (inverter) που είναι απαραίτητος για την μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη προκειμένου να τροφοδοτηθούν τα ηλεκτρικά φορτία [2].

Τα παραπάνω στοιχεία αναλύονται πλήρως, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά τους και τον τρόπο λειτουργίας τους, στα Κεφάλαια που ακολουθούν. Το γενικό διάγραμμα του ενσωματωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο μελετάται στην παρούσα εργασία φαίνεται στο Σχ. 1.3. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι το σύστημα αποτελείται από συστοιχίες φωτοβολταϊκών πλαισίων (συνδεδεμένων σε σειρά ή/και παράλληλα), οι οποίες συνδέονται με τους φορτιστές. Το φορτίο που παράγεται και δεν καταναλώνεται άμεσα αποθηκεύεται σε μπαταρίες και στη συνέχεια μέσω ενός μετατροπέα χρησιμοποιείται προς κατανάλωση.



Σχήμα 1.3: Το φωτοβολταϊκό σύστημα για ενσωμάτωση σε κτίρια, το οποίο μελετήθηκε στην παρούσα εργασία.

Βέβαια για την δημιουργία αυτού του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι προφανές ότι τα φωτοβολταϊκά πάνελ θα ενσωματωθούν σε επιφάνειες που ο χρήστης επιθυμεί. Ουσιαστικά η παρούσα εργασία αποτελείται από τα εξής τμήματα: πρώτα απ' όλα θα πρέπει να γνωρίζουμε τις διαθέσιμες επιφάνειες και στη συνέχεια θα υπολογίζουμε το μέγιστο αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων που μπορούμε να τοποθετήσουμε. Επίσης είσοδο του συστήματός μας αποτελεί και ο γεωμετρικός προσανατολισμός των διαθέσιμων επιφανειών ο οποίος είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας. Όλα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και οι ρυθμιστές φόρτισης που θα χρησιμοποιηθούν συνδέονται με ένα σύνολο μπαταριών ικανό για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Είσοδος του συστήματος μας είναι και το φορτίο που καταναλώνει το κτίριο, για όλες τις ημέρες του χρόνου και για όλες τις ώρες της ημέρας και το οποίο είναι απαραίτητο να καλύψουμε πλήρως. Σύμφωνα λοιπόν με τις εισόδους του συστήματος και με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων προκύπτει ο κατάλληλος αριθμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων που θα πρέπει να τοποθετηθεί σε κάθε επιφάνεια από τις διαθέσιμες. Αυτονόητο είναι πλέον ότι όλα τα παραπάνω θα πρέπει να γίνουν με στόχο το χαμηλότερο κόστος για την χρονική διάρκεια που έχουμε αναφέρει προηγουμένως.

Η ανάλυση του παραπάνω συστήματος περιγράφεται αναλυτικά στα επόμενα Κεφάλαια, το περιεχόμενο των οποίων είναι το εξής: στο πρώτο Κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται μια αναφορά στη χρησιμότητα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στην τεχνολογική εξέλιξη των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των μερών και της συνδεσμολογίας τους, ενός φωτοβολταϊκού συστήματος που θα μπορούσε να ενσωματωθεί σε κτίρια. Στο δεύτερο Κεφάλαιο γίνεται μια εκτενής αναφορά στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο και ακολουθεί μια διεξοδική ανάλυση στον τρόπο λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Το τρίτο Κεφάλαιο αφορά τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές. Γίνεται πλήρης αναφορά στη δομή τους, στα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους και στις ιδιότητές τους και στη συνέχεια αναλύονται όλα τα είδη συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σε ανάλογα συστήματα. Στο τέταρτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα χαρακτηριστικά και οι σημαντικές λειτουργίες των ρυθμιστών τάσης και των μετατροπέων ισχύος. Αφού λοιπόν έγινε η ανάλυση και η περιγραφή όλων των στοιχείων του φωτοβολταϊκού συστήματος που θέλουμε να υλοποιήσουμε, ακολουθεί στο πέμπτο Κεφάλαιο η πλήρης ανάλυση της μεθόδου που χρησιμοποιήσαμε για την διαστασιολόγηση του συστήματος μας. Στο έκτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται αποτελέσματα σχεδιασμού φωτοβολταϊκών συστημάτων τα οποία είναι ενσωματωμένα σε κτίρια. Τέλος, ακολουθεί το έβδομο Κεφάλαιο, που περιέχει τα συμπεράσματα και μερικές από τις μελλοντικές βελτιώσεις που μπορεί να υποστεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

2. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

2.1 Ηλιακή ακτινοβολία

Ο Ήλιος είναι ο αστέρας του ηλιακού μας συστήματος και το πιο λαμπρό σώμα στον ουρανό. Η μορφή του Ήλιου μοιάζει με σφαίρα η οποία έχει διάμετρο 142.000.000 km και θερμοκρασία 5800 βαθμούς Kelvin. Παρακάτω δίνονται τα συστατικά από τα οποία αποτελείται ο Ήλιος, καθώς επίσης και τα ποσοστά για καθένα από αυτά, τα οποία είναι: 78% υδρογόνο, 20% ήλιο και 2% άλλα υλικά. Από την ονομασία της και μόνο είναι προφανές ότι η ηλιακή ενέργεια σχετίζεται άμεσα με τον Ήλιο και τις ιδιότητες του. Από μελέτες έχει προκύψει ότι πηγή της ηλιακής ενέργειας είναι η σύντηξη 4 ατόμων υδρογόνου (H_2) από την οποία προκύπτει ένα άτομο ηλίου (H_3). Η ενέργεια η οποία παράγεται στον Ήλιο (βασική πηγή ενέργειας της ατμόσφαιρας) διοχετεύεται στη Γη περνώντας μέσα από το διάστημα ως ηλεκτρομαγνητική ενέργεια [2].

Έτσι, πολύ μεγάλες ποσότητες ενέργειας που παράγει ημερησίως ο Ήλιος φτάνουν με την ηλιακή ακτινοβολία σε όλη τη Γη. Οι ποσότητες αυτές βέβαια που φτάνουν στην επιφάνεια της Γης διαφέρουν ανάλογα με την γεωγραφική θέση, την ημέρα, την εποχή και τη νεφοκάλυψη. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται με δύο τρόπους: τις θερμικές και φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Στην πρώτη περίπτωση η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας που βρίσκει εφαρμογή στη θέρμανση του νερού και τη μετατροπή του σε ατμό για την κίνηση στροβίλων. Στην δεύτερη περίπτωση η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό με την βοήθεια συστοιχιών φωτοβολταϊκών στοιχείων.

Σ' αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει επάνω σε μια επιφάνεια είτε οριζόντια είτε κεκλιμένη, αποτελείται από τρεις συνιστώσες: την άμεση, τη διάχυτη και την ανακλώμενη. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι αυτή η οποία φτάνει απευθείας από τον Ήλιο στην επιφάνεια της Γης χωρίς να έχει υποστεί σκέδαση στη διαδρομή της μέσα στην ατμόσφαιρα και όπως είναι λογικό η ένταση της εξαρτάται από την απόσταση

Ήλιου - Γης, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, το υψόμετρο του τόπου, το ύψος στο οποίο βρίσκεται ο Ήλιος, την ηλιακή απόκλιση, την κλίση της επιφάνειας επάνω στην οποία προσπίπτει, καθώς και από την απορρόφηση και διάχυση την οποία δέχεται μέσα στην ατμόσφαιρα. Η δεύτερη συνιστώσα, η διάχυτη δηλαδή ηλιακή ακτινοβολία είναι το ποσό εκείνο το οποίο φθάνει στην επιφάνεια του εδάφους μετά την ανάκλαση ή σκέδαση που δέχεται μέσα στην ατμόσφαιρα και εξαρτάται από το ύψος στο οποίο βρίσκεται ο Ήλιος, το υψόμετρο του τόπου, το ποσό και το είδος των νεφών, καθώς και από την σκέδαση που υφίσταται στην ατμόσφαιρα. Τέλος, η τρίτη συνιστώσα που είναι η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία δημιουργείται όταν προσπίπτει πάνω σε λεία και γυαλιστερά υλικά ή από ανακλάσεις του εδάφους. Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται μια συγκεκριμένη επιφάνεια είναι το άθροισμα των τριών αυτών συνιστωσών.

2.1.1 Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας

Ένα στοιχείο της ηλιακής ενέργειας που ταυτόχρονα αποτελεί και σημαντικό μέγεθος των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ορίζουμε ως ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας το ποσό της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει σε 1 m^2 επιφάνειας σε χρόνο 1 sec , σύμφωνα με τη σχέση [1]:

$$B = \frac{E}{S \cdot t} = \frac{P}{S} (\text{W/m}^2) \quad (1)$$

όπου:

B: ένταση ηλιακής ακτινοβολίας

E: ενέργεια

S: εμβαδόν επιφάνειας

t: χρόνος

P: ισχύς

Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οποιοδήποτε σημείο της διαδρομής ανάμεσα στον Ήλιο και την επιφάνεια της Γης δίνεται από τη σχέση [23]:

$$B_R = \frac{P_0}{4\pi R^2} \quad (2)$$

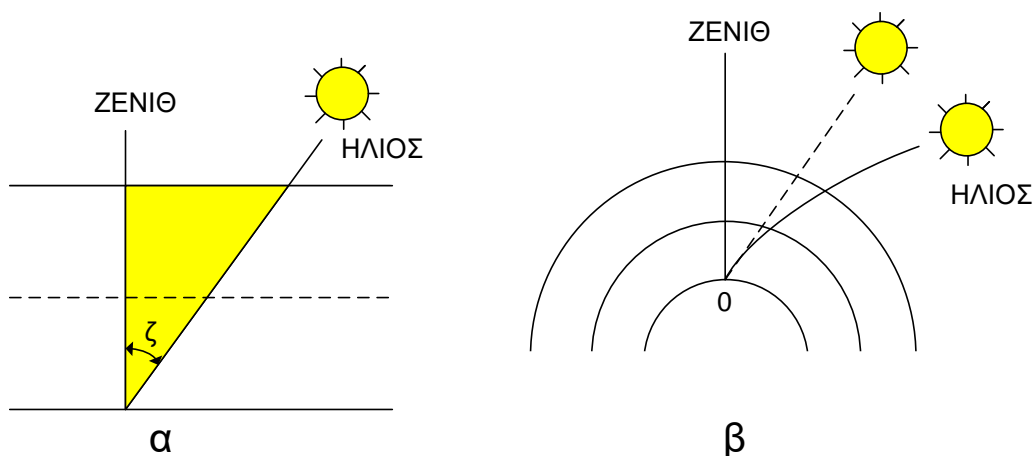
όπου:

P_0 : ισχύς που εκπέμπεται από τον Ήλιο

R: η απόσταση ήλιου-γης

Όπως καταλαβαίνουμε από τον παραπάνω τύπο, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας καθώς προσπίπτει στην γήινη ατμόσφαιρα ελαττώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης, βέβαια αυτό ισχύει για ιδανικές συνθήκες. Στην πραγματικότητα όμως υπάρχουν και απώλειες ενέργειας στην διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας οι οποίες συνοπτικά είναι οι ακόλουθες: το 18% της ακτινοβολίας απορροφάται στα διάφορα στρώματα, όπως όζον, σκόνη, υδρατμοί, το 72 % φτάνει απευθείας στην επιφάνεια της Γης και το υπόλοιπο 10% χωρίζεται σε δύο μέρη. Το ένα μέρος που αποτελεί το 7% φθάνει στην Γη μετά από διάχυση και το δεύτερο μέρος το οποίο είναι το 3% επιστρέφει στο διάστημα. Άρα συμπεραίνουμε ότι μόνο το 79% της ηλιακής ακτινοβολίας καταλήγει στην επιφάνεια της Γης [2].

Όπως προαναφέραμε καθώς απομακρυνόμαστε από τον Ήλιο η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης. Η τροχιά που ακολουθεί η Γη γύρω από τον Ήλιο δεν είναι σφαιρική αλλά ελλειπτική. Αυτό σημαίνει ότι η απόσταση μεταξύ τους συνεχώς μεταβάλλεται. Σύμφωνα με μετρήσεις, σε μια κάθετη επιφάνεια στην αρχή της ατμόσφαιρας της Γης, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 1367 W/m^2 . Επειδή όμως μόνο το 79% της ακτινοβολίας φτάνει στην επιφάνεια της Γης, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίζεται στα 1000 W/m^2 . Επίσης, εύκολα αντιλαμβανόμαστε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαδρομή που ακολουθεί η ακτινοβολία μέχρι την επιφάνεια της Γης τόσο μεγαλύτερη είναι και η απορρόφηση που δέχεται. Επιπροσθέτως όταν ο Ήλιος είναι στο ζενίθ του τόπου, τότε η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η ελάχιστη. Η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στις ακτίνες του Ήλιου και στη κατακόρυφη του τόπου ονομάζεται Ζενίθεια Απόσταση (ζ) [1]. Ακολουθεί η σχηματική αναπαράσταση της Ζενίθειας Απόστασης.



Σχήμα 2.2: Ζενίθεια απόσταση [1].

Επομένως η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας σε σχέση με την Ζενίθεια Απόσταση δίνεται από την σχέση: $B=B_0 \cdot \cos(\zeta)$. Άρα η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας μεταβάλλεται στη διάρκεια της ημέρας μεταξύ μιας μηδενικής τιμής η οποία ισχύει κατά τη διάρκεια της νύχτας και μιας μέγιστης τιμής η οποία προκύπτει όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο ζενίθ του τόπου [2].

2.1.2 Μορφές μετατροπής της ηλιακής ενέργειας

Γενικά προκειμένου να εκμεταλλευτούμε την ηλιακή ενέργεια πρέπει πρώτα να τη μετατρέψουμε σε κάποια άλλη μορφή ενέργειας. Υπάρχουν δυο τρόποι χρήσης της ηλιακής ενέργειας [5]:

1. Υπό τη μορφή θερμότητας. Για τη μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε θερμότητα χρησιμοποιούνται δυο ειδών συστήματα:

- a) Τα παθητικά ηλιακά συστήματα
- b) Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα

2. Υπό τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα παθητικά ηλιακά συστήματα που χρησιμοποιούνται κυρίως στα κτίρια, εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια για θέρμανση των χώρων κυρίως το χειμώνα. Όσον αφορά τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα αυτά συλλέγουν την ηλιακή ακτινοβολία και στη συνέχεια τη μεταφέρουν με τη μορφή θερμότητας σε νερό, αέρα ή οποιοδήποτε ρευστό. Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα μπορούν να βρουν πολλές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα σε θερμικές χρήσεις σε περιβάλλοντα χαμηλών θερμοκρασιών, εξαιτίας της πολύ απλής τεχνολογίας που εφαρμόζεται στα συστήματα αυτά [5]. Στην παρούσα εργασία, όμως, θα ασχοληθούμε με την μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

2.2 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Ξεκινώντας ιστορικά, αναφέρουμε ότι το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από ένα Γάλλο φυσικό επιστήμονα Alexandre Edmond Becquerel το 1839, ο οποίος ανακάλυψε ότι μπορεί να παραχθεί ηλεκτρικό φορτίο από συγκεκριμένες δομές όταν εκτίθενται στο φως (βούτηξε ράβδους πλατίνας σε υγρούς ηλεκτρολύτες). Στη συνέχεια οι Αμερικάνοι Adams και Day το 1876, χρησιμοποίησαν έναν κρύσταλλο σεληνίου για να επιδείξουν το φαινόμενο αυτό έχοντας αποδοτικότητα ελαφρώς μεγαλύτερη του 1%. Το 1949 ακολούθησαν οι Αμερικάνοι Shockley, Bardeen και Brattain οι οποίοι ανακάλυψαν την κρυσταλλολυχνία και προχώρησαν στον ορισμό της φυσικής των ενώσεων **p** και **n** σε υλικά από καθαρούς ημιαγωγούς. Αυτό είχε

σαν αποτέλεσμα να δημιουργηθεί η πρώτη φωτοβολταϊκή γεννήτρια με βαθμό απόδοσης περίπου 6% ενώ το 1956 φτιάχτηκε μια άλλη από σιλικόνη με βαθμό απόδοσης 10%. Η έναρξη εξερεύνησης του διαστήματος έδωσε πολλές ευκαιρίες για εφαρμογές των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Για παράδειγμα το 1958, πραγματοποιήθηκε η πρώτη δοκιμαστική αποστολή 108 φωτοβολταϊκών γεννητριών στο διάστημα. Το 1970, ζητήθηκε για διαστημικές εφαρμογές, η παραγωγή φωτοβολταϊκών στοιχείων συνολικής επιφάνειας 500m². Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι το κόστος των φωτοβολταϊκών στοιχείων τις εποχές αυτές ήταν πολύ μεγάλο με αποτέλεσμα η χρήση τους να ήταν περιορισμένη. Με το πέρασμα όμως των χρόνων και την συνεχή εξέλιξη του τρόπου παραγωγής τους, το κόστος άρχισε να μειώνεται. Σήμερα πολλές είναι οι χώρες που έχουν επενδύσει τεράστια ποσά στην μεγαλύτερη και ταυτόχρονα καλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας (για παράδειγμα Δανία, Γερμανία κ.α) [11].

2.2.1 Φωτοβολταϊκά στοιχεία

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι διατάξεις που μετατρέπουν άμεσα το ηλιακό φως σε ηλεκτρικό ρεύμα. Συγκεκριμένα, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι διατάξεις ημιαγωγών, φτιαγμένες συνήθως από πυρίτιο και οι οποίες δεν περιέχουν κανένα υγρό ή διαβρωτική χημική ουσία. Ένα από τα χαρακτηριστικά του πυριτίου, το οποίο είναι και το δεύτερο αφθονότερο στοιχείο στη Γη, είναι ότι όταν συνδυάζεται με ένα ή περισσότερα υλικά, παρουσιάζει ηλεκτρικές ιδιότητες στο φως του Ήλιου, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να διεγείρονται και να κινούνται μέσα σε αυτό. Αυτή η φωτοβολταϊκή επίδραση οδηγεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατά την διάρκεια της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν αθόρυβα, ενώ παράλληλα δεν μολύνουν το περιβάλλον.

Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα πυριτίου ενισχυμένο με φώσφορο, το οποίο είναι σε επαφή με ένα στρώμα από πυρίτιο ενισχυμένο με βόριο. Όταν το ηλιακό φως προσπίπτει στο φωτοβολταϊκό στοιχείο, ένα μέρος της ακτινοβολίας διεγείρει τα ηλεκτρόνια τα οποία κινούνται ελεύθερα μέσα στον ημιαγωγό. Η δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου αναγκάζει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να κινηθούν προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παράγεται συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα, η ισχύς του οποίου εξαρτάται από τη ροή των ηλεκτρονίων και τη τάση στα άκρα του φωτοβολταϊκού κυττάρου.

Κάθε άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια και σύμφωνα με την ηλεκτρονιακή δομή αυτά είναι κατανεμημένα σε τρεις στοιβάδες, η πρώτη έχει δύο, η δεύτερη οκτώ και η εξωτερική στοιβάδα έχει 4 ηλεκτρόνια τα οποία συμμετέχουν σε δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου σχηματίζοντας έτσι την κρυσταλλική πυραμιδική δομή του καθαρού πυριτίου. Το καθαρό κρυσταλλικό πυρίτιο είναι κακός αγωγός του ηλεκτρισμού. Όταν διοχετεύεται ενέργεια στο

κρυσταλλικό πυρίτιο, κάποια ηλεκτρόνια διεγείρονται με αποτέλεσμα να σπάζουν τους δεσμούς τους και να απομακρύνονται προς γειτονικά τους άτομα. Έτσι δημιουργούν διαθέσιμες θετικά φορτισμένες "οπές" στη δομή του υλικού. Οι διαθέσιμες αυτές "οπές" καλύπτονται από ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων και έτσι δημιουργείται ροή ηλεκτρονίων στο υλικό. Επειδή ο αριθμός των ηλεκτρονίων που μπορούν να κινηθούν δεν είναι μεγάλος για να χρησιμεύσουν στην παραγωγή ηλεκτρισμού, εισάγονται ετεροάτομα στην κρυσταλλική δομή, όπως π.χ. φωσφόρου. Από την ηλεκτρονιακή δομή γνωρίζουμε ότι η εξωτερική στοιβάδα του φωσφόρου έχει πέντε ηλεκτρόνια από τα οποία τα τέσσερα συμμετέχουν σε δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου, ενώ το πέμπτο συγκρατείται ηλεκτροστατικά από τον πυρήνα. Το συγκεκριμένο ηλεκτρόνιο απαιτεί πολύ χαμηλή ενέργεια για να κινηθεί στο κρυσταλλικό πλέγμα με αποτέλεσμα τα περισσότερα από αυτά τα ηλεκτρόνια να ελευθερώνονται και να γίνονται φορείς ηλεκτρικού ρεύματος, ο αριθμός των οποίων είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αριθμό των φορέων του κρυσταλλικού πυριτίου.

Σε περίπτωση ανάμειξης κρυσταλλικού πυριτίου με άτομα φωσφόρου δημιουργείται ημιαγωγός τύπου N. Στην περίπτωση όμως που έχουμε ανάμειξη κρυσταλλικού πυριτίου με βόριο προκύπτει ημιαγωγός τύπου P. Το βόριο από την ηλεκτρονιακή του δομή έχει τρία ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα που παίρνουν μέρος σε δεσμούς με άτομα πυριτίου. Επειδή σε κάθε άτομο χρειάζονται 8 ηλεκτρόνια για τη συμπλήρωση της εξωτερικής τους στοιβάδας, στην εξωτερική στοιβάδα του βορίου υπάρχουν διαθέσιμες δύο ελεύθερες θέσεις ηλεκτρονίων, δημιουργώντας αντίστοιχες θετικά φορτισμένες "οπές" στη δομή του υλικού. Η κατάληψη των "οπών" από ηλεκτρόνια γειτονικών ατόμων δίνει την εικόνα διάδοσής τους στο υλικό ή μεταφοράς θετικών φορτίων στην κρυσταλλική δομή του ημιαγωγού. Αν έρθουν σε επαφή οι ημιαγωγοί τύπου N και P τότε σχηματίζεται ηλεκτρικό πεδίο. Συγκεκριμένα τα ηλεκτρόνια του πυριτίου τύπου N κινούνται προς τις κενές θέσεις του πυριτίου τύπου P με σκοπό να τις καλύψουν. Όταν γίνει η ένωση των δύο υλικών έχουμε ισορροπία με αποτέλεσμα να δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα στις δύο πλευρές. Το ηλεκτρικό πεδίο αυτό λειτουργεί σαν ηλεκτρόδιο, αφού επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να περάσουν από το πυρίτιο P στο N χωρίς όμως να μπορούν να ακολουθήσουν την αντίθετη διαδρομή.

Όταν φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτουν σε ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο διεγείρουν κάποια ηλεκτρόνια και τα ελευθερώνουν, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται αντίστοιχες οπές. Κάθε φωτόνιο με κατάλληλη ενέργεια θα ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο και θα δημιουργήσει μια οπή. Αν αυτό συμβεί κοντά στο ηλεκτρικό πεδίο ή αν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο και μια οπή βρεθούν κοντά στην ένωση P - N ημιαγωγών, το πεδίο θα υποχρεώσει το ηλεκτρόνιο να μεταβεί στον ημιαγωγό τύπου N και θα κατευθύνει την οπή στο πυρίτιο τύπου

P. Έτσι δημιουργείται μεγάλη ανισορροπία στην ηλεκτρική ουδετερότητα και αν χρησιμοποιηθεί μία εξωτερική αγώγιμη οδός τα ηλεκτρόνια θα περάσουν μέσα από αυτή για να πάνε στην αρχική τους θέση από όπου το ηλεκτρικό πεδίο τα απομάκρυνε. Η προσανατολισμένη αυτή κίνηση των ηλεκτρονίων προκαλεί το ρεύμα, και το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί την τάση του ρεύματος.

Σύμφωνα με μελέτες, το μέγιστο ποσό ενέργειας που μπορεί να απορροφήσει θεωρητικά ένα φωτοβολταϊκό κύτταρο είναι περίπου το 25% της ενέργειας που δέχεται, αλλά στην πραγματικότητα το ποσοστό που συνήθως απορροφάει είναι λιγότερο από 15%. Γνωρίζουμε ότι η ηλιακή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από ένα φάσμα διαφορετικών μηκών κύματος, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι περιέχει φωτόνια που έχουν διαφορετικά επίπεδα ενέργειας. Τα φωτόνια λοιπόν που έχουν χαμηλή ενεργειακή στάθμη δεν έχουν την δύναμη να ενεργοποιήσουν τα ηλεκτρόνια του ημιαγωγού και απλά περνάνε μέσα από τη φωτοβολταϊκή κυψέλη. Τα φωτόνια όμως που μεταφέρουν μεγαλύτερη ενέργεια ή τουλάχιστον ίση με ένα ποσό, το οποίο βέβαια εξαρτάται από το υλικό που είναι κατασκευασμένο το κύτταρο, μπορούν να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια. Σημαντική λοιπόν κρίνεται η τεχνολογία των ημιαγωγικών υλικών στην αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας για την παραγωγή ηλεκτρισμού, καθώς στην περίπτωση που περιοριζόμασταν στην χρήση αγώγιμων υλικών, όπως τα μέταλλα, θα είχαμε μεγαλύτερη ροή ηλεκτρονίων αλλά θα είχαμε και το μειονέκτημα της πολύ χαμηλής τάσης του πεδίου, κάτι που δεν επιθυμούμε [5].

2.2.2 Κατηγορίες και χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία με κριτήρια το υλικό και τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάζονται, διακρίνονται σε δυο κατηγορίες:

- A. Κρυσταλλικά μεγάλου πάχους, το οποίο σημαίνει ότι κατασκευάζονται από υλικά σε κρυσταλλική μορφή και έχουν πάχος της τάξης των 300μm και
- B. Λεπτού υμενίου, το οποίο σημαίνει ότι κατασκευάζονται από υλικά σε μορφή λεπτού υμενίου και έχουν πάχος της τάξης των 0,1μm.

Λόγω της τεχνολογίας της επεξεργασίας του πυριτίου που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία της μικροηλεκτρονικής, τα περισσότερα φωτοβολταϊκά στοιχεία κατασκευάζονται από κρυσταλλικό πυρίτιο. Για τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου γνωρίζουμε ότι η απόδοσή τους στην βιομηχανία κυμαίνεται από 15 – 18% για το πλαίσιο. Δεν πρέπει να παραβλέπουμε όμως ότι στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 24,7%. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου έχουν το πλεονέκτημα όσον αφορά την απόδοσή τους, έχουν όμως και το μειονέκτημα του υψηλού κόστους

κατασκευής σε σχέση με τα πολυκρυσταλλικά. Οι δύο κύριες μέθοδοι παραγωγής μονοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών είναι η μέθοδος CZ (Czochralski) και η μέθοδος FZ (float zone).

Στο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, η τιμή πώλησης του οποίου είναι χαμηλότερη σε σχέση με του μονοκρυσταλλικού πυριτίου, εύκολα μπορεί κάποιος να παρατηρήσει τις επιμέρους μονοκρυσταλλικές περιοχές. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η έκταση της μονοκρυσταλλικής περιοχής τόσο μεγαλύτερη είναι και η απόδοση των πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων. Σχετικά με τις αποδόσεις του πολυκρυσταλλικού πυριτίου αναφέρουμε ότι στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 20%, ενώ στη βιομηχανία οι αποδόσεις κυμαίνονται από 13 έως και 15%. Οι κυριότερες μέθοδοι παραγωγής είναι: η μέθοδος της απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ανάπτυξη του λιωμένου πυριτίου (χύτευση) και η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC.

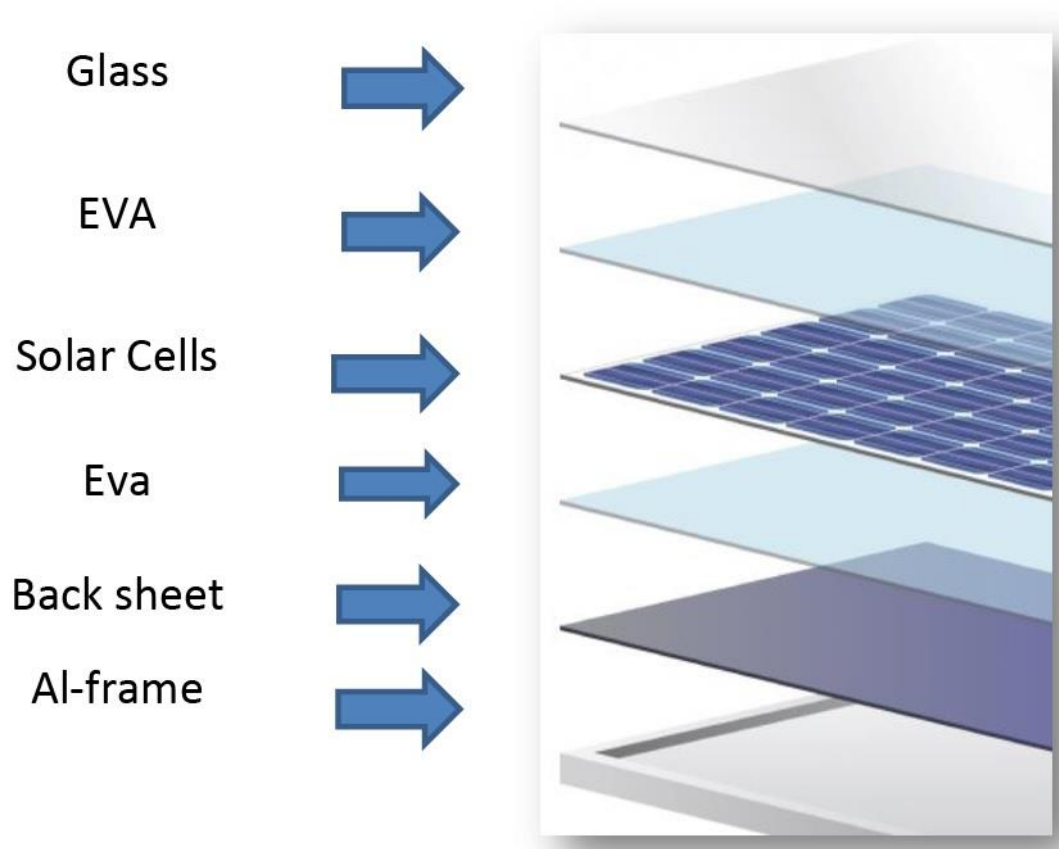
Μια άλλη κατηγορία φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι αυτή του λεπτού υμενίου για την οποία θα πρέπει να σημειωθεί ότι έχει πολύ μικρότερη απόδοση σε σχέση με τις κατηγορίες που ήδη έχουμε αναλύσει παραπάνω. Όσον αφορά την δομή τους είναι ταινίες λεπτών επιστρώσεων οι οποίες δημιουργούνται με την εναπόθεση ημιαγώγιμου υλικού επάνω σε υπόστρωμα υποστήριξης, συνήθως γυαλί ή αλουμίνιο. Το κόστος τους είναι αρκετά χαμηλό εξαιτίας της μικρής ποσότητας ημιαγώγιμου υλικού (κυρίως πυριτίου) που χρησιμοποιείται. Τέλος αναφέρουμε τα άμορφα φωτοβολταϊκά πλαίσια, ονομασία η οποία, όπως καταλαβαίνουμε, προέρχεται από τον τυχαίο τρόπο διάταξης των ατόμων υλικού. Για τα φωτοβολταϊκά thin films πυριτίου, οι αποδόσεις τους στη βιομηχανία κυμαίνονται από 6 έως 8%, ενώ στο εργαστήριο έχουν επιτευχθεί αποδόσεις έως και 14%.

Επειδή στόχος μας είναι η επίτευξη των επιθυμητών τιμών τάσης και ρεύματος, η χρήση των φωτοβολταϊκών στοιχείων γίνεται με σύνδεση τους σε σειρά και παράλληλα. Προφανές είναι ότι τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πρέπει να είναι όμοια για την ομαλή λειτουργία του φωτοβολταϊκού πλαισίου κάτι το οποίο απαιτεί την εμφάνιση των ίδιων ηλεκτρικών χαρακτηριστικών. Ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο περιλαμβάνει πολλαπλά φωτοβολταϊκά στοιχεία τα οποία είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα μεταξύ τους και τοποθετούνται μέσα σε ένα πλαίσιο από αλουμίνιο για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα της διάταξης. Όταν συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους πολλά τέτοια φωτοβολταϊκά πλαίσια (σε σειρά ή/και παράλληλα) δημιουργείται μια φωτοβολταϊκή συστοιχία και τέλος μία ή περισσότερες τέτοιες συστοιχίες δημιουργούν ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 2.3, κάθε φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελείται από τα εξής στρώματα:

- Ειδικό γυαλί
- Συμπυκνωμένο πολυμερές υλικό για την ενθυλάκωση των φωτοβολταϊκών στοιχείων
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία
- Συμπυκνωμένο υλικό (EVA)
- Ειδικό γυαλί

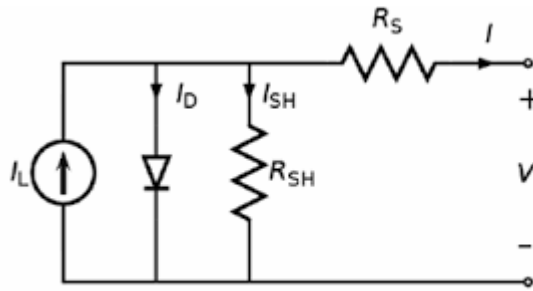
Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία περικλείονται συνήθως από δυο κομμάτια γυαλιού ή από ένα κομμάτι γυαλιού και ένα κομμάτι πλαστικού. Το γυαλί που χρησιμοποιείται είναι διαφανές. Το συμπυκνωμένο υλικό Ethylene Vinyl Acetate (EVA), είναι ένα υλικό που εμφανίζει πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση, ενώ ταυτόχρονα έχει μεγάλη διαπερατότητα στο φως [5].



Σχήμα 2.3: Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου [18].

2.2.3 Χαρακτηριστικά λειτουργίας των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Για την κατανόηση της λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, παρουσιάζεται στο Σχ. 2.4 το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.



Σχήμα 2.4: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Παρατηρώντας το ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, παραθέτουμε τον τύπο που μας δίνει το ρεύμα εξόδου κάθε φωτοβολταϊκού στοιχείου:

$$I_{\text{cell}} = I_{\text{ph}} - I_o \left(\exp^{\frac{q(V+I \cdot R_s)}{m \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (3)$$

όπου:

I_{cell} : το ρεύμα εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου

I_{ph} : το φωτορεύμα (ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας)

m : συντελεστής ιδανικότητας της διόδου

I_o : το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης

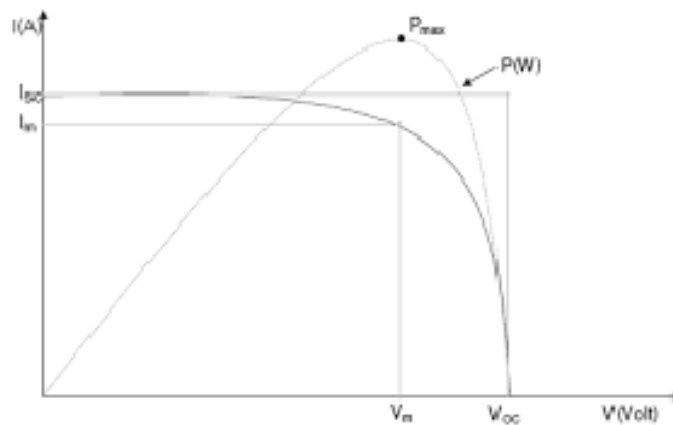
q : το φορτίο του ηλεκτρονίου

V : η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού στοιχείου

k : η σταθερά του Boltzmann

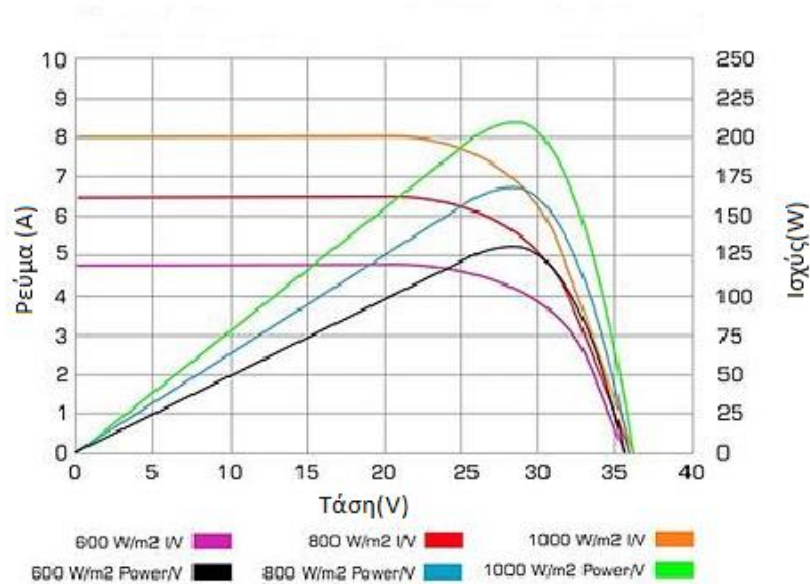
T : η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin

Παρατηρώντας την παραπάνω σχέση βλέπουμε ότι η ένταση του ρεύματος που παράγει ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει άμεση σχέση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και με την θερμοκρασία. Στο Σχ. 2.4 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις του παραγόμενου ρεύματος και ισχύος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου σε σχέση με την τάση που παράγει. Φέρνοντας κάθετη από το σημείο P_{max} προς τον οριζόντιο άξονα, εκεί που θα συναντήσουμε την χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ρεύματος – τάσης είναι το σημείο στο οποίο αναπτύσσονται η τάση και ένταση ρεύματος που παράγουν την μέγιστη ισχύ για τις συγκεκριμένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας.

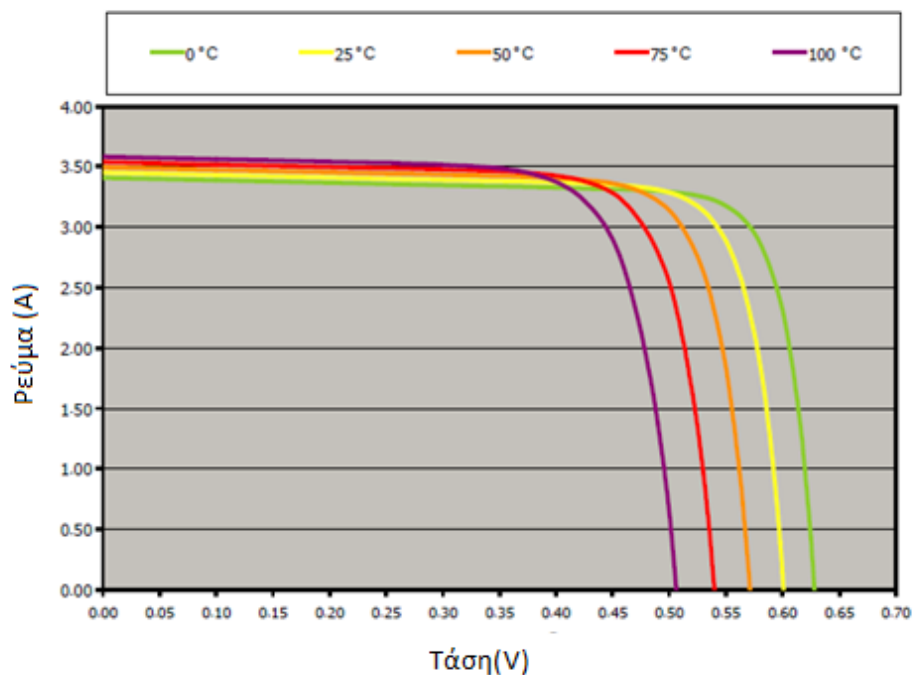


Σχήμα 2.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος – τάσης και ισχύος-τάσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου [8].

Προφανώς και το σημείο μέγιστης ισχύος μετατοπίζεται ανάλογα με τις μετεωρολογικές συνθήκες που υπάρχουν κάθε χρονική στιγμή, καθώς επηρεάζεται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας λειτουργίας, καθώς επίσης και από τη μεταβολή της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Ακολουθούν δύο διαγράμματα με τις παραπάνω μεταβολές για την καλύτερη κατανόησή τους.



Σχήμα 2.6: Μεταβολή του σημείου μέγιστης ισχύος συναρτήσει των μεταβολών της ηλιακής ακτινοβολίας σε σταθερή θερμοκρασία 25°C [11].



Σχήμα 2.7: Μεταβολή του σημείου μέγιστης ισχύος συναρτήσει των μεταβολών της θερμοκρασίας λειτουργίας.

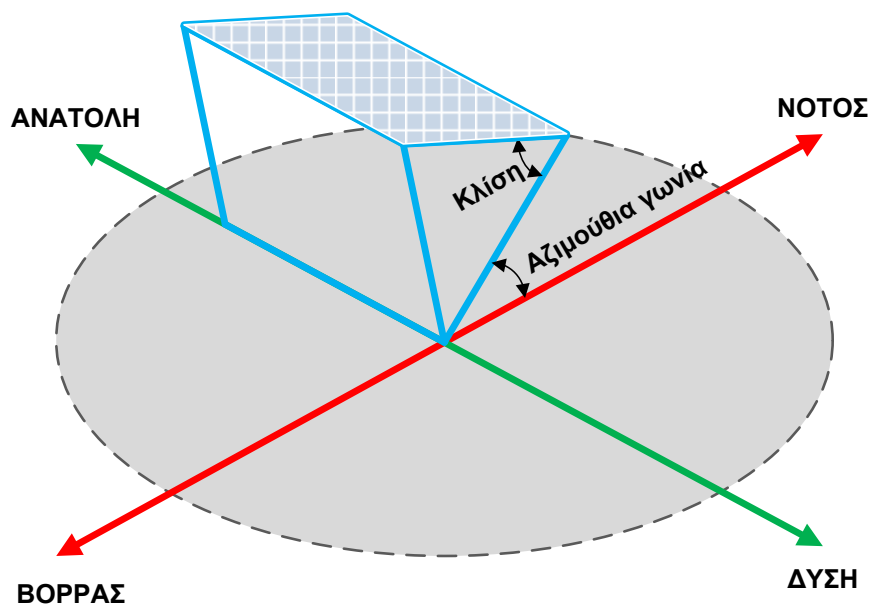
Υπάρχουν διατάξεις οι οποίες χρησιμοποιούνται για να παρακολουθούν συνεχώς το σημείο μέγιστης ισχύος, ώστε να παράγεται συνεχώς η μέγιστη δυνατή τιμή ισχύος από την φωτοβολταϊκή συστοιχία, οι οποίες ονομάζονται ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος (MaximumPowerPointTracker/MPPT).

2.2.4 Προσανατολισμός των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Στην παρούσα εργασία επειδή σκοπός μας είναι η πλήρης κάλυψη του φορτίου σε συνάρτηση με το χαμηλότερο κόστος, ιδιαίτερα σημαντικό είναι να προσπαθήσουμε να παίρνουμε την μέγιστη ισχύ από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία θα είναι τοποθετημένα στις επιφάνειες που ο εκάστοτε χρήστης θα μας δίνει.

Όπως είναι λογικό μια τέτοια επιφάνεια είναι και η οροφή του σπιτιού και η οποία μπορεί να είναι επίπεδη. Αυτομάτως λοιπόν γεννιέται το πρόβλημα της βέλτιστης κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων που θα χρησιμοποιήσουμε. Για να έχουμε μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, θα πρέπει να επιτύχουμε την μέγιστη εκμετάλλευση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Επειδή όμως η πορεία του Ήλιου

αλλάζει τόσο με την ώρα της ημέρας όσο και με την ημέρα του έτους, είναι προφανές πως για να παραχθεί η μέγιστη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει το πλαίσιο να περιστρέφεται συνεχώς ώστε να ακολουθεί την τροχιά του Ήλιου και να είναι διαρκώς κάθετο στην κατεύθυνση της ακτινοβολίας. Αντιλαμβανόμαστε ότι πρακτικά αυτό δεν μπορεί να γίνει επειδή η μηχανική πολυπλοκότητα και το κόστος ενός τέτοιου μηχανισμού αποτελεί μια δύσκολη και μεγάλη σε κόστος λύση για τα κτιριακά φωτοβολταϊκά συστήματα. Γι' αυτό το λόγο στα περισσότερα κτιριακά φωτοβολταϊκά συστήματα καταφεύγουμε στη λύση να επιλέγεται μία ή το πολύ δύο κλίσεις εγκατάστασης για τα πλαίσια. Η πραγματοποίηση αυτού του στόχου εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την σωστή επιλογή της κλίσης και της αζιμούθιας γωνίας τοποθέτησης του πλαισίου. Όταν λέμε κλίση του πλαισίου αναφερόμαστε στη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο της επιφάνειας του φωτοβολταϊκού πλαισίου και το οριζόντιο επίπεδο, ενώ όταν αναφερόμαστε στην αζιμούθια γωνία εννοούμε την γωνία που σχηματίζεται επάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κεκλιμένης πλευράς του πλαισίου και τον τοπικό μεσημβρινό βορρά - νότου. Ακολουθεί ένα χαρακτηριστικό και άκρως επεξηγηματικό σχήμα:



Σχήμα 2.7 Η κλίση και η αζιμούθια γωνία ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου [1].

Μια γενική παρατήρηση είναι ότι η βέλτιστη κλίση είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος. Σε περιοχές όμως με υγρό κλίμα, εξαιτίας των σταγονιδίων νερού που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα ένα σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται, η βέλτιστη κλίση του φωτοβολταϊκού πλαισίου για τη διάρκεια του έτους υπολογίζεται ότι είναι 10-15% μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους και η αζιμούθια γωνία είναι 0° (κατεύθυνση προς νότο) [4]. Σ' αυτό το σημείο θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας, ότι στην περίπτωση των κτιριακών φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων οι βέλτιστες τιμές κλίσης και προσανατολισμού των εν λόγω πλαισίων μπορεί να είναι αδύνατες να εφαρμοστούν λόγω των περιορισμών που προκύπτουν από τις διαθέσιμες επιφάνειες του κτιρίου. Ένα άλλο εξίσου σημαντικό πρόβλημα είναι αυτό των σκιάσεων (πχ. από γειτονικές επιφάνειες, αντικείμενα κλπ.). Στην εργασία αυτή θεωρήσαμε σαν δεδομένο ότι δεν υπάρχουν τέτοιες σκιάσεις. Γενικά, για την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων προτιμώνται οι επιφάνειες νότιου προσανατολισμού και με κλίση που να κυμαίνεται στο εύρος $0^\circ - 70^\circ$. Σημειώνεται ότι η χρήση γωνιών κλίσης άνω των $10 - 15^\circ$ διευκολύνει τον αυτόματο καθαρισμό των πλαισίων από σκόνη και άλλα στοιχεία μέσω της βροχής [10]. Για την καλύτερη μελέτη του προβλήματός μας εμείς έχουμε θεωρήσει ότι σε τέτοιες επιφάνειες θα μπορούμε να έχουμε δύο κλίσεις στα φωτοβολταϊκά πλαίσια οι οποίες και θα υπολογίζονται από τον γενετικό αλγόριθμο. Η μία κλίση θα αφορά τις μέρες 1 – 104 και 290 - 365 του χρόνου και η δεύτερη θα αφορά τις μέρες 105 – 289 (θερινοί μήνες). Επίσης η αζιμούθια γωνία δεν λαμβάνεται ίση με μηδέν, αντιθέτως υπολογίζεται σύμφωνα με τύπους που περιγράφονται στο Κεφάλαιο 6. Όλα τα παραπάνω στοιχεία σχετίζονται με τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που θα χρησιμοποιήσουμε σε οριζόντιες και επίπεδες επιφάνειες εάν και εφόσον μας τις δώσει ο χρήστης. Σε όλες τις υπόλοιπες, μη-οριζόντιες και επίπεδες επιφάνειες, η κλίση και η γωνία αζιμούθιου των φωτοβολταϊκών συστοιχιών, προφανώς, είναι ίσα με αυτά της επιφάνειας εγκατάστασης.

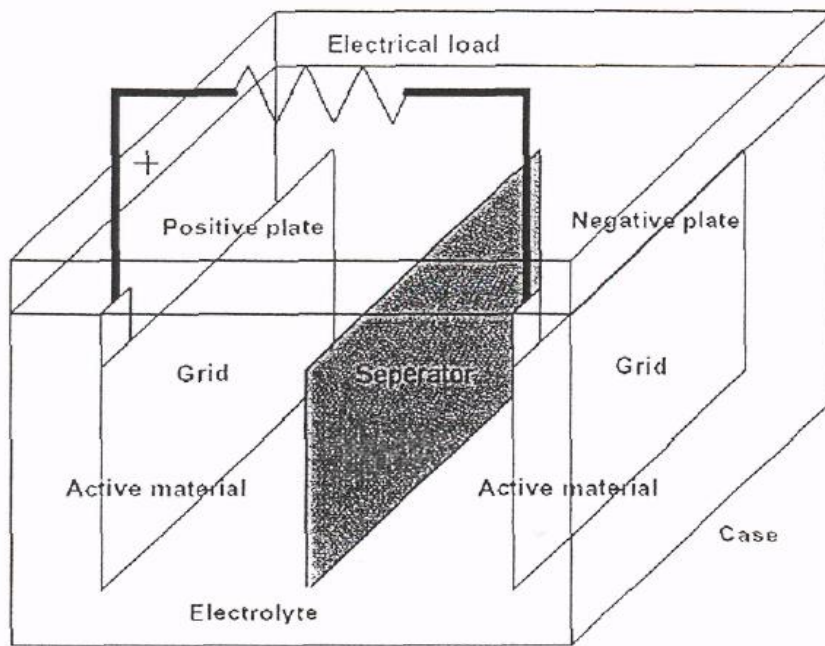
3.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ

Ξεκινώντας με την παραδοχή ότι στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα κρίνεται επιτακτική η ανάγκη χρήσης μπαταριών διότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν συμπίπτει πάντα με την αντίστοιχη κατανάλωση, θα προχωρήσουμε στην ανάλυση των ειδών και στην εξήγηση της λειτουργίας των μπαταριών. Η επιλογή των μπαταριών που θα επιλέξουμε να χρησιμοποιήσουμε σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα δεν είναι μια απλή διαδικασία. Πρώτα απ' όλα ο τύπος της μπαταρίας που θα επιλέξουμε πρέπει να είναι κατάλληλος για αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα. Γι' αυτό το λόγο επιλέγουμε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, οικονομικά αποδοτικές και με ικανότητα διαχείρισης μικρών και μεγάλων ρευμάτων φόρτισης με υψηλή απόδοση.

3.1 Περιγραφή δομικών στοιχείων των συσσωρευτών

Οι μπαταρίες - ηλεκτρικοί συσσωρευτές είναι ουσιαστικά μετατροπείς χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Επίσης έχουν την δυνατότητα να εκτελούν αυτή τη μετατροπή και προς την αντίθετη κατεύθυνση ώστε να επιτυγχάνουν με άμεσο τρόπο τη συσσώρευση ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια οποιαδήποτε χρονική στιγμή είναι αυτή που διαχωρίζει τους συσσωρευτές σε δύο κύριες κατηγορίες. Πρώτη κατηγορία είναι αυτή των πρωτευόντων (primary) συσσωρευτών στην οποία ανήκουν αυτοί που έχουν ήδη αποθηκευμένη χημική ενέργεια και την οποία μπορούν να την διοχετεύσουν ως ηλεκτρική, είναι αδύνατο όμως να επαναφορτιστούν, γι' αυτό το λόγο και δεν προτιμώνται για τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Αντιθέτως αυτές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σ' αυτά τα συστήματα ανήκουν στην κατηγορία των δευτερευόντων (secondary) συσσωρευτών. Η δυνατότητα τους να επαναφορτίζονται είναι ο κυριότερος λόγος επιλογής τους για φωτοβολταϊκά συστήματα. Ακολουθεί το παρακάτω σχήμα από το οποίο θα γίνει μια σύντομη περιγραφή των μερών ενός συσσωρευτή με στόχο την καλύτερη κατανόησή τους [4].



Σχήμα 3.1: Η δομή ενός συσσωρευτή [4].

Ενεργό Υλικό (Active Material): Το ενεργό υλικό είναι ένας συνδυασμός υλικών που αποτελούν τα βασικά προϊόντα της ηλεκτροχημικής αντίδρασης μέσα στην κυψελίδα. Η ποσότητα του ενεργού υλικού σε μία μπαταρία εξαρτάται από την χωρητικότητάς της.

Ηλεκτρολύτης: Ο ηλεκτρολύτης είναι ένα αγώγιμο υλικό που η λειτουργία του είναι να επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος, είτε μέσω της ανταλλαγής ιόντων είτε μέσω ανταλλαγής ηλεκτρονίων, επάνω στις πλάκες της κυψελίδας.

Πλέγμα (Grid): Είναι ένα πλαίσιο από κράμα μολύβδου το οποίο υποστηρίζει το ενεργό υλικό επάνω στις πλάκες και είναι αγωγός ηλεκτρικού ρεύματος.

Πλάκες-Πόλοι (Plates): Οι πλάκες (αναφέρονται και ως ηλεκτρόδια), που αποτελούνται από το πλέγμα και από το ενεργό υλικό, αποτελούν το ζωτικό στοιχείο της μπαταρίας. Γενικά, υπάρχει ένα πλήθος αρνητικών και θετικών πλακών που είναι συνδεδεμένες παράλληλα, μέσα σε μία κυψελίδα. Το πάχος τους και η σχέσεις των επιφανειών μεταξύ των αρνητικών και των θετικών πλακών, επηρεάζουν καθοριστικά τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας.

Διαχωριστής (Separator): Πρόκειται για ένα πορώδες απομονωτικό μέσο μεταξύ των πλακών της μπαταρίας που σκοπός του είναι να μην επιτρέπει την αγώγιμη επαφή μεταξύ θετικής και αρνητικής πλάκας [4].

3.2 Λειτουργικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών

Ύστερα από την ανάλυση των δομικών στοιχείων ενός συσσωρευτή ακολουθεί η εξήγηση ορισμένων βασικών εννοιών που αφορούν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε συσσωρευτή.

Χωρητικότητα: Πρόκειται για την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας είναι τα αμπερώρια (Ah), τα οποία στην ουσία είναι το γινόμενο του χρόνου επί την ένταση του ρεύματος. Ένα παράδειγμα κατανόησης είναι το ακόλουθο: ένας συσσωρευτής 100 Ah προσφέρει 100A σε 1 ώρα ή 10A σε 10 ώρες. Η χωρητικότητα της κάθε μπαταρίας δεν είναι σταθερή, αλλά η τιμή της εξαρτάται από παράγοντες όπως είναι η θερμοκρασία, το ρεύμα εκφόρτισης και η τάση διακοπής εκφόρτισης. Η χωρητικότητα επηρεάζεται και με την αλλαγή της θερμοκρασίας με διαφορετικό τρόπο για κάθε μπαταρία. Έτσι κάθε κατασκευαστής περιγράφει τις παραπάνω μεταβολές στο τεχνικό φυλλάδιο που συνοδεύει το συσσωρευτή.

Αυτοεκφόρτιση: Είναι η διαδικασία κατά την οποία ο συσσωρευτής δέχεται μείωση της κατάστασης φόρτισης του (state of charge, SOC) χωρίς να είναι συνδεδεμένος με κάποιο ηλεκτρικό φορτίο. Συνήθως οι λόγοι που οδηγούν σ' αυτή τη μείωση είναι οι εσωτερικοί χημικοί μηχανισμοί ή άλλες απώλειες ενέργειας της μπαταρίας. Επίσης σημαντικοί παράγοντες στη διαδικασία αυτή είναι τα ενεργά υλικά και τα στοιχεία του κράματος του πλέγματος που επιλέχθηκαν για την κατασκευή του συσσωρευτή. Μελέτες έδειξαν ότι υπάρχουν απώλειες της τάξης του 0.7% του SOC ανά ημέρα για το λόγο αυτό. Έτσι, οι συσσωρευτές κρίνεται απαραίτητο να βρίσκονται σε συνθήκες συντηρητικής φόρτισης ακόμα και αν δεν υπάρχει ηλεκτρικό φορτίο συνδεδεμένο σε αυτούς.

Εκφόρτιση και επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης: το επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης (depth of discharge, DOD) είναι το μέγιστο ποσοστό της χωρητικότητας το οποίο μπορεί να αποδώσει η μπαταρία. Συνήθως καθορίζεται από την τάση αποκοπής και από τον ρυθμό εκφόρτισης. Οι επιτρεπόμενες τιμές για το DOD μπορεί να είναι από 80% έως και 15% της χωρητικότητας (αυτό εξαρτάται βέβαια από τον τύπο της μπαταρίας). Η εκφόρτιση έχει άμεση σύνδεση με τον χρόνο ζωής της μπαταρίας, το οποίο σημαίνει ότι όταν η ονομαστική χωρητικότητα πέσει κάτω από το ποσοστό DOD, τότε ο συσσωρευτής είναι ακατάλληλος για περαιτέρω χρήση.

Αριθμός κύκλων λειτουργίας: πρόκειται για ένα φυσικό αριθμό που μας δείχνει τον αριθμό των φορτίσεων – εκφορτίσεων που μπορεί να αντέξει η μπαταρία, μέχρι η χωρητικότητα να πέσει κάτω από το συγκεκριμένο της όριο. Συνήθως το όριο αυτό αποδίδεται στο 80% της αρχικής χωρητικότητας.

Βαθμός απόδοσης του συσσωρευτή (%): ο βαθμός απόδοσης του συσσωρευτή (round-trip efficiency) μας δείχνει τις απώλειες ενέργειας που έχει ο συσσωρευτής στις φάσεις φόρτισης και εκφόρτισης του.

Ο βαθμός απόδοσης δίνεται από την σχέση:

$$\text{βαθμός απόδοσης} = \frac{\text{εξερχόμενη ενέργεια στην εκφόρτιση (kWh)}}{\text{εισερχόμενη ενέργεια στη φόρτιση (kWh)}} \quad (4)$$

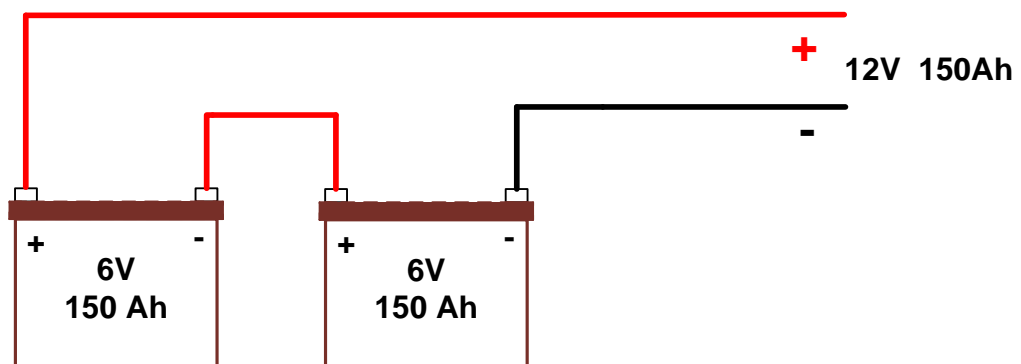
Έκλυση ατμών, δημιουργία κρυστάλλων και διάβρωση στους συσσωρευτές: η υπερβολική φόρτιση καθώς και το αυξημένο ρεύμα φόρτισης των συσσωρευτών έχουν σαν αποτέλεσμα την έκλυση αερίων. Αυτό γίνεται διότι σχηματίζεται αέριο οξυγόνο (O_2) στις θετικές πλάκες και αέριο υδρογόνο (H_2) στις αρνητικές. Στη συνέχεια τα αέρια αυτά ελευθερώνονται μέσω των βαλβίδων εξαερισμού, το οποίο οδηγεί στην απώλεια νερού. Όταν αναφερόμαστε σε συσσωρευτές δεσμευμένου ηλεκτρολύτη, υπάρχει ένας εσωτερικός μηχανισμός ο οποίος επιτρέπει την επανασύσταση νερού από το αέριο μίγμα για την αποκατάσταση του διαλύματος του ηλεκτρολύτη. Ωστόσο, αν η πίεση των ατμών ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο τότε απελευθερώνονται στον αέρα μέσω των βαλβίδων ασφαλείας, και μετά δεν υπάρχει η δυνατότητα αναπλήρωσης του χαμένου νερού. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα που χρησιμοποιούνται τέτοιοι συσσωρευτές, είναι υποχρεωτικό να γίνεται προσεκτική ρύθμιση στην επιλογή της τάσης πλήρους φόρτισης και στον ρυθμό φόρτισης των συσσωρευτών για να μην επηρεαστεί η διάρκεια ζωής τους.

Υπάρχουν και οι συσσωρευτές όπου επιδιώκεται η έκλυση ατμών. Αναφερόμαστε στους συσσωρευτές υγρού ηλεκτρολύτη με ανοικτή βαλβίδα εξαερισμού και ο λόγος που επιβάλλεται έκλυση ατμών είναι η δημιουργία βαρέως θεικού οξέως, το οποίο σχηματίζεται στις πλάκες και καταλήγει στον πυθμένα του δοχείου. Όσο περνάει ο καιρός αυξάνεται η ποσότητα του ηλεκτρολύτη στο κάτω μέρος των κυψελίδων, το οποίο προκαλεί την μη ομαλή λειτουργία και ταυτόχρονα τη σταδιακή διάβρωση του πλέγματος κάτι το οποίο σημαίνει μείωση του χρόνου ζωής του συσσωρευτή. Σε αυτή τη κατηγορία συσσωρευτών ένας τρόπος συντήρησης είναι η δημιουργία ατμών που προκαλεί την ανάδευση του διαλύματος. Γενικά η έκλυση ατμών πρέπει να είναι περιορισμένη. Σε περίπτωση που ο συσσωρευτής βρεθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα σε κατάσταση μερικής φόρτισης, κρύσταλλοι θεικού μολύβδου αναπτύσσονται επάνω στην επιφάνεια των θετικών πλακών. Η αύξηση της ποσότητας θεικού μολύβδου που γίνεται με το πέρασμα του χρόνου οδηγεί στη μείωση της ποσότητας του ενεργού υλικού που λαμβάνει μέρος στην αντίδραση και στην ενεργή επιφάνεια των πλακών κάτι που σημαίνει μείωση της χωρητικότητας του συσσωρευτή. Όσο μεγαλύτερη γίνει η συγκεκριμένη ποσότητα τόσο

μεγαλύτερες είναι και οι μηχανικές βλάβες που προκαλούνται στο πλέγμα των πλακών. Όλη αυτή η περιγραφή αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα στα φωτοβολταϊκά συστήματα όπου οι συσσωρευτές βρίσκονται για μεγάλο χρονικό διάστημα σε κατάσταση μερικής φόρτισης. Γι' αυτό συνιστάται εφαρμογή ρεύματος εξισορρόπησης για συντήρηση. Η διάρκεια ζωής του συσσωρευτή εξαρτάται κυρίως από την αντοχή του πλέγματος, το οποίο όμως υφίσταται διάβρωση για πολλούς λόγους [4].

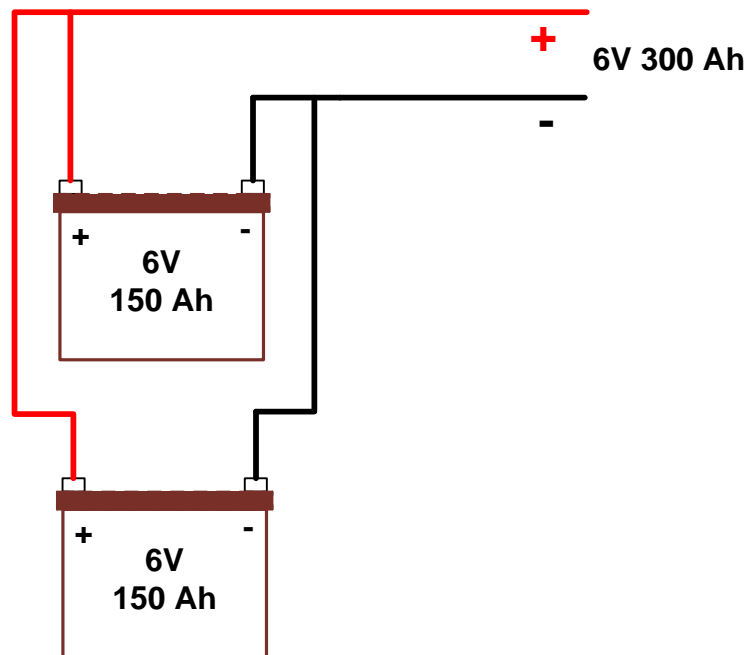
3.3 Τρόποι Σύνδεσης των Συσσωρευτών

Όσον αφορά τους τρόπους σύνδεσης των συσσωρευτών αυτοί είναι τρεις: ή σε σειρά ή παράλληλα ή συνδυασμό και των δύο. Σύνδεση σε σειρά έχουμε όταν συνδέεται ο θετικός πόλος του ενός συσσωρευτή με τον αρνητικό πόλο του δεύτερου, ο θετικός του δεύτερου με τον αρνητικό του τρίτου κ.ο.κ. Σ' αυτό τον τρόπο σύνδεσης η συνολική τάση είναι όσο είναι το άθροισμα των τάσεων των επιμέρους συσσωρευτών, ενώ η χωρητικότητα παραμένει όση είναι η χωρητικότητα του ενός.



Σχήμα 3.2: Σύνδεση συσσωρευτών σε σειρά.

Στη παράλληλη σύνδεση συνδέονται οι θετικοί πόλοι όλων των επιμέρους συσσωρευτών μεταξύ τους και οι αρνητικοί πόλοι μεταξύ τους. Σ' αυτό τον τρόπο σύνδεσης η συνολική χωρητικότητα ισούται με το άθροισμα των επιμέρους χωρητικοτήτων, ενώ η συνολική τάση παραμένει όση είναι και η τάση του ενός συσσωρευτή.



Σχήμα 3.3: Παράλληλη σύνδεση συσσωρευτών.

Όπως αναφέραμε και στον πρόλογο, η επιλογή των συσσωρευτών που θα χρησιμοποιήσουμε κρίνεται πολύ σημαντική και αυτό διότι οι συσσωρευτές αποτελούν ένα σημαντικό κομμάτι ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Για το λόγο αυτό η εκάστοτε επιλογή μας θα πρέπει να πληρεί όσα περισσότερα γίνεται από τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

1. Καλή αναλογία τιμής - απόδοσης
2. Μικρές απαιτήσεις (είτε οικονομικές, είτε λειτουργικές) όσον αφορά την συντήρηση
3. Μεγάλη διάρκεια ζωής
4. Χαμηλή αυτοεκφόρτιση και υψηλή ενεργειακή απόδοση και
5. Ικανότητα φόρτισης με μικρής έντασης ρεύματα

3.4 Τύποι Συσσωρευτών

Οι συσσωρευτές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε φωτοβολταϊκά συστήματα, έχοντας ως κριτήριο ότι πρέπει να είναι επαναφορτιζόμενοι, κατατάσσονται με βάση τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται στις εξής κατηγορίες:

- I. συσσωρευτές μολύβδου – οξέος
- II. συσσωρευτές νικελίου - καδμίου
- III. συσσωρευτές λιθίου

Από αυτούς τους τύπους κυρίως οι Μολύβδου - Οξέος και οι Νικελίου - Καδμίου έχουν χρησιμοποιηθεί στα φωτοβολταϊκά συστήματα μέχρι σήμερα. Οι υβριδικοί συσσωρευτές Νικελίου και οι επαναφορτιζόμενοι συσσωρευτές Λιθίου είναι σύγχρονες τεχνολογίες και βρίσκουν εφαρμογές κυρίως σε ηλεκτρονικές συσκευές, όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα και οι φορητοί ηλεκτρονικοί υπολογιστές. Λόγω του ότι δεν είναι διαθέσιμοι σε μεγάλες χωρητικότητες (εκατοντάδες ή ακόμα και χιλιάδες Ah) δεν χρησιμοποιούνται αρκετά στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Έχουν μεγαλύτερο κόστος σε σύγκριση με τις συσσωρευτές μολύβδου οξέος και επίσης απαιτούν πολύπλοκη προστασία για το κύκλωμα φόρτισής τους, κάτι το οποίο δεν συνάδει με τη μεταβλητή φύση των ρευμάτων φόρτισης που αναπτύσσονται στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Όμως, εξαιτίας της μεγάλης προόδου που έχει σημειωθεί με το πέρασμα των χρόνων στους συσσωρευτές Λιθίου, τελευταία παρατηρείται αύξηση της χρήσης τους στα φωτοβολταϊκά συστήματα.

3.4.1 Συσσωρευτές Μολύβδου

Ανάλογα με τα υλικά του κράματος στο πλέγμα των πλακών, οι συσσωρευτές μολύβδου χωρίζονται σε υποκατηγορίες. Το που είναι περισσότερο κατάλληλοι κάποιοι συσσωρευτές εξαρτάται από τις επιδόσεις τους, οι οποίες εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους και της δομής τους. Ευρέως διαδεδομένοι τύποι συσσωρευτών μολύβδου είναι οι παρακάτω: Οι συσσωρευτές μολύβδου-αντιμονίου (Pb-Sb), οι συσσωρευτές μολύβδου-ασβεστίου (Pb-Ca) οι οποίοι κατηγοριοποιούνται σε υγρού καταλύτη με ανοικτή ή με σφραγισμένη βαλβίδα εξαέρωσης, οι υβριδικοί συσσωρευτές μολύβδου-ασβεστίου, μολύβδου-αντιμονίου και οι μολύβδου με δεσμευμένο καταλύτη και οι οποίοι μπορεί να είναι gelled ή Absorbed Glass Material (AGM) [4].

Στις εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων, που κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι οι ανάγκες κατανάλωσης σπάνια συμβαδίζουν με τις ώρες παραγωγής και την παραγόμενη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας, περισσότερο χρησιμοποιούνται οι συσσωρευτές που έχουν τη δυνατότητα να υποστούν βαθιά εκφόρτιση χωρίς όμως να αλλοιώνεται η χωρητικότητά τους και να μειώνεται η διάρκεια ζωής τους. Καθοριστικό ρόλο κατέχει το φορτίο, διότι κάποιες φορές είναι απαραίτητη η δυνατότητα παροχής μεγάλης έντασης ρεύματος για μικρά χρονικά διαστήματα και κάποιες άλλες χρειάζεται η παροχή κανονικής έντασης ρεύματος για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Επίσης, υπάρχουν περιπτώσεις που ο τύπος της εγκατάστασης είναι δυσπρόσιτος, με αποτέλεσμα να επιλέγονται συσσωρευτές με μικρές ανάγκες συντήρησης.

Κυρίως στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, όπου δεν υπάρχει δυνατότητα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο και όπου οι μεταβολές της ηλιοφάνειας μπορούν

να είναι έντονες και μεγάλης διάρκειας, κατάλληλοι θεωρούνται οι συσσωρευτές που έχουν μεγάλη χωρητικότητα, μπορούν να υποστούν βαθιά εκφόρτιση και βέβαια να υπάρχει μια καλή αναλογία ανάμεσα στο κόστος και τη διάρκεια ζωής τους. Για παράδειγμα σε ένα τέτοιο σύστημα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας συσσωρευτής μολύβδου-αντιμονίου (Pb-Sd). Αυτοί οι συσσωρευτές έχουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά, σχετικά με τις δυνατότητες βαθιάς εκφόρτισης και υψηλού ρυθμού εκφόρτισης και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Σημαντικό βέβαια μειονέκτημα τους είναι ο μεγάλος βαθμός αυτοεκφόρτισης που οδηγεί στην ανάγκη να υπερφορτίζονται κάτι που σημαίνει μεγάλη απώλεια υγρών που εξαρτάται και από τις θερμοκρασίες λειτουργίας. Πρόκειται συνήθως για συσσωρευτές υγρού ηλεκτρολύτη, με ανοικτή βαλβίδα εξαερισμού γι' αυτό χρειάζεται αναπλήρωση υγρών τακτικά. Ο έλεγχος για την κατάσταση τους γίνεται εύκολα με την μέτρηση της ειδικής πυκνότητας του ηλεκτρολύτη.

Η επικρατέστερη επιλογή συσσωρευτών για τα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι οι συσσωρευτές μολύβδου δεσμευμένου ηλεκτρολύτη (Captive Electrolyte Lead Acid Batteries), εξαιτίας της στεγανότητάς τους και της εύκολης μετακίνησής τους. Διαθέτουν βαλβίδα εξαέρωσης, που ανοίγει σε περίπτωση υπερφόρτισης και σε συγκεκριμένη πίεση, προκειμένου να απελευθερωθούν τα αέρια που αναπτύσσονται στο εσωτερικό τους. Δυστυχώς όμως δεν υπάρχει δυνατότητα αναπλήρωσης του ηλεκτρολύτη. Το γεγονός ότι δεν έχουν απαιτήσεις συντήρησης (ούτε και δυνατότητα), σε συνδυασμό με την ευκολία στη μετακίνηση, τις καθιστά ιδανικές για συστήματα σε απομακρυσμένα ή δυσπρόσιτα μέρη. Εκτός από το πρόβλημα της υπερφόρτισης, η απώλεια ηλεκτρολύτη μπορεί να επιταχυνθεί και λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και αφού δεν μπορεί να γίνει αναπλήρωση κρίνεται απαραίτητο να ληφθούν κάποια μέτρα. Η απώλεια ηλεκτρολύτη μπορεί να μειωθεί και παράλληλα να αυξηθεί ο χρόνος ζωής του συσσωρευτή κάνοντας θερμοκρασιακή αντιστάθμιση και ρύθμιση ακριβείας με σκοπό να αποφευχθεί η υπερφόρτιση και η μεγάλη εκφόρτιση. Οι συσσωρευτές μολύβδου δεσμευμένου ηλεκτρολύτη παρέχονται σε δύο κατηγορίες (gelled-electrolyte και Absorbed Glass Mat AGM) και πάρα πολλά απομακρυσμένα φωτοβολταϊκά συστήματα τους χρησιμοποιούν λόγω του ότι δεν έχουν μεγάλο πρόβλημα με την μείωση της χωρητικότητας τους σε σχέση με τους συσσωρευτές υγρού ηλεκτρολύτη [4]. Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι εκτός από τα υλικά του κράματος στο πλέγμα των ηλεκτροδίων, υπάρχουν και άλλα χαρακτηριστικά, όπως ο τρόπος κατασκευής τους ή οι σχετικές διαστάσεις, ο αριθμός και η γεωμετρία των πλακών τους, που δημιουργούν ειδικότερες κατηγορίες. Για παράδειγμα, συσσωρευτές μολύβδου που διαθέτουν θετικές πλάκες με μεγαλύτερη επιφάνεια από την επιφάνεια των αρνητικών, συνοδεύονται από το σύμβολο GroEH, ενώ για οπλισμένα θετικά ηλεκτρόδια χρησιμοποιείται το

συνοδευτικό OpzS. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι το συνοδευτικό 5OpzS, δηλώνει κυψελίδα με 5 θετικές πλάκες, τύπου OpzS [6].

3.4.2 Συσσωρευτές Νικελίου - Καδμίου

Η ανάπτυξη των μπαταριών Νικελίου - Καδμίου ξεκίνησε στις αρχές του 20ου αιώνα μαζί με τις μπαταρίες Νικελίου - Σιδήρου. Όσον αφορά τις μπαταρίες Νικελίου - Καδμίου κατέχουν σημαντική θέση στην αγορά, στην κλειστή τους μορφή ως μια φορητή πηγή ενέργειας, και στην ανοικτή τους μορφή σε στάσιμες εφαρμογές και εφαρμογές έλξης. Διαθέτουν πολύ καλά χαρακτηριστικά σχετικά με το κύκλο και το χρόνο ζωής τους, ενώ τις συναντάμε σε βαρέως τύπου εφαρμογές και σε πολύ ψυχρά κλίματα. Ωστόσο, οι μπαταρίες Νικελίου - Καδμίου περιλαμβάνουν Κάδμιο, το οποίο δεν είναι καθόλου φιλικό προς το περιβάλλον. Σε φωτοβολταϊκά συστήματα, θα συναντήσουμε τις μπαταρίες αυτές αντί των μπαταριών Μολύβδου - Οξέος μόνο στην περίπτωση που απαιτείται λειτουργία σε πολύ χαμηλές (υπό το μηδέν) ή πολύ υψηλές (πάνω από 40°C) θερμοκρασίες, όπου οι μπαταρίες Μολύβδου - Οξέος κινδυνεύουν από πάγωμα ή πολύ μικρή διάρκεια ζωής, αντίστοιχα. Καλό είναι όμως οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες να αποφεύγονται γιατί προκαλούν μείωση της αποδοτικότητας της φόρτισης και μεγάλη αύξηση του ρυθμού αυτοεκφόρτισης. Οι βιομηχανικές μπαταρίες Νικελίου - Καδμίου που χρησιμοποιούνται στα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι συνήθως ανοικτού τύπου, σχεδιασμένες για χρήση σε κατάσταση αναμονής σε χαμηλούς ρυθμούς εκφόρτισης. Ένα από τα μειονεκτήματά αυτού του τύπου συσσωρευτών είναι το “φαινόμενο μνήμης”, το οποίο αναπτύσσεται υπό ορισμένες συνθήκες λειτουργίας. Το “φαινόμενο μνήμης” περιγράφει την τάση που εμφανίζει η μπαταρία να προσαρμόζει της ηλεκτρικές της ιδιότητες στις συνθήκες κύκλου στις οποίες λειτουργεί για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό σημαίνει ότι μια μπαταρία που έχει κύκλο μέχρι ένα συγκεκριμένο βάθος εκφόρτισης για μεγάλο χρονικό διάστημα τείνει να προσαρμόζει την εκφόρτιση σε αυτό το βάθος εκφόρτισης ακόμα και στην περίπτωση που σχεδιάζεται μια μεγαλύτερη εκφόρτιση σε υψηλό ρεύμα εκφόρτισης. Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος μπορεί να γίνει με την εκφόρτιση της μπαταρίας αρκετές φορές με μικρής έντασης ρεύμα. Τέλος δεν θα πρέπει σε καμία περίπτωση να αγνοήσουμε ή να παραβλέψουμε τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του καδμίου. Οι συσσωρευτές Νικελίου - Καδμίου περιέχουν ποσότητα καδμίου μεταξύ 6% (για βιομηχανικούς συσσωρευτές) και 18% (για συσσωρευτές καταναλωτών). Το κάδμιο είναι ένα τοξικό βαρύ μέταλλο που απαιτεί μεγάλη προσοχή στον τρόπο απόρριψης της μπαταρίας διότι μπορεί να προκαλέσει μόλυνση κατά την υγειονομική ταφή ή την αποτέφρωσή του. Γι’ αυτό πολλές είναι οι χώρες στις οποίες λειτουργούν προγράμματα ανακύκλωσης για τη συγκέντρωση και την επανεπεξεργασία παλιών

συσσωρευτών. Οι κατασκευαστές παρέχουν οδηγίες για ασφαλή χειρισμό, χρήση και διάθεση των μπαταριών και οι οποίες επίσης ενημερώνουν για τη φυσική φθορά που μπορούν να υποστούν καθώς και για πιθανά βραχυκυκλώματα κατά την πλήρη φόρτιση ή υπερεκφόρτιση [6].

3.4.3 Συσσωρευτές Λιθίου

Είναι λογικό ότι όσο η τεχνολογία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας εξελίσσεται, τόσο μεγαλώνει και η ανάγκη για καλύτερα συστήματα αποθήκευσης. Οι συσσωρευτές Λιθίου παρουσιάζουν την μεγαλύτερη τεχνολογική ανάπτυξη στο χώρο των συσσωρευτών τα τελευταία χρόνια. Μετά την τεράστια επιτυχία και επικράτησή τους στο χώρο των φορητών ηλεκτρικών συσκευών όπως για παράδειγμα τα κινητά τηλέφωνα και τα laptops, ακολούθησε η μετάβασή τους σε συσσωρευτές μεγάλου μεγέθους με απώτερο στόχο τη χρήση τους σε ένα καινούριο πλήθος εφαρμογών.

Η λειτουργία τους στηρίζεται στη μετακίνηση ιόντων Λιθίου, ανάμεσα στην κάθοδο και την άνοδο και αυτή είναι η ουσιώδης διαφορά με τις μπαταρίες που έχουμε αναφέρει έως τώρα, στις οποίες η βασική μορφή των υλικών καθόδου και ανόδου παραμένει σταθερή.[6] Στους συσσωρευτές ιόντων Λιθίου έχουν χρησιμοποιηθεί 4 είδη ηλεκτρολυτών: υγροί ηλεκτρολύτες, gel ηλεκτρολύτες, ηλεκτρολύτες πολυμερούς και κεραμικοί ηλεκτρολύτες. Οι υγροί ηλεκτρολύτες είναι διαλύματα ενός άλατος Λιθίου σε οργανικούς διαλύτες, συνήθως ανθρακικά άλατα. Ο ηλεκτρολύτης πολυμερούς είναι ένα υλικό χωρίς διαλύτες, όπου σχηματίζεται μια ιοντικά αγωγίμη φάση διαλύοντας ένα άλας σε πολυμερές υψηλού μοριακού βάρους. Στην περίπτωση του gel ηλεκτρολύτη έχουμε ένα ιοντικά αγωγίμο υλικό όπου ένα άλας και ένα διάλυμα διαλύονται ή αναμειγνύονται με ένα πολυμερές υψηλού μοριακού βάρους. Για τους κεραμικούς ηλεκτρολύτες θα πρέπει να σημειωθεί ότι αναφέρονται σε ανόργανα υλικά στερεάς κατάστασης που είναι ιοντικά αγωγίμα.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των εν λόγω συσσωρευτών είναι η πολύ καλή απόδοσή τους, η υψηλότερη απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες που επιτυγχάνεται εξαιτίας της μη υδάτινης φύσης των ηλεκτρολυτών τους, η μεγάλη διάρκεια ζωής τους καθώς και η πολύ καλή ασφάλεια σε συνθήκες υψηλής πίεσης στο εσωτερικό του στοιχείου και χωρίς να παρατηρείται απώλεια χωρητικότητας. Επίσης δεν θα πρέπει να παραλείψουμε ότι πρόκειται για κλειστά στοιχεία και δεν χρειάζονται συντήρηση, έχουν χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης (2% με 8% ανά μήνα) και δυνατότητα ταχείας φόρτισης, υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα και δεν εμφανίζουν το “φαινόμενο μνήμης”. Τέλος είναι ελαφρύτεροι από άλλους επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές που έχουν την ίδια αποθηκευμένη ενέργεια.

Παρά το πολύ υψηλό κόστος τους, η χρήση συσσωρευτών Λιθίου σε φωτοβολταϊκά συστήματα μπορεί να αποτελέσει μια εξαιρετική επιλογή. Υποστηρικτής αυτής της επιλογής αποτελεί μια έρευνα που έγινε πριν λίγα χρόνια από το Πανεπιστήμιο του Southampton και την εταιρία REAPsystems για την τεχνολογία συσσωρευτών λιθίου και η οποία έδειξε ότι ένας νέος τύπος μπαταρίας λιθίου έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει την αποδοτικότητα και να μειώσει το κόστος σε εφαρμογές ηλεκτρικής ενέργειας [6]. Η έρευνα έγινε συγκεκριμένα για τη χρήση συσσωρευτών λιθίου ως συσκευές αποθήκευσης σε φωτοβολταϊκά συστήματα. Ο συσσωρευτής που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας συσσωρευτής φωσφορικού άλατος λιθίου σιδήρου, LiFePO_4 , ο οποίος ήταν συνδεδεμένος με ένα φωτοβολταϊκό σύστημα σε ένα κτίριο του Πανεπιστημίου. Η έρευνα έδειξε ότι ο συσσωρευτής που χρησιμοποιήθηκε έχει ενεργειακή απόδοση 95%, ενώ οι συσσωρευτές Μολύβδου - Οξέος που κατά κύριο λόγο επιλέγονται έχουν απόδοση περίπου 85%. Σ' αυτό θα πρέπει να συνυπολογίσουμε και ότι έχουν μικρότερο βάρος και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τις μπαταρίες Μολύβδου – Οξέος. Τέλος θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι συσσωρευτές Λιθίου φτάνουν τους 1600 κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης, το οποίο αυτομάτως σημαίνει ότι ελαττώνεται ο ρυθμός αντικατάστασής τους. Η έρευνα έδειξε ότι υπάρχει η δυνατότητα να βελτιωθεί η απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων και παράλληλα να μειωθεί το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης τους [6], [11].

Η εμπειρία έχει δείξει ότι στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα, ο συσσωρευτής είναι το πιο αδύναμο στοιχείο αφού το προσδόκιμο ζωής της είναι συνήθως μικρότερο από αυτό όλων των άλλων στοιχείων του συστήματος. Αυτός είναι ο λόγος που είναι και το πιο ακριβό στοιχείο με το ποσοστό να φτάνει ή και να ξεπερνάει το 30% του συνολικού κόστους ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του. Στην παρούσα εργασία, εκτιμώντας όλα τα παραπάνω στοιχεία που έχουμε αναφέρει, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε συσσωρευτές Μολύβδου – Οξέος. Η αναλυτική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας και η ενσωμάτωση των συσσωρευτών στο σύστημά μας περιγράφεται στο Κεφάλαιο 6.

4.

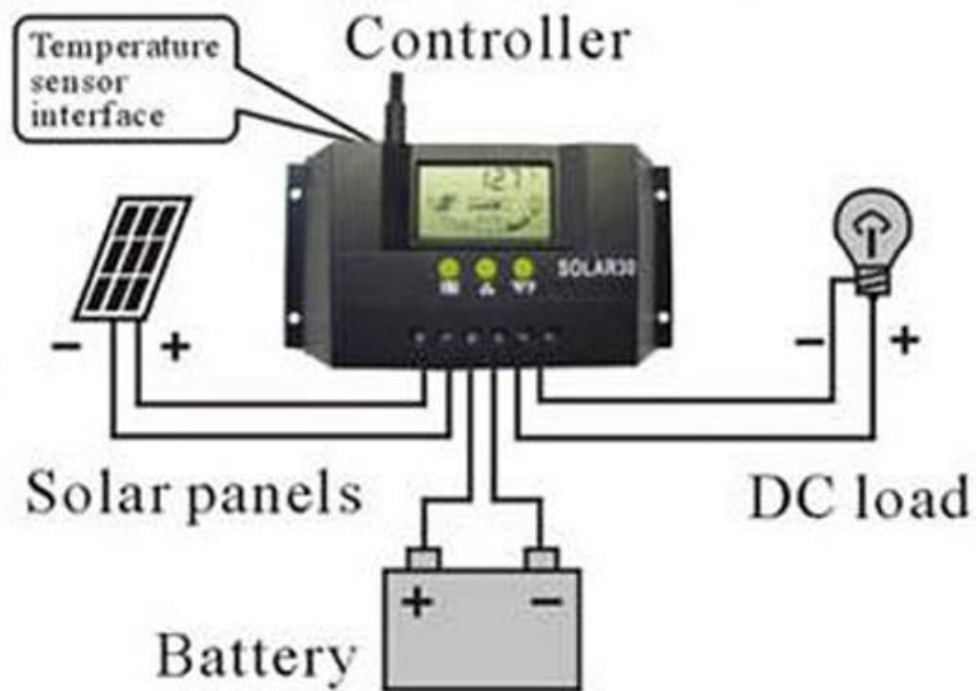
ΡΥΘΜΙΣΤΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ & ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ DC/AC

4.1 Ρυθμιστές φόρτισης συσσωρευτών

Για την εύρυθμη λειτουργία του συσσωρευτή, καθώς και για τη σωστή συντήρησή του είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται ένας ελεγκτής φόρτισης. Η κύρια λειτουργία ενός ελεγκτή φόρτισης σε ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι να διατηρεί το συσσωρευτή στην υψηλότερη δυνατή στάθμη φόρτισης και ταυτόχρονα να τον προστατεύει από την υπερφόρτιση και από την υπερεκφόρτιση. Ο αλγόριθμος ενός ελεγκτή φόρτισης του συσσωρευτή καθορίζει την απόδοση της φόρτισης του συσσωρευτή συμβάλλοντας έτσι στην βέλτιστη αξιοποίηση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Ουσιαστικά, ο ρυθμιστής φόρτισης είναι μια ηλεκτρονική συσκευή που οι βασικές του λειτουργίες είναι οι ακόλουθες:

- Η βέλτιστη φόρτιση των συσσωρευτών παράλληλα με την προστασία από υπερφόρτιση
- Η πρόληψη ώστε ο συσσωρευτής να μην βρεθεί εκτός των ορίων εκφόρτισης

Επίσης, ένας ρυθμιστής φόρτισης παρέχει στον χρήστη του συστήματος γενικές πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση φόρτισης των συσσωρευτών.



Σχήμα 4.1: Απεικόνιση της λειτουργίας ενός ρυθμιστή φόρτισης [17].

Αναλύοντας τις λειτουργίες ενός ρυθμιστή φόρτισης ξεκινάμε από την προστασία από την υπερφόρτιση. Ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα με συσσωρευτές αποθήκευσης σχεδιάζεται έτσι ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του ηλεκτρικού φορτίου που έχουμε υπολογίσει λαμβάνοντας υπόψη τις χειρότερες συνθήκες, δηλαδή για τις μέρες του χρόνου με τη μικρότερη αναλογία ηλιακής ακτινοβολίας – ενέργειας φορτίου. Όταν η φωτοβολταϊκή συστοιχία λειτουργεί κάτω από ιδανικές καιρικές συνθήκες (διάρκεια του καλοκαιριού), η ενέργεια που παράγεται από τη συστοιχία, συχνά ξεπερνάει τις απαιτήσεις του φορτίου. Για να αποφευχθεί λοιπόν η βλάβη του συσσωρευτή από υπερφόρτιση, χρησιμοποιούμε έναν ελεγκτή φόρτισης για να την προστατεύει. Ο ελεγκτής φόρτισης θα πρέπει να προστατεύει το σύστημά μας από υπερφόρτιση ανεξάρτητα από την διαστασιολόγηση του συστήματός μας και ανεξάρτητα από τις αλλαγές στο προφίλ του φορτίου, στη θερμοκρασία λειτουργίας και στην ηλιακή ακτινοβολία που μπορεί να υπάρξουν.

Η ρύθμιση του φορτίου είναι η πρώτη λειτουργία ενός ελεγκτή φόρτισης ενός του συσσωρευτή και ίσως το πιο σημαντικό θέμα που συνδέεται με την απόδοση και τη ζωή του συσσωρευτή μπαταρίας. Ο σκοπός ενός ελεγκτή φόρτισης είναι να τροφοδοτεί το του συσσωρευτή με ισχύ, με έναν τρόπο που να επαναφορτίζει πλήρως το συσσωρευτή αλλά ταυτόχρονα να μην τον υπερφορτίζει. Σε περίπτωση έλλειψης του ελέγχου φόρτισης, το ρεύμα

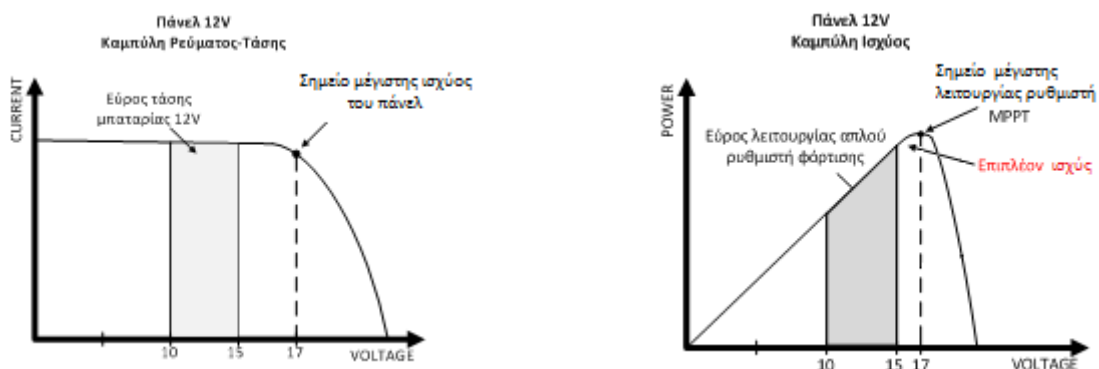
από τη συστοιχία θα διοχετεύεται στο συσσωρευτή ανάλογα με την ηλιακή ακτινοβολία, είτε ο συσσωρευτής χρειάζεται φόρτιση είτε όχι. Εάν ο συσσωρευτής είναι πλήρως φορτισμένος, η υπερβολική φόρτιση θα οδηγήσει το συσσωρευτή σε πολύ υψηλά επίπεδα που θα προκαλέσουν σοβαρή αεριοποίηση, απώλεια ηλεκτρολύτη, εσωτερική θέρμανση και επιταχυνόμενη διάβρωση του πλέγματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις, εάν ο συσσωρευτής δεν προστατεύεται από υπερφόρτιση σ' ένα φωτοβολταϊκό σύστημα, το πιθανότερο αποτέλεσμα είναι να έχουμε πρόωρη αποτυχία του συσσωρευτή και απώλεια φορτίου. Οι ελεγκτές φόρτισης εμποδίζουν την υπέρμετρη υπερφόρτιση του συσσωρευτή με το να διακόπτουν ή να περιορίζουν τη ροή του ρεύματος από τη συστοιχία στο συσσωρευτή, όταν αυτή φτάνει στην κατάσταση πλήρους φόρτισης.

Η επόμενη σημαντική λειτουργία ενός ρυθμιστή φόρτισης είναι η προστασία από την υπερεκφόρτιση. Σε περιόδους που η ηλιακή ακτινοβολία είναι κάτω από το μέσο όρο ή σε περιόδους υπερβολικής χρήσης ηλεκτρικού φορτίου, η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μπορεί να μην είναι αρκετή για να διατηρεί το συσσωρευτή πλήρως επαναφορτισμένο. Όταν λοιπόν ο συσσωρευτής εκφορτίζεται βαθειά, η αντίδραση στο συσσωρευτή συμβαίνει κοντά στα ηλεκτρόδια με αποτέλεσμα να αποδυναμώνεται ο δεσμός μεταξύ ενεργών υλικών και ηλεκτροδίων. Ένας συσσωρευτής που υπόκειται σε επαναλαμβανόμενη υπερβολική εκφόρτιση, έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται η χωρητικότητα και κατ' επέκταση η διάρκεια ζωής του. Για την προστασία των συσσωρευτών από την υπερεκφόρτιση, οι περισσότεροι ελεγκτές περιέχουν μια προαιρετική λειτουργία αποσύνδεσης των φορτίων του συστήματος όταν αντιληφθούν ότι ο συσσωρευτής φτάνει σε χαμηλή τάση.

Σε μερικές περιπτώσεις, τα ηλεκτρικά φορτία σε ένα φωτοβολταϊκό σύστημα απαιτούν υψηλή τάση για να λειτουργήσουν. Εάν λοιπόν οι συσσωρευτές εκφορτίζονται πολύ, η τάση πέφτει κάτω από το λειτουργικό εύρος των φορτίων με αποτέλεσμα να υπολειτουργούν ή ακόμα και να μη λειτουργούν καθόλου. Αυτός είναι ένας ακόμα σημαντικός λόγος για τον οποίο πρέπει να περιορίζεται η υπερεκφόρτιση των συσσωρευτών στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Η προστασία από την υπερεκφόρτιση πραγματοποιείται ανοικτοκυκλώνοντας τη σύνδεση μεταξύ του συσσωρευτή και του ηλεκτρικού φορτίου όταν ο συσσωρευτής φτάνει σε ένα συγκεκριμένο σημείο χαμηλής τάσης αποσύνδεσης φορτίου (low voltage load disconnect set point). Οι περισσότεροι ελεγκτές φόρτισης έχουν μια λυχνία ένδειξης ή έναν ηχητικό συναγερμό που ειδοποιεί το χρήστη του συστήματος ότι βρίσκεται σε κατάσταση αποσύνδεσης του φορτίου. Όταν ο συσσωρευτής έχει επαναφορτιστεί σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, τα φορτία συνδέονται πάλι στο συσσωρευτή. Αρκετοί ρυθμιστές φόρτισης διαθέτουν μια ή περισσότερες υποδοχές για να συνδέουμε τις ηλεκτρικές συσκευές που επιθυμούμε να τροφοδοτήσουμε από τον

συσσωρευτή. Έτσι, έχουν την επιπλέον δυνατότητα να διακόψουν τη λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών όταν αντιληφθούν ότι η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή γίνει μικρότερη από το χαμηλότερο επιτρεπτό όριο, προστατεύοντάς τον από πλήρη αποφόρτιση που συνέβαλε στη μείωση του χρόνου ζωής του [15].

Επίσης, παρατηρώντας τη χαρακτηριστική καμπύλη του φωτοβολταϊκού στοιχείου (Σχήμα 4.2) συμπεραίνεται ότι στην περίπτωση που ένας συσσωρευτής συνδέεται απευθείας στην φωτοβολταϊκή συστοιχία, τότε σημείο λειτουργίας της συστοιχίας καθορίζεται από την τάση του συσσωρευτή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια να μην λειτουργούν πάντα στο μέγιστο σημείο λειτουργίας (Maximum Power Point, MPP) και να μην γίνεται η βέλτιστη αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Για να αποφευχθούν αυτές οι απώλειες ενέργειας, ο ρυθμιστής φόρτισης περιέχει και έναν ανιχνευτή του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Στη λειτουργία αυτή, παρακολουθείται συνεχώς το ρεύμα και η τάση και ελέγχεται ένας μετατροπέας DC/DC ο οποίος συνδέεται μεταξύ της φωτοβολταϊκής συστοιχίας και των συσσωρευτών, έτσι ώστε να παράγεται συνεχώς η μέγιστη δυνατή ισχύς από τη φωτοβολταϊκή συστοιχία. Ακολουθεί μια απεικόνιση για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του ρυθμιστή MPPT:



Σχήμα 4.2: Λειτουργία ρυθμιστή MPPT [19].

Ο συγκεκριμένος τύπος ρυθμιστή φόρτισης είναι απαραίτητος στα φωτοβολταϊκά συστήματα διότι όπως φαίνεται και παραπάνω αυξάνει την απόδοση της εκάστοτε εγκατάστασης.

Η επιλογή των ελεγκτών φόρτισης στα φωτοβολταϊκά συστήματα περιλαμβάνει την εξέταση πολλών παραγόντων ανάλογα με την πολυπλοκότητα και τις επιλογές ελέγχου που απαιτούνται. Ορισμένοι από τους βασικούς παράγοντες που θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας κατά την επιλογή των ελεγκτών φόρτισης για τα φωτοβολταϊκά συστήματα παρατίθεται παρακάτω:

- Τάση λειτουργίας του συστήματος

- Ρεύματα φωτοβολταϊκής συστοιχίας και φορτίου
- Τύπος και μέγεθος του συσσωρευτή
- Περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας
- Δείκτες συστήματος, συναγερμοί και μετρητές (πχ. παραγόμενης ενέργειας)
- Κόστος, εγγύηση και διαθεσιμότητα και
- Ισχύς της φωτοβολταϊκής συστοιχίας που θα χρησιμοποιήσουμε.

4.2 Μετατροπείς ισχύος DC/AC

Επειδή οι περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές λειτουργούν με εναλλασσόμενο ρεύμα, το φωτοβολταϊκό σύστημα θα πρέπει να περιλαμβάνει έναν ή περισσότερους αντιστροφείς DC/AC. Ο αντιστροφέας DC/AC (inverter) είναι μια συσκευή που χρησιμοποιείται για την μετατροπή συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Δηλαδή πρόκειται για μια συσκευή με ηλεκτρονικές διατάξεις η οποία δέχεται ως είσοδό συνεχή τάση και παράγει ως έξοδό σταθερή ηλεκτρική τάση 230V και συχνότητας 50Hz.

Επίσης υπάρχουν αντιστροφείς οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να λειτουργούν και αντίστροφα, δηλαδή, όταν δεν επαρκεί η ενέργεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων και λογικά έχουν εκφορτιστεί και οι συσσωρευτές, τότε δέχονται εναλλασσόμενο (AC) και παράγουν συνεχές (DC) με σκοπό οι μπαταρίες να φορτιστούν από πηγές εναλλασσόμενου ρεύματος (πχ. το ηλεκτρικό δίκτυο). Ο αντιστροφέας, κατά κανόνα, τοποθετείται σε κοντινή απόσταση από το φωτοβολταϊκό σύστημα, προστατευμένος από το περιβάλλον και σε συνθήκες ξηρότητας και καλού εξαερισμού. Ορισμένα από τα βασικά και επιθυμητά χαρακτηριστικά ενός αντιστροφέα είναι τα ακόλουθα:

- ✓ Ο υψηλός βαθμός απόδοσης μετατροπής ισχύος
- ✓ Η υψηλή ικανότητα υπερφόρτωσης στην έναρξη
- ✓ Η ανοχή απέναντι στις διακυμάνσεις της τάσης της μπαταρίας
- ✓ Η προστασία από βραχυκυκλώματα και υπερτάσεις.

Η επιλογή του αντιστροφέα DC/AC πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη μας μερικά σημαντικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Από την είσοδο DC (συσσωρευτής) τα κρίσιμα μεγέθη είναι η ονομαστική τάση του συσσωρευτή και το εύρος τιμών της, καθώς και το μέγιστο ρεύμα φόρτισης του συσσωρευτή (όταν ο μετατροπέας DC/AC λειτουργεί σαν φορτιστής). Από την AC πλευρά του αντιστροφέα (καταναλωτής) πρέπει να επιλέγονται κατάλληλα η ονομαστική τάση και η συχνότητα AC (230V, 50Hz), η συνεχής ισχύς AC (είναι η ισχύς με την οποία

μπορούν να καλύπτουν συνεχώς ένα φορτίο) και η ισχύς υπερφόρτισης (είναι η ισχύς που παρέχουν για μικρά χρονικά διαστήματα και είναι απαραίτητα για την εκκίνηση των ηλεκτρικών συσκευών) [2].

Για τους αντιστροφείς ισχύος υπάρχει το κριτήριο τους σήματος εξόδου που παράγουν, με βάση το οποίο ταξινομούνται στις εξής κατηγορίες: τους ορθογώνιους, τους τραπεζοειδείς και τους ημιτονοειδείς. Οι ημιτονοειδείς αντιστροφείς έχουν υψηλό βαθμό απόδοσης και παρουσιάζουν συμβατότητα με τις οικιακές ηλεκτρικές συσκευές λόγω της χαμηλής αρμονικής παραμόρφωσης της AC τάσης που παράγουν, είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται κυρίως στα φωτοβολταϊκά συστήματα. Οι ορθογώνιοι και οι τραπεζοειδείς αντιστροφείς δεν παράγουν AC τάση με χαμηλή αρμονική παραμόρφωση όσο οι ημιτονοειδείς, αλλά έχουν το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους. Όλοι οι αντιστροφείς, ανεξαρτήτως κατηγορίας, κατά τη λειτουργία τους εκπέμπουν ένα ποσό θερμότητας, το οποίο εξαρτάται από τις απώλειες ισχύος τους και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Για αυτόν τον λόγο, διαθέτουν μια αυτόματη λειτουργία που απενεργοποιεί τον αντιστροφέα σε περίπτωση υπερθέρμανσης. Επίσης οι αντιστροφείς μπορεί να διαθέτουν ή όχι ενσωματωμένους φορτιστές μπαταριών. Αυτοί που διαθέτουν ενσωματωμένους φορτιστές προτιμώνται αν επιθυμούμε τη φόρτιση των μπαταριών με ισχύ που προέρχεται από την AC πλευρά του αντιστροφέα.

Βασικό λειτουργικό χαρακτηριστικό των αντιστροφέων είναι ο βαθμός απόδοσης τους, ο οποίος ορίζεται ως εξής[21]:

$$\eta = \frac{P_{AC}}{P_{DC}} \cdot 100\% \quad (5)$$

όπου:

η : ο βαθμός απόδοσης

P_{AC} : η AC ισχύς εξόδου του αντιστροφέα

P_{DC} : η DC ισχύς εισόδου του αντιστροφέα

Συνήθως, ο βαθμός απόδοσης των αντιστροφέων που χρησιμοποιούνται σε αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα κυμαίνεται από 85% έως 95%. Ο βαθμός απόδοσης των αντιστροφέων μειώνεται όταν χρησιμοποιούνται σε χαμηλές τιμές ισχύος εξόδου. Για παράδειγμα, η χρήση ενός αντιστροφέα 1000 Watt για να τροφοδοτήσει ένα φορτίο των 20 Watt δεν είναι συμφέρουσα διότι ο αντιστροφέας θα χρειαστεί να απορροφήσει 30 με 40 Watt από την μπαταρία, προκειμένου ο ίδιος ο αντιστροφέας να λειτουργήσει και να πραγματοποιήσει την μετατροπή της DC τάσης σε AC [8].

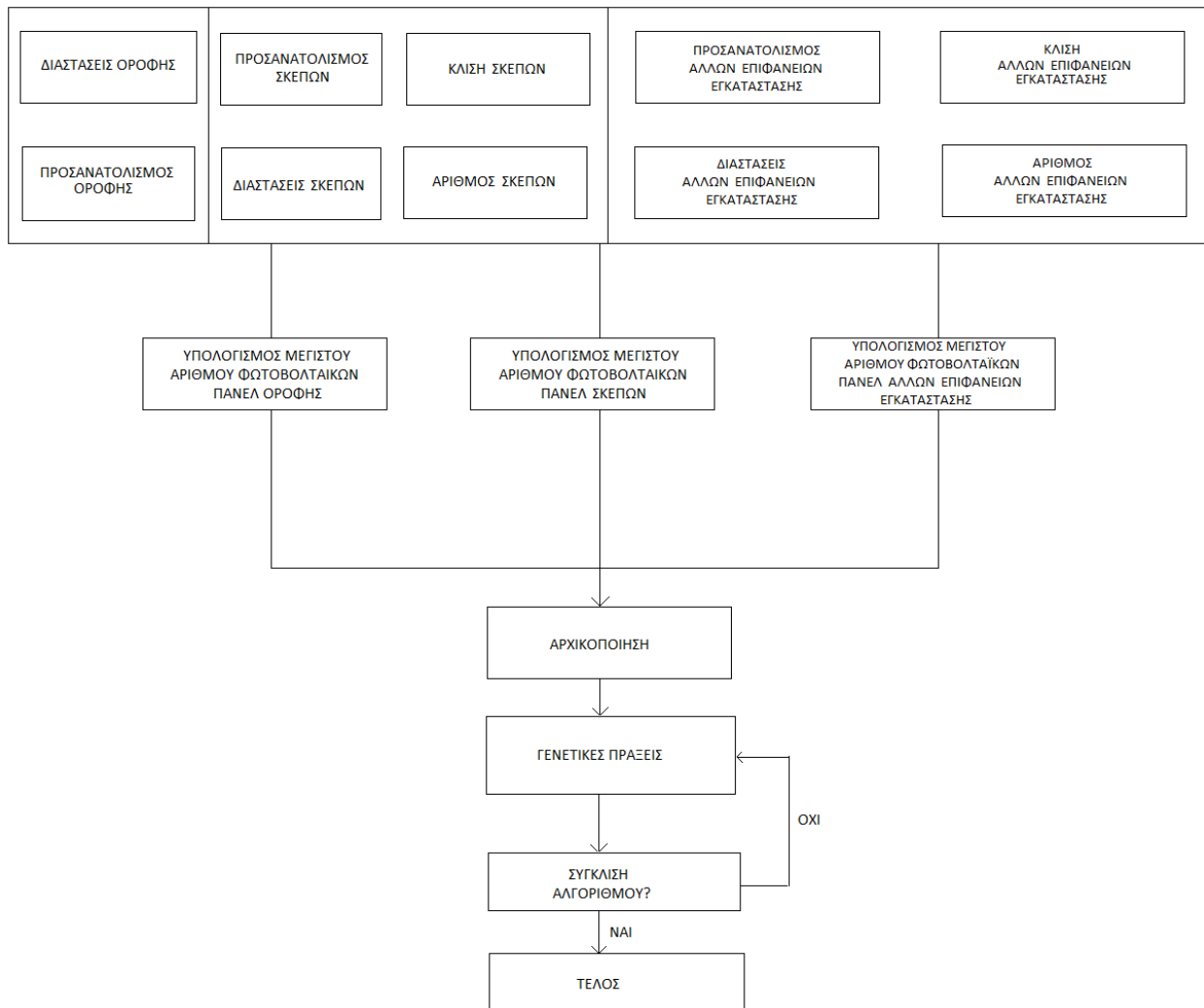
5.

ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ

5.1 Ανάλυση της λύσης του προβλήματος με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων

Στόχος μας στην παρούσα εργασία είναι η σχεδίαση με το βέλτιστο τρόπο ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ενσωματωμένου σε κτίρια με σκοπό την πλήρη κάλυψη του φορτίου με το ελάχιστο οικονομικό κόστος για είκοσι χρόνια. Το γενικό διάγραμμα του ενσωματωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο μελετάται στην παρούσα εργασία φαίνεται στο Σχ. 1.3. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι το σύστημα αποτελείται από συστοιχίες φωτοβολταϊκών πλαισίων (συνδεδεμένων σε σειρά ή/και παράλληλα) οι οποίες συνδέονται με τους φορτιστές. Το φορτίο που παράγεται και δεν καταναλώνεται άμεσα αποθηκεύεται σε μπαταρίες και στη συνέχεια μέσω ενός μετατροπέα ισχύος χρησιμοποιείται προς κατανάλωση. Όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενα Κεφάλαια, για το βέλτιστο σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τους εξής παράγοντες: τον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων, των μπαταριών και των φορτιστών, καθώς θεωρούμε ότι το σύστημά μας έχει ένα μόνο αντιστροφέα DC/AC. Οι παραπάνω πληροφορίες βέβαια έχουν άμεση συνάρτηση με τις διαθέσιμες επιφάνειες που ο χρήστης μας δίνει ως είσοδο καθώς και αν υπάρχει επίπεδη οριζόντια οροφή. Η οριζόντια οροφή είναι μια ιδιαίτερη επιφάνεια για το λόγο και μόνο ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που θα τοποθετήσουμε θα έχουν την δυνατότητα δύο κλίσεων στη διάρκεια του έτους. Στις υπόλοιπες διαθέσιμες επιφάνειες (πχ. τοίχοι, δομικά στοιχεία του κτηρίου κλπ.) αφού υπολογιστεί ο μέγιστος αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων που μπορούν να τοποθετηθούν σε καθεμία απ' αυτές, γνωρίζουμε ότι υποχρεωτικά θα έχουν την κλίση και τον προσανατολισμό της εκάστοτε επιφάνειας. Μ' αυτό το τρόπο πλέον ολοκληρώνεται η τελική μορφή των χρωμοσωμάτων που θα λάβουν μέρος στη μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων. Επίσης υπενθυμίζουμε ότι στο συνολικό κόστος συνυπολογίζεται το κόστος αγοράς και το κόστος συντήρησης για κάθε στοιχείο του συστήματός μας, κάτι το οποίο θα αναλυθεί εκτενώς παρακάτω. Τα βήματα που συμπληρώνουν την λειτουργία του γενετικού

αλγορίθμου είναι πρώτα απ' όλα η υλοποίηση μιας ρουτίνας αρχικοποίησης, στη συνέχεια λαμβάνουν μέρος οι γενετικές πράξεις για να ολοκληρωθεί η διαδικασία με την ικανοποίηση ενός κριτηρίου σύγκλισης. Η γενική λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου απεικονίζεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 5.1: Το διάγραμμα ροής του λογισμικού σχεδίασης φωτοβολταϊκών συστημάτων ενσωματωμένων σε κτήρια, το οποίο αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία.

5.2 Αρχικοποίηση αλγορίθμου

Για να εφαρμοστεί ο γενετικός αλγόριθμος θα πρέπει να διαβαστούν από τα αντίστοιχα αρχεία όλες οι είσοδοι. Αυτοί οι παράμετροι - είσοδοι αφορούν την ισχύ του φορτίου την οποία επιθυμούμε να καλύψουμε, καθώς και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των μπαταριών, των φωτοβολταϊκών πλαισίων, των φορτιστών και του αντιστροφέα DC/AC που θα χρησιμοποιήσουμε. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι εκτός από αυτές τις εισόδους υπάρχουν και οι είσοδοι που αφορούν την ηλιακή ακτινοβολία όλου του χρόνου, όπου παίρνουμε ως δεδομένα την ακτινοβολία B_n (Direct Normal Radiation) και D_h (Diffuse Horizontal Radiation), το

γεωγραφικό πλάτος και το συντελεστή ανάκλασης του τόπου που μελετάμε. Τα δεδομένα για τις ακτινοβολίες B_h και D_h τα λάβαμε από το εργαλείο Meteonorm [17] και αναφέρονται στις μέσες τιμές ανά ώρα και ανά μέρα από το έτος 2001 έως το 2010. Αξίζει να σημειωθεί ότι όλος ο εξοπλισμός που χρησιμοποιούμε και περιγράφουμε παρακάτω αποτελείται από επιλεγμένα εμπορικά προϊόντα που υπάρχουν στην διαθέσιμα αγορά αυτή την περίοδο. Όσον αφορά τη λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου αξίζει να αναφερθεί ότι κάθε φορά που ο αλγόριθμος βρίσκει μια λύση, στη συνέχεια υπολογίζει την ενέργεια που παράγεται. Έτσι δεν δημιουργείται, όπως θα ήταν φυσικό, ένας πίνακας τεσσάρων διαστάσεων ο οποίος θα αποθηκεύει την ενέργεια που παράγουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ανά ημέρα, ανά ώρα, ανά γωνία κλίσης και ανά γωνία αζιμούθιου, κάτι το οποίο θα είχε σαν αποτέλεσμα να μεγάλωνε αισθητά η διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου.

Όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα χαρακτηριστικά τους βρίσκονται στο αρχείο εισόδου `pnmodules.txt` και τα χαρακτηριστικά τα οποία διαβάζονται με την σειρά είναι τα ακόλουθα: η ονομασία τους, η μέγιστη ισχύ που παράγουν, το κόστος εγκατάστασης, το κόστος συντήρησης και τα τετραγωνικά μέτρα της επιφάνειας του πλαισίου. Για τα χαρακτηριστικά των μπαταριών, τα οποία βρίσκονται στο αρχείο εισόδου `batteries.txt`, η σειρά είναι: η ονομασία τους, η χωρητικότητά τους, η τάση τους, το μέγιστο επιτρεπτό βάθος εκφόρτισης, τον βαθμό απόδοσης φόρτισης, το κόστος εγκατάστασης και το κόστος συντήρησης. Για τους φορτιστές, τα χαρακτηριστικά των οποίων βρίσκονται και διαβάζονται από το αρχείο εισόδου `solarchargers.txt`, έχουμε: την ονομασία τους, τον τύπο τους (αν διαθέτουν λειτουργία MPPT ή όχι), τον βαθμό απόδοσής τους, την ισχύ που καλύπτουν, τον χρόνο μεταξύ βλαβών τους σε ώρες, το κόστος εγκατάστασης και το κόστος συντήρησης. Τέλος για τον αντιστροφέα DC/AC που χρησιμοποιούμε, τα χαρακτηριστικά του διαβάζονται από το αρχείο εισόδου `inverters.txt` με την σειρά που ακολουθεί: η ονομασία του, ο βαθμός απόδοσης του, η μέγιστη ισχύς του, ο χρόνος μεταξύ βλαβών του σε ώρες, το κόστος εγκατάστασης και το κόστος συντήρησης. Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητο να αναφερθεί ότι το προφίλ του μεταβλητού φορτίου που πρέπει να καλυφθεί διαβάζεται από ξεχωριστό αρχείο τύπου “.txt” και περιέχει 8760 τιμές (κάθε μέρα και κάθε ώρα για όλο το χρόνο) και αποτελεί τις μέσες καταναλώσεις μιας κατοικίας.

Τέλος, αφού εκτελεστεί ο γενετικός αλγόριθμος θα έχουμε στη διαθεσή μας δύο αρχεία. Το ένα θα είναι το `energy_file.txt` το οποίο περιέχει 8760 τιμές και οι οποίες είναι οι τιμές της ενέργειας που παράγεται κάθε ώρα και κάθε μέρα από την τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στην εκάστοτε επιφάνεια του κτιρίου για την βέλτιστη λύση που έχει υπολογισθεί από τον αλγόριθμο σχεδίασης. Το άλλο αρχείο περιλαμβάνει συνοπτικά το βέλτιστο αποτέλεσμα που υπολογίστηκε από τον γενετικό αλγόριθμο. Συγκεκριμένα περιέχει με τη σειρά:

- ✓ Όλες τις παραμέτρους εισόδου και του συστήματός μας και του γενετικού αλγορίθμου
- ✓ Τον βέλτιστο συνολικό αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων που πρέπει να εγκατασταθούν
- ✓ Τον βέλτιστο αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων που πρέπει να εγκατασταθούν σε κάθε μία ξεχωριστά από τις διαθέσιμες επιφάνειες
- ✓ Τον βέλτιστο συνολικό αριθμό των μπαταριών που πρέπει να εγκατασταθούν
- ✓ Τον βέλτιστο συνολικό αριθμό των φορτιστών που πρέπει να εγκατασταθούν
- ✓ Το συνολικό κόστος της εγκατάστασης
- ✓ Τη συνολική διάρκεια εκτέλεσης του γενετικού αλγορίθμου
- ✓ Τις δύο βέλτιστες κλίσεις των φωτοβολταϊκών πλαισίων της οροφής αν και εφόσον υπήρχε διαθέσιμη τέτοιου τύπου επιφάνεια

Στη συνέχεια του εν λόγω αρχείου ακολουθούν τα κόστη της συνολικής εγκατάστασης και της συντήρησης ολόκληρου του συστήματος μας, αλλά και τα αντίστοιχα κόστη των επιμέρους στοιχείων του συστήματός μας (φωτοβολταϊκά πλαίσια, μπαταρίες, φορτιστές και μετατροπείς ισχύος DC/AC).

5.3 Μοντελοποίηση του προβλήματος

Αντικειμενική συνάρτηση-Συνάρτηση προσαρμογής

Στη συγκεκριμένη εργασία έχουμε θεωρήσει ότι στην περίπτωση που ο χρήστης μας δώσει την δυνατότητα να τοποθετήσουμε φωτοβολταϊκά πλαίσια στην οροφή του κτιρίου, τα πλαίσια θα λαμβάνουν δύο διαφορετικές κλίσεις κατά τη διάρκεια του έτους (προκειμένου να εκμεταλλευτούμε σε μεγαλύτερο βαθμό την ηλιακή ακτινοβολία), μία για τους χειμερινούς μήνες και μία για τους θερινούς μήνες. Έτσι καταλήγουμε στην τελική μορφή που θα έχει κάθε χρωμόσωμα των Γενετικών Αλγορίθμων και η οποία είναι: $c = \{b_1/b_2/N_1/N_2/[Y_1.....Y_v]\}$ όπου b_1 , b_2 είναι οι γωνίες κλίσης που θα έχουν τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, αν και εφόσον υπάρχουν στην οροφή του κτιρίου. Επίσης N_1 είναι ο αριθμός των μπαταριών, N_2 είναι ένας τυχαίος αριθμός, που αρχικοποιείται από τον γενετικό αλγόριθμο και η τιμή του είναι ανάμεσα στο μηδέν και το άνω όριο των φωτοβολταϊκών πλαισίων που μπορούν να τοποθετηθούν στην οροφή (οριζόντια επιφάνεια). Επιπροσθέτως, το χρωμόσωμα μας θα μπορεί να έχει άλλα v γονίδια, όπου v ο αριθμός των επιφανειών που μας έχει δοθεί για την εγκατάσταση πλαισίων. Κάθε ένα στοιχείο του πίνακα $[Y_1.....Y_v]$ είναι επίσης ένας τυχαίος αριθμός που συμπληρώνει ο

γενετικός αλγόριθμος και μπορεί να έχει τιμή από το μηδέν έως το μέγιστο αριθμό φωτοβολταϊκών πλαισίων που μπορούν να τοποθετηθούν στην εκάστοτε διαθέσιμη επιφάνεια. Μια επιπλέον είσοδος του γενετικού αλγορίθμου είναι και ο συνολικός αριθμός των χρωμοσωμάτων του, ο οποίος έχει τεθεί στην τιμή 1000. Η τιμή αυτή δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα και ως προς την ταχύτητα εκτέλεσης του αλγορίθμου αλλά και ως προς την ακρίβεια σύγκλισής του στην βέλτιστη λύση. Έχουμε αναφέρει ότι το βέλτιστα σχεδιασμένο φωτοβολταϊκό σύστημα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις ενέργειας του φορτίου για όλο το έτος, αλλά ταυτόχρονα πρέπει να έχει και το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Γι' αυτό το λόγο σε αυτό το σημείο παραθέτουμε την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος μας την οποία και επιθυμούμε να ελαχιστοποιήσουμε:

$$g(N_1, N_2, N_3) = N_1 \cdot (C_1 + 20 \cdot C_{m1}) + N_2 \cdot (7 \cdot C_2 + 13 \cdot C_{m2}) + N_3 \cdot C_3 \cdot (N_c + 1) + N_3 \cdot C_{m3} \cdot (20 - N_c - 1) + C_4 \cdot (N_i + 1) + C_{m4} \cdot (20 - N_i - 1) \quad (6)$$

όπου:

C_1 : κόστος αγοράς των φωτοβολταϊκών πλαισίων

C_2 : κόστος αγοράς των μπαταριών

C_{m1} : κόστος συντήρησης των φωτοβολταϊκών πλαισίων

C_{m2} : κόστος συντήρησης των μπαταριών

N_3 : ο αριθμός των φορτιστών

C_3 : κόστος αγοράς των φορτιστών

N_c : ο αριθμός αντικαταστάσεων των φορτιστών στη διάρκεια των 20 ετών λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος (υπολογίζεται διαιρώντας το χρόνο ζωής του συνολικού συστήματος με τον εκτιμώμενο χρόνο μεταξύ βλαβών του φορτιστή ο οποίος καθορίζεται από τον κατασκευαστή του)

C_{m3} : κόστος συντήρησης των φορτιστών

C_4 : κόστος αγοράς του μετατροπέα DC/AC

N_i : ο αριθμός αντικαταστάσεων του αντιστροφέα DC/AC στη διάρκεια των 20 ετών λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος (υπολογίζεται διαιρώντας το χρόνο ζωής του συνολικού συστήματος με τον εκτιμώμενο χρόνο μεταξύ βλαβών του αντιστροφέα ο οποίος καθορίζεται από τον κατασκευαστή του)

C_{m4} : κόστος συντήρησης του μετατροπέα DC/AC

Τέλος για να γίνει πλήρως κατανοητή η παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση έχουμε θεωρήσει ότι ο χρόνος ζωής για τις μπαταρίες είναι 3 χρόνια, άρα στην 20ετή μελέτη μας θα χρειαστεί να αλλάξουμε 6 φορές τις μπαταρίες εκτός από την αρχική (άρα συνολικά 7) και να τις συντηρήσουμε 13 φορές. Επειδή στο γενετικό αλγόριθμο χρησιμοποιούμε την συνάρτηση προσαρμογής και όχι την αντικειμενική συνάρτηση και επειδή στόχος μας είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, η ζητούμενη συνάρτηση προσαρμογής είναι η ακόλουθη:

$$f(N_1, N_2, N_4) = \begin{cases} C_{\max} - g(N_1, N_2, N_4), & \text{αν } C_{\max} - g(N_1, N_2, N_4) > 0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (7)$$

Η παραπάνω συνάρτηση προσαρμογής χρησιμοποιείται για την επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα πάρουν μέρος στις πράξεις της διασταύρωσης και της μετάλλαξης που θα ακολουθήσουν.

Συναρτήσεις υπολογισμού παραγόμενης ενέργειας

Το βασικό μέγεθος που χρειαζόμαστε για τον υπολογισμό του αποτελέσματος της βέλτιστης λύσης, είναι η συνολική παραγόμενη ενέργεια ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου ανά ώρα και ανά ημέρα. Η βασική εξίσωση που χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό της ενέργειας είναι η εξής [17]:

$$E = A \cdot H \cdot r \cdot PR \quad (8)$$

όπου:

E: η παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε Wh

A: το εμβαδόν του φωτοβολταϊκού πλαισίου σε m²

H: είναι το συνολικό ποσό ωριαίας ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και έχει μονάδες Wh/m²

r: είναι ο βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου επί τοις εκατό

PR: είναι συντελεστής απωλειών ενέργειας

Στην εργασία μας έχουμε θεωρήσει ότι υπάρχουν απώλειες ενέργειας στο σύστημα οι οποίες οφείλονται στην αντίσταση των καλωδίων που χρησιμοποιούνται στο σύστημά μας. Επίσης, σημαντικές απώλειες θα εμφανίζονται και εξαιτίας της σκόνης που επικάθεται στην επιφάνεια

των φωτοβολταϊκών πλαισίων, καθώς και λόγω σκιάσεων από γειτονικά κτίρια, εμπόδια κλπ. Οι παραπάνω απώλειες εκφράζονται μέσω του συντελεστή PR στην παραπάνω σχέση.

Στην εξίσωση (7) είναι γνωστές οι τιμές όλων των παραμέτρων εκτός από το συνολικό ποσό ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιούμε την επόμενη εξίσωση για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας [12]:

$$G_{\phi} = B_{\phi} + D_{\phi} + R_{\phi} \quad (9)$$

όπου:

G_{ϕ} : είναι το συνολικό ποσό ακτινοβολίας που δέχεται το φωτοβολταϊκό πλαίσιο και έχει μονάδες Wh/m²

B_{ϕ} : είναι η ακτινοβολία που λαμβάνεται απευθείας από τον Ήλιο (Direct normal solar radiation)

D_{ϕ} : είναι η ακτινοβολία που αποτελείται από ακτίνες που προέρχονται από τον ουρανό, όχι όμως απευθείας από τον Ήλιο (Diffuse horizontal solar radiation) και

R_{ϕ} : είναι η ακτινοβολία που προέρχεται από ανακλάσεις του εδάφους (albedo radiation).

Όσον αφορά την ακτινοβολία που λαμβάνεται απευθείας από τον Ήλιο, την υπολογίζουμε ως εξής [12]:

$$B_{\phi} = B_n \cdot \cos\theta \quad (10)$$

όπου:

B_{ϕ} : είναι η ακτινοβολία που έρχεται απευθείας από τον Ήλιο (Direct normal solar radiation)

B_n : είναι η συνιστώσα της απευθείας ακτινοβολίας από τον Ήλιο στο επίπεδο του συλλέκτη (Direct normal solar radiance)

θ : είναι η γωνία πρόσπτωσης

Στην παραπάνω εξίσωση το B_n μας είναι γνωστό από τα μετεωρολογικά δεδομένα και το θ το υπολογίζουμε με την παρακάτω σχέση [12]:

$$\theta = \cos^{-1} \left((\cos\theta_z \cdot \cos\beta) + (\sin\theta_z \cdot \sin\beta \cdot \cos(\gamma_z - \gamma)) \right) \quad (11)$$

όπου:

θ : είναι η γωνία πρόσπτωσης

θ_z : είναι η ηλιακή γωνία ζενίθ

β : είναι η γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων

γ_Z : είναι η ηλιακή γωνία αζιμούθιου και

γ : είναι η γωνία αζιμούθιου των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Από τα παραπάνω μας είναι γνωστές οι γωνίες β και γ και θέλουμε να υπολογίσουμε τις γωνίες θ_Z και γ_Z , οι οποίες υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\theta_z = \cos^{-1}((\sin f \cdot \sin d) + (\cos f \cdot \cos d \cdot \cos h_1)) \quad (12)$$

$$\gamma_z = \cos^{-1}((\sin d - \sin(90 - \theta_z) \cdot \sin f) / (\cos(90 - \theta_z) \cdot \cos f)) \quad (13)$$

όπου:

θ_Z : είναι η ηλιακή γωνία ζενίθ

f : είναι το γεωγραφικό πλάτος στο οποίο είναι τοποθετημένο το φωτοβολταϊκό σύστημα

d : είναι γωνία απόκλισης του Ήλιου και

h_1 : είναι η γωνία της ηλιακής ώρας.

Από τις δύο παραπάνω εξισώσεις τα μόνα άγνωστα στοιχεία είναι οι γωνίες d και h_1 , οι οποίες υπολογίζονται ως εξής:

$$d = 23.45 \cdot \sin(((360 \cdot d_n) + (360 \cdot 284)) / 365) \quad (14)$$

$$h_1 = ((h + 1) \cdot 15) - 180 \quad (15)$$

όπου:

d : είναι η γωνία απόκλισης του Ήλιου

d_n : είναι η μέρα του χρόνου στην οποία βρισκόμαστε (1-365)

h_1 : είναι η γωνία της ηλιακής ώρας και

h : είναι η ώρα για την οποία υπολογίζουμε το αποτέλεσμα (0-23).

Όσον αφορά τώρα την ακτινοβολία που αποτελείται από ακτίνες που έρχονται από τον ουρανό, όχι όμως απευθείας από τον Ήλιο, ο υπολογισμός της γίνεται από την παρακάτω εξίσωση [12]:

$$D_\varphi = D_h \cdot \frac{1}{2}(1 + \cos \beta) \quad (16)$$

όπου:

D_ϕ : είναι η ακτινοβολία που αποτελείται από ακτίνες που έρχονται από τον ουρανό, όχι όμως απευθείας από τον Ήλιο (Diffuse horizontal solar radiation)

D_h : είναι η ποσότητα της ακτινοβολίας που λαμβάνει η επιφάνεια του συλλέκτη σε οριζόντιο επίπεδο, η οποία όμως έχει διασκορπιστεί από μόρια και σωματίδια στην ατμόσφαιρα (διάχυτη ακτινοβολία).

β : είναι η γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Τέλος, για τον υπολογισμό της ακτινοβολίας που ανακλάται από το έδαφος, χρησιμοποιούμε την παρακάτω εξίσωση [12]:

$$R_\phi = \rho \cdot ((B_n \cdot \cos\theta_z) + D_h) \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos\beta), \quad \text{αν } \theta_z \leq 0 \quad \text{τότε } R_\phi = 0 \quad (17)$$

όπου:

R_ϕ : είναι η ακτινοβολία που προέρχεται από ανακλάσεις του εδάφους (albedo radiation)

ρ : είναι ο συντελεστής ανάκλασης του εδάφους

B_n : είναι η συνιστώσα της απευθείας ακτινοβολίας από τον Ήλιο στο επίπεδο του συλλέκτη. (Direct normal solar irradiance)

θ_z : είναι η ηλιακή γωνία ζενίθ

D_h : είναι η ποσότητα της ακτινοβολίας που λαμβάνει η επιφάνεια του συλλέκτη σε οριζόντιο επίπεδο, η οποία όμως έχει διασκορπιστεί από μόρια και σωματίδια στην ατμόσφαιρα (διάχυτη ακτινοβολία)..

β : είναι η γωνία κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

5.4 Πράξη Διασταύρωσης

Η πράξη της διασταύρωσης περιλαμβάνει τρεις τελεστές, οι οποίοι πραγματοποιούνται με την σειρά που τους αναφέρουμε παρακάτω:

- απλή διασταύρωση που πραγματοποιείται σε ένα σημείο του χρωμοσώματος. Η πιθανότητα επιλογής ενός χρωμοσώματος για απλή διασταύρωση αποτελεί είσοδο του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και έχει τεθεί ίση με 10%.
- απλή αριθμητική διασταύρωση: έστω τα χρωμοσώματα $c_1 = [u_1 \dots u_m]$ και $c_2 = [w_1 \dots w_m]$, τότε τα χρωμοσώματα που θα προκύψουν θα είναι $c_1' = [u_1 \dots u_k' \dots u_m]$ και

$c_2' = [w_1 \dots w_k' \dots w_m]$ όπου $u_k' = a \cdot w_k + (1-a) \cdot u_k$ και $w_k' = a \cdot u_k + (1-a) \cdot w_k$. Τα k και a επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε οι απόγονοι να βρίσκονται εντός του πεδίου εφικτών λύσεων. Η λειτουργία αυτού του τελεστή στηρίζεται ακριβώς στη λειτουργία της απλής διασταύρωσης. Η πιθανότητα επιλογής ενός χρωμοσώματος για απλή αριθμητική διασταύρωση αποτελεί επίσης είσοδο του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και έχει τεθεί ίση με 10%.

- ολική αριθμητική διασταύρωση: έστω τα χρωμοσώματα $c_1 = [u_1 \dots u_m]$ και $c_2 = [w_1 \dots w_m]$, τότε οι απόγονοί τους θα είναι $c_1' = a c_2 + (1-a) \cdot c_1$ και $c_2' = a \cdot c_1 + (1-a) \cdot c_2$. Το a έχει επιλεχθεί να έχει την τιμή 0,75 για να είναι βέβαιο ότι τα χρωμοσώματα που θα προκύψουν θα βρίσκονται εντός του πεδίου εφικτών λύσεων. Η πιθανότητα επιλογής που επίσης αποτελεί είσοδο του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και η τιμή της έχει τεθεί ίση με 10% [2].

Σημειώνεται ότι κάθε χρωμόσωμα που παίρνει μέρος σε ένα είδος διασταύρωσης, δεν μπορεί να συμμετέχει και σε άλλο είδος.

5.5 Πράξη Μετάλλαξης

Η πράξη της μετάλλαξης περιλαμβάνει και αυτή τρεις τελεστές που πραγματοποιούνται με τη σειρά που τους αναφέρουμε στη συνέχεια και εδώ πάλι ισχύει ότι χρωμόσωμα που παίρνει μέρος σε ένα είδος μετάλλαξης δεν μπορεί να συμμετέχει και σε άλλο είδος:

- ομοιόμορφη μετάλλαξη: σε αυτό το είδος μετάλλαξης επιλέγεται τυχαία ένα γονίδιο του χρωμοσώματος και η καινούρια του τιμή είτε όλων των στοιχείων του είτε από ένα στοιχείο του και μετά υπολογίζεται με την βοήθεια των ορίων που είναι ορισμένα από τον πίνακα “bnd”, ο οποίος έχει αποθηκευμένα τα όρια που μπορεί να πάρει το κάθε στοιχείο του χρωμοσώματος. Η πιθανότητα ομοιόμορφης μετάλλαξης αποτελεί είσοδο του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και η τιμή της έχει τεθεί ίση με 10%.
- boundary μετάλλαξη: σε αυτή την περίπτωση το γονίδιο που επιλέγεται τυχαία παίρνει σαν καινούρια τιμή την μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή από το εύρος των επιτρεπτών λύσεων, το οποίο υπολογίζει ο αλγόριθμος “dyn_bnd” που περιγράφεται στη συνέχεια. Επίσης, η πιθανότητα Boundary μετάλλαξης αποτελεί είσοδο του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και είναι ίση με 3%.

- μη ομοιόμορφη μετάλλαξη: έστω ότι έχει επιλεχθεί το γονίδιο g_k ενός χρωμοσώματος για μετάλλαξη, τότε το γονίδιο g_k ' θα είναι $g_k' = \left\{ \begin{matrix} g_k + \rho(\overline{g_k} - g_k) \\ g_k - \rho(g_k - \underline{g_k}) \end{matrix} \right\}$, όπου $[\underline{g_k}, \overline{g_k}]$ το εύρος τιμών του γονιδίου g_k , το οποίο επίσης υπολογίζεται από τον αλγόριθμο “dyn_bnd” και όπου ρ είναι η ακόλουθη συνάρτηση: $\rho = u \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right)^B$. Στην προηγούμενη συνάρτηση η μεταβλητή u είναι ένας τυχαίος αριθμός, t είναι ο αριθμός της τρέχουσας γενεάς, T είναι ο συνολικός αριθμός γενεών και B είναι ο συντελεστής ανομοιομορφίας και η τιμή του έχει τεθεί ίση με 3.5. Η πιθανότητα μη ομοιόμορφης μετάλλαξης αποτελεί παράμετρο εισόδου του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και η τιμή της έχει τεθεί ίση με 35% [2].

5.6 Η λειτουργία των αλγορίθμων “dyn_bnd” και “repair”

Όσον αφορά τον αλγόριθμο “dyn_bnd”, πρόκειται για ένα αλγόριθμο σκοπός του οποίου είναι η εύρεση του πεδίου τιμών της μεταβλητής του αριθμού των μπαταριών σε ένα χρωμόσωμα. Αυτό το πεδίο είναι προφανές ότι δεν παραμένει σταθερό κατά την εκτέλεση του Γενετικού Αλγορίθμου. Σ’ αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να αναφέρουμε ότι στο σύστημα το οποίο υλοποιήσαμε θεωρήσαμε ότι οι μπαταρίες επηρεάζουν σημαντικά τόσο το κόστος όσο και την αποθηκευμένη ενέργεια για την κάλυψη της κατανάλωσης. Γι’ αυτό το λόγο μετά από κάθε βέλτιστη λύση και πριν υλοποιηθεί οποιαδήποτε συνάρτηση του Γενετικού Αλγορίθμου καλείται η συνάρτηση “dyn_bnd” η οποία αφού κρατήσει τον αριθμό των μπαταριών της τελευταίας βέλτιστης λύσης τον πολλαπλασιάζει επί το 3 και θέτει τον καινούριο αριθμό ως άνω όριο του αριθμού των μπαταριών που μπορούμε να πάρουμε σαν λύση. Κατόπιν ελέγχουμε όλη την λίστα των χρωμοσωμάτων που έχουν αριθμό μπαταριών μεγαλύτερο από το καινούριο άνω όριο και υπολογίζουμε ξανά τα χρωμοσώματα αυτά, ώστε να είναι εντός των καινούριων ορίων.

Τέλος θα πρέπει να αναφερθεί και ο αλγόριθμος “repair”, στόχος του οποίου είναι ο έλεγχος των χρωμοσωμάτων που προκύπτουν μετά τις διαδικασίες της μετάλλαξης και της διασταύρωσης για το αν καλύπτουν το ζητούμενο φορτίο, αν όχι τότε τα χρωμοσώματα λαμβάνουν τις αρχικές τους τιμές που είχαν πριν πραγματοποιηθούν οι γενετικές πράξεις. [2]

5.7 Συνθήκες τερματισμού εκτέλεσης του Γενετικού Αλγορίθμου

Εκτός από τα κριτήρια που χρησιμοποιούμε για τη δημιουργία των χρωμοσωμάτων κρίνεται επιτακτική η ανάγκη δημιουργίας κριτηρίων για το σημείο λήξης της εκτέλεσης του Γενετικού Αλγορίθμου, όπου θεωρείται ότι ο αλγόριθμος έχει υπολογίσει την βέλτιστη λύση. Σαν κριτήριο σύγκλισης του αλγορίθμου μπορούμε να θέσουμε είτε την εκτέλεση του για ένα προκαθορισμένο πλήθος γενεών ή το λεγόμενο κριτήριο “σύγκλισης του πληθυσμού” σύμφωνα με το οποίο ο αλγόριθμος συγκλίνει όταν η διαφορά της μέσης τιμής της συνάρτησης κόστους από την βέλτιστη τιμή είναι μικρότερη από ένα ποσοστό της βέλτιστης τιμής. Στην παρούσα εργασία, έχει τεθεί ένας μέγιστος αριθμός επαναλήψεων, αλλά παράλληλα έχει ορισθεί να εμφανίζεται προειδοποίηση κατά την διάρκεια της εκτέλεσης του αλγορίθμου όταν ικανοποιείται και το κριτήριο “σύγκλισης του πληθυσμού”. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ότι είτε ικανοποιηθεί είτε όχι το κριτήριο “σύγκλισης του πληθυσμού”, η εκτέλεση του γενετικού αλγόριθμου θα τερματισθεί όταν ολοκληρωθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που αρχικά έχουμε ορίσει. Θα πρέπει να αναφέρουμε ότι ο αριθμός επαναλήψεων που ορίζουμε είναι αρκετά μεγάλος ώστε να αποφεύγεται η σύγκλιση του αλγορίθμου σε μη-βέλτιστες λύσεις.

6.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

6.1 Παραδείγματα εφαρμογής σε κατοικίες

Σε αυτό το Κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε αποτελέσματα βελτιστοποίησης που αφορούν την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων σε δύο κατοικίες. Στο σημείο αυτό κρίνεται απαραίτητο να αναφερθεί ότι για την υλοποίηση των τριών πρώτων σεναρίων χρησιμοποιήσαμε τις διαθέσιμες επιφάνειες από δύο υπαρκτές κατοικίες που βρίσκονται στην περιοχή των Χανίων. Η υλοποίηση όλων των υπολοίπων παραδειγμάτων στηρίχθηκε στις επιφάνειες αυτών των σπιτιών με την κατάλληλη μεταβολή των δεδομένων για το εκάστοτε σενάριο. Στις επιφάνειες που χρησιμοποιήσαμε σε όλα τα παρακάτω σενάρια έχουμε θεωρήσει ότι μόνο στο 70% της κάθε επιφάνειας μπορούμε να τοποθετήσουμε φωτοβολταϊκά πλαίσια, καθώς το υπόλοιπο τμήμα αυτών των διαθέσιμων επιφανειών καλύπτεται από δομικά στοιχεία των κατοικιών όπως πχ. πόρτες, παράθυρα κλπ. Τέλος, μια άλλη παράμετρος που έχουμε λάβει υπόψη μας στην υλοποίηση της εργασίας είναι και ότι η τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων ξεκινάει από το ύψος των δύο μέτρων και πάνω για να αποφεύγουμε τυχόν σκιάσεις (περαστικοί, παρκαρισμένα αυτοκίνητα κλπ.). Για κάθε κατοικία έχουν ληφθεί υπόψη διάφορα σενάρια, ώστε να μπορούμε να αξιολογήσουμε καλύτερα τα αποτελέσματα σχεδιασμού τα οποία προέκυψαν, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Παράδειγμα 1

Στο παράδειγμα αυτό θα εφαρμόσουμε το σύστημά μας σε ένα σπίτι το οποίο έχει 4 διαθέσιμες επιφάνειες (μαζί με την επίπεδη οριζόντια οροφή) και το οποίο απεικονίζεται παρακάτω. Στην εικόνα φαίνεται η αρίθμηση των επιφανειών και το βέλος μας δείχνει προς τα που είναι ο νότος.



Σχήμα 6.1: Κάτοψη πρώτου σπιτιού.

Παρακάτω φαίνεται η μπροστινή επιφάνεια του σπιτιού στην οποία δεν μπορούμε να τοποθετήσουμε φωτοβολταϊκά πλαίσια, διότι υπάρχει κτίριο ακριβώς μπροστά με αποτέλεσμα να μην υπάρχει δυνατότητα συλλογής επαρκούς ηλιακής ενέργειας.



Σχήμα 6.2:Μπροστινή επιφάνεια πρώτου σπιτιού.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τρεις διαθέσιμες επιφάνειες για την τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων και τις οποίες θα χρησιμοποιήσουμε στα διάφορα σενάρια που υλοποιήσαμε.



Σχήμα 6.3: Πρώτη επιφάνεια πρώτου σπιτιού.



Σχήμα 6.4: Δεύτερη επιφάνεια πρώτου σπιτιού.



Σχήμα 6.5: Τρίτη επιφάνεια πρώτου σπιτιού.

Παράδειγμα 2

Στο παράδειγμα αυτό θα εφαρμόσουμε το σύστημά μας σε ένα σπίτι το οποίο έχει 2 διαθέσιμες επιφάνειες. Προτιμήσαμε το συγκεκριμένο σπίτι διότι, όπως φαίνεται και στην εικόνα, δεν διαθέτει επίπεδη οριζόντια οροφή, αλλά κεκλιμένη. Επομένως, στην περίπτωση αυτή τα φωτοβολταϊκά πλαίσια θα έχουν υποχρεωτικά την κλίση της οροφής. Στην εικόνα φαίνεται η αρίθμηση των επιφανειών και το βέλος μας δείχνει προς τα που είναι ο νότος.



Σχήμα 6.6: Κάτοψη δεύτερου σπιτιού.

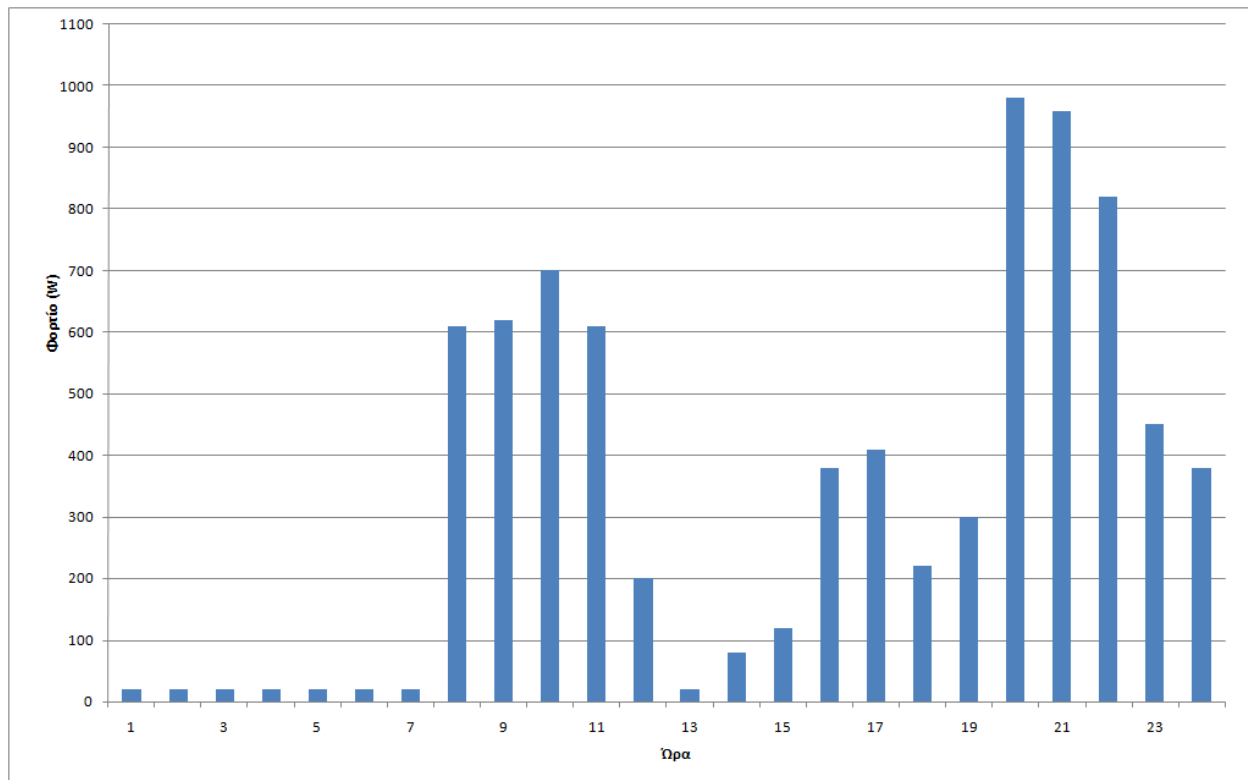
Η παρακάτω εικόνα μας δείχνει τις διαθέσιμες επιφάνειες του δεύτερου σπιτιού.



Σχήμα 6.7: Οι διαθέσιμες επιφάνειες του δεύτερου σπιτιού.

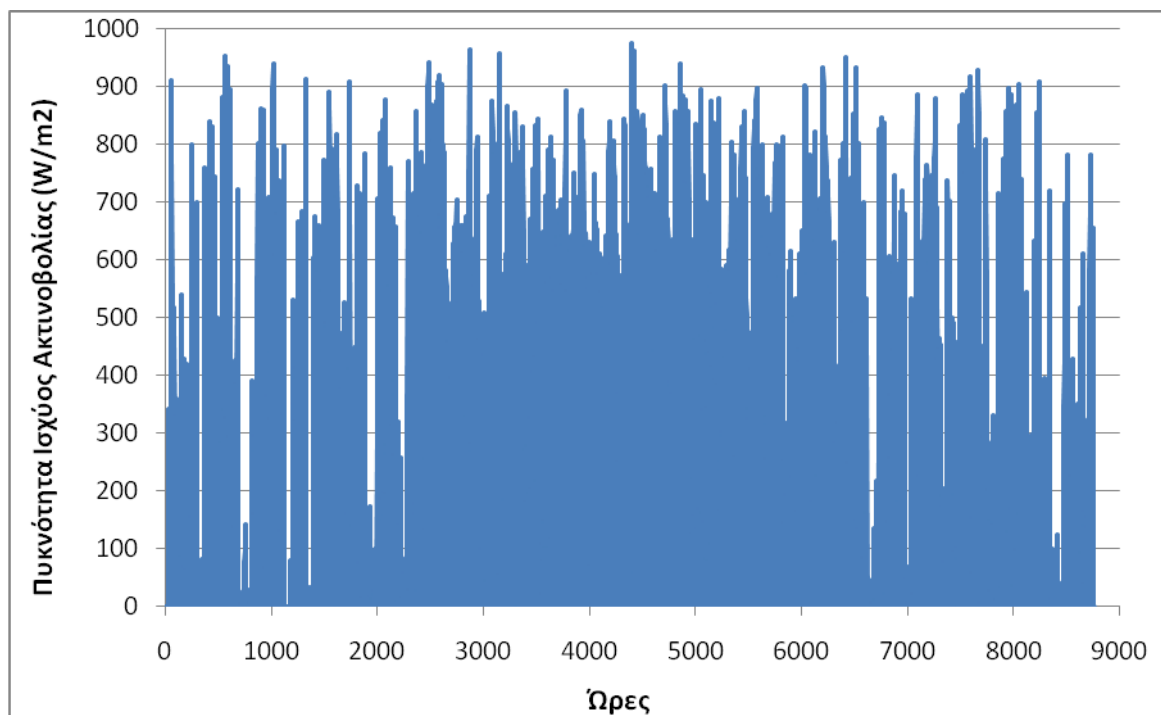
6.2 Σενάρια υπολογισμού

Για τη σχεδίαση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στα σενάρια που αναλύονται στη συνέχεια, ο γενετικός αλγόριθμος εκτελέστηκε με τα παρακάτω χαρακτηριστικά: αριθμός χρωμοσωμάτων 1000 σε κάθε γενεά, πιθανότητα απλής διασταύρωσης 0.1, πιθανότητα απλής αριθμητικής διασταύρωσης 0.1, πιθανότητα ολικής αριθμητικής διασταύρωσης 0.1, πιθανότητα ομοιόμορφης μετάλλαξης 0.1, πιθανότητα boundary μετάλλαξης 0.03 και πιθανότητα μη ομοιόμορφης μετάλλαξης 0.35. Όσον αφορά τα στοιχεία των φωτοβολταϊκών συστημάτων, χρησιμοποιήσαμε φωτοβολταϊκά πλαίσια με ισχύ αιχμής 150 W, μπαταρίες με τάση 12 V και χωρητικότητα 190Ah, φορτιστή (με MPPT) ισχύος 1200 W και τέλος έναν μετατροπέα DC/AC ισχύος 3500 W. Επίσης, θα πρέπει να αναφερθεί ότι για τα παρακάτω αποτελέσματα έχουμε θεωρήσει ως γεωγραφικό πλάτος τις 35° και η τιμή του συντελεστή ανάκλασης του εδάφους είναι ίση με 0.2. Για το φορτίο το οποίο επιθυμούμε να καλύψουμε, χρησιμοποιούμε μέσες ωριαίες τιμές για κάθε μέρα και για όλο το χρόνο. Σχηματικά φαίνεται αμέσως παρακάτω:

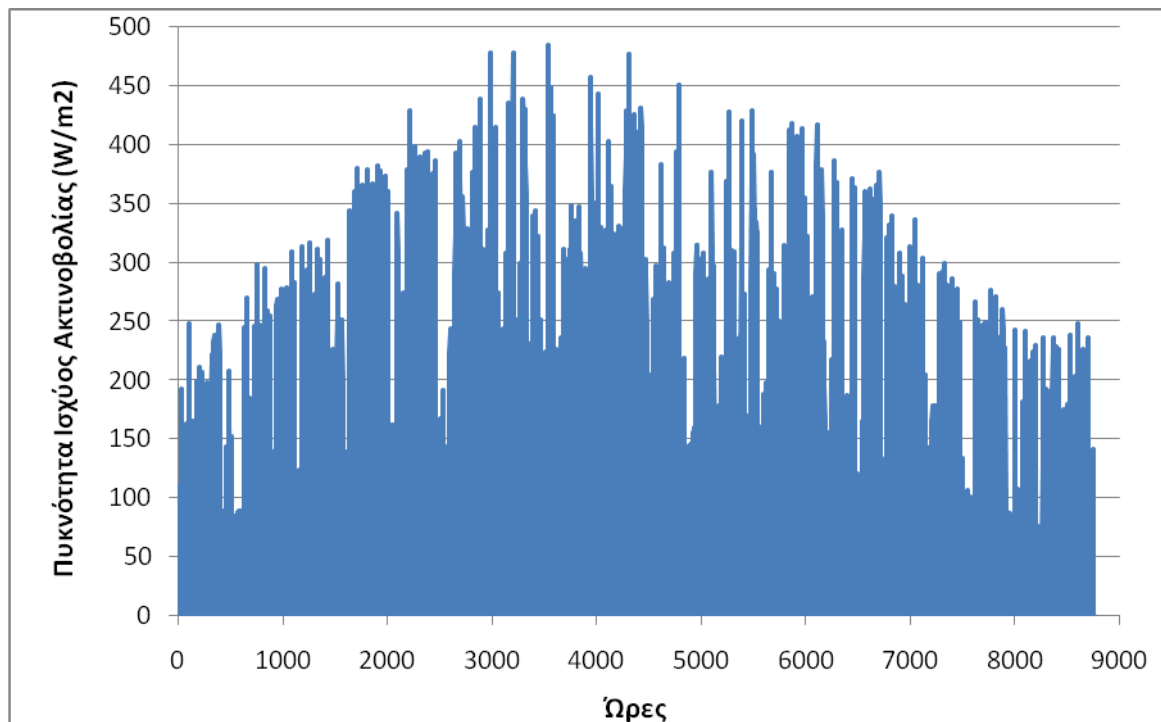


Σχήμα 6.8: Κατανάλωση φορτίου ανά ώρα της ημέρας.

Για την ακτινοβολία, όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενα Κεφάλαια, έχουμε για την B_n (Direct Normal Radiation) και για την D_h (Diffuse Horizontal Radiation) μέσες ωριαίες τιμές για κάθε μέρα και για όλο το χρόνο, απεικονίσεις των οποίων ακολουθούν παρακάτω:



Σχήμα 6.9: Η ακτινοβολία B_n ανά ώρα κατά τη διάρκεια ενός έτους.



Σχήμα 6.10: Η ακτινοβολία D_h ανά ώρα κατά τη διάρκεια ενός έτους.

Ακολουθεί ο πίνακας στον οποίο παρουσιάζονται τα κόστη αγοράς αλλά και συντήρησης όλων των ειδών που χρησιμοποιήσαμε στο αυτόνομο φωτοβολταϊκό μας σύστημα.

Πίνακας 6.1: Κόστη των στοιχείων του συστήματος		
Είδος	Κόστος αγοράς (€)	Κόστος συντήρησης (€)
Φωτοβολταϊκά πλαίσια	188	18.8
Μπαταρίες	423.17	4.23
Φορτιστής	372	37.2
Αντιστροφέας DC/AC	985.5	9.85

Στο σημείο αυτό θα περιγράψουμε όλα τα σενάρια τα οποία υλοποιήσαμε και στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε και θα εξηγήσουμε τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Σενάριο 1

Στο σενάριο αυτό είχαμε την δυνατότητα να τοποθετήσουμε φωτοβολταϊκά πλαίσια και στις τρεις διαθέσιμες επιφάνειες του πρώτου σπιτιού καθώς επίσης και στην οροφή του. Αυτόνομητο

είναι ότι η τοποθέτηση των πλαισίων στην οροφή είναι προς το νότο για να μεγιστοποιήσουμε την συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας.

Σενάριο 2

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα είχαμε την δυνατότητα να τοποθετήσουμε φωτοβολταϊκά πλαίσια στην πρώτη και στη δεύτερη επιφάνεια (σύμφωνα με την αρίθμηση του Σχήματος 6.1) του πρώτου σπιτιού καθώς επίσης και στην οροφή του, επιλέγοντας και πάλι προσανατολισμό προς το νότο.

Σενάριο 3

Το τρίτο σενάριο το οποίο υλοποιήσαμε αφορά το δεύτερο σπίτι. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε και τις δύο διαθέσιμες επιφάνειες (όπως φαίνεται στο Σχήμα:6.6) καθώς και την σκεπή του σπιτιού. Υπενθυμίζουμε ότι στην σκεπή αυτή δεν έχουμε την δυνατότητα επιλογής της κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Σενάριο 4

Στη συνέχεια υλοποιήσαμε το σενάριο το οποίο αναφέρεται στο πρώτο σπίτι και συγκεκριμένα η μόνη διαθέσιμη επιφάνεια στην οποία μπορούμε να τοποθετήσουμε φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι η οροφή του σπιτιού. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα η αζιμούθια γωνία που επιλέγουμε είναι 0° , δηλαδή προς το Νότο για να μεγιστοποιήσουμε την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Σενάριο 5

Στο παράδειγμα αυτό θεωρήσαμε ότι έχουμε δύο διαθέσιμες επιφάνειες, η μία με αζιμούθια γωνία 0° , δηλαδή κατεύθυνση προς το Νότο και η άλλη με αζιμούθια γωνία 90° , δηλαδή κατεύθυνση προς τη Δύση.

Σενάριο 6

Στο σενάριο αυτό λάβαμε υπόψη μας δύο διαθέσιμες επιφάνειες, τη μία με αζιμούθια γωνία 0° , δηλαδή κατεύθυνση προς το Νότο και την άλλη με αζιμούθια γωνία -90° , δηλαδή κατεύθυνση προς την Ανατολή.

Σενάριο 7

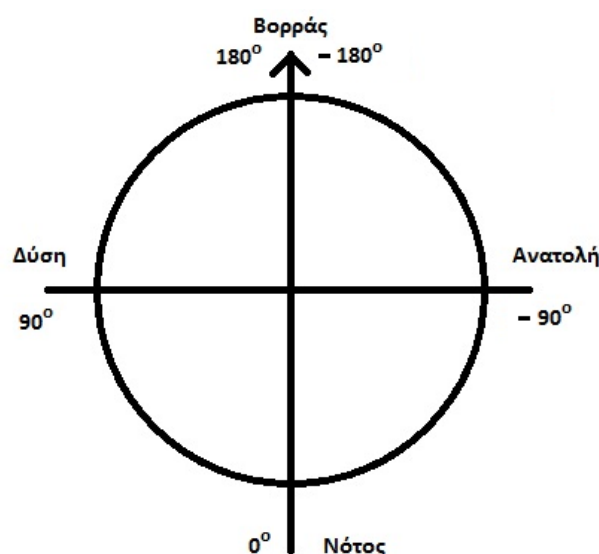
Σε αυτό το παράδειγμα, έχουμε τη δυνατότητα να τοποθετήσουμε φωτοβολταϊκά πλαίσια σε δύο επιφάνειες στη μία με αζιμούθια γωνία 0° , δηλαδή κατεύθυνση προς το Νότο και στην άλλη με αζιμούθια γωνία 180° , δηλαδή κατεύθυνση προς το Βορρά.

Σενάριο 8

Στο τελευταίο σενάριο που διερευνήθηκε, έχουμε στη διαθεσή μας δύο επιφάνειες, η μία είναι η οροφή του πρώτου σπιτιού στην οποία πάλι επιλέγουμε να τοποθετήσουμε τα φωτοβολταϊκά πάνελ με κατεύθυνση προς το Νότο (δηλαδή η αζιμούθια γωνία είναι 0°) και η άλλη επιφάνεια είναι η σκεπή του δεύτερου σπιτιού, η οποία έχει αζιμούθια γωνία ίση με -10° και κλίση 40° .

6.3 Αποτελέσματα

Παρακάτω ακολουθούν οι πίνακες με τα αποτελέσματα όλων των σεναρίων που περιγράψαμε προηγουμένως και στη συνέχεια υλοποιήσαμε. Συγκεκριμένα οι παρακάτω πίνακες απεικονίζουν την αναλυτική εικόνα του εκάστοτε φωτοβολταϊκού συστήματος περιλαμβάνοντας πληροφορίες για κάθε διαθέσιμη επιφάνεια. Οι πληροφορίες αυτές αναφέρονται στο εμβαδόν κάθε επιφάνειας, στον αριθμό των φωτοβολταϊκών πλαισίων, των φορτιστών, των μπαταριών, στις κλίσεις των φωτοβολταϊκών πλαισίων, στην αζιμούθια γωνία αυτών, στη συνολική παραγόμενη ενέργεια και στο συνολικό κόστος της εγκατάστασης. Παρακάτω ακολουθεί το Σχήμα 6.11 στο οποίο απεικονίζεται η σύμβαση για τις αζιμούθιες γωνίες που έχουμε λάβει υπόψη μας για τα παραδείγματα τα οποία έχουμε υλοποιήσει.



Σχήμα 6.11: Σύμβαση υπολογισμού αζιμούθιας γωνίας.

Σενάριο 1

Πίνακας 8.1 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για τρεις επιφάνειες και οροφή πρώτου σπιτιού.				
Επιφάνειες	Πρώτη	Δεύτερη	Τρίτη	Οροφή
Εμβαδόν (m ²)	48	106	33	252
Αξιμούθια γωνία	-40°	50°	140°	-40°
Κλίση b ₁	90°	90°	90°	61°
Κλίση b ₂	90°	90°	90°	47°
Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων	15	3	-	30
Αριθμός φορτιστών	3	1	-	5
Αριθμός μπαταριών	10			
Ετήσια συνολική παραγόμενη ενέργεια (kWh)	2962.53	471.22	-	8252.15
Κόστος εγκατάστασης	17589.2			
Συνολικό κόστος για 20 έτη (€)	81067.85			

Σενάριο 2

Πίνακας 8.2 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για δύο επιφάνειες και οροφή πρώτου σπιτιού.			
Επιφάνειες	Πρώτη	Δεύτερη	Οροφή
Τετραγωνικά Μέτρα (m ²)	48	106	252
Αξιμούθια γωνία	-40°	50°	180°
Κλίση b ₁	90°	90°	66°
Κλίση b ₂	90°	90°	24°
Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων	10	-	36
Αριθμός φορτιστών	2	-	6
Αριθμός μπαταριών	10		
Ετήσια συνολική παραγόμενη ενέργεια (kWh)	1975.02	-	10115.96
Κόστος εγκατάστασης	16841.2		
Συνολικό κόστος για 20 έτη (€)	77856.65		

Σενάριο 3

Πίνακας 8.3 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης για δύο επιφάνειες και σκεπή δεύτερου σπιτιού.			
Επιφάνειες	Πρώτη	Δεύτερη	Σκεπή
Τετραγωνικά Μέτρα (m ²)	13	16	41
Αζιμούθια γωνία	-100°	170°	-10°
b ₁	90°	90°	40°
Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων	6	-	40
Αριθμός φορτιστών	1	-	7
Αριθμός μπαταριών	10		
Ετήσια συνολική παραγόμενη ενέργεια (kWh)	986.332	-	11541.76
Κόστος εγκατάστασης	16841.2		
Συνολικό κόστος για 20 έτη (€)	77856.65		

Σενάριο 4

Πίνακας 8.4 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης με διαθέσιμη επιφάνεια μόνο την οροφή του πρώτου σπιτιού.	
Επιφάνεια	Οροφή
Τετραγωνικά Μέτρα (m ²)	252
Αζιμούθια γωνία	180°
Κλίση b ₁	60°
Κλίση b ₂	44°
Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων	45
Αριθμός φορτιστών	8
Αριθμός μπαταριών	10
Ετήσια συνολική παραγόμενη ενέργεια (kWh)	12738.34
Κόστος εγκατάστασης	16653.2
Συνολικό κόστος για 20 έτη (€)	77292.65

Σενάριο 5

Πίνακας 8.5 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης με δύο διαθέσιμες επιφάνειες (Νότος – Δύση)		
Επιφάνειες	Πρώτη (Νότος)	Δεύτερη (Δύση)
Τετραγωνικά Μέτρα (m ²)	106	33
Αξιμούθια γωνία	-40°	50°
Κλίση b ₁	90°	90°
Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων	46	16
Αριθμός φορτιστών	8	3
Αριθμός μπαταριών	10	
Ετήσια συνολική παραγόμενη ενέργεια (kWh)	9085.1	2512.65
Κόστος εγκατάστασης	20965.2	
Συνολικό κόστος για 20 έτη (€)	93130.25	

Σενάριο 6

Πίνακας 8.6 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης με δύο διαθέσιμες επιφάνειες (Νότος – Ανατολή)		
Επιφάνειες	Πρώτη (Νότος)	Δεύτερη (Ανατολή)
Τετραγωνικά Μέτρα (m ²)	106	48
Αξιμούθια γωνία	50°	140°
Κλίση b ₁	90°	90°
Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων	84	-
Αριθμός φορτιστών	14	-
Αριθμός μπαταριών	14	
Ετήσια συνολική παραγόμενη ενέργεια (kWh)	15075.94	-
Κόστος εγκατάστασης	27909.88	
Συνολικό κόστος για 20 έτη (€)	123856.57	

Σενάριο 7

Πίνακας 8.7 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης με δύο διαθέσιμες επιφάνειες (Νότος – Βορράς)		
Επιφάνειες	Πρώτη (Νότος)	Δεύτερη (Βορράς)
Τετραγωνικά Μέτρα (m ²)	106	16
Αξιμούθια γωνία	-40°	140°
Κλίση b ₁	90°	90°
Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων	45	-
Αριθμός φορτιστών	8	-
Αριθμός μπαταριών	16	
Ετήσια συνολική παραγόμενη ενέργεια (kWh)	8887.6	-
Κόστος εγκατάστασης	19192.22	
Συνολικό κόστος για 20 έτη (€)	95395.73	

Σενάριο 8

Πίνακας 8.8 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης με δύο διαθέσιμες επιφάνειες (οροφή – σκεπή)		
Επιφάνειες	Πρώτη (οροφή)	Δεύτερη (σκεπή)
Τετραγωνικά Μέτρα (m ²)	252	41
Αξιμούθια γωνία	-40°	-10°
Κλίση b ₁	61°	40°
Κλίση b ₂	16°	40°
Αριθμός φωτοβολταϊκών πλαισίων	39	4
Αριθμός φορτιστών	7	1
Αριθμός μπαταριών	10	
Ετήσια συνολική παραγόμενη ενέργεια (kWh)	10973.79	1154.17
Κόστος εγκατάστασης	16277.2	
Συνολικό κόστος για 20 έτη (€)	76164.65	

Παρατηρώντας προσεκτικά τα αποτελέσματα από την υλοποίηση όλων των παραπάνω σεναρίων διαπιστώνεται ότι είναι περισσότερο παραγωγικό και ταυτόχρονα έχει μικρότερο κόστος η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων σε επίπεδες και οριζόντιες επιφάνειες, αν βέβαια υπάρχουν διαθέσιμες. Αυτό βέβαια ήταν κάτι το αναμενόμενο αν αναλογιστούμε ότι τα φωτοβολταϊκά πλαίσια σε αυτές τις περιπτώσεις διαθέτουν δύο κλίσεις το χρόνο ενώ παράλληλα έχουμε την δυνατότητα να τα τοποθετήσουμε με κατεύθυνση προς το Νότο, κάτι το οποίο δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σε οποιαδήποτε άλλη επιφάνεια. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις τα αποτελέσματα από τον αλγόριθμο μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στις βέλτιστες λύσεις τα περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται στις επιφάνειες (αν είναι τέτοιες επιφάνειες διαθέσιμες) που έχουν προσανατολισμό προς το Νότο. Επίσης στις επιφάνειες που έχουν κατεύθυνση προς το Βορρά λογικό είναι να αποφεύγεται η τοποθέτηση φωτοβολταϊκών πλαισίων αφού το όφελος από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρό σε σχέση με την σημαντική αύξηση του συνολικού κόστους.

6.4 Διαγράμματα

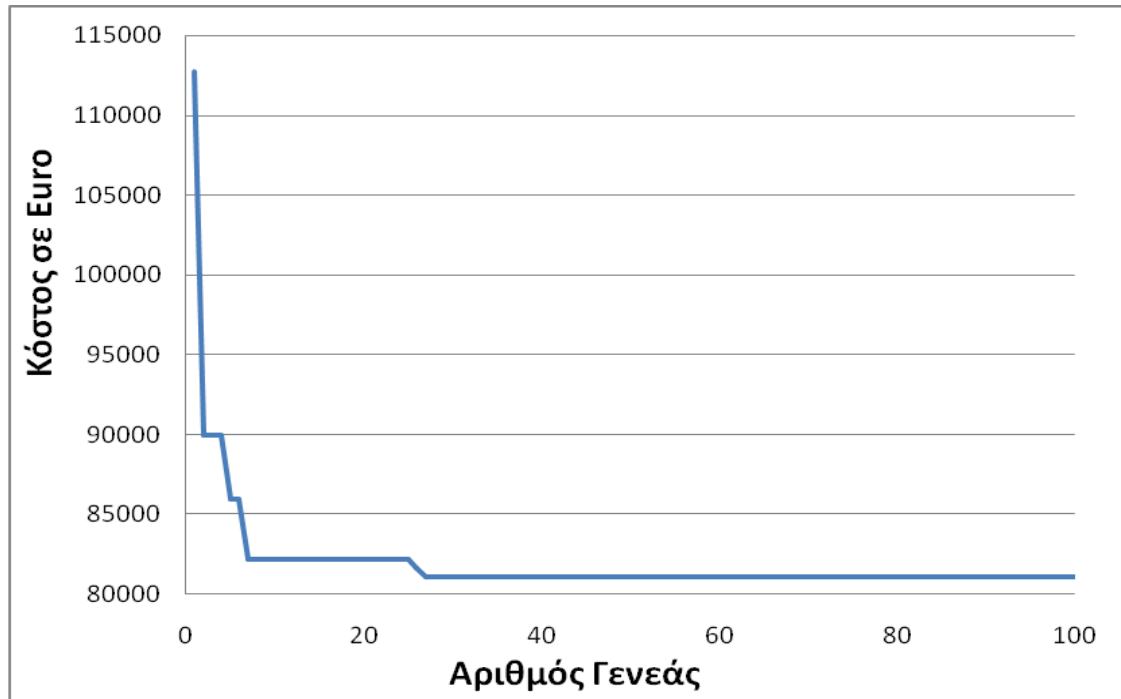
Στα Σχήματα 6.20 και 6.22-6.28 παρατίθενται τα διαγράμματα αποτελεσμάτων για τα σενάρια 1-8 που υλοποιήσαμε και τα οποία μας παρουσιάζουν το πως μεταβάλλεται το συνολικό κόστος του φωτοβολταϊκού συστήματος συναρτήσει της προόδου του αριθμού των γενεών.

Στα παρακάτω σχήματα των τριών σεναρίων αξίζει να παρατηρήσουμε την ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματός μας σε συνάρτηση με την πρόοδο του αριθμού των γενεών. Εύκολα γίνεται αντιληπτό ότι ο Γενετικός Αλγόριθμος προσεγγίζει την περιοχή της βέλτιστης λύσης πάρα πολύ νωρίς πριν τις 30 γενεές ενώ βρίσκει την βέλτιστη λύση κοντά στις 60 γενεές. Αυτό είναι και το χαρακτηριστικό των Γενετικών Αλγορίθμων, να προσεγγίζουν δηλαδή γρήγορα την βέλτιστη λύση και να σταθεροποιούνται σ' αυτήν την περιοχή για το υπόλοιπο χρονικό διάστημα.

Σενάριο 1

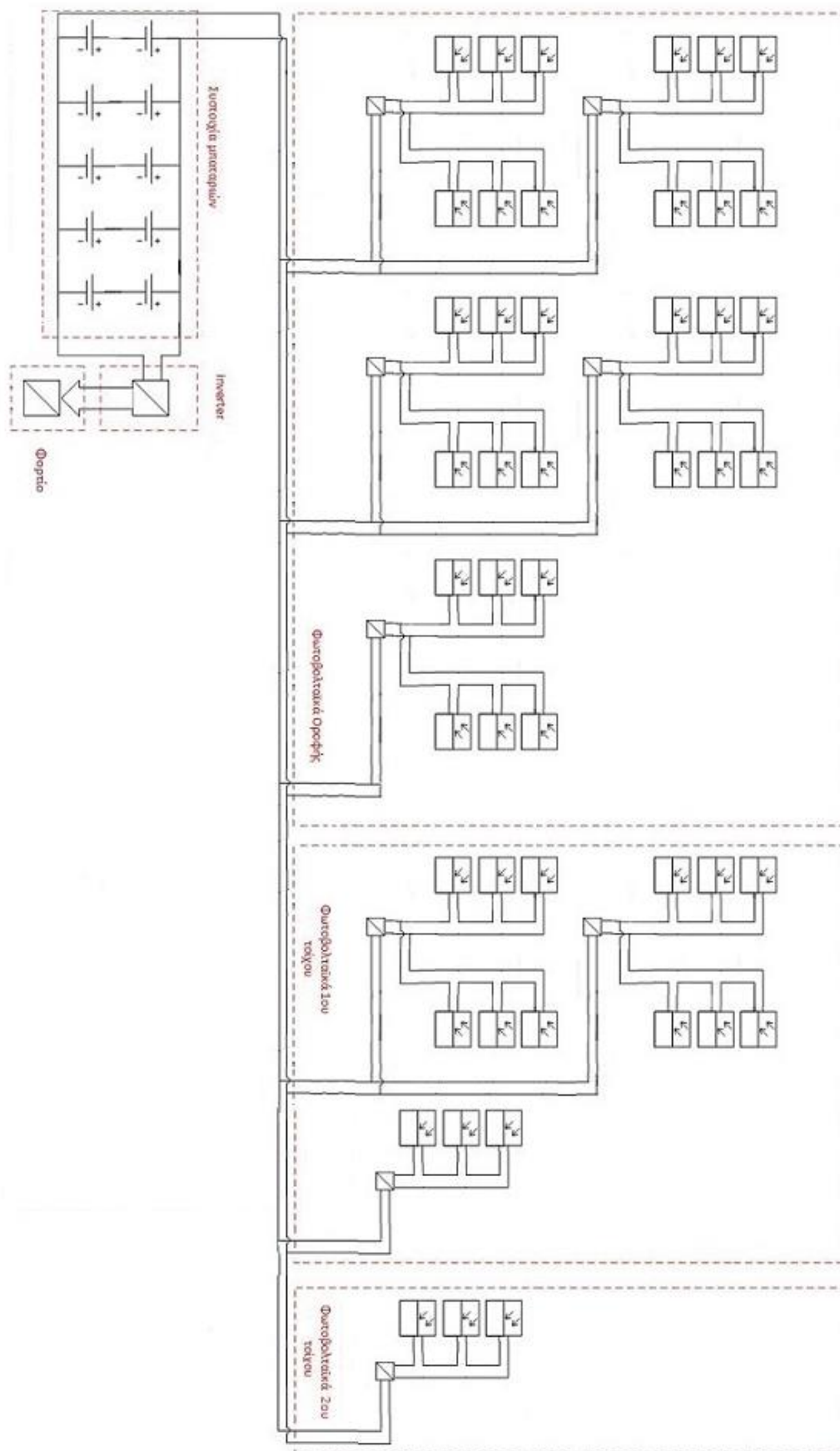
Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τη μεταβολή του συνολικού κόστους του φωτοβολταϊκού συστήματος ως προς τον αριθμό της αντίστοιχης γενεάς κατά την εκτέλεση του Γενετικού Αλγορίθμου στην περίπτωση του πρώτου σπιτιού με τη δυνατότητα τοποθέτησης φωτοβολταϊκών και στις τρεις διαθέσιμες επιφάνειες και στην οροφή του. Σε αυτό το σημείο κρίνεται επιτακτική η ανάγκη να αναφέρουμε ότι το αποτέλεσμα του εν λόγω σεναρίου

επαληθεύτηκε και με τη χρήση μιας γραμμικής μεθόδου αναζήτησης. Η γραμμική μέθοδος αναζήτησης απέδειξε, ψάχνοντας σε όλο το εύρος των δυνατών λύσεων, ότι ο Γενετικός Αλγόριθμος κατέληξε στη βέλτιστη λύση.



Σχήμα 6.20: Διάγραμμα μεταβολής του συνολικού κόστους του φωτοβολταϊκού συστήματος ως προς τον αριθμό της αντίστοιχης γεννεάς κατά την εκτέλεση του Γενετικού Αλγορίθμου για το πρώτο σενάριο.

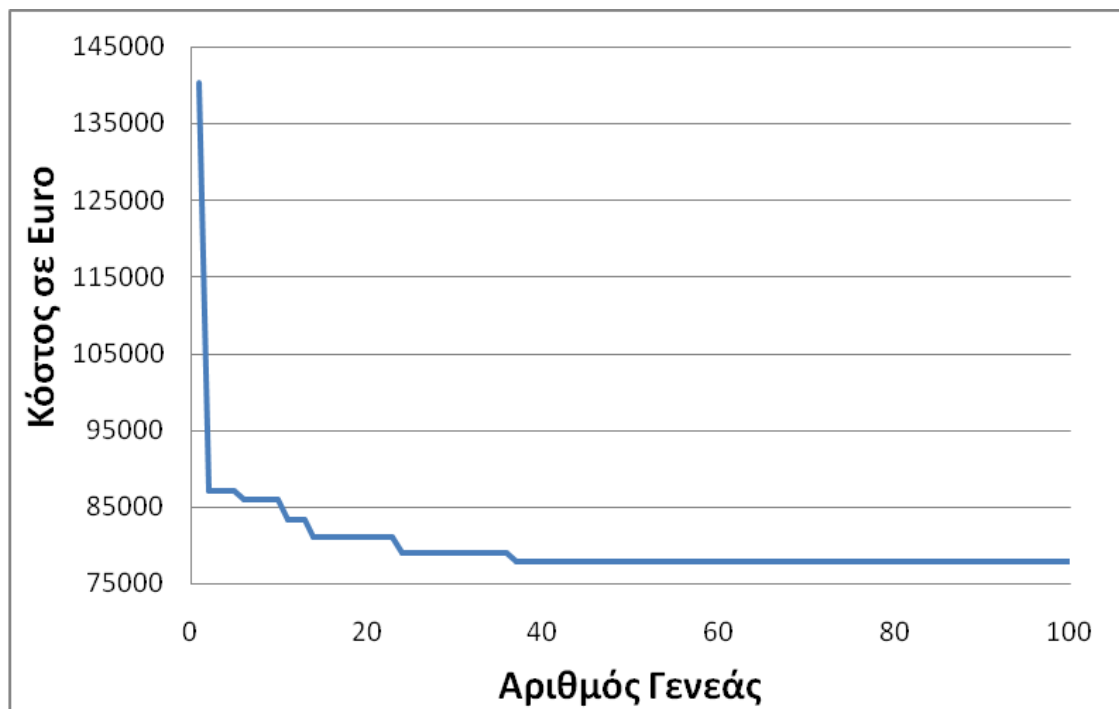
Για το συγκεκριμένο σενάριο υλοποίησης δημιουργήσαμε και την αντίστοιχη συνδεσμολογία όλων των στοιχείων του συστήματός μας, με σκοπό να έχουμε μια πλήρη εικόνα του και η οποία φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 6.21: Η συνδεσμολογία του φωτοβολταϊκού συστήματος για το πρώτο σενάριο.

Σενάριο 2

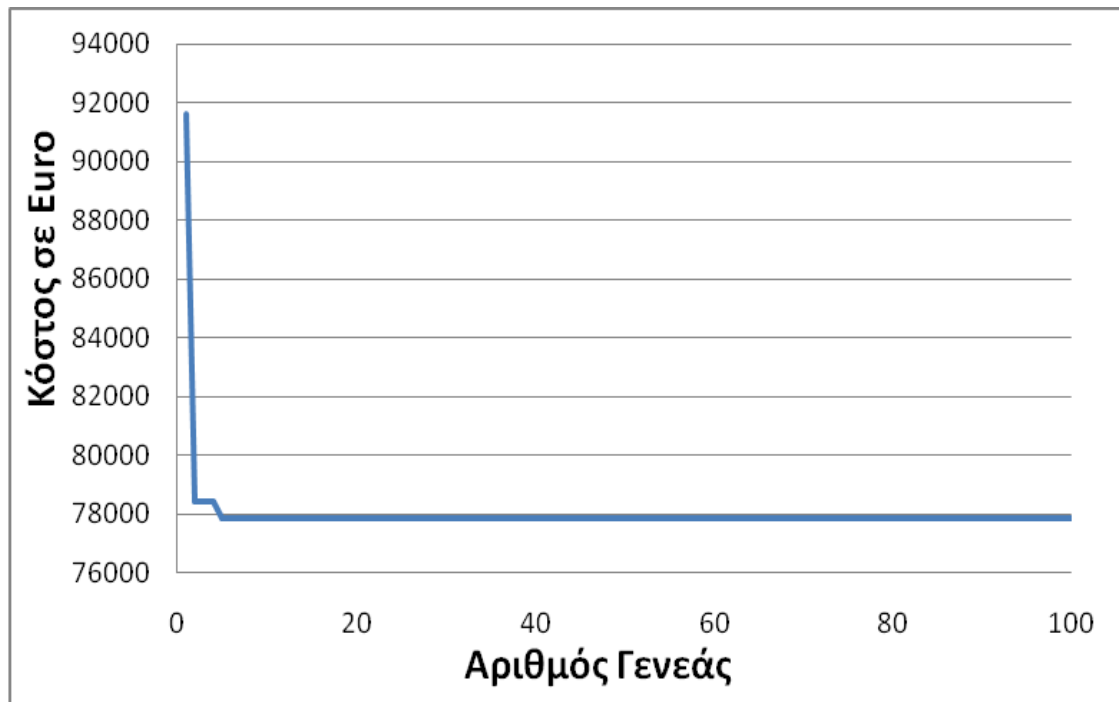
Το παρακάτω διάγραμμα κόστους σε συνάρτηση με τις γενεές αφορά το παράδειγμα του πρώτου σπιτιού με τη δυνατότητα τοποθέτησης φωτοβολταϊκών στις δύο από τις τρεις διαθέσιμες επιφάνειες και στην οροφή του.



Σχήμα 6.22: Διάγραμμα μεταβολής του συνολικού κόστους του φωτοβολταϊκού συστήματος ως προς τον αριθμό της αντίστοιχης γενεάς κατά την εκτέλεση του Γενετικού Αλγορίθμου για το δεύτερο σενάριο .

Σενάριο 3

Το παρακάτω διάγραμμα κόστους σε συνάρτηση με τις γενεές αφορά το παράδειγμα του δεύτερου σπιτιού με τη δυνατότητα τοποθέτησης φωτοβολταϊκών και στις τρεις διαθέσιμες επιφάνειες.



Σχήμα 6.23: Διάγραμμα μεταβολής του συνολικού κόστους του φωτοβολταϊκού συστήματος ως προς τον αριθμό της αντίστοιχης γενεάς κατά την εκτέλεση του Γενετικού Αλγορίθμου για το τρίτο σενάριο.

Σενάριο 4

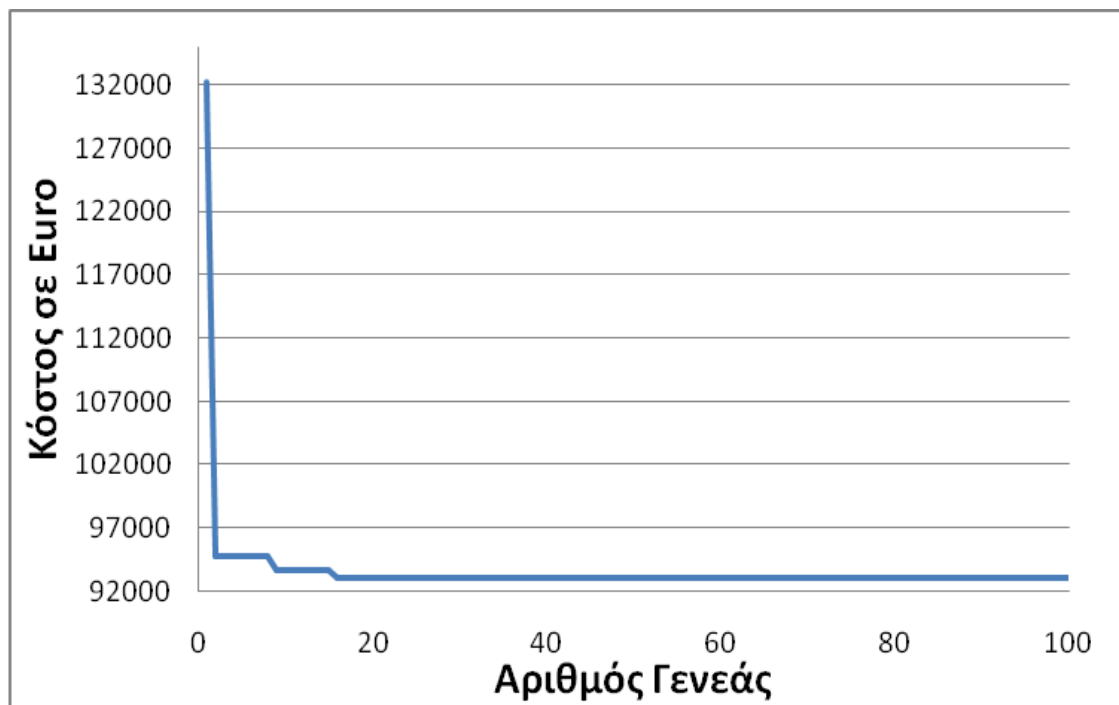
Το παρακάτω διάγραμμα κόστους σε συνάρτηση με τις γενεές αφορά το παράδειγμα του δεύτερου σπιτιού με τη δυνατότητα τοποθέτησης φωτοβολταϊκών μόνο στην οροφή.



Σχήμα 6.24: Διάγραμμα μεταβολής του συνολικού κόστους του φωτοβολταϊκού συστήματος ως προς τον αριθμό της αντίστοιχης γεννεάς κατά την εκτέλεση του Γενετικού Αλγορίθμου για το τέταρτο σενάριο.

Σενάριο 5

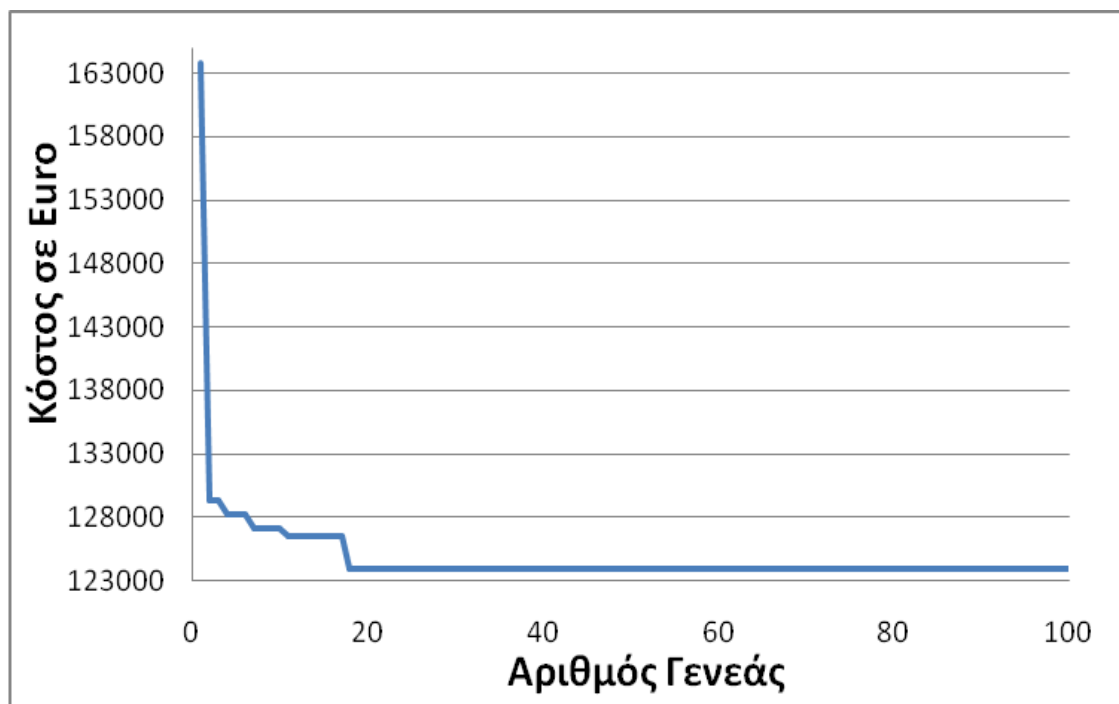
Το παρακάτω διάγραμμα κόστους σε συνάρτηση με τις γενεές αφορά το παράδειγμα ενός σπιτιού με τη δυνατότητα τοποθέτησης φωτοβολταϊκών σε δύο μόνο επιφάνειες. Από τις διαθέσιμες επιφάνειες η μία έχει προσανατολισμό προς το Νότο και η άλλη προς τη Δύση.



Σχήμα 6.25: Διάγραμμα μεταβολής του συνολικού κόστους του φωτοβολταϊκού συστήματος ως προς τον αριθμό της αντίστοιχης γενεάς κατά την εκτέλεση του Γενετικού Αλγορίθμου για το πέμπτο σενάριο.

Σενάριο 6

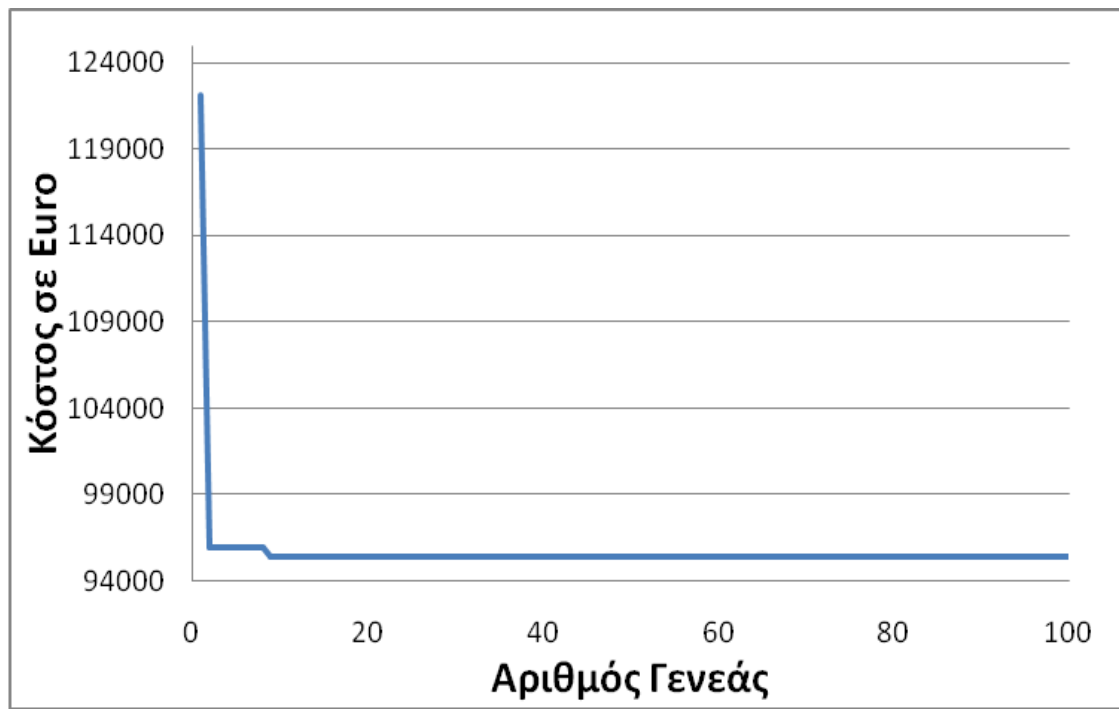
Το παρακάτω διάγραμμα κόστους σε συνάρτηση με τις γενεές αφορά το παράδειγμα ενός σπιτιού με τη δυνατότητα τοποθέτησης φωτοβολταϊκών σε δύο μόνο επιφάνειες. Από τις διαθέσιμες επιφάνειες η μία έχει προσανατολισμό προς το Νότο και η άλλη προς τη Ανατολή.



Σχήμα 6.26: Διάγραμμα μεταβολής του συνολικού κόστους του φωτοβολταϊκού συστήματος ως προς τον αριθμό της αντίστοιχης γεννεάς κατά την εκτέλεση του Γενετικού Αλγορίθμου για το έκτο σενάριο.

Σενάριο 7

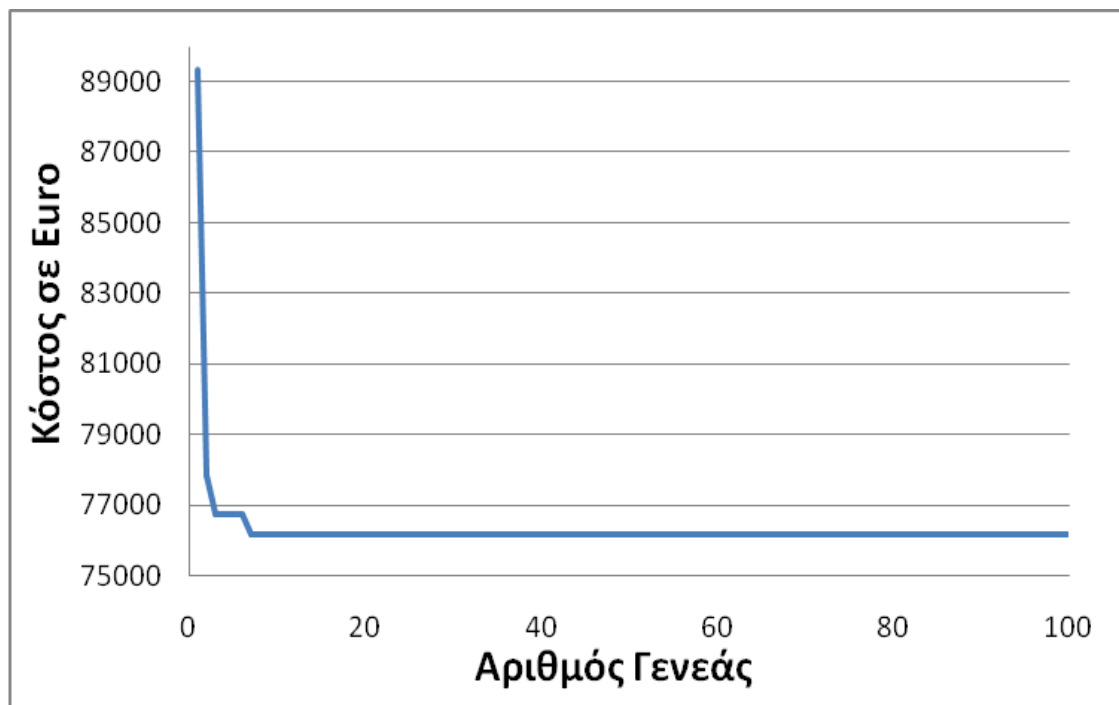
Το παρακάτω διάγραμμα κόστους σε συνάρτηση με τις γενεές αφορά το παράδειγμα ενός σπιτιού με τη δυνατότητα τοποθέτησης φωτοβολταϊκών σε δύο μόνο επιφάνειες. Από τις διαθέσιμες επιφάνειες η μία έχει προσανατολισμό προς το Νότο και η άλλη προς τη Βορρά.



Σχήμα 6.27: Διάγραμμα μεταβολής του συνολικού κόστους του φωτοβολταϊκού συστήματος ως προς τον αριθμό της αντίστοιχης γεννεάς κατά την εκτέλεση του Γενετικού Αλγορίθμου για το έβδομο σενάριο.

Σενάριο 8

Το παρακάτω διάγραμμα κόστους σε συνάρτηση με τις γενεές αφορά το παράδειγμα ενός σπιτιού με τη δυνατότητα τοποθέτησης φωτοβολταϊκών σε δύο μόνο επιφάνειες. Από τις διαθέσιμες επιφάνειες η μία είναι η οροφή του σπιτιού και η άλλη είναι μια επιφάνεια με σταθερή κλίση, όχι κάθετη και προσανατολισμό προς το Νότο.



Σχήμα 6.28: Διάγραμμα μεταβολής του συνολικού κόστους του φωτοβολταϊκού συστήματος ως προς τον αριθμό της αντίστοιχης γεννεάς κατά την εκτέλεση του Γενετικού Αλγορίθμου για το όγδοο σενάριο.

7.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η χρήση όλων των μορφών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι πολύ σημαντική. Σ' αυτή την εργασία λοιπόν δημιουργήσαμε το λογισμικό σχεδίασης αυτόνομων φωτοβολταϊκών συστημάτων τα οποία είναι ενσωματωμένα σε κτίρια και προχωρήσαμε στην βελτιστοποίηση τους χρησιμοποιώντας γενετικούς αλγορίθμους. Έτσι μπορούμε να καλύψουμε όλο το ηλεκτρικό φορτίο που απαιτείται έχοντας όμως και την οικονομικότερη λύση. Το σημαντικότερο σημείο της παρούσας εργασίας είναι ότι όλες οι επιφάνειες που δίνονται από το χρήστη ελέγχονται κατάλληλα έτσι ώστε να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα χωρίς να τις καλύπτουμε απαραίτητα ολόκληρες με φωτοβολταϊκά πλαίσια, αν αυτό δεν είναι οικονομικά συμφέρον. Επίσης έχουμε τη δυνατότητα επιλογής δύο κλίσεων για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, εάν και εφόσον δοθεί σαν επιφάνεια τοποθέτησής τους, η οροφή του κτιρίου. Τα παραπάνω στοιχεία καλύπτουν τις απαιτήσεις σχεδιασμού φωτοβολταϊκών συστημάτων για οποιοδήποτε κτίριο.

Στο πλαίσιο μελλοντικών επεκτάσεων και βελτιώσεων της παρούσας εργασίας, θα μπορούσαμε να αναφέρουμε ότι αφού τα αποτελέσματα που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο Κεφάλαιο αφορούν ένα μόνο τύπο από κάθε στοιχείο που περιλαμβάνει το σύστημά μας, θα μπορούσε ο γενετικός αλγόριθμος να τροποποιηθεί έτσι ώστε να περιλαμβάνει δύο ή και περισσότερους εμπορικά διαθέσιμους τύπους από κάθε στοιχείο (πχ. φωτοβολταϊκά πλαίσια ή μετατροπείς DC/AC διαφορετικών κατασκευαστών κλπ.). Η αλλαγή αυτή θα επέτρεπε την διερεύνηση πιθανών λύσεων για το σχεδιασμό του φωτοβολταϊκού συστήματος που μειώνουν ακόμα περισσότερο το κόστος του. Επίσης μια ακόμα επέκταση θα μπορούσε να είναι η υποστήριξη από το σύστημα βελτιστοποίησης, της χρήσης εύκαμπτων ή και διάφανων φωτοβολταϊκών πλαισίων σε διάφορες επιφάνειες του κτηρίου (πχ. στέγες, παράθυρα κλπ.).

Μια άλλη βελτίωση που μπορεί να πραγματοποιηθεί είναι η δημιουργία ενός interface σύμφωνα με το οποίο θα απλουστευθεί η χρήση της όλης διαδικασίας. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος που αναπτύξαμε στη παρούσα εργασία αναφέρεται σε αυτόνομα συστήματα, αυτό βέβαια δεν αποτελεί μονόδρομο αφού μπορεί να επεκταθεί και σε μη αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα. Έτσι θα μπορούμε και να καλύπτουμε το ηλεκτρικό φορτίο το οποίο απαιτείται, αλλά και η ενέργεια η οποία περισσεύει να διατίθεται στο υπάρχον ηλεκτρικό δίκτυο.

8.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ποτηράκης Αντώνιος, Διπλωματική Εργασία: “Ανάπτυξη λογισμικού διαστασιολόγησης υβριδικού συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας”, Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών - Πολυτεχνείο Κρήτης, 2003.
- [2] Παγέλα Άννα, Τσακνάκη Σεβαστή, Διπλωματική Εργασία: “Σχεδίαση αυτόνομου υβριδικού φωτοβολταϊκού συστήματος για τροφοδότηση κατοικίας”, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2012.
- [3] Ροδίτης Απόστολος, Διπλωματική Εργασία: “Ανάπτυξη προοπτικές και νομοθεσία της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας”, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών – Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2011.
- [4] Παναγιώτου Παναγιώτης, Διπλωματική Εργασία: “Φωτοβολταϊκά συστήματα”, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών – Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2007.
- [5] Ναλπαντίδης Δημήτριος, Νένος Ευθύμιος, Διπλωματική Εργασία: “Φωτοβολταϊκά συστήματα”, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε – Α.Τ.Ε.Ι Θεσσαλονίκης, 2013.
- [6] Τσιουμπρή Ελένη, Διπλωματική Εργασία: “Συσσωρευτές στα φωτοβολταϊκά συστήματα”, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών – Πανεπιστήμιο Πατρών, 2012.
- [7] Σαμαράς Παναγιώτης, Παπανικολάου Μιχαήλ, Διπλωματική Εργασία: “Μελέτη και χρηματοοικονομική ανάλυση οικιακού φωτοβολταϊκού συστήματος 10KW”, Τμήμα Μηχανολογίας – Τ.Ε.Ι Σερρών, 2012.
- [8] Παπακωνσταντίνου Κωνσταντίνος, Διπλωματική Εργασία: “Μελέτη διαστασιολόγησης και ενσωμάτωσης στο δίκτυο φωτοβολταϊκών-αποθηκευτικών συστημάτων ύπο το θεσμό της ιδιοκατανάλωσης”, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών – Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2015.

- [9] Γιανακούρας Ιωάννης, Ζαραβέλα Δέσποινα, Μανδρίκας Αχιλλέας, Εκπαιδευτικό υλικό “Ανανεώσιμες – ήπιες μορφές ενέργειας”, Προγράμματα Ανοικτών Περιβαλλοντικών Τάξεων “ΚΑΛΛΙΣΤΩ”, 2008, <http://www.kpe.gr/documents/kallisto/energy.pdf>.
- [10] Αναγνώστου Γιώργος, Διπλωματική Εργασία: “Μελέτη εγκατάστασης υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε κτίρια”, Σχολή Χημικών Μηχανικών - Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2011.
- [11] Μαλισόβας Αθανάσιος, Διπλωματική Εργασία: “Ανάλυση και σχεδίαση ηλεκτρολογικού συστήματος ενός ηλεκτροηλιακού οχήματος”, Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών - Πολυτεχνείο Κρήτης, 2014.
- [12] M. Gulin, M. Vašak, M. Baotic, “Estimation of the global solar irradiance on tilted surfaces”, *17th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE 2013)*, pp. 334-339, 2013.
- [13] <http://photovoltaic-software.com/PV-solar-energy-calculation.php>
- [14] Φραγκιαδάκης Ι.Ε., “Φωτοβολταϊκά Συστήματα”, Εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2006.
- [15] Κανελλόπουλος Δημήτριος, Διπλωματική εργασία: “Φωτοβολταϊκή τεχνολογία και μελέτη κάλυψης των ενεργειακών απαιτήσεων του Πολυτεχνείου Κρήτης με φωτοβολταϊκές γεννήτριες”, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος – Πολυτεχνείο Κρήτης, 2005.
- [16] Βασίλειος Δ. Μπιτζιώνης, Δημήτριος Β. Μπιτζιώνης “Εναλλακτικές Μορφές Ενέργειας”, Εκδόσεις Τζιόλα, 2011.
- [17] <http://www.meteonorm.com/>
- [18] Κανέλλος Φώτιος, Πρόγραμμα Επικαιροποίησης Γνώσεων Αποφοίτων: “Μελέτη – Διαστασιολόγηση Διασυνδεδεμένων Φ/Β Συστημάτων”, Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών Τ.Ε.Ι Κρήτης και Τμήμα Χημείας Πανεπιστημίου Κρήτης, 2007 – 2013.
- [19] Θεοχάρης Δ. Τσούτσος, Ιωάννης Ν. Κανάκης “Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Τεχνολογίες και Περιβάλλον”, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2013.
- [20] Ιωάννης Κ. Καλδέλης, Γεώργιος Χ. Σπυρόπουλος, Κοσμάς Α. Καββαδίας “Υπολογιστικές εφαρμογές ήπιων μορφών ενέργειας”, Εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, 2007.
- [21] Castaner, Luis, and Santiago Silvestre. “*Modelling photovoltaic systems using PSpice*”, John Wiley and Sons, 2002.
- [22] Κ. Καγκαράκης “Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία”, Εκδόσεις Συμμετρία, 1992.

- [23] Κωνσταντίνος Α. Μπαλάρας, Αθανάσιος Α. Αργυρίου, Φώτης Ε. Καραγιάννης
“Συμβατικές και ήπιες μορφές ενέργειας”, Εκδόσεις ΤεκΔΟΤΙΚΗ, 2006.