

1. Εισαγωγή

1.1 Τα Φωτοβολταϊκά Σήμερα

Τα φωτοβολταϊκά είναι από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες για την περιβαλλοντικά ήπια παραγωγή ενέργειας και την απεξάρτηση από το πετρέλαιο, ενώ το κόστος τους είναι ήδη ανταγωνιστικό σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής σε αρκετές εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής. Είναι από τις ελάχιστες τεχνολογίες των οποίων το κόστος πέφτει συστηματικά, σε μια περίοδο που το κόστος κατασκευής και λειτουργίας των συμβατικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής αυξάνει διαρκώς. Κάθε εγκατεστημένο κιλοβάτ φωτοβολταϊκών συμβάλλει ετησίως στην αποφυγή εκπομπής περίπου 1,5 τόνου διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων, αν η ισόποση ενέργεια παραγόταν με την καύση λιγνίτη, προστατεύοντας ουσιαστικά το περιβάλλον και την υγεία των πολιτών.



Τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα συμβάλλουν στην ενίσχυση του ηλεκτρικού δικτύου μετριάζοντας τις αιχμές κατανάλωσης, την αποκεντρωμένη παραγωγή και την ελαχιστοποίηση των απωλειών κατά τη μεταφορά της ενέργειας, καθώς η παραγωγή γίνεται κοντά στον τόπο κατανάλωσης. Είναι απολύτως αθόρυβα κατά τη λειτουργία, δεν ενοχλούν οπτικά, δεν έχουν κινούμενα μέρη, δεν έχουν απαιτήσεις συντήρησης, είναι επεκτάσιμα κι έχουν εγγυημένη λειτουργία για τουλάχιστον 20-30 χρόνια, ενώ η διάρκεια ζωής μπορεί να ξεπερνάει τα 50 χρόνια.



Δεν είναι λοιπόν καθόλου τυχαίο την τρέχουσα δεκαετία, η διεθνής βιομηχανία φωτοβολταϊκών να παρουσιάζει ετήσιους ρυθμούς ανάπτυξης κοντά στο 50%, αποδεικνύοντας ότι η ανάπτυξη αυτή δεν αποτελεί συγκυριακό γεγονός. Υφίσταται μία ουσιαστική πρόοδος που πυροδοτήθηκε από γενναίες πολιτικές ενίσχυσης του παραγόμενου ηλιακού ηλεκτρισμού. Τα φωτοβολταϊκά δεν είναι μόνο τα εγκατεστημένα μεγαβάτ που συμβάλλουν στην ευστάθεια των δικτύων και βοηθούν στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Είναι ταυτόχρονα και ένα όχημα για μια αποκεντρωμένη και αειφόρο ανάπτυξη με σημαντική συμβολή στην οικονομία και τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας. Ο ΣΕΦ (Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών) υποστηρίζει το στόχο που έχει θέσει η ευρωπαϊκή βιομηχανία φωτοβολταϊκών για κάλυψη του 12% της ηλεκτροπαραγωγής με φωτοβολταϊκά ως το 2020. Για να επιτευχθεί ο φιλόδοξος αυτός στόχος απαιτείται μία γιγαντιαία προσπάθεια τόσο από την ίδια τη βιομηχανία, όσο και από τις αρμόδιες αρχές, οι οποίες καλούνται όχι μόνο να ενισχύσουν θεσμικά αυτή την πορεία, αλλά και να άρουν τα αντικίνητρα που υπάρχουν σήμερα.

Το πρώτο ουσιαστικό βήμα προς την κατεύθυνση αυτή γίνεται με την κοινή υπουργική απόφαση που παρέχει πλέον το δικαίωμα εγκατάστασης φωτοβολταϊκών διασυνδεδεμένων στο δίκτυο. Μέσω των κινήτρων που δίνει η πολιτεία σε τέτοιες επενδύσεις γίνεται ανταγωνιστική η αγορά. Τα κίνητρα όπως διαμορφώνονται με τον ισχύοντα νόμο αφορούν στην ειδική τιμή της ηλιακής kWh και τη δυνατότητα οικονομικής ενίσχυσης από τον Αναπτυξιακό Νόμο (Ν. 3299/04).

1.2 Χρήση Φωτοβολταϊκών σε Οικιακό Καταναλωτή

Είναι σαφές ότι η αγορά των φωτοβολταϊκών έχει αρχίσει ήδη να απασχολεί πιο άμεσα τον οικιακό καταναλωτή. Η επένδυση σε παραγωγή «καθαρής» ενέργειας είναι μια πράξη συνειδητή σύμφωνα με την στοιχειώδη υποχρέωση του καθενός μας προς το περιβάλλον και την προστασία του. Η καταπολέμηση του φαινομένου του θερμοκηπίου αλλά και των άλλων περιβαλλοντικών καταστροφών είναι επιτακτική ανάγκη όσο ποτέ άλλοτε. Παράλληλα όμως η στροφή προς την «πράσινη» ενέργεια έχει οικονομικά οφέλη και αποτελεί πλέον μια σημαντική επένδυση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται η δυνατότητα χρήσης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε μια μέση οικία που βρίσκεται στην περιοχή της Αθήνας ενώ παράλληλα αξιολογείται μια τέτοια απόπειρα σε τεχνικό και οικονομικό επίπεδο.

Τα σενάρια χρήσης της παραγόμενης από φωτοβολταϊκά πλαίσια ενέργειας που εξετάζονται είναι τα εξής :

- Ως διασυνδεδεμένο σύστημα με το δίκτυο της ΔΕΗ και πώληση της παραγόμενης ενέργειας με όρους που καθορίζονται σύμφωνα με πρόσφατη κοινή υπουργική απόφαση
- Ως προς την επίτευξη ενός «ενεργειακά αυτόνομου» σπιτιού που θα δύναται να παράγει τόση ηλεκτρική ενέργεια όση καταναλώνει στο ίδιο χρονικό διάστημα. Αν και καταναλώνει ενέργεια παραγόμενη με τους συμβατικούς τρόπους παραγωγής προσφέρει ισόποση «πράσινη» ενέργεια στο δίκτυο αποτρέποντας την εκπομπή των ρύπων που αναλογούν. Η διαστασιολόγηση ενός τέτοιου σπιτιού έχει ρόλο προπαρασκευαστικό ως προς την μετάβασή του σε αυτόνομο, εκτός δημόσιου δικτύου
- Την πλήρη αυτονόμηση ενός σπιτιού από το δίκτυο της ΔΕΗ. Δύσκολα ζητήματα στην περίπτωση αυτή είναι η επάρκεια της παραγόμενης «καθαρής» ενέργειας και η πρόβλεψη για εφεδρεία

1.3 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας

Συνοπτικά η παρούσα διπλωματική εργασία είναι δομημένη ως εξής:

- Στο *Κεφάλαιο 2* περιγράφεται τοπολογικά και ενεργειακά η εξεταζόμενη οικία πάνω στην οποία θα μελετηθεί η προσαρμογή φωτοβολταϊκού συστήματος
- Στο *Κεφάλαιο 3* παρουσιάζεται η εγκατάσταση φωτοβολταϊκού πάρκου μέσω του οποίου αξιοποιείται σειρά μετρήσεων ετήσιας βάσης για την περαιτέρω μελέτη εφαρμογή της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων σε οικία
- Στο *Κεφάλαιο 4* αναπτύσσεται το ανισοτροπικό μοντέλο HDKR (Hay-Davies-Klucher-Riendl) με το οποίο προσδιορίζεται η ακτινοβολία που δέχεται ένα πλαίσιο αυθαίρετης κλίσης και προσανατολισμού όταν είναι γνωστή η τιμή της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο. Ενδεικτικά παρουσιάζεται η εφαρμογή του μοντέλου σε παράθυρο σπιτιού
- Στο *Κεφάλαιο 5* δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιείται για την αποτίμηση της απόδοσης οποιουδήποτε φωτοβολταϊκού συστήματος ενώ παράλληλα αξιολογείται για την δυναμικότητα, την αποδοτικότητα και την ποιότητα ισχύος το εγκατεστημένο φωτοβολταϊκό πάρκο
- Στο *Κεφάλαιο 6* με τα δεδομένα στοιχεία του φωτοβολταϊκού πάρκου επιχειρείται η εφαρμογή των δύο πρώτων σεναρίων χρήσης της παραγόμενης ενέργειας από φωτοβολταϊκά πλαίσια
- Στο *Κεφάλαιο 7* αναπτύσσεται το θεωρητικό υπόβαθρο για την πραγματοποίηση μελέτης εφαρμογής υβριδικού συστήματος με φωτοβολταϊκά, μπαταρίες και γεννήτρια ενώ πραγματοποιείται και μια πρώτη προσέγγιση διαστασιολόγησης τέτοιου συστήματος (αρχική διαστασιολόγηση)
- Στο *Κεφάλαιο 8* παρουσιάζεται η πορεία ολοκλήρωσης της εγκατάστασης του μικροδικτύου στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Μέσω πειραματικής διαδικασίας που έγινε καταλήγουμε σε χρήσιμα συμπεράσματα μέσω των οποίων βελτιστοποιείται η διαστασιολόγηση αυτόνομου υβριδικού συστήματος στην εν λόγω κατοικία
- Στο *Κεφάλαιο 9* γίνεται μια μικρή παρουσίαση των αποτελεσμάτων του πειράματος προσομοίωσης οικιακών φορτίων ενώ παράλληλα έχουμε την δυνατότητα να εκτιμήσουμε την ενεργειακή απόδοση του μικροδικτύου, των απωλειών και της ποιότητας ισχύος του
- Στο *Κεφάλαιο 10* με την χρήση των εκτιμήσεων της πειραματικής διαδικασίας και την βελτίωση των παραμέτρων της αρχικής θεώρησης ακολουθεί η σχεδίαση στρατηγικής κατάλληλης ενεργειακής διαχείρισης. Υλοποιείται έτσι, το τελικό υβριδικό σύστημα που εξυπηρετεί τις ενεργειακές ανάγκες μιας μέσης κατοικίας στην περιοχή της Αθήνας
- Στο *Κεφάλαιο 11* γίνεται παράθεση των τελικών συμπερασμάτων που προκύπτουν για τα συγκριτικά οφέλη ενός διασυνδεδεμένου και ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος ενώ δίνονται και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

2. Περιγραφή Εξεταζόμενης Οικίας

2.1 Εξεταζόμενη Οικία

Η εξεταζόμενη οικία πάνω στην οποία θα μελετηθεί η προσαρμογή φωτοβολταϊκού συστήματος αφορά μια μέση κατοικία η οποία εξυπηρετεί μια οικογένεια τεσσάρων ατόμων. Το σπίτι αυτό βρίσκεται στα Σπάτα Αττικής (Εικόνα 2.1) με γεωγραφικό πλάτος $\varphi=37,9797^\circ$ και γεωγραφικό μήκος $23,9711^\circ$. Μελετήθηκε η πιθανή χρήση του φωτοβολταϊκού συστήματος για χρονικό διάστημα ενός έτους. Συνεπώς αυτή η χρονική διάρκεια αποτελεί και την αναφορά για την εφαρμογή όλων των σεναρίων. Η βασική θεώρηση για την ανάλυση όλων των μετρήσεων που πάρθηκαν κατά την διάρκεια του έτους ήταν η διαίρεση αυτού σε έξι δίμηνα, από τον Σεπτέμβριο του 2008 έως τον Αύγουστο του 2009. Θεωρήθηκε επίσης για ανάλογες χρονικές περιόδους ένα τυπικό φορτίο μιας τετραμελούς οικογένειας στις παρακάτω δύο ενδεχόμενες καταστάσεις :

- A. χρήση μόνιμης κατοικίας
- B. χρήση εξοχικής κατοικίας κατά το τρίμηνο του καλοκαιριού

Σημαντικό στοιχείο που αφορά στο κατασκευαστικό κομμάτι της φωτοβολταϊκής διάταξης αποτελεί το γεγονός ότι το σπίτι είναι μια μονοκατοικία περίπου 110 m^2 με ελεύθερη πλάκα και «αέρα» για πιθανή εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων ενώ έχει προσανατολισμό σχεδόν νότιο ($\gamma=-10^\circ$) από την μπροστινή του πλευρά. Επιπλέον βρίσκεται σε αρκετά κοντινή περιοχή με το εγκατεστημένο φωτοβολταϊκό πάρκο και δεν παρατηρείται κανένα πρόβλημα σκιάσεων από κάποιο προσκείμενο εμπόδιο στην ταράτσα που σημαίνει ότι μπορούμε να αξιοποιήσουμε όλη την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στην διάρκεια του εξεταζόμενου έτους.



Εικόνα 2.1: Μονοκατοικία στην περιοχή των Σπάτων Αττικής
(φαίνεται η ανατολική πλευρά του σπιτιού)

2.2 Προφίλ Κατανάλωσης Οικίας

Το προφίλ κατανάλωσης της ενέργειας διαχωρίζεται ανάλογα με το σενάριο εφαρμογής του φωτοβολταϊκού συστήματος. Έτσι στην περίπτωση που εξετάζουμε διασυνδεδεμένο σύστημα θεωρείται ένα κοινό προφίλ κατανάλωσης το οποίο εξυπηρετεί τις ανάγκες μιας μέσης τετραμελούς οικογένειας. Αντιθέτως, κατά την μελέτη ενός αυτόνομου συστήματος, το προφίλ κατανάλωσης διαφοροποιείται σημαντικά με σκοπό την διασφάλιση ενός όσο το δυνατόν πιο ενεργειακού προφίλ που δεν θα περιλαμβάνει καθόλου ενεργοβόρες συσκευές.

Για το **διασυνδεδεμένο σύστημα** το ετήσιο προφίλ κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει βάσει κάποιων παραδοχών. Χωρίζουμε έτσι το διάστημα των δώδεκα μηνών σε επτά ομάδες καθεμία εκ των οποίων έχει κάποιο κοινό χαρακτηριστικό στο προφίλ κατανάλωσης. Αναλυτικά η ομαδοποίηση του προφίλ και η αιτιολογία του διαχωρισμού αυτού σε διαφορετικά τμήματα παρουσιάζονται στον πίνακα 2.1.

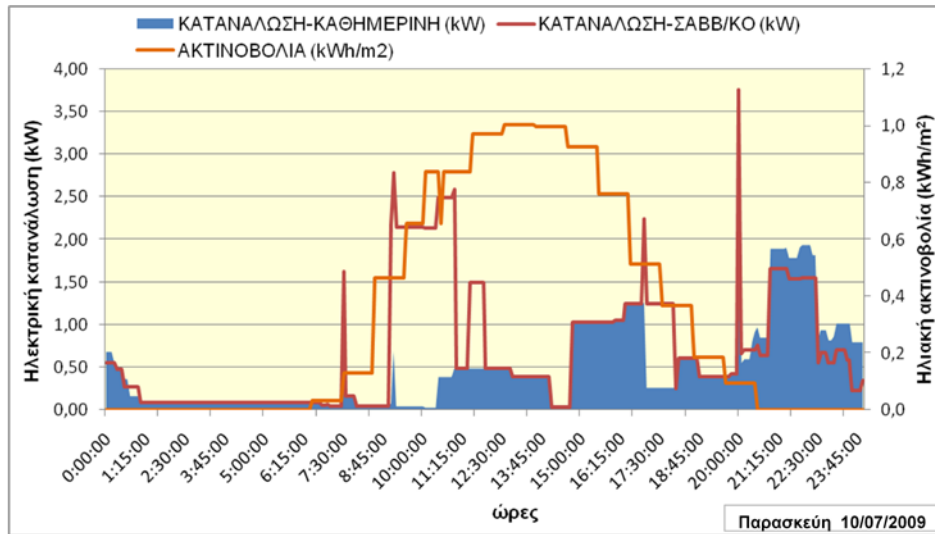
ΟΜΑΔΑ	ΜΗΝΕΣ	ΠΡΟΦΙΛ	Μέση μέρα
1	ΣΕΠ-ΟΚΤ	Μη Χρήση AC-Λέβητα	1/10/08
2	ΝΟΕ-ΔΕΚ	Χρήση Λέβητα	1/12/08
3	ΙΑΝ-ΦΕΒ	Χρήση Λέβητα	1/2/09
4	ΜΑΡ	Χρήση Λέβητα	15/3/09
5	ΑΠΡ-ΜΑΙ	Μη Χρήση AC-Λέβητα	1/5/09
6	ΙΟΥΝ-ΙΟΥΛ	Χρήση AC	1/7/09
7	ΑΥΓ	Χρήση AC - 15 Μέρες Διακοπές	15/8/09

Πίνακας 2.1: Ομαδοποίηση μηνών ανάλογα με το ενεργειακό προφίλ

Σ' αυτόν μπορούμε να δούμε ότι για τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο συνυπολογίζεται η λειτουργία καυστήρα και κυκλοφορητή (λέβητα) ενώ αντιστοίχως για του μήνες Ιούνιο, Ιούλιο και Αύγουστο θεωρείται η χρήση κλιματιστικού. Για τους μήνες Απρίλιος, Μάιος Σεπτέμβριος και Οκτώβριος δεν θεωρείται η χρήση λέβητα ή κλιματιστικού. Τέλος για τους χειμερινούς μήνες θεωρούνται και κάποια επιπλέον φορτία ενώ για τον Αύγουστο συνυπολογίζεται η χρήση μόνο ενός φορτίου ασφαλείας για τις πρώτες 15 ημέρες λόγω της περιόδου των διακοπών. Η στήλη με την μέση μέρα της αντίστοιχης περιόδου έχει να κάνει με την θεώρηση της μέσης ώρας ανατολής και δύσης του ηλίου άρα και ανάλογη χρήση κάθε φορά των φωτιστικών του σπιτιού (μια ώρα πριν την δύση).

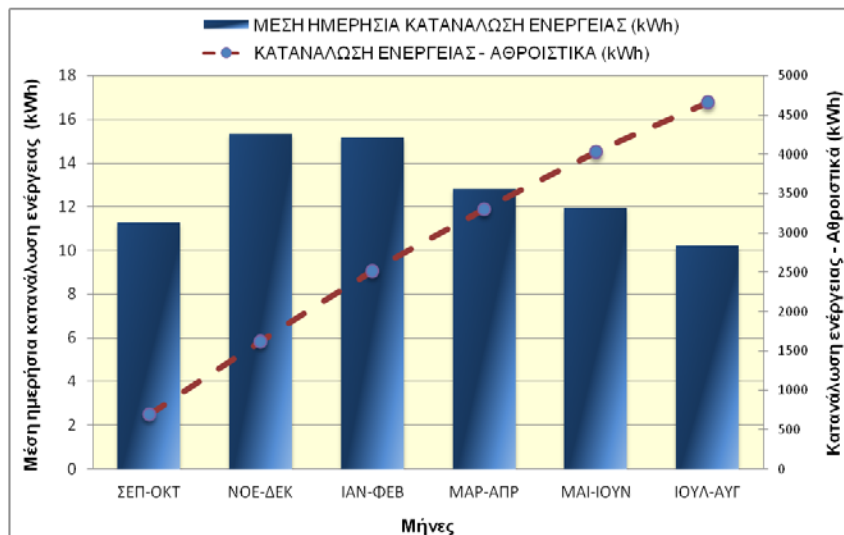
Το θεωρούμενο προφίλ κατανάλωσης για κάθε περίοδο χωρίζεται σε καθημερινές (Δευτέρα – Παρασκευή) και Σαββατοκύριακο αφού γενικά εκεί παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες αποκλίσεις. Ενδεικτικά στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται η ηλεκτρική κατανάλωση για μια μέρα του Ιουλίου. Στο παράρτημα Β υπάρχουν οι καταναλώσεις για ένα τυπικό προφίλ Νοεμβρίου – Δεκεμβρίου για Σαββατοκύριακο. Προκύπτει συνολική κατανάλωση φορτίου περίπου 18,8kWh ενώ η αντίστοιχη ποσότητα ενέργειας για τις καθημερινές του ίδιου διμήνου φτάνουν τις 13,8kWh. Τελικά η μέση τιμή κατανάλωσης για το δίμηνο αυτό προκύπτει 15,31kWh όπως αυτό φαίνεται και στο παρακάτω ετήσιο διάγραμμα μέσης ημερήσιας κατανάλωσης. Ομοίως υπολογίζονται και τα άλλα δίμηνα.

Κεφάλαιο 2 : Περιγραφή Εξεταζόμενης Οικίας



Εικόνα 2.2: Προφίλ κατανάλωσης για το διασυνδεδεμένο σύστημα – Ηλιακή ακτινοβολία ανά τετραγωνικό μέτρο φωτοβολταϊκών πλαισίων για μια καλοκαιρινή μέρα

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας της κατοικίας για το διάστημα μεταξύ Σεπτεμβρίου 2008 έως Αυγούστου 2009 είναι 4661,42kWh. Στην Εικόνα 2.3 και στον πίνακα 2.2 συνοψίζονται γραφικά και αριθμητικά η μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας ανά δίμηνο και η αθροιστική τιμή αυτής κατά την διάρκεια του έτους.



Εικόνα 2.3: Γραφική αναπαράσταση της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας και της αθροιστικής τιμής αυτής κατά την διάρκεια του έτους

Κεφάλαιο 2 : Περιγραφή Εξεταζόμενης Οικίας

A/A	ΜΗΝΕΣ	ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (kWh)	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΑ ΑΝΑ ΔΙΜΗΝΟ (kWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΑ (kWh)
1	ΣΕΠ-ΟΚΤ	11,26	686,77	686,77
2	ΝΟΕ-ΔΕΚ	15,31	934,19	1620,96
3	ΙΑΝ-ΦΕΒ	15,17	895,11	2516,07
4	ΜΑΡ-ΑΠΡ	12,82	784,29	3300,36
5	ΜΑΙ-ΙΟΥΝ	11,95	727,80	4028,17
6	ΙΟΥ-ΑΥΓ	10,21	633,25	4661,42

Πίνακας 2.2: Αριθμητικά η μέση ημερήσια, η αθροιστική τιμή κατανάλωση ενέργειας ανά δίμηνο και η αθροιστική τιμή αυτής κατά την διάρκεια του έτους

Για το σενάριο όπου το σπίτι αφορά εξοχική κατοικία και κατοικείται μόνο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες η συνολική κατανάλωση ενέργειας της κατοικίας μειώνεται αρκετά. Για το διάστημα δηλαδή μεταξύ Ιουνίου 2009 έως Αυγούστου 2009 η υπολογιζόμενη κατανάλωση είναι 1021,54kWh. Το προφίλ αυτό θα χρησιμοποιηθεί για την διαστασιολόγηση ενός σπιτιού που θα εξοικονομεί του ρύπου του με την ανάλογη παραγωγή ενέργειας φιλικής προς το περιβάλλον.

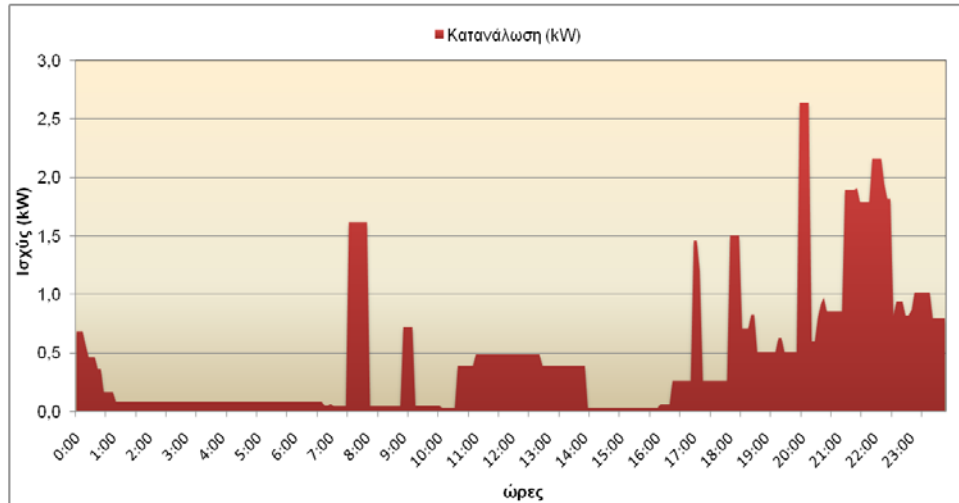
Για το **αυτόνομο σύστημα** το ετήσιο προφίλ κατανάλωσης γίνεται πιο ενεργειακό. Η ενεργειακή αυτονομία μιας οικίας ειδικά όταν αυτή αφορά την μόνιμη διαμονή τετραμελούς οικογένειας είναι αρκετά απαιτητική διαδικασία. Έτσι, πρέπει να ληφθούν αρκετοί παράγοντες υπόψη κατά την διαστασιολόγηση του συστήματος με σκοπό τον περιορισμό της κατανάλωσης.

Ο χαρακτηρισμός του προφίλ κατανάλωσης ως ενεργειακό μπορεί ενδεικτικά να διαμορφωθεί εξασφαλίζοντας τις παρακάτω προϋποθέσεις :

- Η αρτιότητα των μονώσεων και των αλουμινίων που χρησιμοποιεί το υπό μελέτη σπίτι (κατασκευή του 2004) εξασφαλίζει την μικρότερη δυνατή χρήση λέβητα κατά τους χειμερινούς μήνες και κλιματισμού κατά τους θερινούς ενώ επιτρέπει μικρότερη ανταλλαγή θερμότητας προς και από το περιβάλλον αντίστοιχα
- Η χρήση ηλιακού θερμοσίφωνα και ο λόγος ότι δεν υπάρχουν σκιάσεις εξασφαλίζει στο σπίτι ζεστό νερό σχεδόν όλες τις μέρες του έτους
- Η χρήση κουζίνας γκαζιού μας εξοικονομεί αρκετή ενέργεια καθώς η ηλεκτρική κουζίνα αποτελεί μια από τις πιο ενεργοβόρες οικιακές συσκευές
- Χρήση των λαμπτήρων εξοικονόμησης ενέργειας και κατάργηση των λαμπτήρων πυρακτώσεως για τον φωτισμό εξωτερικού και εσωτερικού χώρου
- Πρόβλεψη για μηδενισμό της άσκοπης ετήσιας κατανάλωσης κατά την λειτουργία stand by όλων των ηλεκτρικών συσκευών. Σύμφωνα με μετρήσεις περίπου το 1,5% της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα καταναλώνεται από ηλεκτρικές συσκευές που βρίσκονται σε κατάσταση αναμονής (stand by).
- Η χρήση της τεχνολογίας EIB για την ενεργειακή διαχείριση μέσω απλών κτηριακών αυτοματισμών επιφέρει επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας αλλά ταυτόχρονα καθιστά και πιο λειτουργικό ένα κτήριο - *μελλοντική προοπτική* -

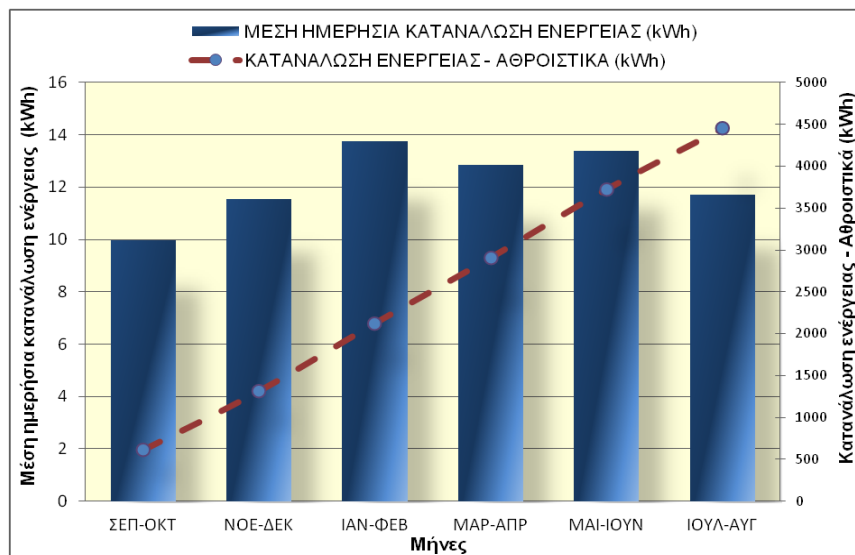
Το προφίλ κατανάλωσης ενέργειας που χρησιμοποιείται για το δίμηνο αναφοράς Νοεμβρίου-Δεκεμβρίου (όπως αυτό καθορίζεται κατά την μελέτη αυτόνομου συστήματος) παρουσιάζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 2.4. Ισχύει και εδώ η χρήση λέβητα για τους μήνες Νοέμβριο – Μάρτιο και ενός μικρού κλιματιστικού για τους μήνες του καλοκαιριού (παράρτημα Β)

Κεφάλαιο 2 : Περιγραφή Εξεταζόμενης Οικίας



Εικόνα 2.4: Ενεργειακό προφίλ κατανάλωσης για το αυτόνομο

Στο διάγραμμα της εικόνας 2.3 και αριθμητικά στον πίνακα 2.3 μπορούμε να δούμε την διακύμανση της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας για το προφίλ φορτίου της εξεταζόμενης οικίας κατά την διάρκεια του έτους. Αθροιστικά η ενέργεια αυτή στο τέλος του έτους είναι ίση με 4450,03kWh



Εικόνα 2.5: Γραφική αναπαράσταση της μέσης ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας και της αθροιστικής τιμής αυτής κατά την διάρκεια του έτους (ενεργειακό προφίλ)

A/A	ΜΗΝΕΣ	ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (kWh)	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΑ ΑΝΑ ΔΙΜΗΝΟ (kWh)	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΑ (kWh)
1	ΣΕΠ-ΟΚΤ	9,96	607,56	607,56
2	ΝΟΕ-ΔΕΚ	11,54	703,94	1311,50
3	ΙΑΝ-ΦΕΒ	13,75	811,25	2122,75
4	ΜΑΡ-ΑΠΡ	12,85	783,85	2906,60
5	ΜΑΙ-ΙΟΥΝ	13,39	816,79	3723,39
6	ΙΟΥΛ-ΑΥΓ	11,72	726,64	4450,03

Πίνακας 2.3: Θεωρούμενες απώλειες αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος

3. Περιγραφή Εγκατάστασης Φωτοβολταϊκού Πάρκου

Κατά την πραγματοποίηση της διπλωματικής εργασίας και στα πλαίσια της περαιτέρω αξιοποίησης των μετρήσεων από μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση κρίθηκε αναγκαίο να γίνει η εγκατάσταση τριών μικρών φωτοβολταϊκών πάρκων. Η πιλοτική αυτή εγκατάσταση πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Ραφήνας Αττικής, στην κατασκήνωση «Μελτέμι» ενώ ολοκληρώθηκε τον Αύγουστο του 2008. Η τοποθεσία αυτή έχει γεωγραφικό πλάτος $\varphi=38,0034^\circ$ και γεωγραφικό μήκος $L=24,0222^\circ$. Το μεγαλύτερο εκ των τριών πάρκων βρίσκεται στην είσοδο της ενώ τα άλλα δύο μικρότερης ισχύος στο εσωτερικό της κατασκήνωσης.

3.1 Περιγραφή Φωτοβολταϊκού Πάρκου – Διάγραμμα Εγκατάστασης

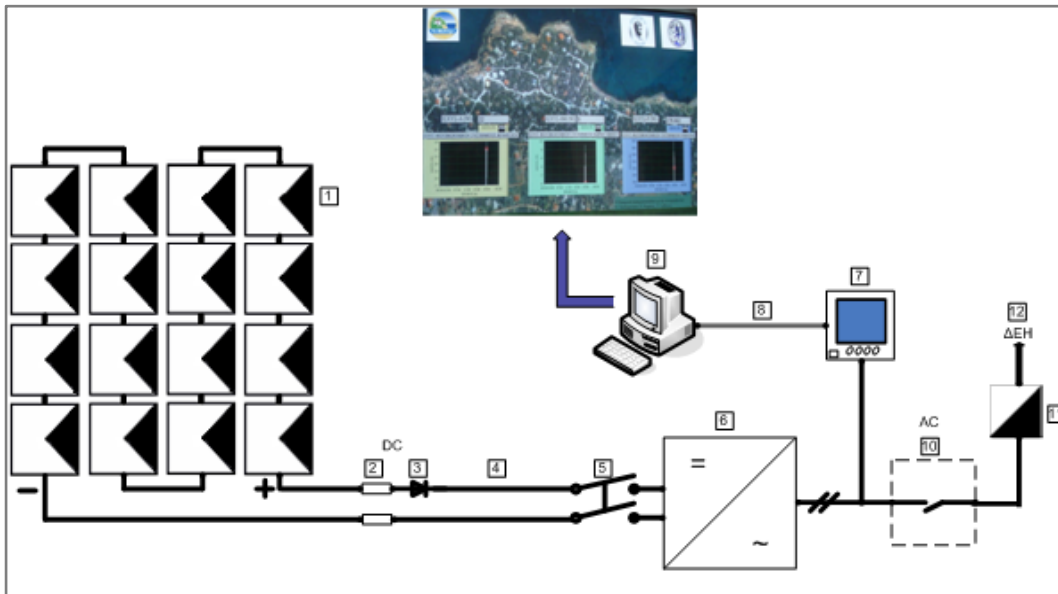
Το διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό πάρκο στην θέση της κεντρικής εισόδου είναι αυτό που επιλέγεται για την πραγματοποίηση όλων εκείνων των εκτιμήσεων και όλων των μετρήσεων που θα χρησιμοποιηθούν στην εργασία αυτή. Ο κύριος λόγος της επιλογής του είναι η ονομαστική του ισχύς που είναι η μεγαλύτερη εκ των τριών και η τοποθεσία που βρίσκεται η οποία βοηθά στην ελάχιστη σκίαση του. Συγκεκριμένα, για το φωτοβολταϊκό πάρκο αυτό θα εκτιμηθεί η απόδοση και η ποιότητα ισχύος που μας παρέχει. Το πάρκο αποτελείται από 16 φωτοβολταϊκά πλαίσια των 170Wr , διαστάσεων 1310 x 990 mm με κλίση $\beta=17^\circ$ και προσανατολισμό νότιο ($\gamma=0^\circ$). Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του πάρκου ανέρχεται σε 2,72kWp ενώ το εμβαδό που καταλαμβάνει είναι 20,75m². Στην εικόνα 3.1 φαίνεται σε πλάγια και πίσω όψη το πάρκο.



Εικόνα 3.1: Φωτοβολταϊκό πάρκο Ραφήνας στην θέση της κεντρικής εισόδου
(α) Πλάγια όψη (β) Πίσω όψη

Στην έξοδο της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών εγκαθίσταται ο αντιστροφέας ενώ η μέτρηση της παραγόμενης ισχύος και άλλων χαρακτηριστικών μεγεθών γίνεται μέσω πολυοργάνου που συνδέεται από την πλευρά του AC μετά τον αντιστροφέα. Η χρήση του πολυοργάνου γίνεται παράλληλα με την χρήση Η/Υ στον οποίο αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό για την απεικόνιση και αποθήκευση όλων των απαιτούμενων μετρήσεων. Στο διάγραμμα της εικόνας 3.2 περιγράφεται η συνολική εγκατάσταση για το κεντρικό φωτοβολταϊκό πάρκο (αντίστοιχες είναι και οι διατάξεις των άλλων δύο). Ιδιαίτερη σημασία σε αυτό έχει η χρήση της διόδου απομόνωσης (isolation diodes) που σκοπό έχει την αποφυγή

κυκλοφορίας ρευμάτων στον κλάδο της φωτοβολταϊκής διάταξης. Κάτι τέτοιο θα είχε ως αποτέλεσμα την ενδεχόμενη καταστροφή των πλαισίων σε πιθανή, για παράδειγμα, ενεργοποίηση του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους που υφίσταται στην εγκατάσταση ή και στην εκφόρτιση των συσσωρευτών κατά τις βραδινές ώρες σε περίπτωση αυτόνομου συστήματος. Η σύνδεση που ακολουθείται είναι σύμφωνα με το σχέδιο του Fraunhofer για διασυνδεδεμένα στο δίκτυο φωτοβολταϊκά συστήματα. [1]



1	Φωτοβολταϊκά πλαίσια	7	Πολύοργανο μετρήσεων
2	Ασφάλειες φωτοβολταϊκής συστοιχίας	8	ModBus
3	Δίοδος φωτοβολταϊκής συστοιχίας	9	H/Y - Απεικόνιση μετρήσεων μέσω labview
4	Αγωγός DC	10	Διακόπτης AC μετά τον αντιστροφέα
5	Διακόπτης DC πριν τον αντιστροφέα	11	Ηλεκτρικός πίνακας διανομής
6	Αντιστροφέας DC σε AC	12	Ηλεκτρικό δίκτυο

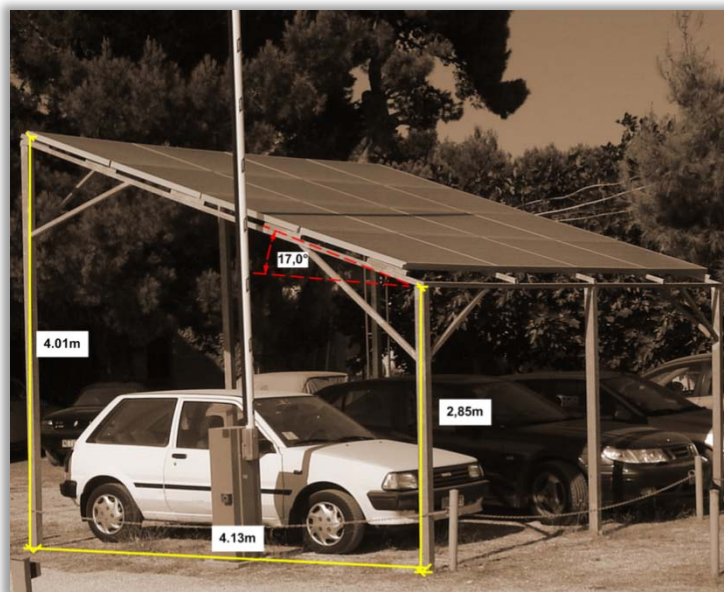
Εικόνα 3.2: Διάγραμμα εγκατάστασης διασυνδεδεμένου φ/β πάρκου (fraunhofer)

3.2 Εξοπλισμός Φωτοβολταϊκής Εγκατάστασης

Η εγκατάσταση του διασυνδεδεμένου φωτοβολταϊκού συστήματος αποτελείται από τον ανάλογο εξοπλισμό όπως αυτός περιγράφεται στην συνέχεια.

Το κύριο συστατικό κάθε τέτοιου συστήματος μετατροπής της ηλιακή ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια είναι τα *φωτοβολταϊκά ηλιακά στοιχεία* (ή φωτοστοιχεία ή ηλιακά κύτταρα ή κυψελίδες). Τα στοιχεία αυτά είναι δίοδοι ημιαγωγών σε μορφή δίσκου που καθώς δέχονται στην επιφάνειά τους την ηλιακή ακτινοβολία εκδηλώνουν μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην εμπρός και πίσω όψη τους. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής του και την ένταση της ακτινοβολίας που δέχεται, ένα ηλιακό στοιχείο μπορεί να δώσει τάση 0,5-1,0 V και πυκνότητα ρεύματος 20-40 mA ανά cm² της επιφάνειάς του. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια του εμπορίου αποτελούνται από πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία που συνδέονται σε σειρά, ενώ οι Φ/Β γεννήτριες από πολλά Φ/Β πλαίσια που συνδέονται σε σειρά και παράλληλα, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή τάση και ένταση. Κατά την εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού πάρκου χρησιμοποιήθηκαν 16 φωτοβολταϊκά πλαίσια της εταιρείας *Yingli Solar* πολυκρυσταλλικής τεχνολογίας. Αυτό που πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερος είναι η αποφυγή της ολικής ή μερικής σκίασης των πλαισίων του φωτοβολταϊκού συστήματος. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται οι δίοδοι παράκαμψης (By pass diodes) που τοποθετούνται

παράλληλα σε κάθε στοιχείο, για να δημιουργείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτές, όταν δεν λειτουργεί αυτό. Η μερική σκίαση μπορεί να προκαλέσει υπερθέρμανση και καταστροφή του πλαισίου (hot spot effect). Η σύνδεση τους έγινε σε σειρά, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της εγκατάστασης, ενώ η διάταξη αυτή είναι τοποθετημένη σε υπερυψωμένη βάση, οι διαστάσεις και η κλίση της οποίας απεικονίζονται στην εικόνα 3.3.



Σχήμα 3.3: Διαστάσεις κατασκευής υπερυψωμένης βάσης και κλίση φ/β πάρκου

Ο *αντιστροφέας* είναι ένα από τα πιο σημαντικά υποσυστήματα των ηλιακών φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Τοποθετείται στην έξοδο της συστοιχίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων και μετασχηματίζει το συνεχές ρεύμα που παράγουν τα πλαίσια σε εναλλασσόμενο για να διοχετευθεί στο δίκτυο της ΔΕΗ. Ένας αντιστροφέας πρέπει να διασφαλίζει την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απωλειών, καθορίζοντας το σημείο λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων για την μέγιστη παραγωγή ισχύος και σε συνδυασμό με την σωστή διαστασιολόγηση του, πρέπει να διασφαλίζει την σωστή διοχέτευση του ηλεκτρικού ρεύματος στο δίκτυο. Ο αντιστροφέας που χρησιμοποιήθηκε είναι της *Würth Solergy* με ονομαστική ισχύ εισόδου 6,6kWp.

Το *πολυόργανο* μετρήσεων εγκαθίσταται στην AC πλευρά του συστήματος και μας παρέχει όλα τα απαραίτητα μεγέθη για την περεταίρω αξιολόγηση του. Τα μετρούμενα μεγέθη πρέπει να καταγράφονται και να αποθηκεύονται έτσι ώστε στην συνέχεια να αξιολογηθούν. Το συγκεκριμένο πολυόργανο που χρησιμοποιήθηκε είναι της *DEIF A/S* και παρέχει μέσω δικού του λογισμικού την δυνατότητα εποπτείας των μεγεθών (ο ρυθμός δειγματοληψίας του στα 200msec) καθώς και αποθήκευσης ενός ιστορικού των δεδομένων του για την μελλοντική χρήση τους. Παρόλα αυτά, επειδή το ελάχιστο χρονικό διάστημα λήψης και αποθήκευσης των μεγεθών, για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, είναι το ένα έτος ζητήθηκε η επιπλέον συνδρομή Η/Υ με το κατάλληλο λογισμικό ώστε να αυξηθούν έτσι οι δυνατότητες μας για αποθήκευση και επεξεργασία του υλικού. Η επικοινωνία αυτή του πολυοργάνου με τον υπολογιστή επιτυγχάνεται μέσω Modbus. [2] Ο υπολογιστής έχει εγκατεστημένο το λογισμικό LabVIEW πάνω στο οποίο έχει αναπτυχθεί όλη η πλατφόρμα λήψης και αποθήκευσης των μετρήσεων με ρυθμό δειγματοληψίας 5 λεπτών. [3] Ο μεγάλος όγκος των μετρήσεων καθιστά απαραίτητη την χρήση

Κεφάλαιο 3 : Περιγραφή Εγκατάστασης Φωτοβολταϊκού Πάρκου

ενός λογισμικού βάσης δεδομένων (MySQL 5.0) μέσω του οποίου υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης πολλών τιμών αλλά και ταχύτητα κατά την ανάκληση αυτών όποτε επιθυμείται.

Ο παραπάνω εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού πάρκου, με τα τεχνικά χαρακτηριστικά όλων των επιμέρους μονάδων, παρουσιάζεται αναλυτικά στο παράρτημα Α.1.

Στην εικόνα 3.4 απεικονίζονται όλες οι μονάδες και τα στάδια της εγκατάστασης. Αναλυτικότερα φαίνονται η διάταξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων τα οποία είναι συνδεδεμένα σε μία σειρά (string). Το καλώδιο από τα πλαίσια καταλήγει σε στεγανό κουτί διακλάδωσης από το οποίο ξεκινά το καλώδιο από αέρος μέσα σε κοντινό κλειστό και στεγανό χώρο όπου είναι εγκατεστημένα και τα υπόλοιπα τμήματα της εγκατάστασης (εικόνες (β) και (γ)). Στην εικόνα (δ) φαίνεται ο αντιστροφέας και ο ηλεκτρικός πίνακας του φωτοβολταϊκού πάρκου.

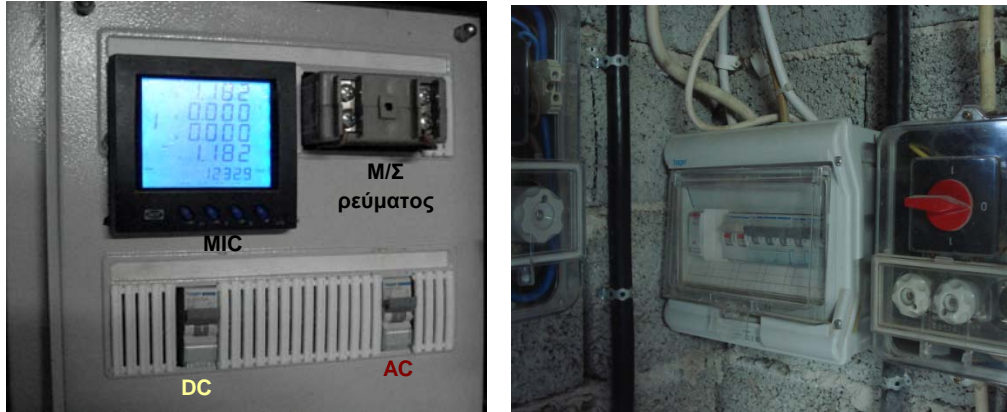


Εικόνα 3.4: Εγκατάσταση φ/β πάρκου στην Ραφήνα

- (α) φ/β πλαίσια ισχύος 2,72kWp
- (β) εναέριο καλώδιο σύνδεσης πάρκου
- (γ) είσοδος καλωδίου σε κλειστό στεγασμένο χώρο
- (δ) συνολική εγκατάσταση αντιστροφέα – ηλεκτρικού πίνακα

Στην εικόνα 3.5 φαίνονται οι ηλεκτρικοί πίνακες της εγκατάστασης. Αναλυτικά μπορούμε να διακρίνουμε καλύτερα στην εικόνα (α) το πολυόργανο μετρήσεων, τον Μ/Σ υποβιβασμού έντασης και τους ασφαλειοαποξεύκτες για την πλευρά του DC (διπολικός) αλλά και AC κυκλώματος. Στην εικόνα (β) διακρίνεται ο ηλεκτρικός πίνακας διανομής της ΔΕΗ πάνω στον οποίο γίνεται η διασύνδεση του φωτοβολταϊκού πάρκου. Στο παράρτημα Γ αναλύεται ο τρόπος υπολογισμού όλων των διατομών των καλωδίων και των ασφαλειών που χρησιμοποιήθηκαν στην εγκατάσταση αυτή. [4]

Κεφάλαιο 3 : Περιγραφή Εγκατάστασης Φωτοβολταϊκού Πάρκου



Εικόνα 3.5: Ηλεκτρικοί πίνακες της εγκατάστασης
(α) ηλεκτρικός πίνακας φ/β πάρκου
(β) ηλεκτρικός πίνακας δικτύου της ΔΕΗ

Το ηλεκτρολογικό σχέδιο της συνολικής εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού πάρκου βρίσκεται στο παράρτημα Γ.2.1.

4. Ηλιακή Ακτινοβολία

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μία οποιαδήποτε επιφάνεια. Είναι κατανοητό πως για την αξιολόγηση του φωτοβολταϊκού συστήματος απαιτείται η γνώση της πορείας του ήλιου και εν τέλει ο προσδιορισμός της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ένα πλαίσιο αυθαίρετης κλίσης και προσανατολισμού. Αυτό που χρειάζεται ως δεδομένο για τον υπολογισμό αυτό είναι η τιμή της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο. Όλες οι γωνίες που χρησιμοποιούνται στο κεφάλαιο είναι σε μοίρες. [5]

4.1 Ορισμοί

Προτού προχωρήσουμε περαιτέρω στην ανάλυση της πορείας που ακολουθεί ο ήλιος και τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε οποιαδήποτε επιφάνεια, θα ήταν χρήσιμο να αναφερθούμε στους παρακάτω ορισμούς :

Ακτινική / άμεση ακτινοβολία (beam radiation) : Η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον ήλιο χωρίς να έχει υποστεί διάχυση από την ατμόσφαιρα. Η ακτινική συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας συχνά αναφέρεται και ως άμεση συνιστώσα.

Διάχυτη ακτινοβολία (diffuse radiation) : Η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνεται από τον ήλιο αφού η κατεύθυνσή της έχει αλλάξει από τη διάχυση στην ατμόσφαιρα.

Ολική Ηλιακή Ακτινοβολία (Total solar radiation) : Το άθροισμα της ακτινικής και της διάχυτης ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια αποτελεί την ολική ακτινοβολία. Οι μετρήσεις ακτινοβολίας που θα παρουσιαστούν στην συνέχεια αναφέρονται σε ολική ακτινοβολία πάνω σε οριζόντιο επίπεδο.

Ένταση ακτινοβολίας (Irradiance) : Η τιμή της ακτινοβολούμενης ενέργειας που προσπίπτει σε μοναδιαία επιφάνεια προς την επιφάνεια αυτή (W/m^2). Το σύμβολο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της έντασης της ακτινοβολίας είναι το G .

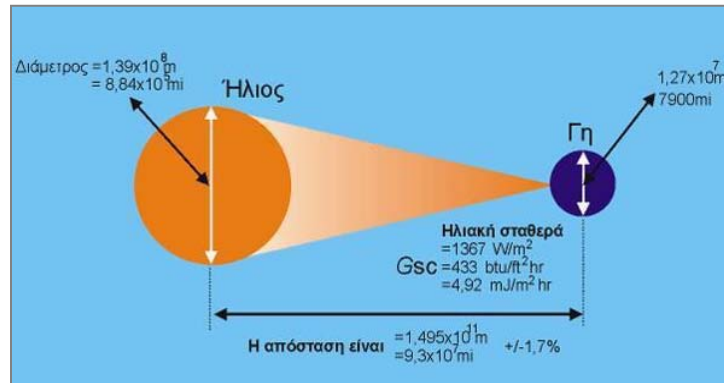
Ακτινοβολία ή ηλιακή έκθεση (Irradiation) : Η προσπίπτουσα ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας που προκύπτει από την ολοκλήρωση της έντασης ακτινοβολίας σε ορισμένο χρονικό διάστημα, συνήθως μιας ώρας ή μέρας (J/m^2). Το σύμβολο που χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ακτινοβολίας σε διάστημα μιας ώρας είναι το I .

4.2 Πορεία του Ήλιου

Ο σημαντικότερος παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η θέση του ήλιου σε σχέση με το σημείο της γης που δέχεται την ακτινοβολία. Για τον λόγο αυτό θα ήταν απαραίτητο να αναφερθούμε σε βασικές αρχές της ηλιακής γεωμετρίας.

• **Εξωγήινη Ακτινοβολία**

Σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας σε κάποιο σημείο της γης είναι η θέση του ήλιου ως προς το σημείο αυτό. Η τροχιά της γης γύρω από την ήλιο είναι ελαφρώς ελλειπτική. Γι' αυτό υπάρχει μεταβολή στην απόσταση των κέντρων μεταξύ γης – ήλιου η οποία είναι της τάξης του 1,7%. Στην εικόνα 1.1 φαίνεται σχηματικά η γεωμετρία μεταξύ γης και ήλιου.



Εικόνα 4.1: Σχέση Γης - Ήλιου

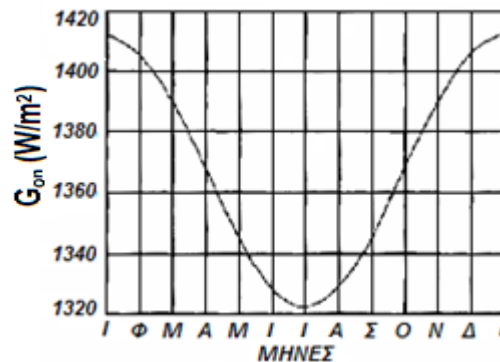
Αυτή η μεταβολή της απόστασης επιφέρει και μια μεταβολή στην εξωγήινη ακτινοβολία κατά $\pm 3\%$. Η ισχύς της ακτινοβολίας που φτάνει τελικά στη γη για κάθε στιγμή του χρόνου φαίνεται στο σχήμα 1.2 και δίνεται από την σχέση :

$$G_{on} = G_{sc} \cdot (1 + 0.033 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365}) W / m^2 \quad (1.1)$$

όπου G_{on} η Εξωγήινη ακτινοβολία (W/m^2) σε κάθετη επιφάνεια ως προς την ακτινοβολία
 n η μέρα του χρόνου στην οποία αναφερόμαστε (π.χ. $n=1$ για την 1^η Ιανουαρίου)
 G_{sc} η Ηλιακή σταθερά ($G_{sc} = 1367 W/m^2$).

Ως *ηλιακή σταθερά* ορίζεται η ενέργεια από τον ήλιο ανά μονάδα χρόνου που δέχεται μονάδα επιφάνειας κάθετη στην κατεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας, για την μέση τιμή απόστασης Γης-Ήλιου έξω από τα όρια της ατμόσφαιρας.

Ως *εξωγήινη ακτινοβολία* ορίζουμε την ακτινοβολία πάνω στην επιφάνεια της γης απουσία ατμόσφαιρας. Η μεταβολή της εξωγήινης ακτινοβολίας ανά μήνα του έτους φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2: Μεταβολή της εξωγήινης ακτινοβολίας ανά μήνα του έτους

Συχνά είναι απαραίτητο να υπολογίζεται η ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας για χρονική περίοδο μιας ώρας. Με ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης στο πεδίο του χρόνου και για περίοδο ανάμεσα στις δύο ωριαίες γωνίες ω_1 και ω_2 που καθορίζουν μία ώρα ($\omega_2 > \omega_1$). Η σχέση αυτή είναι :

$$I_o = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365}\right) \cdot \left(\cos \phi \cdot \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi (\omega_2 - \omega_1)}{180} \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta \right) \quad (1.2)$$

- **Ηλιακή Ώρα**

Η ηλιακή ώρα δεν συμπίπτει με την τοπική ώρα κάθε χώρας. Ορίζεται έτσι ώστε το ηλιακό μεσημέρι (12:00 ηλιακής ώρας) να συμπίπτει με την χρονική στιγμή όπου ο ήλιος βρίσκεται στον μεσημβρινό του παρατηρητή. Έχει δηλαδή άμεση εξάρτηση με το γεωγραφικό μήκος της περιοχής. Ως γεωγραφικό μήκος ενός τόπου στην επιφάνεια της γης ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται από τον Πρώτο μεσημβρινό, με γεωγραφικό μήκος 0° όπου βρίσκεται στο Greenwich, έως το ζητούμενο σημείο. Το γεωγραφικό μήκος μετράται σε μοίρες αρχής γενομένης της μέτρησης από τον πρώτο μεσημβρινό με τα θετικά προς τα δυτικά. Επειδή σε όλες τις εξισώσεις που ακολουθούν η ώρα αναφέρεται ως ηλιακή θα ήταν χρήσιμο να μετατρέψουμε την τοπική σε ηλιακή. Η σχέση για την μετατροπή αυτή είναι:

$$\text{Ηλιακή ώρα} = \text{Τοπική ώρα} + E + 4 (L_{st} - L_{oc}) \quad (1.3)$$

όπου L_{st} το γεωγραφικό μήκος του μεσημβρινού της τοπικής ζώνης ώρας
 L_{oc} το γεωγραφικό μήκος της περιοχής που βρίσκεται ο παρατηρητής (σε μοίρες)
 E η εξίσωση ώρας (σε λεπτά)

Η εξίσωση της ώρας δίνεται από την σχέση :

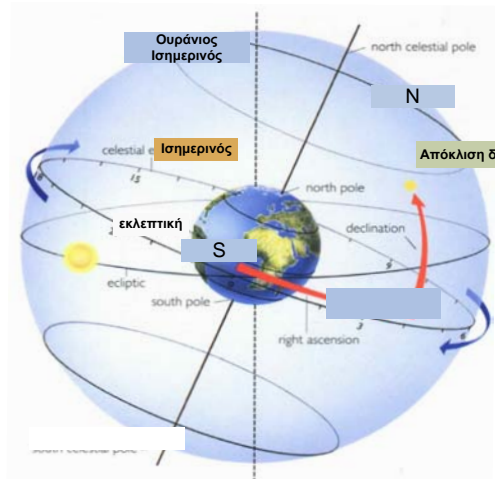
$$E = 229,2 \cdot (0,000075 + 0,001868 \cdot \cos B - 0,032077 \cdot \sin B - 0,014615 \cdot \cos 2B - 0,04089 \cdot \sin 2B) \quad (1.4)$$

$$\text{όπου} \quad B = (n-1) \cdot \frac{360}{365} \quad (1.5)$$

- **Ηλιακή Απόκλιση**

Κατά τη διάρκεια ενός έτους, η θέση του ήλιου παίρνει πολύ διαφορετικές τιμές σαν αποτέλεσμα της μεταβολής της απόκλισης (δ), δηλαδή της γωνίας που σχηματίζεται ανάμεσα στη ευθεία που ενώνει το κέντρο της γης με το κέντρο του ήλιου και στο επίπεδο του ισημερινού (εικόνα 4.3). Οι τιμές της απόκλισης του ήλιου είναι θετικές για το βόρειο ημισφαίριο και αρνητικές για το νότιο. Οι ακραίες τιμές είναι +23,45° στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο για το βόρειο ημισφαίριο) και -23,45° στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο). Άμεση συνέπεια των διαφορετικών τιμών της απόκλισης του ήλιου κατά τη διάρκεια του έτους είναι οι κυκλικές τροχιές

που διαγράφονται βορειότερα στον ουρανό το καλοκαίρι, με την ανατολή νωρίτερα και την δύση αργότερα στο βόρειο ημισφαίριο, ενώ το χειμώνα συμβαίνει το αντίθετο.



Εικόνα 4.3: Ηλιακή απόκλιση δ

Η σχέση που μας δίνει για κάθε μέρα του χρόνου την ηλιακή απόκλιση είναι:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (1.6)$$

- **Η Ωριαία Γωνία**

Η ωριαία ώρα (ω) ορίζεται ως η γωνιακή μετατόπιση του ηλίου ανατολικά ή δυτικά του τοπικού μεσημβριού, λόγω της περιστροφής της γης γύρω από τον άξονά της κατά 15° την ώρα. Τις πρωινές ώρες η ω είναι θετική (+) και κατά τις απογευματινές γίνεται αρνητική (-).

- **Ύψος Ήλιου και Ηλιακό Αζιμούθιο**

Η θέση του ήλιου στον ουρανό ενός τόπου περιγράφεται συνήθως με δύο γωνίες :

- το ύψος του ήλιου (α_s) και
- το ηλιακό αζιμούθιο (γ_s)

Το *ύψος του ήλιου* είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και τον ορίζοντα, παίρνει τιμές από -90° έως 90° με θετικές τιμές όταν ο ήλιος είναι πάνω από τον ορίζοντα και αρνητικές όταν ο ήλιος είναι κάτω από αυτόν.

Ως *ηλιακό Αζιμούθιο* ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στη προβολή της άμεσης ακτινοβολίας του ήλιου και το Νότο. Προς τα δεξιά από το νότο, το ηλιακό αζιμούθιο παίρνει θετικές τιμές ενώ προς τα αριστερά αρνητικές. Κατά την διάρκεια της ημέρας, το ύψος του ήλιου και το ηλιακό αζιμούθιο μεταβάλλονται συνεχώς καθώς ο ήλιος διατρέχει τον ουρανό. Το ηλιακό αζιμούθιο είναι:

Κεφάλαιο 4 : Ηλιακή Ακτινοβολία

- ο Για νότιο προσανατολισμό $\gamma=0$
- ο Για γωνίες δυτικά από το νότο παίρνει θετικές τιμές
- ο Για γωνίες ανατολικά από το νότο παίρνει αρνητικές τιμές.

Η σχέση για τον υπολογισμό του ηλιακού αζιμούθιου είναι:

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos\theta_z \cdot \sin\phi - \sin\delta}{\sin\theta_z \cdot \cos\phi} \right) \right| \quad (1.7)$$

όπου sign η συνάρτηση πρόσημου

θ_z η ζενιθιακή γωνία

ϕ το γεωγραφικό πλάτος (θ_z και ϕ ορίζονται παρακάτω)

4.3 Προσανατολισμός Επιφάνειας

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία κάθε συστήματος που γίνεται δέκτης της ηλιακής ενέργεια είναι ο προσανατολισμός της επιφάνειας σε σχέση με την κατεύθυνση της ηλιακής ακτινοβολίας.

- **Γεωγραφικό Πλάτος**

Γεωγραφικό πλάτος (latitude, ϕ) ενός τόπου στην επιφάνεια της γης ονομάζεται η γωνία που σχηματίζεται από τον Ισημερινό έως το ζητούμενο σημείο. Το γεωγραφικό πλάτος χαρακτηρίζεται Βόρειο B (North N) ή Νότιο N (South S) ανάλογα σε ποιο ημισφαίριο βρίσκεται ο τόπος. Τόποι του ίδιου ημισφαιρίου έχουν ομώνυμα πλάτη (same names) σε αντίθεση με τόπους διαφορετικού ημισφαιρίου που έχουν ετερόνυμα πλάτη (contrary names). (Αυτό λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στους υπολογισμούς). Το γεωγραφικό πλάτος παίρνει τιμές από -90° έως 90° με θετικές τιμές προς το βορρά και αρνητικές προς το νότο.

- **Αζιμουθιακή Γωνία**

Η αζιμούθια γωνία της επιφάνειας (γ) είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και τον τοπικό μεσημβρινό βορρά-νότου. Παίρνει τιμές από -180° μέχρι $+180^\circ$. Η γωνία -180° (που συμπίπτει με την $+180^\circ$) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς το βορρά, η γωνία -90° προς την ανατολή, η γωνία 0° προς το νότο και η γωνία $+90^\circ$ προς τη δύση.

- **Κλίση της Επιφάνειας**

Η κλίση του συλλέκτη (β) είναι η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο της εξεταζόμενης επιφάνειας και το οριζόντιο επίπεδο. Μπορεί να πάρει τιμές από 0° μέχρι 180° .

- **Γωνία Πρόσπτωσης**

Ως γωνία πρόσπτωσης (θ) ορίζουμε την γωνία μεταξύ της άμεσης ακτινοβολίας και της καθέτου στην επιφάνεια που μας ενδιαφέρει. Η σχέση που μας δίνει την γωνία πρόσπτωσης δίνεται παρακάτω

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin \phi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \quad (1.8)$$

□ για επιφάνειες κάθετες ($\beta=90^\circ$)

$$\cos \theta = -\sin \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \quad (1.9)$$

• **Ζενιθιακή Γωνία**

Αντί για το ύψος του ήλιου χρησιμοποιείται επίσης συχνά η συμπληρωματική του γωνία, δηλαδή η γωνία ανάμεσα στην κατεύθυνση του ήλιου και στην κατακόρυφο, που ονομάζεται ζενιθιακή απόσταση (ή ζενιθιακή γωνία) του ήλιου (θ_z). Η σχέση που μας δίνει την γωνία πρόσπτωσης για οριζόντια επιφάνεια δίνεται παρακάτω:

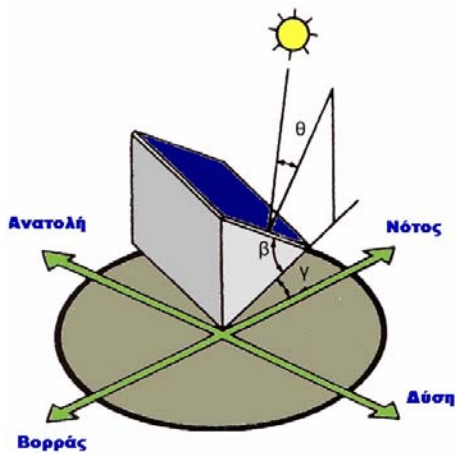
$$\cos \theta_z = \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \cdot \sin \delta \quad (1.10)$$

επίσης ισχύει η σχέση: $\theta_z = 90 - \alpha_s$ (1.11)

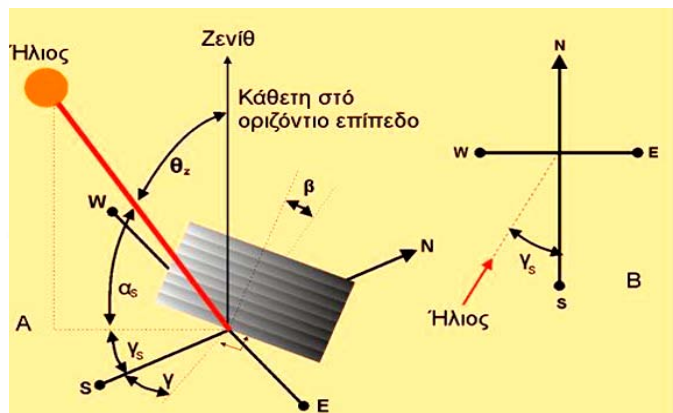
Η διάρκεια της κάθε ημέρας σε ώρες δίνεται από την σχέση:

$$N = \frac{2}{15} \cdot \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (1.12)$$

Όλες οι γωνίες που περιγράφονται ανωτέρω φαίνονται στις εικόνες 4.4 και 4.5 που ακολουθούν.



Εικόνα 4.4: Γωνίες γ , β και θ



Εικόνα 4.5: Γωνίες προσδιορισμού της θέσης του ήλιου και της επιφάνειας που εξετάζουμε

4.4 Μοντέλο Υπολογισμού Προσπίπτουσας Ωριαίας Ακτινοβολίας

Συχνά είναι αναγκαίος ο υπολογισμός της ωριαίας ακτινοβολίας σε ένα κεκλιμένο επίπεδο συλλέκτη. Αυτή η ανάγκη προκύπτει από την στιγμή που μας ενδιαφέρει άμεσα η αποδοτικότητα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος ή ακόμα και γιατί θέλουμε να αξιολογήσουμε φαινόμενα όπως η απορροφούμενη ακτινοβολία από μία οποιαδήποτε επιφάνεια (παράθυρο, τοίχους κτλ). Μέσω λοιπόν, μετρήσεων ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα οριζόντιο επίπεδο θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε κάποιο μαθηματικό μοντέλο για την εκτίμηση αυτής σε κεκλιμένο επίπεδο.

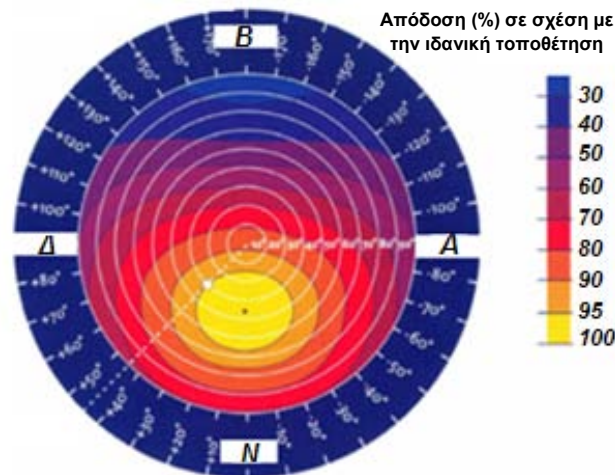
4.4.1 Ο Γεωμετρικός Παράγοντας

Ο παράγοντας R_b αυτός αφορά το λόγο της ακτινικής συνιστώσας σε κεκλιμένη επιφάνεια προς την ακτινική συνιστώσα σε οριζόντια επιφάνεια οποιαδήποτε χρονική στιγμή και προκύπτει μέσω της σχέσης:

$$R_b = \frac{G_{b,T}}{G_b} = \frac{G_{b,n} \cdot \cos \theta}{G_{b,n} \cdot \cos \theta_z} \quad (1.13)$$

όπου $G_{b,T}$ η ακτινοβολία (W/m^2) σε κεκλιμένη επιφάνεια ως προς την ακτινοβολία
 G_b η ακτινοβολία (W/m^2) σε οριζόντια επιφάνεια ως προς την ακτινοβολία και
 $G_{b,n}$ η άμεση ακτινοβολία

Όσον αφορά το βόρειο ημισφαίριο η βέλτιστη γωνία αζιμούθιου για επίπεδους συλλέκτες είναι $\gamma=0^\circ$ (ή 180° στο νότιο ημισφαίριο) και για τον λόγο αυτό τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται με φορά προς τον νότο. Στην παρακάτω εικόνα 4.6 γίνεται σαφής η παραπάνω διαπίστωση.



Εικόνα 4.6: Βέλτιστος προσανατολισμός φ/β πλαισίων

Η γενική σχέση του λόγου R_b με την αντικατάσταση των αντίστοιχων εξισώσεων 1.8 και 1.10 και για γωνία $\gamma=0^\circ$ γίνεται :

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \cdot \sin \delta} \quad (1.14)$$

Ο τρόπος αυτός υπολογισμού της ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα αν και στις ώρες κοντά στην ανατολή και τη δύση του ηλίου μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένες τιμές μεγαλύτερες από ότι ισχύουν στην πραγματικότητα. Τις οριακές χρονικές στιγμές της ημερήσιας ηλιακής πορείας η απολαβή από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι αμελητέα σε σύγκριση με τη συνολική ημερήσια απόδοση του συλλέκτη. Έτσι όλες οι τιμές αυτές για το R_b και κατά συνέπεια για το I_b δεν πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για να μην μας οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα και εκτιμήσεις.

4.4.2 Δείκτης Καθαρότητας Ατμόσφαιρας

Η συχνότητα με την οποία εμφανίζονται περίοδοι με διαφορετικά επίπεδα ακτινοβολίας (αίθριες και συννεφιασμένες μέρες), αποτυπώνεται με το δείκτη καθαρότητας k_T . Ο δείκτης αυτός σε ωριαία βάση αναφοράς είναι ο λόγος της ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο προς την ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας.

$$k_T = \frac{I}{I_o} \quad (1.15)$$

Τα δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία I προέρχονται από μετρήσεις ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο και λαμβάνονται από μονοκρυσταλλικό αισθητήρα όπως θα δούμε παρακάτω, ενώ η τιμή για την I_o υπολογίζεται θεωρητικά από την εξίσωση 1.2. Όσο πιο αίθρια είναι η ατμόσφαιρα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ένταση της ακτινοβολίας. Ο δείκτης k_T αποτελεί χαρακτηριστικό του τύπου εγκατάστασης, ενώ έχει αποδειχθεί στατιστικά ότι ανεξάρτητα από το γεωγραφικό πλάτος, το ποσοστό του χρόνου κατά τον οποίο η συνολική ημερήσια ακτινοβολία είναι μικρότερη ή ίση από ορισμένη τιμή εξαρτάται άμεσα από την τιμή του δείκτη αυτού.

4. 4.3 Ακτινική και Διάχυτη Συνιστώσα Ωριαίας Ακτινοβολίας

Καταρχάς θα πρέπει να γίνει ο απαραίτητος διαχωρισμός της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο στις συνιστώσες της διάχυτη και ακτινική. Κάτι τέτοιο είναι αναγκαίο καθώς οι υπολογισμοί της ακτινοβολίας σε επίπεδο αυθαίρετης κλίσης και προσανατολισμού από δεδομένα στο οριζόντιο επίπεδο απαιτούν διαφορετική αντιμετώπιση των δύο συνιστωσών. Η προσέγγιση που χρησιμοποιείται συσχετίζει τον λόγο της ωριαίας διάχυτης ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο προς την συνολική ακτινοβολία με τον ωριαίο δείκτη καθαρότητας, k_T . Παρόλο που υπάρχουν αρκετές σχέσεις συσχέτισης διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας στην συγκεκριμένη περίπτωση αυτή που χρησιμοποιείται είναι των Erbs et al και περιγράφεται στην σχέση 1.16 για διαφορετικές τιμές του δείκτη καθαρότητας k_T .

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,09 \cdot k_T & k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604 \cdot k_T + 4,388 \cdot k_T^2 - 16,638 \cdot k_T^3 + 12,336 \cdot k_T^4 & 0,22 < k_T \leq 0,80 \\ 0,165 & k_T > 0,80 \end{cases} \quad (1.16)$$

Η συνολική ακτινοβολία δίνεται από την παρακάτω σχέση μέσω της οποίας προκύπτει και η άμεση ακτινοβολία I_b .

$$I_d + I_b = I \quad (1.17)$$

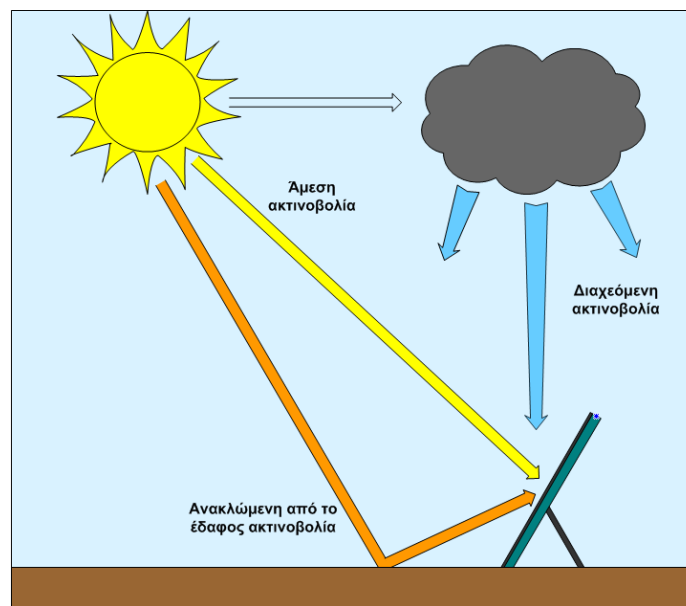
4.4.4 Ακτινοβολία σε Κεκλιμένες Επιφάνειες

Τα μοντέλα περιγραφής του ουράνιου θόλου που χρησιμοποιούνται ουσιαστικά αποτελούν μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφουν τη διάχυτη ακτινοβολία. Οι διαφορές δηλαδή ανάμεσα στα υπάρχοντα μοντέλα συνίστανται στον τρόπο με τον οποίο χειρίζονται τις συνιστώσες της διάχυτης ακτινοβολίας.

Το ιστροπικό μοντέλο αποτελεί την πιο απλή προσέγγιση βάση του οποίου η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από τις τρεις ακόλουθες ακτινοβολίες ενώ θεωρεί μια συνολική συνιστώσα της διάχυτης ακτινοβολίας:

- Την άμεση ακτινοβολία (beam) η οποία προσπίπτει κατευθείαν στην εξεταζόμενη επιφάνεια
- Την διαχεόμενη ακτινοβολία που θεωρείται συνολικά από την διάχυση στην ατμόσφαιρα (diffuse)
- Την ανακλώμενη ακτινοβολία από το έδαφος (ground reflected)

Οι τρεις ακτινοβολίες που προσπίπτουν για παράδειγμα σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο φαίνονται στην εικόνα 4.7:



Εικόνα 4.7: Ισοτροπικό μοντέλο ηλιακής ακτινοβολίας

Οι Hay και Davies αρχικά θεωρούν ότι η περηλίουσα συνιστώσα της διάχυτης ακτινοβολίας έχει την ίδια κατεύθυνση με την ακτινική ενώ το μοντέλο τους βασίζεται στην υπόθεση ότι το σύνολο της διάχυτης ακτινοβολίας απεικονίζεται από δύο μόνο μέρη, το ιστροπικό (isotropic) και το περιήλιο (circumsolar).. Έτσι, η διάχυτη ακτινοβολία σε έναν κεκλιμένο συλλέκτη γράφεται ως εξής:

$$I_{d,T} = I_{T,diso} + I_{Td,cs} \quad (1.18)$$

$$\text{ή} \quad I_{d,T} = I_d \left[(1 - A_i) \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \right] + A_r \cdot R_b \quad (1.19)$$

όπου: A_i ένας ανισοτροπικός δείκτης για την συνάρτηση της ατμοσφαιρικής διαπερατότητας στην ακτινική ακτινοβολία (σχέση 1.20). Ο δείκτης αυτός για αίθριες συνθήκες παίρνει υψηλές τιμές, ενώ σε συνθήκες συννεφιάς, όπου απουσιάζει η ακτινική συνιστώσα, παίρνει την τιμή μηδέν.

$$A_i = \frac{I_b}{I_0} \quad (1.20)$$

Στην εξέλιξη του μοντέλου προστίθενται οι απόψεις των Reindl et al οι οποίοι υποστηρίζουν ότι το παραπάνω μοντέλο παρά τα ικανοποιητικά αποτελέσματα δεν λογαριάζει τη φωτεινότητα του ορίζοντα και έτσι προσθέτουν έναν όρο φωτεινότητας ορίζοντα στο μοντέλο των προηγούμενων, ο οποίος αρχικά προτάθηκε από τον Klucher. Τελικά, η διάχυτη ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο δίνεται από τη παρακάτω σχέση.

$$I_{d,T} = I_{T,diso} + I_{Td,cs} + I_{T,d,hz} \quad (1.21)$$

ή

$$I_{d,T} = I_d \left[(1 - A_i) \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \cdot \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + A_i \cdot R_b \right] \quad (1.22)$$

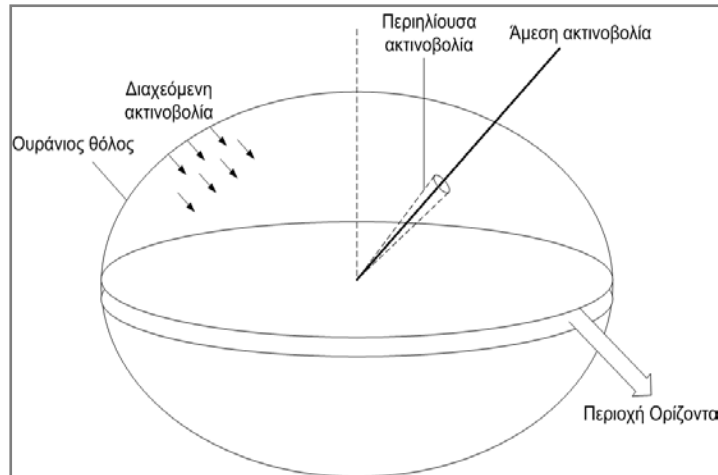
όπου: f διορθωτικός παράγοντας ο οποίος δίνεται από την σχέση 1.23.

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}} \quad (1.23)$$

Η διάχυτη ακτινοβολία δηλαδή προκύπτει από την σύνθεση τριών συνιστωσών :

- Την ισοτροπική που διαχέεται από την ατμόσφαιρα λαμβάνεται ομοιόμορφα από όλο τον ουράνιο θόλο (Isotropic Diffuse)
- Την οριζόντια που προκύπτει από τη φωτεινότητα του ορίζοντα και είναι περισσότερο εμφανής σε συνθήκες καθαρού ουρανού (Horizontal)
- Την περιηλίουσα που δημιουργείται περιμετρικά της άμεσα προσπίπτουσας και άρα έχει την ίδια διεύθυνση (Circumsolar)

Οι τρεις αυτές συνιστώσες της διάχυτης ακτινοβολίας παρουσιάζονται στην εικόνα 4.8



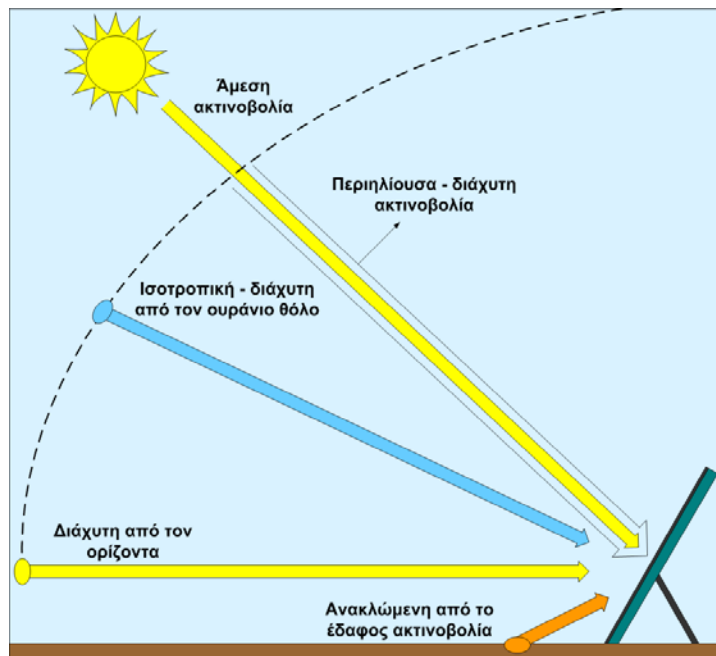
Εικόνα 4.8: Οι συνιστώσες της διάχυτης ακτινοβολίας

Άρα η προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία σε επιφάνεια τυχαίας κλίσης είναι το άθροισμα της άμεσης ακτινοβολίας, των τριών συνιστωσών της διάχυτης που περιγράφεται παραπάνω και της ανακλώμενης στο έδαφος (*albedo*) όπως περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$I_T = I_{T,b} + I_{T,d,iso} + I_{T,d,cs} + I_{T,d,hz} + I_{T,refl} \quad (1.24)$$

όπου οι δείκτες *iso*, *cs*, *hz* και *refl* αναφέρονται στην ιστροπική, περιγραμματική, οριζόντια και ανακλώμενη ακτινοβολία.

Το ανιστροπικό μοντέλο HDKR περιγράφεται από τις πέντε ακτινοβολίες όπως αυτές σχεδιάζονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.9: Ανιστροπικό μοντέλο HDKR

Κεφάλαιο 4 : Ηλιακή Ακτινοβολία

Σύμφωνα με τα παραπάνω η ολική ακτινοβολία σε κεκλιμένη επιφάνεια κατά το μοντέλο HDKR δίνεται από τη σχέση:

$$I_T = I_b \cdot R_b + I_d \cdot R_b \cdot A_i + I_d \cdot (1 - A_i) \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) \cdot \left[1 + f \cdot \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right] + I \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (1.25)$$

Σύμφωνα με την προηγούμενη σχέση οι ακτινοβολίες πλην των τριών που αφορούν την διαχεόμενη ακτινοβολία δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

1. Άμεση ακτινοβολία $I_{T,b}$ που προσπίπτει στην επιφάνεια

$$I_{T,b} = I_b \cdot R_b \quad (1.26)$$

2. Ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία $I_{T,g}$

$$I_{T,g} = I \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (1.27)$$

όπου: ρ_g ο δείκτης ανακλαστικότητας του εδάφους.

Ο ακριβής υπολογισμός της ανακλώμενης ακτινοβολίας από όλα τα αντικείμενα που βρίσκονται γύρω από την υπό εξέταση επιφάνεια είναι πολύ δύσκολος μιας και η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε αυτά μεταβάλλεται συνεχώς. Θεωρείται τελικά μόνο μια επιφάνεια στο οριζόντιο επίπεδο που ευθύνεται για αυτό το θέμα. Στην εφαρμογή του μοντέλου κατά την παρούσα εργασία ο δείκτης αυτός ρ_g θεωρήθηκε ίσος με 0,4.

4.5 Εφαρμογή του Μοντέλου HDKR

Το μοντέλο HDKR στην εφαρμογή του δέχεται κάποιες παραμέτρους. Συγκεκριμένα δέχεται το γεωγραφικό πλάτος ϕ της περιοχής, τον προσανατολισμό γ και την κλίση β της επιφάνειας που θέλουμε να εξετάσουμε ενώ για την ανακλώμενη ακτινοβολία από το έδαφος ορίζουμε και έναν κατάλληλο συντελεστή ανακλαστικότητας (εδώ θεωρήθηκε 0,4). Με αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε την εξωγήινη ακτινοβολία I_0 για την υπό εξέταση μέρα, με την συγκεκριμένη απόκλιση δ της γης και τη γωνιακή θέση του ήλιου τις αντίστοιχες ώρες. Αυτό γίνεται για όλες τις ώρες μεταξύ ανατολής και δύσης. Τελικά, σε ωριαία βάση, υπολογίζουμε τις πέντε ακτινοβολίες του μοντέλου. Για την περίπτωση που θέλουμε την συνολική τιμή αυτής σε κάποια επιφάνεια (θα την θεωρήσουμε για φωτοβολταϊκά πλαίσια στην πορεία της εργασίας) αθροίζουμε όλες τις παραπάνω ακτινοβολίες όπως ορίζει και η σχέση ενώ πολλαπλασιάζουμε και με το εμβαδόν της επιφάνειας.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η εφαρμογή του μοντέλου HDKR για τις συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτουν σε παράθυρο τοίχου σπιτιού (εικόνα 4.10) με νότιο προσανατολισμό. Το παράδειγμα αυτό αφορά την 1^η Ιουλίου και υλοποιείται σε MsExcel 2009 και Labview.

Κεφάλαιο 4 : Ηλιακή Ακτινοβολία

Η θεώρηση που γίνεται στο σημείο αυτό αφορά στην εξέταση του κέντρου του παραθύρου ως σημείο εξέτασης της σκίασης ή όχι. Η γεωμετρία του σκέπαστρου σημειώνεται πάνω στο σχήμα και μας οδηγεί στην διαπίστωση ότι σκίαση από το σκέπαστρο προκύπτει για γωνίες μικρότερες του $52,43^\circ$. Είναι κατανοητό πως η σκίαση στην περίπτωση αυτή εξαρτάται από το ύψος του ήλιου. Άρα είναι λογικό το καλοκαίρι που ο ήλιος είναι στο υψηλότερο του σημείο να παρατηρείται σχεδόν πλήρης αποκοπή της άμεσης ακτινοβολίας. Αυτό διαπιστώνεται και από την φωτογραφία η οποία έχει τραβηχτεί μήνα Ιούλιο και υπάρχει σκίαση στο θεωρούμενο κέντρο. Αντιθέτως το χειμώνα που ο ήλιος κινείται σε χαμηλό ύψος δεν υπάρχει σκίαση από το σκέπαστρο. Εξετάζοντας την θέση του δέντρου ως προς το παράθυρο διαπιστώνονται οι εξής γωνίες:

α. ο προσανατολισμός του δέντρου $-75,8^\circ < \gamma_o < -67,9^\circ$ (εικόνα 4.11)

β. το ύψος του δέντρου $a_o = 16,2^\circ$ (εικόνα 4.12)



Σχήμα 4.12: Ύψος του δέντρου

Για την 1^η Ιουλίου, ημέρα εφαρμογής του μοντέλου HDKR η σκίαση από το δέντρο δεν είναι δυνατόν να εκμηθεύει μιας και το σκέπαστρο κόβει την άμεση ακτινοβολία στο σύνολό της. Γενικότερα όμως αυτό που ισχύει σύμφωνα και με την μοντελοποίηση του εμποδίου αυτού είναι ότι εμφανίζεται σκίαση στο κέντρο του παραθύρου όταν συμβαίνουν ταυτόχρονα οι δύο παρακάτω προϋποθέσεις που αφορούν στο ύψος του ήλιου (α_s) και το ηλιακό αζιμούθιο (γ_s) αντίστοιχα :

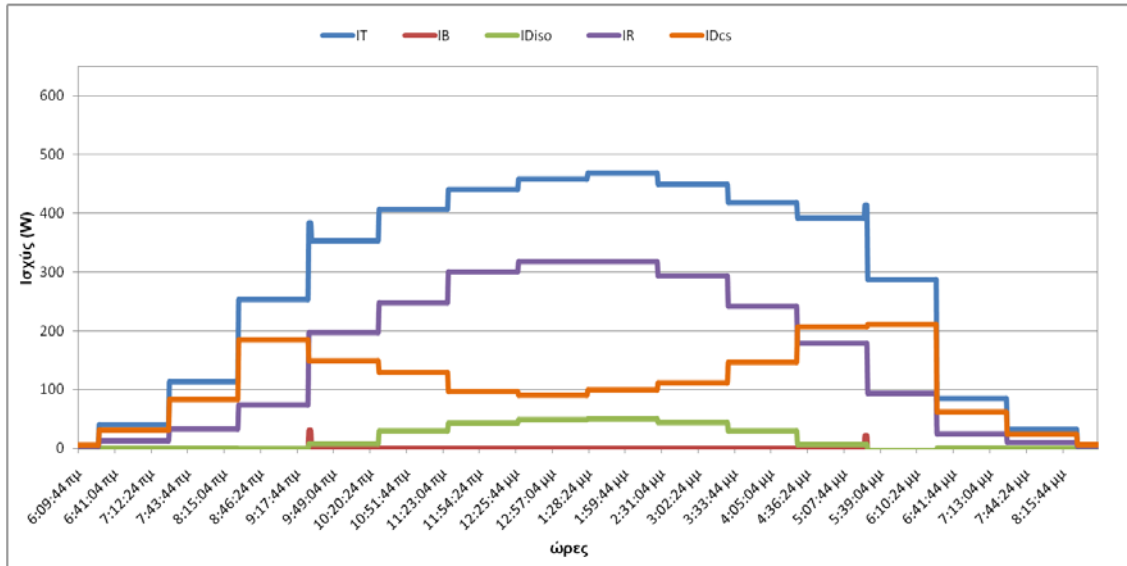
1. $-75,8 < \gamma_s < -67,9$ και
2. $90^\circ > \theta_z > 73,8^\circ$

Τα δεδομένα που εισάγονται στο λογισμικό φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και αφορούν κατά κύριο λόγο στα χαρακτηριστικά στοιχεία της επιφάνειας

Κεφάλαιο 4 : Ηλιακή Ακτινοβολία

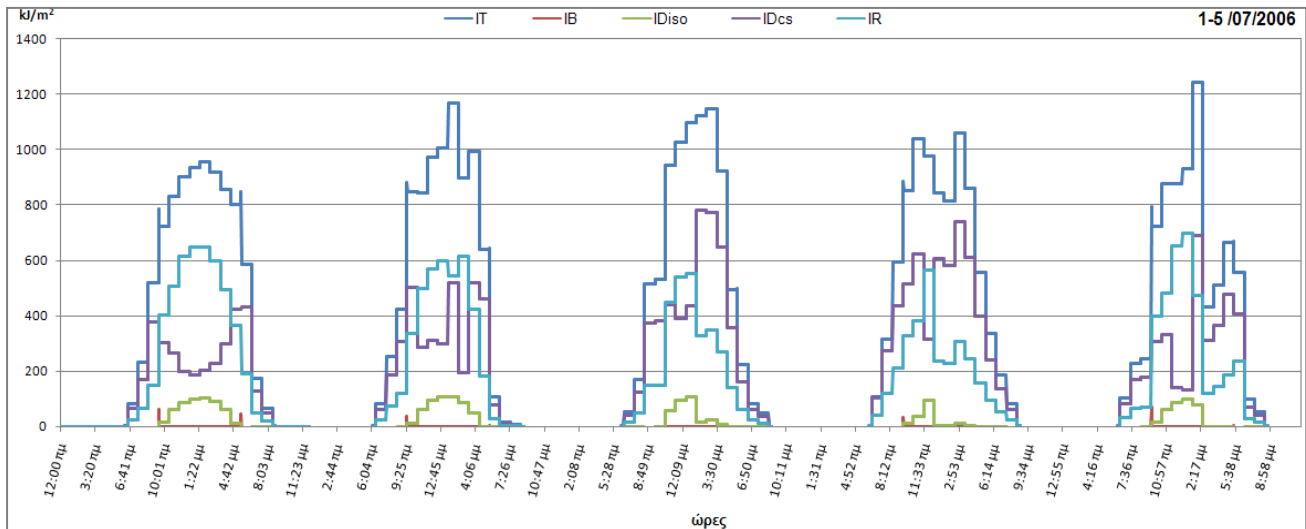
n	φ (°)	γ (°)	β (°)	ρ_g	1η Ιουλίου 2006
182	37,9797	-10	90	0,4	
N (h)	S (m ²)	δ (°)	ΑΝΑΤΟΛΗ		6:09:44 πμ
14,6	1,76	23,13	ΔΥΣΗ		8:45:30 μμ

Με βάση όλα τα παραπάνω η εφαρμογή του ανισοτροπικού μοντέλου HDKR έχει ως αποτέλεσμα το παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 4.13) για την 1^η Ιουλίου του 2006.



Εικόνα 4.13: Εφαρμογή του μοντέλου HDKR για την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε παράθυρο σπιτιού

Από το παραπάνω διάγραμμα διαπιστώνεται μια ηλιόλουστη μέρα ενώ όσον αφορά την άμεσα προσπίπτουσα ακτινοβολία, αυτή δεν εμφανίζεται καθόλου στο θεωρούμενο μέσο του παραθύρου παρά κάποια λεπτά κατά την ανατολή και δύση του ηλίου. Για το διάστημα 1-5 Ιουλίου η εφαρμογή του μοντέλου σε kJ ανά μονάδα επιφάνειας παραθύρου προκύπτει όπως στο διάγραμμα που ακολουθεί (εικόνα 4.12).



Εικόνα 4.14: Εφαρμογή του μοντέλου HDKR από 1/7/2006 έως 5/7/2006

5. Αποτίμηση Φωτοβολταϊκού Πάρκου

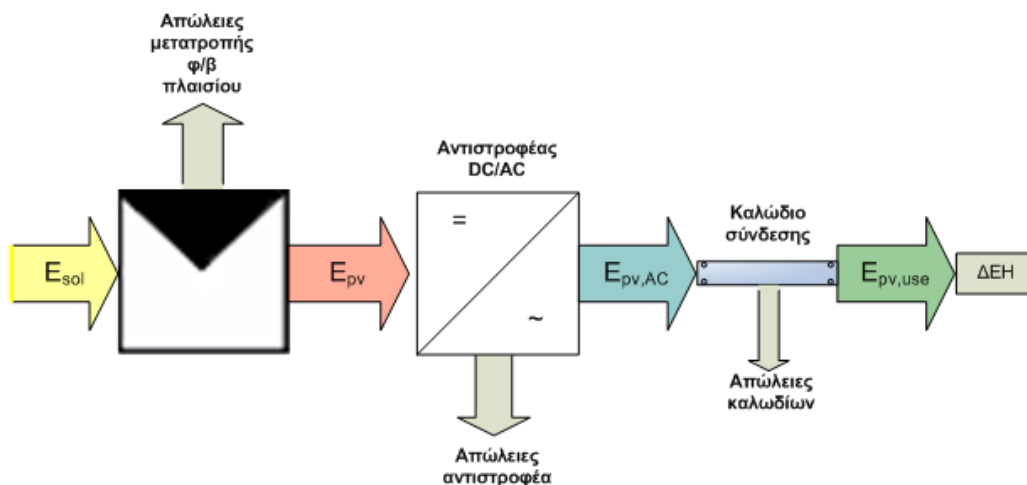
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αρχικώς το απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιείται για την αποτίμηση οποιουδήποτε φωτοβολταϊκού συστήματος. Παράλληλα με την χρήση μετρήσεων της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο εφαρμόζεται το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της σε κεκλιμένη επιφάνεια και έτσι αξιολογείται για την δυναμικότητα, την αποδοτικότητα και την ποιότητα ισχύος το εγκατεστημένο φωτοβολταϊκό πάρκο κατά την διάρκεια του έτους. [6]

5.1 Διάγραμμα Ροής Ενέργειας Φωτοβολταϊκού Πάρκου

Το διάγραμμα ροής ενέργειας του φωτοβολταϊκού πάρκου παρουσιάζεται στην εικόνα 5.1. Η εκτιμώμενη απόδοση της εγκατάστασης αφορά στον λόγο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά πλαίσια και της παραγόμενης ενέργειας ακριβώς μετά τον αντιστροφέα όπου και λαμβάνονται οι μετρήσεις (σχέση 5.1). Να σημειωθεί εδώ ότι ο βαθμός απόδοσης αυτός αφορά το σύνολο της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης δηλαδή από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια έως και το σημείο σύνδεσης του πολυοργάνου δηλαδή μετά τον αντιστροφέα. Συνυπολογίζονται λοιπόν οι βαθμοί απόδοσης των πλαισίων, του αντιστροφέα ενώ επίδραση έχουν και οι απώλειες στα καλώδια λόγω την πτώσης τάσης που παρατηρείται κατά την όδευση του ρεύματος από τα πλαίσια μέχρι τον αντιστροφέα.

$$n = \frac{E_{sol}}{E_{pv,AC}} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

όπου: E_{sol} η προσπίπτουσα ακτινοβολία στα φωτοβολταϊκά πλαίσια
 $E_{pv,AC}$ η παραγόμενη ενέργεια μετά τον αντιστροφέα



E_{sol} : Ηλιακή ενέργεια
 E_{pv} : Παραγόμενη ενέργεια από φ/β πλαίσια
 $E_{pv,AC}$: Παραγόμενη ενέργεια μετά τον αντιστροφέα DC/AC
 $E_{pv,use}$: Ηλιακή ενέργεια προς χρήση - ΔΕΗ

Εικόνα 5.1: Διάγραμμα ροής ενέργειας του διασυνδεδεμένου φ/β πάρκου

Κεφάλαιο 5 : Αποτίμηση Φωτοβολταϊκού Πάρκου

Για την εκτίμηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πάρκου συνολικά ,εκτός από τις μετρήσεις τις παραγόμενης ενέργειας μέσω του πολυοργάνου είναι απαραίτητη και η μέτρηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (kWh/m^2) πάνω στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Ο αισθητήρας ηλιοφάνειας του ISET που χρησιμοποιήθηκε αφορά ένα μονοκρυσταλλικό πυρανόμετρο. 7] Βρίσκεται εγκατεστημένος σε «έξυπνο» κτήριο στην περιοχή του Γέρακα Αττικής η οποία είναι σε σχετικά κοντινή απόσταση από το φωτοβολταϊκό πάρκο. Υπάρχει εκεί στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής του Κ^{ου} Παναγιώτη Ρωμανού και καταγράφονται συνεχώς μετρήσεις ηλιοφάνειας σε οριζόντιο επίπεδο. [8]



Εικόνα 5.2: Αισθητήρας ηλιοφάνειας ISET

Ο αισθητήρας αυτός μετράει ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο και όλες οι τιμές καταγράφονται και αποθηκεύονται μέσω λογισμικού LabVIEW και με συχνότητα δειγματοληψίας 47sec. Στην συνέχεια με βάση το μοντέλο ανάλυσης ηλιακής ακτινοβολίας HDKR, που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η ακτινοβολία αυτή προσαρμόζεται στην ακριβή τοποθεσία, κλίση και προσανατολισμό του φωτοβολταϊκού πάρκου για να υπολογιστεί τελικά η ακτινοβολία που προσπίπτει στην πραγματικότητα στο σύνολο των 16 πλαισίων. Σημαντική είναι η σημείωση ότι όπως φαίνεται και από τις αντίστοιχες εικόνες δεν παρουσιάζεται καμιά απώλεια στην παραγωγή λόγω σκιάσεων από δέντρα ή άλλα εμπόδια.

5.2 Δείκτες Αξιολόγησης του Συστήματος

Οι δείκτες που χρησιμοποιούνται για την αποτίμηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι οι παρακάτω:

1. Ηλιακό κλάσμα – *Solar Fraction* (F_{sol})

Ο δείκτης F_{sol} δίνεται από την σχέση (5.2) και μας δίνει την αναλογία σε ποσοστό της χρησιμοποιούμενης ηλιακής ενέργειας $E_{PV,USE}$ προς την συνολική ενεργειακή κατανάλωση E_{tot} . Ο δείκτης αυτός αποτελεί το σημαντικότερο κριτήριο για την σωστή διαστασιολόγηση ενός πάρκου όπου καλείται να εξυπηρετήσει ένα δεδομένο ενεργειακό προφίλ κατανάλωσης.

$$F_{sol} = \frac{E_{PV,USE}}{E_{tot}} \quad (5.2)$$

όπου:

F_{sol}	ο δείκτης ηλιακού κλάσματος (%)
$E_{PV,USE}$	η AC ενέργεια προς χρήση παραγόμενη από το φ/β πάρκο (kWh/d)
E_{tot} ή E_{Load}	η συνολική κατανάλωση ενέργειας (kWh/d)

Κεφάλαιο 5 : Αποτίμηση Φωτοβολταϊκού Πάρκου

Ο δείκτης αυτός στα διασυνδεδεμένα συστήματα μπορεί να προσεγγίσει το 100% εάν η ηλεκτρική ενέργεια που δεν χρησιμοποιείται απευθείας αλλά διοχετεύεται στο δίκτυο προσμετρείται ως χρήσιμη ενέργεια παραγόμενη από τα φωτοβολταϊκά.

2. Απόδοση σειράς - Array Yield (Y_A)

Ο δείκτης Y_A δίνεται από την σχέση (5.3) και μας δείχνει πόσες ώρες ανά μέρα θα έπρεπε να παράγει το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πάρκο στην μέγιστη ισχύ του ώστε να παραχθεί η ενέργεια που τελικά μετρήθηκε από το πολυόργανο. Η τιμή του δείκτη είναι σε ώρες ανά ημέρα (h/d) και θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Μικρή τιμή αυτής θα σημαίνει αυτόματα και κάποια αστοχία στον προσανατολισμό, την κλίση, πιθανή εμφάνιση σκίασης ή κάποιο πρόβλημα στον αντιστροφέα (χαμηλή απόδοση).

$$Y_A = \frac{E_{PV,AC}}{P_{nom}} \quad (5.3)$$

όπου:

- Y_A ο δείκτης απόδοση σειράς (h/d)
- $E_{PV,AC}$ η παραγόμενη ενέργεια μετά τον αντιστροφέα (kWh/d)
- P_{nom} η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του φ/β πάρκου (kWp)

3. Τελική απόδοση - Final Yield (Y_F)

Ο δείκτης Y_f δίνεται από την σχέση (5.4) και μας δείχνει πόσες ώρες ανά μέρα θα έπρεπε να παράγει το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πάρκο στην μέγιστη ισχύ του ώστε να παραχθεί η ενέργεια που τελικά είναι προς χρήση και είτε δίνεται στην ΔΕΗ, για τα διασυνδεδεμένα συστήματα, είτε καταναλώνεται από τα φορτία και αποθηκεύεται στις μπαταρίες, στα αυτόνομα συστήματα. Αν μιλάμε για αυτόνομα συστήματα, αυτό το μέγεθος διαφέρει αρκετά από το $E_{PV,AC}$ καθώς εισέρχονται απώλειες μπαταριών, καλωδίων καθώς και ένα μέρος της ενέργειας που κάποιες στιγμές πετιέται αν υπάρχει περίσσειμα και οι μπαταρίες είναι 100% φορτισμένες. Στην περίπτωση όπου έχουμε διασυνδεδεμένο πάρκο, υπάρχουν μόνο οι απώλειες καλωδιώσεων. Γενικά πάντως ο δείκτης αυτός είναι ένας αξιόπιστος τρόπος για να συγκρίνεις την παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάρκα διαφορετικού μεγέθους.

$$Y_F = \frac{E_{PV,USE}}{P_{nom}} \quad (5.4)$$

όπου:

- Y_F ο δείκτης τελικής απόδοσης(h/d)
- $E_{PV,USE}$ η AC ενέργεια προς χρήση παραγόμενη από το φ/β πάρκο (kWh/d)
- P_{nom} η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του φ/β πάρκου (kWp)

4. Απώλειες Συστήματος - Systems Losses (L_s)

Ο δείκτης L_s δίνεται από την σχέση (5.5) και μας δίνει τις απώλειες που παρουσιάζονται κατά την μετατροπή της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας έως το σημείο που αυτή δίνεται προς κατανάλωση (AC).

$$L_s = Y_A - Y_F \quad (5.5)$$

Οι απώλειες αυτές ταξινομούνται ως εξής:

- Απώλειες κατά την μετατροπή στον αντιστροφέα
- Απώλειες κατά την αποθήκευση και κατανάλωση στις μπαταρίες (αυτόνομα συστήματα)
- Απώλειες συμβατότητας φ/β πλαισίων και μπαταριών
- Απώλειες συμβατότητας μεταξύ των σειρών των φ/β πλαισίων
- Απώλειες καλωδίων λόγω αντίστασης (R)

Το L_s δείχνει στην ουσία πόσες ώρες την μέρα πρέπει να δουλεύει το πάρκο στην ονομαστική του ισχύ για να καλύψει τις απώλειες από την παραγωγή ως την κατανάλωση.

5. Απόδοση αναφοράς - *Reference Yield* (Y_R)

Ο δείκτης Y_R δίνεται από την σχέση (5.6) και μας δίνει την μέση ημερήσια ακτινοβολία που προσπίπτει στα φ/β πλαίσια διαιρούμενη από την ακτινοβολία αναφοράς G_{STC} . Η G_{STC} είναι η ακτινοβολία για ιδανικές συνθήκες ηλιοφάνειας και ισούται με $1000W/m^2$. Ο δείκτης δείχνει τελικά πόσες ώρες απαιτούνται με ιδανική πρόσπτωση ακτινοβολίας $1000W/m^2$ ώστε να έχουμε την ίδια συνολική ακτινοβολία με αυτή που μετρήσαμε μέσω του αισθητήρα και προσαρμόσαμε στο πάρκο μας μέσω του μοντέλου ανάλυσης HDKR.

$$Y_R = \frac{H_i}{G_{stc}} \quad (5.6)$$

όπου:

- Y_R ο δείκτης απόδοσης αναφοράς (h/d)
- H_i η συνολική ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει ανά m^2 στα φ/β πλαίσια κατά τη διάρκεια όλης της ημέρας (kWh/m^2d)
- G_{STC} η ακτινοβολία αναφοράς STC ($1kW/m^2$)

6. Απώλειες ακτινοβολίας - *Capture or irradiation Losses* (L_c)

Ο δείκτης L_c δίνεται από την σχέση (5.7) και εκφράζει το μέγεθος της εισερχόμενης προσπίπτουσας ακτινοβολίας που τελικά χρησιμοποιείται για την μετατροπή της ενέργειας.

$$L_c = Y_R - Y_A \quad (5.7)$$

Οι απώλειες αυτές ταξινομούνται ως εξής:

- Απώλειες σκίασης
- Απώλειες ανακλάσεων πάνω στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο
- Απώλειες προσανατολισμού - κλίσης
- Απώλειες ρύπανσης του φωτοβολταϊκού πλαισίου

Το L_c δείχνει στην ουσία πόσες ώρες μιας ημέρας ιδανικής ακτινοβολίας χάθηκαν από προβλήματα όπως τα προαναφερθέντα.

7. Λόγος απόδοσης -The Performance Ratio (PR)

Ο λόγος απόδοσης PR δίνεται από την σχέση (5.8) και εισάγεται για να χαρακτηρίσει την λειτουργία του συστήματος. Ουσιαστικά δείχνει πώς χρησιμοποιείται το ενεργειακό δυναμικό του φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο και καθορίζεται σύμφωνα με το STC (Standard Tests Conditions)

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (5.8)$$

Όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος απόδοσης PR τόσο καλύτερα το σύστημα χρησιμοποιεί το δυναμικό του. Αντιθέτως χαμηλή τιμή του μας φανερώνει προβλήματα κατά την μετατροπή που οφείλονται σε τεχνικά ή σχεδιαστικά προβλήματα της εγκατάστασης.

Ο δείκτης PR λοιπόν, ορίζεται ως η αναλογία της χρησιμοποιούμενης ηλιακής ενέργειας σε σχέση την ονομαστική ενέργεια. Στην ουσία μας προσδίδει την ποσόστωση των επιδράσεων που έχουν οι διάφορες απώλειες στην έξοδο του συστήματος (χρησιμοποιούμενη ενέργεια). Οι απώλειες αυτές μπορεί να αφορούν την κακή απόδοση του αντιστροφέα, την αντίσταση των καλωδίων, τις διάφορες ασυμβατότητες κατά την μετατροπή ισχύος από DC σε AC, την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών πάνω στα πλαίσια, την μειωμένη χρήση της ακτινοβολίας λόγω ανακλάσεων στην γυάλινη επιφάνεια των πλαισίων ή ακάθαρτων τμημάτων σ' αυτά και γενικά για οποιαδήποτε άλλη αστοχία των επιμέρους υλικών και συσκευών.

Η τιμή αυτή PR τυπικά αναφέρεται σε μηνιαία ή ετήσια βάση όπου εκεί μπορούν να βγουν και τα πιο χρήσιμα συμπεράσματα για το σύστημα. Η αναφορά του δείκτη αυτού σε εβδομαδιαία ή ημερήσια βάση πιθανόν να είναι χρήσιμη μόνο για την εξακρίβωση ύπαρξης προβλημάτων του εξοπλισμού.

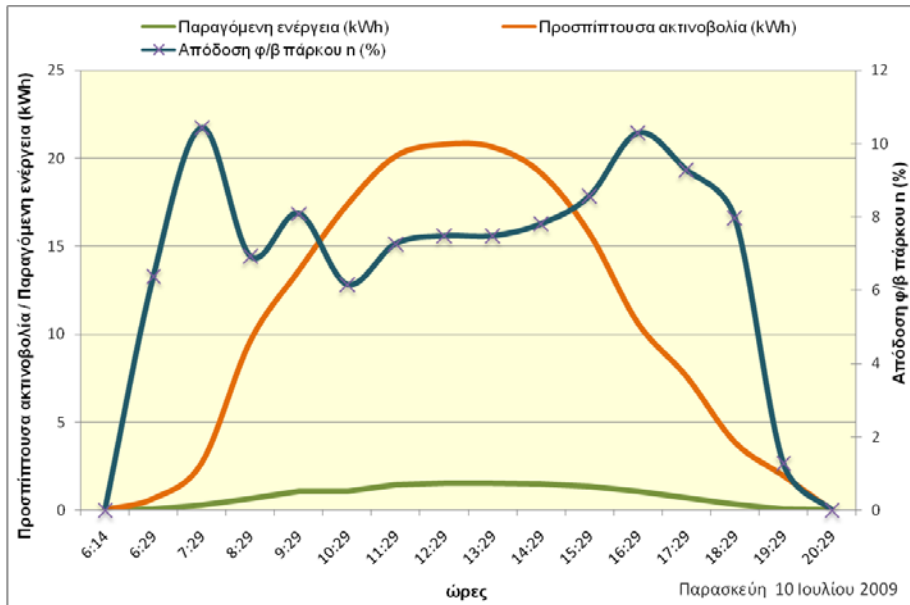
5.3 Απόδοση και Απώλειες Φωτοβολταϊκού Πάρκου

Η λειτουργία του διασυνδεδεμένου με την ΔΕΗ φωτοβολταϊκού πάρκου ξεκίνησε τον Αύγουστο του 2008 ενώ συνολικά έχουν καταγραφεί μετρήσεις για πάνω από ένα έτος. Το χρονικό διάστημα που θεωρείται αξιόπιστο για τη εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων είναι το ένα έτος και γι' αυτό οι μετρήσεις που εισάγονται παρακάτω και πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί αφορούν το διάστημα αυτό. Συγκεκριμένα η περίοδος μετρήσεων ήταν αυτή μεταξύ Νοεμβρίου 2008 και Οκτωβρίου 2009. Θεωρήθηκε απαραίτητο λόγω του όγκου των μετρήσεων και των υπολογισμών να γίνει μια ομαδοποίηση αυτών σε τμήματα των 2 μηνών. Τα δίμηνα αυτά ήταν: Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2008, Νοέμβριος – Δεκέμβριος 2008, Ιανουάριος – Φεβρουάριος 2009, Μάρτιος – Απρίλιος 2009, Μάιος – Ιούνιος 2009, Ιούλιος – Αύγουστος 2009.

Για κάθε δίμηνο από αυτά επιλέγεται μια χαρακτηριστική βδομάδα υπολογισμών της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (HDKR) αλλά και της αντίστοιχης παραγόμενης ενέργειας για το ίδιο ακριβώς διάστημα. Η διαδικασία αυτή σύμφωνα με την βδομάδα αναφοράς επαναλαμβάνεται για όλη την διάρκεια του διμήνου.

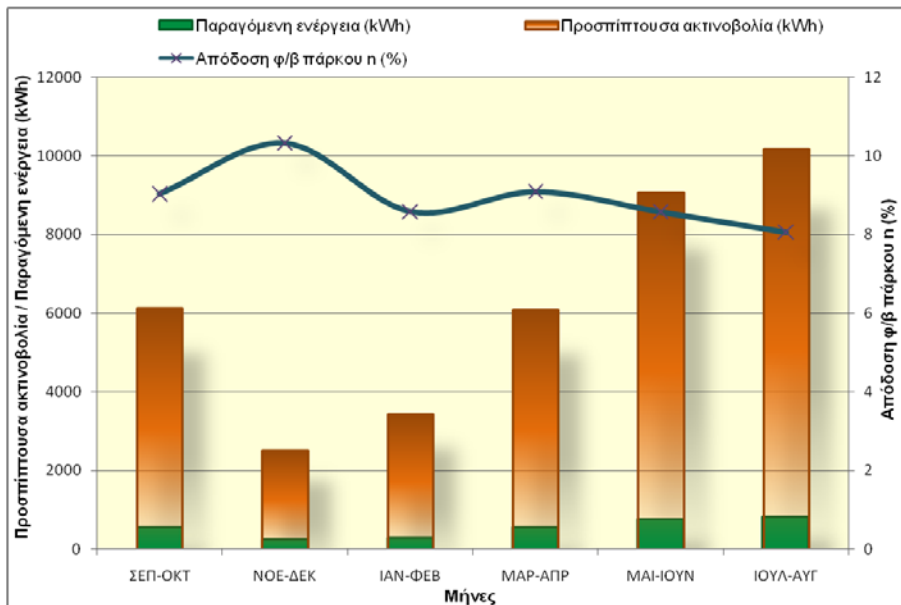
Τα ποιοτικά αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου HDKR και της αντίστοιχης μετρούμενης ενέργειας από το πολυόργανο για μια συγκεκριμένη μέρα απεικονίζονται στο διάγραμμα της εικόνας 5.3. Βλέπουμε λοιπόν για την Παρασκευή 10 Ιουλίου του 2009 τα ωριαία αποτελέσματα κατά την διάρκεια της ημέρας που αφορούν την προσπίπτουσα ακτινοβολία και την παραγόμενη ενέργεια. Στον δεύτερο άξονα παρατηρούμε και την ανάλογη διακύμανση που παρουσιάζει η απόδοση του φωτοβολταϊκού πάρκου.

Κεφάλαιο 5 : Αποτίμηση Φωτοβολταϊκού Πάρκου



Εικόνα 5.3: Ημερήσιο διάγραμμα προσπίπτουσας ακτινοβολίας, παραγόμενης ενέργειας και απόδοσης φ/β πάρκου για την Παρασκευή 10 Ιουλίου του 2009

Κατά την διάρκεια του θεωρούμενου έτους, με τις παραδοχές που προαναφέρθηκαν, καταλήγουμε στο διάγραμμα της εικόνας 5.4. Στο διάγραμμα αυτό βλέπουμε για το φωτοβολταϊκό πάρκο την διακύμανση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, της παραγόμενης ενέργειας και τελικά της τυπικής απόδοσης (σχέση 5.1) ανά δίμηνο αναφοράς μέσα στο έτος.



Εικόνα 5.4: Διάγραμμα προσπίπτουσας ακτινοβολίας, παραγόμενης ενέργειας και τυπικής απόδοσης του φ/β πάρκου για το χρονικό διάστημα από 9/2008 έως 8/2009

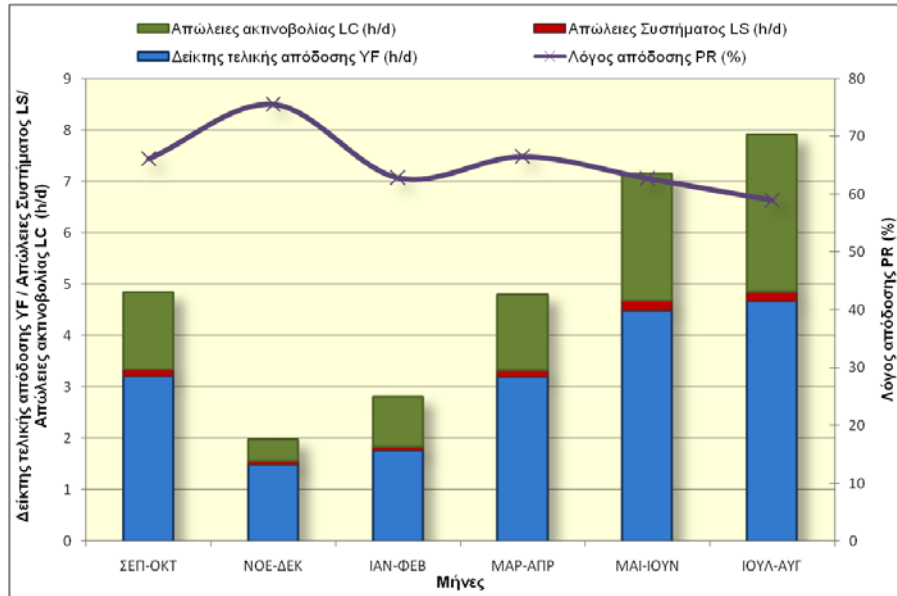
Κεφάλαιο 5 : Αποτίμηση Φωτοβολταϊκού Πάρκου

Η σύνοψη όλων των παραπάνω στοιχείων σε ετήσια βάση για την δυναμικότητα του πάρκου, την προσπίπτουσα ακτινοβολία, την παραγόμενη ενέργεια και την απόδοση του παρουσιάζονται και αριθμητικά στον πίνακα 5.1.

Φωτοβολταϊκό Πάρκο Ραφήνας					
Φ/Β πλαίσια	Διάταξη	4	x	4	16
	Ονομαστική Ισχύς	0,17		kWp	
Φ/Β πάρκο	Εμβαδόν	20,75		m ²	
	Εγκατεστημένη Ισχύς	2,72		kWp	
Ετήσια Προσπίπτουσα Ακτινοβολία (kWh)			Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια (kWh)		
37429,50			3260,14		
ΑΠΟΔΟΣΗ Φ/Β ΠΑΡΚΟΥ ΡΑΦΗΝΑΣ (%)					
8,71					

Πίνακας 5.1: Πίνακας συνοπτικών στοιχείων φωτοβολταϊκού πάρκου

Οι δείκτες που ορίστηκαν παραπάνω και μας δίνουν τον λόγο απόδοσης PR καθώς και τις διάφορες απώλειες που συνολικά υπάρχουν στην εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού συστήματος συνοψίζονται στο διάγραμμα της εικόνας 5.5. Ως προς τον υπολογισμό των δεικτών αυτών θεωρήθηκαν απώλειες καλωδίων της τάξης του 4% της παραγόμενης ενέργειας.



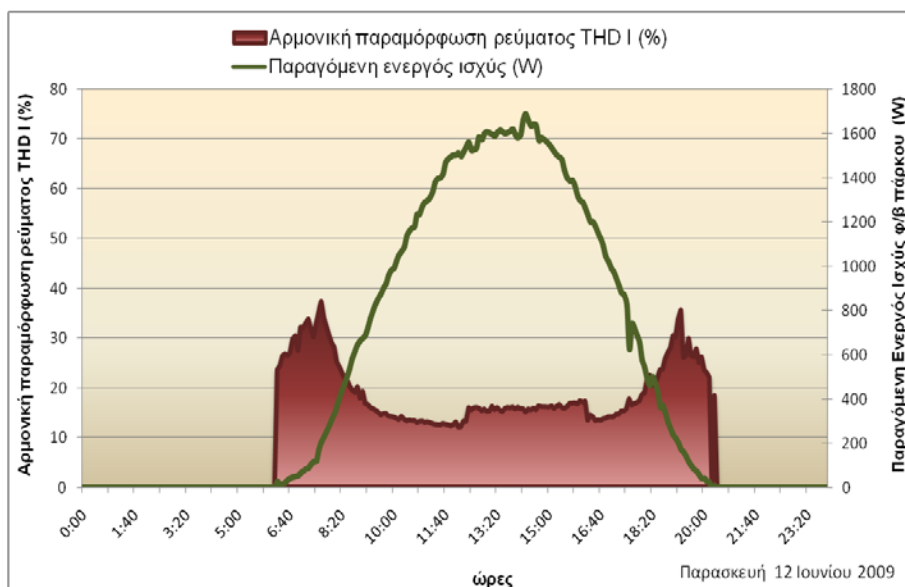
Εικόνα 5.5: Διάγραμμα εκτίμησης της αποδοτικότητας και των απωλειών του φ/β πάρκου για το χρονικό διάστημα από 9/2008 έως 8/2009

Οι απώλειες που παρατηρούνται στο σύστημα συνοψίζονται στον λόγο απόδοσης PR ο οποίος και αναδεικνύει διάφορα προβλήματα και αδυναμίες του. Οι απώλειες του συστήματος L_s αφορούν τις θεωρημένες απώλειες πάνω στους αγωγούς (4%) κατά την σύνδεση του αντιστροφέα μέχρι τον γενικό πίνακα της ΔΕΗ.

5.4 Ποιότητα Ισχύος Φωτοβολταϊκού Συστήματος

Για την εξεταζόμενη χρονική περίοδο μετρήθηκε επίσης και η ποιότητα του ρεύματος που διαχέει ο αντιστροφέας στο δίκτυο της ΔΕΗ. Συγκεκριμένα από τις μετρήσεις του πολυοργάνου αντιπροσωπευτικές για την ποιότητα είναι αυτές που αφορούν την αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος THD που εξαρτάται αποκλειστικά από τον αντιστροφέα, της παραγόμενης ενεργούς ισχύος και του συντελεστή ισχύος.

Αρμονική παραμόρφωση ή THD (total harmonic distortion) ενός σήματος ορίζεται η αναλογία του αθροίσματος της ισχύος όλων των αρμονικών συνιστωσών προς την ισχύ της θεμελιώδους συχνότητας. Στην περίπτωση μας με την χρήση του συγκεκριμένου πολυοργάνου έχουμε την δυνατότητα μέτρησης 31 αρμονικών μέσω των οποίων κάθε φορά προκύπτει το ποσοστό αρμονικής παραμόρφωσης. Η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος THD I σε συσχέτιση με την ενεργό ισχύ παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 5.6. Σε αυτό φαίνεται μια τυπική μέρα του Ιουνίου με ηλιοφάνεια.

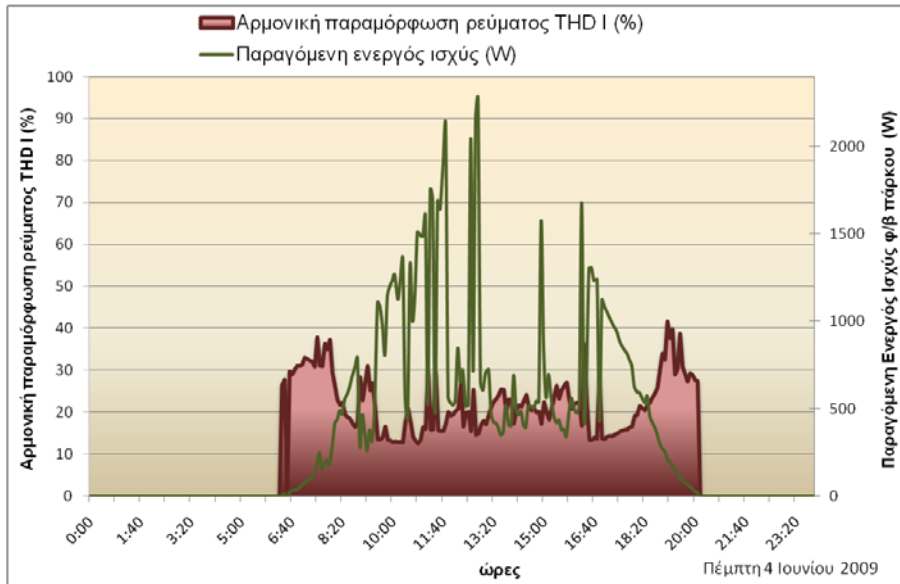


Εικόνα 5.6: Διάγραμμα απεικόνισης της αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος THD I σε σχέση με την ενεργό ισχύ φ/β πάρκου για μια ηλιόλουστη μέρα του Ιουνίου

Αντίστοιχα, για μια τυπική μέρα του Ιουνίου με συννεφιά βλέπουμε την διακύμανση της παραμόρφωσης αυτής στο διάγραμμα της εικόνας 5.7.

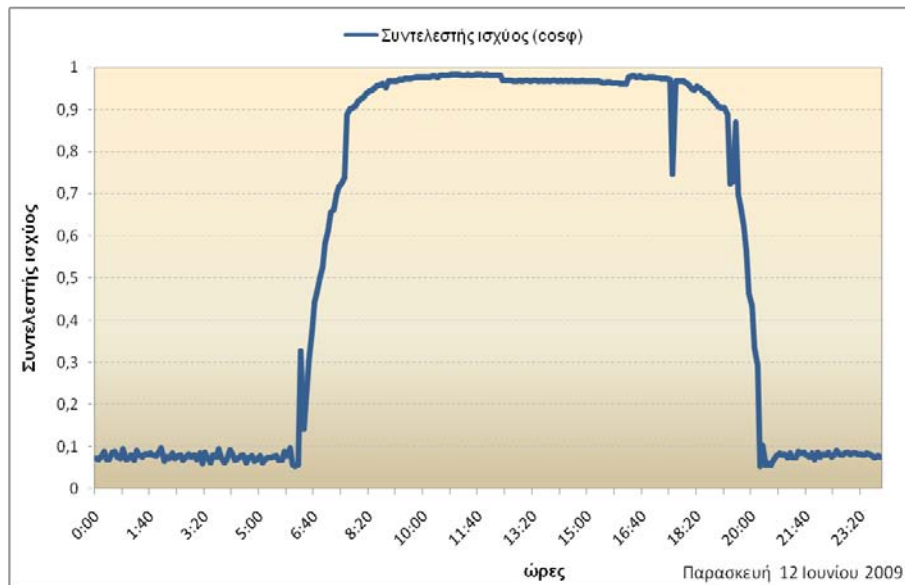
Από τα διαγράμματα της αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος για τις δύο τυπικές ημέρες του Ιουνίου αυτό που φαίνεται σαν πρώτη εικόνα είναι ότι για μικρές τιμές ηλιακής ακτινοβολίας (ανατολή και δύση του ηλίου) το THD πιάνει τις μεγαλύτερες τιμές του. Δηλαδή όταν το πάρκο λειτουργεί μακριά από τις ονομαστικές τιμές ισχύος (υπάρχει μειωμένη ηλιοφάνεια άρα μικρή παραγωγή) η αρμονική παραμόρφωση αυξάνεται σημαντικά και φτάνει σχεδόν το 40%. Το συμπέρασμα αυτό είναι ακόμη πιο έντονο αν παρατηρήσουμε προσεκτικά το διάγραμμα με την έντονη συννεφιά οπότε και παρατηρείται σημαντική αυξομείωση των μεγεθών κατά την διάρκεια της μέρας.

Κεφάλαιο 5 : Αποτίμηση Φωτοβολταϊκού Πάρκου



Εικόνα 5.7: Διάγραμμα απεικόνισης της αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος THD I σε σχέση με την ενεργό ισχύ φ/β πάρκου για μια συννεφιασμένη μέρα του Ιουνίου

Σε αυτό βλέπουμε κατά τις μεσημεριανές ώρες το THD του ρεύματος να αγγίζει το 30% ακολουθώντας αντιστρόφως ανάλογα την βύθιση της παραγόμενης ενεργούς ισχύος αλλά και της ηλιοφάνειας. Σε αντίθεση με αυτό κατά την ηλιόλουστη μέρα της εικόνας 5.6 το THD του ρεύματος ακολουθεί κατά τις μεσημεριανές ώρες μια χαμηλότερη τιμή περίπου στο 15%. Επομένως κατά την αύξηση της ισχύος έχουμε μείωση της τιμής του THD και αύξηση της τιμής του συντελεστή ισχύος $\cos\phi$ που προσεγγίζει κατά το διάστημα αυτό την μονάδα. Το αντίστοιχο διάγραμμα απεικόνισης του συντελεστή ισχύος για την ημέρα με έντονη ηλιοφάνεια παρουσιάζεται στην εικόνα 5.8.



Εικόνα 5.8: Διάγραμμα απεικόνισης του συντελεστή ισχύος ($\cos\phi$) του φ/β πάρκου για μια ηλιόλουστη μέρα του Ιουνίου

Με βάση όλα τα παραπάνω στοιχεία είμαστε πλέον σε θέση να γνωρίζουμε όλα τα απαραίτητα εκείνα μεγέθη που χαρακτηρίζουν ένα φωτοβολταϊκό πάρκο ως προς την απόδοσή του και ως προς την ποιότητα ισχύος που μπορεί να παρέχει. Τελικά οδηγούμαστε σε χρήσιμα συμπεράσματα για την σωστή διαστασιολόγηση αλλά και την όποια πιθανή βελτιστοποίηση στην συνέχεια. Το γεγονός για παράδειγμα ότι παρουσιάζονται αρκετά μεγάλες τιμές αρμονικής παραμόρφωσης του ρεύματος THD οι οποίες είναι και απαγορευτικές οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στην αρχική υπερδιαστασιολόγηση του αντιστροφέα της Wyrth. Ανατρέχοντας λοιπόν στο παράρτημα Α θα δούμε ότι η μέγιστη ισχύς εισόδου $P_{DC,max}$ για τον αντιστροφέα σε ακτινοβολία με ιδανικές συνθήκες ηλιοφάνειας ($1000W/m^2$) είναι $6,6kW$ ενώ η μέγιστη ισχύς εξόδου $P_{AC,max}$ είναι $4,6kW$. Η τιμή μέγιστης ισχύος που δύναται να παράγει ο αντιστροφέας, απέχει αρκετά από το σχεδόν $1,8kW$ που μετράμε με το πολυόργανο κατά τις μεσημεριανές ώρες βάσει της υπάρχουσας εγκατεστημένης ισχύος των $2,7kWp$. Αυτό σημαίνει ότι για να μειωθούν οι σχετικά μεγάλες τιμές του THD θα έπρεπε να εγκατασταθεί μικρότερης ονομαστικής ισχύος αντιστροφέας ή να αυξηθεί η εγκατεστημένη ισχύς με προσθήκη επιπλέον φωτοβολταϊκών πλαισίων. Τότε δεν θα αναγκάζεται ο αντιστροφέας να λειτουργεί μακριά από τα ονομαστικά μεγέθη ισχύος.

Η αρμονική παραμόρφωση της τάσης THD V αφορά στην πλευρά της ΔΕΗ οπότε δεν παρουσιάζει παρόμοιο ενδιαφέρον για το σύστημα μας. Σημαντικό στοιχείο ως προς την αποφυγή λανθασμένων συμπερασμάτων είναι να λάβουμε υπόψη μας τις παραδοχές που έγιναν. Αρχικά θεωρήθηκε τιμή απωλειών στις γραμμές της τάξης του 4% ποσοστό υψηλό αλλά μέσα στα αποδεκτά όρια. Ο αισθητήρας για την καλύτερη θεώρηση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στα φωτοβολταϊκά πλαίσια μέσω του μοντέλου ανάλυσης ακτινοβολίας HDKR θα ήταν προτιμότερο να τοποθετηθεί ακριβώς στο σημείο της εγκατάστασης γιατί τότε μόνο αποφεύγεται το σφάλμα της απόκλισης των μεγίστων της ηλιακής ακτινοβολίας με αυτά της παραγόμενης ενέργειας.

6. Διασυνδεδεμένο Σύστημα Φωτοβολταϊκών

Στο κεφάλαιο αυτό αξιοποιώντας τα στοιχεία και τις μετρήσεις ετήσιας βάσης από το φωτοβολταϊκό πάρκο της Ραφήνας γίνεται εφαρμογή των δύο πρώτων σεναρίων χρήσης της παραγόμενης από φωτοβολταϊκά πλαίσια ενέργειας. Αρχικά μελετάται η αξιοποίηση του υφιστάμενου δυναμικού σε διασύνδεση με την ΔΕΗ ενώ στην συνέχεια γίνεται η διαστασιολόγηση του συστήματος με σκοπό την επίτευξη οικίας εκπομπής μηδενικών ρύπων. [9]

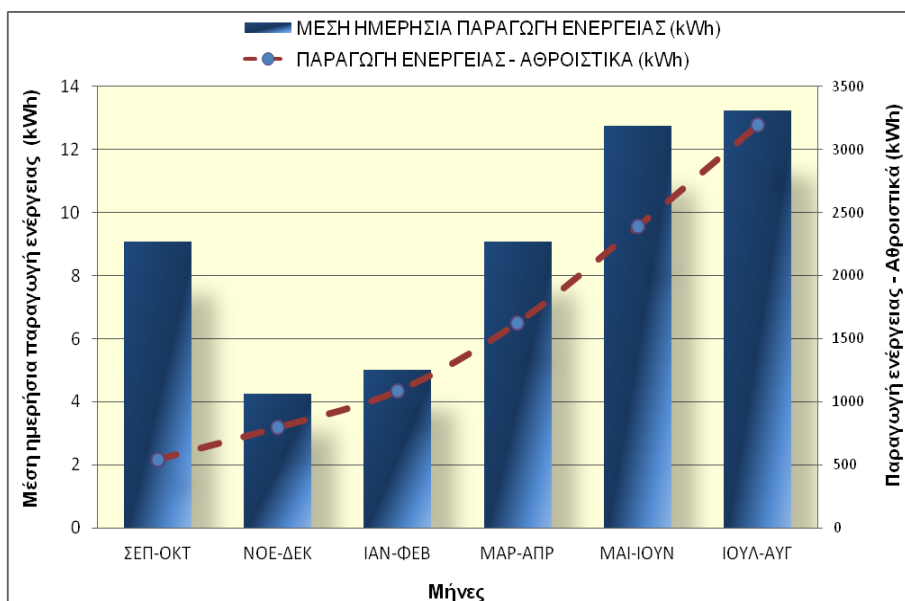
6.1 Διασυνδεδεμένο Φωτοβολταϊκό Σύστημα με την ΔΕΗ

Σύμφωνα με την κοινή υπουργική απόφαση ΦΕΚ/1079/Β/04.06.2009 παρέχεται πλέον η δυνατότητα εγκατάστασης φωτοβολταϊκών συστημάτων ισχύος μέχρι 10kW σε κτιριακές εγκαταστάσεις και κυρίως σε δώματα και στέγες κτιρίων. Το πρόγραμμα αυτό εφαρμόζεται σε όλη την επικράτεια με εξαίρεση τα μη διασυνδεδεμένα νησιά με το ηπειρωτικό σύστημα της χώρας.

Η τιμή της παραγόμενης ενέργειας από το φωτοβολταϊκό σύστημα ορίζεται σε 0,55€/kWh για τις συμβάσεις συμψηφισμού που συνάπτονται τα έτη 2009, 2010 και 2011 ενώ η τιμή αυτή μειώνεται σταδιακά κατά 5% ετησίως για τις συμβάσεις συμψηφισμού που συνάπτονται το διάστημα 1.1.2012 μέχρι και 31.12.2019. Η πίστωση από την παραγόμενη ενέργεια του φωτοβολταϊκού συστήματος εμφανίζεται στο λογαριασμό του ρεύματος. Ουσιαστικά ο λογαριασμός ρεύματος κατέχει θέση τιμολογίου αγοράς. Έτσι το ποσό της πίστωσης συμψηφίζεται με τις χρεώσεις που προκύπτουν από τη σύμβαση προμήθειας ηλεκτρικού ρεύματος με τη ΔΕΗ. Στην περίπτωση που ο συνολικός λογαριασμός ρεύματος είναι πιστωτικός, τότε το ποσό πιστώνεται στον τραπεζικό λογαριασμό του κατόχου του συστήματος στην ημερομηνία λήξης του λογαριασμού ρεύματος.

Με βάση όλα τα παραπάνω θα μπορούσαμε να δούμε πως η υπάρχουσα εγκατάσταση του πάρκου της Ραφήνας μπορεί να καταστεί ωφέλιμη με βάση το πρόγραμμα φωτοβολταϊκών σε στέγες. Η συνολική παραγόμενη ενέργεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων ονομαστικής ισχύος 2,72kWp για το διάστημα μεταξύ Σεπτεμβρίου 2008 έως Αυγούστου 2009 είναι 3194,94kWh. Σημαντική σημείωση αποτελεί το γεγονός ότι η ΔΕΗ προσμετρά σαν παραγόμενη ενέργεια από το σύστημα μας την ενέργεια που παράγεται, μείον τη μικρή απορροφούμενη ενέργεια για ίδια κατανάλωση από τον αντιστροφέα τη νύχτα και τυχόν συνοδευτικό εξοπλισμό (πχ. κάμερα, συναγερμός). Έτσι ο μετρητής του συστήματος είναι διπλής εγγραφής (μέτρηση παραγόμενης ενέργειας από το σύστημα - μέτρηση απορροφούμενης ενέργειας). Τα παραπάνω συνοψίζονται στη εικόνα 6.1 όπου προσμετράτε μια πώση 2% της ενέργειας που καθαρά προσφέρεται. Στους πίνακες 6.1 και 6.2 αναφέρονται αναλυτικά τα οικονομικά στοιχεία για την αγορά και πώληση της ενέργειας.

Κεφάλαιο 6 : Διασυνδεδεμένο Σύστημα Φωτοβολταϊκών



Εικόνα 6.1: Γραφική αναπαράσταση της μέσης ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας και της αθροιστικής τιμής αυτής κατά την διάρκεια του έτους - φ/β σύστημα 16 πλαισίων

	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)	ΤΙΜΟΛΟΓΙΟ	ΠΑΓΙΟ (€)	0-800 kWh (€)	801-1600 kWh (€)	1601-2000 kWh (€)	ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (€)
ΣΕΠ-ΔΕΚ	1620,96	Γ	15,18	70,09	89,21	19,96	194,44
ΙΑΝ-ΑΠΡ	1679,40	Γ	15,18	70,09	89,21	78,40	252,88
ΜΑΙ-ΑΥΓ	1361,05	Β	11,44	70,09	62,53		144,06
						ΣΥΝΟΛΟ	591,37

Πίνακας 3.3: Αριθμητικά η μέση ημερήσια, η αθροιστική τιμή κατανάλωση ενέργειας ανά δίμηνο και η αθροιστική τιμή αυτής κατά την διάρκεια του έτους

	ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (kWh)	ΑΓΟΡΑ ΑΠΟ ΔΕΗ (€/kWh)	ΠΙΣΤΩΣΗ (€)
ΣΕΠ-ΔΕΚ	797,54		438,65
ΙΑΝ-ΑΠΡ	831,58	0,55	457,37
ΜΑΙ-ΑΥΓ	1565,82		861,20
		ΣΥΝΟΛΟ	1757,22

Πίνακας 3.4: Αριθμητικά η μέση ημερήσια, η αθροιστική τιμή κατανάλωση ενέργειας ανά δίμηνο και η αθροιστική τιμή αυτής κατά την διάρκεια του έτους

Από τους παραπάνω πίνακες προκύπτει ένα καθαρό κέρδος 1165,84€ τον χρόνο μεταξύ αγοράς και πώλησης της ενέργειας. Το σύστημα φωτοβολταϊκών πλαισίων στο ίδιο διάστημα μας αποφέρει 1757,22€ και αν λάβουμε ως συνολική τιμή εγκατάστασης 9792€ με τα σημερινά δεδομένα (περίπου 3,6€/Wp με εγκατάσταση και διαδικασία υποβολής φακέλου – πολεοδομία, ΔΕΗ) περιμένουμε την απόσβεση της επένδυσής μας σε περίπου 5,5 χρόνια.

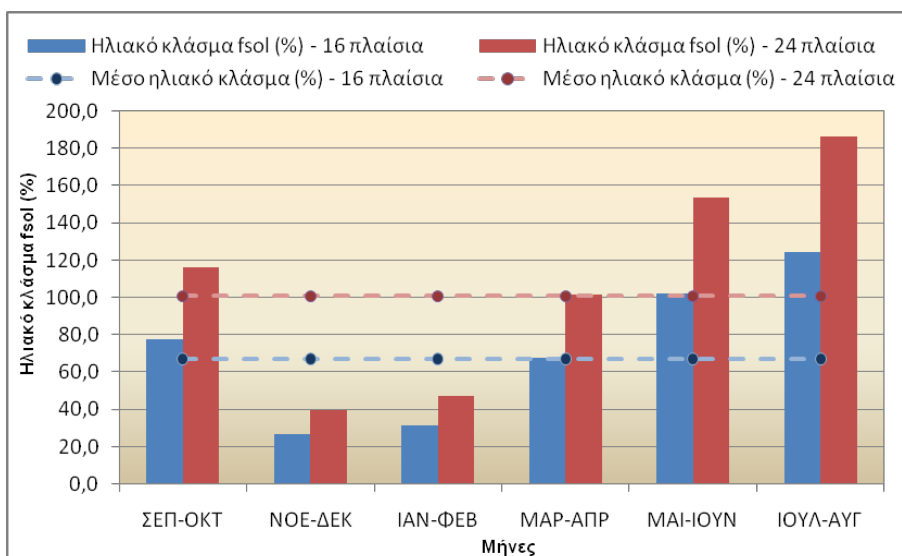
Το βασικό κριτήριο σχεδιασμού ενός διασυνδεδεμένου στο δίκτυο φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους. Προς την κατεύθυνση αυτή υπάρχει η ανάγκη μεγιστοποίησης του βαθμού απόδοσης με τον οποίο θα λειτουργεί. Στην παρούσα εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού πάρκου της Ραφήνας όπως είδαμε και στο προηγούμενο

κεφάλαιο χρησιμοποιούσε τον αντιστροφέα της *Würth Solergy* με ονομαστική ισχύ εισόδου 6,6kW. Στην πραγματικότητα όμως τα ονομαστικά στοιχεία των πλαισίων παραπέμπουν σε ένα αντιστροφέα σχεδόν με την μισή τιμή ονομαστικής ισχύος. Προς την υλοποίηση της διασύνδεσης αυτής με το δίκτυο της ΔΕΗ και με όλα εκείνα τα οφέλη που προκύπτουν από την σωστή διαστασιολόγηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος (καλύτερη απόδοση) ενδεικτικά αναφέρουμε μια εναλλακτική χρήση αντιστροφέα κατάλληλου για την περίπτωση μας. Έτσι θα επιλέγαμε τον αντιστροφέα SB 3000 της σειράς Sunny Boy από την SMA. [10] Συνοπτικά στους πίνακες του παραρτήματος Α.3 παρουσιάζονται τα στοιχεία που αφορούν στην συνολική εγκατάσταση του.

6.2 Διαστασιολόγηση Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Συστήματος για την Επίτευξη Σπιτιού Μηδενικών Ρύπων

Κάθε κιλοβατώρα που παράγεται από φωτοβολταϊκά, και όχι από συμβατικά καύσιμα, συνεπάγεται την αποφυγή έκλυσης 1,1 κιλών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (με βάση το σημερινό ενεργειακό μείγμα στην Ελλάδα και τις μέσες απώλειες του δικτύου). Σύμφωνα με το εγκατεστημένο φωτοβολταϊκό πάρκο αναφοράς που βρίσκεται στην Ραφήνα είναι δυνατόν να έχουμε την βέλτιστη χρήση της παραγωγής, επιτυγχάνοντας την εξίσωση της καταναλισκόμενης και παραγόμενης ενέργειας για το χρονικό διάστημα του ενός έτους. Με την εξίσωση αυτή ουσιαστικά καταφέρνουμε τον μηδενισμό των ρύπων που θα προέρχονταν από την καύση του λιγνίτη για την ετήσια κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του συγκεκριμένου σπιτιού.

Ο δείκτης που μας δίνει την αναλογία παραγόμενης και καταναλισκόμενης ενέργειας είναι αυτός του ηλιακού κλάσματος (f_{sol}) όπως ορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο διάγραμμα που ακολουθεί (εικόνα 6.2) απεικονίζεται η τιμή του για 16 και 24 φωτοβολταϊκά πλαίσια. Το συμπέρασμα που προκύπτει από το διάγραμμα αυτό είναι ότι με μια αύξηση του πάρκου από τα 16 πλαίσια των 170Wp στα 24 επιτυγχάνεται η προσέγγιση της μέσης τιμής του δείκτη στο 100% και η ενεργειακή αυτονομία του σπιτιού με βάση το ετήσιο ενεργειακό προφίλ κατανάλωσης και παραγωγής.

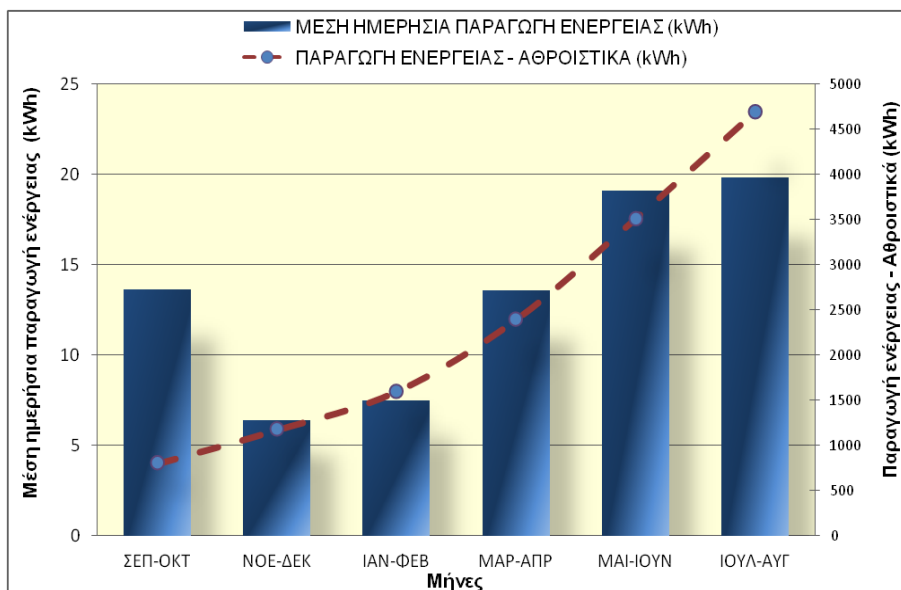


Εικόνα 6.2: Το ηλιακό κλάσμα (Solar fraction - f_{sol}) για φ/β πάρκο δυναμικότητας 16 και 24 πλαισίων

Είναι φανερό ότι χρησιμοποιώντας 24 πλαίσια το ηλιακό κλάσμα γίνεται σχεδόν 100%. Στην περίπτωση αυτή η συνολική παραγόμενη ενέργεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Κεφάλαιο 6 : Διασυνδεδεμένο Σύστημα Φωτοβολταϊκών

ονομαστικής ισχύος 4,08kWp για το διάστημα μεταξύ Σεπτεμβρίου 2008 έως Αυγούστου 2009 είναι 4694,61kWh. Τα παραπάνω συνοψίζονται στην εικόνα 6.3 όπου απεικονίζεται ανά δίμηνο η παραγόμενη ενέργεια η οποία και προσφέρεται στο δίκτυο της ΔΕΗ. Σε αυτήν προσμετρείται και μια πώση 4% της ενέργειας που αρχικά παράγεται για λόγους απωλειών καλωδίων και ιδιοκατανάλωσης του αντιστροφέα.



Εικόνα 6.3: Γραφική αναπαράσταση της μέσης ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας και της αθροιστικής τιμής κατά την διάρκεια του έτους - φ/β σύστημα 24 πλαίσίων

Η νέα εγκατεστημένη ισχύς, το εμβαδόν που καταλαμβάνει το σύστημα, οι συνολικές τιμές παραγωγής και κατανάλωσης καθώς και η τελική έγχυση της περισσευούμενης ενέργειας προς το δίκτυο βρίσκονται συγκεντρωμένες στον πίνακα 3.5.

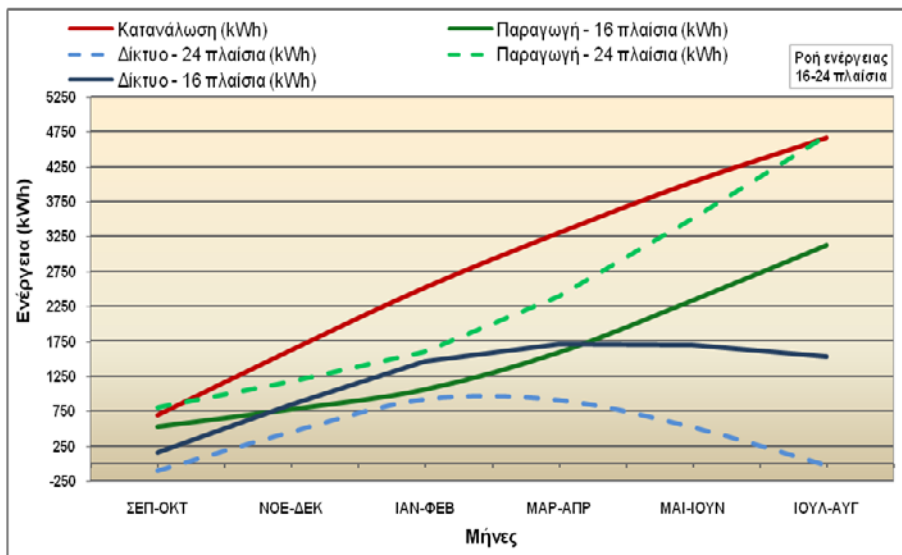
Διαστασιολογημένο φωτοβολταϊκό σύστημα					
Φ/Β πλαίσια	Διάταξη	6	x	4	24
	Ονομαστική Ισχύς	0,17		kWp	
Φ/Β πάρκο	Εμβαδόν	31,13		m ²	
	Εγκατεστημένη Ισχύς	4,08		kWp	
Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια (kWh)			Ετήσια Κατανάλωση (kWh)		
4694,61			4661,42		
Ηλιακό κλάσμα fsol (%)			Ενέργεια από/προς ΔΕΗ (kWh)		
100,71			-33,19		

Πίνακας 3.5: Πίνακας συνοπτικών στοιχείων διαστασιολογημένου φωτοβολταϊκού συστήματος για σπίτι μηδενικών ρύπων – μόνιμη κατοικία

Συνολικά η κατανάλωση του σπιτιού, η παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος με τα 16 (2,72kWp) και τα 24 (4,08kWp) πλαίσια και η συνεισφορά από ή προς το δίκτυο της ΔΕΗ φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 6.4. Συγκεκριμένα, με το θεωρημένο ετήσιο προφίλ κατανάλωσης για το σπίτι, το φωτοβολταϊκό σύστημα των 16 πλαισίων και της εγκατεστημένης ισχύος των 2,72kWp το οποίο επιτυγχάνει τιμή του ηλιακού κλάσματος (fsol)

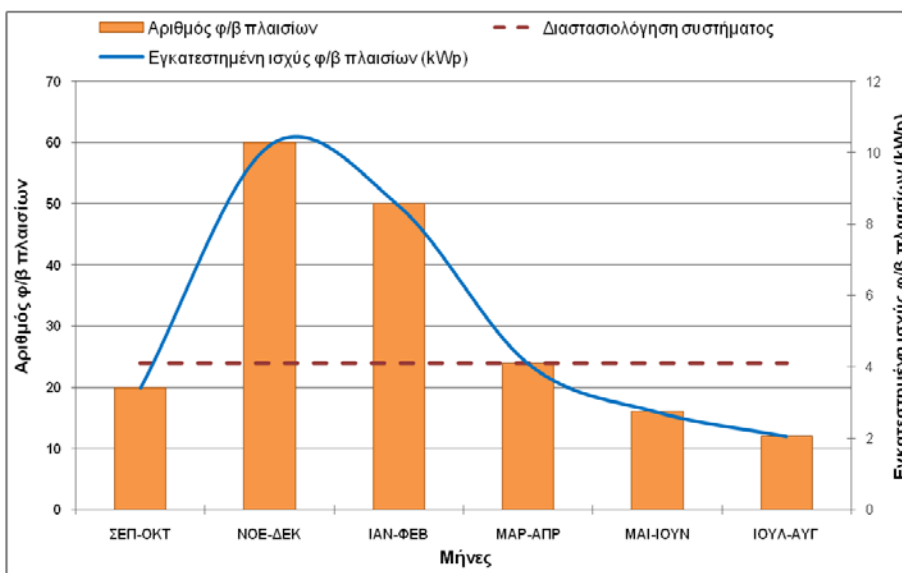
Κεφάλαιο 6 : Διασυνδεδεμένο Σύστημα Φωτοβολταϊκών

67,14% χρειάζεται την συνδρομή 1531,68kWh ενέργειας παραγόμενης από συμβατικά καύσιμα. Για το διαστασιολογημένο σύστημα των 24 πλαισίων και εγκατεστημένης ισχύος 4,08kWp προκύπτει μια περίσσεια «καθαρής» ενέργειας προς το δίκτυο 33,19kWh.



Εικόνα 6.4: Ροή ενέργειας για το σπίτι - κατανάλωση, παραγωγή και ηλεκτρικό δίκτυο - πριν και μετά την διαστασιολόγηση για το διάστημα μεταξύ 9/2008 και 8/2009

Σημαντικό είναι να παρατηρήσουμε την απαιτούμενη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων και της αντίστοιχης ισχύος ώστε να καλυφθεί έτσι το ενεργειακό προφίλ του σπιτιού και να προσεγγίσουμε το 100% σε ότι αφορά στο ηλιακό κλάσμα f_{sol} . Με αυτό το διάγραμμα (εικόνα 6.5) γίνεται κατανοητό ότι τους χειμερινούς μήνες θα θέλαμε υπερδιαστασιολογημένο σύστημα ενώ τους θερινούς υποδιαστασιολογημένο με βάση την διαφορετική προσπίπτουσα ακτινοβολία άρα και παραγόμενη ενέργεια. Για παράδειγμα για το δίμηνο Νοεμβρίου-Δεκεμβρίου θα χρειαζόμασταν 60 πλαίσια ισχύος μεγαλύτερης των 10kWp ενώ το δίμηνο Ιουλίου-Αυγούστου αντίστοιχα θα θέλαμε 12 πλαίσια των 2,04kWp.



Εικόνα 6.5: Διαστασιολόγηση φ/β συστήματος με βάση την εποχή

Κεφάλαιο 6 : Διασυνδεδεμένο Σύστημα Φωτοβολταϊκών

Αν προσπαθήσουμε να επαναλάβουμε τα ίδια βήματα για ένα ενεργειακό προφίλ κατανάλωσης που θα αφορούσε το ίδιο σπίτι ως εξοχικό (Ιούνιος – Αύγουστος 2009) θα καταλήγαμε σε πολύ μικρότερη φωτοβολταϊκή διάταξη αφού το φορτίο που τείνει να καλύψει ενεργειακά τώρα είναι μόλις 1021,54kWh και η τελική ζήτηση ενέργειας από το δίκτυο για να καλυφθεί αυτό είναι 43,5kWh. Τα στοιχεία της νέας διάταξης αναγράφονται στον πίνακα 3.6.

Διαστασιολογημένο φωτοβολταϊκό σύστημα					
Φ/Β πλαίσια	Διάταξη	1	x	5	5
		Ονομαστική Ισχύς	0,17		kWp
Φ/Β πάρκο	Εμβαδόν	6,48		m ²	
	Εγκατεστημένη Ισχύς	0,85		kWp	
Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια (kWh)			Ετήσια Κατανάλωση (kWh)		
1018,79			1021,54		
Ηλιακό κλάσμα fsol (%)			Ενέργεια από/προς ΔΕΗ (kWh)		
95,74			43,5		

Πίνακας 3.6: Πίνακας συνοπτικών στοιχείων διαστασιολογημένου φωτοβολταϊκού συστήματος για ενεργειακά αυτόνομο σπίτι το οποίο κατοικείται με πλήρες φορτίο μόνο το καλοκαίρι (Ιούνιος – Αύγουστος 2009)

Η σημασία που έχει όλη η προηγούμενη αναφορά σε ένα σπίτι μηδενικών ρύπων όπου όση ενέργεια καταναλώνει από το δημόσιο δίκτυο θα την επιστρέφει, αφορά τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα που μας παρέχουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Έτσι ενδεικτικά μπορούμε να δούμε ότι για την κάλυψη των καταναλώσεων της συγκεκριμένης οικίας στο διάστημα ενός έτους με τον συμβατικό τρόπο παραγωγής ενέργειας θα εκλυόταν προς το περιβάλλον 5127,56kg CO₂. Με την συνδρομή της «καθαρής» ενέργειας από το τα 16 πλαίσια του πάρκου της Ραφήνας οι ρύποι αυτοί μειώνονται σε 1531,68kg CO₂, εξοικονόμηση της τάξης του 70,13%. Μετά την διαστασιολόγηση των 24 πλαισίων εκτός ότι δεν παράγονται ρύποι για την τροφοδότηση του σπιτιού υπάρχει και ένα κέρδος σε ρύπους της τάξης των 36,51kg CO₂.

Πέρα από τον μηδενισμό των ρύπων CO₂ στην περίπτωση χρήσης φωτοβολταϊκών συστημάτων επιτυγχάνονται και λιγότερες εκπομπές άλλων επικίνδυνων ρύπων όπως τα αιωρούμενα μικροσωματίδια, τα οξείδια του αζώτου, οι ενώσεις του θείου, κ.λπ. Μιλάμε δηλαδή για ακόμα πιο μεγάλο κέρδος σε έκλυση επικίνδυνων ρύπων (συνολικά 1,5 τόνο ετησίως). Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων που είναι υπεύθυνες και πυροδοτούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, αλλάζουν το κλίμα της Γης. Η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία και το περιβάλλον γεγονός που καθιστά αναγκαία την στροφή σε παραγωγή πράσινης ενέργειας μέσω Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

7. Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

Μετά την μελέτη εφαρμογής για την εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας από φωτοβολταϊκά σε διασυνδεδεμένο σύστημα θα επιχειρηθεί κάτι ανάλογο σε αυτόνομο αυτή την φορά σύστημα με φωτοβολταϊκά, μπαταρίες και γεννήτρια το οποίο διαφοροποιείται πλέον αρκετά. Το σημαντικότερο πρόβλημα για την διαστασιολόγηση ενός τέτοιου υβριδικού συστήματος, το οποίο θα λειτουργεί χωρίς την παραμικρή συνδρομή από το δημόσιο δίκτυο, είναι η πρόβλεψη για επάρκεια, σωστή διαχείριση των συσσωρευτών και η αποφυγή μιας υπερδιαστασιολόγησης που θα εκτινάξει το κόστος κατασκευής στα ύψη. Στο κεφάλαιο αυτό αφού αναπτυχθεί το κατάλληλο θεωρητικό υπόβαθρο επιχειρείται μια αρχική διαστασιολόγηση.

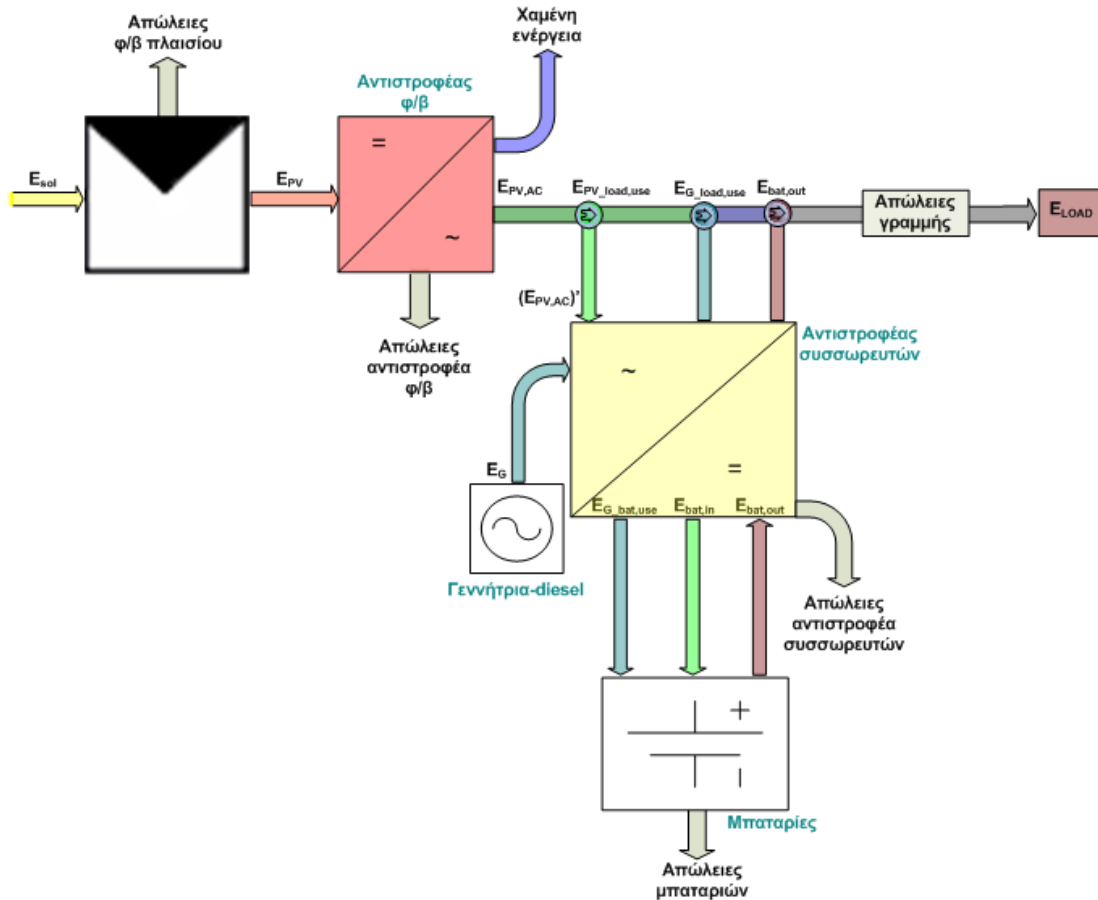
7.1 Σχεδιασμός Αυτόνομων Υβριδικών Συστημάτων

Η διαδικασία σχεδιασμού των φωτοβολταϊκών συστημάτων διαφοροποιείται σημαντικά όταν αφορά αυτόνομο σύστημα. Το βασικό κριτήριο σχεδιασμού ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η εξασφάλιση της τροφοδότησης του συγκεκριμένου φορτίου. Σημαντικό κριτήριο αποτελεί επίσης το συνολικό κόστος της εγκατάστασης καθώς και η εξασφάλιση για όσο το δυνατόν λιγότερη αναξιοποίητη παραγόμενη ενέργεια. Για τον λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητο η χρήση και μιας γεννήτριας diesel όπου θα λειτουργεί κυρίως τους μήνες με χαμηλή ηλιοφάνεια και θα αποτελεί μια σημαντική εφεδρεία για το σύστημα μας. Στο διάγραμμα της εικόνας 7.1 παριστάνεται το διάγραμμα ροής ενέργειας του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (που εξέρχεται από τον αντιστροφέα DC/AC) εισέρχεται στον μετατροπέα αυτόνομων δικτύων DC/AC (battery inverter) ο οποίος αναλαμβάνει την τροφοδοσία του δικτύου με εναλλασσόμενο ρεύμα. Ο μετατροπέας αυτός μαζί με την μονάδα συσσωρευτών αποτελεί τον διαχειριστή του συστήματος μας αφού δημιουργεί το δίκτυο πάνω στο οποίο μπορούν να ενσωματωθούν τόσο οι καταναλώσεις όσο και οι συσκευές παραγωγής ενέργειας. Η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τροφοδοτεί κατευθείαν τα φορτία που υπάρχουν στο διάστημα αυτό ($E_{PV_Load,use}$) ενώ η περισσευούμενη ενέργεια χρησιμοποιείται για να φορτίσει τις μπαταρίες ($E_{bat,in}$). Η χρήση γεννήτριας diesel μας παρέχει μια σημαντική εφεδρεία στην διαθέσιμη ενέργεια και με την σύνδεσή της στον μετατροπέα μπορεί να τροφοδοτήσει άμεσα τις καταναλώσεις ($E_{G_Load,in}$) και παράλληλα να φορτίσει τις μπαταρίες ($E_{G_bat,use}$). Για το φορτίο εκτός παραγωγής οι μπαταρίες καλούνται να παρέχουν την απαιτούμενη ενέργεια ($E_{bat,out}$).

Η γεννήτρια diesel κρίνεται απαραίτητη για τον σωστό σχεδιασμό ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Η παράλληλη λειτουργία της χρησιμεύει για να αποφύγουμε την όποια υπερδιαστασιολόγηση και ταυτόχρονα να μειώσουμε την απαιτούμενη χωρητικότητα των συσσωρευτών. Αν δηλαδή προσπαθήσουμε να καλύψουμε με ενέργεια από φωτοβολταϊκά πλαίσια τα φορτία για μια μέρα με χαμηλή ηλιοφάνεια χωρίς την συμβολή γεννήτριας τότε είναι βέβαιο ότι τους μήνες με έντονη ηλιοφάνεια το σύστημα θα αναγκαστεί να «πετάξει» σημαντικές ποσότητες ενέργειας. Αυτό είναι απαγορευτικό από κάθε άποψη αφού καθιστά το σύστημα πολύ ακριβό και καθόλου αποδοτικό στην διάρκεια του έτους. Η γεννήτρια συνδέεται πάνω στον μετατροπέα και αυτός αποφασίζει τον τρόπο λειτουργία της. Η χρήση της γεννήτριας μπορεί να είναι ανάλογη με το φορτίο, την στάθμη φόρτισης των μπαταριών (SOC) και χρονικά προγραμματιζόμενη. Βεβαίως για έκτακτες περιπτώσεις μπορεί να ξεκινήσει και χειροκίνητα.

Κεφάλαιο 7 : Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος



- E_{sol} : Ηλιακή ενέργεια
- E_{PV} : Παραγόμενη ενέργεια από φ/β πλαίσια
- $E_{PV,AC}$: Παραγόμενη ενέργεια μετά τον αντιστροφή DC/AC
- $E_{PV,load,use}$: Παραγόμενη ενέργεια που καταναλώνεται κατευθείαν από τα φορτία
- $(E_{PV,AC})'$: Παραγόμενη ενέργεια μετά τον αντιστροφή DC/AC που περισσεύει αν αφαιρεθεί η $E_{PV,load,use}$
- $E_{bat,in}$: Ενέργεια παραγόμενη από τα φ/β που αποθηκεύεται στις μπαταρίες
- $E_{bat,out}$: Ενέργεια που καλούνται να δώσουν οι μπαταρίες στο φορτίο
- E_G : Παραγόμενη ενέργεια από γεννήτρια
- $E_{G,load,use}$: Παραγόμενη ενέργεια από γεννήτρια που καταναλώνεται απευθείας από τα φορτία
- $E_{G,bat,use}$: Παραγόμενη ενέργεια από γεννήτρια που αποθηκεύεται στις μπαταρίες
- E_{Load} : Συνολικό φορτίο

Εικόνα 7.1: Διάγραμμα ροής ενέργειας αυτόνομου φ/β συστήματος

Η επάρκεια των μπαταριών ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος είναι πρωταρχικής σημασίας. Το μέγεθος που μας ενδιαφέρει στην περίπτωση αυτή είναι το βάθος εκφόρτισης ή η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών. Οι δύο έννοιες αυτές είναι αντίθετης σημασίας αλλά ουσιαστικά μας δίνουν την ίδια πληροφορία για την κατάσταση των μπαταριών. Αναλυτικά ορίζονται ως εξής:

- *Βάθος εκφόρτισης DOD (depth of discharge):* είναι το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει αφαιρεθεί από μία πλήρως φορτισμένη μπαταρία
- *Επίπεδο φόρτισης SOC (state of charge):* είναι το ποσοστό της χωρητικότητας που έχει απομείνει

Έτσι δοσμένου του DOD, το SOC θα δίνεται από τον τύπο

$$SOC = 100 - DOD \quad (7.1)$$

Μια αποφόρτιση μέχρι το DOD και μια πλήρης φόρτιση ονομάζεται κύκλος ζωής των μπαταριών. Οι κύκλοι ζωής μιας μπαταρίας είναι ένα μέτρο που δείχνει την αντοχή της η οποία βέβαια εξαρτάται από το όριο DOD. Όσο πιο υψηλό είναι το όριο εκφόρτισης των συσσωρευτών τόσο μεγαλύτερη θα είναι η διάρκεια ζωής τους. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πόσο σημαντική είναι η όσο το δυνατόν πιο σωστή πρόβλεψη του επιπέδου αυτού κατά την λειτουργία του υβριδικού συστήματος.

Η σωστή διαστασιολόγηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος το οποίο περιλαμβάνει την ηλιακή γεννήτρια και τις μπαταρίες αποθήκευσης παίζει τον πρώτο ρόλο για την αξιοπιστία του στην εξυπηρέτηση κάποιου δεδομένου ενεργειακού προφίλ κατανάλωσης. Αυτή η διαδικασία πρέπει να γίνει σύμφωνα με τα παρακάτω βήματα :

1. Προσδιορισμός της ζήτησης ενέργειας που υπάρχει. Στο βήμα αυτό εμπεριέχονται οι ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών και αφού βεβαίως αρχικά έχουν εξαντληθεί όλοι οι δυνατοί τρόποι εξοικονόμησης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της μείωσης όλων των περιπτώσεων καταναλώσεων και μέσω της ενεργειακής διαχείρισης που προσφέρουν κάποια συστήματα (π.χ. EIB, BMS)
2. Καθορισμός του σεναρίου βάσει του οποίου αποφασίζεται το επίπεδο της τάσης και ο τύπος του φωτοβολταϊκού συστήματος (DC, AC, συνδυασμός των δύο, διασυνδεδεμένο, αυτόνομο, με ή χωρίς εφεδρική γεννήτρια)
3. Επιλογή και διαστασιολόγηση των διαφόρων τμημάτων του συστήματος. Οι αντιστροφείς που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι σύμφωνα με την παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας καθώς επίσης και βάση πάντα του τύπου του συστήματος που χρησιμοποιείται. Οι αποδόσεις των τμημάτων αυτών παίζουν καθοριστικό ρόλο στην αποδοτικότητα όλου του συστήματος και την ενεργειακή ισορροπία που πρέπει να εξασφαλίζεται
4. Διαστασιολόγηση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και των μπαταριών
5. Διαστασιολόγηση καλωδίων. Η πτώση τάσης που παρατηρείται στα καλώδια δεν πρέπει να αμελείται και ειδικά όταν αφορά μεγάλα συστήματα με μικρά επίπεδα τάσης

Συνήθως είναι σημαντικό να επαναληφθούν τα βήματα 1 έως 4 αρκετές φορές. Για παράδειγμα το αποτέλεσμα που προκύπτει από το βήμα 4 μπορεί να απαιτήσει μια περαιτέρω μείωση στη κατανάλωση ή ακόμα και στην αλλαγή του σεναρίου λειτουργίας (π.χ. διείσδυση ενέργειας από γεννήτρια) για διάφορους λόγους. Κάποιοι τέτοιοι λόγοι που μπορούν να μας αναγκάσουν να αναθεωρήσουμε το σύστημα είναι η μη αποδοτική τοποθεσία για φωτοβολταϊκά, το κόστος του κ.α. Γενικά πάντως για την σωστή και αποδοτική διαστασιολόγηση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν πολλές παράμετροι. Οι παράμετροι αυτοί διαφέρουν ανάλογα με την αξιοπιστία του, το κόστος, τις ενεργειακές ανάγκες και τις ηλεκτρικές ρυθμίσεις. Για συστήματα που χρειάζεται να λειτουργούν πλήρως αυτονομημένα η αξιοπιστία του συστήματος και της παροχής είναι σημαντική αν και αυτό το κεφάλαιο είναι δευτερεύουσας σημασίας για οικιακή παροχή μιας και υπάρχει σε ετοιμότητα εφεδρική γεννήτρια.

Η συμπεριφορά του συστήματος χαρακτηρίζεται και αξιολογείται με την βοήθεια ενός υπολογιστικού λογισμικού, όπως και επιχειρείται στην συνέχεια της εργασίας αυτής. Είναι

σημαντικό να γνωρίζουμε επ' ακριβώς την συμπεριφορά του συστήματος με σεβασμό στην αξιοπιστία της παροχής και την αποδοτική χρήση της ενέργειας που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια.

Για τα αυτόνομα συστήματα το κρίσιμο σημείο της διαστασιολόγησης είναι το γεγονός ότι πρέπει να προσμετρηθεί η απαραίτητη αποθήκευση και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω συστοιχιών συσσωρευτών. Έτσι, στον σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος οι συσσωρευτές θα πρέπει να επιλεγούν με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι πάντα τουλάχιστον 30-40% φορτισμένοι ή και παραπάνω. Οι βαθιές και ανεξέλεγκτες εκφορτίσεις των μπαταριών μπορούν να μειώσουν κατά πολύ την διάρκεια ζωής τους. Γενικά όσο μικρότερο είναι το βάθος εκφόρτισης των συσσωρευτών τόσο μεγαλύτερη θα είναι η διάρκεια ζωής τους. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι είναι καλύτερο να προμηθευτεί κανείς συσσωρευτές των οποίων η χωρητικότητα είναι αρκετά μεγάλη ώστε να διαρκέσουν περισσότερα χρόνια και να μην υποχρεωθεί στην αντικατάστασή τους μετά από 2-3 χρόνια.

7.2 Απώλειες Ενέργειας του Υβριδικού Συστήματος

Ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα με φωτοβολταϊκά και γεννήτρια diesel σχεδιάζεται με σκοπό να είναι ολοκληρωτικά επαρκές σε παραγωγή, αποθήκευση και παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στα φορτία για τα οποία έχουν προβλεφθεί. Οι ανάγκες όμως αυτές με την πάροδο του χρόνου μπορεί να αποκλίνουν από την αρχική τους εκτίμηση και να μεταβληθούν. Το κρίσιμο σημείο τότε είναι η δημιουργία μιας δυναμικής του συστήματός μας όπου θα ισορροπεί ανάμεσα στην τροφοδότηση και παροχή ενέργειας. Πρέπει δηλαδή να υπάρξει μια ισορροπία μεταξύ παραγόμενης και απορροφούμενης ενέργειας ενώ η πρόβλεψη μεγαλύτερης παραγωγής από την άμεση ανάγκη μας, σε αυτόνομα υβριδικά συστήματα, έγκειται στην απαραίτητη πρόβλεψη για ενεργειακά αποθέματα καθώς και προβλεπόμενη διαχείριση των μπαταριών. Αυτό το ενεργειακό ισοζύγιο δείχνει η σχέση (7.2) ενώ η σχέση (7.3) είναι αναλυτικότερη και διευκρινίζει τα μεγέθη αυτά. Στην μεριά της ενέργειας εισόδου θεωρούμε αυτήν από τα φωτοβολταϊκά και την γεννήτρια ενώ στην μεριά της ενέργειας εξόδου τα φορτία και τις απώλειες, όλα σε kWh.

$$E_{in} \approx E_{out} \quad (7.2)$$

$$E_{PV,AC} + E_G = E_{LOAD} + E_{LOSS} \quad (7.3)$$

Ο σκοπός για την επίτευξη ενός αποδοτικού και αξιόπιστου ενεργειακού ισοζυγίου είναι η όσο το δυνατόν μικρότερη διείσδυση ενέργειας από βοηθητικές πηγές. Επιπλέον, η γεννήτρια diesel θα πρέπει να λειτουργεί κοντά στα ονομαστικά της μεγέθη ως προς την επίτευξη υψηλής απόδοσης καυσίμου. Οι απώλειες που παρουσιάζει το υβριδικό σύστημα πρέπει να καλυφθούν από την παραγωγή μας γι' αυτό και κρίνεται απαραίτητο να διευκρινιστεί ο λόγος ύπαρξής τους. Όπως προαναφέρθηκε οι σχέσεις που αναφέρονται στις απώλειες του συστήματος και της ακτινοβολίας μας δίνουν μια ένδειξη για την προέλευση τους και μας κατευθύνουν για την όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερη εξάλειψή τους.

Οι θεωρούμενες απώλειες που παρατηρούνται σε οποιοδήποτε αυτόνομο σύστημα και υπάρχει η ανάγκη να προσδιοριστούν όσο το δυνατόν καλύτερα είναι :

- Οι απώλειες γραμμής, οι οποίες εμφανίζονται πάνω στις γραμμές που τροφοδοτούν τα φορτία και εκφράζονται σαν πτώση τάσης.
- Οι απώλειες μετατροπής κατά την εκφόρτιση των μπαταριών. Αυτές οι απώλειες εμφανίζονται κατά την μετατροπή της αποθηκευμένης ενέργειας των μπαταριών σε ενέργεια προς χρήση από τα φορτία.

- Οι απώλειες μετατροπής κατά την φόρτιση των μπαταριών. Αυτές οι απώλειες εμφανίζονται κατά την μετατροπή της ενέργειας που προορίζεται για την φόρτιση των μπαταριών σε αποθηκευμένη ενέργεια.

7.3 Αρχική Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

Η διαστασιολόγηση του αυτόνομου συστήματος βασίζεται σε μια ηλιόλουστη μέρα του Νοεμβρίου και συγκεκριμένα επιλέγεται η 26^η Νοεμβρίου του 2008. Η ημέρα αυτή αποτελεί την 330^η μέρα του έτους με ώρα ανατολής 07:22:16 και δύση την 17:00:44. Τότε παρατηρείται βάσει των μετρήσεων μας μια μέγιστη για τα δεδομένα της εποχής παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά όπου η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας γενικά είναι αρκετά μειωμένη σε σχέση με τους καλοκαιρινούς μήνες. Στην συνέχεια πράττουμε το ίδιο αλλά με μια μέρα πλήρους συννεφιάς να έπεται παρατηρώντας πάλι τα δεδομένα για το νέο σενάριο. Θεωρείται δηλαδή ότι η μέση μέρα για τα δίμηνα Νοεμβρίου-Δεκεμβρίου και Ιανουαρίου-Φεβρουαρίου προκύπτει από τη μέση παραγόμενη ενέργεια μίας μέρας υψηλής ηλιοφάνειας για την εποχή και μίας πλήρως συννεφιασμένης ενώ στην συνέχεια εξετάζεται και το ενδεχόμενο μιας δεύτερης μέρας πλήρους συννεφιάς (δείγμα αναφοράς). Για τα υπόλοιπα δίμηνα θεωρείται ως μέση μέρα αυτή με την μέση παραγόμενη ενέργεια από φωτοβολταϊκά. Τα δεδομένα αφορούν τις μετρήσεις από το εγκατεστημένο πάρκο της Ραφήνας σε ότι αφορά στην παραγωγή ενέργειας ενώ με παρόμοιο τρόπο από τις μετρήσεις που λάβαμε από το «έξυπνο» κτήριο του Γέρακα και την χρήση του ανισοτροπικού μοντέλου HDKR έχουμε τις αντίστοιχες μετρήσεις ηλιοφάνειας.

Το ενεργειακό προφίλ που θα πρέπει να καλυφθεί στην περίπτωση του αυτόνομου συστήματος που θα μελετήσουμε έχει καθορισθεί στο κεφάλαιο 2 (σχήμα 2.4). Σε όλες τις περιπτώσεις πάντως πρέπει να οριστούν κατάλληλα όλα τα παρακάτω στοιχεία:

1. Διαστάσεις και εγκατεστημένη ισχύς φωτοβολταϊκής γεννήτριας
2. Ονομαστική ισχύς της γεννήτριας diesel
3. Ώρες λειτουργίας γεννήτριας diesel για ημέρα με ήλιο (βοηθητική γεννήτρια) και για ημέρα με πλήρη συννεφιά (κύρια γεννήτρια)
4. Τελική επί τοις εκατό συμβολή της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και της γεννήτριας diesel
5. Αρχική διαστασιολόγηση μπαταριών και συμπεριφορά τους για δύο ηλιόλουστες μέρες με περιορισμό εκφόρτισης των το 40%.
6. Τελική διαστασιολόγηση μπαταριών και συμπεριφορά τους για την περίπτωση διαδοχής ηλιόλουστης και πλήρως συννεφιασμένης μέρας με περιορισμό εκφόρτισης πάλι το 40%.
7. Ετήσια πρόβλεψη συμπεριφοράς του συστήματός μας με προσοχή στην χαμένη ενέργεια κατά τους καλοκαιρινούς μήνες καθώς και στο ποσοστό διείσδυσης μεταξύ φωτοβολταϊκής γεννήτριας και γεννήτριας diesel
8. Ποιοτική ανάλυση του φωτοβολταϊκού συστήματος με εξαγωγή των αντίστοιχων δεικτών απόδοσης και απωλειών για την θεωρούμενη μέρα και το έτος όπως ακριβώς έγινε και στο διασυνδεδεμένο σύστημα

Στην μελέτη που ακολουθεί θεωρούνται προσεγγιστικά κάποιες απώλειες με τις οποίες πραγματοποιείται μια αρχική διαστασιολόγηση του συστήματος. Με την θεώρηση αυτή επιτυγχάνεται η κατανόηση της λογικής ενός τέτοιου εγχειρήματος ενώ παράλληλα προκύπτουν και οι όποιες αδυναμίες του. Στην συνέχεια και αφού διαπιστωθούν οι αστοχίες της αρχικής διαστασιολόγησης γίνεται εκ νέου μια σχεδίαση στρατηγικής ενεργειακής διαχείρισης ώστε να επιτυγχάνει σε μεγάλο βαθμό τις αρχικές μας προδιαγραφές. Ως προς την καλύτερη προσέγγιση

Κεφάλαιο 7 : Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

των απωλειών του συστήματος πραγματοποιήθηκε ανάλογο πείραμα προσομοίωσης προφίλ φορτίων στο μικροδίκτυο του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Πολυτεχνείου. Το εργαστήριο αυτό παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 8 ενώ τα αποτελέσματα του πειράματος, στοιχεία του οποίου θα χρησιμοποιήσουμε στην τελική διαστασιολόγηση του συστήματος, παραθέτονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 9.

Οι θεωρούμενες αρχικές απώλειες απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα 7.1.

Απώλειες Αυτόνομου Συστήματος – θεωρητικές τιμές		
Απώλειες	Συμβολισμός	Τιμή (%)
Γραμμής	LL	4
Μετατροπής κατά την εκφόρτιση των μπαταριών	BIL_{rech}	8
Μετατροπής κατά την φόρτιση των μπαταριών	BIL_{ch}	8

Πίνακας 7.1: Θεωρούμενες απώλειες αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος

Στην περίπτωση του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος η τιμή της $E_{PV,use}$ (AC ενέργεια προς χρήση παραγόμενη από το φωτοβολταϊκό πάρκο (kWh/d)) πλέον αφορά και τις απώλειες που υπάρχουν κατά την μετατροπή της αποθηκευμένης ενέργειας σε ενέργεια προς χρήση. Αυτές οι απώλειες θεωρούνται στον μετατροπέα αυτόνομων δικτύων DC/AC κατά την διαδικασία της εκφόρτισης (BIL_{rech}) και ουσιαστικά διαφοροποιούν την τιμή αυτή σε σχέση με τα διασυνδεδεμένα συστήματα που προσμετρούν μόνο τις απώλειες γραμμής. Η μαθηματική σχέση (7.4) περιγράφει την $E_{PV,use}$ στην περίπτωση αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

$$E_{PV,use} = E_{Load,PV} + E_{bat,in} \cdot \left(\frac{100 - BIL_{rech}}{100} \right) \quad (7.4)$$

όπου: $E_{Load,PV}$ η ενέργεια που παράγεται από τα φ/β και καλύπτει άμεσα τα φορτία που υπάρχουν κατά το χρονικό διάστημα της παραγωγής
 BIL_{rech} οι απώλειες μετατροπής κατά την εκφόρτιση των μπαταριών

7.4 Σενάρια Κάλυψης Ενεργειακών Αναγκών

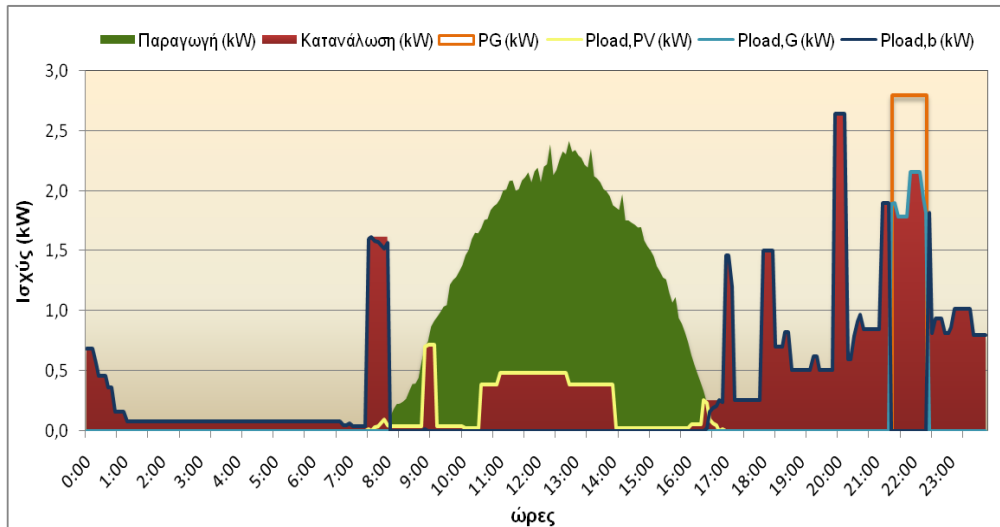
Στην συνέχεια θα εξετάσουμε τα διαφορετικά σενάρια κάλυψης των ενεργειακών αναγκών μας και την δυναμική συμπεριφορά του συστήματος σε κάθε ένα από αυτά.

A. Σενάριο κάλυψης δύο συνεχόμενων ημερών με ηλιοφάνεια (ιδανικό)

Εξετάζοντας πρώτα το σενάριο δυο διαδοχικά ηλιόλουστων ημερών, με ηλιοφάνεια την μέση τιμή που προκύπτει για το δίμηνο μελέτης, καταλήγουμε στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 7.2. Ο σκοπός της προσέγγισης αυτής έχει να κάνει με την παρατήρηση της συμπεριφορά των μπαταριών και την κατάσταση φόρτισης στο διάστημα όπου τελειώνει η δεύτερη μέρα. Η ημέρα είναι αυτή, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, είναι η 26η Νοεμβρίου 2008, ημέρα αναφοράς για την διαστασιολόγηση μας. Σε αυτό διακρίνονται το συνολικό προφίλ των φορτίων, η παραγωγή και ο διαχωρισμός της απαιτούμενης ενέργειας για την κάλυψη αυτών

Κεφάλαιο 7 : Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

των φορτίων σύμφωνα με την πηγή που καλείται κάθε στιγμή να το κάνει. Παρατηρούμε ότι κατά την διάρκεια της παραγωγής το φορτίο είναι αρκετά μικρότερο άρα η ενέργεια που περισσεύει διοχετεύεται στις μπαταρίες και εκφορτίζεται στην συνέχεια κατά τις απογευματινές ώρες όταν οι καταναλώσεις πιάνουν τις μεγαλύτερες τιμές τους.



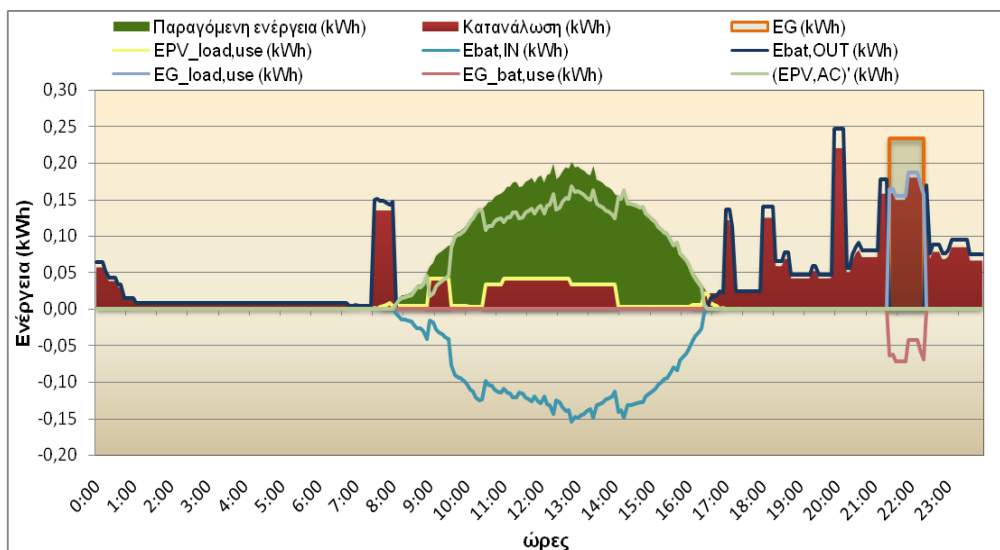
Εικόνα 7.2: Διαχωρισμός των φορτίων στην διάρκεια της ηλιόλουστης ημέρας του Νοεμβρίου

$P_{Load,PV}$: Φορτίο που καλύπτεται από τα φ/β πλαίσια

$P_{Load,G}$: Φορτίο που καλύπτεται από την γεννήτρια diesel

$P_{Load,G}$: Φορτίο που καλύπτεται από τις μπαταρίες

Η λειτουργία του υβριδικού συστήματος κατά την διάρκεια της αναφερόμενης μέρας απεικονίζεται στην εικόνα 7.3. Σε αυτό διακρίνονται οι ροές ενέργειας που υπάρχουν κατά την διάρκεια της μέρας όπως αυτές προσδιορίζονται στο αρχικό διάγραμμα του συστήματος. Σε αυτές τις ροές είναι προσμετρημένη και η θεωρούμενη απώλεια κάθε φορά.



Εικόνα 7.3: Ροή ενέργειας στην διάρκεια της ηλιόλουστης ημέρας του Νοεμβρίου – Σενάριο A

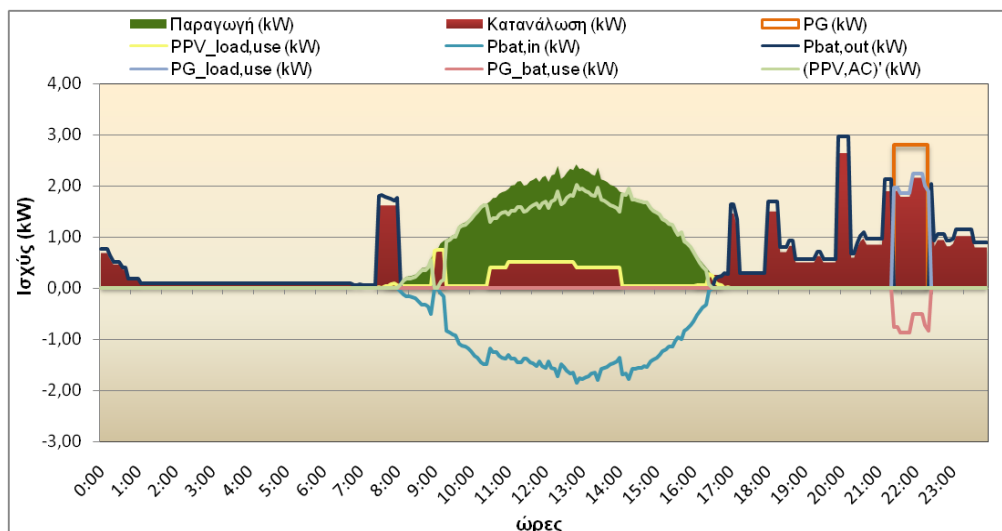
Κεφάλαιο 7 : Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

Συγκεκριμένα για την ενέργεια που καταναλώνεται από τα φορτία κατευθύνει από τα φωτοβολταϊκά ($E_{PV_Load,use}$) υπάρχει μια προσαύξηση της τάξης του 4% η οποία και θα αποσβεστεί λόγω ωμικής αντίστασης των καλωδίων μέχρι να καταναλωθεί. Παρόμοια, για αυτήν που αποθηκεύεται από την περίσσεια της παραγόμενης από τα φωτοβολταϊκά στις μπαταρίες ($E_{bat,in}$) θεωρούνται απώλειες μετατροπής 8% οι οποίες αφαιρούνται από την διαθέσιμη ενέργεια κάθε φορά. Τέλος κατά τρόπο ανάλογο, με την εκφόρτιση των μπαταριών ($E_{bat,out}$) για την κάλυψη του αντίστοιχου φορτίου πρέπει να συνυπολογιστούν απώλειες μετατροπής 8% καθώς και απώλειες καλωδίων 4%.

Συνοπτικά περιγράφεται το διάγραμμα ροής ενέργειας :

- Το γράφημα ξεκινά από τα μεσάνυχτα όπου τα φορτία καλύπτουν οι μπαταρίες μέσω του μετατροπέα, με τις αντίστοιχες απώλειες μετατροπής και καλωδίων (8% και 4%).
- Το πρωί αυξάνεται το φορτίο το οποίο εξακολουθεί να καλύπτεται από τις μπαταρίες ενώ κατά την εμφάνιση του ήλιου στις 07:22 αναλαμβάνουν την τροφοδότηση των φορτίων τα φωτοβολταϊκά πλαίσια μέσω του αντιστροφέα DC/AC. Όταν τα φορτία κατά την διάρκεια της παραγωγής από τα πλαίσια υπερβούν την παραγωγή την διαφορά καλύπτουν πάλι οι μπαταρίες.
- Η παραγόμενη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια που περισσεύει μετά την κάλυψη των φορτίων ($E_{PV,AC}$) φορτίζουν τις μπαταρίες μέσω του μετατροπέα. Η ενέργεια αυτή προκύπτει με πώση της στάθμης της περίσσειας κατά 8%, όσο δηλαδή θεωρήθηκαν οι απώλειες μετατροπής. Έτσι προκύπτει η $E_{bat,in}$.
- Από την δύση του ηλίου και μετά οι μπαταρίες καλύπτουν όλο το φορτίο εκτός από το διάστημα που το φορτίο παρουσιάζει αύξηση και κρίνεται απαραίτητη η συμβολή της γεννήτριας diesel. Η κρίσιμη ώρα θεωρείται γύρω στις 21:30 όπου ο μετατροπέας ενεργοποιεί την γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη πάνω του και αυτή αναλαμβάνει το φορτίο για το διάστημα αυτό ($E_{G_Load,use}$) ενώ όση ενέργεια περισσεύει ($E_{G_bat,use}$) την διοχετεύει στις μπαταρίες με την αντίστοιχη μείωση του 8%.
- Η βοηθητική γεννήτρια σταματάει μια ώρα μετά και για την τελευταία μιάμιση ώρα εκφορτίζουν πάλι οι μπαταρίες.

Το αντίστοιχο διάγραμμα ισχύος φαίνεται στην εικόνα 7.4.



Εικόνα 7.4: Διάγραμμα ισχύος για την διάρκεια της ηλιόλουστης ημέρας του Νοεμβρίου – Σενάριο A

Κεφάλαιο 7 : Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

Οι ονομαστικές τιμές της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και της γεννήτριας diesel που εξυπηρετούν το σενάριο κατά το οποίο εξετάζουμε δυο μέρες ηλιοφάνειας καθώς και τα χαρακτηριστικά στοιχεία που προκύπτουν από την διαστασιολόγηση ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζονται στον πίνακα 7.2. Τα ποσοστά διείσδυσης ενέργειας από φωτοβολταϊκά και γεννήτρια για την μέρα αυτή είναι 81,99% και 18,01% αντίστοιχα.

A.	P_{PV} (kW)	h/d	S (m ²)	P_G (kW)	h/d	$E_{PV,AC}$ (kWh/d)	$E_{PV,use}$ (kWh/d)	E_G (kWh/d)	H_i (kWh/m ² d)	H_i total (kWh/d)	E_{Load} (kWh/d)
Νοε- Δεκ	4,08	9,64	31,13	2,8	1,00	12.75	11.04	2,80	3,87	135	11,54

Πίνακας 7.2: Χαρακτηριστικά μεγέθη υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών – Σενάριο A

Σύμφωνα λοιπόν με τα συγκεντρωτικά στοιχεία του πίνακα χρειάστηκε μια φωτοβολταϊκή γεννήτρια 24 πλαϊσίων, ονομαστικής ισχύος 4,08kWp η οποία παράγει ενέργεια για 9,64 ώρες και καταλαμβάνει εμβαδόν περίπου 31,13m² (το εμβαδόν αφορά στέγη, το ένα δίπλα στο άλλο). Το μέγιστο της παραγωγής για το σύστημα αυτό ξεπερνάει τα 2kW όπως διαπιστώνεται από το διάγραμμα ισχύος του σχήματος 7.4. Η συνεισφορά της γεννήτριας των 2,8kW για μια ώρα προσφέρει χρήσιμη ενέργεια και λειτουργεί βοηθητικά μικραίνοντας όμως αρκετά την διαστασιολόγηση του συστήματος. Στις επόμενες στήλες φαίνονται οι παραγόμενες αυτές ενέργειες, η προς χρήση παραγόμενη από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια $E_{PV,use}$, η συνολική ημερήσια προσπίπτουσα ακτινοβολία και το συνολικό φορτίο.

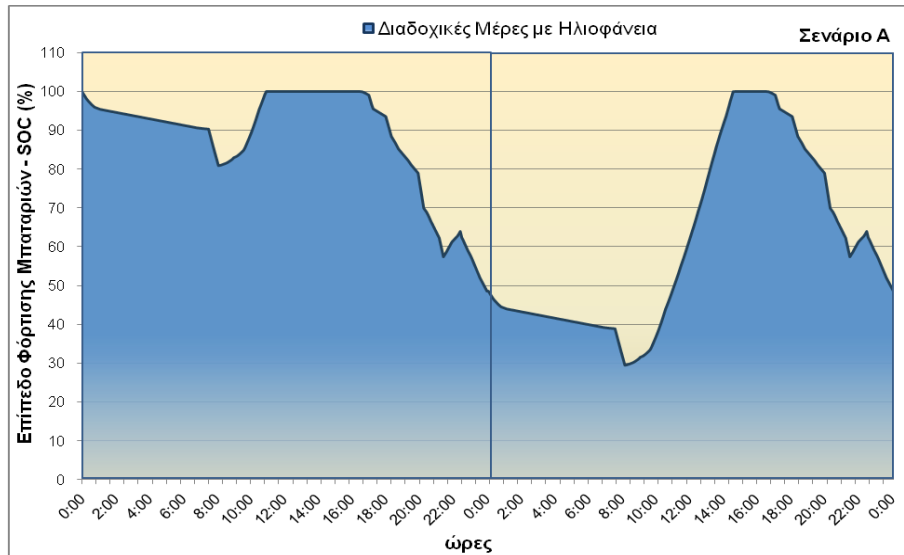
Για την συμπεριφορά των μπαταριών και την τελική διαστασιολόγηση τους, δεδομένου ότι θεωρούνται δυο ηλιόλουστες μέρες, καταλήγουμε στον πίνακα 7.3. Από αυτόν προκύπτουν για μια μέρα οι τιμές της διαθέσιμης ενέργειας (από τα πλαίσια και την γεννήτρια) που είναι προς αποθήκευση στις μπαταρίες, η συνολική τιμή αυτής καθώς και οι τιμές ενέργειας που προσδίδουν οι μπαταρίες και η γεννήτρια στα φορτία με τις αντίστοιχες απώλειες. Συνολικά κατά το πέρας της μέρας οι απώλειες αυτές (E_{loss}) φτάνουν τις 1,97kWh δηλαδή το 17,09% του συνολικού φορτίου. Με μια τελική προσαύξηση 30% της τιμής που πρέπει να έχουν οι συσσωρευτές για την κάλυψη των φορτίων καταλήγουμε σε 24 στοιχεία των 2V (σύνολο 48V) και 230Ah περίπου το καθένα (5 τελευταίες στήλες του πίνακα).

$E_{bat,in}$ (kWh/d)	$E_{bat,out}$ (kWh)	$E_{G,load,use}$ (kWh)	$E_{G,bat,use}$ (kWh)	$E_{bat,in}$ TOTAL (kWh)	E_{Loss} (kWh)	$E_{bat 30\%}$ (kWh)	$E_{bat 30\%}$ (Ah)	τεμάχια	Volts/ τεμάχιο	Volts DC
-9,74	8,44	2,02	-0,72	-10,46	1,97	10,97	228,56	24,00	2,00	48,00

Πίνακας 7.3: Χαρακτηριστικά μεγέθη / Διαστασιολόγηση μπαταριών – Σενάριο A

Σχηματικά μπορούμε να απεικονίσουμε την κατάσταση φόρτισης – εκφόρτισης των μπαταριών κατά την διάρκεια των δύο ημερών που εξετάζουμε στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 7.5).

Κεφάλαιο 7 : Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος



Εικόνα 7.5: Μεταβολή του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών για διάστημα 2 ημερών με πλήρη Ηλιοφάνεια - Σενάριο A

Στον πίνακα 7.4 σημειώνονται οι οριακές τιμές του επιπέδου φόρτισης καθώς και του φορτίου των μπαταριών που επιλέξαμε για την επίτευξη αυτονομίας δύο ημερών με ήλιο. Σύμφωνα με αυτές στο τέλος της πρώτης μέρας η φόρτιση πέφτει σχεδόν στο μισό και κατά την διάρκεια της δεύτερης μέρας οριακά προς τα κάτω φτάνουμε το 30% φόρτισης των μπαταριών (29,60%) όπως εξάλλου είχαμε θέσει αρχικά ως ελάχιστο όριο εκφόρτισης κατά την διαστασιολόγηση. Αυτό που επιτυγχάνεται με όλες τις προαναφερθείσες τιμές παραγωγής από φωτοβολταϊκά και γεννήτρια diesel είναι να ανακτήσει στο τέλος της δεύτερης μέρας το ελάχιστο όριο που είχε και στο τέλος της πρώτης μέρας. Έτσι η φόρτιση των μπαταριών κυμαίνεται μεταξύ 100%-48,65%-29,60%-100%-48,65%.

Τέλος της...	Φορτίο Μπαταρίας (Ah)	Επίπεδο Φόρτισης -SOC (%)
1ης μέρας	111,19	48,65
2ης μέρας	111,19	48,65
Ελάχιστο όριο φόρτισης	67,65	29,60

Πίνακας 7.4: Συμπεριφορά του φορτίου και του SOC των μπαταριών - Σενάριο A

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται ένα ποσοστό χαμένης ενέργειας, κυρίως την πρώτη μέρα όπου είναι πλήρως φορτισμένες οι μπαταρίες (μεταξύ 11:00 και 17:00), το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι τις ώρες παραγωγής από τα φωτοβολταϊκά δεν μπορεί να καταναλωθεί αλλά ούτε και να αποθηκευτεί όλη η διαθέσιμη ενέργεια. Επιπλέον, από το ημερήσιο ισοζύγιο των ενεργειών για το συγκεκριμένο σενάριο (σχέση 7.3) προκύπτει μια περίσσεια παραγόμενης ενέργειας 2kWh. Στην ουσία η περίσσεια ενέργεια έχει να κάνει με την μεγαλύτερη παραγωγή από την γεννήτρια diesel απ' ότι στην πραγματικότητα θα χρειαζόμασταν (με περίπου 0.8kW ονομαστική ισχύ της έχω μηδενική τιμή περίσσειας ενέργειας στο σύστημα). Η παραπάνω αυτή ποσότητα που θέλουμε η γεννήτρια να παράγει επιπλέον της αναγκαίας, συμβάλει ουσιαστικά στην διατήρηση των μπαταριών σε ένα ποσοστό φόρτισης που δεν θα πέσει κάτω από το 30%.

Το πρόβλημα αυτό εναλλακτικά θα λυνόταν με αύξηση της αρχικής θεώρησης των μπαταριών σε αμπερώρια προστατεύοντάς τες από βαθιές εκφορτίσεις αλλά ταυτοχρόνως χωρίς να πρέπει να χρησιμοποιήσω γεννήτρια. Στο σενάριο αυτό δεν προβλέπεται καμία μέρα συννεφιάς (ιδανικό σενάριο) άρα τα τελικά συμπεράσματα που θα μας καθορίσουν την τελική διαστασιολόγηση θα εξαχθούν παρακάτω.

B. Σενάριο κάλυψης δύο συνεχόμενων ημερών με ηλιοφάνεια και πλήρη συννεφιά αντίστοιχα

Η περίπτωση που προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα έχει να κάνει με την δεύτερη θεώρηση κατά την οποία μια μέρα ηλιοφάνειας διαδέχεται μια μέρα πλήρους συννεφιάς. Αυτή η θεώρηση αποτελεί πλέον την μέση μέρα του διμήνου αναφοράς και βάσει αυτής διαστασιολογούμε ξανά το σύστημα. Στην περίπτωση αυτή πρέπει το σύστημα να μπορεί να καλύψει πλήρως τα φορτία, να διατηρήσει το ελάχιστο όριο εκφόρτισης των μπαταριών που του εισάγουμε και τελικά να μπορέσει να ανακτήσει την φόρτιση τους την τρίτη μέρα όπου και επανέρχεται η ηλιοφάνεια. Κρίσιμο σημείο που πρέπει να προσεχθεί είναι η πιθανή υπερδιαστασιολόγηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Με την δημιουργία μιας μεγάλης φωτοβολταϊκής γεννήτριας για την κάλυψη των ενεργειακών μας αναγκών τους μήνες με την χαμηλή ηλιοφάνεια κινδυνεύουμε να αφήνουμε ανεκμετάλλευτη αρκετή παραγόμενη ενέργεια τους θερινούς μήνες όπου η ηλιοφάνεια αυξάνεται. Με την αιτιολογία αυτή θα διατηρήσουμε ίδια εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών αυξάνοντας όμως αισθητά την ισχύ της βοηθητικής πηγής (γεννήτρια diesel). Έτσι καλύπτουμε τις ενεργειακές ανάγκες του σεναρίου για την μέρα χαμηλής ηλιοφάνειας του Νοεμβρίου αλλά ταυτόχρονα αποφεύγουμε την υπερδιαστασιολόγηση των συσσωρευτών και της εγκατεστημένης ισχύος των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Με διεύθυνση δηλαδή της βοηθητικής πηγής ενέργειας αποφεύγουμε να πετάξουμε μεγάλες ποσότητες ενέργειας το καλοκαίρι και να καταστήσουμε έτσι το όλο σύστημα ακριβό σε κόστος και καθόλου αποδοτικό.

Η σχέση 7.5 χρησιμοποιείται για την διαστασιολόγηση των μπαταριών στην περίπτωση που θεωρούμε και ημέρες συννεφιάς. Με διάφορες αλλαγές των παραμέτρων της προσεγγίζουμε καλύτερα την βέλτιστη τιμή χωρητικότητας συσσωρευτών που μας εξυπηρετεί καλύτερα.

$$E_{bat} = E_{bat,out} \cdot (1 + dis_lim) + (E_{bat,out,cloudy} - E_{G,bat,use,cloudy}) \cdot (1 + dis_lim) \cdot Cloudy_days \quad (7.5)$$

όπου : dis_lim : το όριο εκφόρτισης των μπαταριών

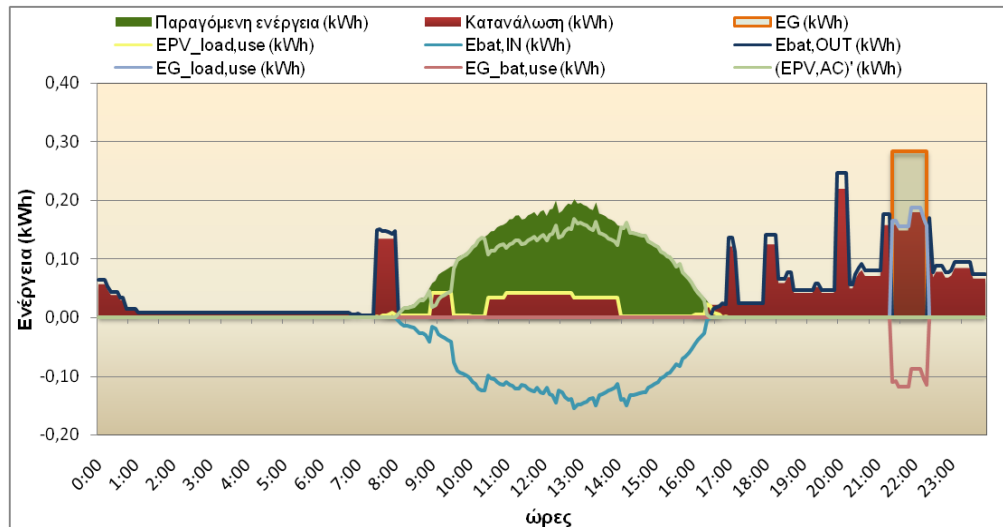
$E_{bat,out,cloudy}$: η ενέργεια που καλούνται να δώσουν οι μπαταρίες στο φορτίο κατά την διάρκεια της συννεφιασμένης μέρας

$E_{G,bat,use,cloudy}$: παραγόμενη ενέργεια από γεννήτρια που αποθηκεύεται στις μπαταρίες κατά την διάρκεια της συννεφιασμένης μέρας

$Cloudy_days$: ημέρες συνεχόμενης συννεφιάς

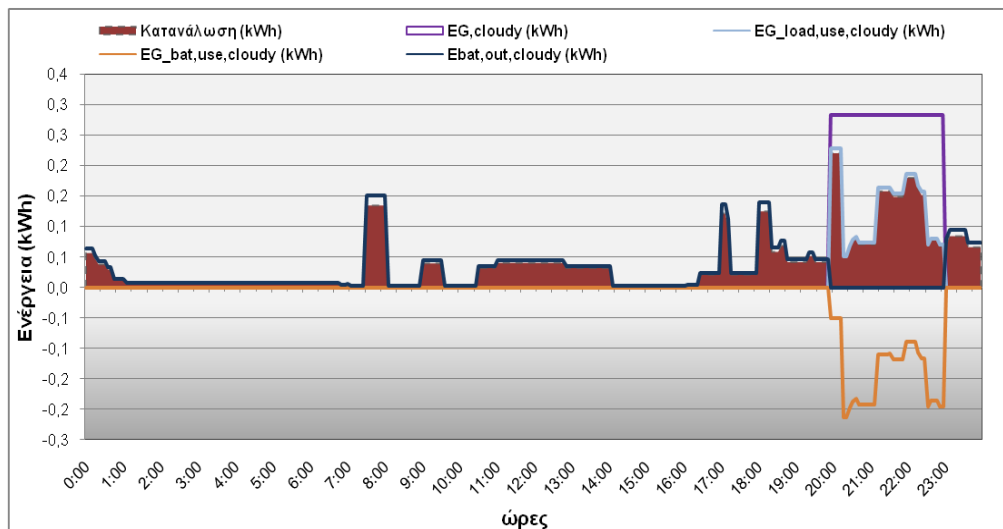
Στην εικόνα 7.6 που φαίνεται παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα ροής ενέργειας για την ηλιόλουστη μέρα του σεναρίου B. Κατά αντίστοιχο τρόπο με το προηγούμενο σενάριο δηλαδή, διαστασιολογούμε την γεννήτρια diesel ως προς την επίτευξη των αρχικών προδιαγραφών που έχουμε θέσει ενώ προς το παρόν δεν μεταβάλλουμε την φωτοβολταϊκή γεννήτρια.

Κεφάλαιο 7 : Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος



Εικόνα 7.6: Ροή ενέργειας στην διάρκεια της ηλιόλουστης ημέρας του Νοεμβρίου – Σενάριο B

Οι αντίστοιχες ροές ενέργειας για την δεύτερη μέρα με πλήρη συννεφιά παρουσιάζονται στο διάγραμμα της εικόνας 7.7. Η γεννήτρια τώρα επιλέγεται να λειτουργήσει τις τρεις εκείνες ώρες όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη ενεργειακή ζήτηση. Καλύπτει έτσι το φορτίο αυτό αλλά ταυτόχρονα επαναφέρει και το επίπεδο φόρτισης των συσσωρευτών στα επιθυμητά επίπεδα εξασφαλίζοντας την ομαλή λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 7.7: Ροή ενέργειας στην διάρκεια της συννεφιασμένης ημέρας του Νοεμβρίου – Σενάριο B

$E_{G,cloudy}$: Παραγόμενη ενέργεια από γεννήτρια κατά την συννεφιασμένη μέρα

$E_{G_load,use,cloudy}$: Παραγόμενη ενέργεια από γεννήτρια που καταναλώνεται απευθείας από τα φορτία κατά την συννεφιασμένη μέρα

$E_{G_bat,use,cloudy}$: Παραγόμενη ενέργεια από γεννήτρια που αποθηκεύεται στις μπαταρίες κατά την συννεφιασμένη μέρα

$E_{bat,out,cloudy}$: Ενέργεια που καλούνται να δώσουν οι μπαταρίες στο φορτίο κατά την συννεφιασμένη μέρα

Κεφάλαιο 7 : Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

Οι ονομαστικές τιμές της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και της γεννήτριας diesel που αφορούν το σενάριο κατά το οποίο εξετάζουμε δυο μέρες με ηλιοφάνεια και συννεφιά διαδοχικά καθώς και τα χαρακτηριστικά στοιχεία που προκύπτουν από την διαστασιολόγηση ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζονται στον πίνακα 7.5. Τα ποσοστά διείσδυσης ενέργειας από φωτοβολταϊκά και γεννήτρια σε αυτήν την περίπτωση είναι 78,95% και 21,05% αντίστοιχα για την πρώτη μέρα και 48,39% με 51,61% στο σύνολο των 2 ημερών (την δεύτερη μέρα έχουμε μόνο γεννήτρια).

B.	P _{PV} (kW)	h/d	S (m ²)	P _G (kW)	h/d		E _{PV,AC} (kWh/d)	E _{PV,use} (kWh/d)	E _G (kWh/d)		H _i (kWh/m ² d)	H _i total (kWh/d)	E _{Load} (kWh/d)
					1η μέρα	2η μέρα			1η μέρα	2η μέρα			
Νοε-Δεκ	4,08	9,64	31,13	3,4	1,00	3,00	12,75	11,04	3,40	10,20	3,87	135	11,54

Πίνακας 7.5: Χαρακτηριστικά μεγέθη υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών – Σενάριο B

Σύμφωνα λοιπόν με τα συγκεντρωτικά στοιχεία του πίνακα παρέμεινε το προηγούμενο φωτοβολταϊκό σύστημα των 24 πλαισίων, ονομαστικής ισχύος 4,08kWp με τα ίδια χαρακτηριστικά παραγωγής όπως και πριν αλλά η συνεισφορά της γεννήτριας πλέον γίνεται πιο μεγάλη και αφορά κυρίως στην δεύτερη μέρα όπου λειτουργεί ως εφεδρική πηγή παραγωγής. Την πρώτη μέρα η γεννήτρια συνεισφέρει στο σύστημα για μια ώρα ενώ την δεύτερη μέρα που παρουσιάζεται η πλήρης συννεφιά αυτή λειτουργεί για τρεις ώρες και επαναφέρει την φόρτιση των μπαταριών προστατεύοντας τες παράλληλα από πλήρη εκφόρτιση.

Για την συμπεριφορά των μπαταριών και την τελική διαστασιολόγηση τους στην περίπτωση τώρα που δεν υπάρχει παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια την δεύτερη μέρα καταλήγουμε στον πίνακα 7.6 στον οποίο εξετάζεται η κάθε μέρα χωριστά. Από αυτόν προκύπτουν για κάθε μέρα οι τιμές της διαθέσιμης ενέργειας (από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και την γεννήτρια) που είναι προς αποθήκευση στις μπαταρίες, η συνολική τιμή αυτής καθώς και οι τιμές ενέργειας που προσδίδουν οι μπαταρίες και η γεννήτρια στα φορτία με τις αντίστοιχες απώλειες. Συνολικά κατά το πέρας της πρώτης μέρας οι απώλειες αυτές (E_{Loss}) φτάνουν τις 2kWh ποσοστό 17,5% ενώ κατά το διάστημα της συννεφιασμένης μέρας οι αντίστοιχες απώλειες (E_{Loss,cloudy}) τις 0,63kWh και ποσοστό 5,49% του συνολικού φορτίου. Όσο περισσότερες μετατροπές της ενέργειας τόσο περισσότερες είναι και οι απώλειες που παρατηρούνται στο σύστημα. Θεωρώντας στην σχέση 7.5 συντελεστή 1 στις «Cloudy_days» και δοκιμάζοντας το όριο εκφόρτισης καταλήγουμε σε 24 στοιχεία των 2V (σύνολο 48V) αλλά με 350Ah το κάθε στοιχείο αυτή την φορά (πίνακας 7.6).

1η μέρα (Ηλιοφάνεια)	E _{bat,in} (kWh/d)	E _{bat,out} (kWh)	E _{G_load,use} (kWh)	E _{G_bat,use} (kWh)	E _{bat,in} TOTAL	E _{Loss} (kWh)
		-9,74	8,44	2,02	-1,27	11,01
2η μέρα (Συννεφιά)	E _{bat,in,cloudy} (kWh/d)	E _{bat,out,cloudy} (kWh)	E _{G_load,use,cloudy} (kWh)	E _{G_bat,use,cloudy} (kWh)	E _{bat,in,cloudy} TOTAL	E _{loss,cloudy} (kWh)
		0,00	7,75	4,82	-5,21	-5,21

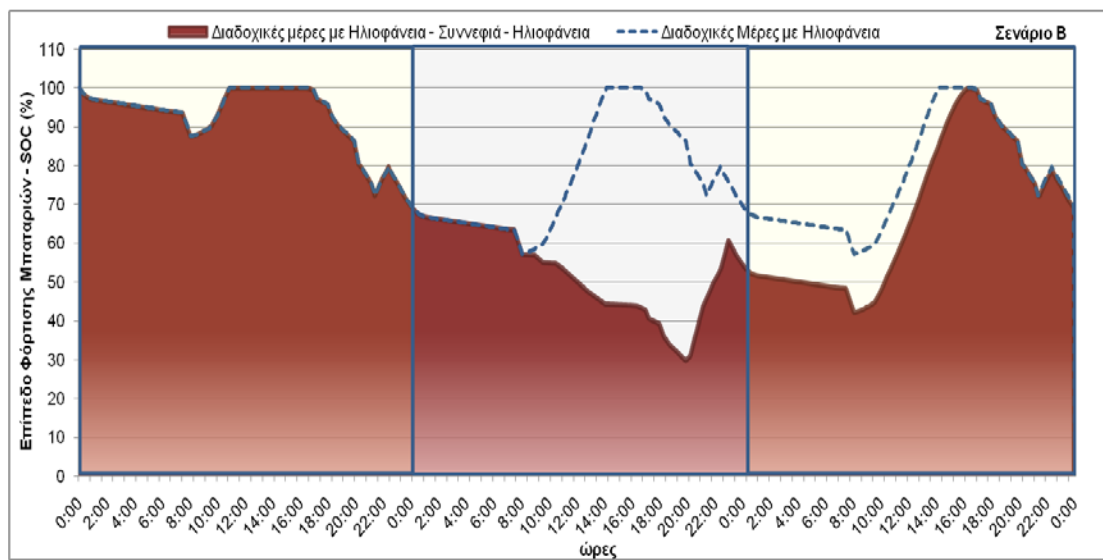
Πίνακας 7.6: Χαρακτηριστικά μεγέθη μπαταριών – Σενάριο B

Κεφάλαιο 7 : Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

E_{bat} (kWh)	E_{bat} (Ah)	τεμάχια	Volts/ τεμάχιο	Volts (DC)
16,80	350,04	24,00	2,00	48,00

Πίνακας 7.7: Διαστασιολόγηση μπαταριών – Σενάριο B

Σχηματικά μπορούμε να απεικονίσουμε την κατάσταση φόρτισης – εκφόρτισης των μπαταριών κατά την διάρκεια των δύο ημερών που εξετάζουμε. Στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 7.8 βλέπουμε διαδοχικά τις τρεις χαρακτηριστικές μέρες όπου την μέρα ηλιοφάνειας διαδέχεται μέρα πλήρους συννεφιάς ενώ η τρίτη μέρα ηλιοφάνειας λαμβάνεται υπ’ όψιν ως προς την δυνατότητα ανάκτησης της φόρτισης των μπαταριών. Στον πίνακα 7.8 που ακολουθεί σημειώνονται οι οριακές τιμές του επιπέδου φόρτισης για το τέλος καθεμιάς από τις εξεταζόμενες μέρες. Επίσης σημειώνεται και το αναμενόμενο φορτίο των μπαταριών που επιλέξαμε για την επίτευξη αυτονομίας σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του σεναρίου B.



Εικόνα 7.8: Μεταβολή του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών για διάστημα διαδοχικών ημερών με Ηλιοφάνεια – Συννεφιά – Ηλιοφάνεια - Σενάριο B

Σύμφωνα με αυτές στο τέλος της πρώτης μέρας το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών πέφτει σχεδόν στο 70% και στο τέλος της δεύτερης συννεφιασμένης μέρας φτάνουμε σχεδόν στο 55% της αρχικής. Αυτό που επιτυγχάνεται, με όλες τις προαναφερθείσες τιμές παραγωγής από φωτοβολταϊκά και γεννήτρια diesel, είναι τελικά το σύστημα να ανακτήσει σχεδόν στο τέλος της τρίτης διαδοχικής μέρας με ηλιοφάνεια το ελάχιστο όριο που είχαμε στο τέλος της πρώτης μέρας.

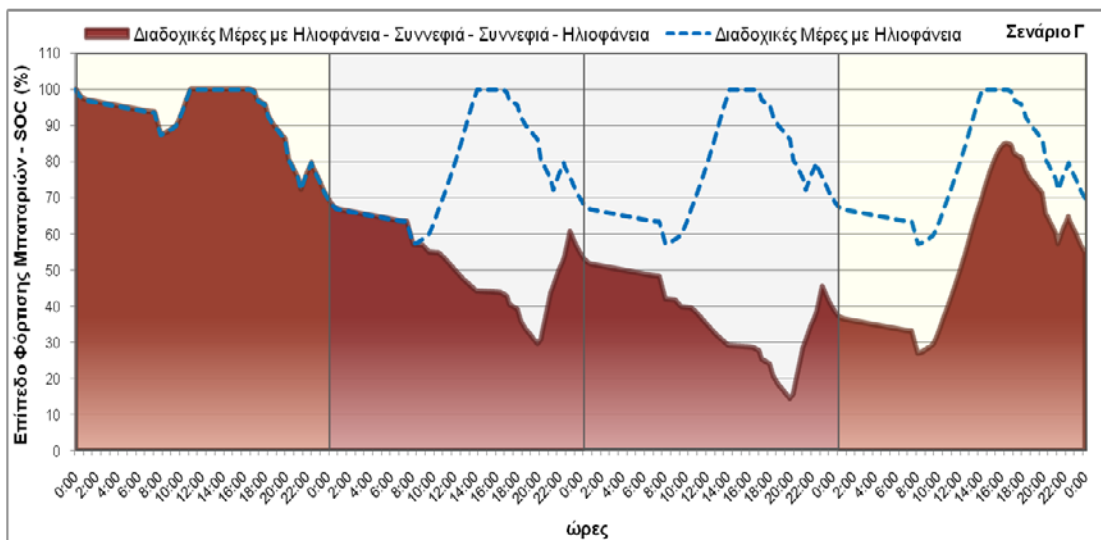
Τελος της...	Φορτίο Μπαταρίας (Ah)	Επίπεδο Φόρτισης -SOC (%)
1ης μέρας	244,17	69,76
2ης μέρας	191,20	54,62
3ης μέρας	241,71	69,05
Ελάχιστο όριο φόρτισης	104,01	29,72

Πίνακας 7.8: Συμπεριφορά του φορτίου και του SOC των μπαταριών - Σενάριο B

Συγκεκριμένα η φόρτιση των μπαταριών στο διάστημα των τριών ημερών κυμαίνεται μεταξύ 100% - 69,76% - 29,72% - 54,62% - 69,05%. Τελικά από το ισοζύγιο των ενεργειών για το συγκεκριμένο σενάριο (σχέση 7.3) προκύπτει μια περίσσεια παραγόμενης ενέργειας 2,6kWh. Στο σύνολο των δύο ημερών η ποσότητα αυτή, αν θεωρήσουμε ότι στην προκειμένη σχέση έχουμε όπου E_G την μέση τιμή της παραγωγής από την γεννήτρια, όπου E_{Load} την μέση τιμή των φορτίων και όπου E_{Loss} την μέση τιμή των απωλειών, τότε η τιμή επιπλέον παραγόμενης ενέργειας από αυτή που τελικά καταναλώνεται μειώνεται σε 0,31kWh.

Γ. Σενάριο κάλυψης τριών συνεχόμενων ημερών με ηλιοφάνεια και δύο ημερών με πλήρη συννεφιά αντίστοιχα

Η τελευταία φάση της μελέτης του υβριδικού συστήματος έχει να κάνει με την δυνατότητα που έχει αυτό σε μήνες του χειμώνα με χαμηλή ηλιοφάνεια να αποκρίνεται ικανοποιητικά αποφεύγοντας την πιθανότητα κάποιου black out. Σε αυτό βοηθάει η γεννήτρια diesel που αν και δεν θα θέλαμε να παίζει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας (χρήση όσο το δυνατόν λιγότερων εξωτερικών συμβατικών πηγών), η διείσδυση της ενέργειας από αυτή κρίνεται απαραίτητη για όλους τους προαναφερθέντες λόγους. Βασιζόμενοι στην διαστασιολόγηση του σεναρίου Β που αφορά μια μέρα πλήρους συννεφιάς διαπιστώνουμε τα όποια αρνητικά στοιχεία παρατηρούνται. Το σύστημα αποκρίνεται εξίσου καλά και επαναφέρει την φόρτιση των μπαταριών σε ικανοποιητικά επίπεδα αλλά το πρόβλημα που παρατηρείται είναι ότι κατά την διάρκεια της τρίτης μέρας η στάθμη φόρτισης φτάνει το 14,58%, δηλαδή εκτελεί βαθιά εκφόρτιση και πέφτει αρκετά πιο κάτω από το κατώφλι του 30% που αρχικά έχουμε θέσει. Σε τέτοιο σενάριο θα πρέπει να έχουμε λίγο ακόμα σε λειτουργία την γεννήτρια diesel ή και να αυξήσουμε την αρχική χωρητικότητα των μπαταριών ώστε να αποτραπεί οποιοδήποτε φαινόμενο βαθιάς εκφόρτισης. Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 7.9) φαίνεται η κατάσταση του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών για το σενάριο όπου την πρώτη μέρα καλής ηλιοφάνειας διαδέχονται δυο μέρες πλήρους συννεφιάς. Κατά την τέταρτη μέρα η στάθμη φόρτισης των μπαταριών φτάνει σε επιθυμητά επίπεδα.



Εικόνα 7.9: Μεταβολή του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών για διάστημα διαδοχικών ημερών με Ηλιοφάνεια - Συννεφιά - Συννεφιά - Ηλιοφάνεια - Σενάριο Γ

Κεφάλαιο 7 : Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

Στον πίνακα 7.9 σημειώνονται οι διαφορές που παρατηρούνται πλέον στις οριακές τιμές του επιπέδου φόρτισης καθώς και του φορτίου των μπαταριών που επιλέξαμε για την επίτευξη αυτονομίας δύο ημερών πλήρους συννεφιάς. Η διαφορά έγκειται στο τέλος της τρίτης μέρας όπου το ποσοστό αυτό φτάνει περίπου το 40% ενώ λίγες ώρες πριν μπει η γεννήτρια υπήρξε και το κατώτατο όριο των 14,58%.

Τέλος της...	Φορτίο Μπαταρίας (Ah)	Επίπεδο Φόρτισης -SOC (%)
1ης μέρας	244,17	69,76
2ης μέρας	191,20	54,62
3ης μέρας	138,23	39,49
4ης μέρας	241,71	54,79
Ελάχιστο όριο φόρτισης	51,05	14,58

Πίνακας 7.9: Συμπεριφορά του φορτίου και του SOC των μπαταριών - *Σενάριο Γ*

Όσον αφορά στους δείκτες αποτίμησης του συστήματος αυτοί προκύπτουν δουλεύοντας όπως και στην παράγραφο 5.4. Σημειώνουμε ότι ο δείκτης ηλιακού κλάσματος (fsol) αφορά την αναλογία της χρήσιμης ηλιακής ενέργειας ως προς την συνολική κατανάλωση και λαμβάνεται υπ' όψιν για την διαστασιολόγηση της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και των συσσωρευτών. Ο δείκτης PR χαρακτηρίζει τις απώλειες που παρουσιάζονται και διευκρινίζει πόσο κοντά δουλεύει το σύστημα στην μέγιστη τιμή ισχύος που παρέχεται από τα πλαίσια. Ορίζεται ως η αναλογία της ηλιακής ενέργειας που είναι προς χρήση σε σχέση με αυτή που σύμφωνα με τα ονομαστικά στοιχεία θα μπορούσε να είναι διαθέσιμη δηλαδή που θεωρητικά θα παραγόταν αν η ηλιακή ενέργεια εμφανίζονταν όπως ορίζει το STC (1000W/m²). Μεγάλη τιμή PR σημαίνει ότι το σύστημα εκμεταλλεύεται σε μεγάλο βαθμό τους πόρους του ενώ μικρή τιμή φανερώνει προβλήματα απωλειών κατά την παραγωγή και κακή σχεδίαση. Συνοπτικά οι δείκτες παρουσιάζονται στον πίνακα 7.10. Οι δείκτες αυτοί αφορούν στην χαρακτηριστική μέρα αναφοράς 26 Νοεμβρίου του 2008 βάση της οποίας διαστασιολογείται αρχικώς το σύστημα και μπορούν να μας δώσουν κάποιες μόνο πληροφορίες για την εν γένει συμπεριφορά του συστήματος. Η ετήσια παρουσίαση όπως θα δούμε παρακάτω έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον και δίνει μια δυναμική κατάσταση της απόκρισης του συστήματος κατά την διάρκεια του εξεταζόμενου έτους.

	Y _A (h/d)	Y _F (h/d)	Y _R (h/d)	Fsol (%)	PR (%)	Lc	Ls	β.α. (%)
Νοε-Δεκ	2,79	2,42	3,87	95,7	62,56	1,08	0,37	9,44

Πίνακας 7.10: Συμπεριφορά φορτίου μπαταριών για διάστημα 2 ημερών με ήλιο

7.5 Ετήσια Πρόβλεψη Αρχικής Διαστασιολόγησης

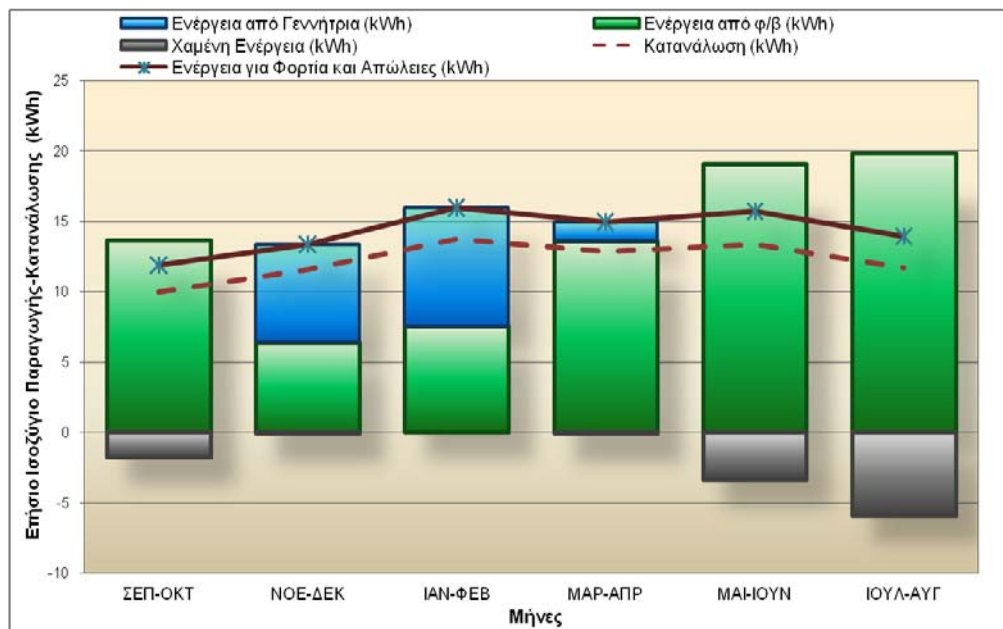
Σύμφωνα με την παραπάνω διαστασιολόγηση του υβριδικού συστήματος είναι απαραίτητο να μελετήσουμε προοπτικά την συμπεριφορά του ιδίως σε μήνες που η ηλιοφάνεια μεγιστοποιείται και θα πρέπει να προληφθεί ο περιορισμός της απόρριψης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Η παραπάνω μελέτη του συστήματος στοχεύει στην κάλυψη των αναγκών για τους δύσκολους μήνες Νοεμβρίου - Φεβρουαρίου όπου προβλέπει πλήρη κάλυψη για δύο μέρες συνεφιάς. Για τους υπόλοιπους μήνες με δεδομένο την μικρότερη συχνότητα εμφάνισης ημερών πλήρους συνεφιάς το σύστημα προβλέπει την κάλυψη μιας μέσης μέρας (ή μιας ηλιόλουστης και μιας πλήρους συνεφιασμένης μέρας). Για την περίπτωση όπου θέλουμε να καλύψουμε σενάριο με επιπλέον μέρες πλήρους συνεφιάς απαιτείται νέα μελέτη διαστασιολόγησης όπου θα αθροίζεται η εφεδρική γεννήτρια diesel με την λογική που εξετάσαμε στο τετράμηνο του Νοεμβρίου - Φεβρουαρίου.

Σύμφωνα λοιπόν με τις παραδοχές αυτές το υβριδικό σύστημα διαστασιολογείται όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα 7.11.

P_{PV} (kW)	S (m ²)	P_G (kW)	Qbat (Ah)	τεμάχια	Volts/ τεμάχιο	Volts (DC)
4,08	31,13	3,4	350	24	2	48

Πίνακας 7.11: Αρχική διαστασιολόγηση υβριδικού συστήματος

Η ονομαστική τιμή της γεννήτριας είναι 3,4kW και λειτουργεί βάσει του διμήνου και της ανάγκης που υπάρχει στο σύστημα για συνεισφορά ενέργειας από αυτή. Όπως δηλαδή χρησιμοποιείται για μια ώρα τις ηλιόλουστες μέρες του διμήνου Νοεμβρίου - Δεκεμβρίου και τρεις ώρες για τις πλήρως συνεφιασμένες, αντίστοιχα λειτουργεί και για τους υπόλοιπους μήνες, λιγότερο ή περισσότερο. Το συνολικό ισοζύγιο ενέργειας όπως αυτό ορίστηκε (σχέσεις 7.2, 7.3) μέσα στο έτος φαίνεται στην εικόνα 7.10.



Εικόνα 7.10: Ισοζύγιο ενέργειας κατά την διάρκεια του έτους – Αρχική διαστασιολόγηση

Κεφάλαιο 7 : Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι για την κάλυψη του προφίλ κατανάλωσης της συγκεκριμένης οικίας στο διάστημα του ενός έτους ισχύουν :

- Συνεισφορά στην παραγόμενη ενέργεια σε ποσοστό 47,73% από τα φωτοβολταϊκά και 52,27% από την γεννήτρια diesel κατά το δίμηνο Νοεμβρίου-Δεκεμβρίου.
- Συνεισφορά στην παραγόμενη ενέργεια σε ποσοστό 47,09% από τα φωτοβολταϊκά και 52,91% από την γεννήτρια diesel κατά το δίμηνο Ιανουαρίου-Φεβρουαρίου.
- Η συνολική συνεισφορά φωτοβολταϊκών και γεννήτριας στο σύστημα κατά την διάρκεια του έτους είναι 82,70% και 17,30% αντίστοιχα.
- Κατά τους μήνες Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου, Μαΐου-Ιουνίου και Ιουλίου-Αυγούστου παρατηρείται ποσότητα χαμένης ενέργειας σε ποσοστό 13,82% της συνολικά παραγόμενης από τα φωτοβολταϊκά ενέργειας..

Οι απώλειες του συστήματος εξαρτώνται κάθε φορά από την συνολικά παραγόμενη ενέργεια που απαιτείται για να καλύψει τις ανάγκες αλλά και από το ποσοστό χρήσης της γεννήτριας diesel και των φωτοβολταϊκών αντίστοιχα. Ισχύει και εδώ ότι για περισσότερες μετατροπές ενέργειας εμφανίζονται μεγαλύτερες απώλειες. Για παράδειγμα για τα δίμηνα Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου και Νοεμβρίου-Δεκεμβρίου που έχουν σχεδόν ίδιες τιμές παραγόμενης ενέργειας αλλά διαφορετικά ποσοστά συνεισφοράς σε αυτή από την γεννήτρια diesel, παρατηρείται μεγαλύτερη τιμή απωλειών κατά το δίμηνο Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου (1,92kWh) απ' ότι κατά το δίμηνο Νοεμβρίου-Δεκεμβρίου (1,81kWh). Κατά το πρώτο δίμηνο η συνεισφορά από την γεννήτρια diesel είναι μηδενική οπότε όλο το φορτίο καλύπτεται από μπαταρίες και φωτοβολταϊκά με τις ανάλογες απώλειες ενώ κατά το δεύτερο δίμηνο είναι αρκετά μεγάλη (52,27%) οπότε σημαντικό φορτίο καλύπτεται από αυτή απευθείας με λιγότερες απώλειες μετατροπής από την εκφόρτιση των μπαταριών.

8. Υβριδικό Σύστημα Εργαστηρίου Σ.Η.Ε

Κατά το χρονικό διάστημα εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας εκτός από την εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού πάρκου στην περιοχή της Ραφήνας, υπήρξε παράλληλη εργασία ως προς την ολοκλήρωση του μικροδικτύου στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η πορεία της εγκατάστασης, η οποία ολοκληρώθηκε τον Δεκέμβρη του 2009 όπου και πραγματοποιήθηκε το πείραμα προσομοίωσης. Η εργασία αυτή αφορούσε την επέκταση των δυνατοτήτων του μικροδικτύου σε επίπεδο εξοπλισμού αλλά και δημιουργίας κατάλληλου λογισμικού επικοινωνίας και διαχείρισης του.

8.1 Περιγραφή Μικροδικτύου

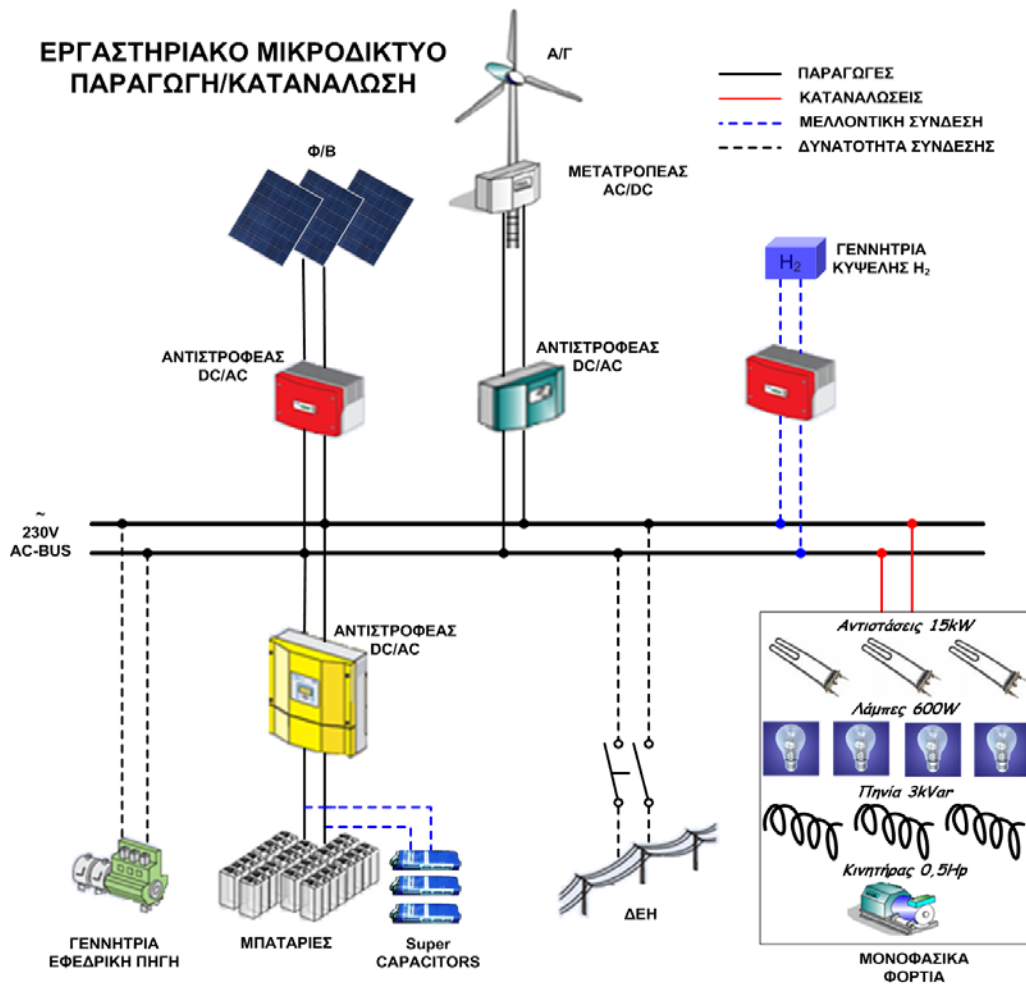
Το εργαστηριακό μικροδίκτυο αποτελείται από μια μονοφασική γραμμή ισχύος πάνω στην οποία συνδέονται όλες οι παραγωγές και οι καταναλώσεις. Συγκεκριμένα από την πλευρά της παραγωγής έχουμε τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και την ανεμογεννήτρια μέσω των κατάλληλων αντιστροφένων, την δυνατότητα σύνδεσης της ΔΕΗ (λαμβάνοντας υπ' όψιν όλες τις απαραίτητες προϋποθέσεις), ενώ σε περίπτωση μελέτης αυτόνομου μικροδικτύου (απουσία δικτύου της ΔΕΗ) υπάρχουν συνδεδεμένες και οι μπαταρίες όπου συνδέονται μέσω του αντίστοιχου μετατροπέα. Στην περίπτωση που μελετάται η λειτουργία αυτόνομου σπιτιού κρίνεται απαραίτητη και η διείσδυση ποσότητας ενέργειας από γεννήτρια diesel (διατήρηση της φόρτισης των μπαταριών, εφεδρεία σε συννεφιά, κρίσιμα φορτία κ.α.). Η γενική άποψη του εργαστηριακού μικροδικτύου φαίνεται στην εικόνα 8.1.



Εικόνα 8.1 : Γενική άποψη εργαστηριακού μικροδικτύου

8.1.1 Διάγραμμα Ισχύος

Το υβριδικό σύστημα που υλοποιήθηκε στον χώρο του εργαστηρίου έχει ως κύριο γνώρισμά του τις παράλληλες πηγές ενέργειας όπου συνεργάζονται για να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια. Στην περίπτωση μας αυτές οι παροχές ενέργειας είναι το δίκτυο της ΔΕΗ τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, η ανεμογεννήτρια και οι μπαταρίες (μέσω αποθήκευσης ενέργειας). Στα επόμενα στάδια επέκτασης των πηγών προβλέπεται η κατάλληλη ενσωμάτωση των super capacitors καθώς και γεννήτριας κυψέλης υδρογόνου. Στο παρακάτω παραστατικό διάγραμμα (εικόνα 8.2) παρουσιάζεται το μικροδίκτυο του εργαστηρίου Σ.Η.Ε. από την πλευρά της παραγωγής (υπάρχουσες και μελλοντικά προβλέψιμες πηγές) και της κατανάλωσης (διάγραμμα ισχύος).



Εικόνα 8.2 : Διάγραμμα ισχύος εργαστηριακού μικροδικτύου

8.1.2 Περιγραφή Εξοπλισμού της Γραμμής Ισχύος

Στην συνέχεια περιγράφονται τα στοιχεία των πηγών ενέργειας και των μετατροπών που υπάρχουν στο εργαστήριο και αφορούν το τμήμα ισχύος του μικροδικτύου. Κατά σειρά αυτά είναι:

- **Φωτοβολταϊκά πλαίσια** της σειράς *isofoton I 110/12*. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα 8.3 υπάρχουν εγκατεστημένα συνολικά 11 πλαίσια σε σειρά (1 string) το καθένα από τα οποία έχει ονομαστικές τιμές ισχύος, ρεύματος και τάσης όπως αυτές αναγράφονται στον πίνακα 8.1. Συνολικά δηλαδή η ονομαστική ισχύς της φωτοβολταϊκής γεννήτριας φτάνει τα 1,21kWp ενώ το ρεύμα της γραμμής αφού είναι συνδεδεμένα σε σειρά είναι 6,6A.



Εικόνα 8.3 : Φωτοβολταϊκά πλαίσια εργαστηριακού μικροδικτύου

Φ/Β πλαίσιο	<i>isofoton I 110/12</i>
P_{nom} (kWp)	110
I_{nom} (A)	6,6
V_{nom} (V)	15

Πίνακας 8.1 : Χαρακτηριστικά μεγέθη φ/β πλαισίων

- **Ανεμογεννήτρια** κατασκευασμένη από ομάδα διπλωματικών φοιτητών που πρόσφατα εγκαταστάθηκε στην ταράτσα του κτηρίου (εικόνα 8.4). Η γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη ονομαστικής ισχύος 1kW παράγει τριφασική εναλλασσόμενη τάση η οποία εισέρχεται στον μετατροπέα AC/DC (*Whisper Link*) και εξέρχεται ως συνεχής. Στην συνέχεια τροφοδοτείται στον αντιστροφέα του μικροδικτύου όπου μετατρέπεται πάλι σε εναλλασσόμενη τάση και τροφοδοτεί τον αντίστοιχο ζυγό.

Απαραίτητη κρίθηκε η εγκατάσταση τριφασικού μετασχηματιστή με λόγο μετασχηματισμού 350/100 ο οποίος παρεμβάλλεται μεταξύ ανεμογεννήτριας και *Whisper Link* ώστε να πολλαπλασιάζεται η παραγόμενη τάση της ανεμογεννήτριας. Η τάση αυτή φτάνει τα επιθυμητά όρια που ορίζονται από την κατώτερη τάση προσαρμογής της ανεμογεννήτριας στον αντιστροφέα και έτσι ξεκινάει η λειτουργία του και μπορεί να συνδεθεί στο μικροδίκτυο.



Εικόνα 8.4 : Ανεμογεννήτρια εργαστηριακού μικροδικτύου

- **Συσσωρευτές** μολύβδου οξέος βαθιάς εκφόρτισης της εταιρίας ΕΡΓΟΝ και της σειράς *Pb Solar OpzS* (εικόνα 8.5). Στο μικροδίκτυο αυτή την στιγμή υπάρχουν 30 μπαταρίες συνδεδεμένες σε σειρά. Έτσι η τάση της συστοιχίας αυτής των μπαταριών φτάνει τα 60V. Οι ονομαστικές τιμές φορτίου και τάσης καθενός στοιχείου αναγράφονται στον πίνακα 8.2.



Συσσωρευτές	<i>Pb Solar OpzS</i>
Q (Ah)	250
V _{nom} (V)	2V

Πίνακας 8.2 : Χαρακτηριστικά μεγέθη φ/β πλαισίων

Εικόνα 8.5 : Συσσωρευτές εργαστηριακού μικροδικτύου

- **Αντιστροφέας** DC/AC διασύνδεσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο μικροδίκτυο. Ο αντιστροφέας είναι της σειράς Sunny Boy 1100E της SMA με μέγιστη ισχύ AC 1100W (εικόνα 8.6). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του περιγράφονται στο παράρτημα Α.2.



Εικόνα 8.6 : Αντιστροφέας DC/AC σύνδεσης φ/β

- **Αντιστροφέας** AC/DC (Whisper Link) και DC/AC διαδοχικά για την διασύνδεση της ανεμογεννήτριας στο μικροδίκτυο (σχήμα 8.7). Ο αντιστροφέας DC/AC είναι της σειράς Windy Boy 1700 της SMA με μέγιστη ισχύ AC 1300W. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του περιγράφονται στο παράρτημα Α.2.



Σχήμα 8.7 : Αντιστροφείς AC/DC και DC/AC για την σύνδεση της Α/Γ

- **Αντιστροφέας** DC/AC για την δημιουργία πηγής τάσης μέσω των συσσωρευτών σε περίπτωση αυτόνομου δικτύου όπου απουσιάζει η ΔΕΗ. Στην περίπτωση αυτή ο αντιστροφέας πραγματοποιεί έλεγχο της τάσης και της συχνότητας εξ' ολοκλήρου ενώ κατά την λειτουργία του σε διασυνδεδεμένο δίκτυο αποτελεί πηγή ρεύματος. Ο αντιστροφέας αυτός είναι της σειράς Sunny Island 4500 της SMA με ονομαστική τιμή ισχύος AC 3,3kW (εικόνα 8.8). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του περιγράφονται στο παράρτημα Α.2.



Σχήμα 8.8 : Αντιστροφέας συσσωρευτών αυτόνομου δικτύου

8.1.3 Περιγραφή φορτίων

Το εργαστηριακό μικροδίκτυο διαθέτει μια σειρά από φορτία με τα οποία μπορούμε να υλοποιήσουμε διαφορετικά προφίλ καταναλώσεως, να προσομοιώσουμε διαφορετικά σενάρια και να διαχειριστούμε κατάλληλα την παραγόμενη ενέργεια. Τα φορτία αυτά παρουσιάζονται στο σχήμα 8.9. Συγκεκριμένα στην εικόνα 8.9α φαίνονται οι εγκατεστημένες λάμπες συνολικής ισχύος 580W (5Χ100 λάμπες πυρακτώσεως και 4Χ20 λαμπτήρες φθορισμού), ένας κινητήρας 0,5HP και 2 ρευματοδότες που έχουμε την δυνατότητα να συνδέσουμε επιπλέον φορτία διαφορετικού συντελεστή ισχύος. Στην εικόνα 8.9β βλέπουμε τα 10 πηνία 280Var το καθένα που χρειαζόμαστε στην περίπτωση προσομοίωσης επαγωγικών φορτίων.



Εικόνα 8.9: Φορτία προσομοίωσης προφίλ καταναλώσεων
(α) μονοφασικός κινητήρας, λάμπες φθορισμού/πυρακτώσεως και 2 ρευματοδότες (β) πηνία

Όλα τα παραπάνω φορτία, τα οποία προϋπήρχαν στο εργαστήριο, δεν ήταν στα επίπεδα εκείνης της ισχύος ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν ορισμένα πειράματα. Έτσι σε περιπτώσεις που θα μελετάμε μεγάλες εκφορτίσεις των μπαταριών ή θα θέλουμε να φτάσουμε στα όρια του τον αντιστροφέα μπαταριών (battery inverter) για να εξάγουμε διαφόρων ειδών συμπεράσματα (απόδοση, ποιότητα ισχύος, χρόνο αποκοπής του δικτύου σε κατάσταση overload κ.α.) είναι κατανοητό ότι χρειαζόμαστε μεγαλύτερα φορτία. Προς την κατεύθυνση αυτή κρίθηκε απαραίτητη η μελέτη, εγκατάσταση και λειτουργία ενός προσομοιωτή μεγάλων φορτίων (load simulator) αποτελούμενο από 15 αντιστάσεις του 1kW η καθεμία.



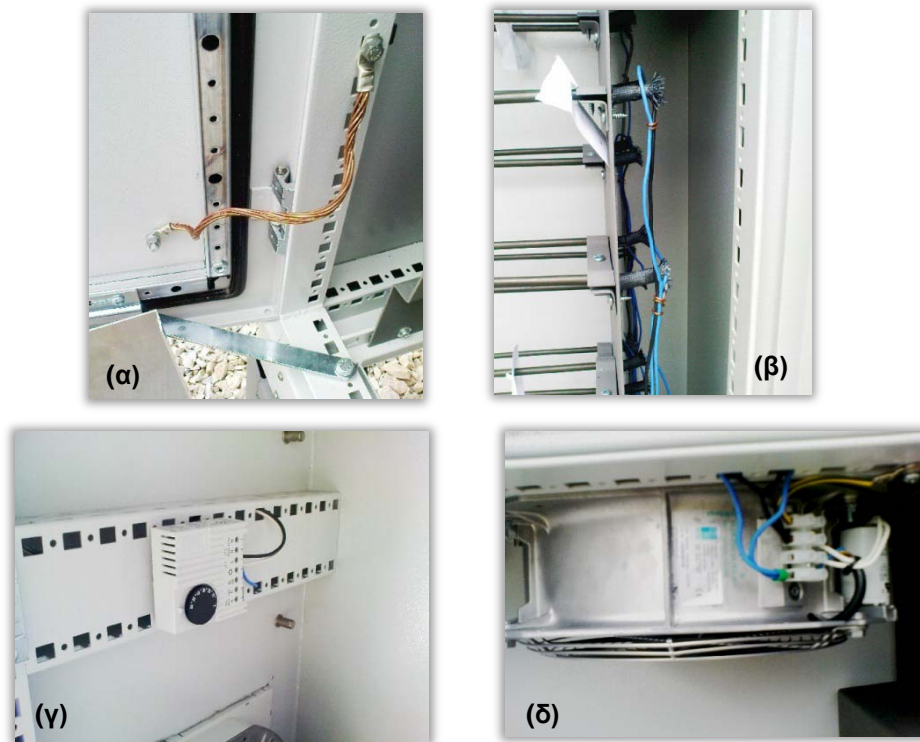
Εικόνα 8.10 : Προσομοιωτής μεγάλων φορτίων

Έτσι τώρα το διαθέσιμο φορτίο του εργαστηριακού μικροδικτύου εκτινάσσεται σε 15kW, γεγονός που καθιστά το εργαστήριο πιο λειτουργικό και πιο αποδοτικό.

Σε γενικές γραμμές η εγκατάσταση του προσομοιωτή φορτίων ήταν μια χρονοβόρα διαδικασία και απαιτούσε αρκετές ώρες συλλογικής ενασχόλησης σε επίπεδο μελέτης, αγοράς και προετοιμασίας όλου του εξοπλισμού για την τελική του διασύνδεση στο μικροδίκτυο. Όλα αυτά σεβόμενοι τις απαραίτητες προδιαγραφές ασφαλείας για την μέγιστη προστασία του προσωπικού και του υφιστάμενου εξοπλισμού. Η τελική μορφή του προσομοιωτή φορτίων παρουσιάζεται στην εικόνα 8.10.

Στην εικόνα φαίνεται το ερμάριο το οποίο τελικά εγκαταστάθηκε στην ταράτσα του κτηρίου λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών που αναπτύσσονται σε αυτό κατά την πλήρη λειτουργία του αλλά και λόγω του αρκετά μεγάλου όγκου που καταλαμβάνει. Το ερμάριο είναι

πλήρως στεγανό ενώ βρίσκεται στερεωμένο με συρματόσχοινα και κατάλληλους κρίκους με στριφόνια πάνω στον τοίχο. Επίσης βρίσκεται πάνω σε μεταλλική υπερυψωμένη βάση που δημιουργεί τις κατάλληλες συνθήκες για τον απαιτούμενο αερισμό του εσωτερικού του. Οι 15 αντιστάσεις είναι στερεωμένες με κατάλληλα στηρίγματα πάνω σε παράλληλες πλάκες που δημιουργούν τον απαραίτητο χώρο στις πλαϊνές πλευρές του για την πραγματοποίηση όλων των ηλεκτρικών συνδέσεων αλλά και για την καλύτερη εποπτεία και συντήρηση του. Οι αντιστάσεις όπως φαίνεται είναι τοποθετημένες παράλληλα μεταξύ τους αλλά και σε διαφορετικό βάθος η μία με την άλλη (εναλλάξ) για την όσο το δυνατόν περισσότερη διευκόλυνση του αερισμού του εσωτερικού χώρου. Οι δύο ανεμιστήρες ισχύος 150W ο καθένας καλούνται να απάγουν την μάζα του αέρα που εισέρχεται από την κάτω πλευρά (είναι κλειστή μόνο με κατάλληλα στερεωμένα σήτα για την προστασία από την είσοδο εξωτερικών παραγόντων) και δημιουργεί έτσι μια κατάλληλη ροή αέρα για την απαραίτητη ψύξη της εγκατάστασης. Οι καλωδιώσεις στο εσωτερικό του προσομοιωτή φορτίων είναι από κατάλληλο πυρίμαχο καλώδιο και γενικά όλες οι συνδέσεις καλύπτονται από πυρίμαχο υλικό για την αποφυγή της καταστροφής των συνδέσεων λόγω της πολύ υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται εκεί. Στις παρακάτω εικόνες 8.11 φαίνονται κάποια βασικά κομμάτια της συνολικής εγκατάστασης.



Εικόνα 8.11 : Τμήματα εγκατάστασης του προσομοιωτή φορτίων
(α) γείωση πάνω στο ερμάριο (β) σύνδεση αντιστάσεων στο τμήμα πίσω από αυτές
(γ) θερμοστάτης χώρου στην οροφή του ερμαρίου (δ) συνδέσεις ανεμιστήρα

8.1.4 Επικοινωνία Εργαστηρίου

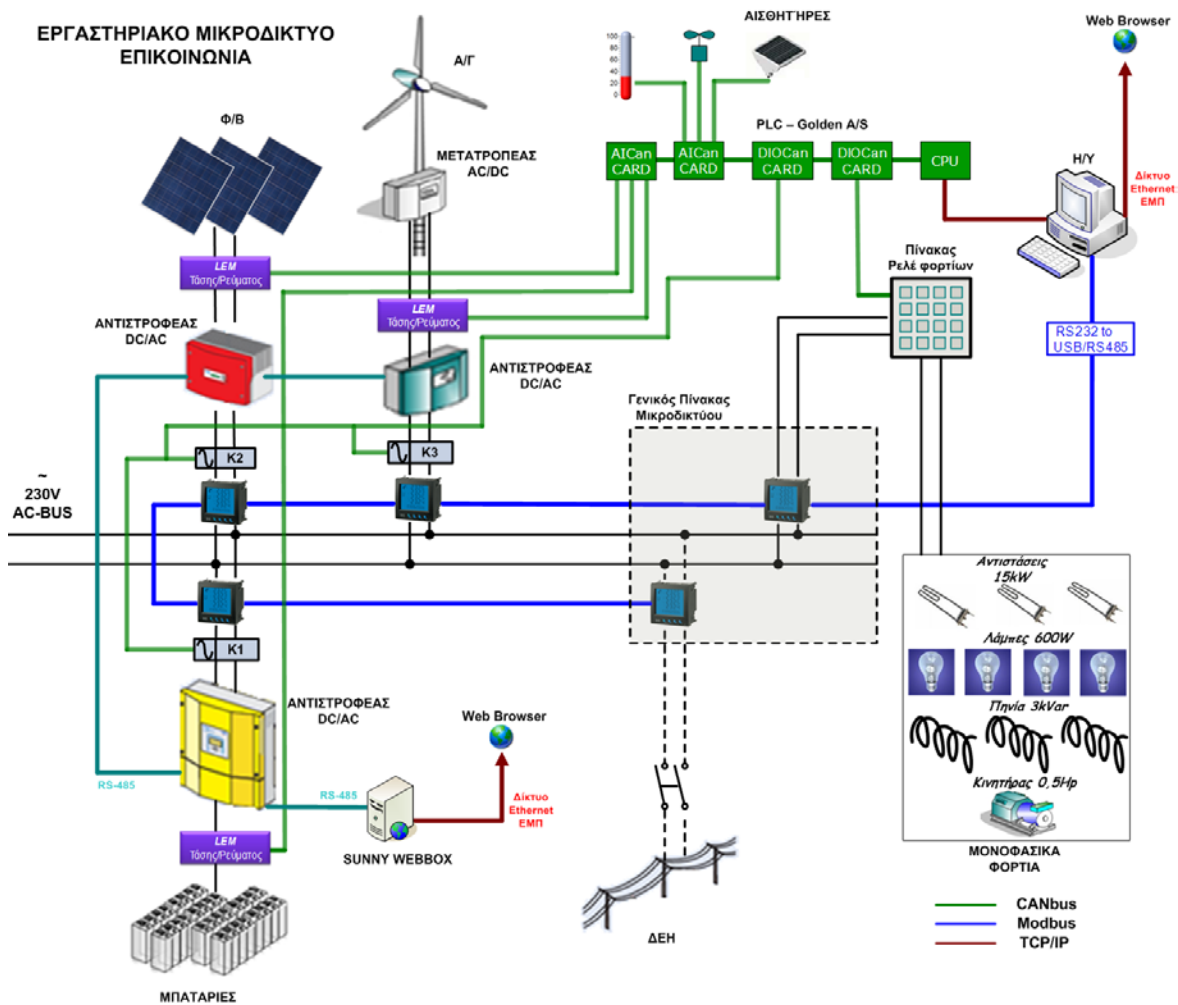
Για την επικοινωνία του εργαστηρίου χρησιμοποιήθηκε το PLC της εταιρίας Golden A/S. [11] Ο προγραμματισμός της κεντρική μονάδας CPU του PLC υλοποιείται μέσω του λογισμικού Codesys. [12] Μέσω αυτού πραγματοποιείται μια αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ της CPU και του Η/Υ δημιουργώντας στην ουσία έναν TCP/Server (από την πλευρά της CPU) και μεταφέροντας

Κεφάλαιο 8 : Υβριδικό Σύστημα Εργαστηρίου Σ.Η.Ε.

όλα τα δεδομένα μέσω δικτύου Ethernet. Ο Η/Υ στην περίπτωση αυτή λειτουργεί ως client και εκτελεί όλες τις αναγκαίες εκείνες εργασίες απεικόνισης και αποθήκευσης των μετρήσεων ενώ ταυτόχρονα έχει και τον πλήρη έλεγχο των φορτίων. Το λογισμικό πάνω στο οποίο υλοποιούνται και αναπτύσσονται όλα αυτά είναι το LabVIEW. [13] Υφίσταται δηλαδή μια αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ χρήστη και συστήματος. Το δίκτυο επικοινωνίας είναι χωρισμένο σε τρία τμήματα καθένα από τα οποία χρησιμοποιεί το κατάλληλο πρωτόκολλο επικοινωνίας. Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται είναι :

- Πρωτόκολλο επικοινωνίας CANbus (CANopen) το οποίο έχει το πλεονέκτημα της συμβατότητας με διαφορετικά είδη PLC ή ακόμα και Inverters [14]
- Πρωτόκολλο επικοινωνίας TCP/IP. Αποτελεί το πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ της CPU του PLC και του υπολογιστή.
- Πρωτόκολλο επικοινωνίας Modbus για τη επικοινωνία των πολυοργάνων MIC

Το διάγραμμα που περιγράφει όλο το δίκτυο επικοινωνίας, λήψης και ελέγχου σε πραγματικό χρόνο των μεγεθών παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 8.12.



Εικόνα 8.12 : Διάγραμμα επικοινωνίας εργαστηριακού μικροδικτύου

Στο παραπάνω διάγραμμα δίνεται η τοπολογία του δικτύου επικοινωνίας το οποίο λαμβάνει χώρα και εξυπηρετεί συγκεκριμένες ανάγκες ως προς την διαχείριση του μικροδικτύου. Συγκεκριμένα βλέπουμε :

1. Την κεντρική μονάδα του PLC, το οποίο μέσω CANbus επικοινωνεί με τις κάρτες (αναλογικές και ψηφιακές) δημιουργώντας έτσι μια αμφίδρομη επικοινωνία λήψης μετρήσεων αλλά και ελέγχου των φορτίων με συγκεκριμένο ρυθμό δειγματοληψίας.
2. Τις αναλογικές κάρτες του PLC (AICan), οι οποίες διαθέτουν 8 κανάλια με την δυνατότητα επιλογής του αναλογικού σήματος μεταξύ των 0-20mA, 4-20mA και 0-10V. Στην παρούσα εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκε η επιλογή 0-20mA.
3. Τις ψηφιακές κάρτες του PLC (DIOCan), οι οποίες διαθέτουν 8 κανάλια εισόδων / εξόδων και χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των φορτίων. Καθεμία κάρτα από τις τέσσερις του πίνακα φορτίων, όπως φαίνεται παρακάτω, ελέγχει και οκτώ ρελέ μέσα από τα οποία περνούν όλες οι γραμμές ισχύος από τον γενικό πίνακα προς τα φορτία. Επιπλέον, μέσω των καρτών αυτών μπορούμε να πραγματοποιήσουμε την διαχείριση όλων των παραγωγών. Αυτό επιτυγχάνεται με την ενεργοποίηση ή όχι κάποιου ρελέ, ανάλογα πάντοτε και με το σχέδιο εφαρμογής που ακολουθείται και τις προϋποθέσεις λειτουργίας που τίθενται.
4. Τα πολυόργανα της DEIF (όμοιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή του φωτοβολταϊκού πάρκου της Ραφήνας), που εκτελούν τις μετρήσεις σε όλο το κομμάτι του AC και μέσω Modbus μεταφέρουν τα δεδομένα αυτά στον Η/Υ.
5. Ο Η/Υ επικοινωνεί με την CPU του PLC μέσω δικτύου Ethernet (συνδέεται στην αντίστοιχη θύρα) και με τα πολυόργανα, μέσω USB μετά τον αντίστοιχο μετατροπέα, ελέγχοντας ουσιαστικά όλο το σύστημα. Μέσω του Η/Υ δηλαδή, λαμβάνουμε τις τιμές από τις αναλογικές κάρτες (AICan) και από τα πολυόργανα ενώ ταυτόχρονα μπορούμε να ελέγξουμε τα φορτία και τις παραγωγές από την μεταβολή των ψηφιακών εισόδων των αντίστοιχων καρτών (DIOCan). Τέλος, από την στατική IP του δικτύου του ΕΜΠ, ο υπολογιστής έχει πρόσβαση στο διαδίκτυο και έτσι μπορούμε να παρακολουθούμε την λειτουργία όλου του συστήματος και να παρεμβαίνουμε όταν το θέλουμε μέσω οποιοδήποτε web browser από οποιοδήποτε σημείο του κόσμου.
6. Επιπλέον συνδέθηκε και η SUNNY WEBBOX της SMA (παράρτημα Α.2) κατευθείαν πάνω στους αντιστροφείς μέσω σύνδεσης RS-485, όπως φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα. Λαμβάνοντας μετρήσεις από την συσκευή αυτή έχουμε την δυνατότητα να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα και να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα.

8.2 Μετρήσεις και Έλεγχος Μικροδικτύου

Οι μετρήσεις που είναι απαραίτητες να λαμβάνονται συνεχώς ως προς την υλοποίηση ενός πλήρως ελεγχόμενου μικροδικτύου είναι οι εξής :

- Μετρήσεις στην μεριά του DC (τάση, ρεύμα)

Για την λήψη μετρήσεων στην μεριά του DC χρησιμοποιούμε μετασχηματιστές ρεύματος και τάσης (LEM). Σύμφωνα με την λειτουργία τους τα LEM μετατρέπουν τις DC τιμές ρεύματος και τάσης σε ρεύμα τάξεως κάποιων mA ή τάσης κάποιων volt. Στην συνέχεια και αφού σχεδιαστεί κατάλληλα το κύκλωμα σύνδεσης των LEM ώστε να τηρείται το όριο της έντασης του ρεύματος που οδηγείται στην αναλογική κάρτα εντός των επιθυμητών ορίων (0-20mA). Αν για κάποιο λόγο (κακή διαστασιολόγηση στοιχείων της πλακέτας) κάποια μέτρηση ξεπεράσει τα 20mA η είσοδος της αναλογικής κάρτας θα καεί. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των LEM που χρησιμοποιήθηκαν και

τα σχέδια σύνδεσης τους στην πλευρά του DC του μικροδικτύου βρίσκονται στο παράρτημα A.2 και B.2.5 αντίστοιχα. Βάσει των τεχνικών προδιαγραφών του κάθε LEM σχεδιάστηκε και διαστασιολογήθηκε το καθένα με σκοπό την βέλτιστη ακρίβεια και τον περιορισμό του ρεύματος εξόδου στα επιθυμητά όρια που καθορίζει η αναλογική κάρτα του PLC.

- Μετρήσεις στην πλευρά του AC (τάση, ρεύμα, ισχύς, συχνότητα κ.α.)

Όλες οι μετρήσεις στην μεριά του AC λαμβάνονται από τα πέντε πολυόργανα που υπάρχουν και είναι κατάλληλα συνδεδεμένα στο μικροδίκτυο. Από τα πέντε πολυόργανα τα τέσσερα αφορούν στις παραγωγές (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτρια, ΔΕΗ και μπαταρίες) και το ένα τα φορτία. Απαραίτητη όπως φαίνεται είναι η χρήση του μετατροπέα RS232 σε RS485 ή USB για την σύνδεση του δικτύου των πολυοργάνων σε θύρα USB του Η/Υ. Η σύνδεση μεταξύ τους γίνεται σε σειρά ενώ για στο τελευταίο της τοπολογίας αυτής συνδέεται και η κατάλληλη τερματική αντίσταση των 120Ω μεταξύ των A, B. Η συνδεσμολογία σύνδεσης του πολυοργάνου των φορτίων και της ΔΕΗ βρίσκονται στο παράρτημα B.2.2. Σε αυτά εκτός των άλλων διακρίνονται και οι κατάλληλοι μετασχηματιστές ρεύματος οι οποίοι υποβιβάζουν το ρεύμα μέτρησης με λόγο 100/5 ώστε να μην καταστραφεί το πολυόργανο. Οι μετασχηματιστές ρεύματος είναι ένας ανά φάση στα πολυόργανα της ΔΕΗ και των φορτίων (με την πρόβλεψη για μελλοντική επέκταση σε τριφασικό δίκτυο) και ένας στον Sunny Island. Συνολικά δηλαδή υπάρχουν επτά μετασχηματιστές έντασης, ένας από τους οποίους φαίνεται στην εικόνα 8.13. Ο λόγος μετασχηματισμού είναι απαραίτητο να εισαχθεί στο πολυόργανο, μέσα από το λογισμικό του, αλλά και στο πρόγραμμα scada του εργαστηρίου που υλοποιήθηκε μέσω LabVIEW ώστε έτσι να έχουμε τις πραγματικές τιμές των ρευμάτων απεικόνισης και αποθήκευσης.



Εικόνα 8.13 : Πολυόργανο φορτίων και μετασχηματιστής έντασης

- Μετρήσεις στους αντιστροφείς μέσω της μονάδας επικοινωνίας SUNNY WEBBOX

Με την μονάδα αυτή (εικόνα 8.14) μπορούμε να έχουμε επιπλέον δυνατότητες όπως είναι η επιτήρηση, η τηλεδιάγνωση, και η αποθήκευση δεδομένων. Όλες οι μετρήσεις DC/AC καθώς και του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών (για τον Sunny Island - SOC) μπορούν να απεικονίζονται και να αποθηκεύονται σε αρχεία CLV ή XLS. Έτσι στην συνέχεια έχουμε την δυνατότητα για περαιτέρω επεξεργασία τους μέσω του MS Excel, την σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες τιμές που μας δίνουν τα πολυόργανα και τα LEM κ.α. Μια χρήσιμη ακόμη λειτουργία που εκμεταλλευτήκαμε μέσω της μονάδας αυτής ήταν η παραμετροποίηση του Sunny Island που χρειάστηκε να γίνει. Έτσι σύμφωνα με την λειτουργία που επιθυμούσαμε να έχουμε αλλάζαμε κάθε φορά το προφίλ λειτουργίας του. Συγκεκριμένα, για να είναι εφικτή η σύνδεση του αντιστροφέα με το δίκτυο της ΔΕΗ για την φόρτιση των μπαταριών, ήταν απαραίτητη η ενεργοποίηση του αντίστοιχου ρελέ συγχρονισμού (K6) των δύο πηγών που διαθέτει ο Sunny Island για τον σκοπό αυτό. Την δυνατότητα αυτή μας την παρέιχε το SUNNY WEBBOX.

Στην μονάδα επικοινωνίας έχει δοθεί η IP 147.102.30.65 και μέσω του δικτυακού διακομιστή που υπάρχει ενσωματωμένος, μπορούμε να συνδεθούμε online και απευθείας από οποιοδήποτε υπολογιστή. Το μόνο που χρειάζεται είναι η χρήση κάποιου web Browser και με την πληκτρολόγηση της διεύθυνσης <http://147.102.30.65/> έχουμε πρόσβαση στο μικροδίκτυο μας. Τέλος με την χρήση της επιλογής που παρέχει αυτομάτως ο SUNNY WEBBOX έγινε εγγραφή της εγκατάστασης του μικροδικτύου με το όνομα Microgridntua στο διαδικτυακό τόπο μέσω του Sunny Portal που προσφέρει η SMA. Κατά την είσοδο σε αυτή την εφαρμογή υπάρχει η δυνατότητα γραφικής απεικόνισης των δεδομένων μέτρησης και των ενεργειακών αποδόσεων, η στατιστική καταγραφή αυτών καθώς και η πρόβλεψη παραγωγής, οικονομικών στοιχείων και ποσότητας αποφυγής έκλυσης CO₂ στην ατμόσφαιρα.

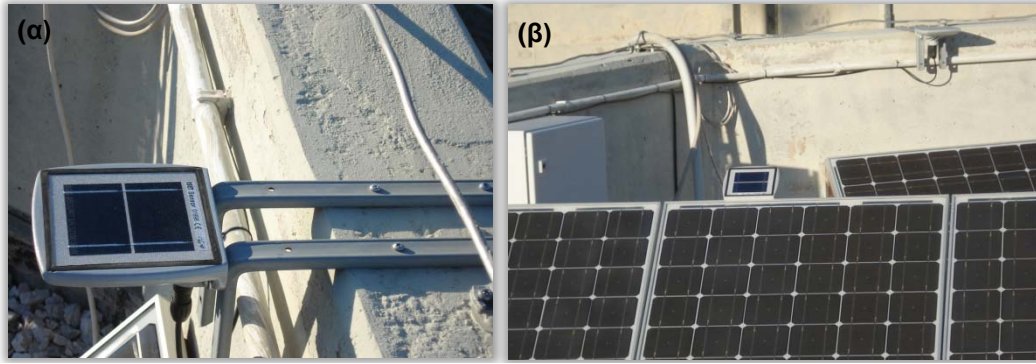
Από όλες τις δυνατότητες που μας προσφέρει η μονάδα επικοινωνίας στην εφαρμογή που θα αναλυθεί παρακάτω, άμεσα χρησιμοποιήσαμε τον δείκτη SOC για το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών ενώ παραθέτονται και κάποια συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ των αποτελεσμάτων που μας δίνει η WEBBOX και τα αντίστοιχα μετρητικά όργανα του μικροδικτύου για τους βαθμούς απόδοσης των αντιστροφών κ.α.



Εικόνα 8.14: Κεντρική μονάδα επικοινωνίας SUNNY WEBBOX

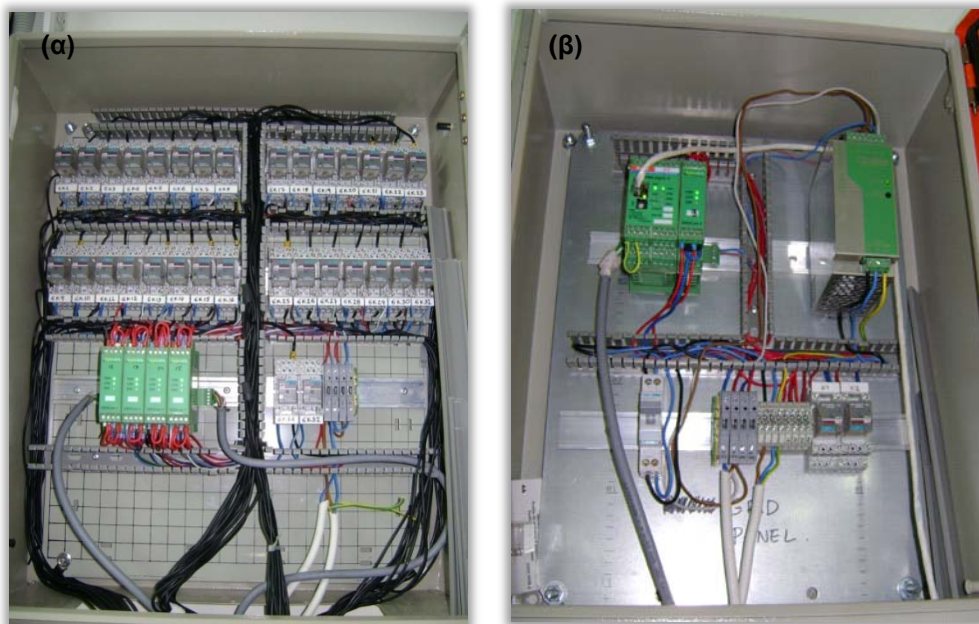
- Μετρήσεις ηλιοφάνειας και θερμοκρασίας

Συγκεκριμένα μέσω των αναλογικών καρτών λαμβάνουμε, εκτός των μετρήσεων από το DC κομμάτι του μικροδικτύου, και μετρήσεις από τα αισθητήρια όργανα τα οποία βρίσκονται εγκατεστημένα στην ταράτσα του κτηρίου και μας ενημερώνουν για τις μετεωρολογικές συνθήκες (θερμοκρασία – ηλιοφάνεια – ταχύτητα ανέμου). Σημειώνουμε ότι υπάρχουν δύο συνδεδεμένοι αισθητήρες ISET (εικόνα 8.15) για την επαλήθευση του μοντέλου του HDKR. Ο ένας βρίσκεται σε οριζόντιο επίπεδο και ο δεύτερος με την κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Οι αισθητήρες ηλιοφάνειας συνδέονται όπως φαίνεται στην συνδεσμολογία του σχήματος στο παράρτημα Β.2.5. Κάθε αισθητήρας μετράει την ακτινοβολία μέσω αναλογικού σήματος 0-100mV. Το σήμα αυτό οδηγείται σε μετατροπέα της AS έτσι ώστε στην έξοδό του να λαμβάνουμε αναλογικό σήμα 0-20mA το οποίο στην συνέχεια να οδηγηθεί στην αναλογική κάρτα AICan. Επιπλέον, ο κάθε αισθητήρας δίνει και την θερμοκρασία μέσω μεταβλητής αντίστασης R την οποία και αυτή μετατρέπουμε μέσω κατάλληλου μετατροπέα (ABB/Pt1000) ξανά σε αναλογικό σήμα 0-20mA όπου συνδέεται σε μία δεύτερη αναλογική είσοδο της κάρτας. Εκτός από την πληροφορία για την θερμοκρασία που έχουμε, η μέτρηση αυτή χρειάζεται και για τον σωστό υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας. Από μια τιμή θερμοκρασίας και άνω αλλάζει η σχέση υπολογισμού. Ο αισθητήρας μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου δεν έχει τοποθετηθεί ακόμα.



Σχήμα 8.15 : Αισθητήρες ηλιοφάνειας ISET εργαστηριακού μικροδικτύου
(α) οριζόντιο επίπεδο (β) κλίση φ/β πλαισίων (στο βάθος φαίνεται και ο δεύτερος αισθητήρας)

Τέλος, για τον έλεγχο των φορτίων του μικροδικτύου και την δυνατότητα δημιουργίας ενός πλήρως αυτοματοποιημένου συστήματος μέσω της επίτευξης μιας αμφίδρομης επικοινωνίας χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχες κάρτες του PLC με τις ψηφιακές εισόδους/εξόδους (DIOCan). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο πίνακας ελέγχου των φορτίων με τις ψηφιακές κάρτες DIOCan και ο πίνακας με την κεντρική μονάδα του PLC μαζί με το τροφοδοτικό της. Στον πίνακα της εικόνας 8.16β φαίνεται και η σύνδεση στην θύρα Ethernet του PLC με την αντίστοιχη θύρα του υπολογιστή. Το καλώδιο σύνδεσης πρέπει να είναι cross over (ανεστραμμένο).



Σχήμα 8.16 : Πίνακες αυτοματισμού του μικροδικτύου
(α) πίνακας ελέγχου φορτίων - κάρτες DIOCan (β) πίνακας PLC - τροφοδοτικού

8.3 Ηλεκτρική Εγκατάσταση - Μέσα Προστασίας

Πολύ σημαντικός παράγοντας για την δημιουργία μιας ολοκληρωμένης εγκατάστασης αποτελεί η ορθή διαστασιολόγηση του συστήματος και τα μέσα προστασίας που χρησιμοποιούνται σε αυτήν. Βασικό μέλημά μας για κάθε ηλεκτρική εγκατάσταση θα πρέπει εκτός των άλλων κατά πρώτο ρόλο να είναι η προστασία του χειριστή και κατά δεύτερο του εξοπλισμού. Στο παράρτημα Β.1 αναφέρονται όλες εκείνες οι πληροφορίες που χρειάζονται για

την ορθή επιλογή των υλικών που εγκαταστάθηκαν στο εργαστήριο βάσει όλων των απαραίτητων προδιαγραφών. Επιπλέον, σημειώνεται ότι αν και στην παρούσα φάση το μικροδίκτυο λειτουργεί με μονοφασική παροχή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έχει προβλεφθεί η μετατροπή του στο μέλλον σε τριφασικό. Ως προς αυτό υπάρχει η ανάλογη πρόβλεψη στον γενικό πίνακα κατά την διαστασιολόγηση των διατομών, των ασφαλειών, του διακόπτη διαφυγής έντασης και του μπαροκιβώτιου όπου ενώνονται όλες οι παραγωγές. Το ηλεκτρολογικό σχέδιο του γενικού πίνακα φαίνεται στο παράρτημα Β.2.3. Στο σχέδιο αναφέρονται οι διατομές των καλωδίων και οι ονομαστικές τιμές των ασφαλειών για κάθε μια από τις 24 διαφορετικές γραμμές που τροφοδοτούν τα αντίστοιχα φορτία που αναγράφονται. Ο πίνακας αν και είναι τριφασικός στην παρούσα φάση λειτουργεί με την μονοφασική παροχή του υφιστάμενου μικροδικτύου.

Συνοπτικά αναφέρονται τα μέσα προστασίας που έχουν ληφθεί σε όλη την εγκατάσταση του εργαστηριακού μικροδικτύου :



Εικόνα 8.17: Γενικός πίνακας μικροδικτύου

- Με την χρήση κατάλληλου αυτοματισμού που υλοποιείται με ρελέ ισχύος (της εταιρίας ABB) πετυχαίνουμε τον έλεγχο της διασύνδεσης ή όχι του battery inverter στο μικροδίκτυο. Μέσα από τον έλεγχο της ψηφιακής εξόδου της DIOCan ενεργοποιείται το αντίστοιχο ηλεκτρονικό ρελέ που με την σειρά του ενεργοποιεί δεύτερο ρελέ ισχύος το οποίο μπορεί να οδηγήσει το μέγιστο ρεύμα του αντιστροφέα στον ζυγό. Έτσι μπορούμε στην συνέχεια να ελέγξουμε μέσα από το πρόγραμμα διαχείρισης του μικροδικτύου το πότε θα μπορεί να εισέλθει εντός του δικτύου ο αντιστροφέας. Για παράδειγμα είναι εφικτή και εύκολα υλοποιήσιμη η απαγόρευση της ταυτόχρονης σύνδεσης του δικτύου της ΔΕΗ και του battery inverter εφόσον προηγουμένως δεν έχει ρυθμιστεί αυτός για μια τέτοια σύνδεση (φόρτιση μπαταριών από ΔΕΗ). Στο παράρτημα Β.2.4, σχήμα Β.5 παρουσιάζεται το κύκλωμα ελέγχου της διασύνδεσης αυτής.

- Για την προστασία της εγκατάστασης του προσομοιωτή φορτίου των 15kW από υπερθέρμανση χρησιμοποιείται αυτοματισμός του οποίου το βοηθητικό και το κύκλωμα ισχύος φαίνονται στο παράρτημα Β.2.4, σχήμα Β.6. Σύμφωνα με αυτό υπάρχει θερμοστάτης μέσα στο ερμάριο του προσομοιωτή ο οποίος έχει ρυθμιστεί στους 60°C διακόπτοντας την λειτουργία του όταν η θερμοκρασία στο εσωτερικό υπερβεί το όριο αυτό. Επιπλέον μέσω ρελέ ελέγχεται η λειτουργία ή όχι του κυκλώματος ισχύος που τροφοδοτεί τις αντιστάσεις. Προϋπόθεση για να τροφοδοτηθούν οι αντιστάσεις είναι να έχουν ενεργοποιηθεί πρώτα οι ανεμιστήρες (ενεργοποιούνται μέσω διακόπτη από τον κεντρικό πίνακα).

Απαγορεύεται λοιπόν σε κάθε περίπτωση :

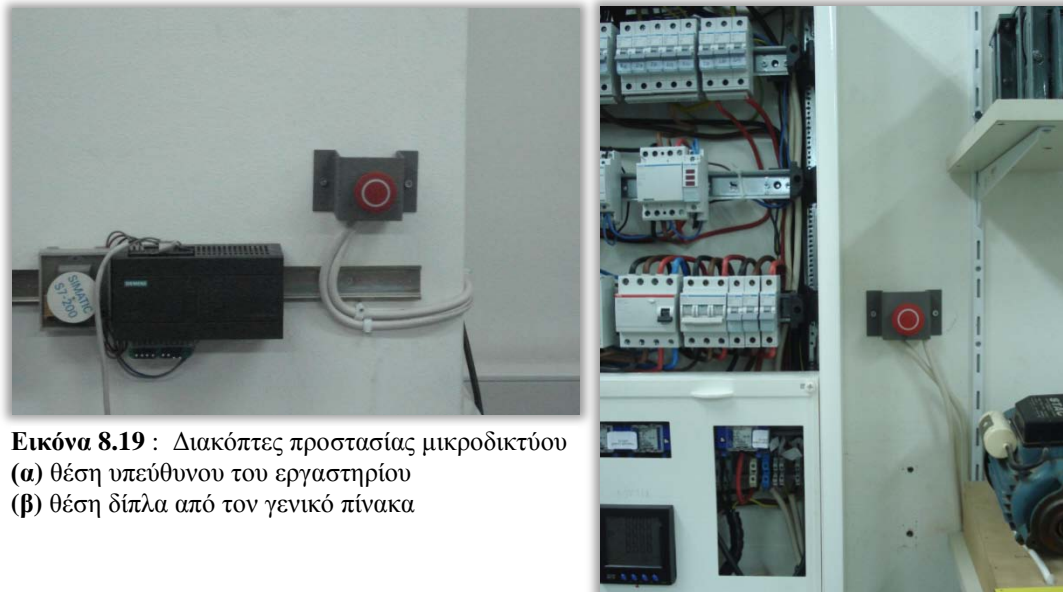
- i) η λειτουργία του προσομοιωτή φορτίου χωρίς την ταυτόχρονη λειτουργία των ανεμιστήρων
- ii) η λειτουργία του προσομοιωτή φορτίου μετά την υπέρβαση ενός ρυθμιζόμενου ορίου θερμοκρασίας στον θερμοστάτη

Στην παρακάτω εικόνα 8.18 φαίνονται ο θερμοστάτης και ο διακόπτης χειρισμού των ανεμιστήρων που βρίσκεται στον γενικό πίνακα του μικροδικτύου.



Εικόνα 8.18: (α) διακόπτης χειρισμού των ανεμιστήρων
(β) θερμοστάτης στο ερμάριο του προσομοιωτή φορτίου

- Για την προστασία των φοιτητών, που κατά κύριο λόγο θα χειριστούν το μικροδίκτυο, προβλέπεται και έχει εγκατασταθεί αυτοματισμός ακαριαίας διακοπής της τάσης του μικροδικτύου με το πάτημα δύο μπουτόν κινδύνου (ή μανιτάρια όπως αλλιώς ονομάζονται) τα οποία υπάρχουν σε καίρια σημεία μέσα στο εργαστήριο. Η τάση, είτε αυτή προέρχεται από το δίκτυο της ΔΕΗ είτε από το δίκτυο που φτιάχνει ο battery inverter. Στην περίπτωση χρήσης του μικροδικτύου ως αυτόνομο, θα διακοπεί αυτομάτως με το πάτημα του μπουτόν προστατεύοντας έτσι οποιονδήποτε εκτελεί κάποια εργασία και κινδυνεύει από ηλεκτροπληξία. Τα μανιτάρια αυτά όπως φαίνονται και στην παρακάτω εικόνα 8.19 είναι εγκατεστημένα το ένα στην θέση του υπευθύνου του εργαστηρίου και το άλλο ακριβώς δίπλα στον γενικό πίνακα του μικροδικτύου σε εμφανές και εύκολα προσβάσιμο σημείο. Η χρήση των διακοπών αυτών αφορά κυρίως στην πλευρά της παραγωγής και προστατεύεται έτσι το προσωπικό και ο εξοπλισμός σε περίπτωση σφάλματος (παράρτημα Β.2.4, σχήμα Β.7). Από την πλευρά των φορτίων υπάρχει επιπλέον και ο διακόπτης διαρροής έντασης (ΔΔΕ) ο οποίος ελέγχει και διακόπτει αμέσως οποιαδήποτε διαρροή έντασης ρεύματος διαπιστώσει προς γη ή ουδέτερο.



Εικόνα 8.19 : Διακόπτες προστασίας μικροδικτύου
(α) θέση υπεύθυνου του εργαστηρίου
(β) θέση δίπλα από τον γενικό πίνακα

8.4 Εφαρμογές – Προοπτικές Εργαστηριακού Μικροδικτύου

Μερικές από τις εφαρμογές που μπορεί να πραγματοποιηθούν μέσω του ολοκληρωμένου, πλέον μικροδικτύου είναι οι εξής :

1. Εκτίμηση της απόδοσης του συστήματος αλλά και των επιμέρους τμημάτων αυτού μέσω των μετρήσεων που λαμβάνονται τόσο στο κομμάτι του DC και του AC όσο και σε μετρήσεις ηλιοφάνειας, αέρα, θερμοκρασίας κ.α.
2. Έλεγχος και διαχείριση των φορτίων με τρόπο βέλτιστο ώστε να εξασφαλίζεται η εν γένει λειτουργία του συστήματος αποφεύγοντας πιθανό black-out.
3. Έλεγχος και διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας με κριτήρια οικονομικά (χρηματιστήριο ενέργειας) αλλά και διασφάλισης της εξυπηρέτησης των καταναλώσεων κάτω από οποιαδήποτε «ειδική» συνθήκη ή σενάριο μπορεί να προκύψει.
4. Προσομοίωση σε πραγματικό χρόνο του προφίλ καταναλώσεων οποιασδήποτε κατοικίας με δυνατότητα αυτονομίας από το δίκτυο της ΔΕΗ και ταυτόχρονη βέλτιστη διαχείριση των μπαταριών για μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής των.
5. Δυνατότητα μετατροπής σε «έξυπνο» σπίτι μέσω διαχείρισης των καταναλώσεων λαμβάνοντας υπόψη σε πραγματικό χρόνο τις μετρήσεις που αφορούν την ηλιοφάνεια, την θερμοκρασία ή ενδεχομένως και την τρέχουσα τιμή της ενέργειας ανά kWh, η οποία θα ενημερώνεται από το διαδίκτυο, επιλέγοντας έτσι την περαιτέρω παραμετροποίηση του συστήματος.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει αξιοποίηση του μικροδικτύου και θα εκτελεστεί πείραμα προσομοίωσης οικιακού φορτίου το οποίο θα καλυφθεί από μπαταρίες και φωτοβολταϊκά για το διάστημα ενός πλήρους εικοσιτετραώρου. Το πείραμα αυτό αποτελεί μια από τις πολλές δυνατότητες που μας δίνει ένα τέτοιο εργαστήριο. Η χρησιμότητα του εργαστηριακού μικροδικτύου καθώς και κάθε τέτοιου υβριδικού συστήματος είναι πολύ μεγάλη καθώς μπορούμε να πετύχουμε τα εξής :

- Συνδυασμό διαφορετικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη των φορτίων. Επιπλέον υπάρχει και η δυνατότητα διείσδυσης ενέργειας από γεννήτρια diesel που συνδέεται στον Sunny Island και αποτελεί εφεδρεία σε περίπτωση που δεν αρκούν τα αποθέματα ενέργειας από ΑΠΕ και που οι μπαταρίες έχουν εκφορτιστεί επικίνδυνα
- Μεγάλα περιβαλλοντικά οφέλη με μηδενισμό των εκπομπών CO₂ και ταυτόχρονη εκμετάλλευση της άφθονης πρώτης ύλης που προέρχεται από την φύση όπως είναι ο ήλιος και ο αέρας
- Το κόστος είναι εύκολα προβλέψιμο και ανεξάρτητο από τις διακυμάνσεις στις τιμές των συμβατικών καυσίμων. Προσοχή κατά την διαστασιολόγηση και την εν γένει χρήση των μπαταριών πρέπει να υπάρχει όταν το σύστημα είναι αυτόνομο. Οι τιμές των μπαταριών παίζουν σημαντικό ρόλο και είναι εύκολο να αυξηθούν το κόστος της εγκατάστασης αν και εφόσον δεν έχει προβλεφθεί μια ορθολογική χρήση τους. Οι πολλές βαθιές εκφορτίσεις, συρρικνώνουν τον χρόνο ζωής τους με αποτέλεσμα να μεγιστοποιείται το αρχικό κόστος με μια πιθανή πρόωρη αντικατάστασή τους.

Στο εγγύς μέλλον το *εργαστηριακό μικροδίκτυο* μπορεί να αναβαθμιστεί αυξάνοντας την παραγόμενη ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές και αξιοποιώντας άμεσα όλα τα εγκατεστημένα φορτία. Προϋπόθεση της ήδη υπάρχουσας εγκατάστασης ήταν η ικανότητα επέκτασης του συστήματος σε τριφασικό και η δυνατότητα άμεσης τροφοδότησης πολύ μεγαλύτερων φορτίων απ' ό,τι τώρα μπορεί. Όπως προαναφέρθηκε, όλη η διαστασιολόγηση του διακοπτικού υλικού,

των ασφαλειών και των διατομών των καλωδίων είχε σκοπό την γρήγορη και χωρίς επιπλέον έξοδα μετατροπή του σε τριφασικό. Έτσι τα επόμενα σχέδια ολοκλήρωσης του εργαστηριακού μικροδικτύου είναι :

1. Μετατροπή από μονοφασικό σε τριφασικό σύστημα. Αυτή την στιγμή υπάρχουν ήδη στο εργαστήριο άλλοι δύο αντιστροφείς από την SMA (νέας σειράς) και επιπλέον συσσωρευτές που μπορούν να προσαρμοστούν εύκολα στο υπάρχων σύστημα.
2. Αντίστοιχη αύξηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Προβλέπεται εγκατάσταση και άλλων συστοιχιών φωτοβολταϊκών πλαισίων ενώ υπάρχει και η γεννήτρια κυψέλων υδρογόνου που μπορεί να εισέλθει με κατάλληλο αντιστροφέα στον κεντρικό ζυγό παραγωγής.
3. Εγκατάσταση των Super capacitors που υπάρχουν ήδη στο εργαστήριο και αποσκοπούν στην αύξηση της αποθηκευμένης ενέργειας σε συνδυασμό με τις μπαταρίες που ήδη υπάρχουν.
4. Δυνατότητα μετατροπής του εργαστηριακού μικροδικτύου σε εργαστήριο δοκιμών αντιστροφέν βάση του DERLAB. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να συνδεθεί και κατάλληλος Power analyzer (σε συνδυασμό αντίστοιχων μετασχηματιστών ρεύματος) μεγάλης ακρίβειας και 8 ταυτόχρονων καναλιών μέτρησης για να μπορεί να μετράει σε πραγματικό χρόνο και να αποθηκεύει ταυτόχρονα στην AC και DC πλευρά οποιοδήποτε αντιστροφέα ακόμη και τριφασικού.

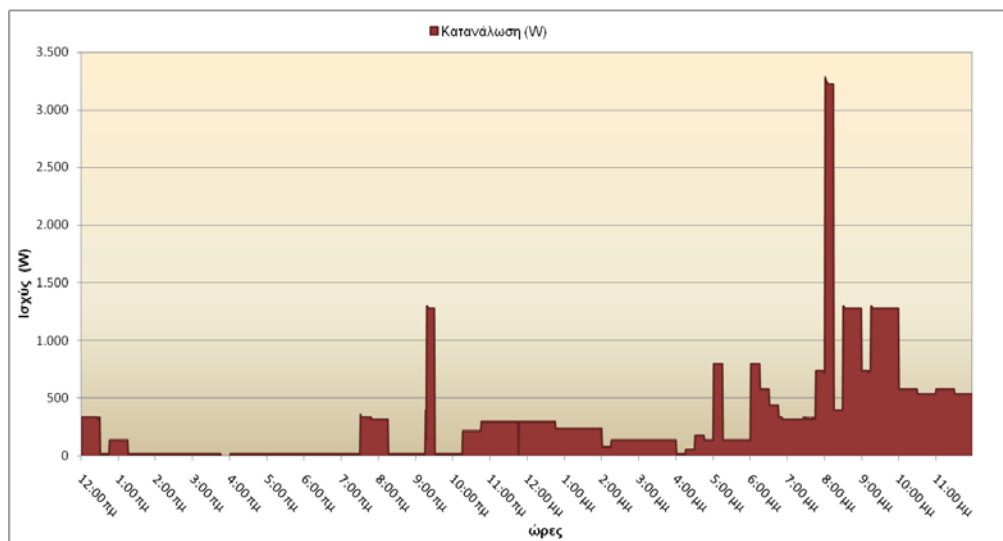
9. Ανάλυση Στρατηγικής Ενεργειακής Διαχείρισης Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

Η ανάλυση της στρατηγικής που θα μας καθορίσει την τελική απόφαση διαστασιολόγησης του συστήματος μας περιγράφεται στην συνέχεια. Το πειραματικό μέρος έχει ως σκοπό κυρίως στην αξιολόγηση των επιμέρους τμημάτων του μικροδικτύου σε ότι αφορά την ενεργειακή τους απόδοση και τις απώλειες που παρουσιάζονται σε αυτά. Η παρατήρηση και καταγραφή των απωλειών του συστήματος, ιδίως σε ότι έχει να κάνει με τον battery inverter που αποτελεί και την πηγή τάσης του αυτόνομου συστήματος. Πρωτίστης σημασίας είναι η παρατήρηση της δυναμικής συμπεριφοράς των μπαταριών κατά την διάρκεια της μέρας γεγονός που θα μας επαληθεύσει ή όχι τη θεωρητική πρόβλεψη που πραγματοποιείται. Τέλος, διαπιστώνονται συγκριτικές διαφορές των μετρήσεων που έγιναν με την βοήθεια των μετρητικών οργάνων του εργαστηρίου και αυτών που μας δίνει η SUNNY WEBBOX της SMA.

9.1 Περιγραφή Πειραματικής Διαδικασίας

Η ημέρα διεξαγωγής του πειράματος ήταν στις 18 Δεκεμβρίου 2009 με μοναδικό κριτήριο την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ηλιακή ακτινοβολία. Το πείραμα αφορούσε ένα πλήρες εικοσιτετράωρο το οποίο ξεκίνησε τα μεσάνυχτα στις 12:00 πμ (18/12/2009) και ολοκληρώθηκε στις 12:00 πμ (19/12/2009). Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή του σεναρίου μέσω αυτοματοποιημένου ελέγχου των φορτίων, της λήψης και αποθήκευσης όλων των μετρήσεων σε αρχείο XLS ανά ένα λεπτό ήταν το LabVIEW. Η αντίστοιχη καταγραφή και αποθήκευση των μετρήσεων από την WEBBOX γίνεται ανά πέντε λεπτά (μέση τιμή). Μέσω κατάλληλου προγράμματος το LabVIEW επιτυγχάνει επικοινωνία με όλα τα μετρητικά όργανα και αισθητήρες καθώς και την CPU του PLC με την οποία δημιουργείται αμφίδρομη σύνδεση για την μεταφορά δεδομένων. Τα πρωτόκολλα και η ακριβής διαδικασία όλου του δικτύου επικοινωνίας έχουν αναπτυχθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο ενώ ο εμπρόσθιος πίνακας (front panel) του προγράμματος προσομοίωσης για την διαχείριση των φορτίων την λήψη και αποθήκευση των μετρήσεων παρουσιάζεται στο παράρτημα Γ.3.1 και Γ.3.2.

Το προφίλ που εφαρμόστηκε τελικά απεικονίζεται στην εικόνα 9.1.



Εικόνα 9.1: Προφίλ κατανάλωσης του πειράματος

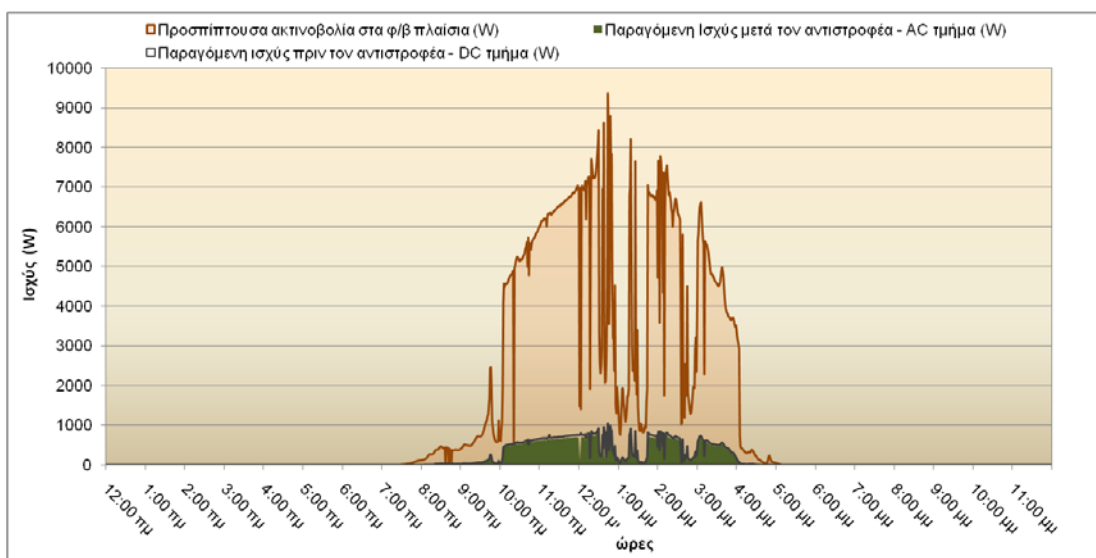
Αν και κατά κάποιο συντελεστή μικρότερο ήταν ανάλογο με αυτό του υπό μελέτη για αυτονόμηση σπιτιού. Η συνολική τιμή του για το διάστημα μιας μέρας ήταν 7,314kWh. Τέλος, η ονομαστική τιμή ισχύος του Sunny Island των 3,3kW μας οδήγησε στην προσαρμογή του προφίλ κατανάλωσης για ένα τέταρτο της ώρας στα επίπεδα αυτά, ώστε να διαπιστωθεί η εν γένει συμπεριφορά του inverter στην ονομαστική του περιοχή λειτουργίας.

9.2 Ενεργειακή Απόδοση του Συστήματος

Για την αξιολόγηση κάθε συστήματος είναι απαραίτητη η εξαγωγή του συντελεστή απόδοσης για κάθε ένα τμήμα του εξοπλισμού του ώστε να προκύψουν τα όποια πιθανά προβλήματα κακής διαστασιολόγησης ή εγκατάστασης του. Μετά την πραγματοποίηση του πειράματος υπάρχει η δυνατότητα να εκτιμηθεί εκτός των άλλων η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, του αντιστροφέα Sunny Boy 1100E και του αντιστροφέα Sunny Island 4500. Κατά σειρά οι αποδόσεις αυτές φαίνονται παρακάτω:

- Απόδοση φωτοβολταϊκών πλαισίων / Sunny Boy 1100E / Φ/Β Συστήματος

Για τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ο βαθμός απόδοσης εκφράζεται ως το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Στην σημερινή εποχή ο τυπικός βαθμός απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου βρίσκεται στο 13 – 15% και ειδικά για τα πλαίσια μονοκρυσταλλικής τεχνολογίας που αφορούν την εγκατάσταση μας ο βαθμός απόδοσης προσεγγίζει τις μεγαλύτερες τιμές του. Βεβαίως, συγκρινόμενος με την απόδοση άλλου συστήματος (συμβατικού, αιολικού, υδροηλεκτρικού κλπ.), παραμένει ακόμη αρκετά χαμηλός. Ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης του Sunny Boy 1100E προκύπτει από το κλάσμα παραγόμενης ισχύος στην AC πλευρά δια την αντίστοιχη ισχύ στο κομμάτι του DC. Στο παρακάτω διάγραμμα ισχύος (εικόνα 9.2) κατά την διάρκεια της μέρας φαίνεται η προσπίπτουσα από τον ήλιο ακτινοβολία στα 9,42m² της σειράς των 11 πλαισίων και η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς πριν και μετά τον αντιστροφέα.



Εικόνα 9.2: Προσπίπτουσα ακτινοβολία και παραγόμενη ενέργεια πριν και μετά τον αντιστροφέα

Οι σχέσεις 9.1, 9.2 και 9.3 μας προσδίδουν τους βαθμούς απόδοσης φωτοβολταϊκών πλαισίων, Sunny Boy 1100E καθώς και του συνολικού φωτοβολταϊκού συστήματος.

$$n_{PV_array} = \frac{P_{PV_array,DC}}{P_{solar}} \cdot 100\% \quad (9.1)$$

$$n_{SB} = \frac{P_{SB,AC}}{P_{SB,DC}} \cdot 100\% \quad (9.2)$$

$$n_{PV_system} = \frac{P_{SB,AC}}{P_{solar}} \cdot 100\% \quad (9.3)$$

Στον παρακάτω πίνακα 9.1 αναγράφονται η μέση και η μέγιστη τιμή των αποδόσεων που καταγράφονται κατά την διάρκεια της μέρας.

<i>Ενεργειακή απόδοση του φ/β συστήματος</i>		
<i>Βαθμός Απόδοσης (%)</i>	<i>Μέση τιμή</i>	<i>Μέγιστη Τιμή</i>
Sunny Boy 1100E	88,1	98,85
φ/β πλαίσια	9	12,06
Σύστημα φ/β πλαισίων - SB 1100E	7,93	11,20

Πίνακας 9.1: Απόδοση φ/β συστήματος

Σημειώνεται εδώ ότι η απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων που προκύπτει από τα μετρητικά όργανα του μικροδικτύου εμπεριέχει και τις απώλειες καλωδίων μιας και τα LEM τα οποία μετράνε τις DC τιμές βρίσκονται ακριβώς πριν τον αντιστροφέα. Για να έχουμε ακριβή βαθμό απόδοσης της συστοιχίας των πλαισίων μόνο, θα χρειαστούμε αντίστοιχες μετρήσεις σε σημείο ακριβώς μετά από αυτά. Για τον λόγο αυτό υπολογίστηκαν οι απώλειες καλωδίου από την τάρατσα μέχρι το σημείο μέτρησης και συνυπολογίστηκε στην τελική τιμή. Η αντίσταση του αγωγού δίνεται από την σχέση 9.4.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (9.4)$$

όπου: ρ η ειδική αντίσταση του Cu

l το μήκος του καλωδίου

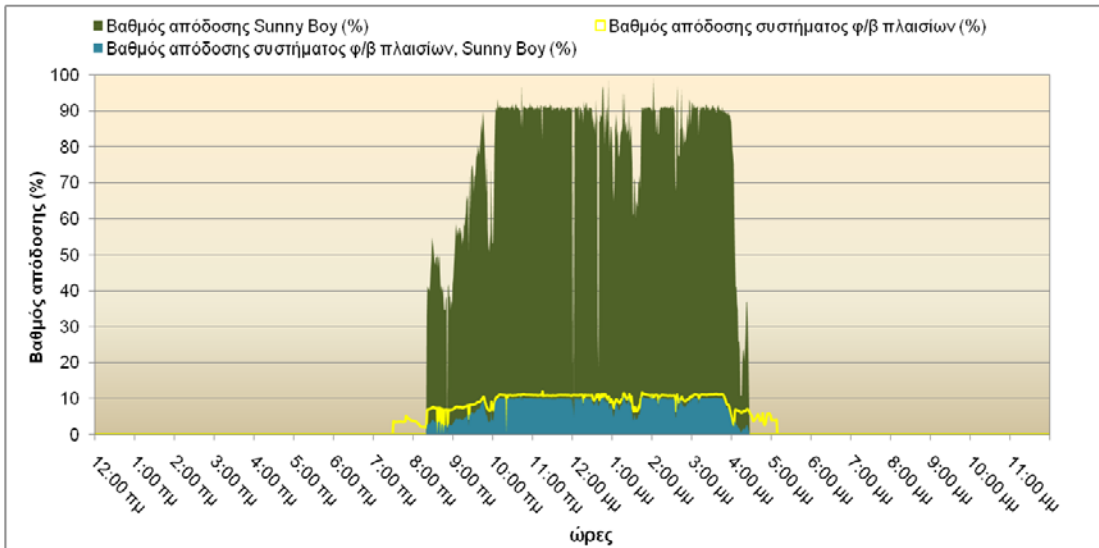
S η διατομή του καλωδίου

Θεωρώντας 20 μέτρα καλωδίου διατομής 6mm² και ειδικής αντίστασης (χαλκού) 0,017Ω*mm²/m η αντίσταση αυτή ισούται με 0,057Ω. Με αυτήν την τιμή αντίστασης και για την τιμή του ρεύματος που ρέει κάθε φορά από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια ως τον αντιστροφέα υπολογίζεται η ισχύς με την βοήθεια της σχέσης 9.5.

$$P_{απωλειών} = I_{pv}^2 \cdot R \quad (9.5)$$

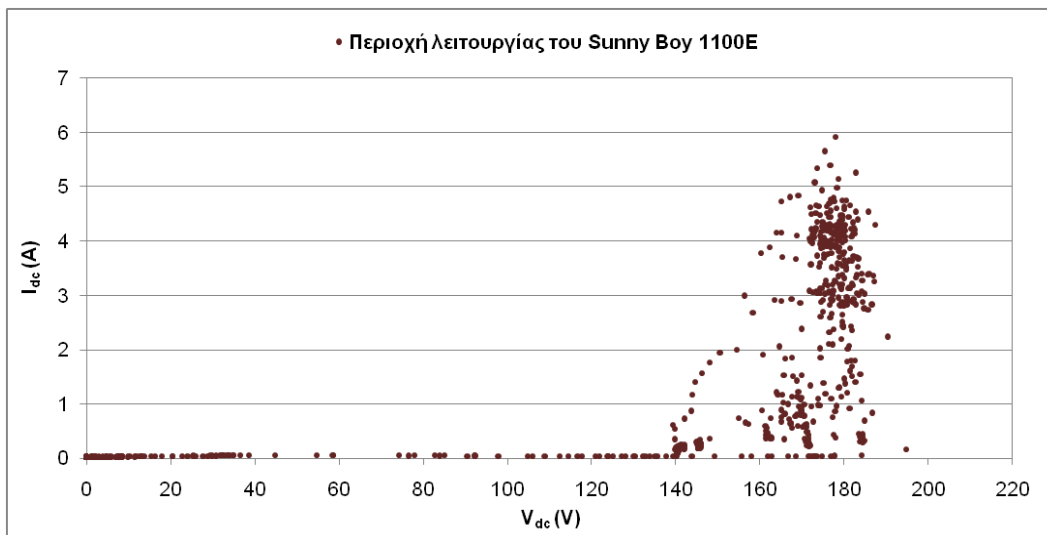
Κεφάλαιο 9 : Ανάλυση Στρατηγικής Ενεργειακής Διαχ. Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

Οι απώλειες τελικά, που λόγω της διατομής του καλωδίου δεν είναι τόσο σημαντικές, προκύπτουν 0,063% (μέση τιμή 0,366W). Γραφικά στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 9.3 παρουσιάζονται οι διακυμάνσεις των αποδόσεων κατά την διάρκεια της μέρας. Για την διακύμανση της συνολικής απόδοσης του συστήματος φωτοβολταϊκών πλαισίων και αντιστροφέα εμπεριέχονται και οι απώλειες των καλωδίων.



Εικόνα 9.3: Βαθμοί απόδοσης Sunny Boy, φ/β πλαισίων και φ/β συστήματος

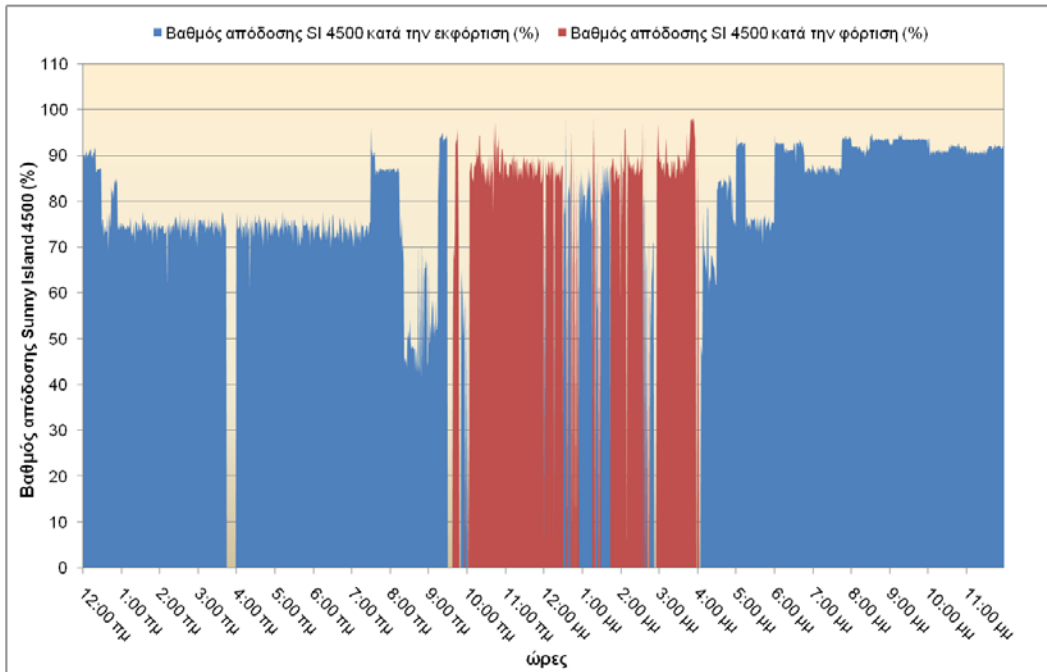
Τέλος, στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 9.4) παρατηρούμε τα σημεία τάσεως και ρεύματος στην πλευρά του DC του αντιστροφέα. Με τα σημεία αυτά μπορούμε να δούμε την περιοχή λειτουργίας που ο Sunny Boy 1100E ακολούθησε από την ανατολή μέχρι την δύση του ηλίου.



Εικόνα 9.4: Περιοχή λειτουργίας του αντιστροφέα Sunny Boy 1100E

- Απόδοση Sunny Island 4500

Σημαντικό ρόλο παίζει στην αξιολόγηση του αυτόνομου υβριδικού συστήματος με μπαταρίες ο υπολογισμός του βαθμού απόδοσης του αντίστοιχου μετατροπέα. Στο εργαστηριακό μικροδίκτυο όπως έχουμε δει, έχει εγκατασταθεί ο Sunny Island 4500 ο οποίος σύμφωνα με την SMA έχει βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο από 91%. Στο διάγραμμα που ακολουθεί (εικόνα 9.5) βλέπουμε τις αποδόσεις του Sunny Island 4500 στις δύο καταστάσεις λειτουργίας του δηλαδή κατά την εκφόρτιση των μπαταριών και κατά την αντίστροφη κατάσταση φόρτισης.



Εικόνα 9.5: Βαθμός απόδοσης Sunny Island 4500

Οι σχέσεις που ισχύουν και μας προσδίδουν τους βαθμούς απόδοσης για την κατάσταση φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών φαίνονται παρακάτω.

$$n_{SI,ch} = \frac{P_{bat_in,DC}}{P_{bat_in,AC}} \cdot 100\% \quad (9.6)$$

$$n_{SI,rech} = \frac{P_{bat_out,AC}}{P_{bat_out,DC}} \cdot 100\% \quad (9.7)$$

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα απόδοσης προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα :

- Το διάστημα της νύχτας όπου το φορτίο είναι μικρό (40W) και καλύπτεται μόνο από τον SI ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται στους 70-75%
- Κατά την ανατολή του ηλίου στις 8:20πμ και μόλις ο Sunny Boy αρχίσει να καλύπτει μέρος του φορτίου (που ακόμα είναι χαμηλό) ο Sunny Island λειτουργεί ακόμη πιο

χαμηλά και αναγκάζεται να συνεισφέρει γύρω στα 30-35W. Για το διάστημα αυτό ο βαθμός απόδοσης πέφτει στο κατώτερο όριο του περίπου στο 45-50%

- Κατά την φόρτιση των μπαταριών ο Sunny Island λειτουργεί με αρκετά πιο σταθερή απόδοση της τάξης του 85-90%
- Κατά το διάστημα όπου το φορτίο αυξάνει από 1,3kW έως 3,3kW ο SI φτάνει στις ονομαστικές του τιμές ισχύος και τότε καταφέρνει να λειτουργήσει σε απόδοση μεταξύ 90-94% όση δηλαδή προσδιορίζουν και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του

Στον πίνακα 9.2 αναγράφονται όλες οι τιμές απόδοσης και απωλειών του αντιστροφέα αυτόνομου δικτύου. Σημαντική είναι και η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των τιμών που παίρνουμε από τα μετρητικά όργανα που εγκαταστάθηκαν στο εργαστήριο και αυτών που αποδίδει ο WEBBOX.

<i>Ενεργειακή απόδοση - Απώλειες του Sunny Island 4500</i>				
<i>Κατάσταση...</i>	<i>Μετρητικά μικροδικτύου</i>		<i>SUNNY WEBBOX</i>	
	<i>Βαθμός Απόδοσης (%)</i>	<i>Απώλειες μετατροπής (%)</i>	<i>Βαθμός Απόδοσης (%)</i>	<i>Απώλειες μετατροπής (%)</i>
Φόρτισης	86,62	13,25	75,25	24,75
Εκφόρτισης	80,36	19,64	76,08	23,92
Ονομαστική Ισχύ (3,3kW)	91,79	8,21	93,62	6,38
Συνολικά	81,66	18,34	75,88	24,12

Πίνακας 9.2: Ενεργειακή απόδοση του Sunny Island 4500 σύμφωνα με τα μετρητικά όργανα του εργαστηρίου και την μονάδα επικοινωνίας της SMA (SUNNY WEBBOX)

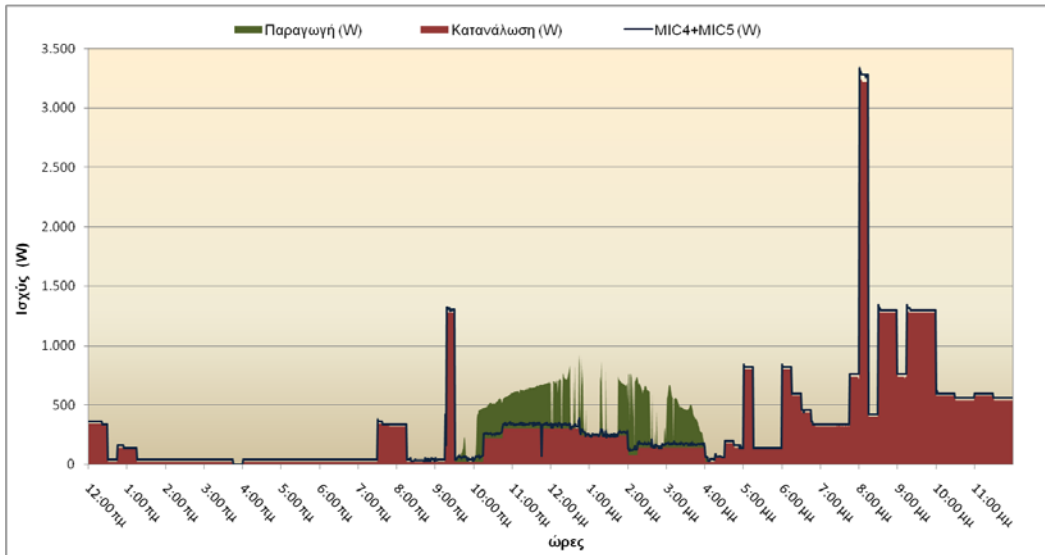
9.3 Απώλειες του Συστήματος

Με τις μετρήσεις που έγιναν στο συγκεκριμένο πείραμα προσομοίωσης φορτίου έχουμε την δυνατότητα πέρα από την αποδοτική αξιολόγηση του μικροδικτύου να υπολογίσουμε και τις απώλειες του μιας και οι δύο αυτές έννοιες είναι συναφείς. Οι απώλειες που μας ενδιαφέρουν και συνδέονται άμεσα και σε μεγάλο βαθμό με την βελτιστοποίηση στην διαστασιολόγηση της εγκατάστασης αυτόνομης κατοικίας είναι αυτές που παρατηρούνται στις γραμμές από την AC μεριά του Sunny Island ως τα φορτία καθώς και οι απώλειες κατά την φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών πάνω στον Sunny Island (πίνακας 9.2). Οι απώλειες παρουσιάζονται γραφικά και υπολογίζονται αριθμητικά (μέση τιμή) στην συνέχεια:

- Απώλειες γραμμής (LL)

Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 9.6) φαίνονται οι απώλειες που παρατηρούνται πάνω στην γραμμή από τον αντιστροφέα αυτόνομου δικτύου (Sunny Island) έως τα φορτία. Με την μπλε γραμμή παρατηρείται η μέτρηση της ισχύος που κάθε στιγμή προκύπτει από το άθροισμα της τιμής του πολυοργάνου του αντιστροφέα των φωτοβολταϊκών (MIC4) και αυτής του πολυοργάνου του αντιστροφέα αυτόνομου δικτύου (Sunny Island) (MIC5). Έτσι η διαφορά αυτής της μέτρησης (MIC4+MIC5) με την μέτρηση που καταγράφει το πολυόργανο φορτίων (MIC2) μας δίνει τις αντίστοιχες απώλειες.

Κεφάλαιο 9 : Ανάλυση Στρατηγικής Ενεργειακής Διαχ. Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

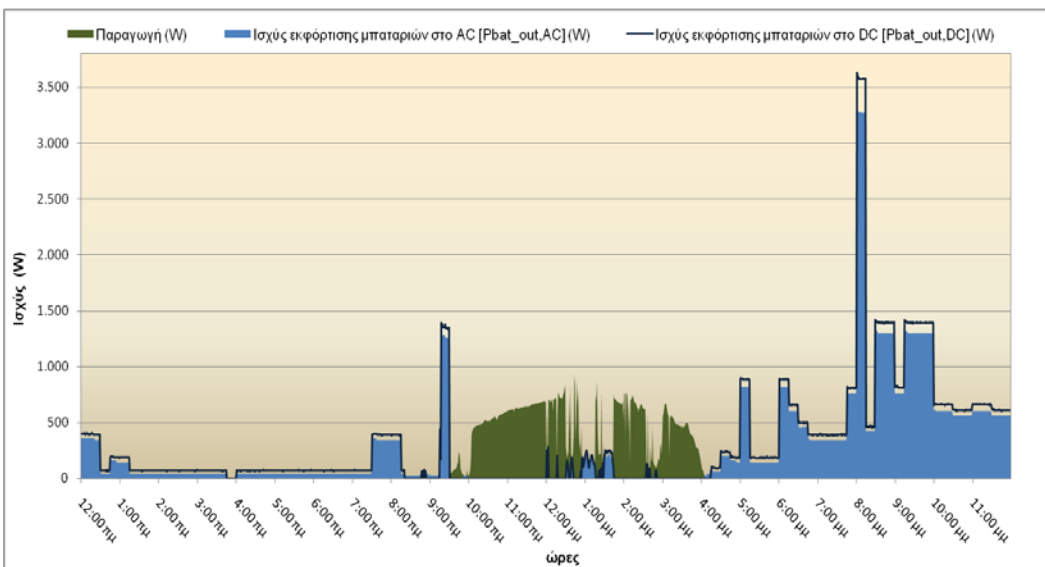


Εικόνα 9.6: Απώλειες γραμμής από τον Sunny Island έως τα φορτία

Η μέση τιμή των απωλειών αυτών που προκύπτουν είναι 3,61%.

- Απώλειες μετατροπής κατά την εκφόρτιση των μπαταριών (BLrech)

Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 9.7) φαίνονται οι απώλειες που παρατηρούνται πάνω στον αντιστροφέα αυτόνομου δικτύου (Sunny Island) κατά την εκφόρτιση των μπαταριών. Με την γαλάζια επιφάνεια βλέπουμε την ισχύ που καταγράφεται από το πολυόργανο του αντιστροφέα αυτόνομου δικτύου (MIC5) κατά την εκφόρτιση ενώ την ίδια στιγμή μπορούμε να μετράμε και την ισχύ εκφόρτισης των μπαταριών στην πλευρά του DC (μπλε γραμμή). Αριθμητικά οι απώλειες αυτές προκύπτουν και από την απόδοση του αντιστροφέα (πίνακας 9.2).

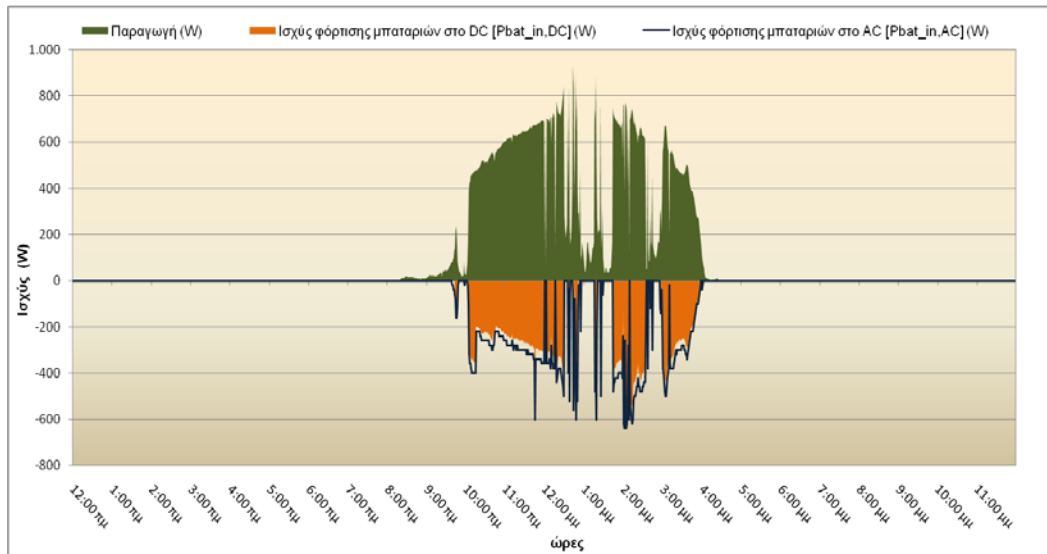


Εικόνα 9.7: Απώλειες μετατροπής κατά την εκφόρτιση των μπαταριών

Η μέση τιμή των απωλειών αυτών που προκύπτουν είναι 19,64%.

- Απώλειες μετατροπής κατά την φόρτιση μπαταριών (BILch)

Αντίστοιχα με τις απώλειες μετατροπής κατά την φόρτιση προκύπτουν και οι απώλειες που παρατηρούνται πάνω στον αντιστροφέα αυτόνομου δικτύου (Sunny Island) κατά την φόρτιση των μπαταριών. Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 9.8) βλέπουμε την ισχύ με την οποία φορτίζουν οι μπαταρίες στο DC αλλά και το AC κομμάτι.



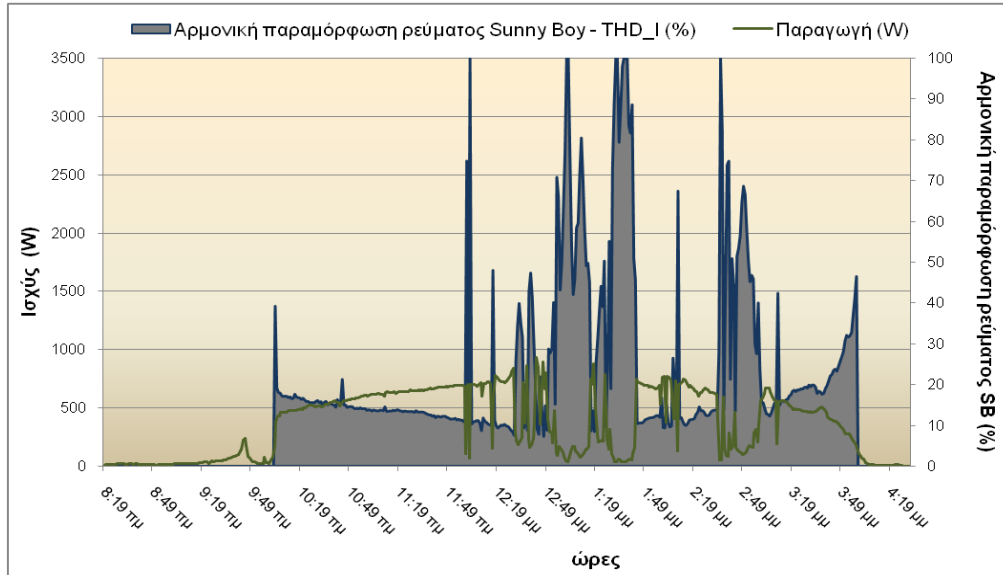
Εικόνα 9.8: Απώλειες μετατροπής κατά την φόρτιση των μπαταριών

Η μέση τιμή των απωλειών αυτών που προκύπτουν είναι 13,25%.

9.4 Ποιότητα Ισχύος του Εργαστηριακού Μικροδικτύου

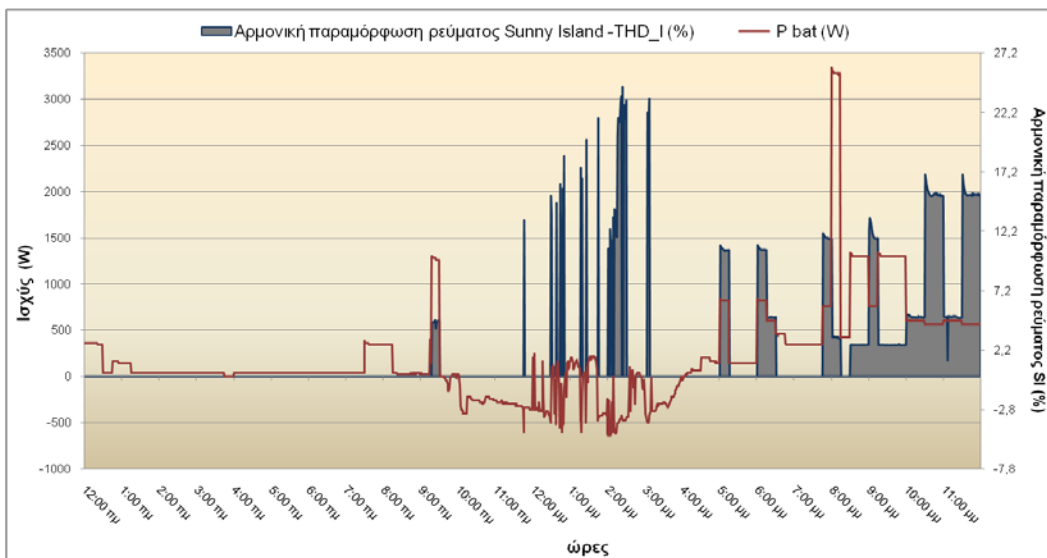
Όπως και στην αξιολόγηση του φωτοβολταϊκού πάρκου της Ραφήνας οι μετρήσεις του πολυοργάνου που είναι αντιπροσωπευτικές για την ποιότητα ισχύος είναι αυτές που αφορούν την αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος THD_I. Η τιμή αυτή για τον Sunny Boy 1100 σε συσχέτιση με την παραγόμενη ενέργεια παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα της εικόνας 9.9. Σε αυτό μπορούμε να διακρίνουμε την αύξηση του συντελεστή THD κατά την μείωση της παραγόμενης ενέργειας. Αντιθέτως, κατά την αύξηση της παραγωγής η αρμονική παραμόρφωση ρεύματος προσεγγίζει την κατώτατη τιμή της που είναι κοντά στο 10%.

Κεφάλαιο 9 : Ανάλυση Στρατηγικής Ενεργειακής Διαχ. Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος



Εικόνα 9.9: Αρμονική παραμόρφωση ρεύματος THD I του Sunny Boy 1100E

Η αρμονική παραμόρφωση του ρεύματος THD_I για τον Sunny Island 4500 απεικονίζεται στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 9.10). Παρατηρούμε ότι όταν ο αντιστροφέας κατά την εκφόρτιση των μπαταριών όταν καλύπτει φορτίο 1,3kW παρουσιάζει THD ρεύματος 2,5% με 4,5 % ενώ όταν καλύπτει φορτίο κοντά στα ονομαστικά (3,3kW) η τιμή αυτή προσεγγίζει το 3,3%. Κατά την διάρκεια που αναγκάζεται να καλύψει χαμηλότερο φορτίο αλλά πάνω από 500W η τιμή του THD ρεύματος εκτοξεύεται σε τιμές μεταξύ του 5% και του 17%.

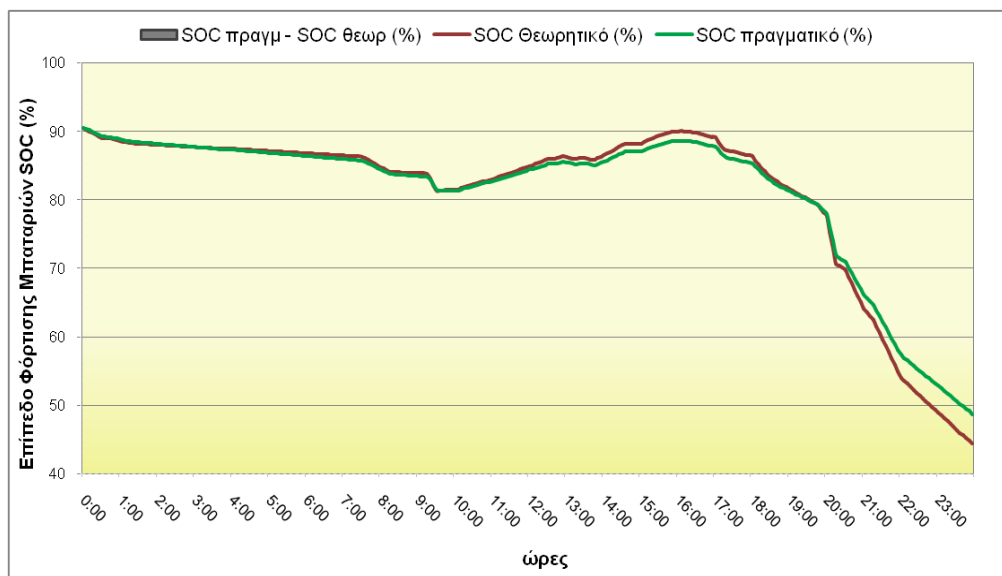


Εικόνα 9.10: Αρμονική παραμόρφωση ρεύματος THD_I του Sunny Island 4500

9.5 Συμπεριφορά των Μπαταριών του Υβριδικού Συστήματος

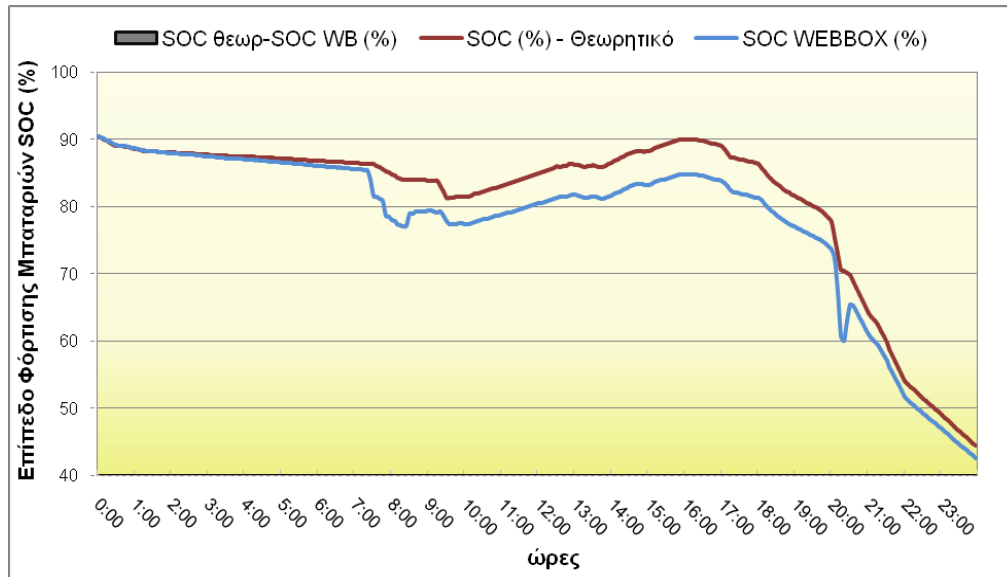
Κατά την διαστασιολόγηση του αυτόνομου υβριδικού συστήματος στο κεφάλαιο 7 αναφερθήκαμε στην σημασία που έχει η σωστή πρόβλεψη του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών. Κατά την αρχική διαστασιολόγηση του συστήματος όπου εισάγονται θεωρητικές τιμές απωλειών προσεγγίσαμε το πρόβλημα πρόβλεψης του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών και την εν γένει συμπεριφορά αυτών, δημιουργήθηκε όμως η ανάγκη για μια καλύτερη και πιο ρεαλιστική απεικόνιση. Αυτή έρχεται μέσα από την προσομοίωση που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο αυτό.

Με την χρήση των τιμών αυτών για τις απώλειες γραμμής και τις απώλειες μετατροπής κατά την φόρτιση και εκφόρτιση των μπαταριών στο θεωρητικό μοντέλο υπολογισμού του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών, καταλήγουμε στην κόκκινη καμπύλη της εικόνας 9.11. Στο ίδιο διάγραμμα απεικονίζεται και η αντίστοιχη πορεία που ακολούθησε η φόρτιση βάσει της πληροφορίας που παίρνουμε από το μετρούμενο DC ρεύμα των μπαταριών καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Το πείραμα ξεκινά από το 90,5% φόρτισης των μπαταριών ενώ η μέση τιμή της διαφοράς μεταξύ των δύο καμπυλών είναι 0,91%. Καταφέρνουμε δηλαδή σε ικανοποιητικό βαθμό να επιβεβαιώσουμε το θεωρητικό μοντέλο της μελέτης που αφορά την πρόβλεψη του επιπέδου φόρτισης για ένα συγκεκριμένο προφίλ φορτίου.



Εικόνα 9.11: Επίπεδο φόρτισης μπαταριών SOC μέσω θεωρητικού μοντέλου και μέσω πραγματικών μετρήσεων

Οι μετρήσεις που λάβαμε παράλληλα από το SUNNY WEBBOX σε ότι αφορά το επίπεδο φόρτισης SOC των μπαταριών, σε σχέση πάλι με την αντίστοιχη θεωρητική πρόβλεψη απεικονίζονται στην εικόνα 9.12. Η μέση τιμή της διαφοράς μεταξύ των δύο καμπυλών αυτή την φορά είναι 3,13.



Εικόνα 9.12: Επίπεδο φόρτισης μπαταριών SOC μέσω θεωρητικού μοντέλου και μέσω μετρήσεων από το SUNNY WEBBOX

10. Σχεδίαση Στρατηγικής Ενεργειακής Διαχείρισης Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

Στην τελευταία φάση της διπλωματικής περιλαμβάνεται η σχεδίαση του τελικού υβριδικού συστήματος και η αξιολόγηση του. Η στρατηγική που ακολουθείται έχει να κάνει πλέον και με την προηγούμενη ανάλυση της ενεργειακής διαχείρισης που προέκυψε από την πειραματική διαδικασία προσομοίωσης.

10.1 Τελική Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος

Η αρχική διαστασιολόγηση που έγινε στο κεφάλαιο 7 λειτουργεί ως οδηγός μέσω του οποίου θα επαναπροσδιοριστούν οι όποιες αστοχίες που παρατηρήθηκαν και θα προσεγγίσουμε την βέλτιστη λύση για την δημιουργία ενός αποδοτικότερου συστήματος. Το βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουμε στην πρώτη προσέγγιση είναι η χαμηλή στάθμη φόρτισης των μπαταριών που προκύπτει κατά σειρά σε όλα τα σενάρια με 29,6%, 29,72% και 14,48%. Αυτό το κατώτατο όριο πρέπει να αποφευχθεί αυξάνοντας λίγο τις αρχικές τιμές του φορτίου των μπαταριών. Επιπλέον θα πρέπει να λάβουμε σοβαρά υπ' όψιν το ποσοστό του 13,82% το οποίο και χάνεται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες όταν και η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνεται αισθητά. Ενδέχεται δηλαδή με μικρή αύξηση της διεύθυνσης της γεννήτριας να μπορέσουμε να μειώσουμε την ονομαστική τιμή εγκατεστημένης ισχύος του φωτοβολταϊκού πάρκου. Τέλος θα γίνει μια καλύτερη προσέγγιση των απωλειών μετατροπής της ενέργειας κατά τον κύκλο φόρτισης – εκφόρτισης από 16% στις τιμές που μας προέκυψαν κατά την πραγματοποίηση του πειράματος. Ο νέος σχεδιασμός που υλοποιείται βασίζεται στις τελικές βελτιωτικές παρεμβάσεις που συνοψίζονται παρακάτω:

Ονομαστική ισχύς πάρκου 4,08kWp \Rightarrow Ονομαστική ισχύς πάρκου 3,4kWp
 Κατώτατο επιτρεπτό όριο SOC = 30% \Rightarrow Κατώτατο επιτρεπτό όριο SOC = 40%

Στον πίνακα απωλειών (10.1) υπάρχουν πλέον οι πειραματικές τιμές που προέκυψαν από την προσομοίωση. Έτσι προσεγγίζουμε με ρεαλιστικότερο τρόπο το πρόβλημα.

Απώλειες Αυτόνομου Συστήματος – Πειραματικές τιμές		
Απώλειες	Συμβολισμός	Τιμή (%)
Γραμμής	LL	3,61
Μετατροπής κατά την εκφόρτιση των μπαταριών	BIL _{rech}	19,64
Μετατροπής κατά την φόρτιση των μπαταριών	BIL _{ch}	13,25

Πίνακας 10.1: Προσεγγιστικές τιμές απωλειών αυτόνομου φ/β συστήματος από το αντίστοιχο πείραμα προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα της τελικής διαστασιολόγησης παρουσιάζονται στον πίνακα 10.2 όπου για το δίμηνο αναφοράς Νοέμβριος – Δεκέμβριος σημειώνονται οι νέες ονομαστικές τιμές ισχύος της φωτοβολταϊκής γεννήτριας και της γεννήτριας diesel.

Κεφάλαιο 10 : Σχεδίαση Στρατηγικής Ενεργειακής Διαχ. Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

	P_{PV} (kW)	h/d	S (m ²)	P_G (kW)	h/d		$E_{PV,AC}$ (kWh/d)	$E_{PV,use}$ (kWh/d)	E_G (kWh/d)		H_i (kWh/m ² d)	H_i total (kWh/d)	E_{Load} (kWh/d)
					1η μέρα	2η μέρα			1η μέρα	2η μέρα			
Νοε- Δεκ	3,4	9,64	25,94	4,5	1,00	3,00	10,62	7,98	4,50	13,50	3,87	120,55	11,54

Πίνακας 10.2: Προσεγγιστικές τιμές απωλειών αυτόνομου φ/β συστήματος από αντίστοιχο πείραμα προσομοίωσης

Σύμφωνα με τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια από 24 γίνονται 20 και πλέον το σύστημα γίνεται ονομαστικής ισχύος 3,4kWp. Αυτό επίσης που αλλάζει είναι η συνεισφορά της γεννήτριας όπου γίνεται πιο μεγάλη αφού τείνει επιλεκτικά πλέον να καλύψει την μειωμένη παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Τώρα η ονομαστική τιμή ισχύος της γεννήτριας πρέπει να είναι 4,5kW. Επειδή τα πλαίσια θα τοποθετηθούν στην ταράτσα της μονοκατοικίας το εμβαδόν που θα χρειαστεί είναι περίπου 55m², διπλάσιο δηλαδή από το αναγραφόμενο στον πίνακα 10.2 που αφορά στέγη (το ένα δίπλα στο άλλο).

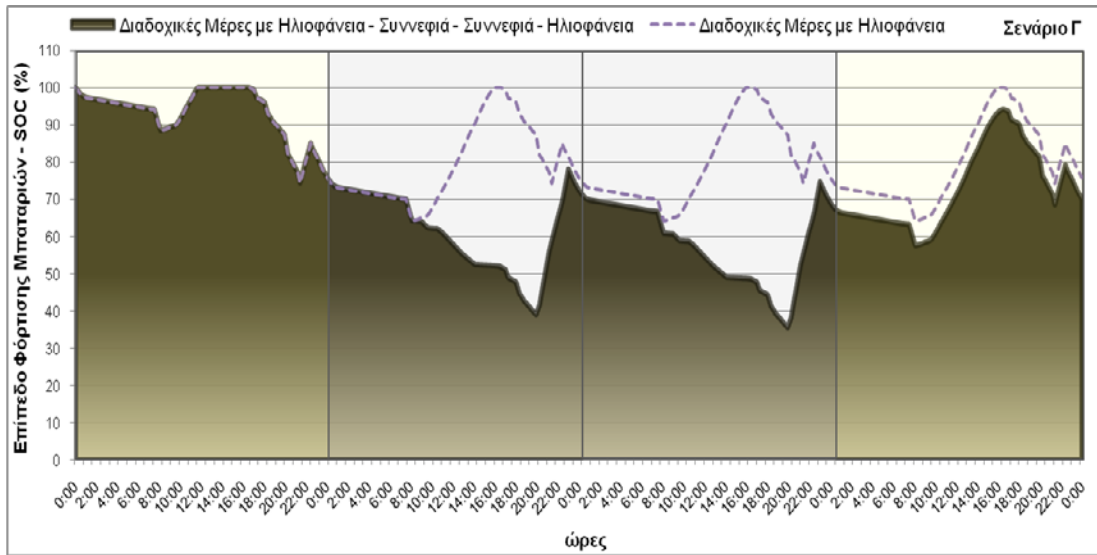
Για την συμπεριφορά των μπαταριών και την τελική διαστασιολόγηση τους φτάνουμε στα μεγέθη που αναγράφονται στον πίνακα 10.3. Συνολικά κατά το πέρας της πρώτης μέρας με ηλιοφάνεια οι απώλειες αυτές (E_{Loss}) φτάνουν τις 3,35kWh ποσοστό 29% ενώ κατά το διάστημα της συνεφιασμένης μέρας οι αντίστοιχες απώλειες ($E_{Loss,cloudy}$) τις 1,28kWh και ποσοστό 11,06% του συνολικού φορτίου. Βλέπουμε δηλαδή ότι σε σχέση με τις απώλειες που είχαμε κατά την πρώτη διαστασιολόγηση (σενάριο Β) τώρα είναι αισθητά πιο αυξημένες. Θεωρώντας στην σχέση 7.5 συντελεστή 1 στις *Cloudy_days* και δοκιμάζοντας το όριο εκφόρτισης, καταλήγουμε σε 24 στοιχεία των 2V (σύνολο 48V) αλλά των 420Ah το κάθε στοιχείο αυτή την φορά για να αποτραπεί το φαινόμενο βαθιάς εκφόρτισης.

E_{bat} (kWh)	E_{bat} (Ah)	τεμάχια	Volts/ τεμάχιο	Volts (DC)
20,16	420	24,00	2,00	48,00

Πίνακας 10.3: Τελική διαστασιολόγηση μπαταριών υβριδικού συστήματος

Με τις νέες τιμές που προέκυψαν πετυχαίνουμε σαφέστατα καλύτερα αποτελέσματα. Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 10.1) φαίνεται η κατάσταση των μπαταριών στην πιο δυσμενή κατάσταση με δύο συνεχόμενες μέρες πλήρους συνεφιάς (σενάριο Γ). Κατά την τέταρτη μέρα η στάθμη φόρτισης των μπαταριών φτάνει σε επιθυμητά επίπεδα αλλά υπάρχει και ταυτόχρονη διατήρηση του κατώτατου ορίου φόρτισης κοντά στο 40% που επιθυμούμε.

Κεφάλαιο 10 : Σχεδίαση Στρατηγικής Ενεργειακής Διαχ. Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος



Εικόνα 10.1: Μεταβολή του επιπέδου φόρτισης των μπαταριών για διάστημα διαδοχικών ημερών με Ηλιοφάνεια - Συννεφιά - Συννεφιά – Ηλιοφάνεια (Σενάριο Γ) – Τελική διαστασιολόγηση

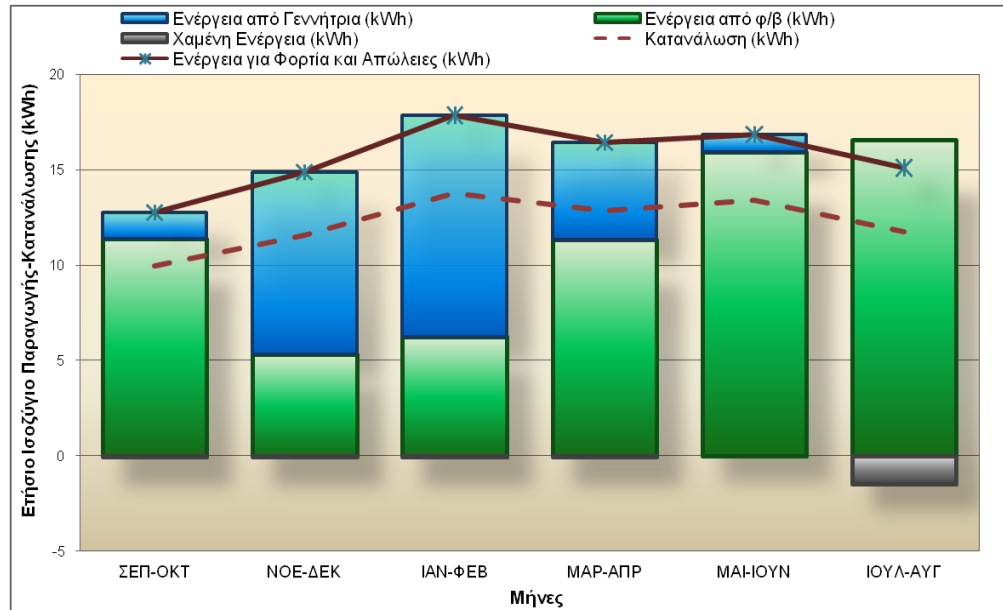
Στον πίνακα 10.4 σημειώνονται οι διαφορές που παρατηρούνται πλέον στις οριακές τιμές του επιπέδου φόρτισης καθώς και του φορτίου των μπαταριών που εκ νέου επιλέξαμε για την επίτευξη αυτονομίας δύο ημερών πλήρους συννεφιάς. Η διαφορά εντοπίζεται στο τέλος της τρίτης μέρας όπου το ποσοστό αυτό είναι στα επίπεδα πλήρους ανάκτησης. Το κατώτατο όριο λίγες ώρες πριν μπει η γεννήτρια από 14,58% που ήταν πριν έγινε 35,68%.

Τέλος της...	Φορτίο Μπαταρίας (Ah)	Επίπεδο Φόρτισης -SOC (%)
1ης μέρας	318,85	75,90
2ης μέρας	304,58	72,51
3ης μέρας	290,31	69,11
4ης μέρας	294,17	70,03
Ελάχιστο όριο φόρτισης	149,90	35,68

Πίνακας 10.4: Συμπεριφορά του φορτίου και του SOC των μπαταριών (Σενάριο Γ) - Τελική διαστασιολόγηση

10.2 Ετήσια Πρόβλεψη Τελικής Διαστασιολόγησης

Το συνολικό ισοζύγιο ενέργειας κατά την διάρκεια του έτους θεωρώντας πλέον τα νέα δεδομένα, παρουσιάζεται στην εικόνα 10.2.



Εικόνα 10.2: Ισοζύγιο ενέργειας κατά την διάρκεια του έτους – Τελική διαστασιολόγηση

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι για την κάλυψη του προφίλ κατανάλωσης της συγκεκριμένης οικίας στο διάστημα του ενός έτους και με την νέα διαστασιολόγηση ισχύουν :

- Συνεισφορά στην παραγόμενη ενέργεια σε ποσοστό 35,67% από τα φωτοβολταϊκά και 64,33 από την γεννήτρια diesel κατά το δίμηνο Νοεμβρίου-Δεκεμβρίου.
- Συνεισφορά στην παραγόμενη ενέργεια σε ποσοστό 35,07% από τα φωτοβολταϊκά και 64,93 από την γεννήτρια diesel κατά το δίμηνο Ιανουαρίου-Φεβρουαρίου.
- Η συνολική συνεισφορά φωτοβολταϊκών και γεννήτριας στο σύστημα κατά την διάρκεια του έτους είναι 69,98% και 30,02% αντίστοιχα.
- Κατά τους μήνες Ιουλίου - Αυγούστου παρατηρείται ποσότητα χαμένης ενέργειας σε ποσοστό 2,2% της συνολικά παραγόμενης από τα φωτοβολταϊκά ενέργειας.

Τελικά, αυτό που επιτυγχάνεται μετά από τις τελικές επιλογές του υβριδικού συστήματος με φωτοβολταϊκά, μπαταρίες και γεννήτρια diesel συγκεντρώνονται και παρουσιάζονται στον πίνακα 10.5.

Μεταβολή των στοιχείων του υβριδικού συστήματος					
	Ελάχιστο όριο φόρτισης (%)	Συνεισφορά φ/β (%)	Συνεισφορά γεννήτριας (%)	Χαμένη ενέργεια από φ/β (kWh)	Χαμένη ενέργεια από φ/β (%)
Αρχική διαστασιολόγηση	14,58	82,7	17,3	11,07	13,82
Τελική διαστασιολόγηση	35,68	69,98	30,02	1,47	2,2

Πίνακας 10.5: Συγκριτικά στοιχεία αρχικής – τελικής διαστασιολόγησης υβριδικού συστήματος

10.3 Αποτίμηση του Υβριδικού Συστήματος

Στο σημείο αυτό θα ήταν χρήσιμο να δούμε κάποια αποτελέσματα που αφορούν την απόδοση και τις απώλειες του υβριδικού συστήματος. Στον παρακάτω πίνακα 10.6 αναφέρονται για την μέση μέρα ανά δίμηνο οι τιμές εκείνες παραγόμενης ενέργειας από φωτοβολταϊκά και γεννήτρια, οι αντίστοιχες ώρες παραγωγής από καθεμία πηγή, η κατανάλωση του σπιτιού, η ενέργεια που χάνεται σαν απώλειες κατά τις μετατροπές και τελικώς οι συνολικές τιμές ενέργειας εισόδου και ενέργειας εξόδου του συστήματος μας.

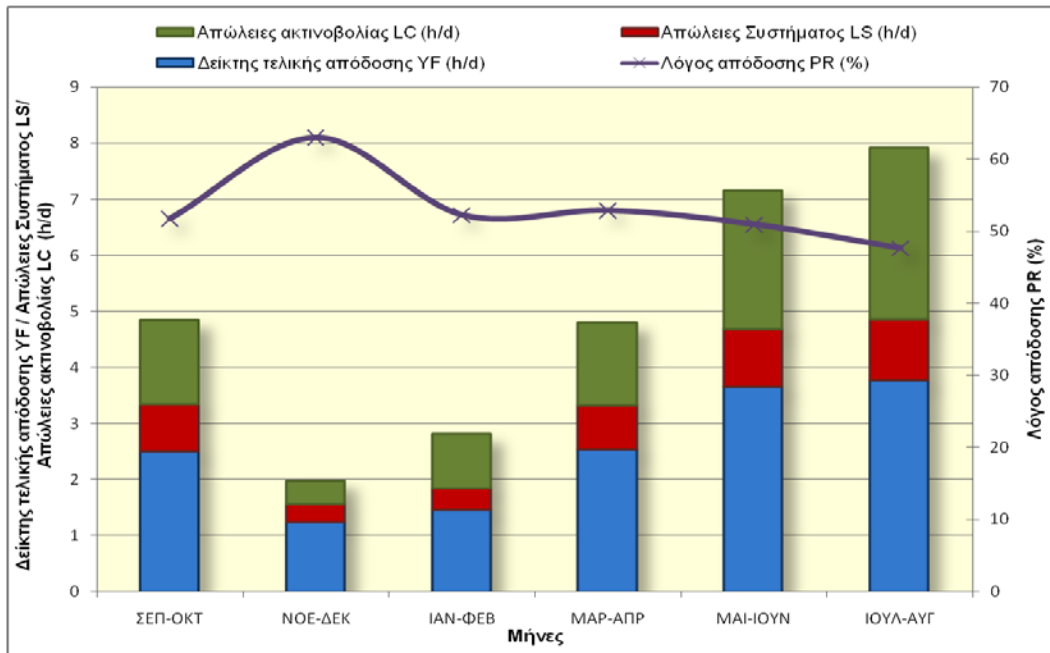
Μήνες	Μέση παραγόμενη ενέργεια από Φ/β $E_{PV,AC}$ (kWh)	ώρες παραγωγής (h)	Μέση παραγόμενη ενέργεια από Γεννήτρια E_G (kWh)	ώρες παραγωγής (h)	Μέση κατανάλωση E_{Load} (kWh)	Απώλειες Ενέργειας E_{Loss} (kWh)	Ενέργεια εισόδου E_{in} (kWh)	Ενέργεια εξόδου E_{out} (kWh)	Χαμένη Ενέργεια (kWh)
ΣΕΠ-ΟΚΤ	11,36	11,66	1,41	0,31	9,96	2,81	12,77	12,77	0,00
ΝΟΕ-ΔΕΚ	5,31	9,33	9,58	2,13	11,54	3,35	14,89	14,89	0,00
ΙΑΝ-ΦΕΒ	6,26	9,66	11,59	2,58	13,75	4,10	17,85	17,85	0,00
ΜΑΡ-ΑΠΡ	11,33	12,00	5,12	1,14	12,85	3,60	16,45	16,45	0,00
ΜΑΙ-ΙΟΥΝ	15,92	14,25	0,93	0,21	13,39	3,46	16,85	16,85	0,00
ΙΟΥΛ-ΑΥΓ	16,55	14,00	0,00	0,00	11,72	3,37	16,55	15,09	-1,47
ΣΥΝΟΛΟ	66,74	70,90	28,63	6,36	73,21	20,69	95,37	93,90	-1,47

Πίνακας 10.6: Ετήσια στοιχεία παραγωγής, κατανάλωσης και χαμένης ενέργειας

Οι δείκτες αξιολόγησης του φωτοβολταϊκού συστήματος για την διάρκεια του ενός έτους όπου εξετάζεται παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 10.7 και με διάγραμμα στο σχήμα 10.3. Επιπλέον, στις πρώτες στήλες του πίνακα φαίνονται ανά δίμηνο αλλά και συνολικά κατά το εξεταζόμενο έτος, η ενέργεια που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και καταναλώνεται άμεσα από τα φορτία, η περισσευούμενη ενέργεια αυτής που αποθηκεύεται στις μπαταρίες και η παραγόμενη ενέργεια που τελικά είναι προς χρήση.

Μήνες	$E_{Load,PV}$ (kWh)	$E_{bat,in}$ (kWh)	EPV,use (kWh)	Ηλιακό κλάσμα F_{sol} (h/d)	Τελική απόδοση YF (h/d)	Απόδοση σειράς Y_A (h/d)	Απόδοση αναφοράς Y_R (h/d)	Λόγος απόδοσης PR (%)	Απώλειες ακτινοβολίας L_c (h/d)	Απώλειες συστήματος L_s (h/d)
ΣΕΠ-ΟΚΤ	2,20	-7,88	8,53	85,68	2,51	3,34	4,85	51,75	1,51	0,83
ΝΟΕ-ΔΕΚ	1,97	-2,84	4,25	36,83	1,25	1,56	1,98	63,00	0,42	0,31
ΙΑΝ-ΦΕΒ	2,28	-3,38	5,00	36,35	1,47	1,84	2,81	52,28	0,97	0,37
ΜΑΡ-ΑΠΡ	2,70	-7,40	8,65	67,32	2,54	3,33	4,81	52,91	1,48	0,79
ΜΑΙ-ΙΟΥΝ	4,73	-9,56	12,41	92,71	3,65	4,68	7,16	50,98	2,48	1,03
ΙΟΥΛ-ΑΥΓ	4,67	-10,16	12,83	109,49	3,77	4,87	7,92	47,67	3,05	1,09
ΣΥΝΟΛΟ	18,55	-41,22	51,68							
ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ				71,40	2,53	3,27	4,92	53,10	1,65	0,74

Πίνακας 10.7: Δείκτες αξιολόγησης φωτοβολταϊκού συστήματος

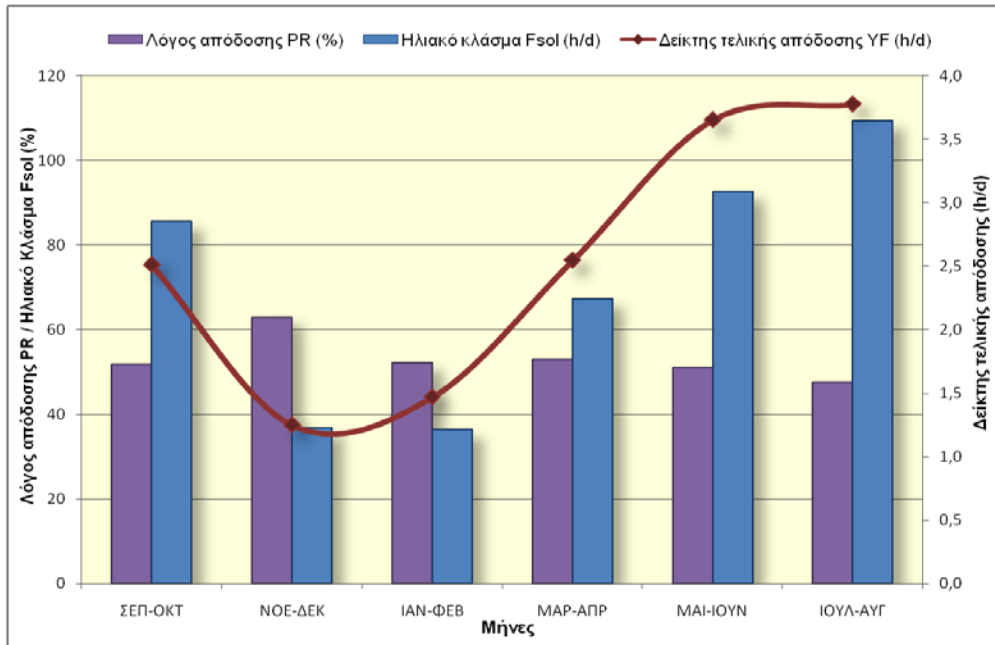


Εικόνα 10.3: Διάγραμμα εκτίμησης της αποδοτικότητας και των απωλειών του φ/β συστήματος

Στο παραπάνω διάγραμμα (εικόνα 10.3) παρουσιάζονται οι απώλειες του συστήματος. Οι απώλειες αυτές συνοψίζονται στον λόγο απόδοσης PR ο οποίος αναδεικνύει διάφορα προβλήματα και αδυναμίες του συστήματος. Η διάφορα του λόγου αυτού με το αντίστοιχο διάγραμμα του διασυνδεδεμένου πάρκου της Ραφήνας είναι ότι η ενέργεια $E_{PV,use}$ τώρα είναι μικρότερη γιατί βάσει και της σχέσης 7.4 εισέρχονται εκτός από τις απώλειες των καλωδίων, απώλειες κατά την μετατροπή φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών πάνω στον αντιστροφέα. Το γεγονός αυτό ευθύνεται για τον μικρότερο δείκτη PR ενώ κατά ανάλογο τρόπο ευθύνεται και για την αύξηση του δείκτη απωλειών συστήματος L_s και την μείωση του δείκτη τελικής απόδοσης Y_F . Τέλος, οι απώλειες ακτινοβολίας όπως θα περιμέναμε παραμένουν σταθερές με αυτές του πάρκου της Ραφήνας μιας και το κομμάτι από την προσπίπτουσα ακτινοβολία έως την παραγόμενη ενέργεια $E_{PV,AC}$ παραμένει ίδιο και ανάλογο.

Πολύ σημαντική πληροφορία μας δίνει και το παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 10.4) όπου συσχετίζει τον λόγο απόδοσης με το ηλιακό κλάσμα. Το ηλιακό κλάσμα σύμφωνα με τον ορισμό που του δόθηκε στο κεφάλαιο 5 μας δίνει την αναλογία σε ποσοστό της χρησιμοποιούμενης ηλιακής ενέργειας $E_{PV,use}$ προς την συνολική ενεργειακή κατανάλωση E_{Load} . Έτσι, όταν η $E_{PV,use}$ είναι μεγαλύτερη από την κατανάλωση το κλάσμα αυτό προκύπτει μεγαλύτερο του 100% γεγονός που μεταφράζεται με πεταμένη παραγόμενη ενέργεια. Όταν είναι μικρότερο του 100% προκύπτει το έλλειμμα εκείνο που καλύπτει η εφεδρική πηγή παραγωγής ενέργειας, η γεννήτρια diesel. Γίνεται κατανοητό ότι στόχος της παρούσας μελέτης ήταν το κλάσμα αυτό να ναι κοντά στο 100% μόνο τους καλοκαιρινούς μήνες ειδάλλως τα ποσοστά χαμένης ενέργειας θα ήταν πολλαπλάσια.

Κεφάλαιο 10 : Σχεδίαση Στρατηγικής Ενεργειακής Διαχ. Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος



Εικόνα 10.4: Σχέση λόγου απόδοσης PR, ηλιακού κλάσματος F_{sol} και δείκτη τελικής απόδοσης Y_F

Για τον βαθμό απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος χρειαζόμαστε τα στοιχεία του πίνακα 10.8. Σε αυτόν βλέπουμε συνολικά την παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, την κατανάλωση, την προσπίπτουσα ακτινοβολία ανά τετραγωνικό μέτρο και στην συνολική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Στην τελευταία στήλη προκύπτει ανά δίμηνο η απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος ενώ συνολικά για όλο το έτος παρουσιάζει απόδοση της τάξης του 8,71%.

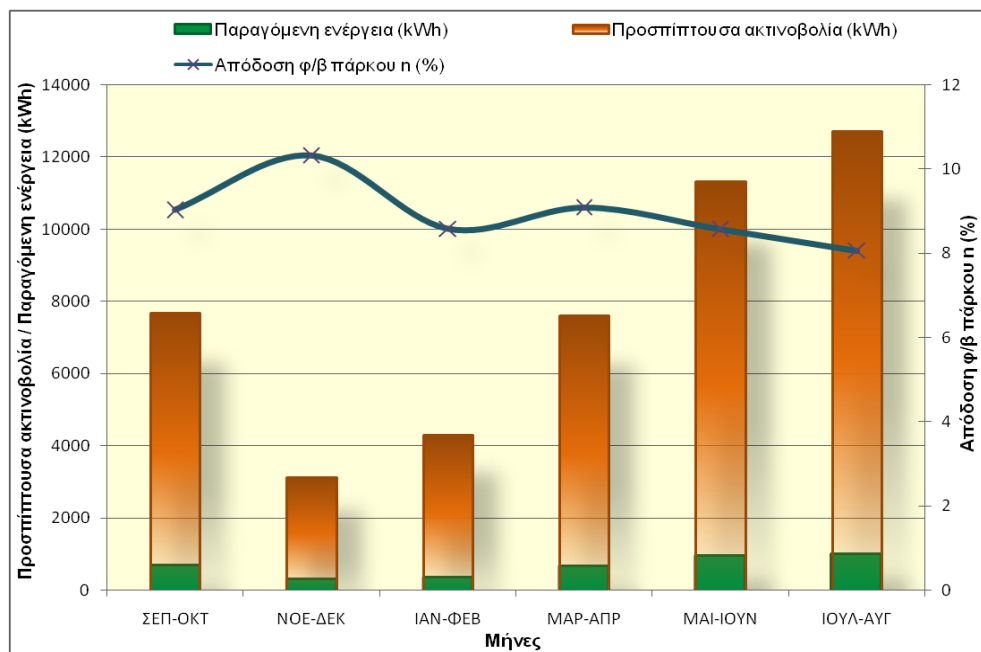
Μήνες	Παραγόμενη ενέργεια από φ/β EPV,AC (kWh)	Κατανάλωση ενέργειας από φορτία ELoad (kWh)	Προσπίπτουσα Ακτινοβολία (kWh/m ²)	Προσπίπτουσα Ακτινοβολία στο φ/β σύστημα (kWh)	Απόδοση φ/β συστήματος η (%)
ΣΕΠ-ΟΚΤ	693,23	607,56	295,86	7673,80	9,03
ΝΟΕ-ΔΕΚ	324,04	703,94	121,05	3139,71	10,32
ΙΑΝ-ΦΕΒ	369,37	811,25	165,88	4302,51	8,58
ΜΑΡ-ΑΠΡ	691,32	783,85	293,33	7608,15	9,09
ΜΑΙ-ΙΟΥΝ	971,31	816,79	436,87	11331,39	8,57
ΙΟΥΛ-ΑΥΓ	1025,91	726,64	490,85	12731,33	8,06
ΣΥΝΟΛΟ	4075,18	4450,03	1803,83	46786,88	-

Πίνακας 10.8: Συμπεριφορά φορτίου μπαταριών για διάστημα 2 ημερών με ήλιο

Η απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος θα είναι ακριβώς η ίδια με αυτήν που υπολογίστηκε και στο φωτοβολταϊκό πάρκο της Ραφήνας:

$$n = \frac{4075,18}{46786,88} \cdot 100 = 8.71\%$$

Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 10.5) βλέπουμε την διακύμανση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, της παραγόμενης ενέργειας και τελικά της τυπικής απόδοσης ανά δίμηνο κατά την διάρκεια του έτους.



Εικόνα 10.5: Ισοζύγιο ενέργειας κατά την διάρκεια του έτους – Τελική διαστασιολόγηση

Συνοπτικά, η παραπάνω διαστασιολόγηση πετυχαίνει μια πολύ καλή προσέγγιση ενός υβριδικού συστήματος που χρησιμοποιεί ως εφεδρική πηγή μια γεννήτρια diesel και έτσι καταφέρνει να περιορίσει την ονομαστική τιμή του φωτοβολταϊκού συστήματος. Όπως είδαμε, προκύπτει μια συνεισφορά από φωτοβολταϊκά και γεννήτρια στο σύστημα κατά την διάρκεια του έτους, της τάξης του 69,98% και 30,02% αντίστοιχα. Περιορίσαμε έτσι την χαμένη ενέργεια μόλις στο 2,2% της παραγόμενης από φωτοβολταϊκά, ενώ παράλληλα έγινε πρόβλεψη για ελάχιστο όριο φόρτισης των συσσωρευτών στο 40%.

10.4 Επιλογή και Κόστος Εξοπλισμού

Σύμφωνα με την τελική διαστασιολόγηση του υβριδικού συστήματος θα χρειαστούν 20 πλαίσια όπως και αυτά του πάρκου της Ραφήνας τα οποία θα τοποθετηθούν στην πλάκα του σπιτιού σε διάταξη τεσσάρων γραμμών και πέντε στηλών με προσοχή στην απαιτούμενη απόσταση που πρέπει να προβλεφθεί μεταξύ των σειρών για την αποφυγή φαινομένων σκίασης της μιας από την άλλη. Η αρχική εκτίμηση των 25,94m² όπως γίνεται κατανοητό θα αυξηθεί κάπως ενώ ο προσανατολισμός των πλαισίων θα είναι νότιος ($\gamma=0^\circ$) με κλίση 17 μοιρών. Ο προσανατολισμός και η κλίση αφορούν το φωτοβολταϊκό πάρκο της Ραφήνας το οποίο και ήταν σημείο αναφοράς κατά την διάρκεια όλης της μελέτης. Ασφαλώς η κλίση αυτή δεν αφορά την βέλτιστη κατάσταση αλλά μπορεί να βελτιωθεί αρκετά με προσαρμογή της τιμής της ανάλογα με την εποχή. Έτσι, η τιμή των 17 μοιρών μπορεί να λειτουργεί αποδοτικά για τους καλοκαιρινούς μήνες αλλά για τους χειμερινούς μήνες, όπου ο ήλιος είναι χαμηλά στον ουρανό, η κλίση αυτή πρέπει να αυξηθεί. Ένας γενικός κανόνας είναι ότι η βέλτιστη κλίση είναι ίση με τον γεωγραφικό παράλληλο του τόπου. Επειδή βέβαια σε περιοχές με υγρό κλίμα, όπου λόγω των σταγονιδίων του νερού στην ατμόσφαιρα ένα μεγάλο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας διαχέεται στον ουρανό, η

Κεφάλαιο 10 : Σχεδίαση Στρατηγικής Ενεργειακής Διαχ. Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

βέλτιστη κλίση του ηλιακού συλλέκτη για τη διάρκεια ολόκληρου του έτους είναι περίπου 10-15% μικρότερη από τη γωνία του τοπικού γεωγραφικού πλάτους δηλαδή γύρω στις 32 μοίρες.

Η ονομαστική τιμή ισχύος της γεννήτριας με την οποία διαστασιολογήθηκε όλο το σύστημα είναι 4,5kW ενώ οι μπαταρίες σύμφωνα και με τα στοιχεία του πίνακα 10.3 θα πρέπει να είναι 24 τεμάχια των 2V και 420Ah η καθεμία. Το σύστημα δηλαδή θα δουλεύει στα 48V. Ο εξοπλισμός περιγράφεται αναλυτικότερα στο παράρτημα Α.4 ενώ το κόστος αγοράς αυτού περιγράφεται στον πίνακα 10.9. Σε αυτό το κόστος (βασικός εξοπλισμός) αν προστεθούν και τα έξοδα καλωδίων, βάσεων στήριξης, διακοπτικού υλικού και εργατικών η τελική τιμή θα ξεπεράσει τις 20.000€. Όλες οι θεωρούμενες τιμές αφορούν την χρονική στιγμή εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Κόστος εξοπλισμού Υβριδικού Συστήματος					
	Εταιρεία	Μοντέλο	τιμή/τεμάχιο (€)	τεμάχια	τιμή (€) (+19% ΦΠΑ)
Αντιστροφέας DC/AC συσσωρευτών	SMA	Sunny Island 4500*	2499	1	2.973,81
φ/β πλαίσια	Yingli Solar	YL 170 P-23b (πολυκρυσταλλικής τεχνολογίας)	321,3	20	7.646,94
Αντιστροφέας DC/AC φωτοβολταϊκών	SMA	SB 3300TL HC	1399	1	1.664,81
Γεννήτρια- diesel	KUMATSU	GRH180M 5.6KVA	958	1	1.140,02
Μπαταρίες	EPFON	6 OPzS 420 2V	141	24	4.026,96
* Από την νέα γενιά αντιστροφέων που κυκλοφορούν τώρα στην αγορά επιλέγεται ο Sunny Island 4248			ΣΥΝΟΛΟ (€)		17.452,54
** 1.89 ευρώ / ανα watt					

Πίνακας 10.9: Κόστος εξοπλισμού αυτόνομου υβριδικού συστήματος

10.5 Συγκριτικά Οφέλη του Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

Σε γενικές γραμμές, κάνοντας μια συνολική αποτίμηση των χαρακτηριστικών στοιχείων του υβριδικού συστήματος, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η χρήση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας παράλληλα με άλλες ηλεκτρικές πηγές (ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη ντίζελ ή ανεμογεννήτριες), όπου η μια πηγή δρα συμπληρωματικά προς την άλλη, έχει πολλά συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με το αντίστοιχο φωτοβολταϊκό σύστημα ή την αποκλειστική τροφοδότηση των καταναλώσεων με ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος. Αυτή δηλαδή η συνεργασία παράλληλων πηγών ενέργειας κατά τον σχεδιασμό αυτόνομου μικροδικτύου μας εξασφαλίζει:

- Ενεργειακά αποδοτικότερο σύστημα και
- Οικονομικά αποδοτικότερο σύστημα

Αν προσπαθούσαμε να καλύψουμε τις ενεργειακές ανάγκες της κατοικίας μόνο με φωτοβολταϊκά πλαίσια το κόστος αγοράς θα ήταν υπερβολικό. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών μας αναγκών και την τήρηση του ισοζυγίου της ενέργειας μόνο με παραγωγή από τον ήλιο, θα χρειαζόμασταν 56 φωτοβολταϊκά πλαίσια και 24 μπαταρίες των 2V και των 1.350Ah η κάθε μία. Ένα τέτοιο σύστημα με ονομαστική ισχύ 9,52kWp καταλαμβάνει χώρο περίπου 150m² και θα κόστιζε πολλαπλάσια απ' ό τι κοστίζει το αντίστοιχο υβριδικό. Σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 10.9 τα πλαίσια αυτά κοστολογούνται στις 21411€ ενώ αν προσθέταμε και το πολύ μεγάλο κόστος των μπαταριών η συνολική εγκατάσταση θα αποτελούσε

ένα πανάκριβο και εντελώς απρόσιτο εγχείρημα. Όταν το συνολικό κόστος του αντίστοιχου υβριδικού φτάνει τα 17.453€ σε βασικό εξοπλισμό γίνεται κατανοητό ότι αποτελεί την πιο συμφέρουσα πρόταση. Πέρα όμως από το διαφανιόμενο υπερβολικό κόστος του φωτοβολταϊκού συστήματος, η ενέργεια που απορρίπτει το σύστημα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες (σχήμα 10.2 - ισοζύγιο ενέργειας) αγγίζει ένα ποσοστό της τάξης του 43,4%. Αυτή η ενέργεια αν δεν υπάρξει κάποια περεταίρω πρόβλεψη για εκμετάλλευση της θα πάει χαμένη. Κάτι τέτοιο ασφαλώς και είναι απαγορευτικό αφού καθιστά το σύστημα, ενεργειακά μη αποδοτικό.

Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν και αν προσπαθούσαμε να καλύψουμε τις ενεργειακές ανάγκες της κατοικίας μόνο με γεννήτρια diesel. Το περιβαλλοντικό κόστος στην περίπτωση αυτή θα ήταν πρωτίστης σημασίας αφού πλέον θα μιλάγαμε μόνο για συμβατικές πηγές ενέργειας με την απελευθέρωση των ανάλογων ποσοτήτων από ανεπιθύμητους ρύπους CO₂. Με την βοήθεια του αντίστοιχου λογισμικού που αναπτύχθηκε για την διαστασιολόγηση του υβριδικού συστήματος, προκύπτει η απαιτούμενη παραγωγή ενέργειας για την κάλυψη των ετήσιων ενεργειακών αναγκών. Θα έπρεπε λοιπόν, να παραχθεί ποσότητα ενέργειας ίση με 4612kWh το χρόνο γεγονός που αντιστοιχεί στην απελευθέρωση 5 τόνων ρύπων CO₂. Από οικονομικής πλευράς, για να καλύψουμε το φορτίο της εν λόγω κατοικίας θα έπρεπε να τροφοδοτήσουμε την γεννήτρια diesel με περίπου 2.591,94 λίτρα πετρελαίου ανά έτος (0,562t/kWh κατανάλωση γεννήτριας diesel). [15] Με μία μέση τιμή πετρελαίου 1€/λίτρο (η τιμή αυτή αυξάνεται όσο αυξάνεται το κόστος μεταφοράς του καυσίμου) η τροφοδοσία της γεννήτριας με πετρέλαιο θα κόστιζε περίπου 2.600€/έτος.

Τελικά, με την δημιουργία ενός υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών, μπαταριών και γεννήτριας diesel καταφέραμε να πετύχουμε την ενεργειακή αυτονομία μιας μέσης κατοικίας με μειωμένο κόστος σε σχέση με άλλα αυτόνομα συστήματα. Ως προς την διατήρηση των οικονομικών προβλέψεων αυτών, σημαντικότερο ρόλο παίζει το κόστος των μπαταριών και ο απαιτούμενος χρόνος αντικατάστασής τους. Αν λάβουμε υπ' όψη τα αποτελέσματα του πίνακα 10.10 είναι φανερό πως οι μπαταρίες έχουν σημαντικό μερίδιο στην τελική διαμόρφωση του τιμολογίου. Άρα, βασική προϋπόθεση για την οικονομική υπεροχή ενός υβριδικού συστήματος έναντι των άλλων λύσεων αποτελεί η βέλτιστη διαχείριση των μπαταριών και η μεγιστοποίηση του χρόνου ζωής τους.

11. Συμπεράσματα και Προοπτικές

11.1 Συμπεράσματα

Συνοπτικά, τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη υβριδικών και φωτοβολταϊκών συστημάτων σε κτίρια είναι:

1. Τα *διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα* αποτελούν μια συμφέρουσα οικονομική επένδυση. Με την τωρινή τιμή να κυμαίνεται στα επίπεδα του 3,6€/Wp η εγκατάσταση ενός συστήματος εγκατεστημένης ισχύος 2,72kWp θα κόστιζε 9792€. Το σύστημα αυτό θα απέδιδε 3.194,94kWh/έτος που μεταφράζεται σε πίστωση 1.757,22€ βάσει του προγράμματος επιδοτούμενης κλιματικής από την ΔΕΗ. Με βάση το προφίλ κατανάλωσης που θεωρήθηκε για την συγκεκριμένη κατοικία η ενέργεια που θα αγοράζε από την ΔΕΗ για τον ένα χρόνο θα κόστιζε 591,37€ άρα θα προέκυπτε ένα καθαρό κέρδος 1.165,84€ τον χρόνο. Η επένδυση θα έκανε πλήρη απόσβεση στα 5,57 έτη και από εκεί και πέρα θα αποφέρει στον επενδυτή καθαρό κέρδος με εγγυημένο συμβόλαιο και μικρά έξοδα συντήρησης. Τα συγκεντρωτικά οικονομικά στοιχεία του διασυνδεδεμένου συστήματος φωτοβολταϊκών που μελετήθηκε στην διπλωματική εργασία παραθέτονται στο πίνακα 11.1.

<i>Οικονομικά στοιχεία Διασυνδεδεμένου Συστήματος</i>		
ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (kWh)	ΑΓΟΡΑ ΑΠΟ ΔΕΗ (€/kWh)	ΠΙΣΤΩΣΗ (€)
3194,94	0,55	1757,217
ΚΟΣΤΟΣ ΣΕ €/ Watt	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (kWp)	ΚΟΣΤΟΣ (€)
3,6	2,72	9792
ΑΠΟΣΒΕΣΗ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ (Έτη)		5,57

Πίνακας 11.1: Οικονομικά στοιχεία διασυνδεδεμένου φ/β συστήματος με την ΔΕΗ

2. Το *διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα* που έχει ως αναφορά την πιλοτική εγκατάσταση στην Ραφήνα έχει βαθμό απόδοσης 8,71%. Ο αντίστοιχος βαθμός απόδοσης του φωτοβολταϊκού συστήματος του εργαστηριακού μικροδικτύου είναι 7,93%.
3. Το *αυτόνομο υβριδικό σύστημα* αποτελεί μια μη οικονομικά βιώσιμη επενδυτική λύση. Το γεγονός αυτό προκύπτει με μια σύγκριση του κόστους αγοράς και εγκατάστασης του εξοπλισμού με το ετήσιο τιμολόγιο αγοράς της αντίστοιχης ενέργειας από το δημόσιο δίκτυο. Το κόστος αυτό σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 11.2 φτάνει τα 473,13€.

Κεφάλαιο 11 : Συμπεράσματα και Προοπτικές

	ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (kWh)	ΤΙΜΟΛΟΓΙΟ	ΠΑΓΙΟ (€)	0-800 kWh (€)	801-1600 kWh (€)	1601-2000 kWh (€)	ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (€)
ΣΕΠ-ΔΕΚ	1311,50	B	11,44	70,09	57,00		138,52
ΙΑΝ-ΑΠΡ	1595,10	B	11,44	70,09	88,66		170,19
ΜΑΙ-ΑΥΓ	1543,43	B	11,44	70,09	82,89		164,42
						ΣΥΝΟΛΟ	473,13

Πίνακας 11.2: Τιμολόγιο της ΔΕΗ για την ετήσια κατανάλωση ενέργειας

Το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του εξοπλισμού όπως εκτιμήθηκε στην παράγραφο 10.5 φτάνει τις 20.000€ άρα ο αναμενόμενος χρόνος απόσβεσης ξεπερνάει τα 40 χρόνια. Αν θεωρηθούν και οι λογικές φθορές του συστήματος και η περιοδική αντικατάσταση των μπαταριών, ο χρόνος αυτός είναι ακόμη μεγαλύτερος.

4. Με την χρήση *υβριδικού συστήματος* δύο ή παραπάνω παράλληλων πηγών ενέργειας καταλήγουμε σε αποδοτικότερο ενεργειακά και οικονομικά σύστημα σύμφωνα και με τα στοιχεία που δόθηκαν στην παράγραφο 10.4.
5. Η αναλογία 70% – 30% σε διείσδυση ενέργειας από την φωτοβολταϊκή γεννήτρια και γεννήτρια diesel αντίστοιχα, καθιστά το σύστημα αξιόπιστο σε σχέση με τις προδιαγραφές που θέσαμε κατά τον στρατηγικό σχεδιασμό της ενεργειακής διαχείρισης του αυτόνομου υβριδικού συστήματος.
6. Όπως τελικά διαστασιολογήθηκε το αυτόνομο υβριδικό σύστημα αποτελεί μια αξιόπιστη ενεργειακά λύση για την ηλεκτροδότηση μιας κατοικίας που βρίσκεται εκτός δικτύου της ΔΕΗ. Επιπλέον αποτελεί μια αξιόπιστη λύση και για άλλες περιπτώσεις απομονωμένων εγκαταστάσεων όπως είναι οι τηλεπικοινωνιακοί αναμεταδότες, οι αγροτικές εγκαταστάσεις κ.α.

11.2 Προοπτικές

Μελλοντικά ως προς την περαιτέρω ανάπτυξη και διεύρυνση των συμπερασμάτων και των μεθόδων που ακολουθήθηκαν κατά την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να γίνει:

1. Χρήση δεύτερης ανανεώσιμης πηγής ενέργειας ως προς την δημιουργία αυτόνομου υβριδικού συστήματος. Η δεύτερη πηγή παραγωγής ενέργειας θα μπορούσε κάλλιστα να είναι μια ανεμογεννήτρια όπως αυτήν που υπάρχει εγκατεστημένη στο εργαστηριακό μικροδίκτυο. Στην περίπτωση αυτή χρειάζεται ανάλογη μελέτη για την προσαρμογή της στο σύστημα ώστε βάσει των προδιαγραφών που θα οριστούν με ανάλογο τρόπο να συμπληρώνει την παραγωγή προς την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Εναλλακτικά θα μπορούσε να συνεισφέρει ανάλογα με την εφαρμογή, γεννήτρια κυψέλης υδρογόνου, μικρό υδροηλεκτρικό κ.α.
2. Ανάπτυξη νέων μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας. Όπως είδαμε, για την αξιοπιστία του συστήματος πολλά εξαρτώνται από την διαθεσιμότητα και την αντοχή των μέσων αποθήκευσης της ενέργειας. Στο κομμάτι αυτό η ανάπτυξη νέων προτάσεων θα αποτελέσει σημαντική προσθήκη ως προς την βελτίωση της συνολικής λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος. Οι super capacitors για παράδειγμα, θα μπορούσαν να συμβάλλουν σημαντικά

Κεφάλαιο 11 : Συμπεράσματα και Προοπτικές

στην αύξηση της αποθηκευμένης ενέργειας και η συμπεριφορά τους σε συνδυασμό με τον υπόλοιπο εξοπλισμό είναι προς διερεύνηση.

3. Η χρήση τεχνολογίας EIB παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως προς την εξοικονόμηση πρόσθετων ποσοτήτων ενέργειας. Με παράλληλη δηλαδή χρήση των κτηριακών αυτοματισμών και όλων των εφαρμογών έξυπνου κτηρίου, μπορούμε να περιορίσουμε την κατανάλωση ενέργειας και να υποδιαστασιολογήσουμε έτσι το αυτόνομο υβριδικό σύστημα με τα ανάλογα οφέλη που προκύπτουν από κάτι τέτοιο.
4. Η χρήση του υβριδικού συστήματος σε συνεργασία με το δίκτυο της ΔΕΗ (διασυνδεδεμένο) αποτελεί πεδίο μελέτης. Το αντικείμενο αυτής έχει να κάνει την ενεργειακή διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας με πρόσθετο κριτήριο την τρέχουσα τιμή της κιλοβατώρας που καθορίζει το EEX (European Energy Exchange). Έτσι το σύστημα, με την επίτευξη αμφίδρομης επικοινωνίας όλων των πηγών παραγωγής, θα δύναται να αποφασίσει αν θα πουλήσει ή θα αγοράσει ενέργεια.

Παράρτημα Α: Τεχνικά Χαρακτηριστικά Εξοπλισμού

A.1 Πιλοτική Εγκατάσταση Φωτοβολταϊκού Πάρκου Ραφήνας

➤ **Φωτοβολταϊκό πλαίσιο**

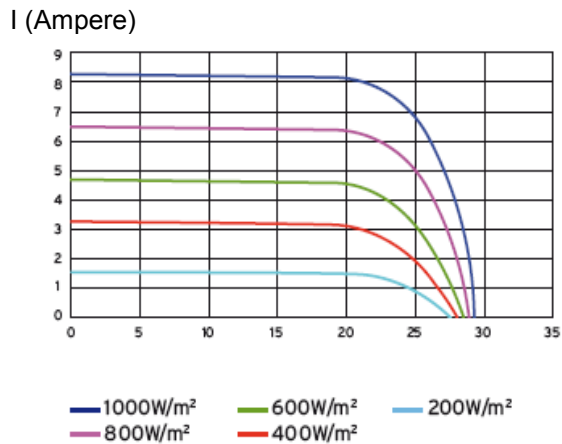
Χαρακτηριστικά μεγέθη του φωτοβολταϊκού πλαισίου (σχήμα Α.1) αποτελούν:

- η μέγιστη παραγόμενη ισχύς,
- η απόδοση,
- το μέγιστο ρεύμα λειτουργίας,
- το ρεύμα βραχυκύκλωσης,
- η μέγιστη τάση λειτουργίας,
- η τάση ανοιχτού κυκλώματος
- μηχανικά χαρακτηριστικά (διαστάσεις / αντοχές των υλικών)

Στους πίνακες Α.1 και Α.2 αναγράφονται όλες οι τιμές των ηλεκτρικών και μηχανικών αυτών μεγεθών αντίστοιχα. Επιπλέον, χαρακτηριστικό στοιχείο της συμπεριφοράς κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου αποτελεί το διάγραμμα I-V για διάφορες τιμές προσπίπτουσας ακτινοβολίας (σχήμα Α.2). Οι διαστάσεις του πλαισίου παρουσιάζονται στο σχήμα Α.3.



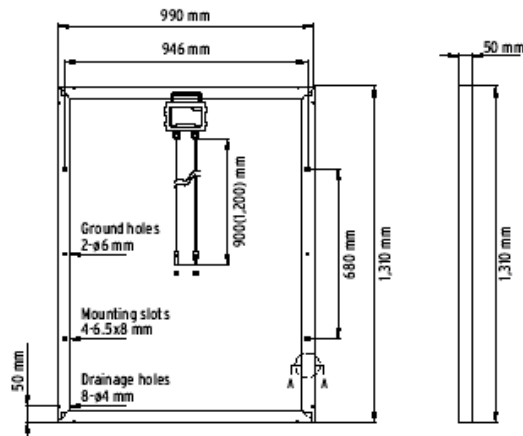
Σχήμα Α.1: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο (YL 170 P-23b)



Σχήμα Α.2: I-V καμπύλες φωτοβολταϊκού πλαισίου

Ηλεκτρικές Παράμετροι (σε ακτινοβολία αναφοράς STC 1kW/m ² , 25°C) AM 1.5 EN 60904-3	
Τύπος πάνελ	YL 170 P-23b
Ισχύς εξόδου (Wp)	170Wp
διακύμανση Ισχύς εξόδου (%)	±3
Απόδοση πάνελ (%)	12,7
Τάση για Pmax (V)	23
Ρεύμα για Pmax (V)	7,17
Τάση ανοιχτού κυκλώματος (V)	29
Ρεύμα βραχυκύκλωσης (A)	7,9
Μέγιστη τάση συστήματος (V)	1000

Πίνακας Α.1: Ηλεκτρικές παράμετροι



Σχήμα Α.3: Διαστάσεις φωτοβολταϊκό πλαισίου

Μηχανικές Παράμετροι (σε ακτινοβολία αναφοράς STC 1kW/m ² , 25°C) AM 1.5 EN 60904-3	
Διαστάσεις (μήκος / πλάτος / πάχος [mm])	1310 / 990 / 50
Βάρος [kg]	15,8
Καλώδιο (κατασκευαστής / μήκος[mm] / διατομή[mm ²])	CIXI / 900 / 4,0
Ακροδέκτης σύνδεσης (κατασκευαστής / τύπος / βαθμός προστασίας)	MC4 / με προστασία υπεριώδους ακτινοβολίας UV / IP67
Μπροστινή κάλυψη (υλικό / πάχος [mm])	Γυαλί ασφαλείας / 3,6mm
Τύπος κυψέλης (ποσότητα / τεχνολογία / διαστάσεις)	48 / πολυκρυσταλλική / 156X156
Κουτί διακλάδωσης (κατασκευαστή / βαθμός προστασίας, αριθμός διόδων)	CIXI / IP65 / 6
Κουτί διακλάδωσης - Διαστάσεις (μήκος / πλάτος / πάχος [mm])	151 / 122 / 25
Υλικά	Οξικό Άλας Αιθυλενίου Βινυλίου (EVA)
Πίσω κάλυμμα (υλικό / πάχος)	Le / PET / PVDF / 0,287
Συνθήκες Λειτουργίας	
Θερμοκρασία [°C]	-40 έως +85
Μέγιστο φορτίο ανέμου / Μέγιστο φορτίο χιονιού [Pa]	2,4K / 5,4K

Πίνακας Α.2: Μηχανικές παράμετροι

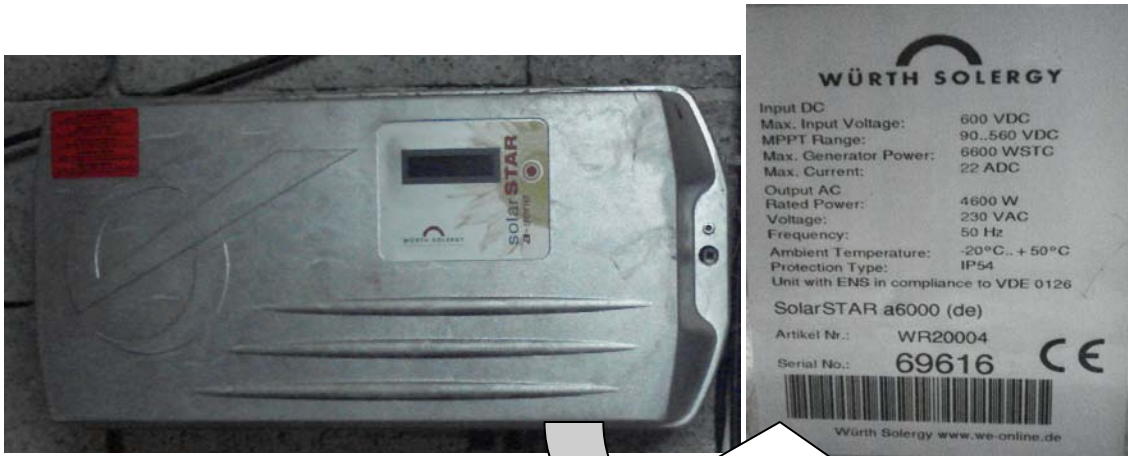
Τα πολυκρυσταλλικά πλαίσια πυριτίου που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή του πάρκου έχουν ένα μέτριο κόστος σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες που είναι διαθέσιμες στις μέρες μας, και σίγουρα χαμηλότερο από τα αντίστοιχα μονοκρυσταλλικά. Αυτό οφείλεται στην χαμηλότερη ποιότητα πυριτίου που χρησιμοποιούν με άμεσο επίσης μειονέκτημα σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά πλαίσια την σχετικά μειωμένη ικανότητα μετατροπής που κυμαίνεται σε 12-14%. Η συγκεκριμένη σειρά φωτοβολταϊκών πλαισίων YL 170 P-23b διαθέτει πιστοποίηση IEC 61215 Edition 2, IEC 61730 Class A, CE, ISO 9001.

➤ Αντιστροφέας DC/AC

Τα σημαντικότερα κριτήρια για την επιλογή του αντιστροφέα είναι η αξιοπιστία, ενεργειακή απόδοση, οι αρμονικές παραμορφώσεις, το κόστος και η συμβατότητα με τις τεχνικές απαιτήσεις της ΔΕΗ . Τα χαρακτηριστικά των αντιστροφέων είναι

- το εύρος τάσης εισόδου $V_{DC,max}$ *που καθορίζει και την συνδεσμολογία των πλαισίων*
- η μέγιστη ισχύ εισόδου $P_{DC,max}$
- το μέγιστο ρεύμα εισόδου $I_{DC,max}$
- η μέγιστη ισχύ εξόδου $P_{AC,max}$
- το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας
- ο τύπος προστασίας
- οι πιστοποιήσεις

Ο αντιστροφέας που χρησιμοποιήθηκε στο φωτοβολταϊκό πάρκο της Ραφήνας είναι της Würth Solergy. Αυτός και η πινακίδα των τεχνικών χαρακτηριστικών φαίνονται στο σχήμα Α.4.



Σχήμα Α.4: Αντιστροφέας Würth Solergy 6,6kW -
πινακίδα αναγραφόμενων μεγεθών

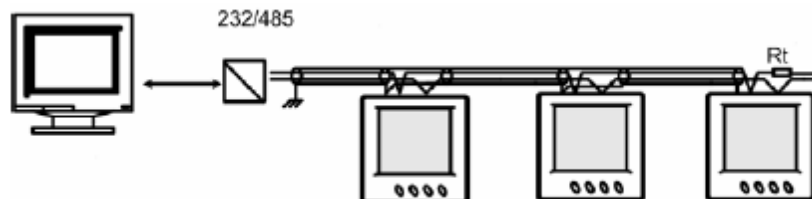
➤ Πολυόργανο Μετρήσεων

Το πολυόργανο της DEIF A/S φαίνεται στο σχήμα Α.5.



Σχήμα Α.5: Πολυόργανο της DEIF A/S

Στον πίνακα Α.3 αναγράφονται όλες οι μετρούμενες και υπολογιζόμενες τιμές του πολυοργάνου. Η επικοινωνία μεταξύ του πολυοργάνου και του Η/Υ γίνεται μέσω RS485 bus (modbus) και άρα απαιτείται η χρήση κατάλληλου εξωτερικού μετατροπέα RS232/RS485 (σχήμα Α.6). Στην εγκατάσταση χρησιμοποιήθηκε ο μετατροπέας του σχήματος Α.7 που μας δίνει την επιπλέον δυνατότητα σύνδεσης απευθείας μέσω θύρας USB στον υπολογιστή. Η μέγιστη απόσταση σύνδεσης που μπορούμε να έχουμε μεταξύ πολυοργάνου (ή πολυοργάνων -έως 32 συσκευές-) και Η/Υ είναι το 1km ενώ πάντα στο τέλος της γραμμής συνδέεται τερματική αντίσταση 120Ω. Σημειώνεται επίσης, ότι το συγκεκριμένο όργανο έχει δυνατότητα μέτρησης 31 αρμονικών.



Σχήμα Α.6: Σύνδεση πολυοργάνων σε σειρά

Μετρούμενες και υπολογιζόμενες τιμές πολυοργάνου	
Στοιχεία Τάσης - Έντασης	
Φασική Τάση (Vφ)	τρέχουσα τιμή για κάθε φάση και μέση τιμή
Πολική Τάση (Vπ)	τρέχουσα τιμή για κάθε φάση και μέση τιμή
Ρεύμα (I)	τρέχουσα τιμή για κάθε φάση και μέση τιμή
Ρεύμα Ουδετέρου (I_n)	τρέχουσα τιμή
Στοιχεία Ισχύος	
Ενεργό Ισχύ (P)	τρέχουσα - συνολική τιμή για κάθε φάση
Άεργο Ισχύ (Q)	τρέχουσα - συνολική τιμή για κάθε φάση
Φαινόμενη Ισχύ (S)	τρέχουσα - συνολική τιμή για κάθε φάση
Συντελεστή Ισχύος (cosφ)	τρέχουσα τιμή για κάθε φάση - μέση τιμή συστήματος
Παραγωγή Ισχύος	συνολική παραγωγή ισχύος συστήματος- P,Q,S
Συχνότητα (f)	τρέχουσα και τιμή
Στοιχεία Ποιότητας Ισχύος	
THD τάσης (THD_V)*	τρέχουσα τιμή για κάθε φάση και μέση τιμή
THD ρεύματος (THD_Vπ)*	τρέχουσα τιμή για κάθε φάση και μέση τιμή
Στοιχεία Ενέργειας	
Εισερχόμενη ενέργεια (E_{p_imp})	συνολική τιμή σε kWh
Εξερχόμενη ενέργεια (E_{p_exp})	συνολική τιμή σε kWh
Απόλυτο/Αλγεβρικό άθροισμα ενεργειών (E_{p_total})	τιμή σε kWh
Εισερχόμενη ενέργεια (E_{q_imp})	συνολική τιμή σε kVarh
Εξερχόμενη ενέργεια (E_{q_exp})	συνολική τιμή σε kVarh
Απόλυτο/Αλγεβρικό άθροισμα ενεργειών (E_{q_total})	τιμή σε kWh

Πίνακας Α.3: Μετρούμενες και υπολογιζόμενες τιμές του πολυοργάνου DEIF A/S


*έως 31 αρμονικές



Σχήμα Α.7: Εξωτερικός μετατροπέας RS232-USB/RS485

A.2 Εγκατάσταση Εργαστηριακού Μικροδικτύου

➤ Αντιστροφέας DC/AC – battery inverter

Technical data		Sunny Island 4500 
Output data Rated AC voltage (adjustable) Grid frequency (adjustable) Continuous AC output at 25 °C / 45 °C Continuous AC output at 25 °C for 30 / 5 / 1 min Rated AC current Max. current (peak value) for 5 s Output voltage harmonic distortion factor Power factor	U_{AC} f P_{nom} P30 / 5 / 1 $I_{AC, nom}$ K_{VAC} $\cos \varphi$	SI 4500 230 V (200 - 260 V) 50 o. 60 Hz (40 - 70 Hz) 3700 / 3300 W 4500 / 5200 / 6000 W 16 A 70 A < 3 % -1 to +1
Input data Input voltage Input frequency Max. AC input current Max. input power	$U_{AC, ext}$ f_{ext} $I_{AC, ext}$ $P_{AC, ext}$	230 V (150 - 260 V) 50 or 60 Hz (40 - 70 Hz) 0 - 500 A (depends on external wiring) depends on external wiring
Battery data Battery voltage (range) Max. battery charging current Continuous charging current Battery capacity Charge control	U_{Bat} $I_{Bat, max}$ $I_{Bat, nom}$ C_{Bat}	48 - 60 V (41 - 81 V) 125 A 60 A 100 - 10000 Ah IU ₀ U with automatic full charge and equalization charge
Efficiency/power consumption Max. efficiency (typical) Own consumption (no load/standby)	η	> 91 % 60 W (< 9 W)
Protection type acc. to DIN EN 60529		IP30
Device protection		Short-circuit, overload, overtemperature
Interfaces		6 buttons, 8-line display, 8 multifunction relays, 1 service interface (COM3), RS485/RS232 electrically separated (optional)
Mechanical data Width / Height / Depth Weight		510 / 560 / 270 mm 45 kg
Ambient conditions Ambient temperature Guarantee (EU)		from -25 °C to +45 °C 2 years
Accessories Ext. Battery temperature sensor Generator management "GenMan"		optional integrated



Πίνακας Α.4: Τεχνικά χαρακτηριστικά Sunny Island

➤ Αντιστροφέας DC/AC – PV inverter



Sunny Boy 1100E

Input Values

	Sunny Boy 700			Sunny Boy 850	Sunny Boy 1100 E	Sunny Boy 2500	Sunny Boy 3000
Input voltage range U_{PV}	75 ... 150 V DC	100 ... 200 V DC	125 ... 250 V DC	125 ... 250 V DC	150 ... 400 V DC	250 ... 600 V DC	290 ... 600 V DC
recommended peak power of the PV-panels P_{PV}	640 Wp	840 Wp (configuration with jumpers)	1000 Wp	1250 Wp	1500 Wp	3450 Wp	4100 Wp
maximum input current I_{Vmax}	7 A	7 A	7 A	8 A	8.5 A	11 A	11.2 A

DC-disconnection facility

SB 700, SB 850 . . . : all pole disconnection

SB 1100 E, SB 2500,

SB 3000 : safe to touch MC[®] snap cable connectors

surge voltage protection: thermally monitored varistors on DC-side

voltage rippel U_{pp} . . . : < 10 %

earth fault monitoring : standard feature

pole interchanging

protection : short circuit diode

Output Values

	Sunny Boy 700			Sunny Boy 850	Sunny Boy 1100 E	Sunny Boy 2500	Sunny Boy 3000
nominal output power P_{ACnom}	460 W	600 W	700 W	850 W	1000 W	2200 W	2600 W
peak power				900 W	1100 W	2500 W	3000 W
Total Harmonic Distortion of output current (with $K_{UAC} < 2\%$, $P_{AC} > 0.5 P_{ACnom}$)	THD < 3 %	THD < 3 %	THD < 3 %	THD < 3 %	THD < 4 %	THD < 4 %	THD < 4 %

short circuit proof . . . : grid side with current control

grid voltage U_{AC} . . . : 196 ... 253 V AC

grid frequency f_{AC} . . . : 49.8 ... 50.2 Hz (60 Hz option.)

phase shift φ

(based on fundamental

wave of the current) . . . : 0°

General Data

	Sunny Boy 700			Sunny Boy 850	Sunny Boy 1100 E	Sunny Boy 2500	Sunny Boy 3000
maximum efficiency	≥ 93 %	≥ 93 %	≥ 93 %	≥ 93 %	≥ 93 %	≥ 93 %	≥ 95 %
internal consumption in operation	≤ 4 W	≤ 4 W	≤ 4 W	≤ 4 W	≤ 4 W	≤ 7 W	≤ 7 W
internal consumption in stand by	≤ 0.1 W	≤ 0.1 W	≤ 0.1 W	≤ 0.1 W	≤ 0.1 W	≤ 0.25 W	≤ 0.25 W
size (w x h x d)	322 x 290 x 180 mm	322 x 290 x 180 mm	322 x 290 x 180 mm	322 x 290 x 180 mm	322 x 320 x 180 mm	434 x 295 x 214 mm	434 x 295 x 214 mm
weight (approx.)	16 kg	16 kg	16 kg	18 kg	21 kg	30 kg	32 kg

Πίνακας Α.5: Τεχνικά χαρακτηριστικά Sunny Boy 1100E

Παράρτημα Α : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Εξοπλισμού

➤ Αντιστροφέας DC/AC – Wind inverter



Windy Boy 1700

Max. input open circuit voltage	U_{DC0}	400 V
Input voltage, MPP range	U_{DC}	139 V ... 400 V DC
Nominal DC operating voltage	U_{DCnom}	180 V
Max. input current	I_{DCmax}	12.6 A
Max. input power	P_{DCmax}	1850 W
Recommended generator power at 5000 full-load hours / year	$P_{turbmax}$	1240 W
Recommended generator power at 2500 full-load hours / year	$P_{turbmax}$	1395 W
All-pole isolator on the DC input side		DC plug connector
Overvoltage protection		Thermally monitored varistors
Voltage ripple	U_{PP}	< 4 % of the input voltage
Personal protection		Insulation monitoring (Riso > 1 MΩ)
Operating consumption		< 4 W
Reverse polarity protection		Short circuit diode

Nominal output power	P_{ACnom}	1550 W
Peak output power	P_{ACmax}	1700 W
Nominal output current	I_{ACnom}	6.5 A
Harmonic distortion of output current (at $K_{Unom} < 2\%$, $P_{AC} > 0.5 P_{ACnom}$)	THD_{IAC}	< 4 %
Operating range, grid voltage	V_{AC}	198 ... 260 V AC (180 ... 265 V programmable)
Operating range, grid frequency	f_{AC}	49.8 ... 50.2 Hz / 59.8 ... 60.2 Hz (45.5 ... 54.5 Hz / 55.5 ... 64.5 Hz programmable)
All-pole isolator grid side		Independent disconnection device (SMA grid guard)
Phase shift angle (relative to the fundamental wave of the current)	$\cos \varphi$	1
Overvoltage category		III
Test voltage (50 Hz)		1.4 kV (1 s routine testing / 5 s type testing)
Test surge voltage		4 kV (1.2/50 ms) (serial interface: 6 kV)
Own consumption in standby mode		0.1 W

Πίνακας Α.6: Τεχνικά χαρακτηριστικά windy Boy 1700

➤ Μετασηματιστές ρεύματος και τάσης (LEM)

➔ Voltage Transducer LV 25-P

$I_{PN} = 10 \text{ mA}$
 $V_{FN} = 10..500 \text{ V}$



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal current rms	10	mA
I_{FN}	Primary current, measuring range	0 .. ± 14	mA
R_M	Measuring resistance	$R_{M,mini}$ $R_{M,maxi}$	
	with ± 12 V	@ ± 10 mA ^{maxi}	30 190 Ω
		@ ± 14 mA ^{maxi}	30 100 Ω
	with ± 15 V	@ ± 10 mA ^{maxi}	100 350 Ω
		@ ± 14 mA ^{maxi}	100 190 Ω
I_{SN}	Secondary nominal current rms	25	mA
K_N	Conversion ratio	2500 : 1000	
V_C	Supply voltage (± 5 %)	± 12 .. 15	V
I_C	Current consumption	10 (@ ± 15 V) + I_S	mA

Accuracy - Dynamic performance data

X_o	Overall Accuracy @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ ± 12 .. 15 V	± 0.9	%
		@ ± 15 V (± 5 %)	± 0.8	%
ϵ_L	Linearity error		< 0.2	%
I_o	Offset current @ $I_S = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$		Typ Maxi	± 0.15 mA
I_{OT}	Temperature variation of I_o	0°C .. + 25°C	± 0.06	± 0.25 mA
		+ 25°C .. + 70°C	± 0.10	± 0.35 mA
t_r	Response time ¹⁾ to 90 % of I_{PN} step		40	µs

General data

T_A	Ambient operating temperature	0 .. + 70	°C
T_S	Ambient storage temperature	- 25 .. + 85	°C
R_p	Primary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	250	Ω
R_s	Secondary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	110	Ω
m	Mass	22	g
	Standards	EN 50178: 1997	

Πίνακας Α.7: Τεχνικά χαρακτηριστικά LEM μέτρησης V_{DC} σε ϕ/β , A/Γ και μπαταρίες

➔ DC Current transducer DK-B3/5/10

$I_{PN} = 50..400 \text{ A}$



Electrical data

Primary Nominal Current	Analogue Output Signal ¹⁾	Type
I_{FN} (A.t)	V_{OUT} (V)	
50,75,100	0-3	DK 100 B3
100,150,200	0-3	DK 200 B3
150,225,300	0-3	DK 300 B3
200,300,400	0-3	DK 400 B3
50,75,100	0-5	DK 100 B5
100,150,200	0-5	DK 200 B5
150,225,300	0-5	DK 300 B5
200,300,400	0-5	DK 400 B5
50,75,100	0-10	DK 100 B10
100,150,200	0-10	DK 200 B10
150,225,300	0-10	DK 300 B10
200,300,400	0-10	DK 400 B10

V_C	Supply voltage	20-50 VDC or 22-38 VAC
R_L	Load resistance (max)	250 kΩ
V_S	Isolation voltage	3000 V AC
f	Frequency	DC
I_C	Current consumption (max)	100 mA

Accuracy - Dynamic performance data

X	Accuracy of reading @ $T_A = 25^\circ\text{C}$	± 1	%
ϵ_L	Linearity	± 0.75	%
t_r	Response time @ 90% of I_{PN}	< 300	mS

Πίνακας Α.8: Τεχνικά χαρακτηριστικά LEM μέτρησης I_{DC} στις μπαταρίες

$$I_{PN} = 100 \text{ A}$$

➔ **Current Transducer LA 100-P/SP13**



Electrical data					
I_{FN}	Primary nominal r.m.s. current	100	A		
I_p	Primary current, measuring range	0 .. 160	A		
R_M	Measuring resistance		$R_{M \text{ min}}$	$R_{M \text{ max}}$	
			with $\pm 12 \text{ V}$	@ $\pm 100 \text{ A}_{\text{max}}$	10
		@ $\pm 160 \text{ A}_{\text{max}}$	10	30	Ω
	with $\pm 15 \text{ V}$	@ $\pm 100 \text{ A}_{\text{max}}$	40	95	Ω
	@ $\pm 160 \text{ A}_{\text{max}}$	40	50	Ω	
I_{SN}	Secondary nominal r.m.s. current	100	mA		
K_N	Conversion ratio	1 : 1000			
V_C	Supply voltage ($\pm 5 \%$)	$\pm 12 \dots 15$	V		
I_C	Current consumption	10 (@ $\pm 15 \text{ V}$) + I_S	mA		
V_G	R.m.s. voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 mn	2.5	kV		

Accuracy - Dynamic performance data				
X	Accuracy @ I_{FN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ $\pm 15 \text{ V}$ ($\pm 5 \%$)	± 0.45	%
		@ $\pm 12 \dots 15 \text{ V}$ ($\pm 5 \%$)	± 0.70	%
ϵ_L	Linearity		< 0.15	%
I_O	Offset current @ $I_p = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$		Typ	Max
I_{OM}	Residual current ¹⁾ @ $I_p = 0$, after an overload of $3 \times I_{FN}$			± 0.2 mA
I_{OT}	Thermal drift of I_O	- $25^\circ\text{C} \dots + 70^\circ\text{C}$	± 0.1	± 0.5 mA
t_{ra}	Reaction time @ 10 % of I_{FN}		< 500	ns
t_r	Response time ²⁾ @ 90 % of I_{FN}		< 1	μs
di/dt	di/dt accurately followed		> 200	A/ μs
f	Frequency bandwidth (- 1 dB)		DC .. 200	kHz

General data			
T_A	Ambient operating temperature	- 25 .. + 70	$^\circ\text{C}$
T_S	Ambient storage temperature	- 40 .. + 85	$^\circ\text{C}$
R_S	Secondary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	25	Ω
m	Mass	18	g
	Standards ³⁾	EN 50178	

Πίνακας Α.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά LEM μέτρησης I_{DC} στα ϕ/β

➤ **Κεντρική μονάδα επικοινωνίας SUNNY WEBBOX**



Sunny WebBox



Μηχανολογικά μεγέθη

Διαστάσεις σε Π x Υ x Β	255 mm x 130 mm x 57 mm
Βάρος	750 g

Τροφοδοσία τάσης

Τυπική κατανάλωση ισχύος	4 W
Μέγιστη κατανάλωση ισχύος	12 W

Περιβαλλοντικές συνθήκες

Θερμοκρασία περιβάλλοντος	-20 °C ... +65 °C
Σχετική υγρασία αέρα	5 % ... 95 %, χωρίς συμπύκνωση
Κλάση προστασίας*	IP20

*Είδος προστασίας σύμφωνα με το πρότυπο DIN 60529

Επικοινωνία

Μετατροπείες εκτός τον Sunny Central	RS485
Sunny Central	RS485, 10/100 Mbit Ethernet
Ηλεκτρονικός Υπολογιστής	10/100 Mbit Ethernet
μόντεμ / Διαμορφωτής*	Αναλογικό, GSM
Εμβέλεια επικοινωνίας RS485	1.200 m
Εμβέλεια επικοινωνίας Ethernet	100 m

* προαιρετικά

Λοιπά

Γλώσσες της διασύνδεσης λογισμικού	Γερμανικά, αγγλικά, γαλλικά, ιταλικά, ισπανικά, ελληνικά, κορεατικά, πορτογαλικά, τσεχικά, ολλανδικά,
Εσωτερική κυκλική μνήμη	8 MB
Επέκταση μνήμης με κάρτες SD*	128 MB/512 MB/1 GB/2 GB

* προαιρετικά

Μηχανολογικά μεγέθη

Διαστάσεις σε Β x Η x Τ	107,8 mm x 57,5 mm x 33,5 mm
Βάρος	300 g

Τροφοδοσία τάσης

Τάση	110 V – 230 V AC, 50/60 Hz
Ονομαστικό ρεύμα	0,8 A

Πίνακας Α.10: Τεχνικά χαρακτηριστικά SUNNY WEBBOX

A.3 Διαστασιολόγηση Διασυνδεδεμένου Φωτοβολταϊκού Συστήματος

Ο πίνακας του αντιστροφέα μας δίνει τα κύρια μεγέθη που μας εξυπηρετούν στην παρούσα εφαρμογή. Το φωτοβολταϊκό και η καλωδίωση του συστήματος παρουσιάζονται στους επόμενους δύο πίνακες. Όπως φαίνεται η διασύνδεση από την πλευρά του AC γίνεται με καλώδιο διατομής 2,5mm² και μήκους 10m περίπου έως ότου συνδεθεί μέσω μετρητή με το δίκτυο της ΔΕΗ. Τα στοιχεία αυτά προέκυψαν μετά την χρήση του αντίστοιχου λογισμικού SMA Design.



Σχήμα Α.8: Προτεινόμενος αντιστροφέας για το διασυνδεδεμένο φ/β σύστημα της Ραφήνας

Inverter SMA	
Model	SB 3000
Μέγιστη DC Ισχύς (kWp)	3,2
Μέγιστη AC Ισχύς (kWp)	3
Ονομαστική AC Ισχύς (kW)	2,75
Μέγιστο επιτρεπόμενο ρεύμα εισόδου (Ap)	9,8
Μέγιστη επιτρεπόμενη DC τάση (Vp)	600
Τάση ανοιχτοκυκλώματος στοιχειοσειράς (-10°C) (V)	524
MPP Τάση στοιχειοσειράς (15°C)	385
MPP Τάση στοιχειοσειράς (50°C)	325
MPP Τάση στοιχειοσειράς (70°C)	291
Ελάχιστη MPP Τάση	268
Μέγιστος αριθμός στοιχειοσειρών	3
Ονομαστική τάση AC (V)	220-240
Ονομαστική συχνότητα AC (Hz)	50/60
Απόδοση (%)	93,8
Τύπος προστασίας	IP 65

ΚΑΛΩΔΙΩΣΗ	DC	AC
Μήκος καλωδίου (m)	15	10
Διατομή καλωδίου (mm ²)	4	2,5
Πτώση Τάσης (V)	1,18	1,79
Ανίσταση καλωδίου (Ω)	0,06	0,07
Συνολική απώλεια Ισχύος (W)	10,78	23,41
Απώλεια ισχύος για μέγιστη DC/AC ισχύ (%)	0,34	0,85

Φ/Β σύστημα	
Ονομαστική Ισχύς (kWp)	2,72
Αριθμός στοιχείων	16
Αριθμός στοιχειοσειρών	1
Μέγιστη DC τιμή ρεύματος (Ap)	7,4
Μέγιστη DC τιμή τάσης (Vp)	368

Πίνακας Α.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά εγκατάστασης φ/β πάρκου Ραφήνας

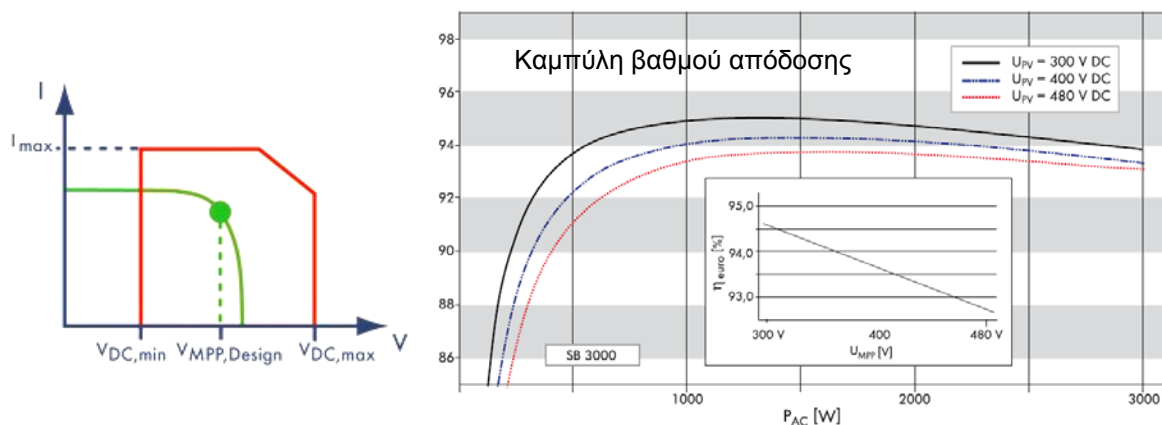
Παράρτημα Α : Τεχνικά Χαρακτηριστικά Εξοπλισμού



SUNNY BOY 2500 / 3000

	SB 2500	SB 3000
Είσοδος (DC)		
Μέγ. ισχύς DC	2700 W	3200 W
Μέγ. τάση DC	600 V	600 V
Περιοχή φωτοβολταϊκής τάσης, σημείου μέγιστης ισχύος (μέσω ανιχνευτή MPP)	224 V - 480 V	268 V - 480 V
Μέγ. ρεύμα εισόδου	12 A	12 A
Αριθμός των ανιχνευτών σημείου μέγιστης ισχύος	1	1
Μέγ. αριθμός στοιχειοσειρών (παράλληλη σύνδεση)	3	3
Εξόδος (AC)		
Ονομαστική ισχύς AC	2300 W	2750 W
Μέγ. ισχύς AC	2500 W	3000 W
Μέγ. ρεύμα εξόδου	12,5 A	15 A
Ονομαστική τάση / Περιοχή τάσεων AC	220 V - 240 V / 180 V - 260 V	220 V - 240 V / 180 V - 260 V
Συχνότητα δικτύου AC (αυτορυθμιζόμενη) / Περιοχή	50 Hz / 60 Hz / ± 4,5 Hz	50 Hz / 60 Hz / ± 4,5 Hz
Συντελεστής ισχύος (cos φ)	1	1
Σύνδεση AC	μονοφασική	μονοφασική
Βαθμός απόδοσης		
Μέγ. βαθμός απόδοσης	94,1 %	95,0 %
Euro-eta	93,2 %	93,6 %
Συστήματα προστασίας		
Προστασία αντιστροφής πόλων DC	●	●
Διακόπτης ESS απομόνωσης φορτίου DC	●	●
Αντοχή σε βραχυκύκλωμα AC	●	●
Επιτήρηση βραχυκυκλώματος γης	●	●
Επιτήρηση δικτύου (SMA grid guard)	●	●
Γαλβανικά μονωμένος	●	●
Γενικά στοιχεία		
Διαστάσεις (Πλάτος / Ύψος / Βάθος) σε mm	434 / 295 / 214	434 / 295 / 214
Βάρος	30 kg	32 kg
Περιοχή θερμοκρασιών λειτουργίας	-25 °C ... +60 °C	-25 °C ... +60 °C
Ίδια κατανάλωση: Λειτουργία (Αναμονής) / νυχτερινή	< 7 W / 0,25 W	< 7 W / 0,25 W
Τοπολογικά στοιχεία	Μετασχηματιστής NF (χαμηλής συχνότητας)	Μετασχηματιστής NF (χαμηλής συχνότητας)
Τρόπος ψύξης	Μεταφορά θερμότητας	Μεταφορά θερμότητας
Χώρος τοποθέτησης: εσωτερικά / εξωτερικά (Προστασία IP65)	●/●	●/●
Εξοπλισμός		
Σύνδεση DC: MC3 / MC4 / Τυσο	●/○/○	●/○/○
Σύνδεση AC: Βύσμα σύνδεσης	●	●
Οθόνη LCD	●	●
Χρώμα καπακιού: κόκκινο	●	●
Διαπαφές: RS485 / Ασύρματη	○/○	○/○
Εγγύηση: 5 έτη / 10 έτη	●/○	●/○
Πιστοποιητικά και εγκρίσεις	www.SMA-Hellas.com	www.SMA-Hellas.com
● Βασικός εξοπλισμός ○ Προαιρετικά	Στοιχεία στις ονομαστικές συνθήκες - Έκδοση Ιανουάριος 2009	

Πίνακας Α.10: Τεχνικά χαρακτηριστικά Sunny Boy



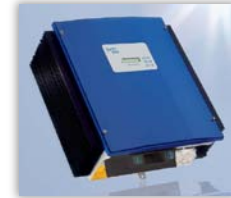
A.4 Διαστασιολόγηση Αυτόνομου Υβριδικού Συστήματος

- **Αντιστροφέας DC/AC φωτοβολταϊκών**

Για την κάλυψη των αναγκών μας σε ότι αφορά την σύνδεση των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο σύστημα επιλέγεται ο Sunny Boy 3300TL HC

(α.) Inverter SMA	
Model	SB 3300TL HC
Μέγιστη DC Ισχύς (kWp)	3,44
Μέγιστη AC Ισχύς (kWp)	3,3
Ονομαστική AC Ισχύς (kW)	3
Μέγιστο ρεύμα εισόδου (Ap)	8.5
Μέγιστη επιτρεπόμενη DC τάση (Vp)	750
Τάση ανοιχτοκυκλώματος στοιχειοσειράς (-10°C) (V)	655
MPP Τάση στοιχειοσειράς (15°C)	481
MPP Τάση στοιχειοσειράς (50°C)	406
MPP Τάση στοιχειοσειράς (70°C)	363
Ελάχιστη MPP Τάση	125
Μέγιστος αριθμός στοιχειοσειρών	2
Ονομαστική τάση AC (V)	220-240
Ονομαστική συχνότητα AC (Hz)	50/60
Απόδοση (%)	94,2
Τύπος προστασίας	IP 65

(β.) ΚΑΛΩΔΙΩΣΗ		DC
Μήκος καλωδίου (m)		15
Διατομή καλωδίου (mm ²)		4
Πτώση Τάσης (V)		0,85
Ανίσταση καλωδίου (Ω)		0,06
Συνολική απώλεια Ισχύος (W)		5,65
Απώλεια ισχύος για μέγιστη DC/AC ισχύ (%)		0,16

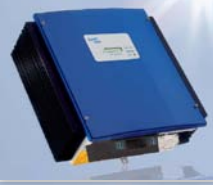


(γ.) Φ/Β σύστημα	
Ονομαστική Ισχύς (kWp)	3.4
Αριθμός στοιχείων	20
Αριθμός στοιχειοσειρών	1
Μέγιστη DC τιμή ρεύματος (Ap)	7,4
Μέγιστη DC τιμή τάσης (Vp)	460

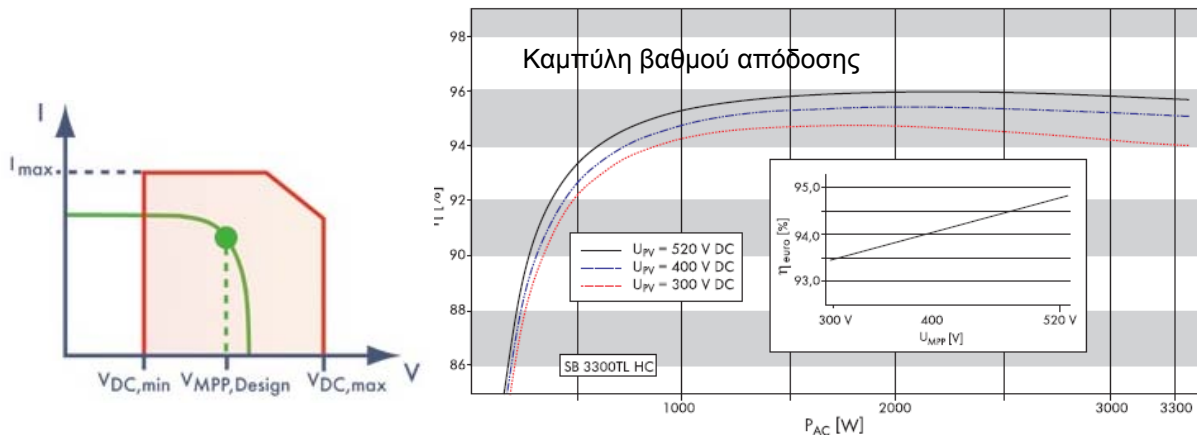
Πίνακας 10.9: Αριθμητικά η μέση ημερήσια, η αθροιστική τιμή κατανάλωση ενέργειας ανά δίμηνο και η αθροιστική τιμή αυτής κατά την διάρκεια του έτους

Οι παραπάνω πίνακες συμπληρώθηκαν με την βοήθεια του λογισμικού της SMA Sunny Design.

SUNNY BOY 3300TL HC

		SB 3300TL HC	
Input (DC)			
Max. DC output		3440 W	
Max. DC voltage		750 V	
PV voltage range, MPPT		125 V - 600 V	
Max. input current		11 A	
Number of MPPT trackers		1	
Max. number of strings (parallel)		2	
Output (AC)			
Nominal AC output		3000 W	
Max. AC output		3300 W	
Max. output current		16 A	
Nominal AC voltage / range		220 V - 240 V / 180 V - 260 V	
AC grid frequency / range		50 Hz / 45.5 Hz - 52.5 Hz	
Power factor (cos φ)		1	
AC connection		single-phase	
Efficiency			
Max. efficiency		96.0 %	
Euro ETA		94.6 %	
Protective equipment			
DC reverse polarity protection		●	
DC load disconnecting switch ESS		●	
AC short-circuit proofing		●	
Ground fault monitoring		●	
Grid monitoring (SMA grid guard 2)		●	
Integrated all-pole sensitive RCD		●	
General data			
Dimensions (W / H / D) in mm		470 / 490 / 225	
Weight		28 kg	
Operating temperature range		-25 °C ... +60 °C	
Consumption: operating (standby) / night		<10 W / 0.25 W	
Topology		transformerless	
Cooling concept		convection	
Installation location: indoor / outdoor (IP65)		● / ●	
Features			
DC connection: MC3 / MC4 / Tyco		● / ○ / ○	
AC connection: screw terminal		●	
LCD display		●	
Cover color: red / blue / yellow		● / ○ / ○	
Interfaces: Powerline / RS232 / RS485 / radio		○ / ○ / ○ / ○	
Warranty: 5 years / 10 years		● / ○	
Certificates and approvals		www.SMA.de	
● Included ○ Option		Values apply for nominal conditions	

Πίνακας Α.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά Sunny Boy 2500/3000



- **Αντιστροφέας DC/AC συσσωρευτών**

Ως μετατροπέας αυτόνομου δικτύου μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο *Sunny Island 4500* (παράρτημα Α.2.1) ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο μικροδίκτυο του εργαστηρίου Σ.Η.Ε. Ο αντιστροφέας αυτός είναι της προηγούμενης γενιάς αντιστροφέν για αυτόνομα δίκτυα της SMA αλλά μας καλύπτει στις παρούσες ανάγκες μας σε ότι αφορά το προφίλ του φορτίου αλλά και την περιοχή τάσης συσσωρευτών που χρειαζόμαστε (δέχεται τάσεις μεταξύ 48-60V). Από την νέα γενιά μετατροπέων αυτόνομου δικτύου με παραπλήσια χαρακτηριστικά επιλέγεται ο *Sunny Island 4248*.



- **Φωτοβολταϊκά πλαίσια**

Τα πλαίσια που εγκαταστάθηκαν στο φωτοβολταϊκό πάρκο της Ραφήνας και των οποίων αναφέρονται οι ετήσιες μετρήσεις παραγόμενης ενέργειας, θα χρησιμοποιηθούν και στο υβριδικό σύστημα. Αυτά είναι της εταιρίας *Yingli solar*, πολυκρυσταλλικής τεχνολογίας με ισχύ εξόδου 170Wp (σειρά YL 170 P-23b). Στο παράρτημα Α.1 υπάρχουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πλαισίου.



- **Γεννήτρια diesel**

Για την επιλογή μιας γεννήτριας όπου θα εξυπηρετεί κυρίως κάποια οικιακά φορτία τις βραδινές ώρες διατηρώντας ταυτοχρόνως και το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών σε επιθυμητά επίπεδα. Τα οικιακά φορτία προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθούν ότι έχουν $\cos\phi$ 0.85 και έτσι επιλέγουμε μια γεννήτρια των 5,3KVA περίπου. Σύμφωνα με τα μεγέθη της αγοράς επιλέγεται η *KUMATSU GPH180M 5.6KVA* με μίζα.



ΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	
Μέγιστη απόδοση (KVA)	5,6
Τάση (Volt)	230
Ισχύς (HP)	10
Κυβισμός cc	406
Κινητήρας	4χρονος, αερόψυκτος
Εκκίνηση	με Μίζα
Καύσιμο	Diesel
Χωρητικότητα (lt)	12.5
Χρόνος λειτουργίας (h)	8
Ρεύμα συγκόλλησης (A)	80-200

Πίνακας Α.12: Τεχνικά χαρακτηριστικά Γεννήτριας diesel

- **Μπαταρίες**

Θα χρειαστούν 42 μπαταρίες 420AH/2V οι οποίες έχουν 14-15 χρόνια διάρκεια ζωής. Είναι κλειστού τύπου με 1200 κύκλους βαθιάς εκφόρτισης.



Παράρτημα Β: Ενεργειακά Προφίλ Κατανάλωσης

Ενδεικτικές Καταναλώσεις Νοε-Δεκ		Για α. ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ και β. ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑ									
ΦΟΡΤΙΑ	ισχύς/ τεμάχιο (W)	τεμάχια	πρόβλεψη ωρών λειτουργίας				ώρες (dec)	ώρες (dec)	Ενέργεια (Wh)	Ενέργεια (Wh)	
			h	min	h	min					
Λάμπα κουζίνας	72	1	4	15	5	30	4,25	5,50	306,00	396,00	
Λάμπες εκτός σπιτιού	11	6	10	15	10	15	10,25	10,25	676,50	676,50	
	15	3	3	25	5	20	3,42	5,33	153,75	240,00	
Λάμπες δωμάτια	7	3	8	0	7	40	8,00	7,67	168,00	161,00	
	15	5	10	14	2	35	10,23	2,58	767,50	193,75	
Λάμπα μπάνιου	30	4	3	35	3	55	3,58	3,92	430,00	470,00	
Λάμπα σαλόνι/ χωλ	15	6	2	41	2	55	2,68	2,92	241,50	262,50	
Ψυγείο μεγάλο με καταψύκτη	22	1	24	0	24	0	24,00	24,00	528,00	528,00	
Απορροφητήρας Κουζίνας	100	1	1	50	1	50	1,83	1,83	183,33	183,33	
Φούρνος μικροκυμάτων	1500	1	0	25	0	5	0,42	0,08	625,00	125,00	
Βραστήρας νερού	3000	1	0	2	0	10	0,03	0,17	100,00	500,00	
Ηλεκτρικό χτυπητήρι φασσέ	100	1	0	2	0	2	0,03	0,03	3,33	3,33	
Τοστιέρα	640	1	0	7	0	7	0,12	0,12	74,67	74,67	
TV 42"	360	1	8	0	8	55	8,00	8,92	2880,00	3210,00	
Στερεοφωνικό (Φορητό)	16	1	10	5	10	5	10,08	10,08	161,33	161,33	
Πλυντήριο πιάτων	1000	1	1	30	1	30	1,50	1,50	1500,00	1500,00	
TV 21"-32"	100	1	1	20	1	20	1,33	1,33	133,33	133,33	
VIDEO/DVD	40	1	2	0	2	0	2,00	2,00	80,00	80,00	
φορτιστής κινητού	18	1	2	20	2	20	2,33	2,33	42,00	42,00	
Ασύρματο τηλέφωνο	5	1	24	0	24	0	24,00	24,00	120,00	120,00	
PC (με οθόνη)	200	1	6	50	2	0	6,83	2,00	1366,67	400,00	
Καυστήρα /Κυκλοφορητής	250	1	4	0	4	0	4,00	4,00	1000,00	1000,00	
Σεσουάρ	1600	1	0	0	0	5	0	0,08	0	133,33	
Σίδερο ρούχων	1000	1	0	0	1	0	0	1,00	0	1000,00	
Πλυντήριο ρούχων	2100	1	0	0	2	0	0	2,00	0	4200,00	
Ηλεκτρικός φούρνος	2000	1	0	0	1	30	0	1,50	0	3000,00	
ΣΥΝΟΛΟ									11540,92	18794,08	

Πίνακας Β.1: Ηλεκτρικές καταναλώσεις Νοεμβρίου - Δεκεμβρίου

Χρήση AC		Καλοκαιρινούς μήνες				
ΦΟΡΤΙΑ	ισχύς/ τεμάχιο (W)	τεμάχια	πρόβλεψη ωρών λειτουργίας		ώρες (dec)	Ενέργεια (Wh)
			h	min		
Κλιματιστικό split (8530BTU/H)	1000	1	2	20	2,33	2333,33

Πίνακας Β.2: Ηλεκτρικές καταναλώσεις – Χρήση AC τους καλοκαιρινούς μήνες

Παράρτημα Γ: Ηλεκτρική εγκατάσταση

Γ.1 Διατομές Καλωδίων - Ασφάλειες

Για τις εγκαταστάσεις χαμηλής τάσης (ΧΤ) που αφορούν όλα τα μέλη της ευρωπαϊκής ένωσης, άρα και την Ελλάδα, το πρότυπο που ισχύει είναι το CENELEC HD 384.

Έτσι για τον υπολογισμό της Ηλεκτρικής Εγκατάστασης, υπολογίζουμε πρώτα το ρεύμα για κάθε γραμμή σύμφωνα με τους τύπους:

Για μονοφασικές εγκαταστάσεις:
$$I = \frac{P}{V \cos f}$$

Για τριφασικές εγκαταστάσεις:
$$I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos f}$$

Στην συνέχεια υπολογίζουμε το μέγιστο ρεύμα για κάθε γραμμή από τον τύπο $I_{max} = I_o * f_1 * f_2$ όπου:

I_o : το μέγιστο θερμικό ρεύμα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 30°C και μέγιστη θερμοκρασία αγωγού 60°C.

f_1 : ο συντελεστής μετατροπής για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος όπως δίνεται στον πίνακα Γ.1.

f_2 : ο συντελεστής μετατροπής για περισσότερους από 3 αγωγούς σε καλώδιο ή σωλήνα όπως δίνεται στον πίνακα Γ.2.

Θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)	f_1
30	1,00
από 30 έως 35	0,91
από 35 έως 40	0,82
από 40 έως 45	0,71
από 45 έως 50	0,58
από 55 έως 60	0,41

Πίνακας Γ.1: Συντελεστής μετατροπής f_1 για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος

Αριθμός αγωγών	f_2
4 έως 6	0,8
7 έως 9	0,7

Πίνακας Γ.2: Συντελεστής μετατροπής f_2 για περισσότερους από 3 αγωγούς σε καλώδιο ή σωλήνα

Στη συνέχεια με βάση το μέγιστο ρεύμα και την ομάδα που κατατάσσεται η εγκατάσταση μας υπολογίζουμε την διατομή των αγωγών από τον πίνακα Γ.3. Αφού έχουμε υπολογίσει με όλα τα παραπάνω την κατάλληλη διατομή για την υπολογιζόμενη τιμή έντασης του ρεύματος που θα προκύψει στο κύκλωμα μας επιλέγουμε και την αντίστοιχη τιμή ασφαλειοαποζεύκτη για κάθε γραμμή. Ο πίνακας Γ.4 μας δίνει την αντιστοιχία διατομής με αυτόματη ασφάλεια για κάθε μια από τις 3 ομάδες.

Παράρτημα Γ : Ηλεκτρική Εγκατάσταση

Διατομή αγωγού mm ²	ΟΜΑΔΑ I Ορατές ή χωνευτές εγκ. καλωδίων με έως 3 ενεργούς αγωγούς ή έως 3 ενεργοί αγωγοί σε σωλήνα	ΟΜΑΔΑ II Ορατές εγκαταστάσεις μονοπολικών καλωδίων ή μονωμένων αγωγών Ρεύμα I ₀ (A)	ΟΜΑΔΑ III Καλώδια με λεπτο-πολύκλωνους (εύκαμπτους) αγωγούς
0,75	9	15	7
1	11	18	9
1,5	14	22	10
2,5	20	31	15
4	25	41	20
6	33	54	26
10	43	70	35
16	60	96	48
25	83	128	65
35	100	153	78
50	127	197	100
75	147	234	-
95	181	287	-
120	208	336	-
150	238	383	-
185	266	435	-
240	310	515	-
300	355	596	-
400	-	710	-
500	-	810	-

Πίνακας Γ.3: Μέγιστο συνεχώς επιτρεπόμενο θερμικό ρεύμα I₀ σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 30°C και μέγιστη θερμοκρασία αγωγού 60°C

Ονομαστική διατομή αγωγών H07V (NYA)	ΟΜΑΔΑ I Τρεις το πολύ αγωγοί σε σωλήνα ή καλώδιο		ΟΜΑΔΑ II Μονοπολικά καλώδια ή αγωγοί ορατών εγκαταστάσεων ...κλπ.		ΟΜΑΔΑ III Σερίδες τριών το πολύ αγωγών	
	Ένταση (A)	Αυτόματη ασφάλεια	Ένταση (A)	Αυτόματη ασφάλεια	Ένταση (A)	Αυτόματη ασφάλεια
0.75	--	---	15	10	12	
1	11	6	19	16	15	
1.5	14	10	23	20	19	
2.5	20	16	32	25	25	
4	25	20	42	35	33	
6	33	25	54	35	44	
10	43	35	73	63	60	
16	60	50	97	80	81	
25	83	63	128	100	107	
35	100	80	156	125	133	
50	127	100	197	160	166	
70	147	125	242	200	---	
95	181	160	288	224	---	
120	208	200	339	250	---	
150	238	---	386	300	---	
185	266	---	442	355	---	
240	310	---	521	425 _r	---	
300	355	---	600	500	---	
400		---	716	600	---	
500	---	---	818	710	---	
630					---	

Πίνακας Γ.4: Επιλογή αυτόματης ασφάλειας με βάση την διατομή του καλωδίου και την ομάδα κατάταξης της εγκατάστασης αυτού.

Γ.1.1 Πιλοτική Εγκατάσταση Φ/Β Πάρκου Ραφήνας

- Από την πλευρά του AC τμήματος της εγκατάστασης για τάση 230Vac και ισχύ 2720W προκύπτει ρεύμα 11,82A. Θεωρώντας ότι η εγκατάσταση αντιστοιχεί στην 1^η ομάδα και ότι η θερμοκρασία κατά τους καλοκαιρινούς μήνες φτάνει στους 40-45°C στο δωμάτιο επιλέγουμε από τον πίνακα Γ.1 τιμή για τον συντελεστή f_1 , 0,71. Ο συντελεστής f_2 παίρνει την τιμή 1 γιατί δεν ξεπερνάει το καλώδιο μας τους 3 αγωγούς. Με βάση λοιπόν την τιμή $I_o=20A$ προκύπτει ότι καλώδιο διατομής 2,5mm² μπορεί να οδηγήσει μέχρι και ρεύμα 14,2A ($20 \cdot 0,71 \cdot 1$). Άρα καλύπτει την παρούσα ανάγκη για διέλευση ρεύματος 11,82A. Από τον πίνακα Γ.4 για τιμή διατομής 2,5mm² προκύπτει αυτόματη ασφάλεια 16A. Το καλώδιο που εγκαταστάθηκε τελικά ήταν διατομής 4mm² ώστε σε περίπτωση μελλοντικής επέκτασης της εγκατεστημένης ισχύος και άρα της παραγόμενης ισχύος στα ονομαστικά μεγέθη του αντιστροφέα (4600W) να ικανοποιούνται οι ανάγκες μας σε διατομή καλωδίου και να αρκεί η αλλαγή μόνο μιας τάξης μεγέθους της ασφάλειας.
- Η διατομή του καλωδίου από την πλευρά του DC (των φωτοβολταϊκών πλαισίων) καθορίζεται από αυτά δηλαδή διατηρεί την διατομή 4mm² έως την διπολική ασφάλεια των 10A. Η επιλογή της ασφάλειας αυτής γίνεται βάσει της εγκατεστημένης ισχύος των 2720Wr και των 368Vdc. Η τιμή αυτή προκύπτει επίσης και από το γεγονός ότι υπάρχει μια σειρά φωτοβολταϊκών πλαισίων το μέγιστο ρεύμα της οποίας δεν ξεπερνά σε καμία περίπτωση τα 7,17A (πίνακας Α.1). Για την ολοκλήρωση της ηλεκτρικής εγκατάστασης στην συνέχεια χρησιμοποιείται μια δίοδος απομόνωσης των 10A η οποία και έχει ως σκοπό την αποφυγή κυκλοφορίας ηλεκτρικού ρεύματος προς τα πλαίσια κατά την λειτουργία της εφεδρικής γεννήτριας-diesel που διαθέτει η κατασκήνωση για την τροφοδοσία της σε περίπτωση διακοπής του δικτύου της ΔΕΗ.
- Η συνδεσμολογία του πολυοργάνου μετρήσεων, η οποία στην εφαρμογή μας είναι και μονοφασική, γίνεται στην μεριά του AC ακριβώς μετά τον αντιστροφέα. Οι διατομές όλων των καλωδίων είναι 1,5mm² ενώ οι τιμές των ασφαλειών του (γυάλινες) όπως αυτές δίνονται από το αντίστοιχο εγχειρίδιο είναι 1A για την τροφοδοσία του οργάνου και της προς μέτρηση τάσης και 5A για την τροφοδότηση του προς μέτρηση ρεύματος.
- Ο Μ/Σ έντασης με λόγο μετασχηματισμού 50/5A χρησιμοποιείται για τον υποβιβασμό του ρεύματος και την προστασία του πολυοργάνου το οποίο ασφαρίζεται με 1A.

Στο σχήμα Γ.1 φαίνεται το ηλεκτρολογικό σχέδιο της συνολικής εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού πάρκου με σημειωμένες τις τιμές διατομών καλωδίου και των ασφαλειοαποζευκτών.

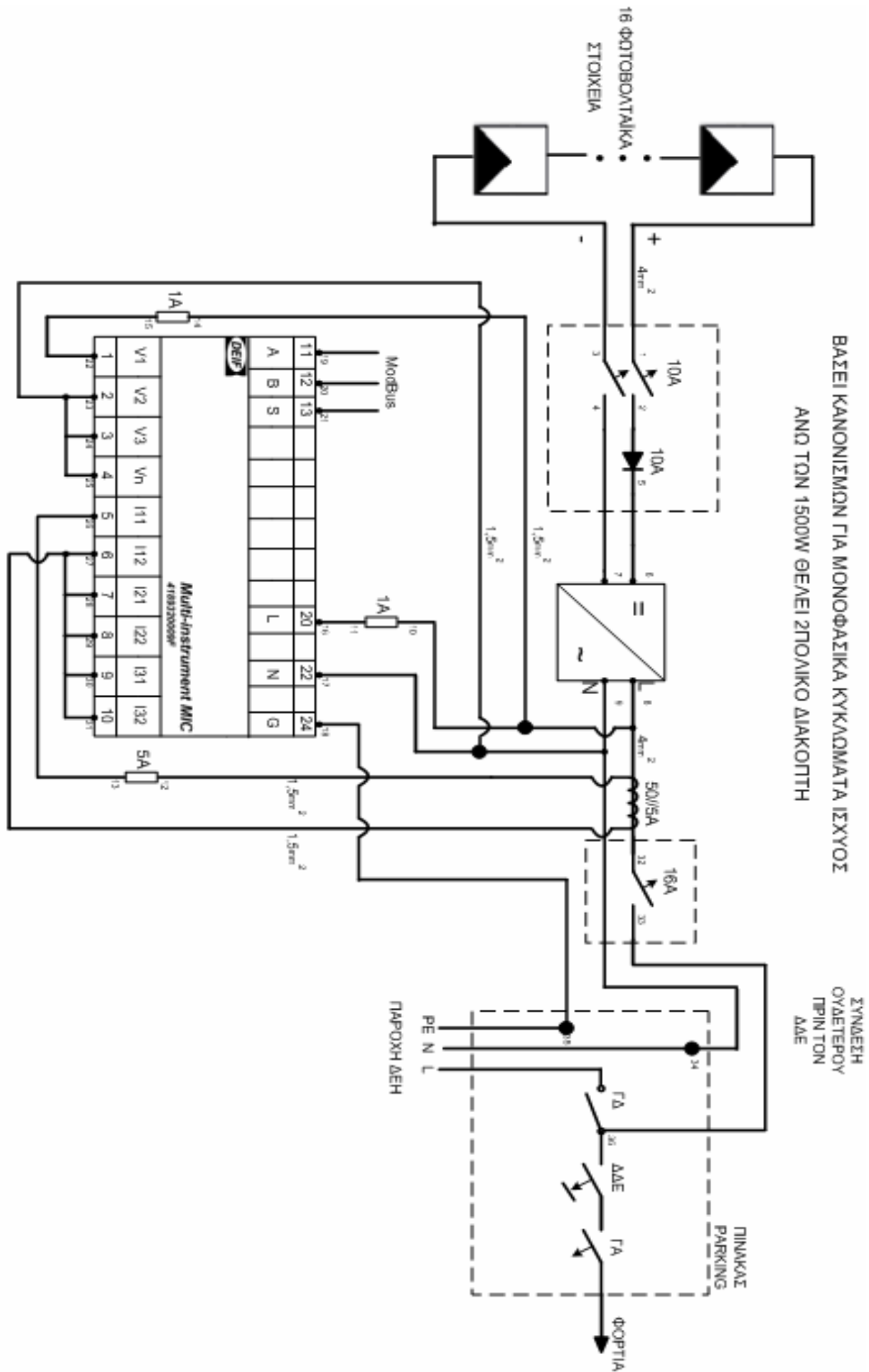
Γ.1.2 Εργαστηριακό Μικροδίκτυο

- Για τον battery inverter (sunny Island) από την πλευρά του DC τμήματος για ισχύ 4,5kW που μπορεί να δίνει για 30 λεπτά ο αντιστροφέας και τάση μπαταριών 60V προκύπτει ρεύμα 75. Θεωρώντας ότι η εγκατάσταση αντιστοιχεί στην 2^η ομάδα και ότι η θερμοκρασία κατά τους καλοκαιρινού μήνες φτάνει στους 35-40°C στο δωμάτιο επιλέγουμε από τον πίνακα Β.1 τιμή για τον συντελεστή f_1 , 0,82. Ο συντελεστής f_2 παίρνει την τιμή 1 γιατί δεν ξεπερνάει το καλώδιο μας τους 3 αγωγούς. Με βάση λοιπόν την τιμή $I_0=96A$ προκύπτει ότι καλώδιο διατομής 16mm² μπορεί να οδηγήσει μέχρι και ρεύμα 78,72 A ($96 \cdot 0,82 \cdot 1$). Άρα καλύπτει την παρούσα ανάγκη για διέλευση ρεύματος 75A. Βάσει του μέγιστου DC ρεύματος ο διακόπτης που απομονώνει τις μπαταρίες από τον αντιστροφέα έχει ονομαστικά μεγέθη 80A.
- Για τον battery inverter (sunny Island) από την πλευρά του AC τμήματος για ισχύ 4,5kW που μπορεί να δίνει για 30 λεπτά ο αντιστροφέας και τάση δικτύου 230V προκύπτει ρεύμα 19,56A. Θεωρώντας ότι η εγκατάσταση αντιστοιχεί στην 2^η ομάδα και ότι η θερμοκρασία κατά τους καλοκαιρινού μήνες φτάνει στους 40-45°C στο δωμάτιο επιλέγουμε από τον πίνακα Γ.1 τιμή για τον συντελεστή f_1 , 0,71. Ο συντελεστής f_2 παίρνει την τιμή 1 γιατί δεν ξεπερνάει το καλώδιο μας τους 3 αγωγούς. Με βάση λοιπόν την τιμή $I_0=22A$ προκύπτει ότι καλώδιο διατομής 1,5mm² μπορεί να οδηγήσει μέχρι και ρεύμα 15,62 A ($22 \cdot 0,71 \cdot 1$). Άρα δεν καλύπτει την παρούσα ανάγκη για διέλευση ρεύματος 19,56A και έτσι ελέγχουμε για την επόμενη τιμή ρεύματος $I_0=31A$. Τώρα προκύπτει ότι καλώδιο διατομής 2,5mm² μπορεί να οδηγήσει μέχρι και ρεύμα 22,01A ($31 \cdot 0,71 \cdot 1$) άρα μας καλύπτει. Από τον πίνακα Γ.4 για τιμή διατομής 2,5mm² προκύπτει αυτόματη ασφάλεια 25A.

Με την ίδια ακριβώς λογική και χρησιμοποιώντας τους παραπάνω πίνακες διαστασιολογούμε όλη την εγκατάσταση του μικροδικτύου. Τα στοιχεία αυτά σημειώνονται στα αντίστοιχα σχέδια που ακολουθούν.

Γ.2 Ηλεκτρολογικά Σχέδια

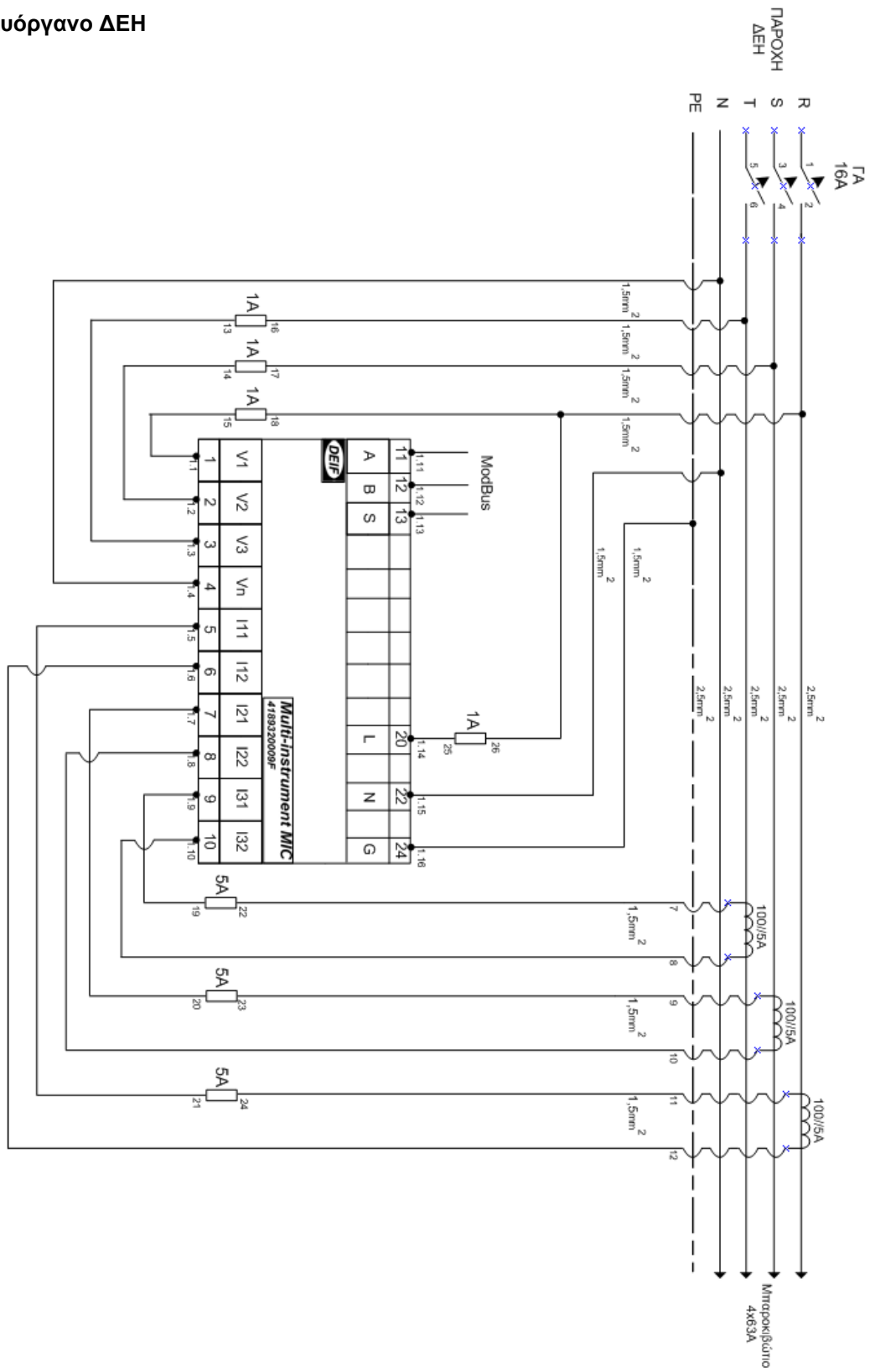
Γ.2.1 Πολύοργανο Μετρήσεων – Πιλοτική Εγκατάσταση Φ/Β Πάρκου Ραφήνας



Σχήμα Γ.1: Ηλεκτρολογικό σχέδιο εγκατάστασης φωτοβολταϊκού πάρκου

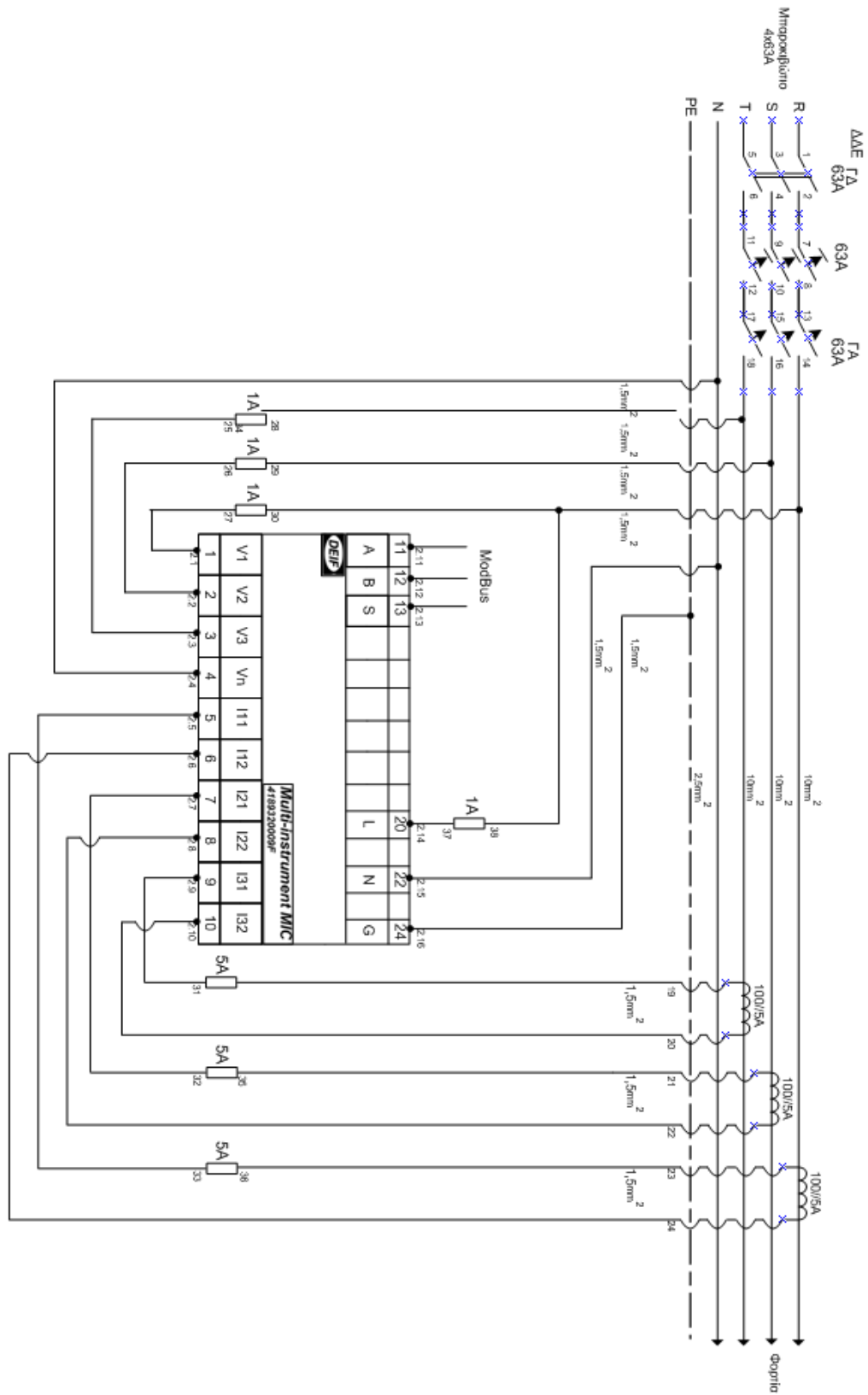
Γ.2.2 Πολυόργανα μετρήσεων – Εργαστηριακό μικροδίκτυο

I. Πολυόργανο ΔΕΗ



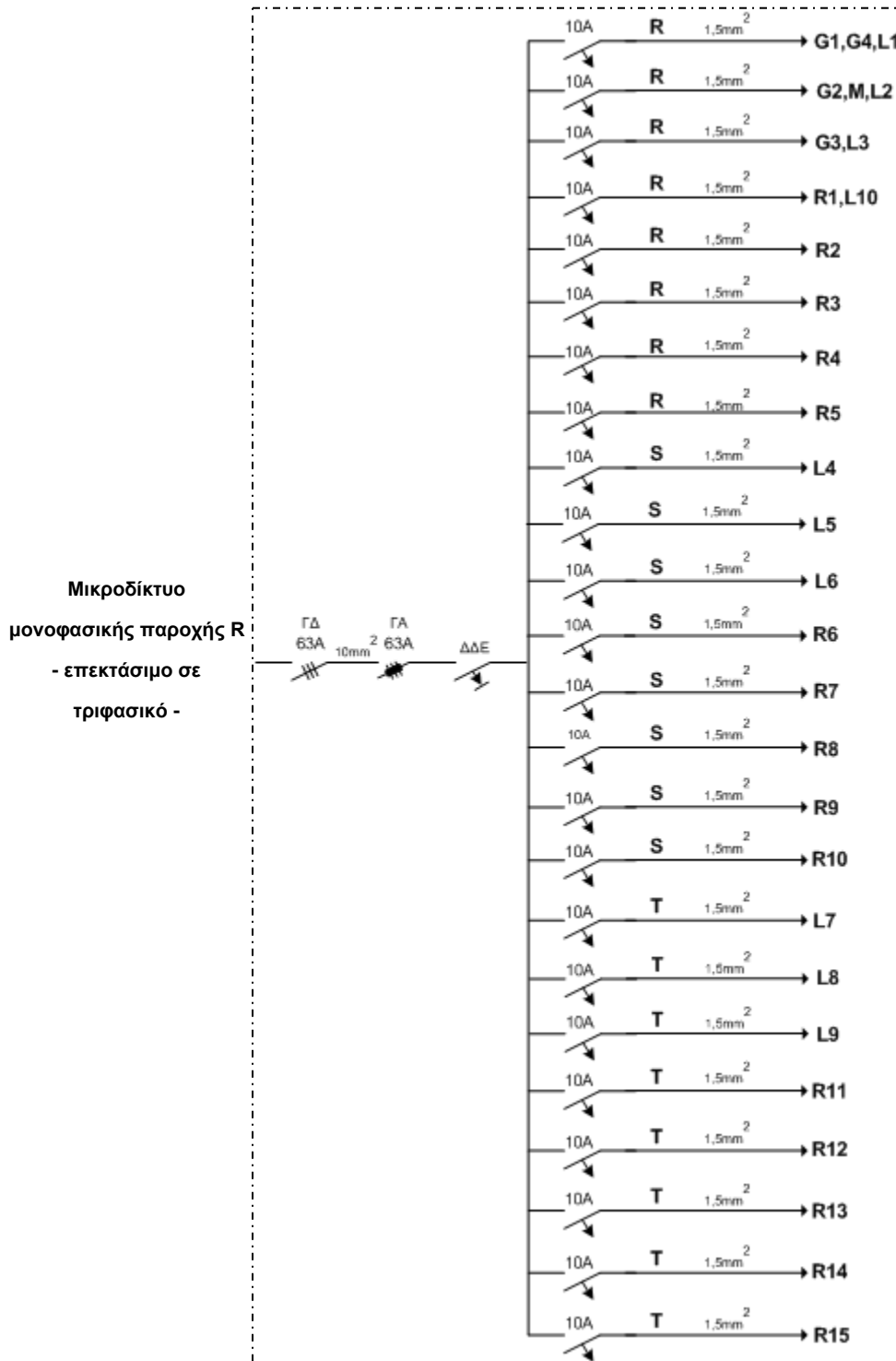
Σχήμα Γ.2: Ηλεκτρολογικό σχέδιο εγκατάστασης πολυοργάνου της ΔΕΗ (γενικός πίνακας)

II. Πολυόργανο Φορτίων



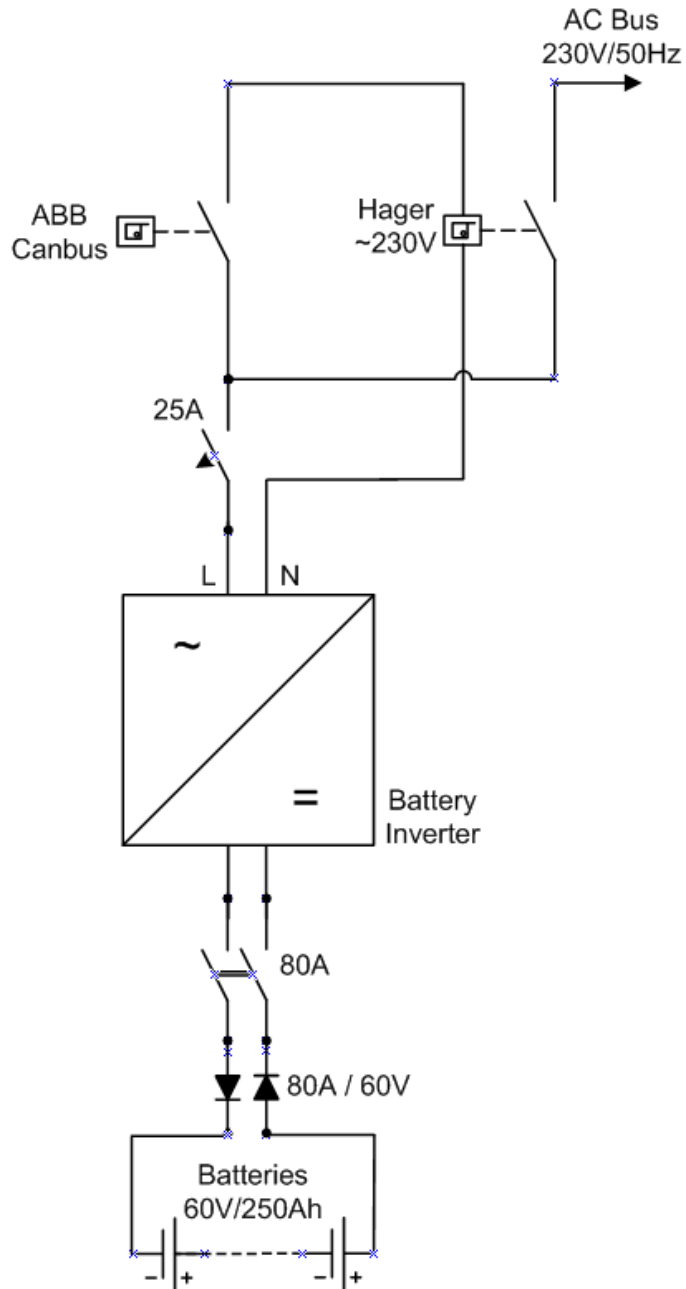
Σχήμα Γ.3: Ηλεκτρολογικό σχέδιο εγκατάστασης πολυοργάνου φορτίων (γενικός πίνακας)

Γ.2.3 Γενικός Πίνακας – Εργαστηριακό Μικροδίκτυο



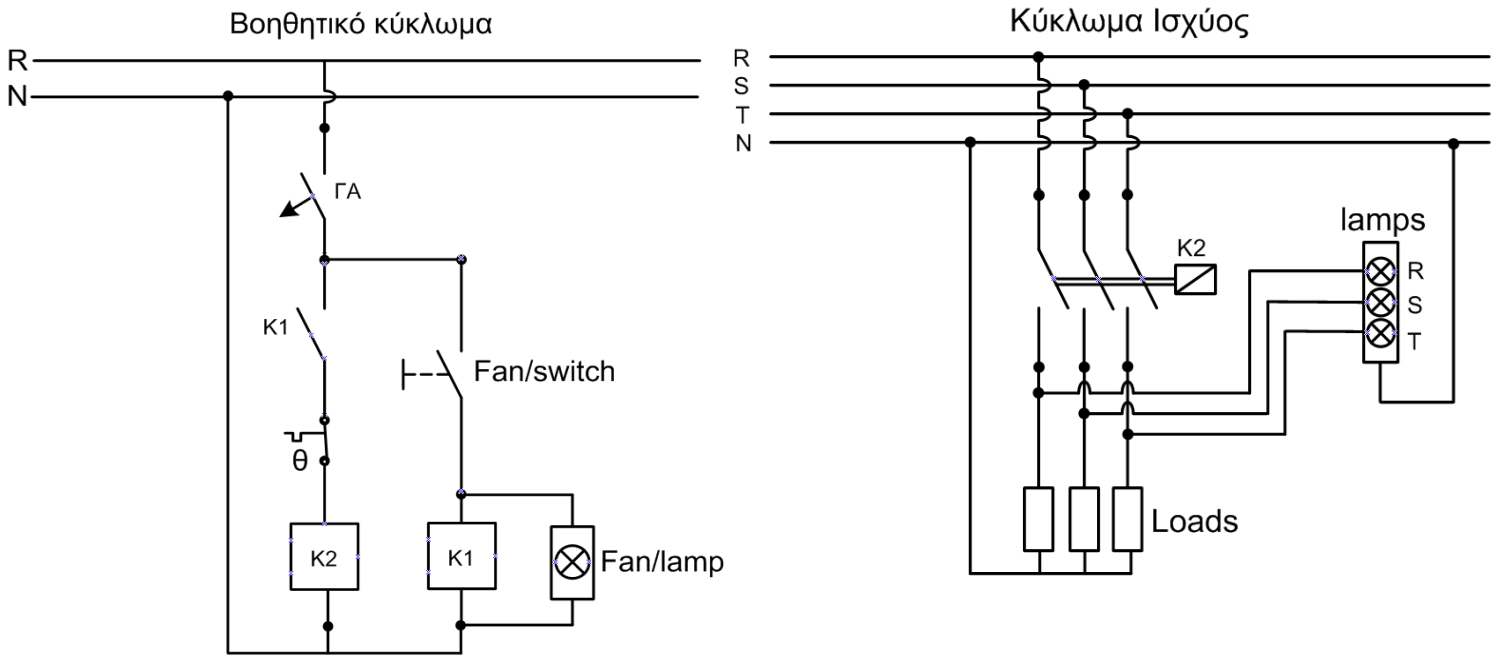
Σχήμα Γ.4: Γενικός πίνακας μικροδικτύου

Γ.2.4 Κυκλώματα Προστασίας – Εργαστηριακό Μικροδίκτυο

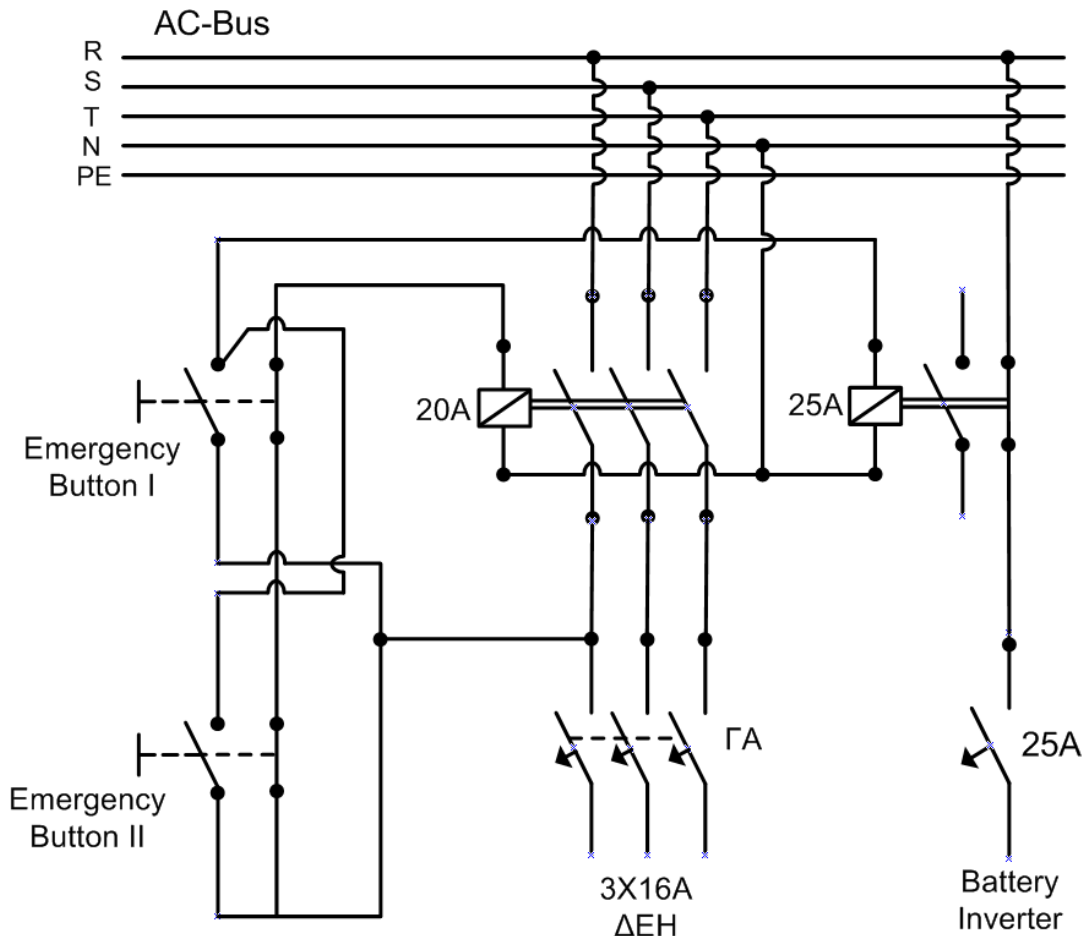


Σχήμα Γ.5: Κύκλωμα ελέγχου της διασύνδεσης του battery

Παράρτημα Γ : Ηλεκτρική Εγκατάσταση

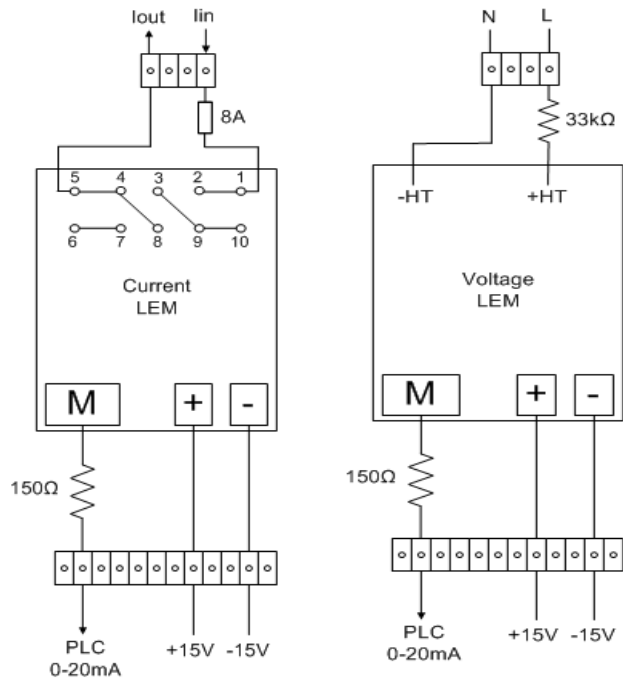


Σχήμα Γ.6: Αυτοματισμός προστασίας προσομοιωτή φορτίων 15kW από υπερθέρμανση



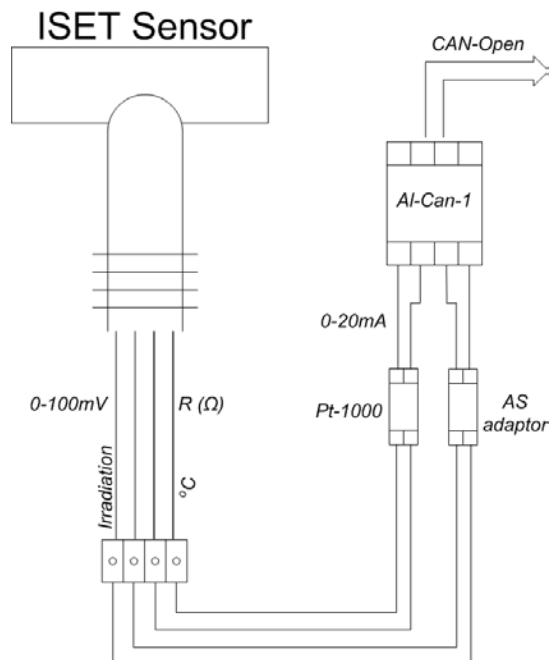
Σχήμα Γ.7: Αυτοματισμός προστασίας χειριστή-εξοπλισμού με 2 μονιτάρια

Γ.2.5 Συνδεσμολογία LEM Τάσης και Ρεύματος



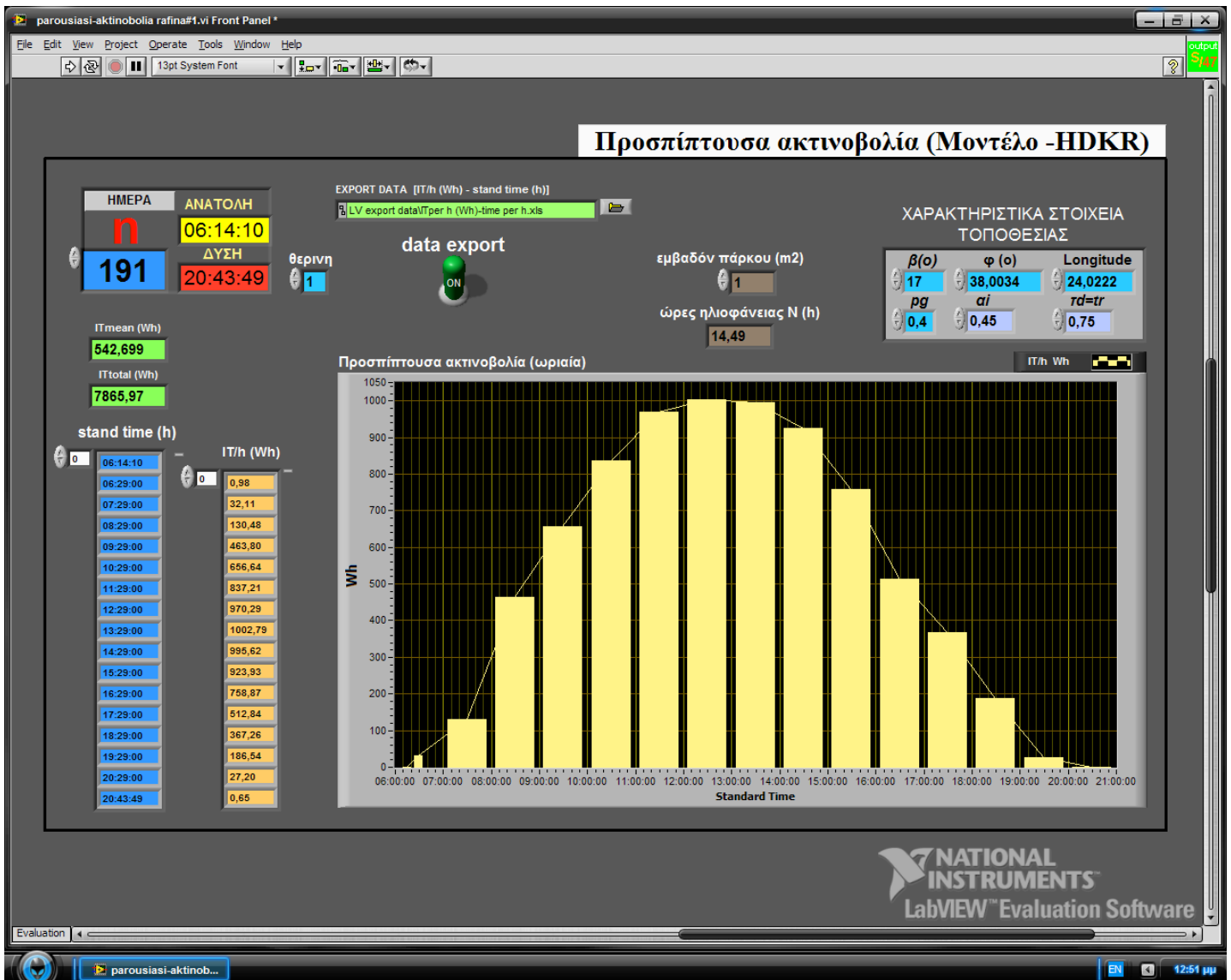
Σχήμα Γ.8: Σχέδιο πλακέτας LEM ρεύματος και τάσης

Γ.2.6 Συνδεσμολογία Αισθητήρα Ηλιοφάνειας



Σχήμα Γ.9: Σχέδιο πλακέτας LEM ρεύματος και τάσης

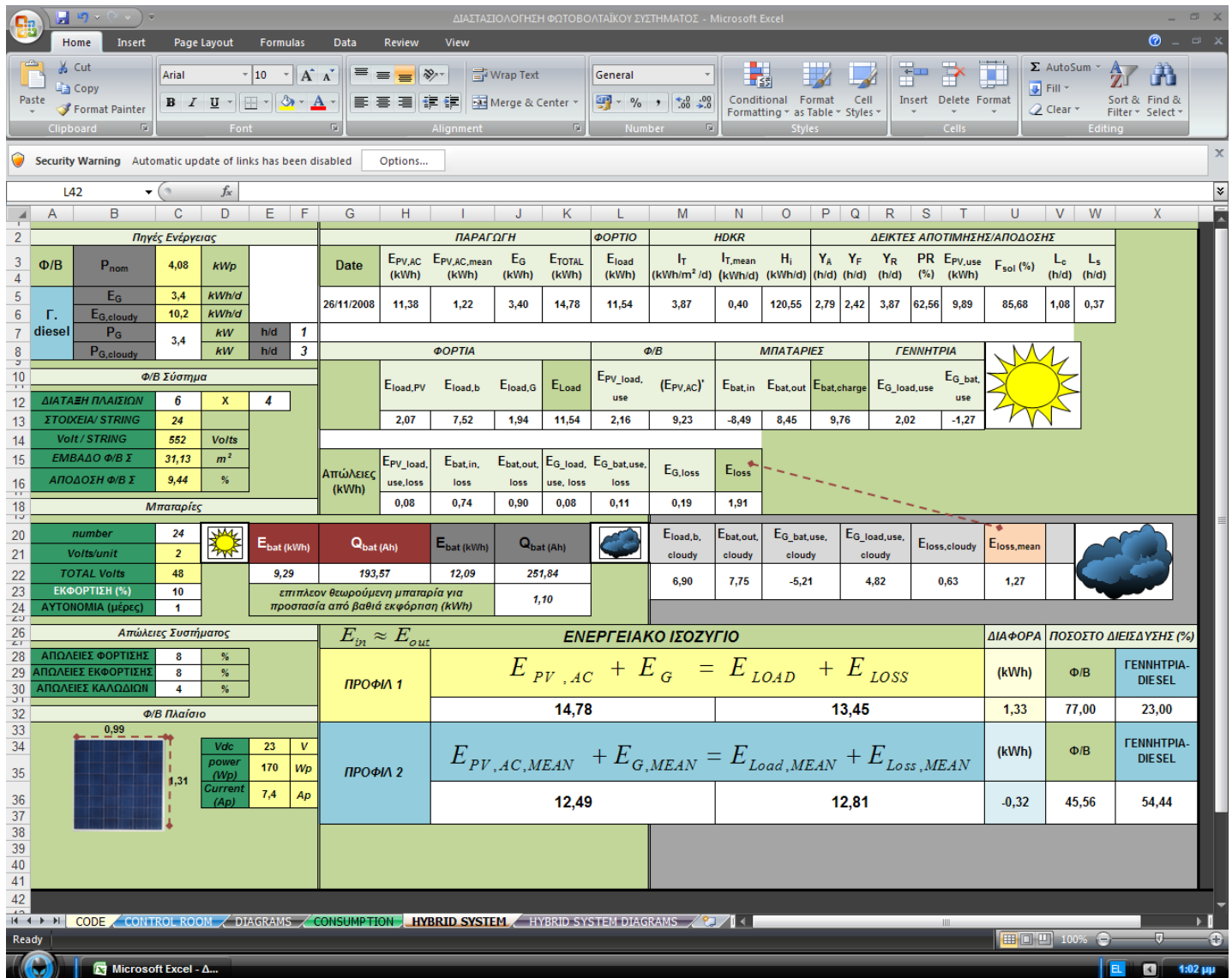
Δ.1 Προσπίπτουσα Ακτινοβολία σε Κεκλιμένη Επιφάνεια (HDKR) μέσω LabVIEW



Σχήμα Δ.1: Πρόγραμμα σε LabVIEW για τον προσδιορισμό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε οποιαδήποτε επιφάνεια (HDKR)

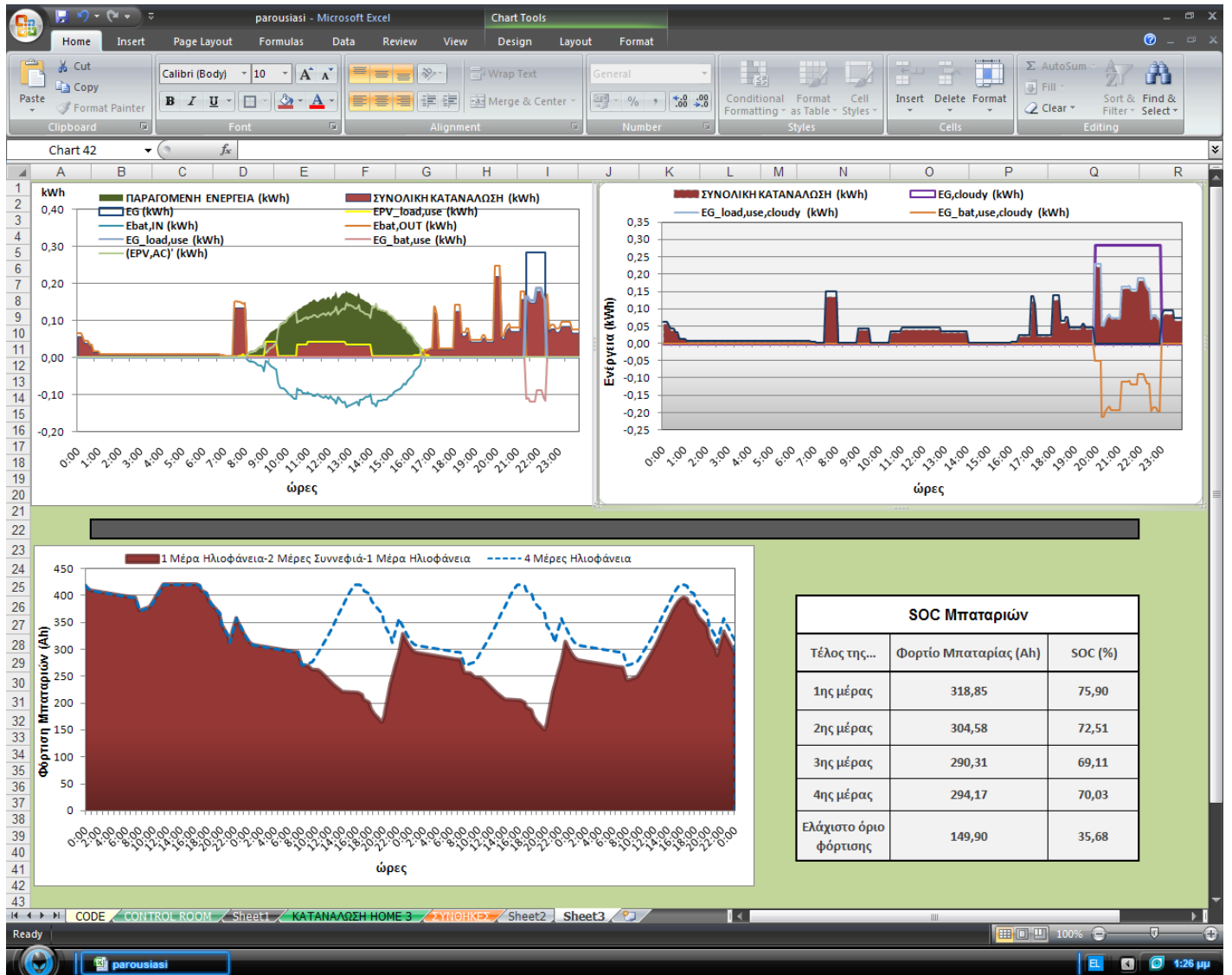
Δ.2 Διαστασιολόγηση Υβριδικού Συστήματος μέσω MsExcel 2007

Δ.2.1 Λογισμικό Διαστασιολόγησης – Απεικόνιση Χαρακτηριστικών Τιμών του Συστήματος



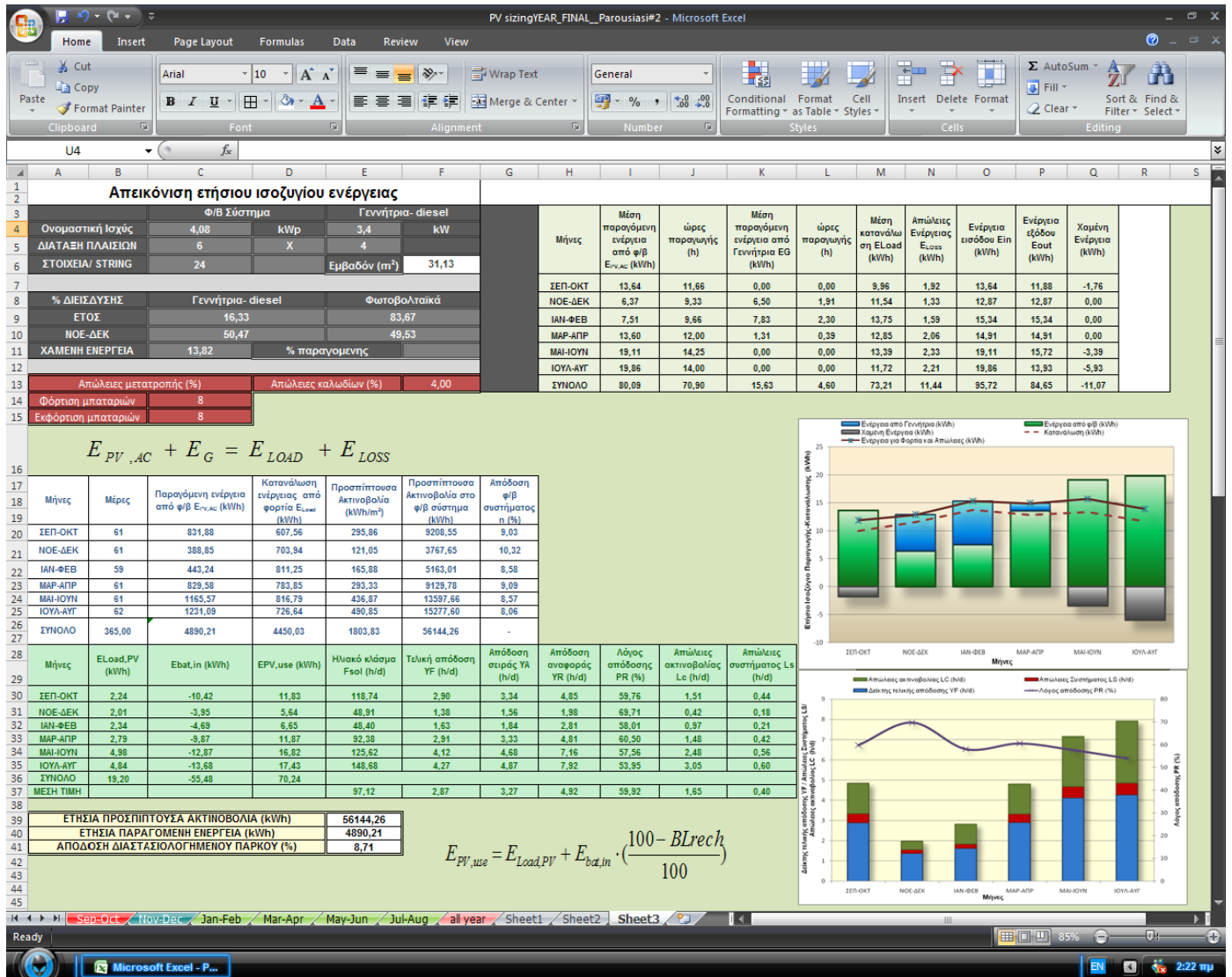
Σχήμα Δ.2: Πρόγραμμα σε MsExcel 2007 για την διαστασιολόγηση αυτόνομου υβριδικού συστήματος

Δ.2.2 Λογισμικό Διαστασιολόγησης – Απεικόνιση Διαγραμμάτων



Σχήμα Δ.3: Πρόγραμμα σε MsExcel 2007 για την απεικόνιση διαγραμμάτων αυτόνομου υβριδικού συστήματος

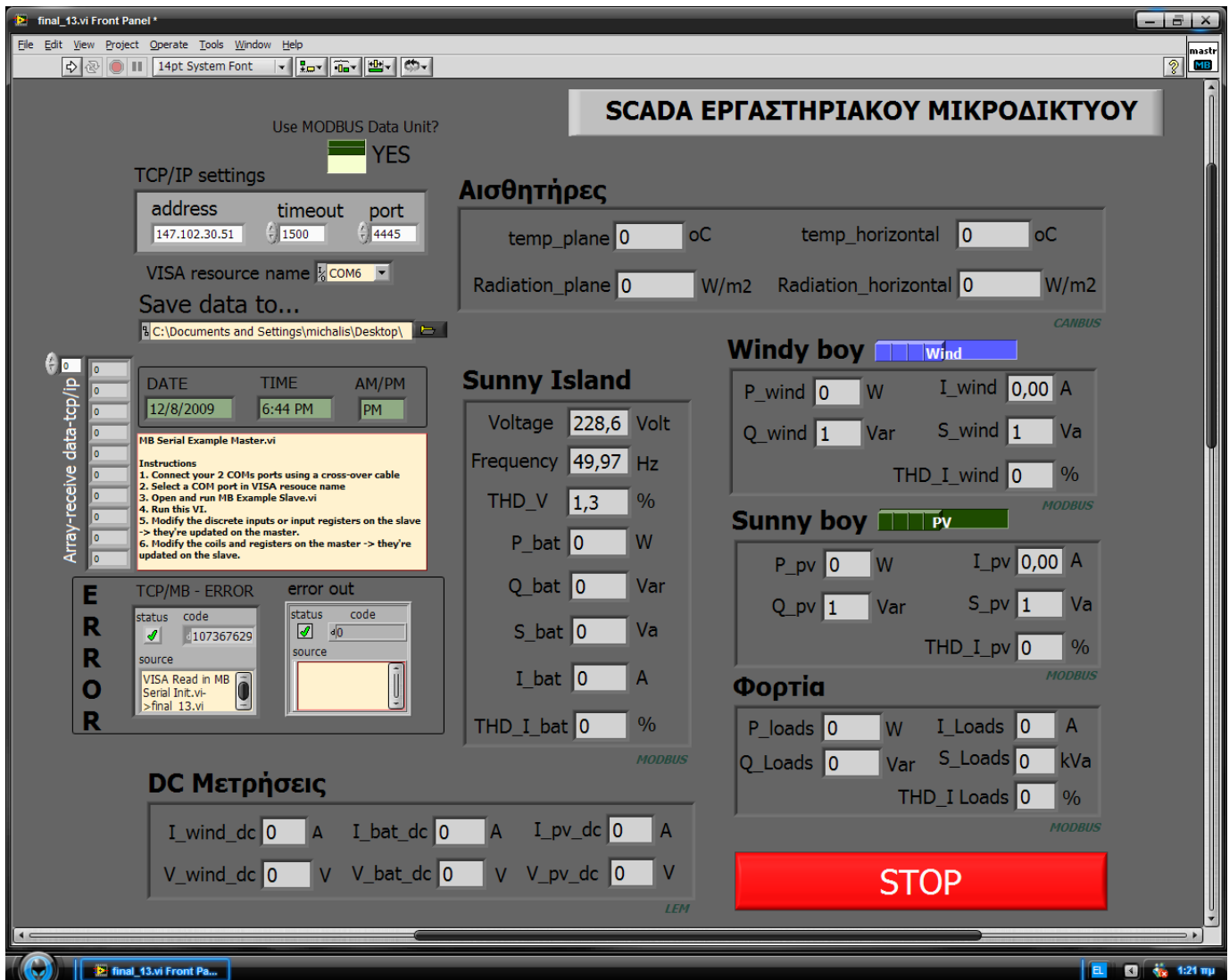
Δ.2.3 Λογισμικό Υπολογισμού του Ετήσιου Ενεργειακού Ισοζυγίου και της Αξιολόγησης του Φ/Β Συστήματος



Σχήμα Δ.4: Πρόγραμμα σε MsExcel 2007 για τον υπολογισμό του ετήσιου ενεργειακού ισοζυγίου και την αξιολόγηση του αυτόνομου υβριδικού συστήματος

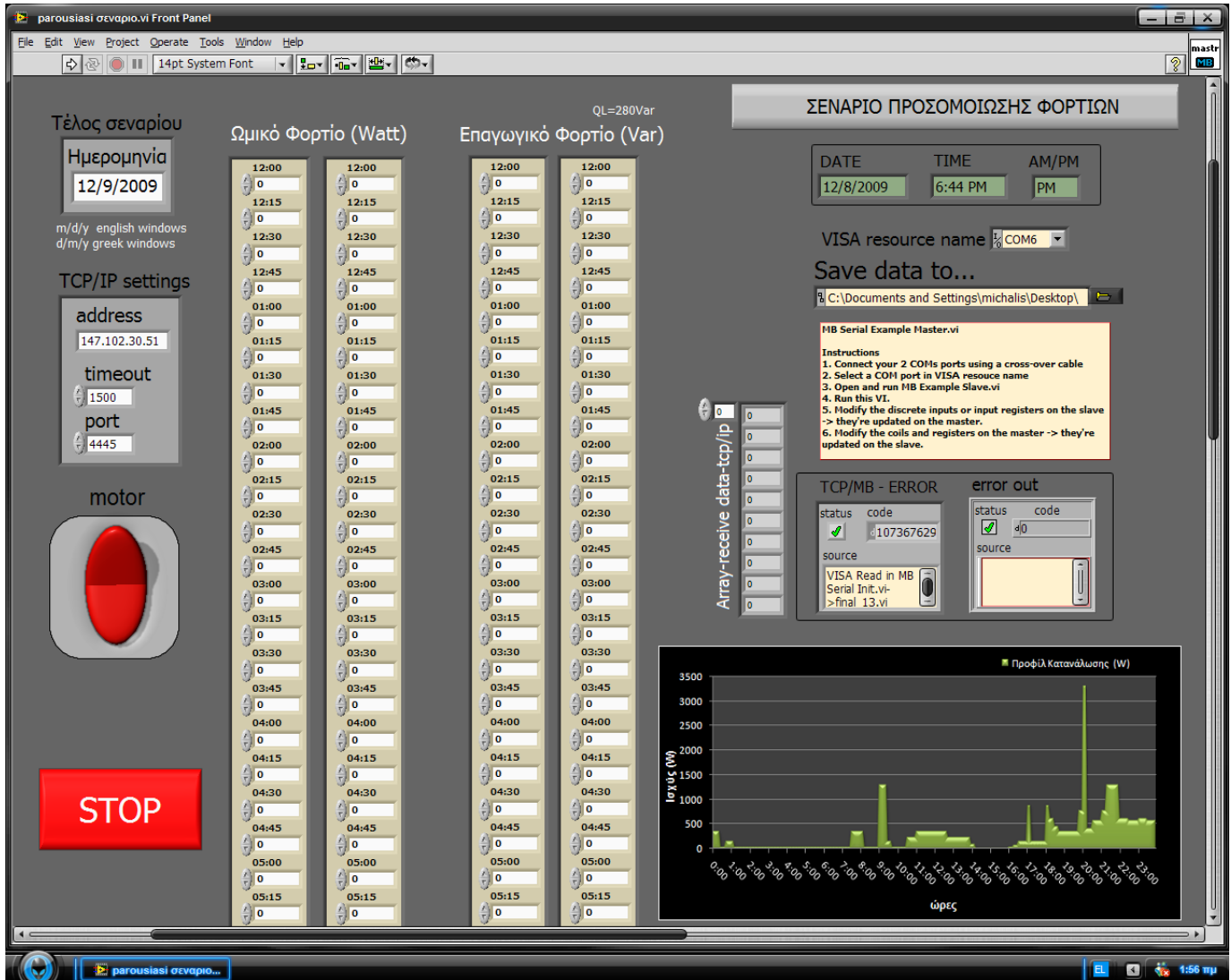
Δ.3 Λογισμικό Επικοινωνίας για την Λήψη Μετρήσεων και τον Έλεγχο του Μικροδικτύου

Δ.3.1 Πρόγραμμα Επικοινωνίας για την Λήψη και Απεικόνιση των Μετρήσεων του Μικροδικτύου



Σχήμα Δ.5: Πρόγραμμα επικοινωνίας σε LabVIEW για την λήψη και απεικόνιση των μετρήσεων του μικροδικτύου

Δ.3.2 Πρόγραμμα Διαχείρισης Φορτίων και Εφαρμογής Επιθυμητού Σεναρίου



Σχήμα Δ.6: Πρόγραμμα επικοινωνίας σε LabVIEW για την διαχείριση φορτίων

Παράρτημα Ε : Φωτογραφικό Υλικό

Παράρτημα Ε : Φωτογραφικό Υλικό

Φωτογραφίες από τα 2 μικρότερα φωτοβολταϊκά πάρκα της Ραφήνας

- Φ/Β πάρκο «Αρχηγείο»



- Φ/Β πάρκο «Super Market»



Βιβλιογραφία

1. **Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.** *Photovoltaic Systems Technology.* Kassel : Universität Kassel, 2003.
2. **The Modbus Organization.** [Ηλεκτρονικό] www.modbus.org
3. **National Instruments. LabVIEW Basics I: Introduction Course Manual.** USA : National Instruments, 2003.
4. **Ντοκόπουλος, Πέτρος.** *Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις Καταναλωτών.* Θεσσαλονίκη : εκδόσεις ΖΗΤΗ, 2005.
5. **J.A. Duffie and W.A. Beckmann.** *Solar Engineering of Thermal Processes 3rd Edition.* USA : John Wiley & Sons Inc., 2006.
6. **Tawatchai Suwannakum.** *Mini-Grid System for Rural Electrification in the Great Mekong Sub Regional Countries* Germany : Kassel University Press, 2007.
7. **ISET.** [Ηλεκτρονικό] www.iset.uni-kassel.de
8. **P. Romanos.** *Thermal Model Predictive Control for Demand Side Management Cooling Strategies.* Germany : Kassel University Press, 2008.
9. **P. Romanos, N. Hatziargyriou, S. Bonias, N. Daniil, La Rocca, K. Pantazis et all (ICCS/NTUA).** *Photovoltaics in Smart Buildings.* Hamburg : Twenty-Fourth European Photovoltaic Solar Energy, 2009
10. **SMA Hellas.** [Ηλεκτρονικό] www.SMA-Hellas.com
11. **Golden A/S.** [Ηλεκτρονικό] www.gma.gr
12. **3S Software.** [Ηλεκτρονικό] www.3s-software.com
13. **National Instruments LabVIEW Basics II: Development Course Manual.** USA : National Instruments, 2007.
14. CAN in Automation (CiA). <http://www.can-cia.org>
15. **P. Romanos et all,** *PV Hybrid Building Systems using EIB* Glasgow : 16th European PV Conference, 2000
16. **EEX (European Energy Exchange).** [Ηλεκτρονικό] www.eex.com.