



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΚΑΙ
ΒΙΩΣΙΜΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΣΤΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΣΩ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΟΥ ΙΩΑΝΝΗ ΖΑΒΟΥ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

**Αναπλ. Καθηγητής ΘΕΟΧΑΡΗΣ ΤΣΟΥΤΣΟΣ
(ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)**

**Επικ. Καθηγήτρια ΔΙΟΝΥΣΙΑ ΚΟΛΟΚΟΤΣΑ
Καθηγητής ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΑΛΑΪΤΖΑΚΗΣ**

ΧΑΝΙΑ, 2013



Αφιέρωση
Στους γονείς μου

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή Θεοχάρη Τσούτσο και τον κύριο Ιωάννη Κανάκη, για την πολύτιμη συνεισφορά και συνεργασία τους στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Οι προτάσεις και τα εύστοχα σχόλιά τους είχαν καθοριστικό ρόλο στο ποιοτικό αποτέλεσμα της μελέτης.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, την επίκουρη καθηγήτρια Διονυσία Κολοκοτσά και τον καθηγητή Κωνσταντίνο Καλαϊτζάκη για το χρόνο που αφιέρωσαν κατά τη μελέτη και την παρουσίαση της διπλωματικής εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Χρήστο Σαμαρά, άγνωστο σε εμένα, για τη βοήθεια που μου προσέφερε μέσω του φόρουμ michanikos.gr με σκοπό τον προγραμματισμό μιας μακροεντολής σε περιβάλλον VBA, απαραίτητης για τη διαμόρφωση κάποιων πειραματικών δεδομένων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ABSTRACT.....	7
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1. Αντικείμενο της μελέτης	9
1.2. Για τα φωτοβολταϊκά	10
1.3. Περιγραφή της ΦΒ διάταξης	19
1.4. Λογισμικά που χρησιμοποιούνται	21
2. ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ.....	23
2.1. Αξιολόγηση ΦΒ εγκαταστάσεων.....	23
2.2. Αξιολόγηση των εμπορικών λογισμικών	28
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	32
3.1. Προετοιμασία μετεωρολογικών δεδομένων	32
3.2. Χάραξη ορίζοντα	36
3.3. Επεξεργασία δεδομένων αντιστροφεία	38
3.4. Υπολογισμός δεικτών επίδοσης φωτοβολταϊκών	43
3.5. Προσομοίωση διάταξης με το λογισμικό PVSYST.....	48
3.6. Προσομοίωση διάταξης με το λογισμικό RETSCREEN.....	49
3.7. Προσομοίωση διάταξης με το διαδικτυακό εργαλείο PVGIS	51
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	52
4.1. Αποτελέσματα των πραγματικών μετρήσεων.....	52
4.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης με PVSYST	61
4.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης με RETSCREEN	70
4.4. Αποτελέσματα εκτίμησης του PVGIS	73
5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ	75
5.1. Σχολιασμός αποτελεσμάτων	75

5.2. Σύγκριση και παρατηρήσεις	77
5.3. Σφάλματα και αποκλίσεις	88
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	94
6.1. Κύρια ευρήματα	94
6.2. Αξιολόγηση μεθοδολογίας	95
6.3. Προτάσεις για τη συνέχιση της εργασίας	100
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	103
8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	105
8.1. Αλγόριθμος Liu & Jordan.....	105
8.2. Εισαγωγή και ανάλυση δεδομένων με το PVSYST	115
8.3. Εισαγωγή και ανάλυση δεδομένων με το RETSCREEN	138
8.4. Εκτέλεση εκτίμησης με το εργαλείο PVGIS	143
8.5. Μακροεντολές και Συναρτήσεις	145

ABSTRACT

This dissertation focuses on the efficiency analysis of the photovoltaic (PV) array located on the top of the Renewable Energy and Sustainable Energy Systems Lab (ReSEL) of the Technical University of Crete, Chania. Data analysis is performed using Microsoft Office Excel. The energy yield and the most common indexes for PV operation rating are extracted from the analysis. Next, an attempt is being made to calculate and predict the same results by the use of special software. Finally, the software programs are compared and their credibility is ranked based on the similarity of their predictions to the actual results.

The comparison shows that the commercial PVSYST software systematically underestimates the energy production of the proposed PV installation while the free RETSCREEN software provides very satisfactory results. Finally, the PVGIS tool gives a very good estimate for the final annual production of PV energy, despite the fact it does not receive as an input the user's weather data.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία αναλύεται η απόδοση της φωτοβολταϊκής (ΦΒ) συστοιχίας που βρίσκεται στην οροφή του χώρου ηλιακών δοκιμών του εργαστηρίου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Τα δεδομένα αναλύονται με τη βοήθεια του λογισμικού υπολογιστικών φύλλων Microsoft Office Excel. Από την ανάλυση προκύπτουν οι συνηθέστεροι δείκτες περιγραφής της λειτουργίας και της απόδοσης ενέργειας των ΦΒ πλαισίων. Στη συνέχεια, γίνεται προσπάθεια πρόβλεψης και σύγκρισης των ήδη υπολογισθέντων αποτελεσμάτων με τη χρήση κάποιων από τα διαθέσιμα ειδικά λογισμικά. Κατόπιν, αυτά τα λογισμικά συγκρίνονται μεταξύ τους και αξιολογείται η αξιοπιστία τους, βάσει της εγγύτητας των αποτελεσμάτων τους με τα πραγματικά.

Από τη σύγκριση προκύπτει ότι το εμπορικό λογισμικό PVSYST υποτιμά συστηματικά την ενεργειακή παραγωγή της εξεταζόμενης ΦΒ διάταξης ενώ το δωρεάν λογισμικό RETSCREEN προβλέπει τα αποτελέσματα πολύ ικανοποιητικά. Τέλος, το εργαλείο PVGIS δίνει μια πολύ καλή τελική ετήσια εκτίμηση για την ενεργειακή παραγωγή των ΦΒ, παρά το γεγονός ότι δεν λαμβάνει ως είσοδο τα δεδομένα καιρού από το χρήστη.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Αντικείμενο της μελέτης

Κύριο αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο έλεγχος της αξιοπιστίας ορισμένων εμπορικών λογισμικών και εργαλείων που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη και την πρόβλεψη της επίδοσης φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων. Ως ανάγκη για τον παραπάνω έλεγχο προκύπτει η ανάλυση μιας ΦΒ εγκατάστασης που βρίσκεται σε λειτουργία. Μια γρήγορη αναζήτηση στο διαδίκτυο φανερώνει την ύπαρξη πληθώρας λογισμικών που αποσκοπούν στην εκπόνηση μελέτης εγκατάστασης και ανάλυσης ΦΒ συστημάτων. Η αξιολόγηση των δημοφιλέστερων λογισμικών κρίνεται αναγκαία ώστε να δοθεί στο μελετητή η δυνατότητα να επιλέξει το καταλληλότερο λογισμικό με βάση τις ανάγκες του, είτε αυτές είναι αυξημένη αξιοπιστία και δυνατότητες παραμετροποίησης, είτε απλότητα και ευκολία χρήσης. Αυτή η εργασία εστιάζει μόνο στα αποτελέσματα των λογισμικών και δεν αξιολογεί τη δομή της διεπαφής τους (interface): άρα δεν εξετάζεται το κριτήριο της φιλικότητας στο χρήστη.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, υπάρχει απαίτηση για πραγματικά δεδομένα προκειμένου να πραγματοποιηθεί αξιολόγηση των εκτιμήσεων των εμπορικών λογισμικών. Τα λογισμικά αυτά δέχονται ως είσοδο σειρά παραμέτρων που είναι απαραίτητες για τους εσωτερικούς υπολογισμούς που πραγματοποιούν για να εκτιμήσουν τα αποτελέσματα. Αυτές οι παράμετροι είναι δεδομένα ηλιοφάνειας, τοποθεσίας, υψομέτρου, και τεχνικά χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων συστημάτων. Τα αποτελέσματα που εκδίδονται από τα λογισμικά είναι η ενεργειακή απόδοση των ΦΒ, οι απώλειες κάθε υποσυστήματος καθώς και άλλοι δείκτες λειτουργίας. Έτσι, εκτός από τα αρχικά δεδομένα, απαραίτητα πρέπει να

διατίθενται τα μετρούμενα πειραματικά αποτελέσματα από τη λειτουργία της εγκατάστασης για την οποία γίνεται εκτίμηση επίδοσης.

1.2. Για τα φωτοβολταϊκά

Τα φωτοβολταϊκά (ΦΒ) συστήματα είναι διατάξεις που παράγουν ηλεκτρική ισχύ μετατρέποντας την ηλιακή ακτινοβολία σε συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (DC) εκμεταλλευόμενες το φωτοβολταϊκό φαινόμενο.

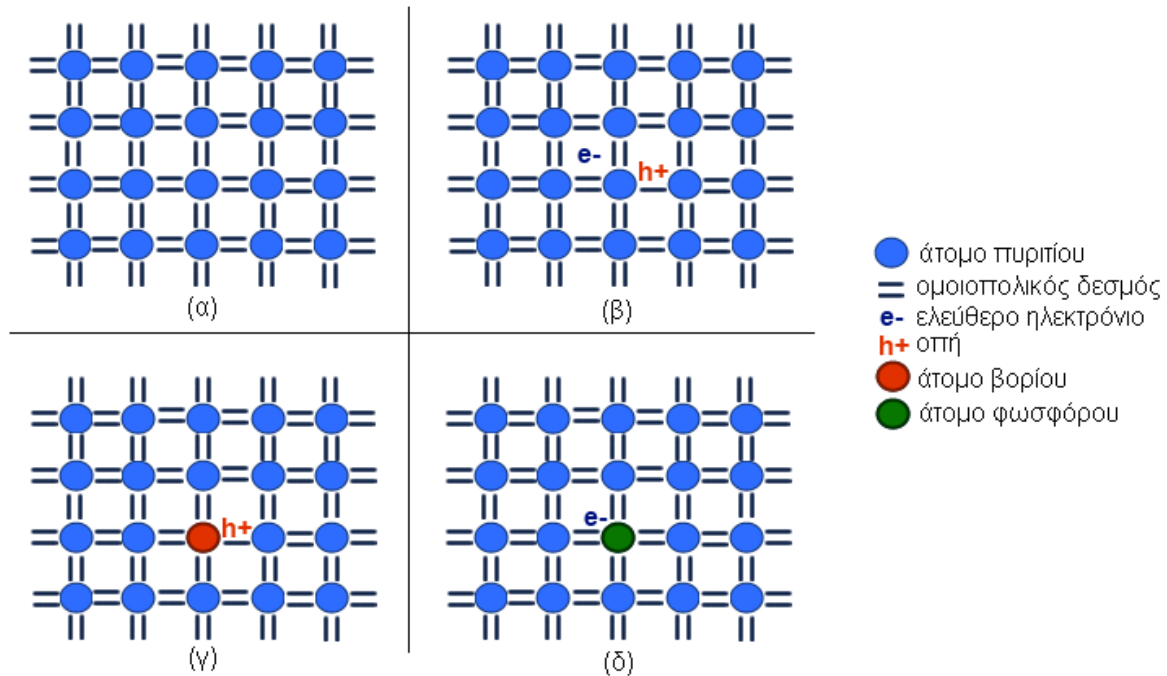
Τα ΦΒ είναι φτιαγμένα από υλικά που ονομάζονται ημιαγωγοί¹, συνήθως πυρίτιο. Το πυρίτιο έχει ιδιαίτερες χημικές ιδιότητες στην κρυσταλλική μορφή του. Ένα άτομο πυριτίου έχει 14 ηλεκτρόνια μοιρασμένα σε τρεις στοιβάδες. Οι πρώτες δύο στοιβάδες περιέχουν 2 και 8 ηλεκτρόνια και είναι πλήρεις. Η εξωτερική στοιβάδα, ωστόσο, είναι συμπληρωμένη κατά το ήμισυ με 4 μόλις ηλεκτρόνια. Προκειμένου να συμπληρώσει πλήρως την εξωτερική του στοιβάδα, το άτομο πυριτίου θα μοιράζεται με μορφή ομοιοπολικού δεσμού τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής του στοιβάδας με άλλα τέσσερα άτομα πυριτίου σχηματίζοντας έτσι την κρυσταλλική δομή του (πλέγμα). Επομένως, γύρω από κάθε άτομο πυριτίου υπάρχουν 8 κοινόχρηστα ηλεκτρόνια (εικόνα 1α). Το κρυσταλλικό πυρίτιο έχει χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα καθώς κανένα από τα ηλεκτρόνιά του δεν μπορεί να κινηθεί ελεύθερα, εκτός αν του προσδοθεί αρκετή ενέργεια (για παράδειγμα, σε μορφή θερμότητας) ώστε κάποια ηλεκτρόνια να αποδεσμευτούν (εικόνα 1β). Τα ηλεκτρόνια που αποδεσμεύονται αφήνουν οπές (holes) στις θέσεις από τις οποίες ξέφυγαν. Οι οπές είναι νοητά θετικά ηλεκτρικά φορτία που προκύπτουν από την έλλειψη ηλεκτρονίων. Είναι πολύ πιο βολικό να θεωρούμε τη νοητή κίνηση μιας οπής στο κρυσταλλικό πλέγμα αντί της διαδοχικής κίνησης των ηλεκτρονίων

¹ Ως ημιαγωγοί χαρακτηρίζονται υλικά με ειδική ηλεκτρική αντίσταση (ρ) από 10^{-2} έως $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$.

σθένους των γειτονικών ατόμων που καταφθάνουν για να συμπληρώσουν το δεσμό από τον οποίο αποδεσμεύτηκε ηλεκτρόνιο. Η κίνηση της σπής είναι αντίθετη της πραγματικής κίνησης των ηλεκτρονίων σθένους. Η αγωγιμότητα που προκύπτει από την ελευθέρωση ηλεκτρονίων, όταν η είσοδος της ενέργειας γίνεται με μορφή φωτός, ονομάζεται φωτοαγωγιμότητα. Προκειμένου να αντιμετωπισθεί η πολύ χαμηλή φωτοαγωγιμότητα του καθαρού πυριτίου, εισάγονται κάποιες προσμίξεις (impurities).

Η βασική δομή ενός ΦΒ αποτελείται από δύο επιφάνειες κρυσταλλικού πυριτίου σε επαφή. Οι προσμίξεις που εισάγονται συνήθως στην πρώτη επιφάνεια είναι άτομα φωσφόρου (περίπου ένα ανά 10^6 άτομα πυριτίου). Αυτή η διαδικασία λέγεται εμπλουτισμός (doping). Ένα άτομο φωσφόρου έχει 5 ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα και, ενώ σχηματίζει δεσμό με τα γειτονικά άτομα πυριτίου, το πέμπτο ηλεκτρόνιο παραμένει αδέσμευτο· συγκρατείται, όμως, στη θέση του από το θετικό φορτίο του πυρήνα του φωσφόρου (εικόνα 1δ). Αρκεί, πλέον, να εισαχθεί λίγη ενέργεια στο εμπλουτισμένο πλέον κρυσταλλικό πλέγμα και μερικά από τα επιπλέον ηλεκτρόνια των ατόμων φωσφόρου αποδεσμεύονται πλήρως. Αυτά τα ηλεκτρόνια λέγονται ελεύθεροι φορείς (free carriers) και κινούνται ακανόνιστα στο κρυσταλλικό πλέγμα. Το εμπλουτισμένο με άτομα φωσφόρου πυρίτιο που προκύπτει χαρακτηρίζεται τύπου-N (n-type) επειδή επικρατούν σε αυτό τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που είναι αρνητικά (negative). Οι προσμίξεις (άτομα φωσφόρου) στον ημιαγωγό τύπου n χαρακτηρίζονται ως δότες (donors). Στην δεύτερη επιφάνεια κρυσταλλικού πυριτίου εισάγονται ως προσμίξεις άτομα βορίου, τα οποία έχουν 3 ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα αντί για 4 (εικόνα 1γ). Έτσι, αυτή η επιφάνεια πυριτίου έχει οπές αντί για ελεύθερα ηλεκτρόνια, είναι δηλαδή του αντίθετου φορτίου από την πρώτη και χαρακτηρίζεται τύπου-P (p-type)

αφού είναι θετική (positive). Οι προσμίξεις (άτομα βορίου) σε αυτήν την επιφάνεια χαρακτηρίζονται ως αποδέκτες (acceptors).



Εικόνα 1: (α) Κρυσταλλική δομή του πυριτίου, (β) Δημιουργία ζεύγους ελεύθερου ηλεκτρονίου – οπής με εισαγωγή ενέργειας στο κρυσταλλικό πλέγμα, (γ) Ημιαγωγός τύπου p και (δ) Ημιαγωγός τύπου n

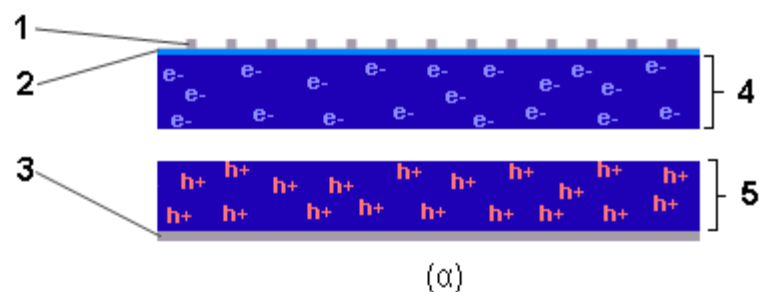
Όταν οι δύο ημιαγωγοί (τύπου n και p) έρθουν σε επαφή, οι ηλεκτρικοί τους φορείς (ηλεκτρόνια και οπές αντίστοιχα) ρέουν με διάχυση προς τα απέναντι τμήματα. Αυτή η κίνηση των φορέων, των ηλεκτρονίων από τον αγωγό τύπου n στον ημιαγωγό τύπου p και των οπών αντίθετα, λέγεται ρεύμα διάχυσης (diffusion current). Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που εγκαταλείπουν τον ημιαγωγό τύπου n σχηματίζουν θετικά φορτισμένα ιόντα σε αυτόν. Αντίστοιχα, οι οπές που εγκαταλείπουν τον ημιαγωγό τύπου p σχηματίζουν αρνητικά φορτισμένα ιόντα σε αυτόν. Έτσι, κοντά στην επαφή των δύο ημιαγωγών δημιουργείται μια περιοχή χωρίς ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές, η οποία λέγεται περιοχή απογύμνωσης (depletion region). Τα ιόντα που σχηματίζονται σε αυτήν την περιοχή από τη διάχυση των φορέων δημιουργούν ηλεκτρικό πεδίο ανασταλτικό στην κίνησή τους. Δηλαδή, το ηλεκτρικό πεδίο αναγκάζει τα ηλεκτρόνια να επιστρέφουν στον

ημιαγωγό τύπου n και τις οπές αντίστοιχα στον ημιαγωγό τύπου p . Η εξαναγκασμένη κίνηση των φορέων από το ηλεκτρικό πεδίο ονομάζεται ρεύμα ολίσθησης (drift current). Το ρεύμα ολίσθησης είναι ίσου μέτρου και αντίθετης κατεύθυνσης με το ρεύμα διάχυσης σε κατάσταση ισορροπίας (εικόνα 2β).

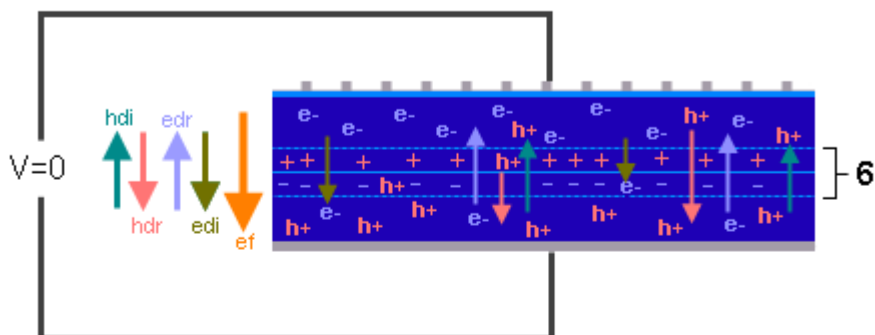
Η κατάσταση τροποποιείται όταν το ΦΒ στοιχείο φωτίζεται. Το φως, με την ενέργεια που προσδίδει στους ημιαγωγούς, δημιουργεί επιπλέον ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς οι οποίοι τίθενται σε προσανατολισμένη κίνηση χάρη στο ηλεκτρικό πεδίο της επαφής p - n . Αυτή η προσανατολισμένη κίνηση των ηλεκτρικών φορέων που δημιουργούνται από το φως ονομάζεται φωτόρευμα (I_L) και αντιστοιχεί στο ρεύμα ολίσθησης. Δύο χαρακτηριστικές καταστάσεις ισορροπίας για ένα φωτιζόμενο ΦΒ αξίζει να σημειωθούν, το ΦΒ στοιχείο: (α) σε ανοιχτό κύκλωμα (εικόνα 2γ) και (β) σε βραχυκύκλωση (εικόνα 2δ). Στην περίπτωση όπου το κύκλωμα του ΦΒ στοιχείου είναι ανοικτό, δηλαδή δεν υπάρχει σύνδεση με καλώδιο της πίσω και εμπρός επαφής του, το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο της επαφής των ημιαγωγών, όπως αναφέρθηκε, σπρώχνει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και τις οπές προς το αρνητικό και το θετικό τμήμα αντίστοιχα. Όμως, η αύξηση των συγκεντρώσεων των φορέων στα τμήματα που τους κατευθύνει το πεδίο προκαλεί με τη σειρά της ελάττωση της έντασης του πεδίου και κατά συνέπεια αύξηση του ρεύματος διάχυσης. Έτσι, δημιουργείται μια νέα κατάσταση ισορροπίας στην οποία το φωτόρευμα (ρεύμα ολίσθησης) ισούται πάλι με το ρεύμα διάχυσης, με τη διαφορά ότι στους πόλους του ΦΒ στοιχείου εμφανίζεται ηλεκτρική τάση· αυτή ονομάζεται τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}). Στην περίπτωση όπου αγωγός μηδενικής αντίστασης συνδεθεί στις δύο άκρες του ΦΒ στοιχείου (βραχυκύκλωμα), ηλεκτρόνια που βρίσκονται στον ημιαγωγό τύπου n κινούνται από την εμπρός επαφή μέσω του αγωγού στην πίσω επαφή και στη συνέχεια επανασυνδέονται με τις οπές στον ημιαγωγό τύπου

ρ. Σε αυτή την ιδανική περίπτωση, το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό είναι ίσο με το φωτόρευμα και ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}). Καμία από τις παραπάνω περιπτώσεις, ωστόσο, δεν αποτελεί συνηθισμένη κατάσταση λειτουργίας ενός ΦΒ, ούτε είναι θεμιτή. Η ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από τα ΦΒ πρέπει να αξιοποιηθεί, γι' αυτό και στο ηλεκτρικό κύκλωμα προστίθεται φόρτος (αντίσταση κατανάλωσης). Έτσι, σε μια κανονική κατάσταση λειτουργίας η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το ηλεκτρικό κύκλωμα ισούται με τη διαφορά των εντάσεων του ρεύματος διάχυσης από το φωτόρευμα.

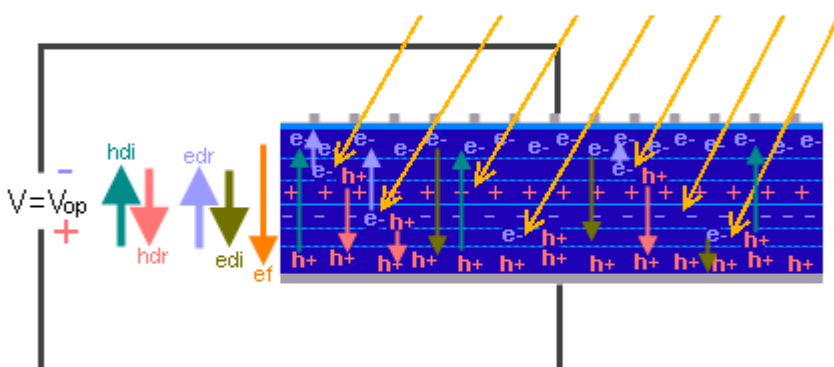
Έχει ιδιαίτερη σημασία η γνώση της ιδανικής αντίστασης (φόρτου) που πρέπει να προστίθεται σε ένα τέτοιο ηλεκτρικό κύκλωμα προκειμένου να πραγματοποιείται μέγιστη αξιοποίηση. Η ιδανική αντίσταση που πρέπει να έχει το ηλεκτρικό κύκλωμα διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του ΦΒ, κυρίως βάσει της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Για τον προσδιορισμό της αντίστασης για αποδοτικότερη λειτουργία του ΦΒ είναι απαραίτητη η μελέτη και κατασκευή της καμπύλης των σημείων μέγιστης ισχύος του ΦΒ καθώς και της ευθείας φόρτου. Αυτή η πειραματική διαδικασία δεν είναι ιδιαίτερα δύσκολη, ωστόσο η περιγραφή της ξεφεύγει από τα όρια του σκοπού της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Αναφέρεται, απλά, ότι στις περιπτώσεις ΦΒ συνδεδεμένων σε κεντρικό δίκτυο, όπως και στην εξεταζόμενη, υπάρχει ηλεκτρονική διάταξη που αναζητά και παρακολουθεί το σημείο μέγιστης ισχύος (maximum power point tracking ή MPPT) και προσαρμόζει ανάλογα το φόρτο στην έξοδο της ΦΒ συστοιχίας.



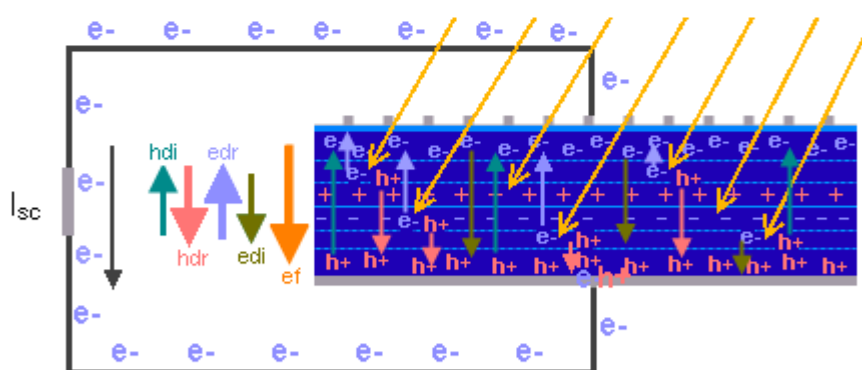
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Εικόνα 2: (α) Ημιαγωγοί p και n πριν έρθουν σε επαφή, (β) ημιαγωγοί p & n σε επαφή, ΦΒ στοιχείο στο σκοτάδι, (γ) ΦΒ στοιχείο υπό το φως με ανοικτό κύκλωμα και (δ) ΦΒ στοιχείο υπό το φως με κλειστό κύκλωμα χωρίς αντίσταση

Υπόμνημα:

- | | |
|----------------------------|------------------------------|
| 1 εμπρός επαφή ΦΒ | ▼ διάχυση ηλεκτρονίων (edi) |
| 2 αντανάκλαστική επίστρωση | ▲ ολίσθηση ηλεκτρονίων (edr) |
| 3 πίσω επαφή ΦΒ | ▼ ολίσθηση οπών (hdr) |
| 4 ημιαγωγός τύπου n | ▲ διάχυση οπών (hdi) |
| 5 ημιαγωγός τύπου p | + θετικά ιόντα |
| 6 περιοχή απογύμνωσης | - αρνητικά ιόντα |
| ↘ ηλιακή ακτινοβολία | e- ελεύθερο ηλεκτρόνιο |
| ▼ ηλεκτρικό πεδίο (ef) | h+ οπή |
| | ↓ φορά ηλ. ρεύματος |

Συνοπτικά, το ΦΒ φαινόμενο αποτελεί συνδυασμό δύο διαφορετικών εσωτερικών φαινομένων [Φραγκιαδάκης, 2011]:

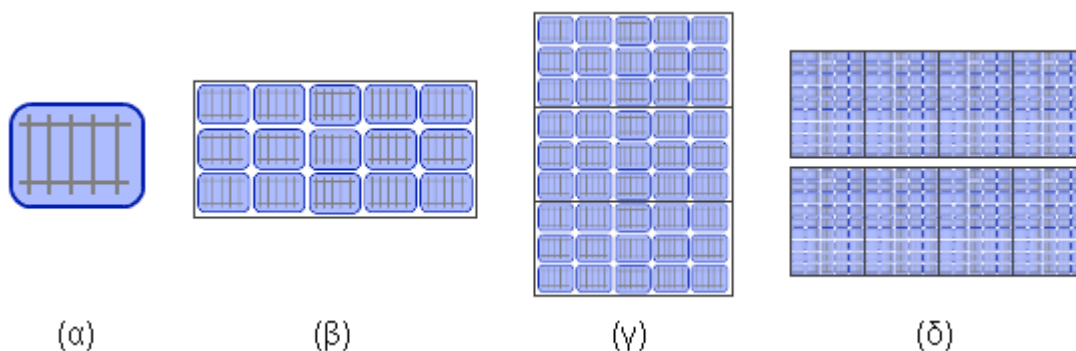
- Της δημιουργίας ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων (οπές και ηλεκτρόνια) στο εσωτερικό των ημιαγωγών από την πρόσπτωση του φωτός και
- Της δημιουργίας εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή επαφής των δύο ημιαγωγών.

Στην εικόνα 2α αναφέρονται κάποιες επιπρόσθετες κατασκευαστικές λεπτομέρειες των ΦΒ στοιχείων. Αυτές είναι: η αντιανακλαστική επίστρωση, μια διάφανη ουσία που καλύπτει την όψη του ΦΒ με δείκτη διάθλασης τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιεί την ανακλώμενη συνιστώσα του φωτός· το ορισμένο πάχος του ΦΒ, το οποίο είναι περιορισμένο στην ενεργή περιοχή του, δηλαδή, στην περιοχή που μπορεί να λάβει χώρα το ΦΒ φαινόμενο· τα μεταλλικά ηλεκτρόδια συλλογής, το εμπρός έχει σχήμα αραιής μεταλλικής σχάρας ώστε να περιορίζει την αποκοπή του προσπίπτοντος φωτός αλλά και να συλλέγει με τον αποτελεσματικότερο τρόπο τα φωτορεύματα, το πίσω καλύπτει όλη την έκταση του ΦΒ και έχει μορφή λεπτού και πυκνού μεταλλικού πλέγματος. Σημειώνεται ότι η κατασκευή των ΦΒ στοιχείων είναι μια αρκετά περίπλοκη διαδικασία με διαδοχικά στάδια και δεν πραγματοποιείται απλά με επαφή δύο προκατασκευασμένων ημιαγωγών τύπου p και n· η σχηματική απεικόνιση αποτελεί απλούστευση.

Οι πιο συνήθεις τύποι ΦΒ πυριτίου είναι οι εξής: (α) ΦΒ μονοκρυσταλλικού πυριτίου (single-crystal silicon) τα οποία έχουν υψηλό κόστος κατασκευής αλλά και υψηλή απόδοση (21% έως 24% σε μορφή κυψελίδας και 13% με 18% σε μορφή πλαισίου)· (β) ΦΒ πολυκρυσταλλικού πυριτίου (multicrystalline silicon ή mc-Si) τα οποία χαρακτηρίζονται από μέτριο κόστος κατασκευής, υψηλή χρονική σταθερότητα και μέση απόδοση (17% με 20% για τις κυψελίδες και 10% έως 14%

για τα πλαίσια)· (γ) ΦΒ ταινίας (ribbon silicon), τα οποία δημιουργούνται από λεπτή ταινία που προκύπτει από τηγμένο υλικό πολυκρυσταλλικού πυριτίου με απόδοση περίπου 13%, έχουν υψηλό κόστος παραγωγής και διατηρούν περιορισμένη εφαρμογή· και τέλος (δ) ΦΒ άμορφου πυριτίου (amorphous ή thin film silicon) τα οποία αποτελούνται από λεπτές επιστρώσεις ή υμένες (films), έχουν πολύ χαμηλό κόστος αλλά και χαμηλή απόδοση της τάξης του 6% με 8%, ενώ τα τελευταίας τεχνολογίας που κατασκευάζονται από κράμα πυριτίου με άνθρακα και γερμάνιο (a-SiC και a-SiGe) έχουν καλύτερη απόδοση, της τάξης του 13% [Ι. Φραγκιαδάκης, 2011]. Τα εξεταζόμενα ΦΒ σε αυτή την εργασία ανήκουν στη δ΄ ομάδα.

Το δομικό στοιχείο των ΦΒ ή αλλιώς των φωτοβολταϊκών γεννητριών ισχύος είναι το ΦΒ ηλιακό στοιχείο ή κυψελίδα ή κύτταρο (solar cell). Η τάση και η ισχύς που αποδίδει ένα ΦΒ στοιχείο είναι περίπου 0,5 V και 0,4 W αντίστοιχα, γι' αυτό και αρκετά στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους δίνοντας μια κοινή ηλεκτρική έξοδο σχηματίζοντας αυτό που λέγεται ΦΒ πλαίσιο (PV module). Μερικά πλαίσια μπορούν να συνδεθούν επίσης μεταξύ τους πάνω σε ένα ενιαίο σκελετό σχηματίζοντας ένα ΦΒ σύνθετο ή πανέλο (panel). Τα ΦΒ σύνθετα τοποθετούνται σε σειρά ώστε να παράγουν την απαιτούμενη ηλεκτρική τάση, σχηματίζοντας έτσι μια ΦΒ συστοιχία (array). Περισσότερες από μία συστοιχίες ΦΒ συνδέονται συνήθως παράλληλα μεταξύ τους για να δώσουν μεγαλύτερης έντασης ρεύμα· εάν είναι αρκετές στον αριθμό θεωρούνται συγκρότημα ή πάρκο (field ή park). Ένα ΦΒ πάρκο μαζί με τον ηλεκτρολογικό και κτηριακό εξοπλισμό του καλείται ΦΒ σταθμός (station). Τα δομικά στοιχεία των ΦΒ παρουσιάζονται σχηματικά στην εικόνα 3.



Εικόνα 3: (α) ΦΒ στοιχείο ή ΦΒ κυψελίδα, (β) ΦΒ πλαίσιο, (γ) ΦΒ σύνθετο ή panel και (δ) ΦΒ συστοιχία με δύο κλάδους

Η χρήση ΦΒ για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος συνοδεύεται από μία σειρά πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων· αναφέρονται ονομαστικά στον πίνακα 1.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αθόρυβη λειτουργία	Κατάληψη μεγάλης έκτασης
Μηδενική εκπομπή ρύπων	Υψηλό κόστος επένδυσης
Μεγάλη διάρκεια ζωής	
Ελάχιστη συντήρηση (κυρίως καθαρισμός)	
Αυτόνομη λειτουργία	
Συνδυασμός με άλλες ΑΠΕ (υβριδικά)	

Πίνακας 1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΦΒ

Είναι φυσικό, με τη σωστή μελέτη και σχεδιασμό, τα μειονεκτήματα από τη χρήση των ΦΒ να μετριάζονται στο ελάχιστο· για παράδειγμα, με την εγκατάσταση και ενσωμάτωση των ΦΒ στην πρόσοψη, στις στέγες ή στα σκίαστρα ενός κτηρίου (παθητικά συστήματα) αντιμετωπίζεται η κατάληψη ωφέλιμου χώρου. Αντίθετα, ο ελλιπής ή ανύπαρκτος χωροταξικός σχεδιασμός μπορεί να οξύνει τα μειονεκτήματα και να εγείρει ζητήματα ηθικής, όπως την κάλυψη γόνιμων και καλλιεργήσιμων εκτάσεων από ΦΒ.

1.3. Περιγραφή της ΦΒ διάταξης

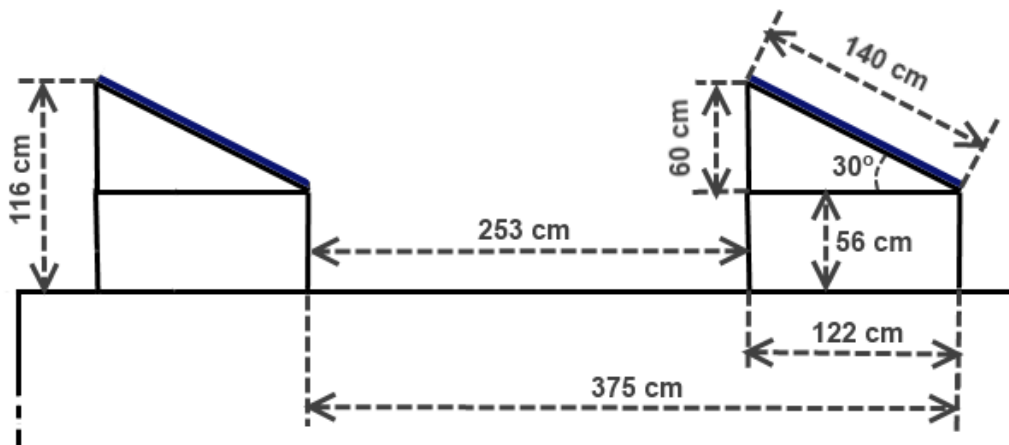
Η εξεταζόμενη ΦΒ διάταξη βρίσκεται σε επίπεδη στέγη στο χώρο ηλιακών δοκιμών του εργαστηρίου Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων στην Πολυτεχνειούπολη του Πολυτεχνείου Κρήτης (Χανιά). Το κτήριο του εργαστηρίου είναι προκατασκευασμένο, έχει ύψος περίπου 3 m και ο προσανατολισμός της πρόσοψής του αποκλίνει κατά 50° ανατολικά από το Νότο (εικόνα 4).



Εικόνα 4: Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων Πολυτεχνείου Κρήτης

Η φωτοβολταϊκή διάταξη αποτελείται από 18 ΦΒ σύνθετα (panels) τα οποία σχηματίζουν δύο παράλληλες συστοιχίες (arrays), η καθεμία αποτελούμενη από 9 ΦΒ σύνθετα σε σειρά με συνολική επιφάνεια 26 m^2 . Ο προσανατολισμός τους ακολουθεί τον προσανατολισμό του κτηρίου για λόγους αισθητικής· έτσι, η αζιμουθιακή γωνία είναι $\gamma = 50^\circ$. Η κλίση τους είναι $s = 30^\circ$, ενώ οι υπόλοιπες διαστάσεις τους αναγράφονται στην εικόνα 5. Ο τύπος των ΦΒ που

χρησιμοποιείται είναι επάλληλων λεπτών φιλμ άμορφου μικροκρυσταλλικού πυριτίου (*uCSi-aSi*), συγκεκριμένα το μοντέλο NA-F121G5 της Sharp. Η ικανότητα αιχμής (peak capacity) του συστήματος είναι 2,18 kWp⁽²⁾ και η απόδοσή του (efficiency) σε πρότυπες συνθήκες δοκιμής³ (STC) είναι 8,5%. Ο αντιστροφέας (inverter) που χρησιμοποιείται είναι το μοντέλο SunnyBoy SB2500 της εταιρείας SMA. Η μέγιστη ισχύς (power) που μπορεί να αποδώσει είναι 2.500 W εναλλασσόμενου ρεύματος και η απόδοσή του είναι 94,1%. Η διάταξη τέθηκε πρώτη φορά σε λειτουργία τον Ιούνιο του 2010.



Εικόνα 5: Πλάγια όψη της ΦΒ διάταξης.

Τα δεδομένα ακτινοβολίας προέρχονται από το πυρανόμετρο CMP11 της Kipp & Zonen, ενώ οι υπόλοιπες μετεωρολογικές παράμετροι (θερμοκρασία, ταχύτητα ανέμου, κ.λπ.) καταγράφονται από το μετεωρολογικό σταθμό WXT 250 της Vaisala Corp που βρίσκεται σε διπλανό κτήριο.

² kW peak ή κιλοβάτ αιχμής: αναφέρονται στη μέγιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ από ένα ΦΒ στοιχείο, πλαίσιο ή συστοιχία σε Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής (STC).

³ Οι Πρότυπες Συνθήκες Δοκιμής (Standard Test Conditions) αποτελούν σύνολο συνθηκών για τον έλεγχο και χαρακτηρισμό των ΦΒ, που περιλαμβάνουν κάθετη πρόσπτωση φυσικής ή τεχνητής ακτινοβολίας στην επιφάνεια των ΦΒ με ισχύ 1 kW/m² και φάσμα AM1,5 καθώς και μέση θερμοκρασία ΦΒ στοιχείων 25±2 °C. Ως AM1,5 νοείται φωτεινό φάσμα με μορφή όμοια της ηλιακής ακτινοβολίας όταν αυτή έχει διανύσει μία και ήμισυ φορές το πάχος της ατμόσφαιρας της Γης [Φραγκιαδάκης, 2011].

1.4. Λογισμικά που χρησιμοποιούνται

1.4.1. PVSYST

Το λογισμικό PVSYST είναι επαγγελματικό εργαλείο υπολογισμού για μηχανικούς που επιτρέπει τη μελέτη, μέτρηση μεγέθους, προσομοίωση και ανάλυση δεδομένων ολοκληρωμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων. Αναπτύχθηκε από τον μηχανικό André Mermoud στο πανεπιστήμιο της Γενεύης. Περιλαμβάνει πλούσιες βάσεις δεδομένων, τόσο των διαφορετικών φωτοβολταϊκών πλαισίων και αντιστροφέων μαζί με τα χαρακτηριστικά τους, όσο και των ιστορικών μετεωρολογικών δεδομένων πολλών περιοχών. Αν και απαιτεί αρκετό χρόνο για την εξοικείωση του χρήστη σε αυτό, δίνει πολλές επιλογές προσαρμογής και παραμετροποίησης για τη μοντελοποίηση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Η διάρκειας 30 ημερών δοκιμαστική (trial) έκδοση 5.69 του λογισμικού θα χρησιμοποιηθεί σε αυτή τη διπλωματική [<http://www.pvsyst.com/en/download>].

1.4.2. RETSCREEN

Το RETSCREEN 4 είναι λογισμικό εργαλείο ανάλυσης έργων καθαρής ενέργειας βασισμένο στο Microsoft Office Excel που βοηθά τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να προσδιορίσουν γρήγορα και ανέξοδα την τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα πιθανών έργων ανανεώσιμης ενέργειας, ενεργειακής απόδοσης και συμπαραγωγής. Το RETSCREEN Plus είναι εργαλείο διαχείρισης ενέργειας βασισμένο στα Windows που επιτρέπει στους ιδιοκτήτες των έργων να εξακριβώνουν εύκολα την τρέχουσα ενεργειακή απόδοση των εγκαταστάσεών τους. Το λογισμικό RETSCREEN δημιουργήθηκε από την κυβέρνηση του Καναδά και διατίθεται δωρεάν [<http://www.etscreen.net/ang/home.php>].

1.4.3. PVGIS

Το PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System – Φωτοβολταϊκό Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών) παρέχει χαρτογραφημένη απογραφή για τους πόρους της ηλιακής ενέργειας κάθε περιοχής καθώς και αποτίμηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΦΒ συστήματα σε Ευρώπη, Αφρική και Νοτιοδυτική Ασία. Είναι μέρος της δράσης SOLAREC που συμβάλει στην εισαγωγή της ανανεώσιμης ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση ως μια βιώσιμη και μακροπρόθεσμη πηγή ενέργειας αναλαμβάνοντας την ανάπτυξη της τεχνολογίας και της επιστήμης σε τομείς όπου η εναρμόνιση είναι απαιτούμενη και ζητείται από τους πελάτες. Η χρήση του εργαλείου είναι ελεύθερη για όλους μέσω της ιστοσελίδας του [<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>].

1.4.4. Microsoft Office Excel

Το Excel είναι το πλέον δημοφιλές λογισμικό υπολογιστικών φύλλων από το 1993. Αναπτύχθηκε από τη Microsoft για υπολογιστές με Windows ή Mac OS X και αποτελεί μέρος της σουίτας εφαρμογών γραφείου Microsoft Office. Περιλαμβάνει δυνατότητες υπολογισμού, εργαλεία απεικόνισης γραφικών παραστάσεων, συγκεντρωτικούς πίνακες και γλώσσα προγραμματισμού με την ονομασία Visual Basic for Applications.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία το Excel χρησιμοποιείται για την επεξεργασία των πραγματικών δεδομένων από τη λειτουργία των ΦΒ και την εξαγωγή αποτελεσμάτων. Δεν συγκρίνεται με τα λογισμικά που περιγράφηκαν προηγουμένως με την έννοια της αξιολόγησης, αλλά χρησιμοποιείται για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση.

2. ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

Η αναζήτηση των βιβλιογραφικών πηγών πραγματοποιήθηκε ηλεκτρονικά σε επιστημονικούς εκδοτικούς οίκους στους οποίους έχει συνδρομητική πρόσβαση το Πολυτεχνείο Κρήτης. Η αναζήτηση εκτελέστηκε για δύο είδη πληροφοριών: (1) τους τρόπους ανάλυσης της επίδοσης ΦΒ εγκαταστάσεων και (2) τα λογισμικά που διατίθενται για την προσομοίωση των ΦΒ εγκαταστάσεων.

2.1. Αξιολόγηση ΦΒ εγκαταστάσεων

- Για τη ΦΒ διάταξη που βρίσκεται στο χώρο ηλιακών δοκιμών του εργαστηρίου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων του Πολυτεχνείου Κρήτης έχουν συνταχθεί δύο δημοσιευμένες εργασίες. Η πρώτη εργασία παρουσιάστηκε κατά το 26^ο Ευρωπαϊκό συνέδριο και έκθεση για τη φωτοβολταϊκή ηλιακή ενέργεια (PVSEC) στο Αμβούργο το 2011, ενώ η δεύτερη την αμέσως επόμενη χρονιά κατά το 27^ο συνέδριο στη Φρανκφούρτη. Το ετήσιο Ευρωπαϊκό συνέδριο PVSEC είναι το μεγαλύτερο παγκοσμίως συνέδριο για την έρευνα στα ΦΒ, τις τεχνολογίες και τις εφαρμογές τους και ταυτόχρονα αποτελεί μία από τις κορυφαίες εκθέσεις παγκοσμίως για τη βιομηχανία των ΦΒ [πηγή: <http://www.photovoltaiic-conference.com>, επίσκεψη στις 13/7/13].

Στην πρώτη εργασία με τίτλο «Temperature effect on PV performance experimental results from a 2.18 kWp thin film system» οι ερευνητές καταγράφουν τις παραμέτρους απόδοσης καθώς και τις απώλειες της ΦΒ διάταξης στα Χανιά της Κρήτης. Ο στόχος που επιδιώκει αυτή η εργασία είναι η επισημάνση των διαφορών στην απόδοση των ΦΒ κατά την ιδανική λειτουργία σε εργαστηριακές συνθήκες και κατά τη λειτουργία στο πεδίο. Διάφορα διαγράμματα, που παρουσιάζουν τόσο την επίπτωση των μετεωρολογικών παραμέτρων στη

θερμοκρασία των φωτοβολταϊκών πλαισίων όσο και την απόδοση των ΦΒ σε σχέση με τη θερμοκρασία, εμφανίζονται σε όλο το μήκος της αναφοράς [Tsoutsos et al., 2011].

Στη δεύτερη εργασία με τίτλο «Performance analysis of two grid connected thin film PV installations 2.18 kW_p for the first two years of their operation in the island of Crete and in Athens» γίνεται ανάλυση επίδοσης για διάστημα δύο ετών της ΦΒ διάταξης στα Χανιά και μίας δεύτερης όμοιας διάταξης στην Αθήνα. Η προσθήκη σε σχέση με την πρώτη εργασία είναι η σύγκριση μεταξύ δύο δίδυμων εγκαταστάσεων αλλά και ο υπολογισμός κάποιων επιπλέον παραμέτρων, συγκεκριμένα της απόδοσης (η) της συστοιχίας, του αντιστροφέα αλλά και ολόκληρου του συστήματος [Kanakakis et al., 2012].

- Παρακάτω αναφέρονται επιστημονικά άρθρα τα οποία αφορούν την αξιολόγηση των ΦΒ εγκαταστάσεων. Οι περισσότερες μελέτες που εκτελούνται έχουν αρκετά κοινά σημεία μεταξύ τους, όπως τον υπολογισμό των καθιερωμένων δεικτών λειτουργίας των ΦΒ, ωστόσο διαφέρουν ως προς τους στόχους και τα συμπεράσματά τους. Έτσι, μπορεί μια μελέτη να εστιάζει στην επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση μιας ΦΒ συστοιχίας, ενώ μια άλλη, στη σύγκριση της απόδοσης διαφορετικών ΦΒ τεχνολογιών κάτω από όμοιες συνθήκες.

Η εργασία με τίτλο «Performance Parameters for grid-connected PV systems» δίνει έμφαση στην αξία των καθιερωμένων παραμέτρων επίδοσης που έχουν θεσπιστεί για τα ΦΒ συστήματα, ώστε να διευκολύνεται η σύγκριση μεταξύ συστημάτων διαφορετικών σε σχεδιασμό, μέγεθος αλλά και γεωγραφική τοποθέτηση. Πέραν των συνηθισμένων δεικτών, γίνεται επίσης αναφορά στο δείκτη εκτίμησης PVUSA. Ο τελευταίος χρησιμεύει στην εκχώρηση τάξης για το

εναλλασσόμενο ρεύμα σε παλαιά συστήματα για τα οποία διατίθεται ιστορικό δεδομένων. Για μία ακόμα φορά γίνεται συσχέτιση της απόδοσης των ΦΒ με τα μετεωρολογικά δεδομένα κατά τη διάρκεια ενός έτους. Τέλος, παρουσιάζεται η φθίνουσα πορεία στο λόγο επίδοσης (PR) σε συνάρτηση με το χρόνο για συστήματα που διαθέτουν δεδομένα με διάρκεια μεγαλύτερη της δεκαετίας. Οι διαφορετικές κλίσεις των γραμμών επίδοσης των ΦΒ συστημάτων, δηλώνουν το ρυθμό με τον οποίο υποβαθμίζονται τα διαφορετικής τεχνολογίας συστήματα καθώς αυτά παλαιώνουν [Marion et al., 2005].

Σε επόμενη εργασία με όνομα «Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected system in Ireland» γίνεται ανάλυση για ένα έτος της επίδοσης ενός διασυνδεδεμένου μονοκρυσταλλικού ΦΒ συστήματος εγκατεστημένο στο Δουβλίνο της Ιρλανδίας. Όπως και στις προηγούμενες εργασίες, γίνεται υπολογισμός των δεικτών απόδοσης των ΦΒ πλαισίων. Επιπλέον, προσδιορίζονται ξεχωριστά οι κάθε είδους απώλειες, η απόδοση του αντιστροφέα και του συνολικού συστήματος καθώς και ο παράγοντας πληρότητας. Οι μετεωρολογικές παράμετροι (ένταση ανέμου, θερμοκρασία αέρα) καθώς και η θερμοκρασία των πλαισίων παρουσιάζονται συναρτήσει της ακτινοβολίας. Οι απώλειες χωρίζονται σε απώλειες συστήματος, δέσμευσης συστοιχίας και θερμοκρασίας κυψελίδας. Για τις τελευταίες, υπολογίζεται ο συντελεστής θερμοκρασιακών απωλειών. Τέλος, γίνεται μια αναφορική σύγκριση της τελικής αποδοτικότητας του συστήματος με άλλες ΦΒ διατάξεις σε νοτιότερες χώρες· η απόδοση φαίνεται να είναι υψηλότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η διαφορά οφείλεται στην καλύτερη τεχνολογία που χρησιμοποιείται: μονοκρυσταλλικά ΦΒ έναντι πολυκρυσταλλικών ή άμορφου πυριτίου [Ayompe et al., 2011].

Μια λίγο διαφορετική εργασία με τίτλο «Performance assessment of different photovoltaic systems under identical field conditions of high irradiation» εξετάζει δεκατέσσερα διαφορετικού τύπου ΦΒ συστήματα τα οποία βρίσκονται στην ίδια τοποθεσία (Κύπρος). Έτσι, είναι δυνατή η σύγκριση της επίδοσης διαφορετικής τεχνολογίας και διάταξης συστημάτων κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Οι διαφορετικοί τύποι ΦΒ περιλαμβάνουν από μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά έως λεπτού φιλμ. Όπως και σε όλες τις δοκιμασίες, οι παράμετροι που εξετάζονται είναι ο λόγος επίδοσης (PR) καθώς και η απόδοση ενέργειας τόσο του συνεχούς όσο και του εναλλασσόμενου ρεύματος (E_{AC} και E_{DC}). Το σύστημα που αποδίδει καλύτερα κάτω από αυτές τις συνθήκες εμφανίζεται να είναι ένα ΦΒ μονοκρυσταλλικής τεχνολογίας της εταιρείας Suntechnics με ονομαστική απόδοση 16,09% και μετρημένο λόγο επίδοσης συνεχούς ρεύματος 94% [Makrides et al., 2006].

Η εργασία «Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based in Nominal Operation Cell Temperature calculations» εξετάζει τις πρότυπες μεθόδους που έχουν καθιερωθεί για τον υπολογισμό της ονομαστικής θερμοκρασίας λειτουργίας στοιχείου (NOCT) σε ΦΒ πλαίσια διάφορων τεχνολογιών. Η NOCT χρησιμοποιείται στη σύγκριση διαφορετικών ΦΒ συστημάτων και επηρεάζει τις προβλέψεις για τη λειτουργία ενός συστήματος. Η εν λόγω εργασία, εκτός από την επικύρωση των μεθόδων υπολογισμού της NOCT, επιχειρεί να εφαρμόσει τις τιμές της σε διάφορες προσομοιώσεις ΦΒ συστημάτων και να καθορίσει τα όρια των περιβαλλοντικών παραμέτρων για τα οποία ισχύουν οι τιμές της. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ότι: (α) η θέρμανση των ΦΒ πλαισίων είναι εντονότερη τις απογευματινές ώρες (κυρίως λόγω φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας αυτές τις ώρες) και ο καλύτερος τρόπος

για τον υπολογισμό της NOCT είναι η χρήση των περισσότερων δυνατών δεδομένων τόσο από πρωινές όσο και από απογευματινές ώρες· (β) μικρές αβεβαιότητες στον υπολογισμό της NOCT, ανακρίβειες περίπου $\pm 3^{\circ}\text{C}$, εισάγουν σφάλματα της τάξης του $\pm 1,5\%$ στις ετήσιες προβλέψεις απόδοσης· (γ) τα πρότυπα μέτρησης EN-61215 και EN-61646 δεν είναι τα πιο κατάλληλα για πλαίσια ενσωματωμένα σε κτήρια και (δ) κρίνεται χρήσιμη η δημιουργία μιας νέας μεθόδου για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας των ενσωματωμένων ΦΒ πλαισίων σε κατασκευές, όταν απαιτείται μεγάλη ακρίβεια [Alonso Garcia, Balenzategui, 2003].

Στην αναφορά με τίτλο «Long-term performance of amorphous photovoltaic modules» παρουσιάζονται αποτελέσματα από τη μακροχρόνια λειτουργία διάφορων άμορφων ΦΒ συστημάτων και εξετάζεται η εποχιακή αλλά και ετήσια επίδοσή τους. Τα συμπεράσματα που εξάγονται είναι: (α) Η μεγαλύτερη επίπτωση στην απόδοση εμφανίζεται να είναι ο ίδιος ο εσφαλμένος χαρακτηρισμός των ΦΒ πλαισίων από τον κατασκευαστή, ο οποίος αναγράφει ως επίδοση αυτή κατά την κατασκευή και όχι αυτή μετά την αρχική υποβάθμιση της απόδοσης, ως όφειλε. (β) Η εποχικότητα στην απόδοση των κυψελίδων τριπλής επαφής (triple junction solar cells) κατά κύριο λόγο κυριαρχείται από το ηλιακό φάσμα, ενώ λιγότερες από τις μισές κυψελίδες τύπου μονής επαφής επηρεάζονται από φασματικές αλλαγές [Vorasayan et al., 2006].

- Μια παλαιά εργασία που, αν και πλησιάζει τα όρια της επιστημονικής φαντασίας, αφορά αποκλειστικά τα ΦΒ άμορφου πυριτίου, παρουσιάζεται περιληπτικά παρακάτω.

Η εργασία με τίτλο «Recent progress of amorphous silicon solar cell applications and systems» περιγράφει τις μεθόδους κατασκευής ΦΒ κυψελίδων άμορφου πυριτίου, τους διαφορετικούς τύπους τους, τη βελτίωση της αξιοπιστίας τους καθώς και τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται. Στη συνέχεια αξιολογεί το μελλοντικό σχέδιο GENESIS (Global Energy Network Equipped with Solar cells and International Superconductor grids – Παγκόσμιο Ενεργειακό Δίκτυο Εξοπλισμένο με Ηλιακές κυψελίδες και Διεθνή Υπεραγώγιμα πλέγματα) για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε ολόκληρο τον κόσμο με την εγκατάσταση ΦΒ συστημάτων στο 4% τις συνολικής έκτασης των ερήμων του πλανήτη. Η ανάγκη σε πυρίτιο για την κατασκευή άμορφων ΦΒ (a-Si) είναι ίση με το 1/100 της ανάγκης για κατασκευή κρυσταλλικών ΦΒ (c-Si), οπότε κατά τους συγγραφείς το σχέδιο χαρακτηρίζεται βιώσιμο με βάση την υπάρχουσα διαθεσιμότητα πυριτίου [Tarui et al., 1996].

- Οι παράμετροι λειτουργίας που θα αναλυθούν σε αυτή τη διπλωματική εργασία περιγράφονται και υπολογίζονται παράλληλα στην παράγραφο 3.4. Ονομαστική αναφορά τους γίνεται στον πίνακα 15 της παραγράφου 6.2.1.

2.2. Αξιολόγηση των εμπορικών λογισμικών

Από την αναζήτηση στις επιστημονικές βάσεις δεδομένων δεν βρέθηκαν άρθρα με κύριο θέμα την αξιολόγηση εμπορικών λογισμικών ως προς τη δυνατότητά τους να προσομοιώνουν και να προβλέπουν τη λειτουργία των ΦΒ εγκαταστάσεων. Αυτή η έλλειψη δημιουργεί την ανάγκη εκπόνησης αυτής της μελέτης για τη σύγκριση των εμπορικών ή ελεύθερων λογισμικών που κυκλοφορούν. Ενδιαφέρον υπάρχει σε ένα μοναδικό άρθρο που περιγράφει αναλυτικά τη λειτουργία και τις συνέπειες από τη χρήση του εργαλείου PVGIS.

Στο επιστημονικό άρθρο με τίτλο «Geographic Aspects of Photovoltaics in Europe: Contribution of the PVGIS Website» γίνεται επισκόπηση, αναλυτική εξέταση λειτουργίας και εξαγωγή συμπερασμάτων για το εργαλείο PVGIS. Η ενδελεχής ανάλυση εστιάζει σε δύο σημεία: (1) την αβεβαιότητα της εκτίμησης της ηλιακής ακτινοβολίας και (2) τις προβλέψεις απόδοσης των ΦΒ. Οι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι η ταχεία ανάπτυξη της ΦΒ τεχνολογίας και το αυξημένο ενδιαφέρον, τόσο από επαγγελματίες του χώρου, όσο και από μη ειδικούς, εμφανίζουν την ανάγκη για καλύτερη κατανόηση της γεωγραφικής κατανομής των ηλιακών πόρων και του ΦΒ δυναμικού στην Ευρώπη. Το PVGIS (photovoltaic geographic information system) αναπτύχθηκε από το Κέντρο Κοινών Ερευνών (JRC) της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για να καλύψει αυτήν την ανάγκη με το μικρότερο δυνατό κόστος. Οι τελικοί στόχοι του εγχειρήματος είναι: (α) η υποστήριξη των Ευρωπαϊκών, κρατικών και τοπικών πολιτικών, (β) η συνεισφορά στην έρευνα, την εκπαίδευση αλλά και τη βιομηχανία και (γ) η διεύρυνση της επίγνωσης του κοινού στα θέματα της ηλιακής ενέργειας [Suri et al., 2008].

Το PVGIS μπορεί να προσφέρει δύο ειδών πληροφορίες για μια επιλεγμένη τοποθεσία: (α) εποπτικές πληροφορίες για την ηλιακή ενέργεια και το κλίμα και (β) μια εκτίμηση της απόδοσης ΦΒ με επίπεδο πάνελ (όχι κατ' ανάγκη οριζόντιο). Οι διαθέσιμες βάσεις δεδομένων από τις οποίες εξάγονται οι πληροφορίες είναι για την Ευρώπη και τις γειτονικές περιοχές (ηλιακή ακτινοβολία και θερμοκρασία) και για την Αφρική και τη Νοτιοδυτική Ασία (μόνο ακτινοβολία) [Suri et al., 2008].

Η Ευρωπαϊκή βάση δεδομένων αναπτύχθηκε από συνδυασμό χρήσης του μοντέλου r.sun⁴ και χωρικής παρεμβολής⁵. Για την ανάλυση των δεδομένων ακτινοβολίας, το μοντέλο r.sun λαμβάνει ως εισόδους τρεις σειρές παραμέτρων: (α) το ψηφιακό μοντέλο υψομέτρου⁶ (DEM – Digital elevation model), (β) το συντελεστή θολερότητας Linke⁷ (linke turbidity factor) για μάζα αέρος 2 και (γ) τους συντελεστές καθαρού ουρανού⁸ k_{cb} και k_{cd} (clear-sky coefficients). Η ανάλυση του υψομέτρου στο διαδραστικό χάρτη του εργαλείου PVGIS έχει πλάτος πλέγματος 100 m ενώ η ανάλυση της θολερότητας και των συντελεστών καθαρού-ουρανού έχει πλάτος πλέγματος 1 km. Άλλη παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη είναι ο συντελεστής ανακλαστικότητας του εδάφους (albedo) ο οποίος έχει την προεπιλεγμένη τιμή 0,2. Για την προσθήκη των θερμοκρασιακών δεδομένων γίνεται χωρική παρεμβολή επτά μέσων μηνιαίων τιμών θερμοκρασίας ανά ημέρα, που περιλαμβάνουν τη μέγιστη, την ελάχιστη και άλλες πέντε τιμές σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα. Τα δεδομένα λαμβάνονται από τις Ευρωπαϊκές Μετεωρολογικές Υποδομές Καταγραφής (EMMI) και η τελική ανάλυση γίνεται με τη βοήθεια του GRASS GIS [Suri et al., 2008].

Η ιστοσελίδα του PVGIS δέχθηκε συνολικά 1,3 εκατομμύρια επισκέψεις από 90.000 μοναδικούς χρήστες το έτος 2007, καθώς τα δεδομένα που παρέχει, εκτός

⁴ Η λειτουργία του r.sun βασίζεται στο ελεύθερο ανοιχτού κώδικα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών GRASS (Geographic Resource Analysis Support System).

⁵ Η χωρική παρεμβολή (spatial interpolation) είναι η διαδικασία υπολογισμού της τιμής ιδιοτήτων (μεταβλητών) σε σημεία που δεν έχει πραγματοποιηθεί δειγματοληψία σε μια ευρύτερη έκταση καλυμμένη από υπάρχουσες παρατηρήσεις.

⁶ Το DEM βασίζεται στα δεδομένα των μοντέλων SRTM-3 v.2 και STRM-30 που αποτελούν προϊόντα της διεθνούς προσπάθειας της Εθνικής Υπηρεσίας Γεωχωρικών Πληροφοριών των ΗΠΑ (NGA) και της NASA για τη δημιουργία της πιο αναλυτικής ψηφιακής βάσης τοπογραφικών δεδομένων (μέχρι το 2009).

⁷ Ο συντελεστής θολερότητας Linke (T_L) είναι μία από τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση της εξασθένησης της ακτινοβολίας δέσμης.

⁸ Οι δείκτες k_{cb} και k_{cd} χρησιμοποιούνται για τη μετατροπή της ακτινοβολίας δέσμης και της διάχυτης ακτινοβολίας καθαρού-ουρανού που υπολογίζονται από το μοντέλο r.sun στις τιμές του πραγματικού ουρανού.

από πρόβλεψη απόδοσης ΦΒ συστημάτων, μπορούν να βοηθήσουν σε άλλου είδους έργα, όπως ηλιακά θερμικά συστήματα. Η ακρίβεια των δεδομένων ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο μετά από επαλήθευση σε 539 τοποθεσίες έδειξε ότι: (α) η απόκλιση στο 90% των τοποθεσιών κυμαίνεται στο $\pm 7,2\%$, (β) σε 3,5% των τοποθεσιών η απόκλιση ήταν μεγαλύτερη του $\pm 10\%$ και (γ) η μεγαλύτερη αβεβαιότητα συναντάται σε βουνά, παράκτιες περιοχές ή τοποθεσίες με χαμηλή πυκνότητα μετεωρολογικών σταθμών. Το εργαλείο διαθέτει μόνο έναν ενιαίο συντελεστή απωλειών για λόγους απλότητας, η τιμή του οποίου είναι προκαθορισμένη συντηρητικά, δίνοντας όμως τη δυνατότητα στο χρήστη να την αλλάξει. Η ετήσια υποβάθμιση της απόδοσης των ΦΒ λόγω παλαίωσης δεν λαμβάνεται υπόψη από το εργαλείο. Το PVGIS φαίνεται να πετυχαίνει τους αρχικούς στόχους του στην έρευνα, την εκπαίδευση και την ενημέρωση του κοινού ενώ παράλληλα βοηθά το ευρύ κοινό στα προκαταρκτικά στάδια εκπόνησης μελετών. Παρόλα αυτά, δεν είναι γνωστό εάν το συγκεκριμένο εργαλείο αποτελεί το βέλτιστο μέσο ανάλυσης σε κάθε περίπτωση, λόγω των εμφανιζόμενων αποκλίσεων, επομένως η διασταύρωση των αποτελεσμάτων του με άλλα λογισμικά είναι απαραίτητη [Suri et al., 2008].

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

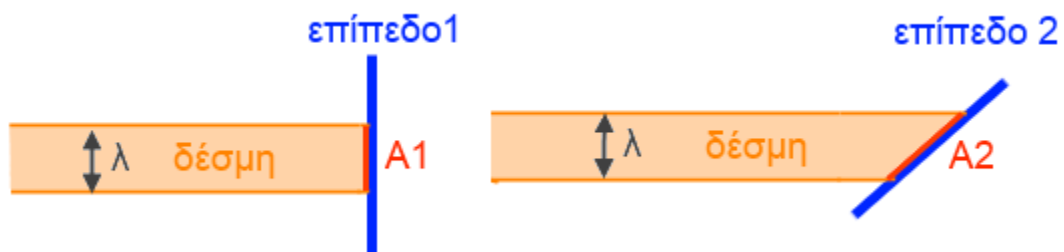
Η μέθοδος που ακολουθείται σε αυτή τη διπλωματική εργασία είναι η ανάλυση και σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις διαφορετικές μεθόδους πρόβλεψης (εμπορικά λογισμικά) και των πραγματικών αποτελεσμάτων από τη λειτουργία των ΦΒ που αναλύονται σε λογιστικό φύλλο (Excel). Μία φωτοβολταϊκή συστοιχία από ΦΒ σύνθετα (panels) λεπτού φιλμ άμορφου πυριτίου παρακολουθείται για χρονικό διάστημα δύο ετών. Οι μετεωρολογικές παράμετροι καθώς και η ενεργειακή απόδοση των ΦΒ καταγράφονται με βήμα δέκα και ενός λεπτών αντίστοιχα από ειδική συσκευή καταγραφής η οποία είναι συνδεδεμένη με τα όργανα μέτρησης (τα κυριότερα εξ αυτών αναφέρθηκαν στο τέλος της παραγράφου 1.3). Τα πειραματικά δεδομένα αναλύονται με τη βοήθεια του προγράμματος υπολογιστικών φύλλων Microsoft Office Excel και εξάγονται αποτελέσματα για την ενεργειακή αποδοτικότητα των ΦΒ αλλά και την απόδοση ολόκληρου του εγκατεστημένου συστήματος. Στη συνέχεια, μόνο τα μετεωρολογικά δεδομένα εισάγονται σε εμπορικά λογισμικά με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με τα πραγματικά αποτελέσματα από την ανάλυση της ΦΒ διάταξης. Η ακρίβεια πρόβλεψης των λογισμικών εξετάζεται στο τέλος.

3.1. Προετοιμασία μετεωρολογικών δεδομένων

Η βασική μετεωρολογική παράμετρος που απαιτείται για την ανάλυση της απόδοσης των ΦΒ είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Ως δεδομένα για την ηλιακή ακτινοβολία διατίθεται η τιμή της πυκνότητας ισχύος της (E ή G) ανά δεκάλεπτο για δύο χρόνια (Ιούνιος 2010 – Μάιος 2012). Η πυκνότητα ηλιακής ισχύος έχει μονάδες ισχύος ανά επιφάνεια (W/m^2) και το όργανο μέτρησης που τη μετρά ονομάζεται πυρανόμετρο. Σημειώνεται ότι το πυρανόμετρο μετρά την ολική (ημισφαιρική) ηλιακή ακτινοβολία, δηλαδή το άθροισμα της απ' ευθείας, διάχυτης

και διάχυτα ανακλώμενης από το έδαφος ακτινοβολίας· δεν πρέπει να συγχέεται με το πυρηλιόμετρο που μετρά μόνο την απ' ευθείας συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας.

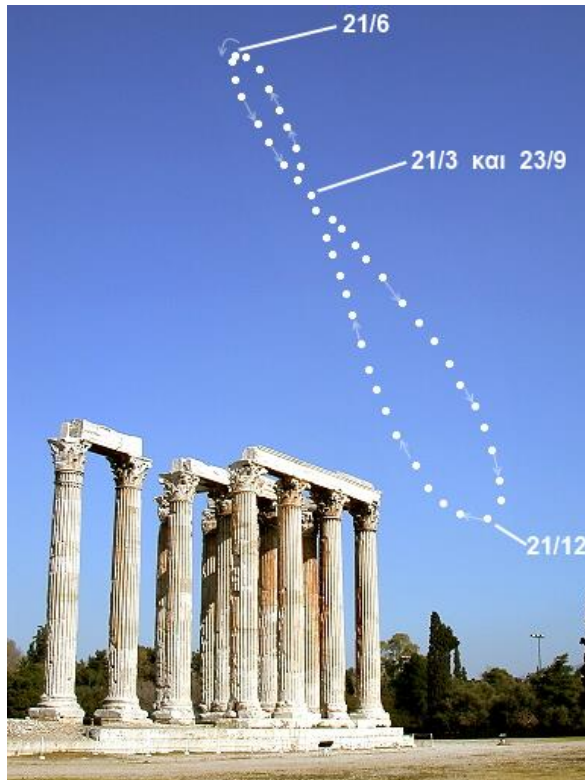
Το πρόβλημα με τα δεδομένα της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας είναι ο προσανατολισμός της επιφάνειας για την οποία αναφέρονται. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης έχει τρεις συνιστώσες, την απ' ευθείας, τη διάχυτη και τη διάχυτα ανακλώμενη από το έδαφος. Οι δύο τελευταίες συνιστώσες μπορούν να θεωρηθούν για λόγους απλούστευσης ισότροπες, δηλαδή ίσου μέτρου προς κάθε κατεύθυνση. Η πρώτη, όμως, και βασικότερη συνιστώσα, η απ' ευθείας ακτινοβολία έχει συγκεκριμένη κατεύθυνση η οποία αλλάζει κατά τη διάρκεια της ημέρας και του έτους. Είναι προφανές ότι μια δέσμη φωτός ορισμένου πλάτους και κατεύθυνσης που προσπίπτει σε επίπεδα με διαφορετικό προσανατολισμό σχηματίζει διαφορετικού εμβαδού φωτιζόμενες επιφάνειες, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.



Εικόνα 6: Δύο όμοιες δέσμες φωτός προσπίπτουν κατακόρυφα και πλάγια σε δύο επιφάνειες.

Η φωτισμένη επιφάνεια A1 είναι μικρότερη από την επιφάνεια A2 επειδή η δέσμη φωτός προσπίπτει στη δεύτερη υπό κλίση ενώ στην πρώτη κάθετα. Επομένως, η μεταφερόμενη φωτεινή ενέργεια ανά χρόνο προσδίδεται σε μεγαλύτερη επιφάνεια στη δεύτερη περίπτωση. Ορίζοντας την πυκνότητα ισχύος ως την ενέργεια της ακτινοβολίας ανά χρόνο και επιφάνεια, τότε, η επιφάνεια A2 δέχεται μικρότερη

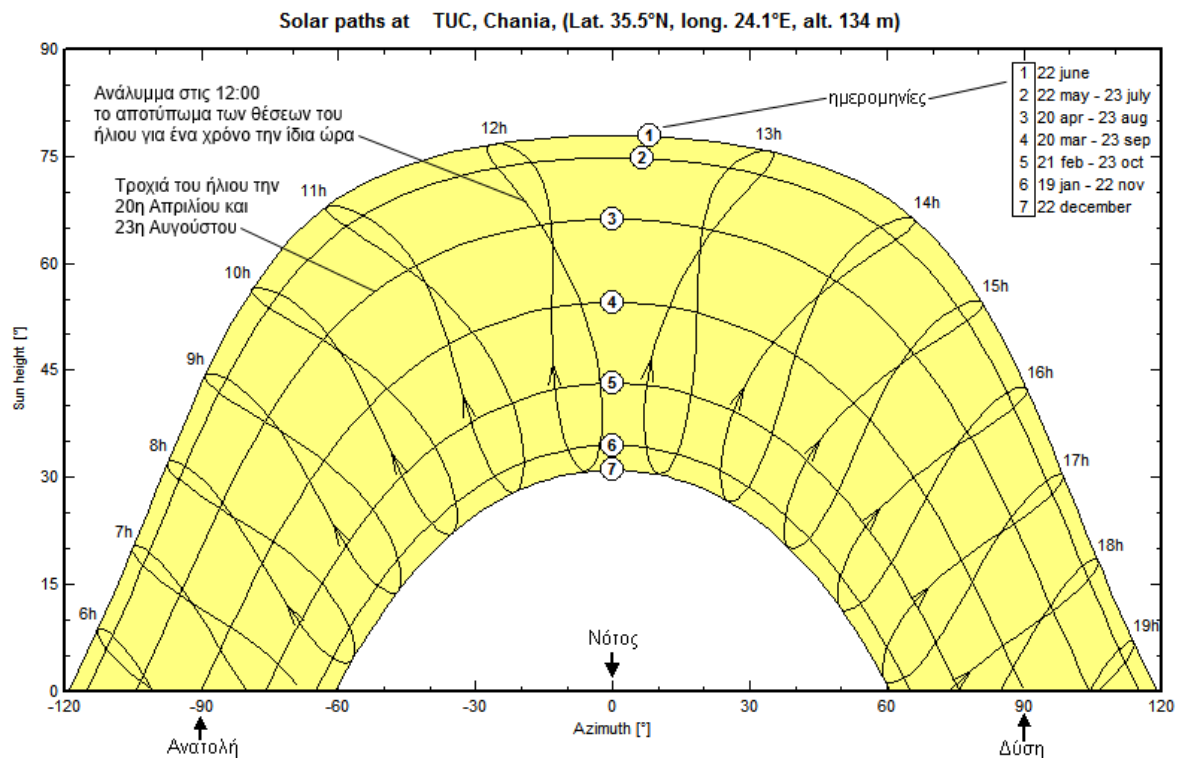
πυκνότητα ισχύος. Δηλαδή, δύο επιφάνειες που φωτοβολούνται από όμοιες δέσμες φωτός μπορούν να δέχονται διαφορετικές πυκνότητες ισχύος ακτινοβολίας εάν έχουν διαφορετικό προσανατολισμό.



Εικόνα 7: Ανάλημμα το αποτύπωμα της θέσης του ήλιου στον ουρανό για μια ορισμένη ώρα κατά τη διάρκεια ενός έτους. Πηγή: περιοδικό «γεωτρόπιο» της «Ελευθεροτυπίας» Σάββατο, 5 Νοεμβρίου 2005

σταθερή διεύθυνση. Όμως, η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο (και σε οποιοδήποτε άλλο) αλλάζει συνεχώς κατά τη διάρκεια της ημέρας (εικόνα 8) αλλά και από μέρα σε μέρα κατά τη διάρκεια του έτους (εικόνα 7). Αυτό απαιτεί μια αρκετά πιο σύνθετη προσέγγιση για την αναγωγή των δεδομένων της πυκνότητας ισχύος από το οριζόντιο στο κεκλιμένο επίπεδο.

Η πυκνότητα ισχύος από τα δεδομένα που διατίθενται αφορά το οριζόντιο επίπεδο, αφού το πυρανόμετρο της πειραματικής διάταξης έχει τοποθετηθεί οριζόντια. Η αναγωγή των δεδομένων της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας από το οριζόντιο επίπεδο στο κεκλιμένο επίπεδο των ΦΒ πλαισίων είναι απαραίτητη. Με μια πρώτη επισκόπηση, αυτή η διαδικασία μοιάζει με μια απλή εφαρμογή βασικών τριγωνομετρικών συναρτήσεων. Αυτό θα ίσχυε εάν η φωτεινή δέσμη είχε



Εικόνα 8: Η φαινόμενη τροχιά του ήλιου στον ουρανό σε Βόρειο Γεωγραφικό Πλάτος 36° για 12 χαρακτηριστικές ημερομηνίες, Πηγή: λογισμικό PVSYST

Υποδείγματα για την αναγωγή των δεδομένων της ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο έχουν δημιουργηθεί από διάφορους ερευνητές. Οι Temps και Coulson (1977) κατασκεύασαν μοντέλο ανισοτροπικού-καθαρού-ουρανού (anisotropic-clear-sky model) το οποίο αποκρίνεται καλά στην περίπτωση όπου ο ουρανός είναι καθαρός. Το μειονέκτημα του μοντέλου είναι ότι υπερεκτιμά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τις νεφελώδεις ημέρες από 30 μέχρι και 50 W/m² τον Ιούνιο και έως 120 W/m² τον Ιανουάριο [Thomas M. Klucher, 1978]. Ένα πιο συχνά χρησιμοποιούμενο μοντέλο είναι αυτό των Liu και Jordan (1961) και αφορά κεκλιμένες επιφάνειες με αυστηρά νότιο προσανατολισμό. Πρόκειται για μοντέλο ισοτροπικού-ουρανού το οποίο ανταποκρίνεται καλύτερα σε συνθήκες χαμηλότερης έντασης ηλιακής ακτινοβολίας, συνήθως σε νεφελώδεις ουραμούς. Για επίπεδα έντασης μεγαλύτερα των 50 W/m² το μοντέλο υποεκτιμά την πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας κατά περίπου 30 W/m² τον Ιούνιο και από 50

έως 80 W/m^2 τον Ιανουάριο [Klucher, 1978]. Αυτή η διαπίστωση του T. Klucher, που πραγματοποίησε την αξιολόγηση των δύο μοντέλων και πρότεινε ένα τρίτο καλύτερο, έρχεται σε αντίθεση με τα λεγόμενά του, αφού η μεγαλύτερη απόκλιση εμφανίζεται τον Ιανουάριο ενώ ο ίδιος ισχυρίζεται ότι το μοντέλο αποκρίνεται καλύτερα σε χαμηλότερες εντάσεις.

Σε αυτήν τη διπλωματική εργασία θα γίνει χρήση του μοντέλου ισοτροπικού-ουρανού των Liu και Jordan σε συνδυασμό με μία προσθήκη από τον S. A. Klein (1976) ώστε να είναι εφαρμόσιμο και για κεκλιμένες επιφάνειες με προσανατολισμό που αποκλίνει από το Νότο. Επισημαίνεται ότι ο αλγόριθμος των Liu και Jordan λειτουργεί για πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας και όχι πυκνότητα ισχύος. Η εφαρμογή του αλγόριθμου παρουσιάζεται αναλυτικά στην παράγραφο 8.1 του παραρτήματος και τα αποτελέσματα της μετατροπής στην παράγραφο 4.1.1.

3.2. Χάραξη ορίζοντα

Καθοριστικό παράγοντα για την επίδοση ηλεκτρικής ενέργειας από τα ΦΒ συνιστά η ώρα ανατολής και δύσης του ήλιου, όπως αυτή επηρεάζεται από τον ορίζοντα. Οι ώρες ανατολής και δύσης του ήλιου για ένα δοσμένο γεωγραφικό μήκος και πλάτος αφορούν τη θεωρητική περίπτωση στην οποία παρατηρητής βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας ενώ η γραμμή του ορίζοντα είναι καθαρή από εμπόδια, όπως νησιά, βουνά κ.λπ. Η αρνητική επίδραση του ανάγλυφου του ορίζοντα στην επίδοση των ΦΒ αυξάνει όσο πιο κοντά βρίσκεται το εμπόδιο ή όσο μεγαλύτερο ύψος έχει. Η επίδραση του ανάγλυφου του ορίζοντα αναφέρεται επίσης στη βιβλιογραφία ως μακρινές σκιάσεις.

Στην παρούσα περίπτωση, η επίδραση των μακρινών σκιάσεων από τον ορίζοντα φαίνεται να είναι αμελητέα λόγω της μεγάλης απόστασης και του χαμηλού υψόμετρου των βουνών που σχηματίζουν το ανάγλυφο του ορίζοντα στις περιοχές ανατολής και δύσης του ήλιου. Παρόλα αυτά, αποφασίστηκε η ενδεδειγμένη αποτύπωση του ορίζοντα με γεωδαιτικό σταθμό (total station) για τυπικούς λόγους. Ο γεωδαιτικός σταθμός (εικόνα 9) είναι το όργανο ακριβείας που χρησιμοποιείται στην τοπογραφία για τη μέτρηση αποστάσεων και γωνιών.



Εικόνα 9: Γεωδαιτικός σταθμός

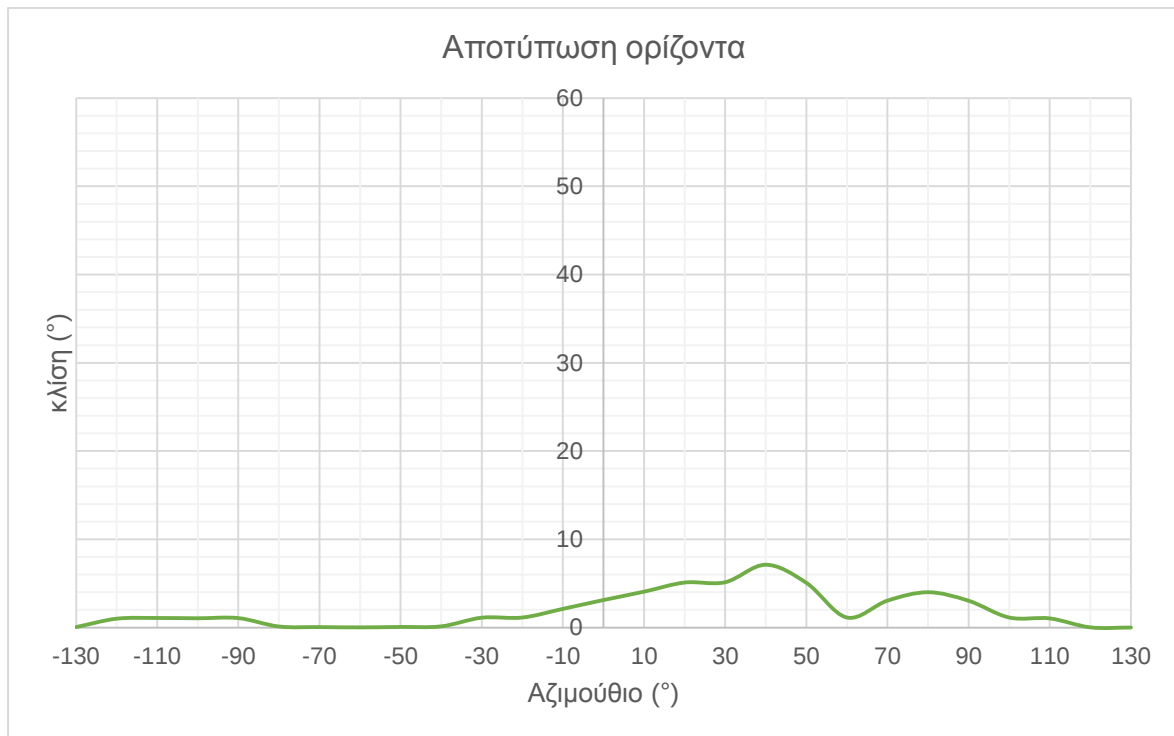
Αποτελεί συνδυασμό δύο οργάνων: του θεοδόλιχου⁹ και του ηλεκτρονικού αποστασιόμετρου¹⁰. Για την αποτύπωση του ανάγλυφου του ορίζοντα γίνεται χρήση της πρώτης δυνατότητας του γεωδαιτικού σταθμού.

Αρχικά γίνεται οριζοντίωση του οργάνου, δηλαδή προσαρμογή του σε οριζόντια θέση με τη βοήθεια του ενσωματωμένου αλφαδιού. Το όργανο τοποθετείται στο γεωμετρικό κέντρο της ΦΒ διάταξης και σε ύψος ίσο με το υψηλότερο σημείο των ΦΒ πλαισίων. Στη συνέχεια, γίνεται ενεργοποίηση του οργάνου και θέση σε λειτουργία μέτρησης ζενίθιας γωνίας. Το όργανο διαθέτει ενσωματωμένη πυξίδα, έτσι είναι γνωστός κάθε στιγμή ο προσανατολισμός της διόπτρας του ο οποίος αναγράφεται συνεχώς στην οθόνη. Η οθόνη αναγράφει επίσης και την τρέχουσα κλίση της διόπτρας, δηλαδή τη γωνία που σχηματίζει αυτή με το οριζόντιο επίπεδο. Για τη χάραξη του ορίζοντα γίνεται στόχευση μέσω της διόπτρας των

⁹ Ο θεοδόλιχος είναι όργανο ακριβείας το οποίο μετρά γωνίες και αποτελείται από ένα μικρό τηλεσκόπιο τοποθετημένο σε βαθμονομημένη βάση που του επιτρέπει τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφη περιστροφή.

¹⁰ Το ηλεκτρονικό αποστασιόμετρο (EDM) είναι όργανο που μετρά αποστάσεις και λειτουργεί με εκπομπή, ανάκλαση, λήψη και επεξεργασία ενός ειδικά διαμορφωμένου φέροντος σήματος μικροκυμάτων ή υπέρυθρης ακτινοβολίας.

σημείων του ορίζοντα και καταγραφή της κλίσης για κάθε τιμή του αζιμούθιου από τις -130° μέχρι τις $+130^\circ$ με βήμα 10° . Τα αποτελέσματα της χάραξης τοποθετούνται και παρουσιάζονται στο διάγραμμα 1. Για τη κατασκευή αυτού του διαγράμματος απαραίτητη ήταν η χρήση της μακροεντολής που παρατίθεται στην παράγραφο 8.5.7.



Διάγραμμα 1: Η γραμμή του ορίζοντα όπως φαίνεται με σημείο παρατήρησης το κέντρο της ΦΒ διάταξης.

3.3. Επεξεργασία δεδομένων αντιστροφέα

3.3.1. Η διάταξη του αντιστροφέα

Ο αντιστροφέας ισχύος (power inverter) είναι ηλεκτρικός μετατροπέας DC/AC (DC/AC converter) που με τη χρήση μετασχηματιστών (transformers) μετατρέπει το συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (DC) σε εναλλασσόμενο (AC) στην απαιτούμενη τάση και συχνότητα. Γενικά, η μετατροπή του συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο μπορεί να γίνει με: (α) συνδυασμό κινητήρα συνεχούς ρεύματος με γεννήτρια εναλλασσόμενου· (β) κλασικό μηχανικό ή ηλεκτρονικό διακοπτικό σύστημα με μετασχηματιστές και (γ) καθαρά ηλεκτρονικό μετατροπέα DC/AC. Οι αντιστροφείς

που λειτουργούν με τον τελευταίο τρόπο ονομάζονται και αντιστροφείς στερεάς κατάστασης (solid state) επειδή δεν περιλαμβάνουν μηχανικά μέρη. Τέτοιοι αντιστροφείς βρίσκουν πολύ ευρύ πεδίο εφαρμογής και συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται σε πηγές ενέργειας συνεχούς ρεύματος, όπως οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (batteries) ή τα ΦΒ.

Συσκευές καταγραφής (loggers) μετρούν τις παραμέτρους του ηλεκτρικού ρεύματος πριν και μετά τον αντιστροφέα. Η καταγραφή γίνεται με βήμα ενός λεπτού. Συγκεκριμένα, καταγράφονται η τάση (V) και η ένταση (I) του συνεχούς (DC) και του εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος καθώς και η συχνότητα του εναλλασσόμενου (f_{AC}) και η θερμοκρασία των πλαισίων (T). Οι παράμετροι που καταγράφονται ή υπολογίζονται, εμφανίζονται στον πίνακα 2.

Μετρούμενο μέγεθος	Τάση AC	Ένταση AC	Ισχύς AC	Ημερήσια απόδοση AC	Συχνότητα	Τάση DC	Ένταση DC	Ισχύς DC	Ημερήσια απόδοση DC	Θερμοκρασία πλαισίων
Συμβολισμός	V_{AC}	I_{AC}	P_{AC}	$E_{d,AC}$	f	V_{DC}	I_{DC}	P_{DC}	$E_{d,DC}$	T
Μονάδες μέτρησης	V	A	W	kWh	Hz	V	A	W	kWh	°C

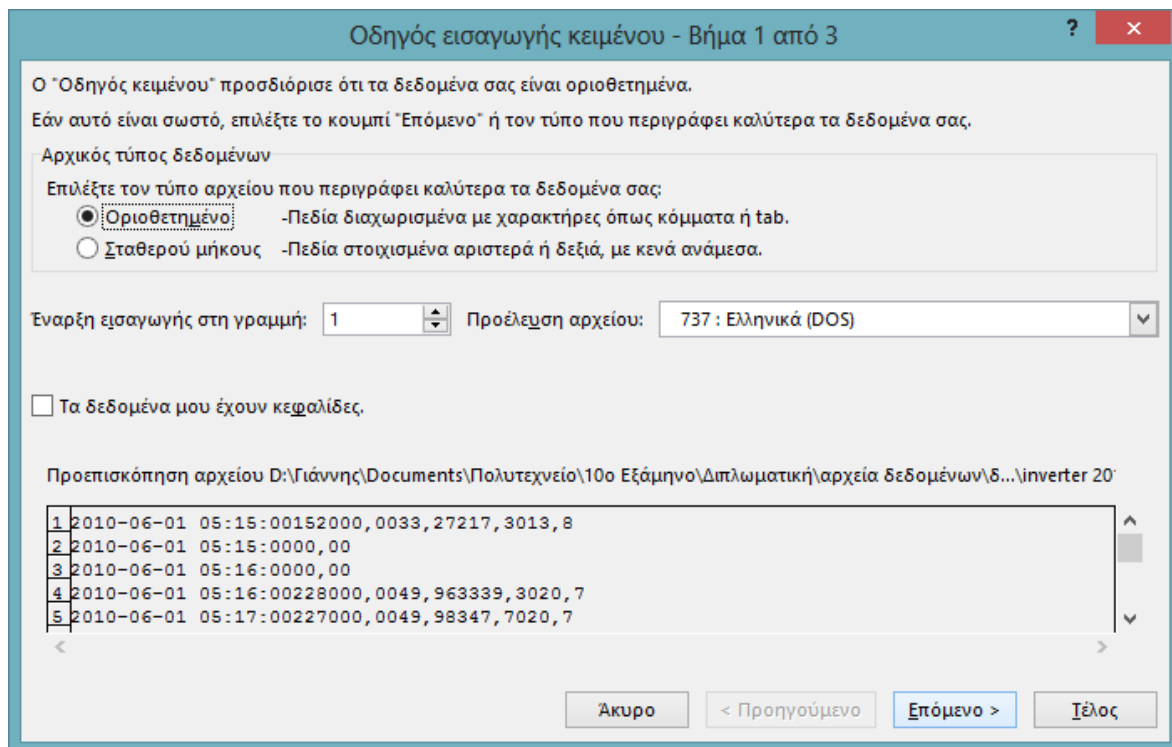
Πίνακας 2: Παράμετροι λειτουργίας ΦΒ που καταγράφονται / υπολογίζονται

Από τις παραπάνω σειρές δεδομένων μπορούν να εξαχθούν τα αποτελέσματα για τη στιγμιαία αποδιδόμενη ισχύ (P) και στη συνέχεια την ημερήσια ενέργεια (E) που αποδίδεται στο δίκτυο από τα ΦΒ. Η τιμή της θερμοκρασίας των ΦΒ αναφέρεται ως παράμετρος αλλά δεν θα εξετασθεί στη συνέχεια· επηρεάζει, ωστόσο, την επίδοση των ΦΒ. Η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμεύει για την εποπτεία της καλής λειτουργίας του αντιστροφέα· επίσης δεν συμμετέχει στην ανάλυση.

3.3.2. Προετοιμασία δεδομένων

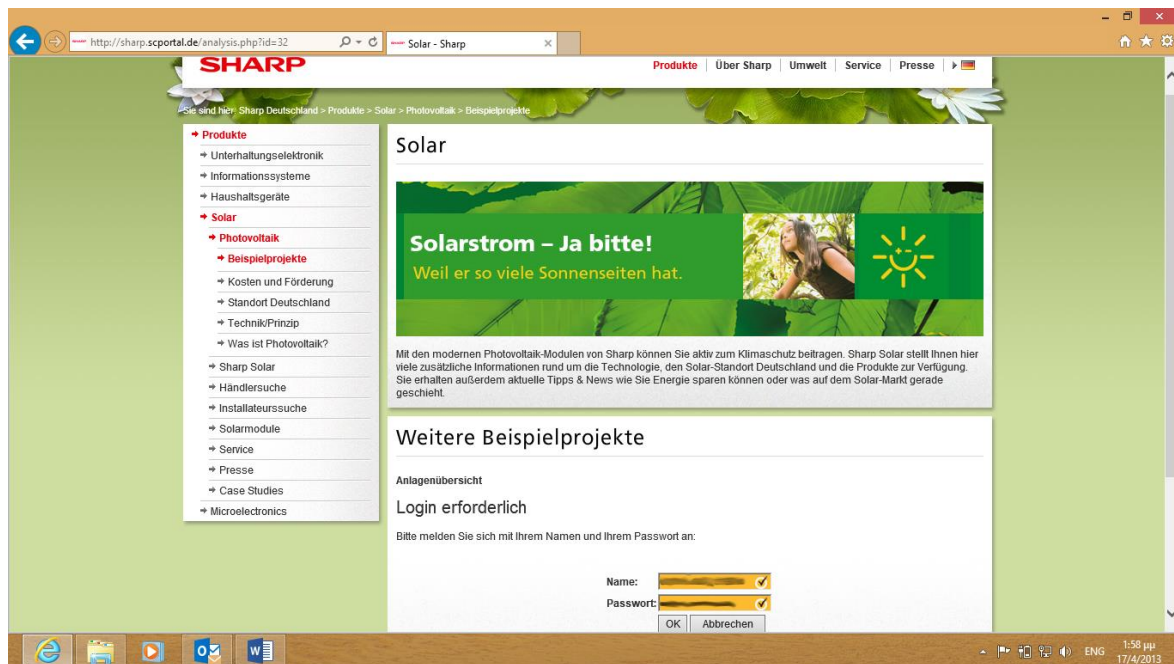
Τα πειραματικά δεδομένα για τη λειτουργία του αντιστροφέα, λαμβάνονται σε μορφή αρχείου κειμένου (.txt) από την ιστοσελίδα της Sharp και στη συνέχεια

εισάγονται στο Excel με τη βοήθεια του οδηγού εισαγωγής κειμένου (εικόνα 10). Ο καταγραφέας (logger) των δεδομένων που βρίσκεται κοντά στη ΦΒ διάταξη στέλνει απευθείας τις τιμές που καταγράφονται στην εταιρεία και εκεί αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων με περιορισμένη πρόσβαση (απαιτούνται διαπιστευτήρια για τη λήψη τους – εικόνα 11).



Εικόνα 10: Οδηγός εισαγωγής αρχείων κειμένου στο Excel.

Είναι φυσικό, σε πειραματικά δεδομένα που καταγράφονται για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα, να υπάρχουν σφάλματα. Συγκεκριμένα, τα αποθηκευμένα δεδομένα παρουσιάζουν κάποιες χρονικές ασυνέχειες· δηλαδή, ενώ καταγράφονται με βήμα ενός min υπάρχουν κάποια χρονικά κενά, συνήθως μιας ώρας. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με τον προγραμματισμό και εκτέλεση κάποιων μακροεντολών. Οι μακροεντολές που συντάχθηκαν για τη μορφοποίηση αυτών των δεδομένων παρουσιάζονται αναλυτικά στις παραγράφους 8.5.1, 8.5.2 και 8.5.3. Για την ημερήσια ανάλυση των δεδομένων, βοηθά επίσης η μακροεντολή στην παράγραφο 8.5.4.



Εικόνα 11: Ιστοσελίδα λήψης δεδομένων της Sharp

3.3.3. Τάση, ένταση και ισχύς

Ως ηλεκτρική τάση (voltage) ορίζεται η διαφορά στην ηλεκτρική δυναμική ενέργεια ανά μονάδα φορτίου μεταξύ δύο σημείων. Η τάση μεταξύ δύο σημείων ισούται με το έργο ανά μονάδα φορτίου που θα πρέπει να πραγματοποιηθεί για να μετακινηθεί το φορτίο από το ένα σημείο στο άλλο μέσα από στατικό ηλεκτρικό πεδίο. Σε ένα στατικό πεδίο το έργο είναι ανεξάρτητο της ακολουθούμενης διαδρομής. Η τάση μετριέται σε V (volt) και μπορεί να εκφραστεί χρησιμοποιώντας μόνο τις βασικές μονάδες του SI ως:

$$1 \text{ Volt} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{A} \cdot \text{s}^3}$$

Η ένταση (I – intensity) του ρεύματος ορίζεται ως ο ρυθμός διέλευσης του ηλεκτρικού φορτίου από τη διατομή του αγωγού:

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Η ένταση μετριέται σε A (ampere) ή αλλιώς C/s. Το C (coulomb) είναι η μονάδα μέτρησης ηλεκτρικού φορτίου στο SI και αντιστοιχεί σε περίπου $6,2415 \cdot 10^{18}$ e⁻ (ηλεκτρόνια).

Η ισχύς (P – power) του ηλεκτρικού ρεύματος μετριέται σε W (watt) ή ισοδύναμα J/s και αντιστοιχεί στην ενέργεια που μεταφέρεται ανά χρόνο μέσω ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Η ισχύς του ρεύματος συνδέεται με την τάση και την ένταση από την ακόλουθη σχέση:

$$P = V \cdot I$$

Η μονάδα μέτρησης της ισχύος μπορεί να αναλυθεί στις βασικές μονάδες μέτρησης του SI όπως αναγράφεται παρακάτω:

$$1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}$$

Για τον υπολογισμό της ισχύος τόσο του συνεχούς ρεύματος από τη ΦΒ συστοιχία όσο και του εναλλασσόμενου μετά τον αντιστροφέα έγινε χρήση της σχέσης $P = V \cdot I$ στο λογιστικό φύλλο του Excel.

3.3.4. Ενέργεια

Η ισχύς μετριέται σε W ή J/s ενώ η ενέργεια σε J (joule), δηλαδή η ισχύς εκφράζει ενέργεια ανά χρόνο.

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

Για να βρεθεί η ενέργεια που παράχθηκε από τα ΦΒ πλαίσια σε ένα καθορισμένο χρόνο αρκεί να πολλαπλασιαστεί η μέση ισχύς των ΦΒ για το ζητούμενο χρονικό διάστημα επί το χρονικό διάστημα. Επειδή η καταγραφή της τάσης και της έντασης λάμβανε χώρα με βήμα ενός λεπτού, η μέση ισχύς για ένα λεπτό μπορεί να θεωρηθεί ίση με την ισχύ τη στιγμή της καταγραφής χωρίς ιδιαίτερους

συμβιβασμούς στην ακρίβεια. Έτσι, η ενέργεια που αποδίδεται σε ένα λεπτό από τα ΦΒ μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$\Delta E_i = P_i \cdot \Delta t$$

όπου:

ΔE_i η αποδιδόμενη ενέργεια στο διάστημα Δt

P_i η στιγμιαία ισχύς το i -στό λεπτό της ημέρας

$\Delta t = 60$ s το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο καταγραφών (1 min)

3.4. Υπολογισμός δεικτών επίδοσης φωτοβολταϊκών

3.4.1. Απόδοση ημέρας, $E_{yield,d}$

Η απόδοση ημέρας (day yield) αφορά την ενέργεια σε kWh που αποδίδει το προερχόμενο από τα ΦΒ ηλεκτρικό ρεύμα σε μία ημέρα. Το άθροισμα της ενέργειας που αποδίδεται από τα ΦΒ κάθε λεπτό για όλα τα μονόλεπτα χρονικά διαστήματα της ημέρας είναι η ζητούμενη απόδοση ημέρας, δηλαδή:

$$E_{yield,d} = \sum_{i=1}^{1.440} \Delta E_i$$

όπου:

i ο αύξον αριθμός των λεπτών της ημέρας ($24 \times 60 = 1.440$ min)

ΔE_i η αποδιδόμενη ενέργεια στη διάρκεια του i -στού λεπτού

Σημειώνεται ότι η απόδοση ημέρας που αφορά το συνεχές ρεύμα (DC) είναι η ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται κατευθείαν από τα ΦΒ ενώ η απόδοση ημέρας του εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) περιλαμβάνει τις απώλειες του αντιστροφέα και για αυτό το λόγο αναμένεται ελαφρώς μικρότερη.

Τελικά, γίνεται υπολογισμός της μέσης ημερήσιας απόδοσης μήνα ($E_{d,m}$) η οποία δεν αποτελεί τίποτα περισσότερο από το μέσο όρο των ημερήσιων αποδόσεων για ένα μήνα:

$$E_{d,m} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{d,i}$$

όπου:

N ο αριθμός των ημερών του μήνα

$E_{d,i}$ η ημερήσια απόδοση της i-στής ημέρας του μήνα

3.4.2. Αποδοτικότητα συστοιχίας, Y_a

Ως αποδοτικότητα συστοιχίας (Y_a) ορίζεται ο λόγος της ενεργειακής απόδοσης του συνεχούς ρεύματος (DC) προς την ικανότητα (capacity) της ΦΒ διάταξης. Η απόδοση συνεχούς ρεύματος (E_{DC}) είναι η ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται απευθείας από τη ΦΒ συστοιχία. Η ικανότητα της ΦΒ συστοιχίας είναι η λεγόμενη ονομαστική ισχύς, δηλαδή η ισχύς που θα απέδιδε η συστοιχία σε πρότυπες συνθήκες δοκιμής (STC). Αυτές οι πρότυπες συνθήκες αντιστοιχούν σε ισχύ ηλιακής ακτινοβολίας 1 kW/m^2 και θερμοκρασία ΦΒ κυττάρου 25°C .

$$Y_a = \frac{E_{DC}}{P_{PV, rated}}$$

3.4.3. Τελική αποδοτικότητα, Y_f

Ως τελική αποδοτικότητα (Y_f) ορίζεται ο λόγος της ενεργειακής απόδοσης του εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) προς την ικανότητα της ΦΒ διάταξης. Η απόδοση εναλλασσόμενου ρεύματος (E_{AC}) είναι η αξιοποιήσιμη ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται από τη ΦΒ συστοιχία μετά τον αντιστροφέα (inverter).

$$Y_f = \frac{E_{AC}}{P_{PV, rated}}$$

Τόσο η αποδοτικότητα συστοιχίας όσο και η τελική αποδοτικότητα μετριοούνται σε kWh/kW/d ή σε κάποιες περιπτώσεις απλά h/d (ώρες ανά ημέρα). Πρόκειται για μέσες ημερήσιες τιμές για κάθε μήνα, αλλά μπορούν να υπολογισθούν για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα.

3.4.4. Αποδοτικότητα αναφοράς, Y_r

Ως αποδοτικότητα αναφοράς (reference yield) ορίζεται ο λόγος της μέσης ημερήσιας απόδοσης ηλιακής ενέργειας του μήνα στο επίπεδο του ΦΒ συλλέκτη (H_t) προς την ακτινοβολία αναφοράς της συστοιχίας. Η ακτινοβολία αναφοράς θεωρείται ισχύος 1 kW/m^2 και φάσματος AM1,5. Η μέση ημερήσια ηλιακή ενέργεια που αποδίδεται στην κεκλιμένη επιφάνεια ανά μήνα έχει υπολογισθεί προηγουμένως από τον αλγόριθμο των Liu και Jordan.

$$Y_r = \frac{H_t}{1 \text{ kW/m}^2}$$

Η αποδοτικότητα αναφοράς συναντάται στη βιβλιογραφία και ως ισοδύναμος χρόνος ηλιοφάνειας (PSH – peak sun hours ή ESN – equivalent sun hours). Αυτό γιατί αντιστοιχεί στο χρόνο για τον οποίο ίση ηλιακή ενέργεια θα προσέπιπτε στο επίπεδο του ΦΒ συλλέκτη εάν η ακτινοβολία του ήλιου ήταν σταθερή και ίση με την ακτινοβολία αναφοράς. Εάν το ζητούμενο είναι ο ισοδύναμος χρόνος ηλιοφάνειας τότε η αποδοτικότητα αναφοράς είναι βολικό να εκφράζεται σε h/d.

3.4.5. Απώλειες πρόσληψης ακτινοβολίας, L_c

Οι απώλειες πρόσληψης ή δέσμευσης (capture losses) προκαλούνται είτε από θερμικές απώλειες λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας της ηλιακής κυψελίδας (L_{ct}), είτε από διάφορες άλλες απώλειες (L_{cm}), όπως οπτικές ανακλάσεις, σκιάσεις από αντικείμενα ή σκόνη, μη βέλτιστο φάσμα ηλιακής

ακτινοβολίας (π.χ. κατά τη δύση του ήλιου) κ.ά.. Αφορούν αποκλειστικά τη λειτουργία των ΦΒ.

Αυτές οι απώλειες υπολογίζονται από τη διαφορά της αποδοτικότητας συστοιχίας από την αποδοτικότητα αναφοράς.

$$L_c = Y_r - Y_a$$

3.4.6. Απώλειες συστήματος, L_s

Οι απώλειες συστήματος έχουν να κάνουν κατά κύριο λόγο με τη λειτουργία του αντιστροφέα (inverter). Τέτοιου είδους απώλειες μπορούν να προκαλούνται στην καλωδίωση από τα ΦΒ προς τον αντιστροφέα, εάν η απόσταση είναι μεγάλη και οι συνδέσεις των καλωδίων προβληματικές ή υπάρχουν ανεπιθύμητοι βρόγχοι. Επίσης, οι αντιστροφείς έχουν συνήθως υψηλές αποδόσεις για ισχύ ρεύματος κοντά στη μέγιστη ονομαστική ισχύ τους, οπότε εισαγωγή ρεύματος μικρότερης ισχύος σε αυτούς προκαλεί περαιτέρω ελάττωση της αποδιδόμενης ενέργειας. Τέλος, η αδυναμία ιδανικής ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος από τον αντιστροφέα μπορεί να προκαλέσει σημαντικές απώλειες.

Οι απώλειες συστήματος υπολογίζονται από τη διαφορά της τελικής αποδοτικότητας από την αποδοτικότητα συστοιχίας.

$$L_s = Y_a - Y_f$$

3.4.7. Απόδοση, η

Γενικά, ως απόδοση (efficiency) ενός συστήματος ορίζεται το ποσοστό της διαθέσιμης ενέργειας που μετατρέπεται από το σύστημα σε ενέργεια αξιοποιήσιμης μορφής. Για τα ΦΒ νοείται το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που

μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η απόδοση των ΦΒ (n_{PV}) και η απόδοση ολόκληρου του συστήματος (n_{sys}) ορίζονται από τα επόμενα κλάσματα:

$$n_{PV} = \frac{E_{DC}}{A \cdot H_t} 100\%$$

$$n_{sys} = \frac{E_{AC}}{A \cdot H_t} 100\%$$

όπου:

A το εμβαδόν των ΦΒ (26 m²)

Η απόδοση του αντιστροφέα (n_{inv}) αφορά το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος (E_{DC}) που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος (E_{AC}). Αυτή ορίζεται από το λόγο της τελικής αποδοτικότητας προς την αποδοτικότητα συστοιχίας.

$$n_{inv} = \frac{Y_f}{Y_a} 100\%$$

3.4.8. Λόγος επίδοσης, PR

Ο λόγος επίδοσης (performance ratio) ισούται με το λόγο της τελικής αποδοτικότητας προς την αποδοτικότητα αναφοράς, όταν αφορά όλο το σύστημα, ή με το λόγο της αποδοτικότητας συστοιχίας προς την αποδοτικότητα αναφοράς, όταν αφορά μόνο τη συστοιχία. Είναι αδιάστατος και μπορεί να αναγράφεται επί τοις εκατό.

$$PR_{AC} = \frac{Y_f}{Y_r}$$

$$PR_{DC} = \frac{Y_a}{Y_r}$$

Επειδή τα ΦΒ είναι διατάξεις με χαμηλή απόδοση (6%~18%), όπως αναφέρθηκε στο 1^ο κεφάλαιο, η εισαγωγή της παραμέτρου του λόγου επίδοσης είναι χρήσιμη,

αφού δίνει τη σχέση της αποδιδόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς αυτή που θα μπορούσε να αποδοθεί κάτω από ιδανικές συνθήκες λειτουργίας.

3.5. Προσομοίωση διάταξης με το λογισμικό PVSYST

Όπως αναφέρθηκε, το λογισμικό PVSYST είναι ίσως το πιο δημοφιλές στην κατηγορία του και προσφέρει τις περισσότερες δυνατότητες τροποποίησης των παραμέτρων της ΦΒ εγκατάστασης. Λόγω κάποιων απρόβλεπτων προβλημάτων που προέκυψαν κατά την εκτέλεσή του και επηρέασαν τα αποτελέσματα, το λογισμικό θα εκτελεστεί για τέσσερις διαφορετικές διαμορφώσεις ρυθμίσεων. Αναλυτική περιγραφή των διαδικασιών που ακολουθούνται αλλά και των προβλημάτων που εμφανίζονται γίνεται στην παράγραφο 8.2 του παραρτήματος. Τα στάδια εκτέλεσης της προσομοίωσης με το λογισμικό αναφέρονται περιληπτικά παρακάτω.

Το πρώτο στάδιο είναι η εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων και δεδομένων τοποθεσίας στο λογισμικό (συντεταγμένες, υψόμετρο, πυκνότητα ηλιακής ισχύος και θερμοκρασία περιβάλλοντος). Όπως τα περισσότερα προγράμματα της κατηγορίας του, το PVSYST μπορεί να λειτουργήσει λαμβάνοντας μετεωρολογικά δεδομένα: (α) από τις ενσωματωμένες βάσεις δεδομένων του, (β) από αναγνωρισμένες εξωτερικές επιστημονικές πηγές και (γ) από προσαρμοσμένα δεδομένα του χρήστη, αρκεί αυτά να τηρούν μια συγκεκριμένη μορφοποίηση (format). Για την παρούσα μελέτη θα γίνει χρήση της τελευταίας δυνατότητας με δύο τρόπους: (1) εισαγωγή των δεδομένων με διόρθωση της αλλαγής χειμερινής-θερινής ώρας (DST) στην χρονική σήμανση του αρχείου και (2) εισαγωγή των δεδομένων από αρχείο χωρίς διόρθωση της αλλαγής ώρας ή επισήμανση της ημερομηνίας αλλαγής ώρας στο λογισμικό. Έτσι, στη δεύτερη περίπτωση τα δεδομένα θα εμφανίζονται μετατοπισμένα κατά μία

ώρα πίσω τους θερινούς μήνες. Επισημαίνεται ότι τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας που εισάγονται είναι τα αρχικά, δηλαδή αυτά που αφορούν την τιμή της πυκνότητας ηλιακής ισχύος στο οριζόντιο επίπεδο.

Το επόμενο στάδιο είναι η πλήρης εισαγωγή των στοιχείων της ΦΒ διάταξης, προκειμένου να εκτελεστεί σωστά η προσομοίωση. Εδώ εισάγονται πληροφορίες όπως το μοντέλο και ο κατασκευαστής των ΦΒ και του αντιστροφέα, η γεωγραφική θέση και ο προσανατολισμός, η κλίση των ΦΒ και τα εμπόδια του ορίζοντα, καθώς και οποιαδήποτε άλλη λεπτομέρεια ή χαρακτηριστικό που μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργία της διάταξης. Η εισαγωγή αυτών των στοιχείων πραγματοποιείται βήμα προς βήμα στην παράγραφο 8.2.4 στο παράρτημα. Και σε αυτό το στάδιο θα δοκιμαστούν δύο διαφορετικές περιπτώσεις: (1) ο καθορισμός του αζιμούθιου στις 50° (δυτική απόκλιση από το Νότο) και (2) στις -50° (ανατολική απόκλιση – πραγματική).

Τέλος, μετά την ορθή εισαγωγή των δεδομένων και των παραμέτρων της διάταξης, γίνεται εκτέλεση της προσομοίωσης και εξαγωγή των αποτελεσμάτων για τις τέσσερις διαφορετικές διαμορφώσεις του λογισμικού (2x2 συνδυασμοί). Η διαδικασία της εκτέλεσης περιγράφεται στην παράγραφο 8.2.6 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4.2.

3.6. Προσομοίωση διάταξης με το λογισμικό RETSCREEN

Το λογισμικό RETSCREEN περιλαμβάνει δύο ξεχωριστές εφαρμογές: η πρώτη είναι βασισμένη στο Microsoft Excel και εκτελείται ως πρόσθετο (plug-in)· η δεύτερη είναι αυτόνομο πρόγραμμα για Windows. Για τις απαιτήσεις ανάλυσης της παρούσας διπλωματικής γίνεται χρήση της πρώτης εφαρμογής.

Το λογισμικό RETSCREEN δίνει τη δυνατότητα επιλογής των μετεωρολογικών δεδομένων για κάθε τοποθεσία στη Γη από ένα ευρύ δίκτυο μετεωρολογικών σταθμών ή από τους χάρτες δορυφορικής ανάλυσης της NASA. Ενδεικτικά για την πυκνότητα των μετεωρολογικών σταθμών, αναφέρεται ότι στην περιοχή του Ακρωτηρίου Χανίων υπάρχουν δύο μετεωρολογικοί σταθμοί· ο ένας βρίσκεται στο αεροδρόμιο Ι. Δασκαλογιάννης και ο άλλος στη βάση της Σούδας. Αν και το λογισμικό δεν καθιστά εμφανή τη δυνατότητα εισαγωγής προσαρμοσμένων δεδομένων από το χρήστη, αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με επί τόπου αντικατάσταση των δεδομένων των προεπιλεγμένων πηγών.

Αρχικά πραγματοποιείται καθορισμός του τύπου του έργου και της μελέτης στο λογισμικό. Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή, το λογισμικό RETSCREEN είναι εργαλείο γενικής χρήσης με πολλές διαφορετικές επιλογές ανάλυσης και εκτίμησης. Στη συνέχεια, εισάγονται τα μετεωρολογικά δεδομένα καθώς και περισσότερες λεπτομέρειες για την εγκατάσταση. Ως μετεωρολογικά δεδομένα, στην πραγματικότητα, εισάγεται από το χρήστη μόνο το άθροισμα της πυκνότητας ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας ανά μήνα. Τα υπόλοιπα μετεωρολογικά δεδομένα που συμμετέχουν στους υπολογισμούς του λογισμικού (θερμοκρασία, υγρασία, άνεμος κ.λπ.) προέρχονται από τη βάση δεδομένων του λογισμικού για το αεροδρόμιο Ι. Δασκαλογιάννης των Χανίων. Οι υπόλοιπες παράμετροι της διάταξης περιλαμβάνουν τη γεωγραφική θέση, το υψόμετρο, τον προσανατολισμό και την κλίση των ΦΒ πλαισίων. Επειδή το RETSCREEN δεν διαθέτει στις προεπιλεγμένες λίστες του τα μοντέλα του αντιστροφέα και των ΦΒ πλαισίων, συμπληρώνονται στη θέση τους κάποια άλλα που έχουν παρόμοια τεχνικά χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αυτόματα σε πίνακα μόλις

συμπληρωθούν τα απαραίτητα δεδομένα (παράγραφος 4.3). Η χρήση του λογισμικού περιγράφεται πιο αναλυτικά στην παράγραφο 8.3 του παραρτήματος.

3.7. Προσομοίωση διάταξης με το διαδικτυακό εργαλείο PVGIS

Το PVGIS είναι γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών με χαρτογραφημένο ηλιακό δυναμικό κάθε περιοχής της Ευρώπης. Η μόνη του δυνατότητα είναι η πρόχειρη εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης ΦΒ συστημάτων ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης, τον προσανατολισμό και τον τύπο τους. Είναι χρήσιμο όταν υπάρχει ανάγκη για γρήγορη εξαγωγή αποτελεσμάτων μιας ΦΒ εγκατάστασης χωρίς τη λεπτομερή εξέταση παραμέτρων. Το εργαλείο PVGIS μπορεί να εκτελεσθεί μόνο από την αντίστοιχη ιστοσελίδα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Αρχικά, γίνεται μετάβαση στην ιστοσελίδα που φιλοξενεί το online εργαλείο. Εκεί εισάγονται τα απολύτως απαραίτητα χαρακτηριστικά της εγκατάστασης, όπως η ισχύς αιχμής, η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, η εκτίμηση των απωλειών, ο τρόπος στήριξης και τοποθέτησης, η κλίση και ο προσανατολισμός καθώς και η τοποθεσία. Για τις απώλειες αφήνεται η προεπιλεγμένη τιμή (14%). Με το πάτημα ενός συνδέσμου, τα αποτελέσματα εξάγονται άμεσα είτε στην ίδια την ιστοσελίδα είτε σε αρχείο κειμένου. Η εισαγωγή των δεδομένων παρουσιάζεται αναλυτικότερα στην παράγραφο 8.4 και τα αποτελέσματα στην παράγραφο 4.4.

Σημειώνεται ότι τα διαφορετικά λογισμικά εξάγουν αποτελέσματα σε διαφορετική μορφή. Συγκεκριμένα, το PVSYST και το RETSCREEN αναφέρονται σε συνολική ενέργεια διοχετευόμενη στο δίκτυο ανά μήνα, ενώ το PVGIS σε μέση ημερήσια ενέργεια που αποδίδεται στο δίκτυο για κάθε μήνα. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους πραγματοποιείται στην παράγραφο 5.2 μετά από κατάλληλη μορφοποίηση.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. Αποτελέσματα των πραγματικών μετρήσεων

4.1.1. Μετεωρολογικά δεδομένα

Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (πίνακας 3) της εφαρμογής του αλγορίθμου των Liu και Jordan (παράγραφος 8.1) για τη μετατροπή των τιμών πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο σε τιμές πυκνότητας ενέργειας στο κεκλιμένο, δηλαδή, στην επιφάνεια των ΦΒ πλαισίων.

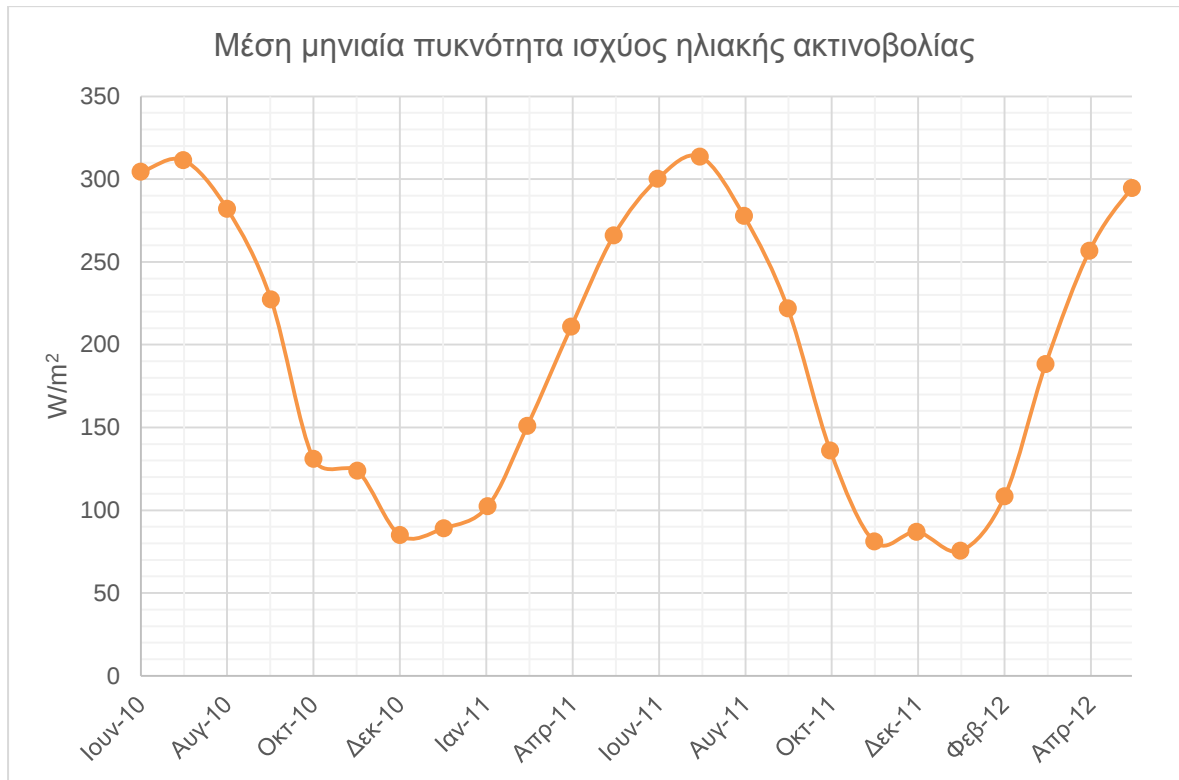
Μήνας	Μέση ημερήσια απολαβή ηλιακής ενέργειας στην κεκλιμένη επιφάνεια H_t (Wh/m ²)	Μέση ημερήσια απολαβή ηλιακής ενέργειας στην κεκλιμένη επιφάνεια H_t (kJ/m ²)
Ιουν-10	6.791	24.446
Ιουλ-10	7.033	25.317
Αυγ-10	6.728	24.220
Σεπ-10	5.894	21.219
Οκτ-10	3.623	13.043
Νοε-10	3.887	13.995
Δεκ-10	2.691	9.686
Ιαν-11	2.728	9.820
Φεβ-11	2.843	10.236
Μαρ-11	3.942	14.192
Απρ-11	5.134	18.482
Μαϊ-11	6.116	22.017
Ιουν-11	6.695	24.103
Ιουλ-11	7.080	25.487
Αυγ-11	6.622	23.841
Σεπ-11	5.741	20.668
Οκτ-11	3.776	13.593
Νοε-11	2.356	8.480
Δεκ-11	2.766	9.956
Ιαν-12	2.231	8.032
Φεβ-12	3.035	10.928
Μαρ-12	5.020	18.070
Απρ-12	6.304	22.694
Μαϊ-12	6.779	24.403

Πίνακας 3: Αποτελέσματα του αλγόριθμου Liu and Jordan

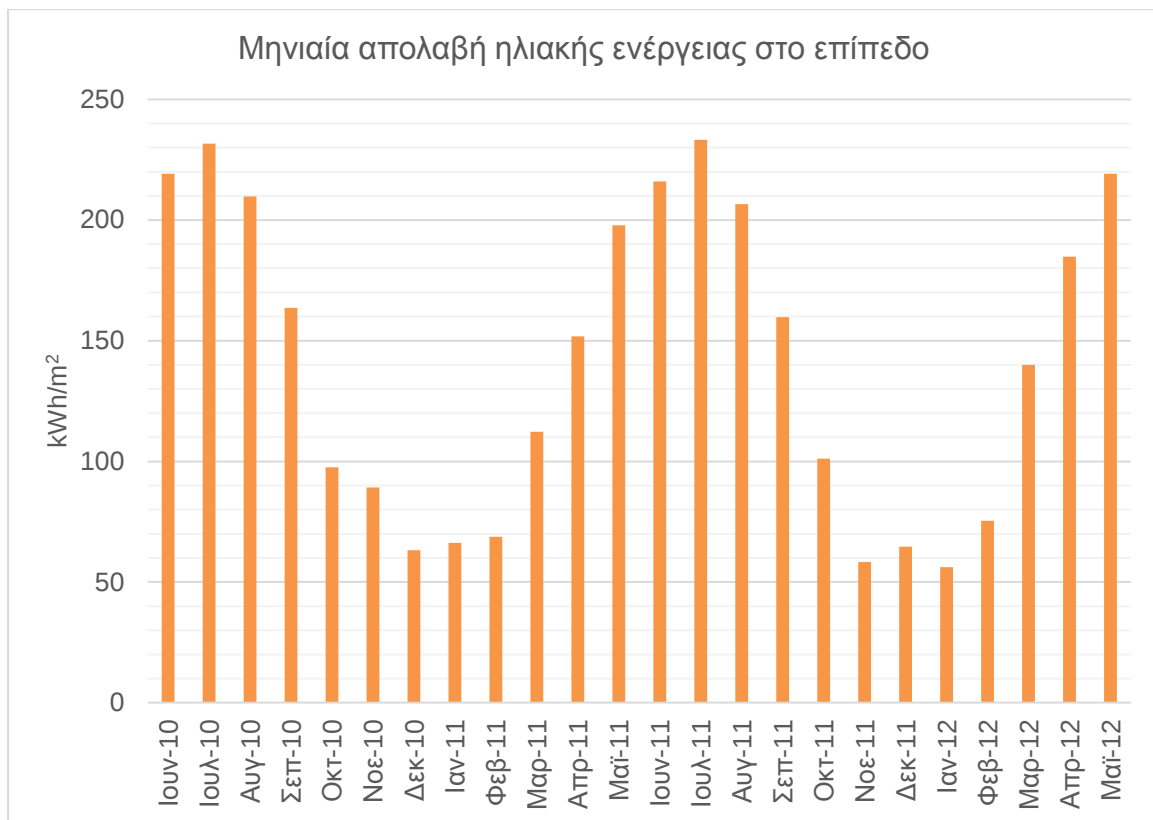
Σημειώνεται ότι αυτά τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται ως δεδομένα για τον μετέπειτα υπολογισμό των πραγματικών δεικτών λειτουργίας της ΦΒ διάταξης. Επίσης, θα γίνει σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων με τις μεθόδους ή τις εσωτερικές διεργασίες που χρησιμοποιούν τα εμπορικά λογισμικά για να επιτύχουν τον ίδιο σκοπό (αναγωγή ακτινοβολίας από το οριζόντιο στο κεκλιμένο επίπεδο). Ωστόσο, αυτή η σύγκριση θα πραγματοποιηθεί για να βοηθήσει στην ερμηνεία και στη σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων της λειτουργίας των ΦΒ, που αποτελεί και στόχο αυτής της εργασίας.

Το διάγραμμα 2 παρουσιάζει με συνοπτικό τρόπο τα αρχικά δεδομένα. Πρόκειται για τις μέσες τιμές πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας για κάθε μήνα στο οριζόντιο επίπεδο. Τα αρχικά δεδομένα (raw data) είναι καταχωρημένα στο λογιστικό φύλλο του Excel ως στιγμιαίες τιμές με καταγραφή δεκάλεπτου βήματος. Η μέση τιμή εξάγεται περιλαμβάνοντας όλες τις ώρες του 24ώρου γι' αυτό το λόγο είναι αρκετά χαμηλότερη από μια τυπική τιμή πυκνότητας ισχύος του ήλιου κατά τη διάρκεια του μεσημεριού. Το διάγραμμα 3 παρουσιάζει επίσης τα αρχικά δεδομένα σε μορφή ενέργειας ανά μήνα, ενώ το διάγραμμα 4 σε μέση ημερήσια ενέργεια. Αυτή η παρουσίαση γίνεται για την καλύτερη αντίληψη της ενεργειακής προσφοράς του ήλιου.

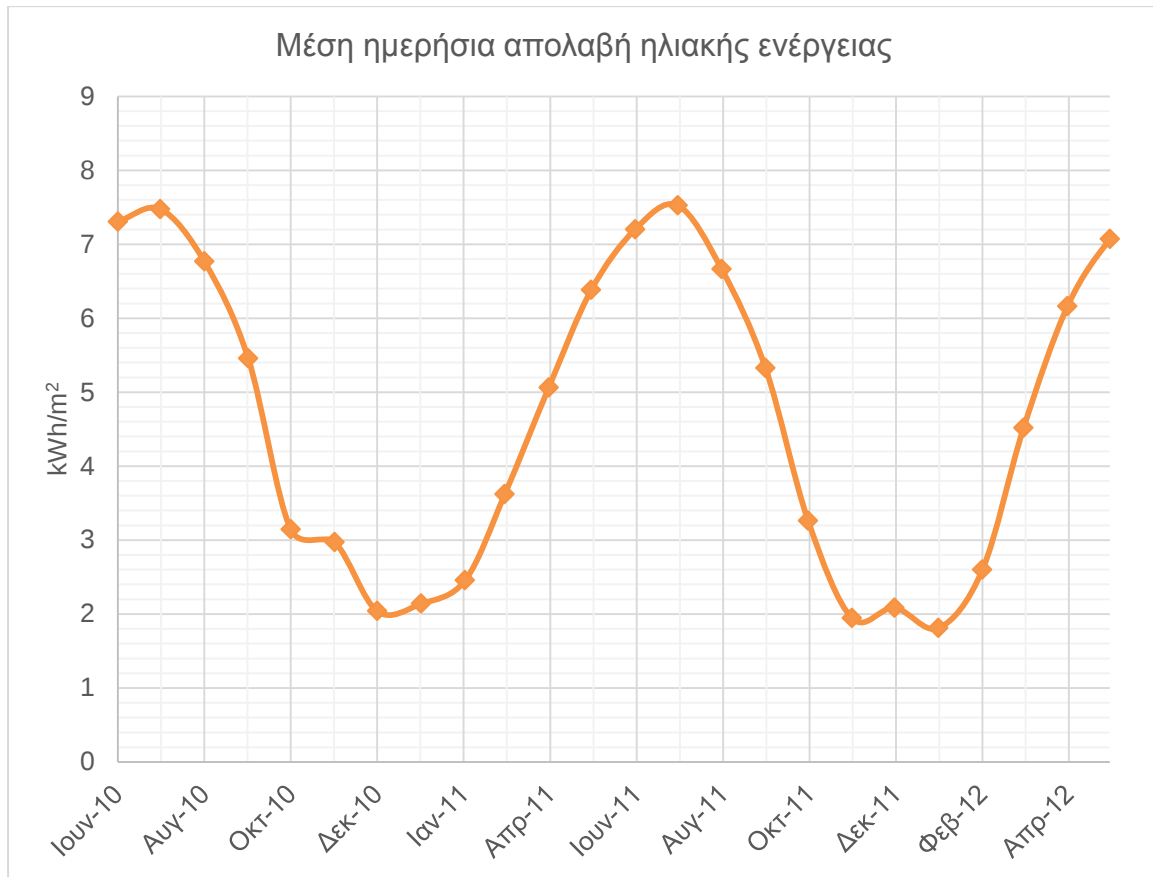
Τα τελικά αποτελέσματα του αλγόριθμου καθώς και ενδιάμεσες τιμές που προέκυψαν κατά την εφαρμογή του παρουσιάζονται στο διάγραμμα 5. Ως τελικές τιμές νοείται η απολαβή ηλιακής ενέργειας στο κεκλιμένο επίπεδο (μπλε γραμμή με τριγωνικούς δείκτες).



Διάγραμμα 2: Μέση μηνιαία πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο

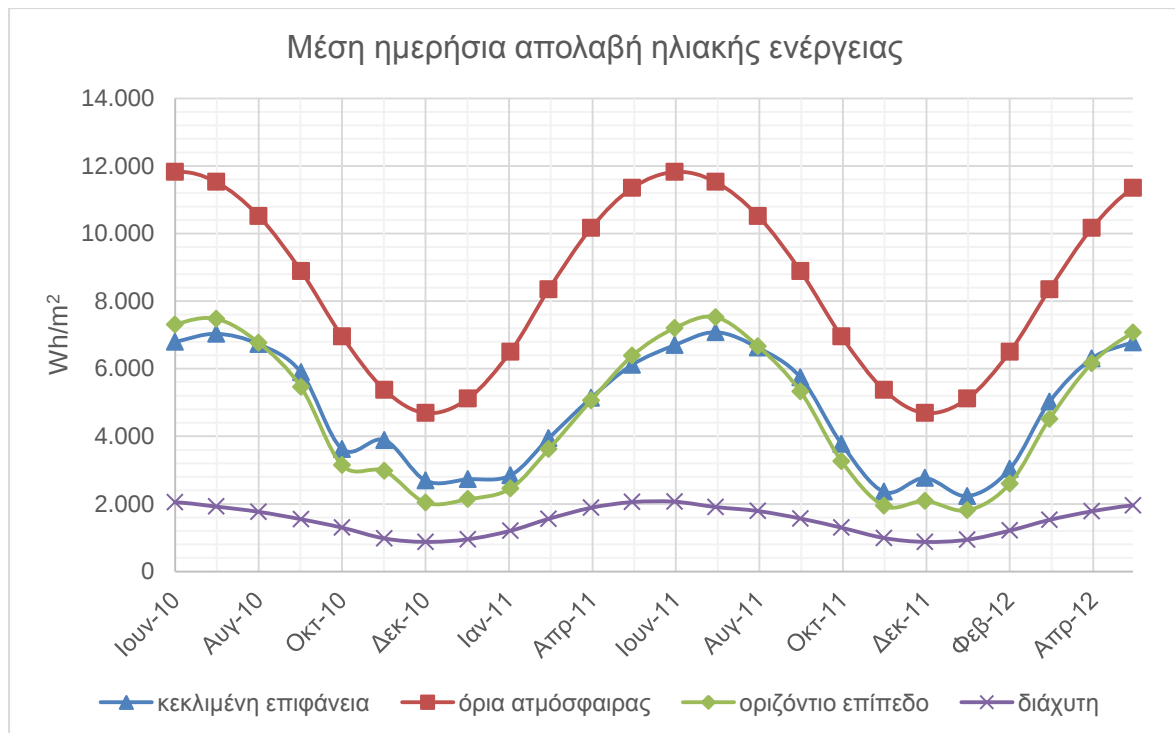


Διάγραμμα 3: Μηνιαία πυκνότητα απολαβής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο



Διάγραμμα 4: Μέση ημερήσια πυκνότητα απολαβής ηλιακής ενέργειας στο οριζόντιο επίπεδο

Οι ενδιάμεσες τιμές αφορούν την ηλιακή ενέργεια που απορροφάται ή διαχέεται κατά την είσοδό της στην ατμόσφαιρα της Γης. Η γραμμή που αντιστοιχεί στην ηλιακή ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας (κόκκινη με τετράγωνους δείκτες) εμφανίζει απόλυτη περιοδικότητα. Αυτό εξηγείται εφόσον η ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας δεν επηρεάζεται από τα μετεωρολογικά φαινόμενα και είναι μαθηματική συνάρτηση της θέσης της Γης ως προς τον ήλιο. Η διάχυτη ακτινοβολία (μοβ γραμμή με δείκτες X) φαίνεται να επηρεάζεται λίγο από τις διακυμάνσεις της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο και διατηρεί σχεδόν τέλεια περιοδικότητα. Τέλος, η κλίση που έχουν τα ΦΒ πλαίσια φαίνεται να τα ευνοεί κατά τους θερινούς μήνες ως προς την ενέργεια που λαμβάνουν. Το συμπέρασμα προκύπτει από παρατήρηση των καμπύλων που αντιστοιχούν στην ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο και στην κεκλιμένη επιφάνεια.



Διάγραμμα 5: Μέση ημερήσια πυκνότητα απολαβής ηλιακής ενέργειας για κάθε μήνα στα όρια της ατμόσφαιρας, στην κεκλιμένη επιφάνεια, στο οριζόντιο επίπεδο και ως διάχυτη ακτινοβολία.

4.1.2. Αποτελέσματα λειτουργίας ΦΒ συστοιχίας

Η απόδοση ενέργειας από τα ΦΒ στο δίκτυο και οι δείκτες περιγραφής της λειτουργίας τους που προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων (παράγραφος 3.4) παρουσιάζονται στον πίνακα 4.

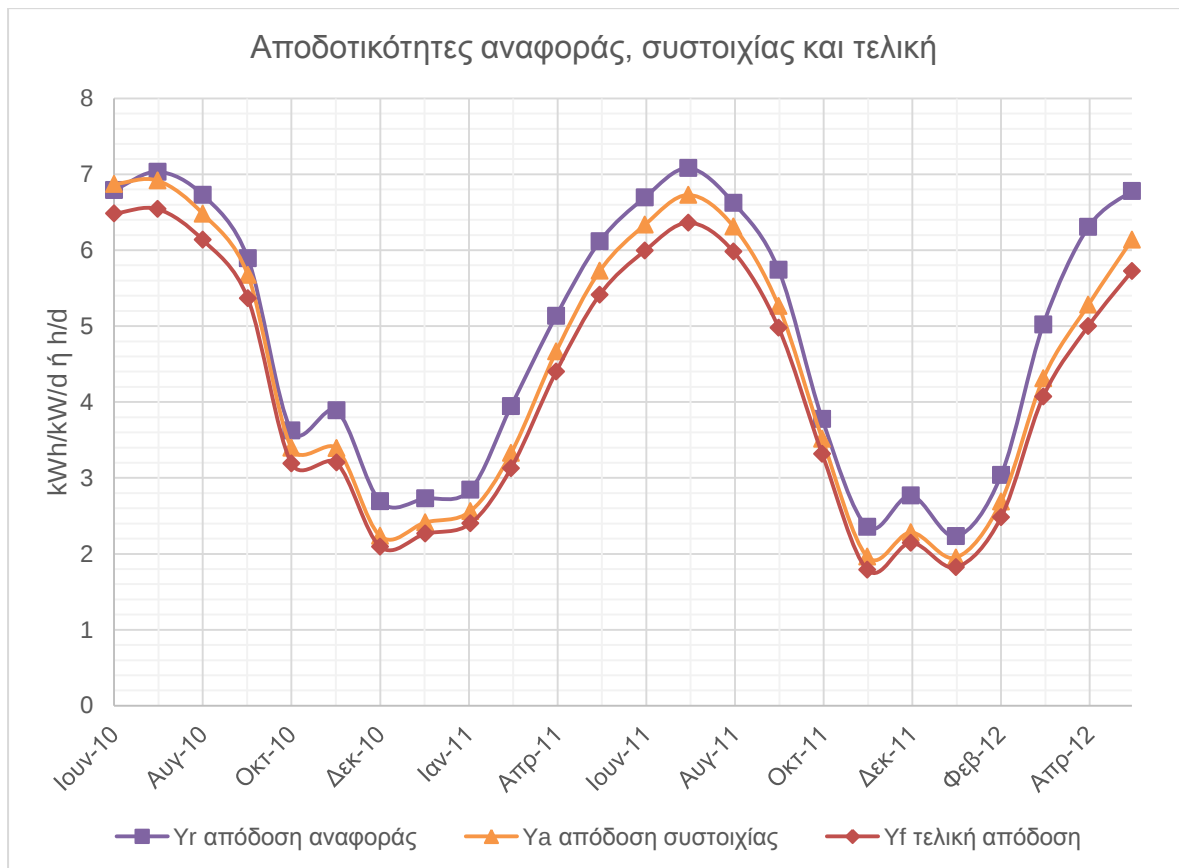
Μήνας	Μέση ημερήσια απόδοση μήνα ($E_{\text{yield,DC}}$)	Μέση ημερήσια απόδοση μήνα ($E_{\text{yield,AC}}$)	Αποδοτικότητα συστοιχίας (γ_a)	Τελική αποδοτικότητα (γ_t)	Αποδοτικότητα αναφοράς (γ_r)	Απώλειες πρόσληψης (L_o)	Απώλειες συστήματος (L_s)	Απόδοση ΦΒ (η_{PV})	Απόδοση συστήματος (η_{sys})	Απόδοση αντιστροφέα (η_{inv})	Λόγος επίδοσης (PR)
	kWh	kWh	kWh/kW _p	kWh/kW _p	kWh/kW	kWh/kW _p	kWh/kW _p				
Ιουν-10	14,977	14,131	6,870	6,482	6,791	-0,079	0,388	0,085	0,080	0,944	0,955
Ιουλ-10	15,077	14,259	6,916	6,541	7,033	0,117	0,375	0,082	0,078	0,946	0,930
Αυγ-10	14,127	13,375	6,480	6,135	6,728	0,247	0,345	0,081	0,076	0,947	0,912
Σεπ-10	12,367	11,693	5,673	5,364	5,894	0,221	0,310	0,081	0,076	0,945	0,910
Οκτ-10	7,403	6,954	3,396	3,190	3,623	0,227	0,206	0,079	0,074	0,939	0,880
Νοε-10	7,392	6,976	3,391	3,200	3,887	0,497	0,191	0,073	0,069	0,944	0,823
Δεκ-10	4,872	4,564	2,235	2,094	2,691	0,456	0,141	0,070	0,065	0,937	0,778
Ιαν-11	5,262	4,935	2,414	2,264	2,728	0,314	0,150	0,074	0,070	0,938	0,830
Φεβ-11	5,584	5,230	2,562	2,399	2,843	0,282	0,162	0,076	0,071	0,937	0,844
Μαρ-11	7,252	6,819	3,327	3,128	3,942	0,616	0,199	0,071	0,067	0,940	0,793
Απρ-11	10,166	9,587	4,663	4,398	5,134	0,471	0,265	0,076	0,072	0,943	0,857

Μαϊ-11	12,483	11,801	5,726	5,413	6,116	0,389	0,313	0,079	0,074	0,945	0,885
Ιουν-11	13,808	13,063	6,334	5,992	6,695	0,361	0,342	0,079	0,075	0,946	0,895
Ιουλ-11	14,665	13,866	6,727	6,361	7,080	0,353	0,366	0,080	0,075	0,946	0,898
Αυγ-11	13,757	13,035	6,310	5,979	6,622	0,312	0,331	0,080	0,076	0,947	0,903
Σεπ-11	11,479	10,852	5,266	4,978	5,741	0,475	0,288	0,077	0,073	0,945	0,867
Οκτ-11	7,664	7,226	3,515	3,315	3,776	0,260	0,201	0,078	0,074	0,943	0,878
Νοε-11	4,275	3,899	1,961	1,789	2,356	0,394	0,172	0,070	0,064	0,912	0,759
Δεκ-11	4,974	4,674	2,282	2,144	2,766	0,484	0,138	0,069	0,065	0,940	0,775
Ιαν-12	4,253	3,976	1,951	1,824	2,231	0,280	0,127	0,073	0,069	0,935	0,818
Φεβ-12	5,863	5,412	2,689	2,482	3,035	0,346	0,207	0,074	0,069	0,923	0,818
Μαρ-12	9,394	8,876	4,309	4,072	5,020	0,710	0,237	0,072	0,068	0,945	0,811
Απρ-12	11,509	10,901	5,280	5,000	6,304	1,024	0,279	0,070	0,067	0,947	0,793
Μαϊ-12	13,379	12,476	6,137	5,723	6,779	0,641	0,414	0,076	0,071	0,933	0,844

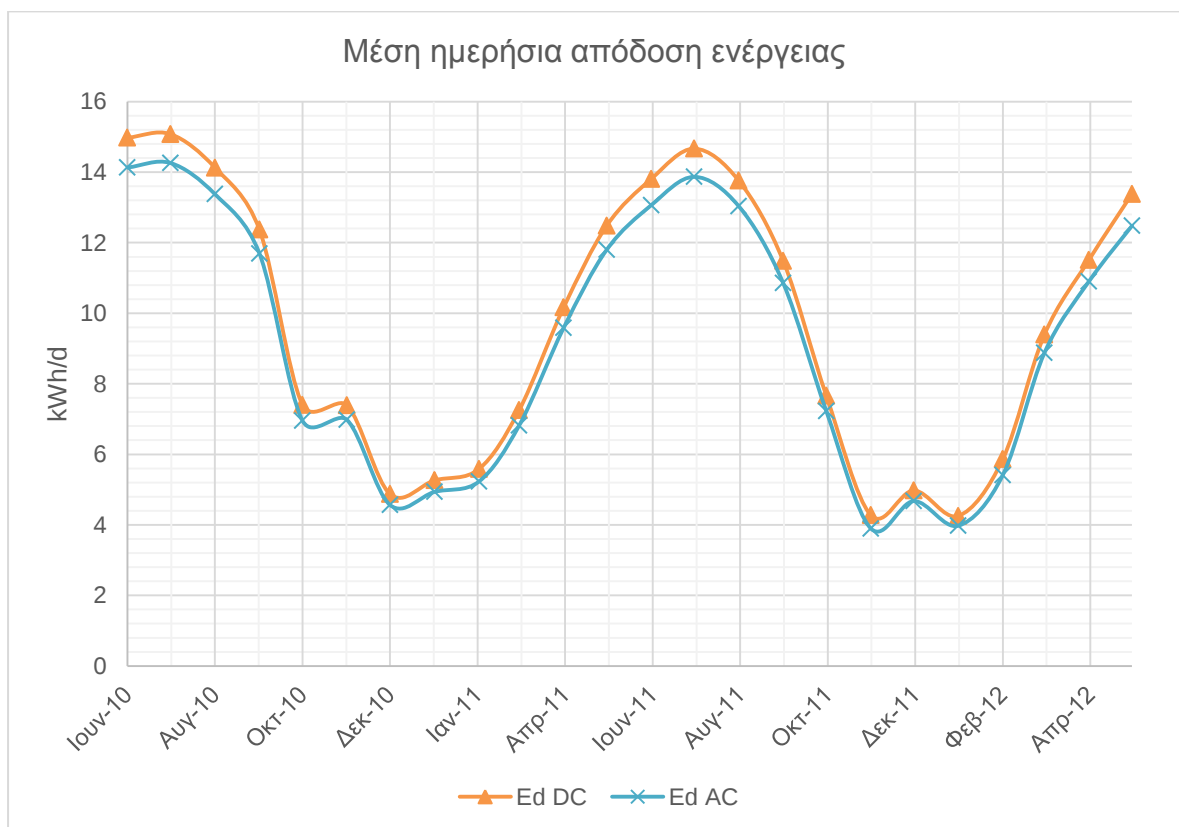
Πίνακας 4: Πραγματικοί δείκτες λειτουργίας των ΦΒ

Τα αποτελέσματα του πίνακα 4 παρουσιάζονται γραφικά στα επόμενα διαγράμματα, για να γίνει ευκολότερα αντιληπτή η ετήσια μεταβολή των παραμέτρων λειτουργίας. Το διάγραμμα 6 περιλαμβάνει την αποδοτικότητα συστοιχίας, αναφοράς και την τελική αποδοτικότητα. Το διάγραμμα 7 παρουσιάζει τη μέση ημερήσια απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε μήνα για το συνεχές και το εναλλασσόμενο ρεύμα. Το διάγραμμα 8 παρουσιάζει την αποδοτικότητα των ΦΒ, του συστήματος και του αντιστροφέα για κάθε μήνα. Το διάγραμμα 9 απεικονίζει το λόγο επίδοσης της λειτουργίας των ΦΒ και το διάγραμμα 10 παραθέτει τις απώλειες συστοιχίας και συστήματος.

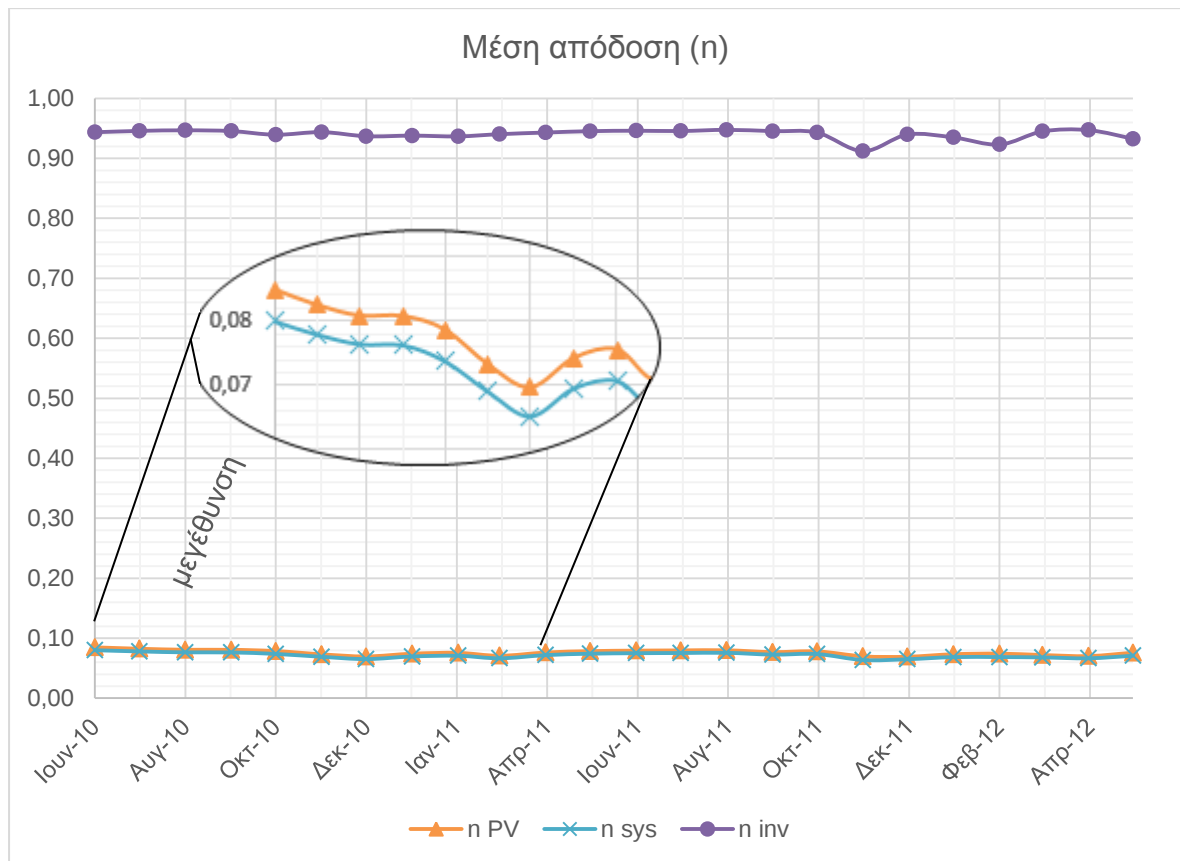
Τέλος, κατασκευάζεται συμπληρωματικά το διάγραμμα 11 το οποίο περιλαμβάνει τη συνολική ηλεκτρική ενέργεια που αποδίδεται στο δίκτυο αλλά και την ολική ηλιακή ενέργεια που προσπίπτει ανά μήνα στην επιφάνεια των ΦΒ. Η μηνιαία αποδιδόμενη ενέργεια διατίθεται απευθείας από τους υπολογισμούς στο προηγούμενο κεφάλαιο, ενώ η πρόσπτωση της ηλιακής ενέργειας προκύπτει με πολλαπλασιασμό της μέσης ημερήσιας πυκνότητας ενέργειας επί το πλήθος των ημερών του μήνα επί το εμβαδό των ΦΒ συνθέτων.



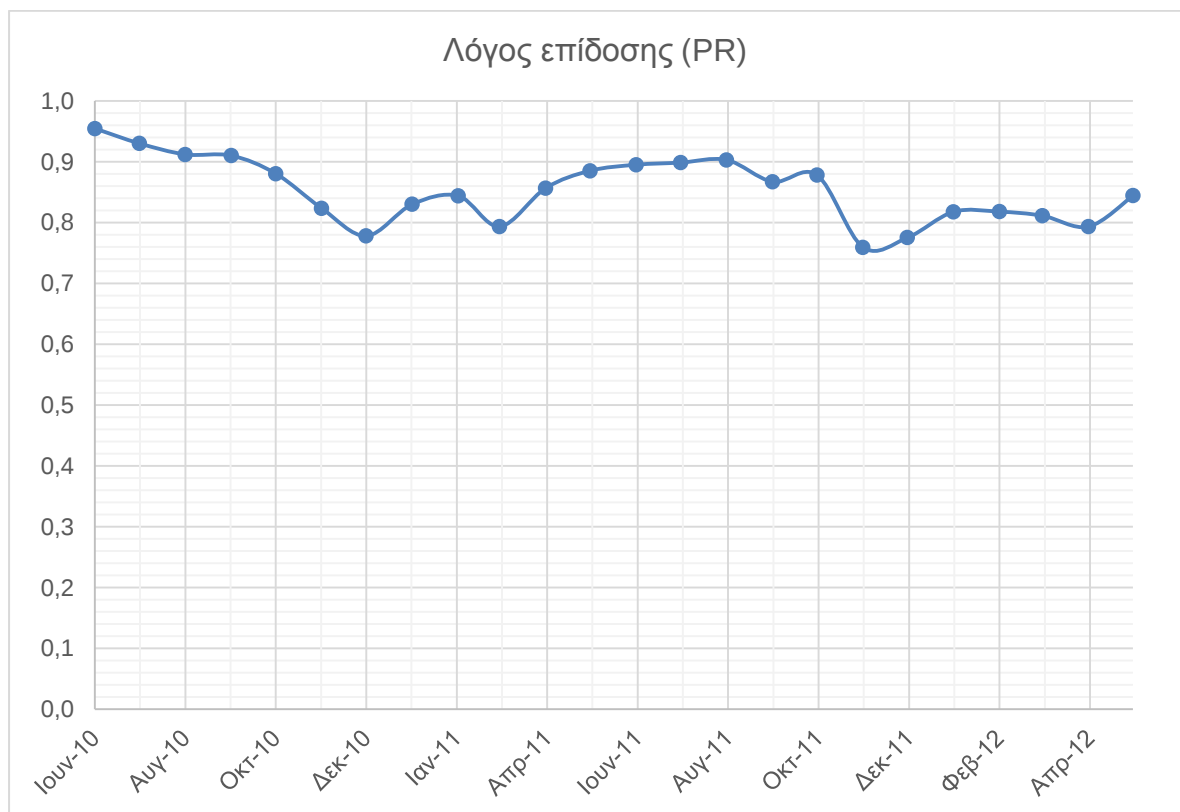
Διάγραμμα 6: Αποδοτικότητα αναφοράς, συστοιχίας και τελική αποδοτικότητα



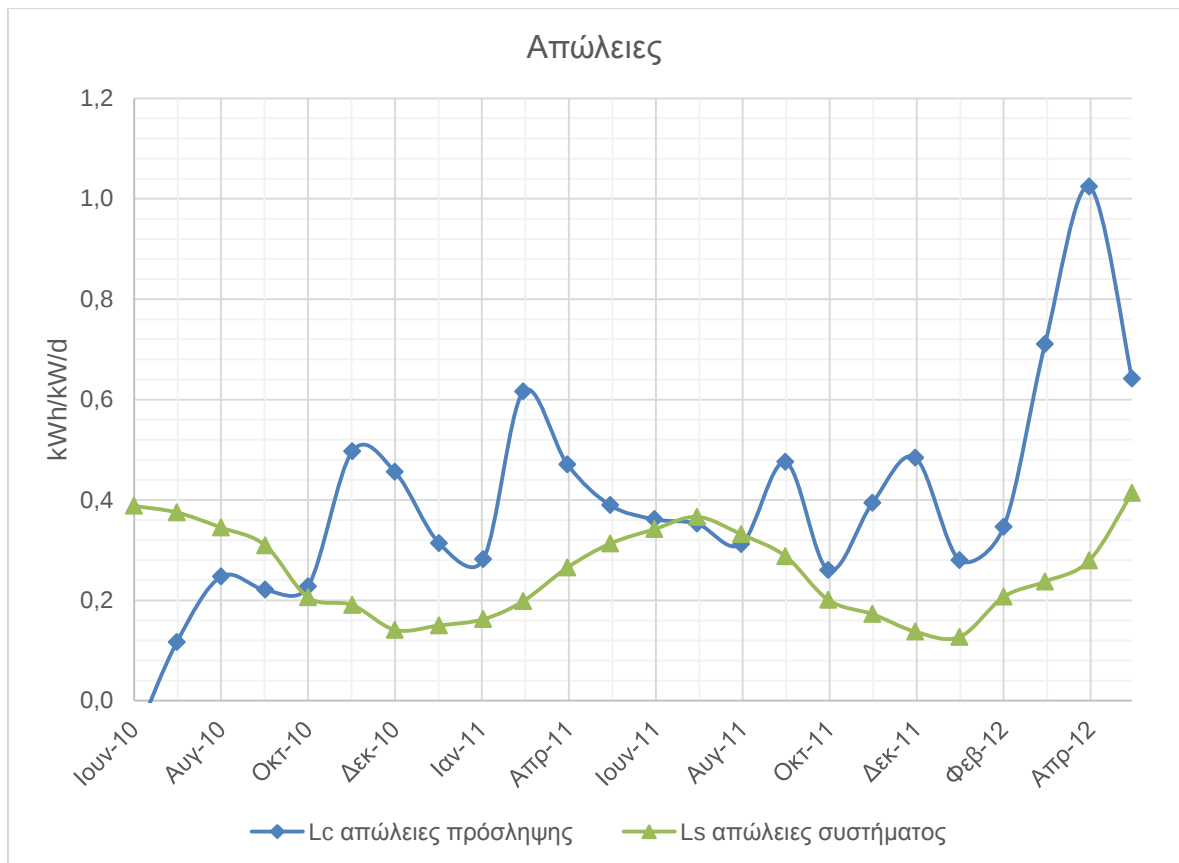
Διάγραμμα 7: Μέση ημερήσια απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας (συνεχούς και εναλλασσόμενου)



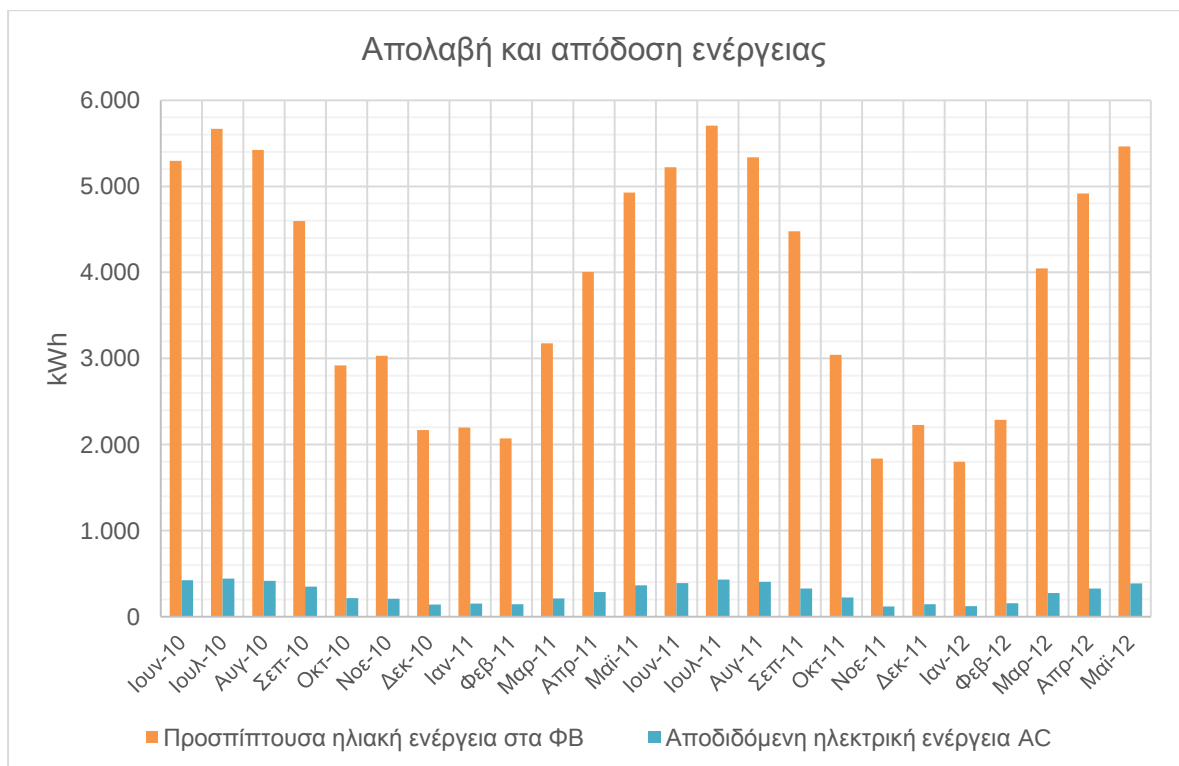
Διάγραμμα 8: Αποδοτικότητα ΦΒ, συστήματος και αντιστροφέα



Διάγραμμα 9: Λόγος επίδοσης



Διάγραμμα 10: Απώλειες πρόσληψης και συστήματος



Διάγραμμα 11: Απολαβή ηλιακής ενέργειας και απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο από τα ΦΒ

4.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης με PVSYST

Το PVSYST, ως το πιο σύνθετο λογισμικό ανάλυσης ΦΒ εγκαταστάσεων από τα εξεταζόμενα, προσφέρει πολλές διαφορετικές παραμέτρους που μπορούν να εξαχθούν ως αποτελέσματα. Οι ζητούμενοι δείκτες λειτουργίας, ωστόσο, είναι αυτοί που υπολογίσθηκαν προηγουμένως από την ανάλυση των πραγματικών δεδομένων στην παράγραφο 3.4. Περιγραφή της διαδικασίας εξαγωγής τους γίνεται στην παράγραφο 8.2.6 του παραρτήματος. Τα αποτελέσματα για τις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις ρυθμίσεων του PVSYST παρατίθενται στους πίνακες που ακολουθούν. Η ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο αντιστοιχεί στην ενέργεια του εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) ενώ η ενέργεια της συστοιχίας αντιστοιχεί στο συνεχές ρεύμα (DC). Όλες οι ενέργειες (ηλιακή και ηλεκτρική) εκφράζονται σε μηνιαίες τιμές καθώς εξάγονται από το PVSYST. Έτσι, για λόγους σύγκρισης στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει μετατροπή τους σε μέση ημερήσια ενέργεια ανά μήνα.

4.2.1. 1^η περίπτωση

Προσανατολισμός νοτιοδυτικός (+50°) με διόρθωση αλλαγής χειμερινής-θερινής ώρας στο αρχείο.

Μήνας	Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας οριζόντια (G_h)	Θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{Amb})	Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας στο κεκλιμένο (G_t)
	kWh/m ²	°C	kWh/m ²
Ιουν-10	219,2	24,27	216,6
Ιουλ-10	231,7	26,53	236,1
Αυγ-10	209,8	27,61	225,7
Σεπ-10	163,7	24,27	191,1
Οκτ-10	97,5	20,62	120,5
Νοε-10	89,2	19,04	126,8
Δεκ-10	63,2	15,49	87,5
Ιαν-11	66,3	12,58	87,6

Φεβ-11	68,8	12,27	87,5
Μαρ-11	112,2	13,05	132,1
Απρ-11	151,8	14,94	164,3
Μαϊ-11	197,8	18,59	197,1
Ιουν-11	216,1	23,51	210,7
Ιουλ-11	233,3	26,43	229,5
Αυγ-11	206,6	25,44	216,8
Σεπ-11	159,8	24,13	181,7
Οκτ-11	101,1	17,99	120,0
Νοε-11	58,3	13,51	73,3
Δεκ-11	64,7	13,39	91,2
Ιαν-12	56,1	10,03	70,7
Φεβ-12	75,4	10,43	89,9
Μαρ-12	140,0	13,09	160,0
Απρ-12	184,8	17,41	192,9
Μαϊ-12	219,1	20,21	216,6

Πίνακας 5: Αποτελέσματα PVSYST για ακτινοβολία (1^η περίπτωση)

Μήνας	Μηνιαία απόδοση ενέργειας συστοιχίας (E _{DC})	Μηνιαία απόδοση ενέργειας στο δίκτυο (E _{AC})	Απόδοση συστοιχίας (η _{PV})	Απόδοση συστήμ. (η _{sys})	Αποδοτικ. αναφοράς (Y _r)	Απώλειες πρόσληψης (L _c)	Αποδοτικ. συστοιχίας (Y _a)	Απώλειες συστήματος (L _s)	Τελική αποδοτικ. (Y _t)	Λόγος επίδοσης (PR)
	kWh	kWh			kWh/kW _p	kWh/kW _p	kWh/kW _p	kWh/kW _p	kWh/kW _p	
Ιουν-10	381,8	355,9	6,89	6,42	6,99	1,376	5,84	0,395	5,45	0,755
Ιουλ-10	411,7	384,5	6,81	6,36	8,43	1,520	6,10	0,403	5,69	0,748
Αυγ-10	389,7	364,1	6,75	6,30	7,28	1,507	5,77	0,380	5,39	0,741
Σεπ-10	333,2	310,9	6,81	6,36	6,37	1,271	5,10	0,342	4,76	0,747
Οκτ-10	212,4	196,8	6,89	6,38	3,89	0,742	3,15	0,232	2,91	0,750
Νοε-10	218,4	203,1	6,73	6,26	4,23	0,884	3,34	0,235	3,11	0,735
Δεκ-10	153,4	141,5	6,85	6,32	2,82	0,549	2,27	0,177	2,10	0,743
Ιαν-11	157,5	145,0	7,03	6,47	2,83	0,493	2,33	0,185	2,15	0,760
Φεβ-11	158,2	145,8	7,07	6,51	3,12	0,530	2,59	0,204	2,39	0,765
Μαρ-11	240,8	222,8	7,12	6,59	4,26	0,696	3,57	0,266	3,30	0,774
Απρ-11	302,0	280,6	7,18	6,67	5,48	0,855	4,62	0,328	4,29	0,784
Μαϊ-11	357,7	333,2	7,09	6,61	6,36	1,059	5,30	0,363	4,94	0,776
Ιουν-11	374,1	348,5	6,94	6,46	7,02	1,299	5,73	0,392	5,33	0,759
Ιουλ-11	400,7	374,0	6,82	6,37	7,40	1,470	5,93	0,395	5,54	0,748
Αυγ-11	379,3	354,1	6,84	6,38	6,99	1,376	5,62	0,373	5,24	0,750
Σεπ-11	317,8	296,2	6,83	6,37	6,06	1,194	4,86	0,330	4,53	0,748
Οκτ-11	214,1	198,4	6,97	6,46	3,87	0,700	3,17	0,233	2,94	0,759
Νοε-11	132,2	121,0	7,04	6,45	2,44	0,421	2,02	0,171	1,85	0,758
Δεκ-11	159,0	146,8	6,81	6,29	2,94	0,589	2,35	0,181	2,17	0,738
Ιαν-12	129,8	118,7	7,17	6,56	2,28	0,360	1,92	0,164	1,76	0,770
Φεβ-12	165,4	152,4	7,19	6,63	3,10	0,480	2,62	0,206	2,41	0,778
Μαρ-12	292,3	271,7	7,14	6,64	5,16	0,832	4,33	0,306	4,02	0,780
Απρ-12	349,8	325,9	7,09	6,60	6,43	1,076	5,35	0,366	4,99	0,776
Μαϊ-12	390,1	363,9	7,04	6,57	6,99	1,208	5,78	0,388	5,39	0,772

Πίνακας 6: Αποτελέσματα PVSYST για τη λειτουργία των ΦΒ (1^η περίπτωση)

4.2.2. 2^η περίπτωση

Προσανατολισμός νοτιοδυτικός (+50°) χωρίς διόρθωση αλλαγής χειμερινής-θερινής ώρας στο αρχείο ή στο λογισμικό.

Μήνας	Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας οριζόντια (G_{hor})	Θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{Amb})	Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας στο κεκλιμένο (G_{tilt})
	kWh/m ²	°C	kWh/m ²
Ιουν-10	219,2	24,27	253,2
Ιουλ-10	231,7	26,53	277,6
Αυγ-10	209,8	27,60	258,2
Σεπ-10	163,7	24,28	231,3
Οκτ-10	97,5	20,63	150,3
Νοε-10	89,2	19,04	125,7
Δεκ-10	63,2	15,49	86,4
Ιαν-11	66,3	12,58	86,4
Φεβ-11	68,8	12,27	86,7
Μαρ-11	112,2	13,04	137,5
Απρ-11	151,8	14,95	190,2
Μαϊ-11	197,8	18,58	227,6
Ιουν-11	216,1	23,50	249,5
Ιουλ-11	233,3	26,43	274,6
Αυγ-11	206,6	25,44	252,0
Σεπ-11	159,8	24,14	223,7
Οκτ-11	101,1	18,00	146,5
Νοε-11	58,3	13,51	72,2
Δεκ-11	64,7	13,39	90,1
Ιαν-12	56,1	10,03	69,5
Φεβ-12	75,4	10,43	88,3
Μαρ-12	140,0	13,09	169,4
Απρ-12	184,8	17,41	227,5
Μαϊ-12	219,1	20,21	253,0

Πίνακας 7: Αποτελέσματα PVSYST για ακτινοβολία (2^η περίπτωση)

Μήνας	Μηνιαία απόδοση ενέργειας συστοιχίας (E_{DC})	Μηνιαία απόδοση ενέργειας στο δίκτυο (E_{AC})	Απόδοση συστοιχίας (η_{PV})	Απόδοση συστήμ. (η_{sys})	Αποδοτικ. αναφοράς (Y_r)	Απώλειες πρόσληψης (L_c)	Αποδοτικ. συστοιχίας (Y_a)	Απώλειες συστήματος (L_s)	Τελική αποδοτικ. (Y_f)	Λόγος επίδοσης (PR)
	kWh	kWh			kWh/kW _p	kWh/kW _p	kWh/kW _p	kWh/kW _p	kWh/kW _p	
Ιουν-10	432,7	404,1	6,68	6,24	8,17	1,817	6,62	0,438	6,18	0,733
Ιουλ-10	466,3	436,0	6,56	6,14	9,91	2,048	6,91	0,448	6,46	0,721
Αυγ-10	431,8	403,8	6,53	6,11	8,33	1,935	6,40	0,415	5,98	0,718
Σεπ-10	380,2	355,1	6,42	6,00	7,71	1,892	5,82	0,384	5,44	0,705

Οκτ-10	245,2	227,8	6,38	5,92	4,85	1,215	3,63	0,259	3,37	0,696
Νοε-10	215,5	200,3	6,70	6,23	4,19	0,893	3,30	0,233	3,06	0,731
Δεκ-10	150,7	138,9	6,82	6,43	2,79	0,553	2,23	0,175	2,06	0,739
Ιαν-11	154,6	142,2	6,99	6,48	2,79	0,497	2,29	0,183	2,11	0,756
Φεβ-11	156,1	143,8	7,04	6,48	3,10	0,537	2,56	0,202	2,36	0,761
Μαρ-11	246,2	227,9	7,00	6,43	4,44	0,789	3,65	0,271	3,38	0,761
Απρ-11	336,2	312,9	6,91	6,43	6,34	1,193	5,15	0,357	4,79	0,755
Μαϊ-11	401,7	374,6	6,90	6,27	7,34	1,392	5,95	0,400	5,55	0,756
Ιουν-11	428,6	400,2	6,71	6,16	8,32	1,759	6,56	0,435	6,12	0,736
Ιουλ-11	463,2	433,0	6,59	6,19	8,86	1,999	6,86	0,447	6,41	0,724
Αυγ-11	427,0	399,3	6,62	6,02	8,13	1,805	6,32	0,411	5,91	0,727
Σεπ-11	369,1	344,7	6,45	6,10	7,46	1,809	5,65	0,375	5,27	0,707
Οκτ-11	246,2	228,7	6,57	6,41	4,73	1,080	3,65	0,260	3,39	0,717
Νοε-11	129,7	118,6	7,02	6,25	2,41	0,423	1,98	0,170	1,81	0,754
Δεκ-11	156,2	144,1	6,77	6,27	2,91	0,594	2,31	0,179	2,13	0,734
Ιαν-12	127,0	116,0	7,14	6,52	2,24	0,361	1,88	0,163	1,72	0,766
Φεβ-12	161,9	149,0	7,16	6,59	3,05	0,482	2,56	0,205	2,36	0,775
Μαρ-12	302,5	281,3	6,98	6,49	5,47	0,985	4,48	0,315	4,17	0,762
Απρ-12	398,2	371,6	6,84	6,38	7,58	1,489	6,09	0,407	5,69	0,750
Μαϊ-12	443,0	414,0	6,84	6,39	8,16	1,600	6,56	0,430	6,13	0,751

Πίνακας 8: Αποτελέσματα PVSYST για τη λειτουργία των ΦΒ (2^η περίπτωση)

4.2.3. 3^η περίπτωση

Προσανατολισμός νοτιοανατολικός (-50°) με διόρθωση αλλαγής χειμερινής-θερινής ώρας στο αρχείο. Αυτή η περίπτωση αντιστοιχεί στην ορθή εισαγωγή των παραμέτρων της ΦΒ διάταξης στο λογισμικό.

Μήνας	Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας οριζόντια (G_{hor})	Θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{Amb})	Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας στο κεκλιμένο (G_{tilt})
	kWh/m ²	°C	kWh/m ²
Ιουν-10	219,2	24,27	199,3
Ιουλ-10	231,7	26,53	209,6
Αυγ-10	209,8	27,61	200,4
Σεπ-10	163,7	24,27	166,8
Οκτ-10	97,5	20,62	104,6
Νοε-10	89,2	19,04	105,8
Δεκ-10	63,2	15,49	77,1
Ιαν-11	66,3	12,58	82,5
Φεβ-11	68,8	12,27	75,6
Μαρ-11	112,2	13,05	116,3

Απρ-11	151,8	14,94	149,0
Μαϊ-11	197,8	18,59	188,2
Ιουν-11	216,1	23,51	199,0
Ιουλ-11	233,3	26,43	218,9
Αυγ-11	206,6	25,44	202,5
Σεπ-11	159,8	24,13	166,4
Οκτ-11	101,1	17,99	115,4
Νοε-11	58,3	13,51	67,9
Δεκ-11	64,7	13,39	84,2
Ιαν-12	56,1	10,03	71,6
Φεβ-12	75,4	10,43	88,7
Μαρ-12	140,0	13,09	151,7
Απρ-12	184,8	17,41	188,8
Μαϊ-12	219,1	20,21	210,1

Πίνακας 9: Αποτελέσματα PVSYSYΤ για ακτινοβολία (3^η περίπτωση –σωστή εισαγ.)

Μήνας	Μηνιαία απόδοση ενέργειας συστοιχίας (E _{DC})	Μηνιαία απόδοση ενέργειας στο δίκτυο (E _{AC})	Απόδοση συστοιχίας (η _{PV})	Απόδοση συστήμ. (η _{sys})	Αποδοτικ. αναφοράς (Y _i)	Απώλειες πρόσληψης (L _c)	Αποδοτικ. συστοιχίας (Y _a)	Απώλειες συστήματος (L _s)	Τελική αποδοτικ. (Y _t)	Λόγος επίδοσης (PR)
	kWh	kWh			kWh/kW _p	kWh/kW _p	kWh/kW _p	kWh/kW _p	kWh/kW _p	
Ιουν-10	353,9	329,8	6,94	6,47	6,43	1,227	5,42	0,369	5,05	0,760
Ιουλ-10	368,1	343,6	6,86	6,41	7,49	1,308	5,45	0,363	5,09	0,753
Αυγ-10	349,4	325,9	6,81	6,35	6,47	1,291	5,17	0,348	4,83	0,747
Σεπ-10	294,1	274,1	6,89	6,42	5,56	1,057	4,50	0,306	4,20	0,755
Οκτ-10	189,1	174,7	7,07	6,53	3,37	0,572	2,80	0,214	2,59	0,767
Νοε-10	188,4	174,6	6,96	6,45	3,53	0,643	2,88	0,211	2,67	0,758
Δεκ-10	138,7	127,5	7,03	6,46	2,49	0,433	2,05	0,167	1,89	0,759
Ιαν-11	150,7	138,8	7,14	6,57	2,66	0,430	2,23	0,177	2,06	0,772
Φεβ-11	140,0	128,5	7,24	6,64	2,70	0,404	2,30	0,188	2,11	0,781
Μαρ-11	215,4	199,1	7,24	6,69	3,75	0,560	3,19	0,242	2,95	0,786
Απρ-11	276,9	256,9	7,26	6,74	4,97	0,728	4,24	0,306	3,93	0,792
Μαϊ-11	343,5	319,6	7,13	6,64	6,07	0,984	5,09	0,353	4,73	0,780
Ιουν-11	354,7	330,5	6,96	6,49	6,63	1,206	5,43	0,370	5,06	0,762
Ιουλ-11	383,9	358,3	6,85	6,40	7,06	1,375	5,69	0,379	5,31	0,752
Αυγ-11	356,7	332,8	6,88	6,42	6,53	1,248	5,28	0,355	4,93	0,755
Σεπ-11	292,9	272,7	6,88	6,40	5,55	1,065	4,48	0,308	4,17	0,752
Οκτ-11	209,1	193,7	7,08	6,56	3,72	0,624	3,10	0,228	2,87	0,771
Νοε-11	124,5	113,7	7,16	6,54	2,26	0,358	1,91	0,165	1,74	0,769
Δεκ-11	150,4	138,5	6,99	6,43	2,71	0,486	2,23	0,177	2,05	0,756
Ιαν-12	131,6	120,6	7,19	6,58	2,31	0,359	1,95	0,164	1,79	0,773
Φεβ-12	165,1	152,0	7,28	6,70	3,06	0,444	2,61	0,208	2,41	0,787
Μαρ-12	279,1	259,3	7,19	6,68	4,89	0,759	4,13	0,294	3,84	0,785
Απρ-12	343,7	320,2	7,11	6,63	6,29	1,032	5,26	0,360	4,90	0,779
Μαϊ-12	379,1	353,4	7,05	6,57	6,78	1,163	5,61	0,380	5,23	0,772

Πίνακας 10: Αποτελέσματα PVSYSYΤ για τη λειτουργία των ΦΒ (3^η περίπτωση – θεωρητικά σωστή)

4.2.4. 4^η περίπτωση

Προσανατολισμός νοτιοανατολικός (-50°) χωρίς διόρθωση αλλαγής χειμερινής-θερινής ώρας στο αρχείο ή στο λογισμικό.

Μήνας	Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας οριζόντια (G_{hor})	Θερμοκρασία περιβάλλοντος (T_{Amb})	Πυκνότητα ισχύος ακτινοβολίας στο κεκλιμένο (G_{tilt})
	kWh/m ²	°C	kWh/m ²
Ιουν-10	219,2	24,27	168,8
Ιουλ-10	231,7	26,53	168,2
Αυγ-10	209,8	27,60	168,2
Σεπ-10	163,7	24,28	138,1
Οκτ-10	97,5	20,63	87,1
Νοε-10	89,2	19,04	105,8
Δεκ-10	63,2	15,49	77,1
Ιαν-11	66,3	12,58	82,5
Φεβ-11	68,8	12,27	75,6
Μαρ-11	112,2	13,04	111,9
Απρ-11	151,8	14,95	126,8
Μαΐ-11	197,8	18,58	159,4
Ιουν-11	216,1	23,50	167,3
Ιουλ-11	233,3	26,43	182,1
Αυγ-11	206,6	25,44	168,1
Σεπ-11	159,8	24,14	136,0
Οκτ-11	101,1	18,00	95,1
Νοε-11	58,3	13,51	67,9
Δεκ-11	64,7	13,39	84,2
Ιαν-12	56,1	10,03	71,6
Φεβ-12	75,4	10,43	88,7
Μαρ-12	140,0	13,09	143,7
Απρ-12	184,8	17,41	157,7
Μαΐ-12	219,1	20,21	176,2

Πίνακας 11: Αποτελέσματα PVSYST για ακτινοβολία (4^η περίπτωση)

Μήνας	Μηνιαία απόδοση ενέργειας συστοιχίας (E_{DC})	Μηνιαία απόδοση ενέργειας στο δίκτυο (E_{AC})	Απόδοση συστοιχίας (η_{PV})	Απόδοση συστήμ. (η_{sys})	Αποδοτικ. αναφοράς (Y_r)	Απώλειες πρόσληψης (L_c)	Αποδοτικ. συστοιχίας (Y_a)	Απώλειες συστήματος (L_s)	Τελική αποδοτικ. (Y_t)	Λόγος επίδοσης (PR)
	kWh	kWh			kWh/kW _p	kWh/kW _p	kWh/kW _p	kWh/kW _p	kWh/kW _p	
Ιουν-10	301,3	279,4	6,97	6,47	5,45	1,017	4,61	0,334	4,28	0,760
Ιουλ-10	311,9	289,7	6,9	6,41	6,31	1,078	4,62	0,329	4,29	0,753
Αυγ-10	294,0	273,3	6,83	6,35	5,43	1,072	4,35	0,305	4,05	0,746
Σεπ-10	243,7	225,9	6,89	6,39	4,60	0,876	3,73	0,271	3,46	0,751

Οκτ-10	157,7	144,7	7,07	6,49	2,81	0,475	2,34	0,193	2,14	0,762
Νοε-10	188,4	174,6	6,96	6,45	3,53	0,643	2,88	0,211	2,67	0,758
Δεκ-10	138,7	127,5	7,03	6,46	2,49	0,433	2,05	0,167	1,89	0,759
Ιαν-11	150,7	138,8	7,14	6,57	2,66	0,430	2,23	0,177	2,06	0,772
Φεβ-11	140,0	128,5	7,24	6,64	2,70	0,404	2,30	0,188	2,11	0,781
Μαρ-11	207,6	191,6	7,25	6,69	3,61	0,535	3,07	0,237	2,84	0,786
Απρ-11	236,1	218,2	7,28	6,72	4,23	0,614	3,61	0,274	3,34	0,790
Μαϊ-11	291,6	270,4	7,15	6,63	5,14	0,824	4,32	0,313	4,00	0,779
Ιουν-11	300,2	278,3	7,01	6,50	5,58	0,982	4,59	0,335	4,26	0,764
Ιουλ-11	321,9	299,0	6,91	6,42	5,87	1,107	4,77	0,340	4,43	0,754
Αυγ-11	297,4	276,5	6,91	6,43	5,42	1,019	4,40	0,309	4,10	0,755
Σεπ-11	240,0	222,3	6,89	6,39	4,53	0,862	3,67	0,270	3,40	0,750
Οκτ-11	173,4	159,7	7,12	6,56	3,07	0,500	2,57	0,203	2,37	0,771
Νοε-11	124,5	113,7	7,16	6,54	2,26	0,358	1,91	0,165	1,74	0,769
Δεκ-11	150,4	138,5	6,99	6,43	2,71	0,486	2,23	0,177	2,05	0,756
Ιαν-12	131,6	120,6	7,19	6,58	2,31	0,359	1,95	0,164	1,79	0,773
Φεβ-12	165,1	152,0	7,28	6,70	3,06	0,444	2,61	0,208	2,41	0,787
Μαρ-12	264,8	245,7	7,2	6,68	4,64	0,714	3,92	0,282	3,64	0,785
Απρ-12	288,7	268,0	7,15	6,64	5,26	0,838	4,42	0,316	4,10	0,780
Μαϊ-12	318,7	296,2	7,07	6,57	5,68	0,962	4,72	0,334	4,39	0,772

Πίνακας 12: Αποτελέσματα PVSYST για τη λειτουργία των ΦΒ (4^η περίπτωση)

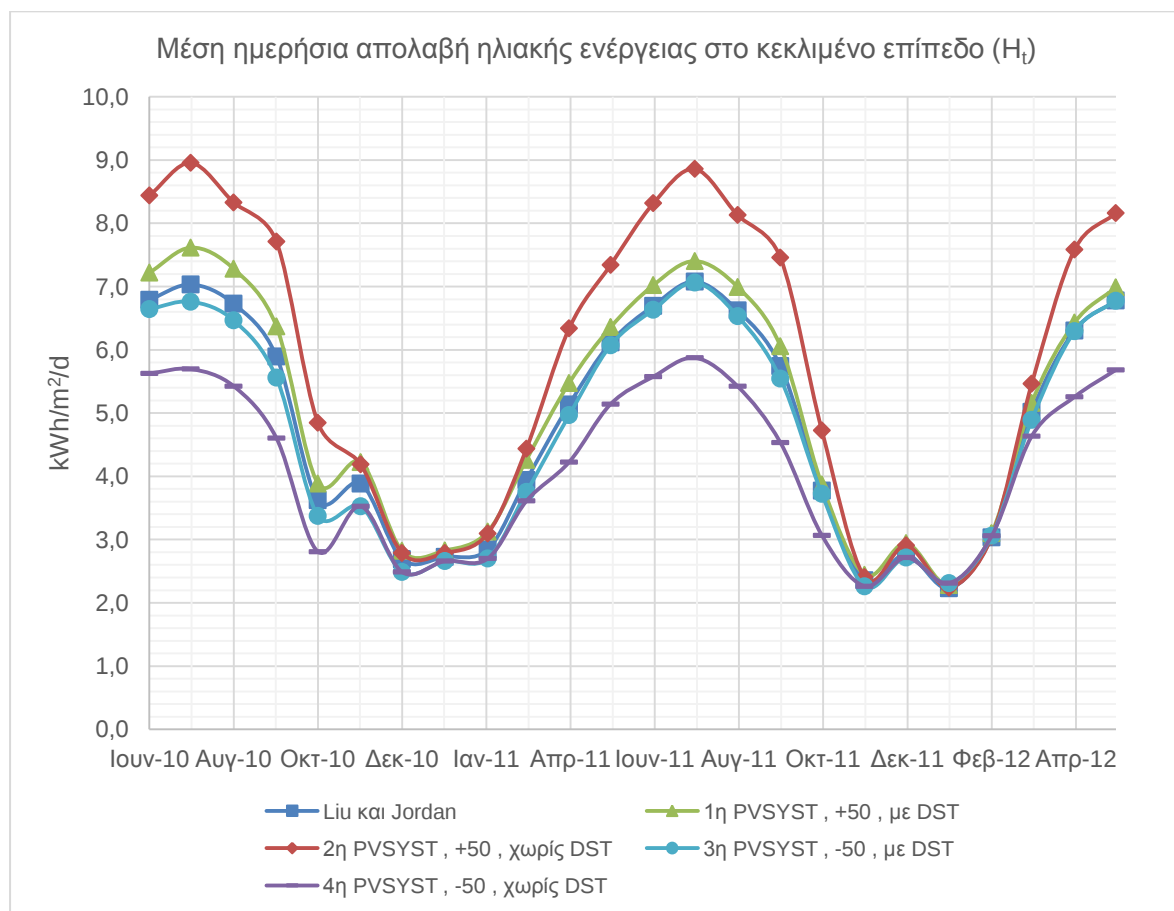
4.2.5. Γρήγορη σύγκριση

Ακόμη και με μια βιαστική παρατήρηση των αποτελεσμάτων του PVSYST μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων εισαγωγής των παραμέτρων της ΦΒ διάταξης, είναι προφανές ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές. Δειγματοληπτικά, εξετάζεται η αποδιδόμενη ενέργεια το μήνα Ιούνιο του 2010 για τη 2^η και 4^η περίπτωση όπου ο προσανατολισμός εισάγεται διαφορετικά (+50° , -50°) ενώ η εισαγωγή μετεωρολογικών δεδομένων είναι όμοια (χωρίς διόρθωση αλλαγής ώρας): τα αποτελέσματα είναι 432,7 kWh και 301,3 kWh αντίστοιχα, μια απόλυτη διαφορά, δηλαδή, 131,4 kWh ανά μήνα.

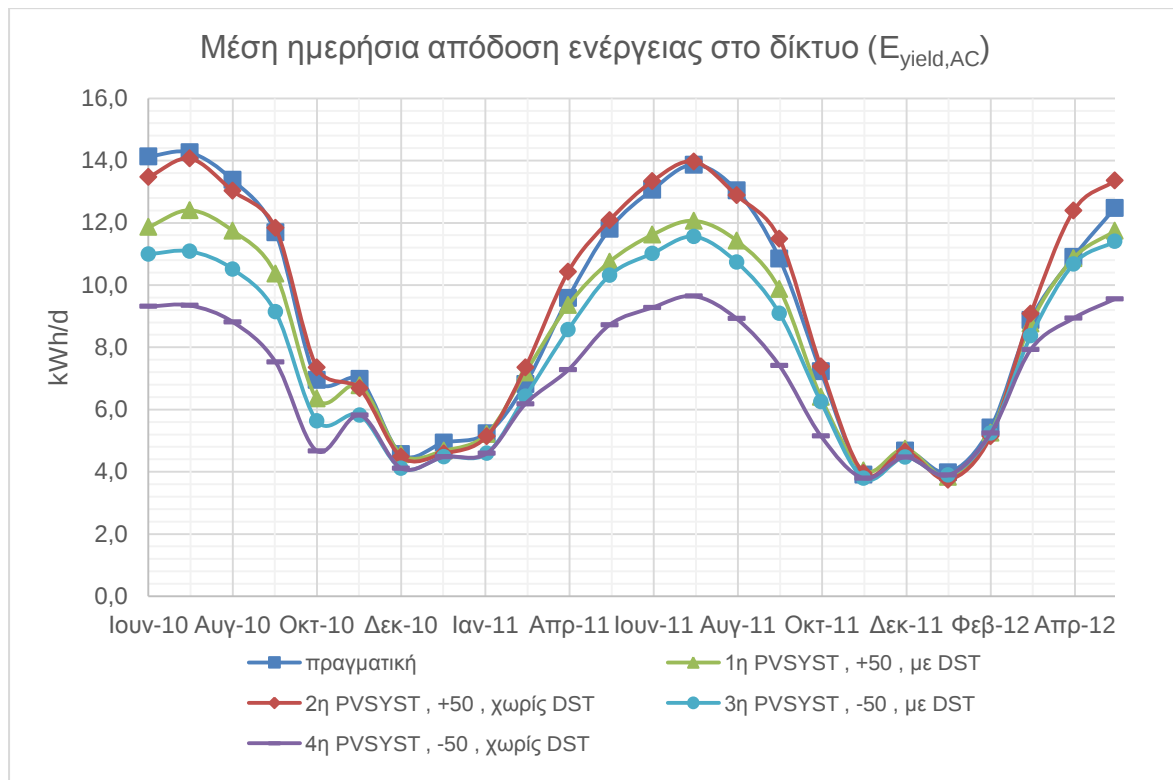
Προκειμένου να παρατηρηθούν ευκολότερα οι αποκλίσεις που συναντώνται μεταξύ των διαφορετικών περιπτώσεων εισαγωγής των παραμέτρων της διάταξης στο λογισμικό, γίνεται γραφική απεικόνιση των βασικότερων δεικτών στα επόμενα διαγράμματα με παράλληλη σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα. Λόγω των

πολλών διαφορετικών περιπτώσεων και του συνεπαγόμενου αυξημένου πλήθους διαγραμμάτων, τα αποτελέσματα του PVSYST δεν θα παρουσιαστούν τόσο αναλυτικά όσο παρουσιάστηκαν προηγουμένως τα πραγματικά αποτελέσματα από τη λειτουργία των ΦΒ.

Το διάγραμμα 12 παρουσιάζει τα ενδιάμεσα αποτελέσματα των τεσσάρων ρυθμίσεων του PVSYST για την αναγωγή της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας από το οριζόντιο επίπεδο στο επίπεδο του συλλέκτη και τα συγκρίνει με τα αποτελέσματα του αλγόριθμου των Liu και Jordan. Το διάγραμμα 13 παρουσιάζει τα τελικά αποτελέσματα του PVSYST για την ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο ανά μήνα και τα συγκρίνει με τα πειραματικά αποτελέσματα.



Διάγραμμα 12: Αναγωγή ακτινοβολίας από το οριζόντιο επίπεδο στο επίπεδο των ΦΒ, PVSYST



Διάγραμμα 13: Μέση ημερήσια απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, PVSYST

Επιθεωρώντας τα διαγράμματα παρατηρούνται τα εξής: (1) Κατά τους χειμερινούς μήνες τα αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων ρύθμισης παραμέτρων του PVSYST για όλους τους δείκτες φαίνεται να ταυτίζονται πολύ καλά με τα πειραματικά δεδομένα· (2) η απουσία επισήμανσης της αλλαγής ώρας (θερινή-χειμερινή) προκαλεί μεγάλες αποκλίσεις κατά τους θερινούς μήνες στην αναγωγή της ακτινοβολίας, θετική για την περίπτωση εσφαλμένου καθορισμού του προσανατολισμού και αρνητική για την περίπτωση ορθού καθορισμού του· (3) τα αποτελέσματα της αναγωγής της ακτινοβολίας ταυτίζονται σχεδόν απόλυτα με τα υπολογισμένα από τον αλγόριθμο των Liu και Jordan για την ορθή εισαγωγή των παραμέτρων στο λογισμικό· (4) μόνο με εσφαλμένη εισαγωγή προσανατολισμού και δεδομένων ακτινοβολίας τα τελικά αποτελέσματα του PVSYST για την ενέργεια ταυτίζονται με τα πραγματικά δεδομένα και (5) υπάρχει συνέπεια στα αποτελέσματα του λογισμικού μεταξύ ενέργειας που λαμβάνεται από τα ΦΒ και ενέργειας που παράγεται από αυτά για την κάθε περίπτωση.

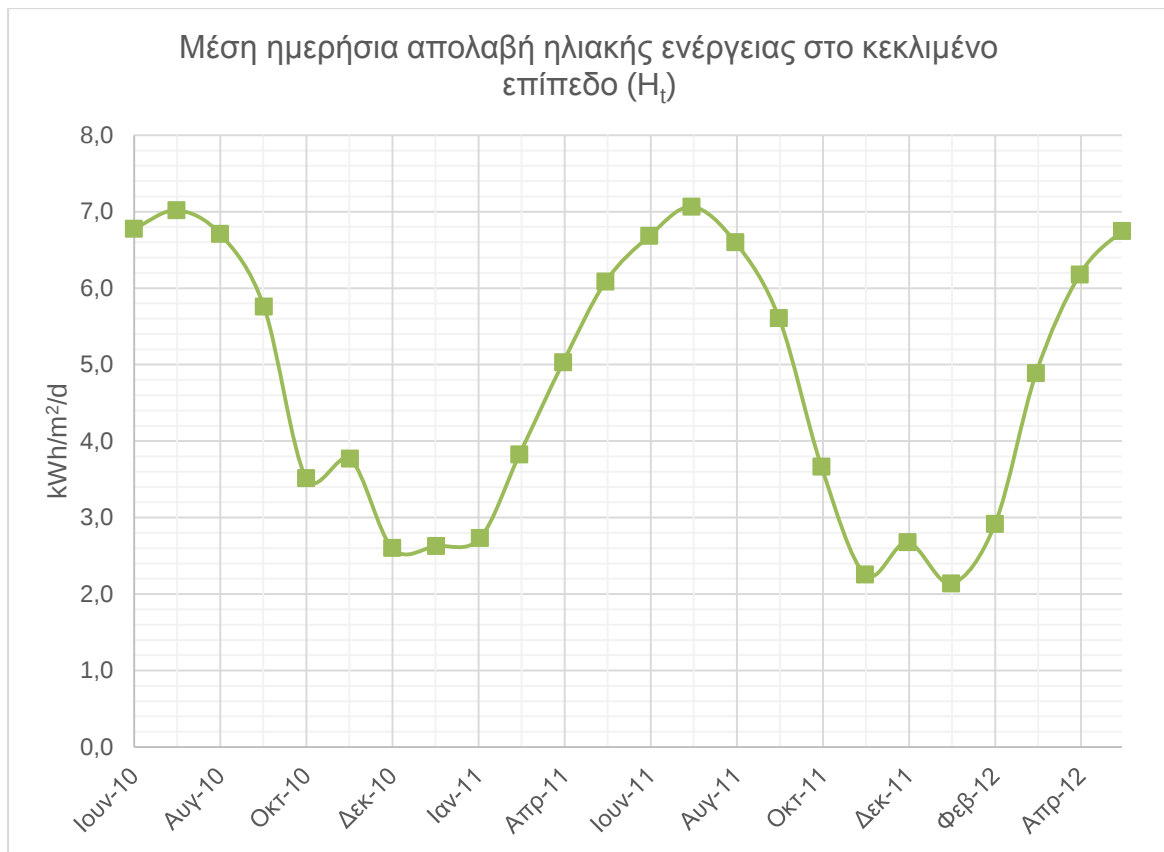
Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει πλήρης σύγκριση των αποτελεσμάτων του PVSYST με τα υπόλοιπα προγράμματα και τα πειραματικά αποτελέσματα. Λόγω των διαφορετικών περιπτώσεων αποτελεσμάτων και για αποφυγή παρουσίασης χαοτικού όγκου πληροφοριών, θα επιλεγεί προς σύγκριση η 3^η περίπτωση ρυθμίσεων (θεωρητικά σωστή) και η 2^η περίπτωση (καλύτερα τελικά αποτελέσματα). Στο 6^ο κεφάλαιο θα γίνει προσπάθεια ερμηνείας των προηγούμενων παρατηρήσεων.

4.3. Αποτελέσματα προσομοίωσης με RETSCREEN

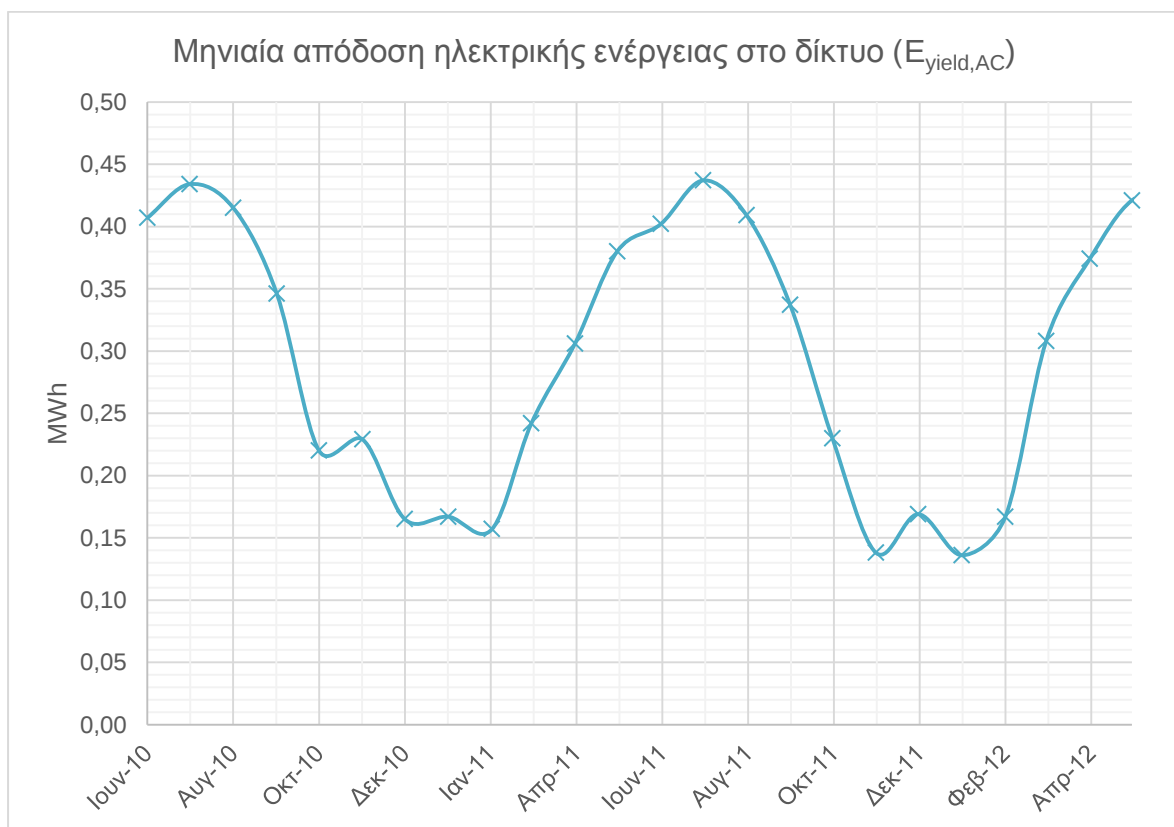
Το λογισμικό RETSCREEN εστιάζει περισσότερο στην οικονομική πτυχή της λειτουργίας των ΦΒ συστημάτων. Επίσης, όπως έχει αναφερθεί, είναι εργαλείο γενικής χρήσης που περιλαμβάνει όλες τις μορφές ΑΠΕ, οπότε, σε αντίθεση με το PVSYST, δεν διαθέτει πολλές ειδικευμένες εξόδους δεδομένων. Έτσι, τα αποτελέσματα που μπορεί να παρέχει είναι: (α) πυκνότητα ηλιακής ενέργειας στην κεκλιμένη επιφάνεια, (β) έσοδα από την ηλεκτρική ενέργεια με βάση την τιμολόγηση του ρεύματος και (γ) διοχετευόμενη στο δίκτυο ηλεκτρική ενέργεια ανά μήνα. Η πρώτη και η τρίτη επιλογή αποτελούν τα μόνα χρήσιμα στοιχεία για προβολή και παρουσιάζονται στον πίνακα 13 και στα διαγράμματα 14 και 15. Για τη σύγκριση με τα υπόλοιπα αποτελέσματα θα γίνει μετατροπή των μονάδων.

Μήνας	Μέση ημερήσια ακτινοβολία στην κεκλιμένη επιφάνεια (H_t) kWh/m ² /d	Ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο ανά μήνα ($E_{\text{yield,AC}}$) MWh
Ιουν-10	6,776	0,407
Ιουλ-10	7,017	0,434
Αυγ-10	6,707	0,415
Σεπ-10	5,758	0,346
Οκτ-10	3,512	0,22
Νοε-10	3,768	0,229
Δεκ-10	2,600	0,165
Ιαν-11	2,627	0,167
Φεβ-11	2,731	0,157
Μαρ-11	3,823	0,242
Απρ-11	5,031	0,306
Μαϊ-11	6,083	0,38
Ιουν-11	6,681	0,402
Ιουλ-11	7,064	0,437
Αυγ-11	6,600	0,409
Σεπ-11	5,607	0,337
Οκτ-11	3,665	0,23
Νοε-11	2,255	0,138
Δεκ-11	2,675	0,169
Ιαν-12	2,138	0,136
Φεβ-12	2,917	0,167
Μαρ-12	4,886	0,308
Απρ-12	6,177	0,374
Μαϊ-12	6,743	0,421

Πίνακας 13: Αποτελέσματα RETSCREEN



Διάγραμμα 14: Μέση ημερήσια απολαβή ηλιακής ενέργειας στο επίπεδο των ΦΒ, RETSCREEN



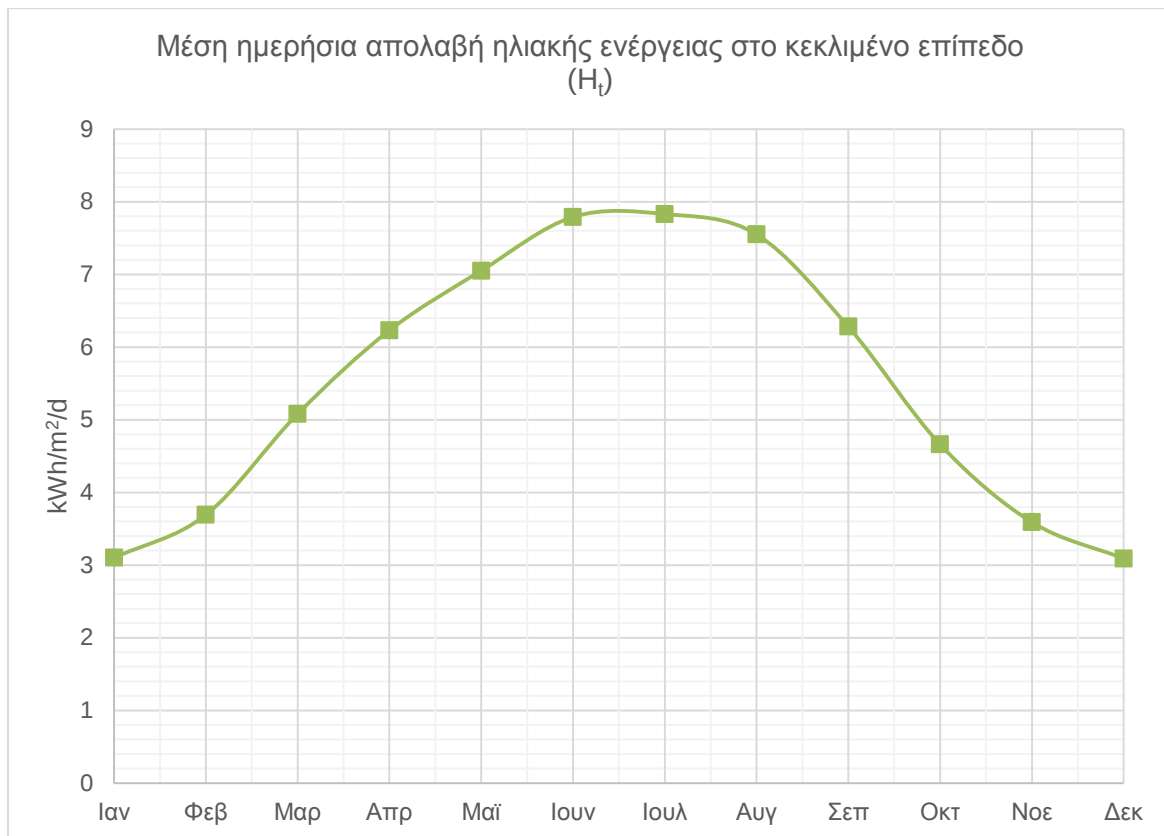
Διάγραμμα 15: Μηνιαία απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, RETSCREEN

4.4. Αποτελέσματα εκτίμησης του PVGIS

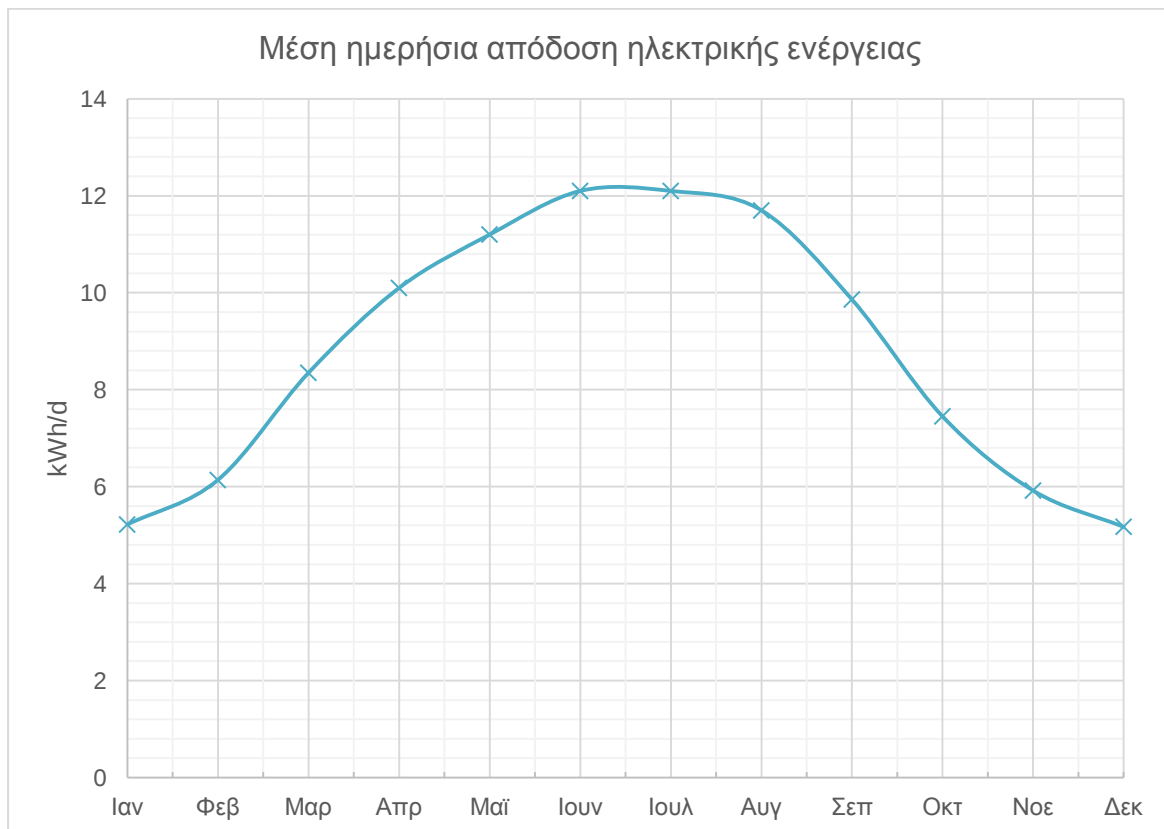
Τα αποτελέσματα από το online εργαλείο PVGIS περιλαμβάνουν μόνο τιμές ημερήσιας και μηνιαίας ενεργειακής απόδοσης καθώς και ημερήσια και μηνιαία πρόσπτωση ηλιακής ενέργειας στα ΦΒ. Η μέση ημερήσια απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας που θα απέδιδε η ΦΒ διάταξη στα Χανιά καθώς και η μέση ημερήσια πυκνότητα ενέργεια που θα λάμβανε από τον ήλιο, με βάση το PVGIS, παρουσιάζονται στον πίνακα 14. Τα ίδια αποτελέσματα παριστάνονται γραφικά στα διαγράμματα 16 και 17.

Μήνας	Μέση ημερήσια απόδοση ενέργειας ($E_{\text{yield,AC}}$)	Μέση ημερήσια πυκνότητα απολαβής ηλιακής ενέργειας στο επίπεδο των ΦΒ (H_t)
	kWh	kWh/m ² /d
Ιαν	5,22	3,10
Φεβ	6,14	3,69
Μαρ	8,35	5,08
Απρ	10,10	6,23
Μαΐ	11,20	7,05
Ιουν	12,10	7,79
Ιουλ	12,10	7,83
Αυγ	11,70	7,55
Σεπ	9,86	6,28
Οκτ	7,45	4,66
Νοε	5,92	3,59
Δεκ	5,17	3,09

Πίνακας 14: Αποτελέσματα PVGIS



Διάγραμμα 16: Μέση ημερήσια απολαβή ηλιακής ενέργειας στο επίπεδο των ΦΒ, PVGIS

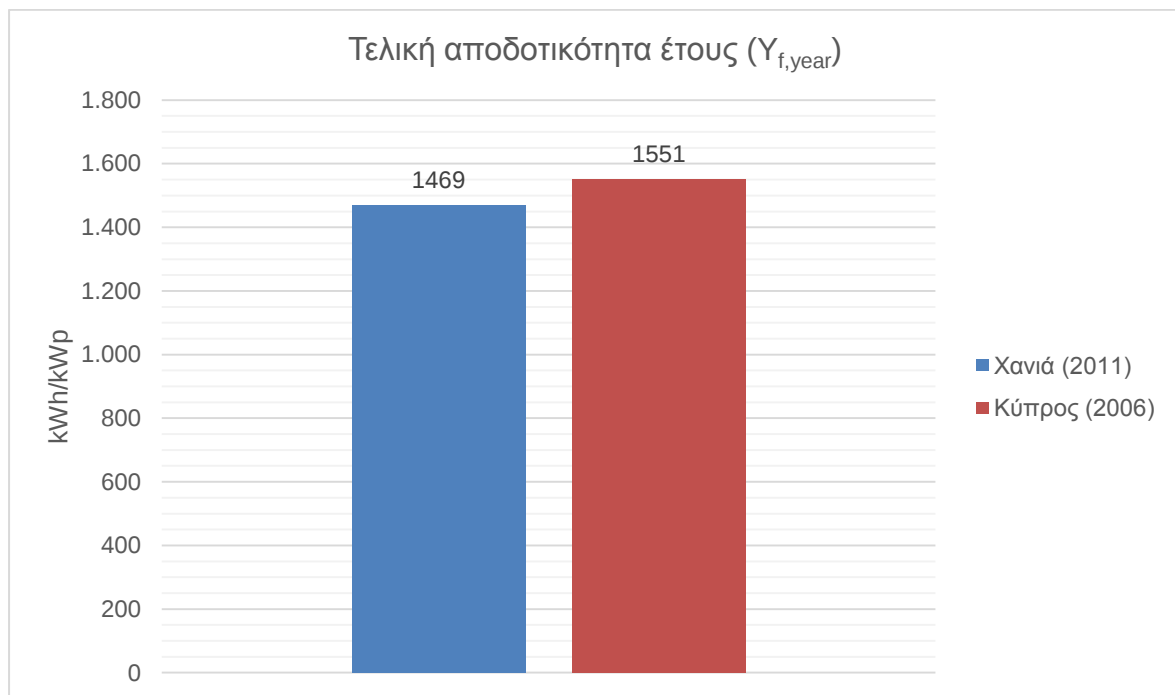


Διάγραμμα 17: Μέση ημερήσια απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας, PVGIS

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων ήταν τα προσδοκόμενα για τη λειτουργία του συγκεκριμένου τύπου φωτοβολταϊκών κάτω από τις συνθήκες ηλιοφάνειας της Κρήτης. Πουθενά δεν εμφανίστηκαν τιμές που να μην μπορούν να δικαιολογηθούν ή να είναι άξιες απορίας. Μια πρόχειρη επιβεβαίωση μπορεί να δοθεί από το επόμενο διάγραμμα που συγκρίνει την τελική αποδοτικότητα (Y_f) για ένα έτος (α) από την εξεταζόμενη ΦΒ διάταξη στα Χανιά και (β) από μια διάταξη ίδιας τεχνολογίας στην Κύπρο, όπου οι συνθήκες ηλιοφάνειας είναι παρόμοιες.



Διάγραμμα 18: Τελική αποδοτικότητα ενός έτους για την εξεταζόμενη ΦΒ διάταξη στα Χανιά (2011) και μιας άλλης παρόμοιας τεχνολογίας στην Κύπρο (2006).

Τα δεδομένα για τη ΦΒ εγκατάσταση στην Κύπρο προέρχονται από εργασία που αναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο [Makrides et al., 2006]. Η σύγκριση δεν είναι αυστηρά έγκυρη, αφού αφορά διαφορετικά συστήματα σε διαφορετικές περιοχές και χρόνους, αλλά αποτελεί ένδειξη της γενικής απόδοσης των ΦΒ συστημάτων άμορφου πυριτίου στην περιοχή της Μεσογείου. Εδώ φαίνεται, επίσης, η

χρησιμότητα των δεικτών περιγραφής των ΦΒ: η αποδοτικότητα συστοιχίας, αναφοράς, η τελική αποδοτικότητα, καθώς και ο λόγος επίδοσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σύγκριση μεταξύ ΦΒ διατάξεων με διαφορετική εγκατεστημένη ισχύ αιχμής.

Οι απώλειες πρόσληψης (L_c) της ακτινοβολίας από τα ΦΒ σύνθετα εμφανίζουν μία εξέχουσα κορυφή τον Απρίλιο του 2012. Αυτή μπορεί να οφείλεται σε εναπόθεση σκόνης πάνω στα ΦΒ, κυρίως λόγω των βροχών από σύννεφα με σκόνη άμμου από την έρημο της Σαχάρας, ιδιαίτερα εκείνη τη περίοδο.

Τα αποτελέσματα του PVSYST, για τη μετατροπή της πυκνότητας ισχύος της ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο σε πυκνότητα ενέργειας στο κεκλιμένο, ταυτίζονται πολύ καλά με τα αποτελέσματα του αλγόριθμου των Liu και Jordan. Δεν ισχύει όμως το ίδιο για τα τελικά αποτελέσματα της επίδοσης των ΦΒ, όπου το PVSYST φαίνεται να υποτιμάει συστηματικά την ενεργειακή απόδοσή τους. Αυτό ισχύει για τη θεωρητικά σωστή εισαγωγή των δεδομένων και των ρυθμίσεων στο λογισμικό (3^η περίπτωση). Γενικά, πέραν της υποεκτίμησης της πρόβλεψης, το λογισμικό εμφανίζει συνέπεια μεταξύ των τεσσάρων διαφορετικών περιπτώσεων που εξετάζονται: (α) για υψηλότερη προβλεπόμενη ακτινοβολία στην επιφάνεια των ΦΒ η ενέργεια που παράγεται είναι περισσότερη (2^η περίπτωση, όλες οι είσοδοι εσφαλμένες, τυχαία σωστά τελικά αποτελέσματα) και (β) για χαμηλότερη προβλεπόμενη πρόσπτωση ακτινοβολίας η ενέργεια που παράγεται είναι η λιγότερη (4^η περίπτωση).

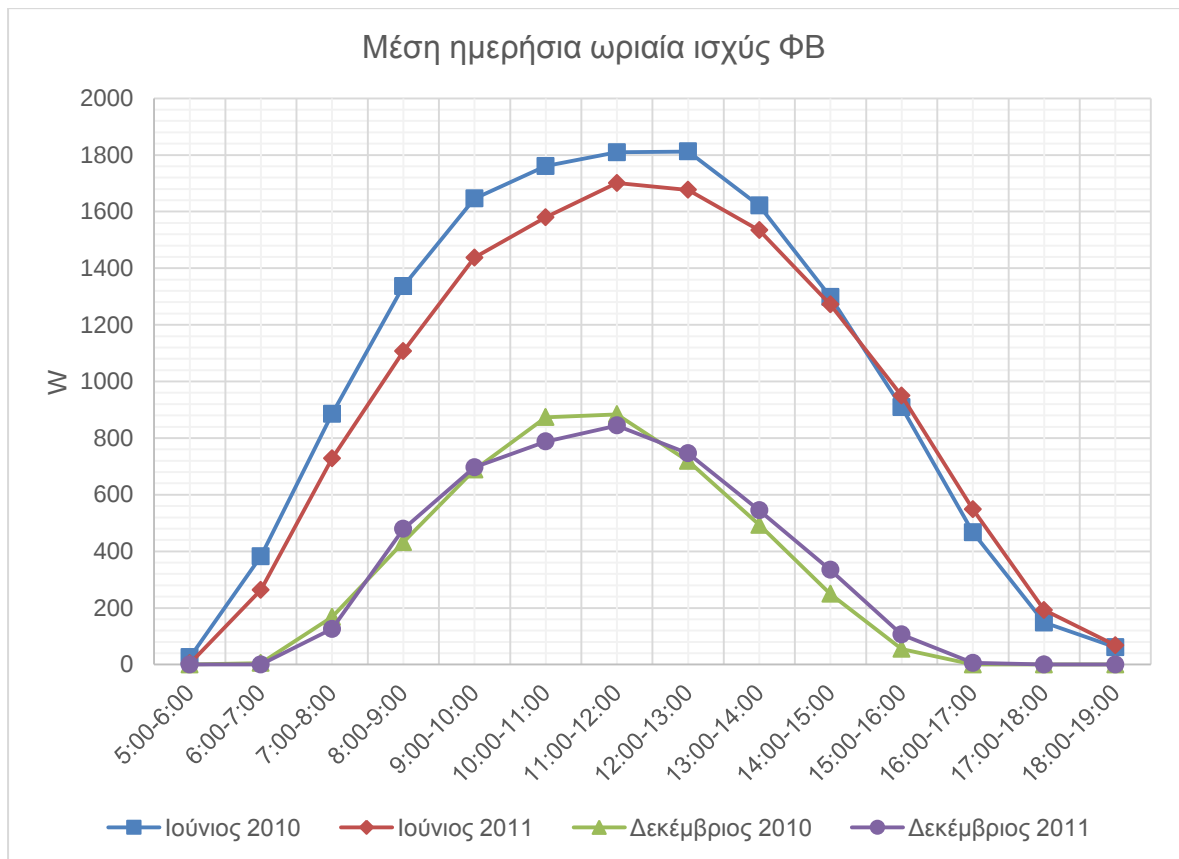
Το λογισμικό RETSCREEN υπολογίζει πολύ καλά τόσο την πρόσπτωση της ηλιακής ενέργειας στην επιφάνεια των ΦΒ όσο και την ενεργειακή τους απόδοση.

Αυτό επαληθεύεται από τα συγκριτικά διαγράμματα που ακολουθούν στην επόμενη παράγραφο.

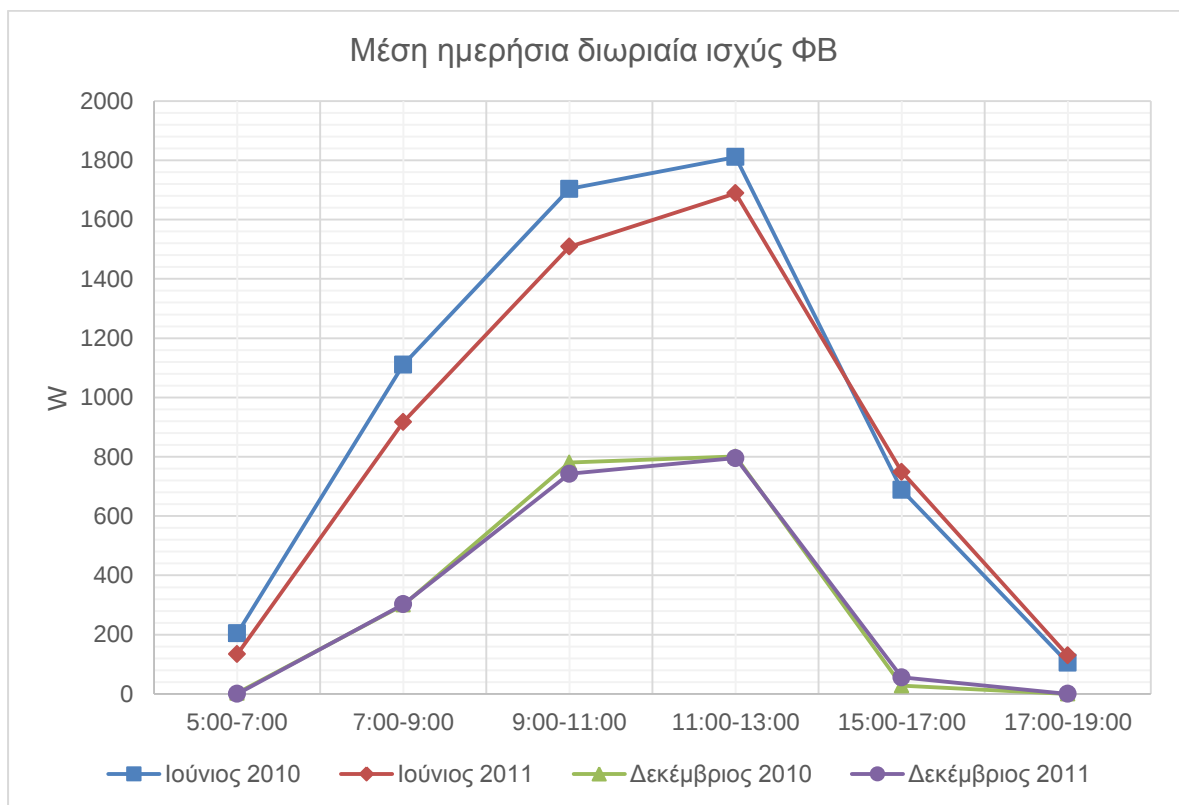
Το εργαλείο PVGIS φαίνεται πως δεν προβλέπει με ιδιαίτερη ακρίβεια την πρόσπτωση της ηλιακής ενέργειας στην επιφάνεια των ΦΒ. Κάτι τέτοιο είναι αναμενόμενο εφόσον δεν λαμβάνει ως είσοδο τα καταγεγραμμένα πειραματικά δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας. Η εκτίμηση που εκτελεί βασίζεται σε μοντέλα που συνδυάζουν πληροφορίες από διαφορετικούς μετεωρολογικούς σταθμούς ή δορυφορικά δεδομένα της ευρύτερης περιοχής. Παρόλα αυτά, τα τελικά αποτελέσματα που παρέχει για την απόδοση ενέργειας της ΦΒ διάταξης είναι αρκετά ικανοποιητικά εάν εξετασθούν για το σύνολο της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου. Ωστόσο, η ευστοχία της πρόβλεψης δεν μπορεί να αποτελεί ασφαλές κριτήριο για την αποτελεσματικότητα και την εγκυρότητα του λογισμικού εφόσον ακόμα και ο καθορισμός της χρησιμοποιούμενης ΦΒ τεχνολογίας σε αυτό είναι ανακριβής.

5.2. Σύγκριση και παρατηρήσεις

Πριν από οποιαδήποτε σύγκριση αποτελεσμάτων, ενδιαφέρον έχει η παρουσίαση μερικών χαρακτηριστικών διαγραμμάτων από τη λειτουργία της ΦΒ συστοιχίας για τους μήνες Ιούνιο και Δεκέμβριο. Τα διαγράμματα 19 και 20 περιλαμβάνουν τη μέση αποδιδόμενη ισχύ συνεχούς ρεύματος (DC) ανά ώρα και ανά δώρο αντίστοιχα, για τα έτη 2010 και 2011 ξεχωριστά. Για τη δημιουργία τους χρειάστηκε η σύνταξη και εκτέλεση κάποιων μακροεντολών ώστε να γίνει η επιθυμητή ταξινόμηση των δεδομένων (μέσοι όροι κατά μέρα και ώρα ή δώρο). Αυτές οι μακροεντολές παρατίθενται στις παραγράφους 8.5.5 και 8.5.6 του παραρτήματος.



Διάγραμμα 19: Μέση ημερήσια ισχύς ΦΒ συστοιχίας ανά ώρα (πειραματικά δεδομένα)

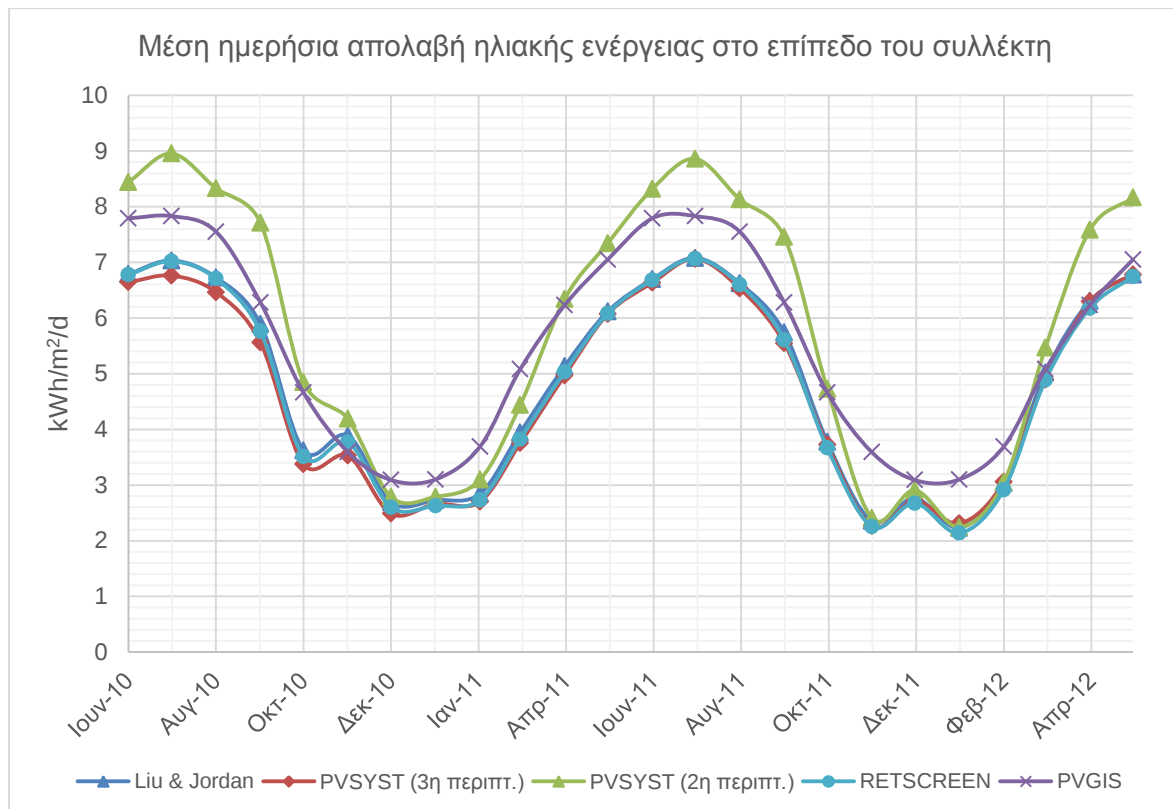


Διάγραμμα 20: Μέση ημερήσια ισχύς ΦΒ συστοιχίας ανά δύο ώρες (πειραματικά δεδομένα)

Από τα παραπάνω διαγράμματα εξάγονται πληροφορίες λειτουργίας των ΦΒ για δύο χαρακτηριστικές περιόδους του έτους. Είναι χαρακτηριστικό ότι η ισχύς που αποδίδει η ΦΒ συστοιχία στο μέσο μιας τυπικής ημέρας, κατά τις 12:00 μ.μ. περίπου, είναι διπλάσια το μήνα Ιούνιο από το μήνα Δεκέμβριο. Επίσης, είναι εμφανής η μείωση των παραγωγικών ωρών της ΦΒ διάταξης το Δεκέμβριο λόγω της μικρότερης διάρκειας της ημέρας. Τέλος, η ετήσια διακύμανση της παραγωγής είναι πιο αισθητή για τις θερινές περιόδους, χωρίς ωστόσο να μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την αξία αυτής της πληροφορίας, λόγω της φθίνουσας απόδοσης των ΦΒ άμορφου πυριτίου κατά το πρώτο έτος της λειτουργίας τους.

Στη συνέχεια ακολουθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων. Αρχικά, συγκρίνονται τα αποτελέσματα της αναγωγής της ηλιακής ακτινοβολίας από το οριζόντιο επίπεδο (πειραματικά δεδομένα) στο επίπεδο των ΦΒ πλαισίων. Επισημαίνεται ότι τα δεδομένα πυκνότητας ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας που προκύπτουν από τον αλγόριθμο των Liu και Jordan υπόκεινται στην ακρίβεια της μεθόδου και δε μπορούν να θεωρηθούν ίδια με τα πραγματικά, τα οποία δεν διατίθενται. Ύστερα, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων από τα λογισμικά που εξετάστηκαν και από τα επεξεργασμένα πειραματικά δεδομένα για τη λειτουργία των ΦΒ.

Το διάγραμμα 21 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της αναγωγής της πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας από το οριζόντιο επίπεδο στο επίπεδο των ΦΒ.

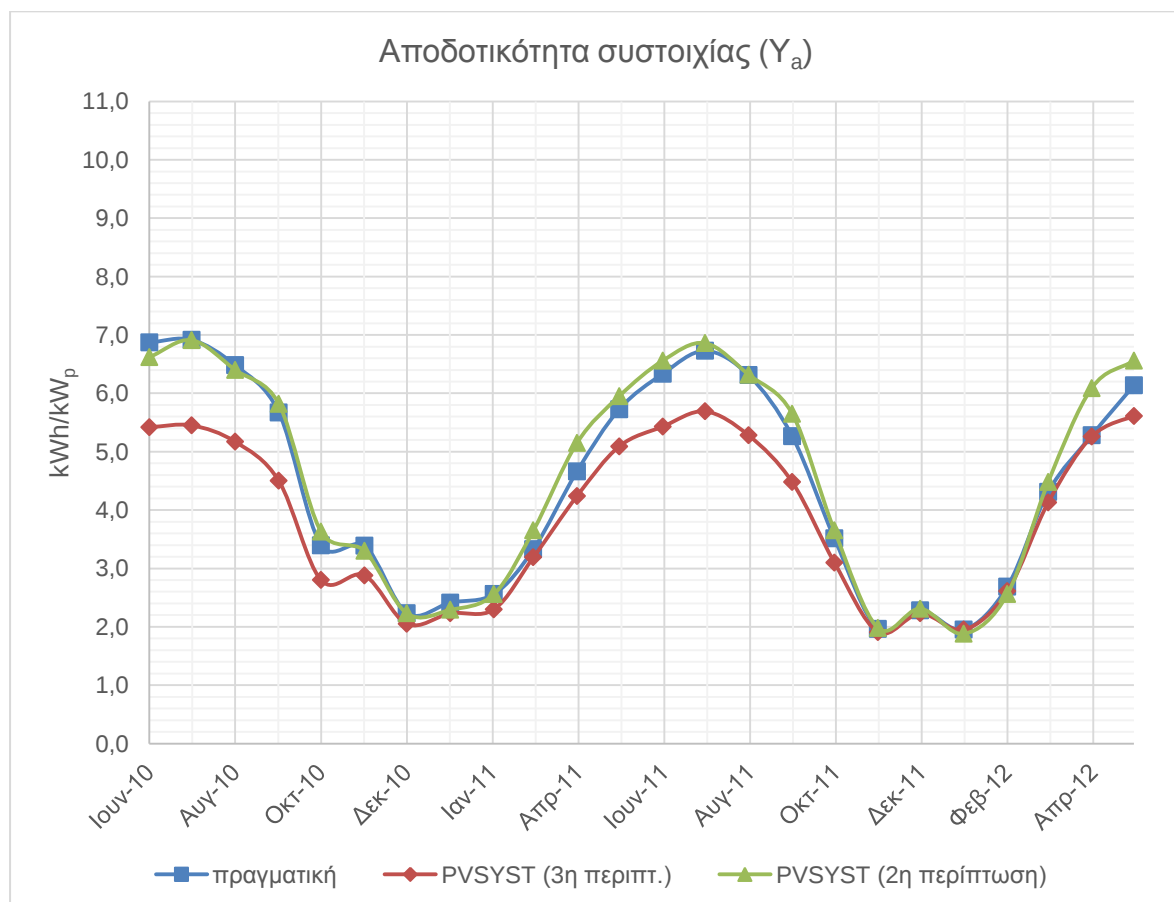


Διάγραμμα 21: Μέση ημερήσια απολαβή ηλιακής ενέργειας στο κεκλιμένο επίπεδο (σύγκριση)

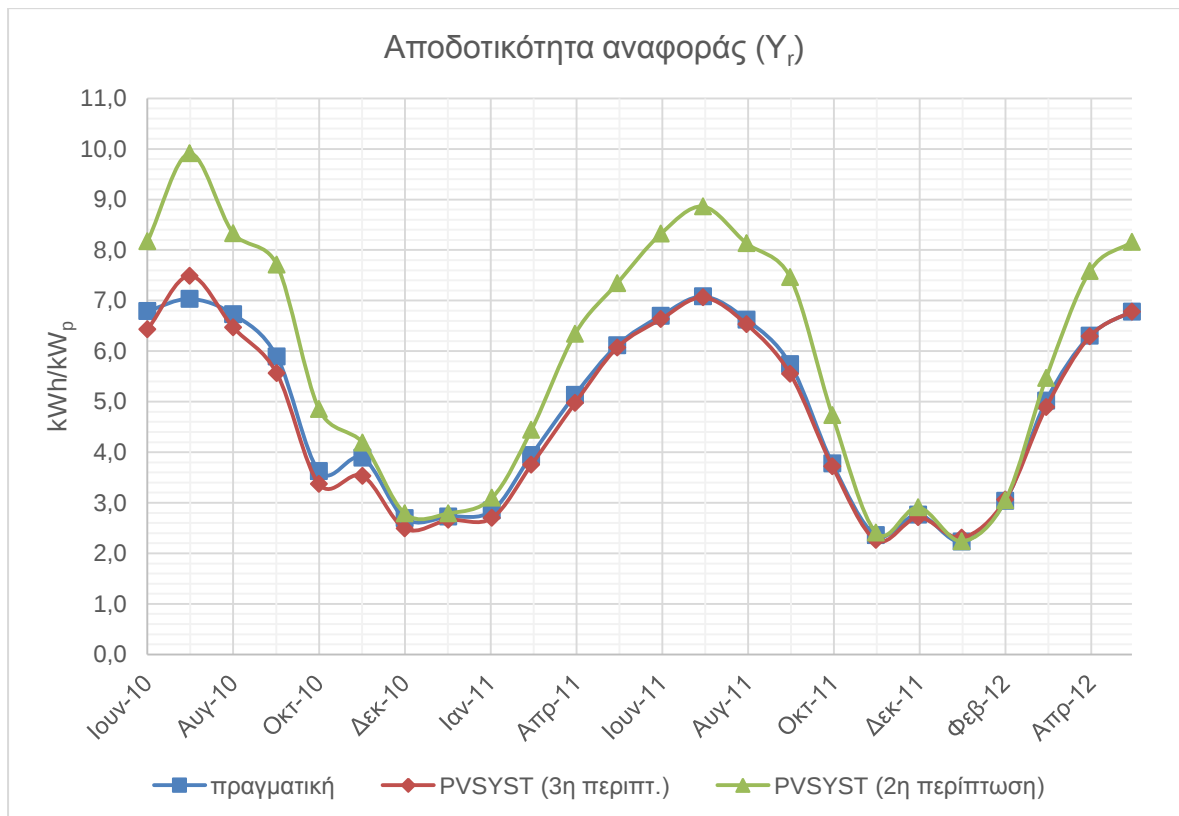
Με βάση τις καμπύλες στο διάγραμμα προκύπτει ότι το PVSYST (3^η περίπτωση, σωστή εισαγωγή δεδομένων) και το RETSCREEN υπολογίζουν σχεδόν άριστα την πρόσπτωση ηλιακής ενέργειας στο επίπεδο των ΦΒ συνθέτων – ή, τουλάχιστον, όμοια με τον αλγόριθμο των Liu και Jordan. Η αστοχία του PVGIS είναι δικαιολογημένη, εφόσον το συγκεκριμένο εργαλείο εξάγει αυτά τα αποτελέσματα από την on-line βάση δεδομένων που διαθέτει. Η αποτυχία σωστής αναγωγής για την 2^η περίπτωση εκτέλεσης του PVSYST προέρχεται όχι τόσο από τον εσφαλμένο προσανατολισμό (+50° αντί για -50°), αλλά από την απουσία επισήμανσης της αλλαγής θερινής-χειμερινής ώρας στο λογισμικό. Αυτό επιβεβαιώνει και η παρατήρηση του διαγράμματος 12 στο προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι, φαίνεται πως η λάθος χρονική σήμανση προκαλεί μεγάλες αποκλίσεις στον υπολογισμό της πρόσπτωσης ηλιακής ενέργειας στην επιφάνεια των ΦΒ, ενώ ο προσανατολισμός κάνει αυτήν την απόκλιση θετική για δυτικές τιμές του (-50°) και

αρνητική για ανατολικές τιμές ($+50^\circ$). Η πιθανότερη αιτία που προκαλεί την απόκλιση των αποτελεσμάτων του λογισμικού είναι η λάθος γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας για τη δεδομένη ώρα και πυκνότητα ισχύος στο οριζόντιο επίπεδο, λόγω του εσφαλμένου καθορισμού χρονικής σήμανσης. Επίσης, η διαφορά του φάσματος της ακτινοβολίας του ήλιου κατά την ανατολή και τη δύση πιθανώς συμβάλει στη θετική ή αρνητική απόκλιση των αποτελεσμάτων για διαφορετικούς προσανατολισμούς. Περαιτέρω διερεύνηση των αιτιών δεν έχει ιδιαίτερη σημασία σε αυτή την ούτως ή άλλως λάθος περίπτωση.

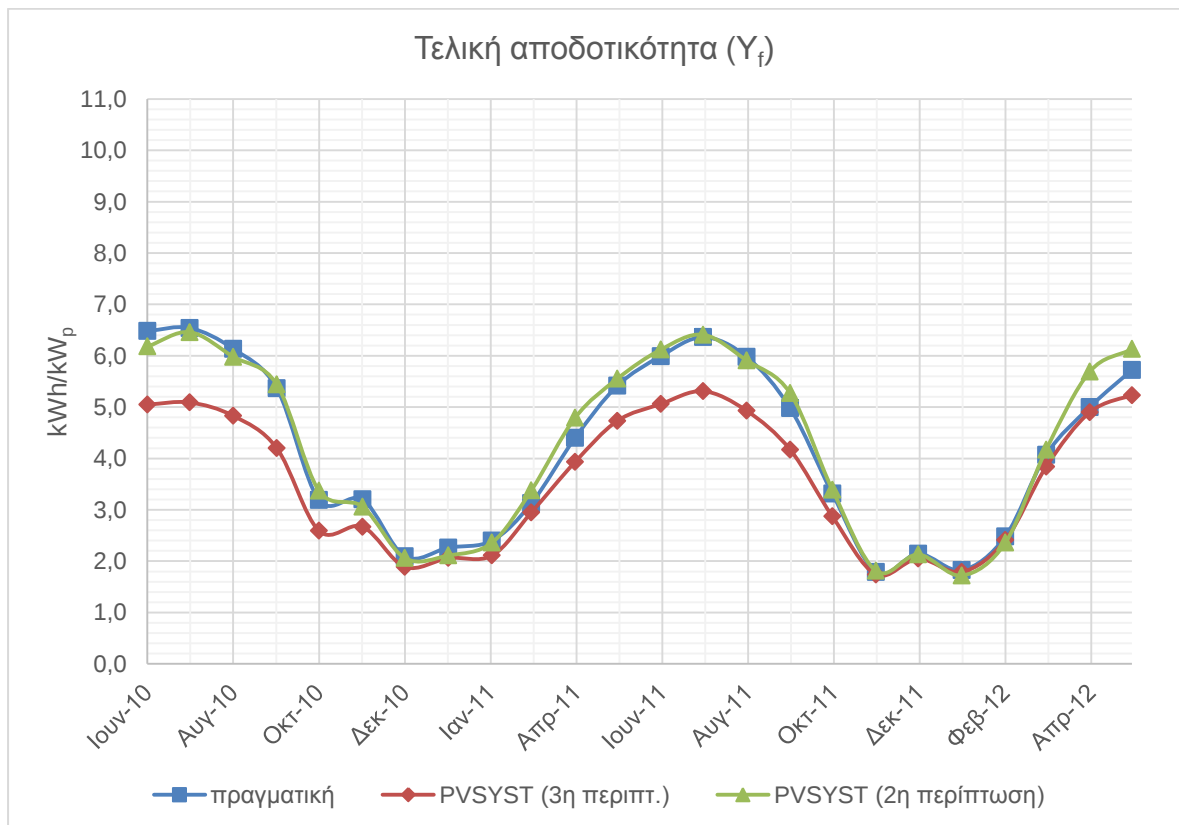
Τα διαγράμματα 22, 23 και 24 παρουσιάζουν τους δείκτες απόδοσης των ΦΒ με βάση τα αποτελέσματα του PVSYST και τους συγκρίνουν με τα πραγματικά. Υπενθυμίζεται ότι τα υπόλοιπα λογισμικά δεν υπολογίζουν αυτούς τους δείκτες.



Διάγραμμα 22: Αποδοτικότητα συστοιχίας (σύγκριση πραγματικής – PVSYST)



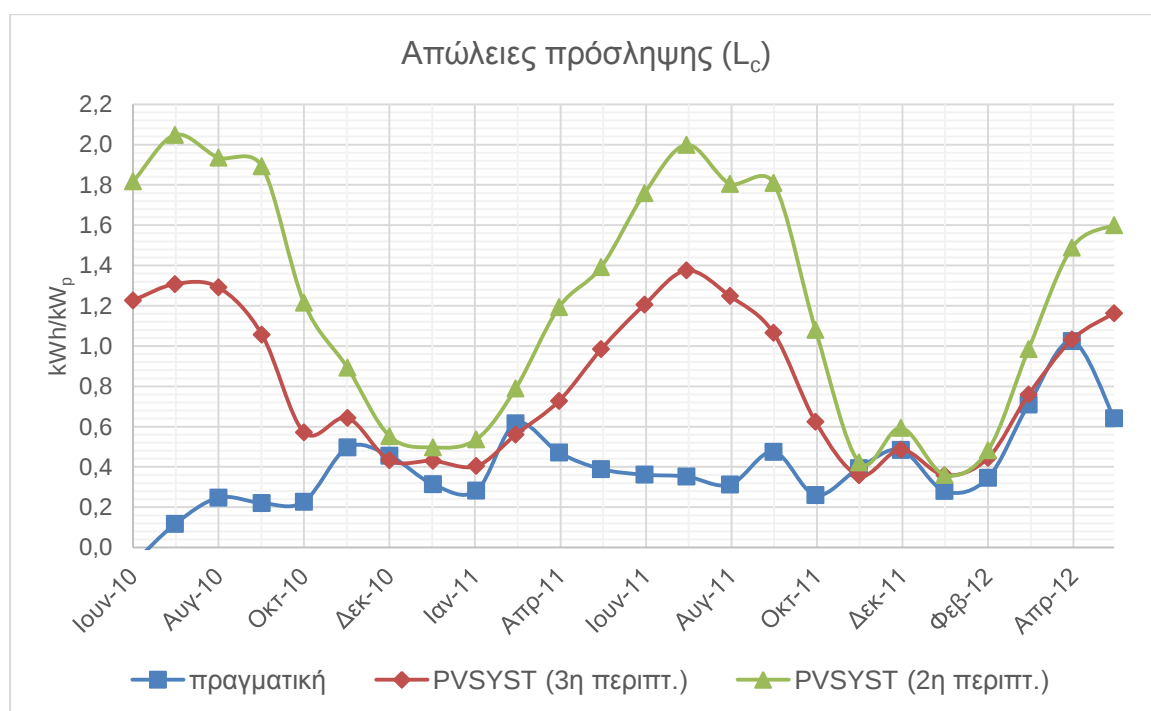
Διάγραμμα 23: Αποδοτικότητα αναφοράς (σύγκριση πραγματικής – PVSYST)



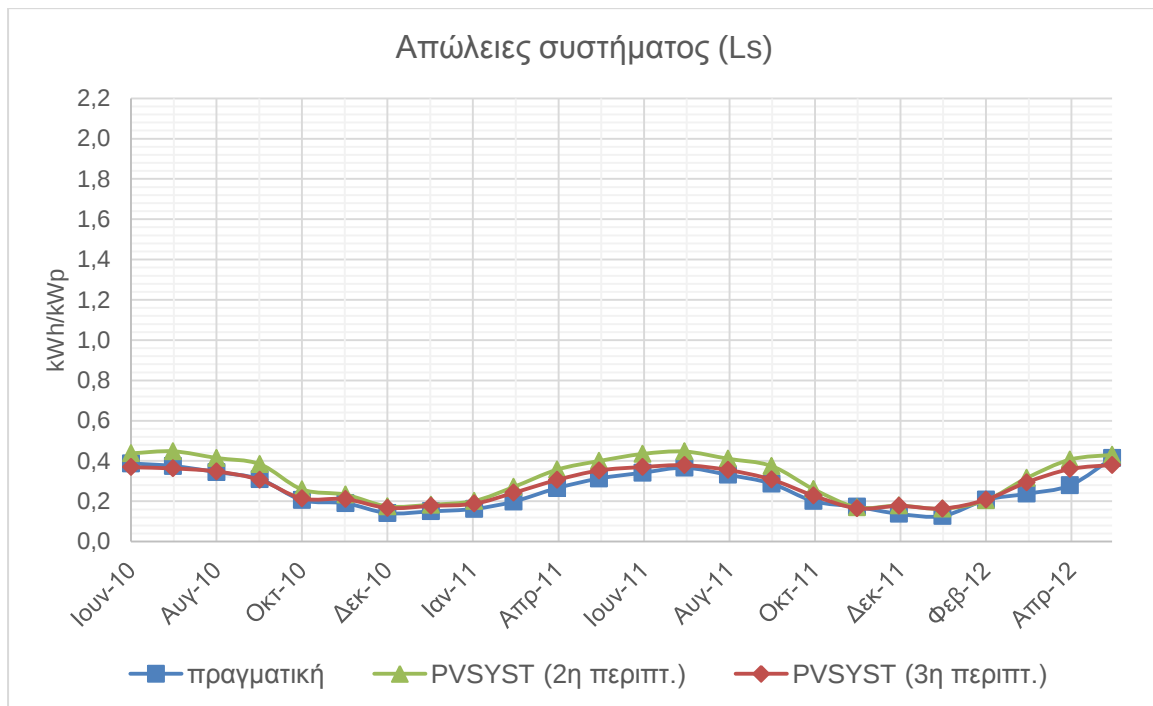
Διάγραμμα 24: Τελική αποδοτικότητα (σύγκριση πραγματικής – PVSYST)

Από τα παραπάνω διαγράμματα φαίνεται ότι τα αποτελέσματα του PVSYST για την 3^η περίπτωση (ορθή εισαγωγή) ταυτίζονται αρκετά με τα πειραματικά μόνο για την αποδοτικότητα αναφοράς, ενώ αντίθετα, τα αποτελέσματα της 2^{ης} περίπτωσης (λάθος προσανατολισμός και χρονική σήμανση) ταυτίζονται ικανοποιητικά με τα πειραματικά μόνο για την τελική αποδοτικότητα και την αποδοτικότητα συστοιχίας. Αυτό ταιριάζει εν μέρει με τις παρατηρήσεις στα προηγούμενα διαγράμματα: εφόσον η αναγωγή της ακτινοβολίας γίνεται σωστά για την 3^η περίπτωση ρυθμίσεων (διάγραμμα 21), τότε και η αποδοτικότητα αναφοράς που προκύπτει άμεσα από αυτή αναμένεται να είναι σωστή (διάγραμμα 23).

Τα διαγράμματα 25 και 26 παρουσιάζουν τις απώλειες πρόσληψης και συστήματος αντίστοιχα, όπως αυτές υπολογίστηκαν από το PVSYST και τις συγκρίνουν με τις υπολογισμένες από τα πειραματικά αποτελέσματα. Κανένα άλλο από τα λογισμικά που εξετάστηκαν δεν δίνει επιλογή υπολογισμού αυτών των απωλειών.



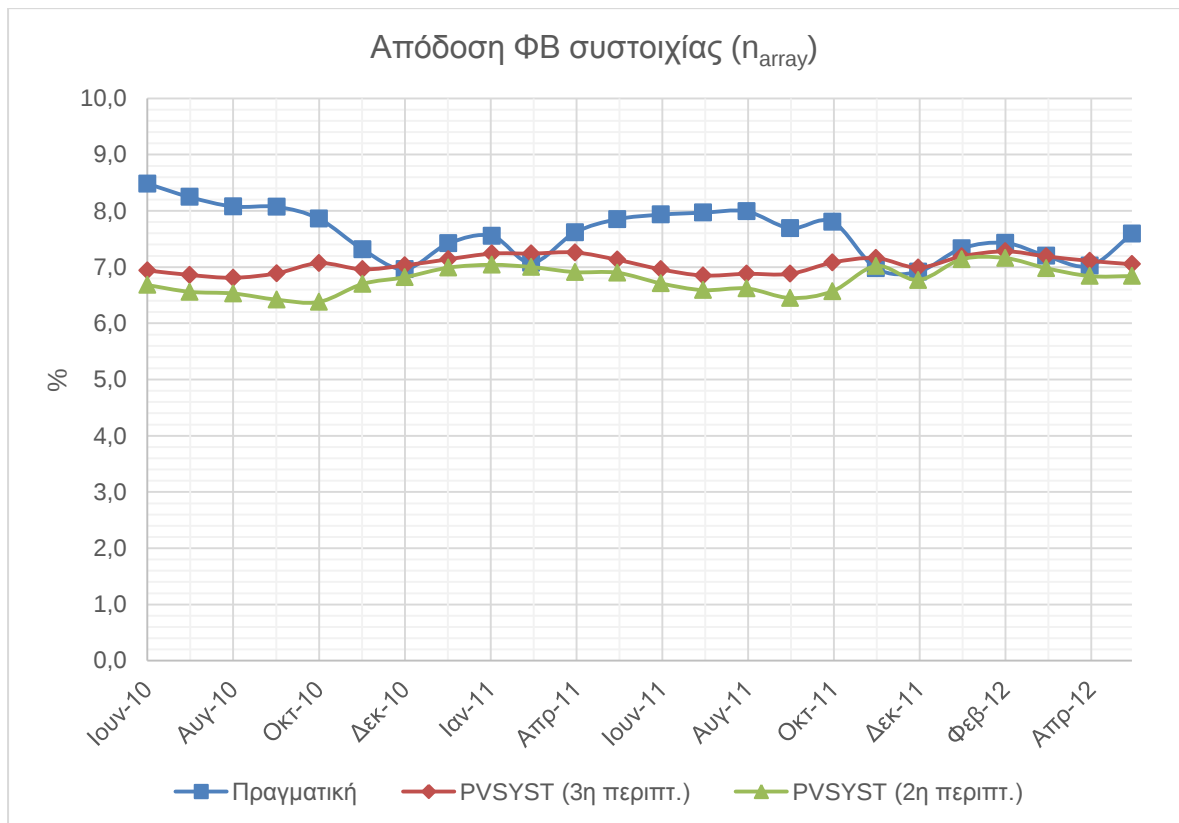
Διάγραμμα 25: Απώλειες πρόσληψης (σύγκριση πραγματικών – PVSYST)



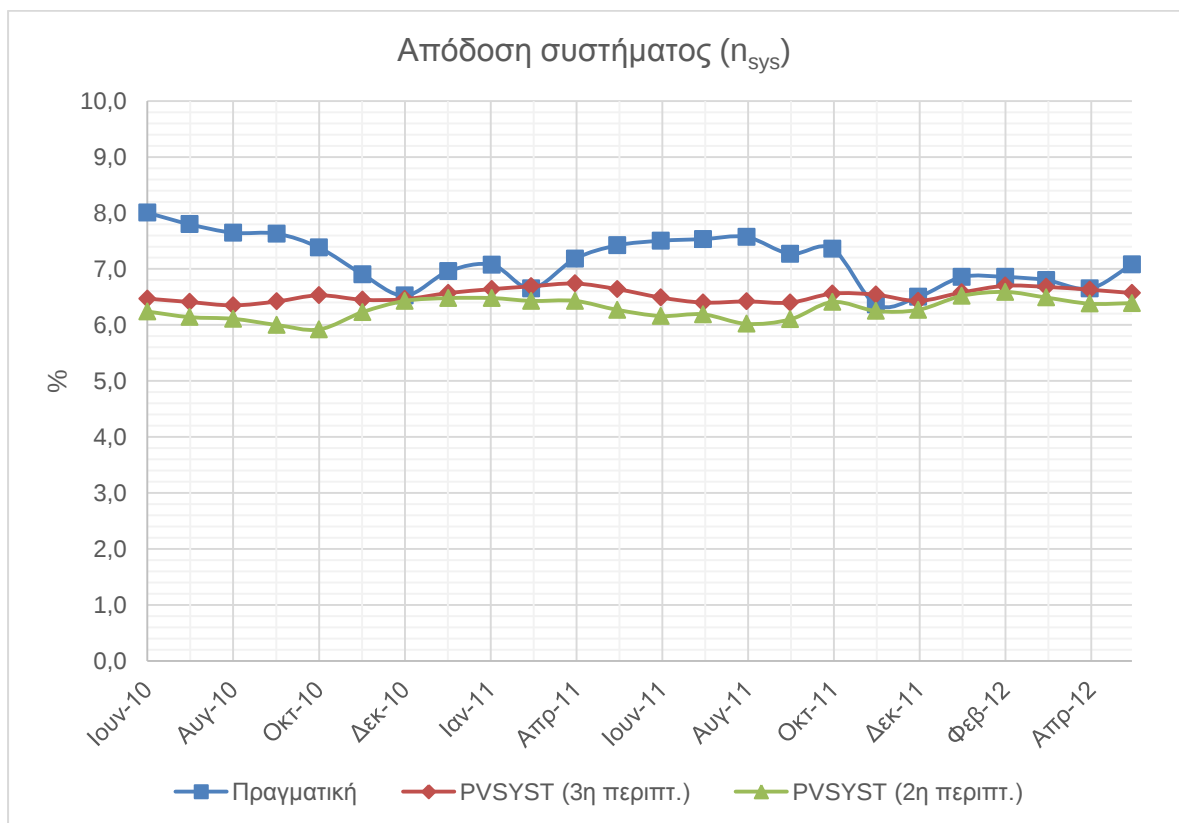
Διάγραμμα 26: Απώλειες συστήματος (σύγκριση πραγματικών – PVSYST)

Οι απώλειες πρόσληψης και συστήματος είναι δείκτες που προκύπτουν από τις σχέσεις των παραγράφων 3.4.5 και 3.4.6. Οι υπολογισμένες από το λογισμικό απώλειες πρόσληψης δεν ταυτίζονται με τις πειραματικά υπολογισμένες σε καμία περίπτωση επειδή περιλαμβάνουν διαφορές μεταξύ αποδόσεων που ήταν σωστές σε διαφορετικές περιπτώσεις. Αντίθετα, οι απώλειες συστήματος εμφανίζονται εύστοχα υπολογισμένες στην 3^η περίπτωση αφού η τελική αποδοτικότητα και η αποδοτικότητα συστοιχίας είχαν προηγουμένως υπολογιστεί σωστά για την ίδια περίπτωση. Κοντινές εμφανίζονται και για τη 2^η περίπτωση εφόσον υπάρχει συμφωνία μεταξύ τους για αυτές τις αποδόσεις στην ίδια περίπτωση.

Τα διαγράμματα 27 και 28 παρουσιάζουν την αποδοτικότητα της συστοιχίας και του συστήματος αντίστοιχα, όπως προέκυψαν από το PVSYST και την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων. Αυτοί είναι άλλοι δύο δείκτες τους οποίους δεν υπολογίζουν τα υπόλοιπα λογισμικά.



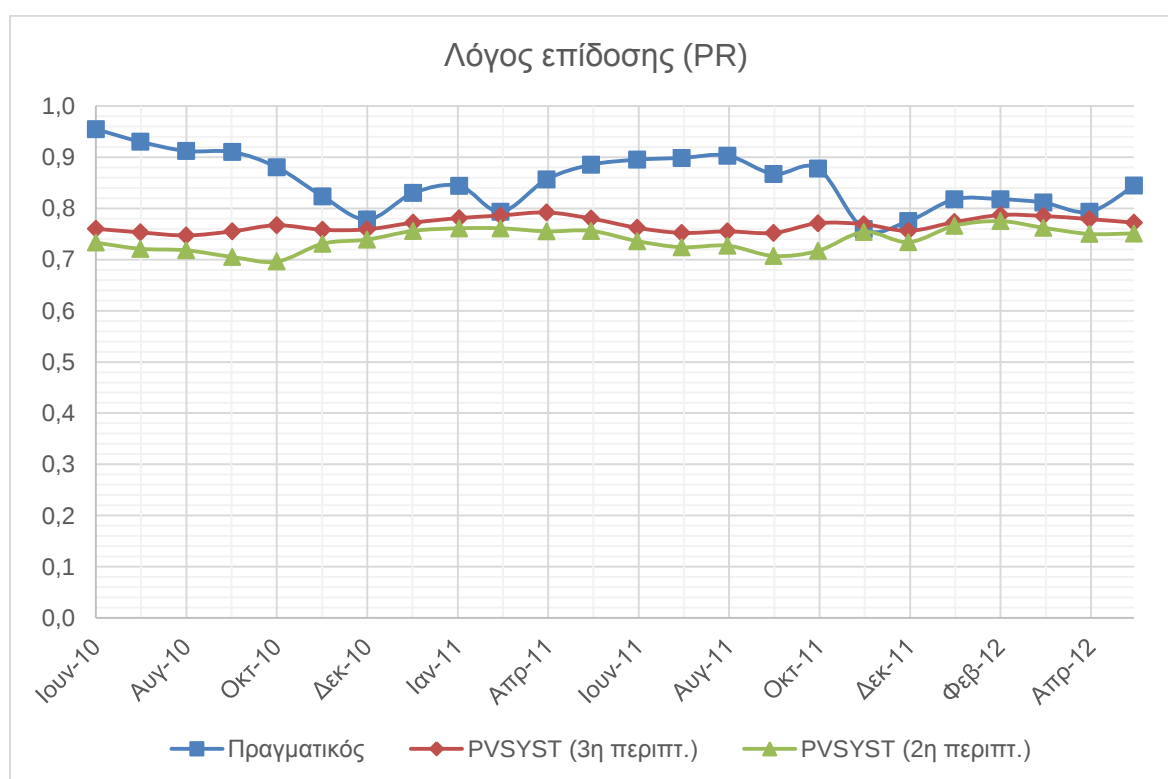
Διάγραμμα 27: Απόδοση ΦΒ συστοιχίας (σύγκριση πραγματικών – PVSYST)



Διάγραμμα 28: Απόδοση συστήματος (σύγκριση πραγματικών – PVSYST)

Η κακή ταύτιση αμφοτέρων προβλέψεων του λογισμικού με τα πραγματικά αποτελέσματα οφείλεται και πάλι στον συνδυασμό ασυμφωνιών των αποτελεσμάτων του για τις βασικές παραμέτρους (αποδιδόμενη ενέργεια από τα ΦΒ και πρόσπτωση ηλιακής ενέργειας στην επιφάνειά τους).

Η τελευταία παράμετρος λειτουργίας που υπολογίστηκε μόνο από το PVSYST και τα πειραματικά δεδομένα είναι ο λόγος επίδοσης των ΦΒ και παρουσιάζεται στο διάγραμμα 29.

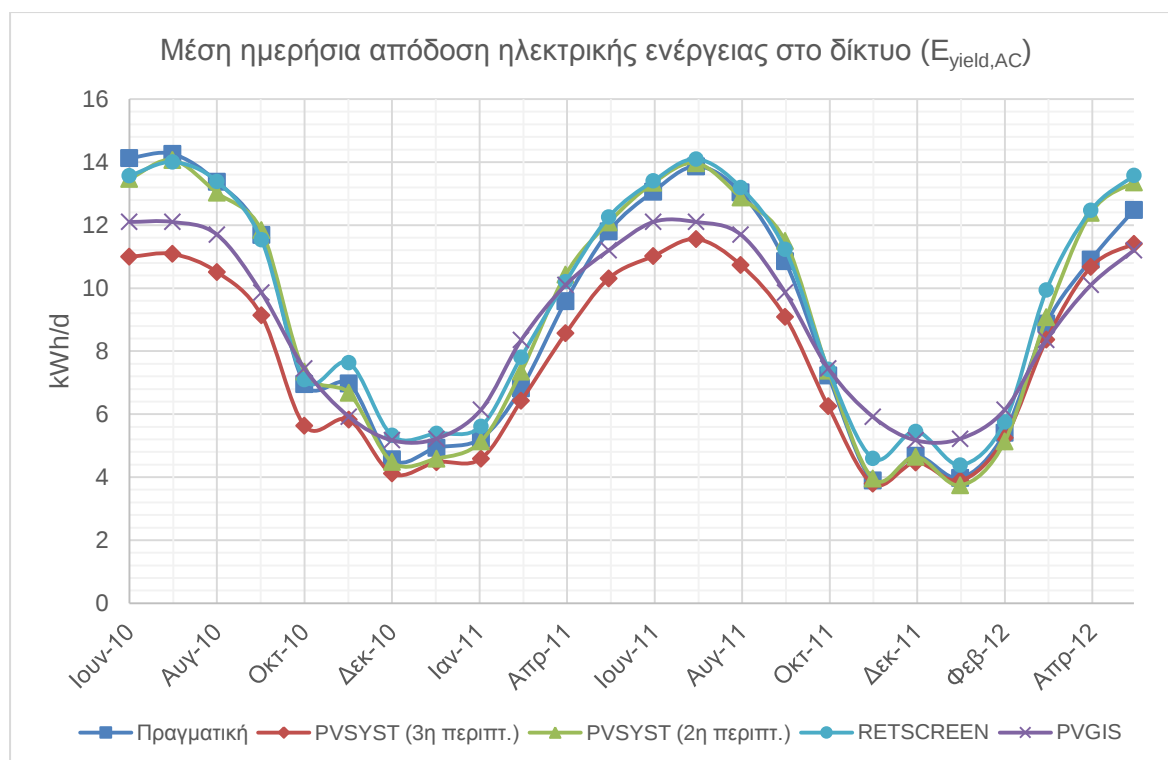


Διάγραμμα 29: Λόγος επίδοσης (σύγκριση πραγματικών – PVSYST)

Οι λόγοι της κακής ταύτισης των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα πραγματικά έχουν αναφερθεί προηγουμένως. Οι αρχικά υψηλές τιμές του πραγματικού λόγου επίδοσης πιθανώς οφείλονται στην υψηλότερη απόδοση των ΦΒ άμορφου πυριτίου κατά το πρώτο διάστημα λειτουργίας τους.

Τέλος, γίνεται σύγκριση της σημαντικότερης παραμέτρου λειτουργίας των ΦΒ που υπολογίστηκε από όλα τα λογισμικά. Πρόκειται για τη μέση ημερήσια απόδοση

ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος στο δίκτυο για κάθε μήνα. Η γραφική παρουσίασή της γίνεται στο διάγραμμα 30.



Διάγραμμα 30: Μέση ημερήσια απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο (πειραματικά και όλα τα λογισμικά)

Από το τελευταίο διάγραμμα είναι εμφανής η εύστοχη πρόβλεψη της αποδιδόμενης ενέργειας στο δίκτυο από το λογισμικό PVSYST (2^η περίπτωση) και το RETSCREEN. Το PVGIS φαίνεται να αποκλίνει αρκετά, αλλά όχι συστηματικά, έτσι, υποεκτιμά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το καλοκαίρι και την υπερεκτιμά το χειμώνα. Τονίζεται ότι το PVGIS δίνει μια πολύ πρόχειρη εκτίμηση για ΦΒ πυριτίου και δε δέχεται καμία είσοδο δεδομένων πέραν από την τοποθεσία, οπότε η σύγκρισή του με τα άλλα λογισμικά είναι άνιση. Τέλος, η 3^η περίπτωση εκτέλεσης του PVSYST, που είναι η θεωρητικά σωστή, αποτυγχάνει, λόγω της υποεκτίμησης της παραγόμενης ενέργειας από τον αλγόριθμο του λογισμικού.

5.3. Σφάλματα και αποκλίσεις

Όπως έχει αναφερθεί, κάποιο σφάλμα προκαλεί μη αναμενόμενα αποτελέσματα στην προσομοίωση λειτουργίας της ΦΒ διάταξης από το PVSYST. Για αυτό το λόγο πραγματοποιήθηκε έλεγχος τεσσάρων περιπτώσεων ρυθμίσεων του λογισμικού και στη συνέχεια λεπτομερέστερη εξέταση δύο εξ αυτών: (1) θεωρητικά σωστή ρύθμιση (3^η περίπτωση) και (2) ρύθμιση με τα καλύτερα αποτελέσματα (2^η περίπτωση – λάθος προσανατολισμός και απουσία επισημάνσης αλλαγής ώρας).

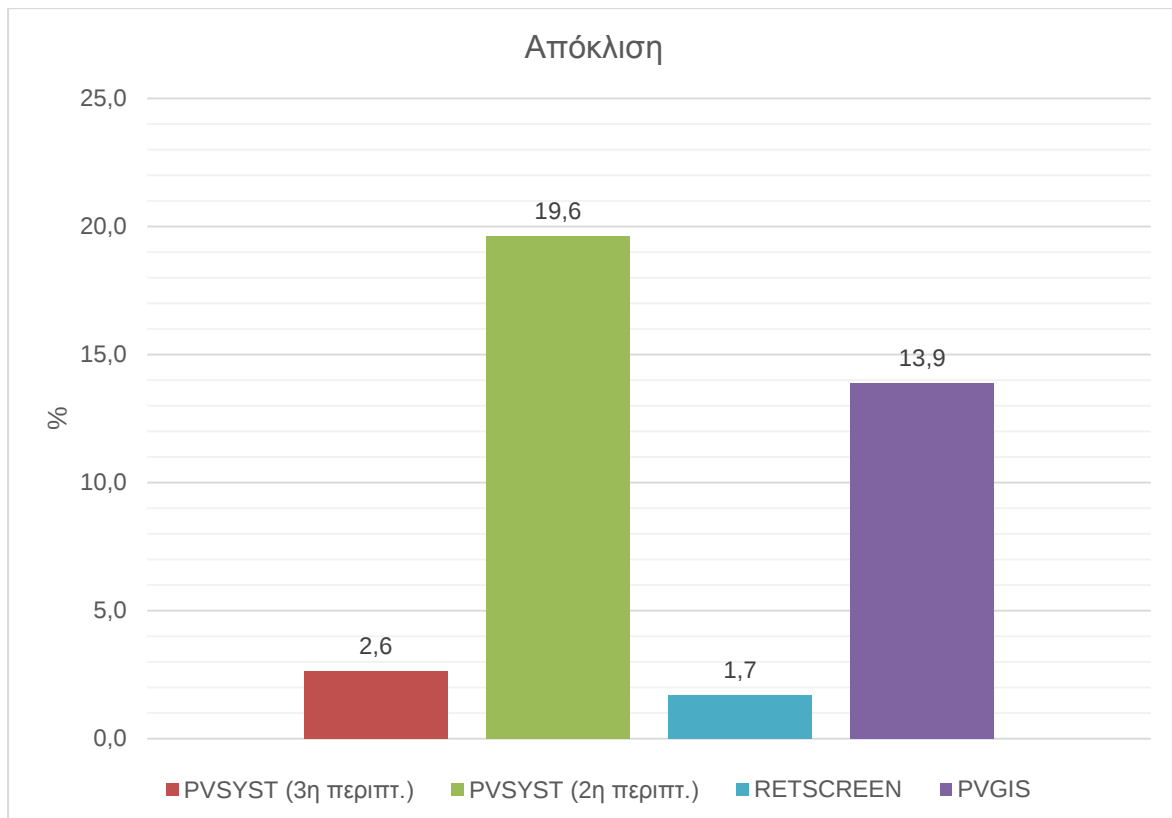
Παρακάτω εξετάζονται οι ποσοστιαίες αποκλίσεις των αποτελεσμάτων των λογισμικών επί των πραγματικών δεδομένων.

Επειδή δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα για την πυκνότητα ισχύος ή την απολαβή ηλιακής ενέργειας στο επίπεδο των ΦΒ συνθέτων, η σύγκριση και η εύρεση της ποσοστιαίας απόκλισης γίνεται με βάση τα αποτελέσματα του αλγορίθμου των Liu και Jordan. Η απόκλιση υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{απόκλιση}(\%) = \frac{|\sum_{I_{\text{ουν}}-10}^{M_{\text{αϊ}}-12} H_{t,Liu\&Jordan} - \sum_{I_{\text{ουν}}-10}^{M_{\text{αϊ}}-12} H_{t,λογισμικό}|}{\sum_{I_{\text{ουν}}-10}^{M_{\text{αϊ}}-12} H_{t,Liu\&Jordan}} 100\%$$

και παρουσιάζεται στο διάγραμμα 31, σε συνέχεια του διαγράμματος 21 της προηγούμενης παραγράφου.

Παρατηρείται καλύτερη ταύτιση αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα του αλγόριθμου Liu & Jordan από το λογισμικό RETSCREEN. Αμέσως μετά έρχεται η 3^η περίπτωση ρυθμίσεων του PVSYST (σωστή εισαγωγή δεδομένων), στη συνέχεια και με διαφορά τα αποτελέσματα του PVGIS το οποίο όμως αναφέρει από τη δική του βάση δεδομένων και τέλος, με μεγάλη απόκλιση, η 2^η περίπτωση ρυθμίσεων του PVSYST.



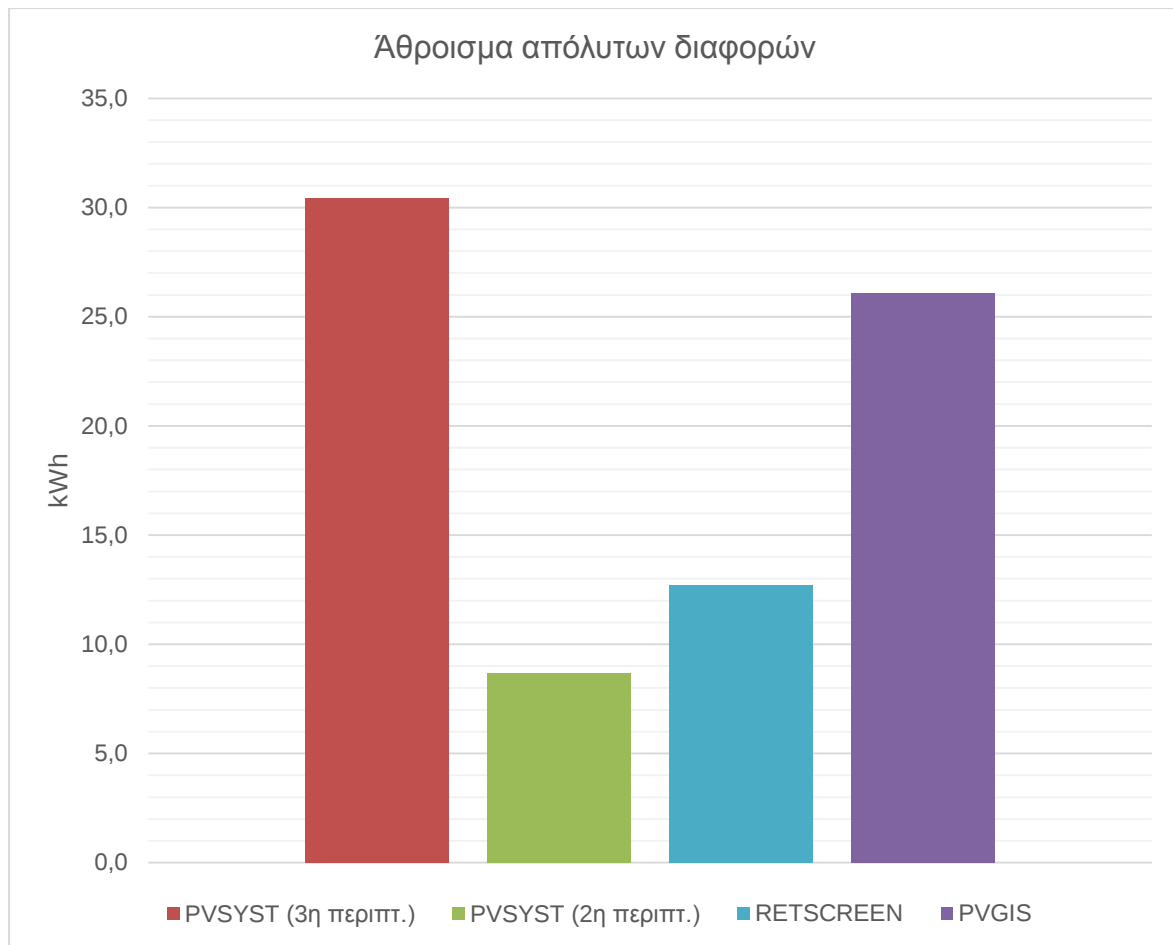
Διάγραμμα 31: Ποσοστιαία απόκλιση των αποτελεσμάτων αναγωγής ακτινοβολίας από τα λογισμικά σε σχέση με τα αποτελέσματα του αλγόριθμου των Liu και Jordan.

Η σημαντικότερη σύγκριση σε αυτή τη διπλωματική εργασία αφορά τα τελικά αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και των προσομοιώσεων των λογισμικών, δηλαδή της ενεργειακής απόδοσης της διάταξης (διάγραμμα 30).

Αρχικά, εξετάζεται το άθροισμα των απόλυτων διαφορών των αποτελεσμάτων των λογισμικών από τα πειραματικά δεδομένα. Για την ακρίβεια χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$|διαφορά| = \sum_{Ιουν-10}^{Μαϊ-12} |E_{yield,AC,πειραματικό} - E_{yield,AC,λογισμικό}|$$

Επισημαίνεται ότι αυτό δεν είναι το απόλυτο σφάλμα, αλλά μια διαφορά που αθροίζει επιμέρους σφάλματα ανεξαρτήτως πρόσημου. Οι τιμές που προκύπτουν παρουσιάζονται στο διάγραμμα 32, ενώ η αξία υπολογισμού αυτού του δείκτη θα επισημανθεί στη συνέχεια.



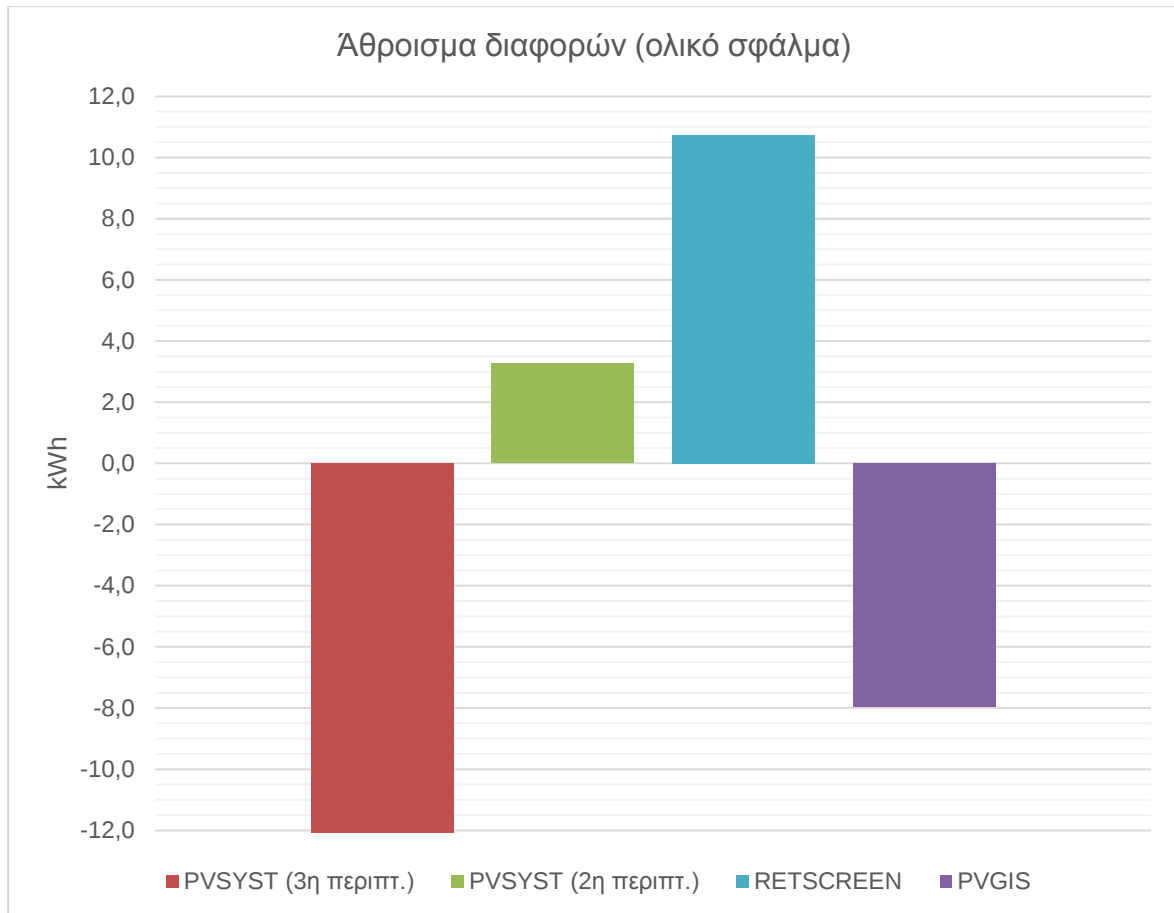
Διάγραμμα 32: Άθροισμα απόλυτων μηνιαίων διαφορών

Στη συνέχεια, γίνεται υπολογισμός του αθροίσματος των μηνιαίων διαφορών (ολικό σφάλμα) των αποτελεσμάτων των λογισμικών από τα πειραματικά. Εδώ το πρόσημο δεν παραλείπεται. Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στο διάγραμμα 33. Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι η:

$$\sigma\phi\acute{\alpha}\lambda\mu\alpha = \sum_{\text{Ιουν}-10}^{\text{Μαΐ}-12} (E_{\text{yield},AC,\text{πειραματικό}} - E_{\text{yield},AC,\text{λογισμικό}})$$

ή

$$\sigma\phi\acute{\alpha}\lambda\mu\alpha = \sum_{\text{Ιουν}-10}^{\text{Μαΐ}-12} E_{\text{yield},AC,\text{πειραματικό}} - \sum_{\text{Ιουν}-10}^{\text{Μαΐ}-12} E_{\text{yield},AC,\text{λογισμικό}}$$

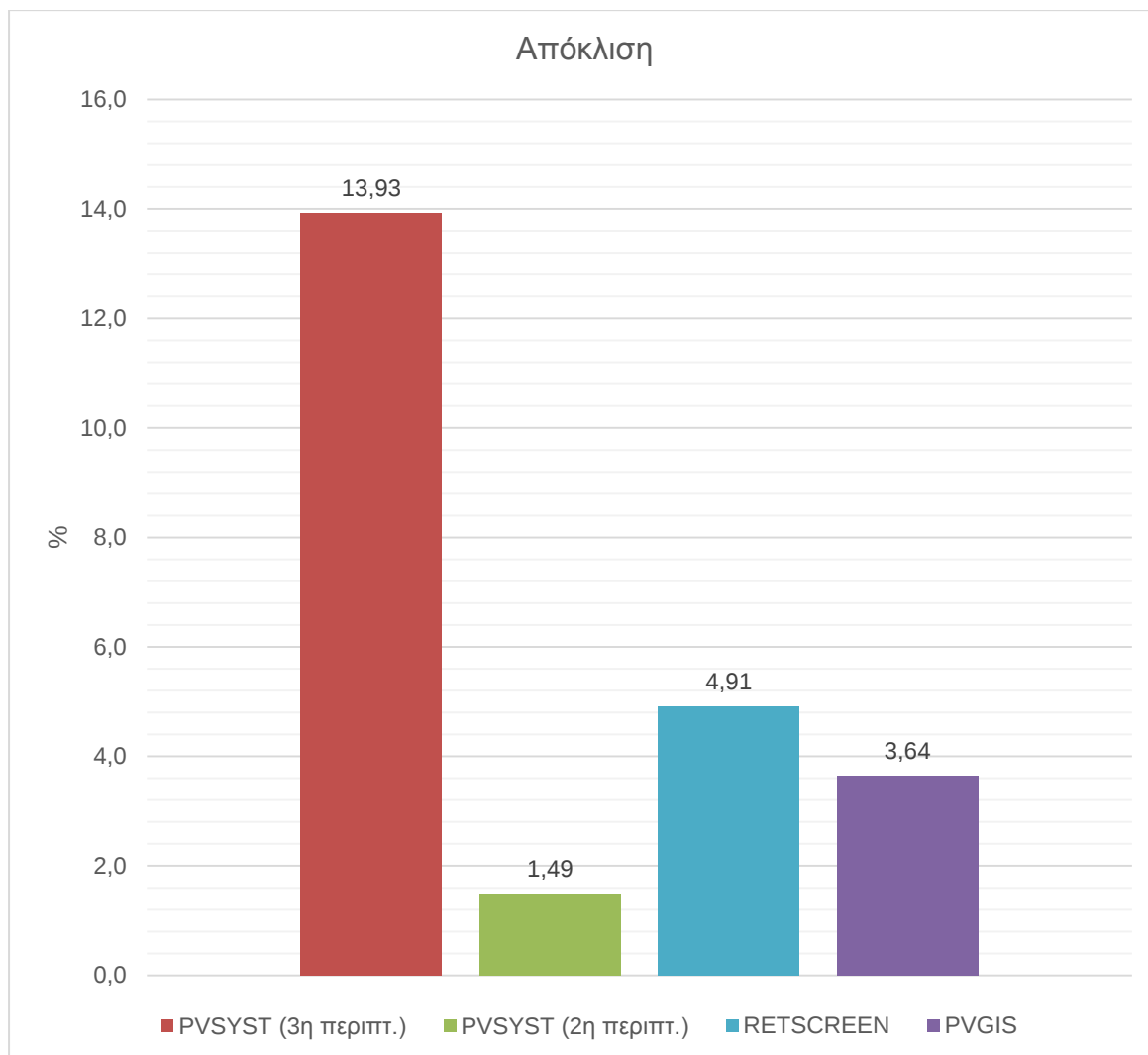


Διάγραμμα 33: Ολικό σφάλμα των προσομοιώσεων για τη διάρκεια δύο ετών

Τέλος, υπολογίζεται η ποσοστιαία απόκλιση των αποτελεσμάτων από τα λογισμικά επί των πραγματικών αποτελεσμάτων. Η σχέση που χρησιμοποιείται αναγράφεται παρακάτω:

$$\text{απόκλιση (\%)} = \frac{\sum_{\text{Ιουν}-10}^{\text{Μαϊ}-12} E_{\text{yield,AC,πειραματικό}} - \sum_{\text{Ιουν}-10}^{\text{Μαϊ}-12} E_{\text{yield,AC,λογισμικό}}}{\sum_{\text{Ιουν}-10}^{\text{Μαϊ}-12} E_{\text{yield,AC,πειραματικό}}} 100\%$$

και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα 34.



Διάγραμμα 34: Ποσοστιαία απόκλιση αποτελεσμάτων προσομοίωσης από πειραματικά αποτελέσματα

Με βάση το ποσοστό απόκλισης από τα πραγματικά δεδομένα, είναι σαφές ότι το PVSYST για τη 2^η περίπτωση κάνει την καλύτερη συνολική πρόβλεψη για τη λειτουργία των ΦΒ στο εξεταζόμενο χρονικό διάστημα δύο ετών (1,49% απόκλιση). Αυτή η πρόβλεψη, όμως, είναι μάλλον τυχαία σωστή εφόσον βασίζεται σε λάθος υπολογισμένα δεδομένα πρόσπτωσης ηλιακής ενέργειας στην επιφάνεια των ΦΒ (απόκλιση 19,6% από τον αλγόριθμο Liu και Jordan). Αντίθετα, η 3^η περίπτωση ρυθμίσεων του προγράμματος που είναι θεωρητικά σωστή, αποκλίνει κατά 13,93% από τα πειραματικά αποτελέσματα ενώ προβλέπει καλά την πρόσπτωση ηλιακής ενέργειας στα ΦΒ (απόκλιση 2,6%).

Επόμενη παρατήρηση που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και δικαιολογεί τον υπολογισμό των προηγούμενων διαφορών και αποκλίσεων αφορά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του RETSCREEN και του PVGIS. Εξετάζοντας το διάγραμμα 30 εύκολα καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι το RETSCREEN προσομοιώνει τη λειτουργία των ΦΒ πολύ καλύτερα από το PVGIS. Όμως, τα συνολικά αποτελέσματα διαψεύδουν αυτήν την παρατήρηση. Το άθροισμα των απόλυτων διαφορών (διάγραμμα 32), δηλαδή, η πρόσθεση κάθε μηνιαίου σφάλματος ανεξαρτήτως πρόσημου, είναι μικρότερο για το RETSCREEN από ότι για το PVGIS. Αυτό δηλώνει μια τάση του RETSCREEN να είναι κάθε μήνα πιο κοντά στα πραγματικά αποτελέσματα από ότι το PVGIS. Ωστόσο, το ολικό σφάλμα του PVGIS είναι μικρότερο (διάγραμμα 33). Αυτό σημαίνει πως, ενώ το PVGIS απόκλινε σημαντικά κάθε μήνα, τελικά υπολόγισε με μεγαλύτερη ακρίβεια την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επειδή την υπερεκτιμούσε και υποεκτιμούσε με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρεί τον ετήσιο μέσο όρο ίδιο με τον πειραματικά μετρημένο. Αντίθετα, το RETSCREEN, ενώ κάθε μήνα προέβλεπε πιο σωστά την ηλεκτρική παραγωγή, απέκλινε πάντα θετικά καθ' όλη τη διάρκεια του έτους με αποτέλεσμα το αθροιστικό σφάλμα να είναι μεγαλύτερο. Η θετική αυτή απόκλιση μπορεί και πάλι να δικαιολογηθεί από τον καθορισμό διαφορετικού μοντέλου ΦΒ στο λογισμικό, το οποίο είχε μεγαλύτερη απόδοση (9,3% έναντι 8,5% του χρησιμοποιούμενου στη διάταξη). Επομένως, το RETSCREEN θα είχε πιθανόν άριστα αποτελέσματα εάν μπορούσε να καθοριστεί σε αυτό το σωστό ΦΒ μοντέλο.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1. Κύρια ευρήματα

Αξιοσημείωτο εύρημα είναι η αποτυχία του λογισμικού PVSYST στην πρόβλεψη των αποτελεσμάτων, όταν γίνεται σωστή παραμετροποίηση των ρυθμίσεων του (3^η περίπτωση). Συγκρίνοντας με τις υπόλοιπες περιπτώσεις εισαγωγής δεδομένων σε αυτό, το μόνο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί το λογισμικό αποτυγχάνει, υποτιμώντας την ενεργειακή παραγωγή των ΦΒ. Ωστόσο, δεν μπορούν να εξαχθούν γενικά συμπεράσματα για τις δυνατότητες του λογισμικού καθώς ο έλεγχος που πραγματοποιήθηκε αφορά μόνο μία διάταξη από τους ατελείωτους συνδυασμούς εξοπλισμών που μπορούν να καθοριστούν. Έτσι, αυτή η αποτυχία είναι πιθανώς τοπική.

Το RETSCREEN προσομοιώνει αρκετά καλά τόσο την πρόσπτωση ηλιακής ενέργειας στην επιφάνεια των ΦΒ όσο και την ενεργειακή παραγωγή τους. Έχει λιγότερες δυνατότητες παραμετροποίησης της εξεταζόμενης ΦΒ εγκατάστασης από ότι το PVSYST και η εισαγωγή των δεδομένων σε αυτό γίνεται λιγότερο αναλυτικά. Ωστόσο, απαιτεί πολύ λιγότερο χρόνο για την εκμάθηση και την εκτέλεσή του, υπό την προϋπόθεση ότι τα δεδομένα που εισάγονται σε αυτό είναι ήδη στη σωστή μορφή.

Το εργαλείο PVGIS δίνει μια πολύ καλή πρόβλεψη για τη συνολική ετήσια ενεργειακή παραγωγή των ΦΒ. Δεν προβλέπει όμως τοπικά το ίδιο καλά την ενεργειακή απόδοση για κάθε μήνα, υποτιμώντας τους καλοκαιρινούς και υπερεκτιμώντας τους χειμερινούς. Είναι σίγουρα ένα εργαλείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα και γρήγορα για την προκαταρκτική μελέτη ΦΒ

εγκαταστάσεων, αλλά από μόνο του δεν αρκεί λόγω των περιορισμών του και των λίγων επιλογών παραμετροποίησης.

Μια τελευταία διαπίστωση, που φυσικά δεν αφορά μόνο τον τομέα αυτής της εργασίας, είναι η απαραίτητη κριτική αξιολόγηση και διασταύρωση από τον άνθρωπο όλων των αποτελεσμάτων και προγνώσεων που προκύπτουν από λογισμικά ή άλλες αυτοματοποιημένες υπολογιστικές διαδικασίες.

6.2. Αξιολόγηση μεθοδολογίας

6.2.1. Επισκόπηση διαδικασίας και παραμέτρων που συγκρίνονται

Όπως έχει γίνει σαφές, για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο καθώς και άλλων μετεωρολογικών παραμέτρων. Επίσης, διαθέσιμα ήταν τα αποτελέσματα από τη λειτουργία της ΦΒ διάταξης για δύο χρόνια, στα οποία στη συνέχεια έγινε επεξεργασία ώστε να εξαχθούν οι δείκτες περιγραφής της λειτουργίας των ΦΒ. Τα μετεωρολογικά δεδομένα ακτινοβολίας και θερμοκρασίας εισήχθησαν σε ειδικά λογισμικά προκειμένου να γίνει προσομοίωση της διάταξης και να εξαχθούν, ως πρόβλεψη, οι δείκτες περιγραφής της λειτουργίας των ΦΒ. Κατόπιν, έγινε σύγκριση των πραγματικών αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα προσομοίωσης από τα λογισμικά.

Επειδή τα λογισμικά που συγκρίνονται είναι αρκετά διαφορετικά μεταξύ τους, ο εποπτικός πίνακας 15 βοηθά στην παρουσίαση των παραμέτρων που εισήχθησαν σε κάθε λογισμικό ώστε να γίνει πιο κατανοητή η διαδικασία της σύγκρισης αλλά και να τονιστούν οι αδυναμίες της. Οι υποσημειώσεις που ακολουθούν συμπληρώνουν τις πληροφορίες του πίνακα.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ			ΑΠΟΤΕΛΟΥΝ ΕΙΣΟΔΟ / ΕΞΟΔΟ			
Παράμετρος	Σύμβολο	Μονάδα	ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ	PVSYST	RETSCREEN	PVGIS
πυκνότητα ισχύος ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο	E ή G _h	W/m ²	ναι	ναι	ναι (5)	
θερμοκρασία περιβάλλοντος	T	°C	ναι (1)	ναι		
γεωγραφική θέση	Lat & Lon	°	ναι (1)	ναι	ναι	ναι (7)
υψόμετρο	Alt	m	ναι (1)	ναι	ναι	
τοποθέτηση	σε οριζόντια στέγη		ναι (1)	ναι	ναι	
προσανατολισμός (αζιμούθιο)	γ	°	ναι	ναι	ναι	ναι
κλίση	s	°	ναι	ναι	ναι	ναι
ανακλαστικότητα εδάφους (albedo)	ρ	αδιάστατο	ναι (1)	ναι		
ορίζοντας	διάγραμμα 1		ναι (1)	ναι		
γεωμετρικά χαρακτηριστικά	εικόνα 5		ναι (1)	ναι		
τύπος ΦΒ	άμμορφου πυριτίου λεπτού φιλμ (uCSi-aSi)		ναι (1)	ναι	ναι	ναι (8)
μοντέλο ΦΒ	Sharp NA-F121G5		ναι (1)	ναι	ναι (6)	
μοντέλο αντιστροφέα	Sunnyboy SB2500		ναι (1)	ναι	ναι (6)	
τύπος δικτύου	διασυνδεδεμένο		ναι (1)	ναι	ναι	
συνδεσμολογία	2 κλάδοι x 9 ΦΒ σύνθετα		ναι (1)	ναι		
ικανότητα συστήματος	P	kWp	ναι	ναι	ναι	
ονομαστική θερμ. λειτουργίας κυψελ.	NOCT	°C	ναι (1)	ναι (3)	ναι (3)	
συντελεστές απωλειών	-			ναι (4)	ναι (4)	ναι (4)
Μέθοδος υπολογισμού >>			Klein με βάση Liu & Jordan	Hay model	Duffie και Beckman με τροποπ.	r.sun και άλλα
πυκνότητα ενέργειας ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του συλλέκτη	H _t	Wh/m ² /d	ναι			
		KJ/m ² /d	ναι			
		kWh/m ² /d			ναι	ναι
		kWh/m ² /mo		ναι		ναι
ημερήσια απόδοση συνεχούς ρεύματος	E _{y,DC}	kWh/d	ναι	ναι		
ημερήσια απόδοση εναλλασσόμενου ρεύματος	E _{y,AC}	kWh/d	ναι	ναι	ναι	ναι
αποδοτικότητα συστοιχίας	γ _a	kWh/kW _p /d ή h/d	ναι	ναι		
τελική αποδοτικότητα	γ _f	kWh/kW _p /d ή h/d	ναι	ναι		
αποδοτικότητα αναφοράς	γ _r	kWh/kW/d ή h/d	ναι (2)	ναι		
απώλειες πρόσληψης	L _c	kWh/kW/d ή h/d	ναι (2)	ναι		
απώλειες συστήματος	L _s	kWh/kW/d ή h/d	ναι	ναι		
απόδοση ΦΒ	η _a	αδιάστατο	ναι	ναι		
απόδοση αντιστροφέα	η _{inv}	αδιάστατο	ναι			
απόδοση συστήματος	η _{sys}	αδιάστατο	ναι	ναι		
λόγος επίδοσης	PR	αδιάστατο	ναι	ναι		

Πίνακας 15: Παράμετροι που εισάγονται σε κάθε λογισμικό, τρόπος επεξεργασίας και αποτελέσματα που εξάγονται.

- (1) Αυτά τα δεδομένα είναι γνωστά αλλά δεν αξιοποιούνται για την εξαγωγή των πραγματικών αποτελεσμάτων της λειτουργίας της ΦΒ διάταξης.
- (2) Η ακρίβεια προσδιορισμού της αποδοτικότητας αναφοράς και των απωλειών πρόσληψης υπόκειται στην ακρίβεια με την οποία έγινε η αναγωγή των δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας από το οριζόντιο στο κεκλιμένο επίπεδο μέσω του αλγόριθμου των Liu και Jordan.
- (3) Η Ονομαστική Θερμοκρασία Λειτουργίας Κυψελίδας (NOCT) αφήνεται στην προεπιλεγμένη τιμή της στα λογισμικά.
- (4) Οι συντελεστές απωλειών είναι άγνωστοι. Το λογισμικό PVSYST μπορεί να δεχθεί μια εξαιρετικά λεπτομερή σειρά συντελεστών απωλειών για κάθε υποσύστημα της διάταξης. Στο RETSCREEN μπορούν να καθοριστούν δύο γενικοί συντελεστές απωλειών, ο μὲν για τα ΦΒ πλαίσια, ο δε για τον αντιστροφέα. Τέλος, στο PVGIS μπορεί να καθοριστεί ένας συντελεστής απωλειών για όλο το σύστημα. Οι συντελεστές διατηρούνται στις προεπιλεγμένες τους τιμές ώστε το αποτέλεσμα να υπόκειται στην κρίση του κατασκευαστή του λογισμικού.
- (5) Στο RETSCREEN πραγματοποιείται είσοδος των δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας σε μορφή μέσης ημερήσιας πυκνότητας ενέργειας ανά μήνα και όχι αναλυτικά, δηλαδή, πυκνότητα ισχύος με δεκάλεπτο βήμα.
- (6) Το RETSCREEN δεν διαθέτει στη βάση δεδομένων του τα συγκεκριμένα μοντέλα των ΦΒ και του αντιστροφέα, έτσι αναγκαστικά επιλέγονται παραπλήσια.
- (7) Η θέση καθορίζεται στο εργαλείο PVGIS με απόθεση μιας εικονικής καρφίτσας σε διαδραστικό χάρτη· ως αποτέλεσμα η ακρίβεια της θέσης είναι περιορισμένη.
- (8) Το PVGIS διαθέτει μόνο μια γενική κατηγορία για ΦΒ πυριτίου και όχι συγκεκριμένο τύπο.

Επίσης, σημειώνεται ότι:

α) για να πραγματοποιηθεί η ενδιάμεση σύγκριση των μεθόδων αναγωγής της ηλιακής ακτινοβολίας από το οριζόντιο στο κεκλιμένο επίπεδο γίνεται μετατροπή των αποτελεσμάτων του αλγόριθμου Liu – Jordan και των λογισμικών ώστε αυτά να εκφράζονται σε kWh/m²/d για κάθε μήνα.

β) τα αποτελέσματα της ενεργειακής απόδοσης των ΦΒ στο δίκτυο μετατρέπονται όλα ώστε να εκφράζονται σε kWh/d για κάθε μήνα.

Αυτές οι δύο μετατροπές δεν επηρεάζουν την ακρίβεια των συγκρίσεων αλλά είναι απαραίτητες για να καταστεί δυνατή η σύγκριση.

6.2.2. Αξιολόγηση των εφαρμοσμένων διαδικασιών

Ο αλγόριθμος των Liu και Jordan (1961) αποτελεί μια βολική αλλά όχι ιδανική λύση για την αναγωγή της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας από το οριζόντιο επίπεδο σε πυκνότητα ενέργειας στο επίπεδο του συλλέκτη. Το συγκεκριμένο υπόδειγμα βασίζεται στην παραδοχή του ισοτροπικού ουρανού, δηλαδή της ίσης έντασης διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας προς όλες τις κατευθύνσεις. Από μια μελέτη που έγινε για τη NASA προκύπτει ότι αυτό το υπόδειγμα ανταποκρίνεται καλύτερα για νεφελώδεις ουραμούς. Περισσότερες λεπτομέρειες για τα σφάλματα από τον αλγόριθμο Liu και Jordan αναφέρονται στην παράγραφο 3.1 [T. Klucher, 1978]. Ανάλυση για την επίδραση του σφάλματος στα αποτελέσματα του αλγόριθμου δεν πραγματοποιείται.

Η χάραξη του ορίζοντα πραγματοποιήθηκε κυρίως για το τυπικό της διαδικασίας και δεν έχει ουσιαστικό αντίκτυπο στην εκπόνηση αυτής της μελέτης. Ο λόγος είναι ότι ο ορίζοντας γύρω από την περιοχή της ΦΒ εγκατάστασης είναι ιδιαίτερα χαμηλός, απουσιάζουν, δηλαδή, βουνά ή υψώματα που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τη στιγμή ανατολής ή δύσης του ηλίου. Επίσης, τα μετεωρολογικά δεδομένα ακτινοβολίας περιλαμβάνουν ήδη την επίδραση του ορίζοντα, εφόσον

καταγράφονται στο σημείο της ΦΒ εγκατάστασης· αυτό καθιστά τη χάραξη του ορίζοντα καταχρηστική.

Η διαδικασία για τον υπολογισμό των πραγματικών αποτελεσμάτων από τη λειτουργία των ΦΒ κρίνεται αξιόπιστη. Πλην των ανακρίβειών που μπορούν να προκύψουν κατά τον υπολογισμό των παραμέτρων της αποδοτικότητας αναφοράς και των απωλειών πρόσληψης, καθώς αυτός βασίζεται σε αποτελέσματα του αλγόριθμου των Liu και Jordan, τα υπόλοιπα αποτελέσματα οφείλουν να αντιστοιχούν στην πραγματικότητα εφόσον βασίζονται σε αυτοματοποιημένες αριθμητικές πράξεις. Η μοναδική επιφύλαξη για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων προκύπτει από σφάλματα των οργάνων μέτρησης και καταγραφής. Σφάλματα που είναι γνωστό ότι υπήρχαν είναι οι κενές σειρές δεδομένων σε ορισμένες καταγραφές. Τα κενά αντιμετωπίστηκαν με προσθήκη ενδιάμεσων τιμών, χειρωνακτικά ή με προγραμματισμό των κατάλληλων μακροεντολών. Έτσι, σε συνδυασμό με την μικρή πυκνότητά εμφάνισής τους, η επίδρασή τους στα αποτελέσματα κρίνεται αμελητέα.

Όσον αφορά την ουσία της σύγκρισης των λογισμικών με τα οποία έγιναν οι προσομοιώσεις, αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί παρεκκλίνουσα καθώς συνέκρινε ανόμοια μεταξύ τους στοιχεία. Δηλαδή, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των αποτελεσμάτων διαφορετικών λογισμικών τα οποία όμως δεν είχαν ακριβώς τις ίδιες εισόδους δεδομένων. Ξεχωρίζει η περίπτωση του εργαλείου PVGIS από το οποίο έλειπαν ως είσοδοι ακόμα και τα καταγεγραμμένα μετεωρολογικά δεδομένα της εγκατάστασης. Η λεπτομερής αναφορά για τις εισόδους του κάθε λογισμικού πραγματοποιήθηκε στον πίνακα 15 της προηγούμενης παραγράφου.

Η εκτέλεση των λογισμικών έγινε χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα, πέραν του χρόνου που απαιτούταν για εξοικείωση του χρήστη με τις λειτουργίες τους. Σε ορισμένες περιπτώσεις δεν πραγματοποιήθηκε πλήρης παραμετροποίηση των εισόδων των λογισμικών καθώς αυτό θα ήταν ιδιαίτερα εξειδικευμένο. Για παράδειγμα, αφέθηκαν στις προεπιλεγμένες τους τιμές όλοι οι συντελεστές απωλειών στις εισόδους κάθε λογισμικού, αφού η διερεύνηση των ακριβών τιμών θα μπορούσε να αποτελεί αντικείμενο μελέτης από μόνη της. Επίσης, στο λογισμικό RETSCREEN δεν καθορίστηκε το ακριβές μοντέλο των ΦΒ της διάταξης αλλά ένα παρόμοιο της ίδιας εταιρείας. Άλλο σημείο που αξίζει αναφορά είναι μια προειδοποίηση που εμφανιζόταν στο λογισμικό PVSYST η οποία αφορούσε υπέρβαση στην τάση εισόδου του αντιστροφέα με βάση την τρέχουσα συνδεσμολογία της διάταξης και το χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό· εκτενέστερη περιγραφή του σφάλματος γίνεται στην παράγραφο 8.2.5 του παραρτήματος.

6.3. Προτάσεις για τη συνέχιση της εργασίας

Αρκετά σημεία αυτής της διπλωματικής θα μπορούσαν να αναπτυχθούν στο μέλλον. Πρώτη και σημαντικότερη, είναι η προσθήκη περισσότερων λογισμικών για προσομοίωση της εγκατάστασης και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Με αυτή την προσθήκη, πέραν της αριθμητικής αύξησης των αξιολογήσεων, μπορεί να ελαττωθεί η αίσθηση σύγκρισης ανόμοιων στοιχείων, εάν τα νέα λογισμικά ταξινομηθούν και συγκριθούν σε κατηγορίες με βάση τις δυνατότητές τους. Έτσι, στην κατηγορία των προχωρημένων λογισμικών θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί σύγκριση του PVSYST μαζί με το PVSOL Expert, το BlueSOL Design και το TRNSYS, ενώ, στην κατηγορία λογισμικών γενικής χρήσης με οικονομική ανάλυση θα μπορούσε να συγκριθεί το RETSCREEN μαζί με το SAM.

Με την προϋπόθεση της εκτέλεσης περισσότερων λογισμικών, θα μπορούσε επίσης να πραγματοποιηθεί λεπτομερέστερη είσοδος των παραμέτρων της εγκατάστασης. Αυτό θα απαιτούσε περισσότερους επί τόπου ελέγχους για τα χαρακτηριστικά και την κατάσταση της διάταξης. Για παράδειγμα, για την εισαγωγή του συντελεστή ωμικών απωλειών θα ήταν απαραίτητη η γνώση του μήκους των καλωδίων της εγκατάστασης αλλά και ο τύπος τους. Αντίστοιχα, για τη γνώση των απωλειών πρόσληψης θα ήταν απαραίτητη η παρακολούθηση της διάταξης για εναπόθεση σκόνης ή άλλων υλικών πάνω στα ΦΒ πλαίσια.

Σημαντική θα ήταν και η διερεύνηση των αιτιών που οδήγησαν στα εσφαλμένα αποτελέσματα του PVSYST. Παραμένει ακόμα άγνωστο γιατί το λογισμικό παρουσίασε σωστά το πρώτο βήμα υπολογισμού αποτελεσμάτων και λάθος το τελικό, για σωστή ρύθμιση των παραμέτρων εισόδου. Μια πιο ενδελεχής αναζήτηση που να απαντά το παραπάνω ερώτημα θα είχε ενδιαφέρον με εκτέλεση της ανάλυσης σε άλλα ΦΒ συστήματα και στη συνέχεια διερεύνηση του αλγόριθμου που χρησιμοποιεί το λογισμικό.

Άλλη ενδιαφέρουσα επέκταση είναι η εκτέλεση της ίδιας εκτίμησης για περισσότερα χρόνια. Αυτή η επέκταση δεν προσδίδει τόσο στην αξιοπιστία της αξιολόγησης των λογισμικών, όσο διερευνά την ικανότητα των λογισμικών να προσομοιώνουν σωστά την ετήσια υποβάθμιση της απόδοσης των ΦΒ. Έτσι, ελέγχεται η προσομοίωση μιας επιπλέον παραμέτρου, αυτή της φθοράς των ΦΒ με την πάροδο του χρόνου. Κάτι τέτοιο, ενδεχομένως, θα απαιτούσε παρακολούθηση για αρκετά περισσότερα έτη. Στους αρχικούς στόχους αυτής της διπλωματικής ήταν η εκτέλεση της ίδιας εκτίμησης για τρία χρόνια, αλλά αυτό δεν κατέστη δυνατό λόγω της παύσης λειτουργίας του τμήματος φωτοβολταϊκών της Sharp στη Γερμανία από το οποίο παρέχονταν τα δεδομένα.

Τέλος, η εκτέλεση της ίδιας εκτίμησης για περισσότερες διαφορετικές εγκαταστάσεις θα ήταν μια χρήσιμη προσθήκη. Ήδη, το Πολυτεχνείο Κρήτης διαθέτει μία ακόμη ΦΒ διάταξη στη στέγη του κτηρίου της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος, ενώ πρόσφατα έγινε εγκατάσταση μιας τρίτης διάταξης στον προαύλιο χώρο ηλιακών δοκιμών του εργαστηρίου Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων. Η προσομοίωση περισσότερων διατάξεων αυξάνει την αξιοπιστία της σύγκρισης και της αξιολόγησης των λογισμικών, ενώ παράλληλα δίνει την ευκαιρία για σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών ΦΒ τεχνολογιών κάτω από όμοιες συνθήκες λειτουργίας, αν και το τελευταίο ξεφεύγει από το σκοπό αυτής της εργασίας.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Βιβλία:

Ιωάννης Ε. Φραγκιαδάκης, Θεσσαλονίκη 2011, *Φωτοβολταϊκά Συστήματα*, εκδόσεις Ζήτη

Φ. Κολυβά - Μαχαίρα, Ε. Μπόρα - Σέντα, Θεσσαλονίκη 1998, *Στατιστική Θεωρία Εφαρμογές*, εκδόσεις Ζήτη

- Κεφάλαια συλλογικού τόμου:

B. Marion et al., 2005, *Performance parameters for grid-connected PV systems*, IEEE, σελ. 1601-1606

Hisaki Tarui et al., 1996, *Recent progress of amorphous silicon solar cell applications and systems*, WREC, σελ. 390-395

Jonathan Leloux et al., 2012, *Review of the performance of residential PV systems in France*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, σελ. 1369-1376

L. M. Ayompe et al., 2011, *Measured performance of a 1.72 kW rooftop grid connected photovoltaic system in Ireland*, Energy Conversion and Management 52, σελ. 816-825

M. C. Alonso Garcia et al., 2004, *Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on Nominal Operation Cell Temperature calculations*, Renewable Energy 29, σελ. 1997-2010

Marcel Suri et al., 2008, *Geographic aspects of photovoltaics in Europe: Contribution of the PVGIS website*, IEEE 1, σελ. 34-41

P. Vorasayan et al., 2006, *Long-term performance of amorphous photovoltaic modules*, Loughborough University UK, σελ. 2129-2132

S. A. Klein, 1977, *Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces*, Solar Energy, Pergamon Press 19, σελ. 325-329

Theocharis Tsoutsos et al., 2011, *Temperature effect on PV performance; Experimental results from a 2.18 kWp thin film PV system*, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, σελ. 3635-3639

Thomas M. Klucher, 1978, *Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces*, Solar Energy, Pergamon Press, τόμος 23 σελ. 111-114

- Λοιπά επιστημονικά άρθρα:

George Macrides et al., 2006, *Performance assessment of different photovoltaic systems under identical field conditions of high irradiation*, University of Cyprus, University of Stuttgart

Ioannis Kanakis et al., 2012, *Performance analysis of two twin grid connected thin film PV installations 2.18 kWp for the first two (2) years of their operation in the island of Crete and in Athens*, 27th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition

- Βοηθητικές πηγές:

<http://science.howstuffworks.com/environmental/energy/solar-cell.htm>, επίσκεψη στις 8/5/2013

<http://pveducation.org>, επίσκεψη στις 15/5/2013

http://www.appropedia.org/Solar_photovoltaic_software, επίσκεψη στις 16/7/2013

<http://www.photovoltaic-conference.com>, επίσκεψη στις 13/7/2013

<http://support.microsoft.com/kb/213449>, επίσκεψη στις 10/11/2012

<http://www.pvsyst.com/en>, επίσκεψη στις 20/10/2012

<http://www.retscreen.net/ang/home.php>, επίσκεψη στις 20/10/2012

<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>, επίσκεψη στις 20/10/2012

Σημείωση: Οι εικόνες και τα διαγράμματα που δεν περιλαμβάνουν πηγή έχουν δημιουργηθεί από το συγγραφέα της διπλωματικής.

8. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

8.1. Αλγόριθμος Liu & Jordan

8.1.1. Υπολογισμός μέσων τιμών απολαβής ηλιακής ενέργειας

Για την εκτέλεση του αλγόριθμου απαιτείται μετατροπή των δεδομένων πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας σε πυκνότητα ενέργειας. Για την απαραίτητη αυτή μετατροπή, υπολογίζονται πρώτα οι μέσες ημερήσιες και μέσες μηνιαίες πυκνότητες ισχύος ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της συνάρτησης AVERAGE στο Excel. Τα κελιά των αρχικών δεδομένων επιλέγονται ανά 144 για την εύρεση των μέσων ημερήσιων τιμών, αφού οι τιμές της πυκνότητας ισχύος καταγράφονταν με δεκάλεπτο βήμα από το όργανο και $1d \cdot 24h / d \cdot 6 \text{ damin} / h = 144$. Για τον υπολογισμό των μέσων μηνιαίων τιμών, γίνεται επιλογή αντίστοιχου με τη διάρκεια του μήνα αριθμού κελιών από τα αρχικά δεδομένα.

Για τη μετάβαση από ισχύ σε ενέργεια γίνεται πολλαπλασιασμός με το χρόνο. Εάν σε ένα διάγραμμα υπήρχε μια συνεχής συνάρτηση της ισχύος τότε η ενέργεια θα ήταν παρά το ολοκλήρωμα αυτής της συνάρτησης μεταξύ των ζητούμενων χρονικών στιγμών, δηλαδή το εμβαδό που σχηματίζεται κάτω από την καμπύλη. Επειδή δεν διατίθενται άπειρα δεδομένα ούτε κάποια γνωστή μαθηματική συνάρτηση της διακύμανσης της ηλιακής ακτινοβολίας, παρά μόνο τιμές σε δεκάλεπτο βήμα, η ενέργεια μπορεί να υπολογισθεί με πολλαπλασιασμό της κάθε τιμής ισχύος επί 10 min και στη συνέχεια με άθροιση των γινομένων. Ο υπολογισμός αυτός προϋποθέτει την παραδοχή ότι η τιμή της ισχύος της ακτινοβολίας παραμένει σταθερή μέσα σε κάθε δεκάλεπτο διάστημα.

Το άθροισμα των γινομένων που αντιστοιχεί στη χρονική διάρκεια μίας ημέρας αποτελεί τη μέση πυκνότητα απολαβής ηλιακής ενέργειας για εκείνη τη μέρα. Για τον υπολογισμό της μέσης απολαβής ηλιακής ενέργειας ενός μήνα εκτελείται και πάλι το αντίστοιχο άθροισμα. Σημειώνεται ότι επειδή το χρονικό βήμα της καταγραφής είναι σταθερό, είτε πολλαπλασιάζοντας τη μέση ισχύ με το συνολικό χρόνο, είτε αθροίζοντας τα γινόμενα των στιγμιαίων τιμών ισχύος με το χρονικό βήμα, το αποτέλεσμα είναι το ίδιο.

8.1.2. Ημέρα του μήνα και του έτους

Για την εφαρμογή του αλγορίθμου, χρειάζεται επίσης να βρεθεί η ημέρα κάθε μήνα στην οποία αντιστοιχεί η μέση ακτινοβολία του μήνα. Αυτή συνήθως είναι η 15^η ημέρα του μήνα. Στη συνέχεια πρέπει να βρεθεί σε ποια ημέρα του έτους αντιστοιχεί η μέση ημέρα κάθε μήνα. Αυτό είναι εύκολο και προκύπτει από το άθροισμα της αντίστοιχης ημέρας του μήνα με το πλήθος των ημερών των μηνών που παρήλθαν από την αρχή του έτους. Για παράδειγμα, η 15^η Μαρτίου θα είναι η $31 + 28 + 15 = 74^{\text{η}}$ ημέρα του έτους.

8.1.3. Χαρακτηριστικά ΦΒ διάταξης

Απαραίτητα δεδομένα που χρειάζονται για την έναρξη της εφαρμογής του αλγόριθμου των Liu και Jordan είναι: το αζιμούθιο (προσανατολισμός) των ΦΒ, η κλίση της επιφάνειας των ΦΒ στην οποία θα γίνει αναγωγή των δεδομένων ακτινοβολίας, το γεωγραφικό πλάτος, η ηλιακή σταθερά και η ανακλαστικότητα του εδάφους (albedo). Οι τιμές αυτών των παραμέτρων είναι καταχωρημένες σε ξεχωριστό πίνακα στο Excel.

8.1.4. Ηλιακή απόκλιση δ

Το πρώτο στοιχείο που πρέπει να υπολογιστεί για τον αλγόριθμο των Liu και Jordan είναι η ηλιακή απόκλιση¹¹ (δ) σε μοίρες. Η τιμή της για κάθε μήνα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(\frac{360}{365}(284 + n)\right)$$

όπου:

n = ημέρα του έτους

Σημειώνεται ότι οι τριγωνομετρικές συναρτήσεις του Excel επεξεργάζονται γωνίες σε ακτίνια (rad). Για να εισαχθεί μία γωνία μετρημένη σε μοίρες σε συνάρτηση του Excel πρέπει πρώτα να συμπεριληφθεί η συνάρτηση RADIANS που θα τη μετατρέψει σε ακτίνια. Ομοίως, για να ληφθεί το αποτέλεσμα σε μοίρες και όχι ακτίνια, προστίθεται η συνάρτηση DEGREES.

8.1.5. Παράμετροι A και B

Οι παράμετροι A και B αποτελούν προσθήκη του Klein (1976) στον αλγόριθμο των Liu και Jordan (1961) για κεκλιμένες επιφάνειες των οποίων ο προσανατολισμός αποκλίνει ανατολικά ή δυτικά. Οι A και B είναι συναρτήσεις του γεωγραφικού πλάτους (ϕ), του αζιμούθιου (γ), και της κλίσης (s) της επιφάνειας. Η παράμετρος B είναι επίσης συνάρτηση της ηλιακής απόκλισης (δ) γι' αυτό το λόγο

¹¹ Απόκλιση αστέρος (declination – dec ή δ) ονομάζεται η μία από τις δύο ουράνιες συντεταγμένες που αντιστοιχεί στο γεωγραφικό πλάτος και ορίζεται ως η γωνιώδης απόσταση του ίχνους ενός άστρου από τον ουράνιο ισημερινό. Η ηλιακή απόκλιση δ (solar declination) είναι η γωνιά που σχηματίζει ο ήλιος με τον ισημερινό για έναν παρατηρητή στο κέντρο της Γης. Οι τιμές που μπορεί να λάβει είναι από $-23^\circ 24'$ έως $+23^\circ 24'$. Η ηλιακή απόκλιση λαμβάνει την τιμή μηδέν κατά τις δύο ισημερίες του έτους (εαρινή και φθινοπωρινή) ενώ τις δύο ακραίες τιμές κατά τα ηλιοστάσια (θερινό και χειμερινό). Η τιμή $23^\circ 24'$ είναι και η κλίση ϵ του άξονα περιστροφής της Γης γύρω από τον εαυτό της σε σχέση με το επίπεδο που σχηματίζεται από την περιφορά της γύρω από τον ήλιο.

διαφοροποιείται για κάθε μήνα. Η παράμετρος A λαμβάνει μία σταθερή τιμή. Οι σχέσεις από τις οποίες προκύπτουν εμφανίζονται παρακάτω:

$$A = \frac{\cos(\varphi)}{\sin(\gamma) \tan(s)} + \frac{\sin(\varphi)}{\tan(\gamma)}$$

$$B = \tan(\delta) \left(\frac{\cos(\varphi)}{\tan(\gamma)} - \frac{\sin(\varphi)}{\sin(\gamma) \tan(s)} \right)$$

8.1.6. Ωρική γωνία δύσης ω_s

Το επόμενο βήμα στην εφαρμογή του αλγόριθμου των Liu και Jordan είναι ο υπολογισμός της ωρικής γωνίας δύσης¹² (ω_s) του ήλιου. Το συνημίτονο της ωρικής γωνίας δύσης δίνεται από την επόμενη σχέση. Για τον υπολογισμό της ωρικής γωνίας δύσης (ω_s) αρκεί να εφαρμοστεί η αντίστροφη συνάρτηση του συνημίτονου, δηλαδή, το τόξο συνημίτονου (ACOS).

$$\cos(\omega_s) = -\tan(\varphi) \tan(\delta)$$

$$\omega_s = \arccos(\cos(\omega_s))$$

8.1.7. Ωρικές γωνίες ανατολής ω_{sr} και δύσης ω_{ss} στην κεκλιμένη επιφάνεια

Η προσθήκη του Klein απαιτεί, επίσης, τον υπολογισμό μιας νέας ωρικής γωνίας δύσης (ω_{ss}) καθώς και της ωρικής γωνίας ανατολής (ω_{sr}) για την κεκλιμένη επιφάνεια. Αυτοί οι υπολογισμοί περιλαμβάνουν κάποιες συνθήκες σύγκρισης μεταξύ των ωρικών γωνιών δύσης που υπολογίστηκαν προηγουμένως και σχέσεων με τόξα συνημίτονων κλασμάτων με τις παραμέτρους A και B . Οι συγκρίσεις και οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται παρακάτω:

¹² Η αστρική ωρική ή ωριαία γωνία (hour angle – SHA) είναι η ουράνια συντεταγμένη που αντιστοιχεί στο γεωγραφικό μήκος. Η ωρική γωνία δύσης πρόκειται για τη συντεταγμένη του στίγματος του ηλίου στον ουράνιο θόλο κατά τη δύση.

Εάν το αζιμούθιο είναι αρνητικό ($\gamma < 0$), τότε:

$$\omega_{sr} = -\min \left[\omega_s, \arccos \left(\frac{AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \right) \right]$$

$$\omega_{ss} = \min \left[\omega_s, \arccos \left(\frac{AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \right) \right]$$

Εάν το αζιμούθιο είναι θετικό ($\gamma > 0$), τότε:

$$\omega_{sr} = -\min \left[\omega_s, \arccos \left(\frac{AB - \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \right) \right]$$

$$\omega_{ss} = \min \left[\omega_s, \arccos \left(\frac{AB + \sqrt{A^2 - B^2 + 1}}{A^2 + 1} \right) \right]$$

8.1.8. Λόγος R_b

Ως R_b συμβολίζεται ο λόγος της μέσης απευθείας¹³ ακτινοβολίας στην κεκλιμένη επιφάνεια προς την ακτινοβολία στην οριζόντια επιφάνεια για κάθε μήνα και ορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{R}_b = \frac{\bar{H}_{T,b}}{\bar{H}_b}$$

Οι Liu και Jordan προτείνουν ότι ο λόγος R_b μπορεί να εκτιμηθεί ως ο λόγος της ακτινοβολίας στα όρια της ατμόσφαιρας σε κεκλιμένη επιφάνεια προς αυτήν σε οριζόντια επιφάνεια, δηλαδή

$$\bar{R}_b = \frac{\bar{H}_{T,0}}{\bar{H}_0}$$

Για επιφάνειες με νότιο προσανατολισμό ο λόγος θα δίνεται από τη σχέση:

¹³ Ονομάζεται και ακτινοβολία δέσμης ή άμεση ακτινοβολία.

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\varphi - s) \cos(\delta) \sin(\omega'_s) + \frac{\pi}{180} \omega'_s \sin(\varphi - s) \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta)}$$

όπου:

ω'_s = ωρική γωνία δύσης για την κεκλιμένη επιφάνεια, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\omega'_s = \min[\omega_s, \arccos(-\tan(\varphi - s) \tan(\delta))]$$

Επειδή όμως το ζητούμενο είναι ο υπολογισμός του λόγου R_b για κεκλιμένη επιφάνεια με μη νότιο προσανατολισμό, θα χρειαστεί να γίνει εφαρμογή του τροποποιημένου τύπου από τον Klein, όπως αυτός παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\begin{aligned} R_b = & \left\{ \cos(s) \sin(\delta) \sin(\varphi) \frac{\pi}{180} (\omega_{ss} - \omega_{sr}) \right. \\ & - \sin(\delta) \cos(\varphi) \sin(s) \cos(\gamma) \frac{\pi}{180} (\omega_{ss} - \omega_{sr}) \\ & + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(s) [\sin(\omega_{ss}) - \sin(\omega_{sr})] \\ & + \cos(\delta) \cos(\gamma) \sin(\varphi) \sin(s) [\sin(\omega_{ss}) - \sin(\omega_{sr})] \\ & \left. - \cos(\delta) \sin(s) \sin(\gamma) [\cos(\omega_{ss}) - \cos(\omega_{sr})] \right\} \\ & / \left\{ 2 \left[\cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \frac{\pi}{180} \omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) \right] \right\} \end{aligned}$$

Γίνεται τμηματικός υπολογισμός του λόγου R_b στο Excel, επειδή η σχέση που τον περιγράφει είναι πολύ εκτενής.

8.1.9. Απολαβή ηλιακής ενέργειας στα όρια της ατμόσφαιρας

Η απολαβή της ηλιακής ενέργειας εκτός Γης (H_{ex} ή H_0) είναι η ενέργεια που απορροφάται από μία οριζόντια επιφάνεια στα όρια της ατμόσφαιρας μέσα σε μία

μέρα. Η ατμόσφαιρα απορροφά και ανακλά τουλάχιστον το 20% της ηλιακής ακτινοβολίας πριν αυτή φτάσει στο έδαφος.

Για να υπολογισθεί η μέση ημερήσια απολαβή ενέργειας μέσω της ακτινοβολίας στα όρια της ατμόσφαιρας για κάθε μήνα σε kJ/m^2 , οι Liu και Jordan προτείνουν την επόμενη σχέση:

$$\bar{H}_0 = \frac{1}{m_2 - m_1} \sum_{n=m_1}^{m_2} (H_0)_n$$

όπου:

m_1, m_2 = οι ημέρες του έτους που αντιστοιχούν στην αρχή και το τέλος του μήνα

$(H_0)_n$ = ημερήσια ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας τη n-στη ημέρα, η οποία με τη σειρά της υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$(H_0)_n = \frac{24}{\pi} I_{sc} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \left[\cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s) + \frac{\omega_s 2\pi}{360} \sin(\varphi) \sin(\delta) \right]$$

όπου:

n = ημέρα του έτους

I_{sc} = ηλιακή σταθερά, θεωρείται ίση με 4.871 kJ/h m^2

δ = ηλιακή απόκλιση

ω_s = ωρική γωνία δύσης

Σημειώνεται ότι για να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος σε αυτό το στάδιο πρέπει να υπολογιστούν οι ωρικές γωνίες δύσης (ω_s) και η ηλιακή απόκλιση (δ) για κάθε ημέρα του έτους (1 – 365).

8.1.10. Δείκτης αιθριότητας K_T

Ο δείκτης αιθριότητας (clearness index) είναι ο λόγος της μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας σε μια οριζόντια επιφάνεια προς τη μέση ημερήσια ακτινοβολία στα όρια της ατμόσφαιρας.

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0}$$

Και τα δύο μεγέθη έχουν υπολογιστεί προηγουμένως, οπότε, με τη σωστή μετατροπή των μονάδων και αντικατάσταση στον παραπάνω λόγο, γίνεται εύρεση του δείκτη αιθριότητας για κάθε μήνα.

8.1.11. Διάχυτη ακτινοβολία H_d

Αρκετοί ερευνητές έχουν παρατηρήσει ότι η διάχυτη ακτινοβολία¹⁴ (H_d) είναι συνάρτηση του δείκτη αιθριότητας (K_T). Οι Liu και Jordan προτείνουν την ακόλουθη σχέση για τον υπολογισμό του λόγου της διάχυτης ακτινοβολίας προς την ολική, με την αρχική παραδοχή ότι η διάχυτη ακτινοβολία είναι ισότροπη:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,390 - 4,027\bar{K}_T + 5,531\bar{K}_T^2 - 3,108\bar{K}_T^3$$

Ο μηνιαίος δείκτης αιθριότητας (K_T) καθώς και η ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (H), ως μέση ημερήσια απολαβή ηλιακής ενέργειας μήνα, έχουν είδη υπολογιστεί. Επομένως, με αντικατάσταση στη σχέση προκύπτει η διάχυτη ακτινοβολία (H_d) για κάθε μήνα. Οι μονάδες μέτρησης της διάχυτης ακτινοβολίας

¹⁴ Η διάχυτη ακτινοβολία αποτελείται από τα φωτόνια που σκεδάζονται στα πολύ μικρής διαμέτρου σωματίδια (σκέδαση Rayleigh) και στα μεγαλύτερης διαμέτρου αιωρήματα, όπως οι υδρατμοί, η σκόνη και ο καπνός (σκέδαση Mie ή Tyndall). Χαρακτηριστικό της διάχυτης ακτινοβολίας είναι ότι δεν εστιάζεται και επομένως δεν δίνει είδωλο.

είναι ενέργειας προς επιφάνεια, όμως, επειδή η διάχυτη ακτινοβολία έχει θεωρηθεί ισότροπη, ο προσανατολισμός της επιφάνειας είναι άνευ σημασίας.

8.1.12. Λόγος R και τέλος του αλγόριθμου

Τέλος, με R συμβολίζεται ο λόγος της ολικής μέσης ημερήσιας ακτινοβολίας στην κεκλιμένη επιφάνεια (H_T) προς την ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο (H) για κάθε μήνα:

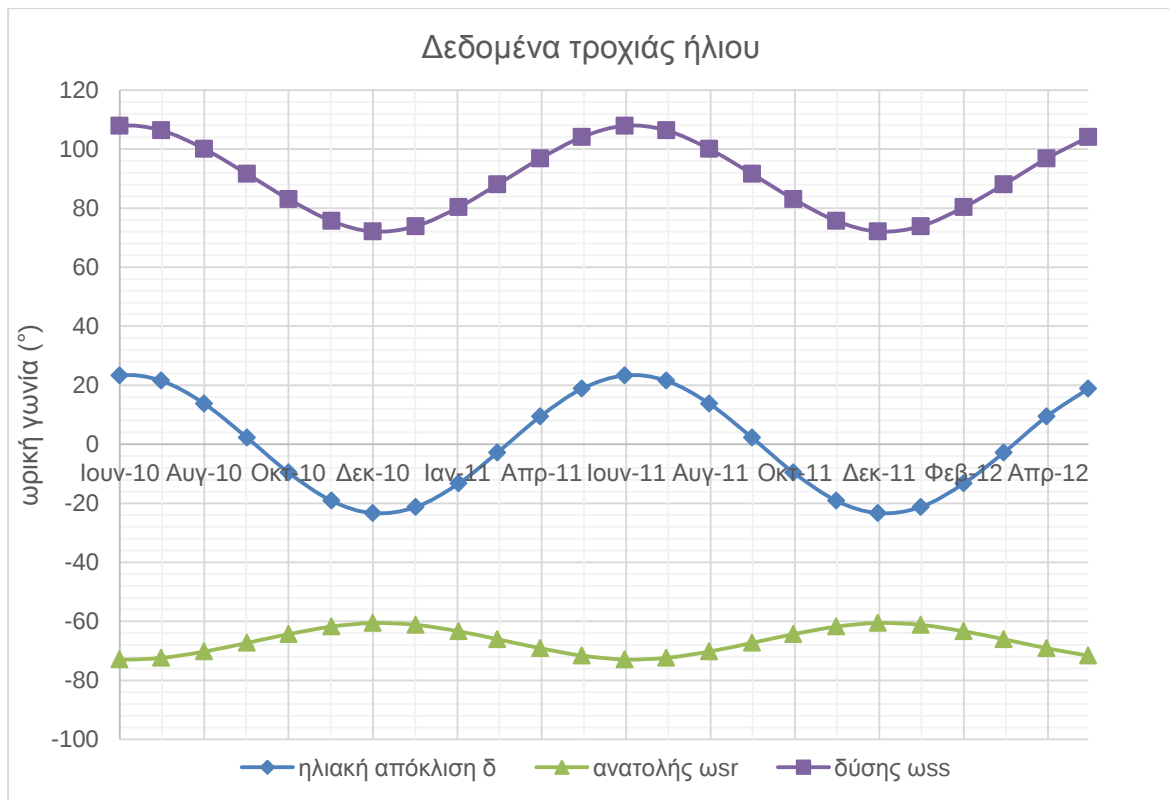
$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} \Rightarrow \bar{H}_T = \bar{R}\bar{H}$$

Το ζητούμενο εδώ, για το οποίο και ξεκίνησε η εφαρμογή του αλγόριθμου, είναι η μέση ημερήσια απολαβή ηλιακής ενέργειας στην κεκλιμένη επιφάνεια (H_T). Για να υπολογιστεί, πρέπει να βρεθεί πρώτα ο λόγος R από την τελευταία σχέση του αλγόριθμου των Liu και Jordan:

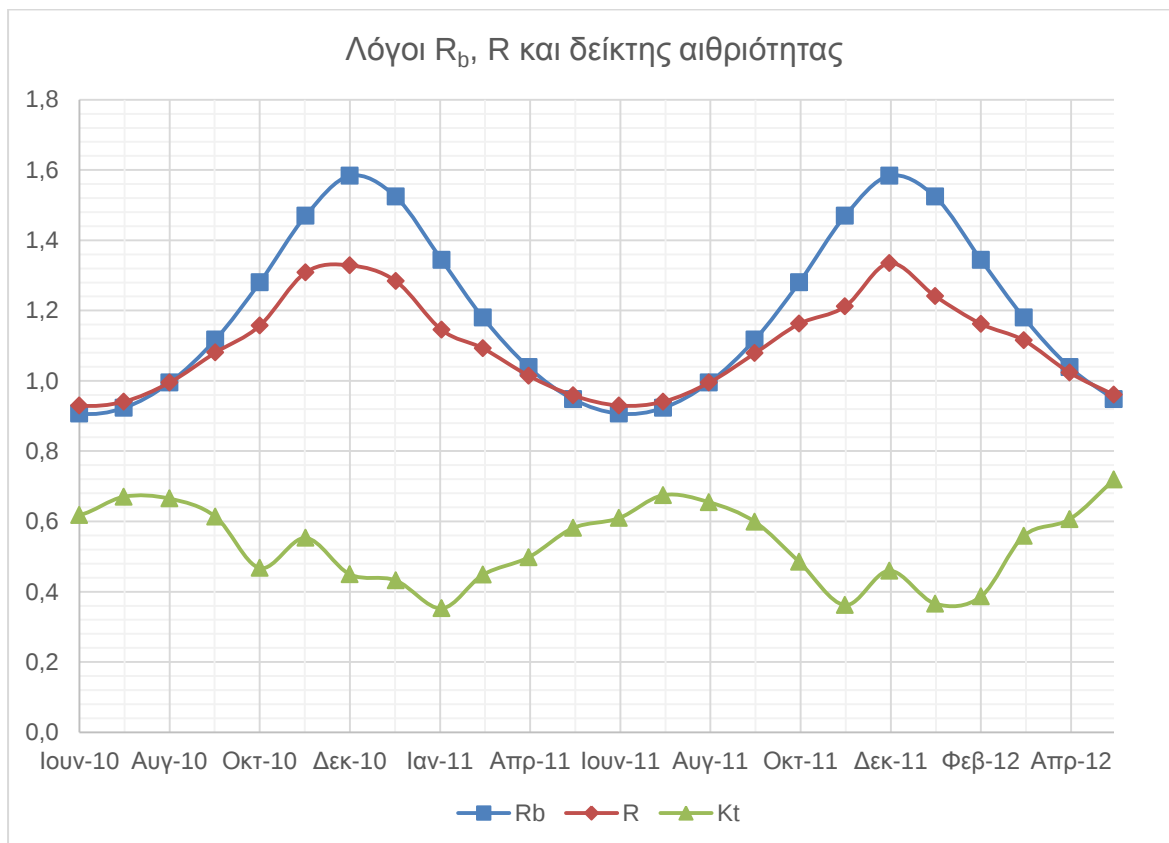
$$R = \left(1 - \frac{H_d}{H}\right) R_b + \frac{H_d}{H} \frac{1 + \cos(s)}{2} + \rho \frac{1 - \cos(s)}{2}$$

Τα αρχικά δεδομένα πυκνότητας ισχύος ακτινοβολίας ανά δεκάλεπτο μετατράπηκαν σε μέσες ημερήσιες και μηνιαίες τιμές και στη συνέχεια σε ημερήσιες και μηνιαίες πυκνότητες απολαβής ενέργειας. Με το πέρας του αλγόριθμου τα δεδομένα απολαβής ηλιακής ενέργειας ανήχθησαν σε μέσες ημερήσιες πυκνότητες απολαβής ενέργειας στη ζητούμενη κεκλιμένη επιφάνεια για κάθε μήνα του έτους.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4.1.1 ενώ στα διαγράμματα 35 και 36 παρουσιάζονται τιμές από τα επί μέρους βήματα του αλγόριθμου.



Διάγραμμα 35: Δεδομένα τροχιάς ήλιου: ηλιακή απόκλιση δ , ωρική γωνία ανατολής και δύσης



Διάγραμμα 36: Λόγος R_b , λόγος R και δείκτης αιθριότητας K_t

8.2. Εισαγωγή και ανάλυση δεδομένων με το PVSYST

8.2.1. Μορφοποίηση των μετεωρολογικών δεδομένων

Τα μετεωρολογικά δεδομένα, συμπεριλαμβανομένης της πυκνότητας ηλιακής ισχύος, βρίσκονται σε αρχείο Excel και προέρχονται απευθείας από τις συσκευές καταγραφής του μετεωρολογικού σταθμού του εργαστηρίου. Αρχικά γίνεται χειρωνακτικός έλεγχος των δεδομένων για κενές σειρές ή άλλα προβλήματα και όπου χρειάζεται συμπληρώνονται κατάλληλα μέσες τιμές. Σε ξεχωριστό φύλλο εργασίας μεταφέρονται οι στήλες με τη χρονική σήμανση, την πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος – τα υπόλοιπα μετεωρολογικά δεδομένα είναι αδιάφορα. Επίσης, τα δεδομένα χωρίζονται σε φύλλα εργασίας για κάθε έτος.

Το λογισμικό PVSYST μπορεί να λάβει ως είσοδο δεδομένων αρχείο κειμένου σε μορφή ASCII. Έτσι, για κάθε ένα από τα τρία λογιστικά φύλλα που δημιουργήθηκαν (2010, 2011, 2012) επιλέγεται «Αποθήκευση ως... Κείμενο Unicode (*.txt)» ώστε να δημιουργηθούν τα κατάλληλα αρχεία κειμένου. Πλέον, τα δεδομένα μπορούν να εισαχθούν στο λογισμικό.

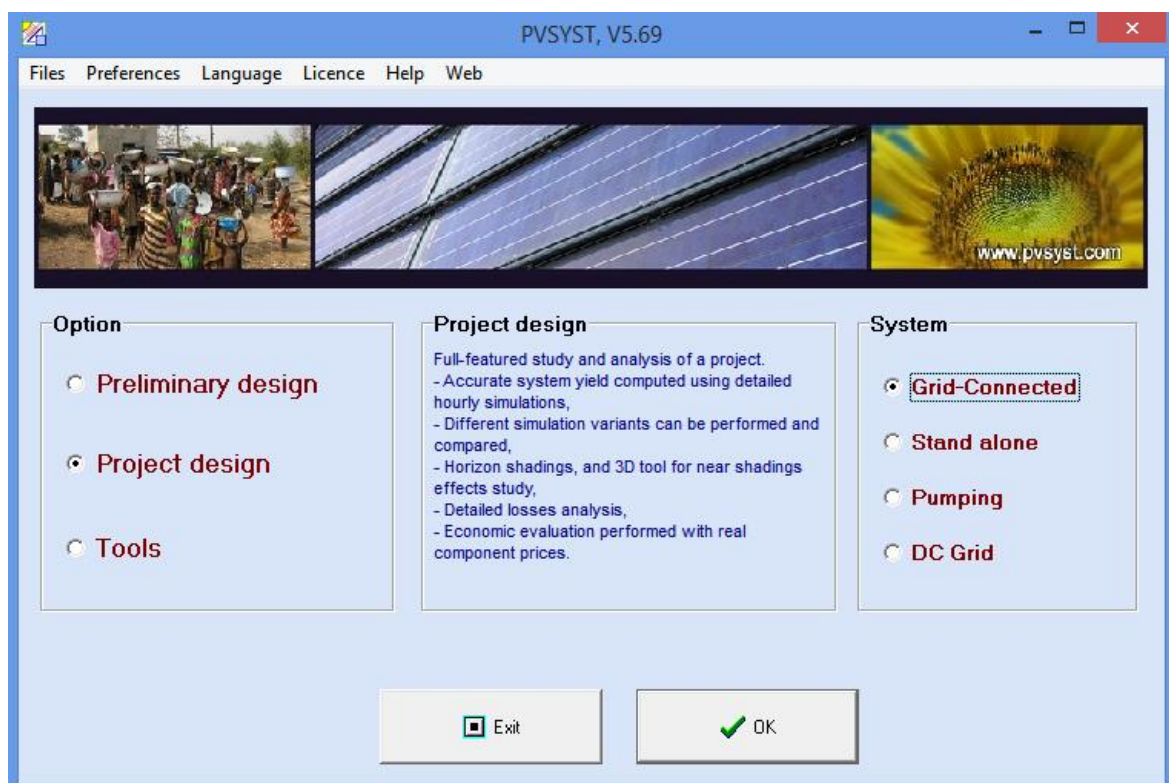
Για λόγους που αναφέρονται πιο μετά, στην πραγματικότητα δημιουργούνται έξι αρχεία κειμένου (δύο για κάθε έτος), τα μισά εκ των οποίων περιλαμβάνουν τροποποίηση στη χρονική τους σήμανση ώστε να μην εμφανίζεται πρόβλημα κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό λόγω της αλλαγής της ώρας από χειμερινή σε θερινή και αντίστροφα.

8.2.2. Σύντομη παρουσίαση της διεπαφής χρήστη (UI) του λογισμικού

Το παράθυρο που ανοίγει κατά την εκκίνηση του λογισμικού εμφανίζεται παρακάτω (εικόνα 12). Εδώ δίνονται οι αρχικές επιλογές για τον τύπο του

σχεδιασμού (προκαταρκτικός ή κανονικός / preliminary ή project) και στη συνέχεια τον τύπο του συστήματος (διασυνδεδεμένο, αυτόνομο, άντλησης ή δίκτυο συνεχούς ρεύματος / grid-connected, stand alone, pumping ή DC grid). Τέλος, υπάρχει η επιλογή για το άνοιγμα εργαλείων (tools) για την εισαγωγή προσαρμοσμένων δεδομένων.

Για την παρούσα περίπτωση επιλέγεται το “project design” (σχεδιασμός έργου) στο πλαίσιο “option” (επιλογή) και στη συνέχεια “grid-connected” (διασυνδεδεμένο) στο πλαίσιο “system” (σύστημα). Με κλικ στο “OK” γίνεται επιβεβαίωση της επιλογής και εμφανίζεται η επόμενη οθόνη που αποτελεί και τον κύριο χώρο εργασίας στο εξής (εικόνα 13).



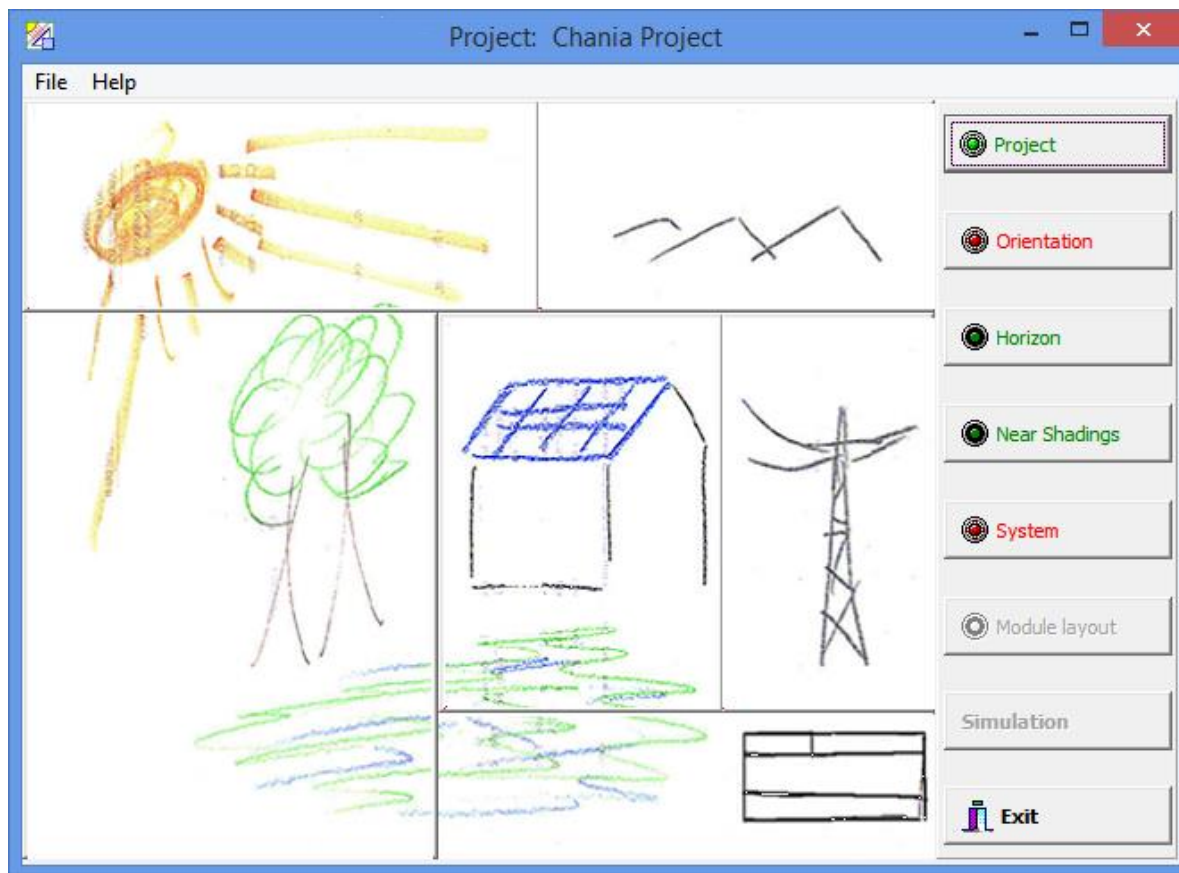
Εικόνα 12: Αρχική οθόνη λογισμικού PVSYST (έκδοση 5.69)

Σε αυτό το παράθυρο του λογισμικού γίνεται η πλοήγηση στις βασικές εργασίες σχεδιασμού του έργου (project design). Στο αριστερό μέρος της οθόνης εμφανίζονται τα ακόλουθα πλήκτρα:

- Project (έργο) – περιλαμβάνει επιλογές ονομασίας, περιγραφής και αποθήκευσης του έργου και των παραμέτρων του.
- Orientation (προσανατολισμός) – παρέχει τις επιλογές προσανατολισμού και κλίσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων.
- Horizon (ορίζοντας) – εμφανίζει τη διαδρομή του ήλιου καθ' όλη τη διάρκεια του έτους για την επιλεγμένη περιοχή και επιτρέπει το σχεδιασμό του ορίζοντα ώστε να λαμβάνεται υπόψη στην προσομοίωση η ακριβής ώρα δύσης και ανατολής του ήλιου.
- Near shadings (κοντινές σκιάσεις) – δίνει την επιλογή σχεδιασμού τρισδιάστατων αντικειμένων που βρίσκονται κοντά στην εγκατάσταση και μπορούν να προκαλέσουν σκιές.
- System (σύστημα) – καθορίζει τις πιο σημαντικές παραμέτρους: την έκταση του έργου, την επιφάνεια των ΦΒ πλαισίων, τον τύπο και το μοντέλο των πλαισίων, τον αριθμό τους και τη συνδεσμολογία τους στη συστοιχία, καθώς και το μοντέλο του αντιστροφέα που χρησιμοποιείται.
- Simulation (προσομοίωση) – επεξεργάζεται δεδομένα και παραμέτρους προσαρμογής και εμφανίζει τα αποτελέσματα απόδοσης του έργου για το χρονικό διάστημα που καθορίστηκε.
- Module layout (διάταξη μονάδας) – σχεδιάζει και χωροθετεί τα ΦΒ πλαίσια στο διαθέσιμο χώρο που υπάρχει για τοποθέτηση.

Τα πλήκτρα επισημαίνονται με φωτεινή πράσινη ένδειξη όταν έχουν συμπληρωθεί σωστά, με σκούρο πράσινο όταν έχουν συμπληρωθεί μερικώς ή δεν είναι απαραίτητη η συμπλήρωσή τους, με κίτρινο όταν υπάρχει κάποια παράληψη και

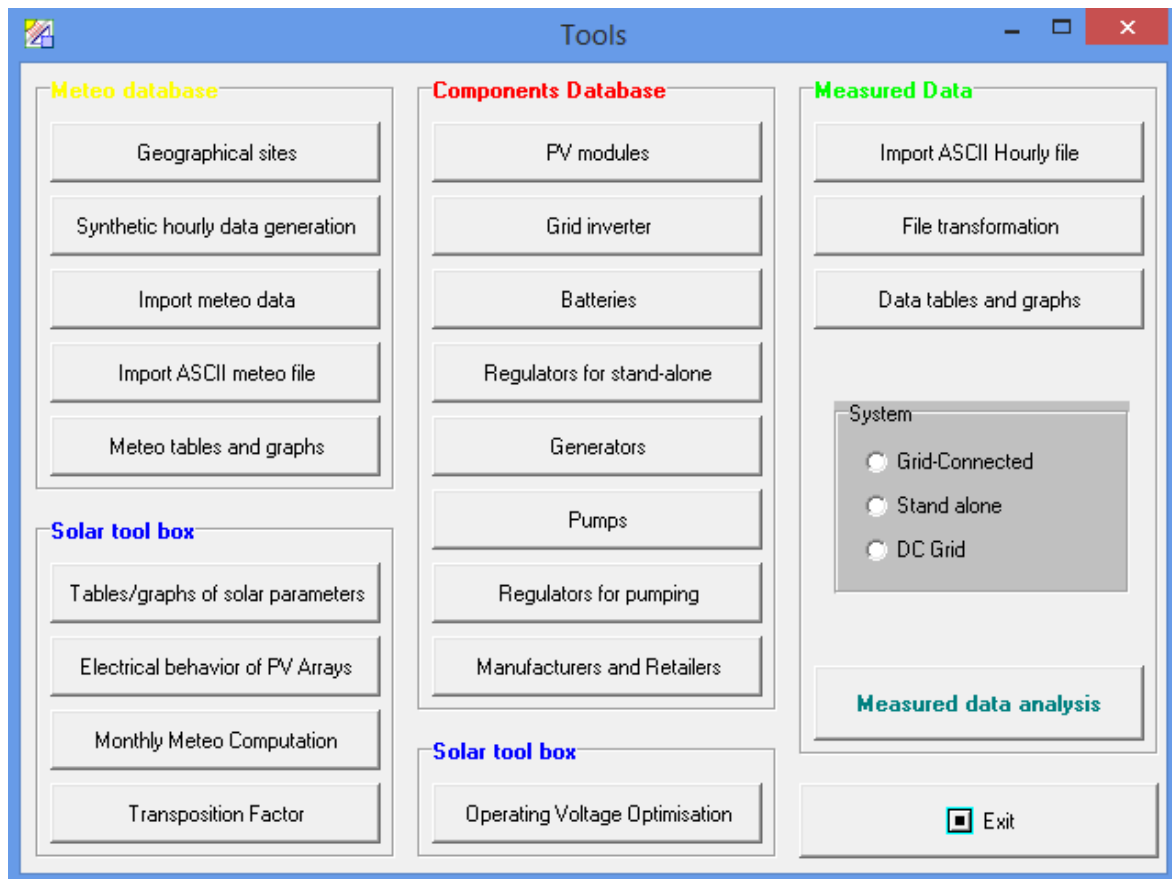
με κόκκινο όταν δεν έχουν συμπληρωθεί ή υπάρχει σφάλμα που αποτρέπει την εκτέλεση της προσομοίωσης.



Εικόνα 13: Αρχική οθόνη έργου (project)

8.2.3. Εισαγωγή δεδομένων θέσης και μετεωρολογίας στο λογισμικό

Πριν από τη συμπλήρωση οποιουδήποτε πεδίου, πρέπει να εισαχθούν τα μετεωρολογικά δεδομένα και η θέση της ΦΒ εγκατάστασης. Γι' αυτό επιλέγονται τα "tools" (εργαλεία) από την αρχική οθόνη του προγράμματος (εικόνα 12). Τότε, εμφανίζεται το παράθυρο της εικόνας 14 στο οποίο επιλέγεται αρχικά το "Geographical sites" (γεωγραφικές θέσεις) με αποτέλεσμα να εμφανιστεί το νέο παράθυρο της εικόνας 15.



Εικόνα 14: Εργαλεία για εισαγωγή προσαρμοσμένων μετεωρολογικών δεδομένων και τοποθεσιών, υπολογισμό ηλιακών δεδομένων, εισαγωγή εξοπλισμού με προσαρμοσμένα χαρακτηριστικά και σύγκριση πειραματικών δεδομένων με αποτελέσματα προσομοίωσης.

Στην καρτέλα “geographical coordinates” (γεωγραφικές συντεταγμένες) στο πεδίο “location” (τοποθεσία) συμπληρώνεται το όνομα της θέσης, η χώρα και η περιοχή (site name = Khandia, Country = Greece, Region = Europe). Έχει σημασία η χρήση του Khandia αντί του πιο κοινά γραφόμενου Chania (Χανιά) γιατί το λογισμικό ενδέχεται να θεωρήσει αυτόματα ομώνυμη περιοχή στην Αφρική. Στη συνέχεια, συμπληρώνονται τα υπόλοιπα πεδία (γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος, υψόμετρο, ζώνη ώρας) ως εξής: latitude = 35,53° , longitude= 24,07° , altitude = 134 m και time zone = 2. Αν και θεωρητικά δεν χρειάζεται κάποιο άλλο στοιχείο για τη θέση, προκειμένου να γίνει αποθήκευσή της πρέπει να εισαχθούν κάποια μηνιαία μετεωρολογικά δεδομένα· γι’ αυτό γίνεται μετάβαση στην επόμενη καρτέλα (εικόνα 16). Εδώ απλά επιλέγεται το πλήκτρο “Default (from NASA-SSE)”

(προεπιλογή από NASA-SSE) και τα δεδομένα συμπληρώνονται αυτόματα από τις βάσεις δεδομένων του κέντρου Επιφανειακής Μετεωρολογίας και Ηλιακής Ενέργειας της NASA (Surface meteorology and Solar Energy – SSE). Με κλικ στο OK τα δεδομένα θέσης αποθηκεύονται.

The image shows a software window titled "Geographical site parameters". It has two tabs: "Geographical Coordinates" (selected) and "Monthly meteo".

Location section:

- Site name: Khania
- Country: Greece (dropdown)
- Region: Europe (dropdown)

Coordinates section:

	Decimal		Deg.	min.	
Latitude	35.53	*	35	32	(+ = North, - = South hemisph.)
Longitude	24.07	*	24	4	(+ = East, - = West of Greenwich)
Altitude	134		M above sea level		
Time zone	2		Corresponding to an average difference		
					Legal Time - Solar Time = 0h 24m

Buttons:

- Sun paths (with sun icon)
- Print (with printer icon)
- New Site (with folder icon)
- Export table (with table icon)
- Export line (with line icon)
- Import (with document icon)
- Cancel (with red X icon)
- OK (with green checkmark icon)

Εικόνα 15: Παράθυρο γεωγραφικών παραμέτρων θέσης, καρτέλα συντεταγμένων

Για την εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων επιλέγεται το πλήκτρο "Import ASCII meteo file" (Εισαγωγή μετεωρολογικού αρχείου μορφής ASCII) από το παράθυρο εργαλείων (εικόνα 14) κι έτσι εμφανίζεται το παράθυρο της εικόνας 17. Εκεί γίνεται αρχικά επιλογή του αρχείου που περιέχει τα διαμορφωμένα μετεωρολογικά δεδομένα, όπως αυτό περιγράφηκε στην παράγραφο 8.2.1. Θα γίνει εισαγωγή τριών αρχείων για τα έτη 2010, 2011 και 2012, ασχέτως της μη πληρότητας των ετών 2010 και 2012. Από αυτά τα αρχεία θα δημιουργηθούν

ισάριθμα νέα αρχεία μετεωρολογικών παραμέτρων σε μορφή (.met) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το λογισμικό PVSYST. Κάνοντας κλικ στο “choose” (επιλογή) δίπλα στο “ASCII source file” (πηγαίο αρχείο ASCII) γίνεται πλοήγηση στα αρχεία του υπολογιστή και επιλογή του κατάλληλα διαμορφωμένου αρχείου. Στο πεδίο “file to be created” (αρχείο προς δημιουργία) πραγματοποιείται επιλογή της θέσης (Khania) και στη συνέχεια δίνεται όνομα στο αρχείο που θα δημιουργηθεί με κλικ στο επόμενο κουμπί “choose”. Πρέπει να τονισθεί ότι το αρχείο που θα δημιουργηθεί δεν πρέπει να έχει το όνομα του ήδη υπάρχοντος αρχείου μετεωρολογικών δεδομένων τοποθεσίας που δημιουργήθηκε προηγουμένως κατά την αποθήκευση της θέσης, αλλά να έχει όνομα που περιλαμβάνει το έτος το οποίο αφορούν τα δεδομένα (π.χ. Khania2010.met).

Geographical site parameters

Geographical Coordinates:

Site: **Khania (Greece)**

Data source:

	Global Irrad. kW/h/m².mth	Diffuse kW/h/m².mth	Temper. °C	Wind Vel. m/s
January	71.6		13.8	
February	89.6		13.2	
March	141.7		14.3	
April	189.0		16.9	
May	230.9		20.3	
June	253.5		24.1	
July	260.7		26.2	
August	235.0		26.6	
September	184.2		24.6	
October	132.7		21.5	
November	79.5		18.0	
December	63.6		15.1	
Year	1932.0		19.6	

Required Data:

- ☒ Horizontal global irradiation
- ☒ Average Ext. Temperature

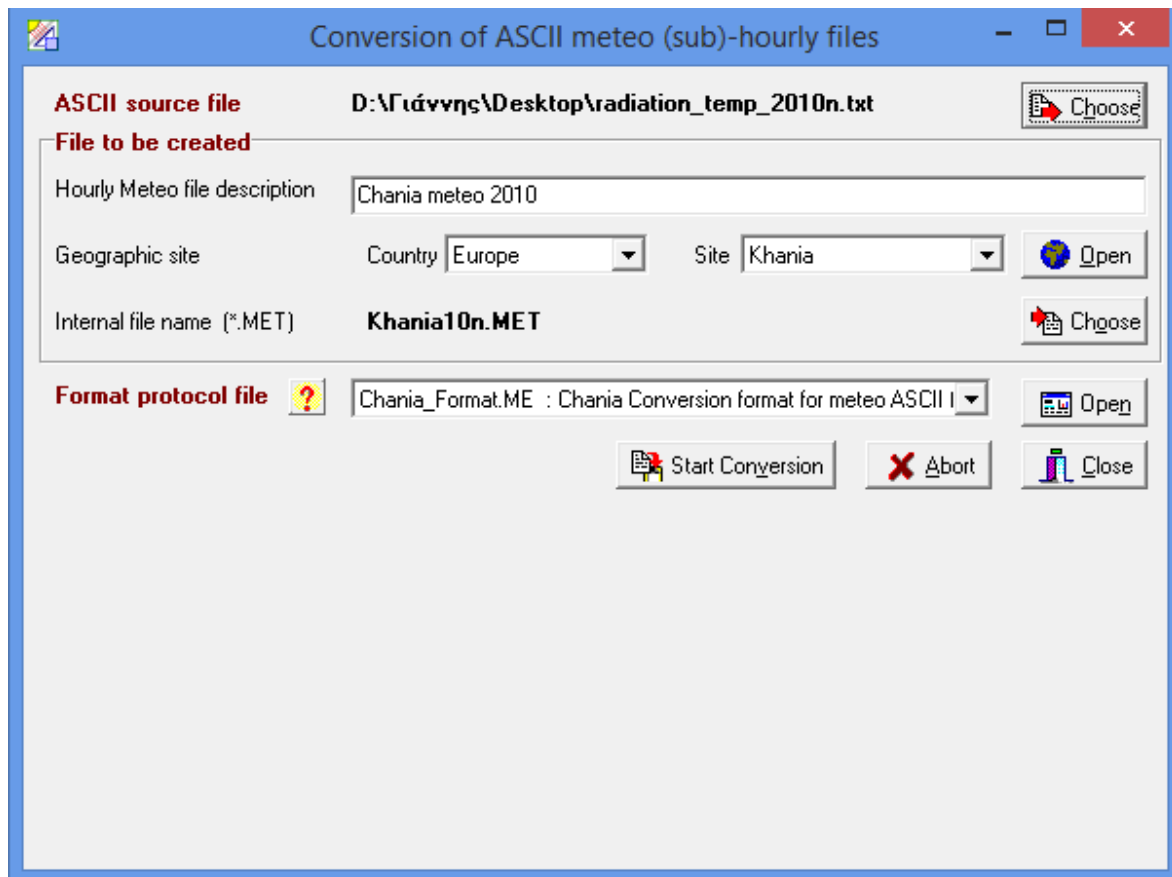
Extra data:

- ☐ Horizontal diffuse irradiation
- ☐ Wind velocity

Irradiation units:

- ☐ kW/h/m².day
- ☒ kW/h/m².mth
- ☐ MJ/m².day
- ☐ MJ/m².mth
- ☐ W/m²
- ☐ Clearness Index Kt

Εικόνα 16: Παράθυρο γεωγραφικών παραμέτρων θέσης, καρτέλα μηνιαίας μετεωρολογίας



Εικόνα 17: Μετατροπή μετεωρολογικού αρχείου τύπου ASCII (υπο)-ωριαίων δεδομένων

Τέλος, πρέπει δημιουργείται ένα βοηθητικό αρχείο το οποίο ορίζει στο λογισμικό τον τρόπο ανάγνωσης των δεδομένων από το πηγαίο μετεωρολογικό αρχείο. Έτσι, δίπλα στο “format protocol file” (αρχείο διαμόρφωσης πρωτοκόλλου) επιλέγεται το “open” (άνοιγμα) και ξεκινάει ο καθορισμός των μεταβλητών που περιέχει το πηγαίο αρχείο (εικόνα 18). Επιγραμματικά, στην πρώτη καρτέλα (general) γίνεται προεπισκόπηση του πηγαίου αρχείου ως δείγμα (πεδίο Sample ASCII file), καθορίζεται το χρονικό βήμα των δεδομένων ((sub)-hourly data > time step = 10 minutes) και οι αρχικές σειρές που παραλείπονται (head lines to be skipped = 1) στο τμήμα “source file organization” (οργάνωση πηγαίου αρχείου) και ορίζεται το διαχωριστικό πεδίων (fields separator) ως κενό από το πλήκτρο TAB (στηλοθέτης). Στη δεύτερη καρτέλα (date format), όπως φαίνεται στην εικόνα 19, επιλέγεται ο τρόπος εγγραφής των ημερομηνιών (data recording mode) ως

αναγνώσιμες από το πηγαίο αρχείο (dates read on the file), η μορφή της ημερομηνίας (date format = DD/MM/(YY) | hhmm (or hh/mm)) και οι στήλες που αντιστοιχούν στην ημερομηνία και στην ώρα (No Field on the ASCII line).

Format description: Chania Conversion format for meteo ASCII file

General | Date Format | Meteo Variables | Chaining files

Source File organization

☒ (Sub)-hourly data Time step: 10 minutes

☐ Daily data

Number of head lines to be skipped: 1

Supplement lines at beginning of days: 0

Supplement lines at beginning of months: 0

Fields separator

☐ ; semicolon

☐ , comma

☐ spaces

☒ TAB

☐ Other : []

☐ Fixed width

Sample ASCII file

Choose

The source file must hold one record (ASCII line) per time step

ASCII source file : D:\Γιάννης\Desktop\radiation_temp_2010n.txt

1	2	3	4	5
1: ημερομηνία	ώρα	ακτινοβολία	θερμοκρασία	
2: 1/6/2010	0:00	0	18,2	
3: 1/6/2010	0:10	0	18,265	
4: 1/6/2010	0:20	0	18,11	
5: 1/6/2010	0:30	0	18,115	
6: 1/6/2010	0:40	0	18,085	
7: 1/6/2010	0:50	0	18,12	

Εικόνα 18: Παράθυρο καθορισμού μορφοποίησης αρχείων εισόδου, καρτέλα Γενικά

Η νομική ώρα θεωρείται ως η βάση της ώρας που είναι καταγεγραμμένη στο αρχείο (time base = legal time) ενώ δεν εφαρμόζεται θερινό ωράριο¹⁵. Στην τρίτη καρτέλα (meteo variables) γίνεται καθορισμός των μετεωρολογικών μεταβλητών που θα εισαχθούν (Available on the source file = Horizontal global irradiance, Ambient temperature) και των στηλών στις οποίες αντιστοιχούν (field order on the

¹⁵ Θα εξεταστούν δύο περιπτώσεις: η εισαγωγή δεδομένων με διαμορφωμένα τα αρχεία εισόδου (πηγαία) ώστε η χρονική σήμανση να αντιστοιχεί μόνο στη χειμερινή ώρα και η εισαγωγή των δεδομένων από αρχείο εισόδου με αλλαγή θερινής/χειμερινής ώρας χωρίς ωστόσο επισήμανσής της στο λογισμικό.

ASCII line). Επίσης, προσδιορίζεται η μορφή της πυκνότητας των δεδομένων ακτινοβολίας σε ισχύ (Irradiance given in: power) και οι πολλαπλασιαστές (multiplier) προκειμένου οι μονάδες να μετατραπούν σε MJ/m² για την ακτινοβολία και σε °C για τη θερμοκρασία (εικόνα 20). Οι τιμές των πολλαπλασιαστών δίνονται από τη βοήθεια (help) του λογισμικού. Η τελευταία καρτέλα (chaining files) δε θα χρησιμοποιηθεί καθώς αφορά δεδομένα που βρίσκονται καταναμεμημένα σε περισσότερα αρχεία. Έχοντας συμπληρώσει μια περιγραφή για την τρέχουσα διαμόρφωση (format description = Chania conversion format) αποθηκεύεται το βοηθητικό αρχείο με κλικ στο OK.

Conversion of ASCII meteo (sub)-hourly files

Format description: Cancel OK

General | Date Format | Meteo Variables | Chaining files

Date recording mode

- ☐ Reference year (1 jan - 31 dec, not leap year)
- ☐ Sequential dates, not read on the file
- ☒ Dates read on the file

Date format

?

NB : If the dates are not sequential (missing measurements), they have to be read on the file.

No Field on the ASCII line

DD/MM/YY
hhmm

Time base

- ☐ Solar time
- ☒ Legal time

Summer Time

- ☐ Apply ?
- ☐ Std Europe

Record time label

- ☒ Interval beginning
- ☐ Interval end

Time Shift (minutes) ?

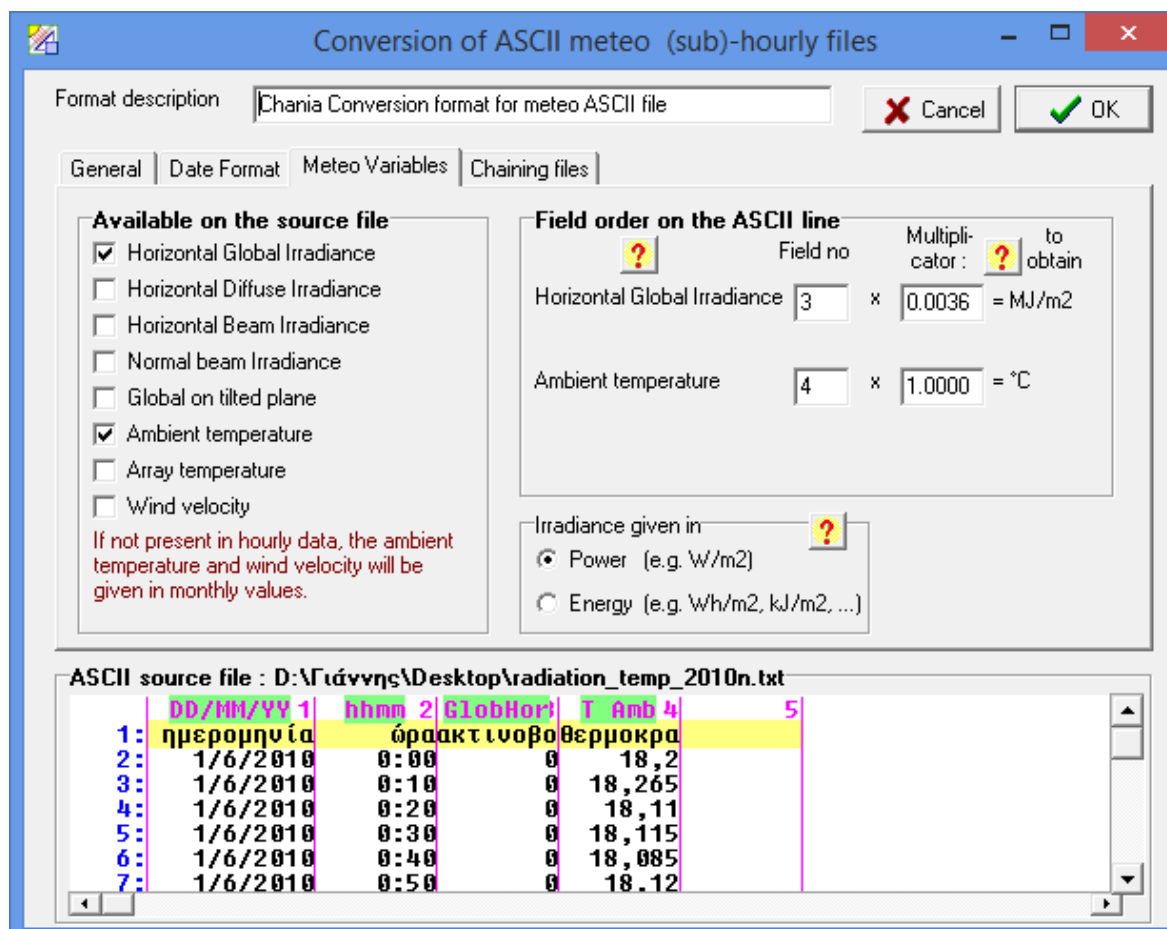
ASCII source file : D:\Γιάννης\Desktop\radiation_temp_2010n.txt

	DD/MM/YY 1	hhmm 2	GlobHorz 3	T Amb 4	
1:	ημερομηνία	ώρα	ακτινοβολία	θερμοκρασία	
2:	1/6/2010	0:00	0	18,2	
3:	1/6/2010	0:10	0	18,265	
4:	1/6/2010	0:20	0	18,11	
5:	1/6/2010	0:30	0	18,115	
6:	1/6/2010	0:40	0	18,085	
7:	1/6/2010	0:50	0	18,12	

Εικόνα 19: Παράθυρο καθορισμού μορφοποίησης αρχείων εισόδου, καρτέλα Μορφή Ημερομηνίας

Το εσωτερικό αρχείο μετεωρολογικών δεδομένων μπορεί να δημιουργηθεί πλέον με κλικ στο πλήκτρο “start conversion” (έναρξη μετατροπής). Αυτή η διαδικασία

διαρκεί μερικά δευτερόλεπτα και το λογισμικό ειδοποιεί με επιβεβαίωση για την επιτυχή δημιουργία του. Εάν τα δεδομένα δεν είναι σε καλή κατάσταση εμφανίζεται αντίστοιχη προειδοποίηση. Τα επόμενα μετεωρολογικά δεδομένα εισάγονται γρήγορα επιλέγοντας το επόμενο πηγαίο αρχείο (source file) και δίνοντας κατάλληλο όνομα για το αρχείο που θα δημιουργηθεί (internal file name). Με κλικ στο “close” (κλείσιμο) γίνεται επιστροφή στο κυρίως πρόγραμμα αφού η εισαγωγή δεδομένων έχει αποπερατωθεί με επιτυχία.



Εικόνα 20 Παράθυρο καθορισμού μορφοποίησης αρχείων εισόδου, καρτέλα Μετεωρολογικές Μεταβλητές

8.2.4. Εισαγωγή παραμέτρων της ΦΒ εγκατάστασης στο λογισμικό

Κάνοντας κλικ στο πρώτο από τα αριστερά πλήκτρα της αρχικής οθόνης έργου (εικόνα 13), ξεκινάει ο καθορισμός των αρχικών παραμέτρων του έργου. Αρχικά, δίνεται ένα όνομα για το έργο (project's name) στο πλαίσιο “project's designation” (προσδιορισμός έργου), όπως φαίνεται στην επόμενη οθόνη (εικόνα 21). Εδώ

επιλέγεται ο τίτλος “Chania Project” και τα υπόλοιπα κελιά μπορούν να διατηρηθούν κενά.

Project and Simulation version definitions

Project's designation

The Project includes mainly the geographic SITE definition, and the associated METEO hourly file

Project's name Chania Project **Date** 30/7/2013

Customer **Phone**

Address **Fax**

City Chania **Email**

Country Greece

Please define the geographical site and meteo !

Buttons: Cancel, New project, Load project, Site and Meteo

System Variant

A system version includes all Parameters required for a simulation, the Results of the simulation, and an eventual Economic Evaluation. Within a project, you may construct as many System versions as desired.

Variant n° New simulation variant **New Version**

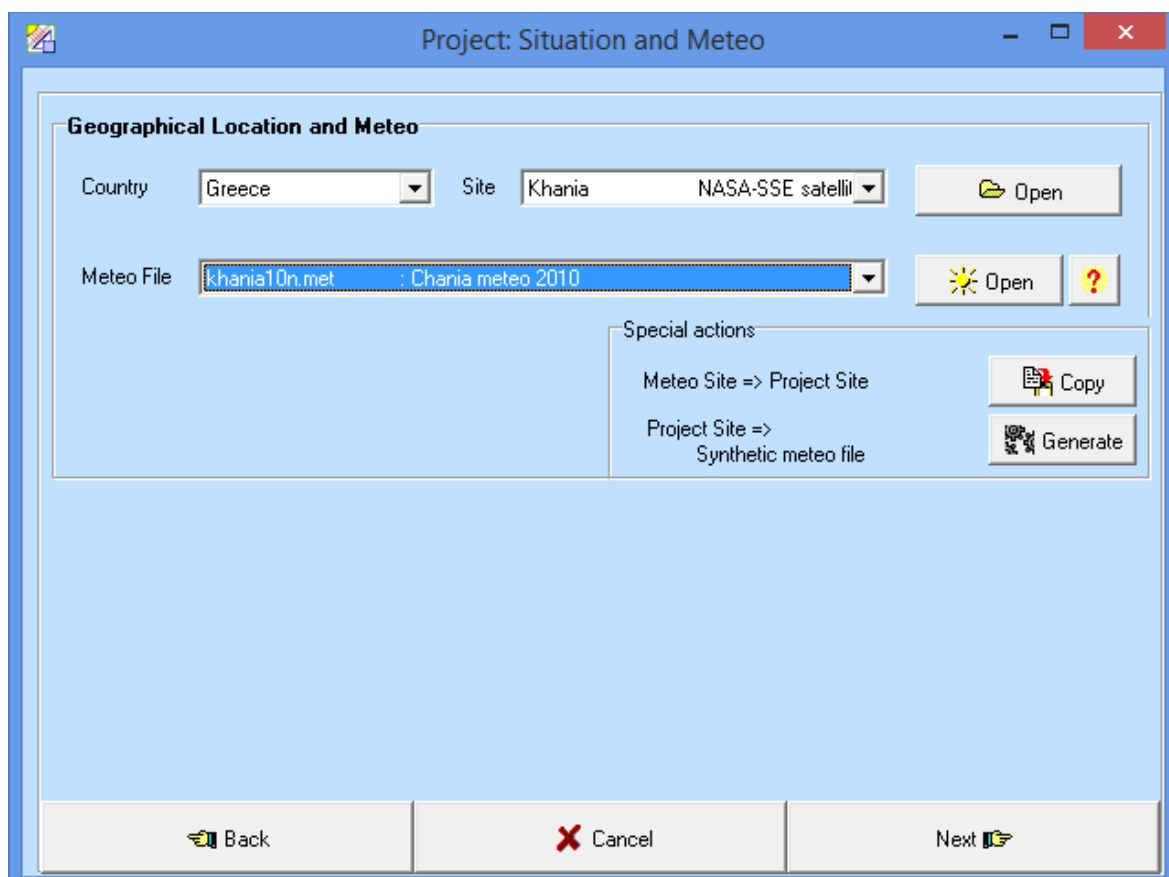
Back (Calculation)

Εικόνα 21: Παράθυρο έργου και εξομοίωσης

Στη συνέχεια, γίνεται επιλογή του πλήκτρου “site and meteo” για τον καθορισμό της τοποθεσίας και των μετεωρολογικών δεδομένων. Εμφανίζεται το επόμενο παράθυρο (εικόνα 22) στο οποίο γίνεται επιλογή της χώρας (country = Greece) και της περιοχής για την τοποθεσία που βρίσκεται η ΦΒ εγκατάσταση (site = Chania). Πρόκειται για τη θέση που δημιουργήθηκε προηγουμένως. Η επιλογή του μετεωρολογικού αρχείου που περιέχει τα δεδομένα αυτής της περιοχής γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα. Όμως, σε αυτή τη περίπτωση πρέπει να επιλεγθεί το προσαρμοσμένο από το χρήστη αρχείο, αρχικά αυτό που αφορά το έτος 2010.

Ύστερα, με κλικ στο πλήκτρο “next” (επόμενο) εμφανίζεται το παράθυρο της εικόνας 23 για τον καθορισμό του συντελεστή ανάκλασης του εδάφους (albedo)

και άλλων σχετιζόμενων με την τοποθεσία παραμέτρων. Στο πλαίσιο “Albedo values” δίνεται η επιλογή καθορισμού ενιαίου ανά έτος ή ξεχωριστού ανά μήνα συντελεστή ανακλαστικότητας. Η ανά μήνα επιλογή έχει αξία για περιοχές όπου η επιφάνεια του εδάφους μεταβάλλεται ανά εποχή. Για παράδειγμα, το έδαφος μπορεί να είναι καλυμμένο με χιόνι το χειμώνα, έχοντας μεγάλη ανακλαστικότητα, και ξερό το καλοκαίρι με μικρό συντελεστή ανάκλασης. Εδώ, επιλέγεται ένας σταθερός συντελεστής ίσος με 0,25 που αντιστοιχεί σε επιφάνεια εδάφους από σκυρόδεμα. Επίσης, στο πλαίσιο “site-depended design parameters” γίνεται διόρθωση της προεπιλεγμένης “lower temperature for V_{max} Abs limit” (χαμηλότερης θερμοκρασίας για απόλυτη μέγιστη τάση) από -10°C σε -5°C για την αποφυγή μιας διένεξης που εμφανίζεται στη συνέχεια.



Εικόνα 22: Παράθυρο Θέσης και Μετεωρολογικών

Τέλος, με κλικ στο OK αποθηκεύονται οι αρχικές παράμετροι του έργου. Προς επιβεβαίωση της ορθής εισαγωγής των δεδομένων, το πλήκτρο “project” γίνεται φωτεινό πράσινο στη αρχική οθόνη του έργου (εικόνα 13).

Project's parameter: Albedo for the project's situation

Albedo values

Monthly values

Jan.	0.25	July	0.25
Feb.	0.25	Aug.	0.25
Mar.	0.25	Sep.	0.25
Apr.	0.25	Oct.	0.25
May	0.25	Nov.	0.25
June	0.25	Dec.	0.25

Set a common value

Common value: 0.25
(Default: albedo = 0.2)

Usual values for albedo

Urban situation	0.14 - 0.22
Grass	0.15 - 0.25
Fresh Grass	0.26
Fresh snow	0.82
Wet snow	0.55 - 0.75
Dry asphalt	0.09 - 0.15
Wet asphalt	0.18
Concrete	0.25 - 0.35
Red tiles	0.33
Aluminium	0.85
New galvanised steel	0.35
Very dirty galvanised steel	0.08

Site-dependent Design parameters

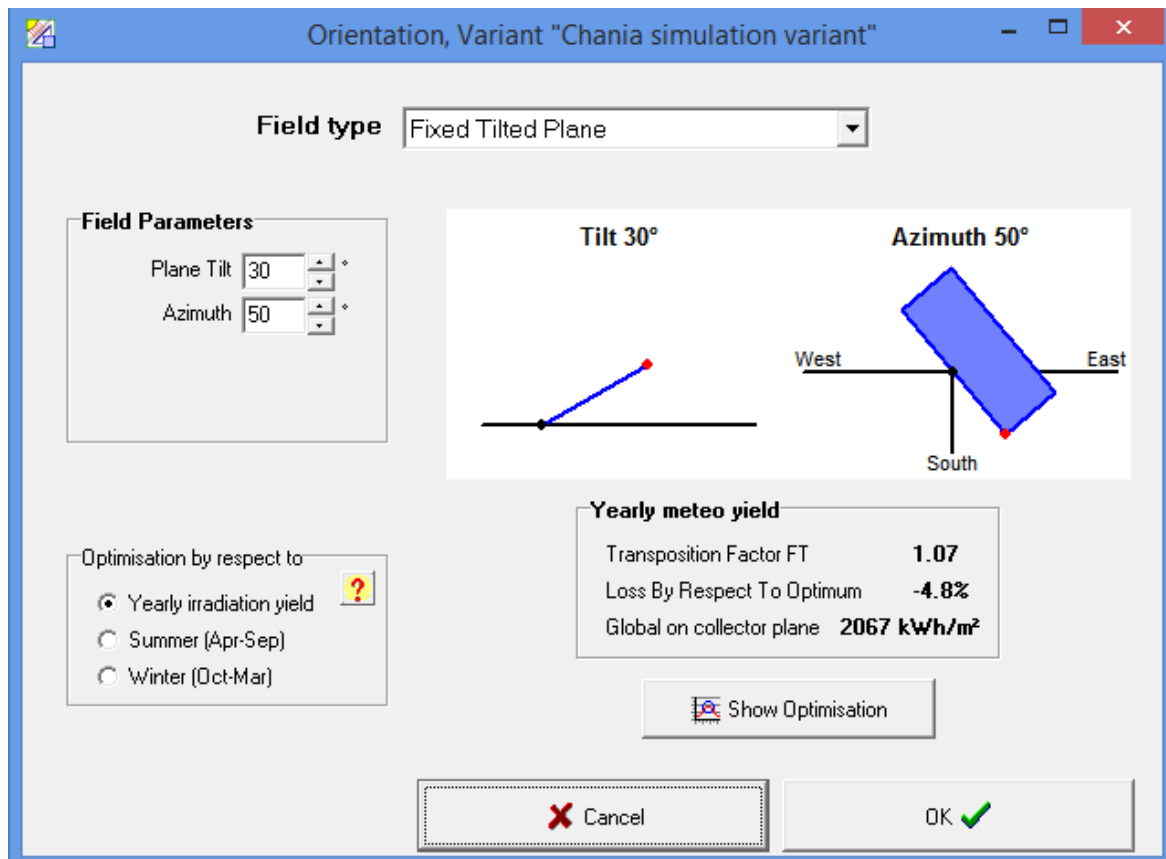
Reference temperatures for array design by respect to the inverter input voltages

Lower temperature for VmaxAbs limit	-5	°C	☐	Default
Winter operating temperature for VmppMax design	20	°C	☒	
Usual operating temperature under 1000 W/m	50	°C	☒	
Summer operating temperature for VmppMin design	60	°C	☒	

Back Cancel OK

Εικόνα 23: Παράθυρο καθορισμού του συντελεστή ανάκλασης (albedo) του εδάφους

Επόμενο σημαντικό βήμα στον καθορισμό παραμέτρων του έργου είναι η εισαγωγή του προσανατολισμού και της κλίσης των ΦΒ πλαισίων. Στο αρχικό παράθυρο έργου γίνεται επιλογή του “orientation”, και έτσι εμφανίζεται το επόμενο παράθυρο (εικόνα 24).



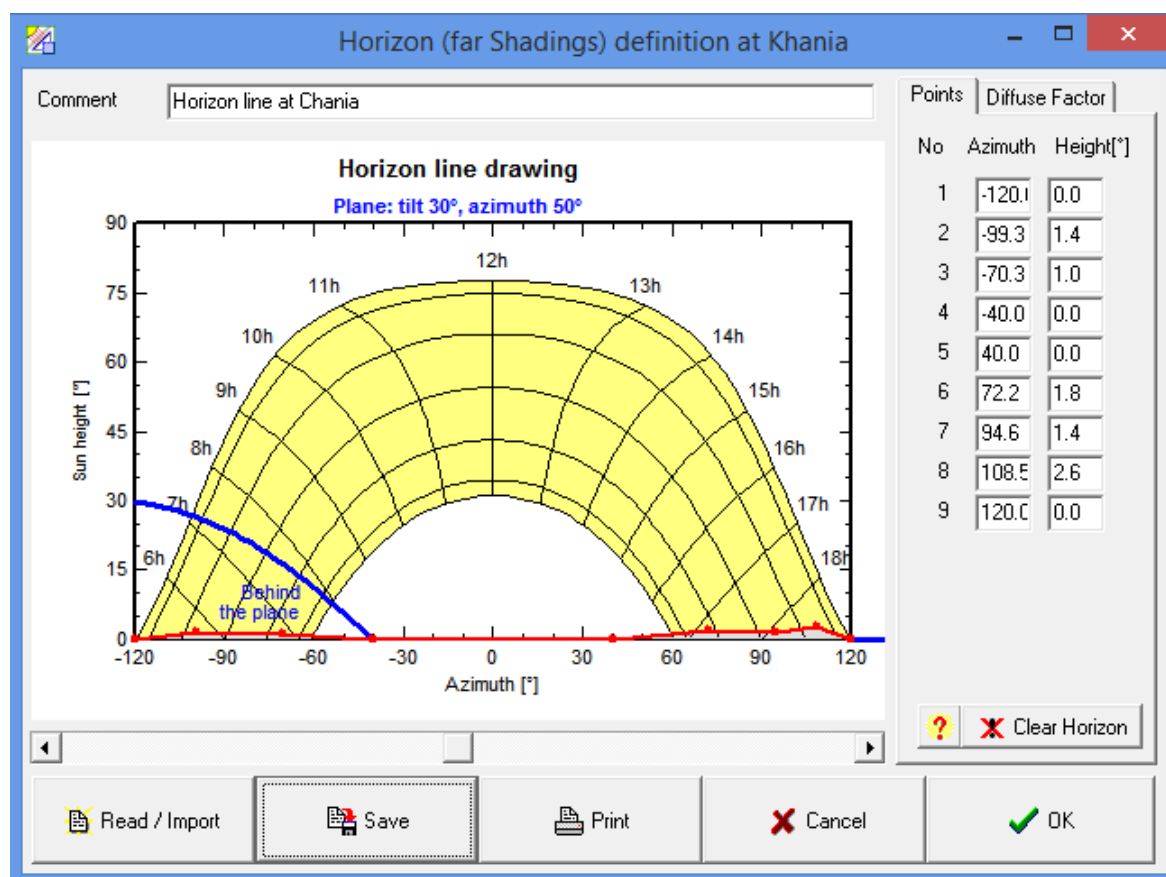
Εικόνα 24: Παράθυρο προσανατολισμού (και κλίσης) των ΦΒ

Στο πλαίσιο “field type” (τύπος πεδίου) γίνεται επιλογή του “fixed tilted plane” (σταθερό κεκλιμένο επίπεδο). Υπάρχουν πολλές άλλες επιλογές, όπως, εποχιακή ρύθμιση της κλίσης με δυνατότητα καθορισμού χειμερινών και θερινών μηνών· ιχνηλάτης ηλίου οριζοντίου άξονα· ιχνηλάτης ηλίου κατακόρυφου άξονα· ιχνηλάτης διπλού άξονα κ.ά.. Στο πλαίσιο “field parameters” (παράμετροι πεδίου) γίνεται εισαγωγή της κλίσης (plane tilt) και του αζιμούθιου¹⁶ (azimuth) των ΦΒ πλαισίων. Η βέλτιστη κλίση για όλο το έτος στα Χανιά υπολογίζεται στις 30° ενώ τα ΦΒ στρέφονται στις 50° από το Νότο με νοτιοανατολικό προσανατολισμό για λόγους αισθητικής του κτηρίου πάνω στο οποίο βρίσκονται. Αυτή η απόκλιση από το

¹⁶ Θα εξετασθούν δύο περιπτώσεις, η ρύθμιση του αζιμούθιου: (1) στις 50° και (2) στις -50°.

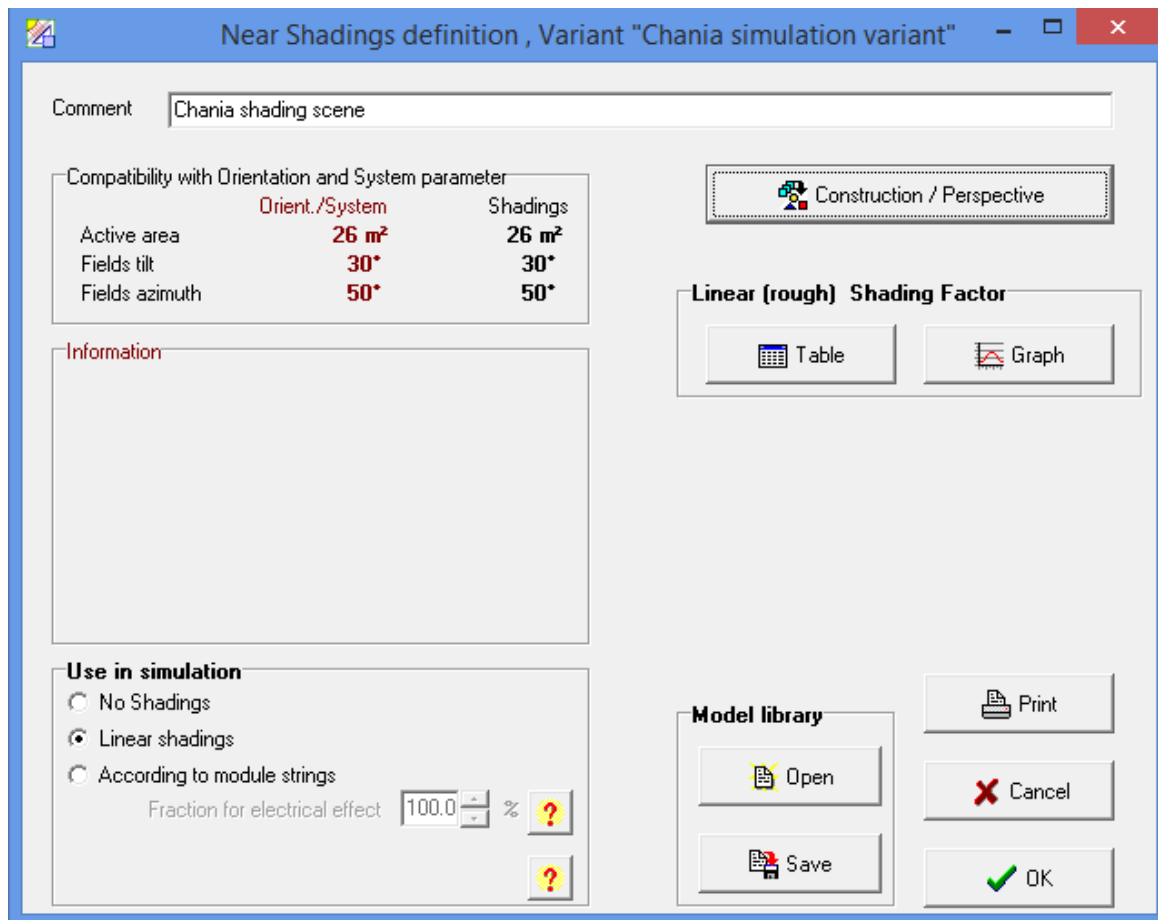
βέλτιστο προσανατολισμό προκαλεί απώλειες της τάξης του 5%, όπως ενημερώνει το πρόγραμμα. Οι ρυθμίσεις προσανατολισμού έχουν πλέον ολοκληρωθεί.

Για το τρίτο βήμα γίνεται επιλογή του πλήκτρου “horizon” στο αρχικό παράθυρο έργου. Εδώ μπορεί να σχεδιαστεί το ανάγλυφο του ορίζοντα, όπως αυτό φαίνεται με σημείο αναφοράς τη ΦΒ συστοιχία. Στο παράθυρο που ανοίγει (εικόνα 25), εμφανίζεται ένα σκαρίφημα με τις τροχιές του ήλιου καθ’ όλη τη διάρκεια του έτους. Στον οριζόντιο άξονα αναγράφεται το αζιμούθιο και στον κατακόρυφο η κλίση από τον ορίζοντα. Προσαρμόζοντας την κόκκινη γραμμή στο κάτω μέρος της εικόνας, δύνανται να εισαχθούν στο πρόγραμμα τα δεδομένα που αφορούν τον ορίζοντα, δηλαδή τα βουνά της περιοχής που κρύβουν μέρος της τροχιάς του ήλιου και προκαλούν «μακρινές» σκιάσεις. Ο σχεδιασμός του ορίζοντα στο πρόγραμμα γίνεται με βάση τη χάραξη του ορίζοντα που πραγματοποιήθηκε (παραγρ. 3.2).



Εικόνα 25: Παράθυρο ορίζοντα (ή μακρινών σκιάσεων)

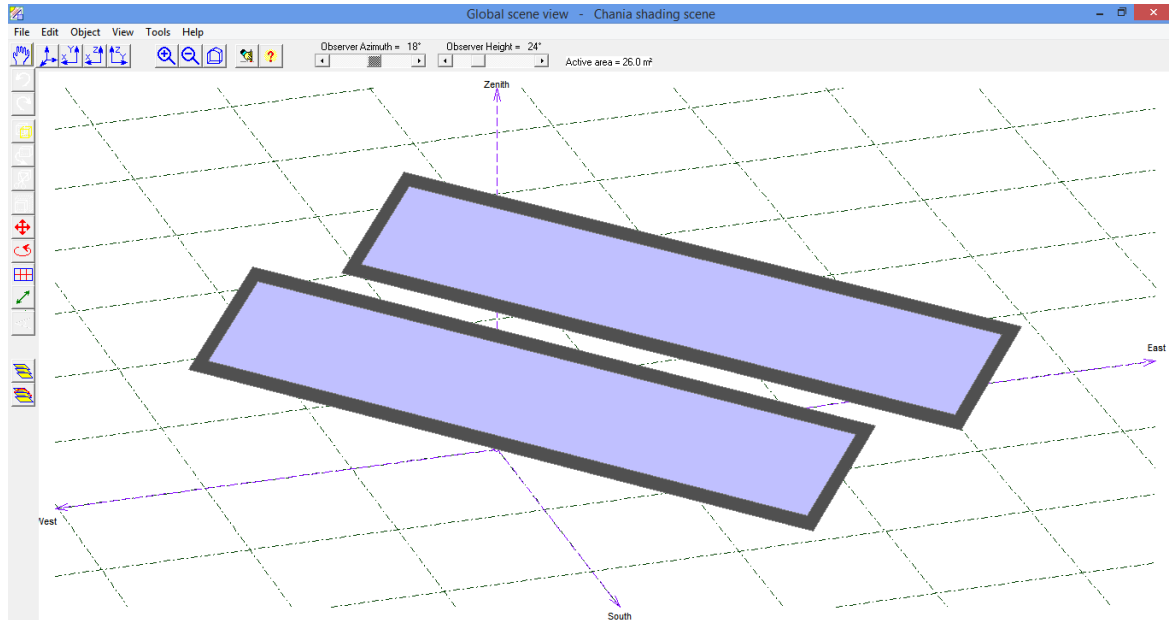
Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των κοντινών σκιάσεων. Από το αρχικό παράθυρο έργου γίνεται επιλογή του τέταρτου πλήκτρου στα αριστερά που αναγράφει “near shadings”. Έτσι, ανοίγει το παράθυρο ορισμού των κοντινών σκιάσεων (near shadings definition) (εικόνα 26).



Εικόνα 26: Παράθυρο ορισμού κοντινών σκιάσεων

Στο πλαίσιο “use in simulation” (χρήση στην προσομοίωση) γίνεται επιλογή του “linear shadings” (γραμμικές σκιάσεις) και στη συνέχεια να κλικ στο “construction / perspective” (κατασκευή / οπτική) για τον ακριβή σχεδιασμό τυχόν αντικειμένων που σκιάζουν τη διάταξη. Με αυτήν την επιλογή το παράθυρο που επιτρέπει το σχεδιασμό της διάταξης στο χώρο και την εισαγωγή εμποδίων για τη δημιουργία μιας γενικής άποψης της σκηνής του έργου (global scene view) (εικόνα 27). Πρώτα, γίνεται σχεδιασμός της ίδιας της διάταξης ώστε να ληφθούν υπόψη κατά την προσομοίωση οι σκιές πάνω στην πίσω συστοιχία από τη μπροστά, όταν ο

ήλιος βρίσκεται χαμηλά στον ορίζοντα. Ύστερα, γίνεται σχεδιασμός των υπόλοιπων κοντινών εμποδίων, όπως δέντρα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν υπάρχουν σκιάσεις από κοντινά αντικείμενα, οπότε αυτή η επιλογή παραλείπεται.



Εικόνα 27: Παράθυρο σχεδιασμού διάταξης και αντικειμένων που προκαλούν σκιάσεις.

Το τελικό βήμα της εισαγωγής δεδομένων αφορά τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται στο έργο. Από το αρχικό παράθυρο έργου γίνεται επιλογή του κουμπιού “system” (σύστημα) και εμφανίζεται το επόμενο παράθυρο (εικόνα 28) με τίτλο “grid system definition” (καθορισμός δικτύου).

Αρχικά, στο πλαίσιο “resizing help” (βοήθεια προκαθορισμού μεγέθους) πραγματοποιείται εισαγωγή είτε της συνολικής ισχύος των ΦΒ σε kW_p είτε της επιφάνειάς τους σε m^2 . Αμέσως μετά, στο πλαίσιο “select the PV module” (επιλογή του ΦΒ πλαισίου) γίνεται εύρεση και επιλογή του ΦΒ που χρησιμοποιείται στη διάταξη. Για ευκολία στον εντοπισμό του ανάμεσα σε όλα τα υπόλοιπα, η επεκτεινόμενη λίστα μπορεί να ταξινομηθεί με βάση τον κατασκευαστή (sort modules by manufacturer) με επιλογή του αντίστοιχου πλαισίου ελέγχου.

Grid system definition , Variant "Chania simulation variant"

Global System configuration
1 Number of kinds of sub-fields
Simplified Schema

Global system summary
Nb. of modules 18 Nominal PV Power 2.2 kWp
Module area 26 m² Maximum PV Power 2.1 kWdc
Nb. of inverters 1 Nominal AC Power 2.3 kWac

Homogeneous System

Presizing Help
☐ No Sizing Enter planned power ☐ 2.2 kWp, ... or available area ☐ 26 m²

Select the PV module
Sort modules: ☒ Power ☐ Technology ☐ Manufacturer All modules
121 Wp 38V uCSI-aSi:H NA-F121 (G5) Sharp Manufacturer 20(Open
Sizing voltages : Vmpp (60°C) 39.3 V
Voc (-5°C) 65.7 V

Select the inverter
Sort inverters by: ☒ Power ☐ Voltage (max) ☐ Manufacturer All inverters
2.3 kW 224 - 480 V 50/60 Hz Sunny Boy SB 2500 SMA Open
Nb. of inverters 1 Operating Voltage: 224-480 V Global Inverter's power 2.3 kWac
Input maximum voltage: 600 V "String" inverter with 3 inputs

Design the array

Number of modules and strings
Initial degrad. 10 % ☒ should be between 6 and 8
Mod. in series 9 ☐ between 6 and 8
Nb. strings 2
Overload loss 0.0 % Show sizing
Phom ratio 0.95

Operating conditions
Vmpp (60°C) 354 V
Vmpp (20°C) 426 V
Voc (-5°C) 591 V
Plane irradiance 1000 W/m² ☐ Max. in data ☒ STC
Imp (STC) 5.4 A Max. operating power 2.0 kW at 1000 W/m² and 50°C
Isc (STC) 6.8 A
Isc (at STC) 6.7 A Array nom. Power (STC) 2.2 kWp

Nb. modules 18 Area 26 m²

User's needs Detailed losses Cancel OK

Εικόνα 28: Παράθυρο ορισμού διασυνδεδεμένου συστήματος

Με τον ίδιο τρόπο γίνεται επιλογή στο πλαίσιο "select the inverter" του μοντέλου του αντιστροφέα (inverter) που χρησιμοποιείται. Στη συνέχεια, στο πλαίσιο "design the array" (σχεδιασμός της συστοιχίας) προσδιορίζονται αναλυτικά ο αριθμός των ΦΒ πλαισίων, η διάταξη των κλάδων (strings) και η αρχική υποβάθμιση της απόδοσής τους (degradation). Η τελευταία αφήνεται στην προεπιλεγμένη τιμή της. Τέλος, με κλικ στο "detailed losses" (λεπτομερείς απώλειες) εμφανίζεται ένα νέο παράθυρο στο οποίο καθορίζονται οι συντελεστές απωλειών σε κάθε σημείο του

συστήματος. Τα διάφορα είδη απωλειών περιλαμβάνουν τη θερμική παράμετρο (thermal parameter), τις ωμικές απώλειες (ohmic losses), την ποιότητα και την αναντιστοιχία μεταξύ των ΦΒ πλαισίων (module quality – mismatch), τις απώλειες καθαρότητας (soiling loss) και τέλος τις απώλειες λόγω της γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στα ΦΒ (incidence angle modifier losses). Η θερμική παράμετρος απωλειών καθορίζεται είτε από τον παράγοντα θερμικών απωλειών πεδίου (field thermal loss factor) είτε από τον πρότυπο παράγοντα της ονομαστικής θερμοκρασίας λειτουργίας κυψελίδας (nominal operating cell temperature - NOCT). Οι ωμικές απώλειες υπολογίζονται με βάση την αντίσταση των καλωδίων, το μήκος τους και την παρουσία εξωτερικού μετασχηματιστή. Οι απώλειες λόγω ποιότητας καθορίζονται ως μέγεθος από τον κατασκευαστή, ομοίως και οι απώλειες αναντιστοιχίας. Οι απώλειες καθαρότητας εξαρτώνται από τη συχνότητα με την οποία γίνεται καθαρισμός των ΦΒ και ο παράγοντας καθαρότητας συμπληρώνεται εμπειρικά. Οι απώλειες λόγω γωνίας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας καθορίζονται από το μοντέλο ASHRAE όπου η παράμετρος b_0 μπορεί να καθοριστεί από το χρήστη ανάλογα με το υλικό επίστρωσης των ΦΒ. Όλες οι τιμές διατηρούνται στις προεπιλογές τους.

8.2.5. Προβλήματα και διενέξεις

Η εκτέλεση του λογισμικού PVSYST συνοδευόταν από μερικές απρόοπτες καταστάσεις. Γι' αυτό το λόγο εξήχθησαν αποτελέσματα για διαφορετικές περιπτώσεις ρύθμισης των παραμέτρων της ΦΒ εγκατάστασης.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ταυτίζονται πολύ καλά με τα πραγματικά αποτελέσματα από τη λειτουργία των ΦΒ όταν ο προσανατολισμός της διάταξης και τα μετεωρολογικά δεδομένα εισαχθούν εσφαλμένα! Με βάση το εγχειρίδιο του λογισμικού, προσανατολισμός με ανατολική απόκλιση από το Νότο εισάγεται με

αρνητικό πρόσημο (-). Περιγραφή αυτών των ευρημάτων και προσπάθεια ερμηνείας έχει πραγματοποιηθεί στα προηγούμενα κεφάλαια.

Παρακάτω περιγράφονται άλλα λειτουργικά προβλήματα του λογισμικού, τα οποία, όμως, δεν δημιούργησαν μη αντιμετωπίσιμες καταστάσεις.

Οι παράμετροι του ΦΒ συστήματος κρίνονται εσφαλμένες από το λογισμικό. Συγκεκριμένα, στο παράθυρο «σύστημα», εμφανίζεται μια προειδοποίηση ότι «η τάση ανοιχτοί κυκλώματος της συστοιχίας υπερβαίνει την απόλυτη μέγιστη τάση εισόδου του αντιστροφέα στους -10°C ». Το σφάλμα είναι τόσο καθοριστικό ώστε το πρόγραμμα να εμφανίζει το πλήκτρο «σύστημα» με κόκκινο χρώμα και να μην επιτρέπει την περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων. Για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο, γίνεται αντικατάσταση της προεπιλεγμένης ελάχιστης θερμοκρασίας των -10°C για το χειμώνα με μια λιγότερο ακραία τιμή για τα Χανιά, τους -5°C . Σε αυτήν την περίπτωση, η υπέρβαση της τάσης, κατά το πρόγραμμα, αφορά μόνο το διάστημα πριν την αρχική περίοδο πτώσης της απόδοσης των ΦΒ (“the initial array V_{OC} before degradation at -5°C is greater than the inverter absolute maximum input voltage”). Έτσι, το σφάλμα επισημαίνεται με κίτρινο χρώμα από το πρόγραμμα και η εκτέλεση της προσομοίωσης μπορεί να συνεχιστεί κανονικά.

Τέλος, εμφανίζονταν κάποια αναπάντεχα σφάλματα τα οποία προκαλούσαν τερματισμό της λειτουργίας του λογισμικού ή απώλεια αποθήκευσης ρυθμίσεων. Τα μήνυμα σφάλματος εμφανιζόταν στα Γαλλικά, λόγω της Ελβετικής προέλευσης του λογισμικού. Η αιτία εμφάνισης των σφαλμάτων (bugs) είναι άγνωστη.

8.2.6. Εκτέλεση προσομοίωσης και εξαγωγή αποτελεσμάτων

Προκειμένου να εξαχθούν τα αποτελέσματα για τα δύο χρόνια λειτουργίας της ΦΒ διάταξης πρέπει να γίνει εκτέλεση της προσομοίωσης τρεις φορές, για τα χρονικά

διαστήματα: Ιούνιος 2010 με Δεκέμβριος 2010, ολόκληρο το 2011 και Ιανουάριος 2012 με Μάιος 2012. Αυτό πραγματοποιείται με τρεις διαφορετικές αποθηκεύσεις του έργου (project) για τα τρία ξεχωριστά μετεωρολογικά αρχεία.

Από την αρχική οθόνη έργου (εικόνα 13) γίνεται επιλογή του πλήκτρου “simulation” (προσομοίωση) με αποτέλεσμα την εμφάνιση του παραθύρου της εικόνας 29. Γίνεται επιβεβαίωση του χρονικού διαστήματος για το οποίο θα πραγματοποιηθεί η εκτέλεση της εκτίμησης και επιλέγεται και πάλι το “simulation”. Όσο διαρκεί η προσομοίωση εμφανίζεται ένα προσωρινό παράθυρο με μπάρα προόδου (εικόνα 30). Με το πέρας της προσομοίωσης, η οποία δε διαρκεί περισσότερο από μερικά δευτερόλεπτα για αυτήν την περίπτωση, εμφανίζεται το παράθυρο αποτελεσμάτων (εικόνα 31). Από εκεί είναι δυνατή η προβολή και εκτύπωση αναφοράς (report), γραφημάτων (graphs), πινάκων (tables) αλλά και η διεξαγωγή οικονομικής αποτίμησης (economic evaluation). Για τις ανάγκες αυτής της διπλωματικής θα γίνει μόνο εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε πίνακες, οι οποίοι στη συνέχεια θα επικολληθούν στο Excel για περαιτέρω επεξεργασία, κατασκευή διαγραμμάτων και σύγκριση αποτελεσμάτων.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης βρίσκονται στο κεφάλαιο 4.2.

Simulation, Variant "Chania simulation variant"

Simulation parameters

Variant: **Chania simulation variant**

Project	Chania Project	PV module	NA-F121 (G5)	Inverter	Sunny Boy SB 2500
Site	Khania	Unit power	121 Wp	Unit power	2.3 kW
Horizon	Average Height = 0.7°	Nb. modules	18	Nb. inverters	1
System	Grid-Connected	Array Power	2.18 kWp	Pnom AC	2.30 kWac

Preliminary definitions

Optional further definitions. For refined data analysis only.

Hourly data storage

Special graphs

Output File

Simulation dates

from: 1/1/2013 ☒ Meteo begin

up to: 31/5/2013 ☒ Meteo end

Back to params. **Simulation** Results

Εικόνα 29: Παράθυρο προσομοίωσης

Hourly Simulation Progress

Status: Executes the simulation by steps of one hour

Attenuation factors for Diffuse

	IAM	Shading	IAM*Shading
Diffuse	0.961	0.995	0.961
Albedo	0.811	0.963	0.782

Display:

☐ Hourly Values

☒ Daily Values

☐ Monthly Values

Display daily values Simulation 23/03/13

Meteo: Global, Diffuse, Tamb 6.19, 1.46kWh/m².day, 13.8°C, 0.0 m/s

On collt: Global, Diffuse, Glob. eff. 7.24, 1.62, 0.10, 7.04 kWh/m².day

System: EMax, ENet, EUse 13.2, 13.2, 12.34kWh/day

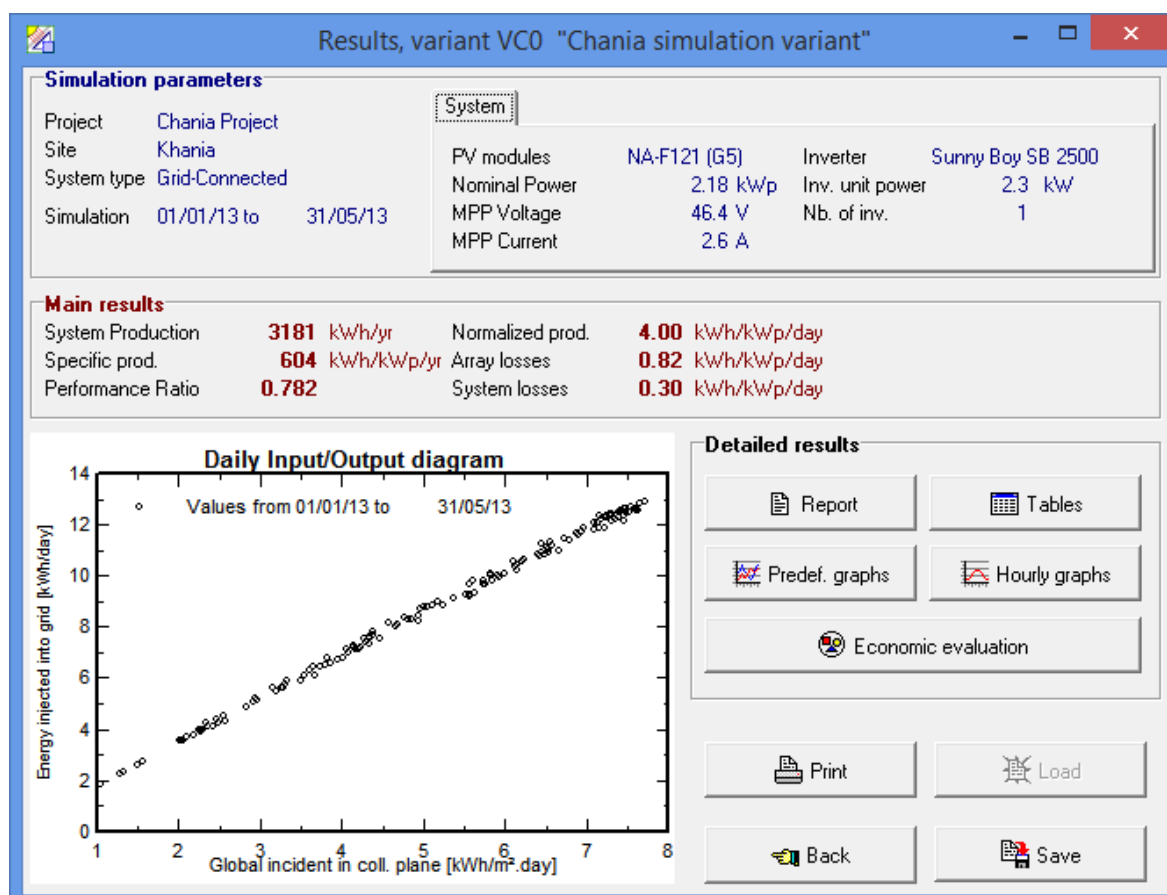
Load: ELoad, EUsed, EOver Unlimited, 0.0, 0.0 kWh/day

Step by step

Continue

Abort

Εικόνα 30: Παράθυρο Προόδου ωριαίας προσομοίωσης



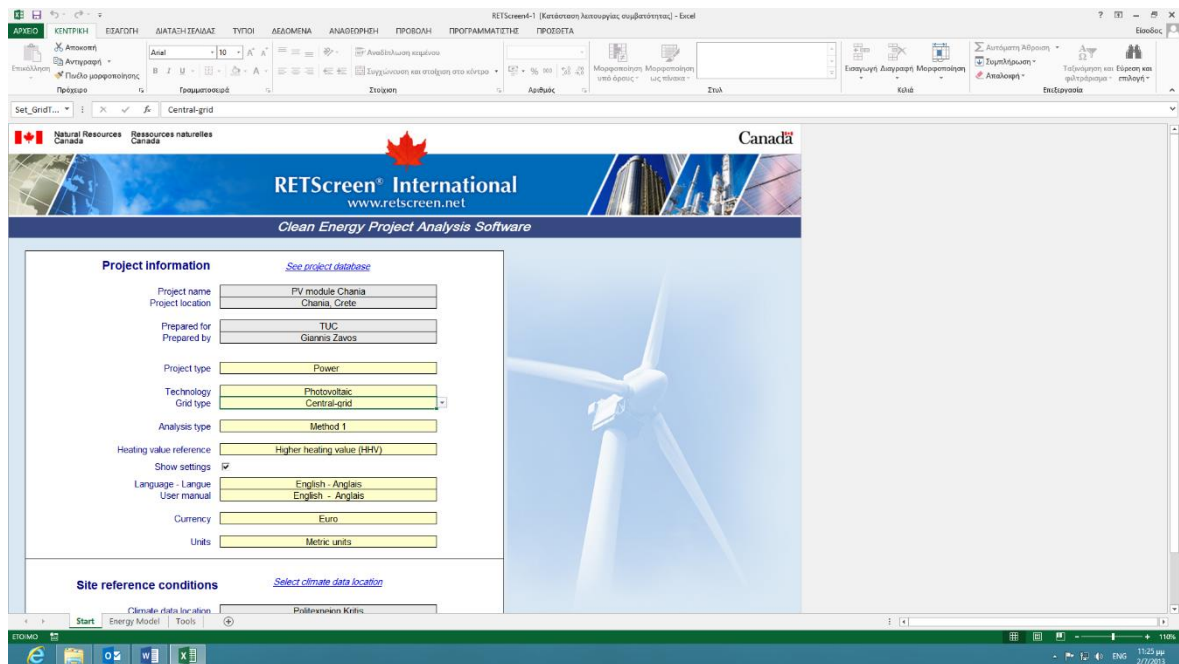
Εικόνα 31: Παράθυρο αποτελεσμάτων

8.3. Εισαγωγή και ανάλυση δεδομένων με το RETSCREEN

8.3.1. Εισαγωγή δεδομένων

Με την εκκίνηση του λογισμικού RETSCREEN 4 ανοίγει ένα ειδικά διαμορφωμένο λογιστικό φύλλο του MS Office Excel. Όλη η διαδικασία της εισαγωγής δεδομένων για τη ΦΒ συστοιχία γίνεται με συμπλήρωση αριθμών στα κατάλληλα κελιά του υπολογιστικού φύλλου ή την επιλογή προεπιλεγμένων παραμέτρων από λίστες.

Στην καρτέλα “start” (έναρξη) του λογισμικού, υπάρχουν δύο πλαίσια (εικόνα 32). Το πρώτο που εμφανίζεται έχει τίτλο Πληροφορίες Έργου (project information). Εκεί, συμπληρώνονται αρχικά το όνομα και η τοποθεσία της εγκατάστασης.



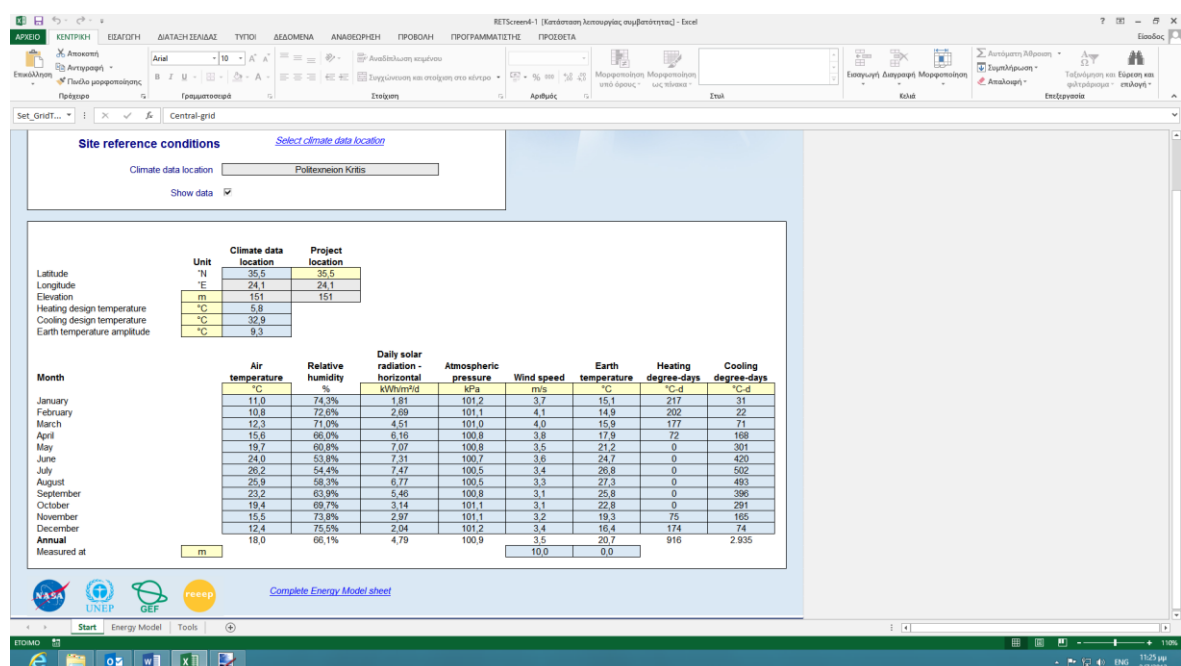
Εικόνα 32: Καρτέλα Start (α' μέρος) του λογισμικού RETSCREEN (πρόσθετο του Excel)

Κατόπιν, επιλέγονται μέσω επεκτεινόμενων λιστών στα επόμενα κελιά το είδος του έργου (project type), η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία (technology), ο τύπος του δικτύου (grid type), ο τύπος της ανάλυσης (analysis type), η τιμή αναφοράς θέρμανσης (heating reference value), η γλώσσα (language), το νόμισμα (currency) και οι μονάδες μέτρησης (units). Εδώ σημειώνεται ότι ο χρήστης μπορεί να συμπληρώσει ελεύθερα με δικές του τιμές τα γκρι κελιά, ενώ στα κίτρινα κελιά οι τιμές που μπορούν να εισαχθούν (αριθμητικές ή λογικές) είναι προκαθορισμένες και επιλέγονται μέσω επεκτεινόμενης λίστας που εμφανίζεται με κλικ στο αντίστοιχο κελί.

Ο τύπος του έργου που επιλέγεται είναι ισχύος (power). Ενδεικτικά, θα μπορούσε να είναι ισχύος από πολλαπλές πηγές, ψύξης, συμπαραγωγής ενέργειας και θερμότητας κ.λπ. Ο τύπος του δικτύου είναι κεντρικό (central-grid) αφού η ΦΒ εγκατάσταση είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο της ΔΕΗ. Για τον τύπο ανάλυσης επιλέγεται η μέθοδος 1, διαφορετικά η ανάλυση γίνεται κατά βάση χρηματοοικονομική και η διεπαφή του προγράμματος αλλάζει εμφανίζοντας

πλήθος εργαλείων οικονομολογίας. Η γλώσσα είναι επιλογή του χρήστη, ενώ η επιλογή νομίσματος αδιάφορη καθώς δεν θα εξετασθεί καμία οικονομική πτυχή της λειτουργίας των ΦΒ. Για μονάδες μέτρησης επιλέγονται αυτές του μετρικού συστήματος (metric units).

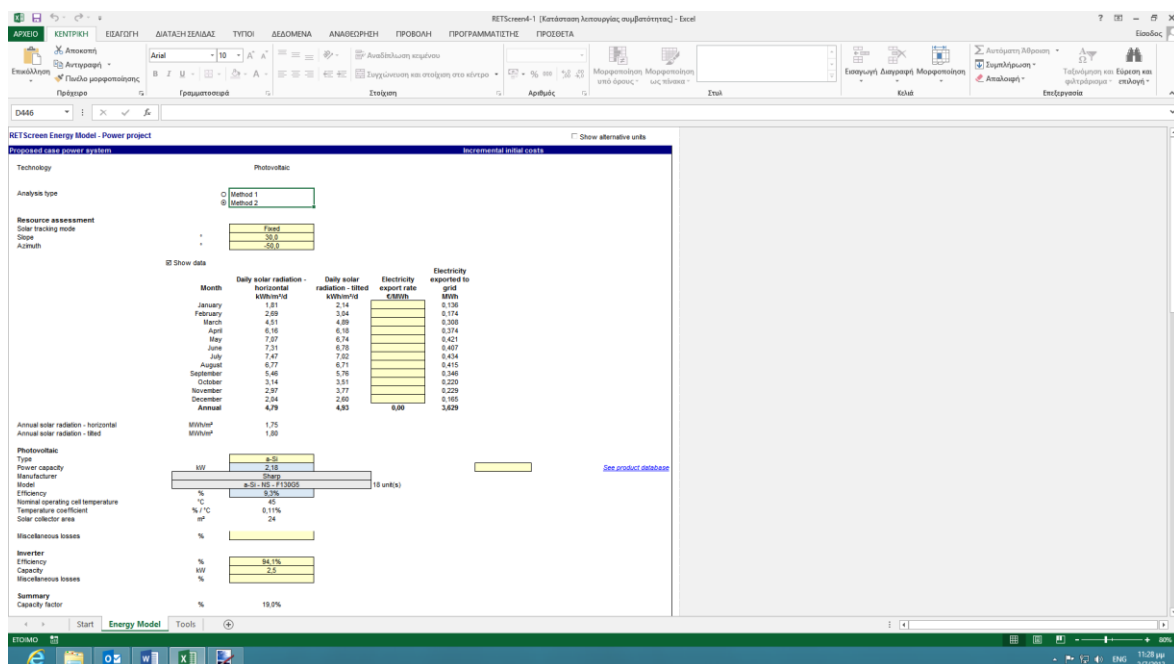
Πραγματοποιώντας κύλιση προς τα κάτω, εμφανίζεται το υπόλοιπο τμήμα της αρχικής καρτέλας του λογισμικού, με όνομα πλαισίου Συνθήκες Αναφοράς Τοποθεσίας (site reference conditions). Σε αυτό το τμήμα γίνεται εισαγωγή των μετεωρολογικών δεδομένων (εικόνα 33). Με κλικ στον σύνδεσμο «επιλογή τοποθεσίας κλιματικών δεδομένων» (select climate data location) εμφανίζεται ένα πρόσθετο παράθυρο με δυνατότητα εύρεσης της κοντινότερης τοποθεσίας. Από εκεί, γίνεται επιλογή του αεροδρομίου Ι. Δασκαλογιάννης των Χανίων που βρίσκεται στην περιοχή του Ακρωτηρίου (η πιο κοντινή περιοχή στο Πολυτεχνείο Κρήτης). Παράλληλα, επιλέγεται το πλαίσιο ελέγχου «προβολή δεδομένων» (show data) ώστε τα κλιματικά δεδομένα να εμφανιστούν στην οθόνη του λογισμικού.



Εικόνα 33: Καρτέλα Start (β' μέρος) του λογισμικού RETSCREEN (πρόσθετο του Excel)

Η εισαγωγή των δεδομένων μέσης ημερήσιας πυκνότητας ισχύος ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας γίνεται με επί τόπου αντικατάσταση των υπαρχόντων τιμών στην αντίστοιχη στήλη του πίνακα δεδομένων (daily solar radiation, horizontal – kWh/m²/d). Τα δεδομένα που εισάγονται έχουν προκύψει κατά την προεργασία της εφαρμογής του αλγόριθμου των Liu και Jordan στο Excel, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 8.1.1.

Στη συνέχεια γίνεται επιλογή της καρτέλας Ενεργειακό Μοντέλο (energy model). Σε αυτήν την καρτέλα υπάρχουν τρία πλαίσια, εκ των οποίων μόνο το πρώτο θα αξιοποιηθεί καθώς τα υπόλοιπα αφορούν οικονομική ανάλυση και ανάλυση ρύπων (εικόνα 34). Επομένως, στο πρώτο πλαίσιο με τίτλο «Σύστημα ισχύος προτεινόμενης περίπτωσης» (proposed case power system) πραγματοποιείται συμπλήρωση των στοιχείων της εγκατάστασης.



Εικόνα 34: Καρτέλα Energy Model του λογισμικού RETSCREEN (πρόσθετο του Excel)

Στον τύπο ανάλυσης (analysis type) αυτής της καρτέλας επιλέγεται η μέθοδος 2, επειδή αυτή παρέχει τη δυνατότητα επισκόπησης της παραγόμενης ενέργειας από τα ΦΒ. Στη λειτουργία παρακολούθησης του ήλιου (solar tracking mode)

συμπληρώνεται η ύπαρξη σταθερής στήριξης των ΦΒ (fixed) και στη συνέχεια συμπληρώνονται η κλίση (slope = 30°) και το αζιμούθιο (azimuth = -50°). Το πλαίσιο ελέγχου προβολή δεδομένων (show data) πρέπει να είναι και εδώ ενεργοποιημένο. Παρακάτω συμπληρώνεται ο τύπος του ΦΒ (type = a-Si), η ισχύς (power capacity = 2,18 kW), ο κατασκευαστής (manufacturer = Sharp) και το μοντέλο (model = a-Si-NS-F130G5). Η απόδοση (efficiency = 9,3%) εμφανίζεται αυτόματα. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη (NA-F121G5, απόδοση = 8,5%) δεν υπήρχε στη λίστα των διαθέσιμων μοντέλων, γι' αυτό συμπληρώθηκε αυτό με τα κοντινότερα τεχνικά χαρακτηριστικά. Τέλος, συμπληρώνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αντιστροφέα, που είναι η ικανότητα (capacity = 2,5 kW) και η απόδοση (efficiency = 94,1%).

8.3.2. Εξαγωγή αποτελεσμάτων

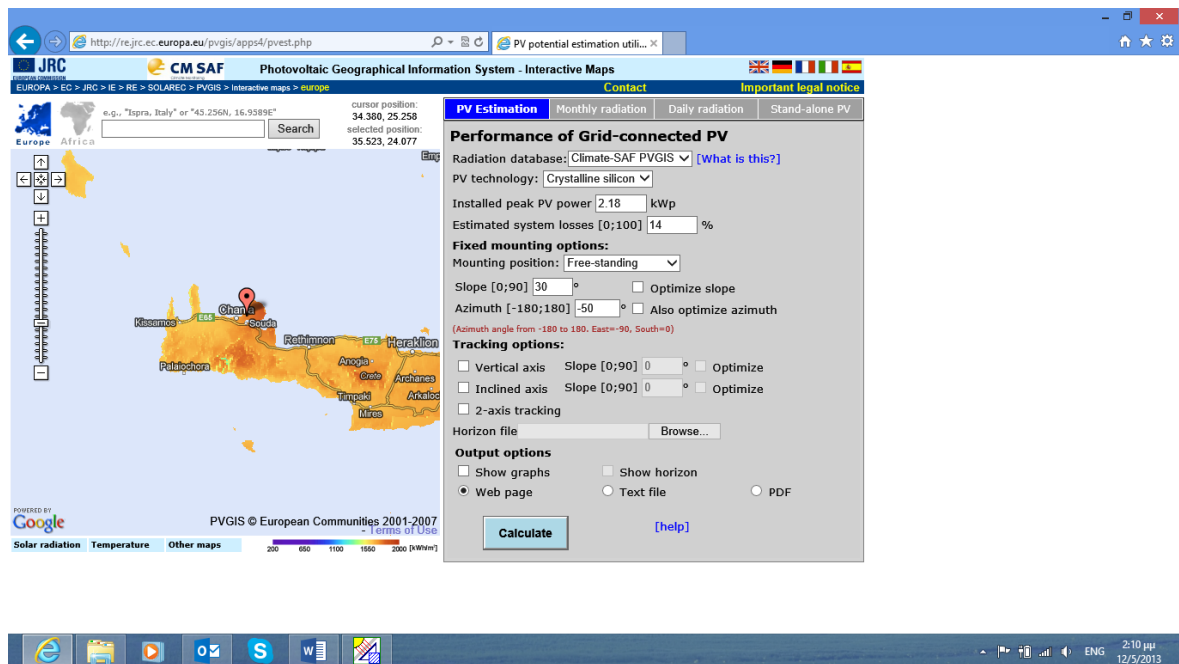
Ο υπολογισμός των αποτελεσμάτων γίνεται αυτόματα με την είσοδο των δεδομένων. Για αυτό το λόγο παρατηρείται συχνά μια καθυστέρηση στην απόκριση του προγράμματος, καθώς οι νέες παράμετροι που εισάγονται αναγκάζουν τους αλγόριθμους του λογισμικού να εκτελεστούν εκ νέου. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται σε πίνακα κάτω από το πλαίσιο ελέγχου «προβολή δεδομένων» (show data). Αυτά περιλαμβάνουν τη μέση ημερήσια πυκνότητα ηλιακής ενέργειας στην κεκλιμένη επιφάνεια για κάθε μήνα, την αξία του εξαγόμενου ρεύματος (για την περίπτωση που εισήχθησαν πληροφορίες τιμολογίου) και την ηλεκτρική ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο κάθε μήνα σε MWh. Η τελευταία είναι και η μόνη παράμετρος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση με τα πραγματικά στοιχεία από τη λειτουργία των ΦΒ. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4.3.

8.4. Εκτέλεση εκτίμησης με το εργαλείο PVGIS

Το διαδικτυακό εργαλείο PVGIS εκτελείται απευθείας στην ιστοσελίδα <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php> στην οποία γίνεται μετάβαση (εικόνα 35). Εκεί υπάρχει ένας διαδραστικός χάρτης και στα δεξιά του ένα πλαίσιο με τέσσερις καρτέλες. Από αυτές θα επιλεγθεί μόνο η πρώτη με τίτλο PV Estimation (εκτίμηση ΦΒ). Οι υπόλοιπες αφορούν τον υπολογισμό της ημερήσιας και μηνιαίας ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και την ανάλυση αυτόνομου ΦΒ συστήματος (stand alone).

Αρχικά γίνεται επιλογή του σημείου της υπό εξέτασης εγκατάστασης. Ο χάρτης παρέχεται από την Google και είναι ειδικά διαμορφωμένος ώστε να προβάλει χαρτογραφημένα με χρωματική διαβάθμιση τα δεδομένα πυκνότητας ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο χρήστης μπορεί να κινεί το χάρτη με το δείκτη του ποντικιού και να αλλάζει την κλίμακα. Η επιλογή του σημείου γίνεται με «καρφίτσωμα» πάνω στο χάρτη, δηλαδή, με κλικ του ποντικιού πάνω στο επιθυμητό σημείο· το αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση μιας πινέζας που κατοχυρώνει το επιλεγμένο σημείο.

Στη συνέχεια συμπληρώνονται τα δεδομένα που αφορούν το ΦΒ. Η επιλογή της βάσης δεδομένων ακτινοβολίας (radiation database) δεν γίνεται να αλλάξει, αν και αυτή η δυνατότητα φαίνεται πως υπάρχει αλλά δεν λειτουργεί. Ως τεχνολογία ΦΒ (PV technology) επιλέγεται το κρυσταλλικό πυρίτιο (crystalline silicon), καθώς δεν υπάρχει επιλογή για ΦΒ άμορφου πυριτίου. Η εγκατεστημένη ισχύς αιχμής συμπληρώνεται (installed peak PV power = 2,18 kW) και μετά ακολουθούν οι εκτιμώμενες απώλειες, οι οποίες αφήνονται στην προεπιλεγμένη τους τιμή (estimated system losses = 14%).



Εικόνα 35: Ιστοσελίδα του PVGIS, <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>

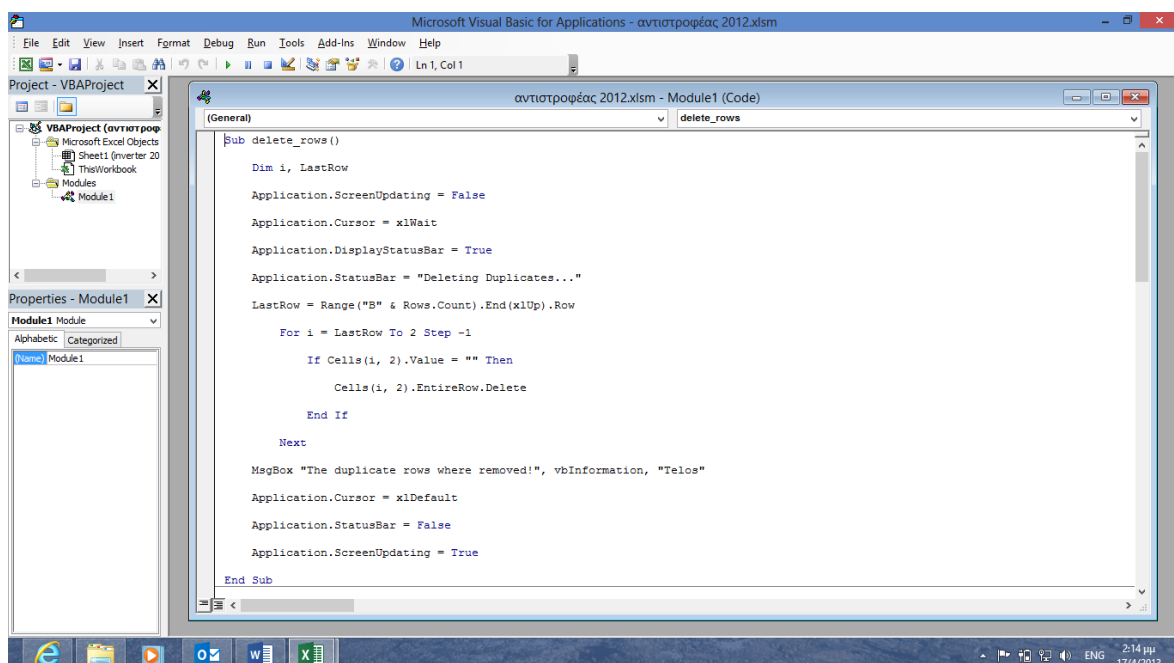
Τα τελευταία δεδομένα που εισάγονται αφορούν την τοποθέτηση και τη στήριξη των ΦΒ. Το εργαλείο έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει στήριξη δύο αξόνων αλλά και να λάβει δεδομένα για τον ορατό ορίζοντα από το σημείο της εγκατάστασης. Η εξεταζόμενη εγκατάσταση έχει σταθερή στήριξη, ενώ ο ορίζοντας είναι ιδιαίτερα χαμηλός, οπότε δε γίνεται χρήση αυτών των δυνατοτήτων. Έτσι, συμπληρώνεται ως θέση στήριξης η ελεύθερη στήριξη (mounting options = free-standing) σε αντίθεση με την ενσωμάτωση σε κτήριο (building integrated) και εισάγεται η κλίση (slope = 30°) και το αζιμούθιο (azimuth = -50°).

Τέλος, γίνεται επιλογή της μορφής του αρχείου των αποτελεσμάτων (μεταξύ προβολής στην ιστοσελίδα, αρχείο κειμένου και αρχείο PDF) και επιλέγεται το πλήκτρο Calculate (υπολογισμός) για την ανάλυση και εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε πίνακα. Αυτά παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4.4.

8.5. Μακροεντολές και Συναρτήσεις

Οι μακροεντολές είναι συλλογές εντολών που μπορούν να εκτελεσθούν με ένα κλικ του ποντικιού στον υπολογιστή. Μπορούν να αυτοματοποιήσουν ενέργειες που θα ήταν εξαιρετικά χρονοβόρες εάν πραγματοποιούνταν χειρωνακτικά ή να δώσουν νέες δυνατότητες στα εκτελούμενα προγράμματα, όπως το MS Office Excel (εικόνα 36). Οι μακροεντολές αποτελούν ένα είδος προγραμματισμού, ωστόσο δεν χρειάζεται κάποιος να είναι προγραμματιστής για να τις χρησιμοποιήσει. Οι περισσότερες μακροεντολές που μπορεί να δημιουργήσει ο χρήστης στο MS Office έχουν συνταχθεί σε γλώσσα προγραμματισμού Microsoft Visual Basic for Applications ή αλλιώς VBA.

Οι συναρτήσεις συντάσσονται παρόμοια με τις μακροεντολές αλλά εκτελούνται απευθείας σε κάθε κελί, όπως και οι υπόλοιπες ενσωματωμένες μαθηματικές συναρτήσεις του Excel.



Εικόνα 36: Το περιβάλλον χρήσης της γλώσσας Visual Basic for Applications στο MS Excel.

8.5.1. Μακροεντολή διαγραφής κενών σειρών

Τα δεδομένα από τους καταγραφείς τάσης και έντασης περιείχαν για άγνωστο λόγο διπλότυπες σειρές, μετά την εισαγωγή τους από το αρχείο κειμένου (.txt) στο λογιστικό φύλλο (.xls) για επεξεργασία. Αν και το MS Excel διαθέτει μία ενσωματωμένη λειτουργία διαγραφής διπλοτύπων, αυτή ήταν άχρηστη στη συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω της εναλλασσόμενης εμφάνισης των διπλότυπων σειρών και της εναλλάξ ύπαρξης περισσότερων χρήσιμων δεδομένων σε μία σειρά από ένα ζεύγος διπλότυπων. Για αυτό το λόγο, ήταν απαραίτητη η ανάπτυξη της παρακάτω μακροεντολής.

```
Sub delete_rows()  
    Dim i, lastrow  
    Application.ScreenUpdating = False  
    lastrow = Range("B" & Rows.Count).End(xlUp).Row  
    For i = lastrow To 2 Step -1  
        If Cells(i, "b").Value = "" Then  
            Cells(i, "B").EntireRow.Delete  
        End If  
    Next i  
    MsgBox "The duplicate rows where removed!", vbInformation, "End"  
    Application.ScreenUpdating = True  
End Sub
```

8.5.2. Μακροεντολή απαλοιφής χρονικών ασυνεχειών

Η παρακάτω μακροεντολή προγραμματίστηκε από το Χρήστο Σαμαρά, χάρη στην εθελοντική βοήθεια που προσέφερε μέσω διαδικτυακού φόρουμ για μηχανικούς [www.michanikos.gr]. Η μακροεντολή αυτή διαβάζει σε ένα φύλλο δεδομένων τη χρονική σήμανση και, όπου εντοπίζει χρονικές ασυνέχειες, προσθέτει τον ανάλογο αριθμό σειρών που λείπουν. Οι σειρές που εισάγονται είναι κενές από δεδομένα και περιλαμβάνουν μόνο τη χρονική σήμανση που έλειπε. Η συμπλήρωση των

δεδομένων γίνεται αργότερα κατά περίπτωση, είτε χειρωνακτικά είτε με άλλη μακροεντολή.

```
Sub TimeDiscontinuity()  
    Dim LastRow As Long  
    Dim i As Long  
    Dim insRows As Long  
    Dim j As Long  
    'Inserts missing time values, starting from the last row in column A.  
    'By Christos Samaras  
    'http://www.myengineeringworld.net  
    Application.ScreenUpdating = False  
    With ActiveSheet  
        LastRow = .Cells(.Rows.Count, "A").End(xlUp).Row  
    End With  
    For i = LastRow To 3 Step -1  
        If Cells(i, 1).Value - Cells(i - 1, 1).Value > 6.94444446708076E-04 Then  
            insRows = ((Cells(i, 1).Value - Cells(i - 1, 1).Value) / 6.94444446708076E-04)  
            - 1  
            '6.94444446708076E-04 = (1 / (24 * 60))  
            ActiveSheet.Rows(i & ":" & i + insRows - 1).Insert  
            For j = i To i + insRows - 1  
                Cells(j, 1) = Cells(j - 1, 1) + 6.94444446708076E-04  
            Next j  
        End If  
    Next i  
    MsgBox "The missing time values were inserted!", vbInformation, "Done"  
    Application.ScreenUpdating = True  
End Sub
```

8.5.3. Μακροεντολή συμπλήρωσης κενών σειρών

Η επόμενη μακροεντολή συμπληρώνει τις σειρές όπου τα δεδομένα λείπουν. Για να πραγματοποιηθεί αυτό εισάγει τη μέση τιμή της προηγούμενης και της

επόμενης σειράς δεδομένων. Ο περιορισμός της είναι ότι λειτουργεί μόνο για απομονωμένες κενές σειρές δεδομένων. Εάν δύο ή περισσότερες κενές σειρές βρεθούν η μία κάτω από την άλλη τότε θα πρέπει να συμπληρωθούν χειρωνακτικά. Αυτό συμβαίνει επειδή ο προγραμματισμός μιας πιο πλήρους μακροεντολής θα ήταν αρκετά σύνθετος και θα έπρεπε να λαμβάνει υπόψη περισσότερες παραμέτρους. Για παράδειγμα, εάν οι κενές σειρές εμφανίζονταν κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι τιμές ακτινοβολίας θα έπρεπε να συμπληρωθούν με μηδενικά κι όχι με μέσες τιμές.

```
Sub lonely_row()  
    Dim LastRow As Long  
    Dim i As Long  
    Application.ScreenUpdating = False  
    With ActiveSheet  
        LastRow = .Cells(.Rows.Count, "A").End(xlUp).Row  
    End With  
    For i = 3 To LastRow Step 1  
        If Cells(i, 2).Value = "" Then  
            If Cells(i + 1, 2).Value <> "" And Cells(i - 1, 2) <> "" Then  
                Cells(i, 2).Value = (Cells(i - 1, 2).Value + Cells(i + 1, 2).Value) / 2  
                Cells(i, 3).Value = (Cells(i - 1, 3).Value + Cells(i + 1, 3).Value) / 2  
                Cells(i, 4).Value = (Cells(i - 1, 4).Value + Cells(i + 1, 4).Value) / 2  
                Cells(i, 5).Value = (Cells(i - 1, 5).Value + Cells(i + 1, 5).Value) / 2  
                Cells(i, 6).Value = (Cells(i - 1, 6).Value + Cells(i + 1, 6).Value) / 2  
                Cells(i, 7).Value = (Cells(i - 1, 7).Value + Cells(i + 1, 7).Value) / 2  
                Cells(i, 8).Value = (Cells(i - 1, 8).Value + Cells(i + 1, 8).Value) / 2  
                Cells(i, 9).Value = (Cells(i - 1, 9).Value + Cells(i + 1, 9).Value) / 2  
            End If  
        End If  
    Next i  
    MsgBox "Average values have been added", vbInformation, "Done"  
    Application.ScreenUpdating = True
```

End Sub

8.5.4. Μακροεντολή ταξινόμησης δεδομένων ανά ημέρα

Τα δεδομένα από τους καταγραφείς πριν και μετά τον αντιστροφέα έχουν βήμα ενός λεπτού. Η ημερήσια απόδοση ενέργειας υπολογίζεται αθροίζοντας τα γινόμενα της στιγμιαίας ισχύος επί το χρονικό διάστημα του βήματος για κάθε ολόκληρη ημέρα. Η παρούσα μακροεντολή εξειδικεύεται στην ανάγνωση και εύρεση αυτών των ημερήσιων αθροισμάτων· στη συνέχεια κατασκευάζει μια νέα στήλη με τα δεδομένα τακτοποιημένα ανά ημέρα.

Sub day_yield()

Dim LastRow As Long

Dim i As Long

Dim j As Long

Application.ScreenUpdating = False

With ActiveSheet

LastRow = .Cells(.Rows.Count, "A").End(xlUp).Row

End With

j = 2

For i = 2 To LastRow Step 1

If Cells(i + 1, 2).Value = "" And Cells(i, 2).Value > 0 Then

Cells(j, 13).Value = Cells(i, 1).Value

Cells(j, 14).Value = Cells(i, 5).Value

Cells(j, 15).Value = Cells(i, 10).Value

j = j + 1

End If

Next

MsgBox "Η ημερήσια ταξινόμηση ολοκληρώθηκε!", vbInformation, "Τέλος"

Application.ScreenUpdating = True

End Sub

8.5.5. Μακροεντολή εύρεσης μέσων διωριαίων τιμών ισχύος για τον Ιούνιο (30 ημέρες)

Η μακροεντολή αυτή υπολογίζει τη μέση ημερήσια τιμή ισχύος δίκωρου των ΦΒ για τον μήνα Ιούνιο. Τα δεδομένα πρέπει να έχουν την ανάλογη μορφοποίηση για την εκτέλεση της μακροεντολής.

Sub average_duo_hourly_June()

Dim i As Long

Dim j As Long

Dim k As Long

Dim l As Long

Dim m As Long

Dim n As Long

For j = 2 To 9 Step 1

*m = 302 + (j - 2) * 120*

n = 0

For i = 1 To 30 Step 1

*l = m + (i - 1) * 1440*

For k = 1 To 120

n = n + Cells(l, 2).Value

l = l + 1

Next

Next

Cells(j, 6).Value = n / 3600

Next

End Sub

8.5.6. Μακροεντολή εύρεσης μέσων ωριαίων τιμών ισχύος για τον Δεκέμβριο (31 ημέρες)

Αυτή η μακροεντολή υπολογίζει και τακτοποιεί τις μέσες ημερήσιες ωριαίες τιμές ισχύος των ΦΒ για το μήνα Δεκέμβριο.

```

Sub average_hourly_Dec()
    Dim i As Long
    Dim j As Long
    Dim k As Long
    Dim l As Long
    Dim m As Long
    Dim n As Long
    For j = 2 To 17 Step 1
        m = 302 + (j - 2) * 60
        n = 0
        For i = 1 To 31 Step 1
            l = m + (i - 1) * 1440
            For k = 1 To 60
                n = n + Cells(l, 2).Value
                l = l + 1
            Next
        Next
        Cells(j, 9).Value = n / 1860
    NextEnd Sub

```

8.5.7. Συνάρτηση μετατροπής μοιρών, λεπτών και δευτερολέπτων σε μοίρες και δεκαδικά ψηφία

Το MS Excel δεν έχει τη δυνατότητα να αναγνωρίσει τα λεπτά και τα δευτερόλεπτα της μοίρας καθώς και τους συμβολισμούς τους. Έτσι, προκειμένου να κατασκευαστούν κάποια γραφήματα τα οποία περιέχουν γωνίες, είναι απαραίτητη η μετατροπή της έκφρασης της γωνίας κλίσης από μοίρες και λεπτά της μοίρας σε μοίρες ως πραγματικό αριθμό. Η συνάρτηση αυτή προέρχεται από την ιστοσελίδα υποστήριξης της Microsoft [<http://support.microsoft.com/kb/213449>].

```

Function Convert_Decimal(Degree_Deg As String) As Double
    ' Declare the variables to be double precision floating-point.
    Dim degrees As Double

```

```

Dim minutes As Double
Dim seconds As Double
' Set degree to value before "°" of Argument Passed.
degrees = Val(Left(Degree_Deg, InStr(1, Degree_Deg, "°") - 1))
' Set minutes to the value between the "°" and the "'"
' of the text string for the variable Degree_Deg divided by
' 60. The Val function converts the text string to a number.
minutes = Val(Mid(Degree_Deg, InStr(1, Degree_Deg, "°") + 2, _
    InStr(1, Degree_Deg, "'") - InStr(1, Degree_Deg, _
    "°") - 2)) / 60
' Set seconds to the number to the right of "'" that is
' converted to a value and then divided by 3600.
seconds = Val(Mid(Degree_Deg, InStr(1, Degree_Deg, "'") + _
    2, Len(Degree_Deg) - InStr(1, Degree_Deg, "'") - 2)) _
    / 3600
Convert_Decimal = degrees + minutes + seconds
End Function

```