

Περιβαλλοντική Μελέτη Αξιοποίησης της Ηλιακής Ενέργειας μέσω Φωτοβολταϊκού Συστήματος στην περιοχή της Μηλιάς Νεστάνης στην Αρκαδία.

Α. Γ. Μπλέτα¹ και Π. Θ. Νάστος¹

¹Εργαστήριο Κλιματολογίας και Ατμοσφαιρικού Περιβάλλοντος, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Πανεπιστημιούπολη Τ.Κ. 15784, Αθήνα (ableta@geol.uoa.gr).

Περίληψη

Η ηλιακή ενέργεια είναι καθαρή, ανεξάντλητη, ήπια, ανανεώσιμη, ενώ δεν ελέγχεται και αποτελεί ένα ανεξάντλητο εγχώριο ενεργειακό πόρο, που παρέχει ανεξαρτησία, προβλεψιμότητα και ασφάλεια στην ενεργειακή τροφοδοσία. Οι πιο διαδεδομένοι τρόποι αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας είναι τα φωτοβολταϊκά συστήματα, που παράγουν ηλιακό ηλεκτρισμό, τα ηλιοθερμικά συστήματα, τα οποία αξιοποιούν τον ήλιο για θέρμανση και ψύξη, οι ηλιακοί πύργοι, που παράγουν ηλεκτρισμό κ.α.

Στη χώρα μας υπάρχει η δυνατότητα αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας αφού έχουμε πολύ μεγάλη διάρκεια ηλιοφάνειας. Η παρούσα εργασία αφορά την περιοχή Μηλιά Νεστάνης του νομού Αρκαδίας, μια περιοχή με αρκετή ηλιοφάνεια, η οποία έχει την ανάγκη της εκμετάλλευσης του ηλιακού της δυναμικού προσφέροντας στην περιοχή κοινωνικοοικονομική και περιβαλλοντική ανάπτυξη. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να διεξαχθούν συμπεράσματα που θα αφορούν τόσο την αναγκαιότητα στη στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όσο και την εκτίμηση όλων των παραμέτρων που σχετίζονται με την λειτουργία και την απόδοση του φωτοβολταϊκού πάρκου στην περιοχή Μηλιάς Νεστάνης.

Για την επίτευξη του σκοπού αυτού συγκεντρώθηκαν στοιχεία για τα παρακάτω χαρακτηριστικά της περιοχής: γεωλογικά, γεωμορφολογικά και κλιματολογικά της περιοχής, ακτινοβολία και θερμοκρασία που αλληλοσχετίζονται για ένα έτος με στοιχεία από το φωτοβολταϊκό πάρκο της περιοχής. Συγκεκριμένα υπολογίστηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας, της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο (H_h), της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στις 90° (H_{90}) και της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στη βέλτιστη κλίση (H_{opt}). Τέλος, η βέλτιστη γωνία κλίσης για τη λειτουργία του πάρκου είναι 29° και το ετήσιο έλλειμμα ακτινοβολίας λόγω σκίασης είναι 0,2%.

Παρατηρήθηκε ότι η μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο (H_h) και η βέλτιστη μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο (H_{opt}) έχουν μέγιστη τιμή τον μήνα Ιούνιο ($6960 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ και $6580 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ αντίστοιχα) και ελάχιστη τιμή τον μήνα Δεκέμβριο, ενώ αντιθέτως η μέση μηνιαία ολική ηλιακή ακτινοβολία στις 90° (H_{90}) έχει μέγιστη τιμή τον μήνα Σεπτέμβριο ($3710 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$) και ελάχιστη τιμή τον μήνα Ιούνιο ($2350 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$). Τέλος η ηλεκτρική ενέργεια του πάρκου είναι 137000 KWh/year και δεδομένου ότι η εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού είναι 100 kW αποδίδει $1.370 \text{ KWh/year/kW}$.

Λέξεις κλειδιά: φωτοβολταϊκό πάρκο, ηλιακή ενέργεια, ηλεκτρική ενέργεια, Νεστάνη Αρκαδίας

Abstract

Solar energy is clean, inexhaustible, soft, renewed; it cannot be controlled and is an inexhaustible domestic resource, which provides independence, predictability and security in energy supply. The most common ways of utilizing solar energy photovoltaic systems that generate solar electricity, solar thermal systems, which utilize the sun for heating and cooling, solar towers, generating electricity, etc.

In our country there is the possibility of utilizing solar energy since we have a long period with sunshine. This concerns the Milia Nestanis of Arcadia, a region with enough sunshine, which is the need to exploit the potential of solar offering in socio-economic and environmental development. The purpose of this work is to be carried out, conclusions referring by both the need to shift to renewable energy, and the estimate of all parameters associated with the operation and performance of the photovoltaic park in Milia Nestanis.

To achieve that objective, data were collected for the following characteristics: geological, geomorphological and climatic data, radiation and temperature are interrelated to one year from the photovoltaic park for the study area. Specifically, it has been calculated the mean monthly values of electricity power, the total solar radiation on horizontal plane (H_h), on the 90° gradient (H_{90}) and on the optimum gradient (H_{opt}). Finally the best function of the park, optimum tilt angle is 29° degrees and the annual deficit of radiation due to shading is 0.2%.

The interpretation of the results of this analysis suggests that mean monthly global solar radiation on horizontal plane (H_h) and the optimal mean monthly global solar radiation on optimum gradient are maximum in June ($6960\text{kWh/m}^2/\text{day}$ and $6580\text{kWh/m}^2/\text{day}$ respectively) and minimum in December. However, the mean monthly global solar radiation on the 90° gradient (H_{90}) is maximum in September ($3710\text{kWh/m}^2/\text{day}$) and minimum in June ($2350\text{kWh/m}^2/\text{day}$). Finally the electrical power of the park is 137000KWh/year and since the installed capacity of the station delivers 1.370KWh/year/kW .

Keywords: Photovoltaic Park, solar energy, electric energy, Nestani Arcadia

Εισαγωγή

Η καταστροφή του περιβάλλοντος αποτελεί θέμα που παγκοσμίως ενδιαφέροντος, για αυτό πολλές χώρες του πλανήτη έχουν ήδη αρχίσει να λαμβάνουν μέτρα για να αναχαιτίσουν αυτή τη καταστροφή. Η εντατική χρήση των ορυκτών καυσίμων (γαιάνθρακες, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) και της πυρηνικής ενέργειας τα τελευταία χρόνια, ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για τα σοβαρά περιβαλλοντικά προβλήματα που αντιμετωπίζει ο πλανήτης μας, τα οποία έχουν άμεσο αντίκτυπο στις κλιματικές συνθήκες και γενικά στις συνθήκες ζωής πάνω στον πλανήτη. Παράλληλα οι ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου συνεχώς αυξάνονται, αφού ο πληθυσμός της γης αυξάνεται με γοργούς ρυθμούς αλλά και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου πολλαπλασιάζει τις δραστηριότητές του ανθρώπου, οι οποίες απαιτούν κατανάλωση ενέργειας.

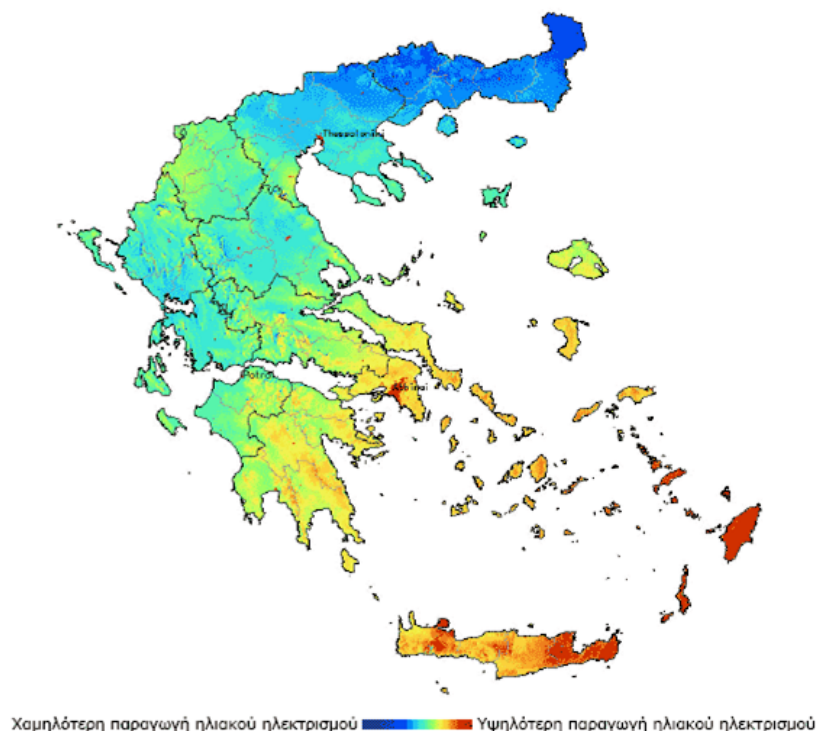
Η ανθρωπότητα καλείται να απαντήσει στο βασικό ερώτημα, αν θα συνεχίσει να καλύπτει τις ενεργειακές της ανάγκες κυρίως με τα ορυκτά καύσιμα (μέχρι αυτά να εξαντληθούν) με την

επακόλουθη περιβαλλοντική επιβάρυνση ή θα αναζητήσει σύντομα άλλες λύσεις. Οι παγκόσμιες συνδιασκέψεις του Ρίο, του Κιότο και της Χάγης δυστυχώς δεν κατάφεραν να δώσουν ουσιαστική λύση στο πρόβλημα αυτό. Η μόνη απάντηση που προς το παρόν διαφαίνεται ότι θα περιορίσει δραστικά τα περιβαλλοντικά προβλήματα είναι η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αν και η τεχνολογία έχει κάνει σημαντικά βήματα προς τον τομέα αυτό, η εφαρμογή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας βρίσκεται σε αρχικό ακόμη στάδιο. Η εκμετάλλευση του ήλιου, του ανέμου, του νερού, της γεωθερμίας και της βιομάζας, που αποτελούν πηγές ενέργειας φιλικές προς το περιβάλλον, μπορούν και πρέπει να γίνουν οικονομικά εκμεταλλεύσιμες ώστε να συμβάλλουν στην αειφόρο ανάπτυξη, εφόσον είναι ανανεώσιμες και ρυπαίνουν ελάχιστα ή καθόλου (**Riches, M.R., 1980**).

Συνεπώς είναι πιο αναγκαίο από ποτέ η στροφή στη φύση και η εύρεση ουσιαστικών λύσεων στα μεγάλα περιβαλλοντικά προβλήματα, χωρίς βέβαια να παρατηρείται υπερεκμετάλλευση και καταστροφή του φυσικού περιβάλλοντος. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν ήπιες μορφές και προέρχονται από φυσικές διαδικασίες. Σε παγκόσμιο επίπεδο οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συνεισφέρουν περίπου στο 18% της παραγωγής ενέργειας. Εξαπλώνονται συνεχώς και οι τεχνολογίες αναπτύσσονται έτσι ώστε να μπορούν να συνεισφέρουν όσο το δυνατότερο σε περισσότερους τομείς αντικαθιστώντας τα συμβατικά καύσιμα (**Dyk et al, 2002**).

Ειδικότερα ο ήλιος με την εκπομπή τεραστίων ποσοτήτων ενέργειας ημερησίως παράγει μεγάλη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας που μπορεί να αξιοποιηθεί είτε με θερμικές, είτε με φωτοβολταϊκές εφαρμογές για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι πρώτες αφορούν την συλλογή ηλιακής ενέργειας για παραγωγή θερμότητας για τη θέρμανση του νερού και την κίνηση των τουρμπινών. Οι δεύτερες περιλαμβάνουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα που μετατρέπουν το φως του ήλιου σε ηλεκτρισμό με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών (Αντωνόπουλος, 2004, **Akbaba and Alattawi, 1995**). Τα φωτοβολταϊκά συστήματα είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που αναπτύσσεται με ραγδαίο ρυθμό τα τελευταία χρόνια και η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος σε ΦΒ έχει ξεπεράσει και το πιο αισιόδοξο σενάριο (**Šúri et al, 2007**). Αν και όλη η γη δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, η ποσότητά της εξαρτάται κυρίως από τη γεωγραφική θέση, την ημέρα, την εποχή και τη νεφοκάλυψη. Η έρημος δέχεται περίπου το διπλάσιο ποσό ηλιακής ενέργειας από άλλες περιοχές (<http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi321.html>).

Στη χώρα μας η δυνατότητα αξιοποίησης αυτών των πηγών ενέργειας και συγκεκριμένα της ηλιακής είναι επιτακτική, αφού υπάρχει πολύ μεγάλη διάρκεια ηλιοφάνειας (Εικ. 1). Η παρούσα εργασία αφορά την περιοχή Μηλιά Νεστώνης του νομού Αρκαδίας, μια περιοχή με αρκετή ηλιοφάνεια, η οποία έχει την ανάγκη της εκμετάλλευσης του ηλιακού της δυναμικού προσφέροντας στην περιοχή κοινωνικοοικονομική και περιβαλλοντική ανάπτυξη. Θα πρέπει να συνυπολογιστεί ότι η εγκατάσταση τέτοιων σταθμών αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας σε περιοχές με μεγάλη ηλιακή ακτινοβολία είναι αναγκαία και κυρίως σε περιοχές όπου η μετακίνηση των απαραίτητων για την κατασκευή του πάρκου υλικών είναι εύκολη. Έτσι η Πελοπόννησος διαφοροποιείται από τα νησιά, γιατί η μετακίνηση καθίσταται ευκολότερη και χωρίς μεγάλο κόστος.



Εικόνα 1. Χάρτης Ελλάδος παραγωγής ηλιακού ηλεκτρισμού από τα φωτοβολταϊκά συστήματα (Πηγή: <http://re/pv>)

Η εν λόγω περιοχή Μηλιά Νεστώνης χρήζει ανάγκης μείωσης των ρύπων, που προέρχονται από τη βιομηχανική περιοχή της πόλης της Τρίπολης και της γειτονικής περιοχής της Μεγαλόπολης (Sarris et al, 2009), η οποία θα οδηγήσει σε καλύτερευση της υγείας των πολιτών. Επιπρόσθετα είναι δυνατή η ύπαρξη οφελών στην οικονομία, αφού τα ορυκτά καύσιμα που ήδη χρησιμοποιούνται στην περιοχή μπορεί να αντικατασταθούν από την ηλιακή ενέργεια, ενώ παράλληλα νέες θέσεις εργασίας προκύπτουν κατά τη διάρκεια κατασκευής και λειτουργίας του πάρκου. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η περιοχή δεν απέχει πολύ από την πρωτεύουσα του νομού, που αποτελεί ένα μεγάλο αστικό κέντρο, αποτελώντας πόλο έλξης για την εγκατάσταση νέων ανθρώπων στην περιοχή. Τέλος η περιοχή της εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού πάρκου είναι πιθανό να αποτελέσει πόλο ήπιας τουριστικής ανάπτυξης, αφού με την κατάλληλη διαφήμιση και προώθηση θα ελκύει επισκέπτες για εκπαιδευτικούς, ερευνητικούς και επιδεικτικούς σκοπούς, σχολικές εκδρομές κ.α.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σημαντικός λόγος για την εγκατάσταση του συγκεκριμένου φωτοβολταϊκού πάρκου στην συγκεκριμένη περιοχή της Μηλιάς Νεστώνης ήταν το σχετικά μεγάλο υψόμετρο που βρίσκεται η περιοχή έχοντας κατά αυτόν τον τρόπο αυξημένες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας. Ακόμα, είναι γνωστό ότι η σκίαση επηρεάζει σημαντικά την απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, αφού ακόμα και μια μικρή σκίαση μπορεί να μειώσει την απόδοση του συστήματος έως και 80%. Συνεπώς απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του χώρου εγκατάστασης των πλαισίων και στον τρόπο τοποθέτησης τους, έτσι ώστε να αποφεύγεται οποιαδήποτε σκίαση, κυρίως κατά τις ώρες 9.00 π.μ. με 3.00 μ.μ. Έτσι στην επιλεγείσα περιοχή παρατηρείται η απουσία εμποδίων στην πορεία του ηλίου κατά το μεγαλύτερο διάστημα του χρόνου, που θα μπορούσαν να προκαλέσουν μεγάλες σκιάσεις.

Σκοπός της εργασίας είναι η εκτίμηση της απόδοσης του φωτοβολταϊκού πάρκου στην περιοχή Μηλιές Νεστώνης και να διεξαχθούν συμπεράσματα που θα αφορούν τόσο την αναγκαιότητα στη στροφή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όσο και τη λειτουργία του εν λόγω πάρκου. Έτσι συλλέχθηκαν τα γεωλογικά, γεωμορφολογικά και κλιματολογικά (ακτινοβολία και θερμοκρασία) χαρακτηριστικά της περιοχής και έγινε σύγκριση των στοιχείων από το φωτοβολταϊκό πάρκο της περιοχής για ένα έτος. Έτσι, πραγματοποιήθηκαν επισκέψεις στη Μηλιά της Νεστώνης Αρκαδίας ώστε να συγκεντρωθούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία του πάρκου αλλά και της γύρω περιοχής και παράλληλα αποκτήθηκε το φωτογραφικό υλικό. Επίσης προμηθευτήκαμε γεωλογικά, τοπογραφικά διαγράμματα από τη Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (Γ.Υ.Σ.), ενώ τα κλιματολογικά δεδομένα της περιοχής ελήφθησαν από τον σταθμό Τρίπολη της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας. Η ηλιοφάνεια είναι ο σημαντικότερος παράγοντας που μελετάται για την περιοχή μελέτης. Οι μετρήσεις από τον σταθμό της Τρίπολης αφορούν το διάστημα 1977 έως 2003 και παρατηρήθηκε ότι μεγαλύτερη ηλιοφάνεια υπάρχει τον μήνα Ιούλιο με τιμή 327.3h, ενώ η μικρότερη παρατηρήθηκε τον μήνα Δεκέμβριο με τιμή 112.6h. Η αστρονομική μέση ημερήσια τιμή της ηλιοφάνειας σε ώρες για τον μήνα Ιανουάριο στην ευρύτερη περιοχή του πάρκου είναι 4.1h (Καραλής, 1988).

Υλικά και Μέθοδοι

Το οικόπεδο που επιλέχθηκε για την εγκατάσταση του φωτοβολταϊκού πάρκου βρίσκεται στη Μηλιά της Νεστώνης Αρκαδίας με συνολική έκταση 1.746m² (Εικ. 2).



Εικόνα 2. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ με κλίση 29⁰ και διεύθυνση ανατολική (α) και βόρεια (β)

Για την εγκατάσταση της μονάδος δεν απαιτήθηκε καμία σταθερή, βαριά και μόνιμη κατασκευή. Χρησιμοποιήθηκαν φωτοβολταϊκές γεννήτριες τύπου SHELL ULTRA 185P με ισχύ 185Wp, τεχνολογίας μονοκρυσταλλικού πυριτίου POWERMAX®, TOPS™ (Texture Optimized Pyramidal Surface) (Πίν. 1) έχοντας 20% μεγαλύτερη ημερήσια ενεργειακή απολαβή σε σχέση με άλλες Φ/Β γεννήτριες.

Το συγκεκριμένο φωτοβολταϊκό πάρκο εγκαταστάθηκε τον Σεπτέμβριο του 2007 με 541 φωτοβολταϊκά στοιχεία ισχύος 185W το καθένα. Το πάρκο λειτουργεί ως ανεξάρτητη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής και είναι συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο. Η εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού είναι 100kW και η συνολική ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι 135MWh περίπου.

Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών γεννητριών

Ονομαστική τάση (25 °C)	35,0 V
Τάση ανοιχτού κυκλώματος (25 °C)	44,5 V
Ονομαστικό ρεύμα φόρτισης	4,72 A
Ρεύμα βραχυκύκλωσης	5,4 A
Ασφάλεια σειράς	20 A
Διαστάσεις: (1622 x 814 x 40) mm	(1622 x 814 x 40) mm
Βάρος	17,2 Kg

Επίσης τοποθετήθηκε μετεωρολογικός σταθμός καθώς και αντιστροφείς ισχύος με μέγιστο βαθμό απόδοσης 94,3% και συντελεστή ισχύος 1. Το βάρος του υπολογίστηκε στα 245Kg, ενώ η τάση εξόδου ήταν 400V και η συχνότητα εξόδου 50Hz.

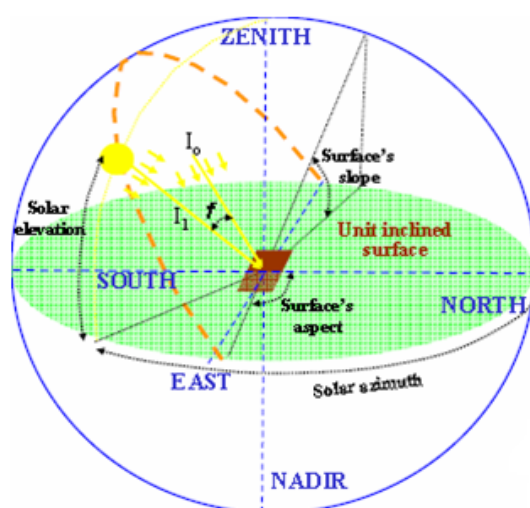
Για τον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας υπεισέρχονται οι ακόλουθοι παράγοντες (**Μαμάσης Νίκος, 2008**):

Αζιμούθιο ηλίου-azimuth (Azm): Η γωνία μεταξύ (α) του επιπέδου που περνάει από τον ήλιο, τον παρατηρητή και το zenith του και (β) της γραμμής που συνδέει τον παρατηρητή και το Βορρά. Η γωνία μετριέται από το Βορρά στη φορά των δεικτών του ρολογιού σε μοίρες (0-360).

Υψόμετρο ηλίου - Elevation (Elv): Η γωνία μεταξύ (α) της γραμμής του ορίζοντα του παρατηρητή και (β) της γραμμής που συνδέει τον παρατηρητή και τον ήλιο. Η γωνία μετριέται από τον ορίζοντα προς τα πάνω σε μοίρες (0-90).

Κλίση κυττάρων - Slope (Slp): Η κλίση ενός κυττάρου είναι η μεγαλύτερη κλίση ενός επιπέδου που ορίζεται από το κύτταρο και τα οκτώ γειτονικά του. Η γωνία μετριέται σε μοίρες (0-90).

Διεύθυνση κυττάρων - Aspect (Asp): Η διεύθυνση που «βλέπει» η κλίση. Η γωνία μετριέται από το Βορρά στη φορά των δεικτών του ρολογιού σε μοίρες (0-360). Επίπεδα κύτταρα παίρνουν την τιμή -1 που κυμαίνεται από +1 έως -1 (Εικ. 4).



Εικόνα 4. Απεικόνιση των παραμέτρων που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας

Για τον υπολογισμό της δυνητικής ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2) χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$I = I_o * d * \cos f$$

όπου I_o η ηλιακή σταθερά, d ο παράγοντας διόρθωσης για τη μέση απόσταση γης-ηλίου και $\cos f = \sin Az_m * \cos El_v * \cos(90 - Sl_p) * \sin Asp + \cos Az_m * \cos El_v * \cos(90 - Sl_p)$

$* \cos Asp + \sin El_v * \sin(90 - Sl_p)$, $I_o \approx 1367 \text{ W/m}^2$ και $d = 1 + 0.034 * \cos(2 * \pi * J / 365 - 0.05)$

Αποτελέσματα – Συζήτηση

Το φωτοβολταϊκό πάρκο έχει συντεταγμένες $37^{\circ}35,6'$ βόρεια και $22^{\circ}25,45'$ ανατολικά. Ενώ βρίσκεται σε υψόμετρο 638m και σε απόσταση 10Km από την πόλη της Τρίπολης. Από το φωτοβολταϊκό πάρκο πάρθηκαν οι παρακάτω μετρήσεις (Πίν. 2).

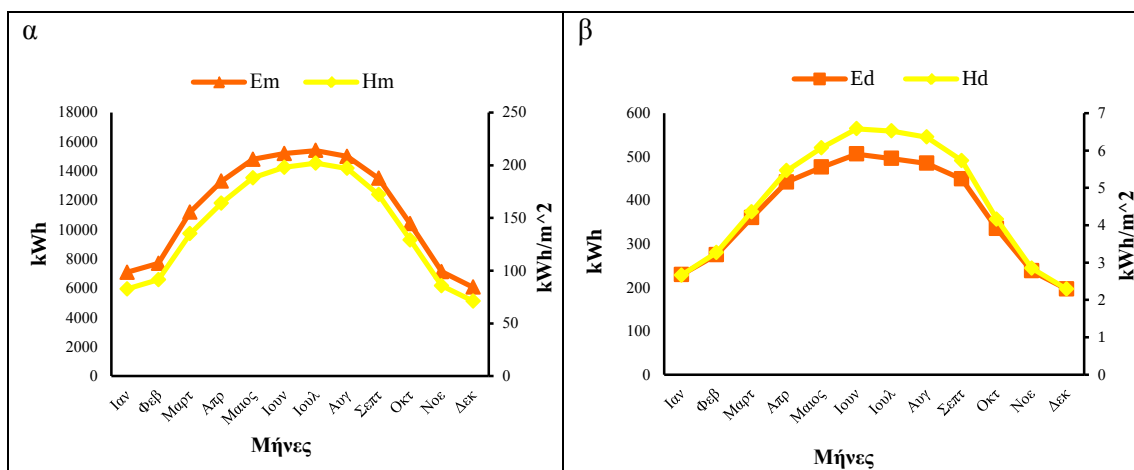
Πίνακας 2. Μετρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας και ακτινοβολίας του δεδομένου φωτοβολταϊκού πάρκου για τη χρονική περίοδο 1977-2003

Month	E_d (kWh)	E_m (kWh)	H_d (kWh/m ²)	H_m (kWh/m ²)
Jan	229.00	7090	2.66	82.6
Feb	275.00	7700	3.27	91.4
Mar	360.00	11200	4.36	135
Apr	442.00	13300	5.46	164
May	476.00	14800	6.07	188
Jun	506.00	15200	6.58	198
Jul	496.00	15400	6.52	202
Aug	485.00	15000	6.36	197
Sep	449.00	13500	5.73	172
Oct	335.00	10400	4.16	129
Nov	238.00	7130	2.85	85.6
Dec	196.00	6070	2.29	71.1
Yearly average	374	11400	4.70	143
Total for year	137000	1720		

Η μέση ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται καθημερινά από το σύστημα συμβολίζεται ως E_d σε (kWh), ως E_m είναι η μέση ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μηνιαία από το σύστημα σε (kWh), H_d είναι η μέση ημερήσια συνολική ακτινοβολία ανά τετραγωνικό μέτρο του δεδομένου συστήματος σε (kWh/m²) και H_m είναι η μέση μηνιαία συνολική ακτινοβολία ανά τετραγωνικό μέτρο του δεδομένου συστήματος σε (kWh/m²).

Τόσο η μέση μηνιαία ηλεκτρική ενέργεια (E_m) σε kWh, όσο και η μέση μηνιαία συνολική ακτινοβολία ανά τετραγωνικό μέτρο (H_m) σε kWh/m² του δεδομένου συστήματος παρουσιάζουν το μέγιστο τον μήνα Ιούλιο (15400kWh και 202kWh/m² αντίστοιχα) δεδομένου ότι ο Ιούλιος παρουσιάζει μειωμένη νεφοκάλυψη, ενώ το ελάχιστο τον μήνα Δεκέμβριο (6070kWh και 71.1kWh/m² αντίστοιχα) (Εικ. 5α).

Ομοίως η μέση ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται καθημερινά (E_d) σε kWh, όσο και η μέση ημερήσια συνολική ακτινοβολία ανά τετραγωνικό μέτρο (H_d) σε kWh/m² του δεδομένου συστήματος παρουσιάζουν το μέγιστο τον μήνα Ιούνιο (506kWh και 6.58kWh/m² αντίστοιχα), ενώ το ελάχιστο τον μήνα Δεκέμβριο (196kWh και 2.29kWh/m² αντίστοιχα) (Εικ. 5β).



Εικόνα 5. Η μέση μηνιαία (α) και η μέση ημερήσια (β) ηλεκτρική ενέργεια

Η βέλτιστη γωνία κλίσης για τη λειτουργία του πάρκου είναι οι 29° και το ετήσιο έλλειμμα ακτινοβολίας λόγω σκίασης είναι 0,2%.

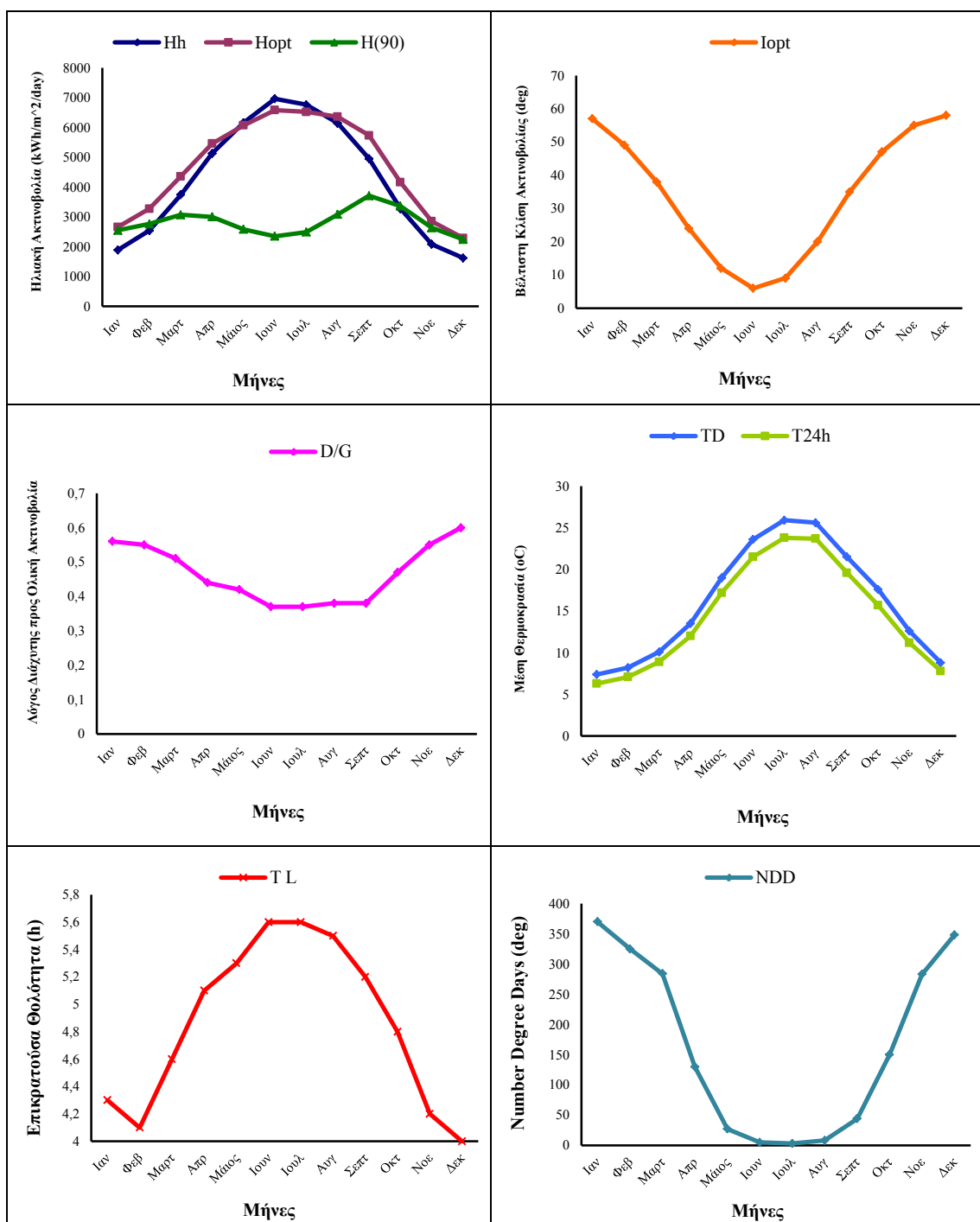
Ακολούθως μετρήθηκαν οι παράμετροι που αφορούν τα διάφορα είδη ακτινοβολίας (σε οριζόντιο επίπεδο H_h , η βέλτιστη ακτινοβολία H_{opt} και η ακτινοβολία στις 90° $H_{(90)}$), η ένταση της ακτινοβολίας στη βέλτιστη κλίση (I_{opt}), η επικρατούσα θολότητα (T_L), που αποτελεί δείκτη αερολυμάτων, ο λόγος διάχυτης προς ολικής ακτινοβολίας (D/G), η μέση ημερήσια θερμοκρασία (T_D), ο μέσος όρος της 24ωρης θερμοκρασίας (T_{24h}) και τέλος οι μέρες του χρόνου που απαιτείται ενέργεια (N_{DD}) (Πίν. 3).

Πίνακας 3. Μετρήσεις των διαφόρων ειδών ακτινοβολίας, της επικρατούσας νέφωσης, της θερμοκρασίας και οι μέρες της απαιτούμενης ενέργειας του δεδομένου φωτοβολταϊκού πάρκου για τη χρονική περίοδο 1977-2003

Month	H_h (kWh/m²/day)	H_{opt} (kWh/m²/day)	$H_{(90)}$ (kWh/m²/day)	I_{opt} (deg)	T_L (°C)	D/G	T_D (°C)	T_{24h} (°C)	N_{DD} (days)
Jan	1890	2660	2550	57	4.3	0.56	7.4	6.3	370
Feb	2540	3270	2760	49	4.1	0.55	8.2	7.1	325
Mar	3740	4360	3070	38	4.6	0.51	10.1	8.9	284
Apr	5130	5460	3000	24	5.1	0.44	13.5	12.0	130
May	6160	6070	2580	12	5.3	0.42	19.0	17.2	27
Jun	6960	6580	2350	6	5.6	0.37	23.6	21.5	5
Jul	6760	6520	2490	9	5.6	0.37	25.9	23.8	3
Aug	6140	6360	3080	20	5.5	0.38	25.6	23.7	8
Sep	4950	5730	3710	35	5.2	0.38	21.5	19.6	44
Oct	3270	4160	3360	47	4.8	0.47	17.6	15.7	150
Nov	2080	2850	2630	55	4.2	0.55	12.6	11.2	283
Dec	1620	2290	2240	58	4.0	0.60	8.8	7.8	348

Η ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο (H_h) και η βέλτιστη ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο (H_{opt}) έχουν τη μέγιστη τιμή τον μήνα Ιούνιο (6960kWh/m²/day και 6580kWh/m²/day αντίστοιχα) και την ελάχιστη τιμή τον μήνα Δεκέμβριο, αντιθέτως η ακτινοβολία στις 90°

($H_{(90)}$) έχει τη μέγιστη τιμή τον μήνα Σεπτέμβριο ($3710 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$) και την ελάχιστη τιμή τον μήνα Ιούνιο ($2350 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$) (Εικ. 5α). Η ένταση της ακτινοβολίας στη βέλτιστη κλίση (I_{opt}) σε deg παρατηρείται ότι παρουσιάζει το μέγιστό της τον μήνα Δεκέμβριο (58 deg), ενώ το ελάχιστό της τον μήνα Ιούνιο (6 deg) (Εικ. 5β).



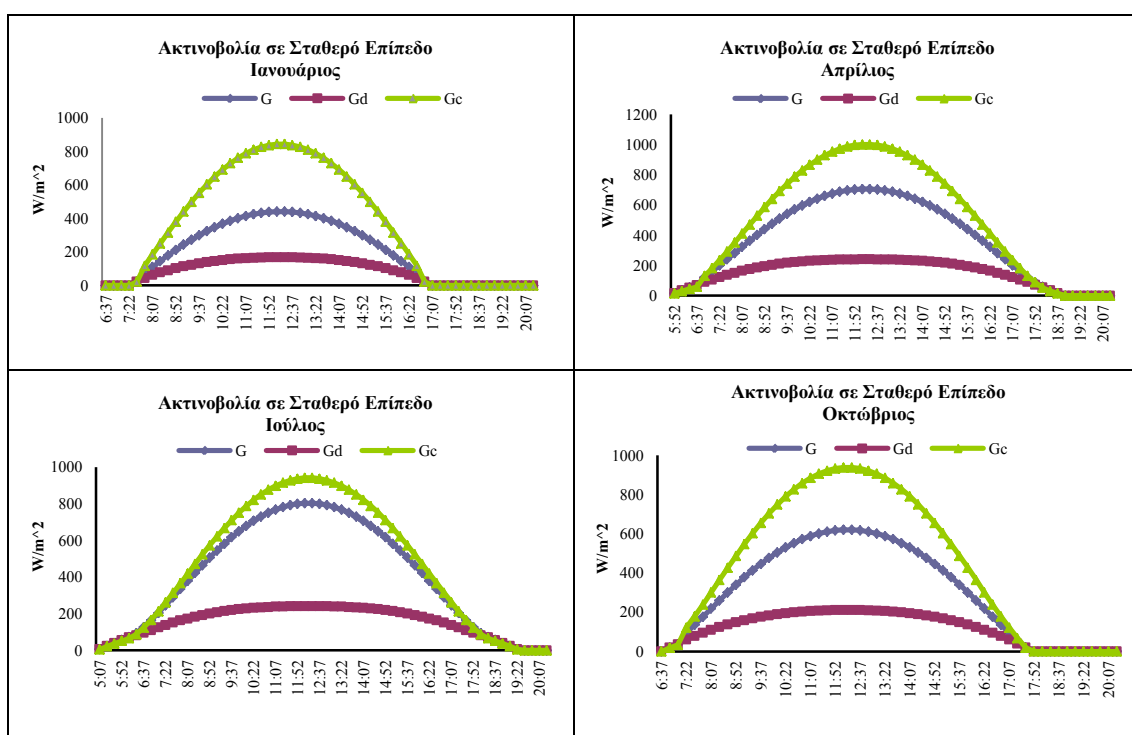
Εικόνα 5. Η ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο (H_h), η βέλτιστη ηλιακή ακτινοβολία σε κεκλιμένο επίπεδο (H_{opt}) και η ηλιακή ακτινοβολία σε 90 μοίρες ($H_{(90)}$) (α), η ένταση της ακτινοβολίας στη βέλτιστη κλίση (I_{opt}) (β), η αναλογία διάχυτης και ολικής ακτινοβολίας (D/G) (γ), η μέση ημερήσια θερμοκρασία (T_D) και ο μέσος όρος της 24ωρης θερμοκρασίας (T_{24h}) (δ), η επικρατούσα θολότητα (T_L) (ε) και οι μέρες που απαιτείται ενέργεια (N_{DD}) (στ).

Ο λόγος διάχυτης προς ολικής ακτινοβολίας (D/G) παίρνει τη μεγαλύτερη τιμή τον μήνα Δεκέμβριο (0.60), ενώ τη μικρότερη τους μήνες Ιούνιο και Ιούλιο (0.37). Επισημαίνεται ότι η διάχυτη ακτινοβολία είναι πάντοτε μικρότερη της ολικής για αυτό και ο λόγος είναι μικρότερος της μονάδας, παίρνοντας τιμές από 0.37 ως 0.60 (Εικ. 5γ).

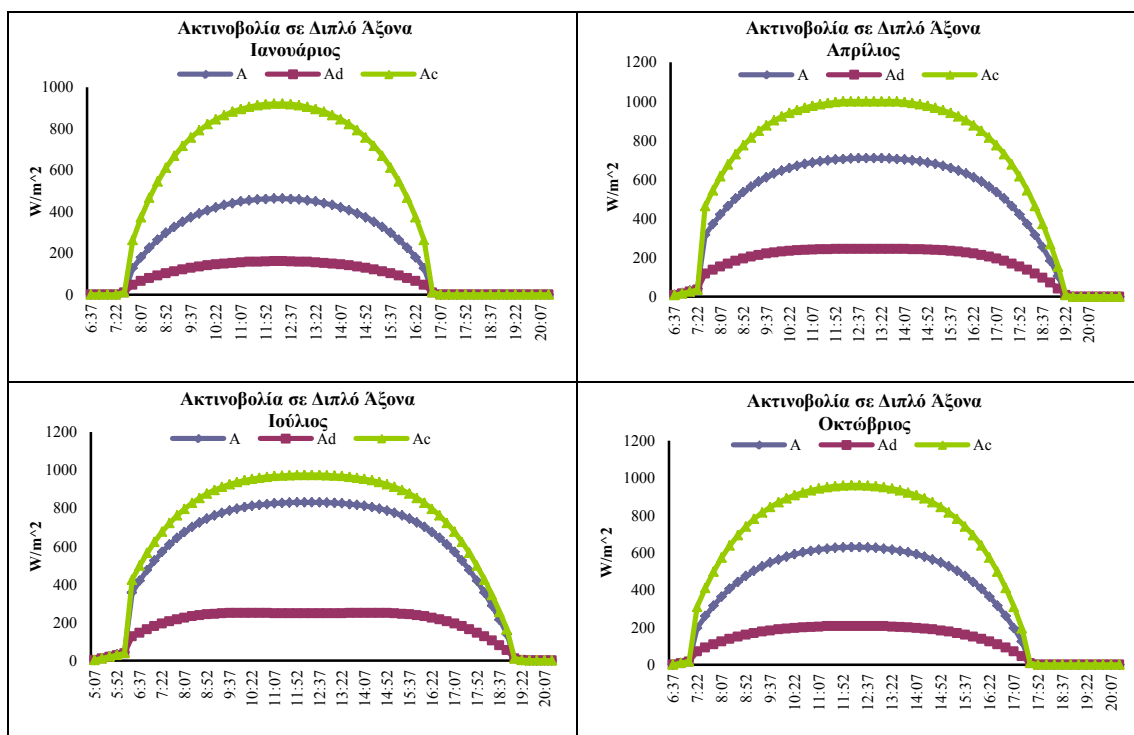
Η μέση ημερήσια θερμοκρασία (T_D) και ο μέσος όρος της 24ωρης θερμοκρασίας (T_{24h}) παρουσιάζουν τη μέγιστη τιμή τους τον μήνα Ιούλιο (25.9°C και 23.8°C), ενώ την ελάχιστη τον μήνα Ιανουάριο (7.4°C και 6.3°C) (Εικ. 5δ).

Η επικρατούσα θολότητα (T_L) έχει μέγιστη τιμή τους μήνες Ιούνιο (5.6h) και Ιούλιο (5.6h), ενώ την ελάχιστη τον μήνα Δεκέμβριο (4.0h) (Εικ. 5ε). Ο αριθμός των ημερών που απαιτούν ενέργεια (N_{DD}) είναι αυξημένος τον μήνα Ιανουάριο (370days) και μειωμένος τον μήνα Ιούλιο (3days) (Εικ. 5στ).

Στη συνέχεια μετρήθηκαν ανά τέταρτο (15 λεπτά) από τις 6:37 έως τις 20:07 για όλους τους μήνες για ένα έτος η συνολική ακτινοβολία σε σταθερό επίπεδο (G), η διάχυτη ακτινοβολία σε σταθερό επίπεδο (G_d) και η συνολική ακτινοβολία καθαρού ουρανού σε σταθερό επίπεδο (G_c). Ακόμα υπολογίστηκαν για τα ίδια διαστήματα την ίδια χρονική διάρκεια η συνολική ακτινοβολία σε διπλό άξονα (A), η διάχυτη ακτινοβολία σε διπλό άξονα (A_d) και η συνολική ακτινοβολία καθαρού ουρανού σε διπλό άξονα (A_c), των οποίων οι μονάδες μέτρησης είναι σε W/m^2 (Εικ. 6).



Εικόνα 6. Ακτινοβολία σε σταθερό επίπεδο για τους μήνες Ιανουάριο, Απρίλιο, Ιούλιο και Οκτώβριο.



Εικόνα 7. Ακτινοβολία σε διπλό άξονα για τους μήνες Ιανουάριο, Απρίλιο, Ιούλιο και Οκτώβριο.

Σε σταθερό επίπεδο και σε διπλό άξονα η συνολική ακτινοβολία (G/A), η διάχυτη ακτινοβολία (G_d/A_d) και η συνολική ακτινοβολία καθαρού ουρανού (G_c/G_c) σε W/m^2 παρουσιάζουν μέγιστο τις μεσημεριανές ώρες (12:07 και 12:22) για όλους τους μήνες, ενώ ελάχιστο παρουσιάζεται τις πρώτες πρωινές ώρες (05:07 για Ιούνιο και Ιούλιο έως 07:37 για Ιανουάριο και Δεκέμβριο) και τις απογευματινές (19:22 για Ιούνιο και Ιούλιο έως 16:52 για Ιανουάριο και Δεκέμβριο) (Εικ. 7).

Συμπεράσματα

Το συγκεκριμένο πάρκο που εγκαταστάθηκε τον Σεπτέμβριο του 2007 με 541 φωτοβολταϊκά στοιχεία ισχύος 185W το καθένα, λειτουργεί ως ανεξάρτητη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής και είναι συνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο. Επιπρόσθετα παρουσιάζει ηλεκτρική ενέργεια 137000KWh/year (Πίνακας 2) και δεδομένου ότι η εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού είναι 100kW αποδίδει 1.370 KWh/year/kW. Σε σταθερό και διπλό άξονα η συνολική (G/A) και η διάχυτη (G_d/A_d) ακτινοβολία παρουσιάζουν μέγιστο τις μεσημεριανές ώρες (12:07 και 12:22) καθ'όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ ελάχιστο καταγράφεται τις πρώτες πρωινές ώρες (05:07 Ιούνιο και Ιούλιο έως και 07:37 για Ιανουάριο και Δεκέμβριο) και τις απογευματινές (19:22 Ιούνιο και Ιούλιο έως 16:52 για Ιανουάριο και Δεκέμβριο). Επιπλέον η ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο (H_h) και σε κεκλιμένο επίπεδο (H_{opt}) έχουν μέγιστη τιμή τον μήνα Ιούνιο (με 6960kWh/m²/day και 6580kWh/m²/day αντίστοιχα και την ελάχιστη τιμή τον μήνα Δεκέμβριο (με 1620 kWh/m²/day και 2290 kWh/m²/day αντίστοιχα).

Η επικρατούσα θολότητα (T_L) έχει μέγιστη τιμή τους μήνες Ιούνιο (5.6h) και Ιούλιο (5.6h), ενώ την ελάχιστη τον μήνα Δεκέμβριο (4.0h). Ο αριθμός των ημερών που απαιτούν ενέργεια (N_{DD}) είναι αυξημένος τον μήνα Ιανουάριο (370days) και μειωμένος τον μήνα Ιούλιο (3days).

Το μικρό αυτό φωτοβολταϊκό πάρκο θα μπορούσε να αποτελέσει πρότυπο εγκατάστασης για να καλυφθούν οι ανάγκες σε ομαδικό χαρακτήρα των κατοίκων της περιοχής όπου κατά αυτόν τον τρόπο θα ήταν δυνατό οι κάτοικοι της περιοχής να καλύπτουν εν μέρει τις ενεργειακές τους ανάγκες, συμπεραίνοντας, λοιπόν, ότι το ηλιακό δυναμικό της περιοχής προσφέρεται για την ανάπτυξη της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.

Ευχαριστίες

Η ερευνητική εργασία υποστηρίζεται από το Έργο “Συνεργασία 2007-2013 (09ΣΥΝ-31-711 «ΑΚΤΑΙΑ»)” του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα» συγχρηματοδοτούμενο από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΤΠΑ) και τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας του Υπουργείου Παιδείας και Θρησκευμάτων (ΕΥΔΕ-ΕΤΑΚ).

Βιβλιογραφία

E.E. van Dyk, E.L. Meyer, F.J. Vorster and A.W.R.. Leitch, 2002. Long-term monitoring of photovoltaic devices. *Renewable Energy*, 25/2, 183-197.

Greek Parliament Law 3468/2006, Government Gazette A 129/27.06.2006, Generation of electricity using renewable energy sources and high-efficiency generation of electricity and heat and miscellaneous provisions.

Mehmet Akbaba, Mohammed A. A. Alattawi, 1995. A new model for V-I characteristic of solar cell generators and its applications, *Elsevier Solar Energy Materials and Solar Cells* 37, 123-132.

Riches, M.R., 1980. Duration of sunshine. U.S Department of Energy.

Sarris A., Kokinou E., Aidona E., Kallithrakas-Kontos N., Koulouridakis P., Kakoulaki G., Droulia K. and Damianovits O., 2009. Environmental study for pollution in the area of Megalopolis power plant (Peloponnesos, Greece). *Environ Geol* 58, 1769–1783.

Šúri M. Huld T.A., Dunlop E.D. and Ossenbrink H.A., 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Solar Energy* 81, 1295–1305.

Αντωνόπουλος Κ., 2004. «ΘΕΡΜΙΚΑ – ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ» Πολυτεχνειακές Εκδόσεις, Μέρος Πρώτο.

Καραλής Ι.Δ. και Τσελεπιδάκη Η.Γ., 1988. Φυσική Περιβάλλοντος και Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα, 22-57.

Μαμάσης Ν., 2008. Αρχές Οικολογίας και Περιβαλλοντικής Χημείας – Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Τομέας Υδάτινων Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 55-71.

<http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi321.html>.