



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΚΡΗΤΗΣ

Διαστασιολόγηση και Προσομοίωση Λειτουργίας Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

ΜΟΝΟΓΙΟΣ ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΚΟΥΤΡΟΥΛΗΣ ΕΥΤΥΧΙΟΣ (Επιβλέπων καθηγητής)

ΠΕΠΠΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΙΨΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

Χανιά, 2024

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία κύριος σκοπός αποτελεί η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου βέλτιστου σχεδιασμού και προσομοίωσης, με στόχο την διαστασιολόγηση μιας εγκατάστασης φωτοβολταϊκού συστήματος για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών. Αρχικά, γίνεται μια αναφορά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στη συνέχεια αναλύεται η λειτουργία των φωτοβολταϊκών συστημάτων για την εξοικονόμηση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και για την καλύτερη κατανόηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Στη συνέχεια, για την πραγματοποίηση του υπολογιστικού τμήματος της διπλωματικής εργασίας, γίνεται αναφορά στο μαθηματικό μοντέλο με το οποίο προσδιορίζεται η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάνελ. Για τη διαπίστωση της ακρίβειας υπολογισμού της, γίνεται μια σύγκριση με τις εργοστασιακές προδιαγραφές του κάθε φωτοβολταϊκού πάνελ, οι οποίες αναγράφονται στα φυλλάδια των κατασκευαστών τους. Επιπλέον, αναπτύσσεται και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό του μεγέθους της εγκατάστασης σχετικά με την ενεργειακή ζήτηση που έχει επιλεχθεί. Με βάση το πιο πάνω μοντέλο, δημιουργήθηκε ένας κώδικας στο περιβάλλον Matlab ο οποίος στοχεύει στη βέλτιστη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Τέλος, υλοποιείται η βελτιστοποίηση για δύο διαφορετικά ενεργειακά προφίλ: μιας κατοικίας και ενός νοσοκομείου. Η ονομαστική ισχύς των φωτοβολταϊκών πάνελ που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη αυτή είναι της τάξης των 270-630W.

Abstract

In this thesis, the main objective is the development of an algorithm with the purpose of developing photovoltaic systems which could cover electric energy needs.

Initially, there is a reference to renewable energy sources and subsequently the analysis of the design and operation of the photovoltaic systems is discussed. This analysis is made in order to achieve electricity saving, as well as for better understanding of this thesis.

In addition, through the computational part and the calculations made in this thesis, a reference is made to the mathematical model used in order to calculate the production of energy from photovoltaic panels. For the better calculation of the photovoltaic energy, a comparison is performed between the manufacturers' datasheets and the mathematic model of the photovoltaic panel.

Furthermore, there is a development of an algorithm in order to determine the size of the installation in relation to the energy demand that was selected. Based on this model, a code has been developed in Matlab which aims to the optimal dimensioning of the photovoltaic installation.

Finally, the optimization is implemented for two different energy profiles. The one profile corresponds to a household and the other profile to a hospital. The photovoltaic panels used for this study have a nominal power rating in the range of 270-630W.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1°	6
1.1 Εισαγωγή	6
1.2 Φωτοβολταϊκό Σύστημα	8
1.3 Πρόβλημα διαστασιολόγησης φωτοβολταϊκών συστημάτων	9
1.4 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	10
Κεφάλαιο 2°	11
2.1 Μαθηματικό μοντέλο φωτοβολταϊκού συστήματος	11
2.1.2 Συνθήκες Βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού συστήματος (SC)	12
2.1.3 Συνθήκες Ανοικτού Κυκλώματος (OC)	13
2.1.4 Συνθήκες Μεγίστης Ισχύος (MPP)	13
Κεφάλαιο 3°	16
3.1 Εισαγωγή κεφαλαίου	16
3.2 Δεδομένα εισαγωγής	18
3.3 Σύγκριση πειραματικών και Θεωρητικών τιμών για διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ	22
3.4 Συμπεράσματα ακρίβειας μαθηματικού μοντέλου	33
3.5 Παρουσίαση κώδικα	35
3.6 Βελτιστοποίηση	36
Κεφάλαιο 4°	38
4.1 Ενεργειακό προφίλ κατοικίας	38
4.1.2 Βελτιστοποίηση για διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ	38

Κεφάλαιο 5°	47
5.1 Ενεργειακό προφίλ νοσοκομείου.....	47
5.1.2 Βελτιστοποίηση για διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ.....	47
Κεφάλαιο 6°	55
6.1 Συμπεράσματα.....	55
6.2 Μελλοντικά βήματα.....	56
Βιβλιογραφία	57

Κεφάλαιο 1^ο

1.1 Εισαγωγή

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι ενεργειακές πηγές, που υπάρχουν άφθονες στο φυσικό μας περιβάλλον. Χρησιμοποιήθηκαν ως η πρώτη μορφή ενέργειας από τον άνθρωπο πριν τη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Οι ΑΠΕ είναι ανεξάντλητες και κατά τη χρήση τους δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον, αλλά η αξιοποίηση τους εμποδίζεται μόνο από την πρόοδο φερέγγυων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών που έχουν ως απώτερο σκοπό τη δέσμευση του δυναμικού τους. Για αρκετές χώρες οι ΑΠΕ αποτελούν μια πηγή ενέργειας οι οποία συνεισφέρει στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, με αποτέλεσμα τη μείωση της ζήτησης του ακριβού εισαγόμενου πετρελαίου και την ενδυνάμωση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Επιπλέον, βελτιώνουν τη ποιότητα του περιβάλλοντος αφού έχει διαπιστωθεί ότι κυρίως ο ενεργειακός τομέας ευθύνεται για τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Τέλος, μας δίνουν τη δυνατότητα να επιλέξουμε την κατάλληλη μορφή ενέργειας προσαρμοσμένη στις ανάγκες μας, με αποτέλεσμα να επιτύχουμε μια πιο σωστή χρήση των ενεργειακών πόρων [1].

Μορφές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

🌊 **Υδραυλική Ενέργεια:** Είναι η ενέργεια που αποταμιεύεται με τη συσσώρευση μεγάλης ποσότητας νερού που μέσω της πτώσης της από υψομετρική διαφορά και αποδίδεται ως κινητική ενέργεια, που με τη χρήση υδροηλεκτρικών διατάξεων μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

🌱 **Βιομάζα:** Χαρακτηρίζουμε οποιοδήποτε υλικό παράγεται από διάφορους ζωντανούς οργανισμούς (ξύλο, υπολείμματα καλλιεργειών, απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων, κτηνοτροφικά απόβλητα κ.α.) τα οποία μπορούν να

χρησιμοποιηθούν ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας. Η βιομάζα είναι η πιο γνωστή και παλιά ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

✚ **Ενέργεια από τα κύματα:** Με την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας παράγεται ηλεκτρική ενέργεια.

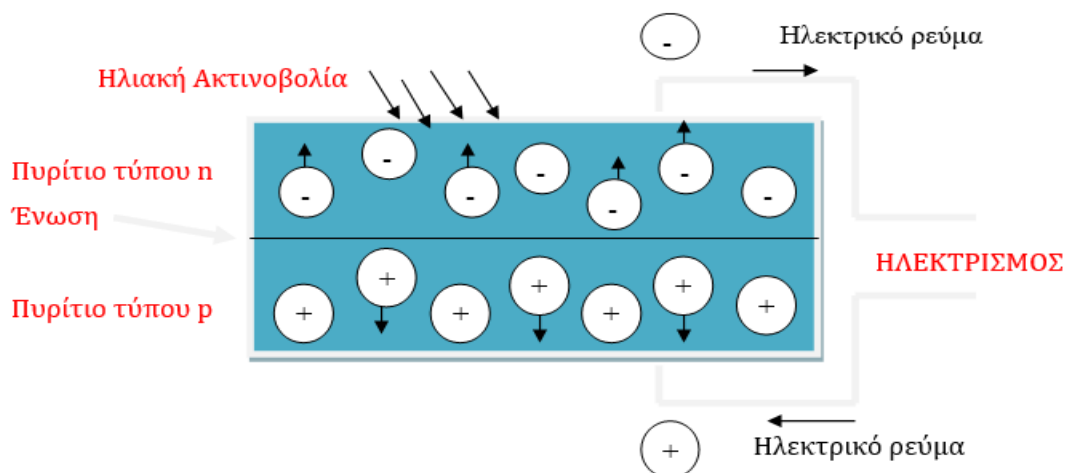
✚ **Αιολική Ενέργεια:** Η Αιολική ενέργεια στις μέρες μας είναι βιώσιμη και είναι πολύ φιλική προς το περιβάλλον σε αντίθεση με την καύση ορυκτών καυσίμων, με αποτέλεσμα να είναι πολύ ελκυστική λύση στο θέμα της ηλεκτροπαραγωγής. Παράγεται ηλεκτρική ενέργεια με την εκμετάλλευση του ανέμου μέσω των ανεμογεννητριών.

✚ **Γεωθερμική Ενέργεια:** Ονομάζουμε τη φυσική θερμική ενέργεια της Γής που βγαίνει στην επιφάνεια του πλανήτη από το εσωτερικό της. Μπορούμε να τη χρησιμοποιήσουμε απευθείας για θερμικές εφαρμογές είτε για παραγωγή ηλεκτρισμού.

✚ **Ηλιακή Ενέργεια:** Η ηλιακή ακτινοβολία αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού με δύο τρόπους: με θερμικές και φωτοβολταϊκές διατάξεις. Με τις θερμικές διατάξεις εννοείται η συλλογή της ηλιακής ενέργειας με στόχο την παραγωγή θερμότητας (χρησιμοποιείται για θέρμανση νερού και τον μετασχηματισμό του σε ατμό για την κίνηση τουρμπινών), ενώ στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές πραγματοποιείται μετατροπή από το φως του ήλιου σε ηλεκτρισμό με τη βοήθεια φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών [2].

1.2 Φωτοβολταϊκό Σύστημα

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, την στήριξη εγκατάστασης τους και τον βοηθητικό εξοπλισμό που περιλαμβάνει ηλεκτρικά κυρίως μέρη. Κεντρικό στοιχείο του φωτοβολταϊκού πάνελ είναι το ηλιακό στοιχείο από πυρίτιο όπου συγκεκριμένος αριθμός στοιχείων συνδέεται σε σειρά για την αύξηση της αποδιδόμενης τάσης και παράλληλα για την αύξηση του αποδιδόμενου ρεύματος. Η φυσική σημασία της λειτουργίας των στοιχείων έγκειται στην παρουσία δύο τύπων ημιαγωγών : τύπου n και τύπου p .



Σχήμα 1.1 Αρχή λειτουργίας ενός ηλιακού στοιχείου.

Στον αρνητικό πόλο τα ηλεκτρόνια διαθέτουν ελευθερία κίνησης, ενώ αντίθετα στον θετικό πόλο οι οπές-θέσεις των ηλεκτρονίων είναι αυτές που κινούνται, δημιουργώντας μία ένωση τύπου $p-n$ που λειτουργεί ως δίοδος. Όταν τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτουν στα ηλιακά στοιχεία με ενέργεια μεγαλύτερη του e_{gap} του υλικού, διαπερνούν τον πόλο n (αυξάνεται ο αριθμός των οπών) και επιδρούν στα άτομα του πόλου p (αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρονίων). Με τον τρόπο αυτό, τα ηλεκτρόνια του πόλου p κινούνται και φτάνουν στην περιοχή της διόδου όπου και έλκονται από το θετικό πεδίο της εκεί περιοχής. Το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο εφόσον συνδεθεί σε εξωτερικό κύκλωμα (σχήμα 1.1) μπορεί να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα.

1.3 Πρόβλημα διαστασιολόγησης φωτοβολταϊκών συστημάτων

Σημαντικό ρόλο στην επιλογή του είδους των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι το ποσό ενέργειας το οποίο απαιτείται να παράγουν. Έχει μεγάλη διαφορά η αναγκαία ενέργεια ενός σπιτιού, από ένα ξενοδοχείο ή ένα συγκρότημα κατοικιών. Γνωρίζοντας πως τα καιρικά φαινόμενα είναι ασταθή υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στην κατάλληλη και συνεχή παροχή ηλεκτρισμού, οπότε σύνηθες φαινόμενο είναι η συνεργασία με έναν πάροχο ενέργειας για την εξασφάλιση της σταθερής παροχής.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός πλήρους συστήματος εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας περιλαμβάνει τη μελέτη της κατεύθυνσης της ηλιακής ακτινοβολίας με σκοπό την εκλογή της βέλτιστης τοποθεσίας για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πάνελ και την πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας. Ιδιαίτερη προσοχή κατά την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων δίδεται στην αποφυγή εμποδίων, όπως η βλάστηση ή σκίαση, καθώς μπορεί να συντελέσουν στη σημαντική μείωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για την εύρεση του καλύτερου τρόπου αντιμετώπισης των διακυμάνσεων της ηλιακής ενέργειας, πρέπει να γίνει μελέτη του βέλτιστου τρόπου μεταφοράς ενέργειας αν απαιτείται και διερεύνηση της καλύτερης προσαρμογής της μεταβαλλόμενης παραγωγής ενέργειας του συστήματος προς την κατανάλωση. Τέλος πρέπει να βρούμε την κλίση των πάνελ προς τον ήλιο η οποία εξαρτάται από την γεωγραφική θέση της περιοχής εγκατάστασης.

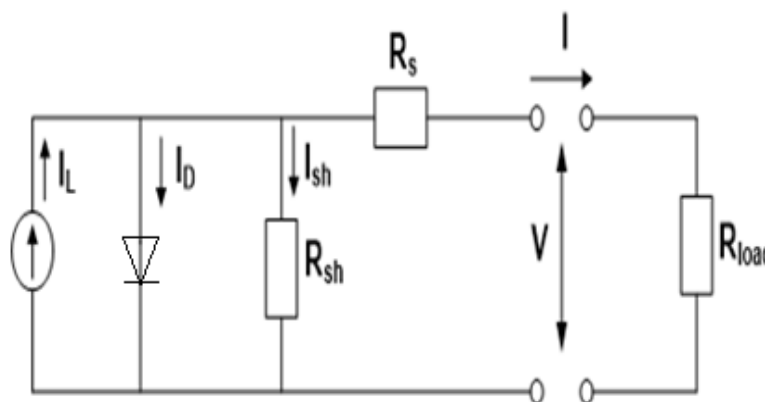
1.4 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η έρευνα για την βέλτιστη διαστασιολόγηση και προσομοίωση λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σε διάφορες εφαρμογές, ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες που θα κληθούμε να αντιμετωπίσουμε. Τα βήματα για την επίτευξη του σκοπού της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου με το οποίο θα γίνει η προσομοίωση των φωτοβολταϊκών πάνελ και της αποδιδόμενης ισχύος (σε σύγκριση με διαθέσιμα δεδομένα), καθώς και η ανάπτυξη μεθοδολογίας για την επίλυση του προβλήματος διαστασιολόγησης και βελτιστοποίησης λειτουργίας. Επίσης σκοπό έχουμε τη συλλογή δεδομένων από διάφορα φωτοβολταϊκά πάνελ με σκοπό την βέλτιστη επιλογή για το κάθε σενάριο ενεργειακής ζήτησης. Τέλος, συλλογή στοιχείων για διαφορετικά σενάρια διαστασιολόγησης βάση της ενεργειακής ζήτησης που χρειάζεται για να λειτουργήσει μία οικία ανάλογα με την κάθε περιοχή εγκατάστασης.

Κεφάλαιο 2°

2.1 Μαθηματικό μοντέλο φωτοβολταϊκού συστήματος

Το μαθηματικό μοντέλο και η μεθοδολογία βελτιστοποίησης που θα ακολουθήσει βασίζεται στην διδακτορική διατριβή του Ιψάκη Δ. με τίτλο «Σχεδιασμός βέλτιστης λειτουργίας ενεργειακών συστημάτων με χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών». Η μαθηματική ανάλυση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων βασίζεται στην χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I - V) που εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία του αέρα στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού συστήματος. Η διάταξη που ισοδυναμεί με την φυσική περιγραφή λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1 και αποτελεί την βάση ανάπτυξης των περισσότερων μαθηματικών μοντέλων φωτοβολταϊκών συστημάτων.



Σχήμα 2.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Η αντίσταση σε σειρά, R_s (V), καθώς και η παράλληλη αντίσταση (shunt resistance), R_{sh} (V), αποτελούν παρασιτικά στοιχεία του κυκλώματος, όπως άλλωστε υπαγορεύει η πραγματική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Σύμφωνα με τον νόμο ρεύματος του Kirchhoff ισχύει για το παραπάνω κύκλωμα:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (2.1)$$

όπου I , I_L , I_D και I_{sh} δηλώνεται το ρεύμα λειτουργίας, το ρεύμα φωτοδίοδου, το ρεύμα δίοδου και το ρεύμα της παράλληλης αντίστασης σε A, αντίστοιχα.

Από την ανάλυση των ρευμάτων της σχέσης (2.1) θα προκύψει έμμεσα η σχέση ισχύος, προσπίπτουσας ακτινοβολίας και θερμοκρασίας που εμφανίζει μία ισχυρά μη-γραμμική συμπεριφορά. Αναπτύσσοντας τους όρους του δεξιού σκέλους της (2.1) προκύπτει η συσχέτιση I-V :

$$I = I_{pv} = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{\alpha}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (2.2)$$

όπου α δηλώνεται η παράμετρος συσχέτισης της χαρακτηριστικής καμπύλης σε V, I_0 το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού δίοδου σε A και V_{pv} η τάση του στοιχείου σε V [3].

Θεωρώντας υψηλή την διαφορά των δύο αντιστάσεων, $R_{sh} \gg R_s$, η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται περαιτέρω ως εξής :

$$I_{pv} = I_L - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Για την επίλυση της (2.3), απαιτούνται εξισώσεις που θα λαμβάνουν υπόψη συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Τέτοιου είδους καταστάσεις αφορούν τις τιμές ρεύματος και τάσης σε συνθήκες βραχυκύκλωσης, ανοικτού κυκλώματος και μεγίστης ισχύος.

2.1.2 Συνθήκες Βραχυκύκλωσης του φωτοβολταϊκού συστήματος (SC)

Στις συνθήκες όπου ισχύει $V_{pv}=0$ (βραχυκύκλωση), το ρεύμα I_L διαπερνά την δίοδο και ισούται με το λεγόμενο ρεύμα βραχυκυκλώματος (short current):

$$I_{L,ref} = I_{pv,sc,ref} = I_{pv} = I_{sc,ref} \quad (2.4)$$

Με το όρο ref δηλώνονται οι συνθήκες αναφοράς: ηλιακή ακτινοβολία $G_{ref}= 1000 \text{ W/m}^2$ και θερμοκρασία $T_{ref}=25 \text{ }^\circ\text{C}$

2.1.3 Συνθήκες Ανοικτού Κυκλώματος (OC)

Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος με μηδενική ένταση ρεύματος $I_{pv}=0$, η σχέση (2.3) μετασχηματίζεται ως εξής (ο όρος 1 είναι μικρός σε σύγκριση με την εκθετική παράσταση):

$$I_{o,oc,ref} = I_{L,ref} \cdot \exp\left(\frac{V_{oc,ref}}{\alpha_{ref}}\right) \quad (2.5)$$

2.1.4 Συνθήκες Μεγίστης Ισχύος (MPP)

Οι συνθήκες μέγιστης ισχύος υποδηλώνουν $I_{pv}=I_{mp,ref}$ και $V_{pv}=V_{mp,ref}$ και αντικαθιστώντας τις (2.4) και (2.5) στην (2.3) (ο όρος 1 είναι μικρός σε σύγκριση με την εκθετική παράσταση), προκύπτει η σχέση για την αντίσταση σε σειρά:

$$R_{s,ref} = \frac{\alpha_{ref} \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{L,ref}}\right) - V_{mp,ref} + V_{oc,ref}}{I_{mp,ref}} \quad (2.6)$$

Πέραν όμως ανωτέρω βασικών σχέσεων, διακρίνεται και η ανάγκη ενσωμάτωσης της μεταβλητής της θερμοκρασίας στο μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης, καθώς επηρεάζει σημαντικά την μορφή της καμπύλης I-V. Δύο παράμετροι που εξαρτώνται πλήρως από την θερμοκρασία και δίνονται πάντοτε σε φυλλάδια εταιρειών κατασκευής που συνοδεύουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, αποτελούν οι σταθερές θερμοκρασίας ($\mu_{i,j}$) σε συνθήκες βραχυκύκλωσης (SC) και ανοικτού κυκλώματος (OC) για σταθερή ακτινοβολία:

$$\mu_{I,sc} = \frac{\Delta I_{sc}}{\Delta T} \cong \frac{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (2.7)$$

$$\mu_{V,oc} = \frac{\Delta V_{oc}}{\Delta T} \cong \frac{V_{oc}(T_2) - V_{oc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (2.8)$$

όπου T_1, T_2 δηλώνονται θερμοκρασίες μεταξύ της θερμοκρασίας αναφοράς ($T_{c,ref}$) σε K ($T_2 > T_1$).

Επιπλέον, η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στους όρους α , I_L και I_o που αναφέρθηκαν στην βασική εξίσωση (2.3) εισάγεται ως εξής :

$$\alpha = \alpha_{ref} \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad (2.9)$$

$$I_L = \frac{G_T}{G_{T,ref}} \cdot [I_{L,ref} + \mu_{I,sc} \cdot (T_c - T_{c,ref})] \quad (2.10)$$

$$I_o = I_{o,ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[\left(\frac{e_{gap} \cdot N_s}{a_{ref}} \right) \cdot \left(1 - \frac{T_{c,ref}}{T_c} \right) \right] \quad (2.11)$$

$$e_{gap} = 1.17 - 4.7310^{-4} \cdot \frac{T_c^2}{T_c + 636} \quad (2.12)$$

όπου T_c δηλώνεται η θερμοκρασία του στοιχείου (ίδια με του αέρα) σε K, G_T δηλώνεται η ηλιακή ακτινοβολία σε W/m^2 , N_s ο αριθμός των ηλιακών στοιχείων του φωτοβολταϊκού πάνελ και e_{gap} η ζώνη εύρους του υλικού κατασκευής (Si) σε eV.

Μέσω διαφοροποίησης της σχέσης (2.5) ως προς την θερμοκρασία ($dV_{oc,ref}/dt = \mu_{V,oc}$) και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (2.5), (2.7), (2.9), (2.11) προκύπτει ο προσδιορισμός της παραμέτρου a_{ref} που απαιτείται για την ολοκλήρωση της μαθηματικής περιγραφής του φωτοβολταϊκού συστήματος :

$$\alpha_{ref} = \frac{\mu_{V,oc} \cdot T_{c,ref} - V_{oc,ref} + e_{gap} \cdot N_s}{\frac{\mu_{I,sc} \cdot T_{c,ref}}{I_{L,ref}} - 3} \quad (2.13)$$

Οι σχέσεις (2.3)-(2.13) ουσιαστικά αποτελούν το σετ των εξισώσεων που περιγράφουν την λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. Η αποδιδόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος δίδεται ως:

$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv} \cdot \eta_{pv} \cdot N_{panel} \quad (2.14)$$

όπου P_{pv} δηλώνεται η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος σε W, N_{panel} ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πάνελ και η_{pv} η απόδοση του συστήματος. Στην απόδοση του συστήματος, η_{pv} , εμπεριέχονται όλες οι ηλεκτρικές απώλειες κατά την παραγωγή ρεύματος και συνήθως αντιστοιχούν σε μία τιμή κοντά στο 90%.

Κεφάλαιο 3^ο

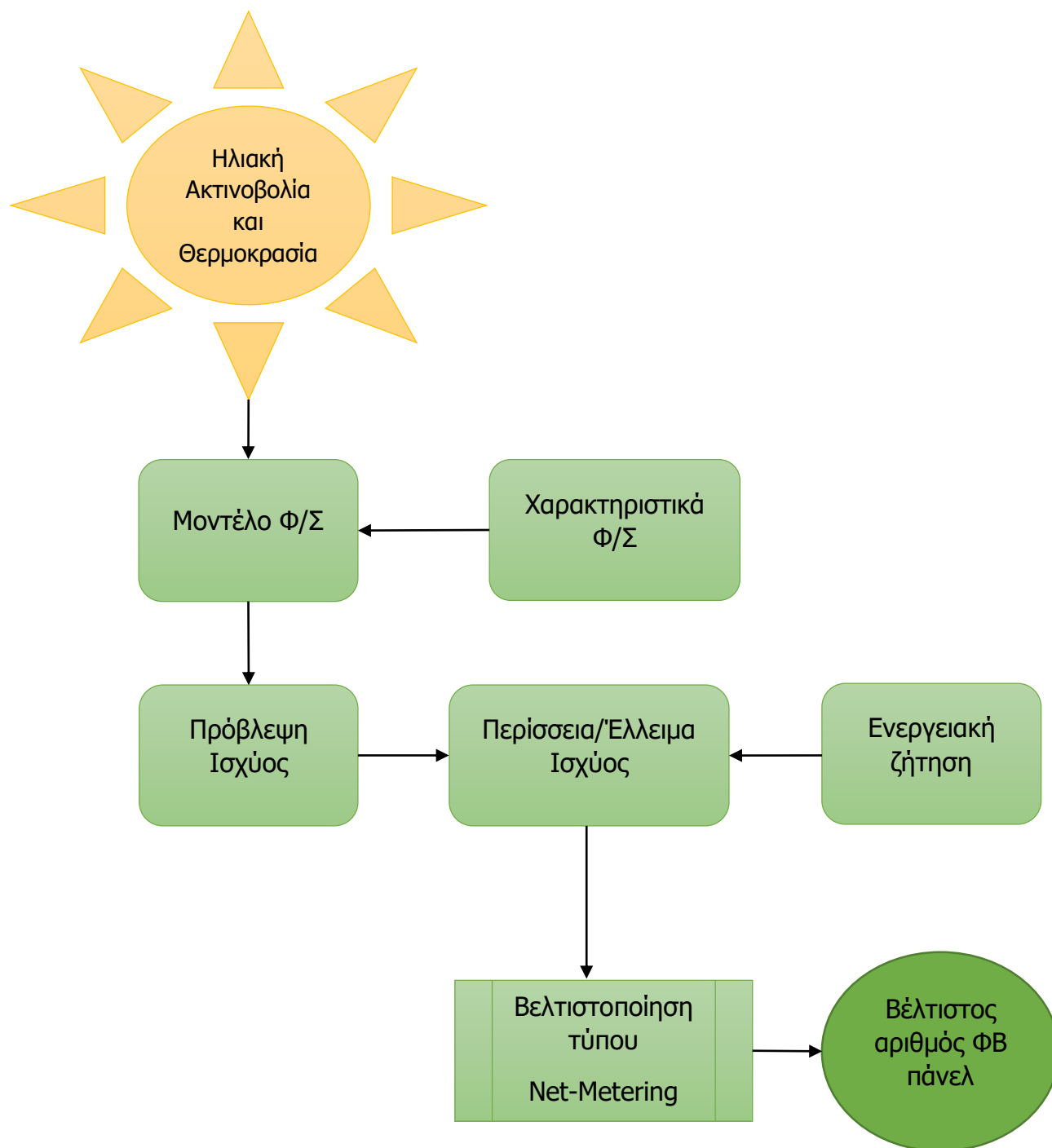
3.1 Εισαγωγή κεφαλαίου

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τη μεθοδολογία την οποία χρησιμοποιήσαμε για τον βέλτιστο σχεδιασμό και την διαστασιολόγηση των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Πιο κάτω αναλύουμε τη διαδικασία με την οποία το μαθηματικό υπόβαθρο μπορεί να καταλήξει στον βέλτιστο αριθμό φωτοβολταϊκών πάνελ μιας κατοικίας ανάλογα με την ζήτηση των ενεργειακών αναγκών της.

Πιο κάτω αναφέρονται τα βήματα που ακολουθεί η παρούσα διπλωματική όσον αφορά την διαστασιολόγηση και προσομοίωση λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος (Φ/Σ):

1. Επιλογή μετεωρολογικών δεδομένων (ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας) για την τοποθεσία της οικίας όπου θα γίνει η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πάνελ.
2. Συλλογή ενεργειακών προφίλ που στοχεύει το Φ/Σ να καλύψει.
3. Σύγκριση και επιλογή φωτοβολταϊκών πάνελ με τα επαρκή χαρακτηριστικά έτσι ώστε να υποστηρίζουν τα ανάλογα ενεργειακά προφίλ. Αρχικά, θα επιβεβαιωθεί το μαθηματικό μοντέλο με διαθέσιμα κατασκευαστικά δεδομένα 10 εταιρειών.
4. Τέλος, απαραίτητο βήμα αποτελεί η βελτιστοποίηση του προβλήματος για να βρεθεί η λύση που με την οποία δεν θα υπάρχει μεγάλη απόκλιση στην μέση παραγόμενη ενέργεια και στην μέση αναγκαία ζήτηση τροφοδότησης. Αυτό το βήμα επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του Optimtool του Matlab.

Πιο κάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα στο οποίο απεικονίζονται τα βήματα για την επίλυση των πιο πάνω προβλημάτων:



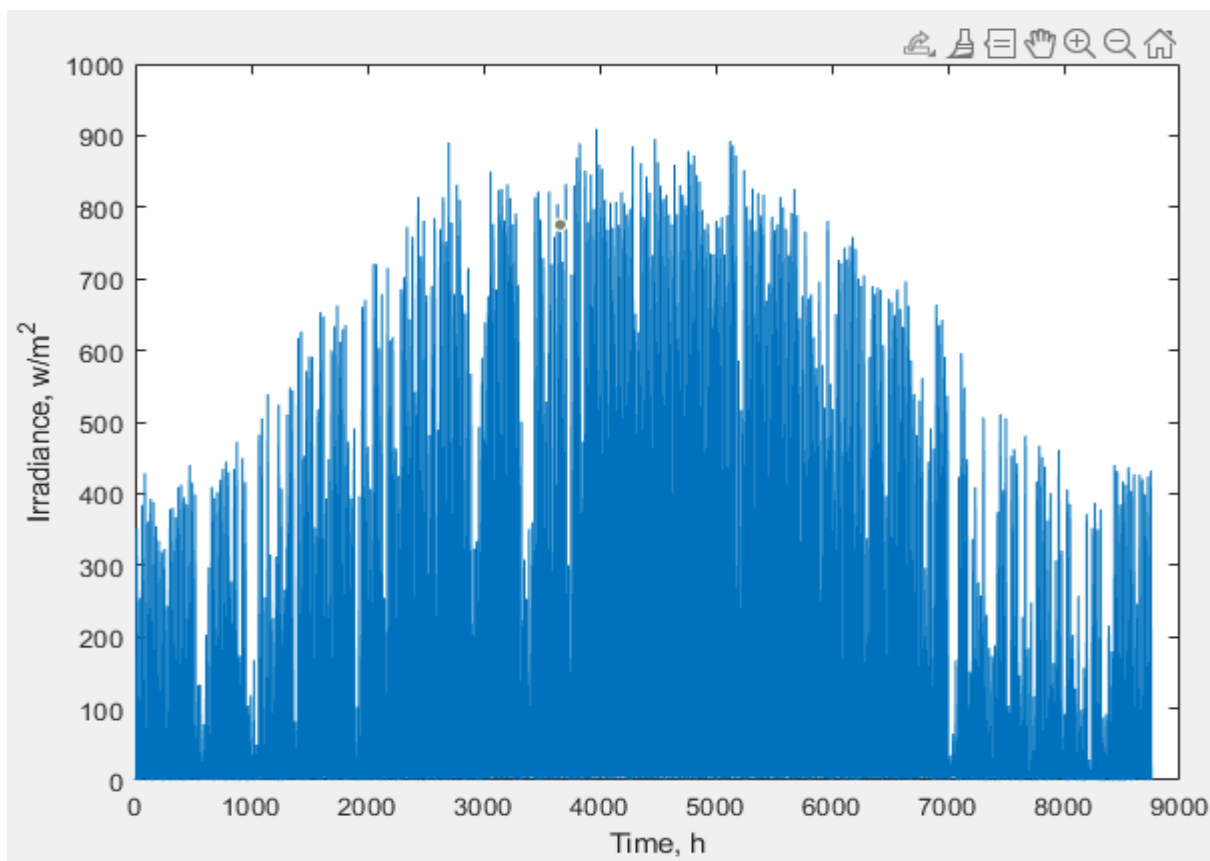
Εικόνα 3.1 Λογικό διάγραμμα στρατηγικής επίλυσης του προβλήματος.

3.2 Δεδομένα εισαγωγής

Στο μοντέλο χρησιμοποιούνται σαν δεδομένα εισαγωγής τα ενεργειακά προφίλ: α) μιας κατοικίας, β) ενός νοσοκομείου, καθώς και δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας της τοποθεσίας όπου θα γίνει η εγκατάσταση. Τα πιο πάνω δεδομένα είναι μετρήσεις ανά ώρα και για ένα έτος.

Δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας

Για τα δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας της περιοχής όπου θα γίνει η εγκατάσταση μας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανά μια ώρα για διάστημα 365 ημερών, δηλαδή συνολικά 8760 μετρήσεις. Διαγραμματικά η ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με τον χρόνο παρουσιάζεται πιο κάτω:

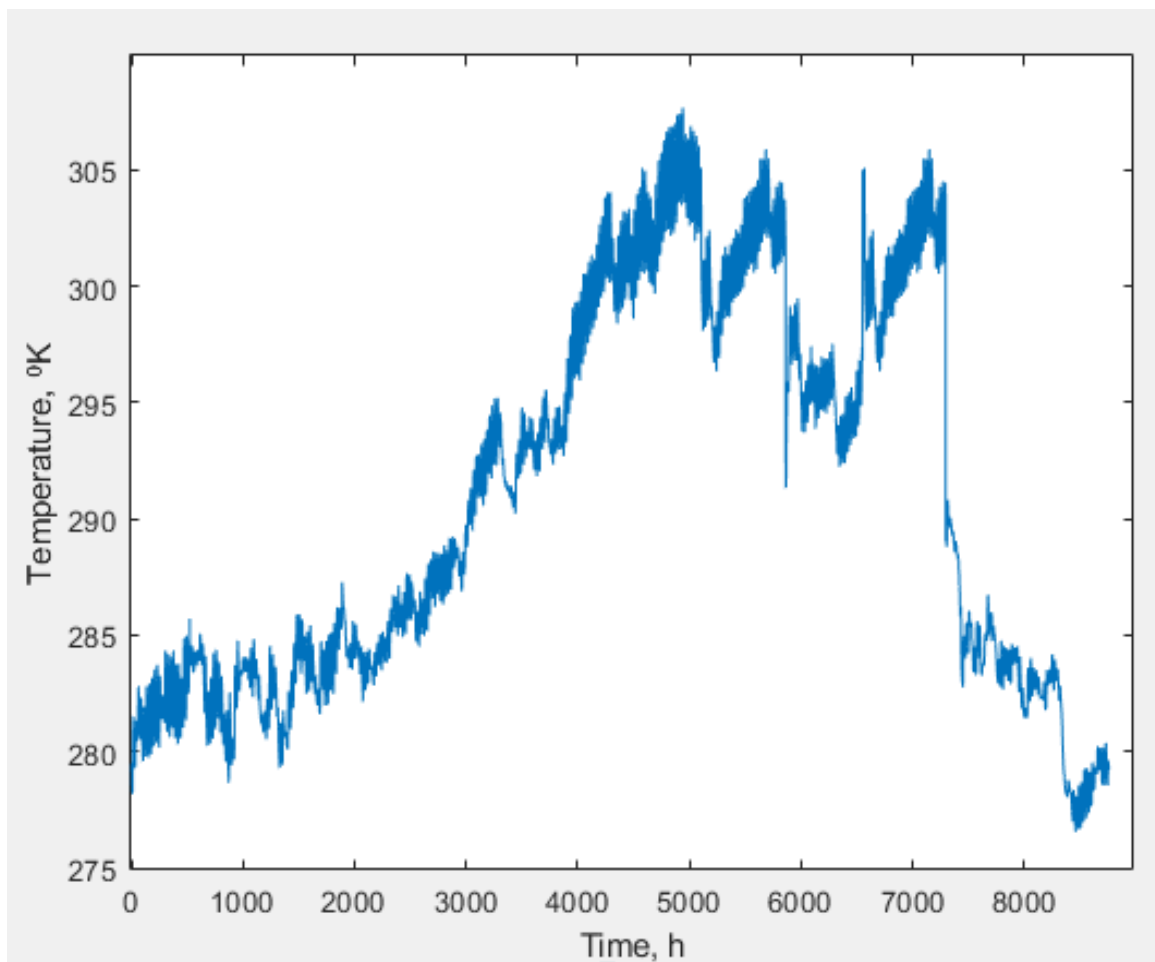


Σχήμα 3.1 Μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας για ένα έτος.

πως φαίνεται από τις μετρήσεις η ηλιακή ακτινοβολία δεν είναι σταθερή όλες τις μέρες και ώρες του χρόνου, οπότε μπορεί να υπάρξουν ημέρες που τα φωτοβολταϊκά μας να παράγουν ελάχιστη ενέργεια. Τα στοιχεία αυτά θα χρησιμοποιηθούν για όλα τα είδη φωτοβολταϊκών πάνελ αφού είναι τα δεδομένα μας από την περιοχή της εγκατάστασης μας.

Δεδομένα θερμοκρασίας

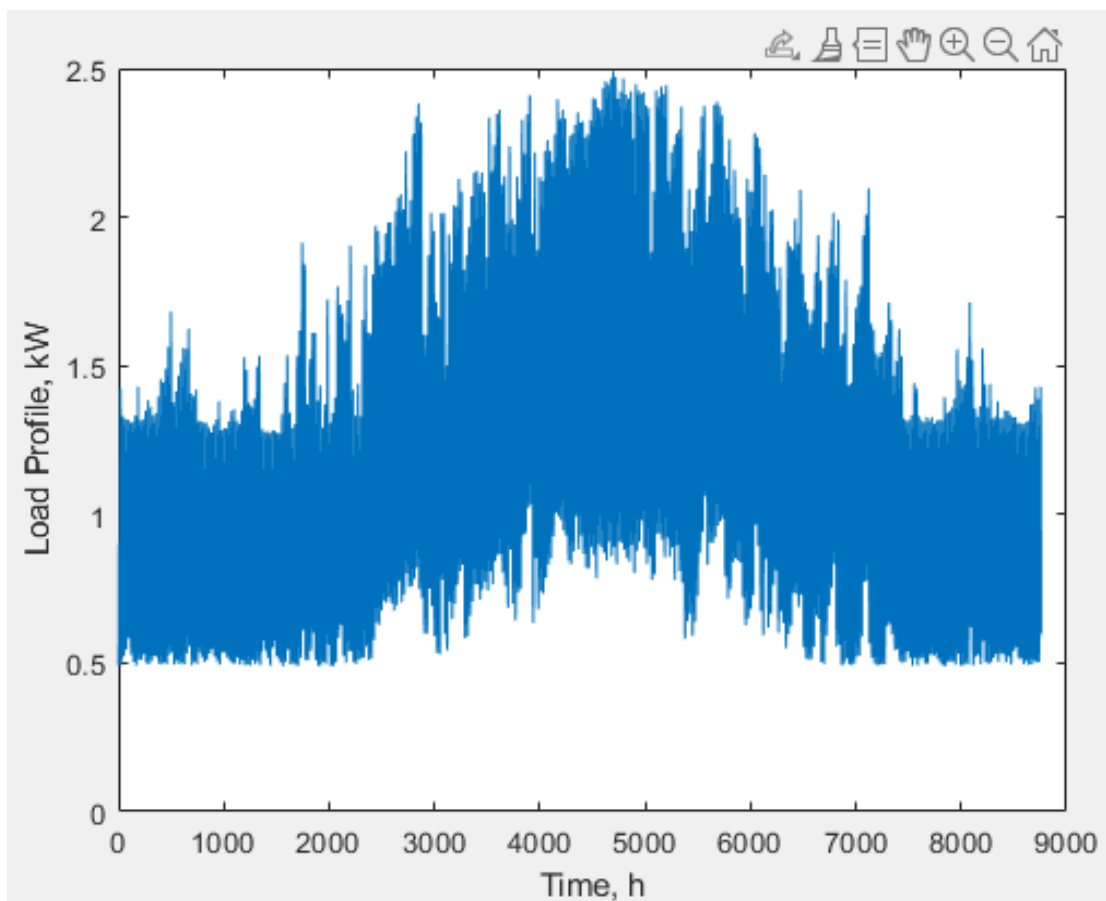
Για τα δεδομένα θερμοκρασίας της περιοχής όπου θα γίνει η εγκατάσταση μας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανά μια ώρα για διάστημα 365 ημερών, δηλαδή συνολικά 8760 μετρήσεις. Διαγραμματικά η θερμοκρασία σε σχέση με τον χρόνο παρουσιάζεται πιο κάτω:



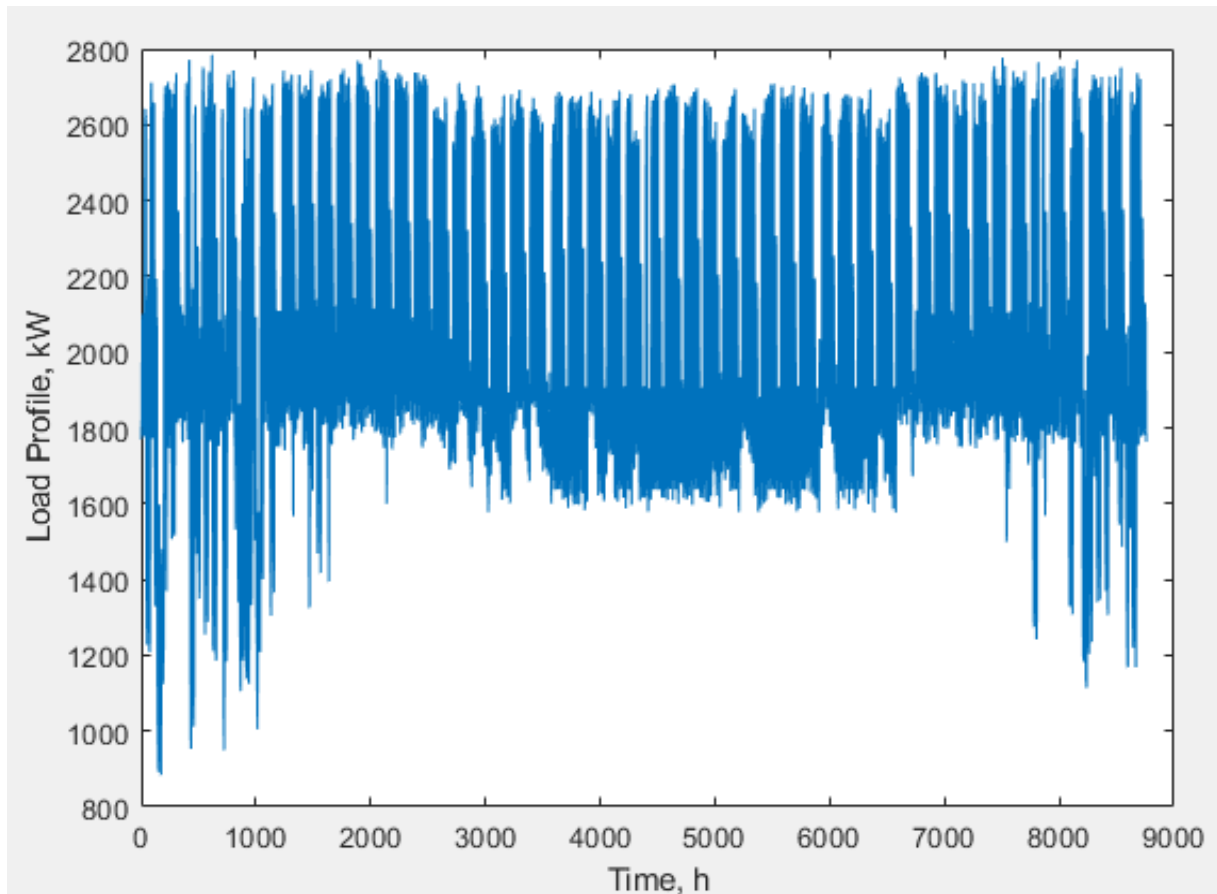
Σχήμα 3.2 Μετρήσεις θερμοκρασίας για ένα έτος.

Ενεργειακά προφίλ

Για τα ενεργειακά δεδομένα της περιοχής όπου θα γίνει η εγκατάσταση μας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ανά μια ώρα για διάστημα 365 ημερών, δηλαδή συνολικά 8760 μετρήσεις. Τα δεδομένα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν παρακάτω ως ενεργειακά προφίλ είναι μιας κατοικίας και ενός νοσοκομείου. Παρουσιάζονται στο πιο κάτω σχήμα:



Σχήμα 3.3 Ενεργειακό προφίλ κατοικίας.



Σχήμα 3.4 *Ενεργειακό προφίλ νοσοκομείου.*

Υπολογίζεται ακόμα και ο μέσος όρος κατανάλωσης για το κάθε προφίλ:

- Μέσος όρος ημερήσιας κατανάλωσης ισχύος της κατοικίας : 1.09 kW
- Μέσος όρος ημερήσιας κατανάλωσης ισχύος του νοσοκομείου : 2099 kW

3.3 Σύγκριση πειραματικών και θεωρητικών τιμών για διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ

Πιο κάτω θα ακολουθήσει η σύγκριση της ισχύος από διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ με τα αποτελέσματα που αποδίδει το μαθηματικό μοντέλο που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.

Τα δεδομένα που απαιτούνται είναι:

- $I_{L_{ref}}$: Light current reference for $U=0$, A (short circuit current), A
- $V_{oc_{ref}}$: Open circuit voltage, V
- A_{panels} : The size of one panel in m^2
- NOCT: Nominal Operating Cell Temperature, K
- $I_{mp_{ref}}$: Current at maximum point, A
- $V_{mp_{ref}}$: Voltage at maximum point, V
- N_s : Cell number
- μ_{oc} : Temperature coefficient, $\%/^{\circ}C$
- μ_{sc} : Temperature coefficient, $\%/^{\circ}C$

Παρακάτω εμφανίζονται οι πίνακες με τα τεχνικά χαρακτηριστικά 10 διαφορετικών φωτοβολταϊκών πάνελ τα οποία εντοπίστηκαν μέσα από τα φυλλάδια της κάθε εταιρείας και χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα εισαγωγής στον κώδικα.

Πίνακας 3.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πάνελ 1-5.

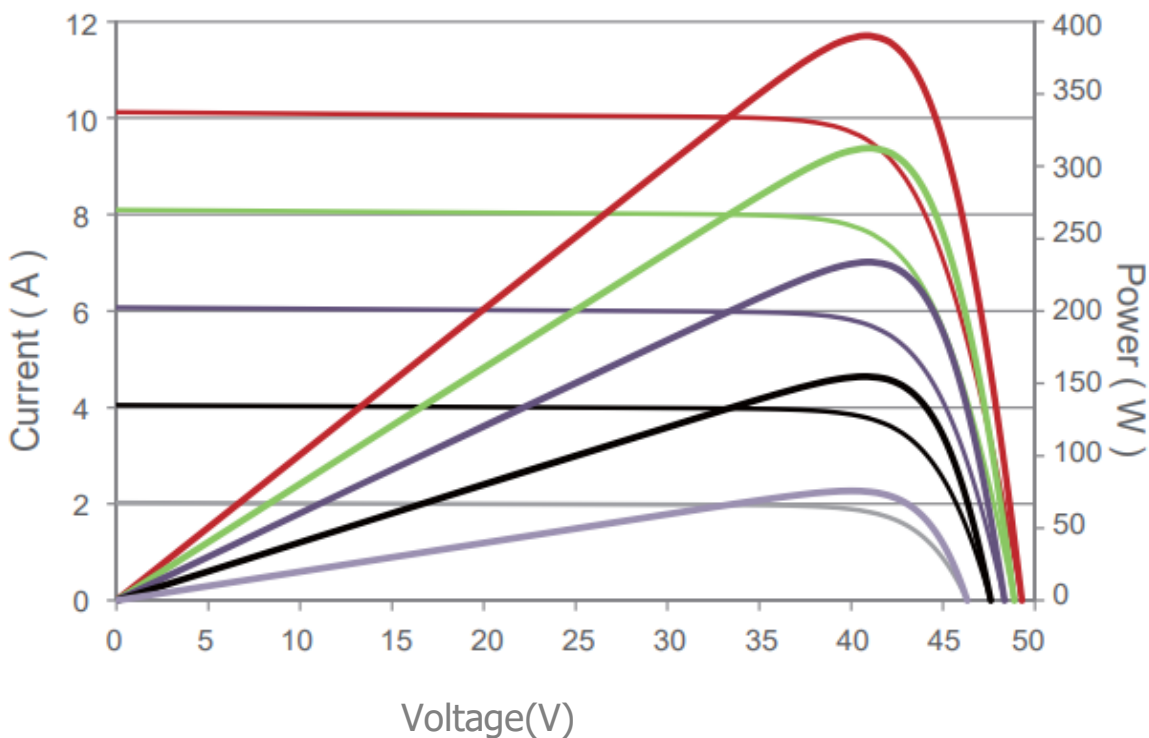
	Panel Type 1 (400W)	Panel Type 2 (320W)	Panel Type 3 (380W)	Panel Type 4 (480W)	Panel Type 5 (340W)
$I_{L_{ref}}(A)$	10.36	9.06	9.99	11.86	10.82
$V_{oc_ref}(V)$	49.8	46.22	48.4	52.34	41.0
$A_{panels}(m^2)$	1.983	1.9384	1.9711	2.2453	1.6873
NOCT	318	318	318	318	318
$I_{mp_ref}(A)$	9.6	8.56	9.55	11.04	10.02
$V_{mp_ref}(V)$	41.7	37.38	39.8	43.48	33.93
Ns	72	72	72	78	60
$\mu_{oc}(\%/^{\circ}C)$	-0.29	-0.33	-0.29	-0.28	-0.28
$\mu_{sc}(\%/^{\circ}C)$	0.048	0.058	0.052	0.048	0.048

Πίνακας 3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών πάνελ 6-10.

	Panel Type 6 (280W)	Panel Type 7 (630W)	Panel Type 8 (270W)	Panel Type 9 (370W)	Panel Type 10 (300W)
$I_{L_{ref}}(A)$	9.45	14.39	9.09	9.78	9.85
$V_{oc_ref}(V)$	38.6	55.85	38.8	48.43	39.4
$A_{panels}(m^2)$	1.6873	2.7953	1.6368	1.9404	1.6873
NOCT	317	318	316	318	314
$I_{mp_ref}(A)$	8.78	13.69	8.52	9.32	8.91
$V_{mp_ref}(V)$	31.9	46.02	31.7	39.7	33.66
Ns	60	78	60	72	60
$\mu_{oc}(\%/^{\circ}C)$	-0.32	-0.25	-0.31	-0.3	-0.32
$\mu_{sc}(\%/^{\circ}C)$	0.055	0.045	0.06	0.38	0.055

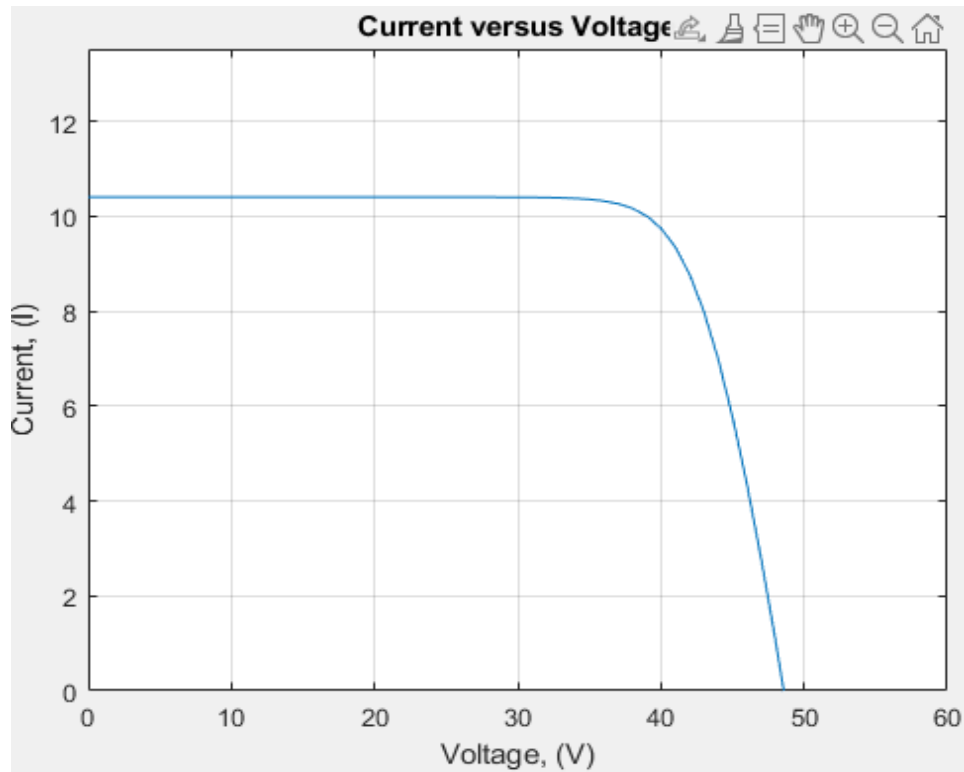
Panel Type 1 (400W Cheetah-Jinko Solar)

Τα συγκεκριμένα φωτοβολταϊκά είναι ονομαστικής ισχύος 400W. Πιο κάτω βλέπουμε την καμπύλη ισχύος από το φυλλάδιο της εταιρείας.

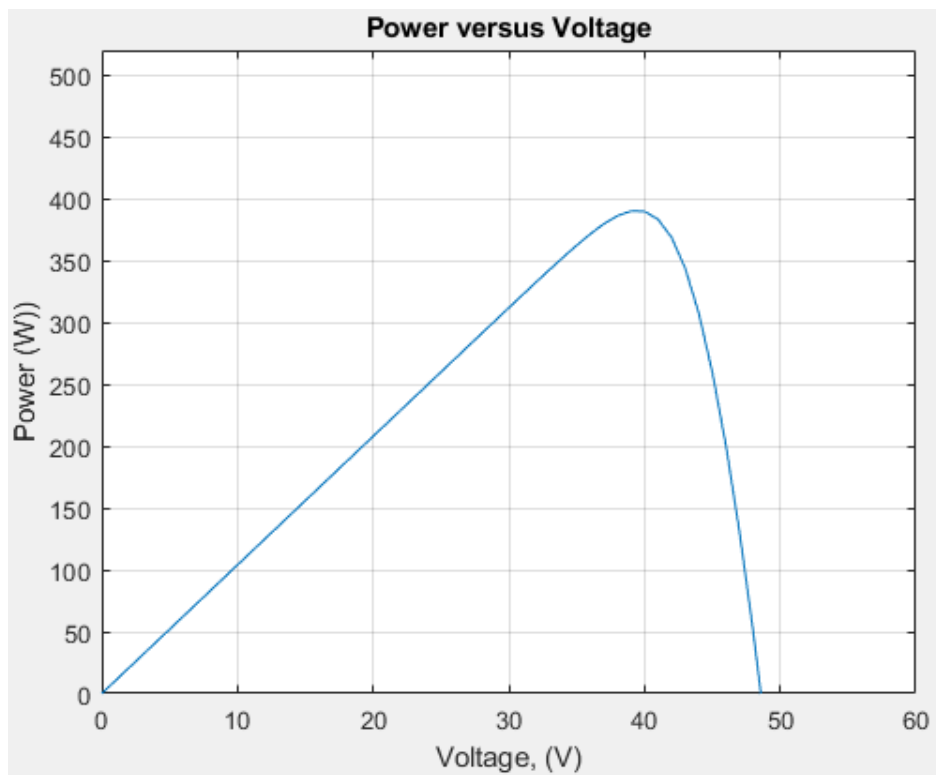


Σχήμα 3.5 Σχήμα από φυλλάδιο εταιρείας: $Current(A)-Voltage(V)$ & $Power(W)-Voltage(V)$.

Από το πιο πάνω σχήμα μας ενδιαφέρουν οι κόκκινες καμπύλες αφού τα φωτοβολταϊκά πάνελ μας είναι ονομαστικής ισχύος 400W. Οι υπόλοιπες καμπύλες είναι για λειτουργία των Φ/Σ σε χαμηλότερες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας. Εισάγοντας τα στοιχεία στο μαθηματικό μοντέλο στο περιβάλλον της Matlab με βάση το προαναφερθέν μαθηματικό μοντέλο, εμφανίζονται τα παρακάτω αποτελέσματα για την καμπύλη ισχύος.



Σχήμα 3.6 Σχήμα από Matlab: Current(A)-Voltage(V).

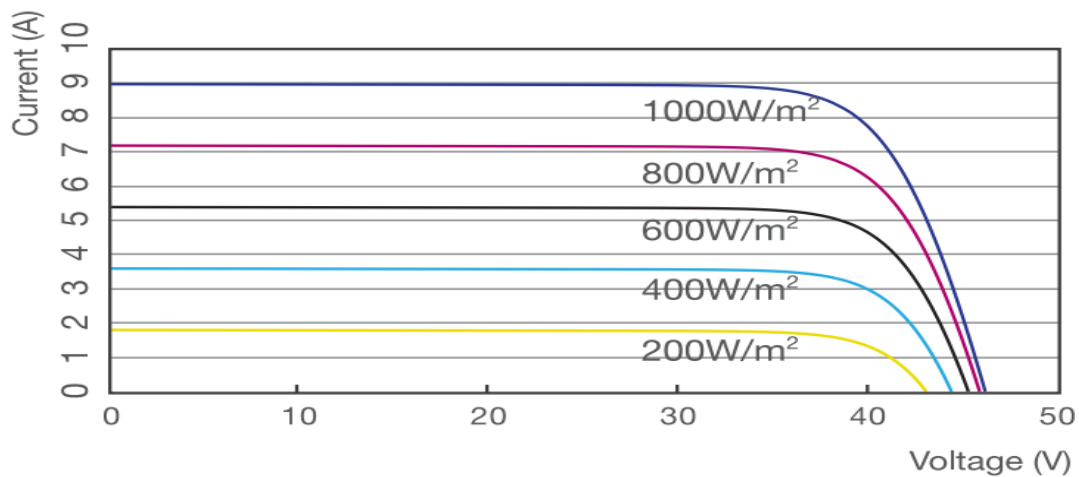


Σχήμα 3.7 Σχήμα από Matlab: Power(W)-Voltage(V).

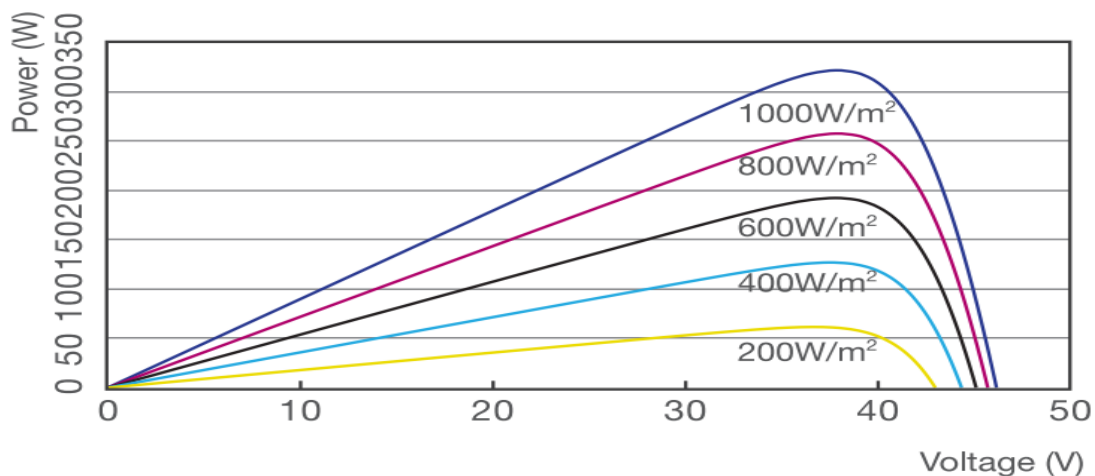
Στα σχήματα 3.5, 3.6 και 3.7 φαίνεται πώς οι προδιαγραφές και τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου συμπίπτουν με ελάχιστη απόκλιση. Αυτό μας δείχνει πόσο αξιόπιστο είναι το μαθηματικό μοντέλο.

Panel Type 2 (320W-JAsolar)

Τα συγκεκριμένα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι ονομαστικής ισχύος 320W. Πιο κάτω βλέπουμε τις καμπύλες ισχύος από το φυλλάδιο της εταιρείας.

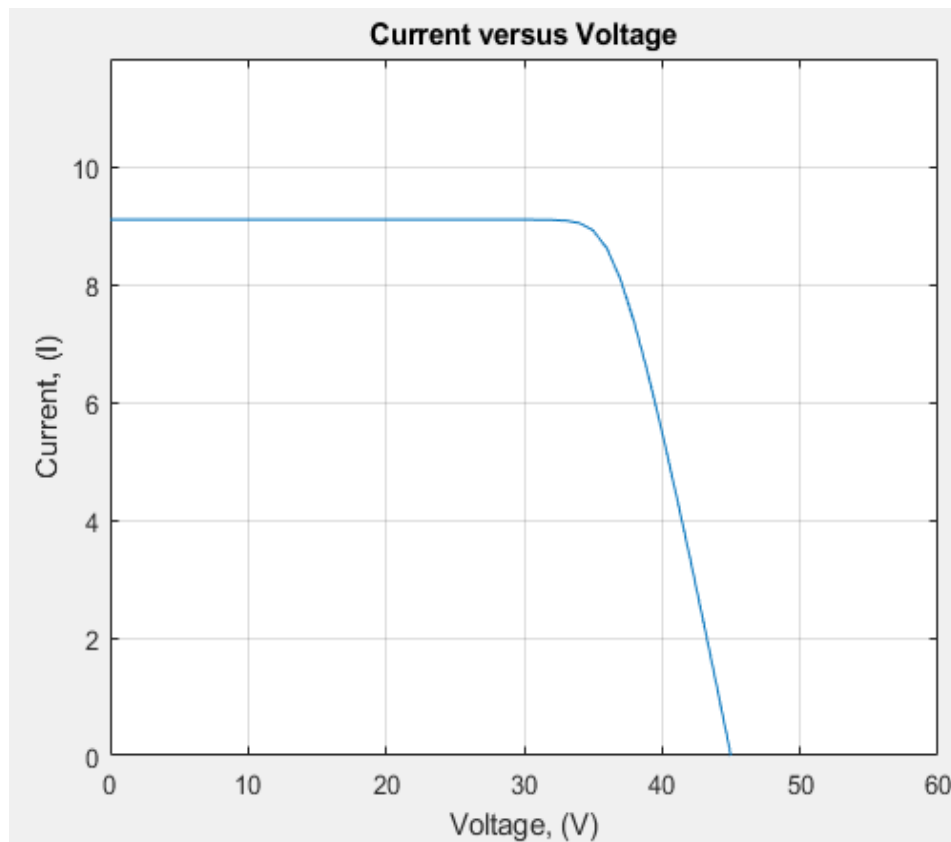


Σχήμα 3.8 Σχήμα από φυλλάδιο εταιρείας: *Current(A)-Voltage(V)*.

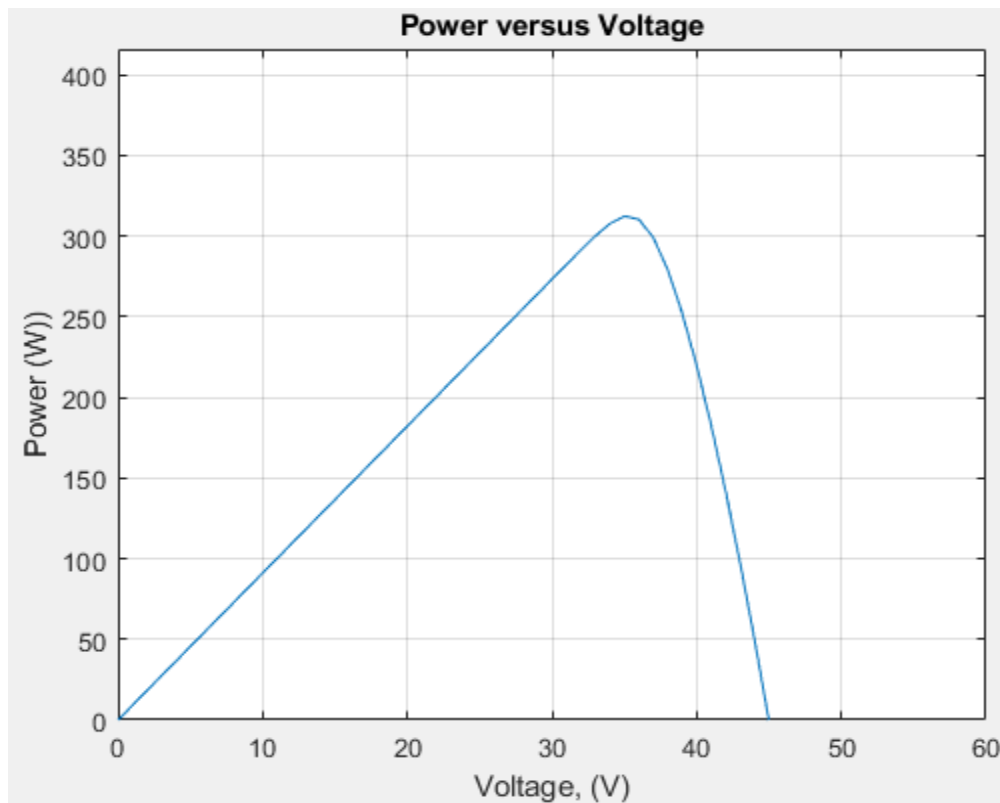


Σχήμα 3.9 Σχήμα από φυλλάδιο εταιρείας: *Power(W)-Voltage(V)*.

Από τα πιο πάνω σχήμα μας ενδιαφέρουν οι μπλε καμπύλες αφού τα φωτοβολταϊκά πάνελ μας είναι ονομαστικής ισχύος 320W. Οι υπόλοιπες καμπύλες είναι για λειτουργία των φωτοβολταϊκών πάνελ σε χαμηλότερες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας. Εισάγοντας τα στοιχεία στο μαθηματικό μοντέλο στο περιβάλλον της Matlab με βάση το προαναφερθέν μαθηματικό μοντέλο, εμφανίζονται τα παρακάτω αποτελέσματα για την καμπύλη ισχύος.



Σχήμα 3.10 Σχήμα από Matlab: *Current(A)-Voltage(V)*.

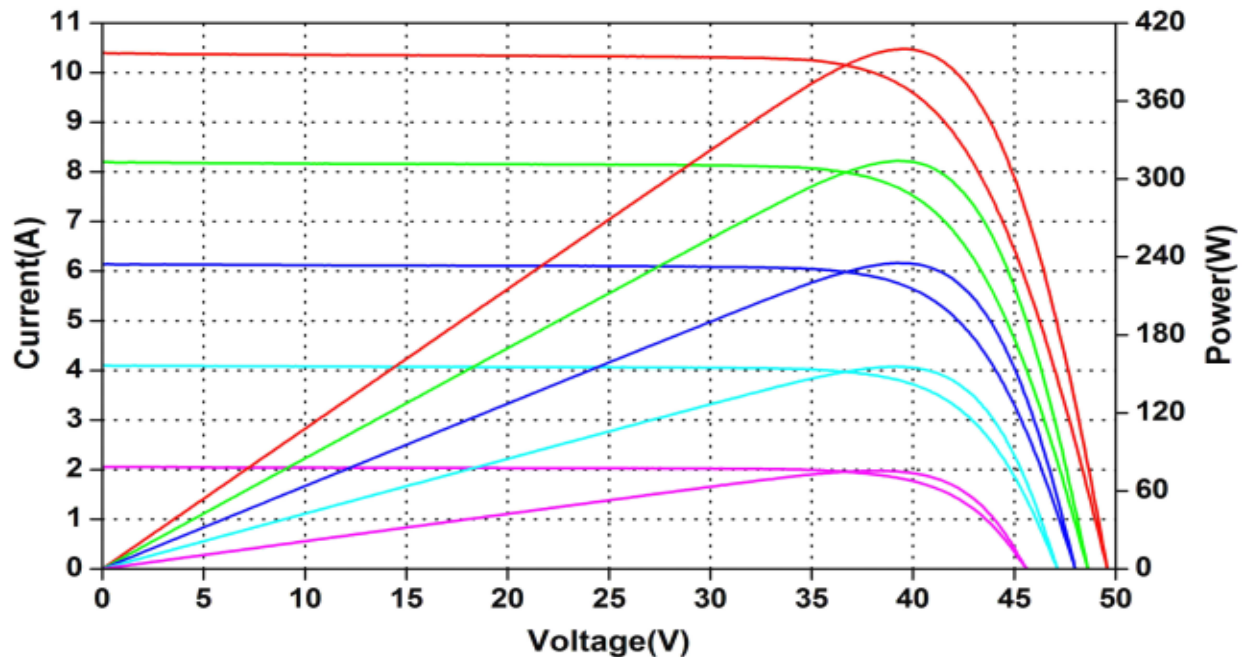


Σχήμα 3.11 Σχήμα από Matlab: $Power(W)$ - $Voltage(V)$.

Στα σχήματα 3.8, 3.9, 3.10 και 3.11 φαίνεται πώς οι προδιαγραφές και τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου συμπίπτουν με ελάχιστη απόκλιση. Αυτό μας δείχνει πόσο αξιόπιστο είναι το μαθηματικό μοντέλο.

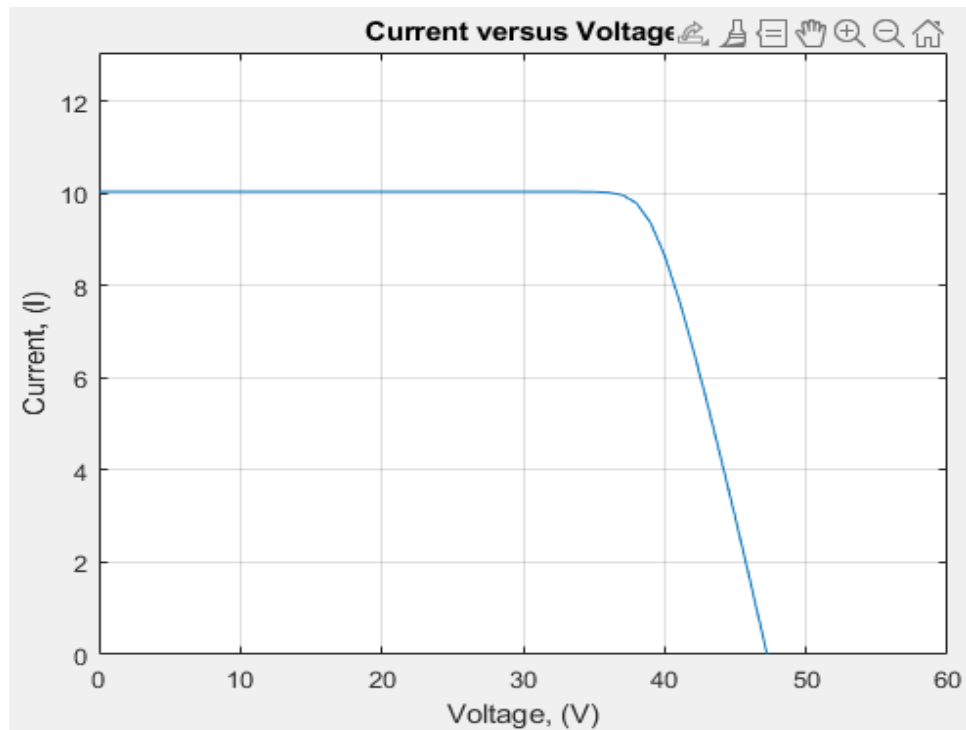
Panel Type 3 (380W-Amerisolar)

Τα συγκεκριμένα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι ονομαστικής ισχύος 380W. Πιο κάτω βλέπουμε την καμπύλη ισχύος από το φυλλάδιο της εταιρείας.

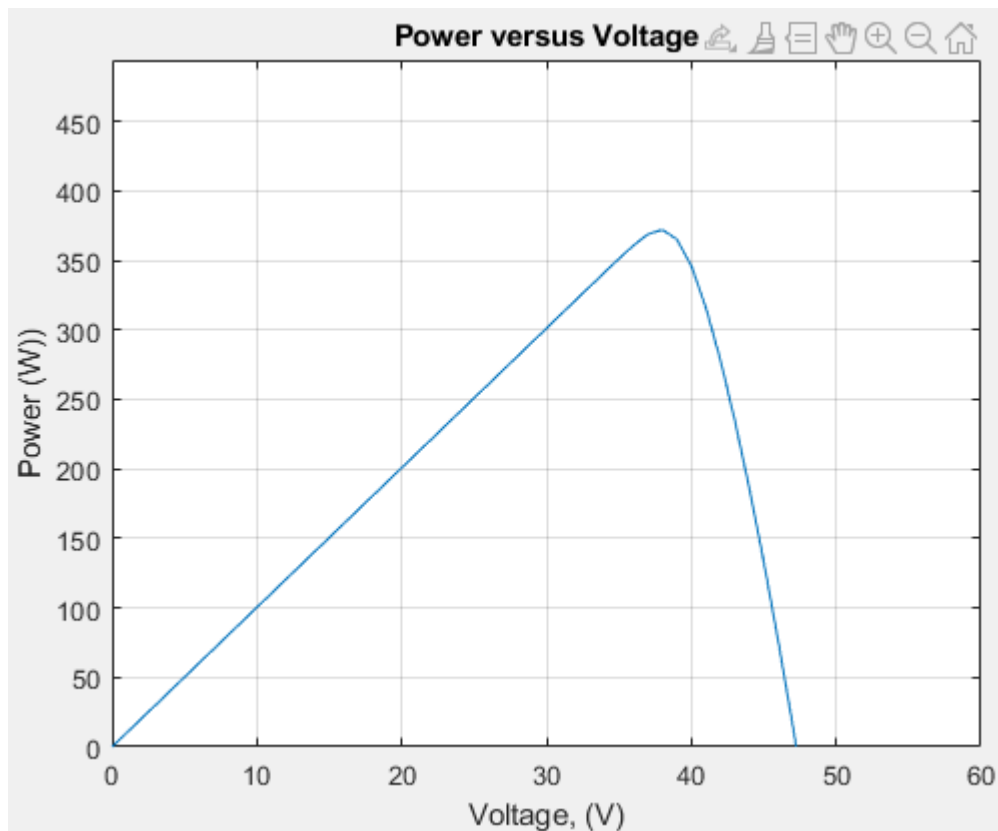


Σχήμα 3.12 Σχήμα από φυλλάδιο εταιρείας: *Current(A)-Voltage(V) & Power(W)-Voltage(V).*

Από το πιο πάνω σχήμα μας ενδιαφέρουν οι κόκκινες καμπύλες αφού τα φωτοβολταϊκά πάνελ μας είναι ονομαστικής ισχύος 380W. Οι υπόλοιπες καμπύλες είναι για λειτουργία των φωτοβολταϊκών πάνελ σε χαμηλότερες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας. Εισάγοντας τα στοιχεία στο μαθηματικό μοντέλο στο περιβάλλον της Matlab με βάση το προαναφερθέν μαθηματικό μοντέλο, εμφανίζονται τα παρακάτω αποτελέσματα για την καμπύλη ισχύος.



Σχήμα 3.13 Σχήμα από Matlab: *Current(A)-Voltage(V)*.

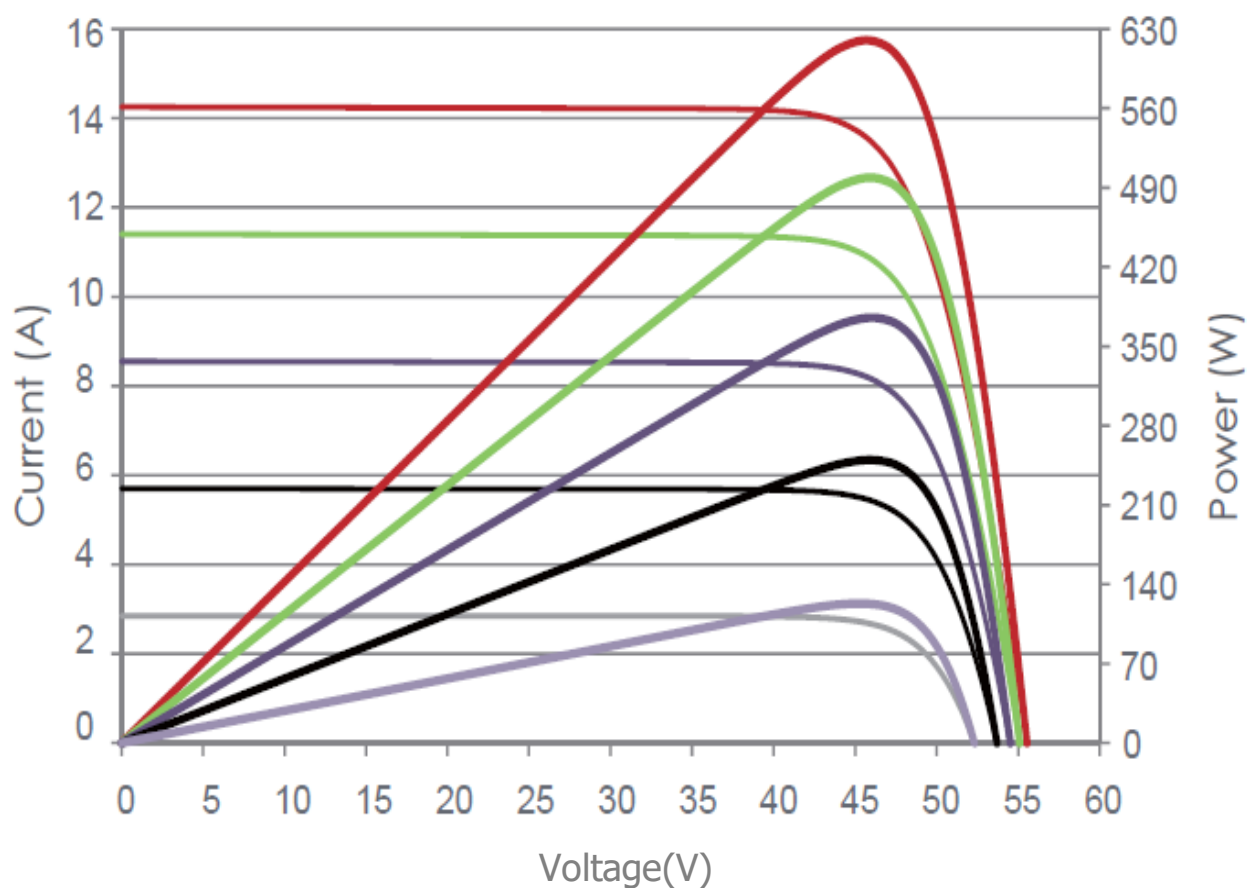


Σχήμα 3.14 Σχήμα από Matlab: *Power(W)-Voltage(V)*.

Στα σχήματα 3.12, 3.13 και 3.14 φαίνεται πώς οι προδιαγραφές και τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου συμπίπτουν με ελάχιστη απόκλιση. Αυτό μας δείχνει πόσο αξιόπιστο είναι το μαθηματικό μοντέλο.

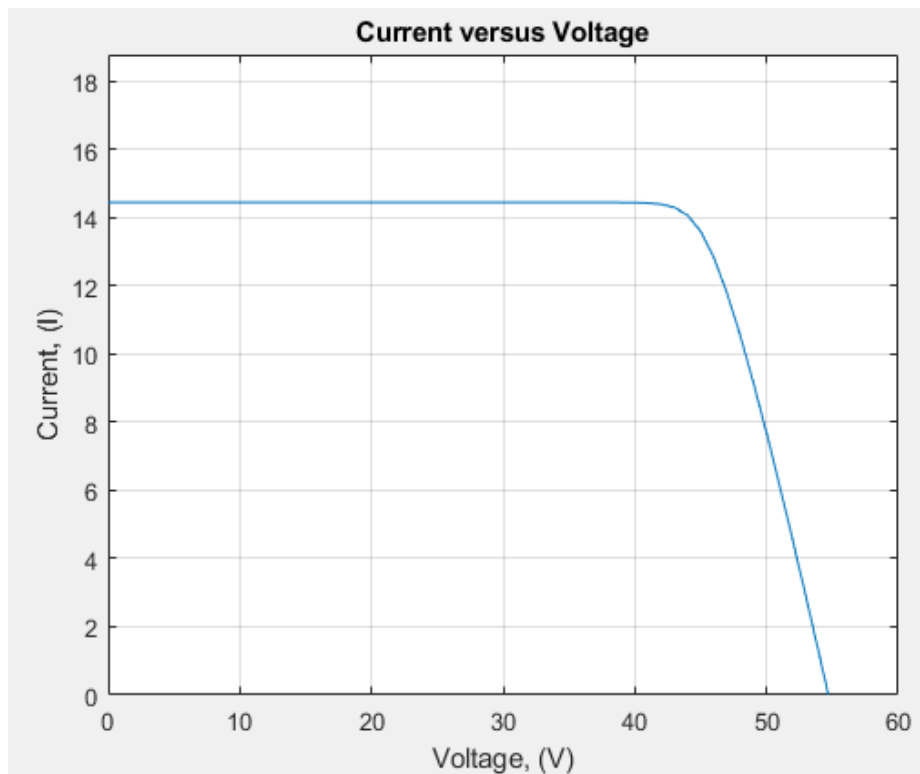
Panel Type 7 (630W Tiger Neo N-Type-Jinko Solar)

Τα συγκεκριμένα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι ονομαστικής ισχύος 630W. Πιο κάτω βλέπουμε την καμπύλη ισχύος από το φυλλάδιο της εταιρείας.

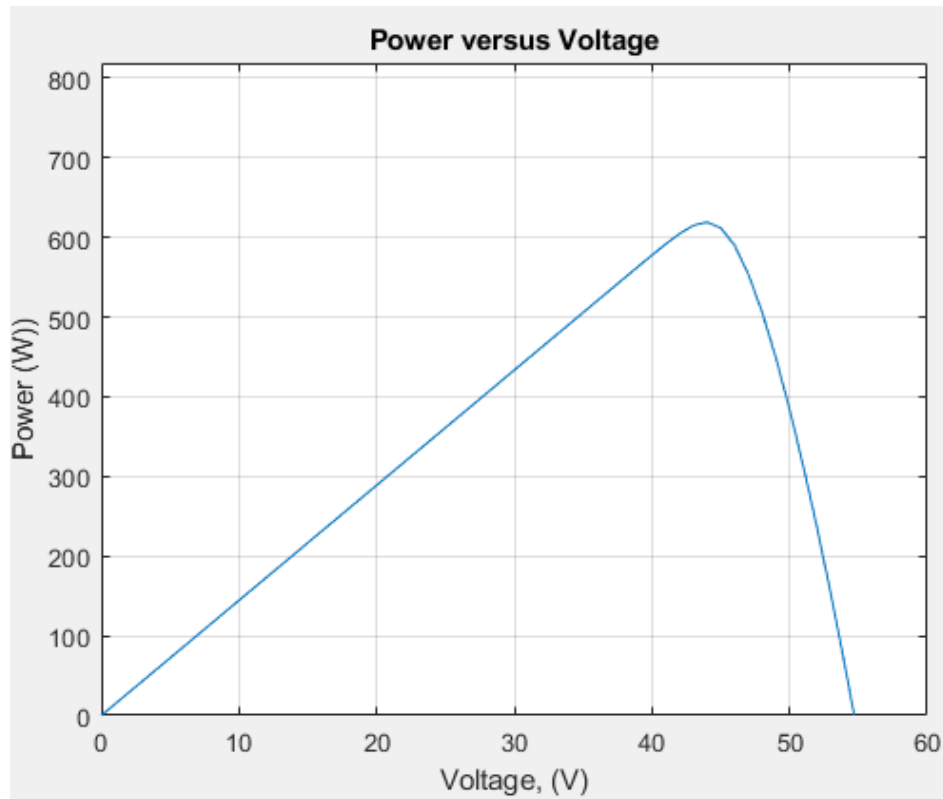


Σχήμα 3.15 Σχήμα από φυλλάδιο εταιρείας: *Current(A)-Voltage(V) & Power(W)-Voltage(V)*.

Από το πιο πάνω σχήμα μας ενδιαφέρουν οι κόκκινες καμπύλες αφού τα φωτοβολταϊκά πάνελ μας είναι ονομαστικής ισχύος 630W. Οι υπόλοιπες καμπύλες είναι για λειτουργία των φωτοβολταϊκών πάνελ σε χαμηλότερες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας. Εισάγοντας τα στοιχεία στο μαθηματικό μοντέλο στο περιβάλλον της Matlab με βάση το προαναφερθέν μαθηματικό μοντέλο, εμφανίζονται τα παρακάτω αποτελέσματα για την καμπύλη ισχύος.



Σχήμα 3.16 Σχήμα από Matlab: Current(A)-Voltage(V).



Σχήμα 3.17 Σχήμα από Matlab: Power(W)-Voltage(V).

Στα σχήματα 3.15, 3.16 και 3.17 φαίνεται πώς οι προδιαγραφές και τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου συμπίπτουν με ελάχιστη απόκλιση. Αυτό μας δείχνει πόσο αξιόπιστο είναι το μαθηματικό μοντέλο.

3.4 Συμπεράσματα ακρίβειας μαθηματικού μοντέλου

Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 2.1 έχει μεγάλη ακρίβεια στον υπολογισμό της καμπύλης ισχύος για κάθε είδους φωτοβολταϊκό πάνελ. Αναλυτικότερα οι αποκλίσεις προκύπτουν από τη μαθηματική σχέση:

$$\text{Απόκλιση} = \left(\frac{\text{μοντέλο} - \text{εταιρεία}}{\text{εταιρεία}} \right) * 100$$

Τα σφάλματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 3.3 Απόκλιση προσέγγισης.

		Μοντέλο	Εταιρεία	Απόκλιση
PanelType1	Imp(A)	10.01	9.6	4.27%
	Vmp(V)	40	41.7	4.08%
	Pmax(Wp)	390.4	400	2.40%
PanelType2	Imp(A)	8.925	8.56	4.26%
	Vmp(V)	35	37.38	6.37%
	Pmax(Wp)	312.4	320	2.38%
PanelType3	Imp(A)	9.79	9.55	2.51%
	Vmp(V)	38	39.8	4.52%
	Pmax(Wp)	372	380	2.11%
PanelType4	Imp(A)	11.78	11.04	6.70%
	Vmp(V)	41	43.48	5.70%
	Pmax(Wp)	483	480	0.63%
PanelType5	Imp(A)	10.54	10.02	5.19%
	Vmp(V)	32	33.93	5.69%
	Pmax(Wp)	337.4	340	0.76%
PanelType6	Imp(A)	9.231	8.78	5.14%
	Vmp(V)	30	31.9	5.96%
	Pmax(Wp)	276.9	280	1.11%
PanelType7	Imp(A)	14.07	13.69	2.78%
	Vmp(V)	44	46.02	4.39%
	Pmax(Wp)	619.3	630	1.70%
PanelType8	Imp(A)	8.983	8.52	5.43%
	Vmp(V)	30	31.7	5.36%
	Pmax(Wp)	269.5	270	0.19%
PanelType9	Imp(A)	9.195	9.32	1.34%
	Vmp(V)	38	39.7	4.28%
	Pmax(Wp)	349.4	370	5.57%
PanelType10	Imp(A)	9.504	8.91	6.67%
	Vmp(V)	32	33.66	4.93%
	Pmax(Wp)	294.6	300	1.80%

3.5 Παρουσίαση κώδικα

Αφού έχουμε επιλέξει τα στοιχεία που θα εισάγουμε για τη μελέτη που θα γίνει, ακολουθεί η διαστασιολόγηση που εκτελείται σε περιβάλλον Matlab. Με βάση την ηλιακή ακτινοβολία, τη θερμοκρασία, και το ενεργειακό προφίλ, μπορούμε να υπολογίσουμε την παραγωγή ισχύος (διαστασιολόγηση) που μας προσφέρει το Φ/Σ (με βάση τα εξακριβωμένα κατασκευαστικά δεδομένα του). Στα κεφάλαια 4 και 5 παρουσιάζονται διαγραμματικά τα αποτελέσματα, τα οποία είναι η ισχύς του Φ/Σ για ένα έτος, η ζήτηση της εγκατάστασης μας κατά τη διάρκεια του έτους και τέλος η διαφορά των δύο για κάθε μέτρηση η οποία αναφέρεται στην εργασία ως P_{net} . Η διαφορά αυτή είναι το σφάλμα που προέρχεται από την έλλειψη ή το πλεόνασμα της ενέργειας, το οποίο θα ελαχιστοποιήσουμε στη περίπτωση μας.

$$P_{net} = P_{pv} - P_{load} \quad (3.1)$$

όπου P_{pv} είναι η ισχύς που παράγουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ, P_{load} η ζήτηση ισχύος της εγκατάστασης μας και P_{net} η διαφορά τους, στην οποία θα γίνει ελαχιστοποίηση (σε kW).

Net-Metering

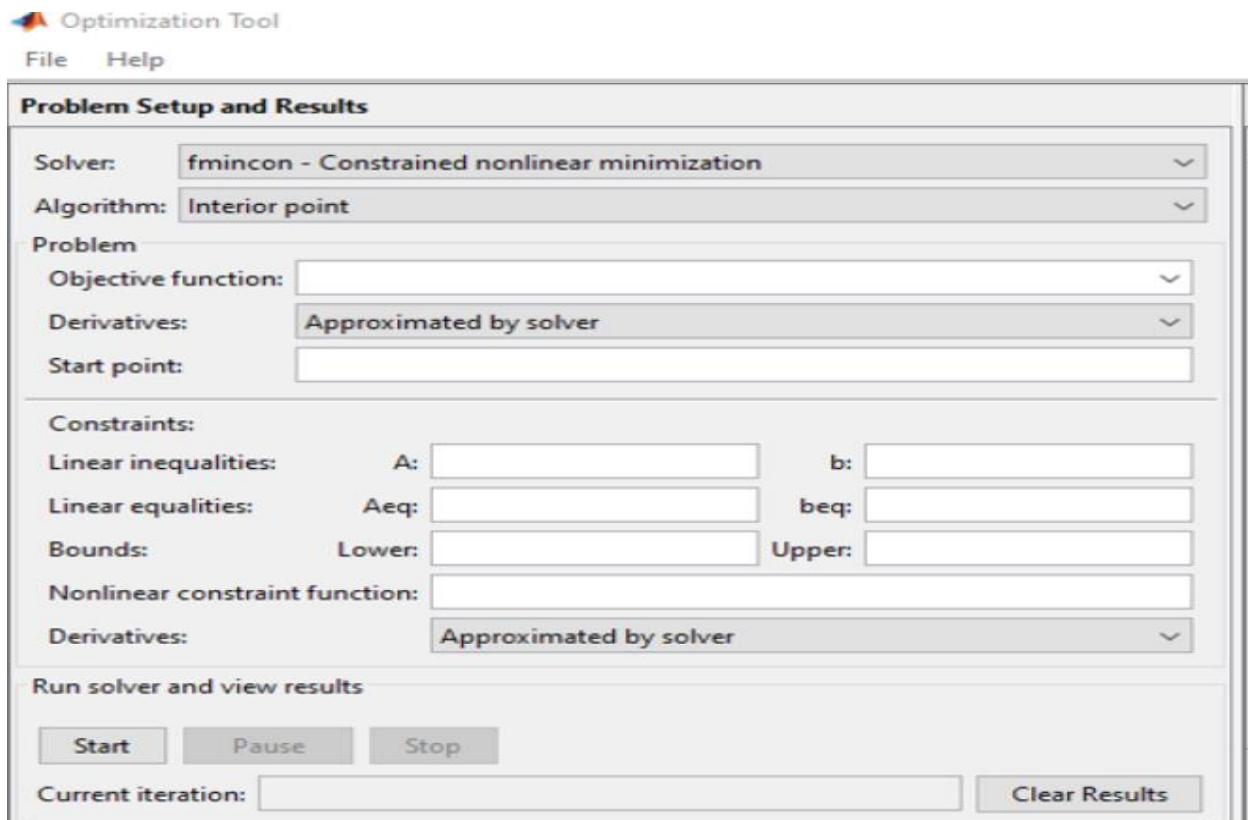
Το Net-Metering είναι ο συμψηφισμός παραγόμενης-καταναλισκόμενης ενέργειας και εφαρμόζεται κυρίως για εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Επιτρέπει στον καταναλωτή να καλύψει ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας που καταναλώνει ενώ παράλληλα του προσφέρει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει το δίκτυο για έμμεση αποθήκευση της ενέργειας που παράγει το σύστημα. Ο όρος "net" προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ καταναλισκόμενης και παραγόμενης ενέργειας σε μία ορισμένη χρονική περίοδο. Σε περίπτωση όμως που υπάρχει περίσσεια ενέργειας δεν χάνεται για τον καταναλωτή αλλά συμψηφίζεται για μια ορισμένη χρονική περίοδο οπότε και γίνεται η τελική εκκαθάριση και επίσης αν υπάρχει έλλειμα τότε η ενέργεια παρέχεται από τον

πάροχο. Στόχος φυσικά της βελτιστοποίησης είναι να μην υπάρχει έλλειμμα σε καμία περίπτωση στο τέλος του έτους.

3.6 Βελτιστοποίηση

Η βελτιστοποίηση είναι η διαδικασία επίτευξης του βέλτιστου αποτελέσματος κάτω από δεδομένες καταστάσεις. Ο στόχος μας είναι να επιτύχουμε την υψηλότερη δυνατή απόδοση χρησιμοποιώντας το ελάχιστο ποσό πόρων που μας προσφέρονται ή να μειώσουμε το κόστος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ελαχιστοποιήσουμε το κόστος είτε να μεγιστοποιήσουμε το κέρδος μας, αφού το κόστος και το κέρδος μπορούν να εκφραστούν ως μια συνάρτηση καθορισμένων μεταβλητών απόφασης. Η βελτιστοποίηση μπορεί να καθοριστεί ως η διαδικασία εύρεσης των συνθηκών που δίνουν τη ελάχιστη ή τη μέγιστη τιμή μιας συνάρτησης. Στην δική μας περίπτωση η βελτιστοποίηση θα χρησιμοποιηθεί για τον ενεργειακό τομέα αλλά και για τον οικονομικό.

Στο επόμενο βήμα απαιτείται το Optimization tool (Optimtool) το οποίο είναι εργαλείο του Matlab το οποίο χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης κάθε είδους αντικειμενικής συνάρτησης. Το Optimtool παρέχει λειτουργίες που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν τις μεταβλητές που δέχονται, λαμβάνοντας υπόψιν και κάποιους περιορισμούς που εισάγονται. Για να υλοποιηθεί η βελτιστοποίηση χρειάζεται η αντικειμενική συνάρτηση, οι περιορισμοί και η μέθοδος με την οποία ο χρήστης θέλει να πραγματοποιήσει την διαδικασία. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος F_{mincon} . Πιο κάτω εμφανίζεται μια εικόνα με το περιβάλλον του Optimtool του Matlab.



Εικόνα 3.2 Περιβάλλον *Optimization Tool* του *Matlab*.

Στο πεδίο Solver ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την μέθοδο βελτιστοποίησης που θέλει να ακολουθήσει. Στην περίπτωση της διπλωματικής αυτής έχει επιλεχθεί η μέθοδος *constrained nonlinear minimization* ή f_{mincon} . Παρακάτω στο πεδίο Objective function καλείται ο χρήστης να επιλέξει την αντικειμενική συνάρτηση που χρειάζεται να ελαχιστοποιήσει ή να μεγιστοποιήσει. Τέλος, εισάγονται τα όρια του αποτελέσματος στο πεδίο Bounds, τα οποία δεν μπορούν να είναι μικρότερα του ένα διότι θέλουμε τουλάχιστον ένα φωτοβολταϊκό πάνελ, καθώς και τον αριθμό ένα στο starting point. Για το πρόβλημα της διαστασιολόγησης μιας κατοικίας, η αντικειμενική συνάρτηση θα είναι η διαφορά της συνολικής ζήτησης ισχύος (P_{load}) με την παραγωγή ισχύος των Φ/Σ (P_{pv}) για την διάρκεια ενός έτους.

Ελαχιστοποιώντας λοιπόν αυτή την παράμετρο θα βρεθεί ο κατάλληλος αριθμός φωτοβολταϊκών πανελ, έτσι ώστε να μην υπάρχει μεγάλο πλεόνασμα ή μεγάλη έλλειψη τα οποία αυξάνουν το κόστος επένδυσης.

Κεφάλαιο 4^ο

4.1 Ενεργειακό προφίλ κατοικίας

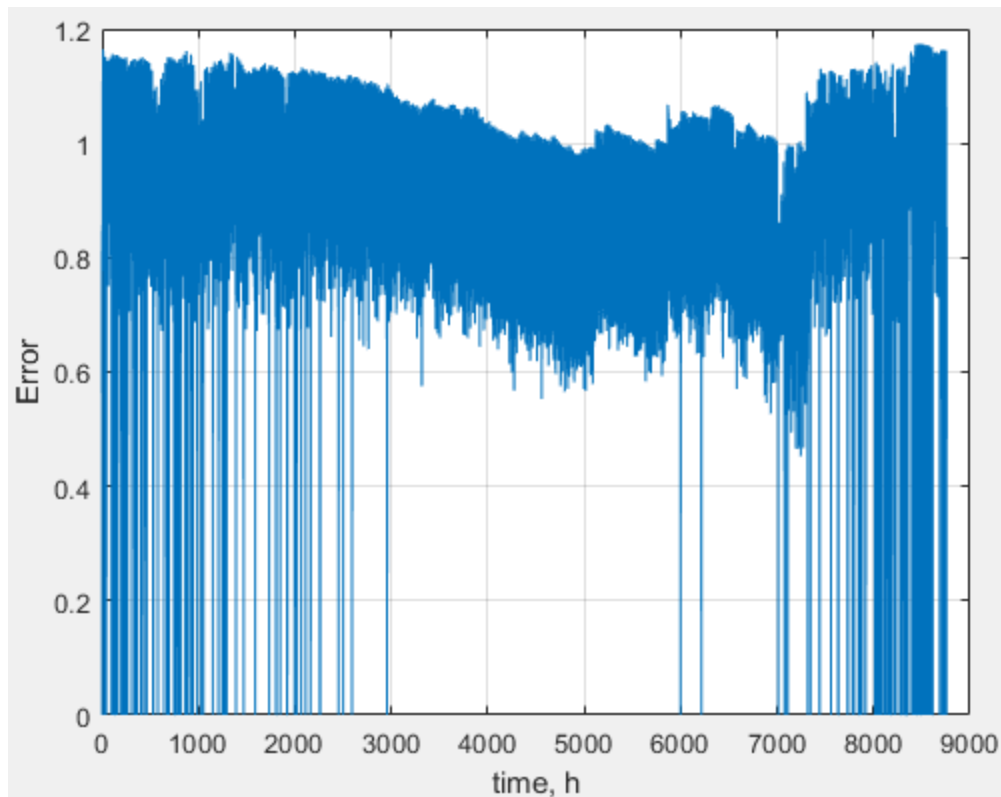
Το ενεργειακό προφίλ της κατοικίας έχει προαναφερθεί στο 3^ο κεφάλαιο και στο σχήμα 3.3. Οι μετρήσεις αυτές και τα δεδομένα από τα φυλλάδια των εταιρειών για τα φωτοβολταϊκά πάνελ θα εισαχθούν στον κώδικα που αναπτύχθηκε για την εύρεση του βέλτιστου αριθμού των φωτοβολταϊκών πάνελ στην εγκατάσταση μας.

4.1.2 Βελτιστοποίηση για διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ

Πιο κάτω ακολουθεί η διαστασιολόγηση για διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ έχοντας ως στόχο τη βέλτιστη εγκατάσταση τους στο νοικοκυριό σχετικά και με την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του. Συγκεκριμένα, θα δούμε τέσσερις τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ που χρησιμοποιήθηκαν και στο υπό κεφάλαιο 3.2, αλλά η ανάλυση στο τέλος θα περιλαμβάνει όλα τα διαθέσιμα πάνελ.

Panel Type 1 (400W Cheetah-Jinko Solar)

Με βάση το μαθηματικό μοντέλο του κεφαλαίου 2 καθώς και τον κώδικα ο οποίος αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab, ο βέλτιστος αριθμός φωτοβολταϊκών πάνελ που προκύπτει ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγόμενης ενέργειας είναι 20 άρα και το πλάνο της εγκατάστασης μας με το συγκεκριμένο τύπο φωτοβολταϊκών πάνελ θα φτάνει τα 7.82 kWp. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια σχήματα για καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας και των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.1 Απόκλιση παραγωγής και ζήτησης ισχύος.

Στο παραπάνω σχήμα εμφανίζεται η απόκλιση μεταξύ της παραγόμενης ισχύος και της ζητούμενης ισχύος για ένα χρόνο. Η εξίσωση υπολογισμού της απόκλισης είναι:

$$Error = \left| \frac{P_{max_{pv}} - P_{max_{pv_basic}}}{P_{max_{pv}}} \right| \quad (4.1)$$

όπου Error είναι η απόκλιση, $P_{max_{pv}}$ το μέγιστο ποσό ισχύος που αναμένεται να παραχθεί από το Φ/Σ και $P_{max_{pv_basic}}$ είναι το μέγιστο ποσό ισχύος που παράγεται από το Φ/Σ. Παρακάτω παρουσιάζεται πως προκύπτει το $P_{max_{pv_basic}}$.

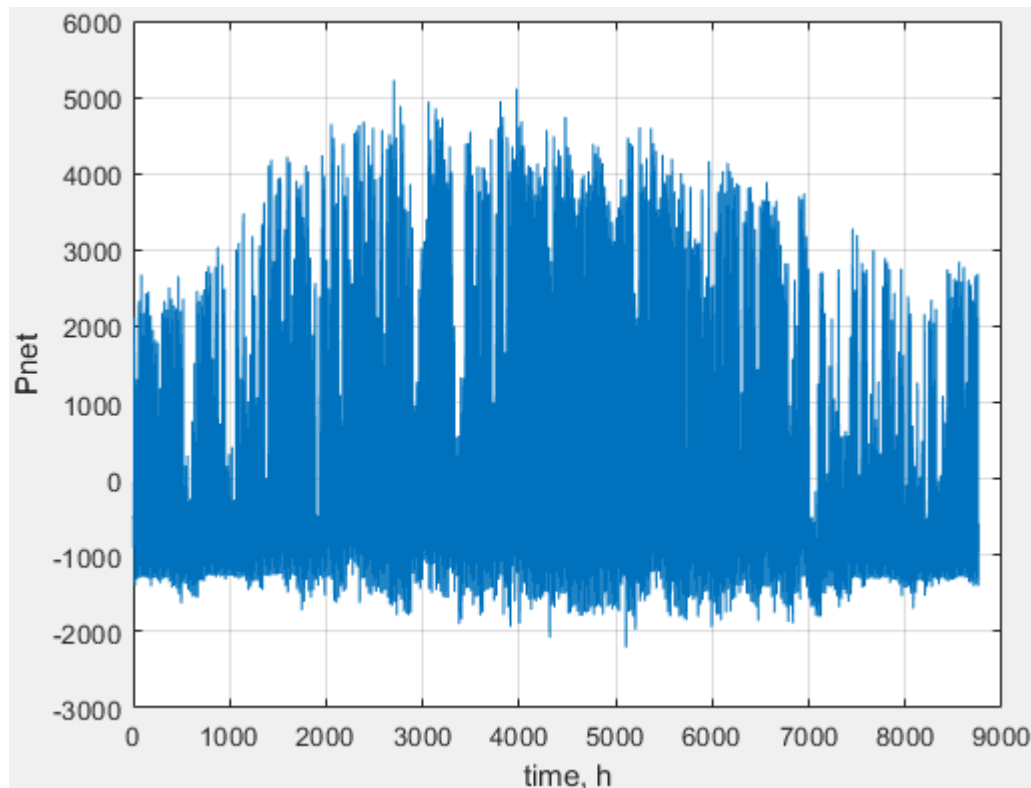
$N_{panels} = 19.554$ (βέλτιστος αριθμός πάνελ της εγκατάστασης)

$A_{pv} = N_{panels} * A_{panels} N_{pv} = 0.092$ (Σταθερά)

$GT = G_{year}$ (Δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας)

$P_{max_pv_basic} = GT * A_{pv} * n_{pv}$

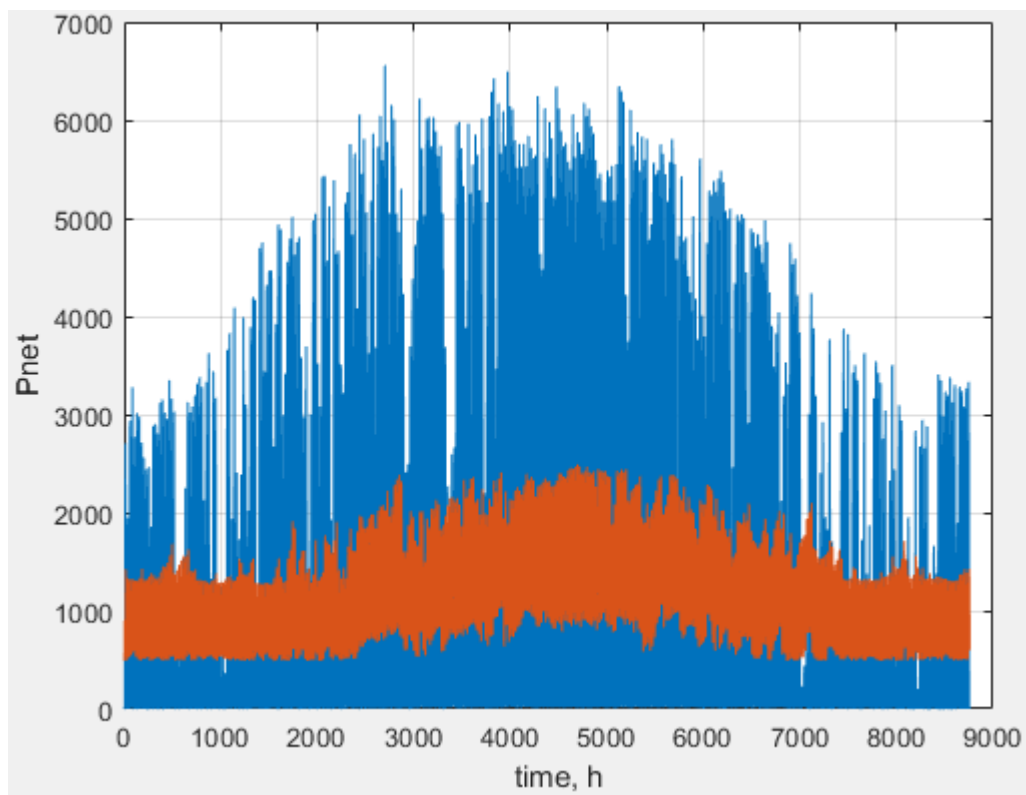
όπου $P_{max_pv_basic}$ είναι η μέγιστη ισχύς που παράγεται από το Φ/Σ.



Σχήμα 4.2 Διαφορά ζήτησης και παραγωγής ισχύος.

Στο πιο πάνω σχήμα παρουσιάζεται η διαφορά ζήτησης και παραγωγής ισχύος από την εγκατάσταση των 20 φωτοβολταϊκών πάνελ των 400W.

Σκοπός μας ήταν η ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτής και από το πιο πάνω διάγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα ότι έχει επιτευχθεί αφού οι περισσότερες τιμές βρίσκονται κοντά στο 0 και ο μέσος όρος είναι $P_{netav} = 0.02406W$.

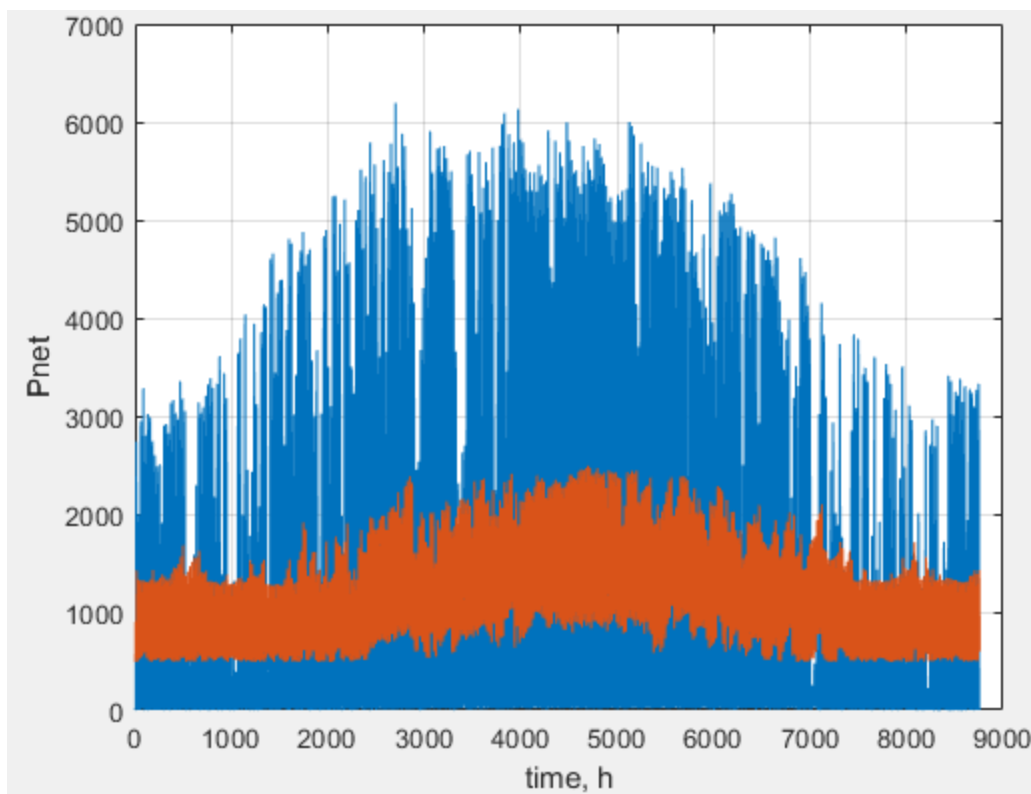


Σχήμα 4.3 Ζήτηση και παραγωγή ισχύος φωτοβολταϊκών.

Στο πιο πάνω σχήμα παρουσιάζεται με πορτοκαλί χρώμα η ζήτηση ισχύος της κατοικίας και με μπλε χρώμα η παραγωγή ισχύος που προσφέρεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ των 400W.

Panel Type 2 (320W-JAsolar)

Με βάση το μαθηματικό μοντέλο του κεφαλαίου 2, καθώς και τον κώδικα ο οποίος αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab, ο βέλτιστος αριθμός φωτοβολταϊκών πάνελ που προκύπτει ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγόμενης ενέργειας είναι 23 άρα και το πλάνο της εγκατάστασής μας με το συγκεκριμένο τύπο φωτοβολταϊκών πάνελ θα φτάνει τα 7.28 kWp. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σχήμα για καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας και των αποτελεσμάτων. Αφού η ποσοτική και ποιοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων προηγήθηκε στον πιο πάνω τύπο φωτοβολταϊκών πάνελ, δεν απαιτείται η επανάληψη της ανάλυσης.

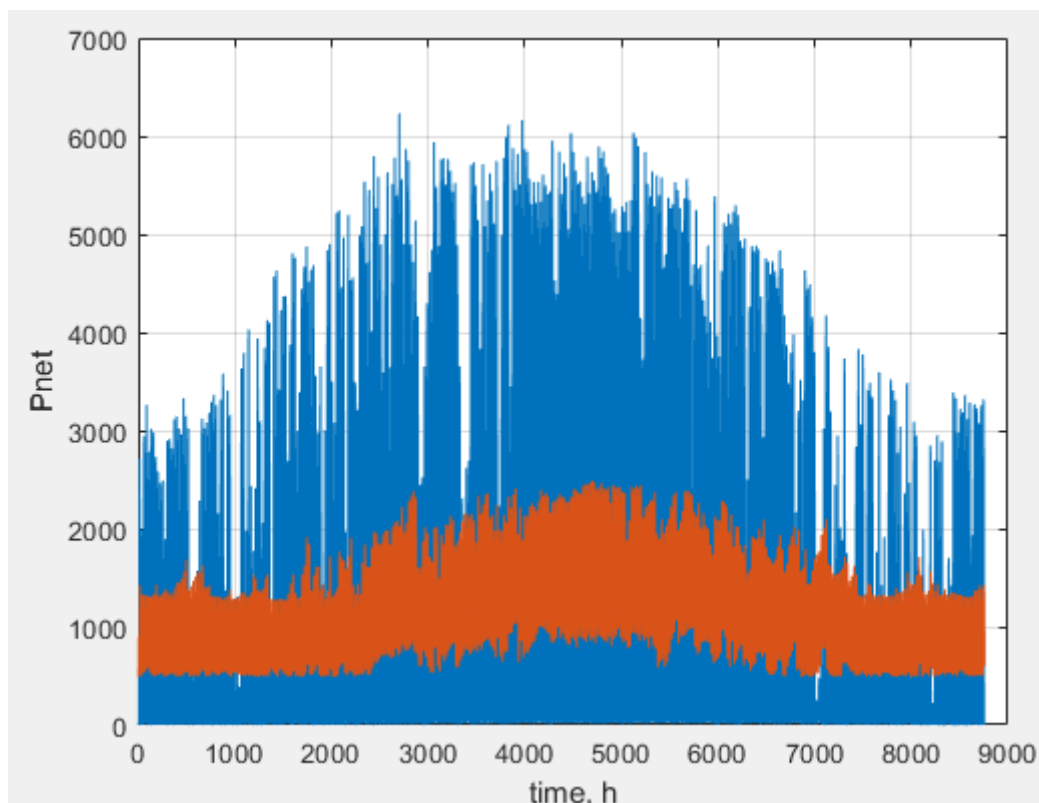


Σχήμα 4.4 Ζήτηση και παραγωγή ισχύος φωτοβολταϊκών.

Στο πιο πάνω σχήμα παρουσιάζεται με πορτοκαλί χρώμα η ζήτηση ισχύος της κατοικίας και με μπλε χρώμα η παραγωγή ισχύος που προσφέρεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ των 320W.

Panel Type 3 (380W-Amerisolar)

Με βάση το μαθηματικό μοντέλο του κεφαλαίου 2, καθώς και τον κώδικα ο οποίος αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab, ο βέλτιστος αριθμός φωτοβολταϊκών πάνελ που προκύπτει ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγόμενης ενέργειας είναι 20 άρα και το πλάνο της εγκατάστασης μας με το συγκεκριμένο τύπο φωτοβολταϊκών πάνελ θα φτάνει τα 7.36 kWp. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σχήμα για καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας και των αποτελεσμάτων.

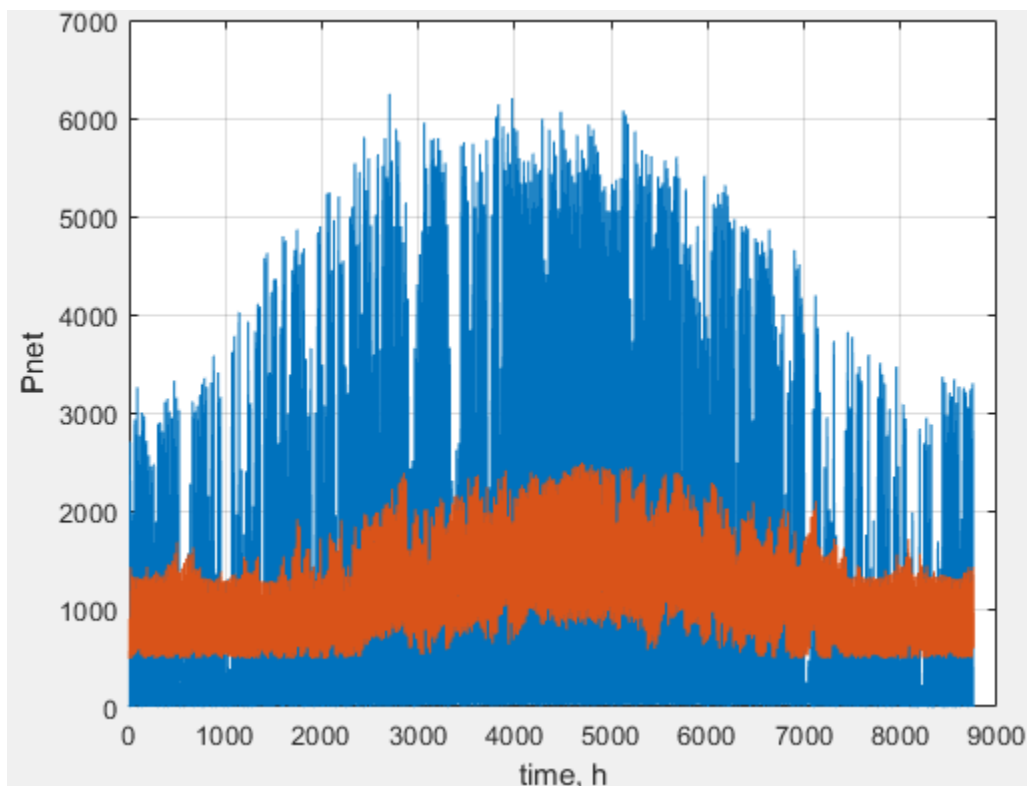


Σχήμα 4.5 Ζήτηση και παραγωγή ισχύος φωτοβολταϊκών.

Στο Σχήμα 4.5 παρουσιάζεται με πορτοκαλί χρώμα η ζήτηση ισχύος της κατοικίας και με μπλε χρώμα η παραγωγή ισχύος που προσφέρεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ των 380W.

Panel Type 7 (630W Tiger Neo N-Type-Jinko Solar)

Με βάση το μαθηματικό μοντέλο του κεφαλαίου 2, καθώς και τον κώδικα ο οποίος αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab, ο βέλτιστος αριθμός φωτοβολταϊκών πάνελ που προκύπτει ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγόμενης ενέργειας είναι 12 άρα και το πλάνο της εγκατάστασής μας με το συγκεκριμένο τύπο φωτοβολταϊκών πάνελ θα φτάνει τα 7.41 kWp. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σχήμα για καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας και των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 4.6 Ζήτηση και παραγωγή ισχύος φωτοβολταϊκών.

Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται με πορτοκαλί χρώμα η ζήτηση ισχύος της κατοικίας και με μπλε χρώμα η παραγωγή ισχύος που προσφέρεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ των 630W.

Έχοντας εφαρμόσει την μεθοδολογία βελτιστοποίησης και για τα δέκα διαφορετικά είδη πάνελ, πιο κάτω υπάρχει ένας πίνακας που μας δείχνει τον κατάλληλο αριθμό φωτοβολταϊκών πάνελ που πρέπει να εγκαταστήσουμε στην κατοικία για να ικανοποιήσουμε τις ανάγκες της.

Στη τρίτη στήλη του πίνακα φαίνεται το πλάνο της κάθε εγκατάστασης (ισχύς) που προκύπτει από:

$$\text{Installed Power} = \text{Number of Panels} * P_{\text{max}}$$

Στη τέταρτη στήλη, παρουσιάζεται η συνολική ενέργεια που καταναλώνεται για ένα έτος σε kWh:

$$\text{Total Energy} = \frac{\text{sum}(P_{\text{max}_{\text{pv}}})}{1000}$$

Πίνακας 4.1 Αναγκαίος αριθμός φωτοβολταϊκών πάνελ, ισχύς εγκατάστασης και συνολική ενέργεια.

Types of Panels	Num. of Panels	Installed Power, kWp	Total Energy, kWh
PanelType1	19.554→20	7.8216	9565.8
PanelType2	22.760→23	7.2832	9565.7
PanelType3	19.376→20	7.36288	9565.4
PanelType4	14.628→15	7.02144	9565.3
PanelType5	21.410→22	7.2794	9565.6
PanelType6	25.839→26	7.23492	9565.5
PanelType7	11.760→12	7.4088	9566.0
PanelType8	25.894→26	6.99138	9565.5
PanelType9	19.587→20	7.24719	9565.8
PanelType10	26.016→27	7.8048	9565.6

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης.

Types of Panels	P _{netav} , W
PanelType1	0.02406
PanelType2	0.00596
PanelType3	-0.02562
PanelType4	-0.03524
PanelType5	-0.00501
PanelType6	-0.01523
PanelType7	0.04557
PanelType8	-0.01870
PanelType9	0.02412
PanelType10	0.00240

Βλέπουμε στο πιο πάνω πίνακα ότι δεν θα υπάρχει μεγάλο ποσοστό περίσσειας ενέργειας στη οικία, αφού για όλα τα είδη φωτοβολταϊκών πάνελ το P_{netav} είναι περίπου 0. Οπότε για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης μας θα επιλέξουμε το PanelType8 (270W Eagle-Jinko Solar) αφού έχει το χαμηλότερο $P_{netav} = -0.01870W$ με την εγκατάσταση 26 πάνελ. Επιλέγουμε το PanelType8 αφού έχουμε την ίδια παραγωγή ενέργειας με μικρότερη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ.

Κεφάλαιο 5^ο

5.1 Ενεργειακό προφίλ νοσοκομείου

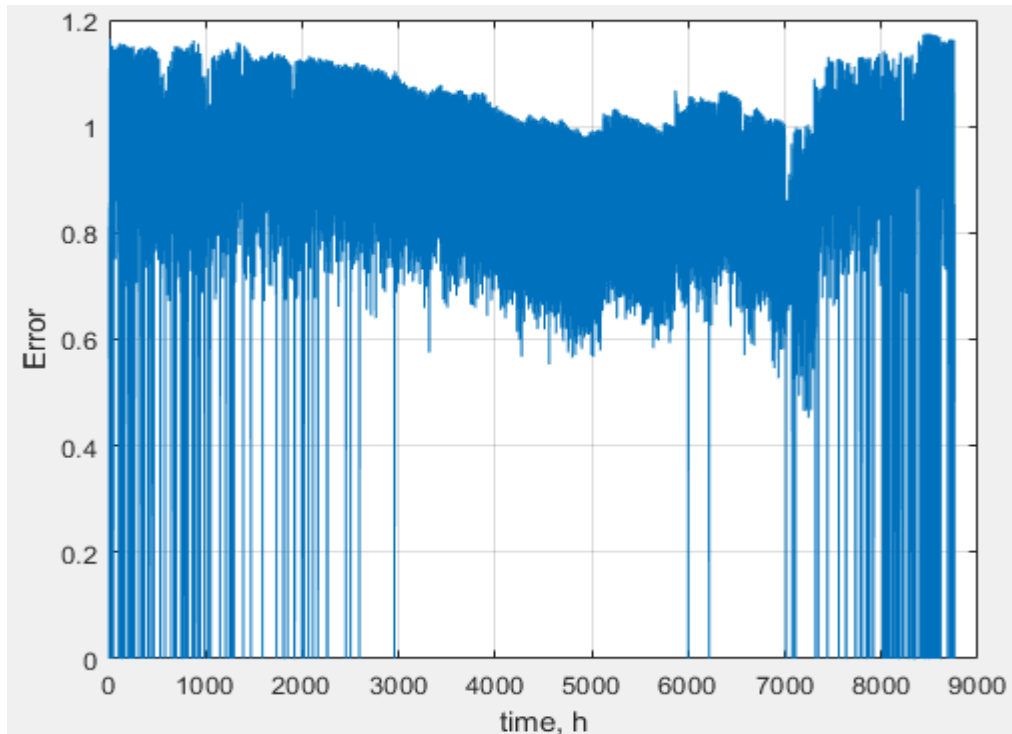
Το ενεργειακό προφίλ του νοσοκομείου έχει προαναφερθεί στο 3^ο κεφάλαιο και διαγραμματικά στο σχήμα 3.4. Οι μετρήσεις αυτές και τα δεδομένα μας από τα φυλλάδια των εταιρειών για το φωτοβολταϊκά πάνελ θα εισαχθούν στον κώδικα που αναπτύχθηκε για την εύρεση του βέλτιστου αριθμού των φωτοβολταϊκών πάνελ στην εγκατάσταση μας.

5.1.2 Βελτιστοποίηση για διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ

Πιο κάτω ακολουθεί η διαστασιολόγηση για διάφορους τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ έχοντας ως στόχο τη βέλτιστη εγκατάσταση τους στο νοσοκομείο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του. Συγκεκριμένα θα δούμε τους τέσσερις τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ που χρησιμοποιήθηκαν και στο υπό κεφάλαιο 3.2, αλλά και πιο πάνω στο ενεργειακό προφίλ κατοικίας.

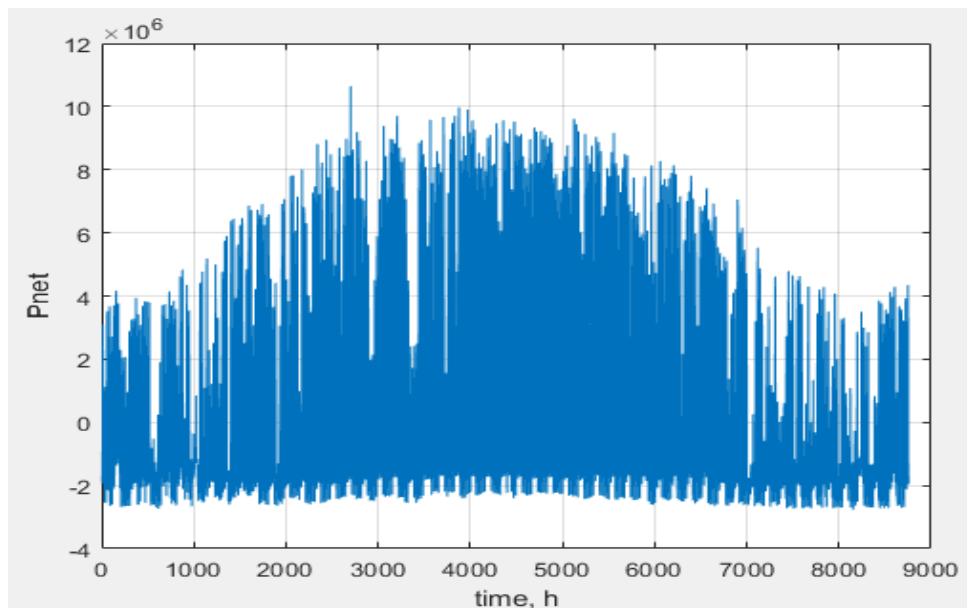
Panel Type 1 (400W Cheetah-Jinko Solar)

Με βάση το μαθηματικό μοντέλο του κεφαλαίου 2, καθώς και τον κώδικα ο οποίος αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab, ο βέλτιστος αριθμός φωτοβολταϊκών πάνελ που προκύπτει ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγόμενης ενέργειας είναι 37595 άρα και το πλάνο της εγκατάστασης μας με το συγκεκριμένο τύπο φωτοβολταϊκών πάνελ θα φτάνει τα 15.04 MWp. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια σχήματα για καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας και των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 5.1 Απόκλιση παραγωγής και ζήτησης ισχύος.

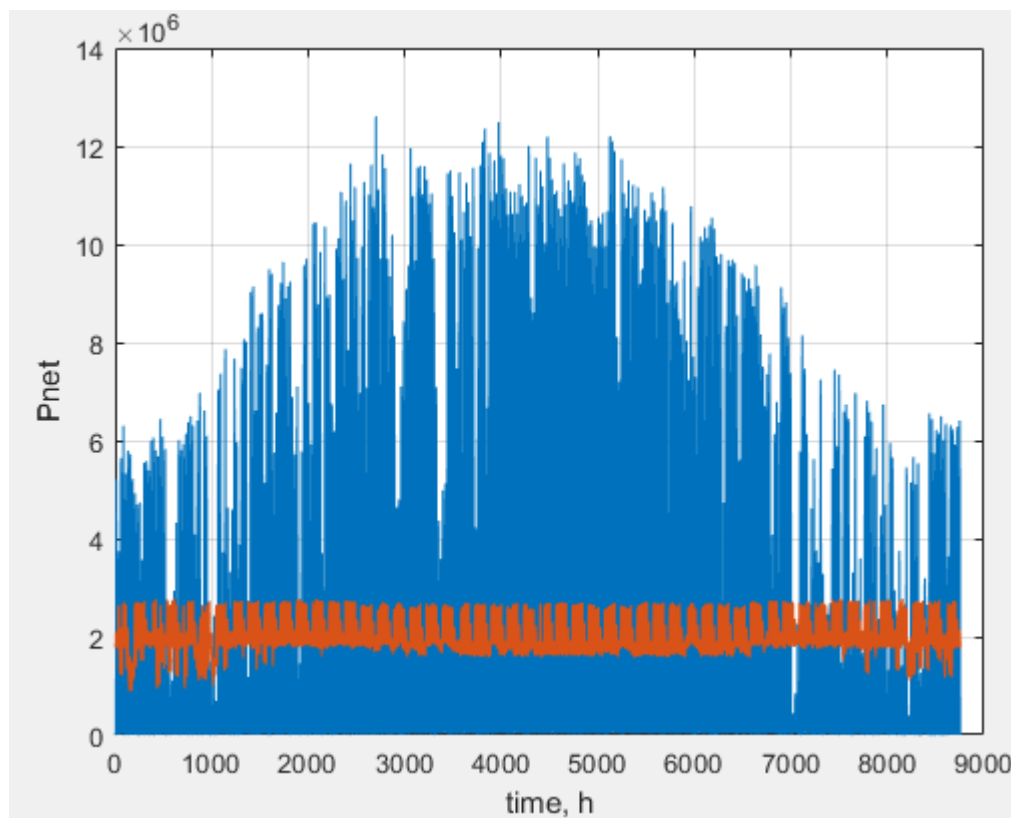
Στο παραπάνω σχήμα εμφανίζεται *απόκλιση παραγωγής και ζήτησης ισχύος* για ένα χρόνο. Η εξίσωση υπολογισμού της απόκλισης έχει αναφερθεί πιο πάνω στο υπό κεφάλαιο 4.1.2 (Εξίσωση 4.1).



Σχήμα 5.2 Διαφορά ζήτησης και παραγωγής ισχύος.

Στο πιο πάνω σχήμα παρουσιάζεται η διαφορά ζήτησης και παραγωγής ισχύος από την εγκατάσταση των 37595 φωτοβολταϊκών πάνελ των 400W.

Σκοπός μας ήταν η ελαχιστοποίηση της διαφοράς αυτής και από το πιο πάνω διάγραμμα φαίνεται ξεκάθαρα ότι έχει επιτευχθεί αφού οι περισσότερες μετρήσεις βρίσκονται κοντά στο 0. Ο μέσος όρος είναι $P_{netav} = -0.02663W$.

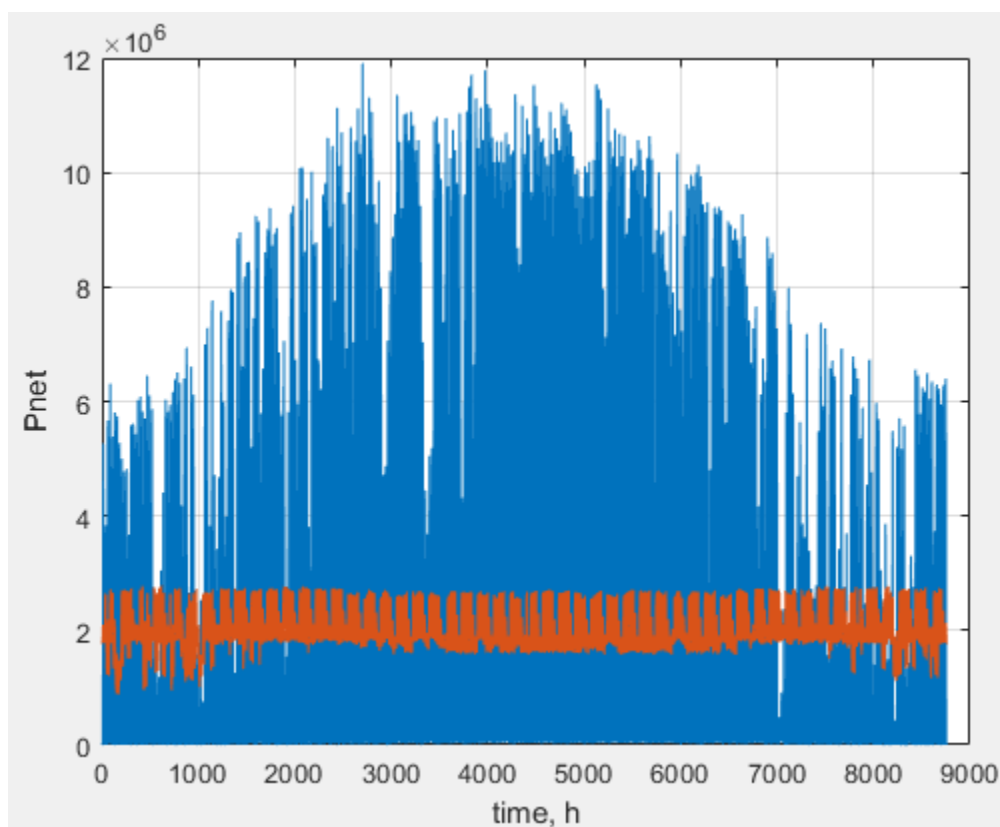


Σχήμα 5.3 Ζήτηση και παραγωγή ισχύος φωτοβολταϊκών.

Στο πιο πάνω σχήμα παρουσιάζεται με πορτοκαλί χρώμα η ζήτηση ισχύος του νοσοκομείου και με μπλε χρώμα η παραγωγή ισχύος που προσφέρεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ των 400W.

Panel Type 2 (320W-JAsolar)

Με βάση το μαθηματικό μοντέλο του κεφαλαίου 2, καθώς και τον κώδικα ο οποίος αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab, ο βέλτιστος αριθμός φωτοβολταϊκών πάνελ που προκύπτει ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγόμενης ενέργειας είναι 43760 άρα και το πλάνο της εγκατάστασης μας με το συγκεκριμένο τύπο φωτοβολταϊκών πάνελ θα φτάνει τα 14 MWp. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα για καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας και των αποτελεσμάτων. Αφού η ποσοτική και ποιοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων προηγήθηκε στον πιο πάνω τύπο φωτοβολταϊκών πάνελ δεν απαιτείται η επανάληψη της ανάλυσης.

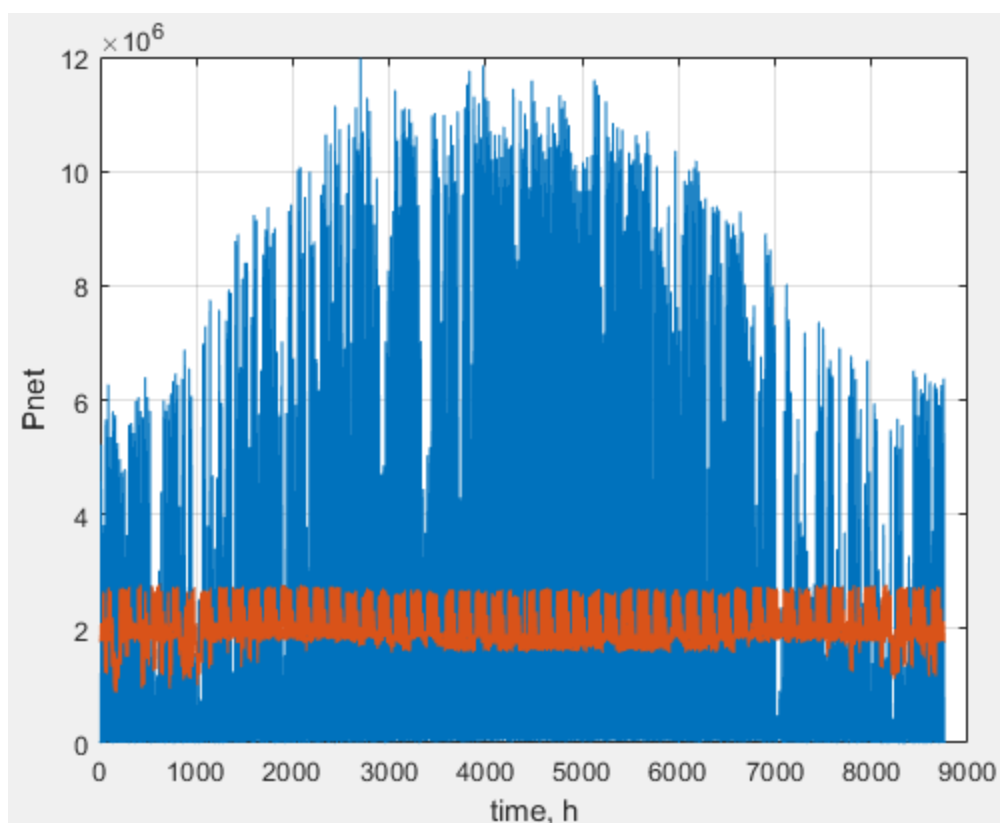


ετΣχήμα 5.4 Ζήτηση και παραγωγή ισχύος φωτοβολταϊκών.

Στο πιο πάνω σχήμα παρουσιάζεται με πορτοκαλί χρώμα η ζήτηση ισχύος του νοσοκομείου και με μπλε χρώμα η παραγωγή ισχύος που προσφέρεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ των 320W.

Panel Type 3 (380W-Amerisolar)

Με βάση το μαθηματικό μοντέλο του κεφαλαίου 2, καθώς και τον κώδικα ο οποίος αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab, ο βέλτιστος αριθμός φωτοβολταϊκών πάνελ που προκύπτει ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγόμενης ενέργειας είναι 37255 άρα και το πλάνο της εγκατάστασης μας με το συγκεκριμένο τύπο φωτοβολταϊκών πάνελ θα φτάνει τα 14.16 MWp. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σχήμα για καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας και των αποτελεσμάτων.

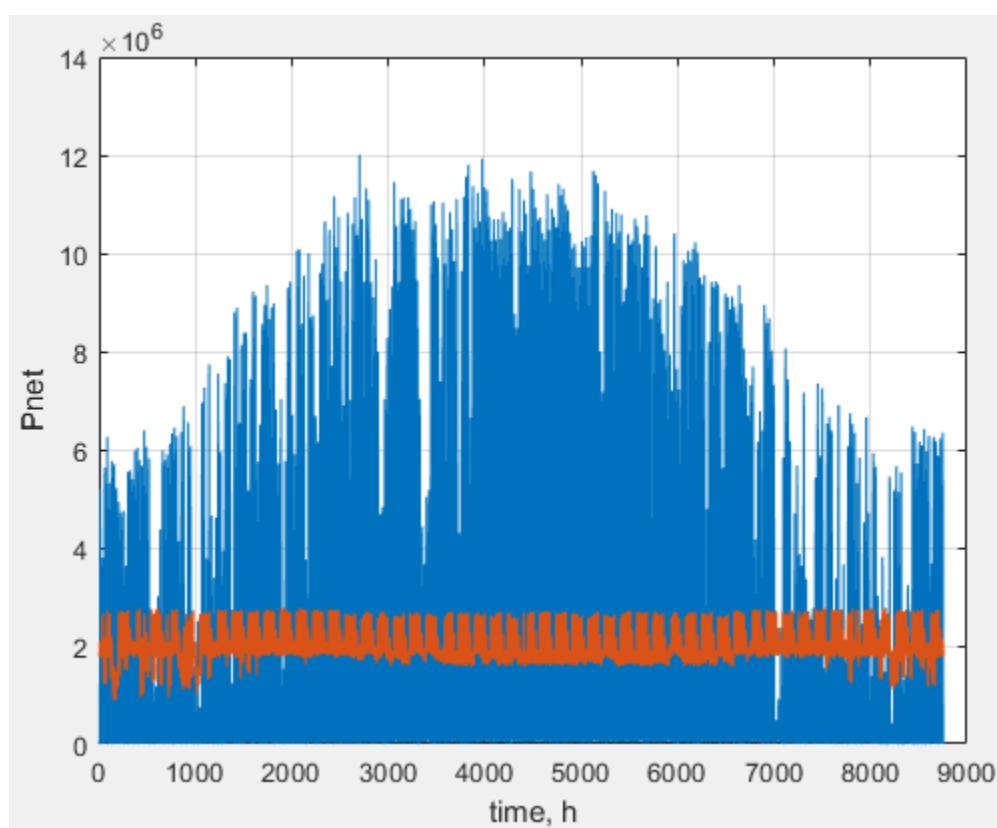


Σχήμα 5.5 Ζήτηση και παραγωγή ισχύος φωτοβολταϊκών.

Στο πιο πάνω σχήμα παρουσιάζεται με πορτοκαλί χρώμα η ζήτηση ισχύος του νοσοκομείου και με μπλε χρώμα η παραγωγή ισχύος που προσφέρεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ των 380W.

Panel Type 7 (630W Tiger Neo N-Type-Jinko Solar)

Με βάση το μαθηματικό μοντέλο του κεφαλαίου 2, καθώς και τον κώδικα ο οποίος αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab, ο βέλτιστος αριθμός φωτοβολταϊκών πάνελ που προκύπτει ελαχιστοποιώντας τη διαφορά ζήτησης και παραγόμενης ενέργειας είναι 22610 άρα και το πλάνο της εγκατάστασής μας με το συγκεκριμένο τύπο φωτοβολταϊκών πάνελ θα φτάνει τα 14.24 MWp. Παρακάτω παρουσιάζεται ένα σχήμα για καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας και των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 5.6 Ζήτηση και παραγωγή ισχύος φωτοβολταϊκών.

Στο πιο πάνω σχήμα παρουσιάζεται με πορτοκαλί χρώμα η ζήτηση ισχύος του νοσοκομείου και με μπλε χρώμα η παραγωγή ισχύος που προσφέρεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ των 630W.

Παρακάτω υπάρχει ένας πίνακας που μας δείχνει τον κατάλληλο αριθμό φωτοβολταϊκών πάνελ που πρέπει να εγκαταστήσουμε στο νοσοκομείο για να ικανοποιήσουμε τις ενεργειακές ανάγκες του.

Πίνακας 5.1 *Αναγκαίος αριθμός φωτοβολταϊκών πάνελ, ισχύς εγκατάστασης και συνολική ενέργεια.*

Types of Panels	Num. of Panels	Installed Power, MWp	Total Energy, MWh
PanelType1	37594.540→37595	15.04	18391
PanelType2	43759.125→43760	14.00	18391
PanelType3	37254.012→37255	14.16	18391
PanelType4	28125.335→28126	13.50	18391
PanelType5	41163.983→41164	14.00	18391
PanelType6	49679.875→49680	13.91	18391
PanelType7	22609.343→22610	14.24	18391
PanelType8	49785.780→49786	13.44	18391
PanelType9	37657.984→37658	13.93	18391
PanelType10	50019.380→50020	15.01	18391

Πίνακας 5.2 *Αποτελέσματα διαστασιολόγησης.*

Types of Panels	P _{netav} , W
PanelType1	-0.02663
PanelType2	0.00558
PanelType3	-0.03292
PanelType4	-0.01772
PanelType5	-0.03792
PanelType6	-0.02329
PanelType7	0.01924
PanelType8	-0.02922
PanelType9	-0.01242
PanelType10	-0.02682

Βλέπουμε στο πιο πάνω πίνακα ότι δεν θα υπάρχει μεγάλο ποσοστό περίσσειας ενέργειας στο νοσοκομείο, αφού για όλα τα είδη φωτοβολταϊκών πάνελ το P_{netav} είναι

περίπου 0. Οπότε για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης μας θα επιλέξουμε το PanelType8 (270W Eagle-Jinko Solar) αφού έχει το χαμηλότερο $P_{netav} = -0.02922W$ με την εγκατάσταση 49786 πάνελ. Επιλέγουμε το PanelType8 αφού έχουμε την ίδια παραγωγή ενέργειας με μικρότερη εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάνελ.

Κεφάλαιο 6^ο

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε η βέλτιστη διαστασιολόγηση μιας εγκατάστασης Φ/Σ για δύο ενεργειακά προφίλ, μιας κατοικίας και ενός νοσοκομείου. Τα ενεργειακά προφίλ που χρησιμοποιήθηκαν έχουν διαφορετικές ενεργειακές απαιτήσεις, οι οποίες βελτιστοποιήθηκαν για 10 διαφορετικούς τύπους φωτοβολταϊκών πάνελ. Αρχικά, υπήρξε μια εισαγωγή στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, στα χαρακτηριστικά των Φ/Σ, όπως και στη λειτουργία τους. Επιπλέον, δημιουργήθηκε το μαθηματικό μοντέλο για την καλύτερη προσέγγιση της παραγόμενης ισχύος από τα επιλεγμένα φωτοβολταϊκά πάνελ προς μελέτη και στη συνέχεια έγινε έλεγχος των αποτελεσμάτων του μοντέλου μας σε σύγκριση με τις ηλεκτρικές προδιαγραφές των φωτοβολταϊκών πάνελ οι οποίες αναγράφονται στα φυλλάδια των εταιρειών κατασκευής τους. Επίσης, με την εφαρμογή της βελτιστοποίησης για τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν και αρχίζοντας από το ενεργειακό προφίλ της κατοικίας για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης μας προκύπτουν 26 φωτοβολταϊκά πάνελ των 270W, όπου η εγκατάσταση μας έχει συνολική ονομαστική ισχύ 6.99 KWp. Τέλος, από το ενεργειακό προφίλ του νοσοκομείου για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση της εγκατάστασης μας προκύπτουν 49786 φωτοβολταϊκά πάνελ των 270W, όπου η εγκατάσταση μας έχει συνολική ονομαστική ισχύ 13.44 MWp.

6.2 Μελλοντικά βήματα

Μπορούμε να κάνουμε ένα συνδυασμό των φωτοβολταϊκών πάνελ μαζί με ανεμογεννήτριες, αποθήκευση ενέργειας ή και άλλους συνδυασμούς με ανανεώσιμες

πηγές ενέργειας, καθώς και να προσθέσουμε σαν παράμετρο το κόστος κάθε φωτοβολταϊκού πάνελ. Επίσης, μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μια οικονομική μελέτη για το χρόνο απόσβεσης της εγκατάστασης. Επιπλέον, μπορεί να γίνει μια μελέτη των νομικών θεμάτων, αδειών και επιχορήγησης από το κράτος για την εγκατάσταση μας.

Βιβλιογραφία

- [1] Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Περιβάλλον και Διαχείριση Ενέργειας, [προσπελάστηκε στις 24/04/2023]: <http://www.allaboutenergy.gr/Piges23.html>
- [2] Ηλιακή ενέργεια, Περιβάλλον και Διαχείριση Ενέργειας, [προσπελάστηκε στις 26/04/2023]: <http://www.allaboutenergy.gr/HliakiEnergeia.html>
- [3] Ulleberg, Ø., Stand-alone power systems for the future: optimal design, operation & control of solar-hydrogen energy systems, PhD thesis. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 1998
- [4] Rosell, J.I., Ibáñez, M., Modelling power output in photovoltaic modules for outdoor operating conditions, Energy Conversion and Management, Volume 47 (15-16), 2006, pp. 2424-2430
- [5] Ioffe Physico-Technical Institute of Russia. New semiconductor materials: Band structure and carrier concentration. Technical report, 2001. [προσπελάστηκε στις 03/05/2023]: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/SiGe/bandstr.html>
- [6] Enrique, J.M., Andújar, J.M., Bohórquez, M.A., A reliable, fast and low cost maximum power point tracker for photovoltaic applications, Solar Energy, Volume 84 (1), 2010, pp. 79-89
- [7] Camblong, H., Digital robust control of a variable speed pitch regulated wind turbine for above rated wind speeds, Control Engineering Practice, Volume 16 (8), 2008, pp. 946-958
- [8] Ipsakis, D., Voutetakis, S., Seferlis, P., Stergiopoulos, F., Papadopoulou, S., Elmasides, C., The effect of the hysteresis band on power management strategies in a stand-alone power system, Energy, Volume 33 (10), 2008, pp. 1537-1550
- [9] Ipsakis, D., Voutetakis, S., Seferlis, P., Stergiopoulos, F., Elmasides, C., Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy

sources and hydrogen storage, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 34 (16), 2009, pp. 7081-7095

[10] Voutetakis, S. S., Stergiopoulos, F., Seferlis, P., Papadopoulou, S., Ipsakis, D., Ziogou, C., Papadopoulos, A. I., Elmasides, C., Design of a Stand-Alone Power System using Renewable Energy Sources and Long-Term Hydrogen Storage, in Handbook of Sustainable Energy, W. H. Lee and V. G. Cho Eds, Nova Publishers, (Editorial Preparation) 2010, pp. 1-88

[11] Voutetakis, S., Stergiopoulos, F., Seferlis, P., Papadopoulou, S., Ipsakis, D., Ziogou, C., Papadopoulos, A.I., Elmasides, C., Design, Optimization and Control of Stand-Alone Power Systems using Renewable Energy Sources and Hydrogen Production, Nova Publishers, (Under Preparation – Expected Spring 2011)

[12] Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών, NewTech-Pub, [προσπελάστηκε στις 14/06/2023]:

https://newtech-pub.com/wp-content/uploads/2016/09/Syndveltisotpioish_kef1.pdf

[13] Jinko Solar, PanelType1(400W Cheetah-Jinko Solar), [προσπελάστηκε στις 28/06/2023]:

<https://www.jinkosolar.com/uploads/5e68b53d/c4.pdf>

[14] Amerisolar, PanelType3(380W Amerisolar), [προσπελάστηκε στις 28/06/2023]:

<https://www.weamerisolar.eu/wp-content/uploads/2021/03/AS-6M-Module-Specification-1956-992-40mm.pdf>

[15] Jinko Solar, PanelType4(480W Tiger-Jinko Solar), [προσπελάστηκε στις 28/06/2023]:

[https://jinkosolarcdn.shwebspace.com/uploads/JKM460-480N-60HL4-\(V\)-F3-EN.pdf](https://jinkosolarcdn.shwebspace.com/uploads/JKM460-480N-60HL4-(V)-F3-EN.pdf)

[16] Jinko Solar, PanelType5(340W Cheetah HC-Jinko Solar), [προσπελάστηκε στις 28/06/2023]:

<https://cdn.enfsolar.com/z/pp/h5m3fzey076b5u8/Cheetah-JKM320-340M-60HB-A4-EN-F30.pdf>

[17] Jinko Solar, PanelType7(630W Tiger Neo N-Type-JinkoSolar), [προσπελάστηκε στις 28/06/2023]:

[https://jinkosolarcdn.shwebspace.com/uploads/63e0a597/JKM610-630N-78HL4-\(V\)-F3-EN.pdf](https://jinkosolarcdn.shwebspace.com/uploads/63e0a597/JKM610-630N-78HL4-(V)-F3-EN.pdf)

[18] Jinko Solar, PanelType8(270W Eagle-Jinko Solar), [προσπελάστηκε στις 28/06/2023]:

<https://solaroptimum.com.au/wp-content/uploads/2018/02/Jinko-Eagle.pdf>