

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



Πτυχιακή εργασία

**ΕΡΕΥΝΑ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΒΑΣΗΣ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ**

Νικόλας Χατζηγεωργίου

Μαρίνος Πορφυρίου

Ηλίας Σιαμμούτη

Μάριος Χαραλάμπους

Λεμεσός, 2016

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

Πτυχιακή εργασία

**ΕΡΕΥΝΑ, ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΒΑΣΗΣ
ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ**

Νικόλας Χατζηγεωργίου

Μαρίνος Πορφυρίου

Ηλίας Σιαμμούτη

Μάριος Χαραλάμπους

Σύμβουλος καθηγητής

Δρ Σώτος Βοσκαρίδης

Λεμεσός, 2016

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Νικόλας Χατζηγεωργίου, Μαρίνος Πορφυρίου, Ηλίας Σιαμμούτη, Μάριος Χαραλάμπους, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένεια μου για την αγάπη και υποστήριξη κατά τη διάρκεια των σπουδών μου και σε όλη τη ζωή μου γενικά. – Νικόλας

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τη μητέρα μου, την αδελφή μου και τους στενούς μου φίλους για την ένθερμη υποστήριξη που μου έδειχναν από την αρχή μέχρι το τέλος. Κυρίως ευχαριστώ τον πατέρα μου για την έμπρακτη βοήθεια και τις γνώσεις που μου προσέφερε. – Μαρίνος

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους γονείς μου για τη φοβερή στήριξη και υπομονή όλα αυτά τα χρόνια, γιατί είναι πάντα εκεί για μένα και με υποστηρίζουν σε όλες μου τις προσπάθειες. – Ηλίας

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένεια μου, τη γυναίκα μου και τα τρία μου παιδιά για την υποστήριξη και την κατανόηση που έδειξαν κατά τις σπουδές μου. – Μάριος

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον εισηγητή και επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Σώτο Βοσκαρίδη, για την καθοδήγηση αυτής της πτυχιακής εργασίας και την όλη του συμβολή στην απόκτηση του πτυχίου μας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ηλιακή ενέργεια, η πλέον διαθέσιμη μορφή ενέργειας στον πλανήτη, αξιοποιείται με τα λεγόμενα φωτοβολταϊκά συστήματα, τα οποία αποτελούνται από αριθμό συνδεδεμένων φωτοβολταϊκών πλαισίων και βασίζονται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Όταν η ακτινοβολία του ήλιου προσπέσει σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, μέρος από τα φωτόνια απορροφάται από το πλαίσιο με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος συνεχούς τάσης.

Ένα μικρό ποσό όμως της ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος αυξάνεται εάν το πλαίσιο επιτυγχάνει με κάποιο τρόπο να απορροφά την μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία, ακολουθώντας την κίνηση του ήλιου. Αυτό επιτυγχάνεται με την μετακίνηση του πλαισίου στην ιδανική θέση του ήλιου, καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας.

Τέτοια συστήματα είναι οι μονοαξονικές βάσεις (κίνηση σε μία μόνο κατεύθυνση) και οι διαξονικές βάσεις (κίνηση σε δύο κατευθύνσεις).

Σκοπός την πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ενός μοντέλου διαξονικής βάσης φωτοβολταϊκού πλαισίου.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε χωρίζεται σε τέσσερα στάδια. Την μελέτη και σχεδιασμό του μοντέλου, την κατασκευή και τον προγραμματισμό του συστήματος ελέγχου με την χρήση προγραμματιζόμενης πλακέτας, την προσομοίωση του συστήματος σε εξειδικευμένο πρόγραμμα (PVsyst) και τέλος, την κατασκευή του μοντέλου και την εκτέλεση πραγματικών δοκιμών.

Η σημασία του μοντέλου είναι μεγάλη, λόγω του ότι πρόκειται για ένα αυτόνομο μοντέλο που βασίζεται σε απευθείας λήψη δεδομένων από το περιβάλλον και χρησιμοποιεί επιπλέον τεχνικές που δεν εφαρμόζονται στις ήδη υπάρχουσες διαξονικές βάσεις φωτοβολταϊκών πλαισίων. Επιπλέον, ο κώδικας προγραμματισμού γράφτηκε εξ ολοκλήρου για τη λειτουργία ενός τέτοιου μοντέλου και μπορεί να υποστεί συνεχείς βελτιώσεις και μετατροπές, εάν αυτό κρίνεται αναγκαίο.

Λέξεις κλειδιά: φωτοβολταϊκό φαινόμενο, φωτοβολταϊκό πλαίσιο, ηλιακή ακτινοβολία, διαξονική βάση φωτοβολταϊκού πλαισίου, ανίχνευση θέσης ήλιου, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας, μικροελεγκτής Arduino UNO Rev3, βηματικοί κινητήρες

ABSTRACT

Solar energy is the most available form of energy on the planet and it is utilized from the photovoltaic systems, which consist of a number of connected PV modules and are based on the photovoltaic effect. When the rays from the sun incident on a photovoltaic panel, some of the photons are absorbed by the frame and result in the generation of electrical DC current.

However, a small amount of solar radiation is converted into electricity. The efficiency of the photovoltaic system is increased if the frame achieves to absorb more solar radiation, following the movement of the sun. This is accomplished by moving the frame to the ideal position of the sun throughout the day.

Such systems are the single axis bases (movement in a single direction) and the dual axis bases (movement in two directions).

The aim of this thesis is the research, design and manufacture of a dual axis solar tracker model.

The methodology followed is divided into four stages: the study and design of the model, the construction and programming of the control system using a programmable board, the simulation testing using a specialized program (PVsyst) and finally, the construction of the model and the actual testing.

The significance of this model is great, because it is a standalone model based on environment data and not in downloading data from the Internet. Moreover, it uses additional techniques that are not applicable to already existing dual axis bases. Furthermore, the programming code was written entirely for the operation of this model and it can be subjected to continuous improvements and modifications if necessary.

Keywords: photovoltaic effect, photovoltaic module, sunlight, biaxial model for photovoltaic panel, sun position tracking, solar radiation intensity, Arduino UNO Rev3 microcontroller, stepper motors

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iv
ABSTRACT	v
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	xii
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	xv
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ	xvi
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	xvii
1 Αξιοποίηση ηλιακής ακτινοβολίας για παραγωγή ηλεκτρισμού	1
1.1 Ενεργειακό Πρόβλημα	1
1.2 Ηλιακή ενέργεια	1
1.3 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο	2
1.4 Δίοδος ημιαγωγών	2
1.4.1 Περιγραφή και εσωτερική δομή	2
1.4.2 Κατασκευή διόδου	4
1.4.3 Λειτουργία διόδου	5
1.4.4 Πόλωση διόδου	5
1.5 Φωτοβολταϊκά κελιά/στοιχεία και πλαίσια	7
1.5.1 Λειτουργία φωτοβολταϊκών κελιών	9
1.5.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια	10
1.5.3 Παράλληλη σύνδεση κελιών	11
1.5.4 Σύνδεση κελιών σε σειρά	12
1.5.5 Πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα φωτοβολταϊκών στοιχείων	13

1.6	Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκών στοιχείων	13
1.6.1	Καμπύλες λειτουργίας	13
1.6.2	Κατασκευαστικά τεχνικά χαρακτηριστικά πλαισίου	15
1.7	Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων/πλαισίων	15
1.7.1	Κρυσταλλικό πυρίτιο	15
1.7.2	Λεπτό υμένιο (Thin film)	16
1.7.3	Άλλοι τύποι φωτοβολταϊκών κελιών	18
1.8	Επίδραση θερμοκρασίας, έντασης ακτινοβολίας και σκίασης	18
1.8.1	Επίδραση της θερμοκρασίας	18
1.8.2	Επίδραση της έντασης ακτινοβολίας	19
1.8.3	Επίδραση της σκίασης	19
1.9	Απόδοση φωτοβολταϊκών στοιχείων/πλαισίων	20
1.9.1	Παράγοντες μείωσης της απόδοσης	20
1.9.2	Παρακολούθηση σημείου βέλτιστης λειτουργίας (MPPT)	21
1.9.3	Συντελεστής Πληρώσεως (Fill Factor)	21
1.10	Πρακτικοί κανόνες χωροθέτησης	22
1.11	Διασυνδεδεμένα (Grid connected) και Αυτόνομα συστήματα φ/β πλαισίων	23
1.12	Συστήματα στήριξης	24
1.12.1	Εγκατάσταση σε κεκλιμένη στέγη ή οριζόντια οροφή	24
1.12.2	Σταθερές βάσεις	25
1.12.3	Ηλιακοί ανιχνευτές (Solar trackers)	26
2	Σχεδιασμός διαξονικής βάσης φωτοβολταϊκού πλαισίου	28
2.1	Ανάλυση κατασκευής	28
2.2	Γενικά χαρακτηριστικά μοντέλου	28
2.3	Σχηματικό διάγραμμα (Block diagram) κατασκευής	29
2.4	Σχέδια μοντέλου	30

2.5	Έρευνα αγοράς	31
2.5.1	Εισαγωγή	31
2.5.2	Συντελεστές προς αγοραστική διερεύνηση	31
2.5.3	Συμπέρασμα	33
2.6	Επιλογή υλικών και επεξήγηση κατασκευής	33
2.6.1	Επιλογή υλικών	33
2.6.2	Επεξήγηση κατασκευής	34
2.7	Μηχανισμοί κίνησης – Επιλογή κινητήρων	36
2.7.1	Υδραυλικά έμβολα	36
2.7.2	Πνευματικά έμβολα	36
2.7.3	Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC motors)	36
2.7.4	Σερβοκινητήρες (Servo motors)	37
2.7.5	Βηματικοί κινητήρες (Stepper motors)	37
2.7.6	Συνδυασμός τύπων	37
2.8	Μέρη κατασκευής	38
2.8.1	Κύκλωμα αισθητήρων φωτός	38
2.8.2	Ανεμόμετρο	40
2.8.3	Τροφοδοτικό 5V/12V DC	41
2.8.4	EasyDriver shield για Arduino (οδηγός κινητήρων)	45
2.8.5	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	46
2.8.6	Βηματικοί κινητήρες – Stepper motor NEMA 17	47
2.9	Είδη μετάδοσης κίνησης	51
2.10	Σχεδιασμός ηλεκτρονικού κυκλώματος	55
3	Μικροελεγκτής μοντέλου	57
3.1	Επιλογή μικροελεγκτή	57
3.2	Πλακέτα Arduino UNO Rev3 ATmega328P CH340G	58

3.2.1	Προγραμματισμός	58
3.2.2	Τροφοδοσία	58
3.2.3	Μνήμη	59
3.2.4	Θύρες εισόδου/εξόδου (I/O pins)	59
3.2.5	Επικοινωνία	60
3.3	Χαρακτηριστικά μικροελεγκτή	60
4	Προγραμματισμός μικροελεγκτή	62
4.1	Διάγραμμα ροής (Flow diagram)	62
4.2	Κώδικας της εργασίας	63
4.3	Προγραμματισμός πλακέτας Arduino UNO Rev3	71
5	Κατασκευή του μοντέλου	72
5.1	Παρουσίαση τελικής κατασκευής	72
5.2	Παρουσίαση μοντέλου με φ/β πλαίσιο	74
6	Προσομοίωση στο PVsyst	76
6.1	Λογισμικό PVsyst	76
6.2	Προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων	77
7	Ενεργειακή πολιτική της Κύπρου για τις ΑΠΕ	82
7.1	Εισαγωγή	82
7.2	Ενεργειακοί στόχοι για την ΕΕ και την Κύπρο	83
7.3	Ενεργειακό ισοζύγιο και δίκτυο της ΑΕΚ	83
7.4	Εθνικός στόχος και εθνικές προκλήσεις	85
7.5	Ανάγκη για νέα σχέδια δράσης για τις ΑΠΕ	88
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	90
	ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ	92
	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ	93
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	94

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	97
Παράρτημα 1: Σχηματικό διάγραμμα Arduino UNO Rev 3	97
Παράρτημα 2: Προδιαγραφές βηματικών κινητήρων	98
Παράρτημα 3: Σχηματικό διάγραμμα EasyDriver	99
Παράρτημα 4: Κοστολόγιο εργασίας	100

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.8.2: Χαρακτηριστικά ανεμόμετρου	41
Πίνακας 2.8.3α: Χαρακτηριστικά τροφοδοτικού	42
Πίνακας 2.8.3β: Χρωματισμοί καλωδίων τροφοδοτικού	43
Πίνακας 2.8.5: Χαρακτηριστικά φ/β πλαισίου	46
Πίνακας 2.8.6α: Τεχνικά χαρακτηριστικά του βηματικού κινητήρα NEMA 17	49
Πίνακας 2.8.6β: Συνδεσμολογία καλωδίων βηματικού κινητήρα NEMA 17	50
Πίνακας 2.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά γранаζιών	53
Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά ολοκληρωμένου κυκλώματος ATmega328P	60
Πίνακας 6.2α: Δεδομένα μεταβολής γωνιάς κλίσης στον κάθετο άξονα	78
Πίνακας 6.2β: Γωνίες ύψους και αζιμούθιου	79
Πίνακας 6.2γ: Δεδομένα μεταβολής διαξονικού συστήματος εντοπισμού του ήλιου	79

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.4.1: Σύμβολο της διόδου επαφής PN	3
Εικόνα 1.4.2.: Χαρακτηριστική της διόδου επαφής PN πυριτίου ($I_D - V_D$)	4
Εικόνα 1.4.4α: Συνδεσμολογία ορθής πόλωσης διόδου	5
Εικόνα 1.4.4β: Εσωτερική δομή διόδου κατά την ορθή πόλωση	6
Εικόνα 1.4.4γ: Κατανομή πληθυσμών φορέων κατά την ορθή πόλωση	6
Εικόνα 1.4.4δ: Συνδεσμολογία ανάστροφης πόλωσης διόδου	6
Εικόνα 1.4.4ε: Εσωτερική δομή διόδου κατά την ανάστροφη πόλωση	7
Εικόνα 1.5α: Φωτοβολταϊκό κελί	7
Εικόνα 1.5β: Η κατασκευή του φωτοβολταϊκού πλαισίου	8
Εικόνα 1.5.1α: Διαδικασία συλλογής ηλιακής ενέργειας από φωτοβολταϊκό πλαίσιο	9
Εικόνα 1.5.1β: Μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική	10
Εικόνα 1.5.2α: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο (36 φ/β κελιά σε σειρά)	10
Εικόνα 1.5.2β: Φ/β πάρκο στο Τσέρι (Λευκ.), 12 000 φ/β πλαισίων και 4,6 εκταρίων	10
Εικόνα 1.5.3α: Παράλληλη σύνδεση φ/β κελιών	11
Εικόνα 1.5.3β: Παράδειγμα χαρακτηριστικής $I - V$ για παράλληλη σύνδεση κελιών	11
Εικόνα 1.5.4α: Σύνδεση κελιών σε σειρά	12
Εικόνα 1.5.4β: Παράδειγμα χαρακτηριστικής $I - V$ για σύνδεση κελιών σε σειρά	12
Εικόνα 1.6.1α: Απλό μοντέλο προσομοίωσης φωτοβολταϊκού στοιχείου	13
Εικόνα 1.6.1β: Καμπύλη έντασης – τάσης ($I - V$)	14
Εικόνα 1.6.1γ: Καμπύλη ισχύος-τάσης ($P - V$)	14
Εικόνα 1.7.1α: Φωτοβολταϊκά κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου	16
Εικόνα 1.7.1β: Φωτοβολταϊκά κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου	16
Εικόνα 1.7.2α: Φωτοβολταϊκά κελιά άμορφου πυριτίου	17
Εικόνα 1.7.2β: Φωτοβολταϊκά κελιά καδμίου – τελλουρίου	17
Εικόνα 1.7.2γ: Φωτοβολταϊκά κελιά χαλκού – ινδίου/γαλλίου – δισελληνιούχου	17
Εικόνα 1.8.1: Επίδραση της θερμοκρασίας της ηλιακής ακτινοβολίας	18
Εικόνα 1.8.2: Επίδραση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας	19
Εικόνα 1.8.3: Δίοδοι παράκαμψης και δίοδοι αντεπιστροφής σε φωτοβολταϊκά πλαίσια ...	20
Εικόνα 1.9.3: Καμπύλη έντασης – τάσης ($I - V$)	21
Εικόνα 1.11α: Διάγραμμα συστήματος Net Metering	23
Εικόνα 1.11β: Διασυνδεδεμένο οικιακό φωτοβολταϊκό σύστημα	23
Εικόνα 1.11γ: Αυτόνομο οικιακό φωτοβολταϊκό σύστημα	24

Εικόνα 1.12.1α: Φωτοβολταϊκά πλαίσια εγκατεστημένα σε κεκλιμένη στέγη	25
Εικόνα 1.12.1β: Φωτοβολταϊκά πλαίσια εγκατεστημένα σε οροφή	25
Εικόνα 1.12.2α: Φωτοβολταϊκά πλαίσια εγκατεστημένα μέσω σκυροδέτησης σε οροφή ...	25
Εικόνα 1.12.2β: Φωτοβολταϊκά πλαίσια εγκατεστημένα μέσω φύτευσης στο έδαφος	26
Εικόνα 1.12.3α: Μονοαξονικό σύστημα	26
Εικόνα 1.12.3β: Διαξονικό σύστημα	26
Εικόνα 1.12.3γ: Διαξονικό σύστημα πραγματικών διαστάσεων	27
Εικόνα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα μοντέλου	29
Εικόνα 2.4α: Μηχανολογικά σχέδια μοντέλου	30
Εικόνα 2.4β: Μηχανολογικά σχέδια μοντέλου με φ/β πλαίσιο	30
Εικόνα 2.5.2: Έδρανα με κουζινέτα	32
Εικόνα 2.6.2α: Όψη κατασκευής πριν τις τροποποιήσεις (πάνω και κάτω μέρος)	34
Εικόνα 2.6.2β: Όψη κατασκευής μετά τις τροποποιήσεις (πάνω και κάτω μέρος)	35
Εικόνα 2.8.1α: Φωτοαντίσταση (LDR) και το σύμβολο της	38
Εικόνα 2.8.1β: Χαρακτηριστική φωτοαντίστασης (αντίσταση ως προς ηλ. ακτινοβολία)	38
Εικόνα 2.8.1γ: Κύκλωμα αισθητήρων φωτός	39
Εικόνα 2.8.2α: Διαστάσεις ανεμόμετρου	40
Εικόνα 2.8.2β: Ανεμόμετρο τριών καλωδίων (τροφοδοσία, γείωση, σήμα εξόδου)	40
Εικόνα 2.8.3α: Όψη τροφοδοτικού	42
Εικόνα 2.8.3β: Κεραμική Αντίσταση 10Ω/10W	44
Εικόνα 2.8.3γ: Εσωτερική όψη τροφοδοτικού	44
Εικόνα 2.8.4: EasyDriver shield για stepper motors	45
Εικόνα 2.8.6α: Βηματικός κινητήρας υβριδικού τύπου	47
Εικόνα 2.8.6β: Συνδεσμολογία βηματικού κινητήρα	48
Εικόνα 2.8.6γ: Διαστάσεις βηματικού κινητήρα NEMA 17	50
Εικόνα 2.8.6δ: Συνδεσμολογία καλωδίων βηματικού κινητήρα NEMA 17	50
Εικόνα 2.9α: Τα γρανάζια που επιλέγηκαν	52
Εικόνα 2.9β: Διάταξη στον άξονα Βορρά – Νότου (για το μοντέλο και τη βάση του φ/β) ...	54
Εικόνα 2.9γ: Διάταξη στον άξονα Ανατολής – Δύσης	54
Εικόνα 2.10α: Σχέδιο ηλεκτρονικών	55
Εικόνα 2.10β: Μονογραμμικό σχέδιο ηλεκτρονικών	56
Εικόνα 3.1: Η πλακέτα Arduino UNO R3 ATmega328P CH340G	57
Εικόνα 3.3: Αντιστοίχιση ακροδεκτών του μικροελεγκτή (ATmega328)	61
Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής	62

Εικόνα 4.3: Ο κώδικας στο λογισμικό Arduino (IDE)	71
Εικόνα 5.1α: Μοντέλο διαξονικής βάσης φ/β πλαισίου (1)	72
Εικόνα 5.1β: Μοντέλο διαξονικής βάσης φ/β πλαισίου (2)	72
Εικόνα 5.1γ: Πλακέτα ηλεκτρονικών	73
Εικόνα 5.1δ: Τροφοδοτικό και πλακέτα ηλεκτρονικών στο κουτί του μοντέλου	73
Εικόνα 5.2α: Κατασκευή με φ/β πραγματικών διαστάσεων (1)	74
Εικόνα 5.2β: Κατασκευή με φ/β πραγματικών διαστάσεων (2)	74
Εικόνα 5.2γ: Κατασκευή με φ/β πραγματικών διαστάσεων (3)	75
Εικόνα 6.2α: Γεωγραφική περιοχή (Λευκωσία, Κύπρος)	77
Εικόνα 6.2β: Επιλογή φ/β στοιχείου και αντιστροφέα	77
Εικόνα 6.2γ: Σταθερό σύστημα με μεταβαλλόμενη γωνιά ύψους	78
Εικόνα 6.2δ: Διαξονικό σύστημα με μεταβαλλόμενες γωνιές ύψους και αζιμούθιου	80
Εικόνα 6.2ε: Αποτελέσματα προσομοίωσης διαξονικού συστήματος εντοπισμού	80
Εικόνα 7.3α: Τεχνολογίες /ποσοστά συμμετοχής στο σύστημα παραγωγής της Κύπρου	83
Εικόνα 7.3β: Τεχνολογίες συνδεδεμένες με το δίκτυο της ΑΗΚ	84
Εικόνα 7.3γ: Ποσοστιαία συμμετοχή της κάθε τεχνολογίας στο ενεργειακό ισοζύγιο	84
Εικόνα 7.4α - Στόχοι για το 2020 για τα ποσοστά των ΑΠΕ στο δίκτυο της ΑΗΚ	85
Εικόνα 7.4β: 22 Μαρτίου 2015 – Ρεκόρ διείσδυσης των ΑΠΕ στο δίκτυο ΑΗΚ	86
Εικόνα 7.4γ : 22 Μαρτίου 2015 – Ημερήσια παραγωγή	86
Εικόνα 7.4δ: 22 Μαρτίου 2015 – SCADA control screen	87
Εικόνα 7.5α: Σενάρια για την διαμόρφωση της εθνικής πορείας για τις ΑΠΕ	88
Εικόνα 7.5β: Ποσοστό διείσδυσης των φωτοβολταϊκών ανάλογα με το σενάριο	89
Εικόνα 7.5γ: Ποσοστό διείσδυσης των φ/β και των ανεμογεννητριών για το έτος 2030	89

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

ΤΕΠΑΚ:	Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου
ΦΒ:	Φωτοβολταϊκό
ΕΕ:	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΑΠΕ:	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΑΗΚ:	Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου
Η/Υ:	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής
STC:	Standard Test Conditions
LDR:	Light Dependent Resistor
PSU:	Power Supply Unit
IRENA:	International Renewable Energy Agency

ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ

Pulse Width Modulation	Παλμοκωδική Διαμόρφωση
Bypass diode	Δίοδος παράκαμψης
Blocking diode	Δίοδος αντεπιστροφής
Maximum Power Point Tracking	Παρακολούθηση του σημείου βέλτιστης λειτουργίας
Standard Test Conditions	Πρότυπες συνθήκες ελέγχου
Fill Factor	Συντελεστής Πληρώσεως
Depletion Layer	Περιοχή Απογύμνωσης
Potential Barrier	Φράγμα Δυναμικού
Net Metering	σύστημα συμψηφισμού
Solar trackers	Ηλιακοί ανιχνευτές
Grid connected	Διασυνδεδεμένα συστήματα φ/β πλαισίων
Cooling fan	Ανεμιστήρας ψύξης
Latitude	Γεωγραφικό Πλάτος
Longitude	Γεωγραφικό Μήκος

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Κύπρο εξαρτάται σε τεράστιο βαθμό από τις συμβατικές πηγές παραγωγής και συγκεκριμένα το πετρέλαιο. Η συνεισφορά των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) παραμένει περιορισμένη, αν και υπάρχει μεγάλη προοπτική, κυρίως ως προς την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Η αξιοποίηση, λοιπόν, αυτής της φιλικής προς το περιβάλλον ενέργειας είναι πολύ υποσχόμενη, λόγω της μεγάλης σε διάρκεια ηλιοφάνειας που επικρατεί στο νησί τις πλείστες μέρες του χρόνου.

Η ηλιακή ενέργεια, η πλέον διαθέσιμη μορφή ενέργειας στον πλανήτη, αξιοποιείται με τα λεγόμενα φωτοβολταϊκά (φ/β) συστήματα, τα οποία βασίζονται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο. Το ηλιακό φως αποτελείται από τα φωτόνια τα οποία, ανάλογα με το μήκος κύματος τους, έχουν διαφορετική συχνότητα και ποσότητα ενέργειας το κάθε ένα. Το βασικό μέρος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι το φωτοβολταϊκό πλαίσιο, το οποίο αποτελείται από συνδεδεμένα μεταξύ τους φωτοβολταϊκά στοιχεία. Όταν η ακτινοβολία του ήλιου προσπέσει σε ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο, μέρος από τα φωτόνια απορροφάται από το πλαίσιο με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος συνεχούς τάσης.

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι η φιλικότητα προς το περιβάλλον, καθότι η ηλιακή ενέργεια είναι μία καθαρή και ανανεώσιμη πηγή, η αθόρυβη τους λειτουργία, η ελάχιστη συντήρηση που χρειάζονται και η αξιόπιστη τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρισμού. Ένα μικρό πόσο, όμως, της ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος αυξάνεται εάν το πλαίσιο επιτυγχάνει με κάποιο τρόπο να απορροφά την μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία, ακολουθώντας την κίνηση του ήλιου. Αυτό γίνεται κατορθωτό με την μετακίνηση του πλαισίου στην ιδανική θέση του ήλιου, καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας. Τέτοια συστήματα είναι οι μονοαξονικές βάσεις (κίνηση σε ένα μόνο άξονα) και οι διαξονικές βάσεις (κίνηση σε δύο άξονες).

Σκοπός την πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη, σχεδίαση και κατασκευή ενός μοντέλου διαξονικής βάσης φ/β πλαισίου. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί λήψη δεδομένων από τέσσερεις ενσωματωμένους αισθητήρες φωτός και ένα ανεμόμετρο (active tracking) και στην συνέχεια, κατόπιν επεξεργασίας των δεδομένων, μετακινεί το ενσωματωμένο σε αυτό φωτοβολταϊκό πλαίσιο στην κατάλληλη θέση για μέγιστη απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας. Δύο μοτέρ κινούν το πλαίσιο στην επιθυμητή θέση, η οποία είναι η κάθετη ως προς τις ακτίνες του ήλιου. Το μοντέλο αυτό λειτουργεί αυτόματα και αυτόνομα και χρησιμοποιεί επεξεργαστή για τον προγραμματισμό του και την επεξεργασία των δεδομένων. Μια ακόμη λειτουργία του μοντέλου αυτού είναι η οριζοντίωση του πλαισίου το βράδυ όταν η ηλιοφάνεια είναι μηδαμινή, για την αποφυγή ανεπιθύμητων ανεμικών πιέσεων. Κατά την ανατολή του ήλιου το πλαίσιο επιστρέφει στην ιδανική θέση του ήλιου. Ένα ενσωματωμένο τροφοδοτικό τάσης χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας.

Στόχος είναι η βελτίωση των ήδη υφιστάμενων τεχνολογιών διαξονικών βάσεων φ/β πλαισίων, με τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός νέου προτύπου. Με αυτό τον τρόπο θα εξακολουθήσει να υφίσταται η αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τα σταθερά φωτοβολταϊκά συστήματα, μειώνοντας τα κόστη και με προοπτική περαιτέρω χρησιμοποίησης αυτού του μοντέλου σε πραγματικές διαστάσεις στο μέλλον.

Επιστημονικός και τεχνολογικός στόχος

Η ανίχνευση της βέλτιστης θέσης του ήλιου όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ένα φ/β πλαίσιο και επομένως, η αύξηση της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων με τη χρήση του νέου συστήματος με διαξονική βάση, το οποίο προτείνεται στο πλαίσιο της πτυχιακής εργασίας ενοποιημένου σχεδιασμού. Το μοντέλο αυτό θα μπορεί πιθανόν στο μέλλον να κατασκευαστεί σε πραγματικές διαστάσεις για να δώσει λύσεις στο υπάρχον πρόβλημα στο χώρο των φ/β συστημάτων.

Τα προσδοκώμενα αποτελέσματα λαμβάνονται τόσο με την εκτέλεση προσομοιώσεων (με το λογισμικό PVsyst), όσο και με την εκτέλεση πραγματικών δοκιμών.

Η θεωρητική μελέτη επικεντρώθηκε στην έρευνα και τον σχεδιασμό ενός μοντέλου διαξονικής βάσης φ/β πλαισίου, αλλά και την εκτέλεση προσομοιώσεων για να επιβεβαιωθεί η χρηστικότητα του. Το πρακτικό κομμάτι περιλαμβάνει την κατασκευή του μοντέλου, τον ορθό προγραμματισμό του με χρήση πλακέτας Arduino και τέλος, τον έλεγχο ορθής λειτουργίας μέσω πραγματικών δοκιμών.

Υπάρχουσα γνώση

Στην Κύπρο έχουν δημιουργηθεί αρκετά φ/β πάρκα και υπάρχει προοπτική για περαιτέρω ανάπτυξη τους λόγω του κλίματος που επικρατεί στο νησί, το οποίο ευνοεί την ανάπτυξη των ΑΠΕ και ειδικότερα εκείνων που αφορούν την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας. Υπάρχουν αυτή την στιγμή τα ακίνητα φωτοβολταϊκά συστήματα, καθώς επίσης και τα χειροκίνητα, αλλά και συστήματα με μονοαξονική και διαξονική βάση.

Λόγω του ότι οι εταιρείες που έχουν εγκαταστήσει τα υφιστάμενα συστήματα των φ/β πάρκων στην Κύπρο αντιμετώπισαν και αντιμετωπίζουν προβλήματα λόγω κακής οικονομικής διαχείρισης, δεν μπορούν να καλύψουν τις αναμενόμενες συντηρήσεις, παρόλο που έχουν δεσμευθεί με εγγυήσεις. Το πρόβλημα των εγγυήσεων αυτών έχει ως αποτέλεσμα να αφήνουν εκτεθειμένους τους ιδιοκτήτες των φ/β πάρκων. Τα συστήματα με διαξονικές βάσεις στην Κύπρο έχουν κριθεί ως μη βιώσιμα.

Καινοτομία εργασίας

Το επίπεδο καινοτομίας αυτής της εργασίας ενοποιημένου σχεδιασμού θεωρείται σημαντικό, αφού θα δώσει νέες λύσεις όσον αφορά το πρόβλημα με τα υφιστάμενα φ/β πάρκα στην Κύπρο. Έχει δημιουργηθεί ένα βελτιωμένο μοντέλο διαξονικής βάσης, το οποίο δεν χρησιμοποιεί τις υφιστάμενες μεθόδους που χρησιμοποιούν τέτοιου είδους φωτοβολταϊκά συστήματα για την κίνηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου, όπως για παράδειγμα τις υδραυλικές μεθόδους (έμβολα) ή τους μάντες, αλλά και για τη λήψη των δεδομένων.

Η λήψη των δεδομένων γίνεται από τους τέσσερις αισθητήρες φωτός και το ανεμόμετρο και στην συνέχεια, με την κατάλληλη επεξεργασία από το κύκλωμα ελέγχου, το πλαίσιο κινείται στην κατάλληλη θέση, η οποία είναι η κάθετη επιφάνεια του πλαισίου στις ακτίνες του ήλιου. Είναι δηλαδή ένα active tracker, το οποίο λειτουργεί ανάλογα με το περιβάλλον και όχι ανάλογα με δεδομένα που λαμβάνονται από το διαδίκτυο για την προβλεπόμενη θέση του ήλιου, τεχνική που χρησιμοποιούν τα υφιστάμενα συστήματα στην Κύπρο.

Επιπλέον, δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στην κίνηση του πλαισίου όσον αφορά και τους δύο άξονες, κάτι που κρίνεται ως πολύ σημαντικό, λόγω του ότι στην υπάρχουσα αγορά των φ/β συστημάτων όλες οι βάσεις τέτοιου τύπου έχουν περιορισμούς στις κινήσεις τους.

1 Αξιοποίηση ηλιακής ακτινοβολίας για παραγωγή ηλεκτρισμού

1.1 Ενεργειακό Πρόβλημα

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει η σημερινή κοινωνία και κυρίως η επιστήμη, είναι το λεγόμενο Ενεργειακό Πρόβλημα. Το Ενεργειακό Πρόβλημα πρωτοπαρουσιάστηκε τον 20^ο αιώνα, λόγω των καταλοίπων της Βιομηχανικής Επανάστασης και της εξέλιξης της τεχνολογίας γενικότερα. Η συνειδητοποίηση του έγινε ακόμα πιο έντονη με την λεγόμενη Πετρελαϊκή Κρίση των αρχών της δεκαετίας του 1970.

Κατά τη μεγαλύτερη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα, όλα τα κράτη ήταν εξαρτημένα από τα ορυκτά καύσιμα και τις συμβατικές τεχνολογίες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμα και σήμερα, τα πλείστα κράτη του πλανήτη παραμένουν εξαρτημένα σε μεγάλο βαθμό από αυτές τις μη αιεφόρες τεχνολογίες.

Η χρήση αυτών των τεχνολογιών γιγάντωσε τις ανεπιθύμητες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η διαδικασία παραγωγής ηλεκτρισμού επιβαρύνει το περιβάλλον, όπως για παράδειγμα με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, την όξινη βροχή και τα ραδιενεργά απόβλητα. Η αλόγιστη εκμετάλλευση των συμβατικών καυσίμων οδήγησε επιπλέον στη μείωση της διαθεσιμότητας τους και την αύξηση των τιμών τους, με συνεπακόλουθο μεγάλα οικονομικά προβλήματα για τα κράτη. Η στροφή στην ορθολογική χρήση της Ενέργειας και τις μη συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ήταν αναπόφευκτη.

Η αύξηση της κατανάλωσης Ενέργειας λόγω της συνεχούς τεχνολογικής εξέλιξης καθιστά την χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας αναγκαία και μονόδρομο. Η ηλιακή ενέργεια, η αιολική, η υδροηλεκτρική, η βιομάζα, τα θαλάσσια ρεύματα και η γεωθερμική είναι αιεφόρες μορφές ενέργειας, δεν εξαντλούνται δηλαδή και δεν προκαλούν προβλήματα στο περιβάλλον.

Το Ενεργειακό Πρόβλημα δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί πλήρως από τις ΑΠΕ, λόγω του ότι σε αυτό το στάδιο δεν το καθιστούν δυνατόν τα τεχνολογικά και οικονομικά δεδομένα. Επομένως η χρήση των ΑΠΕ σε συνδυασμό με την ορθολογική χρήση των συμβατικών καυσίμων, είναι η μόνη λύση έτσι ώστε να περιοριστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγή ηλεκτρισμού.

1.2 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια είναι η πλέον διαθέσιμη μορφή ενέργειας στον πλανήτη. Είναι μια ανεξάντλητη, καθαρή σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα και δωρεάν μορφή ενέργειας. Είναι επομένως ιδανική προς εκμετάλλευση για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Αρχικά, ο τρόπος εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας ήταν έμμεσος, με την αξιοποίηση της θερμοκρασίας που παράγεται όταν ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει σε μία επιφάνεια. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας των ημιαγωγών και με βάση το φωτοβολταϊκό φαινόμενο (φωτοβολταϊκά στοιχεία), η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια από τις πιο αξιόπιστες και διαδεδομένες μη συμβατικές μορφές ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλιακή ακτινοβολία παρέχει στη Γη ένα τεράστιο ποσό ενέργειας, περίπου 10 χιλιάδες

φορές μεγαλύτερο από την ετήσια παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση. Κατά μέσο όρο 1700kWh προσπίπτουν σε κάθε τετραγωνικό μέτρο το χρόνο.

Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης αποτελείται κατά κύριο λόγο από το άμεσο φως και το έμμεσο (διάχυτο) φως, το οποίο είναι η ακτινοβολία που έχει διασκορπιστεί στην ατμόσφαιρα από τα μόρια της σκόνης και του νερού.

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να αξιοποιήσουν για την παραγωγή ηλεκτρισμού τόσο την άμεση ακτινοβολία, όσο και την έμμεση. Για αυτό το λόγο η παραγωγή ηλεκτρισμού από φωτοβολταϊκά είναι δυνατή ακόμα και σε περιόδους νέφωσης ή μη έντονης ηλιοφάνειας γενικότερα.

1.3 Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Φωτοβολταϊκό φαινόμενο ονομάζεται η φυσική διαδικασία κατά την οποία ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο μετατρέπει το ηλιακό φως που προσπίπτει στην επιφάνεια του σε ηλεκτρική ενέργεια.

Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελείται από πακέτα ηλιακής ενέργειας, τα λεγόμενα φωτόνια. Ανάλογα με το μήκος κύματος του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, τα φωτόνια χαρακτηρίζονται από διαφορετικό ποσό ενέργειας [1]. Όταν τα φωτόνια προσπίπτουν σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο θα ανακλαστούν ή θα απορροφηθούν από αυτό ή θα το διαπεράσουν. Από την απορρόφηση φωτονίων, αναγκάζονται τα ηλεκτρόνια του φωτοβολταϊκού κυττάρου να μετακινηθούν, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ροή ρεύματος.

Για την κατασκευή φωτοβολταϊκών κυττάρων, χρησιμοποιούνται οι ημιαγωγοί, όπως το πυρίτιο (silica) κατά κύριο λόγο και σπανιότερα το γερμάνιο (germanium) [1]. Υπάρχουν δύο τύποι ημιαγωγών οι ημιαγωγοί τύπου N (N-type), στους οποίους υπάρχουν πολλά ηλεκτρόνια σχεδόν ελεύθερα και οι ημιαγωγοί τύπου P (P-type) στους οποίους υπάρχουν πολλές ελεύθερες οπές, οι οποίες είναι στην ουσία απώλεια ηλεκτρονίου.

Όταν ένα φωτόνιο προσπίπτει σε ένα ημιαγωγό τύπου N, το ηλεκτρόνιο φεύγει από την αρχική του θέση και λόγω του αρνητικού του φορτίου, έλκεται από το θετικό φορτίο το οποίο είναι συγκεντρωμένο στον ημιαγωγό τύπου P. Εξαιτίας του μονωτικού υλικού που υπάρχει ανάμεσα στους δύο ημιαγωγούς (P και N), ο μοναδικός τρόπος διέλευσης από τη μια μεριά στην άλλη είναι μέσω του εξωτερικού φορτίου, με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

1.4 Δίοδος ημιαγωγών

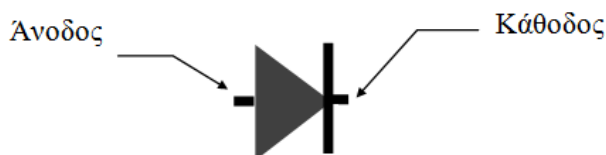
1.4.1 Περιγραφή και εσωτερική δομή

Αποτελεί την πιο απλή ηλεκτρονική συσκευή και έχει δύο ακροδέκτες, την Άνοδο και την Κάθοδο. Επιτρέπει τη ροή ρεύματος σε μία μόνο κατεύθυνση (ορθή πόλωση) και αποκόπτει στην άλλη (ανάστροφη πόλωση). Το χρησιμοποιούμενο υλικό είναι συνήθως πυρίτιο (Si) και σπανιότερα γερμάνιο (Ge).

Εσωτερικά υπάρχουν δύο τμήματα, το υλικό τύπου P (positive), όπου συνδέεται ο ακροδέκτης για την Άνοδο και το υλικό τύπου N (negative), όπου συνδέεται ο ακροδέκτης

για την Κάθοδο. Ο τύπος P έχει οπές ως φορείς θετικού ηλεκτρικού φορτίου (πλειονότητας) και ο τύπος N έχει ηλεκτρόνια ως φορείς αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου (πλειονότητας).

Μια οπή είναι στην ουσία η απουσία ενός ηλεκτρονίου από έναν ομοιοπολικό δεσμό. Και στα δυο μέρη υπάρχουν φορείς μειονότητας: μικρό ποσοστό οπών στο N-type και μικρό ποσοστό ηλεκτρονίων στο P-type λόγω της θερμοκρασίας, που συμβάλλει στο να σπάζουν ομοιοπολικοί δεσμοί και να ελευθερώνονται ηλεκτρόνια. Η δημιουργία των υλικών τύπου N και P γίνεται με την προσθήκη ουσιών σε μικρές ποσότητες στο πυρίτιο ή το γερμάνιο [2].



Εικόνα 1.4.1: Σύμβολο της διόδου επαφής PN

Ελεύθερα ηλεκτρόνια υπάρχουν στις κανονικές θερμοκρασίες στο πιο υψηλό ενεργειακό επίπεδο του ατόμου του πυρίτιο (ενεργειακή ζώνη αγωγιμότητας) και κινούνται ελεύθερα στο υλικό τύπου N. Δημιουργούνται στο πυρίτιο με τη πρόσμιξη μικρής ποσότητας πεντασθενούς στοιχείου, όπως το φωσφόρο (P) ή το Αρσένιο (As) [2]. Με αυτό τον τρόπο ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο δημιουργείται στο υλικό για κάθε άτομο του πεντασθενούς στοιχείου, λόγω του ότι ένα άτομο του πεντασθενούς στοιχείου σχηματίζει τέσσερις ομοιοπολικούς δεσμούς με τέσσερα άτομα του πυρίτιο, έτσι τέσσερα από τα πέντε ηλεκτρόνια στην εξωτερική στιβάδα του δεσμεύονται. Το πέμπτο μένει αδέσμευτο σε σχετικά ψηλό επίπεδο ενέργειας μέσα στο άτομο και σε κανονικές θερμοκρασίες είναι ελεύθερο να κινηθεί σαν φορέας ηλεκτρικού αρνητικού φορτίου. Αυτά είναι οι φορείς πλειοψηφίας. Μέσα στο υλικό τύπου N υπάρχουν και φορείς μειοψηφίας, οι οπές από διαλυμένους από την θερμοκρασία ομοιοπολικούς δεσμούς. Ο πληθυσμός τους είναι πολύ μικρός και αυξάνεται με την θερμοκρασία [1, 2].

Οι οπές δημιουργούνται στο υλικό τύπου P με τη πρόσμιξη τρισθενούς στοιχείου με το πυρίτιο, όπως το βόριο (B) ή αργίλιο (Al). Μια οπή δημιουργείται για κάθε άτομο του τρισθενούς στοιχείου στο πυρίτιο, λόγω του ότι ένα άτομο του τρισθενούς στοιχείου που έχει τρία ηλεκτρόνια στην εξωτερική στιβάδα του, σχηματίζει τρεις ομοιοπολικούς δεσμούς με τρία άτομα πυρίτιο. Ως αποτέλεσμα ο τέταρτος ομοιοπολικός δεσμός είναι ασυμπλήρωτος, του λείπει ένα ηλεκτρόνιο, υπάρχει μια οπή. Μια οπή είναι στην ουσία η απουσία ενός ηλεκτρονίου από έναν ομοιοπολικό δεσμό σε ένα σχετικά χαμηλό ενεργειακό επίπεδο [2]. Η κίνηση της οπής είναι κίνηση ενός ηλεκτρονίου από μια τρύπα στην επόμενη σε χαμηλό ενεργειακό επίπεδο, στο επίπεδο σθένους του ατόμου των δύο υλικών. Άρα η οπή κινείται αντίθετα της κίνησης του ηλεκτρονίου. Οι οπές είναι οι φορείς πλειοψηφίας θετικού φορτίου στο υλικό τύπου P. Υπάρχουν και φορείς μειοψηφίας, ηλεκτρόνια από διαλυμένους από την θερμοκρασία ομοιοπολικούς δεσμούς. Ο πληθυσμός τους είναι πολύ μικρός και αυξάνεται με την θερμοκρασία [1, 2].

1.4.2 Κατασκευή Διόδου

Οι δύο τύποι υλικού δημιουργούνται ξεχωριστά σε ένα κομμάτι πυριτίου. Το σημείο που ενώνονται ονομάζεται Επαφή PN (PN Junction). Με την δημιουργία των δύο τύπων αρχίζει η διάχυση των ηλεκτρονίων από τον τύπο N στον τύπο P και των οπών από τον τύπο P στον τύπο N. Έτσι δημιουργούνται θετικά ιόντα στην πλευρά N-type της Επαφής λόγω της φυγής των ηλεκτρονίων. Με τον ίδιο τρόπο, δημιουργούνται αρνητικά ιόντα στην πλευρά P-type της Επαφής. Το αποτέλεσμα είναι να δημιουργηθεί μια περιοχή εκατέρωθεν της επαφής απογυμνωμένη από φορείς ηλεκτρικού φορτίου, η οποία ονομάζεται Περιοχή Απογύμνωσης (Depletion Layer). Παράλληλα τα θετικά και αρνητικά ιόντα στις δύο πλευρές της Επαφής δημιουργούν μια διαφορά δυναμικού, ένα εμπόδιο που θα σταματήσει την περαιτέρω διάχυση. Αυτό το εμπόδιο ονομάζεται Φράγμα Δυναμικού (Potential Barrier, V_{ho}) και η τιμή του είναι 0.7V για το πυρίτιο και 0.2V για το γερμάνιο [2].

Το ρεύμα μέσω της διόδου για το πυρίτιο δίνεται από:

$$I_D = I_s (e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1)$$

όπου

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (25\text{mV σε κανονικές θερμοκρασίες})$$

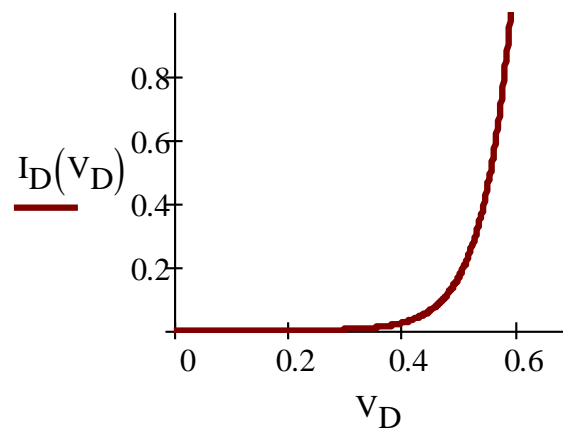
$K = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ (σταθερά Boltzmann)

$q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ (ηλεκτρικό φορτίο ηλεκτρονίου)

T (θερμοκρασία αναφοράς σε βαθμούς Kelvin)

$\eta = 1$ για I_D κάτω από $1\mu\text{A}$, $\eta = 2$ για I_D μέχρι 10mA , $\eta = 1$ για $I_D > 10\text{mA}$

$I_s = 10\mu\text{A}$ (τυπική τιμή για ανάστροφο ρεύμα κόρου)



Εικόνα 1.4.2.: Χαρακτηριστική της διόδου επαφής PN πυριτίου ($I_D - V_D$)

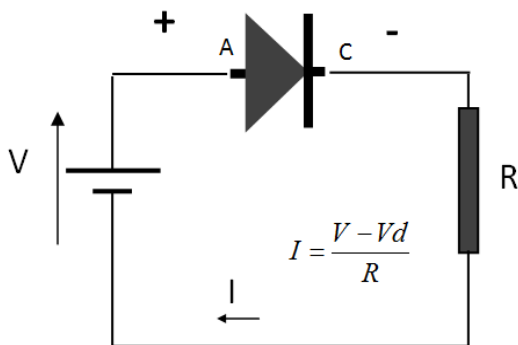
1.4.3 Λειτουργία Διόδου

Το κύριο λειτουργικό χαρακτηριστικό της διόδου είναι ότι επιτρέπει την ροή του ρεύματος σε μια κατεύθυνση μόνο. Η ροή ή όχι εξαρτάται από την μορφή Πόλωσης: Ορθή ή Ανάστροφη.

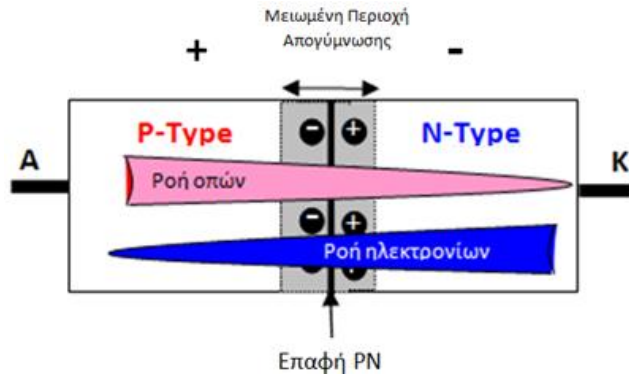
1.4.4 Πόλωση διόδου

Η Ορθή Πόλωση της διόδου παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.4.4α, όπου το θετικό τερματικό της μπαταρίας συνδέεται με την Άνοδο και το αρνητικό τερματικό στην Κάθοδο της διόδου. Σε αυτήν την περίπτωση τα ηλεκτρόνια (-) που είναι στο υλικό τύπου N απωθούνται από την κάθοδο προς την Επαφή και οι οπές (+) που είναι στο υλικό τύπου P απωθούνται από την Άνοδο προς την Επαφή και υπερβαίνοντας το Φράγμα Δυναμικού, διαχέονται στα αντίθετα υλικά πέραν της Περιοχής Απογύμνωσης σαν φορείς μειονότητας [2]. Εκεί εξουδετερώνονται από τους τοπικούς φορείς πλειονότητας: ένα ηλεκτρόνιο γεμίζει μια οπή με αποτέλεσμα να εξουδετερώνονται τα φορτία τους. Επομένως η συγκέντρωση των φορέων στα αντίθετα υλικά μειώνεται δραστικά από το όριο της Περιοχής Απογύμνωσης μέχρι το τέλος του υλικού προς τον ακροδέκτη, Εικόνα 1.4.4γ [2].

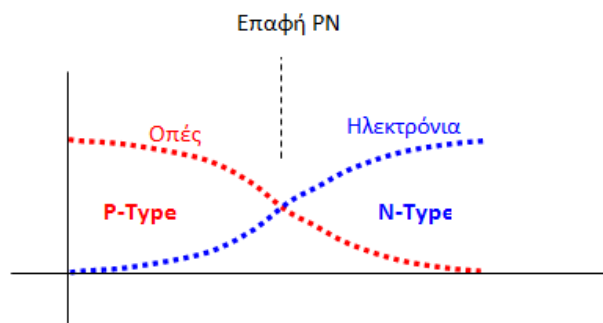
Σε κάθε υλικό υπάρχει το ρεύμα φορέων πλειοψηφίας προς την περιοχή απογύμνωσης που διαπερνά την επαφή PN και το ρεύμα φορέων μειοψηφίας, προερχόμενο από το άλλο υλικό από την περιοχή απογύμνωσης προς τον ακροδέκτη του υλικού, Εικόνα 1.4.4β. Το ολικό ρεύμα που εξέρχεται από τον ακροδέκτη είναι το άθροισμα των δύο. Το αρνητικό τερματικό της μπαταρίας παρέχει τα νέα ηλεκτρόνια στον τύπο N και οι νέες οπές δημιουργούνται στον τύπο P από το θετικό τερματικό της μπαταρίας. Ως εκ τούτου η ροή συνεχίζεται και το εύρος της Περιοχής Απογύμνωσης μειώνεται, Εικόνα 1.4.4β. Για να παρατηρηθεί ροή ρεύματος, πρέπει απαραίτητα η ελάχιστη τάση να είναι ίση με το Φράγμα Δυναμικού V_D (ή V_{ho}) το οποίο είναι 0.7V για τη δίοδο πυριτίου και το οποίο μπορεί να μεταβληθεί ελάχιστα λόγω θερμοκρασίας. Μια αντίσταση R περιορίζει το ρεύμα, Εικόνα 1.4.4α [2, 3].



Εικόνα 1.4.4α: Συνδεσμολογία ορθής πόλωσης διόδου

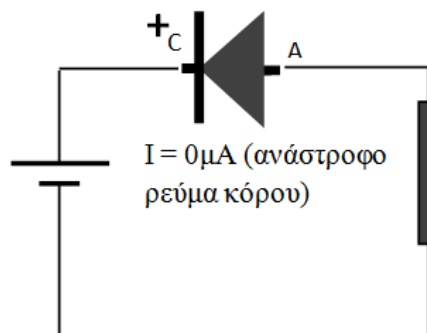


Εικόνα 1.4.4β: Εσωτερική δομή διόδου κατά την ορθή πόλωση

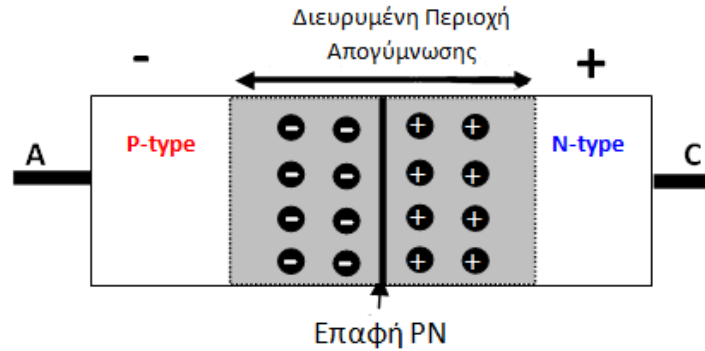


Εικόνα 1.4.4γ: Κατανομή πληθυσμών φορέων κατά την ορθή πόλωση

Η ανάστροφη πόλωση παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.4.4δ, όπου η πολικότητα της μπαταρίας αντιστρέφεται. Σε αυτήν την περίπτωση τα ηλεκτρόνια στον τύπο N προσελκύονται από την κάθοδο που είναι θετική μακριά από την επαφή PN και οι οπές στο υλικό τύπου P προσελκύονται από την άνοδο που είναι αρνητική μακριά από την επαφή PN. Η Περιοχή Απογύμνωσης διευρύνεται, όπως στην Εικόνα 1.4.4ε και καμία σημαντική ροή ρεύματος δεν πραγματοποιείται. Δημιουργείται ένα ελάχιστο ρεύμα από τους μειονοτικούς φορείς φορτίου στον κάθε τύπο. Αυτό είναι ένα πολύ μικρό ρεύμα που αυξάνεται μόνο με την θερμοκρασία και ονομάζεται ανάστροφο ρεύμα κόρου I_s , το οποίο τις περισσότερες φορές αγνοείται [2]. Το ανάστροφο ρεύμα κόρου οφείλεται στους φορείς μειοψηφίας και στα δυο υλικά και αυξάνεται με την θερμοκρασία.



Εικόνα 1.4.4δ: Συνδεσμολογία ανάστροφης πόλωσης διόδου

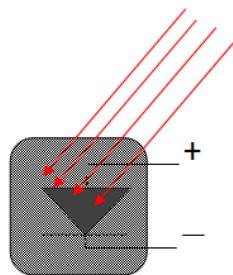


Εικόνα 1.4.4ε: Εσωτερική δομή διόδου κατά την ανάστροφη πόλωση

1.5 Φωτοβολταϊκά κελιά/στοιχεία και πλαίσια

Το βασικό δομικό μέρος ενός φωτοβολταϊκού συστήματος είναι το φωτοβολταϊκό κελί ή στοιχείο. Τα φ/β κελιά αποτελούνται από δύο στρώματα ημιαγωγού υλικού τα οποία αποτελούνται κυρίως από κρυστάλλους πυριτίου. Στο κάτω στρώμα του ηλιακού κελιού προστίθεται συνήθως βόριο (B), το οποίο δημιουργεί δεσμούς με το πυρίτιο οδηγώντας στην ανάπτυξη θετικού φορτίου (P-type). Στο πάνω μέρος του ηλιακού κελιού προστίθεται συνήθως φώσφορος (P), το οποίο δημιουργεί δεσμούς με το πυρίτιο οδηγώντας στην ανάπτυξη αρνητικού φορτίου (N-type). Η επιφάνεια μεταξύ των ημιαγωγών τύπου P και τύπου N που δημιουργείται ονομάζεται, όπως αναφέρεται και πιο πάνω επαφή PN (PN junction).

Το φωτοβολταϊκό κελί είναι στην ουσία μια κρυσταλλική δίοδος πυριτίου που όταν δεχτεί την ακτινοβολία του ήλιου, παρουσιάζει διαφορά τάσεως στα άκρα της και ροή ρεύματος όταν η Άνοδος ενωθεί εξωτερικά με την Κάθοδο [2].



Εικόνα 1.5α: Φωτοβολταϊκό κελί

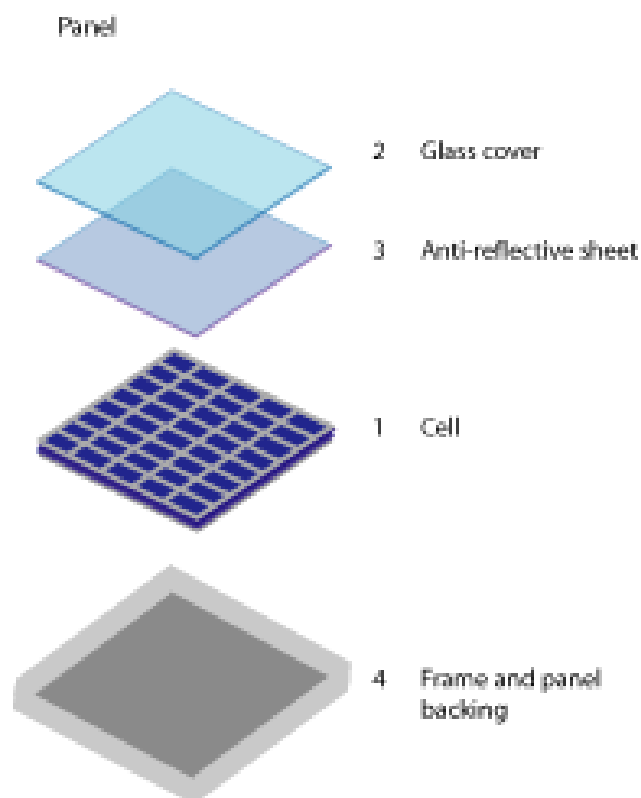
Κατά την πρόσπτωση του ηλιακού φωτός στο φωτοβολταϊκό κελί, ηλεκτρόνια και στα δύο στρώματα απελευθερώνονται λόγω της ενέργειας του. Αυτά τα ελεύθερα πλέον ηλεκτρόνια, τείνουν να μετακινηθούν από το στρώμα τύπου N στο στρώμα τύπου P, λόγω της αντίθετης πόλωσης των δύο στρωμάτων [3]. Το ηλεκτρικό πεδίο όμως στην επαφή PN εμποδίζει αυτή τη μετακίνηση. Δημιουργώντας ένα εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, επιτρέπεται η ροή ηλεκτρονίων από το ένα στρώμα στο άλλο με έμμεσο τρόπο. Η κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων δημιουργεί συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα (DC). Συνήθως τα φ/β κελιά έχουν τετράγωνο σχήμα με μήκος πλευράς 10 εκατοστά.

Η μικρή επιφάνειά τους περιορίζει την παραγωγική τους ικανότητα σε πολύ μικρή ισχύ. Κατά τη διάρκεια πρόσπτωσης ηλιακού φωτός στην επιφάνεια του φ/β στοιχείου, αναπτύσσεται ανάμεσα στα άκρα του διαφορά δυναμικού της τάσης των 0,5 – 1,2 Volts. Για το λόγο αυτό, συνδέοντας φ/β κελιά σε σειρά ή παράλληλα, κατασκευάζονται τα φ/β πλαίσια μεγαλύτερης ισχύος [3].

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι πολύ ευαίσθητα στις εξωτερικές επιδράσεις, για αυτό το λόγο επικαλύπτονται από γυαλιά, τα οποία δεν επιδρούν στην απόδοσή τους. Η κατασκευή των φ/β στοιχείων είναι πολύ δαπανηρή και απαιτεί τη χρήση τοξικών ουσιών. Ωστόσο, μετά την κατασκευή τους δεν προκαλούν ρύπανση, είναι ανθεκτικά και χρειάζονται ελάχιστη συντήρηση, με αποτέλεσμα να καθίστανται ιδανικά για χρήση σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου είναι δύσκολη η συντήρηση ή δεν παρέχεται ηλεκτρικό δίκτυο [2].

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία έχουν χαμηλή απόδοση. Αυτό συμβαίνει επειδή για το φωτοβολταϊκό φαινόμενο απαιτείται φως με επαρκή ενέργεια, το οποίο αντιστοιχεί περίπου μόνο στο 15 – 25% όλου του ηλιακού φωτός.

Καταβάλλονται προσπάθειες να βελτιωθεί ο τρόπος παραγωγής των φωτοβολταϊκών έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται λιγότερο επιβλαβείς χημικές ουσίες για την κατασκευή τους, να μειωθεί το κόστος τους και να αυξηθεί η απόδοσή τους.



Εικόνα 1.5β: Η κατασκευή του φωτοβολταϊκού πλαισίου

1.5.1 Λειτουργία φωτοβολταϊκών κελιών

Η ενέργεια του ηλιακού φωτός αποτελείται από πακέτα, τα λεγόμενα φωτόνια (photons) τα οποία έχουν μια συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας E που καθορίζεται από την συχνότητα του φωτός ν .

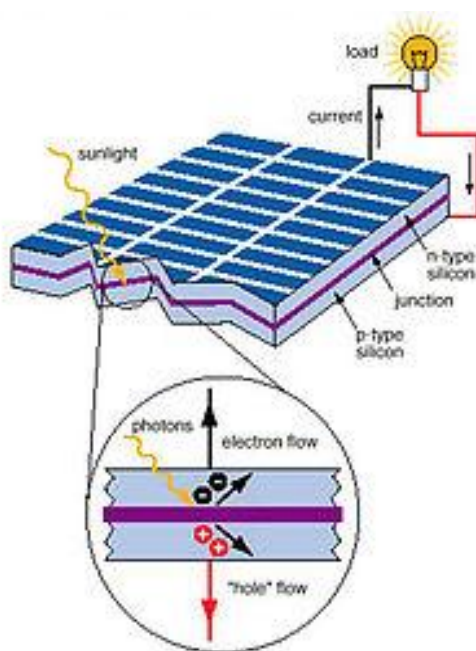
$$E = h \cdot \nu \text{ ή } E = h \cdot c / \lambda \text{ όπου } h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ (σταθερά του Plank)}$$

Αν η ενέργεια του φωτονίου, E είναι ίση ή μεγαλύτερη της ενέργειας που χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο σθένους να μεταπηδήσει στην Ζώνη Αγωγιμότητας από την Ζώνη Σθένους, $E_g = 1.12\text{eV}$, τότε ένας ομοιοπολικός δεσμός στο πυρίτιο σπάζει και το ελεύθερο ηλεκτρόνιο πηδά στην Ζώνη Αγωγιμότητας αφήνοντας πίσω του μια οπή. Όταν αυτό συμβεί στην περιοχή της επαφής PN, το υπάρχον Φράγμα Δυναμικού στην Περιοχή Απογύμνωσης στέλνει τα ηλεκτρόνια στο υλικό N και τις οπές στο υλικό P [2].

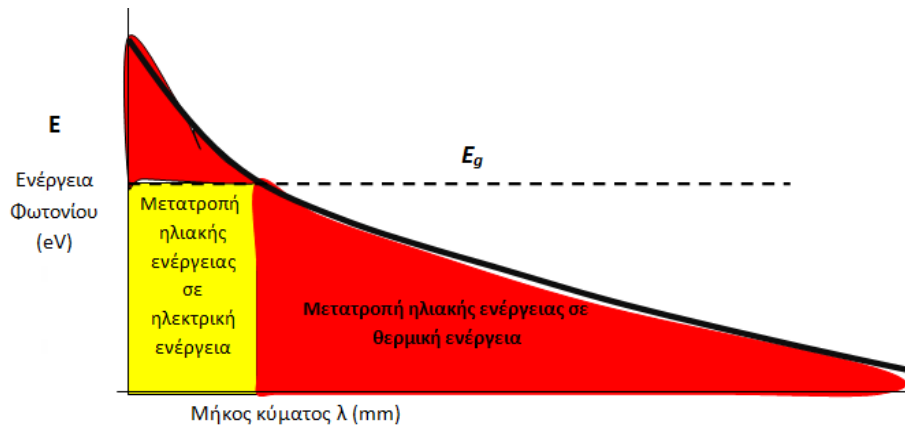
Υπάρχουν τρεις περιπτώσεις όταν το ϕ/β στοιχείο εκτεθεί στο φως:

- Η ενέργεια που περιέχει κάθε φωτόνιο ισούται με E_g ($E = E_g$): Ένας ομοιοπολικός δεσμός στο πυρίτιο σπάζει και το ελεύθερο ηλεκτρόνιο πάει στο υλικό N και η οπή στο υλικό P.
- Η ενέργεια που περιέχει κάθε φωτόνιο είναι μεγαλύτερη από E_g ($E > E_g$): Ένας ομοιοπολικός δεσμός στο πυρίτιο σπάζει και το ελεύθερο ηλεκτρόνιο πάει στο υλικό N και η οπή στο υλικό P. Η υπόλοιπη ενέργεια γίνεται θερμότητα, ανεβάζοντας την θερμοκρασία του στοιχείου.
- Η ενέργεια που περιέχει κάθε φωτόνιο είναι μικρότερη από E_g ($E < E_g$): Κανένας ομοιοπολικός δεσμός στο πυρίτιο δεν σπάζει και η ενέργεια γίνεται θερμότητα, ανεβάζοντας την θερμοκρασία του στοιχείου.

Η ηλιακή ακτινοβολία περιλαμβάνει και τις τρεις περιπτώσεις [2].



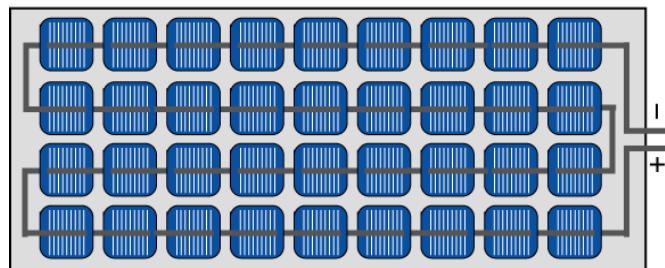
Εικόνα 1.5.1α: Η διαδικασία συλλογής της ηλιακής ενέργειας από φωτοβολταϊκό πλαίσιο



Εικόνα 1.5.1β: Μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική

1.5.2 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

Τα φ/β κελιά σπάνια χρησιμοποιούνται μόνα τους. Συνήθως συνδέονται μεταξύ τους ώστε να προκύψει μεγαλύτερη ισχύς, με αποτέλεσμα να σχηματίζουν το λεγόμενο φωτοβολταϊκού πλαισίου. Τα πλαίσια στη συνέχεια συνδυάζονται μεταξύ τους ώστε να προκύψουν τα φωτοβολταϊκά συστήματα [4]. Τα φ/β μπορούν να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα.



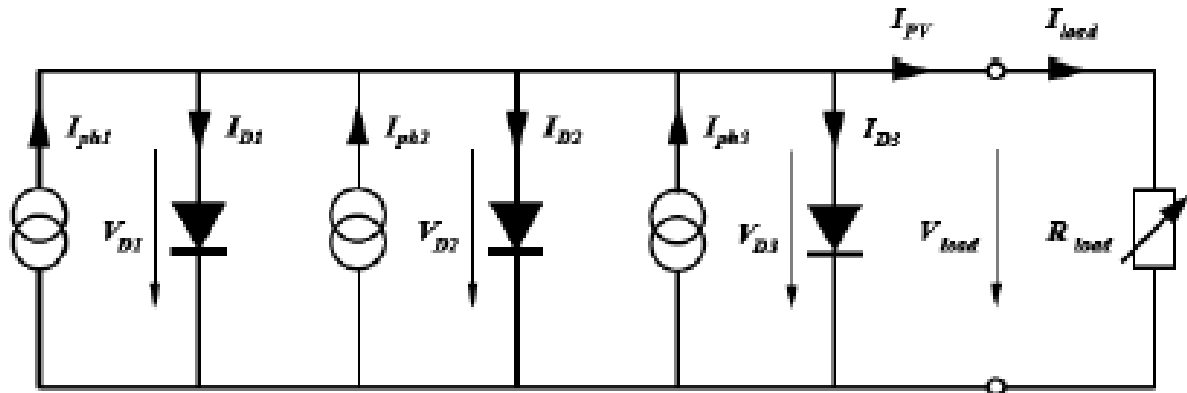
Εικόνα 1.5.2α: Φωτοβολταϊκό πλαίσιο αποτελούμενο από 36 φωτοβολταϊκά κελιά σε σειρά



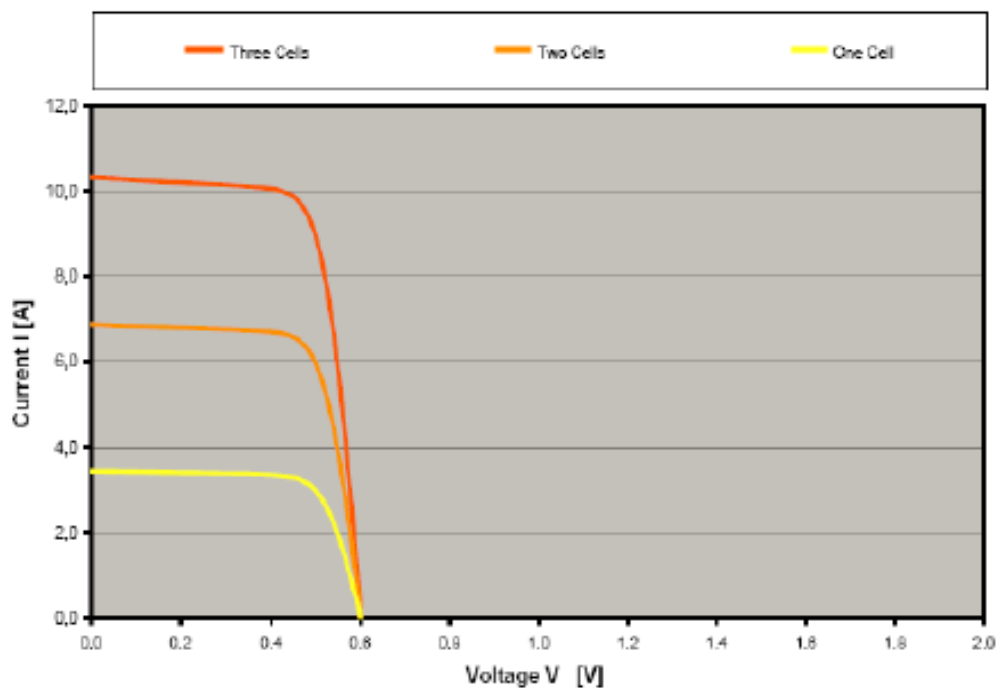
Εικόνα 1.5.2β: Φ/β πάρκο στο Τσέρι (Λευκωσία), 12 000 φ/β πλαισίων και έκτασης 4,6 εκταρίων

1.5.3 Παράλληλη σύνδεση κελιών

Η παράλληλη σύνδεση κελιών αυξάνει την ένταση του ρεύματος, όμως η τάση στα άκρα της συνδεσμολογίας παραμένει ίση με την τάση του κάθε φ/β κελιού ξεχωριστά. Η χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης ($I - V$) της συνδεσμολογίας προκύπτει από το άθροισμα των όλων των εντάσεων για την ίδια τάση [5].



Εικόνα 1.5.3α: Παράλληλη σύνδεση φ/β κελιών

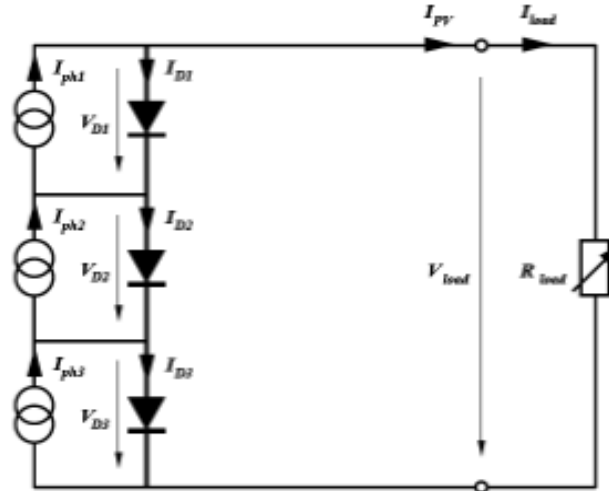


Εικόνα 1.5.3β: Παράδειγμα χαρακτηριστικής $I - V$ για παράλληλη σύνδεση κελιών

Η παράλληλη σύνδεση κελιών δεν είναι ευρέως διαδεδομένη, λόγω του ότι η μεγαλύτερη ένταση ρεύματος απαιτεί και μεγαλύτερες διατομές αγωγών, ενώ επιπλέον οι απώλειες αυξάνονται με τη μείωση της τάσης.

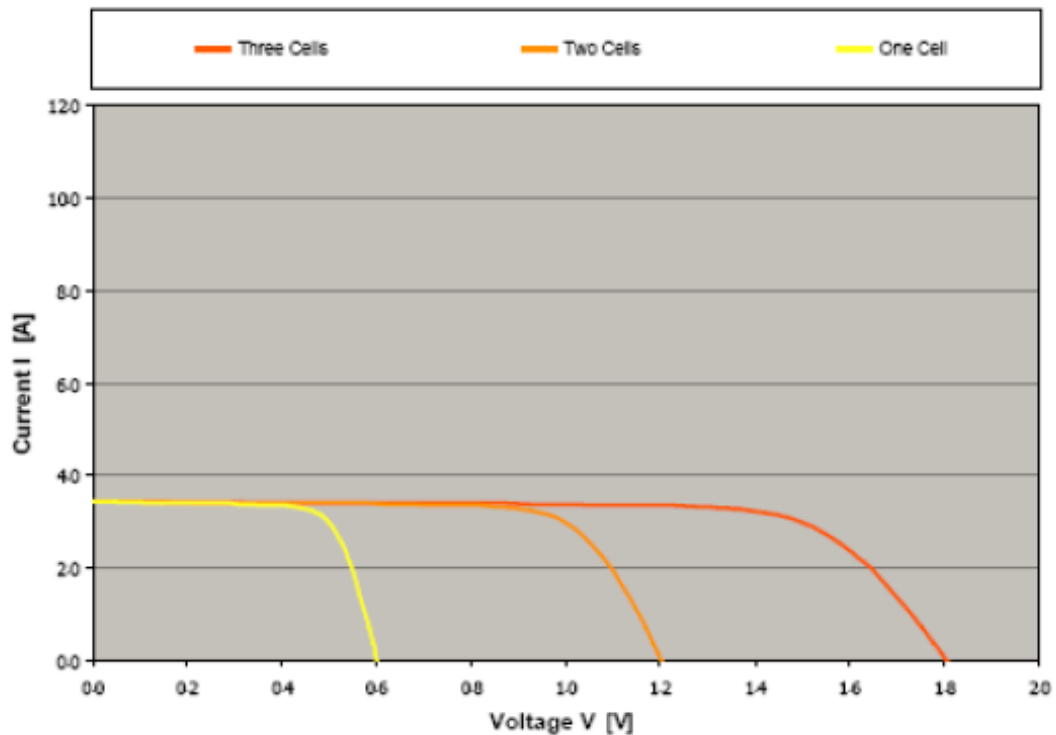
1.5.4 Σύνδεση κελιών σε σειρά

Στη σύνδεση κελιών σε σειρά η ροή ρεύματος ανά φ/β κελί είναι η ίδια, όμως η τάση της συνδεσμολογίας είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων όλων των φ/β κελιών [5]. Αποτελεί τον πιο συχνό τρόπο σύνδεσης.



Εικόνα 1.5.4α: Σύνδεση κελιών σε σειρά

Η χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης ($I - V$) της συνδεσμολογίας προκύπτει από το άθροισμα των τάσεων των κελιών για την ίδια τιμή ρεύματος.



Εικόνα 1.5.4β: Παράδειγμα χαρακτηριστικής $I - V$ για σύνδεση κελιών σε σειρά

1.5.5 Πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα φωτοβολταϊκών στοιχείων

Τα φ/β στοιχεία έχουν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

Πλεονεκτήματα

- Ελάχιστη συντήρηση
- Είναι φιλικά προς το περιβάλλον αφού κατασκευαστούν
- Δεν χρειάζονται γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος
- Δεν χρειάζονται καύσιμα
- Αθόρυβη λειτουργία
- Αξιόπιστη τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρισμού
- Μεγάλη διάρκεια ζωής [4]

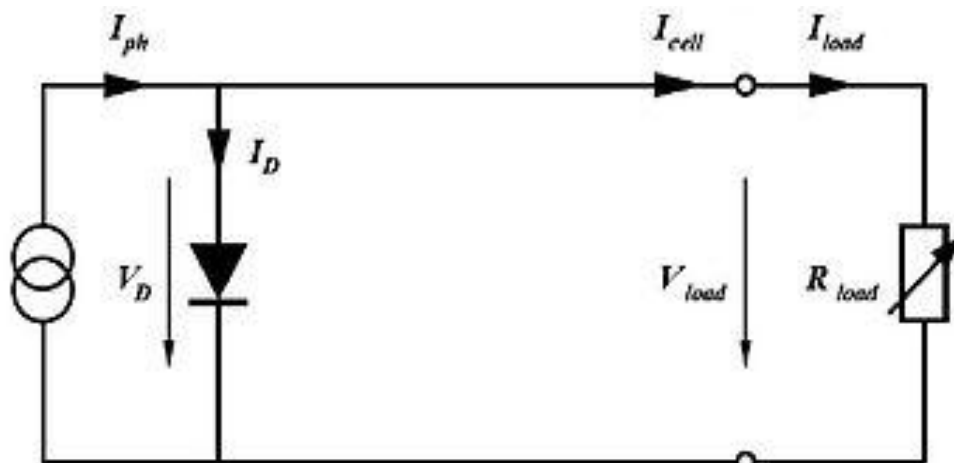
Μειονεκτήματα

- Η κατασκευή τους είναι δαπανηρή
- Μικρή απόδοση
- Προκαλείται ρύπανση κατά την κατασκευή τους
- Η ισχύς που παράγουν είναι μικρή [4]

1.6 Μοντελοποίηση φωτοβολταϊκών στοιχείων

1.6.1 Καμπύλες λειτουργίας

Το πιο απλό μοντέλο για προσομοίωση ενός φ/β στοιχείου είναι το πιο κάτω [3]:



Εικόνα 1.6.1α: Απλό μοντέλο προσομοίωσης φωτοβολταϊκού στοιχείου

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_o \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

όπου

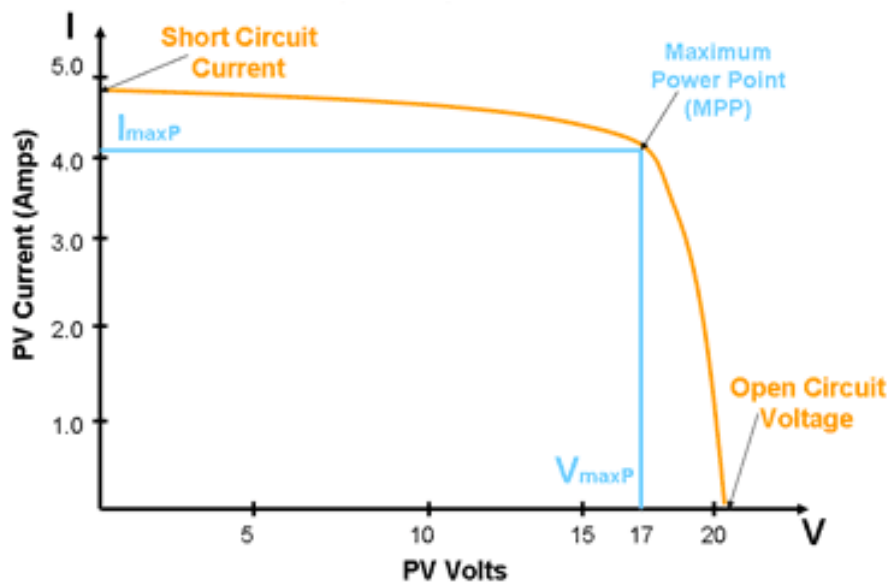
I_{cell} : ρεύμα κελιού

I_{ph} : φωτορεύμα, ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

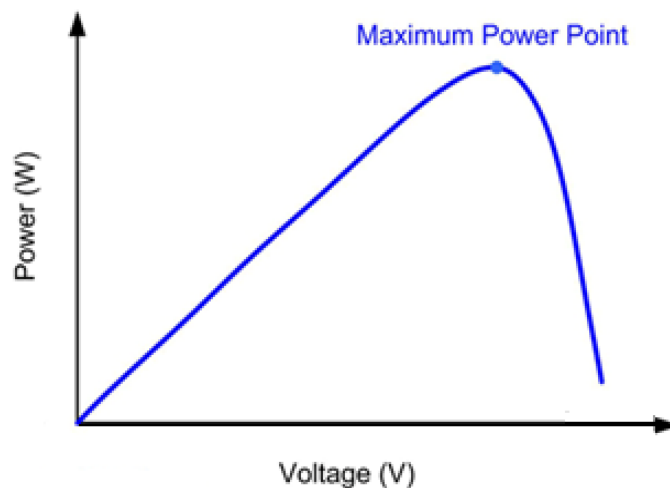
I_D : ρεύμα διόδου
 I_0 : ρεύμα διαρροής της διόδου
 q : φορτίο ηλεκτρονίου
 V : τάση στα άκρα της διόδου
 k : σταθερά Boltzmann
 T : θερμοκρασία σε Kelvin

Η παραγωγή ρεύματος ενός φ/β στοιχείου εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας (I_{cell}) και τη θερμοκρασία (T).

Ένα φωτοβολταϊκό κελί μπορεί να μοντελοποιηθεί με τις καμπύλες έντασης – τάσης ($I - V$) ή ισχύος-τάσης ($P - V$).



Εικόνα 1.6.1β: Καμπύλη έντασης – τάσης ($I - V$)



Εικόνα 1.6.1γ: Καμπύλη ισχύος-τάσης ($P - V$)

Οι πιο πάνω καμπύλες έχουν τα ακόλουθα τρία χαρακτηριστικά σημεία:

- Τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}): Τα άκρα του φ/β κελιού/πλασίου είναι ανοιχτοκυκλωμένα. Η τάση που αναπτύσσεται στα άκρα του ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος ($V_{oc}=0,6V$). Επιπλέον, η ισχύς και η ένταση του ρεύματος που προωθούνται στο δίκτυο είναι μηδέν [3].
- Ρεύμα βραχυκυκλώσεως (I_{sc}): Τα άκρα του φ/β κελιού/πλασίου είναι βραχυκυκλωμένα. Το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης και στην κατάσταση αυτή, η τάση και η ισχύς προς το δίκτυο είναι μηδενικά [3].
- Σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος (P_m ή MPP): Το φ/β κελί/πλαίσιο παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ σε συγκεκριμένες συνθήκες. Οι καμπύλες ισχύος – τάσεως ($P - V$) δίνονται για συγκεκριμένες συνθήκες δοκιμών, γνωστές ως Standard Test Conditions (STC), οι οποίες αντιστοιχούν σε καθορισμένες τιμές για ένταση ακτινοβολίας ($1000W/m^2$), θερμοκρασία κελιού ($25^{\circ}C$) και μάζα αέρα (1,5), η οποία είναι η παράμετρος που σχετίζεται με τη διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας διαμέσου της ατμόσφαιρας [3].

1.6.2 Κατασκευαστικά τεχνικά χαρακτηριστικά πλαισίου

Οι προδιαγραφές κάθε φ/β πλαισίου δίνονται σε Standard Test Conditions [2] (Θερμοκρασία κελιού = $25^{\circ}C$, Ηλιακή ακτινοβολία = $1KW/m^2$, Μάζα αέρα = 1,5)

Power at STC (P_m)	Ισχύς Αιχμής
Maximum power voltage (V_m)	Τάση στην Μεγίστη Ισχύ
Maximum power current (I_m)	Ρεύμα στην Μεγίστη Ισχύ
Open circuit voltage (V_{oc})	Τάση Ανοικτού Κυκλώματος
Short circuit current (I_{sc})	Ρεύμα Βραχυκυκλώματος
Module efficiency (%)	Απόδοση πλαισίου
Temperature coefficient	Συντελεστής Θερμοκρασίας για το P_m , V_{oc} και I_{sc} σε %/K
Tolerance	Ανοχή (%)

1.7 Τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων/πλασίων

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες ημιαγωγών υλικών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Οι επικρατέστερες τεχνολογίες παρόλα αυτά στην αγορά των φωτοβολταϊκών είναι δύο, το κρυσταλλικό πυρίτιο (crystalline silicon) και το λεπτό υμένιο (thin film) [3].

1.7.1 Κρυσταλλικό πυρίτιο

Τα πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από φ/β κελιά, τα οποία είναι ειδικά επεξεργασμένα στρώματα πυριτίου για την προσθήκη προσμίξεων. Στη συνέχεια ενώνονται μεταξύ τους για να δημιουργήσουν ένα φ/β πλαίσιο. Το κρυσταλλικό πυρίτιο αποτελεί την πιο παλιά και διαδεδομένη τεχνολογία στην αγορά των φωτοβολταϊκών.

Τα πλαίσια κρυσταλλικού πυριτίου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Μονοκρυσταλλικό πυρίτιο (c-Si): Τα κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από έναν μεγάλο κρυσταλλικό δίσκο (wafer) πυριτίου. Απαιτούν την υψηλότερη καθαρότητα του πυριτίου και έχουν την πιο πολύπλοκη διαδικασία κατασκευής. Η απόδοσή τους είναι υψηλή, της τάξης του 15-18%, ωστόσο παρουσιάζουν και υψηλότερο κόστος. Τα φ/β κελιά κατασκευάζονται σε σχήμα κύκλου ή τετράγωνα και το χρώμα τους είναι συνήθως βαθύ μπλε έως μαύρο (με αντί-ανακλαστική επίστρωση) ή γκρι (χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση) [3].



Εικόνα 1.7.1α: Φωτοβολταϊκά κελιά μονοκρυσταλλικού πυριτίου

- Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (Multi c-Si): Τα κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου κατασκευάζονται από δίσκους (wafers) πυριτίου που κόβονται από τετραγωνισμένους ράβδους πυριτίου. Η μέθοδος κατασκευής τους απαιτεί πολύ μικρότερη ακρίβεια και κόστος σε σχέση με τα μονοκρυσταλλικά κελιά. Η απόδοσή τους κυμαίνεται από 13% έως 16% και είναι φθηνότερα από τα μονοκρυσταλλικά κελιά. Κατασκευάζονται συνήθως σε τετράγωνο σχήμα, ενώ το χρώμα τους είναι μπλε (με αντί-ανακλαστική επίστρωση) ή γκρι-ασημί (χωρίς αντί-ανακλαστική επίστρωση) [3].



Εικόνα 1.7.1β: Φωτοβολταϊκά κελιά πολυκρυσταλλικού πυριτίου

1.7.2 Λεπτό υμένιο (Thin film)

Τα πλαίσια αυτού του τύπου κατασκευάζονται τοποθετώντας λεπτές στρώσεις ημιαγωγού υλικού πάνω σε διάφορες επιφάνειες (συνήθως γυαλί). Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε με στόχο τη χρήση μικρότερων ποσοτήτων ημιαγωγού υλικού. Η απόδοση αυτών των φ/β κελιών είναι αρκετά μικρότερη (5-7%), αλλά και με μικρότερο κατασκευής. Για να επιτευχθεί η ίδια παραγωγική ικανότητα ενός φ/β συστήματος, απαιτούνται περισσότερα πλαίσια και επομένως μεγαλύτερη διαθέσιμη επιφάνεια για την εγκατάστασή τους [3].

Τα πλαίσια λεπτού υμενίου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Άμορφο πυρίτιο (αSi): Αποτελούν την πιο συνηθισμένη μορφή και έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως σε ηλεκτρονικά προϊόντα ευρείας κατανάλωσης (π.χ. υπολογιστές τσέπης). Πλεονέκτημά τους αποτελεί το γεγονός ότι το άμορφο πυρίτιο μπορεί να καταλαμβάνει λιγότερο από 1% του πάχους ενός κρυσταλλικού κελιού. Επιπλέον, τα κελιά άμορφου πυριτίου δίνουν τη δυνατότητα κατασκευής εύκαμπτων φωτοβολταϊκών πάνελ. Ωστόσο, η ικανότητά τους στην μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι η λιγότερο αποτελεσματική (10,4%) [3].



Εικόνα 1.7.2α: Φωτοβολταϊκά κελιά άμορφου πυριτίου

- Καδμίου – Τελλουρίου (CdTe): Κάδμιο – Τελλούριο ονομάζεται η ένωση που σχηματίζουν τα ημιαγωγά υλικά καδμίου – τελλουρίου. Είναι ο πιο κοινός τύπος της κατηγορίας thin film και ο πιο οικονομικός στην κατασκευή. Επιπλέον έχουν την καλύτερη και αποδοτικότερη συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες και σε συνθήκες χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας (16,5%). Μειονέκτημα τους αποτελεί το γεγονός της χρήσης του σπάνιου μετάλλου τελλούριο. Η χρήση του καδμίου επιβάλλει την αναγκαστική ανακύκλωση τους μετά το πέρας της ζωής τους [3].



Εικόνα 1.7.2β: Φωτοβολταϊκά κελιά καδμίου – τελλουρίου

- Κελιά χαλκού – Ινδίου/Γαλλίου – Δισεληνιούχου (κελιά CIGS): Αποτελεί μία από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες, όπου κελιά λεπτού υμενίου κατασκευάζονται από έναν συνδυασμό χαλκού-ινδίου-δισεληνιούχου ή χαλκού-γαλλίου-δισεληνιούχου. Η απόδοσή τους είναι η υψηλότερη για τα φωτοβολταϊκά κελιά του είδους (19,9%) [3].



Εικόνα 1.7.2γ: Φωτοβολταϊκά κελιά χαλκού – ινδίου/γαλλίου – δισεληνιούχου

1.7.3 Άλλοι τύποι φωτοβολταϊκών κελιών

Εκτός των παραπάνω συναντώνται σε μικρότερο βαθμό ή σε εργαστηριακό επίπεδο:

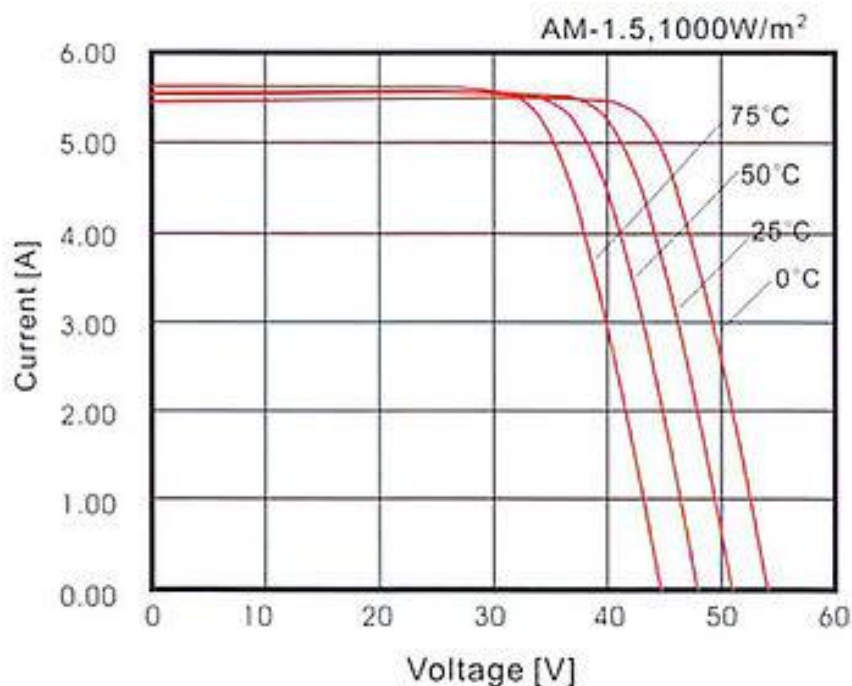
- Κελιά Γαλλίου-Αρσενικούχου (GaAs): Αποτελούν κελιά υψηλής απόδοσης (έως και 36%), ωστόσο έχουν αυξημένο κόστος αγοράς.
- Οργανικά/πολυμερή κελιά: Αποτελούν μία σχετικά νέα τεχνολογία. Τα οργανικά κελιά λειτουργούν με διαφορετικό τρόπο σε σχέση με τις άλλες τεχνολογίες, αφού αντί για ημιαγώγιμες p-n επαφές, τα οργανικά κελιά χρησιμοποιούν οργανικά υλικά που λειτουργούν ως δότες και δέκτες ηλεκτρονίων. Το μεγάλο πλεονέκτημα χρήσης οργανικών υλικών είναι ότι επιτρέπουν την μεγάλης κλίμακας, χαμηλής θερμοκρασίας κατασκευή εύκαμπτων ηλιακών κελιών σε υποστρώματα πλαστικών. Η απόδοση των οργανικών κελιών είναι της τάξης του 5-6% [1, 3, 5].

1.8 Επίδραση θερμοκρασίας, έντασης ακτινοβολίας και σκίασης

Οι δύο βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή ισχύος στα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και η θερμοκρασία.

1.8.1 Επίδραση της θερμοκρασίας

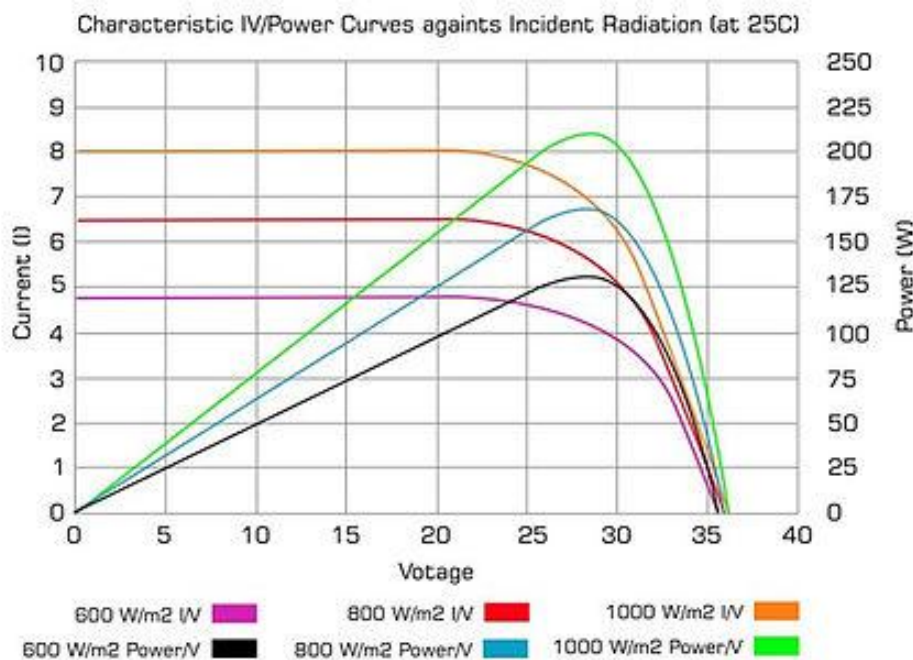
Όσο πιο υψηλή είναι η θερμοκρασία, τόσο αυξάνεται η τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) και μειώνεται η παραγόμενη ισχύς, λόγω μείωσης της τάσης V_m . Το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) και το ρεύμα I_m παραμένουν θεωρητικά αμετάβλητα. Επομένως, η βέλτιστη λειτουργία ενός φ/β συστήματος είναι σε ηλιόλουστες ημέρες, με σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες [5].



Εικόνα 1.8.1: Επίδραση της θερμοκρασίας της ηλιακής ακτινοβολίας

1.8.2 Επίδραση της έντασης ακτινοβολίας

Όσο πιο έντονη είναι η ηλιακή ακτινοβολία, τόσο αυξάνεται το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}) και η παραγόμενη ισχύ, λόγω αύξησης του I_m . Η τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{oc}) και η τάση V_m παραμένουν θεωρητικά αμετάβλητες [5].



Εικόνα 1.8.2: Επίδραση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας

1.8.3 Επίδραση της σκίασης

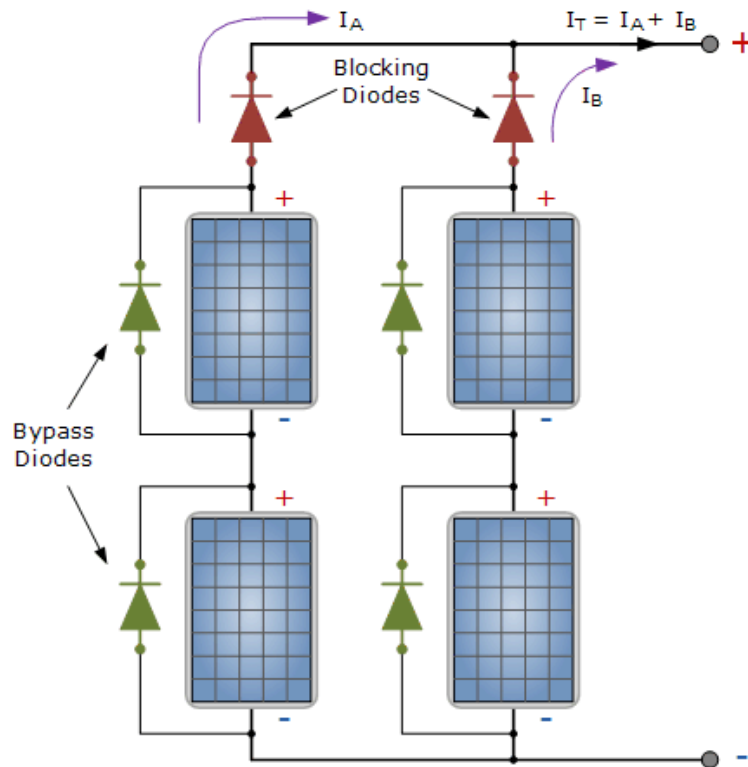
Είναι πιθανό τα φ/β πλαίσια να σκιάζονται μερικώς ή ολικώς, εξαιτίας εμποδίων (δέντρα, κεραίες, πινακίδες κτλ.) Η έλλειψη ηλιακής ακτινοβολίας σε μέρος ή όλο το πλαίσιο, συνεπάγεται μερική ή ολική απώλεια φωτορεύματος, λόγω της μείωσης ή μηδενισμού το ρεύματος του φ/β κελιού και της συνδεσμολογίας σε σειρά [6]. Επομένως, μειώνεται ή μηδενίζεται και η παραγόμενη ενέργεια σε όλη τη σειρά του πλαισίου.

Επιπλέον, όταν σκιαστεί είναι στοιχείο σε ένα πλαίσιο, παύει να άγει με αποτέλεσμα να διακόψει το ρεύμα σε όλα τα στοιχεία που βρίσκονται στην ίδια σειρά. Σύμφωνα με το Νόμο του Kirchhoff για τις τάσεις, το άθροισμα όλων των τάσεων των στοιχείων σε σειρά θα παρουσιαστεί στα άκρα του σκιασμένου στοιχείου και θα το καταστρέψει. Αυτή η περίπτωση ονομάζεται φαινόμενο Hot Spot [2].

Δίοδος παράκαμψης (Bypass diode): Αυτή η δίοδος τοποθετείται παράλληλα με την σειρά των φ/β στοιχείων, έτσι ώστε να άγει σε περίπτωση Hot Spot. Η δίοδος παράκαμψης είναι ανάστροφα πολωμένη όταν το φ/β στοιχείο δεν είναι σκιασμένο και άγει [2].

Δίοδος αντεπιστροφής (Blocking diode): Δεν επιτρέπει την αγωγή από μία εξωτερική πηγή προς το φ/β στοιχείο/πλαίσιο όταν αυτό δεν φωτίζεται.

Η χρήση διόδων παράκαμψης ή αντεπιστροφής για κάθε κελί είναι πολύ δαπανηρή και συνήθως τα δύο αυτά είδη διόδων τοποθετούνται ανά ομάδες φ/β στοιχείων/πλαισίων.



Εικόνα 1.8.3: Δίοδοι παράκαμψης και δίοδοι αντεπιστροφής σε φωτοβολταϊκά πλαίσια

1.9 Απόδοση φωτοβολταϊκών στοιχείων/πλαισίων

Η απόδοση ενός φ/β στοιχείου/πλαισίου καθορίζεται από την ικανότητα του να μετατρέπει την ενεργεια από την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρισμό. Αυτό επιτυγχάνεται μόνο στις συχνότητες που τα φωτόνια περιέχουν τουλάχιστον ίση ενέργεια με αυτή που χρειάζεται για να απελευθερωθεί ένα ηλεκτρόνιο από την περιοχή κοντά στην επαφή. Περισσότερη ή λιγότερη ενέργεια μετατρέπεται σε ανεπιθύμητη θερμότητα [2].

Απόδοση = Μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια εξόδου / Προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια, δηλαδή

$$\eta\% = \frac{V_m I_m}{E \cdot S}$$

όπου E = Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας (W/m^2), S = Εμβαδόν πλαισίου (m^2), V_m = Τάση στη μέγιστη ισχύ, I_m = Ρεύμα στη μέγιστη ισχύ

1.9.1 Παράγοντες μείωσης της απόδοσης

Η απόδοση ενός πλαισίου επηρεάζεται από τους πιο κάτω παράγοντες:

- Γήρανση
- Ρύπανση
- Κλιματολογικά δεδομένα
- Θερμοκρασία
- Δίοδος παράκαμψης
- Προσανατολισμός και κλίση [2, 6, 7]

1.9.2 Παρακολούθηση σημείου βέλτιστης λειτουργίας (MPPT)

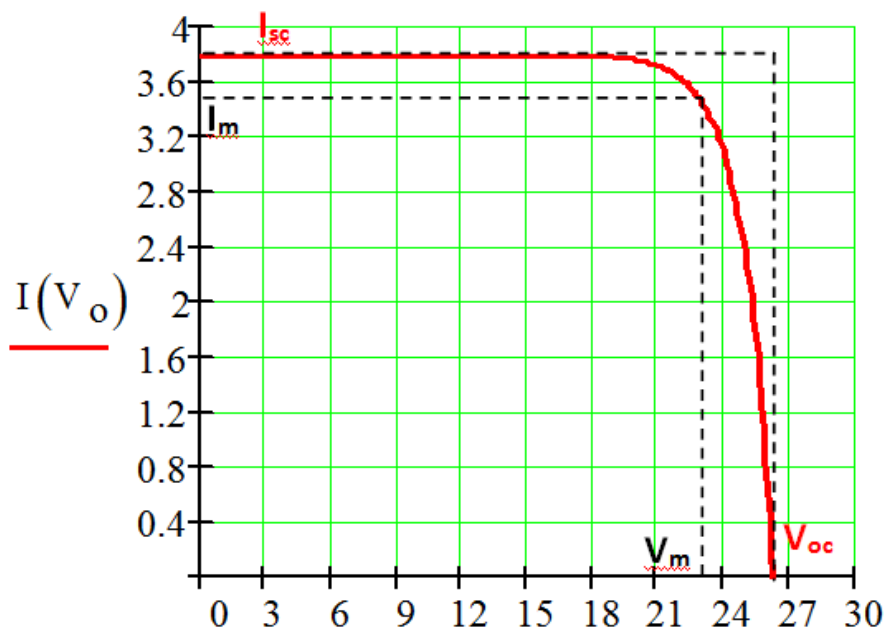
Η παρακολούθηση του σημείου βέλτιστης λειτουργίας (Maximum Power Point Tracking), είναι η τεχνική που χρησιμοποιείται ώστε να μεταβάλλεται το σημείο λειτουργίας (χαρακτηριστική έντασης – τάσης) των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ώστε να ανταποκρίνεται κάθε φορά στο σημείο που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ.

Η ισχύς ενός φωτοβολταϊκού πάνελ, η οποία προκύπτει από το γινόμενο της τάσης και της έντασης ρεύματος ($P = V * I$), δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται σε σχέση με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Οι κατασκευαστές των πλαισίων παρέχουν στα τεχνικά εγχειρίδια πληροφορίες για την μέγιστη ισχύ (P_m) στις πρότυπες συνθήκες ελέγχου (STC). Σε οποιοδήποτε άλλες συνθήκες η μέγιστη ισχύς θα μεταβληθεί. Συγκεκριμένα, θα μειωθεί με τη μείωση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας και την αύξηση της θερμοκρασίας [3].

1.9.3 Συντελεστής Πληρώσεως (Fill Factor)

Όταν το φ/β στοιχείο/πλαίσιο συνδεθεί με κάποιο φορτίο, η σχέση τάσεως εξόδου με το ρεύμα εξόδου δεν είναι γραμμική. Η μέγιστη ισχύς εξόδου επιτυγχάνεται σε συγκεκριμένο σημείο που καθορίζεται από το φορτίο στις τιμές V_m και I_m . Ο Συντελεστής Πληρώσεως είναι μια ένδειξη για το πόσο πλησιάζει η μέγιστη τιμή ισχύος (Ισχύς Αιχμής) με την ισχύ που η φωτοβολταϊκή πηγή θα μπορούσε να παράγει αν ήταν μια σταθερή πηγή ρεύματος [2].

$$\text{Fill Factor} = \frac{I_m V_m}{I_{sc} V_{oc}}$$



Εικόνα 1.9.3: Καμπύλη έντασης – τάσης (I – V)

1.10 Πρακτικοί κανόνες χωροθέτησης

Για μέγιστη ενεργειακή απόδοση των φ/β συστημάτων, πρέπει να εξεταστεί η πιο κατάλληλη τοποθεσία για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, η λεγόμενη χωροθέτηση. Οι δύο βασικές παράμετροι που πρέπει να ελεγχθούν είναι ο προσανατολισμός και η κλίση που θα πρέπει να έχουν τα φ/β πλαίσια και εξαρτώνται άμεσα από το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής που πρόκειται να εγκατασταθούν [5].

Η κλίση στην οποία θα τοποθετηθούν τα πλαίσια επιδρά στη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτινών στην επιφάνεια τους [3], όσον αφορά την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και όχι την έμμεση, η οποία έχει τυχαίες κατευθύνσεις. Επιπλέον, η θέση του ήλιου κατά τη διάρκεια της ημέρας και των εποχών μεταβάλλεται. Ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της κάθε περιοχής, υπάρχει μια βέλτιστη κλίση τοποθέτησης ώστε η ενεργειακή απολαβή των πλαισίων να είναι η μέγιστη. Στην Κύπρο η βέλτιστη κλίση, σε σχέση πάντοτε με το γεωγραφικό πλάτος του νησιού, είναι γύρω στις 27-28° [7].

Ο προσανατολισμός των φ/β πλαισίων έχει επίδραση μόνο τις ώρες που τα πλαίσια βρίσκονται υπό το φως του ήλιου [3]. Ο βέλτιστος προσανατολισμός για το βόρειο ημισφαίριο της γης είναι ο νότιος και επομένως για το νότιο ημισφαίριο, ο βόρειος.

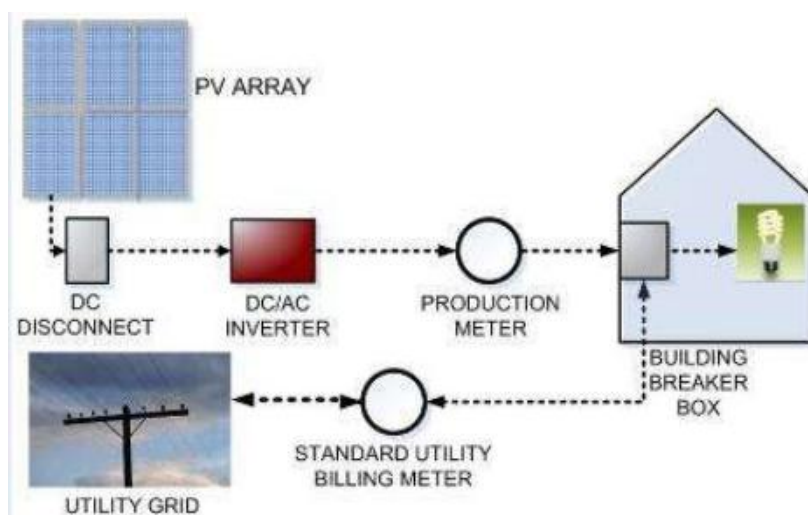
Οι κανόνες χωροθέτησης αφορούν εγκαταστάσεις με σταθερά συστήματα στήριξης. Υπάρχουν συστήματα ανίχνευσης της πορείας του ήλιου γνωστά ως ηλιακοί ανιχνευτές (solar trackers), οι οποίοι προσαρμόζουν τη θέση των πλαισίων ανά σύντομα χρονικά διαστήματα (5 – 10 λεπτά) έτσι ώστε οι επιφάνειες των φ/β να δέχονται τη μέγιστη δυνατή ηλιακή ακτινοβολία. Οι ανιχνευτές αυτοί χωρίζονται στους ανιχνευτές μονού άξονα (κίνηση σε ένα άξονα: σταθερή κλίση, μεταβαλλόμενος προσανατολισμός) και διπλού άξονα (κίνηση σε δύο άξονες: μεταβαλλόμενος προσανατολισμός και μεταβαλλόμενη κλίση).

Βασικά κριτήρια επιλογής χώρου εγκατάστασης φ/β συστήματος για την Κύπρο:

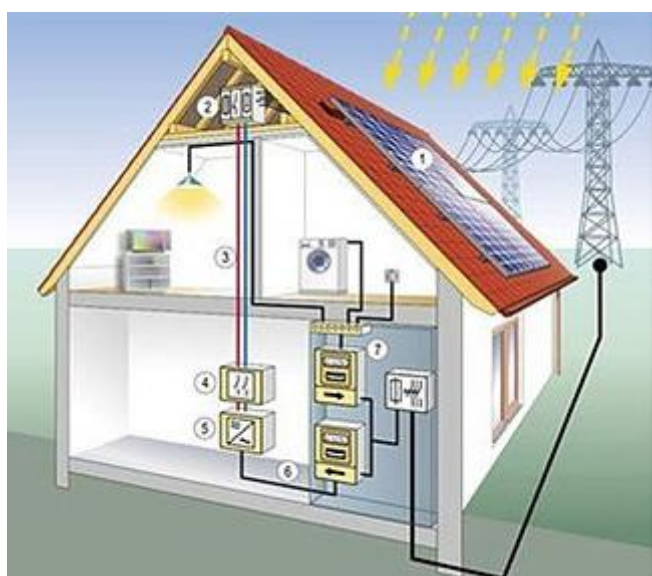
- Ο προσανατολισμός της οροφή ή του οικοπέδου (όσο πιο μικρή απόκλιση από τον νότο).
- Η κλίση της οροφής ή του οικοπέδου πρέπει να είναι τέτοια που να επιτρέπει την τοποθέτηση των ΦΒ πλαισίων υπό κλίση γύρω στις 27°.
- Μορφολογία του εδάφους (μη ύπαρξη πετρωμάτων, βράχων κτλ.)
- Επιλογή χώρου όπου δεν υπάρχουν γύρω δέντρα ή άλλα εμπόδια πιθανής σκίασης.
- Ευκολία πρόσβασης στο οικόπεδο.
- Απόσταση από το δίκτυο ή από υποσταθμό της ΑΗΚ.
- Επιλογή χώρου που δεν εμπίπτει σε ζώνη προστασίας αρχαιολογικού χώρου ή σε ειδική ζώνη αερολιμένα, δεν βρίσκεται σε προστατευμένη περιοχή φυσικού καλούς ή κοντά σε παραδοσιακό οικισμό ή μνημείο [4, 7, 8].

1.11 Διασυνδεδεμένα (Grid connected) και Αυτόνομα συστήματα φ/β πλαισίων

Τα φ/β συστήματα κατηγοριοποιούνται σε διασυνδεδεμένα με το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο (στην περίπτωση της Κύπρου την ΑΗΚ) ή αυτόνομα. Στα διασυνδεδεμένα φ/β συστήματα, το φ/β σύστημα χρησιμοποιείται για να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες της εγκατάστασης και το περίσσειμα της ενέργειας που παράγεται πωλείται μέχρι πρότινος στην ΑΗΚ, αφού πρώτα ικανοποιούνται οι ανάγκες του πελάτη/παραγωγού σε ηλεκτρική ενέργεια. Πλέον, στο σύστημα συμψηφισμού (Net Metering), το περίσσειμα ενέργειας παρέχεται στην ΑΗΚ δωρεάν. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του φ/β συστήματος δεν επαρκεί για την κάλυψη των αναγκών της εγκατάστασης, οι ανάγκες συμπληρώνονται από το δίκτυο. Τόσο η ενέργεια που προσφέρει ο πελάτης/παραγωγός στο ηλεκτρικό δίκτυο, όσο και αυτή που απορροφά από αυτό για προσωπική κατανάλωση, μεταφέρονται μέσω της ίδιας ηλεκτρικής παροχής [5].

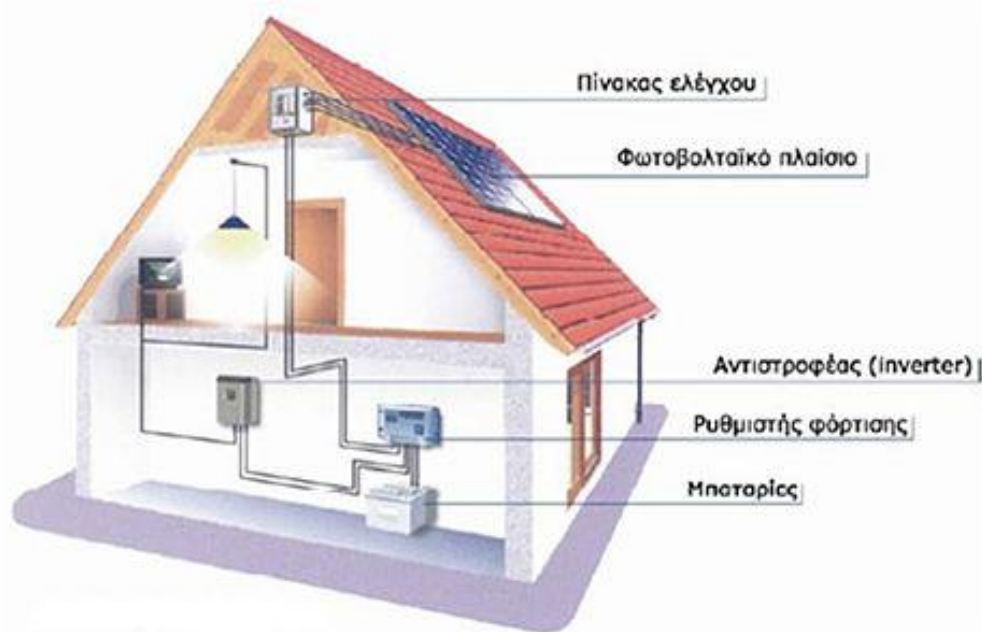


Εικόνα 1.11α: Διάγραμμα συστήματος Net Metering



Εικόνα 1.11β: Διασυνδεδεμένο οικιακό φωτοβολταϊκό σύστημα

Στα αυτόνομα, μη διασυνδεδεμένα συστήματα, ο παραγωγός έχει την ευχέρεια να καταναλώσει όλη την ενέργεια που παράγει, λόγω του ότι δεν συνδέεται με το εθνικό δίκτυο. Δεν τροφοδοτεί, αλλά ούτε και τροφοδοτείται δηλαδή από το δίκτυο της ΑΗΚ. Για ένα τέτοιο, απομονωμένο σύστημα, είναι αναγκαία ακόμα πιο προσεκτική μελέτη ως προς την ισχύ των φ/β πλαισίων που αναμένεται να εγκατασταθούν [3], όπως επίσης και για την αποθήκευση της ενέργειας, αφού όταν τα φ/β δεν παράγουν ενέργεια, ενέργεια που αποθηκεύτηκε κατά τη διάρκεια της ημέρας χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της εγκατάστασης. Τα αυτόνομα συστήματα απαιτούν επιπλέον εξοπλισμό σε σχέση με τα διασυνδεδεμένα (χρήση μπαταριών για την αποθήκευση ενέργειας) και δεν εγγυώνται τη συνεχή και αδιάλειπτη τροφοδότηση της εγκατάστασης. Επίσης, η μη επιμελής συντήρηση των συστημάτων αυτών θα μπορούσε να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες καταστάσεις, όπως έλλειψη ενέργειας.



Εικόνα 1.11γ: Αυτόνομο οικιακό φωτοβολταϊκό σύστημα

1.12 Συστήματα στήριξης

Τα συστήματα στήριξης χωρίζονται ανάλογα με τον χώρο εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος.

1.12.1 Εγκατάσταση σε κεκλιμένη στέγη ή οριζόντια οροφή

Η εγκατάσταση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος σε στέγη έχει άμεση σχέση με το είδος της στέγης, αν είναι δηλαδή από κεραμίδια και το είδος τους ή αν είναι οριζόντια οροφή. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιούνται ειδικά στηρίγματα και ράγες. Τα στηρίγματα συνήθως κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα ή αλουμίνιο [3]. Για την εγκατάσταση τους, απαιτείται η διαπίστωση της στατικής τους επάρκειας και της αντοχής τους σε ανεμικές πιέσεις, έπειτα από τεχνική μελέτη.



Εικόνα 1.12.1α: Φωτοβολταϊκά πλαίσια εγκατεστημένα σε κεκλιμένη στέγη



Εικόνα 1.12.1β: Φωτοβολταϊκά πλαίσια εγκατεστημένα σε οροφή

1.12.2 Σταθερές βάσεις

Οι σταθερές βάσεις κατασκευάζονται συνήθως από αλουμίνιο ή ανοξείδωτο χάλυβα [3]. Εγκαθίστανται έπειτα από τεχνική μελέτη ώστε να διαπιστωθεί η στατική τους επάρκεια και η αντοχή τους σε ανεμικές πιέσεις. Οι βάσεις τοποθετούνται στο εδάφος είτε με σκυροδέτηση είτε με φύτευση στο έδαφος.

Η σκυροδέτηση των βάσεων γίνεται συνήθως σε δοκάρι, το οποίο συνδέει όλη τη σειρά των βάσεων. Το δοκάρι είναι συνήθως από οπλισμένο σκυρόδεμα ή πέλματα από σκυρόδεμα, τοποθετημένα κατάλληλα ώστε να επιτρέπουν το βίδωμα των υποδοχών των βάσεων. Η μέθοδος αυτή αυξάνει το κόστος της εγκατάστασης.



Εικόνα 1.12.2α: Φωτοβολταϊκά πλαίσια εγκατεστημένα μέσω σκυροδέτησης σε οροφή

Η φύτευση στο έδαφος γίνεται συνήθως σε βάθος 0,5 – 1,5 μέτρο, όπου τοποθετούνται πάσσαλοι, στους οποίους στη συνέχεια τοποθετείται η βάση.



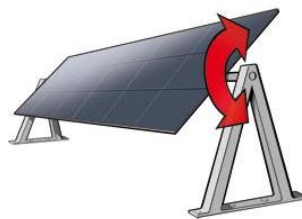
Εικόνα 1.12.2β: Φωτοβολταϊκά πλαίσια εγκατεστημένα μέσω φύτευσης στο έδαφος

1.12.3 Ηλιακοί ανιχνευτές (Solar trackers)

Προσανατολισμός: Το πλαίσιο αποδίδει τη μέγιστη απόδοση του όταν οι ακτίνες του ήλιου είναι κάθετες στην επιφάνεια του [4]. Ο ήλιος όμως αλλάζει θέση συνέχεια κινούμενος από την Ανατολή στην Δύση ως προς τον Νότο (για το βόρειο ημισφαίριο). Επομένως, για περισσότερη απορρόφηση της ενέργειας της ηλιακής ακτινοβολίας, τα φ/β πλαίσια τοποθετούνται σε βάσεις που ακολουθούν την πορεία του ήλιου, μετακινούνται δηλαδή ανάλογα με τη θέση του ήλιου.

Τα συστήματα ακολουθίας της πορείας του ήλιου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Μονοαξονικό σύστημα (single axis): Η κίνηση των πλαισίων γίνεται σε έναν άξονα (Ανατολή – Δύση ή Βορράς – Νότος). Τα συστήματα αυτά επιτυγχάνουν αύξηση της παραγωγής περίπου κατά 20 – 25% σε σχέση με τα συστήματα σταθερών βάσεων.



Εικόνα 1.12.3α: Μονοαξονικό σύστημα

- Διαξονικό σύστημα (dual axis): Η κίνηση των πλαισίων γίνεται σε δύο άξονες, τον οριζόντιο (αζιμούθιο) και τον κάθετο (κλίση).



Εικόνα 1.12.3β: Διαξονικό σύστημα



Εικόνα 1.12.3γ: Διαξονικό σύστημα πραγματικών διαστάσεων

Η ανίχνευση της θέσης του ήλιου επιτυγχάνεται με δύο τρόπους. Ο ένας τρόπος είναι με τη χρήση ηλιακών αισθητήρων, οι οποίοι απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και επομένως αντιλαμβάνονται τη θέση του ήλιου.

Ο άλλος τρόπος είναι μέσω λογισμικού, από αστρονομικά δεδομένα, βάσει των οποίων υπολογίζεται ως προς τις γεωγραφικές συντεταγμένες της περιοχής η θέση και πορεία του ήλιου, για κάθε μέρα ενός έτους [3, 9, 10].

Λόγω του μεγέθους τους και των κινήσεών τους, οι ηλιακοί ανιχνευτές είναι πιο ευάλωτοι σε σχέση με συστήματα σταθερών βάσεων, όσον αφορά πιέσεις από τον άνεμο [5]. Για το λόγο αυτό σε μερικά φωτοβολταϊκά συστήματα, όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει ένα όριο για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, τα συστήματα κίνησης, για λόγους προστασίας των φωτοβολταϊκών, οριζοντιώνουν ως προς το έδαφος την επιφάνεια των πλαισίων [9, 10].

2 Σχεδιασμός διαξονικής βάσης φωτοβολταϊκού πλαισίου

2.1 Ανάλυση κατασκευής

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται το μηχανολογικό και ηλεκτρολογικό μέρος της εργασίας και παρουσιάζονται τα σχέδια του μοντέλου. Η όλη κατασκευή του μοντέλου υλοποιεί τον σκοπό του, ο οποίος είναι η κίνηση φ/β πλαισίου σε δύο άξονες με βάση την κατάλληλη θέση του πλαισίου ως προς τον ήλιο για μέγιστη απορρόφηση ενέργειας.

Το σύστημα αποτελείται από τα εξής μέρη:

- Μηχανολογικό
 - Τα μοτέρ κίνησης (δύο μικρά stepper motors για την επίτευξη της κίνησης του φ/β πλαισίου στον οριζόντιο και κατακόρυφο άξονα)
 - Την κατασκευή των μηχανικών ενώσεων και στηρίξεων
 - Το κύκλωμα αισθητήρων φωτός
 - Το ανεμόμετρο
- Ηλεκτρολογικό
 - Πλακέτα Arduino UNO Rev3
 - Τροφοδοτικό 5V/12V
 - Οδηγοί EasyDrivers για stepper motors
 - Δύο δίοδοι φωτοεκπομπής (LED)
 - Καλωδιώσεις

2.2 Γενικά χαρακτηριστικά μοντέλου

Το μοντέλο αυτό δεν χρησιμοποιεί τις υφιστάμενες μεθόδους που χρησιμοποιούν τέτοιου είδους φωτοβολταϊκά συστήματα για την κίνηση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, όπως για παράδειγμα τις υδραυλικές/πνευματικές μεθόδους (έμβολα) ή τους μάντες, αλλά και για τη λήψη των δεδομένων. Η λήψη των δεδομένων γίνεται από τέσσερις αισθητήρες φωτός (σε δύο ζεύγη) και το ανεμόμετρο. Στην συνέχεια, με την κατάλληλη επεξεργασία από το κύκλωμα ελέγχου, το πλαίσιο κινείται στην κατάλληλη θέση, η οποία είναι η κάθετη επιφάνεια του πλαισίου στις ακτίνες του ήλιου. Είναι δηλαδή ένα active tracker, το οποίο λειτουργεί ανάλογα με το περιβάλλον και όχι ανάλογα με δεδομένα που λαμβάνονται από το διαδίκτυο για την προβλεπόμενη θέση του ήλιου, τεχνική που χρησιμοποιούν τα υφιστάμενα συστήματα στην Κύπρο.

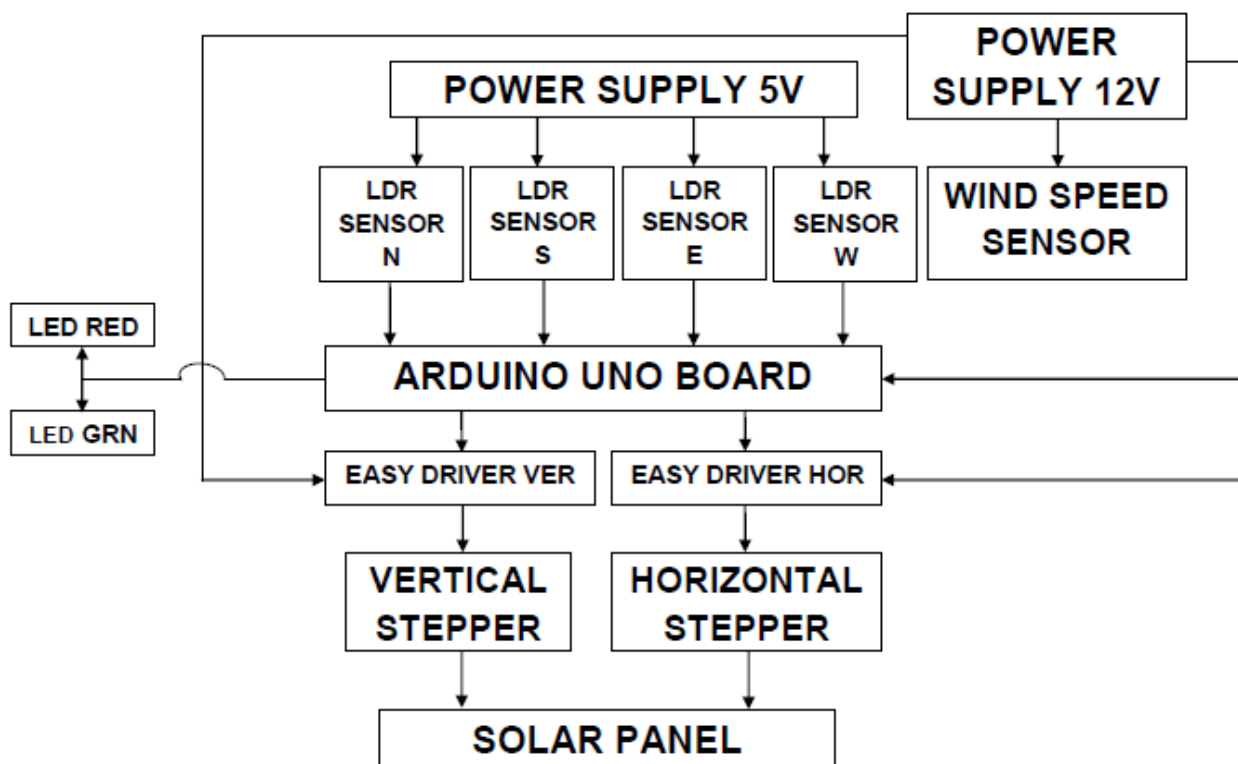
Αφού επιτευχθεί η λήψη δεδομένων από τους τέσσερις ενσωματωμένους αισθητήρες φωτός και το ανεμόμετρο, στην συνέχεια, κατόπιν επεξεργασίας των δεδομένων, οι κινητήρες κινούν το ενσωματωμένο φ/β πλαίσιο στην κατάλληλη θέση για μέγιστη απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας. Συγκρίνονται τα ζεύγη των αισθητήρων φωτός. Εάν για παράδειγμα ο πάνω αισθητήρας φωτός έχει μεγαλύτερη τάση από τον κάτω, πράγμα που σημαίνει πως δέχεται περισσότερη ακτινοβολία, τότε ο κινητήρας του κάθετου άξονα ρυθμίζει την κλίση κατάλληλα, έτσι ώστε οι δύο τάσεις να ισορροπήσουν. Με τον ίδιο τρόπο, εάν ο κάτω αισθητήρας φωτός έχει τιμή μεγαλύτερη από τον πάνω, τότε ο ίδιος κινητήρας στρέφει το

πλαίσιο προς τα κάτω, έτσι ώστε και πάλι οι δύο τάσεις να γίνουν ίσες. Παρομοίως και για τον οριζόντιο άξονα. Με αυτό τον τρόπο η επιφάνεια του πλαισίου γίνεται κάθετη ως προς τις ακτίνες του ήλιου, το οποίο είναι και το ζητούμενο. Το ανεμόμετρο δέχεται πιέσεις από τον αέρα, οι οποίες περιστρέφουν την πτερωτή του. Παράγεται τάση από 0 (ελάχιστο) μέχρι 5 Volts (μέγιστο) ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα, η οποία στέλνεται ως είσοδος στον μικροελεγκτή. Στην περίπτωση που η τιμή του ανεμόμετρου ξεπεράσει το ρυθμισμένο όριο αέρα, τότε οι κινητήρες κινούνται κατάλληλα για να θέσουν το πλαίσιο πίσω στην αρχική του θέση.

Το μοντέλο αυτό λειτουργεί αυτόματα και αυτόνομα και χρησιμοποιεί επεξεργαστή για τον προγραμματισμό του και την επεξεργασία των δεδομένων. Μια ακόμη λειτουργία του μοντέλου αυτού είναι η οριζοντίωση του πλαισίου το βράδυ όταν η ηλιοφάνεια είναι μηδαμινή, για την αποφυγή ανεπιθύμητων ανεμικών πιέσεων. Κατά την ανατολή του ηλίου το πλαίσιο επιστρέφει στην ιδανική θέση του ήλιου.

Ένα ενσωματωμένο τροφοδοτικό τάσης χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας. Επιπλέον, δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στην κίνηση του πλαισίου όσον αφορά και τους δύο άξονες, κάτι που κρίνεται ως πολύ σημαντικό, λόγω του ότι στην υπάρχουσα αγορά των φ/β συστημάτων όλες οι βάσεις τέτοιου τύπου έχουν περιορισμούς στις κινήσεις τους. Το μοντέλο αποτελείται από μέταλλο, το οποίο προσδίδει στο όλο σύστημα ασφάλεια και ισορροπία.

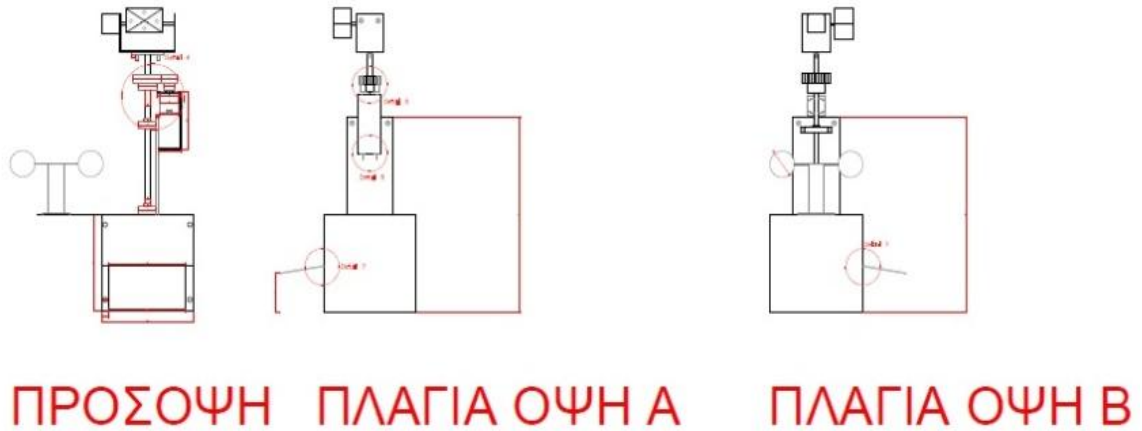
2.3 Σχηματικό διάγραμμα (Block diagram) κατασκευής



Εικόνα 2.3: Σχηματικό διάγραμμα μοντέλου

2.4 Σχέδια μοντέλου

Παρουσιάζονται τα σχέδια του μοντέλου και του μοντέλου με φ/β πλαίσιο με την χρήση του προγράμματος AutoCAD.



Εικόνα 2.4α: Μηχανολογικά σχέδια μοντέλου



Εικόνα 2.4β: Μηχανολογικά σχέδια μοντέλου με φ/β πλαίσιο

2.5 Έρευνα αγοράς

2.5.1 Εισαγωγή

Για την επιλογή των υλικών, των μηχανισμών και του μικροεπεξεργαστή, χρειάστηκε να γίνει μια έρευνα αγοράς, όσον αφορά την απόκτηση όλων όσων χρειάζονται, τη διαθεσιμότητά τους, τον τρόπο απόκτησης και το κόστος.

Αφού αποφασίστηκε το πως θα είναι η κατασκευή, οι διαστάσεις της, οι κινήσεις της και ο έλεγχος της, τα μέλη της ομάδας ανέτρεξαν στην αγορά της Κύπρου, όπου ήρθαν σε επαφή με αρκετούς έμπορους, καταστήματα και μικρές βιομηχανίες, χωρίς ωστόσο να βρεθούν πολλά από όσα ήταν αναγκαία. Λόγω του ότι το μοντέλο διαξονικής βάση φ/β πλαισίου που επρόκειτο να κατασκευαστεί είναι κάτι εξειδικευμένο και μικρού μεγέθους, κάποια εξαρτήματα που ενώ ήταν διαθέσιμα στην κυπριακή αγορά, οι διαστάσεις τους ήταν πολύ πιο μεγάλες από τις απαιτούμενες. Επομένως, αποφασίστηκε πως οι πλείστοι συντελεστές της κατασκευής θα έπρεπε να αγοραστούν από το εξωτερικό μέσω διαδικτύου, να αποσταλούν στην Κύπρο και να παραληφθούν ταχυδρομικώς.

Συνοψίζοντας, αναζητήθηκαν όλα όσα χρειάζονταν από την κυπριακή αγορά, καθώς επίσης και μέσω των διαδικτυακών ιστοσελίδων και ηλεκτρονικών καταστημάτων (ebay.com, ebay.com.uk, amazon.com και aliexpress.com).

2.5.2 Συντελεστές προς αγοραστική διερεύνηση

Τα εξαρτήματα που συμπεριλήφθησαν στην έρευνα αγοράς είναι τα ακόλουθα:

- Μεταλλικές φλάντζες, λαμαρίνες, λάμες, πασαμάνια και ατσάλινοι άξονες
- Βίδες, παξιμάδια και ροδέλες
- Έδρανα με κουζινέτα (bearings – ρουλεμάν)
- Ατσαλένια γρανάζια (spur gears)
- Stepper motors
- Καθοδηγητές των stepper motors
- Ανεμόμετρο
- Μικροεπεξεργαστής Arduino
- Καλωδιώσεις, αντιστάσεις, πλακέτες, συνδετήρες, αναλώσιμα

Μεταλλικές φλάντζες, λαμαρίνες, λάμες, πασαμάνια και ατσάλινοι άξονες: Μεταλλικά κατασκευαστικά κομμάτια που απαρτίζουν το σκελετό της κατασκευής. Στην Κύπρο υπάρχουν σε διαθεσιμότητα σε πολλά καταστήματα. Αγοράστηκαν από την εταιρεία M.A.A. METAL MASTER LTD στη Λεμεσό. Κόπηκαν στις διαστάσεις που έπρεπε και συγκολλήθηκαν μεταξύ τους από τα μέλη της ομάδας.

Βίδες, παξιμάδια και ροδέλες: Για τις ανάγκες του μοντέλου χρειάστηκαν βίδες, παξιμάδια και ροδέλες διαφόρων μήκων σε διαμέτρους 3mm, 5mm και 6mm. Στην Κύπρο υπάρχουν σε διαθεσιμότητα σε πολλά καταστήματα. Αγοράστηκαν από την εταιρεία PANAGIOTIS S. GEORGIU LTD στη Λεμεσό.

Έδρανα με κουζινέτα (bearings – ρουλεμάν): Τα έδρανα χρειάζονται για να μπορούν να περιστρέφονται ελεύθερα οι άξονες χωρίς τριβές και τα κουζινέτα που περιλαμβάνουν, είναι οι βάσεις που τα περικλείουν, οι οποίες θα εγκατασταθούν πάνω στο σκελετό. Στην Κυπριακή αγορά υπάρχουν σε διαθεσιμότητα στο κατάστημα CYPRUS ENGINEERING LTD όμως το μικρότερο έδρανο που υπάρχει είναι με τρύπα διαμέτρου 14mm. Οι άξονες της κατασκευής είναι διαμέτρων 8mm, 10mm και 12mm. Έτσι αγοράστηκαν μέσω της διαδικτυακής ιστοσελίδας ebay.com και χρόνος αποστολής ήταν 4 εβδομάδες.



Εικόνα 2.5.2: Έδρανα με κουζινέτα

Ατσαλένια γρανάζια (spur gears): Τα γρανάζια απασχόλησαν τα μέλη της ομάδας ιδιαίτερα, αφού στην κυπριακή αγορά υπήρχαν μόνο στο κατάστημα VASILIS KOUKOUNIDIS LTD στη Λευκωσία και σε πολύ περιορισμένη γκάμα. Γρανάζια του ίδιου τύπου υπήρχαν σε άλλα καταστήματα, αλλά είτε ήταν εντελώς ακατάλληλα, είτε ήταν από μίγμα πλαστικού. Υπήρχαν σκέψεις για αγορά κάποιων καλύτερων μέσω διαδικτύου, όμως λόγω αυξημένου βάρους, το κόστος αποστολής θα ήταν μεγάλο με αποτέλεσμα να αγοραστούν από το συγκεκριμένο κατάστημα την Κύπρο.

Stepper motors: Τέτοιοι κινητήρες δεν υπάρχουν πουθενά στην Κυπριακή αγορά, κάτι που είναι μεγάλο μειονέκτημα, αφού πολλές εφαρμογές χρησιμοποιούν αυτού τους είδους κινητήρες. Η μόνη λύση ήταν η αγορά τους από την διαδικτυακή ιστοσελίδα ebay.com. Υπήρχε βέβαια μεγάλο ρίσκο, αφού ο χρόνος αποστολής τους ήταν 6 εβδομάδες και στη περίπτωση που κάτι δεν λειτουργούσε, μια νέα παραγγελία θα καθυστερούσε τη ροή της πτυχιακής.

Οδηγοί των stepper motors: Ένα stepper motor μπορεί να καθοδηγηθεί με πολλούς τρόπους. Ένας τρόπος είναι με τη χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων L293D. Τα συγκεκριμένα υπάρχουν σε διαθεσιμότητα σε αρκετά καταστήματα στην Κύπρο. Αναζητήθηκαν τα πιο οικονομικά τα οποία και βρέθηκαν στο κατάστημα KOKOS Electronics & Co στην Λεμεσό. Αφού όμως εφαρμόστηκαν για έλεγχο των κινητήρων, δεν δούλευαν ορθά και έτσι εισηγήθηκε ένας άλλος τρόπος, η χρήση των EasyDrivers. Αγοράστηκαν από την διαδικτυακή ιστοσελίδα ebay.com.uk και ο χρόνος αποστολής τους ήταν 10 μέρες.

Ανεμόμετρο: Δεν υπάρχει πουθενά στην κυπριακή αγορά. Αγοράστηκε από την διαδικτυακή ιστοσελίδα ebay.com και ο χρόνος αποστολής του ήταν 5 εβδομάδες. Λόγω της τιμής του, χρειάστηκε εκτελωνισμός από το ταχυδρομείο με επιπλέον χρηματικό κόστος.

Μικροεπεξεργαστής Arduino: Μικροεπεξεργαστές όπως της εταιρείας Arduino υπάρχουν σε ένα κατάστημα στην Λευκωσία, όμως το κόστος τους είναι αρκετά μεγάλο. Αγοράστηκαν από την διαδικτυακή ιστοσελίδα ebay.com και ο χρόνος αποστολής του ήταν 4 εβδομάδες.

Καλωδιώσεις, αντιστάσεις, πλακέτες, συνδετήρες, αναλώσιμα: Τέτοιου είδους ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εξαρτημάτων υπάρχουν σε μεγάλη γκάμα στην κυπριακή αγορά. Τα πιο φθηνά είδη βρέθηκαν στο κατάστημα KOKOS Electronics & Co στην Λεμεσό, από όπου και αγοράστηκαν.

2.5.3 Συμπέρασμα

Η κυπριακή αγορά είναι πολύ περιορισμένη όσον αφορά τη μοντελοποίηση και τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά είδη. Το πρόβλημα στην απόκτηση των αναγκαίων υλικών ήταν μεγάλο, αφού στην περίπτωση της αγοράς τους από το εξωτερικό τα περισσότερα εξαρτήματα δεν ήταν άμεσα διαθέσιμα, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η περίοδος αναμονής τους και ο χρόνος διεκπεραίωσης της κατασκευής. Επίσης, γίνεται αντιληπτό πως όσον αφορά τις ΑΠΕ και πιο συγκεκριμένα τον τομέα των φ/β συστημάτων, η κυπριακή αγορά δεν μπορεί να ικανοποιήσει στο έπακρο τις ανάγκες των εταιρειών/πελατών, με αποτέλεσμα αυτοί να στρέφονται προς το εξωτερικό για εξεύρεση λύσεων.

2.6 Επιλογή υλικών και επεξήγηση κατασκευής

2.6.1 Επιλογή υλικών

Τα υλικά που επιλέχθηκαν για την κατασκευή του σκελετού της κατασκευής είναι κυρίως τα μεταλλικά σίδερα και σε δύο συγκεκριμένες περιπτώσεις, το ατσάλι. Συνήθως, τέτοιου είδους κατασκευές κατασκευάζονται από αλουμίνιο, όμως λόγω του υψηλού κόστους αγοράς του, απορρίφθηκε ως επιλογή. Επιπλέον, τέτοιου είδους κατασκευές από σίδηρο μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν και να τροποποιηθούν στις εγκαταστάσεις που διαθέτει η ομάδα.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν εντός του μηχανουργείου για την υλοποίηση της κατασκευής είναι τα ακόλουθα:

Ηλεκτρικά εργαλεία:

- Μεγάλος δίσκος κοπής
- Μικρός δίσκος κοπής
- Κόφτης & τρίφτης χειρός
- Τρυπάνι εδάφους
- Τρυπάνι χειρός
- Ηλεκτροσυγκόλληση ηλεκτροδίου

Μηχανολογικά εργαλεία:

- Μέγγενη
- Σφυρί χειρός
- Γωνιές 90 μοιρών
- Σφικτήρες
- Αρίδες
- Μέτρο
- Ηλεκτρονικό παχύμετρο
- Χάρακας μετάλλων
- Κατσαβίδια
- Εξάγωνα Allen Keys
- Γαλλικό κλειδί (σουηδικό)
- Γερμανικά κλειδιά και εξάγωνα καρυδάκια & καστάνιες

2.6.2 Επεξήγηση κατασκευής

Ο σκελετός της κατασκευής χωρίζεται σε δύο μέρη. Το κάτω μέρος αποτελείται από την περιστροφή στον οριζόντιο άξονα (Ανατολή – Δύση), την ρύθμιση δηλαδή της αζιμουθιακής γωνίας. Το πάνω μέρος αποτελείται από την περιστροφή στον κατακόρυφο άξονα (Βορράς – Νότος), την ρύθμιση δηλαδή της γωνιάς ύψους.



Εικόνα 2.6.2α: Όψη κατασκευής πριν τις τροποποιήσεις (πάνω και κάτω μέρος)

Κάτω Μέρος: Το κάτω μέρος της κατασκευής ξεκινά από μια τετράγωνη φλάντζα στην οποία είναι συγκολλημένη κάθετα μια άλλη ορθογώνια φλάντζα. Η συγκρότηση αυτή επιτρέπει τη στερέωση των κουζινέτων που περικλείουν τα ρουλεμάν, μέσα στα οποία θα περιστρέφεται ελεύθερα και χωρίς τριβές ο ασάλινος άξονας διαμέτρου 12mm. Πάνω στον άξονα αυτό, είναι συγκολλημένο το γρανάζι M1.5 40 δοντιών μέσω του οποίου θα μεταδίδεται η περιστροφική κίνηση από τον βηματικό κινητήρα. Επίσης, στο άνω άκρο του άξονα είναι συγκολλημένη κάθετα μια λάμα με δύο τρύπες. Αυτή η λάμα, είναι ο συνδετικός κρίκος μεταξύ του πάνω μέρους και του κάτω μέρους. Πάνω στην ορθογώνια φλάντζα είναι στερεωμένη και η βάση του βηματικού κινητήρα η οποία διαθέτει συρταράκι προσαρμογής ενώ πάνω στην τετράγωνη φλάντζα υπάρχουν και δύο τρύπες στις οποίες μπαίνουν δύο δίοδοι φωτοεκπομπής ανάδρασης (feedback LEDs). Επιπλέον, στο κάτω μέρος της κατασκευής βρίσκεται και ένα κουτί, μέσα στο οποίο μπαίνουν τα ηλεκτρονικά μέρη όπως οι πλακέτες, οι καλωδιώσεις και το τροφοδοτικό. Όλα τα καλώδια από το εξωτερικό της κατασκευής προς τα μέσα του κουτιού περνούν μέσω μιας τρύπας με εφαρμοσμένο bush για μείωση των τριβών. Το πίσω μέρος του κουτιού αποτελείται από ένα καπάκι για κλείσιμο, με μια αεροτομή για καλύτερη ψύξη των ηλεκτρονικών μερών.

Πάνω Μέρος: Το πάνω μέρος αποτελείται ουσιαστικά από μια φλάντζα πρεσαρισμένη σε σχήμα ανάποδου "Π". Πάνω στο "Π" είναι στερεωμένα δύο κουζινέτα που περικλείουν τα ρουλεμάν, μέσα στα οποία θα περιστρέφεται ελεύθερα και χωρίς τριβές ο ατσάλινος άξονας διαμέτρου 8mm. Στο ένα άκρο του άξονα είναι συγκολλημένο το γρανάτζι M1 20 δοντιών και κατά μήκος του ένα τελάρο. Το τελάρο διαθέτει τρύπες για να στερεώνεται το φ/β πλαίσιο καθώς επίσης και το κύκλωμα των αισθητήρων φωτός. Στο "Π" υπάρχουν και δύο τρύπες για να στερεώνεται η βάση του φ/β πλαισίου με την λάμα-συνδετικό κρίκο του κάτω μέρους. Το γρανάτζι που είναι συγκολλημένο με τον άξονα βγαίνει έξω από το "Π" μέσα από μια τρύπα. Λίγο πιο κάτω από το σημείο αυτό στερεώνεται η βάση του βηματικού κινητήρα, η οποία διαθέτει συρταράκι προσαρμογής, ενώ στο τέρμα του "Π" είναι συγκολλημένη μια λαμαρίνα για να στερεώνεται το ανεμόμετρο.

Τροποποιήσεις: Λόγω του αυξημένου βάρους της κατασκευής και τη μειωμένη δύναμη που μπορούσαν να δώσουν οι βηματικοί κινητήρες, η κατασκευή τροποποιήθηκε. Το πάνω μέρος αντικαταστήθηκε από ένα άλλο "Π", πολύ μικρότερο, του οποίου στο ένα άκρο είναι στερεωμένο ένα ρουλεμάν για να περιστρέφεται ο άξονας διαμέτρου 10mm ελεύθερα και χωρίς τριβές. Πάνω στον άξονα επισυνάπτεται και το κύκλωμα αισθητήρων φωτός. Στο άλλο άκρο του "Π" στερεώνεται ο βηματικός κινητήρας ο οποίος ενώνεται απευθείας με τον άξονα. Η λαμαρίνα που στερέωνε το ανεμόμετρο έχει στερεωθεί στο πλάι της τετράγωνης φλάντζας.



Εικόνα 2.6.2β: Όψη κατασκευής μετά τις τροποποιήσεις (πάνω και κάτω μέρος)

2.7 Μηχανισμοί κίνησης – Επιλογή κινητήρων

Ένα σημαντικό κομμάτι που έχριζε μεγάλης προσοχής, μελέτης και πολλών υπολογισμών, είναι ο τύπος και το είδος των μηχανισμών που προσφέρουν κίνηση στους δύο βαθμούς ελευθερίας που έχει το μοντέλο διαξονικής βάσης. Μελετήθηκαν διάφοροι τύποι και είδη μετάδοσης κίνησης μέχρι το τελικό στάδιο επιλογής.

Συγκρίθηκαν μεταξύ τους με βάση τους παράγοντες:

- Αξιοπιστία
- Εξοικονόμηση ενέργειας και αποδοτικότητα
- Κόστος αγοράς
- Αποτελεσματικότητα

Ελέχθηκαν οι ακόλουθοι τύποι μηχανισμών:

- Υδραυλικά έμβολα
- Πνευματικά έμβολα
- Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC motors)
- Σερβοκινητήρες (Servo motors)
- Βηματικοί κινητήρες (Stepper motors)
- Συνδυασμός των πιο πάνω

2.7.1 Υδραυλικά έμβολα

Παρόλο που χρησιμοποιούνται ευρέως σε συστήματα διαξονικών βάσεων, δεν είναι αξιόπιστα αφού χρειάζονται αρκετή και τακτική συντήρηση. Τα έμβολα συχνά παρουσιάζουν διαρροές και το συμπιεσμένο λάδι μετά από αρκετή χρήση χρειάζεται αντικατάσταση. Επιπλέον, πέραν των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων που θα ελέγχουν το μοντέλο, απαιτείται μια αντλία συμπιεσμένου λαδιού ξεχωριστά για κάθε έμβολο και ένας σωληνοειδής διακόπτης για κάθε κίνηση που θα μετατρέπει τα ηλεκτρικά σήματα σε κινήσεις των εμβόλων. Η αντλία αποτελεί πηγή σπατάλης ενέργειας και ο σωληνοειδής διακόπτης, πηγή διαρροών. Ακόμη, οι διαξονικές βάσεις φ/β πλαισίων απαιτούν ακρίβεια κίνησης και συνεχή έλεγχο της θέσης των πλαισίων, κάτι που είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθεί με τη χρήση υδραυλικών εμβόλων.

2.7.2 Πνευματικά έμβολα

Εργάζονται με την ίδια φιλοσοφία όπως τα υδραυλικά έμβολα, μόνο που κινούνται με συμπιεσμένο αέρα, αντί με τη χρήση συμπιεσμένου λαδιού. Επιπλέον, πέραν της αντλίας, χρειάζονται και αεροφυλάκιο συμπιεσμένου αέρα, κάτι που καταλαμβάνει αρκετό όγκο. Οι απώλειες ενέργειας και σε αυτή την περίπτωση είναι πολλές.

2.7.3 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC motors)

Αποκλείοντας τα έμβολα, θεωρήθηκε ορθό η κίνηση του πλαισίου σε δύο άξονες να επιτευχθεί μέσω μηχανικών κινήσεων που θα προέλθουν από κινητήρες. Οι απλοί κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC motors) είναι κατασκευασμένοι να εργάζονται σε ψηλές ταχύτητες. Για τις ανάγκες του μοντέλου δεν χρειάζονται ψηλές ταχύτητες, αλλά μεγάλες ροπές για να

κρατούν τη διαξονική βάση σταθερή σε περιόδους αναμονής και ακινησίας. Με τη χρήση ενός κιβωτίου ταχυτήτων μειώνεται η ταχύτητα περιστροφής και αυξάνεται η ροπή αδρανείας. Οι τυπικοί κινητήρες όμως δεν μπορούν να παραμείνουν ακίνητοι σε περιόδους αναμονής. Για αυτό τον λόγο έγιναν σκέψεις για τη χρησιμοποίηση σερβοκινητήρων (servo motors).

2.7.4 Σερβοκινητήρες (Servo motors)

Αποτελούν μια αρκετά καλή λύση για τις ανάγκες κίνησης του μοντέλου και μελετήθηκαν ενδελεχώς. Προσφέρουν χαμηλή και σταθερή ταχύτητα σε συνδυασμό με μεγάλες ροπές. Είναι αρκετά αποδοτικοί κινητήρες. Αποτελούνται από ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος (DC motor) και ένα κιβώτιο ταχυτήτων υποβιβασμού ταχύτητας. Επιπλέον, διαθέτουν ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ανάδρασης που ελέγχει τη θέση του τελικού άξονα κίνησης, ο οποίος δεν μπορεί να εκτελεί πλήρη περιστροφή, αλλά μετάβαση μεταξύ δύο ακραίων θέσεων. Ο βαθμός ελευθερίας στην περιστροφή του τελικού άξονα περιορίζεται στις 180°, κάτι που αποτελεί μεγάλο μειονέκτημα, αφού τις καλοκαιρινές μέρες στην Κύπρο ο ήλιος διανύει τόξο μέχρι και 240° κατά τη διάρκεια της ημέρας. Σε καταστάσεις αδράνειας και αναμονής, οι σερβοκινητήρες μπορούν να κρατήσουν ροπή παραμένοντας ακίνητοι μόνο σε 12 σημεία στο διάστημα περιστροφής του άξονα τους [11]. Επομένως στην περίπτωση χρήσης τους στο μοντέλο διαξονικής βάσης της εργασίας, μειώνεται η ακρίβεια εντοπισμού της θέσης του ήλιου. Επιπρόσθετα το κόστος των σερβομηχανισμών είναι αυξημένο σε σχέση με άλλους μηχανισμούς κίνησης [12].

2.7.5 Βηματικοί κινητήρες (Stepper motors)

Για τις ανάγκες του μοντέλου, οι πιο κατάλληλοι μηχανισμοί κίνησης θεωρήθηκαν οι βηματικοί κινητήρες (stepper motors). Το stepper motor είναι ένας σύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρες. Η περιστροφή του άξονα δηλαδή, είναι συγχρονισμένη με τη συχνότητα των παλμών εισόδου και ανάλογη του ρεύματος τροφοδοσίας. Η ψήκτρα (brush) είναι ένα μίγμα γραφίτη και άνθρακα ή χαλκού, ένα μαλακό δηλαδή αγωγίμο μέρος που επιτρέπει την αγωγή ρεύματος μεταξύ στάτορα και ρότορα σε ένα κινητήρα. Το stepper motor μετατρέπει ψηφιακούς παλμούς σε μηχανικές περιστροφές του άξονα. Μπορεί να ολοκληρώνει πλήρεις περιστροφές που χωρίζονται σε 200 ίσα βήματα. Μια πλήρης περιστροφή ενός άξονα είναι 360°. Αν η περιστροφή αυτή γίνει σε διαβαθμίσεις 200 βημάτων, εξάγεται διαβάθμιση κάθε 1,8°. Δεδομένου ότι κάθε παλμός έχει ως αποτέλεσμα μια ακριβή γωνιά στον κινητήρα, η θέση του άξονα μπορεί να ελεγχθεί με ακρίβεια χωρίς κάποιο μηχανισμό ανάδρασης [13].

2.7.6 Συνδυασμός τύπων

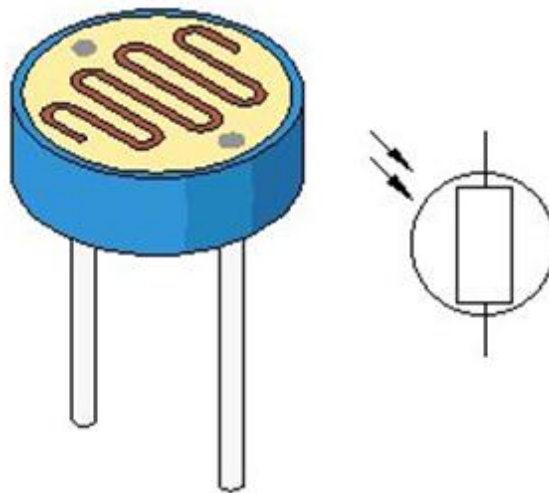
Πιθανός συνδυασμός πάνω αναφερθέντων μηχανισμών αποδεικνύεται μη εξυπηρετικός, ένεκα του ότι υπερισχύουν τα μειονεκτήματά τους του κάθε είδους και η ακαταλληλότητα τους ως προς την αξιοπιστία, την εξοικονόμηση και την αποτελεσματικότητά τους. Συνονίζοντας, οι δύο βαθμοί ελευθερίας που χρειάζεται να έχει το μοντέλο διαξονικής βάσης θα επιτευχθούν χρησιμοποιώντας δύο βηματικούς κινητήρες.

2.8 Μέρη κατασκευής

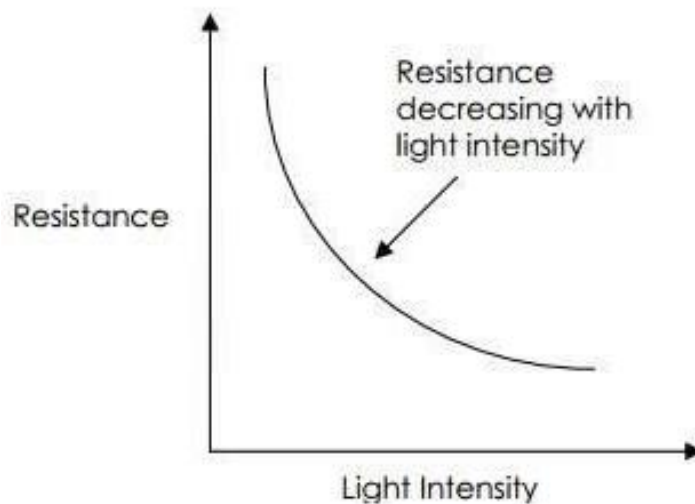
2.8.1 Κύκλωμα αισθητήρων φωτός

Για την λήψη δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας χρησιμοποιούνται τέσσερις αισθητήρες φωτός σε δύο ζεύγη (Βόρειο – Νότιο για τον κάθετο άξονα, Ανατολικό – Δυτικό για τον οριζόντιο). Οι αισθητήρες φωτός κατασκευάστηκαν με τη χρήση τεσσάρων φωτοαντιστάσεων (LDRs).

Φωτοαντίσταση (LDR): Κατασκευάζεται από υψηλής αντίστασης ημιαγωγούς. Με την πρόσπτωση φωτός στην φωτοαντίσταση, τα φωτόνια απορροφούνται από τον ημιαγωγό και δεσμευμένα ηλεκτρόνια αποκτούν επαρκή ενέργεια έτσι ώστε να αποσπαστούν από τα άτομα που τα δεσμεύουν. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια άγουν με αποτέλεσμα να υπάρχει μείωση της αντίστασης. Επομένως, όταν μία φωτοαντίσταση δέχεται φως, μειώνεται η τιμή της αντίστασης της.



Εικόνα 2.8.1α: Φωτοαντίσταση (LDR) και το σύμβολο της

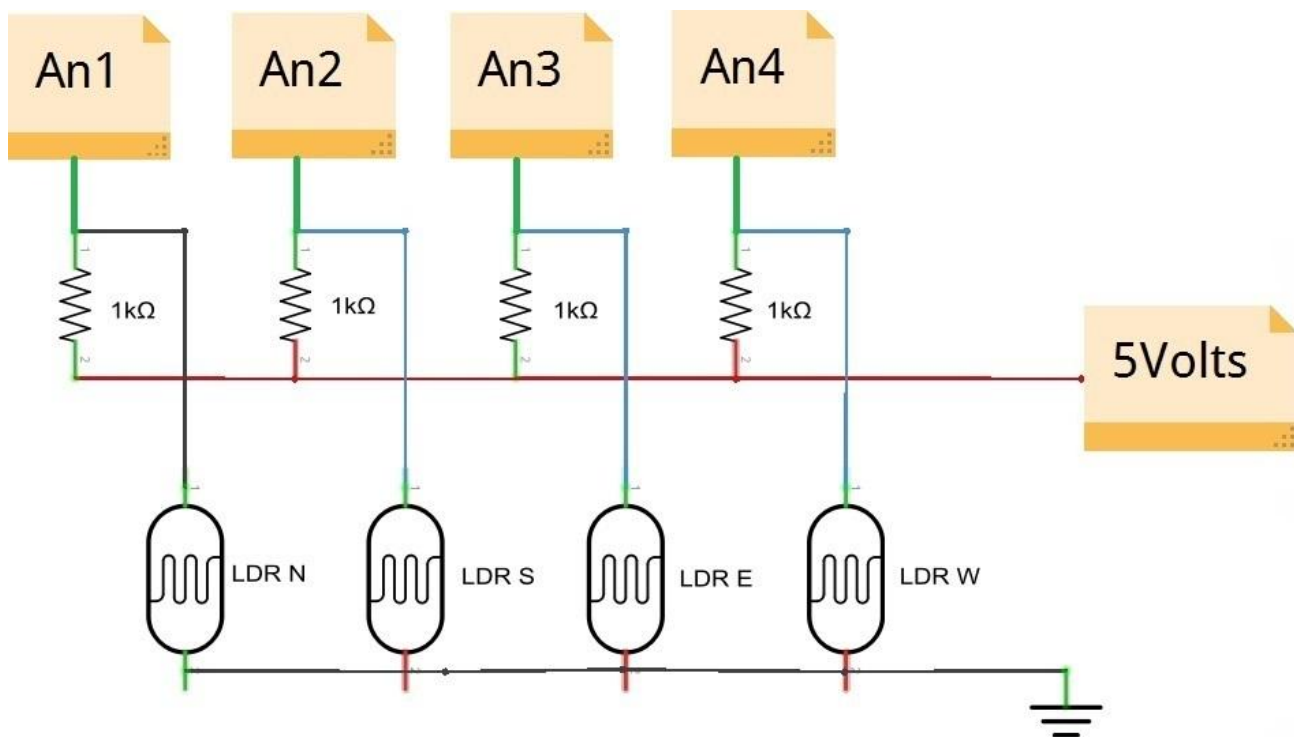


Εικόνα 2.8.1β: Χαρακτηριστική φωτοαντίστασης (τιμή αντίστασης ως προς ηλιακή ακτινοβολία)

Οι τιμές των τεσσάρων αισθητήρων φωτός (Βορράς, Νότος, Ανατολή, Δύση) εξάγονται σε μορφή τάσεως (Volts), από 0 (για τις περιπτώσεις ολικού σκότους) μέχρι 5 Volts (για τις περιπτώσεις ολικού φωτός) και καταλήγουν ως είσοδοι στον μικροελεγκτή, όπου γίνεται η κατάλληλη επεξεργασία με βάση τον κώδικα προγραμματισμού. Ο μικροελεγκτής με βάση τις τιμές των αισθητήρων φωτός θα δώσει τις ανάλογες εντολές στα stepper motors για την κίνηση του πλαισίου.

Το κύκλωμα τροφοδοτείται με συνεχή τάση 5 Volts. Τέσσερις αντιστάσεις 1 KΩ χρησιμοποιούνται για την λήψη των τεσσάρων τιμών τάσεως. Οι αντιστάσεις κάθε ζεύγους είναι πανομοιότυπες, με μία μικρή απόκλιση στην τιμή τους. Λόγω του διαιρέτη τάσης, λαμβάνονται τα τέσσερα αυτά σήματα συνεχούς τάσεως (An1, An2, An3, An4) ως έξοδος του κυκλώματος φωτοαντιστάσεων, είσοδος όμως για τον μικροελεγκτή.

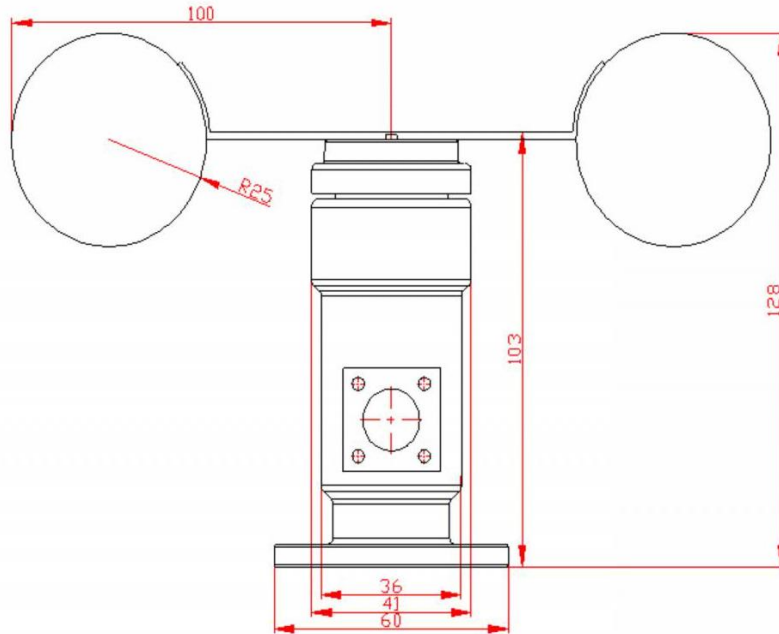
Όταν για παράδειγμα η ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα ζεύγος φωτοαντιστάσεων είναι η ίδια, τότε η τάση τους είναι η ίδια (2,5 Volts λόγω της διαίρεσης τάσης) και το πλαίσιο βρίσκεται στην επιθυμητή (για εκείνο τον άξονα) θέση. Σε περίπτωση που μία από τις δύο φωτοαντιστάσεις δέχεται μεγαλύτερη ακτινοβολία, τότε η τάση στα άκρα της φωτοαντίστασης αυτής γίνεται μεγαλύτερη από την άλλη και καλούνται οι κινητήρες να κινηθούν κατάλληλα.



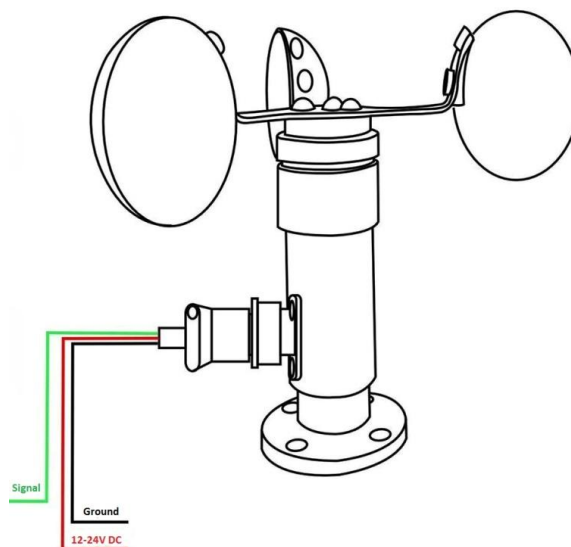
Εικόνα 2.8.1γ: Κύκλωμα αισθητήρων φωτός

2.8.2 Ανεμόμετρο

Το ανεμόμετρο δέχεται πιέσεις από τον αέρα, οι οποίες περιστρέφουν την πτερωτή του. Παράγεται τάση από 0 (ελάχιστο) μέχρι 5 Volts (μέγιστο) ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα, η οποία στέλνεται ως είσοδος στον μικροελεγκτή. Στην περίπτωση που η τιμή του ανεμόμετρου ξεπεράσει το ρυθμισμένο όριο αέρα, τότε οι κινητήρες κινούνται κατάλληλα για να θέσουν το πλαίσιο πίσω στην αρχική του θέση.



Εικόνα 2.8.2α: Διαστάσεις ανεμόμετρου



Εικόνα 2.8.2β: Ανεμόμετρο τριών καλωδίων (τροφοδοσία, γείωση, σήμα εξόδου)

Πίνακας 2.8.2: Χαρακτηριστικά ανεμόμετρου

Wind speed sensor (Anemometer)	
Three cups aluminum alloyed with 3m cable and voltage output	Waterproof aviation plug type
Voltage output:	0 – 5 Volts
Sensor:	Three cups
Start-up wind speed:	0.4 – 0.8 m/s
Resolution:	0.1 m/s
Measuring range:	0 – 30 m/s or 0 – 60 m/s
Accuracy:	±3%
Transmission distance:	>1000m
Transmission medium:	Cable transmission
Connection mode:	Three-wire system
Working temperature:	-40°C to 80°C
Supply voltage:	12 - 24 Volts DC
Max. power consumption:	≤0.2W (pulse), ≤0.3W (voltage), ≤0.7W (current)
Unit:	mm

2.8.3 Τροφοδοτικό 5V/12V DC

Τόσο οι βηματικοί κινητήρες, όσο και οι οδηγοί τους, η πλακέτα Arduino, το ανεμόμετρο και το κύκλωμα αισθητήρων φωτός, πρέπει να τροφοδοτούνται με την κατάλληλη τάση. Οι βηματικοί κινητήρες, οι οδηγοί τους, η πλακέτα Arduino και το ανεμόμετρο δέχονται συνεχή τάση 12V. Το κύκλωμα αισθητήρων φωτός τροφοδοτείται με συνεχή τάση 5V.

Το τροφοδοτικό (DC power supply) που χρησιμοποιείται για την πτυχιακή εργασία, είναι ένα τροφοδοτικό Ηλεκτρονικού Υπολογιστή. Λόγω της δυσκολίας εύρεσης τυπικών τροφοδοτικών για την κάλυψη των αναγκών του μοντέλου, αλλά και του υψηλού τους κόστους, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί το αναφερθέν τροφοδοτικό, το οποίο είναι εξίσου ικανό και ανταποκρίνεται απόλυτα στις ανάγκες του μοντέλου.

Το συγκεκριμένο τροφοδοτικό δωρίστηκε στα μέλη της ομάδας, χρειάστηκαν όμως ορισμένες τροποποιήσεις για να μπορεί να δουλεύει ομαλά, οι οποίες και έγιναν.

Πίνακας 2.8.3α: Χαρακτηριστικά τροφοδοτικού

Τροφοδοτικό	
Μάρκα:	HIPRO
Μοντέλο:	HP-200 PPGN
Είσοδος:	A.C. 230V / 3.5A 50Hz
Έξοδος:	D.C. +5 V / 20A, +12V / 8A
Μέγιστη Ισχύς Εξόδου:	200W
Serial Number:	H1-9611102577



Εικόνα 2.8.3α: Όψη τροφοδοτικού

Ένα τυπικό τροφοδοτικό υπολογιστή (Power Supply Unit), τροφοδοτείται από το δίκτυο με εναλλασσόμενη τάση και βγάζει στην έξοδο του συνεχή τάση διαφόρων δυναμικών, έτσι ώστε να μπορέσουν να δουλέψουν όλα τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά μέρη του Ηλεκτρονικού Υπολογιστή. Είναι πολύ σημαντικό στοιχείο γιατί πρέπει να παρέχει σταθερή και συνεχή ροή τάσης στην έξοδο του, καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του. Το PSU βγάζει στην έξοδο του συνεχείς τάσεις, της τάξεως των +12V, -12V, +5V, -5V και +3,3V [14]. Όλες αυτές οι τάσεις, προκύπτουν στην έξοδο σε διαφορετικά καλώδια και κάθε ένα από αυτά φέρει διαφορετικό χρώμα, ως ακολούθως:

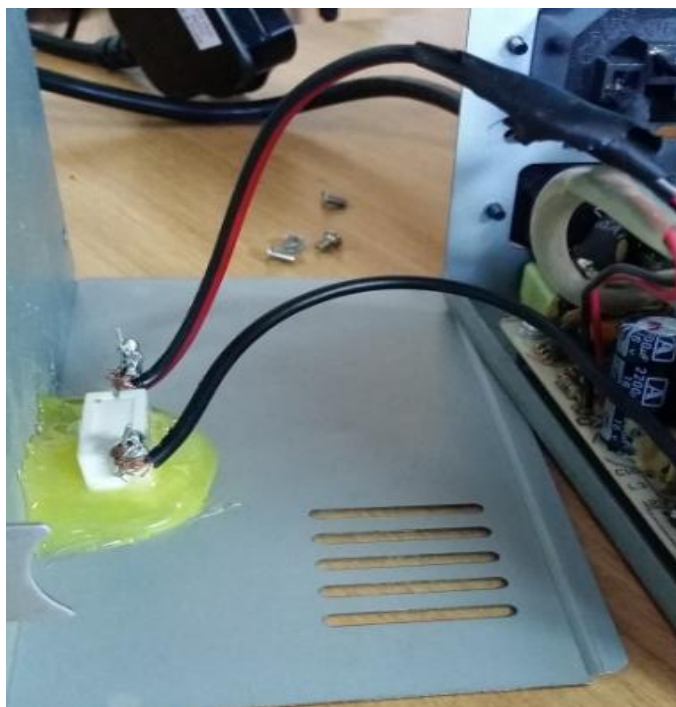
Πίνακας 2.8.3β: Χρωματισμοί καλωδίων τροφοδοτικού

Πορτοκαλί:	+3,3V
Άσπρο:	-5V
Μπλε:	-12V
Πράσινο:	PS-ON
Γκριζο:	PWR_OK
Κόκκινο:	+5V
Κίτρινο:	+12V
Μαύρο:	Γείωση

Τροποποιήσεις: Για τις ανάγκες του μοντέλου, χρειάζονται παροχές συνεχών τάσεων 5V και 12V. Οι φωτοαντιστάσεις πρέπει να τροφοδοτούνται με 5V ενώ τα Stepper Motors, τα EasyDrivers, η Arduino και το Ανεμόμετρο χρειάζονται 12V. Επομένως παραμένουν τα Κόκκινα, τα Κίτρινα και τα Μαύρα καλώδια και τα υπόλοιπα καλώδια τροποποιήθηκαν αναλόγως. Δηλαδή, τα Πορτοκαλί, τα Άσπρα και τα Μπλε καλώδια, αφού δεν χρειάζονται, απομονώθηκαν με μονωτική ταινία [15].

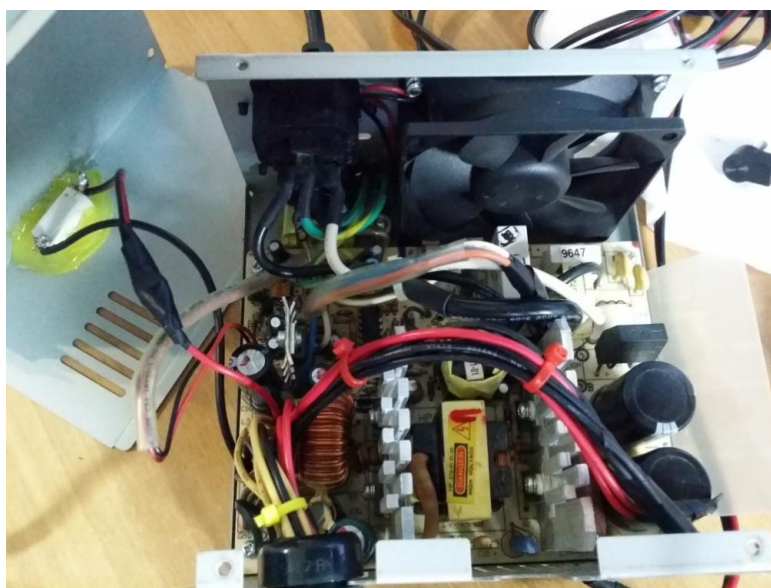
Το Γκριζο (PWR_OK) καλώδιο δίνει ένα σήμα κατάστασης (status signal) στον Η/Υ για να τον ενημερώσει ότι οι λειτουργικές τάσεις βρίσκονται εντός των ορίων που απαιτούνται για τη σωστή λειτουργία του υπολογιστή. Κάτι τέτοιο δεν θα χρειαστεί, όμως επειδή σε έναν Η/Υ το καλώδιο αυτό συνήθως είναι συνδεδεμένο και με μια φωτοδίοδο (LED), βραχυκυκλώθηκε με ένα καλώδιο γείωσης (μαύρο). Το Πράσινο (PS-ON) καλώδιο είναι το καλώδιο ενεργοποίησης (Power Supply ON) και όταν αυτό είναι βραχυκυκλωμένο με τη γείωση, τότε ενεργοποιεί το τροφοδοτικό και δίνει τάση στην έξοδο. Επομένως βραχυκυκλώθηκε με ένα καλώδιο γείωσης (μαύρο) [16].

Όταν τροποποιείται ένα τροφοδοτικό ενός Η/Υ, είναι σημαντικό να είναι γνωστό πως για να δουλέψει σωστά χρειάζεται ένα ελάχιστο φορτίο για να κρατηθεί σε λειτουργία. Στην περίπτωση του μοντέλου αυτό το ελάχιστο φορτίο θα επιτευχθεί χρησιμοποιώντας μια Κεραμική Αντίσταση (sandbar) με χαρακτηριστικά 10Ω/10W. Τα άκρα της αντίστασης συνδέθηκαν μεταξύ ενός κόκκινου (+5V) καλωδίου και ενός καλωδίου γείωσης (μαύρο) [17].



Εικόνα 2.8.3β: Κεραμική Αντίσταση 10Ω/10W

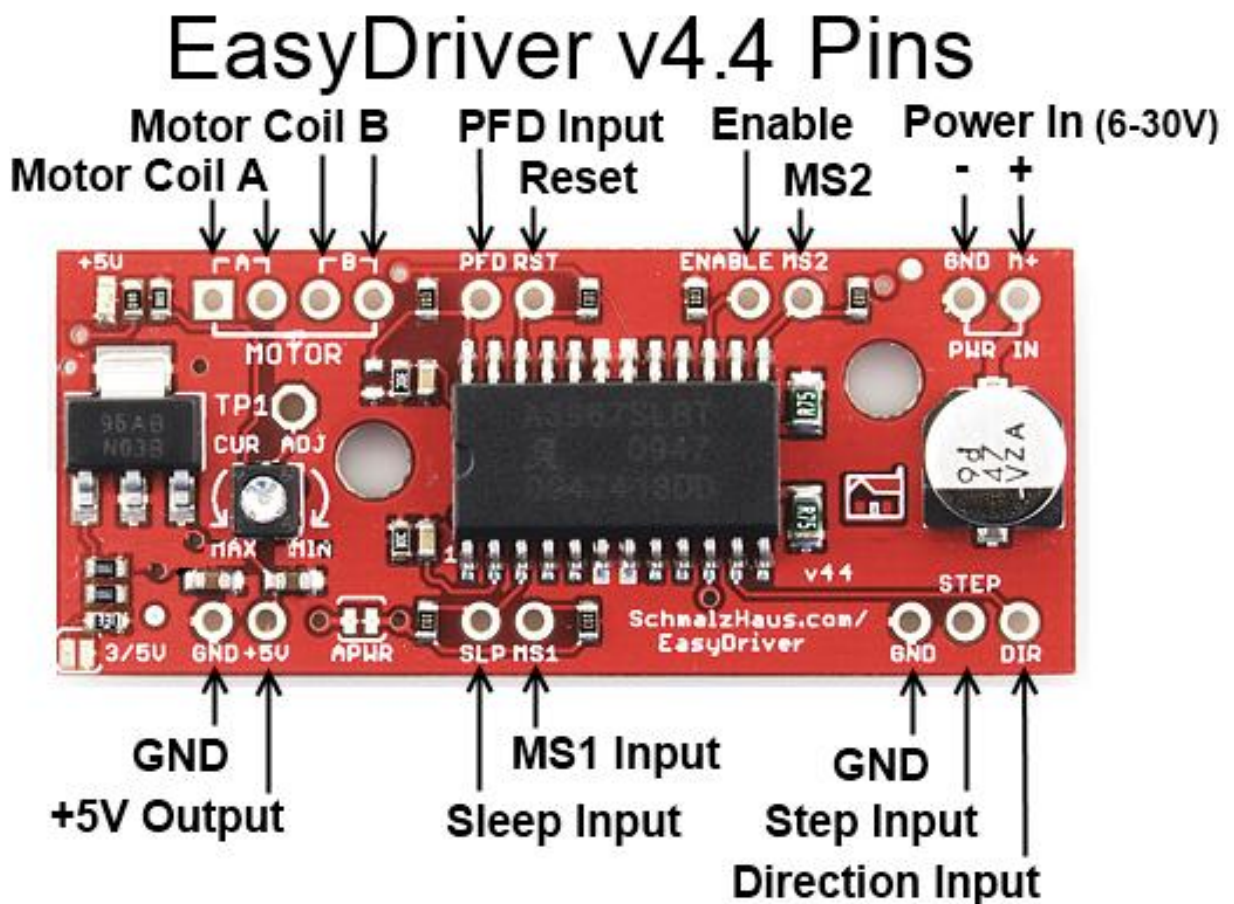
Ακολουθως, τόσο η αντίσταση αυτή, όσο και τα μονωμένα και βραχυκυκλωμένα καλώδια τοποθετήθηκαν εσωτερικά του τροφοδοτικού, σε σημείο που να μην εμποδίζεται ο ανεμιστήρας ψύξης (cooling fan), αλλά ούτε να έρχονται σε επαφή με τις ψήκτρες αλουμινίου οι οποίες υπερθερμαίνονται.



Εικόνα 2.8.3γ: Εσωτερική όψη τροφοδοτικού

2.8.4 EasyDriver shield για Arduino (οδηγός κινητήρων)

Για τον έλεγχο των κινητήρων απαιτείται ένας οδηγός (driver), ο οποίος προγραμματίζεται μέσω ενός μικροεπεξεργαστή. Ο οδηγός που επιλέχθηκε να δίνει κίνηση στα stepper motors ονομάζεται EasyDriver, ενώ ο μικροεπεξεργαστής που θα διαχειρίζεται τα ηλεκτρικά σήματα είναι μία πλακέτα της εταιρείας Arduino. Το Stepper Motor πρέπει να λάβει ξεχωριστό παλμό για κάθε βηματική εντολή που θα υλοποιήσει και κάθε φορά που θα κινηθεί, το μήκος της κίνησης που διανύει είναι το ίδιο. Όταν οι ψηφιακοί παλμοί αυξάνονται στη συχνότητα του μικροεπεξεργαστή, μια βηματική κίνηση μπορεί να μετατραπεί σε συνεχή περιστροφή με την ταχύτητα περιστροφής να είναι ανάλογη ως προς τη συχνότητα των παλμών.



Εικόνα 2.8.4: EasyDriver shield για stepper motors

2.8.5 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο

Στον κάθετο άξονα του μοντέλου τοποθετείται το φ/β πλαίσιο, το οποίο είναι ενσωματωμένο στη κατάλληλα κατασκευασμένη βάση μαζί με πρόνοια για τοποθέτηση του κυκλώματος των αισθητήρων φωτός.

Πίνακας 2.8.5: Χαρακτηριστικά φ/β πλαισίου

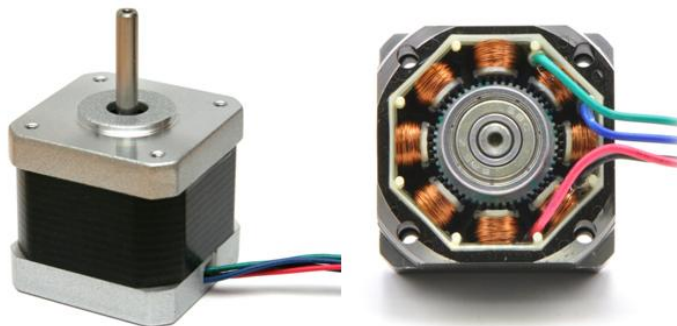
REC Peak Energy Demo Module	
Designation	REC Peak Energy 20W Module
Serial No.	JMD20WPA12011211
Date	2012-01-06
Specification at STC	1000W/m ² solar irradiance AM1.5 25°C cell temperature
Pmax	20.00W
Vpm	2.81 Volts
Ipm	7.10 Amps
Voc	3.60 Volts
Isc	7.80 Amps
Maximum System Voltage	1000 Volts

2.8.6 Βηματικοί κινητήρες – Stepper motor NEMA 17

Πλεονεκτήματα από τη χρήση βηματικών κινητήρων:

- Λόγω του ότι ένα stepper motor αποτελεί σύγχρονο κινητήρα, μπορεί να επιτευχθεί ένα ευρύ φάσμα στροφών, δεδομένου ότι η ταχύτητα του είναι ανάλογη προς τη συχνότητα των παλμών εισόδου από τον μικροελεγκτή.
- Λόγω του ότι ο έλεγχος ανοιχτού βρόγχου της θέσης του άξονα είναι ακριβής, δεν χρειάζεται μηχανισμό ανάδρασης για να εντοπισθεί.
- Λόγω του ότι η ταχύτητα και το μέγεθος κάθε κίνησης καθορίζονται από το χρήστη, η ικανότητα περιστροφής σε πολύ χαμηλές ταχύτητες είναι εφικτή. Αυτό δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης ενός φορτίου απευθείας με τον άξονα του stepper motor, χωρίς να χρειάζεται να εγκατασταθεί κάποιο κιβώτιο ταχυτήτων (gearbox).
- Τα stepper motors είναι αρκετά αξιόπιστα, διότι δεν υπάρχουν ψήκτρες επαφής. Η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται από τη διάρκεια ζωής των δύο εδράνων (bearings) που βρίσκονται στο εσωτερικό τους.
- Τα stepper motors έχουν μεγάλη και αποτελεσματική ανταπόκριση κατά την έναρξη της λειτουργίας τους, τη διακοπή και την αντιστροφή της κατεύθυνσης περιστροφής τους.
- Τα stepper motors παρέχουν ακριβή τοποθέτηση και επαναληψιμότητα της κίνησης.
- Όταν ένα ενεργό stepper motor πρέπει να παραμείνει σε μια ακίνητη θέση, διατηρεί πλήρη ροπή.
- Οι θέσεις παραμονής σε κατάσταση αδράνειας είναι όσες και τα βήματα, δηλαδή 200 [18].
- Το κόστος των stepper motors σε σύγκριση με αυτό των σερβομηχανισμών για τις ίδιες λειτουργίες είναι πολύ πιο μειωμένο.

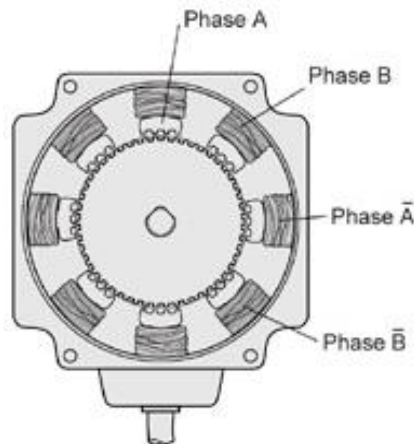
Τύποι βηματικών κινητήρων: Υπάρχουν τρεις τύποι βηματικών κινητήρων. Οι μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet), οι υβριδικοί (hybrid) και οι τύποι μεταβλητής αδράνειας (variable reluctance). Οι υβριδικοί κινητήρες προσφέρουν ευελιξία και συνδυάζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά των άλλων δύο τύπων. Οι υβριδικοί κινητήρες είναι κατασκευασμένοι με πολύ-οδοντωτό στάτορα εναλασσόμενων πόλων και με ρότορα μόνιμου μαγνήτη. Ο ρότορας επίσης είναι πολύ-οδοντωτός και έχει 200 δόντια. Όταν βρίσκονται υπό τάση, παρέχουν υψηλή στατική και δυναμική ροπή [18].



Εικόνα 2.8.6α: Βηματικός κινητήρας υβριδικού τύπου

Οι βηματικοί κινητήρες χρησιμοποιούν συνδυασμό ηλεκτρικών παλμών για την κίνησή τους. Στην Εικόνα 3.8.6α δεξιά παρουσιάζεται η διατομή ενός βηματικού κινητήρα. Ο ρότορας αποτελείται από πολλές οδοντώσεις και ο στάτορας από τέσσερα ζεύγη ηλεκτρομαγνητών. Ο συγκεκριμένος κινητήρας είναι δύο φάσεων και για κάθε φάση, αντιστοιχούν δύο ζεύγη ηλεκτρομαγνητών [18].

Η συνδεσμολογία των φάσεων είναι διαδοχική όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.8.6β:



Εικόνα 2.8.6β: Συνδεσμολογία βηματικού κινητήρα

Το κάθε ζεύγος αποτελείται από τους ηλεκτρομαγνήτες που βρίσκονται απέναντι ο ένας από τον άλλο. Για να περιστραφεί ο ρότορας εφαρμόζεται ορθά πολωμένη τάση σε κάθε ζεύγος διαδοχικά. Όταν το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται από το ένα ζεύγος ηλεκτρομαγνητών στο διπλανό του, μαγνητικές δυνάμεις εφαρμόζονται στον ρότορα με αποτέλεσμα να μετατοπίζεται κατά 1 βήμα, δηλαδή 1.8 μοίρες.

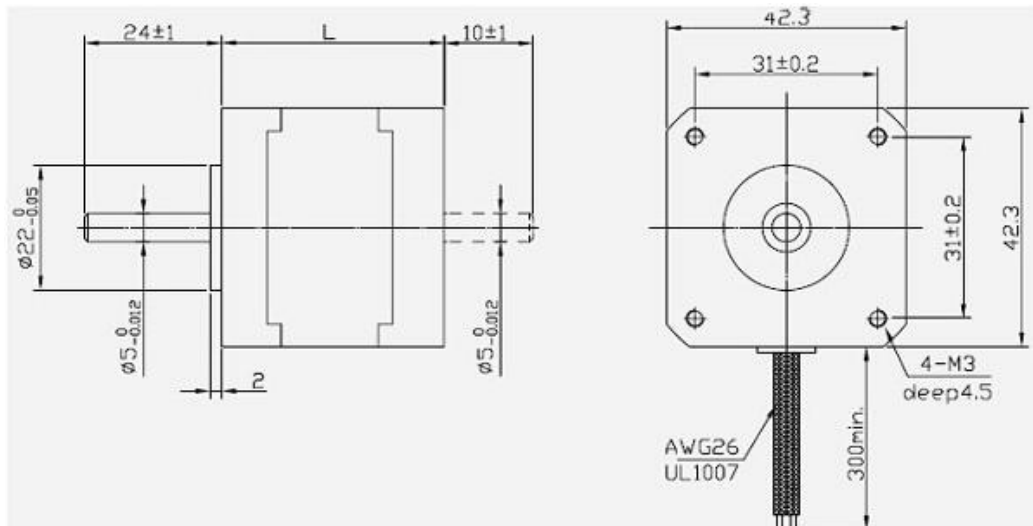
Τρόποι και βήματα περιστροφής: Η περιστροφή του άξονα του βηματικού κινητήρα μπορεί να ολοκληρωθεί είτε σε πλήρες βήμα, μισό βήμα, $\frac{1}{4}$ του βήματος, $\frac{1}{8}$ του βήματος (micro step). Για τον έλεγχο του απαιτείται ένας οδηγός (driver), ο οποίος προγραμματίζεται μέσω ενός μικροεπεξεργαστή (στην περίπτωση του μοντέλου, το EasyDriver). Το stepper motor πρέπει να λάβει ξεχωριστό παλμό για κάθε βηματική εντολή που θα υλοποιήσει και κάθε φορά που θα κινηθεί, το μήκος της κίνησης που θα διανύσει είναι το ίδιο. Όταν οι ψηφιακοί παλμοί αυξάνονται στη συχνότητα του μικροεπεξεργαστή, μια βηματική κίνηση μπορεί να μετατραπεί σε συνεχή περιστροφή με την ταχύτητα περιστροφής να είναι ανάλογη ως προς τη συχνότητα των παλμών [18].

Stepper motor NEMA 17: Πέραν από τους τρεις τύπους βηματικών κινητήρων, οι μηχανισμοί αυτοί έχουν διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Σύμφωνα με τις απαιτήσεις περιστροφής του μοντέλου διαξονικής βάσης, μελετήθηκαν και υπολογίστηκαν οι απαιτούμενες ροπές αδρανείας, ροπές ικανότητας περιστροφής, καθώς επίσης και οι τάσεις που χρειάζονται για να τροφοδοτηθούν τα stepper motors. Το κόστος αγοράς τους λήφθηκε επίσης υπόψη. Αφού έγινε η σχετική μελέτη, αποφασίστηκε η επιλογή τους. Επιλέχθηκε το μοντέλο NEMA 17. Η εταιρεία κατασκευής που τα κατασκευάζει, έχει δώσει στη σειρά αυτή το όνομα "NEMA" και το μοντέλο που επιλέχθηκε είναι το νούμερο 17.

Πίνακας 2.8.6α: Τεχνικά χαρακτηριστικά του βηματικού κινητήρα NEMA 17

Stepper motor NEMA 17	
Motor Type	Stepper Motor
Series	NEMA
Model	17- JK42HS40-1704
Step Angle	1.8°
Voltage (V)	12
Rated Current / Phase (A)	1.68
Resistance / Phase (Ohms)	1.5
Inductance / Phase (mH)	2.3
Holding Torque (kg.cm)	4.2
No. of Phases	2
No. of Lead Wires	4
Insulation Resistant	100 MΩMin. , 500VDC
Insulation Strength	50Hz 1Min. , 500V Min
Ambient Temperature	-20°C ~ +50°C
Temperature Rise	80°C Max.
Shaft Radial Play	0.02mm Max. (450g-load)
Shaft Axial Play	0.08Max. (450g-load)
End Play (mm)	0.1 - 0.3
Max. Radial Force (N)	28
Max. Axial Force (N)	10
Size (cm)	4.2 x 4.2 x 4
Shaft Diameter (mm)	5
Weight (Kg)	0.40

Τα φυσικά χαρακτηριστικά του Stepper Motor Nema 17 φαίνονται στην Εικόνα 2.8.6γ:

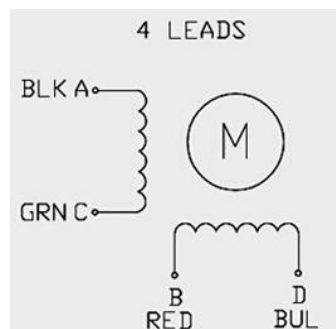


Εικόνα 2.8.6γ: Διαστάσεις βηματικού κινητήρα NEMA 17

Stepper Motor NEMA 17 – Καλωδίωση: Ο βηματικός κινητήρας NEMA 17 έχει τέσσερα καλώδια, δύο για κάθε φάση. Οι φάσεις ονομάζονται A και B και το κάθε καλώδιο εσωτερικά του κινητήρα έχει την εξής συνδεσμολογία.

Πίνακας 2.8.6β: Συνδεσμολογία καλωδίων βηματικού κινητήρα NEMA 17

Φάση	Καλώδιο (χρώμα)
A+	ΜΑΥΡΟ
A-	ΠΡΑΣΙΝΟ
B+	ΚΟΚΚΙΝΟ
B-	ΜΠΛΕ



Εικόνα 2.8.6δ: Συνδεσμολογία καλωδίων βηματικού κινητήρα NEMA 17

Για να επιβεβαιωθεί η ορθότητα των καλωδίων κάθε φάσης, ελέγχθηκαν τα καλώδια με συγκεκριμένη διαδικασία. Με το πολύμετρο ρυθμισμένο στη μέτρηση αντίστασης, συνδέθηκε το ένα άκρο του μαζί με ένα από τα 4 καλώδια. Ακολουθώντας, τα υπόλοιπα 3 καλώδια ενώθηκαν ξεχωριστά με το άλλο άκρο του πολύμετρου και κάθε φορά πάρθηκε μια τιμή αντίστασης. Το καλώδιο που όταν συνδέθηκε είχε τη μικρότερη αντίσταση είναι το αντίστοιχο ζεύγος του αρχικού. Τα άλλα 2 καλώδια αντιστοιχούν για την άλλη φάση του κινητήρα.

2.9 Είδη μετάδοσης κίνησης

Είδη μετάδοσης κίνησης:

- ιμάντες
- καδένες
- γρανάζια
- απευθείας – άξονας με άξονα

Έπειτα από την επιλογή του μηχανισμού κίνησης, ο οποίος είναι βηματικοί κινητήρες (stepper motors NEMA 17) και για τους δύο άξονες, έπρεπε να επιλεγεί και το είδος μετάδοσης της κίνησης, το οποίο μεταδίδει την κίνηση από τους κινητήρες στους δύο βαθμούς ελευθερίας του μοντέλου.

Οι δύο βαθμοί ελευθερίας είναι δύο μεταλλικοί άξονες που πρέπει να περιστρέφονται γύρω από τον εαυτό τους. Οι δύο περιστροφές που εκτελούνται είναι στον κάθετο άξονα (Βορράς – Νότος) και στον οριζόντιο (Ανατολή – Δύση).

Τα είδη μετάδοσης κίνησης που μελετήθηκαν είναι τα ακόλουθα:

- Ιμάντας χρονισμού
- Καδένα χρονισμού
- Σύνδεση άξονα με άξονα
- Γρανάζι σε γρανάζι
- Συνδυασμός των πιο πάνω

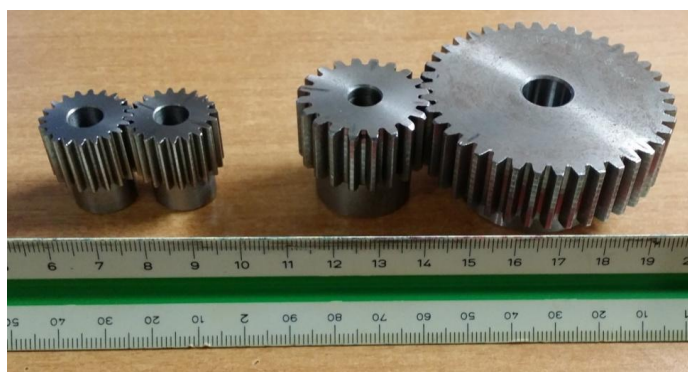
Ο ιμάντας χρονισμού είναι ευρέως διαδεδομένος σε αρκετές κατασκευές. Αποτελείται από δύο κυλίνδρους με αυλακώσεις που ενώνονται μεταξύ τους, με ένα εύκαμπτο πλαστικό μείγμα τον ιμάντα. Η κινητήριος δύναμη του είναι ο κινητήρας, ο οποίος καθώς περιστρέφεται αναγκάζει το κινούμενο μέρος να περιστραφεί αναλογικά προς την ίδια κατεύθυνση. Η διάμετρος των δύο κυλίνδρων όταν δεν είναι η ίδια, μπορεί να επιτύχει υποβιβασμό ή αύξηση της ταχύτητας, ανάλογα με τη περίπτωση. Παρόλα αυτά, η χρήση του ιμάντα χρονισμού καταλαμβάνει αρκετό όγκο εκεί και όπου εφαρμόζεται, αφού στο διάστημα που ο ιμάντας εργάζεται, δεν πρέπει να εμποδίζεται [19]. Επιπλέον, χρειάζεται αρκετή συντήρηση αφού με τη χρήση ο ιμάντας χαλαρώνει, φθείρετε και χρειάζεται αντικατάσταση. Όταν χαλαρώσει, υπάρχει αυξημένη πιθανότητα να απολεσθεί ο συγχρονισμός μεταξύ κινητήριου και κινούμενου μέρους, με αποτέλεσμα να εκτελούνται άσκοπες κινήσεις. Όταν δεν ελέγχεται τακτικά, μπορεί να αποκοπεί, με αποτέλεσμα να παύει η λειτουργία του και να θέτει σε κίνδυνο το κινούμενο μέρος το οποίο είναι υπεύθυνος να περιστρέφει [20, 21, 22, 23].

Τα μειονεκτήματα της χαλάρωσης, της φθοράς και της αποκοπής μπορούν να επιλυθούν με την εφαρμογή καδένας χρονισμού. Αποτελείται από δύο οδοντοτροχούς που ενώνονται μεταξύ τους με μια μεταλλική καδένα. Είναι αρκετά αποτελεσματική λύση όμως και σε αυτή την περίπτωση καταλαμβάνει αρκετό όγκο. Η συντήρηση της πρέπει να είναι τακτική αφού πρέπει να λιπαίνεται για να λειτουργεί ομαλά και δεν πρέπει να είναι εκτεθειμένη σε νερό και σκόνη. Για τους σκοπούς του μοντέλου διαξονικής βάσης της εργασίας, η χρήση της καδένας κρίθηκε μη απαραίτητη, λόγω κόστους κυρίως [21].

Ένα πλεονέκτημα των βηματικών κινητήρων είναι ότι λόγω του ότι η ταχύτητα και το μέγεθος κάθε κίνησης καθορίζονται από το χρήστη, η ικανότητα περιστροφής σε πολύ χαμηλές ταχύτητες είναι εφικτή. Αυτό δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης ενός φορτίου απευθείας με τον άξονα του stepper motor. Στην προκειμένη περίπτωση, ο άξονας του φορτίου πρέπει να μπορεί να συνδεθεί με τον άξονα του κινητήρα με τέτοιο τρόπο που να μπορεί να περιστρέφεται ανεμπόδιστα και ταυτόχρονα. Αν η διάμετρος των δύο αξόνων είναι συγκριτικά μεγάλη, τότε μπορεί ο μεγαλύτερος να τρυπηθεί με τρύπα διαμέτρου ίση με του μικρότερου και να εφαρμοστεί κάποιος σφικτήρας για να τον κρατά σταθερό, αλλιώς στο ενδιάμεσο μπορεί να εφαρμοστεί κάποιος σύνδεσμος που να ενώνει και τους δύο άξονες και να τους κρατά σε επαφή με σφικτήρες. Η σύνδεση άξονα με άξονα, μπορεί να επιτευχθεί μόνο στην περίπτωση που τόσο ο άξονας του κινούμενου μέρους όσο και ο άξονας του κινητήρα βρίσκονται σε οριζόντια διάταξη. Στην περίπτωση που βρίσκονται σε κατακόρυφη διάταξη, δεν συνιστάται η εφαρμογή αυτή γιατί όλο το βάρος της κατασκευής θα επιβαρύνει τον κινητήρα, με αποτέλεσμα την καταστροφή του.

Το προτιμότερο είδος μετάδοσης κίνησης για το μοντέλο, κρίθηκε πως είναι η επαφή δύο γραναζιών. Αποτελεί πολύ αποτελεσματική λύση και προσφέρει μεγάλη ακρίβεια κίνησης για τις ανάγκες της διαξονικής βάσης. Όταν δύο γρανάζια έρχονται σε επαφή, η κατεύθυνση περιστροφής μεταξύ κινητήριου μέρους και κινούμενου είναι αντίστροφη. Αν ένα τρίτο εφαρμοστεί στο ενδιάμεσο, τότε επιτυγχάνεται ίδιας κατεύθυνσης περιστροφή. Η διάμετρος των γραναζιών όταν δεν είναι η ίδια, μπορεί να επιτύχει υποβιβασμό ή αύξηση της ταχύτητας και ταυτόχρονη αύξηση ή μείωση της ροπής αντίστοιχα [22, 23].

Για την επίτευξη της μετάδοσης της κίνησης από τους βηματικούς κινητήρες για τους σκοπούς του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε η περίπτωση επαφής δύο γραναζιών για τον κάθετο άξονα (αζιμούθιο) και η απευθείας σύνδεση του κινητήρα με τον οριζόντιο άξονα (κλίση). Όσον αφορά τη βάση του φ/β πλαισίου, χρησιμοποιήθηκαν ακόμα δύο γρανάζια για την κίνηση στον οριζόντιο άξονα (κλίση). Στην Εικόνα 3.9α παρουσιάζονται τα δύο όμοια γρανάζια που δίνουν κίνηση στον κάθετο άξονα (κλίση) της βάσης του φ/β πλαισίου και τα δύο ανόμοια γρανάζια που δίνουν κίνηση στον οριζόντιο άξονα (αζιμούθιο).



Εικόνα 2.9α: Τα γρανάζια που επιλέγηκαν

Η περιστροφή μεταξύ Βορρά – Νότου (κάθετος άξονας – κλίση) για το μοντέλο, επιτυγχάνεται με απευθείας σύνδεση του άξονα στον αντίστοιχο κινητήρα και η αντίστοιχη περιστροφή μεταξύ Βορρά – Νότου (κάθετος άξονας – κλίση) για τη βάση του φ/β πλαισίου, επιτυγχάνεται με επαφή δύο γραναζιών σε αναλογία 1:1. Δηλαδή όση περιστροφή γίνεται στον άξονα του κινητήρα, τόση γίνεται και στον τελικό άξονα.

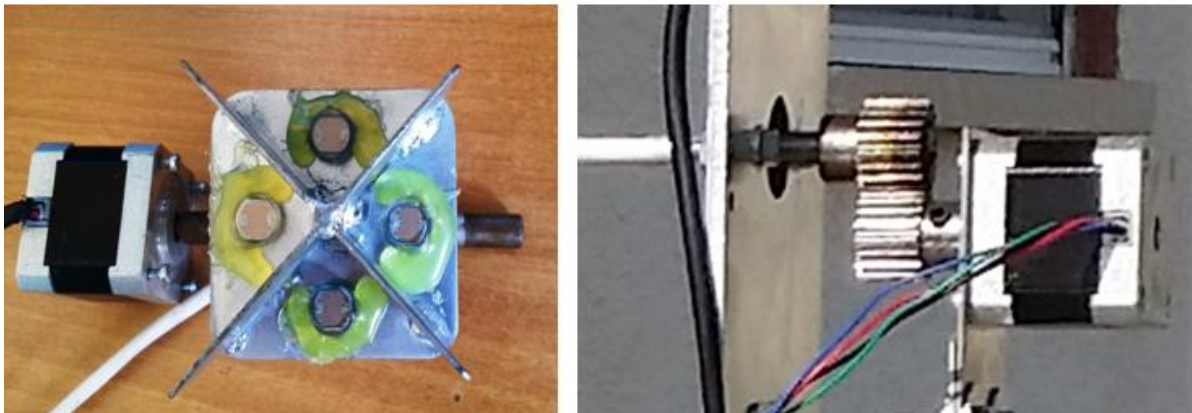
Η περιστροφή μεταξύ Ανατολής – Δύσης (οριζόντιος άξονας – αζιμούθιο) επιτυγχάνεται με επαφή δύο ανόμοιων γραναζιών σε αναλογία 2:1. Δηλαδή ο τελικός άξονας κάνει τη μισή περιστροφή από αυτήν του κινητήρα. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτή η αναλογία, δεν είναι για σκοπούς μείωσης ταχύτητας ή αύξησης ροπής. Ο βηματικός κινητήρας μπορεί να λειτουργήσει όπως επιθυμεί ο χρήστης. Αντιθέτως, υπήρχε η ανάγκη αύξησης της απόστασης μεταξύ των δύο κέντρων των αξόνων, έτσι ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί ο κινητήρας στο σημείο που πρέπει.

Πίνακας 2.9: Τεχνικά χαρακτηριστικά γραναζιών

Modulus Gears Specifications			
#	1*	2**	3***
Type	Cylindrical Modulus Steel Gear		
Modulus of Steel	M1	M1.5	M1.5
No. of Teeth	20	20	40
Central Hole Diameter (mm)	8	8	12
Fastening Holes	0	0	0
Diameter (mm)	22	33	62.8
Tooth depth (mm)	2.2	3.3	3.3
Tooth Length (mm)	15	17	17
Total Length (mm)	25	30	30
* Τα δύο όμοια γρανάζια για την κίνηση Β – Ν			
** Το γρανάζι του κινητήρα για την κίνηση Α – Δ			
*** Το γρανάζι του κινούμενου άξονα για την κίνηση Α – Δ			

Αναγκαίες τροποποιήσεις: Από την έρευνα αγοράς που έγινε, τα γρανάζια αγοράστηκαν από την εταιρεία VASILIS KOUKOUNIDIS LTD. Η συγκεκριμένη εταιρεία ήταν η μόνη που διέθετε τέτοιου είδους γρανάζια στην αγορά της Κύπρου. Ωστόσο τα συγκεκριμένα, χρειάστηκαν ορισμένες τροποποιήσεις για να μπορέσουν να συμβαδίσουν με τα Stepper Motors NEMA 17.

- Η κεντρική τρύπα των γραναζιών 1 και 2 είναι διαμέτρου 8mm. Ο άξονας του stepper motor είναι 5mm. Επομένως για αυτή την τροποποίηση, χρειάστηκε η επέμβαση από ένα Τορναδόρο, ο οποίος με μεγάλη ακρίβεια δημιούργησε ένα δαχτυλίδι μετάπτωσης από 8mm σε 5mm κατά μήκος και εσωτερικά της κεντρικής τρύπας των γραναζιών.
- Τα συγκεκριμένα γρανάζια δεν διέθεταν τρύπα στερέωσης για να μπορούν να στερεώνονται και να παραμένουν σταθερά τα γρανάζια πάνω στον άξονα του κινητήρα. Και εδώ χρειάστηκε ο Τορναδόρος, ο οποίος με μεγάλη ακρίβεια τρύπησε κάθετα την κεντρική τρύπα των γραναζιών και χρησιμοποιώντας ένα εξειδικευμένο εργαλείο (κολαούζος), δημιούργησε πάσο. Στο πάσο αυτό μπήκε μια ακέφαλη βίδα διαμέτρου 5mm για να στερεώνει το γρανάζι με τον κινητήρα.

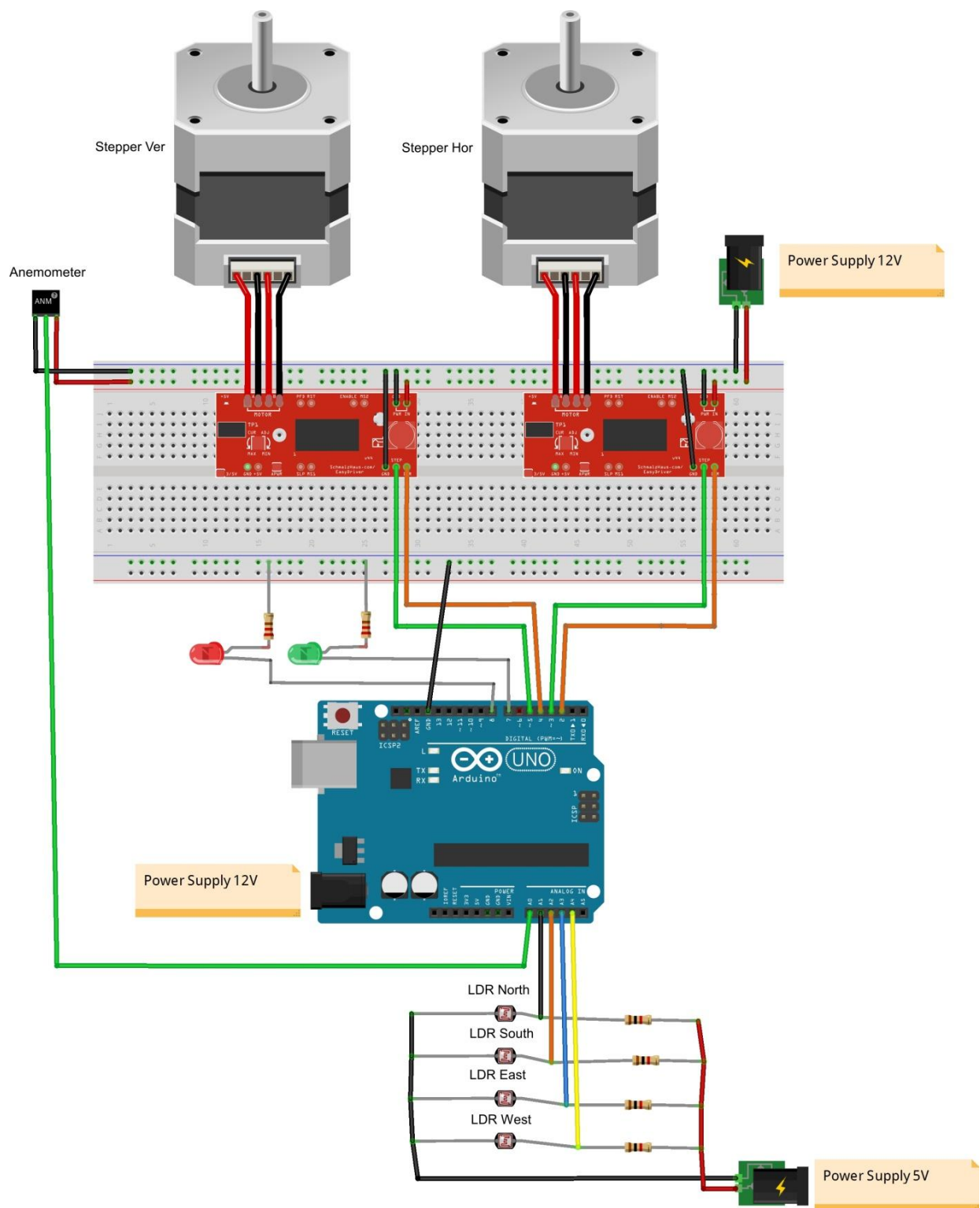


Εικόνα 2.9β: Διάταξη στον άξονα Βορρά – Νότου (για το μοντέλο και τη βάση του φ/β)

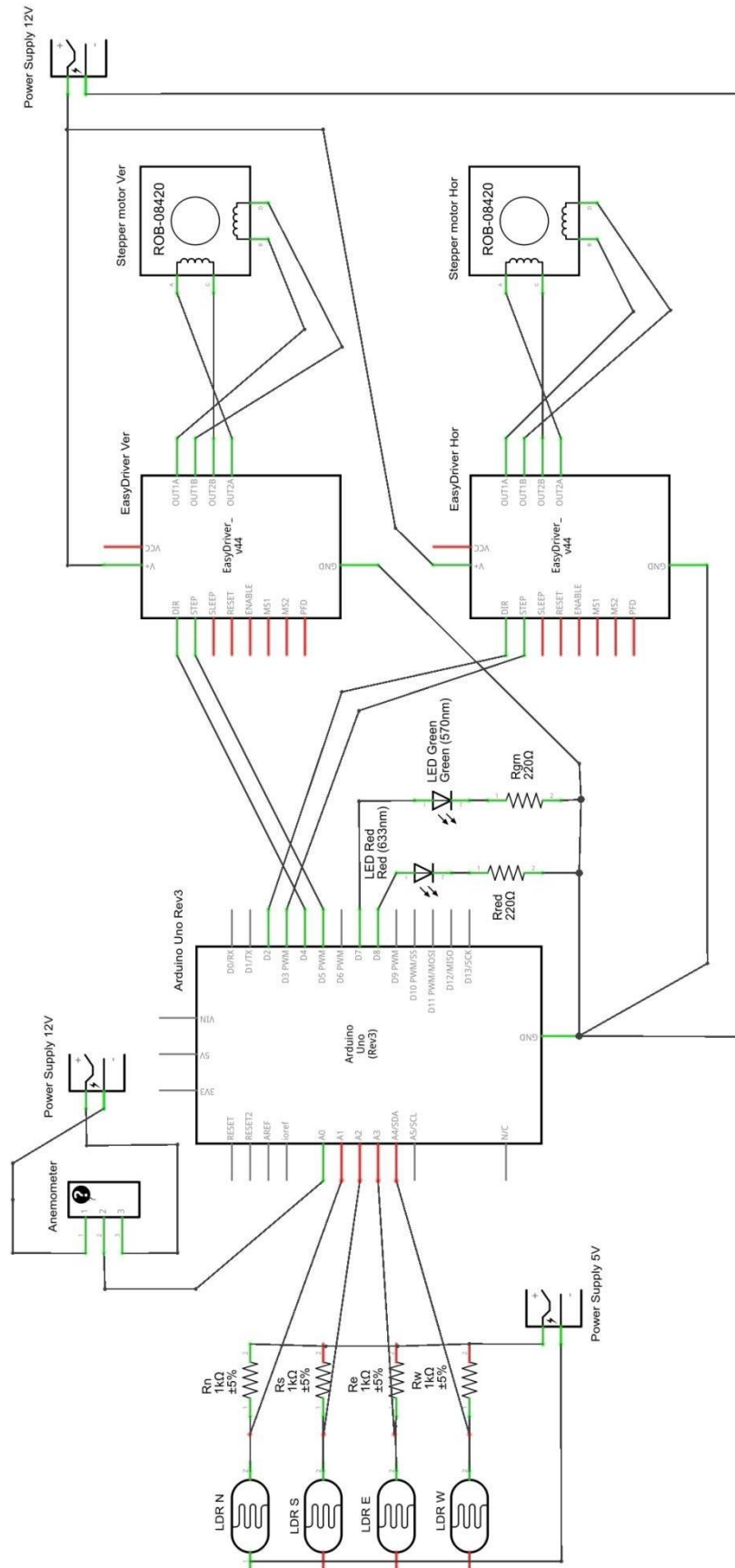


Εικόνα 2.9γ: Διάταξη στον άξονα Ανατολής – Δύσης

2.10 Σχεδιασμός ηλεκτρονικού κυκλώματος



Εικόνα 2.10α: Σχέδιο ηλεκτρονικών



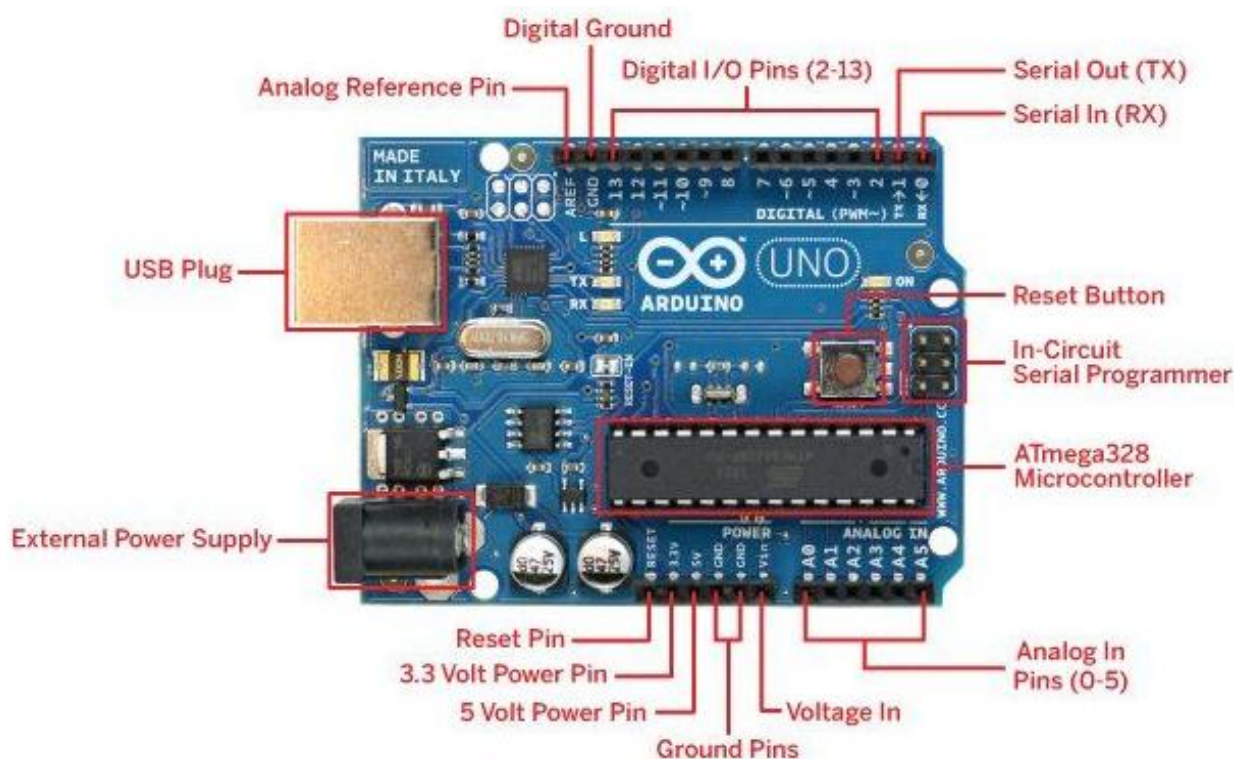
Εικόνα 2.10β: Μονογραμμικό σχέδιο ηλεκτρονικών

3 Μικροελεγκτής μοντέλου

3.1 Επιλογή μικροελεγκτή

Ο μικροελεγκτής αποτελεί τον «εγκέφαλο» του συστήματος. Δέχεται ως εισόδους τις τάσεις από το κύκλωμα των LDRs και το ανεμόμετρο και τις ψηφιοποιεί μέσω του Analog/Digital Converter που διαθέτει. Πιο συγκεκριμένα, δέχεται τάσεις εισόδου από 0 μέχρι 5 Volts και τις ψηφιοποιεί σε ένα εύρος 1024 ακέραιων τιμών, από 0 μέχρι 1023. Ακολουθως, ελέγχει τις τιμές αυτές βάσει του προγραμματισμού του και δίνει εντολές στα τμήματα εξόδου για την κίνηση των δύο κινητήρων (δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα), να σταματήσουν στη βέλτιστη θέση ή να επιστρέψουν πίσω στην αρχική.

Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιείται είναι ο Arduino UNO R3 ATmega328P CH340G της εταιρείας Arduino. Είναι κατάλληλος για την κατασκευή του μοντέλου διαξονικής βάσης και επιλέχθηκε μεταξύ πολλών άλλων, τόσο της ίδιας εταιρείας, όσο και παρόμοιων μικροελεγκτών λόγω του χαμηλού του κόστους σε σχέση με τις απαιτούμενες λειτουργίες και της ευκολίας προγραμματισμού του.



Εικόνα 3.1: Η πλακέτα Arduino UNO R3 ATmega328P CH340G

3.2 Πλακέτα Arduino UNO Rev3 ATmega328P CH340G

Το UNO είναι ένας μικροελεγκτής με μορφή πλακέτας βασισμένο στο ολοκληρωμένο κύκλωμα ATmega328P. Περιλαμβάνει 14 ψηφιακές εισδοχές εισόδου/εξόδου, από τις οποίες οι 6 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως παλμοκωδικοί διαμορφωτές (PWM), 6 αναλογικές εισόδους, κρύσταλλο χαλαζία για συχνότητα 16MHz, σύνδεση USB, μια υποδοχή ρεύματος, μια κεφαλίδα ICSP και ένα κουμπί επαναφοράς [24]. Περιλαμβάνει όλα όσα χρειάζεται ο μικροελεγκτής του μοντέλου διαξονικής βάσης φ/β πλαισίου της εργασίας. Συνδέεται πολύ απλά μέσω του καλωδίου USB σε ένα υπολογιστή ή τροφοδοτείται από ένα AC σε DC τροφοδοτικό ή μπαταρία.

Σε περίπτωση που η πλακέτα καταστραφεί, αλλά αντικαθιστάται το ολοκληρωμένο κύκλωμα ATmega328P, το οποίο είναι σχετικά φθινό σε κόστος.

3.2.1 Προγραμματισμός

Η πλακέτα UNO μπορεί να προγραμματιστεί με το λογισμικό Arduino (IDE). Το ολοκληρωμένο κύκλωμα ATmega328 στην πλακέτα UNO είναι ήδη προγραμματισμένο με ένα bootloader που επιτρέπει τη φόρτωση νέου κώδικα σε αυτό, χωρίς τη χρήση ενός εξωτερικού προγραμματιστή υλικού. Επικοινωνεί με τη χρήση του αρχικού πρωτοκόλλου αναπτυξιακής κάρτας STK500. Η πλακέτα UNO έχει δυνατότητα επαναφοράς polyfuse που προστατεύει τις θύρες USB του υπολογιστή από βραχυκύκλωμα και υπερένταση. Παρόλο που οι πλείστοι υπολογιστές παρέχουν τη δική τους εσωτερική προστασία, η ασφάλεια της πλακέτας παρέχει ένα επιπλέον επίπεδο προστασίας. Εάν εφαρμοστούν περισσότερα από 500mA στη θύρα USB, η ασφάλεια θα διακόψει αυτόματα τη σύνδεση μέχρι την απομάκρυνση του βραχυκυκλώματος ή της υπερέντασης [24].

3.2.2 Τροφοδοσία

Η πλακέτα Uno μπορεί να τροφοδοτείται μέσω της σύνδεσης USB ή με εξωτερικό τροφοδοτικό. Σε περίπτωση εξωτερικής τροφοδοσίας, η πλακέτα UNO μπορεί να λειτουργήσει με εξωτερική πηγή 6 – 20 Volts. Εάν τροφοδοτηθεί με λιγότερο από 7 Volts, η εισδοχή 5V της πλακέτας μπορεί να παρέχει λιγότερο από 5 Volts και η πλακέτα να γίνει ασταθής. Εάν εφαρμοστούν περισσότερα από 12 Volts, ο ρυθμιστής τάσης μπορεί να υπερθερμανθεί και να προκαλέσει ζημιά στην πλακέτα. Συνιστάται από την εταιρεία η τροφοδότηση τάσεως 7 έως 12 Volts [24].

Οι εισδοχές ισχύος (power pins) είναι ως εξής:

- Vin: Η τάση εισόδου της πλακέτας UNO, όταν χρησιμοποιείται εξωτερική πηγή ενέργειας (σε αντιδιαστολή με τα 5 Volts από τη σύνδεση USB). Μέσω αυτής της εισδοχής γίνεται η παροχή τάσης.
- 5V: Εξάγει μια ρυθμισμένη τάση στα 5 Volts από τον ρυθμιστή στην πλακέτα.
- 3V3: Έξοδος τάσης 3,3 Volts που παράγεται από το ρυθμιστή στην πλακέτα. Η μέγιστη κατανάλωση ρεύματος είναι 50 mA.
- GND: Γείωση.

3.2.3 Μνήμη

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα ATmega328 έχει μνήμη 32KB (0.5 KB καταλαμβάνεται από το bootloader). Διαθέτει επίσης 2KB SRAM και 1KB EEPROM (η οποία μπορεί να διαβάσει και να γράψει μέσω της βιβλιοθήκης EEPROM) [24].

3.2.4 Θύρες εισόδου/εξόδου (I/O pins)

Κάθε μία από τις 14 ψηφιακές εισδοχές της πλακέτας UNO μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος ή έξοδος, χρησιμοποιώντας τις εντολές/συναρτήσεις pinMode(), digitalWrite() και digitalRead() και οι οποίες λειτουργούν στα 5 Volts. Κάθε pin μπορεί να παρέχει ή να λάβει 20mA ως συνιστώμενη κατάσταση λειτουργίας και έχει μια εσωτερική αντίσταση pull-up (προεπιλογή αποσύνδεσης) της τάξης των 20 – 50 KΩ. Η μέγιστη τιμή που δεν πρέπει να υπερβαίνεται σε κάθε pin I/O είναι 40mA, για να αποφευχθεί μόνιμη βλάβη στον μικροελεγκτή [24].

Επιπλέον, μερικές εισδοχές έχουν εξειδικευμένες λειτουργίες:

- Serial – 0 (RX) και 1 (TX): Χρησιμοποιείται για τη λήψη (RX) και τη διαβίβαση (TX) σειριακών δεδομένων TTL.
- Εξωτερικές διακοπές – 2 και 3: Αυτές οι εισδοχές μπορούν να διαμορφωθούν ανάλογα για να προκαλέσουν μια διακοπή σε μια χαμηλή τιμή, μια άνοδο ή την πτώση άκρης ή μια αλλαγή στην αξία.
- PWM – 3, 5, 6, 9, 10 και 11: Παροχή 8-bit εξόδου PWM μέσω της εντολής analogWrite().
- SPI – 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO) και 13 (SCK): Αυτές οι εισδοχές υποστηρίζουν την επικοινωνία SPI, χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη SPI.
- LED – 13: Υπάρχει μία ενσωματωμένη λάμπα LED οδηγούμενο από το ψηφιακό pin 13. Όταν η τιμή της εισδοχής είναι HIGH, η LED είναι αναμμένη, ενώ όταν είναι LOW, είναι σβηστή.
- TWI – A4 ή SDA pin και A5 ή SCL pin: Υποστήριξη επικοινωνίας TWI, χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη Wire.

Η πλακέτα UNO έχει 6 αναλογικές εισόδους (A0 μέχρι A5), κάθε μία από τις οποίες παρέχει 10 bits κωδικοποίησης (δηλαδή 1024 διαφορετικές τιμές). Εξ ορισμού μετρούν από το 0 μέχρι τα 5 Volts, χρησιμοποιώντας το pin AREF και την εντολή analogReference().

Υπάρχουν και τα pins:

- AREF: Τάση αναφοράς αναλογικών εισόδων. Χρησιμοποιείται μέσω της εντολής analogReference().
- Reset: Επαναφέρει τον μικροελεγκτή στην αρχική κατάσταση.

3.2.5 Επικοινωνία

Η πλακέτα UNO έχει μια σειρά από εργαλεία για την επικοινωνία με έναν υπολογιστή, μια άλλη πλακέτα UNO ή άλλους μικροελεγκτές. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα ATmega328 παρέχει UART TTL (5V) σειριακή επικοινωνία, η οποία είναι διαθέσιμη στις ψηφιακές εισδοχές 0 (RX) και 1 (TX).

Η πλακέτα UNO χρησιμοποιεί τα τυπικά προγράμματα οδήγησης USB COM και δεν χρειάζεται εξωτερικό οδηγό. Ωστόσο, στα Windows απαιτείται ένα αρχείο της μορφής .inf. Το λογισμικό Arduino (IDE) περιλαμβάνει μια σειριακή οθόνη η οποία επιτρέπει απλά την εμφάνιση δεδομένων μέσω κειμένου όταν αποστέλλονται προς και από την πλακέτα. Οι ενδείξεις LED RX και TX στην πλακέτα αναβοσβήνουν όταν τα δεδομένα μεταδίδονται μέσω του ολοκληρωμένου κυκλώματος και του καλωδίου USB. Η βιβλιοθήκη SoftwareSerial επιτρέπει σειριακή επικοινωνία σε οποιαδήποτε από τις ψηφιακές εισδοχές του UNO. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα ATmega328 υποστηρίζει επίσης I2C (TWI) και την επικοινωνία SPI. Το λογισμικό Arduino (IDE) περιλαμβάνει μια βιβλιοθήκη καλωδίων για να απλοποιήσει τη χρήση του διαύλου I2C. Για επικοινωνία SPI, απαιτείται βιβλιοθήκη SPI [24].

3.3 Χαρακτηριστικά μικροελεγκτή

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά ολοκληρωμένου κυκλώματος ATmega328P

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

Atmega168 Pin Mapping

Arduino function				Arduino function
reset	(PCINT14/RESET) PC6	1	28	PC5 (ADC5/SCL/PCINT13) analog input 5
digital pin 0 (RX)	(PCINT16/RXD) PD0	2	27	PC4 (ADC4/SDA/PCINT12) analog input 4
digital pin 1 (TX)	(PCINT17/TXD) PD1	3	26	PC3 (ADC3/PCINT11) analog input 3
digital pin 2	(PCINT18/INT0) PD2	4	25	PC2 (ADC2/PCINT10) analog input 2
digital pin 3 (PWM)	(PCINT19/OC2B/INT1) PD3	5	24	PC1 (ADC1/PCINT9) analog input 1
digital pin 4	(PCINT20/XCK/T0) PD4	6	23	PC0 (ADC0/PCINT8) analog input 0
VCC	VCC	7	22	GND GND
GND	GND	8	21	AREF analog reference
crystal	(PCINT6/XTAL1/TOSC1) PB6	9	20	AVCC VCC
crystal	(PCINT7/XTAL2/TOSC2) PB7	10	19	PB5 (SCK/PCINT5) digital pin 13
digital pin 5 (PWM)	(PCINT21/OC0B/T1) PD5	11	18	PB4 (MISO/PCINT4) digital pin 12
digital pin 6 (PWM)	(PCINT22/OC0A/AIN0) PD6	12	17	PB3 (MOSI/OC2A/PCINT3) digital pin 11(PWM)
digital pin 7	(PCINT23/AIN1) PD7	13	16	PB2 (SS/OC1B/PCINT2) digital pin 10 (PWM)
digital pin 8	(PCINT0/CLKO/ICP1) PB0	14	15	PB1 (OC1A/PCINT1) digital pin 9 (PWM)

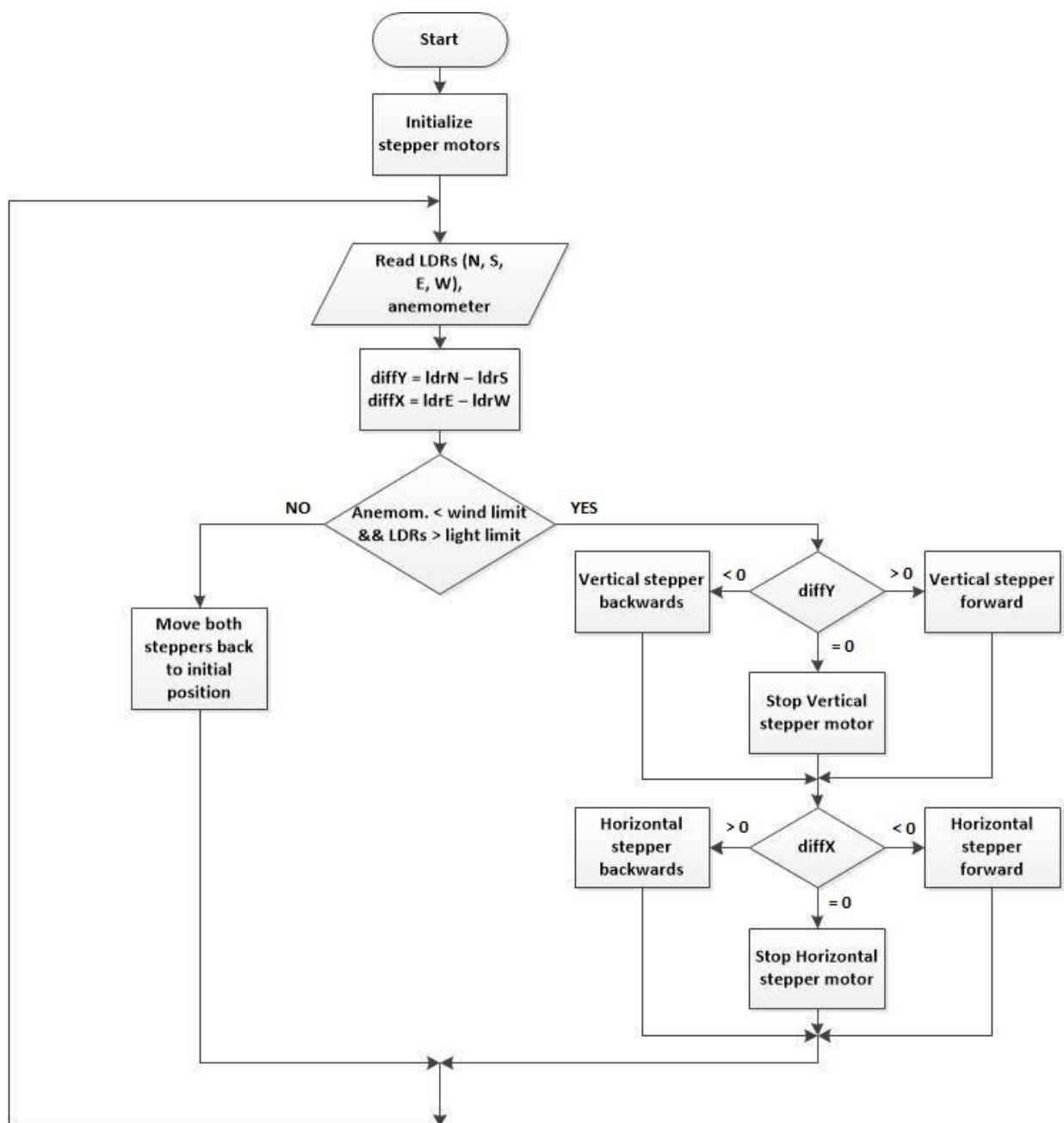
Digital Pins 11, 12 & 13 are used by the ICSP header for MOSI, MISO, SCK connections (Atmega168 pins 17, 18 & 19). Avoid low-impedance loads on these pins when using the ICSP header.

Εικόνα 3.3: Αντιστοίχιση ακροδεκτών του μικροελεγκτή (ΑΤmega168 παρόμοιος με ΑΤmega328)

4 Προγραμματισμός μικροελεγκτή

Σε αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνεται η δημιουργία διαγράμματος ροής του προγράμματος, η σύνταξη του κώδικα στο λογισμικό Arduino (IDE), διαδικασία προγραμματισμού της πλακέτας Arduino UNO και ο έλεγχος της ορθής λειτουργίας του μέσω πραγματικών δοκιμών της κατασκευής.

4.1 Διάγραμμα ροής (Flow diagram)



Εικόνα 4.1: Διάγραμμα ροής

4.2 Κώδικας της εργασίας

Ακολουθεί ο κώδικας που συντάχθηκε για τη λειτουργία του μοντέλου:

```
// Cyprus University of Technology, Limassol, Cyprus
// Department of Electrical Engineering, Computer Engineering and Informatics
// EEN412 - Capstone Design II
// Research, design and manufacture of a dual axis solar tracker model
// Chatzigeorgiou N., Porfyriou M., Siammouti E., Charalampous M.
// Dr. Sotos Voskarides

#include <Stepper.h> // Library Stepper.h for dealing stepper motors
#include <math.h>    // Library math.h for basic mathematical operations

// Variables
int windspeed;      // Value of the wind speed sensor
int upsensor;       // Value of the Up LDR sensor
int downsensor;    // Value of the Down LDR sensor
int rightsensor;   // Value of the Right LDR sensor
int leftsensor;    // Value of the Left LDR sensor
int diffy;         // Difference between the Up LDR and the Down LDR (Vertical axis)
int diffx;         // Difference between the Right LDR and the Left LDR (Horizontal axis)
int ledGreen = 7;  // Green LED is attached to pin 7
int ledRed = 8;    // Red LED is attached to pin 8
int stepCountyF = 0; // Number of steps the Vertical motor has taken Forward
int stepCountyB = 0; // Number of steps the Vertical motor has taken Backward
int stepCountxF = 0; // Number of steps the Horizontal motor has taken Forward
int stepCountxB = 0; // Number of steps the Horizontal motor has taken Backward
int stepsV; // Number of steps the Vertical motor has taken... with the initial position
int stepsH; // Number of steps the Horizontal motor has taken... with the initial position
int tolY;      // Light tolerance margin in Vertical axis
int tolX;      // Light tolerance margin in Horizontal axis
int y;         // Counter for the Verical axis
int x;         // Counter for the Horizontal axis
```

```

// Horizontal stepper motor definition
#define horDIR_PIN 2 // horDIR_PIN is attached to pin 2
#define horSTEP_PIN 3 // horSTEP_PIN is attached to pin 3
// Vertical stepper motor definition
#define verDIR_PIN 4 // verDIR_PIN is attached to pin 4
#define verSTEP_PIN 5 // verSTEP_PIN is attached to pin 5

// Program initialization
void setup()
{
  // Setup code here, to run once
  // Serial port
  Serial.begin(9600); // Initialize serial communication at 9600 bits per second
  // Pins configuration
  pinMode(windspeed, INPUT); // Initialize windspeed as an input
  pinMode(upsensor, INPUT); // Initialize upsensor as an input
  pinMode(downsensor, INPUT); // Initialize downsensor as an input
  pinMode(rightsensor, INPUT); // Initialize rightsensor as an input
  pinMode(leftsensor, INPUT); // Initialize leftsensor as an input
  pinMode(horDIR_PIN, OUTPUT); // Initialize horDIR_PIN as an output
  pinMode(horSTEP_PIN, OUTPUT); // Initialize horSTEP_PIN as an output
  pinMode(verDIR_PIN, OUTPUT); // Initialize verDIR_PIN as an output
  pinMode(verSTEP_PIN, OUTPUT); // Initialize verSTEP_PIN as an output
  pinMode(ledGreen, OUTPUT); // Initialize ledGreen as an output
  pinMode(ledRed, OUTPUT); // Initialize ledRed as an output
}

void loop()
{
  // Main code here, to run repeatedly
  // Reading the analog wind speed input
  windspeed=analogRead(A0);
  // Reading the analog LDR voltage inputs. Arduino's ADC converts them to integers
  // Multiplying them by a constant to calibrate them with upsensor as reference.
  // Each constant is found by calculations

```

```

upsensor = analogRead(A1);
downsensor = analogRead(A2)*0.98504486;
rightsensor = analogRead(A3)*0.98406375;
leftsensor = analogRead(A4)*0.99596774;
// Differences in the sensors
diffy = upsensor - downsensor; // Difference in the Vertical axis
diffx = rightsensor - leftsensor; // Difference in the Horizontal axis
delay(50);

// Check for high wind speed or dark conditions
// Maximum sun irradiation gives maximum voltage (5 Volts correspond to 1023 units...)
// Maximum wind speed gives maximum voltage (5 Volts coresspond to 1023 units...)
// Check if the wind speed is below the winds speed limit AND if at least one LDR sensor
// takes an above the limit light
if ((windspeed < 50) && ((upsensor > 200) || (downsensor > 200) || (rightsensor > 200) ||
(leftsensor > 200)))
{
    // Green LED on, to show that the whole system is working (cases of low
    // speed winds AND daylight)
    digitalWrite(ledGreen, HIGH); // Turn green LED on
    digitalWrite(ledRed, LOW); // Turn red LED off
    delay(1000); // Wait for 1000ms (1 second)

    // Check in the Vertical axis
    // If Up>Down
    if (diffy > 0)
    {
        // Rotate a specific number of microsteps (8 microsteps per step)
        // A 200 step stepper would take 1600 micro steps for one full revolution
        rotateV(8, .3); // Turn motor up 1 step (8 microsteps) with 0.3 speed
        delay(10);
        stepCountyF = stepCountyF + 8; // Counting steps in Vertical axis (Forward)
        delay(50);
    }
    // If Up<Down
    if (diffy < 0)

```

```

{
  rotateV(-8, .3);          // Turn motor down 1 step (8 microsteps) with 0.3 speed
  delay(10);
  stepCountyB = stepCountyB + 8; // Counting steps in Vertical axis (Backward)
  delay(50);
}
// Check if the the tracker found the optimum sun position in the Verical axis
// between the tolerance margin
tolY = abs(upsensor - downsensor); // Absolute difference value in Vertical axis
if (tolY < 3)                    // The value 3 is an example for illustration purposes
{
  delay(3000);                  // Delay 3000ms (3 seconds)
}
// If Up=Down
if (diffy == 0)
{
  rotateV(0, .3);              // Stop Vertical motor
  delay(50);
}

// Check in the Horizontal axis
// If Right>Left
if (diffx > 0)
{
  rotateH(-8, .3);            // Turn motor right 1 step (8 microsteps) with 0.3 speed
  delay(10);
  stepCountxF = stepCountxF + 8; // Counting steps in Horizontal axis (Forward)
  delay(50);
}
// If Right<Left
if (diffx < 0)
{
  rotateH(8, .3);              // Turn motor left 1 step (8 microsteps) with 0.3 speed
  delay(10);
  stepCountxB = stepCountxB + 8; // Counting steps in Horizontal axis (Backward)
}

```

```

    delay(50);
}
// Check if the the tracker found the optimum sun position in the Horizontal axis
// between the tolerance margin
tolX = abs(rightsensor - leftsensor); // Absolute difference value in Horizontal axis
if (tolX < 3) // The value 3 is an example for illustration purposes
{
    delay(3000); // Delay 3000ms (3 seconds)
}
// If Right=Left
if (diffx == 0)
{
    rotateH(0, .3); // Stop Horizontal motor
    delay(50);
}
delay(10);
}
else
{
    // Red LED on, to show that the whole system is back in its initial place
    // (cases of high speed winds OR night)
    digitalWrite(ledGreen, LOW); // Turn green LED off
    digitalWrite(ledRed, HIGH); // Turn red LED on
    delay(1000); // Wait for 1000ms (1 second)

    // Measuring the steps of the two axis in respect with the initial position
    // Absolute value of the difference of Vertical axis
    stepsV = abs(stepCountyF - stepCountyB);
    // Absolute value of the difference of Horizontal axis
    stepsH = abs(stepCountxF - stepCountxB);

    // Turning the motors back to initial place by inverse stepping
    // Horizontal motor
    if (stepCountxF > stepCountxB)
    {
        for(x=0; x<stepsH; x=x+8)

```

```

{
  rotateH(8, .3); // Horizontal motor inverse stepping with 0.3 speed
  delay(50);
}
}
else if (stepCountxF < stepCountxB)
{
  for(x=0; x<stepsH; x=x+8)
  {
    rotateH(-8, .3); // Horizontal motor stepping with 0.3 speed
    delay(50);
  }
}
else
{
  rotateH(0, 0.3); // Stop Horizontal motor
  delay(50);
}
// Vertical motor
if (stepCountyF > stepCountyB)
{
  for (y=0; y<stepsV; y=y+8)
  {
    rotateV(-8, .1); // Vertical motor inverse stepping with 0.1 speed
    delay(50);
  }
}
else if (stepCountyF < stepCountyB)
{
  for (y=0; y<stepsV; y=y+8)
  {
    rotateV(8, .1); // Vertical motor stepping with 0.1 speed
    delay(50);
  }
}

```



```

    }
    else
    {
        rotateV(0, .1);    // Stop Vertical motor
        delay(50);
    }

    delay(10);

    stepCountyF=0; // Initialize stepper counter in Vertical axis (Forward)
    stepCountyB=0; // Initialize stepper counter in Vertical axis (Backward)
    stepCountxF=0; // Initialize stepper counter in Horizontal axis (Forward)
    stepCountxB=0; // Initialize stepper counter in Horizontal axis (Backward)
    stepsV=0;      // Initialize stepper counter in Vertical axis
    stepsH=0;      // Initialize stepper counter in Horizontal axis
}
delay(100); // 100ms time delay to repeat the loop, real trackers check the sun
// every 5-10 minutes
}

// Function rotateV
void rotateV(int steps, float speed)
{
    // Rotate a specific number of microsteps (8 microsteps per step) - (negative for
    // reverse movement)
    // Speed is any number from .01 -> 1 with 1 being fastest - Slower is stronger
    int dir = (steps > 0)? HIGH:LOW;
    steps = abs(steps);

    digitalWrite(verDIR_PIN,dir);

    float usDelay = (1/speed) * 70;

    for(int i=0; i < steps; i++)
    {

```

```

digitalWrite(verSTEP_PIN, HIGH);
delayMicroseconds(usDelay);

digitalWrite(verSTEP_PIN, LOW);
delayMicroseconds(usDelay);
}
}

// Function rotateH
void rotateH(int steps, float speed)
{
  // Rotate a specific number of microsteps (8 microsteps per step) - (negative for
  // reverse movement)
  // Speed is any number from .01 -> 1 with 1 being fastest - Slower is stronger
  int dir = (steps > 0)? HIGH:LOW;
  steps = abs(steps);

  digitalWrite(horDIR_PIN,dir);

  float usDelay = (1/speed) * 70;

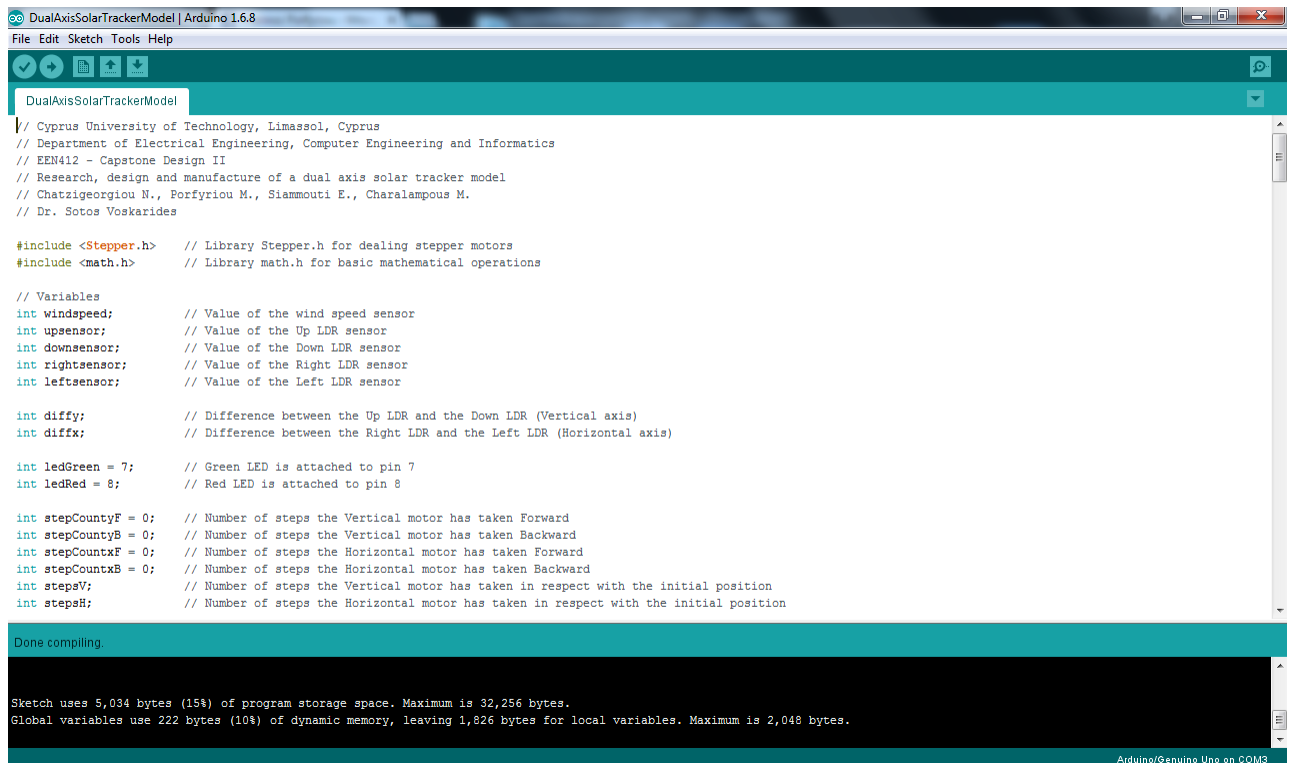
  for(int i=0; i < steps; i++)
  {
    digitalWrite(horSTEP_PIN, HIGH);
    delayMicroseconds(usDelay);

    digitalWrite(horSTEP_PIN, LOW);
    delayMicroseconds(usDelay);
  }
}

```

4.3 Προγραμματισμός πλακέτας Arduino UNO Rev3

Προγραμματισμός της πλακέτας Arduino UNO Rev3 μέσω του περιβάλλοντος του λογισμικού Arduino (IDE).



```
DualAxisSolarTrackerModel | Arduino 1.6.8
File Edit Sketch Tools Help

DualAxisSolarTrackerModel

// Cyprus University of Technology, Limassol, Cyprus
// Department of Electrical Engineering, Computer Engineering and Informatics
// EEN412 - Capstone Design II
// Research, design and manufacture of a dual axis solar tracker model
// Chatzigeorgiou N., Porfyriou M., Siammouti E., Charalampous M.
// Dr. Sotos Voskarides

#include <Stepper.h> // Library Stepper.h for dealing stepper motors
#include <math.h> // Library math.h for basic mathematical operations

// Variables
int windspeed; // Value of the wind speed sensor
int upsensor; // Value of the Up LDR sensor
int downsensor; // Value of the Down LDR sensor
int rightsensor; // Value of the Right LDR sensor
int leftsensor; // Value of the Left LDR sensor

int diffy; // Difference between the Up LDR and the Down LDR (Vertical axis)
int diffx; // Difference between the Right LDR and the Left LDR (Horizontal axis)

int ledGreen = 7; // Green LED is attached to pin 7
int ledRed = 8; // Red LED is attached to pin 8

int stepCountyF = 0; // Number of steps the Vertical motor has taken Forward
int stepCountyB = 0; // Number of steps the Vertical motor has taken Backward
int stepCountxF = 0; // Number of steps the Horizontal motor has taken Forward
int stepCountxB = 0; // Number of steps the Horizontal motor has taken Backward
int stepsV; // Number of steps the Vertical motor has taken in respect with the initial position
int stepsH; // Number of steps the Horizontal motor has taken in respect with the initial position

Done compiling.

Sketch uses 5,034 bytes (15%) of program storage space. Maximum is 32,256 bytes.
Global variables use 222 bytes (10%) of dynamic memory, leaving 1,826 bytes for local variables. Maximum is 2,048 bytes.

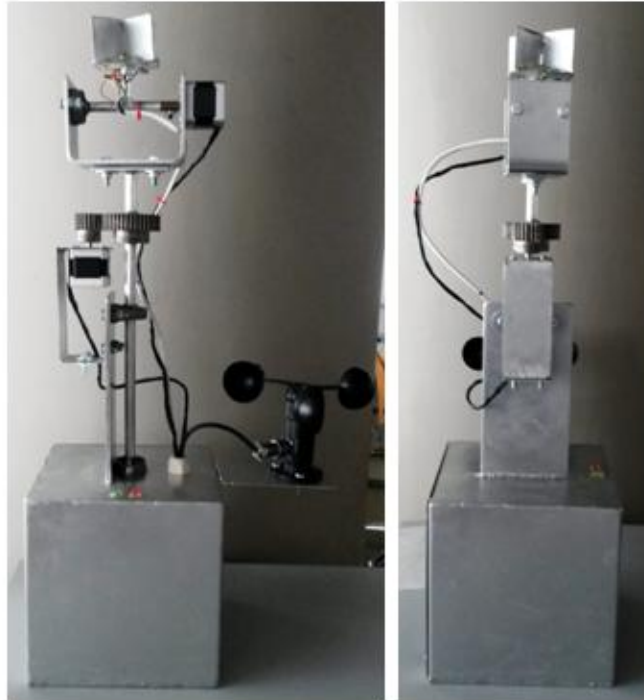
Arduino/Genuino Uno on COM3
```

Εικόνα 4.3: Ο κώδικας στο λογισμικό Arduino (IDE)

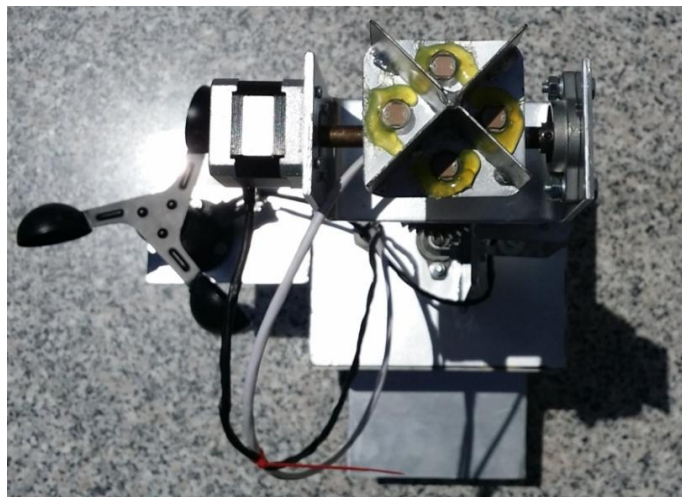
5 Κατασκευή μοντέλου

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται φωτογραφίες του ολοκληρωμένου μοντέλου της εργασίας, καθώς επίσης και η πραγματικών διαστάσεων βάση του φωτοβολταϊκού πλαισίου συνδεδεμένη με το μοντέλο.

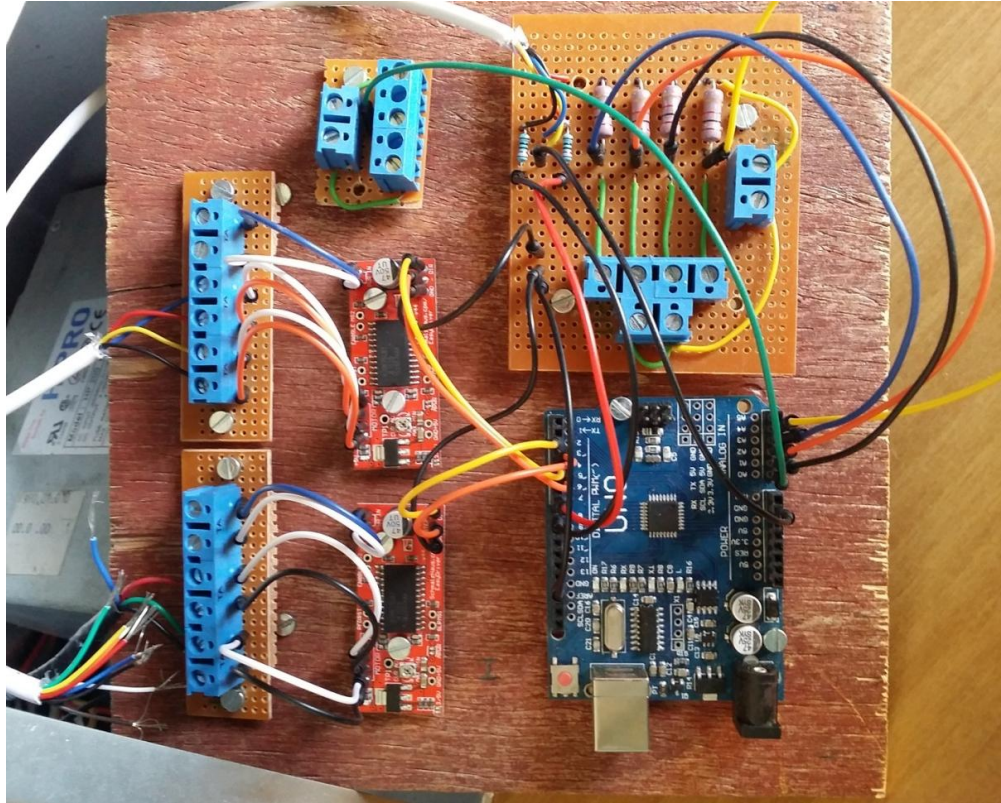
5.1 Παρουσίαση τελικής κατασκευής



Εικόνα 5.1α: Μοντέλο διαξονικής βάσης φ/β πλαισίου (1)



Εικόνα 5.1β: Μοντέλο διαξονικής βάσης φ/β πλαισίου (2)



Εικόνα 5.1γ: Πλακέτα ηλεκτρονικών



Εικόνα 5.1δ: Τροφοδοτικό και πλακέτα ηλεκτρονικών στο κουτί του μοντέλου

5.2 Παρουσίαση μοντέλου με φ/β πλαίσιο



Εικόνα 5.2α: Κατασκευή με φ/β πραγματικών διαστάσεων (1)



Εικόνα 5.2β: Κατασκευή με φ/β πραγματικών διαστάσεων (2)



Εικόνα 5.2γ: Κατασκευή με φ/β πραγματικών διαστάσεων (3)

6 Προσομοίωση στο PVsyst

Σε αυτό το κεφάλαιο περιλαμβάνεται η εκτέλεση προσομοιώσεων σε εξειδικευμένο πρόγραμμα (PVsyst) και η εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Ένας από τους σκοπούς της πτυχιακής αυτής εργασίας ήταν η αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσα από τη βέλτιστη συλλογή των ηλιακών ακτινών σε ένα φ/β πλαίσιο. Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενα κεφάλαια, όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει κάθετα σε ένα φ/β πλαίσιο, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται. Για να επιτευχθεί αυτή η παρατήρηση, χρειαζόταν ενδελεχής μελέτη, συλλογή ετήσιων δεδομένων και σύγκρισης τους, έτσι ώστε να αποδειχτεί ότι η εγκατάσταση διαξονικών βάσεων αυξάνει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τις σταθερές βάσεις φ/β πλαισίων. Για να γίνει αυτή η σύγκριση πρέπει τα φ/β πλαίσια να έχουν τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά και διάρκεια που θα εκτίθενται στον ήλιο να είναι η ίδια.

Λόγω του ότι η περίοδος αποπεράτωσης της εργασίας ήταν μόνο 9 μήνες, δεν υπήρχε η δυνατότητα και η ευχέρεια για εκτέλεση αυτού του είδους μελέτη. Επομένως, αποφασίστηκε η εκτέλεση προσομοιώσεων σε εξειδικευμένο λογισμικό, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στην αγορά των φ/β συστημάτων.

Η μελέτη έγινε για την περιοχή της Λευκωσίας στην Κύπρο με Γεωγραφικό Πλάτος 35.1 μοίρες Βορρά και Γεωγραφικό Μήκος 33.2 μοίρες Ανατολή.

Latitude: 35.1°N (ή 35° 10' 31 B)

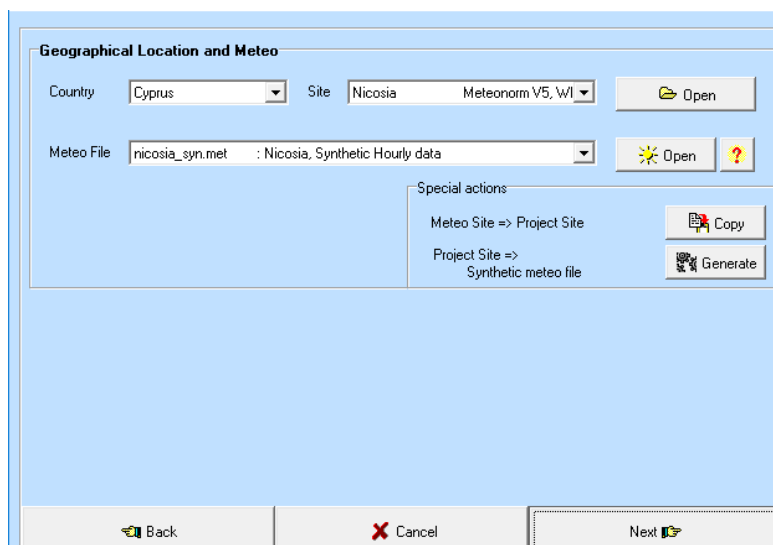
Longitude: 33.2°E (ή 33° 21' 51 E)

6.1 Λογισμικό PVsyst

Το PVsyst είναι ένα ισχυρό λογισμικό προσομοίωσης φωτοβολταϊκών συστημάτων. Έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιείται από αρχιτέκτονες, μηχανικούς και ερευνητές και αποτελεί επίσης ένα πολύ χρήσιμο μορφωτικό εργαλείο. Περιλαμβάνει ένα λεπτομερές μενού βοήθειας που εξηγεί τις διαδικασίες και τα πρότυπα που χρησιμοποιούνται και προσφέρει μια φιλική προς τον χρήστη προσέγγιση με οδηγίες για την ανάπτυξη ενός έργου.

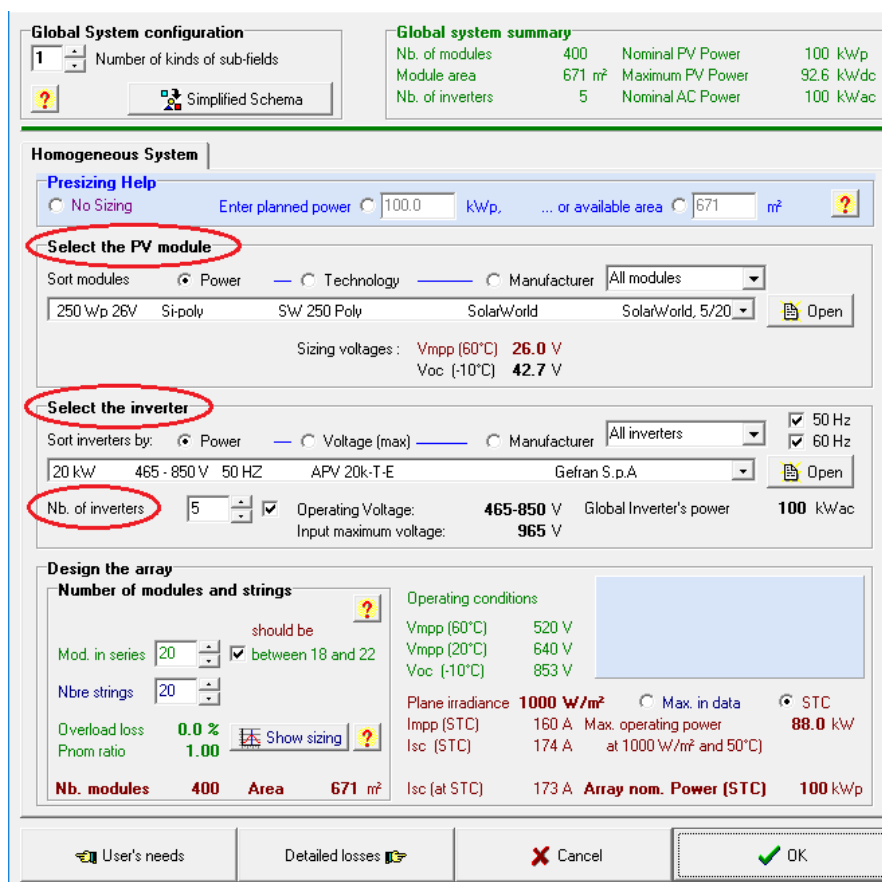
Το PVsyst είναι σε θέση να δέχεται μετεωρολογικά δεδομένα από πολλές διαφορετικές πηγές, καθώς και προσωπικά δεδομένα και να παρουσιάζει τα αποτελέσματα με τη μορφή της πλήρους έκθεσης, συγκεκριμένων γραφικών παραστάσεων και πινάκων. Επιπλέον, δίνεται η δυνατότητα τα δεδομένα μπορούν να εξαχθούν για χρήση σε άλλο λογισμικό [25, 26].

6.2 Προσομοίωση και εξαγωγή αποτελεσμάτων



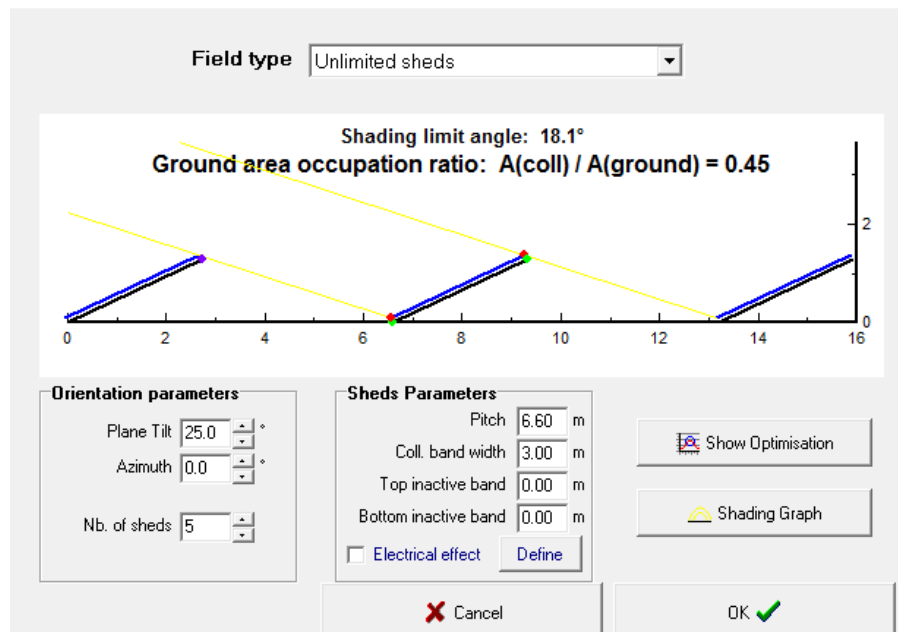
Εικόνα 6.2α: Γεωγραφική περιοχή (Λευκωσία, Κύπρος)

Τα φ/β πλαίσια και οι αντιστραφείς που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση στο λογισμικό, ήταν και για τις δύο περιπτώσεις τα ίδια.



Εικόνα 6.2β: Επιλογή φ/β στοιχείου και αντιστροφέα

Σταθερό Σύστημα: Κρατώντας σταθερό το φ/β πλαίσιο 0 μοίρες προς το Νότο, προσαρμόζεται η γωνιά ύψους του πλαισίου μεταξύ 23 έως 32 μοίρες, έτσι ώστε να βρεθεί η βέλτιστη γωνία.



Εικόνα 6.2γ: Σταθερό σύστημα με μεταβαλλόμενη γωνιά ύψους

Τα δεδομένα που πάρθηκαν από την προσομοίωση μεταβολής στη γωνιά κλίσης του πλαισίου στον κάθετο άξονα, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2α.

Πίνακας 6.2α: Δεδομένα μεταβολής γωνιάς κλίσης στον κάθετο άξονα

Plane Tilt	System Production (mWh/yr)	Specific Production (kWh/kWp/yr)	Performance Ration	Normalized Production (Kwh/kWp/day)	Array Loses (Kwh/kWp/day)
23°	144	1443	0,735	3,95	1,20
24°	144	1444	0,734	3,96	1,21
25°	144	1444	0,733	3,96	1,22
26°	144	1444	0,732	3,96	1,22
27°	144	1443	0,732	3,95	1,23
28°	144	1442	0,731	3,95	1,23
29°	144	1440	0,730	3,95	1,25
30°	144	1438	0,729	3,94	1,25
31°	144	1436	0,728	3,93	1,25
32°	143	1433	0,726	3,93	1,26

Με βάση τα πιο πάνω δεδομένα, η βέλτιστη γωνιά ύψους που πρέπει να έχει ένα φ/β πλαίσιο το οποίο είναι εγκατεστημένο στην περιοχή της Λευκωσίας και βλέπει 0° προς το Νότο, είναι 26° από τον οριζόντιο άξονα. Για το συγκεκριμένο φ/β πλαίσιο, η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 1444 kWh/kWp/yr.

Διαξονικό Σύστημα Ανίχνευσης: Για να επιλεγθεί το εύρος των γωνιών ύψους και αζιμούθιου που μπορεί και πρέπει να έχει ένα διαξονικό σύστημα εντοπισμού του ήλιου στην περιοχή της Λευκωσίας, πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι γωνιές ύψους και αζιμούθιου. Οι γωνιές αυτές μπορούν να βρεθούν μέσω μαθηματικών φόρμουλων. Η πιο κατάλληλη μέρα εξαγωγής των γωνιών αυτών είναι η 21η Ιουνίου εκάστοτε έτους, στην οποία η διάρκεια τη ημέρας είναι η μέγιστη [27].

Οι γωνιές ύψους και αζιμούθιου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2β.

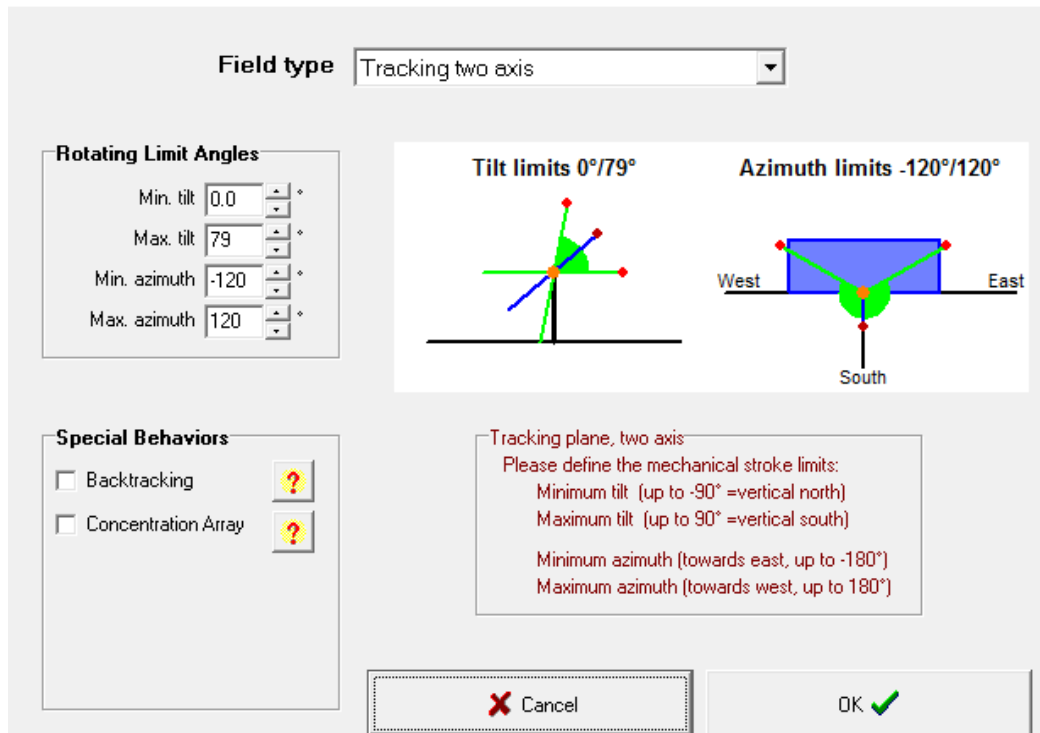
Πίνακας 6.2β: Γωνίες ύψους και αζιμούθιου

	Όρια Περιστροφής Γωνιών		Περιγραφή
	MIN	MAX	
Γωνιά Ύψους (Tilt Angle)	MIN	0°	Η ανατολή και δύση κάθε μέρας γίνεται σε γωνιά ύψους 0 μοίρες
	MAX	78,22°	Στις 21 Ιουνίου και ώρα 12:00 ηλιακή ώρα, η γωνιά ύψους βρίσκεται στο μέγιστο της
Γωνιά Αζιμούθιου (Azimuth Angle)	MIN	-119,02°	Στις 21 Ιουνίου η ηλιακή ανατολή είναι -119,02° από το Νότο
	MAX	119,04°	Στις 21 Ιουνίου η ηλιακή δύση είναι 119,04° από το Νότο

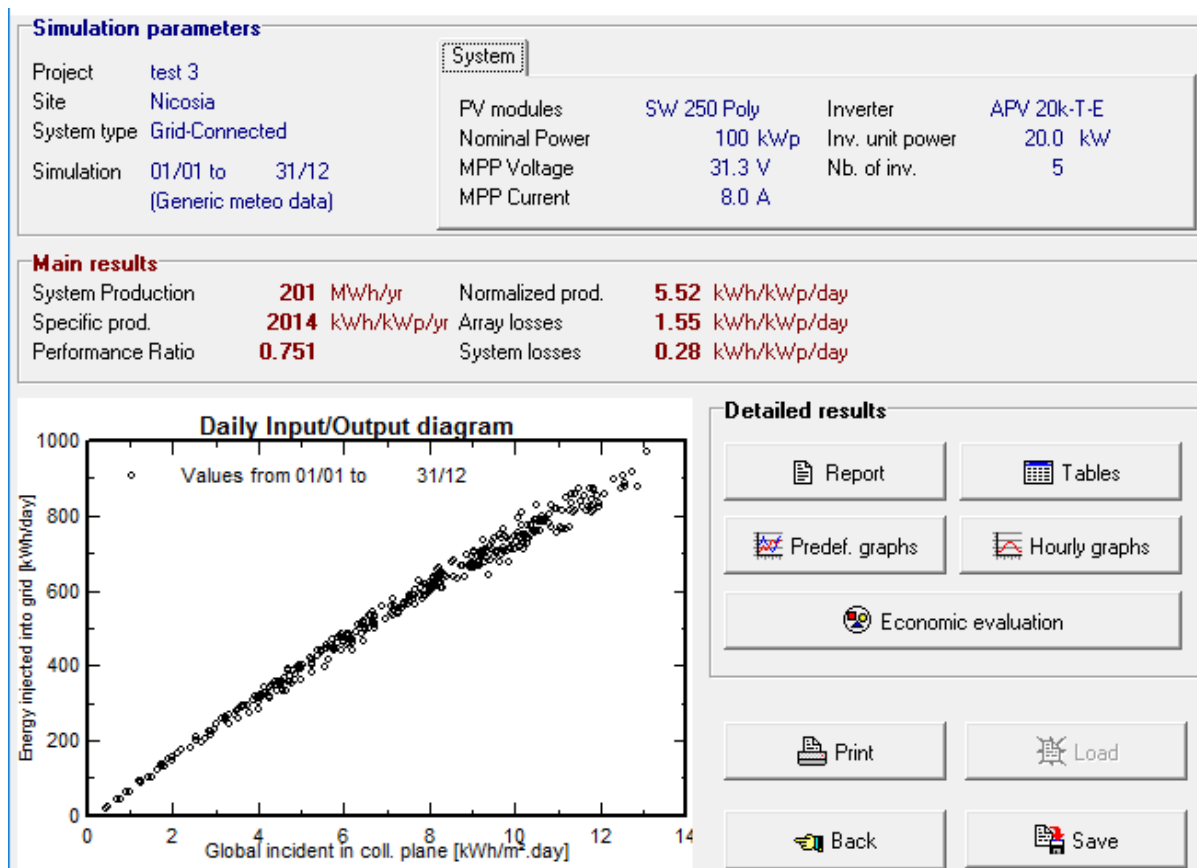
Τα δεδομένα που πάρθηκαν από την προσομοίωση του διαξονικού συστήματος εντοπισμού του ήλιου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2γ.

Πίνακας 6.2γ: Δεδομένα μεταβολής διαξονικού συστήματος εντοπισμού του ήλιου

System Production (mWh/yr)	Specific Production (kWh/kWp/yr)	Performance Ration	Normalized Production (Kwh/kWp/day)	Array Loses (Kwh/kWp/day)
201	2014	0,751	5,52	1,55



Εικόνα 6.2δ: Διαζωνικό σύστημα με μεταβαλλόμενες γωνίες ύψους και αζιμούθιου



Εικόνα 6.2ε: Αποτελέσματα προσομοίωσης διαζωνικού συστήματος εντοπισμού

Για το συγκεκριμένο φ/β πλαίσιο που επιλέχθηκε να εγκατασταθεί στο διαξονικό σύστημα εντοπισμού του ήλιου, η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 2014 kWh/kWp/yr.

Συμπέρασμα: Μέσω της προσομοίωσης στο λογισμικό πρόγραμμα PVsyst, εξάχθηκε η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για ένα συγκεκριμένο φ/β πλαίσιο, συγκρίνοντας δύο περιπτώσεις. Η πρώτη περίπτωση, είναι η εγκατάσταση σε σταθερό σημείο με γωνιά ύψους 26° από τον οριζόντιο άξονα και βλέποντας 0° προς το Νότο. Η δεύτερη περίπτωση είναι όταν εγκατασταθεί σε διαξονικό σύστημα ανίχνευσης του ήλιου μεταξύ των γωνιών ύψους 0° και 79° από τον οριζόντιο άξονα και μεταξύ των αζιμουθιακών γωνιών -119° και +119° προς το Νότο.

Η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για τις δύο περιπτώσεις είναι η ακόλουθη:

- Σταθερό Σύστημα: 1444 kWh/kWp/yr
- Διαξονικό Σύστημα Ανίχνευσης: 2014 kWh/kWp/yr

Συγκρίνοντας τα δύο αυτά αποτελέσματα, παρατηρείται ότι με την εγκατάσταση διαξονικών συστημάτων εντοπισμού του ήλιου, υπάρχει μια αύξηση στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, της τάξης του 39,47%.

7 Ενεργειακή πολιτική της Κύπρου για τις ΑΠΕ

7.1 Εισαγωγή

Ο έλεγχος της κατανάλωσης της ενέργειας στην Ευρώπη, η αύξηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις ΑΠΕ, η εξοικονόμηση ενέργειας και η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, αποτελούν σημαντικά μέτρα που αποφασίστηκαν για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου και τη συμμόρφωση προς το πρωτόκολλο του Κιότο στη σύμβαση των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή. Επιπλέον, οι συντελεστές αυτοί θα επιτελέσουν σημαντικό ρόλο στην προώθηση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού, της ανάπτυξης της τεχνολογίας και της καινοτομίας και στη δημιουργία απασχόλησης και περιφερειακής ανάπτυξης, κυρίως στις αγροτικές και τις απομονωμένες περιοχές της Ευρώπης [28].

Η Κύπρος αποτελεί πλήρες κράτος – μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης από το 2004. Είναι ένα ενεργειακά απομονωμένο νησιώτικο κράτος και αριθμεί περίπου 689.565 μόνιμους κατοίκους. Η κύρια δραστηριότητα της Κύπρου είναι η τουριστική βιομηχανία, η οποία αυξάνει την ενεργειακή ζήτηση, ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες όταν ο πληθυσμός του νησιού αυξάνεται δραματικά λόγω του τουρισμού [28].

Η Κύπρος παρουσιάζει ιδιαιτερότητες όσον αφορά το θέμα της ενέργειας:

- είναι απομονωμένο ενεργειακό σύστημα (στο παρόν στάδιο δεν υπάρχουν διασυνδέσεις με γείτονες χώρες)
- απουσία ενδογενών πηγών ενέργειας
- μεγάλη εξάρτηση από εισαγωγές προϊόντων πετρελαίου
- υψηλό κόστος ενεργειακού εφοδιασμού
- μειωμένη ασφάλεια λόγω του τύπου των πηγών εφοδιασμού
- αυξομειώσεις στη ζήτηση ενέργειας κατά εποχή, ιδιαίτερα κατά τους τουριστικούς μήνες
- λειτουργία του συστήματος παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας στο όριο (σε περιόδους μέγιστης ζήτησης φορτίου)
- μικρή (σχετικά) αγορά, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο κόστος μεταφοράς εξοπλισμού
- υψηλό κόστος ενέργειας στους καταναλωτές λόγω των εισαγωγών ενεργειακών προϊόντων [7, 29]

Το ενεργειακό ισοζύγιο της Κύπρου εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τις εισαγωγές πετρελαιοειδών που προορίζονται για την παραγωγή ενέργειας. Η συνεισφορά των ΑΠΕ στην Κύπρο παραμένει πολύ περιορισμένη, παρόλη τη δυνατότητα για αξιοποίηση τους. Η ενεργειακή και περιβαλλοντική πολιτική της Κύπρου έχει εναρμονιστεί σχεδόν πλήρως με τα πρωτόκολλα της ΕΕ. Η εμπλοκή παρόλα αυτά της τοπικής αυτοδιοίκησης στον ενεργειακό σχεδιασμό είναι ακόμα και σήμερα περιορισμένη, με αποτέλεσμα την μη ύπαρξη αποκεντρωμένης ή διεσπαρμένης παραγωγής ενέργειας, κυρίως όσον αφορά απομακρυσμένες περιοχές και τις ΑΠΕ [7].

7.2 Ενεργειακοί στόχοι για την ΕΕ και την Κύπρο

Η Οδηγία για τις ΑΠΕ προτείνει ως δεσμευτικό στόχο για την Κύπρο την προέλευση του 13% της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης από ανανεώσιμες πηγές μέχρι το 2020 [28, 29]. Επιπλέον, διαμορφώθηκαν οι εθνικοί ενεργειακοί στόχοι για τη μείωση των εναέριων ρύπων:

- Ανάπτυξη των ΑΠΕ και περαιτέρω εξοικονόμησης ενέργειας.
- Αύξηση της παραγωγής ηλεκτρισμού από ΑΠΕ στο 6% της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρισμού μέχρι το 2010, στόχος ο οποίος έχει επιτευχθεί κυρίως από αιολική ενέργεια (4,59%) και βιομάζα (1,18%).
- Αύξηση της συνεισφοράς των ΑΠΕ από το 4,7% (2006) στο 9% της συνολικής κατανάλωσης μέχρι το 2010, στόχος ο οποίος έχει επιτευχθεί.
- Μείωση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας κατά 1% κάθε χρόνο, μέσω μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας με έτος αναφοράς το 2006, στόχος ο οποίος έχει επιτευχθεί.
- Χρήση 10% βιοκαυσίμων στις μεταφορές μέχρι το 2020.
- Κατασκευή ενεργειακού κέντρου στο Βασιλικό (οριστικοποιήθηκε η απαλλοτρίωση της θέσης που επιλέχθηκε για την εγκατάσταση του ενεργειακού κέντρου, ολοκληρώθηκαν οι εργασίες αποκατάστασης του χώρου και εκπονήθηκε ο βασικός σχεδιασμός του έργου) [7, 28, 29].

7.3 Ενεργειακό ισοζύγιο και δίκτυο της ΑΗΚ

Η ΕΕ προσάρμοσε την πολιτική της για την επίτευξη της μέγιστης μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από μονάδες παραγωγής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, στόχος είναι μέχρι το 2020 η μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 20% σε σύγκριση με τα επίπεδα εκπομπών του 1990.

Τεχνολογία Μονάδας Παραγωγής	Σταθμός Παραγωγής	Αριθμός	Εγκατεστημένη Δυναμικότητα (MW)
Συμβατικές Μονάδες			
Ατμοστρόβιλοι	Βασιλικός Δεκέλεια	3 x 130 MW 6 x 60 MW	390 360
Μονάδες Συνδιασμένου Κύκλου	Βασιλικός	2 x 220 MW	440
Αεριοστρόβιλοι	Βασιλικός, Δεκέλεια	5 x 37,5 MW	187,5
ΜΕΚ	Δεκέλεια	6 x 16,7 MW	100,2
			1478 MW
ΑΠΕ			
Αιολικά Πάρκα		6 Αιολικά Πάρκα (από τα οποία τα 5 εμπίπτουν στον έλεγχο & παρακολούθηση του ΔΣΜΚ)	157,5
Φωτοβολταϊκά Συστήματα		Συνδεδεμένα στο Σύστημα Διανομής	68,8
Συστήματα Βιομάζας		Συνδεδεμένα στο Σύστημα Διανομής	9,7
			236 MW
		ΣΥΝΟΛΟ:	1714 MW

Εικόνα 7.3α: Τεχνολογίες και ποσοστά συμμετοχής στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρισμού της Κύπρου

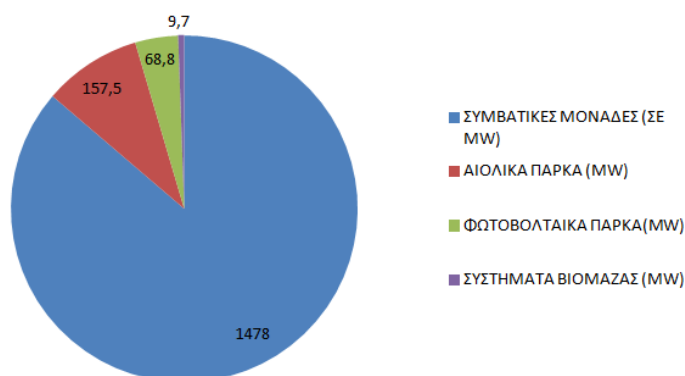
Αναγνωρίζοντας τις θετικές προοπτικές των ΑΠΕ για την επίτευξη του στόχου αυτού, η ΕΕ προωθεί την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο υφιστάμενο Ευρωπαϊκό σύστημα παραγωγής ενέργειας μέσω παροχής διευκολύνσεων. Έχει ψηφισθεί ένα δεσμευτικό σχέδιο δράσης με την μορφή Ευρωπαϊκής Οδηγίας (2009/28/EC) για την περαιτέρω ανάπτυξη των ΑΠΕ στην Ευρώπη. Το ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στην συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας για την ΕΕ τέθηκε στο 20% μέχρι το έτος 2020. Η Οδηγία αυτή θέτει συγκεκριμένους δεσμευτικούς εθνικούς στόχους για κάθε κράτος – μέλος της ΕΕ. Για την Κύπρο, στόχος είναι η αύξηση του ποσοστού συμμετοχής των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση μέχρι το 2020, στο 13% [28, 29].

Με βάση τα πιο πάνω, η Κυπριακή Κυβέρνηση έχει υλοποιήσει σχετικά σχέδια παροχής οικονομικών κινήτρων με την μορφή Κυβερνητικών επιδοτήσεων, που έχουν ως στόχο την ενσωμάτωση διάφορων τεχνολογιών ΑΠΕ στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου. Τα μέτρα αυτά έχουν ετοιμαστεί από το αρμόδιο Υπουργείο Ενέργειας, Εμπορίου, Βιομηχανίας και Τουρισμού της Κυπριακής Δημοκρατίας [30].

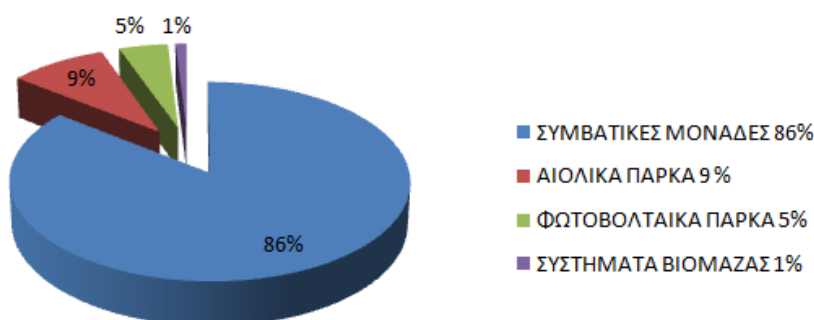
Οι τεχνολογίες ΑΠΕ που προωθούνται για ενσωμάτωση στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου με βάση τα σχέδια αυτά είναι:

- Ηλιακή ενέργεια
- Αιολική ενέργεια
- Βιομάζα

Στην Εικόνα 7.3β παρουσιάζεται η σημερινή εγκατεστημένη ισχύς των διαφόρων τεχνολογιών για την παραγωγή ηλεκτρισμού οι οποίες είναι συνδεδεμένες με το δίκτυο της ΑΗΚ.



Εικόνα 7.3β: Τεχνολογίες συνδεδεμένες με το δίκτυο της ΑΗΚ

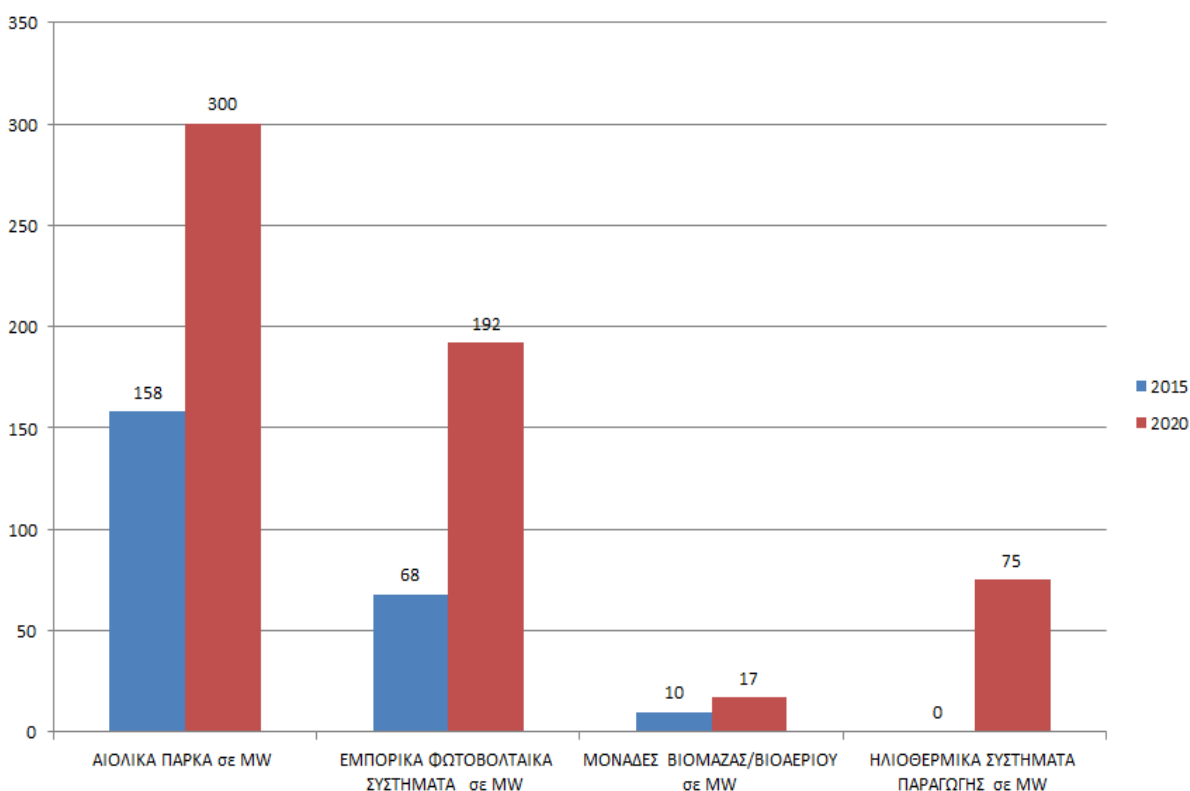


Εικόνα 7.3γ: Ποσοστιαία συμμετοχή της κάθε τεχνολογίας στο ενεργειακό ισοζύγιο

7.4 Εθνικός στόχος και εθνικές προκλήσεις

Για την περίπτωση της Κύπρου, τέθηκε ως δεσμευτικός στόχος το 13% της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης να προέρχεται από ΑΠΕ μέχρι το 2020 και η συμμετοχή των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση των μεταφορών να ανέλθει στο 10%. Μέχρι το 2020 αναμένεται η εγκατάσταση συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ συνολικής δυναμικότητας 584MW που θα περιλαμβάνουν [29]:

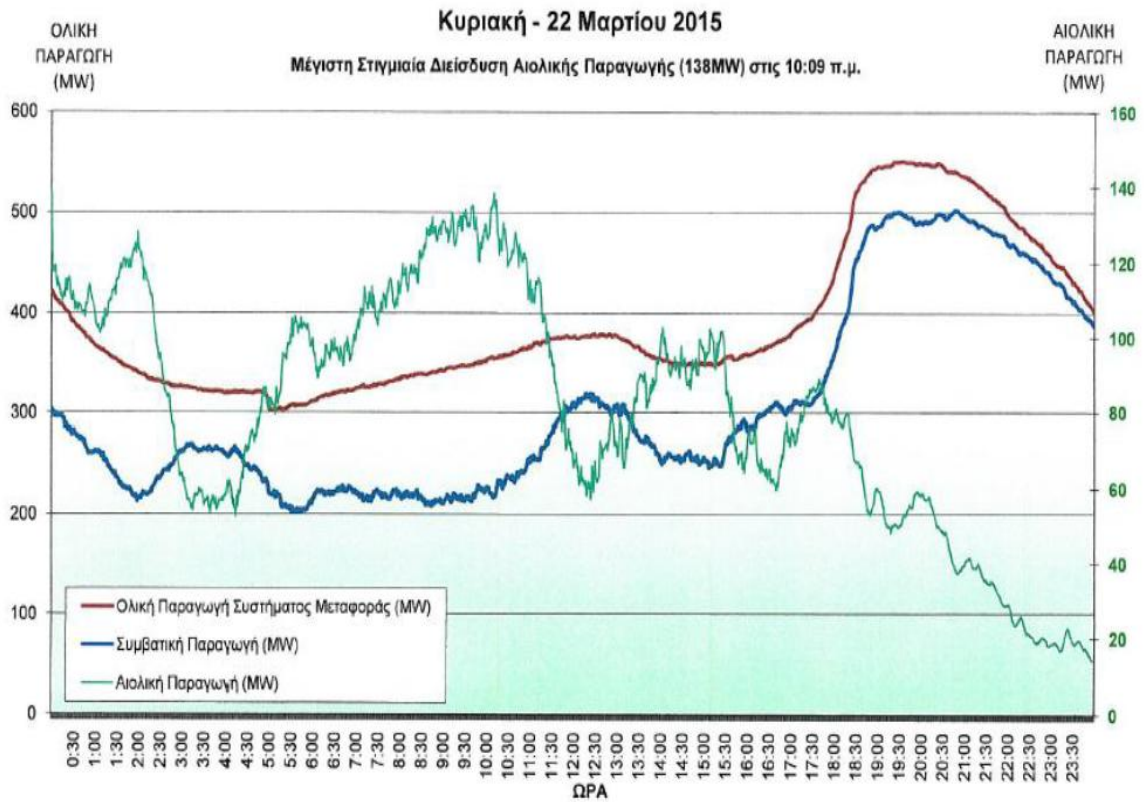
- Αιολικά πάρκα 300MW
- Εμπορικά φωτοβολταϊκά 192MW
- Μονάδες βιομάζας/βιοαερίου 17MW
- Ηλιοθερμικό σταθμό 75MW



Εικόνα 7.4α - Στόχοι για το 2020 για τα ποσοστά των ΑΠΕ στο δίκτυο της ΑΗΚ

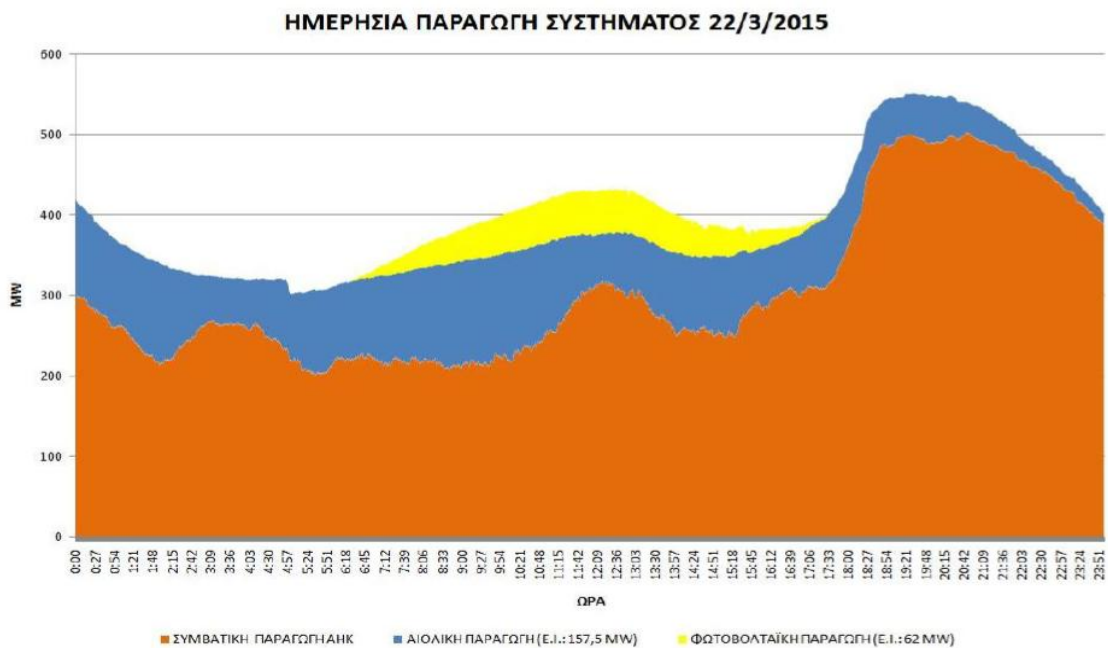
Η αυξημένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα αιολικά πάρκα, η οποία ανέρχεται στα 158 MW, προκαλεί προβλήματα στο Σύστημα όσον αφορά τη διακύμανση της παραγωγής, το ρυθμό μεταβολής της παραγόμενης ενεργού ισχύος και τη διαχείριση της άεργου ισχύος [30].

Στην Εικόνα 7.54β παρουσιάζεται η διακύμανση της παραγόμενης ισχύος του Συστήματος της Κύπρου και η μέγιστη καταγραμμένη αιολική παραγωγή ηλεκτρισμού στις 22 Μαρτίου 2015, ημερομηνία η οποία αποτελεί ρεκόρ διείσδυσης των ΑΠΕ στο δίκτυο της ΑΗΚ.



Εικόνα 7.4β: 22 Μαρτίου 2015 – Ρεκόρ διείσδυσης των ΑΠΕ στο δίκτυο ΑΗΚ

Στις Εικόνες 7.4γ και 7.4δ παρουσιάζεται η ημέρα με τη μέγιστη ποσοστιαία διείσδυση των ΑΠΕ, η οποία έφθασε το 47% της συνολικής παραγωγής, δηλαδή 191 MW [30].



Εικόνα 7.4γ : 22 Μαρτίου 2015 – Ημερήσια παραγωγή



Εικόνα 7.4δ: 22 Μαρτίου 2015 – SCADA control screen

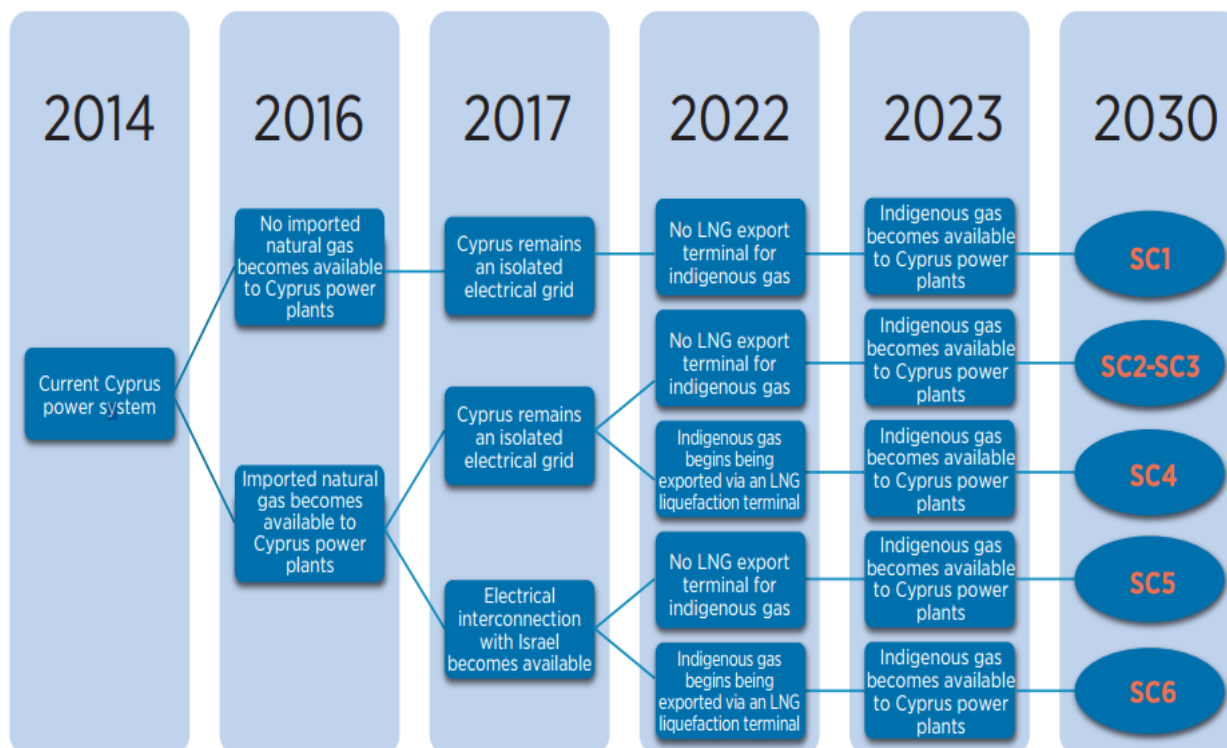
Γενικά, πρέπει να αντιμετωπιστούν οι πιο κάτω προκλήσεις:

- Μείωση ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας μετά το 2010 κατά 20 – 25% (λόγω της οικονομικής κρίσης).
- Χαμηλά επίπεδα φορτίου κατά τη διάρκεια της νύχτας και των πρωινών ωρών, ειδικά κατά την άνοιξη και το φθινόπωρο, τα οποία προκαλούν προβλήματα σε σχέση με την ελάχιστη σταθερή φόρτιση των δεσμευμένων συμβατικών Μονάδων Παραγωγής, αλλά και τη χαμηλή αδράνεια του Συστήματος.
- Μεγάλες και απρόσμενες μεταβολές στην αιολική ηλεκτροπαραγωγή σε διάστημα μερικών λεπτών πράγμα το οποίο καταλήγει στην απαίτηση για μεγάλες ποσότητες στρεφόμενης εφεδρείας.
- Οι προβλέψεις αιολικής ηλεκτροπαραγωγής παραμένουν σε ορισμένες περιπτώσεις ακόμη αναξιόπιστες.
- Η μεγάλη διείσδυση Φωτοβολταϊκών στο Σύστημα Διανομής επηρεάζει τη ροή φορτίων στις αναχωρήσεις 11KV και κατ' επέκταση επηρεάζει τη λειτουργία του Σχεδίου Απόρριψης Φορτίου Λόγω Υποσυχνότητας, που αποτελεί, μαζί με την εφεδρεία, το κύριο εργαλείο του Συστήματος για συγκράτηση της πτώσης της συχνότητας και ανάκαμψη της στα επιτρεπτά επίπεδα μετά από μια διαταραχή.
- Μεγάλες συμβατικές μονάδες βάσης που επηρεάζουν τον τρόπο λειτουργίας του Συστήματος [30].

7.5 Ανάγκη για νέα σχέδια δράσης για τις ΑΠΕ

Είναι εμφανής η ανάγκη για άμεση αναθεώρηση των ποσοστών των τεχνολογιών ΑΠΕ οι οποίες έχουν ήδη εισχωρήσει στην αγορά ηλεκτρισμού της Κύπρου. Για αυτό τον λόγο, ο διεθνής οργανισμός IRENA, έθεσε σε ομάδα εμπειρογνώμων τον σχηματισμό της εθνικής πορείας για τις ΑΠΕ.

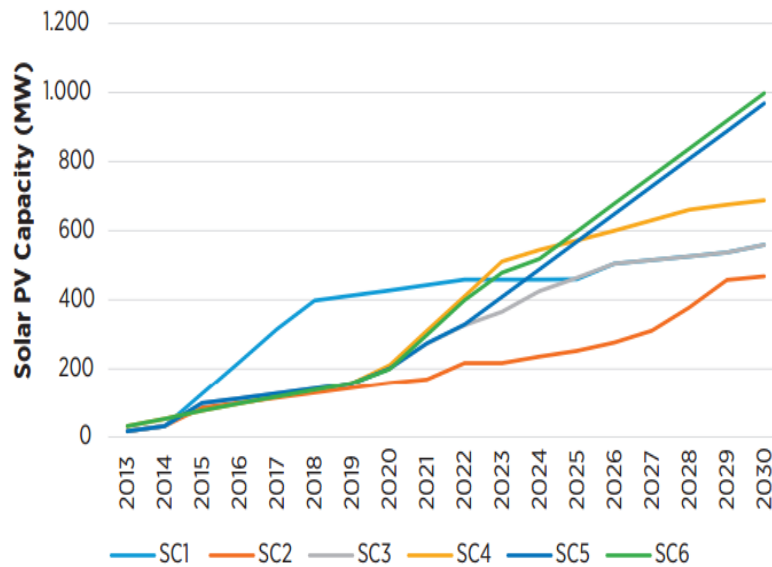
Η έρευνα της εν λόγω ομάδας βασίστηκε σε 6 σενάρια σύμφωνα με την Εικόνα 7.5α [8]:



Εικόνα 7.5α: Σενάρια για την διαμόρφωση της εθνικής πορείας για τις ΑΠΕ

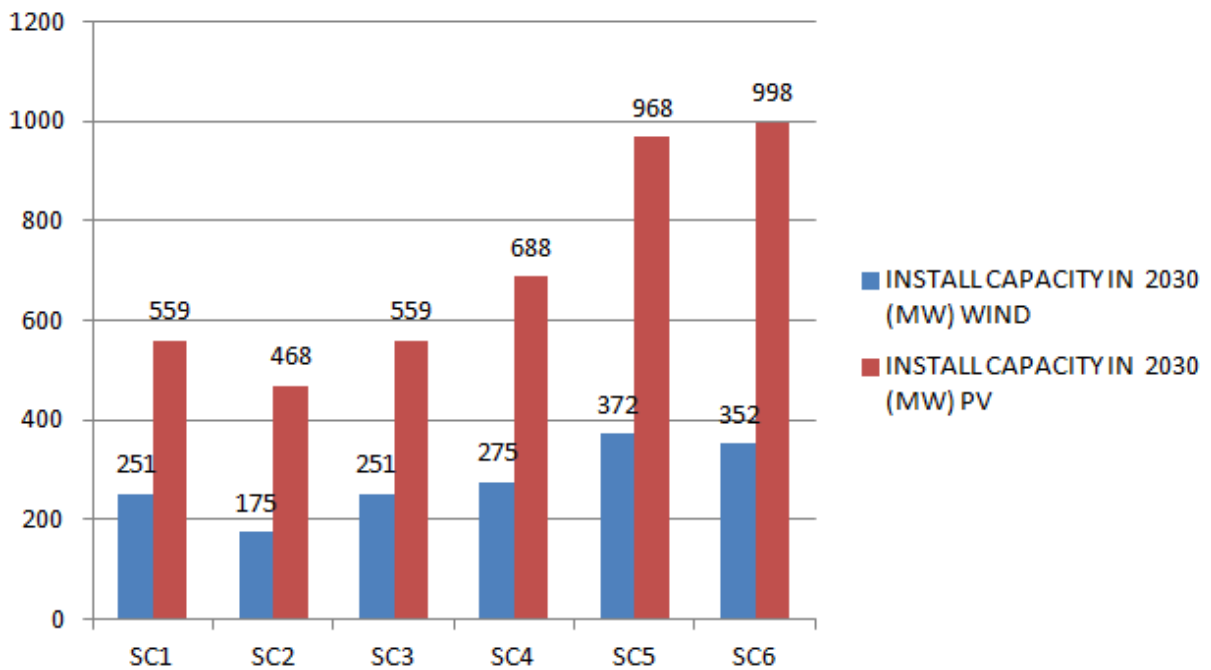
Η εξέλιξη των ΑΠΕ στην Κύπρο και τα ποσοστά συμμετοχής τους στο σύστημα εξαρτώνται άμεσα από την εξόρυξη ή διέλευση του φυσικού αερίου και την ηλεκτρική διασύνδεση της Κύπρου με το Ισραήλ [8, 30].

Στην Εικόνα 7.5β φαίνεται το ποσοστό της διείσδυσης των φωτοβολταϊκών στην αγορά της Κύπρου ανάλογα με το σενάριο που έχει δημιουργηθεί.



Εικόνα 7.5β: Ποσοστό διείσδυσης των φωτοβολταϊκών ανάλογα με το σενάριο

Στην Εικόνα 7.5γ παρουσιάζεται το ποσοστό των φ/β συστημάτων και αιολικών συστημάτων εγκατεστημένης ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2030 σύμφωνα με τα σενάρια που έχουν δημιουργηθεί.



Εικόνα 7.5γ: Ποσοστό διείσδυσης των φ/β και των ανεμογεννητριών για το έτος 2030

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Επιτεύχθηκε η ορθή λειτουργία του μοντέλου σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους με πολύ καλά αποτελέσματα.

Δημιουργήθηκε ένα βελτιωμένο μοντέλο διαξονικής βάσης, το οποίο δεν χρησιμοποιεί τις υφιστάμενες μεθόδους που χρησιμοποιούν τέτοιου είδους φωτοβολταϊκά συστήματα για την κίνηση του φωτοβολταϊκού πλαισίου. Είναι ένα active tracker, το οποίο λειτουργεί ανάλογα με το περιβάλλον και όχι ανάλογα με δεδομένα που λαμβάνονται από το διαδίκτυο για την προβλεπόμενη θέση του ήλιου, τεχνική που χρησιμοποιούν τα υφιστάμενα συστήματα στην Κύπρο.

Το μοντέλο λειτουργεί αυτόνομα σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους.

Δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στην κίνηση του πλαισίου όσον αφορά και τους δύο άξονες, κάτι που κρίνεται ως πολύ σημαντικό, λόγω του ότι στην υπάρχουσα αγορά των φ/β συστημάτων όλες οι βάσεις τέτοιου τύπου έχουν περιορισμούς στις κινήσεις τους.

Ο κώδικας προγραμματισμού δημιουργήθηκε αποκλειστικά για τους σκοπούς του συγκεκριμένου μοντέλου και μπορεί να υποστεί συνεχείς βελτιώσεις και μετατροπές εάν κριθεί αναγκαίο.

Το μοντέλο αυτό θα μπορεί πιθανόν στο μέλλον να κατασκευαστεί σε πραγματικές διαστάσεις για να δώσει λύσεις στο υπάρχον πρόβλημα στο χώρο των φ/β συστημάτων.

Εντριβή με το πρόγραμμα PVsyst και ανάλυση αποτελεσμάτων μέσω προσομοίωσης, Επιβεβαίωση των αρχικών εκτιμήσεων με βάση τα αποτελέσματα αυτά.

Ανάπτυξη ικανοτήτων συμμετοχής σε ομάδα των μελών που έλαβαν μέρος.

Ενασχόληση με τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός αυτόνομου μοντέλου και ανάπτυξη ικανοτήτων δημιουργίας τεχνολογικών έργων.

Η απόδοση του φωτοβολταϊκού πλαισίου αυξάνεται εάν το πλαίσιο επιτυγχάνει με κάποιο τρόπο να απορροφά την μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία, ακολουθώντας την κίνηση του ήλιου. Αυτό γίνεται κατορθωτό με την μετακίνηση του πλαισίου στην ιδανική θέση του ήλιου, καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Κύπρο εξαρτάται σε τεράστιο βαθμό από τις συμβατικές πηγές παραγωγής και συγκεκριμένα το πετρέλαιο.

Η συνεισφορά των ΑΠΕ παραμένει περιορισμένη αν και υπάρχει μεγάλη προοπτική, κυρίως ως προς την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας λόγω της μεγάλης σε διάρκεια ηλιοφάνειας που επικρατεί στο νησί τις πλείστες μέρες του χρόνου.

Στην Κύπρο έχουν ήδη δημιουργηθεί αρκετά φ/β πάρκα και υπάρχει προοπτική για περαιτέρω ανάπτυξη τους λόγω του κλίματος που επικρατεί στο νησί, το οποίο ευνοεί την ανάπτυξη των ΑΠΕ και ειδικότερα εκείνων που αφορούν την αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας.

Το Ενεργειακό Πρόβλημα δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί πλήρως από τις ΑΠΕ, λόγω του ότι σε αυτό το στάδιο δεν το καθιστούν δυνατόν τα τεχνολογικά και οικονομικά δεδομένα. Επομένως η χρήση των ΑΠΕ σε συνδυασμό με την ορθολογική χρήση των συμβατικών καυσίμων, είναι η μόνη λύση έτσι ώστε να περιοριστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Η υψηλή θερμοκρασία επηρεάζει αρνητικά την παράγωγή των φωτοβολταϊκών.

Η έντονη ακτινοβολία επηρεάζει θετικά την παράγωγή των φωτοβολταϊκών.

Η κατασκευή των φ/β στοιχείων είναι πολύ δαπανηρή και απαιτεί τη χρήση τοξικών ουσιών. Ωστόσο, μετά την κατασκευή τους δεν προκαλούν περαιτέρω ρύπανση.

Η κυπριακή αγορά είναι πολύ περιορισμένη όσον αφορά τη μοντελοποίηση και τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά είδη. Επίσης, γίνεται αντιληπτό πως όσον αφορά τις ΑΠΕ και πιο συγκεκριμένα τον τομέα των φ/β συστημάτων, η κυπριακή αγορά δεν μπορεί να ικανοποιήσει στο έπακρο τις ανάγκες των εταιρειών/πελατών, με αποτέλεσμα αυτοί να στρέφονται προς το εξωτερικό για εξεύρεση λύσεων.

Η βέλτιστη γωνιά ύψους που πρέπει να έχει ένα φ/β πλαίσιο το οποίο είναι εγκατεστημένο στην περιοχή της Λευκωσίας και βλέπει 0° προς το Νότο, είναι 26° από τον οριζόντιο άξονα. Για το συγκεκριμένο φ/β πλαίσιο, η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τη συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας είναι 1444 kWh/kWp/yr.

Η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για τις δύο περιπτώσεις φ/β συστημάτων στην Κύπρο είναι 1444 kWh/kWp/yr για Σταθερό Σύστημα και 2014 kWh/kWp/yr για Διαξονικό Σύστημα Ανίχνευσης. Συγκρίνοντας τα δύο αυτά αποτελέσματα, παρατηρείται ότι με την εγκατάσταση διαξονικών συστημάτων εντοπισμού του ήλιου, υπάρχει μια αύξηση στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, της τάξης του 39,47%.

Μέχρι το 2020 αναμένεται η εγκατάσταση συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ συνολικής δυναμικότητας 584MW που θα περιλαμβάνουν αιολικά πάρκα 300MW, εμπορικά φωτοβολταϊκά 192MW, μονάδες βιομάζας/βιοαερίου 17MW και ηλιοθερμικό σταθμό 75MW.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Κατά τη διάρκεια της διεκπεραίωσης αυτής της εργασίας παρουσιάστηκαν τα ακόλουθα προβλήματα, τα οποία επιλύθηκαν στο μέγιστο δυνατό βαθμό:

Η κυπριακή αγορά είναι πολύ περιορισμένη όσον αφορά τη μοντελοποίηση και τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά είδη. Παρόλο που βρέθηκαν κάποια ζητούμενα υλικά στην αγορά, δεν ταίριαζαν με τις απαιτούμενες διαστάσεις της κατασκευής, λόγω του σχετικά μικρού μεγέθους του μοντέλου. Το πρόβλημα στην απόκτηση των αναγκαίων υλικών ήταν ακόμα μεγάλο, αφού στην περίπτωση της αγοράς τους από το εξωτερικό τα περισσότερα εξαρτήματα δεν ήταν άμεσα διαθέσιμα, με αποτέλεσμα να αυξηθεί η περίοδος αναμονής τους και ο χρόνος διεκπεραίωσης της κατασκευής. Ακόμη, το κάθε εξάρτημα λαμβανόταν σε διαφορετική χρονική στιγμή και αναγκαστικά υπήρχε αναμονή μέχρι την παραλαβή και του τελευταίου εξαρτήματος για τη συναρμολόγηση της τελικής κατασκευής.

Έγινε μια μεγάλη έρευνα αγοράς σε όλες τις επαρχίες για την αγορά των αναγκαίων γραναζιών, τα οποία βρέθηκαν μόνο σε ένα σημείο πώλησης στην Κύπρο, σε ένα κατάστημα στη Λευκωσία. Τα μέλη της ομάδας ενημερωθήκαν από τον ιδιοκτήτη πως μόνο αυτός προμηθεύει τα συγκεκριμένα γρανάζια στη Λευκωσία και πως είναι δύσκολο να εντοπιστούν, λόγω χαμηλής ζήτησης και οικονομικού προβλήματος στην αγορά. Τα γρανάζια αυτά εξασφαλίζουν την ομαλή μετάδοση κίνησης και κρατούν πολύ χαμηλά τα επίπεδα του θορύβου πλεονεκτώντας σημαντικά σε σχέση με τα άλλα είδη σε αυτόν τον τομέα, έτσι κρίθηκε αναγκαία η αγορά τους. Ακόμα ένα πρόβλημα ήταν να ταιριάξουν τα γρανάζια που αγοράστηκαν με την κατασκευή μας. Για αυτό το λόγο προτιμήθηκε η αγορά τους από την Κύπρο, έτσι ώστε να υπάρχει επαφή με τον προμηθευτή. Η διαδικασία εξεύρεσης και επιλογής των γραναζιών χρειάστηκε αρκετό χρόνο, παρόλα αυτά ήταν μέσα στα χρονικά πλαίσια που είχαν συμφωνηθεί.

Τα συγκεκριμένα γρανάζια χρειάστηκαν ορισμένες τροποποιήσεις για να μπορέσουν να συμβαδίσουν με τους επιλεγμένους βηματικούς κινητήρες. Λόγω της μεγάλης λεπτομέρειας και του ειδικού εξοπλισμού που απαιτήθηκε για αυτές τις τροποποιήσεις, ήταν αναγκαία η εκτέλεση τους από εξειδικευμένο επαγγελματία τεχνίτη (τορναδόρος) με το ανάλογο κόστος, το οποίο προστέθηκε στο τελικό συνολικό κόστος της εργασίας. Στο θέμα τορναδόρου υπήρχε μεγάλο πρόβλημα λόγω του ότι έπρεπε να βρεθεί συγκεκριμένος τορναδόρος με συγκεκριμένο μηχάνημα, το οποίο ελάχιστοι διαθέτουν στην Κύπρο και κοστίζει αρκετά.

Λόγω του αυξημένου βάρους της κατασκευής και της μειωμένη δύναμης που μπορούσαν να προσφέρουν οι βηματικοί κινητήρες που επιλέγηκαν σε σύγκριση με το βάρος αυτό, η αρχική κατασκευή δεν λειτουργούσε όπως απαιτείτο. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη μη διεκπεραίωση της εργασίας σε αρχικό στάδιο. Ακολούθως, η αρχική κατασκευή αναγκαστικά τροποποιήθηκε, με αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου διεκπεραίωσης της εργασίας.

Λόγω του ότι η περίοδος αποπεράτωσης της εργασίας ήταν μόνο 9 μήνες, δεν υπήρχε η δυνατότητα και η ευχέρεια για επιβεβαίωση αποτελεσμάτων μέσω πραγματικών δοκιμών και λήψης πραγματικών δεδομένων. Επομένως, αποφασίστηκε η εκτέλεση προσομοιώσεων σε εξειδικευμένο λογισμικό, το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στην αγορά των φ/β συστημάτων.

Απαραίτητη ήταν η οδήγηση των βηματικών κινητήρων, λόγω του ότι δεν μπορούν να ελεγχτούν μόνο από την πλακέτα Arduino. Ένας τρόπος είναι με τη χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων L293D. Τα συγκεκριμένα υπάρχουν σε διαθεσιμότητα σε αρκετά καταστήματα στην Κύπρο. Αναζητήθηκαν τα πιο οικονομικά τα οποία και βρέθηκαν σε κατάστημα στην Λεμεσό. Αφού όμως εφαρμόστηκαν για έλεγχο των κινητήρων, δεν δούλευαν ορθά και έτσι εισηγήθηκε ένας άλλος τρόπος, η χρήση των EasyDrivers. Αγοράστηκαν από το εξωτερικό αφού δεν υπάρχουν διαθέσιμα προς αγορά στην Κύπρο, με αποτέλεσμα περαιτέρω αναμονή και αύξηση του χρόνου διεκπεραίωσης της εργασίας.

Χρειάστηκε εκτελωνισμός του ανεμόμετρου, γεγονός που αύξησε το τελικό κόστος της κατασκευής. Το ανεμόμετρο ήταν αναγκαίο να αγοραστεί από το εξωτερικό, αφού δεν βρέθηκε διαθέσιμο στην κυπριακή αγορά.

ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ

Το μοντέλο αυτό δύναται να κατασκευαστεί σε πραγματικές διαστάσεις.

Αντικατάσταση των βηματικών κινητήρων με πιο ισχυρούς (και πιο ακριβούς), έτσι ώστε να μπορούν να ανταπεξέλθουν στο απαιτούμενο βάρος του/των φωτοβολταϊκών πλαισίου/πλαισίων. Οι νέοι κινητήρες θα αυξήσουν το κόστος της κατασκευής.

Ο κώδικας προγραμματισμού δημιουργήθηκε αποκλειστικά για τους σκοπούς του συγκεκριμένου μοντέλου και μπορεί να υποστεί συνεχείς βελτιώσεις και μετατροπές εάν κριθεί αναγκαίο.

Καλύτερος έλεγχος λειτουργίας του μοντέλου μέσω εισαγωγής επιλογής ή κουμπιού ON/OFF, πιθανότατα στο τροφοδοτικό.

Προσθήκη οθόνης στο όλο σύστημα η οποία πιθανότατα θα μπορεί να εμφανίζει τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, τα επίπεδα υγρασίας και τις γωνίες (κλίσης και αζιμούθιου) του πλαισίου. Θα απαιτηθεί όμως πλακέτα Arduino με περισσότερες εισδοχές (για παράδειγμα πλακέτα MEGA R3). Η νέα πλακέτα θα αυξήσει το κόστος της κατασκευής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

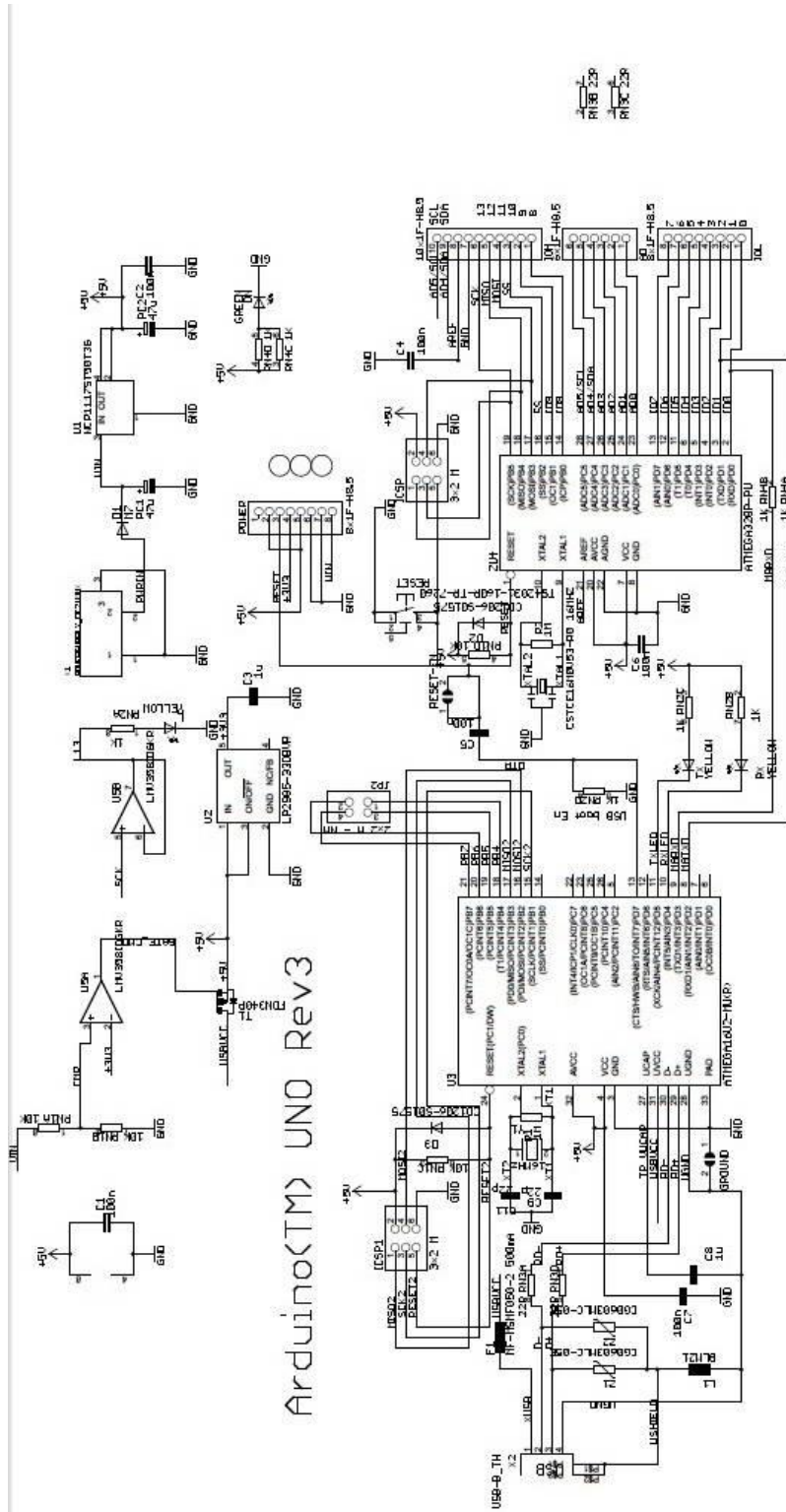
- [1] Ostria Solar (χ.χ.). *Μελέτη & κατασκευή φωτοβολταϊκών μονάδων*. Ανακτήθηκε 18 Απριλίου, 2016, από <http://www.ostrasolar.gr/index.php/2011-03-04-23-37-35>
- [2] Μαρούχος, Χ. (2016). *Τα φωτοβολταϊκά: Παραγωγή ηλεκτρισμού απευθείας από τον ήλιο*. ΗΜ445: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου
- [3] Λουκαδόπουλος Μηνάς & Σία Ο.Ε. (χ.χ.). *Τεχνικές πληροφορίες φωτοβολταϊκών*. Ανακτήθηκε 17 Απριλίου, 2016, από <http://www.lmco.gr/#!faq/cx4a>
- [4] Οδηγός Ενεργειακών Επενδύσεων, Επιτροπή Διαχείρισης Ειδικού Ταμείου ΑΠΕ και ΕΞ.Ε (2013). *Σχέδιο χορηγιών για ενθάρρυνση της ηλεκτροπαραγωγής από μεγάλα εμπορικά αιολικά, ηλιοθερμικά και φωτοβολταϊκά συστήματα και συστήματα αξιοποίησης βιομάζας (2009 – 2013)*. Κυπριακή Δημοκρατία
- [5] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, Μόνιμη Επιτροπή Ενέργειας (2011). *Οδηγός μελέτης και υλοποίησης φωτοβολταϊκών έργων*. Θεσσαλονίκη
- [6] Τετελένης, Σ.Ε. (2011). *Προσδιορισμός παραμέτρων γήρανσης φωτοβολταϊκών στοιχείων*. Διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ελλάδα
- [7] Ενεργειακό Γραφείο Κυπρίων Πολιτών (2010). *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Κύπρο*. Κύπρος
- [8] International Renewable Energy Agency (2015). *Renewable Energy Roadmap for the Republic of Cyprus*. Cyprus
- [9] ΕΛΒΙΤΥΛ Α.Β.Ε.Ε. (χ.χ.). *Σύστημα κινητής βάσης φωτοβολταϊκών (tracker) "ΗΛΙΟΤΡΟΠΙΟ"*. Ανακτήθηκε 22 Απριλίου, 2016, από <http://www.elvityl.gr/114655A7.el.aspx>
- [10] Τεχνομεταλλική Βαμβακάς L.T.D. (χ.χ.). *Φωτοβολταϊκά: Tracker 2-axis GTR*. Ανακτήθηκε 22 Απριλίου, 2016, από <http://www.texnometaliki.com/Proionta/Vaseis-Fotovoltaikon/2-AXIS-GTR.html>
- [11] Πιπερίδης, Σ. (χ.χ.). *Βηματικοί κινητήρες και σέρβο*. Εργαστήριο Ευφών Συστημάτων & Ρομποτικής. Ανακτήθηκε 18 Απριλίου, 2016, από http://www.robotlab.tuc.gr/ASSETS/PAPERS_PDF/ROBOTICS/LAB/4_STEPPER&SERVOS_LAB.pdf

- [12] TIGERTEK Industrial Services (χ.χ.). Differences Between Servo Motors and Stepper Motors. Ανακτήθηκε 18 Απριλίου, 2016, από <http://www.tigertek.com/servo-motor-resources/differences-between-servo-stepper-motors.html>
- [13] Stellaris Launchpad & CodeBlocks (2012). Βηματικοί κινητήρες (*Stepper motors*). Ανακτήθηκε 18 Απριλίου, 2016, από <https://alexkaltsas.wordpress.com/2012/12/25/%CE%B2%CE%B7%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CE%AF-%CE%BA%CE%B9%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%AE%CF%81%CE%B5%CF%82-stepper-motors/>
- [14] GreatScott! (2014). *DIY Lab Bench Power Supply*. Ανακτήθηκε 24 Απριλίου, 2016, από <https://www.youtube.com/watch?v=QoGnOoTICGY>
- [15] JumperOneTV (2011). *Converting Computer ATX Power Supply to Lab Bench Power Supply*. Ανακτήθηκε 24 Απριλίου, 2016, από https://www.youtube.com/watch?v=z2oSFpKh_Uw
- [16] Sitnalta (χ.χ.). *Convert an ATX Power Supply into a Regular DC Power Supply*. Ανακτήθηκε 24 Απριλίου, 2016, από <http://www.instructables.com/id/Convert-an-ATX-Power-Supply-Into-a-Regular-DC-Powe/?ALLSTEPS>
- [17] matthewbeckler (χ.χ.). *ATX to Lab Bench Power Supply Conversion*. Ανακτήθηκε 24 Απριλίου, 2016, από <http://www.instructables.com/id/ATX--%3E-Lab-Bench-Power-Supply-Conversion/>
- [18] CircuitSpecialists (χ.χ.). *Stepper Motors*. Ανακτήθηκε 18 Απριλίου, 2016, από <https://www.circuitspecialists.com/stepper-motor>
- [19] 1A Auto (χ.χ.). *Timing Belts vs. Timing Chains*. Ανακτήθηκε 24 Απριλίου, 2016, από <http://www.1aauto.com/content/articles/timing-belts-chains>
- [20] Pfeifer Industries (χ.χ.). *Timing Belt Advantages and Disadvantages*. Ανακτήθηκε 24 Απριλίου, 2016, από <http://www.pfeiferindustries.com/timing-belt-advantages-disadvantages-i-15-l-en.html>

- [21] eBay (χ.χ.) *Timing Belt vs. Timing Chain*. Ανακτήθηκε 24 Απριλίου, 2016, από <http://www.ebay.com/gds/Timing-Belt-vs-Timing-Chain-/10000000177635177/g.html>
- [22] Grieve, D. (2001). *Gear Tooth Nomenclature*. Ανακτήθηκε 24 Απριλίου, 2016, από <http://www.tech.plymouth.ac.uk/sme/desnotes/gears/nomen1.htm>
- [23] GreenMechanic (χ.χ.). *Advantages and Disadvantages of Different Types of Gears*. Ανακτήθηκε 24 Απριλίου, 2016, από http://www.green-mechanic.com/2014/05/advantages-and-disadvantages-of_7.html
- [24] Arduino (χ.χ.). *Arduino UNO & Genuino UNO*. Ανακτήθηκε 18 Απριλίου, 2016, από <https://www.arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno>
- [25] PVsyst SA (χ.χ.) *PVsyst photovoltaic software*. Ανακτήθηκε 23 Απριλίου, 2016, από <http://www.pvsyst.com/en/software/functionalities>
- [26] Mermoud, A., Wittmer, B. (2014). *PVsyst user's manual*. PVsyst SA. Switzerland
- [27] PVEDucation.org (χ.χ.). *Sun Position Calculator*. Ανακτήθηκε 23 Απριλίου, 2016, από <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/sun-position-calculator>
- [28] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο (2009) . *Οδηγία 2009/28/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 23ης Απριλίου 2009*. Ευρωπαϊκή Ένωση
- [29] Υπουργείο Εμπορίου και Βιομηχανίας Κύπρου (2010). *Εθνικό Σχέδιο Δράσης για την Ανανεώσιμη Ενέργεια με βάση την Οδηγία 2009/28/EK (2010-2020)*. Κυπριακή Δημοκρατία
- [30] Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς Κύπρου (2016). *Διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κύπρου*. Κυπριακή Δημοκρατία

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα 1: Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας Arduino UNO Rev3

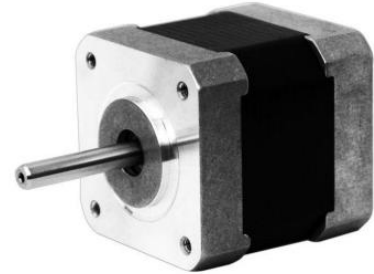


Reference Designs ARE PROVIDED "AS IS" AND "WITH ALL FAULTS. Arduino DISCLAIMS ALL OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED, REGARDING PRODUCTS, INCLUDING BUT NOT LIMITED TO, ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. Arduino may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. The Customer must not rely on the absence or characteristics of any features or instructions marked "reserved" or "undefined." Arduino reserves these for future definition and shall have no responsibility whatsoever for conflicts or incompatibilities arising from future changes to them. The product information on the web site or materials is subject to change without notice. Do not finalize a design with this information. ARDUINO is a registered trademark.

Παράρτημα 2: Προδιαγραφές βηματικών κινητήρων

1.8° 42MM High Torque Hybrid Stepping Motor

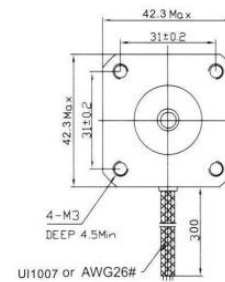
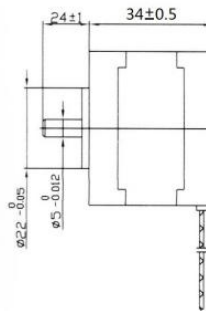
Item	Specifications
Step Angle	1.8°
Step Angle Accuracy	±5% (full step, no load)
Resistance Accuracy	±10%
Inductance Accuracy	±20%
Temperatru Rise	80°CMax. (rated current,2 phase on)
Ambient Temperatuar	-20°C~+50°C
Insulation Resistance	100M?Min.,500VDC
Dielectric Strength	500VAC/ for one minute
Shaft Radial Play	0.02Max. (450 g-load)
Shaft Axial Play	0.08Max. (450 g-load)
Max. radial force	28N (20mm foom the flange)
Max.axial force	10N



● 42MM Hybrid Stepping Motor Specifications

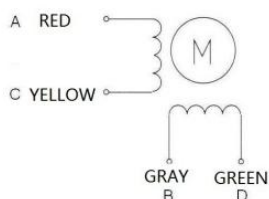
Model No	Rated Voltage	Current /Phase	Resistance /Phase	Inductance /Phase	Holding Torque	# of Leads	Rotor Inertia	Weinght	Detent Torque	Length
XY42STH34-0354A	V	A	Ω	mH	Kg-cm		g-cm ²	kg	g-cm	mm
	12	0.35	34	33	1.6	4	35	0.22	120	34

● Dimension

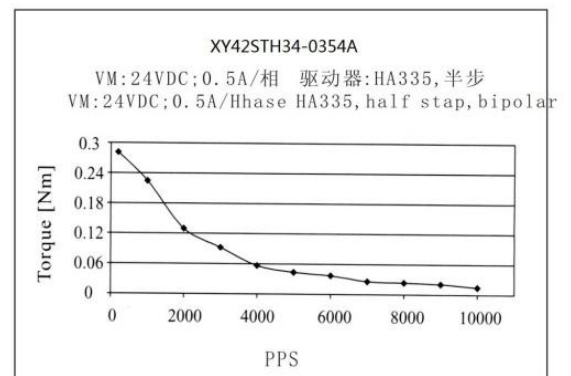


● Wiring Diagram

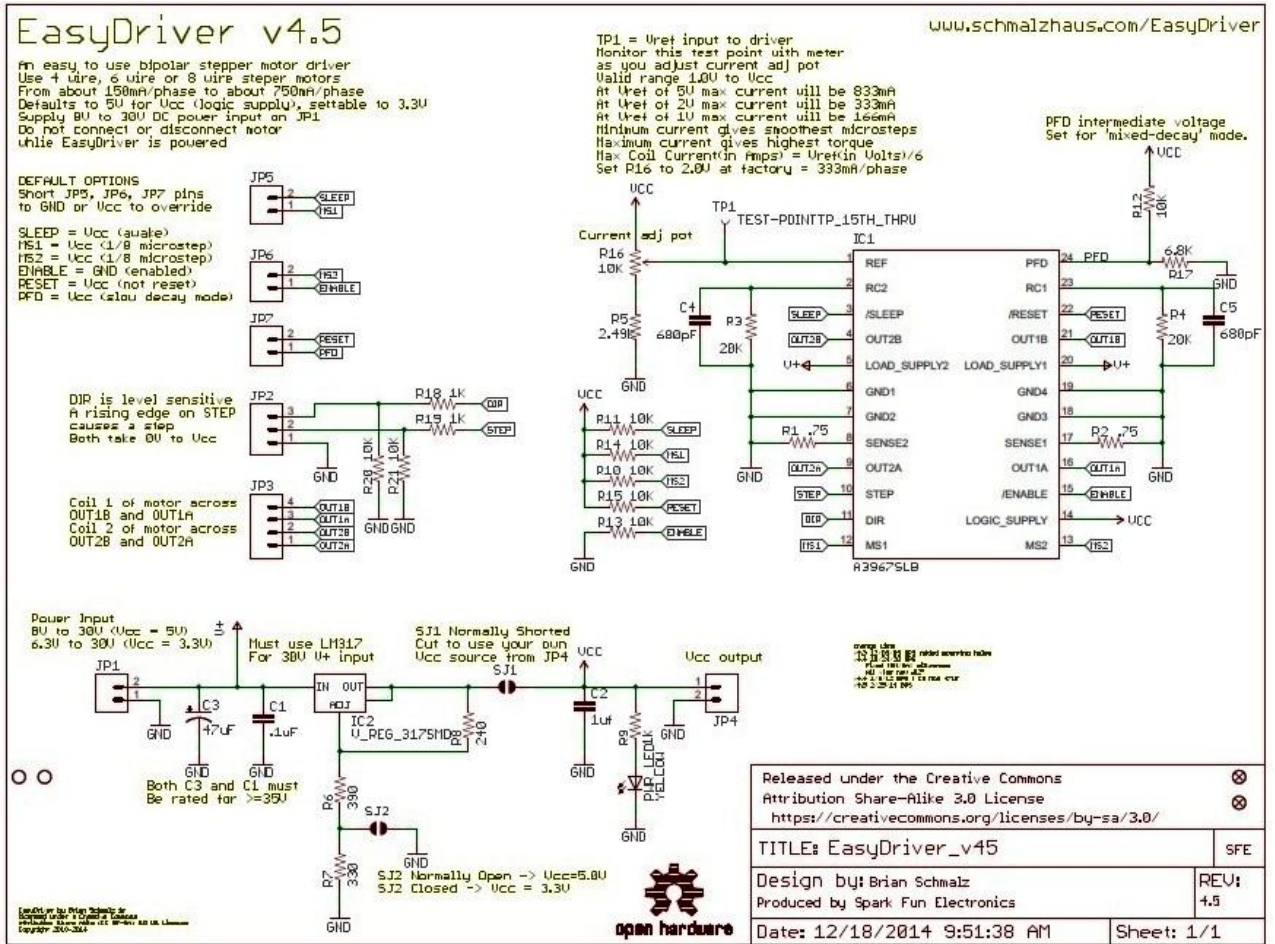
4 LEADS



● Pull out Torque Curve



Παράρτημα 3: Σχηματικό διάγραμμα EasyDriver



Παράρτημα 4: Κοστολόγιο εργασίας

ΚΟΣΤΟΛΟΓΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΔΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΒΑΣΗΣ ΦΒ ΠΛΑΙΣΙΟΥ					
A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΠΟΣ/ΗΤΑ	ΜΟΝΑΔΑ	ΤΙΜΗ ΜΟΝ.	ΠΟΣΟ
1.0	ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΚΑ				
1.1	Τροφοδοτικό DC (Power supply 5V/12V)	1	Τεμ.	Χ	Χ
1.2	Φωτοβολταϊκό πλαίσιο	1	Τεμ.	Χ	Χ
	Σύνολο ηλεκτρολογικών υλικών				0,00
2.0	ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ				
2.1	Μικροεπεξεργαστής Arduino UNO	2	Τεμ.	3,68	7,36
2.2	Arduino UNO Starter kit	1	Τεμ.	19,03	19,03
2.3	Αντιστάσεις φωτός (LDRs)	5	Τεμ.	2,00	10,00
2.4	Αντιστάσεις, διακόπτης	1	Σύνολο	6,00	6,00
2.5	Ανεμόμετρο	1	Τεμ.	60,20	60,20
2.6	EasyDriver Shield για stepper motors	1	Σύνολο	13,10	13,10
2.7	L293D για stepper motors	3	Τεμ.	5,00	15,00
2.8	Breadboard	1	Τεμ.	7,50	7,50
2.9	Πλακέτες άδειες	5	Τεμ.	1,90	9,50
2.10	Screw Driven to Pin Connectors	20	Σύνολο	10,00	10,00
2.11	Καλώδια multi-core	3	Σύνολο	5,00	5,00
2.12	Κινητήρες (stepper motors)	2	Σύνολο	29,53	29,53
	Σύνολο ηλεκτρονικών υλικών				192,22
3.0	ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΑ				
3.1	Λαμαρίνες, πασαμάνια, λάμες, φλάντζες	1	Σύνολο	60,00	60,00
3.2	Βίδες 5mm, μπουλόνια 5mm, ροδέλλες 5-6mm	1	Σύνολο	9,50	9,50
3.3	Βίδες 3mm x 3cm, παξιμάδια, ροδέλλες	1	Σύνολο	2,50	2,50
3.4	Ρουλεμάν	4	Σύνολο	29,65	29,65
3.5	Γρανάζια M1 και M1,50 (cylindrical gears)	4	Σύνολο	60,00	60,00
3.6	Αρίδες 2.5mm, 5mm, 6mm, 8mm	1	Σύνολο	17,50	17,50
3.7	Ηλεκτρόδια (electrodes)	1	Σύνολο	13,50	13,50
3.8	Βίδες ακέφαλες Allen Key 5mm	1	Σύνολο	1,00	1,00
3.9	Βίδες Screw Driven 3mm	10	Σύνολο	1,50	1,50
3.10	Καλάι	4	Τεμ.	1,00	4,00
1.11	Spray για βάψιμο της κατασκευής	2	Σύνολο	12,00	12,00
1.12	Δίσκοι κοπής μεταλλικών αντικειμένων	4	Τεμ.	2,00	8,00
1.13	Γυαλόχαρτο	1	Τεμ.	4,00	4,00
	Σύνολο μηχανολογικών υλικών				223,15
4.0	Απρόοπτα				
4.1	Εκτελωνισμός ανεμόμετρου	-	-	14,90	14,90
4.2	Τορναδόρος	-	-	70,00	70,00
	Σύνολο απροόπτων				84,90
	ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ				€ 500,27