



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΥΤΟΝΟΜΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ

Υπό
ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ ΣΩΚΡΑΤΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2023

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΥΤΟΝΟΜΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΑ

ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ ΣΩΚΡΑΤΗΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2021

Επιβλέπων:

Σαχαρίδης Γεώργιος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, καθηγητή κ. Γεώργιο Σαχαρίδη για την πολύτιμη βοήθειά και καθοδήγησή του σε αυτό το εγχείρημα, αλλά και για τις ιδιαίτερα χρήσιμες συμβουλές του. Οφείλω να ευχαριστήσω το Γεώργιο Καλαντζή καθώς η βοήθειά του στις τεχνικές δυσκολίες που προέκυψαν ήταν υπερπολίτιμη και καθοριστική.

Είμαι ευγνώμων στην οικογένειά μου, στους γονείς μου, Κώνσταντίνο και Στέλλα, στο θείο μου Βασίλη, για την ολόψυχη αγάπη τους όλα αυτά τα χρόνια και τους αφιερώνω αυτή την εργασία.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η κατασκευή ενός ενεργειακά αυτόνομου συστήματος παρακολούθησης ποιότητας αέρα. Αρχικά στα πρώτα κεφάλαια γίνεται ιστορική αναδρομή και βιβλιογραφική ανασκόπηση των υφιστάμενων μελετών που αφορούν το συγκεκριμένο θέμα. Στην συνέχεια επεξηγείται ο τρόπος με τον οποίο έγινε η προεργασία που απαιτήθηκε για την κατασκευή του τελικού μηχανήματος. Ακολούθως αναλύεται λεπτομερώς η μέθοδος κατασκευής, τα βήματα καθώς και όλα τα επιμέρους συστήματα από τα οποία αποτελείται. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των επιμέρους συστημάτων, τα κατασκευαστικά σχέδια του τελικού μηχανήματος και ο κώδικας ο οποίος δημιουργήθηκε για την τελική λειτουργία παρουσιάζονται στο τελευταίο κεφάλαιο όπως επίσης και τα συμπεράσματα από την δοκιμή λειτουργίας του μηχανήματος.

Λέξεις-κλειδιά: ενεργειακή αυτονομία, ποιότητα, αέρα, έλεγχος, παρακολούθηση

ENERGY AUTONOMY OF AIR QUALITY MONITORING SYSTEM

STYLIANOS SOKRATIS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2021

Supervisor:

Sacharidis Georgios Professor, Department of Mechanical Engineering, University of
Thessaly

Abstract

The purpose of this thesis was the production of an energy autonomous air quality monitoring system. Initially, in the first chapters, a historical and bibliographic review of the existing studies related to the specific subject is carried out. The way in which the pre-processing required to produce the final device was done is explained. Next, the production method, the steps and all the individual systems of which it is composed are analyzed in detail. The technical characteristics of the individual systems, the construction plans of the final machine and the code that was created for the final operation are presented in the last chapter as well as the final conclusions from the operation test of the machine.

Keywords: energy autonomy, quality, air, control, monitoring

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1^ο 8

1.1 Εισαγωγή – Ιστορική αναδρομή του Αυτόματου Ελέγχου	8
1.1.1 Ανάλυση σταθερότητας στον 19ο αιώνα	10
1.1.2 Ηλεκτρονική, Ανατροφοδότηση και Μαθηματική Ανάλυση	13
1.1.3 Η Εμφάνιση της Σύγχρονης Θεωρίας Ελέγχου.....	15
1.1.4 Ο Ψηφιακός Υπολογιστής.....	17
1.2 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων	20
1.2.1 Κόμβοι ασύρματου δικτύου αισθητήρων και τα χαρακτηριστικά τους.....	21
1.2.2 Χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN)	22
1.3 Εξέλιξη τεχνολογίας συστημάτων ελέγχου δικτύου	25
1.3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των NCS	26
1.4 Τοπολογίες σε συστήματα NCS	28
1.4.1 Κεντρική Τοπολογία.....	28
1.4.2 Αποκεντρωμένη Τοπολογία	29
1.4.3 Κατανεμημένη Τοπολογία	30
Κεφάλαιο 2^ο	32
2.1 Δικτυακά συστήματα ελέγχου αισθητήρων με συλλογή ηλιακής ενέργειας	32
2.2 Προκλήσεις σχεδιασμού σε επίπεδο συλλογής ηλιακής ενέργειας (Solar Energy harvesting SEH).	37
2.2.1 Απόδοση ηλιακών κυψελών (η).....	39
2.2.2 Μετατροπείς DC σε DC	41
2.2.3 Τεχνικές ανάχνευσης μέγιστου σημείου ισχύος (MPPT).....	41
2.2.4 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες / supercapacitors)	43
Κεφάλαιο 3^ο	45
3.1 Ερευνητική διαδικασία, μελέτη και επιλογή των εξαρτημάτων	45
3.2 Κεντρική ιδέα κατασκευής	45
3.3 Ερευνητική διαδικασία και ανάλυση όλων των επιμέρους εξαρτημάτων	46
3.3.1 Μελέτη μπαταρίας και ρυθμιστής φόρτισης	46

3.3.2 Μελέτη ηλιακού πάνελ.....	48
3.3.3 Arduino.....	52
3.3.4 Linear actuators	56
3.3.5 Υλικό κατασκευής.....	58
3.4 Επιλογή εξαρτημάτων και υλικών για την κατασκευή του πρωτοτύπου	61
3.4.1 Επιλογή μπαταρίας.....	61
3.4.2 Επιλογή υλικού κατασκευής σκελετού.....	62
3.4.4 Επιλογή linear actuator	64
3.4.5 Επιλογή ηλιακού πάνελ.....	65
3.4.6 Επιλογή μηχανισμού κίνησης ηλιακού πάνελ.....	66
3.5 Εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών και επεκτασιμότητα	66
3.5.1 Αποστολή και αποθήκευση μετρήσεων	66
3.5.2 Ενέργεια.....	66
Κεφάλαιο 4ο.....	68
4.1 Ψηφιακός σχεδιασμός και υλοποίηση του πρωτότυπου	68
4.2 Ψηφιακός σχεδιασμός 2D σε AutoCAD.....	68
4.3 Διαδικασία υλοποίησης του πρωτοτύπου.....	70
4.3.1 Κύκλωμα μέτρησης μπαταρίας.....	73
4.3.2 Κύκλωμα λειτουργίας φωτοαισθητήρων	74
4.3.3 Κύκλωμα λειτουργίας γραμμικών ενεργοποιητών	75
4.3.4 Κύκλωμα φωτοβολταϊκού πάνελ	76
4.3.5 Αλγόριθμος αποδοτικής κίνησης των ενεργοποιητών.....	77
4.4 Παρουσίαση πρωτοτύπου, δοκιμές συμπεράσματα και πιθανές αναβαθμίσεις.....	78
4.4.1 Παρουσίαση και δοκιμές.....	78
4.4.2 Συντήρηση και τεχνικά χαρακτηριστικά	81
4.4.3 Αναβαθμίσεις και δυνατότητες βελτίωσης.....	81
4.4.4 Συμπεράσματα και πρόταση για μελλοντική μελέτη	82
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	84
Παράρτημα Α.....	88
Παράρτημα Β.....	91
Παράρτημα Γ	97

Κεφάλαιο 1^ο

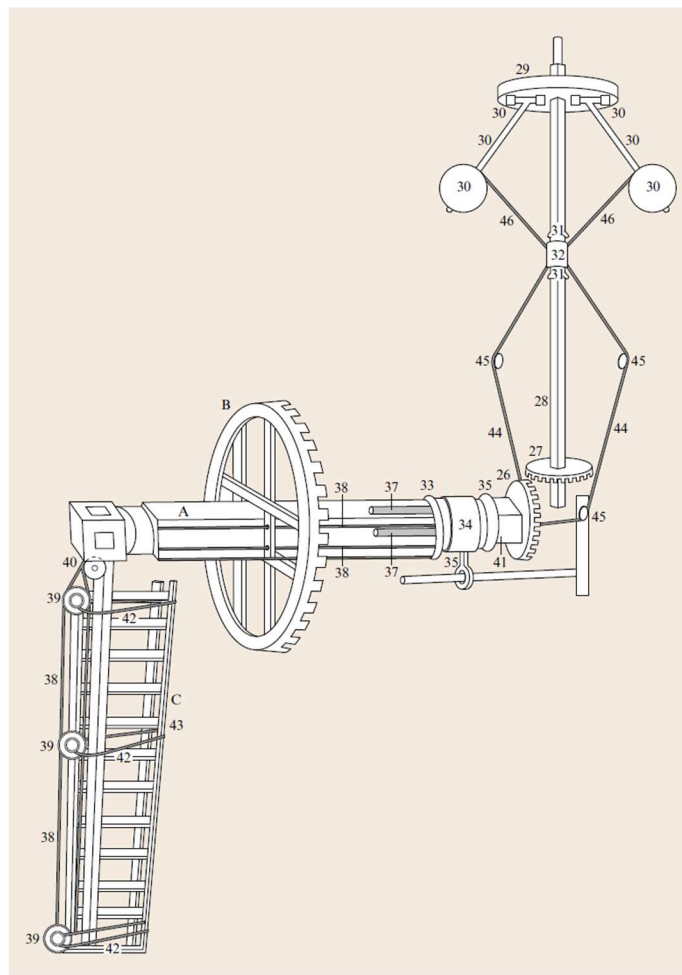
1.1 Εισαγωγή – Ιστορική αναδρομή του Αυτόματου Ελέγχου

Ο αυτόματος έλεγχος μπορεί να θεωρηθεί από πολλούς ότι προήλθε από τους πλωτούς ρυθμιστές βαλβίδας του Ελληνικού και Αραβικού κόσμου [1]. Χρησιμοποιήθηκαν από τους Έλληνες και τους Άραβες για τον έλεγχο συσκευών όπως ρολόγια νερού, λάμπες λαδιού και διανομείς κρασιού, καθώς επίσης και για τον έλεγχο της στάθμης του νερού σε δεξαμενές. Η ακριβής κατασκευή τέτοιων συστημάτων δεν είναι ακόμη απολύτως σαφής, καθώς οι περιγραφές στα πρωτότυπα Ελληνικά ή Αραβικά είναι συχνά ασαφείς και στερούνται εικονογραφήσεων. Τα πιο γνωστά ελληνικά ονόματα είναι ο Κτησίβιος και ο Φίλων (3ος αιώνας π.Χ.) και ο Ήρων (1ος αιώνας μ.Χ.) που δραστηριοποιήθηκαν στην ανατολική Μεσόγειο (Αλεξάνδρεια, Βυζάντιο).

Ο πλωτός ρυθμιστής βαλβίδας δεν φαίνεται να έχει εξαπλωθεί στη μεσαιωνική Ευρώπη, παρόλο που υπήρχαν μεταφράσεις ορισμένων από τα κλασικά κείμενα από τους παραπάνω συγγραφείς. Φαίνεται μάλλον να επανεφευρέθηκε κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής επανάστασης, που εμφανίστηκε στην Αγγλία, για παράδειγμα, τον 18ο αιώνα. Το πρώτο ανεξάρτητο ευρωπαϊκό σύστημα ανάδρασης ήταν ο ρυθμιστής θερμοκρασίας του Cornelius Drebbel (1572–1633). Ο ίδιος ο Drebbel δεν άφησε γραπτά αρχεία, αλλά σώζονται πολλές σύγχρονες περιγραφές της εφεύρεσής του. Ουσιαστικά χρησιμοποιήθηκε ένα θερμόμετρο αλκοόλης (ή άλλο) για τη λειτουργία μιας βαλβίδας που ελέγχει έναν καπναγωγό κλιβάνου και ως εκ τούτου τη θερμοκρασία ενός περιβλήματος [2]. Η συσκευή περιλάμβανε βίδες για να αλλάξει αυτό που θα ονομάζαμε τώρα σημείο ρύθμισης.

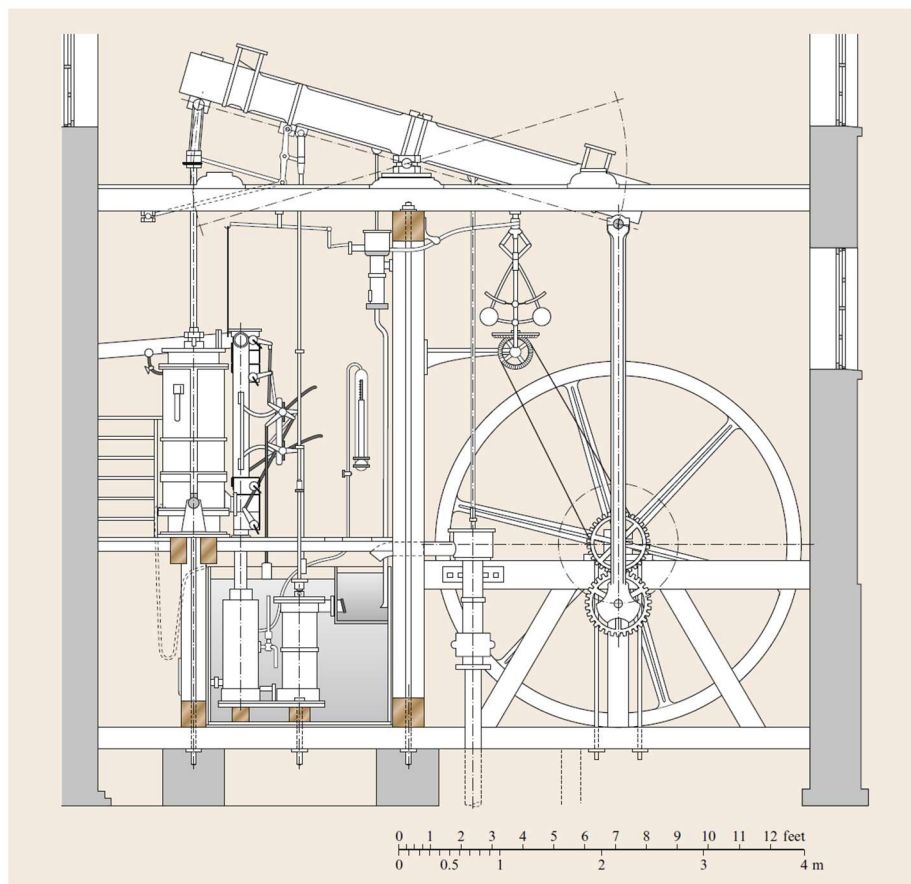
Εάν η ρύθμιση της στάθμης και της θερμοκρασίας ήταν δύο από τους κύριους προδρόμους των σύγχρονων συστημάτων ελέγχου, τότε ένας αριθμός συσκευών που σχεδιάστηκαν για χρήση σε ανεμόμυλους έδειχναν το δρόμο προς πιο εξελιγμένες συσκευές. Κατά τη διάρκεια του 18ου αιώνα αναπτύχθηκε ο μύλος fantail τόσο για να κρατά τα πανιά του μύλου στραμμένα προς τον άνεμο όσο και για να μεταβάλλει αυτόματα τη γωνία πρόσπτωσης του αέρα, έτσι ώστε να

αποφεύγονται οι υπερβολικές ταχύτητες στους δυνατούς ανέμους. Μια άλλη σημαντική συσκευή ήταν ο ανυψωτήρας. Οι μολόπετρες έχουν την τάση να διαχωρίζονται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ποιότητα του αλευριού. Αναπτύχθηκε ένας αριθμός τεχνικών για να μετριάται η ταχύτητα και αυτόματα σαν ανάδραση να παράγεται μια δύναμη αποκατάστασης η οποία πίεζε τις μολόπετρες πιο κοντά μεταξύ τους. Από αυτές, ίσως οι πιο σημαντικές ήταν οι συσκευές του Thomas Mead [3], οι οποίες χρησιμοποιούσαν ένα φυγόκεντρο εκκρεμές για να ανιχνεύουν την ταχύτητα και - σε ορισμένες εφαρμογές - επίσης για να παρέχουν ανάδραση, δείχνοντας έτσι τον δρόμο προς την δημιουργία του φυγοκεντρικού ρυθμιστή (Εικ. 1.1).



Εικ. 1.1 Ρυθμιστής ταχύτητας Mead [1]

Οι πρώτες ατμομηχανές ήταν οι παλινδρομικές μηχανές που αναπτύχθηκαν για την κίνηση αντλιών νερού. Οι περιστροφικοί κινητήρες του James Watt πωλούνταν από τις αρχές της δεκαετίας του 1780. Αλλά χρειάστηκε μέχρι το τέλος της δεκαετίας για να εφαρμοστεί ο φυγόκεντρος ρυθμιστής στο μηχάνημα, μετά από μια επίσκεψη του συνεργάτη του Watt, Matthew Boulton, στο Albion Mill στο Λονδίνο, όπου είδε έναν ανελκυστήρα σε δράση υπό τον έλεγχο ενός φυγοκεντρικού ρυθμιστή (Εικ 1.2). Οι Boulton και Watt δεν προσπάθησαν να κατοχυρώσουν με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τη συσκευή (η οποία, όπως σημειώθηκε παραπάνω, ουσιαστικά είχε ήδη κατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Mead), αλλά προσπάθησαν ανεπιτυχώς να την κρατήσουν μυστική. Αντιγράφηκε για πρώτη φορά το 1793 και εξαπλώθηκε σε όλη την Αγγλία τα επόμενα δέκα χρόνια [4].



Εικ. 1.2 Ατμομηχανή Boulton & Watt με φυγόκεντρο ρυθμιστή [1]

1.1.1 Ανάλυση σταθερότητας στον 19ο αιώνα

Με την εξάπλωση του φυγόκεντρου ρυθμιστή στις αρχές του 19ου αιώνα έγινε εμφανής μια σειρά από μεγάλα προβλήματα. Πρώτον, λόγω της απουσίας ολοκληρωμένης δράσης, ο ρυθμιστής δεν μπορούσε να ρυθμίσει αλλά μόνο να μετριάσει. Δεύτερον, η απόκρισή του σε μια αλλαγή στο φορτίο ήταν αργή. Και τρίτον, οι (μη γραμμικές) δυνάμεις τριβής στον μηχανισμό θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μεγάλες ανεπιθύμητες αποκλίσεις. Έγιναν διάφορες προσπάθειες για να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα: για παράδειγμα, ο χρονομετρικός ρυθμιστής της Siemens εισήγαγε αποτελεσματικά την ολοκληρωμένη δράση μέσω διαφορικού γραναζιού, καθώς και μηχανική ενίσχυση. Άλλες προσεγγίσεις στο σχεδιασμό ενός ισόχρονου ρυθμιστή βασίστηκαν σε έξυπνες μηχανικές κατασκευές, αλλά συχνά αντιμετώπιζαν προβλήματα σταθερότητας.

Ωστόσο, ο 19ος αιώνας σημείωσε σταθερή πρόοδο στην ανάπτυξη πρακτικών ρυθμιστών για ατμομηχανές και υδραυλικούς στροβίλους, συμπεριλαμβανομένων σχεδίων με ελατήριο (τα οποία θα μπορούσαν να γίνουν πολύ μικρότερα και να λειτουργούν σε υψηλότερες ταχύτητες) και ρυθμιστές ρελέ (έμμεσης δράσης) [6]. Μέχρι το τέλος του αιώνα, ρυθμιστές διαφόρων μεγεθών και σχεδίων ήταν διαθέσιμοι για αποτελεσματική ρύθμιση σε μια σειρά εφαρμογών, και υπήρχε ένας αριθμός γραφικών τεχνικών για σχεδιασμό σταθερής κατάστασης. Λίγοι μηχανικοί ασχολήθηκαν με την ανάλυση της δυναμικής ενός συστήματος ανάδρασης.

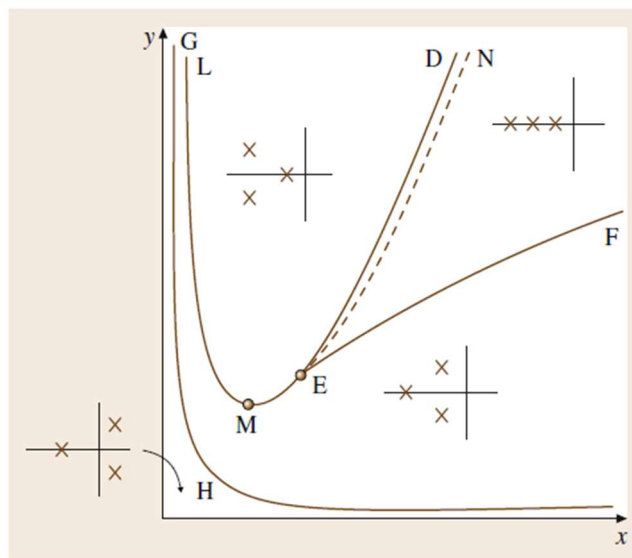
Παράλληλα με τις εξελίξεις στον τομέα της μηχανικής, αρκετοί επιφανείς Βρετανοί επιστήμονες ενδιαφέρθηκαν για τους ρυθμιστές προκειμένου να διατηρήσουν ένα τηλεσκόπιο στραμμένο σε ένα συγκεκριμένο αστέρι καθώς η Γη περιστρεφόταν. Μια επίσημη ανάλυση της δυναμικής ενός τέτοιου συστήματος από τον George Bidell Airy, Astronomer Royal, το 1840 [7] έδειξε ξεκάθαρα την τάση ενός τέτοιου συστήματος ανάδρασης να γίνει ασταθές. Το 1868 ο Τζέιμς Κλερκ Μάξγουελ ανέλυσε τη δυναμική του ρυθμιστή, που έγινε από ένα ηλεκτρικό πείραμα στο οποίο η ταχύτητα περιστροφής ενός πηνίου έπρεπε να διατηρείται σταθερή. Η κλασική του εργασία που προέκυψε για τους ρυθμιστές [8] ελήφθη από τη Βασιλική Εταιρεία στις 20 Φεβρουαρίου. Ο Maxwell εξήγαγε ένα γραμμικό μοντέλο τρίτης τάξης και τις σωστές συνθήκες σταθερότητας ως προς τους συντελεστές της χαρακτηριστικής εξίσωσης. Μη μπορώντας να βρει μια λύση για μοντέλα υψηλότερης τάξης, εξέφρασε την ελπίδα ότι το ερώτημα θα κέρδιζε την προσοχή των μαθηματικών. Το 1875 το θέμα για το βραβείο Adams του Πανεπιστημίου του Κέιμπριτζ στα μαθηματικά ορίστηκε ως το κριτήριο της δυναμικής σταθερότητας. Ένας από τους εξεταστές ήταν ο ίδιος ο Maxwell (βραβευμένος το 1857) και το βραβείο του 1875 (που απονεμήθηκε το 1877) κέρδισε ο Edward James Routh. Ο Routh

ενδιαφερόταν για τη δυναμική σταθερότητα για αρκετά χρόνια και είχε ήδη βρει μια λύση για ένα σύστημα πέμπτης τάξης. Στη δημοσιευμένη εργασία [9] βρίσκουμε ότι προέρχεται η έκδοση Routh του διάσημου κριτηρίου σταθερότητας Routh–Hurwitz.

Σχετικές, ανεξάρτητες εργασίες πραγματοποιούνταν στην ηπειρωτική Ευρώπη την ίδια περίπου περίοδο [5]. Περίληψη του έργου του I.A. O Vyshnegradskii στην Αγία Πετρούπολη εμφανίστηκε στη γαλλική Comptes Rendus de l'Academie des Sciences το 1876, με την πλήρη έκδοση να εμφανίζεται στα ρωσικά και γερμανικά το 1877 και στα γαλλικά το 1878/79. Ο Vyshnegradskii μεταμόρφωσε ένα μοντέλο διαφορικής εξίσωσης τρίτης τάξης μιας ατμομηχανής με ρυθμιστή στη εξής τυπική μορφή:

$$\varphi^3 + x * \varphi^2 + y * \varphi + 1 = 0$$

όπου τα x και y έγιναν γνωστά ως παράμετροι Vyshnegradskii. Στη συνέχεια έδειξε ότι ένα σημείο στο επίπεδο x–y καθόριζε τη φύση της μεταβατικής απόκρισης του συστήματος. Το σχήμα 1.3 δείχνει το διάγραμμα που σχεδίασε ο Vyshnegradskii, στο οποίο έχουν προστεθεί τυπικοί αστερισμοί πόλων για διάφορες περιοχές του επιπέδου.



Εικ. 1.3 Διάγραμμα ευστάθειας του Vyshnegradskii με σύγχρονες θέσεις πόλων [5]

Το 1893 ο Aurel Boreslav Stodola στο Ομοσπονδιακό Πολυτεχνείο της Ζυρίχης, μελέτησε τη δυναμική ενός υδραυλικού στροβίλου υψηλής πίεσης και χρησιμοποίησε τη μέθοδο του Vyshnegradskii για να αξιολογήσει τη σταθερότητα ενός μοντέλου τρίτης τάξης. Ένα πιο

ρεαλιστικό μοντέλο, ωστόσο, ήταν έβδομης τάξης και ο Stodola έθεσε το γενικό πρόβλημα σε έναν συνάδελφο μαθηματικό Adolf Hurwitz, ο οποίος πολύ σύντομα κατέληξε στην εκδοχή του για το κριτήριο Routh–Hurwitz [10]. Οι δύο εκδόσεις αποδείχθηκαν πανομοιότυπες από τον Enrico Bompiani το 1911 [11].

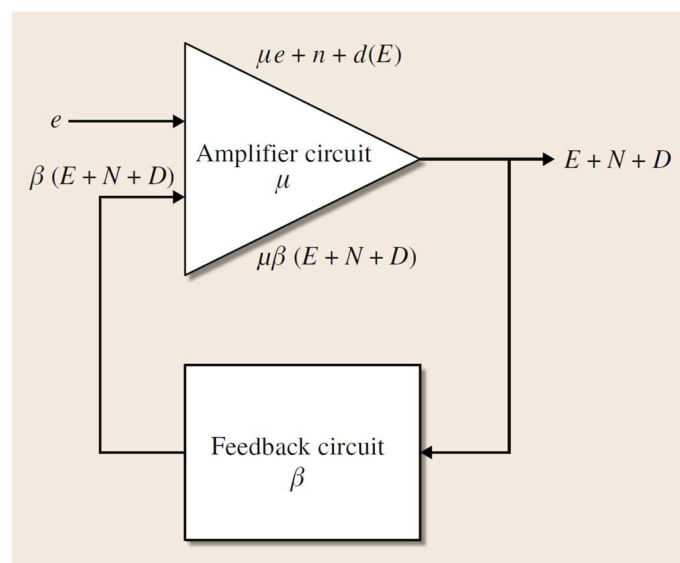
1.1.2 Ηλεκτρονική, Ανατροφοδότηση και Μαθηματική Ανάλυση

Η ταχεία εξάπλωση της τηλεγραφίας και στη συνέχεια της τηλεφωνίας από τα μέσα του 19ου αιώνα και μετά προκάλεσε μεγάλη θεωρητική έρευνα για τη συμπεριφορά των ηλεκτρικών κυκλωμάτων. Ο Oliver Heaviside δημοσίευσε εργασίες για τον λειτουργικό λογισμό του επί σειρά ετών από το 1888 [12], αλλά παρόλο που οι τεχνικές του παρήγαγαν έγκυρα αποτελέσματα για την παροδική απόκριση των ηλεκτρικών δικτύων, επικρίθηκε σφοδρά από τους σύγχρονους μαθηματικούς για την έλλειψη αυστηρότητας. Μόλις τη δεύτερη δεκαετία του 20ου αιώνα οι Bromwich, Carson και άλλοι έκαναν τη σύνδεση μεταξύ του λειτουργικού λογισμού του Heaviside και των μεθόδων Fourier, και έτσι απέδειξαν την εγκυρότητα των τεχνικών του Heaviside [13].

Στις τρεις πρώτες δεκαετίες του 20ου αιώνα έγιναν σημαντικές αναλύσεις σχεδιασμού κυκλωμάτων και φίλτρων, ιδιαίτερα στις ΗΠΑ και τη Γερμανία. Ο Harry Nyquist και ο Karl Küpfmüller ήταν δύο από τους πρώτους που εξέτασαν το πρόβλημα του μέγιστου ρυθμού μετάδοσης των τηλεγραφικών σημάτων, καθώς και την έννοια της πληροφορίας στις τηλεπικοινωνίες, και αμφότεροι συνέχισαν να αναλύουν το γενικό πρόβλημα σταθερότητας ενός κυκλώματος ανάδρασης [14].

Το 1928 ο Küpfmüller ανέλυσε τη δυναμική ενός ηλεκτρονικού κυκλώματος αυτόματου ελέγχου απολαβής χρησιμοποιώντας ανάδραση. Εκτίμησε τη δυναμική του συστήματος ανάδρασης, αλλά η προσέγγισή του με ολοκληρωτική εξίσωση είχε ως αποτέλεσμα μόνο προσεγγίσεις και διαγράμματα σχεδίασης, παρά ένα αυστηρό κριτήριο σταθερότητας. Την ίδια περίπου εποχή στις ΗΠΑ, ο Harold Black σχεδίαζε ενισχυτές ανάδρασης για διηπειρωτική τηλεφωνία (Εικ. 1.4). Στο πορθμείο Hudson River τον Αύγουστο του 1927 συνειδητοποίησε ότι η αρνητική ανάδραση θα μπορούσε να μειώσει την παραμόρφωση με κόστος τη μείωση του συνολικού κέρδους. Ο Black μετέδωσε το πρόβλημα της σταθερότητας ενός τέτοιου βρόχου ανάδρασης στον συνάδελφό του από τα Bell Labs, Harry Nyquist, ο οποίος δημοσίευσε το περίφημο κριτήριο περικύκλωσης του τομέα συχνότητας το 1932 [15]. Ο Nyquist έδειξε,

χρησιμοποιώντας αποτελέσματα που προέρχονται από τον Cauchy, ότι το κλειδί για τη σταθερότητα είναι αν ο γεωμετρικός τόπος απόκρισης συχνότητας ανοιχτού βρόχου στο μιγαδικό επίπεδο περιβάλλει (στην αρχική σύμβαση του Nyquist) το σημείο $1+i0$ ή όχι. Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα αυτής της προσέγγισης είναι ότι δεν απαιτείται αναλυτική μορφή της απόκρισης συχνότητας ανοιχτού βρόχου: ένα σύνολο μετρούμενων σημείων δεδομένων μπορεί να γραφτεί χωρίς την ανάγκη για μαθηματικό μοντέλο. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι, σε αντίθεση με το κριτήριο Routh-Hurwitz, μια αξιολόγηση της παροδικής απόκρισης μπορεί να γίνει απευθείας από την γραφική παράσταση Nyquist ως προς το κέρδος και τα περιθώρια φάσης.



Εικ. 1.4 Ενισχυτής ανάδρασης του Black [16]

Το έγγραφο του 1934 του Black που αναφέρει τη συμβολή του στην ανάπτυξη του ενισχυτή αρνητικής ανάδρασης περιελάμβανε αυτό που επρόκειτο να γίνει η τυπική ανάλυση κλειστού βρόχου στον τομέα συχνοτήτων [16].

Ο τρίτος βασικός συνεισφέρων στην ανάλυση της ανάδρασης σε ηλεκτρονικά συστήματα στα εργαστήρια Bell ήταν ο Hendrik Bode, ο οποίος εργάστηκε σε ισοσταθμιστές από τα μέσα της δεκαετίας του 1930, και ο οποίος έδειξε ότι η εξασθένηση και η μετατόπιση φάσης σχετίζονταν σε οποιοδήποτε πραγματοποιήσιμο κύκλωμα [17]. Το όνειρο των μηχανικών τηλεφώνων να κατασκευάσουν κυκλώματα με γρήγορη αποκοπή και χαμηλή μετατόπιση φάσης ήταν πράγματι μόνο ένα όνειρο. Ήταν ο Bode που εισήγαγε τις έννοιες του κέρδους και των περιθωρίων φάσης και επανασχεδίασε την γραφική παράσταση Nyquist στη συμβατική πλέον

μορφή της με το κρίσιμο σημείο στο $-1+i0$. Εισήγαγε επίσης τις περίφημες ευθύγραμμες προσεγγίσεις στις καμπύλες απόκρισης συχνότητας γραμμικών συστημάτων που απεικονίζονται σε άξονες log-log. Ο Bode παρουσίασε τις μεθόδους του σε ένα κλασικό κείμενο που δημοσιεύτηκε αμέσως μετά τον πόλεμο [18]. Αν το έργο των μηχανικών επικοινωνιών ήταν ένας σημαντικός πρόδρομος του κλασικού ελέγχου, τότε ένας άλλος ήταν η ανάπτυξη σερβομηχανισμών υψηλής απόδοσης τη δεκαετία του 1930. Η ανάγκη για τέτοιους σερβομηχανισμούς δημιουργήθηκε από την αυξανόμενη χρήση αναλογικών προσομοιωτών, όπως οι αναλυτές δικτύου για τη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας και οι διαφορικοί αναλυτές για ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων.

Σημαντικό κέντρο καινοτομίας ήταν το MIT, όπου οι Vannevar Bush, Norbert Wiener και Harold Hazen είχαν συμβάλει στο σχεδιασμό. Το 1934 ο Hazen συνόψισε τις εξελίξεις των προηγούμενων ετών στο Theory of servomechanisms [19]. Υιοθέτησε κανονικοποιημένες καμπύλες και παραμέτρους όπως η χρονική σταθερά και ο παράγοντας απόσβεσης, για να χαρακτηρίσει την σέρβο-απόκριση, αλλά δεν έδωσε καμία ανάλυση σταθερότητας: αν και φαίνεται ότι γνώριζε το έργο του Nyquist, (όπως σχεδόν όλοι οι σύγχρονοί του) δεν φαίνεται να έχει εκτιμήσει τη στενή σχέση μεταξύ ενός σερβομηχανισμού ανάδρασης και ενός ενισχυτή ανάδρασης.

1.1.3 Η Εμφάνιση της Σύγχρονης Θεωρίας Ελέγχου

Η σύγχρονη προσέγγιση στην θεωρία ελέγχου προήλθε τελικά από το πρωτότυπο έργο των Poincaré και Lyapunov στα τέλη του 19ου αιώνα. Οι Ρώσοι είχαν συνεχείς εξελίξεις προς αυτή την κατεύθυνση, ιδιαίτερα κατά τις δεκαετίες του 1920 και του 1930 σε κέντρα αριστείας στη Μόσχα και στο Γκόρκι (τόρα Νίζνι Νόβγκοροντ). Το ρωσικό έργο της δεκαετίας του 1930 μεταφέρεται αργά στη Δύση [20], αλλά μόνο στη μεταπολεμική περίοδο, και ιδιαίτερα με την εισαγωγή μεταφρασμένων εξωφύλλων των μεγάλων σοβιετικών επιστημονικών περιοδικών.

Ένας από τους πρώτους επιστήμονες στην δύση που ασχολήθηκε με το συγκεκριμένο θέμα ήταν ο Leroy MacColl στο πρώτο του βιβλίο [21]. Οι απαιτήσεις του ψυχρού πολέμου της μηχανικής ελέγχου επικεντρώθηκαν στον έλεγχο βαλλιστικών αντικειμένων για αεροδιαστημικές εφαρμογές. Τα λεπτομερή και ακριβή μαθηματικά μοντέλα, τόσο γραμμικά

όσο και μη, και οι κλασικές τεχνικές της απόκρισης συχνότητας και του τόπου ριζών (ουσιαστικά προσεγγίσεις) αντικαταστάθηκαν ολοένα και περισσότερο από μεθόδους σχεδιασμένες να βελτιστοποιούν κάποια μέτρα απόδοσης, όπως η ελαχιστοποίηση του χρόνου τροχιάς ή της κατανάλωσης καυσίμου. Τα μοντέλα υψηλότερης τάξης εκφράστηκαν ως ένα σύνολο εξισώσεων πρώτης τάξης ως προς τις μεταβλητές κατάστασης. Οι μεταβλητές κατάστασης επέτρεπαν μια πιο περίπλοκη αναπαράσταση της δυναμικής συμπεριφοράς από το κλασικό σύστημα απλής εισόδου μονής εξόδου που μοντελοποιήθηκε με μια διαφορική εξίσωση και ήταν κατάλληλες για προβλήματα πολλαπλών μεταβλητών. Σε γενικές γραμμές, έχουμε σε μορφή μήτρας:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

όπου x είναι οι μεταβλητές κατάστασης, u οι εισοδοί και y οι εξοδοί. Οι εξελίξεις στον αυτόματο έλεγχο στα τέλη της δεκαετίας του 1940 και της δεκαετίας του 1950 βοηθήθηκαν σε μεγάλο βαθμό από αλλαγές στους επαγγελματικούς φορείς μηχανικών και μια σειρά διεθνών συνεδρίων [22]. Στις ΗΠΑ, τόσο η Αμερικανική Εταιρεία Μηχανολόγων Μηχανικών όσο και το Αμερικανικό Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων Μηχανικών έκαναν διάφορες αλλαγές στη δομή τους για να αντικατοπτρίζουν την αυξανόμενη σημασία των σερβομηχανισμών και του ελέγχου της ανάδρασης. Στο Η.Β. παρόμοιες αλλαγές σημειώθηκαν στους βρετανικούς επαγγελματικούς φορείς, κυρίως στο Ίδρυμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, αλλά και στο Ινστιτούτο Μετρήσεων και Ελέγχου και στους φορείς μηχανολογίας και χημικής μηχανικής.

Τα πρώτα συνέδρια για το θέμα εμφανίστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1940 στο Λονδίνο και τη Νέα Υόρκη, αλλά το πρώτο πραγματικά διεθνές συνέδριο πραγματοποιήθηκε στο Cranfield του Ηνωμένου Βασιλείου το 1951. Ακολούθησαν πολλά άλλα, το πιο σημαντικό από τα οποία ήταν το γεγονός της Χαϊδελβέργης του Σεπτεμβρίου 1956, που οργανώθηκε από την κοινή επιτροπή ελέγχου των δύο μεγάλων γερμανικών μηχανικών φορέων, των VDE και VDI.

Ακολούθησε η ίδρυση της Διεθνούς Ομοσπονδίας Αυτόματου Ελέγχου το 1957 με το πρώτο της συνέδριο στη Μόσχα το 1960 [23]. Το συνέδριο της Μόσχας ήταν ίσως το πιο αξιοσημείωτο για την εργασία του Kalman σχετικά με τη γενική θεωρία των συστημάτων ελέγχου που εντόπισε τη δυαδικότητα μεταξύ του πολυμεταβλητού ελέγχου ανάδρασης και του

φιλτραρίσματος πολλαπλών μεταβλητών ανάδρασης και η οποία ήταν καθοριστική για την ανάπτυξη του βέλτιστου ελέγχου.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1950 και στις αρχές της δεκαετίας του 1960 κυκλοφόρησαν μια σειρά άλλων σημαντικών εργασιών για τον δυναμικό προγραμματισμό και τον βέλτιστο έλεγχο, από τα οποία μπορούν να ξεχωρίσουν εκείνα των Bellman [24], Kalman [25-27] και Pontryagin και συνεργατών [28].

1.1.4 Ο Ψηφιακός Υπολογιστής

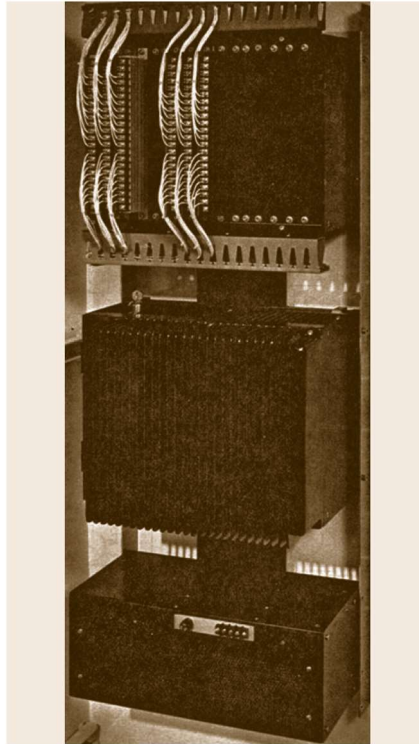
Η εισαγωγή των ψηφιακών τεχνολογιών στα τέλη της δεκαετίας του 1950 έφερε τεράστιες αλλαγές στον αυτόματο έλεγχο. Η μηχανική έλεγχου είχε από καιρό συσχετιστεί με υπολογιστικές συσκευές – όπως σημειώθηκε παραπάνω, μια κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη των σερβομηχανισμών ήταν οι εφαρμογές στον αναλογικό υπολογισμό. Αλλά η μεγάλη αλλαγή με την εισαγωγή των ψηφιακών υπολογιστών ήταν ότι τελικά οι κατά προσέγγιση μέθοδοι απόκρισης συχνότητας ή ριζικού σχεδιασμού, που αναπτύχθηκαν ρητά για να αποφευχθεί ο υπολογισμός, θα μπορούσαν να αντικατασταθούν από τεχνικές στις οποίες ο ακριβής υπολογισμός έπαιξε ζωτικό ρόλο.

Υπάρχει κάποια συζήτηση σχετικά με την πρώτη εφαρμογή ψηφιακών υπολογιστών στον αυτόματο έλεγχο διεργασιών, αλλά σίγουρα η εισαγωγή του ελέγχου υπολογιστών στο διυλιστήριο Texaco Port Arthur (Τέξας) το 1959 και το εργοστάσιο αμμωνίας Monsanto στο Luling (Λουϊζιάνα) το επόμενο έτος είναι δύο από τις πρώτες εφαρμογές [29]. Τα παλαιότερα συστήματα ήταν συστήματα εποπτείας, στα οποία οι μεμονωμένοι βρόχοι ελέγχονταν από συμβατικούς ηλεκτρικούς, πνευματικούς ή υδραυλικούς ελεγκτές, αλλά παρακολουθούνταν και βελτιστοποιούνταν από υπολογιστή.

Ακολούθησαν εξειδικευμένοι υπολογιστές ελέγχου διεργασιών στο δεύτερο μισό της δεκαετίας του 1960, προσφέροντας άμεσο ψηφιακό έλεγχο (DDC) καθώς και εποπτικό έλεγχο. Στον άμεσο ψηφιακό έλεγχο ο ίδιος ο υπολογιστής εφαρμόζει μια διακριτή μορφή ενός αλγορίθμου ελέγχου, όπως ο έλεγχος τριών όρων ή άλλη διαδικασία. Τέτοια συστήματα ήταν ακριβά, ωστόσο, και υπέφεραν επίσης πολλά προβλήματα με τον προγραμματισμό, και σύντομα αντικαταστάθηκαν από τους πολύ φθηνότερους μικροϋπολογιστές της αρχής της δεκαετίας του

1970, κυρίως τη σειρά Digital Equipment Corporation PDP. Όμως, όπως και σε πολλούς άλλους τομείς, ήταν ο μικροεπεξεργαστής που είχε το μεγαλύτερο αποτέλεσμα. Σύντομα αναπτύχθηκαν ψηφιακοί ελεγκτές βασισμένοι σε μικροεπεξεργαστές που ήταν συμπαγείς, αξιόπιστοι, περιλάμβαναν μια ευρεία επιλογή αλγορίθμων ελέγχου, είχαν καλή επικοινωνία με εποπτικούς υπολογιστές και συγκριτικά εύρηστα εργαλεία προγραμματισμού και διάγνωσης μέσω μιας αποτελεσματικής διεπαφής χειριστή. Οι μικροεπεξεργαστές θα μπορούσαν επίσης να ενσωματωθούν εύκολα σε συγκεκριμένα κομμάτια εξοπλισμού, όπως βραχίονες ρομπότ, για να παρέχουν αποκλειστικό έλεγχο θέσης, για παράδειγμα.

Μια εξέλιξη που συχνά παραμελείται στην ιστορία του αυτόματου ελέγχου είναι ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (PLC). Τα PLC αναπτύχθηκαν για να αντικαταστήσουν μεμονωμένους ηλεκτρονόμους που χρησιμοποιούνται για διαδοχικό (και συνδυαστικό) λογικό έλεγχο σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς. Οι πρώτες συσκευές βύσματος εμφανίστηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1960, αλλά το πρώτο κατάλληλο PLC ήταν πιθανώς το Modicon, που αναπτύχθηκε για τη General Motors για να αντικαταστήσει τα ηλεκτρομηχανικά ρελέ στην παραγωγή εξαρτημάτων αυτοκινήτου. Τα σύγχρονα PLC προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα επιλογών ελέγχου, συμπεριλαμβανομένων των συμβατικών αλγορίθμων ελέγχου κλειστού βρόχου όπως το PID καθώς και τις λογικές λειτουργίες. Παρά την άνοδο των ανθεκτικών υπολογιστών σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, τα PLC εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως λόγω της αξιοπιστίας και της εξοικείωσης που υπάρχει με αυτά (Εικ. 1.5).



Εικ. 1.5 Modicon 084 PLC [30]

Οι ψηφιακοί υπολογιστές κατέστησαν επίσης δυνατή την εφαρμογή των πιο προηγμένων τεχνικών ελέγχου που αναπτύχθηκαν στις δεκαετίες του 1960 και του 1970 [31]. Στον προσαρμοστικό έλεγχο ο αλγόριθμος τροποποιείται ανάλογα με τις περιστάσεις.

Ο προσαρμοστικός έλεγχος έχει μακρά ιστορία: ο λεγόμενος προγραμματισμός απολαβής (gain scheduling), για παράδειγμα, όταν το κέρδος ενός ελεγκτή μεταβάλλεται σύμφωνα με κάποια μετρούμενη παράμετρο, χρησιμοποιήθηκε πολύ πριν από τον ψηφιακό υπολογιστή. (Το κλασικό παράδειγμα είναι στον έλεγχο πτήσης, όπου το ύψος επηρεάζει τη δυναμική του αεροσκάφους, και επομένως πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη ρύθμιση του κέρδους.) Ο ψηφιακός προσαρμοστικός έλεγχος, ωστόσο, προσφέρει πολύ μεγαλύτερες δυνατότητες για:

1. Προσδιορισμό των σχετικών παραμέτρων του συστήματος
2. Λήψη αποφάσεων σχετικά με τις απαιτούμενες τροποποιήσεις στον αλγόριθμο ελέγχου
3. Εφαρμογή των αλλαγών.

Αναπτύχθηκαν επίσης βέλτιστες και ισχυρές τεχνικές, με τις πιο διάσημες ίσως να είναι οι γραμμικές-τετραγωνικές προσεγγίσεις Gauss (linear-quadratic- Gaussian LQG) και H_∞ από

τη δεκαετία του 1960 και μετά. Χωρίς ψηφιακούς υπολογιστές, αυτές οι τεχνικές, που προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν την απόρριψη των διαταραχών του συστήματος (σύμφωνα με κάποιο μέτρο συμπεριφοράς) ενώ ταυτόχρονα είναι ανθεκτικές σε σφάλματα στο μοντέλο, θα ήταν απλώς αδύνατο να εφαρμοστούν [32].

1.2 Ασύρματα δίκτυα αισθητήρων

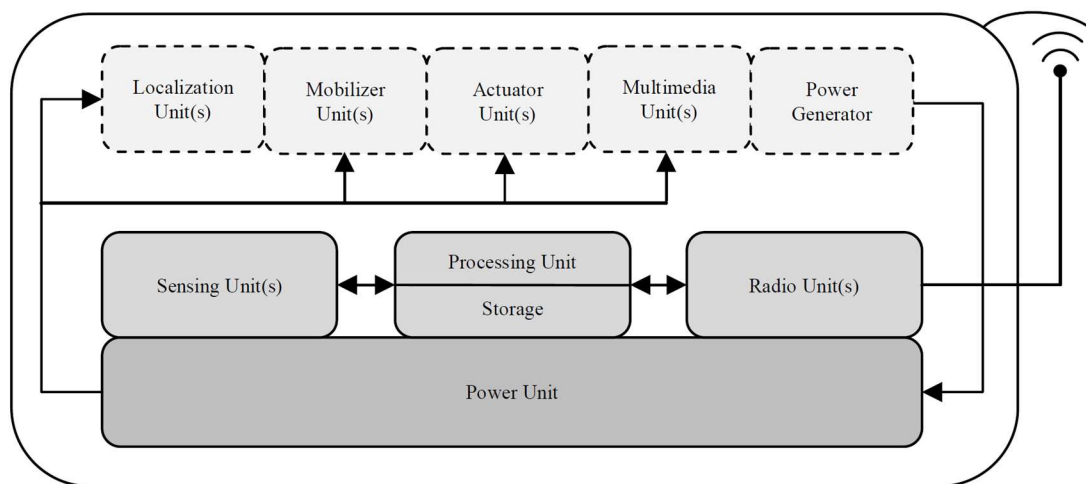
Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων έχουν μεγάλα πλεονεκτήματα λόγω των έξυπνων κόμβων αισθητήρων χαμηλού κόστους και μικρής κλίμακας. Όχι μόνο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε επικίνδυνες περιοχές ενδιαφέροντος, για την παρακολούθηση ή τον έλεγχο της περιοχής, αλλά μπορούν επίσης να αναπτυχθούν για την αυτοματοποίηση εργασιών.

Οι πρώιμες αισθητηριακές μονάδες ήταν ακριβές και δεν είχαν τις υπολογιστικές και επικοινωνιακές δυνατότητες των σημερινών έξυπνων κόμβων αισθητήρων, οι οποίοι μπορούν τώρα να ανιχνεύουν, να επεξεργάζονται, να αποθηκεύουν και να προωθούν δεδομένα, όλα τροφοδοτούμενα από μια μπαταρία. Υπάρχουν μυριάδες εφαρμογές που αξιοποιούν τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων ως λύσεις χαμηλού κόστους για την παρατήρηση του οικοτόπου και του περιβάλλοντος, από στρατιωτική και πολιτική παρακολούθηση και εφαρμογές ανίχνευσης και παρακολούθησης στόχων, μέχρι γεωργία, παρακολούθηση ασθενών στην υγειονομική περίθαλψη, οικιακές εφαρμογές όπως διαχείριση ενέργειας. για ασφάλεια και αποτελεσματικότητα στα δίκτυα οχημάτων έως τις εξερευνήσεις του διαστήματος.

Η ποικιλία των εφαρμογών των ασύρματων δικτύων αισθητήρων επιβάλλει ποικίλες απαιτήσεις σχεδιασμού, υλοποίησης και απόδοσης στα Ασύρματα Δίκτυα Αισθητηρίων. Επομένως, για την πλήρη κατανόηση των διαφορετικών τεχνικών σχεδιασμού και υλοποίησης, πρέπει να κατανοήσουμε τα εγγενή χαρακτηριστικά των Ασύρματων Δικτύων Αισθητηρίων και των έξυπνων κόμβων αισθητήρων τους. Αυτή η εγγενής φύση των ασύρματων δικτύων αισθητήρων για συγκεκριμένες εφαρμογές καθιστά την ταξινόμηση και την ταξινομική οριοθέτηση δύσκολη.

1.2.1 Κόμβοι ασύρματου δικτύου αισθητήρων και τα χαρακτηριστικά τους

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στα MEMS (micro-electromechanical system) και τα Ολοκληρωμένα Κυκλώματα (IC) υποκινούν την ευρεία διαθεσιμότητα χαμηλού κόστους, μικρής κλίμακας αισθητήρων, οι οποίοι εξελίχθηκαν σε έξυπνους αισθητήρες που τροφοδοτούνται από μπαταρία, με δυνατότητες επεξεργασίας και επικοινωνίας. Αυτοί οι έξυπνοι αισθητήρες αποτελούν το Ασύρματο Δίκτυο Αισθητηρίων κόμβων εφεξής WSN (Wireless Sensor Network nodes). Η εικόνα 1.6, απεικονίζει ένα τυπικό WSN με τις θεμελιώδεις μονάδες του.



Εικ. 1.6 Ένα τυπικό WSN με τις θεμελιώδεις μονάδες του [32]

Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από μια μονάδα που λειτουργεί με μπαταρία με έναν ή πολλούς αισθητήρες, μια μονάδα επεξεργασίας με αποθήκευση και έναν πομποδέκτη. Συνήθως, υπάρχουν υποδοχές επέκτασης ή μπορούν να προσαρτηθούν για να επεκτείνουν το σύστημα ώστε να συμπεριλάβουν άλλες μονάδες ειδικές για την εφαρμογή, όπως το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) για εντοπισμό ή μονάδες συλλογής ενέργειας από ηλιακή ή αιολική ενέργεια ή συμπληρωματικό ημιαγωγό μεταλλικού οξειδίου (CMOS) τσιπ για δυνατότητες πολυμέσων κ.λπ.

Αυτά τα συστήματα τοποθετούνται σε πλακέτες προγραμματισμού, σε διασύνδεση με υπολογιστή. Αυτή τη στιγμή, οι κινήσεις μπορούν επίσης να προγραμματιστούν με έναν συγκεκριμένο αριθμό αναγνώρισης και, ή αριθμό αναγνώρισης ομάδας.

Τα WSN μπορεί να διαφέρουν πολύ, σε σχέση με το μέγεθος, το κόστος, την ισχύ επεξεργασίας, το εύρος επικοινωνίας, τα πρωτόκολλα και τα λειτουργικά συστήματα. Τα WSN μπορεί να είναι τόσο μεγάλα όσο ένα κουτί παπουτσιών, π.χ. Sensoria Wireless Integrated Network Sensors (WINS) Επόμενης Γενιάς (NG) 2.0 [36], ή τόσο μικρά σαν κέρμα, όπως το Tmote Mini της Moteiv Corporation [37], αλλά οι τυπικές διαστάσεις WSN είναι της τάξης των μερικών εκατοστών [38].

Τα WSN είναι συνήθως εξοπλισμένα με πολλαπλούς αισθητήρες για ευαισθησία σε διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες, π.χ. μηχανικά, θερμικά, βιολογικά, χημικά, οπτικά και μαγνητικά, κ.λπ. Συχνά έχουν υποδοχές επέκτασης που τους επιτρέπουν να είναι εξοπλισμένοι με μηχανικούς ενεργοποιητές, τροχούς για κινητικότητα ή τσιπ CMOS ή μικρόφωνο για δυνατότητες πολυμέσων. Οι επεξεργαστές που χρησιμοποιούνται σε αυτά τα μπορούν να κυμαίνονται από επεξεργαστές εξαιρετικά χαμηλής ισχύος 8 bit έως πιο ισχυρούς επεξεργαστές 32 bit, ομοίως, ο χώρος μνήμης μπορεί να ποικίλλει από μερικά kilobyte έως την τάξη των megabyte [39].

Τα WSN μπορούν επίσης να εξοπλιστούν με μονάδες παραγωγής ενέργειας, οι οποίες αντλούν ενέργεια από πηγές ενέργειας του περιβάλλοντος όπως η ηλιακή [41], η μηχανική και η θερμική [42].

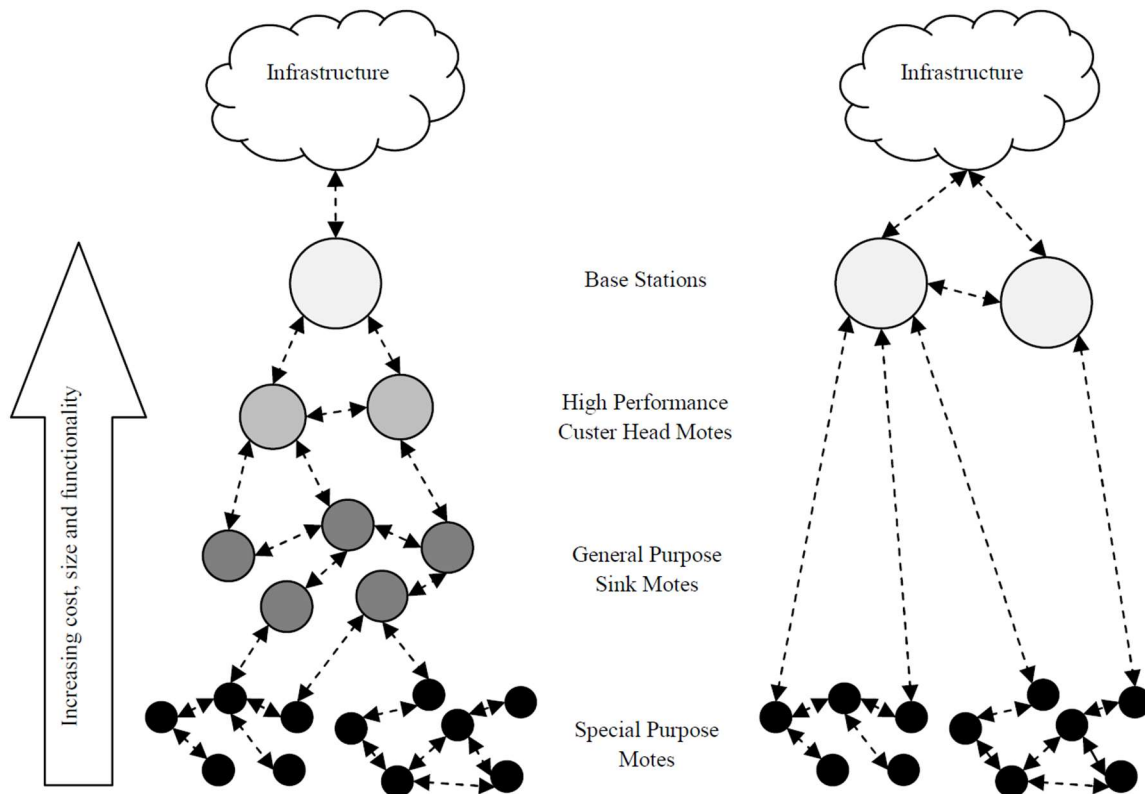
1.2.2 Χαρακτηριστικά των ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN)

Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων αναπτύσσονται σε μια περιοχή ενδιαφέροντος για μια χρονική περίοδο. Δεδομένου ότι ο κάθε κόμβος των συστημάτων αυτών έχουν μικρή εμβέλεια και μικρή περιοχή κάλυψης, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων περιέχουν συνήθως μεγάλο αριθμό κόμβων. Αυτοί οι κόμβοι σχηματίζουν δίκτυα πολλαπλών κόμβων και συνεργάζονται μεταξύ τους για να διατηρήσουν τη συνδεσιμότητα και την κάλυψη. Εκτός από τις παραδοσιακές ανησυχίες σχετικά με τη συνεργασία και την επικοινωνία σε ένα ad hoc περιβάλλον, τα WSN μαστίζονται επίσης από ανησυχίες σχετικά με τη διαχείριση ενέργειας, λόγω των μοτέρ που λειτουργούν με μπαταρία.

Περιοχή ενδιαφέροντος – Η περιοχή ενδιαφέροντος στις εφαρμογές WSN έχει μεγάλο εύρος. Για παράδειγμα, η παρακολούθηση ηφαιστειών [35] είναι ένα επικίνδυνο έργο για τον άνθρωπο αλλά μπορεί να επιτευχθεί με χρήση συστημάτων WSN χαμηλού κόστους που αναπτύσσονται στην περιοχή. Αυτά τα συστήματα δεν είναι μόνο αναλώσιμα, αλλά παρέχουν επίσης κρίσιμες αναλύσεις δεδομένων και μεγάλο αριθμό πληροφοριών.

Τρόποι ανάπτυξης – Υπάρχουν δύο ξεχωριστές στρατηγικές ανάπτυξης κίνησης, τυχαία και ακριβής. Στην τυχαία ανάπτυξη, οι κόμβοι κατανέμονται τυχαία σε ασύρματα ad hoc δίκτυα. Η ακριβής ανάπτυξη συνήθως συνίσταται σε χειροκίνητη ή προσχεδιασμένη τοποθέτηση κόμβων. Οι στρατηγικές ανάπτυξης που χρησιμοποιούνται επηρεάζουν τη δομή του WSN και μπορούν να έχουν αντίκτυπο στην κάλυψη της περιοχής και στο κόστος ανάπτυξης [40].

Οργάνωση και Αρχιτεκτονική – Τα WSN μπορούν να οργανωθούν σε δύο τυπικές δομές, επίπεδες ή ιεραρχικές. Η εικόνα 1.7 απεικονίζει το επίπεδο και ιεραρχικό WSN. Σε ένα επίπεδο δίκτυο, όλες οι κινήσεις στο δίκτυο έχουν τον ίδιο ρόλο και σημασία, ενώ, σε μια ιεραρχική οργάνωση, οι κινήσεις συγκεντρώνονται ή οργανώνονται σε ομάδες με διαφορετικές κινήσεις που παίζουν διαφορετικούς ρόλους, όπως κινήσεις ανίχνευσης γενικού σκοπού ή συγκεντρωτές δεδομένων ή προωθητές. κ.λπ. Καθώς ανεβαίνουμε στην ιεραρχία, η λειτουργικότητα του μοτέρ αυξάνεται σε σχέση με το κόστος, το μέγεθος, την ισχύ επεξεργασίας, το μέγεθος αποθήκευσης κ.λπ.



Εικ. 1.7 Αρχιτεκτονική WSN, ιεραρχική (αριστερά) και επίπεδη (δεξιά). [32]

Για καλύτερα αποτελέσματα, η ανάπτυξη του WSN θα πρέπει να αποτελείται από μια ιεραρχική οργάνωση ετερογενών κόμβων, ενσωματώνοντας μεγαλύτερο αριθμό κόμβων γενικής χρήσης χαμηλής ισχύος με μικρότερο αριθμό εξειδικευμένων ή υψηλής απόδοσης κόμβων [38]. Επιπλέον, αυτοί οι κόμβοι μπορούν να εξοπλιστούν με ενεργοποιητές [34].

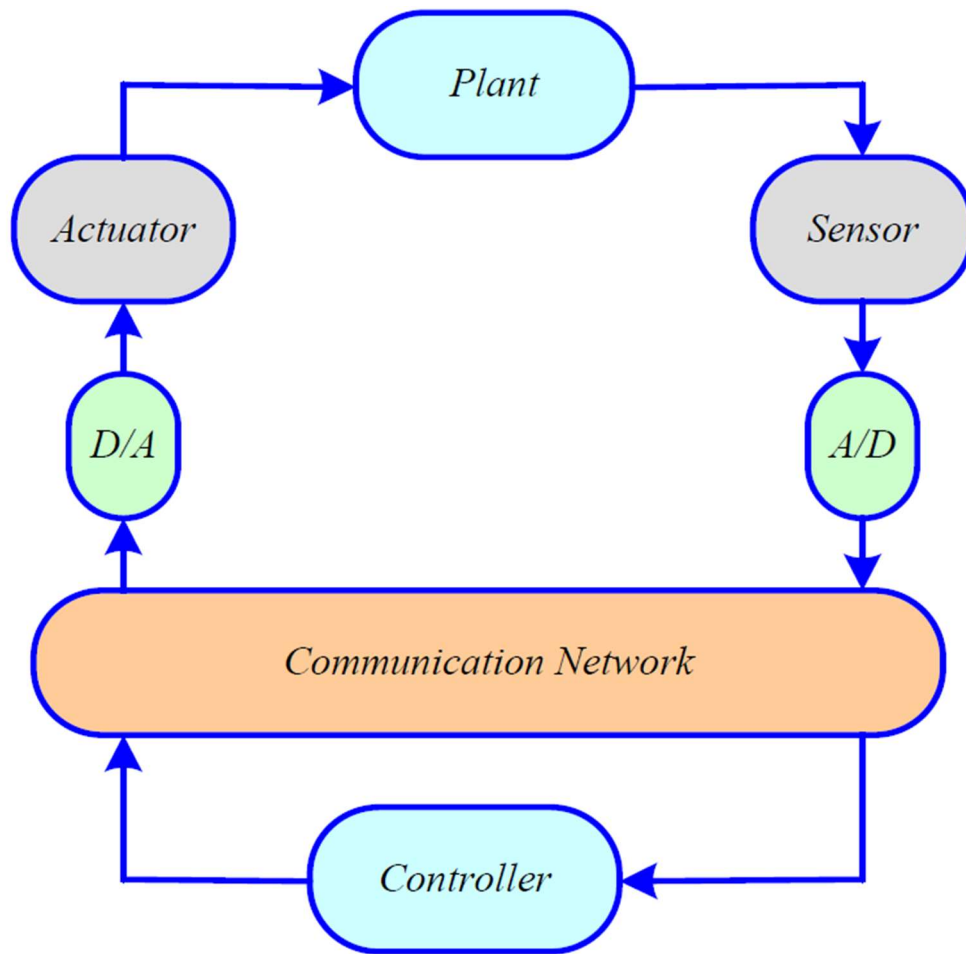
Διάρκεια ζωής του WSN – Τα WSN αναπτύσσονται με σκοπό την παροχή μακροπρόθεσμης συλλογής δεδομένων σε μεγάλες κλίμακες και αναλύσεις [43]. Οι τυπικές εφαρμογές παρακολούθησης οικοτόπων WSN επωφελούνται από μακροπρόθεσμα δεδομένα που βοηθούν στην αποκρυπτογράφηση των τάσεων δεδομένων και είναι απαραίτητα για την ανίχνευση σημαντικών αλλαγών [44]. Έτσι, η διάρκεια ζωής ενός WSN είναι ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό. Οριοθετείται από την πεπερασμένη πηγή ενέργειας των κόμβων που λειτουργούν με μπαταρία και τη φύση της αναπτυσσόμενης περιοχής, και η αντικατάσταση και η απόρριψη αυτών των μπαταριών είναι ανέφικτη ή δύσκολη. Αυτό απαιτεί άριστη διαχείριση ενέργειας σε στοιχεία υλικού και λογισμικού των κόμβων ([45], [33]) και στα πρωτόκολλα WSN [46]. Οι στρατηγικές ενίσχυσης διερευνώνται επίσης στα WSN μέσω τεχνικών συγκομιδής ισχύος, από ηλιακές [41], μηχανικές και θερμικές [42] πηγές.

Αυτο-διαμόρφωση και οργάνωση – Υπάρχουν διάφοροι τύποι αλγορίθμων αυτο-ανακάλυψης για χρήση στα WSN, ορισμένοι είναι προσαρμογές από τον μηχανισμό εντοπισμού Bluetooth και άλλοι αναπτύχθηκαν ειδικά για τα WSN. Οι αλγόριθμοι που περιγράφονται στα [47], [48], [49] αποτελούνται από μια σειρά πρωτοκόλλων που είναι υπεύθυνα για την ανακάλυψη μοτίβων και την οργάνωση της ασύρματης υποδομής, παρά τις αλλαγές στην τοπολογία και τις αστοχίες μοτίβων.

1.3 Εξέλιξη τεχνολογίας συστημάτων ελέγχου δικτύου

Τα δικτυακά συστήματα ελέγχου (Networked control systems NCS) προσελκύουν την προσοχή των μηχανικών συστημάτων ελέγχου. Το NCS έχει δημιουργήσει μια αλλαγή στην τεχνολογία των συστημάτων ελέγχου. Ένα NCS αποτελείται από βρόχους ελέγχου που συνδέονται μέσω δικτύων επικοινωνίας στα οποία ανταλλάσσονται τόσο το σήμα ελέγχου όσο και το σήμα ανάδρασης μεταξύ του συστήματος και του ελεγκτή. Ωστόσο, η υλοποίησή του αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις καθώς απαιτεί την ενσωμάτωση προηγμένων τεχνικών ελέγχου και επικοινωνίας.

Ένα απλό διάγραμμα ενός δικτυακού συστήματος ελέγχου φαίνεται στην εικόνα 1.8. Σε ένα NCS, η έξοδος της εγκατάστασης μετράται χρησιμοποιώντας τους αισθητήρες. Αυτά τα σήματα μετατρέπονται σε ψηφιακά σήματα χρησιμοποιώντας τους αναλογικούς-ψηφιακούς μετατροπείς (A/D), οι οποίοι μεταδίδονται στον ελεγκτή μέσω ενός δικτύου επικοινωνίας. Ο ελεγκτής καθορίζει το σήμα ελέγχου με βάση την έξοδο του αισθητήρα, το οποίο μεταδίδεται πίσω στην εγκατάσταση χρησιμοποιώντας το ίδιο κανάλι επικοινωνίας. Το σήμα ελέγχου πριν τροφοδοτηθεί στο τμήμα του ενεργοποιητή (actuator) της εγκατάστασης, μετατρέπεται από ψηφιακό σε αναλογικό σήμα χρησιμοποιώντας τον ψηφιακό-αναλογικό (D/A) μετατροπέα. Με αυτόν τον τρόπο, η δυναμική της εγκατάστασης μπορεί να ελεγχθεί από μια απομακρυσμένη τοποθεσία.



Εικ. 1.8 Μια απλή αναπαράσταση μπλοκ ενός δικτυακού συστήματος ελέγχου (NCS). [33]

1.3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των NCS

Υπάρχουν πολλά υποκείμενα πλεονεκτήματα ενός συστήματος NCS. Τα βασικά πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- (i) Αποτελεσματική μείωση της πολυπλοκότητας του συστήματος: Είναι δυνατό να ελαχιστοποιηθεί η πολυπλοκότητα των συστημάτων ελέγχου μέσω της διασύνδεσής τους με το δίκτυο επικοινωνίας. Με το δίκτυο επικοινωνίας, τα δεδομένα που σχετίζονται με πολλαπλές εγκαταστάσεις μπορούν εύκολα να αποθηκευτούν σε έναν μόνο διακομιστή, γεγονός που μειώνει την πολυπλοκότητα των συστημάτων ελέγχου.
- (ii) Αποτελεσματική κοινή χρήση δεδομένων δικτύου: Πολλές παράμετροι που σχετίζονται με την εγκατάσταση μπορούν να ανταλλάσσονται εύκολα

χρησιμοποιώντας τα δίκτυα επικοινωνίας, κάτι που βοηθά στο σχεδιασμό αλγορίθμων ελέγχου.

- (iii) Απλή μέθοδος λήψη αποφάσεων με βάση τις πληροφορίες: Οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να ληφθούν εύκολα έξυπνες αποφάσεις.
- (iv) Εξάλειψη περιττής καλωδίωσης: Σήμερα, είναι δυνατή η ασύρματη μετάδοση δεδομένων με πολύ υψηλή ταχύτητα. Η καλωδίωση για τους ελεγκτές και τις εγκαταστάσεις διασύνδεσης μπορεί επίσης να αποφευχθεί. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων είναι αρκετά προηγμένα ώστε ο ασύρματος έλεγχος να είναι εφικτός.
- (v) Απλή κλιμάκωση των δικτύων προσθέτοντας επιπλέον αισθητήρες, ενεργοποιητές και ελεγκτές: Οι ασύρματοι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές μπορούν να αντικατασταθούν εύκολα, γεγονός που μειώνει το κόστος συντήρησης των NCS. Οι ελεγκτές μπορούν επίσης να αντικατασταθούν οικονομικά σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς ενσύρματους ελεγκτές. Η επέκταση των ελεγκτών μπορεί επίσης να επιτευχθεί εύκολα.
- (vi) Ευρύ φάσμα εφαρμογών: Εφαρμογές στον τομέα των κατανεμημένων συστημάτων ισχύος, ρομπότ, μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (UAV), αυτοκίνητων, ανακάλυψη διαστήματος, επίγεια ανακάλυψη, αυτοματισμός βιομηχανικών μονάδων, απομακρυσμένη επίλυση προβλημάτων και αντιμετώπιση προβλημάτων, επικίνδυνα περιβάλλοντα, αεροσκάφη, παρακολούθηση εργοστασίων παραγωγής περιβάλλον κ.α. Όλο και περισσότερες εφαρμογές NCS υλοποιούνται καθημερινά.

Τα NCS μαστίζονται επίσης από αρκετά προβλήματα. Τα μειονεκτήματα των NCS είναι:

- (i) Απώλεια ικανότητας προσδιορισμού της ώρας των εισερχόμενων δεδομένων: Η ώρα κατά την οποία φτάνουν τα δεδομένα δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια, επομένως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ομοιόμορφη δειγματοληψία.
- (ii) Απώλεια ακεραιότητας δεδομένων: Τα δεδομένα ενδέχεται να χαθούν κατά τη διαδικασία μετάδοσης, επομένως δεν μπορούν να δώσουν τις πλήρεις πληροφορίες.
- (iii) Καθυστέρηση επικοινωνίας: Σε απομακρυσμένα NCS, λόγω του λανθάνοντος χρόνου επικοινωνίας, η ενέργεια ελέγχου ενδέχεται να μην υλοποιηθεί με άμεση ισχύ.
- (iv) Πολυπλοκότητα και συμφόρηση: Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κόμβων, αυξάνεται και η πολυπλοκότητα του συστήματος επικοινωνίας, προκαλώντας

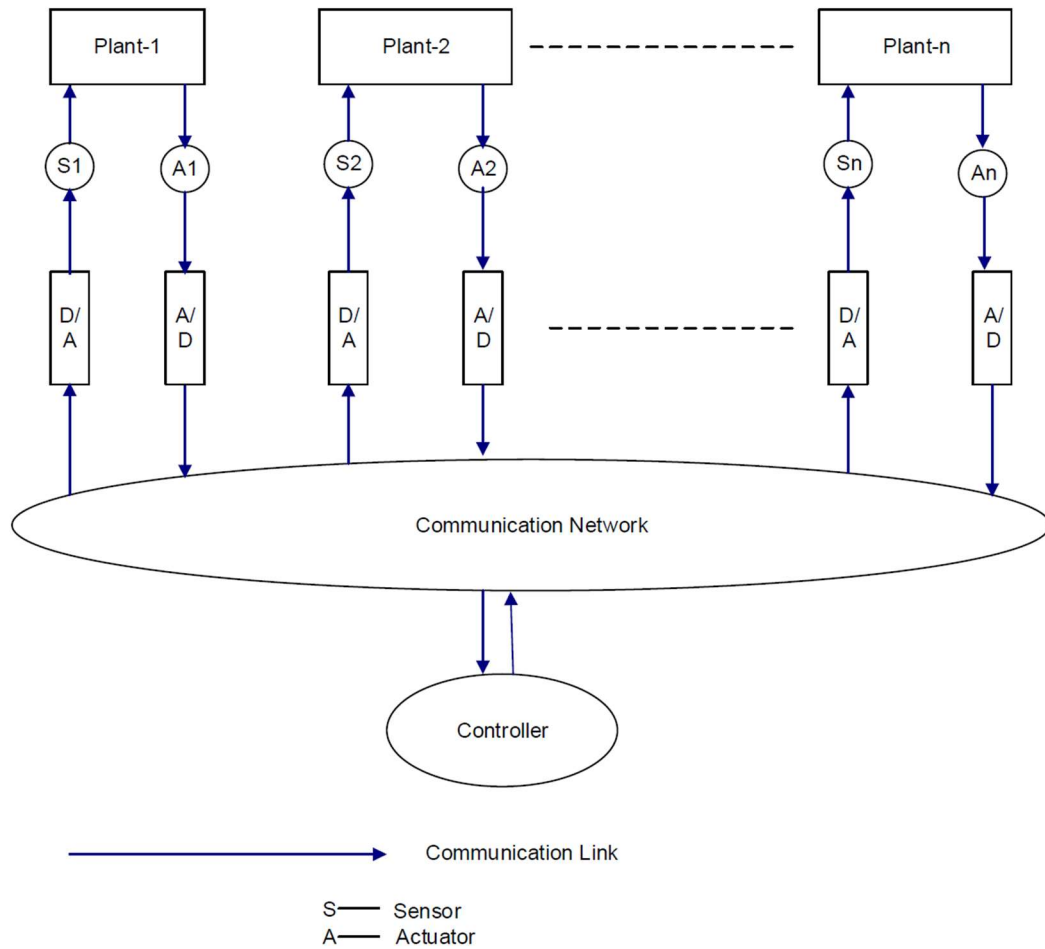
συμφόρηση και χρονικές καθυστερήσεις. Επομένως, η ανάπτυξη σε μια βιομηχανία με δεκάδες χιλιάδες αισθητήρες και ενεργοποιητές μπορεί να είναι μια πρόκληση.

1.4 Τοπολογίες σε συστήματα NCS

Κατά κύριο λόγο υπάρχουν τρεις τύποι τοπολογιών δικτύου που διατίθενται στα NCS, συγκεκριμένα η κεντρική τοπολογία, η αποκεντρωμένη τοπολογία και η κατανεμημένη τοπολογία. Μια σύντομη συζήτηση για αυτές τις τοπολογίες δίνεται παρακάτω.

1.4.1 Κεντρική Τοπολογία

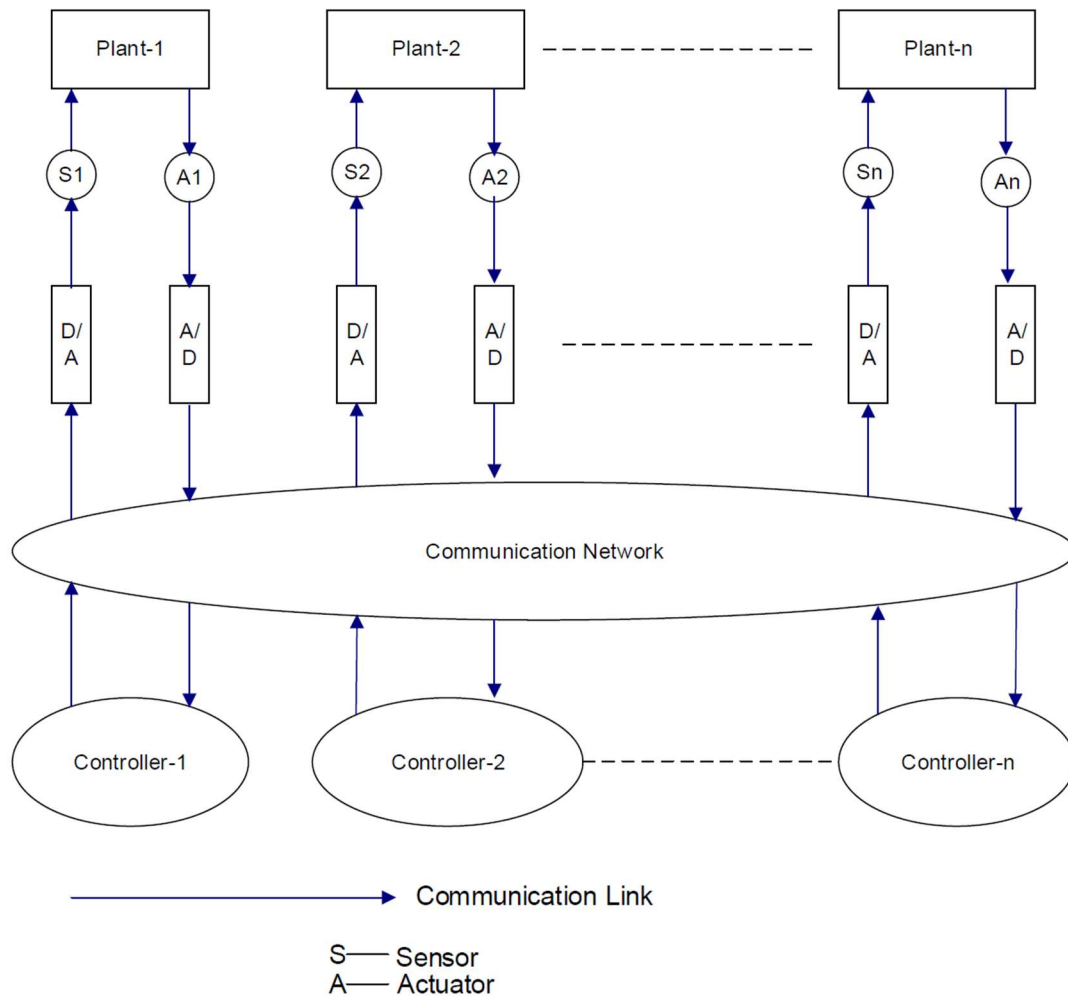
Η κεντρική τοπολογία φαίνεται στην εικ. 1.9. Εδώ, τα δεδομένα ανίχνευσης αποστέλλονται σε έναν κεντρικό ελεγκτή για συγχώνευση δεδομένων. Οι κατάλληλες μέθοδοι συγκέντρωσης δεδομένων είναι απαραίτητες για τη λήψη των συγχωνευμένων δεδομένων που χρησιμοποιούνται για υπολογιστικές διαδικασίες και εκτελέσεις.



Εικόνα 1.9 Κεντρική τοπολογία. [33]

1.4.2 Αποκεντρωμένη Τοπολογία

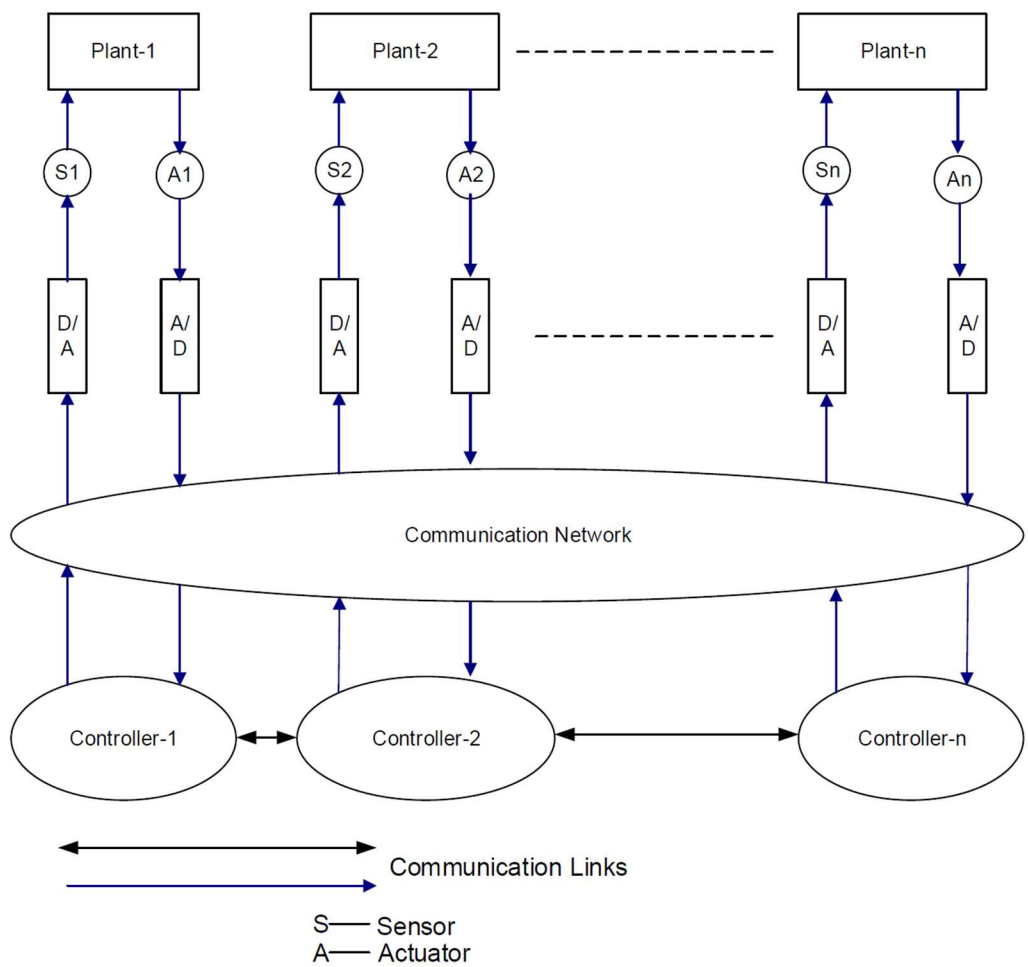
Αυτή η τοπολογία φαίνεται στην εικ. 1.10. Κάθε κόμβος ελεγκτή εξαρτάται μόνο από τις τοπικές πληροφορίες που διαθέτει ο ελεγκτής για τη λήψη της τοπικής του απόφασης. Σε αυτήν την τοπολογία, οι κόμβοι ελεγκτή δεν μοιράζονται τις πληροφορίες τους με τους αντίστοιχους γειτονικούς κόμβους. Αυτοί οι τύποι τοπολογιών βοηθούν στη μείωση του χρόνου που απαιτείται για την ανάλυση και τη σύνθεση των NCS. Εδώ, οι ελεγκτές είναι αποκεντρωμένοι ελεγκτές.



Εικ 1.10 Αποκεντρωμένη τοπολογία. [33]

1.4.3 Κατανεμημένη Τοπολογία

Η εικονογραφική αναπαράσταση της κατανεμημένης τοπολογίας φαίνεται στην εικ. 1.11. Υπάρχουν δύο σημαντικά χαρακτηριστικά αυτής της τοπολογίας: οι πληροφορίες του υποσυστήματος ανταλλάσσονται με τη βοήθεια ενός κοινού δικτύου επικοινωνίας και η εγκατάσταση αποτελείται από έναν τεράστιο αριθμό απλών αλληλεπιδρώντων μονάδων που διασυνδέονται για την επίτευξη ενός επιθυμητού στόχου. Σε αυτήν την τοπολογία, κάθε ελεγκτής επιτρέπεται να μοιράζεται τις τοπικές πληροφορίες του με τους αντίστοιχους γειτονικούς ελεγκτές. Έτσι, οι κατανεμημένοι ελεγκτές είναι σε θέση να συντονίζουν τη συμπεριφορά τους μεταδίδοντας/λαμβάνοντας πληροφορίες προς/από άλλους ελεγκτές εντός της αντίστοιχης γειτονικής τους περιοχής. Εδώ, οι ελεγκτές είναι κατανεμημένοι ελεγκτές.



Εικόνα 1.11 Κατανεμημένη τοπολογία. [33]

Κεφάλαιο 2^ο

2.1 Δικτυακά συστήματα ελέγχου αισθητήρων με συλλογή ηλιακής ενέργειας

Τα ασύρματα δικτυακά συστήματα ελέγχου αισθητήρων με συλλογή ηλιακής ενέργειας (Solar energy harvesting wireless sensor networks ή SEH-WSNs) χρησιμοποιούνται για εφαρμογές παρακολούθησης και ελέγχου σε διάφορες εφαρμογές όπως έλεγχος φωτός, θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης, επιτάχυνσης βιομηχανικών εγκαταστάσεων, έξυπνων πόλεων, αγροκτημάτων, δασών, θερμοκηπίων και απομακρυσμένων τοποθεσιών. Τα συμβατικά ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) έχουν τον σχεδιαστικό περιορισμό της κατανάλωσης υψηλής ισχύος κατά τη λειτουργία τους, ο οποίος έχει αντιμετωπιστεί με προσεγγίσεις που βασίζονται κυρίως στον κύκλο λειτουργίας μέχρι τώρα. [50,51].

Όπως εφαρμόζεται στα WSN, η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια και χρησιμοποιείται για την επαναφόρτιση της μπαταρίας ενός κόμβου WSN στο ίδιο το σημείο λειτουργίας. Επομένως, απαιτείται αντικατάσταση της μπαταρίας ξανά και ξανά αφού αποφορτιστεί η ενέργεια της μπαταρίας (όπως συμβαίνει στα συμβατικά WSN που βασίζονται σε μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες). Η ηλεκτρική ενέργεια που συλλέγεται από την ηλιακή ενέργεια (ηλιακό φως) μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί απευθείας για την τροφοδοσία ενός κόμβου WSN.

Εναλλακτικά, η συλλεγόμενη ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία (ή έναν supercapacitor) για μελλοντικούς σκοπούς (π.χ. κατά τη διάρκεια της νύχτας όταν το φως του ήλιου δεν είναι διαθέσιμο). Τα SEH-WSN αποτελούνται από μικρούς αυτόνομους κόμβους WSN που είναι προσαρτημένοι σε μικρού μεγέθους ηλιακούς συλλέκτες για τις ανάγκες συλλογής ενέργειας τους.

Η πυκνότητα ισχύος (mW/cm^2) και η απόδοση (g%) διαφόρων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ενέργεια φωτός περιβάλλοντος (ηλιακή), η κινητική ενέργεια (επιτάχυνση / δονήσεις / καταπόνηση), η θερμική ενέργεια (ανθρώπινες/βιομηχανικές μηχανές) και η ενέργεια ραδιοσυχνότητας (RF) (ζώνη κινητού τηλεφώνου @GSM 900 MHz, σήματα Wi-Fi) φαίνονται στον Πίνακα 2.1. Από τον Πίνακα 2.1, παρατηρούμε ότι η μέγιστη δυνατή συλλεγόμενη ισχύς από την ηλιακή ενέργεια σε εξωτερικούς χώρους και είναι $15 \text{ mW}/\text{cm}^2$ με υψηλότερη απόδοση

να φτάνει το 30% [63-65]. Ως εκ τούτου, μπορούμε να συμπεράνουμε σε σχέση με τις άλλες μορφές ενέργειας του πίνακα ότι η συλλογή ηλιακής ενέργειας για την παροχή εναλλακτικής ισχύος στα WSN είναι η βέλτιστη επιλογή, καθώς έχει την υψηλότερη πυκνότητα ισχύος και καλή απόδοση.

Πίνακας 2.1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για WSN [91]

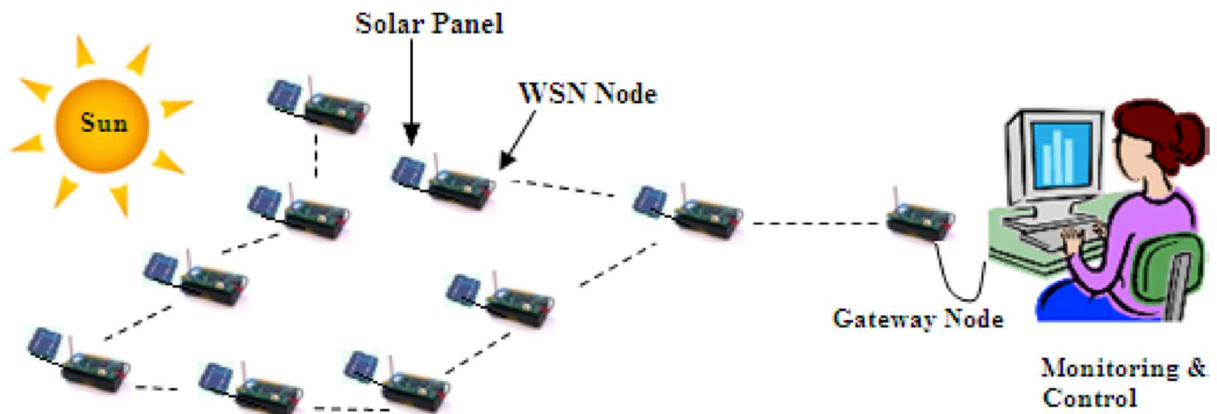
Ανανεώσιμη πηγή ενέργειας		Διαθέσιμη ισχύς	Πυκνότητα ισχύος	Αποδοτικότητα (n)
Ενέργεια φωτός περιβάλλοντος (ηλιακή)	Εσωτερικά	0.1 mW/cm ²	10 μW/cm ²	5%–30%
	Υπαίθρια	100 mW/cm ²	10–15mW/cm ²	
Κινητική ενέργεια (επιτάχυνση / δόνηση / καταπόνηση)	Άνθρωπος	0.5m σε 1Hz 1m/s ² σε 50Hz	4 μW/cm ²	1%–10%
	Βιομηχανικά μηχανήματα	1m σε 5Hz 10m/s ² σε 1kHz	100 μW/cm ²	
Θερμική ενέργεια	Άνθρωπος	20mW/cm ²	30 μW/cm ²	0.15%
	Βιομηχανικά μηχανήματα	100mW/cm ²	1–10 m W/cm ²	1%–10%
Ραδιοσυχνότητα (RF Radio frequency)	Κινητό τηλέφωνο @GSM900MHz	0.3 μW/cm ²	0.1 μW/cm ²	50%
	Wi-Fi	0.03 μW/cm ²	0.01 μW/cm ²	

Τα πλεονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας είναι μεγάλος κινητήριος παράγοντας για το σχεδιασμό κόμβων SEH-WSN, και είναι τα εξής:

- Η ηλιακή ενέργεια είναι η ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.
- Η ηλιακή ενέργεια δεν βλάπτει την ατμόσφαιρα.
- Έχει την υψηλότερη επιτευχθείσα πυκνότητα ισχύος 10–15 mW/cm² σε σύγκριση με όλες τις άλλες ανανεώσιμες πηγές όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1.
- Η ηλιακή ενέργεια είναι ευέλικτη, δηλαδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές χαμηλής τάσης, όπως αριθμομηχανές χειρός, ρολόγια και ασύρματες ενσωματωμένες συσκευές μικροελεγκτή, καθώς και εφαρμογές υψηλής ισχύος σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής και δορυφορικούς αναμεταδότες.
- Η ηλιακή ενέργεια είναι δωρεάν και δεν προκαλεί ρύπανση.
- Τα ηλιακά συστήματα χρειάζονται πολύ μικρή συντήρηση και διαρκούν αρκετά χρόνια.

Επιπλέον, όταν αρκετές εκατοντάδες κόμβοι αισθητήρων κατανέμονται σε γεωργικές εκμεταλλεύσεις, δάση, παρακολούθηση θερμοκηπίων ή οποιεσδήποτε άλλες εφαρμογές που απαιτούν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, τότε είναι πολύ δύσκολο να αντικαθιστούμε περιοδικά τις αποφορτισμένες μπαταρίες κάθε κόμβου αισθητήρα χειροκίνητα.

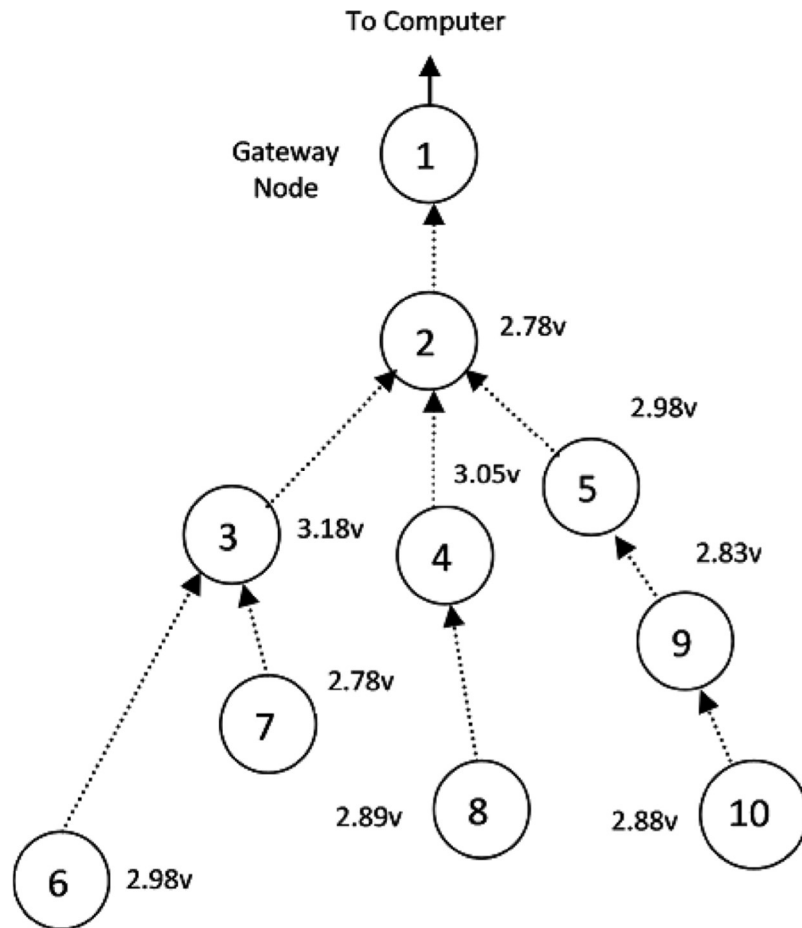
Επομένως, η συλλογή ηλιακής ενέργειας είναι η νέα και καινοτόμος λύση για την παροχή μιας εναλλακτικής πηγής ενέργειας στους κόμβους WSN στον ίδιο τον χώρο τοποθέτησης τους. Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ελεγχόμενη και χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια, διατηρώντας παράλληλα χαμηλό κόστος, είναι μια πολύ μεγάλη πρόκληση για την ανθρωπότητα. Η λειτουργία ενός SEH-WSN εξηγείται στην εικόνα. Εδώ, οι κόμβοι χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος (Κελσίου), του φωτός (Lux), της υγρασίας (%), της πίεσης (bar) και της επιτάχυνσης (m/s²). Μια εφαρμογή λογισμικού είναι εγκατεστημένη και εκτελείται σε ένα σύστημα προσωπικού υπολογιστή. Χρησιμοποιώντας τον πίνακα ελέγχου λογισμικού, ο χρήστης μπορεί να μετρήσει εξ αποστάσεως τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, το φως, την υγρασία, την πίεση και την επιτάχυνση.



Εικ. 2.1 Ένα σενάριο SEH-WSN για εφαρμογή παρακολούθησης θερμοκρασίας. [91]

Τα κυκλώματα συλλογής ηλιακής ενέργειας, (όπως πχ η προηγμένη γραμμική συσκευή (ALD) EH300,83 MAX17710,85 LTC 3105,86 και TI BQ2550587) χρησιμοποιούνται για την παροχή απεριόριστης διάρκειας ζωής δικτύου στους κόμβους WSN. Η ενέργεια του περιβάλλοντος φωτός από τον ήλιο συλλέγεται από τις ηλιακές μονάδες και ανανεώνεται σε ηλεκτρική ενέργεια (τάση D.C.). Αυτή η τάση μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας για την τροφοδοσία του φορτίου κόμβου WSN ή μπορεί να αποθηκευτεί σε μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία για μελλοντική χρήση. Η ισχύς που λαμβάνεται από την ηλιακή ενέργεια δεν ρυθμίζεται και επομένως χρειαζόμαστε κυκλώματα ρύθμισης τάσης/ρυθμιστικής ισχύος.

Η εικόνα 2.2 δείχνει την τοπολογία δικτύου με κάθε κόμβο WSN και την υπολειπόμενη στάθμη τάσης μπαταρίας. Εδώ, εάν η τάση της μπαταρίας ενός κόμβου WSN πέσει κάτω από ένα ορισμένο κρίσιμο ελάχιστο επίπεδο τάσης (V_{min}), (πχ δηλαδή 2,3 V) τότε, δεν χρησιμοποιείται στη διαδρομή δρομολόγησης της ροής πληροφοριών.



Εικ. 2.2 Τοπολογία δικτύου και υπολειπόμενη τάση μπαταρίας κάθε κόμβου WSN.[91]

Οι κύριες εφαρμογές των SEH-WSN είναι η παρακολούθηση θερμοκρασίας, [53] η μέτρηση έντασης φωτός, [54] η μέτρηση υγρασίας, [55] η παρακολούθηση πίεσης, [56] η παρακολούθηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, [57] παρακολούθηση περιοχών που καίγονται, [58] Παρακολούθηση κατασκευών, [59] Παρακολούθηση μεταφορών [60] παρακολούθηση ποιότητας αέρα, [61] και παρακολούθηση δασών [62].

Στον τομέα των WSN, υπάρχουν μερικές πολύ διάσημες αναθεωρήσεις βιβλιογραφίας, που δόθηκαν από τον Akyildiz [50] το 2002 και από τον Giuseppe [51] το 2009. Αλλά εκείνη την εποχή (2002–2009), μεγάλη εστίαση στον τομέα των WSN ήταν μόνο στον ενεργειακά αποδοτικό σχεδιασμό και κανείς δεν μίλησε για τη συγκομιδή ενέργειας στα WSN. Αργότερα, το 2009, οι Sudevalayam και Kulkarni [52] έκαναν μια ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με τη συλλογή ενέργειας στα WSN και συζήτησαν πολλές τεχνολογίες συλλογής ενέργειας όπως η ηλιακή, η θερμική, η πιεζοηλεκτρική και η συλλογή ενέργειας ραδιοσυχνοτήτων για WSN.

2.2 Προκλήσεις σχεδιασμού σε επίπεδο συλλογής ηλιακής ενέργειας (Solar Energy harvesting SEH).

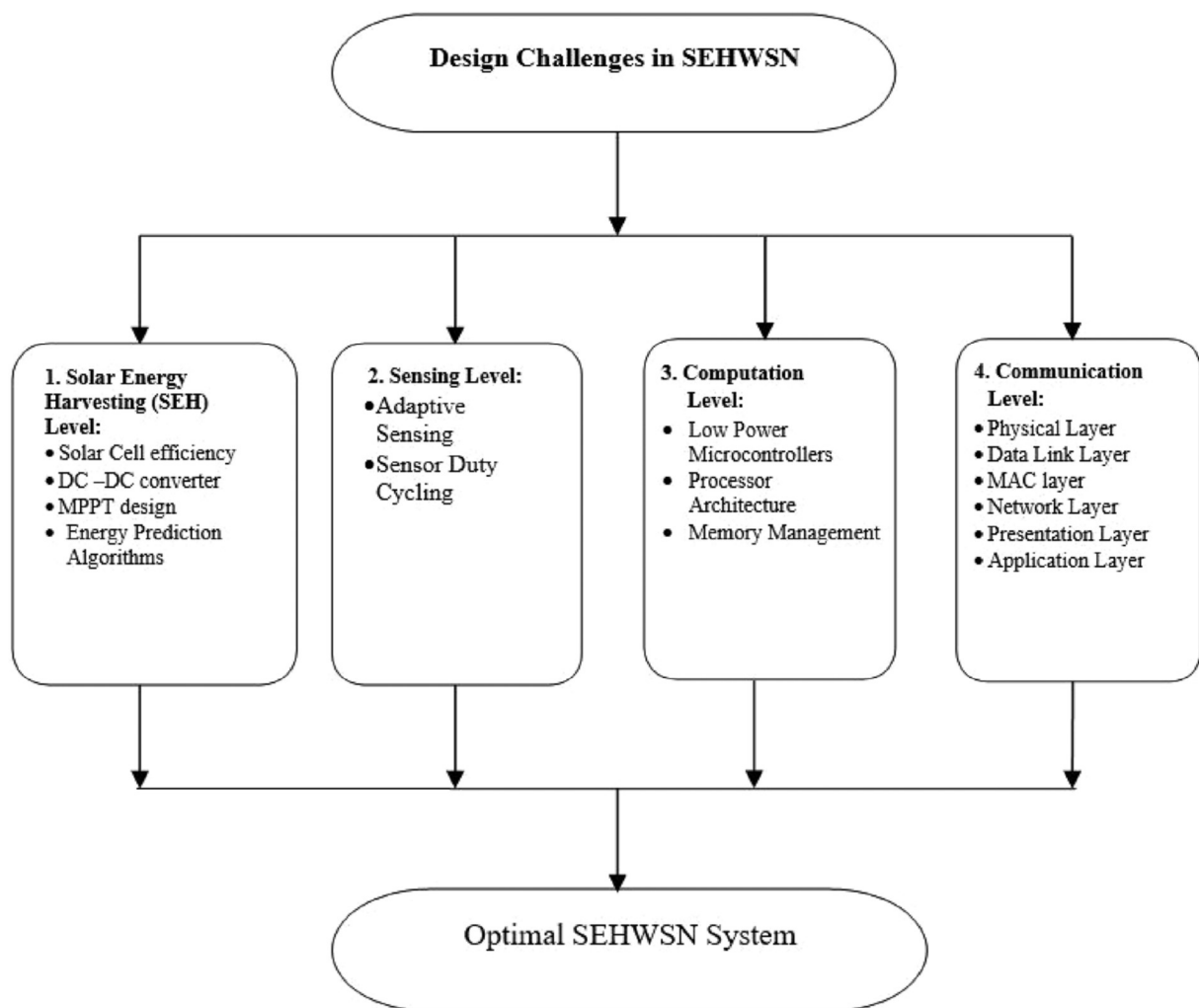
Η συλλογή ηλιακής ενέργειας (SEH) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια του περιβάλλοντος και μετατρέπει τη συλλεγόμενη φωτεινή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση από τον κόμβο αισθητήρα.

Οι προκλήσεις σχεδιασμού σε επίπεδο συλλογής ηλιακής ενέργειας είναι οι εξής:

- Όλη η φωτεινή ενέργεια που προέρχεται από τις ακτίνες του ήλιου θα πρέπει να αξιοποιείται πλήρως. Ο κόμβος SEH-WSN θα πρέπει να χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια ως κύρια πηγή και την ενέργεια της επαναφορτιζόμενης μπαταρίας ως δευτερεύουσα πηγή.
- Επέκταση του κύκλου ζωής φόρτισης-εκφόρτισης της μπαταρίας.
- Σχεδιασμός απλού και αποδοτικού ηλιακού φορτιστή.
- Η συρρίκνωση της συνολικής χρήσης ισχύος.
- Η ενίσχυση της σταθερότητας του συνολικού συστήματος SEH-WSN.
- Τα κυκλώματα συγκομιδής ενέργειας θα πρέπει να είναι συμβατά με τα υπάρχοντα βιομηχανικά πρότυπα επικοινωνίας WSN όπως τα πρότυπα IEEE 802.15.4 (ZigBee) και IEEE 1451 [54].
- Η επίτευξη υψηλότερης ισχύος από τον ήλιο.
- Η εξασφάλιση μικρής κατανάλωσης ενέργειας για τη λειτουργία του μετατροπέα DC-DC Boost.
- Η μεταφορά μέγιστης ισχύος στον κόμβο SEH-WSN χρησιμοποιώντας τη συγκομιδή ενέργειας.
- Οι μεταβολές στο επίπεδο ηλιακής ακτινοβολίας, στην απόδοση των ηλιακών κυψελών (g), στον σχεδιασμό μετατροπέα DC-DC και στον σχεδιασμό MPPT και στους αλγόριθμους πρόβλεψης ενέργειας.
- Οικονομικά αποδοτικές λύσεις συλλογής ενέργειας (φθηνότερες από το κόστος αντικατάστασης της μπαταρίας)

Όσον αφορά τη συγκομιδή της ηλιακής ενέργειας για την τροφοδοσία των WSN, πολλοί ερευνητές έχουν κάνει πολλή ερευνητική εργασία. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές προκλήσεις σχεδιασμού στα SEH-WSN, οι οποίες πρέπει να διερευνηθούν για περαιτέρω βελτιστοποίηση.

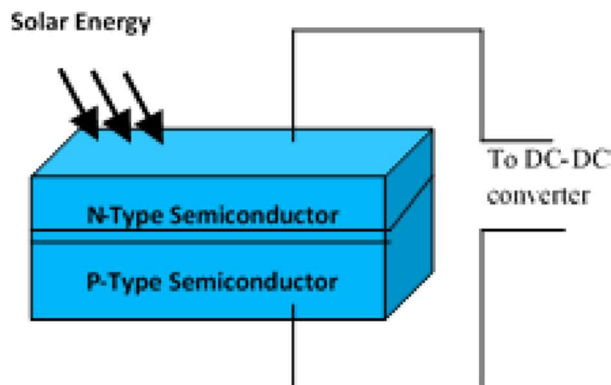
Οι προκλήσεις σχεδιασμού στο SEH-WSN φαίνονται στην εικόνα 2.3.



Εικ. 2.3 Προκλήσεις σχεδιασμού στα συστήματα SEH-WSN. [91]

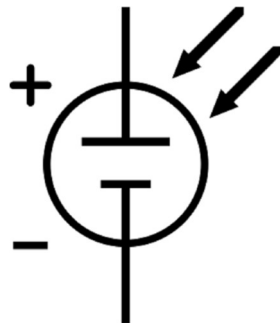
2.2.1 Απόδοση ηλιακών κυψελών (n)

Ένα ηλιακό κύτταρο είναι βασικά μια σύνδεση ημιαγωγού τύπου P και τύπου N (PN) που αποτελείται από Si, GaAs ή CdTe. Η βασική κατασκευή ηλιακών κυψελών φαίνεται στην εικόνα 2.4.



Εικ. 2.4 Ηλιακό στοιχείο. [91]

Αποτελείται από ημιαγωγούς πυριτίου τύπου N και P. Το σύμβολο της ηλιακής κυψέλης φαίνεται στο εικ. 2.5



Εικ. 2.5 Σύμβολο. [91]

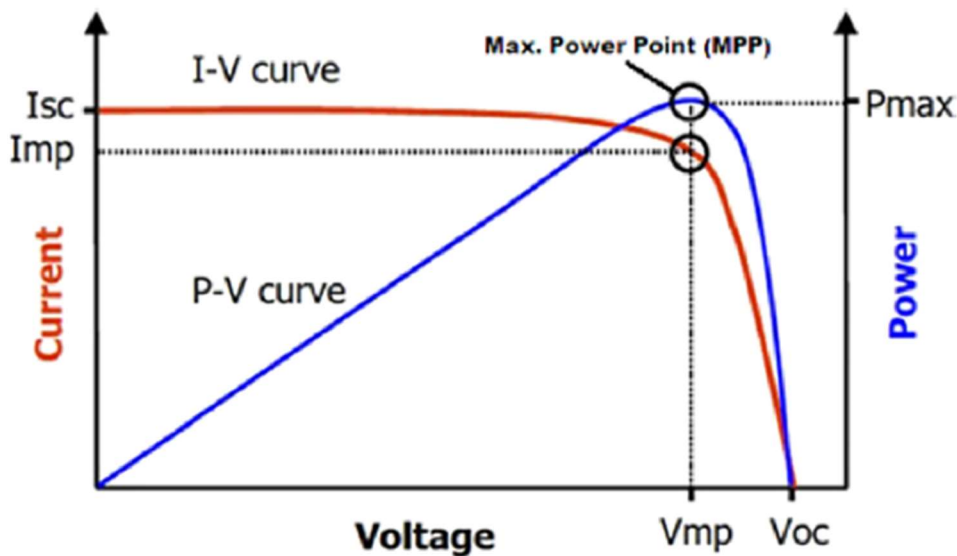
Το ισοδύναμο κύκλωμα ηλιακής κυψέλης αποτελείται από μια πηγή ρεύματος, μια δίοδο και δύο αντιστάσεις (σειρά και διακλάδωση) που συνδέονται. Μαθηματικά, η εξίσωση ρεύματος ενός ηλιακού στοιχείου δίνεται ως εξής [66] :

$$I = I_l - I_0 \left[e^{\frac{V}{VT}} - 1 \right]$$

όπου I είναι το ρεύμα εξόδου από το ηλιακό κύτταρο, V είναι η τάση της διόδου, θερμική τάση $(VT) \frac{1}{4}kT/q$, I_L είναι το ρεύμα που δημιουργείται από το φως και I_0 είναι το αντίστροφο ρεύμα κορεσμού. Σε θερμοκρασία δωματίου (300 K), η θερμική τάση είναι ίση με 0,0259 V (ή 26 mV). Η ικανότητα του ηλιακού στοιχείου να μετατρέπει την φωτεινή ενέργεια σε ηλεκτρική ονομάζεται απόδοση μετατροπής και δίνεται ως εξής:

$$\text{Solar Cell Efficiency } (\eta) = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{P_i},$$

όπου FF είναι ο συντελεστής πλήρωσης, V_{oc} είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος (OCV), I_{sc} είναι το ρεύμα βραχυκυκλώματος και P_i είναι η προσπίπτουσα οπτική ισχύς. Το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) είναι ένα σημείο της τάσης ισχύος (P-V) χαρακτηριστικό της ηλιακής κυψέλης, όπου η μέγιστη ισχύς μπορεί να εξαχθεί από την ηλιακή κυψέλη όπως φαίνεται στην εικ. 2.6. Ιδανικά, η απόδοση της ηλιακής κυψέλης θα πρέπει να είναι υψηλή. Αλλά πρακτικά, περιορίζεται μόνο στο 5%-15% [65].

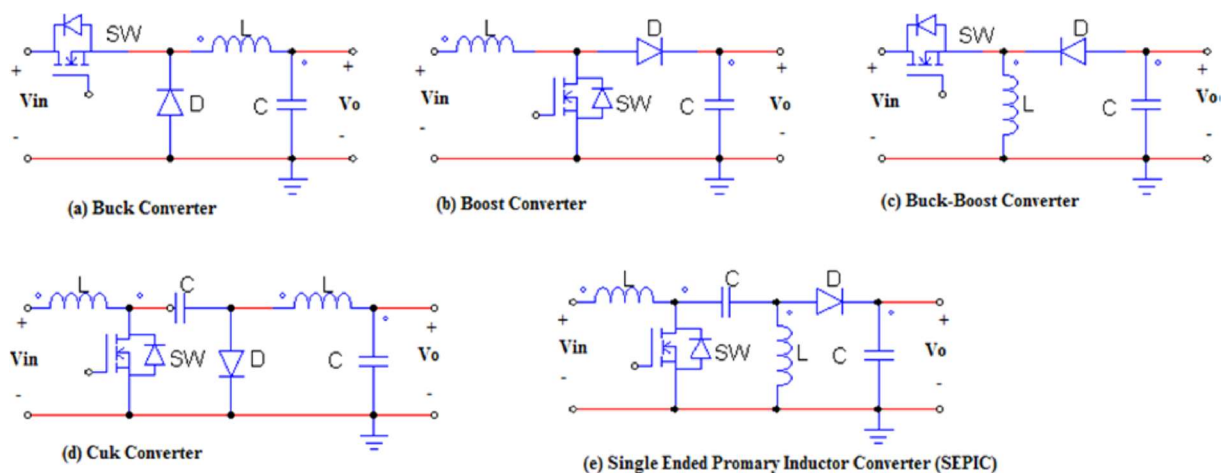


Εικ. 2.6 Χαρακτηριστικά V-I και P-V [91]

2.2.2 Μετατροπές DC σε DC

Ο μετατροπέας DC-DC είναι μια ηλεκτρονική συσκευή ισχύος που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του πλάτους τάσης από ένα επίπεδο σε άλλο. Τα επίπεδα τάσης κυμαίνονται από πολύ χαμηλές (mV) έως υψηλές (V). Τα διαγράμματα κυκλώματος σημαντικών τοπολογιών μετατροπέων DC-DC φαίνονται στην Εικ. 2.7 [67-72].

- Boost Converter
- Buck Converter
- Buck-Boost converter
- Cuk Converter
- Single End Primary Inductor Current (SEPIC) converter

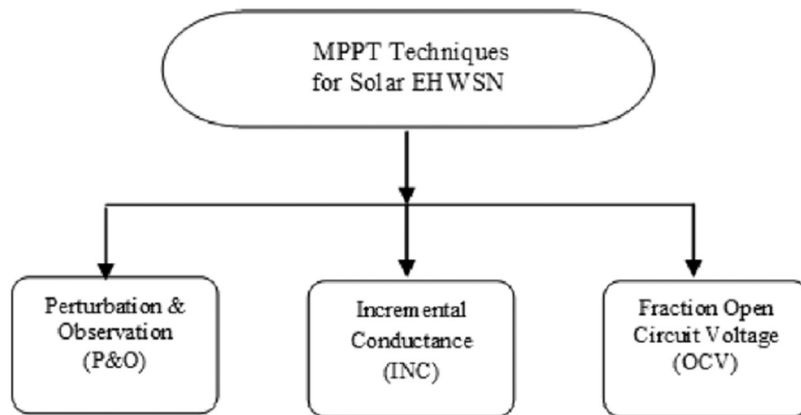


Εικ. 2.7 Τοπολογίες μετατροπέα ενίσχυσης DC σε DC για SHE-WSN. [91]

2.2.3 Τεχνικές ανίχνευσης μέγιστου σημείου ισχύος (MPPT)

Η MPPT είναι μια μέθοδος που ενσωματώνεται σε ελεγκτές ηλιακής φόρτισης για την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ισχύος από ηλιακούς συλλέκτες. Το επίπεδο τάσης στο οποίο ένα ηλιακό πάνελ μπορεί να παράγει μέγιστη ισχύ ονομάζεται σημείο μέγιστης ισχύος (MPP). Σήμερα, η τεχνική MPPT χρησιμοποιείται συνήθως σε όλα τα φωτοβολταϊκά (PV) ηλιακά συστήματα για

τη μεγιστοποίηση της εξαγωγής ενέργειας κάτω από όλες τις ηλιακές συνθήκες. Η εικ. 2.8 δείχνει την ταξινόμηση των βασικών τεχνικών MPPT.



Εικ. 2.8 Τεχνικές MPPT για SEH-WSN. [91]

Οι ακόλουθοι αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται συνήθως σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές:

➤ **Τεχνική Διαταραχής και Παρατήρησης (P&O - Perturbation and Observation).**

Αυτός είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος σε όλες τις εφαρμογές ηλιακών κυψελών όπως ηλιακοί φορτιστές, ηλιακοί μετατροπείς κ.λπ. Η λειτουργία του βασίζεται στη διατάραξη της τάσης λειτουργίας με βάση σε σύγκριση της παραγόμενης ισχύος. Αυτό εξασφαλίζει τη μέγιστη λειτουργία του σημείου ισχύος. Σε αυτόν τον αλγόριθμο, πρώτα μετράται η τάση των ΦΒ (V_{pv1}) και το ρεύμα (I_{pv1}) και στη συνέχεια υπολογίζεται η ισχύς (P_{pv1}) σε μια χρονική στιγμή (t_1). Μετά από κάποιο χρονικό διάστημα, υπολογίζεται ξανά η ισχύς (P_{pv2}) με την ίδια μέθοδο. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η απόκλιση ισχύος (DP_{pv}). Εάν είναι θετικό, τότε η διαταραχή (μετατόπιση) είναι στη θετική πλευρά, διαφορετικά, στην αρνητική πλευρά.

➤ **Τεχνική αυξητικής αγωγιμότητας (INC- Incremental Conductance).**

Αυτός ο αλγόριθμος είναι ελαφρώς πιο περίπλοκος και ισχυρός. Η κεντρική ιδέα είναι να συγκρίνουμε την αυξητική αγωγιμότητα με τη στιγμιαία αγωγιμότητα z_{nd} και στη συνέχεια να προσαρμόσουμε τον κύκλο λειτουργίας ανάλογα. Οι ευφυείς τεχνικές MPPT περιλαμβάνουν

τεχνικές MPPT με βάση τον έλεγχο ασαφούς λογικής και MPPT βασισμένες σε νευρωνικά δίκτυα.

➤ **Τάση ανοικτού κυκλώματος κλάσματος (OCV - Fraction Open Circuit Voltage)**

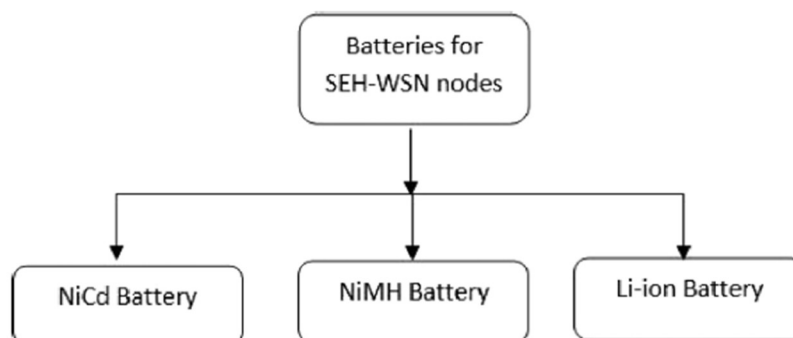
Αυτός ο αλγόριθμος είναι διαφορετικός από τους δύο πρώτους και εξαρτάται από το γεγονός ότι η τάση μέγιστης ισχύος (MPP) είναι πάντα ένα αμετάβλητο (σταθερό) κλάσμα της τάσης ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) των ηλιακών κυψελών.

2.2.4 Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας (μπαταρίες / supercapacitors)

Υπάρχουν κυρίως δύο τύποι σχημάτων αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιούνται στα SEH-WSN, δηλαδή, μπαταρίες και υπερπυκνωτές. Σήμερα, οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται ως συσκευές αποθήκευσης πρωτογενούς ενέργειας και οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται ως δευτερεύουσες συσκευές αποθήκευσης για ασύρματους κόμβους αισθητήρων λόγω του χαμηλού κόστους και της υψηλής πυκνότητας ενέργειας.

➤ **Μπαταρίες**

Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες χρησιμοποιούνται κυρίως για αποθήκευση ενέργειας, σε κόμβους EHWSN όπως φαίνεται στην Εικ. 2.9. Οι κύριοι τύποι επαναφορτιζόμενων μπαταριών είναι το νικέλιο κάδμιο (NiCd), το νικέλιο μεταλλικό υδρίδιο (NiMH) και το ιόν λιθίου (ιόν λιθίου).



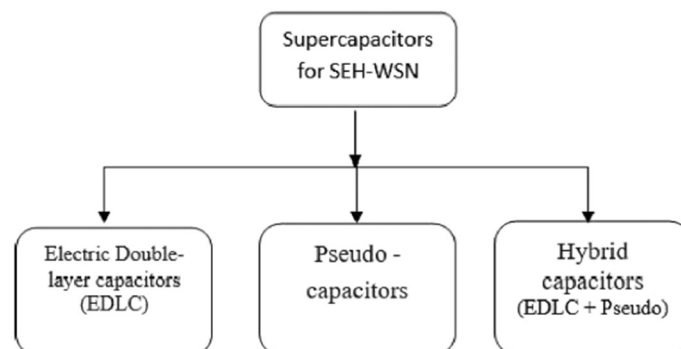
Εικ. 2.9 Τεχνολογίες αποθήκευσης μπαταριών σε SEH-WSN [91]

Πίνακας 2.2 Τεχνολογίες μπαταριών για κόμβους SEH-WSN [73]

α/α	Μάρκα, Αρ. Μοντέλου.	Μπαταρία	Τάση (V)	Ισχύς (mAh)	Ενεργειακή Πυκνότητα ανα βάρος (Wh/kg)	Απόδοση φόρτισης - εκφόρτισης, η (%)	Ποσοστό Αυτο εκφόρτισης (%/month)	Κύκλοι επαναφόρτισης (αρ. φορές)
1	Sanyo	NiCd	1.2V	1100 mAh	42	70-90	10	1500
	KR-1100AAU							
2	Energizer	NiMH	1.2V	2500 mAh	100	70	18	900
	NH15-2500							
3	Ultralife	Li-ion	3.6V	740 mAh	165	95	<20	1300
	UBP053048							
4	Ultralife	Li-polymer	3.6V	930 mAh	156	97	<10	500–1000
	UBC433475							
5	Maxwell	Supercap	2.5V	350 F	5.06 Wh/kg	99.8%	5.9% / μέρα	>10 ⁶
	BCAP0350							

➤ **Υπερπυκνωτές**

Ένας υπερπυκνωτής είναι ένας πυκνωτής μεγάλης χωρητικότητας (συνήθως >50 F), αλλά έχει χαμηλότερες τάσεις και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση για τις μπαταρίες. Μπορεί να δεχθεί και να παραδώσει ενέργεια πολύ πιο γρήγορα και μπορεί να ανεχθεί μεγαλύτερο αριθμό κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης από τις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Σήμερα, το τυπικό κόστος ενός υπερπυκνωτή 100 F, 2,7 V, είναι περίπου 4,23 \$ και είναι εμπορικά διαθέσιμος στην αγορά. Υπάρχουν κυρίως τρεις τύποι υπερπυκνωτών ανάλογα με την αρχή αποθήκευσης: Ηλεκτρική χωρητικότητα διπλής στρώσης (EDLC), ψευδοχωρητικότητα και υβριδικοί πυκνωτές. Η ταξινόμηση υπερπυκνωτών φαίνεται στην εικ. 2.10



Εικ. 2.10 Υπερπυκνωτές αποθήκευσης ενέργειας σε κόμβους SEH-WSN. [91]

Κεφάλαιο 3^ο

3.1 Ερευνητική διαδικασία, μελέτη και επιλογή των εξαρτημάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε την ερευνητική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επιλογή των εξαρτημάτων που απαιτήθηκαν για την υλοποίηση της κατασκευής του πρωτοτύπου. Επιπλέον, πραγματοποιείται σύγκριση των διάφορων επιλογών των εξαρτημάτων και των υλικών που είναι διαθέσιμα στην αγορά και συγχρόνως αναλύονται και τα κριτήρια για την επιλογή των τελικών εξαρτημάτων. Τέλος, γίνεται αναλυτική περιγραφή των εξαρτημάτων αλλά και των συστημάτων που προορίζονται να προσαρμοστούν στην κατασκευή του πρωτοτύπου.

3.2 Κεντρική ιδέα κατασκευής

Προκειμένου να επιτευχθεί η κατασκευή του πρότυπου ενεργειακά αυτόνομου συστήματος παρακολούθησης ποιότητας αέρα έπρεπε να γίνει διαχωρισμός των βημάτων τα οποία έπρεπε να ακολουθηθούν, καθώς και προσεκτική έρευνα και επιλογή των καταλληλότερων εξαρτημάτων σε συνάρτηση με το όσο το δυνατόν μικρότερο κοστολόγιο.

- αξιοπιστία
- αντοχή
- συμβατότητα με αισθητήρες
- εύκολη διαφοροποίηση ενεργειακής επάρκειας
- καινοτομίες για την αποστολή δεδομένων

Προκειμένου να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι ήταν αναγκαίο η συσκευή να διαθέτει ένα σύνολο χαρακτηριστικών που να την καθιστούν χρηστική σε ποικίλες κλιματικές καταστάσεις, εύκολη διαφοροποίηση της αυτονομίας της ανάλογα με την χρήση της καθώς και καινοτόμο σχεδιασμό ο οποίος μπορεί να υποστηρίξει τις διαφοροποιήσεις αυτές.

Μείζονος σημασίας ρόλο κατέχουν τα εξής:

- μπαταρία

- ηλιακό πάνελ
- linear actuator
- βάση στήριξης

Καθίσταται λοιπόν σαφές ότι η ορθή επιλογή των εξαρτημάτων καθορίζεται και συνδέεται με το σύνολο των χαρακτηριστικών και κάθε ένα από αυτά αποτελεί έναν κρίκο μιας κοινής αλυσίδας

3.3 Ερευνητική διαδικασία και ανάλυση όλων των επιμέρους εξαρτημάτων

Προκειμένου να επιτευχθεί η δημιουργία του συστήματός έπρεπε να γίνει κατάλληλη επιλογή των εξαρτημάτων όπως αναφέρεται παραπάνω. Πραγματοποιήθηκε μελέτη και σύγκριση των εξαρτημάτων όπως και έρευνα για τα καταλληλότερα υλικά τα οποία θα δημιουργούσαν το βέλτιστο συνδυασμό σε συνάρτηση με το χαμηλότερο δυνατό κόστος

3.3.1 Μελέτη μπαταρίας και ρυθμιστής φόρτισης

Προκειμένου το σύστημα μας να έχει την επιθυμητή αυτονομία και να επιτελεί σωστά όλες του τις λειτουργίες, απαιτείται η χρήση μιας πολύ καλής μπαταρίας, με μεγάλη χωρητικότητα διάρκεια ζωής. Η μπαταρία αποτελεί την πηγή ενέργειας των αισθητήρων και της κίνησης του πάνελ. Για αυτό το λόγο η επιλογή της θα πρέπει να γίνεται με βάση τις ενεργειακές ανάγκες του εκάστοτε αισθητήρα, τις κατανάλωσης που απαιτούν τα υπόλοιπα μέρη, την επιθυμητή αυτονομία αλλά και την δυνατότητα αποτελεσματικής επαναφόρτισης.

Υπάρχουν διάφορα είδη μπαταριών όπως είναι οι μπαταρίες μολυβδου και οι λιθίου. Ωστόσο στη σημερινή εποχή οι πλέον διαδεδομένες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που συναντώνται ευρέως, είναι οι μπαταρίες VRLA AGM, καλύπτοντας τις ανάγκες μας σε μια σειρά από εφαρμογές. Τις βρίσκουμε σε αυτοκίνητα, μοτοσυκλέτες, φωτοβολταϊκά, συναγερμούς, ηλεκτροκίνητα παιχνίδια, ηλεκτρικά ποδήλατα, αναπηρικά καροτσάκια, ταμειακές μηχανές ακόμα και ιατρικά μηχανήματα.

Το αρκτικόλεξο AGM ή αλλιώς Absorbed Glass Matt, υποδεικνύει ότι ο συγκεκριμένος τύπος συσσωρευτών διαθέτει το λεγόμενο ματ βοριοπυριτικό γυαλί. Μέσα σε αυτό εμπεριέχεται ο ηλεκτρολύτης της μπαταρίας, αποτρέποντας, έτσι, τον κίνδυνο διαρροής σε περίπτωση σπασίματος. Ακόμη, ανάμεσα στις πλάκες μόλυβδου των μπαταριών AGM, υπάρχει ένα πορώδες υλικό από ίνες γυαλιού εμποτισμένο με το διάλυμα θειικού οξέος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή ελάχιστων αερίων κατά την χημική αντίδραση, τα οποία μάλιστα ανακυκλώνονται εντός της μπαταρίας. Καθίστανται, επομένως, ιδανικές για κλειστούς χώρους ή για απομακρυσμένες εγκαταστάσεις όπου η τακτική παρακολούθηση είναι δύσκολη.

Οι μπαταρίες AGM έχουν ιδιαίτερα χαμηλή εσωτερική αντίσταση η οποία επιτρέπει στις μπαταρίες αυτού του τύπου να δίνουν υψηλά ρεύματα κατά ζήτηση και να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής ακόμη και σε χρήση βαθιάς εκφόρτισης. Το χαρακτηριστικό αυτό τις ξεχωρίζει, μιας και επιτρέπει την πλήρη επαναφόρτισή τους, ακόμα και σε περιπτώσεις εκφόρτωσης μεγαλύτερης του 80% του φορτίου τους. Επιπλέον είναι κλειστού τύπου, μετά την σφράγιση τους, δεν χρειάζονται συντήρηση και έχουν μεγάλη ανθεκτικότητα σε υπερφόρτωση.

Ανάλογα με τα πρότυπα σχεδιασμού του ηλεκτρικού κυκλώματος υπάρχουν και αντίστοιχα κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της μπαταρίας τα οποία κατέχουν καθοριστικό ρόλο.

Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι τα εξής:

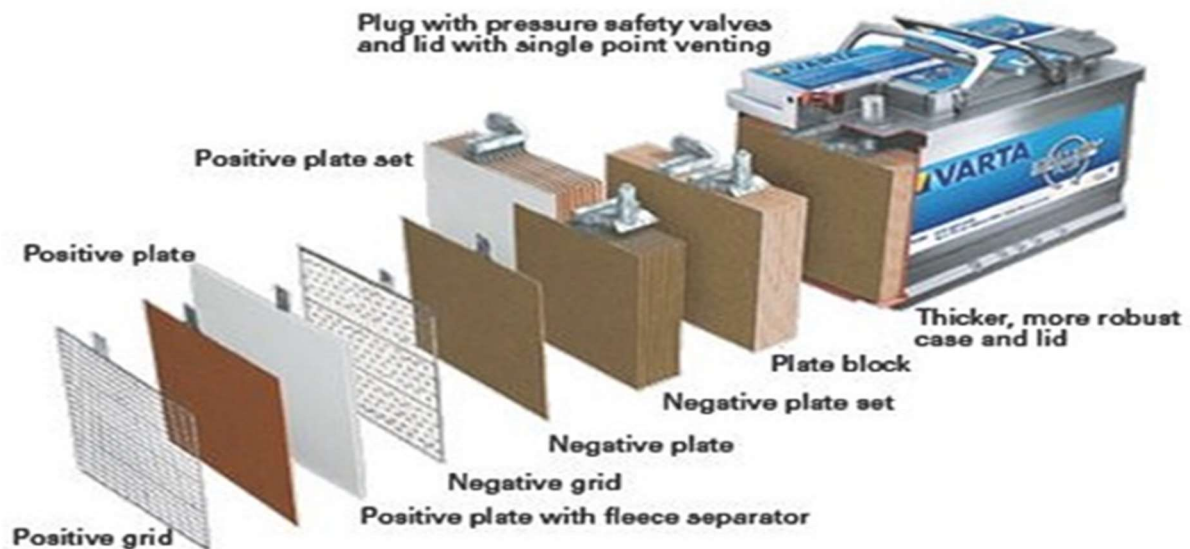
- Ονομαστική τάση της μπαταρίας σε Volts
- Ονομαστική ένταση του ρεύματος σε Amps
- Χωρητικότητα μπαταρίας σε Ah ή mAh

Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθορίζονται ανάλογα με τις ανάγκες μας και την επιθυμητή αυτονομία. Η ονομαστική τάση σε συνδυασμό με την ονομαστική ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος καθορίζουν την ισχύ δηλαδή την απόδοση της μπαταρίας σε Watts, καθώς η ισχύς υπολογίζεται ως εξής:

$$Watts = Volts * Amps$$

Μια ορθά κατασκευασμένη μπαταρία περιλαμβάνει και έναν ρυθμιστή φόρτισης, μια ηλεκτρονική πλακέτα, το λεγόμενο BMS (Battery Management System), το οποίο ελέγχει την τάση της μπαταρίας ανά πάσα στιγμή και καθορίζει την διαδικασία φόρτισης και εκφόρτισης

σταματώντας την κάθε διαδικασία όταν η τιμή της τάσης είναι στο μέγιστο επιτρεπτό άνω όριο και στο ελάχιστο επιτρεπτό κάτω όριο αντίστοιχα, προστατεύοντας την έτσι από υπερβολική φόρτιση και από υπερβολική εκφόρτιση μεγιστοποιώντας την διάρκεια ζωής της μπαταρίας.



Εικ. 3.1 Μπαταρία η οποία χρησιμοποιήθηκε [92]

3.3.2 Μελέτη ηλιακού πάνελ

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά κομμάτια ενός ολοκληρωμένου φωτοβολταϊκού συστήματος. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν μια μόνο από τις εφαρμογές των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Εκμεταλλευόμενα το φωτοβολταϊκό φαινόμενο το φωτοβολταϊκό σύστημα παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ενέργεια. Η απόδοση του συστήματος εξαρτάται πάντα από την επιλογή ενός κατάλληλου, ποιοτικού και αξιόπιστου φωτοβολταϊκού πάνελ. Τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελούνται τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι τα εξής:

➤ Το φωτοβολταϊκό Στοιχείο

Τα πιο αξιόπιστα φωτοβολταϊκά πάνελ χρησιμοποιούν ποιοτικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Το Φ/Β στοιχείο (solar cell), είναι το κομμάτι εκείνο το οποίο συλλέγει το ηλιακό φως. Στην ουσία επρόκειτο για έναν κατάλληλα επεξεργασμένο ημιαγωγό λεπτού πάχους σε επίπεδη επιφάνεια. Όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπέφτει πάνω στο Φ/Β στοιχείο τότε δημιουργεί ηλεκτρική τάση και με την κατάλληλη σύνδεση σε φορτίο παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα.



Εικ. 3.2 Φωτοβολταϊκό πάνελ [93]

➤ Το φωτοβολταϊκό Πλαίσιο

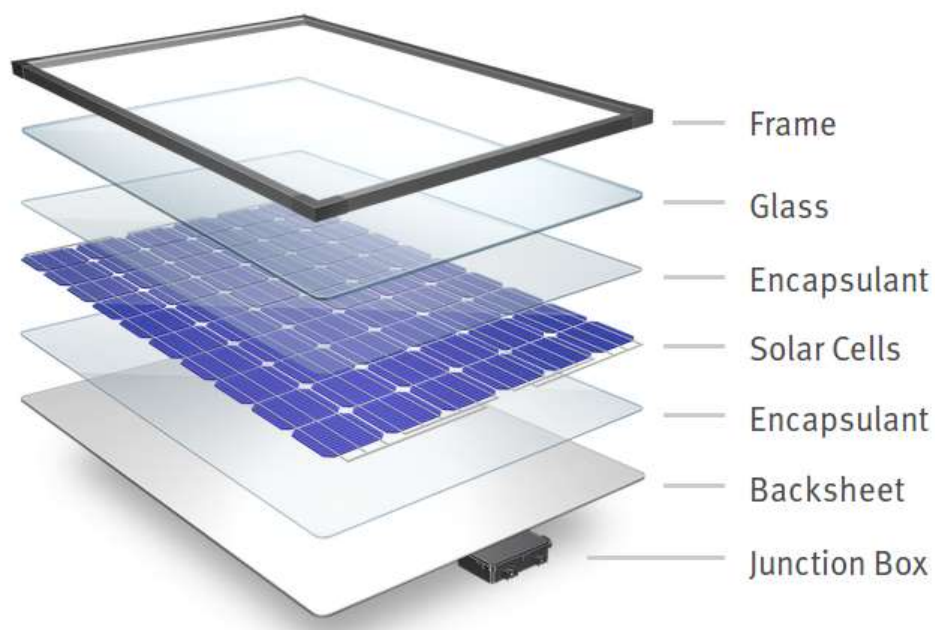
Το φωτοβολταϊκό πλαίσιο (PV module) απαρτίζεται από πολλά φωτοβολταϊκά στοιχεία συνδεδεμένα κατάλληλα μεταξύ τους. Τα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούν στην ουσία τη βασική δομική μονάδα για όλα τα σύγχρονα φωτοβολταϊκά πάνελ. Είναι κοινά αποδεκτό πως τα περισσότερα φωτοβολταϊκά πλαίσια έχουν τυπική ισχύ από 20W έως 300W. Στην συνέχεια τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέονται ηλεκτρολογικά μεταξύ τους ώστε να δημιουργηθούν οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες (strings) οι οποίες θα καταστήσουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ λειτουργικά.



Εικ. 3.3 Φωτοβολταϊκό πλαίσιο [94]

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποτελούνται από:

1. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία
2. Υλικό EVA για την ενθυλάκωση των ΦΒ στοιχείων
3. Το ειδικό γυαλί στο εμπρόσθιο μέρος
4. Το ειδικό φύλλο προστασίας στο πίσω μέρος (συνήθως TPT Tedlar)
5. Το πλαίσιο αλουμινίου
6. Το κουτί σύνδεσης



Εικ. 3.4 Δομή φωτοβολταϊκού πλαισίου [95]

Ενώ τα κύρια χαρακτηριστικά που θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη πριν την τελική απόφαση χρήσης είναι τα εξής:

- P_m = Η ονομαστική (μέγιστη) ισχύς (σε Watt)
- V_{pm} = Η τάση που αντιστοιχεί στην ονομαστική ισχύ (σε Volt)
- I_{pm} = Η ένταση ρεύματος που αντιστοιχεί στην ονομαστική ισχύ (σε Ampere)
- V_{oc} = Τάση ανοιχτού κυκλώματος (σε Volt)
- I_{sc} = Ένταση ρεύματος βραχυκυκλώματος (σε Ampere)
- V_{max} = Μέγιστη Τάση συστήματος (σε Volt)
- T_{coe} = Συντελεστές επίδρασης θερμοκρασίας αP_m (%/C), αI_{sc} (%/C), αV_{oc} (mV/C)
- Εγγύηση απόδοσης solar panel
- Εγγύηση κατασκευής προϊόντος

Οι τύποι των φωτοβολταϊκών πάνελ ανάλογα με τις κυψέλες χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Μονοκρυσταλλικά ηλιακά φωτοβολταϊκά πάνελ

(Mono-Si) ~ 20-21% Υψηλό ποσοστό απόδοσης βέλτιστα για εμπορική χρήση

- Πολυκρυσταλλικά ηλιακά φωτοβολταϊκά πάνελ

(p-Si) ~ 15-19% χαμηλότερη τιμή Ευαίσθητα σε υψηλές θερμοκρασίες. Χαμηλότερη διάρκεια ζωής & ελαφρώς λιγότερη απόδοση χώρου

- Thin-Film ηλιακά φωτοβολταϊκά πάνελ:

Άμορφα ηλιακά πάνελ πυριτίου (A-Si) ~ 7-10% Σχετικά χαμηλό κόστος, εύκολο στην παραγωγή & ευέλικτο μικρότερες εγγυήσεις και διάρκεια ζωής

- Συμπυκνωμένο φωτοβολταϊκό στοιχείο

(CVP) ηλιακά φωτοβολταϊκά πάνελ ~ 41% Πολύ υψηλό ποσοστό απόδοσης και απόδοσης
Απαιτείται ηλιακό σύστημα παρακολούθησης και ψύξης (για να επιτευχθεί υψηλό ποσοστό απόδοσης)

Με βάση το υλικό των στοιχείων τα φωτοβολταϊκά πάνελ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε:

- Φωτοβολταϊκά στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου (crystalline silicon, si)
 - Μονοκρυσταλλικά στοιχεία Πυριτίου (sc-Si)
 - Πολυκρυσταλλικά στοιχεία Πυριτίου (mc-Si)
 - Ταινία Πυριτίου (Ribbon-Si)
- Φωτοβολταϊκά στοιχεία λεπτού υμένα (thin film)
 - Δισεληνοϊνδιούχος χαλκός (CIS, CIGS)
 - Αμορφο Πυρίτιο (a-Si)
 - Τελουριούχο Κάδμιο (CdTe)
 - Αρσενικούχο Γάλλιο (GaAs)
- Άλλες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών υλικών
 - Υβριδικό φωτοβολταϊκό (HIT)
 - Τύποι Νανοκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών στοιχείων

3.3.3 Arduino

Προκειμένου το να επιτευχθεί η απαραίτητη επικοινωνία όλων των μερών του συστήματος μας απαραίτητη είναι η ύπαρξη ενός "εγκεφάλου", τη λειτουργία αυτή την επιτελεί μια πλακέτα arduino.

Το Arduino είναι μια δημοφιλής υπολογιστική πλατφόρμα. Είναι βασισμένη σε μια απλή μητρική πλακέτα με ενσωματωμένο μικροελεγκτή, εισόδους και εξόδους, ψηφιακές και αναλογικές. Είναι μια πολύ εύχρηστη πλατφόρμα η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία πρωτοτύπων συσκευών αλλά και για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Επάνω σε αυτή την πλατφόρμα μπορούν να συνδεθούν διάφορων ειδών στοιχεία όπως αισθητήρες θερμοκρασίας, πίεσης, φωτός αλλά και βηματικοί κινητήρες, LDE, οθόνες, Ite module κλπ.

Πρόκειται για ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega της Atmel και του οποίου όλα τα σχέδια, καθώς και το Software που χρειάζεται για την λειτουργία του, διανέμονται ελεύθερα και δωρεάν ώστε να μπορεί να κατασκευαστεί από τον καθένα (απ' όπου προκύπτει και ο χαρακτηρισμός «ανοικτού κώδικα»). Αφού κατασκευαστεί, μπορεί να συμπεριφερθεί σαν ένας μικροσκοπικός υπολογιστής, αφού ο χρήστης μπορεί να συνδέσει επάνω του πολλαπλές μονάδες εισόδου/εξόδου και να προγραμματίσει τον μικροελεγκτή να δέχεται δεδομένα από τις μονάδες εισόδου, να τα επεξεργάζεται και να στέλνει κατάλληλες εντολές στις μονάδες εξόδου. το κύριο πλεονέκτημά του είναι η τεράστια κοινότητα που το υποστηρίζει και η οποία έχει δημιουργήσει, συντηρεί και επεκτείνει μια ανάλογου μεγέθους OnLine γνωσιακή βάση. Έτσι, παρότι ένας έμπειρος ηλεκτρονικός μπορεί να προτιμήσει διαφορετική πλατφόρμα ή εξαρτήματα ανάλογα με την εφαρμογή που έχει στον νου του, το Arduino, με το εκτενές documentation, καταφέρνει να είναι εύχρηστο και ταυτόχρονα αποτελεσματικό.

Το arduino υποστηρίζει σειριακή επικοινωνία, την οποία προωθεί μέσα από έναν ελεγκτή Serial-over-USB ώστε να συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω USB. Η σύνδεση αυτή χρησιμοποιείται για την μεταφορά των προγραμμάτων που σχεδιάζονται από τον υπολογιστή στο Arduino αλλά και για αμφίδρομη επικοινωνία του Arduino με τον υπολογιστή μέσα από το πρόγραμμα την ώρα που εκτελείται.

Επιπλέον, στην πάνω πλευρά του Arduino βρίσκονται 14 θηλυκά pin, αριθμημένα από 0 ως 13, που μπορούν να λειτουργήσουν ως ψηφιακές είσοδοι και έξοδοι. Λειτουργούν στα 5V και καθένα μπορεί να παρέχει ή να δεχτεί το πολύ 40mA.

Ως ψηφιακή έξοδος, ένα από αυτά τα pin μπορεί να τεθεί σε κατάσταση HIGH ή LOW, οπότε το Arduino θα ξέρει αν πρέπει να διοχετεύσει ή όχι ρεύμα στο συγκεκριμένο pin. Αν πάλι ένα από αυτά τα pin ρυθμιστεί ως ψηφιακή είσοδος, μπορεί με την κατάλληλη εντολή να διαβάσει

την κατάστασή του (HIGH ή LOW) ανάλογα με το αν η εξωτερική συσκευή που έχει συνδεθεί σε αυτό το pin διοχετεύει ή όχι ρεύμα στο pin. Μερικά από αυτά τα 14 pin, εκτός από ψηφιακές εισόδου/εξόδου έχουν και δεύτερη λειτουργία.

Συγκεκριμένα : Τα pin 0 και 1 λειτουργούν ως RX και TX της σειριακής όταν το πρόγραμμα ενεργοποιεί την σειριακή θύρα. Έτσι, όταν λόγω χάρη το πρόγραμμα στέλνει δεδομένα στην σειριακή, αυτά προωθούνται και στην θύρα USB μέσω του ελεγκτή Serial-Over-USB αλλά και στο pin 0 για να τα διαβάσει ενδεχομένως μια άλλη συσκευή (π.χ. ένα δεύτερο Arduino στο δικό του pin 1).

Τα pin 2 και 3 λειτουργούν και ως εξωτερικά interrupt (interrupt 0 και 1 αντίστοιχα). Ρυθμίζονται αποκλειστικά ως ψηφιακές εισόδου στις οποίες όταν συμβαίνουν συγκεκριμένες αλλαγές, η κανονική ροή του προγράμματος σταματάει *άμεσα* και εκτελείται μια συγκεκριμένη συνάρτηση. Τα εξωτερικά interrupt είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε εφαρμογές που απαιτούν συγχρονισμό μεγάλης ακρίβειας.

Τα pin 3, 5, 6, 9, 10 και 11 μπορούν να λειτουργήσουν και ως ψευδοαναλογικές εξόδου με το σύστημα PWM (Pulse Width Modulation), δηλαδή το ίδιο σύστημα που διαθέτουν οι μητρικές των υπολογιστών για να ελέγχουν τις ταχύτητες των ανεμιστήρων.

Ακόμη με τη σήμανση ANALOG IN, υπάρχει μια σειρά από 6 pin, αριθμημένα από το 0 ως το 5. Το καθένα από αυτά λειτουργεί ως αναλογική είσοδος κάνοντας χρήση του ADC (Analog to Digital Converter) που είναι ενσωματωμένο στον μικροελεγκτή. Έτσι συνδέονται στο arduino ποτενσιομετρα και να είναι εφικτή η διακύμανση τάσεων μέσω αυτών των pin. Τέλος, καθένα από τα 6 αυτά pin, με κατάλληλη εντολή μπορεί να μετατραπεί σε ψηφιακό pin εισόδου/εξόδου όπως τα 14 τα οποία περιεγράφηκαν πριν. Σε αυτή την περίπτωση τα pin μετονομάζονται από 0~5 σε 14~19 αντίστοιχα.

Το Arduino μπορεί να τροφοδοτηθεί με ρεύμα είτε από τον υπολογιστή μέσω της σύνδεσης USB, είτε από εξωτερική τροφοδοσία που παρέχεται μέσω μιας υποδοχής φισ των 2.1mm (θετικός πόλος στο κέντρο).

Για να μην υπάρχουν προβλήματα, η εξωτερική τροφοδοσία πρέπει να είναι από 7 ως 12V και μπορεί να προέρχεται από ένα κοινό μετασχηματιστή του εμπορίου, από μπαταρίες ή οποιαδήποτε άλλη πηγή DC.

Υπάρχει μια ακόμα συστοιχία από 6 pin με την σήμανση POWER. Η λειτουργία του καθενός έχει ως εξής:

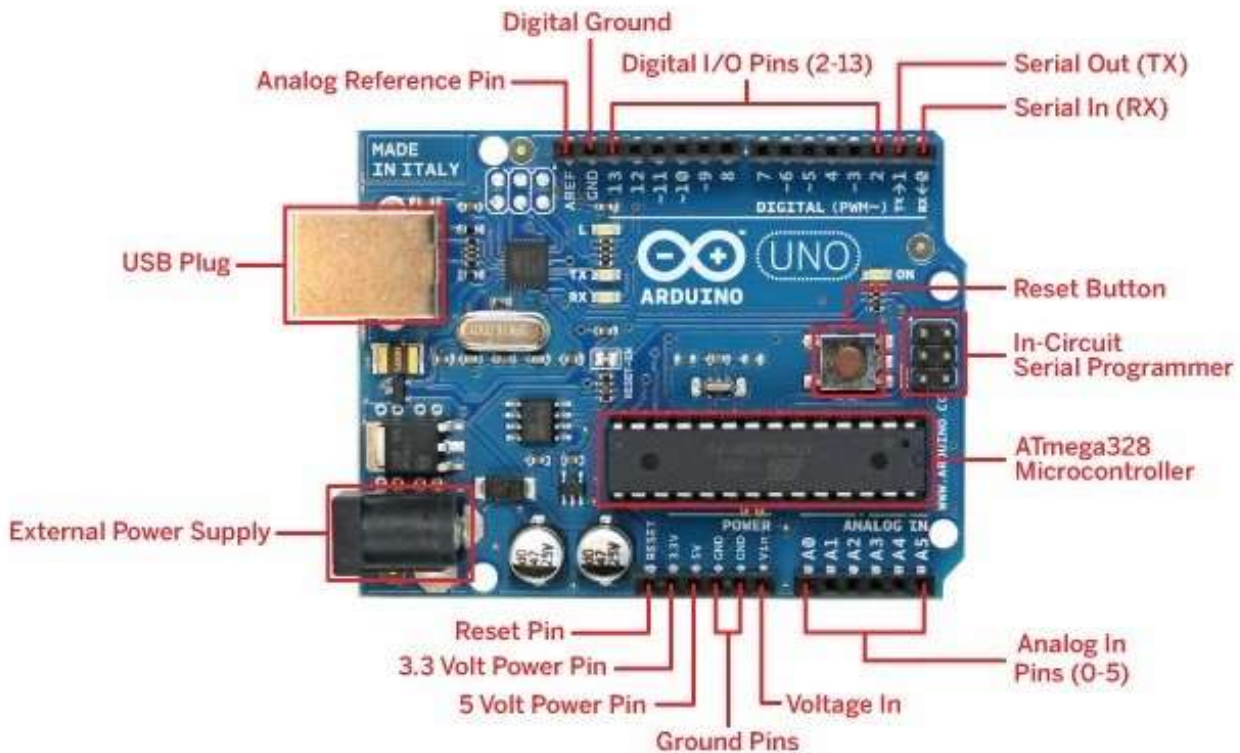
Το πρώτο, με την ένδειξη RESET, όταν γειωθεί (σε οποιοδήποτε από τα 3 pin με την ένδειξη GND που υπάρχουν στο Arduino) έχει ως αποτέλεσμα την επανεκκίνηση του Arduino.

Το δεύτερο, με την ένδειξη 3.3V, μπορεί να τροφοδοτήσει τα εξαρτήματά σας με τάση 3.3V. Η τάση αυτή δεν προέρχεται από την εξωτερική τροφοδοσία αλλά παράγεται από τον ελεγκτή Serial-over-USB και έτσι η μέγιστη ένταση που μπορεί να παρέχει είναι μόλις 50mA.

Το τρίτο, με την ένδειξη 5V, μπορεί να τροφοδοτήσει τα εξαρτήματα με τάση 5V. Ανάλογα με τον τρόπο τροφοδοσίας του ίδιου του Arduino, η τάση αυτή προέρχεται είτε άμεσα από την θύρα USB (που ούτως ή άλλως λειτουργεί στα 5V), είτε από την εξωτερική τροφοδοσία αφού αυτή περάσει από ένα ρυθμιστή τάσης για να την «φέρει» στα 5V.

Το τέταρτο και το πέμπτο pin, με την ένδειξη GND, είναι φυσικά γειώσεις.

Το έκτο και τελευταίο pin, με την ένδειξη Vin έχει διπλό ρόλο. Σε συνδυασμό με το pin γείωσης δίπλα του, μπορεί να λειτουργήσει ως μέθοδος εξωτερικής τροφοδοσίας του Arduino, στην περίπτωση που βολεύει η χρησιμοποίηση της υποδοχής του φισ των 2.1mm. Ωστόσο αν είναι συνδεδεμένη εξωτερική τροφοδοσία μέσω του φισ, χρησιμοποιείται αυτό το pin για να τροφοδοσία εξαρτημάτων με την πλήρη τάση της εξωτερικής τροφοδοσίας (7~12V), πριν αυτή περάσει από τον ρυθμιστή τάσης όπως γίνεται με το pin των 5V.



Εικ. 3.5 Arduino που χρησιμοποιήθηκε [96]

3.3.4 Linear actuators

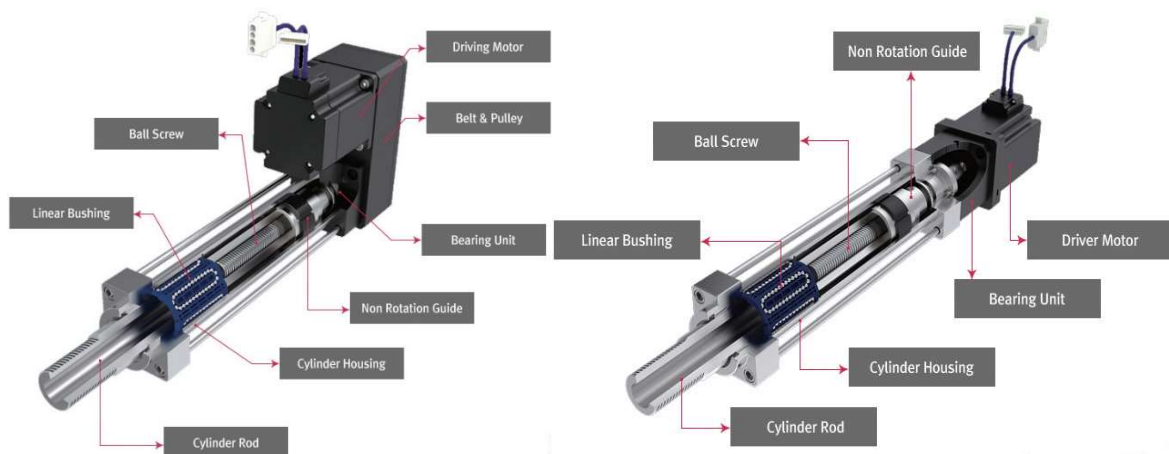
Με σκοπό να επιτευχθεί η κίνηση του συστήματος μας και συνεπώς η μέγιστη εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, αποφασίστηκε η χρήση γραμμικών ενεργοποιητών (linear actuator). Ένας γραμμικός ενεργοποιητής είναι ένας ενεργοποιητής που δημιουργεί κίνηση σε ευθεία γραμμή. Εντοπίζονται σε εργαλειομηχανές και βιομηχανικά μηχανήματα, σε περιφερειακά υπολογιστών όπως μονάδες δίσκου και εκτυπωτές, σε βαλβίδες και αποσβεστήρες και σε πολλά άλλα μέρη όπου απαιτείται γραμμική κίνηση, άλλοι μηχανικοί γραμμικοί ενεργοποιητές τραβάνε μόνο, όπως ανυψωτικά, κίνηση αλυσίδα και ιμάντες ενώ υπάρχουν και άλλοι που απλώς σπρώχνουν (όπως ένας ενεργοποιητής έκκεντρο).

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ενεργοποιητών, οι οποίοι είναι οι εξής:

- Υδραυλικοί: Χρησιμοποιούν κάποιο είδος υγρού για να μετακινήσουν το έμβολο. Ένα παράδειγμα μπορεί να είναι αυτό πολλών γεωργικών μηχανημάτων ή εκσκαφών,

χρησιμοποιώντας αυτά τα έμβολα και την πίεση λαδιού για να μετακινήσουν τους αρθρωτούς βραχίονες, τις υδραυλικές πρέσες

- Ελαστικοί: χρησιμοποιούν τον αέρα ως υγρό, αντί για ένα υγρό όπως στην περίπτωση των υδραυλικών. Ένα παράδειγμα αυτών είναι οι τυπικοί γραμμικοί ενεργοποιητές που βρίσκονται στα εργαστήρια τεχνολογίας ορισμένων εκπαιδευτικών κέντρων.
- Ηλεκτρικοί: είναι ενεργοποιητές που χρησιμοποιούν μια ατέρμονη βίδα που κινείται από έναν ηλεκτροκινητήρα για να δημιουργήσει την κίνηση. Υπάρχουν επίσης ηλεκτρομαγνήτες τύπου ηλεκτρομαγνήτη, οι οποίοι χρησιμοποιούν μαγνητικό πεδίο για να μετακινήσουν το έμβολο ή το έμβολο και ένα ελατήριο για να το επιστρέψουν στην αρχική του θέση όταν δεν ασκείται αυτό το πεδίο.



Εικ. 3.6 Actuators που χρησιμοποιήθηκαν [97]

Ο ηλεκτρικός γραμμικός ενεργοποιητής δεν είναι παρά ένας ηλεκτροκινητήρας. Αυτός ο κινητήρας γυρίζει τον άξονα του και μέσω ενός συνδυασμού γραναζιών ή οδοντωτών αλυσίδων θα γυρίσει μια ατέρμονη βίδα. Αυτή η ατελείωτη βίδα θα είναι υπεύθυνη για την ολίσθηση ενός εμβόλου ή ράβδου στη μία ή την άλλη κατεύθυνση (ανάλογα με την κατεύθυνση περιστροφής). Το έμβολο είναι αυτό που λειτουργεί ως ενεργοποιητής για να ωθήσει, να τραβήξει, ή να ασκήσει δύναμη. Αυτοί οι γραμμικοί ενεργοποιητές, έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να ασκήσουν μεγάλες δυνάμεις και μετατοπίσεις. Ενδεικτικά μερικά μοντέλα μπορούν να

κυμανθούν από 20 έως 150 Kgf (χιλιόγραμμα δύναμης ή kilopond), και μετακινήσεις 100 έως 180 mm.

Το μειονέκτημα τους είναι ταχύτητα μετατόπισης, διότι με την άσκηση αυτών των τεράστιων δυνάμεων, οι τροχοί μείωσης που απαιτούνται για την αύξηση της ροπής θα μειώσουν την ταχύτητα επέκτασης και ανάσχυσης. Οι ταχύτητες κυμαίνονται από 4 έως 20 mm / s μπορούν να δοθούν σε τυπικά μοντέλα. Αυτό σημαίνει ότι για να ολοκληρωθεί ολόκληρη η γραμμική διαδικασία μπορεί να περάσει από λίγα δεκάδες δευτερόλεπτα έως λίγα λεπτά σε περίπτωση που είναι μεγαλύτερη και πιο αργή. Επικοινωνούν άριστα με arduino και απαιτούν για τη "σίτισή" τους συνήθως 12 ή 24 volt, ενώ όσον αφορά την κατανάλωσή τους, μπορεί να κυμαίνονται από 2A έως 5A. Ο Γραμμικός έλεγχος ενεργοποιητής, με τη χρήση Arduino, πραγματοποιείται με διάφορους τύπους, όπως:

- Με ποτενσιόμετρο: μέσω ποτενσιόμετρου επιτρέπουν την επιλογή της θέσης του εμβόλου.
- Με το τέλος της σταδιοδρομίας: ένας διακόπτης ορίου σε κάθε άκρο θα τον κάνει να σταματά από μόνο του όταν φτάσει στην κορυφή.
- Εκτός ελέγχου: δεν έχουν κανένα από τα παραπάνω συστήματα ελέγχου.

3.3.5 Υλικό κατασκευής

Ένα από τα πιο σημαντικά συστατικά στοιχεία της συσκευής αποτελεί ο ίδιος ο σκελετός, δηλαδή η βάση πάνω στην οποία θα βρίσκεται το πάνελ και ταυτόχρονα θα του επιτρέπει την κίνηση στους άξονες x-y, τόσο ως προς το υλικό του όσο και ως προς τη γεωμετρία του. Υπάρχουν διάφορα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τέτοιου είδους βάσεων, όπως είναι για παράδειγμα, το αλουμίνιου, ο χάλυβας

Το κάθε ένα από τα υλικά έχει τις δικές του ιδιαιτερότητες οι οποίες επηρεάζουν σε τεράστιο βαθμό τις ιδιότητες της κατασκευής και της αντοχής της. Οι ιδιότητες των υλικών που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν, είναι οι εξής:

- Αντοχή
- Ελαστικότητα
- Βάρος
- Διαμορφωσιμότητα
- Ευκολία επεξεργασίας
- Διαθεσιμότητα
- Κόστος

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα πιο συνήθη υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των σκελετών, το αλουμίνιο και ο χάλυβας. Για την περάτωση της υλοποίησης της παρούσας κατασκευής, τα υλικά που μελετήθηκαν κυρίως ήταν ο χάλυβας και το αλουμίνιο. Προκειμένου να κατασκευαστεί σωστά η βάση, πρέπει να υπάρχει ισορροπία μεταξύ των παρακάτω τριών ιδιοτήτων:

- Ακαμψία
- Βάρος
- Αντοχή

Οι ιδιότητες αυτές είναι αλληλένδετες μεταξύ τους και η μεταβολή της μιας επηρεάζει την μεταβολή της άλλης. Οι παραπάνω τρεις ιδιότητες εξαρτώνται με τη σειρά τους από:

- Το ίδιο το υλικό εκ φύσεως
- Τη διάμετρο των κυκλικών κοιλοδοκών ή τη διαγώνιο των τετραγωνικών κοιλοδοκών
- Το πάχος των τοιχωμάτων των κοιλοδοκών

Παρακάτω παρουσιάζεται αναλυτικά μια σύγκριση μεταξύ του χάλυβα και του αλουμίνιου

Ο χάλυβας και το αλουμίνιο είναι ίσως τα πιο διαδεδομένα υλικά όσον αφορά τις διάφορες κατασκευές βάσεων στήριξης και ειδικότερα βάσεων στήριξης φωτοβολταϊκών. Παρόλα αυτά, είναι δυο πολύ διαφορετικά υλικά, καθένα με τις ιδιαιτερότητες του, τα πλεονεκτήματά και τα μειονεκτήματά του.

Αναφορικά με την σχέση βάρους – αντοχής είναι κοινώς αποδεκτό ότι οι χαλύβδινες βάσεις έχουν πολύ μεγαλύτερο βάρος από αυτές του αλουμινίου, κάτι το οποίο δεν ισχύει. Το αλουμίνιο όντως είναι πιο ελαφρύ σαν υλικό (δηλαδή αν τεθούν σε σύγκριση ο ίδιος όγκος αλουμινίου και χάλυβα ως υλικά, ο χάλυβας θα έχει την τριπλάσια τιμή όσον αφορά την μάζα του), παρόλα αυτά δεν ισχύει το ίδιο και για τις βάσεις. Προκειμένου μία βάση αλουμινίου να έχει την ίδια απαραίτητη αντοχή με μία βάση χάλυβα, πολλές φορές απαιτείται οι κοιλοδοκοί του αλουμινίου να είναι παχύτεροι όσον αφορά τα τοιχώματα αλλά και μεγαλύτεροι σε διάμετρο από τους χαλύβδινους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το βάρος της βάσης να αυξάνεται με αποτέλεσμα μία βάση αλουμινίου πολλές φορές να έχει το ίδιο ή και μεγαλύτερο βάρος από μία σωστά φτιαγμένη χαλύβδινη βάση.

Πίνακας 3.1 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα χάλυβα και αλουμινίου

Υλικό	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χάλυβας	Μεγάλη αντοχή Μεγάλη διάρκεια ζωής Ευκολία επισκευής Εύκολη διαχείριση και διαμορφωσιμότητα Ευκολία συγκολλήσεων Μεγαλύτερη ασφάλεια	Ελαφρώς μεγαλύτερο βάρος Διάβρωση από σκουριά Μεγαλύτερο κόστος
Αλουμίνιο	Μικρότερο βάρος Μικρότερο κόστος	Ψαθυρότητα Μικρή αντοχή σε χτυπήματα Δύσκολη επισκευή θραύσεων Περιορισμένη διάρκεια ζωής Δύσκολο όσον αφορά τη διαμορφωσιμότητα και τις συγκολλήσεις

3.4 Επιλογή εξαρτημάτων και υλικών για την κατασκευή του πρωτοτύπου

Μετά από μια μελέτη των διαφορετικών επιλογών των διάφορων εξαρτημάτων που απαιτούνται για την κατασκευή του πρωτοτύπου, καθώς κι έπειτα από εκτενή μελέτη και σύγκριση των επιλογών όσον αφορά τα υλικά που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση της κατασκευής, καταλήξαμε στην επιλογή συγκεκριμένων προϊόντων, ιδανικά για τις απαιτήσεις του παρόντος project και πάντα σε συνάρτηση με τη διατήρηση του κόστους στα όσο το δυνατόν χαμηλότερα επίπεδα.

3.4.1 Επιλογή μπαταρίας

Η μπαταρία είναι το εξάρτημα το οποίο καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του συστήματος καιτροφοδοτεί όλα τα μέρη και καθορίζει την αυτονομία του. Είναι η καρδιά και η πηγή ενέργειας των περισσότερων συστημάτων που υπάρχουν στο σύστημα και για αυτό η επιλογή μιας αξιόπιστης και ανθεκτικής μπαταρίας είναι ζωτικής σημασίας για το σύνολο της κατασκευής. Οι μπαταρίες που τέθηκαν υπό μελέτη είναι οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτωσης διότι έπρεπε να ληφθεί υπόψη η αντοχή της και η δυνατότητα επαναφόρτιση της κάτω από ακραίες καιρικές συνθήκες, δηλαδή συνθήκες μη ηλιοφάνειας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Παράλληλα η τεχνολογία τους έχει προχωρήσει με αλματώδεις ρυθμούς την τελευταία δεκαετία με αποτέλεσμα να μπορούν να προσδώσουν την πλειοψηφία των επιθυμητών ιδιοτήτων για την συγκεκριμένη κατασκευή. Μερικές από τις επιθυμητές ιδιότητες είναι οι εξής:

- Μεγάλη διάρκεια ζωής και αυτονομία
- Γρήγορη φόρτιση
- Μεγάλη απόδοση
- Ευκολία αντικατάστασης
- Ανθεκτικότητα σε πολλούς κύκλους φόρτισης

Για την συγκεκριμένη κατασκευή, η μπαταρία έπρεπε να μπορεί να ανταπεξέλθει στις ενεργειακές ανάγκες των γραμμικών ενεργοποιητών, των αισθητήρων αλλά και του arduino. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας που επιλέχθηκε για να καλύψει αυτές τις ανάγκες:

Πίνακας 3.2 Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας που επιλέχθηκε

Τάση (V)	12
Χωρητικότητα c20 (Ah)	20
Είδος Πόλου	Φυσάκια
Πλήθος πόλων	2
Βάρος (κιλά)	5,4
Διαστάσεις (Μ x Π x Υ) (mm)	181 x 77 x 167
Κύκλοι Φόρτισης	300 στο 80% εκφόρτισης

3.4.2 Επιλογή υλικού κατασκευής σκελετού

Ένα από τα κυριότερα μέρη της κατασκευής αποτελεί ο ίδιος ο σκελετός, η βάση πάνω στην οποία θα στηριχθεί το πάνελ, και το υλικό κατασκευής του. Είναι απαραίτητο να κατασκευαστεί με τέτοια τρόπο ώστε να είναι ελαφριά στο πάνω μέρος της ώστε οι γραμμικοί ενεργοποιητές να σηκώνουν το λιγότερο δυνατό βάρος και παράλληλα στιβαρή και με βάρος στο υπόλοιπο μέρος της ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί σε εξωτερικούς χώρους, να βιδωθεί και να μην μπορεί να υποστεί φθορές, να σπάσει ή να λυγίσει. Η επιλογή του υλικού έγινε έπειτα από εκτενή μελέτη των διαθέσιμων επιλογών της αγοράς και έπειτα από σχολαστική διερεύνηση των πλεονεκτημάτων αλλά και των μειονεκτημάτων τους. Τα υλικά στα οποία δόθηκε ιδιαίτερη βάση, είναι δύο υλικά ευρέως γνωστά σε τέτοιου είδους κατασκευές. Αυτά, είναι ο χάλυβας και το αλουμίνιο.

Κατά κύριο λόγο η επιλογή βασίστηκε στο κόστος κατόπιν σύγκρισης των ιδιοτήτων των δύο αυτών μετάλλων. Το υλικό το οποίο παρουσίαζε μεγαλύτερη ευκολία ως προς την επεξεργασία, τις συγκολλήσεις και την διαμορφωσιμότητά του, ήταν ο χάλυβας. Για την συγκεκριμένη κατασκευή, ο χάλυβας σαν υλικό αποτελεί την βέλτιστη επιλογή καθώς προσφέρει υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητα, μεγάλη ευκολία επεξεργασίας και ταυτόχρονα την πιο οικονομική λύση όσον αφορά το συνολικό κόστος υλικού και επεξεργασίας μαζί. Αντίθετα, το αλουμίνιο σαν υλικό ήταν πιο οικονομικό σε όγκο, αλλά λιγότερο στιβαρό που σημαίνει ότι θα απαιτούταν μεγαλύτερος όγκος υλικού, ο οποίος σε συνδυασμό με την χρονοβόρα και δύσκολη επεξεργασία θα διαμόρφωνε τελικά ένα πολλαπλάσιο κόστος από αυτό του χάλυβα, πολύ πιθανόν και χωρίς τα επιθυμητά αποτελέσματα αντοχής.

- Χαλύβδινοι κοιλοδοκοί τετραγωνικής διατομής

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του δικτύωματος του σκελετού αλλά και για τα τοιχώματα της κατασκευής αντίστοιχα ήταν:

- χαλύβδινοι τετραγωνικοί κοιλοδοκοί πλευράς 25 χιλιοστών και πάχους 2 χιλιοστών
- χαλύβδινη λαμαρίνα 1 χιλιοστού πάχους για την στήριξη του ηλιακού πάνελ.

Στην παρακάτω φωτογραφία διακρίνονται ενδεικτικά κάποια μεγέθη κοιλοδοκών.



Εικ. 3.7 Ενδεικτικά μεγέθη κοιλοδοκών [98]

3.4.3 Επιλογή arduino

Η βέλτιστη λειτουργία του συστήματος μας συνδέεται άμεσα με την ορθή επιλογή του ιδανικού, για την συγκεκριμένη κατασκευή, εγκεφάλου, ο οποίος ουσιαστικά είναι μια πλακέτα που καθορίζει όλες τις λειτουργίες και ταυτόχρονα πρέπει να μπορεί να συνδεθεί με τους αισθητήρες αέριας ρύπανσης. Πρέπει για παράδειγμα να ελέγχει την ορθή λειτουργία της μπαταρίας, την κίνηση του πάνελ, την επικοινωνία με τους φωτοαισθητήρες. Αυτή η πλακέτα δεν είναι άλλη από ένα arduino. επιλέχθηκε ένα arduino υπο λόγω του χαμηλού κόστους και ταυτόχρονα της λιγότερης απαίτησης που είχε από άλλες εφάμιλλες πλακέτες σε ενέργεια.

Ταυτόχρονα αποτελούσε τον ιδανικό 'εγκέφαλο' για την λειτουργία των γραμμικών ενεργοποιητών.

3.4.4 Επιλογή linear actuator

Σκοπός και στόχος του συστήματος μας είναι τροφοδοσία των αισθητήρων με ενέργεια σε απομακρυσμένα σημεία. Με στόχο αυτό επιλέχθηκε η κίνηση του ηλιακού πάνελ σύμφωνα με τον ήλιο ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή συλλογή ηλιακής ενέργειας κατά τις ώρες ηλιοφάνειας. Για την επίτευξη αυτής της κίνησης σε συνδυασμό με τον κατάλληλο σχεδιασμό της βάσης, επιλέχθηκαν δύο γραμμικού ενεργοποιητές για να επιτελούν αυτό το έργο. Η επιλογή τους έγινε με βάση το βάρος του πάνελ, της ενέργειας που απαιτούν αλλά και της συνδεσιμότητας με το arduino για τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος. Έπρεπε έτσι οι ενεργοποιητές μας να έχουν κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, έτσι με γνώμονα όλα τα παραπάνω επιλέχθηκαν οι ενεργοποιητές με τα παρακάτω στοιχεία:

Πίνακας 3.3 Χαρακτηριστικά linear actuator που επιλέχθηκε

Gearing Option	1,459027778
Peak Power Point	50N @16mm/s
	24N @24mm/s
	32mm/s
	90N
	31N
Stroke option	140mm
Mass	84g
	0.5mm
	20N
	208MM
	208 mm
	16kΩ+-50%
	“P”, “S” Rated at 12VDC. “R” series rated at 6VDC
Stall Current	650mA @ 12V
	-10C to +50C
	60dB @ 45cm
	IP-54
	0.25mm
	Max. Current Leakage: 8uA
Maximum Static Force	250 N
Maximum Duty Cycle	0,2

3.4.5 Επιλογή ηλιακού πάνελ

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, η πηγή φόρτισης της μπαταρίας μας επιτυγχάνεται μέσω ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. Η κατασκευή μας είναι με τέτοιο τρόπο μελετημένη ώστε να μπορεί να τροφοδοτήσει διάφορους τύπους αισθητήρων, με διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες, ως εκ τούτου πάνω στη βάση μπορούν να τοποθετηθούν ποικίλα πάνελ. Στη περίπτωση μας επιλέχθηκε ένα πάνελ ικανό να επαναφορτίσει την μπαταρία μας μέσα σε μία ημέρα, και ταυτόχρονα αρκετά ελαφρύ ούτως ώστε να μπορεί να κινηθεί με τους γραμμικούς ενεργοποιητές που επιλέχθηκαν.

Τεχνικά Χαρακτηριστικά

- Ονομαστική Ισχύς (P_{max}): 60Wp
- Τάση Ανοικτού Κυκλώματος (V_{oc}): 22.32V
- Μέγιστη Τάση (V_{mp}): 18.18V
- Ρεύμα Βραχυκυκλώματος (I_{sc}): 3.47A
- Μέγιστη Τιμή Ρεύματος (I_{mp}): 3.30A
- Μονοκρυσταλλικός Συλλέκτης
- Διαστάσεις: 2,5 x 51,5 x 68,5 cm
- Βάρος: 3,7kg

Παράλληλα για τη σωστή λειτουργία του συλλέκτη σε αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα θα χρησιμοποιηθεί ένας ρυθμιστής φόρτισης. Προστατεύει την μπαταρία από υπερφόρτιση και υπερβολική εκφόρτιση και την διατηρεί σε καλή κατάσταση.

- Τεχνικά Χαρακτηριστικά:
- Τάση συστήματος: 12V
- Μέγιστο Ρεύμα Φόρτισης: 5A
- Διαστάσεις: 90 x 49 x 18 mm
- Βάρος: 40gr
- Αδιάβροχο: IP22
- Κύρια εφαρμογή: Προστασία & Συντήρηση μπαταρίας.
- Διαθέτει έξοδο για φορτίο.
- Μέγιστη διατομή καλωδίου σύνδεση: 1.50 mm²

3.4.6 Επιλογή μηχανισμού κίνησης ηλιακού πάνελ

Η ανάγκη για περιστροφική κίνηση οδήγησε στην επιλογή ενός φλατζωτού κόμπλερ τζούντο , το οποίο θα μετατρέπει την ευθύγραμμη κίνηση των γραμμικών ενεργοποιητών σε περιστροφική κίνηση της βάσης. Το κόμπλερ είναι ένας σύνδεσμος δύο αξόνων, οι οποίοι μπορεί να μην έχουν την ίδια διάμετρο ή έχουν κάποια απόσταση μεταξύ τους και θέλουμε να μεταδώσουμε την κίνηση. Το φλατζωτό κόμπλερ αποτελείται από την κολώνα, την φλάντζα κινεί έναν σταυρό μετάδοσης κίνηση ενδιάμεσα ο οποίος μας επιτρέπει την κίνηση σε δύο άξονες και στο συνδυασμό τους την επιθυμητή περιστροφική κίνηση.

3.5 Εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών και επεκτασιμότητα

3.5.1 Αποστολή και αποθήκευση μετρήσεων

Το σύστημα μας είναι απαραίτητο να είναι ικανό αφού λάβει ο αισθητήρας την εκάστοτε μέτρηση να μπορεί να την αποστείλει και αυτή να αποθηκευτεί και να μπορεί να μελετηθεί. Λόγω του ότι η συσκευή μας κατασκευάστηκε με σκοπό να εξυπηρετεί απομακρυσμένα σημεία χωρίς πρόσβαση σε παροχή ρεύματος, αναμενόμενη είναι και η ανάγκη εύρεσης τρόπου αποστολής δεδομένων χωρίς την χρήση δικτύου Wi-Fi. Έτσι αποφασίστηκε η χρήση ενός gsm module/dongle μιας πλακέτας δηλαδή στην οποία τοποθετείται μια κάρτα παρόχου κινητής τηλεφωνίας και έτσι γίνεται χρήση του δικτύου κινητής για την αποστολή δεδομένων. Παράλληλα απαιτούνταν και η δημιουργία ενός server στον οποίο θα αποστέλλονταν όλες οι μετρήσεις. Η υλοποίηση του server έγινε στη γλώσσα προγραμματισμού python και πιο συγκεκριμένα με τη χρήση του Flask framework.link grafana with influx db.

3.5.2 Ενέργεια

Η έρευνα και η ανάπτυξη της συσκευής έγινε με γνώμονα την χρήση της από ποικίλους αισθητήρες αλλά και σε ποικίλες εφαρμογές οι οποίες απαιτούν τροφοδοσία και αποστολή δεδομένων μακριά από παροχή ρεύματος και δικτύου wi-fi. Λαμβάνοντας υπόψη αυτό ήταν απαραίτητος ο σχεδιασμός του με τέτοιο τρόπο ώστε με μικρές αλλαγές σε μέρη του

συστήματος τα οποία δεν θα άλλαζαν τη δομή του να μπορεί να τροποποιηθεί και να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές. Τέτοιες τροποποιήσεις αφορούν την μπαταρία και το φωτοβολταϊκό πάνελ, όχι δηλαδή "δομικά στοιχεία" όπως οι γραμμικοί ενεργοποιητές. Έτσι με δεδομένο ότι η μπαταρία μπορεί να εκφορτιστεί μέχρι και 80% και σε συνδυασμό με τις καταναλώσεις όλων των μερών σχεδιάστηκε ένα πρόγραμμα στο οποίο ο χρήστης επιλέγει την διάρκεια που επιθυμεί να λειτουργεί η συσκευή που θέλει να τροφοδοτήσει και τις ενεργειακές της απαιτήσεις καθώς και την κλιματική ζώνη που θα τοποθετηθεί το σύστημα, σύμφωνα με το ΚΕΝΑΚ. Με αυτήν την είσοδο το σύστημα υπολογίζει πόσα Watt χρειάζεται, και έτσι επιλέγει το κατάλληλο πάνελ καθώς και την κατάλληλη μπαταρία.

Ο κώδικας του προγράμματος παρουσιάζεται στο παράρτημα Α

Παράλληλα το σύστημα μας έχει τη δυνατότητα να ελέγχει τη αντοχή της μπαταρίας και να στέλνει μήνυμα alert όταν αυτή έχει φθαρεί και έχει εκφορτιστεί σε σημείο το οποίο δεν της επιτρέπει να επανέλθει με αποτέλεσμα να απαιτείται η επισκευή ή η αντικατάσταση της.

Κεφάλαιο 4ο

4.1 Ψηφιακός σχεδιασμός και υλοποίηση του πρωτότυπου

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού του συστήματός μας σε επίπεδο γενικής σχεδιαστικής προσέγγισης για την κατανόηση του μοντέλου στο σύνολο του. Ο σχεδιασμός του πρωτότυπου και των διαφόρων εξαρτημάτων του πραγματοποιήθηκε σε πρώτη φάση στο χέρι και στη συνέχεια σε σχεδιαστικό περιβάλλον AutoCAD.

4.2 Ψηφιακός σχεδιασμός 2D σε AutoCAD

Η επιλογή του μεγέθους του συστήματός μας έγινε σε συνδυασμό με τη μεταβλητότητα που επιθυμούσαμε για αυτό. Η κατασκευή της βάσης έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να προσαρμοστούν διαφορετικών διαστάσεων ηλιακοί συλλέκτες. Έτσι κατασκευάστηκε μία πλάκα με οπές σε διαφορετικά σημεία στα οποία μπορούν να προσαρμοστούν σε ποικίλα μεγέθη και υλικά κατασκευής πάνελ.

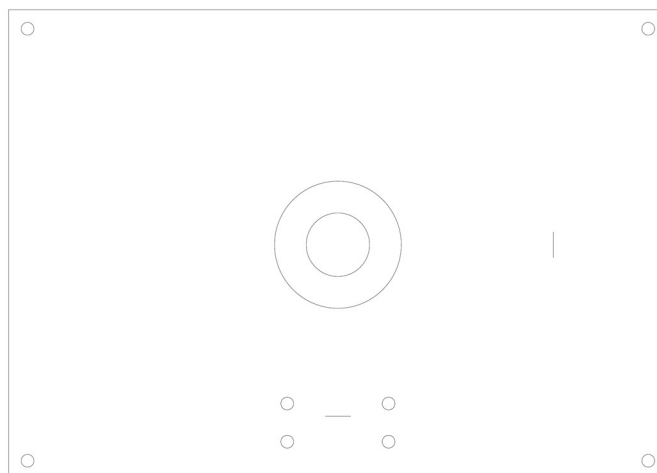
Κατόπιν μελέτης, και πάντοτε με γνώμονα τη διατήρηση όσον το δυνατόν χαμηλότερου κόστους, υπολογίστηκε η συνολική ενέργεια τη οποία απαιτεί, σε πρώτη φάση ο αισθητήρας αέριας ρύπανσης καθώς και τα επιμέρους άλλα εξαρτήματα όπως το arduino, το 4g module και τα liner actuator (γραμμικοί ενεργοποιητές) για να λειτουργήσουν για διάρκεια έως και 30 ημέρες. Επιλέχθηκε έτσι μία μπαταρία 12 V και το ηλιακό πάνελ 60Watt. Οι διαστάσεις των πανέλων 60Watt και άνω ποικίλουν από (0,5x04)m και άνω ανάλογα και με το υλικό κατασκευής. Ταυτόχρονα σε παρόμοιες διαστάσεις βρίσκονται και τα πάνελ περισσότερων Watt έως και 1000 Watt, με διαφορά βέβαια στο υλικό κατασκευής και συνεπώς και στην τιμή. Ακόμη κατασκευάστηκε ένα πλαίσιο τοποθέτησης φωτοαισθητήρων με διαχωριστικό σταυρό ανάμεσα οι οποίοι λαμβάνουν μετρήσεις και κατευθύνουν το ηλιακό πάνελ.

Παράλληλα το ύψος του συστήματός μας δεν επιθυμούσαμε να υπερβαίνει τα 2m, οπότε η κολώνα στήριξης κατασκευάστηκε ρυθμιζόμενη από 1,8m έως 2m,, και τέλος για να στέκεται

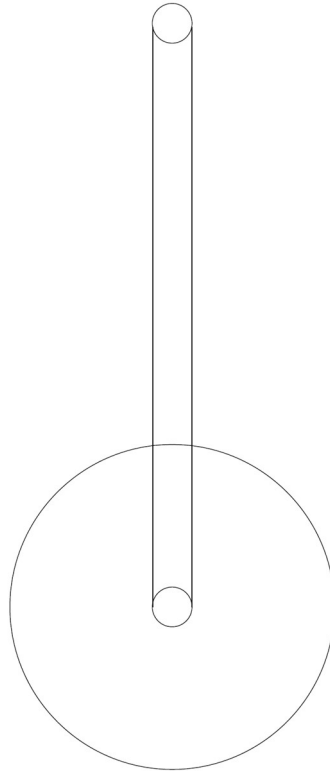
το σύστημά μας κατασκευάστηκε μία κυκλική βάση η οποία έχει τη δυνατότητα είτε να πακτωθεί στο έδαφος είτε να θαφτεί ώστε να επιτύχουμε τη απαραίτητη στατικότητα.



Εικ. 4.1 Βραχίονας στήριξης φωτοαισθητήρων [99]



Εικ. 4.2 Βάση στήριξης φωτοβολταϊκού πάνελ[99]



Εικ. 4.3 Βάση στήριξης συστήματος [99]

4.3 Διαδικασία υλοποίησης του πρωτοτύπου

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναλυτική περιγραφή των βημάτων υλοποίησης της κατασκευής και της συναρμολόγησης των διαφόρων τμημάτων του συστήματός μας καθώς και της και προσαρμογής όλων των εξαρτημάτων και των ηλεκτρονικών συσκευών στο σύνολο της κατασκευής.

Η κατασκευή ολοκληρώθηκε ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

1. Επιλογή χαλύβδινων κοιλοδοκών για την κατασκευή της βάσης του συστήματος
2. Δημιουργία του αρχικού πλαισίου της βάσης/πλάκας τοποθέτησης ηλιακού πάνελ
3. Κατασκευή δικτύωματος της βάσης του συστήματος

4. Διαμόρφωση ειδικών υποδοχών για την τοποθέτηση των γραμμικών ενεργοποιητών
5. Κατασκευή βάσης τοποθέτησης φωτοαισθητήρων με διαχωριστικό σταυρό ανάμεσα
6. Βαφή της βάσης
7. Κατασκευή ηλεκτρικών κυκλωμάτων
8. Διαμόρφωση και προσαρμογή των ηλεκτρολογικών συστημάτων και των ηλεκτρονικών συσκευών στην κατασκευή καθώς και ολοκλήρωση όλων των καλωδιακών συνδέσεων
9. Μόνωση των καλωδίων και τοποθέτηση όλων των μικροσυσκευών σε στεγανό κουτί
10. Δοκιμαστική λειτουργία
11. Κατασκευή δικτύωματος της βάσης της συσκευής και διαμόρφωση ειδικών υποδοχών

Αρχικά, η διαδικασία της κατασκευής ξεκίνησε με την επιλογή των χαλύβδινων κοιλοδοκών για την κατασκευή της στήλης. Οι κοιλοδοκοί που επιλέχθηκαν ήταν διατομής πλευράς 2,5 εκατοστών και πάχους 2 χιλιοστών και διαμέτρου 2,5 εκατοστών και πάχους 3 χιλιοστών. Η κοπή τους στα απαιτούμενα μέτρα για την κατασκευή του σκελετού πραγματοποιήθηκε με ειδικό πριόνι υψηλής ακρίβειας. Επιλέχθηκε επίσης μια πλάκα (βάση) χαλύβδινη διαμέτρου και πάχους 8 χιλιοστών, στην οποία έγιναν με τρυπάνι οπές ώστε να έχει τη δυνατότητα να πακτωθεί στο έδαφος αλλά ταυτόχρονα να μπορεί να θαφτεί στο έδαφος σε περιπτώσεις που είναι αδύνατη η πάκτωσή της.

Κατόπιν λειάνθηκαν τα άκρα της προς συγκόλληση. Αφότου ολοκληρώθηκε η συγκόλληση της κολώνας στήριξης με τη βάση επιλέχθηκε μία χαλύβδινη πλάκα 2 χιλιοστών στην οποία έγιναν οπές εκ νέου με τρυπάνι στις οποίες μπορούσε να βιδωθεί το ηλιακό πάνελ, καθώς και τέσσερις οπές για την τοποθέτηση της βάσης των φωτοαισθητήρων. Αυτή η χαλύβδινη πλάκα συνδέθηκε με ένα μηχανισμό κόμπλερ τζούντο. Η κολώνα του κόμπλερ έχει τη δυνατότητα να κινηθεί στο εσωτερικό της κοιλοδοκού με σκοπό την αυξομείωση του ύψους της συσκευής, από 1,80-2 μέτρα, και έτσι έγινε ακόμη μία οπή στην οποία υπήρχε η δυνατότητα τοποθέτησης ενός σφικτήρα για την αυξομείωση του τελικού ύψους του πάνελ.

Στη συνέχεια συγκολλήθηκαν λαμάκια στα οποία έγινε μία οπή στο κάτω μέρος της βάσης στήριξης του φωτοβολταϊκού και στην κολώνα του κόμπλερ, με τρόπο τέτοια ώστε στη πλήρη έκταση του γραμμικού ενεργοποιητή να μετακινείται στην ακραία επιτρεπτή θέση του κόμπλερ και συνεπώς της βάσης του φωτοβολταϊκού και στη ελάχιστη έκταση του, να μετακινείται στην απέναντι ακραία θέση.

Οι γραμμικοί ενεργοποιητές τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν ορθή γωνία μεταξύ τους αλλά και με την κολώνα του κόμπλερ, ώστε να μπορεί να εκτελεστεί περιστροφική κίνηση. Έπειτα κατασκευάστηκε η βάση τοποθέτησης των φωτοαισθητήρων χρησιμοποιώντας μία λαμαρίνα μήκους 30 εκατοστών, ώστε να προεξέχει από το ηλιακό πάνελ, στη οποία κολλήθηκαν δύο λαμαρίνες στην άκρη, σε απόσταση 5 εκατοστών, της οι οποίες δημιούργησαν τέσσερις χώρους στους οποίους δημιουργήθηκαν με τη χρήση τρυπανιού από δύο οπές ώστε να περάσουν τα καλώδια των φωτοαισθητήρων.

Παράλληλα έγιναν τέσσερις οπές στην άλλη άκρη της πλάκας ώστε να βιδωθεί στην πάκα στήριξης του ηλιακού πάνελ. Όλες οι κοχλιοσυνδέσεις έγιναν με τη χρήση κοχλία και περικοχλίου. Τα σημεία όλων των κολλήσεων λειάνθηκαν και έγινε βαφή της βάσης.

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζεται η κοπή, η προετοιμασία της συγκόλλησης, η διαδικασία της συγκόλλησης των κοιλοδοκών αλλά και η λείανσή αλλά και μηχανήματα τα οπίσθια χρησιμοποιήθηκαν.

Ακολούθησε η κατασκευή των ηλεκτρικών κυκλωμάτων και η διαμόρφωση των ηλεκτρικών συσκευών, η μόνωση των καλωδίων και η τοποθέτησή τους στο στεγανό κουτί. Όλο το σύστημα που υλοποιήθηκε διαιρείται σε επιμέρους ηλεκτρικά υποσυστήματα-κυκλώματα, για την κάλυψη όλων των αναγκών του συστήματος.

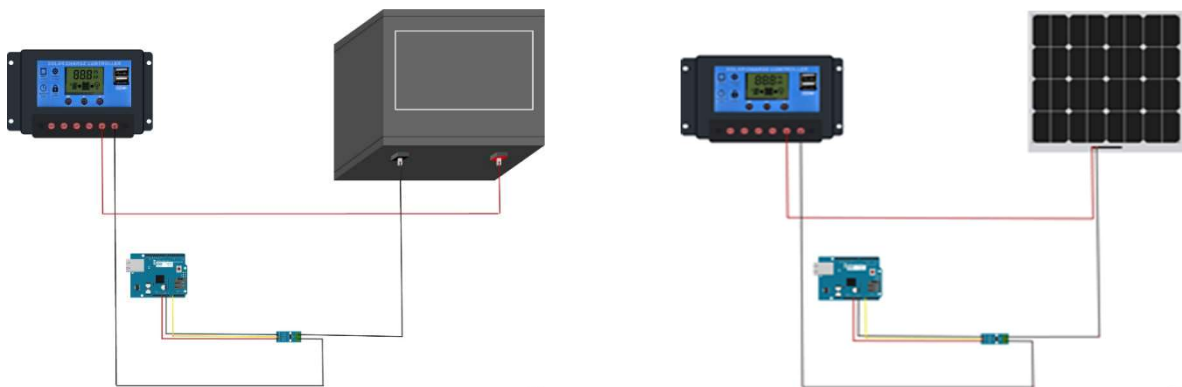
Τα επιμέρους ηλεκτρικά κυκλώματα είναι τα εξής:

- Κύκλωμα μέτρησης μπαταρίας
- Κύκλωμα λειτουργίας φωτοαισθητήρων
- Κύκλωμα λειτουργίας γραμμικών ενεργοποιητών
- Κύκλωμα φωτοβολταϊκού πάνελ

4.3.1 Κύκλωμα μέτρησης μπαταρίας

Η ανάγκη δημιουργίας κυκλώματος μέτρησης της μπαταρίας προέκυψε για τον έλεγχο της ενέργειας της μπαταρίας ανά πάσα στιγμή. Για τον σκοπό αυτό θα γίνει χρήση αισθητήρων ρεύματος. Οι αισθητήρες ρεύματος λειτουργούν μετρώντας το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται κατά μήκος του καλωδίου. Από τη μια πλευρά έχουν δυο connectors τους οποίους συνδέουμε σε σειρά με τη γείωση, δηλαδή παρεμβάλουμε τον αισθητήρα στο καλώδιο που καταλήγει στη γείωση. Σκοπός μας είναι να μετρήσουμε την ένταση του ρεύματος τόσο στο κύκλωμα το οποίο φορτίζει την μπαταρία όσο και στο κύκλωμα των καταναλώσεων. Για αυτό τον σκοπό έχουμε τοποθετήσει τον έναν από τους αισθητήρες ακριβώς μετά από το φορτίο, όπως αυτό καταλήγει στη γείωση και τον άλλο το τοποθετούμε πριν τον ρυθμιστή φόρτισης.

Επίσης υπάρχουν διαθέσιμα επιπλέον 3 pins όπου το 1ο είναι το Vcc το 2ο συνδέεται με κάποιο αναλογικό pin στο arduino και το τρίτο είναι η γείωση. Στη δικιά μας περίπτωση χρησιμοποιούμε το A0 για το φορτίο και το A1 για το ρεύμα που παίρνει η μπαταρία από το ηλιακό πάνελ.



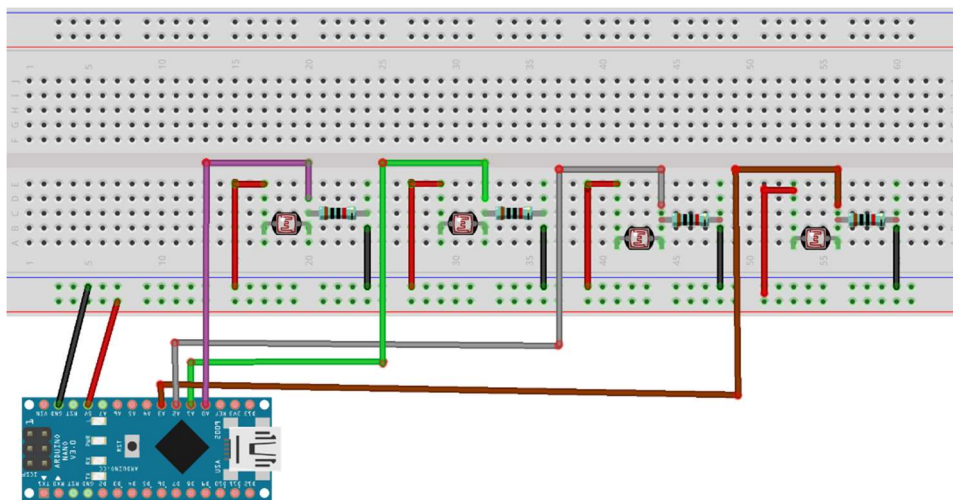
Εικ. 4.4 Κύκλωμα μέτρησης μπαταρίας, [99]

4.3.2 Κύκλωμα λειτουργίας φωτοαισθητήρων

Για το κύκλωμα των φωτοαισθητήρων χρειάζονται τα εξής υλικά, ένα φωτοαισθητήρα καθώς και μια αντίσταση 10k ohm. Η συνδεσμολογία είναι η εξής:

1. Δίνουμε σταθερή τάση 5 Volt από το arduino στο ένα από τα δυο pin του φωτοαισθητήρα
2. Το δεύτερο pin του φωτοαισθητήρα το συνδέουμε με τη μια άκρη της αντίστασης και εκεί βάζουμε και ένα από τα αναλογικά pin (A0, A1, A2, A3) του arduino για να μπορέσουμε να πάρουμε μέτρηση από τον αισθητήρα.
3. Το δεύτερο άκρο της αντίστασης καταλήγει στο ground για να μπορέσει να ολοκληρωθεί το κύκλωμα.

Την ίδια συνδεσμολογία ακολουθούν και οι τέσσερις φωτοαισθητήρες

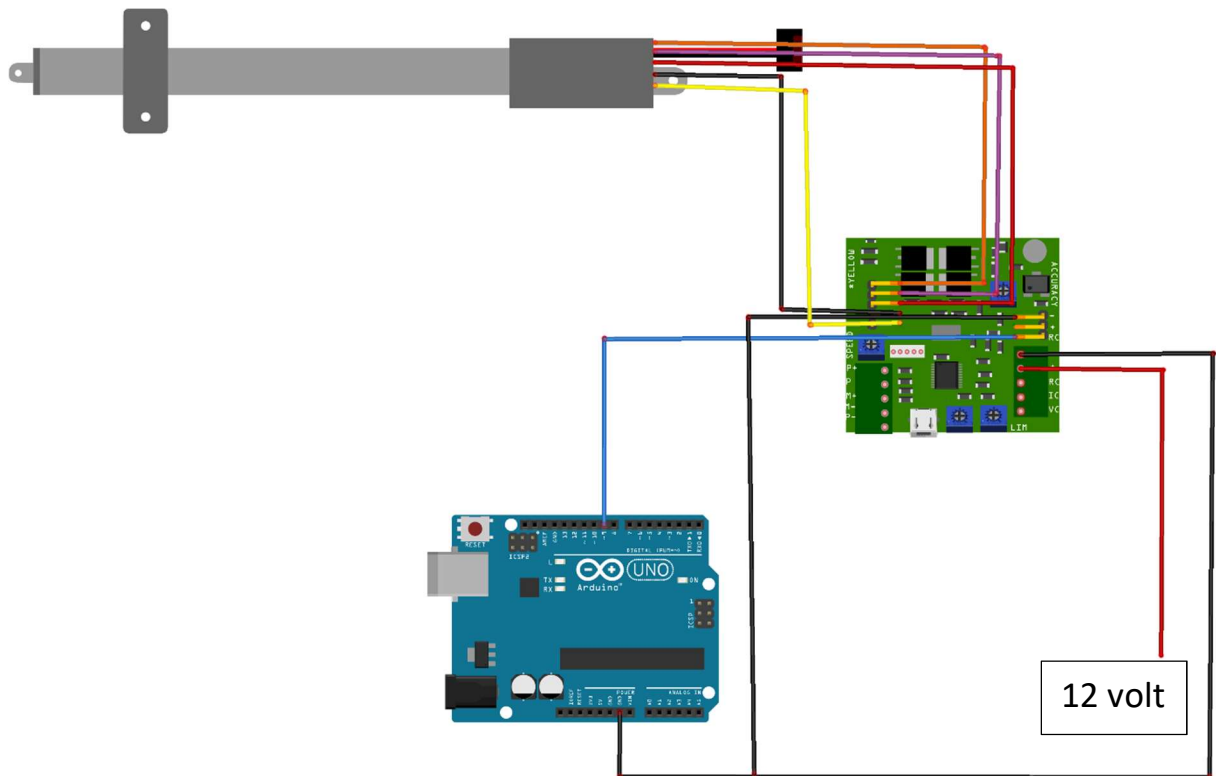


Εικ. 4.5 Κύκλωμα λειτουργίας φωτοαισθητήρων [99]

4.3.3 Κύκλωμα λειτουργίας γραμμικών ενεργοποιητών

Για το κύκλωμα των γραμμικών ενεργοποιητών έπρεπε να συνδεθούν οι ενεργοποιητές με τη πλακέτα της εταιρίας, ώστε να παίρνουμε πληροφορίες για την εκάστοτε θέση του ενεργοποιητή (feedback) και να του δίνουμε τις κατάλληλες εντολές είτε να επιμηκυνθεί είτε να συρρικνωθεί. Η συνδεσμολογία έγινε ως εξής:

1. Τα καλώδια των γραμμικών ενεργοποιητών (κόκκινο V+, μαύρο V-, πορτοκαλί positive feedback reference, κίτρινο negative reference feedback και μωβ η θέση του ενεργοποιητή) συνδέθηκαν στις υποδοχές της πλακέτας όπως υποδεικνύει το datasheet.
2. Το signal pin της πλακέτας (LAC) συνδέεται με ένα digital pin του arduino (D8)
3. Η πλακέτα πρέπει να έχει ένα κοινό ground με το arduino, οπότε συνδέεται το ground της πλακέτας με κάποιο από τα ground του arduino.
4. Το Vin της πλακέτας συνδέεται με το + της μπαταρίας και το ground της πλακέτας με το - της μπαταρίας.

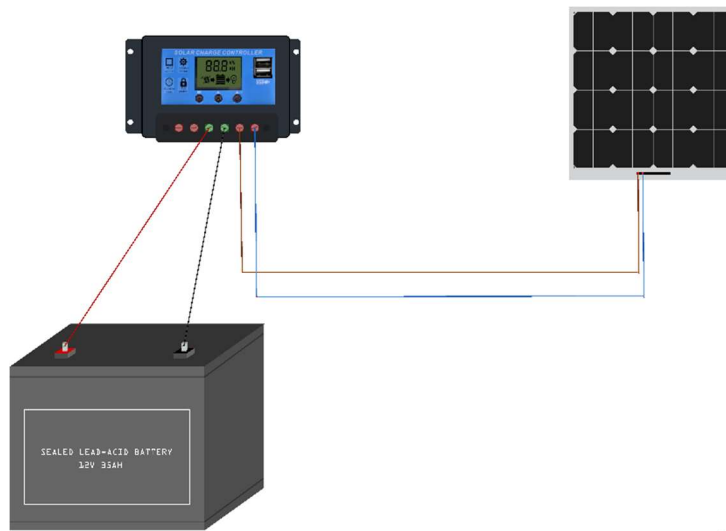


Εικ. 4.6 Κύκλωμα λειτουργίας γραμμικών ενεργοποιητών [99]

4.3.4 Κύκλωμα φωτοβολταϊκού πάνελ

Η συνδεσμολογία για το κύκλωμα του ηλιακού πάνελ έγινε ως εξής:

1. Συνδέουμε το θετικό πόλο (+) της μπαταρίας με το θετικό πόλο (+) του ρυθμιστή φόρτισης της μπαταρίας
2. Συνδέουμε τον αρνητικό πόλο (-) της μπαταρίας με τον αρνητικό πόλο (-) του ρυθμιστή φόρτισης της μπαταρίας.
3. Συνδέουμε τον θετικό πόλο (+) του ηλιακού πάνελ με το θετικό πόλο (+) του ρυθμιστή φόρτισης της μπαταρίας.
4. Συνδέουμε τον αρνητικό πόλο (-) του ηλιακού πάνελ με τον αρνητικό πόλο (-) του ρυθμιστή φόρτισης της μπαταρίας.



Εικ. 4.7 Κύκλωμα φωτοβολταϊκού πάνελ [99]

4.3.5 Αλγόριθμος αποδοτικής κίνησης των ενεργοποιητών

Οι ελάχιστες δυνατές κινήσεις των ενεργοποιητών εξοικονομούν σημαντικό ποσοστό ενέργειας για το σύστημα, αυτό επιτυγχάνεται με την παρακάτω διαδικασία:

1. Διαβάζουμε τις τιμές από τους 4 φωτοαισθητήρες και τις συγκρίνουμε ανά δύο μεταξύ τους
2. Με βάση την παραπάνω διαδικασία εντοπίζουμε ποιοι αισθητήρες έχουν τη υψηλότερη φωτεινότητα και μετακινούμε τους ενεργοποιητές έως τη στιγμή που όλοι οι φωτοαισθητήρες μας δίνουν την ίδια τιμή, πάντοτε μ μία ανοχή, της τάξης του 10%
3. Όταν η τιμή της φωτεινότητας πέσει κάτω από το ελάχιστο όριο τότε οι ενεργοποιητές πάνε σε μια στρατηγική θέση, η οποία είναι η αρχική θέση τοποθέτησης, στην οποία το πάνελ σχηματίζει κλίση 30 μοίρες με το έδαφος όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία.
4. Η απόφαση να ξεκινήσει η κίνηση λαμβάνεται όταν η μέτρηση των φωτοαισθητήρων ξεπεράσει το άνω όριο.

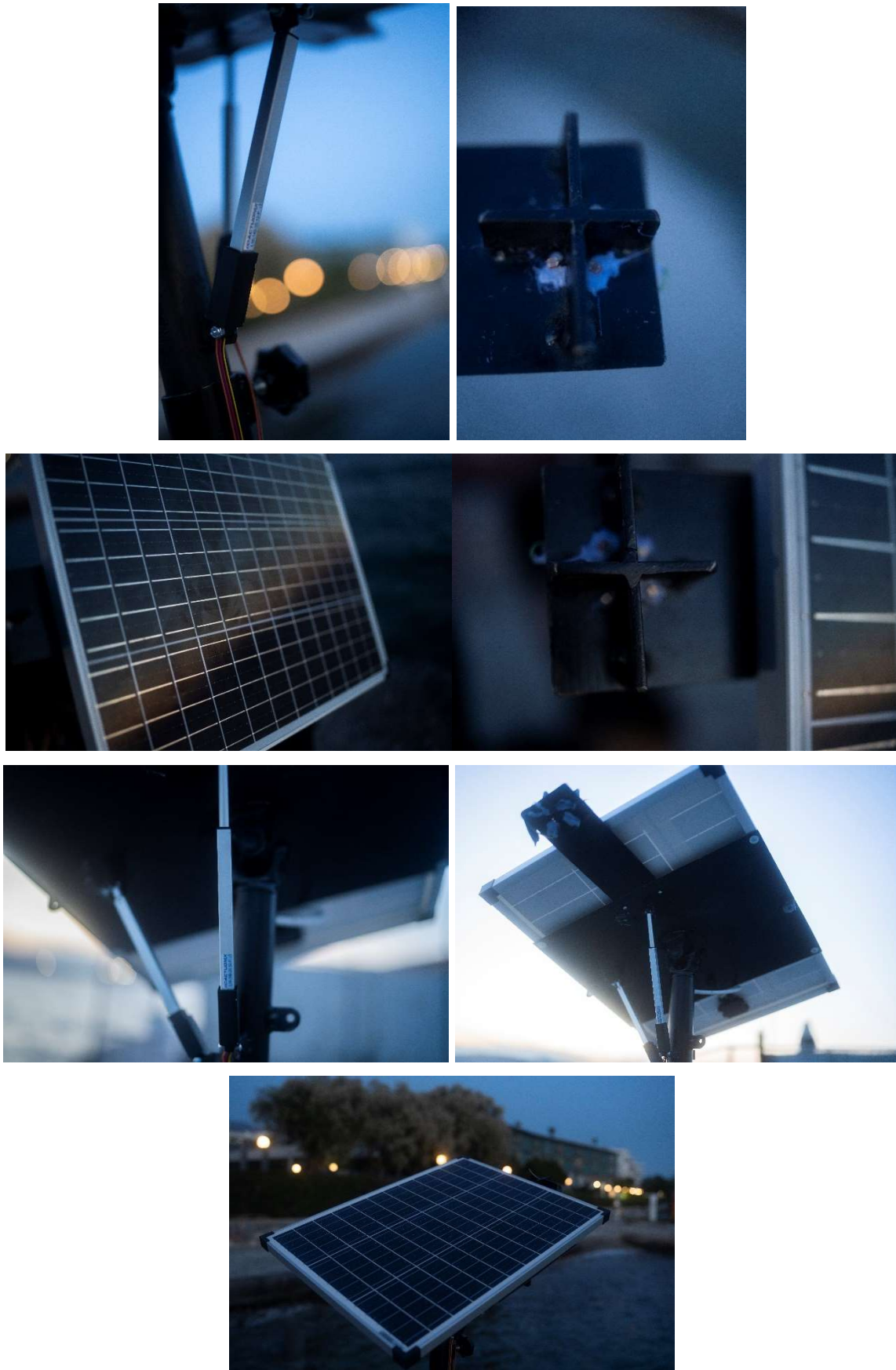
4.4 Παρουσίαση πρωτοτύπου, δοκιμές συμπεράσματα και πιθανές αναβαθμίσεις

4.4.1 Παρουσίαση και δοκιμές

Οι πρώτες δοκιμές αφορούσαν την κίνηση της βάσης του φωτοβολταϊκού και κατ' επέκταση του ίδιου του φωτοβολταϊκού οι οποίες πραγματοποιήθηκαν πριν την τελική μορφή της συσκευής. Αφού η κίνηση είχε επιτευχθεί και οι γραμμικού ενεργοποιητές επιτελούσαν τις απαραίτητες κινήσεις, περάσαμε στο δεύτερο στάδιο το οποίο ήταν η επικοινωνία με τους φωτοαισθητήρες. Η παραπάνω διαδικασία ξεκινά με το διάβασμα της αναλογικής μέτρησης που μας δίνει ο αισθητήρας. Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο δίνοντας ως παραμέτρους τις τιμές τις οποίες διαβάσαμε από τους φωτοαισθητήρες και να δώσει την εντολή κίνησης στους ενεργοποιητές, με έναν αποτελεσματικό τρόπο και χωρίς να κάνει 'περιττές' κινήσεις. Με την υλοποίηση όλων των παραπάνω, έγινε πρώτα μια δοκιμή χρησιμοποιώντας πηγή φωτός στην οποία η συσκευή λειτούργησε όπως αναμενόταν, στη συνέχεια έγινε δοκιμή σε εξωτερικό χώρο υπό η συσκευή πλέον ακολουθούσε το φως του ηλίου.







Εικ. 4.7 Τελικές φωτογραφίες συστήματος [99]

4.4.2 Συντήρηση και τεχνικά χαρακτηριστικά

Η σωστή χρήση της συσκευής προϋποθέτει την γνώση των τεχνικών του χαρακτηριστικών καθώς και την εξοικείωση με τις διαδικασίες σωστής συντήρησής του. Στον παρακάτω πίνακα αναγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της συσκευής:

Πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών

Ύψος βάσης 1,60 - 2,00 μέτρα
Ονομαστική τάση: 12 Volts
Χωρητικότητα μπαταρίας: 28 Ah
Διαστάσεις μπαταρίας: 181*77*167 χιλιοστά
Φωταντιστάσεις
Γραμμικοί ενεργοποιητές μέγιστη ανυψωτική δύναμη 9,7 kg
Διάρκεια ζωής μπαταρίας: >80% χωρητικότητα μετά από 800 κύκλους φόρτισης
Ηλιακό πάνελ μονοκρυσταλικό 60 Watt βάρος 3,7 Kg 2,5*51,5*68,5 cm
Arduino nano
4g module
Χαλύβδινη κατασκευή
Μηχανισμός κόμπλερ τζούντο με φλάντζα
Αδιάβροχη βαθμολογία Ip-54
Χαλύβδινη κατασκευή

4.4.3 Αναβαθμίσεις και δυνατότητες βελτίωσης

Η κατασκευή της συσκευής πραγματοποιήθηκε με στόχο την δημιουργία ενός πρωτότυπου το οποίο θα πληροί συγκεκριμένες προδιαγραφές και τεχνικά χαρακτηριστικά στα πλαίσια πάντα ενός προκαθορισμένου προϋπολογισμού. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να περιοριστεί σημαντικά η δυνατότητα επιλογής συγκεκριμένων εξαρτημάτων και υλικών για την κατασκευή καθώς το κόστος τους ήταν πολύ υψηλό. Παρόλα αυτά, στα πλαίσια μεγαλύτερου προϋπολογισμού είναι δυνατόν να κατασκευαστεί μια δεύτερη έκδοση της συσκευής η οποία θα διαθέτει αρκετές αναβαθμίσεις και βελτιώσεις συγκριτικά με την αρχική.

Οι τομείς στους οποίους θα μπορούσαν αρχικά να γίνουν αναβαθμίσεις είναι οι εξής:

- ισχυρότεροι γραμμικοί ενεργοποιητές για την έκθεση της συσκευής σε μέρη ιδιαίτερα εκτεθειμένα σε ακραίες καιρικές συνθήκες Για παράδειγμα χρήση υδραυλικών γραμμικών ενεργοποιητών
- δημιουργία βάσης φωτοβολταϊκού από αλουμίνιο για μείωση βάρους και συνεπώς υποβοήθηση στους ενεργοποιητές
- Αντικατάσταση των ήδη τοποθετημένων πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών πάνελ, τα οποία έχουν απόδοση 15-18 % , με μονοκρυσταλλικά πάνελ τύπου N-type IBC, τα οποία έχουν απόδοση 20-22.6%

Όλες οι παραπάνω αναβαθμίσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν για την δημιουργία μιας πιο βελτιωμένης και εξελιγμένης έκδοσης συσκευής αυτονομίας αισθητήρων αέριας ρύπανσης Παρόλα αυτά, το κόστος κατασκευής θα είναι πολλαπλάσιο καθώς τα εξαρτήματα, τα υλικά αλλά και οι διαδικασίες επεξεργασίας τους θα κόστιζαν πολύ περισσότερο.

Ακόμη αφού έγινε πλήρως κατανοητή η λειτουργία της πλακέτας η οποία δίνει την κίνηση στους ενεργοποιητές, παρατηρήθηκε ότι η κύρια λειτουργία ήταν η αλλαγή πολικότητας για την επίτευξη της εναλλαγής επέκτασης ή συρρίκνωσης του ενεργοποιητή. Οπότε καθίσταται εφικτή η κατασκευή πλακέτας κίνησης με αισθητά μικρότερο κόστος από την αγορά της πλακέτας παραγωγής, της τάξης του 50%. Αυτή η πλακέτα μπορεί να κατασκευαστεί με την χρήση ρελέ και διόδων για την επίτευξη αλλαγής της πολικότητας.

4.4.4 Συμπεράσματα και πρόταση για μελλοντική μελέτη

Συμπερασματικά στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας σχεδιάστηκε και δημιουργήθηκε ένα αυτόνομο ενεργειακό σύστημα παρακολούθησης ποιότητας αέρα. Μετά την κατασκευή του πρωτοτύπου αρχικά εκτελέστηκαν δοκιμές με τεχνητό φωτισμό (εσωτερικά) και ηλιακή ακτινοβολία (εξωτερικά) όπου και διαπιστώθηκε η επιθυμητή κίνηση του βραχίονα σε όλο το υπολογιζόμενο εύρος ακολουθώντας την θέση μέγιστης έντασης φωτός. Κατόπιν επιβεβαιώθηκε η αποστολή δεδομένων μέτρησης αέριας ρύπανσης αλλά επίσης και δεδομένων που αφορούν την ζωή της μπαταρίας. Επομένως το τελικό σύστημα έχει

μελετηθεί σε θεωρητικό επίπεδο και έχει ελεγχθεί η πλήρης λειτουργία όλων των απαιτούμενων παραμέτρων (κίνηση, αποστολή δεδομένων, στατικότητα).

Πρόταση για μελλοντική μελέτη αποτελεί η τοποθέτηση του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες (εξωτερικός χώρος) για ικανοποιητικό χρονικό διάστημα, για την επαλήθευση της αυτονομίας του συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. O. Mayr: *The Origins of Feedback Control* (MIT, Cambridge 1970)
- [2]. F.W. Gibbs: *The furnaces and thermometers of Cornelius Drebbel*, *Ann. Sci.* 6, 32–43 (1948)
- [3]. T. Mead: *Regulators for wind and other mills*, *British Patent (Old Series)* 1628 (1787)
- [4]. H.W. Dickinson, R. Jenkins: *James Watt and the Steam Engine* (Clarendon Press, Oxford 1927)
- [5]. C.C. Bissell: *Stodola, Hurwitz and the genesis of the stability criterion*, *Int. J. Control* 50(6), 2313–2332 (1989)
- [6]. S. Bennett: *A History of Control Engineering 1800– 1930* (Peregrinus, Stevenage 1979)
- [7]. G.B. Airy: *On the regulator of the clockwork for effecting uniform movement of equatorials*, *Mem. R. Astron. Soc.* 11, 249–267 (1840)
- [8]. J.C. Maxwell: *On governors*, *Proc. R. Soc.* 16, 270–283 (1867)
- [9]. E.J. Routh: *A Treatise on the Stability of a Given State of Motion* (Macmillan, London, 1877)
- [10]. A. Hurwitz: *Über die Bedingungen, unter welchen eine Gleichung nur Wurzeln mit negativen reellen*
- [11]. E. Bompiani: *Sulle condizione sotto le quali un equazione a coefficienti reale ammette solo radici con parte reale negative*, *G. Mat.* 49, 33–39 (1911), in Italian
- [12]. O. Heaviside: *Electrical Papers* (Chelsea, New York 1970), reprint of the 2nd edn.
- [13]. S. Bennett: *A History of Control Engineering 1800– 1930* (Peregrinus, Stevenage 1979), Chap. 6
- [14]. C.C. Bissell: *Karl Küpfmüller: a German contributor to the early development of linear systems theory*, *Int. J. Control* 44, 977–89 (1986)
- [15]. H. Nyquist: *Regeneration theory*, *Bell Syst. Tech. J.* 11, 126–47 (1932)
- [16]. H.S. Black: *Stabilized feedback amplifiers*, *Bell Syst. Tech. J.* 13, 1–18 (1934)
- [17]. H.W. Bode: *Relations between amplitude and phase in feedback amplifier design*, *Bell Syst. Tech. J.* 19, 421–54 (1940)
- [18]. H.W. Bode: *Network Analysis and Feedback Amplifier Design* (Van Nostrand, Princeton 1945)
- [19]. H.L. Hazen: *Theory of servomechanisms*, *J. Frankl. Inst.* 218, 283–331 (1934)
- [20]. A.A. Andronov, S.E. Khaikin: *Theory of Oscillators* (Princeton Univ. Press, Princeton 1949), translated and adapted by S. Lefschetz from Russian 1937 publication
- [21]. L.A. MacColl: *Fundamental Theory of Servomechanisms* (Van Nostrand, Princeton 1945)
- [22]. S. Bennett: *The emergence of a discipline: automatic control 1940–1960*, *Automatica* 12, 113–121 (1976)
- [23]. E.A. Feigenbaum: *Soviet cybernetics and computer sciences, 1960*, *Commun. ACM* 4(12), 566–579 (1961)
- [24]. R. Bellman: *Dynamic Programming* (Princeton Univ. Press, Princeton 1957)
- [25]. R.E. Kalman: *Contributions to the theory of optimal control*, *Bol. Soc. Mat. Mex.* 5, 102–119 (1960)
- [26]. R.E. Kalman: *A new approach to linear filtering and prediction problems*, *Trans. ASME J. Basic Eng.* 82, 34–45 (1960)
- [27]. R.E. Kalman, R.S. Bucy: *New results in linear filtering and prediction theory*, *Trans. ASME J. Basic Eng.* 83, 95–108 (1961)
- [28]. L.S. Pontryagin, V.G. Boltyansky, R.V. Gamkrelidze, E.F. Mishchenko: *The Mathematical Theory of Optimal Processes* (Wiley, New York 1962)
- [29]. T.J. Williams: *Computer control technology – past, present, and probable future*, *Trans. Inst. Meas. Control* 5, 7–19 (1983)
- [30]. C.A. Davis: *Industrial Electronics: Design and Application* (Merrill, Columbus 1973) p. 458

- [31]. T. Williams, S.Y. Nof: Control models. In: Handbook of Industrial Engineering, 2nd edn., ed. By G. Salvendy (Wiley, New York 1992) pp. 211–238
- [32]. J.C. Willems: In control, almost from the beginning until the day after tomorrow, Eur. J. Control 13, 71–81 (2007)
- [33]. I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramainiam and E. Cayirci, "A Survey on Sensor Networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, 2002.
- [34]. I. F. Akyildiz and I. H. Kasimoglu, "Wireless sensor and actor networks: research challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 2, no. 4, pp. 351-367, 2004.
- [35]. W.-Z. Song, R. Huang, M. Xu, A. Ma, B. Shirazi and R. LaHusen, "Air-dropped sensor network for real-time high-fidelity volcano monitoring," in *International Conference on Mobile System, Applications and Services (MobiSys 09)*, Krakow, Poland, 2009.
- [36]. W. Merrill and W. Kaiser, "Wireless Integrated Network Sensors (WINS) Next Generation," Airforce Research Laboratory, Rome, New York, 2004.
- [37]. "Wireless Applications - Moteiv launches wireless mote with interface to mobile devices," Sensors, 11 May 2007. [Online]. Available: <http://www.sensormag.com/wireless-applications/news/moteiv-launcheswireless-mote-with-interface-mobile-devices-2523>. [Accessed 7 January 2012].
- [38]. J. Hill, M. Horton, R. Kling and L. Krishnamurthy, "The platforms enabling wireless sensor networks," *Communications of the ACM*, vol. 47, no. 6, pp. 41-46, 2004.
- [39]. M. Healy, T. Newe and E. Lewis, "Wireless Sensor Node hardware: A review," in *IEEE Sensors*, Lecce, Italy, 2008.
- [40]. J. Yick, B. Mukherjee and D. Ghosal, "Wireless sensor network survey," *Computer Networks (Elsevier)*, vol. 52, no. 12, pp. 2292-2330, 2008.
- [41]. P. Bhuvaneshwari, R. Balakumar, V. Vaidehi and P. Balamuralidhar, "Solar Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks," in *International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks (CICSYN)*, Indore, India, 2009.
- [42]. W. K. Seah, Z. A. Eu and H.-P. Tan, "Wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (WSN-HEAP) - Survey and challenges," in *International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronics Systems Technology (Wireless VITAE)*, Aalborg, Denmark, 2009.
- [43]. J. Polastre, R. Szewczyk, A. Mainwaring, D. Culler and J. Anderson, "Analysis of wireless sensor networks for habitat monitoring," in *Wireless Sensor Networks*, Norwell, MA, Kluwer Academic Publishers, 2004, pp. 399-423.
- [44]. P. Schoonmaker and W. Luscombe, "Habitat Monitoring: An Approach for Reporting Status and Trends for State Comprehensive Wildlife Conservation Strategies," 22 March 2005. [Online]. Available: http://www.defenders.org/resources/publications/programs_and_policy/biodiversity_partners/habitat_monitoring.pdf. [Accessed 8 January 2012].
- [45]. R. Agarwal, R. Martinez-Catala, S. Harte, C. Segard and B. O'Flynn, "Modeling Power in Multifunctionality Sensor Network Applications," in *International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, Cap Esterel, France, 2008.
- [46]. W. Dargie, "Dynamic Power Management in Wireless Sensor Networks: State-of-the-Art," *IEEE Journal on Sensors*, vol. PP, no. 99, 2011.
- [47]. K. Sohrabi, J. Gao, V. Ailawadhi and G. J. Pottie, "Protocols for self-organization of a wireless sensor network," *IEEE Personal Communications*, vol. 7, no. 5, pp. 16-27, 2000.
- [48]. O. Saglam and M. E. Dalkili, "A Self Organizing Multihop Clustering Protocol for Wireless Sensor Networks," in *International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN)*, Fujian, China, 2009.
- [49]. R. Kacimi, R. Dhaou and A. Beylot, "Energy-Aware Self-Organization Algorithms for Wireless Sensor Networks," in *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, New Orleans, Louisiana, 2008.
- [50]. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankar Subramaniam, and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey," *Comput. Networks* 38, 393–422 (2002).
- [51]. A. Giuseppe, M. Conti, M. Di Francesco, and A. Passarella, "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey," *Ad Hoc Networks* 7, 537–568 (2009).

- [52]. S. Sudevalayam and P. Kulkarni, "Energy harvesting sensor nodes: Survey and implications," *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 13(3), 443–461 (2011).
- [53]. B. Li, O. Yassine, and J. Kosel, "A surface acoustic wave passive and wireless sensor for magnetic fields, temperature, and humidity," *IEEE Sens. J.* 15(1), 453–462 (2015).
- [54]. H. Park, J. Friedman, P. Gutierrez, V. Samanta, J. Burke, and M. B. Srivastava, "Illumimote: Multimodal and highfidelity light sensor module for wireless sensor networks," *IEEE Sens. J.* 7(7), 996–1003 (2007).
- [55]. S. Sauer and W.-J. Fischer, "An irreversible single-use humidity-threshold monitoring sensor principle for wireless passive sensor solutions," *IEEE Sens. J.* 16(18), 6920–6930 (2016).
- [56]. H. Lin, W. Xu, N. Guan, D. Ji, and Y. Wei, "Noninvasive and continuous blood pressure monitoring using wearable body sensor networks," in *IEEE Intelligent Systems (IEEE Computer Society, 2015)*, pp. 38–48.
- [57]. T. Naumowicz, R. Freeman, H. Kirk, B. Dean, M. Calsyn, A. Liers, A. Braendle, T. Guilford, and J. Schiller, "Wireless sensor network for habitat monitoring on Skomer Island," in *5th IEEE International Workshop on Practical Issues in Building Sensor Network Applications SenseApp, Denver, CO (2010)*, pp. 882–889.
- [58]. R. Lara, D. Benítez, A. Caamaño, M. Zennaro, and J. L. Rojo-Alvarez, "On real time performance evaluation of volcano monitoring systems with wireless sensor networks," *IEEE Sens. J.* 15(6), 3514–3523 (2015).
- [59]. M. Elserly, T. M. Elfouly, and M. H. Ahmed, "Optimal placement, routing, and flow assignment in wireless sensor networks for structural health monitoring," *IEEE Sens. J.* 16(12), 5095–5106 (2016).
- [60]. J. Guevara, F. Barrero, E. Vargas, J. Becerra, and S. Toral, "Environmental wireless sensor network for road traffic applications," *IET Intell. Transp. Syst.* 6(2), 177–186 (2012).
- [61]. P. Spachos and D. Hatzinakos, "Real-time indoor carbon dioxide monitoring through cognitive wireless sensor networks," *IEEE Sens. J.* 16(2), 506–514 (2016).
- [62]. L. Yu, N. Wang, and X. Meng, "Real-time Forest fire detection with wireless sensor networks," in *Proceedings of IEEE International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (2005), Vol. 2*, pp. 1214–1217.
- [63]. M. Rasheduzzaman, P. B. Pillai, A. N. C. Mendoza, and M. M. De Souza, "A study of the performance of solar cells for indoor autonomous wireless sensors," in *IEEE 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP) (2016)*, pp. 1–6.
- [64]. M. Sengupta, A. Habte, C. Gueymard, S. Wilbert, and D. Renné, *Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications*, 2nd ed. (NREL, 2017); Technical Report No. NREL/TP-5D00-68886, 2017.
- [65]. M. A. Green, K. Emery, and E. D. Dunlop, "Solar cell efficiency tables (version 47)," *J. Prog. Photovoltaics: Res. Appl.* 24(1), 3–11 (2015).
- [66]. C. S. Solanki, *Solar Photovoltaics: Fundamentals, Technologies, and Applications*, 3rd ed. (Prentice Hall of India (PHI), Delhi, 2015).
- [67]. S. Mariethoz et al., "Comparison of hybrid control techniques for buck and boost DC-DC converters," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* 18(5), 1126–1145 (2010).
- [68]. I. Mandourarakis and E. Koutroulis, "Optimal design of a boost-type DC-DC converter for PV power-supplied wireless sensor networks," in *Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology (2015)*, pp. 1100–1105.
- [69]. M. H. Rashid, N. Kumar, and A. R. Kulkarni, *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*, 4th ed. (Pearson Education, Delhi, 2013).
- [70]. N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, 3rd ed. (John Wiley & Sons Inc., California, 2007).
- [71]. S. Roberts, *DC/DC Book of Knowledge - Practical Tips for the User*, 3rd ed. (RECOM, Austria, 2014).
- [72]. S. Sivakumar et al., "An assessment on performance of DC-DC converters for renewable energy applications," *Renewable Sustainable Energy Rev.* 58, 1475–1485 (2016).

- [73]. J. Taneja, J. Jeong, and D. Culler, "Design, modeling, and capacity planning for micro-solar power sensor networks (Hydrowatch)," in IEEE Proceedings of the 7th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IEEE, 2008), pp. 407–418.
- [74]. <https://tescom-ups.gr/blog/post/vrla-agm-mpataries>
- [75]. <https://www.ilektronio-batteries.com/agm-gel-batteries-definition/>
- [76]. <http://m.gr.motionyes.com/info/why-use-electric-linear-actuators-28489575.html>
- [77]. https://www.shop-e.gr/images/product_pdf/Lorentz/21.20.0049_LINAK-LORENTZ-Linear-Actuator-LA36-Data-Sheet.pdf
- [78]. <https://edurobotics.gr/what-is-arduino/>
- [79]. <https://www.eshops.gr/τύποι-φωτοβολταϊκών-πανελ-πλαισίων-γ/>
- [80]. <https://shop.grkbatteries.gr/YUSUBA-VRLA-12V20AH>
- [81]. <https://www.solarcooking.com>
- [82]. <https://www.axonas.com.gr/site/product/ΔΙΧΑΛΟ-55HP--30-2X106-5--ΕΣΩ-ΤΡΙΓΩΝΟ?prId=DT-33&extLang=>
- [83]. <https://www.skroutz.gr/s/9457231/UNO-R3-ATmega328P-USB.html>
- [84]. <https://www.actuonix.com/L16-R-Miniature-Linear-Servo-For-RC-p/116-r.htm?1=1&CartID=1>
- [85]. https://www.solarcooking.com/index.php?route=product/product&product_id=473
- [86]. <https://shop.grkbatteries.gr/YUSUBA-VRLA-12V20AH>
- [87]. <https://shop.grkbatteries.gr/YUSUBA-VRLA-12V20AH>
- [88]. https://www.spelectronics.gr/photoresistor-pgm5639d?skr_prm=WyIxNTJlYTAxYy01ZDc1LTQ0MDctYWJkZC0zNWVjZjJiOTlmNTciLDE2Mzk2MTA0NDgyMjAseyJhcHBfdHlwZSI6IndlYiIsImNwIjoiYiIsInRhZ3MiOiliifV0
- [89]. https://www.spelectronics.gr/photoresistor-pgm5639d?skr_prm=WyIxNTJlYTAxYy01ZDc1LTQ0MDctYWJkZC0zNWVjZjJiOTlmNTciLDE2Mzk2MTA0NDgyMjAseyJhcHBfdHlwZSI6IndlYiIsImNwIjoiYiIsInRhZ3MiOiliifV0
- [90]. https://www.spelectronics.gr/photoresistor-pgm5639d?skr_prm=WyIxNTJlYTAxYy01ZDc1LTQ0MDctYWJkZC0zNWVjZjJiOTlmNTciLDE2Mzk2MTA0NDgyMjAseyJhcHBfdHlwZSI6IndlYiIsImNwIjoiYiIsInRhZ3MiOiliifV0
- [91]. Himanshu Sharma, Ahteshamul Haque, and Zainul A. Jaffery Journal of Renewable and Sustainable Energy Solar energy harvesting wireless sensor network nodes: A survey Journal of Renewable and Sustainable Energy
- [92]. <https://images.app.goo.gl/XQXzq8Gy25nnzjG38>
- [93]. <https://images.app.goo.gl/r7RdM49dFpEvtPNP9Σ>
- [94]. <https://images.app.goo.gl/kcmZWh2JroBWL8N29Σ>
- [95]. <https://images.app.goo.gl/vijsYmagDoz4aEb27Σ>
- [96]. <https://images.app.goo.gl/55AhHXXrgCZmZKq78>
- [97]. <https://images.app.goo.gl/9E79TG2avGDoPT7r7>
- [98].
- [99]. <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fpetroulakis-shop.gr%2Fproducts%2Fsidera-koilodokoi&psig=AOvVaw3foM3IX9eBUYQ4lglI812I&ust=1674837637601000&source=images&cd=vfe&ved=0CBAQjRxpFwoTCKDsnMXW5fwCFQAAAAAdAAAAABAG>
- [100]. Προσωπικό αρχείο φωτογραφιών

Παράρτημα Α

Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για διαστασιολόγηση έργου :

```
#!/usr/local/bin/python3
import sys
MOVING_PANEL_CONSUMPTION = 15.6
ARDUINO_CONSUMPTION     = 6
HOURS_PER_DAY           = 24
BATTERY_SLICE           = 0.8
LOWER_BOUND              = 60
UPPER_BOUND              = 700
consumptions_per_region = {
    "A" : {
        "consumption" : 1,
        "duration"    : 12
    },
    "B" : {
        "consumption" : 1,
        "duration"    : 11
    },
    "C" : {
        "consumption" : 1,
        "duration"    : 10
    },
    "D" : {
        "consumption" : 1,
        "duration"    : 9
    }
}

battery_type = {
    "low"      : 6.0,
    "medium"   : 12.0,
    "high"     : 24.0
}

'''
    Inputs:
```



```
# Find total panel consumption
panel_consumption = ((total_amperage * working_days) / 0.8) * 0.3

print(f"Panel consumption is: {panel_consumption} Watt")
if __name__ == "__main__":
    main()
    sys.exit(1)
```

Παράρτημα Β

Κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για λειτουργία συστήματος:

```
//#include <SoftwareSerial.h> // serial software library for interfacing gsm module

//SoftwareSerial Serial1(2, 3); // RX, TX // connect gsm Tx at D2 and Rx at D3

#define LIGHT_THRESHOLD 10
#define INITIAL_DEGREES 45
#define CHUNK 90
#define SAMPLE_SIZE 50
#define INITIAL_DEGREES 90
#define SERVO_STEP 5
#define DEBUG 1
#define THRESHOLD 50
#define ACTION_TIME 1000

int expandServoPinX = 10;
int shrinkServoPinX = 11;

int expandServoPinY = 12;
int shrinkServoPinY = 13;

int counter = 0;
uint16_t servoAnalogValue;
int photoResistors_values[4];

int differences[6];

int currentPositionX = 0;
int currentPositionY = 0;

int _1;
int _2;
int _3;
```

```

int _4;

void moveServo(char axis, uint8_t action) {
  if(action == 's') {
    if(axis == 'x') {
      if(currentPositionY - currentPositionX >= 18) {
        digitalWrite(shrinkServoPinY, HIGH);
        delay(ACTION_TIME);
        digitalWrite(shrinkServoPinY, LOW);
      }
      digitalWrite(shrinkServoPinX, HIGH);
      delay(ACTION_TIME);
      digitalWrite(shrinkServoPinX, LOW);

      currentPositionX -= 1;
    }
    else {
      if(currentPositionX - currentPositionY >= 18) {
        digitalWrite(shrinkServoPinX, HIGH);
        delay(ACTION_TIME);
        digitalWrite(shrinkServoPinX, LOW);
      }
      digitalWrite(shrinkServoPinY, HIGH);
      delay(ACTION_TIME);
      digitalWrite(shrinkServoPinY, LOW);

      currentPositionY -= 1;
    }
  }
  if (action == 'e'){
    if(axis == 'x') {
      if(currentPositionX < 22) {
        if(currentPositionX - currentPositionY >= 18) {
          digitalWrite(expandServoPinY, HIGH);
          delay(ACTION_TIME);
          digitalWrite(shrinkServoPinY, LOW);
        }
        digitalWrite(expandServoPinX, HIGH);
        delay(ACTION_TIME);
        digitalWrite(expandServoPinX, LOW);

        currentPositionX += 1;
      }
    }
  }
}

```

```

else {
  if(currentPositionY < 22) {
    if(currentPositionY - currentPositionX >= 18) {
      digitalWrite(expandServoPinX, HIGH);
      delay(ACTION_TIME);
      digitalWrite(expandServoPinX, LOW);
    }
    digitalWrite(expandServoPinY, HIGH);
    delay(ACTION_TIME);
    digitalWrite(expandServoPinY, LOW);

    currentPositionY += 1;
  }
}
}
}

```

```

float readPhotoResistor(int photoResistorID) {
  uint32_t sum = 0;

  for(int i = 0; i < SAMPLE_SIZE; i++) {
    if(photoResistorID == 1) {
      sum += analogRead(A0);
    }else if(photoResistorID == 2) {
      sum += analogRead(A1);
    }else if(photoResistorID == 3) {
      sum += analogRead(A2);
    }else if(photoResistorID == 4) {
      sum += analogRead(A3);
    }
  }

  return sum/SAMPLE_SIZE;
}

```

```

void updatePhotoresistorsValues() {
  photoResistors_values[0] = readPhotoResistor(1);
  photoResistors_values[1] = readPhotoResistor(3);
  photoResistors_values[2] = readPhotoResistor(2);
  photoResistors_values[3] = readPhotoResistor(4);

  _1 = photoResistors_values[0];
  _2 = photoResistors_values[1];
  _3 = photoResistors_values[2];
}

```

```

    _4 = photoResistors_values[3];
}

bool isNight() {
    updatePhotoresistorsValues();

    if(_1 < LIGHT_THRESHOLD &&
       _2 < LIGHT_THRESHOLD &&
       _3 < LIGHT_THRESHOLD &&
       _4 < LIGHT_THRESHOLD) {

        return true;
    }

    return false;
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    Serial.println(F("Program start running!!!"));
    delay(100);

    pinMode(expandServoPinX, OUTPUT);
    pinMode(shrinkServoPinX, OUTPUT);

    pinMode(expandServoPinY, OUTPUT);
    pinMode(shrinkServoPinY, OUTPUT);

    // Tell servo stop in the existing position
    digitalWrite(expandServoPinX, LOW);
    digitalWrite(shrinkServoPinX, LOW);

    digitalWrite(expandServoPinY, LOW);
    digitalWrite(shrinkServoPinY, LOW);

    for(int i = 0; i < 25; i++) {
        digitalWrite(shrinkServoPinX, HIGH);
        delay(1000);
        digitalWrite(shrinkServoPinX, LOW);

        digitalWrite(shrinkServoPinY, HIGH);
        delay(1000);
        digitalWrite(shrinkServoPinY, LOW);
    }
}

```

```

}
}

void loop() {
  updatePhotoresistorsValues();

  Serial.println("Photoresistor with ID 1 has value: ");
  Serial.println(photoResistors_values[0]);

  Serial.println("Photoresistor with ID 2 has value: ");
  Serial.println(photoResistors_values[1]);

  Serial.println("Photoresistor with ID 3 has value: ");
  Serial.println(photoResistors_values[2]);

  Serial.println("Photoresistor with ID 4 has value: ");
  Serial.println(photoResistors_values[3]);

  counter = 0;
  if(abs((_1+_2)/2 - (_3+_4)/2) > THRESHOLD) {
    while(abs((_1+_2)/2 - (_3+_4)/2) > THRESHOLD) {
      if(counter > 10) {
        break;
      }
      moveServo('y','e');

      Serial.print(F("Expand y-axis to ")); Serial.print(currentPositionY);
      Serial.println(F(" degrees"));
      updatePhotoresistorsValues();
      counter++;
    }
  }

  counter = 0;
  if(abs((_1+_4)/2 - (_2+_3)/2) > THRESHOLD) {
    Serial.println(F("Expand x-axis"));
    while(abs((_1+_4)/2 - (_2+_3)/2) > THRESHOLD) {
      if(counter > 10) {
        break;
      }
      moveServo('x','e');

      Serial.print(F("Expand x-axis to ")); Serial.print(currentPositionX);
      Serial.println(F(" degrees"));

```

```

    updatePhotoresistorsValues();
    counter++;
  }
}

counter = 0;
if(abs((_3+_4)/2 - (_1+_2)/2) > THRESHOLD) {
  while(abs((_3+_4)/2 - (_1+_2)/2) > THRESHOLD) {
    if(counter > 10) {
      break;
    }
    moveServo('y','s');

    Serial.print(F("Shrink y-axis to ")); Serial.print(currentPositionY); Serial.println(F("
degrees"));
    updatePhotoresistorsValues();
    counter++;
  }
}

counter = 0;
if(abs((_2+_3)/2 - (_1+_4)/2) > THRESHOLD) {
  while(abs((_2+_3)/2 - (_1+_4)/2) > THRESHOLD) {
    if(counter > 10) {
      break;
    }
    moveServo('x','s');

    Serial.print(F("Shrink x-axis to ")); Serial.print(currentPositionX); Serial.println(F("
degrees"));
    updatePhotoresistorsValues();
    counter++;
  }
}

delay(1000);
}

```


Παράρτημα Γ

```
#define LOAD_PIN          A0
#define SOLAR_PIN         A1

#define BATTERY_CAPACITY_mAh  28000
#define PAYLOAD_SIZE        3

#define MEAS_INTERVAL_IN_HOURS 0.000277778
#define SAMPLE_INTERVAL      170000

#define SATURATION_POINT    5600

float battery_output;
float battery_input;

float battery_output_mAh;
float battery_input_mAh;

float available_capacity;

void setup() {
  available_capacity = BATTERY_CAPACITY_mAh;

  Serial.begin(9600);

  delay(10);
}

float readCurrent(int analogPin) {
  unsigned int x=0;
  float AcsValue=0.0,Samples=0.0,AvgAcs=0.0,AcsValueF=0.0;

  for (int x = 0; x < 150; x++){ //Get 150 samples
    AcsValue = analogRead(analogPin); //Read current sensor values
    Samples = Samples + AcsValue; //Add samples together
```

```

    delay (3); // let ADC settle before next sample 3ms
}
AvgAcs=Samples/150.0;//Taking Average of Samples
//((AvgAcs * (5.0 / 1024.0)) is converitng the read voltage in 0-5 volts
//2.5 is offset(I assumed that arduino is working on 5v so the viout at no current comes
//out to be 2.5 which is out offset. If your arduino is working on different voltage than
//you must change the offset according to the input voltage)
//0.185v(185mV) is rise in output voltage when 1A current flows at input
if(analogPin == A0) {
    AcsValueF = (2.5 - ((AvgAcs * (5.0 / 1024.0)))) / 0.1;
}else {
    AcsValueF = (2.5 - ((AvgAcs * (5.0 / 1024.0)))) / 0.007;
}

if(AcsValueF < 0.0) {
    AcsValueF = 0;
}

return AcsValueF;
}

void calc_available_capacity() {
    battery_output = readCurrent(LOAD_PIN); // A
    Serial.print(F("Load is: ")); Serial.println(battery_output);

    battery_output_mAh = battery_output * MEAS_INTERVAL_IN_HOURS * 1000.0;
// mAh

    battery_input = readCurrent(SOLAR_PIN); // A
    Serial.print(F("Solar is: ")); Serial.println(battery_input);
    battery_input_mAh = battery_input * MEAS_INTERVAL_IN_HOURS * 1000.0; //
mAh

    if( available_capacity > SATURATION_POINT) {
        available_capacity = available_capacity + battery_input_mAh -
battery_output_mAh;
    }else {
        available_capacity = available_capacity - battery_output_mAh;
    }

    if(available_capacity >= BATTERY_CAPACITY_mAh) {
        available_capacity = BATTERY_CAPACITY_mAh;
    }
}

```

```

if(available_capacity <= SATURATION_POINT) {
  Serial.println(F("Battery damaged, 5600 mAh remains !!! Need to change battery."));
}
}

void printCapacity() {

  Serial.print(F("Capacity of battery in mAh is: ")); Serial.println(available_capacity);
  Serial.print(F("Capacity  %  is:  "));  Serial.println((available_capacity  /
BATTERY_CAPACITY_mAh) * 100);
}

void loop() {
  unsigned long start_time = millis();

  while((millis() - start_time) < SAMPLE_INTERVAL) {
    // Overflow handle
    if(start_time > millis()) {
      start_time = millis();
    }

    calc_available_capacity();

    delay(1000);
  }

  // Send data
  printCapacity();

  delay(1000);
}
}

```