



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ**  
**ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

Ανάπτυξη Ενεργειακά Αυτόνομου Συστήματος Συλλογής Μετρήσεων  
Αισθητήρων, Συνεργαζόμενου με Μη-Επανδρωμένα Ιπτάμενα Οχήματα

**Στρατάκης Ιπποκράτης**

**Τριμελής Επιτροπή**

Καθηγητής Κουτρούλης Ευτύχιος (επιβλέπων)

Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος

Καθηγητής Παρτσινέβελος Παναγιώτης

**Χανιά, 2024**

# Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών σε συνεργασία με το εργαστήριο Γεωπληροφοριακών Συστημάτων SenseLAB της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης. Αποτελεί μια ιδέα που θα εξυπηρετήσει πολλές και διαφορετικές εφαρμογές στον τομέα των Ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN) και κατ' επέκταση θα μπορέσει να λύσει και ανάγκες που υπάρχουν στην κοινωνία μας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Ευτύχιο Κουτρούλη για τις πολύτιμες συμβουλές καθοδήγησης, όπως και τον Καθηγητή Παρτσινέβελο Παναγιώτη υπεύθυνο καθοδηγητή του εργαστηρίου SenseLAB.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συναδέλφους Άγγελο Αντωνόπουλο, Ζήση Χαροκόπο και Εμμανουήλ Λιουδάκη μέλη των αντίστοιχων εργαστηρίων για την βοήθεια στην επίλυση των τυχόν προβλημάτων στην διάρκεια της υλοποίησης και των πειραμάτων.

Δεν θα μπορούσα να ξεχάσω την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχαν απλόχερα οι γονείς μου, Δημήτρης και Μαρίνα, τους οποίους ευχαριστώ που στάθηκαν δίπλα μου όλα τα χρόνια της ζωής μου και ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου βοηθώντας με να εκπληρώσω τους στόχους μου.

# Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο την ανάπτυξη ενός πρωτότυπου κόμβου για χρήση σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων - WSN, ο οποίος θα μπορεί να τοποθετηθεί από μη-επανδρωμένο drone. Αναπτύχθηκε ένα σύστημα το οποίο θα μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικές εφαρμογές ανάλογα με τους αισθητήρες και τα υποσυστήματα που θα το συνοδεύουν. Το σύστημα συνδυάζει σε μια πλακέτα κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας, παροχής σταθερής τάσης για τα λογικά κυκλώματα και τους αισθητήρες, κύκλωμα προστασίας τάσης και δυνατότητα σύνδεσης συσκευών μέσω ειδικών βυσμάτων.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας παρουσιάζονται οι βασικοί τομείς που χρειάζονται για την υλοποίηση, παρόμοια συστήματα που υπάρχουν και χρησιμοποιούνται ήδη στις μέρες μας καθώς και γιατί μπορεί ένα τέτοιο σύστημα να βοηθήσει περαιτέρω στην εγκατάσταση και υλοποίηση δικτύων αισθητήρων.

Στο δεύτερο μέρος γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση όλων των δομικών μονάδων ενός τέτοιου συστήματος. Αναλύονται συστήματα συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, συγκομιδής και αποθήκευσης ενέργειας, επικοινωνίας όπως και μέθοδοι μέγιστης απορρόφησης ισχύος από πηγές ενέργειας.

Στο τρίτο μέρος παρουσιάζεται η διαδικασία ανάπτυξης του πρωτότυπου συστήματος. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται όλα τα στάδια της σχεδίασης, της επιλογής στοιχείων για τα κυκλώματα, της μονάδας επεξεργασίας και του τρόπου επικοινωνίας.

Στο τέταρτο μέρος περιγράφονται οι πειραματικές διατάξεις μαζί με τα διάφορα πειράματα που έγιναν για την επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του συστήματος. Ενδεικτικά έγιναν πειράματα σε όλα τα υποσυστήματα για την σωστή λειτουργία τους ως προς την συγκομιδή ενέργειας, την παροχή σταθερής τάσης, την εμβέλεια του επιλεγμένου συστήματος επικοινωνίας και την αυτονομία ολόκληρου του συστήματος με πραγματικές μετρήσεις.

Στο τελευταίο μέρος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των πειραμάτων και αναλύονται πιθανές βελτιώσεις αλλά και επεκτάσεις ώστε το σύστημα να βελτιωθεί και να αποκτήσει ακόμα μεγαλύτερη χρησιμότητα.

# Abstract

The target of this thesis is the development of a prototype node tailored for deployment in Wireless Sensor Networks (WSN) via unmanned aerial vehicles (UAVs), known as drones. The developed system is versatile, allowing adaptation to diverse applications based on the integrated sensors and subsystems. Housed on a single board, the system comprises energy harvesting and storage, provides a constant voltage supply for logic circuits and sensors, incorporates a voltage protection circuit, and facilitates device connectivity through specialized connectors.

The first section introduces the fundamental aspects crucial for implementation, highlighting existing similar systems and emphasizing the potential advantages of such a system in facilitating the placement and integration of sensor networks.

The next section conducts a comprehensive literature review of the constituent elements essential for such a system. This encompasses an analysis of systems for data collection and processing, energy harvesting and storage, communication methods, and strategies for maximizing power production from energy sources.

The third section analyzes the developmental of the prototype system. It outlines each stage, from design considerations to component selection for circuits, processing units, and communication modalities.

In the fourth section, detailed descriptions of experimental setups are provided, along with an account of various experiments conducted to validate the proper functioning of the system. Noteworthy, experiments include assessments of subsystems concerning energy harvesting, consistent voltage supply, the range of the chosen communication system, and the overall system's autonomy, through experimental measurements.

The concluding part encapsulates insights drawn from the experimental results, presenting conclusions and deliberating on potential enhancements and extensions to refine the system's utility and effectiveness.

# Περιεχόμενα

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	<b>6</b>
<b>2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b>	<b>11</b>
<b>2.1. Σύστημα Συλλογής – Επεξεργασίας Δεδομένων</b>	<b>12</b>
2.1.1. Αισθητήρας	12
2.1.2. Κεντρική Μονάδα Ελέγχου	13
<b>2.2. Σύστημα συγκομιδής ενέργειας (Energy Harvesting)</b>	<b>14</b>
2.2.1. Φωτοβολταϊκά πάνελ – Ηλιακή Ενέργεια	15
2.2.2. Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια	18
2.2.3. Πιεζοηλεκτρική Γεννήτρια	19
2.2.4. Ηλεκτρομαγνητική Γεννήτρια	20
2.2.5. Γεννήτρια Ραδιοσυχνοτήτων - RF generator	21
<b>2.3. Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας</b>	<b>21</b>
2.3.1. Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία	22
2.3.2. Υπερπυκνωτές (SuperCapacitors)	23
<b>2.4. Θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος</b>	<b>24</b>
<b>2.5. Μετατροπείς DC-DC</b>	<b>26</b>
2.5.1. Step Down – Buck converter	27
2.5.2. Step up – Boost Converter	30
2.5.3. Buck/Boost Converter	32
<b>2.6. Αλγόριθμοι Maximum Power Point Tracking (MPPT)</b>	<b>34</b>
2.6.1. Constant Voltage – Constant current	35
2.6.2. Perturb & Observe	36
2.6.3. Incremental Conductance	37
<b>2.7. Σύστημα επικοινωνίας</b>	<b>39</b>
2.7.1. Τεχνολογίες Ασύρματης Επικοινωνίας	39
2.7.2. Low Power Wide Area Networks – LPWAN	41
2.7.3. Βασικές Τοπολογίες Δικτύων	43
2.7.4. LEACH	45
2.7.5. PEGASIS	49

<b>3. ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ</b>	<b>53</b>
3.1. Σχεδιασμός του Περιβλήματος	53
3.2. Σχεδιασμός της πλακέτας	55
3.3. Παροχή Ενέργειας	58
3.4. Κεντρική μονάδα ελέγχου	60
3.5. Επικοινωνία	63
<b>4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b>	<b>65</b>
4.1. Πείραμα εύρεσης MPP	65
4.2. Πείραμα ρεύματος φόρτισης	67
4.3. Πείραμα Voltage Protection	68
4.4. Πείραμα επαναλειτουργίας	69
4.5. Πείραμα σταθερής τάσης 3.3V	70
4.6. Πείραμα καταστάσεων	70
4.7. Υπολογισμός παραγωγής ενέργειας	73
4.8. Πείραμα μέγιστης απόστασης επικοινωνίας	78
<b>5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>83</b>
<b>6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>86</b>

# Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2-1: Energy Harvesting Opportunities [11].....	15
Πίνακας 2-2: Βασικά χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων μπαταριών [25]. ....	23
Πίνακας 2-3: Βασικά χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων Supercapacitor [25].....	24
Πίνακας 4-1: Κατανάλωση αισθητήρων σε τάση 3.3V. ....	75
Πίνακας 4-2: Συνολική κατανάλωση συστήματος σε κάθε κατάσταση. ....	76

# Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1-1: Διαμόρφωση του δικτύου «human daily action»[3].....	8
Σχήμα 2-1: Υποσυστήματα ενός κόμβου (Node).....	11
Σχήμα 2-2: Γενικό διάγραμμα ενός MCU.....	14
Σχήμα 2-3: Μονοκρυσταλλικό (A) και Πολυκρυσταλλικό (B) PV [20]. ....	16
Σχήμα 2-4: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου. ....	16
Σχήμα 2-5: Χαρακτηριστικές καμπύλες PV [21]. ....	17
Σχήμα 2-6: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός TEG. ....	19
Σχήμα 2-7: Απλοποιημένο μοντέλο πηγής (Source) – φορτίου (Load). ....	24
Σχήμα 2-8: Μοντέλο πηγής-φορτίου με σύνθετες αντιστάσεις. ....	25
Σχήμα 2-9: Συνδεσμολογία Buck (Step Down) Converter. ....	27
Σχήμα 2-10: Κυματομορφές Buck converter [29]. ....	28
Σχήμα 2-11: Συνδεσμολογία Boost (Step Up) Converter. ....	30
Σχήμα 2-12: Κυματομορφές Boost converter [29]. ....	31
Σχήμα 2-13: Συνδεσμολογία Buck/Boost Converter. ....	32
Σχήμα 2-14: Κυματομορφές Buck/Boost Converter [29]. ....	33
Σχήμα 2-15: Συνδεσμολογία EH-Storage-Load. ....	34
Σχήμα 2-16: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου «P&O».....	36
Σχήμα 2-17: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου «Incremental Conductance».....	38
Σχήμα 2-18: BUS Τοπολογία.....	43
Σχήμα 2-19: Linear Τοπολογία. ....	43
Σχήμα 2-20: Ring Τοπολογία.....	44
Σχήμα 2-21: Τοπολογία Αστέρα (Star Topology).....	45
Σχήμα 2-22: Τοπολογία πρωτοκόλλου LEACH. ....	47
Σχήμα 2-23: Χρόνος ζωής συστήματος χρησιμοποιώντας direct transmission, MTE routing, static clustering, and LEACH with 0.5 J/node [9]. ....	48
Σχήμα 2-24: Απόδοση Direct, LEACH και PEGASIS για ένα 100m x 100m δίκτυο με αρχική ενέργεια .5J/κόμβο [10]. ....	50
Σχήμα 2-25: Τοπολογία πρωτοκόλλου PEGASIS. ....	51
Σχήμα 3-1: Σχέδιο κάτοψης του περιβλήματος. ....	54
Σχήμα 3-2: Τρισδιάστατη απεικόνιση του περιβλήματος. ....	55
Σχήμα 3-3: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος της πλακέτας. ....	56
Σχήμα 3-4: Top (A) και Bottom (B) Layer της κατασκευασμένης πλακέτας. ....	57
Σχήμα 3-5: Top (A) και Bottom (B) Layer του σχεδίου της πλακέτας. ....	58



Σχήμα 3-6: Συνδεσμολογία PVs.....	59
Σχήμα 3-7: Σχηματικό διάγραμμα του MCU με τις εξωτερικές διεπαφές.....	61
Σχήμα 3-8: Θέσεις των connectors: Top Layer Connectors (A), Bottom Layer Connectors (B), Επάνω πλευρά (Γ). ....	61
Σχήμα 3-9: Συνδεσμολογία ISP για φόρτωση bootloader. ....	62
Σχήμα 3-10: Συνδεσμολογία UART για προγραμματισμό. ....	62
Σχήμα 3-11: RFM95 τοποθετημένο στην πλακέτα.....	63
Σχήμα 4-1: Το ολοκληρωμένο κύκλωμα INA219.....	66
Σχήμα 4-2: Καμπύλες P-V για 250, 500, 750, 975 W/m <sup>2</sup> σε θερμοκρασία 23,8 °C.....	67
Σχήμα 4-3: Σταθερό ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας.....	68
Σχήμα 4-4: Πτώση ρεύματος φόρτισης καθώς η μπαταρία πλησιάζει την πλήρη φόρτιση. ....	68
Σχήμα 4-5: Διακοπή παροχής στα 2.9V.....	69
Σχήμα 4-6: Επαναλειτουργία με τάση φόρτισης.....	69
Σχήμα 4-7: Buck/Boost 3.3V (γαλάζιο), Τάση μπαταρίας (κίτρινο).....	70
Σχήμα 4-8: Σχηματικό διάγραμμα του πειράματος.....	71
Σχήμα 4-9: Μηχανή καταστάσεων του συστήματος. ....	72
Σχήμα 4-10: Απεικόνιση εξόδου LED για την αναγνώριση των καταστάσεων λειτουργίας. ....	72
Σχήμα 4-11: Απεικόνιση κατανάλωσης ρεύματος του συστήματος ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας.....	73
Σχήμα 4-12: GHI το έτος 2019.....	74
Σχήμα 4-13: Μέσος δείκτης GHI κάθε μήνα. ....	74
Σχήμα 4-14: Δείκτης GHI το μήνα Δεκέμβριο. ....	75
Σχήμα 4-15: Υπολογιζόμενη παραγωγή ισχύος του συστήματος. ....	77
Σχήμα 4-16: Μετάδοση με οπτική επαφή (μαύρο), μετάδοση με παρεμβολή εμποδίου (κίτρινο). ....	79
Σχήμα 4-17: Συνδέσεις των 2 κόμβων στο πείραμα με τα NRF24L01.....	80
Σχήμα 4-18: Μετάδοση με οπτική επαφή (A), μετάδοση με παρεμβολή εμποδίου (B). ..	80

# Κατάλογος Συντομογραφιών

HEΔ:	Ηλεκτρεγερτική Δύναμη
IoT:	Internet of Things
WSN:	Wireless Sensor Network
MEMS:	MicroElectroMechanical Systems
CPP:	Contacted Poly Pitch
MMP:	Minimum Metal Pitch
MCU:	MicroController Unit
PV:	PhotoVoltaic
TEG:	ThermoElectric Generator
Emf:	Electromotive Force
DoD:	Depth of Discharge
EDLC:	Electrochemical Double Layer Capacitor
EH:	Energy Harvesting
MPP:	Maximum Power Point
CM:	Continuous Mode
DM:	Discontinuous Mode
MPPT:	Maximum Power Point Tracking
DuC:	Duty Cycle
WLAN:	Wireless Local Area Network
OFDM:	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
DSSS:	Direct Sequence Spread Spectrum
FHSS:	Frequency Hoping Spread Spectrum
CSMA/CA:	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
LPWAN:	Low Power Wide Area Network
BW:	Bandwidth
SF:	Spreading Factor
PHY:	Physical
GW:	Gateway
BS:	Base Station
CH:	Cluster Head
PDR:	Packet Delivery Ratio
SoC:	State of Charge
ADC:	Analog to Digital Converter

SPI:	Serial Peripheral Interface
I2C:	Inter-Integrated Circuit
PWM:	Pulse Width Modulation
UART:	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
ISP:	In System Programming
CON:	Connector
LED:	Light Emitting Diode
NREL:	National Renewable Energy Laboratory
NSRDB:	National Solar Radiation Database
GHI:	Global Horizontal Radiation
RF:	Radio Frequency

# 1.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η σημερινή κοινωνία είναι οι επιπτώσεις από φυσικές καταστροφές (φωτιές, πλημμύρες, σεισμούς, εκρήξεις ηφαιστείων κ.α.). Η προετοιμασία, η πρόληψη και η προηγούμενη γνώση της δράσης τέτοιων φαινομένων κρίνονται απαραίτητα για την αντιμετώπιση τους και την εξασφάλιση της προστασίας των πολιτών. Με μια ματιά στα γεγονότα των τελευταίων ετών στην Ελλάδα και όχι μόνο, μπορεί κανείς να καταλάβει το μέγεθος των καταστροφών και του κόστους τους σε ανθρώπινες ζωές και περιουσίες, στο φυσικό περιβάλλον, την χλωρίδα και την πανίδα. Τα παραδείγματα είναι πολλά, κάθε χρόνο καίγονται αμέτρητες εκτάσεις από δάση με άμεσες κλιματικές συνέπειες (φαινόμενο θερμοκηπίου, αύξηση της θερμοκρασίας κ.α.). Παρατηρούνται ακραίες πλημμύρες και σεισμοί που ίσως αν μελετηθούν σε βάθος ή ακόμη και αν έχουμε έγκαιρη ενημέρωση λίγο πριν ή μετά την εμφάνισή τους να μπορούμε να προστατευθούμε καλύτερα και να μην φτάνουμε στο έσχατο σημείο άδικης απώλειας ανθρωπίνων και όχι μόνο ζωών.

Η ραγδαία ανάπτυξη των μικροηλεκτρονικών κυκλωμάτων και το χαμηλό κόστος τους έχουν οδηγήσει στην μελέτη και βελτίωση σχετικών εφαρμογών με το Internet of Things (IoT). Επιπλέον, έχει δοθεί μεγάλη έμφαση στην εξέλιξη των δικτύων ασυρμάτων αισθητήρων (WSN) τα οποία μπορούν να λύσουν πολλά από τα παραπάνω προβλήματα που αναφέρθηκαν όσον αφορά την μελέτη, πρόβλεψη και την ανίχνευση τέτοιου είδους φαινομένων.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, ξεκίνησε η ιδέα της ανάπτυξης ενός κόμβου για WSN, ο οποίος εκτός από τα βασικά του μέρη (παροχή ενέργειας, μονάδα ελέγχου και επεξεργασίας και σύστημα επικοινωνίας) θα έχει την ιδιαιτερότητα να μεταφέρεται και

να τοποθετείται από μη-επανδρωμένο drone. Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να λύσει πολλά προβλήματα αφού θα είναι ικανό να εφαρμοστεί σε πολλές διαφορετικές λύσεις, ανάλογα με τους αισθητήρες και τα άλλα στοιχεία που θα φέρει, και επιπλέον θα μπορεί να τοποθετηθεί σε δυσπρόσιτες περιοχές, όπου δηλαδή είναι πολύ δύσκολη έως και αδύνατη η ανθρώπινη πρόσβαση.

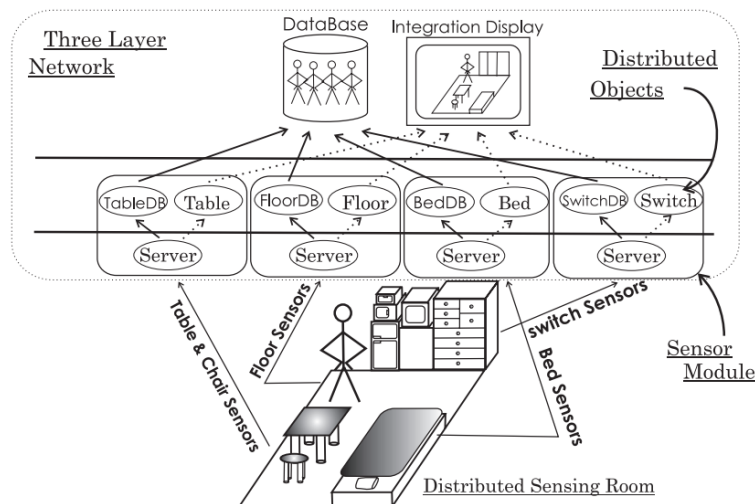
Η μεταφορά κόμβων με μη-επανδρωμένο drone ενέχει πολλές ιδιαιτερότητες. Για την ομαλή πτήση του drone και την τοποθέτηση των κόμβων είναι απαραίτητος ο συσχετισμός μεγέθους, σχήματος και βάρους μεταξύ drone και κόμβων. Αυτό προσδίδει επιπλέον πολυπλοκότητα στην υλοποίηση του κόμβου, καθώς εκτός από τη σωστή λειτουργικότητα του πρέπει να πληροί και τους περιορισμούς.

Τα WSNs μας δίνουν τη δυνατότητα να παρακολουθούμε φαινόμενα και να ελέγχουμε διάφορες λειτουργίες απομακρυσμένα. Η έρευνα που έχει γίνει έχει οδηγήσει στην μείωση του κόστους υλοποίησης-συντήρησης και στην βελτιστοποίηση της απόδοσής τους. Η ανάλυση που μας δίνει ένα WSN στις μετρήσεις είναι πολύ μεγάλη, καθώς μπορεί να μετρηθεί το ίδιο φαινόμενο σε πολλά σημεία μιας περιοχής. Συνεπώς η περιοχή μπορεί να παρακολουθείται σε βάθος και να χωρίζεται σε υποπεριοχές, οι οποίες θα μπορούν να έχουν δική τους ξεχωριστή λειτουργικότητα. Με τη πάροδο του χρόνου χρησιμοποιούνται σε όλο και περισσότερες εφαρμογές, που αφορούν την παρακολούθηση φαινομένων αλλά και τον απομακρυσμένο έλεγχο καταστάσεων. Παρακάτω θα αναλυθούν πραγματικές εφαρμογές στους κύριους διακριτούς τομείς που χρησιμοποιούνται τα WSNs.

Στην **παρακολούθηση περιβαλλοντικών φαινομένων** (Environmental monitoring). Πολλές υπηρεσίες και εφαρμογές χρησιμοποιούν WSN για παρακολούθηση καιρικών φαινομένων (νεφοκάλυψη, ηλιοφάνεια, αέρα), του νερού και χαρακτηριστικών τιμών του εδάφους. Τα πραγματικά παραδείγματα ποικίλουν και πολλά από αυτά τα συναντάμε στην καθημερινότητά μας. Ένα από αυτά είναι η παρακολούθηση των παγόβουνων στην εφαρμογή Glacswab, με μετρήσεις τοποθεσίας, θερμοκρασίας, πίεσης και κλίσης στις πλαγιές των παγόβουνων [1]. Σε άλλη περίπτωση οι Pierce και Elliot ανέπτυξαν ένα αγροτικό δίκτυο αισθητήρων που παρέχει απομακρυσμένη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και έλεγχο των γεωργικών εργασιών σε δύο γεωργικές εφαρμογές, ενός δικτύου παρακολούθησης του καιρού και ενός δικτύου παρακολούθησης παγετού [2].

**Οικιακές εφαρμογές** (Home applications) χρησιμοποιούν WSN για τις διάφορες λειτουργίες τους. Βοηθούν στον έλεγχο λειτουργιών όπως το φωτισμό, τη θερμοκρασία του νερού, την κατανάλωση του ρεύματος και τη θερμοκρασία του σπιτιού. Αυτόματοι

θερμοσίφωνες, αυτόματη ρύθμιση εσωτερικού φωτισμού ανάλογα με το φυσικό φως και συστήματα εντοπισμού κίνησης είναι μόνο μερικά παραδείγματα που διευκολύνουν την καθημερινότητα του ανθρώπου στο σπίτι και συμβάλουν στην εξοικονόμηση πόρων (ρεύμα, νερό). Πιο συγκεκριμένα στο Πανεπιστήμιο του Τόκιο σχεδιάστηκε ένα έξυπνο δωμάτιο για την βελτίωση της καθημερινής ζωής ενός κατοίκου. Το σύστημα έχει τρία κύρια στοιχεία: λήψη δεδομένων, επεξεργασία δεδομένων και ενημέρωση της κατάστασης του προγράμματος, τα οποία το βοηθούν να εκτιμά την τρέχουσα κατάσταση ενός περιβάλλοντος από τους αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι σε κρεβάτια, δάπεδα, τραπέζια και διακόπτες. Για την παρακολούθηση κάθε αλλαγής στο σύστημα, συνθέτει τμήματα για τα συλλεγόμενα δεδομένα των αισθητήρων παρατηρώντας τις ξαφνικές αλλαγές. Κάθε τμήμα χαρακτηρίζεται με μια «κατάσταση». Ο αλγόριθμος συνοψίζει τις καταστάσεις κάθε τμήματος για να επιλέξει την επόμενη κατάσταση για όλο το σύστημα [3].



*Σχήμα 1-1: Διαμόρφωση του δικτύου «human daily action»[3].*

Στις **εφαρμογές υγειονομικής περίθαλψης** (Healthcare applications), όπου χρησιμοποιείται ένα σύστημα μετρήσεων πραγματικού χρόνου, επάνω στο σώμα του ασθενούς, για τη παρακολούθηση των δραστηριοτήτων του αλλά και των τιμών του. Δημιουργήθηκε ένας νέος εξειδικευμένος τύπος δικτύου WSN, το BAN (Body Area Network), που αφορά την τοποθέτηση αισθητήρων στο ανθρώπινο σώμα. Ένα τέτοιο δίκτυο, εκτός από τις πληροφορίες που μας δίνει για τον ασθενή, βοηθά και στον εντοπισμό επειγουσών καταστάσεων, όπως ξαφνικές πτώσεις, καρδιακές προσβολές, χαμηλό επίπεδο οξυγόνου και θερμοκρασίας. Η πληροφόρηση αυτή μπορεί άμεσα να σώζει ζωές μιας και σε ένα επείγον περιστατικό ακόμη και τα δευτερόλεπτα είναι σημαντικά. Στην εργασία [4] οι ερευνητές ανέπτυξαν ένα τρόπο μεταφοράς δεδομένων

σε WSN για υγειονομικές εφαρμογές που βοηθά στην εξοικονόμηση ενέργειας του συστήματος.

**Στρατιωτικές εφαρμογές** (Military applications). Η επιτήρηση πεδίου μάχης αποτέλεσε μια από τις πρώτες εφαρμογές των WSN. Χαρακτηριστικά όπως η αυτόνομη λειτουργία, η γρήγορη οργάνωση και η εύκολη αντιμετώπιση βλαβών των κόμβων τα καθιστούν ένα εξαιρετικό μηχανισμό παρακολούθησης για στρατιωτικές εφαρμογές. Οι κόμβοι για τέτοιες εφαρμογές διαθέτουν αισθητήρες ήχου, δονήσεων, ανίχνευσης κίνησης, περιβαλλοντικών μετρήσεων και ανίχνευσης τοποθεσίας. Τοποθετούνται κατάλληλα σε ένα πεδίο μάχης ή σε ένα απομακρυσμένο πεδίο με σκοπό την παρακολούθηση εχθρικών ή συμμαχικών κινήσεων, την παρακολούθηση του εξοπλισμού τους, την ανίχνευση πυρηνικών, βιολογικών και χημικών επιθέσεων κ.α. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ανάπτυξη συστήματος που ελέγχει τον στρατιωτικό χώρο στην εργασία [5], συμβάλλοντας στην προστασία του και την ασφάλεια των στρατιωτών.

Εφαρμογές στα **μέσα μεταφοράς** (Transportation applications). Κύριο αντικείμενο τέτοιων εφαρμογών είναι η ασφάλεια στους δρόμους και η αντιμετώπιση της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι αυτό που αναφέρεται στην εργασία [6], το οποίο χρησιμοποιεί συνδυασμό WSNs με σκοπό την ενημέρωση των οδηγών σε πραγματικό χρόνο για συμβάντα όπως αυξημένη κίνηση ή ατυχήματα.

Εφαρμογές στη **βιομηχανική παραγωγή** (Industrial applications). Τα WSN στις βιομηχανικές εγκαταστάσεις δίνουν τη δυνατότητα για συνεχή παρακολούθηση των συνθηκών, την κατάσταση του εξοπλισμού και την αυτοματοποίηση των βιομηχανικών διαδικασιών. Κύρια χαρακτηριστικά που παρέχουν είναι η ευκολία στην υλοποίηση, συντήρηση και χρήση, η ευελιξία, τα φθηνά υλικά κατασκευής και η αξιοπιστία τους σε βάθος χρόνου. Η χρήση τους διευκολύνει τις διαδικασίες παρακολούθησης και ελέγχου στη βιομηχανική διαδικασία, όπως έλεγχο γραμμής παραγωγής και της κατάστασης των παραγόμενων προϊόντων σε πραγματικό χρόνο [7].

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει ανάλυση όλων των επιμέρους συστημάτων τα οποία μπορούν να υλοποιήσουν ένα κόμβο για WSN και συγκρίσεις μεταξύ τους. Θα αναλυθούν η σχεδίαση, η υλοποίηση και τα πειράματα που έγιναν στο πρωτότυπο που αναπτύχθηκε, καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα αυτών.





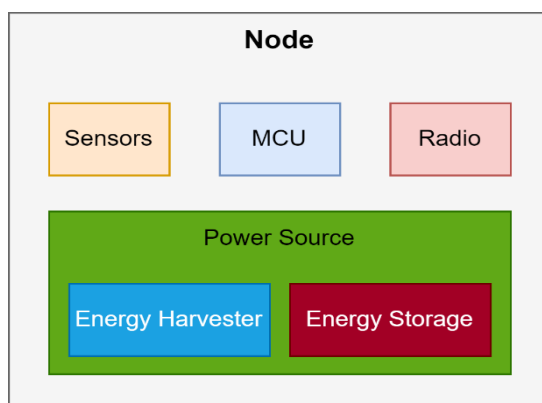
# 2.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

---

Για τη κατασκευή ενός κόμβου που θα εξυπηρετήσει το σκοπό της εργασίας είναι σημαντική η κατανόηση του συνολικά. Ένας κόμβος σε ένα WSN αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα το οποίο είναι ικανό να παίρνει μετρήσεις από τους αισθητήρες, να τις επεξεργάζεται και να έχει επικοινωνία με τους υπόλοιπους κόμβους στο ασύρματο δίκτυο.

Στη προκειμένη περίπτωση έγινε υλοποίηση ενός κόμβου, που θα μπορεί να είναι πλατφόρμα ανάπτυξης για πολλές διαφορετικές εφαρμογές. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, έγινε μελέτη των βασικών υποσυστημάτων που χρειάζεται ο κόμβος ώστε να παρέχει πλήρη λειτουργικότητα στα απαραίτητα μέρη του.



*Σχήμα 2-1: Υποσυστήματα ενός κόμβου (Node).*

Τα διακριτά υποσυστήματα που θα αναλυθούν είναι οι αισθητήρες ως μεμονωμένες συσκευές, η παροχή ενέργειας, που διαχωρίζεται στην συγκομιδή και αποθήκευσή της, το σύστημα διαχείρισης και επεξεργασίας δεδομένων, το μέσο επικοινωνίας και η τοπολογία του δικτύου.

## **2.1. Σύστημα Συλλογής – Επεξεργασίας Δεδομένων**

Για να γίνει μια μέτρηση χρειάζονται ένας αισθητήρας και μια μονάδα η οποία θα επικοινωνεί μαζί του για να τον διαχειρίζεται και να συλλέγει δεδομένα. Τα τελευταία χρόνια βλέπουμε συστήματα όπου ο αισθητήρας έχει ενσωματωμένη μονάδα επεξεργασίας και αποτελούν μαζί ένα ολοκληρωμένο σύστημα. Τέτοιοι αισθητήρες ονομάζονται «έξυπνοι». Για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη ανάπτυξη ενός κόμβου θα πρέπει να μελετήσουμε καλά ποιοι αισθητήρες θα χρησιμοποιηθούν όπως και ποια μονάδα επεξεργασίας είναι η κατάλληλη.

### **2.1.1. Αισθητήρας**

Η βελτίωση του αισθητήρα ως συσκευή παίζει καθοριστικό ρόλο. Κυρίως η μείωση του μεγέθους, η πτώση του κόστους και η απαιτούμενη ενέργεια λειτουργίας είναι οι τομείς που φέρουν μεγαλύτερη ανάπτυξη, χωρίς παράλληλα να υποβαθμίζεται ότι η βελτίωση στη κλίμακα κατασκευής του αισθητήρα φέρει μεγάλες βελτιώσεις στην ταχύτητα και στην ακρίβεια της μέτρησης.

Μεγάλη μερίδα σύγχρονων αισθητήρων βασίζεται στην τεχνολογία των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (Microelectromechanical Systems – MEMS). Τα MEMS συνδυάζουν ηλεκτρονικά και μηχανικά μέρη στις τάξεις των μικρομέτρων κατασκευασμένα με διαδικασίες παρόμοιες των απλών κυκλωμάτων. Βασικός παράγοντας για την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων ήταν η εφεύρεση του τρανζίστορ MOS το 1959 [15], ενώ οι πρώτες γενιές αισθητήρων τύπου MEMS αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 70' [16]. Οι MEMS αισθητήρες έχουν άμεση εξάρτηση από την ανάπτυξη στην τεχνολογία των ημιαγωγών, συνεπώς χρειάστηκαν αρκετά χρόνια για να γίνουν αποτελεσματικοί και αξιόπιστοι. Η πορεία ανάπτυξης αυτή μπορεί να μελετηθεί από τους τεχνολογικούς κόμβους των ημιαγωγών, οι οποίοι μας παρουσιάζουν τη σταδιακή πρόοδο στην ελαχιστοποίηση του μεγέθους των τρανζίστορ MOS. Η ανάπτυξη αυτή είναι και ανάλογη της προόδου των συστημάτων αισθητήρων.

Ο νόμος του Moore [17] περιγράφει την πρόοδο στους τεχνολογικούς κόμβους, υποστηρίζοντας ότι περίπου κάθε 2 χρόνια παρατηρείται διπλασιασμός του αριθμού

τρανζίστορ ή υποδιπλασιασμός του χώρου που απαιτείται για τον ίδιο αριθμό τρανζίστορ. Η επίτευξη αυτού του στόχου απαιτεί μείωση δύο σημαντικών χαρακτηριστικών των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Το contacted poly pitch(CPP) ή gate pitch, που αφορά την ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο πυλών, και το minimum metal pitch (MMP), που αφορά την ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο αγωγών μετάλλου. Παλαιότερα, κάθε τεχνολογικός κόμβος χαρακτηριζόταν από τον συνδυασμό αυτών των δύο παραμέτρων. Ωστόσο, στη συνέχεια, αντιμετωπίστηκαν δυσκολίες στη μείωση αυτών των διαστάσεων, καθώς δεν ήταν δυνατό να υπάρξουν βελτιώσεις χωρίς την εμφάνιση προβλημάτων. Έτσι, οι τεχνολογικοί κόμβοι υιοθέτησαν καινοτόμες προσεγγίσεις στους τομείς της αρχιτεκτονικής και της τεχνολογίας των τρανζίστορ, διατηρώντας παράλληλα την ισχύ του νόμου του Moore.

### **2.1.2. Κεντρική Μονάδα Ελέγχου**

Η κεντρική μονάδα ελέγχου αποτελεί το σύνολο των κυκλωμάτων που ρόλο έχουν την διαχείριση του κόμβου. Αυτό συνεπάγεται με τον έλεγχο των κύριων διαδικασιών που γίνονται στον κόμβο, όπως είναι η λήψη μετρήσεων και η επεξεργασία τους.

Το σύστημα αυτό συνδέει όλα τα συστήματα του κόμβου με σκοπό την αρμονική συνεργασία τους. Ευθύνεται για τη λήψη των μετρήσεων από τους αισθητήρες, ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί συσκευές για εξοικονόμηση ενέργειας ή άλλους σκοπούς, επεξεργάζεται τα δεδομένα, αποφασίζει την κατάσταση του συστήματος (κατάσταση αποστολής ή λήψης δεδομένων, αναστολής λειτουργίας συστήματος ή επιμέρους στοιχείων) κ.α.

Στην πάροδο των τελευταίων κυρίων χρόνων έχουν αναπτυχθεί πολλές υλοποιήσεις τέτοιων συστημάτων όπου η καθεμία συνεισφέρει σε διαφορετικές περιπτώσεις. Οι υλοποιήσεις χωρίζονται σε δύο τύπους, αυτούς που περιέχουν όλα τα συστήματα σε ένα τσιπ και αυτούς που χρειάζονται συνδυασμό στοιχείων για την πλήρη λειτουργικότητα. Σε υλοποιήσεις μικρού μεγέθους και περιορισμένης ενέργειας ο μικροελεγκτής (Microcontroller Unit – MCU) είναι ο δημοφιλέστερος τύπος. Παρόλα αυτά υπάρχουν τύποι που εξυπηρετούν διαφορετικά ζητούμενα (π.χ. μεγαλύτερη επεξεργαστική ισχύ), όπως είναι οι FPGA, DSP, ASIC, Arm processor, Risc Processor και τα SoCs.

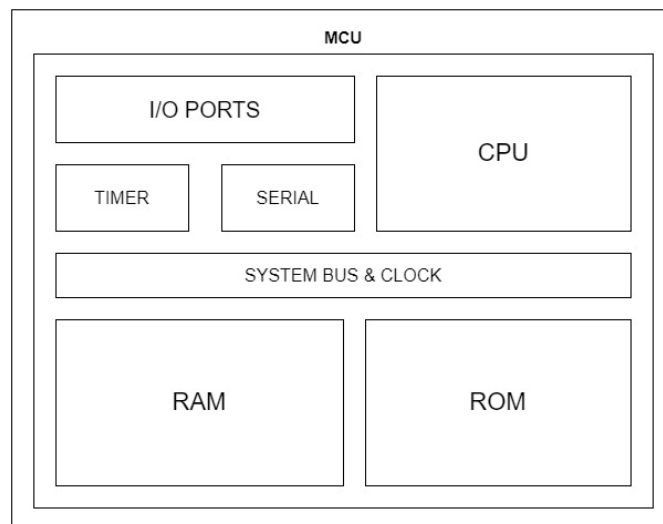
#### **Microcontroller Unit**

Ο μικροελεγκτής είναι ένα ενσωματωμένο κύκλωμα περιορισμένων δυνατοτήτων. Μπορεί να θεωρηθεί ως ένας μικρός ολοκληρωμένος υπολογιστής καθώς περιέχει όλα τα βασικά στοιχεία του και επιπλέον τη δυνατότητα να συνδέεται με άλλα κυκλώματα.

Πολλές από τις συσκευές που χρησιμοποιούμε στη καθημερινότητά μας ελέγχονται μονάχα από ένα MCU, όπως είναι οι ηλεκτρικές συσκευές και ηλεκτρικά εργαλεία.

Ο ρόλος ενός MCU είναι να λύνει προβλήματα με μικρό κόστος. Για να το κάνει αυτό δεν αρκείται μόνο σε μία CPU, μνήμη και το πρόγραμμα, έχει επιπλέον ενσωματωμένα στοιχεία που του δίνουν πρόσβαση και έλεγχο σε εξωτερικές συσκευές [18]. Αυτά τα στοιχεία ονομάζονται περιφερειακά κυκλώματα. Επιγραμματικά, ο MCU έχει τα εξής βασικά στοιχεία:

- CPU, κεντρική μονάδα επεξεργασίας.
- I/O θύρες, δηλαδή pins τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι ή έξοδοι.
- Timer, που χρησιμοποιείται για μέτρηση του χρόνου είτε για την εκτέλεση χρονικών συμβάντων.
- Serial θύρα, που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά δεδομένων σε σειριακή μορφή. Είναι χρήσιμη γιατί χρησιμοποιεί λιγότερα pin από τη παράλληλη σύνδεση.
- System clock, RAM και ROM.



*Σχήμα 2-2: Γενικό διάγραμμα ενός MCU.*

## 2.2. Σύστημα συγκομιδής ενέργειας (Energy Harvesting)

Για να γίνει ένας αισθητήρας ενεργειακά αυτόνομος πρέπει να μπορεί να συλλέγει ενέργεια απ' το περιβάλλον γύρω του. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται συγκομιδή ενέργειας (Energy Harvesting). Ο τομέας αυτός έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια και γίνεται όλο και πιο δημοφιλής σε εφαρμογές IoT. Παρόλο που η τεχνολογική πρόοδος έχει οδηγήσει σε κυκλώματα πολύ χαμηλής κατανάλωσης, συχνά εμφανίζεται

η ανάγκη ενεργειακής κάλυψης πολύπλοκων συστημάτων, που θα μπορούν να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής αλλά και την παροχή κατάλληλης ισχύος.

Τα συστήματα που εφαρμόζουν μεθόδους συγκομιδής ενέργειας μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες πολύ περισσότερων συστημάτων. Χρησιμοποιώντας τις μπορεί να κατασκευαστεί ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας, που θα παράγει περισσότερη ενέργεια από την καταναλισκόμενη, δίνοντας στον κόμβο επιπλέον διάρκεια ζωής και δυνατότητα υποστήριξης αισθητήρων υψηλής κατανάλωσης. Το περιβάλλον μας παρέχει πολλές πηγές ενέργειας που δίνουν ισχύ από μερικά  $\mu\text{W}$  έως και τάξεις των  $\text{mW}$ . Ο Πίνακας 2-1 προέρχεται από μελέτη σύγκρισης μεθόδων συγκομιδής ενέργειας για αισθητήρες [11].

*Πίνακας 2-1: Energy Harvesting Opportunities [11].*

Πηγή		Ισχύς/μονάδα εμβαδού
Ηλιακή ακτινοβολία	Εσωτερικός χώρος	$100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$
	Εξωτερικός χώρος	$100 \text{mW}/\text{cm}^2$
Δονήσεις/κινήσεις	Ανθρώπινη κίνηση – Hz	$4 \text{mW}/\text{cm}^2$
	Βιομηχανικές μηχανές - kHz	$800 \text{mW}/\text{cm}^2$
Θερμική ενέργεια	5 K διαφορά θερμοκρασίας	$60 \text{mW}/\text{cm}^2$
	10 K διαφορά θερμοκρασίας	$135 \text{mW}/\text{cm}^2$
Ραδιοσυχνότητες	Ελεύθερες Ραδιοσυχνότητες	$1 \text{mW}/\text{cm}^2$
	Ασύρματη επικοινωνία σε 2m απόσταση	$14 \text{mW}/\text{cm}^2$

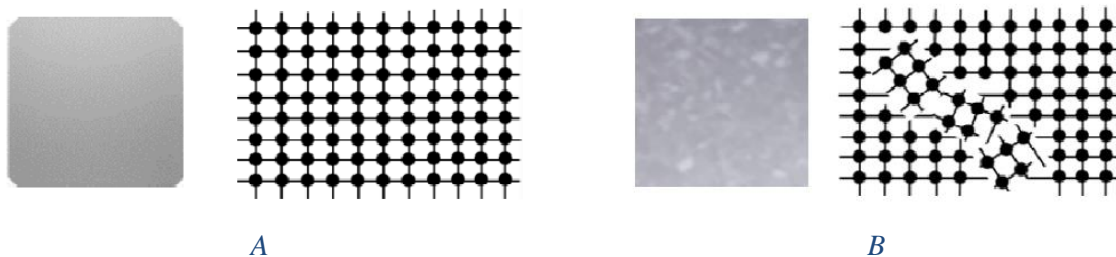
### 2.2.1. Φωτοβολταϊκά πάνελ – Ηλιακή Ενέργεια

Η ηλιακή ενέργεια συλλέγεται από φωτοβολταϊκά πάνελ (PVs). Τα PVs στηρίζουν τη λειτουργία τους στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή ακτινοβολία. Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι η δημιουργία κίνησης ηλεκτρονίων σε ένα υλικό κατά την διάρκεια έκθεσης του σε ακτινοβολία. Η ερμηνεία της κβαντικής φύσης του φωτός και η αλληλεπίδραση του με την ύλη από τον Albert Einstein συνέβαλλε στην εξήγηση αυτού του φαινομένου. Αναλυτικά, η ακτινοβολία αποτελείται από φωτόνια, κβάντα ενέργειας, τα οποία φέρουν ενέργεια  $E = hf$ , όπου  $h$  είναι η σταθερά του Planck και  $f$  είναι η συχνότητα της εκπέμπουσας ακτινοβολίας. Κάθε υλικό για να τελέσει κίνηση ηλεκτρονίου από φωτόνιο θα πρέπει το φωτόνιο να έχει ενέργεια  $E_\phi > E_0$ , συνεπώς και  $f_\phi > f_0$ , όπου  $f_0$  η οριακή συχνότητα ακτινοβολίας κάτω από την οποία δεν δύναται να αποσπαστεί κάποιο ηλεκτρόνιο..

Η κατασκευή των φωτοβολταϊκών στοιχείων γίνεται κυρίως από πυρίτιο και βασίζεται στη δημιουργία μιας p-n επαφής, που αποτελεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο. Για την

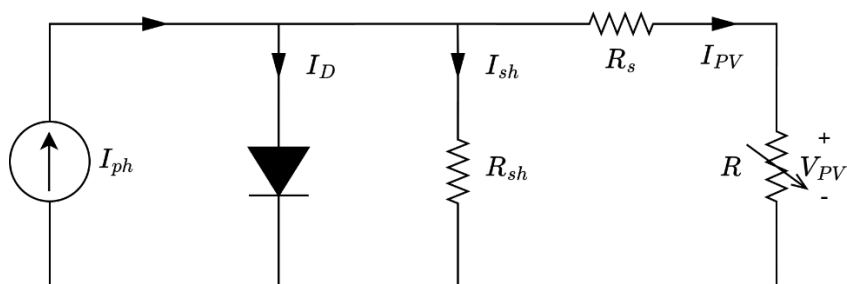
n-περιοχή χρησιμοποιούνται άτομα από υλικά με πέντε ηλεκτρόνια σθένους, ενώ για την p-περιοχή άτομα από υλικά με 3 ηλεκτρόνια σθένους. Κατά την επαφή των δύο υλικών τα ηλεκτρόνια έλκονται από την περιοχή n προς την p, αλληλοαναιρούνται τα φορτία και το σύστημα ισορροπεί έχοντας δημιουργήσει μια περιοχή απογύμνωσης. Μόλις η επαφή p-n δεχθεί ακτινοβολία δημιουργείται διαφορά δυναμικού καθώς τα ηλεκτρόνια αποσπώνται και έλκονται από την n-περιοχή, ενώ στην p-περιοχή δημιουργούνται οπές. Έτσι, αν συνδέσουμε ένα φορτίο μεταξύ των περιοχών τα ηλεκτρόνια θα κινηθούν από την n προς την p περιοχή δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα.

Τα PVs χωρίζονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το τρόπο επεξεργασίας του πυριτίου στην κατασκευή τους, τα μονοκρυσταλλικά και τα πολυκρυσταλλικά. Τα πολυκρυσταλλικά κατασκευάζονται από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, είναι πιο εύκολα στην κατασκευή και χρησιμοποιούνται περισσότερο λόγω της καλύτερης σχέσης απόδοσης-τιμής που έχουν. Αντίστοιχα τα μονοκρυσταλλικά κατασκευάζονται από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο και χρειάζονται περισσότερη επεξεργασία στην κατασκευή πράγμα που αυξάνει το κόστος αλλά και την απόδοση. Ενδεικτικά η απόδοση ενός πολυκρυσταλλικού PV είναι από 13-14,5%, ενώ ενός μονοκρυσταλλικού 14,5-21% [19].



Σχήμα 2-3: Μονοκρυσταλλικό (A) και Πολυκρυσταλλικό (B) PV [20].

Η παραγωγή ισχύος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορεί να υπολογιστεί με βάση το ισοδύναμο του κύκλωμα, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-4.



Σχήμα 2-4: Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου.

Κατά την πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο παράγεται ρεύμα  $I_{ph}$  το οποίο είναι ανάλογο του πλήθους των φωτονίων. Μόλις

συνδέσουμε το φορτίο  $R$ , το ρεύμα  $I_{ph}$  διαμοιράζεται στην δίοδο  $D$ ,  $R_{sh}$  και στο φορτίο  $R$ . Επομένως το παραγόμενο ρεύμα του PV με βάση το νόμο του Kirchhoff θα είναι:

$$I_{PV} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (2.1)$$

όπου το ρεύμα της διόδου  $I_D$  και το ρεύμα  $I_{sh}$  είναι:

$$I_D = I_0 * e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \quad (2.2)$$

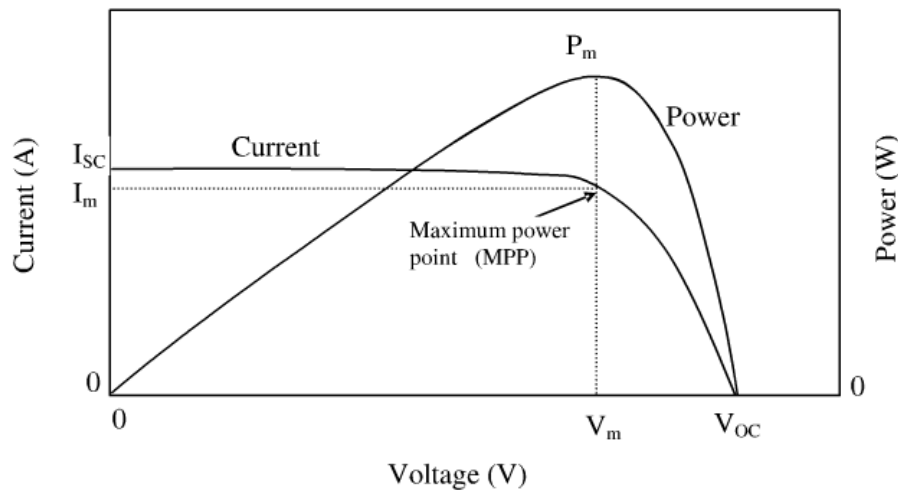
με  $I_0$  το αντίστροφο ρεύμα κορεσμού και  $n$  τον παράγοντα ιδανικότητας της διόδου. Επίσης  $V_T = kT$ , με  $k$  την σταθερά του Boltzmann και  $T$  την απόλυτη θερμοκρασία. Αντίστοιχα:

$$I_{sh} = \frac{V_D}{R_{sh}} = \frac{I_{PV}R_s + V_{PV}}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

Χρησιμοποιώντας τις (2.2) και (2.3) στην (2.1) παίρνουμε:

$$I_{PV} = I_{ph} - \left( I_0 * e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right) - \frac{I_{PV}R_s + V_{PV}}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

Χρησιμοποιώντας τον παραπάνω τύπο στην εξίσωση της παραγόμενης ισχύος  $P_{PV} = V_{PV}I_{PV}$  εξάγονται οι παρακάτω χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης και ισχύος-τάσης (Σχήμα 2-5).



Σχήμα 2-5: Χαρακτηριστικές καμπύλες PV [21].

Τα PVs είναι μια από τις σημαντικότερες πηγές ανανεώσιμης ενέργειας και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Επιπροσθέτως, η εφαρμογή τους στον τομέα της συγκομιδής ενέργειας για αισθητήρες σε εφαρμογές μικρής κλίμακας είναι αξιοσημείωτη, λόγω της μεγάλης απόδοσης ενέργειας σε συνάρτηση με το μέγεθός τους.

### 2.2.2. Θερμοηλεκτρική Γεννήτρια

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια (ThermoElectric Generator - TEG) παράγει ενέργεια εκμεταλλευόμενη το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο, δηλαδή παράγει ενέργεια όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στις δύο πλευρές της. Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο συμπεριλαμβάνει το φαινόμενο Seebeck και το φαινόμενο Peltier.

Το φαινόμενο Seebeck εκφράζεται από την ηλεκτροκινητική δύναμη (electromotive force – emf) που δημιουργείται στα δύο άκρα ενός αγωγικού υλικού όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ τους. Η δύναμη αυτή προκαλεί την κίνηση ηλεκτρονίων και συνεπώς τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος. Η emf εκφράζεται από τον τύπο:

$$E_{emf} = -S\Delta T \quad (2.5)$$

όπου  $S$  είναι ο συντελεστής Seebeck και  $\Delta T$  είναι η διαφορά θερμοκρασίας. Η θέρμανση του υλικού προκαλεί αύξηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων και την κίνησή τους προς την κρύα πλευρά. Από την κίνηση αυτή προκύπτει μια διαφορά δυναμικού με την θερμή πλευρά να φορτίζεται θετικά και την ψυχρή αρνητικά.

Στο φαινόμενο του Seebeck βασίζονται και τα θερμοζεύγη τα οποία χρησιμοποιούνται για μέτρηση διαφοράς θερμοκρασίας ή για παραγωγή ενέργειας μέσω αυτής. Η λειτουργία τους βασίζεται στην σύνδεση δύο αγωγικών υλικών στο ένα άκρο. Η θερμοκρασία στη σύνδεση αυτή συμβολίζεται με  $T_H$  ενώ η θερμοκρασία στα δύο ελεύθερα άκρα με  $T_C$  ή θερμοκρασία αναφοράς. Για να μετρηθεί η θερμοκρασία  $T_H$  χρειάζεται να γνωρίζουμε την θερμοκρασία αναφοράς και τον συντελεστή Seebeck μεταξύ των δύο υλικών. Με αυτά τα δεδομένα η παραγόμενη διαφορά δυναμικού μας υποδηλώνει τη θερμοκρασία. Εκτός από τη μέτρηση θερμοκρασίας μπορούμε να παράγουμε και ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση του θερμοζεύγους. Η ενέργεια αυτή όμως είναι πολύ μικρή και χρειάζεται η σύνδεση πολλών θερμοζευγών σε σειρά για την παραγωγή αρκετής ενέργειας προς χρήση, δημιουργώντας την θερμοηλεκτρική γεννήτρια [22].

Για να υπάρχει αυξημένη απόδοση της γεννήτριας πρέπει το θερμοηλεκτρικό υλικό της να έχει:

- Μεγάλη σταθερά Seebeck, η οποία αναλογεί σε αύξηση της παραγόμενης τάσης σε μια δεδομένη διαφορά θερμοκρασίας.
- Χαμηλή ηλεκτρική αντίσταση.
- Υψηλή θερμική αντίσταση, για να περιορίζεται η μεταφορά θερμότητας από ζεστή προς τη κρύα πλευρά, ώστε να διατηρείται η διάφορά θερμοκρασίας.



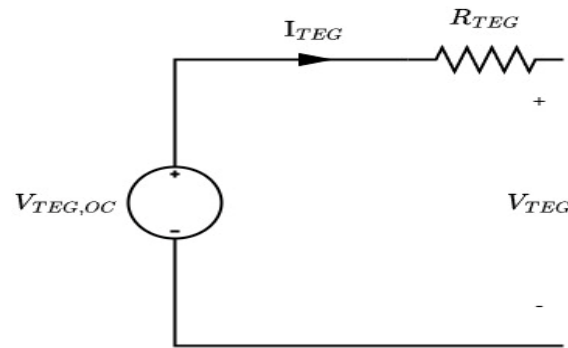
Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά εμπεριέχονται στην σχέση της θερμοηλεκτρικής μετρικής  $zT$ , η οποία χρησιμοποιείται για τον χαρακτηρισμό της απόδοσης ενός θερμοηλεκτρικού υλικού:

$$zT = \frac{S^2 \sigma T}{k} \quad (2.6)$$

όπου  $\sigma$  είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα και  $k$  είναι η θερμική αγωγιμότητα.

Εκτός από την απόδοση του θερμοηλεκτρικού υλικού, εξίσου σημαντικό ρόλο παίζουν και οι επαφές της TEG με τις θερμές και ψυχρές επιφάνειες. Για την διευκόλυνση του έργου αυτού χρησιμοποιούνται ψύκτρες, καθώς αυξάνουν την ενεργή επιφάνεια της γεννήτριας. Η TEG μπορεί να λειτουργήσει και αντίστροφα ως διάταξη δημιουργίας διαφοράς θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει όταν ασκήσουμε τάση στα άκρα της και αυτή διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται Peltier και χρησιμοποιείται για την κατασκευή μικρών ψυγείων.

Το ηλεκτρικό ισοδύναμο μιας θερμοηλεκτρικής γεννήτριας φαίνεται στο Σχήμα 2-6.



Σχήμα 2-6: Ισοδύναμο κύκλωμα ενός TEG.

Η  $V_{TEG,OC}$  αποτελεί την τάση ανοιχτοκύκλωσης και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$V_{TEG,OC} = S \Delta T \quad (2.7)$$

### 2.2.3. Πιεζοηλεκτρική Γεννήτρια

Το φαινόμενο του πιεζοηλεκτρισμού αφορά τη δημιουργία διαφοράς δυναμικού σε ένα υλικό του ασκείται μηχανική πίεση και παραμορφώνεται. Η λειτουργία αυτή του υλικού συμβαίνει και αντίστροφα, δηλαδή το υλικό παραμορφώνεται κατά την εφαρμογή τάσης σε αυτό. Το φαινόμενο αναπτύσσεται λόγω διπολικών ροπών που υπάρχουν στους κρυστάλλους ενός υλικού. Το υλικό περιέχει ροπές προς διάφορες κατευθύνσεις. Όταν δεν δέχεται καμία πίεση αυτές ισορροπούν και δεν υπάρχει ηλεκτρική πόλωση. Με την εφαρμογή πίεσης ή παραμόρφωσης η συνολική διπολική ροπή αλλάζει με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ηλεκτρικής τάσης. Η πολικότητα εξαρτάται

από τη δομή του κρυστάλλου, την κατεύθυνση των διπολικών ροπών και το μέγεθος της ασκούμενης δύναμης.

Οι πιεζοηλεκτρικές γεννήτριες είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες σε εφαρμογές με αισθητήρες καθώς έχουν απλή και αξιόπιστη δομή. Η χρησιμότητά τους είναι σε περιβάλλοντα όπου λαμβάνουν χώρο δονήσεις και ταλαντώσεις προκαλώντας μηχανικές παραμορφώσεις στο κρύσταλλο της γεννήτριας, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη ηλεκτρικού ρεύματος. Η παραγόμενη ενέργεια δεν είναι μεγάλη, παρόλα αυτά είναι αρκετή για να καλύψει αρκετά συστήματα αισθητήρων. Πολύ συχνή εφαρμογή της βρίσκουμε σε υποστηρίγματα, όπου, με το ένα στοιχείο σταθερό και το άλλο στοιχείο προσδεμένο σε ένα ταλαντευόμενο υποστήριγμα, παράγεται ενέργεια για τους αισθητήρες.

#### 2.2.4. Ηλεκτρομαγνητική Γεννήτρια

Μια ηλεκτρομαγνητική γεννήτρια εκμεταλλεύεται την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σύμφωνα με το νόμο του Faraday, η μεταβολή της ηλεκτρομαγνητικής ροής στην επιφάνεια ενός αγωγού συνεπάγεται στην ανάπτυξη διαφοράς δυναμικού στα άκρα του. Η πολικότητα της τάσης αυτής εξαρτάται από την φορά της ηλεκτρομαγνητικής ροής:

$$E = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.8)$$

όπου  $E$  είναι η επαγόμενη ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ),  $N$  είναι το πλήθος των τυλιγμάτων του αγωγού και  $\Phi_B$  είναι η μαγνητική ροή που ορίζεται ως:

$$\Phi_B = \int_A \vec{B} d\vec{A} \quad (2.9)$$

Η οποία εκφράζει τον αριθμό των μαγνητικών γραμμών  $B$  που διαπερνούν την επιφάνεια  $A$ .

Οι ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες αξιοποιούν την κινητική ενέργεια και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρική. Πιο συγκεκριμένα γίνεται εγκατάστασή τους σε περιστρεφόμενους άξονες, τους οποίους και αξιοποιούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλεκτρομαγνητικές γεννήτριες διαφέρουν ανάλογα την προέλευση της κινητικής ενέργειας. Ενδεικτικές πηγές είναι ο άνεμος (αιολική ενέργεια) τον οποίο χρησιμοποιούν οι ανεμογεννήτριες, η ροή υγρού (π.χ. νερού) σε ποτάμια, φράγματα, για την οποία χρησιμοποιείται υδροηλεκτρική γεννήτρια αλλά και η κίνηση που προκαλείται στον στρόφαλο ενός κινητήρα, π.χ. γεννήτριες πετρελαίου. Περιστροφή επίσης μπορεί να προκληθεί και από συνδυασμό πηγών ενέργειας, όπως συμβαίνει στα

εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πολλά από τα οποία χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα για την θέρμανση νερού και εκμεταλλεύονται τον παραγόμενο ατμό για την στρέψη στροβίλου ή τουρμπίνας.

Σε συστήματα energy harvesting μικρής κλίμακας γίνεται χρήση ηλεκτρομαγνητικών γεννητριών, κυρίως αξιοποιώντας την ενέργεια από ταλαντώσεις και δονήσεις. Επιπλέον μπορεί να χρησιμοποιηθούν και στην περίπτωση χρήσης μικρής ανεμογεννήτριας. Παρόλα αυτά υπάρχει περιορισμός στην απόδοση σε πολύ μικρές εφαρμογές όπως είναι για αισθητήρες τύπου MEMS καθώς η παραγόμενη ενέργεια σε τόσο μικρά πηνία δεν είναι αρκετή.

### **2.2.5. Γεννήτρια Ραδιοσυχνότητων - RF generator**

Η συγκεκριμένη γεννήτρια είναι φτιαγμένη να συλλέγει ενέργεια από τα ραδιοκύματα στο περιβάλλον. Για τη λειτουργία αυτής της γεννήτριας χρειάζεται μια κεραία και ένας ανορθωτής που μετατρέπει το εναλλασσόμενο σε συνεχές ρεύμα. Επιπλέον χρειάζεται και ένα κύκλωμα impedance matching για να μειωθούν οι απώλειες στην συγκομιδή ενέργειας.

Αφού η κεραία κάνει λήψη ραδιοκυμάτων, μέσω του κυκλώματος impedance matching, γίνεται μέγιστη μεταφορά ισχύος στον ανορθωτή και έπειτα στο φορτίο. Η παραγόμενη ενέργεια είναι αισθητά χαμηλότερη από τις άλλες μορφές πράγμα που κάνει τη χρήση της γεννήτριας πολύ εξειδικευμένη. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται σε συστήματα που δεν έχουν καθόλου συλλέκτη και λειτουργούν όταν κάποια πηγή RF βρίσκεται κοντά στον αισθητήρα, όπως είναι το σύστημα που αναπτύχθηκε στην εργασία [23]. Επιπλέον, η δυνατότητα μη χρήσης συλλέκτη βοηθά στην ανάπτυξη βιοδιασπώμενων αισθητήρων με πολλαπλά οφέλη ως προς τη προστασία του περιβάλλοντος, όπως για παράδειγμα η ανάπτυξη του Degradable Intelligent Radio Transmitting Sensor (DIRTS) [24], στο οποίο χρησιμοποιείται drone για την συλλογή των μετρήσεων.

## **2.3. Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας**

Η τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας κατέχει ένα πολύ σημαντικό ρόλο στα συστήματα αισθητήρων αφού παρέχουν την αποθηκευμένη τους ενέργεια στο σύστημα όποτε αυτή ζητείται. Ακόμη σημαντικότερο ρόλο έχουν σε υλοποιήσεις που περιέχουν και σύστημα συγκομιδής ενέργειας καθώς θα πρέπει να γίνει προσεκτική επιλογή του στοιχείου αποθήκευσης και της τεχνολογίας φόρτισής του. Οι

επαναφορτιζόμενες μπαταρίες είναι η συνηθέστερη επιλογή για τέτοιες υλοποιήσεις όχι όμως η μοναδική καθώς οι υπερπυκνωτές (SuperCapacitors) είναι χρήσιμοι σε πολλές άλλες.

### **2.3.1. Επαναφορτιζόμενη Μπαταρία**

Υπάρχουν πολλών ειδών μπαταρίες. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εφαρμογής την ταχύτητα φόρτισης και εκφόρτισης, τη χωρητικότητα, τους κύκλους ζωής, το μέγεθος, το σχήμα και το βάρος. Η χρήση τους έγκειται στην παροχή ενέργειας στο σύστημα αλλά και στην αποθήκευση της περισσευούμενης από τους energy harvesters. Σημαντικά χαρακτηριστικά στοιχεία για τις μπαταρίες είναι η τεχνολογία αποθήκευσης, η εσωτερική αντίσταση, η αυτοεκφόρτιση, το βάθος εκφόρτισης (Depth of Discharge – DoD) και η αντοχή στην υπερφόρτιση. Είναι επομένως αναγκαίο, πέραν των βασικών στοιχείων, να προσδιορίζονται και οι συνθήκες στις οποίες θα λάβει χώρα η εφαρμογή, π.χ. κλιματικές συνθήκες.

Σύμφωνα με την εργασία [25] οι περισσότερες μπαταρίες εκτός από αυτές του λιθίου, δεν έχουν καλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες λόγω της αύξησης της εσωτερικής τους αντίστασης. Το αντίθετο ισχύει για υψηλές θερμοκρασίες όπου ναι μεν έχουν αυξημένη απόδοση αλλά με ρίσκο να πάθουν σοβαρές ζημιές και να σταματήσει η λειτουργία τους. Βάσει αυτών υπολογίζεται ότι η μέση απόδοση μιας μπαταρίας κυμαίνεται μεταξύ 60% και 80% ανάλογα με τον κύκλο φόρτισης και την ηλεκτροχημεία της [26].

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά απόδοσης μιας μπαταρίας είναι η ενεργειακή πυκνότητα, η χωρητικότητα και ο χρόνος ζωής. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι το μέγιστο όριο αποθηκευμένης ενέργειας σε σχέση με το βάρος (Wh/Kg), η χωρητικότητα αφορά την μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει ένα κελί σε πλήρη φόρτιση και ο χρόνος ζωής μετρά σε πόσους κύκλους φόρτισης/εκφόρτωσης η μπαταρία θα αρχίσει να αποκτά σοβαρά προβλήματα. Καθ' όλη την διάρκεια χρήσης της μπαταρίας η χωρητικότητά της μειώνεται καθώς τα ηλεκτρόδια της υπόκεινται σε οξείδωση. Επιπλέον, η ένταση και το πλήθος της φόρτισης και εκφόρτισης επιδρούν άμεσα στο χρόνο ζωής της μπαταρίας. Εκτός των παραπάνω η θερμοκρασία παίζει αρκετά σημαντικό ρόλο στην διάρκεια ζωής. Τα χαρακτηριστικά των μπαταριών μετρούνται σε θερμοκρασία 20°C καθώς εκεί βρίσκονται κοντά στα ονομαστικά χαρακτηριστικά τους. Οποιαδήποτε χρήση πέραν αυτής της θερμοκρασίας επηρεάζει τις μπαταρίες είτε πολύ είτε λίγο όπως αναφέρεται στην εργασία [27].

Πίνακας 2-2: Βασικά χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων μπαταριών [25].

Τύπος	Τάση λειτουργίας (V)	Χωρητικότητα (Ah)	Εύρος θερμοκρασίας (°C)	Κύκλοι φόρτισης	Ειδική ενέργεια (Wh/Kg)
Lead-Acid	2	1,3	-20 – 60	500-1.000	30-50
MnO <sub>2</sub> Li	3	0,03-5	-20 – 60	1.000-2.000	280
Li poly-carbon	3	0,025-5	-20 – 60	-	100-250
LiSOCl <sub>2</sub>	3,6	0,025-40	-40 – 85	-	350
LiO <sub>2</sub> S	3	0,025-40	-60 – 85	-	500-700
NiCd	1,2	1,1	-40 – 70	10.000-20.000	50-60
NiMH	1,2	2,5	-20 – 40	1.000-20.000	60-70
Li-Ion	3,6	0,74	-30 – 45	1.000-100.000	75-200
MnO <sub>2</sub>	1,65	0,617	-20 – 60	-	300-610

### 2.3.2. Υπερπυκνωτές (SuperCapacitors)

Οι Supercapacitors χαρακτηρίζονται από αρκετά υψηλότερη παροχή ισχύος σε σχέση με τις μπαταρίες και τους απλούς πυκνωτές. Υπάρχουν δύο (2) είδη, οι electrochemical double layer capacitors (EDLCs) και οι ψευδοπυκνωτές (pseudocapacitors). Η φόρτιση των ELDCs γίνεται μεταξύ ηλεκτροδίων μεγάλης επιφάνειας εκατέρωθεν ενός λεπτού ηλεκτρολυτικού διηλεκτρικού, το οποίο προσδίδει και τον περιορισμό στην τάση λειτουργίας τους. Παρόλο που οι ψευδοπυκνωτές παρέχουν λιγότερη ισχύ από τους ELDCs, έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα και ενεργειακή πυκνότητα [28].

Οι υπερπυκνωτές έχουν πλεονεκτήματα έναντι των μπαταριών:

- Αρκετά μεγάλο πλήθος φορτίσεων/εκφορτώσεων χωρίς να χάνουν αισθητά την απόδοσή τους, 500.000 έως και 1.000.000 κύκλους.
- Παρέχουν μεγάλη απόδοση σε μεγάλα ρεύματα φόρτισης και εκφόρτισης.
- Αρκετά μεγάλη αντοχή σε θερμοκρασίες -40°C έως 65°C.

Παρόλα αυτά τα θετικά συγκριτικά με τις μπαταρίες, η αυτό-εκφόρτιση αποτελεί μεγάλο περιορισμό για τη χρήση τους, καθώς ο υπερπυκνωτής χάνει αποθηκευμένη ενέργεια ακόμα και αν δεν καταναλώνεται σε κάποιο φορτίο. Επομένως μειώνεται

δραστικά ο χρόνος ζωής του συνδεδεμένου συστήματος, πράγμα που μπορεί να αντισταθμιστεί λόγω της δυνατότητας πολύ γρήγορης φόρτισής του.

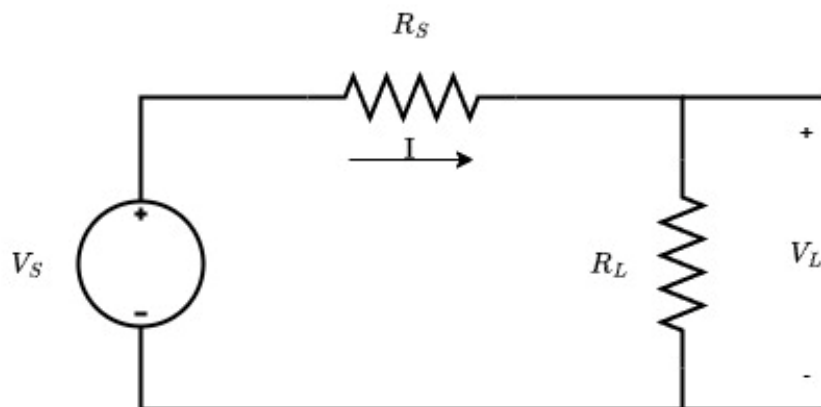
*Πίνακας 2-3: Βασικά χαρακτηριστικά διαφόρων τύπων Supercapacitor [25].*

Type	Life Cycle	Specific Energy (Wh/Kg)	Temp. Range (°C)	Cell voltage
Maxwell PC10	500.000	1,4	-40 - 70	2,5
Maxwell BCAP0350	500.000	5,1	-40 - 70	2,5
Green-cap EDLC	>100.000	1,47	-40 – 60	2,7
EDLC SC	1.000.000	3-5	-40 – 65	2,7
Pseudo SC	100.000	10	-40 – 65	2,3-2,8
Hybrid SC	500.000	180	-40 - 65	2,3-2,8

## 2.4. Θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος

Σε εφαρμογές Energy Harvesting (EH) για αισθητήρες, λόγω του μικρού μεγέθους του κόμβου, η παραγωγή ενέργειας είναι περιορισμένη. Επιπλέον, δεν υπάρχει τρόπος για ακριβή πρόβλεψη της διαθέσιμης περιβαλλοντικής ενέργειας. Ένας κόμβος με σύστημα EH απαιτείται να συλλέγει την μέγιστη δυνατή ενέργεια κάθε στιγμή που αυτή είναι διαθέσιμη για να την παρέχει στο σύστημα απευθείας ή να την αποθηκεύει για μελλοντική χρήση.

Το θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος ορίζει ότι για να έχουμε μέγιστη έξοδο από μια πηγή πρέπει η εσωτερική σύνθετη αντίσταση της πηγής να ισούται με την σύνθετη αντίσταση του φορτίου που είναι συνδεδεμένη.



*Σχήμα 2-7: Απλοποιημένο μοντέλο πηγής (Source) – φορτίου (Load).*

Από το νόμο του Ohm το παραγόμενο ρεύμα  $I$  θα ισούται με:

$$I = \frac{V_S}{R_S + R_L} \quad (2.10)$$

Η ισχύς στο φορτίο υπολογίζεται ως εξής:

$$P_L = V_L I = I^2 R_L = \left( \frac{V_S}{R_S + R_L} \right)^2 R_L = \frac{V_S^2}{\frac{R_S^2}{R_L} + 2R_S + R_L} \quad (2.11)$$

Θεωρώντας την τάση  $V_S$  και την αντίσταση  $R_S$  της πηγής σταθερές, για να μεγιστοποιηθεί η ισχύς στο φορτίο θα πρέπει ο παρονομαστής της σχέσης (2.11) να ελαχιστοποιηθεί ως εξής:

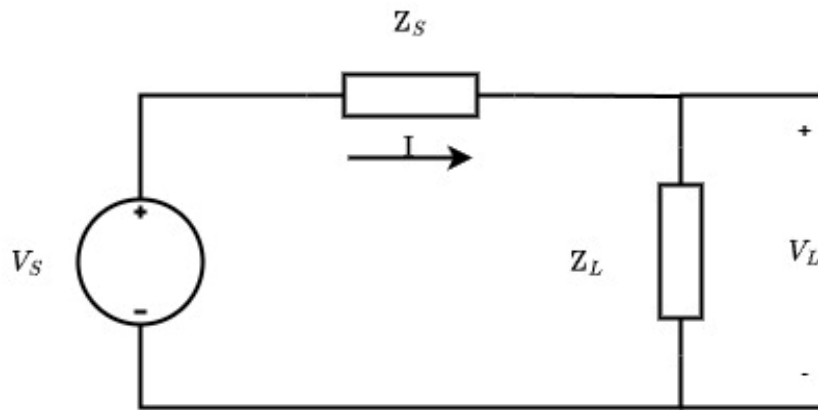
$$\frac{d}{dR_L} \left( \frac{R_S^2}{R_L} + 2R_S + R_L \right) = -R_S^2/R_L^2 + 1 \quad (2.12)$$

Για την εύρεση του μεγίστου πρέπει να δούμε που μηδενίζεται η (2.12):

$$R_S^2/R_L^2 = 1 \Rightarrow R_L = R_S \quad (2.13)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι για να μεγιστοποιηθεί το φορτίο πρέπει η αντίσταση της πηγής να ισούται με την αντίσταση του φορτίου.

Στα πραγματικά συστήματα όμως δεν έχουμε μόνο ωμικά φορτία αλλά σύνθετα, με επαγωγικές και χωρητικές ιδιότητες. Κατ' επέκταση πρέπει να μελετηθεί το ίδιο κύκλωμα αντικαθιστώντας τις ωμικές αντιστάσεις με σύνθετες.



Σχήμα 2-8: Μοντέλο πηγής-φορτίου με σύνθετες αντιστάσεις.

Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα θα είναι εναλλασσόμενο με μέτρο:

$$|I| = \frac{|V_S|}{|Z_S + Z_L|} \quad (2.14)$$

Η παραγόμενη ισχύς στο φορτίο θα είναι:

$$P_L = I_{rms}^2 R_L = \frac{1}{2} |I|^2 R_L = \frac{1}{2} \left( \frac{|V_S|}{|Z_S + Z_L|} \right)^2 R_L \quad (2.15)$$

$$\Rightarrow P_L = \frac{1}{2} \frac{|V_S|^2 R_L}{(R_S + R_L)^2 + (X_S + X_L)^2}$$

Για οποιεσδήποτε τιμές των  $R_L$  και  $R_S$  παρατηρούμε ότι η σχέση (2.15) μεγιστοποιείται όταν ο παρονομαστής λάβει την ελάχιστη τιμή. Έχοντας υπόψη πως η  $R_L$  παίρνει μόνο θετικές τιμές, η σχέση ελαχιστοποιείται όταν:

$$\min\{(X_S + X_L)^2\} \text{ δηλαδή } X_S + X_L = 0 \Rightarrow X_S = -X_L \quad (2.16)$$

Η (2.15) με βάση την (2.16) γίνεται:

$$P_L = \frac{1}{2} \frac{|V_S|^2 R_L}{(R_S + R_L)^2} \quad (2.17)$$

Η εξίσωση αυτή επιλύθηκε παραπάνω στην (2.13). Για να έχουμε μέγιστη ισχύ στο φορτίο πρέπει να ισχύουν ταυτόχρονα οι σχέσεις (2.13) και (2.17). Έχοντας υπόψη ότι  $Z_S = R_S + jX_S$  και  $Z_L = R_L + jX_L$  καταλήγουμε ότι η συνθήκη μεγιστοποίησης είναι:

$$Z_L = \overline{Z_S} \quad (2.18)$$

Η συνθήκη (2.18) μας δείχνει ότι η σύνθετη αντίσταση της πηγής με αυτή του φορτίου πρέπει να είναι συζυγής για να επιτευχθεί η μεγιστοποίηση της μεταφοράς ισχύος. Η συνθήκη αυτή ονομάζεται *impedance matching* και όταν επιτυγχάνεται το κύκλωμα μας βρίσκεται στο σημείο μέγιστης ισχύος – Maximum Power Point (MPP).

## 2.5. Μετατροπείς DC-DC

Οι DC-DC μετατροπέας είναι ηλεκτρονικό κύκλωμα που μετατρέπει μια DC τάση σε διαφορετική είτε μικρότερη είτε μεγαλύτερη. Η είσοδος είναι συνδεδεμένη σε πηγή ενώ η έξοδος του σε φορτίο. Η λειτουργία του βασίζεται στον έλεγχο ενός διακόπτη, που ανάλογα τη θέση του, ανοικτός ή κλειστός, αποθηκεύει ενέργεια ή την παρέχει στο φορτίο. Η αποθήκευση της ενέργειας αυτής γίνεται από πυκνωτές και πηνία. Ο διακόπτης είναι συνήθως ένα transistor MOSFET, που ελέγχεται από ένα PWM σήμα που ορίζει την τάση εξόδου ελέγχοντας το Duty Cycle.

Η χρήση των μετατροπέων έχει γίνει ο κύριος τρόπος τροφοδοσίας ηλεκτρονικών συσκευών στις μέρες μας. Μπορούν να παρέχουν μεγάλη πληθώρα τάσεων εξόδου από μια δεδομένη τάση εισόδου, ενώ μπορούν να εξασφαλίσουν σταθερή τάση σε ένα φορτίο ακόμα και αν αλλάξει η τάση εισόδου. Με άλλα λόγια ένας τέτοιος μετατροπέας μπορεί να ελέγχει την ισχύ εξόδου μιας πηγής. Στην καθημερινότητα τον συναντάμε σχεδόν παντού όπου υπάρχει φόρτιση μιας επαναφορτιζόμενης συσκευής, στην τροφοδοσία κινητήρων, στις συνδέσεις φωτοβολταϊκών κ.α. Η διακοπτική τεχνική που χρησιμοποιεί δίνει πολύ μεγάλο βαθμό απόδοσης, μεταξύ 75% και 98% σε σχέση με



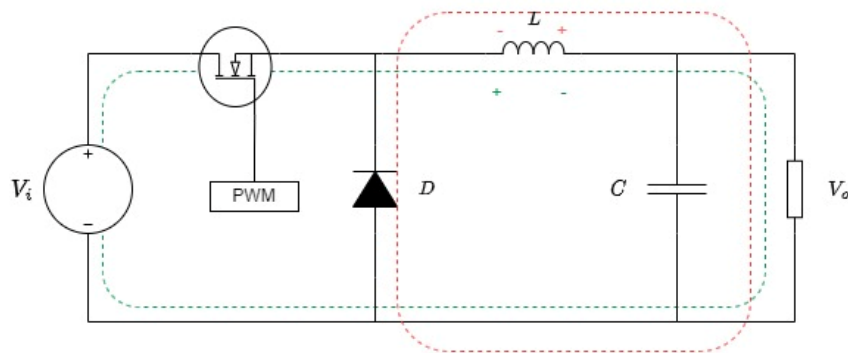
παλαιότερες τεχνικές, που χρησιμοποιούσαν ωμικά φορτία, τα οποία έδιναν μεγάλες απώλειες στο σύστημα.

Υπάρχουν τρία είδη DC-DC converter με διαφορετικές συνδεσμολογίες και διαφορετική λειτουργικότητα:

- Step down ή Buck converter, μετατροπéας υποβιβασμού τάσης.
- Step up ή Boost converter, μετατροπéας ανύψωσης τάσης.
- Buck-Boost converter, λειτουργεί και για ανύψωση και για υποβιβασμό τάσης.

### 2.5.1. Step Down – Buck converter

Ο μετατροπéας υποβιβασμού τάσης δέχεται μια τάση εισόδου και την μετατρέπει σε χαμηλότερη τάση εξόδου. Το κύκλωμά του αποτελείται από ένα διακοπτικό στοιχείο (συνήθως MOSFET), μια δίοδο, ένα πηνίο και ένα πυκνωτή συνδεδεμένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-9.



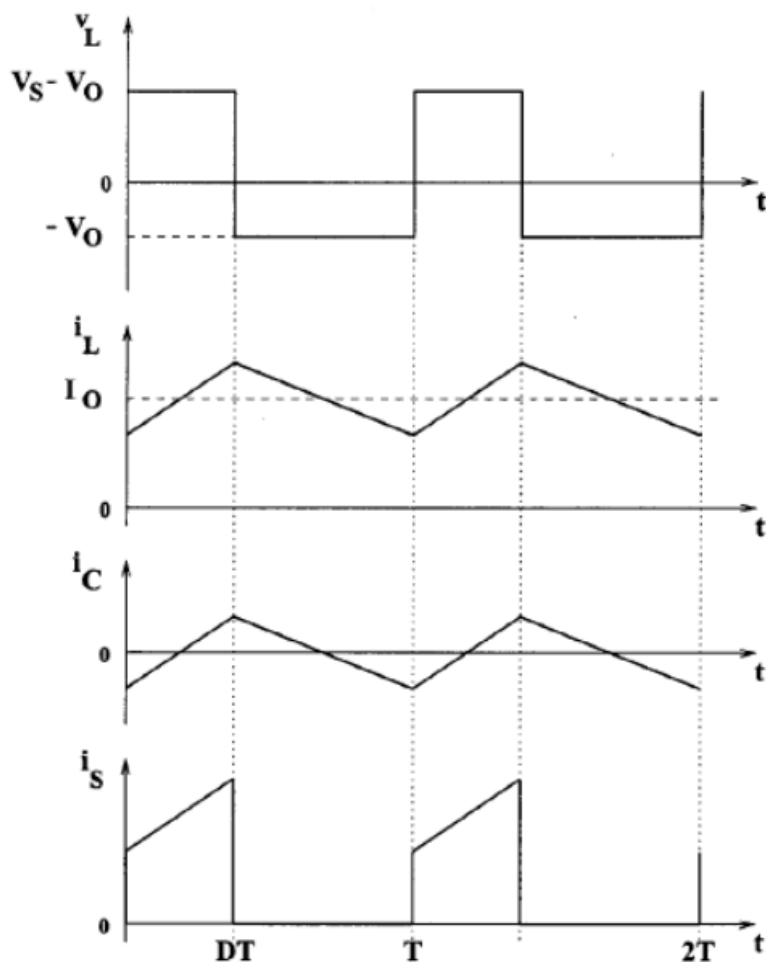
Σχήμα 2-9: Συνδεσμολογία Buck (Step Down) Converter.

Ο Buck Converter ελέγχεται από τον διακόπτη (MOSFET) μέσω σήματος PWM. Η λειτουργία του διακρίνεται σε δύο φάσεις, ON όταν ο διακόπτης είναι κλειστός και το κύκλωμα συνδέεται με την πηγή και OFF όταν ο διακόπτης είναι ανοιχτός και δεν περνά ρεύμα από την πηγή προς το υπόλοιπο κύκλωμα. Έστω ότι κάποια χρονική στιγμή ο διακόπτης μπαίνει στη φάση ON (πράσινη ροή του ρεύματος). Η δίοδος  $D$  σε αυτή τη φάση είναι πολωμένη ανάστροφα και δεν άγει. Το ρεύμα αυξάνεται σταδιακά στο κύκλωμα, με αποτέλεσμα το πηνίο  $L$  να αναπτύσσει τάση που αντιστέκεται στη μεταβολή αυτή. Ο χρόνος όπου το κύκλωμα βρίσκεται στην φάση ON ορίζεται με  $t_{on}$ . Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από το Duty cycle ( $D_c$ ) του PWM σήματος που ελέγχει το διακόπτη, το οποίο εκφράζει το ποσοστό του χρόνου αγωγής σε σχέση με την περίοδο  $T$ :

$$D_c = \frac{t_{on}}{T} \Rightarrow t_{on} = D_c T \quad (2.19)$$

Στην συνέχεια ο διακόπτης μεταβαίνει στην φάση OFF (κόκκινη ροή ρεύματος). Η ένταση του ρεύματος αρχίζει να μειώνεται με συνέπεια το πηνίο να αντιστέκεται στη μεταβολή αυτή και να αποκτά αντίθετη πολικότητα σε σχέση με τη φάση ON. Η πολικότητα αυτή πολώνει ορθά τη δίοδο με αποτέλεσμα να διατηρείται ίδια φορά ρεύματος στο φορτίο. Όλη αυτή η λειτουργικότητα επαναλαμβάνεται κάθε περίοδο  $T = t_{on} + t_{off}$ , όπου  $t_{off}$  ο χρόνος από την αρχή της φάσης OFF ως την αρχή της φάσης ON.

Ο μετατροπέας έχει δύο καταστάσεις λειτουργίας, που διακρίνονται από το αν κατά τη διάρκεια μιας περιόδου μηδενίζεται το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα ή όχι. Οι καταστάσεις αυτές ονομάζονται continuous (CM) ή discontinuous mode (DM) αντίστοιχα. Η κατάσταση μέγιστης απόδοσης του μετατροπέα επιτυγχάνεται στο continuous mode, την οποία θα χρησιμοποιήσουμε και στην παρακάτω μελέτη των βασικών αρχών του.



Σχήμα 2-10: Κυματομορφές Buck converter [29].

Υποθέτουμε ότι ο μετατροπέας βρίσκεται σε σταθερή λειτουργία, δηλαδή ότι η ενέργεια που αποθηκεύεται στο πηνίο είναι ίδια στην αρχή κάθε περιόδου, συνεπώς είναι ίδιο και το ρεύμα. Αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$E_L = \frac{1}{2} L I_L^2 \quad (2.20)$$

Η ενέργεια του πηνίου μεταβάλλεται ανάλογα με την μεταβολή του ρεύματος που το διαρρέει. Μπορούμε να υπολογίσουμε την μεταβολή αυτή από την σχέση:

$$V_L = L \frac{dI_L}{dt} \quad (2.21)$$

όπου  $V_L = V_i - V_o$  στην ON φάση και  $-V_o$  στην OFF φάση, βάσει του νόμου τάσεων Kirchhoff. Βάσει αυτού υπολογίζεται ότι η μεταβολή του ρεύματος στην ON φάση θα είναι:

$$dI_{L_{on}} = \int_0^{t_{on}} \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_i - V_o}{L} t_{on}, \quad t_{on} = D_c T \quad (2.22)$$

Αντίστοιχα στην OFF φάση θα είναι:

$$dI_{L_{off}} = \int_{t_{on}}^T \frac{V_L}{L} dt = -\frac{V_o}{L} t_{off}, \quad t_{on} = (1 - D_c)T \quad (2.23)$$

Όπως προαναφέρθηκε η κατάσταση του μετατροπέα είναι σταθερή, που σημαίνει ότι η ένταση του ρεύματος και η ενέργεια στο πηνίο είναι ίδια σε κάθε αρχή νέας περιόδου:

$$\begin{aligned} dI_{L_{on}} + dI_{L_{off}} &= 0 \\ \xrightarrow{(2.22), (2.23)} \frac{V_i - V_o}{L} t_{on} - \frac{V_o}{L} t_{off} &= 0 \\ \xrightarrow[t_{off}=(1-D_c)T]{t_{on}=D_c T} (V_i - V_o) D_c T - V_o (1 - D_c) T &= 0 \\ \Rightarrow D_c V_i - V_o &= 0 \\ \Rightarrow D_c = \frac{V_o}{V_i} \Rightarrow V_o = D_c V_i, \quad 0 \leq D_c \leq 1 & \quad (2.24) \end{aligned}$$

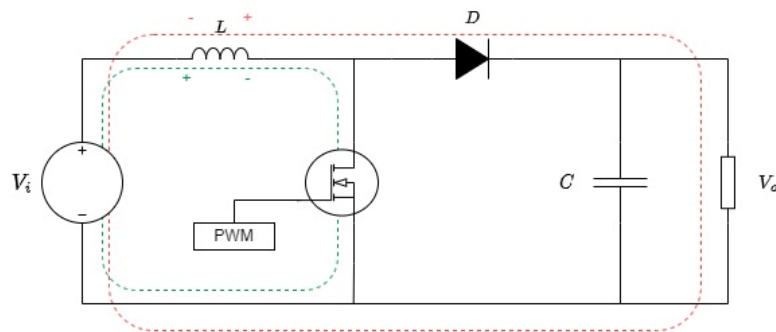
Η σχέση (2.24) μας δείχνει την απευθείας συσχέτιση της τάσης εξόδου με το Duty cycle που ορίζει το PWM σήμα. Επιπλέον, υπολογίζοντας και τη σχέση  $0 \leq D_c \leq 1$ , ο μετατροπέας μπορεί να ρυθμίζει την τάση εξόδου σε  $0 \leq V_o \leq V_i$ .

Συνοψίζοντας, ο Buck Converter χρησιμοποιείται για τον υποβιβασμό μιας τάσης εισόδου  $V_i$  σε χαμηλότερη τάση εξόδου  $V_o$ . Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας συστοιχία αντιστάσεων, όμως το σύστημα θα έχει πολύ μεγάλες απώλειες ενέργειας. Στη περίπτωση του Buck converter την υποβίβαση της τάσης

αναλαμβάνει το πηνίο, το οποίο δεν αφήνει το ρεύμα να περάσει ολόκληρο από την πηγή, αλλά εμποδίζει την κίνησή του αποθηκεύοντας ενέργεια. Η διαδικασία αυτή κάνει το μετατροπέα να ελαχιστοποιεί τις απώλειες και να επιτυγχάνει απόδοση άνω του 90%.

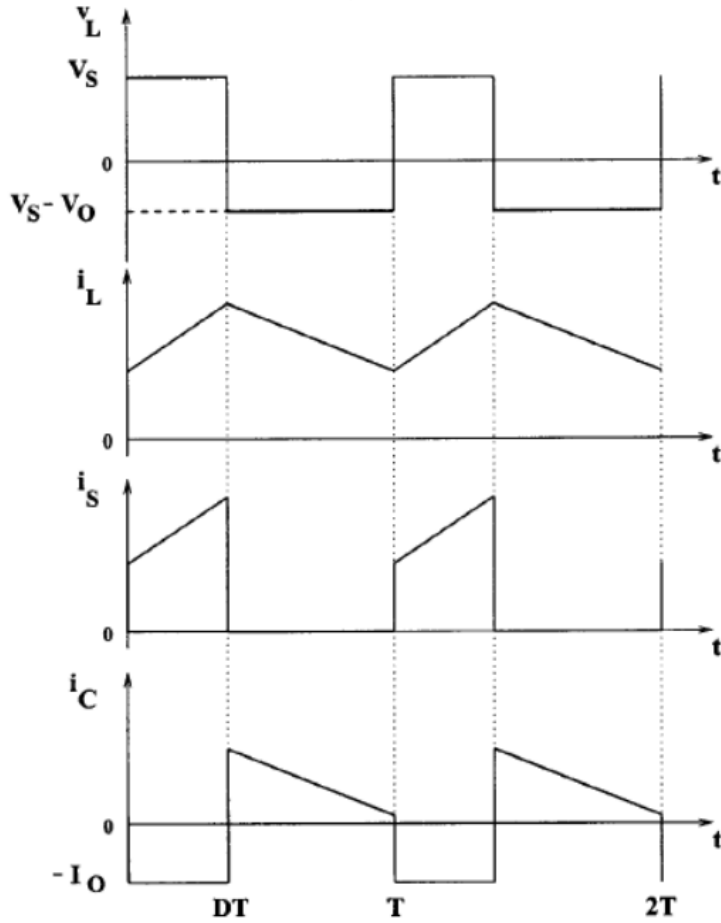
### 2.5.2. Step up – Boost Converter

Ο Boost Converter έχει παρόμοια λειτουργικότητα με τον Buck, με την διαφορά ότι χρησιμοποιείται για ανύψωση της τάσης εισόδου. Το κύκλωμα του έχει τα ίδια στοιχεία με επιμέρους αλλαγές στη συνδεσμολογία όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-11.



Σχήμα 2-11: Συνδεσμολογία Boost (Step Up) Converter.

Η λειτουργία του μετατροπέα διακρίνεται σε δύο φάσεις, ON (πράσινη ροή του ρεύματος) κατά τη διάρκεια που άγει το τρανζίστορ και OFF (κόκκινη ροή του ρεύματος) κατά τη διάρκεια μη αγωγής. Έστω ότι ο διακόπτης μπαίνει στη φάση ON τη στιγμή  $t_0$ . Το πηνίο δημιουργεί ανάστροφη τάση στην αύξηση του ρεύματος, με αποτέλεσμα η διόδος να μην άγει αφού πολώνεται ανάστροφα. Μετά από χρόνο  $D_c T$  το τρανζίστορ μεταβαίνει στην φάση OFF. Η διόδος πολώνεται ορθά, το φορτίο συνδέεται στο κύκλωμα και το ρεύμα τείνει να μειωθεί. Τότε το πηνίο αντιστρέφει την πολικότητα του αντιτιθέμενο στην τάση αυτή η οποία εκφράζεται μέσω του νόμου τάσεων Kirchhoff ως  $V_L = V_i - V_o$ .



Σχήμα 2-12: Κυματομορφές Boost converter [29].

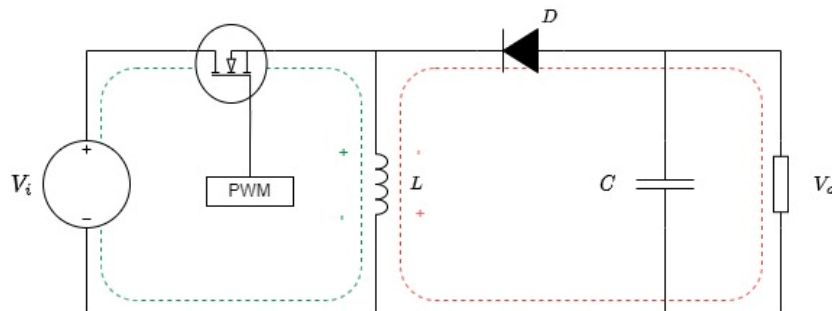
Όπως και στην προηγούμενη ανάλυση, θεωρείται ότι ο μετατροπέας λειτουργεί σε συνεχή αγωγή ρεύματος και βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση. Με όμοιο τρόπο και με τη βοήθεια του κυκλώματος στο Σχήμα 2-12 θα έχουμε την σχέση:

$$\begin{aligned}
 dI_{LT} = 0 &\Rightarrow dI_{L_{on}} + dI_{L_{off}} = 0 \\
 &\Rightarrow \int_0^{D_c T} \frac{V_i}{L} dt + \int_{D_c T}^T \frac{V_i - V_o}{L} dt = 0 \\
 &\Rightarrow \frac{V_i D_c T}{L} + \frac{(V_i - V_o)(1 - D_c)T}{L} = 0 \\
 &\Rightarrow V_i - V_o + V_o D_c = 0 \\
 &\Rightarrow D_c = \frac{V_i - V_o}{V_o} \Rightarrow V_o = \frac{V_i}{(1 - D_c)}, \quad 0 \leq D_c \leq 1
 \end{aligned} \tag{2.25}$$

Σύμφωνα με την Σχέση (2.25) παρατηρείται ότι  $V_i \leq V_o \leq \infty$  και το πλάτος της τάσης εξόδου εξαρτάται από το  $D_c$ .

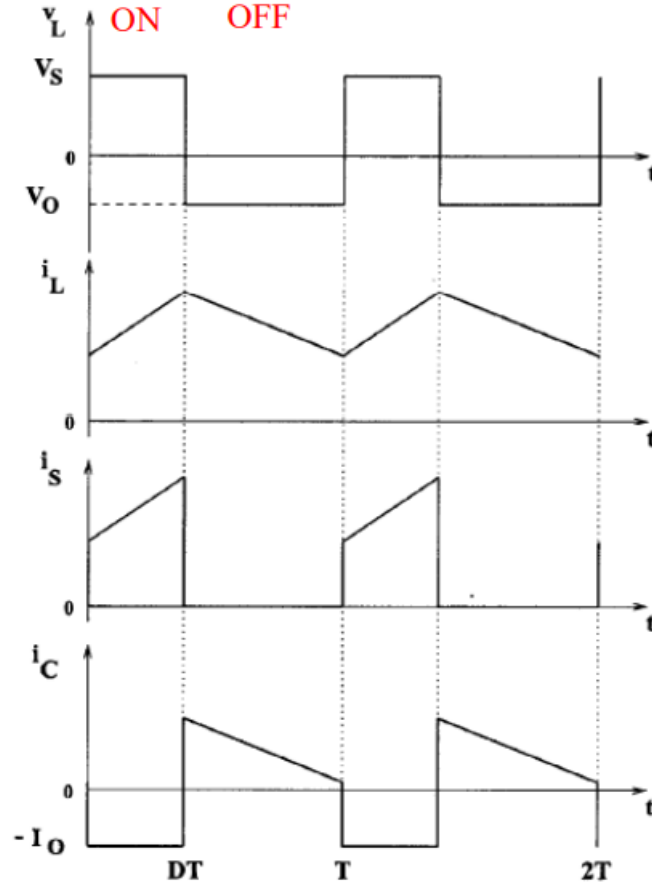
### 2.5.3. Buck/Boost Converter

Ο συγκεκριμένος μετατροπέας χρησιμοποιείται και για ανύψωση και για υποβιβασμό της τάσης εισόδου. Όπως και οι προηγούμενοι μετατροπείς, έχει τα ίδια στοιχεία στο κύκλωμά του με αλλαγές στη συνδεσμολογία.



Σχήμα 2-13: Συνδεσμολογία Buck/Boost Converter.

Στο κύκλωμα παρατηρείται ότι μόλις ο διακόπτης επέλθει στη θέση ON (πράσινη ροή ρεύματος), η διόδος πολώνεται ανάστροφα και όλο το ρεύμα περνά από το πηνίο. Το πηνίο αντιστέκεται στην σταδιακή αύξηση του ρεύματος αναπτύσσοντας τάση στα άκρα του ίση με  $V_L = V_i$ . Τη χρονική στιγμή  $t = D_c T$  ο διακόπτης μπαίνει στη φάση OFF (κόκκινη ροή ρεύματος). Τότε αποσυνδέεται η τάση εισόδου, το ρεύμα στο πηνίο τείνει να μειωθεί και το πηνίο αναπτύσσει τάση αντίθετη στη μείωση αυτή. Η διόδος πολώνεται ορθά και το ρεύμα διαπερνά το φορτίο. Η τάση που αναπτύσσει το πηνίο στα άκρα του ισούται με  $V_L = V_o$ .



Σχήμα 2-14: Κυματομορφές Buck/Boost Converter [29].

Όμοια με την ανάλυση των προηγούμενων δύο μετατροπέων, υποτίθεται ότι ο μετατροπέας λειτουργεί σε CM και βρίσκεται στην σταθερή κατάσταση. Εφόσον στην αρχή κάθε περιόδου το ρεύμα βρίσκεται στην ίδια τιμή προκύπτει:

$$\begin{aligned}
 dI_{LT} = 0 &\Rightarrow dI_{L_{on}} + dI_{L_{off}} = 0 \\
 &\Rightarrow \int_0^{D_c T} \frac{V_i}{L} dt + \int_{D_c T}^T \frac{V_o}{L} dt = 0 \\
 &\Rightarrow \frac{V_i D_c T}{L} + \frac{V_o (1 - D_c) T}{L} = 0 \\
 &\Rightarrow V_i D_c + V_o - V_o D_c = 0 \\
 &\Rightarrow D_c = \frac{V_o}{V_o - V_i} \Rightarrow V_o = -\frac{D_c}{(1 - D_c)} V_i, \quad 0 \leq D_c \leq 1
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

Στην παραπάνω σχέση (2.26) παρατηρείται η αντίστροφη πολικότητα της τάσης εξόδου σε σχέση με την τάση εισόδου και η εξάρτησή της από το  $D_c$ . Λαμβάνοντας υπόψη τις απόλυτες τιμές των δύο τάσεων της συνάρτησης παρατηρούμε ότι για  $0 \leq$

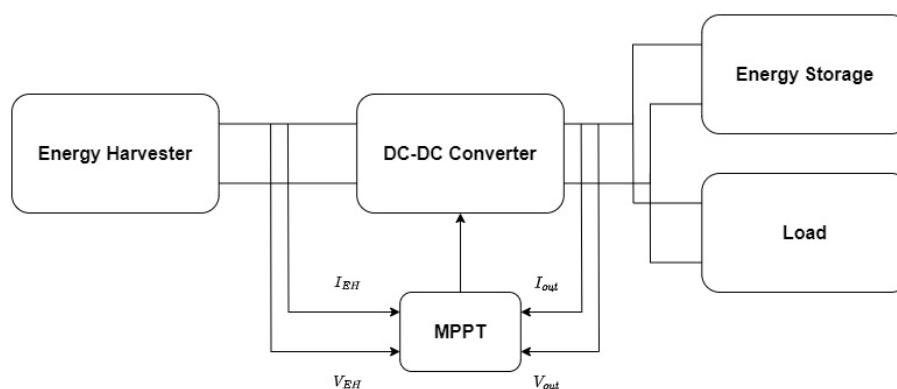
$D_c \leq 0,5$  προκύπτει  $0 \leq |V_o| \leq |V_i|$ , ενώ για  $0,5 < D_c \leq 1$  προκύπτει  $|V_o| < |V_i| < \infty$ . Συνοπτικά ο buck/boost μετατροπέας λειτουργεί ως buck για duty cycle από 0 έως 0,5 και ως boost από 0,5 έως 1.

## 2.6. Αλγόριθμοι Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Όπως γίνεται αντιληπτό είναι αναγκαία η απορρόφηση της περισσότερης δυνατής ενέργειας από το περιβάλλον σε συστήματα ΕΗ καθώς δεν μπορεί να προβλεφθεί ούτε ο χρόνος ούτε και η ποσότητα της διαθέσιμης ενέργειας. Επιπλέον δεν μπορούν να προβλεφθούν οι συνθήκες της εγκατεστημένης γεννήτριας στο σύστημα ούτε το καταναλισκόμενο φορτίο που θα έχει το σύστημα κάθε στιγμή. Συνεπώς δεν μπορεί να επιτευχθεί η συνθήκη impedance matching μεταξύ της γεννήτριας και του υπόλοιπου συστήματος μέσω μιας στατικής επιλογής.

Εγείρεται η ανάγκη χρήσης τεχνικών, οι οποίες θα μεταβάλλουν τη σύνθετη αντίσταση του φορτίου ανάλογα με την κατάσταση της πηγής κάθε στιγμή για να μπορεί το σύστημα να λειτουργεί όσο το δυνατόν πιο κοντά στο MPP. Οι τεχνικές αυτές ονομάζονται αλγόριθμοι Maximum Power Point Tracking (MPPT).

Για να μπορέσει να υλοποιηθεί μια MPPT μέθοδος είναι απαραίτητη η χρήση ενός DC-DC converter (μετατροπέα), με τον οποίο μπορούμε να μεταβάλουμε την σύνθετη αντίσταση που συνδέεται με την πηγή. Για την επίτευξη του impedance matching κάθε MPPT αλγόριθμος μεταβάλλει την λειτουργία του μετατροπέα, χρησιμοποιώντας PWM σήμα. Στο Σχήμα 2-15 φαίνεται μια τυπική συνδεσμολογία μεταξύ Energy Harvester, DC-DC converter, συσσωρευτή ενέργειας και του φορτίου.



*Σχήμα 2-15: Συνδεσμολογία EH-Storage-Load.*

Η εύρεση του σημείου MPP μπορεί να αποβεί από εύκολη έως και πολύ δύσκολη. Λαμβάνοντας υπόψη την λειτουργία των φωτοβολταϊκών πάνελ, σε μία μέρα με καθαρή ηλιοφάνεια η συνάρτηση τάσεως-ισχύος (P-V) θα έχει ένα μέγιστο. Αντίθετα σε



μια μέρα με συννεφιά, όπου μπορεί να έχουμε το φαινόμενο μερικής σκίασης, η ίδια συνάρτηση μπορεί να έχει πολλά τοπικά μέγιστα δυσκολεύοντας την εύρεση του ολικού μέγιστου.

Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί ήδη πολλοί διαφορετικοί αλγόριθμοι εύρεσης του σημείου MPP. Κάθε αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια διαφορετική προσέγγιση και έτσι βρίσκουμε διαφορές στα στοιχεία που χρησιμοποιούνται, στην πολυπλοκότητα, στην ταχύτητα εύρεσης του MPP, στην αντοχή που έχουν σε τυχόν αλλαγές του MPP κ.α. Οι κυριότερες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι οι Constant Voltage - Constant Current, Perturb & Observe και η Incremental Conductance.

### 2.6.1. Constant Voltage – Constant current

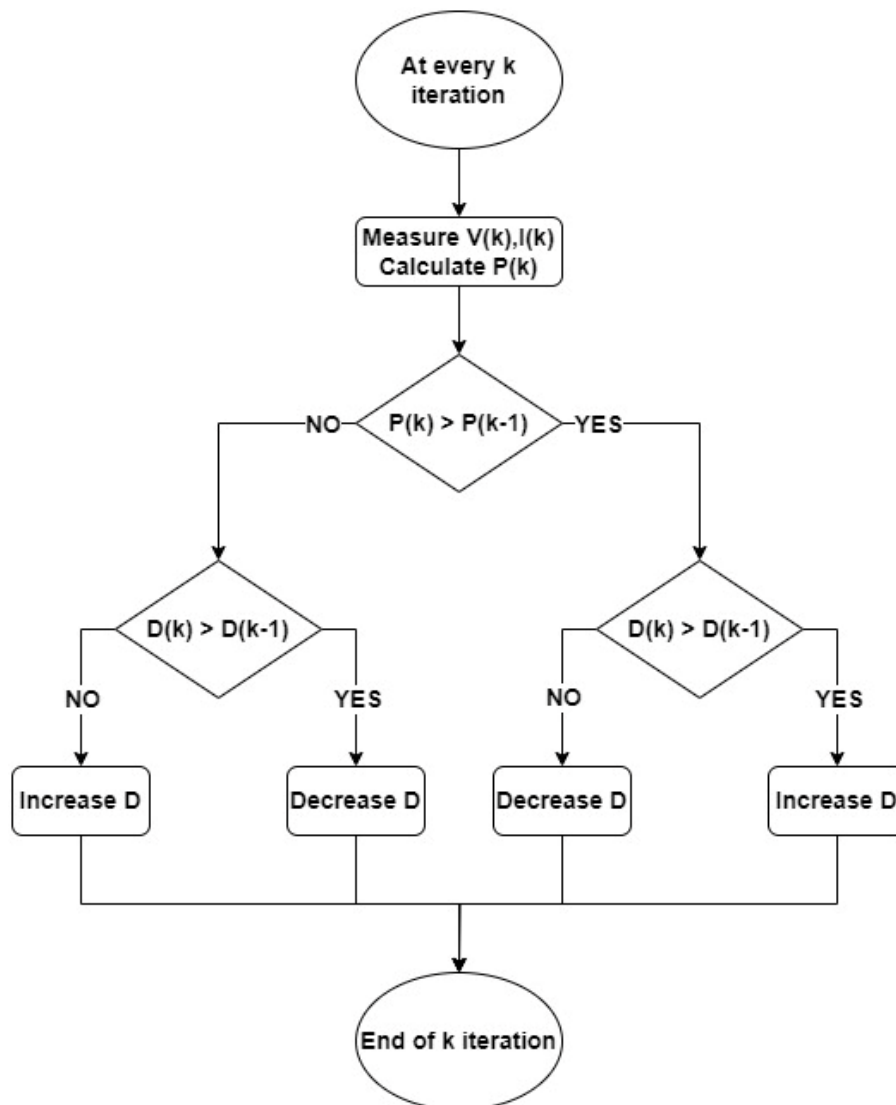
Η μέθοδος Constant Voltage (Σταθερής Τάσης) αποτελεί την βασικότερη μορφή MPPT αλγορίθμου. Βασίζεται στο γεγονός ότι ο λόγος της τάσης μέγιστης παραγωγής ισχύος  $V_{MPP}$  σε σχέση με την τάση ανοικτοκύκλωσης της γεννήτριας  $V_{OC}$  είναι σταθερός. Για παράδειγμα σε μια συστοιχία φωτοβολταϊκών, η  $V_{MPP}$  βρίσκεται περίπου στο 70% - 85% της  $V_{OC}$ . Όπως γίνεται αντιληπτό, για την λειτουργία της μεθόδου το κύκλωμα μετράει την τάση ανοικτοκύκλωσης της πηγής ανά συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια ρυθμίζει κατάλληλα το Duty Cycle του μετατροπέα ώστε να κρατήσει την τάση λειτουργίας της πηγής στην τάση  $V_{MPP}$  που έχει οριστεί από τον χρήστη.

Η μέθοδος Constant Current (Σταθερού Ρεύματος) λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο όπως η μέθοδος Σταθερής Τάσης, στηριζόμενη στη θεωρία ότι ο λόγος του ρεύματος στο σημείο MPP ( $I_{MPP}$ ) σε σχέση με το ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{CC}$ ) είναι σταθερός. Στα φωτοβολταϊκά πάνελ το ρεύμα  $I_{MPP}$  είναι περίπου το 72% - 92% του ρεύματος  $I_{CC}$ . Το κύκλωμα μετράει ανά συγκεκριμένο χρονικό διάστημα το ρεύμα βραχυκύκλωσης και ρυθμίζει το Duty Cycle του μετατροπέα ώστε να συγκλίνει στο υπολογιζόμενο ρεύμα μέγιστης παραγωγής ισχύος.

Οι δύο παραπάνω μέθοδοι αποτελούν λύση στο πρόβλημα εύρεσης του MPP με προσεγγιστικές μεθόδους. Συνεπώς δεν εγγυούνται την εύρεση του MPP με ακρίβεια καθώς δεν λαμβάνουν υπόψη τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της γεννήτριας κάθε στιγμή. Παρόλα αυτά είναι χρήσιμες λόγω της ευκολίας υλοποίησής τους και της χαμηλής πολυπλοκότητας του κυκλώματός τους.

### 2.6.2. Perturb & Observe

Η μέθοδος Perturb and Observe (Διαταραχή και Παρατήρηση) βασίζεται στην αλλαγή του Duty cycle (DuC) του μετατροπέα και στην παρατήρηση της αλλαγής της παραγόμενης ισχύος από την πηγή. Σε κάθε βήμα ο αλγόριθμος μετρά την ισχύ και την τάση και τις συγκρίνει με τις προηγούμενες αντίστοιχες τιμές. Αν η διαταραχή του DuC αποφέρει αύξηση στην ισχύ τότε η επόμενη διαταραχή θα είναι προς την ίδια κατεύθυνση, ενώ αν επιφέρει μείωση τότε η επόμενη θα είναι προς την αντίθετη κατεύθυνση.



Σχήμα 2-16: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου «P&O».

Όταν ο αλγόριθμος φτάσει στο σημείο μέγιστης παραγωγής ισχύος ταλαντώνεται γύρω από αυτό έως ότου οι περιβαλλοντικές συνθήκες αλλάξουν. Το βασικό μειονέκτημα του αλγορίθμου αυτού είναι, ότι είναι αποδοτικός μόνο όταν υπάρχει ομοιόμορφη ακτινοβολία, δηλαδή όταν η P-V χαρακτηριστική έχει ένα τοπικό μέγιστο

που είναι και το ολικό. Σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να παγιδευτεί από κάποιο τοπικό μέγιστο και να παραμείνει εκεί χωρίς να βρει το ολικό. Συνολικά είναι μια αποδοτικότερη μέθοδος από τις προαναφερθείσες, που όμως απαιτεί μεγαλύτερη πολυπλοκότητα στην υλοποίηση και χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να συγκλίνει στο MPP.

### 2.6.3. Incremental Conductance

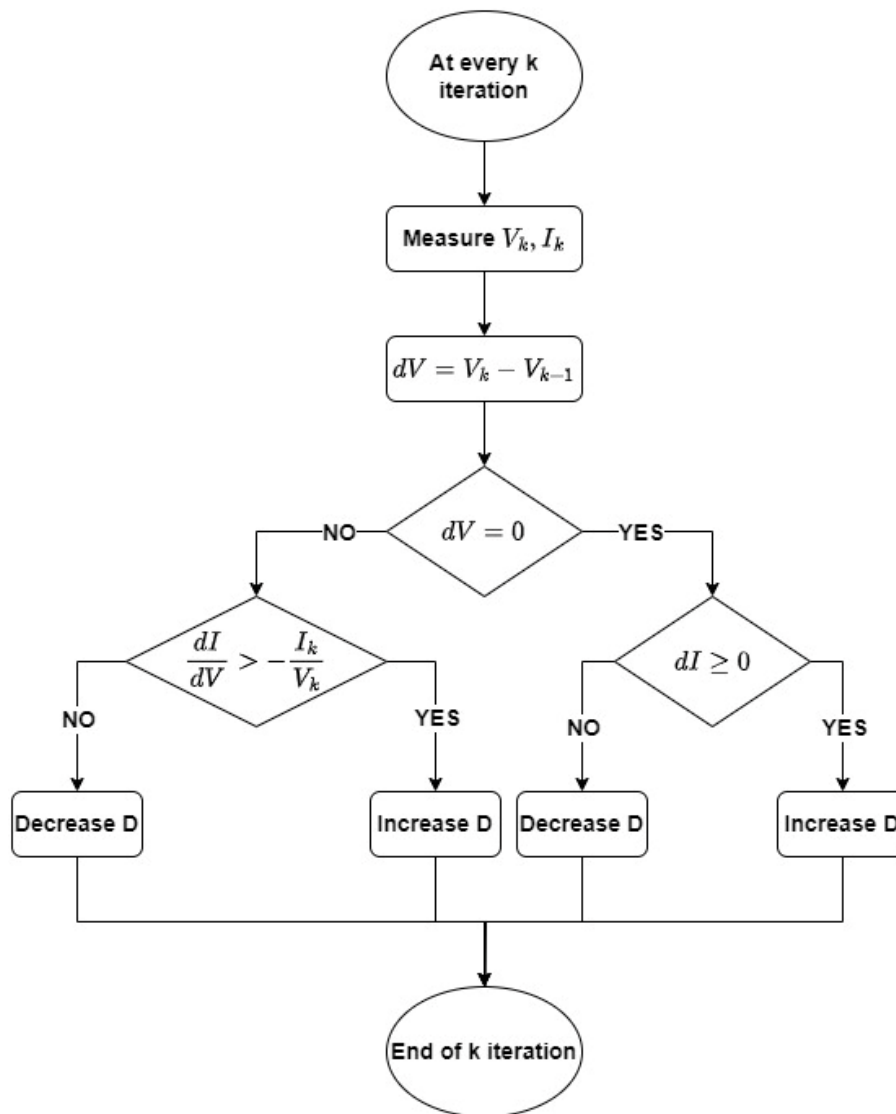
Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στο γεγονός ότι η παράγωγος της P-V χαρακτηριστικής μηδενίζεται στο σημείο MPP έχοντας θετική παράγωγο αριστερά και αρνητική δεξιά.

$$\begin{aligned}
 \frac{dP}{dV} &= 0 \Rightarrow \\
 \Rightarrow \frac{d(PV)}{dV} &= 0 \\
 \Rightarrow P + \frac{dP}{dV}V &= 0 \\
 \Rightarrow \frac{dP}{dV} &= -\frac{P}{V}
 \end{aligned} \tag{2.27}$$

Συνεπώς έχουμε τις παρακάτω συνθήκες:

$$\begin{aligned}
 \frac{dP}{dV} &= -\frac{P}{V}, \text{ όταν } V = V_{MPP} \\
 \frac{dP}{dV} &> -\frac{P}{V}, \text{ όταν } V < V_{MPP} \\
 \frac{dP}{dV} &< -\frac{P}{V}, \text{ όταν } V > V_{MPP}
 \end{aligned}$$

Βασισμένος στις παραπάνω εξισώσεις ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τις μετρήσεις από τους αισθητήρες και τις συγκρίνει για να συγκλίνει στο σημείο στην τάση  $V_{MPP}$ .



Σχήμα 2-17: Διάγραμμα ροής αλγόριθμου «Incremental Conductance».

Ο αλγόριθμός αυτός και ο αλγόριθμος P&O μοιράζονται τα ίδια μειονεκτήματα. Έχουν αυξημένο χρόνο σύγκλισης με αποτέλεσμα απώλεια ενέργειας και επιπλέον αργή αναπροσαρμογή στις αλλαγές των περιβαλλοντικών συνθηκών και συνθηκών λειτουργίας της πηγής. Ο χρόνος αυτός μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας το βήμα αύξησης ή μείωσης του DuC με αντάλλαγμα όμως την μείωση της ακρίβειας εύρεσης του MPP. Εκτός των άλλων και οι δύο αλγόριθμοι δεν μπορούν να εντοπίσουν το MPP σε συνθήκες μερικής σκίασης όπου η χαρακτηριστική ισχύος-τάσης παρουσιάζει τοπικά μέγιστα. Για όλους αυτούς τους λόγους έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι που βελτιστοποιούν την εύρεση του τόσο στο χρόνο σύγκλισης όσο και στην ακρίβεια.

## 2.7. Σύστημα επικοινωνίας

Η ασύρματη επικοινωνία είναι από τα σημαντικότερα συστήματα σε ένα κόμβο-αισθητήρα. Διευκολύνει πολλά προβλήματα που μπορούν να υπάρξουν από τη τοποθέτηση, την συλλογή των μετρήσεων αλλά και την πιθανή αλλαγή του τρόπου λειτουργίας του αισθητήρα. Σε εφαρμογές απομακρυσμένης πρόσβασης υπάρχουν δύο τρόποι επικοινωνίας, η ενσύρματη και η ασύρματη. Η ενσύρματη έχει πολλαπλά μειονεκτήματα σε σχέση με την ασύρματη καθώς πρέπει να υπάρχει φυσικό καλώδιο που θα συνδέει τους αισθητήρες μεταξύ τους αλλά και με το σταθμό βάσης. Όπως είναι επόμενο, σε εφαρμογές που υλοποιούνται σε εξωτερικούς χώρους η ασύρματη επικοινωνία είναι μονόδρομος. Ιδιαίτερα σε συστήματα αυτόνομων αισθητήρων μπορούμε να έχουμε το δίκτυο αρκετά απομακρυσμένο από τον σταθμό βάσης, ο οποίος θα είναι συνδεδεμένος στο διαδίκτυο και στο ρεύμα στις περισσότερες περιπτώσεις, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους κόμβους που είναι ενεργειακά αυτόνομοι. Στη συνέχεια θα γίνει ανάλυση των ασύρματων μεθόδων επικοινωνίας με κύριο γνώμονα τη χαμηλή κατανάλωση και την εμβέλεια επικοινωνίας, όπως και διαφόρων τοπολογιών που συνεισφέρουν στην εξοικονόμηση ενέργειας στον κάθε κόμβο.

### 2.7.1. Τεχνολογίες Ασύρματης Επικοινωνίας

#### WiFi

Το WiFi υλοποιεί ασύρματη τοπική επικοινωνία χρησιμοποιώντας κυρίως τις ραδιοσυχνότητες των 2,4 και 5 GHz. Επιτρέπει την μεταφορά δεδομένων μεταξύ συσκευών συνδεδεμένων στο ίδιο δίκτυο σε εσωτερικό ή και εξωτερικό χώρο. Το δίκτυο αυτό ονομάζεται Wireless Local Area Network (WLAN) και τα χαρακτηριστικά προσδιορίζονται κυρίως απ' το πρωτόκολλο IEEE 801.11. Ωστόσο η εμβέλεια του είναι περιορισμένη καθώς επηρεάζεται πολύ από εμπόδια, θόρυβο, παρεμβολές, ισχύ μετάδοσης κ.α. Τυπικά η μέγιστη απόσταση επικοινωνίας του είναι τα 100 μέτρα.

Το πρωτόκολλο IEEE 801.11 προσδιορίζει τις διαδικασίες που διενεργούνται στο φυσικό (Physical) και MAC επίπεδο επικοινωνίας. Το φυσικό επίπεδο διαχειρίζεται τη διαμόρφωση, τη κωδικοποίηση, τη μετάδοση και την λήψη των δεδομένων. Στη διαμόρφωση της συχνότητας χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές με τις επικρατέστερες να είναι η Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) και Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS). Το MAC επίπεδο καθορίζει τη διευθυνσιοδότηση και τον έλεγχο της πρόσβασης στο κανάλι

χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα όπως το CSMA/CA (Carrier Sense multiple Access with Collision Avoidance).

Αναλύοντας τις δύο συχνότητες του WiFi παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις, οι οποίες και καθορίζουν τις περιπτώσεις χρήσης τους. Η μετάδοση στα 5 GHz προσφέρει μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και εύρος φάσματος από τα 2,4 GHz. Όμως η υψηλότερη συχνότητα κάνει το σήμα πιο ευάλωτο στα εμπόδια και μειώνει την εμβέλεια του. Έτσι θα επιλέγαμε 5 GHz αν χρειαζόμαστε μια γρήγορη και αξιόπιστη επικοινωνία που δεν θα παρεμποδίζεται από πολλά εμπόδια, ενώ τα 2,4 GHz σε περίπτωση που θέλουμε μεγαλύτερη απόσταση μετάδοσης που ίσως παρεμβάλλεται από ενδιάμεσα εμπόδια.

### **Cellular Network - Δίκτυο κινητής τηλεφωνίας**

Τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών αποτελούν την βασική μέθοδο ασύρματης επικοινωνίας κινητών συσκευών παγκοσμίως, όπως είναι τα κινητά τηλέφωνα, συσκευές GPS, συστήματα αισθητήρων κ.α. Πρόκειται για δίκτυα που κατανέμουν την περιοχή κάλυψης του σε κυψέλες, που η κάθε μία εξυπηρετείται από τουλάχιστον ένα σταθμό βάσης. Κάθε σταθμός βάσης παρέχει υπηρεσίες δικτύου, που αφορούν μεταφορά δεδομένων κλήσης, μηνυμάτων, δεδομένων ίντερνετ κ.α. Οι γειτονικές κυψέλες λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ τους και την καλύτερη δυνατή αξιοπιστία των υπηρεσιών.

Συνδέοντας πολλές τέτοιες κυψέλες μεταξύ τους δημιουργείται ένα δίκτυο συνεχόμενης κάλυψης σε μια μεγάλη περιοχή, η οποία μπορεί επιπλέον να επεκταθεί πολύ εύκολα. Τα δίκτυα αυτά δίνουν την δυνατότητα σε κινητές και σταθερές συσκευές, διαμέσου των σταθμών βάσης, να επικοινωνούν μεταξύ τους, ακόμα και αν κάποια συσκευή κινείται από κυψέλη σε κυψέλη κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας.

Οι κυψελοειδής μορφή των δικτύων κινητών επικοινωνιών έχει πολλαπλά οφέλη σε σχέση με την χρήση μίας κεραίας κάλυψης για κάθε περιοχή. Αρχικά το δίκτυο μπορεί να εξυπηρετήσει πολλούς περισσότερους συνδρομητές στην ίδια περιοχή αφού κάθε κυψέλη λειτουργεί σε διαφορετικό εύρος συχνοτήτων, και επίσης μειώνεται δραστικά η απόσταση επικοινωνίας με αποτέλεσμα την λιγότερη κατανάλωση ενέργειας των συσκευών και των σταθμών. Επιπλέον υπάρχει αποτελεσματικότερη και μεγαλύτερη κάλυψη περιοχών, αφού με την χρήση πολλών σταθμών παρακάμπτεται ο περιορισμός της κάλυψης σε ορατή εμβέλεια. Τέλος υπάρχει δυνατότητα λειτουργίας του δικτύου σε μεγαλύτερες συχνότητες λαμβάνοντας υπόψη τις μειωμένες αποστάσεις επικοινωνίας και τυχόν λιγότερα εμπόδια στην επικοινωνία.

Η πρώτη μορφή δικτύου κινητών επικοινωνιών, 1G, εμφανίστηκε το 1979 στην Ιαπωνία. Αρχικά αφορούσε μόνο την περιοχή του Τόκιο αλλά μέσα σε λίγα χρόνια επεκτάθηκε σε ολόκληρη την Ιαπωνία. Η τεχνολογία του βασιζόταν στην αναλογική μορφή ασύρματης επικοινωνίας. Έπειτα λόγω της ανάπτυξης της μετατροπής του αναλογικού σε ψηφιακό σήμα, κυρίως λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των MOSFET, ακολούθησε και μεγάλη ανάπτυξη στα ασύρματα δίκτυα. Η τεχνολογία άρχισε να υιοθετείται περί το 1990 από τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών και το 1991 παρουσιάστηκε η πρώτη μορφή ψηφιακού δικτύου, η 2G. Με την πάροδο των χρόνων έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται μετέπειτα γενιές με την πιο πρόσφατη να είναι η 5G.

### 2.7.2. Low Power Wide Area Networks – LPWAN

Τα LPWANs είναι μια εξειδικευμένη μορφή δικτύων επικοινωνίας που απευθύνεται σε εφαρμογές μικρής κατανάλωσης ενέργειας. Έχουν καταφέρει να κερδίσουν έδαφος στον χώρο των WSN, σε εφαρμογές που η ενεργειακή αυτονομία είναι κρίσιμη, καθώς προσφέρουν μεγάλη εμβέλεια επικοινωνίας με λιγοστή κατανάλωση ενέργειας. Το μειονέκτημά τους είναι η χαμηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων (data rate), που όμως δεν είναι σημαντικό μειονέκτημα όταν μιλάμε για δεδομένα αισθητήρων. Βασικές μέθοδοι επικοινωνίας LPWAN είναι το Cellular IoT που χρησιμοποιεί το υπάρχον δίκτυο κινητών επικοινωνιών, το Sigfox και το LoRa που χρησιμοποιούν δικό τους δίκτυο.

#### LoRa

Το LoRa (Long Range) αποτελεί μια μέθοδο επικοινωνίας που προορίζεται για χρήση σε IoT εφαρμογές και αναπτύχθηκε από την εταιρεία Semtech. Βασίζεται στην επικοινωνία μέσω Chirp Spread Spectrum (CSS) διαμόρφωσης και οι πομποδέκτες του επικοινωνούν σε συχνότητες κάτω του 1 GHz. Συγκεκριμένα στην Ευρώπη επιτρέπεται η χρήση των συχνοτήτων 433MHz και 868MHz. Οι ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων κυμαίνονται ανάμεσα σε 0.3 και 27 Kbit/s και καθορίζονται κυρίως από το εύρος ζώνης (bandwidth – BW, συνήθως 125, 250, 500 kHz) και το spreading factor (SF) από 7 έως 12 που χρησιμοποιείται.

Η διαμόρφωση βασίζεται στην αντιστοιχία ενός συμβόλου και ενός chirp («κομματιού») συχνότητας στο διαθέσιμο BW. Θεωρώντας  $f_0$  την κεντρική συχνότητα τα chirps αντιστοιχίζονται κυκλικά στο διάστημα  $\left[f_0 - \frac{BW}{2}, f_0 + \frac{BW}{2}\right]$  σε πλήθος  $2^{SF}$ . Βάσει των παραπάνω ο ρυθμός μετάδοσης των συμβόλων θα είναι:

$$R_s = \frac{BW}{2^{SF}} \quad (2.28)$$

Αντίστοιχα εκφράζεται και η ταχύτητα μετάδοσης  $R_b$  σε bits/s λαμβάνοντας υπόψη ότι το  $SF$  υποδηλώνει και τον αριθμό των bits που χρησιμοποιείται στην κωδικοποίηση κάθε συμβόλου.

$$R_b = SF * R_s \quad (2.29)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω βασικές αρχές λειτουργίας του LoRa μπορούμε να εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα: Η χρήση της μορφοποίησης CSS με συγχρονισμένο τον πομπό και τον δέκτη αποφέρει την μεγάλη εμβέλεια και αξιοπιστία σε συστήματα LoRa. Περαιτέρω ο χρήστης μπορεί να παραμετροποιήσει το BW, την ισχύ εκπομπής σήματος και το  $SF$  προκειμένου να επιτύχει το καλύτερο αποτέλεσμα για την εφαρμογή του, καθώς κάθε αλλαγή στις παραμέτρους αυτές επιφέρει και αλλαγές στην εμβέλεια, την ταχύτητα μετάδοσης ή την αντοχή στις παρεμβολές. Ως ενδεικτικό παράδειγμα, η αύξηση της ισχύος εκπομπής αυξάνει ασφαλώς και την εμβέλεια όπως και την κατανάλωση του συστήματος ενώ, παρατηρώντας τις σχέσεις (2.28) και (2.29), με την αύξηση του BW αυξάνεται και ο ρυθμός μετάδοσης, ενώ αντιθέτως με την αύξηση του SF ο ρυθμός μετάδοσης μειώνεται.

Το LoRa εκφράζει την διαδικασία επικοινωνίας στο φυσικό επίπεδο (PHY), δηλαδή τα χαρακτηριστικά του καναλιού επικοινωνίας. Η LoRa Alliance δημιούργησε και διατηρεί ένα ανοικτό δίκτυο επικοινωνίας τέτοιων συσκευών που ονομάζεται LoRaWAN. Το LoRaWAN αποτελείται από ένα μεγάλο πλήθος συμβεβλημένων Gateways (GW) και server που εξυπηρετούν LoRa συσκευές. Οποιοσδήποτε (ατομικά ή εταιρεία) μπορεί να συμμετέχει στο LoRaWAN συνδέοντας είτε τερματική συσκευή είτε GW για να εξυπηρετεί τις συσκευές στην περιοχή του συμβάλλοντας στην εξάπλωση του. Επιπροσθέτως μπορεί να δημιουργήσει και το δικό του ιδιωτικό δίκτυο για την χρήση συγκεκριμένης εφαρμογής, δίνοντας στο LoRa μεγαλύτερη ευελιξία και δυνατότητα κάλυψης σε σχέση με τον ανταγωνισμό.

Συνοψίζοντας το LoRa χρησιμεύει σε εφαρμογές που χρειάζονται μετάδοση δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις καταναλώνοντας χαμηλή ισχύ. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά το καθιστούν κατάλληλο για ενεργειακά αυτόνομες συσκευές που έχουν χαμηλή ή καθόλου πρόσβαση σε κάποια πηγή ενέργειας. Ακόμα περισσότερο για συσκευές που βρίσκονται απομακρυσμένες από το σταθμό συλλογής δεδομένων μιας και μπορεί να επιτευχθεί επικοινωνία σε αποστάσεις της τάξεως 10-15 χιλιομέτρων με τις κατάλληλες παραμέτρους, σε καλές συνθήκες και οπτική επαφή.

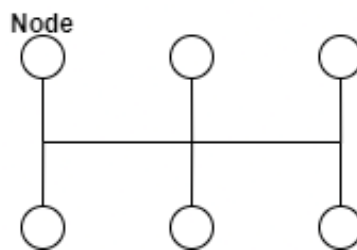


### 2.7.3. Βασικές Τοπολογίες Δικτύων

Η χρήση συγκεκριμένης τοπολογίας σε ένα δίκτυο αισθητήρων είναι πολύ σημαντική. Έχει γίνει αντικείμενο μελέτης καθώς καθεμία έχει τα δικά της χαρακτηριστικά που την κρίνουν κατάλληλη ή όχι για μία εφαρμογή. Η πιο απλή μορφή δικτύου είναι η απευθείας σύνδεση ανάμεσα σε δύο κόμβους (Point to Point), και είναι και η θεμελιώδης για την ανάπτυξη των υπολοίπων.

#### Bus Topology

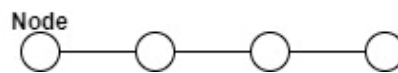
Η τοπολογία αυτή αποτελείται από ένα κοινό δίαυλο επικοινωνίας μέσω του οποίου επικοινωνούν όλοι οι κόμβοι μεταξύ τους. Κάθε πακέτο μεταδίδεται για όλους τους κόμβους ταυτόχρονα. Λόγω αυτού, για την περεταίρω αξιόπιστη λειτουργία της χρειάζεται αλγορίθμους διαχείρισης των μεταδόσεων σε κάθε κόμβο για την αποφυγή συγκρούσεων ταυτόχρονα μεταδιδόμενων πακέτων. Τέτοιοι είναι οι Carrier Sense Multiple Access (CSMA) και ο ALOHA. Το μεγάλο μειονέκτημα της είναι ότι αν ο δίαυλος υποστεί βλάβη διακόπτεται η επικοινωνία ολόκληρου του δικτύου.



Σχήμα 2-18: BUS Τοπολογία.

#### Linear Topology

Η γραμμική τοπολογία είναι μια αλυσίδα κόμβων που είναι στη σειρά συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Η επικοινωνία ενός κόμβου με έναν μη γειτονικό του εξαρτάται πλήρως από τους ενδιάμεσους. Πιθανή βλάβη σε κάποιο κόμβο διακόπτει την επικοινωνία και σε όλους τους εξαρτώμενους από αυτόν.

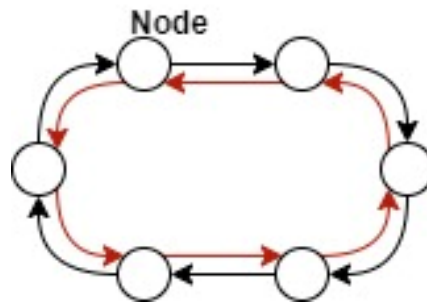


Σχήμα 2-19: Linear Τοπολογία.

#### Ring Topology

Η τοπολογία σε δαχτυλίδι αποτελεί αναβάθμιση της γραμμικής. Η διαφορά τους είναι ότι ενώνονται οι κόμβοι στα άκρα δημιουργώντας μια κυκλική πορεία επικοινωνίας. Στην πρώτη υλοποίηση της τοπολογίας αυτής μεταφέρονταν τα δεδομένα προς μια κατεύθυνση. Μετέπειτα υλοποιήθηκε παράλληλα άλλο ένα δαχτυλίδι μεταφοράς

δεδομένων προς την αντίθετη κατεύθυνση ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ανοχή σε πιθανή βλάβη.



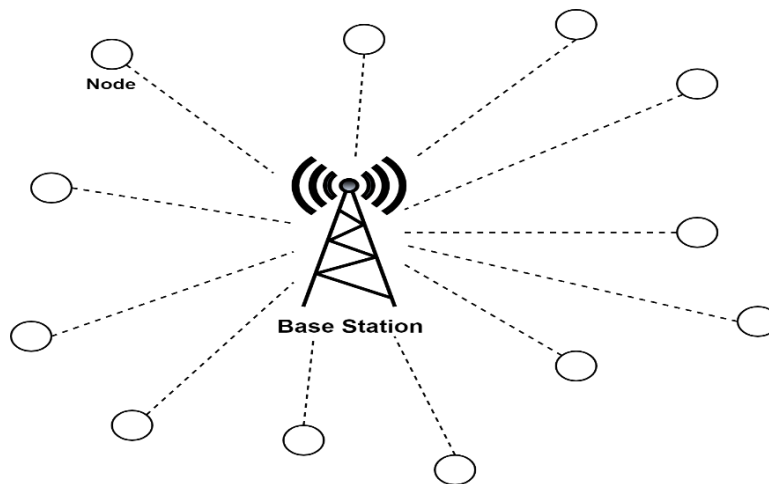
*Σχήμα 2-20: Ring Τοπολογία.*

### **Tree Topology**

Η τοπολογία δέντρου οργανώνει τους κόμβους σε δομή επιπέδων, με τον κεντρικό κόμβο να αναλαμβάνει το ρόλο της ρίζας του δένδρου δρομολόγησης δεδομένων. Οι κόμβοι δημιουργούν σχέσεις γονέα-παιδιού συνδεδεμένοι διαδοχικά στα επίπεδα, παρέχοντας έτσι μια ιεραρχική δομή. Παρά την επεκτασιμότητα και τη δυνατότητα ανίχνευσης σφαλμάτων που προσφέρει αυτή η τοπολογία, προκύπτει η ανάγκη κόμβων υψηλότερων προδιαγραφών στα ανώτερα επίπεδα, λόγω της μεγάλης συσσώρευσης δεδομένων καθώς αυτά δρομολογούνται προς τη ρίζα.

### **Star Topology**

Αποτελεί τη συχνότερη υλοποίηση σε δίκτυα αισθητήρων μεγάλης κλίμακας. Πολλά από τα δίκτυα που χρησιμοποιούμε στη καθημερινότητά μας υλοποιούνται με την τοπολογία αστέρα, όπως είναι το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Βασίζεται στην επικοινωνία όλων των τερματικών κόμβων με έναν κεντρικό που αποτελεί και το σταθμό βάσης του δικτύου. Οι κόμβοι δεν έχουν καμία επικοινωνία μεταξύ τους παρά μόνο με το σταθμό βάσης (Base Station - BS), έτσι ο σταθμός βάσης διαχειρίζεται ολόκληρη τη μεταφορά δεδομένων στο δίκτυο. Γι' αυτό το λόγο και πρέπει να έχει πολύ μεγαλύτερα ενεργειακά αποθέματα σε σχέση με τους τερματικούς κόμβους όπως και μεγαλύτερη ισχύ στην μετάδοση σε περίπτωση ασύρματου επικοινωνίας. Η οργάνωση αυτή παρέχει πολύ εύκολη επεκτασιμότητα και ταυτόχρονα συμβάλει στην απλοποίηση των τερματικών κόμβων στους τομείς της πολυπλοκότητας, του κόστους και της κατανάλωσης ενέργειας. Σε πιθανή βλάβη του κεντρικού σταθμού το δίκτυο δεν υλοποιεί καμία επικοινωνία.



*Σχήμα 2-21: Τοπολογία Αστέρα (Star Topology).*

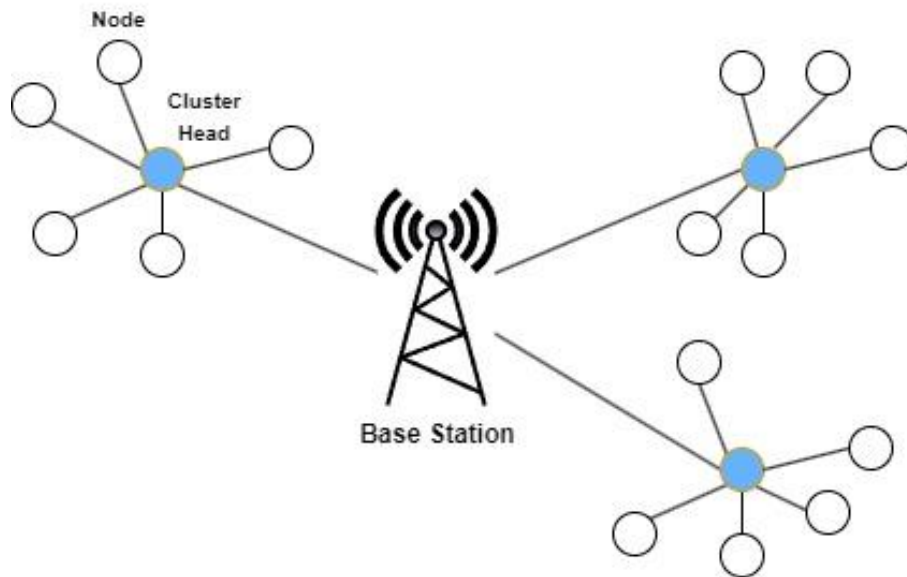
Χρησιμοποιώντας τις απλές μεθόδους δικτύωσης και συνδυασμούς αυτών, η επιστήμη προχώρησε στην ανάπτυξη τοπολογιών, που στοχεύουν στη βελτίωση διαφόρων τομέων. Τέτοιοι είναι η αξιοπιστία στην επικοινωνία, η αντοχή σε βλάβες, η ταχύτητα μετάδοσης, η εμβέλεια και ο χρόνος ζωής του δικτύου στο σύνολό του αλλά και για τους κόμβους ξεχωριστά. Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε σε τοπολογίες που βελτιώνουν κυρίως την διάρκεια ζωής του δικτύου.

#### 2.7.4. LEACH

Ο αλγόριθμος LEACH (**Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy**) αποτελεί ένα αλγόριθμο δυναμικής ομαδοποίησης (clustering) κόμβων που αποσκοπεί στην εξοικονόμηση ενέργειας ολόκληρου του δικτύου. Ο αλγόριθμος έχει ως προκάτοχο την στατική ομαδοποίηση κόμβων, όπου κάθε ομάδα (cluster) έχει έναν συγκεκριμένο κόμβο επικεφαλής. Όλοι οι κόμβοι της ομάδας επικοινωνούν με τον επικεφαλής και αυτός με τη σειρά του αναμεταδίδει στον Σταθμό Βάσης (Base Station – BS). Η ομαδοποίηση αυτή συνεισφέρει στην μείωση της απόστασης μετάδοσης και στην δυνατότητα επέκτασης του δικτύου. Για την αποφυγή παρεμβολών και συγκρούσεων κατά τη διάρκεια μιας μετάδοσης χρησιμοποιείται η μέθοδος TDMA, η οποία δίνει σε κάθε κόμβο μια μοναδική χρονική θυρίδα στην οποία θα μπορεί να μεταδίδει. Το πρόβλημα στο στατικό clustering είναι ότι οι επικεφαλής των ομάδων διαχειρίζονται δυσανάλογα περισσότερο όγκο δεδομένων και επικοινωνιών σε σχέση με απλούς τερματικούς κόμβους με αποτέλεσμα να έχουν αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερη διάρκεια ζωής ή στην ανάγκη διαφοροποίησης των επικεφαλής κόμβων κάνοντάς τους ισχυρότερους από τους υπόλοιπους.

Το LEACH αποτελεί ένα πρωτόκολλο, με κυρίαρχες αρχές την αυτό-οργάνωση και την προσαρμογή. Αναπτύχθηκε για να αναβαθμίσει τη στατική ομαδοποίηση. Οι κόμβοι οργανώνονται σε clusters και επιλέγουν ένα κόμβο ως cluster-head (CH), που αναλαμβάνει το ρόλο ενός τοπικού BS. Με απλά λόγια δημιουργούνται μικρότερα δίκτυα σε Star Topology, όπου το ρόλο του BS αναλαμβάνει ο CH. Η διαφοροποίηση έγκειται ότι στο LEACH αναλαμβάνουν - το ρόλο του CH - διαφορετικοί κόμβοι σε κάθε περίοδο για να διαμοιραστεί το φορτίο όσο το δυνατόν σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Εκτός αυτού το LEACH προβλέπει τη συγχώνευση δεδομένων στους CHs με σκοπό την ελαχιστοποίηση των δεδομένων που στέλνονται στο BS, συμβάλλοντας έτσι σε ακόμη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας στο σύστημα.

Οι κόμβοι επιλέγουν τους εαυτούς τους ως CH για μια χρονική περίοδο ανάλογα με μια πιθανότητα. Αφότου κάποιος επιλεγεί ως CH στέλνει σήμα προς όλους για την ενημέρωση της κατάστασής του. Οι μη-CH κόμβοι επιλέγουν σε ποιο cluster θα συμμετέχουν βάσει της λιγότερης ενέργειας επικοινωνίας με τον CH, συγκρίνοντας ουσιαστικά την ισχύ του σήματος ανάμεσα σε όλα τα μηνύματα των νέων CH. Μόλις οι κόμβοι οργανωθούν σε clusters ο κάθε CH δημιουργεί ένα χρονοδιάγραμμα για την επικοινωνία με τους κόμβους του. Αυτό επιτρέπει στους απλούς κόμβους να μπαίνουν σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας και να ξυπνούν κατά τη διάρκεια που τους έχει οριστεί για επικοινωνία εξοικονομώντας ακόμη περισσότερη ενέργεια. Κατά τη διάρκεια κανονικής λειτουργίας του συστήματος ο CH συλλέγει τα δεδομένα από όλους τους κόμβους, τα συγχωνεύει και τα στέλνει στο BS. Η συγχώνευση κρίνεται απαραίτητη καθώς μειώνει τον αριθμό επικοινωνιών από τον CH στο BS, ο οποίος συνήθως βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το δίκτυο και απαιτεί μεγάλη κατανάλωση ενέργειας σε κάθε επικοινωνία.

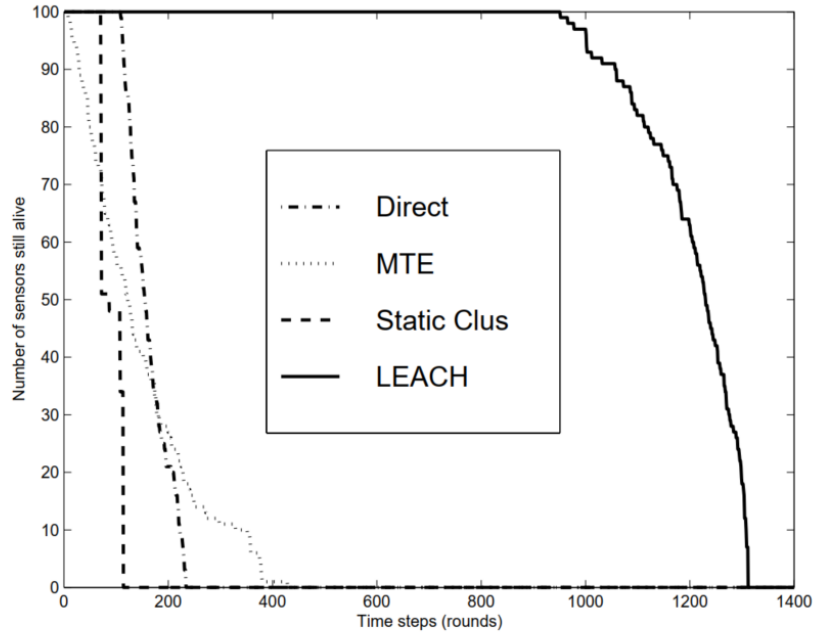


*Σχήμα 2-22: Τοπολογία πρωτοκόλλου LEACH.*

Στην πρώτη υλοποίηση που έγινε για το LEACH πρωτόκολλο από τους Heizelman, Chandrakasan & Balakrishnan [9], οι ερευνητές το σύγκριναν με τις μεθόδους direct transmission, Minimum Transmission Energy Routing (MTE) και Static Clustering. Σε σύγκριση με τις παραπάνω μεθόδους το LEACH έχει μεγαλύτερη απόδοση, καθώς διανέμει την ενέργεια, προσαρμόζοντας το δίκτυο ανάλογα με τους CH σε κάθε περίοδο. Επομένως, δεν χρειάζονται οι κόμβοι συνολική γνώση του δικτύου για να λειτουργήσει το πρωτόκολλο.

Πιο συγκεκριμένα, στην παραπάνω έρευνα οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι:

- Το LEACH μειώνει κατά 8 φορές την ενέργεια επικοινωνίας σε σύγκριση με direct transmission και MTE.
- Ο χρόνος έως ότου ο πρώτος κόμβος σταματήσει να λειτουργεί αυξήθηκε κατά 8 φορές, σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τρεις μεθόδους ενώ για τον τελευταίο κόμβο του δικτύου ο χρόνος αυτός αυξήθηκε κατά 3 φορές.



Σχήμα 2-23: Χρόνος ζωής συστήματος χρησιμοποιώντας *direct transmission*, *MTE routing*, *static clustering*, and *LEACH* with  $0.5 \text{ J/node}$  [9].

Παρόλη τη μεγάλη βελτίωση στο χρόνο ζωής του συστήματος, που προσφέρει το LEACH, έχει πολλά μειονεκτήματα τα οποία προέρχονται από την καθαρά τυχαία επιλογή των CH και δημιουργία των clusters. Τα μειονεκτήματα αυτά είναι [8]:

1. Η πιθανότητα να γίνει ένας κόμβος CH είναι ίδια για όλους είτε έχουν είτε δεν έχουν τη διαθέσιμη ενέργεια να το υποστηρίξουν [12]. Έτσι υπάρχει περίπτωση να εκλεγεί CH ένας κόμβος με μειωμένη ενέργεια, πράγμα που πιθανόν να οδηγήσει στον γρηγορότερο τερματισμό λειτουργίας του κόμβου και κατ' επέκταση του δικτύου.
2. Ο αριθμός των CH διαφέρει σε κάθε γύρο, καθώς γίνεται τυχαία επιλογή. Εκτός αυτού μπορεί ο CH να βρεθεί σε θέση απομακρυσμένη από τον BS ή από τους γειτονικούς του κόμβους [13]. Αυτά οδηγούν σε επιπλέον κατανάλωση ενέργειας για επικοινωνία στο επίπεδο του CH.
3. Ο CH παρέχει την μοναδική διαδρομή επικοινωνίας του cluster με τον BS, γεγονός που αποτρέπει τη χρήση του LEACH σε εφαρμογές μεγάλου βεληνικού [14].

Με τη πάροδο του χρόνου δημιουργήθηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις του LEACH. Στην επιλογή του CH λαμβάνουν υπόψη στοιχεία όπως είναι η διαθέσιμη ενέργεια, ο αριθμός των clusters, οι αποστάσεις, οι θέσεις και ο αριθμός των κόμβων σε λειτουργία με σκοπό την περαιτέρω επέκταση του χρόνου ζωής του συστήματος.

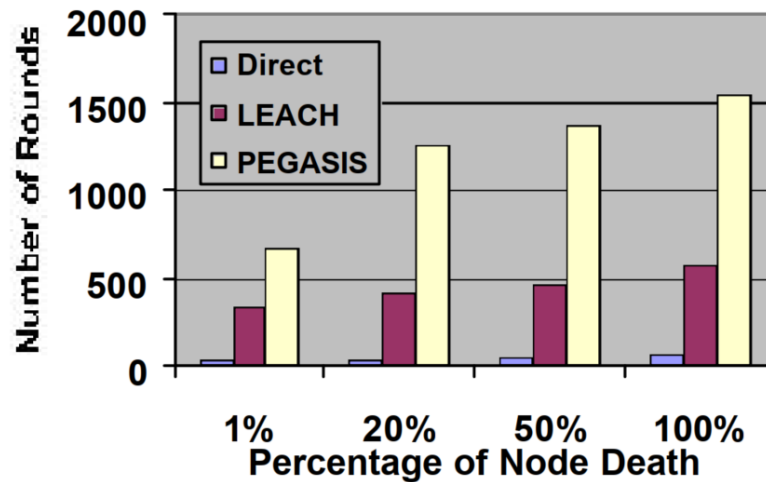
Οι νέες τεχνικές βασισμένες στο LEACH χρησιμοποιούν διαφοροποιήσεις του ανάλογα με το που θέλουν να εστιάσουν και με το είδος της εφαρμογής που χρησιμοποιούνται. Στην [8] διεξήχθη μια έρευνα που συγκρίνει τους περισσότερους τύπους βασισμένους στο LEACH και αναλύει την βελτίωση στην απόδοση του αρχικού πρωτοκόλλου. Σε καθένα από αυτούς, οι ερευνητές δίνουν έμφαση κυρίως στα κριτήρια επιλογής των CHs ώστε να βελτιώσουν τον τομέα που τους ενδιαφέρει. Ανάμεσα σε όλες τις διαφορετικές υλοποιήσεις και συγκρίσεις, οι ερευνητές κατέληξαν σε κάποιες μεθόδους που ξεχωρίζουν η κάθε μια στον τομέα της. Το LEACH-MAC απεδείχθη το καλύτερο σε περίπτωση που η διάρκεια ζωής του δικτύου είναι το κύριο ζητούμενο. Το I-LEACH, που βασίζεται στην επανεκλογή του CH, ανάλογα με τη διαθέσιμη ενέργεια του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις περισσότερες περιπτώσεις είτε σε μικρά είτε σε μεγάλα δίκτυα. Επίσης, το LEACH-KH μπορεί να πετυχαίνει μεγάλο ρυθμό μεταφοράς πακέτων (Packet Delivery Ratio – PDR). Τέλος, η χρήση του αξιοποιείται κυρίως σε δίκτυα όπου η αξιόπιστη και ταχεία μεταφορά δεδομένων παίζουν τον καταλυτικό ρόλο.

### **2.7.5. PEGASIS**

Η συγκέντρωση δεδομένων σε WSNs από αισθητήρες, που χρειάζεται να λειτουργούν για μεγάλο χρονικό διάστημα, βοηθά ενεργά στην εξοικονόμηση ενέργειας. Το LEACH - πρωτόκολλο που αναφέρθηκε παραπάνω - αποτελεί μια τοπολογία, η οποία χρησιμοποιεί clusters για την συγκέντρωση πληροφοριών προτού αποσταλούν στο BS. Η PEGASIS (Power-Efficient GATHERing in Sensor Information Systems) είναι μια τοπολογία τύπου αλυσίδας, η οποία αποτελεί μια βελτιστοποιημένη έκδοση του LEACH. Ως κεντρική αρχή του PEGASIS είναι η ελαχιστοποίηση των επικοινωνιών και του συνόλου των δεδομένων προς το BS. Η συγχώνευση των δεδομένων από κόμβο σε κόμβο βοηθά στην μείωση της συνολικής μεταφοράς δεδομένων προς το BS. Πιο συγκεκριμένα, κάθε κόμβος συγχωνεύει τα δικά του δεδομένα με τα δεδομένα που ήρθαν απ' τον προηγούμενό του, στέλνοντας τα στον επόμενο κόμβο. Στο LEACH αυτή η συγχώνευση γίνεται από τους cluster heads, και αυτοί με τη σειρά τους μεταδίδουν στον BS. Όμως υπάρχει περίπτωση οι κόμβοι να έχουν μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους ή με το BS λόγω της τυχαιότητας της επιλογής των CHs. Το PEGASIS περιορίζοντας τις επικοινωνίες ανάμεσα σε γειτονικούς κόμβους και ορίζοντας ένα συγκεκριμένο κόμβο επικοινωνίας με τον BS σε κάθε γύρο, επιτυγχάνει περαιτέρω αναβαθμίσεις.

Το PEGASIS επιτυγχάνει σχεδόν βέλτιστη συγχώνευση πληροφοριών σε ένα WSN. Κεντρική ιδέα της τοπολογίας αυτής είναι η δημιουργία αλυσιδωτών επικοινωνιών ανάμεσα σε γειτονικούς κόμβους με τελικό αποδέκτη το BS. Με το τρόπο αυτό

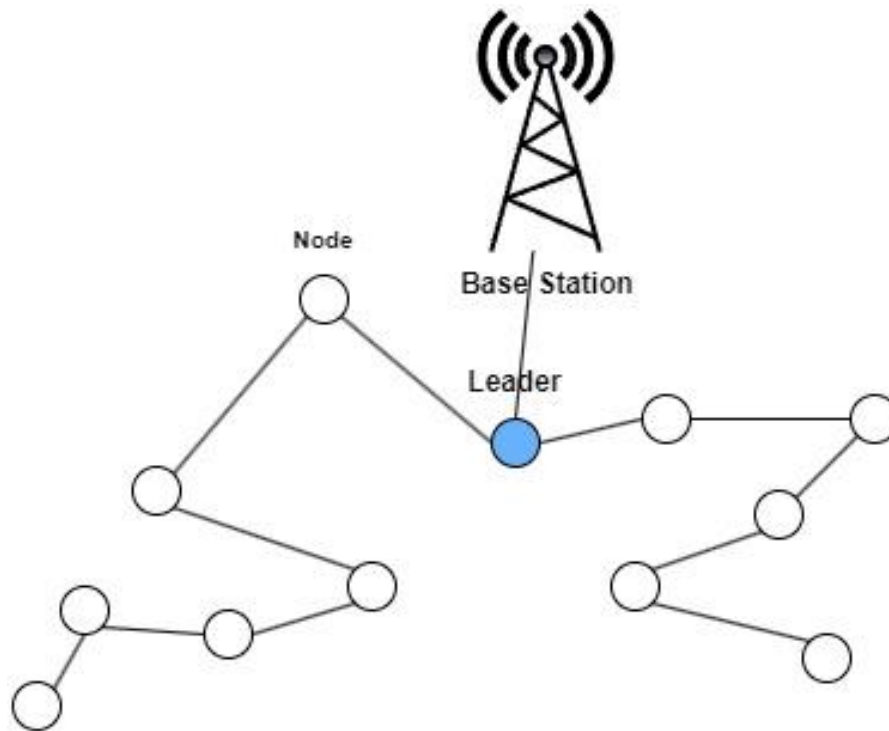
κατανέμεται αποδοτικά το ενεργειακό φορτίο του δικτύου και μπορεί να αποφέρει 100% έως και 300% αύξηση του χρόνου ζωής, όταν το 1%, 20%, 50% ή 100% των κόμβων έχει σταματήσει να λειτουργεί σε σύγκριση με το LEACH [10].



Σχήμα 2-24: Απόδοση *Direct*, *LEACH* και *PEGASIS* για ένα  $100m \times 100m$  δίκτυο με αρχική ενέργεια  $.5J/\text{κόμβο}$  [10]. [10]

Η διαδικασία κατασκευής των διάδρομων επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων γίνεται από τους πιο απομακρυσμένους κόμβους προς το BS. Αρχικά, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί ότι οι πιο απομακρυσμένοι κόμβοι έχουν επαφή με κάποιο γειτονικό, καθώς ένας κόμβος που έχει ενταχθεί στο δίκτυο δεν μπορεί να προσπελαστεί ξανά και μπορεί κάποιος κόμβος να μείνει εκτός δικτύου. Μετέπειτα, όσο ο αλγόριθμος προχωρά αυξάνονται σταδιακά και οι αποστάσεις επικοινωνίας.





Σχήμα 2-25: Τοπολογία πρωτοκόλλου PEGASIS.

Ο τρόπος αυτός δημιουργίας του δικτύου και η συγχώνευση των δεδομένων σε κάθε κόμβο ξεχωριστά βελτιώνει και την αποφυγή αποτυχίας του δικτύου σε περίπτωση που σταματήσει να λειτουργεί κάποιος κόμβος, μέσω της εύκολης επαναδρομολόγησης της επικοινωνίας.

Το PEGASIS αποτελεί βελτίωση του LEACH, αφού εξοικονομεί ενέργεια σε πολλά στάδια συγκριτικά. Πρώτον, κάθε αισθητήρας συμμετέχει στη συγχώνευση δεδομένων. Δεύτερον, μειώνονται οι αποστάσεις επικοινωνίας. Τρίτον, ένας μόνο κόμβος δύναται να επικοινωνεί με τον BS.

Πιο συγκεκριμένα, οι κύριες βελτιώσεις του PEGASIS σε σχέση με το LEACH, μετά από πειράματα που έγιναν είναι [10]:

- Περίπου 2x περισσότερους γύρους όταν 1%, 20%, 50% ή 100% των κόμβων σταματάει να λειτουργεί σε ένα 50m x 50m δίκτυο.
- Περίπου 3x περισσότερους γύρους όταν 1%, 20%, 50% ή 100% των κόμβων σταματάει να λειτουργεί σε ένα 100m x 100m δίκτυο.
- Ισόβαθμη διασπορά του ενεργειακού φορτίου σε όλους τους κόμβους του δικτύου.
- Απόδοση κοντά στη βέλτιστη που μπορεί να επιτευχθεί.

Οι βελτιώσεις αυτές αυξάνονται όσο αυξάνεται και το μέγεθος του δικτύου σε πλήθος κόμβων αλλά και στο συνολικό εμβαδόν κάλυψης.



# 3.

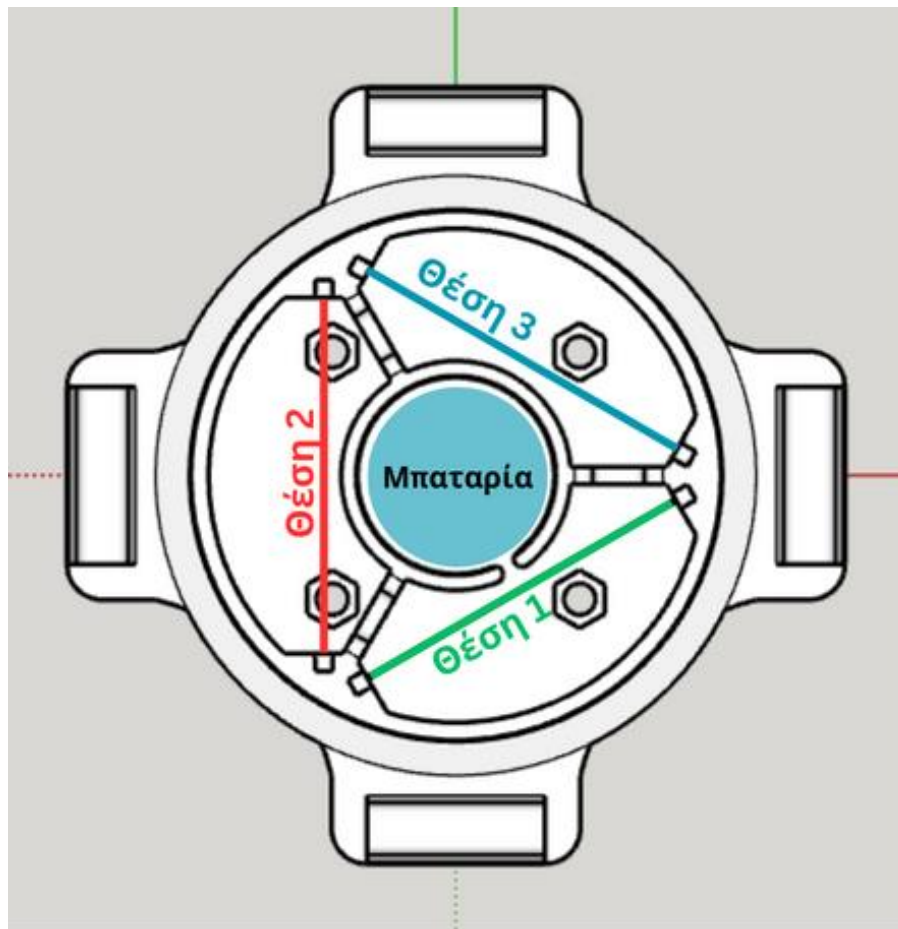
## ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ

---

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται ο σχεδιασμός του συστήματος που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, που αφορά την κατασκευή κόμβου για χρήση σε WSN. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη ενότητα αναλύεται ο σχεδιασμός του περιβλήματος του κόμβου που υλοποιήθηκε. Η επόμενη ενότητα αναφέρεται στον τρόπο σχεδιασμού της πλακέτας, πάνω στην οποία εγκαταστάθηκαν όλα τα απαραίτητα συστήματα του κόμβου. Στην συνέχεια, περιγράφεται ο σχεδιασμός του συστήματος παροχής ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ και χρήσης μπαταρίας λιθίου. Στη τέταρτη ενότητα παρουσιάζεται η κεντρική μονάδα ελέγχου των διαδικασιών του κόμβου και τα στοιχεία τα οποία τη συνοδεύουν. Τέλος, στη τελευταία ενότητα περιγράφεται το βασικό κύκλωμα επικοινωνίας το οποίο ενσωματώθηκε στη πλακέτα.

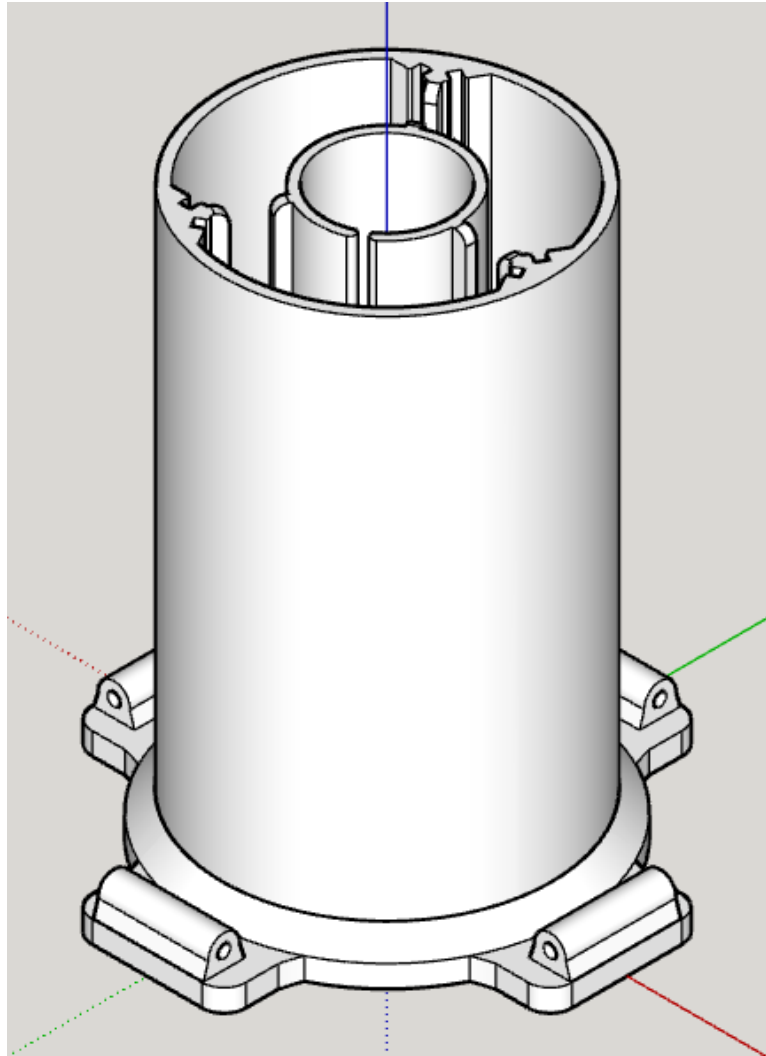
### 3.1. Σχεδιασμός του Περιβλήματος

Ο σχεδιασμός του περιβλήματος παίζει σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση του κόμβου καθώς καθορίζει τη σχεδίαση και άλλων μερών του. Ο σχεδιασμός αυτός στοχεύει στην μη παρεμπόδιση στην πτήση του drone αλλά και στο να δώσει ευελιξία στην προσαρμογή του κόμβου σε διαφορετικές εφαρμογές.



*Σχήμα 3-1: Σχέδιο κάτοψης του περιβλήματος.*

Χρησιμοποιήθηκε συμμετρική σχεδίαση με σκοπό ομοιόμορφη κατανομή του βάρους και διατήρησής του στο κέντρο καθώς και την διατήρηση της θέσης του κατά την μεταφορά και την τοποθέτηση. Όπως φαίνεται και στην κάτοψη, χρησιμοποιήθηκε ένας κυλινδρικός σχεδιασμός, όπου στο κέντρο βρίσκεται η θέση για την μπαταρία. Γύρω από την μπαταρία βρίσκονται οι τρεις ίδιες θέσεις για τις πλακέτες διαστάσεων 60mm\*40mm\*2mm, εκ των οποίων η μία χρησιμοποιείται για την πλακέτα που υλοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική εργασία και οι άλλες δύο για την πρόσθεση οποιουδήποτε επιπλέον στοιχείου μπορεί να απαιτηθεί, ενώ μεταξύ τους υπάρχουν κενά για να μπορέσουν εύκολα να περάσουν καλώδια επικοινωνίας.



*Σχήμα 3-2: Τρισδιάστατη απεικόνιση του περιβλήματος.*

Όπως φαίνεται στην τρισδιάστατη απεικόνιση στην παραπάνω εικόνα, στην κάτω περιμετρικά του περιβλήματος υπάρχουν οι βάσεις για την τοποθέτηση των τεσσάρων PVs, οι οποίες τους δίνουν και ένα άξονα ελευθερίας ώστε να μπορούν να διπλώνουν κατά την μεταφορά και να ανοίγουν μετά την τοποθέτηση. Επιπλέον οι πλακέτες τοποθετούνται ολισθαίνοντας κατακόρυφα από το επάνω μέρος για να είναι εύκολη η αντικατάστασή τους και η σύνδεσή τους με τα υπόλοιπα στοιχεία του κόμβου αφού όλες οι διεπαφές βρίσκονται στο επάνω μέρος όπως αναγράφεται στην επόμενη ενότητα.

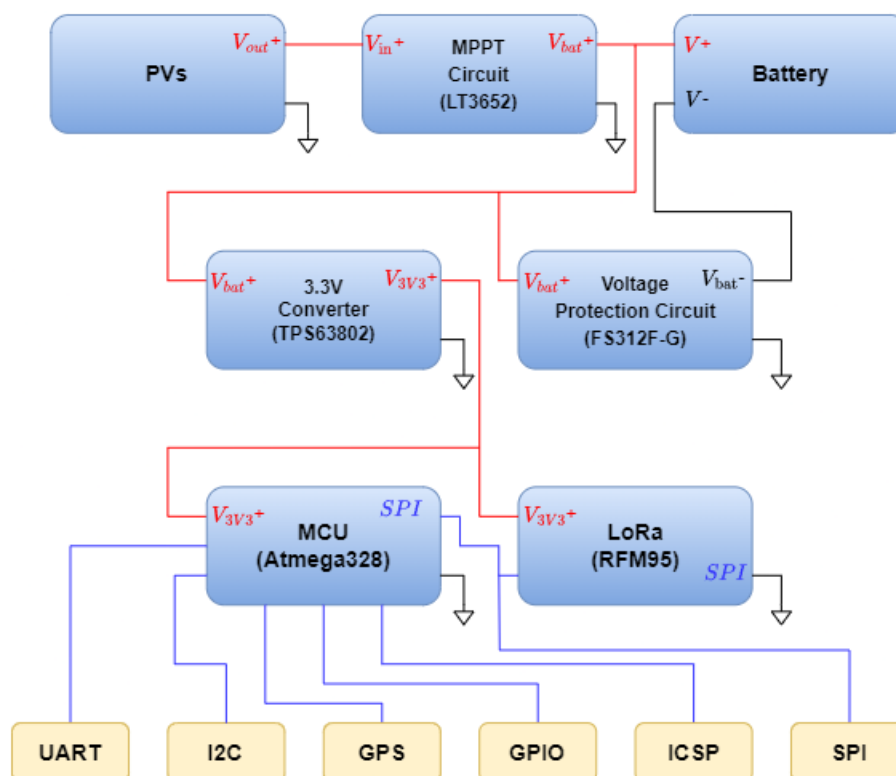
### **3.2. Σχεδιασμός της πλακέτας**

Ο σχεδιασμός της πλακέτας είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με τον σχεδιασμό του περιβλήματος του κόμβου. Το περίβλημα περιορίζει το μέγεθος και το πάχος των πλακετών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αρχικά έγινε μελέτη με συνδυασμούς

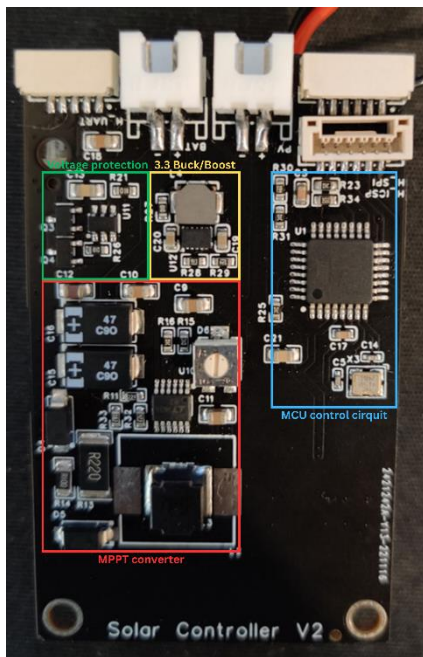
έτοιμων συστημάτων της αγοράς, που όμως δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν καθότι παραβιάζονταν οι περιορισμοί.

Κεντρική ιδέα στην κατασκευή της πλακέτας αποτέλεσε η λειτουργικότητα και ο ρόλος της μητρικής πλακέτας ενός υπολογιστή. Σύμφωνα με αυτό, έπρεπε όλα τα βασικά συστήματα που συνθέτουν τον κόμβο να συνδυαστούν και να εγκατασταθούν σε μία πλακέτα. Τα βασικά αυτά συστήματα και οι μεταξύ τους συνδέσεις διακρίνονται στο Σχήμα 3-3.

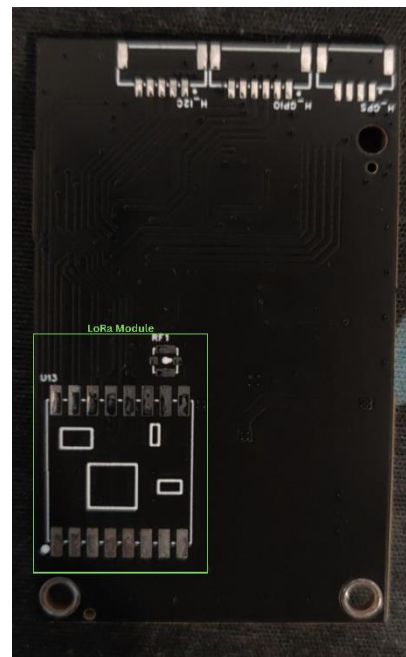
Στην είσοδο του MPPT κυκλώματος συνδέεται η συστοιχία των PVs ενώ στην έξοδό του η μπαταρία λιθίου. Μεταξύ του αρνητικού πόλου της μπαταρίας και της γείωσης του κυκλώματος παρεμβάλλεται το κύκλωμα προστασίας τάσης. Στην είσοδο του Buck/Boost μετατροπέα 3,3V συνδέεται η μπαταρία, της οποίας την τάση σταθεροποιεί στα 3,3V στην έξοδό του. Ο παραπάνω μετατροπέας αναλαμβάνει και την τροφοδοσία όλων των υπόλοιπων συστημάτων (MCU, LoRa, τις παροχές τάσης στις εξωτερικές διεπαφές). Ο MCU Atmega328 συνδέεται εσωτερικά στην πλακέτα με το κύκλωμα LoRa μέσω των SPI διεπαφών τους. Ταυτόχρονα συνδέεται με όλες τις εξωτερικές διεπαφές που είναι εγκατεστημένες στα άκρα της πλακέτας (SPI, ICSP, I2C, GPS με υλοποίηση software serial και GPIO).



Σχήμα 3-3: Σχηματικό διάγραμμα του κυκλώματος της πλακέτας.



A.



B.

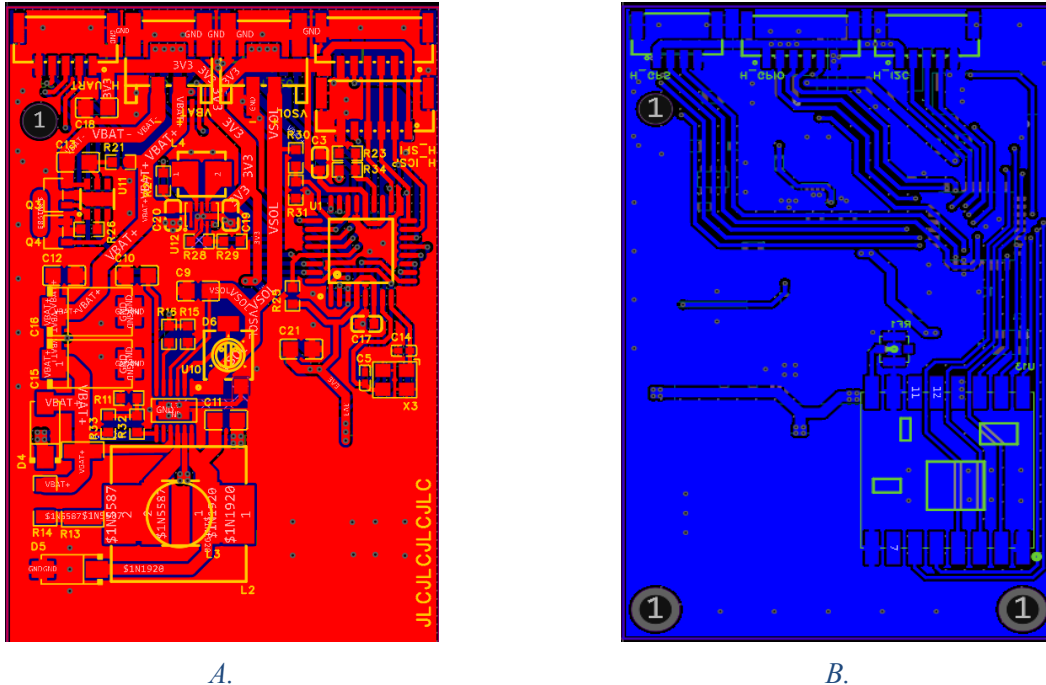
Σχήμα 3-4: Top (A) και Bottom (B) Layer της κατασκευασμένης πλακέτας.

Το περίβλημα προβλέπει την στέγαση τριών πλακετών μεγέθους 60mm x 40mm. Αυτό είναι και το μέγεθος που χρησιμοποιήθηκε για την σχεδίαση ολόκληρης της παραπάνω πλακέτας, ο σχεδιασμός της οποίας έγινε στο πρόγραμμα EasyEDA PRO.

Η συγκεκριμένη πλακέτα είναι σχεδιασμένη σε δύο Layers (Top και Bottom). Στο Top Layer όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-4(A) βρίσκονται ο MPPT converter, ο DC-DC 3,3V converter, το κύκλωμα προστασίας τάσης και η μονάδα ελέγχου. Επιπλέον στην πάνω πλευρά βρίσκονται και πέντε από τους οκτώ connectors που διαθέτει η πλακέτα. Βλέποντας το Σχήμα 3-4(A) από αριστερά προς τα δεξιά βρίσκονται ένας GH CON 5pin για UART επικοινωνία, δύο XH CONs 2pin για σύνδεση της μπαταρίας και των φωτοβολταϊκών αντίστοιχα, ένας GH CON 6pin για SPI επικοινωνία πάνω δεξιά και ένας GH CON 6pin κάθετος για προγραμματισμό μέσω ICSP κάτω δεξιά. Οι τέσσερις πρώτοι έχουν προσανατολισμό παράλληλα με το μήκος της πλακέτας καθώς χρησιμοποιούνται για συνδέσεις εσωτερικά του κόμβου, ενώ ο ICSP κάθετα αφού χρησιμοποιείται μόνο για φόρτωση bootloader στον Atmega328. Στο Bottom Layer, από το Σχήμα 3-4(B), βρίσκεται η υποδοχή για το κύκλωμα LoRa όπως και τρεις ακόμη connectors. Παρόμοια από αριστερά προς τα δεξιά ένας GH 4pin για GPS σύνδεση (υλοποίηση με Software Serial), ένας GH 6pin με διάφορα GPIO σήματα (ADC, Interrupt) και ένας GH 5pin για I2C επικοινωνία.

Όλες οι γραμμές σύνδεσης που τυπώθηκαν πάνω στη πλακέτα είναι σχεδιασμένες χειροκίνητα. Το πλάτος κάθε γραμμής σήματος συνήθως είναι  $\frac{1}{100}in$  ή  $0.254mm$ , με

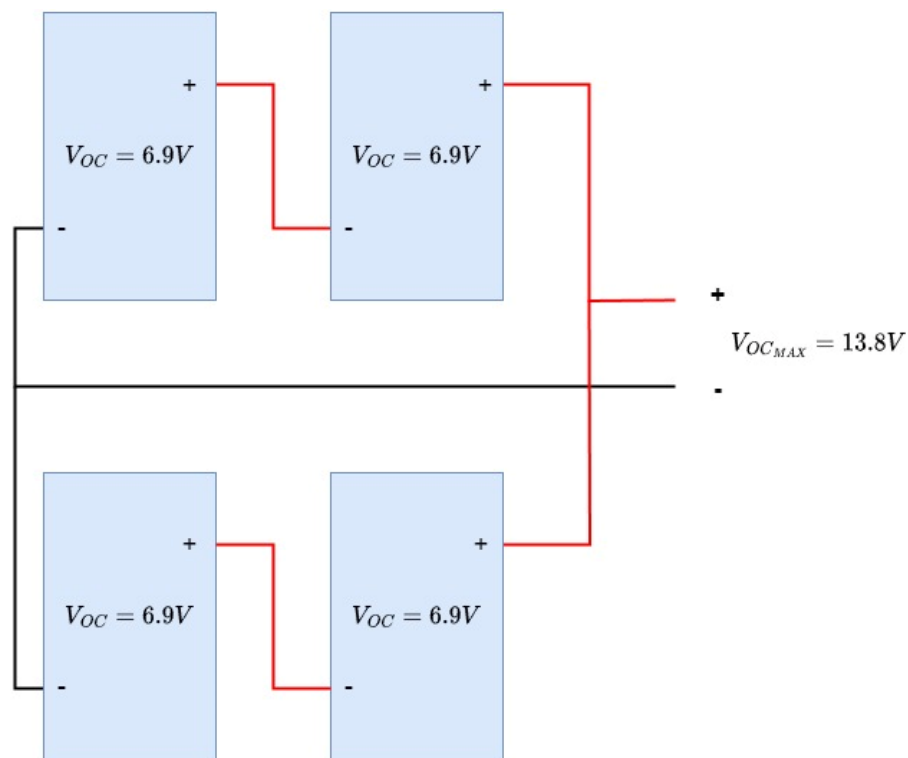
μέγιστη ανοχή ρεύματος περίπου 1A. Όμως, όπως στην περίπτωση του αγωγού που συνδέει την έξοδο του κυκλώματος του MPPT μετατροπέα με την μπαταρία, το ρεύμα μπορεί να φτάσει έως και τα 2A. Έτσι ανάλογα με το απαιτούμενο ρεύμα στο εκάστοτε αγωγό οριζόταν και το κατάλληλο πλάτος του. Το μεγαλύτερο πλάτος σχεδιάστηκε στον προαναφερθέν αγωγό με πλάτος τα 1,44mm. Η σχεδίαση των αγωγών παρουσιάζεται στις παρακάτω φωτογραφίες.





Όσον αφορά την συγκομιδή ενέργειας του κόμβου χρησιμοποιήθηκαν 4 πάνελ με διαστάσεις 125x63 mm, ονομαστικής ισχύος 1W και τάσης 6V. Για την αποθήκευση της ενέργειας χρησιμοποιήθηκε μπαταρία τύπου Li-ion 21700 με ονομαστική τάση 3,7V και χωρητικότητα 5000mAh. Το ρόλο της μεταξύ τους σύνδεσης αναλαμβάνει το τσιπ LT3652. Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο τσιπ υλοποιεί φόρτιση συστοιχίας μπαταριών λιθίου έως και 14,4V με χρήση αλγορίθμου MPPT. Το εύρος τάσης εισόδου λειτουργίας του είναι 4,95-32V και το μέγιστο ρεύμα φόρτισης 2A.

Για την επίτευξη της μέγιστης απόδοσης της μετατροπής ισχύος χρειάζεται τη μικρότερη δυνατή διαφορά ανάμεσα στην τάση εισόδου και εξόδου. Συνεπώς επιλέχθηκε η συνδεσμολογία των πάνελ ανά δύο σε σειρά και μεταξύ τους παράλληλα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-6.



Σχήμα 3-6: Συνδεσμολογία PVs.

Η συγκεκριμένη συνδεσμολογία δίνει μέγιστη τάση εξόδου 13,8V, μέγιστο ρεύμα εξόδου 0,2A ενώ ταυτόχρονα αποφεύγεται το κατώτατο όριο των 4,95V του LT3652. Επομένως επιλέχθηκαν τα κατάλληλα ηλεκτρονικά στοιχεία (αντιστάσεις, πηνία, πυκνωτές) σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή για την ρύθμιση της τάσης εισόδου και εξόδου.

Στη συνέχεια υλοποιήθηκε ένα σύστημα παροχής σταθερής τάσης 3,3V για την τροφοδοσία των επιμέρους λογικών κυκλωμάτων. Έγινε χρήση ενός DC-DC Buck/Boost converter καθώς το εύρος της τάσης εισόδου του από την μπαταρία είναι 2,5-4,2V. Για

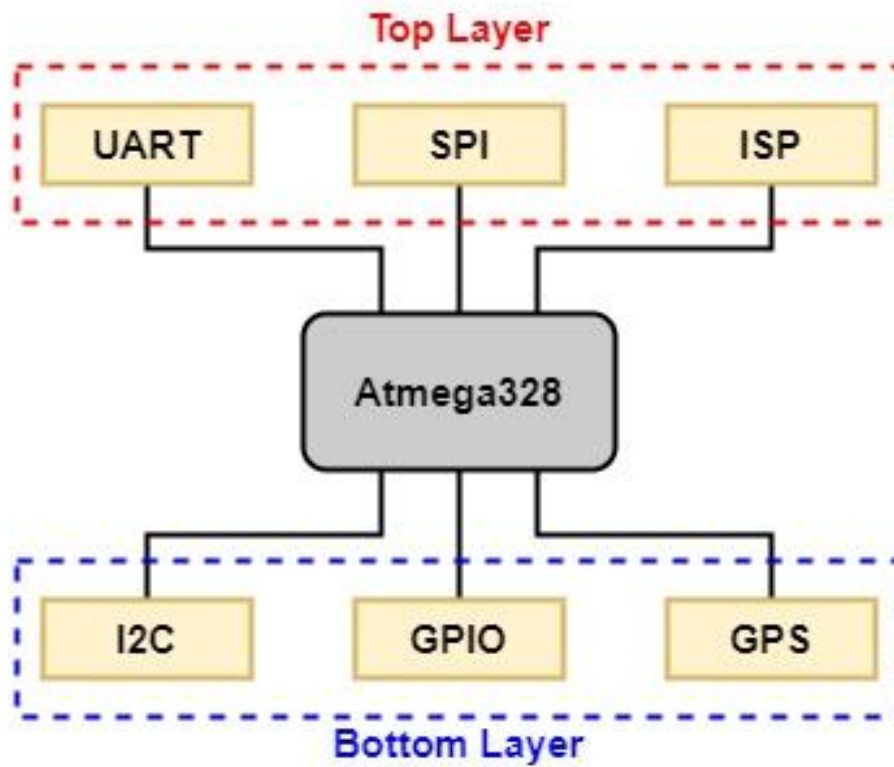
την υλοποίηση του επιλέχθηκε ο Buck/Boost μετατροπέας TPS63802, ο οποίος μπορεί να δώσει προγραμματιζόμενη τάση στο εύρος 1,8-5,2V και μέγιστο ρεύμα 2A. Επιλέγοντας, όπως και προηγούμενα, τα κατάλληλα ηλεκτρονικά στοιχεία σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή, ρυθμίστηκε να παρέχει σταθερά 3,3V.

Τέλος, υλοποιήθηκε ένα κύκλωμα προστασίας της μπαταρίας, χρησιμοποιώντας το ολοκληρωμένο FS312F-G, το οποίο λειτουργεί σαν διακόπτης, επιτρέποντας στην μπαταρία να λειτουργεί όταν η τάση της βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές 2,9 – 4,25V. Σε περίπτωση που ανιχνεύσει τάση πέραν των ορίων αυτών διακόπτει την παροχή στο φορτίο από την μπαταρία. Για την επανασύνδεσή της μπαταρίας το κύκλωμα πρέπει να ανιχνεύσει τάση 3V, αν βρίσκεται στην κατάσταση υπερεκφόρτισης και 4,14V, αν για κάποιο λόγο (π.χ. σφάλμα του κυκλώματος φόρτισης) η τάση της μπαταρίας προηγουμένως έχει υπερβεί το επιτρεπτό όριο.

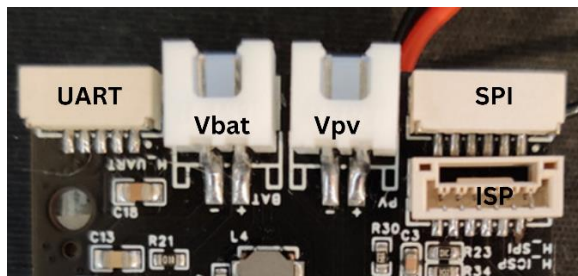
### **3.4. Κεντρική μονάδα ελέγχου**

Για την κεντρική μονάδα ελέγχου κρίθηκε κατάλληλος ο μικροελεγκτής (microcontroller – MCU), διότι παρέχει συνήθως επαρκή επεξεργαστική ισχύ και αρκετούς τρόπους απευθείας σύνδεσης εξωτερικών συσκευών, αισθητήρων κ.α.

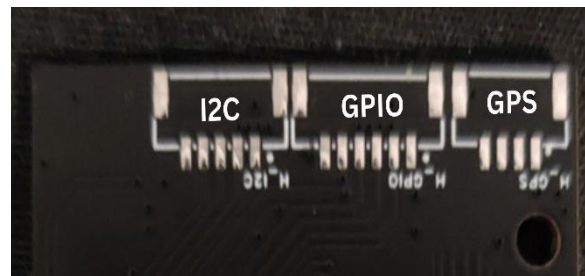
Πιο συγκεκριμένα, επιλέχθηκε ο Atmega328 της ATMEL, ένας εκ' των δημοφιλέστερων MCUs. Η χαμηλή κατανάλωση του, η συγκέντρωση όλων των απαραίτητων διεπαφών και η ευκολία στον προγραμματισμό είναι από τα κύρια χαρακτηριστικά που αναζητούσε η συγκεκριμένη υλοποίηση. Πιο συγκεκριμένα, στο κόμβο που κατασκευάστηκε παρέχονται 8 ADCs (Analog to Digital Converters) των 10-bit ανάλυσης, 2 SPI, 1 I2C, 6 PWM και UART διεπαφές από τον συγκεκριμένο μικροελεγκτή. Στον τελικό σχεδιασμό της πλακέτας δίνεται η δυνατότητα χρήσης όλων αυτών των διεπαφών από τους GH connectors που είναι συνδεδεμένοι πάνω της. Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται όλες οι συνδέσεις του MCU προς τους εξωτερικούς connectors της πλακέτας αρχικά σε διάγραμμα και στη συνέχεια σε φωτογραφίες.



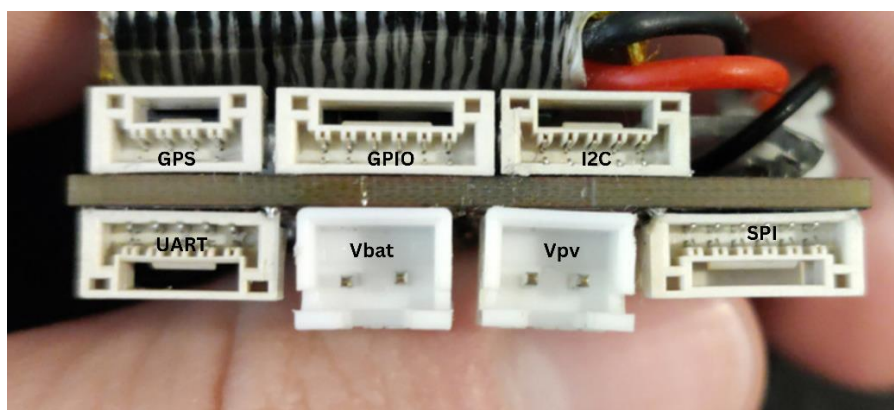
Σχήμα 3-7: Σχηματικό διάγραμμα του MCU με τις εξωτερικές διεπαφές.



A.



B.

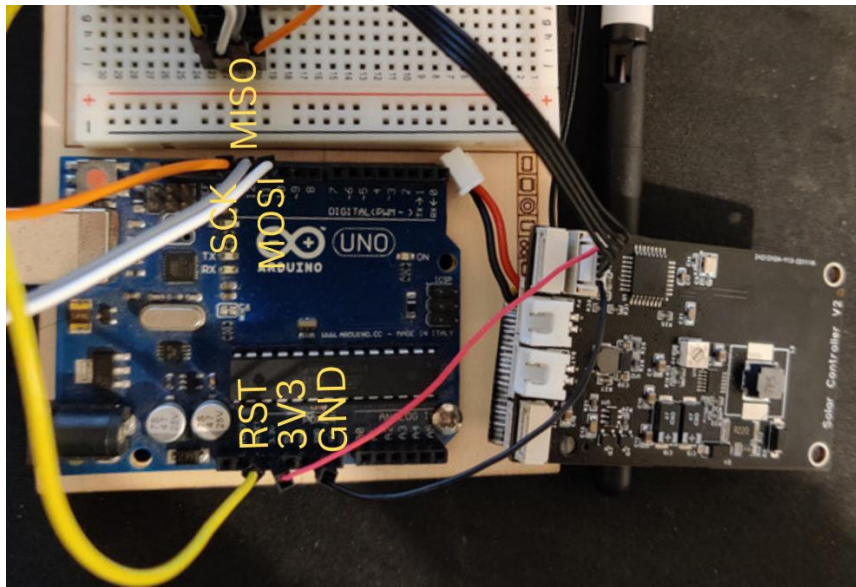


Γ.

Σχήμα 3-8: Θέσεις των connectors: Top Layer Connectors (A), Bottom Layer Connectors (B), Επάνω πλευρά (Γ).

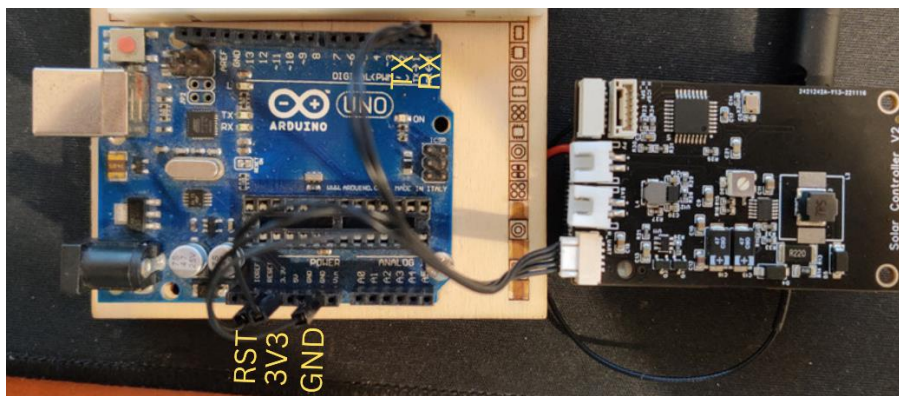
Για τον προγραμματισμό του Atmega328 χρησιμοποιήθηκε πλακέτα Arduino UNO. Αρχικά έγινε η φόρτωση του bootloader μέσω της διεπαφής ISP. Χρησιμοποιήθηκε bootloader του Arduino UNO καθώς στον Atmega328 έχει συνδεθεί κρύσταλλος 16MHz όπως υπάρχει και στο UNO. Η διαδικασία έχει ως εξής:

- Συνδέθηκαν τα ISP pins του Arduino Uno με τα αντίστοιχα στην πλακέτα (ISP connector).
- Προγραμματίστηκε το Arduino UNO να λειτουργεί ως ISP.
- Επιλέχθηκε ο bootloader και δόθηκε η εντολή burn bootloader για την φόρτωσή του.



*Σχήμα 3-9: Συνδεσμολογία ISP για φόρτωση bootloader.*

Στην συνέχεια, για τον προγραμματισμό του Atmega328 με κανονικό πρόγραμμα, αφαιρέθηκε ο προεγκατεστημένος Atmega328p από το Arduino UNO για να χρησιμοποιηθούν τα pin RESET, RX και TX για την επικοινωνία με τον υπολογιστή όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-10.



*Σχήμα 3-10: Συνδεσμολογία UART για προγραμματισμό.*



### 3.5. Επικοινωνία

Η κύρια επικοινωνία του κόμβου υλοποιείται με πρωτόκολλο LoRa, για το οποίο επιλέχθηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα RFM95. Το συγκεκριμένο κύκλωμα υλοποιείται γύρω από το τσιπ SX1276 και είναι προγραμματισμένο για συχνότητα επικοινωνίας στα 868MHz.

Πάνω στην πλακέτα έχουν τυπωθεί οι ακροδέκτες του RFM95, οι οποίοι συνδέονται εσωτερικά με τον Atmega328 μέσω SPI επικοινωνίας. Το RFM95 κολλήθηκε στο εργαστήριο πάνω στην πλακέτα και συνδέθηκε μια μικρή κεραία με +2dbm ενίσχυση για την επίτευξη της ισορροπίας μεταξύ ισχύος σήματος και κατανάλωσης. Επιπλέον τοποθετήθηκε και μια μικρή μπαταρία λιθίου για να διευκολυνθεί η διαδικασία των πειραμάτων.



*Σχήμα 3-11: RFM95 τοποθετημένο στην πλακέτα.*

Από τον MCU ορίστηκαν τα κατάλληλα pin επικοινωνίας, η συχνότητα επικοινωνίας (868MHz), η εσωτερική ενίσχυση σήματος στα 13db και το spreading factor στο 7 για την μεγαλύτερη δυνατή απόσταση και αξιοπιστία στην επικοινωνία, αφού τα δεδομένα μετάδοσης είναι λίγα.

Κάθε πακέτο μετάδοσης ορίστηκε να έχει μια συγκεκριμένη δομή, για να μπορούν να αναγνωριστούν τα κύρια χαρακτηριστικά του και οι μετρήσεις από τον κόμβο. Αναλυτικά η δομή του πακέτου είναι η εξής:

Receiver	Sender	Node Type	Message type	Location	Battery SoC	Data
----------	--------	-----------	--------------	----------	-------------	------

- Receiver: 1-byte ανά επίπεδο κόμβου, π.χ. αν ο κόμβος βρίσκεται στο 3<sup>ο</sup> επίπεδο θα χρησιμοποιηθούν 3 bytes.
- Sender: 1-byte/επίπεδο, όμοια με Receiver.

- Node Type: 1-byte, εξαρτάται από την τοπολογία του δικτύου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχουν 2 τύποι, CH:0 και N(ode):1.
- Message type: 1-byte, οι τύποι μηνυμάτων διαφέρουν ανάλογα με την χρήση. Για τη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε 2 τύπους, κατάστασης: 0 (GPS, κατάσταση μπαταρίας-SoC), δεδομένων: 1 (θερμοκρασία, υγρασία, πυκνότητα CO<sub>2</sub>) και ολική: 3, που περιέχει όλα τα δεδομένα σε ένα πακέτο.
- Location: 8-byte (2 floats), 4 για το γεωγραφικό μήκος και 4 για το γεωγραφικό πλάτος.
- Battery SoC: 1-byte, στο εύρος 2,8-4,2V με ανάλυση 256.
- Data: 3-byte, 1 για υγρασία στο εύρος 0-100% ανάλυσης 256, 1 για θερμοκρασία στο εύρος -30°C-60°C ανάλυσης 256, 1 για την πυκνότητα του CO<sub>2</sub>

Το μέγεθος πακέτου εξαρτάται από τον τύπο του. Το πακέτο κατάστασης αποτελείται από 13 bytes, των δεδομένων από 7 bytes και το ολικό από 16 bytes.

# 4.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

---

Σ' αυτή την ενότητα αναλύονται τα πειράματα και τα αποτελέσματα τους που διεξήχθησαν στη πλακέτα που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο Όπου χρειάστηκε χρησιμοποιήθηκε επιπλέον μια πλακέτα Arduino UNO. Οι περισσότερες μετρήσεις που έγιναν καταγράφηκαν με παλμογράφο ενώ υπάρχουν και κάποιες που μελετήθηκαν με αισθητήρες από το Arduino.

Αρχικά μελετήθηκε το σύστημα παροχής ενέργειας σε όλα του τα στάδια, εύρεση MPP από τον DC converter, έλεγχο του ρεύματος φόρτισης ανάλογα με την κατάσταση της μπαταρίας, έλεγχος κυκλώματος προστασίας τάσης και κυκλώματος παροχής σταθερής τάσης 3.3V. Στη συνέχεια μετρήθηκαν οι καταναλώσεις ενέργειας του συστήματος σε διάφορες καταστάσεις λειτουργίας, όπως και σε λειτουργία με διαφορετικούς αισθητήρες. Επιπλέον έγινε ανάλυση των δεδομένων ηλιακής ακτινοβολίας ώστε να βρεθεί η υπολογιζόμενη αυτονομία του συγκεκριμένου συστήματος σε διαφορετικά σενάρια λειτουργίας, όπως και πειράματα εμβέλειας των επιλεγμένων μεθόδων επικοινωνίας.

### 4.1. Πείραμα εύρεσης MPP

Ο βασικός λόγος ύπαρξης ενός συστήματος μετατροπέα τάσης σε συστήματα Energy Harvesting είναι η εύρεση του σημείου μέγιστης παραγωγής ισχύος της επιλεγμένης

γεννήτριας, στη συγκεκριμένη περίπτωση των φωτοβολταϊκών πάνελ. Το παραπάνω έγινε εφικτό μελετώντας τη χαρακτηριστική καμπύλη P-V των πάνελ. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα από το Εργαστήριο Κυκλωμάτων, Αισθητήρων και Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας της Σχολής ΗΜΜΥ του Πολυτεχνείου Κρήτης, το οποίο σαρώνει όλο το εύρος τάσεων μιας φωτοβολταϊκής συστοιχίας σε συγκεκριμένες συνθήκες (ηλιοφάνεια, θερμοκρασία, κλίση της φωτοβολταϊκής συστοιχίας). Το σύστημα υλοποιείται με τη χρήση ενός Boost converter, στον οποίο μεταβάλλεται σταδιακά το Duty Cycle του PWM σήματος με σκοπό την αντίστοιχη αλλαγή της αντίστασης εισόδου που «βλέπουν» τα πάνελ. Σε όλη τη διαδικασία καταγράφεται η τάση και το ρεύμα παραγωγής των PVs, σχηματίζεται η χαρακτηριστική I-V και με χρήση της εξίσωσης ισχύος  $P = VI$  εξάγεται το διάγραμμα P-V. Οι μετρήσεις τάσης και ρεύματος όπως και ο έλεγχος του PWM σήματος έγιναν με τη χρήση Arduino. Για τη μέτρηση της τάσης χρησιμοποιείται διαιρέτης τάσης με τελεστικό ενισχυτή σε συνδεσμολογία ακόλουθου τάσης προς την είσοδο ενός ADC, ενώ για τη μέτρηση του ρεύματος η παρακάτω πλακέτα με τον ADC INA219, στην οποία χρησιμοποιείται μια αντίσταση 0,1 Ω για την μέτρηση της πτώσης τάσης και κατ' επέκταση και του ρεύματος που καταναλώνεται.

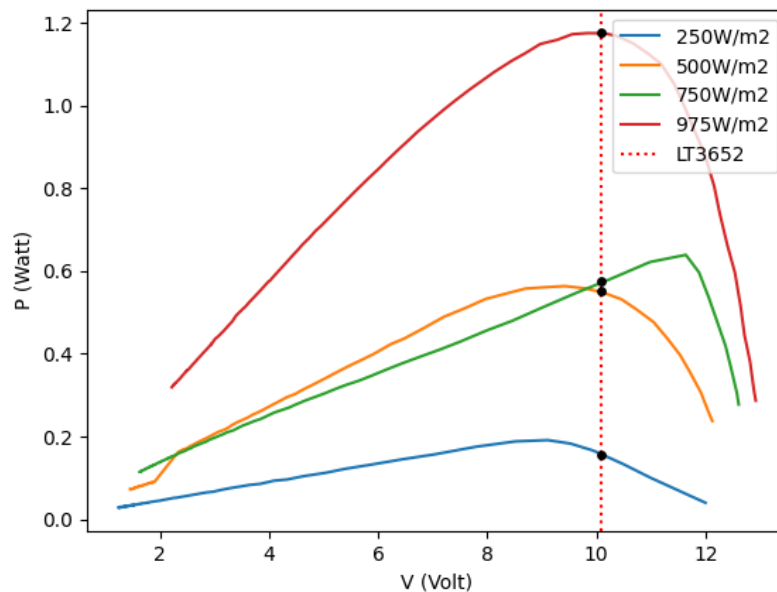


*Σχήμα 4-1: Το ολοκληρωμένο κύκλωμα INA219.*

Αφότου εξάχθηκε η χαρακτηριστική καμπύλη των PVs σε κάθε ξεχωριστή κατάσταση, συνδέθηκαν στην πλακέτα για να μετρηθεί η τάση στην οποία συγκλίνει το κύκλωμα MPPT ενώ παράλληλα μετρήθηκε και το ρεύμα παραγωγής τους. Η ίδια διαδικασία



έγινε για διαφορετικές συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας ώστε να βρεθεί το σημείο MPP που λειτουργεί το κύκλωμα.



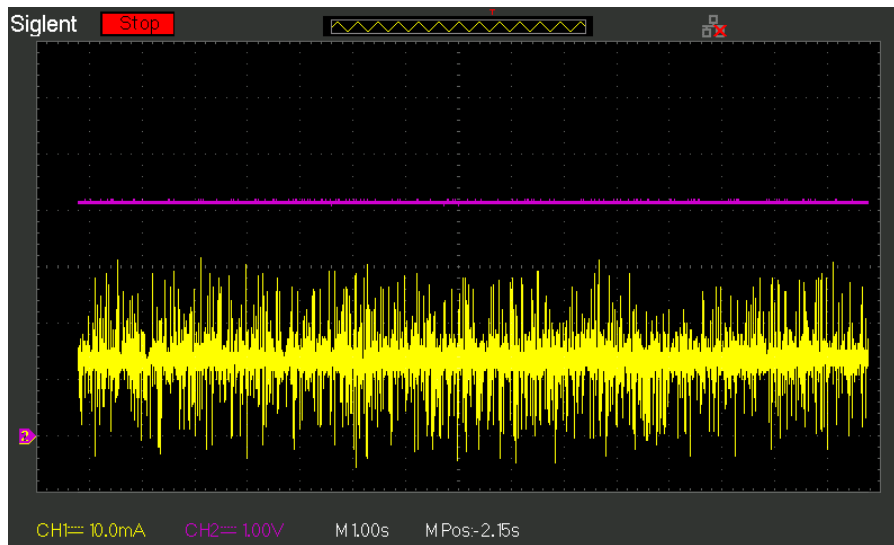
Σχήμα 4-2: Καμπύλες  $P$ - $V$  για 250, 500, 750, 975 W/m<sup>2</sup> σε θερμοκρασία 23,8 °C.

Σε τέσσερα διαφορετικά πειράματα που έγιναν διαδοχικά, το MPPT κύκλωμα με το LT3652 συνέκλινε στην ίδια ακριβώς τάση, 10,12 V. Αυτό αποδεικνύει ότι το συγκεκριμένο τσιπ λειτουργεί με τον αλγόριθμο Constant Voltage. Η τάση στην οποία λειτουργεί το κύκλωμα είναι ρυθμιζόμενη από το pin  $V_{IN\_REG}$  του LT3652, στο οποίο έχει συνδεθεί ένα ποτενσιόμετρο ως ένας ρυθμιζόμενος διαιρέτης τάσης για να μπορεί να ρυθμιστεί η τάση λειτουργίας ανάλογα με την τάση εισόδου του συστήματος.

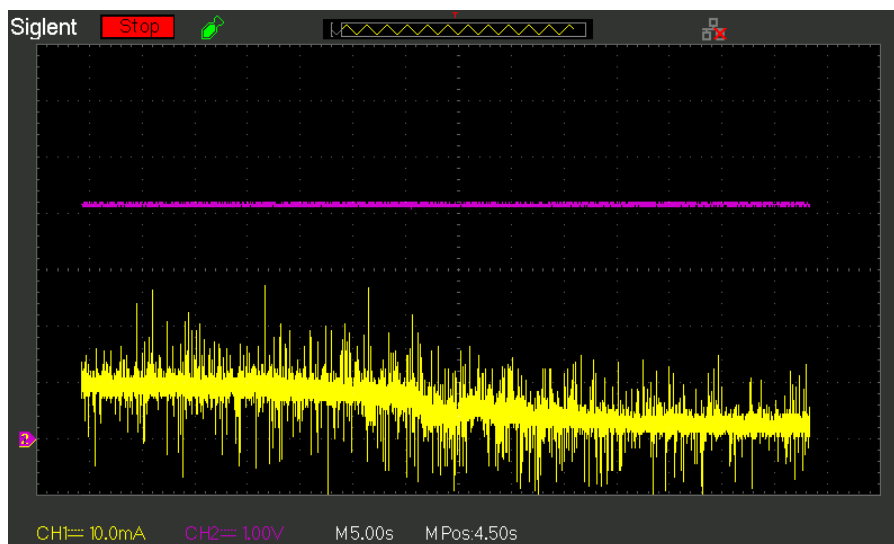
## 4.2. Πείραμα ρεύματος φόρτισης

Η πλήρης φόρτιση μιας μπαταρίας λιθίου γίνεται μέσω διαφόρων σταδίων. Στο πρώτο στάδιο το MPPT κύκλωμα παρέχει τη μέγιστη δυνατή ισχύ που δίνουν τα PVs προς την μπαταρία. Στη συνέχεια το κύκλωμα λειτουργεί σε κατάσταση σταθερής τάσης, ρυθμίζοντας το ρεύμα φόρτισης ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας.

Μια μπαταρία πρέπει να αποφεύγεται να βρίσκεται στις ακραίες καταστάσεις της, πλήρους φόρτισης ή πλήρους αποφόρτισης, καθώς αυτό επιδρά αρνητικά στην απόδοσή της. Το κύκλωμα LT3652 δίνει τη δυνατότητα προγραμματισμού της  $V_{FLOAT}$  της μπαταρίας μέσω του pin  $V_{BAT\_FLT}$ , εισάγοντας έναν διαιρέτη τάσης από την μπαταρία όπου θα δίνει μέγιστη τάση εξόδου 3,3V. Επιλέγοντας τις κατάλληλες αντιστάσεις, 56kΩ και 220kΩ, η τάση  $V_{BAT\_FLT}$  ορίστηκε στα 4,14V.



Σχήμα 4-3: Σταθερό ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας.

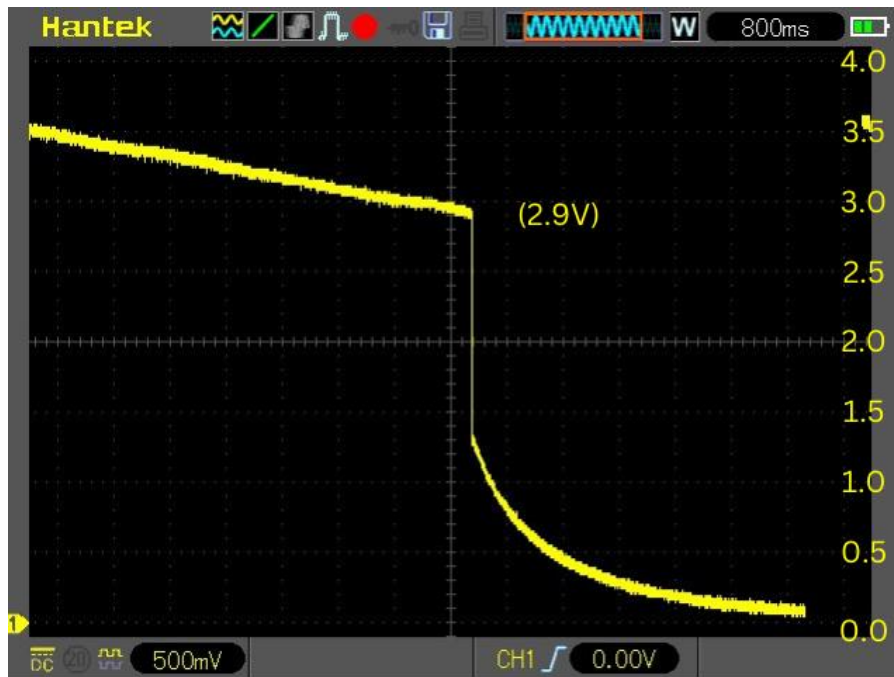


Σχήμα 4-4: Πτώση ρεύματος φόρτισης καθώς η μπαταρία πλησιάζει την πλήρη φόρτιση.

Στο Σχήμα 4-33 και Σχήμα 4-44 φαίνονται η τάση της μπαταρίας (μωβ) και το ρεύμα φόρτισης (κίτρινο). Παρατηρείται ότι το κύκλωμα μειώνει το ρεύμα φόρτισης μόλις η μπαταρία πλησιάζει την τάση  $V_{BAT\_FLT}$ . Αρχικά κρατάει ένα σταθερό αλλά χαμηλό ρεύμα, ενώ αυτό το ρεύμα τείνει στο 0 καθώς πλησιάζουμε την πλήρη φόρτιση.

### 4.3. Πείραμα Voltage Protection

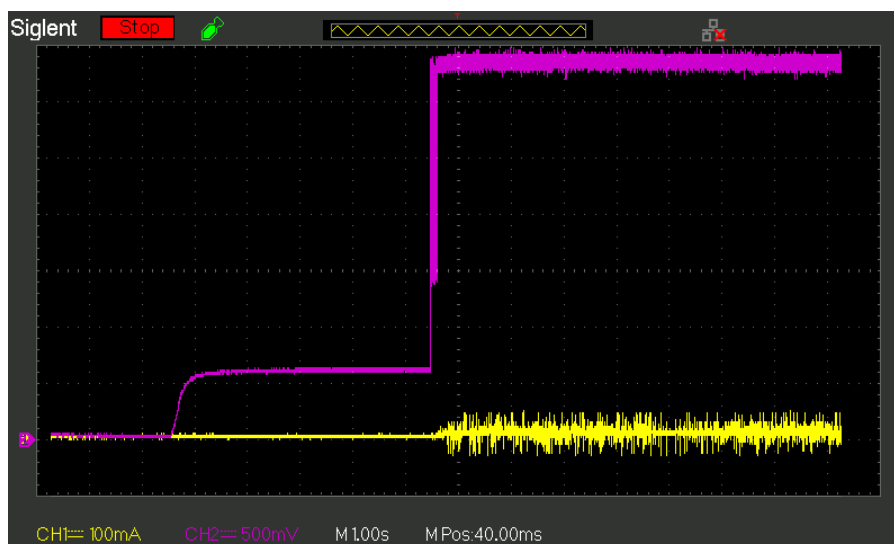
Στην ενότητα 3.3 αναπτύχθηκε ο λόγος ύπαρξης του κυκλώματος Voltage Protection. Στο παρακάτω σχήμα προσομοιώθηκε η αντίδρασή του σε σχέση με την τάση της μπαταρίας. Στην είσοδο της μπαταρίας συνδέθηκε το τροφοδοτικό για να γίνει η προσομοίωση της τάσης. Μειώνοντας σταδιακά την τάση και σε τάση 2.9V το κύκλωμα προστασίας διέκοψε την παροχή, όπως ακριβώς έχει σχεδιαστεί.



Σχήμα 4-5: Διακοπή παροχής στα 2.9V.

#### 4.4. Πείραμα επαναλειτουργίας

Στο πείραμα αυτό αποδεικνύεται μια από τις πιο κρίσιμες λειτουργίες της πλακέτας, η επαναλειτουργία του κόμβου μετά από παύση λειτουργίας. Το πείραμα έγινε με την βοήθεια του τροφοδοτικού, το οποίο προσομοίωνε την τάση εισόδου από τα φωτοβολταϊκά. Η τάση εισόδου αυξανόταν σταδιακά έως ότου το κύκλωμα προστασίας εντοπίσει ρεύμα φόρτισης και τάση μπαταρίας άνω των 3V. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η στιγμή που ο Buck/Boost 3,3V converter παρέχει ισχύ στο κύκλωμα.

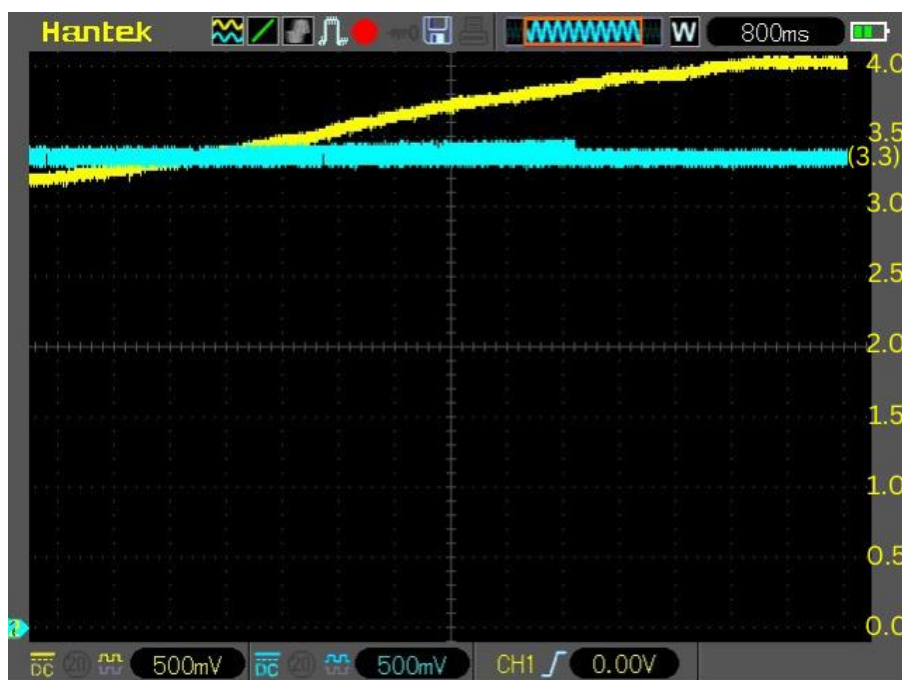


Σχήμα 4-6: Επαναλειτουργία με τάση φόρτισης.

## 4.5. Πείραμα σταθερής τάσης 3.3V

Η ύπαρξη σταθερής τάσης τροφοδοσίας στα κυκλώματα είναι πολύ σημαντική. Πρέπει όλα τα κυκλώματα να έχουν την ίδια τάση αναφοράς και λειτουργίας για να επικοινωνούν αξιόπιστα. Ιδιαίτερα σε στοιχεία που παράγουν αναλογική τάση εξόδου, είναι σημαντικό η τάση τροφοδοσίας να είναι ίδια με την τάση του MCU ή έστω να είναι σταθερή και γνωστή στον MCU.

Ο συγκεκριμένος μετατροπέας παίρνει ως είσοδο την τάση από τη μπαταρία και παράγει ως έξοδο σταθερή 3.3V, με την οποία τροφοδοτούνται όλα τα επιμέρους κυκλώματα (MCU, LoRa, αισθητήρες). Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκε το τροφοδοτικό προσομοιώνοντας την τάση της μπαταρίας από 2.9V έως 4V και παρακολούθηθηκε αν η τάση στην έξοδο να παραμένει σταθερή στα 3.3V.

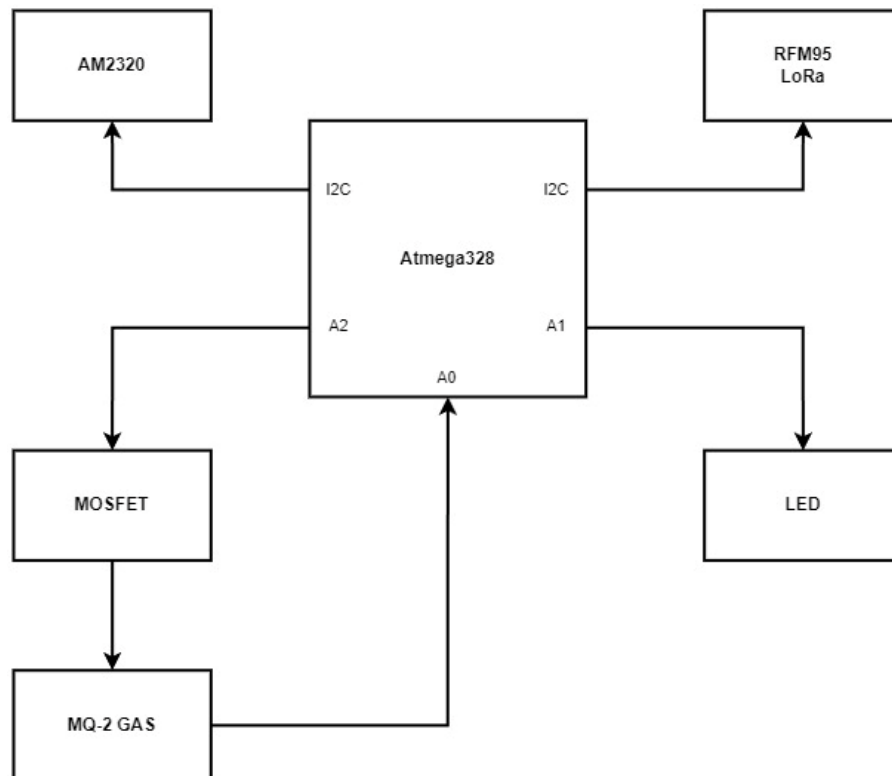


Σχήμα 4-7: Buck/Boost 3.3V (γαλάζιο), Τάση μπαταρίας (κίτρινο).

## 4.6. Πείραμα καταστάσεων

Στο παρακάτω πείραμα απεικονίζεται η μετάβαση του συστήματος σε διαδοχικές καταστάσεις με δύο τρόπους. Πρώτον, απεικονίζονται οι χαρακτηριστικοί παλμοί κάθε κατάστασης και δεύτερον, το γράφημα των καταναλώσεων ενέργειας. Το σύστημα στο συγκεκριμένο πείραμα προγραμματίστηκε να δίνει ένα παλμό, ο οποίος ενεργοποιεί ένα LED με σκοπό να μπορεί κάποιος να καταλάβει από κοντά σε ποια κατάσταση βρίσκεται το σύστημα ανάλογα με τον φωτισμό του.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος ο κόμβος τροφοδοτείται από την μπαταρία. Επιπλέον είναι συνδεδεμένες διάφορες συσκευές που χρησιμοποιούνται σε κάθε κατάσταση, όπως το LoRa, MQ-2, MOSFET, AM2320 και ένα LED με σκοπό την ανάδειξη της πραγματικής λειτουργίας και των καταναλώσεων ενέργειας.

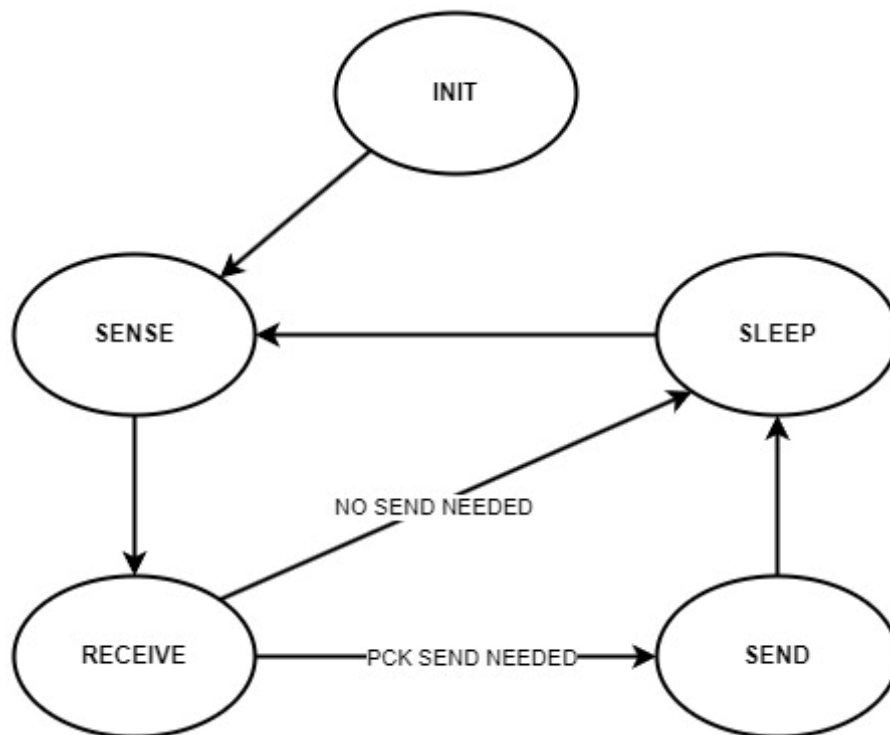


*Σχήμα 4-8: Σχηματικό διάγραμμα του πειράματος.*

Στο Σχήμα 4-8 παρουσιάζονται οι συνδέσεις του κόμβου κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα RFM95 είναι συνδεδεμένο εσωτερικά στην πλακέτα και χρησιμοποιήθηκε για την επικοινωνία του συστήματος. Στον connector (CON) I2C είναι συνδεδεμένος ο αισθητήρας θερμοκρασίας και υγρασίας AM2320. Τέλος στον CON GPIO έχουν συνδεθεί τα εξής:

- το A2 με το Gate του MOSFET, που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του MQ-2 λόγω της μεγάλης του κατανάλωσης,
- η αναλογική έξοδος του MQ-2 με το A0,
- το LED με το A1.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μηχανή καταστάσεων που διέπει το σύστημα κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.



Σχήμα 4-9: Μηχανή καταστάσεων του συστήματος.

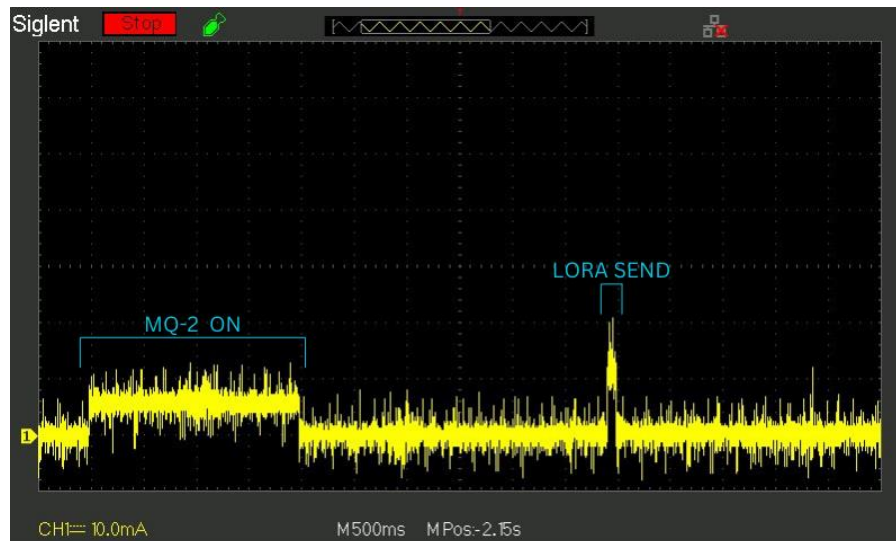


Σχήμα 4-10: Απεικόνιση εξόδου LED για την αναγνώριση των καταστάσεων λειτουργίας.

Στο παραπάνω σχήμα παρατηρείται η μετάβαση του προγράμματος από κατάσταση σε κατάσταση στην κανονική λειτουργία του (μετά την αρχικοποίηση). Για κάθε κατάσταση απεικονίζεται ο αναγνωριστικός παλμός στην αρχή και στο τέλος της. Αναλυτικά:

- SLEEP (3 παλμοί): Μετάβαση στην κατάσταση sleep mode για όλα τα στοιχεία του κυκλώματος που έχουν τη δυνατότητα, Atmega328p, LoRa και MQ-2 GAS sensor.

- SENSE (4 παλμοί): Χρήση των αισθητήρων, AM2320 και MQ-2 GAS sensor, για τη συλλογή μετρήσεων.
- RECEIVE (5 παλμοί): Λήψη πακέτων από άλλους κόμβους αν υπάρχουν.
- SEND (6 παλμοί): Αποστολή δεδομένων.

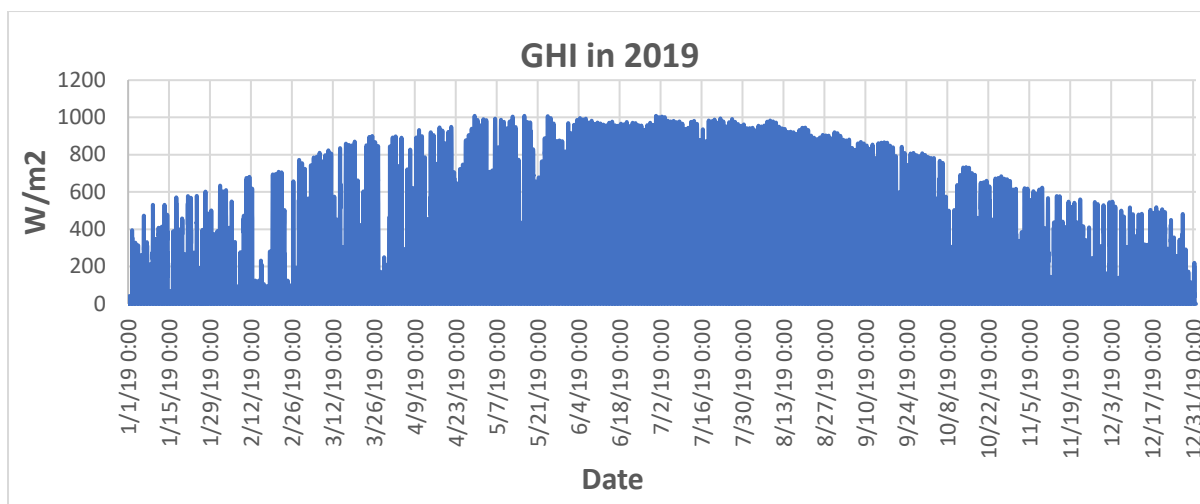


*Σχήμα 4-11: Απεικόνιση κατανάλωσης ρεύματος του συστήματος ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας.*

Στο παραπάνω γράφημα μπορούν να διακριθούν αισθητές διαφορές στην κατανάλωση ρεύματος το οποίο μετράται από τη διαφορά δυναμικού μιας αντίστασης  $0,1\Omega$  σε σειρά ανάμεσα στο φορτίο και την μπαταρία. Λόγω θορύβου του παλμογράφου και πολύ μικρής έντασης ρεύματος δεν μπορεί να φανεί διαφορά στην κατάσταση SLEEP αλλά μπορούν να διακριθούν τα 2 δευτερόλεπτα που δίνεται παροχή στον MQ-2 και η αποστολή του πακέτου από το ολοκληρωμένο κύκλωμα RFM95.

## 4.7. Υπολογισμός παραγωγής ενέργειας

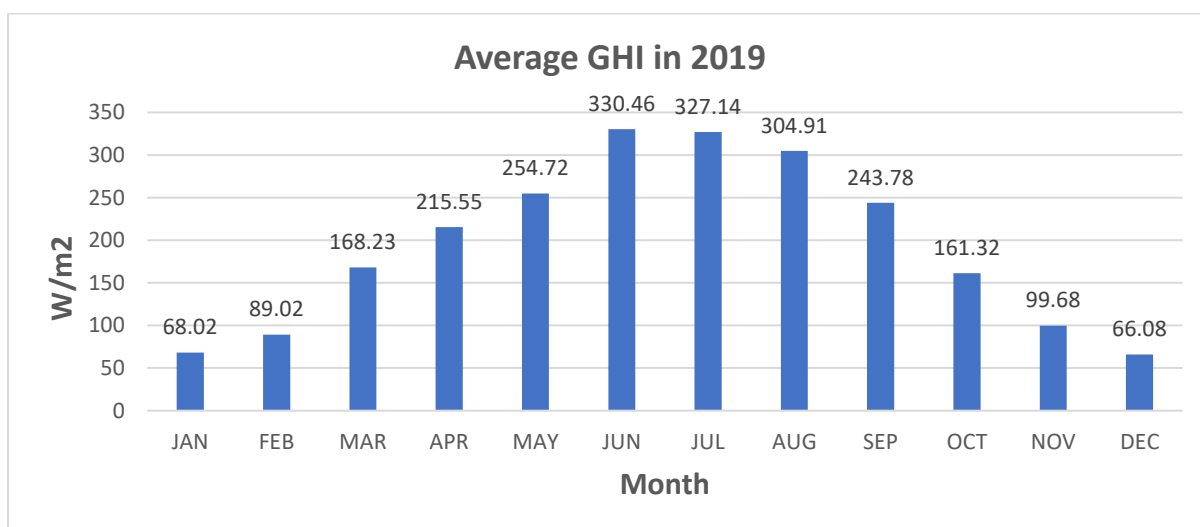
Στο συγκεκριμένο πείραμα έγινε ανάλυση της παραγόμενης ενέργειας από τα τοποθετημένα PVs σύμφωνα με τις μετρήσεις ηλιακής ακτινοβολίας που παρέχονται από το National Renewable Energy Laboratory (NREL) και συγκεκριμένα από το National Solar Radiation Database (NSRDB). Από τα διαθέσιμα δεδομένα που παρέχονται για την πόλη των Χανίων, μελετήθηκε ο δείκτης Global Horizontal Irradiance (GHI), ο οποίος είναι ο πιο αντιπροσωπευτικός για να μελετηθεί η παραγωγή ισχύος από φωτοβολταϊκά πάνελ. Τα πιο πρόσφατα δεδομένα που παρέχονται είναι της χρονιάς 2019.



*Σχήμα 4-12: GHI το έτος 2019.*

Στο Σχήμα 4-122 φαίνεται η συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο κατά τη διάρκεια ενός ολόκληρου έτους. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, το διάγραμμα δείχνει μικρότερες τιμές στις άκρες του όπου και βρίσκονται οι χειμερινοί μήνες Ιανουάριος και Δεκέμβριος. Αυτό είναι λογικό μιας και ο Ήλιος βρίσκεται στη μεγαλύτερη γωνία πρόσπτωσης εκείνους τους μήνες.

Επομένως είναι σημαντικό να μελετηθεί η αυτονομία του συστήματος τον μήνα που η ηλιακή ακτινοβολία είναι στα χαμηλότερα επίπεδά της. Στο Σχήμα 4-133 παρουσιάζονται οι μέσοι όροι ηλιακής ακτινοβολίας σε κάθε μήνα του έτους 2019. Ο μήνας με την λιγότερη ηλιοφάνεια είναι ο Δεκέμβριος, συνεπώς οι υπολογισμοί αυτονομίας θα γίνουν με βάση το μήνα αυτόν.

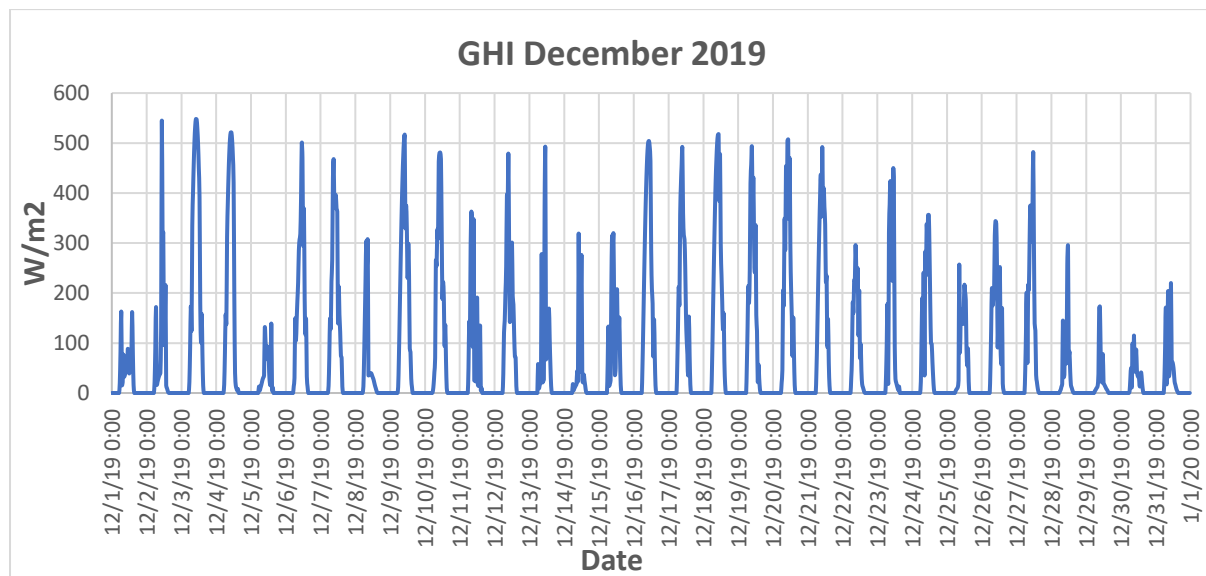


*Σχήμα 4-13: Μέσος δείκτης GHI κάθε μήνα.*

Παρακάτω παρουσιάζεται και αναλυτικά η ηλιακή ακτινοβολία σε όλο το μήνα Δεκέμβριο με ανάλυση δείγματος ανά μισή ώρα. Παρατηρείται ότι όλες οι ημέρες είχαν



έστω και λίγη ηλιοφάνεια για λίγες ώρες. Παρόλα αυτά παρακάτω θα μελετηθεί και το ακραίο σενάριο να βρεθεί ο αισθητήρας σε περίοδο με μηδαμινή ηλιοφάνεια.



*Σχήμα 4-14: Δείκτης GHI το μήνα Δεκέμβριο.*

Θα αναλυθούν μερικά σενάρια ενδεικτικά για να γίνει κατανόηση πως διαφοροποιείται η ενεργειακή αυτονομία του συστήματος ανάλογα με τον τρόπο διαχείρισης και λειτουργίας του κόμβου. Τα βασικά στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι οι καταναλώσεις του συστήματος σε διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα από μετρήσεις που έγιναν με πολύμετρο στο εργαστήριο.

Για την παρακάτω ανάλυση θα χρησιμοποιηθεί το σενάριο από την προηγούμενη ενότητα 4.6. Αναλυτικά θα παρουσιαστούν οι καταναλώσεις του συστήματος και των αισθητήρων ξεχωριστά σε διαφορετικές καταστάσεις και πιθανά σενάρια χρήσης.

*Πίνακας 4-1: Κατανάλωση αισθητήρων σε τάση 3.3V.*

Αισθητήρας	Κατανάλωση (mW)
MQ-2	228.3
AM 2320	2.5
GPS	99.8
ezPyro TO	0.8

Πίνακας 4-2: Συνολική κατανάλωση συστήματος σε κάθε κατάσταση.

Κατάσταση	Κατανάλωση (mW)
SLEEP	7.5
SENSE	255.3
RECEIVE	63.3
SEND	314.1

Οι καταναλώσεις στον Πίνακα 4-1 αφορούν την μετρούμενη κατανάλωση κάθε αισθητήρα ξεχωριστά από το υπόλοιπο σύστημα. Στην περίπτωση του MQ-2 περιλαμβάνεται και το MOSFET τρανζίστορ που προστέθηκε για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του. Επιπλέον η κατανάλωση του GPS αφορά την στιγμή λήψης δεδομένων από τους δορυφόρους.

Στις καταστάσεις λειτουργίας στον Πίνακα 4-2 αναγράφονται οι καταναλώσεις ολόκληρου του συστήματος. Η ιδιαιτερότητα είναι ότι στην κατάσταση SENSE η κατανάλωση περιλαμβάνει και την κατανάλωση του αισθητήρα MQ-2, ο οποίος έχει το ρόλο ενός πολύ υψηλής κατανάλωσης αισθητήρα, του οποίου η τροφοδοσία ελέγχεται από ένα MOSFET συνδεδεμένο όπως αναφέρεται στην ενότητα 4.6. Τέλος, η κατανάλωση στη κατάσταση SEND δεν αφορά όλη τη διάρκειά της αλλά μόνο την στιγμή που στέλνεται κάθε πακέτο και ανάγεται σε 314.1 mW/100ms.

### Σενάριο αυτονομίας

Το πρώτο σενάριο είναι και αυτό με την περισσότερη κατανάλωση αφού η δειγματοληψία και η αποστολή δεδομένων γίνεται ανά 10 δευτερόλεπτα. Αναλυτικά σε κάθε περίοδο  $T = 10\text{sec}$  θα λειτουργούν οι καταστάσεις SENSE: 1s, RECEIVE: 1s, SEND: 1 πακέτο και τον υπόλοιπο χρόνο το σύστημα θα είναι στη SLEEP: 8s. Δηλαδή το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση SENSE και RECEIVE από 10% του χρόνου, SLEEP περίπου 80% ενώ ο χρόνος της κατάστασης SEND είναι σχεδόν μηδέν.

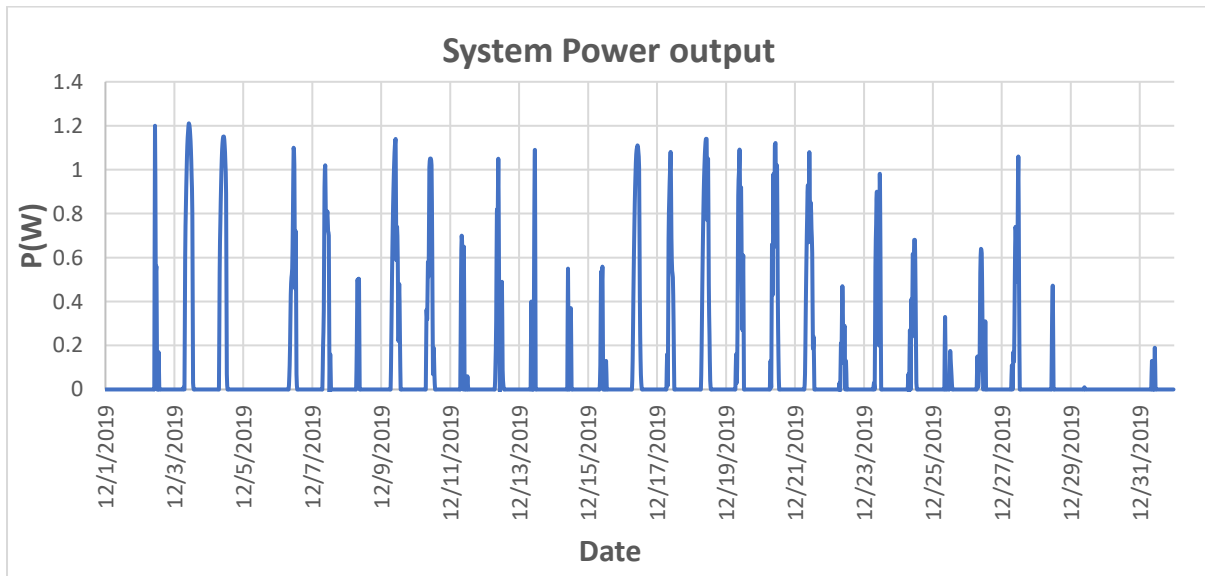
Ανάγοντας τα παραπάνω δεδομένα, λαμβάνοντας υπόψη τις καταναλώσεις κάθε κατάστασης, στην ώρα θα έχουμε καταναλώσεις ενέργειας ως εξής:

- $E_{\text{SENSE}}(6 \text{ mins}) = 25.5\text{mWh}$
- $E_{\text{RECEIVE}}(6 \text{ mins}) = 6.3\text{mWh}$
- $E_{\text{SLEEP}}(48 \text{ mins}) = 6\text{mWh}$
- $E_{\text{SEND}}(360 \text{ pck}) = 3.1\text{mWh}$

Συνολικά υπολογίζεται ότι η κατανάλωση του συστήματος κατά τη διάρκεια μιας ώρας λειτουργίας στο συγκεκριμένο σενάριο είναι  $E_{\text{hour}} = \sum E = 25.5 + 6.3 + 6 + 3.1 =$

40.9mWh. Κατ' επέκταση, η καταναλισκόμενη ενέργεια σε 24 ώρες θα είναι  $E_{24h} = 24 * E_{hour} = 981.6mWh$ . Στην ενότητα 3.3 αναφέρεται ότι η επιλεγμένη μπαταρία για το σύστημα είναι μια Li-ion 21700 με 5000mAh στα 3.7V, δηλαδή συνολική ονομαστική ενέργεια  $E_{bat} = 5000 * 3,7 = 18500mWh$  όταν είναι σε πλήρη φόρτιση. Για τον υπολογισμό της αυτονομίας θα ληφθεί υπόψη το 80% της συνολικής χωρητικότητάς της. Επομένως η χρησιμοποιούμενη χωρητικότητα είναι  $18500 * 0,8 = 14800$ . Διαιρώντας με την καταναλισκόμενη ημερήσια ενέργεια θα έχουμε  $\frac{14800}{981.1} = 15,08$  ημέρες αυτονομίας χωρίς το σύστημα να συλλέξει ενέργεια μέσω των PVs.

Υπολογίζοντας την παράγωγή ισχύος του συστήματος με 4 PV πάνελ, χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις της ενότητας 4.1 παράγεται το ακόλουθο διάγραμμα παραγωγής ισχύος στον μήνα με την λιγότερη κατά μέσο όρο ηλιακή ακτινοβολία, τον Δεκέμβριο.



Σχήμα 4-15: Υπολογιζόμενη παραγωγή ισχύος του συστήματος.

Η μέση παραγωγή ισχύος είναι 88mW, δηλαδή τα PVs παράγουν μέση ενέργεια  $E_{hour} = 88mWh$ . Η καθαρή παραγωγή ενέργειας προκύπτει συνυπολογίζοντας το βαθμό απόδοσης του DC/DC converter (κυμαίνεται γύρω στο 95%) ενώ υπολογίζονται και 10% λοιπές απώλειες εντός του συστήματος. Επομένως η καθαρή παραγωγή ενέργειας είναι  $E_{hour} = 88 * 0,95 * 0,9 = 75,2mWh$ . Συγκρίνοντας την με την κατανάλωση το σύστημα έχει  $75,2 - 40,9 = 34,3mWh$  κατά μέσο όρο πλεόνασμα ενέργειας.

Το αποτέλεσμα αυτό απορρέει από ένα παράδειγμα με αισθητήρες υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης, μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας και μεγάλης κίνησης πακέτων από και προς τον κόμβο. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να ανταπεξέλθει και σε περιοχή με λιγότερη ηλιακή ακτινοβολία. Ακόμα και αν φτάσει στο σημείο να έχει συνολικά έλλειψη ενέργειας, μειώνοντας την δειγματοληψία των μετρήσεων (ή των

ενεργοβόρων αισθητήρων μόνο) και την αποστολή και λήψη πακέτων χωρίς να θυσιάζεται η αξιοπιστία και η ποιότητα του δικτύου μπορεί να μειωθεί σε μεγάλο βαθμό η κατανάλωση ενέργειάς του. Ενδεικτικά, χρησιμοποιώντας παρόμοιους υπολογισμούς με παραπάνω, αν μειωθούν οι μετρήσεις, οι αποστολές και λήψεις πακέτων κατά 1/3 στο σύνολό τους, η κατανάλωση ενέργειας μειώνεται σε 19.35mWh δίνοντας αυτονομία  $\frac{18500}{19,35 \cdot 24} = 39,83$  ημέρες, που είναι περίπου η διπλάσια αυτονομία ή η μισή ενεργειακή κατανάλωση. Επιπλέον το σύστημα μπορεί να μεταβάλει τα παραπάνω μεγέθη ανάλογα με την ενεργειακή κατάσταση που βρίσκεται και τις απαιτήσεις του δικτύου.

#### 4.8. Πείραμα μέγιστης απόστασης επικοινωνίας

Όπως έχει αναλυθεί παραπάνω το βασικό σύστημα επικοινωνίας που επιλέχθηκε είναι το LoRa με το ολοκληρωμένο κύκλωμα RFM95 και κεραία 2dbm. Σ' αυτό το στάδιο έγινε και ένα επιπλέον πείραμα με τον transceiver NRF 24l01+ με κεραία επίσης 2dbm, το οποίο χρησιμοποιεί τη συχνότητα 2.4 GHz, ώστε να μετρηθούν οι αποστάσεις μετάδοσης έως ότου επέλθει σφάλμα.

Αρχικά έγινε πείραμα απόστασης μετάδοσης πακέτου με το LoRa το οποίο είναι ενσωματωμένο στην πλακέτα. Το σύστημα προγραμματίστηκε να στέλνει ένα πακέτο ανά δευτερόλεπτο με αύξοντα σειριακό αριθμό για την αναγνώρισή του. Συνδέθηκε μια μπαταρία και προσδέθηκε σε ένα drone ώστε να απομακρυνθεί και να βρεθεί το σημείο στο οποίο θα υπάρξει απώλεια πακέτων. Στον υπολογιστή συνδέθηκε ένα Arduino με την ίδια μονάδα LoRa ώστε να παρατηρούνται τα πακέτα που λαμβάνονται.

Το πείραμα εμπεριείχε δύο μέρη. Μετάδοση πακέτου σε μεγάλη απόσταση έχοντας οπτική επαφή από κόμβο σε κόμβο και μετάδοση με την παρεμβολή ενός μεγάλου εμποδίου. Και στα δύο πειράματα το σημείο αναφοράς, που ήταν και το σημείο παρακολούθησης των εισερχόμενων πακέτων, είναι η πλατεία που βρίσκεται ανάμεσα στις Σχολές ΗΜΜΥ και ΜΗΧΟΠ στην Πολυτεχνειούπολη του Πολυτεχνείου Κρήτης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.

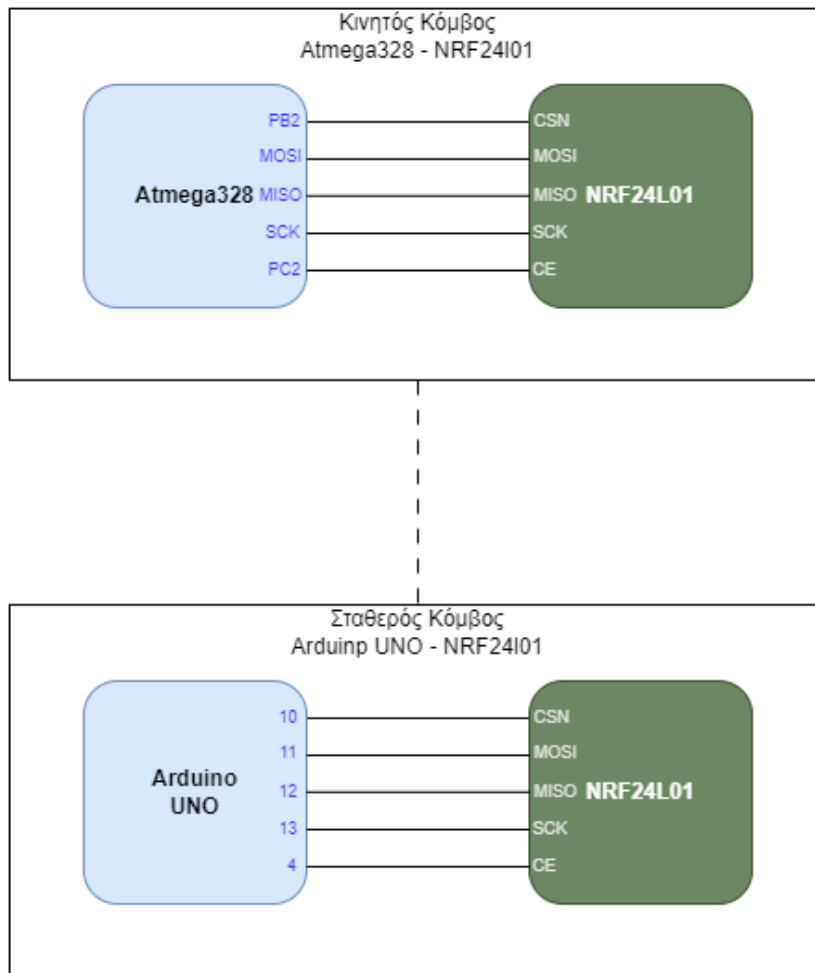


*Σχήμα 4-16: Μετάδοση με οπτική επαφή (μαύρο), μετάδοση με παρεμβολή εμποδίου (κίτρινο).*

Στη μετάδοση οπτικής επαφής, με μαύρο χρώμα, η απόσταση μεταξύ των δύο κόμβων έφτασε μέχρι τα 1430 μέτρα. Να σημειωθεί ότι δεν χάθηκε κανένα πακέτο καθ' όλη τη διάρκεια αυτή αλλά το πείραμα σταμάτησε για λόγους ασφαλείας. Συνεπώς θα μπορούσε να επιτευχθεί ακόμη μεγαλύτερη απόσταση. Στην δεύτερη μετάδοση, με κίτρινο χρώμα, έγινε μια διαδρομή ώστε να παρεμβάλλεται μεταξύ των κόμβων ένα εμπόδιο. Το εμπόδιο αυτό ήταν το κτίριο της Σχολής ΗΜΜΥ και το drone καθώς απομακρυνόταν έριχνε σταδιακά και το υψόμετρο ώστε να δυσκολέψει όσο γίνεται περισσότερο την επικοινωνία. Περίπου στα 440 μέτρα και αφού το drone ήταν σε υψόμετρο λιγότερο από αυτό του ισογείου του κτιρίου άρχισαν να χάνονται πακέτα και η μετάδοση να μην είναι αξιόπιστη.

Έπειτα έγινε παρόμοιο πείραμα εμβέλειας με τα κυκλώματα NRF. Στον ένα κόμβο παρακολουθούνταν τα μεταδιδόμενα πακέτα μέσω της σειριακής του Arduino, ενώ ο δεύτερος κινούνταν με μπαταρία. Η συνδεσμολογία του είναι παρόμοια με το RFM95 αφού χρησιμοποιείται η διεπαφή SPI, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-17. Σ' αυτή τη περίπτωση χρειάστηκε η μεταφορά του ενός κόμβου με τα πόδια αφού οι αποστάσεις μετάδοσης αποδείχθηκαν πολύ μικρότερες.





Σχήμα 4-17: Συνδέσεις των 2 κόμβων στο πείραμα με τα NRF24L01.



Σχήμα 4-18: Μετάδοση με οπτική επαφή (A), μετάδοση με παρεμβολή εμποδίου (B).

Στο πρώτο μέρος του πειράματος μετρήθηκε η απόσταση μετάδοσης από κόμβο σε κόμβο διατηρώντας οπτική επαφή. Η απόσταση που μετρήθηκε είναι 156 μέτρα, αλλά

με μικρές αλλαγές στην οπτική επαφή το σήμα χανόταν εύκολα. Στο δεύτερο πείραμα ο ένας κόμβος ήταν στο παλιό Εργαστήριο του Sense Lab στην Πολυτεχνειούπολη του Πολυτεχνείου Κρήτης, ενώ ο άλλος μετακινούνταν στο δρόμο προς τη Σχολή ΜΗΠΕΡ. Η μέγιστη απόσταση ήταν 106 μέτρα με παρεμβολή του βόρειου κτιρίου της Σχολής ΜΗΧΟΠ.

Στα δύο πειράματα παρατηρείται η πολύ μεγαλύτερη εμβέλεια μετάδοσης των κυκλωμάτων LoRa. Επομένως η χρήση τους ως βασικό μέσο επικοινωνίας είναι πολύ σημαντική, αφού μπορεί να καλύψει οποιαδήποτε μετάδοση και μειώνει δραστικά την ύπαρξη αναμεταδοτών που μπορεί να χρειαζόντουσαν σε σχέση με άλλα κυκλώματα.





# 5.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Το σύστημα που αναπτύχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί ένα πρωτότυπο σύστημα για λειτουργία ως κόμβος σε Ασύρματα Δίκτυα Αισθητήρων, που θα μπορεί να εξυπηρετήσει διαφορετικές εφαρμογές ανάλογα με τους αισθητήρες που θα συνδυαστεί. Έγινε πλήρης μελέτη όλων των τομέων από τους οποίους αποτελείται και επιλέχθηκαν τα καταλληλότερα στοιχεία.

Πρωταρχικός στόχος ήταν να αναπτυχθεί μια πρωτότυπη πλακέτα στις προδιαγραφές που μας επιτρέπει το περίβλημα του κόμβου, ο οποίος θα έχει την δυνατότητα μεταφοράς από drone. Η συγκεκριμένη υλοποίηση δίνει μεγάλη έμφαση στους κύριους τομείς ενός ασύρματου αυτόνομου κόμβου, την ενεργειακή του αυτονομία, την επεξεργασία των μετρήσεων, τον έλεγχο βασικών διεργασιών, τον βαθμό προσαρμογής του ανάλογα την εφαρμογή και τις μεθόδους επικοινωνίας και δικτύωσής του με άλλους κόμβους.

Στο πρώτο στάδιο υλοποιήθηκε η παροχή ενέργειας του κόμβου. Σύμφωνα με τη μελέτη, ο αποδοτικότερος τρόπος συγκομιδής ενέργειας είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ. Τα πάνελ που επιλέχθηκαν τηρούσαν τους χωρικούς περιορισμούς. Κεντρικό ρόλο στο συγκεκριμένο υποσύστημα κατέχει το ολοκληρωμένο LT3652 το οποίο έχει την δυνατότητα να βρίσκει το MPP της πηγής, αν και όχι βέλτιστα, και να λειτουργεί παράλληλα ως φορτιστής της μπαταρίας παρέχοντάς της το κατάλληλο ρεύμα φόρτισης ανάλογα με την κατάστασή της. Επιπλέον επιλέχθηκε να δοθεί σταθερή 3,3V τάση σε όλα τα λογικά και κυκλώματα καθώς σε αυτήν την τάση μπορούν να λειτουργήσουν οι περισσότεροι αισθητήρες. Αυτό το σύστημα ενεργειακής

τροφοδοσίας δίνει εξαιρετικές δυνατότητες αυτονομίας εφόσον έχει πλεόνασμα ενέργειας. Ακόμα και σε σενάριο με συχνές μετρήσεις, λήψεις και αποστολές πακέτων και με αισθητήρες υψηλής κατανάλωσης στο διάστημα με την λιγότερη κατά μέσο όρο παροχή ηλιακής ακτινοβολίας, το μήνα Δεκέμβριο, το σύστημα καταφέρνει να διατηρηθεί σε λειτουργία και να αποθηκεύει ενέργεια.

Τα παραπάνω αποτελέσματα λύνουν το βασικότερο ζητούμενο λειτουργίας για ένα ασύρματο κόμβο, την ενεργειακή του αυτονομία. Ιδιαίτερα για τη συγκεκριμένη περίπτωση, που τέτοιοι κόμβοι θα τοποθετούνται σε δυσπρόσιτες περιοχές, λύνονται δύο βασικά ζητήματα, η ύπαρξη πλεονάσματος ενέργειας και η επαναλειτουργία του κόμβου σε περίπτωση ενδεχόμενης έλλειψης ενέργειας. Εκτός των άλλων, ο κόμβος θα μπορεί να μεταβάλλει την κατανάλωσή του αυξάνοντας ή μειώνοντας τη συχνότητα μετρήσεων και επικοινωνιών και τον χρόνο που τα κυκλώματα του βρίσκονται σε κατάσταση sleep.

Στο δεύτερο στάδιο επιλέχθηκε το κεντρικό κύκλωμα ελέγχου και επεξεργασίας, η καρδιά του κόμβου. Λόγω των χαμηλών επεξεργαστικών απαιτήσεων και του περιορισμού του μεγέθους της πλακέτας η καλύτερη λύση ήταν να χρησιμοποιηθεί ένας MCU. Ο Atmega328 προσφέρει μικρό μέγεθος, όλες τις βασικές διεπαφές για συνδεσιμότητα, πολύ καλό υλικό σε βιβλιοθήκες για τον συνδυασμό του μαζί με αισθητήρες και άλλα ολοκληρωμένα κυκλώματα της αγοράς.

Στο τρίτο στάδιο έγινε η επιλογή του προτεινόμενου συστήματος επικοινωνίας, το οποίο και ενσωματώθηκε στην πρωτότυπη πλακέτα ως μόνιμο. Το LoRa κερδίζει επάξια την θέση του ως κεντρικό σύστημα επικοινωνίας λαμβάνοντας υπόψη στοιχεία, όπως η εμβέλεια, η αξιοπιστία του σήματος και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Με LoRa αναμεταδότες μπορούν να καλυφθεί θεωρητικά οποιαδήποτε διαδρομή σήματος, ιδιαίτερα αν λάβουμε υπόψη την τεράστια εμβέλειά του, η οποία επιβεβαιώθηκε ως ένα βαθμό και στο πείραμα που υλοποιήθηκε πετυχαίνοντας περίπου 1500 μέτρα σε οπτική επαφή και 440 με παρεμβολή ισχυρού εμποδίου. Ακόμη μεγαλύτερη ευελιξία προσδίδει η ύπαρξη ανοικτού δικτύου από δρομολογητές -GW- που έχει δημιουργηθεί, το Things Network. Στο συγκεκριμένο δίκτυο μπορεί να συνεισφέρει οποιοσδήποτε έχει ένα LoRa GW, το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιοσδήποτε χρήστης του Things Network.

Σε τελικό στάδιο όλα τα παραπάνω μέρη έπρεπε να συνδυαστούν και να τυπωθούν πάνω σε μία πλακέτα, η οποία θα έχει αντίστοιχη λειτουργία με αυτήν της μητρικής πλακέτας ενός υπολογιστή, δηλαδή θα παρέχει όλα τα βασικά μέρη που διέπουν ένα πλήρως αυτόνομο κόμβο-αισθητήρα. Σε μία πλακέτα 60mm \* 40mm εγκαταστάθηκαν

όλα τα κυκλώματα και υλοποιήθηκε το πρωτότυπο αφήνοντας χώρο σε άλλες δύο, ίδιου μεγέθους, για την εγκατάσταση όποιου περαιτέρω συστήματος απαιτεί κάθε ζητούμενη εφαρμογή.

Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός τέτοιου πρωτότυπου συστήματος αποτελεί μόνο την αρχή. Παρέχει μια πολύ καλή βάση για περαιτέρω έρευνα και βελτιώσεις. Το συγκεκριμένο πρωτότυπο αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα σε πραγματικές εφαρμογές ή για ερευνητικούς σκοπούς. Πιθανές αλλαγές μπορούν να το βελτιώσουν σε διάφορους τομείς.

Στον πιο κρίσιμο τομέα που είναι η ενεργειακή αυτονομία, μπορεί να γίνει εξειδικευμένη έρευνα για το κύκλωμα MPPT-φόρτισης της μπαταρίας. Με την επιλογή ενός πιο αποδοτικού κυκλώματος μπορεί να μειωθεί το εμβαδόν των φωτοβολταϊκών και η χωρητικότητα της μπαταρίας, με επακόλουθο την μείωση του βάρους και του μεγέθους όλου του κόμβου. Επιπλέον μπορεί να γίνει συνδυασμός μπαταριών με υπερπυκνωτές σε περιπτώσεις που υπάρχει πολύ ισχυρή κατανάλωση ή που η πηγή παρέχει υψηλά ποσά ενέργειας για μικρό χρονικό διάστημα.

Επόμενο στάδιο είναι να οριστικοποιηθούν τα σχέδια του περιβλήματος και να ξεκινήσουν τα πραγματικά πειράματα τοποθέτησης τέτοιων ασύρματων κόμβων από μη-επανδρωμένο drone. Στόχος είναι να μπορέσει το σύστημα στο μέλλον να συμβάλει στην βελτίωση κοινωνικών αναγκών και της ασφάλειάς μέσω εφαρμογών παρακολούθησης και έγκαιρης ενημέρωσης για φυσικά και άλλα φαινόμενα.

# 6.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] Martinez, K., Ong, R., & Hart, J. Glacswab: a sensor network for hostile environments. *2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004*, 81-87, 2004, <https://doi.org/10.1109/sahcn.2004.1381905>
- [2] Pierce, F. J., & Elliott, T. V. Regional and on-farm wireless sensor networks for agricultural systems in Eastern Washington. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(1), 32-43, 2007, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.05.007>
- [3] Noguchi, H., Mori, T., & Sato, T. Construction of network system and the first step of summarization for human daily action data in the sensing room. *Proceedings. IEEE Workshop on Knowledge Media Networking*, 17-22, 2002, <https://doi.org/10.1109/kmn.2002.1115157>
- [4] Saleh, N., Kassem, A., & Haidar, A. M. Energy-Efficient architecture for wireless sensor networks in healthcare applications. *IEEE Access*, 6, 6478-6486, 2018, <https://doi.org/10.1109/access.2018.2789918>
- [5] Mahamuni, C. V. A military surveillance system based on wireless sensor networks with extended coverage life. *2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC)*, 375-381, 2016, <https://doi.org/10.1109/icgtspicc.2016.7955331>

- [6] Souadiah, R., & Semchedine, F. Energy-efficient coverage and connectivity of wireless sensor network in the framework of hybrid sensor and vehicular network. *International Journal of Computers and Applications*, 44(5), 444–454, 2022, <https://doi.org/10.1080/1206212x.2020.1808346>
- [7] Polavarapu, S. C., & Panda, S. K. A Survey on Industrial Applications using MEMS and WSN. *2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, 982-986, 2020, <https://doi.org/10.1109/i-smac49090.2020.9243514>
- [8] Behera, T. M., Samal, U. C., Mohapatra, S. K., Khan, M. S., Appasani, B., Bizon, N., & Thounthong, P. Energy-Efficient Routing Protocols for wireless sensor networks: architectures, strategies, and performance. *Electronics*, 11(15), 2282, 2022, <https://doi.org/10.3390/electronics11152282>
- [9] Heinzelman, W., Chandrakasan, A. P., & Balakrishnan, H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2, 10, 2000, <https://doi.org/10.1109/hicss.2000.926982>
- [10] Lindsey, S., & Raghavendra, C. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems. *Proceedings, IEEE Aerospace Conference*, 3, 3-3, 2002, <https://doi.org/10.1109/aero.2002.1035242>
- [11] Vullers, R., Van Schaijk, R., Visser, H. J., Penders, J., & Van Hoof, C. Energy harvesting for autonomous wireless sensor networks. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 2(2), 29–38, 2010 <https://doi.org/10.1109/mssc.2010.936667>
- [12] Luan, W., Zhu, C., Su, B., & Pei, C. An improved routing algorithm on LEACH by combining node degree and residual energy for WSNs. *Communications in computer and information science*, 312, 104-109, 2012, [https://doi.org/10.1007/978-3-642-32427-7\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-642-32427-7_15)
- [13] Fu, C., Jiang, Z., Wei, W., & Wei, A. An Energy Balanced Algorithm of LEACH Protocol in WSN. *International Journal of Computer Science Issues*, 10(1), 354-359, 2013, <http://ijcsi.org/papers/IJCSI-10-1-1-354-359.pdf>
- [14] Fan, X., & Yulin, S. Improvement on LEACH Protocol of Wireless Sensor Network. *2007 International Conference on Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM 2007)*, 260-264, 2007, <https://doi.org/10.1109/sensorcomm.2007.4394931>

- [15] Dawon, K. Electric field controlled semiconductor device. *US Patent* 3,102,230, 1963.
- [16] Nathanson, H., & Wickstrom, R.. A RESONANT-GATE SILICON SURFACE TRANSISTOR WITH HIGH-Q BAND-PASS PROPERTIES. *Applied Physics Letters*, 7(4), 84–86, 1965, <https://doi.org/10.1063/1.1754323>
- [17] Moore, G. E. Cramming more components onto integrated circuits. *Proceedings of the IEEE*, 86(1), 82–85, 1998, <https://doi.org/10.1109/jproc.1998.658762>
- [18] Bannatyne, R., & Viot, G. Introduction to microcontrollers. WESCON/97 Conference Proceedings, 564-574, 1997, <https://doi.org/10.1109/wescon.1997.632384>
- [19] Γεωργιάδης Βασίλειος, Ανάπτυξη συστήματος MPPT για φωτοβολταϊκούς μετατροπείς DC/DC ανύψωσης τάσης, *Πολυτεχνείο Κρήτης*, 2018.
- [20] Jiang, L., Cui, S., Sun, P., Wang, Y., & Yang, C. Comparison of monocrystalline and polycrystalline solar modules. *2020 IEEE 5th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC)*, 341-344, 2020, <https://doi.org/10.1109/ITOEC49072.2020.9141722>
- [21] Mohammed, S. S., & Devaraj, D. Simulation and analysis of stand-alone photovoltaic system with boost converter using MATLAB/Simulink. *2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2014]*, 814-821, 2014, <https://doi.org/10.1109/ICCPCT.2014.7054991>
- [22] Κ. Καλαϊτζάκης, Διαλέξης μαθήματος «Ηλεκτρικές μετρήσεις και αισθητήρες», *Πολυτεχνείο Κρήτης*, 2018.
- [23] Assimonis, S. D., Daskalakis, S., & Bletsas, A. Sensitive and efficient RF harvesting supply for batteryless backscatter sensor networks. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 64(4), 1327–1338. <https://doi.org/10.1109/tmtt.2016.2533619>
- [24] Gopalakrishnan, S., Waimin, J., Zareei, A., Sedaghat, S., Raghunathan, N., Shakouri, A., & Rahimi, R. A biodegradable chipless sensor for wireless subsoil health monitoring. *Scientific Reports*, 12(1), 8011, 2022 <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12162-z>
- [25] Prauzek, M., Konecny, J., Borova, M., Janošová, K., Hlavica, J., & Musilek, P. Energy harvesting Sources, storage devices and system topologies for

- environmental wireless sensor networks: A review. *Sensors*, 18(8), 2446, 2018, <https://doi.org/10.3390/s18082446>
- [26] Tan, X., Li, Q., & Wang, H. Advances and trends of energy storage technology in Microgrid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 44(1), 179–191, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.07.015>
- [27] Aneke, M., & Wang, M. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied Energy*, 179, 350–377, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>
- [28] Okonkwo, P. C., Collins, E., & Okonkwo, E. C. 18 - Application of Biopolymer Composites in Super Capacitor. *Biopolymer composites in electronics*. Elsevier, 487-503, 2017, <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809261-3.00018-8>
- [29] Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. Power electronics: converters, applications, and design. *John wiley & sons*, 2003.