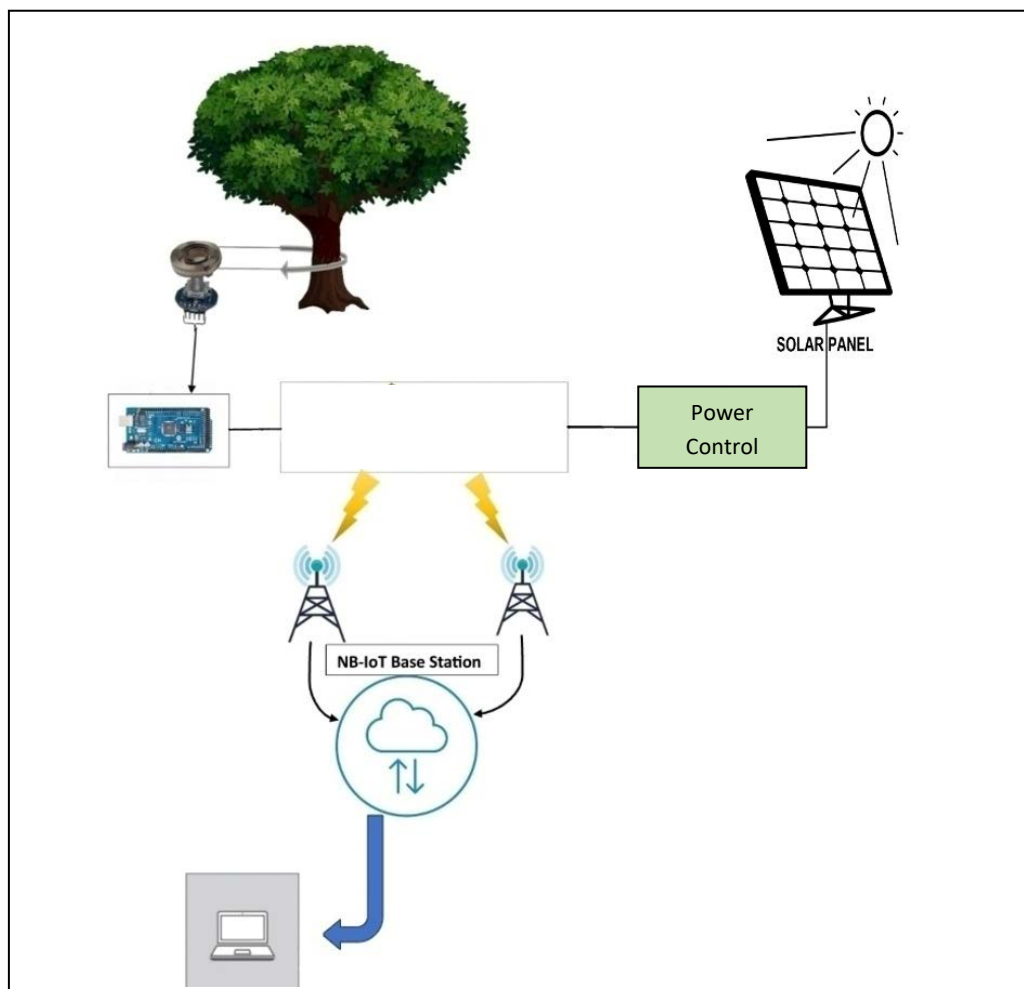




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## Διπλωματική Εργασία

### Ανάπτυξη και Υλοποίηση Ασύρματης Διάταξης Δεντρομέτρου



**Φοιτητής: Βάλβης Ανδρέας**  
**AM: 18387048**  
**Επιβλέπων Καθηγητής**  
**Δημήτριος Πυρομάλης**  
**Αναπληρωτής Καθηγητής**

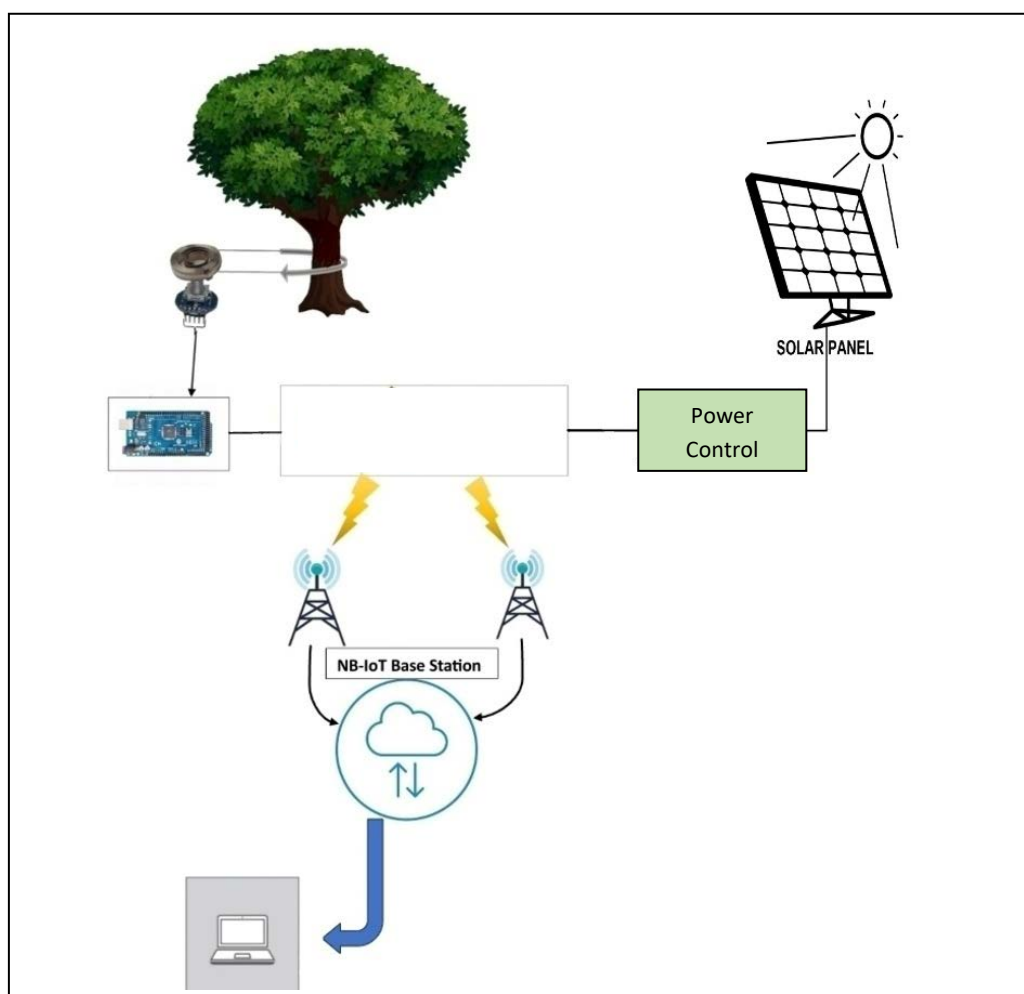
**ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΜΑΡΤΙΟΣ, 2024**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

## **Diploma Thesis**

### **Development and implementation of a wireless dendrometer device**



**Student: Valvis Andreas**  
**Registration Number: 18387048**  
**Supervisor**  
**Dimitrios Piromalis**  
**Assoc. Professor**  
**ATHENS-EGALEO, MARCH, 2024**



Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Δημήτριος Πυρομάλης Αναπληρωτής Καθηγητής	Παναγιώτης Παπαγέωργας Καθηγητής	Σταύρος Καμινάρης Καθηγητής

**Copyright ©** Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Βάλβης Ανδρέας, Φεβρουάριος, 2024**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

#### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Βάλβης Ανδρέας του Αναστάσιου, με αριθμό μητρώου 18387048 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι 01/01/2025 και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος/ουσας καθηγητή/ήτριας.»

Ο Δηλών  
Βάλβης Ανδρέας



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού διπλώματος του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής το έτος 2023-24. Θέλω να εκφράσω τις ειλικρινέστερες μου ευχαριστίες για την βοήθεια που μου προσφέρατε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας στους καθηγητές μου Κ. Πυρομάλη , στον Κ. Παπαγέωργα και στον Κ. Φαμέλη.

*Αφιερώνω την διπλωματική στην μητέρα μου, που η αφοσίωσή της και η αμέριστη πίστη της στις δυνατότητές μου με ενέπνευσε και με κίνησε να επιδιώξω την αρτιότερη εκπόνηση αυτής της διπλωματικής.*

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει σε ένα ουσιαστικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η διαχείριση των δασικών πόρων στην πορεία μιας αναδάσωσης: Το πρόβλημα της παρακολούθησης του ρυθμού ανάπτυξης των δέντρων. Η ανάπτυξη των δασών στην Ευρώπη αποτελεί θεμέλιο πυλώνα για τη διασφάλιση της οικολογικής ισορροπίας και της παροχής ουσιαστικών περιβαλλοντικών υπηρεσιών [1]. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα του δασικού οικοσυστήματος και οι διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη των δέντρων καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη σύγχρονων και αποτελεσματικών μεθόδων παρακολούθησης [2] [16]. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος θα χρειαστεί η δημιουργία μιας συσκευής δεντρόμετρου που θα απαρτίζεται από τα παρακάτω χαρακτηριστικά: Απομακρυσμένη παρακολούθηση μετρήσεων, έναν αισθητήρα που θα μετράει τον ρυθμό ανάπτυξης του δέντρου καθώς και ένα σύστημα διαχείρισης της ενέργειας που θα τροφοδοτεί το δεντρόμετρο. Ύστερα από έρευνα η βέλτιστη υλοποίηση για εφαρμογή σε αναδασωτικά προγράμματα είναι η χρήση ασύρματων τεχνολογιών και ειδικότερα της τεχνολογίας NB-IoT (Narrowband Internet of Things) που αποτελεί έναν εξελιγμένο τύπο ασύρματης επικοινωνίας που σχεδιάστηκε ειδικά για απαιτήσεις απομακρυσμένης επικοινωνίας με χαμηλή κατανάλωση. [17] [3]. Γι' αυτό θα δημιουργηθεί ένας κόμβος NB-IoT, ο οποίος θα συνδέεται με έναν αισθητήρα μέτρησης της περιμέτρου του δέντρου για να υπολογίζει τον ρυθμό ανάπτυξής του. Επίσης για αισθητήρα σκόπιμα επιλέχθηκε η χρήση rotary encoder, αφότου μπορεί να παρέχει υψηλή ακρίβεια στη μέτρηση της περιστροφικής θέσης, καθιστώντας τον κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν ακριβή εντοπισμό θέση. Επιπλέον, δεν έχει ευαίσθητα κινούμενα μέρη όπως ένα ποτενσιόμετρο με γραφίτη. Η απουσία τέτοιων υλικών σημαίνει ότι χρησιμοποιείται χωρίς να επηρεάζεται από σκόνη, βρωμιά ή φθορά εξασφαλίζοντας την μακροχρόνια λειτουργία του και καθιστώντας τον ιδανικό για την χρήση του σε ένα δάσος [4]. Έπειτα αναγκαία είναι και η δημιουργία ενός συστήματος συγκομιδής και διαχείρισης ενέργειας που θα διασφαλίζει την κατάλληλη διανομή ενέργειας στον κόμβο NB-IoT [5]. Τέλος, ο προγραμματισμός του λογισμικού, η αποστολή δεδομένων σε απομακρυσμένο σημείο από τον κόμβο και η αρμονική σύνδεση των συστημάτων αποτελούν το σημείο όπου διαμορφώνεται το ολοκληρωμένο σύνολο της εφαρμογής του δεντρόμετρου για χρήση σε προγράμματα αναδάσωσης.

## Λέξεις – κλειδιά

NB-IoT (Narrowband Internet of Things), ασύρματος κόμβος, rotary encoder, σύστημα συγκομιδής και διαχείρισης ενέργειας.

## Abstract

This thesis focuses on an essential problem that forest resource management faces in the course of reforestation: the problem of monitoring the growth rate of trees. Forest development in Europe is a fundamental pillar for ensuring ecological balance and providing essential environmental services [1]. However, the complexity of the forest ecosystem and the various factors influencing tree growth make it necessary to develop modern and effective monitoring methods [2] [16]. To address the problem, it will be necessary to create a tree measuring device consisting of the following features: Remote monitoring of measurements, a sensor that measures the tree growth rate and a power management system that will power the tree meter. After research, the optimal implementation for application in reforestation projects is the use of wireless technologies and in particular NB-IoT (Narrowband Internet of Things) technology, which is an advanced type of wireless communication designed specifically for low-power remote communication requirements [17] [3]. For this purpose, an NB-IoT node will be created, which will be connected to a sensor measuring the tree's perimeter to calculate its growth rate. Also for sensor was deliberately chosen to be rotary encoder after it can provide high accuracy in measuring rotary position, making it suitable for applications that require accurate position detection. In addition it has no sensitive moving parts like a graphite potentiometer. The absence of such materials means that it is used without being affected by dust, dirt or wear ensuring long term operation and making it ideal for use in a forest [4]. Then it is also necessary to create a harvesting and energy management system to ensure proper energy distribution to the NB-IoT node [5]. Finally, software programming, sending data to a remote point from the node and the harmonious connection of the systems are the point up to which the complete set of the tree meter application is formed for use in reforestation projects.

## Keywords

Growth rate of trees = Ρυθμός ανάπτυξης των δέντρων,  
rotary encoder = περιστροφικός κωδικοποιητής  
graphite potentiometer = ποτενσιόμετρο με γραφίτη.

## Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων .....	9
Κατάλογος Εικόνων .....	9
Αλφαβητικό Ευρετήριο .....	12
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας .....	14
Σκοπός και στόχοι .....	15
Δομή εργασίας .....	15
Καινοτομία .....	16
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: Προσέγγιση της Δεντρομετρίας.....</b>	<b>17</b>
1.1 Η Αναγκαιότητα της Δεντρομετρίας .....	17
1.2 Ο Ρόλος της Δεντρομετρίας στη Διατήρηση της Βιοποικιλότητας .....	18
1.3 Η εξέλιξη της αναδάσωσης με την δεντρομετρία.....	18
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: Τεχνικές - Μέθοδοι Μέτρησης Δέντρων.....</b>	<b>19</b>
2.1 Μέτρηση DBH με παχύμετρο .....	20
2.2 Μέτρηση DBH με D-Tape.....	21
2.4 Μέτρηση DBH με Sector Fork .....	22
2.4 Μέτρηση DBH με Lidar .....	25
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Ανάπτυξη και Εξέλιξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) .....</b>	<b>27</b>
3.1 Εισαγωγή στο διαδίκτυο των πραγμάτων .....	27
3.2 Η δομή της τεχνολογίας IoT.....	27
3.3 Διαφορές του IoT με το WSN.....	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Μελέτη Δικτύων Μεγάλης Εμβέλειας .....</b>	<b>33</b>
4.1 Εισαγωγή στο LPWAN .....	33
4.1.1 Αρχιτεκτονική LPWAN .....	33
4.2 DASH7 .....	35
4.3 Sigfox .....	36
4.4 Wi-SUN .....	37
4.5 Weightless.....	38
4.6 Ingenu .....	39
4.7 MIOTY .....	40
4.8 LTE Cat-M.....	41
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: LoRaWAN και NB-IoT .....</b>	<b>43</b>
5.1 LoRaWAN .....	43
5.1.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του LoRaWAN .....	45
5.2 NB-IoT .....	46
5.2.1 Αρχιτεκτονική του NB-IoT .....	47
5.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του NB-IoT .....	48
5.3 Σύγκριση NB-IoT και LoRa για εφαρμογές δεντρομετρίας .....	48
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: Rotary Encoders .....</b>	<b>49</b>
6.1 Απόλυτοι και Αυξητικοί encoders.....	50
6.2 Optical encoder .....	50
6.3 Magnetic encoder .....	52
6.4 Capacitive encoder .....	54
6.5 Rotary encoder με ελάσματα .....	55



<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>: Σύστημα διαχείρισης ενέργειας.....</b>	<b>56</b>
<b>7.1 Solar Panel .....</b>	<b>57</b>
<b>7.2 Είδη των Solar Panel.....</b>	<b>58</b>
<b>7.3 Τεχνική εξαγωγής μέγιστης ισχύος .....</b>	<b>58</b>
<b>7.3 Μπαταρία Lead – Acid.....</b>	<b>59</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>: Υλοποίηση Κατασκευής.....</b>	<b>60</b>
<b>8.1 Κόμβος NB-IoT .....</b>	<b>60</b>
<b>8.2 Εργαλεία για την δημιουργία κόμβου .....</b>	<b>62</b>
<b>8.3 Προγραμματισμός κόμβου NB-IoT .....</b>	<b>69</b>
<b>8.4 Αισθητήρας μέτρησης .....</b>	<b>73</b>
<b>8.5 Προγραμματισμός κόμβου NB-IoT για δεντρομετρία .....</b>	<b>79</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup>: Αξιολόγηση Ακρίβειας του Δεντρόμετρου.....</b>	<b>95</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10<sup>ο</sup>: Τελικό Σύστημα και Συμπεράσματα .....</b>	<b>107</b>
<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές.....</b>	<b>112</b>

### **Κατάλογος Πινάκων**

Πίνακας 1 Περίληψη των δεδομένων DBH ανά διάμετρο και δενδρομετρητή [24] ...σελ.21
Πίνακας 2 Τιμές διαφοράς μέσης τιμής μεταξύ τριών δεντρομετρικών οργάνων [24] ...σελ.23
Πίνακας 3 Διαφορές και ομοιότητες στις τεχνολογίες IoT/Internet/WSN [40] [44] ...σελ.28
Πίνακας 4 Διαφορές στις τεχνολογίες Weightless-N/-W/-P [58] [59] [60] ...σελ.36
Πίνακας 5 Χαρακτηριστικά δικτύων CAT-1 / LTE-M ( Rel 13 & Rel 14) [66] ...σελ.40
Πίνακας 6 Διαφορές του NB-IoT με το LoRaWAN [60]...σελ.47
Πίνακας 7 Αποτελέσματα της μέτρησης των steps για 10 cm και 20cm...σελ.73
Πίνακας 8 Μετρήσεις περιμέτρου σε δέντρα...σελ.93

### **Κατάλογος Εικόνων**

Εικόνα 1 Μέτρηση του DBH σε ακανόνιστα δέντρα [28]... σελ. 17
Εικόνα 2 Μέτρηση της διαμέτρου των δέντρων στο ύψος DBH (1,3 m) με παχύμετρο [26]...σελ.18
Εικόνα 3 Μέτρηση της περιμέτρου ενός δέντρου με D-Tape [29]...σελ.19
Εικόνα 4 Πως είναι το Sector fork [24] ...σελ.20
Εικόνα 5 Εσωτερική δομή του αισθητήρα LiDAR [33] ...σελ.24
Εικόνα 6 Χρήση του LiDAR σε τετρακόπτερο [34] ...σελ.24
Εικόνα 7 Αρχιτεκτονική 3 και 5 επιπέδων του IoT [42] ...σελ.26
Εικόνα 8 Αρχιτεκτονική 5 επιπέδων IoT [43] ...σελ.26
Εικόνα 9 Εντοπισμός αντικειμένων σε WSN [48] ...σελ.29
Εικόνα 10 Βασική τοπολογία του LPWAN [70] ...σελ.32
Εικόνα 11 Τοπολογίες LPWAN [48] ...σελ.32
Εικόνα 12 Λογότυπο DASH7 [54] ...σελ.33
Εικόνα 13 Λογότυπο Sigfox [55] ...σελ.34
Εικόνα 14 Βασική υπηρεσία Sigfox [55] ...σελ.34

- Εικόνα 15 Λογότυπο του Wi-SUN [56] ...σελ.35
- Εικόνα 16 Έξυπνη Γεωργία [57] ...σελ.35
- Εικόνα 17 Λογότυπο του WEIGHTLESS [58] ...σελ.36
- Εικόνα 18 Λογότυπο του Ingenu [61] ...σελ.37
- Εικόνα 19 Περιγραφή δυνατοτήτων του RPMA [62] ...σελ.37
- Εικόνα 20 Λογότυπο του MIOTY [64] ...σελ.38
- Εικόνα 21 Δυνατότητες του LTE-M [65] ...σελ.39
- Εικόνα 22 Λογότυπο LoRa [72] ...σελ.41
- Εικόνα 23 Αρχιτεκτονική του LoRaWAN [73] ...σελ.42
- Εικόνα 24 Εικονική αναπαράσταση παραθύρων κλάσεις A,B,C [75] ...σελ.43
- Εικόνα 25 Λογότυπο NB-IoT [76] ...σελ.44
- Εικόνα 26 standalone/guard Band/ In bad επικοινωνία NB-IoT [81] ...σελ.44
- Εικόνα 27 Αρχιτεκτονική NB-IoT [79] ...σελ.45
- Εικόνα 28 LORA versus NB-IoT [82] ...σελ.46
- Εικόνα 29 Εσωτερική διάταξη Optical Encoder [84] ...σελ.49
- Εικόνα 30 Οπτικός κωδικοποιητής με μετάδοση και με αντανάκλαση [84] ...σελ.49
- Εικόνα 31 Clockwise και counter clockwise μέτρηση [84] ...σελ.50
- Εικόνα 32 Απόλυτοι οπτικοί κωδικοποιητές 4 και 3 σειρών [84] ...σελ.50
- Εικόνα 33 Μαγνητικός αποκωδικοποιητής με βόρειους και νότιους πόλους [38] ...σελ.51
- Εικόνα 34 Εσωτερική διάταξη magnetic encoder[38] ...σελ.51
- Εικόνα 35 Εσωτερική διάταξη capacitive encoder και προσέγγιση με 3 και 2 μέρη [88] ...σελ.52
- Εικόνα 36 Οι 4 φάσεις ενός παλμικού rotary encoder [89] ...σελ.53
- Εικόνα 37 Στρώματα φωτοβολταϊκού πάνελ [93] ...σελ.55
- Εικόνα 38 Τρία στάδια φόρτισης Lead-Acid μπαταρίας [98] ...σελ.57
- Εικόνα 39 Arduino UNO R3 Pinout [99] ...σελ.58
- Εικόνα 40 SIM7000E Pinout [100] ...σελ.59
- Εικόνα 41 MQTT Publish/subscribe αρχιτεκτονική [102] ...σελ.60
- Εικόνα 42 Λογότυπο Eclipse Mosquitto [105] ...σελ.61
- Εικόνα 43 MQTT Explorer δημιουργία σύνδεσης με Broker [104] ...σελ.61
- Εικόνα 44 Έυρεση IP με την nslookup ...σελ.62
- Εικόνα 45 Δημιουργία topic στον Mosquitto broker μέσα από την εφαρμογή MQTT Explorer ...σελ.62
- Εικόνα 46 Έλεγχος σωστής λειτουργίας του MQTT Explorer...σελ.63
- Εικόνα 47 Λογότυπο Node-red...σελ.63
- Εικόνα 48 CMD Node-red...σελ.64
- Εικόνα 49 GUI του Node-red [109] ...σελ.64
- Εικόνα 50 Δημιουργία απαραίτητων Node για επικοινωνία με broker...σελ.65
- Εικόνα 51 Ρύθμιση MQTT In node ...σελ.65
- Εικόνα 52 Upload ATTest sketch στο Arduino Uno...σελ.66
- Εικόνα 53 Προγραμματισμός του SIM7000E μέσα από το Serial monitor...σελ.67
- Εικόνα 54 Εντολές από το Site της Emnify [106] ...σελ.68
- Εικόνα 55 Το Sim7000 πήρε IP και κάνει roaming...σελ.69
- Εικόνα 56 Serial monitor επαλήθευση σωστής λειτουργίας...σελ.69

- Εικόνα 57 Εμφάνιση μετρήσεων στο Node-red...σελ.69
- Εικόνα 58 Εσωτερική διάταξη του EMS DRS26 [19] ...σελ.70
- Εικόνα 59 Ελατήριο που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή [107] ...σελ.70
- Εικόνα 60 Κατασκευή με ελατήριο για επαναφορά σύρματος...σελ.71
- Εικόνα 61 Τελική κατασκευή αισθητήρα μέτρησης ...σελ.71
- Εικόνα 62 Η κάτω όψη του rotary encoder...σελ.72
- Εικόνα 63 Κώδικας μέτρησης rotary steps...σελ.72
- Εικόνα 64 Πλαστικός σωλήνας 10cm για την μέτρηση της ακρίβειας του rotary encoder...σελ.73
- Εικόνα 65 Σύγκριση μέτρου με rotary encoder...σελ.74
- Εικόνα 66 Rotary steps για 20 cm σελ.75
- Εικόνα 67 Δημιουργία 2 functions στο node-red...σελ.74
- Εικόνα 68 Συνάρτηση Convert to mm...σελ.75
- Εικόνα 69 Συνάρτηση Modify for diameter...σελ.75
- Εικόνα 70 Arduino serial Plot και MQTT Explorer...σελ.76
- Εικόνα 71 Μέτρηση κατανάλωσης κόμβου χωρίς αλλαγές στον κώδικα...σελ.77
- Εικόνα 72 Flowchart ...σελ.78
- Εικόνα 73 Βιβλιοθήκες...σελ.79
- Εικόνα 74 Δήλωση μεταβλητών...σελ.79
- Εικόνα 75 Εδραίωση επικοινωνίας με το Sim7000 και ενεργοποίηση interrupt για χαμηλή κατανάλωση...σελ.80
- Εικόνα 76 Δημιουργία μιας καθυστέρησης 20 δευτερολέπτων ...σελ.83
- Εικόνα 77 Σύνδεση του SIM7000 με δίκτυο και με broker...σελ.83
- Εικόνα 78 Αποστολή δεδομένων στον broker...σελ.83
- Εικόνα 79 Αποστολή μετρήσεων στον MQTT και καταστολή του Arduino Uno...σελ.83
- Εικόνα 80 Η συνάρτηση handleEncoderChange...σελ.84
- Εικόνα 81 Μείωση κατανάλωσης στο 70,34%...σελ.84
- Εικόνα 82 Τελικός έλεγχος αποστολής δεδομένων...σελ.85
- Εικόνα 83 Ιστοσελίδα global solar atlas [108] ...σελ.86
- Εικόνα 84 PVOUT map [108] ...σελ.86
- Εικόνα 85 Απόδοση φωτοβολταϊκού 10 Watt στην Αθήνα [108] ...σελ.87
- Εικόνα 86 Ετήσιες καμπύλες ηλιακής ενέργειας [108] ...σελ.87
- Εικόνα 87 Φορτιστής μπαταρίας PSC-10 [111] ...σελ.89
- Εικόνα 88 Τελικό σύστημα [110] ...σελ.89
- Εικόνα 89 DC/DC μετατροπέας ...σελ.90
- Εικόνα 90 Τελική κατανάλωση ενέργειας κόμβου ...σελ.91
- Εικόνα 91 Πίσω όψη κατασκευής...σελ.92
- Εικόνα 92 Δισδιάστατο μοντέλου εφαρμογής δεντρόμετρου...σελ.95
- Εικόνα 93 Δέντρο με λείο φλοιό...σελ.96
- Εικόνα 94 Δέντρο με τραχύ ανάγλυφο φλοιού ...σελ.96
- Εικόνα 95 Εισαγωγή βιβλιοθηκών ...σελ.100
- Εικόνα 96 Δεδομένα πραγματικών τιμών (X) και σφαλμάτων (Y)...σελ.100
- Εικόνα 97 Εύρεση εξίσωσης Y\_predict ...σελ.101
- Εικόνα 98 Υπολογισμός στατιστικών δεικτών...σελ.101

Εικόνα 99 Έξοδος προγράμματος python: plot ...σελ.102
Εικόνα 100 Μετατροπή κώδικα του κόμβου ...σελ.103
Εικόνα 101 Τελικό σύστημα...σελ.104
Εικόνα 102 Σύστημα κόμβου...σελ.104
Εικόνα 103 Φωτογραφία δέντρου 1...σελ.107
Εικόνα 104 Φωτογραφία δέντρου 2 ...σελ.107
Εικόνα 105 Φωτογραφία δέντρου 3 ...σελ.108
Εικόνα 106 Φωτογραφία δέντρου 4...σελ.108
Εικόνα 107 Φωτογραφία δέντρου 5 ...σελ.108
Εικόνα 108 Φωτογραφία δέντρου 6...σελ.108
Εικόνα 109 Φωτογραφία δέντρου 7...σελ.109
Εικόνα 110 Φωτογραφία δέντρου 8...σελ.109
Εικόνα 111 Φωτογραφία δέντρου 8...σελ.109
Εικόνα 112 Φωτογραφία δέντρου 8...σελ.109

## Αλφαβητικό Ευρετήριο

IoT: Internet of Things

NB-IoT: Narrowband Internet of Things

LPWAN: Low-power wide-area network

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

DBH: diameter at breast height

QoS: Quality of Service

GUI: Graphic Unit Interface

MPPT: Maximum Power Point Tracking

MQTT: Message Queuing Telemetry Transport

GIS: Geographic Information System

GPS: Global Positioning System

LTE: Long-Term Evolution

WSN: Wireless Sensor Network

RFID: Radio Frequency Identification

GRN: Global Radio Network

DOS: Denial-of-service

GMSK: Gaussian minimum shift keying

QPSK: Quadrature Phase Shift Keying

DBPSK: Differential binary phase shift keying

GNSS: Global Navigation Satellite System

HTTP: Hypertext Transfer Protocol

TCP: Transmission Control Protocol

UDP: User Datagram Protocol

VoLTE: Voice over Long-Term Evolution

FOTA: firmware-over-the-air

PPP: Point-to-Point Protocol

CCW: Counter clockwise

CW: clockwise

APN: Access point name

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την αύξηση της προσοχής προς την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και την ανάγκη για διατήρηση των φυσικών πόρων, η αναδάσωση είναι ένα κρίσιμο μέσο για την αποκατάσταση και τη διατήρηση των δασών. Ταυτόχρονα, η αναδάσωση απαιτεί αποτελεσματικά μέσα παρακολούθησης για να μπορεί να αξιολογήσει την πρόοδο της και την υγεία των νέων δέντρων. Σε αυτό το πλαίσιο, το δεντρόμετρο αποκτά ένα καίριο ρόλο. Χρησιμοποιώντας ένα αυτόνομο δεντρόμετρο, μπορεί να παρακολουθήσουμε την ανάπτυξη και την υγεία των νέων δέντρων που φυτεύονται κατά τη διάρκεια αναδασωτικών προγραμμάτων. Αυτό μπορεί να συμπεριλάβει τη μέτρηση της ανάπτυξης τους σε ύψος και διάμετρο, την παρακολούθηση των επιπέδων νερού και θρεπτικών ουσιών στο έδαφος, και την ανίχνευση τυχόν προβλημάτων υγείας όπως ασθένειες ή επιθέσεις από παθογόνους οργανισμούς. Με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται από το δεντρόμετρο, οι φορείς που είναι υπεύθυνοι για την αναδάσωση μπορούν να λάβουν πιο ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με τη διαχείριση των νέων δασών. Επιπλέον, οι επιστημονικές έρευνες μπορούν να ωφεληθούν από τα δεδομένα που συλλέγονται για την κατανόηση των διαδικασιών ανάπτυξης και επιβίωσης των νέων δέντρων σε διάφορα περιβαλλοντικά πλαίσια. Συνολικά, η σύνδεση της αναδάσωσης με τη χρήση ενός δεντρόμετρου μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην προστασία και τη διαχείριση των δασών μας για το μέλλον. [\[1\]](#) [\[6\]](#)

### Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη δημιουργία ενός συστήματος αξιολόγησης των αναδασωτικών προγραμμάτων. Ο ρυθμός ανάπτυξης των δέντρων και η απόδοση της αναδάσωσης αντικατοπτρίζονται από το μέγεθος των δέντρων στο πέρασμα του χρόνου. Η δημιουργία ενός αυτόνομου δεντρόμετρου ανοιχτού κώδικα που θα μετράει τον ρυθμό ανάπτυξης των δέντρων καθίσταται αναγκαία για το παραπάνω πρόβλημα. Το δεντρόμετρο πρέπει να είναι ικανό να υπολογίσει την αύξηση της περιμέτρου των δέντρων, ώστε να αξιολογηθεί ο ρυθμός ανάπτυξης των δέντρων και να εκτιμηθεί εάν το αναδασωτικό πρόγραμμα είναι αρκετά αποδοτικό. Επιπλέον πρέπει να αποστέλλει απομακρυσμένα τις εκάστοτε μετρήσεις ώστε να μην είναι αναγκαία η επίβλεψη της πορείας της αναδάσωσης από κάποιον άνθρωπο δια ζώσης. Τέλος, να είναι ενεργειακά αυτόνομο για περισσότερο από 5 χρόνια μιας και η διάρκεια ενός προγράμματος αναδάσωσης μπορεί να διαρκέσει από μερικούς μήνες έως και αρκετά χρόνια. [\[6\]](#)

## Σκοπός και στόχοι

Η παρούσα εργασία οδηγεί στην κατασκευή ενός δεντρόμετρου για την παρακολούθηση της αναδάσωσης σε απομακρυσμένα μέρη. Σκοπός είναι η δημιουργία ενός συστήματος ανοικτού κώδικα, που θα είναι προσιτό σε ερευνητικά εργαστήρια και επιστήμονες, ενώ θα παρέχει έλεγχο τόσο στο hardware όσο και στις πλατφόρμες επικοινωνίας. Οπότε στόχος είναι η ανάπτυξη ενός δεντρόμετρου όπου θα μετρά την περίμετρο του δέντρου, θα διαχειρίζεται την απομακρυσμένη αποστολή δεδομένων και μαζί με αυτό θα τοποθετηθεί ένα σύστημα ενεργειακής αυτονομίας με την ελευθερία του open source.

## Δομή εργασίας

Η δομή της εργασίας στηρίζεται αρχικά σε έρευνα για το πρόβλημα που αντιμετωπίζει, αξιοποιώντας επιστημονικά άρθρα και συλλέγοντας πληροφορίες από μηχανικούς του πεδίου για το πρόβλημα της δεντρομετρίας και την διάσταση του προβλήματος διαχείρισης των δασικών πόρων. Έτσι αρθρώθηκε το πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, απαντώντας στα ερωτήματα, ποιο είναι το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται και πόσο σημαντικό είναι για τον άνθρωπο.

Στο επόμενο κεφάλαιο απαντάτε πως μπορεί να λυθεί το πρόβλημα της μέτρησης του ρυθμού ανάπτυξης των δέντρων όπου παρουσιάζονται τεχνικές δεντρομετρίας, αναλύονται τα χαρακτηριστικά τους και στην συνέχεια επιλέγεται η καταλληλότερη τεχνική μέτρησης για την παρούσα εργασία.

Στο τρίτο, τέταρτο και πέμπτο μέρος της εργασίας αναλύεται η τεχνολογία του IoT (διαδίκτυο των πραγμάτων), ποια είναι η αρχιτεκτονική της και τι ενθυλακώνει σαν επιμέρους μοντέλα επικοινωνιών. Έπειτα, γίνεται επισκόπηση των κινητών δικτύων επικοινωνίας και τέλος αναλύονται τεχνολογίες επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας. Αναλυτικότερα γίνεται παρουσίαση του LPWAN , των πρωτοκόλλων επικοινωνίας που κατατάσσονται σε αυτό και εμβαθύνονται οι τεχνολογίες NB-IoT και LORA Η δομή της εργασίας στηρίζεται αρχικά σε έρευνα για το πρόβλημα που αντιμετωπίζει, αξιοποιώντας επιστημονικά άρθρα και συλλέγοντας πληροφορίες από μηχανικούς του πεδίου για το πρόβλημα της δεντρομετρίας, την διάσταση του προβλήματος διαχείρισης των δασικών πόρων και την σημασία της αξιολόγησης της αναδάσωσης. Έτσι αρθρώθηκε το πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, απαντώντας στα ερωτήματα, ποιο είναι το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται και πόσο σημαντικό είναι.

Στο επόμενο κεφάλαιο απαντάτε πως μπορεί να λυθεί το πρόβλημα της μέτρησης του ρυθμού ανάπτυξης των δέντρων όπου παρουσιάζονται τεχνικές δεντρομετρίας δια ζώσης και αναλύονται τα χαρακτηριστικά τους. Έπειτα, γίνεται η επιλογή της καταλληλότερης τεχνικής μέτρησης ώστε να πληροί τις προϋποθέσεις του στόχου της εργασίας που είναι οι απομακρυσμένες μετρήσεις χωρίς την παρουσία ανθρώπου στην φυσική κατασκευή.

Στο τρίτο, τέταρτο και πέμπτο μέρος της εργασίας αρχικά αναλύουμε γιατί καθίσταται αναγκαία η τεχνολογία του IoT και γιατί την χρησιμοποιούμε στην δεντρομετρία. Ποια είναι η αρχιτεκτονική της και τι ενθυλακώνει σαν επιμέρους μοντέλα επικοινωνιών. Έπειτα, γίνεται επισκόπηση των κινητών δικτύων επικοινωνίας και τέλος αναλύονται τεχνολογίες επικοινωνίας μεγάλης εμβέλειας.

Αναλυτικότερα γίνεται παρουσίαση του LPWAN, των πρωτοκόλλων επικοινωνίας που κατατάσσονται σε αυτό και εμβαθύνονται οι τεχνολογίες NB-IoT και LORA.

Στο έκτο μέρος της εργασίας εξετάζεται το όργανο μέτρησης της διαμέτρου των δέντρων που είναι ο rotary encoder. Προερχόμενοι από το κεφάλαιο 2 αναζητούμε μια τεχνολογία για την απομακρυσμένη μέτρηση της περιμέτρου των δέντρων. Οπότε αναφέρονται οι τεχνολογίες για την μέτρηση της περιμέτρου, διαχωρίζονται οι πιο γνωστές που υπάρχουν στην αγορά και συγκρίνονται για να επιλεγθεί η καταλληλότερη για την υλοποίηση της τελικής κατασκευής.

Τελικό κεφάλαιο πριν την υλοποίηση είναι η ενεργειακή προσέγγιση που θα πρέπει να γίνει για να αποκτήσει αυτονομία το δεντρόμετρο. Αναλύονται οι επιλογές όσον αφορά τη χρήση φωτοβολταϊκού, μιας μπαταρίας και ενός συστήματος φόρτισης της μπαταρίας, προκειμένου να επιλεγεί η βέλτιστη λύση για τις ανάγκες του συστήματος.

Η υλοποίηση της κατασκευής αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο που θα κλείσει η εργασία, εδώ περιγράφεται η σύνδεση των επιμέρους κεφαλαίων και γράφεται κώδικας για την επικοινωνία των πρωτοκόλλων και των συστημάτων που απαρτίζεται η παρούσα διπλωματική. Θα χρησιμοποιηθεί ένα Arduino uno με το shield SIM7000E για την δημιουργία ενός ασύρματου κόμβου NB-IoT στο οποίο θα συνδεθεί ο αισθητήρας μέτρησης rotary encoder. Επιπρόσθετα γίνεται προεπισκόπηση των εφαρμογών και των πρωτοκόλλων τόσο για την ασφάλεια της μετάδοσης της πληροφορίας όσο και για την άρτια σύνδεση του Cloud με την φυσική κατασκευή. Παρουσιάζονται τα εργαλεία MQTT broker, MQTT Explorer και Node red που θα αναλάβουν την διαχείριση της μετάδοσης της πληροφορίας από την φυσική κατασκευή προς το Cloud και έπειτα προς τον χρήστη. Στην συνέχεια κατασκευάζεται το σύστημα μέτρησης, διεξάγονται στατιστικά για την ακρίβεια της μέτρησης και προγραμματίζεται ο κόμβος για να επιτευχθεί η ελάχιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Ύστερα λαμβάνουμε τις μετρήσεις για την ηλιακή ενέργεια της Αθήνας από το site global solar atlas και εγκαθιστούμε ένα φωτοβολταϊκό πάνελ μαζί με τον κατάλληλο φορτιστή και την κατάλληλη μπαταρία για την τροφοδοσία του κόμβου. Τέλος δημιουργείται το μεταλλικό μέρος για την στήριξη σε δέντρα και ακολουθούν εικόνες τοποθέτησης του κόμβου πάνω σε δέντρα.

## Καινοτομία

Η διπλωματική βασίζεται σε δύο υλοποιήσεις, η μία είναι του EMS DRS26 της εταιρείας EMS Brno [19], ενός δεντρόμετρου που χρησιμοποιεί τεχνολογία IoT, δηλαδή ασύρματη ζεύξη με τον χρήστη για την παρακολούθηση του ρυθμού ανάπτυξης των δέντρων χρησιμοποιώντας έναν μη βηματικό μετρητή και μπαταρίες. Ενώ η δεύτερη υλοποίηση βρίσκεται στο IEEE με τίτλο NB-IoT based Tree Health Monitoring System όπου χρησιμοποιούν έναν κόμβο NB-IoT και αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας και διοξειδίου [3]. Σε αυτή τη μελέτη συνδυάζονται οι τεχνολογίες των αντίστοιχων ερευνών, ταυτόχρονα δε, ενσωματώνεται ένα νέο σύστημα διαχείρισης ενέργειας για την μακροχρόνια αυτονομία του συστήματος. Καταλήγουμε σε ένα πρωτότυπο ενός δεντρόμετρου χαμηλής κατανάλωσης για απομακρυσμένες μετρήσεις περιμέτρου δέντρων, ενεργειακά αυτόνομο, χαμηλού κόστους και open source.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>: Προσέγγιση της Δεντρομετρίας

Τα δεντρόμετρα είναι εργαλεία και τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση και την αξιολόγηση των δέντρων και των δασικών περιοχών. Η δεντρομετρία συνδυάζει διάφορες μεθόδους και εργαλεία για τη συλλογή, ανάλυση και ερμηνεία δεδομένων που σχετίζονται με τα δάση και τα δέντρα [18]. Οι δεντρομετρικές τεχνικές μπορεί να περιλαμβάνουν τη χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού, όπως υπολογιστικά συστήματα, laser (μετρητές απόστασης), και drones (αεροφωτογραφία με χρήση drones) [11] [32] [34], καθώς και γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) [14]. Ο στόχος είναι να παρακολουθείται, μετριέται, και καταγράφεται η σωστή πληροφορία για τα δέντρα, συμβάλλοντας στη βιώσιμη διαχείριση των δασών και των φυσικών πόρων. Η δεντρομετρία έχει ευρεία εφαρμογή σε διάφορους τομείς, όπως η δασοκομία, η οικολογία, η κλιματολογία, η έρευνα για τον ανθρώπινο πληθυσμό, και άλλους τομείς που σχετίζονται με την αειφόρα ανάπτυξη και τη διαχείριση του περιβάλλοντος.[7] Τα δεντρόμετρα είναι συσκευές μέτρησης της ανάπτυξης του δέντρου, μερικές από τις μετρήσεις που καταγράφουν είναι η αύξηση των ριζών, το πάχος των κλαδιών και των καρπών με υψηλή χρονική και χωρική ανάλυση σύμφωνα με την μεταβλητότητα του περιβάλλοντος που υπάρχει σε αυτά [20]. Τα δεδομένα που μετρούν και διεξάγουν ποικίλουν ανάλογα το ερευνητικό ενδιαφέρον της εκάστοτε περιοχής, όπως διάμετρο του κορμού και αυτών που έχουν τυπωθεί παραπάνω αλλά και της θερμοκρασίας, της περιεκτικότητας του νερού στο έδαφος και της βροχόπτωσης [10]. Για την ανάλυση των δεδομένων του δεντρόμετρου, υπάρχουν δύο μέθοδοι: (1) ημερήσιες προσεγγίσεις που υπολογίζουν και εξάγουν τιμές ανά ημέρα όπως μέσος όρος, μέγιστη ανάπτυξη και ελάχιστη ανάπτυξη [21] και (2) προσεγγίσεις της διαμέτρου του κορμού που διαχωρίζουν τις μετρήσεις του δεντρόμετρου σε διακριτές φάσεις σύσπασης, διαστολής και αύξησης της ακτίνας του κορμού όπου εκεί χρειάζονται σύνθετοι τρόποι μέτρησης με χρήση πολύπλοκων αλγορίθμων. [20]

### 1.1 Η Αναγκαιότητα της Δεντρομετρίας

Η δεντρομετρία, ως επιστημονική διαδικασία, αναδεικνύεται ως κρίσιμο εργαλείο για τη διαχείριση των δασών και τη διασφάλιση ενός πράσινου και αειφόρου αύριο. Στον σύγχρονο κόσμο, η ανάγκη για βιώσιμη χρήση των φυσικών πόρων είναι πιο κρίσιμη από ποτέ. Η δεντρομετρία προσφέρει έναν ολοκληρωμένο τρόπο μέτρησης και αξιολόγησης των δασών, επιτρέποντας την ενδελεχή αντίληψη της κατάστασής τους. Η σημασία της δεντρομετρίας ξεπερνά τα όρια της επιστήμης, καθώς αντικατοπτρίζει την προσπάθεια να συμβαδίσουμε με την ανάγκη για ανάπτυξη και την αναγκαιότητα διατήρησης του περιβάλλοντος. Με τη ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και την αυξανόμενη ζήτηση για ξυλεία, χαρτί, και άλλα προϊόντα δασοκομίας, η διαχείριση των δασών γίνεται εξαιρετικά επιτακτική. Μέσω της δεντρομετρίας, είναι δυνατό να καταγράψουμε όχι μόνο τον αριθμό των δέντρων, αλλά και τις διαστάσεις τους, την υγεία τους, και τον ρυθμό ανάπτυξής τους. Αυτά τα δεδομένα είναι απαραίτητα για την αξιολόγηση της βιοποικιλότητας, την πρόβλεψη των κινδύνων πυρκαγιών, και τη διατήρηση των οικοσυστημάτων.[10] Τα δάση αποτελούν σημαντικό φίλτρο άνθρακα, και η παρακολούθηση των επιπέδων CO<sub>2</sub> και άλλων αερίων του θερμοκηπίου μπορεί να γίνει αποτελεσματικά με τη χρήση δεντρομετρικών τεχνικών [18]. Μέσω ακριβών μετρήσεων, μπορούμε να κατανοήσουμε τον ρόλο των δασών ως προς την

αποθήκευση άνθρακα και να αναπτύξουμε στρατηγικές για την αντιμετώπιση των κλιματικών προκλήσεων. Συγχρόνως, η δεντρομετρία λειτουργεί ως ισχυρό εργαλείο για την παρακολούθηση και την καταπολέμηση της παράνομης υλοτομίας και άλλων παραβατικών δραστηριοτήτων. [\[1\]](#) [\[3\]](#) [\[7\]](#) [\[8\]](#)

## 1.2 Ο Ρόλος της Δεντρομετρίας στη Διατήρηση της Βιοποικιλότητας

Η Δεντρομετρία αναδεικνύεται ως ισχυρό εργαλείο για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας, αποτελώντας θεμέλιο πυλώνα για την κατανόηση, παρακολούθηση και προστασία της ποικιλομορφίας των ειδών και των οικοσυστημάτων. Ο ρόλος της σε αυτό το πλαίσιο είναι κρίσιμος, καθώς παρέχει εργαλεία για τη μέτρηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη βιοποικιλότητα και επιτρέπει τη λήψη αποτελεσματικών μέτρων διατήρησης. [\[12\]](#) Στον τομέα της δασοκομίας, η δεντρομετρία συνεισφέρει σημαντικά στη διατήρηση της βιοποικιλότητας μέσω της αξιολόγησης της υγείας των δασών. Οι μετρήσεις της πυκνότητας των δέντρων, της κατανομής των ειδών και της δομής του δάσους επιτρέπουν τον προσδιορισμό περιοχών που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή για τη διατήρηση της βιοποικιλότητας. [\[13\]](#)

Με τη χρήση γεωγραφικών πληροφοριακών συστημάτων [\[14\]](#), οι ερευνητές μπορούν να αναλύσουν περιοχές που απειλούνται από απώλεια βιοποικιλότητας και να αναπτύξουν στρατηγικές διατήρησης. Μέσω της παρακολούθησης των μετρήσεων υγρασίας, θερμοκρασίας, ρυθμού ανάπτυξης των δέντρων και διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) οι ερευνητές μπορούν να αντλήσουν πληροφορίες για τους πληθυσμούς και για την εξαφάνιση ειδών, ώστε να αντληθούν ποια είδη βρίσκονται σε κίνδυνο και να λάβουν μέτρα διατήρησης για την προστασία τους. [\[15\]](#).

## 1.3 Η εξέλιξη της αναδάσωσης με την δεντρομετρία

Η αναδάσωση αποτελεί τη διαδικασία αναπλήρωσης δέντρων σε περιοχές που έχουν υποστεί φυσικές ή ανθρωπογενείς καταστροφές, όπως πυρκαγιές, ξηρασία, ασθένειες των δέντρων, ή από ανθρώπινες δραστηριότητες όπως κοπή δέντρων για ξυλεία, εκμετάλλευση ορυκτών πόρων και καθαρισμό της γης για γεωργική χρήση. Με άλλα λόγια, αναδάσωση είναι η διαδικασία αναγέννησης των περιοχών που καλύπτονται από δάση οι οποίες έχουν υποστεί οποιαδήποτε μορφή καταστροφής, είτε φυσική είτε ανθρωπογενή. Μέσω της δεντρομετρίας, μπορεί να προσδιοριστεί η κατάσταση των υφιστάμενων δασικών πόρων, όπως η πυκνότητα των δέντρων, η διάμετρος και το ύψος τους, και η γενετική ποικιλία. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση των αναγκών αναδάσωσης σε μια περιοχή, καθώς και για τον καθορισμό των κατάλληλων ειδών δέντρων και των βέλτιστων μεθόδων φύτευσης. Επιπλέον, η δεντρομετρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της ανάπτυξης των νεοφυτεμένων δέντρων και την εκτίμηση της απόδοσής της αναδάσωσης. Μέσω της ποσοτικής ανάλυσης και της εφαρμογής προηγμένων αλγορίθμων, η δεντρομετρία μπορεί να συμβάλει στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης των δασικών πόρων και την επίτευξη μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας. Για την παρακολούθηση της ανάπτυξης των δέντρων υπάρχουν τεχνικές που προσδιορίζουν το μέγεθος του δέντρου ανάλογα με την περίμετρο του. Οι περισσότερες τεχνολογίες αφορούν μεθόδους δια ζώσης μέτρησης, ας δούμε

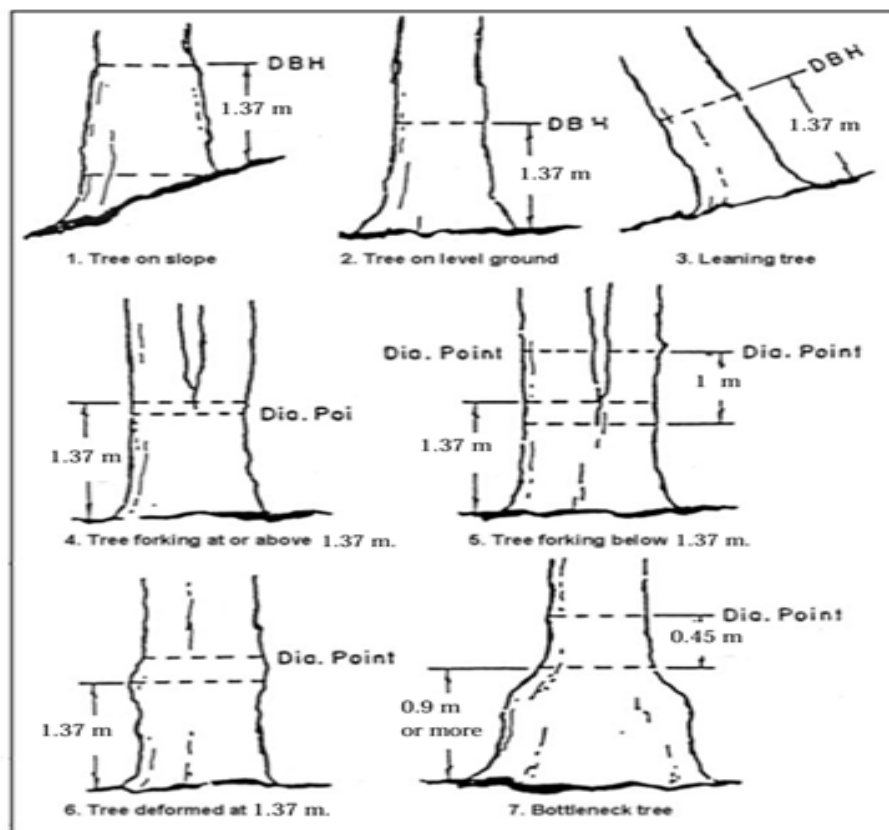
πως μπορούμε να προσεγγίσουμε το πρόβλημα της μέτρησης της περιμέτρου του δέντρου αποδοτικά και με την δυνατότητα απομακρυσμένης παρακολούθησης. [112]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>: Τεχνικές - Μέθοδοι Μέτρησης Δέντρων

Αρχικά πρέπει να οριστεί ποιο είναι το κατάλληλο ύψος για να παρθούν μετρήσεις, τι τεχνολογίες έχουμε διαθέσιμες για αξιοποίηση και τι ισχύει ως παγκόσμιος πρότυπο για τον υπολογισμό της ανάπτυξης των δέντρων. Τα χαρακτηριστικά όπως το ύψος των δέντρων, η διάμετρος στο κατάλληλο ύψος DBH (diameter at breast height) [22] και άλλες παράμετροι που περιγράφουν τη δασική δομή αποτελούν στοιχεία για έρευνα σχετικά με την διαχείριση των δασικών πόρων γενικότερα. Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με το DBH που αποτελεί κύρια μέτρηση για την καταγραφή της ανάπτυξης των δέντρων [23]. Υπάρχουν πολλοί μέθοδοι μέτρησης του DBH και πολλές επισκοπήσεις που καλύπτουν εκτενώς την ιστορία, την εξέλιξη, την αξιολόγηση και τις κατευθυντήριες οδηγίες για την κατάλληλη επιλογή των δεντρόμετρων. [25]

Κάποιες από τις πιο γνωστές είναι:

Μέτρηση του DBH χρησιμοποιώντας παγόμετρο, D-Tape (diameter tape) και sector fork. Αρχικά, πρέπει να μελετήσουμε που ορίζεται το σημείο DBH. Το σημείο DBH μετράται στα 4,5 πόδια ή στα 1,37 m και είναι το πιο σύνηθες ύψος για την μέτρηση διαμέτρου των δένδρων στη βόρεια Αμερική. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία [28] σε ακανόνιστα δέντρα έχει δοθεί η οδηγία ότι το DBH ορίζεται ως η κάθετη απόσταση από το υψηλότερο σημείο του εδάφους έως του σημείου του δέντρου που η απόσταση φτάνει το 1,37 m.



Εικόνα 1 Μέτρηση του DBH σε ακανόνιστα δέντρα [28]

## 2.1 Μέτρηση DBH με παχύμετρο

Η παρακάτω διάταξη αποτελείται από 2 δαγκάνες που αγκυλώνονται στο δέντρο, ένα σταθερό σημείο ορίζεται ως η μία δαγκάνα ενώ η άλλη είναι μεταβαλλόμενη. Αυτές συνδέονται με ένα χάρακα αριθμημένο. Η φιλοσοφία πίσω από αυτό το εργαλείο είναι ότι όσο εκτείνεται η δαγκάνα αλλάζει η μέτρηση που αναγράφεται στον χάρακα. Κατά την διάρκεια της μέτρησης υπάρχει σφάλμα που είναι η διαφορά του πραγματικού πάχους του δέντρου με αυτό που πραγματικά έχει μιας και τα δέντρα δεν είναι πλήρως ομοιόμορφα και κυλινδρικά. Για αυτό και παίρνονται συνήθως τουλάχιστον 2 μετρήσεις με παχύμετρο στο ίδιο ύψος αλλά σε διαφορετικό περιμετρικό σημείο, τέλος αθροίζονται οι τελικές τιμές και διαιρούνται με το πλήθος τους, δηλαδή βγαίνει ο μέσος όρος και αυτός ορίζεται ως η τελική τιμή για την εκτίμηση της διαμέτρου του δέντρου. Για τον υπολογισμό της περιμέτρου ισχύει ο τύπος:  $Περίμετρος = Διάμετρος * \pi$ , όπου  $\pi = 3.14159$  [27]



Εικόνα 2 Μέτρηση της διαμέτρου των δέντρων στο ύψος DBH (1,3 m) με παχύμετρο [26]

## 2.2 Μέτρηση DBH με D-Tape

Στην συνέχεια έχουμε την μέτρηση με D-Tape, η οποία είναι μια ταινία διαβαθμισμένη σε ισαπέχουσα διαστήματα και ένα σύστημα μονάδων που αναγράφεται κάθε φορά στην εκάστοτε ταινία μέτρησης (inches, cm). Η ταινία είναι ένα εργαλείο άμεσης μέτρησης της περιμέτρου του δέντρου χωρίς υπολογισμούς. Για την μέτρηση της περιμέτρου ο χρήστης ευθυγραμμίζει την ταινία γύρω από το σημείο DBH και βλέπει την τιμή που αναγράφεται πάνω στην ταινία όταν το ένα άκρο της ταινίας για πρώτη φορά αγγίζει το υπόλοιπο τμήμα της ταινίας. [24]

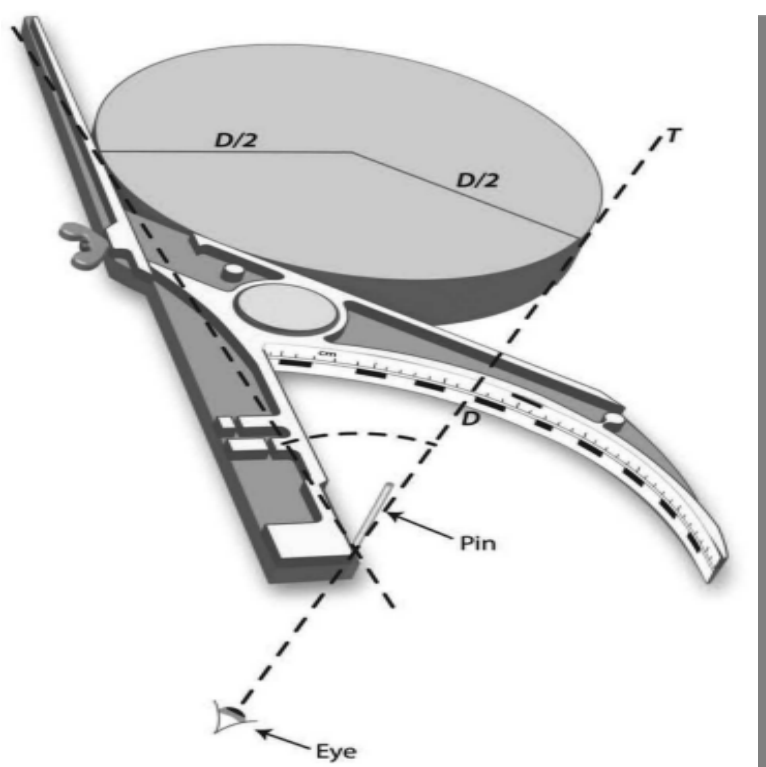
Ακολουθεί εικόνα με τον τρόπο μέτρησης της περιμέτρου του δέντρου χρησιμοποιώντας D-Tape.



Εικόνα 3 Μέτρηση της περιμέτρου ενός δέντρου με D-Tape [29]

## 2.4 Μέτρηση DBH με Sector Fork

Το Sector fork είναι ένα όχι τόσο διαδεδομένο εργαλείο που χρησιμοποιείται για την δεντρομετρία κάνοντας χρήση του μοντέλου Bitterlich, το οποίο είναι ένα μαθηματικό μοντέλο που δημιουργήθηκε από τον Walter Bitterlich το 1947 και υπολογίζει με χρήση τριγωνομετρίας τη διάμετρο ενός δέντρου χρησιμοποιώντας μόνο τη μία πλευρά του δέντρου με βάση τη γνωστή απόσταση και τη γωνία μεταξύ των δύο πλευρών του οργάνου. Τα δέντρα που μετρούνται είναι διαμέτρου από 4 cm έως 100 cm (από 2 έως 40 ίντσες) μιας και σε μεγαλύτερα δέντρα υπάρχουν μη ανεκτά σφάλματα. Δεν θα γίνει ανάλυση του μοντέλου μιας και δεν είναι αντικείμενο της παρούσας εργασίας. [30]



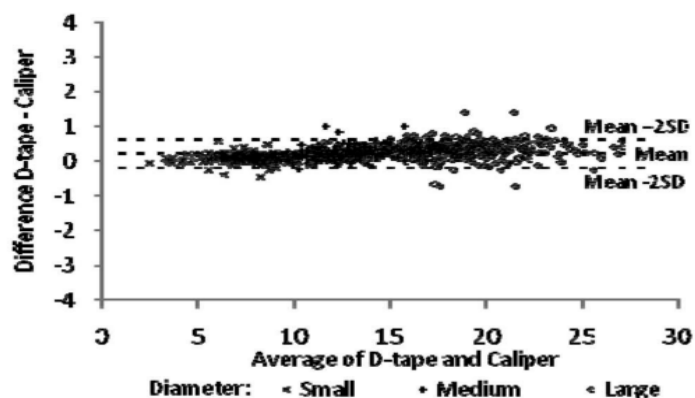
Εικόνα 4 Sector fork. T = εφαπτομένη, D = Διάμετρος [24]

Για την αξιολόγηση των μετρήσεων σύμφωνα με την βιβλιογραφία [24] έχουν παρθεί μετρήσεις από τους ερευνητές, ώστε να καταγράψουν ποιο από τα εκάστοτε θεωρείται καλύτερο στην ακρίβεια της μέτρησης. Ακολουθεί πίνακας με τις μετρήσεις διαφορετικών δέντρων ταξινομώντας τα δέντρα σε κλάσεις ανάλογα τη διάμετρο που έχουν. Έτσι προκύπτουν 3 κλάσεις, η πρώτη είναι **μικρής διαμέτρου ( $dbh \leq 18 \text{ cm}$ )**, η δεύτερη **μεσαίας διαμέτρου ( $18 \text{ cm} < dbh \leq 34 \text{ cm}$ )** και η τρίτη **μεγάλης διαμέτρου ( $dbh > 34 \text{ cm}$ )**. Σε κάθε κλάση μετριέται ο μέσος όρος των μετρήσεων που πάρθηκαν (Mean), η διαφορά μεταξύ των μετρήσεων (SD), η ελάχιστη μέτρηση από την δειγματοληψία (Minimum) και η μέγιστη μέτρηση από την δειγματοληψία (Maximum). [31]

Πίνακας 1 Περίληψη των δεδομένων DBH ανά κατηγορία διαμέτρου και δενδρομετρητή

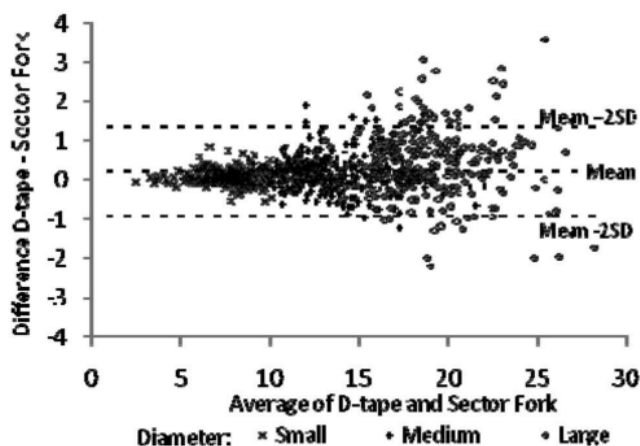
Diameter class	Plot	Sample size	Dendrometer	Mean	SD	Minimum	Maximum
Small	1	100	D-tape	7.20	1.20	3.40	9.40
			Caliper	7.11	1.19	3.35	9.15
			Sector fork	7.12	1.20	3.43	9.29
	2	100	D-tape	7.58	1.34	2.40	11.10
			Caliper	7.47	1.34	2.45	10.95
			Sector fork	7.50	1.35	2.44	11.08
	3	100	D-tape	7.88	1.43	4.10	10.90
			Caliper	7.79	1.44	4.10	10.85
			Sector fork	7.84	1.46	4.09	11.18
	Total	300	D-tape	7.55	1.35	2.40	11.10
			Caliper	7.46	1.35	2.45	10.95
			Sector fork	7.48	1.37	2.44	11.18
Medium	4	99	D-tape	14.95	2.66	8.60	21.90
			Caliper	14.68	2.63	8.50	21.80
			Sector fork	14.72	2.68	8.46	22.05
	5	100	D-tape	13.19	2.09	7.90	18.00
			Caliper	12.91	2.06	7.75	17.50
			Sector fork	13.02	2.16	7.62	17.81
	6	103	D-tape	11.88	1.25	9.00	15.20
			Caliper	11.72	1.21	9.05	15.10
			Sector fork	11.70	1.29	8.43	14.76
	Total	302	D-tape	13.32	2.42	7.90	21.90
			Caliper	13.08	2.37	7.75	21.80
			Sector fork	13.13	2.44	7.62	22.05
Large	7	101	D-tape	19.25	2.37	15.40	26.00
			Caliper	18.95	2.35	15.15	25.90
			Sector fork	18.73	2.36	14.31	26.28
	8	90	D-tape	20.10	2.92	12.90	27.20
			Caliper	19.81	2.90	12.65	26.80
			Sector fork	19.54	2.91	12.20	27.17
	9	80	D-tape	17.26	3.06	11.80	27.30
			Caliper	16.88	3.00	11.25	26.70
			Sector fork	17.15	3.29	11.28	29.04
	Total	271	D-tape	18.94	2.99	11.80	27.30
			Caliper	18.63	2.98	11.25	26.80
			Sector fork	18.53	2.99	11.28	29.04
All trees	873	D-tape	13.08	5.16	2.40	27.30	
		Caliper	12.87	5.07	2.45	26.80	
		Sector fork	12.87	5.04	2.44	29.04	

Για να καταλήξουν στο συμπέρασμα ποιο δεντρομετρικό όργανο θεωρείτε καλύτερο στην ακρίβεια των μετρήσεων έχουν συγκρίνει τις διασπορές των μέσων όρων σε τρία διαγράμματα. Το πρώτο διάγραμμα συγκρίνει την διασπορά του μέσου όρου από δέντρα μικρού, μεσαίου και μεγάλου μεγέθους του D-Tape με την διασπορά του μέσου όρου από δέντρα μικρού, μεσαίου και μεγάλου μεγέθους του παχύμετρου.

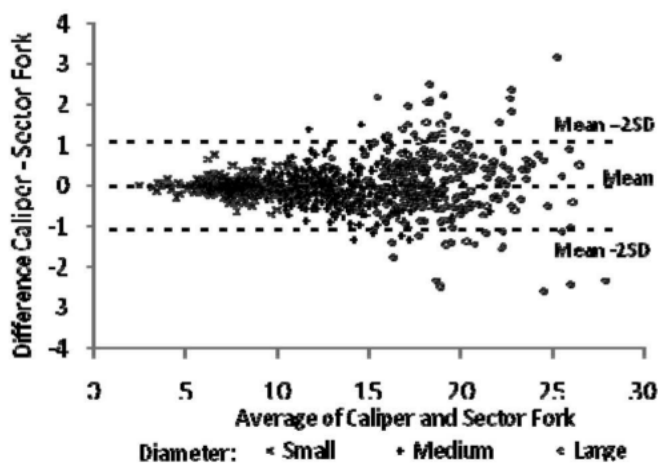


Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι σε μικρό μέγεθος το D-Tape και το παχύμετρο δεν έχουν αποκλίσεις που να είναι μη επιτρεπτές, ομοίως σε μεσαίου μεγέθους. Στα μεγαλύτερα δέντρα παρατηρείται μικρή απόκλιση του παχύμετρου όπως διατυπώθηκε και από τους ερευνητές, αλλά είναι στα πλαίσια αποδεκτού σφάλματος.

Το δεύτερο διάγραμμα συγκρίνει την διασπορά του μέσου όρου από δέντρα μικρού, μεσαίου και μεγάλου μεγέθους του D-Tape με την διασπορά του μέσου όρου από δέντρα μικρού, μεσαίου και μεγάλου μεγέθους του Sector Fork.



Από το διάγραμμα παρατηρείται ότι σε μικρό μέγεθος το D-Tape και το Sector Fork δεν έχουν αποκλίσεις που να είναι μη επιτρεπτές, ομοίως σε μεσαίου μεγέθους. Στα μεγαλύτερα δέντρα παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση του Sector Fork από τον μέσο όρο των μετρήσεων, η διασπορά τους σε ορισμένες μετρήσεις υπερβαίνει τα όρια  $[-1,1]$  (mean -2SD). Γι' αυτό το Sector Fork κρίνεται ως ένα εργαλείο που χρειάζεται προσοχή στις μετρήσεις για δέντρα μεγάλου μεγέθους. Τέλος, στο τρίτο διάγραμμα παρουσιάζονται οι μετρήσεις του μέσου όρου του παχύμετρου με το Sector Fork.



Στα μικρού μεγέθους δέντρα το παχύμετρο και το Sector Fork δεν έχουν σημαντικές διαφορές, ομοίως και στους μεσαίου μεγέθους δέντρα. Στα μεγαλύτερα δέντρα φαίνεται αισθητή η διαφορά των μέσων όρων των δύο οργάνων, το παχύμετρο βρίσκεται στα πλαίσια αποδεκτής μέτρησης μιας και η διασπορά των μετρήσεων κυμαίνεται στα όρια  $[-1,1]$  ενώ όπως και πριν το Sector Fork έχει μεγαλύτερη απόκλιση.



Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι αποκλίσεις που έχουν τα τρία διαφορετικά εργαλεία μέτρησης:

**Πίνακας 2 Τιμές διαφοράς μέσης τιμής μεταξύ των τριών οργάνων**

	D-tape versus caliper	D-tape versus sector fork	Caliper versus sector fork
<b>Small diameter class</b>			
Total	<0.0001	<0.0001	0.0112
Plot 1	<0.0001	<0.0001	0.532
Plot 2	<0.0001	<0.0001	0.0825
Plot 3	<0.0001	0.0451	0.0482
<b>Medium diameter class</b>			
Total	<0.0001	<0.0001	0.0802
Plot 4	<0.0001	<0.0001	0.3223
Plot 5	<0.0001	0.0017	0.0202
Plot 6	<0.0001	<0.0001	0.5242
<b>Large diameter class</b>			
Total	<0.0001	<0.0001	0.1267
Plot 7	<0.0001	<0.0001	0.0077
Plot 8	<0.0001	<0.0001	0.0056
Plot 9	<0.0001	0.1156	0.0002

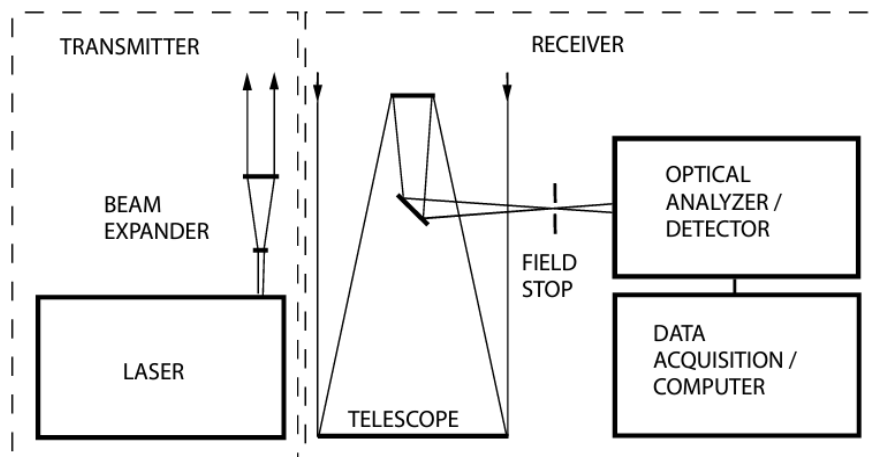
Συμπέρασμα, το D-Tape και το παχύμετρο αλλά και το Sector Fork είναι αξιόπιστα σε μετρήσεις μικρών δέντρων ενώ σε δέντρα που ανήκουν στην κλάση «μεσαίου μεγέθους δέντρα» το Sector Fork έχει λίγο μεγαλύτερη απόκλιση από τα προηγούμενα δύο.

Στην κλάση «μεγάλου μεγέθους δέντρα» το Sector Fork έχει μεγαλύτερη απόκλιση ενώ το παχύμετρο και το D-Tape έχουν παρόμοιες μετρήσεις. Το D-Tape και το παχύμετρο ορίζονται ως κατάλληλα για μετρήσεις δέντρων ανεξαρτήτως μεγέθους και περιοχής (plot) χωρίς μεγάλες αποκλίσεις [24]. Παρόλα αυτά εμείς εξετάζουμε τα όργανα μέτρησης για να προβούμε στην επιλογή μιας τεχνολογίας που θα επιτρέπει την απομακρυσμένη μετάδοση μετρήσεων. Η τεχνολογία που βρίσκεται σε αιχμή και μπορεί να στείλει δεδομένα εξ αποστάσεως είναι η χρήση του Lidar σε drones.

## 2.4 Μέτρηση DBH με Lidar

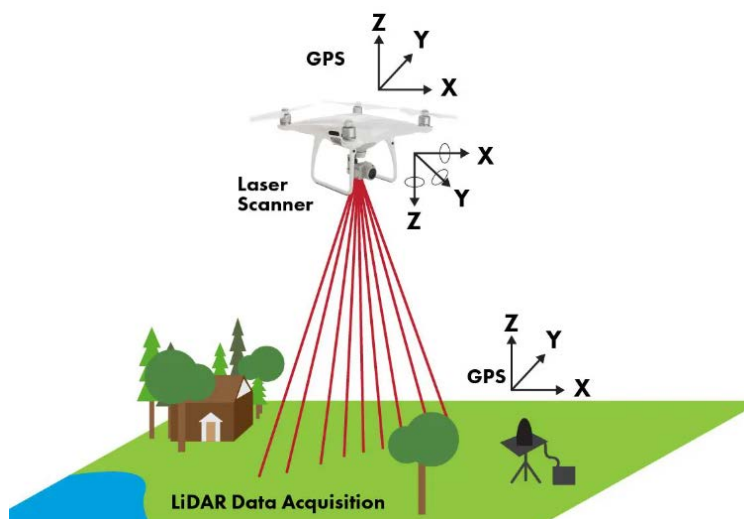
Τα τελευταία χρόνια η χρήση αερομεταφερόμενης τεχνολογίας με Drones και μη επανδρωμένα αεροσκάφη έχει αυξηθεί ραγδαία. Ο συνδυασμός των Drones, των μη επανδρωμένων αεροσκαφών και του αισθητήρα LiDAR (Light Detection Ranging) δίνουν την δυνατότητα της μέτρησης βιοφυσικών χαρακτηριστικών του δάσους όπως το ύψος, το πλάτος και τη πυκνότητα των δέντρων. Επιπλέον γίνεται δυνατή η χαρτογράφηση και η λήψη συντεταγμένων για την ακριβή τοποθεσία λήψης του δείγματος από τον αισθητήρα. Ταυτόχρονα οι ερευνητές με τις πληροφορίες αυτές μπορούν να μοντελοποιήσουν το δάσος για την αναγνώριση είτε μεμονωμένων είτε ομάδων δέντρων [32]. Ο αισθητήρας LiDAR είναι ένα σύστημα που αποτελείται από έναν πομπό και έναν δέκτη, ο πομπός ακτινοβολεί με μια δέσμη laser σε συγκεκριμένες φασματικές ιδιότητες, ενώ ο πομπός περιμένει να λάβει το ανακλώμενο laser. [33]

Ακολουθεί εικόνα που περιγράφει αναλυτικά τα εσωτερικά συστήματα του αισθητήρα.



Εικόνα 5 Εσωτερική δομή του αισθητήρα LiDAR [33]

Η παρακάτω εικόνα είναι μια πραγματική αναπαράσταση ενός Drone που χαρτογραφεί μια περιοχή με τον αισθητήρα LiDAR και την χρήση GPS για τον εντοπισμό της θέσης του Drone στον χάρτη.



Εικόνα 6 Χρήση του LiDAR σε τετρακόπτερο [34]

Το συμπέρασμα που προκύπτει ύστερα από την εξέταση μερικών τεχνολογιών είναι ότι υπάρχουν πολλοί τρόποι προσέγγισης της περιμέτρου του δέντρου και γενικότερα του μεγέθους του. Η επιλογή ενός τρόπου γίνεται με κριτήρια την ακρίβεια της μέτρησης, το κόστος του οργάνου, τον συνδυασμό των συστημάτων μετρήσεων και αν η μέτρηση θα γίνεται απομακρυσμένα είτε δια ζώσης [24]. Στην παρούσα εργασία αναζητούμε τρόπους προσέγγισης της δεντρομετρίας με την καλύτερη απόδοση και με την δυνατότητα απομακρυσμένης μέτρησης. Όπως είδαμε παραπάνω ένας διαθέσιμος τρόπος απομακρυσμένης μέτρησης των βιοφυσικών χαρακτηριστικών του δάσους είναι με τον αισθητήρα LIDAR, αλλά η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος με Drone έχει μεγάλο κόστος. Η πλησιέστερη λύση είναι η δημιουργία ενός αυτόματου D-Tape οργάνου, που θα μπορεί να υπολογίζει την περίμετρο των δέντρων με τρόπο παρόμοιο με αυτό που αναλύθηκε στην παράγραφο «[Μέτρηση DBH με D-Tape](#)». Σκόπιμα επιλέγεται αυτή η μέθοδος μιας και εξασφαλίζει όλα τα προνόμια και τις

αποδόσεις που έχει σε σύγκριση με τις υπόλοιπες τεχνολογίες. Η ανάγκη για εξ αποστάσεως μετρήσεις μας οδηγεί στην αποφυγή των παραδοσιακών μεθόδων μέτρησης δια ζώσης όπως εκείνες που αναφέρθηκαν, έτσι μεταβαίνουμε σε τεχνολογίες που υποστηρίζουν την μετάδοση της πληροφορίας απομακρυσμένα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: Ανάπτυξη και Εξέλιξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT)

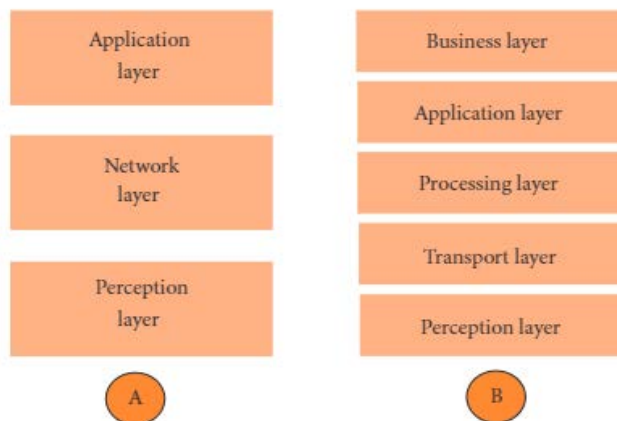
Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας του Internet of Things (IoT) στα συστήματα μέτρησης επιτρέπει την απομακρυσμένη συλλογή, ανάλυση και διαχείριση δεδομένων. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε τώρα να λαμβάνουμε μετρήσεις από αισθητήρες σε απόσταση και να αξιοποιούμε την πληθώρα των δεδομένων για να λάβουμε πιο ενημερωμένες αποφάσεις. Η ανάπτυξη ενός συστήματος μέτρησης που εκμεταλλεύεται την τεχνολογία του IoT ανοίγει νέους ορίζοντες στον τρόπο που διαχειριζόμαστε τις εφαρμογές μας. Έτσι, μεταβαίνουμε στο επόμενο κεφάλαιο που αναλύουμε τις διαθέσιμες τεχνολογίες του IoT και επιλέγουμε εκείνη που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της εργασίας. Δηλαδή στην υλοποίηση μιας κατασκευής με δυνατότητα απομακρυσμένης διαχείρισης δεδομένων για προγράμματα αναδάσωσης.

### 3.1 Εισαγωγή στο διαδίκτυο των πραγμάτων

Ένα παράδειγμα της σύγχρονης τεχνολογίας είναι το IoT, που επιτρέπει την αλληλεπίδραση και επικοινωνία συστημάτων και αισθητήρων με το περιβάλλον, δημιουργώντας έξυπνες συσκευές. Η βασική ιδέα είναι να δημιουργηθεί ένα πεπλεγμένο δίκτυο διάφορων πρωτοκόλλων επικοινωνίας και ασφάλειας όπου οι συσκευές μπορούν να συλλέγουν, μεταδίδουν και ανταλλάσσουν δεδομένα, προσφέροντας νέες δυνατότητες σε πολλούς τομείς της ζωής μας. Αυτή η τεχνολογία μπορεί να διευκολύνει την καθημερινότητά μας, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα, την άνεση και την ασφάλεια σε διάφορους τομείς, όπως αυτοματισμός στην βιομηχανία, οικιακός αυτοματισμός, έξυπνες τεχνολογίες στον κλάδο της υγείας και των μεταφορών. Ειδικότερα, στον τομέα της δασοκομίας και της γεωργίας το IoT προσφέρει τεχνολογίες που επιτρέπουν την απομακρυσμένη παρακολούθηση εδάφους και δέντρων ώστε να βελτιστοποιηθεί η διαχείριση των δασικών πόρων. [\[39\]](#)

### 3.2 Η δομή της τεχνολογίας IoT

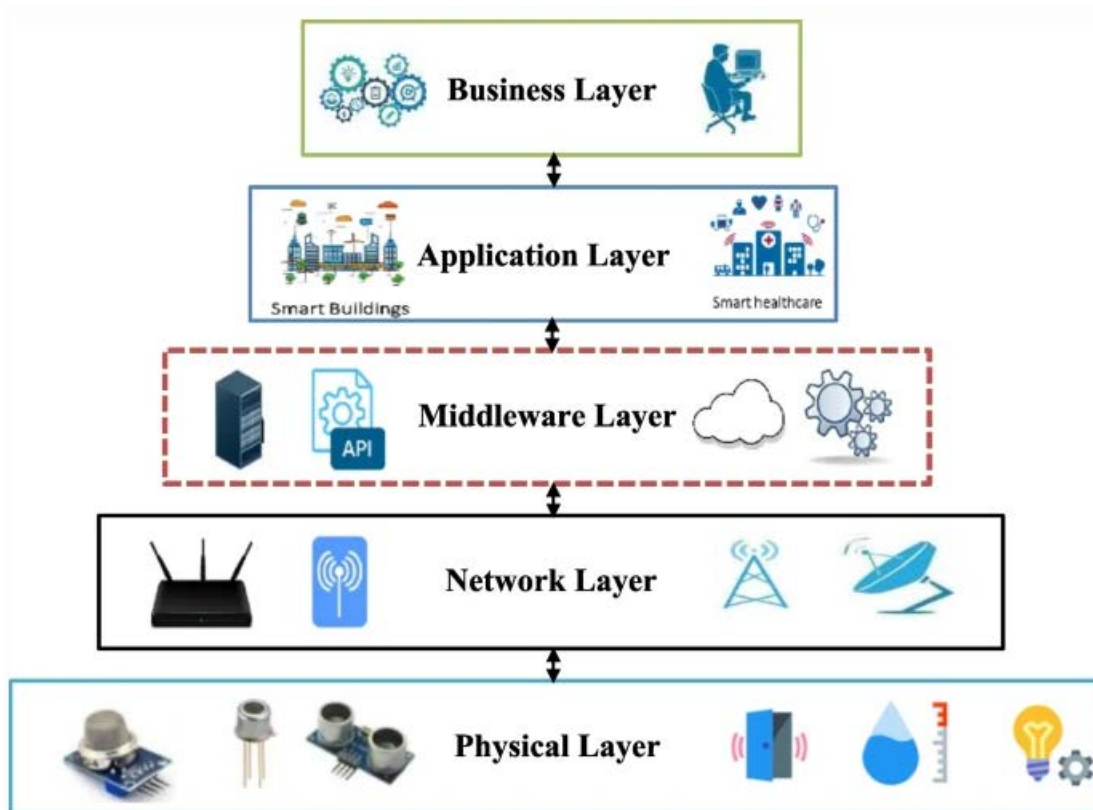
Για την υλοποίηση της κατασκευής πρέπει αρχικά να δούμε εκτενώς τα εργαλεία που έχουμε διαθέσιμα και τα χαρακτηριστικά τους. Έτσι περνάμε στην δομή του IoT όπου αναλύουμε την τεχνολογία τόσο θεωρητικά όσο και στις εφαρμογές που χρησιμοποιείται. Για την δομή του IoT έχουν δοθεί αρκετές προτάσεις από τους ερευνητές, καμία όμως δεν έχει συμφωνηθεί παγκοσμίως, παρόλα αυτά υπάρχουν δύο κύριες υλοποιήσεις της δομής του. Η αρχιτεκτονική των 3 επιπέδων και η αρχιτεκτονική των 5 επιπέδων. Η αρχιτεκτονική των 3 επιπέδων ορίζεται από το **Application Layer**, το **Network Layer** και τέλος το **Perception Layer** δηλαδή αντίστοιχα το επίπεδο εφαρμογής, επίπεδο δικτύου και επίπεδο αντίληψης. Σε αντίθεση με την πρώτη υλοποίηση έρχεται η δεύτερη όπου οι ερευνητές θεωρούν ότι πρέπει να υπάρχουν άλλα δύο Layers το **Business Layer** και το **Processing Layer**.



Εικόνα 7 Αρχιτεκτονική 3 και 5 επιπέδων του IoT

Οι εκάστοτε επιστήμονες που σχεδίασαν τις δύο αρχιτεκτονικές έχουν περιγράψει τα ίδια πράγματα για το **Network Layer** και για το **Transport Layer** οπότε για διευκόλυνση θα γίνει ανάλυση σε αυτό το Layer μια φορά. Ομοίως για το **Perception Layer** όπου παρακάτω αναφέρεται ως **Physical Layer**. Για να αναλυθούν όλα τα Layers θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο των 5 Layers που ενθυλακώνει και το μοντέλο των 3 Layers.

Μια εικονική αναπαράσταση που δείχνει με γραφήματα και σχέδια τι περιγράφει το κάθε Layer είναι η παρακάτω:



Εικόνα 8 Αρχιτεκτονική 5 επιπέδων IoT

### Το **πρώτο** Layer ονομάζεται **Business Layer** (Επιχειρησιακό Επίπεδο)

Το επιχειρησιακό επίπεδο αποτελεί σημαντικό μέρος της αρχιτεκτονικής του IoT μιας και είναι υπεύθυνο για να εξασφαλίζει στις επιχειρήσεις διαγράμματα, στατιστικά και αναλύσεις από φυσικές συσκευές που συνδέονται στο διαδίκτυο. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος χρήσης αυτού του Layer είναι η παρακολούθηση δεδομένων, όπως στο εμπόριο για την παρακολούθηση αγορών των πελατών και την διεξαγωγή στατιστικών ώστε να βελτιωθεί η διαχείριση των αποθεμάτων. Επιπλέον, έξυπνες συσκευές, όπως ιατρικά διαγνωστικά, μπορούν να παρακολουθούν την κατάσταση των ασθενών και να στέλνουν τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο στο ιατρό που τους επιβλέπει ώστε να λαμβάνει πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις στην περίθαλψη. Οι εφαρμογές δεν σταματούν εκεί μιας και στον τομέα της ενέργειας χρησιμοποιείται κατά κόρο για την διαχείριση της ενέργειας. [\[39\]](#) [\[42\]](#) [\[43\]](#)

### Το **δεύτερο** επίπεδο είναι το **Application Layer**

Αυτό το επίπεδο είναι υπεύθυνο για την εφαρμογή στοχευμένων υπηρεσιών που θέλουν οι χρήστες, όπως υπηρεσίες αποθήκευσης απλών δεδομένων για μετρήσεις πίεσης, θερμοκρασίας, υγρασίας είτε για αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων είτε και για data mining (χρήση αλγόριθμων ομαδοποίησης ή κατηγοριοποίησης των δεδομένων). Τα έξυπνα σπίτια, η έξυπνη υγειονομική περίθαλψη και τα έξυπνα μεταφορικά συστήματα με διεπαφή με τον χρήστη ανήκουν σε αυτό το επίπεδο. [\[39\]](#) [\[42\]](#) [\[43\]](#)

### Το **τρίτο** Layer ονομάζεται **Middleware Layer** (Επίπεδο Ενδιάμεσου Λογισμικού)

Το επίπεδο middleware είναι υπεύθυνο για την άρτια σύνδεση του επιπέδου εφαρμογής με το επίπεδο του δικτύου. Παρέχει τα κατάλληλα services ώστε οι πληροφορίες όπως τα datasets και τα δεδομένα να επεξεργάζονται κατάλληλα για την αποστολή τους στο επίπεδο εφαρμογής ή στο επίπεδο δικτύου και ταυτόχρονα αναλαμβάνει τον έλεγχο της επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών λογισμικών αυτού του επιπέδου. Επιπλέον παρέχει υπηρεσίες που απλοποιούν την υλοποίηση διαχείρισης κατανεμημένης πληροφορίας αφότου παρέχει ασφάλεια στην επικοινωνία και λειτουργίες διαχείρισης απορρήτου ανάμεσα στις συσκευές IoT. [\[39\]](#) [\[42\]](#) [\[43\]](#)

### Το **τέταρτο** Layer ονομάζεται **Network Layer** (Επίπεδο Δικτύου)

Επόμενο επίπεδο είναι το Network Layer το οποίο λειτουργεί ως μεσολαβητής και δρομολογητής της πληροφορίας μεταξύ του επιπέδου Physical Layer ή αλλιώς Perception Layer και του middleware Layer. Η μετάδοση των δεδομένων γίνεται με αυτό το επίπεδο χρησιμοποιώντας είτε ασύρματες είτε ενσύρματες τεχνολογίες όπως το WiFi, το Bluetooth, LTE (2G/3G..), Ethernet, NFC (Near Field Communications), Zigbee και δίκτυα χαμηλής ισχύος όπως τα LPWAN. [\[39\]](#) [\[42\]](#) [\[43\]](#)

### Το **πέμπτο** Layer ονομάζεται **Perception Layer** (Επίπεδο αντίληψης)

Τελευταίο επίπεδο στην δομή του IoT είναι το Perception layer ή αλλιώς Επίπεδο Εφαρμογής, το παρόν επίπεδο παρέχει στον χρήστη συγκεκριμένες υπηρεσίες όπως την δυνατότητα επικοινωνίας των αισθητήρων (υγρασίας, θερμοκρασίας, φωτεινότητας, απόστασης...) με το Network Layer. Συλλέγει ή εντοπίζει ερεθίσματα από το περιβάλλον και επίσης είναι υπεύθυνο για να ανέβουν τα δεδομένα στο Cloud. Ταυτόχρονα επεξεργάζεται μεγάλο όγκο δεδομένων και διαχειρίζεται την πληροφορία ώστε να μεταφερθεί σωστά στο προηγούμενο επίπεδο. [\[39\]](#) [\[42\]](#) [\[43\]](#)

### 3.3 Διαφορές του IoT με το WSN

Η αρχιτεκτονική των 5 και 3 layers συχνά χρησιμοποιεί ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) για τη συλλογή δεδομένων από το περιβάλλον. Τα WSN αποτελούνται από αισθητήρες που είναι συνδεδεμένοι ασύρματα και μπορούν να μεταδίδουν δεδομένα σε κεντρικούς κόμβους. Αυτός ο συνδυασμός επιτρέπει τη δημιουργία ευφών συστημάτων που μπορούν να παρακολουθούν και να ελέγχουν διεργασίες απομακρυσμένα. Παρόλα αυτά το WSN και το IoT είναι διαφορετικά πράγματα και συγκεκριμένα το IoT είναι η επέκταση του WSN. Οι διαφορές του IoT (διαδίκτυο των πραγμάτων) με το WSN μπορούν να αναπαρασταθούν σε μια εξίσωση:

$$\text{“ IoT = Internet + WSN ” [40]}$$

Όπως αναφέρθηκε και πριν το IoT είναι μια τεχνολογία επέκτασης του WSN πράγμα το οποίο το κάνει να έχει πολλά κοινά και με το διαδίκτυο. Ας δούμε έναν πίνακα που διαχωρίζει το IoT, το διαδίκτυο και το WSN.

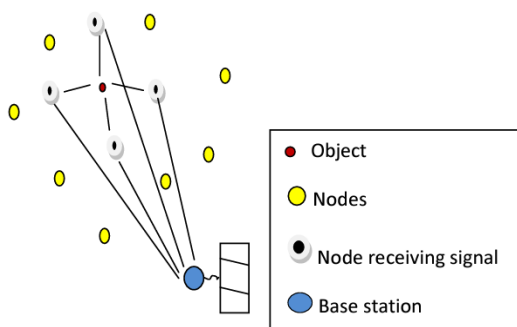
**Πίνακας 3 Διαφορές και ομοιότητες στις τεχνολογίες IoT/Internet/WSN [40] [44]**

Characteristics	IoT	Internet	WSN
Comm. Protocol	Lightweight Comm. protocols.	(TCP/IP)	Lightweight Comm. protocols.
Scale degree of Area	Cover wide area	Cover wide area	Cover local area
Networking Approach	Determine backbone	Determine backbone	Self-organization
Identify objects	Must	Can not	Can
Type of nodes	Active and passive	Active	Active
Network design	WSN+ dynamic smart things+ Internet surrounded by intelligent environment	Set of networks contains set of Fixed objects	Dynamic smart objects
Behavior	Dynamically	Fixed	Dynamically
Networking Time	Timing synchronization	Unlimited	Unlimited

Αρχικά το IoT και το WSN προσφέρει ένα ελαφρύ σύστημα επικοινωνίας χωρίς την πολυπλεξία του διαδικτύου με τα πρωτόκολλα TCP/IP. Για την ακρίβεια το M2M ή αλλιώς LWM2M (lightweight Machine to Machine) ανήκουν σαν πρωτόκολλα του IoT και του WSN, είναι δομημένα έτσι ώστε να μπορούν να συνδεθούν αισθητήρες και συστήματα με περιορισμένους πόρους σε κεντρικούς διακομιστές είτε και κόμβους. Παράδειγμα της χρήσης του πρωτόκολλου LWM2M είναι όταν ένα μετεωρολογικό σύστημα με εκατοντάδες αισθητήρες που καταναλώνουν αρκετή ενέργεια για την λήψη και την αποστολή δεδομένων να χρειάζεται να επικοινωνήσει με πρωτόκολλα TCP/IP. Η κατανάλωση ενέργειας είναι από τα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζονται με την χρήση του LWM2M και επιπλέον ο όγκος δεδομένων κατά την επικοινωνία μειώνεται αφού αποστέλλονται μικρά και αποδοτικά πακέτα δεδομένων. [45]

Επόμενο είναι το Scale degree of area, το IoT ενθυλακώνει πολλές τεχνολογίες όπως το Lora WAN(Long range wide area network) που είναι για μεγάλες αποστάσεις επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων έτσι κατατάσσεται σαν τεχνολογία στα Wide Area, ομοίως και το διαδίκτυο έχει αναπτύξει τεχνολογίες που διαδίδουν την πληροφορία σε μεγάλες αποστάσεις. Σε αντίθεση έρχεται το WSN χωρίς την δυνατότητα να αποστέλλει πακέτα-data σε μεγάλες αποστάσεις και αυτό το καθιστά μια τεχνολογία για Local Area εφαρμογές. [45]

Ακολουθεί το Network approach όπου έχουμε τα δίκτυα Backbone και τα αυτοοργανωμένα δίκτυα. Αυτά αποτελούν δύο διαφορετικές προσεγγίσεις στον τομέα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και των Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (WSN). Ας εξετάσουμε το καθένα ξεχωριστά: Backbone δίκτυα είναι τα δίκτυα που χρειάζονται έναν κεντρικό διακομιστή δηλαδή έναν διαχειριστή της πληροφορίας και της οργάνωσης της πληροφορίας που δέχεται. Γενικότερα ισχύει η λογική Master-Slave. Πολλοί αισθητήρες (Slaves) συνδέονται σε έναν κεντρικό πυρήνα (Master) και αυτός ελέγχει τα περιφερειακά του που είναι συνδεδεμένα σε αυτόν και ταυτόχρονα αυτός είναι συνδεδεμένος σε άλλους Masters για να αποτελέσουν ένα δίκτυο κόμβων. Αυτή η δομή είναι κατάλληλη για συστήματα που απαιτείται οργάνωση του δικτύου για συγκεκριμένες εφαρμογές με βάση τις προτιμήσεις του χειριστή του δικτύου. Σε αντίθεση έρχονται τα αυτοοργανωμένα δίκτυα όπου εκεί οι αισθητήρες δεν χρειάζονται έναν κεντρικό κόμβο να συνδεθούν αλλά αποτελούν από μόνα τους αυτοτελή κομβικά σημεία για να συνδεθούν με άλλους αισθητήρες. Η αυτοοργάνωση αποτελεί το θεμέλιο για την οργάνωση ενός δικτύου που μεταβάλλεται συνεχώς και δεν είναι αναγκαία η επέμβαση του ανθρώπου. Χρησιμοποιεί τεχνικές αυτοδιόρθωσης, αυτοπροσαρμογής και αυτά καθιστούν το δίκτυο ευέλικτο και κλιμακούμενο. Σε συστήματα IoT και WSN θεωρείται αναγκαίο για τις απαιτήσεις των εφαρμογών, το δίκτυο να είναι ευέλικτο ώστε να γίνεται ευκολότερη η διαχείριση των πόρων. [46] Έπειτα έχουμε την αναγνώριση αντικειμένων μέσα σε ένα δίκτυο, το δίκτυο του IoT και το δίκτυο του WSN δίνουν την δυνατότητα για αναγνώριση αντικειμένων όπως αισθητήρες υγρασίας, θερμοκρασίας, πίεσης κτλπ. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία μια τεχνική εύρεσης αντικειμένων είναι το RFID (Radio Frequency identification). Οι κόμβοι (Nodes) στέλνουν σήματα και ταυτόχρονα λαμβάνουν σήματα. Οι κόμβοι που θα λάβουν σήμα από ένα αντικείμενο με RFID tag το μεταδίδουν στην κεντρική μονάδα και εκεί γίνεται η τοποθέτηση του στον χώρο αφότου καταλαβαίνει ποιοι κόμβοι το περικυκλώνουν, θεωρώντας το σαν αντικείμενο ενδιάμεσα τους. Το διαδίκτυο δεν έχει αυτή την δυνατότητα μιας και δεν απαρτίζεται από κόμβους τέτοιας μορφής και η τοπολογία του είναι διαφορετική από αυτή του IoT. [47]



Εικόνα 9 Εντοπισμός αντικειμένων σε WSN

Η προσέγγιση των κόμβων γίνεται με βάση την αρχή λειτουργίας τους, υπάρχουν κόμβοι αισθητήρων που ανήκουν στους παθητικούς και άλλοι κόμβοι που ανήκουν στους ενεργητικούς. Ο ενεργητικός κόμβος χρησιμοποιείται για την μέτρηση της ισχύος του σήματος από άλλους κόμβους, στην περίπτωση ανίχνευσης αντικειμένου (προηγούμενη παράγραφος) οι κόμβοι γύρω από το αντικείμενο είναι ενεργητικοί. Επιπλέον χρειάζεται μία επιπρόσθετη εξωτερική τροφοδοσία για την λειτουργία του μιας και αποστέλλει αλλά και λαμβάνει σήματα. Ο παθητικός κόμβος αποτελεί μια απλούστερη έκδοση του ενεργητικού κόμβου αφότου μπορεί μόνο να λάβει σήματα και δεν μπορεί να μεταδώσει, επιπλέον δεν χρειάζεται επιπρόσθετη εξωτερική τροφοδοσία και είναι κόμβος χαμηλότερης κατανάλωσης ενέργειας από τον ενεργητικό κόμβο. [48]

Επόμενο στον πίνακα είναι το Network design, θα αρχίσουμε με το ίντερνετ όπου εκεί επικρατεί ένα ιεραρχικό μοντέλο με σταθερούς κόμβους. Αναφερόμαστε σε υποδίκτυα ή συστήματα που το καθένα έχει συγκεκριμένους στόχους, όπως την αποστολή και λήψη δεδομένων από συγκεκριμένα τερματικά ή την διανομή δεδομένων σε άλλα συγκεκριμένα δίκτυα. Το WSN έχει δυναμικό μοντέλο, κάθε κόμβος μπορεί να μοιραστεί δεδομένα με οποιοδήποτε άλλο κόμβο, έτσι και αποδεικνύεται η λειτουργία του Object Location που τυπώθηκε προηγουμένως. Όπως αναφέρθηκε και στο WSN, το IoT έχει κ αυτό δυναμικό μοντέλο, χωρίς να επικρατεί κάποια ιεραρχία, επιπλέον δίνει την ικανότητα σε αισθητήρες και συστήματα διαλογής δεδομένων να επικοινωνούν και να αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον τους κάτι που τα τοποθετεί στα Intelligent objectives δημιουργώντας ένα ευφυή περιβάλλον (internet surrounded by intelligent environment). Συνοψίζοντας, οι τεχνολογίες δικτύων WSN και IoT προσφέρουν ένα δυναμικό χαρακτήρα προσφέροντας μεταβλητότητα και αυτοπροσαρμογή όταν κάποιος κόμβος πάψει να ανήκει στο δίκτυο, ενώ σε αντίθεση έρχεται το κοινό ίντερνετ όπου υπάρχουν σταθερά συστήματα και κόμβοι (Fixed behavior). [49]

Τελική παράμετρος του πίνακα για τον διαχωρισμό των 3ων τεχνολογιών αποτελεί το Networking Time. Το networking time δεν αναφέρεται σε χρονικό όριο που οι συσκευές μπορεί να είναι σε ένα δίκτυο γιατί όπως και το Internet έχει πρωτόκολλα που κάνουν Time Out και διακόπτουν την σύνδεση όταν δεν είναι εφικτή. Εδώ αναφερόμαστε στον συγχρονισμό των συσκευών – κόμβων που αποτελούν το δίκτυο, για την ακρίβεια το WSN και το Internet χρησιμοποιούν απεριόριστο χρόνο μέχρι να τους έρθει ένα μήνυμα, δηλαδή παραμένουν ενεργά και περιμένουν για κάποιο εξωτερικό πακέτο. Το IoT δεν έχει την δυνατότητα να λάβει ένα πακέτο δεδομένων χωρίς να εδραιωθεί πρώτα ένας συγχρονισμός επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών που θα ανταλλάξουν τα πακέτα δεδομένων για αυτό και επιτρέπει την δημιουργία Real-Time εφαρμογών. Η δυνατότητα αποστολής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει να γνωρίζουν οι επιστήμονες την ακριβή χρονική στιγμή που έγινε ένα φαινόμενο ή άλλαξε κάποια κατάσταση στο σύστημα που είναι ενθουλακωμένη η τεχνολογία του IoT. Στην παρούσα εργασία η αύξηση της περιμέτρου του δέντρου ορίζεται σαν μια κατάσταση που μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Έτσι μπορούμε να δημιουργήσουμε μια **χρονοσειρά της περιμέτρου του δέντρου** δηλαδή να απεικονίσουμε σε διαγράμματα μήκους της περιμέτρου συνάρτηση του χρόνου πότε αυξήθηκε ο κορμός του δέντρου και υπό ποιες συνθήκες εάν χρησιμοποιούμε και αισθητήρες υγρασίας, πίεσης, θερμοκρασίας κλπ. [50]



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>: Μελέτη Δικτύων Μεγάλης Εμβέλειας

Η ανάγκη για απομακρυσμένο έλεγχο μας οδηγεί σε αυτό το κεφάλαιο μιας και γίνεται αναφορά των τεχνολογιών που είναι ευρείας απόστασης μετάδοσης δεδομένων. Προσεγγίζει τέτοιου είδους τεχνολογίες αφότου η τελική κατασκευή πρέπει να επικοινωνεί με τον χρήστη χωρίς την φυσική του παρουσία σε μεγάλη απόσταση και με την ελάχιστη δυνατή ενεργειακή κατανάλωση.

### 4.1 Εισαγωγή στο LPWAN

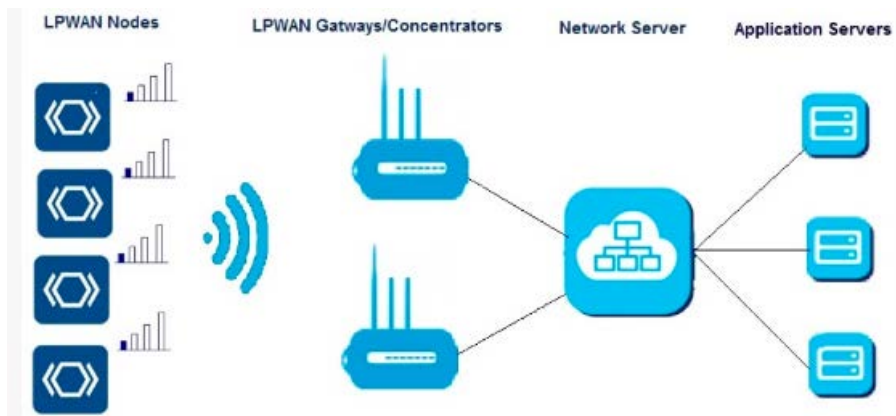
Το LPWAN (Low Power Wide Area Network) είναι μια τεχνολογία που φέρει λύσεις και πρότυπα ασύρματης επικοινωνίας για εφαρμογές IoT μεγάλης εμβέλειας και σε επικοινωνίες του IoT μηχανής σε μηχανή (M2M). Γενικότερα εξοπλίζει τις εφαρμογές με μεγάλες περιοχές κάλυψης, χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, άρα και μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Οι προσδοκίες που έχει είναι φτηνό κόστος για την υλοποίηση μιας εφαρμογής σε LPWAN, μικρά μεγέθη πακέτων των 10 έως 1 Kbyte με ταχύτητες uplink έως 200Kbps και με απόσταση διάδοσης δεδομένων έως και 1000 χιλιόμετρα. Επιπλέον η εξοικονόμηση ενέργειας που προσφέρει εξασφαλίζει σε εφαρμογές έως και 10 χρόνια διάρκεια ζωής της μπαταρίας δημιουργώντας ενεργειακά αυτόνομες υλοποιήσεις του LPWAN. Μερικές από τις εφαρμογές της τεχνολογίας LPWAN βρίσκονται στις έξυπνες πόλεις με την έξυπνη στάθμευση, την μέτρηση της κυκλοφοριακής συμφόρησης, τους μετρητές καυσαερίου και CO<sub>2</sub>. Στο περιβάλλον, χρησιμοποιείται για την προστασία από δασικές πυρκαγιές, την μέτρηση της ποιότητας του αέρα και την παρακολούθηση αναδασωτικών προγραμμάτων. Επιπλέον εξίσου σημαντική είναι και στα εργοστάσια με εφαρμογές M2M έπειτα στην υγεία με τα smart gadgets και τέλος στην γεωργία με τις μετρήσεις θερμοκρασίας/υγρασίας για έξυπνα θερμοκήπια και τους γεωργικούς αυτοματισμούς.

Τα LPWAN χωρίζονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες, στα Licensed (αδειοδοτημένα δίκτυα) και στα Unlicensed (μη αδειοδοτημένα δίκτυα). Τα Licensed λειτουργούν σε δημόσια κυψελωτά δίκτυα τηλεφωνίας, έχουν μια αποκλειστική συχνότητα για επικοινωνία με ένα Gateway και θεωρούνται ασφαλή καθώς χρησιμοποιούν μόνο μια συχνότητα. Σε αυτά περιλαμβάνονται οι τεχνολογίες LTE-M, NB-IoT, GSM. Από την άλλη πλευρά τα Unlicensed δίκτυα δεν χρησιμοποιούν κάποια συγκεκριμένη συχνότητα επικοινωνίας και δεν υπάρχει αποκλειστικότητα στο φάσμα συχνοτήτων. Επίσης είναι λιγότερο αξιόπιστα μιας και μπορεί να προκύψουν παρεμβολές από ραδιοσυχνότητες άλλων εφαρμογών. Τέλος, έχουν χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης από τα Licensed δίκτυα και σε αυτά περιλαμβάνονται οι τεχνολογίες LORA, Sigfox κτλπ.

[\[70\]](#) [\[71\]](#)

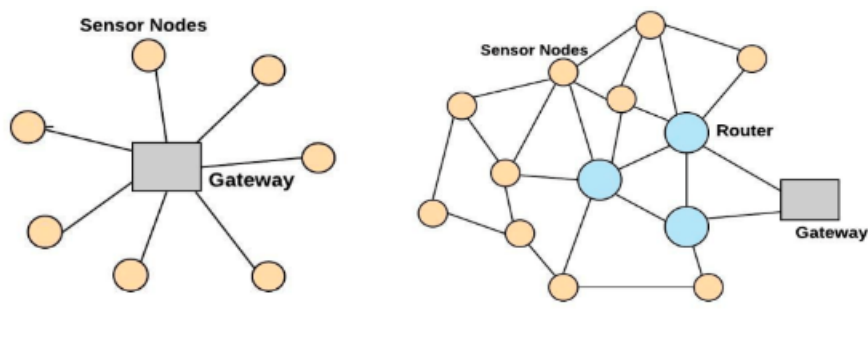
#### 4.1.1 Αρχιτεκτονική LPWAN

Η βασική αρχιτεκτονική παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα, το LPWAN απαιτεί σύνδεση σε ένα δίκτυο (επικοινωνία με ένα LPWAN Gateway), ύστερα την σύνδεση του στο Cloud και τέλος την αποστολή δεδομένων από το Cloud στον χρήστη.



Εικόνα 10 Βασική τοπολογία του LPWAN

Τα δίκτυα LPWAN χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, η πρώτη είναι: mesh δίκτυα και η δεύτερη είναι: Star δίκτυα.



Εικόνα 11 Τοπολογία Star και τοπολογία Mesh

Η τοπολογία star βρίσκεται στα αριστερά και η τοπολογία Mesh στα δεξιά της εικόνας. Η απλούστερη μορφή μιας τοπολογίας αποτελεί η πρώτη μιας και χρειάζεται μόλις ένα Gateway για να επικοινωνήσουν όλοι οι κόμβοι. Γενικότερα το μεγαλύτερο πλήθος των εφαρμογών χρησιμοποιούν την star τοπολογία μιας και είναι επεκτάσιμη και επειδή χρειάζονται λίγα hops για να μεταδοθεί η πληροφορία από έναν κόμβο στον άλλο, είναι και ενεργειακά πιο αποδοτική. Τα μηνύματα μεταδίδονται μόνο μέσα από το Gateway κάνοντας την γρήγορη και αξιόπιστη λόγω του χαρακτηριστικού hop, επιπλέον οι κόμβοι που δεν είναι πλέον λειτουργικοί ανιχνεύονται και αφαιρούνται από το δίκτυο. Στην περίπτωση της Mesh τοπολογίας όλοι οι κόμβοι συνδέονται με άλλους κόμβους απευθείας χωρίς την παρουσία κάποιου ενδιάμεσου, η τεχνολογία αυτή είναι πιο πολύπλοκη και επικίνδυνη στην κατανάλωση ενέργειας. Παρόλα αυτά ένα σημαντικό προτέρημα της Mesh τοπολογίας είναι ότι τα μηνύματα που ανταλλάσσουν οι κόμβοι έχουν πολλαπλές διαδρομές για να φτάσουν στον τελικό κόμβο οπότε αυτή η τοπολογία έχει ευκολότερη επεκτασιμότητα και δυνατότητα αυτοδιοργάνωσης σε περίπτωση βλάβης κάποιου κόμβου. [70]

Για την υλοποίηση του δεντρόμετρου θα πρέπει να επιλέξουμε μια τεχνολογία LPWAN ώστε να εδραιωθεί η ασύρματη επικοινωνία του κόμβου με τον χρήστη. Οπότε, επόμενο βήμα είναι να κάνουμε μια προεπισκόπηση στις διαθέσιμες τεχνολογίες που υπάρχουν, να δούμε τα τεχνικά

χαρακτηριστικά τους και να επιλεγθεί εκείνη που εφαρμόζει, με την καλύτερη απόδοση. Σύμφωνα με την βιβλιογραφική αναφορά [\[51\]](#) και [\[52\]](#) υπάρχουν οι ακόλουθες:

## 4.2 DASH7



Εικόνα 12 Λογότυπο DASH7 [\[54\]](#)

Το DASH7 Alliance (D7AP) είναι ένα πρωτόκολλο που αναπτύχθηκε για το IoT και ανήκει στα LPWAN δίκτυα (Low Power Wide Area Networks) επίσης αποτελεί ένα πρότυπο που χρησιμοποιείται στο RFID ανοικτού κώδικα. Η χρήση του είναι ειδικευμένη σε WSN τεχνολογίες (Wireless Sensor and Actuator Network) δηλαδή χρησιμοποιεί αισθητήρες και ενεργοποιητές προκειμένου να αλληλεπιδρά με το περιβάλλον και να στέλνει πληροφορίες στο δίκτυο. Λειτουργεί σε συχνότητες μικρότερες του 1 Ghz (Sub-1 GHz) και σύμφωνα με το ISO/IEC 18000-7 χρησιμοποιεί τα 433 MHz για να επικοινωνήσει με άλλα συστήματα, αυτή η συχνότητα παρέχει στο DASH7 μεγαλύτερη διαπερατότητα και μεγαλύτερη απόσταση διάδοσης. [\[51\]](#)

Επίσης, έχει 2-GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying) δηλαδή γίνεται έχει διαμόρφωση FSK όπου ψηφιοποιείται το σήμα σε 0 και 1 και πριν από την διαμόρφωση μπαίνει ένα φίλτρο Gauss που κάνει εξομάλυνση των συχνοτήτων ώστε να παράγεται ένα καθαρό σήμα εξόδου [\[53\]](#). Η εμβέλεια διάδοσης ορίζεται στα 2Km για αυτό και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές εντοπισμού πακέτων από μεταφορικές εταιρείες, Health-care ή και σε έξυπνα οχήματα, δηλαδή εφαρμογές που είναι μέσα στην πόλη λόγω της εμβέλειας διάδοσης που είναι μόνο 2Km. [\[51\]](#)

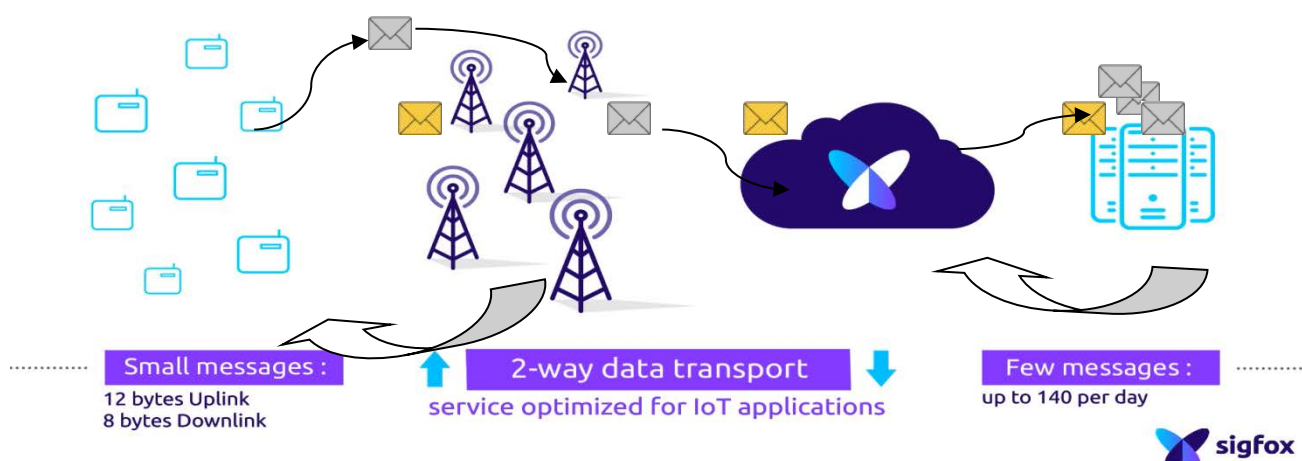
### 4.3 Sigfox



Εικόνα 13 Λογότυπο Sigfox [55]

Το Sigfox παρέχει μία αμφίδρομη επικοινωνία μέσω του GRN (Global Radio Network), πράγμα που σημαίνει ότι μια συσκευή μπορεί να αποστέλλει δεδομένα αλλά και να λαμβάνει. Επίσης η Sigfox έχει δημιουργήσει μια επικοινωνία με πακέτα που είναι μικρά, δεν έχουν μεγάλη έκταση (μόλις 12 Byte για Uplink και μόνο 8 Bytes για Downlink) και ταυτόχρονα η επικοινωνία με το cloud δεν γίνεται συνεχόμενα αλλά μόλις μερικά μηνύματα ανταλλάσσονται καθημερινά (μέχρι 140 μηνύματα/ημέρα) που το καθιστά ιδανικό για IoT εφαρμογές αφού μειώνει την κατανάλωση της μπαταρίας. Στην Ευρώπη υπάρχουν 360 κανάλια των 100Hz που χρησιμοποιούνται και άλλα 40 που είναι δεσμευμένα, το εύρος ραδιοσυχνοτήτων που ανήκουν είναι 868.10 έως 868.22 MHz. Τα τερματικά μπορούν να συνδεθούν σε ένα κανάλι που θεωρούν κατάλληλο για αποστολή μηνυμάτων αφού έχουν αυτόματη σάρωση όλων των καναλιών. Οι εφαρμογές που καλύπτονται από την τεχνολογία Sigfox σύμφωνα με την εταιρεία χρησιμοποιούνται: στην κατασκευή έξυπνων πόλεων στην δημιουργία ενός έξυπνου σπιτιού, στο λιανεμπόριο, στην Γεωργία, στην διαχείριση ενέργειας και στα εργοστάσια-βιομηχανίες. [55]

#### Sigfox core service



Εικόνα 14 Βασική υπηρεσία Sigfox [55]

#### 4.4 Wi-SUN



Εικόνα 15 Λογότυπο του Wi-SUN [56]

Η Wi-SUN Alliance ιδρύθηκε το 2011 και το όνομα της είναι συντομογραφία του Wireless Smart Utility Network, κύριος σκοπός της εταιρείας είναι η δημιουργία και η υιοθέτηση λύσεων για έξυπνες υπηρεσίες και έξυπνες πόλεις χρησιμοποιώντας την τεχνολογία του Wi-Sun μέσα στο IoT. Το Wi-Sun χρησιμοποιεί πρότυπα του IEEE όπως το 802.15.4g που είναι πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας για συσκευές που η μετάδοση του σήματος γίνεται αξιόπιστα και έχει μικρές καθυστερήσεις. Το πρωτόκολλο αυτό καθιστά το Wi-Sun κατάλληλο για εφαρμογές που χρειάζονται υψηλές ταχύτητες επικοινωνίας χωρίς σφάλματα. Μερικά παραδείγματα είναι οι έξυπνες πόλεις, έξυπνα φώτα και εφαρμογές στην γεωργία (πχ. έλεγχος θερμοκρασίας/υγρασίας απομακρυσμένα).



Εικόνα 16 Έξυπνη Γεωργία [57]

Επιπλέον το Wi-Sun χρησιμοποιεί τοπολογία mesh, δηλαδή υπάρχει ένα δίκτυο που όλες οι συσκευές είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους και η πληροφορία κάνει πολλαπλά (άλματα) hops διατηρώντας την κάλυψη του δικτύου σε όλες τις συσκευές. Σε περίπτωση διακοπής μιας σύνδεσης υπάρχει κάλυψη από άλλη συσκευή. Επιπλέον υπάρχει υποστήριξη του IPv6 κάτι που ευνοεί την επικοινωνία με το cloud. Χάρη σε αυτό η επικοινωνία γίνεται πιο γρήγορη και πιο ασφαλή, αφότου περιέχονται όλα τα συναφή για την ασφάλεια του δικτύου, όπως ανίχνευση επιθέσεων DOS (denial-of-service), ανίχνευση εισβολών και διαχείριση της κυκλοφορίας (traffic management). Τέλος οι συσκευές που μπορούν να χρησιμοποιήσουν το W-SUN έχουν κατανάλωση 2mA ρεύμα ηρεμίας (η συσκευή βρίσκεται σε αναμονή και περιμένει εξωτερική έναυση), ενώ όταν είναι σε επικοινωνία με άλλες συσκευές καταναλώνει 8mA. Συνεπώς σαν τεχνολογία θεωρείται και ενεργειακά αποδοτική. [56]

## 4.5 Weightless



Εικόνα 17 Λογότυπο του WEIGHTLESS [58]

Η Weightless SIG είναι αρχικά μια εταιρεία που κάνει χρήση της τεχνολογίας weightless. Συνδυάζει την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των συσκευών σε μεγάλο εύρος και ταυτόχρονα την μικρή κατανάλωση ενέργειας που έχουν τα LPWAN δίκτυα. Λειτουργεί σε συχνότητες μικρότερες του 1GHz (Sub-1GHz) και απαρτίζεται από 3 διαφορετικές τεχνολογίες. Για την αξιολόγηση των 3<sup>ων</sup> τεχνολογιών δημιουργήθηκε ένας πίνακας με γνώμονα το εύρος ζώνης, τον ρυθμό μετάδοσης, την χρήση των προτύπων και την απόσταση διάδοσης που έχει η κάθε τεχνολογία της Weightless SIG. Με αυτό τον τρόπο συγκεντρώνονται οι πληροφορίες της κάθε τεχνολογίας ώστε να συγκριθούν κατάλληλα.

Πίνακας 4 Διαφορές στις τεχνολογίες Weightless-N/-W/-P [58] [59] [60]

	<i>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ</i>	<i>ΕΥΡΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ</i>	<i>ΡΥΘΜΟΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ</i>	<i>ΧΡΗΣΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ</i>	<i>ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΔΙΑΔΟΣΗΣ</i>
1 <sup>η</sup>	Weightless-N	Sub-1GHz	100Kbps	ALOHA	Έως 3 Km
2 <sup>η</sup>	Weightless-W	470-790 MHz	1 Kbps-10Mbps	DBPSK	Έως 5 Km
3 <sup>η</sup>	Weightless-P	Sub-1GHz	Έως 100Kbps	GMSK / QPSK	Έως 2 Km

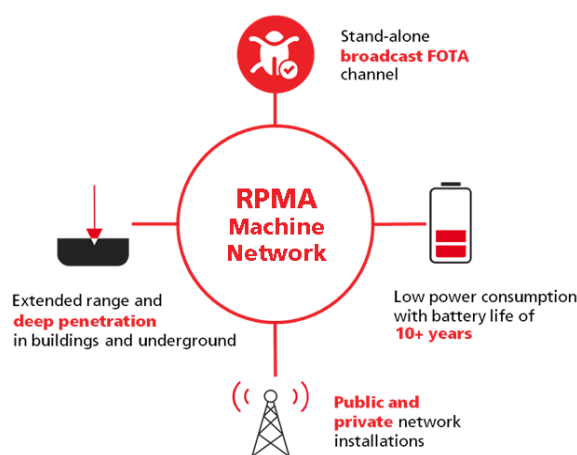
Παρατηρώντας τον πίνακα, φαίνεται ότι η τεχνολογία *Weightless-P* έχει την μικρότερη απόσταση και χρησιμοποιεί τα πρότυπα GMSK / QPSK για να ψηφιοποιήσει την πληροφορία, εξασφαλίζοντας αξιόπιστη και πιο αποτελεσματική επικοινωνία από τις παραπάνω δύο. Η ταχύτητα διάδοσης του σήματος είναι στα 100Kbps που συγκριτικά με τις άλλες τεχνολογίες είναι μικρότερη από το Weightless-W και παρόμοια με το Weightless-N. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η τεχνολογία *Weightless-W* που έχει την μεγαλύτερη απόσταση διάδοσης από τις άλλες δυο. Ανήκει στο bandwidth 470-790 MHz με τον μεγαλύτερο ρυθμό μετάδοσης από τις υπόλοιπες τεχνολογίες (έως 10Mbps) και χρησιμοποιεί το DBPSK (Differential Binary Phase Shift Keying) μια διαφορετική τεχνολογία κωδικοποίησης της πληροφορίας σε 0 και 1 αρκετά σύνθετη. Τέλος έχουμε το *Weightless-N* όπου χρησιμοποιεί το ALOHA, ένα πρότυπο που δεν χρησιμοποιείται τόσο σε υψηλής ταχύτητας επικοινωνίες, έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και δεν είναι τόσο περίπλοκο όσο τα GMSK / QPSK / DBPSK. Επίσης, η απόσταση διάδοσης του σήματος είναι ενδιάμεσα των άλλων δύο τεχνολογιών στα 3 Km (2km < 3Km < 5Km) και ο ρυθμός μετάδοσης είναι σταθερός στα 100Kbps με bandwidth Sub-1Ghz. [58] [59] [60]

## 4.6 Ingenu



Εικόνα 18 Λογότυπο του Ingenu [61]

Η εταιρεία Ingenu, πρώην On Ramp Wireless ιδρύθηκε το 2008 και έρχεται αντιμέτωπη με το γνωστό δίκτυο LPWAN μιας και έφτιαξε τεχνολογία χαμηλής κατανάλωσης (low power). Βασική διάφορά του με το LPWAN είναι ότι δεν χρησιμοποιεί τα πρότυπα του (θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα), παρόλα αυτά χρησιμοποιεί την ζώνη ISM στα 2.4Ghz όπου έχει μεγάλη έκταση μετάδοσης του σήματος εμβέλειας έως και 15 Km. Η χρήση της ISM στα 2.4Ghz δεν αποδεικνύεται βέλτιστη για την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων μιας και χρησιμοποιείται ευρύτερα από άλλες τεχνολογίες όπως το Wi-Fi δημιουργώντας θόρυβο. Λόγω της ειδικευμένης τεχνολογίας που χρησιμοποιεί Randon Phase Multiple Access γνωστή και ως RPMA, χρειάζεται ειδικές εγκαταστάσεις διαμόρφωσης φάσματος ώστε να επιτύχει την άρτια λειτουργία του. Παρακάτω βλέπουμε την τεχνολογία RPMA, είναι σχεδιασμένη για να παρέχει ταχύτητες downlink έως 31kbps και ταχύτητες uplink έως 15kbps, παρουσιάζοντας ομοιότητες με την τεχνολογία του NB-IoT. Όμως, η τεχνολογία αυτή έχει μεγαλύτερη διείσδυση μέσα στα κτίρια και μικρότερο εύρος διάδοσης λόγω της 2.4GHz συχνότητας λειτουργίας. Ακόμα παρέχει την δυνατότητα επικοινωνίας με συσκευές χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά δίκτυα, το public και το private. Τέλος, απαρτίζεται από τα προνόμια της Low Power κατανάλωσης που έχουν και τα LPWAN. [60] [61] [62]



Εικόνα 19 Περιγραφή δυνατοτήτων του RPMA [62]

Παρόλα αυτά, οι ταχύτητες που επιτυγχάνει να μεταδώσει η Ingenu φτάνουν έως 80 Kbps. Είναι μια τεχνολογία που αφορά εφαρμογές διανομής πακέτων για εντοπισμό τοποθεσίας ή γενικότερα για εντοπισμό στίγματος μιας και περιλαμβάνει την τεχνολογία του GNSS (Global Navigation Satellite System). [60] [61]

## 4.7 MIOTY



Εικόνα 20 Λογότυπο του MIOTY [64]

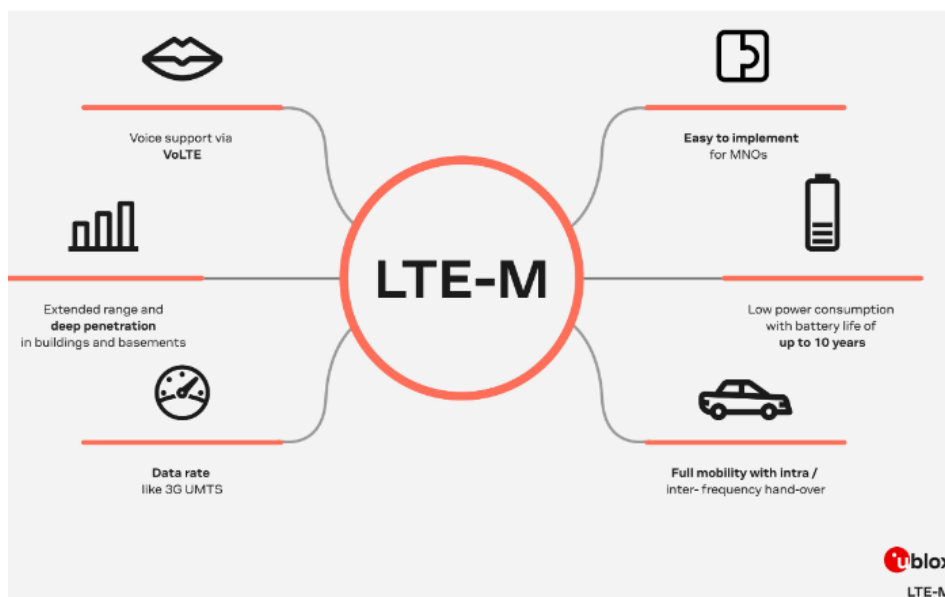
Η Mioty είναι μια τεχνολογία σχετικά καινούργια στον χώρο του IoT, δημιουργήθηκε το 2016 από το ινστιτούτο Fraunhofer στην Γερμανία. Έχει εκτεταμένη κάλυψη μιας και μπορεί να διαδώσει το σήμα μέχρι και 15Km μακριά από τον κόμβο κάνοντας τα δυσπρόσιτα σημεία να έχουν κάλυψη δικτύου. Το πρωτόκολλο MIOTY είναι εξελιγμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Με τις τεχνικές επικοινωνίας που χρησιμοποιεί τα συστήματα είναι ενεργειακά αυτόνομα χωρίς να χρειάζεται η αλλαγή μπαταρίας ή η επαναφόρτιση της κάθε βδομάδα ή ακόμα και κάθε μήνα. Το πρωτόκολλο είναι ειδικά σχεδιασμένο να αντέχει παρεμβολές από άλλα δίκτυα και να είναι αξιόπιστο στην μετάδοση δεδομένων, κάτι που το κάνει ειδικό για βιομηχανικές εφαρμογές που υπάρχει θόρυβος από ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Επίσης έχει υψηλή διαπερατότητα διευκολύνοντας την διείσδυση του σήματος σε τοίχους και χοντρές επιφάνειες. Αναλυτικότερα, χρησιμοποιεί GMSK για κωδικοποίηση της πληροφορίας σε 0-1 και το πρότυπο *TS 103 357* για επικοινωνία.

Το *TS 103 357* είναι βασισμένο στο πρωτόκολλο Telegram Splitting Ultra-narrow Banf (TS-UNB) που είναι φτιαγμένο ειδικά για βιομηχανικούς χώρους και εφαρμογές σε περιβάλλον με ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, το οποίο χρησιμοποιείται γενικότερα και στα LPWAN. Επιπλέον έχει ρυθμό μετάδοσης τα 512 Kbps με πακέτα δεδομένων από 10 έως 19 byte και λειτουργεί σε συχνότητες 433MHz και 868 MHz για ευρώπη, ενώ για τις ΗΠΑ χρησιμοποιείται η συχνότητα 915Mhz.

[64] [63]



## 4.8 LTE Cat-M



Εικόνα 21 Δυνατότητες του LTE-M [65]

Το LTE-M ή αλλιώς LTE-CatM είναι μια τεχνολογία που χρησιμοποιεί τα κυψελωτά δίκτυα τηλεφωνικής επικοινωνίας για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του IoT σε M2M επικοινωνίες. Έχει σχεδιαστεί κυρίως για τεχνολογίες 2G/3G και αναπτύχθηκε ώστε να εξασφαλίσει γρήγορη μετάδοση δεδομένων, ασύρματη επικοινωνία σε μακρινές αποστάσεις και την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας που έχουν τα LPWAN. Τα πρώτα βήματα του LTE έγιναν το 2017 με το 3GPP (3rd Generation Partnership Project) Release 13, μια συνεργασία βιομηχανίας για την ανάπτυξη νέων συστημάτων που θα ικανοποιούσαν περισσότερες απαιτήσεις από τα αντίστοιχα συστήματα LPWAN της εκάστοτε χρονιάς. Κατάφεραν να αναπτύξουν μια τεχνολογία που παρέχει ταχύτητες μετάδοσης δεδομένων έως και 1 Mbps σε uplink ενώ 375Kbps σε downlink. Παράλληλα το LTE-M ενθυλακώνει Half-duplex τεχνολογία ξεπερνώντας τα -150 dBm επιτρέποντας του να διεισδύει σε κτίρια παρέχοντας κάλυψη σε δυσπρόσιτα σημεία. Επιπλέον, το LTE υποστηρίζει τις τεχνολογίες PSM και eDRX για εξοικονόμηση ενέργειας με δυνατότητα αύξησης της αυτονομίας του συστήματος. Έτσι παρατείνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, χωρίς να είναι αναγκαία η φυσική παρουσία του ανθρώπου για αλλαγή ή φόρτιση της. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας LTE είναι ότι υποστηρίζει τον εντοπισμό της θέσης κινούμενων συσκευών, δηλαδή να είναι εν κίνηση και να μεταδίδουν δεδομένα μεταβαίνοντας από κυψέλη σε κυψέλη χωρίς να χάνεται η σύνδεση ή να υπάρχει πρόβλημα αξιοπιστίας στην μετάδοση της πληροφορίας. Ωστόσο αυτό απουσιάζει από το NB-IoT και δεν υποστηρίζεται η κινούμενη μετάδοση δεδομένων. Τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας LTE-M όπως φαίνεται και στην εικόνα, τυπώθηκαν όλα εκτός από το Voice Support που είναι η καινοτομία της τεχνολογίας του VoLTE. Το Voice over Long-Term Evolution είναι ένα πρότυπο όπου η φωνή μεταδίδεται μέσα από το ίδιο δίκτυο που χρησιμοποιούνται τα δεδομένα, δηλαδή το 2G/3G. Οι κλήσεις γίνονται υψηλότερης ποιότητας και πιο γρήγορες στην σύνδεση.

Ακόμα μερικά αξιοσημείωτα τεχνικά χαρακτηριστικά του LTE είναι:

Πίνακας 5 Χαρακτηριστικά δικτύων CAT-1 / LTE-M ( Rel 13 & Rel 14) [66]

Attribute	CAT-1	LTE-M	
		Rel 13	Rel 14
Spectrum	LTE bands	LTE bands Stand Alone (1.4MHz)	
Typical MNO	LTE Coverage	Good LTE Coverage	
Bandwidth	20 MHz	1.08MHz (CAT-M1)	5 MHz (CAT-M2)
Number of DL Antennas	2	1	
Duplex Modes	FD-FDD/TDD	HD-FDD, FD-FDD,TDD	
UL Modulation	QPSK, 16QAM	QPSK, 16QAM	
DL Modulation	QPSK, 16QAM	QPSK, 16QAM	
Spectral Efficiency	V.Good	Good	
Power Class	Class 3 (23dBm)	Class 3 (23 dBm) Class 5 (20 dBm)	
UL Multiple Access	LTE SC-FDMA	LTE SC-FDMA	

Στο LTE-M Rel13 που εξετάστηκε προηγουμένως, χρησιμοποιούμε μόνο μια κεραία για επικοινωνία σε downlink, με τα μοντέλα **Duplex HD-FDD, FD-FDD, TDD**. Το **HD-FDD** (Half-Duplex Frequency Division) είναι όταν γίνεται υποδιαίρεση της συχνότητας στα 2 όπου χρησιμοποιείται μια συχνότητα για uplink και άλλη για downlink ώστε να μην χρειαστεί η τοποθέτηση φίλτρου αποκοπής συχνοτήτων. Το **FD-FDD** (Full-Duplex Frequency Division) είναι η διαίρεση της συχνότητας σε άλλες δύο που έχουν μεγάλη διαφορά μεταξύ τους, γιατί η μια μπορεί να κάνει μετάδοση ενώ η άλλη ταυτόχρονα να κάνει λήψη δεδομένων. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η τεχνολογία είναι ακόμα υπό έρευνα. Το **TDD** αντίστοιχα, είναι από τις απλούστερες υλοποιήσεις μιας και χρησιμοποιεί την ίδια μπάντα συχνοτήτων για λήψη και μετάδοση δεδομένων. Το QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) είναι ένας τύπος ψηφιακής μετάδοσης του σήματος που διαμορφώνει την φάση με σταθερή συχνότητα. Έπειτα, το Power Class εστιάζει στην ενέργεια μετάδοσης, το Class3 έχει μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση από το Class5 αλλά το Class3 είναι πιο ισχυρό από το 5, οπότε ανάλογα την εφαρμογή επιλέγεται και η κατάλληλη τεχνολογία. Κλείνοντας, το SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) είναι ένα προνόμιο της τεχνολογίας LTE μιας και πολλοί χρήστες μπορούν να στέλνουν πληροφορίες στο σύστημα με το LTE μόνο με την χρήση ενός καναλιού χωρίς να χρειάζεται η αλλαγή συχνότητας για κάθε χρήστη. [60] [65] [66] [67] [68] [69]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>: LoRaWAN και NB-IoT

Από τις πιο γνωστές τεχνολογίες στον τομέα της γεωργίας και της δασοκομίας είναι οι τεχνολογίες LoRa και NB-IoT. Μεταξύ άλλων τεχνολογιών LPWAN αποτελούν την πρωταρχική θέση στην υλοποίηση εφαρμογών IoT. Οι δύο τεχνολογίες διαφέρουν κατά την δομή τους, την αρχιτεκτονική τους και τον τρόπο επικοινωνίας αλλά και οι δύο εστιάζουν στην χαμηλή ισχύ και στο μεγάλο εύρος μετάδοσης δεδομένων. Έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής και οι συσκευές στον κόσμο του NB-IoT και του LoRa παρέχουν κάλυψη δικτύου σε πολλές απομακρυσμένες περιοχές. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι πληρούν τις προϋποθέσεις για την υλοποίηση ενός συστήματος απομακρυσμένης αποστολής μετρήσεων για εφαρμογές στην δεντρομετρία. Όμως για την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας σε ένα έργο αναδάσωσης θα πρέπει να επιλεγθεί μία τεχνολογία που θα είναι πιο αποδοτική τόσο στο εύρος μετάδοσης όσο και στην κατανάλωση. Επόμενο βήμα λοιπόν, είναι να αναλυθεί η κάθε τεχνολογία τόσο σε επίπεδο αρχιτεκτονικής όσο και χαρακτηριστικών επομένως να συγκρίνουμε τις δύο τεχνολογίες για να καταλήξουμε στην βέλτιστη, χωρίς να αναιρείται η προϋπόθεση του χαμηλού κόστους.

### 5.1 LoRaWAN

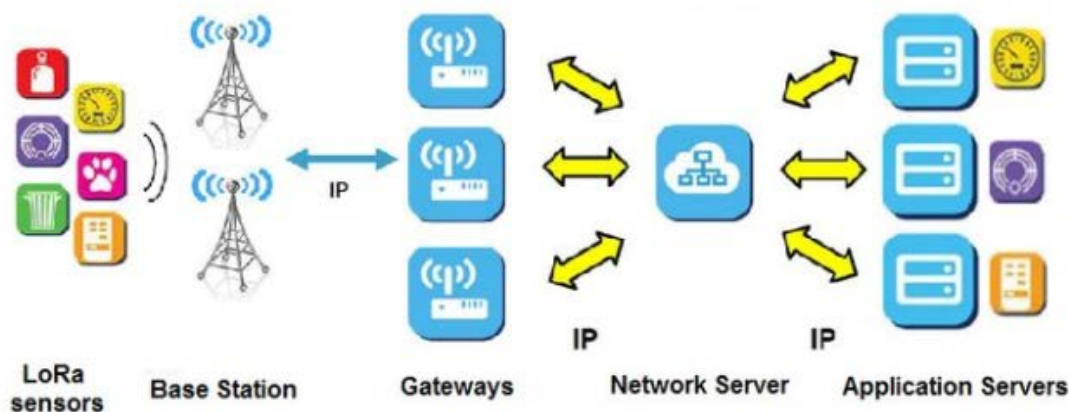


Εικόνα 22 Λογότυπο LoRa [72]

Το LoRa δίκτυο ή αλλιώς LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα για IoT εφαρμογές με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μετάδοση του σήματος σε μεγάλες αποστάσεις. Σχεδιάστηκε για να συνδέει ασύρματα αισθητήρες, έξυπνα συστήματα, να μεταδίδει στίγμα τοποθεσίας εξασφαλίζοντας αξιοπιστία και ασφάλεια με ένα αποδοτικό τρόπο ώστε το σύστημα να έχει μεγάλη ενεργειακή αυτονομία. Στόχος του, με λίγα λόγια είναι να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του IoT στο έπακρο. [72] Το πρωτόκολλο επικοινωνίας LoRa ορίζει την διασύνδεση των συστημάτων ασύρματα με το φυσικό επίπεδο χρησιμοποιώντας αρχιτεκτονική end2end χωρίς να ορίζει κάποια συγκεκριμένη συχνότητα επικοινωνίας. Ειδικότερα, δεν υπάρχει αποκλειστικότητα στο φάσμα συχνοτήτων και αυτό την εντάσσει στα μη αδειοδοτημένα δίκτυα (Unlicensed networks) με Sub-1Ghz. Εκτός από τα παραπάνω, η τεχνολογία αυτή βασίζεται στο CSS δηλαδή Chirp Spread Spectrum, όπου η συχνότητα εκπομπής και λήψης αλλάζει γραμμικά με την πάροδο του χρόνου προκειμένου να αποτρέψει τις παρεμβολές από εξωτερικό ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο και να εντοπίσει σήματα χαμηλής ισχύς. [60] [70]

### 5.1.1 Αρχιτεκτονική του LoRaWAN

Η αρχιτεκτονική του LoRa βασίζεται στην τοπολογία mesh. Όλοι οι κόμβοι δηλαδή συνδέονται με άλλους κόμβους απευθείας χωρίς την παρουσία κάποιου ενδιάμεσου Gateway. Αυτό στο LoRaWAN δεν ισχύει βέβαια μιας και χρησιμοποιεί star τοπολογία, όπου κάθε κόμβος επικοινωνεί με ένα Gateway και προσφέρει ιεραρχική δομή μειώνοντας έτσι, την κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με μια συμβατική mesh τοπολογία. Η αρχιτεκτονική του LoRaWAN μπορεί να δομηθεί σε 4 τεχνολογίες: τα end points (end device), τα Gateway, τον server και τον application server. Παρακάτω φαίνεται η σειρά της αρχιτεκτονικής από το end point έως το Application Server. [70]



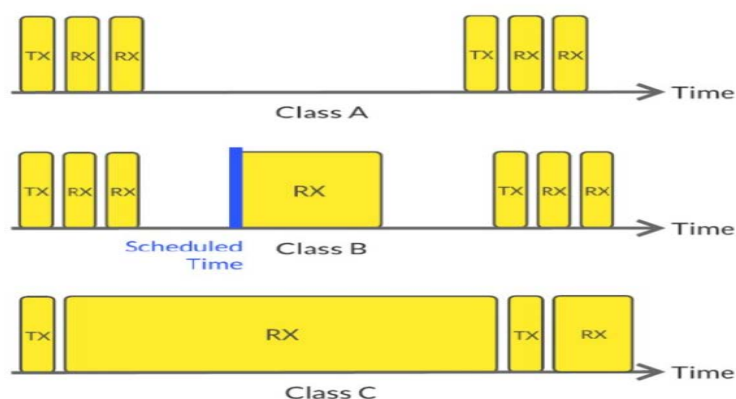
Εικόνα 23 Αρχιτεκτονική του LoRaWAN [73]

Αρχικά, **End Points / End Devices** είναι οι συσκευές που λαμβάνουν και εκπέμπουν δεδομένα προς τα Gateways. Αυτές οι συσκευές έχουν εγκατεστημένο το firmware για το LoRa και μαζί τους είναι όσα περιφερειακά I/O χρειάζονται για κάθε εφαρμογή (αισθητήρες θερμοκρασίας/υγρασίας/πίεσης). Στην συνέχεια, έχουμε τα Gateways που είναι ένα access point στα οποία συνδέονται τα End points. Στην συνέχεια έχουμε το **Gateway** που χρησιμοποιείται ως ένα ενδιάμεσο μέσο και είναι υπεύθυνο για τη δρομολόγηση των δεδομένων μιας και αυτό μετέπειτα κάνει upload τα δεδομένα στον server. Τρίτο στην σειρά έρχεται το **Network Server**, σε αυτό το σημείο το σύστημα γίνεται ευφύες αφότου ελέγχει τα πρωτόκολλα επικοινωνίας LoRaWAN. Αναλυτικότερα, πραγματοποιούνται έλεγχοι ασφαλείας και προσαρμόζονται οι ρυθμοί των δεδομένων για τον συγχρονισμό του συστήματος μέσω αυτού. Ο network Server είναι υπεύθυνο για το αν κάποιο από τα δεδομένα πρέπει να εμφανιστεί σε κάποιο application server χρησιμοποιώντας κάποιο backhaul. Τέλος, ο **application server**, παρουσιάζει τα δεδομένα στον τελικό χρήστη και λαμβάνει αποφάσεις για τις επόμενες λειτουργίες των end points. [60] [70] [73]

### 5.1.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του LoRaWAN

Το LoRaWAN διαμορφώνει τα σήματα στις ISM Sub-GHz συχνότητες δηλαδή σε συχνότητες κάτω του 1 GHz, για την ακρίβεια χρησιμοποιεί 868MHz για την Ευρώπη, 915MHz για την Βόρεια Αμερική και 433MHz για την Ασία σύμφωνα με την τεχνική SST (spread spectrum technique). Επιπλέον με την τεχνική CSS δημιουργείται και ένα αμφίδρομο κανάλι επικοινωνίας half-duplex. Ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων κυμαίνεται από 0.3KBps έως 50KBps με μέγιστο όγκο μηνύματος τα 243byte. Το εύρος κάλυψης για αστική περιοχή ανέρχεται στα 5km, δηλαδή με παρουσία κτιρίων και εμποδίων, ενώ σε αγροτική περιοχή φτάνει έως και 20km. Τέλος, τα μηνύματα κρυπτογραφούνται με βάση το πρότυπο AES128, ενώ στο MAC επίπεδο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο Aloha. Επιπλέον υπάρχει δυνατότητα εντοπισμού θέσης του end-device με την τεχνική TDOA (Time Difference of Arrival) όπου μετρίεται ο χρόνος για να φτάσει το σήμα σε διάφορες γειτονικές κεραιές από το end-device για να υπολογιστεί η θέση της συσκευής.

Λόγω των ποικίλων εφαρμογών του LoRa τόσο στην δασοκομία όσο και στις έξυπνες πόλεις, χρειάστηκε να δημιουργηθούν 3 διαφορετικές κλάσεις. Ο κάθε χρήστης μπορεί να επιλέξει μια κλάση που του αρμόζει καλύτερα στην εφαρμογή του, εφόσον με κάθε κλάση που επιλέγεται, το σύστημα γίνεται περισσότερο ή λιγότερο αποδοτικό στην λήψη-αποστολή δεδομένων ομοίως και λιγότερο ή περισσότερο αποδοτικό στην ενεργειακή του κατανάλωση.



Εικόνα 24 Εικονική αναπαράσταση παραθύρων κλάσεις A,B,C [75]

1. Για την **A** κλάση το σύστημα ανοίγει ένα παράθυρο λήψης δεδομένων όταν έχει προγραμματιστεί και όταν κλείσει ανοίγει το παράθυρο αποστολής δεδομένων, δηλαδή υπάρχει μια περίοδος λήψης που ακολουθείται από μία περίοδο αποστολής, σε αυτή την κατάσταση το σύστημα βρίσκεται στην χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση.
2. Στην κλάση **B** το σύστημα διαθέτει τα χαρακτηριστικά της κλάσης A αλλά ταυτόχρονα υπάρχει και ένα διαθέσιμο παράθυρο λήψης αυθαίρετο που είναι προγραμματιζόμενο για το πότε θα ανοίγει. Έτσι συνδυάζεται η αποτελεσματικότητα της αποστολής δεδομένων με την εξοικονόμηση ενέργειας.
3. Στην κλάση **C** οι συσκευές είναι συνεχώς ενεργές και μπορούν να δέχονται δεδομένα από το gateway ανά πάσα στιγμή, επιπλέον το σύστημα είναι το λιγότερο ενεργειακά αποδοτικό μιας και έχει την μεγαλύτερη κατανάλωση. [60] [70] [74] [73]

## 5.2 NB-IoT



Εικόνα 25 Λογότυπο NB-IoT [76]

Το NB-IoT δίκτυο ή αλλιώς Narrow band Internet of Things είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα για IoT εφαρμογές στα κυψελωτά δίκτυα, σχεδιάστηκε από την 3GPP και βασίζεται στην τεχνολογία LTE 4G για LPWA δίκτυα. Όπως το LoRaWAN, έτσι και το NB-IoT στοχεύει στην χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, μεγάλη εμβέλεια, υψηλές ταχύτητες, αξιοπιστία στην μετάδοση δεδομένων και στην ασφάλεια. Το NB-IoT έχει χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης από το LoRa κάνοντας το ενεργειακά καλύτερο αλλά πιο αργό στην ανταλλαγή δεδομένων. Επίσης παρέχει την υποστήριξη μεγάλου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών στο δίκτυο και θεωρείται κατάλληλο για re-farming GSM καναλιών, δηλαδή αν μια συχνότητα στο μέλλον χρησιμοποιηθεί για νεότερες τεχνολογίες το NB-IoT μπορεί να αλλάξει συχνότητα ώστε όλα να επικοινωνούν άρτια. Το NB-IoT κατατάσσεται στα αδειοδοτημένα δίκτυα (Licensed) και επικοινωνεί μέσω κυψελωτών δικτύων κινητής τηλεφωνίας τα οποία έχουν μια αποκλειστική συχνότητα για επικοινωνία με ένα Gateway, θεωρούνται πιο ασφαλή από τα μη αδειοδοτημένα καθώς χρησιμοποιούν μόνο μια συχνότητα. [70] [77]

Για να εξασφαλίσει η τεχνολογία NB-IoT την αποδοτικότητα στην εξοικονόμηση ενέργειας χρησιμοποιεί τις τεχνικές PSM και eDRX. Το PSM είναι power saving mode στο οποίο η συσκευή μπαίνει σε deep sleep mode απενεργοποιώντας τις εισόδους εξόδους λήψης κ εκπομπής σήματος για ένα προγραμματιζόμενο διάστημα. Το eDRX, Extended Discontinuous Reception είναι μία υπάρχουσα τεχνολογία στο LTE, απενεργοποιεί την δυνατότητα λήψης σημάτων όταν δεν δέχεται μηνύματα για κάποιο χρονικό διάστημα έτσι ώστε να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και να αυξηθεί η αυτονομία του συστήματος. [70] Η τεχνολογία NB-IoT διαθέτει 3 τρόπου λειτουργίας που διαφέρουν με βάση την συχνότητα επικοινωνίας της συσκευής με το υπόλοιπο δίκτυο. Αρχικά έχουμε το **In-band**, εδώ το NB-IoT χρησιμοποιεί την ίδια ζώνη συχνοτήτων με το LTE σε bandwidth 180Khz. Έπειτα έχουμε το **Guard-Band** όπου τα δεδομένα δεν μεταδίδονται στην ίδια ζώνη συχνοτήτων με το LTE αλλά υπάρχει διαχωρισμός και χρησιμοποιείται ένα πλευρικό εύρος συχνοτήτων που ονομάζεται guard-band LTE. Τέλος στο **Standalone** το NB-IoT καταλαμβάνει μια ζώνη συχνοτήτων από το GSM ή όπου αλλού δεν χρησιμοποιείται κάποια άλλη τεχνολογία. [60] [70] [78] [81]

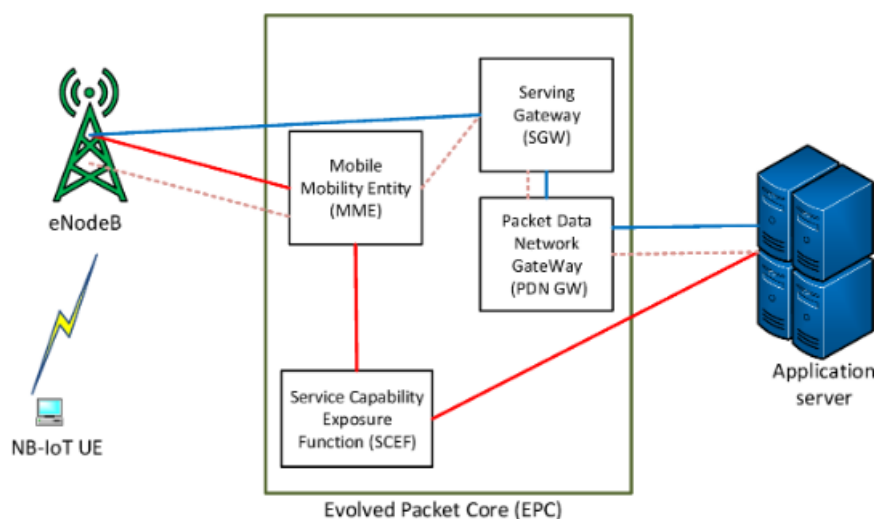


Εικόνα 26 standalone/guard Band/ In bad επικοινωνία NB-IoT [81]

### 5.2.1 Αρχιτεκτονική του NB-IoT

Με την εξέλιξη των έξυπνων συσκευών στον χώρο του IoT και την συνεχόμενη ένταξη νέων συσκευών, το δίκτυο φορτώνεται συνεχώς. Έτσι, μετά την 15<sup>η</sup> έκδοση της 3GPP, στο NB-IoT εφαρμόζεται η τεχνολογία Device-to-device (D2D). Το D2D είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει στα end points να μπορούν να επικοινωνούν χωρίς την παρουσία κάποιου ενδιάμεσου κεντρικού σταθμού, αυξάνοντας την χωρητικότητα του δικτύου και βελτιώνοντας την απόδοση του. Οι συσκευές του δικτύου συνεργάζονται μεταξύ τους και τα πακέτα δεδομένων μεταδίδονται από την μία συσκευή στην άλλη. Έτσι επιτυγχάνεται multi-hop και αποφυγή μετάδοσης πακέτων σε ένα κεντρικό σταθμό. Η τεχνολογία D2D εξασφαλίζει μεγαλύτερη κάλυψη δικτύου μιας και μπορούν να επικοινωνήσουν συσκευές σε χώρο που δεν υπάρχει κάλυψη σήματος από έναν κεντρικό σταθμό.

Η αρχιτεκτονική του IoT βασίζεται στην παρακάτω διασύνδεση. Ας τα πάρουμε τα πράγματα από τα αριστερά προς τα δεξιά, δηλαδή από το σύστημα που έχει το SoC NB-IoT με τους αισθητήρες/ενεργοποιητές έως τον τελικό server εφαρμογής.



Εικόνα 27 Αρχιτεκτονική NB-IoT [79]

- **NB-IoT UE (Narrowband Internet of Things User Equipment):** Εδώ βρίσκεται το σύστημα που έχει επιλέξει ο χρήστης για την αντίστοιχη εφαρμογή, αποτελείται από την συσκευή που ενσωματώνει την τεχνολογία NB-IoT και έχει περιφερειακά όπως αισθητήρες (θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης...), ενεργοποιητές και ανιχνευτές για να διεξάγουν τα αποτελέσματα προς τον χρήστη απομακρυσμένα.
- **eNodeB:** Αποτελεί τον κόμβο ή μια βάση σταθμού που υποστηρίζει την μετάδοση δεδομένων από τον NB-IoT EU προς το σύστημα EPC.
- **EPC (Envolved Packet Core):** Αποτελεί τον πυρήνα της αρχιτεκτονικής του NB-IoT και απαρτίζεται από 4 τμήματα. Το πρώτο είναι το MME (Mobile Mobility Entity) που διαχειρίζεται την κίνηση του δικτύου εισόδου, εξασφαλίζει την αυθεντικότητα της σύνδεσης και πιστοποιεί την μετάβαση στο επόμενο στάδιο που είναι το SGW. Εδώ εξυπηρετούνται τα

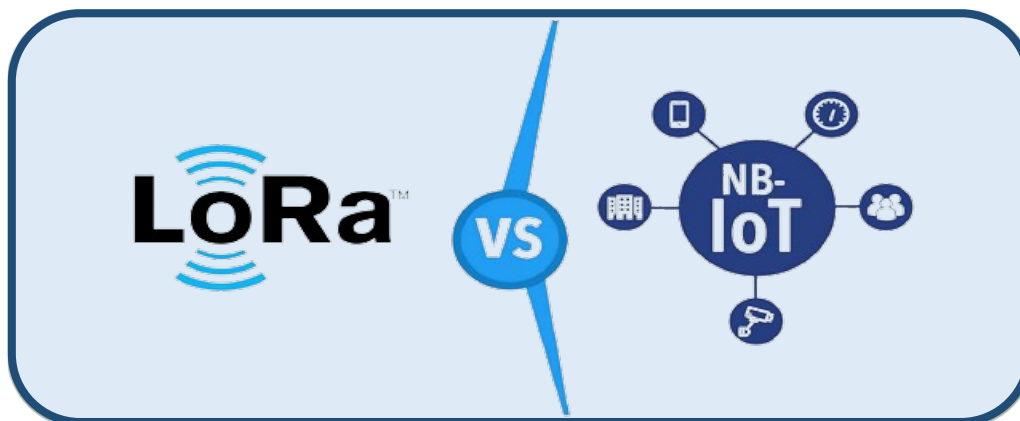
πακέτα, φιλτράρονται και δρομολογούνται στο PDN το οποίο βρίσκεται η συνολική υποδομή διαχείρισης δεδομένων και πακέτων. Τέλος, στο SCEF εφαρμόζεται το QoS και περιέχει δυνατότητες διαχείρισης των πόρων, τα πρότυπα επικοινωνίας και τα APIS.

- **Application Server:** Αποτελεί το σημείο διασύνδεσης του όλου συστήματος με τον χρήστη, εδώ γίνονται επεξεργασίες δεδομένων, διαχειρίζονται οι παράμετροι επικοινωνίας και προβάλλονται στατιστικά και μετρήσεις. [\[60\]](#) [\[70\]](#) [\[80\]](#) [\[77\]](#)

### 5.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά του NB-IoT

Το NB-IoT χρησιμοποιεί την τεχνολογία SC-FDMA για το uplink δεδομένων και το OFDMA για το downlink επιπλέον διαθέτει διαμόρφωση QPSK με έναν ρυθμό μετάδοσης πακέτων στα 250Kbps. Οι συχνότητες που χρησιμοποιεί διαφέρουν ανάλογα τα σενάρια in-band, guard-band ή stand alone με ένα εύρος ζώνης συχνοτήτων τα 180KHz. Μέγιστη απώλεια σύζευξης (MCL) 160db και κάλυψης έως και 25Km με καθυστέρηση στα 10 δευτερόλεπτα.

### 5.3 Σύγκριση NB-IoT και LoRa για εφαρμογές δεντρομετρίας



Εικόνα 28 LORA versus NB-IoT [\[82\]](#)

Για την υλοποίηση της κατασκευής που θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο πρέπει να επιλεχτεί μια τεχνολογία από τις παραπάνω. Για να επιλεχτεί ποια τεχνολογία θεωρείται κατάλληλη, υποθέτουμε ότι η τελική κατασκευή θα μετράει την περίμετρο ενός δέντρου σε μια περιοχή με πυκνή βλάστηση που τουλάχιστον θα υπάρχει κάλυψη κινητής τηλεφωνίας. Επομένως παρακάτω ορίζουμε τα τεκμήρια για την επιλογή μιας τεχνολογίας σύμφωνα με τις απαιτήσεις της κατασκευής του δεντρόμετρου.

Αρχικά, αναζητούμε μια τεχνολογία για να παρέχουμε μεγάλη αυτονομία στο σύστημα, δηλαδή χρειαζόμαστε μια συσκευή που θα αντέξει στην πάροδο των χρόνων, δηλαδή με χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Επιπλέον πρέπει να υποστηρίζει μετάδοση της πληροφορίας σε μεγάλη εμβέλεια, μιας και η μέτρηση είναι απομακρυσμένη από τον χώρο που θα αποστέλλονται τα δεδομένα. Στην συνέχεια επιβάλλεται να έχει μεγάλη διαπερατότητα, εφόσον το σήμα πρέπει να διεισδύει μέσα από πυκνή βλάστηση και τέλος να είναι χαμηλού κόστους, χωρίς να απαιτείται κάποιος κεντρικός σταθμός ή η δημιουργία νέων υποδομών. Στον επόμενο πίνακα έχουμε συγκεντρώσει τα τεχνικά



χαρακτηριστικά των δύο τεχνολογιών και συγκρίνουμε ποια εφαρμόζει καλύτερα σε ένα δεντρόμετρο για χρήση του σε πρόγραμμα αναδάσωσης.

**Πίνακας 6 Διαφορές του NB-IoT με το LoRaWAN [60]**

Technical metrics	NB-IoT	LoRaWAN
Carrier bandwidth	200 kHz	125 and 250 kHz
Uplink	SC-FDMA	Wide-band linear frequency
Downlink	OFDMA	Frequency-modulated pulses
Modulation	QPSK	CSS
Bands	Licensed LTE	915 MHz
MCL	164 dB	155 dB
Data rate	250 kbps	50 kbps
Coverage	<25 km	<20 km
Power consumption (battery life)	>10 years	<10 years
Cost	Low	Low
MAC layer	LTE based	Aloha based
Connection density (maximum number of devices)	50,000 per cell	100,000 per cell
Mobility	No	Yes

Το NB-IoT έχει καλύτερα χαρακτηριστικά για την εφαρμογή που θα δημιουργηθεί μιας και έχει μεγαλύτερο εύρος διάδοσης στα 25Km, έχει μεγαλύτερο Data Rate στα 250Kbps και περισσότερο MCL στα 164db που σημαίνει ότι θα έχει καλύτερες επιδώσεις στο δάσος απ' ότι το LoRa. Τελική παράμετρος επιλογής είναι η ενεργειακή κατανάλωση η οποία στο NB-IoT ξεπερνάει τα 10 χρόνια συγκριτικά με το LoRa. Όσον αφορά τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφορές που θα καθόριζαν ποια τεχνολογία είναι καλύτερη για εφαρμογή σε αναδάσωση. Παρόλα αυτά το NB-IoT έχει και μικρότερο κόστος υλοποίησης, εφόσον δεν χρειάζεται ενδιάμεσα gateways για την μετάδοση της πληροφορίας σε μεγάλο εύρος. Συνεπώς, καταλήγουμε και επιλέγουμε την τεχνολογία επικοινωνίας NB-IoT που είναι η πιο αποδοτική. Η δημιουργία ενός κόμβου NB-IoT αποτελεί την ιδανική λύση για την απομακρυσμένη επικοινωνία του χρήστη με το δεντρόμετρο. Αυτή η τεχνολογία θα εφαρμοστεί για τη μεταφορά των μετρήσεων από τον αισθητήρα περιμέτρου προς τον τελικό χρήστη. Ο αισθητήρας μέτρησης είναι εξίσου σημαντικός με την επιλογή μιας ασύρματης επικοινωνίας, έτσι προβαίνουμε στο επόμενο κεφάλαιο που αναλύουμε τα πιο γνωστά εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση της περιμέτρου του δέντρου.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>: Rotary Encoders

Όπως αναφέρθηκε και σε [προηγούμενη ενότητα](#) το D-Tape αποτελεί όργανο μέτρησης που μπορεί να μετρήσει όλα τα μεγέθη των δέντρων χωρίς προβλήματα στην απόκλιση των μετρήσεων. Η παρούσα εργασία εμβαθύνει στην μεθοδολογία των βιβλιογραφιών [19] [3] όπου την θέση του D-Tape έχει αντικαταστήσει ένας Rotary encoder για την λήψη απομακρυσμένων μετρήσεων. Για την επίτευξη του σκοπού της αυτονομίας της κατασκευής χρειάζεται ένα όργανο μέτρησης με χαμηλή κατανάλωση που δεν θα χρειάζεται να αντλεί συνέχεια ενέργεια και θα μπορεί να είναι απενεργοποιημένο είτε να πέφτει σε deep sleep. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με έναν rotary encoder ο

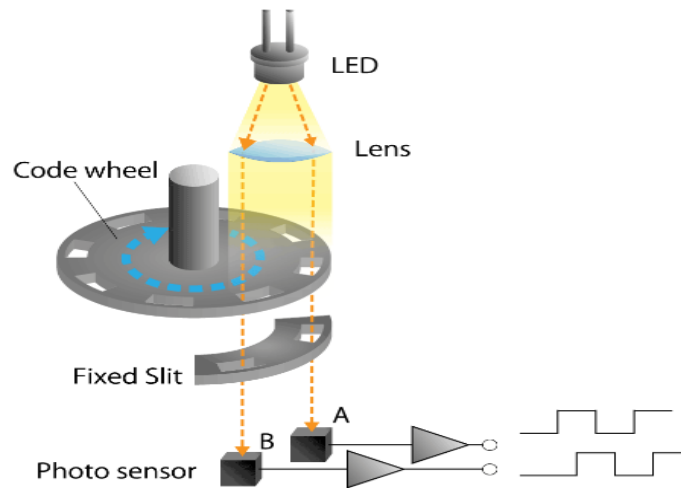
οποίος κάθε φορά που θα νιώθει μία μικρή αύξηση του δέντρου θα δίνει σήμα έναυσης στο αναπτυξιακό που θα είναι συνδεδεμένος ότι το δέντρο αυξήθηκε. Μέχρι να νιώσει μία αύξηση δεν θα αντλεί ενέργεια και το υπόλοιπο σύστημα μπορεί να περιμένει σε deep sleep για κάποιο εξωτερικό Interrupt [35]. Ας δούμε τι είναι ένας rotary encoder και πώς λειτουργεί. Ως rotary encoders ή περιστροφικοί κωδικοποιητές ορίζονται οι αισθητήρες μετατόπισης θέσης ή γωνίας που μπορούν να διεξάγουν είτε ψηφιακό είτε αναλογικό σήμα (ανάλογα τον encoder) με βάση την περιστροφή του άξονα τους. Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες με αισθητήρα που έρχονται μαζί με τους Rotary encoders για τον εντοπισμό της περιστροφής ή της θέσης. Οι πιο γνωστές είναι η χρήση **οπτικού αισθητήρα**, η χρήση **μαγνητικού αισθητήρα** και η χρήση **χωρητικού αισθητήρα**. Παρ' αυτά υπάρχουν και rotary encoders που δεν περιέχουν ηλεκτρονικά κυκλώματα και είναι με **ελάσματα**. [86]

## 6.1 Απόλυτοι και Αυξητικοί encoders

Αρχικά οι rotary encoders (περιστροφικοί κωδικοποιητές) χωρίζονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες: η μία ονομάζεται Absolute encoders (απόλυτοι) και η άλλη Incremental encoders (αυξητικοί κωδικοποιητές). Η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο κατηγοριών είναι ο επαναπροσδιορισμός της θέσης που βρίσκονταν πριν απενεργοποιηθεί ο encoder όταν ξανά ενεργοποιηθεί. Αναλυτικότερα, οι absolute encoders διαθέτουν ένα σύστημα μνήμης όπου με κάθε περιστροφή του άξονα τους αποθηκεύεται στιγμιαία η μνήμη μέσα στον encoder και ανανεώνεται με κάθε νέα αλλαγή. Όταν το σύστημα δεν έχει πλέον τάση και ο rotary encoder δεν τροφοδοτείται από ρεύμα, η θέση που έφτασε τελευταία φορά είναι αποθηκευμένη εσωτερικά στον encoder, οπότε, όταν το σύστημα ξανά τροφοδοτηθεί ο encoder θα κάνει wake up και θα δείχνει στο σύστημα που είναι συνδεδεμένος την τελευταία θέση που έφτασε. Όσον αφορά τους incremental encoders, δεν έχουν κάποια μνήμη εσωτερικά έτσι κάθε φορά που δεν τροφοδοτείται ο encoder η τιμή της θέσης που θα δώσουν θα είναι πάντα 0, δηλαδή κάθε φορά που ξανά τροφοδοτούνται ξεκινούν από την αρχική τους κατάσταση. [83] Οι πιο γνωστές τεχνολογίες απόλυτων και αυξητικών encoder είναι οι παρακάτω:

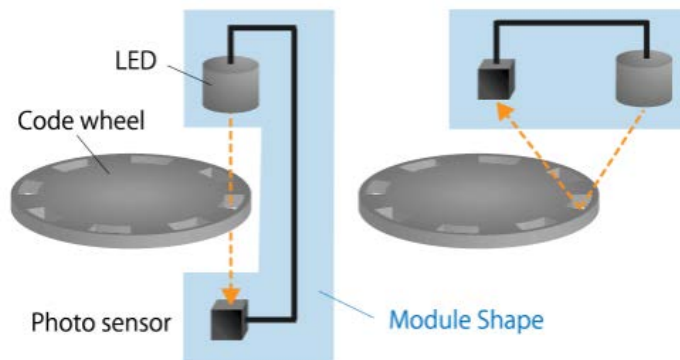
## 6.2 Optical encoder

Ο encoder με οπτικό αισθητήρα αποτελείται από ένα LED που εκπέμπει φως πάνω σε έναν δίσκο που έχει ανοίγματα με συγκεκριμένο μέγεθος και ακολουθούνε ένα μοτίβο. Επίσης έχει κάποιους αισθητήρες φωτός που βρίσκονται από την άλλη πλευρά του δίσκου απέναντι από αυτήν που βρίσκεται το LED. Η ιδέα πίσω από αυτή την τεχνολογία είναι ότι κάθε φορά που θα περιστρέφεται ο άξονας του encoder ο δίσκος θα ακολουθεί με την ίδια ταχύτητα, οπότε όσο το LED εκπέμπει μόνιμα και ο δίσκος περιστρέφεται οι αισθητήρες θα έχουν έξοδο 0..1..0..1.., δηλαδή έναν τετραγωνικό παλμό ακολουθώντας το μοτίβο του δίσκου. Παρακάτω φαίνεται το εσωτερικό ενός οπτικού κωδικοποιητής. [84]



Εικόνα 29 Εσωτερική διάταξη Optical Encoder [84]

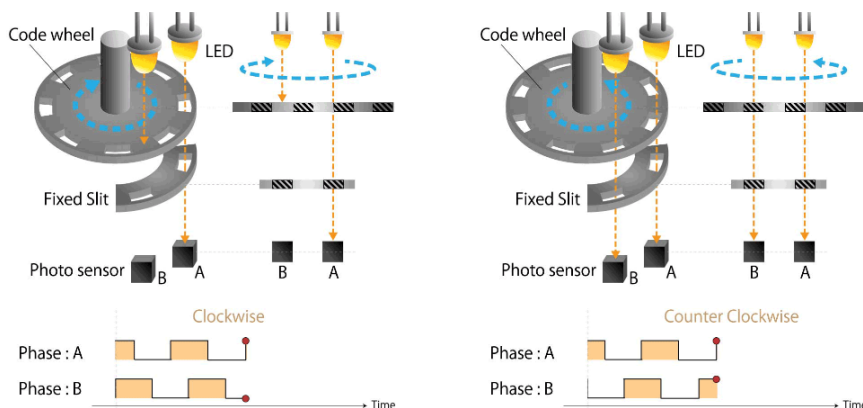
Οι οπτικοί κωδικοποιητές έχουν 2 υποκατηγορίες ανάλογα με την δομή τους: η πρώτη είναι κωδικοποιητές με μετάδοση φωτός και η δεύτερη είναι με αντανάκλαση του φωτός. Συγκεκριμένα όπως φαίνεται και στην ακόλουθη φωτογραφία, αριστερά είναι η διάταξη που αναφέρθηκε παραπάνω, το φως διαπερνά κενά τμήματα από τον δίσκο και ο αισθητήρας τα ανιχνεύει. Τα πλεονεκτήματα αυτής της δομής είναι η καλή απόδοση στις μετρήσεις και η εύκολη κατασκευαστική υλοποίηση. Η δομή στα δεξιά είναι υλοποιημένη με έναν διαφορετικό δίσκο όπου αντί για ανοίγματα έχει ανακλαστήρες που ακολουθούν όμοια διάταξη με τα ανοίγματα. Το φως προσπίπτει στους ανακλαστήρες και αντανάκλατε προς τον αισθητήρα. Με αυτή την δομή εξασφαλίζεται μικρότερο μέγεθος του τελικού encoder αλλά όχι τόσο αξιόπιστες μετρήσεις. [84]



Εικόνα 30 Οπτικός κωδικοποιητής με μετάδοση και με αντανάκλαση [84]

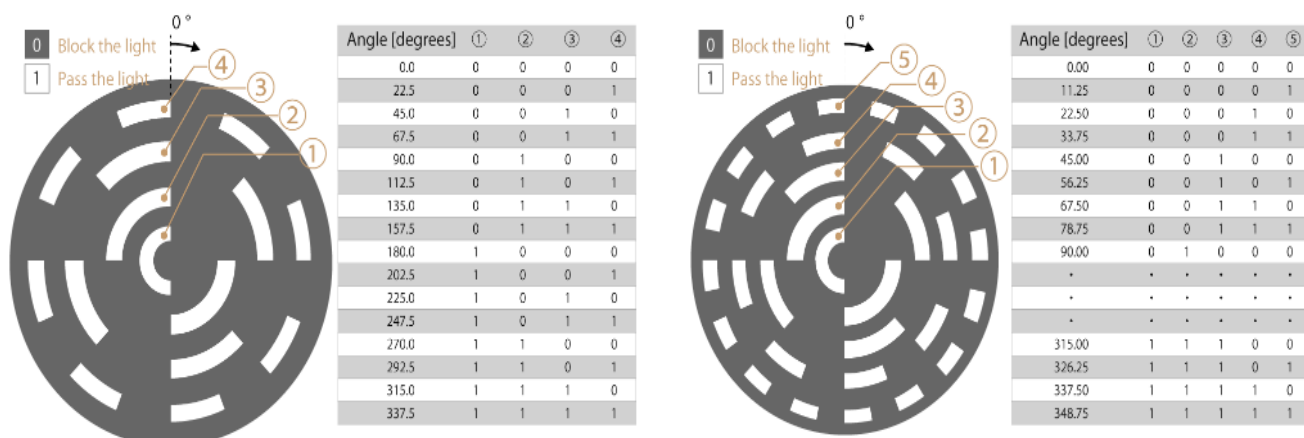
Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται όπως αναφέρθηκε στην εκπομπή και λήψη φωτός, παρόλα αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν και με βάση το αν είναι απόλυτοι ή αυξητικοί.

Στην εικόνα 31 βλέπουμε δύο διαφορετικούς encoders, ο πρώτος μετράει με την φορά του ρολογιού και ο δεύτερος αντίθετα. Το σύστημα καταλαβαίνει πότε αλλάζει κατεύθυνση, γιατί όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί, ο encoder με την φορά του ρολογιού έχει παλμούς από τον αισθητήρα A που προπορεύονται και δίνουν 1 πριν δώσει ο αισθητήρας B. Αντιθέτως, στην άλλη εικόνα οι παλμοί του B προπορεύονται του A.



Εικόνα 31 Clockwise και counter clockwise μέτρηση [84]

Αυτή η τεχνολογία ανήκει στους αυξητικούς encoders γιατί όποια περιστροφή και να κάνει ο αισθητήρας δεν υπάρχει κάποιο στοιχείο μνήμης. Εδώ έρχεται μια νέα λύση όπου έχουμε τον κλασσικό optical encoder αλλά με διαφορετικό δίσκο(absolute encoder). Πλέον η πληροφορία της θέσης οπτικοποιείται με 0 και 1, δηλαδή ο δίσκος έχει περισσότερα ανοίγματα που ακολουθούν ένα μοτίβο. Βλέπουμε έναν rotary με 4 σειρές και έναν rotary με 5 σειρές, όσες περισσότερες σειρές έχει τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια έχουμε για την θέση που θα βρίσκεται. Για παράδειγμα, αν ο encoder με τις 4 γραμμες περιστραφεί 135 μοίρες τότε θα εμφανίζεται από τους αισθητήρες οι τιμές 0 1 0 1 που αντιστοιχεί στο 135. Αν το σύστημα απενεργοποιηθεί, δηλαδή χάσει την τάση και έπειτα το θέσουμε ξανά σε λειτουργία ο encoder θα γνωρίζει σε ποια θέση είχε μείνει γιατί οι αισθητήρες θα του εμφανίζουν το 0 1 0 1. [84]

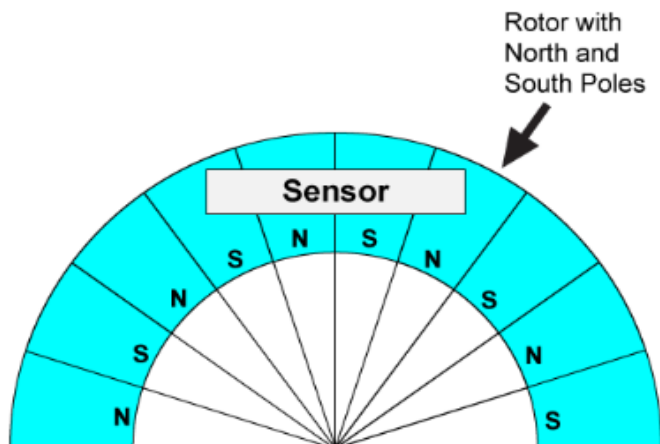


Εικόνα 32 Απόλυτοι οπτικοί κωδικοποιητές 4 και 3 σειρών [84]

### 6.3 Magnetic encoder

Επόμενος είναι ο Magnetic Rotary Encoder ή αλλιώς μαγνητικός αποκωδικοποιητής είναι ένας αισθητήρας μέτρησης γωνίας και χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό θέσης ή περιστροφής ενός αντικειμένου [36]. Περιέχει μαγνήτες και η λειτουργία του βασίζεται στο Hall effect [37]. Κάθε φορά που υπάρχει μηχανική κίνηση παράγει ψηφιακά σήματα χρησιμοποιώντας έναν αισθητήρα μαγνητικού πεδίου και έναν δίσκο με πολλούς μικρούς μαγνήτες τοποθετημένους σε ισαπέχουσα

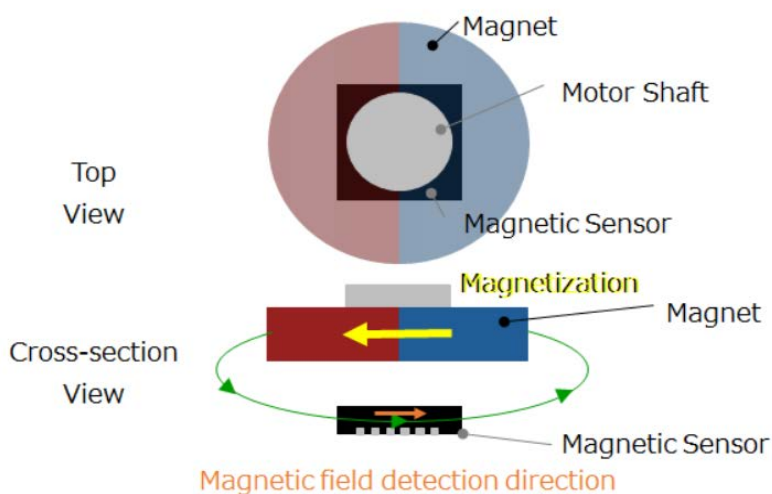
απόσταση και με διαφορετική πόλωση ο ένας με τον άλλο. Δηλαδή ακολουθείτε το μοτίβο N>S>N>S...



Εικόνα 33 Μαγνητικός αποκωδικοποιητής με βόρειους και νότιους πόλους [38]

Έπειτα, υπάρχει ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα αποκωδικοποίησης της πληροφορίας που δίνει ο αισθητήρας μαγνητικού πεδίου και αυτό είναι υπεύθυνο για τον πολλαπλασιασμό ή την διαίρεση του σήματος. Σκοπός του είναι η παραγωγή τετραγωνικών παλμών στην έξοδο του ώστε να είναι μετρήσιμοι από κάποιον μικροελεγκτή. [38] Ο μαγνητικός encoder έχει παρόμοια λειτουργία με εκείνη του οπτικού encoder, η διαφορά του είναι ότι ο μαγνητικός μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον με λάδια, σκόνη και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον με ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, ενώ ο οπτικός encoder μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλον με ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο αλλά είναι ευαίσθητο στην σκόνη και στα λάδια. Ακόμα, ο μαγνητικός encoder δεν μπορεί να αποθηκεύσει με κάποιο τρόπο την τελευταία τιμή που βρισκόταν όπως ο οπτικός. Επομένως, ανήκει στους αυξητικούς encoders. [85]

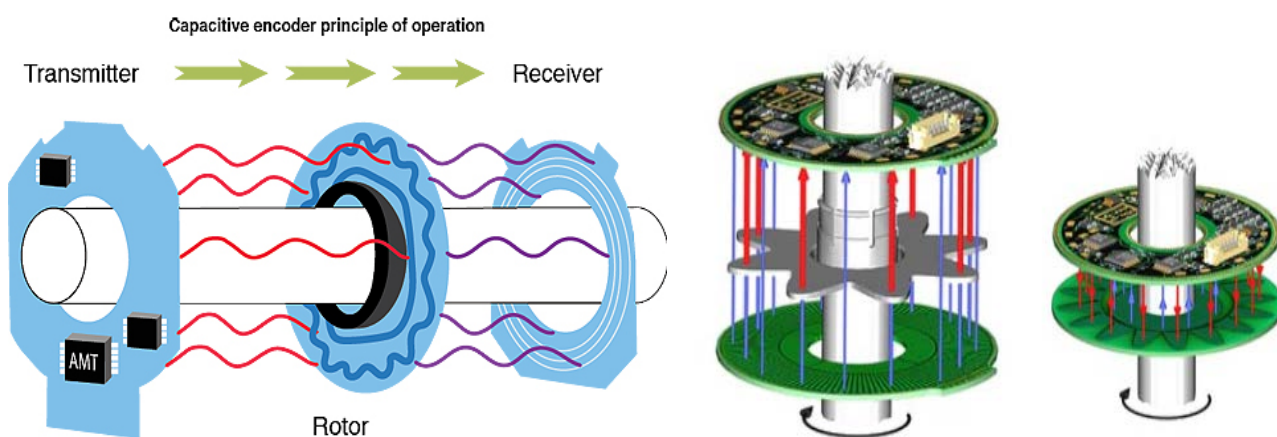
Η αρχιτεκτονική του όπως αναφέρθηκε πριν αποτελείται από έναν δίσκο με μαγνήτες και έναν αισθητήρα που έχει συγκεκριμένη απόσταση από τον δίσκο, όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχέδιο με το εσωτερικό του encoder.



Εικόνα 34 Εσωτερική διάταξη magnetic encoder [85]

## 6.4 Capacitive encoder

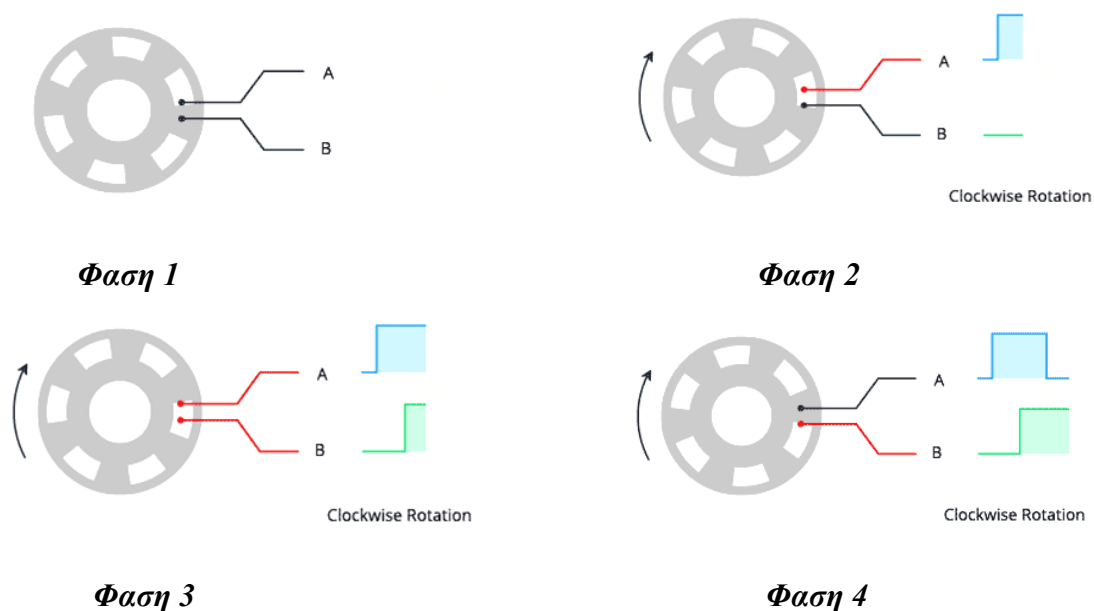
Από τις πιο αποδοτικές και αξιόπιστες τεχνολογίες αποτελούν οι capacitive encoders (χωρητικοί κωδικοποιητές). Δομούνται με μια καινούργια τεχνολογία σε σύγκριση με τις άλλες δύο και είναι αρκετά πιο σύνθετη και πιο ακριβή. Το πλεονέκτημα της τεχνολογίας capacitive encoder είναι ότι αντέχει σε κάθε μορφή ηλεκτρομαγνητικού θορύβου και έχει αντοχή στην σκόνη και στα λάδια δηλαδή συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των άλλων δύο τεχνολογιών. Η αρχή λειτουργίας του capacitive encoder βασίζεται στην ανίχνευση αλλαγής της χωρητικότητας μέσα από ένα σήμα υψηλής συχνότητας. Υπάρχουν δύο υλοποιήσεις, η μία είναι με 3 διαφορετικά μέρη και η άλλη είναι με δύο μέρη, σε κάθε περίπτωση υπάρχει ένας πομπός ένας ενδιάμεσος ρότορας και ένας δέκτης σημάτων. Ο πομπός δημιουργεί AC (Alternating Current) ηλεκτρομαγνητικά κύματα σε μεγάλες συχνότητες που μεταδίδονται μέσα από τον ρότορα στον δέκτη. Ο ρότορας διαμορφώνει το σήμα όσο περιστρέφεται μεταβάλλοντας το εναλλασσόμενο σήμα μιας και αποτελείται από ένα ημιτονοειδές μοτίβο όπως φαίνεται στην εικόνα 34 στα αριστερά. Ο ρότορας δημιουργεί μια χωρητική αντίδραση μεταξύ του AC σήματος από τον πομπό με το μέταλλο που έχει ο ίδιος, η οποία κάνει μια συνεχόμενη παραμόρφωση του AC που μεταδίδεται στον δέκτη. Ο δέκτης λαμβάνει το διαμορφωμένο AC σήμα και το μετατρέπει σε τετραγωνικούς παλμούς, δηλαδή το σήμα AC μετατρέπεται σε DC. Η τεχνολογία του capacitive encoder εντάσσεται στους absolute encoders μιας και μπορεί να προσδιορίζει την θέση που έφτασε τελευταία φορά πριν απενεργοποιηθεί ο encoder. Για να επιτύχει τον προσδιορισμό της θέσης και για να λειτουργεί με μεγάλη ακρίβεια μέτρησης έχει δύο λειτουργίες, η μία είναι **Coarse Mode** και η άλλη **Fine mode**. Όταν το σύστημα ενεργοποιείται μπαίνει σε λειτουργία το Coarse Mode, όπου εκεί μετριέται η θέση που έχει περιστραφεί και μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα για να το δώσει σε κάποιον εξωτερικό ελεγκτή. Στην συνέχεια ακολουθεί το Fine mode που χρησιμοποιείται συνεχόμενα όσο λειτουργεί ο encoder, αυτό κατακερματίζει την πληροφορία που μετράει για να αποδώσει υψηλότερη ακρίβεια χωρίς παραπάνω έξοδα από άλλα περιφερειακά. [87] [88]



Εικόνα 35 Εσωτερική διάταξη capacitive encoder και προσέγγιση με 3 και 2 μέρη [88]

## 6.5 Rotary encoder με ελάσματα

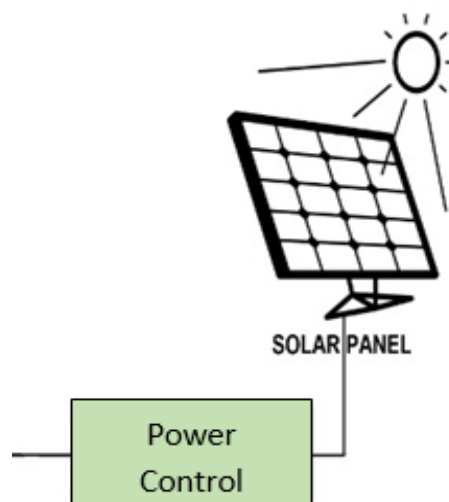
Τέλος, έχουμε τον απλό encoder με δύο μεταλλικά ελάσματα να ακουμπούν πάνω σε ένα μεταλλικό δίσκο. Δεν περιλαμβάνεται κάποιος ελεγκτής, δεν έχει ηλεκτρονικό κύκλωμα για την απομνημόνευση της θέσης, είναι μηχανικός encoder. Η λειτουργία του στηρίζεται στην αγωγιμότητα των ελασμάτων, ο δίσκος συνήθως έχει τάση ενώ τα ελάσματα είναι ψηφιακοί είσοδοι σε κάποιον μικροελεγκτή. Στις παρακάτω εικόνες ο δίσκος έχει τάση ενώ τα ελάσματα είναι οι ψηφιακοί είσοδοι. Όταν ένα έλασμα ακουμπάει τον δίσκο τότε μεταφέρει σαν είσοδο στον μικροελεγκτή την τάση που έχει ο δίσκος, ενώ όταν το έλασμα δεν ακουμπάει τον δίσκο και ακουμπάει το σασί του encoder δίνει γείωση στην είσοδο του μικροελεγκτή. Οπότε δημιουργούνται τετραγωνικοί παλμοί στην είσοδο του μικροελεγκτή οι οποίοι καθορίζουν αν κινείται δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα ανάλογα με το αν προπορεύεται ο παλμός A ή B αντίστοιχα. Αν προπορεύεται ο A παλμός τότε κινείται δεξιόστροφα ενώ αν προπορεύεται ο B τότε κινείται αριστερόστροφα [89]



Εικόνα 36 Οι 4 φάσεις ενός παλμικού rotary encoder [89]

Οι rotary encoder με ελάσματα είναι οι πιο απλοί από όλες τις τεχνολογίες των encoder, έχουν το χαμηλότερο κόστος και δεν χρειάζονται τροφοδοσία για να λειτουργήσουν μιας και δεν περιέχουν ηλεκτρικά κυκλώματα. Για την τελική κατασκευή χρειαζόμαστε έναν encoder με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και γενικότερα στιβαρό στις ακραίες καιρικές συνθήκες όπως μεγάλες θερμοκρασίες, υψηλή υγρασία και αντοχή σε σκόνη και χρώμα. Ο encoder με ελάσματα έρχεται στην πρώτη επιλογή μιας και πληροί τις παραπάνω απαιτήσεις. Η επιλογή τεχνολογιών επικοινωνίας και εργαλείων μέτρησης με την ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση όπως είδαμε παραπάνω είναι ένα μείζων θέμα, γιατί όμως ;

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>: Σύστημα διαχείρισης ενέργειας



Αρχικά, για να απαντήσουμε στο ερώτημα του προηγούμενου κεφαλαίου είναι σημαντικό να ειπωθεί ότι ένα από τα βασικότερα ζητήματα της εργασίας είναι η αυτονομία του συστήματος ή πιο απλά, πόσο θα αντέξει η μπαταρία στο πέρασμα του χρόνου με την συνεχόμενη τροφοδότηση του δεντρόμετρου. Επειδή η προσέγγιση του δεντρόμετρου γίνεται με βάση την μεγάλη διάρκεια ζωής του συστήματος θα πρέπει να συνυπολογιστεί ότι χρειαζόμαστε ένα σύστημα συγκομιδής και διανομής ενέργειας που θα επιτρέπει την μακροχρόνια λειτουργία του ώστε να παρακολουθήσει την εξέλιξη της αναδάσωσης σε όλη της την πορεία.

Η γενική ιδέα βασίζεται σε έναν αυτόνομο NB-IoT κόμβο που θα μπορεί να τροφοδοτείται από ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας με πηγή ένα Solar Panel (φωτοβολταϊκό) και μια μπαταρία. Παρότι η τεχνολογία NB-IoT προσφέρει ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας, για να αυξήσουμε την αυτονομία του συστήματος επιλέγεται και η τοποθέτηση ενός Solar Panel. Οι μπαταρίες Lead-Acid μπορούν να αντέξουν έως και 10 χρόνια με σωστούς κύκλους φόρτισης ενώ το φωτοβολταϊκό μπορεί να φορτίζει την μπαταρία για να μην αποφορτιστεί. Η ιδέα της χαμηλής κατανάλωσης του συστήματος πηγάζει από το ότι οι μπαταρίες όσο κλείνουν κύκλους φόρτισης τόσο μειώνεται και ο χρόνος ζωής τους άρα έχουν και μικρότερη αυτονομία. Οπότε προσπαθούμε να επιτύχουμε χαμηλή κατανάλωση ενέργειας για να αυξήσουμε τον χρόνο ζωής της μπαταρίας.

Το φωτοβολταϊκό έχει κυμαινόμενες τιμές ρεύματος και τάσης ανάλογα με τον ήλιο. Αυτό μπορεί να φέρει την μπαταρία σε σημείο υπερφόρτισης ή αποφόρτισης μειώνοντας τον χρόνο ζωής της και με τον κίνδυνο ανάφλεξης της μπαταρίας. ⚠️ [91]

Το Solar panel δεν μπορεί να τροφοδοτήσει μία μπαταρία άμεσα, δηλαδή δεν γίνεται να συνδέσουμε μια μπαταρία πάνω σε ένα solar panel. Η σωστή αντιμετώπιση του προβλήματος έρχεται με την χρήση ενός ελεγκτή φόρτισης της μπαταρίας που θα είναι ενδιάμεσα στο solar panel και στην μπαταρία, θα τροφοδοτείται από το solar panel και θα φορτίζει την μπαταρία με κατάλληλη τάση και ρεύμα όπως στην δημοσίευση «Arduino battery charging system...». Επίσης ο φορτιστής μπαταρίας παρέχει την δυνατότητα μιας εξόδου στα 12V DC που χρησιμοποιείται για φορτία, στην προκειμένη περίπτωση θα συνδεθεί η τροφοδοσία του NB-IoT κόμβου. [90]

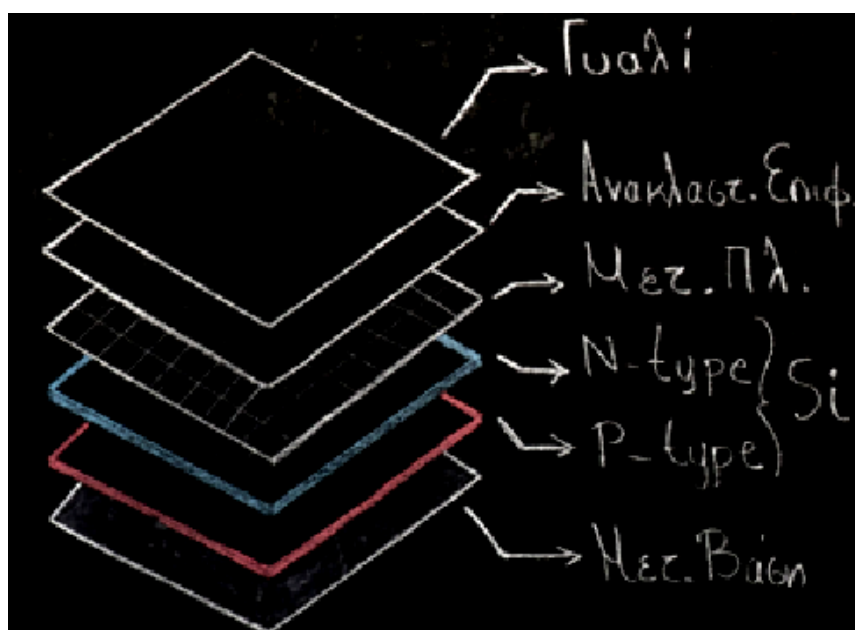


## 7.1 Solar Panel

Γενικότερα το Solar Panel (φωτοβολταϊκό) βασίζεται στο φαινόμενο μετατροπής των φωτονίων σε ρεύμα που ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή μετατρέπει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε ηλιακή ενέργεια. Όσο περισσότερο φως εκπέμπεται τόσο μεγαλύτερη τάση δίνει ως έξοδο. Σύντομη περιγραφή για τα φωτοβολταϊκά: βασίζονται στην δομή 6 διαφορετικών στρώματων. Τα στρώματα είναι τα εξής:

1. **Γυαλί:** Το πρώτο στρώμα είναι ένα είδος γυαλιού που προστατεύει τα υπόλοιπα στρώματα και χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες του έχουμε μόνωση από ηλεκτρικό ρεύμα και επειδή είναι διαφανές έχουμε διέλευση φωτονίων στα υπόλοιπα στρώματα.
2. **Ανακλαστική επιφάνεια:** Για να αυξηθεί η απόδοση του φωτοβολταϊκού χρησιμοποιείται μια ειδική επιφάνεια με συγκεκριμένο πάχος που έχει ως ιδιότητες τον εγκλωβισμό φωτονίων στα εσωτερικά στρώματα.
3. **N-type Si:** Εδώ βρίσκεται ένας ντοπαρισμένος ημιαγωγός πυριτίου N-type με περίσσεια ενός ηλεκτρονίου σθένους.
4. **P-type Si:** Σε αυτό το Layer υπάρχει ένας ντοπαρισμένος ημιαγωγός πυριτίου P-type με μία οπή που περιμένει να δεσμευτεί από ένα ηλεκτρόνιο.
5. **Μεταλλικό πλέγμα και Μεταλλική βάση:** τα layer 3 και 6 είναι σχεδιασμένα για να καθορίσουν την φορά των ηλεκτρονίων που φεύγουν από το στρώμα N-type στο στρώμα P-type.

Ρεύμα DC έχουμε μόνο όταν φωτεινή ακτινοβολία προσπίπτει στα N και P layers όπου έχουμε μετατόπιση ηλεκτρονίων αλλά με συγκεκριμένη κατεύθυνση. [93]



Εικόνα 37 Στρώματα φωτοβολταϊκού πάνελ [93]

## 7.2 Είδη των Solar Panel

Τα φωτοβολταϊκά χωρίζονται σε 4 βασικές κατηγορίες ανάλογα την εσωτερική τους δομή:

1. **Μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό:** αποτελείται από κυψέλες υψηλής καθαρότητας πυριτίου που παράγονται με πολύπλοκη διαδικασία για την δημιουργία ράβδων πυριτίου, οι οποίες κόβονται σε λεπτά Layers και ονομάζονται «γκοφρέτες». Έχει απόδοση 15-24% και είναι αρκετά ακριβά.
2. **Πολυκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό:** αποτελείται από κυψέλες πυριτίου αλλά όχι υψηλής καθαρότητας όπως το μονοκρυσταλλικό. Όταν παρασκευάζεται αυτή η κυψέλη πυριτίου χυτεύεται και ύστερα στερεοποιείται πολύ αργά με αποτέλεσμα την δημιουργία διάφορων μεγεθών κρυστάλλων πυριτίου. Έχει απόδοση 13-18% και είναι πιο φτηνό από το μονοκρυσταλλικό.
3. **Υβριδικό φωτοβολταϊκό:** αποτελείται από ένα σύμπλεγμα άμορφων και μονοκρυσταλλικών κυψελών πυριτίου γνωστά και ως HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer). Παρουσιάζουν λίγο υψηλότερες αποδόσεις από τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά αλλά είναι από τις πιο ακριβές φωτοβολταϊκές τεχνολογίες . [\[92\]](#) [\[94\]](#) [\[95\]](#)

## 7.3 Τεχνική εξαγωγής μέγιστης ισχύος

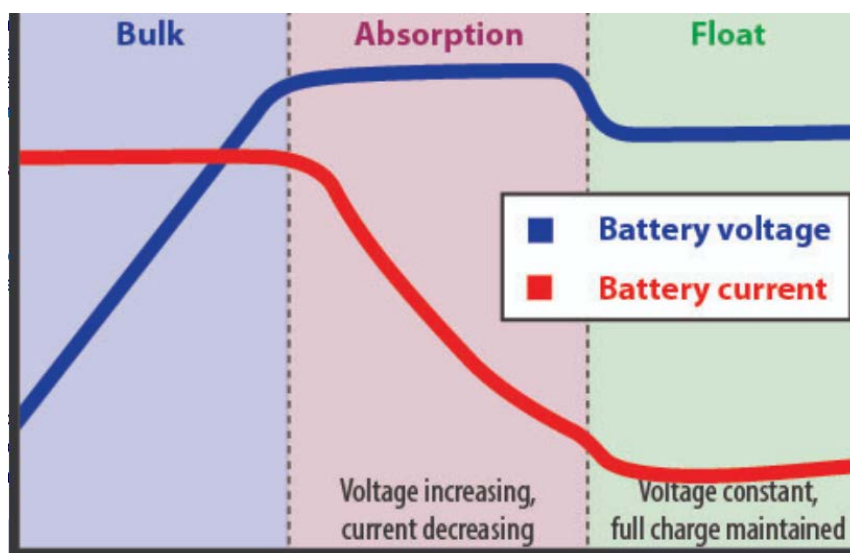
Οι αποδόσεις που τυπώθηκαν παραπάνω βλέπουμε ότι είναι πολύ μικρές, κανένα φωτοβολταϊκό δεν ξεπερνά το 30%, καθιστώντας αναγκαίο την δημιουργία τεχνικών που θα διεξάγουν μεγαλύτερη απόδοση για την φόρτιση της μπαταρίας. Τα φωτοβολταϊκά έχουν την μέγιστη απόδοση όταν το ρεύμα και η τάση παίρνουν την μέγιστη δυνατή τιμή. Η ανάγκη για ταυτόχρονη παρουσία μέγιστης τάσης και μέγιστου ρεύματος μπορεί να οριστεί με την ισχύ στο peak της. Το σημείο όπου το φωτοβολταϊκό δίνει την μέγιστη έξοδο ισχύος ονομάζεται maximum power point. Το MPPT (maximum power point tracking) είναι πλέον μια τεχνική για την διεξαγωγή μέγιστης ισχύος που χρησιμοποιεί μετρητή τάσης-ρεύματος στην είσοδο του φωτοβολταϊκού και έναν Buck/Boost Converter που είναι DC-DC μετατροπέας, ο οποίος κάνει μείωση (buck) είτε ανύψωση της τάσης (boost). Το σύστημα συντονίζεται από έναν μικροελεγκτή για να ρυθμίσει την κατάλληλη έξοδο, οπότε χρησιμοποιείται και ένας αισθητήρας τάσης στην έξοδο για να δώσει feedback στον μικροελεγκτή σύμφωνα με την βιβλιογραφία [\[90\]](#). Για την υλοποίηση ενός MPPT χρειάζονται σύνθετοι αλγόριθμοι που θα ελέγχουν κάθε φορά την είσοδο και την έξοδο του controller φόρτισης, κάτι που δεν αποτελεί αναγκαίο στην παρούσα εργασία.

Η διπλωματική δεν βασίζεται τόσο στην παρουσίαση ενός controller για την καλύτερη απόδοση του φωτοβολταϊκού, έτσι και αλλιώς οι ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος όπως έχει ειπωθεί και στο κεφάλαιο LoRaWAN και NB-IoT είναι πάρα πολύ μικρές. Παρόλα αυτά θα χρειαστεί ένα φωτοβολταϊκό, μια μπαταρία και ένας φορτιστής της μπαταρίας προκειμένου να αυξηθεί η αυτονομία του συστήματος στο έπακρο όπως προαναφέρθηκε.

### 7.3 Μπαταρία Lead – Acid

Σύμφωνα με την δημοσίευση [96] [97], ιδανική επιλογή μπαταρίας για το φωτοβολταϊκό πάνελ αποτελούν αρκετών ειδών μπαταρίες, μια εκ των οποίων είναι η lead-acid. Για την φόρτιση της μπαταρίας χρειαζόμαστε 3 στάδια, όπως προτείνουν και οι περισσότεροι κατασκευαστές μπαταριών μολύβδου.

- **Στάδιο 1:** Bulk mode, υποθέτουμε ότι η μπαταρία δεν έχει αρκετή τάση είναι δηλαδή αποφορτισμένη, χρησιμοποιούμε σταθερή τιμή ρεύματος και αφήνουμε την τάση να αυξάνεται μέχρι περίπου το 80%.
- **Στάδιο 2:** Absorption mode, αναφερόμενοι για μία 12V μπαταρία, όταν έχει φτάσει τα 14.6V η τάση κρατείται σταθερή στην έξοδο του φορτιστή και το ρεύμα αφήνεται να μειωθεί σταδιακά μέχρι να φτάσει σε ένα κατώτατο όριο σύμφωνα με τον κατασκευαστή της κάθε μπαταρίας.
- **Στάδιο 3:** Η μπαταρία αντισταθμίζεται από κάθε μικρή απώλεια της και παραμένει συνεχώς φορτισμένη. [98]



Εικόνα 38 Τρία στάδια φόρτισης Lead-Acid μπαταρίας [98]

Συμπερασματικά, η συγκομιδή ενέργειας θα γίνει από ένα φωτοβολταϊκό το οποίο θα συνδεθεί σε έναν φορτιστή μπαταρίας και αυτός στην μπαταρία. Για φωτοβολταϊκό χρειαζόμαστε κάποιο αποδοτικό λόγω της βλάστησης που θα υπάρχει γύρω αλλά ταυτόχρονα οικονομικό. Καταλήγουμε ότι ένα μονοκρυσταλλικό είναι η ιδανική επιλογή μιας και είναι πιο αποδοτικό από το πολυκρυσταλλικό και πιο οικονομικό από το υβριδικό. Στην συνέχεια, θα τοποθετηθεί μια μπαταρία Lead-Acid διότι προσφέρει μεγάλο χρόνο ζωής άρα και μεγάλη αυτονομία του συστήματος και τέλος, ένας φορτιστής με ρύθμιση φόρτισης για Lead-Acid μπαταρίες. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού και της μπαταρίας θα επιλεγθούν με βάση την κατανάλωση ενέργειας του κόμβου στο επόμενο κεφάλαιο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>: Υλοποίηση Κατασκευής

Η υλοποίηση της εργασίας δομείται σε τρία μέρη. Αρχικά σχεδιάζεται ένας αισθητήρας μέτρησης της περιμέτρου των δέντρων με την χρήση rotary encoder. Έπειτα δημιουργείται ένας κόμβος βασισμένος στην τεχνολογία του NB-IoT με την χρήση ενός Arduino uno και του shield SIM7000E που ενθυλακώνει τις τεχνολογίες Cat-M/NB-IoT/GSM. Τέλος, δημιουργείται ένα σύστημα φόρτισης της μπαταρίας που διαχειρίζεται τόσο την ενέργεια που θα στέλνει στον κόμβο όσο και την ενέργεια που θα λαμβάνει από το φωτοβολταϊκό. Όλα αυτά με γνώμονα την χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση που μπορεί να επιτύχει ο κόμβος, το χαμηλό κόστος της κατασκευής και την δυνατότητα μιας τελικής open source κατασκευής για μελλοντικές εξελίξεις.

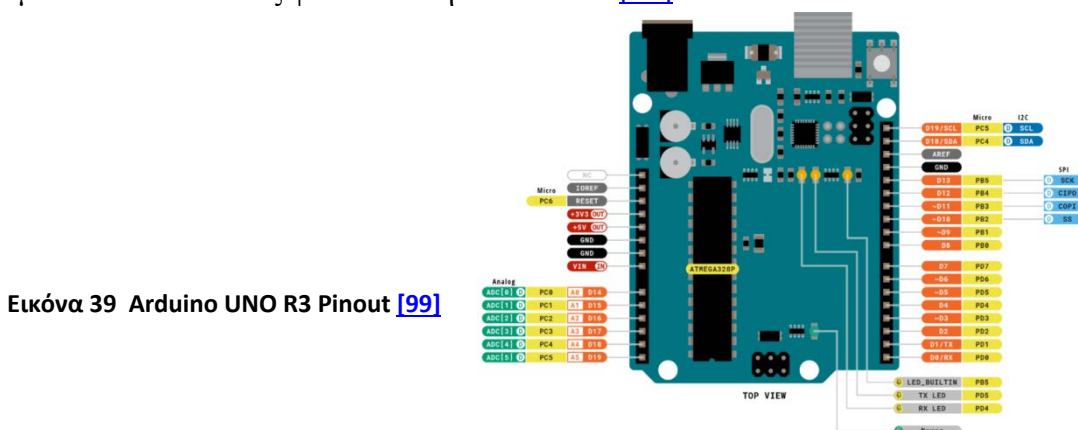
### 8.1 Κόμβος NB-IoT

Για την δημιουργία του κόμβου χρειάστηκε ένα Arduino uno, ένα shield Sim7000E, μια κάρτα sim και το λογισμικό που τα συνδέει για την άρτια επικοινωνία του κόμβου στο δίκτυο του NB-IoT.

#### Arduino Uno

Το αναπτυξιακό Arduino στην παρούσα εργασία αποτελεί τον κύριο πυρήνα διαχείρισης της πληροφορίας τόσο του αισθητήρα μέτρησης (rotary encoder) όσο και του NB-IoT κόμβου. Συμβάλει στην μέτρηση της διαμέτρου του δέντρου ως ένας μικροελεγκτής που ανιχνεύει τότε αυξάνεται κάθε φορά το δέντρο με την βοήθεια του rotary encoder. Ταυτόχρονα, στέλνει μέσω Tx, Rx εντολές στο shield SIM7000E για να ενεργοποιηθεί, να συνδεθεί με ένα δίκτυο και να στείλει δεδομένα απομακρυσμένα μέσω της τεχνολογίας NB-IoT.

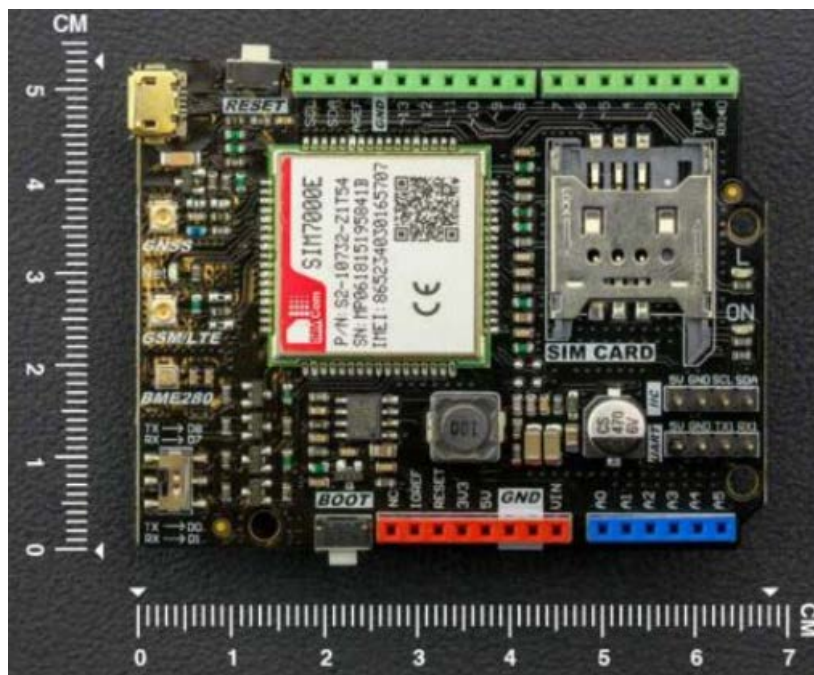
Το Arduino Uno επιλέχθηκε σκόπιμα επειδή είναι ένα από τα πιο δημοφιλή αναπτυξιακά στην κατηγορία των μικροελεγκτών για την δημιουργία open source εφαρμογών. Μπορεί να προγραμματιστεί πολύ γρήγορα και πάνω σε αυτό έχουν δημιουργηθεί πολλές βιβλιοθήκες που μπορούμε να αξιοποιήσουμε δωρεάν. Βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega328P με αρχιτεκτονική RISC 8 bit και clock στα 16.000 KHz. Ενσωματώνει μία SRAM στα 2KB, μια Electrically erom στα 1KB και τέλος μια internal flash στα 32KB. Για την επικοινωνία του αναπτυξιακού με τον υπολογιστή έχουμε ένα Type B 2.0 female USB τροφοδοτώντας το αναπτυξιακό με 5V. Το Arduino Uno Rev3 μπορεί να λειτουργήσει και αυτόνομα αφού έχει και ένα power jack που δέχεται τάση εισόδου 7-12V. Η κατανάλωση του αναπτυξιακού σε πλήρης λειτουργία φτάνει και τα 41mA. Τα I/O που διαθέτει είναι 6 Analog Inputs, 8 Digital Inputs/Outputs και 6 Digital Inputs/Outputs που χρησιμοποιούνται και για PWM. Επίσης έχει ειδικά Pins για χρήση Analog to Digital converter και επικοινωνία με SPI και I2C όπως φαίνεται στην εικόνα 38. [99]



Εικόνα 39 Arduino UNO R3 Pinout [99]

## **Shield SIM7000E**

Το SIM7000E είναι ένα shield πλήρης συμβατότητας με το Arduino Uno Rev3 και αποτελεί το σύστημα μεταφοράς δεδομένων από το Arduino Uno σε έναν Server μέσω 3<sup>ov</sup> διαφορετικών τεχνολογιών. Επίσης ανήκει στα open source αναπτυξιακά, οπότε επιτυγχάνεται και ο σκοπός της διπλωματικής. Οι τεχνολογίες που ενθυλακώνει είναι το LTE-FDD , το GPRS/EDGE σε SMT mode, δηλαδή σύνδεση σε κυψελωτά δίκτυα με LTE CAT-M1 σχεδιασμένο ειδικά για IoT εφαρμογές και τέλος το NB-IoT. Επιπλέον, υποστηρίζει τα HTTP ,TCP,UDP πρωτόκολλα επικοινωνίας και τα TLS/ /DTLS πρωτόκολλα επικοινωνίας με ειδικές δικλείδες ασφαλείας. Κάποια χαρακτηριστικά που διαθέτει είναι η υποστήριξη πρωτοκόλλου TCP/IP, η δικτύωση με τεχνολογία PPP, δηλαδή point to point protocol, η αποστολή SMS και Email και η διασύνδεση του με VoLTE και FOTA. Περιλαμβάνει το ίδιο πλήθος pins για I/O με το Arduino Uno Rev3 και έχει ακόμα micro B usb για σύνδεση με υπολογιστή ώστε να γίνει Firmware update ή για να προγραμματιστεί μέσω AT commands με κάποια εφαρμογή. Τροφοδοτείται απευθείας από το Arduino Uno Rev3 χρησιμοποιώντας απαραίτητα εξωτερική τάση με power jack στα 12V. Έχει κατανάλωση 11mA όταν δεν είναι συνδεδεμένο σε κάποιο δίκτυο και 1mA όταν βρίσκεται σε deep sleep. Στην συσκευασία συμπεριλαμβάνεται μία κεραία 2db και μια κεραία για GNSS που συνδέονται μέσω SMA στο board. [\[100\]](#) [\[101\]](#)



Εικόνα 40 SIM7000E Pinout [\[100\]](#)

## **SIM**

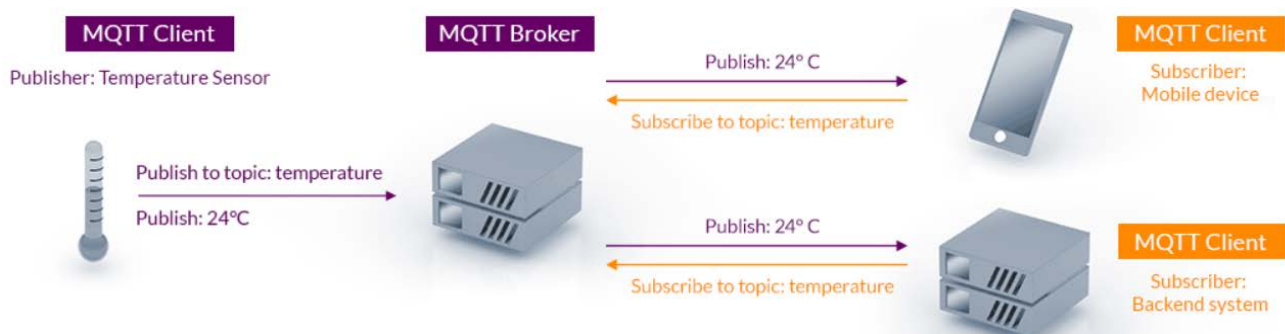
Το τελευταίο κομμάτι για την υλοποίηση του κόμβου πριν από οποιοδήποτε προγραμματισμό είναι η εισαγωγή μιας κάρτας SIM στο shield. Κάθε κάρτα έχει διαφορετικό πάροχο και συνδέεται σε

διαφορετικά δίκτυα. Η κάρτα που τοποθετήθηκε ήταν συμβατή με την εταιρεία της Emnify και επιλέχθηκε πάροχος επικοινωνίας η Vodafone για μετάδοση πακέτων στο δίκτυο NB-IoT.

## 8.2 Εργαλεία για την δημιουργία κόμβου

### MQTT BROKER

Όπως είδαμε και στην δομή της τεχνολογίας του IoT, χρειαζόμαστε ένα ενδιάμεσο λογισμικό “Middleware Layer” για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διάφορων συσκευών. Η ανάγκη για ένα ελαφρύ πρωτόκολλο αμφίδρομης επικοινωνίας publish/subscribe στον κλάδο του IoT και η εξασφάλιση της ασφάλειας στην μεταφορά των πακέτων έφεραν την IBM στην δημιουργία του MQTT. Αυτό ορίζεται ως Message queuing Telemetry Transport και θα το χρησιμοποιήσουμε ως middleware layer μιας και χρειάζεται ελάχιστους πόρους για την χρήση του και παρέχει τις λειτουργίες που απαιτούνται για την εκτέλεση της συγκεκριμένης εργασίας. [102]



Εικόνα 41 MQTT αρχιτεκτονική [102]

Η δομή του Public/subscribe βασίζεται στην δήλωση ενδιαφέροντος για λήψη ή μετάδοση πακέτων σε ένα topic. Ένα στοιχείο όταν ζητάει να λάβει πακέτα δεδομένων κάνει subscription στον MQTT Broker και ονομάζεται subscriber, ενώ όταν ένα στοιχείο θέλει να στείλει πακέτα κάνει publishing στον MQTT Broker και ονομάζεται publishers. Για να γίνει επικοινωνία μιας συσκευής με τον MQTT πρέπει η συσκευή να γνωρίζει: ένα topic, το URL και την πόρτα του broker. Αναλυτικότερα η συσκευή κάνει αίτημα με publishing και δηλώνει διαθεσιμότητα στον broker ότι θέλει να στείλει, ο broker αποφασίζει που θα στείλει αυτό το αίτημα σε ποια έξοδο και τότε θα το στείλει. Ομοίως όταν μια συσκευή θέλει να λάβει δεδομένα κάνει subscription στον broker και γίνονται οι ίδιες ενέργειες. Σε κάθε περίπτωση η συσκευή που συνδέεται στον broker πρέπει να γνωρίζει το topic που έχει δημιουργηθεί στον broker. Επιπλέον χαρακτηριστικό του MQTT πρωτοκόλλου είναι η ενθυλάκωση της τεχνολογίας end-to-end Quality of Service, έτσι διασφαλίζεται η χαμηλή απώλεια πακέτων και διασφάλιση υψηλής ποιότητας της επικοινωνίας. Με την επιλογή QoS 0/1/2 μπορούμε να καθορίσουμε πόσες φορές θα στέλνεται ένα μήνυμα στον Broker για επιβεβαίωση ότι το μήνυμα στάλθηκε σωστά. Η άμεση εξυπηρέτηση των αιτημάτων από τον broker, η τεχνολογία end-to-end Quality of Service και η ταχύτητα λήψης και μετάδοσης δημιουργούν ένα σύστημα ζωντανής μετάδοσης των δεδομένων δηλαδή έχουμε ένα RTOS (real time operating system). [103]

## Eclipse Mosquitto

Για την υλοποίηση της εργασίας επιλέχθηκε σκόπιμα το Mosquitto που είναι ένας open source MQTT Broker ώστε το συνολικό σύστημα να είναι ανοικτό σε παραμετροποιήσεις και μελλοντικές βελτιστοποιήσεις. Επιπλέον δεν χρειάζεται πολλούς πόρους για να εδραιωθεί μια επικοινωνία σε αυτόν καθιστώντας τον ιδανικό για low power εφαρμογές.



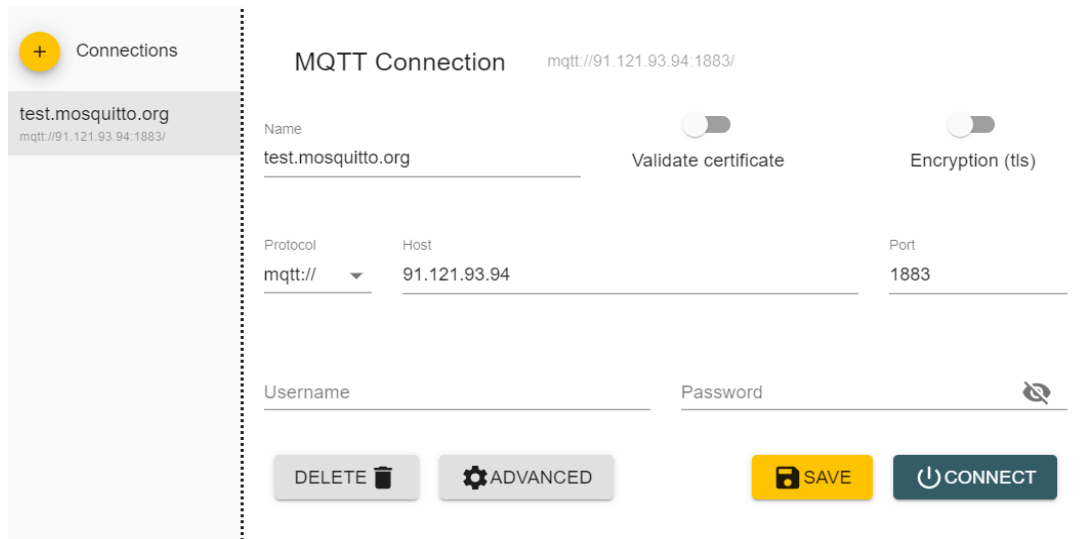
Εικόνα 42 Λογότυπο Eclipse Mosquitto [105]

## MQTT Explorer

Για να επικοινωνήσουμε με τον broker του mosquitto, να δημιουργήσουμε ένα topic και να συνδέσουμε εκεί τις συσκευές μας χρησιμοποιήθηκε μια εφαρμογή που ονομάζεται MQTT Explorer. Είναι ένα γραφικό περιβάλλον με τον ρόλο του client όπου δημιουργούμε ένα topic στον broker του Mosquitto. Με αυτό μπορούμε να κάνουμε τους απαραίτητους ελέγχους και δοκιμές για να δούμε αν όλα λειτουργούν άρτια, δηλαδή προσομοιώνεται η σύνδεση του κόμβου με τον broker. [104]

Κατεβάζουμε από το Site του MQTT Explorer την νεότερη έκδοση για το λειτουργικό μας σύστημα. Ανοίγοντας την εφαρμογή αναδύεται ένα παράθυρο στην οθόνη, εκεί κάνουμε τις ακόλουθες ρυθμίσεις:

**Name:** test.mosquitto.org // Τοποθετείται το όνομα του Broker που θα χρησιμοποιηθεί.  
**Protocol:** mqtt:// // Επιλέγουμε την τεχνολογία επικοινωνίας μετάδοσης των πακέτων.  
**Host:** 91.121.93.94 // Γράφουμε τη διεύθυνση IP του Mosquitto broker.  
**Port:** 1883 // Επιλέγεται σαν default port η 1883.



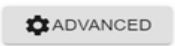
Εικόνα 43 MQTT Explorer δημιουργία σύνδεσης με Broker [104]

Για να βρεθεί η IP του Mosquitto broker ανοίγουμε cmd και κάνουμε nslookup την διεύθυνση test.mosquitto.org

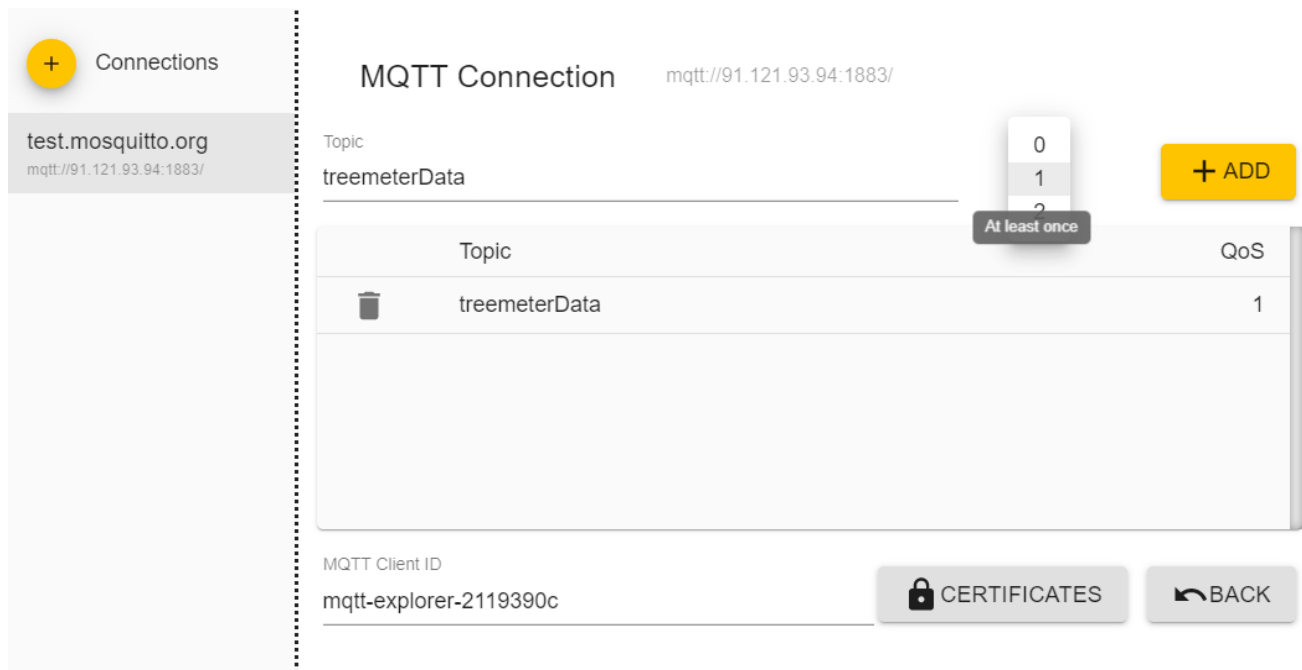
```
C:\Users\eeean>nslookup test.mosquitto.org
Server: speedport.ip
Address: fe80::1

Non-authoritative answer:
Name:     test.mosquitto.org
Addresses: 2001:41d0:1:925e::1
          91.121.93.94
```


Εικόνα 44 Εύρεση IP με την nslookup

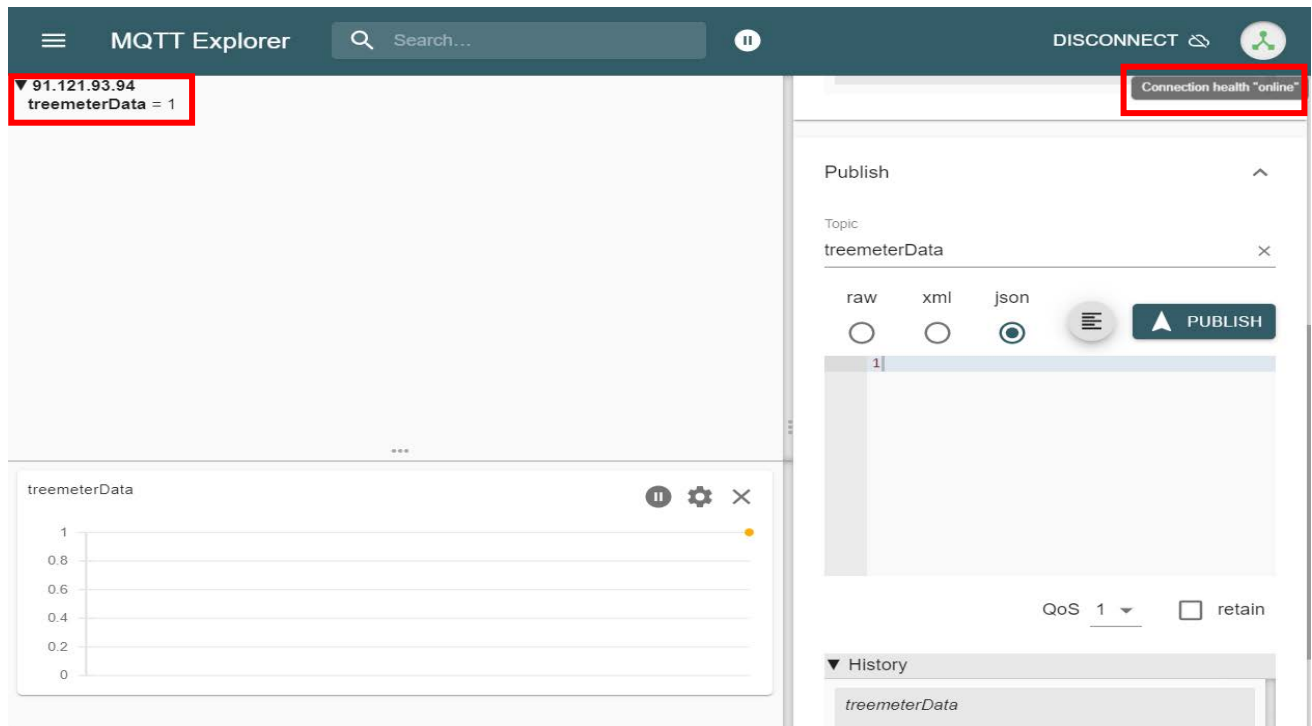
Έπειτα πατάμε  και δημιουργούμε ένα topic με όνομα treemeterData και QoS 1 , δηλαδή να στέλνει τουλάχιστον 1 μήνυμα στον broker για να επιβεβαιώσει ότι το μήνυμα που έλαβε ο broker είναι σωστό.





Εικόνα 45 Δημιουργία topic στον Mosquitto broker μέσα από την εφαρμογή MQTT Explorer

Αφού κάνουμε Back και Save για να επιβεβαιώσουμε ότι όλα είναι σωστά, βλέπουμε πάνω δεξιά το εικονίδιο  να είναι πράσινο και γράφει “online”. Σημαίνει ότι σαν client συνδέθηκε στην IP που του δώσαμε, βρήκε τον Mosquitto broker και έχει ενημερώσει την πόρτα 1883 για έναρξη αμφίδρομης επικοινωνίας. Για δοκιμή στέλνουμε την τιμή 1(publish) στο topic treemeterData και ο broker μας απαντάει treemeterData=1, αυτό σημαίνει ότι το topic βρέθηκε και είναι Online, επίσης υπάρχει ένα γράφημα παρακάτω που δείχνει κάθε φορά την τιμή που στέλνει ο broker.



Εικόνα 46 Έλεγχος σωστής λειτουργίας του MQTT Explorer

## Node-Red



Εικόνα 47 Λογότυπο Node-red

Για την οπτικοποίηση των δεδομένων δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί το MQTT Explorer γιατί είναι ένας client ο οποίος κάνει publish/subscribe με βάση αυτά που του γράφουμε στο text box, η διασύνδεση του με τον υπόλοιπο κόμβο δεν ήταν δυνατή. Αντί αυτού, χρησιμοποιήθηκε το Node-Red που είναι μια πλατφόρμα που χρησιμοποιείται ειδικά για συνδέσεις με κόμβους, επικοινωνία με αισθητήρες και γενικότερα για IoT εφαρμογές. Είναι ένα γραφικό περιβάλλον που είναι εύκολα επεκτάσιμο, ελαφρύ και βασισμένο στο Node.js .

Ύστερα από την λήψη του Node-red, ακολουθούμε τις οδηγίες που έχει το επίσημο site για να εδραιώσουμε το Node-red στον υπολογιστή μας. Ανοίγουμε CMD και πληκτρολογούμε:

```
node --version && npm --version
```

```
v18.15.0  
9.5.0
```

```
Node npm install -g --unsafe-perm node-red
```

```
progress [=====] 96%
```

Όταν ολοκληρωθεί η λήψη των πακέτων, ανοίγουμε το Node-Red με την εντολή:

```
node-red
```

```
node-red
C:\Users\eeean>node-red
11 Jan 11:17:01 - [info]

Welcome to Node-RED
=====

11 Jan 11:17:01 - [info] Node-RED version: v3.1.3
11 Jan 11:17:01 - [info] Node.js version: v20.10.0
11 Jan 11:17:01 - [info] Windows_NT 10.0.22631 x64 LE
11 Jan 11:17:02 - [info] Loading palette nodes
11 Jan 11:17:02 - [info] Dashboard version 1.0.2 started at /ui
11 Jan 11:17:03 - [info] Settings file : C:\Users\eeean\.node-red\settings.js
11 Jan 11:17:03 - [info] Context store : 'default' [module=memory]
11 Jan 11:17:03 - [info] User directory : \Users\eeean\.node-red
11 Jan 11:17:03 - [warn] Projects disabled : editorTheme.projects.enabled=false
11 Jan 11:17:03 - [info] Flows file : \Users\eeean\.node-red\flows.json
11 Jan 11:17:03 - [info] Server now running at http://127.0.0.1:1880/
11 Jan 11:17:03 - [warn]

-----
Your flow credentials file is encrypted using a system-generated key.

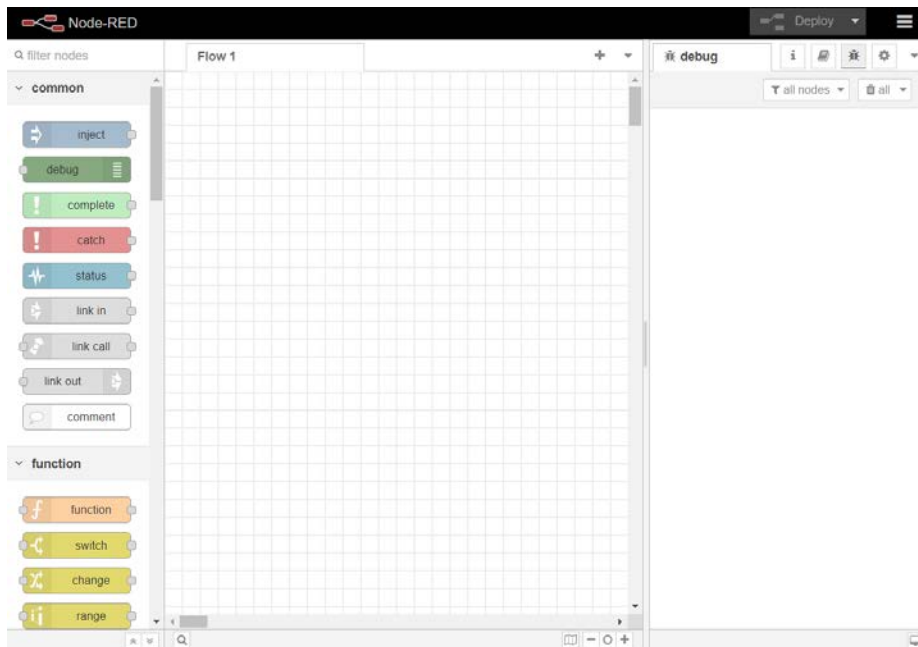
If the system-generated key is lost for any reason, your credentials
file will not be recoverable, you will have to delete it and re-enter
your credentials.

You should set your own key using the 'credentialSecret' option in
your settings file. Node-RED will then re-encrypt your credentials
file using your chosen key the next time you deploy a change.
-----

11 Jan 11:17:03 - [info] Starting flows
11 Jan 11:17:03 - [info] Started flows
```

Εικόνα 48 CMD Node-red

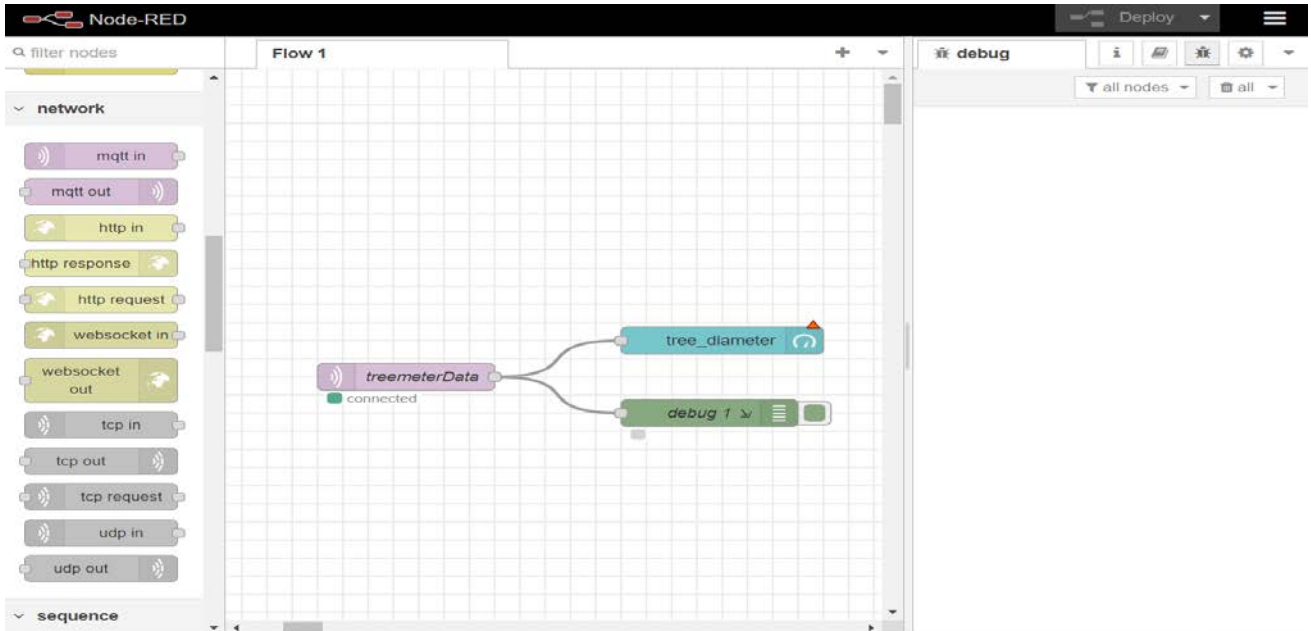
Βλέπουμε ότι έχει φτιάξει έναν Server σε local host με socket <http://127.0.0.1:1880/>  
Ανοίγουμε την διεύθυνση στον browser και εμφανίζεται το GUI του Node-red.



Εικόνα 49 GUI του Node-red [109]

Για να δημιουργήσουμε μια σύνδεση με έναν MQTT broker χρησιμοποιούμε από τα template το MQTT IN node. Ακόμα, χρειαζόμαστε ένα γραφικό παράθυρο που θα εμφανίζονται οι μετρήσεις από τον κόμβο για αυτό και χρησιμοποιούμε από τα templates\_dashboard-ενί το GAUGE node .

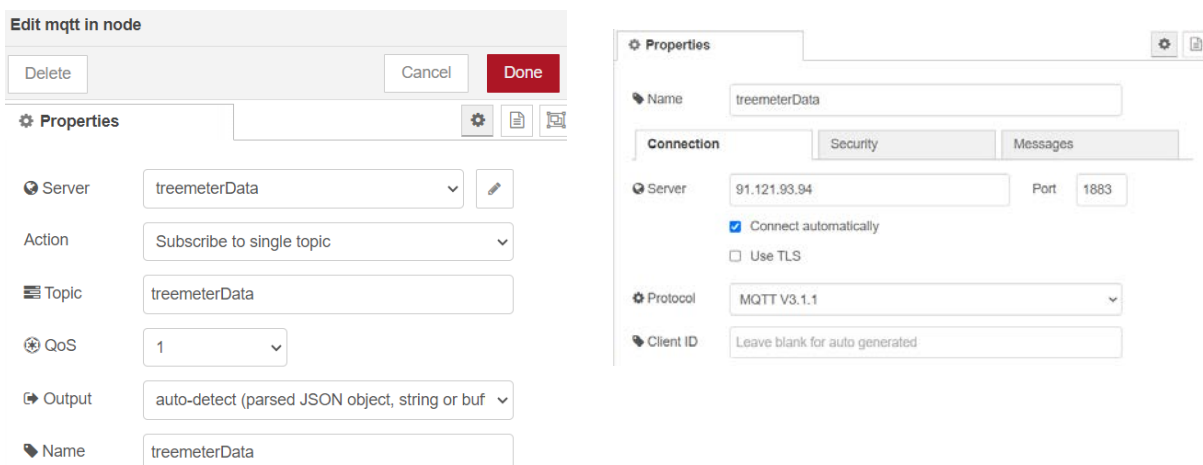
Επίσης και ένα debug node που θα εμφανίζει κάθε φορά την τιμή που έλαβε από τον broker. Ονομάζουμε τα labels όπως κρίνουμε κατάλληλα και έχουμε το τελικό αποτέλεσμα.



Εικόνα 50 Δημιουργία απαραίτητων Node για επικοινωνία με broker

Στην συνέχεια με double-click στο  εμφανίζονται τα ακόλουθα παράθυρα όπου και γράφουμε το topic, την διεύθυνση IP και το Port του broker.

Κάνοντας της κατάλληλες παραμετροποιήσεις καταλήγουμε στα παρακάτω:



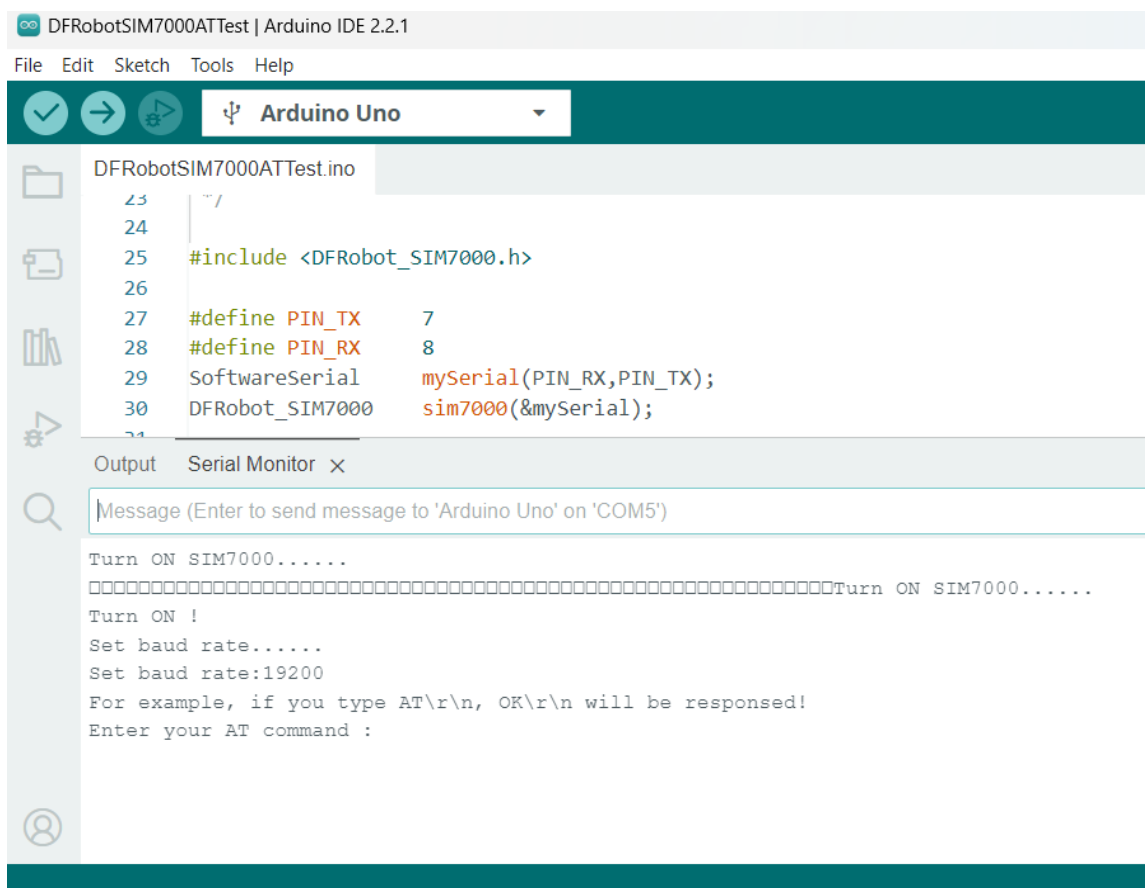
Εικόνα 51 Ρύθμιση MQTT In node

Όταν ολοκληρωθούν οι αλλαγές πατάμε **Done** και **Deploy**, αν όλα είναι σωστά τότε κάτω από το εικονίδιο του treemeterData θα εμφανίζεται η ένδειξη **connected**. Δεν κλείνουμε τον browser και ελέγχουμε το debug window στα αριστερά για νέες μετρήσεις. Έτσι μεταβαίνουμε στην επόμενη ενότητα που είναι η αποστολή των δεδομένων στον broker από τον κόμβο.

### 8.3 Προγραμματισμός κόμβου NB-IoT

Για τον προγραμματισμό του κόμβου χρησιμοποιείται το περιβάλλον Arduino IDE. Τοποθετούμε την Sim στο Shield και το shield πάνω στο Arduino Uno rev3. Συνδέουμε με USB type B, ανοίγουμε το IDE στον υπολογιστή και επιλέγουμε από τα παραδείγματα της βιβλιοθήκης DFRobot το ATTest. Με αυτή την βιβλιοθήκη επικοινωνούμε σειριακά με το SIM7000E μέσω του Arduino IDE. Για τον προγραμματισμό του shield ώστε να συνδεθεί σε δίκτυο, να κάνει publish σε ένα topic και να αποστείλει μία τιμή πρέπει να προγραμματιστεί με έναν ειδικό τρόπο όπως συμβουλεύει το datasheet του SIM7000E που είναι η χρήση AT commands.

Κάνουμε Upload το sketch και εμφανίζουμε το serial monitor



Εικόνα 52 Upload ATTest sketch στο Arduino Uno

Αυτό που πρέπει να κάνουμε είναι να βάλουμε το SIM7000E σε κατάσταση ανίχνευσης δικτύων, να επιλέξουμε έναν πάροχο και να συνδεθεί στο δίκτυο του NB-IoT. Έπειτα να συνδεθεί σε έναν MQTT broker στο topic που δημιουργήσαμε και να αποστείλει τα δεδομένα του αισθητήρα εκεί. Η σύνταξη των εντολών στο ATcomands ακολουθεί την εξής μορφή:

όπου «X» είναι κάθε φορά μια εντολή από το Datasheet.

AT+«X» ?

Επιστρέφει τα χαρακτηριστικά που του έχουν ήδη αποδοθεί από την εκάστοτε εντολή «X».

AT+ «X» =?

Επιστρέφει τα διαθέσιμα χαρακτηριστικά που μπορεί να αποδώσει η εκάστοτε εντολή «X».

AT+ «X» = <n>

Εκτελεί την εντολή «X» με το χαρακτηριστικό n.

Οι εντολές που θα χρειαστούν για να δούμε ότι ο κόμβος έχει πρόσβαση σε δίκτυο είναι οι παρακάτω:

AT // Επιστρέφει αν το SIM7000E ανταποκρίνεται στα AT commands.

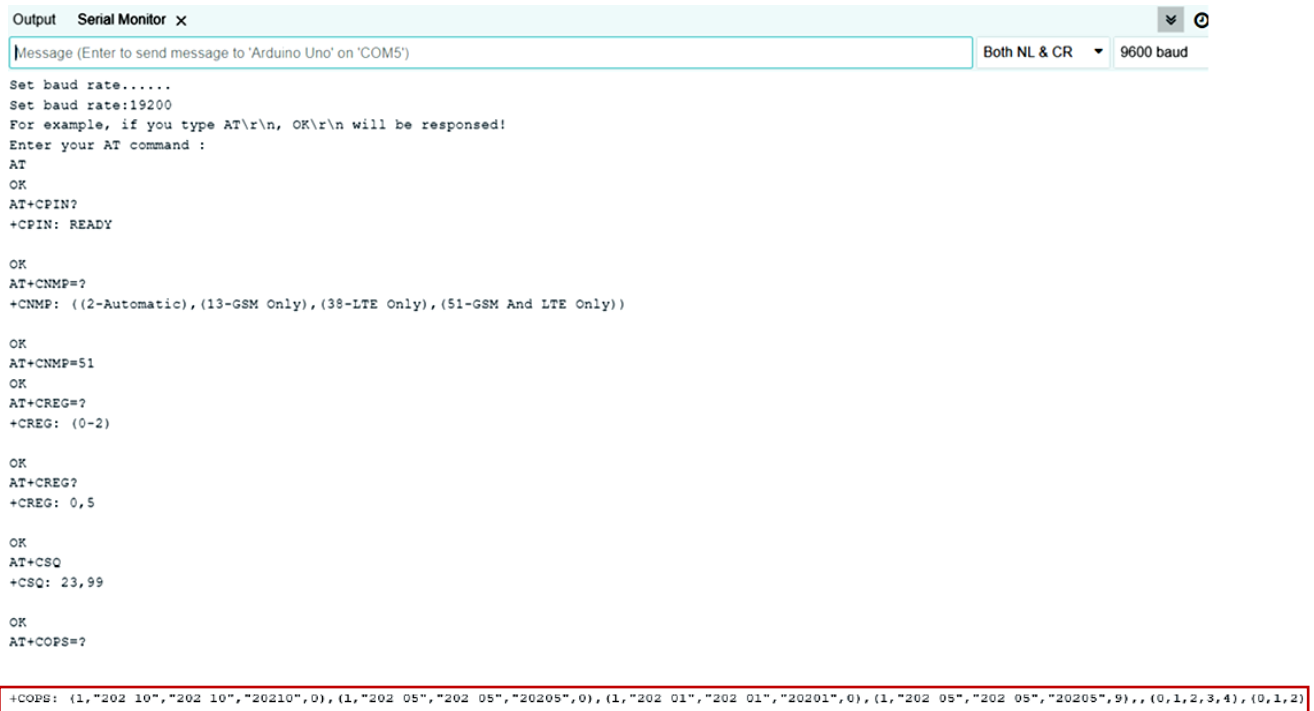
AT+CPIN // Επιστρέφει αν είναι κλειδωμένη η Sim.

AT+CREG // Επιστρέφει αν έχει κάνει εγγραφή σε κάποιο δίκτυο.

AT+CSQ // Επιστρέφει την ισχύ του σήματος για λήψη δικτύων.

AT+CNMP //Επιστρέφει 4 τεχνολογίες επικοινωνίας.

AT+COPS // Επιστρέφει έναν κατάλογο με παρόχους κινητής τηλεφωνίας που ανίχνευσε .



```
Output Serial Monitor x
Message (Enter to send message to 'Arduino Uno' on 'COM5') Both NL & CR 9600 baud
Set baud rate.....
Set baud rate:19200
For example, if you type AT\r\n, OK\r\n will be responded!
Enter your AT command :
AT
OK
AT+CPIN?
+CPIN: READY

OK
AT+CNMP=?
+CNMP: ((2-Automatic), (13-GSM Only), (39-LTE Only), (51-GSM And LTE Only))

OK
AT+CNMP=51
OK
AT+CREG=?
+CREG: (0-2)

OK
AT+CREG?
+CREG: 0,5

OK
AT+CSQ
+CSQ: 23,99

OK
AT+COPS=?
+COPS: (1,"202 10", "202 10", "20210",0), (1,"202 05", "202 05", "20205",0), (1,"202 01", "202 01", "20201",0), (1,"202 05", "202 05", "20205",9), (0,1,2,3,4), (0,1,2)
```

Εικόνα 53 Προγραμματισμός του SIM7000E μέσα από το Serial monitor

Το SIM7000E έχει απαντήσει στις εντολές που του στείλαμε και φαίνεται ότι η κάρτα Sim δεν χρειάζεται κάποιο κωδικό, έχει ήδη συνδεθεί σε ένα δίκτυο και κάνει roaming, το σήμα έχει ισχύ στα 23,99 και σύμφωνα με το datasheet ό,τι είναι από 2 έως 30 σημαίνει -110...-54 dBm . Τέλος παρατηρούμε ότι η AT+COPS επέστρεψε σαν αποτέλεσμα 4 δίκτυα εκ των οποίων ένα από αυτά είναι το NB-IoT. NB-IoT δίκτυα σύμφωνα με το datasheet είναι όσα έχουν “9” σαν τελευταία παράμετρο.

Πληκτρολογούμε :

AT+COPS=1,2,"20205",9 και μπαίνουμε στο δίκτυο του NB-IoT το οποίο ανήκει στην Vodafone μας και το “20205” είναι κωδικός που δηλώνει τον πάροχο Vodafone.

```
AT+COPS=1, 2, "20205", 9
OK
```

Από την στιγμή που έχει δηλωθεί ένας πάροχος επικοινωνίας και το SIM7000 έχει συνδεθεί σε αυτόν μπορούμε να απενεργοποιήσουμε και να ενεργοποιήσουμε το module χωρίς να χάσει τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις επικοινωνίας. Οπότε, όταν ενεργοποιηθεί ξανά οι εντολές που θα του δοθούν δεν θα είναι οι ίδιες αλλά θα είναι τέτοιες ώστε :

- Ενεργοποίησε τα πρωτόκολλα διαχείρισης δεδομένων (PDP) και Network Registration(NReg)
  - AT+CGACT=1
  - AT+CREG=1
  - AT+CGATT=1
- Ζήτησε από κάποιον πάροχο να σου δώσει πρόσβαση APN (Όνομα Σημείου Πρόσβασης) και IP για να συνδεθείς σε κάποιο δίκτυο.
  - AT+CGDCONT=1,"IP","emnify"
  - AT+CNACT=1,"em"

(Κάθε φορά που γράφεται μια εντολή και ακολουθεί «=1» σημαίνει ενεργοποίηση της εκάστοτε λειτουργίας)

Για να αποστείλουμε δεδομένα μέσω NB-IoT χρησιμοποιούμε την εταιρεία emnify ώστε να μας δώσει ένα Access Point Name και μία διεύθυνση IP από το πρωτόκολλο packet data. Οι εντολές που χρησιμοποιήθηκαν βρίσκονται στο site της emnify. [\[106\]](#)

```
U-Blox Cellular IoT Modules special AT configuration commands for APN and roaming

u-Blox supports the standard 3GPP command to set APNs via AT+CGDCONT

AT+CGDCONT=1,"IP","em",,
```

Εικόνα 54 Εντολές από το Site της Emnify [\[106\]](#)

```
Turn ON !
Set baud rate.....
Set baud rate:19200
For example, if you type AT\r\n, OK\r\n will be responded!
Enter your AT command :
AT+CGDCONT=1,"IP","emnify"
OK
AT+CNACT=1,"em"
OK

+APP PDP: ACTIVE
```

Εικόνα 55 Το Sim7000 πήρε IP και κάνει roaming

Επόμενο βήμα είναι να δώσουμε στο SIM7000E μία διεύθυνση IP που θα στέλνει τα δεδομένα και είναι εκείνη του Mosquitto broker. Επίσης πρέπει να δηλωθεί και η πόρτα που θα τα στέλνει αλλά και το topic που έχουμε δημιουργήσει. Σύμφωνα με το datasheet του SIM7000E για επικοινωνία με έναν MQTT broker χρειαζόμαστε τις παρακάτω εντολές:

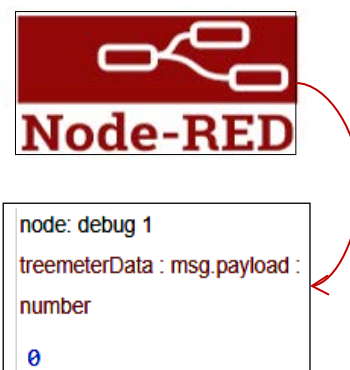
```
AT+SMCONF=URL,91.121.93.94,1883 //το URL του mosquitto broker, η πόρτα επικοινωνίας
AT+SMPUB=treemeterData,5,1,1 //όνομα του topic, μέγεθος μηνύματος, QoS 1, Hold server 1
```

Η αποστολή του μηνύματος γίνεται ακριβώς στην επόμενη γραμμή πληκτρολογώντας μια τιμή και πατώντας *ENTER*. Το μήνυμα πηγαίνει στον Mosquitto broker και έπειτα εμφανίζεται στο Node-red και στο MQTT Explorer. Δοκιμαστικά στάλθηκε η τιμή 0 από το πληκτρολόγιο μέσω του Serial monitor.

```
Sending: AT+SMCONF=URL,91.121.93.94,1883
Received: AT+SMCONF=URL,91.121.93.94,1883
OK

AT+SMPUB=treemeterData,5,1,1
>
Sending: 0.00
Received: 
Sending: AT+SMPUB=treemeterData,5,1,1
Received: 0.00
```

Εικόνα 56 Serial monitor επαλήθευση σωστής λειτουργίας



Εικόνα 57 Εμφάνιση μετρήσεων στο Node-red

Οπότε, δημιουργήθηκε ένας NB-IoT κόμβος ο οποίος μπορεί να αποστέλλει δεδομένα μέσω του Serial monitor. Όμως, για την κάλυψη των απαιτήσεων της εφαρμογής αυτό δεν είναι επαρκές, η μέτρηση πρέπει να γίνεται αυτόματα και στην συνέχεια να αποστέλλει τα δεδομένα χωρίς να χρειάζεται η πληκτρολόγηση τους. Άρα, να δημιουργηθεί ένα όργανο που θα μετράει την αύξηση της περιμέτρου του δέντρου και όλο το σύστημα να είναι πλήρως αυτοματοποιημένο.



## 8.4 Αισθητήρας μέτρησης

Για την δημιουργία του αισθητήριου οργάνου χρησιμοποιήθηκε ένα μεταλλικό σύρμα με περιέλιξη συνθετικού πλαστικού, μια πλαστική βάση για να τοποθετηθεί και ο rotary encoder. Ένα από τα κυριότερα προβλήματα που αντιμετωπίστηκε ήταν το πως θα μετράει ο αισθητήρας την περίμετρο του δέντρου με τεντωμένο το σύρμα χωρίς να κάνει καμπύλες. Η λύση έρχεται με την χρήση ενός επίπεδου μεταλλικού ελατηρίου και βασίζεται στην ιδέα του εργαλείου «μέτρο με επαναφορά». Επιλέχθηκε να τοποθετηθεί ένα ανοξείδωτο ελατήριο (δεν σκουριάζει) μιας και το EMS DRS26 έχει παρόμοια υλοποίηση. Το σύρμα τυλίγεται μαζί με το ελατήριο ώστε να παραμένει συνεχώς τεντωμένο όσο ξετυλίγεται, στις εικόνες φαίνεται η υλοποίηση του EMS DRS26 και παρακάτω η αυτοσχέδια κατασκευή που υλοποιήθηκε . [\[19\]](#)



Εικόνα 58 Εσωτερική διάταξη του EMS DRS26 [\[19\]](#)



Εικόνα 59 Ελατήριο που χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή [\[107\]](#)

Για την δημιουργία σταθερών ενώσεων τόσο στα καλώδια όσο και μεταξύ του σύρματος και του μεταλλικού ελατηρίου χρησιμοποιήθηκε κολλητήρι και καλά. Κολλήθηκε η μια άκρη του σύρματος στην άκρη του ελατηρίου και τοποθετήθηκε στην πλαστική βάση, κάθε φορά που το σύρμα ξετυλίγεται υπάρχει μια αντίστροφη δύναμη που το έλκει προς τα πίσω συνεχόμενα. Αυτό λύνει το πρόβλημα καμπύλωσης του σύρματος έτσι ώστε κάθε φορά να μετριέται η πραγματική τιμή της περιμέτρου του δέντρου.



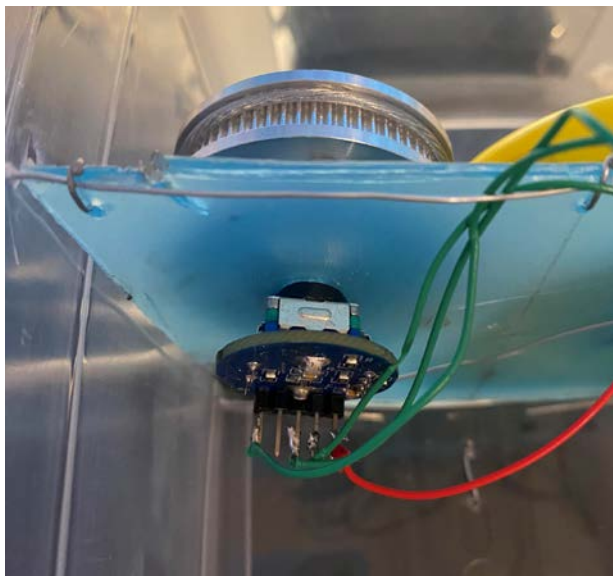
Εικόνα 60 Κατασκευή με ελατήριο για επαναφορά σύρματος

Στην περιστρεφόμενη κεφαλή του encoder τοποθετείται ένα ρουλεμάν με σφυχτήρες και «δόντια». Οι σφυχτήρες χρησιμοποιούνται ώστε να περιστρέφεται ο encoder μαζί με το ρουλεμάν χωρίς απόκλιση και τα «δόντια» ώστε το σύρμα να παρουσιάζει μεγάλη τριβή στο ρουλεμάν για να το περιστρέψει. Η προέκταση του σύρματος που βγαίνει από την πλαστική βάση τοποθετείται με μία περιστροφή γύρω από το ρουλεμάν του encoder ώστε με κάθε ξετύλιγμα να περιστρέφεται ο encoder και να διαβάζεται η τρέχουσα τιμή.

Ένα πρόβλημα που αντιμετωπίστηκε είναι ότι το σύρμα παρουσίαζε μεγάλες τριβές επειδή δεν υπήρχε κάποιος οδηγός για να μην ακουμπάει στα τοιχώματα της υπόλοιπης κατασκευής. Γιαυτό μπήκαν ρουλεμάν που περιστρέφονται για να οδηγήσουν το σύρμα προς την περιφέρεια του δέντρου χωρίς τριβές. Το συνολικό μήκος του σύρματος είναι 1,70m και μπορεί να καταγράψει μετρήσεις με επιτυχία έως τα 1,5m. Δηλαδή για ένα δέντρο με μέγιστη περίμετρο 1.5m ή διάμετρο 47.74cm (Διάμετρος=περίμετρος /  $\pi$ ).



Εικόνα 61 Τελική κατασκευή αισθητήρα μέτρησης



Εικόνα 62 Η κάτω όψη του rotary encoder

Ο rotary encoder είναι ένας μηχανικός μηχανισμός που χρησιμοποιεί μικρές ηλεκτρικές επαφές που ανοίγουν και κλείνουν πολύ γρήγορα καθώς περιστρέφεται με επιτάχυνση. Κατά τη διάρκεια γρήγορης περιστροφής, αυτές οι επαφές μπορεί να μην είναι σταθερές, δημιουργώντας το φαινόμενο bounce, όπου οι τιμές εναλλάσσονται ανεπίτρεπτα γρήγορα μεταξύ των λογικών 0 και 1. Για τον προγραμματισμό του αναπτυξιακού ώστε να λαμβάνει μετρήσεις, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση `myEnc.read()` της βιβλιοθήκης `Encoder.h`. Η χρήση της προσφέρει γρήγορη ανταπόκριση του rotary encoder και ξεπερνάει το πρόβλημα με τον θόρυβο όταν το σύρμα ξετυλίγεται γρήγορα μιας και χρησιμοποιεί `debounce` μέθοδο αναγνώρισης θέσης του encoder. Ακολουθεί το πρόγραμμα που εμφανίζει κάθε φορά την νέα τιμή θέσης του encoder. Όταν περιστρέφεται αριστερόστροφα ο encoder, η μεταβλητή `newposition` αυξάνεται ενώ όταν περιστρέφεται δεξιόστροφα μειώνεται.

```
1
2 #include <Encoder.h>
3
4 Encoder myEnc(3, 6);
5
6 void setup() {
7   Serial.begin(9600);
8   Serial.println("Basic Encoder Test:");
9 }
10
11 void loop() {
12   long newPosition = myEnc.read();
13   Serial.println(newPosition);
14 }
15
```

Εικόνα 63 Κώδικας μέτρησης rotary steps

Η διαδικασία διεξαγωγής μετρήσεων έγινε σταθεροποιώντας την κατασκευή και τραβώντας το σύρμα επαναλαμβανόμενα από 0 έως 10cm. Όπως φαίνεται παρακάτω το σύρμα τοποθετήθηκε σε έναν σωλήνα σταθερού μήκους 10cm και επαναλαμβανόμενα συρόταν από 0 έως 10cm.



Εικόνα 64 Πλαστικός σωλήνας 10cm για την μέτρηση της ακρίβειας του rotary encoder

Πίνακας 7 Αποτελέσματα της μέτρησης των steps για 10 cm και 20cm

A/A Μετρήσεων	Rotary-Steps 0-10cm	Rotary-Steps 0-20cm
1 <sup>η</sup>	62	124
2 <sup>η</sup>	62	124
3 <sup>η</sup>	<b>61</b>	<b>125</b>
4 <sup>η</sup>	62	124
5 <sup>η</sup>	62	124
6 <sup>η</sup>	<b>63</b>	<b>123</b>
7 <sup>η</sup>	<b>63</b>	124
8 <sup>η</sup>	62	124
9 <sup>η</sup>	62	124
10 <sup>η</sup>	62	<b>123</b>

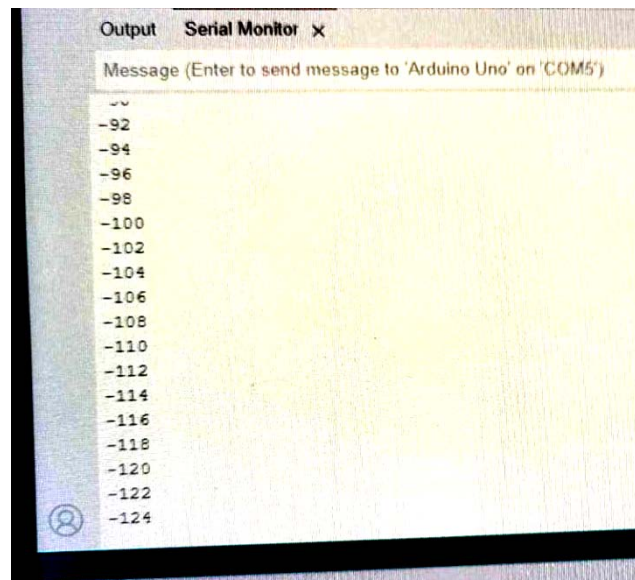
Επιλέχθηκε σκόπιμα η επαναλαμβανόμενη μέτρηση της ακρίβειας διότι οι μετρήσεις που έγιναν δεν είναι πλήρως ακριβής μιας και η κατασκευή αποτελείται από πλαστικά μέρη που καμπυλώνουν όταν δέχονται μεγάλη πίεση. Επίσης, υπάρχει το ανθρώπινο σφάλμα κατά την μέτρηση, αφότου κάποιες φορές ίσως το σύρμα να τραβήχτηκε ελάχιστα παραπάνω είτε λιγότερο. Ο μέσος όρος είναι 62.1 steps (~62) για 10cm με ποσοστό επαναληψιμότητας 70% (δηλαδή 7 στις 10 μετρήσει ήταν όμοιες) και 124 steps για 20cm με ποσοστό επαναληψιμότητας 70%. Παρατηρείται ότι το 124 είναι διπλάσιο του 62, άρα ακολουθεί γραμμική αύξηση ο αριθμός των steps και είναι ανάλογος του μήκους του σύρματος. Για να υπολογιστεί πόσα χιλιοστά είναι κάθε step αρκεί να διαιρεθεί το μήκος

προς τα συνολικά steps. Άρα έχουμε :  $10/62=0,16129\text{ cm}$  ή  $\sim 0,1613\text{cm}$  αυτό σημαίνει ότι μπορεί να μετρήσει *ένα step* κάθε  $1,613\text{ mm}$ .

Για την καλύτερη εμπειρία του χρήστη θα προστεθούν και στο Node-red 2 functions που θα υπολογίζουν ακριβώς το τι μετράει ο rotary encoder, δηλαδή θα αποτυπώνουν τα steps σε mm. Σε επόμενο κεφάλαιο υπάρχουν περαιτέρω σχόλια και παρατηρήσεις για την ακρίβεια της μέτρησης και τα στατιστικά αποτελέσματα πάνω σε δέντρα.

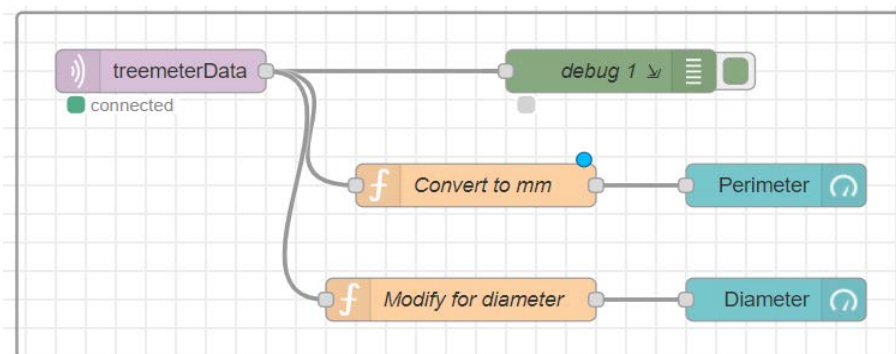


Εικόνα 65 Σύγκριση μέτρου με rotary encoder



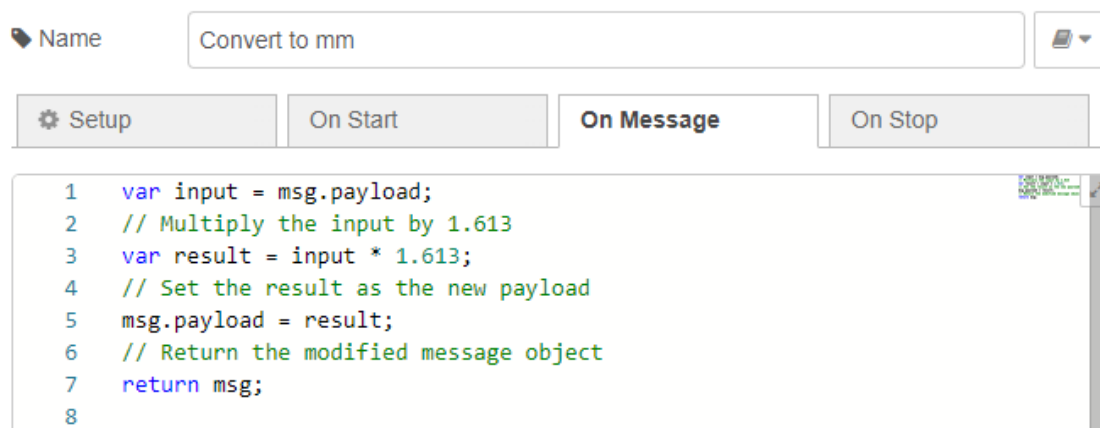
Εικόνα 66 Rotary steps για 20 cm

Γίνεται παραμετροποίηση του κόμβου του Node-red και δημιουργούνται 2 νέα functions



Εικόνα 67 Δημιουργία 2 functions στο node-red

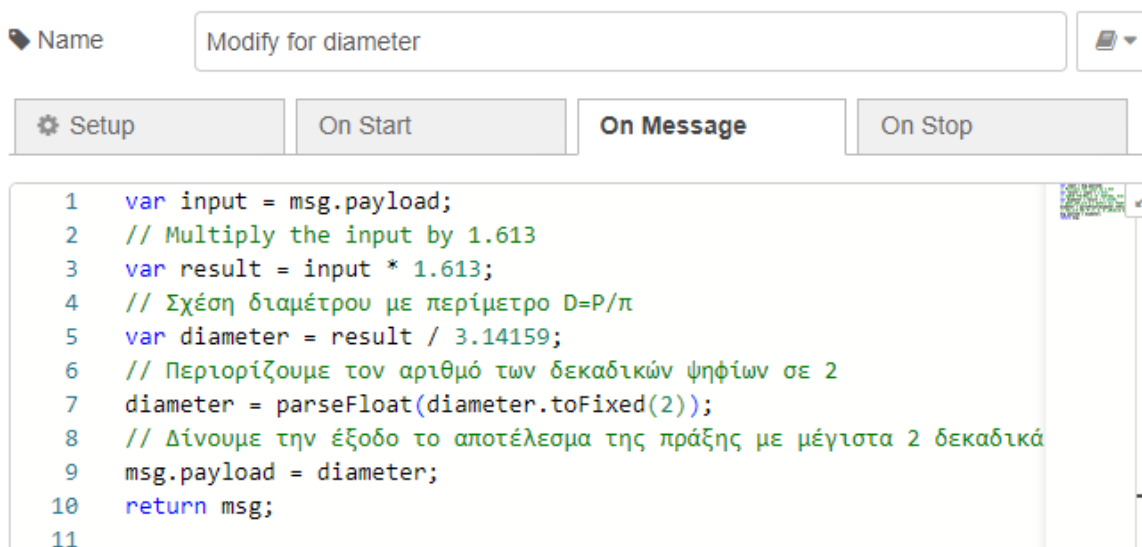
Η πρώτη ονομάζεται **Convert to mm** και είναι υπεύθυνη για να αλλάζει τα δεδομένα από rotary steps σε mm. Παίρνουμε την είσοδο και την πολλαπλασιάζουμε επί 1,613 mm. Άρα όταν ο rotary encoder θα έχει κάνει 62 steps εμείς περιμένουμε 10 cm έξοδο δηλαδή 100mm.



```
1 var input = msg.payload;
2 // Multiply the input by 1.613
3 var result = input * 1.613;
4 // Set the result as the new payload
5 msg.payload = result;
6 // Return the modified message object
7 return msg;
8
```

Εικόνα 68 Συνάρτηση Convert to mm

Η δεύτερη ονομάζεται **Modify for diameter**, χρησιμοποιείται η ίδια μέθοδος αλλά επιπλέον υπολογίζουμε και την διάμετρο του δέντρου μέσα από την περίμετρο με την σχέση  $D=P/\pi$ .

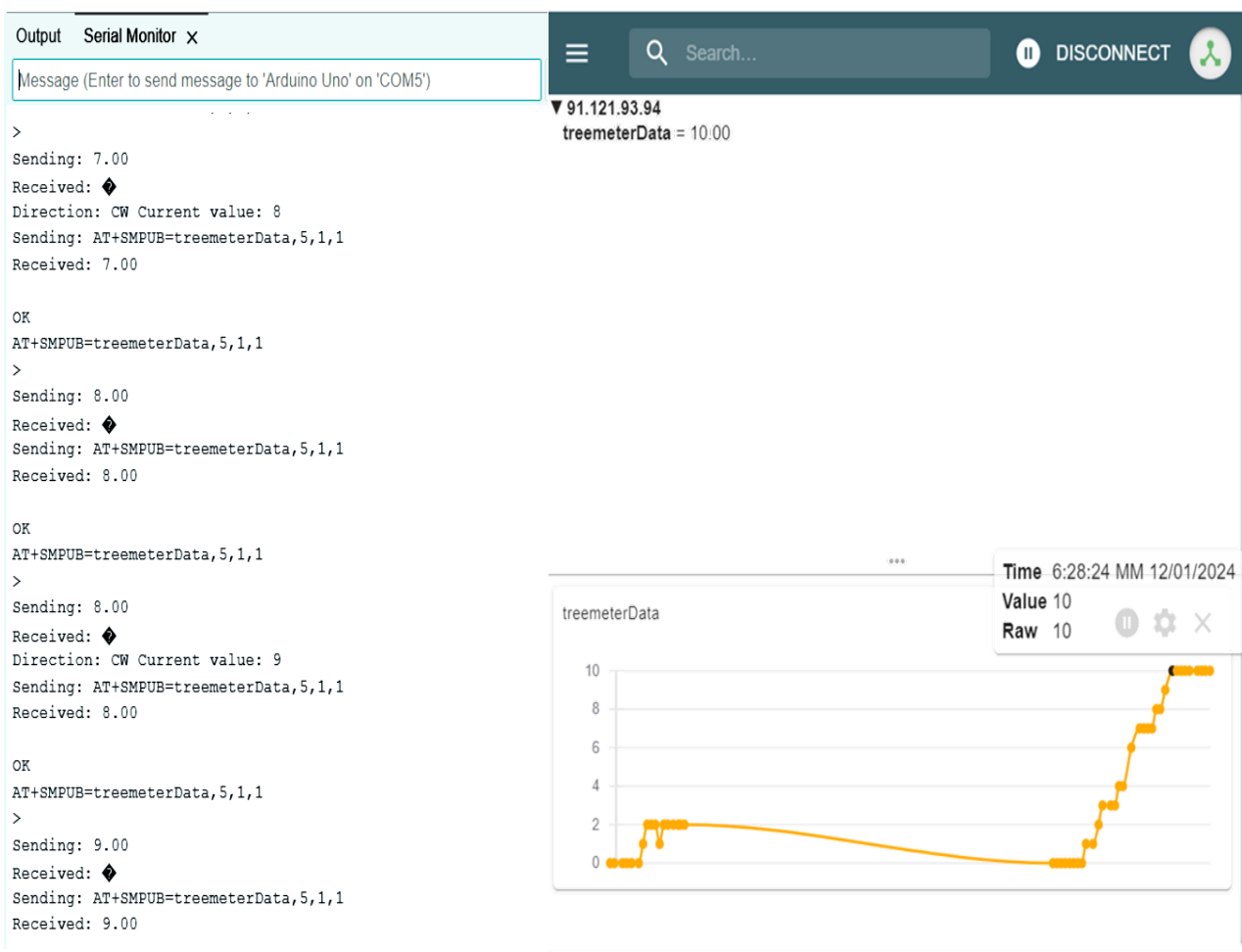


```
1 var input = msg.payload;
2 // Multiply the input by 1.613
3 var result = input * 1.613;
4 // Σχέση διαμέτρου με περίμετρο D=P/π
5 var diameter = result / 3.14159;
6 // Περιορίζουμε τον αριθμό των δεκαδικών ψηφίων σε 2
7 diameter = parseFloat(diameter.toFixed(2));
8 // Δίνουμε την έξοδο το αποτέλεσμα της πράξης με μέγιστα 2 δεκαδικά
9 msg.payload = diameter;
10 return msg;
11
```

Εικόνα 69 Συνάρτηση Modify for diameter

Προτού δημιουργηθεί ο τελικός κώδικας που ενθυλακώνει όλα τα παραπάνω με γνώμονα την χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση του αναπτυξιακού Arduino, δοκιμάζεται η λειτουργία του προγράμματος απλά προσθέτοντας τον κώδικα του rotary encoder στο παράδειγμα ATTest με τις σχετικές τροποποιήσεις ώστε να λειτουργεί σωστά. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται ο κώδικας.

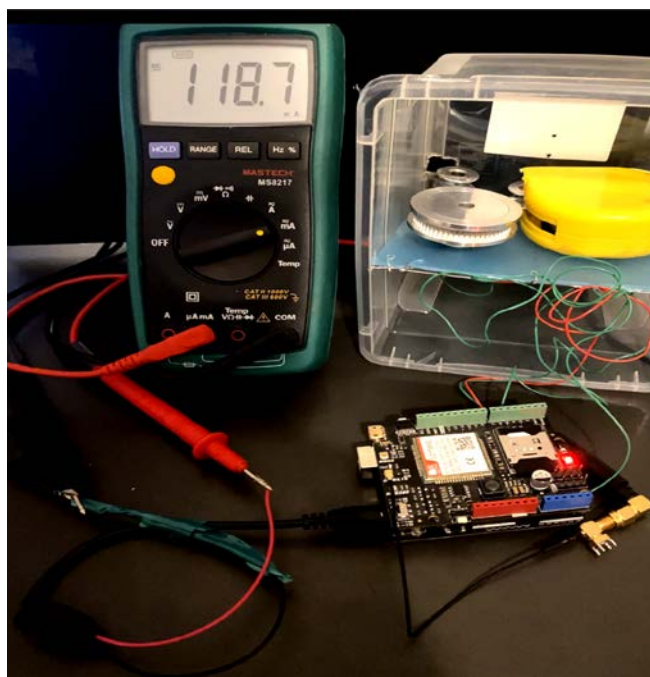
Χρησιμοποιώντας το MQTT Explorer βλέπουμε ότι οι τιμές που έχουν σταλθεί ανταποκρίνονται στις πραγματικές μετρήσεις από το Arduino IDE. Το μόνο πρόβλημα είναι ότι παρουσιάζονται ως rotary encoder steps και δεν είναι πραγματικές τιμές απόστασης περιμέτρου, θα μπορούσε να δημιουργηθεί νέος κώδικας για το Arduino Uno αλλά θα έπρεπε να αποστέλλει περισσότερα δεδομένα (Διάμετρος και περίμετρος) και επιπλέον να κάνει περισσότερες πράξεις δηλαδή μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Για αυτό και χρησιμοποιήθηκε το Node-red.



Εικόνα 70 Arduino serial Plot και MQTT Explorer

## 8.5 Προγραμματισμός κόμβου NB-IoT για δεντρομετρία

Για την λήψη μετρήσεων της διαμέτρου του δέντρου δημιουργήθηκε ένας νέος κώδικας που ενθυλακώνει όλα τα παραπάνω, επιπλέον η ενεργειακή κατανάλωση του αναπτυξιακού Arduino μειώνεται στο μέγιστο δυνατό με χρήση deep sleep και interrupt. Σε κάθε περίπτωση για να δούμε την κατανάλωση του Arduino Υπο μαζί με το shield SIM7000E χρησιμοποιήθηκε ένα πολύμετρο σε σειρά με το κύκλωμα για την μέτρηση της κατανάλωσης του κόμβου. Χωρίς την παραμετροποίηση του κώδικα ATTest η κατανάλωση ενέργειας είναι στα 118mA κινούμενη +/- 5mA συνεχόμενα και όταν επικοινωνεί με τον MQTT broker μπορεί να ξεπεράσει τα 190mA (190-205 mA) για κάποια δευτερόλεπτα.



Εικόνα 71 Μέτρηση κατανάλωσης κόμβου χωρίς αλλαγές στον κώδικα

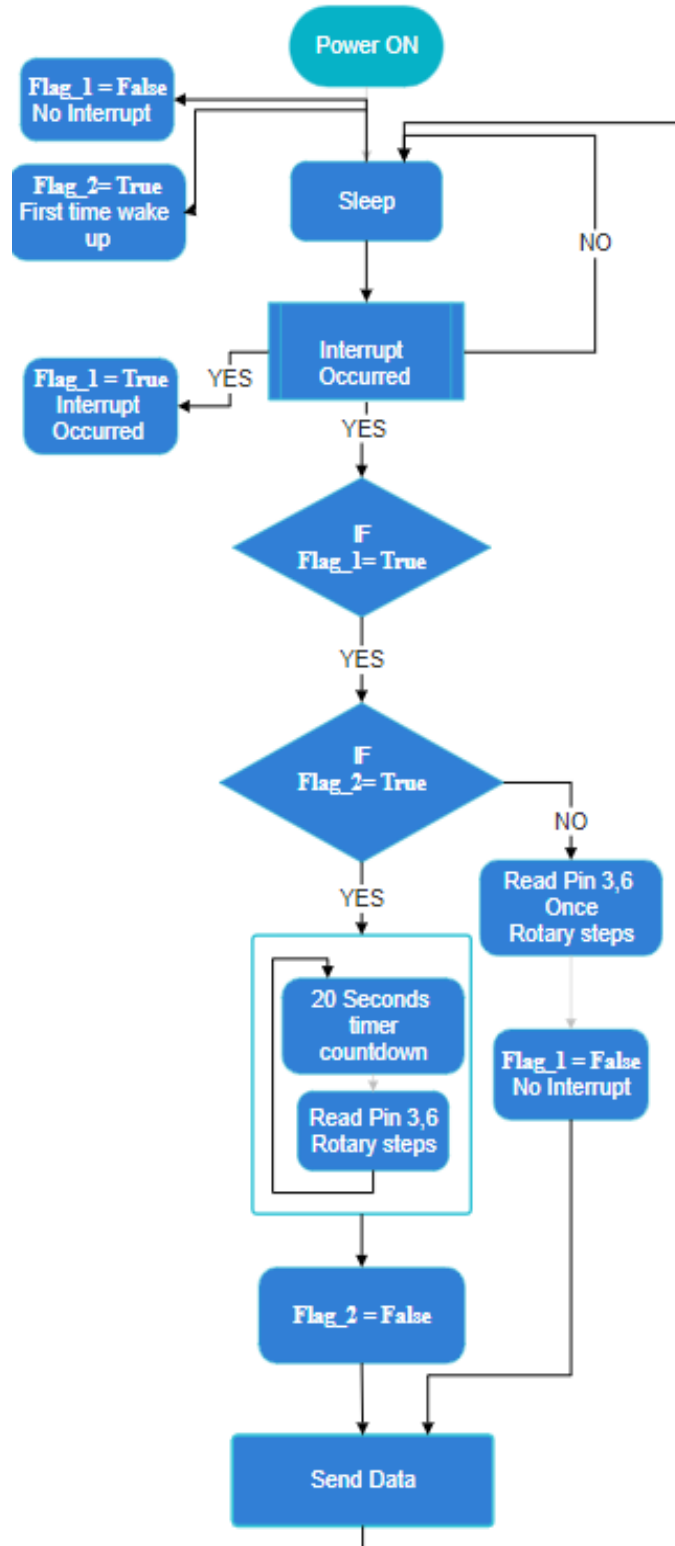
Η δομή του κώδικα σε τέτοιες περιπτώσεις μοιάζει να είναι χαοτική, η λύση σε πολύπλοκα προβλήματα είναι η απλοποίηση τους με τον κατακερματισμό του συνολικού προγράμματος σε μικρότερα κομμάτια κώδικα. Για την επίτευξη του στόχου χρειαζόμαστε ένα flowchart που θα δείχνει τα βήματα που πρέπει να εκτελεί ο κώδικας με ψευδογλώσσα ώστε να λειτουργήσει άρτια και αποδοτικά.

#### Η λειτουργία του δεντρόμετρου έχει ως εξής:

Όταν τροφοδοτηθεί το δεντρόμετρο θα παραμένει σε ύπνο μέχρι να τραβηχτεί το σύρμα του encoder. Σε περίπτωση που αλλάξει κατάσταση το pin του encoder, δηλαδή περιστράφηκε σημαίνει ότι θα εφαρμοστεί πάνω σε δέντρο. Για αυτό δίνεται λίγο χρόνο στον χρήστη (20 δευτερόλεπτα) για να το τοποθετήσει. Μετά το πέρας των 20 δευτερολέπτων θα αποστείλει μέσω MQTT στο Node-red την τιμή της περιμέτρου του δέντρου και έπειτα θα ξαναμπει σε ύπνο. Όταν ξανά αλλάξει κατάσταση το pin του encoder ενώ ήδη βρίσκεται πάνω σε δέντρο τότε, θα αποστείλει την μέτρηση κατευθείαν χωρίς να περιμένει κανένα δευτερόλεπτο και αμέσως μετά θα πέσει σε ύπνο. Δεν του δίνεται κάποιος χρόνος γιατί το δέντρο είναι απίθανο να αλλάξει ξανά περίμετρο εντός μερικών δευτερολέπτων. Η δομή αυτού του κώδικα επιλέχθηκε για να αντιμετωπίσει ένα πρόβλημα που συνέβαινε όταν γινόταν η τοποθέτηση του δεντρόμετρου. Αναλυτικότερα, όταν το σύρμα ξετυλιγόταν για να ολοκληρώσει ένα κύκλο γύρω από το δέντρο, ο κόμβος έστελνε στον MQTT τα πρώτα 3 steps. Οπότε δημιουργήθηκε κώδικας που παγιδεύει την συνεχόμενη μέτρηση της



περιμέτρου για 20", δηλαδή έως ότου να τοποθετηθεί στο δέντρο. Ακολουθεί το flowchart με την βασική ιδέα για την διαμόρφωση του κώδικα.



Εικόνα 72 Flowchart

Για να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος θα πρέπει ο κόμβος να πέφτει σε deep sleep και να ενεργοποιείται μόνο όταν νιώσει κάποια μέτρηση από τον rotary encoder. Επίσης θα πρέπει να κλείνει η σύνδεση του κόμβου με το δίκτυο και να απενεργοποιούνται τα πρωτόκολλα για

PDP και για NReg (network registration). Για να επιτευχθούν τα παραπάνω πρώτα ορίζουμε ένα interrupt που θα περιμένει κάποια αλλαγή στο pin 3 του rotary encoder στην συνέχεια χρησιμοποιούμε την “LowPower” βιβλιοθήκη για να βάλουμε τον μικροελεγκτή σε deep sleep. Αρχικά εγκαθιστούμε τις βιβλιοθήκες για τις εντολές και τις συναρτήσεις που θα χρησιμοποιηθούν. Εντάσσονται μέσα στο Main πρόγραμμα με το #include.

```

1 //author Valvis A. Date 27/1/2024
2 //version 3
3 //code https://github.com/eee-Andrew/Dendrometer\_NB-IoT
4
5 //Ορίζουμε ποιες βιβλιοθήκες θα χρησιμοποιηθούν
6 #include <DFRobot_SIM7000.h> //επικοινωνία με το SIM7000
7 #include <SoftwareSerial.h> //Δημιουργία TX,RX επικοινωνίας
8 #include <ATcommands.h> //Χρήση της συνάρτησης ATserialZero/one()
9 //το ATserialZero χρησιμοποιείται μόνο για αποστολή χαρακτήρων
10 //ATserialOne χρησιμοποιείται μόνο αποστολή αριθμών.
11 #include <LowPower.h> // Χρήση συνάρτησης powerdown()
12 #include <Encoder.h> // χρήση της συνάρτησης myEnc.read();

```

Εικόνα 73 Βιβλιοθήκες

Στην συνέχεια δηλώνονται τα digital pins του Rotary encoder στη συνάρτηση myEnc() και ορίζονται οι μεταβλητές encoderActiveFirstTime, encoderActive και startTime. Είναι flags που αλλάζει η λογική τους τιμή από true σε false και το αντίθετο. Χρησιμοποιούνται για να δείξουν πότε το πρόγραμμα θα τρέξει για πρώτη φορά, πότε ενεργοποιήθηκε μια εξωτερική διακοπή και πότε ξεκίνησε να μετράει ένας χρονοδιακόπτης. Έπειτα αρχικοποιούνται ποια ψηφιακά pins του Arduino Uno θα χρησιμοποιούνται για επικοινωνία Tx , Rx και UART μαζί με την αρχικοποίηση της μεταβλητής newPos που θα εμφανίζει την μέτρηση που πήρε το Arduino Uno από τον encoder. Στην συνέχεια, ορίζουμε μία μεταβλητή για την μέτρηση χρόνου currentTime και 2 μεταβλητές για την αποθήκευση των rotary encoder steps : value και storedValue.

```

13 //ορίζουμε τα digital pins που θα συνδεθεί ο encoder στο A.Uno
14 Encoder myEnc(3, 6); // αρχικοποίηση των digital pins 3 & 6
15 //δημιουργία Flag encoderActiveFirstTime κ δήλωση του ως αληθές για να
16 //χρησιμοποιηθεί σε συνθήκη if().
17 //flag που δηλώνει ότι ενεργοποιείται για πρώτη φορά ο encoder
18 volatile bool encoderActiveFirstTime = true;
19 //ομοίως με πριν, flag που δηλώνει ότι ο encoder περιστράφηκε
20 volatile bool encoderActive = false;
21 //Μεταβλητή που αποθηκεύεται η αρχή που θα ξεκινήσει ένα χρονόμετρο
22 unsigned long startTime;
23 //αποθήκευση της τιμής που διαβάζει η συνάρτηση myEnc.read(); στην newPos
24 long newPos;
25 //δήλωση του currentTime με την συνάρτηση millis() ώστε να μετράει χρόνο όταν
26 //ενεργοποιείται και να αποθηκεύεται ο χρόνος στην currentTime
27 unsigned long currentTime = millis();
28 //Αρχικοποίηση των Digital pins 7,8 ώστε να αποστέλνει τα TX
29 // και RX μηνύματα εκεί
30 #define PIN_TX 7
31 #define PIN_RX 8
32 SoftwareSerial mySerial(PIN_RX, PIN_TX);
33 //εδραίωση επικοινωνίας του SIM7000 με το mySerial
34 DFRobot_SIM7000 sim7000(&mySerial);
35 long value;
36 long storedValue;
37 void storeValue(long &value);

```

Εικόνα 74 Δήλωση μεταβλητών

Τέλος, με την mySerial και την SIM7000() συνάρτηση το Arduino Uno επικοινωνεί μέσω UART με το SIM7000E για να προβάλλονται τα μηνύματα στο Serial monitor του Arduino IDE και να προγραμματιστεί το SIM7000E με AT commands.

Η setup() συνάρτηση θα τρέξει για μία φορά όταν τροφοδοτηθεί το Arduino, είναι υπεύθυνη για να διαβάσει το Pin3 του rotary encoder και να περιμένει κάποιο interrupt από αυτό. Στην συνέχεια συγχρονίζονται οι επικοινωνίες με τα κατάλληλα baud rate και ενεργοποιείται μια συνάρτηση διακοπής (interrupt) η οποία κάθε φορά που θα ανιχνεύσει κάποια αλλαγή στο Pin3, μας οδηγεί στην συνάρτηση encoderISR(). Έπειτα, βάζουμε το Arduino σε deep sleep με την ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση που μπορεί να φτάσει, δηλαδή απενεργοποιούνται τα περιφερειακά που δεν χρησιμοποιούνται μαζί και ο analog to digital converter και η λειτουργία BOD που είναι μία ρουτίνα ελέγχου τάσης του μικροελεγκτή.

```

39 //Συνάρτηση αρχικοποίησης παραμέτρων
40 void setup() {
41 //ρύθμιση του baud rate της σειριακής επικοινωνίας για arduino
42 //ρύθμιση του baud rate της σειριακής επικοινωνίας για SIM7000
43 Serial.begin(9600);
44 mySerial.begin(19200);
45 //Περίμενε για μια εξωτερική αλλαγή κατάστασης που θα προέρχεται απο το Pin 3
46 //δηλαδή απο 0->1 ή 1->0 και τότε πήγαινε στην συνάρτηση encoderISR()
47 attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), encoderISR, CHANGE);
48 //βαθύς ύπνος κλείνοντας των A2D converter και την λειτουργία BOD_OFF
49 LowPower.powerDown(SLEEP_FOREVER, ADC_OFF, BOD_OFF); // Sleep until interrupt
50 }
51

```

Εικόνα 75 Εδραίωση επικοινωνίας με το Sim7000 και ενεργοποίηση interrupt για χαμηλή κατανάλωση

Ακολουθεί το κυρίως μέρος του προγράμματος που είναι η void loop().

Αρχικά για να τρέξει ο κώδικας στην Loop πρέπει να γίνει η μεταβλητή encoderActive=True και ταυτόχρονα η EncoderActiveFirstTime = True , αν γίνουν τότε ενεργοποιείται το SIM7000 και οι λειτουργίες του , δηλαδή το Arduino Uno αρχίζει να στέλνει μηνύματα tx,rx μέσα από την software serial και την DFRobot\_Sim7000”. Το SIM7000E αν απαντήσει τότε εμφανίζει “Turn ON!” αλλιώς αλλάζει baud rate και δοκιμάζει σε διαφορετικό έως ότου να συνδεθεί. Σε κάθε περίπτωση μη πετυχημένης σύνδεσης εμφανίζει “Failed to set baud rate” αλλιώς εμφανίζει “Set baud rate:19200”. Χρησιμοποιούμε διπλή συνθήκη για την ενεργοποίηση του SIM7000E μιας και την πρώτη φορά που θα τοποθετηθεί σε δέντρο θέλουμε να δώσουμε καθυστέρηση στον χρήστη για να το τοποθετήσει πάνω στο δέντρο και να διαβάσει την περίμετρο με επιτυχία. Η δημιουργία μιας καθυστέρησης 20 δευτερολέπτων έγινε με την χρήση current time – start time<=20 και τις κατάλληλες αρχικοποιήσεις.

```

52 //Κυρίως πρόγραμμα
53 void loop() {
54 unsigned long currentTime = millis();
55 //εξετάζει αν έχει περιστραφεί ο encoder και ταυτόχρονα αν
56 //περιστρέφεται για πρώτη φορά
57 if (encoderActive && encoderActiveFirstTime ) {
58 // διάβασε την τιμή του rotary encoder για τα υπόλοιπα 20 δευτερόλεπτα
59 long newPos = myEnc.read();
60 //δημιουργία συνάρτησης storeValue() για αποθήκευση τιμής newPos
61 storeValue(newPos);
62 if (currentTime - startTime >= 20000) { // Run for 1 minute
63 | encoderActive = false;
64 // Εκτύπωσε την τελική τιμή από τον rotary encoder μετά το πέρας 20 δευτερολέπτων
65 Serial.println(newPos);
66 //όλα τα Serial.println() πρέπει να γίνουν comment ή να αφαιρεθούν ώστε ο κώδικας να
67 //τρέχει πιο γρήγορα για να καταναλώνει λιγότερη ενέργεια το αναπτυξιακό, παρόλα
68 // αυτά τα κρατάμε για debugging
69 | Serial.println("Turn ON SIM7000.....");
70 // ενεργοποιεί το SIM7000 γίνεται NB-IoT και περιμένει
71 //θα γίνει NB-IoT επειδή έχει αποθηκεύσει τις προηγούμενες εντολές από το AATest
72 //που του περάσαμε χειροκίνητα
73 if (sim7000.turnON()) {
74 //εμφάνισε στο serial Monitor turn on, άρα όλα πήγαν καλά
75 Serial.println("Turn ON !");
76 }
77 Serial.println("Set baud rate.....");
78 while (1) {
79 //Κάνουμε δοκιμή επικοινωνίας με το SIM7000 στα 19200baud rate
80 //αν όλα πάνε καλά εμφανίζει Set baud rate:19200
81 //αλλιώς Failed
82 if (sim7000.setBaudRate(19200)) {
83 Serial.println("Set baud rate:19200");
84 break;
85 } else {
86 Serial.println("Failed to set baud rate");
87 delay(1000);
88 }
89 }

```

Εικόνα 76 Δημιουργία μιας καθυστέρησης 20 δευτερολέπτων και καταγραφή μετρήσεων

Συνεχίζοντας στην void loop() αφότου έχουμε συνδεθεί με το SIM7000E και το Arduino Uno επικοινωνεί με αυτό σειριακά , στέλνεται η πρώτη AT εντολή. Έπειτα από κάθε εντολή προστίθεται το 2000 που είναι χρόνος για να επεξεργαστεί το αίτημα το SIM7000E για να μας απαντήσει και όχι κάποιο delay για το επόμενο μήνυμα που θα στείλει το Arduino Uno στο SIM7000E.

Εντολές :

- AT+CGACT=1, ενεργοποιούμε τα κατάλληλα πρωτόκολλα που ενθυλακώνουν την τεχνολογία PDP.
- AT+CGREG=1, το SIM7000 επικοινωνεί με τον πάροχο που του είχε δοθεί , στην προκειμένη περίπτωση η Vodafone και μπαίνει στο δίκτυο της.
- AT+CNACT=1,em , δηλώνουμε ποιο Access point δίκτυο θα χρησιμοποιήσει το Sim7000E από αυτά που του έχουν δηλωθεί στην μνήμη , επιλέγεται το 1 της Emnify .
- AT+SMCONF=URL,91.121.93.94,1883, ενημερώνεται το SIM7000E για την διεύθυνση του broker και την πόρτα που θα συνδεθεί.
- AT+SMCONN, δημιουργία μιας σύνδεσης με τον Mosquitto broker για να του σταλθούν πακέτα.

```

90 //Καθορίζουμε με τι baud rate θα στέλνουμε μηνύματα
91 mySerial.begin(19200);
92 //χρήση της ATSerial συνάρτησης για ενεργοποίηση του PDP με AT εντολή
93 ATserialZero("AT+CGACT=1", 2000);
94 //Επειδή αργεί το SIM7000 να κάνει τις απαραίτητες ρυθμίσεις του δίνουμε 2
95 //δευτερόλεπτα πριν του στείλουμε άλλα μηνύματα, ο χρόνος των 2 δευτερολέπτων
96 //επιλέχθηκε πειραματικά
97 delay(2000);
98 //ενεργοποιούμε την λειτουργία για εγγραφή σε δίκτυο
99 ATserialZero("AT+CREG=1", 2000);
.00 //ομοίως με πριν του δίνουμε χρόνο
.01 delay(2000);
.02 //σύνδεση της συσκευής στην υπηρεσία PDP
.03 ATserialZero("AT+CGATT=1", 2000);
.04 delay(2000);
.05 //εντολή της emnify για να πάρουμε απn απο αυτήν
.06 ATserialZero("AT+CNACT=1,em", 2000);
.07 delay(2000);
.08 //ορίζουμε την IP και την πόρτα του broker
.09 ATserialZero("AT+SMCONF=URL,91.121.93.94,1883", 2000); // url , port
.10 delay(2000);
.11 //Στέλνουμε αίτημα να συνδεθούμε με τον MQTT Broker
.12 ATserialZero("AT+SMCONN", 2000);
.13 delay(2000);

```

**Εικόνα 77** Σύνδεση του SIM7000 με δίκτυο και με broker

Έπειτα εκτυπώνουμε στην οθόνη την τιμή που έστειλε ο rotary encoder στο Arduino Uno με την Serial.print. Στην συνέχεια με την εντολή AT+SMPUB κάνουμε subscribe στο topic treemeter και του στέλνουμε σε επόμενη γραμμή την τιμή του rotary encoder. Ύστερα, κλείνουμε το PDP διακόπτοντας και την σύνδεση με το δίκτυο χρησιμοποιώντας τις εντολές AT+CIPSHUT και AT+CPOW=1. Η κατάσταση των flags γίνεται false ώστε να μην ξανά τρέξει η συνθήκη if (encoderActive && encoderActiveFirstTime).

```

114 //συνδέσου στον broker και κάνε γίνει publisher στο topic treemeterData (SMPUB)
115 //με μέγιστο μήκος πακέτου 5 ψηφία ,1,1 είναι για το QoS και για το keep alive
116 //την σύνδεση
117 ATserialZero("AT+SMPUB=treemeterData,5,1,1", 2000);
118 //επόμενη εντολή είναι το τι θα στείλει , επιλέγουμε την μεταβλητη counter
119 ATserialOne(storedValue, 2000);
120 //χρειάστηκε μεγαλύτερο delay για να στείλει τα δεδομένα χωρίς error
121 delay(3000);
122 //κάνουμε ξανά το encoderChanged σε false
123 //encoderChanged = false;
124 // κλείνουμε στο SIM7000 πρώτα τα πρωτόκολλα (PDP)
125 ATserialZero("AT+CIPSHUT", 2000);
126 //κλείνουμε κάθε σύνδεση με δίκτυο και μπαίνει σε off με ελαχιστη δυνατή
127 //κατανάλωση ενέργειας
128 ATserialZero("AT+CPOWD=1", 2000);
129 //το flag encoderActive γίνεται μη αληθές ώστε να μην ισχύει η συνθήκη
130 //if (encoderActive && encoderActiveFirstTime ) και να μην ξανατρέξει
131 encoderActive=false;
132 //το flag γίνεται μη αληθές, δηλαδή ο encoder περιστράφηκε ήδη μια φορά
133 encoderActiveFirstTime=false;
134 | }

```

**Εικόνα 78** Αποστολή δεδομένων στον broker

Σε κάθε άλλη περίπτωση το πρόγραμμα καταλήγει στην ενεργοποίηση του interrupt με το Pin3 και βάζει το arduino σε sleep mode με την Low.power(). Το δεύτερο μέρος της Loop είναι η άμεση ανάγνωση της τιμής του rotary encoder και η αποστολή του χωρίς χρονική παύση. Το μόνο που αλλάζει στο πρόγραμμα με πριν είναι ότι αφαιρείται το παρακάτω μέρος κώδικα και γίνονται οι κατάλληλες αλλαγές.

```
if (currentTime - startTime >= 20000){ // 20 δευτερόλεπτα
| encoderActive = false; //συνεχόμενων μετρήσεων
```

Τροποποιημένο πρόγραμμα χωρίς χρονική παύση:

```
136 //αν ο encoder δεν περιστράφηκε και ταυτόχρονα δεν ήταν η πρώτη φορά
137 //που θα περιστραφεί τότε ενεργοποίησε το εξωτερικό interrupt για το
138 //Pin 3 του rotary encoder και βάλε σε βαθύ ύπνο το σύστημα
139 //ταυτόχρονα έλεγξε αν το flag encoderActive είναι αληθές
140 else {
141 attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(3), encoderISR, CHANGE);
142 LowPower.powerDown(SLEEP_FOREVER, ADC_OFF, BOD_OFF);
143 //αν νιώσει διακοπή και ταυτόχρονα δεν είναι η πρώτη φορά
144 //ενεργοποιείται το παρακάτω μέρος κώδικα. Σε σύγκριση με πάνω
145 //δεν έχουμε 20 δευτερόλεπτα συνεχόμενης ροής μετρήσεων αλλά με κάθε αλλαγή
146 //ξεκινάει η αποστολή της τιμής στον Broker
147 // ομοίως με πριν περιμένει το Flag να γίνει αληθές
148 if (encoderActive) {
149 long newPos = myEnc.read();
150 storeValue(newPos);
151 encoderActive = false;
152 //εκτύπωσε την νέα τιμή
153 Serial.println(newPos);
154 Serial.println("Turn ON SIM7000....."); //used for debugging starts here
155 // ενεργοποιεί το SIM7000 γίνεται NB-IoT και περιμένει;
156 //NB-IoT γίνεται επειδή έχει αποθηκεύσει τις προηγούμενες εντολές απο το AATest
157 if (sim7000.turnON()) {
158 //εμφάνισε στο serial Monitor turn on, άρα όλα πήγαν καλά
159 Serial.println("Turn ON !");
160 }
161 Serial.println("Set baud rate.....");
162 while (1) {
163 //Κάνουμε δοκιμή επικοινωνίας με το SIM7000 στα 19200baud rate
164 //αν όλα πάνε καλά εμφανίζει Set baud rate:19200
165 //αλλιώς Failed
166 if (sim7000.setBaudRate(19200)) {
167 Serial.println("Set baud rate:19200");
168 break;
169 } else {
170 Serial.println("Failed to set baud rate");
171 delay(500);
172 }
173 }
174 //Καθορίζουμε με τι baud rate θα στένουμε μηνύματα
175 mySerial.begin(19200);
176 //χρήση της ATSerial συνάρτησης για ενεργοποίηση του PDP με AT εντολή
177 ATSerialZero("AT+CGACT=1", 2000);
178 //Επειδή αργεί το SIM7000 να κάνει κάποιες ρυθμίσεις του δίνουμε 2
179 //δευτερόλεπτα πριν του στείλουμε άλλα μηνύματα,επιλέχθηκε πειραματικά ο χρόνος
```

Εικόνα 79 Αποστολή μετρήσεων στον MQTT και καταστολή του Arduino Uno

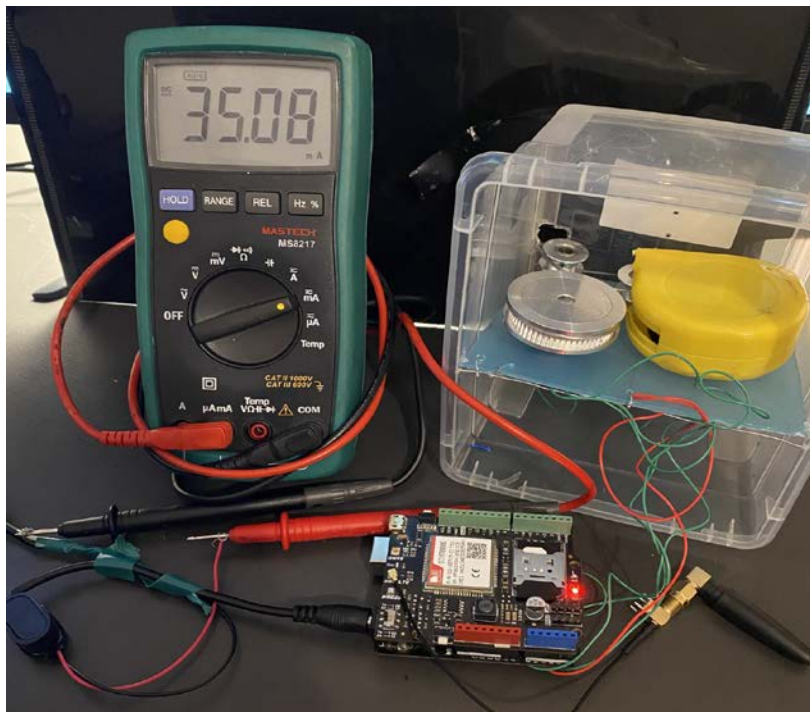
Τελικό μέρος του κώδικα είναι η δημιουργία 2 συναρτήσεων. Η πρώτη μετατρέπει την τιμή value από αρνητική σε θετική μιας και ο rotary encoder περιστρέφεται προς τα αριστερά ενώ η δεύτερη, ενεργοποιεί το flag encoderActive ώστε να ξεκινήσει η λειτουργία λήψης και αποστολής μετρήσεων.

```
224 //δημιουργία συνάρτησης για αποθήκευση τιμής απο την συνάρτηση myEnc.read();
225 //προσθέτουμε +
226 //επειδή η συνάρτηση myEnc.read(); θεωρεί την
227 //αριστερόστροφη κίνηση του rotary αρνητική
228 //ότι μετράει το δείχνει με - , το +58 αφορά το μήκος της πλάτης της κατασκευής
229 void storeValue(long &value) {
230   storedValue = -value ;
231 }
232
233 //κάθε φορά που γίνεται Interrupt μπαίνει σε αυτή την συνάρτηση και
234 //κάνει το Flag encoderActive αληθές ώστε να ξεκινήσει να μετράει η
235 //συνάρτηση myEnc.read(); τα steps που κάνει ο encoder
236 void encoderISR() {
237   encoderActive = true; // Set encoderActive to true when interrupt occurs
238 }
```

Εικόνα 80 Η συνάρτηση handleEncoderChange

Πλέον η ενέργεια που καταναλώνει ο NB-IoT κόμβος είναι 35mA σε standby και όταν είναι ενεργοποιημένος και στέλνει πακέτα δεν ξεπερνά τα 110mA. Δηλαδή λειτουργεί με 70,34% χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση.

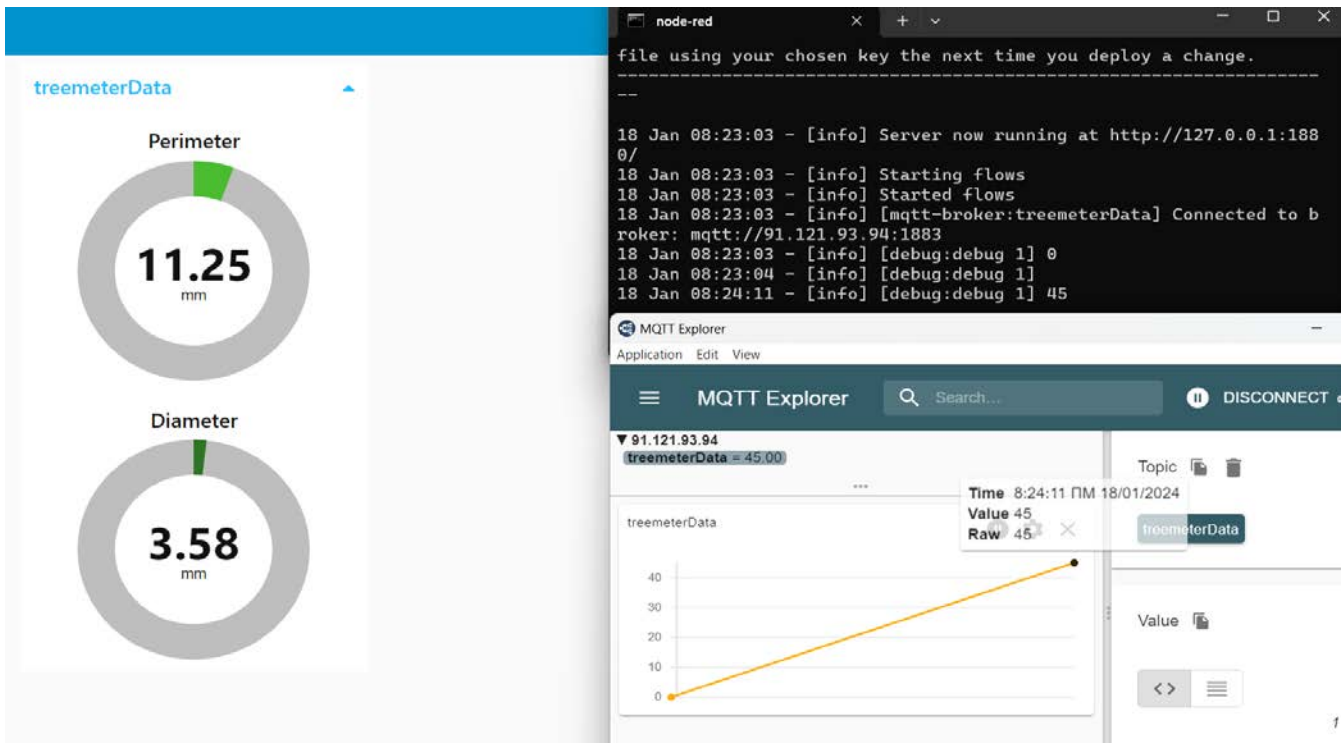
$$[(118\text{mA}-35\text{mA})/118\text{mA}] * 100 = 70,34\%$$



Εικόνα 81 Μείωση κατανάλωσης στο 70,34%

Κάνοντας εκ νέου δοκιμή για την σωστή διασύνδεση του συστήματος, ανοίγουμε Node-red , τοποθετούμε τροφοδοσία στο Arduino Uno και τραβάμε το σύρμα με τυχαίο τρόπο.

Το CMD Node-red έλαβε την τιμή , το Node-red GUI αποκωδικοποίησε την τιμή σε «αύξηση της περιμέτρου και της διαμέτρου» και το MQTT Explorer αποτύπωσε μια χαρακτηριστική ευθείας μιας και η προηγούμενη τιμή ήταν 0 σε παλαιότερη δοκιμή.



Εικόνα 82 Τελικός έλεγχος αποστολής δεδομένων

### Ενεργειακή κατανάλωση

Ο κόμβος είναι έτοιμος για αποστολή μετρήσεων στην ελάχιστη δυνατή ενεργειακή κατανάλωση. Όμως κανένα σύστημα δεν είναι αυτόνομο χωρίς να υπάρχει μία μπαταρία, για αυτό θα χρησιμοποιηθεί μια μπαταρία ένας φορτιστής μπαταρίας και ένα φωτοβολταϊκό.

Το φωτοβολταϊκό που θα χρησιμοποιήσουμε είναι της τάξης των 22V /10W .

Χρησιμοποιώντας μια μπαταρία 12V στα 9Ah υπολογίζουμε ότι με κατανάλωση στα 35mA έχουμε τα εξής :

Διάρκεια (σε ώρες)= χωρητικότητα της μπαταρίας / Τρέχουσα κατανάλωση

$$\text{Διάρκεια} = 9 \text{ Ah} / 0.035 \text{ A}$$

$$\text{Διάρκεια} = 257,14 \text{ ώρες}$$

$$\text{Διάρκεια σε μέρες} = 257,14 / 24 \text{ ώρες την μέρα} = 10,72 \text{ μέρες}$$

Άρα με σταθερή κατανάλωση 35mA χρειάζεται ~10,7 μέρες για να ξεφορτιστεί τελείως.

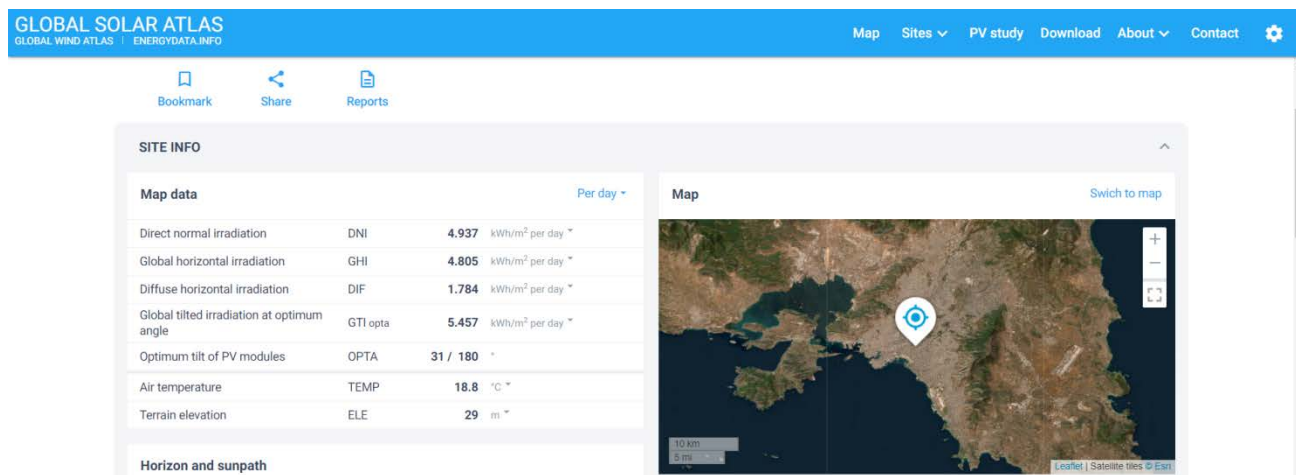
Υπολογίζουμε και την ημερήσια κατανάλωση του κόμβου σε Watt (Watt = I\*V)

$$35\text{mA} * 12\text{V} * 24\text{ώρες} = 0.42\text{W} * 24\text{ώρες} = 10,08 \text{ Watt την ημέρα.}$$

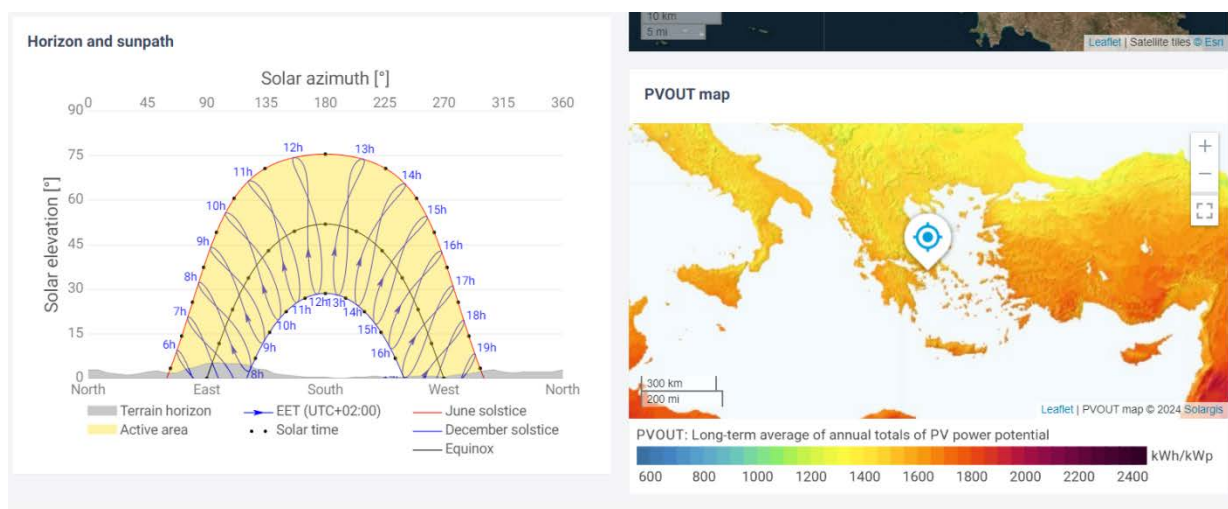
Χρησιμοποιώντας ένα μονοκρυσταλλικό φωτοβολταϊκό με έξοδο 10W σε μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία χρειαζόμαστε 1 ώρα για να παράξουμε 10 Wh.



Στην ιστοσελίδα της global solar atlas μπορούμε να δούμε ότι για την Ελλάδα στην Αθήνα η άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι στα  $4.937 \text{ kWh/m}^2$ , χρησιμοποιώντας φωτοβολταϊκό σε 31 μοίρες κλίση προς τον Νότο.

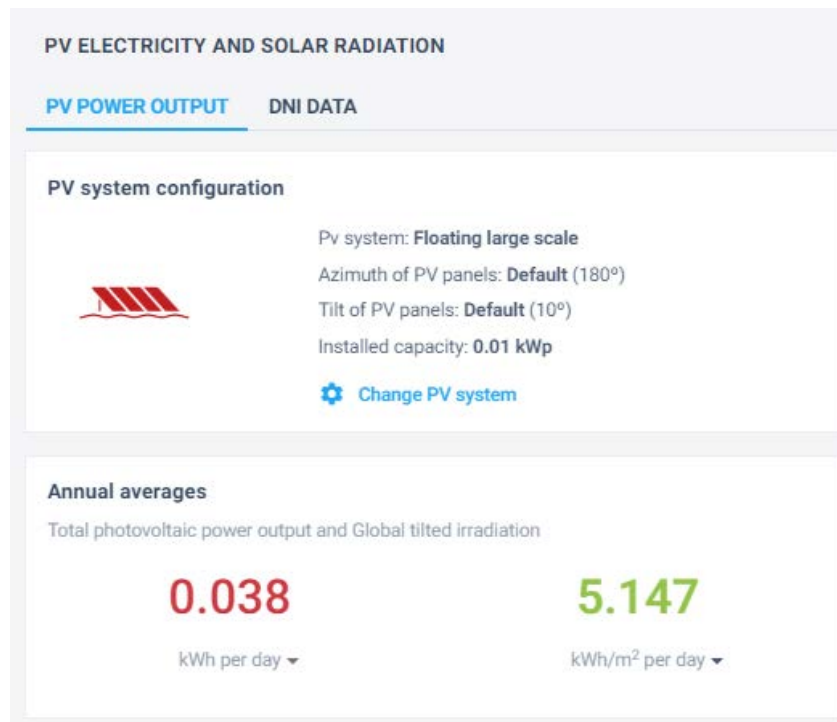


Εικόνα 83 Ιστοσελίδα global solar atlas [108]

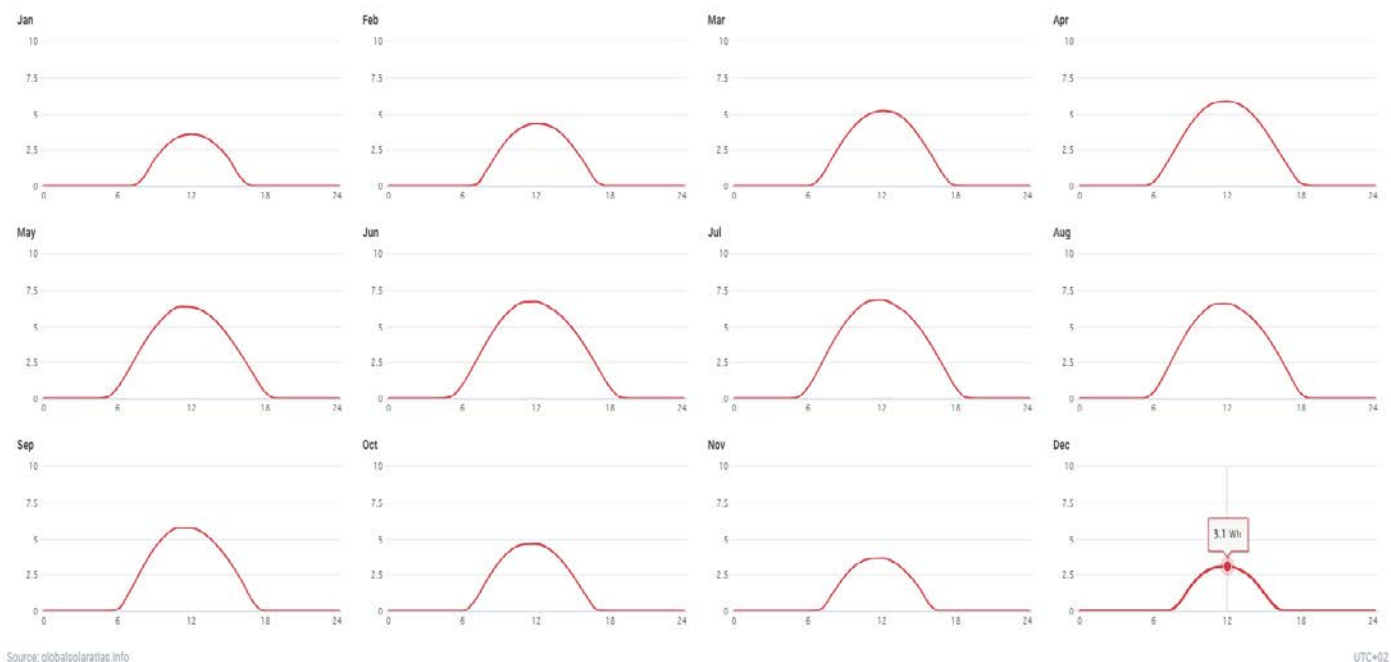


Εικόνα 84 PVOUT map [108]

Παρακάτω στην σελίδα υπάρχει σημείο που επιλέγουμε το δικό μας φωτοβολταϊκό πάνελ, βάζουμε 10W και μας υπολογίζει την καθημερινή ενέργεια που θα μας προσφέρει ανάλογα την τοποθεσία που έχουμε ορίσει παραπάνω. Για 0.01KW power δηλαδή 10W μας προσφέρει 0.038KWh/ημέρα δηλαδή 38Wh/ημέρα. Ταυτόχρονα εμφανίζεται και ένα σχεδιάγραμμα με ενεργειακές καμπύλες για όλο το έτος στην τοποθεσία Αθήνα, παρατηρείται χαμηλότερη ηλιακή ενέργεια τον Δεκέμβριο με 3,1Wh/ώρα. Σε κάθε περίπτωση η ενέργεια των ~10 W που χρειάζεται ο κόμβος καλύπτεται καθημερινά.



Εικόνα 85 Απόδοση φωτοβολταϊκού 10 Watt στην Αθήνα [108]



Εικόνα 86 Ετήσιες καμπύλες ηλιακής ενέργειας [108]

Έτσι, με έναν φορτιστή μπαταρίας και μια μπαταρία 12V, 9Ah ο κόμβος θα τροφοδοτείται από το φωτοβολταϊκό χωρίς να υπάρχει πρόβλημα έλλειψης ενέργειας .

**Το σύστημα πλέον γίνεται πλήρης αυτόνομο.**

### **Φορτιστής μπαταρίας Lead-Acid**

Για την αποθήκευση ενέργειας χρησιμοποιήθηκε μία μπαταρία Lead-Acid 12V 9Ah η οποία θα φορτίζεται από το φωτοβολταϊκό μέσω του φορτιστή. Για ρυθμιστή φόρτισης μπαταρίας επιλέχθηκε το PSC-10 το οποίο είναι για μπαταρίες 12V και 24V με 10A μέγιστο ρεύμα φορτίου και παρέχει προγράμματα για την ρύθμιση της εξόδου όπως και Timer ώστε να ενεργοποιείται η έξοδος με βάση το πρόγραμμα που θα επιλέξουμε. Προσφέρει υψηλή απόδοση μέσω της PWM λειτουργίας φόρτισης, που επεκτείνει τον χρόνο ζωής της μπαταρίας και βελτιστοποιεί την απόδοση των φωτοβολταϊκών panel. Είναι σχεδιασμένος με MOSFET ώστε να προσφέρει προστασία από υπερφόρτιση, βραχυκύκλωμα, και ανάποδη πολικότητα. Ο ρυθμιστής υποστηρίζει διάφορους τύπους μπαταριών, όπως GEL, Sealed και Flooded ενώ ταυτόχρονα προσφέρει την λειτουργία αντιστάθμισης θερμοκρασίας, η οποία βελτιστοποιεί τις παραμέτρους φόρτισης και αποφόρτισης της μπαταρίας. Έχει ενδεικτικό LED για την κατάσταση της μπαταρίας, ενώ μέσω ενός κουμπιού στο μπροστινό μέρος επιλέγονται διάφορα προγράμματα, όπως:

- Charge only: Φορτίζεται μόνο η μπαταρία και απενεργοποιείται η έξοδος του φορτίου.
- Light-open + Timer: Ενεργοποιείται η έξοδος του φορτίου με χρονική καθυστέρηση 10 λεπτά όταν η τάση του φωτοβολταϊκού πέσει κάτω από την NTTV (Night Time Threshold Voltage) δηλαδή στην δύση του ηλίου. Σε αυτό το πρόγραμμα επιπλέον επιλέγεται και η διάρκεια που θα είναι ενεργοποιημένη η έξοδος.(Max 13 ώρες)
- Dusk to Dawn: Όταν η τάση του φωτοβολταϊκού είναι μικρότερη από την DTTV (Day Time Threshold Voltage) κατά την ανατολή και ταυτόχρονα μικρότερη από την NTTV (Night Time Threshold Voltage) κατά την δύση του ηλίου, ο ρυθμιστής έχει ενεργοποιημένη την έξοδο. Αντίστοιχα όταν η τάση του φωτοβολταϊκού ξεπεράσει την DTTV τότε η έξοδος απενεργοποιείται. Σε κάθε αλλαγή κατάστασης της εξόδου χρησιμοποιούνται μερικά λεπτά καθυστέρησης.
- System: Συνεχής λειτουργία του φορτίου.
- Hand: Χειροκίνητη ενεργοποίηση/απενεργοποίηση του φορτίου.
- Debug: Ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της εξόδου του φορτίου με βάση την τάση του φωτοβολταϊκού, αν  $V_{\text{φωτοβολταϊκού}} > \text{DTTV}$  τότε η έξοδος είναι απενεργοποιημένη αλλιώς είναι ενεργοποιημένη χωρίς καθυστερήσεις.

Προστασίες:

- Short-circuit protection
- Open-circuit protection
- Reverse protection
- Over-load protection



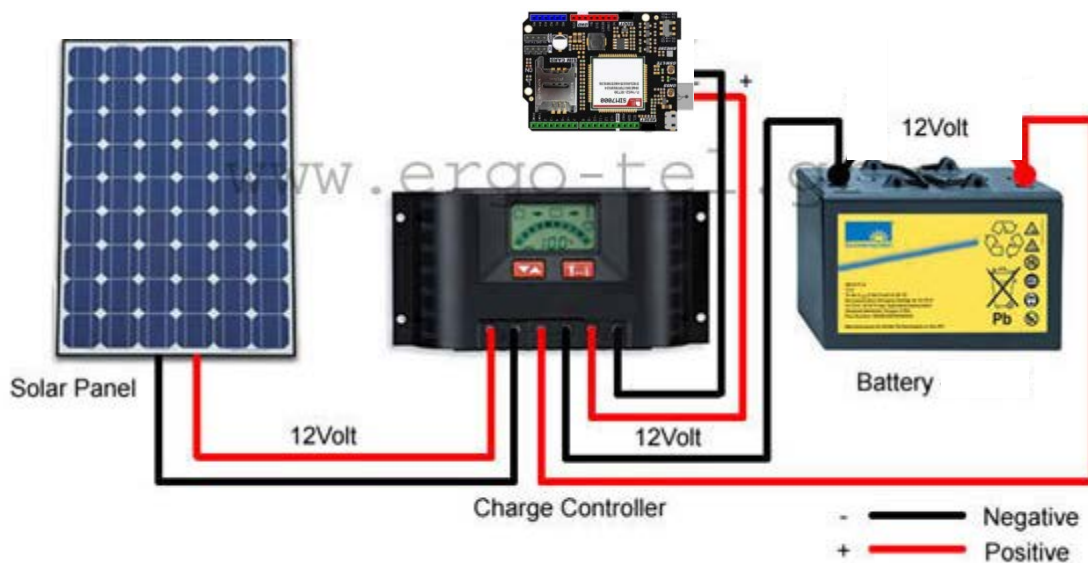
Εικόνα 87 Φορτιστής μπαταρίας PSC-10 [111]

Ο ρυθμιστής φόρτισης PSC-10 έχει μέγιστο ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης τα 10 A και μέγιστη τάση εισόδου από το φωτοβολταϊκό τα 41V. Δημιουργεί μια πτώση τάσης στα 0.2V όταν φορτίζεται η μπαταρία ενώ όταν αποφορτίζεται έχει μικρότερη των 0.25V. Φορτίζει την μπαταρία σύμφωνα με την βιβλιογραφία [98] προσφέροντας 3 στάδια φόρτισης :

1. Bulk με τάση φόρτισης τα 14.5V
2. Acceptance στα 14.2V
3. Float: 13.8V

Τέλος , για προστασία απενεργοποιεί την έξοδο και την κατανάλωση από την μπαταρία όταν η τάση της μπαταρίας πέσει κάτω από 11.2V και ενεργοποιείται ξανά αν γίνει μεγαλύτερη από 12.6V. Επίσης η κατανάλωση για να λειτουργήσει ως φορτιστής είναι μικρότερη από 10mA σε όλες τις λειτουργίες που διαθέτει. [111]

Για τον κόμβο θα επιλέξουμε την λειτουργία **System** και θα δώσουμε απευθείας την έξοδο του φορτιστή 12V DC στην υποδοχή του arduino όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 88 Τελικό σύστημα [110]

## Προβλήματα

Ο φορτιστής κατά την περίοδο της ημέρας τροφοδοτούσε τον κόμβο με 12V τα οποία όμως δεν ήταν σταθερά. Παρότι εγγυάται σταθερή τιμή εξόδου στα 12V εκείνος είχε κυμαινόμενη έξοδο από 12V έως 13,1V, δηλαδή με μέγιστη τάση τα 13,1V .

$$\text{Σφάλμα} = |\text{Μετρηθείσα τιμή} - \text{Αληθινή τιμή}|$$

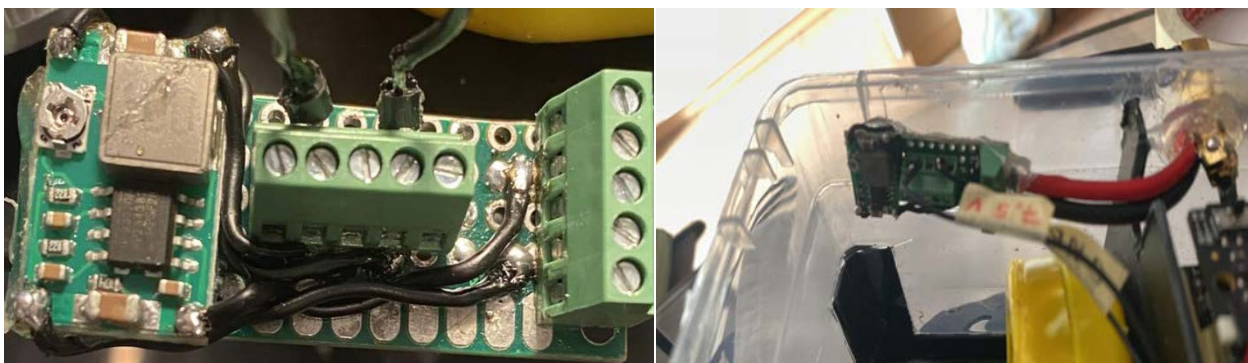
$$\text{Απόκλιση (\%)} = \left( \frac{\text{Σφάλμα}}{\text{Αληθινή Τιμή}} \right) \times 100\%$$

Άρα σφάλμα 1,1V και απόκλιση 9,16%

Ο κατασκευαστής του αναπτυξιακού ορίζει σαν μέγιστη τάση τα 12V με τάση λειτουργίας από 7 έως 12V, οπότε υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του κόμβου. Η λύση δόθηκε με την χρήση ενός step down converter. Η πλακέτα που απεικονίζεται παρακάτω είναι ένας DC/DC μετατροπέας που παίρνει σαν είσοδο τα 12V και τα μετατρέπει σε 7,5V. Χρησιμοποιείται το Vin του αναπτυξιακού παρακάμπτοντας τον σταθεροποιητή τάσης του Arduino Uno, έτσι ο κόμβος θα τροφοδοτείται με σωστή τάση χωρίς τον κίνδυνο καταστροφής του. Ο DC/DC μετατροπέας έχει κατανάλωση 1mA ενώ ο σταθεροποιητής τάσης του Arduino Uno που είναι γραμμικός έχει 5mA κατανάλωση. Επομένως, οδηγούμαστε και σε λιγότερη κατανάλωση του κόμβου με 4mA λιγότερα απ' ότι πριν.

Για την διευκόλυνση της επεκτασιμότητας του κόμβου τοποθετήθηκαν και terminal blocks ώστε τα καλώδια τροφοδοσίας να μπορούν να αποσυνδεθούν ανά πάση στιγμή.

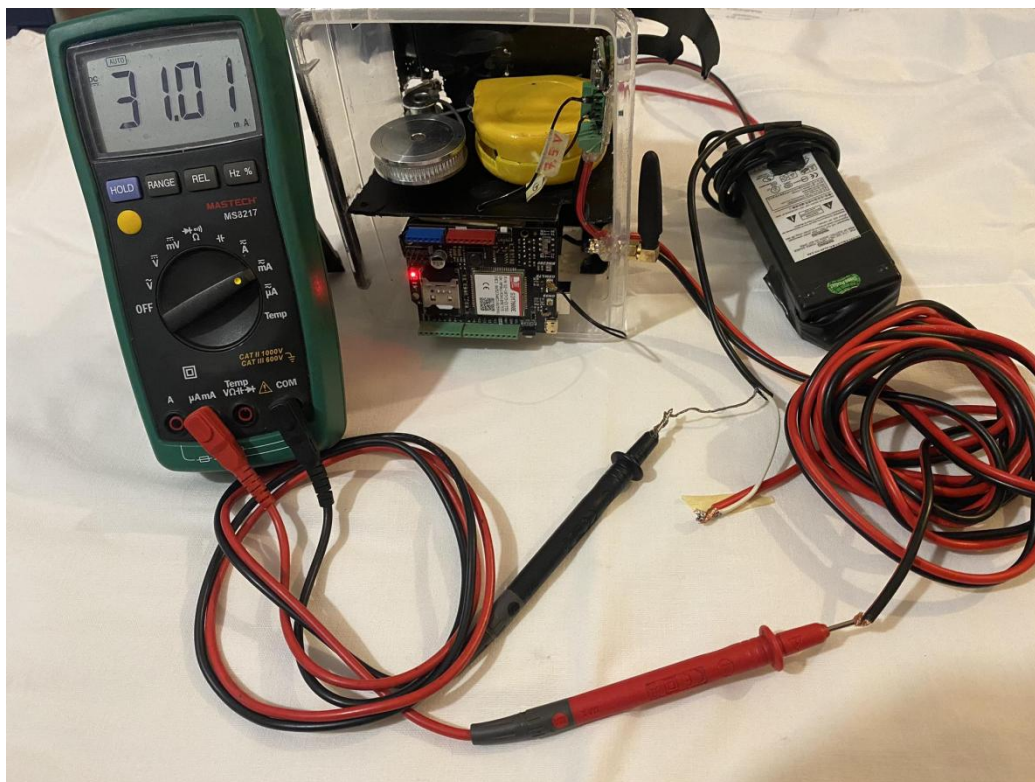
Συγκεκριμένα, ο κόμβος μπορεί να αφαιρεθεί από την υπόλοιπη κατασκευή για να γίνουν τροποποιήσεις είτε αλλαγές σε αυτόν, όπως ένα firmware update.



Εικόνα 89 DC/DC μετατροπέας

Συνεπώς, τελική κατανάλωση του κόμβου σε sleep mode είναι 31mA.

Άρα  $[(118\text{mA} - 31\text{mA}) / 118\text{mA}] * 100 = \underline{73.72\%}$  χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση.

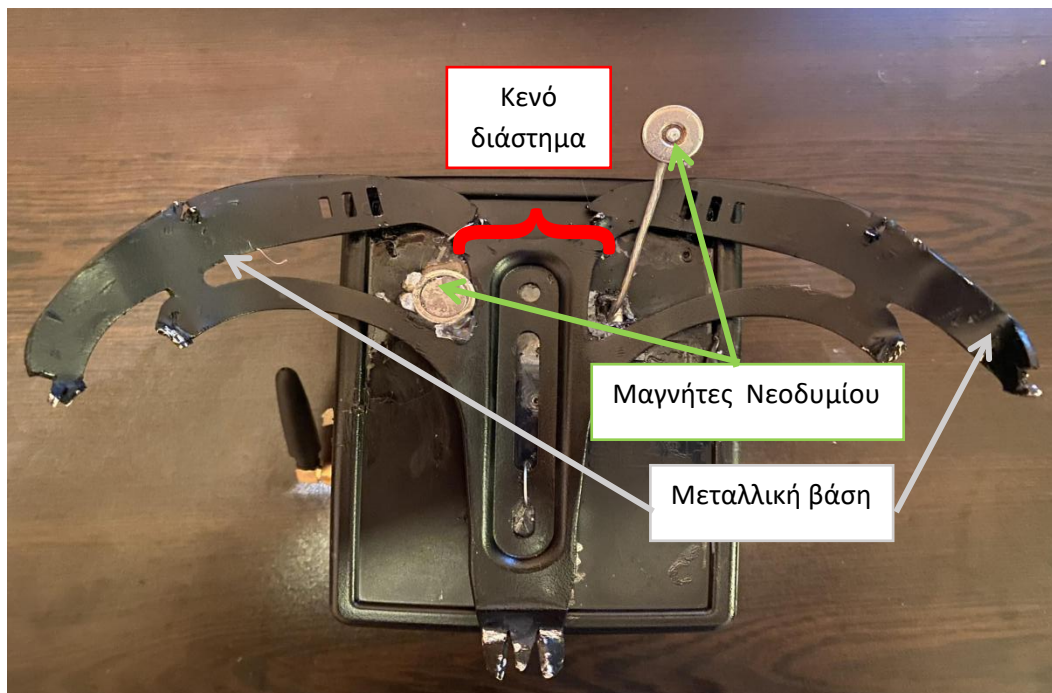


Εικόνα 90 Τελική κατανάλωση ενέργειας κόμβου

### **Κατασκευή στηρίγματος**

Για να στηριχτεί η κατασκευή πάνω σε δέντρο δημιουργήθηκε μία αυτοσχέδια μεταλλική βάση που έχει δόντια ώστε να ακουμπάει στο δέντρο και να γαντζώνεται χωρίς όμως να το τραυματίσει. Το σύρμα με το ελατήριο επιστροφής κρατούν σφιχτά την κατασκευή στο δέντρο μιας και το σύρμα τυλίγεται γύρω από το δέντρο. Όταν τυλιχτεί το σύρμα έπειτα κουμπώνεται πάνω στην κατασκευή. Στην άκρη του σύρματος τοποθετήθηκε ένας μαγνήτης νεοδυμίου και πάνω στην πλάτη της κατασκευή ένας μαγνήτης αντίστροφης πολικότητας ώστε να έλκει τον μαγνήτη του σύρματος. Επιλέχθηκε αυτό το είδος μιας και οι μαγνήτες νεοδυμίου έχουν μεγάλη ισχύ και διατηρούν την μαγνητική τους ικανότητα για πολλές δεκαετίες, επιπλέον έχουν επικάλυψη ώστε να μην σκουριάζουν. [113]

Ένα πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι το σύρμα δεν θα κλείσει μια πλήρη περιστροφή γύρω από το δέντρο, αλλά υπάρχει ένα κενό απόστασης 3cm το οποίο μας οδηγεί σε ασάφεια για την ακρίβεια της μέτρησης της περιμέτρου του δέντρου. Η λύση έρχεται μέσα από στατιστική ανάλυση των μετρήσεων της περιμέτρου των δέντρων. Αναλυτικότερα, πρέπει να τοποθετηθεί η κατασκευή πάνω σε δέντρα διάφορων περιμέτρων, να συγκριθούν οι μετρήσεις που θα διεξάγει το δεντρόμετρο με τις πραγματικές τιμές των περιμέτρων των δέντρων και να υπολογιστούν τα εκάστοτε σφάλματα. Επόμενο βήμα είναι η χρήση κάποια μεθόδους για την εύρεση του σφάλματος όταν μετριέται η περίμετρος του δέντρου. Τέλος θα γίνει κατάλληλη παραμετροποίηση του κώδικα του κόμβου ώστε η μέτρηση που θα κάνει να είναι η πλησιέστερη στην πραγματική τιμή της περιμέτρου.



Εικόνα 91 Πίσω όψη κατασκευής

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup>: Αξιολόγηση Ακρίβειας του Δεντρόμετρου

Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να μετρηθεί το σφάλμα που θα προκύψει από το κενό που υπάρχει στο σύρμα για να κλείσει μια πλήρη περιστροφή. Μετά από τη σχεδίαση και την υλοποίηση του αυτόνομου δεντρόμετρου, τοποθετήθηκε πάνω σε δέντρα διάφορων μεγεθών και διαμέτρων ώστε να ελεγχθεί η άρτια λειτουργία και η ασφαλή τοποθέτησή του. Ιδανικά το δεντρόμετρο πρέπει να έχει καλή επαναληψιμότητα και καλή ακρίβεια ώστε να θεωρείται αξιόπιστο. Παρόλα αυτά η εργασία υλοποιήθηκε με στόχο την απομακρυσμένη αποστολή μετρήσεων μέσω της τεχνολογίας NB-IoT, την αυτονομία του συστήματος σε πολλά έτη και την μέτρηση της ανάπτυξης του δέντρου σε σύγκριση με άλλα δέντρα. Ο σκοπός της εργασίας επιτυγχάνεται με βάση αυτά αλλά αναγκαία είναι επίσης η μελέτη της αξιοπιστίας των μετρήσεων και δεύτερον η πρόβλεψη του σφάλματος των μετρήσεων της περιμέτρου ώστε να συνυπολογιστεί στον κώδικα του κόμβου.

Καλή επαναληψιμότητα έχει ένα όργανο ή ένα σύστημα όταν στο πέρασμα του χρόνου δεν αλλοιώνονται οι μετρήσεις, δηλαδή η δυνατότητα να επαναλαμβάνονται συνεχόμενες μετρήσεις και να έχουν όλες το ίδιο αποτέλεσμα. Παράδειγμα καλής επαναληψιμότητας είναι να αυξηθεί η περίμετρος του δέντρου κατά 1,613mm 10 φορές και το δεντρόμετρο να στείλει 1,613mm 10 φορές. Ο πίνακας 7 στον οποίο μετρήθηκε η ακρίβεια του οργάνου σε γνωστό μήκος είχε επαναληψιμότητα 70% δηλαδή 7 στις 10 μετρήσεις ήταν ίδιες. Για την εκτίμηση του σφάλματος που δημιουργείται από το κενό διάστημα της κατασκευής, μετρήθηκε η περίμετρος στο DBH σημείο με D-Tape για 13 δέντρα και ύστερα χρησιμοποιώντας τον κόμβο σαν όργανο μέτρησης της περιμέτρου καταγράφηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

**Πίνακας 8 : Μετρήσεις περιμέτρου σε δέντρα**

A/A Δέντρων	Πραγματική τιμή	A/A μέτρησης με δεντρόμετρο	-Rotary-Steps	Μέτρηση δεντρόμετρου (Steps*0.1613 mm +3cm)	Σφάλμα (Πραγματική Τιμή- Μέτρηση Δεντρόμετρου)	Μέσος όρος Σφάλματος
1ο	15.1 cm	1η	79	15.7427 cm	-0.6427cm	-0.6750 cm
		2η	79	15.7427 cm	-0.6427 cm	
		3η	80	15.9040 cm	-0.8040 cm	
		4η	79	15.7427 cm	-0.6427 cm	
		5η	79	15.7427 cm	-0.6427 cm	
2ο	16.2 cm	1η	86	16.8718 cm	-0.6718 cm	-0.7041 cm
		2η	86	16.8718 cm	-0.6718 cm	
		3η	87	17.0331 cm	-0.8331 cm	
		4η	85	16.7105 cm	-0.5105 cm	
		5η	87	17.0331 cm	-0.8331 cm	
3ο	17.2 cm	1η	93	18.0009 cm	-0.8009 cm	-0.7686 cm
		2η	92	17.8396 cm	-0.6396 cm	
		3η	93	18.0009 cm	-0.8009 cm	
		4η	93	18.0009 cm	-0.8009cm	
		5η	93	18.0009 cm	-0.8009 cm	
4ο	18.7 cm	1η	102	19.4526cm	-0.7526cm	-0.8494.cm
		2η	103	19.6139cm	-0.9139cm	
		3η	103	19.6139cm	-0.9139 cm	
		4η	103	19.6139cm	-0.9139 cm	
		5η	102	19.4526cm	-0.7526 cm	
5ο	21.2 cm	1η	118	22.0334 cm	-0.8334 cm	-0.9302 cm
		2η	120	22.3560 cm	-1.156 cm	
		3η	118	22.0334 cm	-0.8334 cm	
		4η	119	22.1947 cm	-0.9947 cm	
		5η	118	22.0334 cm	-0.8334 cm	
6ο	24.3 cm	1η	140	25.5820 cm	-1.282 cm	-0.9594 cm
		2η	138	25.2594 cm	-0.9594 cm	
		3η	137	25.0981 cm	-0.7981 cm	
		4η	137	25.0981 cm	-0.7981 cm	
		5η	138	25.2594 cm	-0.9594 cm	
7ο	25.2 cm	1η	144	26.2272 cm	-1.0272 cm	-0.9954 cm
		2η	142	25.9046 cm	-0.7046 cm	
		3η	143	26.309 cm	-1.109 cm	
		4η	143	26.309 cm	-1.109 cm	
		5η	144	26.2272 cm	-1.0272 cm	
8ο	27.4 cm	1η	159	28.6467 cm	-1.2467 cm	-1.0854cm
		2η	158	28.4854 cm	-1.0854 cm	
		3η	158	28.4854 cm	-1.0854 cm	
		4η	158	28.4854 cm	-1.0854 cm	
		5η	157	28.3241 cm	-0.9241 cm	



9ο	30.7 cm	1η	179	31.8727 cm	-1.1727 cm	-1.1727 cm
		2η	179	31.8727 cm	-1.1727 cm	
		3η	180	32.034 cm	-1.3340 cm	
		4η	178	31.7114 cm	-1.0114 cm	
		5η	179	31.8727 cm	-1.1727 cm	
10ο	33.2 cm	1η	195	34.4535 cm	-1.2535 cm	-1.2858 cm
		2η	195	34.4535 cm	-1.2535 cm	
		3η	196	34.6148 cm	-1.4148 cm	
		4η	195	34.4535 cm	-1.2535 cm	
		5η	195	34.4535 cm	-1.2535 cm	
11ο	35.8 cm	1η	213	37.3569 cm	-1.5569 cm	-1.4601 cm
		2η	213	37.3569 cm	-1.5569 cm	
		3η	212	37.1956 cm	-1.3956 cm	
		4η	212	37.1956 cm	-1.3956 cm	
		5η	212	37.1956 cm	-1.3956 cm	
12ο	40.2 cm	1η	241	41.8733 cm	-1.6733 cm	-1.7378 cm
		2η	241	41.8733 cm	-1.6733 cm	
		3η	241	41.8733 cm	-1.6733 cm	
		4η	242	42.0346 cm	-1.8346 cm	
		5η	242	42.0346 cm	-1.8346 cm	
13ο	46.8 cm	1η	283	48.6479 cm	-1.8479 cm	-1.9447 cm
		2η	284	48.8092 cm	-2.0092 cm	
		3η	284	48.8092 cm	-2.0092 cm	
		4η	283	48.6479 cm	-1.8479 cm	
		5η	284	48.8092 cm	-2.0092 cm	

Ο πίνακας οργανώνεται σε 6 στήλες :

**A/A Δέντρων:** Σε αυτή την στήλη αριθμούνται τα δέντρα που χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργηθούν οι επόμενες στήλες.

**Πραγματική τιμή :** Μετρήθηκε με D-Tape στο σημείο DBH κάθε δέντρο, η τιμή της περιμέτρου του δέντρου που μετρήθηκε με αυτή την μέθοδο ονομάζεται πραγματική τιμή.

**A/A μέτρησης με δεντρόμετρο:** Για κάθε δέντρο έγινε η λήψη 5 επαναλαμβανόμενων μετρήσεων της περιμέτρου με το δεντρόμετρο, σε αυτή την στήλη αριθμείται η κάθε φορά.

**Rotary steps :** Ο αριθμός των rotary steps για κάθε διαφορετική μέτρηση του δεντρόμετρου.

**Μέτρηση δεντρόμετρου (Steps\*0.1613 cm +3cm):** Τα rotary steps μεταφράζονται σε cm και προστίθεται το γνωστό κενό διάστημα που έχει η κατασκευή στην μέτρηση της περιμέτρου.

**Σφάλμα:** Η τιμή της διαφοράς Πραγματικής τιμής με την Μέτρηση δεντρόμετρου.

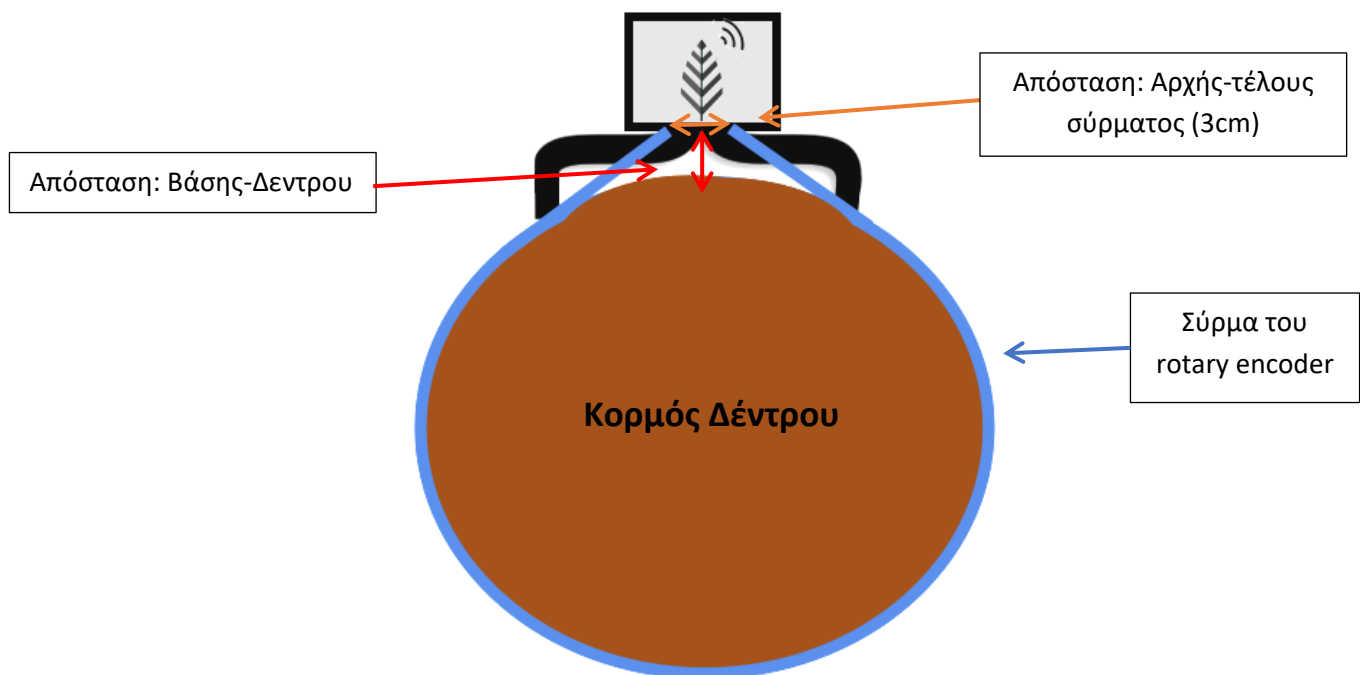
**Μέσος όρος σφάλματος :** Το άθροισμα των σφαλμάτων προς το πλήθος τους.

Διαδικασία διεξαγωγής αποτελεσμάτων:

Συνολικά πάρθηκαν 65 μετρήσεις σε διαφορετικά δέντρα με διαφορετικούς φλοιούς. Αναλυτικότερα μετρήθηκαν 13 δέντρα με D-Tape για να καταγραφούν οι πραγματικές τιμές των περιμέτρων των δέντρων. Στην συνέχεια σε κάθε δέντρο χρησιμοποιήθηκε το δεντρόμετρο για μέτρηση περιμέτρου 5 συνεχόμενες φορές. Το αποτέλεσμα κάθε μέτρησης πολλαπλασιάζεται με την ακρίβεια της μέτρησης (0.1613cm) και προστίθεται σε αυτό το κενό διάστημα ανάμεσα αρχής και τέλους του σύρματος, δηλαδή τα 3cm. Έπειτα, η τιμή που προέκυψε αφαιρείται από την πραγματική τιμή που μετρήθηκε με D-tape και προκύπτει το σφάλμα. Τέλος, συγκεντρώνονται τα σφάλματα για κάθε δέντρο και υπολογίζεται ο μέσος όρος.

Συμπεράσματα:

Αρχικά, παρατηρείται ότι τα σφάλματα είναι αρνητικά και δεν υπάρχει κάποιο θετικό σφάλμα, αυτό συμβαίνει γιατί το σιδερένιο στήριγμα της κατασκευής δημιουργεί ένα κενό ανάμεσα στην βάση της κατασκευής και του δέντρου με αποτέλεσμα να προστίθενται κάποια εκατοστά παραπάνω στην μέτρηση που κάνει το δεντρόμετρο. Η απόσταση αυτή είναι αδύνατο να μετρηθεί γιατί κάθε δέντρο παρουσιάζει διαφορετικό φλοιό και η κατασκευή άλλοτε απέχει περισσότερο και άλλοτε λιγότερο από τον κορμό του δέντρου. Η μόνη γνωστή απόσταση είναι εκείνη της αρχής με το τέλος του σύρματος, δηλαδή τα 3cm.



Εικόνα 92 Δισδιάστατο μοντέλο εφαρμογής δεντρόμετρου

Τα δέντρα που μετρήθηκαν είχαν παρόμοιο φλοιό με τα παρακάτω. Επιλέχθηκαν δέντρα αυτού του είδους μιας και ο φλοιός δεν παρουσιάζει τραχύ ανάγλυφο διότι σκοπός είναι η μελέτη του σφάλματος που δημιουργείται από την κατασκευή και όχι από την μορφή του φλοιού του δέντρου.



Εικόνα 93 Δέντρο με λείο φλοιό

Παρόλα αυτά υπήρχαν δέντρα διάφορων φλοιών αλλά δεν θα ήταν αντικειμενική η εκτίμηση του σφάλματος αν επηρεάζεται τόσο από την μορφή του φλοιού. Η παρακάτω εικόνα δείχνει ένα δέντρο με τραχύ ανάγλυφο φλοιού.



Εικόνα 94 Δέντρο με τραχύ ανάγλυφο φλοιού

Για τις ανάγκες της επίλυσης του προβλήματος θα μεταβούμε σε στατιστικές μεθόδους προσέγγισης του σφάλματος ώστε να συνυπολογιστεί στον νέο κώδικα που θα δημιουργηθεί. Εν ολίγοις αναζητούμε μια μέθοδο για την πρόβλεψη του σφάλματος σε άγνωστες πραγματικές τιμές περιμέτρου δέντρων.

Αρχικά, αναγκαίο είναι να βρεθεί η διακύμανση του σφάλματος για όλες τις μετρήσεις των περιμέτρων, δηλαδή πόσο διασκορπισμένα είναι τα σφάλματα μεταξύ τους (**διασπορά**). Από δείγματα μεγέθους  $N=65$  μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση τιμή του σφάλματος  $\bar{x}$  και την **τυπική απόκλιση SD** (Standard Deviation) που δίνεται από την σχέση 1. Η τυπική απόκλιση έχει δύο τύπους, ο ένας εφαρμόζεται όταν τα δεδομένα περιλαμβάνουν κάθε μέλος του πληθυσμού (Τυπική Απόκλιση του Πληθυσμού) ενώ ο άλλος όταν τα δεδομένα αντιπροσωπεύουν ένα δείγμα ενός μεγαλύτερου πληθυσμού (Τυπική Απόκλιση του Δείγματος). Στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε Τυπική Απόκλιση του Δείγματος μιας και τα 13 δέντρα ανήκουν σε ένα δείγμα όλου του πληθυσμού των δέντρων.

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (1)$$

Όπου  $i = 1, 2, \dots, 65$ ,  $x_i$  = κάθε σφάλμα,  $\bar{x}$  = μέσος όρος.

Η τυπική απόκλιση, όπως υποδηλώνει και η ονομασία της, αντιπροσωπεύει την διακύμανση των τιμών ενός συνόλου δεδομένων γύρω από τον μέσο όρο του δείγματος, ενδεικνύοντας κατά προσέγγιση την απόσταση που μπορεί να έχει μια χαρακτηριστική τιμή σφάλματος από την μέση τιμή.

Η διασπορά των σφαλμάτων ορίζεται ως το τετράγωνο της τυπικής απόκλισης.

$$\text{Άρα, } \boxed{\text{διασπορά} = SD^2} \quad (2)$$

Όσο αυξάνεται ο αριθμός των μετρήσεων, άρα και ο αριθμός του δείγματος, τόσο μειώνεται και η τιμή του τυπικού σφάλματος. Επομένως πλησιάζουμε στον πραγματικό μέσο όρο του δείγματος του πληθυσμού. Αυτό είναι λογικό, διότι όσο πιο πολλές μετρήσεις έχουμε, όσο και περισσότερο θα προσεγγίζουμε την πραγματική τιμή της παραμέτρου που δημιουργεί το σφάλμα.

Επόμενο στατιστικό μέγεθος είναι η εύρεση του τυπικού σφάλματος μέσου, η αβεβαιότητα σχετικά με την εκτίμηση του μέσου όρου δίνεται από το τυπικό σφάλμα μέσου με την παρακάτω σχέση:

$$\boxed{SEM = \frac{SD}{\sqrt{N}}} \quad (3)$$

Για να ελεγχθεί αν τα σφάλματα ακολουθούν κάποια γραμμική εξάρτηση με τις μετρήσεις, θα χρησιμοποιηθεί ο δειγματικός συντελεστής συσχέτισης του pearson. Το  $r$  ή αλλιώς το sample correlation coefficient είναι η ποσότητα που δηλώνει την ισχύ (power) και το ποσοστό της γραμμικής σχέσης ανάμεσα στα  $X, Y$ . Θεωρούμε  $X$  την μέτρηση με το δεντρόμετρο και  $Y$  τα σφάλματα. Ο συντελεστής συσχέτισης δίνεται από τη σχέση:

$$\boxed{r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} * S_{yy}}}} \quad (4)$$

Όπου

$$\boxed{S_{xy} = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})} \quad (5)$$

Και

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad S_{yy} = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (6),(7)$$

Η τιμή του συντελεστή συσχέτισεως ανήκει πάντα στο διάστημα  $[-1,1]$

Διακρίνουμε 3 περιπτώσεις :

- $r = +1$  , τότε τα ζεύγη τιμών (x,y) διατάσσονται κατά μήκος ενός ευθύγραμμου τμήματος έχοντας θετική κλίση
- $r = -1$  , τότε τα ζεύγη τιμών (x,y) διατάσσονται κατά μήκος ενός ευθύγραμμου τμήματος έχοντας αρνητική κλίση
- $r = 0$  , δεν υφίσταται καμία γραμμική σχέση ανάμεσα στις μεταβλητές X και Y.

Αν το  $r$  βρίσκεται ενδιάμεσα από κάποια τιμή  $-1/0/1$  τότε πρέπει να επιλέξουμε με βάση τις απαιτήσεις της εφαρμογής αν θα προσδιοριστεί το μοντέλο από μια ευθεία γραμμή. Στις περιπτώσεις όπου το  $r$  είναι κοντά στο  $+1$  ή  $-1$  υπάρχει μια ισχυρή γραμμική σχέση ενώ για τιμές κοντά στο  $0$  μια αδύναμη έως μη υφιστάμενη γραμμική σύνδεση. Το  $r$  υπολογίστηκε  $-0.9527$  για τις παραπάνω τιμές άρα έχουμε γραμμικό μοντέλο. Για τον υπολογισμό του γραμμικού μοντέλου χρειάζεται να ορίσουμε ποια είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή και ποια η εξαρτημένη. Η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η πραγματική τιμή της περιμέτρου του δέντρου γιατί δεν εξαρτάται από κάποια μεταβλητή, θα παραμείνει ίδια σε κάθε μεταβολή οποιασδήποτε παραμέτρου. Η εξαρτημένη μεταβλητή είναι η μέτρηση του δεντρόμετρου από την οποία και προκύπτει το σφάλμα. Θεωρείται εξαρτημένη γιατί σε αυτή εντάσσεται το ανθρώπινο σφάλμα, η απόσταση βάσης-δέντρου που είναι άγνωστη για κάθε δέντρο και το σφάλμα που προκύπτει από τις τριβές που υπάρχουν πάνω στο σύρμα και στον rotary encoder. Για την εκτίμηση της ερμηνευτικής δύναμης ενός γραμμικού μοντέλου χρησιμοποιούμε τον συντελεστή προσδιορισμού  $r^2$ . Το  $r^2$  είναι το απλούστερο μέτρο που υπολογίζει το ποσό της διακύμανσης της εξαρτημένης μεταβλητής, δηλαδή του σφάλματος στο οποίο κατάφεραν να ερμηνεύσουν οι τιμές του X, δηλαδή οι ανεξάρτητες μεταβλητές άρα οι πραγματικές μετρήσεις. Η τιμή του  $r^2$  θέλουμε να πλησιάζει στο 1 γιατί μόνο τότε τα στοιχεία Y μπορούν να ερμηνευτούν ολοκληρωτικά από τα στοιχεία X μέσω κάποιας εξίσωσης.

Για τον υπολογισμό του  $r^2$  δίνεται ο τύπος:

$$r^2 = \frac{SS_{\text{Regression}}}{SS_{\text{Total}}} = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

Όπου  $\hat{y}_i$  συμβολίζεται η πρόβλεψη και  $\bar{y}$  η μέση τιμή των δειγμάτων.

$SS_{\text{Total}}$  : Ονομάζεται το ολικό άθροισμα τετραγώνων και προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$SS_{\text{Total}} = SS_{\text{Regression}} + SSE \quad (9)$$

Το  $SS_{\text{Regression}}$  ορίζεται ως το άθροισμα των τετραγώνων παλινδρόμησης ή αλλιώς το total sum of squares και το  $SSE$  ορίζεται ως το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων ή αλλιώς το error sum of squares. Το  $SS_{\text{Total}}$  υπολογίζει τη συνολική μεταβλητότητα των προβλέψεων  $\hat{y}_i$ , ουσιαστικά εκφράζει την ασάφεια στον καθορισμό της τιμής του  $Y$  όταν δεν υπάρχει το  $X$ . Το  $SSR$  προσδιορίζει το μέρος της μεταβλητότητας λόγω του  $X$ , το  $SSE = SS_{\text{Total}} - SS_{\text{Regression}}$  είναι η συνολική μεταβλητότητα της απόστασης μεταξύ των σημείων  $X$  και των τιμών των προβλέψεων  $\hat{y}_i$  που δεν μπορεί να εξηγηθεί από το μοντέλο παλινδρόμησης.

Ενώ ο λόγος  $SS_{\text{Regression}}/SS_{\text{Total}} = r^2$  εκφράζει το ποσό της ολικής μεταβλητότητας των  $y_i$  που μπορεί να εξηγηθεί ή απορροφηθεί από την παλινδρόμηση.

Αυτοί οι δείκτες χρησιμοποιούνται κατά κόρο για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του μοντέλου παλινδρόμησης. Το πρόβλημα μας όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα είναι η πρόβλεψη του σφάλματος για άγνωστες τιμές περιμέτρου των δέντρων, μια από τις απλούστερες λύσεις για την πρόβλεψη τιμών είναι η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων. Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων ανήκει στις στατιστικές τεχνικές και χρησιμοποιείται στην εύρεση της καλύτερης προσαρμογής μιας συνάρτησης σε ένα σύνολο δεδομένων με την ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των διαφορών (ή αποκλίσεων) μεταξύ των παρατηρούμενων τιμών και εκείνων που προβλέπονται από τη συνάρτηση. Αυτή η μέθοδος είναι πολύ χρήσιμη στην πραγματοποίηση γραμμικής παλινδρόμησης, όπου ένα μοντέλο γραμμικής σχέσης προσαρμόζεται στα δεδομένα. Στην ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης, η τεχνική των ελαχίστων τετραγώνων εφαρμόζεται για τον καθορισμό των ιδανικών τιμών των παραμέτρων που διέπουν τη γραμμική σχέση, προκειμένου να προσαρμοστεί όσο το δυνατόν περισσότερο το μοντέλο της γραμμικής παλινδρόμησης στα δεδομένα. Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι βρίσκουμε τις τιμές των συντελεστών που κάνουν τη συνολική απόσταση από κάθε παρατηρούμενη τιμή στη γραμμή παλινδρόμησης (δηλαδή, το σφάλμα) να είναι το ελάχιστο δυνατόν. Αυτό γίνεται μέσω της επίλυσης ενός συστήματος εξισώσεων που προκύπτει από τη διαδικασία ελαχιστοποίησης. Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιείται και σε μοντέλα που δεν είναι γραμμικά, όπου οι διαδικασίες και οι υπολογισμοί μπορεί να γίνουν πιο περίπλοκοι, αλλά η βασική ιδέα παραμένει η ίδια: να μειωθεί στο ελάχιστο το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων ανάμεσα σε πραγματικές και προβλεπόμενες τιμές.

Η ευθεία που θα προσεγγιστεί έχει την μορφή  $\hat{Y} = \hat{a} + \hat{b} \cdot X$ , η οποία αποτελείται από :

$\hat{Y}$  : Είναι η πρόβλεψη του μοντέλου για τιμές  $X$

$\hat{a}$  : Ονομάζεται intercept και είναι το σημείο τομής του  $Y$  για  $X=0$

$\hat{b}$  : Αντιπροσωπεύει την κλίση της γραμμής παλινδρόμησης

$$\hat{b} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad \text{και} \quad \hat{a} = \bar{y} - \hat{b} \cdot \bar{x} \quad (10),(11)$$

Στην προκειμένη εργασία η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων προσεγγίζει μια συνάρτηση που δημιουργείται από 13 διαφορετικές πραγματικές μετρήσεις της περιμέτρου των δέντρων (άξονας  $X$ ) και για κάθε τιμή από αυτές έχει 5 σφάλματα (άξονας των  $Y$ ).

Για την εκτίμηση της απόκλισης μεταξύ πραγματικής και της προβλεπόμενης τιμής θα χρησιμοποιηθεί το τυπικό σφάλμα της εκτίμησης, το συμβολίζουμε με  $s$  και ισχύει ο τύπος :

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2} = \sqrt{\frac{SSE}{N-2}} \quad (12)$$

Αν το τυπικό σφάλμα της προβλεπόμενης τιμής βρίσκεται κοντά στο 0 τότε οι πραγματικές τιμές του σφάλματος και οι προβλεπόμενες τιμές του σφάλματος δεν αποκλίνουν σημαντικά. Άρα η γραμμική παλινδρόμηση προσφέρει αρκετά ακριβή περιγραφή της σχέσης που έχουν τα Y με τα X. Σε περίπτωση που το τυπικό σφάλμα της προβλεπόμενης τιμής ξεπερνάει ένα όριο ανεκτικότητας τότε δε ισχύει ο προηγούμενο ισχυρισμός. Στην προκειμένη περίπτωση μπορούμε να θέσουμε τα 0.2 cm ως το όριο ανεκτικότητας. [\[114\]](#) [\[115\]](#) [\[116\]](#) [\[117\]](#) [\[118\]](#)

Η επίλυση των προηγούμενων εξισώσεων για δείγμα 65 μετρήσεων χωρίς την χρήση κάποιας μηχανής είναι πολύπλοκη και χρονοβόρα. Με αφορμή αυτό η επίλυση τους έγινε με την βοήθεια υπολογιστή για την διασφάλιση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

### Μέθοδος: Python

Από τις πιο δημοφιλής γλώσσες προγραμματισμού που χρησιμοποιείται ευρέως για πολύπλοκους υπολογισμούς και ανάλυση δεδομένων είναι η Python, χρησιμοποιείται ειδικά στον τομέα της στατιστικής και της μηχανικής μάθησης. Προσφέρει μια μεγάλη γκάμα με βιβλιοθήκες τόσο για μαθηματικές πράξεις όσο και για διαγράμματα, δηλαδή έχει τα προαπαιτούμενα για την επίλυση των εξισώσεων και την δημιουργία διαγραμμάτων εύκολα και γρήγορα. Έτσι, δημιουργήθηκε κώδικας ο οποίος υλοποιεί μια ανάλυση γραμμικής παλινδρόμησης μεταξύ δύο συνόλων δεδομένων X και Y, και στη συνέχεια δημιουργεί ένα διάγραμμα που παρουσιάζει τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Για κάθε εξίσωση στο πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκαν ως οδηγοί οι προαναφερόμενες εξισώσεις.

Ακολουθεί μια περιγραφή των σταδίων του κώδικα:

Στην αρχή του κώδικα, εισάγονται οι απαραίτητες βιβλιοθήκες (numpy για υπολογισμούς και matplotlib για τη δημιουργία διαγραμμάτων) και ορίζονται τα σετ δεδομένων X(πραγματικές τιμές) και Y(σφάλματα).

```

least_square_Thesis.py x
1 # Εισαγωγή απαραίτητων βιβλιοθηκών για μαθηματικές πράξεις και
2 #διαγράμματα
3 import numpy as np
4 import matplotlib.pyplot as plt
5

```

Εικόνα 95 Εισαγωγή βιβλιοθηκών

Στα X έχουμε 13 σετ δεδομένων με το καθένα να έχει 5 τιμές ώστε να αντιστοιχίζονται στα σφάλματα Y

```

9 X = np.array([15.1, 15.1, 15.1, 15.1, 15.1,
10              16.2, 16.2, 16.2, 16.2, 16.2,
11              17.2, 17.2, 17.2, 17.2, 17.2,
12              18.7, 18.7, 18.7, 18.7, 18.7,
13              21.2, 21.2, 21.2, 21.2, 21.2,
14              24.3, 24.3, 24.3, 24.3, 24.3,
15              25.2, 25.2, 25.2, 25.2, 25.2,
16              27.4, 27.4, 27.4, 27.4, 27.4,
17              30.7, 30.7, 30.7, 30.7, 30.7,
18              33.2, 33.2, 33.2, 33.2, 33.2,
19              35.8, 35.8, 35.8, 35.8, 35.8,
20              40.2, 40.2, 40.2, 40.2, 40.2,
21              46.8, 46.8, 46.8, 46.8, 46.8])
22
23 Y = np.array([-0.6427, -0.6427, -0.8040, -0.6427, -0.6427,
24              -0.6718, -0.6718, -0.8331, -0.5105, -0.8331,
25              -0.8009, -0.6396, -0.8009, -0.8009, -0.8009,
26              -0.7526, -0.9139, -0.9139, -0.9139, -0.7526,
27              -0.8334, -1.156, -0.8334, -0.9947, -0.8334,
28              -1.282, -0.9594, -0.7981, -0.7981, -0.9594,
29              -1.0272, -0.7046, -1.109, -1.109, -1.0272,
30              -1.2467, -1.0854, -1.0854, -1.0854, -0.9241,
31              -1.1727, -1.1727, -1.3340, -1.0114, -1.1727,
32              -1.2535, -1.2535, -1.4148, -1.2535, -1.2535,
33              -1.5569, -1.5569, -1.3956, -1.3956, -1.3956,
34              -1.6733, -1.6733, -1.6733, -1.8346, -1.8346,
35              -1.8479, -2.0092, -2.0092, -1.8479, -2.0092])
36

```

Εικόνα 96 Δεδομένα πραγματικών τιμών (X) και σφαλμάτων (Y)

Επόμενο βήμα είναι να δούμε αν τα στοιχεία  $Y$  έχουν κάποια συσχέτιση με τα στοιχεία  $X$ , δηλαδή αν το  $R^2$  είναι κοντά στο 1. Γνωρίζοντας αυτά προχωράμε στον υπολογισμό του συντελεστή γραμμικής παλινδρόμησης ώστε να βρεθεί το  $\hat{y}_i$  ( $Y$  πρόβλεψης) και μετά στην εύρεση του  $R^2$ .

Ο υπολογισμός των συντελεστών γραμμικής παλινδρόμησης γίνεται από τις σχέσεις 5,6,7. Για να υπολογιστεί το  $n$  άρα και η ευθεία πρόβλεψης χρειάζεται να γνωρίζουμε το  $b$  και το  $a$ , χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 10,11 υπολογίζουμε την ευθεία για τις προβλέψεις του μοντέλου.

```

37 # Υπολογισμός των μέσων τιμών των X και Y
38 X_mean = np.mean(X)
39 Y_mean = np.mean(Y)
40
41 # Υπολογισμός συντελεστών γραμμικής παλινδρόμησης
42 Sxy = np.sum((X - X_mean) * (Y - Y_mean))
43 Sxx = np.sum((X - X_mean)**2)
44 Syy = np.sum((Y - Y_mean)**2)
45
46
47 # Υπολογισμός του συντελεστή κλίσης (b) και το σημείο τομής
48 # με τον άξονα y (intercept) της γραμμικής εξίσωσης
49 b = Sxy / Sxx
50 intercept = Y_mean - (b * X_mean)
51
52 # Πρόβλεψη τιμών της Y χρησιμοποιώντας τη γραμμική εξίσωση
53 Y_pred = b * X + intercept

```

Εικόνα 97 Εύρεση εξίσωσης  $Y_{predict}$

Στην συνέχεια υπολογίζεται το  $r^2$  και το  $r$  για να δούμε εάν το μοντέλο προσαρμόζεται καλά στα δεδομένα. Μετά υπολογίζεται η τυπική απόκλιση και η διασπορά, ωστόσο σημαντικό είναι και να υπολογίσουμε το τυπικό σφάλμα του μέσου για τα σφάλματα. Με το τυπικό σφάλμα του μέσου παρατηρείται πως τα δεδομένα κυμαίνονται στο επίπεδο  $X, Y$ . Τέλος υπολογίζουμε το τυπικό σφάλμα της εκτίμησης. (Σχέση 12)

```

55 # Υπολογισμός r^2 coefficient of determination
56 # και του r : correlation coefficient
57 SSTO = np.sum((Y - Y_mean)**2)
58 SSE = np.sum((Y - Y_pred)**2)
59 r = Sxy / (Sxx*Syy ** 0.5) # Δειγματικός συντελεστής συσχέτισης
60 r2 = 1 - (SSE / SSTO) # Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης X και Y
61
62 # Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης και του τυπικού σφάλματος της μέσης τιμής
63 N = len(Y) # πλήθος μετρήσεων
64 variance = sum((y - Y_mean) ** 2 for y in Y) / (N - 1) # Διασπορά
65 sd = variance ** 0.5 # Τυπική απόκλιση
66 sem = sd / (N ** 0.5) # Τυπικό σφάλμα μέσης τιμής
67
68 # Υπολογισμός του τυπικού σφάλματος της εκτίμησης
69 M=N-2 # M είναι ο αριθμός των μετρήσεων N - 2
70 S = (SSE/M)**0.5 # standard error of the estimate
71

```

Εικόνα 98 Υπολογισμός στατιστικών δεικτών



Το αποτέλεσμα του προγράμματος ήταν  $r^2 \approx 0.9$ , δηλαδή ένα μεγάλο ποσοστό των Y μπορεί να ερμηνευτεί από τα X.

Τελικό μέρος του κώδικα είναι η δημιουργία του διαγράμματος των ελαχίστων τετραγώνων. Συγκεκριμένα δημιουργείται μια γραμμή που ελαχιστοποιεί την τετραγωνική απόσταση κάθε σημείου από τη γραμμή καλύτερης προσαρμογής (best fit line) και πάνω στο διάγραμμα εκτυπώνονται οι μεταβλητές  $r^2$  για τον συντελεστή προσδιορισμού,  $r$  για τον συντελεστή συσχέτισης, Var για την διασπορά των Y, SEM για το τυπικό σφάλμα μέσης τιμής των Y, SD για την τυπική απόκλιση των Y και S τυπικού σφάλματος της πρόβλεψης  $\hat{y}_i$ .

```

73 # Δημιουργία διαγράμματος και εκτύπωση στατιστικών
74 plt.figure(figsize=(10, 6))
75 plt.scatter(X, Y, color='blue', label='Πραγματικά δεδομένα')
76 plt.plot(X, Y_pred, color='red', label=f'Γραμμική πρόβλεψη: y={b:.4f}x+{intercept:.4f}')
77 plt.text(19, max(Y), f'r\u00b2: {r2:.4f}', va='top', ha='left', color='purple', fontsize=13, style='italic')
78 plt.text(22, max(Y), f'SD: {sd:.4f}', va='top', ha='left', color='purple', fontsize=13, style='italic')
79 plt.text(25, max(Y), f'Var: {variance:.4f}', va='top', ha='left', color='purple', fontsize=13, style='italic')
80 plt.text(28, max(Y), f'SEM: {sem:.4f}', va='top', ha='left', color='purple', fontsize=13, style='italic')
81 plt.text(32, max(Y), f'S: {S:.4f}', va='top', ha='left', color='purple', fontsize=13, style='italic')
82 plt.text(35, max(Y), f'r: {r:.4f}', va='top', ha='left', color='purple', fontsize=13, style='italic')
83
84 # Προσδιορισμός αξόνων X,Y
85 plt.title('Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων')
86 plt.xlabel('Πραγματικές τιμές (cm)')
87 plt.ylabel('Σφάλματα (cm)')
88 plt.legend()
89 plt.grid(True)
90 plt.show()
    
```

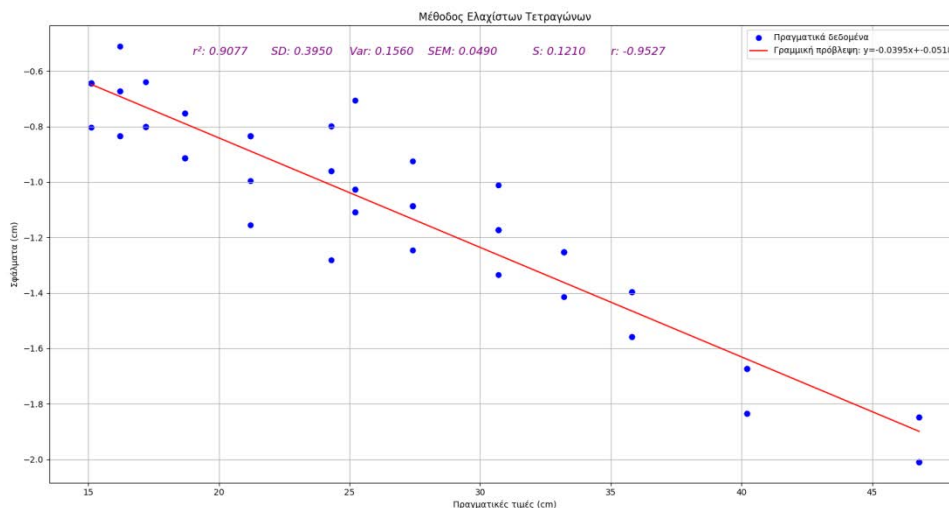
Η έξοδος του προγράμματος είναι το παρακάτω plot στο οποίο αναγράφονται τα εξής :

- $r^2 = 0.9077$
- $r = -0.9527$
- Τυπική Απόκλιση 0.3950 cm
- Διασπορά = 0.1560
- Τυπικό σφάλμα μέσου 0.049 cm
- Τυπικό σφάλμα εκτίμησης 0.121 cm

και η εξίσωση

**Y = -0.0395X - 0.0518**

Οι παρατηρήσεις που δηλώνουν απόσταση είναι όλες σε cm και αποδίδουν αυτά που προηγήθηκαν παραπάνω θεωρητικά



**Εικόνα 99 Έξοδος προγράμματος python: plot**

Από το διάγραμμα μπορούμε να πούμε ότι ακολουθούν ένα γραμμικό μοντέλο οι μετρήσεις του σφάλματος. Με συσχέτιση  $R^2=0.9$  και μια τυπική απόκλιση 0.3950 cm. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση  $Y= -0.0395X - 0.0518$  , αν αντικαταστήσουμε όπου X την μέτρηση του δεντρόμετρου μπορούμε να βρούμε ποιο θα είναι το εκτιμώμενο σφάλμα με μια απόκλιση τα 0.121 cm.

Άρα, ο νέος κώδικας του κόμβου θα πρέπει να περιλαμβάνει δύο νέα πράγματα στην έξοδο των μετρήσεων για την περίμετρο του δέντρου. Αρχικά να προσθέσει στην μέτρηση της περιμέτρου τα 3cm του κενού διαστήματος της κατασκευής και στην συνέχεια να υπολογίζει ποιο θα είναι το σφάλμα με βάση την ευθεία που προέκυψε από την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων. Στην συνέχεια να προσθέτει το σφάλμα που προβλέπει η ευθεία των ελαχίστων τετραγώνων στην μέτρηση των rotary steps και να αποστέλλει αυτό το αποτέλεσμα σε steps στον MQTT broker.

$$Y= -0.0395X - 0.0518$$

Στον παρακάτω κώδικα έχουμε δημιουργήσει 2 νέες συναρτήσεις , η μία είναι η *storeValue* και η άλλη *storeValueNew*. Στην πρώτη συνάρτηση μετατρέπεται η τιμή value σε cm (που είναι τα rotary steps) και προστίθενται σε αυτή τα 3cm του κενού διαστήματος. Το abs( ) επιστρέφει κάθε φορά την απόλυτη τιμή , επιλέχθηκε αυτό γιατί τα rotary steps επιστρέφουν άλλοτε αρνητικές και άλλοτε θετικές τιμές ανάλογα με την φορά περιστροφής. Αρνητική τιμή των steps θα αλλοίωνε το αποτέλεσμα των υπόλοιπων πράξεων. Στην συνέχεια υπολογίζεται το προβλεπόμενο σφάλμα και τέλος στην μεταβλητή storedValue μεταφράζονται όλα σε rotary steps ,άρα διαιρούμε με 0.1613.

Η δεύτερη συνάρτηση καλείται στο δεύτερο μέρος του κώδικα της loop( ), όπου σε κάθε νέο interrupt η τιμή που θα αποστέλλεται στον broker θα είναι εκείνη της προηγούμενης τιμής +1 step ,διότι για να έγινε interrupt σημαίνει ότι το δέντρο αυξήθηκε κατά 1.613 mm.

```

226 void storeValue(long &value) {
227 float X;
228 float Y;
229 X = (abs(value))*0.1613 +3 ; //cm
230 Y = -0.0395*X-0.0518 ;
231 storedValue= (X+Y)/0.1613; //
232
233 }
234
235 void storeValueNew(long &value) {
236 float cons=1.0;
237 storedValue=storedValue + cons;
238 }
239

```

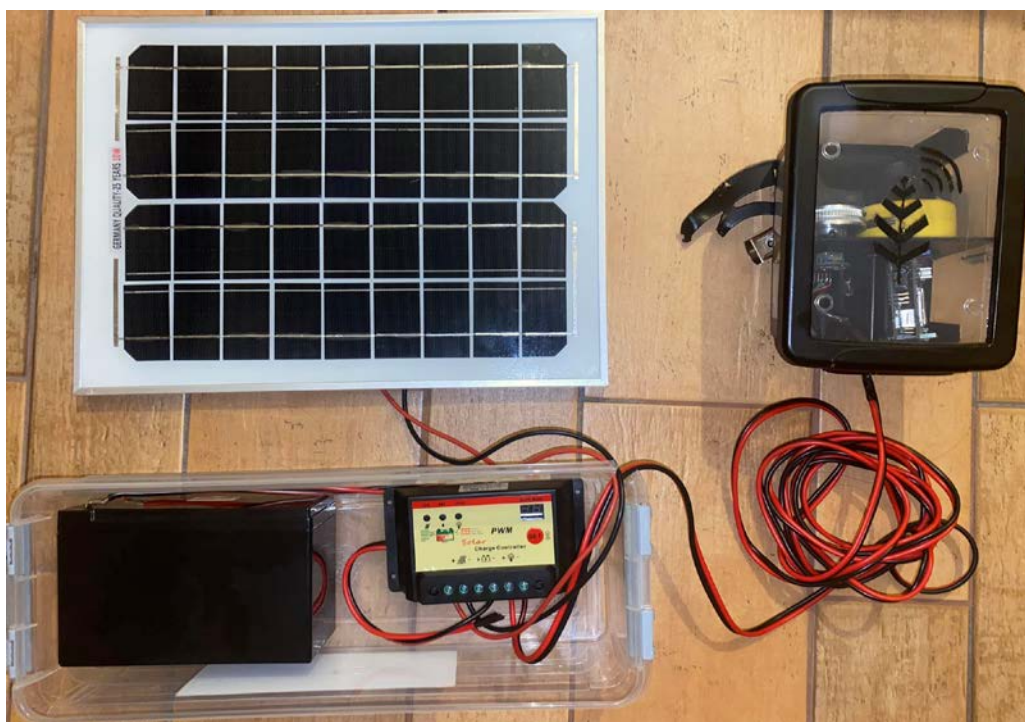
**Εικόνα 100 Μετατροπή κώδικα κόμβου**

Για να αντιμετωπιστούν αρκετά bugs στον κώδικα χρησιμοποιήθηκαν πολλές μεταβλητές που σε έναν κώδικα C++/C θα ήταν αχρείαστες. Στην προκειμένη περίπτωση ήταν ο μόνος τρόπος για να λειτουργήσει αποτελεσματικά και τοποθετήθηκαν με μέθοδο try and error.

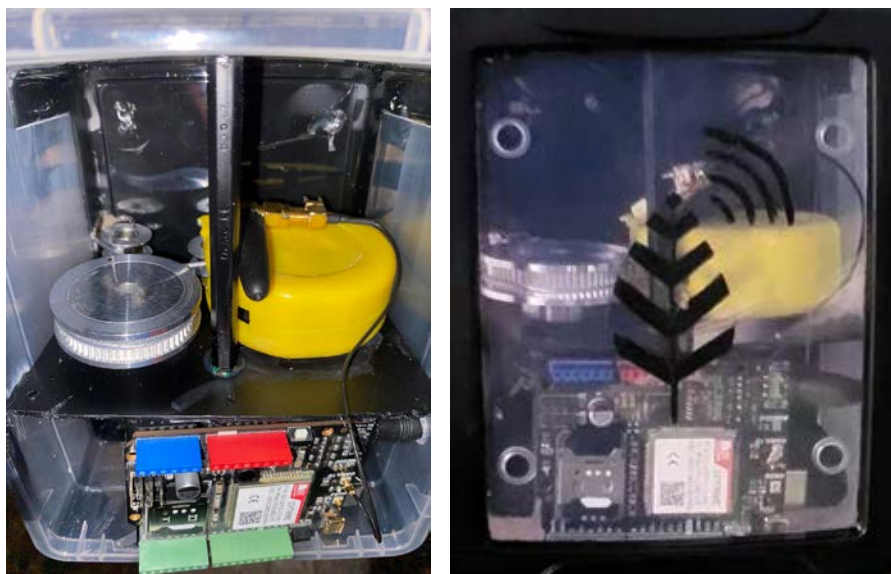
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10<sup>ο</sup>: Τελικό Σύστημα και Συμπεράσματα

### Τελικό σύστημα

Συνδέουμε με καλώδια πολύκλιωνα 20 AWG που είναι για μέγιστο ρεύμα έως και 1.5 A σύμφωνα με την εικόνα 80 και έχουμε το παρακάτω σύστημα. Επίσης η κατασκευή του κόμβου ενισχύθηκε με την προσθήκη σιλικόνης για την αδιαβροχοποίηση και ψεκάζοντας την με σπρέι πλαστικού για να καλύψει τυχόν ρωγμές , προσφέροντας έτσι επιπλέον προστασία από τις καιρικές συνθήκες.



Εικόνα 101 Τελικό σύστημα



Εικόνα 102 Σύστημα κόμβου

### Τεχνικά χαρακτηριστικά

#### *Τρόπος λειτουργίας :*

Η διαδικασία εφαρμογής του δεντρόμετρου ακολουθεί μια συγκεκριμένη σειρά βημάτων για την εξασφάλιση ακριβών μετρήσεων της περιμέτρου δέντρων. Η ενεργοποίηση της συσκευής πρέπει να πραγματοποιηθεί πριν από την τοποθέτησή της στο δέντρο, για την ενεργοποίηση αρκεί να ενεργοποιηθεί ο φορτιστής και να επιλεγθεί η **λειτουργία System**

1. Ενεργοποιήστε το δεντρόμετρο και τοποθετήστε το με τη βάση του να ακουμπά στενά στον κορμό του δέντρου. Οι ενσωματωμένοι μαγνήτες στη βάση πρέπει να ευθυγραμμιστούν στο σημείο DBH για την εξασφάλιση ορθής μέτρησης.
2. Αρχίστε την μέτρηση εκτείνοντας το σύρμα με τον μαγνήτη από τη συσκευή και πραγματοποιήστε μια πλήρη περιστροφή γύρω από το δέντρο, διατηρώντας το σύρμα ευθυγραμμισμένο στο σημείο DBH καθ' όλη τη διαδρομή. Καταλήξτε στο τελικό σημείο, φέρνοντας τον μαγνήτη του σύρματος σε επαφή με τον άλλο μαγνήτη της βάσης.
3. Η ολοκλήρωση της μετρητικής διαδικασίας, από την έκταση του σύρματος μέχρι την επανασύνδεση των μαγνητών, πρέπει να πραγματοποιηθεί εντός είκοσι (20) δευτερολέπτων για τη διασφάλιση της ακρίβειας των μετρήσεων.

#### Προσοχή:

Σε περίπτωση που η μέτρηση δεν ολοκληρωθεί επιτυχώς εντός του δοθέντος χρονικού πλαισίου, απαιτείται η αφαίρεση της τροφοδοσίας και η εκ νέου ενεργοποίηση της συσκευής για την πραγματοποίηση επανεκκίνησης του συστήματος.

### **Ενεργειακή Αυτονομία και Σύστημα Φόρτισης του Δεντρόμετρου:**

Το σύστημα φόρτισης του δεντρόμετρου ενσωματώνει μια σύνθετη διάταξη που περιλαμβάνει φωτοβολταϊκό πάνελ, μπαταρία μολύβδου-οξέος (Lead-Acid) και ειδικό φορτιστή μπαταρίας. Αυτή η διάταξη εξασφαλίζει την ενεργειακή αυτονομία της συσκευής, καθιστώντας την ικανή για συνεχή λειτουργία υπό τις κατάλληλες συνθήκες.

1. φωτοβολταϊκό Πάνελ: Το πάνελ, με ονομαστική τάση 22V και ισχύ 10W, έχει εκτιμηθεί ότι παρέχει επαρκή ενέργεια για τη φόρτιση της μπαταρίας και την τροφοδοσία του δεντρόμετρου στην περιοχή της Αθήνας, λόγω του υψηλού επιπέδου ηλιακής ακτινοβολίας καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.
2. Μπαταρία Μολύβδου-Οξέος: Η χρησιμοποιούμενη μπαταρία έχει ονομαστική τάση 12V και χωρητικότητα 9Ah. Η αυτονομία της συσκευής επηρεάζεται από την διάρκεια ζωής της μπαταρίας, η οποία εκτιμάται στα 8-10 έτη, αλλά μπορεί να μεταβληθεί ανάλογα με την θερμοκρασία περιβάλλοντος και τους κύκλους φόρτισης.
3. Φορτιστής Μπαταρίας: Ο φορτιστής μοντέλου PSC-10 είναι σχεδιασμένος να διαχειρίζεται τη φόρτιση της μπαταρίας με αποτελεσματικότητα από το φωτοβολταϊκό πάνελ.

Η ενσωμάτωση αυτών των συστημάτων φόρτισης και αποθήκευσης ενέργειας προσδίδει στο δεντρόμετρο τη δυνατότητα να λειτουργεί αυτόνομα, μειώνοντας την ανάγκη για συχνές αντικαταστάσεις ή συντηρήσεις, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει την αξιοπιστία της συνεχούς λειτουργίας της συσκευής στο πεδίο.

### **Ακρίβεια Μέτρησης:**

Το δεντρόμετρο έχει ακρίβεια μέτρησης 1,613mm με την χρήση ενός rotary encoder, κάθε step του μεταφράζεται σε 1,613mm. Το δεντρόμετρο μπορεί με επιτυχία να μετρήσει την αύξηση της περιμέτρου του δέντρου όταν το δέντρο αυξηθεί κατά 1,613mm περιμετρικά του DBH με ποσοστό επαναληψιμότητας 70% . Το προβλεπόμενο σφάλμα για την εκτίμηση της περιμέτρου κυμαίνεται με ένα τυπικό σφάλμα εκτίμησης +/- 0.121 cm .

### **Διεπαφή και Συνδεσιμότητα:**

Για την παρακολούθηση των αποτελεσμάτων του δεντρόμετρου από τον χρήστη, ο χρήστης πρέπει να έχει πρόσβαση σε internet ,browser και CMD στην συσκευή του. Αφότου ενεργοποιηθεί σε CMD το node-red ,τότε ανοίγει σε web την σελίδα <http://127.0.0.1:1880/ui> που είναι local host του node-red και βλέπει τα διαγράμματα της περιμέτρου και διαμέτρου .

Το δεντρόμετρο είναι ένας open source κόμβος NB-IoT, οπότε δεν είναι απαραίτητη η φυσική παρουσία του χρήστη με την συσκευή. Σε περίπτωση που καθίσταται αναγκαία η διεπαφή του χρήστη με το δεντρόμετρο για αλλαγή λογισμικού είτε debugging απαραίτητη είναι η φυσική του παρουσία με την συσκευή και επικοινωνία με αυτήν μέσω καλώδιο type B.

Δοκιμάστηκε σε πολλά ήδη δέντρων, διαφορετικών διαμέτρων στο DBH σημείο. Ακολουθούν εικόνες μόνο του κόμβου τοποθετημένο σε δέντρο.



Εικόνα 103 Φωτογραφία δέντρου 1



Εικόνα 104 Φωτογραφία δέντρου 2



Εικόνα 105 Φωτογραφία δέντρου 3



Εικόνα 106 Φωτογραφία δέντρου 4



Εικόνα 107 Φωτογραφία δέντρου 5



Εικόνα 108 Φωτογραφία δέντρου 6



Εικόνα 109 Φωτογραφία δέντρου 7



Εικόνα 110 Φωτογραφία δέντρου 8

Ο κόμβος έχει συνδεθεί με πηγή ενέργειας και βρίσκεται standby



Εικόνα 111 Φωτογραφία δέντρου 9



Εικόνα 112 Φωτογραφία δέντρου 10

## Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

1. Martinho, V.J.P.D.; Ferreira, A.J.D. Forest Resources Management and Sustainability: The Specific Case of European Union Countries. *Sustainability* 2021, 13, 58. <https://doi.org/10.3390/su13010058>
2. Guo, K.; Wang, B.; Niu, X. A Review of Research on Forest Ecosystem Quality Assessment and Prediction Methods. *Forests* 2023, 14, 317. <https://doi.org/10.3390/f14020317>.
3. Wang, H., Wei, Y., Zhu, H., Liu, Y., Wu, C.K., & Tsang, K.F. (2019). NB-IoT based Tree Health Monitoring System. *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 1796-1799.
4. Paredes, F.; Herrojo, C.; Martín, F. Position Sensors for Industrial Applications Based on Electromagnetic Encoders. *Sensors* 2021, 21, 2738. <https://doi.org/10.3390/s21082738>.



5. T. Sanislav, G. D. Mois, S. Zeadally and S. C. Folea, "Energy Harvesting Techniques for Internet of Things (IoT)," in IEEE Access, vol. 9, pp. 39530-39549, 2021, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3064066>.
6. Norbert Kräuchi, Peter Brang, Walter Schönenberger, Forests of mountainous regions: gaps in knowledge and research needs, *Forest Ecology and Management*, Volume 132, Issue 1, Pages 73-82, [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00382-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00382-0).
7. David M. Drew, Geoffrey M. Downes, The use of precision dendrometers in research on daily stem size and wood property variation: A review, *Dendrochronologia*, Volume 27, Issue 2, Pages 159-172, ISSN 1125-7865, <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2009.06.008>.
8. Neil A. Clark, Randolph H. Wynne, Daniel L. Schmoldt, A Review of Past Research on Dendrometers, *Forest Science*, Volume 46, Issue 4, November 2000, Pages 570–576, <https://doi.org/10.1093/forestscience/46.4.570>.
9. Marzano, M.; Urquhart, J. “Understanding Tree Health under Increasing Climate and Trade Challenges: Social System Considerations“. *Forests* 2020, 11, 1046. <https://doi.org/10.3390/f11101046>
10. Annie Deslauriers, Sergio Rossi, Tommaso Anfodillo, “Dendrometer and intra-annual tree growth: What kind of information can be inferred?”, *Dendrochronologia*, Volume 25, Issue 2, 2007, Pages 113-124, ISSN 1125-7865, <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2007.05.003>.
11. Sercan Gülci, Abdullah E. Akay, Neşe Gülci, İnanç Taş, “An assessment of conventional and drone-based measurements for tree attributes in timber volume estimation: A case study on stone pine plantation”, *Ecological Informatics*, Volume 63, 2021, 101303, ISSN 1574-9541, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101303>.
12. Guangpeng Fan, Wenxin Feng, Feixiang Chen, Danyu Chen, Yanqi Dong, Zhiming Wang, “Measurement of volume and accuracy analysis of standing trees using Forest Survey Intelligent Dendrometer“, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 169, 2020, 105211, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105211>.
13. Harini Nagendra, Richard Lucas, João Pradinho Honrado, Rob H.G. Jongman, Cristina Tarantino, Maria Adamo, Paola Mairota, “Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats”, *Ecological Indicators*, Volume 33, 2013, Pages 45-59, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.09.014>.

14. Michael Barrett, Sundeep Sahay, Geoff Walsham (2001) Information Technology and Social Transformation: GIS for Forestry Management in India, The Information Society, 17:1, 5-20, DOI: 10.1080/019722401750067397
15. CLARK, J.S., BELL, D.M., HERSH, M.H. and NICHOLS, L. (2011), Climate change vulnerability of forest biodiversity: climate and competition tracking of demographic rates. *Global Change Biology*, 17: 1834-1849. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02380.x>
16. Sturrock, R.N., Frankel, S.J., Brown, A.V., Hennon, P.E., Kliejunas, J.T., Lewis, K.J., Worrall, J.J. and Woods, A.J. (2011), Climate change and forest diseases. *Plant Pathology*, 60: 133-149. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02406.x>
17. R. Ratasuk, B. Vejlgard, N. Mangalvedhe and A. Ghosh, "NB-IoT system for M2M communication," 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Doha, Qatar, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/WCNC.2016.7564708.
18. Pan, Yude & Birdsey, Richard & Fang, Jingyun & Houghton, Richard & Kauppi, Pekka & Kurz, Werner & Phillips, Oliver & Shvidenko, Anatoly & Lewis, Simon & Canadell, Josep & Ciais, Philippe & Jackson, Robert & Pacala, Stephen & McGuire, A & Piao, Shilong & Rautiainen, Aapo & Sitch, Stephen & Hayes, Daniel. (2011). A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science* (New York, N.Y.). 333. 988-93. [10.1126/science.1201609](https://doi.org/10.1126/science.1201609).
19. Band dendrometer for large trees EMS DRS26  
<http://www.emsbrno.cz/p.axd/en/Band.dendrometer.for.large.trees.EMS.DRS26.html>
20. Ernst van der Maaten, Marieke van der Maaten-Theunissen, Marko Smiljanić, Sergio Rossi, Sonia Simard, Martin Wilmking, Annie Deslauriers, Patrick Fonti, Georg von Arx, Olivier Bouriaud, dendrometeR: "Analyzing the pulse of trees in R", *Dendrochronologia*, Volume 40, 2016, Pages 12-16, ISSN 1125-7865, <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.06.001>
21. Bouriaud O., Leban J.-M., Bert D., Deleuze C. Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce(2005) *Tree Physiology*, 25 (6), pp. 651 - 660, Cited 243 times. DOI:10.1093/treephys/25.6.651  
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.021344474351&doi=10.1093%2ftreephys%2f25.6.651&partnerID=40&md5=fed083569a6289de9ca4d518f24006f2>

22. Yasha A.S. Magarik, Lara A. Roman, Jason G. Henning, How should we measure the DBH of multi-stemmed urban trees?, *Urban Forestry & Urban Greening*, Volume 47, 2020, 126481, ISSN 1618-8667, <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126481>
23. Liu, G.; Wang, J.; Dong, P.; Chen, Y.; Liu, Z. Estimating Individual Tree Height and Diameter at Breast Height (DBH) from Terrestrial Laser Scanning (TLS) Data at Plot Level. *Forests* 2018, 9, 398. <https://doi.org/10.3390/f9070398>
24. RT Journal Article A1 Liu, Shangbin Bitterlich, Walter Cieszewski, Chris J. Zasada, Michal J. Comparing the Use of Three Dendrometers for Measuring Diameters at Breast Height. *Southern Journal of Applied Forestry*. South j appl for YR 2011 DO 10.1093/sjaf/35.3.136 <https://doi.org/10.1093/sjaf/35.3.136>
25. Clark, Neil & Wynne, Randolph & Schmoltd, D.. (1999). A review of past research on dendrometers. *Forest Science*. 46. 570-576.  
[https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/VT\\_Publications/00t26.pdf](https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/VT_Publications/00t26.pdf)
26. Fernández-Moya, Jesús & Urbán, Ignacio & Pelleri, Francesco & Castro, Gaetano & Bergante, Sara & Giorcelli, Achille & Gennaro, Massimo & Licea-Moreno, Ricardo & D, Santacruz & E, Gutiérrez-Tejón & C, Homar-Sánchez & Bidini, Claudio & Chiarabaglio, Pier Mario & Manetti, Maria & Plutino, Manuela & Dalila, Sansone. (2019). *Silvicultural guide to managing walnut plantations for timber production*.
27. Scott, P. (2008). &#960;; Division and Addition. *The Australian Mathematics Teacher*, 64(2), 21–24. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.243619820223996>
28. Modified from “Measurement\_of\_Tree\_Diameter” (New Mexico State University FFA Forestry) and “Condensed tree measurement for Ordway” (Macalester College). EREN PFPP Version 1.04 (June 2012)
29. “Massachusetts Legacy Tree Program” <https://www.mass.gov/how-to/how-to-measure-trees>
30. “Bitterlich sampling”  
[http://wiki.awf.forst.uni-goettingen.de/wiki/index.php/Bitterlich\\_sampling](http://wiki.awf.forst.uni-goettingen.de/wiki/index.php/Bitterlich_sampling)

31. S. Rouvinen, T. Kuuluvainen, Tree diameter distributions in natural and managed old Pinus sylvestris-dominated forests, Forest Ecology and Management, Volume 208, Issues 1–3, 2005, Pages 45-61, ISSN 0378-1127, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.11.021>.
32. Popescu, Sorin & Wynne, Randolph & Nelson, Ross. (2003). Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. Canadian Journal of Remote Sensing. 29. 564-577. 10.5589/m03-027.
33. WANDINGER, Ulla. Introduction to lidar. In: Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere. New York, NY: Springer New York, 2005. p. 1-18. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-387-25101-4\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-387-25101-4_1)
34. “When do I need LiDAR ?” <https://flyguys.com/when-do-i-need-lidar/>
35. “Understanding MCU sleep modes and energy” <https://www.embedded.com/understanding-mcu-sleep-modes-and-energy-savings/>
36. “Magnetic Encoders” [https://www.dynapar.com/technology/encoder\\_basics/magnetic\\_encoder/](https://www.dynapar.com/technology/encoder_basics/magnetic_encoder/)
37. “Hall Effect Encoder Overview” [https://www.dynapar.com/technology/encoder\\_basics/hall\\_effect\\_encoders/](https://www.dynapar.com/technology/encoder_basics/hall_effect_encoders/)
38. “Encoders Guide” <https://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/encoder-guide.php#sthash.7MyUQ6aH.dpbs>
39. Kumar, S., Tiwari, P. & Zymbler, M. Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. J Big Data 6, 111 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0268-2>
40. Ali, Zainab & Ali, Hesham & Badawy, Mahmoud. (2015). Internet of Things (IoT): Definitions, Challenges, and Recent Research Directions. International Journal of Computer Applications. 128. 975-8887.
41. Lombardi, M.; Pascale, F.; Santaniello, D. Internet of Things: A General Overview between Architectures, Protocols and Applications. *Information* 2021, 12, 87. <https://doi.org/10.3390/info12020087>

42. Sethi, Pallavi & Sarangi, Smruti. (2017). Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications. Journal of Electrical and Computer Engineering. 2017. 1-25. 10.1155/2017/9324035.
43. Alaghbari, K.A., Saad, M.H.M., Hussain, A. et al. Complex event processing for physical and cyber security in datacentres - recent progress, challenges and recommendations. J Cloud Comp 11, 65 (2022). <https://doi.org/10.1186/s13677-022-00338-x>
44. Nihong Wang, Wenjing Wu. The Architecture Analysis of Internet of Things. 5th Computer and Computing Technologies in Agriculture (CCTA), Oct 2011, Beijing, China. pp.193-198, (10.1007/978-3-642-27281-3\_25). (hal-01351811)
45. A Complete Guide to IoT Protocols & Standards In 2023 <https://www.nabto.com/guide-iot-protocols-standards/>
46. Sihao Li, Tian Gao, Zhipeng Ye, Yaxing Wang, Comparative research on the formation of backbone media of wireless self-organizing network by DLA-GF algorithm and ant colony algorithm, Alexandria Engineering Journal, Volume 61, Issue 2, 2022, Pages 949-961, ISSN 1110-0168, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.003>.
47. Ram, Gangi Raghu, et al. "Tracking objects using RFID and wireless sensor networks." international journal of engineering science & advanced technology 2.3 (2012): 513-517.
48. Priyadarshi, Rahul & Gupta, Bharat & Anurag, Amulya. (2020). Deployment techniques in wireless sensor networks: a survey, classification, challenges, and future research issues. The Journal of Supercomputing. 76. 10.1007/s11227-020-03166-5.
49. Gomez, Carles et al. 'Internet of Things for Enabling Smart Environments: A Technology-centric Perspective'. 1 Jan. 2019: 23 – 43. <https://content.iospress.com/articles/journal-of-ambient-intelligence-and-smart-environments/ais180509>

50. Marques, B., Ricardo, M. Synchronization of application-driven WSN. *J Wireless Com Network* 2017, 37 (2017). <https://doi.org/10.1186/s13638-017-0821-7>
51. W. Ayoub, AE Samhat, F. Nouvel, M. Mroue και J. -C. Prévotet, "Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs Standards and Supported Mobility," στο *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, τόμ. 21, αρ. 2, σελ. 1561-1581, Δεύτερο τρίμηνο 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2877382.
52. J. S. E, A. Sikora, M. Schappacher and Z. Amjad, "Test and Measurement of LPWAN and Cellular IoT Networks in a Unified Testbed," 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Helsinki, Finland, 2019, pp. 1521-1527, doi: 10.1109/INDIN41052.2019.8972256.
53. "What is GFSK Modulation?" <https://www.everythingrf.com/community/what-is-gfsk-modulation>
54. DASH7 Alliance <https://www.dash7-alliance.org/>
55. What is Sigfox 0G Technology <https://www.sigfox.com/what-is-sigfox/>
56. "COMPARING IOT NETWORKS AT A GLANCE", How Wi-SUN FAN stacks up against LoRaWAN and NB-IoT, <https://wi-sun.org/wp-content/uploads/WiSUN-Alliance-Comparing-IoT-Networks-2019-Nov-A4.pdf>
57. "Smart Sensor Solutions for Smart Agriculture" <https://wi-sun.org/smart-agriculture/>
58. "iot\_global\_network"  
<https://www.iotglobalnetwork.com/companies/single/id/954/weightless>
59. "LPWAN Wireless Technology Protocol Comparison: Pros & Cons"  
<https://www.keysecurity.com.tw/lpwan-wireless-technology-protocol.html?lang=en>
60. Chaudhari, B. S., & Zennaro, M. (2020). *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications* (1st ed.). Academic Press
61. "Ingenu Get Started"  
[https://www.ingenu.com/?doing\\_wp\\_cron=1703512589.9113490581512451171875](https://www.ingenu.com/?doing_wp_cron=1703512589.9113490581512451171875)

62. “What is RPMA Technology?” <https://www.everythingrf.com/community/what-is-rpma-technology>
63. E, J. S., Sikora, A., Schappacher, M., & Amjad, Z. (2019, July). Test and Measurement of LPWAN and Cellular IoT Networks in a Unified Testbed. 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). <https://doi.org/10.1109/indin41052.2019.8972256>
64. “What is MIOTY” <https://behrtech.com/mioty/>
65. “LTE-M” <https://www.u-blox.com/en/technologies/lte-cat-m>
66. “LTE-M and NB-IoT Networks” [https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/Events/2019/ITU-ASP-CoE-Training-on-LTE\\_M%20and%20NB\\_IoT.pdf](https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/Events/2019/ITU-ASP-CoE-Training-on-LTE_M%20and%20NB_IoT.pdf)
67. “Frequency-division multiple access” [https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency-division\\_multiple\\_access](https://en.wikipedia.org/wiki/Frequency-division_multiple_access)
68. “IoT Hacking Series #8: How Does NB-IoT or LTE-M Actually Save Power?” <https://1ot.com/resources/blog/nb-iot-lte-m-save-power>
69. Z. Gao, L. Dai, X. Gao, M.Z. Shakir, Z. Wang, Chapter 12 - Fronthaul design for mmWave massive MIMO, Editor(s): Shahid Mumtaz, Jonathan Rodriguez, Linglong Dai, mmWave Massive MIMO, Academic Press, 2017, Pages 289-312, ISBN9780128044186, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804418-6.00012-1>.
70. Chaudhari, B.S.; Zennaro, M.; Borkar, S. LPWAN Technologies: Emerging Application Characteristics, Requirements, and Design Considerations. *Future Internet* 2020, *12*, 46. <https://doi.org/10.3390/fi12030046>
71. “Difference between Licensed LPWAN vs Unlicensed LPWAN” <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/Licensed-LPWAN-vs-Unlicensed-LPWAN.html>
72. “What is LoRaWAN Specification” <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>
73. de Carvalho Silva, Jonathan & Rodrigues, Joel & Alberti, Antonio & Šolić, Petar & Aquino, Andre. (2017). LoRaWAN - A Low Power WAN Protocol for Internet of Things: a Review and Opportunities.

74. Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, Fernand Meyer, A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, *ICT Express*, Volume 5, Issue 1, 2019, Pages 1-7, ISSN 2405-9595, <https://doi.org/10.1016/j.ict.2017.12.005>.
75. Buurman, Ben & Kamruzzaman, Joarder & Karmakar, Gour & Islam, Syed. (2020). Low-Power Wide-Area Networks: Design Goals, Architecture, Suitability to Use Cases and Research Challenges. *IEEE Access*. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2020.2968057.
76. “NB IoT narrowband IoT platform” <https://thethings.io/nb-iot-narrowband-iot-platform/>
77. AD Zayas και P. Merino, "The 3GPP NB-IoT system architecture for the Internet of Things," *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Παρίσι, Γαλλία, 2017, σελ. 277-282, doi: 10.1109/ ICCW.2017.7962670.
78. Díaz Zayas, A.; Rivas Tocado, F.J.; Rodríguez, P. Evolution and Testing of NB-IoT Solutions. *Appl. Sci.* 2020, *10*, 7903. <https://doi.org/10.3390/app10217903>
79. Mwakwata, C.B.; Malik, H.; Mahtab Alam, M.; Le Moullec, Y.; Parand, S.; Mumtaz, S. Narrowband Internet of Things (NB-IoT): From Physical (PHY) and Media Access Control (MAC) Layers Perspectives. *Sensors* 2019, *19*, 2613. <https://doi.org/10.3390/s19112613>
80. S. Popli, R. K. Jha and S. Jain, "A Survey on Energy Efficient Narrowband Internet of Things (NBloT): Architecture, Application and Challenges," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 16739-16776, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2881533.
81. N. Poursafar, M. E. E. Alahi and S. Mukhopadhyay, "Long-range wireless technologies for IoT applications: A review," *2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST)*, Sydney, NSW, Australia, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICSensT.2017.830450
82. “LORA vs NB-IoT” <https://www.bridgethings.com/lorawan-vs-nb-iot-a-comparison-of-lpwan-technologies/>
83. “Types of Encoders: Rotary, Linear, Position, and Optical Encoder Types” <https://www.thomasnet.com/articles/automation-electronics/types-of-encoders-a-thomasnet-buying-guide/>
84. “optical encoder” <https://www.akm.com/eu/en/products/rotation-angle-sensor/tutorial/optical-encoder/>



85. “magnetic encoder” <https://www.akm.com/eu/en/products/rotation-angle-sensor/tutorial/magnetic-encoder/>
86. “encoders” <https://www.anaheimautomation.com/marketing/encoder/encoders.php>
87. “Capacitive encoders” <https://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/capacitive-encoders-guide.php>
88. “What are capacitive encoders and where are they suitable? ”  
<https://www.motioncontroltips.com/faq-what-are-capacitive-encoders-and-where-are-they-suitable/>
89. “rotary encoder” <https://lastminuteengineers.com/rotary-encoder-arduino-tutorial/>
90. T. Kaur, J. Gambhir and S. Kumar, "Arduino based solar powered battery charging system for rural SHS," *2016 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*, Patiala, India, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/IICPE.2016.8079373.
91. “How to Connect a Solar Panel to a Battery: A Comprehensive Guide with Safety Tips ”  
<https://mercurydirect.com.ng/how-to-connect-a-solar-panel-to-a-battery-a-comprehensive-guide-with-safety-tip/>
92. “introduction to Solar PV” <https://www.thegreenage.co.uk/tech/types-of-solar-panel/>
93. “ΔΟΜΗ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΟΥ ΚΑΙ Η ΠΟΡΕΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ ”  
<https://www.itsjustphysics.gr/fotovoltaika-pos-leitourgei-iliaki-energeia/>
94. Τι είναι το μονοκρυσταλλικό & το πολυκρυσταλλικό πάνελ “<https://www.ideahellas.gr/τι-είναι-το-μονοκρυσταλλικό-πολυκρυσ/>”
95. Principles of Solar Engineering By D. Yogi Goswami ISBN 9781032155005 656 Pages 322 B/W Illustrations Published September 6, 2022 by CRC Press
96. Salah Ud-Din Khan, Zeyad Ammar Almutairi, Omer Salah Al-Zaid, Shahab Ud-Din Khan, Development of low concentrated solar photovoltaic system with lead acid battery as storage device, *Current Applied Physics* , Volume 20, Issue 4,2020,Pages 582-588,ISSN 1567-1739,<https://doi.org/10.1016/j.cap.2020.02.005>.
97. S. Padhee, U. C. Pati and K. Mahapatra, "Design of photovoltaic MPPT based charger for lead-acid batteries," 2016 IEEE International Conference on Emerging Technologies and

Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (EmergiTech), Balaclava, Mauritius, 2016, pp. 351-356, doi: 10.1109/EmergiTech.2016.7737365.

98. “Charging Basics” <https://www.chargetek.com/chargingbasics.html>
99. “What is Arduino?” <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
100. “SIM7000E Arduino NB-IoT/LTE/GPRS/GPS Expansion Shield” <https://core-electronics.com.au/sim7000e-arduino-nb-iot-lte-gprs-gps-expansion-shield.html>
101. “SIM7000E datasheet”  
[https://cdn.shopify.com/s/files/1/2219/1447/files/SIM7000E\\_datasheet.pdf?11407660374207769372](https://cdn.shopify.com/s/files/1/2219/1447/files/SIM7000E_datasheet.pdf?11407660374207769372)
102. “MQTT” <https://mqtt.org/>
103. U. Hunkeler, H. L. Truong and A. Stanford-Clark, "MQTT-S — A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks," *2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE '08)*, Bangalore, India, 2008, pp. 791-798, doi: 10.1109/COMSWA.2008.4554519.
104. “MQTT Explorer” <https://mqtt-explorer.com/>
105. “Eclipse Mosquitto” <https://mosquitto.org/>
106. “Emnify” [https://support.emnify.com/hc/en-us/articles/4401906757906-How-to-configure-the-APN-on-different-devices#h\\_01FDEW91VR2Q637JYY1136JRG5](https://support.emnify.com/hc/en-us/articles/4401906757906-How-to-configure-the-APN-on-different-devices#h_01FDEW91VR2Q637JYY1136JRG5)
107. “Επίπεδο ελατήριο στρέψης ”<https://gr.yunshengsprings.com/tape-measure-springs/61465172.html>
108. “GlobalSolarAtlas”  
<https://globalsolaratlas.info/detail?c=38.000167,23.676653,11&s=37.95546,23.699049&m=site&pv=small,180,31,0.01>
109. “node-red” <https://nodered.org/>
110. “Σύστημα φόρτισης”<https://ergo-tel.gr/>

111. “PSC-10”<https://www.emimikos.gr/PSC-10/>
112. Marchetti, Marco. “Monitoring and Indicators of Forest Biodiversity in Europe – from Ideas to Operationality.” Monitoring and Indicators of Forest Biodiversity in Europe, 2004, [efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2018/proc51\\_net.pdf](http://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2018/proc51_net.pdf).
113. “How long does a magnet last?” <https://www.first4magnets.com/blog/how-long-does-a-magnet-last/>
114. <https://alpha.physics.uoi.gr/PhysLabsII/mean%20value%20main.htm>
115. <https://alpha.physics.uoi.gr/PhysLabsII/mean%20value%20main.htm>
116. <http://users.uoi.gr/hyepilab/assets/pdfs/biomathematics/descriptive.pdf>
117. [https://users.auth.gr/agpapana/Econometrics\\_Lectures/Lecture3\\_econometrics.pdf](https://users.auth.gr/agpapana/Econometrics_Lectures/Lecture3_econometrics.pdf)
118. <https://pythonnumericalmethods.berkeley.edu/notebooks/chapter16.04-Least-Squares-Regression-in-Python.html>