

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

**ΕΞΥΠΝΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΚΟΜΙΔΗΣ ΑΠΟΡΡΙΜΜΑΤΩΝ ΜΕ ΤΗ  
ΣΥΝΔΥΑΣΤΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ ΚΑΙ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ  
ΔΙΚΤΥΩΝ ΧΑΜΗΛΗΣ ΙΣΧΥΟΣ - ΥΨΗΛΗΣ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ (LPWAN)**

**ΧΡΗΣΤΟΥ ΜΑΡΙΑ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΤΑΥΡΟΣ ΠΟΝΗΣ**



ΑΘΗΝΑ, 07/07/2021

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον Οδηγό συγγραφής Διπλωματικών εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας είναι προϊόν δικής μου δουλειάς και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Μαρία Χρήστου

## Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται ο κύκλος σπουδών μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. και θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και συνέβαλαν στην προσπάθεια μου αυτή.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα και καθηγητή μου κ. Σταύρο Πόνη για την απίστευτη υποστήριξη και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της προπτυχιακής μου πορείας, για τις ευκαιρίες που μου έδωσε και κυρίως για το ενδιαφέρον που μου έδειξε τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε προσωπικό επίπεδο.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Κωνσταντίνο Αγαλιανό, ο οποίος υποστήριξε την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθ' όλη τη διάρκεια της και υπήρξε καταπληκτικός δάσκαλος για εμένα τον τελευταίο ένα χρόνο. Χωρίς το ενδιαφέρον του, την καθοδήγησή του και τη συμβολή του, η παρούσα διπλωματική εργασία δεν θα είχε ολοκληρωθεί.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους γονείς μου, τον αδερφό και την αδερφή μου, για την ανιδιοτελή αγάπη που μου έχουν προσφέρει όλα αυτά τα χρόνια, τις θυσίες τους και την υποστήριξή τους σε όλες μου τις επιλογές.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του μαθήματος «Διοίκηση Εφοδιαστικής Αλυσίδας» που προσφέρεται από τον Τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας (ΒΔ&ΕΕ) της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Βασικός στόχος της είναι η ανάπτυξη ενός έξυπνου ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης των απορριμμάτων, που μετατρέπει τους συμβατικούς κάδους που χρησιμοποιούνται από το παρόν σύστημα διαχείρισης των απορριμμάτων σε έξυπνους. Για το σκοπό αυτό αναπτύσσεται ασύρματο δίκτυο αισθητήρων μεταξύ των κάδων απορριμμάτων, το οποίο διαβιβάζει δεδομένα σχετικά με τη στάθμη κάθε κάδου σε μία ηλεκτρονική πλατφόρμα. Η πλατφόρμα αυτή είναι υπεύθυνη για την επεξεργασία των δεδομένων και την παροχή πληροφοριών υποστήριξης αποφάσεων στους σχεδιαστές των δρομολογίων αποκομιδής, της Τοπικής Αρχής που χρησιμοποιεί το σύστημα.

Η διπλωματική εργασία ακολουθεί την ακόλουθη δομή. Αρχικά, στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται παρόμοιες εφαρμογές που εντοπίζονται στο ελληνικό οικοσύστημα διαχείρισης απορριμμάτων, με έμφαση στις διαθέσιμες τεχνολογίες και στον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για την παροχή των υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας. Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 2 η εργασία επικεντρώνεται στην αξιολόγηση των διαδικασιών διαχείρισης των απορριμμάτων ενός τυπικού ελληνικού Δήμου (Κορυδαλλού), σε μια προσπάθεια περαιτέρω εξέτασης της παραδοσιακής διαδικασίας διαχείρισης των απορριμμάτων και απόκτησης των απαραίτητων γνώσεων για να αποφασιστεί αν η επιδιωκόμενη λύση θα προσφέρει τα αναμενόμενα οφέλη όπως αυτά προβλέπονται από τη σύλληψή της. Το θετικό αποτέλεσμα της αξιολόγησης σκοπιμότητας και χρηστικότητας της προηγούμενης ενότητας εκκινεί τη διαδικασία ανάπτυξης του συστήματος, ξεκινώντας με λεπτομερή ανασκόπηση των τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και του Ασύρματου Δικτύου Αισθητήρων (WSN), η οποία παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3. Έμφαση δόθηκε στα δίκτυα ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (LPWAN), δεδομένου ότι αυτά επιλέχθηκαν για χρήση στην παρούσα εργασία.

Το Κεφάλαιο 4 σηματοδοτεί την αρχή του πρακτικού τμήματος αυτής της εργασίας. Περιλαμβάνει τη σύνταξη των προδιαγραφών του συστήματος, την επιλογή των απαραίτητων εξαρτημάτων που ικανοποιούν τις προδιαγραφές, την ανάπτυξη του πρωτοτύπου και τη φάση δοκιμών, η οποία καταλήγει - μετά από έναν κύκλο δοκιμών - στο τελικό πρωτότυπο και τη λειτουργία του σε πιλοτικές συνθήκες. Στο τέλος του Κεφαλαίου 4 παρουσιάζεται επίσης ο προτεινόμενος αλγόριθμος για τη βελτιστοποίηση των δρομολογίων αποκομιδής. Στο επόμενο Κεφάλαιο, συζητείται η δοκιμή του ανεπτυγμένου συστήματος με τις προκαθορισμένες προδιαγραφές, ακολουθούμενη από προτάσεις για περαιτέρω μελλοντικές βελτιώσεις. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας που συνοψίζουν τους στόχους της, τις βασικές δραστηριότητες που διεξήχθησαν για την επίτευξη αυτών των στόχων και τα τελικά αποτελέσματα συνοδευόμενα από την

αξιολόγηση του ισχυρότερου σημείου της εργασίας, των αδυναμιών και των δυνατοτήτων μελλοντικής βελτίωσης του συστήματος τόσο από τεχνολογική όσο και από επιχειρηματική άποψη.

Επιπλέον, οι πηγαίοι κώδικες που χρησιμοποιούνται στην προτεινόμενη λύση μαζί με τα σχέδια για το περίβλημα της μετρητικής διάταξης παρέχονται στο τέλος αυτής της εργασίας, ως δύο διακριτά παραρτήματα.

## Synopsis

This diploma thesis was developed in the context of the course "Supply Chain Management", offered by the Section of Industrial Management and Operational Research (S.I.M.O.R.) of the School of Mechanical Engineering of the National Technical University of Athens (N.T.U.A.). Its core outcome is the development of an end-to-end smart waste management system, which transforms the regular waste bins used by the current waste management system to smart ones. To that end a wireless sensor network between the waste bins is developed that transmits waste level data to an online platform responsible for processing that data and providing decision support information to the waste truck routing planners of the Local Authority using the system.

The thesis follows the following structure. Initially, in Chapter 1 a review of similar applications in the Greek waste management ecosystem are presented providing focus on available technologies and the equipment used for providing their added value services. Next, in Chapter 2 the thesis turns its focus on assessing the waste management processes of a typical Greek municipality (Korydallos), in an attempt to further scrutinize the traditional waste management process and gain the necessary insights for deciding whether the aspired solution will provide the expected benefits as they are prescribed by its inception. The positive outcome of the feasibility and usability assessment of the previous section initiates the development process starting out with a detailed review on Internet of Things (IoT) and Wireless Sensor Network (WSN) technologies, presented in Chapter 3. Emphasis was given in Low Power Wide Area Networks (LPWAN) since these were selected for use in this thesis.

Chapter 4 highlights the beginning of the practical section of this Thesis. It includes the drafting of system specifications, the selection of the necessary parts complementing the specifications' document, the development of the prototype and the testing phase, which results – after a cycle of testing- to the final prototype put in pilot conditions. In the end of Chapter 4, the proposed algorithm for routing planning purposes is also presented. In the next chapter, the testing of the developed system against the predefined specifications is discussed, followed by suggestions for further future improvements. Finally in Chapter 6, the conclusions of the thesis are presented summarizing its objectives, the core activities that were conducted in the pursue of these objectives and the final results enhanced by a critical evaluation of the study's strong point, weaknesses and potential for future system enhancement in both technology and business terms.

In addition, the source code of the proposed solution along with the designs for the sensor housing are provided in the end of this Thesis, as two discrete appendices.

## Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες .....	2
Περίληψη.....	3
Synopsis .....	5
Κατάλογος Εικόνων.....	10
Κατάλογος Σχημάτων.....	11
Κατάλογος Πινάκων .....	13
1. Εισαγωγή .....	15
1.1. Ορισμοί.....	15
1.2. Το πρόβλημα.....	15
1.2.1. Υπάρχουσα Κατάσταση.....	15
1.2.2. Η επίδραση των απορριμμάτων στο βιοτικό επίπεδο των κατοίκων .....	17
1.2.3. Η επίδραση των απορριμμάτων στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος ...	17
1.2.4. Η επίδραση των απορριμμάτων στα έξοδα των Δήμων.....	17
1.3. Υπάρχουσες Λύσεις.....	18
1.3.1. Σύστημα EasyBin .....	18
1.3.2. Σύστημα Recytrust .....	19
1.3.3. Κάδοι SolarBin .....	20
1.3.4. Vodafone Smart Bins Management.....	20
1.3.5. EcoMobile Smart Waste.....	20
1.3.6. Εποπτική Παρουσίαση Υπαρχουσών Λύσεων .....	21
1.3.7. Συμπεράσματα .....	21
1.4. Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας.....	22
1.5. Δομή Εργασίας .....	22
2. Ανάλυση Βιωσιμότητας .....	24
2.1. Εισαγωγικά Στοιχεία.....	24
2.2. Χρονομέτρηση Δρομολογίου - Πληρότητες .....	25
2.3. Επεξεργασία Δεδομένων Πληρότητας.....	28
2.4. Παράμετροι Κοστολόγησης Δρομολογίου .....	31
2.4.1. Κόστος Απορριμματοφόρου Οχήματος.....	31
2.4.2. Κόστος Καυσίμων Απορριμματοφόρου Οχήματος.....	32
2.4.3. Κόστος Ανθρώπινου Δυναμικού .....	33
2.4.4. Συνολικό Κόστος Δρομολογίου Α/Φ Οχήματος .....	34
2.5. Συμπεράσματα .....	34
2.5.1. Προβλεπόμενο Κόστος Απορριμματοφόρου Οχήματος.....	35

2.5.2. Προβλεπόμενο Κόστος Καυσίμων Απορριματοφόρου Οχήματος .....	36
2.5.3. Προβλεπόμενο Κόστος Ανθρώπινου Δυναμικού.....	36
2.5.4. Προβλεπόμενο Συνολικό Κόστος Δρομολογίου Α/Φ Οχήματος .....	37
3. Internet of Things .....	38
3.1. Δίκτυα Επικοινωνίας των IoT Συσκευών .....	38
3.1.1. Συστήματα Μικρής Εμβέλειας.....	38
3.1.2. Συστήματα Μεγάλης Εμβέλειας .....	39
3.1.3. LPWAN λύσεις για υπηρεσίες IoT.....	40
3.2. Σύγκριση Προτύπων LPWAN .....	51
3.2.1. Ποιότητα Παρεχόμενης Υπηρεσίας.....	51
3.2.2. Διάρκεια Ζωής Μπαταρίας και Χρονική Καθυστέρηση .....	52
3.2.3. Επεκτασιμότητα και Όγκος Πληροφοριών .....	52
3.2.4. Γεωγραφική Κάλυψη και Εμβέλεια Δικτύου.....	52
3.2.5. Μοντέλο Ανάπτυξης .....	53
3.2.6. Κόστος .....	53
3.3. Επιλογή Προτύπου .....	53
4. Μελέτη Περίπτωσης .....	55
4.1. Προδιαγραφές Συσκευής .....	55
4.1.1. Χαρακτηρισμός Κρίσιμης Στάθμης.....	55
4.1.2. Εγκυρότητα Μετρήσεων .....	55
4.1.3. Συχνότητα Μετρήσεων .....	55
4.1.4. Αυτονομία Συσκευής .....	56
4.1.5. Αντοχή και Ανθεκτικότητα Προστατευτικού Καλύμματος Διάταξης (Housing) .....	56
4.1.6. Στεγανότητα Προστατευτικού Καλύμματος Διάταξης.....	56
4.1.7. Σύνδεση σε Πλατφόρμα.....	58
4.1.8. Βιωσιμότητα - Επεκτασιμότητα.....	58
4.2. Εναλλακτικές Λύσεις Κατασκευής .....	59
4.2.1. Επιλογή Πλακέτας και Μπαταρίας .....	59
4.2.2. Επιλογή Αισθητήρα Απόστασης .....	61
4.2.3. Επιλογή Διακομιστή Δικτύου.....	67
4.2.4. Επιλογή Υλικού Προστατευτικού Καλύμματος .....	68
4.3. Τελική Επιλογή Εξαρτημάτων .....	70
4.4. Προκαταρκτικός Σχεδιασμός Προστατευτικού Καλύμματος .....	71
4.5. Λεπτομερής Σχεδιασμός .....	73
4.5.1. Συνδεσμολογία .....	73



4.5.2. Λεπτομερής Σχεδιασμός Καλύμματος .....	74
4.6. Calibration Αισθητήρα .....	82
4.6.1. Διεξαγωγή του Πειράματος .....	82
4.6.2. Έλεγχος Πειραματικών Δεδομένων .....	83
4.6.3. Καθορισμός Καμπύλης Αισθητήρα .....	85
4.6.4. Έλεγχος Αποτελεσμάτων .....	90
4.7. Μεταφορά Δεδομένων σε Διακομιστή Δικτύου .....	91
4.7.1. Σύνδεση Πλακέτας στο TTN .....	92
4.7.2. Αποστολή Μετρήσεων στο TTN .....	94
4.7.3. Επεξεργασία Μηνυμάτων στο TTN.....	95
4.8. Βελτιστοποίηση Δρομολογίου Αποκομιδής .....	96
4.8.1. Περιγραφή του Προβλήματος .....	96
4.8.2. Αλγόριθμος Επίλυσης .....	96
4.8.3. Έλεγχος Αξιοπιστίας Αλγορίθμου .....	98
5. Έλεγχοι Λειτουργίας και Προτάσεις Βελτίωσης .....	102
5.1. Έλεγχος Ικανοποίησης Προδιαγραφών.....	102
5.1.1. Έλεγχος Χαρακτηρισμού Κρίσιμης Στάθμης .....	102
5.1.2. Έλεγχος Εγκυρότητας Μετρήσεων .....	102
5.1.3. Έλεγχος Συχνότητας Μετρήσεων .....	103
5.1.4. Έλεγχος Αυτονομίας Συσκευής .....	104
5.1.5. Έλεγχος Αντοχής και Ανθεκτικότητας Καλύμματος.....	104
5.1.6. Έλεγχος Στεγανότητας Καλύμματος .....	104
5.1.7. Έλεγχος Σύνδεσης σε Πλατφόρμα .....	105
5.1.8. Έλεγχος Βιωσιμότητας - Επεκτασιμότητας .....	106
5.2. Βελτιώσεις - Προτάσεις .....	106
5.2.1. Τύπος Αισθητήρα .....	107
5.2.2. Κόστος Συσκευής .....	107
5.2.3. Αισθητήρας Κλίσης.....	107
5.2.4. Περιοδική Απενεργοποίηση του Αισθητήρα .....	107
5.2.5. Αποστολή Μηνυμάτων από το TTN.....	108
5.2.6. Κάλυμμα.....	108
5.2.7. Ασφάλεια Συσκευής.....	108
6. Συμπεράσματα .....	109
7. Βιβλιογραφία .....	111
Παράρτημα Α - Κώδικες .....	116
Α.1. Κώδικας Calibration.....	116

A.2. Κώδικας Testing .....	118
A.3. Επεξεργασία μετρήσεων Calibration.....	121
A.4. Επεξεργασία μετρήσεων Testing .....	124
A.5. Κώδικας First Configuration.....	125
A.6. Κώδικας Αποστολής Μετρήσεων στο TTN .....	127
A.7. Κώδικας Επεξεργασίας Μηνυμάτων στο TTN.....	131
A.8. Κώδικας Βελτιστοποίησης Δρομολογίου.....	131
Παράρτημα Β - Κατασκευαστικά Σχέδια .....	134

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Γεωγραφική κάλυψη σταθμών βάσης στην Αττική .....	68
Εικόνα 2: Arduino MKR WAN 1310 w/out Antenna.....	70
Εικόνα 3: Pin Header 4x1 Right Angled.....	70
Εικόνα 4: Jumper Wires 15cm Male to Female.....	70
Εικόνα 5: Battery Li-Po 3.7V - 2500mAh .....	71
Εικόνα 6: Πειραματική διάταξη για τον καθορισμό της καμπύλης του αισθητήρα .....	82
Εικόνα 7: Εποπτική παρουσίαση της εφαρμογής που δημιουργήθηκε στην πλατφόρμα TTN.....	92
Εικόνα 8: Εποπτική παρουσίαση της εφαρμογής που δημιουργήθηκε στην πλατφόρμα TTN.....	93
Εικόνα 9: Τα μηνύματα που φτάνουν στην πλατφόρμα κατά την πρώτη σύνδεση της με την πλακέτα .....	93
Εικόνα 10: Αποκρυπτογράφηση του μηνύματος από δεκαεξαδικό σύστημα σε συμβολοσειρά .....	94
Εικόνα 11: Μηνύματα που προβάλλονται και υποδηλώνουν ότι ο κάδος θα πρέπει σύντομα να αδειάσει.....	95
Εικόνα 12: Μηνύματα που προβάλλονται και υποδηλώνουν ότι ο κάδος δεν απαιτείται να αδειάσει .....	95
Εικόνα 13: Έξι διαδοχικές μετρήσεις, ανά μία ημέρα η καθεμία .....	103
Εικόνα 14: Αποστολές μηνυμάτων στην πλατφόρμα για μετρήσεις ανά 1 λεπτό ...	105
Εικόνα 15: Ενεργοποίηση συσκευής και αποστολή του πρώτου μηνύματος μέτρησης .....	105
Εικόνα 16: Αποστολές μηνυμάτων στην πλατφόρμα για μετρήσεις ανά 1 ώρα.....	106

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Κατάταξη Χωρών της Ε.Ε. βάσει του Ποσοστού Παραγωγής Απορριμμάτων .....	16
Σχήμα 2: Μέση ποιοτική σύσταση αστικών αποβλήτων .....	16
Σχήμα 3: Ενεργειακή απόδοση και κόστος τελικής συσκευής και συνδέσεως διαφόρων δικτύων .....	39
Σχήμα 4: Εύρος ζώνης και γεωγραφική κάλυψη διαφόρων δικτύων .....	40
Σχήμα 5: Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και γεωγραφική κάλυψη διαφόρων δικτύων .....	40
Σχήμα 6: Τεχνική Διαμόρφωσης Spread Spectrum .....	43
Σχήμα 7: Χορηγοί μέλη της LoRa – Alliance .....	43
Σχήμα 8: Τυπική δομή ενός δικτύου LoRaWAN .....	45
Σχήμα 9: Επίπεδα δικτύου LoRaWAN.....	46
Σχήμα 10: LoRaWAN συσκευή κλάσης Α.....	47
Σχήμα 11: LoRaWAN συσκευή κλάσης Β.....	47
Σχήμα 12: LoRaWAN συσκευή κλάσης Γ .....	48
Σχήμα 13: Ασφάλεια LoRaWAN .....	48
Σχήμα 14: Πλεονεκτήματα μεταξύ των τεχνολογιών IoT σε διαφορετικούς παράγοντες .....	54
Σχήμα 15: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας των IR αισθητήρων.....	61
Σχήμα 16: Σχηματική αναπαράσταση του υπολογισμού της απόστασης.....	62
Σχήμα 17: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας των Ultrasonic αισθητήρων..	63
Σχήμα 18: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας των LiDAR αισθητήρων .....	64
Σχήμα 19: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας των LED Time-of-Flight αισθητήρων.....	65
Σχήμα 20: Μία αρχική προσέγγιση του τρόπου σύνδεσης των δύο τμημάτων του καλύμματος κατά τη διάρκεια του προκαταρκτικού σχεδιασμού.....	73
Σχήμα 21: Συνδεσμολογία μετρητικής διάταξης της συσκευής.....	74
Σχήμα 22: Το ένα εκ των δύο μερών του καλύμματος όπου φέρει το θηλυκό μέρος της σύνδεσης και τη φλάντζα (Αριστερά).....	75
Σχήμα 23: Το τμήμα του καλύμματος με το θηλυκό τμήμα της σύνδεσης και τη φλάντζα. Το κομμάτι έχει παρουσιασθεί σε διαφανή μορφή προκειμένου να γίνεται ξεκάθαρη η θέση της φλάντζας (μαύρο ορθογωνικό τμήμα).....	76
Σχήμα 24: Η οπή του κοχλίας σύνδεσης των δύο μερών έχει ειδική διαμόρφωση ώστε ο κοχλίας να φυτεύεται μέσα σε αυτή .....	76
Σχήμα 25: Εξέλιξη του τρόπου σύνδεσης των δύο τμημάτων από τον προκαταρκτικό σχεδιασμό στον λεπτομερή .....	77
Σχήμα 26: Η βάση τοποθέτησης του αισθητήρα μέσα στο κάλυμμα .....	77
Σχήμα 27: Βάση τοποθέτησης του Arduino μέσα στο κάλυμμα .....	78
Σχήμα 28: Η βάση στήριξης της μπαταρίας μέσα στο κάλυμμα. Τα δύο μαύρα τμήματα αποτελούν τα ελαστικά μέρη τα οποία «εγκλωβίζουν» και συγκρατούν σφιχτά την μπαταρία μόλις αυτή τοποθετηθεί .....	78
Σχήμα 29: Το συναρμολόγημα (assembly) του καλύμματος μαζί με τα τρία εξαρτήματα .....	79
Σχήμα 30: Το συναρμολόγημα της βάσης .....	80
Σχήμα 31: Το συναρμολόγημα καλύμματος, εξαρτημάτων και βάσης.....	81

Σχήμα 32: Διαστάσεις κάδου χωρητικότητας 1100 λίτρων .....	86
Σχήμα 33: Διαστάσεις κάδου χωρητικότητας 240 λίτρων .....	86
Σχήμα 34: Σχηματική αναπαράσταση του προβλήματος και των δεδομένων αυτού	98
Σχήμα 35: Απεικόνιση της τελικά σχηματιζόμενης διαδρομής.....	100
Σχήμα 36: Σχέδιο βασικής μορφολογίας της πλακέτας Arduino .....	134
Σχήμα 37: Σχέδιο βασικής μορφολογίας του αισθητήρα υπέρυθρων .....	135
Σχήμα 38: Σχέδιο βασικής μορφολογίας της μπαταρίας λιθίου .....	136
Σχήμα 39: Σχέδιο του θηλυκού τμήματος του καλύμματος με τις υποδοχές για τον αισθητήρα και την πλακέτα.....	137
Σχήμα 40: Σχέδιο του αρσενικού τμήματος του καλύμματος με την υποδοχή για την μπαταρία.....	138
Σχήμα 41: Συναρμολόγημα του θηλυκού τμήματος του καλύμματος με τον αισθητήρα και την πλακέτα .....	139
Σχήμα 42: Συναρμολόγημα του αρσενικού τμήματος του καλύμματος με την μπαταρία .....	140
Σχήμα 43: Συναρμολόγημα του καλύμματος με τα τρία περιεχόμενα εξαρτήματα..	141
Σχήμα 44: Συναρμολόγημα της βάσης στήριξης του καλύμματος .....	142
Σχήμα 45: Συναρμολόγημα του καλύμματος με τα περιεχόμενα εξαρτήματα και τη βάση στήριξης.....	143

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Εποπτική παρουσίαση των ήδη υφιστάμενων λύσεων διαχείρισης απορριμμάτων .....	21
Πίνακας 2: Πληρότητες και Μέσος Όρος Πληρότητας Κάδων Τύπου Α βάσει των δύο Παρατηρήσεων .....	26
Πίνακας 3: Πληρότητες και Μέσος Όρος Πληρότητας Κάδων Τύπου Β βάσει των δύο Παρατηρήσεων .....	27
Πίνακας 4: Πληρότητες και Μέσος Όρος Πληρότητας Κάδων Τύπου Β-Β βάσει των δύο Παρατηρήσεων .....	28
Πίνακας 5: Μέσος Όρος Πληρότητας Κάδων Τύπου Α και Β .....	28
Πίνακας 6: Μέσος Όρος Πληρότητας Κάδων Τύπου Β-Β.....	29
Πίνακας 7: Ημερήσια Κόστη Α/Φ Οχήματος .....	32
Πίνακας 8: Ημερήσιο Κόστος Καυσίμων Α/Φ Οχήματος .....	32
Πίνακας 9: Ημερήσιο Κόστος Εργατικού Δυναμικού Α/Φ Οχήματος .....	34
Πίνακας 10: Συνολικό Ετήσιο Κόστος Αποκομιδής Απορριμμάτων.....	34
Πίνακας 11: Χρονική διάρθρωση δρομολογίου As-is και Πρόβλεψης.....	35
Πίνακας 12: Ημερήσιο κόστος Α/Φ οχήματος As-is και Πρόβλεψης.....	35
Πίνακας 13: Ημερήσιο κόστος καυσίμων Α/Φ οχήματος As-is και Πρόβλεψης.....	36
Πίνακας 14: Ημερήσιο κόστος εργατικού δυναμικού Α/Φ οχήματος As-is και Πρόβλεψης.....	36
Πίνακας 15: Συνολικό ετήσιο κόστος αποκομιδής απορριμμάτων As-is και Πρόβλεψης .....	37
Πίνακας 16: Χαρακτηριστικά LP-WAN δικτύων Sigfox, LoRa, NB-IoT .....	51
Πίνακας 17: Διαφορετικά κόστη μεταξύ των LoRa, Sigfox και NB-IoT.....	53
Πίνακας 18: Σημασία του 1 <sup>ου</sup> ψηφίου στον κώδικα IP .....	57
Πίνακας 19: Σημασία του 2ου ψηφίου του κώδικα IP.....	57
Πίνακας 20: Βασικά χαρακτηριστικά της πλακέτας Arduino MKR WAN 1310 .....	60
Πίνακας 21: Σύνοψη των βασικότερων χαρακτηριστικών για τους τύπους αισθητήρων .....	66
Πίνακας 22: Τεχνικά χαρακτηριστικά του Pololu Infrared Sharp Sensor GP2Y0A60SZLF, 3V .....	67
Πίνακας 23: Πίνακας υλικών και ιδιοτήτων.....	69
Πίνακας 24: Πίνακας υλικών της μετρητικής διάταξης.....	70
Πίνακας 25: Τιμές εξαρτημάτων μετρητικής διάταξης και συνολικό κόστος.....	74
Πίνακας 26: Παράδειγμα δομής του αρχείου Initial Conditions.dat.....	97
Πίνακας 27: Παράδειγμα δομής του αρχείου Capacity.dat.....	97
Πίνακας 28: Παραδείγματα δομής των αρχείων Rbnn.dat .....	97
Πίνακας 29: Παράδειγμα δομής του αρχείου ID_number .....	97
Πίνακας 30: Παράδειγμα δομής του αρχείου Distances .....	97
Πίνακας 31: Εποπτικός πίνακας των αποστάσεων κάθε κόμβου από όλους τους άλλους.....	98
Πίνακας 32: Πρώτο στάδιο καθορισμού βέλτιστης διαδρομής .....	98
Πίνακας 33: Δεύτερο στάδιο καθορισμού βέλτιστης διαδρομής .....	99
Πίνακας 34: Τρίτο στάδιο καθορισμού βέλτιστης διαδρομής.....	99
Πίνακας 35: Τέταρτο στάδιο καθορισμού βέλτιστης διαδρομής.....	99
Πίνακας 36: Πέμπτο στάδιο καθορισμού βέλτιστης διαδρομής .....	100

Πίνακας 37: Τελικό στάδιο καθορισμού βέλτιστης διαδρομής .....	100
Πίνακας 38: Το αρχείο Initial Conditions.dat του παραδείγματος .....	100
Πίνακας 39: Το αρχείο Capacity.dat του παραδείγματος .....	101
Πίνακας 40: Τα αρχεία Rbnn.dat του παραδείγματος .....	101
Πίνακας 41: Το αρχείο εξόδου Final Path του παραδείγματος .....	101

# 1. Εισαγωγή

## 1.1. Ορισμοί

**Στερεά Απόβλητα:** Ως στερεά απόβλητα (ΣΑ) νοούνται τα στερεά υλικά ή υλικά με ελάχιστο υγρό περιεχόμενο, τα οποία δεν έχουν κάποια χρησιμότητα και ως εκ τούτου ο κάτοχός τους μετά τη χρήση τα απορρίπτει ή προτίθεται ή υποχρεούται να τα απορρίψει (Χαραλάμπους, 2018). Τα στερεά απόβλητα ομαδοποιούνται γενικά σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Αστικά απορρίμματα
- Ειδικά απόβλητα:
  - ✓ Επικίνδυνα απόβλητα
  - ✓ Μη επικίνδυνα απόβλητα
  - ✓ Ιατρικά απόβλητα

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εστιάζει στα αστικά στερεά απόβλητα (ΑΣΑ) τα οποία προέρχονται κυρίως από:

- Οικίες, σχολεία, γήπεδα
- Εμπορικές δραστηριότητες
- Μονάδες επεξεργασίας αστικών αποβλήτων, νερού
- Ανοικτούς χώρους (δρόμους, πλατείες,...)
- Βασικά μη καύσιμα υλικά
- Ογκώδη αντικείμενα

**Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ):** Το σύνολο των δραστηριοτήτων από τη φάση της παραγωγής τους ως και τη φάση της τελικής διάθεσής τους στο περιβάλλον, με ή χωρίς προηγούμενη βιομηχανική επεξεργασία (Χαραλάμπους, 2018).

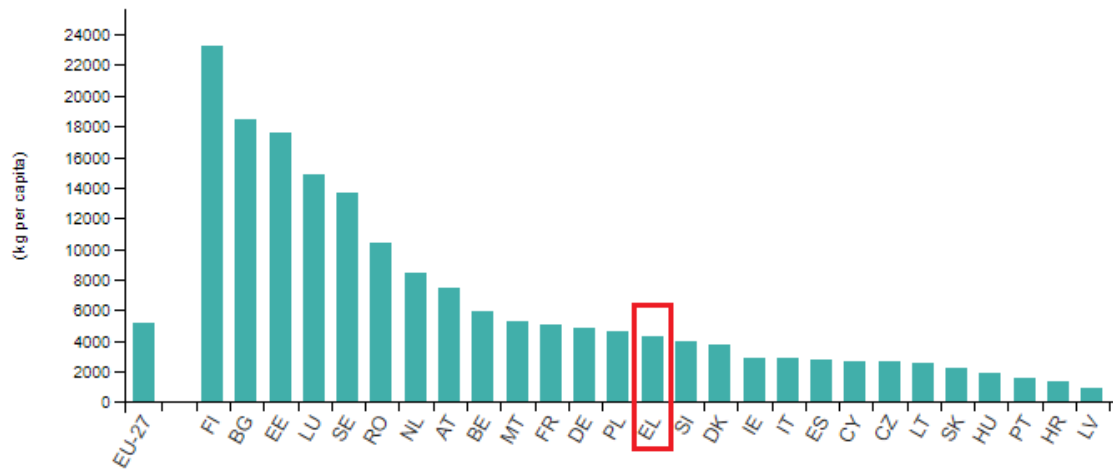
## 1.2. Το πρόβλημα

### 1.2.1. Υπάρχουσα Κατάσταση

Η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου του ανθρώπου έχει αλλάξει τις καταναλωτικές και διατροφικές συνήθειες του. Ο άνθρωπος καταναλώνει περισσότερο, ενώ ταυτόχρονα η αγορά ενός νέου προϊόντος έχει καταστεί οικονομικότερη από την επισκευή ενός παλιού. Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα την μετατροπή περισσότερων προϊόντων και συσκευασιών σε απορρίμματα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την βιομηχανοποίηση που επικρατεί στη σημερινή εποχή οδηγούν σε ραγδαία αύξηση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ). Το πρόβλημα αυτό είναι αρκετά πιο έντονο στις αστικές έναντι των επαρχιακών περιοχών, καθώς στις πόλεις η συγκέντρωση των κατοίκων είναι αυξημένη (και διαρκώς αυξανόμενη).

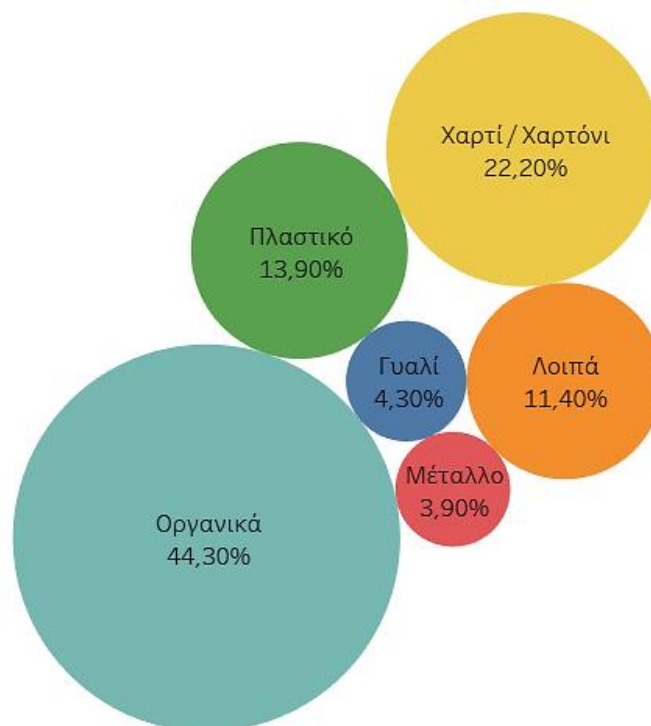
Σύμφωνα με τις στατιστικές έρευνες της Eurostat, το έτος 2018 ο μέσος όρος 27 χωρών της Ε.Ε. στην παραγωγή απορριμμάτων ανά κάτοικο ήταν 5.2 τόνοι (Eurostat, 2020).





**Σχήμα 1:** Κατάταξη Χωρών της Ε.Ε. βάσει του Ποσοστού Παραγωγής Απορριμμάτων

Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας για το έτος 2018 η παραγωγή αστικών στερεών αποβλήτων στην Ελλάδα ανερχόταν στους 5.523.809 τόνους ενώ η κατά κεφαλήν παραγωγή στα 514 Kg/κάτοικο/έτος (ENVIROPLAN, 2020). Η ποιοτική σύσταση των ΑΣΑ στην Ελλάδα το 2018 ήταν η παρακάτω.



**Σχήμα 2:** Μέση ποιοτική σύσταση αστικών αποβλήτων

Σε έναν διαρκώς αυξανόμενο ρυθμό παραγωγής απορριμμάτων, οι κυβερνήσεις προσπαθούν να οργανώσουν τα συστήματα διαχείρισης των απορριμμάτων τους με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, ώστε να αποφύγουν ένα πλήθος προβλημάτων που μπορεί να δημιουργήσει η μη ορθή διαχείρισή τους. Τα βασικότερα από αυτά τα προβλήματα αναλύονται παρακάτω.

### 1.2.2. Η επίδραση των απορριμμάτων στο βιοτικό επίπεδο των κατοίκων

Η εικόνα των πόλεων υποδηλώνει ότι θα πρέπει άμεσα να βελτιωθεί το σύστημα διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων. Η υπερχείλιση των κάδων καθώς και η απόρριψη απορριμμάτων εκτός αυτών εγκυμονεί μεγάλους κινδύνους για τη δημόσια υγεία. Οι δυσοσμίες καθώς και το αποκρουστικό θέαμα υπονομεύουν το βιοτικό επίπεδο των πολιτών, ενώ υπάρχει και υψηλή πιθανότητα αυτανάφλεξης των απορριμμάτων, ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες. Η φωτιά σε έναν τέτοιο χώρο, πέρα από τον κίνδυνο πυρκαγιάς, ευθύνεται και για την απελευθέρωση στην ατμόσφαιρα επικίνδυνων σωματιδίων, που θέτουν σε κίνδυνο τη δημόσια υγεία (Γραμματικογιάννης, 2009).

Επιπλέον, χωρίς τον κατάλληλο χειρισμό, τα οργανικά απορρίμματα γίνονται χώροι αναπαραγωγής και συντήρησης για έντομα και τρωκτικά. Τα μολυσμένα έντομα και τα τρωκτικά είναι δυνατό να μεταδώσουν παθογόνους μικροοργανισμούς στον άνθρωπο και τα ζώα, όπως το πλασμώδιο της ελονοσίας, τη λεισμάνια, την αμοιβάδα, την σαλμονέλα και διάφορους ιούς, όπως του κίτρινου πυρετού καθώς και αρκετούς νευροτρόπους ιούς, που είναι εξαιρετικά επικίνδυνοι για τον άνθρωπο και τα ζώα. Η επικινδυνότητα των νευροτρόπων ιών οφείλεται στο γεγονός ότι, είναι δυνατό να προκαλέσουν θανατηφόρες μορφές εγκεφαλίτιδας και μηνιγγίτιδας (Γιαμαρέλλου, 2005).

Τέλος, μελέτες έχουν δείξει ότι ένα μεγάλο ποσοστό εργαζόμενων που χειρίζονται τα απορρίμματα, καθώς και οι άνθρωποι που ζουν κοντά σε περιοχές διάθεσης απορριμμάτων έχουν αποικιστεί στο γαστρεντερικό τους σύστημα από παθογόνα βακτήρια και παράσιτα, όπως πρωτόζωα και έλμινθες (σκώληκες) (Γιαμαρέλλου, 2005).

### 1.2.3. Η επίδραση των απορριμμάτων στην επιβάρυνση του περιβάλλοντος

Η ανεξέλεγκτη διάθεση των απορριμμάτων οδηγεί σε πλείστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και περιβαλλοντικούς κινδύνους. Η μη συστηματική και χωρίς εφαρμογή συγκεκριμένης τεχνολογίας απόρριψη των απορριμμάτων, επιβαρύνει το περιβάλλον κυρίως εξαιτίας της διαφυγής ρυπογόνων και μολυσματικών στραγγισμάτων στον υδροφόρο ορίζοντα, αλλά και μέσω των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου όπως μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα (Γραμματικογιάννης, 2009).

Επίσης, η ελλιπής ενασχόληση των Δήμων με τη δημιουργία «έξυπνων» δρομολογίων αποκομιδής των απορριμμάτων οδηγεί στην ύπαρξη αρκετών περιπτώσεων διαδρομών των απορριμματοφόρων. Οι διαδρομές αυτές κοστίζουν περιβαλλοντικά αφού αυξάνουν την κατανάλωση καυσίμου και άρα τις εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα ενώ ταυτόχρονα μειώνουν το χρόνο ζωής των οχημάτων (άρα απαιτείται ταχύτερη απόσυρση).

### 1.2.4. Η επίδραση των απορριμμάτων στα έξοδα των Δήμων

Η ελληνική κοινωνία παράγει μια μεγάλη ποσότητα αποβλήτων τα οποία θα πρέπει να διαχειριστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι κίνδυνοι στη δημόσια υγεία και το περιβάλλον. Οι δήμοι διαδραματίζουν έναν ενεργό ρόλο στη διαχείριση αποβλήτων παρέχοντας υπηρεσίες απομάκρυνσης και ανακύκλωσης αποβλήτων.

Επίσης ρυθμίζουν την απομάκρυνση αποβλήτων από ιδιώτες και οργανισμούς του δήμου.

Η διαχείριση των απορριμμάτων αποτελεί ένα από τα πιο δυσβάσταχτα έξοδα για τους Δήμους της Ελλάδας, και κυρίως του μεγάλους Δήμους όπως αυτός της Αττικής. Σύμφωνα με τον Δήμαρχο των 3B (Βάρης Βούλας Βουλιαγμένης) «Ο βασικός ρόλος των δημάρχων είναι να είμαστε σκουπιδιάρηδες, να μαζεύουμε δηλαδή και να διαχειριζόμαστε όσο καλύτερα γίνεται τα απορρίμματα των δημοτών» (Γεωργιοπούλου, 2020).

### 1.3. Υπάρχουσες Λύσεις

Όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα ότι υπάρχει ανάγκη για έξυπνη διαχείριση των απορριμμάτων από τους Δήμους, με σκοπό τη μείωση των περιβαλλοντικών αλλά και των οικονομικών επιπτώσεων. Η έξυπνη διαχείριση των απορριμμάτων, μέχρι στιγμής, ταυτίζεται με τον όρο «Έξυπνοι Κάδοι». Οι έξυπνοι κάδοι, μέσω αισθητήρων, μπορούν να προσδιορίσουν τη στάθμη τους και άρα το ποσοστό πλήρωσής τους. Στη συνέχεια, μέσω του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), αποστέλλουν τα δεδομένα αυτά σε διαδικτυακές πλατφόρμες, στις οποίες είναι δυνατή η αποθήκευση και επεξεργασία. Μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων μπορούν να υπολογιστούν τα βέλτιστα δρομολόγια κάθε απορριμματοφόρου καθώς και η απαιτούμενη συχνότητα αυτών.

Τα τελευταία χρόνια, έχει αναπτυχθεί πλήθος λύσεων για μετατροπή των συμβατικών κάδων σε έξυπνους. Ωστόσο, καμία από αυτές τις λύσεις δεν έχει χρησιμοποιηθεί έως σήμερα από Δήμους σε ευρεία κλίμακα ενώ οι περισσότερες χρησιμοποιούνται από επιχειρήσεις για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματός τους. Παρακάτω παρατίθενται οι πέντε βασικότερες υπάρχουσες λύσεις που εντοπίστηκαν και τα χαρακτηριστικά τους. Σκοπός της μελέτης που ακολουθεί ήταν ο εντοπισμός των στοιχείων εκείνων, που αποτελούν τροχοπέδη για την υιοθέτηση και ευρεία χρήση των έξυπνων συσκευών από τους Δήμους.

#### 1.3.1. Σύστημα EasyBin

Το σύστημα EasyBin προσφέρει μία ολοκληρωμένη λύση στη διαχείριση των απορριμμάτων με τη χρήση πέντε καινοτόμων μηχανισμών:

**nPod EasyBin:** Ο εξοπλισμός nPod επιτρέπει τη μέτρηση της στάθμης των κάδων και την αποστολή των μετρούμενων αποτελεσμάτων. Διαθέτει διπλούς αισθητήρες υπερήχων με μεταβλητή γωνία για την προσαρμογή τους στον εκάστοτε κάδο και στεγάζεται σε μία ανθεκτική πολυκαρβονική θήκη (περίβλημα). Η επικοινωνία με το κέντρο ελέγχου για την αποστολή των μετρήσεων γίνεται μέσω GPRS (2G/3G δίκτυα κινητής τηλεφωνίας).

**EasyBin HUB:** Η διαδικτυακή εφαρμογή EasyBin HUB είναι το κέντρο για τη λήψη αποφάσεων, τη δημιουργία διαδρομών και την ανάλυση των αποτελεσμάτων (reporting). Πρόκειται για ένα κεντρικό σύστημα παρακολούθησης του επιπέδου πληρότητας σε πραγματικό χρόνο που μπορεί να προσαρμοστεί στις ανάγκες κάθε

Δήμου. Βάσει των δεδομένων πραγματικού χρόνου παρέχει πληροφορίες σχετικά με τις διαδρομές και τα απαιτούμενα δρομολόγια αποκομιδής.

**EasyBin Collect:** Η εφαρμογή EasyBin Collect αφορά τα κινητά τηλέφωνα και είναι ένας τρόπος σύνδεσης μεταξύ της παρακολούθησης της πληρότητας των κάδων και της εξασφάλισης ότι εξυπηρετούνται οι δημότες του κάθε Δήμου. Περιλαμβάνει την καταγραφή των καθικόντων του οδηγού, την υποστήριξη δρομολόγησης του απορριμματοφόρου οχήματος καθώς και τη συλλογή δεδομένων από το πεδίο καθαρισμού για σπασμένο κάδο, μετατόπιση αυτού κ.α.

**nTag EasyBin:** Ο εξοπλισμός nTag επιτρέπει τις αυτόματες ειδοποιήσεις του κέντρου ελέγχου όταν οι κάδοι απορριμμάτων αδειάζουν. Οι ειδοποιήσεις γίνονται σε πραγματικό χρόνο με τη χρήση έξυπνων Bluetooth συσκευών. Ο εξοπλισμός επιτρέπει την ενημέρωση για τις περισυλλογές των απορριμμάτων από τους κάδους σε πραγματικό χρόνο ενώ συνδέεται αυτόματα με τα κινητά τηλέφωνα των υπαλλήλων καθαριότητας μέσω της εφαρμογής που έχουν οι τελευταίοι. Η εγκατάσταση του εξοπλισμού στους κάδους είναι πολύ εύκολη.

**EasyBin ANALYSER:** Ο Αναλυτής του EasyBin είναι το εργαλείο ανάλυσης με βάση το λογισμικό της Microsoft υπολογιστικών φύλλων γνωστό ως Excel, που επιτρέπει τις σε βάθος μελέτες των ανεπεξέργαστων δεδομένων στον κάδο. Υποστηρίζει την εξαγωγή δεδομένων από το κέντρο ελέγχου EasyBin HUB και την εκτέλεση ανάλυσης βάσει των περιεχομένων των κάδων. Για τη χρήση του EasyBin ANALYSER δεν απαιτείται ιδιαίτερη γνώση χρήσης του Excel.

### 1.3.2. Σύστημα Recytrust

Η συσκευή της Recytrust τοποθετείται στο κάτω μέρος του κάδου και με χρήση αισθητήρων βάρους μπορεί να προσδιορίσει τη στάθμη του κάδου οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Λόγω της φύσης των αισθητήρων είναι εφικτό να εντοπισθεί κάθε προσθήκη ή αφαίρεση απορρίμματος από τον κάδο καθώς και να αναγνωρισθεί πότε ο κάδος είναι άδειος. Επιπλέον, η συσκευή διαθέτει σύστημα RFID με σκοπό να ταυτοποιεί τους χρήστες και να μπορεί να αξιολογεί την συμπεριφορά τους στην ανακύκλωση, προσφέροντας πόντους σε αυτούς που ανακυκλώνουν συχνά. Η σύνδεση της συσκευής με την πλατφόρμα παρουσίασης της στάθμης γίνεται μέσω του Internet και το σύστημα έχει τη δυνατότητα εκπομπής ειδοποιητικού σήματος όταν οι κάδοι γεμίζουν και απαιτούν άδειασμα.

Η Recytrust έχει δημιουργήσει και εφαρμογή για το κινητό, την οποία κατεβάζουν οι υπεύθυνοι καθαριότητας. Μέσω της διασύνδεσης πλατφόρμας - εφαρμογής δημιουργούνται τα βέλτιστα δρομολόγια αποκομιδής, διατηρείται ιστορικό σχετικά με τους κάδους και εξάγοντας στατιστικά που ως σκοπό έχουν τη μείωση του κόστους διαχείρισης των απορριμμάτων. Επειδή τα δεδομένα που λαμβάνει η εφαρμογή είναι σε πραγματικό χρόνο είναι δυνατή η προσαρμογή του εκάστοτε δρομολογίου ανάλογα με την κίνηση στους δρόμους με σκοπό τη μείωση των νεκρών χρόνων στην αποκομιδή.

### 1.3.3. Κάδοι SolarBin

Οι έξυπνοι κάδοι πόλης SolarBin διαθέτουν αισθητήρες υπερήχων μέσω των οποίων μετρούν τη στάθμη των απορριμμάτων. Στη συνέχεια, μέσω μηνυμάτων (sms) και mails ενημερώνουν για την κατάστασή των κάδων τους οδηγούς απορριμματοφόρων. Η παροχή δεδομένων πληρότητας επιτρέπει το βέλτιστο σχεδιασμό των δρομολογίων για τα απορριμματοφόρα, ενώ υπάρχει δυνατότητα καταγραφής του ιστορικού πληρότητας κάθε κάδου με σκοπό τη βέλτιστη εξυπηρέτηση αυτών. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι δεν πρόκειται για ένα σύστημα που μπορεί να ενσωματωθεί στους υπάρχοντες κάδους αλλά για νέους ειδικούς κάδους με ενσωματωμένο το σύστημα που αναφέρθηκε.

### 1.3.4. Vodafone Smart Bins Management

Η λύση Vodafone Smart Bins Management αποτελείται από αισθητήρες διαχείρισης κάδων απορριμμάτων που παρακολουθούν τη χωρητικότητα, την κλίση και τη θερμοκρασία των κάδων, ώστε να προσφέρουν έγκαιρες ειδοποιήσεις. Με αυτόν τον τρόπο, οι αρμόδιοι αδειάζουν μόνο τους κάδους που είναι πλήρεις, επαναφέρουν τους κάδους σε όρθια θέση ή επεμβαίνουν σε περίπτωση φωτιάς. Επιπρόσθετα, η λύση συμβάλει στον σχεδιασμό αποτελεσματικότερων διαδρομών συλλογής απορριμμάτων, ακόμα και σε απομακρυσμένες περιοχές. Η συσκευή που τοποθετείται στους κάδους διαθέτει αισθητήρες που συνδυάζουν υπερηχητική τεχνολογία για τη μέτρηση της στάθμης των απορριμμάτων, καθώς και αισθητήρες για την ανίχνευση φωτιάς και πτώσης/ανατροπής του κάδου.

### 1.3.5. EcoMobile Smart Waste

Το σύστημα EcoMobile Smart Waste προσφέρει μία ολοκληρωμένη λύση στη διαχείριση των απορριμμάτων με τη χρήση τριών συστημάτων.

**EcoMbile SmartWaste Sensor:** Ο αισθητήρας της EcoMobile είναι ένας ειδικά σχεδιασμένος αισθητήρας υπερήχων που μετράει τη στάθμη των κάδων ανεξαρτήτως μορφής και μεγέθους του κάδου. Είναι εφικτό να ενσωματωθεί σε κάθε συμβατικό κάδο ενώ είναι σχεδιασμένος ώστε να αντέχει σε αντίξοες καιρικές συνθήκες αλλά και στη μηχανική καταπόνηση που υφίσταται κατά το άδειασμα του κάδου. Εκτός από τη μέτρηση της στάθμης, ο αισθητήρας έχει τη δυνατότητα να μετράει και τη θερμοκρασία του κάδου ώστε να εντοπίζει περιπτώσεις ανάφλεξης. Ο αισθητήρας διαθέτει σύστημα GPS με τη χρήση του οποίου επιτυγχάνεται τόσο ο γεωεντοπισμός του κάδου όσο και ο προσδιορισμός της κλίσης στην οποία βρίσκεται, ώστε να μπορούν να εντοπισθούν αλλαγές στη θέση του κάδου ή και αναποδογυρίσματα.

Ο αισθητήρας λαμβάνει μετρήσεις ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα που καθορίζονται από μια Cloud εφαρμογή βάσει ιστορικού και έτσι επιτυγχάνεται ενεργειακή αυτονομία 10 ετών. Η στάθμη του κάθε κάδου αποστέλλεται σε Cloud εφαρμογή με τη χρήση ασύρματων δικτύων GPRS (2G/3G δίκτυα). Ο αισθητήρας επίσης υποστηρίζει τεχνολογία WiFi και NBiOT για την μεταφορά των δεδομένων.

**EcoMobile Navigator:** Πρόκειται για μία android εφαρμογή κινητού, η λήψη της οποίας γίνεται από τους υπευθύνους οδηγούς των απορριμματοφόρων και επιτρέπει την επικοινωνία με την Cloud εφαρμογή σε πραγματικό χρόνο. Με χρήση του navigator

οι οδηγοί των απορριμματοφόρων μπορούν να λαμβάνουν οδηγίες εργασίας, να βλέπουν τα δρομολόγια που οφείλουν να εκπονήσουν αλλά και να πλοηγούνται στο χάρτη της περιοχής. Σε περίπτωση που το απορριμματοφόρο γεμίσει πρόωρα ή τελειώσει το δρομολογίο του με αρκετό εναπομένοντα χώρο, οι οδηγοί μπορούν να επικοινωνήσουν με το Cloud και να ζητήσουν επανακαθορισμό του δρομολογίου. Τότε, στον οδηγό θα σταλούν νέες οδηγίες εργασίας, που ή θα τον παραπέμπουν να μεταφερθεί σε σταθμό εκφόρτωσης και θα αντιστοιχίζουν τους μη αδειασμένους κάδους του σε δρομολόγια άλλων απορριμματοφόρων ή θα του ζητούν να αδειάσει επιπρόσθετα συγκεκριμένο πλήθος κοντινών κάδων ώστε να επιτευχθεί πληρότητα του απορριμματοφόρου.

**Cloud Application:** Η Cloud εφαρμογή της EcoMobile συνδυάζει τα δεδομένα για τις στάθμες των κάδων με τα δεδομένα που έχουν συγκεντρωθεί από τα δρομολόγια των απορριμματοφόρων και σχεδιάζει βέλτιστα δρομολόγια αποκομιδής. Επιπλέον, σε περίπτωση που από τον αισθητήρα έχουν καταγραφεί μετρήσεις που υποδηλώνουν φωτιά, μετακίνηση κάδου ή αναποδογύρισμα, η εφαρμογή αποστέλλει προειδοποιητικά SMS και E-mails στους υπευθύνους καθαριότητας, ώστε να διορθώσουν την κατάσταση. Τέλος, μέσω της ανάλυσης των δεδομένων πληρότητας μπορεί να εκτιμά τα χρονικά διαστήματα ανά τα οποία χρειάζεται αποκομιδή, να υπολογίζει το πλήθος και τον τύπο απορριμματοφόρων που χρειάζονται για να καλύψουν μια συγκεκριμένη περιοχή και να αποστέλλει οδηγίες προς τους οδηγούς των απορριμματοφόρων.

### 1.3.6. Εποπτική Παρουσίαση Υπαρχουσών Λύσεων

Οι λύσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

**Πίνακας 1: Εποπτική παρουσίαση των ήδη υφιστάμενων λύσεων διαχείρισης απορριμμάτων**

Όνομα Έργου	Τύπος Αισθητήρα	Μέθοδος Γεωεντοπισμού Κάδου	Μέθοδος Μετάδοσης Πληροφοριών
<b>Σύστημα EasyBin</b>	Αισθητήρας Υπερήχων	GPS	2G/3G (GPRS)
<b>Σύστημα Recytrust</b>	Αισθητήρας Βάρους	GPS	Wi-Fi
<b>Κάδοι SolarBin</b>	Αισθητήρας Υπερήχων	GPS	GPRS
<b>Vodafone Smart Bins Management</b>	Αισθητήρας Υπερήχων	GPS	4G
<b>EcoMobile SmartWaste</b>	Αισθητήρας Υπερήχων	GPS	2G/3G (GPRS)

### 1.3.7. Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι λύσεις που έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής χρησιμοποιούν τεχνολογία GPS προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα γεωγραφικού εντοπισμού των έξυπνων κάδων, ενώ για τη μεταφορά δεδομένων χρησιμοποιούν δίκτυα 2G, 3G ή 4G. Οι τεχνολογίες αυτές, παρότι παρέχουν τις ζητούμενες λειτουργικότητες έχουν ένα μειονέκτημα που τις καθιστά ανεπαρκείς για τη συγκεκριμένη περίπτωση. Αυτό είναι η υψηλή κατανάλωση ενέργειάς τους, η οποία



απαιτεί είτε τη μόνιμη σύνδεσή τους σε δίκτυο παροχής ενέργειας, είτε την αλλαγή των μπαταριών τους ανά λίγες ημέρες. Η ελλιπής αυτονομία των συσκευών γεννά ένα επιπλέον πρόβλημα, αυτό της αδυναμίας εγκλεισμού τους σε κουτιά. Οι συσκευές θα πρέπει να μπορούν να συσκευαστούν σε κατάλληλα κουτιά προκειμένου να προστατευθούν από τις δυσμενείς συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν στους κάδους, κάτι που δεν μπορεί να συμβεί αν απαιτείται η τακτική πρόσβαση σε αυτές για λόγους τροφοδοσίας.

#### 1.4. Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου (end-to-end) συστήματος έξυπνης διαχείρισης των απορριμμάτων, που θα είναι ικανό να προσφέρει μεγάλη ενεργειακή αυτονομία και ανθεκτικότητα συσκευής.

Με σκοπό τον έλεγχο της βιωσιμότητας της προτεινόμενης ιδέας, εκπονήθηκε έρευνα-μελέτη, η οποία εστίασε στο οικονομικό κέρδος που θα μπορούσε να έχει ο εκάστοτε Δήμος από την υιοθέτηση ενός συστήματος έξυπνης διαχείρισης των απορριμμάτων. Το περιβαλλοντικό και υγειονομικό κέρδος θεωρήθηκε βέβαιο γι' αυτό και δε μελετήθηκε εκτενώς.

Προκειμένου να επιλεγεί η τεχνολογία εκείνη που θα μπορούσε να προσφέρει τη μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση, ικανοποιώντας ταυτόχρονα την ανάγκη γεωεντοπισμού και μετάδοσης πληροφοριών, εκπονήθηκε μελέτη σχετικά με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και τα δίκτυα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στις IoT συσκευές.

Για τη μετατροπή των συμβατικών κάδων σε έξυπνους, δημιουργήθηκε μία συσκευή η οποία μπορεί να ενσωματωθεί στους υπάρχοντες κάδους και έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει τη στάθμη τους ανά πάσα στιγμή. Η συσκευή σχεδιάστηκε με τρόπο τέτοιο, ώστε να είναι ικανή να ανταπεξέλθει στις ιδιαίτερες συνθήκες που επικρατούν σε έναν κάδο (υγρασία, φθορά, αυτονομία), ικανοποιώντας έτσι τη δεύτερη προδιαγραφή του συστήματος, την ανθεκτικότητα της συσκευής. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από τη μέτρηση της στάθμης του κάθε κάδου μπορούν να αποσταλούν σε μία διαδικτυακή πλατφόρμα που παρέχει τη δυνατότητα αξιοποίησης αυτών με σκοπό τη δημιουργία των βέλτιστων δρομολογίων των απορριματοφόρων. Παράλληλα, καθίσταται εφικτή η εξαγωγή στατιστικών και συμπερασμάτων σχετικά με τις παραμέτρους του συστήματος διαχείρισης απορριμμάτων κάθε Δήμου, όπως η απαιτούμενη συχνότητα δρομολογίων, ο απαιτούμενος αριθμός κάδων, η βέλτιστη χωροθέτηση των κάδων κ.α.

#### 1.5. Δομή Εργασίας

Το παρόν κεφάλαιο εισάγει τον αναγνώστη στο αντικείμενο και τους στόχους της εργασίας και παρέχει μια εικόνα για το περιεχόμενο των κεφαλαίων που ακολουθούν.

Στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζεται η μελέτη βιωσιμότητας που εκπονήθηκε με σκοπό τον καθορισμό των οφελών που θα μπορούσε να φέρει η χρήση ενός συστήματος έξυπνης διαχείρισης των απορριμμάτων στους Δήμους.

Στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναλύεται η έννοια «Διαδίκτυο των Πραγμάτων» και οι σύγχρονες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός καινοτόμου συστήματος έξυπνης διαχείρισης των απορριμμάτων.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από έλεγχο της λειτουργίας του συστήματος και αξιολογείται η τήρηση των απαραίτητων προδιαγραφών. Επιπλέον, προτείνονται τρόποι βελτίωσης του συστήματος για μελλοντική διερεύνηση.

Στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα στα οποία καταλήγει η εν λόγω εργασία και αξιολογείται η αξία της, οι αδυναμίες και τα περιθώρια βελτίωσης που παρουσιάζει το σύστημα.



## 2. Ανάλυση Βιωσιμότητας

Για τον έλεγχο της βιωσιμότητας ενός συστήματος έξυπνης διαχείρισης απορριμμάτων εκπονήθηκε μελέτη σχετικά με τα οφέλη που θα μπορούσε να αποφέρει η υιοθέτηση του συστήματος αυτού από τους Δήμους. Παρακάτω παρατίθεται η μελέτη που εκπονήθηκε σχετικά με τη διαχείριση των απορριμμάτων στο Δήμο Κορυδαλλού. Τα δεδομένα που θα προσφέρουν τις απαραίτητες πληροφορίες για την εξαγωγή συμπερασμάτων προέρχονται από τη Διπλωματική Εργασία του κ. Γεώργιου Ν. Θεοδωρίδη, «Ανάλυση και Βελτιστοποίηση Εφοδιαστικής Αλυσίδας Συλλογής Αστικών Απορριμμάτων - Εφαρμογή στο Δήμο Κορυδαλλού» (Θεοδωρίδης, 2011).

### 2.1. Εισαγωγικά Στοιχεία

Ο Δήμος Κορυδαλλού για τη διαχείριση των οικιακών απορριμμάτων, έχει οργανώσει το σύστημα καθαριότητας του κατά τέτοιο τρόπο, ώστε ολόκληρη η έκτασή του, να είναι χωρισμένη σε 15 μεγάλες περιφέρειες. Κάθε μία από αυτές είναι χωρισμένη σε δύο μικρότερες υποπεριφέρειες με παραπλήσια μεταξύ τους έκταση. Θα πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι οι 15 μεγάλες περιφέρειες δεν είναι εδαφικά ισοδύναμες, δηλαδή δεν έχουν ίση έκταση μεταξύ τους. Η ανομοιομορφία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι, τα διάφορα τμήματα της πόλης δεν έχουν ίδια κατανομή και πυκνότητα πληθυσμού. Αυτό έχει ως συνέπεια, να υπάρχει διαφορετικός όγκος απορριμμάτων (τόσο σύμμεικτων όσο και ανακύκλωσης) σε καθημερινή βάση. Ο διαχωρισμός έχει γίνει, λοιπόν, ώστε να επιτευχθούν σχετικά ισοδύναμοι όγκοι οικιακών απορριμμάτων ημερήσια ανά περιφέρεια.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω υπάρχουν 15 περιφέρειες και καθεμία από αυτές είναι χωρισμένη σε δύο υποπεριφέρειες. Τα δρομολόγια εκτελούνται εναλλάξ, τη μία ημέρα στη μία υποπεριφέρεια και την επομένη στην άλλη. Κάθε ημέρα πραγματοποιείται ένα δρομολόγιο ανά περιφέρεια, συνεπώς η κάθε υποπεριφέρεια εξυπηρετείται ανά δύο ημέρες. Χρησιμοποιούνται 15 απορριματοφόρα (ένα για κάθε περιφέρεια), καθένα εκ των οποίων κατέχει πλήρωμα. Το πλήρωμα των οχημάτων απαρτίζεται από 3 μέλη, έναν οδηγό και δύο καθαριστές.

Αξιοσημείωτο είναι, ότι τα δρομολόγια έχουν σχεδιαστεί από την αρμόδια υπηρεσία του Δήμου, έτσι ώστε να μαζεύουν ένα συγκεκριμένο συνολικό βάρος απορριμμάτων καθημερινά, το οποίο, έχει προσδιοριστεί κυρίως από την εμπειρία που έχει συγκεντρωθεί, εδώ και ορισμένες δεκαετίες, από τη συλλογή των απορριμμάτων στο Δήμο. Δεν έχουν γίνει δηλαδή, εμπειριστατωμένες μελέτες, οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε χρήσιμα συμπεράσματα σε ό,τι αφορά τη συχνότητα των δρομολογίων, τη μεγιστοποίηση της πληρότητας (στο βαθμό που είναι εφικτό) του απορριματοφόρου οχήματος, τη σωστή χωροθέτηση των κάδων προσωρινής αποθήκευσης και τον σχεδιασμό των δρομολογίων.

Σε ό,τι αφορά την περιγραφή της εφοδιαστικής αλυσίδας απορριμμάτων, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διαδικασία εκτέλεσης ενός δρομολογίου συλλογής σύμμεικτων αποβλήτων (πράσινοι κάδοι) περιλαμβάνει τα εξής:

- 1) Τα απορριματοφόρα οχήματα ξεκινούν με τα πληρώματά τους, τις πρώτες πρωινές ώρες, έτσι ώστε να μην εμποδίζονται από τον αυξημένο κυκλοφοριακό

φόρτο, που αναπτύσσεται αργότερα, αλλά και να μην εμποδίζουν και καθυστερούν και τα ίδια, την καθημερινή κίνηση των πολιτών.

- 2) Η εκκίνηση γίνεται από τον Σταθμό των Απορριμματοφόρων Οχημάτων και στη συνέχεια κάθε πλήρωμα με το αντίστοιχο όχημα κατευθύνεται προς την περιφέρεια ευθύνης του.
- 3) Φτάνοντας στην περιοχή ευθύνης του, το πλήρωμα ξεκινά την εκκαθάριση όλων των μικρών και μεγάλων κάδων, μέχρι να ολοκληρώσει όλα τα σημεία προσωρινής αποθήκευσης, που ανήκουν στην υποπεριφέρεια αυτή.

Χρησιμοποιούνται οχήματα χωρητικότητας  $16\text{m}^3$  (στη μεγαλύτερη πλειοψηφία τους), τα οποία είναι τύπου πρέσας για τη μείωση του όγκου των συλλεχθέντων απορριμμάτων. Τα στοιχεία του Δήμου δείχνουν ότι συνήθως γίνεται συμπίεση της τάξεως 1:3 έως 1:5. Οι κάδοι προσωρινής αποθήκευσης οικιακών αποβλήτων είναι στη συντριπτική τους πλειοψηφία δύο τύπων:

- Τύπος Α: Μεγάλοι κάδοι με χωρητικότητα  $1,1\text{m}^3$
- Τύπος Β: Μικροί κάδοι με χωρητικότητα  $0,24\text{m}^3$

Συνολικά στα όρια του Δήμου Κορυδαλλού υπάρχουν 1354 μεγάλοι κάδοι και 3973 μικροί (αναλογία 1:3) (EDSNA, 2015). Θα πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι δεν υπάρχει μια συγκεκριμένη αναλογία μικρών-μεγάλων κάδων όμοια σε κάθε περιφέρεια καθώς η τοποθέτηση μικρών ή μεγάλων κάδων εξαρτάται και από τη γεωγραφική έκταση που όπως αναφέρθηκε δεν είναι ίδια για κάθε περιφέρεια.

- 4) Μετά τη λήψη των οικιακών αποβλήτων από το τελευταίο σημείο προσωρινής αποθήκευσης, ακολουθεί η μεταφορά τους στο Σταθμό Μεταφόρτωσης του Σχιστού (Σ.Μ.Α), είτε στο ΧΥΤΑ Λιοσίων. Ο Σταθμός Μεταφόρτωσης Απορριμμάτων του Σχιστού, εξυπηρετεί 8 γειτονικούς Δήμους, ένας από τους οποίους είναι και ο Δήμος Κορυδαλλού, όμως το ωράριο λειτουργίας του είναι τέτοιο, που δεν επιτρέπει την είσοδο των οχημάτων για εκκαθάριση, πέρα από τις 11.00π.μ. Έτσι, αν ένα πλήρωμα δεν προλαβαίνει να φτάσει στο Σταθμό Μεταφόρτωσης πριν τις 11.00π.μ., θα πρέπει να κατευθυνθεί στο ΧΥΤΑ Λιοσίων. Το γεγονός αυτό επιφέρει σημαντική χρονική καθυστέρηση, δεδομένου ότι στο ΧΥΤΑ Λιοσίων προσέρχονται πολλά απορριμματοφόρα οχήματα και κατά συνέπεια δημιουργείται πολλές φορές, αν όχι όλες, μεγάλη ουρά αναμονής.
- 5) Όταν το όχημα φτάσει είτε στη Μεταφόρτωση Σχιστού, είτε στο ΧΥΤΑ Λιοσίων, πραγματοποιείται ζύγιση για τον προσδιορισμό του βάρους των μεταφερομένων απορριμμάτων.
- 6) Πραγματοποιείται η εκφόρτωση του οχήματος.
- 7) Το πλήρωμα επιστρέφει με το απορριμματοφόρο στον Σταθμό των Οχημάτων.

## 2.2. Χρονομέτρηση Δρομολογίου - Πληρότητες

Για τη μελέτη του υπάρχοντος συστήματος, έγινε παρακολούθηση του ίδιου δρομολογίου δύο φορές. Κατά τη διάρκεια του δρομολογίου αυτού, χρονομετρήθηκαν

όλες οι μετακινήσεις του οχήματος, από τη στιγμή που αναχώρησε από τον Σταθμό Οχημάτων, κατευθυνόμενο προς το πρώτο σημείο συλλογής απορριμμάτων της υποπεριφέρειας, που ήταν προγραμματισμένο να εξυπηρετήσει, έως και τη χρονική στιγμή που επέστρεψε στο Σταθμό, από την Μεταφόρτωση Σχιστού. Επιπρόσθετα, χρονομετρήθηκε η διαδικασία λήψης-εκκαθάρισης των κάδων προσωρινής αποθήκευσης αποβλήτων. Τέλος, κατά τη διάρκεια της χρονομέτρησης, πραγματοποιήθηκε και ο προσεγγιστικός προσδιορισμός του ποσοστού πληρότητας του κάθε κάδου σε συνεργασία με τους εργαζομένους στο απορριμματοφόρο όχημα. Η καταγραφή του δρομολογίου έγινε τη δεύτερη ημέρα του κύκλου αποκομιδής, γεγονός που είναι εμφανές και από τις πληρότητες, οι οποίες σε ορισμένους κάδους προσέγγιζαν το 90% της ολικής πληρότητας. Να σημειωθεί ακόμη, πως ο δεύτερος έλεγχος που πραγματοποιήθηκε έγινε σε αντίστοιχη ημέρα (δεύτερη ημέρα) και ίδια ώρα με την πρώτη καταγραφή (δηλαδή λίγο πριν γίνει η εκκαθάρισή τους, εκείνη την ημέρα, από το απορριμματοφόρο όχημα).

Καταμετρήθηκαν συνολικά 68 στάσεις (σημεία συλλογής), 28 σημεία με κάδους τύπου Α, 28 σημεία με κάδους τύπου Β και 12 σημεία με κάδους τύπου Β-Β. Ο Τύπος Α αναφέρεται στους μεγάλους κάδους με χωρητικότητα 1,1m<sup>3</sup> και ο Τύπος Β στους μικρούς κάδους με χωρητικότητα 0,24m<sup>3</sup>. Επίσης ο Τύπος Β-Β αναφέρεται σε σημείο συλλογής, όπου βρίσκονται δύο μικροί κάδοι και θεωρείται ως ένα σημείο συλλογής και όχι ως δύο ξεχωριστά σημεία. Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει τις στάθμες των κάδων τύπου Α, ο Πίνακας 3 τις στάθμες των κάδων τύπου Β και ο Πίνακας 4 τις στάθμες των κάδων τύπου Β-Β για τις δύο μετρήσεις (παρατηρήσεις) που έλαβαν χώρα.

**Πίνακας 2: Πληρότητες και Μέσος Όρος Πληρότητας Κάδων Τύπου Α βάσει των δύο Παρατηρήσεων**

A/A	Τύπος Κάδου	A' Παρατήρηση	B' Παρατήρηση	Μέσος Όρος
1	A	75,0%	70,0%	72,5%
2	A	70,0%	70,0%	70,0%
3	A	70,0%	60,0%	65,0%
4	A	80,0%	75,0%	77,5%
5	A	30,0%	40,0%	35,0%
6	A	75,0%	90,0%	82,5%
7	A	90,0%	100,0%	95,0%
8	A	75,0%	60,0%	67,5%
9	A	70,0%	50,0%	60,0%
10	A	50,0%	60,0%	55,0%
11	A	75,0%	60,0%	67,5%
12	A	50,0%	60,0%	55,0%
13	A	60,0%	70,0%	65,0%
14	A	50,0%	60,0%	55,0%
15	A	75,0%	90,0%	82,5%
16	A	70,0%	60,0%	65,0%
17	A	75,0%	90,0%	82,5%
18	A	75,0%	60,0%	67,5%
19	A	50,0%	60,0%	55,0%

20	A	70,0%	80,0%	75,0%
21	A	40,0%	30,0%	35,0%
22	A	60,0%	75,0%	67,5%
23	A	70,0%	60,0%	65,0%
24	A	75,0%	70,0%	72,5%
25	A	80,0%	70,0%	75,0%
26	A	80,0%	70,0%	75,0%
27	A	75,0%	80,0%	77,5%
28	A	75,0%	80,0%	77,5%

**Πίνακας 3: Πληρότητες και Μέσος Όρος Πληρότητας Κάδων Τύπου Β βάσει των δύο Παρατηρήσεων**

<b>A/A</b>	<b>Τύπος Κάδου</b>	<b>A' Παρατήρηση</b>	<b>B' Παρατήρηση</b>	<b>Μέσος Όρος</b>
1	B	70,0%	80,0%	75,0%
2	B	30,0%	50,0%	40,0%
3	B	80,0%	70,0%	75,0%
4	B	75,0%	60,0%	67,5%
5	B	100,0%	90,0%	95,0%
6	B	75,0%	60,0%	67,5%
7	B	70,0%	50,0%	60,0%
8	B	80,0%	90,0%	85,0%
9	B	60,0%	50,0%	55,0%
10	B	50,0%	60,0%	55,0%
11	B	80,0%	90,0%	85,0%
12	B	70,0%	70,0%	70,0%
13	B	80,0%	90,0%	85,0%
14	B	70,0%	80,0%	75,0%
15	B	40,0%	60,0%	50,0%
16	B	60,0%	50,0%	55,0%
17	B	30,0%	40,0%	35,0%
18	B	50,0%	40,0%	45,0%
19	B	90,0%	75,0%	82,5%
20	B	80,0%	90,0%	85,0%
21	B	70,0%	80,0%	75,0%
22	B	75,0%	80,0%	77,5%
23	B	80,0%	70,0%	75,0%
24	B	75,0%	80,0%	77,5%
25	B	100,0%	90,0%	95,0%
26	B	80,0%	90,0%	85,0%
27	B	70,0%	90,0%	80,0%
28	B	70,0%	60,0%	65,0%

**Πίνακας 4: Πληρότητες και Μέσος Όρος Πληρότητας Κάδων Τύπου B-B βάσει των δύο Παρατηρήσεων**

A/A	Τύπος Κάδου	Α' Παρατήρηση		Β' Παρατήρηση		Μέσος Όρος (των δύο παρατηρήσεων)		Συνολικός Μέσος Όρος
1	B-B	70,0%	80,0%	60,0%	80,0%	65,0%	80,0%	72,5%
2	B-B	40,0%	75,0%	30,0%	50,0%	35,0%	62,5%	48,8%
3	B-B	80,0%	90,0%	70,0%	80,0%	75,0%	85,0%	80,0%
4	B-B	80,0%	75,0%	70,0%	80,0%	75,0%	77,5%	76,3%
5	B-B	30,0%	75,0%	40,0%	60,0%	35,0%	67,5%	51,3%
6	B-B	50,0%	75,0%	60,0%	70,0%	55,0%	72,5%	63,8%
7	B-B	75,0%	75,0%	80,0%	60,0%	77,5%	67,5%	72,5%
8	B-B	50,0%	75,0%	60,0%	80,0%	55,0%	77,5%	66,3%
9	B-B	75,0%	75,0%	80,0%	60,0%	77,5%	67,5%	72,5%
10	B-B	50,0%	80,0%	50,0%	75,0%	50,0%	77,5%	63,8%
11	B-B	75,0%	75,0%	70,0%	80,0%	72,5%	77,5%	75,0%
12	B-B	70,0%	80,0%	60,0%	80,0%	65,0%	80,0%	72,5%

Οι δύο παρατηρήσεις πραγματοποιήθηκαν με μερικές μέρες διαφορά, την ίδια ώρα και με το ίδιο πλήρωμα. Από τους παραπάνω πίνακες γίνεται εμφανές ότι δεν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στις μετρήσεις των δύο παρατηρήσεων. Αυτό που ωστόσο είναι πιο σημαντικό είναι ότι οι κάδοι παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά και στις δύο παρατηρήσεις. Αυτοί που εμφανίζουν πολύ υψηλή στάθμη στην παρατήρηση Α παρουσιάζουν υψηλή στάθμη και στην παρατήρηση Β και αντίστροφα για τις χαμηλές στάθμες. Συνεπώς, φαίνεται ότι η συχνότητα ρίψης απορριμμάτων στους κάδους καθώς και οι απορριπτόμενες ποσότητες από τους πολίτες είναι σχετικά σταθερές ποσότητες και άρα οι δύο παρατηρήσεις αρκούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

### 2.3. Επεξεργασία Δεδομένων Πληρότητας

Μετά από επεξεργασία των δεδομένων προκύπτουν οι μέσοι όροι πληρότητας ανά τύπο κάδου.

**Πίνακας 5: Μέσος Όρος Πληρότητας Κάδων Τύπου Α και Β**

A/A	Τύπος Κάδου	Μέσος Όρος	A/A	Τύπος Κάδου	Μέσος Όρος
1	A	72,5%	1	B	75,0%
2	A	70,0%	2	B	40,0%
3	A	65,0%	3	B	75,0%
4	A	77,5%	4	B	67,5%
5	A	35,0%	5	B	95,0%
6	A	82,5%	6	B	67,5%
7	A	95,0%	7	B	60,0%
8	A	67,5%	8	B	85,0%
9	A	60,0%	9	B	55,0%
10	A	55,0%	10	B	55,0%
11	A	67,5%	11	B	85,0%
12	A	55,0%	12	B	70,0%

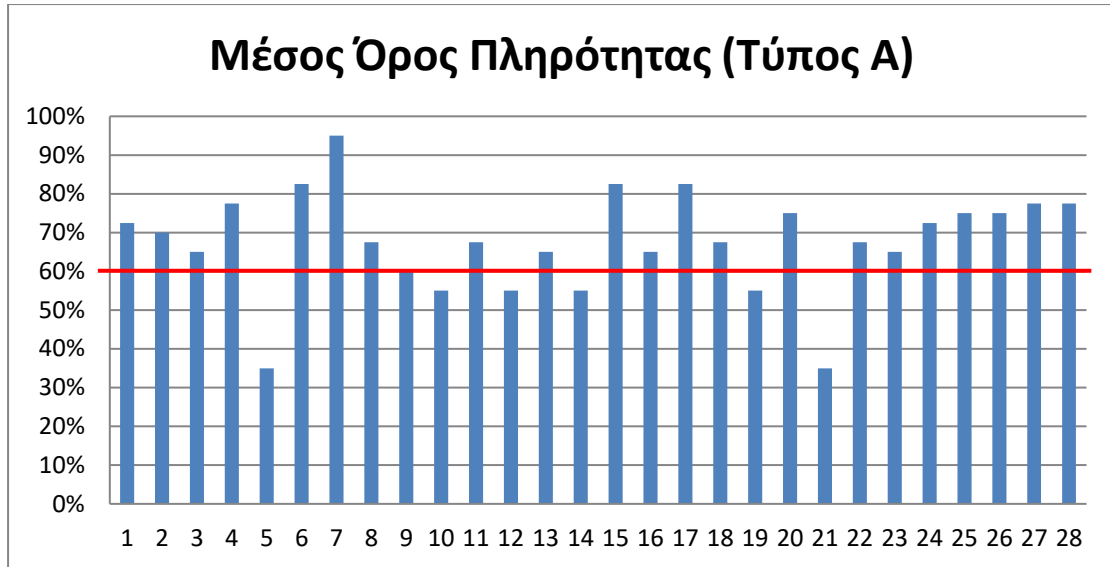
13	A	65,0%	13	B	85,0%
14	A	55,0%	14	B	75,0%
15	A	82,5%	15	B	50,0%
16	A	65,0%	16	B	55,0%
17	A	82,5%	17	B	35,0%
18	A	67,5%	18	B	45,0%
19	A	55,0%	19	B	82,5%
20	A	75,0%	20	B	85,0%
21	A	35,0%	21	B	75,0%
22	A	67,5%	22	B	77,5%
23	A	65,0%	23	B	75,0%
24	A	72,5%	24	B	77,5%
25	A	75,0%	25	B	95,0%
26	A	75,0%	26	B	85,0%
27	A	77,5%	27	B	80,0%
28	A	77,5%	28	B	65,0%

**Πίνακας 6: Μέσος Όρος Πληρότητας Κάδων Τύπου Β-Β**

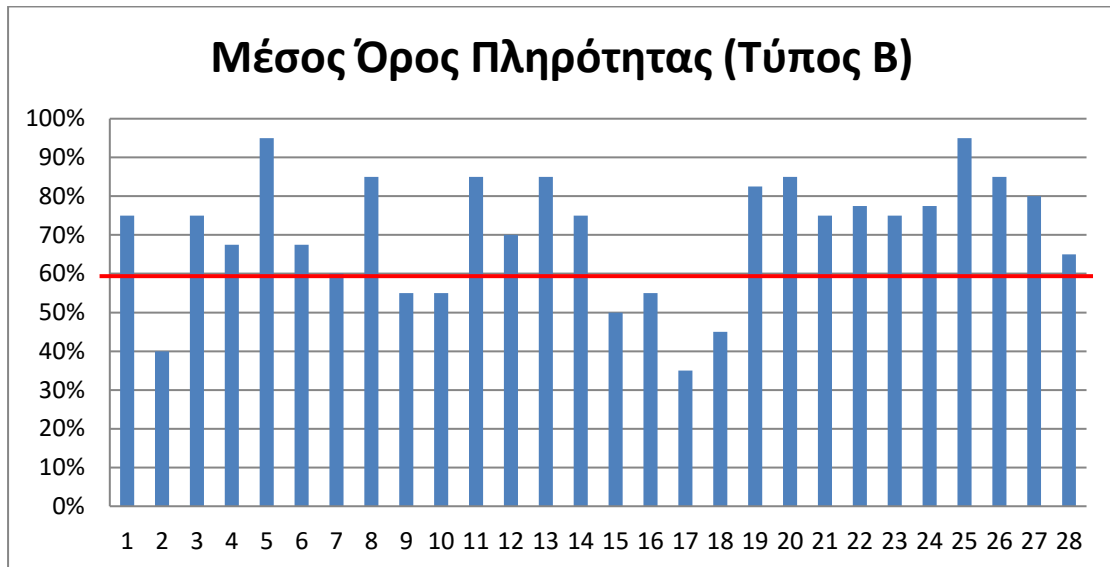
A/ A	Τύπος Κάδου	Μέσος Όρος (των δύο παρατηρήσεων)		Συνολικός Μέσος Όρος
1	B-B	65,0%	80,0%	72,5%
2	B-B	35,0%	62,5%	48,8%
3	B-B	75,0%	85,0%	80,0%
4	B-B	75,0%	77,5%	76,3%
5	B-B	35,0%	67,5%	51,3%
6	B-B	55,0%	72,5%	63,8%
7	B-B	77,5%	67,5%	72,5%
8	B-B	55,0%	77,5%	66,3%
9	B-B	77,5%	67,5%	72,5%
10	B-B	50,0%	77,5%	63,8%
11	B-B	72,5%	77,5%	75,0%
12	B-B	65,0%	80,0%	72,5%

Οι παραπάνω μέσοι όροι πληρότητας έχουν προκύψει μετά από δύο μέρες πλήρωσης των κάδων με σύμμεικτα οικιακά απορρίμματα. Συνεπώς, όσοι κάδοι έχουν μία στάθμη μικρότερη ή ίση του 60% θα μπορούσαν θεωρητικά να αδειάσουν μία μέρα αργότερα χωρίς να υπάρξει υπερπλήρωση του κάδου. Αυτό, αφού πλήρωση 60% σε δύο ημέρες συνεπάγεται πλήρωση 30% ανά ημέρα. Την τρίτη ημέρα η πληρότητα θα έφτανε το 90% και αφού ο κάδος θα άδειαζε την ημέρα 3 η υπερπλήρωση θα αποφευγόταν χωρίς ωστόσο να υπάρξει πρόωρη αποκομιδή τη δεύτερη ημέρα. ο κάδος θα άδειαζε πριν υπερπληρωθεί.

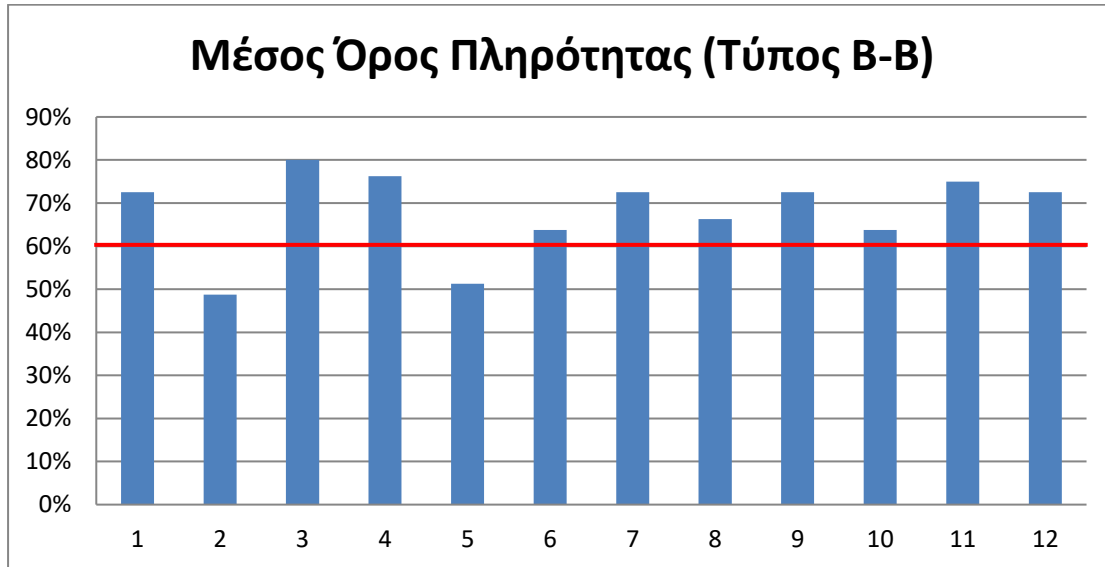
Παρακάτω παρουσιάζονται οι μέσοι όροι των κάδων σε σχέση με τη στάθμη αδειάσματος (60%).



Διάγραμμα 1: Μέσος Όρος Πληρότητας Κάδων Τύπου Α σε σχέση με τη Στάθμη Αδειάσματος



Διάγραμμα 2: Μέσος Όρος Πληρότητας Κάδων Τύπου Β σε σχέση με τη Στάθμη Αδειάσματος



Διάγραμμα 3: Μέσος Όρος Πληρότητας Κάδων Τύπου Β-Β σε σχέση με τη Στάθμη Αδειάσματος

Βάσει των πινάκων και των διαγραμμάτων παρατηρείται ότι 7/28 κάδους Α, 8/28 κάδους Β και 2/12 κάδους Β-Β θα μπορούσαν να αδειάσουν μία μέρα αργότερα. Συνολικά, 17/68 δηλαδή το 25% των κάδων θα μπορούσαν να αδειάζουν μια μέρα αργότερα.

## 2.4. Παράμετροι Κοστολόγησης Δρομολογίου

### 2.4.1. Κόστος Απορριματοφόρου Οχήματος

Όπως προαναφέρθηκε, στο Δήμο Κορυδαλλού, υπάρχουν και χρησιμοποιούνται 18 απορριματοφόρα οχήματα, από τα οποία τα 15 χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή της συλλογής των σύμμεικτων οικιακών απορριμμάτων (πράσινοι κάδοι), ενώ τα υπόλοιπα 3 χρησιμοποιούνται για την ανακύκλωση. Σε ό,τι αφορά την αγορά ενός τέτοιου οχήματος, τα στοιχεία του Δήμου προσδιορίζουν ότι, κατά μέσο όρο, η τιμή αγοράς ενός απορριματοφόρου κυμαίνεται στο ποσό των 200.000€. Η απόσβεση θα πρέπει να ολοκληρωθεί σε 7 έτη. Επομένως η αντιστοίχιση της τιμής αγοράς του οχήματος, ανά ημέρα λειτουργίας του, θα προκύψει με απλή αναγωγή σε ημερήσιο κόστος απόσβεσης ως εξής:

$$\text{Ημερήσιο Κόστος Αγοράς Οχήματος} = \frac{200.000\text{€}}{7 \cdot 300} = 95,24\text{€}$$

Επιπλέον, κάθε τέτοιο όχημα, έχει και μια σειρά από κόστη, που έχουν να κάνουν με την ασφάλιση, τη συντήρηση, τα ανταλλακτικά και την επιδιόρθωση των βλαβών, οι οποίες ανεβαίνουν σημαντικά, με το πέρασμα των χρόνων λειτουργίας και χρήσης του απορριματοφόρου.

Πιο συγκεκριμένα τα στοιχεία που προσκομίστηκαν από τον Δήμο Κορυδαλλού, αναφέρουν ότι για την ασφάλιση ενός απορριματοφόρου των 16m<sup>3</sup>, το κόστος



ανέρχεται γύρω στις 2.500€ ετησίως. Αν θεωρηθεί ότι το ένα έτος έχει 300 εργάσιμες ημέρες, τότε το ημερήσιο κόστος της ασφάλισης του οχήματος προκύπτει ως εξής:

$$\text{Ημερήσιο Κόστος Ασφάλισης Οχήματος} = \frac{2.500\text{€}}{300} = 8,33\text{€}$$

Σε ό,τι αφορά τη συντήρηση των απορριμματοφόρων οχημάτων, τα στοιχεία που προέκυψαν από το Δήμο, δείχνουν ότι συνολικά για τα 18 οχήματα (15 οικιακού, και 3 του ανακυκλώσιμου απορρίμματος) δαπανάται ετησίως, το ποσό των 260.000€. Επομένως, το αντίστοιχο ημερήσιο κόστος ανά όχημα θα προκύψει ως εξής:

$$\text{Ημερήσιο Κόστος Συντήρησης Οχήματος} = \frac{260.000\text{€}}{18 \cdot 300} = 48,15\text{€}$$

Ο Πίνακας 7 συνοψίζει τα παραπάνω αποτελέσματα.

**Πίνακας 7: Ημερήσια Κόστη Α/Φ Οχήματος**

Ημερήσιο Κόστος Απόσβεσης Οχήματος	95,24€
Ημερήσιο Κόστος Ασφάλισης Οχήματος	8,33€
Ημερήσιο Κόστος Συντήρησης Οχήματος	48,15€
<b>Συνολικό Ημερήσιο Κόστος Α/Φ</b>	<b>151,72€</b>

#### 2.4.2. Κόστος Καυσίμων Απορριμματοφόρου Οχήματος

Τα καταναλισκόμενα καύσιμα, είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την κοστολόγηση ενός δρομολογίου καθαρισμού, καθώς είναι ένα μεταβλητό κόστος, το οποίο παίζει ιδιαίτερο ρόλο στην αξιολόγηση του δρομολογίου.

Από την εταιρεία προμήθειας των απορριμματοφόρων οχημάτων του Δήμου Κορυδαλλού δόθηκε ότι η κατανάλωση καυσίμου για ένα κινούμενο όχημα είναι 1,8 lt/Km ενώ όταν το όχημα είναι ακινητοποιημένο καταναλώνει 0,11 lt/min. Βάσει των μετρήσεων που έγιναν κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης ενός δρομολογίου σε μία συγκεκριμένη υποπεριφέρεια έχουμε ότι ο χρόνος ολοκλήρωσης της διαδικασίας ήταν περίπου 3,5h από τις οποίες τα 25min το όχημα παρέμεινε ακίνητο. Συνολικά το απορριμματοφόρο διένυσε απόσταση 24Km. Συνεπώς, ο όγκος του πετρελαίου που καταναλώθηκε θα είναι:

$$\text{Όγκος Πετρελαίου} = 24 \text{ Km} \cdot 1,8 \frac{\text{lt}}{\text{Km}} + 25 \text{ min} \cdot 0,11 \frac{\text{lt}}{\text{min}} = 45,95 \text{ lt}$$

Θεωρώντας μία μέση τιμή πετρελαίου στα 1,1 €/lt η κατανάλωση αυτή δημιουργεί κόστος:

$$\text{Κόστος Πετρελαίου} = 45,95 \text{ lt} \cdot 1,1 \frac{\text{€}}{\text{lt}} = 50,55 \text{ €}$$

Υπενθυμίζεται ότι η τιμή αυτή αναφέρεται στο ημερήσιο κόστος αποκομιδής των απορριμμάτων μίας υποπεριφέρειας. Ο Πίνακας 8 συνοψίζει όλα τα παραπάνω.

**Πίνακας 8: Ημερήσιο Κόστος Καυσίμων Α/Φ Οχήματος**

Κατανάλωση Καυσίμου για Κινούμενο Α/Φ (lt/Km)	1,8
Κατανάλωση Καυσίμου για Ακίνητο Α/Φ (lt/min)	0,11

Χρόνος Ακίνητοποίησης Α/Φ (min)	25
Μέση Χιλιομετρική Απόσταση Δρομολογίου (Km)	24
Όγκος Καυσίμου Δρομολογίου Α' Υποπεριφέρειας (lt)	45,95
Κόστος Πετρελαίου (€/lt)	1,10 €
<b>Κόστος Καυσίμου Δρομολογίου Α' Υποπεριφέρειας</b>	<b>50,55 €</b>

#### 2.4.3. Κόστος Ανθρώπινου Δυναμικού

Στην ενότητα αυτή θα αναφερθεί αναλυτικά, η κοστολόγηση του ανθρώπινου δυναμικού, που απαρτίζει το πλήρωμα ενός απορριματοφόρου οχήματος και αποτελεί την πιο σημαντική, από οικονομικής άποψης, παράμετρο της γενικής κοστολόγησης του δρομολογίου.

Σε ό,τι αφορά τους μόνιμους εργαζόμενους, τα στοιχεία που συλλέχθηκαν από το Δήμο δείχνουν ότι, ο μηνιαίος μισθός του μόνιμου υπαλλήλου στον τομέα της Καθαριότητας ανέρχεται στο ποσό των 1.300€ μηνιαίως. Σε ετήσιο επίπεδο, ο μισθός αυτός πολλαπλασιάζεται επί 14, οπότε οδηγεί στο ποσό των 18.200 €.

Επιπλέον, κατά τη διάρκεια ενός μήνα εργασίας, εμφανίζονται ημέρες, στις οποίες δεν είναι εφικτή η εκκαθάριση των οχημάτων στο Σταθμό Μεταφόρτωσης Σχιστού, λόγω του ωραρίου που έχει θεσπιστεί. Συνεπώς, στις περιπτώσεις αυτές δημιουργείται η ανάγκη της μετακίνησης των απορριματοφόρων στο ΧΥΤΑ Λιοσίων. Αυτό όμως συνεπιφέρει μια σημαντική χρονική καθυστέρηση, λόγω του μεγάλου όγκου εργασίας, που καλείται να εξυπηρετήσει ο ΧΥΤΑ Λιοσίων. Υπάρχουν πολλές περιοχές που μεταφέρουν τα απόβλητά τους στον συγκεκριμένο ΧΥΤΑ, με άμεσο αποτέλεσμα να παρουσιάζεται, σχεδόν πάντα, συμφόρηση οχημάτων, που περιμένουν να παραδώσουν τα μεταφερόμενα απόβλητα. Η χρονική αυτή καθυστέρηση οδηγεί στη χρέωση υπερωριών τις οποίες καλείται να πληρώσει ο Δήμος. Έτσι, σε ετήσια βάση, κάθε εργαζόμενος εισπράττει, λόγω υπερωριών, ένα ποσό που προσεγγίζει τις 3.000€.

Επιπρόσθετα, η ασφάλιση των εργαζομένων κοστολογείται στο ποσό των 6.000€ ετησίως.

Συνολικά, το κόστος για ένα μόνιμο υπάλληλο που εργάζεται στον τομέα της Καθαριότητας ανέρχεται στα 27.200€.

Για έναν συμβασιούχο εργαζόμενο, το ετήσιο κόστος είναι αρκετά μικρότερο. Ο μηνιαίος μισθός του ανέρχεται στο ποσό των 800€ και η τιμή αυτή πολλαπλασιάζεται επί 12, για να οδηγήσει στο ετήσιο ποσό των 9.600€. Αντίστοιχα, τα στοιχεία που ελήφθησαν από τον τομέα Οικονομικής Διαχείρισης του Δήμου, τοποθετούν την ετήσια ασφάλιση του εργαζομένου σε ένα ποσό που πλησιάζει τα 4.000€. Οι αντίστοιχες υπερωρίες που ανακύπτουν, λόγω των προαναφερθέντων αιτιών στο ΧΥΤΑ Λιοσίων, κοστολογούνται στο ποσό των 2.000€ ετησίως.

Συνολικά, για ένα συμβασιούχο υπάλληλο οι ετήσιες αποδοχές κοστολογούνται στις 15.600€.

Ο Πίνακας 9 συνοψίζει όλα τα παραπάνω. Για τον υπολογισμό του ημερήσιου κόστους εργασίας θεωρήθηκε ότι το έτος έχει 300 εργάσιμες ημέρες και η αναλογία μόνιμων-συμβασιούχων εργαζομένων είναι 1:2. Συνεπώς, από τους 3 εργαζομένους ενός Α/Φ οχήματος, οι δύο θα είναι συμβασιούχοι και ο ένας μόνιμος εργαζόμενος στο Δήμο.

**Πίνακας 9: Ημερήσιο Κόστος Εργατικού Δυναμικού Α/Φ Οχήματος**

	<b>Μόνιμοι</b>	<b>Συμβασιούχοι</b>
Μηνιαίος Μισθός	1.300 €	800 €
Ετήσιο Κόστος	18.200 €	11.200 €
Υπερωρίες (€/έτος)	3.000 €	2.000 €
Ασφάλιση (€/έτος)	6.000 €	4.000 €
Ετήσιο Κόστος Εργαζομένου	27.200 €	17.200 €
Ημερήσιο Κόστος Εργαζομένου	91 €	57 €
<b>Ημερήσιο Κόστος Εργατικού Δυναμικού</b>	<b>205 €</b>	

#### 2.4.4. Συνολικό Κόστος Δρομολογίου Α/Φ Οχήματος

Συγκεντρώνοντας και αθροίζοντας όλα τα κόστη που αναφέρθηκαν παραπάνω θα προκύψει ο Πίνακας 10.

**Πίνακας 10: Συνολικό Ετήσιο Κόστος Αποκομιδής Απορριμμάτων**

Συνολικό Ημερήσιο Κόστος Α/Φ	151,72€
Κόστος Καυσίμου Δρομολογίου Α' Υποπεριφέρειας	50,55 €
Ημερήσιο Κόστος Εργατικού Δυναμικού	205,33 €
Ημερήσιο Συνολικό Κόστος Δρομολογίου	407,60 €
Ετήσιο Συνολικό Κόστος Δρομολογίου	122.279 €
<b>Συνολικό Ετήσιο Κόστος Αποκομιδής Απορριμμάτων</b>	<b>1.834.191 €</b>

## 2.5. Συμπεράσματα

Εφόσον αναλύθηκε η διάρθρωση του συνολικού κόστους διαχείρισης των απορριμμάτων στον Δήμο Κορυδαλλού, κρίθηκε σκόπιμο να γίνουν κάποιες εκτιμήσεις για το πώς αυτό το κόστος θα μπορούσε να μεταβληθεί εάν χρησιμοποιούταν ένα έξυπνο σύστημα διαχείρισης των απορριμμάτων από τον Δήμο. Με τον όρο έξυπνο σύστημα διαχείρισης των απορριμμάτων εννοείται πως το πλήρωμα των απορριμματοφόρων θα μπορεί να γνωρίζει εκ των προτέρων ποιοι κάδοι απαιτούν άδεια και ποιοι όχι και θα έχει τα μέσα να δημιουργήσει βέλτιστα δρομολόγια ώστε να περάσει μόνο από τους κάδους εκείνους που απαιτούν κάποια ενέργεια.

Στην περίπτωση αυτή, και δεδομένων όσων αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 2.3. για το ότι το 25% των κάδων που αδειάζουν κάθε μέρα θα μπορούσε να αδειάσει μία μέρα αργότερα είναι ασφαλές να ειπωθεί ότι ο χρόνος καθαρής αποκομιδής των απορριμμάτων θα μειωθεί κατά 25%, αφού κανένας κάδος δε θα αδειάζει πριν να υπερβεί μία συγκεκριμένη στάθμη. Επιπλέον, προβλέπεται και μείωση του χρόνου μετακίνησης από σημείο σε σημείο, αφού το απορριμματοφόρο μπορεί να μην περάσει από ορισμένα σημεία που εμφανίζουν χαμηλές στάθμες πληρότητας. Θα ήταν λάθος να υποτεθεί ότι η μείωση αυτή θα είναι 25% όπως πριν, γιατί παρόλο που το 25% των

κάδων δεν απαιτεί άδειασμα αυτό δε συνεπάγεται ότι το απορριμματοφόρο μπορεί να μην περάσει μπροστά από αυτούς του κάδους, λόγω του οδικού δικτύου. Για το λόγο αυτό, η μείωση εκτιμήθηκε ίση με το 1/6 του αρχικού χρόνου. Το ποσοστό αυτό είναι σχετικά χαμηλό αλλά παρέχει μία σχετική ασφάλεια στην επιτευξιμότητά του. Η χρονική διάρθρωση του ημερήσιου δρομολογίου ενός Α/Φ, όπως αυτό γίνεται την παρούσα στιγμή, σε σύγκριση με τη χρονική διάρθρωση που θα υπήρχε αν υπήρχε ένα σύστημα έξυπνης διαχείρισης των απορριμμάτων φαίνεται στον Πίνακα 11.

**Πίνακας 11: Χρονική διάρθρωση δρομολογίου As-is και Πρόβλεψη**

	<b>As-is</b>	<b>Πρόβλεψη</b>
Εξωτερικές Μετακινήσεις (min)	79	79
Καθαρή Αποκομιδή (min)	25	18,75
Μετακινήσεις από Σημείο σε Σημείο (min)	115	95,83
Διάρκεια Αποκομιδής (min)	140	114,58
<b>Σύνολο Χρόνου (min)</b>	<b>219</b>	<b>193,58</b>

### 2.5.1. Προβλεπόμενο Κόστος Απορριμματοφόρου Οχήματος

Τα κόστη απόκτησης και ασφάλισης ανά όχημα δε σχετίζονται με τις στάθμες των κάδων μιας περιφέρειας και γι' αυτό θα παραμείνουν αμετάβλητα. Το κόστος συντήρησης, ωστόσο, εξαρτάται από το χρονικό διάστημα που το όχημα κινείται ανά ημέρα και συνεπώς, μία βελτιστοποίηση στα δρομολόγια θα μείωνε τη συχνότητα απαιτούμενης συντήρησης. Από τον Πίνακα 11 προκύπτει ότι στο σύνολο του δρομολογίου θα υπάρξει χρονική μείωση κατά 12%. Συνεπώς, είναι λογικό να υποθεθεί ότι και στο κόστος συντήρησης θα υπάρξει η αντίστοιχη μείωση. Τα κόστη που αναλύθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 12.

**Πίνακας 12: Ημερήσιο κόστος Α/Φ οχήματος As-is και Πρόβλεψη**

	<b>As-is</b>	<b>Πρόβλεψη</b>
Κόστος Απόκτησης	95,24 €	95,24 €
Κόστος Ασφάλισης	8,33 €	8,33 €
Κόστος Συντήρησης	48,15 €	42,56 €
<b>Σύνολο Οχήματος</b>	<b>151,72 €</b>	<b>146,13 €</b>

Επιπλέον, προβλέπεται μείωση των απαιτούμενων οχημάτων στον Δήμο αφού μέχρι στιγμής, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2.1, τα δρομολόγια έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε τα Α/Φ να μαζεύουν ένα συγκεκριμένο συνολικό βάρος απορριμμάτων καθημερινά, το οποίο έχει προσδιοριστεί κυρίως από την εμπειρία που έχει συγκεντρωθεί και όχι βάσει εμπειριστατωμένης μελέτης. Πλέον, με τη χρήση ενός συστήματος έξυπνης διαχείρισης απορριμμάτων, θα είναι εφικτή η διατήρηση ιστορικού για την πληρότητα κάθε κάδου και έτσι θα είναι εφικτός ο χωρισμός του Δήμου σε περιφέρειες, έτσι ώστε κάθε απορριμματοφόρο όχημα κατά το πέρας του δρομολογίου του να καταλήγει γεμάτο, αξιοποιώντας όσο το δυνατόν καλύτερα τον διαθέσιμο χώρο του. Η επαναδιαμόρφωση των περιφερειών βάσει ιστορικού με σκοπό την πλήρωση των Α/Φ σε κάθε δρομολόγιο προβλέπεται να μειώσει το πλήθος των σχηματιζόμενων περιφερειών και άρα των απαιτούμενων Α/Φ κατά 1/5.

### 2.5.2. Προβλεπόμενο Κόστος Καυσίμων Απορριματοφόρου Οχήματος

Οι καταναλώσεις των απορριματοφόρων θα παραμείνουν οι ίδιες ενώ θα αλλάξει ο συνολικός χρόνος ακινητοποίησης του Α/Φ, σύμφωνα με τον Πίνακα 11, καθώς και η μέση χιλιομετρική απόσταση του δρομολογίου αφού, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, πλέον το απορριματοφόρο μπορεί να μην περνάει από κάποια σημεία αν αυτά δεν έχουν κάδους προς άδειασμα. Προβλέπεται μείωση του χρόνου ακινητοποίησης κατά 25% και μείωση της χιλιομετρικής απόστασης κατά 1/6. Στον παρακάτω Πίνακα γίνεται αντιπαραβολή του κόστους των καυσίμων όπως είναι σήμερα, με το κόστος που θα μπορούσε να υπάρχει αν γινόταν χρήση της συσκευής.

**Πίνακας 13: Ημερήσιο κόστος καυσίμων Α/Φ οχήματος As-is και Πρόβλεψη**

	<b>As-is</b>	<b>Πρόβλεψη</b>
Κατανάλωση Καυσίμου για Κινούμενο Α/Φ (lt/Km)	1,8	1,8
Κατανάλωση Καυσίμου για Ακίνητο Α/Φ (lt/min)	0,11	0,11
Χρόνος Ακινητοποίησης Α/Φ (min)	25	18,75
Μέση Χιλιομετρική Απόσταση Δρομολογίου (Km)	24	20
Όγκος Καυσίμου Δρομολογίου Α' Υποπεριφέρειας (lt)	45,95	38,06
Κόστος Πετρελαίου (€/lt)	1,10 €	1,10€
<b>Κόστος Καυσίμου Δρομολογίου Α' Υποπεριφέρειας</b>	<b>50,55 €</b>	<b>41,87 €</b>

### 2.5.3. Προβλεπόμενο Κόστος Ανθρώπινου Δυναμικού

Ο χρόνος εργασίας των εργαζομένων θα μειωθεί αν αδειάζουν μόνο οι κάδοι που απαιτείται κάθε φορά. Εύκολα μπορεί να θεωρηθεί, επίσης, ότι αν σε κάθε δρομολόγιο άδειάζαν μόνο οι κάδοι που απαιτούνταν θα υπήρχε περίσσεια χρόνου για τη μετάβαση του απορριματοφόρου οχήματος στο Σταθμό Μεταφόρτωσης Σχιστού και έτσι δε θα δημιουργούταν η ανάγκη για υπερωρίες των εργαζομένων. Για το λόγο αυτό θεωρήθηκε μείωση των υπερωριών των εργαζομένων στο 50%. Βάσει των παραπάνω γίνεται πρόβλεψη για το κόστος του εργατικού δυναμικού για την περίπτωση που μόνο οι απαραίτητοι κάδοι αδειάζουν.

**Πίνακας 14: Ημερήσιο κόστος εργατικού δυναμικού Α/Φ οχήματος As-is και Πρόβλεψη**

	<b>As-is</b>		<b>Πρόβλεψη</b>	
	<b>Μόνιμοι</b>	<b>Συμβασιούχοι</b>	<b>Μόνιμοι</b>	<b>Συμβασιούχοι</b>
Μηνιαίος Μισθός	1.300 €	800 €	1.161 €	714 €
Ετήσιο Κόστος	18.200 €	11.200 €	16.247 €	9.998 €
Υπερωρίες (€/έτος)	3.000 €	2.000 €	1.500 €	1.000 €
Ασφάλιση (€/έτος)	6.000 €	4.000 €	6.000 €	4.000 €
Ετήσιο Κόστος Εργαζομένου	27.200 €	17.200 €	23.747 €	14.998 €
Ημερήσιο Κόστος Εργαζομένου	91 €	57 €	79 €	50 €
<b>Ημερήσιο Κόστος Εργατικού Δυναμικού</b>	<b>205 €</b>		<b>179 €</b>	

#### 2.5.4. Προβλεπόμενο Συνολικό Κόστος Δρομολογίου Α/Φ Οχήματος

Συγκεντρώνοντας και αθροίζοντας όλα τα κόστη που αναφέρθηκαν παραπάνω θα προκύψει ο Πίνακας 15.

**Πίνακας 15: Συνολικό ετήσιο κόστος αποκομιδής απορριμμάτων As-is και Πρόβλεψη**

	<b>As-is</b>	<b>Πρόβλεψη</b>
Συνολικό Ημερήσιο Κόστος Α/Φ	151,72 €	146,55 €
Κόστος Καυσίμου Δρομολογίου Α' Υποπεριφέρειας	50,55 €	41,87 €
Ημερήσιο Κόστος Εργατικού Δυναμικού	205,33 €	179 €
Ημερήσιο Συνολικό Κόστος Δρομολογίου	407,60 €	367,42 €
Ετήσιο Συνολικό Κόστος Δρομολογίου	122.280 €	110.226 €
Πλήθος Περιφερειών	15	12
<b>Συνολικό Ετήσιο Κόστος Αποκομιδής Απορριμμάτων</b>	<b>1.834.191 €</b>	<b>1.322.712 €</b>

Τελικά προκύπτει ετήσια μείωση του κόστους διαχείρισης των απορριμμάτων κατά:

$$1.834.191 \text{ €} - 1.322.712 \text{ €} = 511.479 \text{ €}$$

που αντιστοιχεί σε μείωση:

$$\frac{511.479 \text{ €}}{1.834.191 \text{ €}} \cdot 100\% = 28\%$$

Πρόκειται για ένα σημαντικό ποσοστό του συνολικού κόστους, πάνω από το 1/4 αυτού. Μία τόσο μεγάλη μείωση του κόστους θα μπορούσε να λύσει το τεράστιο πρόβλημα των Δήμων σχετικά με τη διαχείριση των απορριμμάτων και να αποδεσμεύσει ένα μεγάλο ποσό χρημάτων που θα αφιερωθεί στην ανάπτυξη ενός πιο πράσινου Δήμου.

### 3. Internet of Things

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things) αποτελείται από πολύ «έξυπνες» συσκευές που επικοινωνούν μεταξύ τους με σκοπό τη δημιουργία ενός δικτύου (Chuah, 2014). Αυτά τα δίκτυα, πέρα από το λογισμικό τους, περιλαμβάνουν συσκευές που συλλέγουν και μεταδίδουν δεδομένα σχετικά με το περιβάλλον τους σε άλλες συσκευές. Αυτές οι συσκευές μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα μέρη για να εξυπηρετήσουν πολλαπλούς σκοπούς. Μερικά παραδείγματα των εφαρμογών τους είναι τα συστήματα συναγερμού, οι ανιχνευτές καπνού, οι έξυπνοι μετρητές, ο εντοπισμός των διαθέσιμων θέσεων στάθμευσης, οι έξυπνοι φωτεινοί σηματοδότες, τα έξυπνα ρολόγια, οι συσκευές παρακολούθησης της ανθρώπινης υγείας και άλλα (Khulins, Rathonyi, Zaidi, & Hogan, 2020). Το συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για το IoT συμβαδίζει με τη μείωση στις τιμές των συσκευών IoT με την πάροδο των ετών.

#### 3.1. Δίκτυα Επικοινωνίας των IoT Συσκευών

Οι υπάρχουσες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις εφαρμογές των IoT συσκευών χωρίζονται σε μικρής και μεγάλης εμβέλειας μετάδοσης. Μέχρι στιγμής, τα κύρια εμπόδια που εντοπίζονται στην εφαρμογή των IoT λύσεων είναι η διαχείριση κόστους του δικτύου, η επεκτασιμότητα και οργάνωσή του, η διαστασιολόγηση των τελικών συσκευών και η ανεξαρτησία τους σε ενέργεια και τέλος, η κάλυψη δικτύου.

##### 3.1.1. Συστήματα Μικρής Εμβέλειας

Τα συστήματα μικρής εμβέλειας ήταν τα πρώτα που εφαρμόστηκαν σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks). Στις συνδέσεις αυτές, το μεγαλύτερο μέρος του εξοπλισμού του δικτύου είναι στην κτήση ιδιωτών. Αυτό, αυξάνει τόσο το κόστος όσο και την πολυπλοκότητά λειτουργίας του δικτύου. Επιπλέον, στην περίπτωση που ένα σύνθητες δίκτυο ασύρματων αισθητήρων υιοθετούταν από μία στρατηγική δημόσια υποδομής, δε θα ήταν εφικτή η επικοινωνία ανάμεσα στους χρήστες και τον εγκατεστημένο εξοπλισμό, λόγω περιορισμών εμβέλειας μετάδοσης (Wang & Liu, 2011). Επομένως, θα χρειαζόταν επιπρόσθετος εξοπλισμός, όπως Σταθμοί Βάσης (Gateways), για να δράσουν ως μεσολαβητές και να συνδέσουν τις τελικές συσκευές (End-Nodes) με τον Κεντρικό Σταθμό Βάσης.

Επιπλέον, η διαχείριση του δικτύου σε μεγάλη κλίμακα, εμπεριέχει προβλήματα που αφορούν τη μικρή εμβέλεια μετάδοσης που παρουσιάζουν οι επιλεχθείσες τεχνολογίες. Για παράδειγμα, αν οι τελικές συσκευές χρησιμοποιούσαν μία από τις περισσότερο διαδεδομένες τεχνολογίες WSN, όπως, τα βασισμένα σε IEEE 802.15.4, ZigBee και 6LoWPAN, για να στείλουν δεδομένα σε μεγάλα δίκτυα θα απαιτούνταν ένα μεγάλο πλήθος Σταθμών Βάσης που θα συγκέντρωναν τα δεδομένα μόνο των πολύ κοντινών συσκευών. Έτσι, παρά τις μικρές καταναλώσεις ενέργειας που παρουσιάζουν οι συγκεκριμένες τεχνολογίες και τα χαμηλά κόστη τελικών συσκευών που προσφέρουν, το συνολικό κόστος θα αυξανόταν, αφού το μεγάλο πλήθος συλλεκτών αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας.

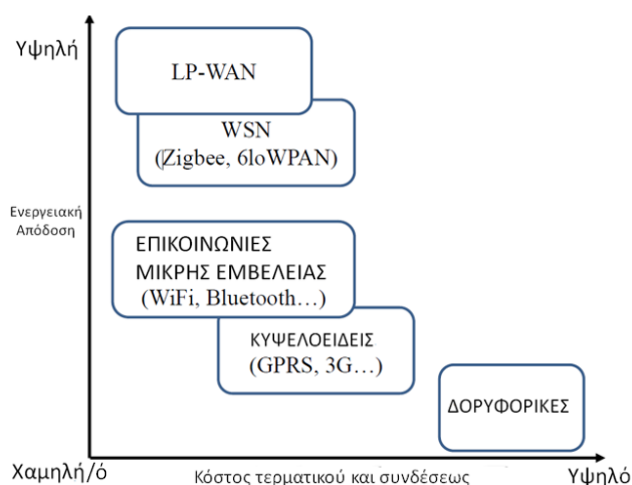
Τέλος, ακόμη ένα σημαντικό ζήτημα, κοινό για όλες τις τεχνολογίες μικρής εμβέλειας, είναι η ανάγκη σύνδεσης στο διαδίκτυο, έτσι ώστε να φορτώνονται τα δεδομένα που



συλλέγονται στο cloud. Ενώ οι αστικές περιοχές και τα προάστια δεν αναμένεται να αντιμετωπίζουν πρόβλημα, σε απομακρυσμένες περιοχές είναι πολύ δύσκολο και κοστοβόρο να αναπτυχθεί δίκτυο, λόγω έλλειψης προϋπάρχουσας υποδομής για παροχή διαδικτυακής πρόσβασης.

### 3.1.2. Συστήματα Μεγάλης Εμβέλειας

Όσον αφορά τη μετάδοση μεγάλης εμβέλειας, τα δίκτυα που χρησιμοποιούνται είναι τα κυψελοειδή. Βασίζονται σε δημόσιες υποδομές και είναι ευρέως διαδεδομένα για την κάλυψη που προσφέρουν σε μεγάλες περιοχές. Τέτοια είναι για παράδειγμα, τα πρότυπα δίκτυα GSM, GPRS, 3G/4G και το 5G. Οι τελικές συσκευές συλλέγουν τα δεδομένα και στη συνέχεια τα στέλνουν στο cloud μέσω συνδέσμου κυψελοειδών δεδομένων. Το κύριο πρόβλημα όμως, είναι ότι αυτά τα συστήματα σχεδιάστηκαν έτσι, ώστε να ικανοποιήσουν διαφορετικές ανάγκες από αυτές των IoT συσκευών (Nasralla, Ognenoski, & Martini, 2013). Οι υπάρχοντες κυψελοειδείς σταθμοί βάσης είναι ικανοί να υποστηρίξουν έναν μικρό σχετικά αριθμό συνδεδεμένων συσκευών, σε αντίθεση με την ανάγκη που υπάρχει σε εφαρμογές αισθητήρων. Για τον λόγο αυτό, τα κυψελοειδή δίκτυα είναι προφανώς ακατάλληλα προς χρήση σε όρους επεκτασιμότητας και κατανάλωσης ενέργειας για τις εφαρμογές αυτές όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3. Αν εστιάσει κανείς στην ενεργειακή απόδοση, τα κυψελοειδή δίκτυα απαιτούν συνεχή επικοινωνία μεταξύ τελικών συσκευών και σταθμών βάσης για κάθε ενέργεια, γεγονός που μειώνει τη διάρκεια ζωής της τελικής συσκευής και παρέχει χαμηλή ενεργειακή αυτονομία.



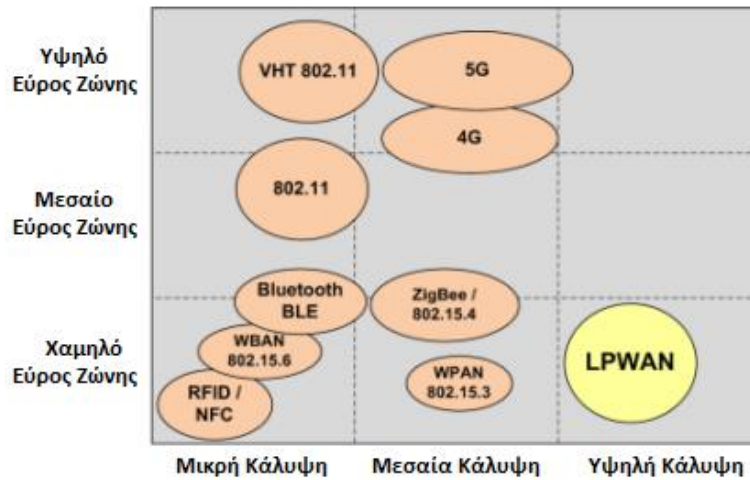
**Σχήμα 3:** Ενεργειακή απόδοση και κόστος τελικής συσκευής και σύνδεσης διαφόρων δικτύων

Μια ακόμη πιο ακατάλληλη υποδομή για IoT είναι αυτή της δορυφορικής επικοινωνίας. Παρά την ευρεία κάλυψη που προσφέρει παγκοσμίως, η ενέργεια που καταναλώνεται για την επικοινωνία είναι απαγορευτική για εφαρμογές IoT. Επίσης, η μεγάλη καθυστέρηση στην μετάδοση σημάτων αποτελεί σημαντικό μειονέκτημα για εφαρμογές στις οποίες παίζει σημαντικό ρόλο η γρήγορη απόκριση, ενώ η παροχή υπηρεσιών δορυφορικής μετάδοσης είναι υπερβολικά δαπανηρή.

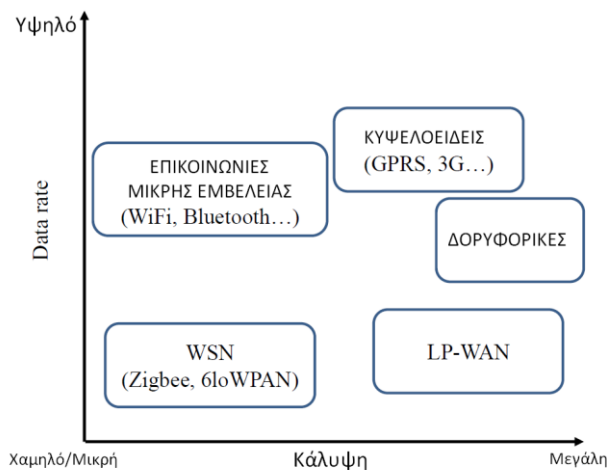
Για όλους τους παραπάνω λόγους, τα Δίκτυα Χαμηλής Ισχύος και Ευρείας Κάλυψης (LPWAN, Low Power Wide Area Network) κερδίζουν έδαφος έναντι παραδοσιακότερων τρόπων μετάδοσης μεγάλης εμβέλειας (Σχήμα 4). Τα



πλεονεκτήματα τους τα καθιστούν ιδανικά για την κάλυψη των αναγκών που παρουσιάζουν οι εφαρμογές IoT, σύμφωνα με το Σχήμα 5.



Σχήμα 4: Εύρος ζώνης και γεωγραφική κάλυψη διαφόρων δικτύων



Σχήμα 5: Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και γεωγραφική κάλυψη διαφόρων δικτύων

### 3.1.3. LPWAN λύσεις για υπηρεσίες IoT

Η συχνότητα επικοινωνίας για τις συσκευές IoT κυμαίνεται από τα 13,56MHz, για εφαρμογές όπως οι ανέπαφες πληρωμές, έως 2,4GHz για εφαρμογές που χρειάζονται τη μετάδοση βίντεο. Με λίγες εξαιρέσεις, οι περισσότερες LPWAN τεχνολογίες λειτουργούν σε ραδιοφωνικές ζώνες ISM (Industrial, Scientific, Medical), συχνοτήτων μικρότερων από τα GHz (Sub-GHz), οι οποίες δεν απαιτούν αδειοδότηση. Στην Ευρώπη η συχνότητα επικοινωνίας με χρήση της τεχνολογίας LPWAN είναι τα 868MHz, στις ΗΠΑ τα 915MHz ενώ στην Ασία 433MHz. Η λειτουργία σε μικρότερες συχνότητες προσθέτει ένα πλήθος χαρακτηριστικών στις τεχνολογίες, που τις καθιστά καταλληλότερες για χρήση σε IoT εφαρμογές.

Αρχικά, επειδή η συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος, μικρότερη συχνότητα συνεπάγεται μεγαλύτερο μήκος κύματος. Το μεγαλύτερο μήκος κύματος εξασφαλίζει μεγαλύτερη διανυόμενη απόσταση για το κύμα καθώς και αυξημένη δυνατότητα υπερπήδησης εμποδίων (κτίρια, δέντρα κ.α.) που ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές θεωρείται απαραίτητη. Το εύρος επικοινωνίας για την τεχνολογία LPWAN σύμφωνα με την ερευνητική ομάδα του κ.Πόνη στο Logistics and Transportation Unit του τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας του ΕΜΠ είναι τα 130Km σε αγροτικές περιοχές ενώ σε αστικές περιοχές το εύρος φτάνει τα 30Km όταν μεταξύ συσκευής και κεραίας δεν παρεμβάλλεται κτίριο ενώ όταν αυτό δεν ισχύει το εύρος μειώνεται, ωστόσο πάντα υπερβαίνει τα 5Km.

Επιπλέον, λόγω της μικρής, μέχρι στιγμής, χρήσης των συχνοτήτων αυτών, η «ραδιοφωνική κυκλοφορία» είναι μειωμένη αποτρέποντας έτσι παρεμβολές και θορύβους που θα μπορούσαν να μειώσουν την αξιοπιστία του μεταδιδόμενου σήματος. Συνεπώς, η λειτουργία στις ζώνες Sub-GHz προσθέτει στο σήμα και αξιοπιστία και αντοχή (Raza, Kulkarni, & Sooriyabandara, 2017).

Ένα κοινό χαρακτηριστικό στα δίκτυα LPWAN είναι η ασύμμετρη συνδεσιμότητα των τελικών συσκευών. Επειδή ο στόχος είναι η μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, οι περισσότερες εφαρμογές εστιάζουν στη σύνδεση μέσω uplink, δηλαδή μέσω της αποστολής δεδομένων από την τελική συσκευή προς το σταθμό βάσης, μιας και το αντίθετο (downlink) είναι περιορισμένο, έτσι ώστε να μειώνεται ο χρόνος στον οποίο γίνεται λήψη δεδομένων. Επομένως, η κύρια ροή δεδομένων έχει κατεύθυνση από τις τελικές συσκευές του δικτύου προς τον πυρήνα του (σταθμοί βάσης) (Sanchez-Iborra & Cano, 2016). Αυτό, ευνοεί τη μείωση του ρυθμού ανταλλαγής μηνυμάτων και έτσι επιτυγχάνεται η μεγάλη εμβέλεια του δικτύου LPWAN. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο ρυθμός αυτός κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες έως χιλιάδες bits το δευτερόλεπτο. Για το λόγο αυτό, η τεχνολογία LPWAN ταιριάζει καλύτερα σε συσκευές IoT χαμηλής ισχύος, που μεταδίδουν μικρή ποσότητα δεδομένων σε μεγάλες αποστάσεις. Ο μικρός ρυθμός ανταλλαγής δεδομένων σε συνδυασμό με τη μικρή κατανάλωση ενέργειας, επιτρέπει στις συσκευές IoT να μεταδίδουν και λαμβάνουν δεδομένα για μεγάλα χρονικά διαστήματα (Patel, 2018).

Τα δίκτυα LPWAN ακολουθούν αστεροειδή τοπολογία, όπου οι τελικές συσκευές συνδέονται άμεσα με τους σταθμούς βάσης. Συνήθως, οι σταθμοί βάσης και ο σκελετός του δικτύου είναι δημόσια και τα διαχειρίζονται οι πάροχοι των IoT υπηρεσιών, κάτι που απελευθερώνει τους χρήστες από τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας, ενώ δεν χρειάζεται να είναι οι ίδιοι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη του συστήματος.

Τέλος, σε σύγκριση με τα δίκτυα επικοινωνίας μηχανής-με-μηχανή (Cellular Machine to Machine, M2M) που έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν μια μεγάλη περιοχή, το LPWAN είναι πιο οικονομικό λόγω της χαμηλής τιμής των υλικών του (συσκευή, κεραία) και της δυνατότητας χρήσης χωρίς συνδρομή (Centenaro, Vangelista, Zanella, & Zorzi, 2016).

Συνοψίζοντας, τα κύρια πλεονεκτήματα των δικτύων LPWAN είναι τα εξής:

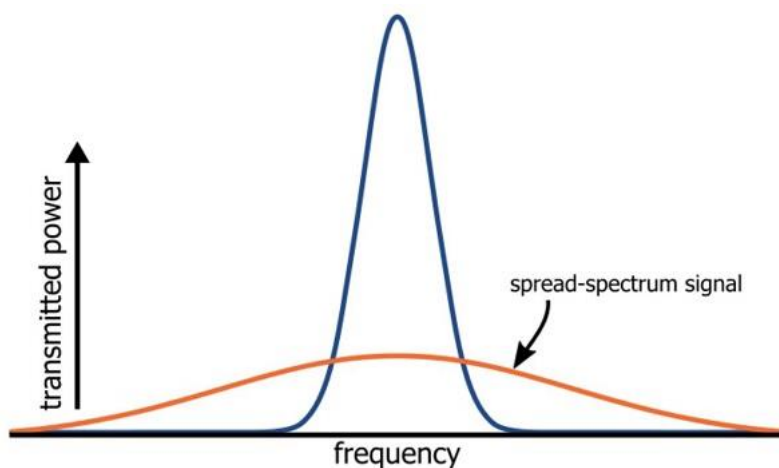
- Μεγάλη εμβέλεια → Εξυπηρέτηση μεγάλων γεωγραφικών περιοχών

- Δυνατότητα επεκτασιμότητας → Εξυπηρέτηση νέων προστιθέμενων τελικών συσκευών
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας → Ενεργειακή αυτονομία, μεγάλη διάρκεια ζωής τελικών συσκευών
- Χαμηλό κόστος τελικών συσκευών
- Δυνατότητα γεωεντοπισμού τελικών συσκευών → Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο
- Γρήγορη μεταφορά δεδομένων → Ειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο

Όπως ήταν αναμενόμενο δεδομένων των οφελών της τεχνολογίας LPWAN, τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται όλο και περισσότερες πλατφόρμες που σκοπό έχουν να εκμεταλλευτούν τη μεγάλη εμβέλεια που παρουσιάζεται στα κυψελοειδή δίκτυα και τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας των ασύρματων δικτύων αισθητήρων. Πολλά από τα LPWAN εγχειρήματα βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο, ενώ κάποια έχουν ήδη ξεκινήσει να αναπτύσσουν την αρχιτεκτονική τους. Οι LoRa, Sigfox και NB-IoT είναι οι πρωτοπόρες πλατφόρμες στον τομέα των δικτύων LPWAN, παρουσιάζουν έντονους ρυθμούς ανάπτυξης και έχουν ήδη ξεκινήσει να παρέχουν IoT υπηρεσίες που χρησιμοποιούν επιχειρήσεις και ιδιώτες (Margelis, Piechocki, Kaleshi, & Thomas, 2015).



### 3.1.3.1. LoRa και LoRaWAN

Το LoRa (Long Range) είναι μια τεχνολογία φυσικού επιπέδου LPWAN, που αναπτύχθηκε από την Semtech (Semtech, 2021) και χρησιμοποιεί μία ιδιόκτητη τεχνική διαμόρφωσης, η οποία ονομάζεται Chirp Spread Spectrum (CSS). Πρόκειται για μία παραλλαγή της τεχνικής διαμόρφωσης Spread Spectrum η οποία λειτουργεί ως εξής: το σήμα στενής ζώνης (narrow band) εξαπλώνεται σε πολύ ευρύτερη συχνότητα, πλησιέστερα στο επίπεδο θορύβου, διατηρώντας ταυτόχρονα το ίδιο επίπεδο δύναμης (Patel, 2018). Η παραπάνω τεχνική διαμόρφωσης φαίνεται και στο Σχήμα 6 (United States Patent No. US8406275B2, 2013). Δεδομένου ότι το μεταδιδόμενο κύμα είναι πολύ κοντά στο επίπεδο θορύβου γίνεται λιγότερο επιρρεπές σε εξωτερικές παρεμβολές και γίνεται επίσης πιο δύσκολο να διαβαστεί εισβολείς (Reynders & Pollin, 2016). Επειδή το σήμα είναι θαμμένο κάτω από το θόρυβο, απαιτούνται ισχυροί δέκτες για την αποκωδικοποίησή του. Το LoRa λειτουργεί στις ραδιοφωνικές ζώνες ISM (Ευρώπη 433MHz και 868MHz, Ασία 430MHz και ΗΠΑ 915MHz).



Σχήμα 6: Τεχνική Διαμόρφωσης Spread Spectrum

Η LoRa - Alliance (LoRa Alliance, 2021) είναι μια ομάδα εταιρειών, προγραμματιστών και κατασκευαστών παγκόσμιου βεληνεκούς, που συνεργάζονται ώστε να αναπτύξουν ένα πρότυπο για λύσεις χαμηλής ισχύος, χαμηλού κόστους, υψηλής ασφάλειας και μεγάλου εύρους στον συνεχώς αναπτυσσόμενο τομέα του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Η LoRa - Alliance υπάρχει από τον Μάρτιο του 2015. Το Σχήμα 7 δείχνει τους τρέχοντες Χορηγούς μέλη της ομάδας (LoRa Alliance, 2021).

	ACTIVITY SA		ORANGE
	Alibaba (China) Co., Ltd		SAGEMCOM BROADBAND SAS
	Amazon Web Services		Semtech
	Charter Communications		Senet
	Cisco Systems, Inc		Shenzhen Tencent Computer Systems Company Limited
	MachineQ, a Comcast Company		STMicroelectronics International NV
	KERLINK		TEKTELIC Communications Inc.
	Netze BW GmbH		

Σχήμα 7: Χορηγοί μέλη της LoRa – Alliance

Εκτός της ύπαρξης Χορηγών Μελών (Sponsors), η LoRa - Alliance προσφέρει επίσης άλλα επίπεδα ιδιότητας μέλους, όπως τα Συνεισφέροντα Μέλη (Contributors) , τα Ακαδημαϊκά Μέλη (Institutional), τα Μέλη Χρήστες (Adopters) και το Ευρύ Κοινό (Public). Καθένα από αυτά τα μέλη έχουν διαφορετικά επίπεδα δικαιωμάτων και προνομίων στην ομάδα.

Στόχος αυτού του μη κερδοσκοπικού οργανισμού είναι να δημιουργήσει ένα κοινό πρότυπο που μπορεί να χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη LPWAN σε όλο τον κόσμο. Αυτό προσπαθεί να το επιτύχει τυποποιώντας τις γνώσεις και τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των φορέων εκμετάλλευσης σε όλο τον κόσμο σε ένα ενιαίο παγκόσμιο πρότυπο.

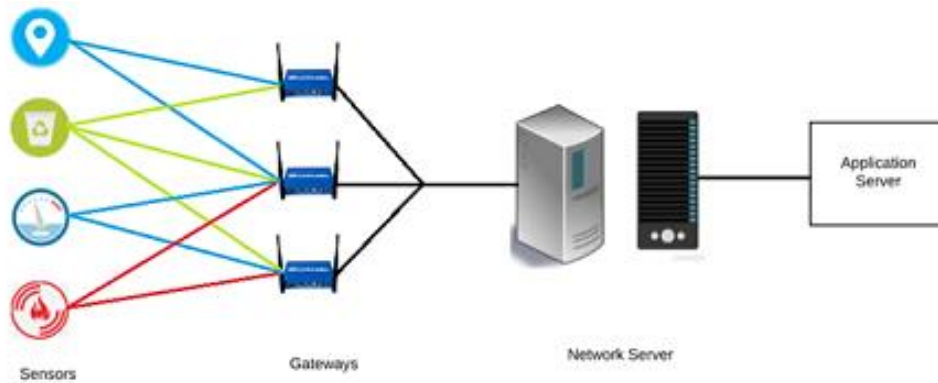
Το LoRaWAN είναι ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που εκδόθηκε από τη LoRa Alliance το 2012 και βασίζεται στην τεχνική διαμόρφωσης LoRa (CSS). Το πρωτόκολλο επικοινωνίας LoRaWAN ανήκει στο δεύτερο επίπεδο του μοντέλου OSI που είναι το στρώμα MAC (Media Access Control Layer). Το LoRaWAN ως πρωτόκολλο έχει διάφορα οφέλη σε σχέση με άλλες ασύρματες επικοινωνίες πρωτόκολλα. Μερικά από τα πλεονεκτήματα είναι (Patel, 2018):

- Αμφίδρομη επικοινωνία
- Ασφάλεια καθόλο το δίκτυο μέσω κρυπτογράφησης AES
- Καταχώρηση τελικών συσκευών μέσω προγραμματισμού OTA (over the air)
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας
- Προσαρμοστικός ρυθμός ανταλλαγής δεδομένων
- Μεγάλο εύρος γεωγραφικής κάλυψης
- Χαμηλό κόστος

Τα δίκτυα LoRaWAN χρησιμοποιούν τοπολογία αστέρα. Στο Σχήμα 8 φαίνεται μία τυπική αρχιτεκτονική ενός δικτύου LoRaWAN. Τα βασικά μέρη του δικτύου είναι τα παρακάτω:

- Τελικές συσκευές
  - ✓ Η τελική συσκευή επιτυγχάνει την ασύρματη επικοινωνία με έναν ή περισσότερους σταθμούς βάσης
  - ✓ Ο κεντρικός υπολογιστής της τελικής συσκευής αποστέλλει τα δεδομένα που λαμβάνονται από τον συνδεδεμένο αισθητήρα στη μονάδα LoRa μέσω σύνδεσης UART, τα οποία στη συνέχεια αποστέλλονται στο σταθμό βάσης μέσω υπό-GHz ραδιοσυχνοτήτων.
- Σταθμός βάσης
  - ✓ Ενεργεί ως διεπαφή μεταξύ των τελικών συσκευών και των διακομιστών δικτύου και κατ' επέκταση του διακομιστή εφαρμογών
  - ✓ Τα δεδομένα από την τελική συσκευή διαβιβάζονται στους διακομιστές μέσω του σταθμού βάσης
  - ✓ Οι σταθμοί βάσης συνδέονται με τον διακομιστή δικτύου μέσω τυπικής σύνδεσης IP
- Διακομιστής δικτύου
  - ✓ Είναι υπεύθυνος για την ταυτοποίηση των δεδομένων
  - ✓ Εάν τα δεδομένα απευθύνονται στον διακομιστή δικτύου υποβάλλονται σε επεξεργασία για περαιτέρω χρήση
  - ✓ Τα υπόλοιπα δεδομένα προωθούνται στον διακομιστή εφαρμογών
  - ✓ Ο διακομιστής δικτύου συνδέεται με τον διακομιστή εφαρμογών μέσω τυπικής σύνδεσης IP
- Διακομιστής εφαρμογών
  - ✓ Είναι ο τελικός σταθμός των δεδομένων

- ✓ Αποκρυπτογραφεί τα δεδομένα που λαμβάνονται από τον διακομιστή δικτύου
- ✓ Πολλαπλοί διακομιστές εφαρμογών μπορούν να υπάρχουν μέσα στο ίδιο δίκτυο LPWAN. Κάθε διακομιστής εφαρμογών μπορεί να χειριστεί έναν συγκεκριμένο τύπο δεδομένων. Για παράδειγμα, πολλαπλοί διακομιστές εφαρμογών για ηλεκτρικό μετρητή, δεδομένα GPS, συναγερμό καπνού κ.α.



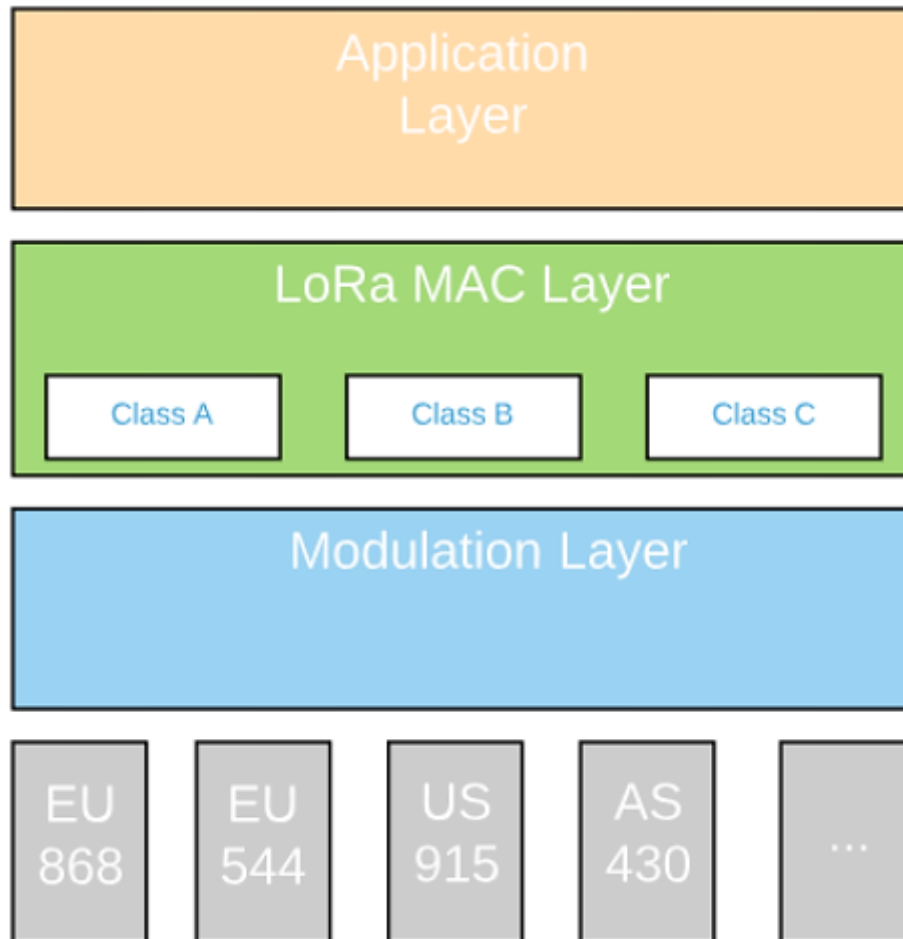
**Σχήμα 8:** Τυπική δομή ενός δικτύου LoRaWAN

Πέρα από την απλότητα του δικτύου σε σχέση με τα κατακεκομμένα δίκτυα, ένα από τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής δικτύου με τοπολογία αστέρα είναι ότι βοηθά στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των τελικών συσκευών. Σε μία κατακεκομμένη τοπολογία όλες οι συσκευές του δικτύου επικοινωνούν μεταξύ τους. Παρόλο που αυτό αυξάνει το εύρος της επικοινωνίας, εξαντλεί την ενέργεια των τελικών συσκευών αφού αυτές βρίσκονται σε συνεχή κατάσταση επικοινωνίας. Αυτό το πρόβλημα επιλύεται στην περίπτωση του LoRaWAN αφού κάθε τελική συσκευή επικοινωνεί με τον καλύτερο σταθμό βάσης, μειώνοντας έτσι τον αριθμό των συσκευών με τις οποίες χρειάζεται να επικοινωνεί, και αυτό με τη σειρά του μειώνει την κατανάλωση ενέργειας. Το LoRaWAN παρέχει επίσης καθολική ασφάλεια στο δίκτυο, προστατεύει δηλαδή τα δεδομένα που μεταδίδονται από τις τελικές συσκευές έως ότου φτάσουν στο διακομιστή.

Μία επιπλέον δυνατότητα του δικτύου LoRaWAN, είναι η χρήση της μεθόδου ADR (Adaptive Data Rate) που επιτρέπει την επιπρόσθετη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας των τελικών συσκευών. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατάλληλη προσαρμογή του ρυθμού ανταλλαγής δεδομένων και τη ραδιοσυχνότητα αποστολής τους από τις τελικές συσκευές. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει στους σταθμούς βάσης να λαμβάνουν πακέτα δεδομένων την ίδια χρονική στιγμή από διαφορετικές τελικές συσκευές (Wixted, Kinnaird, Tait, Ahmadinia, & Strachan, 2016). Η ύπαρξη της μεθόδου ADR είναι καθοριστικής σημασίας για την επεκτασιμότητα δικτύων LoRa, όπως αποδεικνύεται από μελέτες οι οποίες δείχνουν ότι χωρίς ADR ένα δίκτυο θα μπορούσε να υποστηρίξει 120 τελικές συσκευές, ενώ με τη χρήση ADR στο ίδιο δίκτυο θα μπορούσε να υποστηρίξει 1600 τελικές συσκευές.

Οι προδιαγραφές LoRaWAN (Sornin, Luis, Eirich, Kramp, & Hersent, 2016) που δημοσιεύθηκαν από την LoRa Alliance ορίζουν τρεις λειτουργίες επικοινωνίας: Κλάση A, Κλάση B και Κλάση Γ. Κάθε συσκευή LoRaWAN που χρησιμοποιείται σε δίκτυο πρέπει να εφαρμόζει μία αυτές τις τρεις λειτουργίες. Στις περισσότερες περιπτώσεις

χρησιμοποιούνται οι συσκευές κατηγορίας A, ενώ οι κατηγορίες B και Γ είναι προαιρετικές (Neumann et al., 2016). Το Σχήμα 9 δείχνει τις διαφορετικές κλάσεις επικοινωνίας στο δίκτυο LoRa, μεταξύ του επιπέδου LoRa Mac και του επιπέδου εφαρμογής.

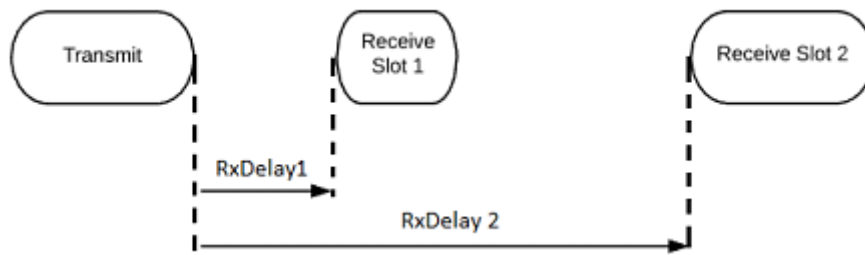


Σχήμα 9: Επίπεδα δικτύου LoRaWAN

**Κλάση A:** Οι συσκευές κλάσης A προσφέρουν αμφίδρομη επικοινωνία με τον διακομιστή. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 10, οι τελικές συσκευές είναι αυτές που αρχικοποιούν την επικοινωνία με τον διακομιστή. Αφού η επικοινωνία επιτευχθεί μετά από την αποστολή μηνύματος από την τελική συσκευή προς τον διακομιστή μόνο τότε μπορεί ο διακομιστής να απαντήσει στέλνοντας πακέτα δεδομένων σε δύο προκαθορισμένα παράθυρα επικοινωνίας (Nolan, Guibene, & Kelly, 2016). Συνεπώς, σε περίπτωση που ο διακομιστής δικτύου θέλει να επικοινωνήσει με κάποια τελική συσκευή θα πρέπει να περιμένει να στείλει πρώτα μήνυμα η τελική συσκευή σε αυτόν και μετά να αποστείλει εκείνος μήνυμα στην τελική συσκευή. Ο συντελεστής διάδοσης της σύνδεσης (spread factor) καθορίζει την καθυστέρηση του πρώτου παραθύρου αποστολής και λήψης ενώ στη συνέχεια η επόμενη καθυστέρηση παραθύρου λήψης είναι πάντα 200 ms. Εξαιτίας αυτής της συμπεριφοράς, οι συσκευές κλάσης A έχουν τη χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος και από τις τρεις κλάσεις και ως εκ τούτου τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας. Ωστόσο, ένα βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι έχουν υψηλή καθυστέρηση, καθώς κάθε φορά που ο διακομιστής χρειάζεται να επικοινωνήσει με τη συσκευή, πρέπει πρώτα να περιμένει τη συσκευή να στείλει ένα

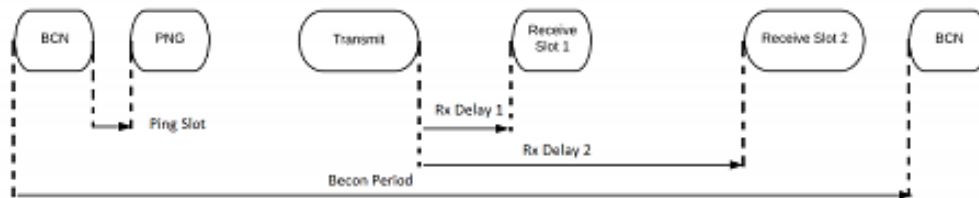


μήνυμα (uplink) σε αυτόν. Συσκευές κλάσης A χρησιμοποιούνται κυρίως σε αισθητήρες που λειτουργούν με μπαταρία, καθώς έχουν χαμηλή τροφοδοσία (Patel, 2018).



Σχήμα 10: LoRaWAN συσκευή κλάσης A

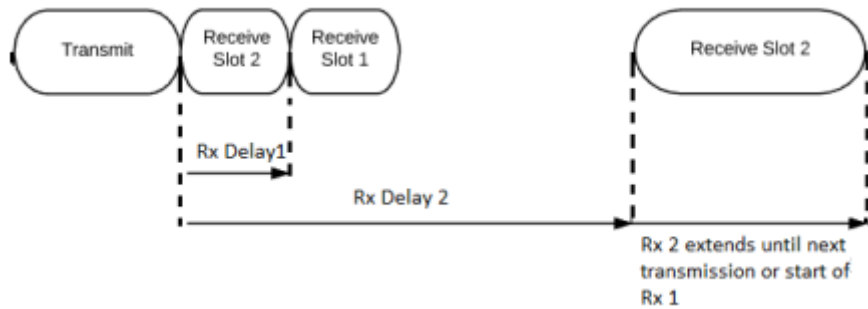
**Κλάση B:** Οι συσκευές κλάσης B επικοινωνούν αμφίδρομα όπως και οι συσκευές κλάσης A. Επιπλέον, έχουν χρονικά προγραμματισμένα παράθυρα λήψης ώστε να λαμβάνουν πακέτα δεδομένων από τον διακομιστή. Σε αυτή τη διαδικασία, πρώτα ο σταθμός βάσης στέλνει σήμα στην τελική συσκευή, υποδεικνύοντας ότι είναι καιρός να λάβει δεδομένα και στη συνέχεια η τελική συσκευή ενημερώνει τον διακομιστή ότι είναι έτοιμη να λάβει τα δεδομένα. Το πλεονέκτημα της κλάσης B έναντι της A είναι ότι έχει ντετερμινιστική (όχι στοχαστική) καθυστέρηση στη μετάδοση uplink (από την τελική συσκευή στο διακομιστή δικτύου) και downlink (από το διακομιστή δικτύου στην τελική συσκευή) μηνυμάτων. Ωστόσο, όλη αυτή η διαδικασία οδηγεί σε υψηλή κατανάλωση ενέργειας και χαμηλή διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Το Σχήμα 11 δείχνει ένα στιγμιότυπο του κύκλου επικοινωνίας μιας συσκευής κλάσης B (Patel, 2018).



Σχήμα 11: LoRaWAN συσκευή κλάσης B

**Κλάση Γ:** Οι συσκευές κλάσης Γ αντιμετωπίζουν τα προβλήματα καθυστερήσεων των συσκευών κλάσης A και B αφού μπορούν να λαμβάνουν διαρκώς πακέτα δεδομένων. Η μοναδική στιγμή που η συσκευή δεν μπορεί να λαμβάνει δεδομένα είναι όταν μεταδίδει. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 12, η συσκευή συνεχίζει να ακούει κατά τη διάρκεια της υποδοχής RX2. Μόλις λάβει ένα μήνυμα από το σταθμό βάσης, αρχίζει να ακούει στην υποδοχή RX1 και μετά επιστρέφει στην υποδοχή RX2 μόλις τελειώσει η λήψη. Λόγω αυτού, ο διακομιστής μπορεί να ξεκινήσει την επικοινωνία με την τελική συσκευή όποτε το θέλει. Η συνεχής διαθεσιμότητα για επικοινωνία των συσκευών κλάσης Γ οδηγεί σε υψηλή κατανάλωση ισχύος και επομένως οι συσκευές αυτές είναι κατάλληλες για συστήματα που έχουν συνεχή τροφοδοσία και δεν τροφοδοτούνται με μπαταρία (Margelis, Piechocki, Kaleshi, & Thomas, 2015).

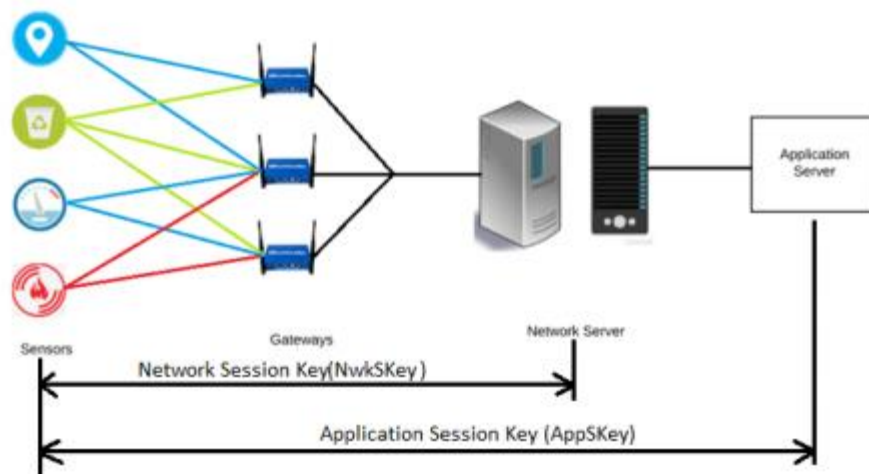




Σχήμα 12: LoRaWAN συσκευή κλάσης Γ

Από την παραπάνω συνοπτική περιγραφή των τριών κλάσεων γίνεται εμφανές ότι η καθυστέρηση στη μετάδοση δεδομένων είναι αντιστρόφως ανάλογη της κατανάλωσης ισχύος. Οι συσκευές κλάσης A έχουν την μεγαλύτερη καθυστέρηση αλλά πολύ μικρή κατανάλωση ενώ αντίθετα οι συσκευές κλάσης Γ έχουν σχεδόν μηδενική καθυστέρηση (Hoang & Chen, 2010) αλλά τη μέγιστη κατανάλωση ισχύος.

Δεδομένου ότι οι IoT συσκευές συνδέονται και επικοινωνούν με ασύρματη σύνδεση, η ασφάλεια των δεδομένων θεωρείται μείζονος σημασίας. Η ασφάλεια στις LoRaWAN συσκευές εξασφαλίζεται με χρήση κλειδιών AES (Εξελιγμένα Πρότυπα Κρυπτογράφησης) 128bit. Οι δύο σημαντικοί τομείς που είναι υπεύθυνοι για την ασφάλεια στο LoRaWAN δίκτυο είναι ο τομέας δικτύου και ο τομέας εφαρμογής. Ο τομέας δικτύου είναι αυτός που διασφαλίζει την ακεραιότητα των μηνυμάτων μεταξύ της τελικής συσκευής και του διακομιστή δικτύου. Αυτό γίνεται από ένα κοινό κλειδί κρυπτογράφησης AES 128bit μεταξύ της τελικής συσκευής και του διακομιστή δικτύου. Ο διακομιστής εφαρμογών είναι αυτός που αποκρυπτογραφεί τα δεδομένα που λαμβάνονται από τις τελικές συσκευές που κρυπτογραφούν τα δεδομένα χρησιμοποιώντας ένα κοινό κλειδί κρυπτογράφησης AES 128bit. Συνοψίζοντας, ο διακομιστής δικτύου μπορεί απλώς να πιστοποιήσει τα δεδομένα της εφαρμογής, αλλά μόνο ο διακομιστής εφαρμογών μπορεί να αποκρυπτογραφήσει τα δεδομένα χρησιμοποιώντας το κοινό κλειδί. Το Σχήμα 13 δείχνει πώς διασφαλίζεται η ασφάλεια σε ένα δίκτυο LoRaWAN.



Σχήμα 13: Ασφάλεια LoRaWAN

### 3.1.3.2. Sigfox

Το Sigfox αποτελεί ένα δίκτυο LPWAN, το οποίο ξεκίνησε να αναπτύσσεται το 2010 από την ομώνυμη start-up εταιρία στη Γαλλία. Ως σήμερα, το δίκτυο Sigfox έχει υιοθετηθεί από πάνω από 100 μεγάλες εταιρίες συμπεριλαμβανομένων των Bayer, BMW, DHL, Michelin και PWC (Sigfox, Customers, 2021). Το Sigfox επιτρέπει στις ασύρματες συσκευές να συνδεθούν σε ιδιόκτητους σταθμούς βάσης χρησιμοποιώντας πολύ χαμηλή ισχύ και χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων με σύνδεση IP.

Η τεχνολογία Sigfox χρησιμοποιεί την τεχνική διαμόρφωσης BPSK (Διαδική Μετατροπή Φάσης Πληκτρολόγησης) για τη μετάδοση δεδομένων. Πρόκειται για ένα εξαιρετικά στενό σήμα ζώνης (μικρά κομμάτια των 100Hz) και τα δεδομένα κωδικοποιούνται αλλάζοντας τη φάση του κύματος φορέα, επιτρέποντας στον δέκτη να τα λαμβάνει σε μικρές φέτες φάσματος. Αυτό, μειώνει την επίδραση του θορύβου, αυξάνοντας έτσι το εύρος του σήματος και μειώνοντας την καταναλισκόμενη ισχύ. Όπως και το LoRa, το Sigfox χρησιμοποιεί τις ζώνες συχνοτήτων ISM για επικοινωνία. Λειτουργεί στα 868MHz στην Ευρώπη και στα 902MHz στις ΗΠΑ. Από τη Sigfox έχει αναφερθεί ότι ένα εκατομμύριο τελικές συσκευές μπορούν να συνδεθούν σε ένα μόνο σημείο πρόσβασης και μπορούν να παρέχουν κάλυψη έως και 3-10km σε αστικές περιοχές με ρυθμό μετάδοσης 100bps και έως 30-50km σε αγροτικές περιοχές. Οι χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων αυξάνουν τις καθυστερήσεις στην επικοινωνία και καθιστούν το δίκτυο Sigfox ευαίσθητο σε παρεμβολές με άλλες τεχνολογίες. Η Sigfox δεν έχει εφαρμόσει κάποια τεχνική για την αποφυγή της σύγκρουσης πακέτων, ενώ ταυτόχρονα, η εξαιρετικά στενή ζώνη μετάδοσης, μπορεί εύκολα να υποστεί παρεμβολές από μία τεχνολογία ευρείας ζώνης Sub-GHz, όπως το LoRa.

Από την άλλη πλευρά, οι σταθμοί βάσης αποτελούν προηγμένες ραδιοφωνικές πλατφόρμες που μπορούν να λαμβάνουν δεδομένα από 8000 κανάλια ταυτόχρονα. Το Sigfox στέλνει κάθε μήνυμα τρεις φορές μέσω διαφορετικών καναλιών (συχνοτήτων) ώστε να διασφαλίζει, με μεγάλη αξιοπιστία, ότι το μήνυμα θα ληφθεί τουλάχιστον από έναν από τους σταθμούς βάσης. Το Sigfox μπορεί να στείλει 140 μηνύματα uplink (από την τελική συσκευή στο σταθμό βάσης) με μέγιστο μέγεθος μηνύματος τα 12 byte και μπορεί να λάβει 4 μηνύματα downlink (από το σταθμό βάσης στην τελική συσκευή) με μέγιστο μέγεθος μηνύματος τα 8 byte ανά ημέρα (Mekki, Bajic, Chaxel, & Meyer, 2017). Λαμβάνοντας υπόψη το χαμηλό ρυθμό αποστολής δεδομένων αλλά και την υψηλή καθυστέρηση που προκαλείται, γίνεται ξεκάθαρο ότι το Sigfox είναι κατάλληλο για εφαρμογές που χρειάζονται χαμηλούς ρυθμούς ανταλλαγής δεδομένων. Επιπλέον, όντας μία ιδιόκτητη και κλειστή τεχνολογία, το Sigfox δίνει στους εξωτερικούς ερευνητές ελάχιστη ελευθερία για να καινοτομήσουν πάνω στον τομέα. Παρακάτω συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του Sigfox.

Πλεονεκτήματα:

- Απαιτείται χαμηλή ισχύς λόγω της απουσίας κυκλώματος δέκτη
- Η αργή διαμόρφωση συμβάλλει στην επίτευξη υψηλότερης εμβέλειας καθιστώντας το Sigfox πιο κατάλληλη λύση για απλές εφαρμογές
- Αναπτύχθηκε με εκτενή έρευνα στις περιοχές του Σαν Φρανσίσκο και της Ευρώπης

Μειονεκτήματα:

- Οι διαφορές στην αρχιτεκτονική των ΗΠΑ και της Ευρώπης καθιστούν δύσκολη την κοινή δοκιμή (testing)
- Δεν αποτελεί πρότυπο ανοιχτού κώδικα
- Προσφέρει μονόδρομη επικοινωνία από την τελική συσκευή στο σταθμό βάσης
- Οι παρεμβολές ραδιοσυχνοτήτων είναι υψηλές
- Προσφέρει χαμηλή ασφάλεια λόγω κρυπτογράφησης 16-bit

### 3.1.3.3. NB-IoT

Το NarrowBand IoT (NB-IoT) είναι μια LPWAN τεχνολογία στενής ζώνης ραδιοφώνου που αναπτύχθηκε και τυποποιήθηκε από τον οργανισμό 3GPP το 2016. Σε αντίθεση με τις τεχνολογίες που παρουσιάστηκαν παραπάνω, χρησιμοποιεί συχνότητες που έχουν λάβει άδεια (700 MHz, 800 MHz και 900 MHz), ίδιες με αυτές του LTE δικτύου και εφαρμόζει τη διαμόρφωση Τετραγωνικής Μετατροπής Φάσης Πληκτρολόγησης (QPSK). Υπάρχουν τρεις τρόποι λειτουργίας για το NB-IoT:

- Stand Alone: Το ίδιο το σήμα λειτουργεί ως αποκλειστικός φορέας
- In-Band: Ένα μπλοκ ανατίθεται εντός του σήματος φορέα LTE
- Guard-Band: Ένα μπλοκ ανατίθεται στη ζώνη προστασίας του σήματος φορέα LTE

Στη stand-alone λειτουργία, το σήμα NB-IoT καταλαμβάνει ένα εύρος ζώνης συχνοτήτων 200 KHz, το οποίο αντιστοιχεί σε μία πηγή μετάδοσης GSM. Στις λειτουργίες in-band και guard-band το NB-IoT εφαρμόζεται ως ένα μπλοκ φυσικού πόρου (PRB) 180kHz μέσα στο σήμα φορέα LTE.

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας του NB-IoT βασίζεται στο πρωτόκολλο LTE. Στην πραγματικότητα, το NB-IoT μειώνει τις λειτουργίες του πρωτοκόλλου LTE στο ελάχιστο και τις προσαρμόζει στις απαιτήσεις των εφαρμογών IoT. Για παράδειγμα, το backend σύστημα του LTE χρησιμοποιείται για να μεταδώσει πληροφορίες στις τελικές συσκευές. Επειδή η επικοινωνία αυτή καταναλώνει την μπαταρία των τελικών συσκευών που είναι ζωτικής σημασίας, η επικοινωνία διατηρείται στο ελάχιστο, τόσο στη συχνότητά της όσο και στο μέγεθος των μηνυμάτων. Η προσαρμογή στις ανάγκες των IoT υπηρεσιών, εστίασε στη μείωση του μεγέθους και την αποστολή των μηνυμάτων δεδομένων, για να δοθεί προτεραιότητα στην αυτονομία των συσκευών.

Το NB-IoT εφαρμόζει διαμόρφωση QPSK (Τετραγωνική Μετατροπή Φάσης Πληκτρολόγησης) και χρησιμοποιεί το FDMA (Πολλαπλή Πρόσβαση Διαίρεσης Συχνότητας) για τη μετάδοση μηνυμάτων downlink ενώ για τη μετάδοση των uplink μηνυμάτων χρησιμοποιεί το OFDMA (Ορθογωνική FDMA) (Wang, et al., 2017). Ο ρυθμός αποστολής δεδομένων φτάνει τα 200 kbps στο downlink και τα 20 kbps στο uplink, ενώ το μέγεθος των μηνυμάτων δεν ξεπερνά τα 1600 bytes. Ο χρόνος ζωής της μπαταρίας μπορεί να φτάσει τα 10 χρόνια, δεδομένου ότι η συσκευή μεταδίδει 200 bytes πληροφορίας την ημέρα κατά μέσο όρο (Adhikary, Lin, & Wang, 2016). Παρακάτω συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του NB-IoT.

Πλεονεκτήματα:

- Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του εξοπλισμού κινητής τηλεφωνίας, καθώς ο σχεδιασμός του NB-IoT βασίζεται στο LTE
- Ενεργειακή αυτονομία τελικής συσκευής άνω των 10 ετών
- Πάνω από 100.000 συσκευές ανά σταθμό βάσης
- Υποστήριξη λειτουργιών LTE όπως εντοπισμός, ασφάλεια και έλεγχος ταυτότητας

Μειονεκτήματα (Raza, Kulkarni, & Sooriyabandara, 2017):

- Περιορισμένη αναγνώριση μηνυμάτων λόγω μεγέθους των downlink
- Αυξημένη καθυστέρηση λόγω συσσώρευσης πακέτων
- Χαμηλή απόδοση του NB-IoT όταν το δίκτυο βρίσκεται υπό βαριά κυκλοφορία δεδομένων και φωνής.
- Η τεχνολογία είναι πολύ νέα σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες και επομένως οι εμπορικές εφαρμογές της δεν είναι ευρέως διαθέσιμες

### 3.2. Σύγκριση Προτύπων LPWAN

Στον παρακάτω Πίνακα γίνεται σύγκριση των LPWAN τεχνολογιών που αναφέρθηκαν παραπάνω.

**Πίνακας 16: Χαρακτηριστικά LP-WAN δικτύων Sigfox, LoRa, NB-IoT**

	Sigfox	LoRaWAN	NB-IoT
Modulation	BPSK	CSS	QPSK
Frequency	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Unlicensed ISM bands (868 MHz in Europe, 915 MHz in North America, and 433 MHz in Asia)	Licensed LTE frequency bands
Bandwidth	100 Hz	250 kHz and 125 kHz	200 kHz
Maximum data rate	100 bps	50 kbps	200 kbps
Bidirectional	Limited / Half-duplex	Yes / Half-duplex	Yes / Half-duplex
Maximum messages/day	140 (UL), 4 (DL)	Unlimited	Unlimited
Maximum payload length	12 bytes (UL), 8 bytes (DL)	243 bytes	1600 bytes
Range	10 km (urban), 40 km (rural)	5 km (urban), 20 km (rural)	1 km (urban), 10 km (rural)
Interference immunity	Very high	Very high	Low
Authentication & encryption	Not supported	Yes (AES 128b)	Yes (LTE encryption)
Adaptive data rate	No	Yes	No
Handover	End-devices do not join a single base station	End-devices do not join a single base station	End-devices join a single base station
Localization	Yes (RSSI)	Yes (TDOA)	No (under specification)
Allow private network	No	Yes	No
Standardization	Sigfox company is collaborating with ETSI on the standardization of Sigfox-based network	LoRa-Alliance	3GPP

Υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επιλογή του κατάλληλου LPWAN δικτύου προκειμένου να εξυπηρετήσει μία εφαρμογή IoT. Η ποιότητα παρεχόμενης υπηρεσίας, η διάρκεια ζωής μπαταρίας των τελικών συσκευών, η χρονική καθυστέρηση μετάδοσης, η επεκτασιμότητα, το μέγεθος δεδομένων, η κάλυψη δικτύου, η εμβέλεια, η εφαρμογή και το κόστος των τεχνολογιών LPWAN είναι οι σημαντικότεροι από αυτούς τους παράγοντες (Mekki, Bajic, Chaxel, & Meyer, 2017) και για τον λόγο αυτό, με βάση αυτούς θα αναλυθούν στη συνέχεια οι διαφορές των LoRa, Sigfox και NB-IoT.

#### 3.2.1. Ποιότητα Παρεχόμενης Υπηρεσίας

Το Sigfox και το LoRa χρησιμοποιούν φάσμα συχνοτήτων χωρίς άδεια και με πρωτόκολλα ασύγχρονης επικοινωνίας. Έχουν τη δυνατότητα να αποφύγουν τις παρεμβολές, το multipath και την εξασθένιση σήματος, όμως δεν μπορούν να φτάσουν

τα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας που προσφέρει το NB-IoT. Το φάσμα που χρησιμοποιεί το NB-IoT είναι αδειοδοτημένο, βασισμένο στο σύγχρονο πρωτόκολλο LTE που διασφαλίζει τη βέλτιστη ποιότητα παρεχόμενων υπηρεσιών, με την προϋπόθεση βέβαια να μπορεί να καλυφθεί το κόστος που έχει μια άδεια LTE φάσματος η οποία μπορεί να ξεπεράσει τα 500 εκατομμύρια ευρώ. Είναι σαφές λοιπόν, ότι το NB-IoT αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή ανάμεσα στα τρία δίκτυα, σε περίπτωση που χρειάζεται η εγγυημένη ποιότητα υπηρεσιών.

### 3.2.2. Διάρκεια Ζωής Μπαταρίας και Χρονική Καθυστέρηση

Στο Sigfox, το LoRa και το NB-IoT, οι τελικές συσκευές βρίσκονται σε κατάσταση αδρανοποίησης τον περισσότερο χρόνο, όταν δε λειτουργούν, με αποτέλεσμα να μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας. Στο NB-IoT, όμως, καταναλώνουν επιπρόσθετη ενέργεια λόγω της σύγχρονης επικοινωνίας και της διαχείρισης ποιότητας υπηρεσίας σε συνδυασμό με τις λειτουργίες OFDMA/FDMA οι οποίες απαιτούν μεγαλύτερα επίπεδα ρεύματος. Σε σύγκριση, λοιπόν, με τα δίκτυα Sigfox και LoRa, προσφέρει λιγότερη διάρκεια ζωής μπαταρίας τελικών συσκευών.

Το πλεονέκτημά του όμως ως προς αυτά, είναι τα χαμηλά επίπεδα χρονικής καθυστέρησης παράδοσης σημάτων. Αντίθετα από το Sigfox, το LoRa παρέχει τη δυνατότητα λειτουργίας Class C τελικών συσκευών, όπως προαναφέρθηκε, ώστε να υποστηρίζει αμφίδρομη επικοινωνία με χαμηλή χρονική καθυστέρηση, σε βάρος της κατανάλωσης ενέργειας. Επομένως, αν δεν παίζει σημαντικό ρόλο η χρονική καθυστέρηση και το μέγεθος των δεδομένων που αποστέλλονται είναι μικρό στην εφαρμογή που αναπτύσσεται, το Sigfox και το LoRa για Class A τελικές συσκευές, είναι οι καλύτερες επιλογές, ενώ για μικρή χρονική καθυστέρηση το NB-IoT και Class C LoRa.

### 3.2.3. Επεκτασιμότητα και Όγκος Πληροφοριών

Ο αριθμός των συσκευών που μπορούν να υποστηρίξουν τα τρία αυτά δίκτυα είναι πολύ μεγάλος, ενώ ανταποκρίνονται θετικά στην αύξηση του πλήθους και την πυκνότητα των συνδεδεμένων συσκευών. Για την επίτευξη επεκτασιμότητας υπάρχουν διάφορες τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί όπως η αποδοτική εκμετάλλευση της ποικιλομορφίας σε ένα κανάλι, αλλά και στον χρόνο και στον χώρο. Το NB-IoT προσφέρει μεγαλύτερες δυνατότητες επέκτασης από τα άλλα δίκτυα, με χωρητικότητα έως και 100 χιλιάδων συσκευών ανά σταθμό βάσης, διπλάσια από αυτή των Sigfox και LoRa. Ακόμη, υποστηρίζει μετάδοση μεγαλύτερου μεγέθους πληροφοριών που φτάνει τα 1600 bytes, τη στιγμή που το LoRa φτάνει τα 243 bytes και το Sigfox μόλις τα 12 bytes.

### 3.2.4. Γεωγραφική Κάλυψη και Εμβέλεια Δικτύου

Το κύριο πλεονέκτημα που αξιοποιείται στο Sigfox είναι πως μία ολόκληρη πόλη μπορεί να καλυφθεί από ένα μόνο σταθμό βάσης, αφού η εμβέλεια μπορεί να φτάσει έως και 40 χιλιόμετρα. Για παράδειγμα, στο Βέλγιο που είναι μία χώρα 30.500 τετραγωνικών χιλιομέτρων, το δίκτυο Sigfox χρειάστηκε μόλις 7 σταθμούς βάσης για την κάλυψη ολόκληρης της χώρας. Το LoRa από την άλλη πλευρά, έχει μικρότερη εμβέλεια, επομένως χρειάζεται περισσότερους σταθμούς βάσης, και για την κάλυψη

μιας πόλης όπως η Βαρκελώνη χρειάζεται 3 σταθμούς βάσης, ενώ το NB-IoT εμφανίζει τη μικρότερη κάλυψη δικτύου συγκριτικά με τις υπόλοιπες και δεν είναι δυνατό να εφαρμοστεί σε αγροτικές ή προαστιακές περιοχές που δεν καλύπτονται από κάλυψη LTE δικτύου.

### 3.2.5. Μοντέλο Ανάπτυξης

Τα χαρακτηριστικά του NB-IoT δημοσιεύθηκαν τον Ιούνιο του 2016, για την καθίδρυση του δικτύου, όμως θα χρειαστεί περισσότερος χρόνος αφού βρίσκεται ακόμη σε στάδιο ανάπτυξης. Το Sigfox και το LoRa όμως, αποτελούν ώριμα οικοσυστήματα δικτύων, που βρίσκονται στο στάδιο εμπορευματοποίησης σε πολλές χώρες και πόλεις. Το LoRa είναι διαθέσιμο σε 42 χώρες έναντι των 31 που είναι το Sigfox, παρ' όλα αυτά οι περιπτώσεις εφαρμογής των δύο δικτύων βρίσκονται ακόμη σε εξέλιξη. Ένα μείζον πλεονέκτημα του LoRa, είναι η προσαρμοστικότητά του, αφού προσφέρει τη δυνατότητα ανάπτυξης δικτύου τοπικού χαρακτήρα με τη χρήση ιδιόκτητων LoRa gateways ή δημόσιων σταθμών βάσης. Στον τομέα της βιομηχανίας μπορεί να εφαρμοστεί ένα υβριδικό λειτουργικό μοντέλο τοπικού δικτύου LoRa σε εργοστασιακές περιοχές και να χρησιμοποιεί το LoRa δίκτυο για να καλύψει και εξωτερικές περιοχές.

### 3.2.6. Κόστος

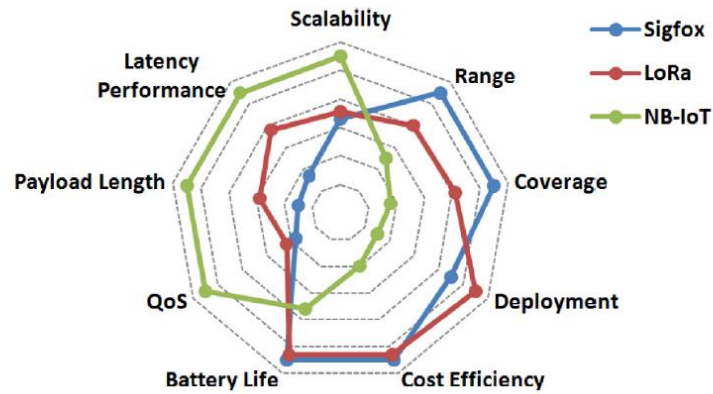
Διάφοροι παράγοντες κόστους πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως το κόστος άδειας φάσματος συχνοτήτων, εφαρμογής και ανάπτυξης δικτύου και το κόστος των συσκευών που χρησιμοποιούνται. Στον Πίνακα 17 παρουσιάζονται τα κόστη των παραγόντων αυτών για κάθε δίκτυο, όπου είναι φανερό πως το Sigfox και το LoRa είναι σημαντικά οικονομικότερα από το NB-IoT. Κάθε δίκτυο παρουσιάζει τα δικά του πλεονεκτήματα, επομένως η καταλληλότητα του κάθε δικτύου κρίνεται από την εφαρμογή στην οποία θα χρησιμοποιηθεί.

Πίνακας 17: Διαφορετικά κόστη μεταξύ των LoRa, Sigfox και NB-IoT

	Κόστος άδειας	Κόστος Ανάπτυξης	Κόστος Τελικής Συσκευής
<b>LoRa</b>	0	> 100€/gateway	3-5€
<b>Sigfox</b>	0	> 4.000€/σταθμό βάσης	< 2€
<b>NB-IoT</b>	> 500 εκατ. €	> 15.000€/σταθμό βάσης	> 20€

## 3.3. Επιλογή Προτύπου

Όπως είναι φανερό, δεν υπάρχει μία μόνο λύση LPWAN δικτύου που να ταιριάζει στις απαιτήσεις κάθε προβλήματος. Σύμφωνα με την ανάλυση των παραγόντων που προηγήθηκε, έχουν δημιουργηθεί γραφικές αναπαραστάσεις των πλεονεκτημάτων του κάθε δικτύου όπως αυτή του Σχήματος 14.



**Σχήμα 14:** Πλεονεκτήματα μεταξύ των τεχνολογιών IoT σε διαφορετικούς παράγοντες

Οι ανάγκες ενός δικτύου που θα καθιστά εφικτό τον εντοπισμό θέσης τελικών συσκευών, δίνοντας έμφαση στην διάρκεια ζωής της μπαταρίας τους, την κάλυψη δικτύου αλλά και το κόστος ανάπτυξης, είναι φανερό πως καλύπτονται επαρκώς από το δίκτυο LoRa.



## 4. Μελέτη Περίπτωσης

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η διαδικασία σχεδιασμού, κατασκευής και ελέγχου λειτουργίας του προτεινόμενου ολοκληρωμένου συστήματος έξυπνης διαχείρισης των απορριμμάτων.

### 4.1. Προδιαγραφές Συσκευής

Στην αρχή της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναφέρθηκε ότι σκοπός της είναι η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου (end-to-end) συστήματος έξυπνης διαχείρισης των απορριμμάτων, με μεγάλη ενεργειακή αυτονομία και ανθεκτικότητα της συσκευής επί κάδου που το υποστηρίζει. . Συνεπώς, τέθηκαν κάποιες προδιαγραφές που το τελικό σύστημα πρέπει να ικανοποιεί οι οποίες και αναλύονται στη συνέχεια.

#### 4.1.1. Χαρακτηρισμός Κρίσιμης Στάθμης

Ως κρίσιμη στάθμη κάδου και συνεπώς στάθμη μετά την οποία θεωρείται ότι ο Δήμος πρέπει να προχωρήσει στην αποκομιδή των απορριμμάτων ορίστηκε το 70% του ωφέλιμου ύψους του κάδου. Με αυτόν τον τρόπο, από τη μία αποφεύγεται η καθυστερημένη αποκομιδή των απορριμμάτων που θα οδηγήσει σε υπερχείλιση του κάδου και από την άλλη δίνεται ένα χρονικό περιθώριο στους Δήμους έως ότου προχωρήσουν στο άδειασμα του. Σε κάθε περίπτωση το ποσοστό πλήρωσης είναι μία σχεδιαστική απόφαση που μπορεί πολύ εύκολα να προσαρμοστεί στις ξεχωριστές ανάγκες κάθε Δήμου.

#### 4.1.2. Εγκυρότητα Μετρήσεων

Οι κάδοι, είτε πρόκειται για τους παραδοσιακούς πράσινους είτε για τούς γνωστούς μπλε της ανακύκλωσης, συνήθως δεν εμφανίζουν ομοιομορφία επιφάνειας, αλλά υπάρχουν σημεία υψηλότερου και χαμηλότερου επιπέδου. Συνεπώς, το σύστημα έπρεπε να υπολογίζει μια μέση στάθμη, με σκοπό την αποφυγή της εξαγωγής λανθασμένων αποτελεσμάτων. Επιπλέον, έπρεπε να δοθεί ένα μέγιστο σφάλμα μεταξύ της μετρούμενης στάθμης και της πραγματικής. Το σφάλμα αυτό ορίστηκε στο  $\pm 10\%$ . Έτσι, αν η στάθμη βρίσκεται στο 70%, που σημαίνει ότι ο κάδος έχει ακόμα περιθώρια πλήρωσης, και η μέτρηση δώσει 60% ο κάδος δε θα θεωρηθεί γεμάτος. Μόλις ωστόσο η στάθμη φτάσει στο 80%, που πλέον ο κάδος είναι αρκετά γεμάτος, ακόμα και αν η μέτρηση δώσει 70% η στάθμη θα θεωρηθεί κρίσιμη και ο Δήμος θα προχωρήσει σε αποκομιδή των απορριμμάτων.

#### 4.1.3. Συχνότητα Μετρήσεων

Για την αποφυγή άσκοπων μεταφορών δεδομένων, έπρεπε να καθοριστεί η επιθυμητή συχνότητα μετρήσεων για τον εκάστοτε κάδο. Ο πιο ασφαλής τρόπος υπολογισμού αυτής της συχνότητας ήταν βάσει του ιστορικού του κάθε κάδου. Δηλαδή σε κάδους που η ρίψη απορριμμάτων είναι συχνότερη έπρεπε να λαμβάνονται μετρήσεις πιο συχνά, ενώ σε κάδους που η ρίψη απορριμμάτων είναι σπανιότερη οι μετρήσεις μπορούσαν να γίνονται αραιότερα. Επειδή τέτοια δεδομένα προς το παρόν δεν ήταν διαθέσιμα, για την πρώτη περίοδο λειτουργίας της συσκευής η συχνότητα ορίστηκε σταθερή και ίδια για όλους τους κάδους, ως μία φορά την ημέρα, πριν τα



απορριμματοφόρα ξεκινήσουν τα δρομολόγιά τους. Σε βάθους χρόνου, που θα υπάρχουν δεδομένα πληρότητας για τους κάδους η συχνότητα αυτή μπορεί να αλλάξει.

#### 4.1.4. Αυτονομία Συσκευής

Δεδομένου ότι η συσκευή είναι αδύνατο να βρίσκεται σε μόνιμη σύνδεση με ένα δίκτυο παροχής ενέργειας έπρεπε η μετρητική διάταξη να έχει πολύ μικρή κατανάλωση ενέργειας ώστε να επιτυγχάνεται υψηλή ενεργειακή αυτονομία. Ως απαραίτητο χρονικό διάστημα αυτονομίας καθορίστηκαν τα 5 έτη.

#### 4.1.5. Αντοχή και Ανθεκτικότητα Προστατευτικού Καλύμματος Διάταξης (Housing)

Το καπάκι του κάδου είναι το μοναδικό κινούμενο μέρος του κάδου και η χρήση του είναι συνήθως βίαιη, αφού περιλαμβάνει απότομα ανοίγματα και κλεισίματα με πρόσκρουση. Δεδομένου ότι το κάλυμμα της διάταξης είναι τοποθετημένο στη μέσα πλευρά του καπακιού, έπρεπε να παρουσιάζει υψηλή αντοχή σε τέτοιες δυνάμεις και συνολικά έπρεπε να είναι σχεδιασμένο ώστε να μπορεί να ανταπεξέλθει ισχυρούς κραδασμούς. Για παράδειγμα, τα εξαρτήματα της μετρητικής διάταξης έπρεπε να είναι στερεωμένα στο κάλυμμα με τέτοιο τρόπο, ώστε σε περίπτωση έντονου κραδασμού του καπακιού να μην υπάρξει αποσύνδεση ή και καταστροφή του κυκλώματος. Εφόσον το κάλυμμα βρίσκεται πακτωμένο στο καπάκι του κάδου, δεν δέχεται φορτία από τα απορρίμματα τα οποία χτυπούν τα τοιχώματα και τον πάτο του κάδου και συνεπώς δεν χρειαζόταν να πληροί ιδιαίτερα απαιτητικές προδιαγραφές αντοχής σε κρούση.

Στη συνέχεια, η βάση στήριξης που θα σχεδιαζόταν για τη συγκράτηση του καλύμματος στο καπάκι του κάδου έπρεπε να έχει κατάλληλη αντοχή ώστε να μπορεί να συγκρατήσει το κάλυμμα και να μην παραμορφώνεται πλαστικά υπό το βάρος του. Επιπλέον, έπρεπε να έχει κατάλληλη αντοχή σε κραδασμούς ώστε να μην δημιουργηθούν ρωγμές από τους κραδασμούς και να είναι τόσο ισχυρά πακτωμένη στο καπάκι ώστε να μην παρασυρθεί από τις βίαιες προσκρούσεις του καπακιού. Τέλος, δεν υπήρξαν ιδιαίτερες απαιτήσεις ως προς αντοχή σε χημικό/ραδιενεργό περιβάλλον ούτε ως προς την ανθεκτικότητα σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες της τάξεως των 65°C και άνω καθώς θεωρήθηκε πως σε έναν κάδο σκουπιδιών δεν εντοπίζονται τέτοιες συνθήκες.

#### 4.1.6. Στεγανότητα Προστατευτικού Καλύμματος Διάταξης

Το κάλυμμα της συσκευής έπρεπε να χαρακτηρίζεται από στεγανότητα όσον αφορά στα υγρά και τη σκόνη. Τόσο η είσοδος υγρών όσο και σκόνης και η επαφή των εξαρτημάτων με αυτά ενδεχομένως να είναι σε θέση να επηρεάσει τη λειτουργία της συσκευής καθώς επίσης και τις μετρήσεις του αισθητήρα. Επιπλέον, η επίδραση, ειδικά των υγρών, σε μεγαλύτερο βαθμό ήταν ικανή ακόμα και να θέσει τη συσκευή εκτός λειτουργίας.

Προκειμένου να προσδιορισθούν οι ακριβείς απαιτήσεις όσον αφορά τη στεγανότητα αξιοποιήθηκε η κατάταξη των κατηγοριών στεγανότητας κατά τον κώδικα IP (Ingress Protection = Προστασία Εισόδου). Η IP κατάταξη προσδιορίζεται από έναν διψήφιο αριθμό, το πρώτο ψηφίο του οποίου προσδιορίζει την προστασία από στερεά σώματα

και το δεύτερο την προστασία από υγρά. Στους δύο παρακάτω πίνακες καταγράφεται η κωδικοποίηση του καθενός από τα δύο ψηφία.

**Πίνακας 18: Σημασία του 1<sup>ου</sup> ψηφίου στον κώδικα IP**

<b>1<sup>ο</sup> Ψηφίο: προστασία από στερεά σώματα/σωματίδια</b>		
Επίπεδο	Είδος Προστασίας	Επεξήγηση
0	Δεν προστατεύεται	
1	> 50 χιλιοστά	Πλήρης προστασία από είσοδο οποιαδήποτε μεγάλης επιφάνειας του σώματος.
2	> 12,5 χιλιοστά	Πλήρης προστασία από είσοδο δακτύλων και άλλων παρόμοιων αντικειμένων.
3	> 2,5 χιλιοστά	Πλήρης προστασία από είσοδο εργαλείων, χοντρών καλωδίων κλπ.
4	> 1 χιλιοστά	Πλήρης προστασία από είσοδο της πλειονότητας των καλωδίων, βιδών, κοχλιών κλπ.
5	Προστασία από σκόνη	Η εισροή σκόνης δεν αποτρέπεται εντελώς, αλλά αποτρέπεται σε ικανοποιητικό βαθμό ώστε να παρεμποδίζει την ικανοποιητική λειτουργία του εξοπλισμού.
6	Προστασία από στενή σκόνη	Αποτρέπεται πλήρως η είσοδος σκόνης

**Πίνακας 19: Σημασία του 2<sup>ου</sup> ψηφίου του κώδικα IP**

<b>2<sup>ο</sup> Ψηφίο: προστασία από υγρά</b>		
Επίπεδο	Είδος Προστασίας	Επεξήγηση
0	Δεν προστατεύεται	
1	Σταγόνες νερού	Πλήρης προστασία από σταγόνες νερού όπου προσπίπτουν κάθετα.
2	Σταγόνες νερού υπό γωνία 15°	Πλήρης προστασία από σταγόνες νερού όπου πέφτουν κάθετα όταν το περίβλημα βρίσκεται υπό γωνία 15°.
3	Ψεκασμός νερού ("Spraying water")	Πλήρης προστασία από νερό που πέφτει ως σπρέι σε οποιαδήποτε γωνία έως 60° από τον κατακόρυφο άξονα.
4	Πιτσίσισμα νερού	Πλήρης προστασία έναντι νερού που εκτοξεύεται προς το περίβλημα υπό οποιαδήποτε γωνία
5	Πίδακας νερού	Πλήρης προστασία έναντι νερού που προεξέχει από ακροφύσιο (6,3 mm) και προσπίπτει στο περίβλημα υπό οποιαδήποτε κατεύθυνση.

6	Ισχυρός πίδακας νερού	Πλήρης προστασία έναντι νερού που προβάλλεται από ακροφύσιο (12,5 mm) και προσπίπτει στο περίβλημα υπό οποιαδήποτε κατεύθυνση.
7	Βύθιση έως 1m	Πλήρης προστασία από είσοδο νερού σε επιβλαβείς για τη συσκευή ποσότητες όταν αυτή βυθίζεται σε νερό υπό καθορισμένες συνθήκες πίεσης και χρόνου (έως 1 m βύθισης).
8	Βύθιση πέρα από 1m	Ο εξοπλισμός είναι κατάλληλος για συνεχή βύθιση στο νερό υπό συνθήκες που καθορίζονται από τον κατασκευαστή. Κανονικά, αυτό σημαίνει ότι ο εξοπλισμός είναι ερμητικά σφραγισμένος. Ωστόσο, με ορισμένους τύπους εξοπλισμού, μπορεί να σημαίνει ότι το νερό μπορεί να εισέλθει αλλά μόνο με τέτοιο τρόπο ώστε να μην παράγει επιβλαβή αποτελέσματα.

Για την υπό σχεδιασμό συσκευή, ήταν απαραίτητη η πλήρης προστασία έναντι εισόδου σκόνης. Η δυσμενέστερη περίπτωση επαφής με το νερό ήταν η περίπτωση όπου το καπάκι του κάδου παραμένει ανοιχτό κατά τη διάρκεια βροχής ή καταιγίδας. Με βάση τις παραπάνω προδιαγραφές η τελική απαίτηση όσον αφορά στη στεγανότητά για το κάλυμμα ήταν IP65.

Η νομοθεσία με βάση την οποία καθορίζονται οι κλάσεις στεγανότητας σύμφωνα με τον κώδικα IP είναι η εξής: IEC 60529:1989+AMD1:1999+AMD2:2013: Degrees of protection provided by enclosures (IP Code).

#### 4.1.7. Σύνδεση σε Πλατφόρμα

Βασικό κομμάτι της εφαρμογής ήταν η μεταφορά των δεδομένων από τους αισθητήρες της συσκευής σε μία διαδικτυακή πλατφόρμα για τη μετέπειτα επεξεργασία τους. Η πλατφόρμα αυτή θα πρέπει να υποστηρίζει τη λήψη δεδομένων ανά τουλάχιστον 1 ώρα. Αυτό όχι γιατί απαιτείται να λαμβάνονται τα δεδομένα τόσο συχνά, μία φορά την ημέρα (ανά 24 ώρες) θα αρκούσε. Απλά θεωρείται πως στην αρχή λειτουργίας των έξυπνων συσκευών οι Δήμοι θα επιθυμούν τη συχνή λήψη δεδομένων με σκοπό την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των κάδων και την εξαγωγή στατιστικών που αφορούν την πλήρωσή τους. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ιστορικό που βοηθάει στην καλύτερη διαμόρφωση των δρομολογίων. Επιπλέον, απαραίτητη ήταν η δυνατότητα εξαγωγής των δεδομένων σε μορφή κειμένου ενώ επιθυμητή ήταν και η δυνατότητα ανάλυσης των δεδομένων απευθείας μέσω της πλατφόρμας.

#### 4.1.8. Βιωσιμότητα - Επεκτασιμότητα

Ως τελευταίος στόχος, αλλά ύψιστης σημασίας, τέθηκε η δυνατότητα επεκτασιμότητας της εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, αναζητήθηκε η χρήση ενός δικτύου τέτοιου, που θα επιτρέπει τη σύνδεση και άλλων έξυπνων συσκευών σε αυτό. Ενδεικτικά, αναφέρονται

συσκευές διαχείρισης κυκλοφορίας, αισθητήρες ατμοσφαιρικής ρύπανσης, σύστημα έξυπνης στάθμευσης, σύστημα απομακρυσμένης διαχείρισης δημοτικού φωτισμού, κ.α. Με αυτόν τον τρόπο, όχι μόνο λύθηκε το πρόβλημα της αποκομιδής των απορριμμάτων αλλά ταυτόχρονα δημιουργήθηκαν και ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη έξυπνων πόλεων.

## 4.2. Εναλλακτικές Λύσεις Κατασκευής

### 4.2.1. Επιλογή Πλακέτας και Μπαταρίας

Η πρώτη βασική απόφαση που έπρεπε να ληφθεί αφορούσε την επιλογή πλακέτας μικροεπεξεργαστή που θα χρησιμοποιούταν στη μετρητική διάταξη. Δεδομένου ότι η καινοτομία του συστήματος είναι η χρήση της τεχνολογίας LPWAN, έπρεπε να βρεθεί μία πλακέτα που να υποστηρίζει την επικοινωνία με διαδικτυακές πλατφόρμες μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας LoRaWAN, που αποτελεί πρωτόκολλο της τεχνολογίας LPWAN για τη μεταφορά δεδομένων.

Κατά την αναζήτηση στο διαδίκτυο βρέθηκαν διάφορες πλακέτες και κυκλώματα που υποστήριζαν τη συνδεσιμότητα LoRa. Οι επιλογές περιορίστηκαν σημαντικά, ωστόσο, από την απαίτηση η επιλεγθείσα πλακέτα να έχει οδηγό βημάτων για την επίτευξη της σύνδεσης και γενικότερα εκτενή βιβλιογραφία στο διαδίκτυο λόγω της απειρίας του συγγραφέα. Επιπλέον εντοπίστηκαν και αρκετές εταιρείες που παράγουν διατάξεις με δυνατότητα συνδεσιμότητας LoRa κατά παραγγελία σύμφωνα με την ανάγκη του πελάτη. Το πρόβλημα με αυτή τη λύση ήταν ότι ο πελάτης τελικά λαμβάνει μία διάταξη που είναι για εκείνον σαν ένα μαύρο κουτί και δεν έχει τη δυνατότητα εξερεύνησης των δυνατοτήτων της.

Τελικά, η αναζήτηση κατέληξε στις πλακέτες Arduino και αυτό διότι η Arduino προσφέρει το δικό της, φιλικό προς τον χρήστη, προγραμματιστικό περιβάλλον, παρέχει έτοιμους κώδικες στους χρήστες και ενδείκνυται για άπειρους χρήστες καθώς παρέχει διαρκή υποστήριξη μέσω βίντεο, άρθρων και κοινοτήτων. Οι δύο πλακέτες που επικράτησαν παρουσιάζονται παρακάτω.

#### 4.2.1.1. *Arduino MKR WAN 1300*

Ο μικροεπεξεργαστής MKR WAN 1300 είναι μία πλακέτα που έχει ενσωματωμένη μονάδα ώστε να επιτρέπει τη συνδεσιμότητα LoRa (Long Range). Δεδομένης της μικρής του κατανάλωσης και της ευκολίας στη χρήση ενδείκνυται για αρχάριους σχεδιαστές IoT συσκευών και για συσκευές εξωτερικού χώρου. Μπορεί να λειτουργήσει είτε με αλκαλικές μπαταρίες είτε με τη σύνδεσή του σε υπολογιστή. Είναι μικρός, ελαφρύς και προσφέρει υψηλή ενεργειακή αυτονομία λόγω της μικρής κατανάλωσης των δικτύων Lo-Ra.

#### 4.2.1.2. *Arduino MKR WAN 1310*

Ο μικροεπεξεργαστής MKR WAN 1310 είναι η εξέλιξη του MKR WAN 1300. Προσφέρει όλες τις λειτουργικότητες που προσφέρει το μοντέλο 1300, ωστόσο παρουσιάζει τέσσερα επιπρόσθετα χαρακτηριστικά που τον καθιστούν εξαιρετικά ανταγωνιστικό. Αρχικά, διαθέτει κύκλωμα επαναφόρτισης της μπαταρίας του (Li-Po) οπότε αν η πλακέτα τροφοδοτηθεί με άλλη πηγή ρεύματος (USB) η μπαταρία μπορεί να

επαναφορτίσει χωρίς να απαιτείται η απόρριψή της. Έπειτα, ο μικροεπεξεργαστής έχει ενισχυθεί με εξωτερική μνήμη, η οποία σε περίπτωση κακής συνδεσιμότητας με την κεραία μπορεί να αποθηκεύσει προσωρινά τα δεδομένα και να τα στείλει στην πλατφόρμα όταν το σήμα επανέλθει. Ακόμα, στο συγκεκριμένο μοντέλο γίνεται εξαιρετικός έλεγχος της κατανάλωσης ρεύματος, μειώνοντας κι άλλο το καταναλισκόμενο ποσό ενέργειας. Τέλος, η ασφάλεια των δεδομένων έναντι υποκλοπών έχει αυξηθεί μέσω της χρήσης αναγνωριστικών και πιστοποιητικών ασφαλείας.

#### 4.2.1.3. Επιλογή Μοντέλου Μικροεπεξεργαστή & Μπαταρίας

Βάσει όσων προηγήθηκαν είναι ξεκάθαρο πως το πλεονέκτημα είχε η πλακέτα MKR WAN 1310. Ωστόσο, οφείλουμε να παρατηρήσουμε ότι και οι δύο πλακέτες συμμορφώνονται στις προδιαγραφές του συστήματος και ικανοποιούν με το παραπάνω τις ανάγκες του, με την 1310 να προσφέρει σαφώς περισσότερα από αυτά που απαιτούσε η παρούσα συσκευή.

Ο λόγος που τελικά επιλέχθηκε ο μικροεπεξεργαστής MKR WAN 1310 ήταν καθαρά ερευνητικός και σύμφωνος με τις επιθυμίες της συγγραφέα να εργαστεί με μία πιο σύγχρονη πλακέτα ώστε να γνωρίσει σε βάθος τις νέες λειτουργίες της. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι η πλακέτα που επιλέχθηκε ήταν ελαφρώς οικονομικότερη. Στον παρακάτω Πίνακα συνοψίζονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά της.

**Πίνακας 20: Βασικά χαρακτηριστικά της πλακέτας Arduino MKR WAN 1310**

<b>Βασικά Χαρακτηριστικά</b>	
Μικροεπεξεργαστής	SAMD21 Cortex®-M0+ 32bit low power ARM MCU
Τάση Εισόδου (USB)	5V
Μπαταρίες	Επαναφορτιζόμενες Li-Ion ή Li-Po, 1024 mAh (ελάχιστη χωρητικότητα)
Τάση Λειτουργίας	3.3V
Ψηφιακά Pins (I/O)	8
Αναλογικά Pins (I)	7 (ADC 8/10/12 bit)
Αναλογικά Pins (O)	1 (DAC 10 bit)
Ρεύμα σε Pins	7 mA
Εσωτερική Μνήμη	256KB
Εξωτερική Μνήμη	2MB
Συχνότητα	868MHz
Μέγεθος	67.64mm x 25mm
Βάρος	32g

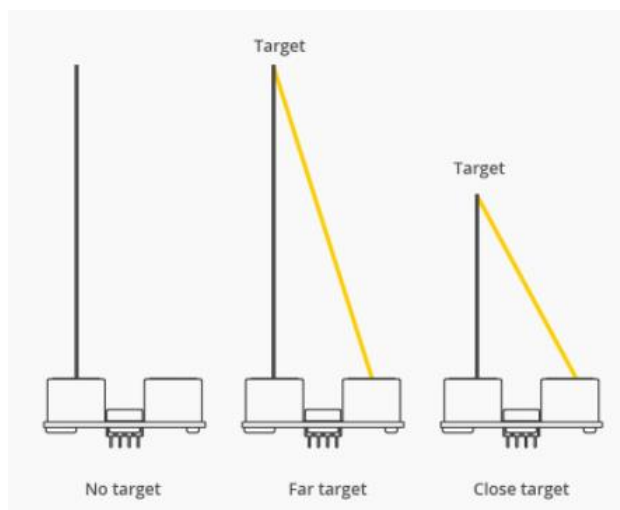
Για την τροφοδοσία της πλακέτας επιλέχθηκε επαναφορτιζόμενη μπαταρία Li-Po με βύσμα εισόδου συμβατό με αυτό που η πλακέτα έχει ενσωματωμένο, τάση 3.7V σύμφωνα με τον κατασκευαστή της πλακέτας και χωρητικότητα 2500mAh (μεγαλύτερο από τα 1024mAh που ήταν η ελάχιστη συμβατή χωρητικότητα).

#### 4.2.2. Επιλογή Αισθητήρα Απόστασης

Μία από τις βασικότερες αποφάσεις που έπρεπε να ληφθεί κατά το σχεδιασμό της μετρητικής διάταξης ήταν ο τύπος αισθητήρα που θα χρησιμοποιηθεί. Μετά από εκτενή μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο Διαδίκτυο παρακάτω παρουσιάζονται οι πέντε (5) κυριότεροι τύποι αισθητήρων απόστασης που εντοπίστηκαν.

##### 4.2.2.1. Αισθητήρες Υπερύθρων

Οι υπέρυθροι αισθητήρες (InfraRed - IR) λειτουργούν βάσει της αρχής της γεωμετρικής τριγωνοποίησης. Αποτελούνται από δύο φακούς: έναν πομπό δέσμης φωτός LED και έναν δέκτη που ανιχνεύει την ύπαρξη φωτός. Η αρχή λειτουργίας τους είναι ιδιαίτερα απλή: ο πομπός εκπέμπει μία δέσμη υπέρυθρης ακτινοβολίας, η οποία όταν συναντήσει το αντικείμενο ανακλάται προς όλες τις κατευθύνσεις. Μία εκ των ανακλώμενων ακτίνων προσπίπτει στον φωτοανιχνευτή και βάσει της γωνίας πρόσπτωσης είναι δυνατό να υπολογιστεί η απόσταση του αντικειμένου. Στο Σχήμα 15, παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των IR αισθητήρων.

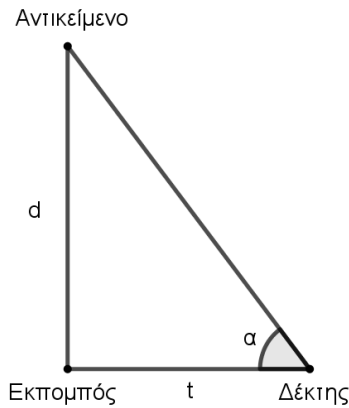


Σχήμα 15: Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας των IR αισθητήρων

Με χρήση γεωμετρικής τριγωνοποίησης, αν  $t$  η απόσταση μεταξύ των δύο φακών,  $d$  η απόσταση του αντικειμένου και  $\alpha$  η γωνία πρόσπτωσης της ανακλώμενης ακτίνας, η απόσταση του αντικειμένου δίνεται από τον τύπο:

$$d = t \cdot \tan \alpha$$

σύμφωνα με το Σχήμα 16:



**Σχήμα 16:** Σχηματική αναπαράσταση του υπολογισμού της απόστασης

Πλεονεκτήματα IR αισθητήρων:

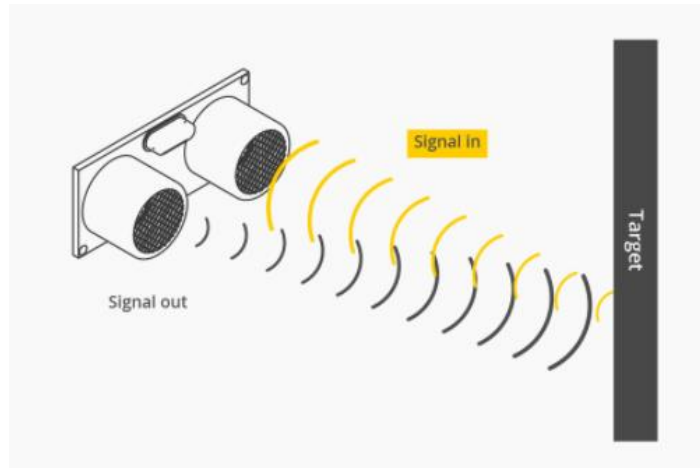
- Έχουν μικρό μέγεθος και χαμηλό βάρος.
- Μπορούν να λειτουργήσουν τόσο τη νύχτα όσο και την ημέρα.
- Είναι ασφαλείς σε περίπτωση οπτικής επαφής.
- Μπορούν να μετρήσουν τις αποστάσεις αντικειμένων με σύνθετες επιφάνειες.

Μειονεκτήματα IR αισθητήρων:

- Έχουν περιορισμένο εύρος μέτρησης.
- Δεν μπορούν να διαπεράσουν συμπαγείς επιφάνειες (πόρτες, τοίχους κ.α.).
- Δεν μπορούν να συνδυασθούν αξιόπιστα με άλλους αισθητήρες.

#### 4.2.2.2. Αισθητήρες Υπερήχων

Οι Αισθητήρες Υπερήχων (Ultrasonic) (ή Sonar) λειτουργούν βασισμένοι στην ταχύτητα του ήχου. Αποτελούνται από δύο μέρη: έναν πομπό υπερήχων και έναν δέκτη που ανιχνεύει τον ήχο. Η αρχή λειτουργίας τους είναι ιδιαίτερα απλή: ο πομπός εκπέμπει ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας μέσω πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων, τα οποία όταν συναντήσουν το αντικείμενο ανακλώνται. Τα κύματα επιστρέφουν στον δέκτη και με βάση το χρόνο που έκαναν να επιστρέψουν υπολογίζεται η απόσταση του αντικειμένου. Στο Σχήμα 17, παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των αισθητήρων υπερήχων.



**Σχήμα 17:** Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας των Ultrasonic αισθητήρων

Αν  $T$  ο συνολικός χρόνος από τη στιγμή εκπομπής του κύματος μέχρι την επιστροφή του στον δέκτη,  $d$  η απόσταση του αντικειμένου και  $C$  η ταχύτητα του ήχου στις συνθήκες περιβάλλοντος που επικρατούν, η απόσταση του αντικειμένου δίνεται από τον τύπο:

$$d = \frac{1}{2} \cdot T \cdot C$$

Πλεονεκτήματα Ultrasonic αισθητήρων:

- Δεν επηρεάζονται από το χρώμα ή τη διαφάνεια του εντοπιζόμενου αντικειμένου.
- Λειτουργούν καλά σε σκοτεινά περιβάλλοντα.
- Καταναλώνουν μικρά ποσά ηλεκτρικού ρεύματος.
- Παρουσιάζουν πολλές επιλογές διασύνδεσης (μικροεπεξεργαστή κ.α.).

Μειονεκτήματα Ultrasonic αισθητήρων:

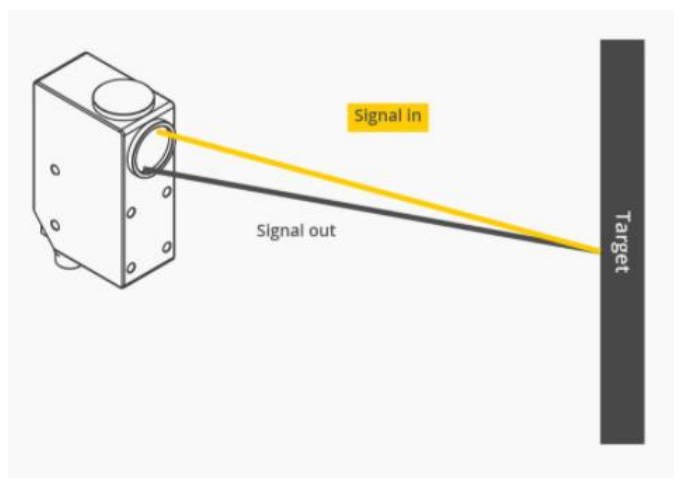
- Έχουν περιορισμένο εύρος μέτρησης.
- Έχουν μικρή ακρίβεια μέτρησης και αργό ρυθμό ανανέωσης, που τους καθιστά ακατάλληλους για τη μέτρηση γρήγορα κινούμενων αντικειμένων.
- Αδυνατούν να μετρήσουν την απόσταση αντικειμένων που εμφανίζουν σύνθετες επιφάνειες.
- Μπορεί να υπάρχουν προβλήματα παρεμβολής αν υπάρχουν ηχητικές πηγές κοντά.

#### 4.2.2.3. LiDAR Αισθητήρες

Οι LiDAR αισθητήρες (Light Detection and Ranging) λειτουργούν βασισμένοι στην ταχύτητα του φωτός. Αποτελούνται από δύο μέρη: έναν πομπό laser και έναν δέκτη που ανιχνεύει το φως. Η αρχή λειτουργίας τους είναι η εξής: ο πομπός εκπέμπει παλμικά (όχι συνεχώς) συμφασικό μονοχρωματικό φως (laser) το οποίο όταν συναντήσει το αντικείμενο ανακλάται. Ο παλμός φωτός επιστρέφει στον δέκτη και με



βάση το χρόνο που έκανε να επιστρέψει υπολογίζεται η απόσταση του αντικειμένου. Στο Σχήμα 18, παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των LiDAR αισθητήρων.



**Σχήμα 18:** Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας των LiDAR αισθητήρων

Η βασική αρχή υπολογισμού της απόστασης ονομάζεται Time-of-Flight, αν και οι laser αισθητήρες διαθέτουν και άλλες μεθόδους υπολογισμού της απόστασης (τριγωνοποίηση, σύγκριση φάσης κ.α.). Βάσει της αρχής Time-of-Flight, αν  $T$  ο συνολικός χρόνος από τη στιγμή εκπομπής του παλμού μέχρι την επιστροφή του στον δέκτη,  $d$  η απόσταση του αντικειμένου και  $C$  η ταχύτητα του φωτός, η απόσταση του αντικειμένου δίνεται από τον τύπο:

$$d = \frac{1}{2} \cdot T \cdot C$$

Πλεονεκτήματα LiDAR αισθητήρων:

- Προσφέρουν μεγάλο εύρος μετρήσεων και υψηλή ακρίβεια.
- Έχουν τη δυνατότητα να μετρήσουν τρισδιάστατες δομές.
- Έχουν υψηλό ρυθμό ανανέωσης, που τους καθιστά κατάλληλους για τη μέτρηση γρήγορα κινούμενων αντικειμένων.
- Τα μήκη κύματος που εκπέμπουν είναι μικρά, επιτρέποντας τους να εντοπίσουν και μικρά αντικείμενα.
- Μπορούν να λειτουργήσουν τόσο τη νύχτα όσο και την ημέρα.

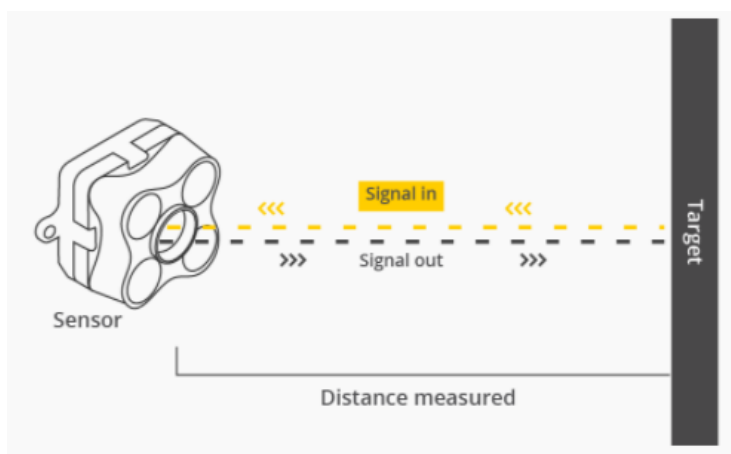
Μειονεκτήματα LiDAR αισθητήρων:

- Έχουν υψηλό κόστος.
- Έχουν μεγάλο μέγεθος και υψηλό βάρος.
- Μπορεί να αποβούν επιβλαβής σε περίπτωση οπτικής επαφής.
- Δεν μπορούν να συνδυασθούν αξιόπιστα με άλλους αισθητήρες.

#### 4.2.2.4. LED Time-of-flight Αισθητήρες

Οι αισθητήρες LED Time-of-Flight λειτουργούν παρόμοια με τους LiDAR με τη διαφορά ότι χρησιμοποιούν υπέρυθρες έναντι laser. Η αρχή λειτουργίας τους είναι η εξής: ο εκπομπός (LED) εκπέμπει παλμικά (όχι συνεχώς) υπέρυθη ακτινοβολία η οποία όταν

συναντήσει το αντικείμενο ανακλάται. Ο παλμός επιστρέφει στον δέκτη και με βάση το χρόνο που έκανε να επιστρέψει υπολογίζεται η απόσταση του αντικειμένου. Στο Σχήμα 19, παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των LED Time-of-Flight αισθητήρων.



**Σχήμα 19:** Σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας των LED Time-of-Flight αισθητήρων

Βάσει της αρχής Time-of-Flight, αν  $T$  ο συνολικός χρόνος από τη στιγμή εκπομπής του παλμού μέχρι την επιστροφή του στον δέκτη,  $d$  η απόσταση του αντικειμένου και  $C$  η ταχύτητα του φωτός, η απόσταση του αντικειμένου δίνεται από τον τύπο:

$$d = \frac{1}{2} \cdot T \cdot C$$

Πλεονεκτήματα LED Time-of-Flight αισθητήρων:

- Έχουν μικρό μέγεθος και χαμηλό βάρος.
- Προσφέρουν μεγάλο εύρος μετρήσεων, υψηλή ακρίβεια και πολύ υψηλό ρυθμό ανανέωσης.
- Έχουν τη δυνατότητα να απεικονίσουν σε τρεις διαστάσεις.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλο εύρος εφαρμογών μιας και μπορούν να απεικονίσουν και μεγάλα αντικείμενα.
- Παρέχουν υψηλό ρυθμό ανανέωσης.
- Μπορούν να συνδυασθούν εύκολα και αξιόπιστα με άλλους αισθητήρες.

Μειονεκτήματα LED Time-of-Flight αισθητήρων:

- Έχουν σχετικά υψηλό κόστος.
- Μέχρι στιγμής η ακρίβεια στον  $z$  άξονα (βάθος) δεν ξεπερνά το 1cm.

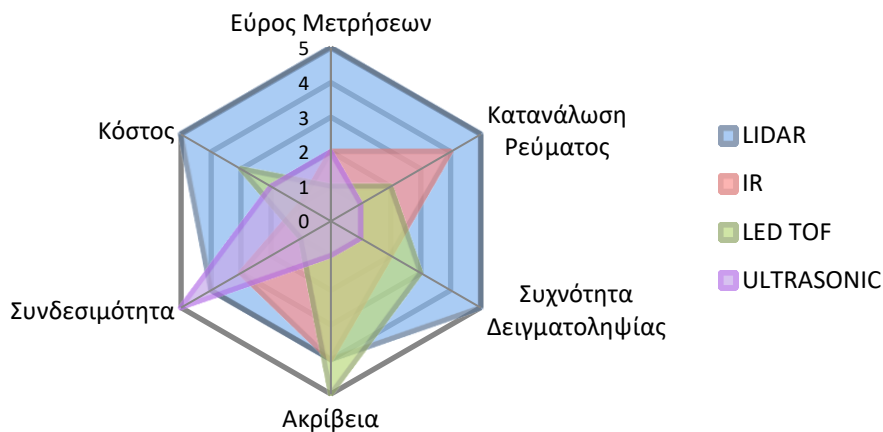
#### 4.2.2.5. Σύγκριση Αισθητήρων

Τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων που αναφέρθηκαν στα παραπάνω Κεφάλαια συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα.

**Πίνακας 21: Σύνοψη των βασικότερων χαρακτηριστικών για τους τύπους αισθητήρων**

Sensors	Ultrasonic	IR	LiDAR	LED ToF
Καταλληλότητα για μεγάλο εύρος μετρήσεων	OXI	OXI	NAI	NAI
Υψηλή συχνότητα μετρήσεων	OXI	OXI	NAI	NAI
Χαμηλό βάρος	NAI	NAI	OXI	NAI
Μικρό μέγεθος	NAI	NAI	OXI	NAI
Ασφάλεια ματιών	NAI	NAI	OXI	NAI
Καταλληλότητα για σύνθετες επιφάνειες	OXI	NAI	NAI	NAI
Ευαισθησία σε εξωτερικές συνθήκες	NAI	OXI	OXI	OXI
Δυνατότητα τρισδιάστατης απεικόνισης	OXI	OXI	NAI	NAI
Συνδυασμός με άλλους αισθητήρες	OXI	OXI	OXI	NAI
Κόστος	ΧΑΜΗΛΟ	ΧΑΜΗΛΟ	ΥΨΗΛΟ	ΜΕΤΡΙΟ

Επειδή η απεικόνιση σε πίνακα δεν ήταν ιδιαίτερα βοηθητική στην επιλογή τύπου αισθητήρα, τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους αντιπαραβλήθηκαν στο παρακάτω αραχνειδές Διάγραμμα.



**Διάγραμμα 4:** Αραχνειδής απεικόνιση των χαρακτηριστικών για τους τύπους αισθητήρων απόστασης

Οι αισθητήρες LiDAR υπερκαλύπτουν τις ανάγκες της εφαρμογής και αυτό αποτυπώνεται στο υψηλό τους κόστος, συνεπώς θεωρήθηκαν ακατάλληλοι. Οι αισθητήρες LED Time-of-flight παρουσιάζουν μεγάλη ακρίβεια που ωστόσο στην παρούσα εφαρμογή δεν ήταν απαραίτητη ενώ είχαν σχετικά αυξημένη κατανάλωση ρεύματος και κόστος. Συνεπώς, υστερούσαν συγκριτικά με τους IR (πολύ χαμηλό

κόστος) και τους Ultrasonic (πολύ χαμηλή κατανάλωση) αισθητήρες και για αυτό απορρίφθηκαν.

Ως επικρατέστεροι τύποι αισθητήρα τελικά εμφανίστηκαν οι αισθητήρες IR και Ultrasonic. Οι αισθητήρες IR έχουν χαμηλότερο κόστος, καλά χαρακτηριστικά ακρίβειας και δειγματοληψίας, ωστόσο έχουν υψηλή κατανάλωση ρεύματος. Από την άλλη, οι Ultrasonic αισθητήρες έχουν πολύ χαμηλή κατανάλωση ρεύματος και πολλές επιλογές συνδεσιμότητας αλλά εμφανίζουν υψηλότερο κόστος και χειρότερα χαρακτηριστικά ακρίβειας και δειγματοληψίας. Τελικά, επιλέχθηκαν οι αισθητήρες υπερύθρων λόγω του χαμηλού κόστους τους και της αρκετά καλής ακρίβειάς τους.

#### 4.2.2.6. Επιλογή Μοντέλου Αισθητήρα

Αφού επιλέχθηκε ο τύπος του αισθητήρα, στη συνέχεια καθορίστηκαν οι βασικές του προδιαγραφές ώστε να βρεθεί το κατάλληλο μοντέλο. Αρχικά, ο αισθητήρας έπρεπε να μπορεί να μετρήσει κάθε στάθμη του κάδου, συνεπώς ορίστηκε πως το εύρος του θα έπρεπε να είναι μεταξύ 10cm και 1.5m. Επίσης, επειδή ο μικροεπεξεργαστής που επιλέχθηκε μπορούσε να παράσχει μέχρι 3.3V τάση, η τάση εισόδου του αισθητήρα δεν έπρεπε να υπερβαίνει τα 3.3V. Όσον αφορά το σήμα, δεδομένου ότι ο μικροεπεξεργαστής διέθετε ενσωματωμένο αναλογο-ψηφιακό μετατροπέα, ο τύπος του δε δημιουργούσε πρόβλημα, μπορούσε δηλαδή να είναι είτε αναλογικό είτε ψηφιακό.

Με βάση τα παραπάνω έγινε αναζήτηση στο Διαδίκτυο και βρέθηκε πως το μοντέλο που ικανοποιεί όλες τις παραπάνω προδιαγραφές είναι ο Pololu Infrared Sharp Sensor GP2Y0A60SZLF, 3V. Στον παρακάτω Πίνακα δίνονται τα βασικότερα χαρακτηριστικά του.

**Πίνακας 22: Τεχνικά χαρακτηριστικά του Pololu Infrared Sharp Sensor GP2Y0A60SZLF, 3V**

Χαρακτηριστικά	
Τάση λειτουργίας	2.7 V - 3.6 V
Κατανάλωση Ρεύματος	33 mA
Εύρος Μέτρησης	10 - 150 cm
Τύπος Σήματος Εξόδου	Αναλογικό
Εύρος Τάσης Εξόδου	3V version: 1.6 V
Συχνότητα Μετρήσεων	60 Hz
Βάρος	2.5 g
Μέγεθος	1.3" × 0.41" × 0.4"
Κόστος	18.9 €

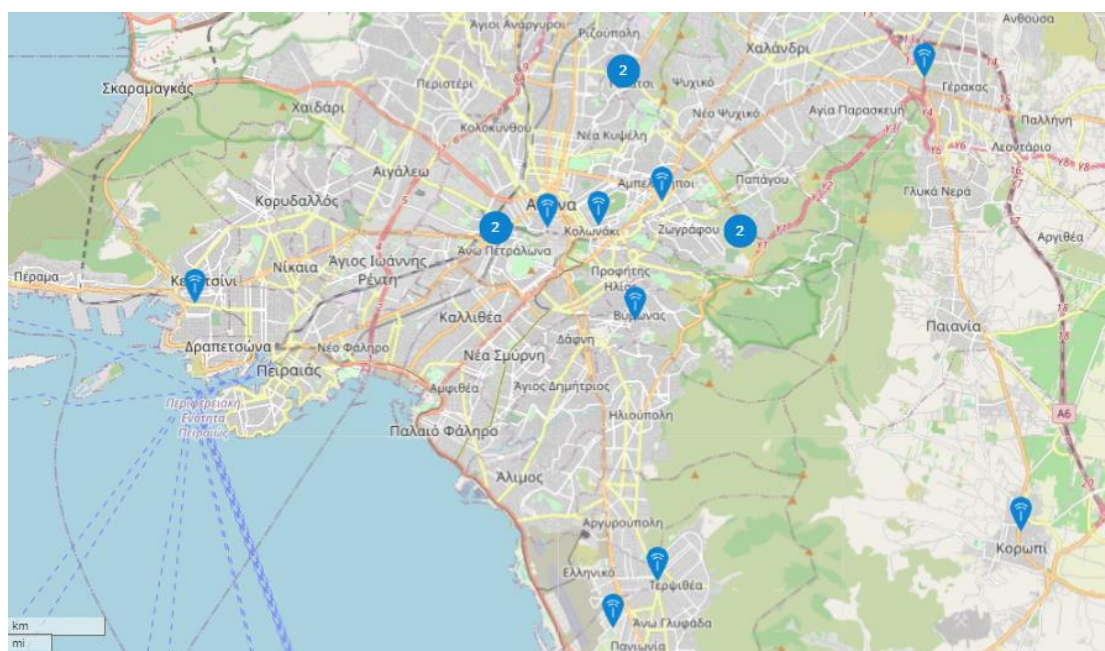
#### 4.2.3. Επιλογή Διακομιστή Δικτύου

Εφόσον επιλέχθηκαν η πλακέτα και ο αισθητήρας, πρακτικά η μετρητική διάταξη είχε σχηματιστεί και απέμενε να καθοριστεί η πλατφόρμα με την οποία θα αλληλεπιδρά η πλακέτα ώστε να στέλνει τις μετρήσεις. Ο κατασκευαστής της πλακέτας MKR WAN 1310 πρότεινε την πλατφόρμα The Things Network και παρείχε αναλυτικές οδηγίες για

τη σύνδεση της πλακέτας με την πλατφόρμα. Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι η πλατφόρμα TTN είναι δωρεάν, θεωρήθηκε καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή της.

Επιπλέον, επειδή ο στόχος του TTN είναι να δημιουργήσει ένα ανοιχτό, παγκόσμιο δίκτυο LoRa WAN, προσβάσιμο σε όλους, κάθε χρήστης που εγγράφει έναν σταθμό βάσης στην πλατφόρμα δεσμεύεται να επιτρέψει τη χρήση του και από άλλους χρήστες. Αυτό σημαίνει ότι παρόλο που δεν κατασκευάστηκε σταθμός βάσης κατά την εκπόνηση της εργασίας, θα ήταν εφικτό να χρησιμοποιηθεί σταθμός βάσης που βρίσκεται κοντά στην πλακέτα, δωρεάν, αρκεί αυτός να ήταν εγγεγραμμένος στην πλατφόρμα.

Επειδή η χρήση σταθμού βάσης ήταν απαραίτητη έγινε αναζήτηση της γεωγραφικής κάλυψης από σταθμούς στον τόπο εκπόνησης της εργασίας, δηλαδή την Αθήνα. Ο χάρτης που παρατίθεται παρακάτω υποδεικνύει ότι υπάρχει μεγάλο πλήθος σταθμών βάσης στην Αθήνα, συνεπώς με μετακίνηση σε συγκεκριμένα μέρη (π.χ. ΕΜΠ) η χρήση κοινόχρηστων σταθμών βάσης ήταν εφικτή.



**Εικόνα 1:** Γεωγραφική κάλυψη σταθμών βάσης στην Αττική

#### 4.2.4. Επιλογή Υλικού Προστατευτικού Καλύμματος

Αρχικά απορρίφθηκε η ιδέα κατασκευής του καλύμματος από μέταλλο. Οι βασικοί λόγοι για τους οποίους τόσο ο ανοξείδωτος χάλυβας όσο και το αλουμίνιο απορρίφθηκαν ήταν οι εξής:

- Το κάλυμμα έπρεπε να είναι ελαφρύ προκειμένου να μπορεί να στηριχθεί στο πλαστικό καπάκι του κάδου χωρίς να προκαλεί παραμόρφωση αυτού.
- Τα εξαρτήματα τα οποία εδράζονται μέσα στο κάλυμμα (λ.χ. ακίδες arduino) ήταν προτιμότερο να μην έρχονται σε επαφή με μεταλλικές επιφάνειες.

- Το κάλυμμα είχε αρκετά πολύπλοκες γεωμετρίες οι οποίες θα επιτυγχάνονταν μόνο με δημιουργία καλουπιού και κατόπιν χύτευση.

Λόγω των παραπάνω καθώς και της ανάγκης παραγωγής πολλών τεμαχίων, επιλέχθηκε η εναλλακτική της 3D εκτύπωσης ως μέθοδος κατασκευής του καλύμματος και συνεπώς έπρεπε να βρεθεί το κατάλληλο υλικό για την εκτύπωση. Η 3D εκτύπωση υποστηρίζει κυρίως κεραμικά και πολυμερή υλικά. Προφανώς τα κεραμικά υλικά για την παρούσα χρήση που περιέχει δονήσεις, κρούσεις και χτυπήματα ήταν ακατάλληλα. Έτσι, η έρευνα για το υλικό εστίασε στα πολυμερή υλικά.

Κατόπιν αναζήτησης που πραγματοποιήθηκε, διαπιστώθηκε ότι τα υλικά τα οποία μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή του καλύμματος ήταν τα εξής.

**Πίνακας 23: Πίνακας υλικών και ιδιοτήτων**

<b>Ιδιότητες/Υλικό</b>	<b>ABS</b>	<b>PLA</b>	<b>HIPS</b>	<b>PETG</b>	<b>ASA</b>
Όριο διαρροής (MPa)	40	65	32	53	55
Στιβαρότητα	5/10	7.5/10	10/10	5/10	5/10
Αντοχή	8/10	4/10	7/10	8/10	10/10
Αντοχή σε θερμοκρασία (°C)	98	52	100	73	95
Πυκνότητα (gr/cm <sup>3</sup> )	1.04	1.24	1.03-1.04	1.23	1.07
Τιμή (€/Kg)	8,37-33,46	8,37-33,46	20,08-26,77	16,73-50,2	31,79-33,46
Ευκολία Εκτύπωσης	8/10	9/10	6/10	9/10	7/10
Ευλυγισία	-	-	-	-	-
Ελαστικό	-	-	-	-	-
Ανθεκτικό σε εξωτερικές επιδράσεις	√	-	√	-	√
Μαλακότητα	-	-	-	-	-
Ανθεκτικό σε UV ακτινοβολία	-	-	-	-	√
Διασπώμενο	-	-	√	-	-
Ανθεκτικό σε θερμοκρασία	√	-	√	-	√
Ανθεκτικό σε χημικό περιβάλλον	-	-	-	√	-
Ανθεκτικό σε κόπωση	-	-	-	√	-

Με βάση τα παραπάνω χαρακτηριστικά, λαμβάνοντας υπόψη και το κόστος, επιλέχθηκε το πολυγαλακτικό οξύ (Polylactic Acid, PLA) λόγω μικρότερου ελάχιστου κόστους και μεγαλύτερου ορίου διαρροής, στιβαρότητας και ευκολίας στην εκτύπωση σε σχέση με το ακρυλονιτρίλιο - βουταδιένιο - στυρόλιο (Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS). Βασική προϋπόθεση ήταν το υλικό να μην είναι διασπώμενο, απαίτηση που πληροί το PLA.

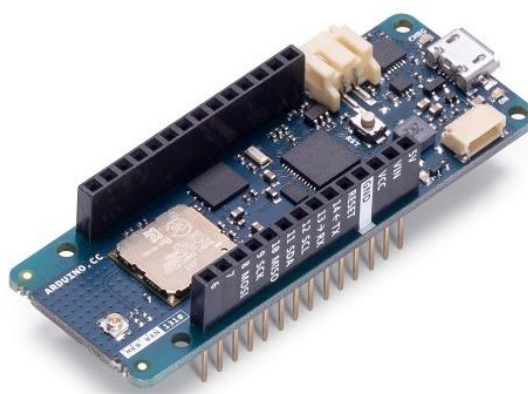
### 4.3. Τελική Επιλογή Εξαρτημάτων

Οι αποφάσεις που λήφθηκαν στο Κεφάλαιο 4.2. σχετικά με τα εξαρτήματα της μετρητικής διάταξης με προσθήκη των απαραίτητων βοηθητικών εξαρτημάτων (καλώδια, pins) συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα υλικών (BOM).

**Πίνακας 24:** Πίνακας υλικών της μετρητικής διάταξης

A/A	Περιγραφή	Ποσότητα
1	Arduino MKR WAN 1310 w/out Antenna	1
2	Pololu Infrared Sharp Sensor GP2Y0A60SZLF	1
3	Pin Header 4x1 Right Angled	1
4	Jumper Wire 15cm Male to Female	3
5	Battery Li-Po 3.7V - 2500mAh	1

Στις εικόνες φαίνονται τα εξαρτήματα του πίνακα υλικών.



**Εικόνα 2:** Arduino MKR WAN 1310 w/out Antenna



**Εικόνα 3:** Pin Header 4x1 Right Angled



**Εικόνα 4:** Jumper Wires 15cm Male to Female





**Εικόνα 5:** Battery Li-Po 3.7V - 2500mAh

#### 4.4. Προκαταρκτικός Σχεδιασμός Προστατευτικού Καλύμματος

Μία από τις πρώτες αποφάσεις που έπρεπε να ληφθεί, κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό του housing της συσκευής, είναι το πως θα υλοποιείται η τοποθέτηση της διάταξης σε αυτό. Ειδικότερα, προκειμένου να καταστεί εφικτό το παραπάνω, το housing έπρεπε σίγουρα να αποτελείται από δύο τμήματα. Οι δύο εναλλακτικές που εξετάστηκαν για τη μορφή όπου θα είχαν τα δύο αυτά τμήματα ήταν οι εξής:

- Housing υπό μορφή συρόμενου συρταριού: δηλαδή το ένα τμήμα αποτελεί την εξωτερική θήκη του housing και το δεύτερο τμήμα αποτελεί το συρόμενο μέρος με μία ελεύθερη επιφάνεια στο οποίο γίνεται η τοποθέτηση της διάταξης. Μόλις η συνδεσμολογία ολοκληρωθεί το δεύτερο μέρος εισέρχεται στο πρώτο.
- Housing υπό μορφή διαιρετού καλύμματος: το κάλυμμα χωρίζεται σε δύο μέρη (ίσα ή άνισα) τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με κοχλιοσύνδεση.

Από τις δύο παραπάνω εναλλακτικές επιλέχθηκε η δεύτερη καθώς έδινε τη δυνατότητα τοποθέτησης εξαρτημάτων και στα δύο μέρη ενώ παράλληλα εξασφαλιζόταν η σφιχτή σύνδεση των δύο τμημάτων μέσω ενός σχετικά εύκολου και φθηνού τρόπου όπως αυτός της κοχλιοσύνδεσης. Τέλος, αναζητώντας στο διαδίκτυο housings με στεγανότητα IP 66 και IP 65 προέκυψε πως η μέθοδος του διαιρετού καλύμματος είναι μία από τις συνιστώμενες.

Ένα άλλο τμήμα του προκαταρκτικού σχεδιασμού ήταν ο καθορισμός των βασικών διαστάσεων της συσκευής. Ως βασικές διαστάσεις ορίστηκαν το μήκος, το πλάτος, το ύψος και το πάχος. Προκειμένου να καθορισθούν οι αρχικές διαστάσεις ήταν απαραίτητη η μελέτη των διαστάσεων των εξαρτημάτων που θα τοποθετούνταν μέσα στο housing. Αφού οι διαστάσεις για το κάθε ένα από τα εξαρτήματα ήταν γνωστές, πραγματοποιήθηκε σκαρίφημα σε χαρτί προκειμένου να αποφασισθεί η χωροταξία τους μέσα στο κέλυφος. Με βάση αυτό και λαμβάνοντας υπόψη τις αποστάσεις που θα έπρεπε να έχουν μεταξύ τους αλλά και τον χώρο που απαιτείται για τη σύνδεση και τοποθέτηση των καλωδίων προέκυψαν οι εξής βασικές διαστάσεις:

- Πάχος Τοιχωμάτων: 4,5mm
- Μήκος: 105,54mm



- Πλάτος: 102,1mm
- Συνολικό ύψος: 39mm

Το μήκος προέκυψε ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Μήκος} = & \text{Πλάτος αισθητήρα} + \text{Μήκος Arduino} + \\ & \text{Διάκενο αισθητήρα και τοιχώματος} + \text{Διάκενο αισθητήρα και Arduino} + \\ & \text{Διάκενο Arduino και τοιχώματος} + 2 * \text{Πάχος} = \end{aligned}$$

$$10,9\text{mm} + 67,64\text{mm} + 5\text{mm} + 5\text{mm} + 8\text{mm} + 2 * 4.5\text{mm} = 105,54\text{mm}$$

Το πλάτος προέκυψε ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Πλάτος} = & \text{Μήκος αισθητήρα} + \text{Πλάτος Μπαταρίας} + \\ & \text{Διάκενο αισθητήρα και τοιχώματος} + \text{Διάκενο αισθητήρα και μπαταρίας} + \\ & \text{Διάκενο μπαταρίας και τοιχώματος} + 2 * \text{Πάχος} = \end{aligned}$$

$$34,62\text{mm} + 50\text{mm} + 2,8\text{mm} + 4,32\text{mm} + 2,8\text{mm} + 2 * 4.5\text{mm} = 102,1\text{mm}$$

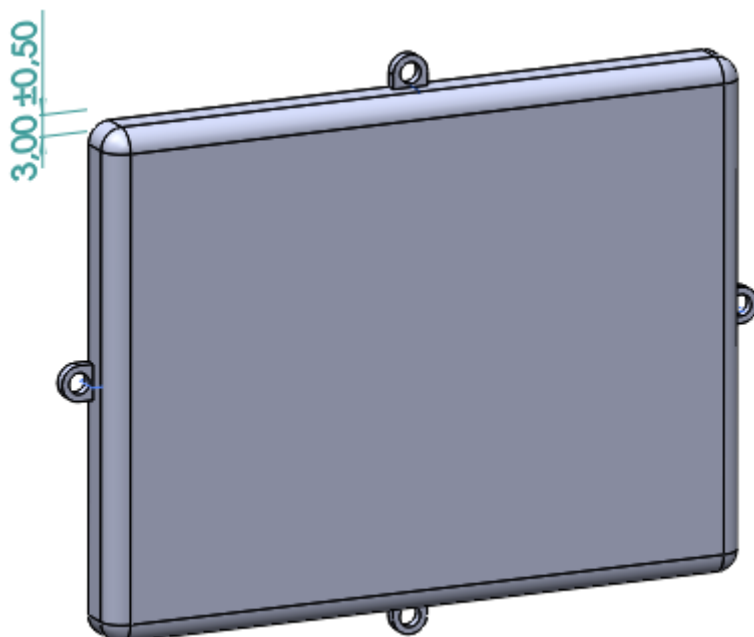
Στο ένα μέρος του καλύμματος αποφασίσθηκε να τοποθετηθούν ο αισθητήρας και το Arduino ενώ στο δεύτερο η μπαταρία.

Το ύψος προέκυψε ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Ύψος} = & \text{Ύψος Arduino} - \text{Ύψος Arduino που βυθίζεται στο housing} + \\ & \text{Ύψος για τα καλώδια} + 2 * \text{Πάχος} = \end{aligned}$$

$$19\text{mm} - 1\text{mm} + 12\text{mm} + 2 * 4.5\text{mm} = 39\text{mm}$$

Ο τρόπος σύνδεσης των δύο μερών, προκειμένου να επιτευχθεί η στεγανότητα, μελετήθηκε κατά τη διάρκεια του λεπτομερή σχεδιασμού. Στο Σχήμα 20 φαίνεται μία αρχική προσέγγιση αυτής της σύνδεσης η οποία στη συνέχεια βελτιώθηκε σημαντικά.



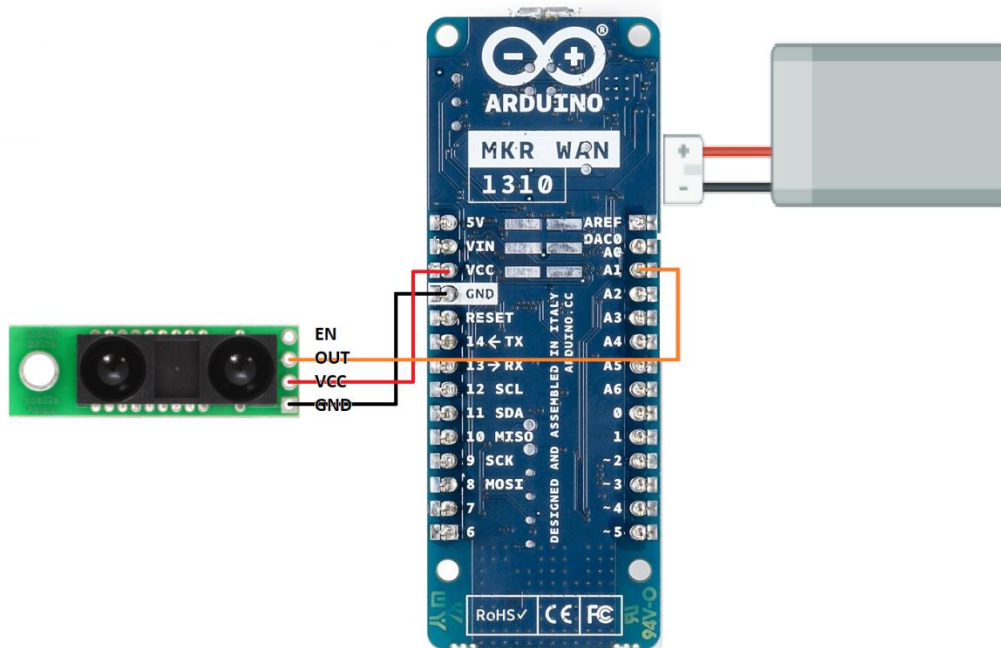
**Σχήμα 20:** Μία αρχική προσέγγιση του τρόπου σύνδεσης των δύο τμημάτων του καλύμματος κατά τη διάρκεια του προκαταρκτικού σχεδιασμού

Τέλος, κατά τη μελέτη και τον σχεδιασμό τέθηκε το ερώτημα σχετικά με τον τρόπο στήριξης/πάκτωσης της συσκευής πάνω στο καπάκι του κάδου. Μία αρχική σκέψη αποτέλεσε να βιδωθεί το κάλυμμα κατευθείαν πάνω στον κάδο, ωστόσο δεν αξιολογήθηκε ως η καλύτερη δυνατή καθώς ένας τέτοιος τρόπος θα καθιστούσε δύσκολη την απομάκρυνση της συσκευής από το καπάκι κατά τη διάρκεια πλύσης του κάδου και θα αύξανε τον κίνδυνο εισροής υγρών στο κάλυμμα. Η λύση που φάνηκε ευνοϊκότερη, ήταν η δημιουργία μίας βάσης πάνω στην οποία θα τοποθετηθεί το κάλυμμα.

## 4.5. Λεπτομερής Σχεδιασμός

### 4.5.1. Συνδεσμολογία

Η συνδεσμολογία που υλοποιήθηκε ήταν η εξής: Το Arduino MKR WAN 1310 λαμβάνει τροφοδοσία από την μπαταρία Li-Po των 3.7V. Στον αισθητήρα χρησιμοποιούνται τα 3 από τα 4 pins (GND, VCC, OUT). Το τέταρτο pin (EN) χρησιμοποιείται όταν ο χρήστης επιθυμεί την προσωρινή απενεργοποίηση του αισθητήρα (για τη μείωση της κατανάλωσης ρεύματος όταν δε λαμβάνει μετρήσεις) και στην παρούσα συσκευή δεν αξιοποιήθηκε. Τα GND, VCC του αισθητήρα αντιστοιχίζονται στα GND, VCC του Arduino αντίστοιχα. Το OUT του αισθητήρα αποτελεί το σήμα που στέλνει και δεδομένου ότι είναι αναλογικό αντιστοιχίζεται σε ένα από τα αναλογικά pins του Arduino (A0-A6). Η περιγραφόμενη συνδεσμολογία φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα.



Σχήμα 21: Συνδεσμολογία μετρητικής διάταξης της συσκευής

Το κόστος της μετρητικής διάταξης προκύπτει βάσει του πίνακα υλικών της και της τιμής του κάθε εξαρτήματος από το οποίο αποτελείται. Παρακάτω παρουσιάζεται Πίνακας με τα κόστη των εξαρτημάτων, συνυπολογιζόμενου του ΦΠΑ.

Πίνακας 25: Τιμές εξαρτημάτων μετρητικής διάταξης και συνολικό κόστος

A/A	Περιγραφή	Ποσότητα	Τιμή Μονάδος	Τιμή Συνόλου
1	Arduino MKR WAN 1310 w/out Antenna	1	44,9€	44,9€
2	Pololu Infrared Sharp Sensor GP2Y0A60SZLF + Pin Header 4x1 Right Angled	1	18,9€	18,9€
3	Jumper Wire 15cm Male to Female (Pack of 10)	1	1,8€	1,8€
4	Battery Li-Po 3.7V - 2500mAh	1	13,8€	13,8€
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>				<b>79,4€</b>

Συνεπώς, το κόστος του πρωτοτύπου υπολογίζεται στα 79,4€.

#### 4.5.2. Λεπτομερής Σχεδιασμός Καλύμματος

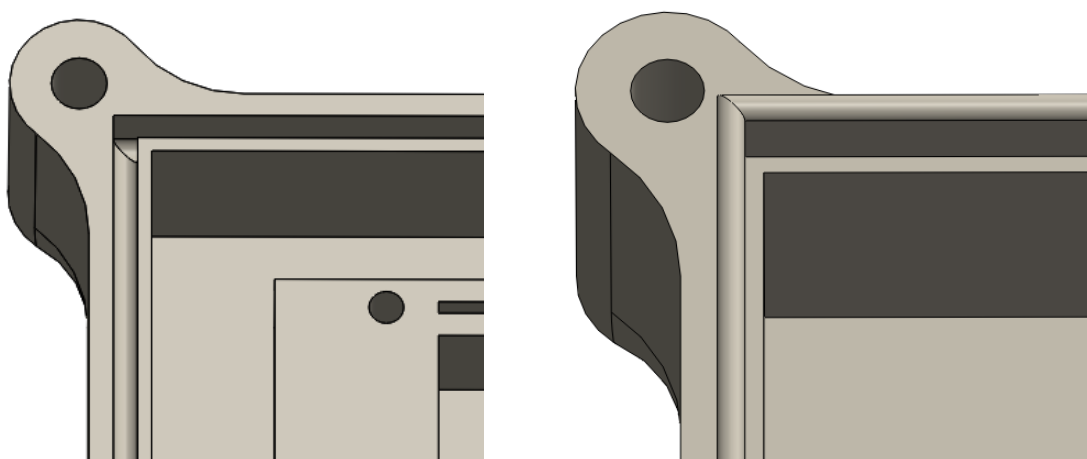
##### 4.5.2.1. Λεπτομερής Σχεδιασμός των επιμέρους τμημάτων και του τρόπου σύνδεσης για επίτευξη στεγανότητας

Στον προκαταρκτικό σχεδιασμό του καλύμματος είχαν αποφασισθεί τα πάχος τοιχωμάτων, μήκος, πλάτος, συνολικό ύψος καθώς και ποια εξαρτήματα θα τοποθετηθούν σε ποια τμήματα. Το αμέσως επόμενο στάδιο ήταν ο καθορισμός του

ύψους των δύο διαιρετών τμημάτων του καπακιού. Καθώς, ο χώρος εντός του καλύμματος θα παρέμενε ο ίδιος δεν υπήρχε εμφανής λόγος διαφοροποίησης του ύψους των δύο τμημάτων, συνεπώς αποφασίσθηκε πως και τα δύο τμήματα θα έχουν ίσο ύψος και ίσο προς:

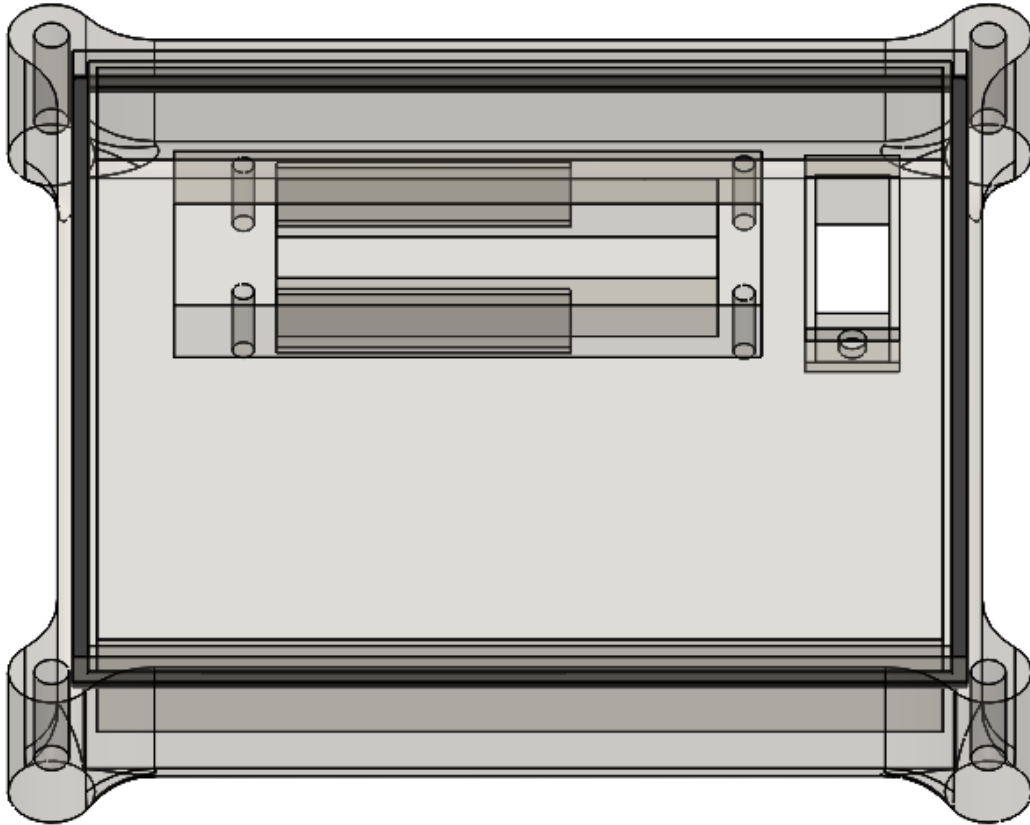
$$\text{Ύψος καπακιού} = \frac{39mm}{2} = 19,5mm$$

Το επόμενο βήμα στον σχεδιασμό του καλύμματος ήταν η απόφαση σχετικά με τον τρόπο σύνδεσης των δύο τμημάτων ώστε να επιτυγχάνεται η στεγανότητα. Η σχεδιαστική λύση που επιλέχθηκε είναι πως το ένα από τα δύο τμήματα θα έφερε περιμετρικά ένα θηλυκό τμήμα το οποίο θα ομοιάζε με αυλάκι (Σχήμα 22 Αριστερά). Το δεύτερο τμήμα θα έφερε περιμετρικά την αντίστοιχη αρσενική διαμόρφωση (Σχήμα 22 Δεξιά). Στο πρώτο τμήμα θα τοποθετούταν με χρήση ειδικής κόλλας φλάντζα από ελαστικό υλικό η οποία και θα παρεμβαλλόταν μεταξύ του θηλυκού και του αρσενικού τμήματος (Σχήμα 23).



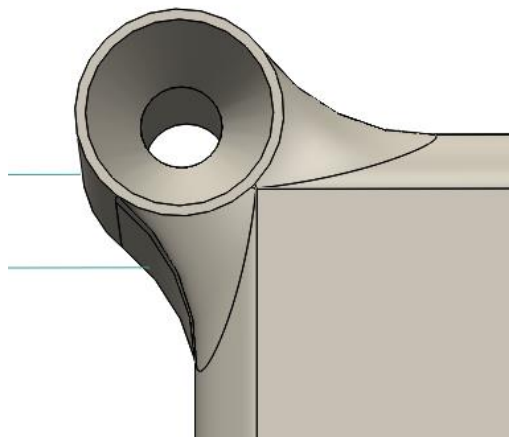
**Σχήμα 22:** Το ένα εκ των δύο μερών του καλύμματος όπου φέρει το θηλυκό μέρος της σύνδεσης και τη φλάντζα (Αριστερά)

Το δεύτερο τμήμα του καλύμματος με το αρσενικό μέρος (Δεξιά)



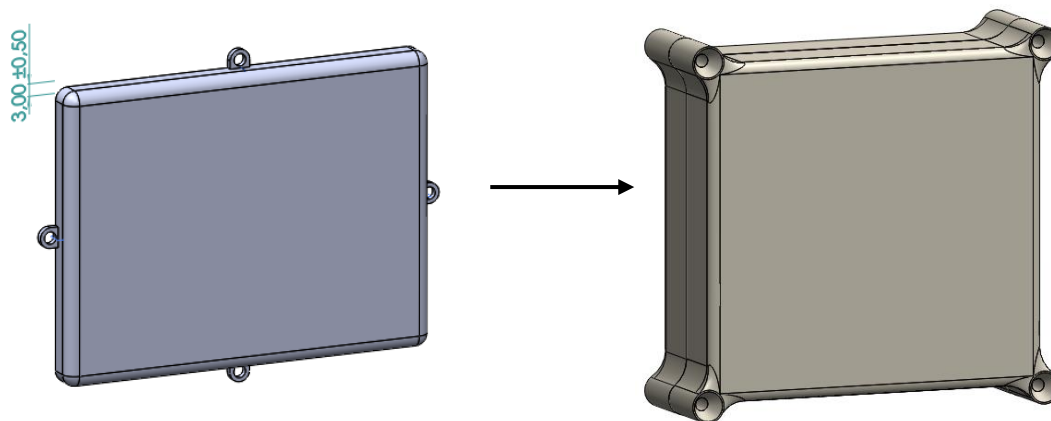
**Σχήμα 23:** Το τμήμα του καλύμματος με το θηλυκό τμήμα της σύνδεσης και τη φλάντζα. Το κομμάτι έχει παρουσιασθεί σε διαφανή μορφή προκειμένου να γίνεται ξεκάθαρη η θέση της φλάντζας (μαύρο ορθογωνικό τμήμα)

Οι οπές για την κοχλιοσύνδεση που φαίνονται και στα παραπάνω σχήματα αποφασίστηκε να έχουν διάμετρο  $\Phi 4$  και ο κοχλίας να είναι φυτευτός στο πρώτο τμήμα (τυφλή οπή). Αντίθετα, στο δεύτερο τμήμα η οπή σχεδιάστηκε να είναι διαμήκης σε όλο το ύψος του κελύφους με πλάτυνση της οπής στο σημείο σύσφιξης για μεγαλύτερη ευκολία του χρήστη (Σχήμα 24).



**Σχήμα 24:** Η οπή του κοχλία σύνδεσης των δύο μερών έχει ειδική διαμόρφωση ώστε ο κοχλίας να φυτεύεται μέσα σε αυτή

Στο επόμενο Σχήμα φαίνεται η εξέλιξη του design μεταξύ των φάσεων του προκαταρκτικού σχεδιασμού και του λεπτομερή σχεδιασμού.



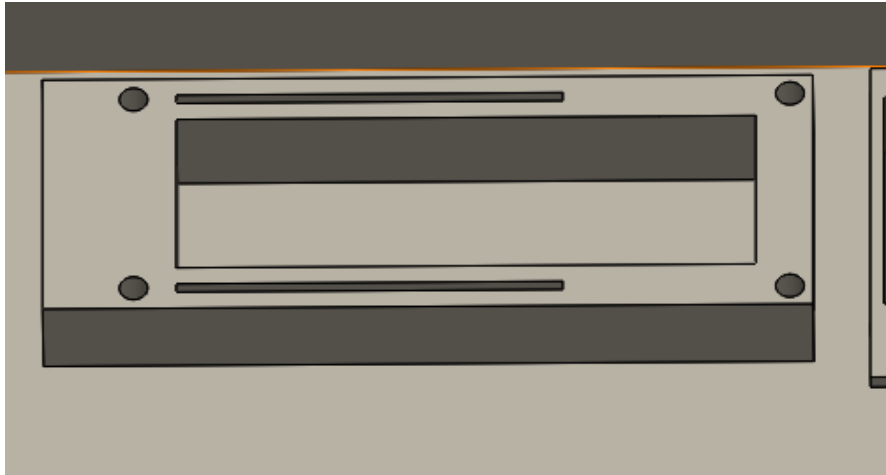
**Σχήμα 25:** Εξέλιξη του τρόπου σύνδεσης των δύο τμημάτων από τον προκαταρκτικό σχεδιασμό στον λεπτομερή

#### 4.5.2.2. Τελικός Σχεδιασμός του εσωτερικού του καλύμματος

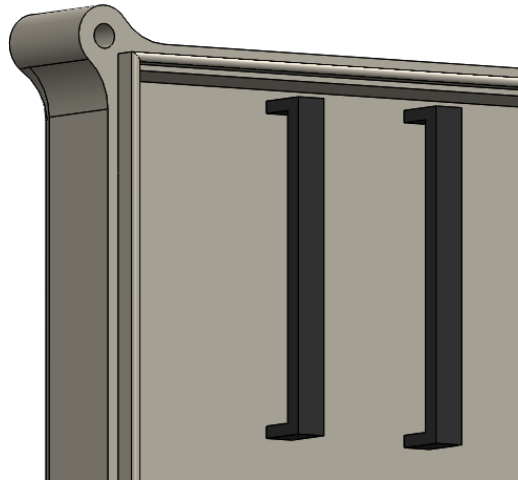
Προκειμένου να γίνει η σταθερή τοποθέτηση των εξαρτημάτων μέσα στο κάλυμμα έπρεπε να σχεδιαστούν εσωτερικά σε αυτό κάποιες υποδοχές και υποστηρίγματα. Οι υποδοχές και τα υποστηρίγματα σχεδιάστηκαν με βάση τη χωροταξία που παρουσιάστηκε στον προκαταρκτικό σχεδιασμό καθώς και των διαστάσεων των εξαρτημάτων. Τόσο η βάση τοποθέτησης του Arduino όσο και του αισθητήρα αποτελούν μέρος του ίδιου του καλύμματος. Αντίθετα, το σημείο τοποθέτησης της μπαταρίας αποτελείται από δύο ελαστικά μέρη τα οποία πακτώθηκαν σε τέσσερις εγκοπές του καλύμματος. Από τη μία μεριά τα ελαστικά μέρη είναι σταθερά τοποθετημένα στο κάλυμμα, ενώ από την άλλη υπάρχει η δυνατότητα απομάκρυνσης τους προκειμένου να τοποθετηθεί/αφαιρεθεί η μπαταρία. Ειδικότερα, η βάση στήριξης του αισθητήρα φαίνεται στο Σχήμα 26, η βάση στήριξης του Arduino στο Σχήμα 27 και τέλος, τα ελαστικά στηρίγματα στο Σχήμα 28.



**Σχήμα 26:** Η βάση τοποθέτησης του αισθητήρα μέσα στο κάλυμμα



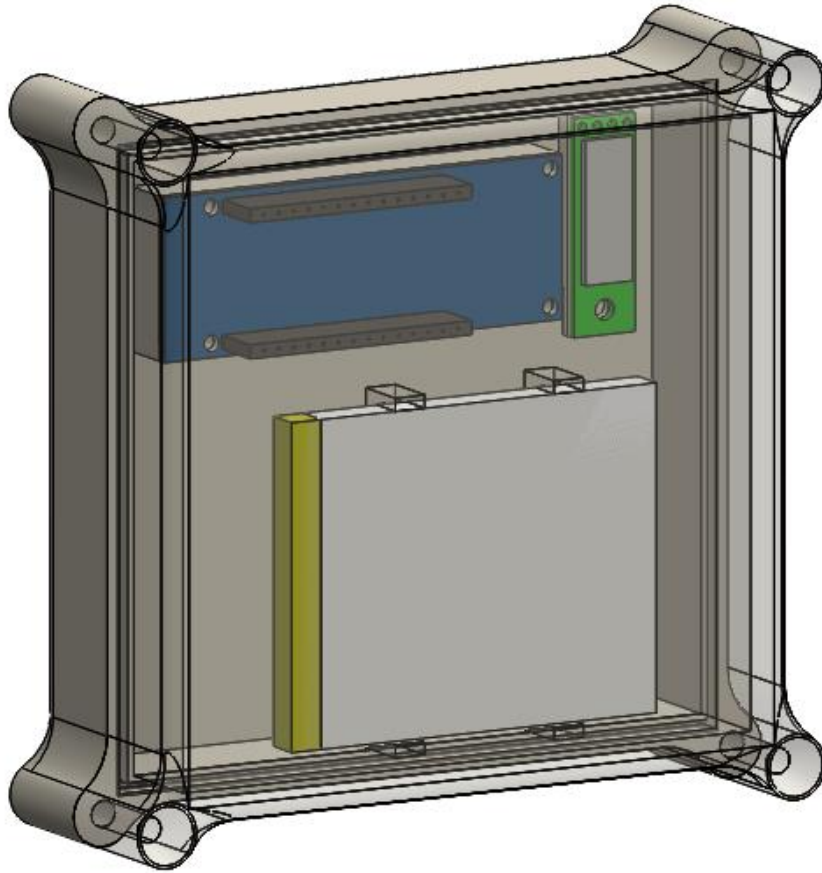
**Σχήμα 27:** Βάση τοποθέτησης του Arduino μέσα στο κάλυμμα



**Σχήμα 28:** Η βάση στήριξης της μπαταρίας μέσα στο κάλυμμα. Τα δύο μαύρα τμήματα αποτελούν τα ελαστικά μέρη τα οποία «εγκλωβίζουν» και συγκρατούν σφιχτά την μπαταρία μόλις αυτή τοποθετηθεί

Στη συνέχεια σχεδιάστηκαν λεπτομερώς τα επιμέρους εξαρτήματα (βλ. Παράρτημα Β).

Αφού ολοκληρώθηκε ο σχεδιασμός τόσο του καλύμματος όσο και των εξαρτημάτων πραγματοποιήθηκε συναρμολόγηση (assembly) του καλύμματος μαζί με τη συνδεσμολογία (Σχήμα 29).



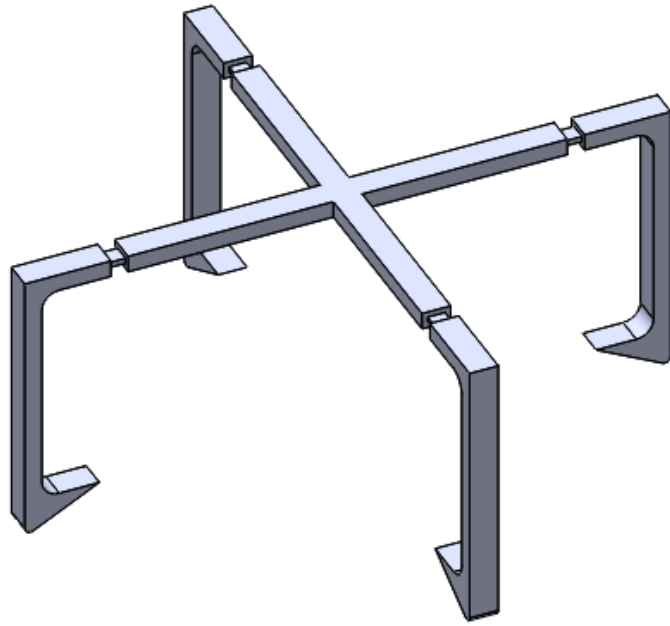
**Σχήμα 29:** Το συναρμολόγημα (assembly) του καλύμματος μαζί με τα τρία εξαρτήματα

#### *4.5.2.3. Σχεδιασμός της βάσης τοποθέτησης του καλύμματος πάνω στο καπάκι του κάδου*

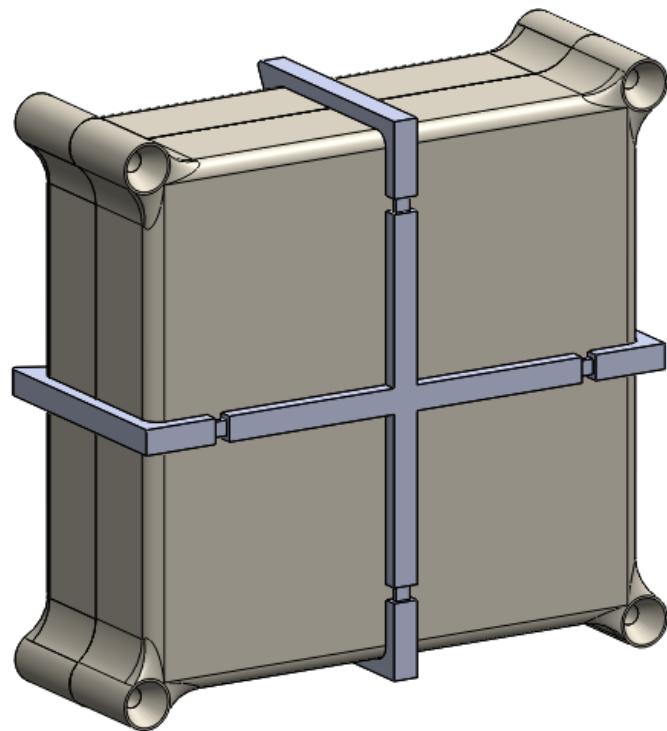
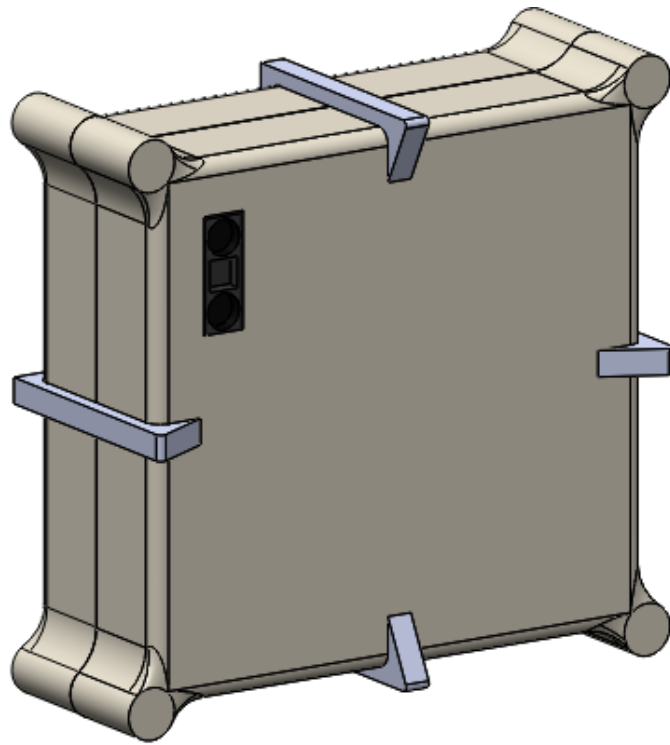
Κατά τη μελέτη και τον σχεδιασμό τέθηκε το ερώτημα σχετικά με τον τρόπο στήριξης/πάκτωσης της συσκευής πάνω στο καπάκι του κάδου. Η απάντηση που δόθηκε κατά τον προκαταρκτικό σχεδιασμό ήταν η ανάπτυξη βάσης στήριξης, η οποία θα κλειδώνει μετά την τοποθέτηση και θα ανοίγει με ειδικό κλειδί.

Κατά τον λεπτομερή σχεδιασμό της βάσης αποφασίστηκε η δημιουργία πτυσσόμενων ποδαρικών με ελατήριο. Το ελατήριο δίνει τη δυνατότητα επέκτασης του ανοίγματος προκειμένου να μπορεί η συσκευή να τοποθετηθεί αλλά και να αφαιρεθεί. Μετά την τοποθέτηση τα ποδαρικά κλείνουν σφιχτά το κάλυμμα λόγω των ελατηρίων και επιπλέον κλειδώνουν σε αυτή τη θέση προς αποφυγή κλοπής. Με αυτόν τον τρόπο επιπλέον, η συσκευή μπορεί εύκολα να απομακρυνθεί σε περίπτωση πλύσης του κάδου αλλά και σε περίπτωση απόσυρσής του. Έτσι, η ίδια συσκευή μπορεί να τοποθετηθεί σε πολλούς κάδους κατά τη διάρκεια ζωής της. Το σύστημα συγκράτησης φαίνεται στο Σχήμα 30, ενώ το συνολικό συναρμολόγημα στο Σχήμα 31.





**Σχήμα 30:** Το συναρμολόγημα της βάσης



**Σχήμα 31:** Το συναρμολόγημα καλύμματος, εξαρτημάτων και βάσης

## 4.6. Calibration Αισθητήρα

Παρόλο που ο κατασκευαστής έδινε μια προσεγγιστική καμπύλη απόστασης - τάσης για τον αισθητήρα από αναζήτηση που έγινε στο διαδίκτυο δημιουργήθηκε η υποψία ότι αυτή η καμπύλη ίσως να μην είναι μια ακριβής αναπαράσταση της συσχέτισης των δύο μεγεθών. Έτσι, κρίθηκε σκόπιμο να παραχθεί πειραματικά η καμπύλη μέσω διαδοχικών μετρήσεων και να συγκριθεί με την καμπύλη του κατασκευαστή με σκοπό τον καθορισμό της τελικά χρησιμοποιούμενης καμπύλης του αισθητήρα.

### 4.6.1. Διεξαγωγή του Πειράματος

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα Arduino MKR WAN 1310 συνδεδεμένη με τον αισθητήρα υπερύθρων Sharp GP2Y0A60SZLF σύμφωνα με το Σχήμα 21. Ο αισθητήρας στερεώθηκε σε τοίχο οριζόντια, ενώ η πλακέτα τοποθετήθηκε σε κοντινή απόσταση και τροφοδοτήθηκε από υπολογιστή με τη χρήση καλωδίου USB. Το αντικείμενο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα λευκό κουτί υπολογιστή διαστάσεων 34x25cm. Για τη μέτρηση των αποστάσεων από τον αισθητήρα χρησιμοποιήθηκε μεζούρα στερεωμένη στο πάτωμα με ακρίβεια εκατοστού. Το πείραμα εκπονήθηκε σε σκοτεινό περιβάλλον για να προσομοιάζει την κατάσταση που επικρατεί σε έναν κάδο απορριμμάτων. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.



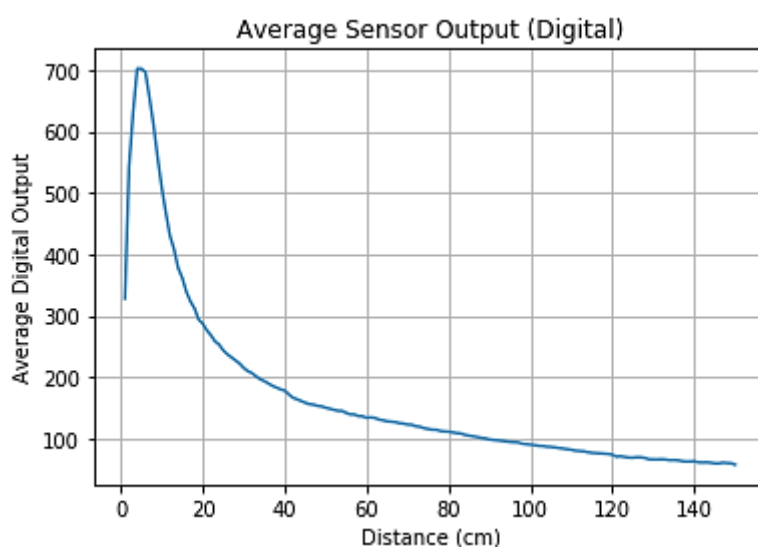
**Εικόνα 6:** Πειραματική διάταξη για τον καθορισμό της καμπύλης του αισθητήρα

Για να καταστεί δυνατή η μέτρηση των αποστάσεων του αντικειμένου από τον αισθητήρα ήταν απαραίτητη η συμβολή ενός χρήστη ο οποίος κάθε φορά θα μετακινούσε το κουτί. Έτσι, δημιουργήθηκε κώδικας στο λογισμικό Arduino IDE ο

οποίος λάμβανε, για κάθε απόσταση από 1 έως 150cm, 500 μετρήσεις της απόστασης και στη συνέχεια έδινε χρόνο στο χρήστη να απομακρύνει κατά 1cm το αντικείμενο ώστε να πάρει τις επόμενες 500 μετρήσεις. Οι τιμές των μετρήσεων αποθηκεύτηκαν σε ξεχωριστό αρχείο για μετέπειτα επεξεργασία.

#### 4.6.2. Έλεγχος Πειραματικών Δεδομένων

Αφού το πείραμα πραγματοποιήθηκε για όλες τις αποστάσεις από 1 έως 150cm λήφθηκε ένα αρχείο 75.000 μετρήσεων (500 μετρήσεις x 150 αποστάσεις). Το αρχείο αυτό τροποποιήθηκε κατάλληλα με χρήση της γλώσσας Python και για κάθε απόσταση υπολογίστηκε η μέση τιμή των 500 μετρήσεων καθώς και η τυπική απόκλιση από τη μέση τιμή. Η μέση τιμή των μετρήσεων ως συνάρτηση της απόστασης του αντικειμένου από τον αισθητήρα φαίνεται στο Διάγραμμα 5.

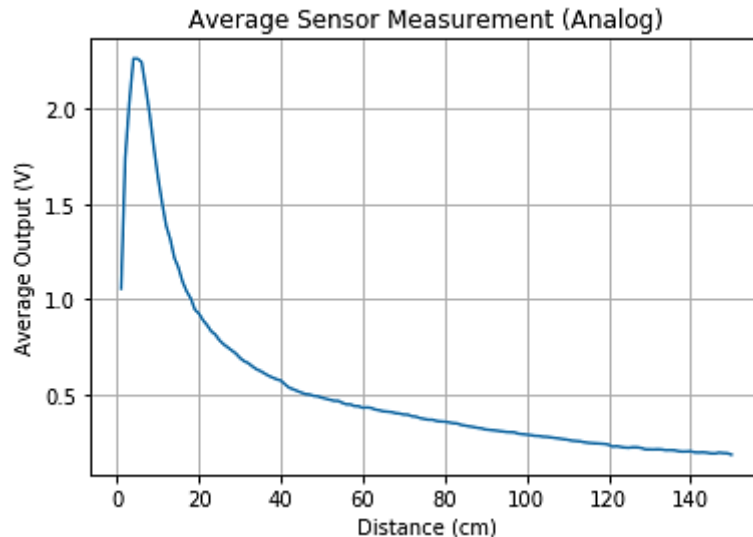


**Διάγραμμα 5:** Μέση τιμή ψηφιακών μετρήσεων αισθητήρα συναρτήσει απόστασης αντικειμένου από αυτόν

Οι μετρήσεις του αισθητήρα που λαμβάνονταν από το Arduino ήταν αναλογικού τύπου, δηλαδή τάσεις, ωστόσο το Arduino είχε ενσωματωμένο έναν αναλογο-ψηφιακό μετατροπέα (ADC) που αυτόματα τις μετέτρεπε σε ψηφιακό σήμα με ακρίβεια 10bits. Συνεπώς, όλες οι μετρήσεις που λήφθηκαν μετατράπηκαν σε ακεραίους αριθμούς μεταξύ του 0 και του 1023. Για να μπορέσει να μετατραπεί το σήμα από ψηφιακό και πάλι σε αναλογικό έπρεπε να γίνει η εξής πράξη, δεδομένου ότι ο αναλογο-ψηφιακός μετατροπέας είχε μέγιστη τάση εξόδου τα 3.3V:

$$\text{Μέτρηση αναλογική} = \frac{\text{Μέτρηση ψηφιακή}}{1023} \cdot 3.3 \text{ V}$$

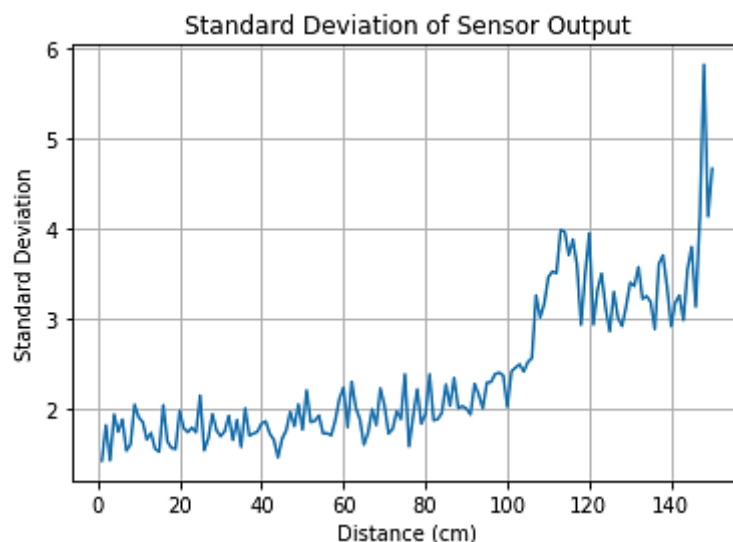
Μετά από μετατροπή των ψηφιακών σημάτων σε αναλογικά προέκυψε η παρακάτω καμπύλη συσχέτισης της απόστασης με τη λαμβανόμενη από τον αισθητήρα τάση.



**Διάγραμμα 6:** Μέση τιμή αναλογικών μετρήσεων αισθητήρα συναρτήσει απόστασης αντικειμένου από αυτόν

Στην παρούσα εφαρμογή δεν υπήρχε ενδιαφέρον για την τάση του αισθητήρα αλλά μόνο για τις αποστάσεις και γι' αυτό από αυτό το σημείο και έπειτα όλη η ανάλυση έγινε με τα ψηφιακά σήματα του Arduino και όχι με τα αναλογικά.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω εκτός από τη μέση τιμή των 500 μετρήσεων υπολογίστηκε και η απόκλιση αυτών από τη μέση τιμή. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στο Διάγραμμα 7.

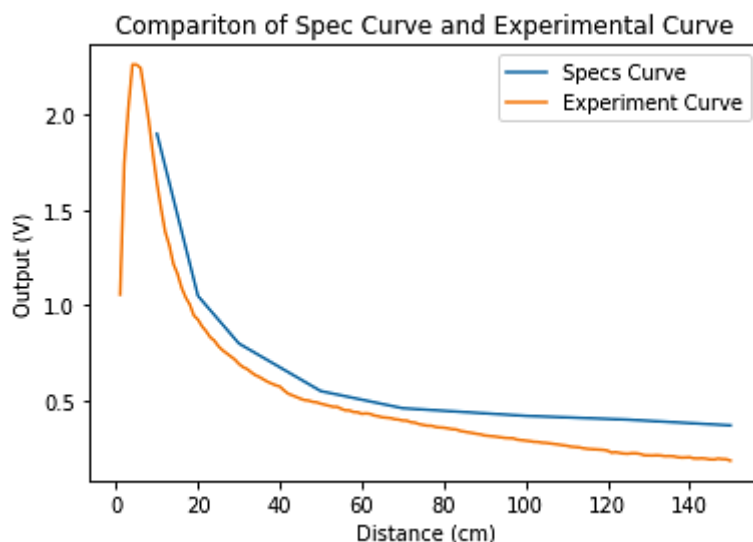


**Διάγραμμα 7:** Αποκλίσεις μετρούμενων τιμών από τη μέση τιμή για κάθε απόσταση αντικειμένου από τον αισθητήρα

Η απόκλιση από τη μέση τιμή είναι το μέγεθος που δείχνει την ακρίβεια που έχει ο αισθητήρας κατά τη μέτρηση των αποστάσεων. Όπως έγινε εμφανές, σε αποστάσεις άνω των 80cm ο αισθητήρας αρχίζει να χάνει την ακρίβειά του, ενώ σε αποστάσεις άνω των 110cm, παρατηρήθηκε σημαντική απορρύθμιση του αισθητήρα όσον αφορά τις μετρήσεις του. Το φαινόμενο αυτό δε δημιούργησε πρόβλημα στην παρούσα εργασία καθώς το σημαντικό εύρος αποστάσεων κυμαίνεται μεταξύ των 10 και των 50cm. Μετά

τα 80cm είναι δεδομένο πως ο κάδος βρίσκεται σε πολύ χαμηλή στάθμη και δεν απαιτείται άδειασμά του.

Αφού παράχθηκε η πειραματική καμπύλη που συσχετίζει την τάση του αισθητήρα με την απόσταση του αντικειμένου από αυτόν μπορούσε να γίνει η σύγκρισή της με αυτή του κατασκευαστή. Οι δύο καμπύλες παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 8.



**Διάγραμμα 8:** Σύγκριση της πειραματικής καμπύλης (πορτοκαλί) με την καμπύλη του κατασκευαστή (μπλε) για τον αισθητήρα

Όπως έγινε εμφανές, οι δύο καμπύλες ομοιάζαν στη μορφή, ωστόσο δεν ταυτίζονταν. Επειδή δεν γινόταν σαφής από τη βιβλιογραφία ο τρόπος σχηματισμού της καμπύλης του κατασκευαστή και ο κατασκευαστής δε εγγυόταν την αξιοπιστία της, κρίθηκε απαραίτητος ο καθορισμός της καμπύλης του αισθητήρα με βάση τα πειραματικά δεδομένα.

#### 4.6.3. Καθορισμός Καμπύλης Αισθητήρα

Επειδή, στην παρούσα εφαρμογή ήταν επιθυμητό μέσω της τάσης να υπολογίζεται η απόσταση και όχι το αντίστροφο, έπρεπε να γίνει αντιστροφή της καμπύλης που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 5, ώστε στον άξονα x να βρεθούν οι μετρήσεις του αισθητήρα και στον άξονα y οι αποστάσεις.

Έγινε εμφανές ότι όσο το αντικείμενο πλησίαζε τον αισθητήρα οι τάσεις που αυτός έδινε αύξαναν. Ωστόσο, μετά από μία ορισμένη απόσταση (6cm) και έπειτα, όσο το αντικείμενο πλησίαζε τον αισθητήρα αυτός έδινε ολοένα και μικρότερες τάσεις. Η συμπεριφορά αυτή κατέστρεφε την 1-1 μορφή της καμπύλης που διατηρούταν μέχρι και τα 6cm και συνεπώς καθιστούσε τη συνάρτηση μη αντιστρέψιμη.

Για να αντιμετωπιστεί το παραπάνω πρόβλημα έγινε αναδρομή στα κατασκευαστικά σχέδια των κάδων απορριμμάτων ώστε να υπολογιστεί το εύρος αποστάσεων στο οποίο υπάρχει ενδιαφέρον για λήψη μετρήσεων. Σύμφωνα με τα Σχήματα 32 και 33 για τους μεγάλους κάδους το εφικτό εύρος τιμών είναι:

$$\begin{aligned} \min &= 128\text{cm} - 118\text{cm} = 10\text{cm} \\ \max &= 128\text{cm} - 20\text{cm} = 108\text{cm} \end{aligned}$$

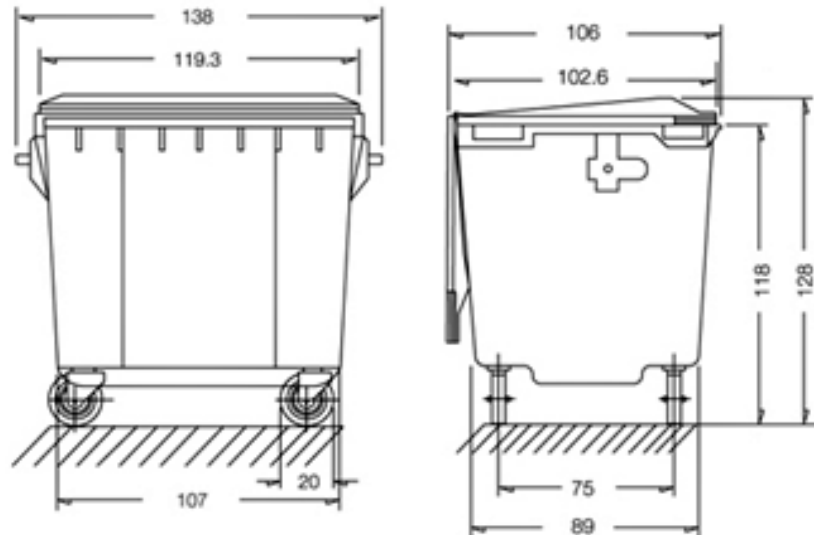
(για τη συσκευή πακτωμένη στο υψηλότερο σημείο του καπακιού)

ενώ για τους μικρούς:

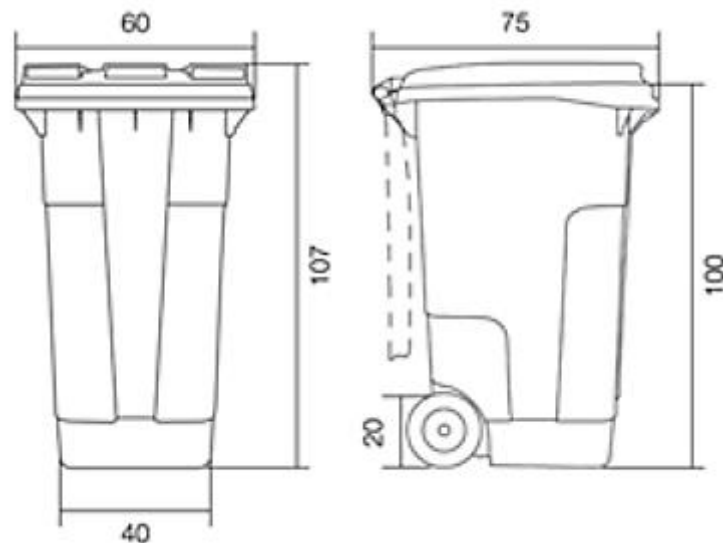
$$\text{min} = 107\text{cm} - 100\text{cm} = 7\text{cm}$$

$$\text{max} = 107\text{cm}$$

(για τη συσκευή πακτωμένη στο υψηλότερο σημείο του καπακιού)

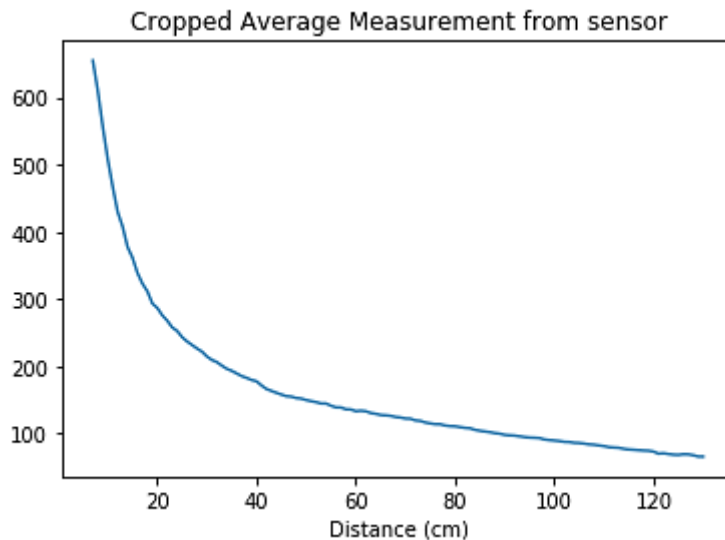


**Σχήμα 32:** Διαστάσεις κάδου χωρητικότητας 1100 λίτρων



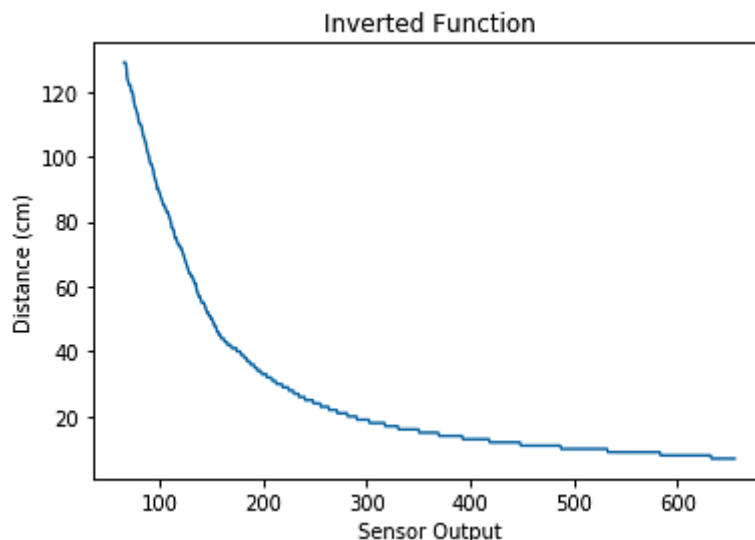
**Σχήμα 33:** Διαστάσεις κάδου χωρητικότητας 240 λίτρων

Συνολικά, το εύρος στο οποίο οι μετρήσεις έπρεπε να μπορούν να μετασχηματιστούν σε αποστάσεις ήταν ίσο με το [7,108]. Βασιζόμενοι στη μορφή της καμπύλης καθώς και την επιθυμία αυτή να παρουσιάζει 1-1 συμπεριφορά τελικά επιλέχθηκε το διάστημα αποστάσεων [6,130] για τον καθορισμό της καμπύλης του αισθητήρα. Στο Διάγραμμα 9 φαίνεται η πειραματική καμπύλη αφού κόπηκαν τα σημεία που βρίσκονταν εκτός τους επιθυμητού διαστήματος.



**Διάγραμμα 9:** Μέση τιμή ψηφιακών μετρήσεων αισθητήρα συναρτήσει απόστασης αντικειμένου από αυτόν για το επιθυμητό διάστημα αποστάσεων

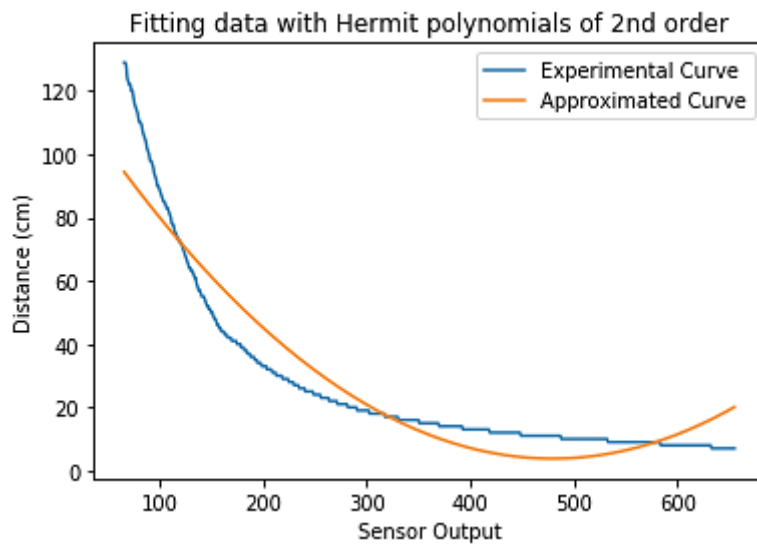
Για την αντιστροφή της συνάρτησης ακολουθήθηκε η εξής λογική. Βρέθηκε ότι το διάστημα [6,130] των αποστάσεων αντιστοιχεί περίπου στο διάστημα [66,656] των μετρήσεων. Για κάθε ακέραιο αριθμό από το 66 έως το 656 βρέθηκε η αντίστοιχη πειραματική μέτρηση που βρισκόταν κοντύτερα. Στη συνέχεια για αυτή τη μέτρηση λήφθηκε η τιμή της απόστασης και έτσι δημιουργήθηκε μια αντιστοίχιση μετρήσεων και αποστάσεων. Στο Διάγραμμα 10 παρουσιάζεται η αντεστραμμένη καμπύλη.



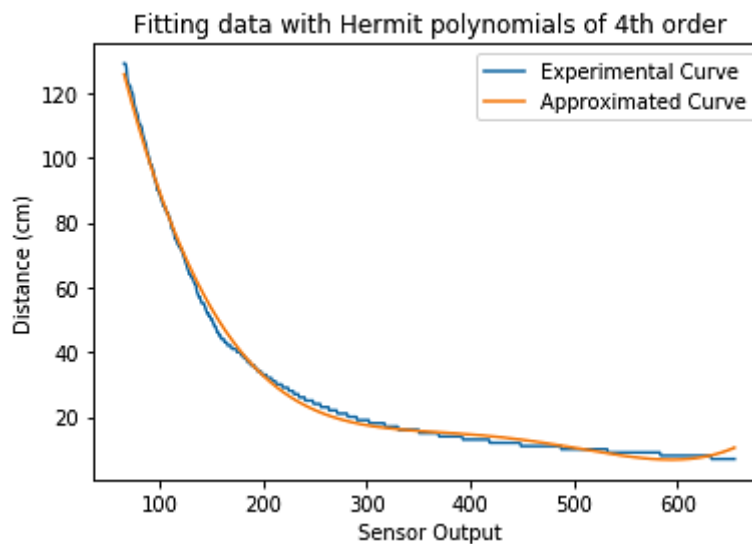
**Διάγραμμα 10:** Απόσταση αντικειμένου από τον αισθητήρα συναρτήσει της μέσης τιμής των μετρήσεων αυτού για το επιθυμητό διάστημα αποστάσεων

Έχοντας ένα σύνολο σημείων μέτρησης-απόστασης ήταν πλέον εφικτό μέσω παρεμβολής να καθορισθεί η συνάρτηση μετρήσεων του αισθητήρα. Για την παρεμβολή χρησιμοποιήθηκαν ερμιτιανά πολυώνυμα ενώ έγιναν δοκιμές για την τάξη του πολυωνύμου που παρεμβαλλόταν καλύτερα μεταξύ των σημείων. Στα παρακάτω Διαγράμματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις διάφορες τάξεις του πολυωνύμου. Τελικά, το πολυώνυμο αποφασίστηκε να είναι έκτου βαθμού, καθώς αυτό παρουσίαζε εξαιρετικά αποτελέσματα.

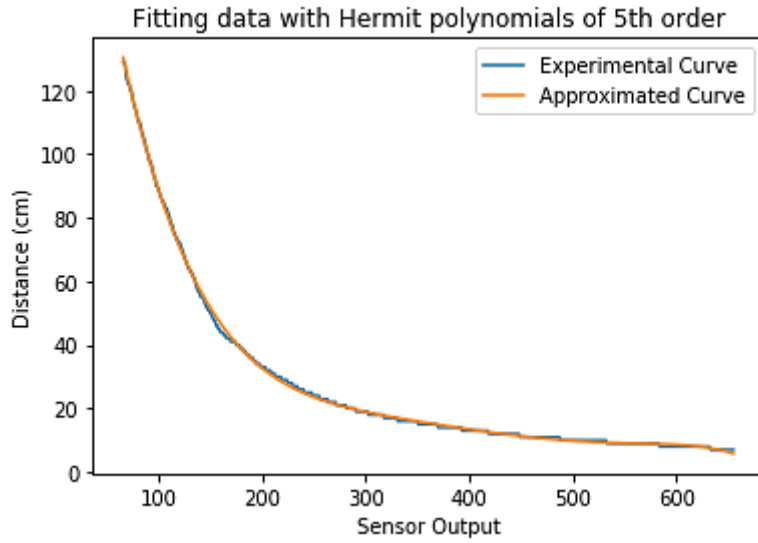




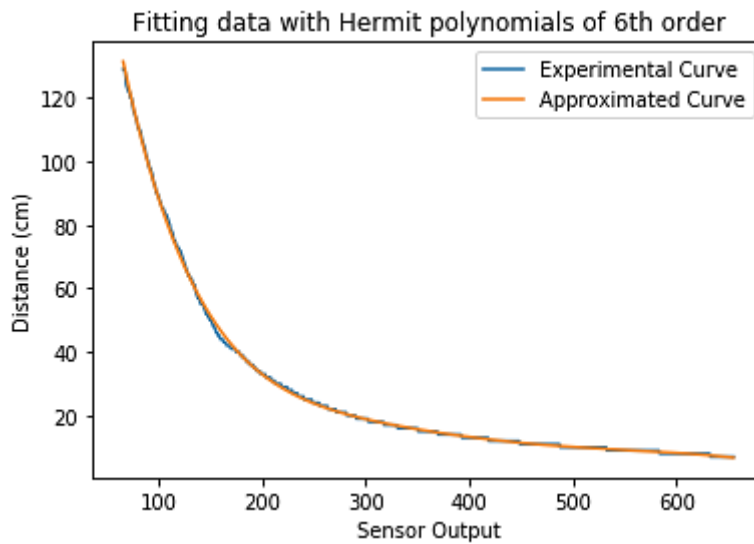
**Διάγραμμα 11:** Παρεμβολή της πειραματικής καμπύλης με χρήση ερμιτιανών πολυωνύμων έως και δευτέρου βαθμού



**Διάγραμμα 12:** Παρεμβολή της πειραματικής καμπύλης με χρήση ερμιτιανών πολυωνύμων έως και τετάρτου βαθμού



**Διάγραμμα 13:** Παρεμβολή της πειραματικής καμπύλης με χρήση ερμιτιανών πολυωνύμων έως και πέμπτου βαθμού



**Διάγραμμα 14:** Παρεμβολή της πειραματικής καμπύλης με χρήση ερμιτιανών πολυωνύμων έως και έκτου βαθμού

Οι συντελεστές που προέκυψαν από την παρεμβολή με ερμιτιανά πολυώνυμα είναι οι παρακάτω:

$$\begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 268.3445281960439956492336932569742202758789 \\ -1.4524644085141484861622984681162051856518 \\ 0.0035802019766784875208498473142526563606 \\ -0.0000047390124066520012503572409356955575 \\ 0.0000000034706504664180602367727765720064 \\ -0.0000000000013200984853924941847242186871 \\ 0.0000000000000002024286755390761949988004 \end{bmatrix}$$

Σύμφωνα με τη θεωρία τα φυσικά ερμιτιανά πολυώνυμα δίνονται ανάλογα τον βαθμό από την σχέση:

$$H_n(x) = (-1)^n \cdot e^{x^2} \cdot \frac{d^n}{dx^n} (e^{-x^2})$$

οπότε τα πρώτα επτά πολυώνυμα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είναι:

$$H_0(x) = 1$$

$$H_1(x) = 2x$$

$$H_2(x) = 4x^2 - 2$$

$$H_3(x) = 8x^3 - 12x$$

$$H_4(x) = 16x^4 - 48x^2 + 12$$

$$H_5(x) = 32x^5 - 160x^3 + 120x$$

$$H_6(x) = 64x^6 - 480x^4 + 720x^2 - 120$$

Από τη θεωρία της πολυωνυμικής παρεμβολής προέκυψε ότι η απόσταση ως συνάρτηση της μέτρησης  $x$  του αισθητήρα θα δίνεται από τον τύπο:

$$\begin{aligned} distance(x) = & c_0H_0(x) + c_1H_1(x) + c_2H_2(x) + c_3H_3(x) + c_4H_4(x) + c_5H_5(x) \\ & + c_6H_6(x) \end{aligned}$$

Μετά από αντικατάσταση των πολυωνύμων λήφθηκε:

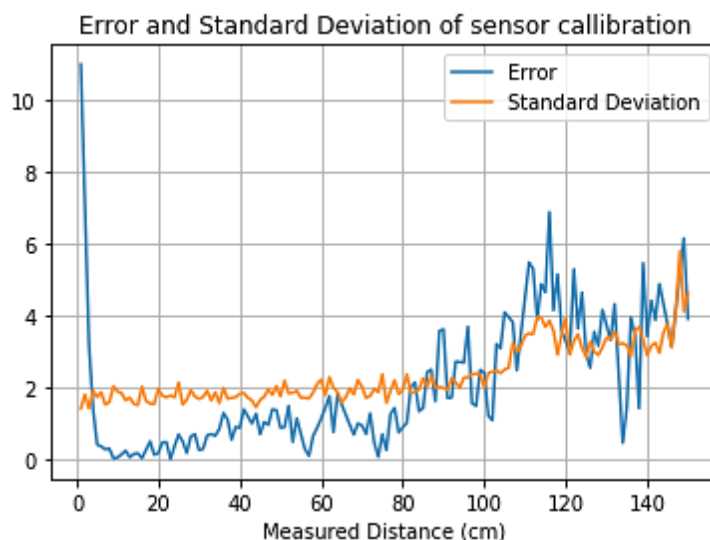
$$\begin{aligned} distance(x) = & 64c_6 \cdot x^6 + 32c_5 \cdot x^5 + (16c_4 - 480c_6) \cdot x^4 + (8c_3 - 160c_5) \cdot x^3 \\ & + (4c_2 - 48c_4 + 720c_6) \cdot x^2 + (2c_1 - 12c_3 + 120c_5) \cdot x + (c_0 - 2c_2 \\ & + 12c_4 - 120c_6) \end{aligned}$$

με τους συντελεστές  $c_i$  να είναι αυτοί που αναφέρθηκαν παραπάνω.

#### 4.6.4. Έλεγχος Αποτελεσμάτων

Αφού καθορίστηκε η καμπύλη του αισθητήρα, θεωρήθηκε σημαντικό να ελεγχθεί κατά πόσο αυτή ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Έτσι, εκπονήθηκε εκ νέου πείραμα στο οποίο όπως και πριν, ο αισθητήρας λάμβανε μετρήσεις για κάθε απόσταση από 1 έως και 150cm με βήμα 1cm. Αυτή τη φορά ωστόσο, οι μετρήσεις του αισθητήρα έπαιρναν τη μορφή απόστασης μέσω της συνάρτησης που υπολογίστηκε παραπάνω. Ο προγραμματισμός έγινε στο Arduino IDE και ο κώδικας όριζε ότι για κάθε απόσταση θα λαμβάνονται 100 μετρήσεις και στη συνέχεια από τη μέση τιμή αυτών θα υπολογίζεται η θεωρητική απόσταση του αντικείμενου. Στη συνέχεια θα δίνεται χρόνος στο χρήστη να απομακρύνει το αντικείμενο κατά 1cm από τον αισθητήρα και θα επαναλαμβάνεται η διαδικασία.

Αφού εκπονήθηκε το πείραμα, τα πειραματικά (υπολογισμένα μέσω συνάρτησης) και τα πραγματικά (μετρημένα από τη μεζούρα) δεδομένα για την απόσταση συγκρίθηκαν και υπολογίστηκε η απόλυτη τιμή του σφάλματος, η οποία δίνεται στο Διάγραμμα 15.



**Διάγραμμα 15:** Απόλυτο σφάλμα μεταξύ υπολογιζόμενης και πραγματικής τιμής της απόστασης και απόκλιση μετρήσεων από τη μέση τιμή

Όπως έγινε εμφανές στο εύρος τιμών που είναι πολύ σημαντικό για την εφαρμογή, δηλαδή στο διάστημα [10,40] που ο κάδος θα πρέπει να στέλνει σήμα πλήρωσης, το σφάλμα από την πραγματική τιμή της απόστασης ήταν κοντά στο 1cm. Για μία εφαρμογή που αφορά στερεά απορρίμματα το σφάλμα αυτό θεωρήθηκε μη σημαντικό.

Όπως ήταν αναμενόμενο και από προηγούμενα αποτελέσματα, σε μεγάλες αποστάσεις του αισθητήρα και του αντικειμένου οι μετρήσεις αποκλιναν σημαντικά από τη μέση τιμή το οποίο σημαίνει ότι ο αισθητήρας μετρούσε με μικρότερη ακρίβεια και συνεπώς, όσο καλή παρεμβολή και να γινόταν αποτελέσματα δε θα μπορούσαν να είναι ικανοποιητικά.

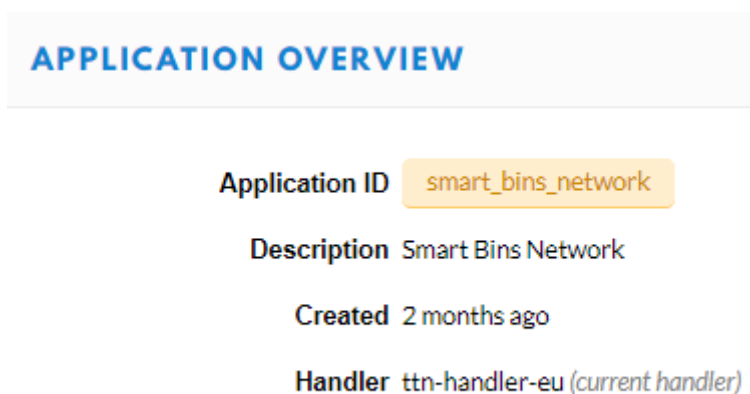
#### 4.7. Μεταφορά Δεδομένων σε Διακομιστή Δικτύου

Αφού ολοκληρώθηκε η μετρητική διάταξη και ελέγχθηκαν οι μετρήσεις του αισθητήρα έμενε να γίνει η σύνδεση της διάταξης στη διαδικτυακή πλατφόρμα. Το TTN που ήταν η πλατφόρμα που επιλέχθηκε λειτουργεί ως εξής: ο χρήστης εγγράφει στην πλατφόρμα τις LoRa συσκευές του (στην παρούσα εφαρμογή την πλακέτα MKR WAN 1310) καθώς και τους σταθμούς βάσης του, εκτός κι αν σκοπεύει να χρησιμοποιήσει κάποιον από τους διαθέσιμους σταθμούς που έχουν ήδη καταχωρηθεί στη πλατφόρμα. Στη συνέχεια συνδέει συσκευές και σταθμούς με τη δημιουργία εφαρμογών.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η εργασία δεν περιλαμβάνει τη δημιουργία σταθμού βάσης. Συνεπώς, έγινε αναζήτηση κάποιου σταθμού βάσης που βρισκόταν κοντά στη μετρητική διάταξη. Δυστυχώς, παρόλο που υπήρχαν σταθμοί βάσης κοντά στην τοποθεσία της διάταξης, αυτοί βρίσκονταν εσωτερικά οικημάτων με αποτέλεσμα το βεληνεκές τους να μην φτάνει επαρκώς στην τοποθεσία της διάταξης. Τελικά χρησιμοποιήθηκε πρωτότυπος σταθμός βάσης της Μονάδας Logistics and Transportation Unit (LTU) του τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας. Έτσι, έγινε εφικτή η σύνδεση της συσκευής με την πλατφόρμα.

#### 4.7.1. Σύνδεση Πλακέτας στο TTN

Αρχικά δημιουργήθηκε λογαριασμός στη διαδικτυακή πλατφόρμα TTN και ‘ανοίχτηκε’ νέα εφαρμογή που θα συνδέσει την πλακέτα με το σταθμό βάσης. Κατά τη δημιουργία της εφαρμογής απαιτείται η εισαγωγή ονόματος και περιγραφής και στη συνέχεια η πλατφόρμα αυτόματα δημιουργεί ένα αναγνωριστικό (κωδικό) της εφαρμογής εκτός κι αν ο χρήστης επιθυμεί να εισάγει το δικό του. Για λόγους ασφάλειας επιλέχθηκε το αναγνωριστικό της εφαρμογής να δημιουργηθεί αυτόματα από την πλατφόρμα. Στην παρακάτω Εικόνα φαίνεται εποπτικά η εφαρμογή που δημιουργήθηκε.



**Εικόνα 7:** Εποπτική παρουσίαση της εφαρμογής που δημιουργήθηκε στην πλατφόρμα TTN

Αφού δημιουργήθηκε η εφαρμογή στην πλατφόρμα, έπρεπε να καταχωρηθεί σε αυτή ο επεξεργαστής της μετρητικής διάταξης, δηλαδή η πλακέτα Arduino. Για να γίνει αυτό χρειαζόταν το κλειδί ασφαλείας της πλακέτας, το οποίο αποτελεί αναγνωριστικό της κάθε πλακέτας και είναι μοναδικό. Η πληροφορία αυτή μπορεί να δοθεί μόνο αφού τρέξει στο Arduino κώδικας που ως σκοπό έχει να εφοδιάσει το χρήστη με τα αναγνωριστικά της συσκευής ώστε να καταστεί εφικτή η σύνδεση της σε εφαρμογές. Ο κώδικας που φορτώθηκε στην πλακέτα ονομάζεται “First Configuration” και αφορά τα μοντέλα Arduino MKR WAN 1300 και 1310, δηλαδή μοντέλα που υποστηρίζουν τη συνδεσιμότητα LoRa. Πρόκειται για κώδικα που παρέχεται έτοιμος ως πρότυπο στο Arduino IDE και χρησιμοποιήθηκε ως έχει. Ο κώδικας παρατίθεται στο Παράρτημα Α.

Μετά τη φόρτωση του κώδικα στην πλακέτα, στην οθόνη του Serial Monitor του Arduino IDE εμφανίστηκε μήνυμα που έδινε την έκδοση της πλακέτας και το κλειδί ασφαλείας της. Το κλειδί αυτό ήταν το αναγνωριστικό που στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για την προσθήκη της πλακέτας ως συσκευή στην εφαρμογή. Στην Εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η εποπτική παρουσίαση της καταχωρημένης συσκευής Arduino. Το πεδίο “Device EUI” είναι αυτό που συμπληρώθηκε με βάση το αναγνωριστικό της πλακέτας ώστε να επιτευχθεί η σύνδεση.

## DEVICE OVERVIEW

Application ID `smart_bins_network`

Device ID `mkr_wan_1310`

Activation Method `OTAA`

Device EUI `<> [REDACTED]`

Application EUI `<> [REDACTED]`

App Key `<> [REDACTED]`

**Εικόνα 8:** Εποπτική παρουσίαση της εφαρμογής που δημιουργήθηκε στην πλατφόρμα TTN

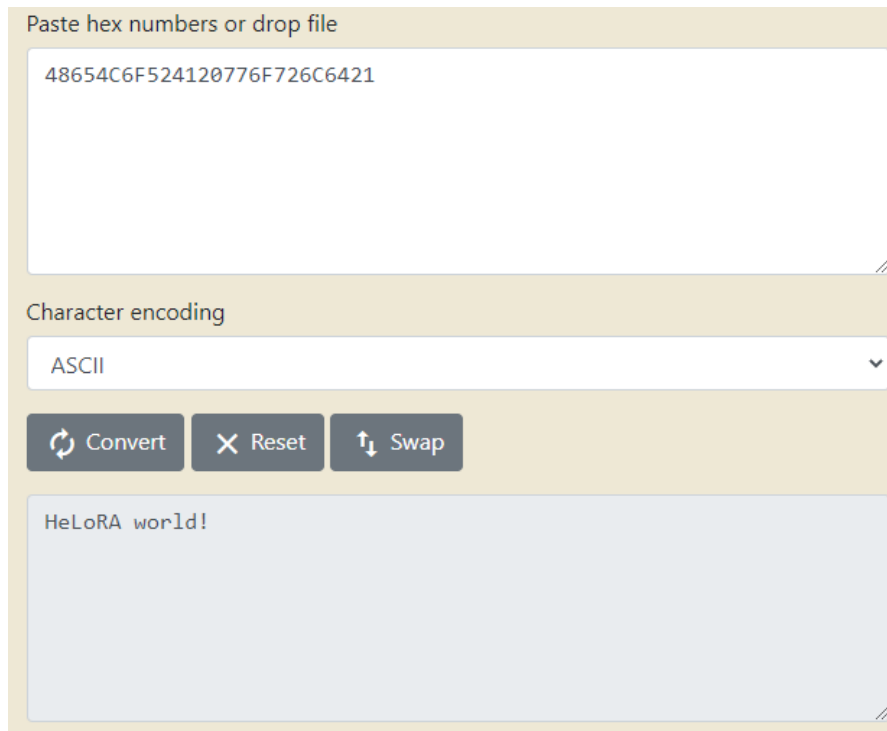
Μετά την καταχώρηση της συσκευής η πρώτη σύνδεση στην πλατφόρμα μπορούσε να επιτευχθεί. Για να συμβεί αυτό έπρεπε να χρησιμοποιηθεί ως διαμεσολαβητής ο σταθμός βάσης, που δόθηκε από το LTU. Ο σταθμός βάσης που λήφθηκε ήταν ήδη προγραμματισμένος κατάλληλα και καταχωρημένος στο TTN, συνεπώς για να μπορέσει να μεταφέρει τις πληροφορίες από την πλακέτα στην διαδικτυακή πλατφόρμα αρκούσε να τροφοδοτηθεί και να του προσφερθεί πρόσβαση στο διαδίκτυο. Για να εξασφαλιστεί σταθερότητα στη σύνδεση και κατ'επέκταση να αποφευχθούν προβλήματα συνδεσιμότητας επιλέχθηκε να γίνει σύνδεση του σταθμού βάσης με οικιακό router με χρήση καλωδίου Ethernet.

Στον κώδικα που προηγήθηκε, μετά την εκτύπωση του αναγνωριστικού της πλακέτας, η οθόνη του Serial Monitor ζητούσε τον τρόπο ενεργοποίησης, που σύμφωνα με την Εικόνα 8 είναι η OTAA καθώς και το αναγνωριστικό και το κλειδί της εφαρμογής (Application EUI, App Key) για να προχωρήσει στη σύνδεση της συσκευής με την πλακέτα. Μόλις ο χρήστης εισήγαγε τα παραπάνω δεδομένα, στην πλατφόρμα έφτανε μήνυμα ενεργοποίησης της συσκευής (δηλαδή της πλακέτας), το οποίο συμβολίζεται με ένα κεραυνό καθώς και το μήνυμα «HeLoRa World» κωδικοποιημένο σε δεκαεξαδικό σύστημα (Εικόνα 9, Εικόνα 10). Το μήνυμα επειδή είχε κατεύθυνση από την πλακέτα προς την πλατφόρμα ονομάζεται uplink και συμβολίζεται με ένα προς τα πάνω βέλος. Το τρίτο μήνυμα που εμφανίζεται στην Εικόνα 9 ονομάζεται downlink και συμβολίζεται με ένα προς τα κάτω βέλος. Αφορά τα μηνύματα από την πλατφόρμα προς την πλακέτα και γι' αυτό στη συγκεκριμένη περίπτωση εμφανίζεται κενό.

Filters `uplink` `downlink` `activation` `ack` `error`

time	counter	port	
14:01:37	0		dev id: <code>mkr_wan_1310</code>
14:01:37	0	3	confirmed dev id: <code>mkr_wan_1310</code> payload: <code>48 65 4C 6F 52 41 20 77 6F 72 6C 64 21</code>
14:01:24			dev id: <code>mkr_wan_1310</code> dev addr: <code>26 01 5CAE</code> app eui: <code>70 B3D57E D003 B1D2</code> dev eui: <code>A8 61 0A 33 35 2</code>

**Εικόνα 9:** Τα μηνύματα που φτάνουν στην πλατφόρμα κατά την πρώτη σύνδεση της με την πλακέτα



**Εικόνα 10:** Αποκρυπτογράφηση του μηνύματος από δεκαεξαδικό σύστημα σε συμβολοσειρά

#### 4.7.2. Αποστολή Μετρήσεων στο TTN

Μετά την πρώτη επιτυχή σύνδεση της πλακέτας στο TTN, έπρεπε να δημιουργηθεί κώδικας που θα αποστέλλει τις εκάστοτε μετρήσεις του αισθητήρα στην πλατφόρμα. Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η απόσταση δεν άλλαξε: λαμβάνονται 500 μετρήσεις εκ των οποίων προκύπτει μία μέση τιμή και με χρήση της συνάρτησης του αισθητήρα τελικά προκύπτει η απόσταση. Ο κώδικας ωστόσο έπρεπε να εμπλουτιστεί και με εντολές που αποσκοπούν στη σύζευξη συσκευής-εφαρμογής. Σε αυτό βοήθησε πολύ ο πρότυπος κώδικας «LoraSendAndReceive» που το Arduino IDE παρέιχε. Με κατάλληλη τροποποίηση του κώδικα αυτού ορίστηκε η εξής αλληλουχία ενεργειών: ο κώδικας λαμβάνει από ένα αρχείο τα αναγνωριστικά της εφαρμογής και επιτυγχάνει σύνδεση στην πλατφόρμα, στη συνέχεια υπολογίζει την απόσταση όπως αναφέρθηκε παραπάνω και το νούμερο που προκύπτει το στέλνει στην εφαρμογή μέσω του LoRa. Οι μετρήσεις καθορίστηκε να γίνονται ανά 5 λεπτά κυρίως για λόγους επίβλεψης των αποτελεσμάτων. Για την παρούσα εφαρμογή ένα διάστημα 24 ωρών θεωρείται πιο λογικό.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε ότι κάποιες φορές η αποστολή του μηνύματος στην πλατφόρμα αποτύγχανε. Για το λόγο αυτό στον κώδικα υπήρξε η απαίτηση πριν ο αισθητήρας προχωρήσει σε καινούρια μέτρηση να υπάρξει αποστολή του προηγούμενου μηνύματος στην πλατφόρμα. Τελικά παρατηρήθηκε ότι αποτυχία αποστολής υπήρχε όταν υπήρχε αίτημα για πολύ συχνή αποστολή δεδομένων. Για αποστολή ανά 5 λεπτά ή αραιότερα δεν υπήρξε καμία αποτυχημένη απόπειρα αποστολής. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε επισυνάπτεται στο Παράρτημα Α.

### 4.7.3. Επεξεργασία Μηνυμάτων στο TTN

Προκειμένου να μειωθεί ο μεταφερόμενος όγκος δεδομένων όσο το δυνατόν περισσότερο, ορίστηκε πως το μόνο μήνυμα που θα φτάνει στην πλατφόρμα από την πλακέτα θα ήταν ο αριθμός που προέκυπτε ως απόσταση. Από κει και έπειτα ωστόσο, το μήνυμα έπρεπε να εμπλουτιστεί με κομμάτια κειμένου (πχ. μονάδα μέτρησης) αλλά και να αξιολογηθεί το κατά πόσο η στάθμη βρίσκεται σε επικίνδυνο σημείο και συνεπώς ο κάδος απαιτεί άδειασμα. Όλα τα παραπάνω αποφασίστηκε να γίνονται στην πλατφόρμα, μετά τη λήψη των δεδομένων από την πλακέτα.

Η πλατφόρμα TTN παρέχει αποκωδικοποιητή που επιτρέπει την επεξεργασία των μηνυμάτων. Πρακτικά πρόκειται για κώδικα Javascript στον οποίο μπορεί να παρέμβει ο χρήστης, ο οποίος εφαρμόζεται σε όσα μηνύματα λαμβάνονται στην εκάστοτε εφαρμογή και τα μορφοποιεί αντίστοιχα. Για την παρούσα εφαρμογή ο κώδικας έπρεπε να επιτυγχάνει τα εξής:

- Αποκωδικοποίηση το μηνύματος από το δυαδικό σύστημα σε συμβολοσειρά.
- Αξιολόγηση της στάθμης του κάδου βάσει της απόστασης αισθητήρα-αντικειμένου.
- Προβολή μηνύματος για την ανάγκη αδειάσματος του κάδου ή όχι.

Στον κώδικα που δημιουργήθηκε, λήφθηκε ως οριακή απόσταση του αισθητήρα από το αντικείμενο τα 40cm. Η στάθμη αυτή πρακτικά αντιστοιχεί στο 70% του ωφέλιμου ύψους του κάδου (που είχε οριστεί ως προδιαγραφή) αφού, από το Σχήμα 32 είναι:

$$\text{ύψος καπακιού} = 128\text{cm} - 118\text{cm} = 10\text{cm}$$

$$\text{ωφέλιμο ύψος} = 128\text{cm} - 10\text{cm} - 20\text{cm} = 98\text{cm}$$

Άρα, όταν η απόσταση αισθητήρα-αντικειμένου είναι 40cm, αυτό σημαίνει ότι έχουν απομείνει ελεύθερα 30cm του ωφέλιμου ύψους.

Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι η οριακή στάθμη για κάθε Δήμο μπορεί να είναι διαφορετική αφού εξαρτάται από τη συχνότητα των δρομολογίων, την πληθυσμιακή κατανομή και άλλους παράγοντες. Ο κώδικας στο TTN είναι πλήρως παραμετροποιήσιμος και μπορεί να προσαρμοστεί κατάλληλα στις ανάγκες οποιουδήποτε Δήμου. Στις παρακάτω Εικόνες φαίνεται ο τρόπος παρουσίασης των μηνυμάτων στην πλατφόρμα μετά τη μορφοποίηση τους από τον αποκωδικοποιητή. Ο κώδικας που συντάχθηκε παρουσιάζεται στο Παράρτημα Α.

▲ 14:17:28	6	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 33 33	DecodedMessage: "Warning!! Waste at a critical level of 33 cm"
▲ 14:10:27	0	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 35	DecodedMessage: "Warning!! Waste at a critical level of 15 cm"

**Εικόνα 11:** Μηνύματα που προβάλλονται και υποδηλώνουν ότι ο κάδος θα πρέπει σύντομα να αδειάσει

▲ 14:13:57	3	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 39 32	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 92 cm"
▲ 14:16:18	5	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 37 38	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 178 cm"

**Εικόνα 12:** Μηνύματα που προβάλλονται και υποδηλώνουν ότι ο κάδος δεν απαιτείται να αδειάσει



## 4.8. Βελτιστοποίηση Δρομολογίου Αποκομιδής

Η λήψη δεδομένων σχετικά με τη στάθμη του εκάστοτε κάδου χωρίς την κατάλληλη αξιοποίηση αυτών δε θα είχε νόημα. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκε κώδικας που λαμβάνοντας ως δεδομένα τις στάθμες των κάδων σε μία δεδομένη γεωγραφική περιοχή και τις αποστάσεις μεταξύ αυτών βελτιστοποιεί το δρομολόγιο που θα πρέπει να πραγματοποιήσει το απορριμματοφόρο. Με τον όρο βελτιστοποίηση δρομολογίου εννοείται η εύρεση της συντομότερης χιλιομετρικά διαδρομής για το απορριμματοφόρο, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους των καυσίμων, της χρήσης του οχήματος και δεδομένου ότι αναφερόμαστε σε μικρές σχετικά γεωγραφικά περιοχές τη μείωση του χρόνου αποκομιδής.

### 4.8.1. Περιγραφή του Προβλήματος

Το πρόβλημα εύρεσης του βέλτιστου δρομολογίου του απορριμματοφόρου από τα σημεία συλλογής των απορριμμάτων αποτελεί παράδειγμα μίας ευρύτερης κατηγορίας προβλημάτων που είναι γνωστή ως πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή. Πιο συγκεκριμένα, πρόκειται για την εύρεση της ταχύτερης διαδρομής, αν η αντικειμενική συνάρτηση είναι η απόσταση, ή γενικότερα την εύρεση διαδρομής από ένα σύνολο κόμβων που ελαχιστοποιεί μια συνάρτηση κόστους, υπό τους περιορισμούς ότι η διέλευση στον κάθε κόμβο είναι υποχρεωτική και πραγματοποιείται μία μόνο φορά, όπως επίσης ότι τα σημεία της αφετηρίας και του τερματισμού ταυτίζονται. Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιήθηκε μια μικρή παραλλαγή του παραπάνω προβλήματος, καθώς δεν ήταν επιθυμητή η επιστροφή του απορριμματοφόρου στο σημείο έναρξης (παρεμβάλλεται ο σταθμός μεταφόρτωσης) παρά μόνο ο υπολογισμός της βέλτιστης διαδρομής έως και τον τελευταίο κόμβο. Οι πλέον αναγνωρισμένες μέθοδοι επίλυσης είναι ο αλγόριθμος των Heinritz και Hsiao, ο αλγόριθμος Branch and Bound των Land και Doig, καθώς και εξελικτικοί αλγόριθμοι.

### 4.8.2. Αλγόριθμος Επίλυσης

Ως μέθοδος επίλυσης του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος των Heinritz και Hsiao, λόγω της απλότητας των μαθηματικών υπολογισμών και της εύρεσης λύσης πολύ κοντά στη βέλτιστη. Δημιουργήθηκε κώδικας σε Fortran 90 βασισμένος στον προαναφερόμενο αλγόριθμο, εμπλουτισμένος με διαδικασίες που αφορούν το προς επίλυση πρόβλημα. Αρχικά, ο κώδικας διαβάζει από το αρχείο Initial\_conditions.dat τον συνολικό αριθμό των κάδων ( $n$ ), καθώς και των αύξοντα αριθμό του κάδου από τον οποίο θα ξεκινήσει (ID\_start). Στην συνέχεια από το αρχείο Capacity.dat, το οποίο εμπεριέχει δύο στήλες με την πρώτη να αναφέρεται στον αύξοντα αριθμό του εκάστοτε κάδου (ID number) και την δεύτερη να αποτελείται από άσους και μηδενικά, ελέγχει τους προς αποκομιδή κάδους και υπολογίζει το πλήθος τους ( $n_{full}$ ). Η τιμή μηδέν αντιστοιχεί σε κάδο που δεν χρειάζεται αποκομιδή ενώ η τιμή ένα στην αντίθετη περίπτωση. Τέλος, ως αρχεία εισόδου διαβάζει τα αρχεία Rbnn.dat, όπου η αντιστοιχεί στον αύξοντα αριθμό του εκάστοτε προς αποκομιδή κάδου. Το κάθε αρχείο Rbnn.dat αποτελείται από δύο στήλες, όπου η πρώτη περιέχει τον αύξοντα αριθμό όλων των κάδων και η δεύτερη την απόσταση μεταξύ του κάδου με αύξοντα αριθμό  $n$  και του εκάστοτε κάδου. Παράδειγμα της δομής των παραπάνω αρχείων παρουσιάζεται παρακάτω :

**Πίνακας 26: Παράδειγμα δομής του αρχείου Initial Conditions.dat**

Initial_conditions.dat	
	4
	1

**Πίνακας 27: Παράδειγμα δομής του αρχείου Capacity.dat**

Capacity.dat	
1	1
2	0
3	1
4	1

**Πίνακας 28: Παραδείγματα δομής των αρχείων Rbnn.dat**

Rb01.dat		Rb02.dat		Rb03.dat		Rb04.dat	
1	0	1	70	1	50	1	100
2	70	2	0	2	60	2	40
3	50	3	60	3	0	3	90
4	100	4	40	4	90	4	0

Στην συνέχεια ο κώδικας αφού διαβάσει τα παραπάνω δεδομένα, κατασκευάζει ένα αρχείο ID\_number το οποίο περιέχει τους αύξοντες αριθμούς των κάδων που χρειάζονται άδεια καθώς επίσης και ένα αρχείο Distances το οποίο περιέχει έναν πίνακα διάστασης ( $n\_full \times n\_full$ ), όπου το κελί  $i, j$  δείχνει την απόσταση του κάδου  $i$  από τον κάδο  $j$ . Με βάση το παραπάνω παράδειγμα τα αρχεία που θα δημιουργηθούν θα είναι της μορφής :

**Πίνακας 29: Παράδειγμα δομής του αρχείου ID\_number**

ID_number	
	1
	3
	4

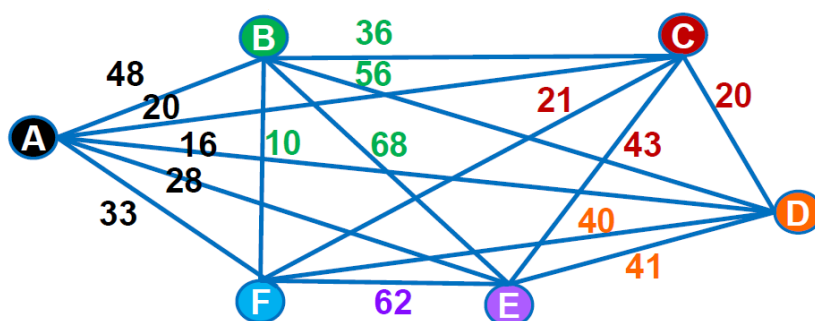
**Πίνακας 30: Παράδειγμα δομής του αρχείου Distances**

Distances		
0	50	100
50	0	90
100	90	0

Σημειώνεται ότι το αρχείο Distances είναι απαραίτητο στοιχείο του αλγορίθμου των Heinritz και Hsiao. Η εφαρμογή του αλγορίθμου και ο τρόπος λειτουργίας του ακολουθούν στην συνέχεια. Στο τέλος, ο κώδικας δημιουργεί τα αρχεία Final\_path και Total\_distance, τα οποία περιέχουν την τελική διαδρομή και απόσταση αντίστοιχα. Ο κώδικας επισυνάπτεται στο Παράρτημα Α.

### 4.8.3. Έλεγχος Αξιοπιστίας Αλγορίθμου

Για να εξακριβωθεί η αξιοπιστία του κώδικα καθώς και να παρουσιαστεί αναλυτικότερα ο αλγόριθμος των Heipritz και Hsiao, χρησιμοποιήθηκε το παρακάτω πρόβλημα του οποίου η λύση είναι δημοσιευμένη (Ρεντιζέλας, 2020) παράδειγμα που υπάρχει στις διαφάνειες που αφορούν το πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή, του μαθήματος Επιχειρησιακή Έρευνα Ι. Τα δεδομένα του προβλήματος παρουσιάζονται στο ακόλουθο Σχήμα.



Σχήμα 34: Σχηματική αναπαράσταση του προβλήματος και των δεδομένων αυτού

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σκοπός της επίλυσης του παραπάνω προβλήματος είναι η εύρεση της διαδρομής εκείνης που θα ελαχιστοποιήσει τη διανυόμενη απόσταση, ώστε ξεκινώντας από τον κόμβο A να γίνει διέλευση από όλους τους κόμβους και έπειτα επιστροφή στον αρχικό κόμβο, A.

#### 4.8.3.1. Αναλυτική Επίλυση

Διαμορφώνοντας κατάλληλα τα δεδομένα εισόδου, δημιουργείται ο παρακάτω Πίνακας που καταγράφει τις αποστάσεις από τον κάθε κόμβο προς όλους τους άλλους.

Πίνακας 31: Εποπτικός πίνακας των αποστάσεων κάθε κόμβου από όλους τους άλλους

	A	B	C	D	E	F
A	0	48	20	16	28	33
B	48	0	36	56	68	10
C	20	36	0	20	43	21
D	16	56	20	0	41	40
E	28	68	43	41	0	62
F	33	10	21	40	62	0

Ξεκινώντας από το σημείο αφετηρίας, όπου στην προκειμένη περίπτωση είναι το σημείο A, αναζητείται ο κόμβος της στήλης A που απέχει την μικρότερη απόσταση από το A. Παρατηρούμε ότι είναι ο κόμβος D. Συνεπώς, η διαδρομή ξεκινάει ως εξής: A → D.

Πίνακας 32: Πρώτο στάδιο καθορισμού βέλτιστης διαδρομής

	A	B	C	D	E	F
A	0	48	20	16	28	33
B	48	0	36	56	68	10
C	20	36	0	20	43	21
D	16	56	20	0	41	40

<b>E</b>	28	68	43	41	0	62
<b>F</b>	33	10	21	40	62	0

Από τον Πίνακα των αποστάσεων διαγράφεται η σειρά του κόμβου εκκίνησης (A) και με τον ίδιο τρόπο συνεχίζεται η διαδικασία, έχοντας ως αφετηρία αυτή τη φορά τη στήλη του κόμβου τερματισμού (D).

**Πίνακας 33: Δεύτερο στάδιο καθορισμού βέλτιστης διαδρομής**

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
<b>A</b>	0	48	20	16	28	33
<b>B</b>	48	0	36	56	68	10
<b>C</b>	20	36	0	20	43	21
<b>D</b>	16	56	20	0	41	40
<b>E</b>	28	68	43	41	0	62
<b>F</b>	33	10	21	40	62	0

Η διαδρομή μέχρι στιγμής θα είναι  $A \rightarrow D \rightarrow C$ . Από τον Πίνακα των αποστάσεων διαγράφεται η σειρά του κόμβου εκκίνησης (D) και με τον ίδιο τρόπο συνεχίζεται η διαδικασία, έχοντας ως αφετηρία αυτή τη φορά τη στήλη του κόμβου τερματισμού (C).

**Πίνακας 34: Τρίτο στάδιο καθορισμού βέλτιστης διαδρομής**

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
<b>A</b>	0	48	20	16	28	33
<b>B</b>	48	0	36	56	68	10
<b>C</b>	20	36	0	20	43	21
<b>D</b>	16	56	20	0	41	40
<b>E</b>	28	68	43	41	0	62
<b>F</b>	33	10	21	40	62	0

Η διαδρομή μέχρι στιγμής θα είναι  $A \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow F$ . Από τον Πίνακα των αποστάσεων διαγράφεται η σειρά του κόμβου εκκίνησης (C) και με τον ίδιο τρόπο συνεχίζεται η διαδικασία, έχοντας ως αφετηρία αυτή τη φορά τη στήλη του κόμβου τερματισμού (F).

**Πίνακας 35: Τέταρτο στάδιο καθορισμού βέλτιστης διαδρομής**

	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
<b>A</b>	0	48	20	16	28	33
<b>B</b>	48	0	36	56	68	10
<b>C</b>	20	36	0	20	43	21
<b>D</b>	16	56	20	0	41	40
<b>E</b>	28	68	43	41	0	62
<b>F</b>	33	10	21	40	62	0

Η διαδρομή μέχρι στιγμής θα είναι  $A \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow F \rightarrow B$ . Από τον Πίνακα των αποστάσεων διαγράφεται η σειρά του κόμβου εκκίνησης (F) και με τον ίδιο τρόπο συνεχίζεται η διαδικασία, έχοντας ως αφετηρία αυτή τη φορά τη στήλη του κόμβου τερματισμού (B).

**Πίνακας 36: Πέμπτο στάδιο καθορισμού βέλτιστης διαδρομής**

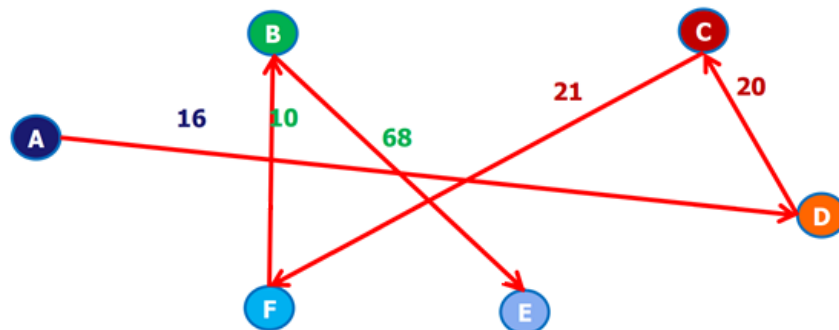
	A	B	C	D	E	F
A	0	48	20	16	28	33
B	48	0	36	56	68	10
C	20	36	0	20	43	21
D	16	56	20	0	41	40
E	28	68	43	41	0	62
F	33	10	21	40	62	0

**Πίνακας 37: Τελικό στάδιο καθορισμού βέλτιστης διαδρομής**

	A	B	C	D	E	F
A	0	48	20	16	28	33
B	48	0	36	56	68	10
C	20	36	0	20	43	21
D	16	56	20	0	41	40
E	28	68	43	41	0	62
F	33	10	21	40	62	0

Η τελική διαδρομή θα είναι  $A \rightarrow D \rightarrow C \rightarrow F \rightarrow B \rightarrow E$ . Η διανυόμενη απόσταση κατά το πέρασμα από όλους τους κόμβους (δεν υπολογίζεται η επιστροφή στο A γιατί στη παρούσα εφαρμογή δε θα συμβεί) θα είναι:

$$d = 16 + 20 + 21 + 10 + 68 = 135$$



**Σχήμα 35:** Απεικόνιση της τελικά σχηματιζόμενης διαδρομής

#### 4.8.3.2. Επίλυση με τη χρήση Κώδικα

Το ίδιο πρόβλημα λύθηκε και με χρήση του κώδικα που δημιουργήθηκε. Τα αρχεία εισόδου ήταν τα παρακάτω.

**Πίνακας 38: Το αρχείου Initial Conditions.dat του παραδείγματος**

Initial_conditions.dat
6
1

**Πίνακας 39: Το αρχείο Capacity.dat του παραδείγματος**

<b>Capacity.dat</b>	
1	1
2	1
3	1
4	1
5	1
6	1

**Πίνακας 40: Τα αρχεία Rbnn.dat του παραδείγματος**

<b>Rb01.dat</b>	
1	0
2	48
3	20
4	16
5	28
6	33

<b>Rb02.dat</b>	
1	48
2	0
3	36
4	56
5	68
6	10

<b>Rb03.dat</b>	
1	20
2	36
3	0
4	20
5	43
6	21

<b>Rb04.dat</b>	
1	16
2	56
3	20
4	0
5	41
6	40

<b>Rb05.dat</b>	
1	28
2	68
3	43
4	41
5	0
6	62

<b>Rb06.dat</b>	
1	33
2	10
3	21
4	40
5	62
6	0

Μετά το τρέξιμο του αλγορίθμου τα αρχεία εξόδου που προέκυψαν ήταν τα παρακάτω.

**Πίνακας 41: Το αρχείο εξόδου Final Path του παραδείγματος**

<b>Final Path</b>
1
4
3
6
2
5

Η απόσταση που υπολογίζει είναι 135.

Παρατηρείται λοιπόν ότι τόσο η αναλυτική λύση όσο και ο κώδικας δίνουν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα.

## 5. Έλεγχοι Λειτουργίας και Προτάσεις Βελτίωσης

### 5.1. Έλεγχος Ικανοποίησης Προδιαγραφών

Αφού το πρωτότυπο ολοκληρώθηκε, έπρεπε να αξιολογηθούν τα χαρακτηριστικά της μετρητικής διάταξης και του καλύμματος.

#### 5.1.1. Έλεγχος Χαρακτηρισμού Κρίσιμης Στάθμης

Ως κρίσιμη στάθμη κάδου είχε οριστεί το 70% του ωφέλιμου ύψους του κάδου. Αυτή η τιμή μεταφράστηκε σε απόσταση και αποτέλεσε την τιμή μετά την οποία η πλατφόρμα επιστρέφει το μήνυμα, «Warning! Waste at a critical level of \_\_\_ cm». Συνεπώς, θεωρείται ότι η δεδομένη προδιαγραφή ικανοποιείται. Επιπλέον, ικανοποιείται και η απαίτηση για εύκολη παραμετροποίηση του ποσοστού αυτού, καθώς με ακριβώς τον ίδιο κώδικα μια αλλαγή στο ποσοστό αρκεί για να αλλάξει το σημείο κρίσιμης στάθμης.

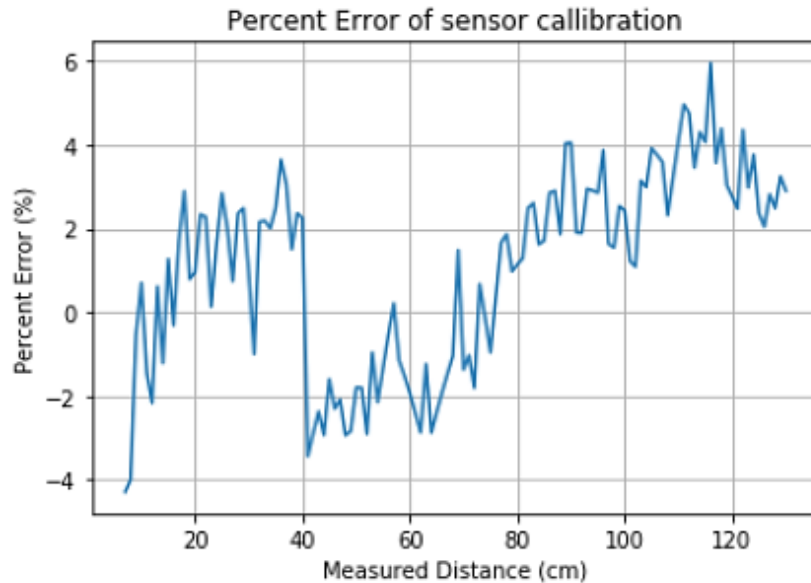
#### 5.1.2. Έλεγχος Εγκυρότητας Μετρήσεων

Ως μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση της μετρούμενης στάθμης του κάδου από την πραγματική είχε οριστεί αυτή του 10%. Μετά το πείραμα που εκπονήθηκε στο Κεφάλαιο 4.6. για να γίνει έλεγχος της καμπύλης του αισθητήρα υπήρχαν για κάθε 1cm από το 1-150cm 100 μετρήσεις απόστασης. Πρακτικά, οι 100 αυτές μετρήσεις είναι το αποτέλεσμα που θα λαμβανόταν αν το πείραμα εκτελούταν 100 φορές και κάθε φορά λαμβανόταν μία μέτρηση της απόστασης. Θεωρείται ότι 100 πειράματα δίνουν την απαραίτητη στατιστική επάρκεια για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Από τις 100 μετρήσεις λήφθηκε ο μέσος όρος και το νούμερο αυτό χρησιμοποιήθηκε στη συνάρτηση του αισθητήρα για τον υπολογισμό της μετρούμενης απόστασης. Το ποσοστό του σφάλματος μέτρησης υπολογίστηκε από τον τύπο:

$$\% \text{ Σφάλμα} = \frac{\text{Πραγματική} - \text{Μετρούμενη Απόσταση}}{\text{Πραγματική Απόσταση}} \cdot 100\%$$

και παρουσιάζεται στο παρακάτω Διάγραμμα. Ο κώδικας που γράφτηκε για τη δημιουργία του Διαγράμματος επισυνάπτεται στο Παράρτημα Α.



**Διάγραμμα 16:** Ποσοστό σφάλματος μεταξύ μετρούμενης και πραγματικής απόστασης αντικειμένου-αισθητήρα

Όπως είναι εμφανές, η απόκλιση μεταξύ πραγματικής και μετρούμενης απόστασης είναι, στο διάστημα ενδιαφέροντος, μικρότερη από το 10%. Μάλιστα, φαίνεται ότι τελικά η προδιαγραφή που ικανοποιείται είναι το σφάλμα να είναι μικρότερο ή ίσο του 6%.

### 5.1.3. Έλεγχος Συχνότητας Μετρήσεων

Στις προδιαγραφές της συσκευής είχε καθοριστεί ως συχνότητα για τις μετρήσεις η μία ημέρα. Για να γίνει έλεγχος της ικανοποίησης της παραπάνω προδιαγραφής, η μετρητική διάταξη τέθηκε σε λειτουργία με τον κώδικα να επιβάλλει την εξαγωγή μέτρησης και αποστολή της στην πλατφόρμα ανά μία ημέρα. Η μετρητική διάταξη δούλεψε για έξι συνεχόμενες ημέρες και τα αποτελέσματα που λήφθηκαν στην πλατφόρμα ήταν αυτά που φαίνονται στην Εικόνα 13.

time	counter	port					
▲ 12:18:49	6	2	confirmed	devid: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 36	DecodedMessage: "Warning!! Waste at a critical level of 16 cm"	
▲ 12:20:57	5	2	confirmed	devid: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 30 36	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 106 cm"	
▲ 12:22:47	4	2	confirmed	devid: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 39 39	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 99 cm"	
▲ 12:24:48	3	2	confirmed	devid: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 35 32	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 152 cm"	
▲ 12:26:56	2	2	confirmed	devid: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 36 33	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 163 cm"	
▲ 12:28:47	1	2	confirmed	devid: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 33 30	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 130 cm"	

**Εικόνα 13:** Έξι διαδοχικές μετρήσεις, ανά μία ημέρα η καθεμία

Όπως είναι εμφανές, η πλακέτα έστειλε κάθε μέρα, επιτυχώς, ένα μήνυμα μέτρησης της στάθμης στην πλατφόρμα. Μικρές διαφορές στον ακριβή χρόνο που έφτανε το μήνυμα στην πλατφόρμα πιθανόν οφείλονται στον χρονοισμό της πλακέτας. Σε κάθε περίπτωση είναι ιδιαίτερα μικρές και δεν επηρεάζουν την ικανότητα του συστήματος να στέλνει τις μετρήσεις στην πλατφόρμα κάθε ημέρα.



#### 5.1.4. Έλεγχος Αυτονομίας Συσκευής

Ως απαραίτητο χρονικό διάστημα αυτονομίας είχαν καθοριστεί τα 5 έτη. Ο αισθητήρας που επιλέχθηκε έχει κατανάλωση ρεύματος 33mA, η πλακέτα 104μΑ (αμελητέα) και η μπαταρία χωρητικότητα 2500mAh. Συνεπώς θα είναι:

$$\text{ώρες λειτουργίας} = \frac{2500 \text{ mAh}}{33 \text{ mA}} = 75,76 \text{ ώρες}$$

$$\text{λεπτά λειτουργίας} = 75,76 \text{ ώρες} \cdot 60 \frac{\text{λεπτά}}{\text{ώρα}} = 4545,6 \text{ λεπτά}$$

Αν θεωρήσουμε ότι ο αισθητήρας θα λειτουργεί 1 φορά την ημέρα, για 2 λεπτά κάθε φορά (η μετρητική διάταξη δεν χρειάζεται πάνω από ένα λεπτό από τη στιγμή της ενεργοποίησής της για να στείλει το μήνυμα) τότε θα έχουμε:

$$\text{ημέρες λειτουργίας} = \frac{4545,6 \text{ λεπτά}}{2 \frac{\text{λεπτά}}{\text{ημέρα}}} = 2272,8 \text{ ημέρες}$$

$$\text{έτη λειτουργίας} = \frac{2272,8 \text{ ημέρες}}{365 \frac{\text{ημέρες}}{\text{έτος}}} = 6,2 \text{ έτη}$$

Ως εκ τούτου, η προδιαγραφή για την αυτονομία ικανοποιείται. Βέβαια, στην πράξη τα 5 έτη λειτουργίας πιθανά θα ήταν λιγότερα, δεδομένου ότι η ενεργειακή αυτονομία της συσκευής υπολογίστηκε βάσει των χαρακτηριστικών λειτουργίας που παρείχαν οι κατασκευαστές των τμημάτων της μετρητικής διάταξης και ίσως να μην είναι ακριβή. Σε κάθε περίπτωση, τα 5 έτη φαίνεται να είναι μία καλή προσέγγιση της αυτονομίας της συσκευής.

#### 5.1.5. Έλεγχος Αντοχής και Ανθεκτικότητας Καλύμματος

Σε σχέση με τον σχεδιασμό του καλύμματος, το κατασκευαστικό σχέδιο καλύπτει τις απαιτήσεις ως προς το βάρος και την σφιχτή/στιβαρή σύνδεση των εξαρτημάτων σε αυτό. Το κάλυμμα δεν εκτυπώθηκε ώστε να μπορεί να ελεγχθεί πειραματικά η αντοχή και ανθεκτικότητά του σε κραδασμούς και προσκρούσεις, ωστόσο βάσει των σχεδίων φαίνεται πως η προδιαγραφή ικανοποιείται.

#### 5.1.6. Έλεγχος Στεγανότητας Καλύμματος

Σε σχέση με τον σχεδιασμό του καλύμματος, το κατασκευαστικό σχέδιο καλύπτει τις απαιτήσεις ως προς τη στεγανότητα στη σύνδεση των δύο διαιρετών τμημάτων του καλύμματος. Ειδικότερα, η στεγανότητα επιτυγχάνεται με τη δημιουργία αρσενικής και θηλυκής διαμόρφωσης καθώς και με την παρεμβολή ελαστικής φλάντζας μεταξύ των δύο μερών. Επιπλέον, το γεγονός πως το κάλυμμα δεν βιδώνεται κατευθείαν στο καπάκι του κάδου αλλά τοποθετείται σε ειδική βάση καθιστά την ανάγκη διάνοιξης οπών από τις οποίες ενδεχομένως να γινόταν εισαγωγή σκόνης και νερού, όχι απαραίτητη.

### 5.1.7. Έλεγχος Σύνδεσης σε Πλατφόρμα

Κατά την εκπόνηση πειραμάτων σχετικά με τον μέγιστο ρυθμό αποστολής μηνυμάτων στην πλατφόρμα παρατηρήθηκε ότι η πλατφόρμα μπορεί να δέχεται νέα δεδομένα ανά περίπου ένα λεπτό. Όταν το διάστημα μεταξύ των αποστολών μειωνόταν σε λιγότερο από ένα λεπτό υπήρχαν θέματα συνδεσιμότητας και κάποια μηνύματα καθυστερούσαν να σταλούν. Αυτό οφείλεται σε περιορισμούς που θέτει η πλατφόρμα TTN ώστε να αποφευχθεί συμφόρηση του δικτύου και να επιτευχθεί μία δίκαιη εξυπηρέτηση για όλους τους χρήστες. Έτσι, ανάλογα το μέγεθος (χρονική διάρκεια αποστολής) του μηνύματος καθορίζεται ένα χρονικό διάστημα αναμονής πριν να επιτραπεί η εκ νέου αποστολή μηνυμάτων. Στην παρούσα εφαρμογή το διάστημα αυτό ήταν περίπου ένα λεπτό. Στην Εικόνα που ακολουθεί φαίνονται τα μηνύματα που στάλθηκαν στην πλατφόρμα όταν ορίστηκε στον κώδικα να παίρνει μετρήσεις ανά ένα λεπτό.

▲ 14:22:10	10	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 30 36	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 106 cm"
▲ 14:21:00	9	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 33 31	DecodedMessage: "Warning!! Waste at a critical level of 31 cm"
▲ 14:19:49	8	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 36	DecodedMessage: "Warning!! Waste at a critical level of 16 cm"
▲ 14:18:39	7	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 39 39	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 99 cm"
▲ 14:17:28	6	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 33 33	DecodedMessage: "Warning!! Waste at a critical level of 33 cm"
▲ 14:16:18	5	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 37 38	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 178 cm"
▲ 14:15:08	4	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 30	DecodedMessage: "Warning!! Waste at a critical level of 10 cm"
▲ 14:13:57	3	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 39 32	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 92 cm"
▲ 14:12:47	2	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 32 36	DecodedMessage: "Warning!! Waste at a critical level of 26 cm"
▲ 14:11:36	1	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 32 36	DecodedMessage: "Warning!! Waste at a critical level of 26 cm"
▲ 14:10:27	0	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 35	DecodedMessage: "Warning!! Waste at a critical level of 15 cm"

**Εικόνα 14:** Αποστολές μηνυμάτων στην πλατφόρμα για μετρήσεις ανά 1 λεπτό

Όπως είναι εμφανές, τα μηνύματα δεν στέλνονται ακριβώς ανά 1 λεπτό αλλά ανά περίπου 1 λεπτό και 10 δευτερόλεπτα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έχει οριστεί στον κώδικα να μετράει, να στέλνει, να περιμένει ένα λεπτό και στη συνέχεια να ξαναρχίζει τη διαδικασία. Συνεπώς, ο χρόνος των 10 δευτερολέπτων περίπου αντιστοιχεί στο χρόνο που κάνει να μετρήσει και να στείλει το μήνυμα. Αυτό γίνεται εμφανές και από τη χρονική διαφορά μεταξύ ενεργοποίησης της συσκευής και αποστολής του πρώτου μηνύματος που φαίνεται στην Εικόνα 15.

▲ 14:10:27	0	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 35	DecodedMessage: "Warning!! Waste at a critical level of 15 cm"	
⚡ 14:10:08				dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	dev addr: 26 01 46 B1	app eui: 70 B3D57ED003 B1D2	dev eui: A8 610A 33 35 2

**Εικόνα 15:** Ενεργοποίηση συσκευής και αποστολή του πρώτου μηνύματος μέτρησης

Πράγματι, υπολογίζεται ότι ο χρόνος μέτρησης και αποστολής είναι σχεδόν 20 δευτερόλεπτα, πολύ μικρότερος δηλαδή από 1 λεπτό. Παρόλα αυτά, όπως αναλύθηκε και παραπάνω χρόνοι αναμονής κάτω του 1 λεπτού δημιουργούσαν προβλήματα στην αποστολή. Σε κάθε περίπτωση πάντως η προδιαγραφή αποστολής ενός μηνύματος ανά 1 ώρα που είχε οριστεί αρχικά ικανοποιείται και αυτό φαίνεται στην Εικόνα 16.

time	counter	port					
▲ 12:10:57	14	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 36 33	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 163 cm"	
▲ 11:10:48	13	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 36 33	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 163 cm"	
▲ 10:10:40	12	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 36 35	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 165 cm"	
▲ 09:10:31	11	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 36 35	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 165 cm"	
▲ 08:10:22	10	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 36 37	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 167 cm"	
▲ 07:10:13	9	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 36 38	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 168 cm"	
▲ 06:10:04	8	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 37 30	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 170 cm"	
▲ 05:09:55	7	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 36 38	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 168 cm"	
▲ 04:09:45	6	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 36 38	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 168 cm"	
▲ 03:09:37	5	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 37 30	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 170 cm"	
▲ 02:09:28	4	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 37 30	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 170 cm"	
▲ 01:09:19	3	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 36 33	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 163 cm"	
▲ 24:09:11	2	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 36 33	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 163 cm"	
▲ 23:09:03	1	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 36 33	DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of 163 cm"	
▲ 22:08:53	0	2	confirmed	dev id: <a href="#">mkr wan 1310</a>	payload: 31 34	DecodedMessage: "Warning!! Waste at a critical level of 14 cm"	

**Εικόνα 16:** Αποστολές μηνυμάτων στην πλατφόρμα για μετρήσεις ανά 1 ώρα

Προδιαγραφή της πλατφόρμας επίσης ήταν να παρέχει τη δυνατότητα απευθείας ανάλυσης των μηνυμάτων. Και αυτή η προδιαγραφή ικανοποιείται, αφού ανάλογα τη στάθμη που λαμβάνεται ως μέτρηση, η πλατφόρμα αποκωδικοποιεί το μήνυμα από δεκαεξαδικό σύστημα σε δεκαδικό και στη συνέχεια προβάλλει το κατάλληλο μήνυμα σε σχέση με την ύπαρξη ή όχι κρίσιμης στάθμης στον κάδο (Εικόνα 14).

#### 5.1.8. Έλεγχος Βιωσιμότητας - Επεκτασιμότητας

Ως τελευταία προδιαγραφή του συστήματος είχε οριστεί η εφαρμογή να είναι βιώσιμη και να έχει προοπτικές επεκτασιμότητας. Η LoRa τεχνολογία που επιλέχθηκε έχει τεράστιες προοπτικές επεκτασιμότητας καθώς αν ο Δήμος προχωρήσει στην αγορά σταθμών βάσης και τους τοποθετήσει σε υψηλά σημεία οι σταθμοί αυτοί θα μπορούν να εξυπηρετήσουν πάρα πολλές έξυπνες συσκευές δίνοντας έτσι τη δυνατότητα δημιουργίας μιας έξυπνης πόλης. Φυσικά, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και κάποια εγγενή στοιχεία του περιβάλλοντος που συναντώνται στις πόλεις καθώς για παράδειγμα η παρεμβολή κτιρίων, δέντρων και άλλων εμποδίων μπορούν να μειώσουν το βεληνεκές μετάδοσης λόγω διάθλασης, αντανάκλασης και διασκόρπισης των κυμάτων. Αυτός είναι και ο λόγος που προτείνεται οι σταθμοί βάσης να τοποθετηθούν σε ψηλά σημεία που δεν συναντούν εμπόδια.

#### 5.2. Βελτιώσεις - Προτάσεις

Κατά την ολοκλήρωση του πρωτοτύπου και τα πειράματα που εκπονήθηκαν σημειώθηκαν κάποιες προτάσεις που θα καθιστούσαν τη συσκευή αποδοτικότερη. Οι βασικές προτάσεις - βελτιώσεις παρατίθενται παρακάτω.

### 5.2.1. Τύπος Αισθητήρα

Ο αισθητήρας υπέρυθρων που επιλέχθηκε είναι σημειακός. Αυτό στην παρούσα εφαρμογή δεν αποτέλεσε πρόβλημα αφού πάντα μετριόταν η κατακόρυφη απόσταση του αισθητήρα από ένα αρκετά μεγάλο αντικείμενο. Στην πραγματική χρήση της συσκευής σε κάδο, ωστόσο, ένας σημειακός αισθητήρας θα ήταν αναποτελεσματικός αφού η στάθμη των στερεών απορριμμάτων αποκλείεται να είναι ομογενής σε όλα τα σημεία του κάδου. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα θα πρέπει είτε να χρησιμοποιηθούν παραπάνω από ένας αισθητήρας (πολύ κοστοβόρο) ή να επιλεγθεί άλλος, πιο κατάλληλος, τύπος αισθητήρα. Καταλληλότερος τύπος αισθητήρα φαίνεται να είναι τελικά ο αισθητήρας υπερήχων κι αυτό αποδεικνύεται και από το γεγονός ότι όλες οι ανταγωνιστικές συσκευές χρησιμοποιούν τέτοιον τύπο αισθητήρα.

Επιπλέον, ο αισθητήρας που επιλέχθηκε είχε αρκετά υψηλή κατανάλωση ρεύματος και αυτό μείωσε δραστικά τη διάρκεια ζωής της συσκευής. Και σε αυτό το πρόβλημα τη λύση φαίνεται να προσφέρουν οι αισθητήρες υπερήχων αφού με βάση το Διάγραμμα 4 (σελίδα 66) καταναλώνουν αρκετά μικρότερη ποσότητα ρεύματος.

### 5.2.2. Κόστος Συσκευής

Το κόστος του πρωτοτύπου που κατασκευάστηκε το καθιστά απαγορευτικό για μαζική χρήση από τους Δήμους. Ωστόσο, επειδή πρόκειται για πρωτότυπο, το κόστος δεν είναι αντιπροσωπευτικό μιας και τα εξαρτήματα δεν επιλέχθηκαν βάσει κόστους και πολλές φορές υπερκάλυπταν τις ανάγκες της εφαρμογής. Σε μαζική παραγωγή, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μία πλακέτα με πολύ μικρή υπολογιστική δύναμη που ως κύριο χαρακτηριστικό της θα έχει τη δυνατότητα επικοινωνίας με την τεχνολογία LoRa. Επιπλέον, το κόστος του αισθητήρα θα μπορούσε να μειωθεί με την παραγγελία μεγάλους πλήθους κομματιών ενώ ταυτόχρονα με τον ίδιο τρόπο θα μπορούσε να μειωθεί και το μοναδιαίο κόστος της μπαταρίας.

### 5.2.3. Αισθητήρας Κλίσης

Οι αισθητήρες υπέρυθρων είναι σημειακοί και όπως αναφέρθηκε παραπάνω το κάλυμμα θα τοποθετηθεί στο καπάκι του κάδου. Συνεπώς, για να λαμβάνονται μετρήσεις που έχουν νόημα θα πρέπει το καπάκι του κάδου να είναι κλειστό ώστε ο αισθητήρας να «κοιτάζει» προς τα κάτω. Για να αποφευχθούν περιπτώσεις που το καπάκι του κάδου είναι ανοιχτό και παρόλα αυτά λαμβάνονται μετρήσεις, προτείνεται να ενσωματωθεί στη μετρητική διάταξη και ένας αισθητήρας κλίσης. Ο αισθητήρας αυτός θα λειτουργεί ως διακόπτης που όταν θα εντοπίζει κλίση άνω κάποιων ορισμένων μοιρών θα στέλνει ως μήνυμα το 1 και με αυτόν τον τρόπο θα σταματούν οι μετρήσεις από τον αισθητήρα ενώ όταν στέλνει το μήνυμα 0 οι χρήστες θα γνωρίζουν ότι ο κάδος βρίσκεται με το καπάκι κλειστό.

### 5.2.4. Περιοδική Απενεργοποίηση του Αισθητήρα

Μία έξυπνη επιλογή, που αναφέρθηκε παραπάνω ωστόσο δεν υλοποιήθηκε στην παρούσα εφαρμογή, είναι η περιοδική απενεργοποίηση του αισθητήρα μέσω του pin enabled. Με αυτόν τον τρόπο, έχουμε εξοικονόμηση ενέργειας και κατά συνέπεια αύξηση της διάρκειας ζωής της συσκευής. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, που οι

μετρήσεις θα λαμβάνονται μία ή δύο φορές την ημέρα, η απενεργοποίηση του αισθητήρα στις νεκρές ώρες είναι υψίστης σημασίας.

#### 5.2.5. Αποστολή Μηνυμάτων από το TTN

Η πλατφόρμα που επιλέχθηκε, το TTN, παρέχει τη δυνατότητα αποστολής downlink μηνυμάτων από την πλατφόρμα στην πλακέτα. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσε να παραμετροποιείται η συχνότητα των μετρήσεων από κάθε Δήμο ξεχωριστά χωρίς να απαιτείται η παρέμβαση των υπαλλήλων στον κώδικα του Arduino. Επίσης, είναι εφικτό να ορίζεται από τους υπαλλήλους του Δήμου το πότε θα απενεργοποιείται ο αισθητήρας ανάλογα με τις ανάγκες του συστήματος.

#### 5.2.6. Κάλυμμα

Περιθώρια βελτίωσης, όσον αφορά στο κάλυμμα, εντοπίζονται αρχικά στη σύνδεση καλύμματος και αισθητήρα. Ειδικότερα, η τοποθέτηση του στην οπή δεν εξασφαλίζει τη μη εισχώρηση υγρών και σκόνης, οπότε ενδεχομένως να μπορεί να τοποθετηθεί κάποια μορφή σιλικόνης στην οπή η οποία δε δύναται να φανεί στο σχέδιο. Επιπλέον, υπάρχουν περιθώρια ανάπτυξης καλύτερων τρόπων συγκράτησης της μπαταρίας λιθίου με σχεδίαση αποσπώμενου πλαισίου το οποίο θα τοποθετείται πάνω από αυτή και θα τη συγκρατεί περιμετρικά. Τέλος, η ίδια η επιλογή υλικού έχει περιθώρια βελτίωσης προκειμένου να βρεθεί ένα υλικό με μεγαλύτερη αντοχή και ανθεκτικότητα στη θερμοκρασία.

Όσον αφορά στη σχεδίαση της βάσης υπάρχουν περιθώρια περαιτέρω μελέτης και βελτίωσης ως προς το κλείδωμα της και την αποτροπή κλοπής της συσκευής. Επιπλέον, ο τρόπος σύνδεσης της βάσης με το καπάκι του κάδου μπορεί να πραγματοποιηθεί με κοχλιοσύνδεση, παρόλα αυτά δεν αξιολογείται ως ο καλύτερος τρόπος σύνδεσης και χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

#### 5.2.7. Ασφάλεια Συσκευής

Τα δίκτυα LoRa επιτρέπουν τον εντοπισμό της γεωγραφικής θέσης των συσκευών που τα χρησιμοποιούν. Συνεπώς, αν οι Δήμοι εκμεταλλευτούν αυτή τη δυνατότητα μπορούν να έχουν διαρκή γνώση της τοποθεσίας των συσκευών τους και έτσι αν υπάρξει κλοπή της συσκευής και μετέπειτα χρήση της να μπορούν να την εντοπίσουν. Αυτή είναι μία πρώτη πρόταση αναφορικά με την ασφάλεια των συσκευών, ωστόσο το θέμα απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση καθώς η αγορά των συσκευών αποτελεί επένδυση για τους Δήμους και πρέπει να την προφυλάξουν.

## 6. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως σκοπό τη δημιουργία ενός έξυπνου ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης των απορριμμάτων, που θα μπορούσε να αντικαταστήσει το σημερινό παραδοσιακό σύστημα που χρησιμοποιείται από τις Τοπικές Αρχές. Για τον λόγο αυτόν χρησιμοποιήθηκαν αισθητήρες απόστασης που μπορούσαν ανά πάσα στιγμή να προσδιορίζουν τη στάθμη του κάθε κάδου. Οι αισθητήρες αυτοί, μέσω της σύνδεσής τους σε μία πλακέτα μπορούσαν να διαβιβάζουν τις μετρήσεις σε μία διαδικτυακή πλατφόρμα, στην οποία η εκάστοτε Τοπική Αρχή μπορούσε να έχει πρόσβαση. Σχεδιάστηκε κάλυμμα για τον εγκλεισμό της μετρητικής διάταξης αισθητήρα – πλακέτας και την προστασία της από τις συνθήκες περιβάλλοντος καθώς και βάση στήριξης για την τοποθέτηση του καλύμματος στο καπάκι του κάδου χωρίς να απαιτείται η πάκτωση του καλύμματος σε αυτό.

Βασικός στόχος της εργασίας ήταν να αναδείξει πως τα δίκτυα LoRa είναι ένας καινοτόμος, πολύτιμος σύμμαχος στην ενσωμάτωση του Διαδικτύου των Πραγμάτων στην καθημερινότητα αφού υποστηρίζουν την επικοινωνία μεταξύ έξυπνων συσκευών καθώς και τον γεωεντοπισμό αυτών με ιδιαίτερα ευνοϊκές συνθήκες. Πράγματι, μέσω της δημιουργίας ενός λειτουργικού πρωτοτύπου, της χρήσης και του ελέγχου του φάνηκε πως η μετάδοση πληροφοριών με χρήση των δικτύων LoRa είναι εφικτή και μάλιστα είναι ιδιαίτερα ενεργειακά συμφέρουσα αφού καταναλώνει ελάχιστο ποσό ενέργειας σε σχέση με παλαιότερους τρόπους μετάδοσης πληροφοριών όπως για παράδειγμα τα δίκτυα 3G, προσφέροντας ενεργειακή αυτονομία άνω των 5 ετών.

Φυσικά, η λύση που προτάθηκε επιδέχεται βελτιώσεις ώστε να γίνει πιο αποτελεσματική και πιο οικονομικά προσιτή. Από τεχνολογικής άποψης, οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν - αισθητήρες υπερέθρων – είναι σημειακοί και αυτό συνεπάγεται πως δεν είναι ιδανικοί για μέτρηση στάθμης, ιδιαίτερα όταν αυτή δεν είναι ομογενής παντού όπως συμβαίνει στους κάδους απορριμμάτων. Ιδανικότεροι πιθανά θα ήταν οι αισθητήρες υπερήχων και μάλιστα η χρήση ενός ζεύγους αυτών και όχι μόνο ενός. Επίσης, προτείνεται η χρήση και άλλων αισθητήρων στη μετρητική διάταξη με σκοπό την ολοκληρωμένη παρακολούθηση της κατάστασης των κάδων ανά πάσα στιγμή. Επιγραμματικά αναφέρεται η χρήση αισθητήρα κλίσης στο καπάκι, όπως αυτή αναλύθηκε και στο Κεφάλαιο 5.2.3. και η προσθήκη αισθητήρα θερμοκρασίας για τον εντοπισμό πιθανών αναφλέξεων στον κάδο.

Η λύση, ωστόσο, επιδέχεται βελτιώσεις και από την επιχειρηματική σκοπιά. Το λειτουργικό πρωτότυπο που δημιουργήθηκε, ήταν αρκετά κοστοβόρο και παρείχε αρκετές δυνατότητες που δεν χρειάζονταν στη συγκεκριμένη εφαρμογή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για την παρούσα εργασία αρκούσε η δημιουργία μιας συσκευής που εκπληρώνει τις προδιαγραφές, χωρίς ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον κόστος και την κατανάλωση ενέργειας. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν εκείνο που αποτέλεσε το μεγαλύτερο ποσοστό κόστους της συσκευής και την κατέστησε απαγορευτική για ευρεία χρήση. Σε μία μαζική παραγωγή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυκλώματα, ειδικά διαμορφωμένα, που η βασική τους δυνατότητα θα είναι η υποστήριξη των δικτύων LoRa για την επικοινωνία μεταξύ συσκευών και η δυνατότητα μέτρησης της στάθμης των κάδων. Καμία πρόσθετη λειτουργία δεν απαιτείται και συνεπώς θα πρέπει να αποφεύγεται. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να

μειωθεί και το συνολικό κόστος δημιουργίας των συσκευών και η ενεργειακή κατανάλωση αυτών.

Ως επόμενο βήμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας προτείνεται η εστίαση στην πορεία της πληροφορίας μετά την πλατφόρμα. Πιο συγκεκριμένα, κρίνεται μεγάλης αξίας η δημιουργία μίας εφαρμογής, που θα λαμβάνει τα δεδομένα στάθμης και τοποθεσίας των κάδων από την πλατφόρμα, και θα τα χρησιμοποιεί ως είσοδο του αλγόριθμου βελτιστοποίησης των δρομολογίων, ανά πάσα στιγμή, αυτόματα. Ο αλγόριθμος θα βελτιστοποιεί τα δρομολόγια των απορριμματοφόρων και θα εμφανίζει την προτεινόμενη διαδρομή στις κινητές συσκευές των οδηγών των απορριμματοφόρων, πάνω σε χάρτη. Επιπλέον, χρήσιμη κρίνεται και η επεξεργασία των δεδομένων πληρότητας των κάδων με σκοπό την εξαγωγή στατιστικών δεδομένων για τις διαδικασίες αποκομιδής στους Δήμους.

Τέλος, σημαντικό είναι να μπορέσει να υπάρξει επικοινωνία με κατεύθυνση από το χρήστη προς τις έξυπνες συσκευές, το οποίο ναι μεν γνωρίζουμε ότι το TTN το προσφέρει ως δυνατότητα ωστόσο στην παρούσα εργασία δεν υλοποιήθηκε. Η αμφίδρομη επικοινωνία συσκευής – χρήστη μπορεί να φέρει τεράστια οφέλη στους χρήστες καθώς θα είναι εκείνοι που θα επιλέγουν πότε θα χρησιμοποιηθεί η έξυπνη συσκευή, για πόσο και με ποιον τρόπο. Για παράδειγμα, στην εφαρμογή των απορριμματοφόρων αυτό θα μπορούσε να μεταφραστεί ως ότι οι οδηγοί θα έχουν τη δυνατότητα να ζητήσουν το βέλτιστο δρομολόγιο λίγο πριν ξεκινήσουν τη διαδρομή, εξασφαλίζοντας έτσι ταυτόχρονα επίκαιρα δεδομένα στάθμης αλλά και χρήση της συσκευής στο ελάχιστο δυνατό και άρα αύξηση της διάρκειας ζωής της.



## 7. Βιβλιογραφία

- Adhikary, A., Lin, X., & Wang, Y. P. (2016). Performance evaluation of nb-iot coverage. *IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)*. IEEE.
- Arduino.cc. (2021). *ARDUINO MKR WAN 1300*. Ανάκτηση από Arduino Store: <https://store.arduino.cc/arduino-mkr-wan-1300-lora-connectivity-1414>
- Arduino.cc. (2021). *ARDUINO MKR WAN 1310*. Ανάκτηση από Arduino Store: <https://store.arduino.cc/mkr-wan-1310>
- BehrTech. (2021). *Sub-GHz vs 2.4 GHz ISM Band: 5 Implications for IoT*. Ανάκτηση από BehrTech Blog: <https://behrtech.com/blog/sub-ghz-vs-2-4-ghz-5-implications-for-iot-deployment/>
- Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the iot and smart city scenarios. *Wireless Communications*. 23, σσ. 60-67. IEEE.
- Chuah, J. W. (2014). The internet of things: An overview and new perspectives in systems design. *International Symposium on Integrated Circuits (ISIC)* (σσ. 216-219). IEEE.
- DSM&T. (2021). *IP Rating Chart*. Ανάκτηση από DSM&T: <http://www.dsmt.com/resources/ip-rating-chart/>
- EasyBin. (2021). *Έξυπνοι Κάδοι*. Ανάκτηση από EasyBin: <http://easybin.gr/%ce%ad%ce%be%cf%85%cf%80%ce%bd%ce%bf%ce%b9-%ce%ba%ce%ac%ce%b4%ce%bf%ce%b9/>
- EcoMobile. (2021). *CONTAINER FILL LEVEL MEASURING SYSTEM*. Ανάκτηση από EcoMobile: <https://www.ecomobile.hr/en/products/smart-waste>
- ecoVRS. (2021). *Έξυπνος Κάδος Πόλης Solar Bin*. Ανάκτηση από ecoVRS: <http://www.ecovrs.com/products/solar-bin/>
- EDSNA. (2015, Ιουλίου 27). *ΤΟΠΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ*. Ανάκτηση 2021, από <https://www.edsna.gr/images/pdf/473/%CE%94%CE%97%CE%9C%CE%9F%CE%A5%20%CE%9A%CE%9F%CE%A1%CE%A5%CE%94%CE%91%CE%9B%CE%9B%CE%9F%CE%A5.pdf>
- Eurostat. (2020). *eurostat-Statistics Explained*. Ανάκτηση από ec.europa.eu: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste\\_statistics](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Waste_statistics)
- FACTORY, I. (2021). *Best LORAWAN Network Servers*. Ανάκτηση από IOT FACTORY: <https://iotfactory.eu/products/software-platform/best-lorawan-network-servers/>



- GSMA. (2016). *Mobile IoT*. Ανάκτηση από gsma.com: <https://www.gsma.com/iot/wp-content/uploads/2016/10/3GPP-Low-Power-Wide-Area-Technologies-GSMA-White-Paper.pdf>
- Guardforce. (2021, March 18). *How Smart Bin Technology is Revolutionising Waste Management*. Ανάκτηση από Guardforce: [https://www.guardforce.com.hk/en/news/blog\\_115/How-Smart-Bin-Technology-is-Revolutionising-Waste-Management--Guardforce\\_3901](https://www.guardforce.com.hk/en/news/blog_115/How-Smart-Bin-Technology-is-Revolutionising-Waste-Management--Guardforce_3901)
- Hoang, D. B., & Chen, L. (2010). Mobile cloud for assistive healthcare (mocache). *IEEE Asia-Pacific Services Computing Conference* (σσ. 325-332). IEEE.
- IEC. (2013). *IEC 60529:1989+AMD1:1999+AMD2:2013*.
- Jost, D. (2019, 10 7). *What is an Ultrasonic Sensor?* Ανάκτηση από FIERCE Electronics: <https://www.fierceelectronics.com/sensors/what-ultrasonic-sensor>
- Khulins, C., Rathonyi, B., Zaidi, A., & Hogan, M. (2020). *Evolving Cellular IoT for industry digitalization*. Ανάκτηση 03 03, 2021, από ericsson.com: <https://www.ericsson.com/en/internet-of-things/iot-connectivity/cellular-iot>
- LoRa Alliance. (2021). *About LoRa Alliance*. Ανάκτηση από lora-alliance.org: <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance/>
- Margelis, G., Piechocki, R., Kaleshi, D., & Thomas, P. (2015). Low throughput networks for the iot: Lessons learned from industrial implementations. *2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)* (σσ. 181-186). IEEE.
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2017). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment.
- Michele Zorzi, A. C. (2003). Wireless Communications. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, σσ. 851-874.
- Nasralla, M. M., Ognenoski, O., & Martini, M. G. (2013). Bandwidth scalability and efficient 2D and 3D video transmission over LTE networks. *International Conference on Communications Workshops (ICC)* (σσ. 617-621). Budapest: IEEE.
- Neumann, P., Montavont, J., & Noel, T. (2016). Indoor deployment of low-power wide area networks (lpwan): A lorawan case study. *IEEE 12th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)* (σσ. 1-8). IEEE.
- Nolan, K. E., Guibene, W., & Kelly, M. Y. (2016). An evaluation of low power wide area network technologies for the internet of things. *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)* (σσ. 439-444). IEEE.
- Patel, D. (2018). Low Power Wide Area Networks (LPWAN):Technology Review And Experimental Study on Mobility Effect. *Electronic Theses and Dissertations*, 6-35.

- pololu. (2021). *Pololu Carrier with Sharp GP2Y0A60SZLF Analog Distance Sensor 10-150cm, 3V*. Ανάκτηση από pololu:  
<https://www.pololu.com/product/2476/specs>
- Portland State, U. (2021). Light Detection and Ranging (LiDAR).
- Ramon, S. (2015). *A Technical Overview of LoRa and LoRaWAN*. California, USA: LoRa-Alliance.
- Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low Power Wide Area Networks: An Overview. *Communications Surveys & Tutorials*. 19, σσ. 855-873. IEEE.
- Recytrust. (2021). *Technology*. Ανάκτηση από Recytrust:  
<https://www.recytrust.com/technology>
- Reynders, B., & Pollin, S. (2016). Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication. *Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT)* (σσ. 1-5). IEEE.
- Sanchez-Iborra, R., & Cano, M. D. (2016). State of the Art in LP-WAN Solutions for Industrial IoT Services. *Sensors*.
- Semtech. (2021). *LoRa: DNA of IoT*. Ανάκτηση από semtech.com:  
<https://www.semtech.com/lora>
- Seubert, C. (2017, 04 25). *How Do Laser Distance Meters Work?* Ανάκτηση από SCIENCING: <https://sciencing.com/do-laser-distance-meters-work-6332366.html>
- Sforza, F. (2013). *United States Ευρεσιτεχνία Αρ. US8406275B2*.
- Shawn. (2020). *SeedStudio*. Ανάκτηση από Types of Distance Sensor and How to select one?: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/12/23/distance-sensors-types-and-selection-guide/>
- Sigfox. (2021). *Customers*. Ανάκτηση από sigfox.com:  
<https://www.sigfox.com/en/customers>
- Sigfox. (2021). *Sigfox*. Ανάκτηση από sigfox.com: <https://www.sigfox.com/en>
- Simplify3D. (2021). *Filament Properties Table*. Ανάκτηση από Simplify3D:  
<https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/properties-table/?filas=abs,pla,hips,petg,asa>
- Sornin, N., Luis, M., Eirich, T., Kramp, T., & Hersent, O. (2016). *Lorawan specification V1.0.2*. Lora-Alliance.
- sparkfun. (2021). *DISTANCE SENSOR COMPARISON GUIDE*. Ανάκτηση από sparkfun: [https://www.sparkfun.com/distance\\_sensor\\_comparison\\_guide](https://www.sparkfun.com/distance_sensor_comparison_guide)

- Spincraft. (2017). *Microchip lorawan class presentation*. Ανάκτηση από spincraft.com: <http://www.spincraft.com/hackers/wp-content/uploads/2017/01/LoRaWAN101-Class-v2-MARCOM-1.pdf>
- TERABEE. (2021). *Choosing the Right Distance Sensor for Your Application*. Ανάκτηση από TERABEE: <https://www.terabee.com/choosing-right-distance-sensor-your-application/>
- TheThingsNetwork. (2021). *LoRaWAN*. Ανάκτηση από TheThingsNetwork: <https://www.thethingsnetwork.org/docs/index.html>
- TheThingsNetwork. (2021). *Map*. Ανάκτηση από TheThingsNetwork: <https://www.thethingsnetwork.org/map>
- Vodafone. (2021). *Smart Bins Management*. Ανάκτηση από Vodafone: <https://www.vodafone.gr/business/products-solutions/iot/smart-bins-management/>
- Wang, F., & Liu, J. (2011). Networked Wireless Sensor Data Collection: Issues, Challenges, and Approaches. *Communications Surveys & Tutorials*. 13, σσ. 673-687. IEEE.
- Wang, Y. P., Lin, X., Adhikary, A., Grovlen, A., Sui, Y., Blankenship, Y., . . . Razaghi, H. S. (2017). A primer on 3gpp narrowband internet of things (nb-iot). *IEEE Communications Magazine*, 55, 117-123.
- Wasser, L. A. (2020, 10 07). *The Basics of LiDAR*. Ανάκτηση από neon: <https://www.neonscience.org/resources/learning-hub/tutorials/lidar-basics>
- Wixted, A., Kinnaird, P., Tait, A., Ahmadinia, A., & Strachan, N. (2016). Evaluation of lora and lorawan for wireless sensor networks. *IEEE Sensors* (σσ. 1-3). IEEE.
- Γεωργιοπούλου, Τ. (2020). Δήμοι δείχνουν τον δρόμο στη διαχείριση απορριμμάτων. *Η Καθημερινή*.
- Γιαμαρέλλου, Ε. (2005). *Λοιμώξεις και αντιμικροβιακή χημειοθεραπεία*. Ιατρικές Εκδόσεις Λίτσας.
- Γραμματικογιάννης, Η. (2009). Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων από Χώρους Διάθεσης Απορριμμάτων, Ανάλυση Κύκλου Ζωής. *Διεπιστημονικό - Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Ε.Μ.Πολυτεχνείου "Περιβάλλον και Ανάπτυξη"*.
- ENVIROPLAN. (2020). *ΕΣΔΑ-ΕΣΔΕΑ*. Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας.
- Θεοδωρίδης, Γ. Ν. (2011). Ανάλυση και Βελτιστοποίηση Εφοδιαστικής Αλυσίδας Συλλογής Αστικών Στερεών Απορριμμάτων - Εφαρμογή στο Δήμο Κορυδαλλού., (σσ. 45-72).
- Λουρίδας, Π. (2021). *Ιδιαιτερότητες Διοίκησης Έργων Πληροφορικής*.
- Ρεντζέλας, Α. (2020). *Το Πρόβλημα του Περιοδούμενου Πωλητή*.

Χαραλάμπους, Α. (2018). Ανάκτηση από <https://www.oeb.org.cy>:  
[https://www.oeb.org.cy/wp-content/uploads/2018/11/05-  
ACharalambous\\_Solid\\_Waste\\_2018.pdf](https://www.oeb.org.cy/wp-content/uploads/2018/11/05-ACharalambous_Solid_Waste_2018.pdf)

# Παράρτημα Α - Κώδικες

## A.1. Κώδικας Calibration

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας που γράφτηκε στο Arduino IDE για την εκπόνηση του πρώτου πειράματος (calibration). Μέσω του κώδικα ο αισθητήρας λαμβάνει 500 τιμές για κάθε απόσταση αντικειμένου και στη συνέχεια παρέχει χρόνο στον χρήστη ώστε να μετακινήσει το αντικείμενο κατά 1cm πιο μακριά.

```
/*=====
IR-Sensor Calibration Script
=====
-How to connect the sensor to the Arduino:
  sensor - arduino
    VCC - VCC pin (3V)
    GND - GND pin
    OUT - A1 pin
    EN - Do not connect

-Purpose:
This Arduino script can be used for conveniently measuring data from the Pololu
Carrier
with Sharp GP2Y0A60SZLF Analog Distance Sensor 10-150cm, 3V sensor in order
to calibrate it.

-Usage:
Begin using this script by setting the calibration parameters. The user can set
the set of distances to be measured by the counter, the step between consecutive
distances, the number of measurements per distance and the idle time that can be
used in order to set-up the next experiment. By uploading the script to an Arduino,
values from the sensor will be sent to the Serial Monitor of the connected computer.
Then, by pressing (Ctrl + Shift + M) in the Tools tab the user can observe the
measured
data and keep a log (usage of Putty is suggested) that will be used to calibrate
the sensor. Throughout the process, messages will be printed that will aid the user
to complete the experiments.
=====*/
// Set up the calibration parameters
int measurements_per_experiment = 500; //The number of values measured for a
(fixed) distance
int starting_experiment = 1; //The first distance (in cm) for which values should be
measured
int final_experiment = 150; //The last distance (in cm) for which values should be
measured
int experiment_step = 1; //The distance (in cm) between two consecutive
experiments
int wait_time = 5; //The idle time (in sec) between two consecutive experiments
```

```

// Define variables to be used in the loop
int sensor_value; //Saves the value measured by the sensor
int measurement_cntr = 1; //Saves the measurement index for the current experiment
int cur_exp = starting_experiment; //Saves the index of the current experiment

// Setup routine
void setup() {
  // Initialize serial communication at 9600 bits per second:
  Serial.begin(9600);
}

// Loop routine
void loop() {

  // Read the input on analog pin 1:
  sensor_value = analogRead(A1);

  // Print the measurement:
  Serial.print(" Experiment for ");
  Serial.print(cur_exp);
  Serial.print("cm - Measurement ");
  Serial.print(measurement_cntr);
  Serial.print(" - Value ");
  Serial.println(sensor_value);

  // Check Termination of Experiment
  if (measurement_cntr == measurements_per_experiment) {
    // Print that the experiment is over
    Serial.print("Experiment for ");
    Serial.print(cur_exp);
    Serial.println("cm has ended.");

    // Idle time until next experiment
    Serial.print("Prepare the next experiment. You have ");
    Serial.print(wait_time);
    Serial.println(" seconds.");
    delay(1000*wait_time);

    // Print that a new experiment start
    Serial.println("New experiment starts.");

    // Set-up counter
    measurement_cntr = 1;

    // Check if the new experiment is valid - else reset
    cur_exp = cur_exp + experiment_step;
    if (cur_exp > final_experiment) {

```

```

    cur_exp = starting_experiment;
  }
}

else {
  // Begin a new measurement
  measurement_cntr = measurement_cntr + 1;
  // Give the sensor time to reset
  delay(20);
}
}
}

```

## A.2. Κώδικας Testing

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας που γράφτηκε στο Arduino IDE για την εκπόνηση του δεύτερου πειράματος (testing). Μέσω του κώδικα ο αισθητήρας λαμβάνει 100 τιμές για κάθε απόσταση αντικειμένου και στη συνέχεια υπολογίζει τον μέσο όρο τους. Μέσω του μέσου όρου των μετρήσεων υπολογίζει την απόσταση του αντικειμένου με χρήση της συνάρτησης του αισθητήρα. Στη συνέχεια, παρέχει χρόνο στον χρήστη ώστε να μετακινήσει το αντικείμενο κατά 1cm πιο μακριά.

```

/*=====
IR-Sensor Testing Script
=====
-How to connect the sensor to the Arduino:
  sensor - arduino
  VCC - VCC pin (3V)
  GND - GND pin
  OUT - A1 pin
  EN - Do not connect

-Purpose:
This Arduino script can be used for conveniently measuring data from the Pololu
Carrier
with Sharp GP2Y0A60SZLF Analog Distance Sensor 10-150cm, 3V sensor and test
whether the
implemented mapping from analog voltage to distance is an acceptable
approximation
of the measured distance .

-Usage:
Begin using this script by setting the testing parameters. This script will log
a series of measurements for each distance from 1cm to 150cm, with a step of 1cm.
The user can set the number of measurements per distance and the idle time
between
consecutive experiments. This script computes the average measurement for each

```

distance (a number in [0,1023]) and uses an implemented mapping to predict a measured distance in cms. Both the true distance and the measured distance are printed,

so that the user can observe them in the Serial Monitor and test the accuracy of the sensor's calibration. Throughout the process, messages will be printed that will aid the user to complete the experiments.

```
=====*/

// Set up the testing parameters
int measurements_per_result = 100; //The number of measurements per experiment
int wait_time = 5; //The idle time (in sec) between two consecutive experiments

// Define variables to be used in the loop
int sensor_value; //Saves the value measured by the sensor
int measurement_cntr = 1; //Saves the measurement index for the current result
int measurement_sum = 0; //Sum of measurements for current experiment
int average; //Used to store the average measurement
double distance; //Used to store the measured distance.
int true_distance = 2; //Used to define the distance of the experiment.

// Constants that will be used for the mapping from digital signal to distances
// These values have been pre-determined by the calibration of the sensor.
double c0=268.3445281960439956492336932569742202758789;
double c1=-1.4524644085141484861622984681162051856518;
double c2=0.0035802019766784875208498473142526563606;
double c3=-0.0000047390124066520012503572409356955575;
double c4=0.0000000034706504664180602367727765720064;
double c5=-0.0000000000013200984853924941847242186871;
double c6=0.00000000000000002024286755390761949988004;

double K0=c0-2*c2+12*c4-120*c6;
double K1=2*c1-12*c3+120*c5;
double K2=4*c2-48*c4+720*c6;
double K3=8*c3-160*c5;
double K4=16*c4-480*c6;
double K5=32*c5;
double K6=64*c6;

// Setup routine
void setup() {
  // Initialize serial communication at 9600 bits per second:
  Serial.begin(9600);
  // Create a 5sec delay and start the experiment for the first distance.
  delay(5000);
  Serial.print("True distance is 1 cm. ");
}

// Loop routine
```



```

void loop() {

    // Read the input on analog pin 1:
    sensor_value = analogRead(A1);

    // Add the value to the sum.
    measurement_sum = measurement_sum + sensor_value;

    // Check Termination of Experiment
    if (measurement_cntr == measurements_per_result) {

        // Compute average
        average = measurement_sum/measurements_per_result;

        // Compute distance function
        distance = K6*pow(average,6) + K5*pow(average,5) + K4*pow(average,4)
+   K3*pow(average,3) +K2*pow(average,2) + K1*average + K0;

        // Print result
        Serial.print("Measured Distance is ");
        Serial.print(distance);
        Serial.println(" cm.");

        // Idle time until next experiment
        Serial.print("Prepare the next experiment. You have ");
        Serial.print(wait_time);
        Serial.println(" seconds.");
        delay(1000*wait_time);

        // Print that a new experiment start
        Serial.print("True distance is ");
        Serial.print(true_distance);
        Serial.println(" cm. ");

        // Set-up counters for the next experiment
        measurement_cntr = 1;
        measurement_sum = 0;
        true_distance = true_distance+1;
    }
    else {
        // Begin a new measurement
        measurement_cntr = measurement_cntr + 1;
        // Give the sensor time to reset
        delay(20);
    }
}
}

```

### A.3. Επεξεργασία μετρήσεων Calibration

Ο κώδικας που συντάχθηκε για την επεξεργασία των μετρήσεων του πειράματος Calibration και τη δημιουργία διαγραμμάτων γράφηκε σε Python και παρουσιάζεται παρακάτω.

```
# Move to the directory of the experimental data
import os
os.chdir("../Data-Logs")

# Open the file with the calibration data
file1 = open('./CalibrationData', 'r')

# Create a list of 150 lists to store data
data = []
for i in range(150):
    data.append([])

# Parse all the lines of the file, one by one
Lines = file1.readlines()
for line in Lines:
    # Split line on "-" character
    sets = line.strip().split("-")
    # Check if it is a valid line with data. If yes, recover data
    if (len(sets)==3):
        # First number in line is the distance of the object
        dist = int("".join(c for c in sets[0] if c.isdigit()))
        # Third number in line is the value of the sensor
        value = int("".join(c for c in sets[2] if c.isdigit()))
        # Store the value in the appropriate position
        data[dist-1].append(value)

# Compute the average value for each distance
average = [sum(l)/len(l) for l in data]

# Compute the standard deviation for each distance
import statistics
st_dev = [statistics.stdev(l) for l in data]

# Create a vector with all the distances for which measurements were taken.
dist = [i for i in range(1,151)]
# Plot the average value for each distance
import matplotlib.pyplot as plt
plt.plot(dist, average)
plt.title("Average Sensor Output (Digital)")
plt.xlabel("Distance (cm)")
plt.ylabel("Average Digital Output")
```

```

plt.grid()
plt.show()

# Plot the average voltage output of the sensor for each distance
plt.plot(dist, [i/1023*3.3 for i in average])
plt.title("Average Sensor Measurement (Analog)")
plt.xlabel("Distance (cm)")
plt.ylabel("Average Output (V)")
plt.grid()
plt.show()

# Plot the standard deviation of the output for each distance
plt.plot(dist, st_dev)
plt.title("Standard Deviation of Sensor Output")
plt.xlabel("Distance (cm)")
plt.ylabel("Standard Deviation")
plt.grid()
plt.show()

# Compare the experimental voltage curve with the specs of the sensor

# First, define the curve included in the sensor's specs
x_points = [10,20,30,50,70,85,100,125,150]
y_points = [1.9, 1.05, 0.8, 0.55, 0.46, 0.44, 0.42, 0.4, 0.37]
plt.plot(x_points, y_points)
plt.title("Specification Curve of Sensor")
plt.xlabel("Distance (cm)")
plt.ylabel("Output (V)")
plt.show()

# Compare the curves
plt.plot(x_points, y_points)
plt.plot(dist, [i/1023*3.3 for i in average])
plt.title("Compariton of Spec Curve and Experimental Curve")
plt.xlabel("Distance (cm)")
plt.ylabel("Output (V)")
plt.legend(["Specs Curve", "Experiment Curve"])
plt.show()

# Crop the data, by keeping the average output for distances between 6 and 130 cms
.
cropped_average = average[5:130]
plt.title("Cropped Average Measurement from sensor")
plt.xlabel("Distance (cm)")
plt.plot(cropped_dist, cropped_average)
plt.show()

```

```

# Invert the 1-1 cropped function
def inverse_data(x_in,y_out,value):
    return x_in[y_out.index(min(y_out, key=lambda x:abs(x-value)))]

sensor_measure = [i for i in range(60,700)]
sensor_distance = [inverse_data(cropped_dist,cropped_average,i) for i in sensor_m
easure]
plt.title("Inverted Function")
plt.xlabel("Sensor Output")
plt.ylabel("Distance (cm)")
plt.plot(sensor_measure,sensor_distance)
plt.show()

# Used physicist's hermite polynomials to approximate the inverted function

# Experiment to find the minimum order for which the approximation is decent
inv_coef = hermfit(sensor_measure, sensor_distance, 2)
dist_fit = hermval(sensor_measure, inv_coef, tensor=True)

plt.title("Fitting data with Hermit polynomials of 2nd order")
plt.xlabel("Sensor Output")
plt.ylabel("Distance (cm)")
plt.plot(sensor_measure,sensor_distance)
plt.plot(sensor_measure,dist_fit)
plt.legend(["Experimental Curve", "Approximated Curve"])
plt.show()

inv_coef = hermfit(sensor_measure, sensor_distance, 4)
dist_fit = hermval(sensor_measure, inv_coef, tensor=True)

plt.title("Fitting data with Hermit polynomials of 4th order")
plt.xlabel("Sensor Output")
plt.ylabel("Distance (cm)")
plt.plot(sensor_measure,sensor_distance)
plt.plot(sensor_measure,dist_fit)
plt.legend(["Experimental Curve", "Approximated Curve"])
plt.show()

inv_coef = hermfit(sensor_measure, sensor_distance, 5)
dist_fit = hermval(sensor_measure, inv_coef, tensor=True)

plt.title("Fitting data with Hermit polynomials of 5th order")
plt.xlabel("Sensor Output")
plt.ylabel("Distance (cm)")
plt.plot(sensor_measure,sensor_distance)
plt.plot(sensor_measure,dist_fit)
plt.legend(["Experimental Curve", "Approximated Curve"])
plt.show()

```

```

inv_coef = hermitefit(sensor_measure, sensor_distance, 6)
dist_fit = hermiteval(sensor_measure, inv_coef, tensor=True)

plt.title("Fitting data with Hermit polynomials of 6th order")
plt.xlabel("Sensor Output")
plt.ylabel("Distance (cm)")
plt.plot(sensor_measure,sensor_distance)
plt.plot(sensor_measure,dist_fit)
plt.legend(["Experimental Curve", "Approximated Curve"])
plt.show()

# Print the Hermit coefficients that approximate the inverted curve
print(inv_coef)

```

#### A.4. Επεξεργασία μετρήσεων Testing

Ο κώδικας που συντάχθηκε για την επεξεργασία των μετρήσεων του πειράματος Testing και τη δημιουργία διαγραμμάτων γράφτηκε σε Python και παρουσιάζεται παρακάτω.

```

# Open the file with the testing data
import string
file2 = open('./TestingData', 'r')

# Create a list to store the results
test_data = []

# Parse all the lines one by one
Lines = file2.readlines()
for line in Lines:
    # Split lines on "-" character
    if (line.startswith("Measured")):
        # Keep the measurement
        st_line = ".join(c for c in line if (c.isdigit() or c == "."));
        test_data.append(float(st_line[:len(st_line)-1]))

# Compute the measurement error for each distance
error = [abs(dist[i]-test_data[i])/dist[j] for i in range(150)]

# Plot the error
plt.plot(dist,error)
plt.grid()
plt.title("Percent Error of sensor callibration")
plt.xlabel("Measured Distance (cm)")
plt.ylabel("Percent Error (%)")

```

```

plt.show()

# Associate error with the standard deviation of the calibration measurements
plt.plot(dist,error)
plt.plot(dist,st_dev)
plt.grid()
plt.title("Error and Standard Deviation of sensor calibration")
plt.xlabel("Measured Distance (cm)")
plt.legend(["Error","Standard Deviation"])
plt.show()

```

## A.5. Κώδικας First Configuration

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας του Arduino IDE που φορτώθηκε στην πλακέτα MKR WAN 1310 για την εκτύπωση των αναγνωριστικών της και την καταχώρησή της ως συσκευή στην εφαρμογή που δημιουργήθηκε στην πλατφόρμα TTN.

```

/*
  First Configuration
  This sketch demonstrates the usage of MKR WAN 1300/1310 LoRa module.
  This example code is in the public domain.
*/

#include <MKRWAN.h>

LoRaModem modem;

// Uncomment if using the Murata chip as a module
// LoRaModem modem(Serial1);

String appEui;
String appKey;
String devAddr;
String nwkSKey;
String appSKey;

void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(115200);
  while (!Serial);
  Serial.println("Welcome to MKRWAN1300/1310 first configuration sketch");
  Serial.println("Register to your favourite LoRa network and we are ready to go!");
  // change this to your regional band (eg. US915, AS923, ...)
  if (!modem.begin(EU868)) {
    Serial.println("Failed to start module");
    while (1) {}
  }
};

```

```

Serial.print("Your module version is: ");
Serial.println(modem.version());
if (modem.version() != ARDUINO_FW_VERSION) {
    Serial.println("Please make sure that the latest modem firmware is installed.");
    Serial.println("To update the firmware upload the
'MKRWANFWUpdate_standalone.ino' sketch.");
}
Serial.print("Your device EUI is: ");
Serial.println(modem.deviceEUI());

int mode = 0;
while (mode != 1 && mode != 2) {
    Serial.println("Are you connecting via OTAA (1) or ABP (2)?");
    while (!Serial.available());
    mode = Serial.readStringUntil('\n').toInt();
}

int connected;
if (mode == 1) {
    Serial.println("Enter your APP EUI");
    while (!Serial.available());
    appEui = Serial.readStringUntil('\n');

    Serial.println("Enter your APP KEY");
    while (!Serial.available());
    appKey = Serial.readStringUntil('\n');

    appKey.trim();
    appEui.trim();

    connected = modem.joinOTAA(appEui, appKey);
} else if (mode == 2) {

    Serial.println("Enter your Device Address");
    while (!Serial.available());
    devAddr = Serial.readStringUntil('\n');

    Serial.println("Enter your NWS KEY");
    while (!Serial.available());
    nwkSKey = Serial.readStringUntil('\n');

    Serial.println("Enter your APP SKEY");
    while (!Serial.available());
    appSKey = Serial.readStringUntil('\n');

    devAddr.trim();
    nwkSKey.trim();
    appSKey.trim();

```

```

    connected = modem.joinABP(devAddr, nwkSKey, appSKey);
}

if (!connected) {
    Serial.println("Something went wrong; are you indoor? Move near a window and
retry");
    while (1) {}
}

delay(5000);

int err;
modem.setPort(3);
modem.beginPacket();
modem.print("HeLoRA world!");
err = modem.endPacket(true);
if (err > 0) {
    Serial.println("Message sent correctly!");
} else {
    Serial.println("Error sending message :(");
}
}

void loop() {
    while (modem.available()) {
        Serial.write(modem.read());
    }
    modem.poll();
}

```

## A.6. Κώδικας Αποστολής Μετρήσεων στο TTN

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας που γράφτηκε στο Arduino IDE για την αποστολή των μετρήσεων στο TTN. Μέσω του κώδικα ο αισθητήρας παίρνει λαμβάνει 500 τιμές για την απόσταση του αντικειμένου και στη συνέχεια υπολογίζει τον μέσο όρο αυτών. Μέσω του μέσου όρου των μετρήσεων υπολογίζει την απόσταση του αντικειμένου με χρήση της συνάρτησης του αισθητήρα. Επιπλέον, στην αρχή λαμβάνει ως είσοδο ένα αρχείο με τα αναγνωριστικά της εφαρμογής του χρήστη στο TTN έτσι ώστε μετά τον υπολογισμό της απόστασης να αποστέλλει τη μέτρηση στην εφαρμογή του στο TTN. Στην παρούσα μορφή του κώδικα η συσκευή αναμένει ένα λεπτό και στη συνέχεια επανεκκινεί τις μετρήσεις.

```

/*=====
IR-Sensor Application Script
=====
-How to connect the sensor to the Arduino:
sensor - arduino
VCC - VCC pin (3V)

```



GND - GND pin  
OUT - A1 pin  
EN - Do not connect

-How to connect the gateway:

In order to function, this implementation demands the arduino to be CLOSE to a gateway in order

to send data. The gateway has to be connected to the internet via ethernet cable.

The user needs

to be connected to TheThingsNetwork and the credentials need to be supplied via a Credentials.h

file included in the same folder as this script. The device and the application also need to be

registered to TheThingsNetwork

-Purpose:

This Arduino script periodically measures the distance from a sensor (the frequency can be set by

the user) and a message is sent online with the information of the measured distance.

=====\*/

```
#include <HID.h>
```

```
#include <MKRWAN.h>
```

```
#include "Credentials.h"
```

```
LoRaModem modem;
```

```
String appEui = SECRET_APP_EUI;
```

```
String appKey = SECRET_APP_KEY;
```

```
// Set up the testing parameters
```

```
int SAMPLES_PER_MEASUREMENT = 500; //The number of samples per  
measurement
```

```
int FREQUENCY = 60; // The delay between consecutive measurements in sec.
```

```
// Define variables to be used in the loop
```

```
int sensor_value, measurement_sum=0, measurement_cntr=1, average, distance,  
err, error_cntr;
```

```
String msg;
```

```
// Constants that will be used for the mapping from digital signal to distances
```

```
// These values have been pre-determined by the callibration of the sensor.
```

```
double c0=268.3445281960439956492336932569742202758789;
```

```
double c1=-1.4524644085141484861622984681162051856518;
```

```
double c2=0.0035802019766784875208498473142526563606;
```

```
double c3=-0.0000047390124066520012503572409356955575;
```

```
double c4=0.0000000034706504664180602367727765720064;
```

```

double c5=-0.0000000000013200984853924941847242186871;
double c6=0.0000000000000002024286755390761949988004;

double K0=c0-2*c2+12*c4-120*c6;
double K1=2*c1-12*c3+120*c5;
double K2=4*c2-48*c4+720*c6;
double K3=8*c3-160*c5;
double K4=16*c4-480*c6;
double K5=32*c5;
double K6=64*c6;

// Setup routine
void setup() {

  // Initialize serial communication at 9600 bits per second:
  Serial.begin(115200);

  while (!Serial);

  if (!modem.begin(EU868)) {

    Serial.println("Failed to start module");
  };

  int connected = modem.joinOTAA(appEui, appKey);

  if (!connected) {

    Serial.println("Something went wrong; are you indoor? Move near a window and
retry");

  }
  else {
    Serial.println("Connection is good!");
  }
}

// Loop routine
void loop() {

  // Read the input on analog pin 1:
  sensor_value = analogRead(A1);

  // Add the value to the sum.
  measurement_sum = measurement_sum + sensor_value;
}

```

```

// Check Termination of Experiment
if (measurement_cntr == SAMPLES_PER_MEASUREMENT) {

    // Compute average
    average = measurement_sum/SAMPLES_PER_MEASUREMENT;

    // Compute distance function
    distance = K6*pow(average,6) + K5*pow(average,5) + K4*pow(average,4) +
K3*pow(average,3) +K2*pow(average,2) + K1*average + K0;
    msg=String(distance);
    Serial.println("Sending message for " + msg + " cm" );

    error_cntr=0;
    modem.beginPacket();
    modem.print(msg);
    err = modem.endPacket(true);

    while (err <= 0) {
        Serial.println("Error sending message. Attempt number " + String(error_cntr));
        error_cntr = error_cntr+1;
        modem.beginPacket();
        modem.print(msg);
        err = modem.endPacket(true);
        delay(1000);
    }

    Serial.println("Message sent correctly!");

    // Set-up counters for the next experiment
    measurement_cntr = 1;
    measurement_sum = 0;
    Serial.println("On cooldown");
    delay(FREQUENCY*1000);
}
else {
    // Begin a new measurement
    measurement_cntr = measurement_cntr + 1;
    // Give the sensor time to reset
    delay(20);
}
}

```

## A.7. Κώδικας Επεξεργασίας Μηνυμάτων στο TTN

Παρακάτω παρουσιάζεται ο κώδικας που γράφτηκε σε Javascript στο TTN για την επεξεργασία του λαμβανόμενου μηνύματος και την αξιολόγηση της στάθμης του κάδου. Ο κώδικας διαβάζει το σήμα που βρίσκεται σε δυαδικό σύστημα, το μετατρέπει σε νούμερο στο δεκαδικό σύστημα, ελέγχει αν είναι πάνω ή κάτω από 40cm και προβάλλει το κατάλληλο μήνυμα.

```
function Decoder(bytes, port) {
  var number = parseInt(String.fromCharCode.apply(null, bytes))
  if (number < 40) {
    return {
      DecodedMessage: "Warning!! Waste at a critical level of " + String(number) + " cm"
    };
  }
  else {
    return {
      DecodedMessage: "Waste at an acceptable level of " + String(number) + " cm"
    };
  }
}
```

## A.8. Κώδικας Βελτιστοποίησης Δρομολογίου

Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης του δρομολογίου των απορριμματοφόρων, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 4.8. παρουσιάζεται παρακάτω.

```
program TSP
  implicit double precision (a-h,o-z)
  allocatable :: id_number(:),empty(:),dist(:,:),final_path(:),final_path_id(:)
  character (len=len('rbXX.txt')):: file_name

  open(1,file='Initial_conditions.dat')
  read(1,*) n
  read(1,*) id_start
  close(1)

  allocate(empty(n))

  open(1,file='Capacity.dat')
  k=0
  do i=1,n
    read(1,*) numb,empty(i)
    if (empty(i).eq.1.d0) k=k+1
  end do
  close(1)
```

```
n_full=k
```

```
allocate(id_number(n_full))  
allocate(dist(n_full,n_full))  
allocate(final_path(n_full))  
allocate(final_path_id(n_full))
```

```
ii=0  
do i=1,n  
  write(file_name,10) i  
  if (empty(i).eq.1.d0) then  
    ii=ii+1  
    open(1,file=file_name)  
    jj=0  
    do j=1,n  
      if (empty(j).eq.1.d0) then  
        jj=jj+1  
        read(1,*) id_number(jj),dist(ii,jj)  
      else  
        read(1,*)  
      end if  
    end do  
    close(1)  
  end if  
end do
```

```
10 format('Rb',i2.2,'.dat')
```

```
open(1,file='Distances')  
open(2,file='ID_number')  
do i=1,n_full  
  write(1,*) (dist(i,j), j=1,n_full)  
  write(2,*) id_number(i)  
end do  
close(1)  
close(2)
```

```
do i=1,n_full  
  if (id_number(i).eq.id_start) n_start=i  
end do
```

```
do k=1,n_full
```

```
  final_path(k)=n_start
```

```
  distance_minimum=5.d30
```

```
do i=1,n_full
```

```

do j=1,k
  if (i.eq. final_path(j)) then
    flag=1.d0
    goto 20
  else
    flag=0.d0
  end if
end do
20  if (dist(i,n_start).lt.distance_minimum .and. dist(i,n_start).ne.0.d0 .and.
flag.eq.0.d0) then
  distance_minimum=dist(i,n_start)
  id_min=i
end if
end do

n_start=id_min

end do

total_distance=0.d0
do i=1,n_full-1
  l1=final_path(i)
  l2=final_path(i+1)
  total_distance=total_distance+dist(l1,l2)
end do

do i=1,n_full
  k=final_path(i)
  final_path_id(i)=id_number(k)
end do

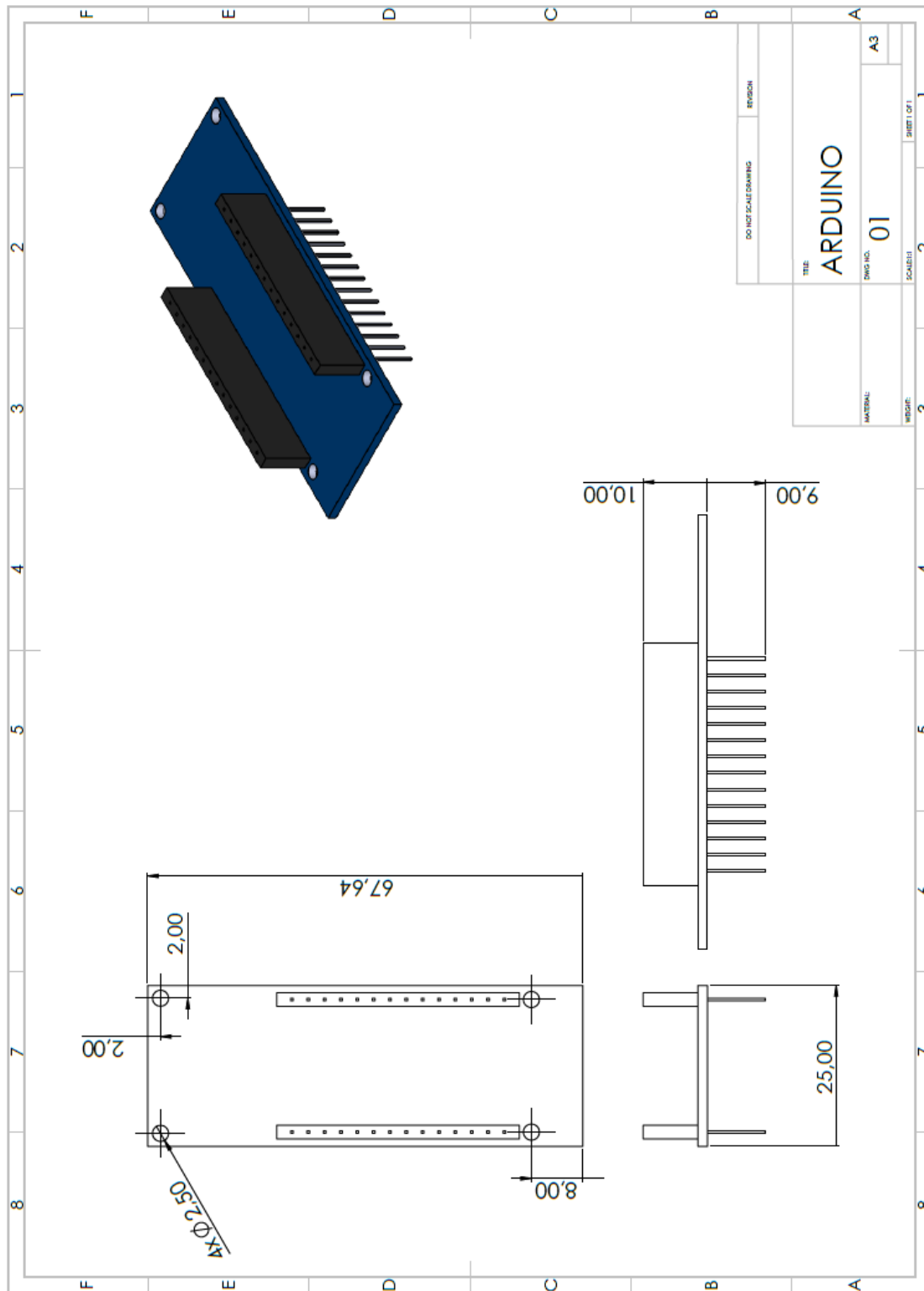
open(1,file='Final_path')
do i=1,n_full
  write(1,*) int(final_path_id(i))
end do
close(1)

open(1,file='Total_distance')
write(1,*) total_distance
close(1)

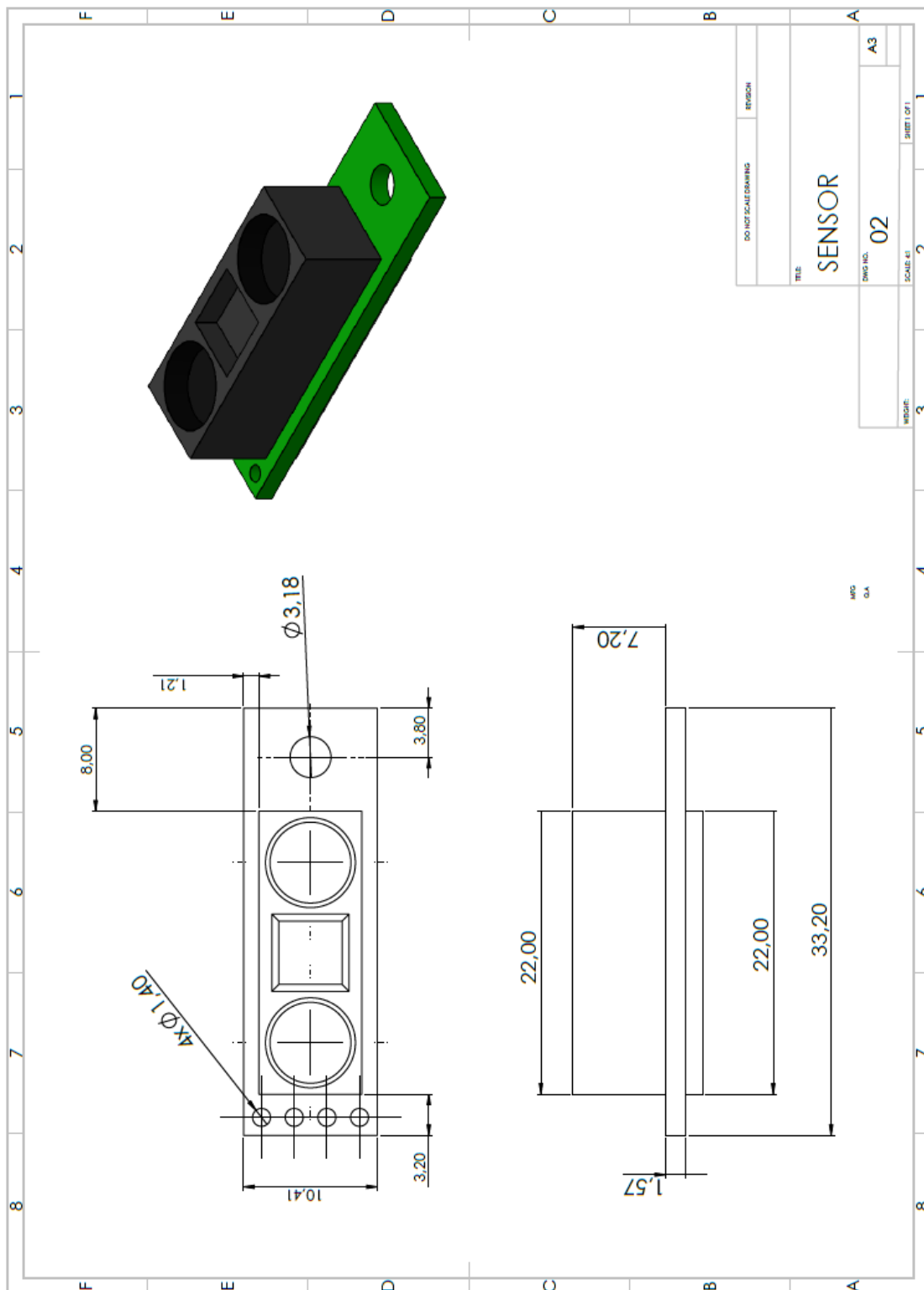
end

```

## Παράρτημα Β - Κατασκευαστικά Σχέδια

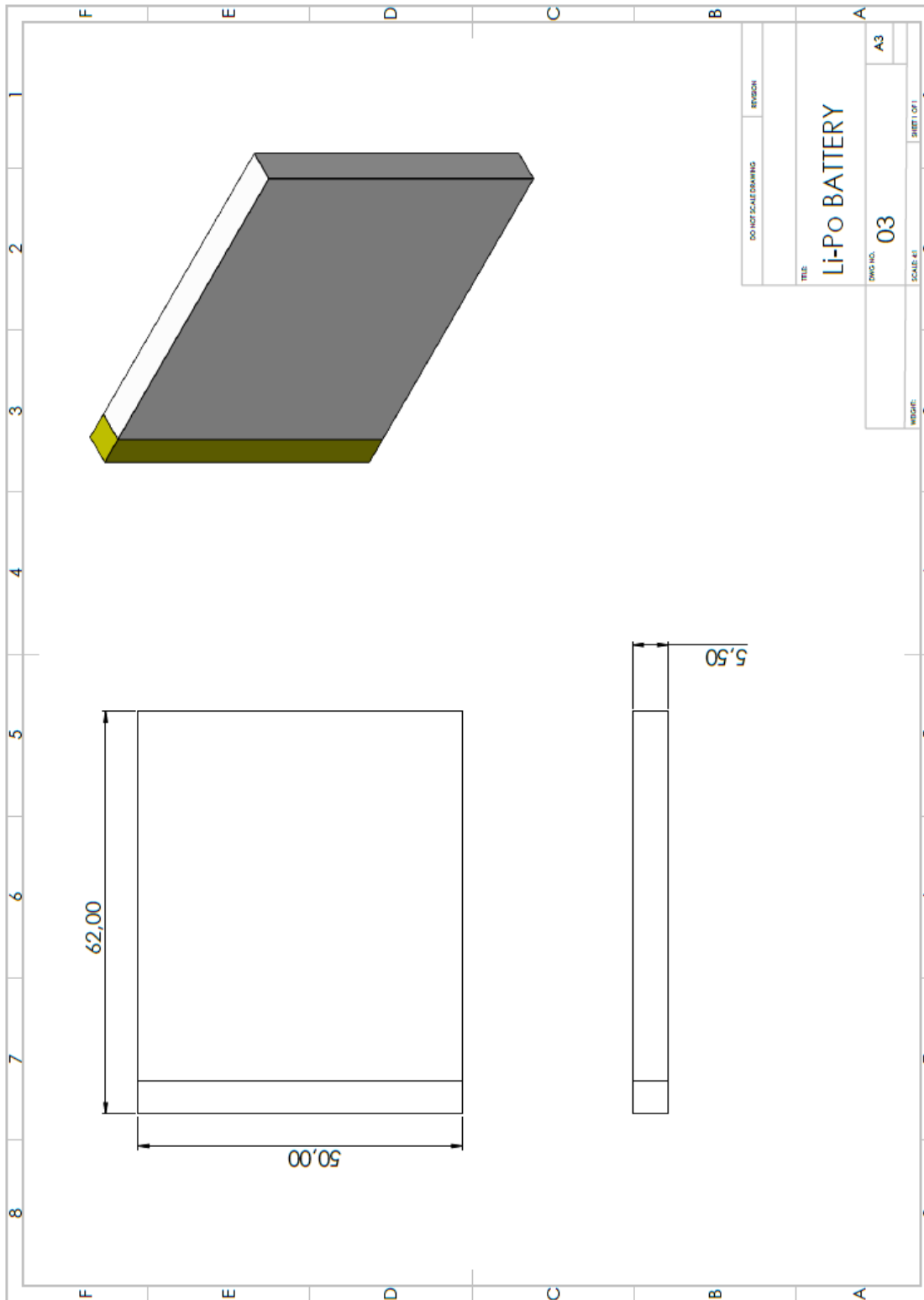


Σχήμα 36: Σχέδιο βασικής μορφολογίας της πλακέτας Arduino

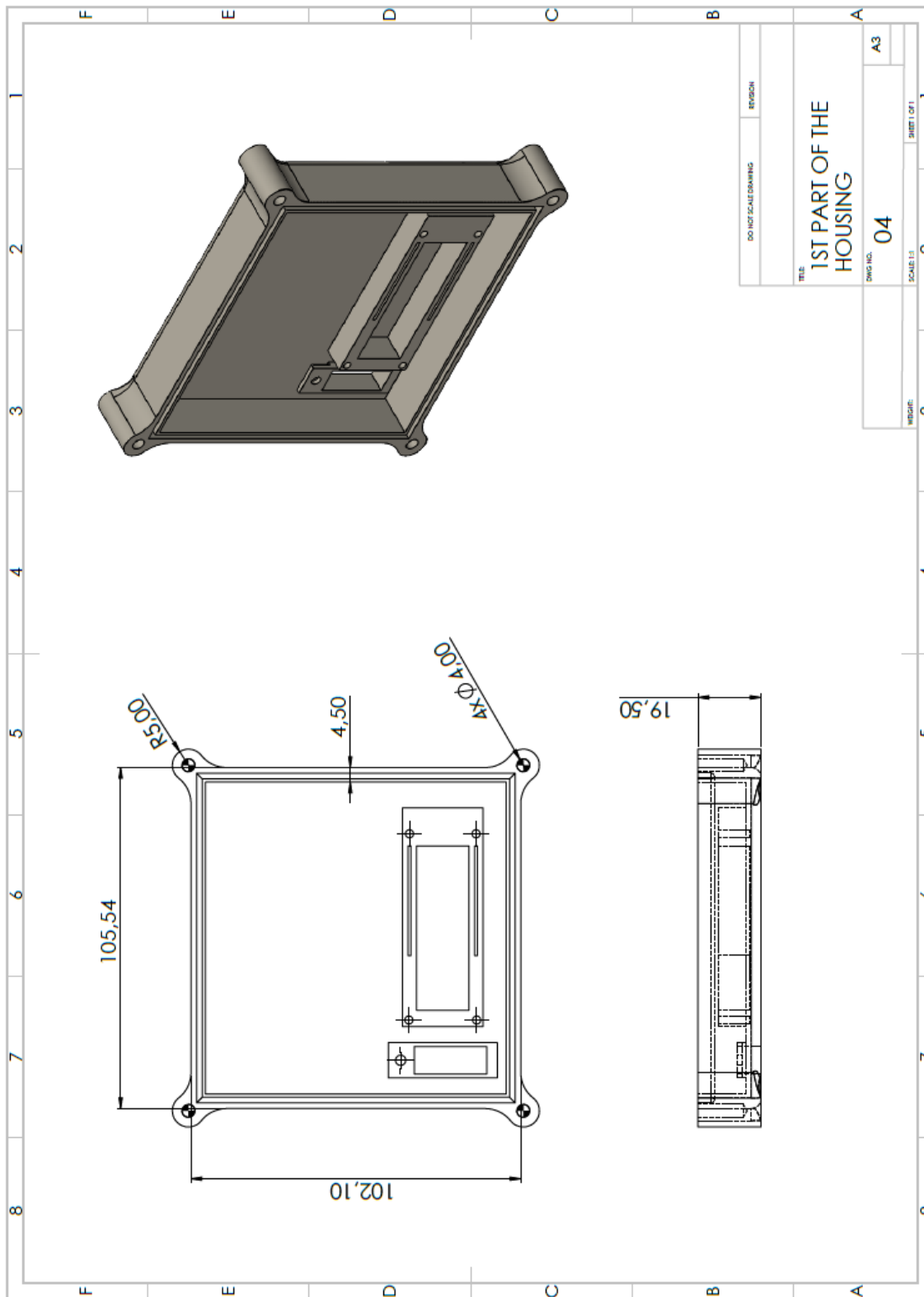


Σχήμα 37: Σχέδιο βασικής μορφολογίας του αισθητήρα υπέρυθρων

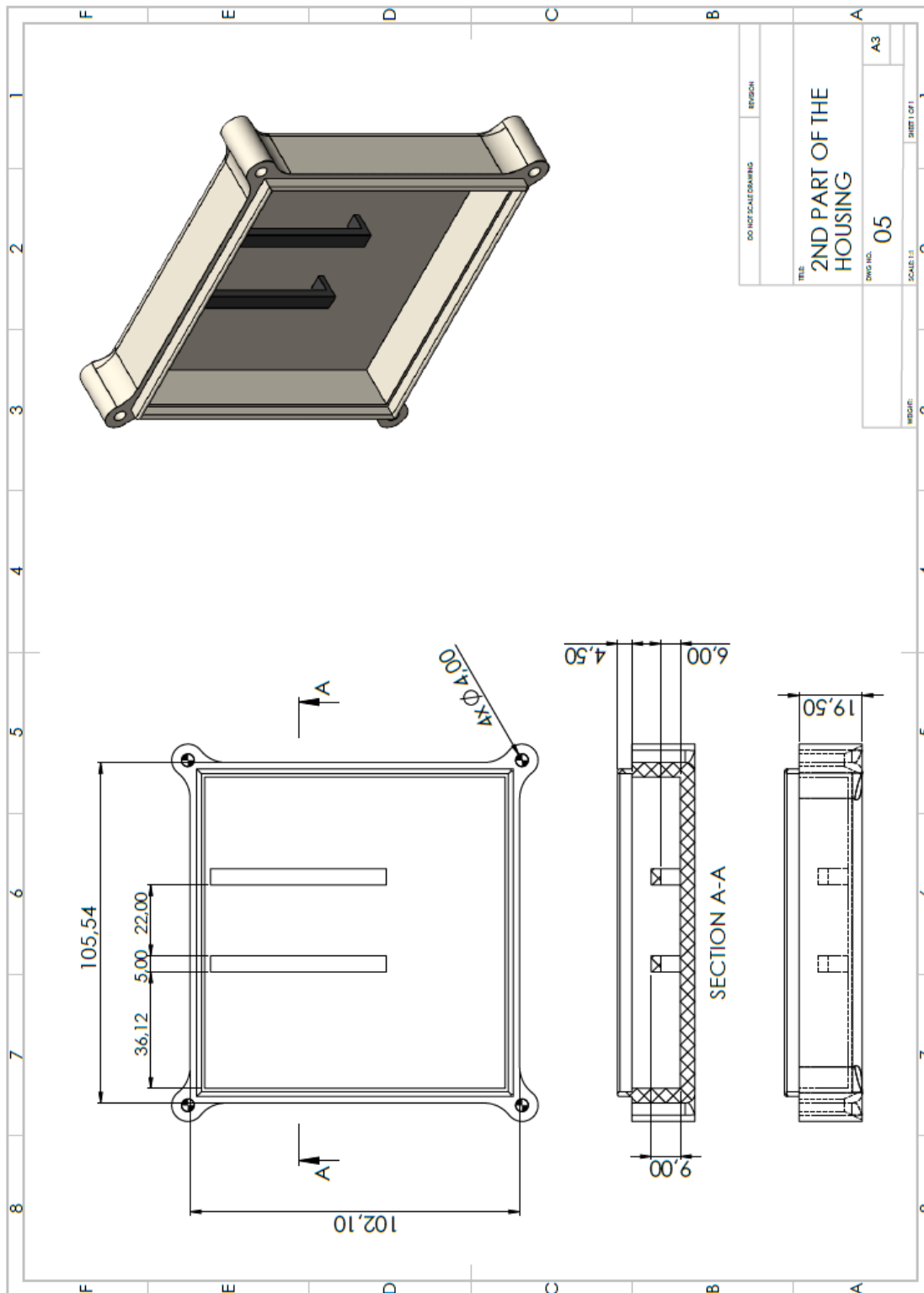




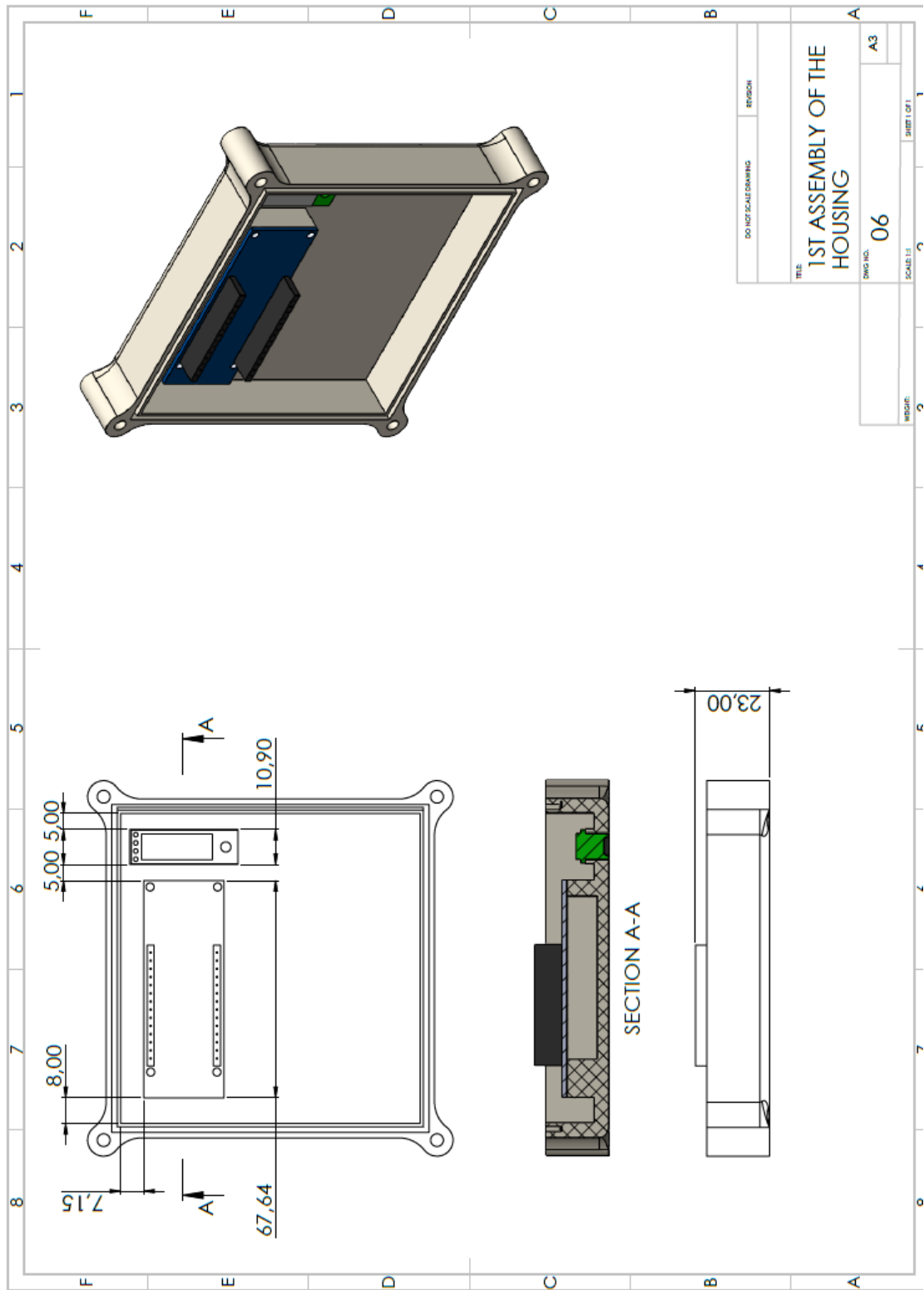
Σχήμα 38: Σχέδιο βασικής μορφολογίας της μπαταρίας λιθίου



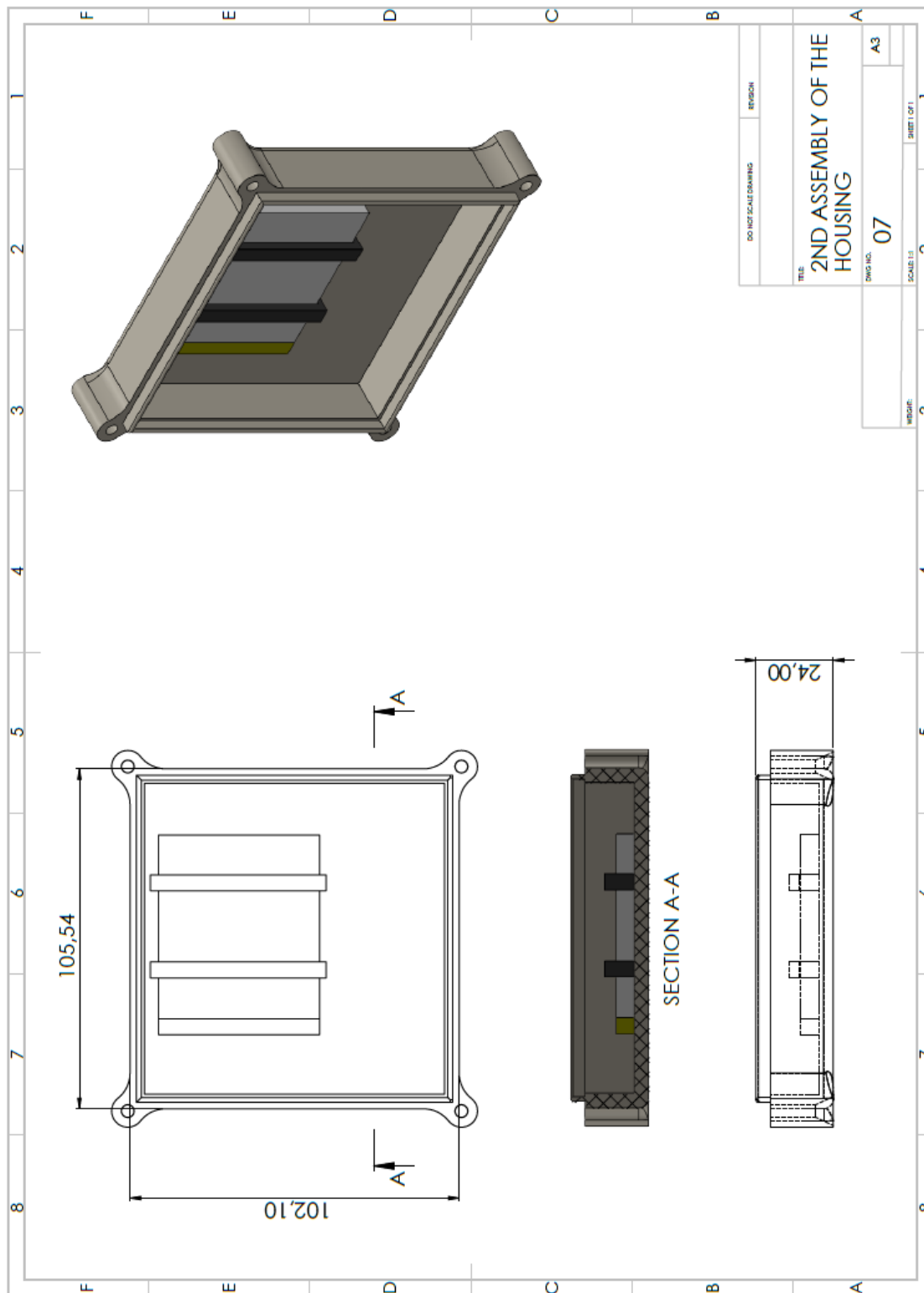
**Σχήμα 39:** Σχέδιο του θηλυκού τμήματος του καλύμματος με τις υποδοχές για τον αισθητήρα και την πλακέτα



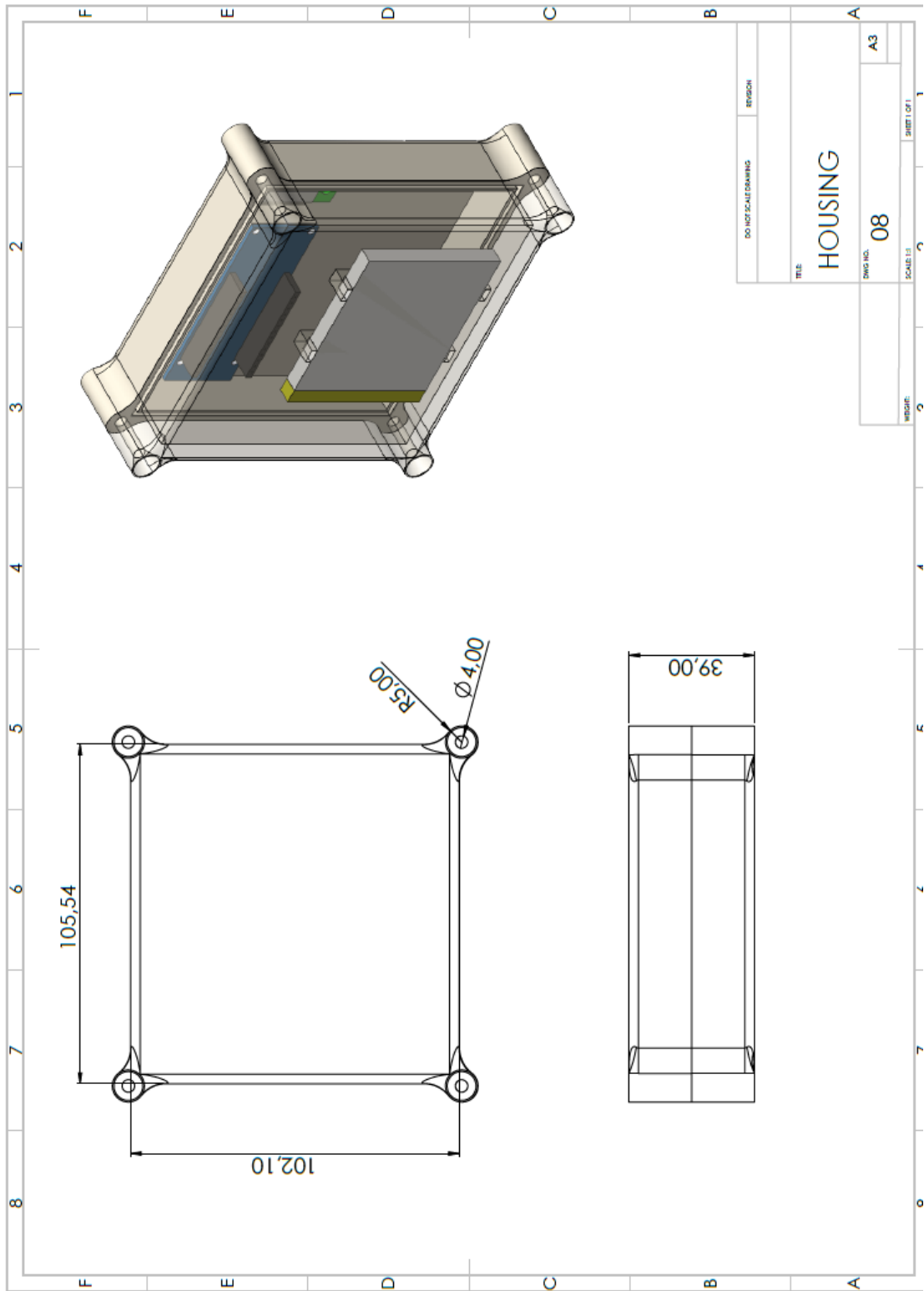
Σχήμα 40: Σχέδιο του αρσενικού τμήματος του καλύμματος με την υποδοχή για την μπαταρία



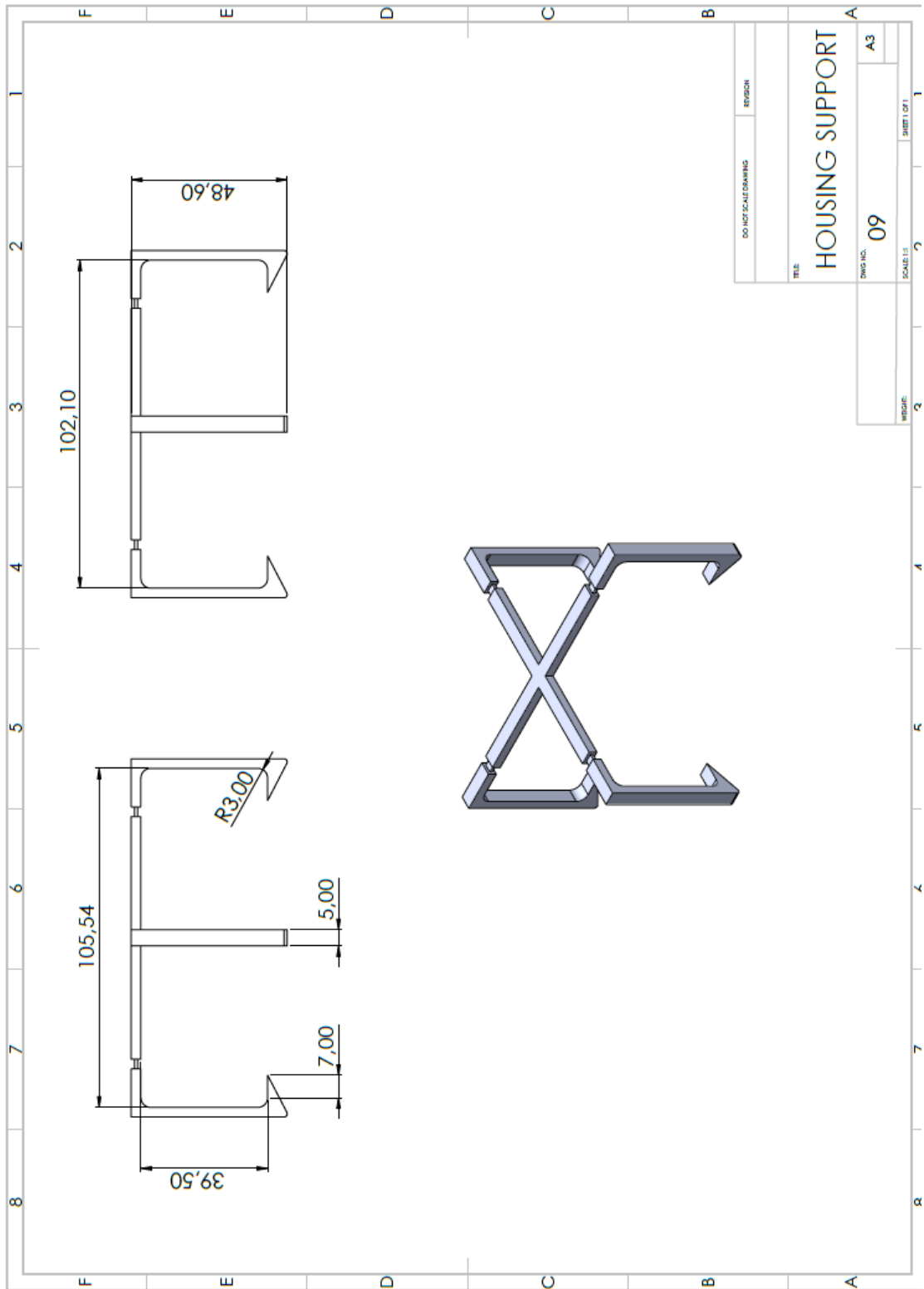
Σχήμα 41: Συναρμολόγημα του θηλυκού τμήματος του καλύμματος με τον αισθητήρα και την πλακέτα



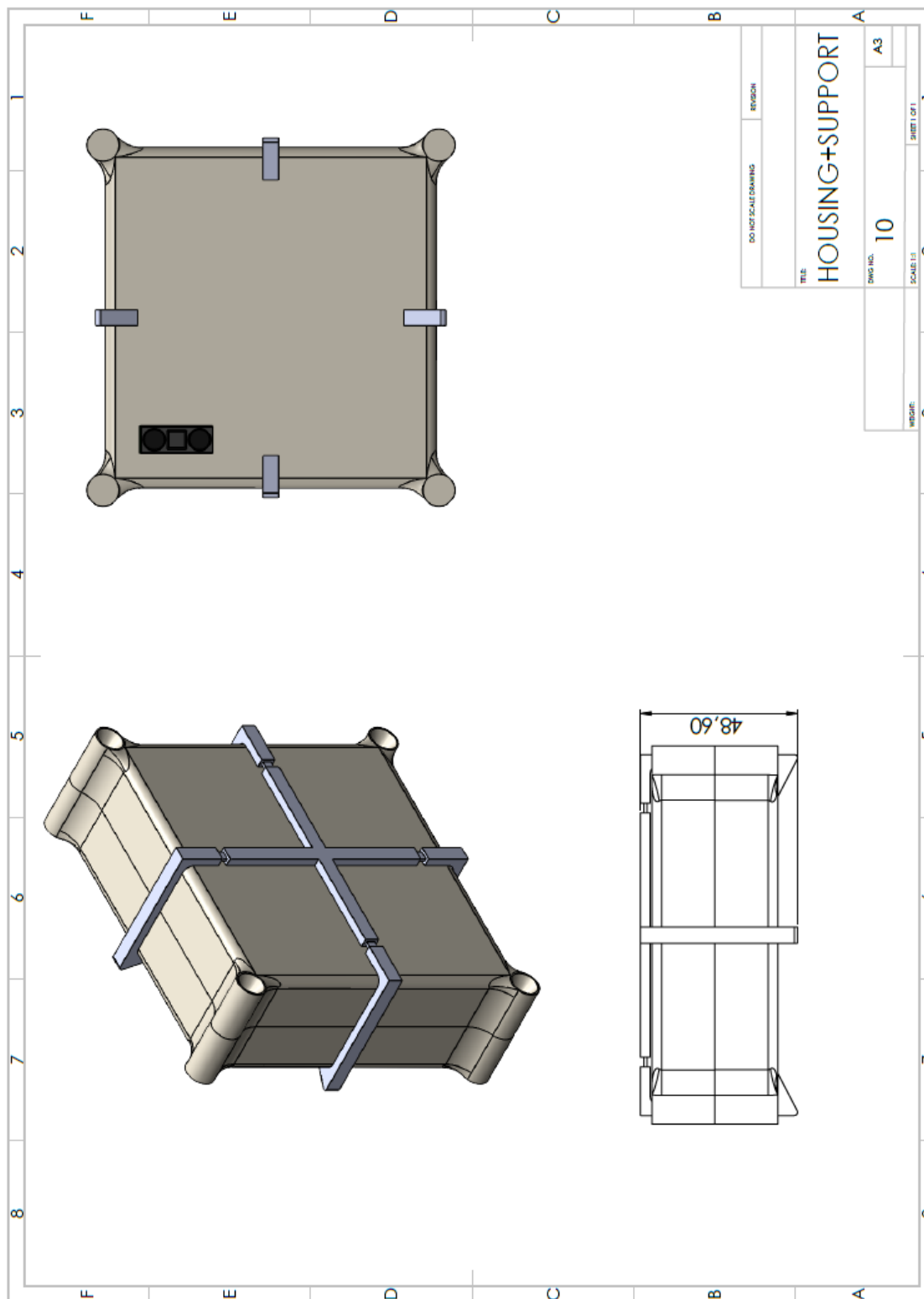
Σχήμα 42: Συναρμολόγημα του αρσενικού τμήματος του καλύμματος με την μπαταρία



Σχήμα 43: Συναρμολόγημα του καλύμματος με τα τρία περιεχόμενα εξαρτήματα



Σχήμα 44: Συναρμολόγημα της βάσης στήριξης του καλύμματος



Σχήμα 45: Συναρμολόγηση του καλύμματος με τα περιεχόμενα εξαρτήματα και τη βάση στήριξης