

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ



ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ

ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΖΙΟΥΖΙΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΔΡ. ΔΑΣΥΓΕΝΗΣ ΜΗΝΑΣ

ΚΟΖΑΝΗ

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2023

ΜΕΛΗ ΤΡΙΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

ΔΑΣΥΓΕΝΗΣ ΜΗΝΑΣ

Επίκουρος Καθηγητής

Παν. Δυτικής Μακεδονίας

ΜΠΙΜΠΗ ΣΤΑΜΑΤΙΑ

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Παν. Δυτικής Μακεδονίας

ΦΡΑΓΚΟΥΛΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Καθηγητής

Παν. Δυτικής Μακεδονίας

ΜΕΛΗ ΕΠΤΑΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

ΔΑΣΥΓΕΝΗΣ ΜΗΝΑΣ

Επίκουρος Καθηγητής
Παν. Δυτικής Μακεδονίας

ΜΠΙΜΠΗ ΣΤΑΜΑΤΙΑ

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
Παν. Δυτικής Μακεδονίας

ΦΡΑΓΚΟΥΛΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Καθηγητής
Παν. Δυτικής Μακεδονίας

ΑΣΗΜΟΠΟΥΛΟΣ
ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΒΡΙΓΚΑΣ ΜΙΧΑΗΛ

ΔΟΥΚΑΣ ΧΡΥΣΤΟΣΤΟΜΟΣ

Καθηγητής
Παν. Δυτικής Μακεδονίας

Επίκουρος Καθηγητής
Παν. Δυτικής Μακεδονίας

Καθηγητής
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΚΑΡΑΜΠΑΤΖΑΚΗΣ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

Επίκουρος Καθηγητής
Διεθνές Πανεπιστήμιο της
Ελλάδος

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας δε σημαίνει αποδοχή των γνώμών του συγγραφέα.

Στην οικογένεια μου....

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	i
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	iv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	vi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	vii
ABSTRACT	ix
ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ – ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ	xi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	1
1.1 Ορισμός του προβλήματος και κίνητρα έρευνας	1
1.2 Ερευνητικοί στόχοι και ερευνητικά ερωτήματα	9
1.3 Μεθοδολογία Έρευνας	8
1.4 Συνεισφορά της διατριβής	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ενσωματωμένα Συστήματα στον τομέα του Περιβάλλοντος	14
2.1 Εισαγωγή.....	14
2.3 Κοινά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις των Ενσωματωμένων Συστημάτων	18
2.5 Τομείς χρήσης Ενσωματωμένων Συστημάτων.....	20
2.6 Τύποι ενσωματωμένων συστημάτων.....	21
2.7.1 Ενσωματωμένα συστήματα βασισμένα σε FPGA	23
2.7.4 Ενσωματωμένα συστήματα με βάση το Raspberry Pi.....	26
2.8 Εφαρμογές της τεχνολογίας FPGA.....	26
2.8.2 Πεδία εφαρμογών της τεχνολογίας FPGA	34
2.9 Εφαρμογές των ενσωματωμένων συστημάτων στο περιβάλλον.....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Αξιοποίηση του Διαδικτύου των Πραγμάτων στον τομέα του Περιβάλλοντος	44
3.1 Ορισμός του Διαδικτύου των Πραγμάτων.....	44
3.2. Μοντέλα επικοινωνίας στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων	45
3.2.1 Μοντέλο Συσκευή προς Συσκευή (Device to Device)	46
3.2.2. Μοντέλο Συσκευή προς Νέφος (Device to Cloud)	47
3.2.3 Μοντέλο Συσκευής προς Πύλη (Device-to-Gateway).....	48
3.2.4 Μοντέλο κοινής χρήσης δεδομένων παρασκηνίου (back-end sharing).....	49
3.3 Πρότυπα συνδεσιμότητας στο Διαδίκτυο των Πράγματος	51
3.3.2 Bluetooth	58
3.3.3 Wi-Fi.....	58
3.3.4 Τεχνολογία Z-Wave	60
3.3.5 Zigbee	61
3.3.6 6LoWPAN - IPv6.....	63
3.3.7 Ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνοτήτων- Radio Frequency Identification (RFID) ..	64

3.4 Ασύρματες Συνδέσεις Μεγάλης Εμβέλειας LPWAN (Low Power Wide Area Networks)	66
3.4.1 Το δίκτυο LoRaWAN και το πρωτόκολλο LoRA	67
3.4.2 Το δίκτυο SigFox	70
3.4.3 Το πρότυπο Narrowband Internet of Things (NB-IoT)	71
3.5 Τομείς εφαρμογής και αξιοποίησης του ΔτΠ	74
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μεθοδολογία σχεδιασμού ενσωματωμένων συστημάτων για περιβαλλοντικές εφαρμογές & τεχνολογίες αντιρρύπανσης	78
4.1 Εισαγωγή.....	78
4.2 Αξιοποιώντας το «Προσαρμοστικό Μοντέλο Z» στην διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων	84
4.2.1 Αισθητήρες.....	87
4.2.2 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας.....	89
4.2.3 Πληροφοριακό Σύστημα	90
4.3 Αξιοποιώντας το «Προσαρμοστικό Μοντέλο Z» στην διαλογή σύμμεικτων απορριμμάτων για ανακύκλωση.....	92
4.3 Συμπεράσματα Μεθοδολογίας.....	99
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Σύγχρονος τρόπος αποκομιδής απορριμμάτων αξιοποιώντας τα ενσωματωμένα συστήματα	101
5.1 Εισαγωγή : Η κατάσταση σήμερα.....	101
5.2 Ο ρόλος των δεδομένων και των πολιτών στις έξυπνες και βιώσιμες πόλεις	103
5.3 Οι Έξυπνοι κάδοι στις έξυπνες πόλεις	106
5.3.1 Τύποι έξυπνων κάδων.....	109
5.4. Σχεδιασμός ενός καινοτόμου κάδου smartbin	114
5.5 Ανάπτυξη του έξυπνου κάδου	126
5.6 Σχεδιασμός διαδρομής απορριμματοφόρων	133
5.5.1 Προβλήματα δρομολόγησης.....	134
5.5.2 Πρόβλημα δρομολόγησης συλλογής απορριμμάτων	136
5.5.3 Πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων συλλογής απορριμμάτων	138
5.6 Πληροφοριακά συστήματα	141
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αξιοποίηση των ενσωματωμένων συστημάτων στην ανακύκλωση υλικών	144
6.1 Εισαγωγή στην Ανακύκλωση υλικών	144
6.2 Τύποι κάδων ανακύκλωσης	146
6.3 Διαχωρισμός στην πηγή	147
6.4 Υπολογιστική νέφους και επιτάχυνση στους έξυπνους κάδους	152
6.5 Διαχωρισμός στις Μονάδες Επεξεργασίας Απορριμμάτων (ΜΕΑ).....	159
6.6 Πειραματικά αποτελέσματα.....	164
6.7 Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις	166

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα.....	167
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	174
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ.....	188

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Κατηγορίες Ενσωματωμένων Συστημάτων.....	18
Εικόνα 2: Αριθμός επιστημονικών δημοσιεύσεων ρομποτικών συστημάτων που χρησιμοποιούν FPGA ανά έτος.....	28
Εικόνα 3: Ταξινόμηση ρομπότ με βάση τον μηχανισμό αλληλεπίδρασης	30
Εικόνα 4: Ταξινόμηση των ρομπότ ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους	31
Εικόνα 5: Τύποι ρομπότ ανά έτος.....	40
Εικόνα 6: Κατανομή των εφαρμογών FPGA για την περίοδο 2010-2019	41
Εικόνα 7: Πρόβλεψη συνδεδεμένων συσκευών σύμφωνα με την Statista 2025	45
Εικόνα 8: Παράδειγμα από το μοντέλο επικοινωνίας Συσκευή προς Συσκευή	47
Εικόνα 9: Παράδειγμα από το μοντέλο επικοινωνίας Συσκευή προς Νέφος	48
Εικόνα 10: Παράδειγμα από το μοντέλο επικοινωνίας device-to-gateway	49
Εικόνα 11: Παράδειγμα από το μοντέλο επικοινωνίας back-end sharing.....	50
Εικόνα 12: Τοπολογία διαδρόμου	51
Εικόνα 13: Τοπολογία Δακτυλίου	52
Εικόνα 14: Αστεροειδής τοπολογία.....	53
Εικόνα 15: Τοπολογία πλέγματος.....	54
Εικόνα 16: Τοπολογία δέντρου	54
Εικόνα 17: Εμβέλεια τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης σε σύγκριση με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων	56
Εικόνα 18: Wi-Fi HaLow	59
Εικόνα 19: Παράδειγμα τοπολογίας τεχνολογίας Z-Wave	60
Εικόνα 20: Τοπολογίες της τεχνολογίας Zigbee	62
Εικόνα 21: Γενική Αρχιτεκτονική ενός βασικού συστήματος RFID	65
Εικόνα 22: Αρχιτεκτονική LoRa Δικτύου	67
Εικόνα 23: Αρχιτεκτονική LoRaWAN.....	69
Εικόνα 24: Δίκτυο SigFox.....	71
Εικόνα 25: Τρόποι Λειτουργίας NB-IoT	73
Εικόνα 26: Εφαρμογές Διαδικτύου των Πραγμάτων.....	75
Εικόνα 27: Διάγραμμα μεθοδολογίας για το "Προσαρμοστικό Μοντέλο-Z".....	80
Εικόνα 28: Οργανωτική δομή των πληροφοριακών συστημάτων	92
Εικόνα 29: Ποσοστά ανακύκλωσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση των 27 ανά ροή αποβλήτων	93
Εικόνα 30: Γραφική αναπαράσταση των δεδομένων που συλλέγονται στις έξυπνες πόλεις	105
Εικόνα 31: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας νέφους.....	111
Εικόνα 32: Δίκτυα WSN	112
Εικόνα 33: Τρόπος λειτουργίας αισθητήρα υπερήχων	117
Εικόνα 34: Τρόπος λειτουργίας αισθητήρα υπέρυθρου τριγωνισμού	118
Εικόνα 35: Τρόπος λειτουργίας αισθητήρα απόστασης laser	119
Εικόνα 36: Τρόπος λειτουργίας αισθητήρα υπέρυθρων "χρόνου πτήσης"	120
Εικόνα 37: Ο έξυπνος κάδος "smart bin"	126
Εικόνα 38: Σχεδιάγραμμα του έξυπνου κάδου	128
Εικόνα 39: Μετρήσεις LoRa	131
Εικόνα 40: Διάγραμμα ροής smarbin	132
Εικόνα 41: Δρομολόγιο απορριμματοφόρου με την βοήθεια των έξυπνων κάδων.....	139
Εικόνα 42: Έξυπνος κάδος ανακύκλωσης υλικών.....	149
Εικόνα 43: Εύρεση ρυθμού εκμάθησης.....	150
Εικόνα 44: Κάδος διαχωρισμού συσκευασιών ροφημάτων.....	150
Εικόνα 45: Σύστημα ταξινόμησης.....	153

Εικόνα 46: Πληροφοριακό Σύστημα έξυπνου κάδου	154
Εικόνα 47: Τρόπος εκφόρτωσης υπολογισμών στο νέφος.....	156
Εικόνα 48: Σχηματική απεικόνιση της τεχνολογίας FPGA	158
Εικόνα 49: Ο βέλτιστος ρυθμός εκμάθησης του μοντέλου MobileNet-V2.....	164
Εικόνα 50: Πίνακας σύγκρισης του μοντέλου μας.....	165

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Βασικές διαφορές WiFi 4/5/6 με WiFi HaLow	59
Πίνακας 2:Ερευνητικές δημοσιεύσεις για τις έξυπνες πόλεις	103
Πίνακας 3: Ολοκληρωμένη σύγκριση των διαφόρων συστημάτων διαχείρισης απορριμμάτων	114
Πίνακας 4: Αποτελέσματα δοκιμών χρησιμοποιώντας το ThrashNet.....	165

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη σύγχρονη εποχή η αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού, η μαζική αστικοποίηση και η ταυτόχρονη αύξηση της κατανάλωσης αγαθών, οδηγούν στην ολοένα και περισσότερο αυξανόμενη παραγωγή προϊόντων, με συνέπεια την αύξηση των αστικών αποβλήτων. Τα Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ) προκαλούν εκτεταμένη ρύπανση του περιβάλλοντος και το πρόβλημα θα γιγαντώνεται εφόσον δεν αντιστραφεί αυτή η πορεία το συντομότερο δυνατό. Ήδη οι ανεπτυγμένες χώρες έχουν αναπτύξει πολιτικές και πρότυπα για την προστασία του περιβάλλοντος. Οι αναπτυσσόμενες χώρες βρίσκονται στην αρχή αυτής της διαδικασίας. Η έκρηξη στην ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών και η ταχεία ανάπτυξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (ΔτΠ) αποτελούν βασικό εργαλείο για την προστασία του περιβάλλοντος και την αναβάθμιση της ζωής στις σύγχρονες πόλεις. Η παρούσα διδακτορική διατριβή, εστιάζει στον σχεδιασμό και στην αξιοποίηση των ενσωματωμένων συστημάτων (ΕΣ) στον τομέα του περιβάλλοντος και συγκεκριμένα στοχεύει στην καλύτερη διαχείριση των ΑΣΑ και στην ανακύκλωση υλικών. Για την ορθότερη ανάπτυξη αυτών των διαδικασιών στα πλαίσια της διατριβής, αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία που ονομάσαμε «Προσαρμοστικό Μοντέλο Ζ» την οποία και χρησιμοποιήσαμε στην ανάπτυξη των προτεινόμενων λύσεων. Έτσι, παρουσιάζεται ένας έξυπνος κάδος από ανακυκλώσιμα υλικά, ο οποίος ενημερώνει τον διαχειριστή του συστήματος σε πραγματικό χρόνο για την πληρότητα του κάδου και την θερμοκρασία του. Με αυτό τον τρόπο ο διαχειριστής του συστήματος μπορεί να γνωρίζει ποιοι κάδοι είναι γεμάτοι και πότε. Αυτή η πληροφορία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη ώστε να προγραμματίζονται τα δρομολόγια των απορριμματοφόρων με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο, εξοικονομώντας οικονομικούς πόρους και ανθρωποώρες εργασίας. Επίσης, μπορεί να αξιοποιηθεί στο να προβλέπει σε ποιες συγκεκριμένες μέρες ή περιόδους απαιτούνται περισσότερα ή λιγότερα δρομολόγια, καθώς επίσης αν οι διαχειριστές πρέπει σε κάποια σημεία να προσθέσουν ή να αφαιρέσουν κάδους. Εκτός από την εξοικονόμηση πόρων μειώνεται και το φαινόμενο υπερχείλισης των κάδων φαινόμενο που εγκυμονεί υγειονομικούς κινδύνους. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ο έξυπνος κάδος ανακύκλωσης υλικών, ο οποίος αξιοποιώντας τα ΕΣ και την όραση μηχανής, αντιλαμβάνεται το αντικείμενο που εισέρχεται στον κάδο και το ταξινομεί ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο. Τέλος, έχει αναπτυχθεί ένα ηλεκτρονικό σύστημα αντικειμένων υψηλής ακρίβειας, σε πραγματικές συνθήκες μονάδας επεξεργασίας απορριμμάτων (ΜΕΑ), αξιοποιώντας τη μηχανική όραση, την τεχνητή νοημοσύνη και τα νευρωνικά δίκτυα. Τα σύμμεικτα υλικά που καταλήγουν

στους κάδους απορριμμάτων, περιέχουν μεγάλες ποσότητες ανακυκλώσιμων υλικών και απαιτείται μια ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία για τον διαχωρισμό τους, η οποία δεν είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και απαιτεί την συμμετοχή του ανθρώπινου παράγοντα κατά τη διαδικασία διαχωρισμού τους, γνωστή και ως διαδικασία διαχωρισμού στο εργοστάσιο. Με τη δική μας συμβολή μειώνεται η συμμετοχή των ανθρώπων στην διαδικασία και αυξάνουμε την αυτοματοποίηση.

Με την αξιοποίηση των ενσωματωμένων συστημάτων το περιβάλλον μπορεί να προστατευθεί και να αναβαθμιστεί η ποιότητα της σύγχρονης ζωής. Με την καλύτερη διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων και την μείωση των ανακυκλώσιμων υλικών που απορρίπτονται, μπορεί να δημιουργηθεί ένα καλύτερο μέλλον.

Λέξεις Κλειδιά: Ενσωματωμένα Συστήματα, Ανακύκλωση, Διαχείριση Απορριμμάτων, Όραση Μηχανής, Νευρωνικά Δίκτυα, Αναγνώριση Αντικειμένων, Προστασία Περιβάλλοντος, Διαδίκτυο των Πραγμάτων

ABSTRACT

In modern times, the growth of the world population, massive urbanization and the simultaneous increase in the consumption of goods, lead to the ever-increasing production of goods, with the consequence of an increase in urban waste. Municipal Solid Waste (MSW) causes widespread pollution of the environment and the problem will grow if this trend is not reversed as soon as possible. Developed countries have already developed policies and standards for environmental protection and the developing countries are at the beginning of this process. The development of new technologies (ICT) and Internet of Things (IoT) are a key tool for protecting the environment and upgrading life in modern cities. This PhD thesis focuses on the design and utilization of embedded systems (ES) in the field of the environment and specifically aims at better management of solid waste and material recycling. For better analysis of these processes within the framework of the thesis, a methodology was developed that we called "Adaptive Model Z" which we used to create the proposed solutions. Thus, a smart bin made of recyclable materials is presented, which informs the system administrator in real time about the fullness of the bin and its temperature. This information is particularly useful for administrators of the system in order to plan garbage truck routes in the best possible way, saving financial resources and man-hours of work. It can also be used to predict on which specific days or periods more or fewer routes are required, as well as if managers need to add or remove bins at certain points. In addition to saving resources, the phenomenon of overflowing bins is also reduced, a phenomenon that poses health risks. Also, the smart material recycling bin is presented, which, using Artificial Intelligence (AI) and machine vision, perceives the object that enters the bin and sorts it according to the material it is made of. Finally, a high-precision electronic object system has been developed in real-world waste treatment plant (WTP) conditions, leveraging machine vision, artificial intelligence and neural networks. The mixed materials that end up in the waste bins contain large amounts of recyclable materials and require a particularly painful process for their separation, which is not fully automated and requires the participation of the human factor during their separation process, also known as the process of separation in factory. With our contribution, we reduce human involvement in the process and increase automation.

By utilizing integrated systems, the environment can be protected, and the quality of modern life can be upgraded. By better managing municipal solid waste and reducing the amount of recyclables thrown away, a better future can be created.

Keywords: Embedded Systems, Recycle, Waste Management, Machine Vision, Neural Network, Object Detection, Environmental Protection, Internet of Things

ΑΠΟΔΟΣΗ ΟΡΩΝ – ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

6LoWPAN - IPv6	IPv6 Low-power Wireless Personal Area Network
ACO	Ant Colony Optimization
AES	Advanced Encryption Standard
ALG	Application Layer Gateway
AMR	Autonomous Mobile Robots
ANN	Artificial Neural Network
API	Application Programming Interface
CARP	Capacitated Arc Routing Problem
CLR	Cyclical Learning Rate
CMS	Content Management System
CNN	Convolutional Neural Network
CoAP	Constrained Application Protocol
CPSO	Chaotic Particle Swarm Optimization
CPU	Central Processing Unit
CSS	Chirp Spread Spectrum
CVRP	Capacitated Vehicle Routing Problem
EKF	Extended Kaman Filters
FFD	Full-Function Device
FOV	Field Of View
FPGA	Field Programme Gate Array
FPS	Frame Per Second
GIS	Geographic Information System
GPU	Graphics Processing Unit
HDL	Hardware Description Language
IC	Integrated Circuit
I/O	Διεπαφές εισόδου/εξόδου
IDE	Ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης
ILS	Iterative Local Search
IoT	Internet of Things
LoRa	Long Range

LPWAN	Low Power Wide Area Networks
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MITM	Man In The Middle
MOAMP	Multiobjective Adaptive Memory Programing
MOPSO	Multiple Objective Particle Swarm Optimization
MSW	Municipal Solid Waste
NB-IoT	Narrowband Internet of Things
NTC	Negative Temperature Coefficient
NSGA	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
ResNet	Residual Neural Network
RFD	Reduced-Function Device
RFID	Radio Frequency Identification
RORO	Roll On Roll Off
RTD	Resistance Temperature Detector
RTOS	Λογισμικό και λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου
SBC	Single Board Computer
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping
SoC	System on Chip
TACO	Trash Annotations in Context
TCP	Transmission Control Protocol
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UNB	Ultra Narrow Band
VRP	Vehicle Routing Problem
WAN	Wide Area Network
WAP	Wireless Access Point
WCRP	Waste Collection Routing Problem
WCVRP	Waste Collection Vehicle Routing Problem
WLAN	Wireless Local Area Network
YOLO	You Only Look Once
ΑμεΑ	Άτομα με Αναπηρία
ΑΣΑ	Αστικά Στερεά Απόβλητα

ΔτΠ	Διαδίκτυο των Πραγμάτων
ΕΣ	Ενσωματωμένα Συστήματα
ΚΜΕ	Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας
ΛΣ	Λειτουργικό Σύστημα
ΣΜΛ	Συσκευές Μειωμένης Λειτουργίας
ΣΠΛ	Συσκευή Πλήρους Λειτουργίας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή

1.1 Ορισμός του προβλήματος και κίνητρα έρευνας

Η προστασία του περιβάλλοντος αποτελεί μία από τις βασικότερες προτεραιότητες για όλα τα κράτη του κόσμου μιας και είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την υγεία των πολιτών. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (Π.Ο.Υ) περίπου το 24% των θανάτων παγκοσμίως προκαλούνται λόγω περιβαλλοντικών παραγόντων [1]. Σε αυτό το ποσοστό λαμβάνεται υπόψη η ατμοσφαιρική ρύπανση, η ποιότητα του νερού, η έκθεση σε χημικές ουσίες και τα επισφαλή αστικά περιβάλλοντα [2]. Ο πληθυσμός της Γης αυξάνεται ταχύτατα τα τελευταία χρόνια και σε συνδυασμό με τον σύγχρονο τρόπο ζωής, αυξάνεται και η ποσότητα των αστικών αποβλήτων. Στην Ευρώπη, ο μέσος πολίτης παράγει 5 τόνους απορριμμάτων σε ετήσια βάση εκ των οποίων πάνω από 60% καταλήγουν ως απόβλητα [3]. Σύμφωνα με την Έκθεση των Προοπτικών της Παγκόσμιας Αστικοποίησης, που πραγματοποιήθηκε το 2018 από το τμήμα Πληθυσμού του Υπουργείου Οικονομικών και Κοινωνικών Υποθέσεων των Ηνωμένων Εθνών (UN DESA), το 55% του παγκόσμιου πληθυσμού ζει σε αστικές περιοχές και αυτό το ποσοστό αναμένεται να αυξηθεί στο 68% έως το 2050 [4].

Στις σύγχρονες πόλεις, είναι σύνηθες να εντοπίζονται υπερπλήρεις κάδοι απορριμμάτων στους δρόμους και ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες το πρόβλημα τείνει να επιδεινώνεται λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και της αποσύνθεσης των υλικών. Σύμφωνα με την έκθεση ανασκόπησης της Παγκόσμιας Τράπεζας [5] το 2012, τα παγκόσμια επίπεδα παραγωγής Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) ήταν περίπου 1,3 δισεκατομμύρια τόνοι ετησίως. Ο αριθμός αναμένεται να ανέλθει σε 2,2 δις τόνους μέχρι το 2025. Οι τρέχουσες τάσεις διαχείρισης των αποβλήτων δεν είναι αρκετά προηγμένες ώστε να επιτευχθεί ένας ισχυρός και αποτελεσματικός μηχανισμός διαχείρισης τους. Αν και η συλλογή των απορριμμάτων είναι συνεπής, ο τρόπος της τρέχουσας αποκομιδής δεν μπορεί να προσφέρει επιπλέον πληροφορίες στους φορείς διαχείρισης απορριμμάτων ώστε να βελτιωθεί η διαδικασία με παράλληλη μείωση του κόστους. Κατά παράδοση, οι κάδοι απορριμμάτων αδειάζουν με καθορισμένο χρονοδιάγραμμα και τα απορριμματοφόρα ακολουθούν συγκεκριμένη διαδρομή. Στο σημερινό μοντέλο διαχείρισης υπάρχουν πολλά μειονεκτήματα, όπως για παράδειγμα μερικοί κάδοι απορριμμάτων γεμίζουν γρηγορότερα από άλλους που βρίσκονται στην ίδια διαδρομή και έχουν υπερχειλίσει πριν την επόμενη

προγραμματισμένη ώρα αποκομιδής, οδηγώντας σε υγειονομικούς κινδύνους. Επίσης, υπάρχουν συγκεκριμένοι χρονικοί περίοδοι όπως φεστιβάλ, Σαββατοκύριακα, αργίες κτλ., που ορισμένοι κάδοι απορριμμάτων γεμίζουν ταχύτερα και υπάρχει ανάγκη για αυξημένες διαδρομές αποκομιδής των απορριμμάτων. Η διατήρηση μιας καθαρής πόλης αποτελεί μεγάλη πρόκληση και περιλαμβάνει διάφορους παράγοντες, όπως η βελτιστοποιημένη διαχείριση αποκομιδής, οι αποτελεσματικοί χρηματοοικονομικοί παράγοντες, η μεταφορά, η ανακύκλωση και άλλοι [6], [7].

Η χρήση των τεχνολογιών των Ενσωματωμένων Συστημάτων (ΕΣ) και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (ΔτΠ) - Internet of Things (IoT) με δυναμικό χρονοδιάγραμμα και δρομολόγηση μπορεί να μειώσει το κόστος αποκομιδής έως και 20% και την απόσταση μεταφοράς έως και 26% [8]. Για ένα δυναμικό και αυτόματο σύστημα, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το τρέχον και πραγματικό επίπεδο πλήρωσης των κάδων, καθώς και να έχουμε καταγράψει το ιστορικό πληρότητας τους, ώστε να μπορούμε να προβλέψουμε μια πιθανή αναμενόμενη υπερχειλίση.

Ο ολοένα και αυξανόμενος παγκόσμιος πληθυσμός ωστόσο, δεν είναι ο μόνος λόγος για την κατάσταση που επικρατεί σήμερα στον τομέα των απορριμμάτων. Σε συνάρτηση με την αύξηση του πληθυσμού και τον σύγχρονο τρόπο ζωής, το κάθε άτομο παράγει όλο και περισσότερα απορρίμματα. Οι άνθρωποι καταναλώνουν περισσότερο και τα προϊόντα έχουν σχεδιαστεί για να έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής. Με δεδομένη αυτή την κατάσταση έχουμε να αντιμετωπίσουμε δύο μεγάλα ζητήματα. Το πρώτο είναι η υπερβολική συγκέντρωση αστικών στερεών απορριμμάτων και το σύστημα διαχείρισης τους, και το άλλο είναι ο πιο αποτελεσματικός τρόπος ανακύκλωσης των υλικών. Αν όλα αυτά τα απορρίμματα συνεχίσουν να καταλήγουν στους χώρους υγειονομικής ταφής, η Γη θα μπορούσε σύντομα να είναι ένας γιγάντιος σκουπιδότοπος. Η βελτίωση της διαχείρισης των απορριμμάτων και η ανακύκλωση συμβάλλουν στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα, στην προστασία της υγείας των πολιτών, στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, τόσο άμεσα με τη μείωση των εκπομπών από τις χωματερές αλλά και έμμεσα με την ανακύκλωση των υλικών τα οποία διαφορετικά θα εξορύσσονταν και θα επεξεργάζονταν.

Για το λόγο αυτό, η ανακύκλωση είναι ο βασικός τρόπος για την δημιουργία ενός βιώσιμου περιβάλλοντος. Υπάρχει μια προφανής και αυξανόμενη ανάγκη να διατηρηθούν πολύτιμοι πόροι και να μειωθούν τα απορρίμματα τα οποία ρυπαίνουν το περιβάλλον. Η

μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής των υλικών με πρακτικές επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης έχει μακροπρόθεσμα οφέλη. Η ΕΕ έχει θεσπίσει ειδικές πολιτικές από το 2015, οι οποίες εστιάζονται σε στόχους ανακύκλωσης. Το 2000, ο μέσος όρος ανακύκλωσης των αστικών αποβλήτων στην ΕΕ ήταν 25,10% των συνολικών παραγόμενων αποβλήτων και 46,40% το 2017 [9]. Η ευρωπαϊκή στρατηγική για τα πλαστικά θέτει ως στόχο για τα πλαστικά που χρησιμοποιούνται για συσκευασία έως το 2030, πως όλες οι πλαστικές συσκευασίες που διατίθενται στην αγορά της ΕΕ πρέπει να μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν ή να ανακυκλωθούν κατά τρόπο αποδοτικό από άποψη κόστους [10].

Για την ανακύκλωση, απαιτείται ο διαχωρισμός των απορριμμάτων, η οποία είναι μια χρονοβόρα διαδικασία. Οι φορείς διαχείρισης απορριμμάτων και ανακύκλωσης υλικών χρησιμοποιούν ερωτηματολόγια και πραγματοποιούν έρευνες με σκοπό την επίτευξη ενός βελτιωμένου συστήματος διαχείρισης. Ορισμένοι ερευνητές διερευνούν φιλοπεριβαλλοντικές συμπεριφορές, όπως η Θεωρία της Προγραμματισμένης Συμπεριφοράς, η Θεωρία Ενεργοποίησης και η Θεωρία Πεποιθήσεων Αξίας [11] για να προβλέψουν πώς τα άτομα ενεργούν μεμονωμένα. Ωστόσο, οι έρευνες και τα ερωτηματολόγια δεν μπορούν να αποτυπώσουν το πρόβλημα στο μέγιστο βαθμό και γι' αυτό θα ήταν ιδανικό αν υπήρχε ένας μηχανισμός που θα μπορούσε να προκαθορίσει τα πρότυπα ανακύκλωσης κατά τη στιγμή της διάθεσης. Συνοπτικά, η διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων αναφέρεται στη αποκομιδή, μεταφορά και διάθεση των στερεών αποβλήτων που παράγονται από νοικοκυριά, επιχειρήσεις και ιδρύματα σε αστικές και προαστιακές περιοχές. Στόχος της διαχείρισης των ΑΣΑ είναι η ελαχιστοποίηση των αρνητικών επιπτώσεων των απορριμμάτων στο περιβάλλον και την υγεία, ενώ ταυτόχρονα ανακτώνται πολύτιμοι πόροι και μειώνεται ο συνολικός όγκος των απορριμμάτων που αποστέλλονται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Η απόθεση των αστικών απορριμμάτων γίνεται συνήθως με έναν από τους δύο τρόπους: μέσω υγειονομικής ταφής ή αποτέφρωσης. Η υγειονομική ταφή περιλαμβάνει την ταφή των απορριμμάτων σε ειδικά σχεδιασμένο χώρο υγειονομικής ταφής, ενώ η αποτέφρωση περιλαμβάνει την καύση των απορριμμάτων για τη μείωση του όγκου τους και την παραγωγή ενέργειας.

Μία από τις πιο ελπιδοφόρες εξελίξεις στη διαχείριση των αστικών απορριμμάτων είναι η αυξημένη χρήση προγραμμάτων ανακύκλωσης. Αυτά τα προγράμματα στοχεύουν στην ανάκτηση πολύτιμων πόρων από τα απορρίμματα, όπως χαρτί, πλαστικό και μέταλλο,

και στην μείωση του συνολικού όγκου των απορριμμάτων που αποστέλλονται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Σύμφωνα με τη μελέτη των Liu et al. [12], η ταχεία αστικοποίηση και η οικονομική ανάπτυξη στην Κίνα έχουν οδηγήσει σε ταχεία αύξηση των αστικών στερεών αποβλήτων (Municipal Solid Waste-MSW), η οποία θέτει σημαντικές προκλήσεις στη διαχείριση των ΑΣΑ. Αυτή η μελέτη δίνει έμφαση στην ανάγκη σωστής διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων στην Κίνα. Μια άλλη μελέτη του Balasubramanian [13], υπογραμμίζει το πρόβλημα της ανεπαρκούς υποδομής και την έλλειψη σωστού σχεδιασμού και κανονισμών ως τις κύριες προκλήσεις στη διαχείριση αστικών στερεών αποβλήτων στην Ινδία. Η Κίνα και η Ινδία αποτελούν δύο από τις μεγαλύτερες αναπτυσσόμενες χώρες στον κόσμο, και έχουν περισσότερο από το 30% του παγκόσμιου πληθυσμού, σύμφωνα με τα Ηνωμένα Έθνη. Αντιστοίχως, υπάρχουν πολλές μελέτες σχετικά με την διαχείριση των ΑΣΑ στην Ευρώπη, όπως του Pires et al. [14], που δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Όπως προκύπτει από όλες αυτές τις έρευνες, η διαχείριση των ΑΣΑ είναι ένα σύνθετο ζήτημα που απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση, αντιμετωπίζοντας όλες τις πτυχές του συστήματος διαχείρισης στερεών απορριμμάτων, από τη αποκομιδή και τη μεταφορά έως τη απόθεση και την ανακύκλωση. Ο σωστός σχεδιασμός και οι κανονισμοί που την διέπουν είναι απαραίτητοι για την επιτυχία οποιουδήποτε προγράμματος διαχείρισης αστικών στερεών απορριμμάτων.

Με την ανακύκλωση, μπορούν οι πολίτες να συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος και της υγείας των κοινοτήτων μας. Εκτός από τα περιβαλλοντικά οφέλη, η ανακύκλωση έχει και οικονομικά οφέλη. Η ανακύκλωση δημιουργεί θέσεις εργασίας, τονώνει την οικονομική δραστηριότητα και τέλος μειώνει το κόστος που σχετίζεται με τη διάθεση των αποβλήτων, καθώς είναι συχνά φθηνότερο να ανακυκλώνουμε από το να διαθέτουμε τα απόβλητα σε χώρους υγειονομικής ταφής ή σε αποτεφρωτήρες.

Μία από τις κύριες προκλήσεις της ανακύκλωσης είναι η βελτιστοποίηση της συλλογής και διαλογής των ανακυκλώσιμων αξιοποιώντας τις σύγχρονες τεχνολογίες. Σε πολλές χώρες, τα συστήματα συλλογής και διαλογής αποβλήτων είναι ανεπαρκή, ασυνεπή και κατακερματισμένα. Αυτό καθιστά δύσκολη την αποτελεσματική και αποδοτική συλλογή και διαλογή των υλικών αποβλήτων, γεγονός που μπορεί να εμποδίσει τις προσπάθειες ανακύκλωσης. Χωρίς κατάλληλα συστήματα συλλογής και διαλογής, πολλά ανακυκλώσιμα υλικά καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής ή σε αποτεφρωτήρες, συμβάλλοντας στη ρύπανση του περιβάλλοντος και στην εξάντληση των πόρων.

Μια άλλη σημαντική πρόκληση της ανακύκλωσης είναι η έλλειψη τεχνολογίας και υποδομών για την επεξεργασία και ανακύκλωση ορισμένων τύπων υλικών αποβλήτων. Ορισμένα απόβλητα, όπως τα ηλεκτρονικά απόβλητα, απαιτούν εξειδικευμένη τεχνολογία και υποδομή για την ασφαλή και αποτελεσματική ανακύκλωση. Ωστόσο, η εν λόγω τεχνολογία και υποδομή μπορεί να μην είναι διαθέσιμη ή προσβάσιμη σε πολλές περιοχές, γεγονός που καθιστά δύσκολη την αποτελεσματική ανακύκλωση αυτών των υλικών [15]. Επιπλέον, η οικονομική βιωσιμότητα της ανακύκλωσης μπορεί να αποτελέσει πρόκληση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, το κόστος της ανακύκλωσης μπορεί να είναι υψηλότερο από το κόστος παραγωγής νέων υλικών. Αυτό μπορεί να δυσχεράνει την παροχή κινήτρων στις επιχειρήσεις και τους ιδιώτες για ανακύκλωση. Τέλος, μια άλλη σημαντική πρόκληση της ανακύκλωσης είναι η έλλειψη ευαισθητοποίησης και εκπαίδευσης. Πολλοί πολίτες και επιχειρήσεις δεν έχουν πλήρη επίγνωση των πλεονεκτημάτων της ανακύκλωσης ή των κατάλληλων μεθόδων ανακύκλωσης. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή των ανακυκλώσιμων υλικών και σε μείωση της αποτελεσματικότητας των προγραμμάτων ανακύκλωσης.

Οι δυνατότητες των νέων τεχνολογιών και των ενσωματωμένων συστημάτων για τη βελτίωση των διαδικασιών ανακύκλωσης αποτελούν θέμα μεγάλου ενδιαφέροντος στον τομέα της διαχείρισης αποβλήτων και της αειφόρου ανάπτυξης. Οι παραδοσιακές διαδικασίες ανακύκλωσης έχουν περιορισμούς και οι νέες τεχνολογίες προσφέρουν τη δυνατότητα βελτίωσης της αποδοτικότητας, της αποτελεσματικότητας και της βιωσιμότητας της ανακύκλωσης. Οι νέες τεχνολογίες προσφέρουν πολυάριθμες ευκαιρίες για τη βελτίωση των διαδικασιών ανακύκλωσης. Για παράδειγμα, οι προηγμένες τεχνολογίες διαλογής μπορούν να βελτιώσουν το διαχωρισμό των διαφόρων τύπων αποβλήτων, καθιστώντας την ανακύκλωση πιο αποδοτική και αποτελεσματική. Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν αισθητήρες, τεχνητή νοημοσύνη και αλγόριθμους μηχανικής μάθησης που μπορούν να διαχωρίζουν και να ταξινομούν με ακρίβεια τα απόβλητα με βάση τη σύνθεση και τα χαρακτηριστικά τους. Τα ενσωματωμένα συστήματα είναι ένας τομέας της νέας τεχνολογίας που έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει τις διαδικασίες αποκομιδής απορριμμάτων και ανακύκλωσης.

Τα ενσωματωμένα συστήματα είναι μικρά συστήματα υπολογιστών που ενσωματώνονται σε άλλες συσκευές ή μηχανήματα. Τα ενσωματωμένα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση, τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση

των διαδικασιών ανακύκλωσης, καθιστώντας τις πιο αποδοτικές και αποτελεσματικές. Για παράδειγμα, τα ενσωματωμένα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας και των επιπέδων υγρασίας στις διαδικασίες κομποστοποίησης, εξασφαλίζοντας τις βέλτιστες συνθήκες για την αποσύνθεση των οργανικών αποβλήτων. Τα ενσωματωμένα συστήματα μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση και τον εντοπισμό υλικών σε όλη τη διαδικασία ανακύκλωσης, διασφαλίζοντας ότι τα υλικά ταξινομούνται, επεξεργάζονται και επαναχρησιμοποιούνται σωστά. Για τον σχεδιασμό ενός ΕΣ στον τομέα του περιβάλλοντος απαιτείται μια στοχευμένη και ολοκληρωμένη μεθοδολογία, και σε αυτό η συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή προτείνει λύσεις.

Οι δυνατότητες των νέων τεχνολογιών και των ενσωματωμένων συστημάτων για τη βελτίωση των διαδικασιών ανακύκλωσης είναι σημαντικές, αλλά υπάρχουν και προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Μια πρόκληση είναι το κόστος εφαρμογής νέων τεχνολογιών και ενσωματωμένων συστημάτων. Πολλές νέες τεχνολογίες και ενσωματωμένα συστήματα απαιτούν σημαντικές επενδύσεις σε έρευνα και ανάπτυξη, εξοπλισμό και υποδομές. Το κόστος εφαρμογής νέων τεχνολογιών και ενσωματωμένων συστημάτων μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εμπόδιο για πολλές επιχειρήσεις και οργανισμούς. Μια άλλη πρόκληση είναι η πολυπλοκότητα των νέων τεχνολογιών και των ενσωματωμένων συστημάτων. Πολλές νέες τεχνολογίες και ενσωματωμένα συστήματα είναι πολύπλοκα και απαιτούν εξειδικευμένες γνώσεις και δεξιότητες για τη λειτουργία και τη συντήρησή τους. Η πολυπλοκότητα αυτών των συστημάτων μπορεί να καταστήσει δύσκολη την εφαρμογή τους και μπορεί να αυξήσει τον κίνδυνο αποτυχίας ή δυσλειτουργίας.

Ένα από τα κύρια ζητήματα που συμβάλλουν σε αυτό το κενό γνώσεων είναι η έλλειψη έρευνας στον τομέα της αποκομιδής απορριμμάτων και ανακύκλωσης με την χρήση των ενσωματωμένων συστημάτων. Η πλειονότητα των μελετών που έχουν διεξαχθεί έχουν επικεντρωθεί σε παραδοσιακές διαδικασίες, όπως ο φυσικός διαχωρισμός και οι χημικές επεξεργασίες. Αντίθετα, υπήρξε περιορισμένη έρευνα σχετικά με τη χρήση νέων τεχνολογιών και ενσωματωμένων συστημάτων για την αποκομιδή των απορριμμάτων και την ανακύκλωση. Ως αποτέλεσμα, υπάρχουν ελάχιστα εμπειρικά στοιχεία που να υποστηρίζουν την αποτελεσματικότητα και τη σκοπιμότητά τους. Επιπλέον, υπάρχει έλλειψη τυποποίησης στην ανάπτυξη και εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών. Πολλές από

τις προτεινόμενες τεχνολογίες βρίσκονται σε πρώιμα στάδια ανάπτυξης και η αποτελεσματικότητα και η σκοπιμότητά τους δεν έχουν δοκιμαστεί πλήρως σε πραγματικές συνθήκες, όπως οι ερευνητικές εργασίες [16] [17] [18] [19]. Συγκεκριμένα στην εργασία των Khandaker et al. [16] προτείνεται ένα σύστημα μέτρησης της πληρότητας του κάδου απορριμμάτων σε πραγματικό χρόνο και ένα σύστημα πλοήγησης για την μείωση των διαδρομών των απορριματοφόρων. Το συγκεκριμένο σύστημα πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες εργαστηρίου και δεν αναπτύχθηκε ή δεν δόθηκε έμφαση σε ένα πληροφοριακό σύστημα (ΠΣ) το οποίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε μια τέτοια λύση, καθώς επίσης για την διασύνδεση χρησιμοποιεί Wi-Fi το οποίο έχει πολλές δεσμεύσεις. Ενώ η ερευνητική εργασία [17] δοκιμάστηκε μόνο σε δύο κάδους σε εργαστηριακές συνθήκες, χρησιμοποιώντας Arduino Uno το οποίο καταλαμβάνει πολύ χώρο στον κάδο. Επίσης, στην ερευνητική εργασία [18] πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μόνο σε εργαστηριακές συνθήκες και αξιοποιήθηκε το Arduino Uno και για την συνδεσιμότητα το WiFi τα οποία σε πραγματικές συνθήκες δημιουργούν ιδιαίτερο πρόβλημα. Στην ερευνητική εργασία [19] θα πρέπει οι κάδοι απορριμμάτων να επικοινωνούν με ένα κεντρικό κόμβο (hub) όπως έχουν διαχωριστεί από τον διαχειριστή του συστήματος δημιουργώντας προβλήματα κατά την πιθανή αλλαγή των κάδων. Υπάρχουν, επίσης, λίγες καθιερωμένες βέλτιστες πρακτικές για το σχεδιασμό και την εφαρμογή ενσωματωμένων συστημάτων στην ανακύκλωση [20] [21][22]. Στην εργασία [20] δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στο χαμηλό κόστος ανάπτυξης ενός συστήματος εντοπισμού ανακυκλώσιμων υλικών. Η εργασία είναι προς την σωστή κατεύθυνση όμως η θα έπρεπε να υπάρχει ακόμη ένας βασικό παράγοντας αυτού της ακρίβειας εντοπισμού του υλικού. Ενώ οι ερευνητές [21] έχουν δημιουργήσει ένα ολοκληρωμένο σύστημα, η ακρίβεια εντοπισμού τριών υλικών (μέταλλο, πλαστικό και χαρτί) είναι χαμηλό, ενώ δεν προβλέπεται η αναγνώριση αντικειμένων που δεν ανήκουν σε αυτές τις κατηγορίες. Τέλος, στην εργασία [22] η ακρίβεια εντοπισμού των υλικών είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Ως αποτέλεσμα, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί πώς να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά αυτές οι τεχνολογίες για τη βελτίωση των πρακτικών ανακύκλωσης. Αυτές είναι κάποιες αντιπροσωπευτικές ερευνητικές εργασίες που έχουν δημοσιευθεί πρόσφατα και αντιμετωπίζουν τα ίδια ερευνητικά ερωτήματα με τα δικά μας. Η δική μας ερευνητική εργασία στον τομέα της διαχείρισης των ΑΣΑ εστιάζει στο μειωμένο κόστος του συστήματος, στο πληροφοριακό σύστημα που αναπτύχθηκε ειδικά γι' αυτό το σκοπό καθώς και στην απρόσκοπτη συνδεσιμότητα του κάθε κάδου ξεχωριστά. Επιπλέον, μέσω της πιλοτικής εφαρμογής στο δήμο Κοζάνης, είχαμε πραγματικά δεδομένα. Όσον αφορά το ζήτημα της ανακύκλωσης και την αναγνώριση των υλικών,

καταφέραμε να επιτύχουμε υψηλή ακρίβεια εντοπισμού της τάξης του 92,43% και πάλι σε πραγματικές συνθήκες στη Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων στην Κοζάνη.

Η αξιολόγηση της σκοπιμότητας αυτών των τεχνολογιών είναι σημαντική για να διασφαλιστεί, ότι μπορούν να εφαρμοστούν σε πραγματικές συνθήκες. Για παράδειγμα, ένα ενσωματωμένο σύστημα που λειτουργεί καλά σε ένα εργαστηριακό περιβάλλον μπορεί να μην είναι εφικτό να εφαρμοστεί σε μια μονάδα ανακύκλωσης λόγω προβλημάτων, όπως οι περιορισμοί χώρου ή η συμβατότητα με τον υπάρχοντα εξοπλισμό. Η αξιολόγηση της σκοπιμότητας αυτών των τεχνολογιών μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό πιθανών εμποδίων στην εφαρμογή και στην ανάπτυξη στρατηγικών για την υπέρβασή τους. Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας και της σκοπιμότητας αυτών των τεχνολογιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι, όπως μελέτες περιπτώσεων, έρευνες και πειράματα. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να παράσχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με τα πιθανά οφέλη, το κόστος και τις προκλήσεις της χρήσης αυτών των τεχνολογιών στην ανακύκλωση. Ωστόσο, είναι σημαντικό να διασφαλιστεί, ότι οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι αυστηρές και καλά σχεδιασμένες, ώστε να διασφαλιστεί ότι τα ευρήματα είναι αξιόπιστα και έγκυρα.

1.2 Μεθοδολογία Έρευνας

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής η μεθοδολογία έρευνας που ακολουθήθηκε βασίστηκε στην συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση (Systematic Literature Review – SLR) όπου συλλέχθηκε, κωδικοποιήθηκε και αναλύθηκε η βιβλιογραφία που σχετίζεται με τα ενσωματωμένα συστήματα, την διαχείριση απορριμμάτων και την ανακύκλωση. Συγκεκριμένα μέσω της διεθνούς βιβλιογραφικής βάσης δεδομένων Scopus και του Google Scholar, επικεντρωθήκαμε στην αναζήτηση των ερευνητικών εργασιών της τελευταίας δεκαετίας μιας και η έρευνα μας απέδειξε πως μετά το 2012 υπάρχουν περισσότερες εργασίες από ότι παλιότερα. Οι λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήσαμε για την αναζήτηση ήταν: embedded system smartbin, embedded system recycling, embedded system object detection environment, methodology embedded system environment, Waste management, environmental protection. Κενά και περιοχές που χρίζουν επέκτασης διακρίνονται κατά την αξιοποίηση της συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης προσδιορίζοντας τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα της διδακτορικής διατριβής που παρουσιάζονται στην ενότητα 1.3. Έχοντας εντοπίσει τα κενά και τις επεκτάσεις, πραγματοποιήθηκε πειραματική ανάπτυξη τόσο στο εργαστήριο όσο και σε

πραγματικές συνθήκες η οποία παρουσιάζεται στις ενότητες 5 και 6. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε η πιλοτική εφαρμογή και η αξιολόγηση συστημάτων στο νομό Κοζάνης ως προς την ορθή λειτουργία του, καθώς επίσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στη Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων της ΕΠΑΔΥΜ που βρίσκεται στο Νότιο Πεδίο της ΔΕΗ στην Κοζάνη. Έτσι, ξεκινώντας από την βιβλιογραφική ανασκόπηση, αναπτύξαμε μια επιστημονική μεθοδολογία για τον σχεδιασμό των ενσωματωμένων συστημάτων στον τομέα του περιβάλλοντος και με την εφαρμογή της αξιολόγησης της αποδείχθηκε η χρησιμότητα της.

1.3 Ερευνητικοί στόχοι και ερευνητικά ερωτήματα

Με βάση την επικείμενη βιβλιογραφία και ενώ γίνονται προσπάθειες για την αξιοποίηση των ενσωματωμένων συστημάτων στους τομείς της αποκομιδής απορριμμάτων και της ανακύκλωσης, υπάρχουν αρκετές αδυναμίες που θα πρέπει να καλυφθούν και είναι αυτές που προσδιορίζουν τους ερευνητικούς στόχους της διδακτορικής διατριβής.

Οι ερευνητικοί στόχοι και τα ερωτήματα που εξετάζονται στην παρούσα διδακτορική διατριβή αναπτύχθηκαν ως απάντηση τόσο στο προσδιορισμένο ερευνητικό πρόβλημα όσο και στην ανάγκη αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας και της σκοπιμότητας των νέων τεχνολογιών και των ενσωματωμένων συστημάτων για την ανακύκλωση. Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζονται οι ερευνητικοί στόχοι και τα ερωτήματα που καθοδήγησαν την παρούσα μελέτη.

Ερευνητικοί στόχοι:

- Ανασκόπηση των υφιστάμενων τεχνικών αποκομιδής απορριμμάτων και ανακύκλωσης υλικών.

Ο πρώτος ερευνητικός στόχος αποσκοπεί στην καταγραφή της σημερινής κατάστασης που αφορά την διαδικασία αποκομιδής αστικών απορριμμάτων και την διαδικασία ανακύκλωσης υλικών. Μέσα από αυτή την καταγραφή θα είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε καλύτερα τις διαδικασίες που ακολουθούνται σήμερα στον κρίσιμο τομέα της αποκομιδής απορριμμάτων και ανακύκλωσης υλικών. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, η διατριβή εξετάζει τη σχετική βιβλιογραφία και αναλύει μελέτες περιπτώσεων.

- Προσδιορισμός των πιο αποτελεσματικών ενσωματωμένων συστημάτων στη διαδικασία αποκομιδής απορριμμάτων και ανακύκλωσης υλικών.

Ο δεύτερος ερευνητικός στόχος, αφορά στον εντοπισμό των πιο αποτελεσματικών ενσωματωμένων συστημάτων την διαδικασία αποκομιδής αστικών απορριμμάτων και την διαδικασία ανακύκλωσης υλικών. Ο στόχος αυτός είναι κρίσιμος, καθώς η επιτυχία των ενσωματωμένων συστημάτων θα εξαρτηθεί από την αποτελεσματικότητα και τη σκοπιμότητά τους.

- Αξιοποίηση των ενσωματωμένων συστημάτων και του Διαδικτύου των πραγμάτων στην αποκομιδή και ανακύκλωσης υλικών.

Ο τρίτος ερευνητικός στόχος αποσκοπεί στην καλύτερη αξιοποίηση των ενσωματωμένων συστημάτων με την χρήση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (ΔτΠ). Το ΔτΠ χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο σε διάφορα προβλήματα της καθημερινότητας και του εργασιακού χώρου. Τα ενσωματωμένα συστήματα αποτελούν αναπόσπαστο μέρος του ΔτΠ. Όσον αφορά τον τομέα του περιβάλλοντος υπάρχουν πολλές δυνατές λύσεις και εφαρμογές. Μέσω της διατριβής αναδεικνύονται οι μεγάλες δυνατότητες που υπάρχουν μέσω του ΔτΠ.

- Ανάπτυξη και αξιολόγηση της κατάλληλης μεθοδολογίας για τον σχεδιασμό και την αξιοποίηση των ενσωματωμένων συστημάτων στον τομέα του περιβάλλοντος.

Ο τέταρτος ερευνητικός στόχος αποσκοπεί στην ανάπτυξη και αξιολόγηση μιας κατάλληλης μεθοδολογίας που έχει ως στόχο να αξιοποιηθεί από τους ερευνητές στον τομέα των ενσωματωμένων συστημάτων και του περιβάλλοντος. Μέσω αυτού του στόχου οι ερευνητές θα έχουν στην διάθεσή τους μια μεθοδολογία περισσότερο προσαρμοσμένη στα ενσωματωμένα συστήματα.

Μέσα από τους ερευνητικούς στόχους προκύπτουν και τα ερευνητικά ερωτήματα:

- Ποια ενσωματωμένα συστήματα είναι σήμερα διαθέσιμα για την εφαρμογές στην ανακύκλωση και ποια είναι τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητές τους;
- Πώς τα ενσωματωμένα συστήματα μπορούν να βελτιώσουν τις διαδικασίες αποκομιδής απορριμμάτων και ανακύκλωσης υλικών, σε σχέση με τις παραδοσιακές

μεθόδους όσον αφορά την αποδοτικότητα, την αποτελεσματικότητα και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας;

- Με ποιον τρόπο μπορούν τα ενσωματωμένα συστήματα και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων να αξιοποιηθούν για να βελτιώσουν τις διαδικασίες αποκομιδής απορριμμάτων και ανακύκλωσης υλικών.
- Μπορεί μια νέα μεθοδολογία να αξιοποιηθεί για την χρήση των ενσωματωμένων συστημάτων στον τομέα του περιβάλλοντος;

1.4 Συνεισφορά της διατριβής

Σύμφωνα με τους παραπάνω ερευνητικούς στόχους η συνεισφορά της παρούσας διατριβής ορίζεται ως:

Συνεισφορά 1: Πραγματοποιήθηκε καταγραφή και αποτύπωση της σημερινής κατάστασης σχετικά με την διαδικασία αποκομιδής των αστικών απορριμμάτων με την χρήση ενσωματωμένων συστημάτων.

Συνεισφορά 2: Πραγματοποιήθηκε καταγραφή και αποτύπωση της σημερινής κατάστασης σχετικά με την ανακύκλωση απορριμμάτων στις Μονάδες Επεξεργασίας Απορριμμάτων (ΜΕΑ) με την χρήση ενσωματωμένων συστημάτων και όραση μηχανής.

Συνεισφορά 3: Πραγματοποιήθηκε καταγραφή και αποτύπωση της σημερινής κατάστασης σχετικά με την ανακύκλωση απορριμμάτων στην πηγή με την χρήση ενσωματωμένων συστημάτων και όραση μηχανής.

Συνεισφορά 4: Ανάπτυξη συστήματος με τη χρήση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (ΔτΠ) και ενσωματωμένων συστημάτων για την καλύτερη διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων.

Συνεισφορά 5: Ανάπτυξη συστήματος βασιζόμενο στην όραση μηχανής για τον εντοπισμό αντικειμένων στις ΜΕΑ σύμφωνα με το υλικό τους. Με αυτό τον τρόπο ο ανθρώπινος παράγοντας παρεμβαίνει λιγότερο στην διαδικασία διαχωρισμού των υλικών.

Συνεισφορά 6: Ανάπτυξη συστήματος βασιζόμενο στην όραση μηχανής, τα ΕΣ και το ΔτΠ για τον εντοπισμό αντικειμένων στην πηγή (στον κάδο) για τον άμεσο διαχωρισμό των υλικών.

Συνεισφορά 7: Δημιουργία επιπλέον δεδομένων στην συλλογή εικόνων απορριμμάτων (dataset). Για το καλύτερο αποτέλεσμα των αποτελεσμάτων στον εντοπισμό αντικειμένων καταγράφηκαν μέσω βίντεο απορρίμματα που στη συνέχεια ταξινομήθηκαν βάση του υλικού τους.

Συνεισφορά 8: Αναπτύχθηκε ειδική μεθοδολογία με την ονομασία “Προσαρμοστικό Μοντέλο Z” η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί από πληθώρα προβλημάτων που σχετίζονται με τα ενσωματωμένα συστήματα και το περιβάλλον.

Βασιζόμενοι στις παραπάνω συνεισφορές πραγματοποιήθηκαν οι δημοσιεύσεις σε ερευνητικά περιοδικά και συνέδρια με κριτές.

Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά:

[Π.1] **Ziouzios D**, Tsiktiris D, Baras N, Dasygenis M. A Distributed Architecture for Smart Recycling Using Machine Learning. *Future Internet*. 2020; 12(9):141. <https://doi.org/10.3390/fi12090141> (Scimago Q2)

[Π.2] **Ziouzios D**, Baras N, Balafas V, Dasygenis M, Stimoniaris A. Intelligent and Real-Time Detection and Classification Algorithm for Recycled Materials Using Convolutional Neural Networks. *Recycling*. 2022; 7(1):9. <https://doi.org/10.3390/recycling7010009> (Scimago Q2)

[Π.3.] **Ziouzios D**, Dasygenis M. Effectiveness of the IoT in Regional Energy Transition: The Smart Bin Case Study. *Recycling*. 2023; 8(1):28. <https://doi.org/10.3390/recycling8010028> (Scimago Q2)

[Π.4] Tsiktiris D, **Ziouzios D**, Dasygenis M. A High-Level Synthesis Implementation and Evaluation of an Image Processing Accelerator. *Technologies*. 2019; 7(1):4. <https://doi.org/10.3390/technologies7010004>

Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά συνέδρια:

[Σ.1] **D. Ziouzios** and M. Dasygenis, "A Smart Recycling Bin for Waste Classification," *2019 Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET)*, Volos, Greece, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/PACET48583.2019.8956270.

[Σ.2] **D. Ziouzios** and M. Dasygenis, "A Smart Bin Implementantion using LoRa," *2019 4th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)*, Piraeus, Greece, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/SEEDA-CECNSM.2019.8908523.

[Σ.3] N. Baras, **D. Ziouzios**, M. Dasygenis and C. Tsanaktsidis, "A cloud based smart recycling bin for waste classification," *2020 9th International Conference on Modern*

Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Bremen, Germany, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/MOCASST49295.2020.9200283.

[Σ.4] N. Baras, **D. Ziouzos**, M. Dasygenis and C. Tsanaktsidis, "A modern cloud based recycling system for smart cities," 2021 10th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Thessaloniki, Greece, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/MOCASST52088.2021.9493420.

[Σ.5] **D. Ziouzos**, N. Baras, M. Dasygenis, A. Manavis, C. Vanidis and C. Tsanaktsidis, "Fueling the technology growth using innovative IoT solutions: The SmartBin project," 2020 International Conference on Technology and Entrepreneurship (ICTE), Bologna, Italy, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICTE47868.2020.9215536.

[Σ.6] **D. Ziouzos**, N. Baras, M. Dasygenis and C. Tsanaktsidis, "Enhancing Technological Development Using Novel Internet Of Things Solutions: The Smart-Bin Project," 2021 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), Kuala Lumpur, Malaysia, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICECCE52056.2021.9514186.

[Σ.7] N. Baras, **D. Ziouzos**, M. Dasygenis and C. Tsanaktsidis, "Waste collection vehicle navigation in modern cities," 2021 6th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM), Preveza, Greece, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/SEEDA-CECNSM53056.2021.9565885.

[Σ.8] D. Tsiktiris, **D. Ziouzos** and M. Dasygenis, "HLS Accelerated Noise Reduction Approach Using Image Stacking on Xilinx PYNQ," 2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Thessaloniki, Greece, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/MOCASST.2019.8741574.

[Σ.9] **D. Ziouzos**, N. Baras, M. Dasygenis and C. Tsanaktsidis, "Envisioning IoT applications in a smart city to underpin an effective municipal strategy: The smartbin project", 2021 SHS Web Conf. 102 04020, doi: 10.1051/shsconf/202110204020

[Σ.10] **D. Ziouzos** and D. Minas, "A methodology to design ubiquitous embedded systems for environmental scenarios," AIP Conf Proc, vol. 2909, no. 1, p. 120013, Nov. 2023, doi: 10.1063/5.0182494.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Ενσωματωμένα Συστήματα στον τομέα του Περιβάλλοντος

2.1 Εισαγωγή

Στη σύγχρονη κοινωνία σε κάθε πτυχή της ζωής τα υπολογιστικά συστήματα διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο. Από τις απλές καθημερινές δραστηριότητες μέχρι και τις διαστημικές αποστολές αξιοποιείται η σύγχρονη τεχνολογία προς όφελος του ανθρώπου. Οι υπολογιστές βρίσκονται παντού γύρω μας και άλλες φορές γίνονται αντιληπτοί και άλλες όχι, προσφέροντας πλήθος υπηρεσιών. Η κατηγοριοποίησή τους μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια όπως η χρήση ή τα χαρακτηριστικά τους, και στις οποίες διακρίνουμε διάφορες υποκατηγορίες. Μια από αυτές τις κατηγοριοποιήσεις υπολογιστών αποτελεί ο διαχωρισμός τους σε γενικού και ειδικού σκοπού και στη συνέχεια πραγματοποιείται η υποκατηγοριοποίηση. Σύμφωνα με αυτή τη λογική υπάρχουν έξι (6) μεγάλες κατηγορίες υπολογιστών: 1. Προσωπικός Υπολογιστής (Personal Computer - PC), 2. Φορητός υπολογιστής (laptop ή notebook), 3. Υπολογιστής ταμπλέτα (ή απλά, tablet), 4. Μικρός Υπολογιστής (mini computer), 5. Μεγάλος Υπολογιστής (mainframe) και 6. Υπερυπολογιστής (Supercomputer).

Όλοι οι προαναφερόμενοι υπολογιστές αποτελούν υπολογιστές γενικού σκοπού, που σημαίνει ότι χρησιμοποιούνται για την επίλυση ενός ευρέος φάσματος επιστημονικών, τεχνικών, οικονομικών και άλλων προβλημάτων. Διαθέτουν μεγάλη μνήμη, προσεγγμένη διεπαφή ανθρώπου - μηχανής και πολλές μονάδες εισόδου-εξόδου. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1970, οι μικροεπεξεργαστές χρησιμοποιούνται για την ανάπτυξη της Κεντρικής Μονάδας Επεξεργασίας (ΚΜΕ) υπολογιστών (Central Processing Unit - CPU). Ένας μικροεπεξεργαστής (microprocessor - MP) περιλαμβάνει τις περισσότερες ή όλες τις λειτουργίες μιας ΚΜΕ σε ένα ενιαίο ολοκληρωμένο κύκλωμα.

Πέρα όμως από τους υπολογιστές γενικού σκοπού, υπάρχουν και τα Ενσωματωμένα Συστήματα (ΕΣ) - Embedded Systems (ES) τα οποία βρίσκονται παντού γύρω μας, ακόμα και εάν δεν γίνονται εύκολα αντιληπτά [23]. Ένας ορισμός των Ενσωματωμένων Συστημάτων σύμφωνα με τους Δασυγένη & Σούντρη [24] μπορεί να είναι ο εξής: *"Ενσωματωμένο Σύστημα είναι οποιαδήποτε συσκευή, η οποία περιλαμβάνει έναν προγραμματιζόμενο επεξεργαστή, ο οποίος δεν είναι ένας επεξεργαστής γενικού σκοπού"*.

Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό, οι συσκευές που διαθέτουν έναν προγραμματιζόμενο επεξεργαστή για κάποιον συγκεκριμένο - ειδικό σκοπό αποτελούν ένα Ενσωματωμένο Σύστημα. Αν και αντιλαμβανόμαστε τους υπολογιστές γενικού σκοπού, δεν συμβαίνει το ίδιο και με τα ΕΣ, τα οποία βρίσκονται παντού γύρω μας, και μάλιστα αυξάνονται με εκθετικούς ρυθμούς. Τα ΕΣ μπορούν να αξιοποιηθούν από τις απλές καθημερινές δραστηριότητες του ανθρώπου μέχρι και τις πιο εξειδικευμένες όπως: τηλεοράσεις, οικιακές συσκευές, οχήματα, ιατρικά συστήματα έξυπνα κτίρια, στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων, στην έξυπνη πόλη, έξυπνη γεωργία, ρομποτική και άλλα.

Τα ενσωματωμένα συστήματα έχουν γίνει αναπόσπαστο μέρος της σύγχρονης τεχνολογίας [25]–[27] τροφοδοτώντας συσκευές και συστήματα που χρησιμοποιούμε καθημερινά. Τα συστήματα αυτά έχουν σχεδιαστεί για να εκτελούν συγκεκριμένες εργασίες και ενσωματώνονται σε άλλες συσκευές για να παρέχουν λειτουργικότητα που θα ήταν αδύνατη διαφορετικά. Τα ενσωματωμένα συστήματα είναι συνήθως μικρά, εξαιρετικά αποδοτικά και βελτιστοποιημένα για χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Βρίσκονται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως συστήματα αυτοκινήτων, ιατρικές συσκευές, ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης, βιομηχανικός αυτοματισμός, αεροδιαστημική και αμυντική βιομηχανία και άλλα.

Τα ΕΣ αποτελούνται από ένα συνδυασμό στοιχείων υλικού και λογισμικού και έχουν σχεδιαστεί για να εκτελούν μια συγκεκριμένη εργασία ή ένα σύνολο εργασιών. Είναι σχεδιασμένα ώστε να είναι ιδιαίτερα αξιόπιστα και να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλόντων, από τις δύσκολες συνθήκες ενός κινητήρα αυτοκινήτου [28] έως τα ευαίσθητα περιβάλλοντα των ιατρικών συσκευών [29].

Τα ενσωματωμένα συστήματα υπάρχουν εδώ και πολλά χρόνια, αλλά η σημασία τους έχει αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια λόγω της ανόδου του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Το IoT είναι ένα δίκτυο φυσικών αντικειμένων ενσωματωμένων με αισθητήρες, λογισμικό και άλλες τεχνολογίες που επιτρέπουν σε αυτά τα αντικείμενα να συλλέγουν και να ανταλλάσσουν δεδομένα [30]. Τα ΕΣ διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στο IoT, παρέχοντας την ευφυΐα και τη συνδεσιμότητα που απαιτούνται για να γίνουν αυτές οι συσκευές έξυπνες.

Ένα από τα καθοριστικά χαρακτηριστικά των ενσωματωμένων συστημάτων είναι οι περιορισμένοι πόροι τους. Τα συστήματα αυτά έχουν συνήθως περιορισμένη επεξεργαστική ισχύ, μνήμη και αποθηκευτική ικανότητα και είναι βελτιστοποιημένα ως

προς την κατανάλωση ενέργειας. Αυτό καθιστά δύσκολη τη σχεδίαση και την ανάπτυξή τους, καθώς απαιτούν ένα διαφορετικό σύνολο αρχών σχεδίασης από τα παραδοσιακά υπολογιστικά συστήματα. Οι σχεδιαστές ενσωματωμένων συστημάτων πρέπει να εξισορροπούν την ανάγκη για λειτουργικότητα με τους περιορισμούς των πόρων του συστήματος, χρησιμοποιώντας συχνά έξυπνους αλγορίθμους και τεχνικές για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης.

Η ανάπτυξη ενσωματωμένων συστημάτων απαιτεί μια διεπιστημονική προσέγγιση, που περιλαμβάνει τεχνογνωσία στη σχεδίαση υλικού, την ανάπτυξη λογισμικού και την ολοκλήρωση συστημάτων. Οι σχεδιαστές ενσωματωμένων συστημάτων πρέπει να κατανοούν τα στοιχεία υλικού του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των μικροελεγκτών, των αισθητήρων και άλλων στοιχείων, καθώς και τα στοιχεία λογισμικού, των λειτουργικών συστημάτων και των εφαρμογών. Πρέπει επίσης να έχουν βαθιά κατανόηση των απαιτήσεων του συστήματος και του τρόπου με τον οποίο το σύστημα θα χρησιμοποιηθεί στο προβλεπόμενο περιβάλλον.

Ένα ενσωματωμένο σύστημα είναι ένα σύστημα υπολογιστή που έχει σχεδιαστεί για να ελέγχει, να παρακολουθεί ή να υποβοηθά τη λειτουργία μιας συσκευής ή μιας διεργασίας. Τα ενσωματωμένα συστήματα αποτελούν συνήθως μέρος ενός μεγαλύτερου συστήματος ή προϊόντος και η κύρια λειτουργία τους είναι να εκτελούν συγκεκριμένες εργασίες εντός του εν λόγω συστήματος. Η αρχιτεκτονική του συστήματος είναι σχεδιασμένη, έτσι ώστε να διασφαλίζει την αξιόπιστη λειτουργία του και την ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση.

Τα ενσωματωμένα συστήματα αποτελούνται συνήθως από τρία βασικά στοιχεία, δηλαδή το υλικό, το λογισμικό και το λειτουργικό σύστημα πραγματικού χρόνου (Real Time Operating Systems - RTOS). Το στοιχείο υλικού αποτελείται από μικροεπεξεργαστές ή μικροελεγκτές, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την εκτέλεση των εντολών που παρέχονται από το λογισμικό. Η συνιστώσα λογισμικού περιλαμβάνει το λογισμικό εφαρμογής, το λογισμικό οδηγού συσκευής και το RTOS. Το λογισμικό εφαρμογής είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση των συγκεκριμένων εργασιών για τις οποίες έχει σχεδιαστεί το ενσωματωμένο σύστημα. Το λογισμικό οδηγού συσκευής παρέχει τη διεπαφή μεταξύ του υλικού και του λογισμικού εφαρμογής, ενώ το RTOS είναι υπεύθυνο για τον προγραμματισμό των εργασιών που εκτελούνται από το λογισμικό εφαρμογής και τη διασφάλιση της εκτέλεσής τους εντός των απαιτούμενων χρονικών περιορισμών.

Τα ενσωματωμένα συστήματα διαφέρουν από τα συστήματα υπολογιστών γενικής χρήσης με διάφορους τρόπους. Πρώτον, τα ενσωματωμένα συστήματα σχεδιάζονται για την εκτέλεση συγκεκριμένων λειτουργιών, σε αντίθεση με τους υπολογιστές γενικής χρήσης που σχεδιάζονται για την εκτέλεση ευρέος φάσματος λειτουργιών. Δεύτερον, τα ενσωματωμένα συστήματα σχεδιάζονται για να λειτουργούν σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον, όπως ένα αυτοκίνητο, ένας ιατρικός εξοπλισμός ή βιομηχανικά μηχανήματα. Αυτό τα καθιστά πιο εξειδικευμένα από τους υπολογιστές γενικής χρήσης, οι οποίοι μπορούν να λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα περιβαλλόντων. Τρίτον, τα ενσωματωμένα συστήματα έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο, πράγμα που σημαίνει, ότι πρέπει να ανταποκρίνονται σε εισόδους εντός συγκεκριμένων χρονικών περιορισμών.

Τα ενσωματωμένα συστήματα έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση και ως εκ τούτου πρέπει να είναι αξιόπιστα και να λειτουργούν σωστά. Η αποτυχία ενός ενσωματωμένου συστήματος μπορεί να έχει καταστροφικές συνέπειες, ιδίως σε κρίσιμες εφαρμογές όπως η αεροπορία ή ο ιατρικός εξοπλισμός. Ως εκ τούτου, ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενσωματωμένων συστημάτων απαιτούν μια αυστηρή προσέγγιση που περιλαμβάνει διαδικασίες δοκιμής και επαλήθευσης.

Τα βασικά ορόσημα στην ιστορία των ενσωματωμένων συστημάτων περιλαμβάνουν την ανάπτυξη των μικροεπεξεργαστών και των μικροελεγκτών, την εισαγωγή των λειτουργικών συστημάτων πραγματικού χρόνου (RTOS) και τη χρήση των ενσωματωμένων συστημάτων σε κρίσιμες εφαρμογές [31].

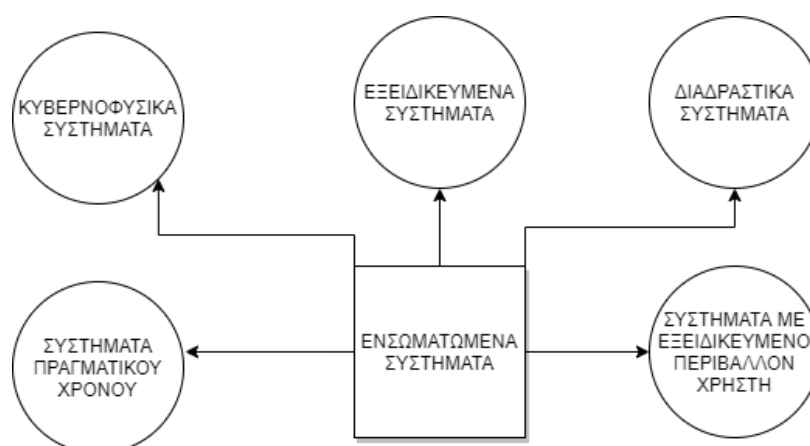
2.2 Σημασία των ενσωματωμένων συστημάτων στον σύγχρονο κόσμο

Η σημασία των ενσωματωμένων συστημάτων στον σύγχρονο κόσμο μπορεί να αποδοθεί σε διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του ρόλου τους στη βελτίωση της αποδοτικότητας, την ενίσχυση της λειτουργικότητας και τη διασφάλιση της αξιοπιστίας [31]. Τα ΕΣ έχουν σχεδιαστεί για να εκτελούν συγκεκριμένες εργασίες με υψηλή απόδοση, συχνά με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση. Στον βιομηχανικό αυτοματισμό, για παράδειγμα, τα ενσωματωμένα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση και τον έλεγχο των διαδικασιών, μειώνοντας την ανάγκη για ανθρώπινη εργασία και αυξάνοντας την παραγωγικότητα και είναι επίσης ζωτικής σημασίας για την ενίσχυση της λειτουργικότητας των συσκευών και των συστημάτων. Έχουν σχεδιαστεί για

να λειτουργούν αξιόπιστα, ακόμη και σε σκληρά περιβάλλοντα και υπό διάφορες συνθήκες και χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

2.3 Κοινά χαρακτηριστικά και απαιτήσεις των Ενσωματωμένων Συστημάτων

Όπως έχουμε δει τα ΕΣ μπορούν να διαφέρουν σε κάποια σημεία, όμως έχουν κοινά χαρακτηριστικά τα οποία τα ομαδοποιούν σε σχέση με άλλα υπολογιστικά συστήματα, και χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες όπως φαίνεται στην [Εικόνα 1](#).



Εικόνα 1: Κατηγορίες Ενσωματωμένων Συστημάτων

Με τον όρο Κυβερνοφυσικά συστήματα (cyber-physical system - CPS) ο οποίος αποδόθηκε για πρώτη φορά το 2006 από την Δρ. Helen Gill του Εθνικού Ινστιτούτου Επιστημών των Η.Π.Α., αναφερόμαστε σε φυσικά, βιολογικά και κατασκευασμένα συστήματα, των οποίων οι λειτουργίες είναι ενσωματωμένες, παρακολουθούνται ή / και ελέγχονται από έναν υπολογιστικό πυρήνα. Τα ΕΣ εκτελούν τις διαδικασίες παρακολούθησης και ελέγχου των φυσικών διαδικασιών. Κατά βάση, υπάρχει ένας βρόχος ανατροφοδότησης όπου η φυσική διαδικασία επηρεάζει τη διαδικασία υπολογισμού και αντίστροφα.

Η πλειονότητα των ΕΣ πρέπει να πληροί περιορισμούς σε πραγματικό χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι οι υπολογισμοί πρέπει να εκτελούνται μέσα σε ένα δεδομένο χρονικό πλαίσιο. Στην περίπτωση ενός συστήματος πραγματικού χρόνου (Real-Time System - RTS), ο χρόνος απόκρισης καθορίζει και την ποιότητα του συστήματος. Το RTS θα πρέπει να βρει μια σωστή λύση για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος πριν από μία συγκεκριμένη προθεσμία. Ο χρόνος απόκρισης (t_r) δεν πρέπει να υπερβαίνει κάποιο

μέγιστο χρόνο ($T_{\max}$). Εάν κάποιο συμβάν δεν πραγματοποιηθεί, τότε δεν υπάρχει καμία ενέργεια (από $T = 0$ έως $T = t_0$). Στην στιγμή t_0 , λαμβάνει χώρα το συμβάν E_1 . Το σύστημα το αναλύει, κάνει μερικούς υπολογισμούς και παίρνει μια απόφαση. Η απόκριση R_1 παράγεται στο στιγμιαίο t_1 . Έτσι, υπάρχει ο χρόνος $t_r = t_1 - t_0$. Εάν $t_r \leq T_{\max}$, τότε το RTS πληροί τους περιορισμούς για την εκδήλωση E_1 .

Υπάρχουν τρεις τύποι RTS: σκληρός, μαλακός και σταθερός, και διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τις επιπτώσεις που έχουν κατά την αθέτηση κάποιας προθεσμίας. Για όλα τα είδη συστημάτων, μια προθεσμία είναι μια δεδομένη στιγμή μετά την ενεργοποίηση κάποιου συμβάντος στο οποίο πρέπει δοθεί μία απάντηση. Στην περίπτωση του σκληρού RTS, η αθέτηση κάποιας προθεσμίας αποφέρει την συνολική αποτυχία του συστήματος. Σε αυτά τα συστήματα είναι επιτακτική ανάγκη η απόκριση να πραγματοποιείται εντός της απαιτούμενης προθεσμίας. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση της δυναμικής μετατόπισης $U(t)$ για να δείξουμε τις διαφορές των συστημάτων. Στην περίπτωση των "σκληρών" συστημάτων η εξίσωση είναι ως εξής:

$$U(t) = \begin{cases} 1 & \text{if } t < T_{\max} \\ -\infty & \text{if } t \geq T_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

Ενώ, στην περίπτωση των «μαλακών» RTS το αποτέλεσμα ενός συμβάντος μετά τη λήξη της προθεσμίας διαδραματίζει μικρό ρόλο, με αποτέλεσμα το σύστημα να λειτουργεί σωστά ακόμη και εάν κατά διαστήματα χάνονται κάποιες προθεσμίες. Το ίδιο ισχύει και για τα «σταθερά» συστήματα, όπου δεν δημιουργείται κάποιο πρόβλημα από τις χαμένες προθεσμίες στο σύστημα, ταυτόχρονα όμως δεν υπάρχει και κανένα όφελος από αυτή τη καθυστέρηση.

Τα ενσωματωμένα συστήματα είναι εξειδικευμένα συστήματα τα οποία εκτελούν κάποιον αλγόριθμο ελέγχου. Αυτό σημαίνει ότι ένα τέτοιο σύστημα εκτελεί μόνο υπολογισμούς που συνδέονται με αυτόν τον αλγόριθμο. Για παράδειγμα, ένας επεξεργαστής που ελέγχει τον κινητήρα του αυτοκινήτου ελέγχει πάντα μόνο τον συγκεκριμένο κινητήρα. Δεν θα εκτελέσει ποτέ ένα παιχνίδι υπολογιστή ή μια εφαρμογή πολυμέσων. Λόγω αυτής της εξειδίκευσης, είναι δυνατή η βελτιστοποίηση υλικού και λογισμικού ενός συγκεκριμένου ΕΣ, και έτσι μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα σύστημα με επιθυμητά χαρακτηριστικά με χαμηλότερη τιμή από τα υπολογιστικά συστήματα γενικής

χρήσης. Ένα τυπικό ΕΣ παρακολουθεί την κατάσταση ενός συγκεκριμένου αντικειμένου περιμένοντας την εμφάνιση κάποιων γεγονότων. Για κάθε είσοδο, ένα ΕΣ εκτελεί ορισμένους υπολογισμούς και δημιουργεί κάποιες εξόδους. Έτσι, υπάρχουν πολλοί κόμβοι αναμονής στους αλγόριθμους ελέγχου. Η δημιουργία μιας συνάρτησης εξόδου αλλάζει τις καταστάσεις του ΕΣ. Με αυτό τον τρόπο, τα διαδραστικά συστήματα θα μπορούσαν να αναπαρασταθούν χρησιμοποιώντας μοντέλα μηχανών πεπερασμένης κατάστασης. Κατά τη διάρκεια που περιμένουν κάποιο συμβάν, τα συστήματα δεν εκτελούν υπολογισμούς. Έτσι, είναι δυνατόν να μειωθεί η τάση ή να αποκλειστεί ο συγχρονισμός για ένα ψηφιακό μέρος του ΕΣ, το οποίο βοηθά στην εξοικονόμηση ενέργειας που καταναλώνεται.

Ένα τελευταίο κοινό χαρακτηριστικό των Ενσωματωμένων Συστημάτων είναι το εξειδικευμένο περιβάλλον χρήστη. Κατά βάση, υπάρχει μια τεράστια διαφορά μεταξύ των ΕΣ και των υπολογιστών γενικού σκοπού όσον αφορά τις διεπαφές των χρηστών. Οι περιφερειακές συσκευές όπως ποντίκι, πληκτρολόγιο, οθόνη κτλ. δεν υφίστανται συνήθως στα ΕΣ.

2.5 Τομείς χρήσης Ενσωματωμένων Συστημάτων

Τα Ενσωματωμένα Συστήματα χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών σε όλες τις δραστηριότητες του ανθρώπου όπως τα καταναλωτικά ηλεκτρονικά συστήματα (έξυπνα κινητά τηλέφωνα, τηλεοράσεις, οικιακές συσκευές, έξυπνα ρολόγια κτλ.), βιομηχανικός αυτοματισμός, η αεροδιαστημική και η άμυνα, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, αλλά και η χρήση τους στους τομείς τους περιβάλλοντος είναι ιδιαίτερη σημαντική όπως, στα έξυπνα δίκτυα ενέργειας (smart grid), την διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) και την ανακύκλωση απορριμμάτων.

Τα ΕΣ αξιοποιούν διάφορους αισθητήρες οι οποίοι αποτελούν βασικό συστατικό τους, καθώς επιτρέπουν στο σύστημα να αντιλαμβάνεται και να αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον στο οποίο λειτουργούν. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι αισθητήρων, με διαφορετικά χαρακτηριστικά και εφαρμογή όπως αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης, φωτός, αερίων και άλλοι.

Σημαντικό είναι να δοθεί έμφαση στην αξιοποίηση των ενσωματωμένων συστημάτων σε έξυπνα δίκτυα και συστήματα διαχείρισης ισχύος για τη βελτίωση της αποδοτικότητας, της αξιοπιστίας και της ασφάλειας της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα έξυπνου δικτύου χρησιμοποιούν προηγμένες τεχνολογίες επικοινωνίας και ενσωματωμένα

συστήματα για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ροής της ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Τα ενσωματωμένα συστήματα χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της κατάστασης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, την ανίχνευση σφαλμάτων και τη διαχείριση της διανομής ηλεκτρικής ενέργειας για την ελαχιστοποίηση των διακοπών και των διαταραχών. Στην εργασία των Ziouzios et. al [32] πραγματοποιείται η ανάλυση και η μοντελοποίηση των έξυπνων δικτύων ενέργειας. Συγκεκριμένα, σε αυτό το κεφάλαιο του βιβλίου, αναλύεται ο αλγόριθμός μοντελοποίησης σε περιβάλλον έξυπνου δικτύου ενέργειας, στις ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά και τα υδροηλεκτρικά συστήματα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση με τη χρήση του λογισμικού GNU Octave, το οποίο είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικα και είναι συμβατό με πληθώρα σεναρίων του MATLAB. Για την ορθή προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε και το πακέτο MATPOWER που είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης και βελτιστοποίησης συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας για το MATLAB και το Octave.

Τα συστήματα διαχείρισης ισχύος χρησιμοποιούν ενσωματωμένα συστήματα για τη διαχείριση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε σπίτια, επιχειρήσεις και βιομηχανίες. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν προηγμένους αισθητήρες και τεχνολογίες επικοινωνίας για την παρακολούθηση της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε πραγματικό χρόνο και την προσαρμογή της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας για τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας και τη μείωση της σπατάλης.

2.6 Τύποι ενσωματωμένων συστημάτων

Τα ενσωματωμένα συστήματα αποτελούν κρίσιμα συστατικά της σύγχρονης τεχνολογίας και διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στον έλεγχο και την παρακολούθηση της λειτουργικότητας των συσκευών στις οποίες είναι ενσωματωμένα. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση των ενσωματωμένων συστημάτων είναι καθοριστικής σημασίας για τη διασφάλιση της αξιόπιστης και αποτελεσματικής λειτουργίας αυτών των συσκευών. Τα ενσωματωμένα συστήματα μπορούν να υλοποιηθούν χρησιμοποιώντας διάφορες πλατφόρμες υλικού και λογισμικού, όπως συστοιχίες προγραμματιζόμενων πυλών πεδίου (FPGA), συστήματα βασισμένα σε ARM, συστήματα βασισμένα σε Arduino, συστήματα βασισμένα σε Raspberry Pi και σε πολλά άλλα. Αυτή η ενότητα παρέχει μια εισαγωγή στους διάφορους τύπους ενσωματωμένων συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των βασικών χαρακτηριστικών και των εφαρμογών τους.

Ενσωματωμένα συστήματα βασισμένα σε διάταξη προγραμματιζόμενων πυλών πεδίου (FPGA)

Τα ενσωματωμένα συστήματα που βασίζονται σε FPGA αποτελούνται από προγραμματιζόμενες λογικές συσκευές που μπορούν να διαμορφωθούν, ώστε να εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες. Οι πλακέτες FPGA αποτελούνται από μια συστοιχία διαμορφώσιμων λογικών μπλοκ και προγραμματιζόμενων διασυνδέσεων που επιτρέπουν στους σχεδιαστές να δημιουργούν προσαρμοσμένα λογικά κυκλώματα. Οι πλακέτες FPGA είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για την υλοποίηση υψηλών ταχυτήτων και πολύπλοκων αλγορίθμων ψηφιακής επεξεργασίας σήματος και χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως η επεξεργασία βίντεο, οι ασύρματες επικοινωνίες και τα στρατιωτικά συστήματα.

Ενσωματωμένα συστήματα βασισμένα σε ARM

Τα ενσωματωμένα συστήματα με βάση τον ARM αποτελούνται από μικροεπεξεργαστές και μικροελεγκτές που βασίζονται στην αρχιτεκτονική ARM. Οι επεξεργαστές ARM έχουν σχεδιαστεί για να είναι χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και αποδοτικοί, γεγονός που τους καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλους για εφαρμογές που λειτουργούν με μπαταρίες και κινητές συσκευές. Τα συστήματα που βασίζονται στον ARM χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως smartphones, tablets και άλλες κινητές συσκευές, καθώς και σε συστήματα ελέγχου αυτοκινήτων και βιομηχανικών συστημάτων.

Ενσωματωμένα συστήματα της οικογένειας Arduino βασισμένα σε AVR

Τα ενσωματωμένα συστήματα με βάση το Arduino αποτελούνται από πλατφόρμες υλικού και λογισμικού ανοικτού κώδικα που επιτρέπουν στους σχεδιαστές να κατασκευάζουν γρήγορα και εύκολα ενσωματωμένα συστήματα. Οι πλακέτες Arduino έχουν σχεδιαστεί για να είναι απλές στη χρήση και είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για την κατασκευή πρωτοτύπων. Τα συστήματα που βασίζονται στο Arduino χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως η ρομποτική, ο οικιακός αυτοματισμός και η περιβαλλοντική παρακολούθηση.

Ενσωματωμένα συστήματα της οικογένειας Raspberry Pi βασισμένα σε ARM

Τα ενσωματωμένα συστήματα με βάση το Raspberry Pi αποτελούνται από μικρούς, χαμηλού κόστους και ισχυρούς υπολογιστές μιας πλακέτας. Οι πλακέτες Raspberry Pi έχουν σχεδιαστεί για να είναι εύχρηστες και είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για εκπαιδευτικά

και ερασιτεχνικά έργα. Τα συστήματα που βασίζονται στο Raspberry Pi χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπως κέντρα πολυμέσων, οικιακός αυτοματισμός και ρομποτική.

2.7.1 Ενσωματωμένα συστήματα βασισμένα σε FPGA

Τα ενσωματωμένα συστήματα που βασίζονται σε FPGA αποτελούνται από προγραμματιζόμενες λογικές διατάξεις οι οποίες μπορούν να διαμορφωθούν ώστε να εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες. Αυτές οι συσκευές αποτελούνται από μια σειρά διαμορφώσιμων λογικών μπλοκ και προγραμματιζόμενων διασυνδέσεων που επιτρέπουν στους σχεδιαστές να δημιουργούν προσαρμοσμένα λογικά κυκλώματα. Τα συστήματα που βασίζονται σε FPGA περιλαμβάνουν επίσης επεξεργαστές, μνήμη και διεπαφές εισόδου/εξόδου (I/O) που επιτρέπουν στο σύστημα να αλληλοεπιδρά με το εξωτερικό περιβάλλον [33].

Τα ενσωματωμένα συστήματα που βασίζονται σε FPGA λειτουργούν με τη διαμόρφωση των προγραμματιζόμενων λογικών διατάξεων, ώστε να εκτελούν συγκεκριμένες λειτουργίες. Η διαδικασία διαμόρφωσης περιλαμβάνει τη συγγραφή κώδικα σε γλώσσα περιγραφής υλικού (Hardware Description Language- HDL), όπως Verilog ή VHDL, που περιγράφει τη λειτουργικότητα του συστήματος. Ο κώδικας HDL συντίθεται στη συνέχεια σε ένα αρχείο δυαδικής ακολουθίας bitstream που φορτώνεται στο FPGA. Το αρχείο bitstream διαμορφώνει το FPGA ώστε να εκτελεί τις συγκεκριμένες λειτουργίες που περιγράφονται στον κώδικα HDL [34].

Τα συστήματα που βασίζονται σε FPGA μπορούν να αναδιαμορφωθούν κατά την εκτέλεση, πράγμα που σημαίνει ότι η λειτουργικότητα του συστήματος μπορεί να αλλάξει χωρίς την ανάγκη τροποποιήσεων υλικού. Αυτό καθιστά τα συστήματα που βασίζονται σε FPGA ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές που απαιτούν ευελιξία και προσαρμοστικότητα.

Εφαρμογές ενσωματωμένων συστημάτων με βάση FPGA

Τα ενσωματωμένα συστήματα που βασίζονται σε FPGA χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλές ταχύτητες και πολύπλοκους αλγορίθμους ψηφιακής επεξεργασίας σήματος. Τα συστήματα αυτά είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για εφαρμογές, όπως η επεξεργασία βίντεο, οι ασύρματες επικοινωνίες και τα στρατιωτικά συστήματα, όπου οι υψηλές επιδόσεις και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας αποτελούν κρίσιμες απαιτήσεις.

Στις εφαρμογές επεξεργασίας βίντεο, οι πλακέτες FPGA μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτέλεση εργασιών όπως η κωδικοποίηση, η αποκωδικοποίηση και η συμπίεση βίντεο. Οι πλακέτες FPGA είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για εφαρμογές επεξεργασίας βίντεο επειδή μπορούν να εκτελέσουν αυτές τις εργασίες σε πραγματικό χρόνο και με χαμηλή καθυστέρηση.

Σε εφαρμογές ασύρματης επικοινωνίας, οι πλακέτες FPGA μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση ασύρματων πρωτοκόλλων όπως το Bluetooth, το Wi-Fi και το LTE. Οι πλακέτες FPGA είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για εφαρμογές ασύρματης επικοινωνίας, επειδή μπορούν να εκτελέσουν εργασίες επεξεργασίας σήματος, όπως φιλτράρισμα, διαμόρφωση και αποδιαμόρφωση με υψηλή απόδοση και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

2.7.2 Ενσωματωμένα συστήματα βασισμένα σε ARM

Η αρχιτεκτονική ARM είναι μια οικογένεια μικροεπεξεργαστών και μικροελεγκτών βασισμένων στην αρχιτεκτονική υπολογιστή περιορισμένου συνόλου εντολών (Reduced instruction set computer -RISC) που αναπτύχθηκε από την ARM Holdings, μια βρετανική εταιρεία σχεδιασμού ημιαγωγών. Οι επεξεργαστές ARM έχουν σχεδιαστεί για να είναι χαμηλής ισχύος, υψηλής απόδοσης και κλιμακούμενοι, καθιστώντας τους ιδιαίτερα κατάλληλους για χρήση σε ενσωματωμένα συστήματα. Η αρχιτεκτονική ARM χωρίζεται σε διάφορες οικογένειες, συμπεριλαμβανομένων των οικογενειών Cortex-A, Cortex-R και Cortex-M [35].

Η οικογένεια Cortex-A έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές υψηλών επιδόσεων, όπως smartphones, tablets και άλλες κινητές συσκευές. Οι επεξεργαστές Cortex-A χαρακτηρίζονται από υψηλές ταχύτητες ρολογιού, πολλαπλούς πυρήνες και υποστήριξη για εικονικοποίηση και εκτέλεση εκτός σειράς.

Η οικογένεια Cortex-R έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπως συστήματα αυτοκινήτων και ιατρικού εξοπλισμού. Οι επεξεργαστές Cortex-R χαρακτηρίζονται από τους ντετερμινιστικούς και γρήγορους χρόνους απόκρισης, την υποστήριξη ανίχνευσης και διόρθωσης σφαλμάτων και τη χαμηλή καθυστέρηση διακοπών.

Η οικογένεια Cortex-M [36] έχει σχεδιαστεί για εφαρμογές χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και ευαίσθητες στο κόστος, όπως συσκευές IoT, οικιακός αυτοματισμός και βιομηχανικά συστήματα ελέγχου. Οι επεξεργαστές Cortex-M χαρακτηρίζονται από τη

χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, τον μικρό συντελεστή μορφής και την υποστήριξη ελέγχου υλικού χαμηλού επιπέδου.

Τα ενσωματωμένα συστήματα που βασίζονται σε αρχιτεκτονική ARM διαθέτουν διάφορα χαρακτηριστικά που τα καθιστούν ελκυστικά για χρήση σε ενσωματωμένα συστήματα. Αυτά τα χαρακτηριστικά περιλαμβάνουν, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, υψηλές επιδόσεις, επεκτασιμότητα, ευελιξία, υποστήριξη περιφερειακών συσκευών.

Τα ενσωματωμένα συστήματα με βάση τον ARM χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης, συστήματα αυτοκινήτων, ιατρικός εξοπλισμός και βιομηχανικά συστήματα ελέγχου.

2.7.3 Ενσωματωμένα συστήματα με βάση το Arduino

Τα ενσωματωμένα συστήματα που βασίζονται στο Arduino [37] αποτελούνται από μια πλακέτα μικροελεγκτή και ένα περιβάλλον ανάπτυξης που περιλαμβάνει μια γλώσσα προγραμματισμού και ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (IDE). Η πλακέτα μικροελεγκτή αποτελείται από έναν μικροελεγκτή, έναν φορτωτή εκκίνησης και διεπαφές εισόδου/εξόδου (Input/Output - I/O). Το περιβάλλον ανάπτυξης περιλαμβάνει μια γλώσσα προγραμματισμού βασισμένη στη γλώσσα προγραμματισμού Wiring και ένα IDE βασισμένο στη γλώσσα προγραμματισμού Processing.

Τα ενσωματωμένα συστήματα που βασίζονται στο Arduino έχουν σχεδιαστεί για να είναι εύκολα στη χρήση, ακόμη και για όσους έχουν μικρή ή καθόλου εμπειρία στα ηλεκτρονικά ή στον προγραμματισμό. Η απλότητα και το χαμηλό κόστος των πλακετών Arduino τις έχουν καταστήσει δημοφιλείς μεταξύ ερασιτεχνών, προγραμματιστών και σχεδιαστών που θέλουν να δημιουργήσουν διαδραστικά έργα ή να δημιουργήσουν γρήγορα πρωτότυπα ηλεκτρονικών συσκευών.

Τα ενσωματωμένα συστήματα που βασίζονται στο Arduino χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Η απλότητα και το χαμηλό κόστος των πλακετών Arduino τις έχουν καταστήσει δημοφιλείς. Τα ενσωματωμένα συστήματα με βάση το Arduino χρησιμοποιούνται επίσης σε εκπαιδευτικά περιβάλλοντα για τη διδασκαλία ηλεκτρονικών και προγραμματισμού σε μαθητές.

2.7.4 Ενσωματωμένα συστήματα με βάση το Raspberry Pi

Το Raspberry Pi [38] είναι ένας υπολογιστής τσέπης, χαμηλού κόστους και με τέτοια ισχύ ώστε να μπορούν να εκτελέσουν μια σειρά λειτουργικών συστημάτων, όπως Linux, Android και Windows 10. Αποτελείται από έναν μικροεπεξεργαστή, μνήμη, διεπαφές I/O και μια μονάδα επεξεργασίας γραφικών (GPU). Οι πιο πρόσφατες πλακέτες Raspberry Pi διαθέτουν τετραπύρηνους επεξεργαστές ARM, μνήμη RAM έως και 8 GB και υποστήριξη για οθόνες 4K.

Τα ενσωματωμένα συστήματα που βασίζονται στο Raspberry Pi έχουν σχεδιαστεί για να είναι εύκολα στη χρήση και συνοδεύονται από μια σειρά εργαλείων λογισμικού και περιβαλλόντων ανάπτυξης. Το Ίδρυμα Raspberry Pi Foundation παρέχει μια σειρά από πόρους, συμπεριλαμβανομένων σεμιναρίων, οδηγιών και ενός φόρουμ κοινότητας, για την υποστήριξη των χρηστών στην ανάπτυξη έργων με πλακέτες Raspberry Pi.

Τα ενσωματωμένα συστήματα που βασίζονται στο Raspberry Pi χρησιμοποιούνται ευρέως σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των κέντρων πολυμέσων, του οικιακού αυτοματισμού, της ρομποτικής και της εκπαίδευσης.

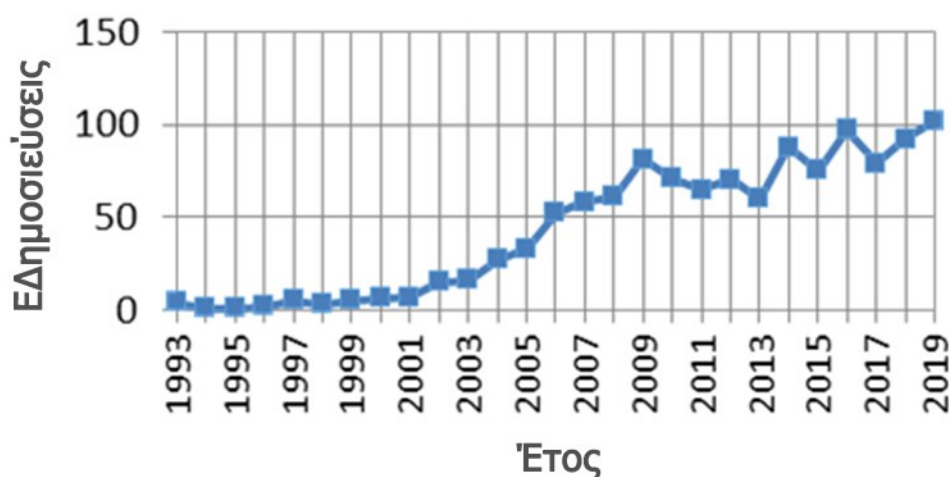
2.8 Εφαρμογές της τεχνολογίας FPGA

Οι συσκευές προγραμματιζόμενων πυλών επί του πεδίου (FPGA) είναι επαναδιαμορφώσιμα κυκλώματα που αποτελούνται από πολυάριθμα διασυνδεδεμένα λογικά κύτταρα. Οι FPGA περιέχουν μια συστοιχία προγραμματιζόμενων λογικών μπλοκ και μια ιεραρχία "επαναδιαμορφώσιμων διασυνδέσεων" που επιτρέπουν τη σύνδεση των μπλοκ μεταξύ τους. Εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ως πλατφόρμα υπολογιστών υψηλών επιδόσεων σε πολλαπλές εφαρμογές στις μέρες μας, παρά την επισκίασή τους από τις CPUs και τις GPUs. Τα γενικά βασικά πλεονεκτήματα των FPGA είναι ότι μπορούν να συνδεθούν εύκολα με τους περισσότερους τύπους κυκλωμάτων λόγω των ανεξάρτητων από το πρωτόκολλο σειριακών συνδέσεων και ότι προσφέρουν υπολογισμούς σκληρού πραγματικού χρόνου και εξαιρετικά παράλληλο αποτελεσματικό προγραμματισμό με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, χρησιμοποιώντας αλγοριθμική σύνθεση υψηλού επιπέδου [38]. Οι FPGA μπορούν να αναδιαμορφωθούν και να επαναπρογραμματιστούν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του χρήστη, σε αντίθεση με τις σταθερές δομές υλικού που έχουν οι CPU. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να τις χρησιμοποιούν σε μια τεράστια ποικιλία εφαρμογών.

Οι πλακέτες FPGA μπορούν στην πραγματικότητα να επανασυνδέσουν τα εσωτερικά τους κυκλώματα προκειμένου να επιτρέψουν τη διαμόρφωση, μετά την εγκατάσταση του συστήματος ελέγχου στο πεδίο. Επιπλέον, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας των εφαρμογών ρομποτικής υποδεικνύει τις FPGA ως κατάλληλα υπολογιστικά συστήματα σε σύγκριση με άλλες λύσεις. Στην πραγματικότητα, τα πλεονεκτήματα της χρήσης αναδιαμορφώσιμων δυναμικών συστημάτων δεν έγκεινται αποκλειστικά στην αυξημένη προσαρμοστικότητα στις μεταβαλλόμενες συνθήκες, αλλά και στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας χωρίς να επηρεάζονται οι δυνατότητες του ρομπότ. Συνολικά, το μέγεθος και η ταχύτητα ενός FPGA είναι παρόμοια με το ολοκληρωμένο κύκλωμα ειδικής εφαρμογής (ASIC), αλλά ο μικρότερος κύκλος σχεδιασμού και οι δυνατότητες επαναδιαμόρφωσης τα καθιστούν πιο εύελικτα για χρήση σε ρομποτικές εφαρμογές [39].

Οι πλακέτες FPGA είναι μια ώριμη τεχνολογία υλοποίησης, που μετρά πάνω από 35 χρόνια τεχνολογικών βελτιώσεων. Ταυτόχρονα, μετά από 70 χρόνια εξέλιξης στη ρομποτική, η πολυπλοκότητα του ελέγχου τους έχει φτάσει σε επίπεδο που μόνο πυρήνες επεξεργασίας υψηλών προδιαγραφών μπορούν να διαχειριστούν. Διερευνώντας την ανάμειξη μεταξύ της ρομποτικής και των FPGAs στη σχετική βιβλιογραφία, εντοπίσαμε ένα κενό. Στην παρούσα εργασία στοχεύουμε να απαντήσουμε στο ερευνητικό ερώτημα: Δεδομένων όλων των πλεονεκτημάτων των CPUs και των GPUs, είναι βιώσιμη η χρήση των FPGAs σε εφαρμογές ρομποτικής, και αν ναι, ποιοι είναι οι τομείς στους οποίους οι FPGAs υπερέχουν στον τομέα της ρομποτικής και ποιες προκλήσεις ελλοχεύουν μπροστά μας; Προς την κατεύθυνση αυτή, διερευνήσαμε τις επιστημονικές δημοσιεύσεις που περιλαμβάνονται στην λίστα IEEE κατά τη δεκαετή περίοδο μεταξύ 2010 και 2019 [40], προκειμένου να αποκτήσουμε μια συνολική εικόνα των τυπικών πεδίων εφαρμογής των FPGAs σε ρομποτικές εφαρμογές. Στο διάγραμμα παρουσιάζεται η απόλυτη ποσότητα του συνόλου των δημοσιεύσεων όσον αφορά τα περιοδικά, τα συνέδρια, τα άρθρα πρώιμης πρόσβασης και τα περιοδικά στην ψηφιακή βιβλιοθήκη IEEE Xplore και ACM, απεικονίζοντας την πραγματική τάση δημοσίευσης κατά τα τελευταία 27 χρόνια, δεδομένου ότι η βιβλιοθήκη περιλαμβάνει στοιχεία δημοσιεύσεων από το 1993. Ο συνολικός αριθμός δημοσιεύσεων από το 1993 έως το 2019 σχετικά με τις FPGAs στη ρομποτική είναι 1.174 δημοσιεύσεις, συμπεριλαμβανομένων των προαναφερθέντων τεσσάρων τύπων δημοσιεύσεων. Εμείς επιλέξαμε να επικεντρωθούμε στην τελευταία δεκαετία όπου ο αριθμός των δημοσιεύσεων είναι μεγαλύτερος σε σχέση με τις άλλες χρονικές περιόδους.

Ο αριθμός των δημοσιεύσεων για την εξεταζόμενη περίοδο 2010-2019 μετρά συνολικά 815 δημοσιεύσεις, όπου οι 762 είναι δημοσιεύσεις σε συνέδρια, 49 δημοσιεύσεις σε περιοδικά, 2 άρθρα πρώιμης πρόσβασης και 2 άρθρα σε περιοδικά. Ο μέσος αριθμός δημοσιεύσεων κατά τη δεκαετή περίοδο έρευνας είναι σχεδόν 80 δημοσιεύσεις ανά έτος. Όπως προκύπτει από διάγραμμα της [Εικόνας 2](#), από το 1993 έως το 2001 ο αριθμός των επιστημονικών δημοσιεύσεων (ΕΔημοσιεύσεις) παραμένει σχετικά σταθερός με λιγότερες από 10 δημοσιεύσεις/έτος, ενώ από το 2002 έως το 2009 παρατηρείται ετήσια σημαντική αύξηση, φθάνοντας στην ανώτατη τιμή των 81 δημοσιεύσεων το 2009. Έκτοτε, παρατηρείται μια κυμαινόμενη καταμέτρηση κατά τη χρονική περίοδο εξέτασης 2010-2019, με τη μέγιστη τιμή να επιτυγχάνεται το 2019 με 102 δημοσιεύσεις. Το διάγραμμα αποτυπώνει την τεχνολογική έκρηξη στις δυνατότητες των FPGA που ξεκίνησε το 2000, επιτρέποντας την ευρεία χρήση των FPGA σε ρομποτικές εφαρμογές



Εικόνα 2: Αριθμός επιστημονικών δημοσιεύσεων ρομποτικών συστημάτων που χρησιμοποιούν FPGA ανά έτος

Η τάση αυτή διήρκεσε σχεδόν μια δεκαετία, μέχρι το 2009, και έκτοτε οι ρομποτικές εφαρμογές FPGA - σύμφωνα με τον αριθμό των δημοσιεύσεων - παραμένουν σχετικά σταθερές με κυμαινόμενες τάσεις. Δεδομένου ότι το σύνολο των δημοσιεύσεων για την εξεταζόμενη χρονική περίοδο είναι σχεδόν 800, οι ερευνητές, Ziouziou et al. [40], επιλέγουν να αναλύσουν 20 δημοφιλείς δημοσιεύσεις για κάθε έτος, προκειμένου να αποτυπώσουν τις τελευταίες επιστημονικές τάσεις. Ο συνολικός αριθμός των δημοσιεύσεων που εξετάστηκαν για τη δεκαετή περίοδο είναι 200.

Η συγκεκριμένη έρευνα [40] έχει δημοσιευτεί σε έγκριτο επιστημονικό περιοδικό και ακολουθεί την εξής δομή: αρχικά, γίνεται μια σύντομη θεωρητική ανάλυση των σύγχρονων τύπων ρομπότ όσον αφορά τα πεδία εφαρμογής τους και τον μηχανισμό αλληλεπίδρασης, σύμφωνα με τις τελευταίες τάσεις της βιβλιογραφίας. Ακολουθεί η περιγραφή των τριών

κύριων κατηγοριών ρομπότ, όπως ταξινομούνται σε αυτή την έρευνα. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα έξι κύρια πεδία εφαρμογής FPGA, όπως αποκαλύφθηκαν κατά την ανάλυση της έρευνας.

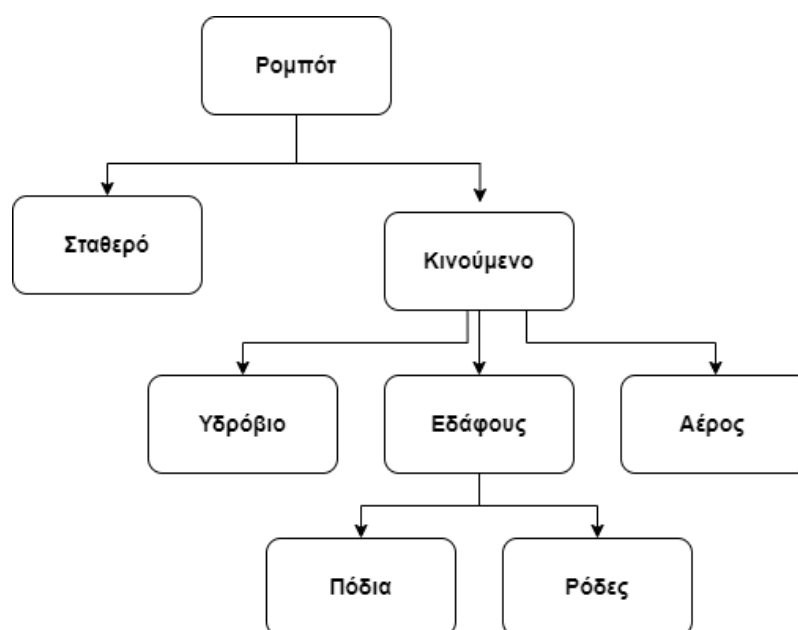
Η έρευνα περιλαμβάνει έναν κατάλογο μελετών που σχετίζονται με το FPGA και συναφή πεδία εφαρμογών καθώς και αρχιτεκτονικές και τεχνολογικές τάσεις. Μια λεπτομερής έρευνα για τις εφαρμογές του FPGA παρουσιάζεται από τους Johannes et al. [41]. Καταγράφονται 22 διακριτές τεχνολογικές εφαρμογές των FPGA και "άλλες" που αναφέρονται ως διακριτή κατηγορία, για μια περίοδο 15 ετών, διερευνώντας 815 δημοσιεύσεις στο IEEE Xplore και την ψηφιακή βιβλιοθήκη ACM για την προαναφερθείσα διάρκεια. Η έρευνα αυτή προσφέρει μια σχετικά ενδεικτική εικόνα των τεχνολογικών τάσεων των FPGA μέχρι το 2015, ωστόσο δεν διερευνά τις αρχιτεκτονικές FPGA που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για εφαρμογές ρομποτικής. Στην εργασία [42] υπογραμμίζεται η διαθεσιμότητα αναδιαμορφώσιμων εφαρμογών ως πλατφόρμες για ψηφιακούς ελεγκτές και παραθέτει τους σημαντικότερους παράγοντες για την τεχνολογική τάση της χρήσης των FPGA σε σύγκριση με άλλες αρχιτεκτονικές, κυρίως λόγω της επιτάχυνσης και της ευελιξίας των FPGA, της μείωσης του κόστους και της μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας. Η μελέτη [43] παραθέτει μια γενική περιγραφή των FPGAs, όσον αφορά τη χρήση τους ως επιταχυντές και πλατφόρμες προσομοίωσης, τη χρήση της ενσωματωμένης μνήμης τους και την ανοχή τους σε σφάλματα, καθώς και τις γλώσσες προγραμματισμού και τις μεθοδολογίες υπολογισμού. Ωστόσο, δεν παραθέτει εφαρμογές ανά έτος ούτε περιλαμβάνει συγκεκριμένη διάκριση των πεδίων εφαρμογής. Οι τεχνικές εικονικοποίησης FPGA περιλαμβάνονται στο [44], χωρισμένες σε τρεις κατηγορίες - επίπεδο πόρων, επίπεδο κόμβων και επίπεδο πολλαπλών κόμβων. Το πρώτο επίπεδο διερευνά αν οι πόροι της FPGA είναι επαναδιαμορφώσιμοι ή όχι. Το επίπεδο κόμβου διερευνά τις εφαρμογές που απαιτούνται τόσο από πλευράς λογισμικού όσο και από πλευράς υλικού όσον αφορά την εικονικοποίηση σε ένα μόνο FPGA. Στο επίπεδο πολλαπλών κόμβων περιγράφονται οι υπάρχουσες αρχιτεκτονικές για τον τρόπο σύνδεσης πολλαπλών FPGA.

Στις έρευνες [45][46] διερευνούν τις αρχιτεκτονικές δρομολόγησης των FPGA και παραθέτουν μια σύντομη περιγραφή των πρόσφατων τεχνολογικών εφαρμογών των FPGA, διακρίνοντάς τις σε οκτώ διαφορετικές κατηγορίες. Συμπερασματικά, δεν υπάρχουν ειδικές έρευνες όπως αυτή των Zizouzios et al. [40] και για το λόγο αυτό πιστεύουμε ότι η

εργασία μας θα διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο ως σημείο αναφοράς για τους ερευνητές στον τομέα της υλοποίησης ρομποτικών εφαρμογών σε FPGAs.

Στην έρευνά μας, κατηγοριοποιήσαμε τις εργασίες σε έξι (6) μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την εφαρμογή. Για να κατηγοριοποιηθεί ένας τομέας εφαρμογής ως ξεχωριστή κατηγορία, έπρεπε να εντοπιστούν τουλάχιστον πέντε (5) δημοσιεύσεις στις βάσεις δεδομένων. Ορισμένα πεδία εφαρμογών μπορούν να αναμειχθούν, για παράδειγμα, ένας ρομποτικός ελεγκτής μπορεί να χρησιμοποιεί έναν κανονικό αλγόριθμο FPGA και αρχιτεκτονική ασαφούς λογικής ή μια εφαρμογή πλοήγησης μπορεί να χρησιμοποιεί συστήματα επεξεργασίας εικόνας SoC FPGA.

Αν και δεν υπάρχει αυστηρή ταξινόμηση των ρομπότ, οι περισσότερες ρομποτικές εφαρμογές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν είτε σύμφωνα με τον μηχανισμό αλληλεπίδρασής τους είτε σύμφωνα με το πεδίο εφαρμογής τους [47]. Στην [Εικόνα 3](#) απεικονίζεται η ταξινόμηση των ρομπότ σύμφωνα με τον μηχανισμό αλληλεπίδρασής τους.



Εικόνα 3: Ταξινόμηση ρομπότ με βάση τον μηχανισμό αλληλεπίδρασης [7]

Έχουμε λοιπόν, δύο βασικές κατηγορίες σταθερό και κινούμενο ρομπότ. Το κινούμενο ρομπότ χωρίζεται σε α) υδρόβιο και αφορά ρομπότ τα οποία κινούνται στο υγρό στοιχείο όπως θάλασσες, ποτάμια, λίμνες, β) αέρος και γ) εδάφους τα οποία με τη σειρά τους χωρίζονται σε αυτά τα οποία έχουν ρόδες ή πόδια για την κίνηση τους.

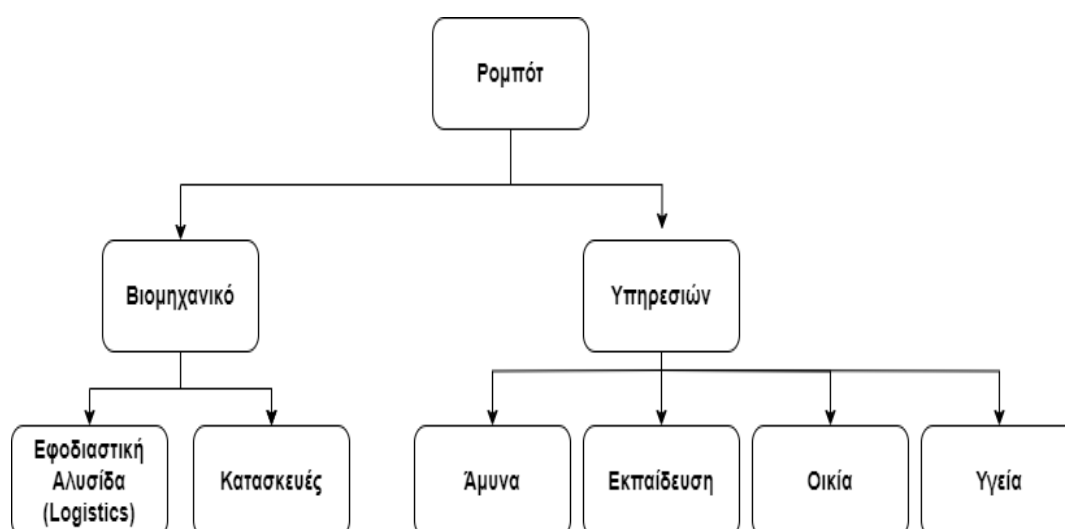
Στην [Εικόνα 4](#) παρουσιάζονται οι έξι υποκατηγορίες ρομπότ ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής, όπου πρέπει να σημειωθεί ότι μπορεί να περιλαμβάνουν και παραλλαγές. Για

παράδειγμα, τα εκπαιδευτικά ρομπότ μπορεί να είναι, είτε τροχοφόρα, είτε ανθρωποειδή (με πόδια) και τα βιομηχανικά ρομπότ μπορεί να είναι ή αρθρωτά ρομπότ, καρτεσιανά ρομπότ, παράλληλα, σφαιρικά ή SCARA κ.λπ. [48]. Οι προαναφερθείσες κατηγορίες βασίζονται στο κύριο μέσο πλοήγησης (για τα εκπαιδευτικά ρομπότ) ή στη βασική διαμόρφωση του ρομπότ (για τα βιομηχανικά ρομπότ).

Ωστόσο, η παρούσα έρευνα περιλαμβάνει τις ρομποτικές εφαρμογές που εφαρμόζονται με FPGA, οπότε η ταξινόμηση των ρομπότ γίνεται σύμφωνα με τις κατηγορίες εκείνες που μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα πεδία εφαρμογής που βρέθηκαν στις δημοσιεύσεις της έρευνας και αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο. Οι κύριες κατηγορίες ρομπότ των ρομποτικών εφαρμογών που βασίζονται σε FPGA και περιλαμβάνονται στην παρούσα έρευνα είναι οι εξής:

- Βιομηχανικά ρομπότ (A1)
- Αυτόνομα κινητά ρομπότ (A2)
- Ανθρωποειδή ρομπότ (A3)

Για να ταξινομηθεί ένας τύπος ρομπότ ως ξεχωριστή κατηγορία, έπρεπε να βρεθούν τουλάχιστον 5 δημοσιεύσεις για την επιλεγμένη περίοδο. Σε άλλες περιπτώσεις, η στήλη αυτή ταξινομείται ως "άλλο", υπονοώντας έναν διαφορετικό τύπο ρομπότ, που περιγράφεται στη στήλη "περιγραφή", όπως ιατρικό, αμυντικό, εκπαιδευτικό κ.λπ.



Εικόνα 4: Ταξινόμηση των ρομπότ ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους [76].

Τα βιομηχανικά ρομπότ αποτελούν μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες που σχετίζονται με τα FPGA. Οι κύριες υποκατηγορίες αυτής της κύριας κατηγορίας ρομπότ είναι [49]:

- Αρθρωτά ρομπότ
- Καρτεσιανά ρομπότ
- Κυλινδρικά ρομπότ
- Ρομπότ SCARA
- Ρομπότ δέλτα
- Πολικά ρομπότ

Ο τύπος του αρθρωτού ρομπότ είναι από τους πιο συνηθισμένους τύπους βιομηχανικής ρομποτικής. Περιλαμβάνει έναν μηχανικό βραχίονα συνδεδεμένο με μια σταθερή βάση. Οι περιστροφικές αρθρώσεις που συνδέουν τις ενώσεις του βραχίονα μπορεί να ποικίλλουν, αν και τα πιο συνηθισμένα ρομπότ είναι αυτά με έξι αρθρώσεις. Οι αρθρώσεις δίνουν στο ρομπότ πρόσθετη ελευθερία στην κίνησή του, ενώ οι αρθρώσεις μπορεί να είναι είτε ορθογώνιες είτε παράλληλες. Τα καρτεσιανά ρομπότ ή τα ρομπότ γερανογέφυρας συγκαταλέγονται επίσης μεταξύ των πιο κοινών τύπων ρομπότ. Έχουν ορθογώνια διαμόρφωση με τρεις πρισματικές αρθρώσεις (X, Y, Z) που επιτρέπουν τη γραμμική κίνηση, ενώ ορισμένα ρομπότ Gantry διαθέτουν έναν επιπλέον καρπό που επιτρέπει την περιστροφική κίνηση. Τα κυλινδρικά ρομπότ χρησιμοποιούν έναν κύριο βραχίονα που κάνει κίνηση πάνω-κάτω. Αυτός ο βραχίονας είναι εσωτερικά ενσωματωμένος με έναν κύλινδρο που επιτρέπει την κίνηση επέκτασης/αντίδρασης. Τα κυλινδρικά ρομπότ χρησιμοποιούν μια τρισδιάστατη συντονισμένη αρχιτεκτονική που χρησιμοποιεί έναν ειδικά επιλεγμένο άξονα αναφοράς για την επιλογή των θέσεων των σημείων. Τα κυλινδρικά ρομπότ χρησιμοποιούνται κυρίως σε εργασίες συλλογής-τοποθέτησης υλικών. Τα ρομπότ SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) χρησιμοποιούν δύο παράλληλες αρθρώσεις που παρέχουν κίνηση σε ειδικά επιλεγμένη τροχιά. Οι περιστρεφόμενες τροχιές τοποθετούνται κάθετα και το λειτουργικό εργαλείο που είναι προσαρτημένο στον βραχίονα κινείται οριζόντια, καθιστώντας τα ρομπότ SCARA καταλληλότερα για εργασίες κάθετης συναρμολόγησης, όπου η αποτελεσματική και γρήγορη λειτουργία pick and place είναι κρίσιμη. Το κύριο χαρακτηριστικό των ρομπότ Delta είναι η διαμόρφωση των παράλληλων συνδέσμων τους, η οποία αποτελείται από

παράλληλες συνδέσεις αρθρώσεων που συνδέονται με μια κοινή σταθερή βάση. Η τοποθέτηση του επενεργητή ελέγχεται με τον ρομποτικό βραχίονα καθιστώντας τον τύπο ρομπότ κατάλληλο για ταχύτατες εφαρμογές pick-and-place. Τα πολικά (ή σφαιρικά) ρομπότ χρησιμοποιούν σταθερούς βραχίονες με σφαιρικά περιβλήματα εργασίας τα οποία μπορούν να τοποθετηθούν σε μια αρχιτεκτονική με πολικό συντονισμό. Χρησιμοποιούν μία γραμμική και δύο περιστροφικές αρθρώσεις που συνδέουν τους συνδέσμους και μία στρεπτική άρθρωση που συνδέεται με τον βραχίονα.

Τα αυτόνομα κινητά ρομπότ (Autonomous Mobile Robots - AMR) έχουν ταξινομηθεί ως ξεχωριστή κατηγορία, επειδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για βιομηχανικούς όσο και για οικιακούς, ιατρικούς, αμυντικούς ή εκπαιδευτικούς σκοπούς. Ένα AMR έχει σχεδιαστεί για να κινείται με τροχούς ή με πόδια (η προσομοίωση ανθρώπινου βαδίσματος εξαιρείται από την κατηγορία AMR) σε όλο το δάπεδο σε καθορισμένες θέσεις λειτουργώντας ως ευέλικτος βοηθός που εκτελεί πολυάριθμες εργασίες. Η κίνηση ενός AMR επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός συνόλου προηγμένων αισθητήρων επί του σκάφους, αρχιτεκτονικών FPGA και επεξεργαστών που του επιτρέπουν να κατανοεί και να ερμηνεύει το εξωτερικό του περιβάλλον. Τα προαναφερθέντα μέσα προσφέρουν στο AMR τη δυνατότητα να συνδυάζει τις πληροφορίες από πολλές διαφορετικές πηγές, όπως βίντεο ή GPS, προκειμένου να πλοηγείται, όταν υπάρχει δυσλειτουργία ή πλήρης απουσία δεδομένων από μία ή περισσότερες πηγές δεδομένων. Η βασική λειτουργία ενός AMR είναι το σύστημα ελέγχου του, όπου οι πλακέτες FPGA μπορούν να αποτελέσουν λύση υλοποίησης σε πολλές περιπτώσεις. Οι απαιτήσεις σχεδιασμού ενός αποτελεσματικού συστήματος ελέγχου AMR περιλαμβάνουν συνήθως την ενσωμάτωση πολλαπλών αισθητήρων και επεξεργαστών, την αντιδραστικότητα στο περιβάλλον, την επαναπρογραμματισιμότητα και επεκτασιμότητα.

Τα ανθρωποειδή ρομπότ είναι ρομποτικές εφαρμογές που μιμούνται τις δομές του ανθρώπινου σώματος τόσο από πλευράς συμπεριφοράς όσο και από πλευράς κίνησης. Θεωρούνται ένας σχετικά πολύπλοκος τύπος ρομπότ, καθώς είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη η μηχανική -μυοσκελετική δομή τους, το υπολογιστικό και αισθητηριακό νευρικό σύστημα, οι εφαρμοζόμενες μέθοδοι επεξεργασίας πληροφοριών στις πρωταρχικές μονάδες λήψης αποφάσεων του ρομπότ και οι εφαρμοζόμενοι αλγόριθμοι λογισμικού στο σύνολό τους και για κάθε δεδομένη εφαρμογή που πρέπει να εκτελέσουν. Οι πλακέτες FPGA μπορούν να χρησιμοποιηθούν για πολλαπλές εφαρμογές ανθρωποειδών ρομπότ, όπως ο έλεγχος της κίνησής τους, οι μονάδες επικοινωνίας μεταξύ ρομπότ και χρηστών, η

οπτική αντίχρευση και επεξεργασία που συνιστούν τη συνολική συμπεριφορά του ρομπότ κατά τη μίμηση της ανθρώπινης λειτουργικότητας. Ωστόσο, το πρωταρχικό στοιχείο που διακρίνει τα ανθρωποειδή σε σύγκριση με άλλους τύπους ρομπότ είναι η κίνηση που μιμείται τον άνθρωπο και η αντίδραση του ρομπότ που μοιάζει με του ανθρώπου [50]. Τα ανθρωποειδή με ενεργοποιητές υψηλού κέρδους τείνουν να έχουν χαμηλή απόδοση στην ορθή εκτίμηση των δυνάμεων που εφαρμόζει ο άνθρωπος για συγκεκριμένες λειτουργίες, ενώ η χρήση ενσωματωμένων πρόσθετων αισθητήρων πρώιμου σταδίου παρουσιάζει καλύτερη απόδοση στη συγκεκριμένη εφαρμογή [51].

2.8.2 Πεδία εφαρμογών της τεχνολογίας FPGA

Παρακάτω παρουσιάζονται εν συντομία τα κύρια πεδία εφαρμογής των τεχνολογικών στοιχείων που σχετίζονται με FPGA σε εφαρμογές ρομποτικής. Οι εφαρμογές αυτές μπορεί να είναι είτε μαθηματικοί αλγόριθμοι και αλγόριθμοι λογισμικού, είτε αρχιτεκτονικές υλικού προσανατολισμένες σε FPGA, είτε μικτά συστήματα με στοιχεία FPGA, είτε συνδυασμοί όλων των παραπάνω.

Οι ρομποτικοί ελεγκτές

Ένα ρομπότ αποτελεί μια αυτόνομη εφαρμογή ελέγχου κλειστού βρόχου, επειδή επηρεάζεται από τις εισόδους των αισθητήρων του. Λόγω της ιδιαίτερα αποτελεσματικής ενσωμάτωσης των πνευματικών ιδιοτήτων των ενσωματωμένων επεξεργαστών στην FPGA, οι μαθηματικοί αλγόριθμοι που εκτελούν τους απαιτητικούς υπολογισμούς που απαιτούνται από τους ελεγκτές ρομπότ μπορούν να υλοποιηθούν με λογισμικό στις πλακέτες FPGA. Αυτό το πεδίο εφαρμογών περιλαμβάνει κυρίως την κωδικοποίηση συστημάτων ελέγχου κίνησης FPGA σταθερής στήριξης ρομποτικών εφαρμογών και των βιομηχανικών ρομπότ. Τα βιομηχανικά ακίνητα ρομπότ χρησιμοποιούνται ευρέως για την επίλυση εργασιών όπως η συναρμολόγηση, ο χειρισμός ή η συγκόλληση.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι διαδρομών βάσει των οποίων μπορεί να λειτουργήσει ένα ρομπότ, ανάλογα με το σκοπό του. Ο απλούστερος τύπος κίνησης ρομπότ είναι η κίνηση από το ένα σημείο στο άλλο, χωρίς να χρειάζεται να εκτελέσει άλλες παράλληλες ταυτόχρονες ενέργειες. Αυτή η κίνηση μπορεί να εκτελεστεί ως μετατοπίσεις αρθρώσεων και αυτός ο τύπος ελέγχου ονομάζεται έλεγχος αρθρώσεων. Η κίνηση ελέγχου των αρθρώσεων εκφράζει τις αλληλεπιδράσεις της θέσης, της επιτάχυνσης και της ταχύτητας στη γλώσσα του ρομπότ περιγράφοντας τις απαραίτητες κινήσεις για την εκτέλεση της ζητούμενης ενέργειας.

Ο κύριος περιορισμός αυτής της μεθόδου ελέγχου είναι ότι ο χρήστης χρειάζεται πληροφορίες για τις διαστάσεις των αρθρώσεων, καθώς πρέπει να κατανοήσει τις μετατοπίσεις των αρθρώσεων του ρομπότ προκειμένου να οδηγήσει το ρομπότ στην επιθυμητή θέση. Αυτός ο περιορισμός μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση του καρτεσιανού χώρου, ο οποίος βοηθά στην ερμηνεία των κινήσεων του ρομπότ με τη χρήση καρτεσιανών συντεταγμένων, με βάση τον Ιακωβιανό πίνακα Transpose. Αυτός ο τύπος ελέγχου ονομάζεται καρτεσιανός έλεγχος [52]. Για το λόγο αυτό, οι μαθηματικοί αλγόριθμοι που αναπαριστούν την κινηματική της κίνησης του καρτεσιανού ελέγχου είναι σημαντικά σημαντικοί προκειμένου να προταθούν οι καταλληλότερες δομές ελέγχου. Στη συνέχεια, ο ελεγκτής που βασίζεται σε FPGA χρησιμοποιείται για να μετατρέψει την τροχιά που δημιουργείται στον καρτεσιανό χώρο σε τροχιά παράλληλου ρομπότ στον χώρο των αρθρώσεων. Αυτό το πεδίο εφαρμογής περιλαμβάνει την έρευνα που έχει αναληφθεί για αλγορίθμους κινηματικής και εφαρμογές λογισμικού όσον αφορά τους ρομποτικούς ελεγκτές, που αντιπροσωπεύουν κυρίως ακίνητα ρομπότ που εκτελούν βιομηχανικές εργασίες.

Χαρτογράφηση – Πλοήγηση

Αυτό το πεδίο εφαρμογής περιλαμβάνει έρευνα σχετικά με αυτόνομα κινητά ρομπότ, αναλύοντας τη χρήση ελεγκτών FPGA σε κρίσιμες λειτουργίες, όπως ο εντοπισμός, η χαρτογράφηση και η πλοήγηση του ρομπότ. Σε γενικές γραμμές, η πλοήγηση των ρομπότ χωρίζεται σε δύο μέρη: Το 1ο μέρος αφορά την ικανότητα του ρομπότ να επιλέγει την καταλληλότερη διαδρομή μεταξύ ενός σημείου εκκίνησης και ενός σημείου τερματισμού (στόχος). Αυτή η διαδρομή μπορεί να υπολογιστεί είτε κάνοντας υπολογισμούς με βάση προϋπάρχοντα δεδομένα που έχουν φορτωθεί είτε επεξεργαζόμενο εισερχόμενα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από το GPS και άλλες εφαρμογές. Το 2ο μέρος περιλαμβάνει την αποτελεσματικότητα του ρομπότ σε πραγματικό χρόνο όσον αφορά την προσαρμογή της συμπεριφοράς του στα χαρακτηριστικά του εξωτερικού περιβάλλοντος, όπως η αποφυγή εμποδίων, η πραγματοποίηση στροφών κ.λπ. Οι εφαρμογές FPGA μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τα δύο μέρη. Η πλοήγηση του ρομπότ πραγματοποιείται με τη χρήση αλγορίθμων παρακολούθησης γραμμής και αποφυγής εμποδίων που μπορούν να λειτουργήσουν με δεδομένα αισθητήρων και πιθανοτικών αλγορίθμων που μελετούν την κυκλοφορία και τα πρότυπα του εξωτερικού περιβάλλοντος. Η μονάδα ελέγχου FPGA

λαμβάνει και επεξεργάζεται όλα τα εισερχόμενα δεδομένα από αισθητήρες και μονάδες προκειμένου να επιλέξει την καταλληλότερη διαδρομή.

Ο εντοπισμός είναι μια άλλη κρίσιμη διαδικασία της κινητής ρομποτικής, καθώς χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης ενός ρομπότ σε σχέση με ένα εξωτερικό σημείο αναφοράς, που ονομάζεται ορόσημο. Υπάρχουν δύο μέθοδοι εντοπισμού: Η πρώτη μέθοδος υπολογίζει την απόσταση από το ορόσημο και τη γωνία του σε σχέση με το βορρά, που ονομάζεται αζιμούθιο. Η δεύτερη μέθοδος μετρά τις γωνίες προς το αντικείμενο από δύο διαφορετικές θέσεις, που ονομάζεται τριγωνισμός. Οι μονάδες ελέγχου FPGA μπορούν να επεξεργαστούν τα δεδομένα και με την εφαρμογή των κατάλληλων αλγορίθμων είναι σε θέση να καθορίσουν τη σωστή πορεία. Τα τελευταία χρόνια και οι δύο τεχνικές εντοπισμού έχουν αντικατασταθεί από τον εντοπισμό και την πλοήγηση μέσω GPS. Οι δέκτες FPGA χρησιμοποιούνται συχνά για την επεξεργασία δεδομένων GPS και την εφαρμογή των κατάλληλων αλγορίθμων πλοήγησης.

Ο ταυτόχρονος εντοπισμός και χαρτογράφηση (SLAM) είναι το επόμενο βήμα στη χαρτογράφηση και την πλοήγηση των ρομπότ. Πρωταρχικό καθήκον ενός κινητού ρομπότ σε ένα άγνωστο περιβάλλον είναι να δημιουργεί και να ενημερώνει συχνά έναν χάρτη του περιβάλλοντος και να υπολογίζει ταυτόχρονα την τρέχουσα θέση του εντός αυτού του χάρτη. Αυτή η λειτουργία ονομάζεται λειτουργία SLAM. Σε κανονικές συνθήκες, το ρομπότ μπορεί να χρησιμοποιήσει μετρήσεις αισθητήρων ή οδομετρίας για να συλλέξει πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον του προκειμένου να εκτελέσει εντοπισμό και χαρτογράφηση. Η λειτουργία SLAM χρησιμοποιείται όταν οι συνθήκες αυτές μεταβάλλονται, όπως ο εντοπισμός σε μια υποβρύχια ή διαστημική αποστολή. Ορισμένοι ερευνητές έχουν προτείνει τη χρήση πιθανοτικών μεθόδων, όπως τα Extended Kalman Filters [53]. Ο αλγόριθμος Extended Kaman Filters (EKF) υπολογίζει ταυτόχρονα έναν πρότυπο χάρτη του περιβάλλοντος και την τρέχουσα θέση του ρομπότ με βάση τα δεδομένα των οδομετρικών και εξωαισθητικών αισθητήρων. Οι αρχιτεκτονικές που βασίζονται σε FPGA υλοποιούν συνήθως τον αλγόριθμο EKF. Εναλλακτικές λύσεις που αποφεύγουν τα σφάλματα που παράγονται από την οδομετρία βασίζονται σε τεχνικές αντιστοίχισης σάρωσης που συνήθως βασίζονται σε μετρήσεις απόστασης που λαμβάνονται από αισθητήρες του ρομπότ. Μια τέτοια προσέγγιση είναι ο αλγόριθμος SMG [54]. Αυτός ο αλγόριθμος μπορεί να εκτελέσει SLAM εφαρμόζοντας ιδιαίτερα βελτιωμένες παραμέτρους, οι οποίες με τη σειρά τους αυξάνουν σημαντικά τις υπολογιστικές απαιτήσεις του αλγορίθμου. Μπορεί να επιτευχθεί σημαντική επιτάχυνση σε σχέση με το

λογισμικό, χρησιμοποιώντας τους προγραμματιζόμενους πόρους των κυκλωμάτων FPGA και τις ιδιότητες παραλληλισμού του αλγορίθμου.

Επεξεργασία εικόνας

Οι πλακέτες FPGA χρησιμοποιούνται ευρέως για την εκτέλεση αλγορίθμων ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας. Χρησιμοποιούνται ακόμη πιο εντατικά, ειδικά στην περίπτωση ενσωματωμένων εφαρμογών πραγματικού χρόνου, όπου η καθυστέρηση και η ισχύς θεωρούνται σημαντικά ζητήματα. Τυπικά θέματα στην ψηφιακή επεξεργασία εικόνας είναι η αξιολόγηση μεμονωμένων εικόνων ή πολυάριθμων καρέ ενός σήματος βίντεο για ειδικά καθορισμένα κριτήρια, όπως η εξαγωγή πληροφοριών κίνησης ή η παρακολούθηση αντικειμένων [55]. Για παράδειγμα, ένα FPGA ενσωματωμένο σε μια κάμερα μπορεί να εκτελέσει επεξεργασία εικόνας απευθείας μέσω της μετάδοσης της εικόνας μέσω του αισθητήρα. Η κάμερα παρέχει με αυτόν τον τρόπο μια πλήρως επεξεργασμένη ροή εξόδου και όχι απλώς μια ακολουθία εικόνων.

Ο τομέας της ρομποτικής επωφελείται σημαντικά από τα πλεονεκτήματα που παρέχει η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας σε FPGA. Το σύστημα επεξεργασίας εικόνας ενός ρομπότ είναι ζωτικής σημασίας για την ενίσχυση της απόδοσης της επεξεργασίας, καθώς περιλαμβάνει τη δυνατότητα χωρικής αναγνώρισης και πολλαπλούς ανιχνευτικούς αλγορίθμους για την εκτέλεση των καθηκόντων της αποστολής. Τα καθήκοντα αυτά περιλαμβάνουν κυρίως τον εντοπισμό/πλοήγηση στην περίπτωση αυτόνομων κινητών ρομπότ. Ο κύριος λόγος για την εφαρμογή ρομποτικών αλγορίθμων στα FPGA είναι η δυνατότητα παραλληλισμού που δίνει μεγάλες δυνατότητες, όπως το φιλτράρισμα εικόνας σε πραγματικό χρόνο για σκοπούς προεπεξεργασίας. Επιπλέον, η τοπική μνήμη που ενσωματώνεται στις τρέχουσες αρχιτεκτονικές FPGA επιτρέπει τη δέσμευση των σχετικών πληροφοριών εικόνας για τον περιορισμό της επικοινωνίας με εξωτερικές μνήμες, μια κατάσταση που μπορεί δυνητικά να αποτελέσει σημείο συμφόρησης.

Νευρωνικά δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Convolutional neural network - CNN) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια ποικιλία εργασιών που εκτελούνται από ρομπότ, όπως η αναγνώριση τροχιάς και εικόνας, ο έλεγχος οχημάτων, η επεξεργασία εικόνας, η αναγνώριση προτύπων και ακολουθιών και η ιατρική διάγνωση. Πρόκειται για στατιστικά μοντέλα που προορίζονται να προσαρμόζονται και να αυτοπρογραμματίζονται, εφαρμόζοντας αλγόριθμους μάθησης που τα κάνουν να εκτελούν τις προαναφερθείσες

εργασίες. Τα CNN λειτουργούν ως παράλληλα κατανεμημένα υπολογιστικά δίκτυα και λειτουργούν αντίστοιχα με το βιολογικό νευρωνικό σύστημα. Σύμφωνα με αυτό, υπάρχουν πολλαπλά σήματα εισόδου που απευθύνονται στους νευρώνες. Σε κάθε είσοδο αποδίδεται μια σχετική τιμή βάρους, η οποία επηρεάζει αντίστοιχα την επίδραση της συγκεκριμένης εισόδου. Στη μοντελοποίηση, οι τιμές βάρους είναι οι προσαρμοστικοί συντελεστές εντός του δικτύου που υπολογίζουν το μέγεθος του σήματος εισόδου. Το σήμα εξόδου του νευρώνα δημιουργείται στη συνέχεια με την αλγεβρική πρόσθεση όλων των σταθμισμένων εισόδων [56].

Προκειμένου να αποδίδουν σωστά, οι προγραμματιστές οργανώνουν τις αρχιτεκτονικές CNN σε συγκεκριμένα επίπεδα που εκτελούνται παράλληλα. Δεδομένου ότι τα CNN απαιτούν σημαντική υπολογιστική ισχύ, είναι προτιμότερο να υλοποιούνται με παράλληλη αρχιτεκτονική υλικού [57]. Τα CNN μπορούν να υλοποιηθούν είτε με τη χρήση λογισμικού είτε με τη χρήση υλικού. Οι αρχιτεκτονικές υλικού που βασίζονται σε FPGA προσφέρουν υψηλή εφαρμοσιμότητα και το σημαντικό πλεονέκτημα του παραλληλισμού. Τα δύο βασικά χαρακτηριστικά της επαναδιαμορφώσιμης αρχιτεκτονικής υπολογιστών με βάση FPGA είναι η δυναμική υιοθέτηση και ο παραλληλισμός. Αυτές οι αρχιτεκτονικές είναι οι πλέον κατάλληλες για την εφαρμογή των CNN, καθώς ο προγραμματιστής μπορεί να επιτύχει την ταυτόχρονη χρήση και να αναδιαμορφώσει εύκολα προκειμένου να προσαρμόσει την τοπολογία και τα βάρη ενός CNN. Συνολικά, οι αρχιτεκτονικές που βασίζονται σε FPGA προσφέρουν πολυάριθμα πλεονεκτήματα για νευρωνικές εφαρμογές, όπως, δημιουργία πρωτοτύπων μέσω της δυνατότητας επαναπρογραμματισμού, ενσωμάτωση, προσαρμογή και χαρτογράφηση.

Έλεγχος ασαφούς λογικής

Οι αλγόριθμοι ελέγχου για λεπτομερή δυναμικά μοντέλα απαιτούν συχνά τον ακριβή προσδιορισμό ακριβών τιμών-στόχων. Οι εξισώσεις αυτές μπορεί να είναι πολύπλοκες και μη γραμμικές, απαιτώντας μεγαλύτερο «χρόνο εκτέλεσης» προκειμένου να τύχουν επεξεργασίας. Μια εναλλακτική προσέγγιση στη χρήση των κλασικών λογικών ελεγκτών είναι η χρήση αλγορίθμων ελέγχου ασαφούς λογικής, οι οποίοι χρησιμοποιούν ανακριβείς προδιαγραφές προκειμένου να επιτύχουν τον ίδιο στόχο. Οι ελεγκτές ασαφούς λογικής εφαρμόζονται σε εφαρμογές που είναι από τη φύση τους δύσκολο να μοντελοποιηθούν με ακρίβεια. Συχνά θεωρούνται πιο εύρωστοι αλγόριθμοι στο σχεδιασμό αλλαγών στις τιμές των παραμέτρων, σε σύγκριση με τους κανονικούς αλγόριθμους ελέγχου, καθώς δεν

απαιτούν μεγάλη ακρίβεια και υψηλή υπολογιστική ισχύ. Γι' αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμοί στην ρομποτική.

Στον τομέα της ρομποτικής, οι ελεγκτές ασαφούς λογικής χρησιμοποιούνται συχνά για σκοπούς αυτόματης πλοήγησης. Αυτό οφείλεται στην ικανότητά τους να επεξεργάζονται μεγάλο αριθμό ανακριβών και ελλιπών σημάτων εισόδου. Σε μια τέτοια περίπτωση, η επεξεργασία των σημάτων εισόδου μπορεί να επιτρέψει στα ρομπότ να πλοηγούνται σε αβέβαια περιβάλλοντα. Ο μηχανισμός λήψης αποφάσεων του ρομπότ που υλοποιείται από τον ασαφή ελεγκτή αποτελείται από τρία βασικά βήματα προκειμένου να καταλήξει στην τελική απόφαση. Πρώτον, κατά την ασαφοποίηση μια τιμή εισόδου μετατρέπεται σε ασαφή τιμή που πραγματοποιείται με τη χρήση των πληροφοριών της βάσης δεδομένων ασαφών κανόνων. Στη συνέχεια, η ασαφής συμπερασματολογία (αξιολόγηση κανόνων) διατυπώνει την αντιστοίχιση από μια δεδομένη είσοδο σε μια έξοδο χρησιμοποιώντας την ασαφή λογική, εφαρμόζοντας τους κανόνες στις ασαφείς εισόδους. Η αντιστοίχιση περιλαμβάνει το πλαίσιο κανόνων βάσει του οποίου θα λάβει χώρα η λήψη αποφάσεων του ρομπότ. Στη συνέχεια, κατά το βήμα της αποασαφοποίησης οι τιμές από τις μεταβλητές εξόδου υπολογίζονται από τις ασαφείς τιμές με αποτέλεσμα την τελική απόφαση του ελεγκτή [58]. Συνολικά, οι ασαφείς αλγόριθμοι επιτρέπουν στο ρομπότ να επιλέγει μεταξύ διαφόρων συνδυασμών αποφάσεων την πιο αποτελεσματική, αντί να είναι αναγκασμένο να λάβει μια προ-σχεδιασμένη ενιαία απόφαση.

Οι εφαρμογές GPS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σκοπούς εντοπισμού, ανιχνεύοντας την τρέχουσα θέση του ρομπότ. Οι ασαφείς αλγόριθμοι αποτελούν κατάλληλη λύση ελεγκτών για πλοήγηση σε 2D και 3D περιβάλλοντα, βιομηχανικούς χειριστές ρομπότ [59], αλγόριθμους επεξεργασίας εικόνας [59] και διάφορους άλλους ρομποτικούς τομείς που απαιτούν υψηλή υπολογιστική ισχύ.

Ρομποτική σμήνους

Η ρομποτική σμήνους είναι η ταυτόχρονη χρήση πολλαπλών ρομπότ για την ταυτόχρονη εκτέλεση διαφορετικών δραστηριοτήτων. Το μείζον ζήτημα στη ρομποτική σμήνους είναι η αποτελεσματικότητα και η ακρίβεια των αλγορίθμων συντονισμού, καθώς συνήθως εκτελούν εργασίες στο ίδιο φυσικό αντικείμενο ή περιβάλλον. Υπάρχουν δύο κύριες προσεγγίσεις σχεδιασμού της ρομποτικής σμήνους. Η πρώτη προσέγγιση είναι το συγκεντρωτικό σύστημα, σύμφωνα με το οποίο ένα κύριο ρομπότ ενεργεί ως αρχηγός-συντονιστής για τα υπόλοιπα ρομπότ του σμήνους [60]. Στους ρομποτικούς ελεγκτές

FPGA, αυτή είναι μια σχετικά απλή λύση για εργασίες πλοήγησης. Σε αυτή την περίπτωση, ένα κύριο (αρχηγικό) ρομπότ σχεδιάζει το σχεδιασμό της διαδρομής για τη διέλευση προς την κατεύθυνση ενός συγκεκριμένου σημείου στόχου, με τα υπόλοιπα ρομπότ να ακολουθούν. Το βασικό μειονέκτημα είναι ότι εάν η ρομποτική μονάδα-ηγέτης δεν εκτελέσει το προγραμματισμένο έργο ή δεν επικοινωνήσει σωστά με τους ακόλουθους, τότε ολόκληρο το σμήνος αποτυγχάνει να ολοκληρώσει το έργο.

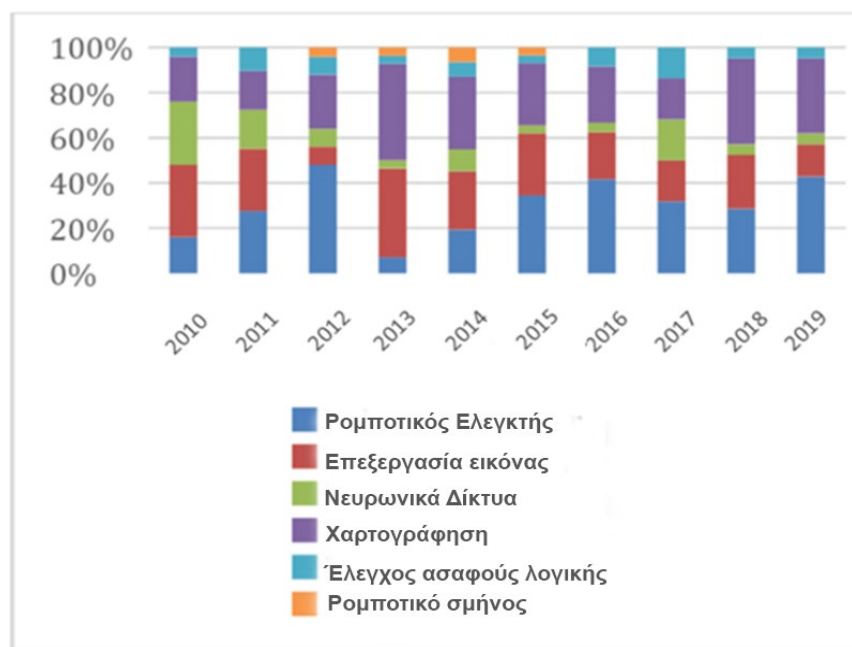
Η δεύτερη προσέγγιση είναι το αποκεντρωμένο σύστημα που λειτουργεί χωρίς μια ρομποτική μονάδα ηγέτη και δεν επηρεάζεται από τις περιπτώσεις βλάβης μιας μονάδας σμήνους ή κακής επικοινωνίας μεταξύ των μελών του σμήνους (πρακτόρων). Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, η κίνηση κάθε ρομπότ συντονίζεται χρησιμοποιώντας την ανταλλαγή τοπικών πληροφοριών, όπως η ταχύτητα, η ύπαρξη εμποδίων ή οι γεωγραφικές συντεταγμένες, από τους πλησιέστερους γειτονικούς πράκτορες σε μια δεδομένη χρονική περίοδο. Συνολικά, οι κεντρικές αρχιτεκτονικές είναι απλούστερες και χρησιμοποιούνται κυρίως για σκοπούς πλοήγησης, ενώ οι αποκεντρωμένες αρχιτεκτονικές είναι πιο περίπλοκες και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτέλεση δραστηριοτήτων όπως προσομοιώσεις, βιοτεχνολογία ή στρατιωτικές εργασίες.

Στο σχήμα της [Εικόνας 5](#) και στο σχήμα της [Εικόνας 6](#) απεικονίζονται οι τύποι ρομπότ και η κατανομή των εφαρμογών FPGA που βρέθηκαν σε αυτή την έρευνα, σύμφωνα με τον συνολικό αριθμό των 200 δημοσιεύσεων που εξετάστηκαν. Στην εικόνα 4, παρουσιάζονται οι τύποι των ρομπότ: αυτόνομα οχήματα, ανθρωποειδής, βιομηχανικά και διάφορα άλλα ανά έτος, από το 2010 έως το 2019. Ενώ στην εικόνα 5 παρουσιάζεται η



Εικόνα 5: Τύποι ρομπότ ανά έτος

κατανομή των εφαρμογών FPGA σε ποσοστό ανά έτος για την ίδια χρονική περίοδο. Όπως φαίνεται και στην εικόνα το μεγαλύτερο ποσοστό αφορά τα αυτόνομα οχήματα, ενώ οι υπόλοιπες κατηγορίες έχουν διακυμάνσεις.



Εικόνα 6: Κατανομή των εφαρμογών FPGA για την περίοδο 2010-2019

2.9 Εφαρμογές των ενσωματωμένων συστημάτων στο περιβάλλον

Όπως είδαμε, τα ενσωματωμένα συστήματα αξιοποιούνται σε πολλές εφαρμογές. Ένας από τους σημαντικότερους τομείς όπου χρησιμοποιούνται είναι και αυτός του περιβάλλοντος το οποίο ερευνάμε σε αυτή τη διατριβή. Η περιβαλλοντική υποβάθμιση και η αύξηση των υγειονομικών κινδύνων απαιτούν τη χρήση ολοένα και περισσότερων συστημάτων προς όφελος του ανθρώπου και του περιβάλλοντος. Γι' αυτό το λόγο υπάρχουν πολλές εφαρμογές των ενσωματωμένων συστημάτων στον τομέα του περιβάλλοντος. Στην παρούσα διατριβή, δίνουμε ιδιαίτερη έμφαση στην διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων και την ανακύκλωση υλικών.

Τα ενσωματωμένα συστήματα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων περιβαλλοντικών εφαρμογών όπως η ανακύκλωση. Η διαδικασία της ανακύκλωσης περιλαμβάνει τη συλλογή, τη διαλογή και την επεξεργασία απορριμμάτων για την παραγωγή νέων προϊόντων. Η χρήση ενσωματωμένων συστημάτων σε εφαρμογές ανακύκλωσης μπορεί να βελτιώσει την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας ανακύκλωσης, να μειώσει τα

απόβλητα και να ελαχιστοποιήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διάθεσης των αποβλήτων. Η παρούσα ενότητα παρέχει μια επισκόπηση της χρήσης ενσωματωμένων συστημάτων σε εφαρμογές ανακύκλωσης.

Τα ενσωματωμένα συστήματα χρησιμοποιούνται σε διάφορα στάδια της διαδικασίας ανακύκλωσης, συμπεριλαμβανομένης της συλλογής, της διαλογής και της επεξεργασίας αποβλήτων. Οι κάδοι συλλογής απορριμμάτων μπορούν να είναι εξοπλισμένοι με ενσωματωμένους αισθητήρες που παρακολουθούν τη στάθμη πλήρωσης του κάδου και μεταδίδουν τις πληροφορίες αυτές σε ένα κεντρικό σύστημα συλλογής. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση των διαδρομών και των χρονοδιαγραμμάτων συλλογής αποβλήτων, μειώνοντας τον αριθμό των φορτηγών συλλογής στο δρόμο και μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμων.

Ενσωματωμένα συστήματα χρησιμοποιούνται, επίσης, στη διαδικασία διαλογής, όπου τα απορρίμματα ταξινομούνται σε διάφορες κατηγορίες με βάση τη σύνθεση των υλικών τους. Οπτικοί αισθητήρες και αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον αυτόματο εντοπισμό και τη διαλογή διαφορετικών τύπων υλικών αποβλήτων, μειώνοντας την ανάγκη για χειροκίνητη διαλογή και αυξάνοντας την ακρίβεια και την ταχύτητα της διαδικασίας διαλογής.

Επίσης, τα ενσωματωμένα συστήματα χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία απορριμμάτων, όπου τα απορρίμματα μετατρέπονται σε νέα προϊόντα. Για παράδειγμα, τα πλαστικά απόβλητα μπορούν να μετατραπούν σε νέα προϊόντα, όπως έπιπλα, ρούχα και οικοδομικά υλικά. Τα ενσωματωμένα συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του εξοπλισμού επεξεργασίας, διασφαλίζοντας, ότι η διαδικασία είναι αποδοτική και αποτελεσματική.

Η χρήση ενσωματωμένων συστημάτων σε εφαρμογές ανακύκλωσης έχει πολλά πλεονεκτήματα. Πρώτον, βελτιώνει την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας ανακύκλωσης, μειώνοντας τα απόβλητα και ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διάθεσης των αποβλήτων. Δεύτερον, μειώνει την ανάγκη για χειρωνακτική εργασία, μειώνοντας τον κίνδυνο τραυματισμού και αυξάνοντας την ταχύτητα και την ακρίβεια της διαδικασίας. Τρίτον, επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω βελτιστοποίηση της διαδικασίας ανακύκλωσης και τη βελτίωση της βιωσιμότητάς της.

Υπάρχουν πολλές εφαρμογές για την αξιοποίηση των ΕΣ στο περιβάλλον, αλλά η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται κυρίως στην διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) σε συνάρτηση με την βελτιστοποίηση της διαδικασίας ανακύκλωσης των υλικών, μιας και αποτελεί ένα από τα βασικότερα προβλήματα των σύγχρονων ανεπτυγμένων και αναπτυσσόμενων χωρών. Για τον λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια της συγκεκριμένης διατριβής μια μεθοδολογία που εστιάζει στην αξιοποίηση των δυνατοτήτων που προσφέρουν τα ενσωματωμένα συστήματα και το διαδίκτυο των πραγμάτων (ΔτΠ) στον τομέα του περιβάλλοντος.

Στο κεφαλαίο 2, πραγματοποιήθηκε ενδελεχής ανασκόπηση σχετικά με τα Ενσωματωμένα Συστήματα που αξιοποιούνται στον τομέα του περιβάλλοντος. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στα Arduino, Raspberry Pi και στις πλακέτες FPGA, μιας και η συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή έδωσε τις δικές της λύσεις με την χρήση αυτών των συστημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Αξιοποίηση του Διαδικτύου των Πραγμάτων στον τομέα του Περιβάλλοντος

3.1 Ορισμός του Διαδικτύου των Πραγμάτων

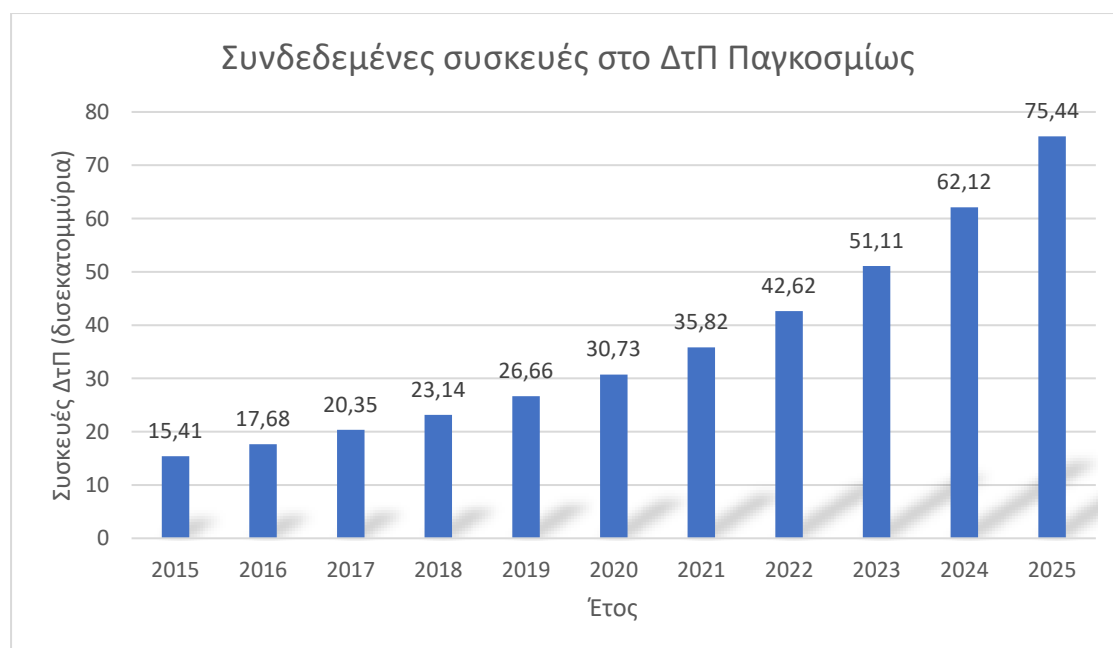
Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων ή το Διαδίκτυο των Αντικειμένων (ΔτΠ ή ΔτΑ, Internet of Things- IoT), όπως συναντάται στην παγκόσμια βιβλιογραφία, προσεγγίζεται από τους ερευνητές ως ένα δίκτυο φυσικών αντικειμένων π.χ. συσκευές, οχήματα, κτίρια και άλλα αντικείμενα /πράγματα στα οποία εμπεριέχονται ενσωματωμένα ηλεκτρονικά συστήματα (embedded systems), λογισμικό, αισθητήρια κτλ. με δυνατότητα σύνδεσης στο διαδίκτυο, επιτρέποντας έτσι την συλλογή και την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των πραγμάτων[61] [62]. Πρώτος ο Βρετανός Kevin Ashton χρησιμοποίησε τον όρο «Διαδίκτυο των Πραγμάτων» το 1999, για να περιγράψει ένα σύστημα που τα αντικείμενα του φυσικού κόσμου θα μπορούσαν με τη βοήθεια αισθητήρων να συνδεθούν με το Διαδίκτυο [63]. Ο βασικός στόχος του ΔτΠ είναι να επιτρέπεται στα πράγματα/αντικείμενα να συνδέονται οποιαδήποτε στιγμή, από οπουδήποτε, με οτιδήποτε και οποιονδήποτε, με χρήση οποιασδήποτε διαδρομής/δικτύου και οποιασδήποτε υπηρεσίας. Ωστόσο, δεν υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος και κοινά αποδεκτός ορισμός του ΔτΠ [64].

Στην πραγματικότητα, υπάρχουν πολλές διαφορετικές ομάδες, συμπεριλαμβανομένων ακαδημαϊκών, ερευνητών, επαγγελματιών, προγραμματιστών και εταιριών που δίνουν τον δικό τους ορισμό. Σύμφωνα με την Παγκόσμια Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunication Union- ITU), το ΔτΠ ορίζεται ως *«μια παγκόσμια υποδομή της κοινωνίας της πληροφορίας, η οποία επιτρέπει προηγμένες υπηρεσίες μέσω διασύνδεσης (φυσικών και εικονικών) αντικειμένων, που βασίζονται σε υπάρχουσες και εξελισσόμενες διαλειτουργικές τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών»* [65]. Ένας άλλος ορισμός, πιο απλός, αποδίδεται από το λεξικό της Οξφόρδης ως *«Διαδίκτυο των πραγμάτων –IoT (ουσιαστικό): Η διασύνδεση, μέσω του Διαδικτύου, υπολογιστικών συσκευών ενσωματωμένων σε καθημερινά αντικείμενα, που τους επιτρέπουν να στέλνουν και να λαμβάνουν δεδομένα»*[55].

Το ΔτΠ, λοιπόν, δίνει τη δυνατότητα σε αυτά τα «πράγματα» να μπορούν να ελεγχθούν απομακρυσμένα μέσω του διαδικτύου, δημιουργώντας σχέσεις αλληλεπίδρασης μεταξύ του πραγματικού και του ψηφιακού κόσμου. Απόρροια όλων αυτών είναι η βελτίωση της αποτελεσματικότητας των συσκευών αυτών, η ενίσχυση της ακρίβειας των

μετρήσεων και λειτουργιών αλλά και η εκθετική μείωση του κόστους. Επιπλέον, το ΔτΠ στηρίζεται σε τεχνολογίες ενσωματωμένων συστημάτων όπως είναι οι αισθητήρες (sensors) και οι ενεργοποιητές (actuators), τα οποία αποτελούν μέρος των καθημερινών έξυπνων συστημάτων όπως έξυπνες συσκευές στα έξυπνα σπίτια, οι φορητές έξυπνες συσκευές που χρησιμοποιούνται στην Έξυπνη Υγεία και σε πολλούς άλλους τομείς της κοινωνικής και επιχειρηματικής ζωής του ανθρώπου. Όλα τα πράγματα/αντικείμενα αναγνωρίζονται ως αυτόνομες οντότητες από το ενσωματωμένο υπολογιστικό σύστημα και μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα και συνεργατικά με την υπόλοιπη υποδομή δικτύου. Τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά του μπορούν να ταξινομηθούν με βάση: την συνδεσιμότητα, τις υπηρεσίες, την ετερογένεια, την ασφάλεια, τις δυναμικές τροποποιήσεις και την κλιμακωσιμότητα [66].

Ολοένα και περισσότερες συσκευές ΔτΠ συνδέονται καθημερινά αποδεικνύοντας περίτρανα την χρησιμότητα του. Σύμφωνα με το σχεδιάγραμμα στην [Εικόνα 7](#) ενώ το 2015 ήταν συνδεδεμένες 15,41 δισεκατομμύρια συσκευές, προβλέπεται περίπου πενταπλασιασμός για το 2025, φτάνοντας στα 75,44 δισεκατομμύρια συσκευές.



Εικόνα 7: Πρόβλεψη συνδεδεμένων συσκευών σύμφωνα με την Statista 2025

3.2. Μοντέλα επικοινωνίας στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Η τεχνολογία του ΔτΠ βασίζεται στη διασύνδεση των συσκευών και των αισθητήρων μέσω Διαδικτύου. Όπως έχει αναφερθεί στα χαρακτηριστικά του ΔτΠ υπάρχει μια ετερογένεια στα πράγματα που συνδέονται και μια ευμεταβλητότητα στο δίκτυο που δεν

καθιστά πολλές φορές προφανή τη σύνδεση. Η διασύνδεση, λοιπόν, των συσκευών μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, οι οποίοι διαρκώς μπορεί να μεταβάλλονται, όπως μεταβάλλεται και το ίδιο το ΔτΠ. Μια ομάδα της Κοινωνίας του Διαδικτύου που επιβλέπει την τεχνική πρόοδο του Διαδικτύου και αποτελεί μέρος του Συμβουλίου Αρχιτεκτονικής Διαδικτύου (Internet Architecture Board, IAB¹) δημοσίευσε έναν «οδηγό για τη δικτύωση των έξυπνων αντικειμένων»² που συνοψίζει και αναλύει τέσσερα μοντέλα επικοινωνίας που εφαρμόζονται στα έξυπνα πράγματα του ΔτΠ και είναι:

1. Συσκευή προς Συσκευή (Device to Device),
2. Συσκευή προς Νέφος (Cloud to Cloud),
3. Συσκευή προς Πύλη (Device to Gateway) και
4. Μοντέλο κοινής χρήσης δεδομένων παρασκηνίου (Back-End Sharing).

Στη συνέχεια αναλύονται τα μοντέλα επικοινωνίας, όπως επίσης και τα χαρακτηριστικά τους [67].

3.2.1 Μοντέλο Συσκευή προς Συσκευή (Device to Device)

Το μοντέλο επικοινωνίας συσκευής προς συσκευή (device to device communication model) αφορά συσκευές και αντικείμενα που συνδέονται και επικοινωνούν άμεσα μεταξύ τους, χωρίς την χρήση ενδιάμεσου διακομιστή εφαρμογών. Αυτές οι συσκευές επικοινωνούν με πολλούς τύπους δικτύων, όπως δίκτυα WiFi. Ωστόσο, αυτές οι συσκευές συνήθως χρησιμοποιούν πρωτόκολλα όπως Bluetooth, Z-Wave ή ZigBee για επικοινωνία συσκευής με συσκευή, όπως φαίνεται στην [Εικόνα 8](#), τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Το δίκτυο Device to Device επιτρέπει στις συσκευές που εφαρμόζουν συγκεκριμένα πρωτόκολλα επικοινωνίας να επικοινωνούν και να ανταλλάσσουν μηνύματα. Αυτός ο τύπος επικοινωνίας είναι συνήθως κατάλληλος για εφαρμογές όπως συστήματα αυτοματισμού σπιτιού. Αυτές οι εφαρμογές χρησιμοποιούν συνήθως μικρό όγκο δεδομένων για επικοινωνία μεταξύ των συσκευών και απαιτούν χαμηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Σε σενάρια αυτοματισμού σπιτιού, οι οικιακές συσκευές IP, όπως διακόπτες φωτισμού, θερμοστάτες και κλειδαριές πόρτας, στέλνουν συνήθως μικρές ποσότητες πληροφοριών μεταξύ τους, όπως μηνύματα κατάστασης κλειδώματος πόρτας ή ενεργοποίηση εντολών φωτισμού. Από την πλευρά του χρήστη, αυτό συχνά σημαίνει ότι το συγκεκριμένο πρωτόκολλο συσκευή προς συσκευή απαιτεί την επιλογή συγκεκριμένων

¹ <https://www.iab.org/>

² <https://www.internetsociety.org/doc/iot-overview>

συσκευών και αισθητήρων που ανήκουν στην ίδια ομάδα. Έτσι, δεν μπορούν να επιλέξουν οποιαδήποτε συσκευή ή/και αισθητήρα αν δεν έχουν ένα κοινό πρωτόκολλο επικοινωνίας.



Εικόνα 8: Παράδειγμα από το μοντέλο επικοινωνίας Συσκευή προς Συσκευή (Device to Device)

3.2.2. Μοντέλο Συσκευή προς Νέφος (Device to Cloud)

Στο μοντέλο επικοινωνίας Device to Cloud, [Εικόνα 9](#), η συσκευή ΔτΠ συνδέεται απευθείας σε μια υπηρεσία νέφους (cloud) του Διαδικτύου, όπως για παράδειγμα είναι ένας πάροχος υπηρεσιών εφαρμογών για την μετάδοση δεδομένων και τον έλεγχο της ροής των μηνυμάτων. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί συνήθως τους υπάρχοντες μηχανισμούς επικοινωνίας, όπως τις παραδοσιακές ενσύρματες συνδέσεις Ethernet ή ασύρματες Wi-Fi, ώστε να δημιουργήσει μια σύνδεση μεταξύ της συσκευής και του δικτύου IP, το οποίο τελικά συνδέεται με την υπηρεσία νέφους. Είτε μέσω του Πρωτοκόλλου Περιορισμένης Εφαρμογής (Constrained Application Protocol - CoAP), το οποίο είναι ένα εξειδικευμένο πρωτόκολλο εφαρμογής Διαδικτύου για περιορισμένες συσκευές, που ονομάζονται "κόμβοι", και επιτρέπει σε αυτές τις συσκευές να επικοινωνούν με το ευρύτερο Διαδίκτυο χρησιμοποιώντας παρόμοια πρωτόκολλα.

Πολλές δημοφιλείς και μη συσκευές ΔτΠ καταναλωτών, χρησιμοποιούν αυτό το μοντέλο επικοινωνίας, από έναν έξυπνο θερμοστάτη μέχρι την έξυπνη τηλεόραση. Αυτή η σύνδεση στο νέφος επιτρέπει στους χρήστες να έχουν απομακρυσμένη πρόσβαση όπως για παράδειγμα στο θερμοστάτη τους μέσω εφαρμογών των έξυπνων κινητών τηλεφώνων (smartphone) ή διαδικτυακών εφαρμογών (web application), ώστε ο χρήστης αφενός να μπορεί να χειρίζεται τον θερμοστάτη και να ελέγχει την κατανάλωση ενέργειας και αφετέρου να μπορεί να ρυθμίζει την συσκευή όπως να δημιουργεί σενάρια λειτουργίας, λόγω χάρη όταν η θερμοκρασία φτάσει στην X θερμοκρασία να κλείσει/ανοίξει, να

κλείσει/ανοίξει σε μια προκαθορισμένη ώρα ή/και ημέρα κτλ, να πραγματοποιεί ενημερώσεις του λογισμικού και άλλα.



Εικόνα 9: Παράδειγμα από το μοντέλο επικοινωνίας Συσκευή προς Νέφος (Device to Cloud)

3.2.3 Μοντέλο Συσκευής προς Πύλη (Device-to-Gateway)

Στο μοντέλο συσκευής προς πύλη (device-to-gateway model), [Εικόνα 10](#), που ονομάζεται επίσης μοντέλο πύλης επιπέδου συσκευής προς εφαρμογή (device to Application Layer Gateway — ALG), η συσκευή ΔτΠ χρησιμοποιεί μία υπηρεσία ALG για την προσπέλαση μιας υπηρεσίας νέφους. Αυτό σημαίνει, ότι υπάρχει λογισμικό εφαρμογών που εγκαθίσταται σε μια συσκευή τοπικής πύλης, και το οποίο λειτουργεί ως μεσολαβητής μεταξύ της συσκευής και της υπηρεσίας νέφους, παρέχοντας ασφάλεια και άλλες λειτουργίες, όπως μετάφραση δεδομένων ή πρωτοκόλλων.

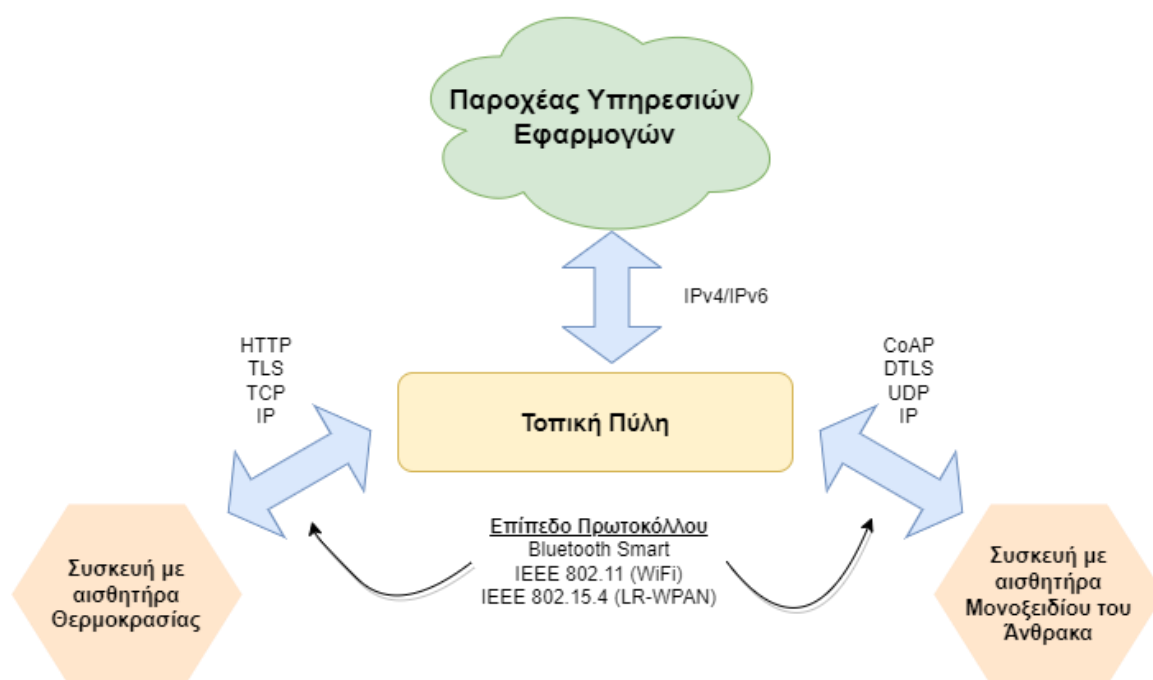
Αρκετές παραλλαγές αυτού του μοντέλου συναντούμε σε πολλές κατηγορίες συσκευών. Σε αρκετές περιπτώσεις, η συσκευή τοπικής πύλης είναι ένα έξυπνο κινητό τηλέφωνο (smartphone) που χρησιμοποιεί λογισμικό για την επικοινωνία με εξωτερική συσκευή και αναμεταδίδει δεδομένα σε μια υπηρεσία νέφους.

Μια άλλη μορφή αυτού του μοντέλου συσκευής-πύλης είναι οι συσκευές κόμβου (hub) σε διάφορες εφαρμογές αυτοματισμού. Είναι δηλαδή συσκευές που λειτουργούν ως τοπικές πύλες μεταξύ μιας υπηρεσίας cloud και μεμονωμένων συσκευών ΔτΠ. επιτυγχάνοντας τη διαλειτουργικότητα μεταξύ των ίδιων συσκευών. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις hub, που ολοένα και αυξάνονται με σκοπό να καλύψουν αυτή την ανάγκη, όπου η αυτόνομη συσκευή πύλης έχει εγκατεστημένους πομποδέκτες π.χ. Z-Wave, και Zigbee για την επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών συσκευών. Εν συνεχεία,

συνδέεται στην αντίστοιχη υπηρεσία cloud, παρέχοντας στο χρήστη τη δυνατότητα πρόσβασης στις συσκευές μέσω μιας εφαρμογής έξυπνου κινητού τηλεφώνου

Αυτό το μοντέλο επικοινωνίας χρησιμοποιείται στις περιπτώσεις όπου τα έξυπνα πράγματα απαιτούν διαλειτουργικότητα με συσκευές που δεν έχουν πρόσβαση στο διαδίκτυο (πρωτόκολλο Internet). Μερικές φορές, με αυτή την προσέγγιση επιτυγχάνεται η ενοποίηση συσκευών IPv6, το οποίο δείχνει ότι μια τέτοια πύλη χρησιμεύει για παλαιότερες συσκευές και υπηρεσίες που χρησιμοποιούν μόνο IPv4.

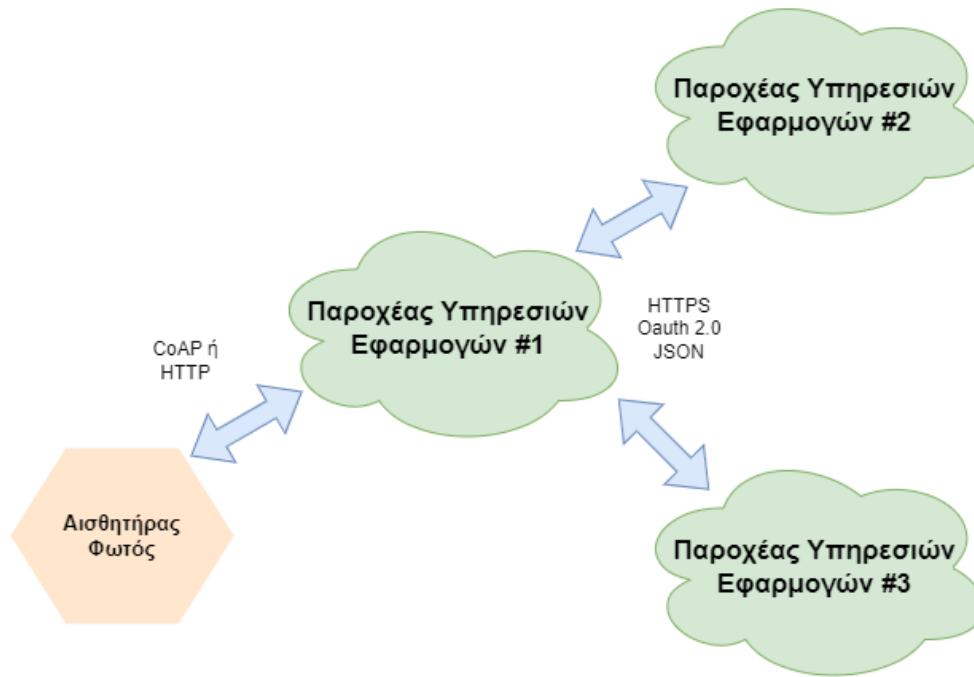
Με άλλα λόγια, το συγκεκριμένο μοντέλο επικοινωνίας είναι χρήσιμο για την ενσωμάτωση νέων έξυπνων συσκευών σε ένα υπάρχον σύστημα με παλαιότερες συσκευές οι οποίες δεν υποστηρίζουν τη διαλειτουργικότητα. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι απαιτείται η ανάπτυξη του λογισμικού και του συστήματος πύλης κάτι που προσθέτει πολυπλοκότητα και αυξάνει το κόστος στο συνολικό σύστημα.



Εικόνα 10: Παράδειγμα από το μοντέλο επικοινωνίας device-to-gateway

3.2.4 Μοντέλο κοινής χρήσης δεδομένων παρασκήνιου (back-end sharing)

Το μοντέλο διαμοιρασμού δεδομένων back-end, [Εικόνα 11](#), βασίζεται σε μια αρχιτεκτονική επικοινωνίας που δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να εξάγουν και να αναλύουν δεδομένα έξυπνων πραγμάτων από μια υπηρεσία cloud συνδυάζοντας τα με δεδομένα άλλων πηγών. Με αυτή την αρχιτεκτονική υποστηρίζεται η επιλογή του χρήστη να μοιραστεί τα δεδομένα των αντικειμένων/πραγμάτων του που έχει συλλέξει, μέσω της χορήγησης πρόσβασης και αποστολής τους σε τρίτους.



Εικόνα 11: Παράδειγμα από το μοντέλο επικοινωνίας back-end sharing

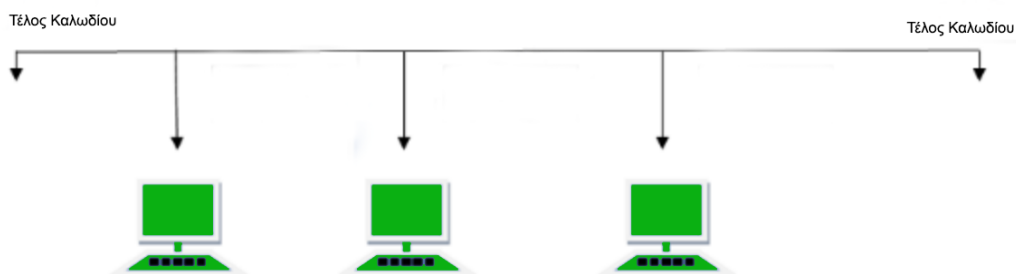
Μπορεί να αξιοποιηθεί το πρωτόκολλο HTTP ή CoAP (Constrained Application Protocol). Το CoAP είναι ένα εξειδικευμένο πρωτόκολλο εφαρμογής Διαδικτύου για περιορισμένες συσκευές (κόμβοι) που τις επιτρέπει να επικοινωνούν με το ευρύτερο Διαδίκτυο χρησιμοποιώντας παρόμοια πρωτόκολλα. Αυτός ο τρόπος συνδεσιμότητας ουσιαστικά αποτελεί επέκταση του μοντέλου επικοινωνίας μίας συσκευής προς το cloud, η οποία μπορεί να δημιουργήσει ένα αποθετήριο δεδομένων όπου οι συσκευές του ΔτΠ ανεβάζουν δεδομένα μόνο σε έναν πάροχο υπηρεσιών εφαρμογών. Η συγκέντρωση και ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται από μεμονωμένες ροές δεδομένων συσκευών του ΔτΠ, υποστηρίζεται από την αρχιτεκτονική διαμοιρασμού παρασκηνίου (back-end). Αυτού του είδους η αρχιτεκτονική επιτρέπει επίσης τη μεταφορά δεδομένων, δίνοντας τη δυνατότητα στους χρήστες να μεταφέρουν και να αποθηκεύσουν τα δεδομένα τους εάν ή όταν μεταβαίνουν από μία υπηρεσία του ΔτΠ σε μια άλλη.

Το μοντέλο κοινής χρήσης δεδομένων υποβάθρου μας δίνει μια προσέγγιση ομόσπονδων υπηρεσιών νέφους ή διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών νέφους (cloud applications developer interfaces - APIs) που χρειάζονται ώστε να επιτευχθεί η διαλειτουργικότητα των δεδομένων των έξυπνων συσκευών που φιλοξενούνται στο cloud.

3.3 Πρότυπα συνδεσιμότητας στο Διαδίκτυο των Πράγματος

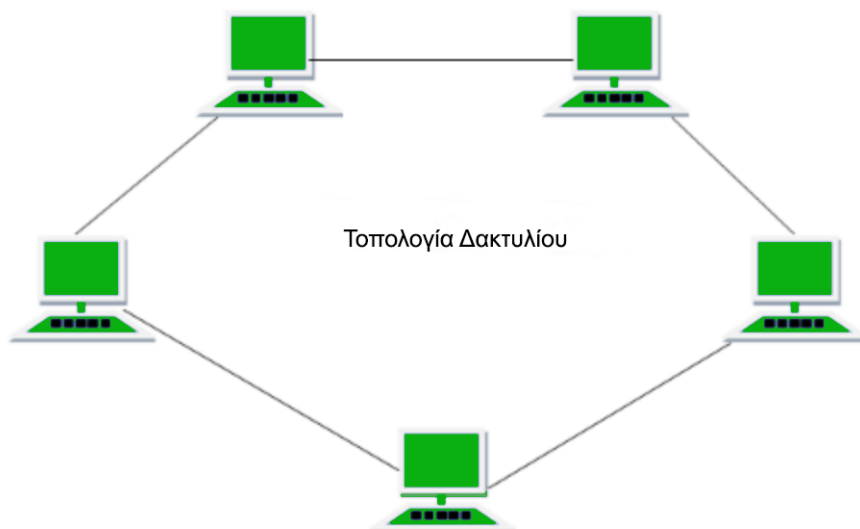
Από τα προηγούμενα, γίνεται εύκολα αντιληπτό το πόσο σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η συνδεσιμότητα στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Υπάρχουν διάφορων τύπων τεχνολογίες, οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν, ώστε να παρέχουν την υποδομή για τη σύνδεση των έξυπνων συσκευών. Για την βέλτιστη λειτουργία του ΔτΠ, θα πρέπει οι συνδεδεμένες συσκευές ή αλλιώς οι κόμβοι αισθητήρων, να λειτουργούν υπό αυστηρές προδιαγραφές σχεδιασμού, συμπεριλαμβανομένου την εξοικονόμηση ενέργειας, και ταυτόχρονα την απρόσκοπτη λειτουργία τους σε «θορυβώδη» περιβάλλοντα. Οι διαφορετικές αυτές τεχνολογίες, λειτουργούν σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων οι οποίες καθορίζονται από εθνικούς ή/και διεθνείς οργανισμούς, και κυμαίνονται από μερικά μεγαχέρτζ (MHz) έως δεκάδες γιγαχέρτζ (GHz). Υπάρχουν διαθέσιμα πληθώρα πρωτοκόλλων επικοινωνίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Οι βασικές τοπολογίες είναι οι εξής έξι (6) : τοπολογία διαδρόμου (Bus Topology), δακτυλίου (Ring Topology), αστεροειδής (Star Topology), πλέγματος (Mesh Topology), δενδροειδής (Tree Topology) και υβριδική (Hybrid Topology). Καθένας από αυτούς του τύπους συνδέσεων έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του. Η επιλογή του πρωτοκόλλου επικοινωνίας είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ορθή λειτουργία του συστήματος. Η κάλυψη της απόστασης, η ενέργεια που απαιτείται, η γεωμορφία του περιβάλλοντος και το κόστος αποτελούν τα βασικά κριτήρια για την επιλογή.

Η τοπολογία διαδρόμου, σχήμα της [Εικόνας 12](#), είναι το είδος της τοπολογίας δικτύου όπου κάθε κόμβος, δηλαδή κάθε συσκευή στο δίκτυο, συνδέεται στη δική του καλωδιακή γραμμή. Τα δεδομένα μεταδίδονται σε μία μόνο διαδρομή, από το ένα σημείο στο άλλο. Χρησιμοποιείται κυρίως για μικρά δίκτυα. Τα πλεονεκτήματα αυτής της τοπολογίας είναι η απλότητα της και η εύκολη επέκταση, ενώ αν για κάποιο λόγο καταρρεύσει το καλώδιο, καταρρέει όλο το δίκτυο, αν υπάρχουν πολλοί κόμβοι μειώνεται η απόδοση του, δεν είναι ιδιαίτερα γρήγορο και το μήκος του καλωδίου είναι πεπερασμένο. Στη δική μας περίπτωση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, μιας και η ασύρματη σύνδεση είναι η καταλληλότερη.



Εικόνα 12: Τοπολογία διαδρόμου

Η τοπολογία δακτυλίου, σχήμα της [Εικόνας 13](#), είναι ένας τύπος τοπολογίας στον οποίο κάθε κόμβος είναι συνδεδεμένος με έναν άλλο σε κάθε πλευρά. Ο τελευταίος κόμβος συνδέεται με τον πρώτο, σχηματίζοντας έτσι ένα σχήμα δακτυλίου. Αυτή η τοπολογία επιτρέπει σε κάθε υπολογιστή να έχει ακριβώς δύο γειτονικούς υπολογιστές. Σε αυτήν την τοπολογία, ο κύριος κόμβος είναι γνωστός ως σταθμός παρακολούθησης, ο οποίος είναι υπεύθυνος για όλες τις λειτουργίες.

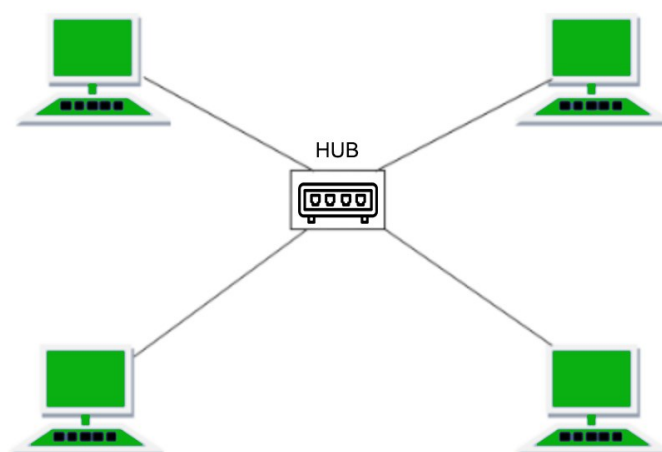


Εικόνα 13: Τοπολογία Δακτυλίου

Η μετάδοση δεδομένων γίνεται με διαδοχική μέθοδο, δηλαδή bit προς bit. Επομένως, τα δεδομένα πρέπει να ακολουθήσουν την διαδρομή μέσα από κάθε κόμβο του δικτύου για να φτάσουν στον κόμβο προορισμού. Χρησιμοποιούμε επαναλήπτες σε μια τοπολογία Ring για να αποτρέψουμε την απώλεια δεδομένων κατά τη μετάδοση τους. Αυτοί οι επαναλήπτες είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι όταν η τοπολογία έχει μεγάλο αριθμό κόμβων και τα δεδομένα πρόκειται να φτάσουν στον τελευταίο κόμβο του δικτύου. Η μετάδοση δεδομένων είναι μονής κατεύθυνσης σε μια τοπολογία δακτυλίου, αλλά μπορεί να δημιουργηθεί ως αμφίδρομη συνδέοντας κάθε κόμβο με ένα άλλο σύνολο γραμμών σύνδεσης. Αυτό είναι γνωστό ως Τοπολογία Διπλού Δακτυλίου. Εδώ, δημιουργούνται δύο δίκτυα δακτυλίου, με τα δεδομένα στο καθένα να κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις. Τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της τοπολογίας είναι ότι το δεν επηρεάζεται η ταχύτητα του δικτύου από τους πολλούς κόμβους ή την μεγάλη κίνηση, καθώς μόνο οι κόμβοι που διαθέτουν διακριτικά μπορούν να μεταφέρουν δεδομένα και έχει μικρό κόστος εγκατάστασης και επεκτασιμότητας. Από την άλλη η αντιμετώπιση τυχόν προβλημάτων αποτελεί μια

ιδιαίτερα δύσκολη διαδικασία, καθώς επίσης η προσθήκη ή διαγραφή ενός κόμβου δημιουργεί προβλήματα στην λειτουργία του δικτύου αφού θα πρέπει να διακοπεί.

Η αστεροειδής τοπολογία της [Εικόνας 14](#), είναι το είδος της τοπολογίας δικτύου στο οποίο όλοι οι κόμβοι συνδέονται σε έναν μόνο κεντρικό κόμβο που ονομάζεται hub. Ο κάθε κόμβος μπορεί να έχει ενεργό ή παθητικό χαρακτήρα.

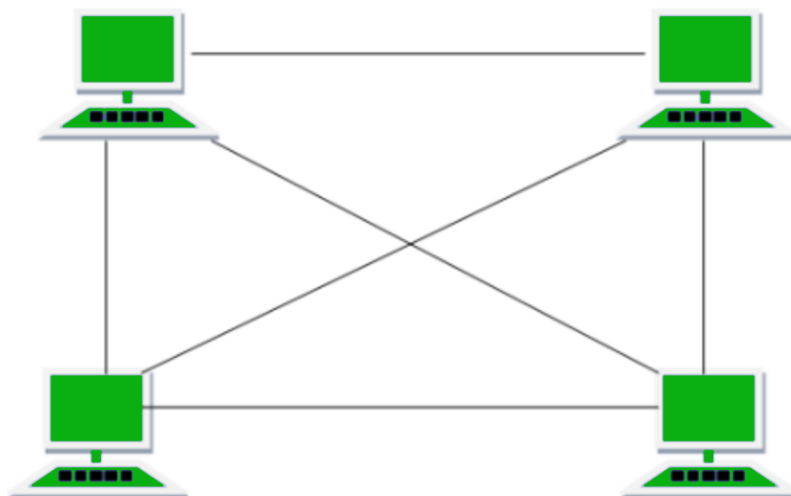


Εικόνα 14: Αστεροειδής τοπολογία

Κάθε κόμβος περιέχει μια δεσμευμένη σύνδεση με τον κεντρικό κόμβο, τον οποίο ο κεντρικός κόμβος λειτουργεί ως επαναλήπτης (repeater) κατά τη μετάδοση των δεδομένων. Η συγκεκριμένη τοπολογία έχει γρήγορη απόδοση λόγω της χαμηλής κίνησης του δικτύου, είναι εύκολη η αναβάθμιση του κόμβου (hub), η εγκατάσταση και η τροποποίηση του μπορεί να γίνει εύκολα και σε περίπτωση που ένας κόμβος έχει πρόβλημα, μπορεί εύκολα να αντικατασταθεί χωρίς να επηρεαστεί η λειτουργία του υπόλοιπου δικτύου. Αντίθετα, όλοι οι κόμβοι του δικτύου εξαρτώνται από το hub και το κόστος εγκατάστασης αλλά και η χρήση του είναι ιδιαίτερα δαπανηρό.

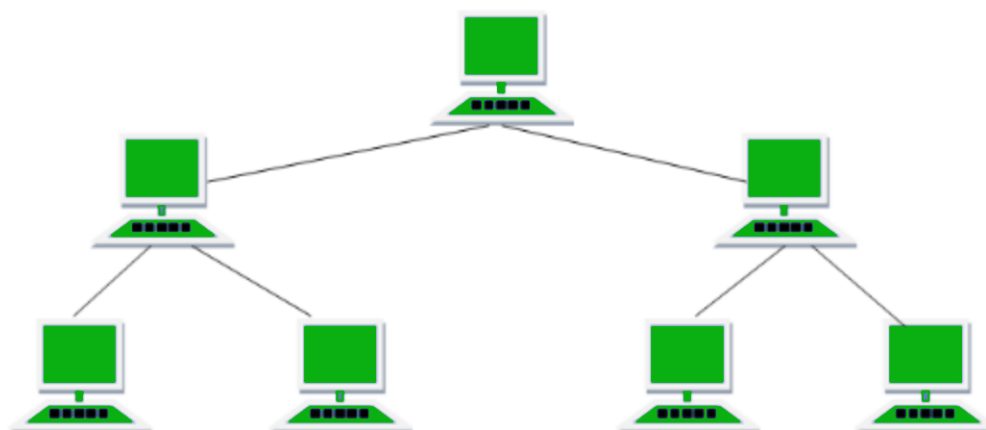
Στην τοπολογία πλέγματος, [Εικόνα 15](#), όλοι οι κόμβοι συνδέονται με όλους τους άλλους κόμβους μέσω ενός καναλιού δικτύου. Η τοπολογία πλέγματος είναι μια σύνδεση από σημείο σε σημείο. Διαθέτει $n(n-1)/2$ κανάλια δικτύου για σύνδεση n κόμβων. Η τοπολογία πλέγματος έχει δύο τεχνικές για τη μετάδοση δεδομένων, τη δρομολόγηση και την πλημμύρα. Στην τεχνική δρομολόγησης, οι κόμβοι διαθέτουν μια λογική δρομολόγησης, όπως είναι η λογική με τη μικρότερη απόσταση από τον κόμβο προορισμού ή την λογική για την αποφυγή διαδρομών με προβληματικές συνδέσεις. Στην τεχνική πλημμύρας, όλοι οι κόμβοι του δικτύου λαμβάνουν τα ίδια δεδομένα. Αυτή η τεχνική

καθιστά το δίκτυο εύρωστο αλλά έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του φόρτου εργασίας στο δίκτυο, είναι εύκολο στο να διαγνωστούν βλάβες και παρέχει υψηλή ασφάλεια.



Εικόνα 15: Τοπολογία πλέγματος

Η τοπολογία δέντρου, Εικόνα 16, είναι η τοπολογία στην οποία οι κόμβοι συνδέονται ιεραρχικά, με τον ανώτατο κόμβο ή τον κόμβο ρίζα. Ως εκ τούτου, είναι επίσης γνωστή ως ιεραρχική τοπολογία. Η τοπολογία δέντρων έχει τουλάχιστον τρία επίπεδα ιεραρχίας. Η τοπολογία δέντρων εφαρμόζεται στο Δίκτυο Ευρείας Περιοχής (Wide Area Network – WAN). Είναι μια επέκταση της αστεροειδούς τοπολογίας και της τοπολογίας διαδρόμου. Για να λειτουργήσει καλύτερα και να είναι ευκολότερη η διαχείριση του, οι κόμβοι θα πρέπει να είναι τοποθετημένοι σε ομάδες. Αυτού του είδους η τοπολογία μπορεί εύκολα να επεκταθεί, έχει εύκολη διαχείριση και συντήρηση, καθώς επίσης, μπορεί εύκολα να εντοπιστεί κάποιο σφάλμα στο δίκτυο. Παρ' όλα αυτά το κόστος είναι αρκετά υψηλό σε



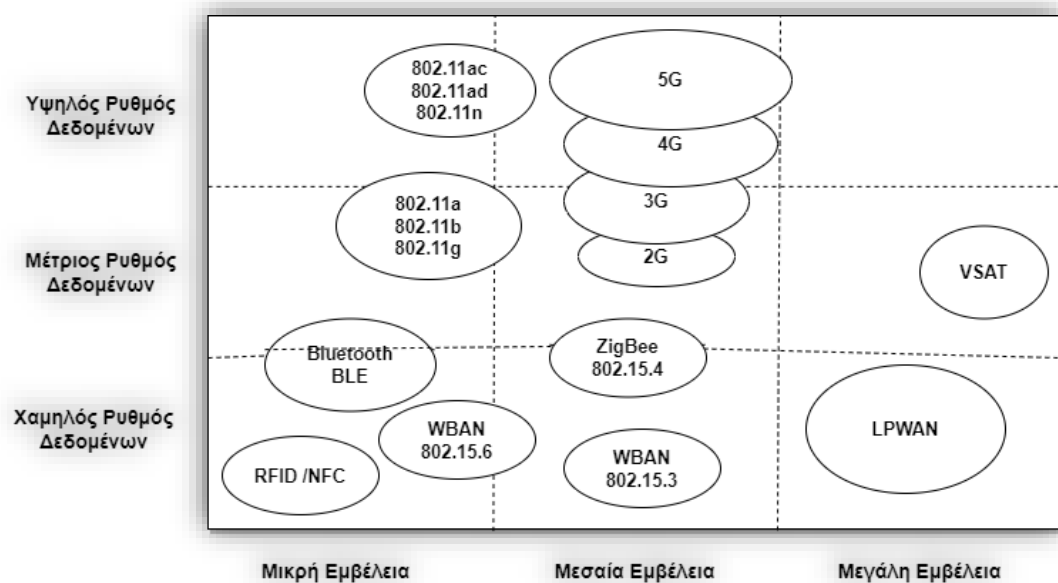
Εικόνα 16: Τοπολογία δέντρου

σχέση με άλλες τοπολογίες και εάν καταρρεύσει ο «ριζικός» κόμβος καταρρέει μαζί του και ολόκληρο το δίκτυο.

Μια Υβριδική Τοπολογία είναι βασικά μια τοπολογία δικτύου που περιλαμβάνει δύο ή περισσότερους διαφορετικούς τύπους τοπολογιών. Είναι μια αξιόπιστη και επεκτάσιμη τοπολογία, αλλά ταυτόχρονα δαπανηρή. Λαμβάνει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των εκάστοτε τοπολογιών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του. Είναι μια ευέλικτη τοπολογία δικτύου, αρκετά αποτελεσματική, εύκολα επεκτάσιμη και με εύκολη αντιμετώπιση των προβλημάτων αφού παρέχει απλές τεχνικές ανίχνευσης σφαλμάτων. Όμως είναι ιδιαίτερα δύσκολη στον σχεδιασμό της και με μεγάλο κόστος ανάπτυξης και συντήρησης.

Καθένα από τις παραπάνω τοπολογίες έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της. Έχοντας θέσει τα κριτήρια επιλεξιμότητας της συνδεσιμότητας, φαίνεται πως θα ήταν ιδανικά δύο τοπολογίες, η αστεροειδής και η υβριδική. Στην αστεροειδή τοπολογία μπορούμε να έχουμε διάφορους κόμβους (hub) που θα λαμβάνουν την πληροφορία από τα ενσωματωμένα συστήματα που θα έχουν εγκατασταθεί στους κάδους. Έτσι, δεν θα εξαρτάται κανένας κάδος από τον άλλον, θα μπορούμε να οριοθετήσουμε την θέση των hub ώστε να αποφύγουμε τυχόν προβλήματα γεωμορφίας, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να περιοριστεί αν στέλνουμε τα δεδομένα ανά χρονικά διαστήματα και το κόστος δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό. Όσον αφορά το υβριδικό μοντέλο θα μπορούσαμε να χρησιμοποιούμε σε διαφορετικά τμήματα της περιοχής διαφορετικές τοπολογίες όπως αυτή την αστεροειδή, την τοπολογία πλέγματος και την δενδροειδή. Με αυτό τον τρόπο θα μειώσουμε κατά πολύ τα οποιαδήποτε προβλήματα προκύψουν κατά τη διάρκεια υλοποίησης του συστήματος, αλλά αυτό θα αυξήσει το κόστος και ταυτόχρονα ο σχεδιασμός θα πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή, ώστε να προσδιοριστεί με λεπτομέρεια σε ποιες περιοχές θα χρησιμοποιηθεί η αντίστοιχη τοπολογία. Αυτό ταυτόχρονα δημιουργεί και μια «δυσκαμψία» στον τρόπο λειτουργίας τους συστήματος μιας και δεσμευόμαστε με τις συγκεκριμένες τοπολογίες στις συγκεκριμένες περιοχές που επιλέξαμε. Ο συνδυασμός διαφόρων τεχνολογιών όπως ZigBee, WiFi και άλλων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί συνδυαστικά σε διάφορες λύσεις όπου απαιτείται συγκεκριμένο υλικό (hardware) και λογισμικό (software) για την ενσωμάτωση αυτών των διαφόρων πρωτοκόλλων σε «πράγματα» [68].

Διάφορες λύσεις προτείνονται διαρκώς, αξιοποιώντας τα ήδη υπάρχοντα πρότυπα είτε αναπτύσσοντας καινούργια τα οποία υπόσχονται την παροχή καλύτερων υπηρεσιών προς τους χρήστες. Παρ' όλες τις διαφορές αυτών των προτύπων σύνδεσης υπάρχουν κάποιες βασικές προδιαγραφές οι οποίες καθορίζουν και την επιλογή τους για συγκεκριμένες χρήσεις του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Σύμφωνα με τον Andreev et al. [69] μερικές από αυτές τις προδιαγραφές είναι: η συχνότητα λειτουργίας του προτύπου (Frequency), η μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων ή αλλιώς ο ρυθμός μετάδοσης (Max data throughput/ data rates), η μέγιστη εμβέλεια μετάδοσης των δεδομένων (Maximum data range), η χρονική καθυστέρηση (Latency), η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, εφόσον χρησιμοποιείται (Battery life in connectivity modules), η γεωγραφική κάλυψη (Coverage), η κινητικότητα (Mobility), η ασφάλεια (Security), η επεκτασιμότητα (Scalability).



Εικόνα 17: Εμβέλεια τεχνολογιών ασύρματης δικτύωσης σε σύγκριση με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων [63]

Στην [Εικόνα 17](#) βλέπουμε σχηματικά στο που κινείται η κάθε τεχνολογία, συναρτήσει της εμβέλειας και του ρυθμού μετάδοσης των δεδομένων. Σε αυτές τις τέσσερις μεγάλες κατηγορίες, υπάρχουν συμφωνίες τόσο μεταξύ των κρατών, για παράδειγμα οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (Η.Π.Α) και η Ευρωπαϊκή Ένωση, όσο και μεταξύ ιδιωτών.

Η συνδεσιμότητα των συσκευών στο ΔτΠ μπορεί να γίνει τόσο ενσύρματα όσο και ασύρματα. Παρ' όλα αυτά στην πράξη, όταν μιλάμε για συσκευές που συνδέονται στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων, μιλάμε κυρίως για ασύρματες συνδέσεις. Οι ασύρματες συνδέσεις μπορούν να υποδιαιρεθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες με βάση την εμβέλεια τους σε συνδέσεις μεγάλων αποστάσεων (Long Range) και μικρών αποστάσεων (Short Range). Επίσης, εκτός των προτύπων κινητής τηλεφωνίας, μια άλλη λύση απομακρυσμένης σύνδεσης είναι το διευρυμένο δίκτυο χαμηλής κατανάλωσης, LPWAN (Low Power Wide Area Network), και μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε αδειοδοτημένα και μη πρότυπα. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα πραγματοποιηθεί αναφορά σχετικά με αυτές τις συνδέσεις, ώστε να γίνει περισσότερο αντιληπτός ο τρόπος λειτουργίας τους.

3.3. 1 Ασύρματες Συνδέσεις Μικρής Εμβέλειας (Short Range)

Η πρώτη κατηγορία ασύρματης σύνδεσης, αφορά την τεχνολογία συνδεσιμότητας μικρών αποστάσεων όπου τα δεδομένα μεταδίδονται σε μικρή φυσική απόσταση, συνήθως μικρότερη των 150 μέτρων, από τη συσκευή αποστολής στη συσκευή υποδοχής των δεδομένων [70] [71]. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή αναφερόμαστε στις πιο διαδεδομένες λύσεις που υπάρχουν και χρησιμοποιούνται αυτή τη στιγμή. Το πρότυπο σύνδεσης Bluetooth Low Energy, χρησιμοποιεί τη συχνότητα των 2,4 GHz και επιτυγχάνει μέγιστη ταχύτητα δεδομένων περίπου στα 2 Mbps. Μια από τις πιο διαδεδομένες επίσης τεχνολογίας μικρής εμβέλειας είναι το Wi Fi 802.11n, το οποίο χρησιμοποιεί δύο μπάντες συχνοτήτων στα 2,4GHz με μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων τα 600 Mbps ή 5 GHz και ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων έως και 1.300 Mbps, με μέγιστη εμβέλεια τα 50 μέτρα, με την συχνότητα των 2,4GHz να υπερτερεί. Το Z-Wave αποτελεί μια από τις καλύτερες ενεργειακά λύσεις για μικρής εμβέλειας συνδεσιμότητα, μιας και έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και μεταδίδει τα δεδομένα στα 900 MHz και παρέχει ενεργειακά αποδοτικές συνδέσεις και μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Το πρότυπο IEEE 802.15.4 λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένη ζώνη συχνοτήτων, χρησιμοποιώντας χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων αλλά και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το Zigbee βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 έχοντας χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και σταθερό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων στα 250kbps. Το 6LoWPAN έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μέχρι 200kbps. Τέλος, το RFID (Radio Frequency Identification) αφορά στην επικοινωνία ετικετών (tags) όπου πραγματοποιείται μία σύνδεση τύπου συσκευής προς συσκευής μέσω ενός αναγνώστη (reader) και μιας ετικέτας.

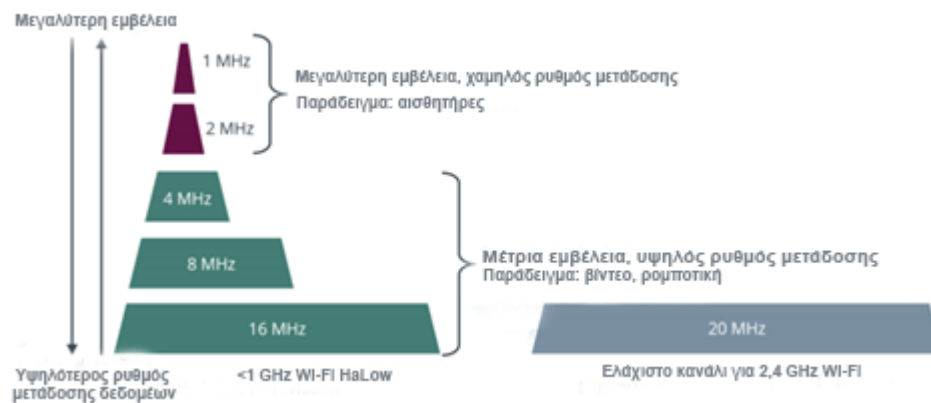
3.3.2 Bluetooth

Το Bluetooth αποτελεί μια τεχνολογική λύση επικοινωνίας μικρών αποστάσεων με μέτριο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μέχρι 2Mbps, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και χαμηλού κόστους [72]. Λειτουργεί στο φάσμα συχνοτήτων των 2,4GHz και για να περιοριστούν στο ελάχιστο οι παρεμβολές μεταξύ παρεμφερών συσκευών, το πρωτόκολλο εκμεταλλεύεται την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ των συσκευών (συσκευή προς συσκευή/ point to point) και αξιοποιώντας τη μέθοδο μετάδοσης με διασπορά φάσματος με εναλλαγή συχνοτήτων - Frequency Hopping (FHSS), πραγματοποιεί έως και 1.600 εναλλαγές συχνότητας ανά δευτερόλεπτο. Η τεχνολογία Bluetooth έκανε την εμφάνιση της το 1999 με τις εκδόσεις 1.0 και 1.0B, ενώ σήμερα χρησιμοποιείται η έκδοση 5 του 2016 και η οποία επιτρέπει την μετάδοση των δεδομένων μέχρι και 200 μέτρα, ενώ ταυτόχρονα έχει μειώσει κι άλλο τις ενεργειακές απαιτήσεις. Ήδη από την έκδοση 4.2 του 2014, μπορεί να θεωρηθεί ως μία τεχνολογία σχεδιασμένη για το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, μιας και περιλαμβάνει όλα αυτά τα χαρακτηριστικά που την κάνουν ελκτική προς αυτή τη χρήση. Ο σχεδιασμός του αφορά κυρίως μικρά πακέτα δεδομένων, σε μια κοντινή απόσταση. Μέσω της σύνδεσης 6LoWPAN η οποία υποστηρίζει αρχεία διαμόρφωσης μέσω του πρωτοκόλλου Internet επιτρέπει στις συσκευές Bluetooth Smart να έχουν πρόσβαση στο Διαδίκτυο. Η αξιοποίηση του Bluetooth αν και έχουν παρέλθει περισσότερα από 20 χρόνια από την εμφάνιση του βρίσκεται στις επάλξεις της τεχνολογικής προόδου και συμμετέχει ενεργά στην διαμόρφωση του ΔτΠ.

3.3.3 Wi-Fi

Η ιστορία του Wi-Fi (Wireless Fidelity) ξεκινά το 1998 και σήμερα είναι μία από τις περισσότερο διαδεδομένες τεχνολογίας τοπικού ασύρματου δικτύου. Βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.11 (Institute of Electrical and Electronics Engineers) για ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLAN - Wireless Local Area Network). Συχνά, ο όρος Wi-Fi χρησιμοποιείται ως συνώνυμο του WLAN, αν και το WLAN μπορεί να περιλαμβάνει και άλλα ασύρματα πρότυπα [73]. Αυτό δείχνει και τον ηγετικό ρόλο που διαδραματίζει στα ασύρματα τοπικά δίκτυα. Εκτός από την εκτεταμένη υποδομή που διαθέτει λόγω της δημοτικότητας του, το Wi-Fi παρέχει γρήγορη μεταφορά δεδομένων, πράγμα που το καθιστά κατάλληλο για τη μεταφορά μεγάλου όγκου δεδομένων [74]. Η εμβέλεια αυτής της τεχνολογίας, Wi-Fi 4/5/6, μειώνεται όταν υπάρχουν διάφορα εμπόδια όπως τοίχοι, πόρτες κτλ. Σε αντιδιαστολή με αυτές τις εκδόσεις, η τεχνολογία Wi-Fi HaLow [75] είναι κατάλληλη για συσκευές ΔτΠ μικρής απόστασης, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, με

βάση το πρότυπο IEEE 802.11ah, που λειτουργούν σε ζώνη συχνοτήτων μικρότερη του 1GHz. Όπως φαίνεται στην [Εικόνα 18](#), το εύρος λειτουργίας Wi-Fi HaLow εκτείνεται από κανάλια 1 MHz έως 16 MHz.



Εικόνα 18: Wi-Fi HaLow³

Τα κύματα στο κανάλι των 1 MHz ταξιδεύουν μακρύτερα, ενώ το κανάλι των 16 MHz παρέχει υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων και η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων φτάνει τα 80Mbps. Σε σύγκριση με το πρότυπο IEEE 802.11ac, πολλά νέα χαρακτηριστικά έχουν εισαχθεί για να επιτευχθεί απόσταση μετάδοσης 1 χιλιομέτρου και ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων μεγαλύτερη των 100 Kbps σε εξωτερικό περιβάλλον. Το φυσικό επίπεδο χρησιμοποιεί τεχνολογία OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) και ο ρυθμός μετάδοσης είναι 10 φορές πιο αργός από το πρότυπο IEEE 802.11ac, διευρύνοντας έτσι το εύρος επικοινωνίας.

	Wi-Fi 4/5/6 (IEEE 802.11n/ac/ax)	Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah)
Ζώνη συχνότητας λειτουργίας	2,4 GHz, 5 GHz	<1 GHz
Επιλογές καναλιού	20,40,80,160 MHz	1,2,4,8,16 MHz
Μέγιστος αριθμός σταθμών διευθυνσιοδότησης ανά σημείο πρόσβασης	2007	8191
Ρυθμός μετάδοσης	6,5 έως 150 MBs (802.11n, WiFi 4)	150 KBs έως 86,7 MBs
Απόσταση	~100 m	>1 km

Πίνακας 1: Βασικές διαφορές WiFi 4/5/6 με WiFi HaLow

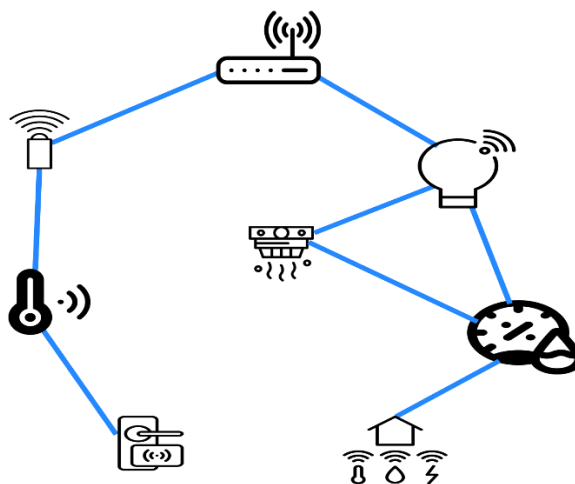
³ https://www.wi-fi.org/downloads-registered-guest/Wi-Fi_HaLow_Technology_Overview_20200518_0.pdf/36879

Στον [Πίνακα 1](#) φαίνονται οι βασικές διαφορές μεταξύ του Wi-Fi 4/5/6 σε σχέση με το Wi-Fi HaLow σύμφωνα με την Ζώνη συχνότητας λειτουργίας, τις επιλογές Καναλιού, τον μέγιστο αριθμό σταθμών διευθυντοδότησης ανά σημείο πρόσβασης, τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων και την απόσταση που μπορεί να καλύψει το κάθε πρότυπο.

Με αυτά ως δεδομένο το Wi-Fi HaLow μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το Διαδίκτυο των Πραγμάτων ως πρότυπο σύνδεσης μικρής εμβέλειας σε σχέση με τα υπόλοιπα πρότυπα Wi-Fi που υπάρχουν μέχρι σήμερα.

3.3.4 Τεχνολογία Z-Wave

Το Z-Wave είναι ένα ασύρματο πρωτόκολλο επικοινωνίας χαμηλής ισχύος, με ταχύτητα μετάδοσης έως 100 Kbps, που αναπτύχθηκε από τη Zensys και επιβεβαιώθηκε από τη Z-Wave Alliance, το οποίο χρησιμοποιείται τόσο για οικιακούς αυτοματισμούς όσο και βιομηχανικούς όπως φωτισμό, κλιματισμό, τηλεοράσεις, ασφάλεια κτλ. Τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας Z-Wave είναι η αξιόπιστη μετάδοση σύντομων μηνυμάτων από τη μονάδα ελέγχου σε μία ή περισσότερες συσκευές στο δίκτυο με τον ελάχιστο δυνατό θόρυβο καθώς και έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας που επιτρέπει στις



Εικόνα 19: Παράδειγμα τοπολογίας τεχνολογίας Z-Wave

συσκευές να φέρουν μπαταρίες [76]. Λειτουργεί στη ζώνη ISM κάτω από 1 GHz και συγκεκριμένα στα 868 MHz στην Ευρώπη και στα 908 MHz στην Αμερική, με αποτέλεσμα η λειτουργία του, να μην επηρεάζεται από άλλες ασύρματες τεχνολογίες σύνδεσης όπως το WiFi, το Bluetooth ή το ZigBee. Η εμβέλεια του μπορεί να φτάσει μέχρι τα 30 μέτρα και λόγω του ότι χρησιμοποιεί την τοπολογία δικτύου πλέγματος (mesh network), όπως φαίνεται στην [Εικόνα 19](#), όπου κάθε κόμβος λειτουργεί ως μια πύλη μεταφοράς δεδομένων από και προς τον γειτονικό του, με αποτέλεσμα όλοι οι κόμβοι να συνεργάζονται μεταξύ τους για την κατανομή των δεδομένων στο δίκτυο. Έτσι, είναι εύκολο επεκτάσιμο και

μπορεί να ελέγξει έως και 232 συσκευές που χωρίζονται σε δύο είδη: ελεγκτές (controllers) και δευτερεύοντες – «σκλάβους» (slaves) [77].

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε πως η ασύρματη τεχνολογία Z-Wave διαθέτει πολλά πλεονεκτήματα που αφορούν κυρίως την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, την αξιοπιστία, την εύκολη χρήση και διαλειτουργικότητα που την διακατέχει.

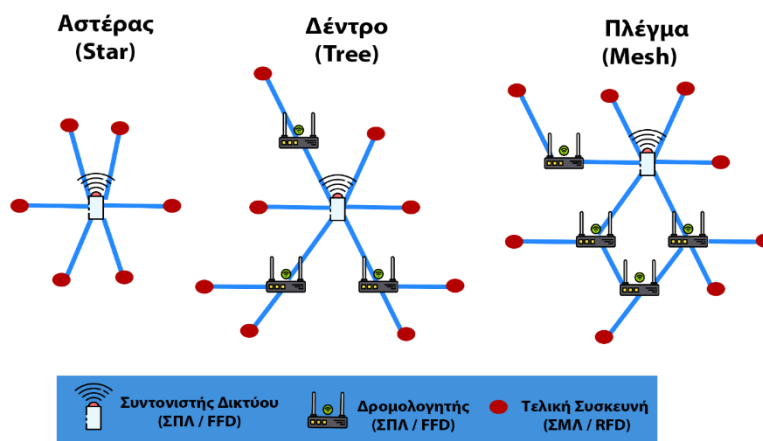
3.3.5 Zigbee

Το ZigBee αποτελεί μια τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας βασισμένη στο πρότυπο IEEE 802.15.4, η οποία λειτουργεί κυρίως στα 2.4 GHz με σταθερό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων 250 Kbps, πράγμα που το καθιστά κατάλληλο για την αξιοποίηση αισθητήρων. Επίσης, λειτουργεί και κάτω από το 1GHz, στα 868 MHz στην Ευρώπη, στα 915 MHz στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και στην Αυστραλία, και στα 784 MHz στην Κίνα, με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων από 20 Kbps. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας είναι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης, υψηλή ασφάλεια, ευστάθεια, υψηλή επεκτασιμότητα και το χαμηλό κόστος. Η μέγιστη απόσταση μετάδοσης των δεδομένων φτάνει τα 100 μέτρα και μπορούν να συνδεθούν στο ίδιο δίκτυο μέχρι και 65.000 κόμβοι. Τα δίκτυα ZigBee προστατεύονται από ένα συμμετρικό κλειδί κρυπτογράφησης των 128-bit. Χρησιμοποιείται συνήθως σε εφαρμογές δεδομένων χαμηλής ταχύτητας που απαιτούν μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και ασφάλεια δικτύου [78].

Υπάρχουν τρεις τοπολογίες δικτύου στο ZigBee [79]. Εκτός από την τοπολογία αστέρα (star), το ZigBee υποστηρίζει επίσης πιο σύνθετες τοπολογίες όπως την δενδροειδής (tree) και πλέγματος (mesh), όπως φαίνεται στην [Εικόνα 20](#). Υπάρχουν τρεις κύριες συσκευές, που συχνά αποκαλούνται και παίκτες, σε ένα δίκτυο ZigBee: ο συντονιστής, οι δρομολογητές και οι τελικές συσκευές. Υπάρχει ένας μόνο συντονιστής σε κάθε δίκτυο. Είναι ο κόμβος που δημιουργεί το δίκτυο και οι άλλοι κόμβοι απλώς ενώνονται. Οι δρομολογητές είναι ενδιάμεσες συσκευές και μπορούν να αναμεταδώσουν πακέτα για άλλους κόμβους.

Επίσης, τις χωρίζουμε σε δύο τύπους συσκευών βάσει της διαφορετικής πολυπλοκότητας που έχουν. Μια συσκευή πλήρους λειτουργίας (ΣΠΛ - full-function device/FFD) υλοποιεί το πλήρες σετ πρωτοκόλλων και λειτουργεί ως συντονιστής δικτύου. Από την άλλη, οι συσκευές με ελάχιστη εφαρμογή πρωτοκόλλου είναι οι Συσκευές Μειωμένης Λειτουργίας (ΣΜΛ - reduced-function device/RFD). Λόγω της διάκρισης

μεταξύ των τύπων συσκευών, τα δίκτυα στα οποία οι περισσότερες συσκευές έχουν μικρές απαιτήσεις λειτουργικότητας, όπως είναι οι διακόπτες και οι αισθητήρες, μπορούν να μειώσουν σημαντικά το κόστος και την κατανάλωση ενέργειας από ό,τι εάν όλες οι συσκευές είχαν τη μέγιστη δυνατότητα. Ένα δίκτυο Zigbee περιλαμβάνει τουλάχιστον ένα ΣΠΛ (FFD), που λειτουργεί ως συντονιστής δικτύου (PAN)[79].



Εικόνα 20: Τοπολογίες της τεχνολογίας Zigbee

Στην τοπολογία αστέρα (star), η επικοινωνία δημιουργείται μεταξύ συσκευών και ενός ενιαίου συντονιστή δικτύου, που ονομάζεται συντονιστής PAN. Ο συντονιστής PAN μπορεί να τροφοδοτείται από το ηλεκτρικό δίκτυο ενώ οι συσκευές πιθανότατα θα τροφοδοτούνται από κάποια μπαταρία. Οι εφαρμογές που επωφελούνται από αυτήν την τοπολογία είναι ο οικιακός αυτοματισμός, τα περιφερειακά των προσωπικών υπολογιστών (PC) και τα παιχνίδια.

Στην δενδροειδή τοπολογία (tree), υπάρχει επίσης ένας συντονιστής PAN. Σε αντίθεση με την τοπολογία του αστέρα, οποιαδήποτε συσκευή μπορεί να επικοινωνήσει με οποιαδήποτε άλλη συσκευή αρκεί να βρίσκονται σε εμβέλεια επικοινωνίας μεταξύ τους. Ένα δενδροειδές δίκτυο μπορεί να είναι ad hoc, αυτο-οργανωμένο και αυτο-θεραπευόμενο. Εφαρμογές όπως ο βιομηχανικός έλεγχος, τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων και η παρακολούθηση αποθεμάτων θα επιλεγόταν από μια τέτοια τοπολογία.

Η τοπολογία πλέματος (mesh) είναι μια ειδική περίπτωση ενός δικτύου, στο οποίο οι περισσότερες συσκευές είναι συσκευές πλήρους λειτουργίας (ΣΠΛ/FFD), ενώ μια συσκευή μειωμένης λειτουργίας (ΣΜΛ/ RFD) μπορεί να συνδεθεί στο τέλος της διαδρομής. Οποιαδήποτε από τις συσκευές πλήρους λειτουργίας μπορεί να λειτουργήσει ως συντονιστής και να παρέχει υπηρεσίες συγχρονισμού στις υπόλοιπες συσκευές. Ωστόσο, θα πρέπει να τονιστεί ότι μόνο ένας από αυτούς τους συντονιστές είναι ο συντονιστής PAN.

Μεταξύ των λειτουργιών που παρέχονται από το επίπεδο δικτύου είναι η δρομολόγηση πολλαπλών βημάτων, η ανακάλυψη και συντήρηση διαδρομής, η ασφάλεια και η σύνδεση/αποχώρηση από ένα δίκτυο, με επακόλουθη σύντομη (16-bit) εκχώρηση διεύθυνσης σε πρόσφατα συνδεδεμένες συσκευές.

Συνοπτικά, η τεχνολογία Zigbee μπορεί να αξιοποιηθεί για πολλές εφαρμογές στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων, ιδιαίτερα όταν το δίκτυο που θέλουμε να αναπτύξουμε απαιτεί πολλούς αισθητήρες. Οι διαφορετικές τοπολογίες που μπορούμε να επιλέξουμε, καθώς και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας συναρτήσει του χαμηλού κόστους, την καθιστά μια από τις καταλληλότερες τεχνολογίες.

3.3.6 6LoWPAN - IPv6

Η τεχνολογίας 6LoWPAN - IPv6 Low-power Wireless Personal Area Network (ασύρματο προσωπικό δίκτυο χαμηλής ισχύος IPv6) σχεδιάστηκε από την αρχή για χρήση σε μικρά δίκτυα αισθητήρων [80]. Οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν την τεχνολογία 6LoWPAN, είναι ιδιαίτερα μικρές σε μέγεθος και χωρούν εύκολα σε μνήμης 32K, οι οποίες είναι συνήθως μικρότερες από αντίστοιχες εφαρμογές άλλων πρωτοκόλλων. Βασίζεται στο Πρωτόκολλο Διαδικτύου (IPv6), το οποίο είναι αυτό που καθορίζει τους μηχανισμούς συμπύκνωσης και συμπίεσης κεφαλίδων, με την διαφορά ότι το 6LoWPAN χρησιμοποιεί έναν μοναδικό μηχανισμό συμπίεσης κεφαλίδας που επιτρέπει τη μετάδοση πακέτων IPv6 σε μόλις 4 byte, ενώ ταυτόχρονα αξιοποιεί τη χρήση του τεράστιου IPv6 χώρο διευθύνσεων. Το πρωτόκολλο IPv6 χρησιμοποιεί διευθύνσεις 128 bit σε αντίθεση με τον προκάτοχο του το IPv4 που χρησιμοποιεί 32 bit. Με 128 bit, το IPv6 μπορεί να παρέχει 56×10^{27} διευθύνσεις ανά άτομο στη γη, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα σε κάθε συσκευή ή ενσωματωμένο σύστημα να έχει τη δική του μοναδική διεύθυνση IP και να συνδέεται στο Διαδίκτυο.

Το IPv6 παρέχει έναν βασικό μηχανισμό μετάδοσης για την παραγωγή σύνθετων συστημάτων ελέγχου και εξοπλισμού για την επικοινωνία μέσω ασύρματων δικτύων χαμηλής ισχύος με οικονομικό τρόπο. Επί του παρόντος, υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι κεφαλίδων που ορίζονται στο πρότυπο: α) κεφαλίδα αποστολής (Dispatch Header), β) κεφαλίδα πλέγματος (Mesh Header), γ) κεφαλίδα κατακερματισμού (Fragmentation Header) και κεφαλίδα συμπίεσης HC1 (IPv6 Header Compression Header). Για την απλούστερη περίπτωση, οι μόνες απαραίτητες κεφαλίδες είναι μια κεφαλίδα αποστολής και μια κεφαλίδα HC1 IPv6. Μόνο όταν στέλνονται πακέτα μεγάλου μεγέθους χρειάζεται

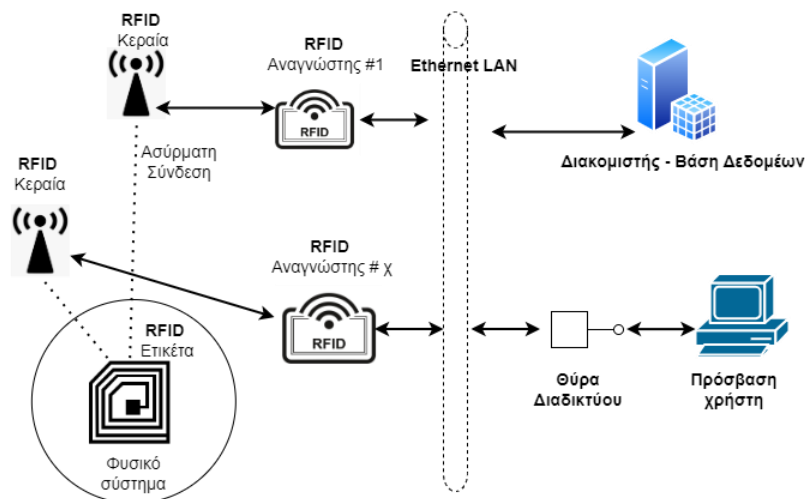
να συμπεριλαμβάνεται και μια κεφαλίδα κατακερματισμού, όπως μόνο όταν χρησιμοποιείται ένα στρώμα δικτύου πλέγματος κάτω από το 6LoWPAN χρειάζεται να συμπεριλαμβάνεται μια κεφαλίδα πλέγματος. Το 6LoWPAN μπορεί να χρησιμοποιηθεί, τόσο με ενσύρματα δίκτυα επικοινωνίας, όπως Ethernet, αλλά και ασύρματα, όπως Wi-Fi, 802.15.4 και ISM sub-1GHz [81].

3.3.7 Ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνοτήτων- Radio Frequency Identification (RFID)

Η ασύρματη τεχνολογία επικοινωνίας “ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνοτήτων” RFID (Radio Frequency Identification) χρησιμοποιείται για τη λήψη δεδομένων, τα οποία μπορούν να συνδέονται με διαφορετικά χαρακτηριστικά αναγνώρισης, όπως ο σειριακός αριθμός, η θέση, το χρώμα, η ημερομηνία αγοράς, κ.λπ. των φορέων RFID ετικέτας. Η διαδικασία συλλογής δεδομένων βασίζεται στην ανταλλαγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μεταξύ ετικετών RFID και αναγνώστών. Αυτή η αυτοματοποιημένη αναγνώριση και σύλληψη των δεδομένων (Auto-ID) παρέχει την δυνατότητα σε επιπλέον πληροφορίες επισήμανσης σε σχέση με προηγούμενες αντίστοιχες τεχνολογίες, όπως οι γραμμωτοί κώδικες (barcodes). Αν και η τεχνολογία είναι γνωστή από το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο, η χρήση της επεκτάθηκε σε διάφορους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, και ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια με την ανάπτυξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων, αρκετές ομάδες, οικονομικές, κοινωνικές, στρατιωτικές, υγειονομικές και πολιτικές, συνειδητοποίησαν τη δυνατότητα που τους δίνεται να καινοτομήσουν και να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών τους χρησιμοποιώντας την τεχνολογία RFID [82].

Για την τεχνολογία RFID EPC-GEN2, απαιτείται η δημιουργία μιας σύνδεσης από μηχανή σε μηχανή (M2M) μεταξύ της ετικέτας (tag) και του αναγνώστη (reader), στην οποία ο αναγνώστης RFID στέλνει ένα σήμα στην ετικέτα και λαμβάνει το ανακλώμενο σήμα από την ετικέτα και στη συνέχεια το μεταδίδει στη βάση δεδομένων. Η βάση δεδομένων συνδέεται με το κέντρο επεξεργασίας και εντοπίζει το αντικείμενο με βάση το ανακλώμενο σήμα. Μια γενική Αρχιτεκτονική ενός βασικού συστήματος RFID όπως φαίνεται στο σχήμα της [Εικόνας 21](#), συνήθως περιλαμβάνει:

- Ετικέτες RFID που καθορίζονται σε οντότητες με μοναδικό ηλεκτρονικό κωδικό προϊόντος (EPC) ανά οντότητα (ασύρματο δίκτυο RFID).
- Δικτυωμένοι αναγνώστες RFID και βάσεις δεδομένων.
- Κεραίες RFID για ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των ετικετών του ασύρματου δικτύου και του ενδιάμεσου λογισμικού/ελέγχου.



Εικόνα 21: Γενική Αρχιτεκτονική ενός βασικού συστήματος RFID

Υπάρχουν δύο τύποι ετικετών RFID: παθητικές και ενεργές. Μια παθητική ετικέτα RFID τροφοδοτείται από την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, που ακτινοβολείται από τις κεραίες ανάγνωση RFID, με βάση την οπισθοσκέδαση. Μια παθητική ετικέτα δεν μπορεί να μεταδώσει από μόνη της ραδιοκύματα και η χωρητικότητα αποθήκευσης πληροφοριών και η υπολογιστική της ικανότητα είναι περιορισμένες. Μπορεί να διαβαστεί μόνο σε μικρή απόσταση (0,6 έως 3 μέτρα). Υπάρχει και μια υποκατηγορία αυτής της ημιπαθητικής ετικέτας, όπου ουσιαστικά πρόκειται για παθητική ετικέτα υποβοηθούμενη από μπαταρία. Ο σκοπός της μπαταρίας είναι κυρίως να υποβοηθήσει να ενεργοποιηθεί το ολοκληρωμένο κύκλωμα (chip) κρατώντας το σε κατάσταση αναμονής. Δεδομένου, ότι η απόσταση ανάγνωσης των παθητικών ετικετών περιορίζεται πολύ συχνά από τη δυσκολία του chip να ενεργοποιηθεί εάν δεν διεγείρεται επαρκώς από την ενέργεια του πεδίου ανάγνωσης, η βοήθεια της μπαταρίας στις ημιπαθητικές ετικέτες προσφέρει μεγαλύτερες αποστάσεις ανάγνωσης.

Οι ενεργές ετικέτες RFID τροφοδοτούνται από μπαταρία. Χάρη στην ενσωματωμένη τροφοδοσία ρεύματος, οι ενεργές ετικέτες μπορούν να ενεργοποιηθούν ανεξάρτητα από την παρουσία ενός αναγνώστη σε κοντινή απόσταση και να φθάσουν τις αποστάσεις ανάγνωσης πολύ υψηλότερες από τις παθητικές ετικέτες. Λόγω του ότι είναι πάντα ενεργοποιημένες, χρησιμοποιούνται ενεργές ετικέτες όταν υπάρχει ανάγκη δημιουργίας συστημάτων εντοπισμού θέσης σε πραγματικό χρόνο (RTLS). Η λειτουργία των ενεργών ετικετών μπορεί να είναι συνεχής ή σε χρονικά διαστήματα με σκοπό την εξοικονόμηση της μπαταρίας. Στόχος είναι, οι ενεργές ετικέτες RFID πρέπει να καταναλώνουν χαμηλή ενέργεια ώστε να μην απαιτείται η συχνή αλλαγή της μπαταρίας. Επίσης, η ενεργή ετικέτα

έχει υψηλότερο κόστος και μεγαλύτερες διαστάσεις σε σχέση με την παθητική ετικέτα. Ένα παράδειγμα χρήστης της τεχνολογίας RFID στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων είναι η αυτόματη χρέωση των διοδίων [83].

Τέλος, υπάρχουν ετικέτες που είναι μόνο για ανάγνωση (read only), μία εγγραφή και πολλές αναγνώσεις (write once & read many) και εγγραφή & ανάγνωση (read & write). Στις δύο πρώτες κατηγορίες η ετικέτα RFID είναι απλά μία τεχνολογική εξέλιξη του γραμμικού κώδικα μιας και οι πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες, όταν εγγραφούν δεν είναι δυνατόν να αλλαχθούν, ενώ στη λειτουργία ανάγνωσης και εγγραφής, η ετικέτα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως δυναμική μνήμη, καθώς οι πληροφορίες μπορούν να ενημερωθούν ανά πάσα στιγμή.

Γενικά μπορεί να γίνει αναφορά, ότι υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες ασύρματες συνδέσεις μικρής εμβέλειας για την αξιοποίηση τους στο ΔτΠ. Όπως ειπώθηκε, το καθένα από αυτά έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όπως το κόστος, η απόσταση σύνδεσης, η μεταφορά των δεδομένων κτλ. Η αξιοποίηση τους εξαρτάται από την εφαρμογή, για την οποία θέλουμε υλοποιήσουμε και σύμφωνα με τους περιορισμούς που υπάρχουν όπως το περιβάλλον, ο προϋπολογισμός, άλλα συστήματα κτλ. Με μια προσεκτική επιλογή το αποτέλεσμα μπορεί να είναι βέλτιστο βάσει των συνθηκών.

3.4 Ασύρματες Συνδέσεις Μεγάλης Εμβέλειας LPWAN (Low Power Wide Area Networks)

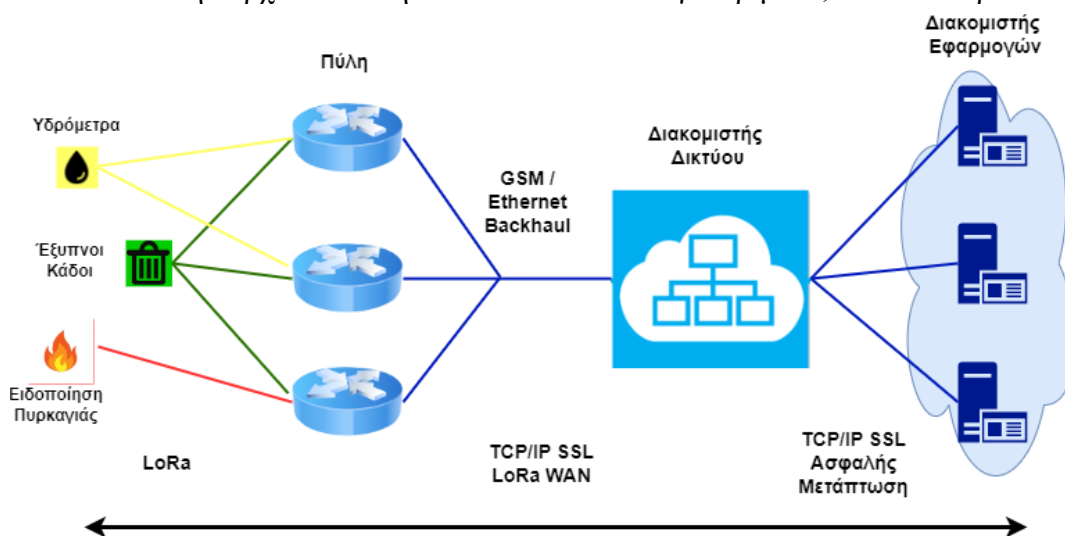
Με την διάδοση του Διαδικτύου των Πραγμάτων, δημιουργήθηκε μεγαλύτερη ανάγκη για την ανάπτυξη προτύπων ασύρματων συνδέσεων μεγάλης εμβέλειας - LPWAN (Low Power Wide Area Networks). Με τον όρο LPWAN δεν αναφερόμαστε σε κάποια συγκεκριμένη σύνδεση, αλλά σε μια κατηγορία ασύρματων συνδέσεων μεγάλης εμβέλειας η οποία έχει δύο βασικά χαρακτηριστικά: την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (LP) και μεγάλη εμβέλεια (WAN) [84]. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά είναι ζωτικής σημασίας για το ΔτΠ μιας και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας δίνει την δυνατότητα στις συσκευές και τους αισθητήρες που συνδέονται στο δίκτυο να λειτουργούν με χαμηλού κόστους μπαταρίες για μεγάλο χρονικό διάστημα, από μερικούς μήνες μέχρι και χρόνια αναλόγως τις υπηρεσίες και την συχνότητα των υπηρεσιών που εκτελούνται. Η απόσταση επικοινωνίας φτάνει τα 10 με 40 χιλιόμετρα σε μη αστικές ζώνες ενώ στις αστικές ζώνες φτάνει από 1 έως 5 χιλιόμετρα. Με αυτά τα βασικά χαρακτηριστικά ολόένα και περισσότεροι ερευνητές ασχολούνται με αυτού του τύπου τις συνδέσεις καθώς έχει τόσο

ερευνητικό ενδιαφέρον αλλά και εμπορικό. Ολοένα και περισσότερες επιχειρήσεις επενδύουν στις ασύρματες συνδέσεις μεγάλης εμβέλειας, μιας και εξυπηρετούν κατάλληλα το ΔτΠ. Πριν το 2013 ο όρος LPWAN δεν υπήρχε καν [85]. Από τότε έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνολογίες, οι οποίες διαρκώς εξελίσσονται τόσο σε μη αδειοδοτημένο όσο και σε αδειοδοτημένο εύρος συχνότητας. Στην παρούσα εργασία, θα αναφερθούμε συνοπτικά στις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες καθώς θα δοθεί και ιδιαίτερη έμφαση στο δίκτυο LoRa (Long Range) το οποίο αξιοποιήθηκε στην ανάπτυξη ενός συστήματος και στις πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν.

3.4.1 Το δίκτυο LoRaWAN και το πρωτόκολλο LoRA

Το LoRa (Long Range) είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία στις εμπορικές λύσεις του Διαδικτύου των Πραγμάτων, [Εικόνα 22](#). Είναι ένα πρωτόκολλο LPWAN που ορίζει το φυσικό επίπεδο ενός δικτύου και αποτελεί μία ιδιόκτητη τεχνολογία που ανήκει στη εταιρία κατασκευής Chip την Semtech που χρησιμοποιεί το Chirp Spread Spectrum (CSS), για να μετατρέψει τις ραδιοσυχνότητες σε bit, ώστε να μπορούν να μεταφερθούν μέσω ενός δικτύου. Το CSS δεν είναι καινούργια τεχνολογία, αλλά χρησιμοποιείται ήδη από το 1940 για στρατιωτικούς σκοπούς, λόγω της μεγάλης εμβέλειας μετάδοσης δεδομένων, εξού και το όνομα. Το LoRa είναι μία από τις τεχνολογίες που καθιστούν δυνατό το LoRaWAN (Long Range Wide Area Network), αλλά δεν περιορίζεται μόνο σε αυτό και δεν είναι το ίδιο πράγμα.

Το LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) [86] είναι ένα ανοιχτό πρωτόκολλο (open source) ανώτερου επιπέδου που βασίζεται στο νέφος και καθορίζει την επικοινωνία και την αρχιτεκτονική του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, είναι ένα πρωτόκολλο



Εικόνα 22: Αρχιτεκτονική LoRa Δικτύου

επιπέδου Medium Access Control (MAC) με ορισμένα στοιχεία του επιπέδου δικτύου. Χρησιμοποιεί LoRa, αλλά αναφέρεται συγκεκριμένα στο δίκτυο και στον τρόπο με τον οποίο μεταδίδονται δεδομένα μέσω αυτού. Το LoRaWAN ουσιαστικά επιτρέπει στις συσκευές ΔτΠ να χρησιμοποιούν LoRa για την επικοινωνία. Το LoRaWAN στοχεύει στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του LPWAN, κυρίως όσον αφορά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και τη μείωση του κόστους. Τα κύρια πλεονεκτήματα του LoRa είναι ότι μπορεί να καλύψει μια ευρεία γεωγραφική περιοχή σε εσωτερικό και εξωτερικό χώρο, με μειωμένο κόστος και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Υπολογίζεται ότι μπορεί να φτάσει τα 5 χιλιόμετρα μέσα στον αστικό ιστό και να ξεπεράσει τα 15 χιλιόμετρα σε μη αστικό περιβάλλον. Όπως μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό, η απόσταση εξαρτάται από το περιβάλλον και τα διάφορα εμπόδια που πιθανόν υπάρχουν διαδραματίζοντας σημαντικό ρόλο στην εμβέλεια του δικτύου.

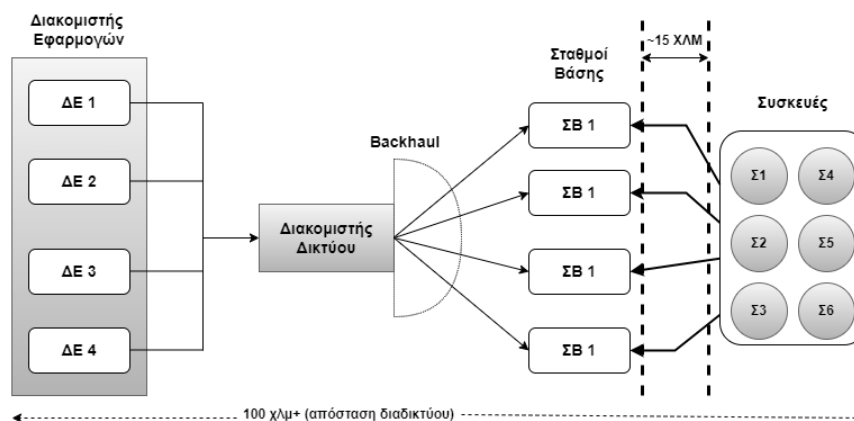
Για να το επιτύχει αυτό, το δίκτυο LoRaWAN εφαρμόζει μια τεχνική προσαρμοστικής διαμόρφωσης με πολυκάναλο πομποδέκτη πολλαπλών μόντεμ στο σταθμό βάσης για λήψη πολλαπλού αριθμού μηνυμάτων από τα κανάλια. Το φάσμα εξάπλωσης παρέχει ορθογώνιο διαχωρισμό μεταξύ των σημάτων χρησιμοποιώντας έναν μοναδικό παράγοντα διασποράς στο μεμονωμένο σήμα. Αυτή η μέθοδος παρέχει πολλά πλεονεκτήματα στη διαχείριση του ρυθμού δεδομένων. Η σχέση μεταξύ του απαιτούμενου ρυθμού δεδομένων (data bit rate) με τον ρυθμό chirp (chirp rate) και το ρυθμό συμβόλων (symbol rate) στην τεχνική διαμόρφωσης LoRa [87] ορίζεται ως εξής:

$$R_b = SF * \frac{1}{\left[\frac{2^{SF}}{BW} \right]} \text{ bits/s} \quad (2)$$

όπου, το R_b είναι ο ρυθμός διαμόρφωσης δεδομένων, SF ο συντελεστής διασποράς και BW = εύρος ζώνης διαμόρφωσης σε Hz. Όπως φαίνεται στην παραπάνω εξίσωση, ο ρυθμός δεδομένων R_b είναι ευθέως ανάλογος με τον παράγοντα διασποράς SF .

Το LoRaWAN χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική του αστέρα μεγάλης εμβέλειας, σχήμα της [Εικόνας 23](#), όπου οι πύλες χρησιμοποιούνται για την μετάδοση των μηνυμάτων μεταξύ των τελικών κόμβων (end-node) και του κεντρικού δικτύου. Σε ένα δίκτυο LoRaWAN, οι κόμβοι δεν σχετίζονται με μια συγκεκριμένη πύλη, αντιθέτως, τα δεδομένα που μεταδίδονται από έναν κόμβο λαμβάνονται συνήθως από πολλαπλές πύλες. Κάθε πύλη

προωθεί το ληφθέν πακέτο από τον τελικό κόμβο στον διακομιστή δικτύου που βασίζεται στην τεχνολογία νέφους μέσω διαφόρων προτύπων όπως WiFi, ethernet, κυψελοειδής δίκτυο, δορυφορικό κτλ. Οι τελικοί κόμβοι (π.χ. αισθητήρες και εφαρμογές) επικοινωνούν



Εικόνα 23: Αρχιτεκτονική LoRaWAN

με μία ή πολλές πύλες μέσω της επικοινωνίας LoRa ενώ όλες οι πύλες είναι συνδεδεμένες στον κεντρικό διακομιστή δικτύου μέσω των τυπικών συνδέσεων IP. Ο διακομιστής δικτύου έχει την απαιτούμενη «ευφυία» για το φιλτράρισμα των διπλότυπων πακέτων από τις διαφορετικές πύλες, να πραγματοποιεί τον έλεγχο ασφαλείας, την αποστολή επιβεβαίωσης μηνυμάτων στις πύλες, και την αποστολή του πακέτου σε συγκεκριμένο διακομιστή. Επειδή το δίκτυο έχει τη δυνατότητα να μπορεί να επιλέξει τις καλύτερες - ποιοτικότερες πληροφορίες μεταξύ των απεσταλμένων πληροφοριών που λαμβάνονται από τις διαφορετικές πύλες, δεν υπάρχει η ανάγκη ενημέρωσης για παραλαβή ή παράδοση της πληροφορίας. Αν ένας κόμβος μετακινείται δεν απαιτείται ενημέρωση παράδοσης από την πύλη σε πύλη, η οποία αποτελεί κρίσιμο χαρακτηριστικό για την ενεργοποίηση εφαρμογών παρακολούθησης σε ένα καθετοποιημένο σύστημα ΔτΠ.

Το LoRa χρησιμοποιεί ζώνες ραδιοσυχνοτήτων στο μη αδειοδοτημένο φάσμα κάτω από 1 GHz. Στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται οι συχνότητες EU868 (863–870/873 MHz), στη Νότια Αμερική AU915/AS923-1 (915–928 MHz), στη Βόρεια Αμερική US915 (902–928 MHz),) στην Ινδία IN865 (865–867 MHz), στην Ασία AS923 (915–928 MHz) και στα 2,4 GHz παγκοσμίως. Αναλόγως τον παράγοντα διασποράς, μπορεί να επιτύχει ρυθμούς δεδομένων μεταξύ 0,3 kbit/s και 27 kbit/s.

Όσον αφορά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, η ενέργεια που απαιτείται για τη μετάδοση ενός πακέτου δεδομένων είναι ελάχιστη μιας και τα πακέτα των δεδομένων είναι πολύ μικρά και μεταδίδονται μόνο μερικές φορές την ημέρα. Επιπλέον, όταν οι τελικές

συσκευές «κοιμούνται», η κατανάλωση ενέργειας μετριέται σε milliwatts (mW), επιτρέποντας στην μπαταρία μιας συσκευής να διαρκέσει για πολλά χρόνια. Όσον αφορά τη χωρητικότητα, ένα δίκτυο LoRaWAN μπορεί να υποστηρίξει εκατομμύρια μηνύματα. Ωστόσο, ο αριθμός των μηνυμάτων που υποστηρίζονται σε οποιαδήποτε συγκεκριμένη ανάπτυξη εξαρτάται από τον αριθμό των πυλών που είναι εγκατεστημένες. Μια πύλη οκτώ καναλιών μπορεί να υποστηρίξει μερικές εκατοντάδες χιλιάδες μηνύματα κατά τη διάρκεια μιας 24ωρης περιόδου. Εάν για παράδειγμα, κάθε τελική συσκευή στέλνει 10 μηνύματα την ημέρα, μια τέτοια πύλη μπορεί να υποστηρίξει περίπου 10.000 συσκευές. Εάν το δίκτυο περιλαμβάνει 10 τέτοιες πύλες, το δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει περίπου 100.000 συσκευές και ένα εκατομμύριο μηνύματα. Εάν απαιτείται περισσότερη χωρητικότητα, το μόνο που χρειάζεται είναι να προστεθούν επιπλέον πύλες στο δίκτυο. Όσον αφορά το κόστος εγκατάστασης και χρήσης ενός δικτύου LoRaWAN είναι ιδιαίτερα χαμηλό, δεδομένου ότι απαιτούνται ελάχιστες πύλες για να εξυπηρετήσουν πολλές τελικές συσκευές. Επίσης, το κόστος απόκτησης και εγκατάστασης πυλών είναι σχετικά χαμηλό, με αποτέλεσμα να μειώνεται περαιτέρω το συνολικό κόστος.

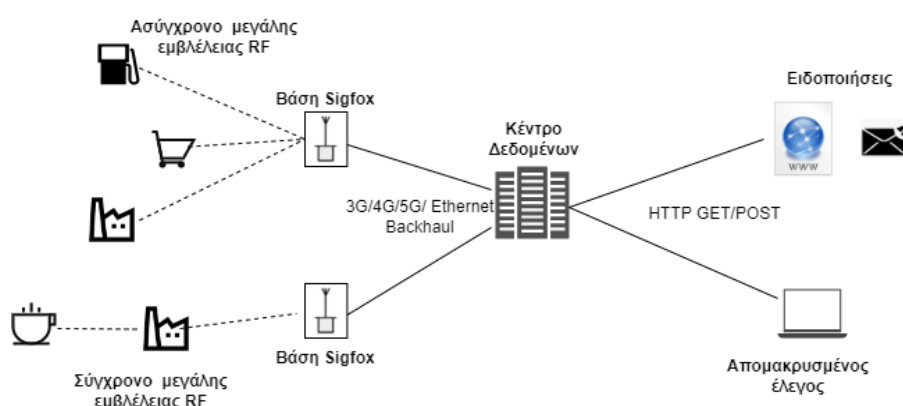
Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε, ότι το LoRaWAN και το πρωτόκολλο LoRa αποτελούν μια καινοτόμο επιλογή στην επικοινωνία του Δικτύου των Πραγμάτων. Καλύπτοντας μεγάλες αποστάσεις, βασισμένο σε ανοιχτά πρότυπα, με χαμηλό κόστος εγκατάστασης & χρήσης και δίνοντας τη δυνατότητα μεγάλης διάρκειας ζωής της μπαταρίας στις τελικές συσκευές, το καθιστούν από τα σημαντικότερα δίκτυα μεγάλης εμβέλειας για χρήση από το ΔτΠ.

3.4.2 Το δίκτυο SigFox

Το δίκτυο Sigfox, ανήκει στην ομώνυμη εταιρεία η οποία ιδρύθηκε το 2010 και έχει ως στόχο την εξάπλωση του ΔτΠ στις επιχειρήσεις μέσω του δικτύου της. Το Sigfox [88] χρησιμοποιεί την τεχνολογία ραδιοεξοπλισμού Ultra Narrow Band (UNB) και αναπτύσσει τους ιδιόκτητους σταθμούς βάσης στις μη αδειοδοτημένες ζώνες (ISM) στο φάσμα υπο-GHz, όπως στα 868 MHz στην Ευρώπη, στα 915 MHz στη Βόρεια Αμερική και στα 433 MHz στην Ασία. Όπως φαίνεται και στην [Εικόνα 24](#), οι τελικές συσκευές συνδέονται με αυτούς τους σταθμούς βάσης χρησιμοποιώντας διαμόρφωση BPSK (Binary Phase Shift Keying) σε μια εξαιρετικά στενή ζώνη των 100 Hz με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων τα 100 bps. Χρησιμοποιώντας εξαιρετικά στενό φάσμα, κάτω του GHz, η Sigfox χρησιμοποιεί με αποτελεσματικό τρόπο αυτή τη ζώνη συχνοτήτων και έχοντας πολύ

χαμηλά επίπεδα θορύβου, με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, με υψηλή ευαισθησία και χαμηλό κόστος.

Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας αντιπροσωπεύεται από την αντοχή της σε παρεμβολές και συγκρούσεις, που καθίστανται δυνατές από το εφαρμογή ενός μηχανισμού ποικιλομορφίας όσον αφορά τόσο τον χρόνο όσο και τη συχνότητα. Έτσι, κάθε αισθητήρας στέλνει κάθε πακέτο δεδομένων σε τρία κανάλια επικοινωνίας σε ψευδοτυχαία επιλεγμένες χρονικές στιγμές. Εν κατακλείδι, τα βασικά χαρακτηριστικά του Sigfox είναι η μεγάλη εμβέλεια, το μικρό μέγεθος των μηνυμάτων που αποστέλλονται, η τυχαία προσπέλαση, το χαμηλό κόστος και η αξιοποίηση του Ultra-Narrow Band (UNB).



Εικόνα 24: Δίκτυο SigFox

3.4.3 Το πρότυπο Narrowband Internet of Things (NB-IoT)

Με την ανάπτυξη των συστημάτων της κυψελοειδούς τεχνολογίας για την ανάπτυξη κυρίως της κινητής τηλεφωνίας, παρέχει σήμερα την δυνατότητα αξιοποίησης της από το Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Με την εξέλιξη από τα δίκτυα δεύτερης (2G) και τρίτης γενιάς (3G) όπου το σύστημα ήταν κυρίως για τη χρήση της τηλεφωνία. Με την ανάπτυξη του δικτύου τέταρτης γενιάς (4G) αλλάζει εξ' ολοκλήρου ο τρόπος λειτουργίας του και βασίζεται πλέον στο πρωτόκολλο Διαδικτύου (IP). Έτσι, η χρήση των κινητών τηλεφώνων περνά σε ένα νέο στάδιο έχοντας πολλές περισσότερες δυνατότητες. Τα συστήματα 4G, χρησιμοποιούν μια προηγμένη ραδιοδιεπαφή με ορθογώνια πολυπλεξία διαίρεσης συχνότητας (orthogonal frequency-division multiplexing OFDM), πολλαπλές-εισόδους/πολλαπλές-εξόδους (multiple-input multiple-output MIMO) και τεχνολογίες προσαρμογής ζεύξης. Τα ασύρματα δίκτυα 4G μπορούν να υποστηρίξουν ταχύτητες δεδομένων έως και 100 Mb/s για υψηλή κινητικότητα, όπως πρόσβαση μέσω κινητού τηλεφώνου. Το δίκτυο πέμπτης γενιάς 5G έχει σημαντικές διαφορές από τα προηγούμενα δίκτυα προσφέροντας

ταχύτητες μέχρι και δέκα φορές μεγαλύτερες από το 4G. Τα βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου 5G είναι:

- Η ταχύτητα του δικτύου μπορεί να φτάσει πάνω από 1 Gbps
- Χαμηλός χρόνος απόκρισης (latency)
- Η μετάδοση/ εκπομπή πραγματοποιείται σε τρεις περιοχές συχνοτήτων: 1) Χαμηλή συχνότητα (low-band) με συχνότητα μικρότερη του 1 GHz, 2) Μεσαία συχνότητα (mid-band) μεταξύ 1 GHz και 6 GHz και 3. Την Υψηλή συχνότητα (high-band) με συχνότητες των 6 GHz και των 26 έως 28 GHz.
- Χαμηλή κατανάλωσης ενέργειας. Ιδιαίτερα σε σχέση με το 4G το δίκτυο 5G έχει σημαντικά χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας.

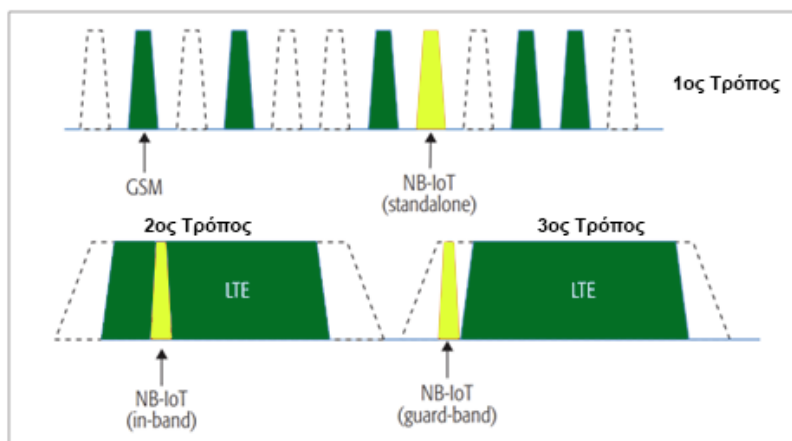
Είναι λοιπόν φανερό, πως το δίκτυο 5G μπορεί να αξιοποιηθεί από το ΔτΠ μιας και τα βασικά χαρακτηριστικά του που είδαμε παραπάνω το καθιστούν σε ορισμένες περιπτώσεις αρκετά ελκυστικό.

Η 3GPP (Generation Partnership Project) ανέπτυξε το δίκτυο Narrowband IoT (NB-IoT) το οποίο λειτουργεί στα 200 kHz σε αξιοποιημένες αλλά αδειοδοτημένες ζώνες ραδιοσυχνοτήτων [89]. Όπως είδαμε προηγουμένως, το LoRa και το Sigfox αποτελούν δημοφιλής επιλογές για δίκτυα LPWAN, τα οποία όμως λειτουργούν στο μη αδειοδοτημένο φάσμα. Το μη αδειοδοτημένο φάσμα συχνοτήτων έχει κάποιους περιορισμούς όπως ότι τα κανάλια μοιράζονται και με άλλες διαφορετικές τεχνολογίες, τυπικά, ο χρόνος μετάδοσης είναι περιορισμένος και απαιτούνται δικλείδες ασφαλείας για την αποφυγή παρεμβολών με συνυπάρχοντα συστήματα. Αντίθετα, το NB-IoT χρησιμοποιεί το υπάρχον δίκτυο κινητής τηλεφωνίας σε narrow band και για τη χρήση του απαιτείται μόνο μια αναβάθμιση λογισμικού στο υπάρχον δίκτυο LTE για να λειτουργήσει. Αυτό αποτελεί και ένα από τα βασικά του πλεονεκτήματα, μιας και δεν απαιτείται η ανάπτυξη κάποιου δικτύου, το οποίο μειώνει το κόστος και το χρόνο εγκατάστασης.

Τα βασικά χαρακτηριστικά του NB-IoT είναι η μικρότερη πολυπλοκότητα στον σχεδιασμό του πομποδέκτη, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, μεγάλος αριθμός κόμβων και όλα αυτά με σχετικά χαμηλό κόστος [76]. Συγκεκριμένα, με τη μη συνεχή λήψη DRX (Discontinuous Reception) επιτρέπουν στις συσκευές να πέφτουν σε «βαθύ ύπνο» και ανά χρονικά διαστήματα να «ξυπνούν» και να δέχονται τα μηνύματα και τα σήματα από το δίκτυο, με αποτέλεσμα να εξοικονομείται μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Το πόσο συχνά θα «ξυπνούν» οι συσκευές, εξαρτάται από

τον κύκλο του DRX. Επίσης, λόγω του μικρού εύρους ζώνης, η φασματική πυκνότητα ισχύος του NB-IoT μπορεί να ενισχυθεί κατά 6 dB σε σύγκριση με το παραδοσιακό LTE δίκτυο. Επιπλέον, η ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος μπορεί να βελτιωθεί με το συνδυασμό πολλαπλών επαναλήψεων. Ως αποτέλεσμα, το NB-IoT προσφέρει βελτιωμένη κάλυψη της τάξης των 20 dB σε σύγκριση με το LTE. Ένας μεμονωμένος κόμβος NB-IoT μπορεί να υποστηρίξει περισσότερες από 100.000 συσκευές που στέλνουν περιστασιακά μικρές ενημερώσεις στο δίκτυο. Αυτό μπορεί να κλιμακωθεί σε εκατομμύρια συνδέσεις προσθέτοντας περισσότερους κόμβους στο δίκτυο.

Το NB-IoT μπορεί να αναπτυχθεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους, όπως φαίνεται και στην [Εικόνα 25](#):



Εικόνα 25: Τρόποι Λειτουργίας NB-IoT

- **Αυτόνομη λειτουργία:** Στην αυτόνομη λειτουργία, το NB-IoT συνήθως θα αναπτυχθεί σε έναν ή περισσότερους υφιστάμενους φορείς GSM. Όλη η διαθέσιμη ισχύς μετάδοσης του σταθμού βάσης (Base Station -BS) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το NB-IoT.
- **Λειτουργία εντός ζώνης:** Μια ανάπτυξη εντός ζώνης σε ένα φορέα LTE χρησιμοποιεί τα ίδια μπλοκ φυσικών πόρων (physical resource block – PRB) με το LTE. Σε αυτή την λειτουργία υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί προγραμματισμού ανάπτυξης, καθώς ορισμένοι πόροι είναι περιορισμένοι για τη λειτουργία LTE, όπως για το φυσικό κανάλι ελέγχου κατερχόμενης ζεύξης και τα σήματα αναφοράς. Η ισχύς μετάδοσης μοιράζεται μεταξύ του παλαιού τύπου LTE και της λειτουργίας του NB-IoT.
- **Λειτουργία ζώνης προστασίας:** Αξιοποιούνται αχρησιμοποίητα μπλοκ πόρων εντός της ζώνης προστασίας του φορέα LTE και η κυψέλη του NB-

IoT εξυπηρετείται από το ίδιο σταθμός βάσης, μοιράζοντας επίσης τη μέγιστη ισχύ μετάδοσης της βάσης. Γενικά, αναμένονται λιγότερες παρεμβολές σε σύγκριση με τη λειτουργία εντός ζώνης, λόγω του τρόπου λειτουργίας του.

Γενικά, το NB-IoT αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση Ασύρματης Σύνδεσης Μεγάλης Εμβέλειας LPWAN. Αξιοποιώντας το ήδη υπάρχον δίκτυο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ταχύτατα και να έχει μεγάλο εύρος, χωρίς επιπλέον κόστος και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας των συσκευών την κάνουν ελκυστική σαν λύση. Έχοντας αυτά τα χαρακτηριστικά είναι μια καλή επιλογή για το ΔτΠ.

Στην παρούσα ενότητα είδαμε τις δημοφιλέστερες τεχνολογίες Ασύρματης Σύνδεσης Μεγάλης Εμβέλειας LPWAN που μπορούν να αξιοποιηθούν από το Διαδίκτυο των πραγμάτων. Η κάθε μία επιλογή, έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα όπου ο εκάστοτε μηχανικός καλείται να αξιολογήσει και αναλόγως την εφαρμογή να επιλέξει. Οι παράγοντες επιλογής μιας τέτοιας τεχνολογίας είναι πολυποίκιλοι όπως ο προϋπολογισμός, υπάρχουσες υποδομές, η γεωμορφολογία και γενικά οι περιορισμοί του περιβάλλοντος κτλ. Τέλος, υπάρχουν και υβριδικά συστήματα για την εξυπηρέτηση του συστήματος με περισσότερους από έναν τρόπους. Αυτό, όπως γίνεται αντιληπτό, αυξάνει το κόστος και την πολυπλοκότητα του συστήματος, με ότι αυτό συνεπάγεται.

3.5 Τομείς εφαρμογής και αξιοποίησης του ΔτΠ

Το διαδίκτυο των πραγμάτων βρίσκει αμέτρητες εφαρμογές όλους τους τομείς των δραστηριοτήτων των ανθρώπων, των εταιριών αλλά και συνολικά της κοινωνίας ([Εικόνα 26](#)). Από την αξιοποίηση του στο σπίτι μέχρι και στην έξυπνη διαχείριση ενέργειας το ΔτΠ μπορεί να ωφεληθεί ποικιλοτρόπως τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Αντιλαμβανόμενοι το εύρος των εφαρμογών που βρίσκει, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι δεν είναι εύκολη η απαρίθμηση τους. Γι' αυτό το λόγο ομαδοποιούνται οι εφαρμογές και αναφέρονται ενδεικτικά κάποιες από αυτές [90][91][92].

A. Έξυπνη πόλη (Smart City)

Με τον όρο «έξυπνη πόλη» (Smart City) εννοούμε τον ψηφιακό μετασχηματισμό των δικτύων και των υπηρεσιών πόλεων με σκοπό την ποιοτική αύξησή τους προς όφελος των πολιτών και των επιχειρήσεων. Μερικές από τις βασικές εφαρμογές της έξυπνης πόλης είναι: Έξυπνος φωτισμός Ασφάλεια, Έξυπνοι δρόμοι και Έξυπνοι Αυτοκινητόδρομοι Έξυπνη Στάθμευσή (Smart Parking), Έξυπνοι κάδοι / Διαχείριση Απορριμμάτων κ.α.

Β. Έξυπνη διαβίωση

Με τον όρο «έξυπνη διαβίωση» (Smart Living) αναφερόμαστε στις υπηρεσίες που χρησιμοποιούνται ώστε να βελτιώσουν την ζωή στην πόλη. Ο τομέας της έξυπνης διαβίωσης έχει ως στόχο την βελτίωση του βιοτικού επιπέδου ζωής των ανθρώπων στις πόλεις και αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της έξυπνης πόλης. Κάποιες χαρακτηριστικές εφαρμογές της έξυπνης διαβίωσης είναι: έλεγχος συσκευών από απόσταση, μετεωρολογία, συσκευές έξυπνου σπιτιού, κάμερες και συστήματα ασφαλείας, ενέργεια και παρακολούθηση κατανάλωσης νερού κ.α.



Εικόνα 26: Εφαρμογές Διαδικτύου των Πραγμάτων

Γ. Έξυπνο περιβάλλον

Η έννοια του έξυπνου περιβάλλοντος περιλαμβάνει την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος μέσω της παρακολούθησης του, της αποδοτικότητας των πόρων κ.α. Κάποια από τα σημαντικότερα στοιχεία του έξυπνου περιβάλλοντος είναι: παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, ανίχνευση δασικών πυρκαγιών, μετεωρολογική παρακολούθηση, ποιότητα ύδατος, παρακολούθηση πλημμυρών φαινομένων, προστασία της άγριας ζωής κ.α.

Δ. Έξυπνη βιομηχανία

Δεν θα μπορούσε το ΔτΠ να αφήσει ανεπηρέαστο και τον κλάδο της βιομηχανίας. Η αξιοποίηση του γίνεται τόσο για την ασφάλεια όσο και για την καλύτερη λειτουργία της βιομηχανίας. Συγκεκριμένα αξιοποιείται για την ανίχνευση των επιπέδων αερίου και των

διαρροών σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, σε περιβάλλοντα χημικών εργοστασίων, στα ορυχεία και αλλού, καθώς και για τη συντήρηση και επισκευή του εξοπλισμού, για τον έλεγχο κτλ.

Ε. Έξυπνη Υγεία

Η υγεία αποτελεί τον σημαντικότερο αγαθό για τον άνθρωπο. Μέσω του ΔτΠ μπορούν να προσφερθούν υψηλότερου επιπέδου υπηρεσίες τόσο στο νοσοκομείο όσο και απομακρυσμένα. Η έξυπνη υγεία μπορεί να βοηθήσει στην παρακολούθηση ασθενών απομακρυσμένα, στην ανίχνευση πτώσης του ασθενή, στην παρακολούθηση της φυσικής δραστηριότητας του ασθενή κ.α.

Ζ. Έξυπνη ενέργεια

Ο όρος «έξυπνη ενέργεια» αναφέρεται ουσιαστικά στα έξυπνα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, που έχουν ως στόχο την μείωση της σπατάλης ενέργειας και χρήσης της μέσω ενός αποδοτικότερου τρόπου. Αναπόσπαστο κομμάτι της, είναι χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Έτσι, οι εφαρμογές της έξυπνης ενέργειας συνοπτικά είναι: έξυπνο πλέγμα, ανεμογεννήτριες / Power house, ελεγκτές παροχής ενέργειας, φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις και άλλα.

Η. Έξυπνη γεωργία

Η «έξυπνη γεωργία» συνδυάζει ενσωματωμένα συστήματα, αισθητήρες και δεδομένα, για την βελτίωση της παραγωγής, την μείωση της χρήσης των πόρων στον αγροτικό τομέα, την επιτήρηση των αγρών και του ζωικού κεφαλαίου, και την μείωση της σπατάλης των φυσικών πόρων στην αγροτική παραγωγή. Έτσι, η έξυπνη γεωργία εφαρμόζεται ως: πράσινα αγρόσπιτα, έξυπνη κτηνοτροφία, επιτήρηση αγρών κ.α.

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (ΔτΠ) αποτελεί ένα από τα βασικότερα εργαλεία για την προστασία του περιβάλλοντος και την αύξηση του επιπέδου ζωής στις πόλεις. Οι εφαρμογές του ΔτΠ αξιοποιούνται σε όλους σχεδόν τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στο περιβάλλον, την ασφάλεια και την αύξηση του βιοτικού επιπέδου της ζωής των ανθρώπων. Χρησιμοποιώντας τους διαθέσιμους πόρους με τον καλύτερο δυνατό τρόπο όπως την καλύτερη διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων και ανακυκλώσιμων υλικών, την παραγωγή και χρήση της ενέργειας, την παρακολούθηση των γεωργικών μονάδων κ.α., μπορεί να οικοδομηθεί ένα πιο βιώσιμο

μέλλον. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή το ΔτΠ κατέχει σημαντική θέση για την ανάπτυξη των προτεινόμενων λύσεων.

Στο Κεφάλαιο 3 αναπτύξαμε τον ρόλο που διαδραματίζει το Διαδίκτυο των Πραγμάτων στον τομέα του περιβάλλοντος. Πραγματοποιήθηκε ενδελεχής ανασκόπηση του όρου ΔτΠ, παρουσιάστηκαν τα βασικά μοντέλα επικοινωνίας και τα πρότυπα συνδεσιμότητας που χρησιμοποιεί. Μέσα από αυτό το κεφάλαιο έγινε κατανοητή η σημαντικότητα του ΔτΠ για τις εφαρμογές στον περιβάλλον, καθώς και η αγαστή συνεργασία μεταξύ των ενσωματωμένων συστημάτων και του Διαδικτύου των Πραγμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μεθοδολογία σχεδιασμού ενσωματωμένων συστημάτων για περιβαλλοντικές εφαρμογές & τεχνολογίες αντιρρύπανσης

4.1 Εισαγωγή

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η διαρκής αύξηση της καταναλωτικής συμπεριφοράς στις ανεπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες, δημιουργεί ολοένα και περισσότερα αστικά απορρίμματα (ΑΣΑ). Η διαχείριση των αστικών στερεών απορριμμάτων, καθώς και η ανακύκλωση τους, αποτελούν έναν από τους βασικότερους προβληματισμούς της σύγχρονης κοινωνίας. Η συνολική λοιπόν αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων θα πρέπει να αντιμετωπιστεί εγκαίρως.

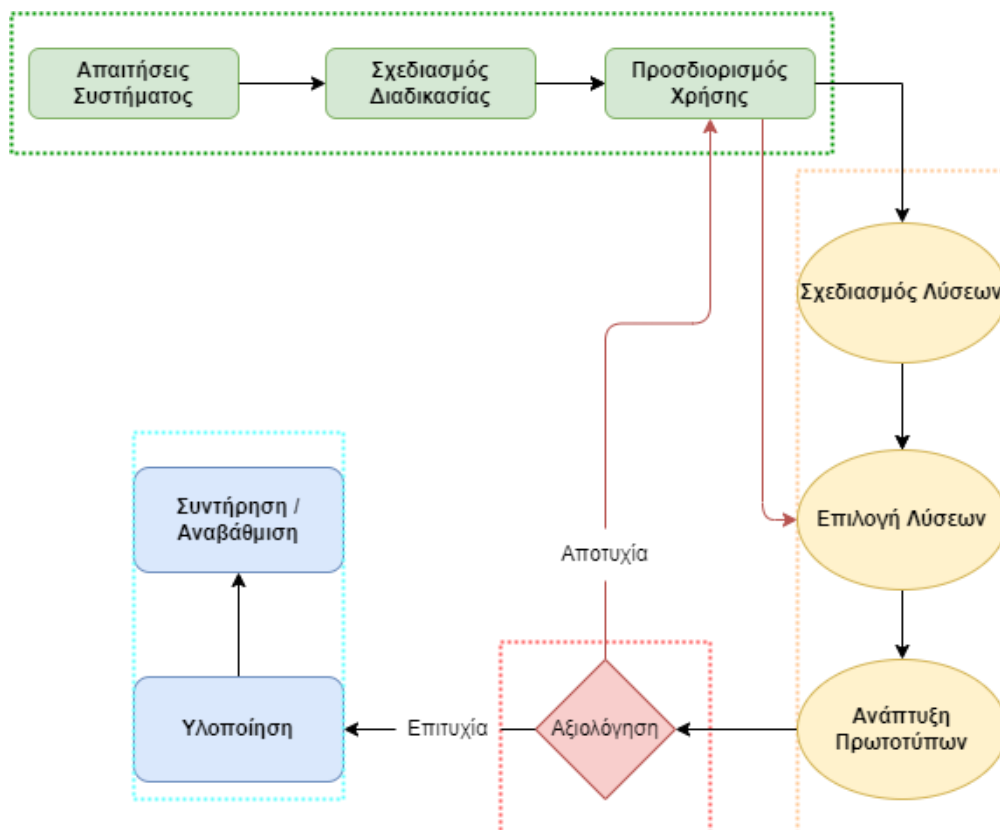
Οι τρέχουσες πρακτικές διαχείρισης των ΑΣΑ δεν είναι αρκετά εξελιγμένες για να επιτύχουν έναν ισχυρό και αποτελεσματικό μηχανισμό. Αν και η αποκομιδή των απορριμμάτων στις ανεπτυγμένες χώρες πραγματοποιείται με συνέπεια, και οι διαχειριστικές αρχές προσπαθούν με τα μέσα που διαθέτουν να κρατήσουν τις πόλεις τους καθαρές, το αποτέλεσμα δεν είναι πάντα το επιθυμητό. Παραδοσιακά, οι κάδοι απορριμμάτων αδειάζονται σε καθορισμένο χρόνο από τα απορριμματοφόρα. Αυτός ο τρόπος όμως έχει κάποια μειονεκτήματα όπως: μερικοί κάδοι απορριμμάτων γεμίζουν ταχύτερα από κάποιους άλλους στην ίδια διαδρομή και ξεχειλίζουν πριν από την επόμενη προγραμματισμένη αποκομιδή, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται συνθήκες που εγκυμονούν υγειονομικούς κινδύνους. Επίσης, υπάρχουν ειδικοί περίοδοι, όπως φεστιβάλ, σαββατοκύριακα, παραθεριστική περίοδος, αργίες κτλ. όπου μερικοί κάδοι απορριμμάτων γεμίζουν πιο γρήγορα σε σχέση με τις υπόλοιπες μέρες του έτους και υπάρχει ανάγκη για περισσότερες διαδρομές ή προσθήκης επιπλέον κάδων γι' αυτές τις περιόδους. Μεγάλη πρόκληση για τις διαχειριστικές αρχές απορριμμάτων αποτελεί η διατήρηση της καθαριότητας της πόλης καθώς περιλαμβάνει πολλούς παράγοντες που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως τα οικονομικά κριτήρια, η διαχείριση διαφορετικών καταστάσεων, η συλλογή και μεταφορά των απορριμμάτων κ.λπ. [93]. Επιπλέον, το 85% των οικονομικών κονδυλίων διαχείρισης στερεών αποβλήτων δαπανάται για τη συλλογή και τη μεταφορά των απορριμμάτων [94]. Οι περισσότερες διαχειριστικές αρχές των απορριμμάτων προσπαθούν να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα με διάφορους τρόπους όπως αλλάζοντας τις διαδρομές, συνδυάζοντας ένα τμήμα διαδρομής με άλλες διαδρομές, τοποθετώντας περισσότερους κάδους, μεγαλύτερης χωρητικότητας κ.λπ. Όμως, όλες αυτές

οι λύσεις είναι προσωρινές και μακροπρόθεσμα δεν φέρουν κάποιο σημαντικό αποτέλεσμα.

Από την άλλη πλευρά, η ανακύκλωση μέρους των ΑΣΑ αποτελεί ένα μεγάλο στόχο για τη σύγχρονη κοινωνία. Αν και σε αρκετές ανεπτυγμένες χώρες η ανακύκλωση έχει φτάσει σε επιθυμητό επίπεδο, στις αναπτυσσόμενες χώρες η ανακύκλωση βρίσκεται σε εμβρυακή κατάσταση. Ο τρόπος συλλογής και διαχωρισμού των ανακυκλώσιμων υλικών απαιτεί νέες μεθόδους, ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο δυνατό αποτέλεσμα. Και τα δύο αυτά βασικά ζητήματα, της αποκομιδής των απορριμμάτων και της διαχείρισης των ανακυκλώσιμων υλικών, μπορούν να επιλυθούν με τη αξιοποίηση των ενσωματωμένων συστημάτων. Οι έξυπνες πόλεις (smart cities) χρησιμοποιούν το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) με σκοπό να βελτιώσουν τις συνθήκες ζωής των πολιτών και να προστατέψουν το περιβάλλον.

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που παρουσιάστηκε στα κεφάλαια 1, 2 και 3 της παρούσας διδακτορική διατριβής αναλύει και σκιαγραφεί την σημερινή κατάσταση στις ανεπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες. Διαφαίνεται πως τα ενσωματωμένα συστήματα αποτελούν βασικό πυλώνα για την επίλυση αυτών των προβλημάτων. Η σχεδίαση των κατάλληλων ενσωματωμένων συστημάτων με την επιλογή των αισθητήρων που απαιτούνται και την συνδεσιμότητα μεταξύ του συστήματος, δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να έχει στη διάθεσή του όλες τις απαραίτητες πληροφορίες και εν συνεχεία με την ανάπτυξη ενός προβλεπτικού αλγορίθμου να προτείνονται οι καλύτερες δυνατές λύσεις.

Για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος, το οποίο έχει πολλές μεταβλητές, αναπτύχθηκε και σχεδιάστηκε το «Προσαρμοστικό Μοντέλο Ζ» [95] [96], όπως το ονομάσαμε, και φαίνεται στην [Εικόνα 27](#). Το προτεινόμενο μοντέλο, το οποίο αποτελείται από εννιά (9) διακριτά μεταξύ τους βήματα, τα οποία τα ομαδοποιούμε σε τέσσερά (4) στάδια, είναι κατάλληλο για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων, δίνοντας έμφαση στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κάθε προβλήματος. Έτσι, σύμφωνα με το Προσαρμοστικό Μοντέλο Ζ, αναλύονται οι απαιτήσεις του συστήματος, σχεδιάζεται η διαδικασία σύμφωνα με τις πιθανές λύσεις που υπάρχουν τη δεδομένη χρονική στιγμή και εν συνεχεία προσδιορίζεται η χρήση του. Σε αυτή την κατηγορία, πραγματοποιείται ο βασικός σχεδιασμός, όπου καταγράφονται οι απαιτήσεις του συστήματος, πιθανοί περιορισμοί του περιβάλλοντος και ο τρόπος χρήσης του. Στο επόμενο βήμα πραγματοποιείται η ανάπτυξη των προτεινόμενων λύσεων. Αφορά δηλαδή, μια λίστα από



Εικόνα 27: Διάγραμμα μεθοδολογίας για το "Προσαρμοστικό Μοντέλο-Z"

πιθανές προτεινόμενες λύσεις του προβλήματος. Στη συνέχεια, επιλέγονται μία ή περισσότερες λύσεις και προχωρά η διαδικασία στον σχεδιασμό και στην ανάπτυξη του πρωτότυπου. Έχοντας αναπτύξει το ή τα πρωτότυπα συστήματα φτάνουμε στην φάση της αξιολόγησης. Αυτό είναι ιδιαίτερα κομβικό μιας και εφόσον είμαστε ικανοποιημένοι από την χρήση του πρωτότυπου, προχωράμε στην υλοποίηση και μετά στην συντήρηση και αναβάθμιση του. Εάν η λύση που δόθηκε και δοκιμάστηκε, δεν επιφέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα τότε επανερχόμαστε ξανά στο στάδιο του προσδιορισμού της χρήσης. Έχοντας συλλέξει χρήσιμες πληροφορίες μπορούμε να αλλάξουμε κάποιες από τις αρχικές απαιτήσεις ή εφόσον δεν απαιτείται καμία αλλαγή να προχωρήσουμε στην επιλογή άλλων λύσεων. Αν καμιά από τις λύσεις που έχουμε προηγουμένως αναπτύξει δεν μας ικανοποιεί, ξεκινάμε πάλι την διαδικασία της ανάπτυξης προτεινόμενων λύσεων. Τέλος, όταν η λύση που επιλέξαμε καλύπτει τα κριτήρια που έχουμε θέσει, πραγματοποιείται η βιομηχανική υλοποίηση και εν συνεχεία η αναβάθμιση και η συντήρηση του.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε αποτελείται από εννιά (9) διακριτά μεταξύ τους βήματα, τα οποία τα ομαδοποιούμε σε τέσσερά (4) στάδια. Έτσι έχουμε:

1^ο Στάδιο: Ανάλυση του συστήματος, στο οποίο ανήκουν τα εξής βήματα:

- Απαιτήσεις Συστήματος
- Σχεδιασμός Διαδικασίας
- Προσδιορισμός Χρήσης

2^ο Στάδιο: Σχεδιασμός και Ανάπτυξη προτεινόμενων λύσεων, η οποία περιλαμβάνει:

- Σχεδιασμός προτεινόμενων λύσεων
- Επιλογή λύσης
- Ανάπτυξη πρωτοτύπων

3^ο Στάδιο: Αξιολόγηση της προτεινόμενης λύσης και

4^ο Στάδιο: Αξιοποίηση της λύσης, όπου περιλαμβάνονται :

- Η υλοποίηση της λύσης και
- Η συντήρηση και Αναβάθμιση του Συστήματος

Το βασικό στοιχείο για την ορθή λειτουργία του «Προσαρμοστικού Μοντέλου Ζ» είναι η έμφαση που δίνεται στην ανάλυση των προδιαγραφών και των απαιτήσεων του συστήματος που απαιτούνται, ώστε να αναπτυχθούν οι καλύτερες δυνατές λύσεις. Με αυτό ως αρχή, μπορούν να σχεδιαστούν περισσότερες από μία λύσεις και να επιλεγεί μία από αυτές που θεωρείται καλύτερη, ώστε να δοκιμαστεί και να αξιολογηθεί πριν την τελική υλοποίηση. Για τον λόγο αυτό, θα πρέπει να οριστούν ξεκάθαρα οι στόχοι του συστήματος και οι προδιαγραφές του, ώστε να μπορούν να αξιολογηθούν οι πιθανές λύσεις.

Όσον αφορά το **πρώτο στάδιο**, αυτό της Ανάλυσης του Συστήματος, θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν διάφοροι παράμετροι τόσο όσον αφορά το ίδιο το σύστημα, όσο και το περιβάλλον στο οποίο θα λειτουργήσει. Για να αναπτυχθεί ένα οποιοδήποτε ενσωματωμένο σύστημα θα πρέπει να πραγματοποιηθεί η ανάλυση των απαιτήσεων που ισχύουν. Οι περιορισμοί που τίθενται ανά σύστημα μπορεί να διαφέρουν αναλόγως με τις παραμέτρους που θέτει ο χρήστης και μπορεί να αφορά: περιορισμούς του περιβάλλοντος στο οποίο θα τοποθετηθεί το σύστημα, το κόστος απόκτησης και συντήρησης, ιδιαίτερους περιορισμούς όπως χρήση από Άτομα με Αναπηρία (ΑμεΑ) και άλλους πιθανούς περιορισμούς. Όσον αφορά ιδιαίτερα τον τομέα της συγκεκριμένης διατριβής που εστιάζει στο περιβάλλον, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην ανάλυση της τοποθεσίας και γενικότερα του περιβάλλοντος εγκατάστασης του συστήματος, της γεωμορφολογίας όπου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή του τρόπου επικοινωνίας με το πληροφοριακό σύστημα, της κατανάλωσης ενέργειας, τον προϋπολογισμό και την εύκολη εύρεση και αντικατάσταση του υλικού (hardware). Σε αυτό το πρώτο στάδιο θα πρέπει να απαντηθούν κάποια κρίσιμα ερωτήματα

όπως: 1) Ποιοι είναι οι χρήστες του συστήματος; 2) Ποιες είναι οι ανάγκες που καλύπτει το σύστημα; 3) Ποια θα πρέπει να είναι η διαδικασία ανάπτυξης του συστήματος; 4) Ποιοι στόχοι θέλουμε να επιτευχθούν; Οι απαντήσεις σε αυτά τα κρίσιμα ερωτήματα εξάγονται από τη συνεργασία όλων των εμπλεκόμενων φορέων όπως μπορεί να είναι ο χρήστης του συστήματος, ο διαχειριστής του συστήματος, τεχνικό προσωπικό και άλλοι.

Κατά το πρώτο στάδιο, στο πρώτο βήμα αναλύονται οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί του συστήματος που υπάρχουν συναρτήσει των στόχων που έχουν τεθεί. Σε αυτό το βήμα καταγράφονται οι απαιτήσεις του συστήματος. Θα πρέπει να γίνει προσεκτική καταγραφή και αποτίμηση των παραγόντων που επηρεάζουν το σύστημα, ώστε να επιτευχθεί το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Στη συνέχεια, και αφού έχει γίνει η καταγραφή και η ανάλυση των περιορισμών και των στόχων, ξεκινά ο σχεδιασμός της διαδικασίας. Ο σχεδιασμός αναφέρεται στην διαδικασία καθορισμού κατάλληλων δράσεων που θα επιλεγούν μεταξύ πολλών επιλογών, διερευνώντας τις πιθανές λύσεις που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του συστήματος. Με λίγα λόγια, αποτελεί έναν οδηγό όπου επιλέγονται οι στόχοι, τα κριτήρια, οι εναλλακτικές λύσεις και τέλος το επιθυμητό αποτέλεσμα και αποτελεί το φυσικό επακόλουθο του πρώτου βήματος. Στη συνέχεια, στο τρίτο βήμα προσδιορίζεται η χρήση του συστήματος, δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο θα χρησιμοποιηθεί το σύστημα από τον χρήστη. Θα πρέπει να τονιστεί ότι αυτό το βήμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό, μιας και τα κριτήρια τα οποία θα τεθούν θα πρέπει να είναι προσεκτικά επιλεγμένα ώστε οι προτεινόμενες λύσεις να φέρουν και το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Το **δεύτερο στάδιο**, αφορά τον Σχεδιασμό και την Ανάπτυξη των λύσεων. Έχοντας θέσει στο προηγούμενο στάδιο τις απαιτήσεις, θα σχεδιαστούν οι πιθανές λύσεις οι οποίες ανταποκρίνονται στα κριτήρια που έχουν τεθεί. Έτσι, διαμορφώνεται ένα πλήθος πιθανών λύσεων που μπορούν να ανταποκριθούν στους στόχους, καλύπτοντας τις απαιτήσεις του συστήματος. Εν συνεχεία, στο επόμενο βήμα, επιλέγεται η λύση που πιθανά μπορεί να επιλύσει το πρόβλημα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο και στο τελευταίο βήμα αυτού του σταδίου αναπτύσσεται η επιλεγείσα λύση ως πρωτότυπο. Σε αυτό το στάδιο, μπορούν να γίνουν αρκετές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο θα αναπτυχθεί το σύστημα. Τέτοιες αλλαγές μπορεί να είναι ως προς το υλικό, τον τρόπο διασύνδεσης, τον τρόπο ανάπτυξης του αλγορίθμου κτλ. Αν και μπορούν να επιλεγούν περισσότερες από μία λύσεις ώστε να περάσουν στο επόμενο στάδιο, αυτού της αξιολόγησης, θα έχει ως συνέπεια να δαπανηθούν

οικονομικοί και ανθρώπινοι πόροι. Γι' αυτό θα ήταν προτιμότερο να επιλέγεται μία λύση κάθε φορά.

Το **τρίτο στάδιο** αφορά την αξιολόγηση της επιλεχθείσας λύσης. Σε αυτό το στάδιο και αφού έχουμε αναπτύξει το πρωτότυπο σύστημα, αξιολογείται σύμφωνα με τους στόχους και τους περιορισμούς που έχουμε θέσει στο πρώτο στάδιο. Σε αυτό το στάδιο υπάρχουν δύο επιλογές, είτε η αξιολόγηση να είναι επιτυχής είτε όχι. Έτσι, αν η αξιολόγηση είναι αρνητική, τότε θα πρέπει να αναζητηθεί και να γίνει ξεκάθαρο το πρόβλημα για το οποίο η αξιολόγηση απέτυχε και να επιστρέψουμε στο στάδιο του προσδιορισμού χρήσης. Εφόσον δεν υπάρχουν δομικές αλλαγές στη χρήση, τότε πηγαίνουμε στην επιλογή μιας εναλλακτικής λύσης που έχουμε προσδιορίσει και συνεχίζουμε στην ανάπτυξη του πρωτοτύπου και την αξιολόγηση του. Αν έχουν προκύψει σημαντικές αλλαγές, τότε επανασχεδιάζουμε τις λύσεις και δημιουργούμε νέες. Εφόσον, η αξιολόγηση όμως είναι επιτυχής, πράγμα που σημαίνει ότι η λύση μας μπορεί να αξιοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος που υπάρχει τότε προχωράμε στην τελευταία κατηγορία που είναι η ανάπτυξη και υλοποίηση της βιομηχανικής πλέον λύσης. Πιθανόν, κατά το στάδιο αυτό η λύση μας να χρειαστεί μικρές τροποποιήσεις οι οποίες θα πραγματοποιηθούν στο τελευταίο στάδιο της υλοποίησης.

Στο **τέταρτο και τελευταίο στάδιο**, υλοποιείται η λύση με τυχόν προσθήκες ή/και τροποποιήσεις που έχουν επισημανθεί κατά το στάδιο της αξιολόγησης. Έτσι, το σύστημα μας είναι πλέον λειτουργικό και έτοιμο να αντιμετωπίσει το πρόβλημα για το οποίο αναπτύχθηκε. Σε αυτό το στάδιο μετατρέπεται η λύση σε βιομηχανική, ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί κατάλληλα. Το τελευταίο βήμα του σταδίου αυτού αφορά την συντήρηση και αναβάθμιση του συστήματος. Όπως είναι γνωστό το σύστημα δεν μπορεί να παραμένει στατικό πράγμα που σημαίνει ότι απαιτείται η συνεχής συντήρηση και αναβάθμιση του όσον αφορά την ασφάλεια, την προσαρμογή σε νέες τεχνολογίες, την λειτουργικότητα, την ενσωμάτωση νέων λειτουργιών, την συμβατότητα κτλ. ώστε να διορθώνονται τυχόν προβλήματα που θα προκύψουν, να παρέχεται μεγαλύτερη δυνατή ασφάλεια και γίνεται πιο λειτουργικό για τον χρήστη.

Χρησιμοποιώντας λοιπόν το «Προσαρμοστικό Μοντέλο Ζ» μπορούμε να φτάσουμε από την ανάλυση ενός προβλήματος στην λύση του, σχεδιάζοντας, αναπτύσσοντας και κατασκευάζοντας το καλύτερο δυνατό σύστημα, τη δεδομένη στιγμή, έχοντας συγκεκριμένα χαρακτηριστικά.

Προκειμένου να παρουσιασθεί το μοντέλο σε πραγματικές καταστάσεις δείχνουμε παρακάτω τον τρόπο εφαρμογής του σε δύο ρεαλιστικά προβλήματα. Το πρώτο πρόβλημα, αφορά στην διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων μέσω ενός ενσωματωμένου συστήματος που αξιοποιείται στους κάδους απορριμμάτων στις σύγχρονες πόλεις. Το δεύτερο πρόβλημα, αφορά την ανακύκλωση, και συγκεκριμένα στον διαχωρισμό των σύμμεικτων απορριμμάτων μεταξύ των ανακυκλώσιμων και μη υλικών, μέσω της οπτικής αναγνώρισης (object detection).

4.2 Αξιοποιώντας το «Προσαρμοστικό Μοντέλο Z» στην διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων

Όπως έχουμε αναφέρει σχετικά με την διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ), ο σύγχρονος τρόπος αποκομιδής δεν έχει εκσυγχρονιστεί και δεν αξιοποιεί τις νέες τεχνολογίες και το διαδίκτυο των πραγμάτων το οποίο είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την καλύτερη διαχείριση τους. Αξιοποιώντας λοιπόν τη μεθοδολογία του Προσαρμοστικού Μοντέλου Z στην διαχείριση των ΑΣΑ μπορούμε να έχουμε καλύτερες λύσεις για την μείωση των απορριμμάτων και την ορθότερη αποκομιδή τους.

Στόχος της υλοποίησης είναι η ανάπτυξη ενός συστήματος, το οποίο αφορά την διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ), όπου θα ενημερώνει σε πραγματικό χρόνο για την πληρότητα του κάδου, την θερμοκρασία του και εάν το καπάκι μένει ανοιχτό, ενώ συλλέγοντας αυτές τις πληροφορίες θα προτείνει στον χρήστη την βέλτιστη αποκομιδή των σκουπιδιών. Βασική προϋπόθεση για την ορθή λειτουργία του συστήματος είναι η ανάπτυξη ενός εξειδικευμένου πληροφοριακού συστήματος, στο οποίο θα αποθηκεύονται όλα τα δεδομένα και με την ανάπτυξη ενός εξειδικευμένου αλγορίθμου θα μπορεί να προτείνει την βέλτιστη διαδρομή. Η βασική λειτουργία του συστήματος αφορά την έγκαιρη προειδοποίηση σε περίπτωση που ο κάδος φτάσει στο όριο που έχει θέσει ο χρήστης, όπως για παράδειγμα στο 70%, ειδοποιήσεις σε περίπτωση φωτιάς και σε περίπτωση που το καπάκι του κάδου μένει ανοιχτό. Αυτές οι πληροφορίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές, ώστε να παρθούν οι σωστές αποφάσεις για την βέλτιστη αποκομιδή των απορριμμάτων και την καλύτερη διαχείριση της αποκομιδής. Οι αισθητήρες που θα είναι εγκατεστημένοι στο σύστημα θα πρέπει να είναι εμπορικά διαθέσιμοι και να έχουν την δυνατότητα αντικατάστασης με αντίστοιχης αρχιτεκτονικής χωρίς να απαιτείται η αλλαγή του κυρίως κώδικα που έχει αναπτυχθεί. Δεν είναι ιδιαίτερα σημαντική η ταχύτητα μετάδοσης της πληροφορίας, αλλά αντίθετα σημαντικός είναι ο τρόπος και κυρίως το κόστος διασύνδεσης του συστήματος με το πληροφοριακό σύστημα. Η ασφάλεια των δεδομένων δεν είναι

κρίσιμη, αν και είναι θεμιτή, μιας και τα δεδομένα αφορούν τιμές πληρότητας, θερμοκρασίας, και τύπου αληθές/ψευδές για το καπάκι, τα οποία δεν περιέχουν καμία ευαίσθητη πληροφορία. Τέλος, θα πρέπει να υπάρξει ειδική μέριμνα σχετικά με την ικανότητα αυτονομίας του συστήματος, με έμφαση στην χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, στην ορθή λειτουργία του συστήματος κάτω από ακραίες καιρικές συνθήκες και στην ευκολία συντήρησης και στην αναβάθμιση του συστήματος όταν και όποτε αυτό κριθεί σκόπιμο.

Ο στόχος του συστήματος είναι η εύκολη χρήση (user friendly) από τον χειριστή, η εύκολη αντικατάσταση υλικού εφόσον κριθεί απαραίτητο, η εύκολη εύρεση ανταλλακτικών του υλικού για την αντικατάσταση του, η τοποθέτηση του συστήματος σε τέτοιο σημείο ώστε να αποφεύγεται ο βανδαλισμός και η κλοπή του, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και η συνδεσιμότητα με το πληροφοριακό σύστημα.

Η διαδικασία είναι να ενημερώνεται το πληροφοριακό σύστημα ανά τακτά χρονικά διαστήματα για την πληρότητα του κάδου. Αυτό μπορεί να είναι σε συγκεκριμένες στιγμές μέσα στην ημέρα ή κάθε φορά που ανοίγει το καπάκι. Αυτή η παράμετρος θα πρέπει να αναλυθεί περισσότερο σε επόμενα βήματα, μιας και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην κατανάλωση ενέργειας και διαφοροποιεί την πολυπλοκότητα του συστήματος. Έτσι, όταν ο κάδος φτάσει σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο απορριμμάτων που θα έχει καθοριστεί από τον διαχειριστή, θα στέλνει ειδοποίηση στο πληροφοριακό σύστημα προς ενημέρωση των αρμοδίων οργάνων. Επίσης, ανά συγκεκριμένα, τακτά χρονικά διαστήματα, θα πραγματοποιείται μέτρηση της θερμοκρασίας του κάδου και όταν αυτή υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή θα ειδοποιεί τον διαχειριστή του συστήματος για πιθανή φωτιά στον κάδο. Στο πληροφοριακό σύστημα θα αποθηκεύονται όλες αυτές οι πληροφορίες οι οποίες θα αξιοποιηθούν ώστε να προκύψουν προτάσεις για την βέλτιστη δυνατή διαδρομή των απορριμματοφόρων. Στόχος του συγκεκριμένου αλγόριθμου θα είναι να μειωθούν οι αποστάσεις και να πραγματοποιούνται τα δρομολόγια που είναι απαραίτητα, αποφεύγοντας τις άσκοπες μετακινήσεις, όταν για παράδειγμα οι κάδοι είναι άδειοι. Με αυτό τον τρόπο θα μειωθεί το κόστος σε καύσιμα και εργατοώρες, προάγοντας ταυτόχρονα την ποιότητα ζωής στο αστικό περιβάλλον. Ακόμη, η συνδεσιμότητα μεταξύ του εγκατεστημένου ενσωματωμένου συστήματος και του πληροφοριακού συστήματος θα πρέπει να είναι συμβατή με το αστικό και περιαστικό περιβάλλον, καλύπτοντας μεγάλες αποστάσεις και έχοντας χαμηλό κόστος. Ο συγκεκριμένος περιορισμός είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την επιτυχία του συστήματος. Θα πρέπει να δοθεί λοιπόν ιδιαίτερη προσοχή, μιας και η

συνδεσιμότητα αποτελεί δομικό στοιχείο του όλου συστήματος και το οποίο επηρεάζει σημαντικά το κόστος.

Για να αξιοποιήσουμε το «Προσαρμοστικό Μοντέλο Z» ξεκινάμε με την ανάλυση των απαιτήσεων του συστήματος, το οποίο αποτελεί και το πρώτο στάδιο. Ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων χωρίζεται σε τρία διακριτά μέρη: α) το υλικό μέρος του συστήματος, β) το λογισμικό μέρος και γ) η συνδεσιμότητα μεταξύ των δύο μερών.

Το σύστημα αποτελείται από σταθμούς (nodes) οι οποίοι μπορούν να επικοινωνούν είτε με κάποιον ενδιάμεσο σταθμό, είτε απευθείας με το πληροφοριακό σύστημα το οποίο είναι εγκατεστημένο σε έναν διακομιστή (server). Οι σταθμοί στέλνουν τις μετρήσεις τους ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα ή όταν εκτελείται κάποιο συμβάν, όπως για παράδειγμα όταν κλείνει το καπάκι του κάδου. Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης του συστήματος γνωρίζει σε τακτά χρονικά διαστήματα ή σε πραγματικό χρόνο, αναλόγως την παραμετροποίηση που επιλέγει, την κατάσταση του κάδου. Με αυτό τον τρόπο και αναλόγως τους αισθητήρες που έχουμε εγκαταστήσει στο σύστημα ελέγχονται οι κάδοι και προτείνονται καλύτεροι τρόποι διαχείρισης των απορριμμάτων. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για να συλλέξουμε τα δεδομένα αφορούν την πληρότητα του κάδου, την θερμοκρασία, και ένας αισθητήρας πίεσης για τον έλεγχο αν το καπάκι μένει ανοιχτό.

Κάθε σταθμός συλλέγει αυτές τις πληροφορίες και αποστέλλει τα δεδομένα στον κεντρικό διακομιστή (server) μέσω ενός ή περισσότερων πρωτοκόλλων εφόσον είναι απαραίτητο. Τα δεδομένα συλλέγονται στον διακομιστή σε μια βάση δεδομένων (database) όπου υπάρχει εγκατεστημένο ένα πληροφοριακό σύστημα και το οποίο αξιοποιεί κάποιον προβλεπτικό αλγόριθμο, ώστε να προτείνονται οι βέλτιστες δυνατές λύσεις για την διαχείριση των απορριμμάτων και που αφορούν την δρομολόγηση των απορριμματοφόρων και την τοποθέτηση των κάδων. Τα δεδομένα που συλλέγονται, αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων. Όταν έχει οριστεί κάποιο επίπεδο ειδοποίησης ο χρήστης ενημερώνεται μέσω του πληροφοριακού συστήματος είτε μέσω της εφαρμογής για έξυπνα κινητά τηλέφωνα (smartphones), η οποία είναι συνδεδεμένη με το πληροφοριακό σύστημα και έχει αναπτυχθεί γι' αυτό το σκοπό, είτε με γραπτό μήνυμα στο κινητό τηλέφωνο (sms). Για την ενημέρωση μέσω της εφαρμογής (mobile app) απαιτείται η σύνδεση στο διαδίκτυο, ενώ για την ενημέρωση μέσω γραπτού μηνύματος απαιτείται η σύνδεση στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας (GSM).

Ο κάθε σταθμός μπορεί να χρησιμοποιεί κάποιο ενσωματωμένο σύστημα που απλά μεταδίδει την πληροφορία στον διακομιστή ή σε άλλον σταθμό, αλλά μπορεί να χρησιμοποιεί και περισσότερο πολύπλοκα συστήματα τα οποία επεξεργάζονται την πληροφορία και στη συνέχεια την αποστέλλουν. Στην παρούσα υλοποίηση επιλέχθηκε να μεταφέρεται η πληροφορία σε κάποιον διακομιστή μιας και να μην πραγματοποιείται καμία επεξεργασία της πληροφορίας στο ενσωματωμένο σύστημα το οποίο τη συλλέγει με την βοήθεια των αισθητήρων, αλλά αντίθετα, όταν όλα τα δεδομένα συλλεχθούν από τον διακομιστή και εφόσον το πλήθος της πληροφορίας είναι ικανοποιητικό, τότε η επεξεργασία μπορεί να δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνουμε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης ανά σταθμό. Η αρχιτεκτονική που ακολουθείται χωρίζεται σε τρία βασικά μέρη:

- 1) Στον σταθμό συλλογής πληροφοριών
- 2) Στο πληροφοριακό σύστημα που περιλαμβάνει τον προβλεπτικό αλγόριθμό και την εφαρμογή για έξυπνα κινητά τηλέφωνα και
- 3) Την συνδεσιμότητα των δύο συστημάτων (σταθμό – πληροφοριακό σύστημα)

Αυτή η αρχιτεκτονική αποτελεί τον βασικό τρόπο επικοινωνίας μεταξύ του ενσωματωμένου και του πληροφοριακού συστήματος. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ασύρματης επικοινωνίας ο οποίοι θα αναλυθούν στη συνέχεια.

4.2.1 Αισθητήρες

Ένα σύστημα διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων και ανακυκλώσιμων υλικών μπορεί να χρησιμοποιήσει πληθώρα διαφορετικών αισθητήρων, οι οποίοι βρίσκονται στο εμπόριο. Για να είναι αποδοτικό το σύστημα θα πρέπει να προβλεφθούν όπως είδαμε κατά τη σχεδίαση του οι αισθητήρες που θα χρησιμοποιηθούν. Όσον αφορά την παρούσα υλοποίηση για την διαχείριση των ΑΣΑ, και σύμφωνα με τους περιορισμούς που έχουν αναλυθεί, θα κατηγοριοποιηθούν οι αισθητήρες σε α) αισθητήρες μέτρησης των απορριμμάτων μέσω της απόστασης ή του όγκου, β) σε αισθητήρες μέτρησης της θερμοκρασίας και γ) αισθητήρες για τη ενημέρωση αν το καπάκι του κάδου ανοίγει ή κλείνει. Αυτοί οι αισθητήρες θα πρέπει να είναι συμβατοί με την πλακέτα ή τις πλακέτες που θα επιλεγούν. Έτσι, θα πρέπει κατά το σχεδιασμό της λύσης να μπορούν να επιλεγθούν διάφοροι αισθητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούν διαφορετικό τρόπο μετρήσεων και είναι συμβατοί με το ενσωματωμένο σύστημα που επιλέχθηκε. Στην δική μας περίπτωση, βάσει των προδιαγραφών που περιεγράφηκαν στο πρώτο στάδιο μπορούμε να επιλέξουμε τους

αισθητήρες βάσει της κατηγοριοποίησης. Οι τεχνικές λεπτομέρειες των αισθητήρων έχουν ήδη περιγραφεί στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διατριβής. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια απλή αναφορά στις κατηγορίες.

α) Αισθητήρες μέτρησης των απορριμμάτων που βρίσκονται μέσα στον κάδο

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι ανίχνευσης για τον προσδιορισμό του χώρου που καταλαμβάνει ένα αντικείμενο ή πολλά αντικείμενα σε πραγματικό χρόνο, καθεμία από τις οποίες διαφοροποιείται από ένα ευρύ φάσμα τεχνικών προδιαγραφών. Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες για την μέτρηση των απορριμμάτων: μέσω απόστασης ή μέσω βάρους. Έτσι, οι αισθητήρες απόστασης ενσωματώνουν ένα εξαιρετικά ευρύ πεδίο τεχνολογιών που μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: υπερήχους (ultrasonic), τριγωνοποίηση υπερύθρων (IR), λέιζερ (laser) και υπερύθρων χρόνου πτήσης (IR Time-of-Flight / LED-TOF). Η τεράστια ποικιλία που προσφέρουν αυτές οι τέσσερις κορυφαίες τεχνολογίες ανίχνευσης απόστασης οδηγεί σε ένα ευρύ φάσμα βασικών ιδιοτήτων απόδοσης, όπως το εύρος, η ανάλυση, το οπτικό πεδίο, η συχνότητα και οι χρόνοι μετάδοσης-λήψης, παράλληλα με το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας.

β) Αισθητήρας μέτρησης της θερμοκρασίας

Υπάρχουν τέσσερις (4) κύριες κατηγορίες αισθητήρων μέτρησης της θερμοκρασίας: αισθητήρας αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας (NTC), ανιχνευτής θερμοκρασίας αντίστασης (RTD), θερμοστοιχεία και αισθητήρες θερμοκρασίας βασισμένοι σε ημιαγωγούς.

γ) Αισθητήρας ανίχνευσης όταν το καπάκι είναι ανοιχτό

Όπως έχουμε αρχικά σχεδιάσει, απαιτείται να γνωρίζει ο χρήστης πότε το καπάκι του κάδου απορριμμάτων μένει ανοιχτό. Για να επιτευχθεί αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αισθητήρας πίεσης ή ένας αισθητήρας απόστασης ή ένας αισθητήρας μαγνητικού πεδίου. Ο αισθητήρας απόστασης μπορεί να μετρά σε τακτά χρονικά διαστήματα την απόσταση από το στόμιο του κάδου μέχρι το καπάκι, και εφόσον αυτή η απόσταση αυξηθεί θα στέλνει σήμα στο πληροφοριακό σύστημα ότι το καπάκι είναι ανοιχτό. Όσον αφορά τους αισθητήρες πίεσης, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν οι εξής κατηγορίες: μετρητής καταπόνησης (Strain gauge), πιεζοηλεκτρικός, χωρητικότητας και μανομετρικοί.

Τα παραπάνω αισθητήρια όργανα θα πρέπει να συνδεθούν σε μια πλακέτα η οποία θα μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις και τους περιορισμούς που έχουμε θέσει. Μιας και

θα βρίσκεται σε εξωτερικό χώρο θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση και στο χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του. Όπως έχουμε αναλύσει στο κεφάλαιο 2, υπάρχουν αρκετές επιλογές οι οποίες καλύπτουν αυτές τις απαιτήσεις. Για παράδειγμα η επιλογή ενός FPGA είναι ασύμφορη μιας και το κόστος είναι ιδιαίτερα υψηλό, καθώς και οι δυνατότητες που προσφέρει είναι υπερβολικές για τη δική μας λύση, δεν θα την επιλέξουμε. Με αυτή τη λογική λοιπόν, δεν θα επιλέξουμε ούτε υβριδικές λύσεις όπου υπάρχουν ARM επεξεργαστές και FPGA αλλά θα κατευθυνθούμε σε πλακέτες με απλούς ARM επεξεργαστές και ιδιαίτερα σε αυτές τις εκδόσεις που έχουν μικρό μέγεθος και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας.

4.2.2 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

Υπάρχουν διαθέσιμα πληθώρα πρωτοκόλλων επικοινωνίας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Οι βασικές τοπολογίες είναι οι εξής έξι (6): τοπολογία διαδρόμου (Bus Topology), δακτυλίου (Ring Topology), αστεροειδής (Star Topology), πλέγματος (Mesh Topology), δενδροειδής (Tree Topology) και υβριδική (Hybrid Topology). Καθένας από αυτούς του τύπους συνδέσεων έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του. Η επιλογή του πρωτοκόλλου επικοινωνίας είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ορθή λειτουργία του συστήματος. Η κάλυψη της απόστασης, η ενέργεια που απαιτείται, η γεωμορφία του περιβάλλοντος και το κόστος αποτελούν τα βασικά κριτήρια για την επιλογή. Αντίθετα, ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων δεν αποτελεί σημαντικό κριτήριο μιας και το μέγεθος των δεδομένων είναι ιδιαίτερα μικρό.

Καθεμιά από τις παραπάνω τοπολογίες έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της. Έχοντας θέσει τα κριτήρια επιλεξιμότητας της συνδεσιμότητας, φαίνεται πως θα ήταν ιδανικά δύο τοπολογίες, η αστεροειδής και η υβριδική. Στην αστεροειδή τοπολογία μπορούμε να έχουμε διάφορους κόμβους (hub) που θα λαμβάνουν την πληροφορία από τα ενσωματωμένα συστήματα που θα έχουν εγκατασταθεί στους κάδους. Έτσι, δεν θα εξαρτάται κανένας κάδος από τον άλλον, θα μπορούμε να οριοθετήσουμε την θέση των hub ώστε να αποφύγουμε τυχόν προβλήματα γεωμορφίας, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να περιοριστεί αν στέλνουμε τα δεδομένα ανά χρονικά διαστήματα και το κόστος δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό. Όσον αφορά το υβριδικό μοντέλο θα μπορούσαμε να χρησιμοποιούμε σε διαφορετικά τμήματα της περιοχής διαφορετικές τοπολογίες όπως αυτή την αστεροειδή, την τοπολογία πλέγματος και την δενδροειδής. Με αυτό τον τρόπο θα μειώσουμε κατά πολύ τα οποιαδήποτε προβλήματα προκύψουν κατά τη διάρκεια υλοποίησης του

συστήματος, αλλά αυτό θα αυξήσει το κόστος και ταυτόχρονα ο σχεδιασμός θα πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή, ώστε να προσδιοριστεί με λεπτομέρεια σε ποιες περιοχές θα χρησιμοποιηθεί η αντίστοιχη τοπολογία. Αυτό ταυτόχρονα δημιουργεί και μια «δυσκαμψία» στον τρόπο λειτουργίας του συστήματος μιας και δεσμευόμαστε με τις συγκεκριμένες τοπολογίες στις συγκεκριμένες περιοχές που επιλέξαμε.

4.2.3 Πληροφοριακό Σύστημα

Υπάρχουν πολλοί ορισμοί για το τι είναι ένα πληροφοριακό σύστημα. Αυτός ο ορισμός όμως που ταιριάζει περισσότερο στη δική μας υλοποίηση είναι ο εξής: *“Τα πληροφοριακά συστήματα είναι αλληλένδετα στοιχεία που συνεργάζονται για τη συλλογή, επεξεργασία, αποθήκευση και διαμοιρασμό των πληροφοριών για την υποστήριξη και της λήψης αποφάσεων, του συντονισμού, του ελέγχου, της ανάλυσης και της οπτικοποίησης σε έναν οργανισμό”*. Στη σύγχρονη κοινωνία αποτελεί δομικό στοιχείο στην συλλογή και επεξεργασία των πληροφοριών για έναν οργανισμό. Στη δική μας περίπτωση είναι η καρδιά του συστήματος, μιας και αποθηκεύει όλες τις τιμές που λαμβάνει από τους αισθητήρες, τα καταχωρεί και δίνει την δυνατότητα στους χρήστες του συστήματος να έχουν σε πραγματικό χρόνο εικόνα σχετικά με την διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων. Είναι ο συνδετικός κρίκος μεταξύ της πληροφορίας και της διοίκησης του οργανισμού στην λήψη αποφάσεων. Η κατηγοριοποίηση των πληροφοριακών συστημάτων γίνεται συνήθως με βάση τη χρήση τους. Έτσι, μπορούμε να τα διαχωρίσουμε ως εξής:

- Σύστημα υποστήριξης. Σε έναν οργανισμό, η εισαγωγή δεδομένων γίνεται από τον τελικό χρήστη, τα οποία υποβάλλονται σε επεξεργασία για τη δημιουργία αναφορών, οι οποίες χρησιμοποιούνται από εσωτερικούς ή εξωτερικούς χρήστες. Σκοπός του συστήματος υποστήριξης είναι η διευκόλυνση των επιχειρηματικών συναλλαγών, ο έλεγχος της παραγωγής, η υποστήριξη εσωτερικής και εξωτερικής επικοινωνίας και η ενημέρωση της κεντρικής βάσης δεδομένων του οργανισμού. Το σύστημα υποστήριξης λειτουργίας χωρίζεται περαιτέρω σε σύστημα επεξεργασίας συναλλαγών, σύστημα ελέγχου επεξεργασίας και σύστημα εταιρικής συνεργασίας.
- Σύστημα Υποστήριξης Διοίκησης. Οι διευθυντές απαιτούν ακριβείς πληροφορίες σε συγκεκριμένη μορφή για να λάβουν μια απόφαση. Ένα σύστημα που διευκολύνει την διαδικασία λήψης αποφάσεων για τα στελέχη ονομάζεται σύστημα υποστήριξης διοίκησης. Τα συστήματα αυτά υπο-κατηγοριοποιούνται ουσιαστικά

ως σύστημα πληροφοριών διοίκησης, σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, σύστημα εμπειρογνομώνων και σύστημα λογιστικών πληροφοριών. Αυτό το σύστημα εστιάζει στην διευκόλυνση των στελεχών να λαμβάνουν ευκολότερα και καλύτερα αποφάσεις βάσει των δεδομένων που έχουν στην διάθεσή τους.

- Σύστημα Ελέγχου Διαδικασιών. Σε έναν οργανισμό, ορισμένες αποφάσεις λαμβάνονται από ένα αυτοματοποιημένο ηλεκτρονικό σύστημα χωρίς καμία χειροκίνητη- ανθρώπινη παρέμβαση. Σε αυτόν τον τύπο συστήματος, οι κρίσιμες πληροφορίες τροφοδοτούνται στο σύστημα σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας έτσι τον έλεγχο της διαδικασίας. Αυτού του είδους τα συστήματα αναφέρονται ως συστήματα ελέγχου διεργασιών.

Σαφώς υπάρχουν και άλλες κατηγορίες που υπάρχουν και εστιάζουν για παράδειγμα στο ανθρώπινο δυναμικό, στην συνεργασία μεταξύ των τμημάτων ενός οργανισμού ή που αναφέρονται στον στρατηγικό σχεδιασμό, στην διαδικασία οργάνωσης κτλ. οι οποίες όμως δεν συνάδουν με την δική μας μελέτη περίπτωσης.

Σύμφωνα με την έγκριτη εγκυκλοπαίδειά Μπριτάνικά, τα πληροφοριακά συστήματα αποτελούνται από τρία επίπεδα ([Εικόνα 28](#)): επιχειρησιακής υποστήριξης, υποστήριξης εργασιών γνώσης και υποστήριξης διαχείρισης. Η επιχειρησιακή υποστήριξη αποτελεί τη βάση ενός πληροφοριακού συστήματος και περιλαμβάνει διάφορα συστήματα επεξεργασίας συναλλαγών για το σχεδιασμό, το μάρκετινγκ, την παραγωγή και την παροχή προϊόντων και υπηρεσιών. Η υποστήριξη της εργασίας γνώσης αποτελεί το μεσαίο στρώμα. Περιέχει υποσυστήματα για την ανταλλαγή πληροφοριών σε έναν οργανισμό. Η υποστήριξη διαχείρισης, που αποτελεί το ανώτερο επίπεδο, περιέχει υποσυστήματα για τη διαχείριση και την αξιολόγηση των πόρων και των στόχων ενός οργανισμού.

Από τις παραπάνω κατηγορίες των πληροφοριακών συστημάτων το καταλληλότερο στην δική μας περίπτωση είναι το «Σύστημα Υποστήριξης Διοίκησης». Αποθηκεύοντας σε μια βάση δεδομένων (ΒΔ) τις απαραίτητες πληροφορίες, όπως πληρότητα κάδου, θερμοκρασία, αν το καπάκι είναι ανοιχτό, ημερομηνία, ώρα και θέση του κάδου μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα ώστε ο χρήστης του συστήματος να μπορεί να πάρει τις κατάλληλες αποφάσεις. Επίσης, μπορεί να αναπτυχθεί ένας αλγόριθμος ο οποίος θα αξιοποιεί αυτή την πληροφορία και θα προτείνει την καλύτερη διαδρομή, εφόσον διαθέτει επιπλέον την πληροφορία των διαδρομών των απορριμματοφόρων.

Για την ανάπτυξη ενός τέτοιου λογισμικού υπάρχουν διάφορα εργαλεία καθώς επίσης και έτοιμες λύσεις από επιχειρήσεις. Επειδή όμως η δική μας λύση είναι ιδιαίτερα συγκεκριμένη, απαιτείται η ανάπτυξη ενός εξειδικευμένου πληροφοριακού συστήματος που θα εξυπηρετεί τις ανάγκες του συστήματος.



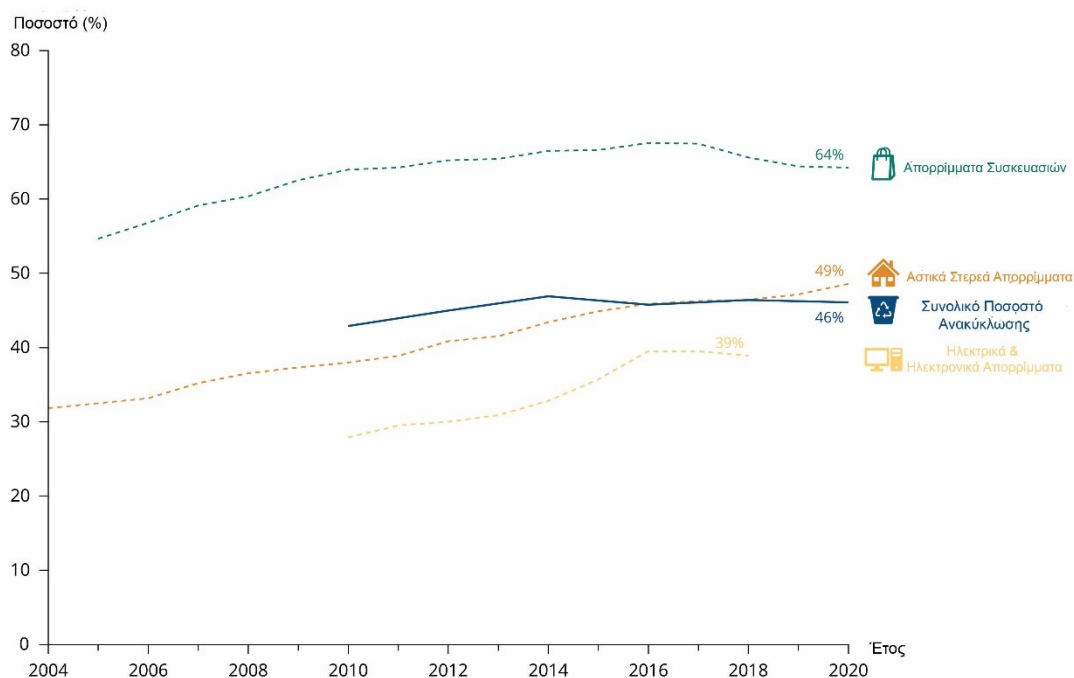
Εικόνα 28: Οργανωτική δομή των πληροφοριακών συστημάτων

Για να μπορεί το πληροφοριακό σύστημα να εξάγει χρήσιμα συμπεράσματα και να προτείνει πιθανές λύσεις, θα πρέπει να συγκεντρώσει μεγάλο όγκο δεδομένων (big data), να τροφοδοτήσει τον αλγόριθμο με αυτά ώστε να εκπαιδευτεί (training) και τέλος, με τη την αξιοποίηση της μηχανικής μάθησης (machine learning) να εξαχθούν χρήσιμα στατιστικά συμπεράσματα αλλά και προτάσεις.

4.3 Αξιοποιώντας το «Προσαρμοστικό Μοντέλο Z» στην διαλογή σύμμεικτων απορριμμάτων για ανακύκλωση.

Η συγκέντρωση ολοένα και περισσότερο του πληθυσμού στα μεγάλα αστικά κέντρα δημιουργεί διάφορα περιβαλλοντικά προβλήματα που έχουν αναφερθεί στο εισαγωγικό κεφάλαιο της συγκεκριμένης διατριβής, όπως η ρύπανση των πόλεων και η μεγάλη συγκέντρωση απορριμμάτων. Η διαχείριση των απορριμμάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους όπως η υγειονομική ταφή, η ανακύκλωση των χρήσιμων υλικών και καύση συγκεκριμένων υλικών. Η σωστή διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων με την χρήση των έξυπνων κάδων μπορεί να μειώσει την ρύπανση των αστικών περιοχών αλλά δεν μειώνει την ποσότητα τους. Έτσι, υπάρχει ένα ακόμη μεγάλο πρόβλημα στις σύγχρονες κοινωνίες που είναι η ανακύκλωση των υλικών. Η ταξινόμηση των

απορριμμάτων σε ανακυκλώσιμα και μη, είναι μια καλή λύση, η οποία όμως απαιτεί την συμμετοχή των πολιτών και την δημιουργία περιβαλλοντικής κουλτούρας. Ήδη οι ανεπτυγμένες χώρες εδώ και δεκαετίες προωθούν την έννοια της ανακύκλωσης και τοποθετούν ειδικούς κάδους ανά υλικό. Οι πολίτες είναι αυτοί οι οποίοι μπορούν να βοηθήσουν ή να υποσκάψουν μια τέτοια προσπάθεια. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση των 27, όπως φαίνεται στην [Εικόνα 29](#) σύμφωνα με έρευνα του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος, από το 2004 μέχρι και το 2020 τα αστικά απόβλητα ανακυκλώνονται ολοένα και περισσότερο. Σημαντικό είναι πως το 2020 υπολογίζεται ότι η ανακύκλωση στο των αστικών αποβλήτων έφτασε το 49%. Η Ελλάδα αν και έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο στον τομέα της ανακύκλωσης, εντούτοις παραμένει πολύ χαμηλά στην κατάταξη των 27 χωρών της ΕΕ, καταλαμβάνοντας την 23^η θέση [97].



Εικόνα 29: Ποσοστά ανακύκλωσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση των 27 ανά ροή αποβλήτων

Επειδή η αλλαγής της κουλτούρας των πολιτών είναι μια διαδικασία που απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα, μπορούν να αξιοποιηθούν οι νέες τεχνολογίες ούτως ώστε να πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός των ανακυκλώσιμων υλικών και των απορριμμάτων. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να μειώσουμε τα απορρίμματα που θάβονται στους χώρους υγειονομικής ταφής, ενώ παράλληλα μειώνουμε και τις πρώτες ύλες που απαιτούνται για την δημιουργία νέων προϊόντων. Στη σημερινή εποχή, η διαδικασία διαχωρισμού των απορριμμάτων σε ανακυκλώσιμα υλικά και μη, πραγματοποιείται σε ειδικά διαμορφωμένα

εργοστάσια τα οποία χρησιμοποιούν τόσο αυτοματοποιημένους τρόπους διαχωρισμού, μηχανικούς και ηλεκτρονικούς, όσο και χειροκίνητους όπως είναι η χειροδιαλογή. Η προσπάθεια που γίνεται σήμερα αφορά στην πλήρη αυτοματοποίηση της διαδικασίας, ώστε να μην έρχεται ο άνθρωπος σε επαφή με τα απορρίμματα ή η έκθεση στα απορρίμματα να είναι όσο το δυνατό μικρότερη, προστατεύοντας έτσι την υγεία των ανθρώπων που εργάζονται σε αυτούς τους είδους τα εργοστάσια.

Η διαδικασία διαχωρισμού των σύμμεικτων απορριμμάτων στο εργοστάσιο μπορεί να διαφέρει από το ένα εργοστάσιο στο άλλο ως προς τον τρόπο διαχωρισμού αλλά η γενική φιλοσοφία που ακολουθείται σε όλα είναι η ίδια. Συγκεκριμένα, σε όλα τα εργοστάσια υπάρχει ένα σημείο έναρξης της διαδικασίας όπου τοποθετούνται τα απορρίμματα όπως αυτά συλλέγονται και ανοίγονται οι τυχόν συσκευασίες όπως σακούλες απορριμμάτων και κουτιά. Στη συνέχεια, με μηχανικό τρόπο διαχωρίζονται τα μεγάλα και βαριά απορρίμματα τα οποία δεν μπαίνουν στην «γραμμή» διαχωρισμού των ανακυκλώσιμων υλικών. Στη συνέχεια διαχωρίζονται μηχανικά τα διάφορα απορρίμματα ανάλογα με το βάρος, το είδος κτλ. και στην τελική γραμμή διαχωρισμού φθάνουν τα ανακυκλώσιμα υλικά όπως χαρτί, πλαστικό, γυαλί και αλουμίνιο, όπου με την χρήση ψηφιακών συστημάτων διαχωρίζονται και φθάνουν στους χειροδιαλογείς που ελέγχουν το εκάστοτε υλικό αν τοποθετήθηκε στη σωστή γραμμή ανακύκλωσης.

Και σε αυτή την περίπτωση το Προσαρμοστικό Μοντέλο Z μπορεί να αξιοποιηθεί προτείνοντας λύσεις. Ξεκινώντας από το πρώτο βήμα του πρώτου σταδίου, πραγματοποιείται η ανάλυση των απαιτήσεων του συστήματος. Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, χρησιμοποιείται ως παράδειγμα το εργοστάσιο της ΕΠΑΔΥΜ (Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων Δυτικής Μακεδονίας) το οποίο λειτουργεί στα πρότυπα των τεχνολογικά νέων εργοστασίων επεξεργασίας απορριμμάτων της Ευρώπης. Η διαδικασία έχει ως εξής:

1. Στην αρχή της αλυσίδας διαλογής, τοποθετούνται τα απορρίμματα όπως συλλέγονται από τους πράσινους κάδους.
2. Στη συνέχεια και με μηχανικό τρόπο ή με την βοήθεια του ανθρώπινου δυναμικού, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο, ανοίγονται οι σακούλες απορριμμάτων και οι συσκευασίες.
3. Μετά, και πάλι μέσω μηχανικού τρόπου ή με την βοήθεια του ανθρώπινου δυναμικού, απομακρύνονται τυχόν ογκώδη και βαριά αντικείμενα.

4. Στο επόμενο στάδιο, με χρήση μηχανικού τρόπου όπως μαγνητών και άλλων, διαχωρίζονται μεταλλικά αντικείμενα, υπολείμματα τροφών κτλ.
5. Εν συνεχεία, περνάν στον οπτικό διαχωρισμό τα υλικά αλουμινίου, γυαλιού, χαρτιού και πλαστικού, όπου πλέον με την χρήση των νέων τεχνολογιών πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των ανακυκλώσιμων υλικών που ενδιαφέρουν και περισσότερο το εργοστάσιο.
6. Στο τελευταίο στάδιο οι χειροδιαλογείς ελέγχουν αν όντως τα αντικείμενα που επιλέχθηκαν είναι τα σωστά. Για παράδειγμα στη γραμμή του πλαστικού, πραγματοποιείται έλεγχος αν όλα τα υλικά που φτάσανε ως εκεί είναι όντως πλαστικά. Σε περίπτωση που κάποιο αντικείμενο δεν είναι πλαστικό το αποσύρουν από τη γραμμή.

Αναλύοντας την ήδη υπάρχουσα γραμμή διαχωρισμού των απορριμμάτων, μπορούν να υπάρξουν βελτιώσεις σε διάφορα στάδια. Στην παρούσα διατριβή δόθηκε έμφαση στο πέμπτο στάδιο της οπτικής αναγνώρισης των ανακυκλώσιμων υλικών το οποίο αποτελεί και το ζητούμενο για το εργοστάσιο, μιας και σε αυτό το στάδιο μπορεί να υπάρξει ουσιαστική βελτίωση στην όλη διαδικασία χωρίς να απαιτείται ιδιαίτερο κόστος μετατροπής του.

Σε αυτό το στάδιο οι κατηγορίες των υλικών που υπάρχουν είναι το αλουμίνιο, το χαρτί, το πλαστικό και διάφορα άλλα υλικά που πιθανά να πέρασαν εκ παραδρομής από τα προηγούμενα στάδια. Έτσι, έχουμε τέσσερις κατηγορίες υλικών:

- Αλουμίνιο
- Χαρτί
- Πλαστικό
- Διάφορα

Για να υλοποιήσουμε το προσαρμοστικό μοντέλο Z ξεκινάμε από το **πρώτο στάδιο** που αφορά την ανάλυση του συστήματος. Όπως είδαμε την διαδικασία διαχωρισμού των υλικών στο εργοστάσιο, που περιεγράφηκε παραπάνω, επιλέγουμε το πέμπτο στάδιο για βελτίωση. Γνωρίζουμε πως ο οπτικός διαχωρισμός μέσω συστήματος επιτυγχάνει οπτική αναγνώριση των αντικειμένων (object detection) σε ποσοστό 85% σύμφωνα με τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί σε πραγματικές συνθήκες εργοστασίου της ΕΠΑΔΥΜ στην Κοζάνη, σύμφωνα με τα στοιχεία που έχουν συλλέξει οι μηχανικοί της επιχείρησης. Ο στόχος λοιπόν είναι να αναπτύξουμε ένα σύστημα το οποίο θα μπορεί να επιτύχει μεγαλύτερο ποσοστό αναγνώρισης από το ήδη υπάρχον. Τα δεδομένα τα οποία έχουμε

είναι ότι υπάρχει παροχή ρεύματος και διαδίκτυο, οι ιμάντες μεταφοράς των απορριμμάτων κινούνται με σταθερή ταχύτητα, υπάρχει φωτισμός, και η δυνατότητα εγκατάστασης νέου συστήματος εξ' ολοκλήρου, είναι ιδιαίτερα δύσκολη μιας και απαιτεί πολλές ώρες εργασίας για την μετατροπή, πράγμα που σημαίνει ότι το σύστημα θα πρέπει να παραμείνει ανενεργό για μεγάλο χρονικό διάστημα και απαιτείται η παρουσία εξειδικευμένων τεχνικών της εταιρείας εγκατάστασης, το οποίο επιφέρει ακόμη μεγαλύτερο κόστος. Η διαδικασία με την οποία γίνεται ο διαχωρισμός αν και θα μπορούσε να αλλάξει εξ' ολοκλήρου, πράγμα που σημαίνει τεράστιο κόστος για την επιχείρηση και για το λόγο αυτό δεν προβαίνουμε σε μια τέτοια μεγάλη αλλαγή αλλά να εστιάσουμε στο στάδιο της οπτικής αναγνώρισης. Έτσι, η διαδικασία διαχωρισμού παραμένει η ίδια και στόχος αποτελεί η βελτίωσή της. Σκοπός λοιπόν αυτού του συστήματος που θα αναπτυχθεί είναι η αύξηση του ποσοστού αναγνώρισης των απορριμμάτων.

Στο **δεύτερο στάδιο** αποτυπώνονται οι πιθανές λύσεις, επιλέγεται και αναπτύσσεται το πρότυπο της καλύτερης δυνατής βάση των χαρακτηριστικών που έχουν τεθεί. Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, υπάρχουν τρία βασικά χαρακτηριστικά που είναι το κόστος, ο βαθμός αποτελεσματικότητας του αναπτυσσόμενου αλγορίθμου και ο βαθμός προσαρμοστικότητας στο ήδη υπάρχον σύστημα. Με αυτά ως δεδομένα μπορούν να αναπτυχθούν και προταθούν διάφορες λύσεις που θα ικανοποιούν τις απαιτήσεις του συστήματος. Για να επιτευχθεί ο στόχος του συστήματος θα πρέπει να σχεδιαστεί ένας αλγόριθμος, ο οποίος θα έχει μεγαλύτερο ποσοστό οπτικής αναγνώρισης των αντικειμένων που κινούνται πάνω στον ιμάντα μεταφοράς. Όπως είδαμε η συνδεσιμότητα δεν αποτελεί πρόβλημα, μιας και το εργοστάσιο διαθέτει σύνδεση με το διαδίκτυο στα 100Mbps και το εσωτερικό δίκτυο φτάνει τα 1000Mbps. Στη συνέχεια θα πρέπει να επιλεγεί κάποια κάμερα, η οποία θα τοποθετηθεί στον ιμάντα μιας και το σύστημα που υπάρχει εγκατεστημένο δεν επιτρέπει την παρέμβαση από τρίτους. Θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί το εγκατεστημένο σύστημα, αλλά όπως είδαμε απαιτεί χρόνο και εξειδικευμένο προσωπικό της εταιρείας εγκατάστασης, το οποίο επιφέρει μεγάλο κόστος. Η εγκατάσταση όμως της κάμερας επιφέρει ένα άλλο πρόβλημα. Το σημείο που θα πρέπει να τοποθετηθεί. Στον ιμάντα υπάρχουν διάφορα πιθανά σημεία στα οποία θα μπορούσε να εγκατασταθεί η κάμερα. Όμως δεν είναι όλα τα σημεία το ίδιο. Σε κάποια έχει περισσότερο σκόνη και υπάρχουν δονήσεις, ενώ σε άλλα υπάρχει χαμηλότερος φωτισμός και η οπτική γωνία δεν βοηθά τόσο πολύ. Η επιλογή που θα γίνει θα πρέπει να αφορά το σημείο στο οποίο υπάρχει μεγαλύτερη ευκρίνεια, καλός φωτισμός και μικρές ή καθόλου δονήσεις. Ένα τέτοιο σημείο είναι δίπλα

στην ήδη εγκατεστημένη κάμερα του συστήματος, όπου υπάρχει αρκετός φωτισμός, καλή γωνία θέασης, υπάρχει εύκολη τροφοδοσία ρεύματος και οι δονήσεις είναι ελάχιστες έως μηδαμινές. Το επόμενο ερώτημα το οποίο θα πρέπει να αντιμετωπίσουμε αφορά το υλικό μέρος του συστήματος ξεκινώντας από το υπολογιστικό σύστημα. Εφόσον υπάρχει επαρκής χώρος θα μπορούσε να τοποθετηθεί οποιοσδήποτε ηλεκτρονικός υπολογιστής ή κάποιο ενσωματωμένο σύστημα. Δεδομένου όμως των συνθηκών που επικρατούν μέσα στο εργοστάσιο, τα συστήματα θα πρέπει να προστατεύονται από την υγρασία και την σκόνη καθώς επίσης και τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται τους θερινούς μήνες. Η χρήση ενός υπολογιστή γενικού σκοπού θα μπορούσε να είναι εφικτή εφόσον υπάρχει αρκετά μεγάλη μνήμη, γρήγορος επεξεργαστής και κάρτα γραφικών που να μπορεί να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις ενός τέτοιου εγχειρήματος. Το κόστος ενός τέτοιου συστήματος είναι αρκετά μεγάλο και έχει μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Από την άλλη, τα ενσωματωμένα συστήματα χαρακτηρίζονται από χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, φορητότητα, σχετικά χαμηλό κόστος αλλά και με τη χρήση των FPGA μπορεί να παραμετροποιηθεί για ειδικό σκοπό όπως του παραδείγματος.

Οι επιλογές και οι συνδυασμοί που μπορούν να επιλεγούν είναι δεκάδες. Θέτοντας λοιπόν ως βασικά κριτήρια επιλογής το κόστος, τη συντηρησιμότητα και την ευκολία εγκατάστασης του συστήματος επιλέγουμε κάποιο ενσωματωμένο σύστημα FPGA που καλύπτει τις ανάγκες που έχουν τεθεί σε συνδυασμό με ένα νευρωνικό δίκτυο (CNN). Αυτή η επιλογή πραγματοποιείται μιας και έχει χαμηλό κόστος απόκτησης και συντήρησης, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και επιτυγχάνει το επιθυμητό αποτέλεσμα που έχει τεθεί. Η τελευταία επιλογή που πρέπει να γίνει ώστε να προχωρήσουμε στην ανάπτυξη του προτύπου είναι η επιλογή του αλγόριθμου αναγνώρισης αντικειμένων. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι αναγνώρισης αντικειμένων που μπορούν να αξιοποιηθούν όπως ο YOLO, ο HOG, ο R-CNN, SPP-net και άλλοι. Ο καθένας από αυτούς έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του. Μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης στην συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης επιλέγουμε τον YOLO (You Only Look Once), ο οποίος αποτελεί έναν από τους πιο δημοφιλείς αλγορίθμους στην αναγνώριση αντικειμένων από τους ερευνητές σε όλο τον κόσμο. Σε συγκριτικά πειράματα που έγιναν από τον Redmon et al. [80].

Ο YOLO φαίνεται να είναι ο γρηγορότερος και με μεγαλύτερη ακρίβεια αλγόριθμος σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους αναγνώρισης αντικειμένων. Ο YOLO βασίζεται σε ένα ενιαίο νευρωνικό δίκτυο (CNN), το οποίο διαιρεί μια εικόνα σε περιοχές και στη συνέχεια προβλέπει τα όρια και τις πιθανότητες για κάθε περιοχή, ενώ προβλέπει

ταυτόχρονα πολλαπλά πλαίσια οριοθέτησης και πιθανότητες για αυτές τις κλάσεις. Ο YOLO βλέπει ολόκληρη την εικόνα κατά τη διάρκεια της εκμάθησης (training) και κατά τη διάρκεια των δοκιμών, επομένως κωδικοποιεί σιωπηρά τις πληροφορίες σχετικά με τις κλάσεις καθώς και την εμφάνισή τους. Υπάρχουν διάφορες εκδόσεις του αλγορίθμου με τελευταία το YOLO V5 ο οποίος είναι ταχύτερος από τους προηγούμενους και έχει υψηλότερη ακρίβεια αναγνώρισης των αντικειμένων. Δεδομένου ότι ο YOLO μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης ενδείκνυται για την αναγνώριση αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο, θα αξιοποιηθεί στο σύστημα μας. Έτσι, έχουμε το ενσωματωμένο σύστημα, μια κάμερα IR τουλάχιστον 60 fps (καρέ ανά δευτερόλεπτο) και τον αλγόριθμο YOLO. Σύμφωνα με τους Mohan et al. [98] η ταχύτητα της κίνησης των αντικειμένων και τα fps θα πρέπει να κινούνται ανάλογα. Όσο αυξάνεται η ταχύτητα να αυξάνονται και τα fps. Σε αντίθετη περίπτωση, αν μειωθούν τα fps τότε υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να μην καταγραφεί το αντικείμενο, αφού δεν θα μπορέσει να εστιάσει η κάμερα σε αυτό. Στο τελευταίο βήμα αυτού του σταδίου προχωράμε στην ανάπτυξη του προτύπου. Βασικό στοιχείο είναι η εκπαίδευση του αλγορίθμου σε αντίστοιχα υλικά που μπορεί να εντοπίσει.

Για τον λόγο αυτό μπορούμε να τον εκπαιδεύσουμε μέσω ήδη υπαρχουσών βιβλιοθηκών εικόνων και βίντεο όπως το TACO, είτε να καταγράψουμε αρκετές ώρες από τους ιμάντες μεταφοράς των απορριμμάτων και στη συνέχεια να κατηγοριοποιήσουμε τα αντικείμενα, είτε και τα δύο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση και μιας και υπάρχει η δυνατότητα να καταγράψουμε όσες ώρες χρειαστούν επιλέγεται η τρίτη λύση το να χρησιμοποιηθούν, δηλαδή, έτοιμα αντικείμενα από ανοιχτές βιβλιοθήκες όσο και να κατηγοριοποιήσουμε τα αντικείμενα που περνούν από τον ιμάντα. Αν και αυτή η διαδικασία είναι αρκετά επίπονη και χρονοβόρα, εντούτοις θα μπορέσει να δώσει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα στον αλγόριθμο. Έτσι, εγκαταστάθηκε η κάμερα και καταγράφηκαν αρκετές ώρες αντικειμένων και πραγματοποιήθηκε η κατηγοριοποίηση των αντικειμένων. Για την διαδικασία της εκπαίδευσης ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία, όπως συναντάται σε αντίστοιχες έρευνες στη βιβλιογραφία:

1. Αρχικά χωρίσαμε τις εικόνες κατά 80% στην εκπαίδευση του αλγορίθμου, 10% για τεστ και 10% για επαλήθευση των αποτελεσμάτων. Θα πρέπει να τονιστεί πως υπήρξε και ένα επιπλέον σύνολο δεδομένων (dataset) το οποίο παρέμεινε κρυφό από τα στάδια της εκπαίδευσης και της επαλήθευσης.
2. Στη συνέχεια μετατρέψαμε την κατηγοριοποίηση των εικόνων σε τέτοια μορφή ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον αλγόριθμο.

3. Επιπλέον, αλλάξαμε το μέγεθος των εικόνων ώστε να ταιριάζουν με το μέγεθος του νευρωνικού δικτύου.
4. Δημιουργήσαμε το κατάλληλο αρχείο για την εκπαίδευση του αλγορίθμου, προσαρμόζοντας τις υπερ-παραμέτρους και ξεκινήσαμε την εκπαίδευση.
5. Τέλος, εξάγαμε τα αποτελέσματα και αποθηκεύσαμε το εκπαιδευόμενο μοντέλο.

Πλέον ο αλγόριθμος μας είναι έτοιμος για χρήση. Τοποθετώντας την κάμερα και συνδέοντας το σύστημα στο δίκτυο είναι έτοιμο για το **τρίτο στάδιο**: την αξιολόγηση της προτεινόμενης λύσης. Εφόσον το ποσοστό επιτυχίας είναι μεγαλύτερο από 85% τότε μπορούμε να προχωρήσουμε στο επόμενο και τελευταίο στάδιο. Αν τα αποτελέσματα είναι μικρότερα τότε θα πρέπει να επανασχεδιάσουμε την λύση μας ή να βρούμε κάποια άλλη. Στο **τέταρτο στάδιο** περνάμε αφού είμαστε ικανοποιημένοι από την λύση. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιούνται οι τελευταίες διορθώσεις που μπορεί να υπάρχουν, ώστε το σύστημα να είναι έτοιμο για την παραγωγή. Τέλος, το σύστημα απαιτεί συντήρηση ή/και αναβάθμιση ανά χρονικά διαστήματα [99].

4.3 Συμπεράσματα Μεθοδολογίας

Αξιοποιώντας το Προσαρμοστικό Μοντέλο Z που παρουσιάστηκε στο παρόν κεφάλαιο 4, μπορεί να επιτευχθεί αξιόπιστη λύση για την αξιοποίηση των ενσωματωμένων συστημάτων στον τομέα του περιβάλλοντος. Το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να προσαρμοστεί σε διάφορες συνθήκες και καταστάσεις, ώστε να δώσει το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα σε πολυπαραγοντικά συστήματα. Για την ανάπτυξη αυτού το συστήματος αναφερθήκαμε διεξοδικά στον τρόπο υλοποίησης του ανά στάδιο και ανά βήμα. Για την τελική έκδοση των λύσεων μπορούν να ληφθούν υπόψιν και ο σχεδιασμός ιστοτόπων και εφαρμογών για φορητές συσκευές, τα οποία είναι χρήσιμα για την τελική ανάπτυξη του συστήματος. Μπορεί λοιπόν να χρησιμοποιηθεί το Προσαρμοστικό Μοντέλο Z και σε αυτή την περίπτωση, δηλαδή να χωρίσουμε το σύστημα σε δύο ή περισσότερα μέρη και να επαναλάβουμε την διαδικασία με διαφορετικές προϋποθέσεις.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και τεκμηριώθηκε στο κεφάλαιο 4, δίνει την δυνατότητα στους ερευνητές να την αξιοποιήσουν ώστε να έχουν περισσότερες εναλλακτικές λύσεις στα προβλήματα που αντιμετωπίζουν. Αναλύοντας το πρόβλημα και θέτοντας τον τελικό στόχο έχουν μια λογική ροή που ξεκινά από την ιδέα και καταλήγει σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα. Τα στάδια είναι διακριτά αλλά αλληλένδετα μεταξύ τους και

το κάθε βήμα που υλοποιείται ξεκαθαρίζει ολοένα και περισσότερο την καλύτερη δυνατή λύση που μπορεί να επιλέξει ο ερευνητής.

Εν κατακλείδι, το Προσαρμοστικό Μοντέλο Z είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την ανάπτυξη ενσωματωμένων συστημάτων και εφαρμογών στον τομέα του περιβάλλοντος. Θέτοντας τα κατάλληλα ερωτήματα και τροφοδοτώντας το με την κατάλληλη πληροφορία μπορεί να μας δώσει λύσεις στα προβλήματα της ανάπτυξης του συστήματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Σύγχρονος τρόπος αποκομιδής απορριμμάτων αξιοποιώντας τα ενσωματωμένα συστήματα

5.1 Εισαγωγή : Η κατάσταση σήμερα

Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει μια έντονη διαμάχη σχετικά με το ρόλο της τεχνολογίας στην επίτευξη των στόχων της βιώσιμης ανάπτυξης. Ενώ παραδοσιακά, με βάση τον τύπο IPAT ($I = P \times A \times T$) ο πληθυσμός (P), το επίπεδο ευημερίας (A) και η επίδραση ανά μονάδα κατανάλωσης (T) θεωρούνται ως οι κύριοι παράγοντες που συμβάλλουν στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (I) [100], αργότερα, η εξίσωση IPAT αναδιαμορφώθηκε ώστε να τονιστεί ότι η τεχνολογία μπορεί να επηρεάσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις με θετικό τρόπο $I=(PA)/T$ [101].

Ο ρόλος της τεχνολογίας γίνεται όλο και πιο σημαντικός, καθώς βιώνουμε την τέταρτη βιομηχανική επανάσταση και τις νέες αναδυόμενες υποδομές και δυνατότητες που προσφέρουν τα Κυβερνο-φυσικά Συστήματα (Cyber-Physical Systems, CPS), η τεχνολογία Blockchain και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων- ΔτΠ (Internet of Things, IoT). Τα CPS είναι μια νέα κατηγορία μηχανικών συστημάτων που προσφέρουν συντονισμό μεταξύ φυσικών και υπολογιστικών υποδομών και αποτελούν τη βάση της Βιομηχανίας 4.0, των έξυπνων εργοστασίων και άλλων έξυπνων συστημάτων, όπως έξυπνα κτίρια, συστήματα ασφαλείας, κέντρα δεδομένων και ιατρικά συστήματα [102]. Εάν οι λειτουργίες δικτύωσης που προσφέρει το διαδίκτυο προστεθούν στα CPS, αναδύεται ένα νέο παράδειγμα δικτύωσης γνωστό ως IoT, όπου οι επικοινωνίες μεταξύ όλων των τύπων φυσικών οντοτήτων θα είναι δυνατές μέσω του διαδικτύου [103]. Επιπλέον, οι δυνατότητες που προσφέρει η τεχνολογία Blockchain για τη δημιουργία ενός αποκεντρωμένου δημόσιου καταλόγου διευκολύνει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των διαφόρων χρηστών που εμπλέκονται σε ένα σύστημα και ανοίγει την πόρτα για νέα διαφανή επιχειρηματικά μοντέλα.

Τις επόμενες δεκαετίες, το ΔτΠ αναμένεται να αλλάξει σημαντικά την αστική ανάπτυξη και τις μελλοντικές πόλεις. Ο αντίκτυπος της τεχνολογίας και της καινοτομίας στην αστική ανάπτυξη αναδείχθηκε με τον όρο "έξυπνη πόλη" (Smart City) που επινοήθηκε στις αρχές του 1990 [104] και πιο πρόσφατα με τον όρο "Πόλη 2.0". Έχουν δοθεί διάφοροι ορισμοί και διαστάσεις για μια έξυπνη πόλη, μεταξύ αυτών των ορισμών, αυτός που προσφέρεται πως είναι κοντά στη βιώσιμη ανάπτυξη, όπου προτείνει ότι μια πόλη είναι έξυπνη όταν ο στόχος της επένδυσης σε κυβερνοϋποδομές είναι η προώθηση της βιώσιμης οικονομικής

ανάπτυξης, της καλύτερης ποιότητας ζωής και της αποτελεσματικής διαχείρισης των φυσικών πόρων.

Υπάρχει ένας κοινός ορισμός για το τι κάνει μια έξυπνη πόλη και τι συνιστά μια βιώσιμη πόλη, όπου μια έξυπνη πόλη δεν είναι μόνο οι υποδομές αλλά ο βαθμός στον οποίο οι υποδομές αυτές βοηθούν στην επίτευξη των στόχων της βιώσιμης ανάπτυξης. Για παράδειγμα, η παραγωγή αποβλήτων είναι ένα ταχέως αυξανόμενο πρόβλημα των σύγχρονων κοινωνιών, ιδίως στις αναπτυσσόμενες αστικές περιοχές. Περίπου 1,7-1,9 δισεκατομμύρια μετρικοί τόνοι αστικών στερεών αποβλήτων παράγονται κάθε χρόνο παγκοσμίως [105]. Εάν ο πληθυσμός της πόλης ως αποτέλεσμα της μετανάστευσης από την ύπαιθρο αυξάνεται με τον υφιστάμενο ρυθμό του 3-5% ετησίως, τότε η παραγωγή αποβλήτων θα διπλασιάζεται κάθε 10 χρόνια. Αν και σύμφωνα με την περιβαλλοντική καμπύλη Kuznets (Environmental Kuznets Curve, EKC) με την αύξηση του κατά κεφαλήν εισοδήματος, η περιβαλλοντική υποβάθμιση και η ρύπανση μειώνεται, η οικονομία κλίμακας και η αύξηση του πληθυσμού μπορεί να αντισταθμίσουν τα οφέλη της οικονομικής ανάπτυξης. Επιπλέον, υπάρχουν αμφιλεγόμενες συζητήσεις σχετικά με την ακρίβεια της EKC. Σύμφωνα με τον Stern [106] τα στατιστικά στοιχεία πίσω από την EKC δεν είναι ισχυρά και η σχέση μεταξύ των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και του κατά κεφαλήν εισοδήματος δεν είναι προβλέψιμη. Η παραγωγή αποβλήτων αποτελεί ανησυχία για τις σύγχρονες κοινωνίες, τόσο λόγω του κόστους υπηρεσιών για τη συλλογή των αποβλήτων, όσο και λόγω των περιβαλλοντικών ζητημάτων των χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων. Το ΔτΠ φαίνεται να αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση για τη διαχείριση των εργασιών συλλογής και ανάκτησης αποβλήτων στις έξυπνες πόλεις.

Ο αριθμός των μελετών που έχουν ασχοληθεί με τις πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων στις έξυπνες πόλεις είναι περιορισμένος. Ένας από τους στόχους της παρούσας διατριβής είναι να εξετάσει αρχικά τις υπάρχουσες μελέτες σχετικά με το θέμα και στη συνέχεια να παρουσιάσει ένα μοντέλο με βάση τα δεδομένα για τις πρακτικές διαχείρισης αποβλήτων στις έξυπνες πόλεις λαμβάνοντας υπόψη την έννοια της κυκλικής οικονομίας.

Στον [Πίνακα 2](#) παρατίθεται κατάλογος των δημοφιλέστερων επιστημονικών δημοσιεύσεων ανασκόπησης σχετικά με έξυπνες πόλεις. Όπως φαίνεται, οι προηγούμενες ανασκοπήσεις επικεντρώνονταν κυρίως είτε στις έξυπνες και βιώσιμες πόλεις, είτε στη διαχείριση των αποβλήτων. Το πεδίο εφαρμογής κάθε προηγούμενης ανασκόπησης που παρέχεται περιορίζεται στην έννοια των έξυπνων πόλεων με μία πρόσφατη εργασία σχετικά με μοντέλα με χρήση ΤΠΕ για τη συλλογή αποβλήτων [107].

Ερευνητική Εργασία	Σκοπός
Cochia (2014, Antonopoulos (2015), Arroub et al. (2016)	Έξυπνες και ψηφιακές πόλεις
Kyriazopoulos (2015)	Τεχνολογίες & Αρχιτεκτονικές σε Έξυπνες πόλεις
Bibri and Krogstie (2017)	Έξυπνες βιώσιμες πόλεις
Talari et al. (2017)	Διαδίκτυο των Πραγμάτων & Έξυπνες πόλεις
Chauhan et al. (2016)	Μεγάλα Δεδομένα & Έξυπνες πόλεις
Khajenasiri et al. (2017)	Διαχείριση ενέργειας κτιρίων σε Έξυπνες πόλεις
Alibasuc et al. (2016)	Κυβερνοασφάλεια για Έξυπνες πόλεις
Shuai et. al (2016)	Ηλεκτρικά οχήματα σε Έξυπνες πόλεις
Giusti (2009)	Διαχείριση απορριμμάτων
Zacho and Mosgaard (2016)	Μείωση απορριμμάτων
Goulart Coelho et al. (2017)	Σύστημα διαχείρισης αποφάσεων στη διαχείριση απορριμμάτων
Belien et al. (2012)	Διαχείριση στερεών αποβλήτων
Anagnostopoulos et al. (2017)	Μοντέλα βασισμένα στις ΤΠΕ για τη διαχείριση απορριμμάτων

Πίνακας 2: Ερευνητικές δημοσιεύσεις για τις έξυπνες πόλεις

5.2 Ο ρόλος των δεδομένων και των πολιτών στις έξυπνες και βιώσιμες πόλεις

Για να μετατραπεί το αστικό περιβάλλον σε έξυπνες ζώνες, εμπλέκονται πολλοί παράγοντες που σχετίζονται με τις υποδομές και τη διαχείριση. Σε αυτή την ενότητα, θα συζητήσουμε το ρόλο των τριών παραγόντων της τεχνολογίας, των δεδομένων και των ανθρώπων, όπως τονίζεται με ιδιαίτερη έμφαση στο ρόλο των δεδομένων και των πολιτών.. Η τεχνολογία και οι υποδομές είναι μόνο ένα στοιχείο αυτού του μετασχηματισμού, η συλλογή των κατάλληλων δεδομένων προς την κατεύθυνση του καθορισμού έξυπνων λύσεων και οι αλλαγές που επιφέρουν στη συμπεριφορά των καταναλωτών είναι δύο άλλοι βασικοί άξονες των έξυπνων πόλεων.

Η συλλογή δεδομένων που παράγονται από τους πολίτες γίνεται όλο και πιο εύκολη, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών έξυπνων κινητών τηλεφώνων και γενικότερα κινητών συσκευών. Ο αριθμός των κινητών συσκευών που πωλήθηκαν στην παγκόσμια αγορά το 2022 έφτασε στα 1,4 δισεκατομμύρια μονάδες, ενώ το 2018 στο ιστορικό υψηλό των 1,57 δισεκατομμύρια μονάδες [108]. Τα δεδομένα που συλλέγονται μέσω των smartphones είναι ένα από τα κύρια στοιχεία των έξυπνων πόλεων. Τα δεδομένα είναι συχνά αναφερόμενα, πράγμα που σημαίνει ότι τα δεδομένα μπορούν να συνδεθούν με μια συγκεκριμένη γεωγραφική τοποθεσία μέσω ενός ζεύγους συντεταγμένων. Επιπλέον, τα δεδομένα είναι συχνά χρονικά προσδιορισμένα, πράγμα που σημαίνει ότι τα δεδομένα αφορούν μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Τα δεδομένα με γεωγραφική αναφορά δεν είναι χρήσιμα μόνο για την κατανόηση της συμπεριφοράς μεμονωμένων πολιτών, αλλά και για την εξαγωγή τάσεων και χαρακτηριστικών της κοινότητας.

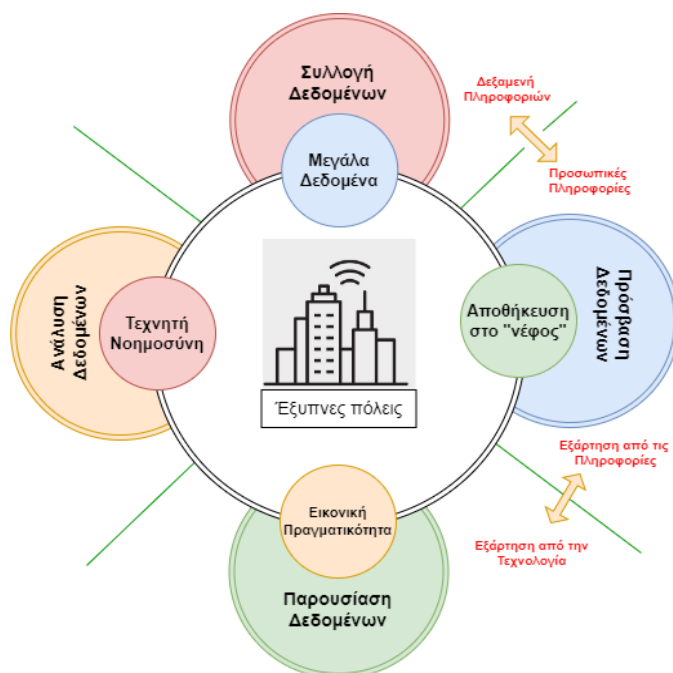
Τα δεδομένα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε: 1) ιδιωτικά κοινωνικά δεδομένα που παράγονται κυρίως από τους πολίτες και 2) πληροφορίες σχετικά με τις δημόσιες υποδομές που συλλέγονται από τεχνολογίες ανίχνευσης που αναπτύσσονται για σκοπούς παρακολούθησης και διαχείρισης [109]. Εκτός από τη συλλογή δεδομένων, οι νέες εξελίξεις επιτρέπουν στα συστήματα επεξεργασίας δεδομένων, να εντοπίζουν τις ανάγκες των χρηστών τους. Αυτό βελτιώνει την ταχύτητα του συστήματος, μειώνει το υπολογιστικό κόστος, καθώς και τα ζητήματα απορρήτου των δεδομένων και την κατανάλωση ενέργειας. Ως παράδειγμα των συνόλων δεδομένων που διατίθενται μέσω κυβερνητικών υπηρεσιών, το SF OpenData⁴ δημοσιεύει τα δεδομένα που συλλέγονται στην πόλη του Σαν Φρανσίσκο σε δέκα κύριες κατηγορίες: (1) οικονομία και κοινότητα, (2) διαχείριση της πόλης και ηθική, (3) μεταφορές, (4) δημόσια ασφάλεια, (5) υγεία και κοινωνικές υπηρεσίες, (6) γεωγραφικές τοποθεσίες και όρια, (7) ενέργεια και περιβάλλον, (8) στέγαση και κτίρια, (9) υποδομές της πόλης και (10) πολιτισμός και αναψυχή.

Επί του παρόντος, τα δεδομένα συλλέγονται ουσιαστικά παντού από διαφορετικούς οργανισμούς, όπως φαίνεται σχηματικά στην [Εικόνα 30](#), αλλά αυτό που λείπει είναι η επικοινωνία μεταξύ των διαφόρων πηγών και η έλλειψη ενός ολοκληρωμένου και συνδεδεμένου νέφους δεδομένων που να μπορεί να τα διαμοιραστεί [110]. Οι Kim et al. [111] εξέτασαν ότι τα δεδομένα που συλλέγονται από τις έξυπνες πόλεις έχουν αναλυθεί στη βιβλιογραφία για τους ακόλουθους σκοπούς: (1) πρόβλεψη των προτύπων και των μοντέλων συμπεριφοράς των πολιτών, (2) ανίχνευση των δεδομένων των πολιτών σε ατομικό επίπεδο, (3) ανίχνευση της κοινωνικής σχέσης και των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μεμονωμένων πολιτών, (4) σύνδεση μεταξύ των χαρακτηριστικών της περιοχής και της συμπεριφοράς των κατοίκων κάθε περιοχής, (5) οπτικοποίηση πολύπλοκων δεδομένων και της δυναμικής της εξέλιξης της πόλης, και (6) ζητήματα ιδιωτικότητας και προσωπικής ταυτότητας.

Οι ερευνητές [112] κατηγοριοποίησαν τους κρίσιμους παράγοντες των πρωτοβουλιών για τις έξυπνες πόλεις σε οκτώ κατηγορίες: διαχείριση, διακυβέρνηση, πολιτική, τεχνολογία, άνθρωποι, υποδομές, οικονομία και φυσικό περιβάλλον. Η δομή και η δυναμική των κοινωνικό-τεχνολογικών κοινοτήτων που σχηματίζονται στις έξυπνες πόλεις συμβάλλουν στα αποτελέσματα της βιώσιμης ανάπτυξης. Οι πόλεις αποτελούνται τόσο από πολίτες όσο και από υποδομές για τρόφιμα, νερό, ενέργεια, μεταφορές και άλλες δραστηριότητες παροχής υπηρεσιών. Ως εκ τούτου, θεωρούνται σύνθετα κοινωνικό-

⁴ <https://datasf.org/opendata/>

τεχνολογικά συστήματα, όπου οι πολίτες ως ανθρωπίνι παράγοντες λειτουργούν διάφορα τεχνολογικά συστήματα.



Εικόνα 30: Γραφική αναπαράσταση των δεδομένων που συλλέγονται στις έξυπνες πόλεις

Τα τεχνολογικά συστήματα μπορούν να χωριστούν σε δύο τύπους ανάλογα με τον τρόπο λήψης αποφάσεων: (1) συστήματα που δημιουργούνται μέσω αποφάσεων που λαμβάνονται συλλογικά μέσω της δημόσιας πολιτικής και (2) συστήματα που δημιουργούνται μέσω ατομικών αποφάσεων των πολιτών. Το σύστημα παραγωγής απορριμμάτων κατατάσσεται στη δεύτερη ομάδα, όπου ο ρυθμός παραγωγής απορριμμάτων επηρεάζεται από αποφάσεις που λαμβάνονται από τα άτομα. Αναμφισβήτητα, οι περισσότερες αποφάσεις που λαμβάνονται από άτομα βασίζονται κυρίως σε τεχνικά κριτήρια όπως το κόστος και όχι σε κοινωνικές ή οικολογικές αξίες [113]. Ως εκ τούτου, η διαχείριση των απορριμμάτων εξελίσσεται σε ένα σύνθετο αστικό πρόβλημα. Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η σχέση μεταξύ πολιτών και τεχνολογίας είναι αμφίδρομη. Ενώ οι αποφάσεις των πολιτών επηρεάζουν το σύστημα διαχείρισης απορριμμάτων, οι υποδομές διαχείρισης απορριμμάτων που περιβάλλουν μεμονωμένους πολίτες επηρεάζουν επίσης τη συμπεριφορά των πολιτών [114]. Οι πόλεις απαιτούν καινοτόμες, διακλαδικές λύσεις για τη διευκόλυνση της συλλογής και της διάθεσης των στερεών αποβλήτων. Οι λύσεις θα πρέπει να είναι προσαρμόσιμες και επεκτάσιμες.

Οι Ahvenniemi et. al. [115] διεξήγαγαν μια μελέτη για να συγκρίνουν τον βαθμό στον οποίο η έννοια των έξυπνων πόλεων αντιμετωπίζει τις ίδιες ανησυχίες με την έννοια των βιώσιμων πόλεων και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι τα υφιστάμενα πλαίσια των έξυπνων πόλεων δεν στοχεύουν επαρκώς στους δείκτες που σχετίζονται με τη βιωσιμότητα, ιδίως οι περιβαλλοντικοί δείκτες, όπως η διαχείριση της ενέργειας, των απορριμμάτων και των υδάτων, υποεκτιμούνται. Οι Neirotti et. al [116] ανέφεραν ένα διαφορετικό συμπέρασμα σχετικά με τον τομέα της ενέργειας και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι τομείς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και της κινητικότητας των ανθρώπων έχουν λάβει τη μεγαλύτερη προσοχή. Η κάλυψη του τομέα της διαχείρισης αποβλήτων εξακολουθεί να είναι περιορισμένη. Παραδόξως, ακόμη και στο πλαίσιο της βιωσιμότητας, το σύνολο των 29 δεικτών που χρησιμοποιούνται από τις Εκθέσεις Πόλεων των Ηνωμένων Εθνών και υιοθετούνται από διάφορους οργανισμούς περιλαμβάνει μόνο την ενέργεια και το νερό που καταναλώνονται ως κύριοι πόροι και δεν περιλαμβάνει άλλους τύπους πόρων, όπως τα στερεά και επικίνδυνα απόβλητα.

5.3 Οι Έξυπνοι κώδος στις έξυπνες πόλεις

Οι έξυπνες πόλεις, όπως περιγράφονται στην προηγούμενη ενότητα 5.2, καλούνται να λύσουν ένα πρόβλημα, το οποίο συνεχώς δείχνει να επιδεινώνεται. Λόγω της συνεχούς αύξησης του πληθυσμού και της έλλειψης δυνατότητας για αξιοποίηση των διαθέσιμων φυσικών πόρων, το πρόβλημα της κατασπατάλησης των πρώτων υλών έχει αρχίσει να γίνεται ένα σημαντικό ζήτημα που επηρεάζει την ανθρωπότητα. Το πρόβλημα που χρίζει αντιμετώπισης είναι διττό. Από τη μία η αύξηση του όγκου των ΑΣΑ δημιουργεί πρόβλημα στις σύγχρονες πόλεις με την αποκομιδή των απορριμμάτων, ενώ παράλληλα χρειαζόμαστε ολοένα και περισσότερους πόρους για την κατασκευή νέων προϊόντων. Σύμφωνα με τα στοιχεία ανακύκλωσης της Υπηρεσίας Προστασίας Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, το 75% του συνόλου των αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) που μπορούν να ανακυκλωθούν σπαταλιέται ή χάνεται [117]. Η ανακύκλωση είναι ένα πρόβλημα που επηρεάζει όλους τους ανθρώπους σε παγκόσμια βάση και συνδέεται στενά με τη μόλυνση του περιβάλλοντος, την οικονομική ανάπτυξη, καθώς και με τα κοινωνικά πρότυπα.

Η διαχείριση των ΑΣΑ είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Τα υπερβάλλοντα υλικά των αποβλήτων συνήθως καίγονται, αποθηκεύονται ή απορρίπτονται σε χώρους υγειονομικής εναπόθεσης (ταφής) ή ακόμη και στη θάλασσα.

Ως αποτέλεσμα, ο αέρας, το υπέδαφος και το νερό μολύνονται, ενώ η χλωρίδα και η άγρια πανίδα κινδυνεύουν και εξαφανίζονται. Αυτό είναι ιδιαίτερα αισθητό στις αναπτυσσόμενες χώρες, όπου τα ποσοστά ανακύκλωσης είναι σημαντικά χαμηλότερα.

Λαμβάνοντας υπόψη, ότι ένα σημαντικό ποσοστό των ΑΣΑ μπορεί να ανακυκλωθεί, είναι ζωτικής σημασίας να χρησιμοποιηθούν διαδικασίες ανακύκλωσης προκειμένου να επαναχρησιμοποιηθούν τα υλικά. Πολλές χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης σημειώνουν πρόοδο όσον αφορά την ανακύκλωση [118], κυρίως μέσω της θέσπισης στοχευμένης νομοθεσίας που ενθαρρύνει τους πολίτες να ανακυκλώνουν. Οι συνήθειες κάδοι διάθεσης απορριμμάτων, οι οποίοι παλαιότερα συνέλεγαν κάθε υλικό, έχουν αντικατασταθεί από κάδους ενός υλικού. Διαφορετικά υλικά, εκτός από τα απαιτούμενα, δεν επιτρέπεται να απορρίπτονται σε αυτούς τους κάδους από το νόμο. Κατά συνέπεια, ενώ οι κάδοι αυτοί διευκολύνουν την ανακύκλωση για τις δημόσιες δομές διαχείρισης απορριμμάτων, δυσχεραίνουν την ανακύκλωση για τους πολίτες.

Η συμμετοχή των πολιτών στη διαδικασία ανακύκλωσης είναι κρίσιμη για την επίτευξη μεγαλύτερου ποσοστού ανακύκλωσης. Παρόλο που τα ανεπτυγμένα έθνη έχουν καταφέρει να εντάξουν τους πολίτες στη διαδικασία της ανακύκλωσης, εξακολουθούν να υπολείπονται των στόχων που έχουν ήδη καθορίσει. Οι διαφορές στην ανακύκλωση μεταξύ των βιομηχανικά ανεπτυγμένων και των υπανάπτυκτων χωρών είναι τεράστιες. Αυτό επιβεβαιώνεται από την πληθώρα των μελετών που δείχνουν πως υφίσταται μια σχέση μεταξύ της συνήθειας της ανακύκλωσης των πολιτών και του Ακαθάριστου Εγχώριου Προϊόντος (ΑΕΠ) της χώρας [119] [120] [121].

Ένας από τους τρόπους που οι έξυπνες πόλεις δίνουν λύση στο πρόβλημα της ανακύκλωσης, είναι μέσω των έξυπνων κάδων. Οι έξυπνοι κάδοι ή “smart bins”, είναι κάδοι απορριμμάτων που έχουν εξοπλιστεί με διάφορα ηλεκτρονικά συστήματα, όπως αισθητήρες υγρασίας, θερμοκρασίας και πίεσης, και με κατάλληλο λογισμικό, με σκοπό τη διευκόλυνση της διαδικασίας της αποκομιδής απορριμμάτων, την παρακίνηση των πολιτών να ανακυκλώνουν περισσότερο, καθώς και τη συλλογή δεδομένων, που χρησιμοποιούνται με σκοπό την συνολική αύξηση της ανακύκλωσης. Οι έξυπνοι κάδοι στις σύγχρονες έξυπνες πόλεις, περιλαμβάνουν επίσης δυνατότητες αναγνώρισης εικόνας, χρησιμοποιώντας τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης, καθώς και σύνδεση με εξειδικευμένα πληροφοριακά συστήματα. Οι έξυπνοι κάδοι στοχεύουν στο να καταναλώνουν ελάχιστη ενέργεια και να λειτουργούν με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ηλιακά πάνελ.

Μέσα από την εργασία μας, Ziouzios & Dasygenis [122] πραγματοποιήθηκε πρωτογενής έρευνα σε 103 Δήμους της Ελλάδας το 2022 σχετικά με τις γνώσεις και την

στάση των υπευθύνων στην καθαριότητα. Από τους 103 Δήμους, το 53,80% αφορά μεσαίου μεγέθους (10.000 – 60.000 πολίτες), το 23,10% αφορά μεγάλους Δήμους (πάνω από 60.000 κατοίκους) και το υπόλοιπο 23,10% αφορά μικρούς Δήμους (κάτω από 10.000 κατοίκους). Τα ευρήματα αυτής της έρευνας δείχνουν ότι οι δήμοι ενδιαφέρονται να υιοθετήσουν έξυπνες και καινοτόμες πρακτικές διαχείρισης απορριμμάτων, υποστηρίζοντας ότι οι επενδύσεις σε έξυπνους κάδους είναι βιώσιμες και αποτελεσματικές. Σε κάθε περίπτωση, η στοχευμένη ενημέρωση των δήμων για τα οφέλη από τη χρήση έξυπνων κάδων καθώς και η υλοποίηση πιλοτικών έργων επίδειξης θα επιταχύνουν σημαντικά τη χρήση έξυπνων κάδων σε ευρεία κλίμακα, δημιουργώντας μια συνεχώς αναπτυσσόμενη αγορά. Το ενδιαφέρον των δήμων για την εκμετάλλευση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), που περιλαμβάνει και τους έξυπνους κάδους κατά προτεραιότητα, είναι μια μεγάλη ευκαιρία για αύξηση της αγοράς τα επόμενα χρόνια. Οι δήμοι είναι επίσης έτοιμοι να δοκιμάσουν τους έξυπνους κάδους μιας και θεωρούν πως είναι μια καλή λύση για την προστασία του περιβάλλοντος, της υγείας των πολιτών και της εξοικονόμησης πόρων, ακόμη και εάν γνωρίζουν ελάχιστα γι' αυτή τη τεχνολογία.

Συγκεκριμένα, η έρευνα έδειξε ότι 26,9% των δήμων γνωρίζει αρκετά για την τεχνολογία έξυπνων κάδων, το 30,8% γνωρίζει μερικές πληροφορίες σχετικά με τους έξυπνους κάδους, ενώ το 42,3% δεν γνωρίζει σχεδόν τίποτα γι' αυτήν. Έτσι, είναι προφανές ότι πάνω από το 60% των εκπροσώπων έχει κάποιες γνώσεις σχετικά με την τεχνολογία του έξυπνου κάδου. Παρ' όλα αυτά, πάνω από το 90% των Δήμων, απάντησαν ότι σχεδιάζουν να υιοθετήσουν καινοτόμες τεχνολογίες σχετικά με τα έξυπνα συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων. Επίσης, το 38,5% ενδιαφέρεται για την άμεση αντικατάσταση των συμβατικών κάδων με έξυπνους και το 57,7% το σχεδιάζει μεσοπρόθεσμα. Ένα άλλο ενδιαφέρον εύρημα είναι ότι το 96,2% των δήμων δεν θα ήταν αντίθετο στην πληρωμή της αυξημένης τιμής αγοράς των έξυπνων κάδων σε σύγκριση με τους συμβατικούς, λαμβάνοντας υπόψη τα οφέλη που θα προκύψουν από τη χρήση τους. Τέλος, το 96,2% των δήμων σχεδιάζουν ή κατευθύνονται προς το να μετατρέψουν τις πόλεις τους σε «έξυπνες» στο άμεσο μέλλον.

Είναι φανερό πως οι έξυπνες πόλεις ολοένα και περισσότερο κερδίζουν έδαφος και πως οι αρμόδιοι στρέφονται προς αυτή την κατεύθυνση. Πιο συγκεκριμένα, η προστασία του περιβάλλοντος και η χρήση των έξυπνων κάδων φαίνεται να είναι μια καλή πρακτική που επιθυμούν να αποκτήσουν οι περισσότεροι Δήμοι.

5.3.1 Τύποι έξυπνων κάδων

Υπάρχουν διάφοροι έξυπνοι κάδοι οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί. Κατά τη μελέτη της βιβλιογραφίας, οι υλοποιήσεις έξυπνων κάδων που έχουν παρουσιαστεί, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε 4 γενικές κατηγορίες, βάσει των ηλεκτρονικών συστημάτων που περιλαμβάνουν καθώς και της τεχνικής δικτύωσης και επικοινωνίας που χρησιμοποιούν. Αναφορικά, οι 4 αυτές κατηγορίες είναι:

- Έξυπνοι κάδοι ΔτΠ: Μικροελεγκτές
- Έξυπνοι κάδοι ΔτΠ: Μικροελεγκτές και Υπολογιστικό νέφος
- Προσέγγιση βασισμένη σε ασύρματο δίκτυο αισθητήρων (WSN)
- Έξυπνοι κάδοι διαφορετικού σκοπού που ενσωματώνουν άλλες τεχνολογίες

A. Έξυπνοι κάδοι ΔτΠ: Μικροελεγκτές

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζονται έξυπνοι κάδοι βασισμένοι σε μικροελεγκτές, οι οποίοι έχουν γίνει και ιδιαίτερα δημοφιλείς τα τελευταία έτη λόγω του χαμηλού τους κόστους. Συνοπτικά, ένας μικροελεγκτής είναι ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα μικρού μεγέθους που έχει σχεδιαστεί για να ρυθμίζει μια συγκεκριμένη λειτουργία σε ένα ενσωματωμένο σύστημα. Ένας τυπικός μικροελεγκτής περιλαμβάνει έναν επεξεργαστή, μνήμη και περιφερειακά εισόδου/εξόδου (I/O) σε ένα μόνο τσιπ.

Οι Yusof et al. [123], πρότειναν ένα σύστημα έξυπνης παρακολούθησης σκουπιδιών βασισμένο σε μικροελεγκτή Arduino Uno, προκειμένου να μετρά το επίπεδο της πληρότητας των κάδων σε πραγματικό χρόνο και όταν το επίπεδο των απορριμμάτων πρόκειται να γεμίσει, τότε αυτό το σύστημα στέλνει μια ειδοποίηση μέσω SMS στο κατάλληλο φορέα (π.χ. δήμο), ώστε ο κάδος να αδειάσει και να συλλεχθούν αμέσως τα σκουπίδια. Το σύστημα είναι εξοπλισμένο με αισθητήρα υπερήχων για τη μέτρηση της στάθμης των απορριμμάτων, τη μονάδα GSM για την αποστολή του SMS. Ως μικροελεγκτής, έχει επιλεγεί ένα Arduino Uno.

Στην ερευνητική εργασία [124], οι ερευνητές ανέπτυξαν μια αρχιτεκτονική βασισμένη στην τεχνολογία της έξυπνης πόλης για τη διαχείριση των απορριμμάτων και εφάρμοσαν ένα πρωτότυπο για να επιβεβαιώσουν την ιδέα τους. Το σύστημα βασίζεται σε πλακέτα μικροελεγκτή Arduino Uno και επιπλέον είναι εξοπλισμένο με αισθητήρα εγγύτητας, κάδο απορριμμάτων και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι αισθητήρες

εγγύτητας είναι προσαρτημένοι σε πέντε διαφορετικές θέσεις σε έναν κάδο απορριμμάτων και διασυνδέονται με την πλακέτα Arduino για τη λήψη δεδομένων. Για να προσδιοριστεί ο κατάλληλος ταξινομητής, πραγματοποιήθηκε πείραμα με τη χρήση του συνόλου δεδομένων που αποκτήθηκε για την εκπαίδευση πέντε διαφορετικών παραλλαγών του ταξινομητή K-NN.

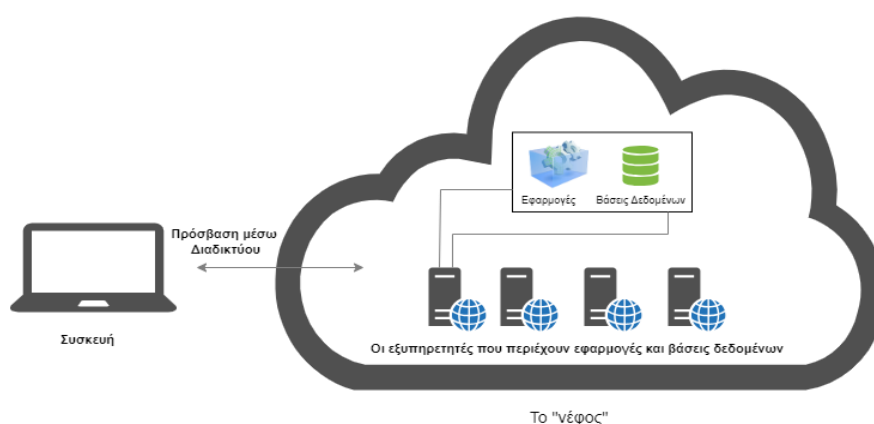
Οι Mohiuddin et al. [125], ανέπτυξαν ένα έξυπνο ευφύες σύστημα ειδοποίησης για τα σκουπίδια που βασίζεται σε Arduino Uno διασυνδεδεμένο με τον αισθητήρα υπερήχων και αν τα σκουπίδια γεμίσουν, τότε το σύστημα αυτό στέλνει την ειδοποίηση στον αντίστοιχο φορέα. Για να πραγματοποιηθεί η απομακρυσμένη παρακολούθηση της διαδικασίας εκκένωσης, αναπτύχθηκε μια εφαρμογή Android και συνδέθηκε με έναν διακομιστή ιστού για να ενημερώνει την υπηρεσία της πόλης για τις ειδοποιήσεις από το σύστημα. Οι ειδοποιήσεις αποστέλλονται από την εφαρμογή Android μέσω μονάδας Wi-Fi.

Στην εργασία [126] οι ερευνητές αναζήτησαν διάφορες λύσεις για το ίδιο πρόβλημα των ΑΣΑ. Για παράδειγμα οι Issac και Akshai, εισήγαγαν ένα σύστημα που ονομάζεται SVASTHA (μια Σανσκριτική λέξη, που σημαίνει "να είσαι υγιής και καθαρός"), το οποίο βασίζεται σε σύστημα RFID και GPS που μπορεί να διαχειριστεί αποτελεσματικά τα αστικά στερεά απόβλητα. Αυτό το ενσωματωμένο σύστημα έχει αναπτυχθεί για να συλλέγει δεδομένα από τον αναγνώστη RFID μέσω της συνδεσιμότητας Bluetooth και να τα μεταφορτώνει σε έναν κεντρικό διακομιστή.

B. Έξυπνοι κάδοι ΔτΠ: Μικροελεγκτές και υπολογιστικό νέφος

Εκτός από τους έξυπνους κάδους βασισμένους μόνο σε έναν μικροελεγκτή, στη βιβλιογραφία είναι αρκετά διαδεδομένοι οι έξυπνοι κάδοι χρησιμοποιώντας μικροελεγκτή σε συνδυασμό με το υπολογιστικό νέφος. Συνοπτικά, το υπολογιστικό νέφος (ή “σύννεφο”) αναφέρεται σε διακομιστές στους οποίους παρέχεται πρόσβαση μέσω του Διαδικτύου, καθώς και στο λογισμικό και τις βάσεις δεδομένων που εκτελούνται σε αυτούς τους διακομιστές ([Εικόνα 31](#)). Οι διακομιστές νέφους βρίσκονται σε κέντρα δεδομένων σε όλο τον κόσμο. Με τη χρήση του υπολογιστικού νέφους, οι χρήστες και οι εταιρείες δεν χρειάζεται να διαχειρίζονται οι ίδιοι φυσικούς διακομιστές ή να εκτελούν εφαρμογές λογισμικού σε δικούς τους εξυπηρετητές. Το υπολογιστικό νέφος δίνει τη δυνατότητα στους χρήστες να έχουν πρόσβαση στα ίδια αρχεία και εφαρμογές από σχεδόν οποιαδήποτε συσκευή, επειδή η υπολογιστική επεξεργασία και η αποθήκευση πραγματοποιούνται σε διακομιστές σε ένα κέντρο δεδομένων, αντί τοπικά στη συσκευή του χρήστη. Η χρήση του

υπολογιστικού νέφους γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής στον τομέα των ενσωματωμένων συστημάτων, κυρίως λόγω της ευελιξίας που παρέχει και της δυνατότητας κλιμάκωσης. Στον τομέα των έξυπνων κάδων, ορισμένες από τις υλοποιήσεις που ξεχωρίζουν, αναφέρονται επιγραμματικά παρακάτω: Το CloudSWAM, ένας μηχανισμός έξυπνης διαχείρισης απορριμμάτων που βασίζεται στο υπολογιστικό νέφος [127] επιτρέπει στους κάδους απορριμμάτων που φέρουν αισθητήρες να κοινοποιούν την κατάσταση της στάθμης των απορριμμάτων τους στο νέφος. Οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να έχουν πρόσβαση στα επιθυμητά δεδομένα από το υπολογιστικό νέφος και έτσι να εκτελούν βελτιστοποίηση της διαδρομής για την αποτελεσματική αποκομιδή των απορριμμάτων.



Εικόνα 31: Σχεδιάγραμμα λειτουργίας νέφους

Με την ενσωμάτωση αισθητήρων υπερήχων και τεχνικών GPRS, το σύστημα δυναμικής διαχείρισης απορριμμάτων που βασίζεται σε μικροελεγκτή [128], θα μπορούσε να μετρήσει το βάρος και τον όγκο των σκουπιδιών και να στείλει πληροφορίες στον διακομιστή νέφους. Η τεχνική Ant Colony Optimization (ACO) χρησιμοποιείται για την εύρεση της συντομότερης δυνατής διαδρομής συλλογής απορριμμάτων για κάθε φορτηγό. Το σύστημα μπορεί να προσαρμοστεί σε δυναμικές αλλαγές, δηλαδή σε διαδρομές που μπλοκάρονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συλλογής απορριμμάτων.

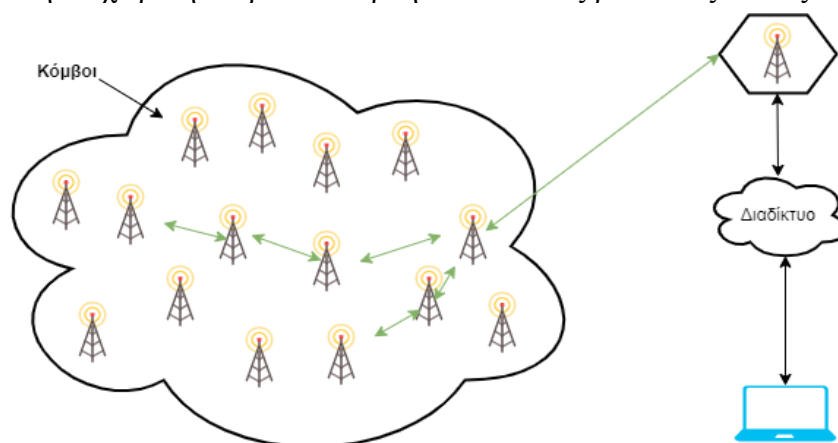
Ένα άλλο σύστημα παρακολούθησης έξυπνων κάδων που βασίζεται στο υπολογιστικό νέφος [129] χρησιμοποιεί την έννοια ενός δικτύου έξυπνων κάδων απορριμμάτων που βασίζεται στην προσέγγιση Stack Based Front End για την ενσωμάτωση του WSN με το υπολογιστικό νέφος. Για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της παρακολούθησης των σκουπιδιών η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιεί τεχνικές μηχανικής μάθησης στα δεδομένα των αισθητήρων που συλλέγονται.

Η χρήση των συστημάτων επιτήρησης ως υποστηρικτική τεχνολογία για υψηλή ποιότητα υπηρεσιών (Quality of Service - QoS) στη συλλογή απορριμμάτων προτείνεται

από τους Medvedev et al. [130]. Συγκεκριμένα, αξιοποιώντας το ΔτΠ, ετικέτες RFID, αισθητήρες, κάμερες και ενεργοποιητές ενσωματώνονται σε συστήματα επιτήρησης για την αποτελεσματική συλλογή απορριμμάτων. Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα προηγμένο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (Decision Support System - DSS) για την αποτελεσματική συλλογή απορριμμάτων και ενσωματώνει ένα μοντέλο για την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των οδηγών φορτηγών σε πραγματικό χρόνο.

Γ. Έξυπνοι κάδοι βασισμένοι σε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN)

Οι Longhi κ.ά. [131], πρότειναν μια αρχιτεκτονική διαχείρισης στερεών αποβλήτων που βασίζεται σε αισθητήρες και χρησιμοποιεί κόμβους μεταφοράς δεδομένων. Αυτό το σύστημα που βασίζεται σε WSN (Wireless Sensor Networks) ([Εικόνα 32](#)) χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της πλήρωσης των κάδων, συλλέγοντας δεδομένα από ενσωματωμένους αισθητήρες. Η απομακρυσμένη παρακολούθηση στο διαδίκτυο διευκολύνεται ως μέρος αυτού του σχεδιασμού συστήματος. Το σύστημα ενσωματώνει ένα ολοκληρωμένο DSS για την αποτελεσματική διαχείριση στερεών αποβλήτων δίνοντας βέλτιστες λύσεις.



Εικόνα 32: Δίκτυα WSN

Το πλαίσιο συστήματος παρακολούθησης κάδων στερεών αποβλήτων σε πραγματικό χρόνο [132] βασίζεται σε WSN και περιλαμβάνει τρία επίπεδα: έξυπνο κάδο, πύλη και σταθμό ελέγχου που αποθηκεύει και αναλύει τα δεδομένα για περαιτέρω χρήση. Ο βασικός στόχος αυτού του πλαισίου είναι η απομακρυσμένη παρακολούθηση του κάδου στερεών αποβλήτων σε πραγματικό χρόνο, μέσω ZigBee-PRO και GPRS, για την βελτίωση της διαδικασίας διαχείρισης στερεών αποβλήτων. Η διαδρομή συλλογής απορριμμάτων μπορεί να βελτιστοποιηθεί με την τροφοδότηση των συλλεγόμενων δεδομένων σε ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (Decision Support System – DSS).

Το σύστημα Smartbin που προτάθηκε από τους Folianto et al. [133] ενσωματώνει την έννοια του ασύρματου δικτύου πλέγματος (WMN) και τεχνικές κύκλου λειτουργίας για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και τη μεγιστοποίηση του χρόνου λειτουργίας. Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να συλλέγει δεδομένα και να παραδίδει τα δεδομένα μέσω του WMN. Το σύστημα Smartbin έχει αρχιτεκτονική τριών επιπέδων: κόμβοι εξωτερικού χώρου, αναλυτές και σταθμός εργασίας. Το σύστημα Smartbin υλοποιήθηκε και αναπτύχθηκε σε υπαίθριο πεδίο δοκιμών.

Δ. Άλλες τεχνολογίες έξυπνων κάδων

Εκτός από τις κατηγορίες έξυπνων κάδων που αναφέραμε ήδη, έχουν βρεθεί στη βιβλιογραφία έξυπνοι κάδοι που δεν εμπίπτουν σε καμία από αυτές. Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζουμε συνοπτικά μερικές από αυτές τις υλοποιήσεις έξυπνων κάδων.

Η πρώτη υλοποίηση είναι το GREENBIN [134], το οποίο έχει ως κύριο στόχο τον διαχωρισμό των απορριμμάτων στην πηγή. Οι Thakker και Narayanamoorthi [135], εισήγαγαν τον έξυπνο κάδο απορριμμάτων, ο οποίος θα ειδοποιεί και θα ενημερώνει το εξουσιοδοτημένο άτομο με μήνυμα στο κινητό τηλέφωνο (SMS) χρησιμοποιώντας την τεχνολογία GSM, όταν ο κάδος απορριμμάτων πρόκειται να γεμίσει. Αυτό το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να διαχωρίζει πέντε τύπους πλαστικών ρητινών οι οποίες δεν είναι βιοδιασπώμενες από τα σκουπίδια με τη χρήση φασματοσκοπίας εγγύς υπερύθρου (Near-infrared spectroscopy - NIR) και παρέχει τις λεπτομέρειες όλων των βιοδιασπώμενων ουσιών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω σε μονάδα βιοαερίου.

Οι Catania και Ventura [136], πρότειναν μια προσέγγιση για την έξυπνη συλλογή απορριμμάτων με βάση την πλατφόρμα Smart-M3. Η πλατφόρμα Smart-M3 συμβάλλει στην επίλυση του ζητήματος της διασύνδεσης μεταξύ ετερογενών συσκευών και της ανταλλαγής δεδομένων. Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο σε επίπεδο πληρότητας των κάδων καθίσταται δυνατή μέσω αισθητήρων που τοποθετούνται στο εσωτερικό τους. Τα δεδομένα που συλλέγονται δίνονται σε ένα σύστημα λήψης αποφάσεων για τον προσδιορισμό του βέλτιστου αριθμού οχημάτων ή κάδων απορριμμάτων που πρέπει να διανεμηθούν στην περιοχή.

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη σύγκριση των διαφόρων συστημάτων διαχείρισης απορριμμάτων όσον αφορά τους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται, τις τεχνολογίες που εφαρμόζονται και τις τεχνικές μεταφοράς δεδομένων που χρησιμοποιούνται.

	Σύστημα Έξυπνου Κάδου	Τεχνολογία																
		Μικροελεγκτής	Ultrasonic	Load Cell	RFID	Ακρίβεια	Αέριο	Θερμ./υγρασία	Επιταχυνσιόμετρο	Υγρασία, μέταλλο	Μεθάνιο	Τεχνολογία νέφους	GPS	Τεχνολογία Ιστού	Wi-Fi	Bluetooth	GSM/GPRS	ZigBee
1	Έξυπνο Σύστημα Ελέγχου	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
2	Αρχιτεκτονική Διαχείρισης Μείωσης Απορριμμάτων	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
3	Έξυπνο Σύστημα Ελέγχου Απορριμμάτων	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗
4	Αρχιτεκτονική Διαχείρισης Απορριμμάτων	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗
5	Έξυπνος Κάδος Ανακύκλωσης	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
6	Νέφος SWAM	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗
7	Δυναμικό Σύστημα Διαχείρισης απορριμμάτων	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗
8	Έξυπνος Κάδος (δικός μας)	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✗
9	Έξυπνη Διαχείριση Αποκομιδής	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓
10	Σύστημα έξυπνου κάδου	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗

Πίνακας 3: Ολοκληρωμένη σύγκριση των διαφόρων συστημάτων διαχείρισης απορριμμάτων

5.4. Σχεδιασμός ενός καινοτόμου κάδου Smartbin

Η δική μας εφαρμογή αφορά έναν καινοτόμο κάδο από ανακυκλώσιμα υλικά που ενημερώνει σε πραγματικό χρόνο: 1) για την στάθμη των απορριμμάτων, 2) σε περίπτωση πυρκαγιάς καθώς και 3) πότε το καπάκι του κάδου παραμένει ανοιχτό. Ένα έξυπνο σύστημα διαχείρισης αστικών στερεών απορριμμάτων αποτελείται σε τρία διακριτά μέρη: α) το υλικό μέρος του συστήματος, β) το λογισμικό μέρος και γ) η συνδεσιμότητα μεταξύ των δύο μερών. Για τον επιτυχή σχεδιασμό και λειτουργία του συστήματος θα πρέπει να εκπληρώνονται οι παρακάτω πέντε άξονες:

- 1) Τα υποσυστήματα που θα αναπτυχθούν θα πρέπει να λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους ώστε να είναι λειτουργικά ακόμα και εάν χρειαστεί να λειτουργήσει το κάθε ένα από αυτά αυτόνομα.

- 2) Αν και τα υποσυστήματα θα πρέπει να λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους, θα πρέπει ο συνδυασμός των δεδομένων του να δίνει ένα συνολικό αποτέλεσμα το οποίο θα μπορεί να επεξεργαστεί περαιτέρω.
- 3) Το σύστημα δεν θα πρέπει να είναι στατικό, υπό την έννοια πως οι αναβαθμίσεις του συστήματος είναι διαρκείς, για την βελτιστοποίηση του. Έτσι, θα πρέπει να υποστηρίζει την τροποποίηση λειτουργιών, την ενσωμάτωση άλλων συστημάτων, και γενικότερα να είναι ανοιχτό στην εξελικτικότητα.
- 4) Η διασύνδεση των υποσυστημάτων θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε ανάλογα με την γεωγραφική κατανομή και τις ιδιαιτερότητες του κάθε αστικού περιβάλλοντος, θα μπορεί να λειτουργήσει το σύστημα απρόσκοπτα.
- 5) Η γεωγραφική κατανομή των συστημάτων βασίζεται όχι μόνο στις τεχνολογικές δυνατότητες του εκάστοτε μοντέλου αλλά και στις ανάγκες των πολιτών που καλείται να καλύψει. Υπό αυτή την έννοια, το σύστημα θα πρέπει να σχεδιαστεί όσο το δυνατό με μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα.

Το σύστημα αποτελείται από σταθμούς (nodes) οι οποίοι μπορούν να επικοινωνούν με κάποιον ενδιάμεσο σταθμό είτε απευθείας με το πληροφοριακό σύστημα το οποίο είναι εγκατεστημένο σε έναν διακομιστή (server). Οι σταθμοί στέλνουν τις μετρήσεις τους ανά συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα ή όταν εκτελείται κάποιο συμβάν, όπως για παράδειγμα όταν κλείνει το καπάκι του κάδου. Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης του συστήματος γνωρίζει σε τακτά χρονικά διαστήματα ή σε πραγματικό χρόνο την κατάσταση του κάδου. Αναλόγως του αισθητήρες που έχουμε εγκαταστήσει στο σύστημα ελέγχονται οι κάδοι και προτείνονται καλύτεροι τρόποι διαχείρισης των απορριμμάτων. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται περισσότερο για να συλλέξουμε χρήσιμα δεδομένα αφορούν την πληρότητα του κάδου, την θερμοκρασία, και τον έλεγχο αν το καπάκι μένει ανοιχτό.

Κάθε σταθμός συλλέγει αυτές τις πληροφορίες και αποστέλλει τα δεδομένα στον κεντρικό διακομιστή (server) μέσω ενός ή περισσότερων πρωτοκόλλων σύνδεσης εφόσον είναι απαραίτητο. Τα δεδομένα συλλέγονται στον διακομιστή σε μια βάση δεδομένων (database) όπου υπάρχει εγκατεστημένο ένα πληροφοριακό σύστημα και το οποίο αξιοποιεί προβλεπτικό αλγόριθμο, ώστε να προτείνονται οι βέλτιστες δυνατές λύσεις για την διαχείριση των απορριμμάτων και που αφορούν την δρομολόγηση των απορριμματοφόρων και την τοποθέτηση των κάδων. Εφόσον έχει οριστεί κάποιο επίπεδο ειδοποίησης ο χρήστης ενημερώνεται μέσω του πληροφοριακού συστήματος είτε μέσω της

εφαρμογής για έξυπνα κινητά τηλέφωνα (smartphones), η οποία είναι συνδεδεμένη με το πληροφοριακό σύστημα και έχει αναπτυχθεί γι' αυτό το σκοπό, είτε με γραπτό μήνυμα στο κινητό τηλέφωνο (sms). Για την ενημέρωση μέσω της εφαρμογής (mobile app) απαιτείται η σύνδεση στο διαδίκτυο ενώ για την ενημέρωση μέσω γραπτού μηνύματος απαιτείται η σύνδεση στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας (GSM).

Ο κάθε σταθμός μπορεί να χρησιμοποιεί κάποιο ενσωματωμένο σύστημα που απλά μεταδίδει την πληροφορία στον διακομιστή ή σε άλλον σταθμό, αλλά μπορεί να χρησιμοποιεί και περισσότερο πολύπλοκα συστήματα τα οποία επεξεργάζονται την πληροφορία και στη συνέχεια την αποστέλλουν. Στην παρούσα υλοποίηση επιλέχθηκε να μεταφέρεται η πληροφορία σε κάποιον διακομιστή μιας και η πληροφορία από μόνη της δεν χρίζει κάποιας επεξεργασίας, αλλά αντίθετα, όταν όλα τα δεδομένα συλλεχθούν από τον διακομιστή και εφόσον το πλήθος της πληροφορίας είναι ικανοποιητικό, τότε η επεξεργασία μπορεί να δώσει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνουμε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης ανά σταθμό. Η αρχιτεκτονική που ακολουθείται χωρίζεται σε τρία βασικά μέρη:

- 1) Στον σταθμό συλλογής πληροφοριών
- 2) Στο πληροφοριακό σύστημα που περιλαμβάνει τον προβλεπτικό αλγόριθμο και την εφαρμογή για έξυπνα κινητά τηλέφωνα και
- 3) Την συνδεσιμότητα των δύο συστημάτων (σταθμό – πληροφοριακό σύστημα)

Αυτή η αρχιτεκτονική αποτελεί τον βασικό τρόπο επικοινωνίας μεταξύ του ενσωματωμένου και του πληροφοριακού συστήματος. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ασύρματης επικοινωνίας οι οποίοι έχουν αναλυθεί στο Κεφάλαιο 3.

Ένα σύστημα διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων και ανακυκλώσιμων υλικών μπορεί να χρησιμοποιήσει πληθώρα διαφορετικών αισθητήρων οι οποίοι βρίσκονται στο εμπόριο. Για να είναι αποδοτικό το σύστημα θα πρέπει να προβλεφθούν όπως είδαμε κατά τη σχεδίαση του οι αισθητήρες που θα χρησιμοποιηθούν. Όσον αφορά την παρούσα υλοποίηση για την διαχείριση των ΑΣΑ, και σύμφωνα με τους περιορισμούς που έχουν αναλυθεί, θα κατηγοριοποιηθούν οι αισθητήρες σε α) αισθητήρες μέτρησης των απορριμμάτων μέσω της απόστασης ή του όγκου, β) σε αισθητήρες μέτρησης της θερμοκρασίας και γ) αισθητήρες για τη ενημέρωση αν το καπάκι του κάδου ανοίγει ή κλείνει. Αυτοί οι αισθητήρες θα πρέπει να είναι συμβατοί με την πλακέτα ή τις πλακέτες που θα επιλεγούν. Έτσι, θα πρέπει κατά το σχεδιασμό της λύσης μπορούν να επιλεγθούν

διάφοροι αισθητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούν διαφορετικό τρόπο μετρήσεων και είναι συμβατοί με το ενσωματωμένο σύστημα που επιλέχθηκε. Στην δική μας περίπτωση, βάσει των προδιαγραφών που περιεγράφηκαν στο πρώτο στάδιο μπορούμε να επιλέξουμε από μια σειρά αισθητήρων όπως:

α) Αισθητήρες μέτρησης των απορριμμάτων που βρίσκονται μέσα στον κάδο.

Υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι ανίχνευσης για τον προσδιορισμό του χώρου που καταλαμβάνει ένα αντικείμενο ή πολλά αντικείμενα σε πραγματικό χρόνο, καθεμία από τις οποίες διαφοροποιείται από ένα ευρύ φάσμα τεχνικών προδιαγραφών. Στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες για την μέτρηση των απορριμμάτων



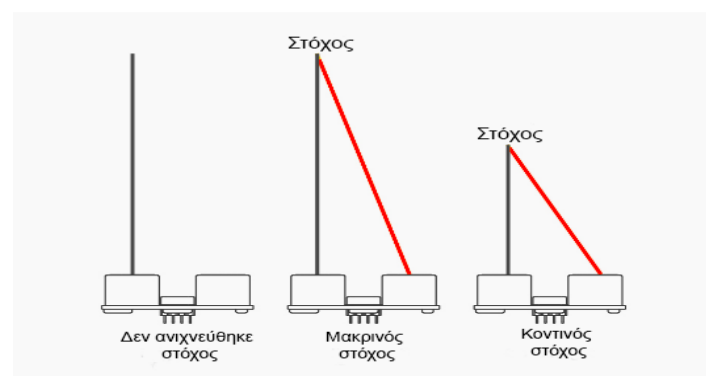
Εικόνα 33: Τρόπος λειτουργίας αισθητήρα υπερήχων

μέσω απόστασης ή μέσω βάρους. Έτσι, οι αισθητήρες απόστασης ενσωματώνουν ένα εξαιρετικά ευρύ πεδίο τεχνολογιών που μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: υπερήχους (ultrasonic), τριγωνοποίηση υπέρυθρων (IR), λέιζερ (laser) και υπέρυθρων χρόνου πτήσης (IR Time-of-Flight / LED-TOF). Υπάρχουν και άλλες κατηγορίες αλλά αυτές είναι οι περισσότερες διαδεδομένες. Η τεράστια ποικιλία που προσφέρουν αυτές οι τέσσερις κορυφαίες τεχνολογίες ανίχνευσης απόστασης οδηγεί σε ένα ευρύ φάσμα βασικών ιδιοτήτων απόδοσης, όπως το εύρος, η ανάλυση, το οπτικό πεδίο, η συχνότητα και οι χρόνοι μετάδοσης-λήψης, παράλληλα με το κόστος εγκατάστασης και συνεχούς λειτουργίας.

Όσον αφορά τον **αισθητήρα υπερήχων**, μετρά την απόσταση εκπέμποντας ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας και καταγράφοντας το χρόνο που πέρασε από τη στιγμή της εκπομπής του ήχου και πριν την αντανάκλαση του στον μορφοτροπέα σήματος (transducer) σχήμα της [Εικόνας 33](#). Ο χρόνος που απαιτείται για να επιστρέψει η συγκεκριμένη συχνότητα στον μορφοτροπέα σήματος είναι γνωστός ως χρόνος μετ' επιστροφής και αποτελεί την συνολική απόσταση που διανύθηκε από τον πομπό υπερήχων στο αντικείμενο

και πίσω. Για τον προσδιορισμό της απόστασης από ένα αντικείμενο, ο αισθητήρας απόστασης υπερήχων πολλαπλασιάζει τον χρόνο μετ' επιστροφής με την ταχύτητα του ήχου – περίπου 344,12 μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s) σε συνθήκες ελεγχόμενου περιβάλλοντος – και μειώνει στο μισό τον υπολογισμό. Το βασικό πλεονέκτημα των αισθητήρων υπερήχων είναι ότι χρησιμοποιούν σήματα μικρού μήκους κύματος και υψηλής συχνότητας που δεν επηρεάζονται από τη σκόνη, το φως, το χρώμα των αντικειμένων που ανιχνεύονται κ.λπ. με αποτέλεσμα να μην δημιουργούνται αποκλίσεις των μετρήσεων. Παρ' όλα αυτά, οι αισθητήρες της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι επιρρεπείς σε παρεμβολές από θόρυβο και παρεμβολές από άλλους αισθητήρες με τις ίδιες συχνότητες. Επίσης, οι αισθητήρες απόστασης υπερήχων προσφέρουν σχετικά χαμηλή ανάλυση και εμβέλεια σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες. Προσφέρουν επίσης μεγαλύτερο οπτικό πεδίο (FOV/ field-of-view) και μεγαλύτερους χρόνους μετάδοσης-λήψης, με μικρή εμβέλεια. Αυτό σημαίνει ότι δεν είναι κατάλληλοι για την ανίχνευση αντικειμένων που κινούνται γρήγορα. Στη δική μας περίπτωση όμως που δεν υπάρχει καθόλου κίνηση δεν δημιουργείται κάποιο πρόβλημα από τη χρήση τους.

Η επόμενη κατηγορία αφορά τον **αισθητήρα υπερύθρων τριγωνισμού (IR Triangulation Distance Sensor)**. Οι αισθητήρες απόστασης είναι εξοπλισμένοι με διόδους εκπομπής φωτός και λειτουργούν με την αρχή του τριγωνισμού όπου ο υπολογισμός της απόστασης πραγματοποιείται σύμφωνα με τη γωνία μιας ανακλώμενης δέσμης υπερύθρων από την επιφάνεια- στόχο όπως φαίνεται στο σχήμα της [Εικόνας 34](#). Όταν η λάμπα LED εστιάζει μια δέσμη φωτός σε μια επιφάνεια, αυτό το φως αντανακλάται προς όλες τις κατευθύνσεις. Ένας αισθητήρας απόστασης που υπάρχει δίπλα στην λάμπα LED αποκτά

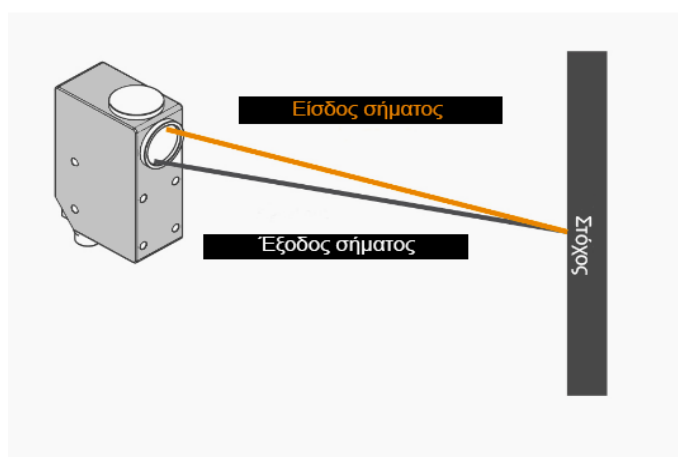


Εικόνα 34: Τρόπος λειτουργίας αισθητήρα υπέρυθρου τριγωνισμού

ένα ανακλώμενο σήμα και ένα τσιπ ολοκληρωμένου συστήματος ορίζει τη γωνία ανάκλασης για τον υπολογισμό της απόστασης. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της κατηγορίας είναι η χαμηλή τιμή, ενώ είναι γενικά λύσεις μικρής εμβέλειας που

χρησιμοποιούνται μεμονωμένα, καθώς δεν μπορούν αξιόπιστα να συνδυαστούν με επιπλέον αισθητήρες.

Η ανίχνευση της απόστασης μέσω μονοχρωματικού φωτός λέιζερ, χρησιμοποιεί συνήθως μια πηγή λέιζερ με ενσωματωμένη οπτικό σύστημα για τη μέτρηση του χρόνου που απαιτείται ώστε η εκπομπή μιας δέσμης παλμικού φωτός να φτάσει σε ένα αντικείμενο και να ανακλαστεί στον αισθητήρα, σχήμα της [Εικόνας 35](#). Η βασική αρχή αυτού είναι γνωστή ως “χρόνος πτήσης” (Time-of-Flight), αν και οι αισθητήρες απόστασης λέιζερ μπορούν να υιοθετήσουν μια διαφορετικές αρχές μέτρησης όπως είναι η σύγκριση φάσεων. Οι **αισθητήρες απόστασης λέιζερ** παρέχουν ακριβή και σταθερά αποτελέσματα σε ποικίλα περιβάλλοντα λειτουργίας με μεγάλη εμβέλεια. Διαθέτουν επίσης ένα πλήρως ρυθμιζόμενο οπτικό πεδίο (FOV/ field-of-view) και αποτελούν κατάλληλη τεχνολογία αισθητήρων απόστασης για εφαρμογές εξωτερικού χώρου. Αυτοί οι αισθητήρες είναι σχετικά πιο δαπανηροί από άλλους, δεν μπορούν αξιόπιστα να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με άλλους αισθητήρες και η θα πρέπει η χρήση τους να γίνεται με προσοχή

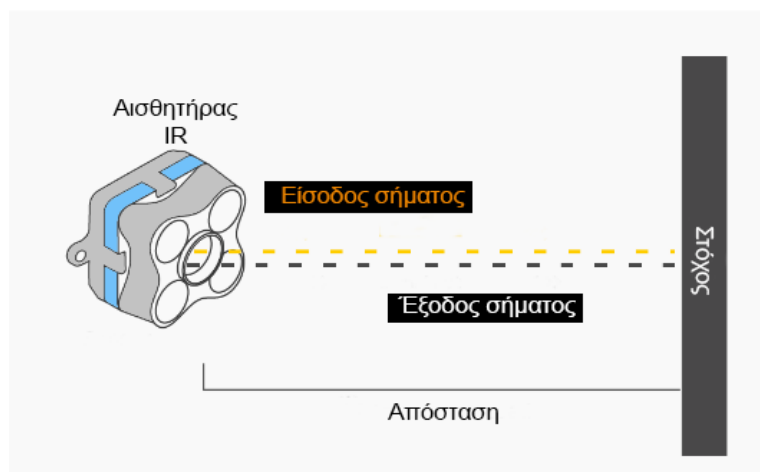


Εικόνα 35: Τρόπος λειτουργίας αισθητήρα απόστασης laser

μιας και μπορεί να δημιουργήσει βλάβη στα μάτια των χρηστών, εφόσον εκτεθούν στη δέσμη laser.

Η τελευταία κατηγορία αφορά τους **αισθητήρες υπέρυθρων «χρόνου πτήσης» (IR Time-of-Flight / LED-TOF)**. Οι αισθητήρες απόστασης υπέρυθρων «χρόνου πτήσης» (IR Time-of-Flight) μετρούν την απόσταση χρησιμοποιώντας ένα μια λάμπα υπέρυθρων σύμφωνα με την αρχή του χρόνου πτήσης, σχήμα της [Εικόνας 36](#). Αυτό έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως ταχύτερους χρόνους λήψης μετάδοσης, μεγάλη εμβέλεια (<60 μέτρα), γρήγορους ρυθμούς ανανέωσης, σταθερό οπτικό πεδίο (FOV/ field-of-view), χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και υποστήριξη plug-and-play για ενσωμάτωση πολλών

αισθητήρων. Επίσης, είναι συμπαγείς, ελαφροί και εύχρηστοι, και η τεχνολογία περιορίζεται σε ακρίβεια επιπέδου εκατοστών (cm). Στα μειονεκτήματα μπορεί να καταλογιστεί η απόδοση σε εξωτερικούς χώρους που μπορεί να επηρεαστεί από το άμεσο ηλιακό φως και οι ανακλαστικές επιφάνειες μπορεί να εμποδίσουν την εμβέλεια του αισθητήρα.



Εικόνα 36: Τρόπος λειτουργίας αισθητήρα υπέρυθρων "χρόνου πτήσης"

Αυτές οι τέσσερις βασικές κατηγορίες αισθητήρων μέτρησης της απόστασης, μπορούν να αξιοποιηθούν για την δική μας περίπτωση. Η κάθε κατηγορία έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα, τα οποία θα πρέπει να ελέγξουμε ώστε να πραγματοποιηθεί η καλύτερη δυνατή επιλογή. Στην παρούσα φάση, δεν μπορούμε ακόμη να κάνουμε την επιλογή, μιας και θα πρέπει να δούμε συνολικά όλες τις πιθανές επιλογές σε αισθητήρες, πλακέτες και τρόπο διασύνδεσης με το πληροφοριακό σύστημα.

Εναλλακτικά, μπορούμε να επιλέξουμε για την μέτρηση του όγκου των απορριμμάτων με αισθητήρες μέτρησης του βάρους. Έτσι, μετρώντας το βάρος του κάδου μπορούμε να υπολογίσουμε το ποσοστό πληρότητας του. Θα πρέπει να σημειωθεί πως αυτή η εναλλακτική μέθοδος προσδιορισμού της πληρότητας έχει το εξής βασικό μειονέκτημα, δεν είναι ακριβής στη μέτρηση, μιας και αντικείμενα μικρού βάρους μπορεί να καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο ή αντίστροφα, βαριά αντικείμενα να καταλαμβάνουν μικρό χώρο. Παρ' όλα αυτά δεν αποκλείεται ως λύση και θα πρέπει να εξεταστεί αν πραγματικά μπορεί να συμβάλει θετικά στην εύρεση της καλύτερης δυνατής λύσης του προβλήματος μας. Κατά τη χρήση του αισθητήρα, πρέπει πρώτα να λάβουμε υπόψη το πραγματικό περιβάλλον εργασίας, το οποίο είναι πολύ σημαντικό για τη σωστή επιλογή του αισθητήρα βάρους.

Ο αισθητήρας βάρους είναι μια συσκευή που μετατρέπει το ποιοτικό σήμα (quality signal) σε μετρήσιμο ηλεκτρικό σήμα εξόδου. Σύμφωνα με τη μέθοδο μετατροπής, οι αισθητήρες βάρους χωρίζονται σε 8 κατηγορίες: φωτοηλεκτρικός τύπος, υδραυλικός τύπος, χωρητικός τύπος, τύπος ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, τύπος μεταβολής μαγνητικού πόλου, τύπος δόνησης, τύπος γυροσκοπίου και τύπος παραμόρφωσης αντίστασης.

Ο φωτοηλεκτρικός τύπος αισθητήρα βάρους (Photoelectric Weight Sensor) χρησιμοποιεί γραμμές Moire (moire fringes). Χρησιμοποιώντας φωτοκύτταρα, κυκλώματα μετατροπής και όργανα απεικόνισης, μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των γραμμών για να μετρήσουμε τη γωνία περιστροφής του πλέγματος και, τέλος, παίρνουμε την μέτρηση. Οι φωτοηλεκτρικοί αισθητήρες βάρους χρησιμοποιούνται κυρίως σε ηλεκτρομηχανικές ζυγαριές.

Υδραυλικός τύπος: Όταν δρα η βαρυτική δύναμη «P» του μετρούμενου αντικειμένου, η πίεση του υδραυλικού λαδιού αυξάνεται. Ο βαθμός της αύξησης είναι ανάλογος του «P». Ο αισθητήρας αυτός έχει απλή και σταθερή δομή και μεγάλο εύρος μέτρησης, αλλά η ακρίβειά του γενικά δεν ξεπερνά το 1/100.

Ο χωρητικός αισθητήρας βάρους, λειτουργεί χρησιμοποιώντας την αναλογική σχέση μεταξύ της συχνότητας ταλάντωσης «f» του κυκλώματος ταλάντωσης του πυκνωτή και της απόστασης της πλάκας του ηλεκτροδίου «d». Υπάρχουν δύο πλάκες ηλεκτροδίων, η μία σταθερή και η άλλη κινητή. Όταν το αντικείμενο τοποθετείται στη φέρουσα πλατφόρμα, το φύλλο ελατηρίου εκτρέπεται, η απόσταση μεταξύ των δύο πλακών ηλεκτροδίων αλλάζει καθώς επίσης αλλάζει ανάλογα και η συχνότητα ταλάντωσης του κυκλώματος. Μετρώντας την αλλαγή στη συχνότητα, μπορούμε να προσδιορίσουμε το βάρος του αντικειμένου. Οι χωρητικοί αισθητήρες βάρους καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια και κοστίζουν λιγότερο, έχοντας ακρίβεια 1/200 έως 1/500.

Ο αισθητήρας βάρους ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, χρησιμοποιεί την αρχή ότι το φορτίο στη φέρουσα πλατφόρμα εξισορροπείται με την ηλεκτρομαγνητική δύναμη. Όταν το αντικείμενο τοποθετείται στη φέρουσα πλατφόρμα, το ένα άκρο του μοχλού γέρνει προς τα πάνω. Το φωτοηλεκτρικό εξάρτημα ανιχνεύει το σήμα κλίσης, το οποίο ενισχύεται και ρέει στο πηνίο για να δημιουργήσει μια ηλεκτρομαγνητική δύναμη για να επαναφέρει το μοχλό σε μια ισορροπημένη κατάσταση. Με την ψηφιακή μετατροπή του ρεύματος που δημιουργεί την ηλεκτρομαγνητική δύναμη ισορροπίας, μπορεί να προσδιοριστεί το βάρος του μετρούμενου αντικειμένου. Ο αισθητήρας βάρους ηλεκτρομαγνητικής δύναμης έχει

υψηλή ακρίβεια, η οποία μπορεί να φτάσει έως 1/60.000, αλλά το εύρος ζύγισης βρίσκεται μεταξύ μερικών δεκάδων μικρογραμμαρίων (mg) και 10 κιλών (kg).

Ο αισθητήρας Βάρους Μεταβολής Μαγνητικού Πόλου λειτουργεί ως εξής: Όταν το σιδηρομαγνητικό στοιχείο παραμορφώνεται μηχανικά υπό την επίδραση της βαρύτητας του μετρούμενου αντικειμένου, δημιουργείται εσωτερική τάση και η διαπερατότητα αλλάζει έτσι ώστε η επαγόμενη τάση του δευτερεύοντος πηνίου που τυλίγεται και στις δύο πλευρές του σιδηρομαγνητικού στοιχείου (μαγνητικός πόλος) να αλλάζει ανάλογα. Έτσι, μπορούμε να μετρήσουμε τη δύναμη που εφαρμόζεται στον μαγνητικό πόλο μέσω της τιμής της αλλαγής τάσης και στη συνέχεια να προσδιορίσουμε τη μάζα του αντικειμένου. Η ακρίβεια του αισθητήρα βάρους μεταβολής του μαγνητικού πόλου είναι 1/100. Το εύρος ζύγισης είναι μεταξύ μερικών κιλών έως δεκάδων χιλιάδων κιλών, το οποίο είναι κατάλληλο για εργασίες ζύγισης μεγάλης χωρητικότητας.

Ο δονούμενος αισθητήρας βάρους. Αφού ασκηθεί δύναμη στο ελαστικό στοιχείο, η φυσική του συχνότητα δόνησης είναι ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα της ασκούμενης δύναμης. Μετρώντας τη μεταβολή της φυσικής συχνότητας, μπορούμε να λάβουμε τη δύναμη του μετρούμενου αντικειμένου που ασκεί το ελαστικό στοιχείο και στη συνέχεια να ληφθεί η μάζα του. Υπάρχουν δύο τύποι αισθητήρων δόνησης: ο τύπος δονούμενης χορδής, όπου η ακρίβεια είναι υψηλή, 1/1.000-1/10.00, με το εύρος ζύγισης να είναι από 100 γραμμάρια έως αρκετές εκατοντάδες κιλά, αλλά αυτός ο αισθητήρας έχει πολύπλοκη δομή και υψηλό κόστος. Ο τύπος πιρουνιού έχει μικρή κατανάλωση ενέργειας, η ακρίβεια μέτρησης είναι 1/10.000-1/200.000, αλλά το εύρος ζύγισης είναι από 500 γραμμάρια μέχρι 10kg.

Ο γυροσκοπικός αισθητήρας βάρους βασίζεται σε έναν εγκατεστημένο ρότορα στο εσωτερικό του πλαίσιο και περιστρέφεται σταθερά γύρω από τον άξονα X με γωνιακή ταχύτητα ω . Το εσωτερικό πλαίσιο συνδέεται με το εξωτερικό πλαίσιο μέσω ενός ρουλεμάν και μπορεί να γέρνει και να περιστρέφεται γύρω από τον οριζόντιο άξονα Y. Το εξωτερικό πλαίσιο συνδέεται με τη βάση του μηχανήματος μέσω ενός γενικού συνδέσμου και μπορεί να περιστρέφεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονα Z. Ο άξονας του ρότορα (άξονας X) παραμένει οριζόντιος όταν δεν ασκείται εξωτερική δύναμη. Όταν μια εξωτερική δύναμη ($P/2$) δρα στο ένα άκρο του άξονα του ρότορα, γέρνει και περιστρέφεται γύρω από τον κατακόρυφο άξονα Z. Η γωνιακή ταχύτητα μετάπτωσης είναι ανάλογη με την εξωτερική δύναμη $P/2$. Και η τιμή της εξωτερικής δύναμης και της μάζας του αντικειμένου μπορούν

να ληφθούν ανιχνεύοντας τη συχνότητα. Ο αισθητήρας βάρους γυροσκοπίου έχει γρήγορο χρόνο απόκρισης (5 δευτερόλεπτα), και υψηλή ακρίβεια στη μέτρηση, επομένως μπορεί να επιτευχθεί υψηλή ανάλυση (1/100.000) και υψηλή ακρίβεια μέτρησης (1/30.000-1/60.000).

Ο **αισθητήρας βάρους αντίστασης** χρησιμοποιεί την αρχή, ότι η αντίσταση των μετρητών καταπόνησης αλλάζει, όταν ο μετρητής τάσης παραμορφώνεται. Αποτελείται κυρίως από 4 μέρη: ελαστικό στοιχείο, μετρητής τάσης αντίστασης, κύκλωμα μέτρησης και καλώδιο μετάδοσης. Αυτός είναι ο συνηθέστερος τύπος που χρησιμοποιείται.

β) Αισθητήρας μέτρησης της θερμοκρασίας

Υπάρχουν τέσσερις (4) κύριες κατηγορίες αισθητήρων μέτρησης της θερμοκρασίας: αισθητήρας αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας (Negative Temperature Coefficient - NTC), ανιχνευτής θερμοκρασίας αντίστασης (Resistance Temperature Detector - RTD), θερμοστοιχεία και αισθητήρες θερμοκρασίας βασισμένοι σε ημιαγωγούς.

Ένας **αισθητήρας αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας (NTC)** είναι μια ευαίσθητη αντίσταση στη θερμοκρασία που «αντιλαμβάνεται» τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, η αντίσταση μειώνεται σταδιακά. Οι μικρές αλλαγές αντικατοπτρίζονται με ακρίβεια λόγω μεγάλων αλλαγών στην αντίσταση ανά βαθμό κελσίου (°C). Η έξοδος ενός NTC είναι μη γραμμική λόγω της εκθετικής φύσης του. Το εύρος λειτουργίας είναι μεταξύ -50 έως 250 °C για NTC με γυάλινη κάψουλα ή 150 °C για τυπικά NTC.

Ένας **ανιχνευτής θερμοκρασίας αντίστασης (RTD)**, αλλάζει την αντίσταση του στοιχείου βάσει της θερμοκρασίας. Ένας RTD αποτελείται από ένα φιλμ ή, για μεγαλύτερη ακρίβεια, από ένα σύρμα τυλιγμένο γύρω από έναν κεραμικό ή γυάλινο πυρήνα. Αναλόγως το υλικό που θα χρησιμοποιήσουμε για την κατασκευή των RTD αισθητήρων θα έχουμε και το αντίστοιχο αποτέλεσμα. Έτσι, η πλατίνα συνιστά τις πιο ακριβείς μετρήσεις θερμοκρασιών, ενώ το νικέλιο και ο χαλκός παράγουν αισθητήρες RTD με χαμηλότερο κόστος. Ωστόσο, το νικέλιο και ο χαλκός δεν έχουν τόσο μεγάλη ακρίβεια όσο η πλατίνα. Οι αισθητήρες RTD με πλατίνα προσφέρουν γραμμική απόδοση υψηλής ακρίβειας σε θερμοκρασία -200 έως 600 °C, αλλά είναι πολύ πιο ακριβά από τον χαλκό ή το νικέλιο.

Ένα θερμοστοιχείο αποτελείται από δύο σύρματα διαφορετικών μετάλλων που συνδέονται ηλεκτρικά σε δύο σημεία. Η μεταβαλλόμενη τάση που δημιουργείται μεταξύ αυτών των δύο ανόμοιων μετάλλων αντανακλά αναλογικές αλλαγές στη θερμοκρασία. Τα

θερμοστοιχεία είναι μη γραμμικά και απαιτούν μετατροπή όταν χρησιμοποιούνται για έλεγχο θερμοκρασίας, που συνήθως επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας έναν πίνακα αναζήτησης. Η ακρίβεια αυτών των αισθητήρων είναι χαμηλή από 0,5 °C έως 5 °C, αλλά τα θερμοστοιχεία λειτουργούν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, από -200 °C έως 1750 °C.

Ένας **αισθητήρας θερμοκρασίας που βασίζεται σε ημιαγωγούς** συνήθως ενσωματώνεται σε ολοκληρωμένα κυκλώματα (Integrated Circuit - IC). Αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούν δύο πανομοιότυπες διόδους με χαρακτηριστικά ευαίσθητα στη θερμοκρασία τάση έναντι του ρεύματος που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση των αλλαγών στη θερμοκρασία. Προσφέρουν γραμμική απόκριση αλλά έχουν χαμηλότερη ακρίβεια από τους βασικούς τύπους αισθητήρων. Αυτοί οι αισθητήρες θερμοκρασίας έχουν επίσης πιο αργή απόκριση λειτουργούν μεταξύ -70 °C και 150 °C, το οποίο αποτελεί ένα σχετικά μικρό φάσμα θερμοκρασιών.

γ) Αισθητήρας πίεσης / διακόπτης

Όπως έχουμε δηλώσει στον αρχικό σχεδιασμό, απαιτείται να γνωρίζει ο χρήστης πότε το καπάκι του κάδου απορριμμάτων μένει ανοιχτό. Για να επιτευχθεί αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας αισθητήρας πίεσης ή ένας αισθητήρας απόστασης. Ο αισθητήρας απόστασης μπορεί να μετρά σε τακτά χρονικά διαστήματα την απόσταση από το στόμιο του κάδου μέχρι το καπάκι, και εφόσον αυτή η απόσταση αυξηθεί θα στέλνει σήμα στο πληροφοριακό σύστημα ότι το καπάκι είναι ανοιχτό. Έχουν ήδη αναφερθεί ήδη οι τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Όσον αφορά τους αισθητήρες πίεσης, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν οι εξής κατηγορίες: μετρητής καταπόνησης (Strain gauge), πιεζοηλεκτρικός, χωρητικότητας και μανομετρικοί.

Οι **μετρητές καταπόνησης**, χρησιμοποιούν τις απτές αλλαγές στις διαστάσεις του ελατηρίου για τη μέτρηση της πίεσης. Οι αισθητήρες αυτοί διαθέτουν ένα ελατήριο που παραμορφώνεται καθώς του ασκείται δύναμη. Το υλικό και η δομή του ποικίλλει αναλογικά ως προς την ηλεκτρική του αντίσταση. Με τις αλλαγές πίεσης, οι διακυμάνσεις της αντίστασης και οι ενδείξεις τάσης λαμβάνονται ως ηλεκτρικά σήματα. Στη συνέχεια βαθμονομούνται σε ισοδύναμη ένδειξη πίεσης και εμφανίζονται από τον αισθητήρα. Είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος αισθητήρων λόγω της διαθεσιμότητας και της προσαρμοστικότητάς τους.

Οι **πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες** λειτουργούν χρησιμοποιώντας το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο. Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο περιγράφει τη δημιουργία ηλεκτρικού φορτίου ως απόκριση σε φυσικές αλλαγές στο υλικό. Αυτή η επίδραση είναι πιο εμφανής σε ορισμένα υλικά σε βαθμό που μπορεί να μετρηθεί. Το φορτίο που δημιουργείται είναι ανάλογο της ασκούμενης δύναμης. Ο αισθητήρας μπορεί να μετρήσει και να βαθμονομήσει τις αλλαγές στη φόρτιση και να εμφανίσει μια αντίστοιχη μέτρηση πίεσης. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες μπορούν να διατίθενται σε πολύ μικρά μεγέθη – καθιστώντας τους μια καλή επιλογή για εφαρμογές με περιορισμένο χώρο. Επιτρέπουν επίσης υψηλές συχνότητες κατά τη λήψη δεδομένων, το οποίο αποτελεί ένα ιδιαίτερο πλεονέκτημα για δυναμικές μετρήσεις που λαμβάνονται μεταξύ μικρών χρονικών διαστημάτων.

Οι **πυκνωτές** είναι συσκευές που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ηλεκτρικού φορτίου. Λειτουργούν έχοντας δύο αγωγούς που χωρίζονται από ένα στενό κενό μεταξύ τους. Ο αισθητήρας μπορεί να μετρήσει την χωρητικότητα μεταξύ των δύο πλακών. Η απόσταση μεταξύ των δύο πλακών καθορίζει τις τιμές χωρητικότητας, οι οποίες ποικίλλουν ανάλογα με την πίεση του περιβάλλοντος. Οι εφαρμογές των χωρητικών αισθητήρων πίεσης περιλαμβάνουν τη μέτρηση των αλλαγών πίεσης σε κινητήρες τζετ, ελαστικά αυτοκινήτων και άλλα σκάφη. Έχουν απλό μηχανικό σχεδιασμό που τους επιτρέπει να αντέχουν σε ιδιαίτερα περιβάλλοντα.

Τα **μανόμετρα** αποτελούνται από έναν σωλήνα που χρησιμοποιεί την κίνηση του υγρού για να συγκρίνει την πίεση που βιώνουν οι δύο επιφάνειές του. Τα πιο βασικά μανόμετρα έχουν σχήμα U με ένα υγρό μέσα που μετατοπίζεται από την διαφορά της πίεσης. Λόγω της βραδύτερης απόκρισής τους και του περιορισμένου εύρους πιέσεων, δεν είναι κατάλληλα για εφαρμογές δυναμικής ανίχνευσης πίεσης. Αποτελούν τις παλαιότερες συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για τη μέτρηση της πίεσης.

Αυτές είναι οι βασικές κατηγορίες που μπορούν να επιλεγθούν για την συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης. Για να μπορέσουν όμως να λειτουργήσουν αυτοί οι αισθητήρες θα πρέπει να γίνει και η κατάλληλη επιλογή της πλακέτας. Τα βασικά χαρακτηριστικά της πλακέτας θα πρέπει να είναι η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, η συνδεσιμότητα με τους αισθητήρες και το πληροφοριακό σύστημα, ο μικρός όγκος της λόγω του περιορισμένου χώρου και το χαμηλό κόστος ώστε να μπορεί να αντικατασταθεί εύκολα σε περίπτωση βλάβης ή βανδαλισμού.

5.5 Ανάπτυξη του έξυπνου κάδου

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε ένας έξυπνος κάδος από ανακυκλώσιμα υλικά, όπως φαίνεται το πρότυπο στην [Εικόνα 37](#), ο οποίος έχει



Εικόνα 37: Ο έξυπνος κάδος “smart bin”

κατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας στον Οργανισμό Βιομηχανικής Ιδιοκτησίας με αριθμό **1010266**. Ο συγκεκριμένος έξυπνος κάδος συμβάλει στην καλύτερη διαχείριση των ΑΣΑ μιας και διαθέτει αισθητήρα για την μέτρηση της πληρότητας του κάδου, αισθητήρα θερμοκρασίας και διακόπτης (κουμπί) τα οποία επικοινωνούν με ένα πληροφοριακό σύστημα το οποίο αναπτύχθηκε γι’ αυτό το σκοπό. Έτσι, ο χρήστης έχει σε πραγματικό χρόνο πληροφορίες σχετικά με την πληρότητα του κάδου, αν το καπάκι είναι ανοιχτό καθώς και την θερμοκρασία του εσωτερικού του κάδου σε περίπτωση πυρκαγιάς. Με αυτό λοιπόν τον τρόπο συλλέγουμε τις πληροφορίες ώστε να αντιμετωπιστούν τα εξής τρία προβλήματα που συχνά συναντώνται στις σύγχρονες κοινωνίες:

- Καλύτερη αποκομιδή των απορριμμάτων. Γνωρίζοντας την πληρότητα του κάθε κάδου ξεχωριστά, μπορούν να προσαρμοστούν οι διαδρομές των απορριμματοφόρων σε μια πόλη, ώστε να αποφευχθεί το πρόβλημα της υπερχειλίσης των απορριμμάτων αλλά και να μειωθούν τα καύσιμα των απορριμματοφόρων μιας και δεν θα χρειάζεται να αδειάζουν τόσο συχνά κάδους που δεν γεμίζουν. Έτσι, γίνεται οικονομία στα καύσιμα αλλά και προστατεύουμε το περιβάλλον μειώνοντας τους ρύπους.
- Προστασία της δημόσιας υγείας. Οι υπερχειλισμένοι κάδοι εγκυμονούν κινδύνους για τη δημόσια υγεία μιας και αποτελούν εστία μόλυνσης. Γνωρίζοντας λοιπόν πότε ο κάδος γεμίζει μπορεί ο χρήστης του συστήματος να επιλέξει πότε θα τον αδειάσει.

Επίσης, γνωρίζοντας ποιοι κάδοι έχουν ανοιχτό καπάκι, ο χρήστης μπορεί να αξιοποιήσει αυτή την πληροφορία, ώστε να τα κλείσει με φυσική παρουσία.

- Προστασία του κάδου και του περιβάλλοντος. Με τον αισθητήρα θερμοκρασίας ενημερώνεται ο χρήστης εάν κάποιος κάδος έχει πάρει φωτιά. Η καύση των σύμμεικτων απορριμμάτων απελευθερώνει στο περιβάλλον τοξικές ουσίες οι οποίες είναι βλαβερές. Εάν υπάρξει πρόληψη, ώστε να κατασβεστεί η φωτιά στην αρχή της τότε περιορίζεται και το πρόβλημα όπως επίσης, είναι πιθανόν να μην δημιουργηθεί και μεγάλη ζημιά στον ίδιο τον κάδο.

Ο σχεδιασμός του συστήματος έγινε με βάσει το Προσαρμοστικό Μοντέλο-Z στο οποίο έγινε ενδεδειγμένη ανάπτυξη στο Κεφάλαιο 4. Ένα σύστημα διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων χωρίζεται σε τρία διακριτά μέρη: α) το υλικό μέρος του συστήματος, β) το λογισμικό μέρος και γ) η συνδεσιμότητα μεταξύ των δύο μερών. Για τον επιτυχή σχεδιασμό και λειτουργία του συστήματος θα πρέπει να εκπληρώνονται οι πέντε άξονες που αναφέρθηκαν στην υποενότητα 5.4.

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής, και πιο συγκεκριμένα κατά τη μελέτη και κατασκευή του έξυπνου κάδου “smart bin”, εξετάστηκαν διάφορες προσεγγίσεις, τόσο ως προς το κατασκευαστικό και σχεδιαστικό τμήμα, όσο και ως προς το ηλεκτρονικό μέρος. Πραγματοποιήθηκε ενδεδειγμένη έρευνα στον τομέα της κατασκευής, της επιλογής των υλικών και στον τομέα της αντοχής, καθώς ένας κάδος οφείλει να πληροί τις προδιαγραφές που ορίζονται. Επιπλέον, ως προς τον ηλεκτρονικό τομέα, εξετάστηκαν διάφορα ενσωματωμένα συστήματα όπως Raspberry Pi, Arduino κ.α. καθώς και διάφορες μέθοδοι επικοινωνίας με το πληροφοριακό σύστημα όπως LoRa, Wi-Fi, GSM, Bluetooth κτλ. Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας με τις προαναφερθέντες τεχνολογίες, καθώς και η αναλυτική περιγραφή των πειραμάτων, είναι δημοσιευμένα σε επιστημονικά περιοδικά έγκριτων εκδοτικών οίκων και σε επιστημονικά συνέδρια με κριτές. Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται ο έξυπνος κάδος που έχει μελετηθεί ενδεδειγμένα στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, καθώς και τα αποτελέσματα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν. Η προσέγγιση που αναπτύχθηκε [137] αφορά την ανάπτυξη ενός έξυπνου κάδου που βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega328 και στο δίκτυο LoRa WAN.

Το σύστημα, σχήμα της [Εικόνας 38](#), αποτελείται από σταθμούς (nodes) οι οποίοι μπορούν να επικοινωνούν με κάποιον ενδιάμεσο σταθμό είτε απευθείας με το πληροφοριακό σύστημα το οποίο είναι εγκατεστημένο σε έναν διακομιστή (server). Οι σταθμοί στέλνουν τις μετρήσεις τους ανά συγκεκριμένα χρονικά ή όταν εκτελείται κάποιο

συμβάν, όπως για παράδειγμα όταν κλείνει το καπάκι του κάδου. Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης του συστήματος γνωρίζει σε τακτά χρονικά διαστήματα ή σε πραγματικό χρόνο την κατάσταση του κάδου. Με αυτό τον τρόπο και αναλόγως του αισθητήρες που έχουμε



Εικόνα 38: Σχεδιάγραμμα του έξυπνου κάδου

εγκαταστήσει στο σύστημα ελέγχονται οι κάδοι και προτείνονται καλύτεροι τρόποι διαχείρισης των απορριμμάτων. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για να συλλέξουμε χρήσιμα δεδομένα αφορούν την πληρότητα του κάδου, την θερμοκρασία, και τον έλεγχο αν το καπάκι μένει ανοιχτό. Κάθε σταθμός συλλέγει αυτές τις πληροφορίες και αποστέλλει τα δεδομένα στον κεντρικό διακομιστή (server) μέσω ενός ή περισσότερων πρωτοκόλλων εφόσον είναι απαραίτητο. Τα δεδομένα συλλέγονται στον διακομιστή σε μια βάση δεδομένων (database) όπου υπάρχει εγκατεστημένο ένα πληροφοριακό σύστημα και το οποίο αξιοποιεί κάποιον προβλεπτικό αλγόριθμο ώστε να προτείνονται οι βέλτιστες δυνατές λύσεις για την διαχείριση των απορριμμάτων και που αφορούν την δρομολόγηση των απορριμματοφόρων και την τοποθέτηση των κάδων. Τα δεδομένα που συλλέγονται, αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων. Όταν έχει οριστεί κάποιο επίπεδο ειδοποίησης ο χρήστης ενημερώνεται μέσω του πληροφοριακού συστήματος είτε μέσω της εφαρμογής για έξυπνα κινητά τηλέφωνα (smartphones) η οποία είναι συνδεδεμένη με το πληροφοριακό σύστημα και έχει αναπτυχθεί γι' αυτό το σκοπό, είτε με γραπτό μήνυμα στο κινητό τηλέφωνο (sms). Για την ενημέρωση μέσω της εφαρμογής (mobile app) απαιτείται η σύνδεση στο διαδίκτυο ενώ για την ενημέρωση μέσω γραπτού μηνύματος απαιτείται η σύνδεση στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας (GSM).

Ο κάθε σταθμός μπορεί να χρησιμοποιεί κάποιο ενσωματωμένο σύστημα που απλά μεταδίδει την πληροφορία στον διακομιστή ή σε άλλον σταθμό, αλλά μπορεί να χρησιμοποιεί και περισσότερο πολύπλοκα συστήματα τα οποία επεξεργάζονται την πληροφορία και στη συνέχεια την αποστέλλουν. Στην παρούσα υλοποίηση επιλέχθηκε να μεταφέρεται η πληροφορία σε κάποιον διακομιστή όπου τα δεδομένα που θα συλλεχθούν από τον διακομιστή και εφόσον το πλήθος της πληροφορίας είναι ικανοποιητικό, θα μπορούν να επεξεργαστούν ώστε να δώσει επιπλέον πληροφορίες στον χρήστη. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνουμε χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και χαμηλότερο κόστος εγκατάστασης ανά σταθμό. Η αρχιτεκτονική που ακολουθείται χωρίζεται σε τρία βασικά μέρη:

- 1) Στον σταθμό συλλογής πληροφοριών
- 2) Στο πληροφοριακό σύστημα που περιλαμβάνει τον προβλεπτικό αλγόριθμό και την εφαρμογή για έξυπνα κινητά τηλέφωνα και
- 3) Την συνδεσιμότητα των δύο συστημάτων (σταθμό – πληροφοριακό σύστημα). Αυτή η αρχιτεκτονική αποτελεί τον βασικό τρόπο επικοινωνίας μεταξύ του ενσωματωμένου και του πληροφοριακού συστήματος.

Το προτεινόμενο σύστημα ο οποίος έχει ένα μικροελεγκτή ATmega328, λειτουργεί με συχνότητα ρολογιού 16MHz σε 5V και έχει μια τυπική κατανάλωση ισχύος 40 έως 50 mA. Για το συγκεκριμένο σύστημα αυτός ο μικροελεγκτής είναι ιδανικός για τη συλλογή των μετρήσεων των αισθητήρων και την αποστολή τους στην πύλη LoRa που έχουμε επιλέξει. Η επιλογή αυτού του μικροελεγκτή έγινε λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, της χαμηλής τιμής και της κάλυψης των απαιτήσεων του συστήματος μιας και καλύπτει τις ελάχιστες αποδόσεις μνήμης και επεξεργαστή. Το Arduino είναι συνδεδεμένο με τους αισθητήρες που αναφέρθηκαν παραπάνω και συγκεκριμένα:

- Αισθητήρας υπερήχων (sonar)

Ο αισθητήρας υπερήχων μετρά την απόσταση εκπέμποντας ηχητικά κύματα υψηλής συχνότητας και καταγράφοντας το χρόνο που πέρασε από τη στιγμή της εκπομπής του ήχου και πριν την αντανάκλαση του στον μορφοτροπέα σήματος (transducer). Ο χρόνος που απαιτείται για να επιστρέψει η συγκεκριμένη συχνότητα στον μορφοτροπέα σήματος είναι γνωστός ως χρόνος μετ' επιστροφής και αποτελεί την συνολική απόσταση που διανύθηκε

από τον πομπό υπερήχων στο αντικείμενο και πίσω. Για τον προσδιορισμό της απόστασης από ένα αντικείμενο, ο αισθητήρας απόστασης υπερήχων πολλαπλασιάζει τον χρόνο μετ' επιστροφής με την ταχύτητα του ήχου – περίπου 344,12 μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s) σε συνθήκες ελεγχόμενου περιβάλλοντος – και μειώνει στο μισό τον υπολογισμό. Στο δικό μας σύστημα επιλέχθηκε ο αισθητήρας υπερήχων HC-SR04 που χαρακτηρίζεται από το χαμηλό κόστος, το μικρό του μέγεθος, την χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και την ικανοποιητική απόσταση που μπορεί να καλύψει και είναι από 2εκατοστά έως 400εκατοστά με ακρίβεια ενός εκατοστού. Με αυτά τα χαρακτηριστικά αποτελεί τον ιδανικό αισθητήρα απόστασης. Με αυτό τον τρόπο ο αισθητήρας υπερήχων μετρά την απόσταση που υπάρχει από το καπάκι μέχρι το ύψος των απορριμμάτων. Αυτή η πληροφορία αποστέλλεται στο πληροφοριακό σύστημα το οποίο εμφανίζει το ποσοστό πληρότητας του κάδου στον χρήστη του συστήματος.

- Αισθητήρας θερμοκρασίας

Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας μέσα στον κάδο απορριμμάτων, τοποθετήθηκε ένας αισθητήρας θερμοκρασίας και συγκεκριμένα ο DHT11, το οποίου το εύρος μέτρησης της θερμοκρασίας είναι από -55°C έως 125°C και η μέτρηση της ακρίβειας είναι $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Λειτουργεί με τάση από 3V έως 5V και έχει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας μέχρι 2.5mA. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας είναι συμβατός με τις περισσότερες πλακέτες όπως Arduino, Raspberry κτλ. Η τοποθέτηση του έχει ως σκοπό την προστασία του κάδου και του ίδιου του περιβάλλοντος σε περίπτωση πυρκαγιάς. Έτσι, σε περίπτωση που εκδηλωθεί πυρκαγιά στον κάδο το σύστημα θα στείλει ειδοποίηση άμεσα στον διαχειριστή του συστήματος ώστε να πράξει αναλόγως.

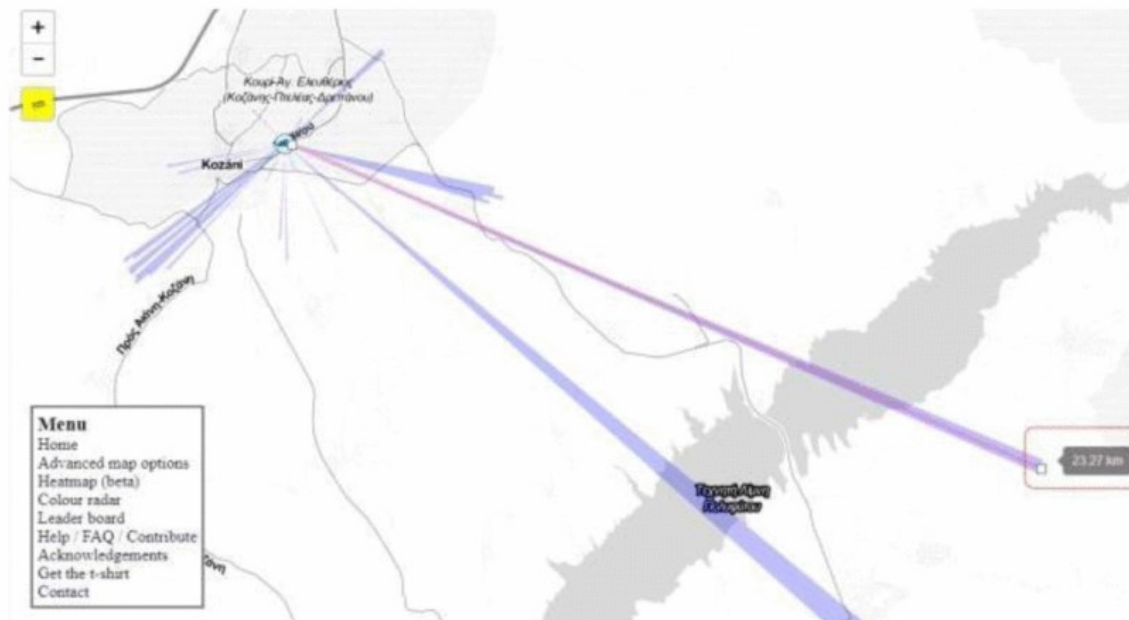
- Διακόπτης ενεργοποίησης

Στο σημείο που κλείνει το καπάκι του κάδου, υπάρχει ένας διακόπτης ενεργοποίησης. Έτσι, όταν το καπάκι ανοίγει και στη συνέχεια κλείνει, το σύστημα ενεργοποιείται και παίρνει την μέτρηση της πληρότητας μέσω του sonar και της θερμοκρασίας και τα στέλνει στο πληροφοριακό σύστημα που έχει αναπτυχθεί γι' αυτό το σκοπό.

- Συνδεσιμότητα με το διακομιστή

Για την συνδεσιμότητα με το διακομιστή που φιλοξενεί και το πληροφοριακό σύστημα επιλέχθηκε το δίκτυο LoRa WAN. Όπως είδαμε στο Κεφάλαιο 3, το δίκτυο LoRa διαθέτει χαμηλό ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων, 0.3 kbps με 11 kbps, ωστόσο ο δέκτης μπορεί να ανιχνεύσει πολλαπλές ταυτόχρονες εκπομπές από διαφορετικούς κόμβους, εκμεταλλευόμενος την ορθογωνικότητα των ακολουθιών που χρησιμοποιούνται από το συγκεκριμένο δίκτυο. Η συγκεκριμένη επιλογή έγινε επειδή το δίκτυο LoRa μπορεί να καλύψει μια περιοχή των 22χλμ [138] με έναν μόνο δέκτη, πράγμα που στην συγκεκριμένη υλοποίηση μειώνει το κόστος συνδεσιμότητας και καλύπτει μεγάλη γεωγραφική περιοχή με χαμηλή κατανάλωση ισχύος. Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, χρησιμοποιήσαμε το Libelium ως πομπό για την συνδεσιμότητα, το οποίο είναι συμβατό με τις πλακέτες Arduino [139].

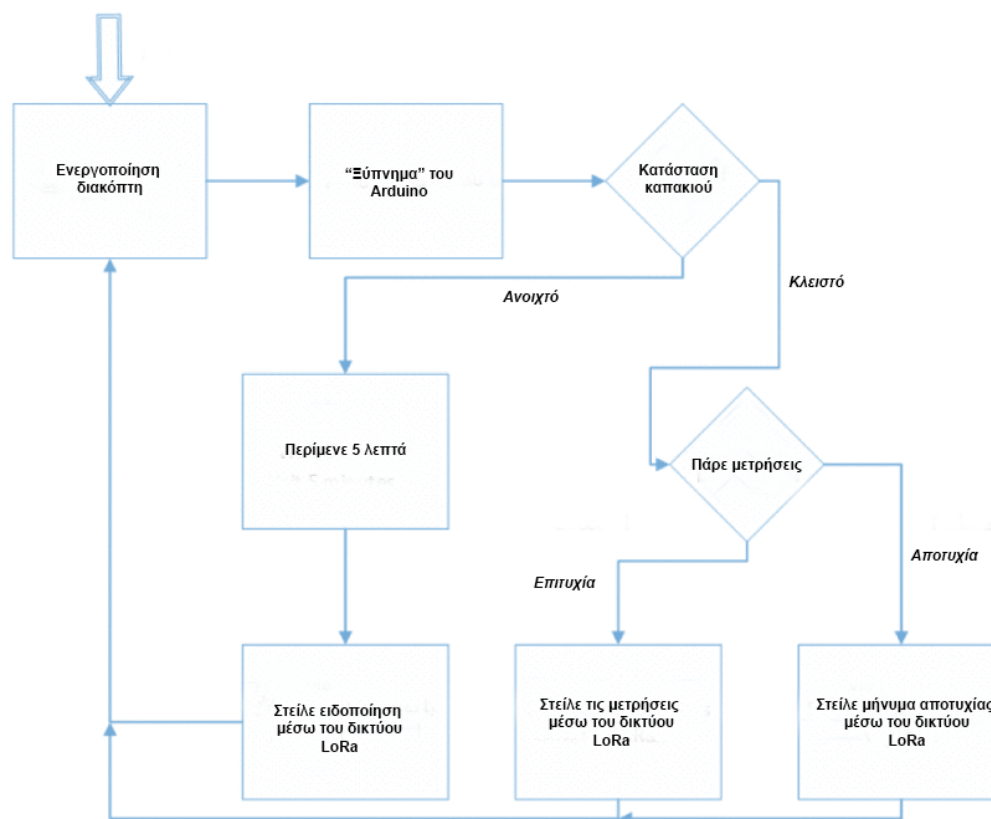
Από τις πειραματικές μετρήσεις που λάβαμε στην Κοζάνη, [Εικόνα 39](#), η μεγαλύτερη απόσταση κάλυψης ήταν 23,27 χλμ. πράγμα που επιβεβαιώνει την μεγάλη γεωγραφική κάλυψη που προσφέρει το δίκτυο LoRa.



Εικόνα 39: Μετρήσεις LoRa

Για την ολοκλήρωση του συστήματος χρησιμοποιήσαμε το περιβάλλον του Arduino IDE ώστε να γραφτεί ο κώδικας βάσει του διαγράμματος ροής που παρουσιάζεται στην [Εικόνα 40](#). Για την έναρξη του κώδικα απαιτείται η ενεργοποίηση του διακόπτη που

βρίσκεται στον κάδο. Μόλις απελευθερωθεί λοιπόν ο διακόπτης ξυπνά το Arduino που βρίσκεται σε κατάσταση «βαθύ ύπνου» (deep sleep). Εν συνεχεία ελέγχει την κατάσταση



Εικόνα 40: Διάγραμμα ροής smarbin

στην οποία βρίσκεται το καπάκι του κάδου. Εφόσον το καπάκι είναι κλειστό τότε παίρνει τις μετρήσεις από το Sonar και τον αισθητήρα θερμοκρασίας. Αν οι παρθούν επιτυχώς οι μετρήσεις, τότε τις στέλνει μέσω του δικτύου LoRa στο πληροφοριακό σύστημα, αν υπάρξει σφάλμα κατά τη μέτρηση στέλνει το μήνυμα αποτυχίας. Έτσι, ο διαχειριστής του συστήματος γνωρίζει την κατάσταση κάθε κάδου και μπορεί να κάνει διαφορετικές επιλογές δρομολογίων αποκομιδής των απορριμμάτων ή για παράδειγμα, να προσθέσει σε μια περιοχή περισσότερους κάδους. Αν όμως το καπάκι είναι ανοιχτό, περιμένει πέντε λεπτά και εφόσον ακόμη δεν έχει κλείσει το καπάκι στέλνει ειδοποίηση στο πληροφοριακό σύστημα πως το καπάκι του κάδου είναι ανοιχτό. Με αυτό τον τρόπο μπορεί ο διαχειριστής του συστήματος να γνωρίζει πότε το καπάκι κάποιου κάδου είναι ανοιχτό. Συμπερασματικά, ο έξυπνος κάδος που παρουσιάστηκε ενημερώνει σε πραγματικό χρόνο για την πληρότητα και την θερμοκρασία του κάθε κάδου σε πραγματικό χρόνο τους διαχειριστές του συστήματος. Οι μετρήσεις αποδείξανε πως το δίκτυο LoRa είναι αξιόπιστο και μπορεί να καλύψει μια ακτίνα πέραν των 22 χλμ.

5.6 Σχεδιασμός διαδρομής απορριμματοφόρων

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) είναι ένα ανερχόμενο ερευνητικό πεδίο που έχει προκαλέσει θετικό αντίκτυπο στον τρόπο διαχείρισης των επιχειρησιακών δραστηριοτήτων [140]. Έτσι, οι επιχειρήσεις αναπτύσσουν τις ικανότητες που απαιτούνται για τη διερεύνηση της χρήσης των τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών (ΤΠΕ). Αυτές ενισχύουν την υψηλότερη αποδοτικότητα και την καλύτερη αποτελεσματικότητα των λειτουργιών τους, ενώ παράλληλα ενισχύουν την προσαρμογή των οργανισμών στο σημερινό δυναμικό περιβάλλον [141]. Σε αυτό το σύνολο, υπάρχουν οι απαραίτητες προϋποθέσεις για την ανάπτυξη δυναμικών συστημάτων εμπειρογνομόνων ικανών να αξιοποιούν πληροφορίες πραγματικού χρόνου για την ενημέρωση των επιχειρήσεων και τη βελτίωση της λήψης αποφάσεων. Ένας από τους τομείς στους οποίους οι εν λόγω συνθήκες είναι απαραίτητο να διερευνηθούν είναι ο τομέας της διαχείρισης των απορριμμάτων, όπου θα πρέπει να αξιοποιούνται πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τη στάθμη πληρότητας των κάδων, οι οποίες παρέχονται από ογκομετρικούς αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι στους κάδους απορριμμάτων, όπως αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα. Αυτή η πρόσβαση σε πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις στάθμες πληρότητας των κάδων, εάν χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά από τους φορείς, θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτίωση της παραγωγικότητας. Αυτό θα έχει μεγάλο αντίκτυπο όχι μόνο για τους φορείς διαχείρισης ΑΣΑ, αλλά και στην ευημερία της κοινωνίας, καθώς η διαχείριση των αποβλήτων αποτελεί σημαντικό πρόβλημα στις παγκόσμιες οικονομίες σήμερα. Ο αστικός πληθυσμός και τα καταναλωτικά πρότυπα αυξάνονται, δημιουργώντας συνεχώς αυξανόμενα επίπεδα απορριμμάτων που πρέπει να συλλέγονται και να επεξεργάζονται. Ως παράδειγμα, κατά τη διάρκεια του 2015, στην Ευρώπη παρήχθησαν περίπου 477 κιλά αστικών απορριμμάτων ανά κάτοικο [142] που αντιστοιχούν σε τόνους απορριμμάτων που έπρεπε να συλλέγονται καθημερινά, γεγονός που συνεπάγεται καλύψεις φορτηγών συλλογής αρκετών χιλιομέτρων με επακόλουθες χιλιάδες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που θα πρέπει να ελαχιστοποιηθούν.

Οι εταιρείες συλλογής απορριμμάτων αντιμετωπίζουν, καθημερινά, κατά τη λειτουργία τους, υψηλό κόστος μεταφοράς και, κυρίως, υψηλή ανεπαρκή χρήση των πόρων τους, καθώς τα απορριμματοφόρα συχνά επισκέπτονται κάδους απορριμμάτων που είναι μερικώς γεμάτοι. Η ποσότητα των αστικών στερεών αποβλήτων είναι εξαιρετικά μεταβλητή και η συσσώρευση αυτών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Κατά συνέπεια, είναι δύσκολο να προβλεφθούν τα επίπεδα πληρότητας των κάδων. Από

δημοσιευμένα στοιχεία σχετικά με μια Πορτογαλική εταιρεία συλλογής απορριμμάτων, παρατηρήθηκε ότι μέσα σε μια περίοδο έξι μηνών, μόνο το 40% των κάδων συλλέχθηκαν με επίπεδο πληρότητας άνω του 75% [143]. Αυτή είναι, δυστυχώς, μια συνηθισμένη κατάσταση στα συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, θα πρέπει να λειτουργήσουν αποτελεσματικά συστήματα συλλογής απορριμμάτων, όπου ο ρόλος των επιτόπιων συστημάτων εμπειρογνομόνων θα μπορούσε να αποτελέσει σημαντικό ακρογωνιαίο λίθο που θα βοηθούσε στον καθορισμό των βέλτιστων διαδικασιών επιχειρησιακής διαχείρισης.

Στο πλαίσιο αυτό, η πρόσβαση στο επίπεδο πλήρωσης των κάδων σε πραγματικό χρόνο, μέσω συστημάτων παρακολούθησης, αναδεικνύεται ως ένας δρόμος προς διερεύνηση, καθώς αυτό θα επιτρέψει τη μείωση της αβεβαιότητας της ζήτησης, όπως της ποσότητας του πραγματικού επιπέδου απορριμμάτων στους κάδους. Ωστόσο, η πρόσβαση σε αυτά τα δεδομένα δεν είναι επαρκής, και για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα μιας επιχείρησης συλλογής απορριμμάτων, τα δεδομένα αυτά θα πρέπει επίσης να χρησιμοποιούνται αναλόγως για τη βελτιστοποίηση των διαδρομών αποκομιδής. Συνεπώς, θα πρέπει να επιδιωχθεί η ανάπτυξη μοντέλων δρομολόγησης που θα διερευνούν τις πληροφορίες που παρέχουν οι τεχνολογίες παρακολούθησης. Όπως αναφέρεται [144], οι σύγχρονες συσκευές ιχνηλασιμότητας, όπως για παράδειγμα οι αισθητήρες ογκομέτρησης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόκτηση πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο που θα πρέπει να επιτρέπουν τη βελτιστοποίηση του σχεδίου διαδρομής, ελαχιστοποιώντας την καλυπτόμενη απόσταση, καθώς και τον αριθμό των οχημάτων που απαιτούνται για τη συλλογή. Συμπερασματικά, θα πρέπει να περάσουμε από την παραδοσιακή λειτουργία συλλογής απορριμμάτων που βασίζεται στη λεγόμενη "τυφλή αποκομιδή", σε μια δυναμική λειτουργία. Στην πρώτη περίπτωση, οι κάδοι αδειάζονται χωρίς προηγούμενη γνώση του πραγματικού επιπέδου πληρότητας τους μέσω προκαθορισμένων και στατικών διαδρομών, δηλαδή επαναλαμβάνεται η ίδια διαδρομή για ένα δεδομένο χρονικό διάστημα, ενώ στη δεύτερη περίπτωση υπάρχει πρόσβαση σε πληροφορίες σχετικά με το πραγματικό επίπεδο πληρότητας των κάδων και αναλαμβάνεται ο καθορισμός δυναμικών διαδρομών, και έτσι ορίζεται μια "έξυπνη αποκομιδή" η οποία, όπως αναφέρουν οι Mamun et al. [145] μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του κόστους της όλης λειτουργίας.

5.5.1 Προβλήματα δρομολόγησης

Το πρόβλημα της δρομολόγησης κατά την αποκομιδή απορριμμάτων (Waste Collection Routing Problem - WCRP) εισήχθη για πρώτη φορά από τους Beltrami και

Bodin [146] όπου εφάρμοσαν μια επέκταση του ευρετικού αλγορίθμου των Clarke και Wright [147] για την αντιμετώπιση της αποκομιδής απορριμμάτων στη Νέα Υόρκη. Στο πρόβλημα WCRP θεωρούμε δεδομένο πως υφίσταται μια ενιαία αποθήκη, ένα σύνολο ομοιογενών ή ετερογενών οχημάτων (απορριματοφόρων), ένας καθορισμένος χρόνος παροχής υπηρεσίας, πολλαπλοί χώροι απόρριψης και ένα σύνολο κάδων που αντιπροσωπεύονται από κόμβους με γνωστές τοποθεσίες. Οι κύριοι περιορισμοί είναι η χωρητικότητα των οχημάτων και η δυναμικότητα της διαδρομής. Μόλις το σύνολο των αποβλήτων που συλλέγονται από ένα όχημα φθάσει τη μέγιστη χωρητικότητά του, πρέπει να κατευθυνθεί αμέσως στον χώρο απόρριψης. Η χωρητικότητα της διαδρομής καθορίζει τη συνολική ποσότητα απορριμμάτων που μπορεί να συλλεχθεί από μια δεδομένη διαδρομή ή τον μέγιστο αριθμό διαδρομών που μπορεί να πραγματοποιήσει ένας οδηγός πριν επιστρέψει στην αποθήκη μετά την απόρριψη των απορριμμάτων. Αυτοί οι περιορισμοί υποδεικνύουν ότι μπορεί να απαιτούνται δύο ή περισσότερα οχήματα για την εκφόρτωση ενός και μόνο κάδου.

Οι βασικοί στόχοι του κλασικού προβλήματος WCRP είναι οι εξής:

- Ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού οχημάτων ή δρομολογίων.
- Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, δηλαδή της συνολικής απόστασης ή του συνολικού χρόνου διαδρομής.

Γενικά, το πρόβλημα της συλλογής απορριμμάτων διατυπώνεται με δύο διαφορετικούς τρόπους με βάση τον τύπο του αστικού περιβάλλοντος, δηλαδή ένα «πρόβλημα τόξου» και ένα «πρόβλημα κόμβου» [148]. Όταν διατυπώνεται ως πρόβλημα τόξου, τα απορρίμματα συσσωρεύονται κατά μήκος του δρόμου (αστικό δίκτυο) και το όχημα πρέπει να επισκεφθεί τον δρόμο για να εκτελέσει τη συλλογή, για παράδειγμα, το πρόβλημα δρομολόγησης χωρητικού τόξου (Capacitated Arc Routing Problem - CARP) και οι παραλλαγές του. Όταν διατυπώνεται ως πρόβλημα κόμβου, τα απόβλητα συσσωρεύονται σε γειτονικές θέσεις απόρριψης, συνήθως σε αγροτικές περιοχές, και το όχημα εκτελεί τη συλλογή σε τέτοιες καθορισμένες θέσεις, για παράδειγμα, το πρόβλημα δρομολόγησης χωρητικού οχήματος (Capacitated Vehicle Routing Problem - CVRP).

5.5.2 Πρόβλημα δρομολόγησης συλλογής απορριμμάτων

Ενώ το μοντέλο [149]WCRP έχει χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του προβλήματος συλλογής απορριμμάτων και η επέκτασή του (Waste Collection Vehicle Routing Problem - WCVRP) έχει εφαρμοστεί ευρέως για την επίλυση μελετών πραγματικών περιπτώσεων στον ίδιο τομέα.

Οι Hauge et al. [150] εφάρμοσαν το Tabu Search (TS) βασισμένο στην ευρετική παραγωγή στηλών (Hybrid CG heuristic) για την επίλυση της δρομολόγησης Roll-on-roll-off (RORO) για την αποκομιδή βιομηχανικών απορριμμάτων. Στο RORO, ένας ομοιογενής στόλος οχημάτων συλλέγει απορρίμματα χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τύπους εμπορευματοκιβωτίων όπου τα μεγέθη των οχημάτων είναι τα ίδια, αλλά το μέγεθος των εμπορευματοκιβωτίων ποικίλλει. Κάθε όχημα μπορεί να μεταφέρει έως και οκτώ δοχεία ταυτόχρονα. Στο RORO, κάθε όχημα θα αναχωρεί από το αμαξοστάσιο για να συλλέξει τα απορρίμματα (εμπορευματοκιβώτιο) από ένα υποσύνολο πελατών όταν η στάθμη των εμπορευματοκιβωτίων φτάσει σε ένα ορισμένο επίπεδο για παράδοση στις χωματερές, ενώ άλλα οχήματα παραδίδουν ένα άδειο ανταλλακτικό εμπορευματοκιβώτιο σε κάθε πελάτη. Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου, πραγματοποιήθηκε δοκιμή σε εννέα σύνολα δεδομένων, τέσσερα από τα οποία προέρχονται από δεδομένα σε πραγματικές συνθήκες και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με το αποτέλεσμα που προέκυψε από έναν εμπορικό επιλυτή, δηλαδή έναν επιλυτή που κατασκευάστηκε καθαρά με την εφαρμογή ευρετικών μεθόδων. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι η Hybrid CG heuristic υπερέβη τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον εμπορικό επιλυτή μειώνοντας την αντικειμενική συνάρτηση μεταξύ 8% και 22% με χρονικό όριο 1 ώρα. Εκτός αυτού, η μέθοδος αυτή υπερείχε του εμπορικού επιλυτή μειώνοντας την αντικειμενική συνάρτηση μεταξύ 11% και 27% με χρονικό όριο 5 λεπτών.

Η ερευνητική εργασία [151] προτείνει την επίλυση του WCRP μέσω ενός συνδυασμού Chaotic Particle Swarm Optimization (CPSO) - ενός συνδυασμού του εκτεταμένου PSO και του Arc-GIS. Ο συγγραφέας ξεκινά με την απόκτηση της συντομότερης διαδρομής εστιάζοντας μόνο στην ελαχιστοποίηση της απόστασης, χωρίς να λαμβάνει υπόψη άλλους περιορισμούς χρησιμοποιώντας το λογισμικό Arc-GIS. Στη συνέχεια, το CPSO χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λύσης, με την επιφύλαξη περιορισμών όπως η σταθερή χωρητικότητα του οχήματος ή η υποχρέωση επίσκεψης του τόπου συλλογής τουλάχιστον μία φορά. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε για τη

μεγιστοποίηση του συνόλου των συλλεχθέντων αστικών στερεών απορριμμάτων από ένα πραγματικό σύνολο δεδομένων στο Danang του Βιετνάμ και το αποτέλεσμα που προέκυψε έδειξε βελτίωση του συνόλου των συλλεχθέντων απορριμμάτων (10.933.537 κιλά) σε σύγκριση με την τρέχουσα πρακτική (10.166.382 κιλά), αλλά απαιτούσε μεγαλύτερη απόσταση ταξιδιού και υψηλότερο χρόνο λειτουργίας: 3436 χλμ και 7,5 ώρες έναντι 2958χλμ και 6,3 ώρες. Αυτή η αντιστάθμιση μεταξύ των στόχων πρέπει να αιτιολογηθεί περαιτέρω, δεδομένου ότι η βελτίωση του συνόλου των συλλεγόμενων απορριμμάτων είναι μόνο 7,5%- ωστόσο, υπάρχει αύξηση τόσο της απόστασης ταξιδιού (16,15%), όσο και του χρόνου ταξιδιού (19,04%).

Οι Xue και Cao [152] χρησιμοποίησαν την έννοια της βελτιστοποίησης του Pareto για να προτείνουν έναν αλγόριθμο Ant Colony Optimization (ACO) για την επίλυση ενός του προβλήματος συλλογής στερεών αποβλήτων στη Σιγκαπούρη με πολλαπλούς στόχους, συμπεριλαμβανομένων της ελαχιστοποίησης του συνολικού χρόνου διαδρομής, των ποσοστών ατυχημάτων και της έκθεσης του πληθυσμού. Ο συνολικός χρόνος διαδρομής προέκυψε από τον υπολογισμό του χρόνου διαδρομής μεταξύ των κόμβων. Το ποσοστό ατυχημάτων ορίζεται μετά τον προσδιορισμό του κατά πόσον η διαδρομή περιλαμβάνει δρόμους με υψηλό κίνδυνο ατυχημάτων. Τέλος, η έκθεση του πληθυσμού βασίζεται στον πίνακα των εικονοστοιχείων που αντιπροσωπεύει τις κατοικημένες και εμπορικές περιοχές με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του αριθμού των εικονοστοιχείων.

Στην δική μας λύση [153] χρησιμοποιούμε το API (Application Programming Interface) του Google-Map με το οποίο βρίσκουμε την διαδρομή για κάθε κάδο. Οι διαδρομές που βρέθηκαν τοποθετούνται σε ένα γράφημα πολλαπλών κόμβων σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$D_{total} = \{D_1 + D_2 +, \dots, + D_i\} \quad (3)$$

όπου D_{total} είναι το σύνολο των διαδρομών D_i . Στη συνέχεια αξιοποιούμε τον αλγόριθμο του Dijkstra [154], ώστε να βρούμε τη διαδρομή που έχει τις απαιτούμενες ιδιότητες όπως: ελάχιστη απόσταση, συντομότερος χρόνος και μικρότερη κατανάλωση καυσίμου. Τέλος, υπολογίζουμε κάθε διαδρομή σε πραγματικό χρόνο. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτού του τρόπου επιλογής είναι ότι μπορούμε να προσαρμόσουμε περαιτέρω την τελική διαδρομή επιλέγοντας συγκεκριμένους κάδους για αποκομιδή. Για παράδειγμα, εάν για κάποιο λόγο ο αριθμός των διαθέσιμων απορριμματοφόρων είναι περιορισμένος, μπορούμε να ρυθμίσουμε το σύστημα να συλλέγει μόνο τους πλήρεις κάδους και να παραλείψει τους υπόλοιπους. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε συγκεκριμένες περιόδους, όπου συνήθως εμφανίζονται τα περισσότερα προβλήματα.

5.5.3 Πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων συλλογής απορριμμάτων

Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων συλλογής απορριμμάτων (WCVRP - Waste Collection Vehicle Routing Problem) διαφέρει από το κλασικό πρόβλημα δρομολόγησης συλλογής απορριμμάτων (WCRP - Waste Collection Routing Problem) επειδή κάθε κόμβος ή πελάτης στο WCVRP πρέπει να έχει επισκεφθεί μία φορά. Από την άλλη πλευρά, η ομοιότητα μεταξύ αυτών των δύο εκδοχών είναι ότι ένα όχημα πρέπει να μεταφέρει τα απορρίμματα στους χώρους εναπόθεσης πριν επιστρέψει στην στον χώρο στάθμευσης.

Το WCVRP έχει εφαρμοστεί με επιτυχία για την επίλυση προβλημάτων σε πραγματικές συνθήκες, [Εικόνα 41](#). Στην παρούσα ενότητα γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση των εφαρμογών δρομολόγησης οχημάτων (Vehicle Routing Problem -VRP) για την επίλυση του προβλήματος συλλογής απορριμμάτων. Το μοντέλο που εφαρμόστηκε από τους Gómez et al. [155] για την επίλυση ενός διπλού αντικειμενικού προβλήματος συλλογής απορριμμάτων, το οποίο όχι μόνο ελαχιστοποιεί το κόστος μεταφοράς αλλά και μεγιστοποιεί το επίπεδο εξυπηρέτησης. Τέσσερις τελεστές τοπικής αναζήτησης χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία βελτίωσης, συγκεκριμένα οι τελεστές Or-exchange, Generalized Or-exchange για τη βελτίωση της γειτονιάς μεταξύ των διαδρομών, CROSS και Insertion για τη βελτίωση των διαδρομών. Η προτεινόμενη μέθοδος δοκιμάστηκε σε 4 πραγματικές περιπτώσεις, 20 τεχνητές περιπτώσεις που δημιουργήθηκαν χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους με τις πραγματικές περιπτώσεις και 4 συνδυαστικές περιπτώσεις. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος TS που χρησιμοποιεί το πλαίσιο Multiobjective Adaptive Memory Programming (MOAMP) υπερτερεί του Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) τόσο σε πραγματικές όσο και σε τεχνητές περιπτώσεις, καθώς και της τρέχουσας διαδρομής που προτείνεται από τις τοπικές αρχές. Και οι δύο αλγόριθμοι εκτελέστηκαν υπό πανομοιότυπες προδιαγραφές υπολογιστή. Από τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε ότι ο MOAMP υπερέβη τον NSGA-II και στις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις κατά 13,96% και 43,61% (κατά μέσο όρο από τέσσερα μεγέθη προβλημάτων).



Εικόνα 41: Δρομολόγιο απορριμματοφόρου με την βοήθεια των έξυπνων κάδων

Οι Farrokhi-Asl et al. [156] πρότειναν τον NSGA-II και τη βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων πολλαπλών στόχων (Multiple Objective Particle Swarm Optimization - MOPSO) για την επίλυση του προβλήματος συλλογής απορριμμάτων. Η απόδοση των προτεινόμενων αλγορίθμων συγκρίθηκε χρησιμοποιώντας την ποσότητα των μη κυριαρχούμενων λύσεων που παρήγαγε κάθε αλγόριθμος, ενώ ο πίνακας αποστάσεων χρησιμοποιήθηκε για να αξιολογηθεί αν οι λύσεις ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένες ή όχι. Η απόδοση αξιολογήθηκε με τη χρήση 10 διαφορετικών τύπων δοκιμών. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, όσον αφορά την ποσότητα των μη κυριαρχούμενων λύσεων και τον πίνακα διαφοροποίησης, ο NSGA-II υπερτερεί του MOPSO κατά 54,08% και 12,03% αντίστοιχα. Ο πίνακας διασποράς ένα υποδεικνύει ότι η NSGA-II είναι πιο ομοιόμορφα κατανεμημένη όσον αφορά τις μη κυριαρχούμενες λύσεις. Επιπλέον, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η NSGA-II υπερτερεί της MOPSO και στις τρεις μετρήσεις επιδόσεων.

Οι Hannan et al. [157] πρότειναν την εφαρμογή της βελτιστοποίησης σμήνους για την επίλυση της χωρητικότητας στη δρομολόγηση οχημάτων συλλογής απορριμμάτων (WCVRP) για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους. Οι συγγραφείς υπέθεσαν ότι όλα τα οχήματα και οι κάδοι είναι ομοιογενείς. Η ποιότητα της λύσης βελτιώνεται με την εφαρμογή ενός τελεστή τοπικής αναζήτησης για τη βελτίωση τόσο μεταξύ των διαδρομών όσο και εντός των διαδρομών. Προκειμένου να επικυρωθεί η απόδοσή του, ο

προτεινόμενος αλγόριθμος συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από προηγούμενες μελέτες που έλυσαν το ίδιο πρόβλημα, όπως οι Wang et al. [158] που πρότειναν την εφαρμογή GA, οι Chen et al. [159] που εφάρμοσαν έναν συνδυασμό διακριτής βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και προσομοιωμένης, οι Kuo et al. [160] που χρησιμοποίησαν υβριδικό PSO και GA, και οι Akhtar et al. [161] που εφάρμοσαν τον αλγόριθμο αναζήτησης backtracking (BSA) στις ίδιες περιπτώσεις αναφοράς. Η προτεινόμενη μέθοδος πέτυχε βέλτιστα αποτελέσματα σε τέσσερα από τα έξι σύνολα δεδομένων, ενώ οι Wang et al. πέτυχαν ένα, οι Chen et al. πέτυχαν τρία και οι Akhtar et al. πέτυχαν δύο. Σε γενικές γραμμές, ο προτεινόμενος αλγόριθμος υπερτερεί των άλλων προσεγγίσεων σε μικρές περιπτώσεις, ενώ σε μεγάλες περιπτώσεις υπάρχουν κενά 1,25% και 1,46% σε σύγκριση με τους Chen et al., των οποίων η λύση εξακολουθεί να είναι η καλύτερη.

Ένας αλγόριθμος επαναλαμβανόμενης τοπικής αναζήτησης (Iterative Local Search - ILS) προτάθηκε από τους Campos και Arroyo [162] για την επίλυση του WCVRP με χρονικά παράθυρα (WCVRPTW). Η αρχική λύση κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας έναν άπληστο αλγόριθμο αναθέτοντας ένα όχημα στον πλησιέστερο πελάτη με τον μικρότερο χρόνο αναμονής. Στη συνέχεια, η λύση βελτιώνεται με την εφαρμογή του αλγορίθμου καθόδου μεταβλητής γειτονιάς (VND). Επιλέχθηκαν περιπτώσεις αναφοράς WCVPR από τους Kim et al. [163] για να ελεγχθεί η απόδοση της προτεινόμενης μεθόδου. Οι λύσεις συγκρίθηκαν με εκείνες που προέκυψαν μετά την εφαρμογή του Variable Neighborhood Tabu Search (VNTS) και φάνηκε ότι ο ILS-VND υπερτερεί του VNTS όσον αφορά το μέσο συνολικό κόστος κατά 5,97% και τον μέσο χρόνο CPU κατά 99,97%. Από την άλλη πλευρά, όταν δοκιμάστηκε στις μικρές περιπτώσεις, το ILS-VND έλαβε μέσο χρόνο CPU 0,01 δευτερόλεπτα και μέσο συνολικό κόστος 73,33, ενώ στο CPLEX ο μέσος χρόνος CPU είναι 1472 δευτερόλεπτα και το μέσο συνολικό κόστος 66,41. Συμπεραίνεται ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος ILS-VND είναι ανταγωνιστικός, παρόλο που η διαφορά συνολικού κόστους από τον επιλυτή CPLEX είναι 10,42%, αλλά η βελτίωση στον υπολογιστικό χρόνο είναι τεράστια.

Μια παραλλαγή της αποκομιδής απορριμμάτων, δηλαδή το WCVRPTW με πολλαπλές θέσεις απόρριψης επιλύθηκε από τους Yaakoubi et al. [164] εφαρμόζοντας την ευρετική προσέγγιση cluster first route second που αποτελείται από έναν αλγόριθμο K-means και μια εκτεταμένη ευρετική αποταμίευσης. Ο αλγόριθμος K-means εφαρμόστηκε για τη διαδικασία ομαδοποίησης και η εκτεταμένη εξοικονόμηση χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία δρομολόγησης. Ο ευρετικός τρόπος εξοικονόμησης συμπεριλαμβανομένου του

χρόνου αναμονής (αλγόριθμος 1) και ο ευρετικός τρόπος εξοικονόμησης χωρίς χρόνο αναμονής (αλγόριθμος 2) εφαρμόστηκαν σε ένα σύνολο δεδομένων πραγματικού κόσμου. Όσον αφορά τον αριθμό των οχημάτων, ο αλγόριθμος 1 έλαβε 15 οχήματα (συνολικός μέσος όρος 5 ημερών) και ο αλγόριθμος 2 έλαβε 16,2 οχήματα, ενώ η τρέχουσα πρακτική απαιτούσε 13 οχήματα κατά μέσο όρο. Όσον αφορά τον συνολικό χρόνο (δευτερεύων στόχος), ο αλγόριθμος 1 έλαβε 347,82 μονάδες χρόνου (συνολικά για 5 ημέρες) και ο αλγόριθμος 2 έλαβε 347,39 μονάδες χρόνου (συνολικά για 5 ημέρες). Γενικά, λαμβάνοντας τον συνολικό χρόνο ως δευτερεύοντα στόχο, και οι δύο αλγόριθμοι έχουν την ίδια απόδοση. Ωστόσο, λαμβάνοντας το σύνολο των οχημάτων ως πρωταρχικό στόχο, ο αλγόριθμος 1 υπερτερεί του αλγορίθμου 2. Επομένως, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος 1 που λαμβάνει υπόψη τόσο τον χρόνο αναμονής όσο και τα χρονικά παράθυρα υπερτερεί του αλγορίθμου 2, αλλά αποτυγχάνει να βελτιώσει την τρέχουσα πρακτική.

5.6 Πληροφοριακά συστήματα

Οι διαδικτυακές πλατφόρμες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον κλάδο της ανακύκλωσης, καθώς παρέχουν σε άτομα και οργανισμούς πρόσβαση σε πληροφορίες, πόρους και εργαλεία που μπορούν να συμβάλουν στην προώθηση και τη διευκόλυνση της διαδικασίας της ανακύκλωσης. Στην ακόλουθη ενότητα θα εξεταστούν οι διάφορες κατηγορίες διαδικτυακών πλατφορμών που χρησιμοποιούνται στον κλάδο της ανακύκλωσης, καθώς και ορισμένες από τις βασικές τεχνολογίες και χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη αυτών των πλατφορμών.

Η πρώτη κατηγορία διαδικτυακών πλατφορμών που χρησιμοποιούνται στον κλάδο της ανακύκλωσης είναι τα συστήματα διαχείρισης περιεχομένου (Content Management System - CMS). Αυτές οι πλατφόρμες έχουν σχεδιαστεί για να διευκολύνουν τους μη τεχνικούς χρήστες να δημιουργούν και να διαχειρίζονται ιστότοπους και χρησιμοποιούνται συχνά από οργανισμούς ανακύκλωσης για την παροχή πληροφοριών σχετικά με προγράμματα και υπηρεσίες ανακύκλωσης. Παραδείγματα πλατφορμών CMS που χρησιμοποιούνται στον κλάδο της ανακύκλωσης περιλαμβάνουν το WordPress και το Joomla, τα οποία αποτελούν δημοφιλείς επιλογές για τη δημιουργία και τη διαχείριση ιστότοπων λόγω της ευκολίας χρήσης και της ευελιξίας τους.

Μια άλλη κατηγορία διαδικτυακών πλατφορμών που χρησιμοποιούνται στον κλάδο της ανακύκλωσης είναι οι πλατφόρμες ηλεκτρονικού εμπορίου. Αυτές οι πλατφόρμες έχουν σχεδιαστεί ειδικά για διαδικτυακές επιχειρήσεις και επιτρέπουν στους εμπόρους να

πωλούν προϊόντα και υπηρεσίες στο διαδίκτυο. Στον κλάδο της ανακύκλωσης, οι πλατφόρμες ηλεκτρονικού εμπορίου χρησιμοποιούνται συχνά για την πώληση ανακυκλωμένων προϊόντων και υλικών, όπως χαρτί, πλαστικό και μέταλλο. Παραδείγματα πλατφορμών ηλεκτρονικού εμπορίου που χρησιμοποιούνται στον κλάδο της ανακύκλωσης περιλαμβάνουν το Shopify και το Magento, τα οποία παρέχουν ισχυρά χαρακτηριστικά και εργαλεία για τη διαχείριση και την εμπορία προϊόντων και υπηρεσιών στο διαδίκτυο.

Οι πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης χρησιμοποιούνται επίσης συνήθως στον κλάδο της ανακύκλωσης. Αυτές οι πλατφόρμες επιτρέπουν στους χρήστες να συνδέονται με άλλους και να μοιράζονται πληροφορίες σχετικά με προγράμματα, υπηρεσίες και πρωτοβουλίες ανακύκλωσης. Παραδείγματα πλατφορμών κοινωνικής δικτύωσης που χρησιμοποιούνται στον κλάδο της ανακύκλωσης περιλαμβάνουν το Facebook και το Twitter, τα οποία παρέχουν ένα μέσο σε άτομα και οργανισμούς για να συνεργαστούν με ένα ευρύ κοινό και να ενισχύσουν την υποστήριξη των προσπάθειών ανακύκλωσης.

Πλαίσια εφαρμογών ιστού χρησιμοποιούνται επίσης στον κλάδο της ανακύκλωσης, καθώς παρέχουν μια δομή για τη δημιουργία εφαρμογών ιστού που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη των προσπαθειών ανακύκλωσης. Παραδείγματα πλαισίων εφαρμογών ιστού που χρησιμοποιούνται στον κλάδο της ανακύκλωσης περιλαμβάνουν το Ruby on Rails, το Django και το Express.js, τα οποία παρέχουν ενσωματωμένα χαρακτηριστικά όπως η πιστοποίηση ταυτότητας, η ενσωμάτωση βάσεων δεδομένων και η επικύρωση φορμών. Αυτά τα πλαίσια χρησιμοποιούνται συχνά για τη δημιουργία διαδικτυακών εφαρμογών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση και τη διαχείριση προγραμμάτων ανακύκλωσης, όπως η παρακολούθηση της ποσότητας ανακυκλώσιμων υλικών που συλλέγονται και επεξεργάζονται.

Εκτός από αυτές τις κατηγορίες διαδικτυακών πλατφορμών, υπάρχουν αρκετές βασικές τεχνολογίες και χαρακτηριστικά που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη του κλάδου της ανακύκλωσης. Για παράδειγμα, η τεχνολογία των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (Geographic Information System - GIS) χρησιμοποιείται συχνά για τη δημιουργία διαδραστικών χαρτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό εγκαταστάσεων και πόρων ανακύκλωσης. Επιπλέον, εργαλεία οπτικοποίησης δεδομένων, όπως διαγράμματα και γραφήματα, χρησιμοποιούνται συχνά για την προβολή δεδομένων σχετικά με προγράμματα και υπηρεσίες ανακύκλωσης σε εύληπτη μορφή.

Συμπερασματικά σε αυτό το κεφάλαιο, έγινε σαφές ότι οι διαδικτυακές πλατφόρμες διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στον κλάδο της ανακύκλωσης, καθώς παρέχουν ένα μέσο για άτομα και οργανισμούς να έχουν πρόσβαση σε πληροφορίες, πόρους και εργαλεία που

μπορούν να βοηθήσουν στην προώθηση και διευκόλυνση των προσπάθειών ανακύκλωσης. Από συστήματα διαχείρισης περιεχομένου έως πλατφόρμες ηλεκτρονικού εμπορίου, πλαίσια εφαρμογών ιστού και πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης, ο κλάδος της ανακύκλωσης αξιοποιεί μια ποικιλία διαδικτυακών πλατφορμών για την επίτευξη των στόχων του. Επιπλέον, τεχνολογίες όπως τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών και τα εργαλεία οπτικοποίησης δεδομένων χρησιμοποιούνται επίσης για την υποστήριξη του κλάδου της ανακύκλωσης, παρέχοντας διαδραστικές και πλούσιες σε δεδομένα εμπειρίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αξιοποίηση των ενσωματωμένων συστημάτων στην ανακύκλωση υλικών

6.1 Εισαγωγή στην Ανακύκλωση υλικών

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, η ανακύκλωση είναι ιδιαίτερα σημαντική για την κοινωνία μας, καθώς συμβάλλει στη διατήρηση των πόρων και στη μείωση των αποβλήτων. Η διαδικασία της ανακύκλωσης, δηλαδή της μετατροπής υλικών σε νέα προϊόντα δεν ωφελεί μόνο το περιβάλλον, αλλά και την οικονομία και τον πολιτισμό μας γενικότερα [165]. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα διερευνήσουμε την αξιοποίηση των ενσωματωμένων συστημάτων στον τομέα της ανακύκλωσης. Θα εξετάσουμε, επίσης, την τρέχουσα κατάσταση της ανακύκλωσης και τις προκλήσεις που πρέπει ακόμη να αντιμετωπιστούν. Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε τις δύο συνηθέστερες κατηγορίες ανακύκλωσης που συναντάμε σήμερα, (α) τον διαχωρισμό στην πηγή, και (β) τον διαχωρισμό στις Μονάδες Επεξεργασίας Απορριμμάτων (ΜΕΑ), ή όπως το λέμε εναλλακτικά στο εργοστάσιο. Θα μιλήσουμε για τεχνικές ενσωμάτωσης της υπολογιστικής νέφους στην ανακύκλωση, και θα παρουσιάσουμε την τεχνική της επιτάχυνσης συστημάτων ανακύκλωσης χρησιμοποιώντας πλακέτες FPGA. Τέλος, θα αναπτύξουμε τις δικές μας λύσεις σε αυτά τα ερευνητικά ερωτήματα.

Γενικά, η ανακύκλωση είναι η διαδικασία μετατροπής υλικών σε νέα προϊόντα για την πρόληψη της δημιουργίας αποβλήτων και τη διατήρηση των πόρων. Αποτελεί σημαντική πτυχή της σύγχρονης κοινωνίας, καθώς συμβάλλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, μειώνοντας την ανάγκη για νέες πρώτες ύλες, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας και μειώνοντας την ποσότητα των αποβλήτων που στέλνονται σε χώρους υγειονομικής ταφής. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι ανακύκλωσης αλλά μπορούν συνοπτικά να ομαδοποιηθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες [166] :

Η πρωτογενής ανακύκλωση περιλαμβάνει την επαναχρησιμοποίηση υλικών όπως το χαρτί, το γυαλί και τα πλαστικά. Για παράδειγμα, το χαρτί μπορεί να ανακυκλωθεί σε νέα χάρτινα προϊόντα, το γυαλί μπορεί να ανακυκλωθεί σε νέα γυάλινα δοχεία και τα πλαστικά μπουκάλια μπορούν να ανακυκλωθούν σε πλαστικά σφαιρίδια που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή νέων πλαστικών προϊόντων. Αυτός ο τύπος ανακύκλωσης ονομάζεται συχνά ανακύκλωση «κλειστού κυκλώματος», καθώς τα υλικά χρησιμοποιούνται ξανά και ξανά χωρίς να χάνεται η ποιότητά τους.

Η δευτερογενής ανακύκλωση περιλαμβάνει τη διαδικασία διάσπασης των υλικών στα συστατικά τους μέρη και στη συνέχεια τη χρήση αυτών των μερών για τη δημιουργία νέων προϊόντων. Για παράδειγμα, τα παλιά αυτοκίνητα μπορούν να ανακυκλωθούν σε χάλυβα, αλουμίνιο και άλλα μέταλλα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή νέων αυτοκινήτων, συσκευών και άλλων προϊόντων [167]. Αυτός ο τύπος ανακύκλωσης ονομάζεται συχνά ανακύκλωση «ανοικτού κυκλώματος», καθώς τα υλικά χρησιμοποιούνται για την κατασκευή νέων προϊόντων, αλλά δεν χρησιμοποιούνται στην ίδια μορφή με την προηγούμενη [168].

Η ανακύκλωση είναι σημαντική για πολλούς λόγους. Ένας από τους σημαντικότερους είναι ότι συμβάλλει στη διατήρηση των φυσικών πόρων. Η ανακύκλωση υλικών απαιτεί λιγότερη ενέργεια από ότι η εξόρυξη νέων υλικών από τη γη. Επιπλέον, η ανακύκλωση μπορεί επίσης να συμβάλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μειώνοντας την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την παραγωγή νέων προϊόντων. Για παράδειγμα, η ανακύκλωση κουτιών αλουμινίου απαιτεί 95% λιγότερη ενέργεια από την παραγωγή νέων κουτιών αλουμινίου από πρώτες ύλες [169].

Η ανακύκλωση δεν είναι μόνο ένας τρόπος προστασίας του περιβάλλοντος, αλλά και ένας τρόπος εξοικονόμησης οικονομικών πόρων. Με την ανακύκλωση υλικών, οι τοπικές κυβερνήσεις και οι επιχειρήσεις μπορούν να εξοικονομήσουν χρήματα από το κόστος διάθεσης των απορριμμάτων, ενώ οι καταναλωτές μπορούν να εξοικονομήσουν χρήματα αγοράζοντας ανακυκλωμένα προϊόντα σε χαμηλότερες τιμές.

Η κατάσταση της ανακύκλωσης σήμερα εξελίσσεται και αλλάζει συνεχώς, καθώς αναπτύσσονται νέες εξελίξεις και τεχνικές για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας των προγραμμάτων ανακύκλωσης. Τα τελευταία χρόνια, η ανακύκλωση έχει διανύσει πολύ δρόμο και έχει γίνει πιο κυρίαρχη και ευρέως αποδεκτή ως βιώσιμη λύση για τη μείωση των αποβλήτων και τη διατήρηση των πόρων.

Εν κατακλείδι, η ανακύκλωση αποτελεί σημαντική πτυχή της σύγχρονης κοινωνίας, καθώς συμβάλλει στη διατήρηση των φυσικών πόρων, στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, στη μείωση της ποσότητας των αποβλήτων που στέλνονται στις χωματερές, στη δημιουργία θέσεων εργασίας και στην εξοικονόμηση χρημάτων. Είναι ένας απλός και αποτελεσματικός τρόπος για να μειώσουμε τις περιβαλλοντικές μας επιπτώσεις και να δημιουργήσουμε ένα πιο βιώσιμο μέλλον. Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ανακύκλωση από μόνη της δεν αρκεί για να λύσει το πρόβλημα των αποβλήτων, αλλά πρέπει να συνδυαστεί με άλλες λύσεις, όπως η μείωση της κατανάλωσης και η επαναχρησιμοποίηση υλικών.

6.2 Τύποι κάδων ανακύκλωσης

Οι κάδοι ανακύκλωσης αποτελούν βασικό εργαλείο στη διαδικασία ανακύκλωσης, καθώς παρέχουν στους ανθρώπους έναν βολικό τρόπο να διαχωρίζουν τα διάφορα υλικά προς ανακύκλωση. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι κάδων ανακύκλωσης [170], καθένας από τους οποίους έχει σχεδιαστεί για τη συλλογή συγκεκριμένων υλικών. Σε αυτήν την ενότητα, θα διερευνήσουμε τους διαφορετικούς τύπους κάδων ανακύκλωσης, τις κατηγορίες στις οποίες εμπίπτουν και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη διαλογή και την επεξεργασία των συλλεγόμενων υλικών. Η ενότητα που θα εξετάσουμε, αφορά τους κάδους ανακύκλωσης μη οργανικών υλικών, η οποία χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες: (α) τον διαχωρισμό στην πηγή, και (β) την ανακύκλωση στο εργοστάσιο. Τα οργανικά υλικά που αφορά το κομπόστ δεν έχουν αναλυθεί στην παρούσα διατριβή.

Έτσι, θα δώσουμε έμφαση στις βασικές κατηγορίες κάδων ανακύκλωσης μη οργανικών υλικών. Ο πρώτος τύπος κάδου ανακύκλωσης είναι ο κάδος μιας ροής. Αυτοί οι κάδοι είναι σχεδιασμένοι για να συλλέγουν όλα τα ανακυκλώσιμα υλικά σε έναν κάδο. Αυτό περιλαμβάνει υλικά όπως χαρτί, χαρτόνι, γυαλί, πλαστικό και μέταλλο. Η ανακύκλωση ενιαίας ροής, όπου ο πολίτης τοποθετεί όλα τα ανακυκλώσιμα υλικά σε έναν κάδο, είναι ένας βολικός τρόπος ανακύκλωσης για τους πολίτες, καθώς εξαλείφει την ανάγκη διαλογής των υλικών πριν από την ανακύκλωση. Ωστόσο, αυξάνει τον κίνδυνο μόλυνσης των υλικών και την πολυπλοκότητα της διαλογής των υλικών στα επόμενα στάδια, καθώς στον κάδο μπορεί να τοποθετηθούν μη ανακυκλώσιμα υλικά. Όμως, η ανακύκλωση ενιαίας ροής μπορεί να αυξήσει το συνολικό ποσοστό ανακύκλωσης, διότι είναι πιο βολικό για τους ανθρώπους να ανακυκλώνουν, μιας και δεν απαιτείται η ταξινόμηση των υλικών εκ των προτέρων. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στη συμμετοχή περισσότερων πολιτών σε προγράμματα ανακύκλωσης. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της ανακύκλωσης ενιαίας ροής είναι ότι αυξάνει το κόστος διαλογής των υλικών. Οι παραδοσιακές μέθοδοι ανακύκλωσης ενιαίας ροής απαιτούν την περαιτέρω επεξεργασία των συλλεχθέντων υλικών στις ΜΕΑ.

Ο δεύτερος τύπος κάδου ανακύκλωσης είναι ο κάδος πολλαπλών ρευμάτων [171]. Αυτοί οι κάδοι έχουν σχεδιαστεί για να συλλέγουν συγκεκριμένα υλικά σε ξεχωριστούς κάδους. Αυτό περιλαμβάνει υλικά όπως χαρτί, χαρτόνι, γυαλί, πλαστικό και μέταλλο. Η ανακύκλωση πολλαπλών ρευμάτων είναι ένας πιο αποτελεσματικός τρόπος ανακύκλωσης, καθώς μειώνει τον κίνδυνο μόλυνσης και βελτιώνει την ποιότητα των ανακυκλωμένων

υλικών. Ωστόσο, απαιτεί επίσης μεγαλύτερη προσπάθεια από το άτομο που ανακυκλώνει, καθώς πρέπει να ταξινομήσει τα υλικά.

Ο τρίτος τύπος κάδου ανακύκλωσης είναι ο κάδος διαχωρισμού στην πηγή [172]. Αυτοί οι κάδοι έχουν σχεδιαστεί για να συλλέγουν συγκεκριμένα υλικά που παράγονται στην πηγή παραγωγής. Αυτό περιλαμβάνει υλικά όπως τα ηλεκτρονικά απόβλητα και τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα. Η ανακύκλωση με διαχωρισμό στην πηγή είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος ανακύκλωσης, καθώς μειώνει τον κίνδυνο μόλυνσης και βελτιώνει την ποιότητα των ανακυκλωμένων υλικών. Ωστόσο, απαιτεί μεγαλύτερη προσπάθεια από το άτομο που ανακυκλώνει, καθώς πρέπει να διαχωρίσει τα υλικά πριν από την ανακύκλωση.

Αφού τα υλικά συλλεχθούν στους κάδους ανακύκλωσης, στη συνέχεια μεταφέρονται σε μια Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων (ΜΕΑ) όπου γίνεται διαλογή και επεξεργασία με τη χρήση διαφόρων τεχνολογιών. Η πιο συνηθισμένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τη διαλογή των ανακυκλώσιμων υλικών είναι η χειροκίνητη διαλογή [173]. Αυτή περιλαμβάνει τη διαλογή των υλικών με το χέρι, η οποία είναι χαμηλής εντάσεως εργασία, αλλά επιτρέπει υψηλό επίπεδο ακρίβειας.

Μια άλλη τεχνολογία που χρησιμοποιείται για τη διαλογή ανακυκλώσιμων υλικών είναι η μηχανική διαλογή [173]. Αυτή περιλαμβάνει τη χρήση μηχανών, όπως μεταφορικές ταινίες για το διαχωρισμό των υλικών με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά τους. Η μηχανική διαλογή είναι ένας πιο αποτελεσματικός τρόπος για τη διαλογή των υλικών, αλλά μπορεί επίσης να οδηγήσει σε διάφορα προβλήματα εάν τα μηχανήματα δεν είναι σωστά βαθμονομημένα. Σήμερα ένα μέρος της μηχανικής διαλογής είναι η υποβοήθηση της με ηλεκτρονικά μέσα. Η συμβολή των ΕΣ σε αυτή την περίπτωση είναι καθοριστική.

Εν κατακλείδι, οι κάδοι ανακύκλωσης είναι ένα ουσιαστικό εργαλείο στη διαδικασία ανακύκλωσης, καθώς παρέχουν έναν βολικό τρόπο στους ανθρώπους να διαχωρίζουν τα διάφορα υλικά για ανακύκλωση. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τύποι κάδων ανακύκλωσης καθένας από τους οποίους έχει σχεδιαστεί για τη συλλογή συγκεκριμένων υλικών.

6.3 Διαχωρισμός στην πηγή

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει στη παρούσα διατριβή, τα οικιακά απορρίμματα διαρκώς αυξάνονται μιας και οι συσκευασίες αλλά και τα προϊόντα έχουν μικρή διάρκεια ζωής και βρίσκονται παντού. Τα περισσότερα από αυτά απορρίπτονται σε χώρους

υγειονομικής ταφής. Εάν αυτή η τάση συνεχίσει να αυξάνεται, ο πλανήτης μας θα γίνει σύντομα ένας γιγάντιος σκουπιδότοπος. Αυτό μπορεί να προκαλέσει σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Η διαλογή των απορριμμάτων θα πρέπει να γίνεται στο αρχικό στάδιο, προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ποσότητα των ανακυκλωμένων υλικών και να μειωθεί η πιθανότητα μόλυνσης από άλλα απορρίμματα. Αυτό θα βοηθήσει στην μείωση της υποβάθμισης του περιβάλλοντος, όπως οι μειωμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η ρύπανση του νερού και του αέρα και άλλα. Η επαναχρησιμοποίηση υλικών και η παράταση της διάρκειας ζωής τους είναι ο μόνος τρόπος για να δημιουργήσουμε ένα βιώσιμο περιβάλλον [174]. Λόγω της φύσης της διαδικασίας της ανακύκλωσης, είναι απαραίτητος ο διαχωρισμός των απορριμμάτων. Πολλοί οργανισμοί πιστεύουν ότι εκπαιδεύοντας τους ανθρώπους να διαχωρίζουν σωστά τα υλικά προς ανακύκλωση μπορεί να βελτιωθεί η διαδικασία σε μεγάλο βαθμό και πως η συλλογή επαρκών πληροφοριών για τα ανακυκλώσιμα υλικά μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη συμπεριφορά ανακύκλωσης [175]. Καθώς η διαδικασία της ανακύκλωσης τα τελευταία χρόνια δεν έχει επιτύχει τους στόχους που έχουν τεθεί από την πολιτεία, έχει γίνει και πολιτικό ζήτημα. Σε μια σύγχρονη πόλη, διάφοροι κάδοι απορριμμάτων χρησιμοποιούνται για τη διάθεση των απορριμμάτων, συνήθως γυαλί, πλαστικό, αλουμίνιο και χαρτί. Εξαιτίας αυτού, οι πολίτες διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο, καθώς είναι αυτοί που συλλέγουν και ταξινομούν τα απόβλητα ανά υλικό. Η διαδικασία διαχωρισμού των απορριμμάτων στην πηγή διευκολύνει και επιταχύνει την διαδικασία ανακύκλωσης μιας και ο διαχωρισμός στη ΜΕΑ που θα δούμε στη συνέχεια, αποτελεί μια χρονοβόρα και κοστοβόρα διαδικασία.

Στη συγκεκριμένη διατριβή έχει αναπτύχθηκε ένα έξυπνος κάδος για ανακύκλωση υλικών όπως φαίνεται στην [Εικόνα 42](#). Στον κυλινδρικό κάδο που αναπτύξαμε, τα απορρίμματα εισέρχονται από την πάνω πλευρά, πέφτουν πάνω στον ηλεκτρομαγνητικό διαχωριστή και στη συνέχεια φωτογραφίζονται από την κάμερα που βρίσκεται στο πάνω μέρος του κάδου. Έχει τοποθετηθεί λάμπα LED στο εσωτερικό του κάδου, ώστε να υπάρχει επαρκής φωτισμός και να παίρνουμε την καλύτερη δυνατή εικόνα. Η κάμερα αποθηκεύει την εικόνα και στη συνέχεια ανοίγει τον ηλεκτρομαγνητικό διαχωριστή και το αντικείμενο πέφτει στο κάτω μέρος του κάδου στον οποίο βρίσκονται τα απορρίμματα και διατηρούνται έως ότου περάσει το απορριμματοφόρο και αδειάσει τον κάδο. Το ενσωματωμένο ηλεκτρονικό σύστημα που βρίσκεται στον έξυπνο κάδο, αποστέλλει ανά τακτά χρονικά διαστήματα της φωτογραφίες που έχουν συλλεχθεί στο πληροφοριακό σύστημα, όπου και επεξεργάζονται. Το πρώτο σύστημα [176] που αναπτύχθηκε στα

πλαίσια της παρούσας διατριβής, στηρίχθηκε στο ενσωματωμένο σύστημα Raspberry Pi 3 Model B+ και στο Xilinx Pynq-Z1 FPGA.



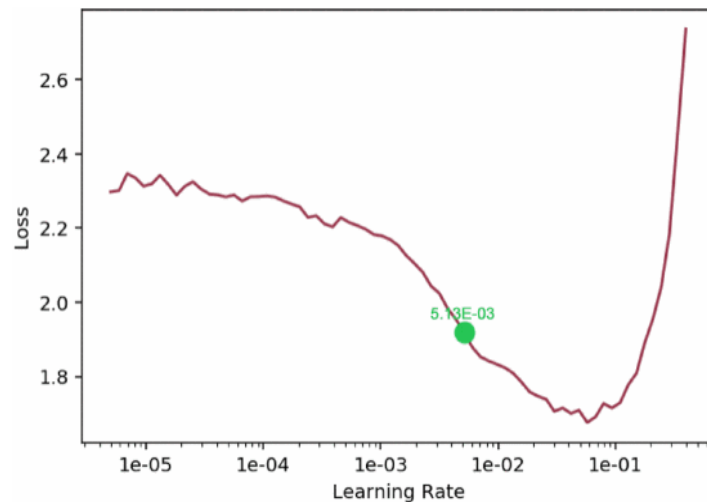
Εικόνα 42: Έξυπνος κάδος ανακύκλωσης υλικών

Το σύστημα μας αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία: α) το υλικό μέρος (hardware), β) το λογισμικό μέρος (software) και γ) τη συνδεσιμότητα. Το βασικό στοιχείο της δικής μας λύσης είναι ένα νευρωνικό δίκτυο (CNN) και συγκεκριμένα το resnet34 το οποίο έχει 34 προ-εκπαιδευμένα επίπεδα στη βάση δεδομένων ImageNet, ώστε να ταξινομηθούν οι εικόνες αναλόγως με το υλικό, δηλαδή σε χαρτί, γυαλί, μέταλλο, πλαστικό και απορρίμματα. Χρησιμοποιούμε την βιβλιοθήκη fastai η οποία απλοποιεί την εκπαίδευση γρήγορων και ακριβών νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιώντας σύγχρονες βέλτιστες πρακτικές, μαζί με ένα χειροκίνητα συλλεγόμενο σύνολο δεδομένων από τον Gary Thung και τη Mindy Yang το ThrashNet⁵. Το σύνολο των δεδομένων χωρίζεται σε έξι κλάσεις και αποτελείται από 2.572 εικόνες. Χρησιμοποιούμε τις εικόνες για εκπαίδευση – επικύρωση – δοκιμή σύμφωνα με: 50 – 25 – 25 με ρυθμό μάθησης $5.13E-03$ όπως προτείνει το εργαλείο εύρεσης ρυθμού εκμάθησης (Εικόνα 43).

Όλα τα δεδομένα αποθηκεύονται σε ένα πληροφοριακό σύστημα, το οποίο έχουμε αναπτύξει για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Οι πληροφορίες αποστέλλονται μέσω ενός δικτύου LoRa, όπου ο κάθε κάδος έχει μια μοναδική ταυτότητα (ID). Οι πληροφορίες αυτές ταξινομούνται σύμφωνα με την χρονοσήμανση (timestamp) και την ταυτότητα του κάθε κάδου. Μέσα από τις πραγματοποιήσεις μετρήσεις, επιτεύχθηκε ακρίβεια 92,1% στα

⁵ <https://github.com/garythung/trashnet>

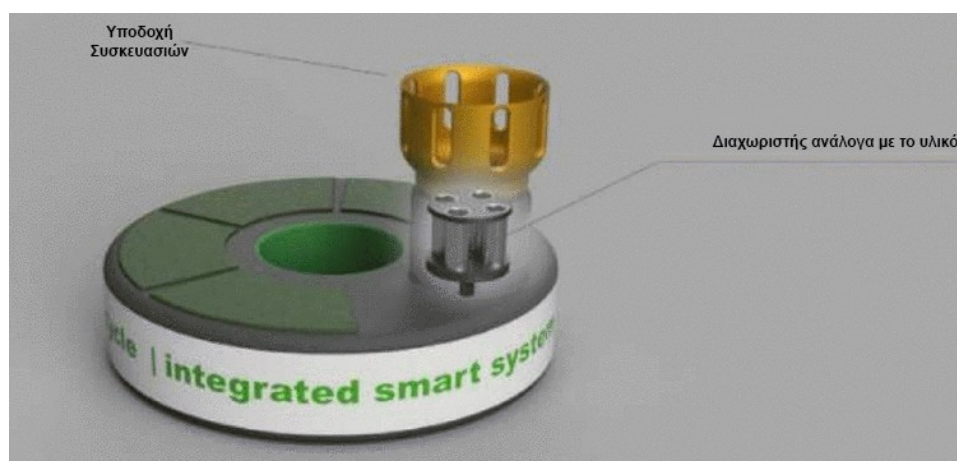
πειραματικά δεδομένα. Ο μέσος χρόνος επεξεργασίας μιας εικόνας είναι 1,82 δευτερόλεπτα κατά μέσο όρο στον επεξεργαστή Cortex-A9 χρησιμοποιώντας μια εικόνα



Εικόνα 43: Εύρεση ρυθμού εκμάθησης

με ανάλυση 640×480 pixel. Τέλος, όλες οι πληροφορίες αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων και έτσι γνωρίζουμε σε πραγματικό χρόνο τα υλικά που υπάρχουν στον κάδο.

Σε μια επέκταση της παραπάνω λύσης περιγράφεται στην εργασία Ziouzios et al. [176]. Η συγκεκριμένη εφαρμογή αφορά στον εντοπισμό και διαχωρισμό συσκευασιών ροφημάτων στην πηγή. Στην [Εικόνα 44](#), παρουσιάζουμε τον κάδο όπου υπάρχει η υποδοχή των υλικών από το επάνω μέρος, ενώ στο κάτω μέρος υπάρχουν οι κάδοι όπου ταξινομούνται οι συσκευασίες ανάλογα με το υλικό τους. Ο κάδος είναι ταυτόχρονα και παγκάκι το οποίο μπορεί να τοποθετηθεί σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους.



Εικόνα 44: Κάδος διαχωρισμού συσκευασιών ροφημάτων

Αξιοποιώντας το Raspberry Pi Zero W και την κάμερα Raspberry Pi Camera v2.1, όταν εισάγει ο χρήστης μια συσκευασία όπως για παράδειγμα ένα γυάλινο μπουκάλι ή μια

χάρτινη συσκευασία, φωτογραφίζεται, η εικόνα συμπιέζεται και στη συνέχεια αποστέλλεται στον διακομιστή για ανάλυση. Για τους σκοπούς αυτής της έρευνας χρησιμοποιήσαμε το σύνολο δεδομένων TACO (Trash Annotations in Context) [177]. Το TACO είναι ένα ανοιχτό σύνολο εικόνων απορριμμάτων προσβάσιμο από όλους. Αποτελείται από εικόνες απορριμμάτων που βρίσκονται σε διαφορετικές συνθήκες και περιβάλλοντα, που κυμαίνονται από βουνά έως πόλεις. Οι εικόνες «περιγράφονται» με το χέρι και ομαδοποιούνται με βάση την ιεραρχική ταξινόμηση. Ως αποτέλεσμα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκπαίδευση και την αξιολόγηση αλγορίθμων ταξινόμησης και ανίχνευσης αντικειμένων. Το TACO, κατά τη διάρκεια των δικών μας πειραμάτων, αποτελείται από συνολικά 1.500 εικόνες, ένας αριθμός που είναι λίγο μικρός για την εκπαίδευση αλγορίθμου. Για τον λόγο αυτό συλλέξαμε επιπλέον 2.500 εικόνες, τις οποίες «περιγράψαμε» με τη βοήθεια του διαδικτυακού εργαλείου www.makesense.ai⁶, ώστε συνολικά να έχουμε ένα σύνολο 4.000 εικόνων, το οποίο μέγεθος είναι ικανοποιητικό. Η καταγραφή των εικόνων λήφθηκε στη Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων (ΜΕΑ) της ΕΔΑΔΥΜ, μέσω βιντεοκάμερας και φωτογραφικών μηχανών. Για την ανίχνευση των αντικειμένων χρησιμοποιήσαμε το δίκτυο YOLOv4 (You Only Look Once version 4). Το YOLOv4 έχει αναδειχθεί ως το καλύτερο μοντέλο ανίχνευσης αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο. Το YOLOv4 μεταφέρει πολλές από τις ερευνητικές συνεισφορές της οικογένειας μοντέλων YOLO μαζί με νέες τεχνικές μοντελοποίησης και αυτή η υλοποίηση βρίσκεται στο Darknet. Για να βελτιώσουμε την απόδοση του νευρωνικού μας δικτύου, αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε ένα ResNet (Residual Neural Network) μοντέλο που χρησιμοποιεί συνδέσεις συντομεύσεων. Ως εκ τούτου, οι μη βέλτιστες τιμές μπορούν να προσαρμοστούν δηλαδή βάρος και μεροληψία, ενώ οι βέλτιστες με μηδενικό υπόλοιπο μπορούν να παραλειφθούν εντελώς. Καθώς πρέπει να γίνουν προσαρμογές, οι συνδέσεις συντομεύσεων εφαρμόζουν τη συνάρτηση ταυτότητας για να περάσουν πληροφορίες στα επόμενα επίπεδα. Αυτό συντομεύει το νευρωνικό δίκτυο όταν είναι δυνατόν και επιτρέπει στο δίκτυο να έχει βαθιές αρχιτεκτονικές και να συμπεριφέρεται περισσότερο σαν ένα «ρηχό» νευρωνικό δίκτυο. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι το προτεινόμενο Νευρωνικό Δίκτυο (CNN) έχει ακρίβεια 94,7%. Αν και στο ενσωματωμένο σύστημα το οποίο χρησιμοποιούμε η Κεντρική Μονάδα Επεξεργασίας (CPU) έχει μόνο έναν πυρήνα, τα πειράματά μας έδειξαν ότι δεν δημιουργήσε συμφόρηση και ότι η επεξεργαστική ισχύς ήταν υπεραρκετή για τις ανάγκες της εφαρμογής μας. Κάθε απαιτητική λειτουργία του

⁶ <https://www.makesense.ai>

επεξεργαστή που απαιτήθηκε, όπως κρυπτογράφηση ή συμπίεση, εκτελέστηκε έγκαιρα και χωρίς προβλήματα. Δεδομένου ότι τα ενσωματωμένα συστήματα δεν εκτελούν καμιά βαριά επεξεργασία, η κατανάλωση ενέργειας ήταν πολύ χαμηλή. Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν δείχνουν ότι η αρχιτεκτονική που παρουσιάζεται, και χρησιμοποιεί ασφαλή απομακρυσμένη διαχείριση από το νέφος (cloud) είναι μια ρεαλιστική λύση τόσο για μικρές όσο και για μεγάλες πόλεις.

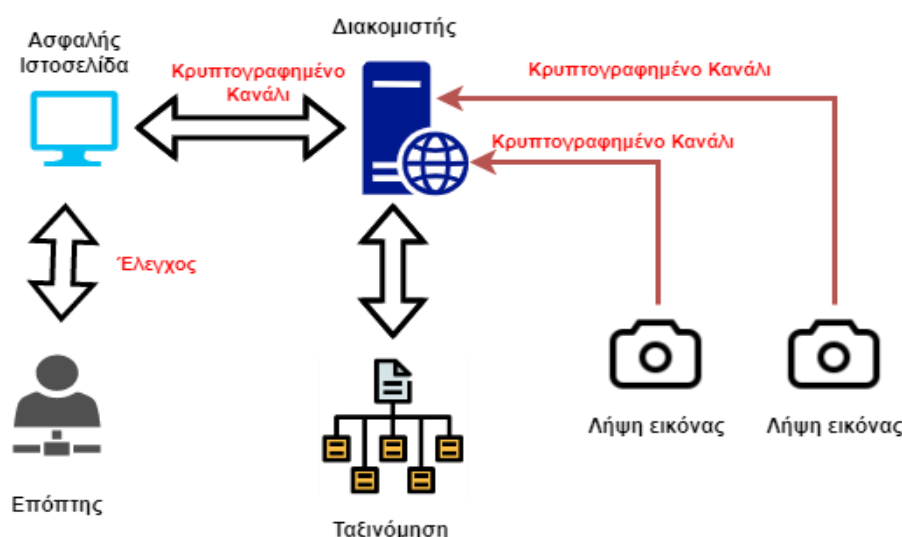
Μια άλλη προτεινόμενη λύση που αναπτύχθηκε είναι με την αξιοποίηση του νέφους παρουσιάζεται στην εργασία μας [178]. Το σύστημα βασίζεται στο ενσωματωμένο σύστημα Raspberry Pi Zero W, το οποίο έχει μικρές διαστάσεις, μόλις 65mm × 30 mm × 5 mm, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, με μέσο όρο στα 200mA και χαμηλό κόστος. Το Raspberry Pi Zero W έχει έναν μονοπύρρηνο επεξεργαστή ARMv6 στα 1GHz καθώς και ενσωματωμένο WiFi (802.11n wireless LAN) και Bluetooth 4.0. Για την λήψη φωτογραφιών, χρησιμοποιούμε την συμβατή κάμερα Raspberry Pi Camera v2.1, η οποία φέρει έναν αισθητήρα εικόνας Sony IMX219 8 megapixel και φακό σταθερής εστίασης, που έχει τη δυνατότητα λήψης στατικών εικόνων έως ανάλυσης 3280 x 2464 pixel και υποστηρίζει επίσης τη λήψη βίντεο σε τρεις διαμορφώσεις, 1080p στα 30 καρέ ανά δευτερόλεπτο (Frame Per Second - FPS), 720p στα 60 FPS και 480p στα 90 FPS. Μόλις πραγματοποιηθεί η λήψη της φωτογραφίας, συμπιέζεται και αποστέλλεται στο νέφος (cloud) μέσω του δικτύου Wi-Fi για επεξεργασία από το νευρωνικό δίκτυο. Και σε αυτή τη λύση χρησιμοποιούμε το νευρωνικό δίκτυο που περιγράψαμε παραπάνω και επιτεύχθηκε 93,4% ακρίβεια, η οποία είναι αποδεκτή βάσει του συστήματος.

6.4 Υπολογιστική νέφους και επιτάχυνση στους έξυπνους κάδους

Κατά το σχεδιασμό μιας αρχιτεκτονικής συστήματος, οι σχεδιαστές του πρέπει να λάβουν ορισμένες αποφάσεις προκειμένου να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του συστήματος, ελαχιστοποιώντας παράλληλα το κόστος και την πολυπλοκότητα της σχεδίασης. Στην παρούσα ενότητα, θα παρουσιάσουμε μια νέα τάση στο χώρο των έξυπνων κάδων, αυτή της υπολογιστικής νέφους. Στο πλαίσιο της εκπόνησης της παρούσας διατριβής, κατασκευάστηκε ένα κατανεμημένο σύστημα ταξινόμησης διαχείρισης απορριμμάτων με βάση το υπολογιστικό νέφος. Το σύστημα αυτό [179], αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Στην συγκεκριμένη εργασία, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο ταξινόμησης απορριμμάτων χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό νέφος για την πλειοψηφία των υπολογιστικών αναγκών του συστήματος. Η τεχνική της εκφόρτωσης των

υπολογισμών στο υπολογιστικό νέφος, γνωστή και ως «cloud computation offloading», είναι αρκετά δημοφιλής τα τελευταία χρόνια, ειδικότερα σε μεγαλύτερες κλίμακες.

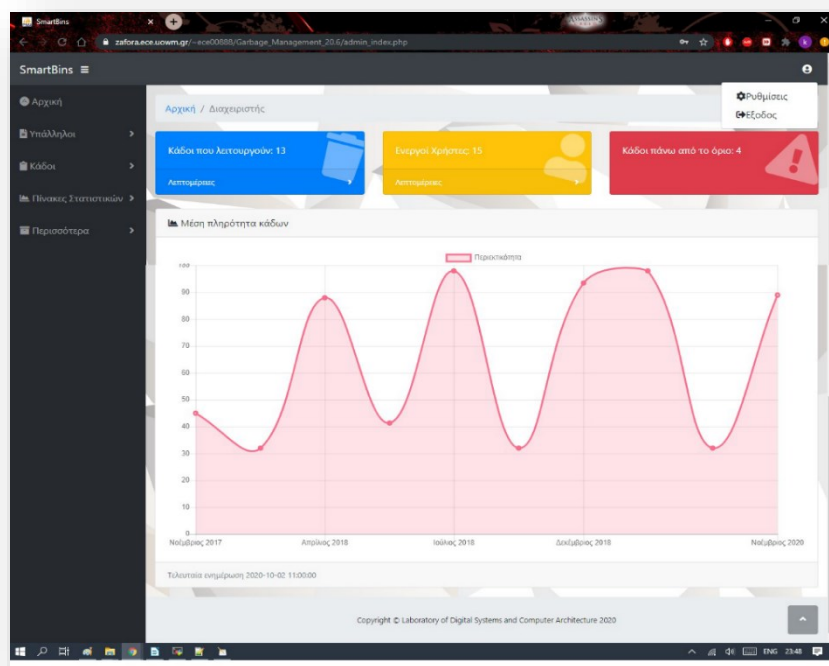
Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιήσαμε την τεχνική της υπολογιστικής νέφους είναι για να βελτιώσουμε την αποτελεσματικότητα της ταξινόμησης των απορριμμάτων. Το σύστημα που αναπτύχθηκε παρουσιάζεται μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική απεικονίζεται στην [Εικόνα 45](#). Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από πολλαπλές ενσωματωμένες συσκευές που είναι κατανεμημένες σε διάφορες εγκαταστάσεις συλλογής απορριμμάτων, οι οποίες φωτογραφίζουν τα απορρίμματα σε πραγματικό χρόνο και τις αποστέλλουν σε έναν διακομιστή νέφους για ταξινόμηση. Στόχος της μελέτης είναι η καθοδήγηση ενός κατανεμημένου αριθμού ρομποτικών συστημάτων για την εξαγωγή και ταξινόμηση των απορριμμάτων στους κατάλληλους κάδους σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 45: Σύστημα ταξινόμησης

Οι ενσωματωμένες συσκευές που βρίσκονται στις εγκαταστάσεις συλλογής αποβλήτων μπορεί να έχουν διαφορετικές διαμορφώσεις υλικού και να διαφέρουν μεταξύ τους. Η μόνη απαίτηση είναι να έχουν συνδεδεμένη μία κάμερα και σύνδεση υψηλής ταχύτητας στο Διαδίκτυο. Οι ενσωματωμένες συσκευές είναι χαμηλού κόστους και χαμηλής ισχύος ενσωματωμένα συστήματα (Single Board Computer- SBC) [180]. Στην συγκεκριμένη μελέτη, χρησιμοποιήσαμε ένα ενσωματωμένο σύστημα που αποτελείται από ένα Raspberry Pi 3B+ και μια κάμερα Raspberry Pi έκδοση 2.1. Η πλακέτα Raspberry Pi 3B+ είναι ιδανική για τις ανάγκες του συστήματός μας για τους παρακάτω τρεις λόγους: (α) έχει πολύ χαμηλό κόστος, (β) είναι ενεργειακά αποδοτική, αφού καταναλώνει λιγότερο από 200 mA υπό φυσιολογικές συνθήκες φορτίου και (γ) έχει πολύ μικρό μέγεθος. Είναι εξοπλισμένο με τετραπύρρηνο επεξεργαστή ARMv8 1,4 GHz (BCM2837B0) και διαθέτει

ενσωματωμένο WiFi (ασύρματο LAN 802.11n) και Bluetooth 4.0. Η υπολογιστική ισχύς του Raspberry Pi 3B+ [181] είναι υπεραρκετή για τις ανάγκες της μελέτης μας, δεδομένου ότι η ταξινόμηση των αποβλήτων θα πραγματοποιείται μόνο στον διακομιστή που βρίσκεται στο νέφος. Το άλλο κύριο συστατικό του πρωτοτύπου μας είναι η κάμερα έκδοσης 2.1, η οποία διαθέτει αισθητήρα εικόνας 8 megapixel Sony IMX219 εξαιρετικά υψηλής ποιότητας (5 megapixel) και φακό κάμερας σταθερής εστίασης. Η συγκεκριμένη κάμερα είναι ικανή να καταγράφει στατικές εικόνες ανάλυσης έως 3280×2464 εικονοστοιχεία και υποστηρίζει επίσης τη λήψη βίντεο σε τρεις διαμορφώσεις, 1080p στα 30 καρέ ανά δευτερόλεπτο (Frame Per Second -FPS), 720p στα 60 FPS και 480p στα 90 FPS. Φυσικά, αντί για αυτό το ενσωματωμένο σύστημα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε οποιοδήποτε σύστημα x86, x86-64 ή ARM Cortex που λειτουργεί με Linux, καθώς το λογισμικό μας δεν είναι συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής και μπορεί εύκολα να μεταφερθεί σε διάφορες πλατφόρμες. Ο διακομιστής που βρίσκεται στο cloud φιλοξενεί το νευρωνικό δίκτυο που επεξεργάζεται τις εικόνες και τις ταξινομεί με βάση τα χαρακτηριστικά τους. Οι πέντε κατηγορίες απορριμμάτων είναι οι εξής: χαρτί, γυαλί, πλαστικό, μέταλλο και τα υπόλοιπα απορρίμματα. Όλα τα δεδομένα που μεταδίδονται μεταξύ του διακομιστή νέφους και των ενσωματωμένων συσκευών κρυπτογραφούνται. Το προτεινόμενο σύστημα χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο AES (Advanced Encryption Standard) προκειμένου να κρυπτογραφήσει και να προστατεύσει όλα τα μεταδεδομένα από κακόβουλες απειλές. Ο



Εικόνα 46: Πληροφοριακό Σύστημα έξυπνου κάδου

αλγόριθμος AES υποστηρίζεται σε όλα τα δημοφιλή λειτουργικά συστήματα (ΛΣ), όπως τα Windows, το FreeBSD και οι διανομές Linux.

Ο διακομιστής νέφους που χρησιμοποιούμε για την μεταφόρτωση της επεξεργασίας στο νέφος χρησιμοποιεί το λειτουργικό σύστημα ανοικτού κώδικα Red Hat Enterprise Linux Server 7.4 x86_64. Χρησιμοποιώντας PHP και MySQL, αναπτύξαμε μια διαδικτυακή πλατφόρμα ([Εικόνα 46](#)) που επιτρέπει στους επόπτες να παρακολουθούν και να αναδιαμορφώνουν το σύστημα με εύκολο και αποτελεσματικό τρόπο. Η πλατφόρμα επιτρέπει στους διαχειριστές να βλέπουν τα αποτελέσματα της διαδικασίας ταξινόμησης, να ρυθμίζουν τον αλγόριθμο ταξινόμησης ή ακόμη και να επανεκπαιδεύουν τον αλγόριθμο χρησιμοποιώντας ένα διαφορετικό σύνολο δεδομένων. Η πλατφόρμα εμφανίζει επίσης πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τα ενσωματωμένα συστήματα, όπως τον φόρτο της KME, τη θερμοκρασία της KME, τις μετρικές του εύρους ζώνης και άλλα. Τέλος, με τη χρήση HTTPS, η επικοινωνία μεταξύ του προγράμματος που εκτελείται στα ενσωματωμένα συστήματα (πελάτης) και της πλατφόρμας (πάροχος) είναι πάντα κρυπτογραφημένη, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο επιθέσεων Man In The Middle (MITM). Η αρχιτεκτονική λογισμικού του συστήματός μας αποτελείται από 3 στάδια: Στο πρώτο στάδιο, το ενσωματωμένο σύστημα που είναι εγκατεστημένο ανοίγει μια σύνδεση TCP (Transmission Control Protocol) stream προς τον διακομιστή νέφους. Αυτό το TCP stream χρησιμοποιείται για την αποστολή των συλλεχθέντων εικόνων προς επεξεργασία. Το ενσωματωμένο σύστημα λαμβάνει μια εικόνα του αντικειμένου καθώς κινείται στον ιμάντα απορριμμάτων. Για τη σύλληψη της εικόνας χρησιμοποιείται ένα λογισμικό σύλληψης εικόνων, όπως η fswebcam, το streamer ή το ffmpeg. Στη συνέχεια, η εικόνα μετατρέπεται σε κωδικοποίηση base64 και σειριοποιείται σε JSON μαζί με μια ετικέτα ID και μια χρονοσφραγίδα. Επειδή ο αλγόριθμος ταξινόμησης μπορεί να επεξεργάζεται ταυτόχρονα πολλές εικόνες, η σειρά με την οποία θα επεξεργαστεί ο αλγόριθμος ταξινόμησης δεν είναι διαδοχική. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να ταυτοποιούνται οι εικόνες με ένα αναγνωριστικό και μια χρονοσφραγίδα. Η εικόνα μεταδίδεται στον διακομιστή νέφους. Όταν ολοκληρωθεί η μετάδοση, ο διακομιστής νέφους αποκωδικοποιεί το JSON και εξάγει την εικόνα μαζί με το αναγνωριστικό και τη χρονοσφραγίδα. Στη συνέχεια στο δεύτερο

στάδιο η εικόνα επεξεργάζεται από τον αλγόριθμο ταξινόμησης απορριμμάτων και ταξινομείται στην κατάλληλη κατηγορία. Τέλος, στο τρίτο στάδιο, ο διακομιστής στέλνει πίσω στο ενσωματωμένο σύστημα το αποτέλεσμα της ταξινόμησης χρησιμοποιώντας το ίδιο TCP socket. Το ενσωματωμένο σύστημα μπορεί στη συνέχεια να τροφοδοτήσει έναν πιθανό ρομποτικό μηχανισμό με αυτές τις πληροφορίες, ο οποίος μπορεί να τοποθετεί το αντικείμενο στον κατάλληλο κάδο, αυτοματοποιώντας πλήρως τη διαδικασία διαχωρισμού.

Η σχεδιαστική επιλογή του συστήματός να χρησιμοποιήσουμε την εκφόρτωση υπολογισμών στο νέφος, προκειμένου να επιτύχουμε μικρότερη κατανάλωση ενέργειας και χαμηλότερο κόστος πάγιων στοιχείων, επιτεύχθηκε αφού είχαμε πραγματοποιήσει ενδελεχή ανάλυση της ενεργειακής και οικονομικής βιωσιμότητας. Στην [Εικόνα 47](#) απεικονίζεται ο τρόπος μεταφόρτωσης υπολογισμών στο νέφος. Καθώς η τεχνολογία εξελίσσεται τα τελευταία χρόνια, υπάρχει αυξημένη παραγωγή δεδομένων, κυρίως λόγω των συσκευών του ΔτΠ, όπως τα κινητά τηλέφωνα, οι έξυπνοι αισθητήρες και τα ενσωματωμένα συστήματα.

Νέες εφαρμογές όπως η επαυξημένη πραγματικότητα, η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση αναδύονται και προσελκύουν νέους χρήστες. Αυτού του είδους οι εφαρμογές, ωστόσο, είναι συνήθως απαιτητικές σε δεδομένα ή υπολογισμούς και απαιτούν υψηλούς πόρους και αυξημένη κατανάλωση ενέργειας. Οι συσκευές ΔτΠ είναι γνωστές για την έλλειψη πόρων, έχοντας περιορισμένη υπολογιστική ισχύ και διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Η αντίφαση μεταξύ των εφαρμογών υπολογισμού/δεδομένων και των συσκευών με περιορισμένους πόρους εμποδίζει την επιτυχή προσαρμογή των ανερχόμενων μοντέλων. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι η μεταφόρτωση υπολογισμών στο υπολογιστικό νέφος, η οποία είναι πολύ δημοφιλής τα τελευταία χρόνια. Η μεταφόρτωση υπολογισμών

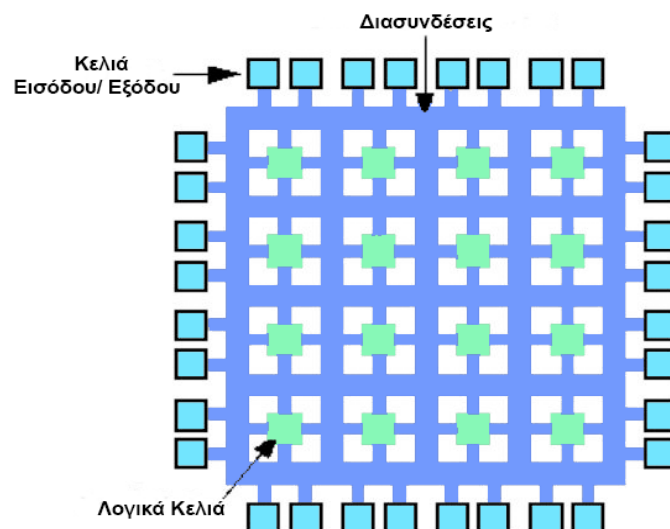


Εικόνα 47: Τρόπος εκφόρτωσης υπολογισμών στο νέφος

στο υπολογιστικό νέφος επεκτείνει τις δυνατότητες των συσκευών με περιορισμένους πόρους, εκτελώντας υπολογισμούς μεγάλου όγκου δεδομένων και υπολογισμών στο υπολογιστικό νέφος. Η υπολογιστική μεταφόρτωση έχει ορισμένα σαφή μειονεκτήματα, όπως η αυξημένη πολυπλοκότητα σχεδιασμού, η απαίτηση μιας διαρκούς σύνδεσης στο διαδίκτυο και φυσικά το κόστος των διακομιστών του υπολογιστικού νέφους. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως η αρχιτεκτονική του συστήματος που προτείνεται στην παρούσα διατριβή, τα οφέλη της μεταφόρτωσης υπολογισμών στο νέφος υπερτερούν των μειονεκτημάτων της. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της χρήσης του υπολογιστικού νέφους είναι το χαμηλό συνολικό κόστος του συστήματος και το χαμηλό κόστος των πάγιων εγκαταστάσεων. Τα ενσωματωμένα συστήματα που βασίζονται στο Raspberry Pi 3B+ στις εγκαταστάσεις συλλογής απορριμμάτων κοστίζουν ελάχιστα σε σχέση με το υλικό που θα απαιτούνταν διαφορετικά, για παράδειγμα έναν επεξεργαστή Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2630 v4 @2,20 GHz μαζί με 2x Tesla K40m GPU. Εκτός από το υλικό, η χρήση εξειδικευμένου λογισμικού είναι επίσης ένα κόστος που πρέπει να ληφθεί υπόψη για κάθε εφαρμογή. Για παράδειγμα, το Red Hat Enterprise Linux Server που χρησιμοποιήσαμε για τα πειράματά της εργασίας μας που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Future Internet [99] είναι ένα ιδιόκτητο λειτουργικό σύστημα που αδειοδοτείται ανά συσκευή εγκατάστασης. Είναι προφανές ότι σε μεγαλύτερες κλίμακες όπου η ταξινόμηση των απορριμμάτων πραγματοποιείται σε πολλές εγκαταστάσεις, η αποστολή δεδομένων στον διακομιστή νέφους για ταξινόμηση είναι πολύ πιο αποτελεσματική και διατηρεί το κόστος στο ελάχιστο. Ένα άλλο πλεονέκτημα της χρήσης του υπολογιστικού νέφους είναι η ευκολία αναδιαμόρφωσης του αλγορίθμου ταξινόμησης. Επειδή όλοι οι υπολογισμοί μεταφέρονται στο νέφος, οι αλλαγές στον αλγόριθμο ταξινόμησης πρέπει να γίνουν μόνο μία φορά και όχι για κάθε εγκατάσταση συλλογής απορριμμάτων ξεχωριστά. Λόγω όλων των προαναφερθέντων πλεονεκτημάτων της εκφόρτωσης των υπολογισμών στο νέφος, η σχεδιαστική επιλογή της εφαρμογής του κρίνεται συμφέρουσα.

Προκειμένου να αυξηθεί περαιτέρω η ταχύτητα εκτέλεσης και η αποδοτικότητα ενός έξυπνου κάδου με βάση το υπολογιστικό νέφος, μια πιθανή λύση είναι η υλοποίηση του αλγορίθμου, π.χ. ταξινόμησης ή πρόβλεψης, σε μια πλακέτα FPGA [182] ([Εικόνα 48](#)), όπως είναι η Zynq-7000 ARM/FPGA SoC. Η δημοτικότητα των πλακετών FPGA αυξάνεται σταθερά τις τελευταίες δεκαετίες. Η τεχνολογία FPGA προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με κλασσικούς αλγορίθμους που εκτελούνται σε CPU ή GPU, συμπεριλαμβανομένης της ταχύτητας εκτέλεσης και της ενεργειακής απόδοσης. Σε έναν έξυπνο κάδο ή στη MEA που χρησιμοποιεί τεχνικές υπολογιστικής νέφους, η πλακέτα

FPGA θα μπορούσε να βρίσκεται στο νέφος σε συνδυασμό με έναν παραδοσιακό διακομιστή υψηλών επιδόσεων. Καθώς ο διακομιστής θα λαμβάνει εικόνες για ταξινόμηση από τα ενσωματωμένα συστήματα που βρίσκονται στις εγκαταστάσεις συλλογής απορριμμάτων, θα μπορούσε να μεταφορτώσει τη διαδικασία ταξινόμησης στις πλακέτες FPGA. Πολλές πλακέτες υποστηρίζουν συνδεσιμότητα PCIe, με μέγιστο θεωρητικό εύρος ζώνης 15,75 GB/s στην έκδοση 3.0. Το κύριο μειονέκτημα των πλακετών FPGA, ωστόσο, είναι το αυξημένο κόστος και η πολυπλοκότητα της σχεδίασης. Η διαδικασία ανάπτυξης σε πλακέτες FPGA περιλαμβάνει τη σχεδίαση προσαρμοσμένων κυκλωμάτων υλικού. Παραδοσιακά, αυτά τα κυκλώματα υλικού περιγράφονται μέσω γλωσσών περιγραφής υλικού (HDL), όπως η VHDL και η Verilog, ενώ το λογισμικό προγραμματίζεται μέσω μιας από μια πληθώρα γλωσσών προγραμματισμού, όπως η Java, η C και η Python. Μια επερχόμενη τάση στις FPGA είναι η σύνθεση υψηλού επιπέδου (High Level Synthesis - HLS). Το HLS επιτρέπει τον προγραμματισμό των FPGA με τη χρήση κανονικών γλωσσών προγραμματισμού, όπως το OpenCL ή η C++, επιτρέποντας ένα πολύ υψηλότερο επίπεδο αφαίρεσης. Ωστόσο, ακόμη και όταν χρησιμοποιούνται γλώσσες υψηλού επιπέδου, ο προγραμματισμός των FPGA εξακολουθεί να είναι μια τάξη μεγέθους πιο δύσκολος από τον προγραμματισμό συστημάτων που βασίζονται σε εντολές. Η επιτάχυνση της διαδικασίας ταξινόμησης απορριμμάτων χρησιμοποιώντας πλακέτες FPGA είναι αποτελεσματική μόνο σε μεγαλύτερες κλίμακες, όπου το κέρδος απόδοσης του συστήματος αντισταθμίζει την αυξημένη πολυπλοκότητα και το κόστος σχεδίασης.



Εικόνα 48: Σχηματική απεικόνιση της τεχνολογίας FPGA

6.5 Διαχωρισμός στις Μονάδες Επεξεργασίας Απορριμμάτων (ΜΕΑ)

Ο διαχωρισμός των ανακυκλώσιμων υλικών στο εργοστάσιο, γνωστός και ως ανακύκλωση μετά την κατανάλωση, είναι η διαδικασία συλλογής ανακυκλώσιμων υλικών σε μια κεντρική τοποθεσία, όπως μια Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων και στη συνέχεια η διαλογή και η επεξεργασία των υλικών [183]. Ενώ, η μέθοδος αυτή έχει αρκετά πλεονεκτήματα, έχει επίσης αρκετά μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Σε αυτήν την ενότητα, θα διερευνήσουμε τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του διαχωρισμού των υλικών στο εργοστάσιο και πώς αυτά μπορούν να επηρεάσουν το περιβάλλον και την οικονομία και θα παρουσιάσουμε την δική μας προτεινόμενη λύση με την χρήση ΕΣ.

- Πλεονεκτήματα διαχωρισμού ανακυκλώσιμων υλικών στο εργοστάσιο

Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα του διαχωρισμού των ανακυκλώσιμων υλικών στο εργοστάσιο είναι ότι μπορεί να αυξήσει την ποιότητα των ανακυκλωμένων υλικών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για τη διαλογή και τον διαχωρισμό των υλικών στη ΜΕΑ χρησιμοποιούνται προηγμένες τεχνολογίες, όπως η μηχανική διαλογή, η οπτική διαλογή και η διαλογή με αισθητήρες. Αυτό συμβάλλει στη διασφάλιση ότι τα ανακυκλωμένα υλικά είναι υψηλής ποιότητας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή νέων προϊόντων.

Επιπλέον, ο διαχωρισμός στο εργοστάσιο μπορεί επίσης να συμβάλει στη δημιουργία θέσεων εργασίας στις βιομηχανίες ανακύκλωσης και παραγωγής, γεγονός που μπορεί να συμβάλει στην τόνωση της οικονομίας. Αυτό συμβαίνει διότι η ανακύκλωση στο εργοστάσιο μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένη ζήτηση για ανακυκλωμένα υλικά, η οποία με τη σειρά της δημιουργεί θέσεις εργασίας στους τομείς της ανακύκλωσης και της μεταποίησης.

- Μειονεκτήματα διαχωρισμού ανακυκλώσιμων υλικών στο εργοστάσιο

Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα του διαχωρισμού στο εργοστάσιο είναι ο κίνδυνος μόλυνσης των ανακυκλώσιμων υλικών. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν μη ανακυκλώσιμα υλικά, όπως πλαστικές σακούλες ή υπολείμματα τροφών, αναμειγνύονται με τα ανακυκλώσιμα υλικά. Αυτό μπορεί να μειώσει την ποιότητα των ανακυκλωμένων υλικών και να καταστήσει δύσκολη ή ακόμη και αδύνατη την ανακύκλωσή τους. Επιπλέον, μπορεί

επίσης να αυξήσει το κόστος της διαδικασίας ανακύκλωσης, καθώς τα υλικά πρέπει να ταξινομηθούν και να διαχωριστούν στην ΜΕΑ.

Ένα άλλο μειονέκτημα του διαχωρισμού στο εργοστάσιο είναι το αυξημένο κόστος μεταφοράς. Προκειμένου να συλλεχθούν τα ανακυκλώσιμα υλικά σε μια κεντρική τοποθεσία, γεγονός που αυξάνει τις ανάγκες σε ενέργεια που χρησιμοποιείται για την διαδικασία ανακύκλωσης. Αυτό με τη σειρά του αυξάνει το συνολικό κόστος της διαδικασίας ανακύκλωσης και μπορεί ως ένα βαθμό να συμβάλει στην ατμοσφαιρική ρύπανση.

Επιπλέον, ο διαχωρισμός στο εργοστάσιο μπορεί, να απαιτεί προηγμένες τεχνολογίες και εξοπλισμό, η εφαρμογή των οποίων συνήθως να είναι δαπανηρή. Αυτό καθιστά δύσκολη τη δημιουργία προγραμμάτων ανακύκλωσης σε μικρές ή αγροτικές κοινότητες ή την υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών διαχείρισης αποβλήτων από τις αναπτυσσόμενες χώρες.

Ένα άλλο μειονέκτημα του διαχωρισμού στο εργοστάσιο είναι ότι μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των θέσεων εργασίας στις βιομηχανίες ανακύκλωσης και μεταποίησης. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η ανακύκλωση γίνεται σε μεγάλη κλίμακα και η αυτοματοποίηση χρησιμοποιείται για τη μείωση του εργατικού κόστους.

Όπως ήδη αναφέρθηκε στην παρούσα διατριβή, ο τρόπος διαχωρισμού των υλικών στις ΜΕΑ χρίζει βελτιστοποίηση. Η χρήση των ενσωματωμένων συστημάτων και του Διαδικτύου των Πραγμάτων μπορούν να συμβάλλουν θετικά προς αυτή την κατεύθυνση.

Η αρχιτεκτονική που παρουσιάζεται στην παρούσα διατριβή [95] επιτυγχάνει εξαιρετική ακρίβεια ταξινόμησης 92,43% σε πέντε διαφορετικές κατηγορίες απορριμμάτων. Το προτεινόμενο σύστημα είναι μια ολοκληρωμένη λύση που μπορεί να εντοπίσει και να παρέχει μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα μπορεί να επιτύχει 76 καρέ ανά δευτερόλεπτο στο σύγχρονο υλικό μας και είναι ικανό για εξαγωγή συμπερασμάτων σε πραγματικό χρόνο. Η ακρίβεια των επιμέρους υλικών είναι πολύ υψηλή όπως για το χαρτί 95,42%, το πλαστικό 95,46%, το αλουμίνιο 94,27% και τα απορρίμματα 84,57%. Επίσης, το δικό μας μοντέλο δοκιμάστηκε σε πραγματικές συνθήκες και όχι σε εργαστηριακές όπου η ταχύτητα και το κόστος δεν αποτελεί βασική προϋπόθεση.

Η κύρια καινοτομία της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής συστήματος είναι ο υπολογισμός που μεταφορτώνεται στο υπολογιστικό νέφος (cloud). Η χρήση του υπολογιστικού νέφους για την ταξινόμηση των απορριμμάτων ελαχιστοποιεί το κόστος υλοποίησης σε μεγαλύτερες κλίμακες όπου πολλαπλές εγκαταστάσεις συλλογής απορριμμάτων χρησιμοποιούν τον διακομιστή υπολογιστικού νέφους. Εξαιτίας αυτού, οι

επιτόπιες απαιτήσεις υλικού στις Μονάδες Επεξεργασίας Απορριμμάτων είναι πολύ χαμηλές σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Αυτό καθιστά το προτεινόμενο σύστημα μια εφικτή λύση σε μεγαλύτερες κλίμακες. Η χρήση του υπολογιστικού νέφους, ωστόσο, είναι επίσης ο μεγαλύτερος περιοριστικός παράγοντας του συστήματος. Δεδομένου ότι η προτεινόμενη αρχιτεκτονική χρησιμοποιεί διακομιστές υπολογιστικού νέφους για τη διαδικασία ταξινόμησης, είναι προφανές ότι τα ενσωματωμένα συστήματα που βρίσκονται σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας απορριμμάτων απαιτούν συνεχή σύνδεση στο διαδίκτυο ή θα πρέπει να βρίσκονται σε διαρκή επικοινωνία με τον διακομιστή. Ωστόσο, αυτό συνήθως δεν αποτελεί πρόβλημα, επειδή οι περισσότερες εγκαταστάσεις διαθέτουν ήδη ευρυζωνικές συνδέσεις διαδικτύου υψηλής ταχύτητας. Επιπλέον, η φυσική απόσταση μεταξύ της θέσης του διακομιστή υπολογιστικού νέφους και κάθε μονάδας επεξεργασίας απορριμμάτων θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη, ώστε να ελαχιστοποιείται ο χρόνος μετάδοσης των εικόνων που λαμβάνονται και να υπάρχουν μικρές αποκρίσεις (delay). Εάν ο χρόνος μετάδοσης μεταξύ τους είναι πολύ μεγάλος, η απόκριση του διακομιστή που περιέχει το αποτέλεσμα της διαδικασίας ταξινόμησης μπορεί να φτάσει στην ΜΕΑ αφού το αντικείμενο φτάσει στο τέλος του κινούμενου ιμάντα απορριμμάτων.

Για να βελτιώσουμε την αποτελεσματικότητα της ταξινόμησης των απορριμμάτων, παρουσιάζουμε μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική που υποστηρίζεται από το υπολογιστικό νέφος. Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από διάφορες ενσωματωμένες συσκευές που διανέμονται σε διαφορετικές εγκαταστάσεις που φωτογραφίζουν σε πραγματικό χρόνο τα απορρίμματα στέλνοντας τις στον διακομιστή προς ταξινόμηση. Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι να δώσουμε οδηγίες σε πραγματικό χρόνο σε ένα καταναμημένο αριθμό ρομποτικών συστημάτων για την εξαγωγή και διαλογή των ανακυκλώσιμων υλικών σε κατάλληλους κάδους. Το ρομποτικό σύστημα είναι εκτός του πεδίου αυτής της διατριβής και δεν θα παρουσιαστεί.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται λεπτομέρειες σχετικά με το σύνολο δεδομένων (dataset) που χρησιμοποιήθηκαν, τις μεθόδους προ-επεξεργασίας και εκπαίδευσης του αλγορίθμου και παραθέτουμε τα πειραματικά αποτελέσματα της υλοποίησης. Τα πειράματα διεξάχθηκαν χρησιμοποιώντας το εργαλείο fast.ai [184] το οποίο χρησιμοποιεί το PyTorch [185] ως backend.

➤ **Σύνολο δεδομένων (Dataset)**

Στη συγκεκριμένη εργασία [95] που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, στοχεύουμε στην ταξινόμηση των ανακυκλώσιμων υλικών : το γυαλί, το χαρτί, το χαρτόνι και το μέταλλο. Το dataset που χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση των μοντέλων είναι το TrashNet. Αυτό το σύνολο δεδομένων περιέχει υποκατηγορίες χαρτιού, γυαλιού, πλαστικού, μετάλλου, χαρτοκιβωτίων και απορριμμάτων. Οι εικόνες σε αυτό το σύνολο δεδομένων αποτελούνται από φωτογραφίες απορριμμάτων που έχουν ληφθεί σε λευκό φόντο. Η διαφορετική έκθεση και ο φωτισμός που έχουν επιλεγεί για κάθε φωτογραφία περιλαμβάνουν τις παραλλαγές στο dataset. Το μέγεθος κάθε εικόνας είναι σε 512×384 pixel και το αρχικό σύνολο δεδομένων είχε μέγεθος σχεδόν 3,5 GB. Το TrashNet [199] περιέχει συνολικά 2527 εικόνες. Το περιεχόμενο του συνόλου δεδομένων έχει ως εξής: 594 χαρτί, 501 γυαλί, 137 σκουπίδια, 410 μέταλλο, 482 πλαστικό, 403 χαρτόνι. Για αυτή την εργασία, το 70% όλων των εικόνων χρησιμοποιήθηκαν για εκπαίδευση, το 17% για δοκιμές και το 13% για επικύρωση [186].

➤ Εκπαίδευση

Για να κατασκευάσουμε τον ταξινομητή μας, χρησιμοποιούμε το μοντέλο MobileNet-V2 από το torchvision. Επιπλέον, ενεργοποιήσαμε το CUDA και προσαρμόσαμε το μοντέλο στην αρχιτεκτονική DataParallel προκειμένου να εκμεταλλευτούμε τον παραλληλισμό πολλών GPU. Το MobileNet είναι ένα μοντέλο που συνιστάται από την ερευνητική ομάδα της Google και αποτελείται από διαχωρίσιμους νευρώνες (convolutions) που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στο μοντέλο Inception. Ο λόγος είναι για να μειωθεί ο αριθμός των πρώτων υπολογισμών στα πρώτα στρώματα.

➤ Αύξηση δεδομένων

Για την αύξηση δεδομένων, χρησιμοποιούμε παραδοσιακούς μετασχηματισμούς. Εκτελείται ένας συνδυασμός συγγενικών μετασχηματισμών για τον χειρισμό των δεδομένων εκπαίδευσης για κάθε εικόνα στο σύνολο δεδομένων. Δημιουργούνται διπλότυπες εικόνες εισόδου, οι οποίες μετατοπίζονται, μεγεθύνονται/σμικρύνονται, περιστρέφονται, αναστρέφονται, παραμορφώνονται ή σκιάζονται με μια απόχρωση. Τόσο η εικόνα όσο και το αντίγραφο τροφοδοτούνται στο μοντέλο μας. Για σύνολο δεδομένων μεγέθους N , δημιουργούμε ένα σύνολο δεδομένων μεγέθους $2N$ για την εκπαίδευση και την αξιολόγηση του μοντέλου μας.

➤ Βέλτιστος ρυθμός μάθησης

Ο ρυθμός εκμάθησης είναι μια παράμετρος συντονισμού σε έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης που καθορίζει το μέγεθος βήματος σε κάθε επανάληψη ενώ κινείται προς

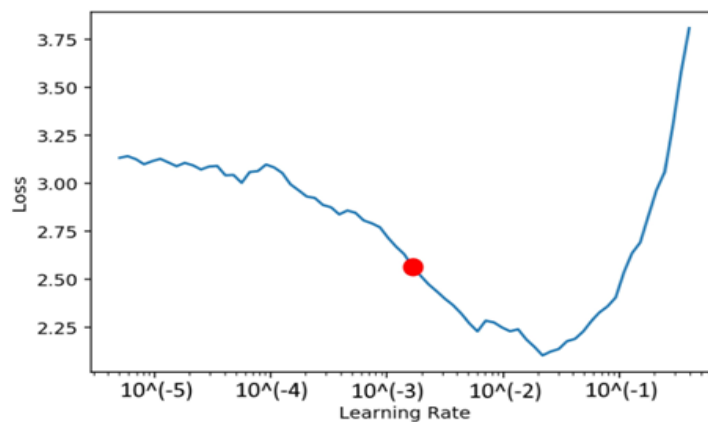
μια ελάχιστη συνάρτηση απώλειας. Ένας πολύ μικρός ρυθμός μάθησης (Learning Rate - LR) μπορεί να προκαλέσει υπερβολική προσαρμογή. Με μεγαλύτερο ρυθμό μάθησης, η εκπαίδευση μπορεί να ομαλοποιηθεί. Ωστόσο, πολύ μεγάλο ποσοστό μάθησης μπορεί να προκαλέσει αποκλίνουσα εκπαίδευση. Επομένως, μια λύση θα μπορούσε να είναι η εύρεση συγκλινόντων ή αποκλινόντων ποσοστών μάθησης χρησιμοποιώντας μια βραχυπρόθεσμη αναζήτηση πλέγματος. Ένας ευκολότερος τρόπος είναι να επιλεγεί ο ρυθμός μάθησης χρησιμοποιώντας μεθόδους, όπως η δοκιμή εύρους ρυθμού μάθησης (δοκιμή εύρους LR) και οι κυκλικοί ρυθμοί μάθησης (Cyclical Learning Rate- CLR).

Στη δοκιμή σειράς LR, ξεκινάμε με ένα μικρό ποσοστό εκμάθησης που αυξάνεται γραμμικά κατά τη διάρκεια της προ-προπόνησης. Αυτό παρέχει ανατροφοδότηση τόσο για το μέγιστο ποσοστό μάθησης του δικτύου όσο και για την αποτελεσματικότητά του που πρέπει να εκπαιδευτεί σε μια σειρά ποσοστών μάθησης. Η επιλογή ενός μικρού ρυθμού εκμάθησης για την έναρξη προκαλεί τη σύγκλιση του δικτύου και τελικά, τη μεγέθυνση, οδηγώντας σε μειωμένη ακρίβεια και αυξημένη απώλεια δοκιμής / επικύρωσης. Αυτός ο ρυθμός μάθησης είναι η μεγαλύτερη τιμή που χρησιμοποιείται για το μέγιστο όριο με κυκλικούς ρυθμούς μάθησης, αλλά σε περίπτωση σταθερού ρυθμού μάθησης, προτιμάται μικρότερη τιμή, διαφορετικά το δίκτυο δεν θα συγκλίνει. Το ελάχιστο όριο ενός ποσοστού μάθησης μπορεί να επιλεγεί από: 1) Συντελεστή 3 ή 4 μικρότερο από το μέγιστο όριο, 2) συντελεστή 10 ή 20 μικρότερο από το μέγιστο όριο όταν χρησιμοποιείται μόνο ένας κύκλος, 3) έλεγχος πολλών επαναλήψεων με λίγα αρχικά ποσοστά μάθησης και επιλογή του μεγαλύτερου που θα επιτρέψει στην εκπαίδευση να συγκλίνει χωρίς να προκαλεί υπερβολική προσαρμογή (σε περίπτωση μεγάλου αρχικού ρυθμού μάθησης, η εκπαίδευση δεν θα συγκλίνει). Από την άλλη, για να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος CLR, πρέπει να καθοριστούν τόσο τα όρια μεγέθους βαθμίδας όσο και τα όρια ελάχιστης και μέγιστης ταχύτητας. Συγκεκριμένα, το μέγεθος βήματος υποδεικνύει τις εποχές που είναι ο αριθμός επαναλήψεων. Σε κάθε κύκλο υπάρχουν δύο βήματα αυτού του είδους: 1) Γραμμική αύξηση του ρυθμού μάθησης από το ελάχιστο στο μέγιστο και 2) γραμμική μείωση. Χρησιμοποιώντας την παραπάνω μεθοδολογία, διαπιστώσαμε ότι ο βέλτιστος ρυθμός μάθησης για τον βελτιστοποιητή είναι $1,66 \times 10^{-3}$ (σχήμα της [Εικόνας 49](#)).

➤ Εκπαίδευση MobileNet

Παρόλο που το MobileNet ήταν δομημένο σε διακριτούς νευρώνες (convolutions) από άποψη βάθους, το πρώτο του επίπεδο είναι η πλήρης συνέλιξη. Το MobileNet προσφέρει υψηλά ποσοστά ακρίβειας αξιοποιώντας μόνο λίγους υπερπαραμέτρους (hyperparameters), καθιστώντας το ένα γρήγορο μοντέλο εκπαίδευσης που χρησιμοποιεί

λιγότερους πόρους. Όπως φαίνεται και στην [Εικόνα 49](#), ο βέλτιστος ρυθμός εκμάθησης του μοντέλου MobileNet-V2 είναι $1,66 \times 10^{-3}$.



Εικόνα 49: Ο βέλτιστος ρυθμός εκμάθησης του μοντέλου MobileNet-V2

Εκπαιδεύσαμε το μοντέλο για 20 εποχές. Ο ρυθμός μάθησης μειώνεται με κάθε εποχή, επιτρέποντάς μας να πλησιάζουμε όλο και πιο κοντά στο βέλτιστο. Την τελευταία εποχή το σφάλμα επικύρωσης μειώνεται σε περίπου 5%, το οποίο είναι ιδανικό.

6.6 Πειραματικά αποτελέσματα

Το περιβάλλον για τα πειράματα αποτελείται από έναν αποκλειστικό διακομιστή Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2630 v4 @ 2.20 GHz με TDP ονομαστικής ισχύος 85 W (Θερμική Ισχύς Σχεδιασμού). Το λειτουργικό σύστημα είναι το Red Hat Enterprise Linux διακομιστή 7.4 x86_64. Το σύστημα χρησιμοποιεί 2x GPU Tesla K40m για επιτάχυνση. Η TGP (Συνολική ισχύς γραφικών- Total Graphics Power) κάθε GPU έχει ονομαστική ισχύ 235 W.

Το μοντέλο MobileNet ανά καρέ είναι περίπου 16 ms. Ο διακομιστής υπό πλήρη χρήση μπορεί να επιτύχει περίπου 76 καρέ ανά δευτερόλεπτο. Επομένως, μπορούμε να υποστηρίξουμε τουλάχιστον 4 βιομηχανικούς σταθμούς, με μέγιστο ρυθμό καρέ 19 fps σε πραγματικό χρόνο. Ένα πειραματικό συμπέρασμα του μοντέλου Inception-V4, είναι ότι πέτυχε μέγιστο 22 fps. Ως εκ τούτου, η χρήση του MobileNet μεγιστοποιεί αποτελεσματικά την ακρίβεια λαμβάνοντας υπόψη τους υπολογιστικούς πόρους.

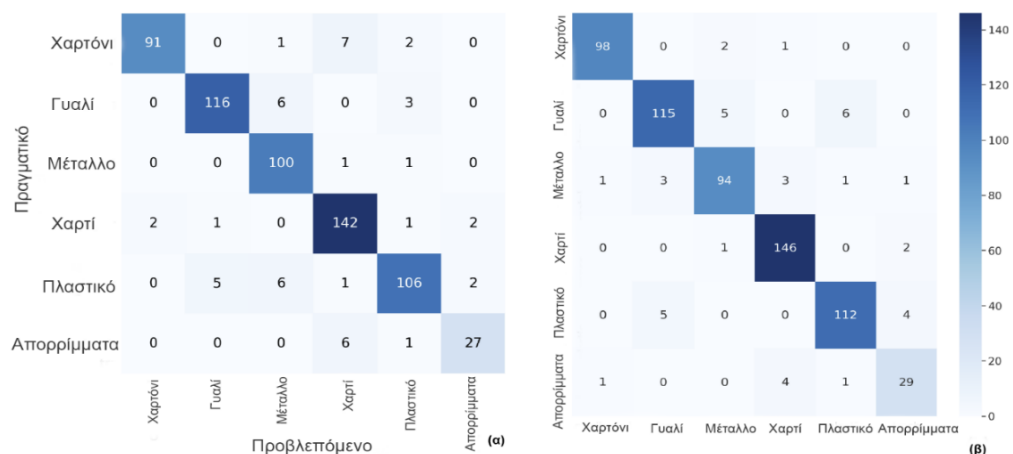
Όπως φαίνεται στον [Πίνακα 3](#), το εκπαιδευμένο μοντέλο μας ξεπερνά τα πιο σύνθετα μοντέλα σε σύγκριση με τους Gomez-Rodriguez & Song [204]. Οι τεχνικές αύξησης δεδομένων και ο συντονισμός υπερπαραμετρήσεων είχαν σημαντικό αντίκτυπο

στα τελικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα στον [Πίνακα 3](#), παρουσιάζονται τα μοντέλα, οι εποχές και η ακρίβεια που επιτεύχθηκε. Όπως βλέπουμε, το δικό μας μοντέλο MobileNet-V2 στις 20 εποχές είχε ακρίβεια της τάξης του 96,57%, ενώ το αμέσως επόμενο μοντέλο ήταν το DenseNet169 με 120 εποχές και ακρίβεια 95,18%. Βάσει του πίνακα το δικό μας μοντέλο είναι γρηγορότερο από τα αντίστοιχα, τρέχει σε 20 εποχές, και η ακρίβεια είναι πολύ υψηλή μεταξύ των επιλεγμένων μοντέλων με μέσο όρο 96,57%.

Μοντέλο	Εποχή	Ακρίβεια
InceptionResnetV2	100	89,13%
Xception	100	80,25%
Xception	150	82,07%
DenseNet121	100	95,10%
DenseNet169	120	95,18%
Inception-V4	200	89,33%
Inception-V4	120	94,24%
MobileNet	200	84,39%
MobileNet-V2 (δικό μας)	20	96,57%

Πίνακας 4: Αποτελέσματα δοκιμών χρησιμοποιώντας το ThrashNet

Όπως φαίνεται στον πίνακα «σύγχυσης» ([Εικόνα 50](#)), το μοντέλο συγχέει κυρίως το γυαλί με το μέταλλο και το πλαστικό. Λόγω της διαφάνειας και της αντανάκλασης του γυάλινου υλικού, θεωρούμε ότι είναι το πιο δύσκολο να ταξινομηθεί, χωρίς πληροφορίες όπως το βάρος και οι ιδιότητες της επιφάνειας, ακόμη και από έναν άνθρωπο.



Εικόνα 50: Πίνακας σύγχυσης του μοντέλου μας σε (α) δεδομένα αμαξοστοιχίας και (β) δοκιμών.

6.7 Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Τα τελευταία χρόνια, η παραγωγή αστικών στερεών αποβλήτων (ΑΣΑ) αυξάνεται συνεχώς. Είναι προφανές ότι η ανακύκλωση είναι η μόνη βιώσιμη λύση σε αυτό το πρόβλημα. Η διαδικασία της ανακύκλωσης, ωστόσο, απαιτεί τον διαχωρισμό των απορριμμάτων εφόσον στις Μονάδες Επεξεργασίας Απορριμμάτων (ΜΕΑ), εφόσον δεν έχει πραγματοποιηθεί στην πηγή. Ο διαχωρισμός των απορριμμάτων είναι μια χρονοβόρα διαδικασία που εκτελείται επί του παρόντος ως ένα βαθμό από τις μηχανές και εν συνεχεία από τον άνθρωπο. Ως προσπάθεια επίλυσης αυτού του ζητήματος, παρουσιάσαμε μια καινοτόμο λύση για την ταξινόμηση των απορριμμάτων στις εγκαταστάσεις συλλογής αποβλήτων. Χρησιμοποιώντας την μεταφόρτωση των υπολογισμών στο νέφος (cloud), μπορούμε να επιτύχουμε χαμηλό κόστος υλοποίησης και πολυπλοκότητας. Η ερευνητική μας εργασία χρησιμοποιεί τεχνολογίες εντοπισμού αντικειμένων μαζί με ένα Νευρωνικό Δίκτυο (CNN) προκειμένου να ανιχνεύσουμε τα ανακυκλώσιμα υλικά σε έναν κινούμενο ιμάντα (διάδρομο). Το Νευρωνικό Δίκτυο ταξινομεί τα απορρίμματα σε πέντε κατηγορίες: χαρτί, γυαλί, πλαστικό, μέταλλο και σκουπίδια. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας είναι πολύ ενθαρρυντικά, καθώς η ακρίβεια του CNN έφτασε στο 92,43%. Το επόμενο βήμα αυτής της έρευνας είναι να πειραματιστούμε με τεχνικές μηχανικής μάθησης (machine learning) και να διερευνήσουμε πώς θα μπορούσαμε να αυξήσουμε την απόδοση του καλύτερου εντοπισμού των αντικειμένων. Ο τελικός στόχος αυτής της έρευνας, ωστόσο, είναι η ανάπτυξη ενός ρομποτικού συστήματος που θα μπορούσε να εγκατασταθεί σε ΜΕΑ και να τοποθετεί τα υλικά στον κατάλληλο κάδο με βάση το υλικό τους, αυτόνομα, χωρίς την εμπλοκή εργαζομένων.

Στο έκτο κεφάλαιο, τα πειραματικά αποτελέσματα απέδειξαν πως η χρήση των ΤΠΕ στην ανακύκλωση και κυρίως τα ενσωματωμένα συστήματα, μπορούν να αξιοποιηθούν προς όφελος της αυτοματοποίησης της διαδικασίας και την μείωση της έκθεσης των ανθρώπων στα απορρίμματα. Μέσω της αυτοματοποίησης η διαδικασία της ανακύκλωσης μπορεί να επιταχυνθεί και να είναι περισσότερο ακριβής, υποβοηθώντας την όλη διαδικασία. Μέσω της συγκεκριμένης διατριβής πραγματοποιήθηκαν πειραματικές αναλύσεις σε πραγματικές συνθήκες και τα αποτελέσματα ήταν πέραν του δέοντος ικανοποιητικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα

Η μαζική αστικοποίηση στις ανεπτυγμένες και αναπτυσσόμενες χώρες, σε συνδυασμό με την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και την οικονομική ανάπτυξη, οδήγησαν στην ραγδαία αύξηση της παραγωγής περισσότερων προϊόντων, με συνέπεια την ολοένα και περισσότερο αυξανόμενη δημιουργία αστικών αποβλήτων. Τα αστικά στερεά απόβλητα (ΑΣΑ) αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Ρυπαίνουν το έδαφος και τον υδροφόρο ορίζοντα με την διαρροή επικίνδυνων τοξικών ουσιών, μπορούν να καταστούν αιτίες πυρκαγιών καθώς και παράγοντας διάδοσης μολυσματικών ασθενειών.

Οι σύγχρονες κοινωνίες καταναλώνουν τεράστιες ποσότητες αγαθών όπως τα τρόφιμα, τα ενδύματα, τα πλαστικά μιας χρήσης κ.α. Τα ΑΣΑ αποτελούν ένα ανομοιογενές σύνολο υλικών όπως χαρτί, γυαλί, πλαστικό, μέταλλα, υπολείμματα τροφών κτλ. Μπορούμε να χωρίσουμε τα απορρίμματα σε πέντε κατηγορίες:

- Οικιακά, τα οποία αφορούν απορρίμματα νοικοκυριών όπως υπολείμματα τροφών και συσκευασίες αγαθών
- Βιομηχανικά, όπως αδρανή υλικά, υπολείμματα υλικών της παραγωγικής διαδικασίας
- Αγροτικά, απορρίμματα που προκύπτουν από τις αγροτικές εργασίες όπως χώμα, ξύλα κτλ.
- Εμπορικά, τα οποία αφορούν απορρίμματα διαφόρων κλάδων όπως καταστήματα, εστιατόρια, ξενοδοχεία κτλ.
- Ειδικά, τα οποία αναφέρονται σε εξειδικευμένες εργασίες όπως τα νοσοκομεία, τα μικροβιολογικά εργαστήρια κτλ και αφορούν χημικά, ραδιενεργά, βιολογικά και άλλα απόβλητα.

Αν συνεχιστεί η παραγωγή των αστικών στερεών αποβλήτων με αυτούς τους ρυθμούς το περιβαλλοντικό πρόβλημα ολοένα και περισσότερο θα αυξάνεται. Ήδη οι ανεπτυγμένες χώρες όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, η Ευρωπαϊκή Ένωση, η Αυστραλία, η Ιαπωνία και άλλες, έχουν χαράξει την πολιτική της πρόληψης και επαναχρησιμοποίησης η οποία όμως απαιτεί χρόνο.

Έτσι προκύπτουν δύο βασικά ζητήματα για την προστασία του περιβάλλοντος. Το πρώτο αφορά την καλύτερη διαχείριση των αστικών στερεών απορριμμάτων ώστε να παραμένουν καθαρές οι αστικές περιοχές όπου βρίσκεται το μεγαλύτερο ποσοστό του

πληθυσμού, και το δεύτερο η ανακύκλωση των υλικών ώστε να μειωθεί ο όγκος των απορριμμάτων και να επαναχρησιμοποιηθούν τα υλικά.

Όσον αφορά το πρώτο πρόβλημα, σήμερα, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αποκομιδή των απορριμμάτων βασίζεται στην «παραδοσιακή» θα λέγαμε τεχνική, όπου ένα απορριμματοφόρο ανά τακτά χρονικά διαστήματα πραγματοποιεί συγκεκριμένα δρομολόγια. Με αυτό τον τρόπο το απορριμματοφόρο περνά από συγκεκριμένες περιοχές είτε οι κάδοι είναι πλήρης είτε άδειοι. Σε πολλές δε περιπτώσεις οι κάδοι έχουν υπερχειλίσει με κίνδυνο για την δημόσια υγεία και το περιβάλλον. Η προσπάθεια με την υπογειοποίηση κάδων σε όσα σημεία είναι εφικτό στον αστικό ιστό, επιφέρουν μία μείωση του φαινομένου αλλά δεν είναι αρκετό, δεδομένου ότι σε αρκετά σημεία των πόλεων ή της υπαίθρου η χρήση αυτών των κάδων είναι ανέφικτη, καθώς επίσης το κόστος εγκατάστασης δεν ενδείκνυται σε αραιοκατοικημένες περιοχές. Επιπλέον, σε αυτούς τους κάδους απαιτείται ειδικό απορριμματοφόρο και ο χρόνος αποκομιδής είναι μεγαλύτερος. Διαφαίνεται λοιπόν, πως ο σημερινός τρόπος αποκομιδής των απορριμμάτων χρίζει βελτίωσης.

Το δεύτερο επίσης μεγάλο ζήτημα, αυτό της ανακύκλωσης, βοηθά στην προστασία του περιβάλλοντος. Είναι σημαντικό να τονιστεί ο ιδιαίτερος ρόλος των πολιτών αλλά και της ίδιας της πολιτείας προς την αύξηση της ανακύκλωσης. Από τη μία πλευρά η πολιτεία πρέπει να ευαισθητοποιήσει, ενημερώσει και διευκολύνει τους πολίτες στη διαδικασία της ανακύκλωσης των υλικών, ενώ από την άλλη, οι πολίτες θα πρέπει να συμμετάσχουν ενεργά σε αυτή. Αν και έχουν γίνει μεγάλες προσπάθειες από τους διάφορους φορείς των ανεπτυγμένων χωρών οι πολίτες δεν συμμετέχουν στον επιθυμητό βαθμό στην ανακύκλωση. Είναι γνωστό, πως ο διαχωρισμός των υλικών στην πηγή, καθιστά αποτελεσματικότερη την ανακύκλωση των υλικών, εξοικονομώντας πολύτιμο χρόνο. Έτσι, τοποθετούνται ξεχωριστοί κάδοι για την συλλογή των υλικών, όπως κάδος μόνο για γυαλί, πλαστικό, χαρτί, αλουμίνιο, υπολείμματα τροφίμων και άλλοι. Μέσα από την παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκε εκτός των πειραματικών μετρήσεων και προσωπική συνέντευξη με τον διευθυντή της ΕΠΑΔΥΜ, όπου υπάρχει η Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων (ΜΕΑ) στη Δυτική Μακεδονία. Μέσα από τη συνέντευξη επικαιροποιήσαμε τα δεδομένα με την βιβλιογραφική ανασκόπηση, δηλαδή, ότι οι πολίτες δεν συμμετέχουν όσο θα έπρεπε στη διαδικασία της ανακύκλωσης και πολλές φορές συμμετέχουν με λάθος τρόπο, τοποθετώντας στους ξεχωριστούς κάδους λάθος υλικά ή υλικά που δεν ανακυκλώνονται. Επίσης, το μεγαλύτερο μέρος των ανακυκλώσιμων υλικών βρίσκεται στα σύμμεικτα απορρίμματα. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν σταθμοί

μεταφόρτωσης απορριμμάτων, που επεξεργάζονται το σύνολο των Αστικών Στερεών Σύμμεικτων Απορριμμάτων. Η διαδικασία είναι χρονοβόρα, ενεργοβόρα, κοστοβόρα και διακρίνεται σε διάφορα στάδια, ξεκινώντας από την χειροδιαλογή των ογκώδη υλικών, συνεχίζει με μηχανικούς τρόπους διαλογής και εν συνεχεία με ηλεκτρονικούς τρόπους πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των ανακυκλώσιμων υλικών από τα απορρίμματα. Τα απορρίμματα χωρίζονται ανάλογα με το υλικό τους και στο τέλος το καθένα με διαφορετική διαδικασία ανακυκλώνεται για να επαναχρησιμοποιηθεί. Σε πολλά στάδια αυτής της διαδικασίας απαιτείται η συμμετοχή του ανθρώπινου παράγοντα, όπου χειροδιαλογείς επεμβαίνουν για να βελτιώσουν τον διαχωρισμό των υλικών. Οι συνθήκες για τους εργαζόμενους στις ΜΕΑ είναι ιδιαίτερα δύσκολες και επικίνδυνες για την υγεία τους. Με την καλύτερη αυτοματοποίηση της διαδικασίας μπορούμε να πετύχουμε την μείωση της έκθεσης των εργαζομένων στον κίνδυνο αλλά και να επιτύχουμε καλύτερο διαχωρισμό των υλικών μιας και σήμερα μέσω του αυτοματοποιημένου τρόπου φτάνει περίπου στο 85%. Συνοψίζοντας, με τη σημερινή διαδικασία απαιτείται πολύτιμος χρόνος και περισσότεροι χειροδιαλογείς για τον διαχωρισμό των υλικών.

Όπως φαίνεται, οι υφιστάμενες τεχνικές αποκομιδής απορριμμάτων και ανακύκλωσης υλικών έχουν περιθώρια βελτίωσης τα οποία θα αποφέρουν οφέλη για την κοινωνία, το περιβάλλον και την οικονομία. Η εφαρμογή των ενσωματωμένων συστημάτων (ΕΣ) μπορεί να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα βελτίωσης των διαδικασιών.

Με βάση τα παραπάνω η συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή εστίασε στην βελτίωση του τρόπου αποκομιδής των απορριμμάτων, αξιοποιώντας τα ενσωματωμένα συστήματα και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (ΔτΠ) για εφαρμογές στον τομέα του περιβάλλοντος, καθώς και στον τομέα της ανακύκλωσης στην πηγή και στο εργοστάσιο. Έτσι, αναπτύχθηκε ένα σύστημα το οποίο λαμβάνει μετρήσεις σχετικά με τον βαθμό πληρότητας του κάδου και την θερμοκρασία του, αποστέλλοντας τες σε ένα πληροφοριακό σύστημα στον διακομιστή για αποθήκευση και περαιτέρω επεξεργασία. Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης του συστήματος μπορεί να γνωρίζει σε πραγματικό χρόνο την πληρότητα του κάδου και την θερμοκρασία και να λαμβάνει τις αντίστοιχες αποφάσεις. Έτσι, συλλέγοντας την πληροφορία μπορεί να καταρτιστεί νέο δρομολόγιο, να αποφευχθεί η υπερχείλιση των κάδων και να μειωθούν τα άσκοπα δρομολόγια σε άδειους κάδους.

Μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και της πειραματικής ανάπτυξης, φαίνεται ότι για την συγκεκριμένη εφαρμογή τα ενσωματωμένα συστήματα με απλό 8bit επεξεργαστή ARM είναι τα καταλληλότερα αφού:

- Έχουν αρκετή μνήμη και υπολογιστική ισχύ για την εφαρμογή
- Έχουν μικρή κατανάλωση ισχύος
- Έχουν μικρό μέγεθος
- Έχουν χαμηλό κόστος

Η τοποθέτηση ενός ενσωματωμένου συστήματος στους κάδους απορριμμάτων θα πρέπει να καταλαμβάνει μικρό χώρο ώστε να τοποθετηθεί στο καπάκι του κάδου και με έναν αισθητήρα απόστασης (υπερήχων) και έναν αισθητήρα θερμοκρασίας να λαμβάνει τις αντίστοιχες μετρήσεις πληρότητας και θερμοκρασίας. Η χαμηλή κατανάλωση ισχύος είναι ιδιαίτερα σημαντική μιας και θα πρέπει να μην απαιτείται η φόρτιση της μπαταρίας του σε μικρά χρονικά διαστήματα, επειδή αυτό επιφέρει επιπλέον κόστος συντήρησης. Με αυτά ως γνώμονα το συγκεκριμένο σύστημα που αναπτύχθηκε βασίστηκε στο ενσωματωμένο σύστημα MKR1100 το οποίο φέρει κεραία LoRa (Long Range) για την μετάδοση των μετρήσεων. Σημαντικό είναι πως στο συγκεκριμένο κύκλωμα μπορούν να τοποθετηθούν διάφοροι αισθητήρες αλλά και άλλα δομοστοιχεία (modules) όπως διαφορετική συνδεσιμότητα (Wi-Fi, GSM, Bluetooth). Στη συγκεκριμένη διατριβή χρησιμοποιήσαμε έναν αισθητήρα υπερήχων HC-SR04 ο οποίος μετρά την απόσταση μεταξύ του καπακιού και της υψηλότερης στάθμης απορριμμάτων του κάδου και ενημερώνει για το ποσοστό πληρότητας. Εν συνεχεία τοποθετήθηκε ένας αισθητήρας θερμοκρασίας DHT-11. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα ο αισθητήρας παίρνει την μέτρηση και την στέλνει στο πληροφοριακό σύστημα. Με αυτό τον τρόπο, σε περίπτωση πυρκαγιάς του κάδου ενημερώνεται άμεσα ο χειριστής τους συστήματος. Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής δημιουργήθηκε μια μεθοδολογία με την ονομασία «Προσαρμοστικό Μοντέλο Z» (Adaptive Model Z), η οποία αφορά την χρήση ενσωματωμένων συστημάτων για εφαρμογές στο περιβάλλον. Χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία σε μελέτες περίπτωσης (use cases) στις ερευνητικές εργασίες [95] και [99] .

Με αυτούς τους δύο αισθητήρες που συνδέονται σε ένα ενσωματωμένο σύστημα πετυχαίνουμε από τη μία να γνωρίζουμε το επίπεδο απορριμμάτων του κάδου με αποτέλεσμα ο χρήστης διαχείρισης των απορριμμάτων να μπορεί να τροποποιήσει ανάλογα τα δρομολόγια μειώνοντας το κόστος μετακίνησης των απορριμματοφόρων. Με αυτό τον

τρόπο μπορούν να κρατηθούν οι πόλεις καθαρότερες. Από την άλλη, κάθε χρόνο καταστρέφονται λόγω εμπρησμού πολλοί κάδοι. Αυτό επιφέρει ένα επιπλέον κόστος στην τοπική κοινωνία καθώς επίσης εκλύονται από την καύση τοξικές ουσίες στο περιβάλλον. Με τον αισθητήρα θερμοκρασίας μπορεί ο χειριστής του συστήματος να γνωρίζει σε πραγματικό χρόνο ποιος κάδος καίγεται με αποτέλεσμα να προλάβει την εξάπλωση της φωτιάς.

Στην παρούσα διατριβή έγιναν διάφορες πειραματικές μετρήσεις χρησιμοποιώντας διαφορετικά πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως LoRa, WiFi και GSM. Το κάθε ένα από αυτά τα πρωτόκολλα έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αναλόγως με το σημείο που θα εγκατασταθεί το σύστημα. Το σημαντικό είναι πως μπορούμε στο δικό μας σύστημα να αξιοποιήσουμε το καθένα από αυτά χωρίς να επηρεάζεται την δομή. Συγκεκριμένα, το δίκτυο LoRa προϋποθέτει να υπάρχει ένα εγκατεστημένο δίκτυο δεκτών στην περιοχή εγκατάστασης του συστήματος. Για την δική μας εφαρμογή, το συγκεκριμένο δίκτυο είναι ιδανικό μιας και το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης είναι μικρό σε σχέση με άλλα δίκτυα, και η απόσταση κάλυψης αρκετά μεγάλη, εμείς λάβαμε μετρήσεις σε απόσταση 27,3 χλμ. Ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων είναι αρκετά μικρός αλλά αυτό δεν επηρεάζει τη δική μας εφαρμογή μιας και τα δεδομένα που αποστέλλονται έχουν μικρό μέγεθος της των byte. Το WiFi προϋποθέτει να υπάρχει ήδη εγκατεστημένο ένα τέτοιο δίκτυο το οποίο όμως καλύπτει μια μικρή γεωγραφική περιοχή. Το κόστος είναι μεγαλύτερο από το LoRa αλλά μπορεί να μεταφέρει ταχύτερα περισσότερα δεδομένα. Τέλος, το GSM είναι χρήσιμο σε αραιοκατοικημένες περιοχές όπου δεν υπάρχουν άλλα δίκτυα. Το μειονέκτημα της χρήσης του GSM στη δική μας εφαρμογή είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Παρ' όλα αυτά, εφόσον χρησιμοποιηθούν και τα τρία δίκτυα μπορεί να καλυφθεί οποιαδήποτε ανάγκη προκύψει.

Το άλλο ζήτημα που απασχόλησε την συγκεκριμένη διατριβή είναι η βελτίωση του αυτοματοποιημένου τρόπου διαχωρισμού των ανακυκλώσιμων υλικών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί είτε με την ανάπτυξη κάδων ανακύκλωσης που διαχωρίζει τα υλικά, είτε στην βελτίωση της διαδικασίας διαχωρισμού των ανακυκλώσιμων υλικών από τα σύμμεικτα απορρίμματα στη Μονάδα Επεξεργασίας Απορριμμάτων (ΜΕΑ). Στη σημερινή εποχή, αν και ο διαχωρισμός στην πηγή από τους πολίτες βαίνει αυξητικός, το μεγαλύτερο ποσοστό ανακυκλώσιμων υλικών καταλήγει στα απορρίμματα. Γι' αυτό οι ΜΕΑ διαδραματίζουν έναν σημαντικό ρόλο στον διαχωρισμό των ανακυκλώσιμων υλικών. Στη συγκεκριμένη διατριβή, αξιοποιήσαμε τα νευρωνικά δίκτυα (CNN) για τον εντοπισμό των αντικειμένων

και την κατάταξη τους αναλόγως του υλικού τους. Χρησιμοποιήσαμε τον αλγόριθμο YOLO V4 τον οποίο εκπαιδεύσαμε από βιντεοσκόπηση που πραγματοποιήσαμε σε πραγματικές συνθήκες εντός της MEA στην Κοζάνη. Έτσι, η μέση ακρίβεια του προτεινόμενου αλγορίθμου για την ανίχνευση και ταξινόμηση των υλικών ήταν 92,43%. Το ποσοστό είναι αρκετά υψηλό δεδομένου των πραγματικών συνθηκών εργασίας.

Επίσης, στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε η μεθοδολογία η οποία ονομάστηκε «Προσαρμοστικό Μοντέλο Z». Η συγκεκριμένη μεθοδολογία έρχεται να δώσει απαντήσεις στον τρόπο που αντιμετωπίζονται τα προβλήματα που βασίζονται ενσωματωμένα συστήματα. Στο συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο που ερευνά η διατριβή δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην αξιοποίηση των ενσωματωμένων συστημάτων στον τομέα του περιβάλλοντος και διαφαίνεται πως το Προσαρμοστικό Μοντέλο Z μπορεί να βοηθήσει τους ερευνητές στην ανάπτυξη λύσεων για ζητήματα που σχετίζονται με την προστασία του περιβάλλοντος. Τα στάδια που ακολουθούνται δίνουν την καλύτερη δυνατή λύση από αυτές που αναπτύσσονται κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας. Μέσα από τις πειραματικές εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν, αποδείχθηκε πως το Προσαρμοστικό Μοντέλο Z αποτελεί μια επιτυχή μεθοδολογία για την επίλυση προβλημάτων που φορούν τα ενσωματωμένα συστήματα στον τομέα του περιβάλλοντος. Αναμένεται να πραγματοποιηθούμε περισσότερα πειράματα σε διαφορετικούς τομείς, καθώς επίσης να αναπτυχθεί και ένα διαδικτυακό εργαλείο για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας.

Εν κατακλείδι, απαντήθηκαν τα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν στην αρχή της διδακτορικής διατριβής. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε έρευνα σχετικά με τα ενσωματωμένα συστήματα που είναι διαθέσιμα σήμερα στον τομέα του περιβάλλοντος, τα χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες τους. Οι οικογένειες του Arduino και το Raspberry Pi αποδείχθηκαν πως προσφέρουν τις περισσότερες εφαρμογές με χαμηλό κόστος, ενώ οι πλακέτες FPGA αφορούν πιο δαπανηρές και συγκεκριμένες εφαρμογές. Αξιοποιώντας αυτά τα ενσωματωμένα συστήματα, μελετήσαμε δύο βασικά προβλήματα της σύγχρονης ζωής: της διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων και της ανακύκλωσης υλικών. Τα αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικά μιας και δείχνουν πως με την χρήση των ΕΣ βελτιώνεται η διαδικασία αποκομιδής των ΑΣΑ, μειώνεται το κόστος της και προστατεύεται η υγεία των πολιτών. Όσον αφορά την ανακύκλωση, βελτιώνεται η διαδικασία με την περαιτέρω αυτοματοποίηση της και μειώνεται η έκθεση των εργατών στα βλαβερά υλικά. Σήμερα, οι ανεπτυγμένες χώρες δίνουν ιδιαίτερη έμφαση στην

προστασία του περιβάλλοντος, αξιοποιώντας όλα τα μέσα που διαθέτουν. Η συγκεκριμένη διατριβή, έρχεται να υποστηρίξει αυτή την πολιτική χρησιμοποιώντας τα ενσωματωμένα συστήματα και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων για την προστασία και βελτίωση του περιβάλλοντος. Τέλος, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία με το όνομα «Προσαρμοστικό Μοντέλο Z» (Adaptive Model Z).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Fairburn, G. Bolte, and M. Braubach, “Environmental Health Inequalities Resource Package. A Tool for Understanding and Reducing Inequalities in Environmental Risk,” *World Health Organization*, 2019.
- [2] S. Zhuang, G. Bolte, and T. Lakes, “Exploring Environmental Health Inequalities: A Scientometric Analysis of Global Research Trends (1970–2020),” *Int J Environ Res Public Health*, vol. 19, no. 12, p. 7394, Jun. 2022, doi: 10.3390/ijerph19127394.
- [3] European Commission, “EU Waste and recycling.” Accessed: Oct. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
- [4] United Nations, “68% of the world population projected to live in urban areas by 2050,” United Nations. Accessed: Oct. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
- [5] D. B.-T. P. Hoornweg, “What a Waste : A Global Review of Solid Waste Management,” *Urban development series;knowledge papers no. 15 World Bank, Washington, DC*, 2012.
- [6] L. Giusti, “A review of waste management practices and their impact on human health,” *Waste management*, vol. 29, no. 8, pp. 2227–2239, 2009.
- [7] L. A. Guerrero, G. Maas, and W. Hogland, “Solid waste management challenges for cities in developing countries,” *Waste management*, vol. 33, no. 1, pp. 220–232, 2013.
- [8] R. E. Marshall and K. Farahbakhsh, “Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries,” *Waste management*, vol. 33, no. 4, pp. 988–1003, 2013.
- [9] Eurostat, “Recycling rate of municipal waste.” Accessed: Oct. 25, 2023. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/sdg_11_60
- [10] European Parliament, “Plastic waste and recycling in the EU: facts and figures.” Accessed: Oct. 25, 2023. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20181212STO21610/plastic-waste-and-recycling-in-the-eu-facts-and-figures>
- [11] I. Ajzen, “The theory of planned behavior,” *Organ Behav Hum Decis Process*, vol. 50, no. 2, pp. 179–211, 1991.
- [12] A. Wang, L. Zhang, Y. Shi, S. Rozelle, A. Osborn, and M. Yang, “Rural solid waste management in China: Status, problems and challenges,” *Sustainability*, vol. 9, no. 4, p. 506, 2017.
- [13] M. Balasubramanian, “Municipal solid waste management in India: status, problems and challenges,” *Int J Environ Waste Manag*, vol. 21, no. 4, pp. 253–268, 2018.
- [14] A. Pires, G. Martinho, and N.-B. Chang, “Solid waste management in European countries: A review of systems analysis techniques,” *J Environ Manage*, vol. 92, no. 4, pp. 1033–1050, 2011.

- [15] R. Laszlo, R. Holonec, R. Copindean, and F. Dragan, "Sorting System for e-Waste Recycling using Contour Vision Sensors," in *2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)*, IEEE, May 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/MPS.2019.8759739.
- [16] K. F. Haque, R. Zabin, K. Yelamarthi, P. Yanambaka, and A. Abdelgawad, "An IoT Based Efficient Waste Collection System with Smart Bins," in *2020 IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, IEEE, Jun. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/WF-IoT48130.2020.9221251.
- [17] S. Murugaanandam, V. Ganapathy, and R. Balaji, "Efficient IOT Based Smart Bin for Clean Environment," in *2018 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, IEEE, Apr. 2018, pp. 0715–0720. doi: 10.1109/ICCSP.2018.8524230.
- [18] H. Poddar, R. Paul, S. Mukherjee, and B. Bhattacharyya, "Design of smart bin for smarter cities," in *2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*, IEEE, Apr. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/IPACT.2017.8245162.
- [19] A. Mishra and A. Kumar Ray, "IoT cloud-based cyber-physical system for efficient solid waste management in smart cities: a novel cost function based route optimisation technique for waste collection vehicles using dustbin sensors and real-time road traffic informatics," *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications*, vol. 5, no. 4, pp. 330–341, Dec. 2020, doi: 10.1049/iet-cps.2019.0110.
- [20] K. Myers and E. L. Secco, "A Low-Cost Embedded Computer Vision System for the Classification of Recyclable Objects," 2021, pp. 11–30. doi: 10.1007/978-981-33-4582-9_2.
- [21] T. J. Sheng *et al.*, "An Internet of Things Based Smart Waste Management System Using LoRa and Tensorflow Deep Learning Model," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 148793–148811, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3016255.
- [22] A. B. Wahyutama and M. Hwang, "YOLO-Based Object Detection for Separate Collection of Recyclables and Capacity Monitoring of Trash Bins," *Electronics (Basel)*, vol. 11, no. 9, p. 1323, Apr. 2022, doi: 10.3390/electronics11091323.
- [23] M. Jiménez, R. Palomera, and I. Couvertier, *Introduction to Embedded Systems*. New York, NY: Springer New York, 2014. doi: 10.1007/978-1-4614-3143-5.
- [24] Minas Dasygenis and Dimitrios Soundris, *Embedded Systems*. Kallipos, 2015.
- [25] S. Pasricha, "Embedded Systems Education in the 2020s: Challenges, Reflections, and Future Directions," in *Proceedings of the Great Lakes Symposium on VLSI 2022*, New York, NY, USA: ACM, Jun. 2022, pp. 519–524. doi: 10.1145/3526241.3530348.
- [26] Z. Ashfaq *et al.*, "Embedded AI-based digi-healthcare," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 1, p. 519, 2022.
- [27] K. Cao, G. Xu, J. Zhou, M. Chen, T. Wei, and K. Li, "Lifetime-aware real-time task scheduling on fault-tolerant mixed-criticality embedded systems," *Future Generation Computer Systems*, vol. 100, pp. 165–175, 2019.
- [28] M. Ashjaei, L. Lo Bello, M. Daneshtalab, G. Patti, S. Saponara, and S. Mubeen, "Time-Sensitive Networking in automotive embedded systems: State of the art and research opportunities," *Journal of systems architecture*, vol. 117, p. 102137, 2021.

- [29] S. Anand and V. Nath, "Study and design of smart embedded system for remote health monitoring using internet of things," in *Nanoelectronics, Circuits and Communication Systems: Proceeding of NCCS 2017*, Springer, 2019, pp. 409–414.
- [30] A. A. Laghari, K. Wu, R. A. Laghari, M. Ali, and A. A. Khan, "A review and state of art of Internet of Things (IoT)," *Archives of Computational Methods in Engineering*, pp. 1–19, 2021.
- [31] D. Mamone, A. Bosio, A. Savino, S. Hamdioui, and M. Rebaudengo, "On the analysis of real-time operating system reliability in embedded systems," in *2020 IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI and Nanotechnology Systems (DFT)*, IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [32] D. Ziouzos, A. Sideris, D. Tsiktsiris, and M. Dasygenis, "Smart-Grid Modelling and Simulation," 2019, pp. 43–54. doi: 10.1007/978-3-030-03640-9_3.
- [33] J. Serrano, "Introduction to FPGA design," 2008.
- [34] P. Simpson, *FPGA design*. Springer, 2010.
- [35] W. Wang and T. Dey, "A survey on arm cortex a processors," *Retrieved March*, 2011.
- [36] J. Yiu, *The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M3 and Cortex®-M4 Processors*. Newnes, 2013.
- [37] S. A. Arduino, "Arduino," *Arduino LLC*, vol. 372, 2015.
- [38] S. J. Johnston and S. J. Cox, "The raspberry Pi: A technology disrupter, and the enabler of dreams," *Electronics*, vol. 6, no. 3. MDPI, p. 51, 2017.
- [39] M.-A. Martínez-Prado, J. Rodríguez-Reséndiz, R.-A. Gómez-Loenzo, G. Herrera-Ruiz, and L.-A. Franco-Gasca, "An FPGA-based open architecture industrial robot controller," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 13407–13417, 2018.
- [40] D. Ziouzos, P. Kilintzis, N. Baras, and M. Dasygenis, "A Survey of FPGA Robotics Applications in the Period 2010- 2019," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, vol. 6 no3 pp. 385-408, 2021.
- [41] J. Romoth, M. Porrmann, and U. Rückert, "Survey of FPGA applications in the period 2000–2015 (Technical Report)," 2017.
- [42] M.-A. Martínez-Prado, J. Rodríguez-Reséndiz, R.-A. Gómez-Loenzo, G. Herrera-Ruiz, and L.-A. Franco-Gasca, "An FPGA-based open architecture industrial robot controller," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 13407–13417, 2018.
- [43] R. Tessier, K. Pocek, and A. DeHon, "Reconfigurable computing architectures," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 3, pp. 332–354, 2015.
- [44] A. Vaishnav, K. D. Pham, and D. Koch, "A Survey on FPGA Virtualization," in *2018 28th International Conference on Field Programmable Logic and Applications (FPL)*, IEEE, Aug. 2018, pp. 131–1317. doi: 10.1109/FPL.2018.00031.
- [45] C. Paiz and M. Porrmann, "The utilization of reconfigurable hardware to implement digital controllers: a review," in *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, IEEE, 2007, pp. 2380–2385.

- [46] S. Gandhare and B. Karthikeyan, "Survey on FPGA architecture and recent applications," in *2019 International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking (ViTECoN)*, IEEE, 2019, pp. 1–4.
- [47] M. Ben-Ari and F. Mondada, *Elements of robotics*. Springer Nature, 2017.
- [48] M. Wilson, *Implementation of robot systems: an introduction to robotics, automation, and successful systems integration in manufacturing*. Butterworth-Heinemann, 2014.
- [49] Y. Yokokohji *et al.*, "Assembly Challenge: a robot competition of the Industrial Robotics Category, World Robot Summit – summary of the pre-competition in 2018," *Advanced Robotics*, vol. 33, no. 17, pp. 876–899, Sep. 2019, doi: 10.1080/01691864.2019.1663609.
- [50] O. Stasse and T. Flayols, "An Overview of Humanoid Robots Technologies," 2019, pp. 281–310. doi: 10.1007/978-3-319-93870-7_13.
- [51] Y. Asano, K. Okada, and M. Inaba, "Design principles of a human mimetic humanoid: Humanoid platform to study human intelligence and internal body system," *Sci Robot*, vol. 2, no. 13, p. eaaq0899, 2017.
- [52] O. Stasse and T. Flayols, "An Overview of Humanoid Robots Technologies," 2019, pp. 281–310. doi: 10.1007/978-3-319-93870-7_13.
- [53] V. Bonato, E. Marques, and G. A. Constantinides, "A Floating-point Extended Kalman Filter Implementation for Autonomous Mobile Robots," *J Signal Process Syst*, vol. 56, no. 1, pp. 41–50, Jul. 2009, doi: 10.1007/s11265-008-0257-8.
- [54] G. Mingas, E. Tsardoulis, and L. Petrou, "An FPGA implementation of the SMG-SLAM algorithm," *Microprocess Microsyst*, vol. 36, no. 3, pp. 190–204, May 2012, doi: 10.1016/j.micpro.2011.12.002.
- [55] U. Ramos, M. E. Stivanello, and M. R. Stemmer, "Adaptable Architecture for the Development of Computer Vision Systems in FPGA," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 12, pp. 2104–2111, Dec. 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9400438.
- [56] K. Han and Y. Wang, "A review of artificial neural network techniques for environmental issues prediction," *J Therm Anal Calorim*, vol. 145, no. 4, pp. 2191–2207, Aug. 2021, doi: 10.1007/s10973-021-10748-9.
- [57] C.-T. Huang *et al.*, "eCNN," in *Proceedings of the 52nd Annual IEEE/ACM International Symposium on Microarchitecture*, New York, NY, USA: ACM, Oct. 2019, pp. 182–195. doi: 10.1145/3352460.3358263.
- [58] P. V. de Campos Souza, "Fuzzy neural networks and neuro-fuzzy networks: A review the main techniques and applications used in the literature," *Appl Soft Comput*, vol. 92, p. 106275, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106275>.
- [59] B. Wu, T. Cheng, T. L. Yip, and Y. Wang, "Fuzzy logic based dynamic decision-making system for intelligent navigation strategy within inland traffic separation schemes," *Ocean Engineering*, vol. 197, p. 106909, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106909.
- [60] A. R. Cheraghi, S. Shahzad, and K. Graffi, "Past, Present, and Future of Swarm Robotics," 2022, pp. 190–233. doi: 10.1007/978-3-030-82199-9_13.

- [61] A. A. Laghari, K. Wu, R. A. Laghari, M. Ali, and A. A. Khan, "RETRACTED ARTICLE: A Review and State of Art of Internet of Things (IoT)," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 29, no. 3, pp. 1395–1413, May 2022, doi: 10.1007/s11831-021-09622-6.
- [62] P. Friess and O. Vermesan, *Internet of Things*. New York: River Publishers, 2022. doi: 10.1201/9781003338659.
- [63] L. Khalid, "Internet of Things (IoT)," in *Software Architecture for Business*, Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 107–127. doi: 10.1007/978-3-030-13632-1_7.
- [64] A. Felfernig *et al.*, "An overview of recommender systems in the internet of things," *J Intell Inf Syst*, vol. 52, no. 2, pp. 285–309, Apr. 2019, doi: 10.1007/s10844-018-0530-7.
- [65] ITU, "Y.2060 : Overview of the Internet of things," Next Generation Networks – frameworks and functional architecture models. Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I>
- [66] K. K. Patel, S. M. Patel, and P. Scholar, "Internet of things-IOT: definition, characteristics, architecture, enabling technologies, application & future challenges," *International journal of engineering science and computing*, vol. 6, no. 5, 2016.
- [67] A. C. Franco da Silva and P. Hirmer, "Models for Internet of Things Environments—A Survey," *Information*, vol. 11, no. 10, p. 487, Oct. 2020, doi: 10.3390/info11100487.
- [68] S. Al-Sarawi, M. Anbar, K. Alieyan, and M. Alzubaidi, "Internet of Things (IoT) communication protocols: Review," in *2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT)*, IEEE, May 2017, pp. 685–690. doi: 10.1109/ICITECH.2017.8079928.
- [69] S. Andreev *et al.*, "Understanding the IoT connectivity landscape: a contemporary M2M radio technology roadmap," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 32–40, Sep. 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7263370.
- [70] S. Al-Sarawi, M. Anbar, K. Alieyan, and M. Alzubaidi, "Internet of Things (IoT) communication protocols: Review," in *2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT)*, IEEE, May 2017, pp. 685–690. doi: 10.1109/ICITECH.2017.8079928.
- [71] M. Koripi, "A Review on Architectures and Needs in Advanced Wireless-communication Technologies," *SSRN Electronic Journal*, 2020, doi: 10.2139/ssrn.3906742.
- [72] S. Raza, P. Misra, Z. He, and T. Voigt, "Building the Internet of Things with bluetooth smart," *Ad Hoc Networks*, vol. 57, pp. 19–31, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.adhoc.2016.08.012.
- [73] Y. Ma, G. Zhou, and S. Wang, "WiFi Sensing with Channel State Information," *ACM Comput Surv*, vol. 52, no. 3, pp. 1–36, May 2020, doi: 10.1145/3310194.
- [74] S. Kaushik, "An overview of technical aspect for WiFi networks technology," *International Journal of Electronics and Computer Science Engineering (IJECSE, ISSN: 2277-1956)*, vol. 1, no. 01, pp. 28–34, 2012.
- [75] L. Tian, S. Santi, A. Seferagić, J. Lan, and J. Famaey, "Wi-Fi HaLow for the Internet of Things: An up-to-date survey on IEEE 802.11ah research," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 182, p. 103036, May 2021, doi: 10.1016/j.jnca.2021.103036.

- [76] C. W. Badenhop, S. R. Graham, B. W. Ramsey, B. E. Mullins, and L. O. Mailloux, "The Z-Wave routing protocol and its security implications," *Comput Secur*, vol. 68, pp. 112–129, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.cose.2017.04.004.
- [77] G. Shi and K. Li, *Signal interference in WiFi and ZigBee networks*. Springer, 2017.
- [78] H.-Y. Chang, "A connectivity-increasing mechanism of ZigBee-based IoT devices for wireless multimedia sensor networks," *Multimed Tools Appl*, vol. 78, no. 5, pp. 5137–5154, Mar. 2019, doi: 10.1007/s11042-017-4584-2.
- [79] T. Kumar and P. B. Mane, "ZigBee topology: A survey," in *2016 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICT)*, IEEE, Dec. 2016, pp. 164–166. doi: 10.1109/ICCICT.2016.7987937.
- [80] G. Mulligan, "The 6LoWPAN architecture," in *Proceedings of the 4th workshop on Embedded networked sensors*, New York, NY, USA: ACM, Jun. 2007, pp. 78–82. doi: 10.1145/1278972.1278992.
- [81] S. M. J. Hasan, M. Ali, T. I. Khan, F. Afrin, and Md. M. Islam, "6LoWPAN Based Futuristic Smart Architecture for Home Automation," in *2020 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technology (ICAICT)*, IEEE, Nov. 2020, pp. 449–454. doi: 10.1109/ICAICT51780.2020.9333483.
- [82] F. Chetouane, "An Overview on RFID Technology Instruction and Application," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 382–387, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.111.
- [83] H. Landaluce, L. Arjona, A. Perallos, F. Falcone, I. Angulo, and F. Muralter, "A Review of IoT Sensing Applications and Challenges Using RFID and Wireless Sensor Networks," *Sensors*, vol. 20, no. 9, p. 2495, Apr. 2020, doi: 10.3390/s20092495.
- [84] N. Poursafar, M. E. E. Alahi, and S. Mukhopadhyay, "Long-range wireless technologies for IoT applications: A review," in *2017 Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST)*, IEEE, Dec. 2017, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICSensT.2017.8304507.
- [85] M. Chere, T. Ngqondi, and M. Bembe, "Wireless Low Power Area Networks in the Internet of Things: A Glimpse on 6LoWPAN," in *2019 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, IEEE, Jan. 2019, pp. 1–10. doi: 10.23919/ELINFOCOM.2019.8706392.
- [86] A. Yegin *et al.*, "LoRaWAN protocol: specifications, security, and capabilities," in *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, Elsevier, 2020, pp. 37–63. doi: 10.1016/B978-0-12-818880-4.00003-X.
- [87] H. Mroue, A. Nasser, B. Parrein, S. Hamrioui, E. Mona-Cruz, and G. Rouyer, "Analytical and Simulation study for LoRa Modulation," in *2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT)*, IEEE, Jun. 2018, pp. 655–659. doi: 10.1109/ICT.2018.8464879.
- [88] A. Lavric, A. I. Petrariu, and V. Popa, "Long Range SigFox Communication Protocol Scalability Analysis Under Large-Scale, High-Density Conditions," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 35816–35825, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2903157.
- [89] M. Chen, Y. Miao, Y. Hao, and K. Hwang, "Narrow Band Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 20557–20577, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2751586.

- [90] K. Rose, S. Eldridge, and L. Chapin, "The internet of things: An overview," *The internet society (ISOC)*, vol. 80, pp. 1–50, 2015.
- [91] P. Asghari, A. M. Rahmani, and H. H. S. Javadi, "Internet of Things applications: A systematic review," *Computer Networks*, vol. 148, pp. 241–261, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.comnet.2018.12.008.
- [92] R. Hassan, F. Qamar, M. K. Hasan, A. H. M. Aman, and A. S. Ahmed, "Internet of Things and Its Applications: A Comprehensive Survey," *Symmetry (Basel)*, vol. 12, no. 10, p. 1674, Oct. 2020, doi: 10.3390/sym12101674.
- [93] M. C. Vos, M. Galetzka, M. P. Mobach, M. van Hagen, and A. T. H. Pruyn, "Cleanliness unravelled: a review and integration of literature," *Journal of Facilities Management*, vol. 16, no. 4, pp. 429–451, Oct. 2018, doi: 10.1108/JFM-06-2017-0025.
- [94] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, and F. Van Woerden, *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*. World Bank Publications, 2018.
- [95] D. Ziouzos, N. Baras, V. Balafas, M. Dasygenis, and A. Stimoniari, "Intelligent and Real-Time Detection and Classification Algorithm for Recycled Materials Using Convolutional Neural Networks," *Recycling*, vol. 7, no. 1, p. 9, Feb. 2022, doi: 10.3390/recycling7010009.
- [96] D. Ziouzos and M. Dasygenis, "A methodology to design ubiquitous embedded systems for environmental scenarios," *AIP Conf Proc*, vol. 2909, no. 1, p. 120013, Nov. 2023, doi: 10.1063/5.0182494.
- [97] "Waste recycling in Europe," European Environmental Agency. Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/waste-recycling-in-europe>
- [98] A. Mohan, A. S. Kaseb, K. W. Gauen, Y.-H. Lu, A. R. Reibman, and T. J. Hacker, "Determining the Necessary Frame Rate of Video Data for Object Tracking under Accuracy Constraints," in *2018 IEEE Conference on Multimedia Information Processing and Retrieval (MIPR)*, IEEE, Apr. 2018, pp. 368–371. doi: 10.1109/MIPR.2018.00081.
- [99] D. Ziouzos, D. Tsiktsiris, N. Baras, and M. Dasygenis, "A Distributed Architecture for Smart Recycling Using Machine Learning," *Future Internet*, vol. 12, no. 9, p. 141, Aug. 2020, doi: 10.3390/fi12090141.
- [100] M. R. Chertow, "The IPAT Equation and Its Variants," *J Ind Ecol*, vol. 4, no. 4, pp. 13–29, Oct. 2000, doi: 10.1162/10881980052541927.
- [101] R. York, E. A. Rosa, and T. Dietz, "STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts," *Ecological Economics*, vol. 46, no. 3, pp. 351–365, Oct. 2003, doi: 10.1016/S0921-8009(03)00188-5.
- [102] M. Rabbani, H. Farrokhi-asl, and H. Rafiei, "A hybrid genetic algorithm for waste collection problem by heterogeneous fleet of vehicles with multiple separated compartments," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 1817–1830, Mar. 2016, doi: 10.3233/IFS-151893.
- [103] W. Xue and K. Cao, "Optimal routing for waste collection: a case study in Singapore," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 30, no. 3, pp. 554–572, Mar. 2016, doi: 10.1080/13658816.2015.1103374.

- [104] J. R. Gómez, J. Pacheco, and H. Gonzalo-Orden, "A Tabu Search Method for a Bi-Objective Urban Waste Collection Problem," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 36–53, Jan. 2015, doi: 10.1111/mice.12031.
- [105] H. Farrokhi-Asl, R. Tavakkoli-Moghaddam, B. Asgarian, and E. Sangari, "Metaheuristics for a bi-objective location-routing-problem in waste collection management," *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 34, no. 4, pp. 239–252, May 2017, doi: 10.1080/21681015.2016.1253619.
- [106] D. I. Stern, "The Rise and Fall of the Environmental Kuznets Curve," *World Dev*, vol. 32, no. 8, pp. 1419–1439, Aug. 2004, doi: 10.1016/j.worlddev.2004.03.004.
- [107] A. Chen, G. Yang, and Z. Wu, "Hybrid discrete particle swarm optimization algorithm for capacitated vehicle routing problem," *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, vol. 7, no. 4, pp. 607–614, Apr. 2006, doi: 10.1631/jzus.2006.A0607.
- [108] Gartner, "Number of smartphones sold to end users worldwide from 2007 to 2022," Statista. Accessed: Oct. 31, 2023. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/263437/global-smartphone-sales-to-end-users-since-2007/>
- [109] P. Neirotti, A. De Marco, A. C. Cagliano, G. Mangano, and F. Scorrano, "Current trends in Smart City initiatives: Some stylised facts," *Cities*, vol. 38, pp. 25–36, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.cities.2013.12.010.
- [110] D. Sackmann, R. Hinze, B. Michael, C. Krieger, and E. Halifeoglu, "A heuristic for the solution of vehicle routing problems with time windows and multiple dumping sites in waste collection," *Investigación Operacional*, vol. 38, p. 206+, 2017, [Online]. Available: <https://link.gale.com/apps/doc/A500683370/IFME?u=anon~53488df5&sid=googleScholar&xid=7e8bf44b>
- [111] B.-I. Kim, S. Kim, and S. Sahoo, "Waste collection vehicle routing problem with time windows," *Comput Oper Res*, vol. 33, no. 12, pp. 3624–3642, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.cor.2005.02.045.
- [112] T. M. Vinod Kumar and B. Dahiya, "Smart Economy in Smart Cities," 2017, pp. 3–76. doi: 10.1007/978-981-10-1610-3_1.
- [113] A. U. Zaman, "A comprehensive study of the environmental and economic benefits of resource recovery from global waste management systems," *J Clean Prod*, vol. 124, pp. 41–50, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.02.086.
- [114] B. Esmailian, B. Wang, K. Lewis, F. Duarte, C. Ratti, and S. Behdad, "The future of waste management in smart and sustainable cities: A review and concept paper," *Waste Management*, vol. 81, pp. 177–195, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.09.047.
- [115] H. Ahvenniemi, A. Huovila, I. Pinto-Seppä, and M. Airaksinen, "What are the differences between sustainable and smart cities?," *Cities*, vol. 60, pp. 234–245, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.cities.2016.09.009.
- [116] P. Neirotti, A. De Marco, A. C. Cagliano, G. Mangano, and F. Scorrano, "Current trends in Smart City initiatives: Some stylised facts," *Cities*, vol. 38, pp. 25–36, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.cities.2013.12.010.

- [117] D. E. Meyer, M. Li, and W. W. Ingwersen, "Analyzing economy-scale solid waste generation using the United States environmentally-extended input-output model," *Resour Conserv Recycl*, vol. 157, p. 104795, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104795.
- [118] M. Carus and L. Dammer, "The Circular Bioeconomy—Concepts, Opportunities, and Limitations," *Industrial Biotechnology*, vol. 14, no. 2, pp. 83–91, Apr. 2018, doi: 10.1089/ind.2018.29121.mca.
- [119] M. Dinu, S. R. Pătărlăgeanu, R. Petrariu, M. Constantin, and A.-M. Potcovaru, "Empowering Sustainable Consumer Behavior in the EU by Consolidating the Roles of Waste Recycling and Energy Productivity," *Sustainability*, vol. 12, no. 23, p. 9794, Nov. 2020, doi: 10.3390/su12239794.
- [120] S. Xiao, H. Dong, Y. Geng, M.-J. Francisco, H. Pan, and F. Wu, "An overview of the municipal solid waste management modes and innovations in Shanghai, China," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 24, pp. 29943–29953, Aug. 2020, doi: 10.1007/s11356-020-09398-5.
- [121] S. Mia *et al.*, "Pyrolysis and co-composting of municipal organic waste in Bangladesh: A quantitative estimate of recyclable nutrients, greenhouse gas emissions, and economic benefits," *Waste Management*, vol. 75, pp. 503–513, May 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.01.038.
- [122] D. Ziouzos and M. Dasygenis, "Effectiveness of the IoT in Regional Energy Transition: The Smart Bin Case Study," *Recycling*, vol. 8, no. 1, p. 28, Feb. 2023, doi: 10.3390/recycling8010028.
- [123] N. Mohd Yusof, A. Z. Jidin, and M. I. Rahim, "Smart Garbage Monitoring System for Waste Management," *MATEC Web of Conferences*, vol. 97, p. 01098, Feb. 2017, doi: 10.1051/mateconf/20179701098.
- [124] N. Abdullah, O. A. Alwesabi, and R. Abdullah, "IoT-Based Smart Waste Management System in a Smart City," 2019, pp. 364–371. doi: 10.1007/978-3-319-99007-1_35.
- [125] A. Mohiuddin, M. Iqbal, N. Kumar, S. Anjum, and S. Nanda, "Automated Garbage Management System for Smart City Applications," in *2021 IEEE 2nd International Conference on Applied Electromagnetics, Signal Processing, & Communication (AESPC)*, IEEE, Nov. 2021, pp. 1–5. doi: 10.1109/AESPC52704.2021.9708495.
- [126] G. Soni and S. Kandasamy, "Smart Garbage Bin Systems – A Comprehensive Survey," 2018, pp. 194–206. doi: 10.1007/978-981-10-7635-0_15.
- [127] M. Aazam, M. St-Hilaire, C.-H. Lung, and I. Lambadaris, "Cloud-based smart waste management for smart cities," in *2016 IEEE 21st International Workshop on Computer Aided Modelling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, IEEE, Oct. 2016, pp. 188–193. doi: 10.1109/CAMAD.2016.7790356.
- [128] S. P. Raflesia and A. K. Pamosoaji, "A Novel Ant Colony optimization Algorithm for Waste Collection Problem," in *2019 4th International Conference on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE)*, IEEE, Nov. 2019, pp. 413–416. doi: 10.1109/ICITISEE48480.2019.9003896.

- [129] J. Joshi *et al.*, “Cloud computing based smart garbage monitoring system,” in *2016 3rd International Conference on Electronic Design (ICED)*, IEEE, Aug. 2016, pp. 70–75. doi: 10.1109/ICED.2016.7804609.
- [130] A. Medvedev, P. Fedchenkov, A. Zaslavsky, T. Anagnostopoulos, and S. Khoruzhnikov, “Waste Management as an IoT-Enabled Service in Smart Cities,” 2015, pp. 104–115. doi: 10.1007/978-3-319-23126-6_10.
- [131] S. Longhi *et al.*, “Solid Waste Management Architecture Using Wireless Sensor Network Technology,” in *2012 5th International Conference on New Technologies, Mobility and Security (NTMS)*, IEEE, May 2012, pp. 1–5. doi: 10.1109/NTMS.2012.6208764.
- [132] M. A. Al Mamun, M. A. Hannan, and A. Hussain, “Real time solid waste bin monitoring system framework using wireless sensor network,” in *2014 International Conference on Electronics, Information and Communications (ICEIC)*, IEEE, Jan. 2014, pp. 1–2. doi: 10.1109/ELINFOCOM.2014.6914431.
- [133] F. Folianto, Y. S. Low, and W. L. Yeow, “Smartbin: Smart waste management system,” in *2015 IEEE Tenth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*, IEEE, Apr. 2015, pp. 1–2. doi: 10.1109/ISSNIP.2015.7106974.
- [134] R. Rajkamal, V. Anitha, P. G. Nayaki, K. Ramya, and E. Kayalvizhi, “A novel approach for waste segregation at source level for effective generation of electricity — GREENBIN,” in *2014 International Conference on Science Engineering and Management Research (ICSEMR)*, IEEE, Nov. 2014, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICSEMR.2014.7043540.
- [135] S. Thakker and R. Narayanamoorthi, “Smart and wireless waste management,” in *2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*, IEEE, Mar. 2015, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICIIECS.2015.7193141.
- [136] V. Catania and D. Ventura, “An approach for monitoring and smart planning of urban solid waste management using smart-M3 platform,” in *Proceedings of 15th Conference of Open Innovations Association FRUCT*, IEEE, Apr. 2014, pp. 24–31. doi: 10.1109/FRUCT.2014.6872422.
- [137] D. Ziouzos and M. Dasygenis, “A Smart Bin Implementation using LoRa,” in *2019 4th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)*, IEEE, Sep. 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/SEEDA-CECNSM.2019.8908523.
- [138] J. Deng, W. Dong, R. Socher, L.-J. Li, Kai Li, and Li Fei-Fei, “ImageNet: A large-scale hierarchical image database,” in *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, Jun. 2009, pp. 248–255. doi: 10.1109/CVPR.2009.5206848.
- [139] D. Ziouzos, N. Baras, M. Dasygenis, A. Manavis, C. Vanidis, and C. Tsanaktsidis, “Fueling the technology growth using innovative IoT solutions: The SmartBin project,” in *2020 International Conference on Technology and Entrepreneurship (ICTE)*, IEEE, Sep. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICTE47868.2020.9215536.
- [140] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, “Understanding the Internet of Things: definition, potentials, and societal role of a fast evolving paradigm,” *Ad Hoc Networks*, vol. 56, pp. 122–140, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.adhoc.2016.12.004.

- [141] R. R. Oliveira, I. M. G. Cardoso, J. L. V. Barbosa, C. A. da Costa, and M. P. Prado, "An intelligent model for logistics management based on geofencing algorithms and RFID technology," *Expert Syst Appl*, vol. 42, no. 15–16, pp. 6082–6097, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.eswa.2015.04.001.
- [142] J. Castillo-Giménez, A. Montañés, and A. J. Picazo-Tadeo, "Performance and convergence in municipal waste treatment in the European Union," *Waste Management*, vol. 85, pp. 222–231, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2018.12.025.
- [143] M. L. Casares, N. Ulierte, A. Matarán, A. Ramos, and M. Zamorano, "Solid industrial wastes and their management in Asegra (Granada, Spain)," *Waste Management*, vol. 25, no. 10, pp. 1075–1082, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.wasman.2005.02.023.
- [144] M. A. Hannan, Md. Abdulla Al Mamun, A. Hussain, H. Basri, and R. A. Begum, "A review on technologies and their usage in solid waste monitoring and management systems: Issues and challenges," *Waste Management*, vol. 43, pp. 509–523, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.05.033.
- [145] Md. A. Al Mamun, M. A. Hannan, A. Hussain, and H. Basri, "Theoretical model and implementation of a real time intelligent bin status monitoring system using rule based decision algorithms," *Expert Syst Appl*, vol. 48, pp. 76–88, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.eswa.2015.11.025.
- [146] E. J. Beltrami and L. D. Bodin, "Networks and vehicle routing for municipal waste collection," *Networks*, vol. 4, no. 1, pp. 65–94, 1974, doi: 10.1002/net.3230040106.
- [147] G. Clarke and J. W. Wright, "Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points," *Oper Res*, vol. 12, no. 4, pp. 568–581, Aug. 1964, doi: 10.1287/opre.12.4.568.
- [148] M. Gomez-Rodriguez and L. Song, "Diffusion in Social and Information Networks," in *Proceedings of the 24th International Conference on World Wide Web*, New York, NY, USA: ACM, May 2015, pp. 1527–1528. doi: 10.1145/2740908.2778851.
- [149] H. Han and E. P. Cueto, "Waste Collection Vehicle Routing Problem: Literature Review," *PROMET - Traffic&Transportation*, vol. 27, no. 4, pp. 345–358, Aug. 2015, doi: 10.7307/ptt.v27i4.1616.
- [150] K. Hauge, J. Larsen, R. M. Lusby, and E. Krappner, "A hybrid column generation approach for an industrial waste collection routing problem," *Comput Ind Eng*, vol. 71, pp. 10–20, May 2014, doi: 10.1016/j.cie.2014.02.005.
- [151] L. Amal, L. H. Son, and H. Chabchoub, "SGA: spatial GIS-based genetic algorithm for route optimization of municipal solid waste collection," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, no. 27, pp. 27569–27582, Sep. 2018, doi: 10.1007/s11356-018-2826-0.
- [152] W. Xue and K. Cao, "Optimal routing for waste collection: a case study in Singapore," *International Journal of Geographical Information Science*, vol. 30, no. 3, pp. 554–572, Mar. 2016, doi: 10.1080/13658816.2015.1103374.
- [153] N. Baras, D. Ziouzos, M. Dasygenis, and C. Tsanaktisidis, "Waste collection vehicle navigation in modern cities," in *2021 6th South-East Europe Design Automation*,

- Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM)*, IEEE, Sep. 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/SEEDA-CECNSM53056.2021.9565885.
- [154] E. W. Dijkstra, “A Note on Two Problems in Connexion with Graphs,” in *Edsger Wybe Dijkstra*, New York, NY, USA: ACM, 2022, pp. 287–290. doi: 10.1145/3544585.3544600.
- [155] J. R. Gómez, J. Pacheco, and H. Gonzalo-Orden, “A Tabu Search Method for a Bi-Objective Urban Waste Collection Problem,” *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 30, no. 1, pp. 36–53, Jan. 2015, doi: 10.1111/mice.12031.
- [156] H. Farrokhi-Asl, R. Tavakkoli-Moghaddam, B. Asgarian, and E. Sangari, “Metaheuristics for a bi-objective location-routing-problem in waste collection management,” *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 34, no. 4, pp. 239–252, May 2017, doi: 10.1080/21681015.2016.1253619.
- [157] M. A. Hannan, M. Akhtar, R. A. Begum, H. Basri, A. Hussain, and E. Scavino, “Capacitated vehicle-routing problem model for scheduled solid waste collection and route optimization using PSO algorithm,” *Waste Management*, vol. 71, pp. 31–41, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2017.10.019.
- [158] C.-H. Wang and J.-Z. Lu, “A hybrid genetic algorithm that optimizes capacitated vehicle routing problems,” *Expert Syst Appl*, vol. 36, no. 2, pp. 2921–2936, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.eswa.2008.01.072.
- [159] A. Chen, G. Yang, and Z. Wu, “Hybrid discrete particle swarm optimization algorithm for capacitated vehicle routing problem,” *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, vol. 7, no. 4, pp. 607–614, Apr. 2006, doi: 10.1631/jzus.2006.A0607.
- [160] R. J. Kuo, Y. J. Syu, Z.-Y. Chen, and F. C. Tien, “Integration of particle swarm optimization and genetic algorithm for dynamic clustering,” *Inf Sci (N Y)*, vol. 195, pp. 124–140, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.ins.2012.01.021.
- [161] M. Akhtar, M. A. Hannan, R. A. Begum, H. Basri, and E. Scavino, “Backtracking search algorithm in CVRP models for efficient solid waste collection and route optimization,” *Waste Management*, vol. 61, pp. 117–128, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.wasman.2017.01.022.
- [162] A. A. Campos and J. E. C. Arroyo, “An ILS Heuristic for the Waste Collection Vehicle Routing Problem with Time Windows,” 2017, pp. 889–899. doi: 10.1007/978-3-319-53480-0_88.
- [163] B.-I. Kim, S. Kim, and S. Sahoo, “Waste collection vehicle routing problem with time windows,” *Comput Oper Res*, vol. 33, no. 12, pp. 3624–3642, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.cor.2005.02.045.
- [164] O. El Yaakoubi, M. Benabdouallah, and C. Bojji, “Heuristic approaches for waste containers location problem and waste collection routes optimisation in an urban area,” *Int J Environ Waste Manag*, vol. 21, no. 4, p. 269, 2018, doi: 10.1504/IJEWMM.2018.093436.
- [165] A. Priban, “Behavioural Economics for Environmental Policy: Lessons from Salience, Status-Quo Bias, and the Power of Social Norms in Curbside Recycling Programs,” 2012.

- [166] T. Ramayah, J. W. C. Lee, and S. Lim, "Sustaining the environment through recycling: An empirical study," *J Environ Manage*, vol. 102, pp. 141–147, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.jenvman.2012.02.025.
- [167] N. Kanari, J.-L. Pineau, and S. Shallari, "End-of-life vehicle recycling in the european union," *JOM*, vol. 55, no. 8, pp. 15–19, Aug. 2003, doi: 10.1007/s11837-003-0098-7.
- [168] K. C. Condie, "Growth of continental crust: a balance between preservation and recycling," *Mineral Mag*, vol. 78, no. 3, pp. 623–637, Jun. 2014, doi: 10.1180/minmag.2014.078.3.11.
- [169] A. T. Tabereaux and R. D. Peterson, "Aluminum Production," in *Treatise on Process Metallurgy*, Elsevier, 2014, pp. 839–917. doi: 10.1016/B978-0-08-096988-6.00023-7.
- [170] K. Keramitsoglou and K. Tsagarakis, "Public Participation in Designing the Recycling Bins to Encourage Recycling," *Sustainability*, vol. 10, no. 4, p. 1240, Apr. 2018, doi: 10.3390/su10041240.
- [171] C. Lakhan, "A Comparison of Single and Multi-Stream Recycling Systems in Ontario, Canada," *Resources*, vol. 4, no. 2, pp. 384–397, Jun. 2015, doi: 10.3390/resources4020384.
- [172] Y. Moh and L. -->Abd Manaf, "Solid waste management transformation and future challenges of source separation and recycling practice in Malaysia," *Resour Conserv Recycl*, vol. 116, pp. 1–14, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.09.012.
- [173] C. Cimpan, A. Maul, M. Jansen, T. Pretz, and H. Wenzel, "Central sorting and recovery of MSW recyclable materials: A review of technological state-of-the-art, cases, practice and implications for materials recycling," *J Environ Manage*, vol. 156, pp. 181–199, Jun. 2015, doi: 10.1016/j.jenvman.2015.03.025.
- [174] D. R. Cooper and T. G. Gutowski, "The Environmental Impacts of Reuse: A Review," *J Ind Ecol*, vol. 21, no. 1, pp. 38–56, Feb. 2017, doi: 10.1111/jiec.12388.
- [175] S. M. Zain *et al.*, "Focusing on Recycling Practice to Promote Sustainable Behavior," *Procedia Soc Behav Sci*, vol. 60, pp. 546–555, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.421.
- [176] D. Ziouzos and M. Dasygenis, "A Smart Recycling Bin for Waste Classification," in *2019 Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET)*, IEEE, Nov. 2019, pp. 1–4. doi: 10.1109/PACET48583.2019.8956270.
- [177] T. Wang, Y. Cai, L. Liang, and D. Ye, "A Multi-Level Approach to Waste Object Segmentation," *Sensors*, vol. 20, no. 14, p. 3816, Jul. 2020, doi: 10.3390/s20143816.
- [178] N. Baras, D. Ziouzos, M. Dasygenis, and C. Tsanaktsidis, "A cloud based smart recycling bin for waste classification," in *2020 9th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCAST)*, IEEE, Sep. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/MOCAST49295.2020.9200283.
- [179] D. Ziouzos, D. Tsiktisiris, N. Baras, and M. Dasygenis, "A Distributed Architecture for Smart Recycling Using Machine Learning," *Future Internet*, vol. 12, no. 9, p. 141, Aug. 2020, doi: 10.3390/fi12090141.

- [180] G. Mitchell, "The Raspberry Pi single-board computer will revolutionise computer science teaching," *Engineering & Technology*, vol. 7, no. 3, pp. 26–26, Apr. 2012, doi: 10.1049/et.2012.0300.
- [181] A. Pajankar, "Introduction to Single Board Computers and Raspberry Pi," in *Raspberry Pi Image Processing Programming*, Berkeley, CA: Apress, 2017, pp. 1–24. doi: 10.1007/978-1-4842-2731-2_1.
- [182] E. Blem, J. Menon, and K. Sankaralingam, "Power struggles: Revisiting the RISC vs. CISC debate on contemporary ARM and x86 architectures," in *2013 IEEE 19th International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA)*, IEEE, Feb. 2013, pp. 1–12. doi: 10.1109/HPCA.2013.6522302.
- [183] S. Nishijima, Y. Izumi, S. Takeda, H. Suemoto, A. Nakahira, and S. Horie, "Recycling of abrasives from wasted slurry by superconducting magnetic separation," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 13, no. 2, pp. 1596–1599, Jun. 2003, doi: 10.1109/TASC.2003.812800.
- [184] R. Y. M. Li, D. C. W. Ho, and K. W. Chau, "State of the Art Research in Artificial Intelligence and Ubiquitous City," in *Current State of Art in Artificial Intelligence and Ubiquitous Cities*, Singapore: Springer Nature Singapore, 2022, pp. 169–208. doi: 10.1007/978-981-19-0737-1_11.
- [185] A. Paszke *et al.*, "PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, H. Wallach, H. Larochelle, A. Beygelzimer, F. d Alché-Buc, E. Fox, and R. Garnett, Eds., Curran Associates, Inc., 2019. [Online]. Available: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2019/file/bdbca288fee7f92f2bfa9f7012727740-Paper.pdf
- [186] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "Understanding the Internet of Things: definition, potentials, and societal role of a fast evolving paradigm," *Ad Hoc Networks*, vol. 56, pp. 122–140, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.adhoc.2016.12.004.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ

Επιστημονικά Περιοδικά:

- Ziouzos, D., Tsiktsiris, D., Baras, N., & Dasygenis, M. (2020). A distributed architecture for smart recycling using machine learning. *Future Internet*, 12(9), 141.
- Ziouzos, D.; Baras, N.; Balafas, V.; Dasygenis, M.; Stimoniaris, A. Intelligent and Real-Time Detection and Classification Algorithm for Recycled Materials Using Convolutional Neural Networks. *Recycling* 2022, 7, 9.
<https://doi.org/10.3390/recycling7010009>
- Ziouzos D, Dasygenis M. Effectiveness of the IoT in Regional Energy Transition: The Smart Bin Case Study. *Recycling*. 2023; 8(1):28.
<https://doi.org/10.3390/recycling8010028>

Επιστημονικά Συνέδρια:

- D. Ziouzos and M. Dasygenis, "A Smart Recycling Bin for Waste Classification," 2019 Panhellenic Conference on Electronics & Telecommunications (PACET), Volos, Greece, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/PACET48583.2019.8956270.
- D. Ziouzos and M. Dasygenis, "A Smart Bin Implementantion using LoRa," 2019 4th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM), Piraeus, Greece, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/SEEDA-CECNSM.2019.8908523.
- N. Baras, D. Ziouzos, M. Dasygenis and C. Tsanaktsidis, "A cloud based smart recycling bin for waste classification," 2020 9th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Bremen, Germany, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/MOCASST49295.2020.9200283.
- N. Baras, D. Ziouzos, M. Dasygenis and C. Tsanaktsidis, "A modern cloud based recycling system for smart cities," 2021 10th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Thessaloniki, Greece, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/MOCASST52088.2021.9493420.
- D. Ziouzos, N. Baras, M. Dasygenis, A. Manavis, C. Vanidis and C. Tsanaktsidis, "Fueling the technology growth using innovative IoT solutions: The SmartBin project," 2020 International Conference on Technology and Entrepreneurship (ICTE), Bologna, Italy, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICTE47868.2020.9215536.
- D. Ziouzos, N. Baras, M. Dasygenis and C. Tsanaktsidis, "Enhancing Technological Development Using Novel Internet Of Things Solutions: The Smart-Bin Project," 2021 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE), Kuala Lumpur, Malaysia, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICECCE52056.2021.9514186.

- N. Baras, D. Ziouzos, M. Dasygenis and C. Tsanaktsidis, "Waste collection vehicle navigation in modern cities," 2021 6th South-East Europe Design Automation, Computer Engineering, Computer Networks and Social Media Conference (SEEDA-CECNSM), Preveza, Greece, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/SEEDA-CECNSM53056.2021.9565885.
- D. Tsiktiris, D. Ziouzos and M. Dasygenis, "HLS Accelerated Noise Reduction Approach Using Image Stacking on Xilinx PYNQ," 2019 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Thessaloniki, Greece, 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/MOCASST.2019.8741574.
- D. Ziouzos, N. Baras, M. Dasygenis and C. Tsanaktsidis, "Envisioning IoT applications in a smart city to underpin an effective municipal strategy: The smartbin project", 2021 SHS Web Conf. 102 04020, doi: 10.1051/shsconf/202110204020
- D. Ziouzos and D. Minas, "A methodology to design ubiquitous embedded systems for environmental scenarios," AIP Conf Proc, vol. 2909, no. 1, p. 120013, Nov. 2023, doi: 10.1063/5.0182494.