

Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών
Υπολογιστών

Βέλτιστη τοποθέτηση πυλών στο
Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Κωνσταντίνος Τίτος Καλογεράς
Επιβλέπων Καθηγητής: Νικόλαος Πλόσκας

Κοζάνη, 28 Φεβρουαρίου 2024

Περίληψη

Την τελευταία δεκαετία ο όρος του "Διαδικτύου των Πραγμάτων" (Internet of Things - IoT) συναντάται όλο και περισσότερο στην καθημερινότητά μας, αποκτώντας μεγαλύτερη απήχηση σε εμπορικές, βιομηχανικές και καταναλωτικές καινοτομίες. Για την ανάπτυξη, όμως, τέτοιων προϊόντων και εφαρμογών απαιτείται και η δημιουργία δικτύων που καλύπτουν τις επιχειρησιακές ανάγκες της εκάστοτε υλοποίησης. Για αυτόν τον λόγο, μεγάλη βαρύτητα έχει δοθεί στην έρευνα της οργάνωσης και σχεδιασμού τέτοιων δικτύων. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η υλοποίηση και σύγκριση αλγορίθμων τοποθέτησης πυλών που καλύπτουν τις ανάγκες ενός δικτύου LoRaWAN, που απευθύνεται σε εφαρμογές του IoT. Η μοντελοποίηση του προβλήματος έγινε με τη χρήση του "Προβλήματος Χωροθέτησης Εγκαταστάσεων" (Facility Location Problem - FLP) το οποίο τη στιγμή της συγγραφής αυτής της εργασίας, δεν είχε αξιοποιηθεί σημαντικά από την ερευνητική κοινότητα στο πλαίσιο της τοποθέτησης πυλών για δίκτυα εφαρμογών IoT. Στο πλαίσιο αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα δύο σημαντικότερα υποπροβλήματα του FLP, το πρόβλημα p -median και p -center καθώς και ένας σύγχρονος προσομοιωτής για την εξαγωγή πειραματικών δεδομένων. Τα εξαγόμενα αποτελέσματα είναι το ποσοστό παράδοσης πακέτων (Uplink Delivery Rate - UDR) και η μέση κατανάλωση ενέργειας (Mean Energy Consumption), τα οποία εκφράζουν την ποιότητα του δικτύου και το κόστος λειτουργίας του, αντίστοιχα. Τα πειράματα που παρουσιάζονται στην εργασία δίνουν μια πρώτη εικόνα για τη μετρήσιμη απόδοση του FLP στην αντιμετώπιση του προβλήματος τοποθέτησης πυλών, εξετάζοντας τρεις τύπους τοποθέτησης, δύο που βασίζονται στην επίλυση των υποπροβλημάτων FLP και μία τοποθέτηση σε πλέγμα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η επίλυση του υποπροβλήματος p -median αποδίδει καλύτερα στην πλειοψηφία των πειραμάτων. Επίσης, για τα πειράματα που έγιναν, η αύξηση του αριθμού των πυλών του δικτύου οδήγησε στην άνοδο της ποιότητας των επικοινωνιών ενώ, ταυτόχρονα, η μέση κατανάλωση

ενέργειας παρέμεινε σε παρόμοια επίπεδα.

Λέξεις κλειδιά: Διαδίκτυο των Πραγμάτων, Τοποθέτηση πυλών, LoRaWAN, Πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων, p-median, p-center

Abstract

In the last decade the term "Internet of Things" (Internet of Things - IoT) is encountered more and more in our everyday life, gaining greater resonance in commercial, industrial and consumer innovations. However, the development of such products and applications also requires the creation of networks that cover the operational needs of each implementation. For this reason, great importance has been given to the research of the organization and design of such networks. The purpose of this thesis is the implementation and comparison of gateway placement algorithms that cover the needs of a LoRaWAN network, aimed at IoT applications. The problem was modeled using the "Facility Location Problem" (FLP) which, at the time of writing this paper, had not been significantly exploited by the research community in the context of gateway placement for IoT application networks. In this context, the two most important subproblems of FLP, the p-median and p-center problem, as well as a modern simulator were used to extract experimental data. The measured results are the packet delivery rate (Uplink Delivery Rate) and the mean energy consumption (Mean Energy Consumption), which express the quality of the network and its operation cost, respectively. The experiments presented in the paper give an initial insight into the measurable performance of FLP in dealing with the gateway placement problem, with the solving of the p-median subproblem performing best in the majority of experiments. In addition, for the experiments carried out, increasing the number of network gateways led to an increase in the quality of communications while, at the same time, the average energy consumption remained at similar levels.

Keywords: Internet of Things, Gateway placement, LoRaWAN, Facility location problem, p-median, p-center

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων

Δήλωση Πνευματικών Δικαιωμάτων Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο "Βέλτιστη τοποθέτηση πυλών στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων" καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Νικόλαο Πλόσκα αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει καμιάς μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Κωνσταντίνος - Τίτος Καλογεράς & Νικόλαος Πλόσκας, 2024, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	9
1.1	Ανάλυση προβλήματος	9
1.2	Στόχοι εργασίας	11
1.3	Διάρθρωση κειμένου	12
2	Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων	13
2.1	Εισαγωγή	13
2.2	Ορισμοί	15
2.3	Τεχνολογίες του IoT	15
2.3.1	Ενσύρματες και ασύρματες μικρής εμβέλειας	17
2.3.2	Δίκτυο χαμηλής κατανάλωσης ευρείας περιοχής	18
3	Βιβλιογραφική ανασκόπηση	21
3.1	LoRaWAN	21
3.2	Προηγούμενες μελέτες	23
4	Μοντελοποίηση προβλήματος	27
4.1	Πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων	27
4.2	Πρόβλημα p-median	28
4.3	Πρόβλημα p-center	29
5	Πειραματική διαδικασία	31
5.1	Λογισμικό προσομοίωσης	31
5.1.1	LoRaWANSim	32
5.1.2	Ορισμός και ρύθμιση των πειραματικών σεναρίων	34
5.2	Αποτελέσματα	36
5.3	Συμπεράσματα αποτελεσμάτων	42

Κατάλογος σχημάτων

2.1	Ο αυτόματος πωλητής του Carnegie Mellon University [1]	13
2.2	Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων: Συσκευές σε χρήση παγκοσμίως [2]	14
2.3	Αρχιτεκτονική IoT τριών επιπέδων [3]	16
2.4	Αρχιτεκτονικές επιπέδων του IoT (τριών, τεσσάρων και πέντε επιπέδων) [3]	16
2.5	Τυπική αρχιτεκτονική ενός LPWAN	18
5.1	Δομή και υπομονάδες του LoRaWANSim [4]	34
5.2	Σενάριο 1. Επίπτωση της αύξησης της περιοχής κάλυψης στο ποσοστό παράδοσης πακέτων για διαφορετικά πλήθη τερματικών	38
5.3	Σενάριο 2. Επίπτωση της αύξησης της περιοχής κάλυψης στο ποσοστό παράδοσης πακέτων για διαφορετικά πλήθη τερματικών	39
5.4	Σενάριο 3. Επίπτωση της αύξησης της περιοχής κάλυψης στο ποσοστό παράδοσης πακέτων για διαφορετικά πλήθη τερματικών	40
5.5	Σενάριο 1. Επίπτωση της αύξησης της περιοχής κάλυψης στη μέση κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικά πλήθη τερματικών	43
5.6	Σενάριο 2. Επίπτωση της αύξησης της περιοχής κάλυψης στη μέση κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικά πλήθη τερματικών	44
5.7	Σενάριο 3. Επίπτωση της αύξησης της περιοχής κάλυψης στη μέση κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικά πλήθη τερματικών	45

Κατάλογος πινάκων

2.1	Τεχνολογίες WLAN/WPAN	18
2.2	Τεχνολογίες LPWAN	20
5.1	Λίστα με τις παραμέτρους που μπορεί να ορίσει ο χρήστης	35
5.2	Λίστα των κοινών μεταβλητών πειραματικών σεναρίων	36

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Ανάλυση προβλήματος

Στην εργασία αυτή εξετάζεται η τοποθέτηση πυλών σε ένα δίκτυο τεχνολογίας LoRaWAN. Για να γίνει κατανοητός, όμως, ο τρόπος με τον οποίο προσεγγίζεται το πρόβλημα σχεδίασης, πρέπει, πρώτα, να δούμε κάποια βασικά στοιχεία ενός δικτύου LoRaWAN. Το LoRaWAN είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας, σχεδιασμένο για τη διασύνδεση με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων που λειτουργούν με μπαταρία, πάνω σε δίκτυα LPWAN [5]. Για να διατηρηθεί χαμηλή η πολυπλοκότητα του δικτύου, το LoRaWAN βασίζεται σε μια τοπολογία αστέρα, στην οποία οι τερματικές συσκευές (π.χ. ένας αισθητήρας θερμοότητας) επικοινωνούν απευθείας με έναν αριθμό πυλών. Οι πύλες προωθούν τα δεδομένα που λαμβάνουν από τερματικές συσκευές σε έναν κεντρικό διακομιστή δικτύου.

Το πρωτόκολλο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη διαμόρφωση Chirp Spread Spectrum (CSS) η οποία επιτρέπει την επίτευξη ζεύξης σε μεγάλες αποστάσεις, διατηρώντας χαμηλή την κατανάλωση ενέργειας. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές τεχνικές διαμόρφωσης, όπου οι απότομες αλλαγές στη συχνότητα ή τη φάση κωδικοποιούν την πληροφορία, το CSS χρησιμοποιεί μια συνεχή, γραμμική διακύμανση της συχνότητας με την πάροδο του χρόνου. Οι παλμοί αυτοί («τερετίσματα» - chirps, όπως λέγονται), επιτρέπουν στα σήματα που διαμορφώνονται μ' αυτή τη μέθοδο να υπερισχύσουν των επιδράσεων που προκαλούνται από τον θόρυβο, τις παρεμβολές και τις πολλαπλές διαδρομές, καθιστώντας το LoRaWAN ιδιαίτερα ικανό στην επικοινωνία μεγάλης εμβέλειας. Ένα βασικό κομμάτι της παραμετροποίησης των δικτύων LoRaWAN είναι η σωστή επιλογή του συντελεστή διάχυσης ή Spreading Factor (SF),

όπως μεταφράζεται. Το SF προσδιορίζει το πλάτος του παλμού διαμόρφωσης και έχει πολλαπλές επιπτώσεις πάνω στο σήμα. Καθορίζει τον ρυθμό μετάδοσης των δεδομένων, το εύρος επικοινωνίας και την ανθεκτικότητα του σήματος. Εξισορροπώντας αυτούς τους παράγοντες, οι χρήστες LoRaWAN μπορούν να επιλέξουν το βέλτιστο SF για τις συγκεκριμένες ανάγκες της εφαρμογής τους.

Από τα παραπάνω, λοιπόν, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το πρόβλημα της σχεδίασης ενός δικτύου LoRaWAN μπορεί δυνητικά να αναλυθεί σε δυο επιμέρους υποπροβλήματα.

Το πρώτο υποπρόβλημα είναι αυτό της διαμόρφωσης της συσκευής (“Device Configuration”). Η διαμόρφωση επιτυγχάνεται με την επιλογή του σωστού συντελεστή διάχυσης και τη σωστή κατανομή ενέργειας στο δίκτυο. Ο «defacto» μηχανισμός επιλογής SF είναι ο ADR (Adaptive Data Rate). Ο συγκεκριμένος μηχανισμός επιλέγει τον ελάχιστο συντελεστή SF και την ελάχιστη ισχύ μετάδοσης για τα οποία μια τερματική συσκευή μπορεί να επικοινωνήσει με μια πύλη. Η ρύθμιση των παραπάνω επηρεάζει την ποιότητα και την κατανάλωση ενέργειας του δικτύου. Δεδομένου ότι οι συσκευές που ρυθμίζονται είναι επί το πλείστον οι τερματικές συσκευές, που λειτουργούν με μπαταρία, το κόστος λειτουργίας επηρεάζεται αυξητικά αν ληφθεί υπόψη και το κόστος για την αλλαγή της μπαταρίας τους.

Το δεύτερο υποπρόβλημα, στο οποίο και επικεντρώνεται η παρούσα εργασία, είναι αυτό της τοποθέτησης των κεραιών (πυλών) στον χώρο. Η επιλογή των θέσεων των πυλών του δικτύου πρέπει να γίνει έτσι ώστε να παρέχουν την αναγκαία κάλυψη, να επιτυγχάνουν τους αναγκαίους στόχους σε επίπεδο ποιότητας επικοινωνίας και αξιοπιστίας μετάδοσης, ενώ, παράλληλα, να ελαττώνουν τα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας του δικτύου. Η αναγκαία κάλυψη επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση των πυλών με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε τερματική συσκευή να μπορεί να αποστείλει, επιτυχώς, πακέτα δεδομένων σε μία ή περισσότερες πύλες. Η αποτελεσματική κάλυψη μιας περιοχής ενδιαφέροντος δεν μπορεί να γίνει απλά με την πυκνότερη τοποθέτηση πυλών αφενός λόγω του αυξανόμενου κόστους και αφετέρου λόγω των παρεμβολών που δημιουργούνται από τις διάφορες αποστολές μεταξύ τερματικών συσκευών και κεραιών. Επιπλέον, προβλήματα μπορεί να δημιουργηθούν εξαιτίας νομικών, περιβαλλοντολογικών αλλά και κοινωνικών περιορισμών που εμποδίζουν την ελεύθερη τοποθέτηση πύλης μέσα σε μια περιοχή ενδιαφέροντος.

Προτεινόμενες λύσεις, λοιπόν, που παραβλέπουν τον περιορισμό αυτό, δεν αντιμετωπίζουν μια σημαντική πτυχή που διέπει όλα τα προβλήματα τοποθέτησης πυλών ανεξαρτήτως του είδους του δικτύου.

Το πρόβλημα τοποθέτησης πυλών και κάλυψης ασύρματου δικτύου έχει ερευνηθεί σε βάθος από την επιστημονική κοινότητα. Παρόλα αυτά, όπως θα δούμε και παρακάτω, τα δίκτυα LoRaWAN παρουσιάζουν ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό, την απουσία συσχέτισης κεραιάς-τερματικού. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά δίκτυα ασύρματης επικοινωνίας, όπου κάθε τερματικό επικοινωνεί με μία συγκεκριμένη πύλη, στο LoRaWAN η τερματική συσκευή, απλά, εκπέμπει ένα μήνυμα και στη συνέχεια οποιαδήποτε πύλη το λάβει, το προωθεί στον εξυπηρετητή δικτύου για επεξεργασία. Η απουσία της ανάγκης για επιτυχημένη ζεύξη μεταξύ ενός τερματικού και μιας συγκεκριμένης πύλης δίνει στο LoRaWAN μια ευελιξία όσον αφορά την τοποθέτηση των πυλών του, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερο αριθμό κεραιών και άρα μικρότερο κόστος. Παρόμοιες λύσεις που αφορούν άλλα δίκτυα τηλεπικοινωνιών (π.χ. κινητής τηλεφωνίας) δεν εκμεταλλεύονται την παραπάνω αρχιτεκτονική ιδιαιτερότητα του LoRaWAN.

1.2 Στόχοι εργασίας

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, το πρόβλημα της τοποθέτησης κεραιών ασύρματων δικτύων δεν αποτελεί πρόσφατο πρόβλημα. Η κάλυψη περιοχών ενδιαφέροντος για τις ανάγκες ραδιοφωνικών, τηλεοπτικών και τηλεπικοινωνιακών δικτύων, μελετάται αρκετά χρόνια τώρα και παρουσιάζει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον. Η έλευση του Διαδικτύου των Πραγμάτων αλλάζει όμως την αρχιτεκτονική των νέων δικτύων και παρουσιάζει νέες απαιτήσεις στη σχεδιάσή τους. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μοντελοποίηση του προβλήματος της τοποθέτησης πυλών με τη βοήθεια ενός κλασικού προβλήματος της επιχειρησιακής έρευνας, του προβλήματος χωροθέτησης εγκαταστάσεων, και η εξαγωγή πειραματικών μετρήσεων για την απόδοσή του. Παρά την απήχυσή του στην επίλυση άλλων, παρόμοιων, προβλημάτων, τη στιγμή της συγγραφής αυτής της εργασίας, το πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων δεν φαίνεται να έχει αξιοποιηθεί στο πλαίσιο της τοποθέτησης πυλών. Αυτή η “έλλειψη αξιοποίησης” είναι λογική, αν κανείς αναλογιστεί ότι, όπως θα αναφέρουμε και παρακάτω, η αρχιτεκτονική αυτού του “νέου” Διαδικτύου είναι αυτή που επι-

τρέπει τη χρήση της συγκεκριμένης μοντελοποίησης. Τέλος, στο γενικότερο πλαίσιο του προβλήματος τοποθέτησης πυλών για εφαρμογές στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων, στόχος ήταν και η εύρεση ενός κατάλληλου λογισμικού για την προσομοίωση τέτοιων δικτύων και εξαγωγή ουσιωδών πειραματικών αποτελεσμάτων.

1.3 Διάρθρωση κειμένου

Τα υπόλοιπα κεφάλαια οργανώνονται ως εξής. Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια γενική εισαγωγή στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων και στις τεχνολογίες που το διέπουν. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται υπάρχουσες μελέτες που αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της τοποθέτησης πυλών στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Το Κεφάλαιο 4 αφορά τη μοντελοποίηση που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί σε αυτήν την εργασία. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται το λογισμικό προσομοίωσης, ο τρόπος διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας και τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας και γίνεται ο σχολιασμός τους. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων

2.1 Εισαγωγή

Ο όρος του «Διαδικτύου των Πραγμάτων» (Internet of Things - IoT) χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από τον Kevin Ashton, ιδρυτή του εργαστηρίου τεχνολογίας αυτόματης αναγνώρισης του MIT, το 1999 σε μια παρουσίασή του. Η πρώτη, όμως, ιδέα για ένα δίκτυο έξυπνων συσκευών ξεκίνησε να συζητιέται από το 1982 με έναν αυτόματο πωλητή αναψυκτικών (Σχήμα 2.1) στο πανεπιστήμιο Carnegie Mellon. Ο αυτόματος πωλητής ήταν η πρώτη συσκευή συνδεδεμένη στο ARPANET και είχε τη δυνατότητα να ενημερώνει για το απόθεμά του καθώς και αν τα αναψυκτικά ήταν κρύα ή ζεστά.

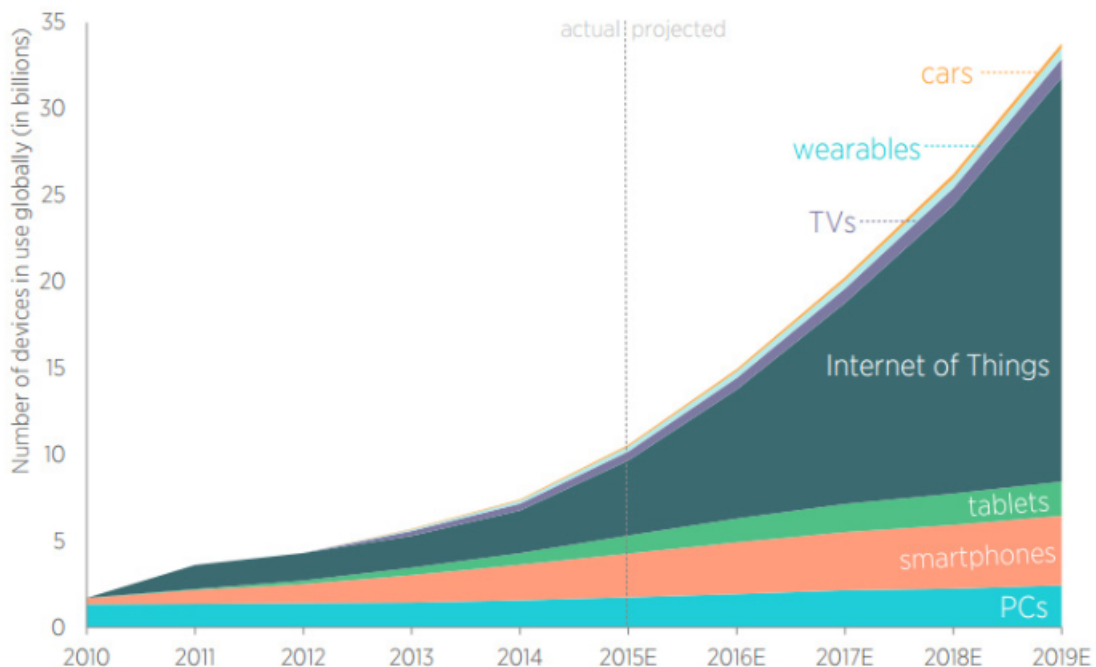


Σχήμα 2.1: Ο αυτόματος πωλητής του Carnegie Mellon University [1]

Καθώς το Διαδίκτυο άλλαζε τον τρόπο ζωής μας από τις αρχές της νέας χιλιετίας, το IoT επωφελήθηκε από την ταχύτατη ανάπτυξη και καινοτομία του υλικού (μικρότερα, φθηνότερα και αποδοτικότερα κυκλώματα, μπαταρίες, μικροεπεξεργαστές κλπ.) για να το ανάγει σε κάτι εντελώς διαφορετικό. Πλέον η πρόσβαση στο

Διαδίκτυο δεν γίνεται μόνο από ανθρώπους αλλά και από συσκευές του εμπορικού και βιομηχανικού τομέα, κάνοντας ευκολότερη τη ζωή μας και αποδοτικότερη τη βιομηχανία μας. Νέες οικιακές συσκευές που ελέγχονται απομακρυσμένα, η αυτοματοποίηση της κατοικίας, η διαχείριση ενέργειας, η ασφάλεια και η εποπτεία, οδηγούν προς την ιδέα του «έξυπνου σπιτιού» (smart home) και της «έξυπνης πόλης» (smart city). Παράλληλα, το παγκόσμιο δίκτυο παραγωγής και προμήθειας βιώνει μια κατάσταση ραγδαίας αυτοματοποίησης των παραδοσιακών κατασκευαστικών και βιομηχανικών πρακτικών του, χρησιμοποιώντας σύγχρονες, έξυπνες τεχνολογίες, επικοινωνίες μηχανής με μηχανή (M2M) μεγάλης κλίμακας και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων.

Αρκετές εταιρίες έχουν κάνει τις προβλέψεις τους για τον αντίκτυπο του IoT στην παγκόσμια οικονομία και το Διαδίκτυο, της τελευταίας δεκαετίας. Η Huawei αναμένει 100 δισεκατομμύρια συνδέσεις IoT έως το 2025 [6]. Οι Manyika et al. [7] προβλέπουν δυνητικό οικονομικό αντίκτυπο του Διαδικτύου των Πραγμάτων από 3,9 έως 11 τρισεκατομμύρια δολάρια ετησίως το 2025. Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται ο αριθμός των συσκευών που είναι συνδεδεμένες με το Διαδίκτυο με την πάροδο των χρόνων, με τις συσκευές IoT να αναμένεται να έχουν ραγδαία αύξηση.



Σχήμα 2.2: Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων: Συσκευές σε χρήση παγκοσμίως [2]

2.2 Ορισμοί

Για να προσδιορίσουμε την έννοια του Διαδικτύου των Πραγμάτων, μπορούμε να αναλύσουμε τα δύο συστατικά του όρου. Ως Διαδίκτυο (“Internet”) ονομάζουμε ένα παγκόσμιο σύστημα διασυνδεδεμένων δικτύων υπολογιστών. Είναι ένα δίκτυο δικτύων που αποτελείται από εκατομμύρια ιδιωτικών, δημόσιων, ακαδημαϊκών, επιχειρηματικών και κυβερνητικών δικτύων που συνδέονται αξιοποιώντας ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρονικών, ασύρματων και οπτικών τεχνολογιών [8].

Με τον όρο Πράγματα (“Things”), αναφερόμαστε σε οποιαδήποτε οντότητα, έμβια ή άβια, η οποία είναι διακριτή στον πραγματικό κόσμο. Στο πλαίσιο του IoT, αναφερόμαστε σε οποιαδήποτε οντότητα μπορεί να συλλέγει και ανταλλάσσει δεδομένα πάνω σε ένα δίκτυο με ελάχιστη ή καθόλου ανθρώπινη παρέμβαση [9].

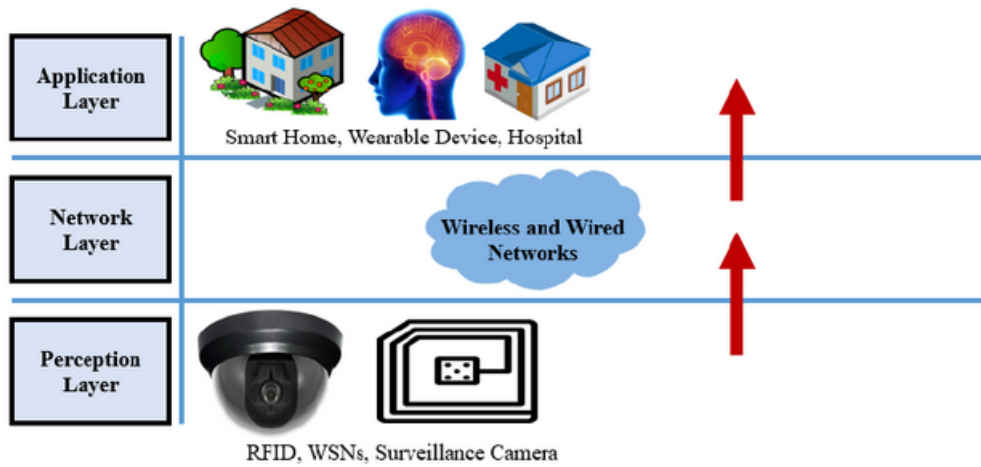
Παρόλο που η ανάλυση των επιμέρους όρων είναι σχετικά εύκολη, η παγκόσμια βιβλιογραφία δεν έχει καταλήξει σε έναν σαφή και μονοσήμαντο ορισμό. Η πληθώρα εφαρμογών του IoT οδηγούν ερευνητές, ακαδημαϊκούς και επιχειρήσεις να διατυπώνουν τους δικούς τους ορισμούς ανάλογα με τη σκοπιά της εργασίας τους. Το περιοδικό IEEE Communication Magazine περιγράφει το Διαδίκτυο των Πραγμάτων ως το πλαίσιο όπου όλα τα Πράγματα έχουν μια αναπαράσταση και μια παρουσία στο Διαδίκτυο [10]. Οι Madakam et al. [11] ορίζουν ως Διαδίκτυο των Πραγμάτων ένα ανοιχτό και περιεκτικό δίκτυο έξυπνων αντικειμένων που έχουν την ικανότητα να οργανώνονται αυτόματα, να ανταλλάσσουν δεδομένα και πόρους και να αντιδρούν απέναντι σε καταστάσεις και αλλαγές στο περιβάλλον.

2.3 Τεχνολογίες του IoT

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων δεν αποτελεί κάποια ενιαία τεχνολογία. Βασίζεται και αναπτύσσεται πάνω σε μια πληθώρα τεχνολογιών οι οποίες διασυνδέονται και συνεργάζονται για την επίτευξη κάποιου στόχου. Παρακάτω θα δούμε συνοπτικά τις βασικές αρχιτεκτονικές προτάσεις.

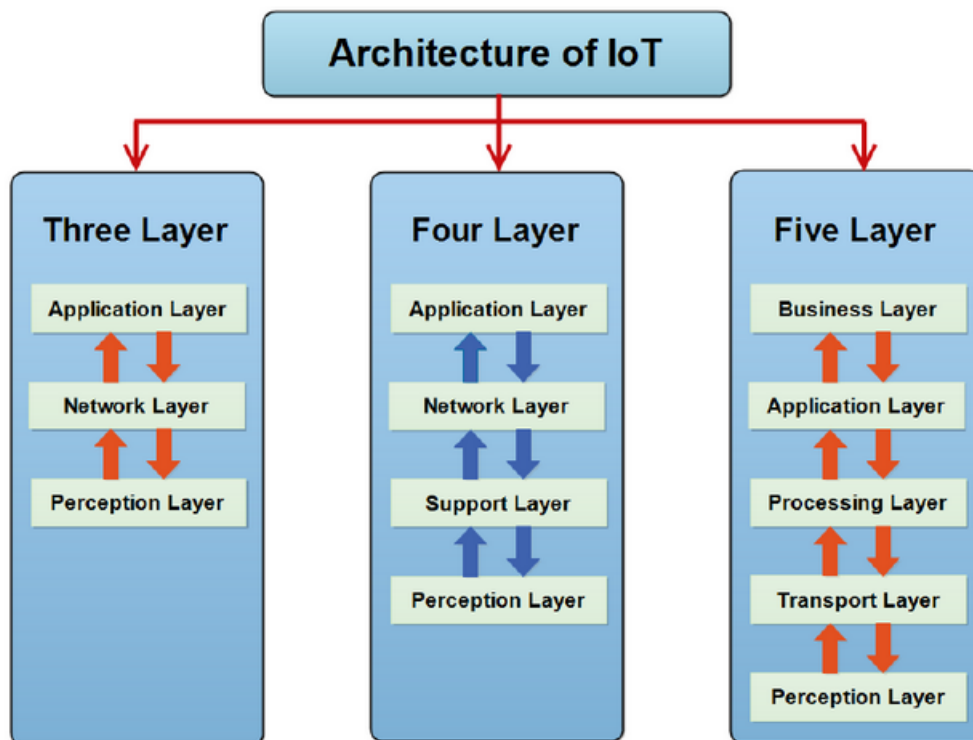
Η αρχιτεκτονική των τριών επιπέδων είναι μια θεμελιώδης αρχιτεκτονική που υλοποιεί τη βασική ιδέα του IoT και προτάθηκε στα αρχικά στάδια της ανάπτυξης του [12]. Τα τρία βασικά επίπεδα, που φαίνονται και στο Σχήμα 2.3, είναι τα επίπεδα της αντίληψης (perception layer), του δικτύου (network layer) και της

εφαρμογής (application layer).



Σχήμα 2.3: Αρχιτεκτονική IoT τριών επιπέδων [3]

Η συνεχόμενη ανάπτυξη του IoT έχει πλέον καταστήσει την αρχιτεκτονική αυτή παρωχημένη και οδηγήσε, αρχικά, στην αρχιτεκτονική των τεσσάρων και, αργότερα, των πέντε επιπέδων [13]. Στο Σχήμα 2.4 μπορούμε να δούμε δίπλα-δίπλα, σε σύγκριση τα επίπεδα όλων των παραπάνω αρχιτεκτονικών.



Σχήμα 2.4: Αρχιτεκτονικές επιπέδων του IoT (τριών, τεσσάρων και πέντε επιπέδων) [3]

2.3.1 Ενσύρματες και ασύρματες μικρής εμβέλειας

Οι τεχνολογίες του φυσικού επιπέδου αφορούν το φυσικό μέσο διάδοσης πάνω στο οποίο μεταδίδεται η πληροφορία. Η ενσύρματη διασύνδεση, παρόλο που υπήρξε θεμελιώδης υποδομή του διαδικτύου, αποτελεί περιορισμένη επιλογή, καθώς η πλειοψηφία των εφαρμογών IoT, απαιτούν συσκευές ασύρματης επικοινωνίας. Για τον λόγο αυτό, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων αξιοποιεί ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών, από προϋπάρχουσες λύσεις της κινητής τηλεφωνίας μέχρι και της δικτύωσης μικρής εμβέλειας.

Οι ασύρματες τεχνολογίες επικοινωνίας χωρίζονται με βάση την εμβέλειά τους σε μικρής και μεγάλης εμβέλειας. Σε ότι αφορά τις μικρής εμβέλειας τεχνολογίες, συνήθως αναφερόμαστε στα δίκτυα WPAN/WLAN (Wireless Personal/Local Area Networks) που βασίζονται σε μερικές από τις γνωστότερες τεχνολογίες, στις οποίες θα αναφερθούμε παρακάτω, όπως το Wi-Fi, το Bluetooth (BLE), το ZigBee και το Z-Wave.

- **Wi-Fi (Wireless Fidelity):**

Μια οικογένεια πρωτοκόλλων ασύρματων δικτύων, βασισμένη στην οικογένεια προτύπων IEEE 802.11, που χρησιμοποιείται ευρέως για δικτύωση συσκευών τοπικής περιοχής και πρόσβαση στο Διαδίκτυο, επιτρέποντας την ανταλλαγή δεδομένων μέσω ραδιοκυμάτων, μεταξύ ψηφιακών συσκευών.

- **Bluetooth (BLE):**

Ένα μικρής εμβέλειας ασύρματο δίκτυο που χρησιμοποιείται σε δίκτυα προσωπικού χώρου (PAN). Το BLE είναι μια έκδοση του προτύπου Bluetooth, σχεδιασμένη για την αποστολή/λήψη μικρού όγκου δεδομένων, καταναλώνοντας εξαιρετικά μικρές ποσότητες ενέργειας.

- **ZigBee:**

Αποτελεί μια σουίτα πρωτοκόλλων επικοινωνίας υψηλού επιπέδου, βασισμένη στο πρότυπο IEEE 802.15, για μια σουίτα πρωτοκόλλων επικοινωνίας υψηλού επιπέδου, η οποία χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δικτύων προσωπικού χώρου με χαμηλής ενέργειας ψηφιακά ραδιοκύματα. Σχεδιάστηκε για μικρής κλίμακας έργα με ανάγκες χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και κοντινής απόστασης.

- Z-Wave:

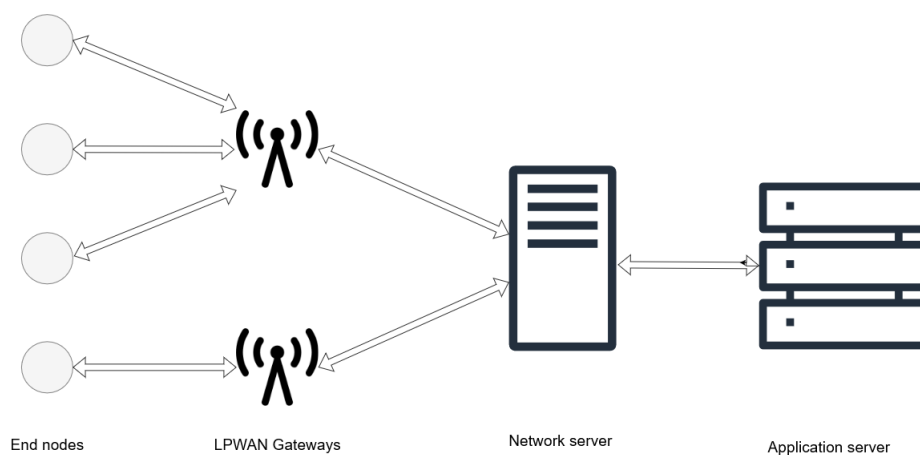
Το Z-Wave είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματων επικοινωνιών που χρησιμοποιείται κυρίως για αυτοματοποίηση κατοικιών και εμπορικών κτηρίων. Χρησιμοποιεί χαμηλής ενέργειας ραδιοκύματα ώστε να υπάρχει επικοινωνία συσκευής με συσκευή σε ένα δίκτυο τύπου «πλέγματος».

Στον Πίνακα 2.1 μπορούμε να δούμε συγκριτικά περισσότερα στοιχεία για τις παραπάνω τεχνολογίες.

Πίνακας 2.1: Τεχνολογίες WLAN/WPAN

	WIFI(802.11n)	BLE	Z-Wave	ZigBee
Συχνότητα	2.4GHz / 5GHz	2.4GHz	868 MHz	868 MHz
Κατανάλωση Ενέργειας	Υψηλή	Πολύ χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
Εμβέλεια	100m	50-100m	100m	10-100m
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	600 Mbps	1 Mb/s	100 Kbps	20 Kbps
Συχνές εφαρμογές	Έξυπνες συσκευές	Έξυπνες φορητές συσκευές, συσκευές έξυπνου σπιτιού	Αυτοματοποίηση σπιτιού	

2.3.2 Δίκτυο χαμηλής κατανάλωσης ευρείας περιοχής



Σχήμα 2.5: Τυπική αρχιτεκτονική ενός LPWAN

Παρομοίως, πληθώρα τεχνολογιών υποστηρίζουν εφαρμογές του IoT, που έχουν

ανάγκη από μεγαλύτερη εμβέλεια και καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις, ακόμα και ολόκληρες πόλεις. Τα δίκτυα LPWAN (Low Power Wide Area Network), βασίζονται σε μία κατηγορία προτύπων και τεχνολογιών που καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις, έχουν μικρούς ρυθμούς μετάδοσης, μικρό μέγεθος πακέτων δεδομένων και μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταρίας [14]. Τα βασικά δομικά στοιχεία (Σχήμα 2.5) ενός LPWAN είναι: 1) τα τερματικά (end nodes), τα οποία αποστέλλουν τα δεδομένα, 2) οι πύλες (gateways), οι οποίες παραλαμβάνουν τα δεδομένα από τα τερματικά και τα μεταδίδουν σε έναν κεντρικό εξυπηρετητή, 3) ο κεντρικός εξυπηρετητής ο οποίος συγκεντρώνει τα δεδομένα και τα διαθέτει στον εξυπηρετητή εφαρμογής, και 4) ο εξυπηρετητής εφαρμογής ο οποίος χρησιμοποιεί τα δεδομένα για την επίτευξη κάποιου στόχου.

Μερικές από τις σημαντικότερες τεχνολογίες στις οποίες βασίζονται τα δίκτυα LPWAN είναι το LoRaWAN, το Sigfox, το NB-Fi και το NB-IoT. Μια ασύρματη τεχνολογία που πρέπει, επίσης, να αναφέρουμε είναι και τα κυψελοειδή δίκτυα (Cellular 3G/4G/5G).

- **LoRaWAN:**

Μια τεχνολογία που υποστηρίζει επικοινωνίες μεγάλης εμβέλειας με μικρή κατανάλωση ενέργειας. Σε φυσικό επίπεδο αξιοποιεί την τεχνολογία LoRa για τη μεταφορά της πληροφορίας και, στη συνέχεια, το πρωτόκολλο LoRaWAN για τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ συσκευών και εξυπηρετητών. Υποστηρίζεται από την LoRa Alliance [5], μέλη της οποίας αποτελούν, μεταξύ άλλων, οι Cisco, IBM, Schneider, Bosch κ.α.

- **Sigfox:**

Η τεχνολογία εξαιρετικά στενής ζώνης (ultra-narrowband), σχεδιασμένη για LPWAN, χρησιμοποιεί αργή διαμόρφωση κύματος επιτυγχάνοντας μεγαλύτερη εμβέλεια. Εγγυάται τη μετάδοση μικρών ποσοτήτων δεδομένων μέσω της επαναλαμβανόμενης αποστολής μηνυμάτων, η οποία, όμως, οδηγεί σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας.

- **NB-IoT:**

Το NarrowBand-IoT είναι μια τεχνολογία κυψελοειδούς δικτύου που σχεδιάστηκε για το IoT. Συνδέει διάφορες συσκευές-«πράγματα» χρησιμοποιώντας

το δίκτυο κινητής τηλεφωνίας. Σχεδιάστηκε με στόχο την ανταλλαγή μικρών ποσοτήτων δεδομένων σε δίκτυα που χρησιμοποιούν μεγάλο αριθμό συσκευών και για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

- NB-Fi:

Το NarrowBand-Fidelity είναι μια τεχνολογία LPWAN, που σχεδιάστηκε με στόχο την αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ μηχανών (M2M). Στοιχειοθετεί όλα τα επίπεδα του δικτύου και χρησιμοποιεί αλγορίθμους βελτιστοποίησης, νευρωνικά δίκτυα και τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης για την επίτευξη καλύτερης φασματικής απόδοσης.

Στον Πίνακα 2.2 μπορούμε να δούμε συγκριτικά περισσότερα στοιχεία για τις παραπάνω τεχνολογίες.

Πίνακας 2.2: Τεχνολογίες LPWAN

	LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	NB-Fi
Συχνότητα	125Khz / 250Khz	100Hz	200kHz	868 MHz
Κατανάλωση Ενέργειας	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
Εμβέλεια	2-5km (urban) / 20km (rural)	3-10km (urban) / 30-50km (rural)	1km (urban) / 10km (rural)	16km (urban) / 50km (rural)
Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	300bps - 50Kbps	100bps	20Kbps (uplink)	100bps
Συχνές εφαρμογές	Βιομηχανικό IoT, έξυπνες πόλεις, έξυπνα κτήρια, έξυπνη γεωργία			

Κεφάλαιο 3

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η ποικιλία εφαρμογών IoT και των τεχνολογιών που τις υποστηρίζουν, έχει οδηγήσει την ερευνητική κοινότητα στην διερεύνηση των διάφορων τρόπων διάταξης των κεραιών/πυλών των δικτύων, αλλά και της αξιοποίησης των φυσικών τους παραμέτρων για την αποδοτικότερη λειτουργία τους.

3.1 LoRaWAN

Το LoRaWAN (“Long Range Wide Area Network”) είναι ένα πρωτόκολλο δικτύου χαμηλής ενέργειας, ευρείας περιοχής, σχεδιασμένο για τη διασύνδεση συσκευών IoT σε μεγάλες αποστάσεις. Αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις διασύνδεσης συσκευών που λειτουργούν με μπαταρία και απαιτούν ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Το LoRaWAN παρέχει αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ τερματικών συσκευών και πυλών του δικτύου, επιτρέποντας την ενσωμάτωσή τους σε πληθώρα εφαρμογών του IoT. Εμφανίστηκε ως λύση στην ανάγκη για ισχυρή συνδεσιμότητα μεγάλης εμβέλειας με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Η εταιρία SemTech Corporation έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην ανάπτυξη του πρωτοκόλλου εισάγοντας την τεχνολογία LoRa, μια ιδιόκτητη τεχνολογία διαμόρφωσης σήματος βασισμένη στη διαμόρφωση CSS (“Chirp Spread Spectrum”). Η διαμόρφωση αυτή παρέχει την αποτελεσματική επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις και χαρακτηρίζει το φυσικό επίπεδο του δικτύου. Μετά την οργάνωση του φυσικού επιπέδου του δικτύου, επήλθε η ανάγκη για οργάνωση των ανώτερων επιπέδων του. Το LoRaWAN αποτελεί ένα πρωτόκολλο επιπέδου ελέγχου του μέσου πρόσβασης (“Medium Access Control layer protocol”) αλλά στην πραγματικότητα λειτουργεί σαν πρωτόκολλο επιπέδου δικτύου για τη διαχείριση της επικοινωνίας πυλών LPWAN και τερματικών

συσκευών. LoRa και LoRaWAN μαζί, συνθέτουν ένα πρωτόκολλο δικτύωσης χαμηλής κατανάλωσης, ευρείας περιοχής (LPWAN) που έχει σχεδιαστεί για να συνδέει ασύρματα συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία, με γνώμονα βασικές απαιτήσεις εφαρμογών του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Η ανάπτυξη και συντήρηση του LoRaWAN γίνεται από τον μη κερδοσκοπικό οργανισμό “LoRa Alliance” στον οποίο η SemTech είναι ιδρυτικό μέλος. Όπως αναφέραμε παραπάνω, τερματικές συσκευές και πύλες συνδέονται σε φυσικό επίπεδο μέσω του LoRa. Οι πύλες συνδέονται ασύρματα ή ενσύρματα με έναν εξυπηρετητή δικτύου μέσω πρωτοκόλλου IP. Οι τερματικές συσκευές ή “End Devices (EDs)” αποστέλουν πακέτα δεδομένων ασύγχρονα, μόλις είναι έτοιμες. Η πρόσβαση στο κανάλι βασίζεται στο πρωτόκολλο ALOHA. Οι πύλες με τη σειρά τους προωθούν τα πακέτα στον εξυπηρετητή δημιουργώντας έτσι μια τοπολογία “αστέρα αστέρων”. Ουσιαστικά, οι τερματικές συσκευές δεν σχετίζονται με κάποια συγκεκριμένη πύλη αλλά με έναν εξυπηρετητή δικτύου, αποστέλλουν πακέτα και όσες πύλες λάβουν τα πακέτα, τα προωθούν στον εξυπηρετητή ο οποίος είναι υπεύθυνος για την απόρριψη διπλότυπων, αποστολή επιβεβαιώσεων (ACK) και γενικότερα τη διαχείριση του δικτύου. Η διαχείριση αυτή περιλαμβάνει και τη ρύθμιση των παραμέτρων που αφορούν το φυσικό επίπεδο του δικτύου, όπως η ισχύς μετάδοσης και το SF. Το πρωτόκολλο ορίζει τρεις βασικές κατηγορίες συσκευών οι οποίες (κατηγορίες) διαχωρίζονται με βάση τις δυνατότητες λήψης πακέτων. Στις συσκευές τύπου A, ένα παράθυρο αποστολής πακέτων ακολουθείται από δύο παράθυρα λήψης τα οποία απέχουν συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα από το παράθυρο αποστολής. Οι συσκευές τύπου A αφορούν κυρίως σε τερματικές συσκευές με περιορισμένη διαθεσιμότητα ενέργειας. Οι συσκευές τύπου B αφορούν πάλι κυρίως σε τερματικές συσκευές αλλά επιτρέπουν περισσότερα από δύο παράθυρα λήψης. Ο συγχρονισμός τερματικών τύπου B και πύλης γίνεται με περιοδικές μεταδόσεις που γίνονται από την εν λόγω πύλη. Οι συσκευές τύπου C έχουν σχεδόν συνεχόμενα ανοιχτό παράθυρο λήψης εκτός από τα διαστήματα κατά τα οποία αποστέλλουν δεδομένα. Για το λόγο αυτό, οι συσκευές τύπου Γ συσχετίζονται με τις πύλες του δικτύου και έχουν μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας.

3.2 Προηγούμενες μελέτες

Στην ερευνά τους, οι Grochla & Polys [15] προτείνουν έναν ευρετικό αλγόριθμο για την υπο-βέλτιστη (suboptimal) επιλογή θέσεων των πυλών ενός δικτύου LoRa, από ένα προκαθορισμένο σύνολο διαθέσιμων τοποθεσιών. Το πρόβλημα μοντελοποιείται ως πρόβλημα εύρεσης κυρίαρχου συνόλου. Οι προτεινόμενες θέσεις του αλγορίθμου εξετάστηκαν σε πολλαπλά σενάρια με τυχαία κατανομή τερματικών, ως προς την κάλυψη του δικτύου και τον συνολικό αριθμό πυλών του. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο αλγόριθμος μπορούσε να πετύχει σχεδόν βέλτιστη επιλογή τοποθεσίας σε όλα τα πειράματα. Ταυτόχρονα, ικανοποιούσε τη συνθήκη για μέγιστο αριθμό τερματικών ανά πύλη με στόχο τη μείωση της πιθανότητας σύγκρουσης πακέτων.

Στο άρθρο τους, οι Cessana et al. [16] παρουσιάζουν ένα μαθηματικό μοντέλο προγραμματισμού που συνδυάζει τη βελτιστοποίηση της διάταξης και των ρυθμιστικών παραμέτρων ενός δικτύου LoRaWAN. Το μοντέλο επιστρέφει το πιο αποδοτικό, από άποψη κόστους, δίκτυο (διάταξη και διαμόρφωση χαρακτηριστικών) με αυστηρούς περιορισμούς τόσο στην κάλυψη των τερματικών, όσο και στην καθυστέρηση διάδοσης και στον ρυθμό εξαγωγής δεδομένων. Τα αποτελέσματα για τυχαία κατανομή τερματικών σε μια περιοχή $25Km^2$ έδειξαν ότι το μοντέλο πέτυχε την επίτευξη πολλαπλών περιορισμών με μια αμελητέα αύξηση του κόστους, σε σχέση με παραδοσιακά μοντέλα που στοχεύουν μόνο στην κάλυψη.

Οι Ousat & Ghaderi [17] αναπτύσσουν έναν αλγόριθμο προσέγγισης, για την επίλυση του προβλήματος τοποθέτησης πυλών, επιλογής του Spreading Factor και κατανομής ισχύος για μικρά δίκτυα. Το πρόβλημα ανάγεται σε πρόβλημα μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού (MINLP). Τα πειράματα έγιναν σε μια υποθετική περιοχή $50x50Km^2$, με 50,000 τερματικές συσκευές που κατανέμονται αυθαίρετα και 36 πιθανές τοποθεσίες πύλης. Αρχικά, οι ερευνητές προτείνουν δύο δικούς τους μηχανισμούς ανάθεσης SF και στη συνέχεια, η διαμόρφωση των συσκευών χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με έναν άπληστο αλγόριθμο για την επίλυση του προβλήματος της διάταξης. Μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων του δικτύου και την τοποθέτηση των πυλών, ο αλγόριθμος των ερευνητών έδειξε σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα στη διαμόρφωση των συσκευών σε σχέση με τον ADR, που

εφαρμόζεται ευρέως σήμερα στο LoRaWAN, με καλύτερες επιδόσεις σε ποσοστό παράδοσης πακέτων και ενεργειακής απόδοσης.

Ο Matni [18] προτείνει μια βέλτιστη τοποθέτηση πυλών για LoRa, την οποία ονομάζει PLACE. Χρησιμοποιεί τη μέθοδο “Gap statistics” για την εύρεση του συνολικού αριθμού των πυλών και στη συνέχεια χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο Fuzzy C-Means για την τοποθέτησή τους. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσής του έδειξαν ότι ο PLACE μείωσε σημαντικά τα CAPEX και OPEX, σε σύγκριση με την τυχαία τοποθέτηση και την τοποθέτηση σε πλέγμα, ενώ παράλληλα διατήρησε παρόμοια αναλογία παράδοσης πακέτων. Επίσης, σε συνέχεια της παραπάνω δουλειάς του, οι Matni et al. [19] προτείνουν και ένα δεύτερο μοντέλο τοποθέτησης πυλών LoRaWAN, με το όνομα DPLACE, αυτή τη φορά για δυναμικά IoT σενάρια, που λαμβάνει υπόψη κτίρια, τερματικές συσκευές με συμπεριφορά που ακολουθεί κατανομή Poisson και πιθανές αστοχίες των πυλών. Για μία περιοχή 100Km^2 και τέσσερις διαφορετικές μεθόδους τοποθέτησης, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέθοδος DPLACE μείωσε κατά 28% τα OPEX και CAPEX σε σχέση με τη μέθοδο GRID25 και είχε καλύτερη αναλογία παράδοσης πακέτων από τις μεθόδους GRID16 και PLACE με μόλις 8% αύξηση στο τελικό κόστος του έργου.

Οι Gravalos et al. [20] αναγνωρίζοντας ότι το πρόβλημα της τοποθέτησης πυλών έχει μεγάλη επίπτωση στο κόστος και στην ποιότητα των υπηρεσιών (Quality of Service), παρουσιάζουν μια μοντελοποίηση ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού που ελαχιστοποιεί το κόστος εγκατάστασης του δικτύου σε σχέση με την τοποθεσία των τερματικών, ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται η τήρηση του ελάχιστου κατωφλίου της ποιότητας των υπηρεσιών. Αφού οι ερευνητές διατύπωσαν το πρόβλημα τους, υπέθεσαν τέσσερα είδη συσκευών, με τα τρία πρώτα να αποτελούν τερματικές συσκευές με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά και το τέταρτο να είναι η πύλη. Στη συνέχεια, για μια περιοχή $1000\text{X}1000$ τετ. μέτρων, εξετάζουν δύο διαφορετικές κατανομές για τις πιθανές θέσεις των πυλών, τυχαία κατανομή και σε πλέγμα (mesh). Έπειτα, για διαφορετικό συνολικό αριθμό πιθανών θέσεων σε κάθε κατανομή, και διαφορετικά είδη τερματικών συσκευών, υπολογίσθηκαν οι εξισώσεις κόστους. Αρχικά εξετάστηκε το πρόβλημα με εξισώσεις που σχετίζονταν μόνο με την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης και στη συνέχεια σε συνδυασμό με αυτές του Quality of Service. Τα αποτελέσματά τους, για πληθώρα σεναρίων, παρου-

σίασαν μειώσεις, έως και 52% στο συνολικό κόστος εγκατάστασης ενώ παράλληλα ικανοποιούνταν τα κριτήρια της ποιότητας των υπηρεσιών.

Οι Folk et al. [21], αναγνωρίζοντας ότι πολλές στρατηγικές τοποθέτησης πυλών σε LoRaWAN στοχεύουν αποκλειστικά και μόνο στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των κεραιών και την επαρκή γεωγραφική κάλυψη για έναν συγκεκριμένο αριθμό τερματικών που εξυπηρετούνται ανά πύλη, παραθέτουν έναν διαφορετικό τρόπο τοποθέτησης που καθιστά το δίκτυο ανθεκτικό σε πιθανές αυξήσεις του αριθμού των τερματικών ή του φόρτου του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, τροποποίησαν έναν ήδη υπάρχοντα αλγόριθμο τοπικής αναζήτησης για προβλήματα επικάλυψης συνόλου, έτσι ώστε να λαμβάνει υπόψη τις δυνατότητες εξυπηρέτησης κάθε κεραιάς. Στη συνέχεια, μείωσαν τις δυνατότητες κάθε πύλης έτσι ώστε στο μέλλον να μπορεί να υποστηρίζει περισσότερα τερματικά. Χρησιμοποιώντας πραγματικά σημεία από την πόλη του Würzburg και κεραιές ποικίλων δυνατοτήτων, οι ερευνητές είδαν ότι με έναν διπλασιασμό των κεραιών, το δίκτυο μπορεί να πενταπλασιάσει τα τερματικά που μπορούν να εξυπηρετούνται, χωρίς να υπερβαίνεται η πιθανότητα σύγκρουσης πακέτων της απλής τοποθέτησης για ελάχιστες πύλες.

Στο άρθρο τους, οι Loh et al. [22] σχεδίασαν έναν graph-based αλγόριθμο για τη βελτιστοποίηση ενός δικτύου LoRaWAN μέσω της εύρεσης των ιδανικών τοποθεσιών των πυλών. Ο αλγόριθμος στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των απαιτούμενων πυλών, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα την κάλυψη των τερματικών και τις ελάχιστες παρεμβολές και απώλεια σήματος. Ο αλγόριθμος αξιολογήθηκε πειραματικά με προσομοίωση, με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι έχει καλύτερη απόδοση από άλλους αλγόριθμους τοποθέτησης πυλών, σε σχέση με την κάλυψη, την αξιοπιστία και την ενεργειακή απόδοση του δικτύου.

Στην έρευνά τους, οι Rawayau et al. [23] προτείνουν την ευρετική τοποθέτηση πυλών για την ελαχιστοποίηση της ισχύς μετάδοσης και της πιθανότητας σύγκρουσης πακέτων σε LPWAN, με σκοπό τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης, η οποία υπολογίζεται με βάση την πιθανότητα σύγκρουσης πακέτων. Αυτό συμβάλλει στη μείωση της ανάγκης επαναμετοδόσεων και του ρυθμού απώλειας πακέτων. Για τη μέτρηση των συγκρούσεων και του ρυθμού απώλειας, χρησιμοποιήθηκε ο προσομοιωτής «The things network simulator». Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σε σχέση με τον αλγόριθμο τοποθέτησης EGBGP [22], ο ρυθμός απώλειας πακέτων μειώθηκε

κατά 6% και η πιθανότητα σύγκρουσης πακέτων, για συνολικό αριθμό τερματικών από 20 έως 80, μειώθηκε κατά 20%.

Στη μελέτη τους, οι Correia et al. [24] προτείνουν μια ολοκληρωμένη στρατηγική για τοποθέτηση πυλών ενός δικτύου LoRaWAN σε αγροτικές περιοχές μεγάλου μεγέθους. Οι ερευνητές μελέτησαν τέσσερις διαφορετικούς αλγόριθμους ομαδοποίησης για την τοποθέτηση πυλών σε μια από τις μεγαλύτερες αγροτικές περιοχές εσπεριδοειδών της Βραζιλίας. Οι αλγόριθμοι συγκρίθηκαν με βάση τον λόγο παράδοσης πακέτων και τη συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου σε δύο διαφορετικά σενάρια. Το σενάριο 1 δεχόταν την τοποθέτηση δύο κεραιών ενώ το δεύτερο σενάριο δεχόταν τη τοποθέτηση περισσότερων. Η απόδοση της τοποθέτησης σε σχέση με το ποσοστό παράδοσης πακέτων διέφερε μεταξύ των σεναρίων και των αλγορίθμων. Τα πειράματα έδειξαν ότι η αύξηση του χρόνου μεταξύ δύο διαδοχικών μεταδόσεων οδήγησε στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και στην καλύτερη ενεργειακή απόδοση του δικτύου. Τέλος, με βάση τα πειράματα, πιο αποδοτικοί αλγόριθμοι συνολικά θεωρήθηκαν οι Fuzzy C-Means (FCM) και K-Means.

Κεφάλαιο 4

Μοντελοποίηση προβλήματος

Το πρόβλημα της επιλογής της τοποθεσίας μια πύλης σε ένα δίκτυο χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης καθώς η χωροταξική διάταξη και ο αριθμός των κεραιών θα επηρεάσουν την απόδοση του καθώς και τα κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας του. Όπως φαίνεται στο Κεφάλαιο 3, η ερευνητική κοινότητα έχει να επιλέξει από μια μεγάλη γκάμα προβλημάτων για τη μοντελοποίηση του προβλήματος που έχει να επιλύσει. Μοντέλα επικάλυψης συνόλου, κυρίαρχου συνόλου, ομαδοποίησης χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τεχνικές ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού προκειμένου να δώσουν μια βέλτιστη λύση. Δεδομένου ότι σε πρακτικό επίπεδο, λόγω νομικών, περιβαλλοντολογικών ή τεχνικών προϋποθέσεων, μια κεραία δεν μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε στον χώρο, οι περισσότερες μελέτες προσπαθούν να βρουν τη βέλτιστη τοποθέτηση από ένα σύνολο πιθανών τοποθεσιών.

Γνωρίζοντας τα παραπάνω, στην παρούσα εργασία επιλέξαμε τη μοντελοποίηση προβλήματος χωροθέτησης εγκαταστάσεων, Facility Location Problem (FLP).

4.1 Πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων

Το πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων [25] είναι ένα από τα κλασικά προβλήματα στον τομέα της επιχειρησιακής έρευνας (operational research) και έχει μελετηθεί ευρέως. Αποσκοπεί στην επιλογή των καλύτερων, μεταξύ των πιθανών, τοποθεσιών, για το άνοιγμα εγκαταστάσεων (όπως εργοστάσια, νοσοκομεία, αποθήκες ή κέντρα εξυπηρέτησης) για την εξυπηρέτηση ενός συνόλου πελατών. Ο στόχος των προβλημάτων χωροθέτησης εγκαταστάσεων είναι συνήθως η ελαχιστοποίηση (ή μεγιστοποίηση) μιας αντικειμενικής συνάρτησης, στην οποία πρέπει να εντοπιστεί

ένα σύνολο τοποθεσιών εγκαταστάσεων το οποίο να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των πελατών, για ένα σύνολο περιορισμών. Μερικοί ενδεικτικοί περιορισμοί θα μπορούσαν να είναι ο μέγιστος αριθμός εγκαταστάσεων που μπορούν να ανοιχθούν, η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δυο εγκαταστάσεων κ.α.

Μπορούμε λοιπόν να μοντελοποιήσουμε το πρόβλημα τις τοποθέτησης κεραιών LPWAN σε μια γεωγραφική περιοχή ως ένα πρόβλημα FLP με τις κεραιές-πύλες του δικτύου να αποτελούν τις εγκαταστάσεις, τις τερματικές συσκευές του δικτύου να αντικατοπτρίζουν τους πελάτες και το σύνολο των πιθανών τοποθεσιών ως τοποθεσίες που πληρούν τις προαναφερθείσες προϋποθέσεις.

Τα FLP, συνήθως, επιλύονται ως προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού [26] και υπάρχουν αρκετές παραλλαγές, κάθε μια από τις οποίες αντιμετωπίζει διαφορετικούς περιορισμούς ή σενάρια του πραγματικού κόσμου. Οι δύο πιο σημαντικές παραλλαγές, τις οποίες θα αναλύσουμε περαιτέρω στη συνέχεια είναι: το p-median problem και το p-center problem.

4.2 Πρόβλημα p-median

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, το πρόβλημα p-median αποτελεί μια παραλλαγή του προβλήματος χωροθέτησης εγκαταστάσεων. Αποσκοπεί στην επιλογή p τοποθεσιών για το άνοιγμα εγκαταστάσεων με τέτοιο τρόπο ώστε το άθροισμα των αποστάσεων από κάθε πελάτη έως την πλησιέστερη εγκατάσταση να ελαχιστοποιείται. Ας υποθέσουμε $i = 1, 2, \dots, n$ πελάτες-τερματικά και $j = 1, 2, \dots, m$ πιθανές τοποθεσίες για τοποθέτηση κεραιών. Αν η απόσταση μεταξύ του τερματικού i και της κεραιάς j συμβολίζεται με C_{ij} και θέλουμε να τοποθετήσουμε ακριβώς p κεραιές για την εξυπηρέτηση n τερματικών, τότε μπορούμε να ορίσουμε τις μεταβλητές:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{αν ο πελάτης } i \in I \text{ εξυπηρετείται από την τοποθεσία } j \in J \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$Y_j = \begin{cases} 1, & \text{αν υπάρχει εγκατάσταση στην τοποθεσία } j \in J \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.2)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να εκφραστεί ως η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους το οποίο είναι το άθροισμα του κόστους εξυπηρέτησης κάθε πελάτη από μια ανοιχτή εγκατάσταση:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} X_{ij} \quad (4.3)$$

με τους περιορισμούς:

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} = 1, i = 1, \dots, n \quad (4.4)$$

$$\sum_{j=1}^m Y_j = p \quad (4.5)$$

$$X_{ij} \leq Y_j, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m \quad (4.6)$$

$$X_{ij} \in 0, 1, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m \quad (4.7)$$

$$Y_j \in 0, 1, i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m \quad (4.8)$$

Ο περιορισμός (4.4) ορίζει ότι κάθε πελάτης θα εξυπηρετείται από μία κεραία και ο περιορισμός (4.5) ότι θα επιλεχθούν ακριβώς p τοποθεσίες για εγκατάσταση κεραίας. Ο περιορισμός (4.6) υποδεικνύει ότι για να εξυπηρετείται ένας πελάτης i από μια τοποθεσία j πρέπει να υπάρχει κεραία στην τοποθεσία.

4.3 Πρόβλημα p-center

Το πρόβλημα p-center αποτελεί παραλλαγή του p-median. Η αντικειμενική συνάρτηση του p-center στοχεύει στην επιλογή p τοποθεσιών έτσι ώστε η μέγιστη απόσταση ενός πελάτη από την κοντινότερη εγκατάσταση να ελαχιστοποιείται. Χρησιμοποιώντας τις ίδιες μεταβλητές και περιορισμούς με το p-median πρόβλημα,

εισάγουμε μια νέα μεταβλητή Z η οποία αντιπροσωπεύει την απόσταση για τον πιο απομακρυσμένο πελάτη από μια επιλεγμένη τοποθεσία. Η νέα διατύπωση είναι η εξής:

$$\min Z \tag{4.9}$$

Επιπλέον των περιορισμών (4.4) - (4.8), θα προσθίσουμε έναν ακόμη:

$$\sum_{j=1}^m C_{ij} X_{ij} \leq Z, i = 1, \dots, n \tag{4.10}$$

Ο περιορισμός (4.10) ορίζει ότι το Z θα λάβει τουλάχιστον τιμή ίση με C_{ij} , για όλες τις εγκαταστάσεις j και τους πελάτες i που εξυπηρετούνται στο j .

Κεφάλαιο 5

Πειραματική διαδικασία

Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας είναι η εξαγωγή πειραματικών αποτελεσμάτων για το πρόβλημα τοποθέτησης κεραιών δικτύου LoRaWAN, με τη χρήση μοντελοποίησης προβλήματος χωροθέτησης εγκαταστάσεων. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων θα γίνει αρχίζοντας με την επιλογή της τοποθεσίας των πυλών με βάση τα υποπροβλήματα p -median και p -center. Αφού τοποθετηθούν οι πύλες, στη συνέχεια, γίνεται η προσομοίωση του δικτύου από την οποία εξάγονται μετρήσεις. Όπως αναφέραμε και παραπάνω, η εργασία αυτή έχει ως στόχο τη διερεύνηση της δυνατότητας μοντελοποίησης του προβλήματος τοποθέτησης πυλών για εφαρμογές IoT με χρήση του προβλήματος FLP. Ταυτόχρονα, έπρεπε να βρεθεί και το κατάλληλο λογισμικό προσομοίωσης που θα εξυπηρετούσε τις ανάγκες της μελέτης. Το δίκτυο της μελέτης αφορά αστικές και ημι-αστικές περιοχές με δυνατότητα εξαγωγής μετρήσεων που θα αφορούσαν τόσο την ποιότητα των επικοινωνιών όσο και το κόστος λειτουργίας τους.

5.1 Λογισμικό προσομοίωσης

Δεδομένου των μεγάλων δυνατοτήτων που παρουσιάζουν τα δίκτυα LoRaWAN, η ερευνητική κοινότητα έχει αφιερώσει μια σημαντική προσπάθεια στην ανάπτυξη πειραματικών εργαλείων για τη μελέτη τους. Ως αποτέλεσμα της προσπάθειας αυτής, διάφορα λογισμικά προσομοίωσης ανοιχτού κώδικα έχουν δημοσιευτεί τα τελευταία χρόνια [27]. Παρακάτω αναφέρουμε ενδεικτικά δύο από τα σημαντικότερα. Ο NS-3 είναι ένας προσομοιωτής δικτύου διακριτών γεγονότων που χρησιμοποιείται ευρέως για εκπαιδευτική και ακαδημαϊκή χρήση. Αποτελεί λογισμικό ανοιχτού κώδικα κάτω από την άδεια GNU/GPLv2 και είναι διαθέσιμος δωρεάν για έρευνα,

ανάπτυξη και μη εμπορική χρήση. Αυτός καθ' αυτός δεν επικεντρώνεται στα δίκτυα LoRaWAN αλλά χάρη στη δουλειά ερευνητών του πανεπιστημίου της Πάντοβα, έχει αναπτυχθεί ένα αυτόνομο πακέτο κώδικα που υποστηρίζει προσομοιώσεις για δίκτυα LoRaWAN [28]. Πέρα από τη μοντελοποίηση του δικτύου και τη ρύθμισή του, το πακέτο κώδικα έχει, επίσης, τη δυνατότητα παρακολούθησης των πακέτων και εξαγωγής στατιστικών, υποστηρίζει τον μηχανισμό ADR για τη ρύθμιση των τερματικών, υποστηρίζει πολλαπλές πύλες κι ενσωματώνει μοντέλο ενέργειας. Ο LoRaSim είναι ένας από τους γνωστότερους προσομοιωτές για LoRaWAN δίκτυα. Είναι βασισμένος στον προσομοιωτή δικτύων διακριτών γεγονότων SimPy ο οποίος έχει αναπτυχθεί σε Python. Έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει ένα δίκτυο συσκευών και πυλών πάνω σε δισδιάστατο πλέγμα και χρησιμοποιείται κυρίως για την προσομοίωση συγκρούσεων πακέτων και επεκτασιμότητας των δικτύων LoRaWAN [29]. Σαν έξοδο παραθέτει δυο αποτελέσματα, τον ρυθμό εξαγωγής δεδομένων και την κατανάλωση ενέργειας του δικτύου. Παρόλα αυτά, ο συγκεκριμένος προσομοιωτής έχει πολλούς περιορισμούς, ένας από τους σημαντικότερους είναι ο μέγιστος αριθμός πυλών που μπορεί να υποστηρίξει.

5.1.1 LoRaWANSim

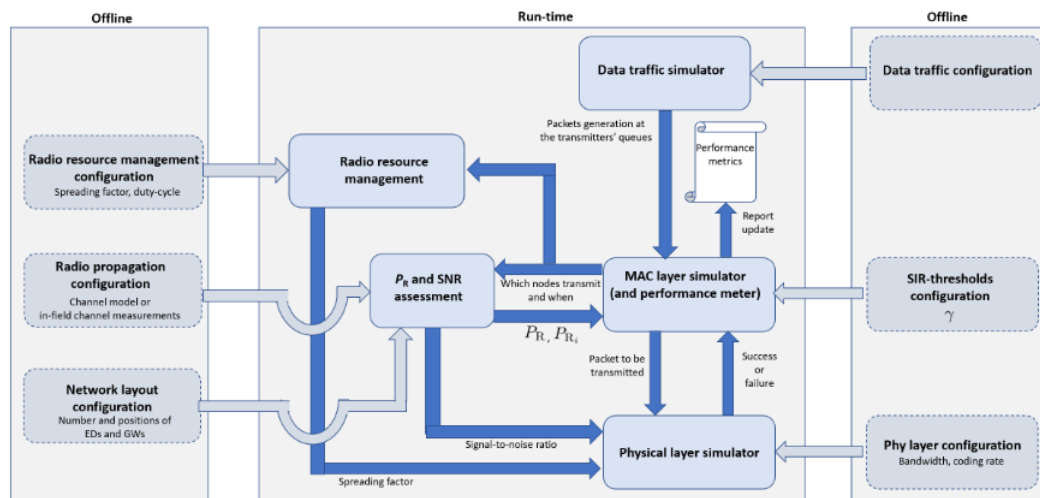
Το λογισμικό το οποίο επιλέχθηκε για την παρούσα εργασία είναι το LoRaWANSim. Οι Marini et al. [4] ανέπτυξαν έναν προσομοιωτή δικτύων LoRaWAN σε Matlab, για την προσομοίωση όλων των επιπέδων του πρωτοκόλλου LoRa. Σε αντίθεση με άλλους προσομοιωτές που στοχεύουν στην παρατήρηση συγκεκριμένων γεγονότων ή διατηρούν μια σειρά από υποθέσεις που επηρεάζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων τους, ο LoRaWANSim αποσκοπεί στην ακριβή αναπαράσταση του LoRaWAN σε όλα τα επίπεδα του δικτύου. Στο φυσικό επίπεδο του δικτύου, ο προσομοιωτής υλοποιεί έναν πλήρη πομποδέκτη LoRa, παράγοντας έτσι το διαμορφωμένο σήμα και εκτελώντας και τις εργασίες αποδιαμόρφωσης. Στο επίπεδο του ελέγχου προσπέλασης του μέσου ("Medium Access Control"), το λογισμικό περιλαμβάνει έναν προσομοιωτή MAC, ο οποίος διαχειρίζεται την πολλαπλή πρόσβαση στο κανάλι, υλοποιώντας έτσι τη διακίνηση των δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψιν τυχόν παρεμβολές και συγκρούσεις. Τα αποτελέσματα που παρέχονται αφορούν το συνολικό ποσοστό παράδοσης, τόσο για ανερχόμενη (από το τερματικό προς την πύλη) όσο

και για κατερχόμενη (από την πύλη προς το τερματικό) ζεύξη, και την κατανάλωση ενέργειας τόσο για τις μεμονωμένες συσκευές όσο το δίκτυο συνολικά.

Οι λόγοι που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο λογισμικό για την πειραματική διαδικασία ήταν πολλαπλοί. Αρχικά, οι ερευνητές που ανέπτυξαν τον προσομοιωτή τον διαθέτουν ελεύθερο για χρήση από την ακαδημαϊκή και ερευνητική κοινότητα. Το εργαλείο προσομοίωσης είναι εξαιρετικά ευέλικτο, καθώς επιτρέπει στον χρήστη να ρυθμίσει έναν μεγάλο αριθμό παραμέτρων που σχετίζονται με το φυσικό επίπεδο (PHY), το πρωτόκολλο LoRaWAN και το ίδιο το δίκτυο. Στον Πίνακα 5.1 αναγράφονται όλες οι παράμετροι που μπορούν να ρυθμιστούν από τον χρήστη. Ο χρήστης έχει την δυνατότητα, επίσης, να καθορίσει την τοποθεσία των τερματικών συσκευών, των πυλών, το μοντέλο απωλειών διάδοσης αλλά και να εφαρμόσει συγκεκριμένες ρυθμίσεις για κάθε τερματικό.

Το Σχήμα 5.1 δείχνει τα μέρη που απαρτίζουν τον προσομοιωτή. Πριν την έναρξη της προσομοίωσης, ορίζονται όλες οι πληροφορίες που συνθέτουν το εκάστοτε πειραματικό σενάριο, από την τοποθεσία των συσκευών μέχρι και τις παραμέτρους που διέπουν τη συμπεριφορά του δικτύου. Στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, η υπομονάδα του προσομοιωτή MAC, μιμείται τη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου ALOHA για όλες τις συσκευές καθορίζοντας ποια συσκευή μεταδίδει. Η πληροφορία περνάει στην υπομονάδα ελέγχου του σηματοθορυβικού λόγου (SNR assessment block), όπου, γνωρίζοντας τη θέση της συσκευής που μεταδίδει και το μοντέλο απωλειών διάδοσης, υπολογίζεται ο σηματοθορυβικός λόγος. Ο τελευταίος περνάει στην υπομονάδα φυσικού επιπέδου η οποία, σε συνδυασμό με το SF, παράγει το διαμορφωμένο σήμα, αλλοιωμένο από το θόρυβο, και το αποδιαμορφώνει προκειμένου να αξιολογηθεί εάν ένα πακέτο έχει ληφθεί σωστά ή όχι. Η πληροφορία της επιτυχούς ή ανεπιτυχούς λήψης ενός πακέτου, επιστρέφεται στην υπομονάδα MAC και με επιπλέον πληροφορίες από την υπομονάδα ελέγχου σηματοθορυβικού λόγου ελέγχεται η πιθανότητα μη έγκυρης λήψης λόγω των επιπέδων παρεμβολής που παρουσιάζονται. Τέλος, η υπομονάδα του προσομοιωτή MAC είναι και υπεύθυνη για να ενημερώνει τους μετρητές απόδοσης, οι οποίοι στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα αποτελέσματα αφορούν το ποσοστό επιτυχημένης παράδοσης πακέτων και τη μέση κατανάλωση ενέργειας. Το πρώτο υπολογίζεται σαν το κλάσμα

του συνολικού αριθμού επιτυχημένων λήψεων πακέτων από τις πύλες, προς τον συνολικό αριθμό αποσταλμένων πακέτων και υπάρχουν δύο αιτίες για την ανεπιτυχή ή μη έγκυρη παράδοση ενός πακέτου, ο θόρυβος και οι παρεμβολές. Η μέση κατανάλωση ενέργειας ορίζεται από τον μέσο όρο των επιμέρους καταναλώσεων κάθε τερματικής συσκευής. Ο προσομοιωτής προσμετράει την κατανάλωση όλων των πιθανών φάσεων ενός τερματικού όπως η αναμονή, η λήψη και η αποστολή πακέτων. Οι υπολογισμοί βασίζονται στα χαρακτηριστικά της συσκευής Microchip RN2483 LoRa Mote, όπως ορίζονται από τον κατασκευαστή της [30].



Σχήμα 5.1: Δομή και υπομονάδες του LoRaWANSim [4]

5.1.2 Ορισμός και ρύθμιση των πειραματικών σεναρίων

Για την ευκολότερη αναφορά, τα επιμέρους πειράματα χωρίστηκαν σε τρία πειραματικά σενάρια, τα οποία διαφέρουν ως προς τον αριθμό των πυλών που τοποθετούνται. Κάθε σενάριο περιλαμβάνει 35 πειράματα τα οποία γίνονται για διαφορετικό πλήθος τερματικών και για περιοχές κάλυψης διαφορετικής επιφάνειας. Στον Πίνακα 5.2 φαίνονται οι κοινές μεταβλητές μεταξύ των τριών σεναρίων. Η διαφορά μεταξύ των σεναρίων είναι το πλήθος των πυλών του δικτύου, που είναι 2, 4 και 6 για τα σενάρια 1, 2 και 3, αντίστοιχα.

Κάθε πείραμα ξεκινάει με την τυχαία κατανομή των τερματικών εντός της περιοχής κάλυψης του πειράματος. Για την κατανομή αυτή γίνονται τρεις διαφορετικές τοποθετήσεις των πυλών: 1) η τοποθέτηση πλέγματος ή τοποθέτηση GRID, η οποία τοποθετεί τις πύλες ομοιόμορφα, 2) η τοποθέτηση p-median που τοποθετεί τις πύλες με βάση τον αλγόριθμο επίλυσης του προβλήματος p-median και 3) η τοποθέτηση

Πίνακας 5.1: Λίστα με τις παραμέτρους που μπορεί να ορίσει ο χρήστης

Network Layout Parameters	
N GW R	Number of EDs Number of GWs Circular area radius [km]
Radio propagation parameters	
P_T^{ED} P_T^{GW} G_A^{ED} G_A^{GW} h_m h_b σ	Transmit power of the ED [dBm] Transmit power of the GW [dBm] ED Antenna Gain [dB] GW Antenna Gain [dB] Height of the ED [m] Height of the GW [m] Shadowing standard deviation [dB]
Radio resource management parameters	
SF RX1DROffset DC	Spreading Factor Shift between Uplink and RX1 SF Duty Cycle Limitation
Data traffic parameters	
B_{UL} B_{DL} H $L_{preamble}$ T	Uplink Payload Size [bytes] Downlink Payload Size [bytes] Packet Header presence Length of the preamble Uplink packet periodicity [s]
SIR threshold parameters	
γ	SIR Threshold [dB]
Physical layer parameters	
CR BW	Coding Rate Sweep interval [kHz]

p-center που κατανέμει τις πύλες με βάση τον αλγόριθμο επίλυσης του προβλήματος p-center. Οι δύο αλγόριθμοι αξιοποιούν τον επιλύτη Gurobi [31] για την επίλυση του FLP ως πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Οι δύο αλγόριθμοι δέχονται τον αριθμό των πυλών που πρέπει να τοποθετήσουν, τον αριθμό των τερματικών συσκευών, τον αριθμό και τις συντεταγμένες των πιθανών τοποθεσιών και τις ευκλείδειες αποστάσεις μεταξύ κάθε τερματικού και κάθε πιθανής τοποθεσίας. Η επίλυση των FLP επιστρέφει τις επιλεγμένες τοποθεσίες για εγκατάσταση πύλης, οι οποίες στη συνέχεια αξιοποιούνται από τον προσομοιωτή για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του ποσοστού επιτυχημένης παράδοσης πακέτων και της μέσης κατανάλωσης ενέργειας.

Πίνακας 5.2: Λίστα των κοινών μεταβλητών πειραματικών σεναρίων

N	[20,50,100,150,250]
R	[4,6,8,10,12,20,24] [km]
P_T^{ED}	14 [dBm]
P_T^{GW}	16 [dBm]
G_A^{ED}	0 [dB]
G_A^{GW}	0 [dB]
h_m	1 [m]
h_b	30 [m]
σ	3 [dB]
RX1DROffset	0
DC	1%
B_{UL}	20 [bytes]
B_{DL}	20 [bytes]
H	1
$L_{preamble}$	8
T	30 [s]
CR	1
BW	125 [kHz]

5.2 Αποτελέσματα

Σε συνδυασμό με τη θεωρητική και πειραματική επικύρωση του προσομοιωτή [4], μπορούμε να εξάγουμε, αρχικά, κάποια γενικά συμπεράσματα. Όπως ήταν αναμενόμενο, με την αύξηση του αριθμού των τερματικών και της περιοχής κάλυψης παρατηρούμε πτώση του Uplink Delivery Rate (UDR) στο σύνολο των σεναρίων. Η εξήγηση είναι ότι η αύξηση των τερματικών οδηγεί σε συγκρούσεις πακέτων αλλά και παρεμβολές από τις πολλαπλές μεταδόσεις τερματικών και κεραιών (Σχήμα 5.2).

Ο αριθμός των πυλών που τοποθετήθηκαν σε κάθε σενάριο επέδρασε σημαντικά στην ανοχή του δικτύου, ως προς το UDR, σε περιπτώσεις αύξησης της περιοχής κάλυψης, καθώς ο μεγαλύτερος αριθμός πυλών επιτρέπει την καλύτερη εξυπηρέτηση των τερματικών. Στα σενάρια 2 και 3 με περιοχές κάλυψης 20 - 24 χιλιόμετρα παρατηρούνται σημαντικά καλύτερα ποσοστά παράδοσης πακέτων (Σχήματα 5.3 - 5.4) σε σχέση με το σενάριο 1.

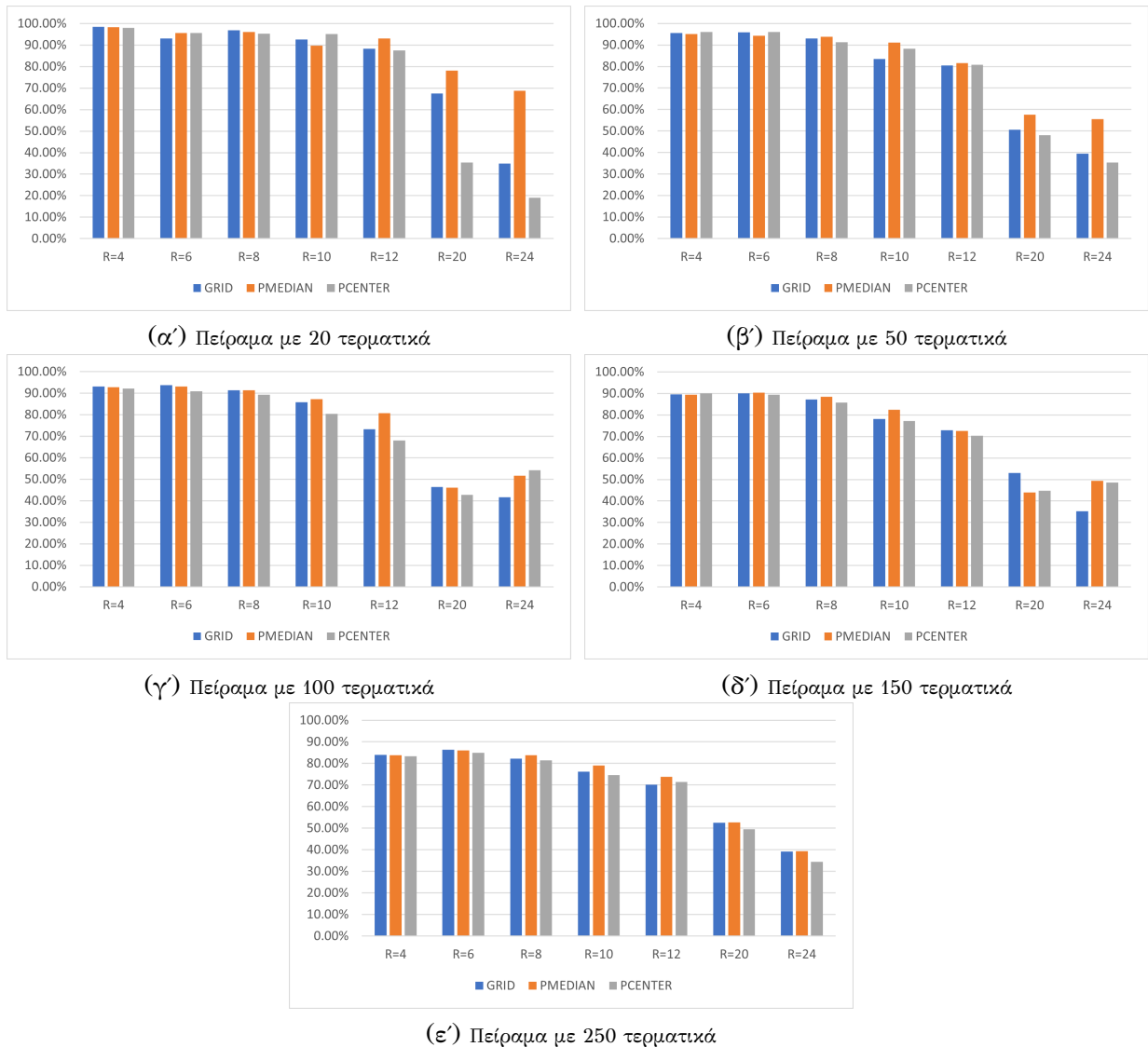
Και τα τρία μοντέλα τοποθέτησης φαίνεται να έχουν παρόμοια συμπεριφορά ως προς την ποιότητα της επικοινωνίας του δικτύου στις περιπτώσεις περιοχών μικρής και μεσαίας κάλυψης, από 4 έως 8 χιλιόμετρα, με τις ποσοστιαίες διαφορές

του UDR τους να είναι κάτω από 3%. Πιο συγκεκριμένα, στο σενάριο 1, η μεγαλύτερη διαφορά, ίση με 2.76% μεταξύ του λιγότερο και περισσότερο αποδοτικού μοντέλου, βρίσκεται στο πείραμα με 100 τερματικά και ακτίνα περιοχής κάλυψης R=6 χιλιόμετρα. Στα άλλα σενάρια, η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ του λιγότερο και περισσότερο αποδοτικού μοντέλου παρατηρείται στα πειράματα με 20 τερματικά και ακτίνα περιοχής κάλυψης R=8 χιλιόμετρα, όπου και ανέρχεται στο 2.92% και 1.94% αντίστοιχα για το σενάριο 2 και το σενάριο 3.

Τέλος, σε όλο το εύρος των πειραμάτων, παρατηρείται μια ομοιόμορφη συμπεριφορά της κατανάλωσης ενέργειας, η οποία ακολουθεί μια μορφή καμπύλης, όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.5 - 5.7. Το σχήμα της καμπύλης αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στις μικρές περιοχές οι απαιτήσεις ενέργειας είναι μικρές για την αποστολή των πακέτων από τα τερματικά. Καθώς, όμως, αυξάνεται η απόσταση μεταξύ τερματικού-κεραίας, αυξάνεται και η ενέργεια που απαιτείται για την αποστολή των πακέτων. Η καμπύλη της ενέργειας κορυφώνεται στις περιοχές κάλυψης μεσαίας έκτασης και στη συνέχεια ξεκινάει μια καθοδική πορεία. Η μείωση της απαιτούμενης ενέργειας οφείλεται στο γεγονός ότι καθώς η περιοχή κάλυψης μεγαλώνει, ο αριθμός των πακέτων που φτάνουν στις πύλες μειώνεται με αποτέλεσμα να μειώνεται, αντίστοιχα, η αποστολή πακέτων επιβεβαίωσης (ACK) από την πύλη προς το τερματικό. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η μείωση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας των τερματικών αφού έχουν να λάβουν και να διαχειριστούν λιγότερα πακέτα.

Ειδικότερα, σε ό,τι αφορά την απόδοση των μοντέλων τοποθέτησης στα διάφορα σενάρια, έχουμε τα ακόλουθα::

1. Σενάριο 1 Στο σενάριο αυτό, με τοποθέτηση δύο κεραιών, παρατηρούνται οι μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ των τριών διαφορετικών μοντέλων. Ο μικρός αριθμός των κεραιών έχει σαν αποτέλεσμα να αποκτά μεγάλη σημασία η επιλογή της τοποθεσίας τους, με μεγάλες διαφορές στον λόγο UDR και στη μέση κατανάλωση ενέργειας. Σε συνδυασμό με τις μεγάλες αποστάσεις ανάμεσα στα τερματικά για τις μεγάλες περιοχές κάλυψης, παρατηρούνται αντίστοιχα και οι μεγαλύτερες διαφορές ανάμεσα στα δύο αποδοτικότερα μοντέλα. Για παράδειγμα, στο πείραμα με 20 τερματικά και ακτίνα περιοχής κάλυψης R = 24 χιλιόμετρα, η τοποθέτηση p-median πετυχαίνει την καλύτερη απόδοση με

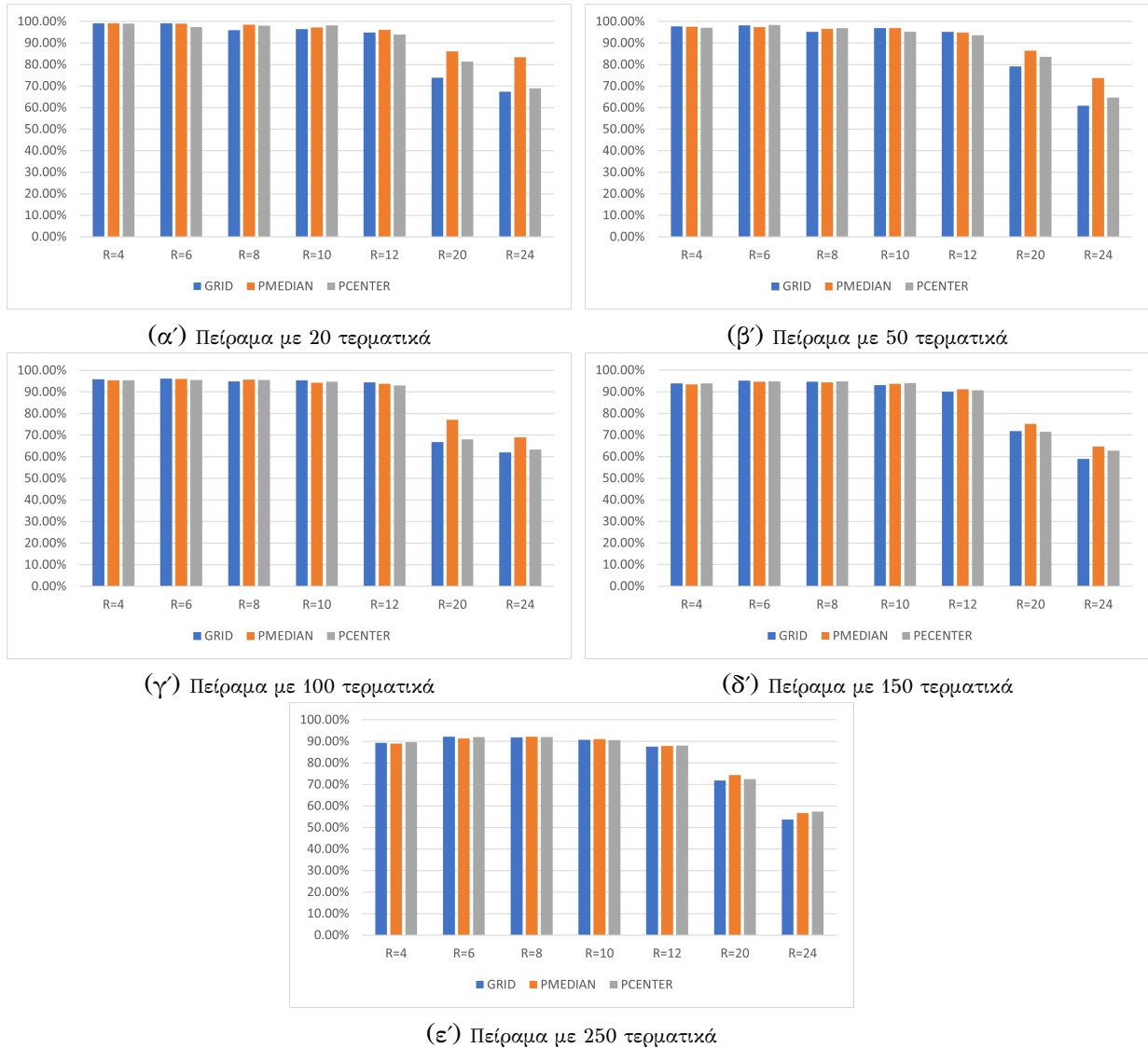


Σχήμα 5.2: Σενάριο 1. Επίπτωση της αύξησης της περιοχής κάλυψης στο ποσοστό παράδοσης πακέτων για διαφορετικά πλήθη τερματικών

διαφορά 34% από το αμέσως επόμενο μοντέλο σε απόδοση. Αντίστοιχα, στο πείραμα με 50 τερματικά, η διαφορά απόδοσης πέφτει στο 16.17%.

Για τις μικρές και μεσαίες περιοχές κάλυψης, παρατηρούνται παρόμοια ποσοστά για όλα τα μοντέλα τοποθέτησης σε όλα τα πειράματα. Στη πλειοψηφία των πειραμάτων, η τοποθέτηση p-median εμφανίζει καλύτερα ποσοστά παράδοσης πακέτων, έστω και οριακά, ενώ η μέση κατανάλωση ενέργειας είναι συγκρίσιμη με αυτή των άλλων μοντέλων. Εξαιρέση αποτελεί το πείραμα με 100 τερματικά, όπου η τοποθέτηση p-center δείχνει να πετυχαίνει 2.68% καλύτερη απόδοση στον UDR για αμελητέα αύξηση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας. Επίσης, στο πείραμα με 150 τερματικά και ακτίνα περιοχής κάλυψης $R = 20$

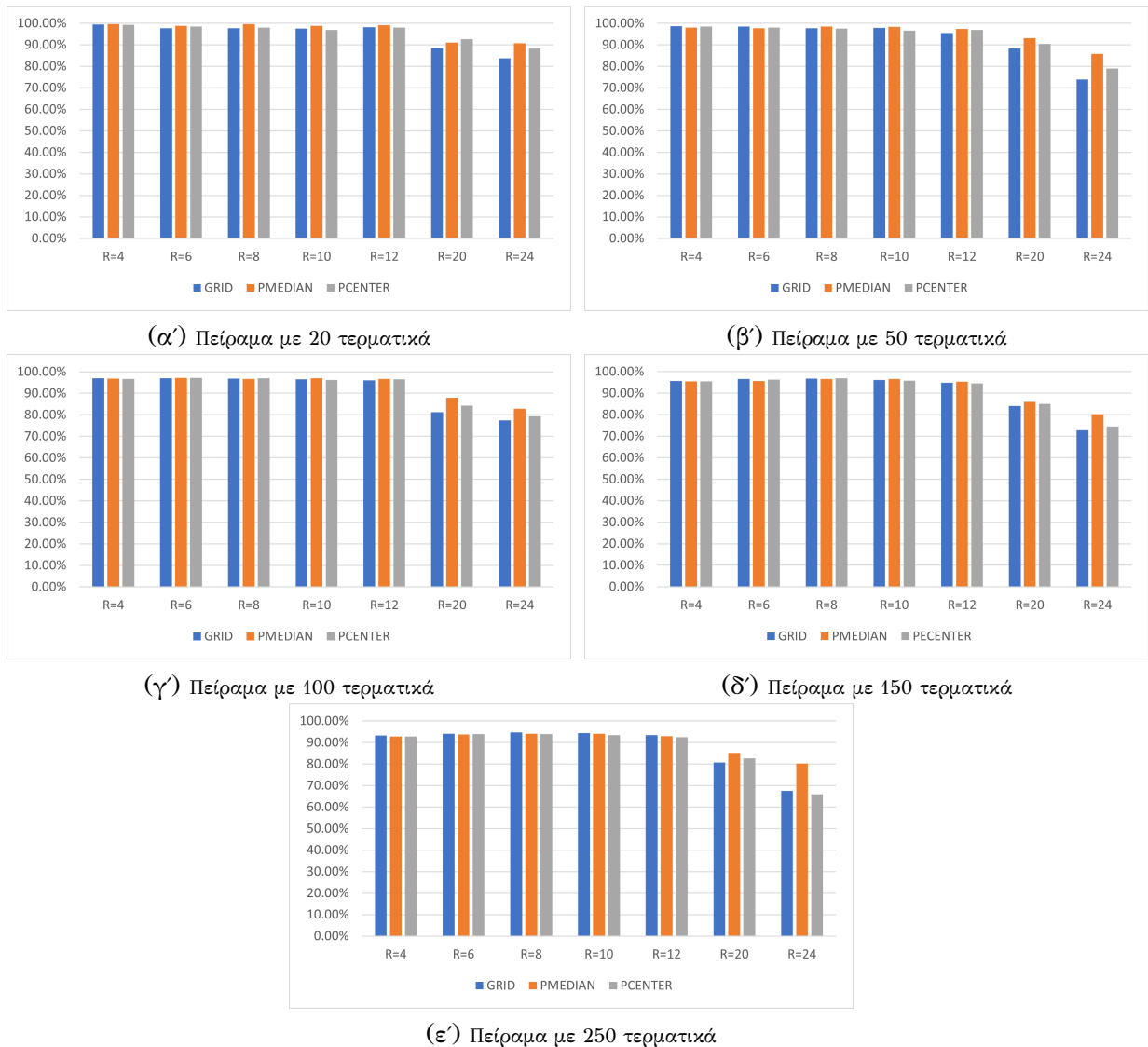
χιλιόμετρα, παρατηρούμε τη μοναδική περίπτωση που η τοποθέτηση GRID πετυχαίνει σημαντικά καλύτερη απόδοση από τα μοντέλα του FLP, ενώ διατηρεί την κατανάλωση ενέργειας σε αντίστοιχα επίπεδα.



Σχήμα 5.3: Σενάριο 2. Επίπτωση της αύξησης της περιοχής κάλυψης στο ποσοστό παράδοσης πακέτων για διαφορετικά πλήθη τερματικών

2. Σενάριο 2

Σε σχέση με το σενάριο 1, η αύξηση του αριθμού κεραιών οδηγεί συνολικά σε καλύτερα ποσοστά UDR σε όλο το φάσμα των περιοχών, η οποία είναι ιδιαίτερα εμφανής για τα πειράματα με κυκλική περιοχή κάλυψης, ακτίνας ίσης ή μεγαλύτερης από 10 χιλιόμετρα. Στα πειράματα με 250 τερματικά, για ακτίνα κυκλικής περιοχής κάλυψης $R = 10$ χιλιόμετρα του σεναρίου 1 και σεναρίου 2, η τοποθέτηση p-median παρουσιάζει καλύτερες ποσοστιαίες



Σχήμα 5.4: Σενάριο 3. Επίπτωση της αύξησης της περιοχής κάλυψης στο ποσοστό παράδοσης πακέτων για διαφορετικά πλήθη τερματικών

διαφορές, της τάξης του 15.31% και 9.7% για το ποσοστό παράδοσης πακέτων και μέση κατανάλωση ενέργειας αντίστοιχα.

Στο σενάριο 1, στο πείραμα με 100 τερματικά και ακτίνα περιοχής κάλυψης $R = 20$ χιλιόμετρα, η τοποθέτηση p-center παρουσιάζει UDR ίσο με 42.7%. Στο αντίστοιχο πείραμα του σεναρίου 2, με την προσθήκη δύο επιπλέον πυλών, το UDR, με τοποθέτηση p-center, ανέρχεται στο 83.67%, μια ποσοστιαία αύξηση της τάξης του 96%, η οποία συνοδεύεται και από την αντίστοιχη αύξηση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας, που ανέρχεται στο 15%.

Ένα ενδιαφέρον φαινόμενο παρατηρείται στην τοποθέτηση GRID για τις μικρές και μεσαίες περιοχές των πειραμάτων με 20 τερματικά, όπου η μέση

κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζεται σημαντικά μεγαλύτερη, ενώ το ποσοστό παράδοσης πακέτων διατηρείται σε παρόμοια επίπεδα με τις άλλες δυο τοποθετήσεις (βλέπε Σχήμα 5.6). Στο πείραμα με 20 τερματικά και ακτίνα κυκλικής περιοχής κάλυψης $R = 6$ χιλιόμετρα, η τοποθέτηση GRID εμφανίζει αύξηση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας της τάξης του 28.2% σε σχέση με την τοποθέτηση p-median και 26.6% σε σχέση με την τοποθέτηση p-center, ενώ η διαφορά στο UDR και για τα δύο μοντέλα είναι μικρότερη του 2%.

Όπως και στο σενάριο 1, η τοποθέτηση p-median εμφανίζει τα καλύτερα αποτελέσματα, καθώς το μέγεθος της περιοχής κάλυψης αυξάνεται (βλέπε Σχήμα 5.3) ενώ για τις μικρές και μεσαίες περιοχές κάλυψης με ακτίνα από 4 έως 10 χιλιόμετρα, οι τοποθετήσεις παρουσιάζουν μικρές διαφορές στο ποσοστό παράδοσης πακέτων. Ενδεικτικά, στο σύνολο των πειραμάτων για τις μικρές και μεσαίες περιοχές, η μεγαλύτερη διαφορά σε UDR μεταξύ των τριών τοποθετήσεων ανέρχεται στο 2.1%. Δεν ισχύει, βέβαια, το ίδιο για τη μέση κατανάλωση ενέργειας, στην οποία η τοποθέτηση GRID παρουσιάζει τα μεγαλύτερα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, στο πείραμα με 20 τερματικά για τις περιοχές κάλυψης ακτίνας 6 και 8 χιλιομέτρων, η τοποθέτηση GRID έχει σημαντικά μεγαλύτερη κατανάλωση σε σχέση με τις άλλες δύο τοποθετήσεις.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το πείραμα με τα 250 τερματικά και ακτίνα περιοχής κάλυψης $R=24$ χιλιόμετρα, όπου, έστω και οριακά, το μοντέλο p-center εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα και στα δύο αξιολογούμενα μεγέθη. Η μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στα δυο αποδοτικότερα μοντέλα βρίσκεται στο πείραμα με τα 20 τερματικά για περιοχή κάλυψης ακτίνας 24 χιλιομέτρων, όπου το μοντέλο p-median έχει 14.51% καλύτερη απόδοση από το αμέσως επόμενο.

3. Σενάριο 3

Το σενάριο 3 επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα και τα μοτίβα των 2 προηγούμενων σεναρίων. Παρατηρείται ότι η αύξηση του αριθμού των πυλών επιφέρει ακόμα καλύτερα ποσοστά παράδοσης πακέτων, διατηρώντας τη μέση κατανάλωση ενέργειας σε συγκρίσιμα με τα προηγούμενα σενάρια επίπεδα. Ενδεικτικά, στο πείραμα με 150 τερματικές συσκευές και ακτίνα κυκλικής

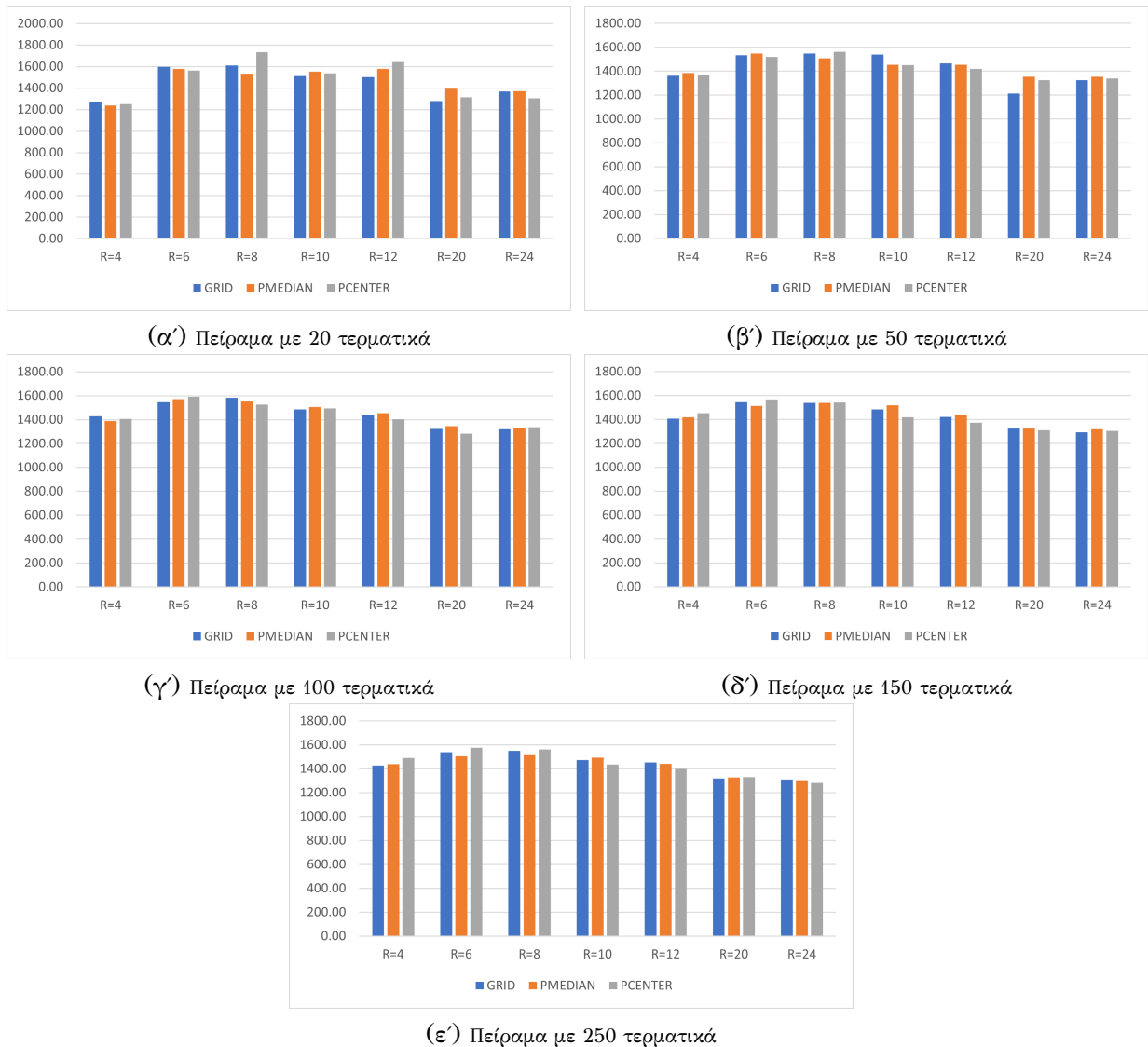
περιοχής $R = 20$ χιλιομέτρων, η τοποθέτηση p-median παρουσιάζει ανοδικό ποσοστό παράδοσης πακέτων ίσο με 44.1%, 75.1% και 85.99%, για τα σενάρια 1, 2 και 3, αντίστοιχα. Ταυτόχρονα, για το ίδιο πείραμα, η ποσοστιαία αύξηση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας των σεναρίων 2 και 3, σε σχέση με την κατανάλωση που παρουσιάζεται στο σενάριο 1, είναι 6.1% και 13.5%.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα της παραπάνω παρατήρησης είναι η αύξηση του χείριστου ποσοστού για κάθε τύπο τοποθέτησης σε σχέση με τα σενάρια 1 και 2. Για παράδειγμα, η τοποθέτηση p-center στο πείραμα με 250 τερματικά για ακτίνα περιοχής κάλυψης 24 χιλιομέτρων του σεναρίου 1 παρουσιάζει ποσοστό παράδοσης πακέτων ίσο με 34.84%, ενώ για το ίδιο πείραμα του σεναρίου 3 το αντίστοιχο ποσοστό είναι 83.73%.

Όπως και στα σενάρια 1 και 2, η τοποθέτηση p-median εμφανίζει, στην πλειοψηφία των πειραμάτων, τα καλύτερα αποτελέσματα. Στο πείραμα με 250 τερματικά και ακτίνα περιοχής κάλυψης 24 χιλιομέτρων παρουσιάζεται η μεγαλύτερη διαφορά, όπου η τοποθέτηση p-median καταφέρνει να πετύχει ποσοστό παράδοσης πακέτων ίσο με 80.28%, με την αμέσως καλύτερη τοποθέτηση να είναι η GRID με ποσοστό παράδοσης πακέτων ίσο με 67.51%. Η καλύτερη απόδοση της τοποθέτησης p-median, επιτυγχάνεται με μια αύξηση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας της τάξης του 5% σε σχέση με την τοποθέτηση GRID.

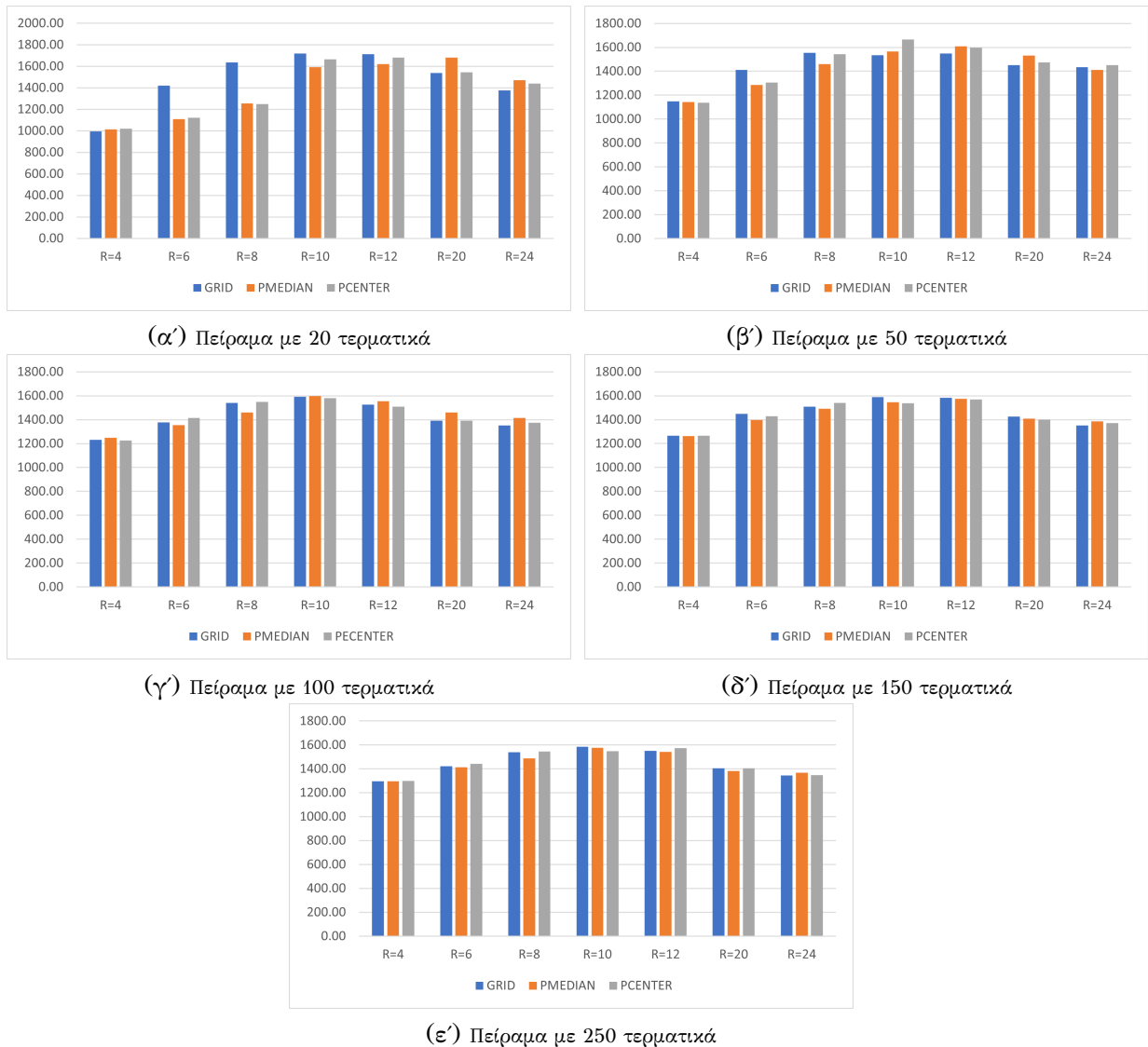
5.3 Συμπεράσματα αποτελεσμάτων

Από τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν κάποια συμπεράσματα για τη φύση του προβλήματος τοποθέτησης πυλών αλλά και για τη μοντελοποίηση που επιλέχθηκε για την επίλυση του προβλήματος. Κατ' αρχήν, η αύξηση του μεγέθους της περιοχής κάλυψης οδηγεί σε πτώση του ποσοστού παράδοσης πακέτων και ταυτόχρονα αυξάνει τη μέση κατανάλωση ενέργειας του δικτύου καθώς οι τερματικές συσκευές αναγκάζονται να χρησιμοποιούν μεγαλύτερη ισχύ μετάδοσης και μεγαλύτερους συντελεστές διάχυσης, προκειμένου να επιτύχουν ζεύξη με μια πύλη. Επίπλέον, η αύξηση του αριθμού των τερματικών οδηγεί σε συγκρούσεις πακέτων, οι οποίες μειώνουν το συνολικό αριθμό πακέτων που λαμβάνονται επιτυχώς από τις πύλες.



Σχήμα 5.5: Σενάριο 1. Επίπτωση της αύξησης της περιοχής κάλυψης στη μέση κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικά πλήθη τερματικών

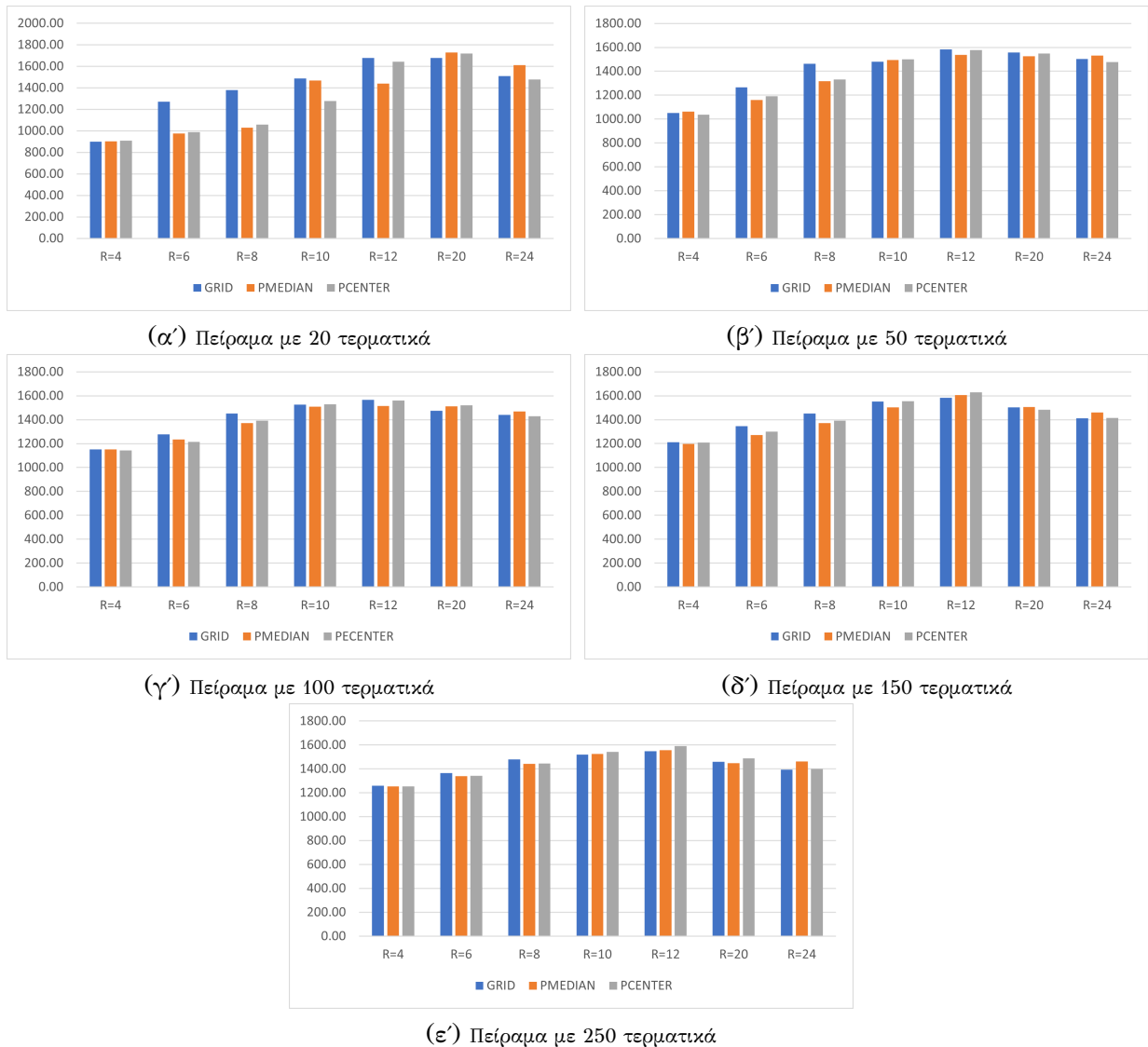
Καθώς, όμως, αυξάνεται ο αριθμός των τερματικών συσκευών, παρατηρείται και πτώση της μέσης κατανάλωσης ενέργειας του δικτύου. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο ότι εξαιτίας της αύξησης των συγκρούσεων πακέτων, οι πύλες λαμβάνουν λιγότερα πακέτα και με τη σειρά τους αποστέλλουν λιγότερα πακέτα επιβεβαίωσης προς τα τερματικά και, άρα, οι τερματικές συσκευές δαπανούν λιγότερη ενέργεια αφού δεν έχουν να διαχειριστούν εισερχόμενα πακέτα. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να γενικευθεί περαιτέρω, συμπεραίνοντας πως όταν ένα πακέτο ανερχόμενης ζεύξης, από μια τερματική συσκευή προς μια πύλη, δεν φτάνει στον προορισμό του για οποιοδήποτε λόγο (σύγκρουση πακέτων, παρεμβολές, θόρυβος κλπ), τότε η τερματική συσκευή δεν θα λάβει το αντίστοιχο μήνυμα επιβεβαίωσης από την πύλη και



Σχήμα 5.6: Σενάριο 2. Επίπτωση της αύξησης της περιοχής κάλυψης στη μέση κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικά πλήθη τερματικών

άρα θα καταναλώσει λιγότερη ενέργεια. Η παραπάνω γενίκευση φαίνεται και στα Σχήματα 5.5 - 5.7 που αποτυπώνουν την κατανάλωση ενέργειας για αυξανόμενα μεγέθη περιοχών και πλήθη τερματικών συσκευών. Η μέση κατανάλωση ενέργειας παρουσιάζει ανοδική πορεία μέχρι ενός σημείου, όπου κορυφώνεται και, στη συνέχεια, ξεκινάει μια καθοδική πορεία, λαμβάνοντας ένα σχήμα “καμπάνας”. Η πτώση αυτή οφείλεται στην επίδραση της αύξησης της ακτίνας της περιοχής κάλυψης και του πλήθους των τερματικών, με την επίδραση που έχουν στην λήψη ενός πακέτου από μια πύλη, όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Οι δυνατότητες των διάφορων τοποθετήσεων είναι ευκολότερα παρατηρήσιμες στα πειράματα που ασκούν τη μεγαλύτερη πίεση στο μοντέλο, δηλαδή στα πειρά-



Σχήμα 5.7: Σενάριο 3. Επίπτωση της αύξησης της περιοχής κάλυψης στη μέση κατανάλωση ενέργειας για διαφορετικά πλήθη τερματικών

ματα μεγάλων περιοχών για πολύ μικρό ή πολύ μεγάλο αριθμό τερματικών. Τα πειράματα μεγάλης περιοχής και μικρού πλήθους τερματικών αναδुकνεύουν καλύτερα την αποτελεσματικότητα της τοποθέτησης διότι δεν παρουσιάζονται ισχυρά φαινόμενα συγκρούσεων και παρεμβολών, επιτρέποντας έτσι την επιτυχημένη κάλυψη των τερματικών συσκευών εξ ολοκλήρου στη βέλτιστη τοποθέτηση των πυλών. Τα πειράματα μεγάλης περιοχής και μεγάλου πλήθους τερματικών, αντίστοιχα, ελέγχουν την απόκριση της τοποθέτησης σε μία κατάσταση που επηρεάζεται σημαντικά από τα προβλήματα του φυσικού επιπέδου του δικτύου. Η αύξηση του πλήθους των πυλών που τοποθετήθηκαν στη περιοχή κάλυψης οδήγησε, οριζόντια, στη μεγαλύτερη ανοχή του δικτύου στα προβλήματα που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη

παράγραφο για όλους τους τύπους τοποθέτησης.

Σε ότι αφορά τις τοποθετήσεις με βάση τα μοντέλα p -median και p -center, η τοποθέτηση p -median παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα στο επίπεδο της ποιότητας των υπηρεσιών του δικτύου με την αναμενόμενη αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας. Η συνολική προσέγγιση του μοντέλου τοποθέτησης p -median, που στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των επιμέρους αποστάσεων τερματικής συσκευής και πύλης φαίνεται να επιφέρει και τα καλύτερα πειραματικά αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος τοποθέτησης πυλών σε ένα δίκτυο LoRaWAN. Μετά από μελέτη της ήδη υπάρχουσας βιβλιογραφίας επιλέχθηκε το πρόβλημα να μοντελοποιηθεί σαν πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων, ένα πρόβλημα του τομέα της επιχειρησιακής έρευνας που έχει μελετηθεί ευρέως, αλλά δεν έχει αξιοποιηθεί στα πλαίσια του ερευνητικού θέματος αυτής της εργασίας. Η τοποθέτηση των πυλών για εξυπηρέτηση μεταβλητού αριθμού τερματικών συσκευών, για μεταβλητά μεγέθη περιοχής κάλυψης, έγινε με την επίλυση των δύο σημαντικότερων υποπροβλημάτων του προβλήματος τοποθεσίας εγκατάστασης, των προβλημάτων P-median και P-center. Τα δύο τελευταία αυτά επιλύονται ως προβλήματα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού με τη βοήθεια του επιλύτη Gurobi.

Για την εξαγωγή πειραματικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε ένας σύγχρονος και ολοκληρωμένος προσομοιωτής ο οποίος παρουσιάζει μεγάλες δυνατότητες ως προς τη προσομοίωση και παραμετροποίηση δικτύων LoRaWAN. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων δίνουν μια πρώτη εικόνα για τη ανταπόκριση της επιλεγμένης μοντελοποίησης του προβλήματος στο επίπεδο ποιότητας των υπηρεσιών του δικτύου και στο κόστος λειτουργίας και συντήρησής του, ενώ, παράλληλα, αναδεικνύονται και σημαντικές πτυχές του προβλήματος που ασκούν και τη μεγαλύτερη επίδραση στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Η βέλτιστη τοποθέτηση των πυλών θα πρέπει να γίνεται για το κατάλληλο αριθμό πυλών σε σχέση με το πλήθος των τερματικών που το δίκτυο καλείται να εξυπηρετήσει.

Τα πειράματα έδειξαν ότι η εφαρμογή του μοντέλου P-median επιφέρει σημαντικά καλύτερα αποτελέσματα στο ποσοστό παράδοσης πακέτων με μικρή διαφορά

(αύξηση) στη συνολική κατανάλωση ενέργειας του δικτύου.

Σε μελλοντικό επίπεδο θα είχε ενδιαφέρον η διενέργεια προσομοιώσεων στον LoRAWANSim με επιπρόσθετες μοντελοποιήσεις και η σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Βιβλιογραφία

- [1] Computer Science Department - Carnegie Mellon University, “Internet coke machine,” 1998.
- [2] J. Greenough, “The internet of everything,” 2015.
- [3] M. Burhan, R. A. Rehman, B. Khan, and B.-S. Kim, “Iot elements, layered architectures and security issues: A comprehensive survey,” 2018.
- [4] R. Marini, K. Mikhaylov, G. Pasolini, and C. Buratti, “Lorawansim: A flexible simulator for lorawan networks,” *Sensors*, vol. 21, no. 3, 2021.
- [5] About LoRa Alliance, Accessed on <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance/>, Date (July 19, 2023).
- [6] L. Huawei Technologies Co., “Global connectivity index,” 2015. Accessed: September 6, 2015.
- [7] e. a. Manyika, “The internet of things: Mapping the value beyond the hype,” (San Francisco), 2015.
- [8] G. Nunberg, “The advent of the internet,” 2012. 12th April, Courses.
- [9] R. Awati and I. Wigmore, “Thing in the internet of things,”
- [10] IEEE Communication Society, IEEE Communication Magazine, Available at <https://www.comsoc.org/publications/magazines/ieee-communications-magazine>.
- [11] S. Madakam, R. Ramaswamy, and S. Tripathi, “Internet of Things (IoT): A Literature Review,” vol. 3, pp. 164–173, 2015.
- [12] Y. Miao and Y. Bu, “Research on the architecture and key technology of internet of things (iot) applied on smart grid,” in *Proceedings of the 2010 International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE)*, (Beijing, China), pp. 69–72, June 2010.
- [13] D. Darwish, “Improved layered architecture for internet of things,” vol. 4, pp. 214–223, 2015.
- [14] B. S. Chaudhari, M. Zennaro, and S. Borkar, “Lpwan technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations,” 2020.
- [15] K. P. Krzysztof Grochla, “Heuristic algorithm for gateway location selection in large scale lora networks,” in *2020 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)*, June 2020.

-
- [16] M. Cesana, A. Redondi, and J. Ortín, “A framework for planning lorawan networks,” in *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2018.
- [17] B. Ousat and M. Ghaderi, “Lora network planning: Gateway placement and device configuration,” in *2019 IEEE International Congress on Internet of Things (ICIOT)*, pp. 25–32, 2019.
- [18] R. C. N. Matni, Moraes, “Optimal gateway placement based on fuzzy c-means for low power wide area networks,” in *2019 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, 2019.
- [19] N. Matni, J. Moraes, H. Oliveira, D. Rosário, and E. Cerqueira, “Lorawan gateway placement model for dynamic internet of things scenarios,” 2020.
- [20] I. Gravalos, P. Makris, K. Christodoulopoulos, and E. A. Varvarigos, “Efficient gateways placement for internet of things with qos constraints,” in *2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2016.
- [21] F. Loh, D. Bau, J. Zink, A. Wolff, and T. Hoßfeld, “Robust gateway placement for scalable lorawan,” in *2021 13th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, 2021.
- [22] F. Loh, N. Mehling, S. Geißler, and T. Hoßfeld, “Efficient graph-based gateway placement for large-scale lorawan deployments,” *Computer Communications*, 2023.
- [23] R. A. Haruna, A. M. Dikko, K. M. Kabir, Y. Muhammad, and B. Samaila, “Heuristic gateway placement for minimal transmission power & collision probability in an internet of things low power wide area network (hgpmpiot-lpwan),” vol. 7, 2023.
- [24] F. P. Correia, S. R. d. Silva, F. B. S. d. Carvalho, M. S. d. Alencar, K. D. R. Assis, and R. M. Bacura, “Lorawan gateway placement in smart agriculture: An analysis of clustering algorithms and performance metrics,” 2023. Received: 27 January 2023; Revised: 17 February 2023; Accepted: 21 February 2023; Published: 1 March 2023.
- [25] B. Pitu and R. Mirchandani, *Discrete Location Theory*. 1990.
- [26] M. Conforti, G. Cornuéjols, and G. Zambelli, *Integer Programming*, vol. 271 of *Graduate Texts in Mathematics*. 2014.
- [27] J. M. Marais, A. M. Abu-Mahfouz, and G. P. Hancke, “A review of lorawan simulators: Design requirements and limitations,” in *Proceedings of the 2019 International Multidisciplinary Information Technology and Engineering Conference (IMITEC)*, 2019.
- [28] D. Magrin, “Network level performances of a lora system,” 2016.
- [29] M. Bor, U. Roedig, T. Voigt, and J. Alonso, “Do lora low-power wide-area networks scale?,” in *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, (Malta), 2016.
- [30] Microchip Technology Inc., “RN2483 Low-Power Long Range LoRa Technology Transceiver Module,” 2015. Accessed on 8 September 2023.

[31] Gurobi Optimization, LLC, “Gurobi Optimizer Reference Manual,” 2023.