



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Συγκριτική μελέτη των πρωτοκόλλων επικοινωνίας για
τα χαμηλά επίπεδα του ΙοΤ»

Του φοιτητή
Πογαρίδη Δημητρίου
Αρ. Μητρώου: 508045

Επιβλέπων
Αμανατιάδης Δημήτριος

Μάιος 2025

Τίτλος Π.Ε.: Συγκριτική μελέτη των πρωτοκόλλων επικοινωνίας για τα χαμηλά επίπεδα του ΙοΤ.

Κωδικός Π.Ε. 24195

Όνοματεπώνυμο φοιτητή Πογαρίδης Δημήτριος

Όνοματεπώνυμο εισηγητή Αμανατιάδης Δημήτριος

Ημερομηνία ανάληψης Π.Ε. 15/05/2024

Ημερομηνία περάτωσης Π.Ε. 30/05/2025

Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε.

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή Πογαρίδη Δημήτρη που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.

Πρόλογος

Ο τομέας του Διαδικτύου των πραγμάτων, είναι πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής μας και εξελίσσεται όλο και περισσότερο, αφού οι τομείς στους οποίους μπορεί να εφαρμοστεί είναι σχεδόν απεριόριστοι και βοηθούν στην βελτίωση της καθημερινότητάς μας. Μέσω της τεχνολογίας αυτής, είναι εφικτό να λαμβάνουμε άμεσα πληροφορίες από συσκευές μέσω αισθητήρων και αφού τις επεξεργαστούμε, να οδηγούμαστε σε χρήσιμα συμπεράσματα, ικανά να αναβαθμίσουν και να αυτοματοποιήσουν πολλές λειτουργίες, οι οποίες έχουν άμεσο αντίκτυπο στον τρόπο ζωής μας και σε πράγματα που πλέον θεωρούμε δεδομένα.

Περίληψη

Το Internet of Things (IoT) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες και πιο δυναμικά αναπτυσσόμενες τεχνολογίες της σύγχρονης εποχής. Σε αυτή την πτυχιακή εργασία, γίνεται μια λεπτομερής ανάλυση του IoT, εστιάζοντας ιδιαίτερα στα χαμηλά επίπεδα της αρχιτεκτονικής του, στην ανάλυση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας που εφαρμόζονται και τους τρόπους που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους οι συσκευές που τα χρησιμοποιούν. Γίνεται διερεύνηση στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους, στους λόγους που επιλέγεται το κάθε ένα για τις διάφορες εφαρμογές στην καθημερινότητα, και εξετάζονται οι μελλοντικές προοπτικές εξέλιξης του του IoT, όπως και οι επιπτώσεις που μπορεί να έχει στη ζωή μας.

«A comparative study of low-level IoT communication protocols»

« Pogaridis Dimitrios »

Abstract

Internet of Things (IoT) is one of the most important and dynamically developing technologies of the modern era. The thesis makes a detailed analysis of IoT, focusing in particular on the low levels of its architecture, the analysis of the communication protocols that are implemented, and the ways in which the devices that use them interact with each other. It investigates their advantages and disadvantages, as well as the reasons that each one is chosen, for the various applications in everyday life. It examines prospects for the development of IoT, as well as the effects it can have on our lives.

Ευχαριστίες

Η παρούσα πτυχιακή εργασία, ολοκληρώθηκε μετά το πέρας πολύωρης έρευνας και μελέτης και είναι σημαντικό για εμένα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Αμανατιάδη Δημήτριο για την καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη του στο πρόσωπό μου. Το μεγαλύτερο ευχαριστώ όμως, οφείλω να το δώσω στην οικογένειά μου καθώς στάθηκαν δίπλα μου με την αγάπη τους και την ατελείωτη υποστήριξη και εμπύχωση τους.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	iii
Περίληψη	iv
Abstract	v
Ευχαριστίες	vi
Περιεχόμενα	vii
Συντομογραφίες.....	x
Κατάλογος σχημάτων	xii
Κατάλογος πινάκων	xiii
1. Εισαγωγή στο Internet of Things	1
1.1 Εισαγωγή	1
1.2 Τι είναι το IoT	1
1.3 Εξέλιξη του IoT.....	2
1.4 Επίπεδα αρχιτεκτονικής και τεχνολογίες του IoT	3
1.4.1 Επίπεδο αντίληψης (Sensing Layer)	4
1.4.2 Επίπεδο δικτύου (network layer).....	5
1.4.3 Επίπεδο επεξεργασίας δεδομένων (Data Processing Layer)	5
1.4.4 Επίπεδο εφαρμογών (Application Layer)	6
1.5 Δυνατότητες και εφαρμογές του IoT	7
1.6 Επίλογος.....	8
2. Μοντέλα αρχιτεκτονικής και πρωτόκολλα επικοινωνίας IoT	10
2.1 Εισαγωγή	10
2.2 Μοντέλα αρχιτεκτονικής IoT	10
2.2.1 Μοντέλο τριών επιπέδων (3-Layer Architecture):.....	10
2.2.2 Μοντέλο πέντε επιπέδων (5-Layer Architecture).....	11
2.2.3 Μοντέλο έξι επιπέδων (6-Layer Architecture).....	12
2.2.4 Μοντέλο επτά επιπέδων (7-Layer Architecture)	13
2.3 Μοντέλο OSI (Open Systems Interconnection)	14
2.4 Μοντέλο TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol)	16
2.5 Αντιστοίχιση των μοντέλων OSI και TCP/IP με τις αρχιτεκτονικές του IoT	18
2.6 Πρωτόκολλα επικοινωνίας στο IoT	20
2.6.1 Πρωτόκολλα υψηλού επιπέδου (Εφαρμογών)	20
2.6.2 Πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου (Συνδεσιμότητας)	21
2.7 Επίλογος.....	22

3.	Πρωτόκολλα επικοινωνίας χαμηλού επιπέδου IoT και οι εφαρμογές τους.....	23
3.1	Εισαγωγή	23
3.2	Εφαρμογές πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου IoT.....	23
3.2.1	Στη βιομηχανία (Industrial Internet of Things, IIoT).....	24
3.2.2	Στην υγεία (H-IoT)	24
3.2.3	Στη γεωργία (Agri-IoT).....	25
3.2.4	Στην εκπαίδευση (Smart Education, EdTech IoT)	26
3.2.5	Στα logistics (Εξυπνη Εφοδιαστική Αλυσίδα).....	27
3.2.6	Σε Smart Home.....	27
3.2.7	Σε Smart Cities	28
3.2.8	Στο Smart Grid	29
3.2.9	Στο Smart Metering	29
3.2.10	Ανασκόπηση εφαρμογών.....	30
3.3	Τεχνικά χαρακτηριστικά πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου στο IoT	30
3.3.1	LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)	31
3.3.2	Zigbee	32
3.3.3	Bluetooth Low Energy (BLE)	33
3.3.4	NB-IoT (Narrowband Internet of Things).....	33
3.3.5	Wi-Fi.....	34
3.3.6	6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks)	35
3.3.7	RFID (Radio Frequency Identification)	35
3.3.8	NFC (Near Field Communication)	36
3.3.9	Wireless M-Bus	37
3.3.10	Ανασκόπηση πρωτοκόλλων.....	38
3.4	Συγκριτική μελέτη πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου στο IoT	39
3.4.1	Εμβέλεια μετάδοσης	39
3.4.2	Κατανάλωση ενέργειας.....	39
3.4.3	Ταχύτητα και ρυθμός μετάδοσης δεδομένων	40
3.4.4	Bandwidth / Εύρος ζώνης	41
3.4.5	Μέγιστο Payload	42
3.4.6	Τοπολογίες δικτύου	43
3.4.7	Ασφάλεια επικοινωνίας.....	43
3.4.8	Συμπεράσματα για τη συγκριτική αποτίμηση των πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου IoT	
	44	
3.5	Κριτήρια επιλογής κατάλληλου πρωτοκόλλου ανά εφαρμογή	45

3.5.1	Στη βιομηχανία (Industrial IoT)	46
3.5.2	Υγεία (e-Health)	47
3.5.3	Γεωργία (Smart Agriculture)	48
3.5.4	Εκπαίδευση (Smart Education)	48
3.5.5	Logistics (Εξυπνες Εφοδιαστικές Αλυσίδες)	49
3.5.6	Έξυπνο σπίτι (Smart Home).....	50
3.5.7	Έξυπνες Πόλεις (Smart Cities).....	51
3.5.8	Έξυπνα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας (Smart grid)	52
3.5.9	Smart Metering	53
3.6	Συμπερασματική ανασκόπηση	53
4.	Το IoT στη γεωργία.....	55
4.1	Εισαγωγή	55
4.2	Η γεωργία του σήμερα.....	55
4.3	Μελέτες Περίπτωσης (Case Studies).....	56
4.3.1	Έξυπνη άρδευση με LoRaWAN στην Πέτα Αχαΐας (Πλατφόρμα AREThOU5A)	56
4.3.2	Εφαρμογή IoT για βελτιστοποίηση άρδευσης στην καλλιέργεια τομάτας στην Ιταλία 58	
4.3.3	Παρακολούθηση ζώων στην Αυστραλία με Ceres Tag και NB-IoT/δορυφορική σύνδεση.	59
4.4	Συμπεράσματα	60
4.5	Επίλογος.....	61
5.	Μελλοντικές προοπτικές και AI για τα πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου στο IoT	62
5.1	Εισαγωγή	62
5.2	AI-Driven βελτιστοποίηση παραμέτρων και διαχείριση ενέργειας.....	62
5.3	Edge-AI για διαχείριση δικτύου	63
5.3.1	Τοπική ανίχνευση ανωμαλιών σήματος (Anomaly Detection)	63
5.3.2	Δυναμική αναδρομολόγηση & τοπική λήψη αποφάσεων	63
5.3.3	Συγχρονισμός με το Cloud για Συλλογική Μάθηση.....	63
5.4	Ασφάλεια & έξυπνα υβριδικά πρωτόκολλα με AI	64
5.5	Επίλογος.....	64
6.	Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις	65
	Βιβλιογραφία.....	66

Συντομογραφίες

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AES-128	Advanced Encryption Standard
AI	Artificial Intelligence
API	Application Programming Interface
ARP	Address Resolution Protocol
ARPANET	Advanced Research Projects Agency Network
ASK	Amplitude-Shift Keying
DNS	Domain Name System
DTLS	Datagram Transport Layer Security
FTP	File Transfer Protocol
GPS	Global Positioning System
HTTP	HyperText Transfer Protocol
ICMP	Internet Control Message Protocol
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IMAP	Internet Message Access Protocol
IP	Internet Protocol
ISM	Industrial, Scientific, and Medical
ISO	International Organization for Standardization
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to Machine
MAC	Media Access Control
OSI	Open Systems Interconnection
POP3	Post Office Protocol
RARP	Reverse Address Resolution Protocol
RSSI	Received Signal Strength Indicator
SMTP	Simple Mail Transfer Protocol
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SSH	Secure Shell
SSL	Secure Sockets Layer

TLS	Transport Layer Security
WLAN	Wireless Local Area Network
WPA	Wi-Fi Protected Access
XML	Extensible Markup Language

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1: Διαδίκτυο των πραγμάτων [3]	2
Σχήμα 1.2: Αύξηση συνδεδεμένων συσκευών από το 2020 έως το 2030 σε δισεκατομμύρια [8]	3
Σχήμα 1.3: Βασικά επίπεδα αρχιτεκτονικής IoT [9]	4
Σχήμα 1.4: Διάγραμμα λειτουργίας αισθητήρων IoT [12]	5
Σχήμα 1.5: Ιεραρχία Edge, Fog, και Cloud Computing [15]	6
Σχήμα 1.6: Τοπίο εφαρμογών IoT [19]	7
Σχήμα 2.1: Αρχιτεκτονική τριών επιπέδων IoT [24]	11
Σχήμα 2.2: Αρχιτεκτονική πέντε επιπέδων IoT [26]	12
Σχήμα 2.3: Αρχιτεκτονική επτά επιπέδων IoT [32]	14
Σχήμα 2.4: Απεικόνιση των επτά επιπέδων του μοντέλου OSI [34]	15
Σχήμα 2.5: Απεικόνιση των τεσσάρων επιπέδων της στοίβας TCP/IP [36]	17
Σχήμα 3.1: Ταξινόμηση των εφαρμογών IoT	23
Σχήμα 4.1: Κάτοψη του ελαιώνα 22 στρεμμάτων που εφαρμόστηκε το σύστημα [106]	57
Σχήμα 4.2: Αρχιτεκτονική του κόμβου AREThOU5A [106]	58
Σχήμα 4.3: Όγκος νερού για τα τρία σενάρια άρδευσης στην πειραματική καλλιέργεια (I100, I60, I30) [107]	59

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2.1: Αντιστοίχιση των μοντέλων OSI και TCP/IP με τις αρχιτεκτονικές του IoT	18
Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά πρωτοκόλλων επικοινωνίας χαμηλού επιπέδου IoT	38

1. Εισαγωγή στο Internet of Things

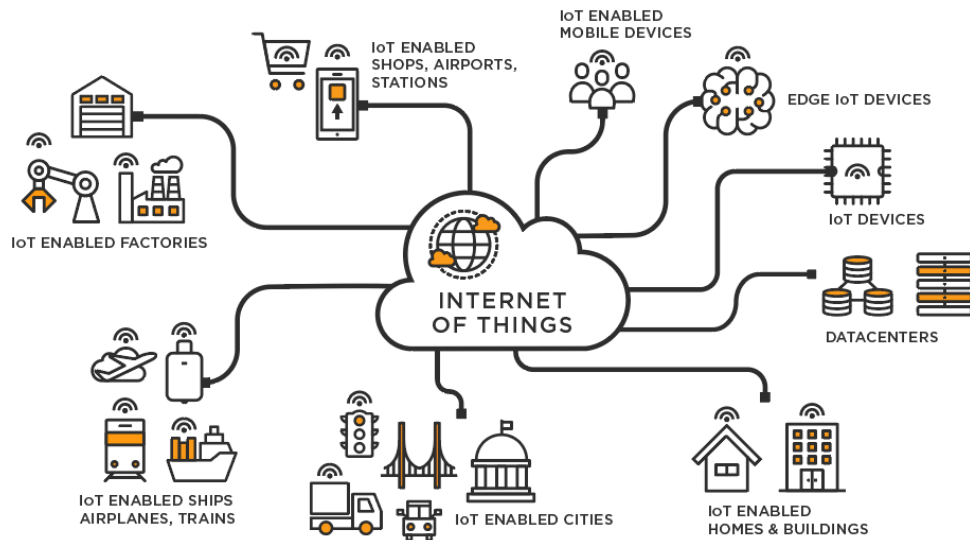
1.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή την έννοια του IoT, με στόχο να εξετάσει την ιστορική του εξέλιξη και να παρουσιάσει τις βασικές δυνατότητές του. Επιπλέον, περιγράφεται με σαφήνεια η αρχιτεκτονική του και οι τεχνολογίες που το απαρτίζουν, εστιάζοντας στις εφαρμογές που επηρεάζουν την καθημερινή ζωή και τις επιχειρήσεις.

1.2 Τι είναι το IoT

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT) είναι ένας από τους πιο ραγδαία αναπτυσσόμενους τεχνολογικούς τομείς του 21ου αιώνα. Πρόκειται για ένα δίκτυο φυσικών αντικειμένων, συσκευών ή "πραγμάτων", τα οποία διαθέτουν ενσωματωμένους αισθητήρες, λογισμικό και άλλες τεχνολογίες, που επιτρέπουν τόσο τη σύνδεσή τους στο διαδίκτυο, τη συλλογή και την ανταλλαγή δεδομένων, όσο και την αλληλοεπίδρασή τους με άλλες συσκευές και συστήματα. Με αυτό τον τρόπο, τα αντικείμενα μπορούν να αναλύσουν και να ανταποκριθούν σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση, παρέχοντας έτσι μια νέα διάσταση αυτοματισμού και διαχείρισης της πληροφορίας. Η σημασία του IoT γίνεται ολοένα και πιο εμφανής, καθώς επηρεάζει ένα ευρύ φάσμα τομέων, όπως η βιομηχανία, η υγεία, οι έξυπνες πόλεις, η γεωργία και η καθημερινή ζωή των ανθρώπων. Χάρη στην πρόοδο της τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence, AI), το cloud computing και τα δίκτυα επικοινωνίας, το IoT έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν οι επιχειρήσεις και οι κοινωνίες [1].

Το IoT είναι ένα οικοσύστημα διασυνδεδεμένων συσκευών, οι οποίες διαθέτουν ενσωματωμένους αισθητήρες, λογισμικό και άλλες τεχνολογίες που τους επιτρέπουν να συλλέγουν και να ανταλλάσσουν δεδομένα, να επικοινωνούν μεταξύ τους ή με κεντρικά συστήματα μέσω του Διαδικτύου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να αναλύσουν καταστάσεις και να ανταποκριθούν σε ποικίλες εφαρμογές σε πραγματικό χρόνο, χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση, παρέχοντας έτσι μια νέα διάσταση αυτοματισμού και διαχείρισης της πληροφορίας. Οι συσκευές αυτές ενδέχεται να περιλαμβάνουν έξυπνες οικιακές συσκευές, αισθητήρες περιβάλλοντος, βιομηχανικό εξοπλισμό, ιατρικά εργαλεία, ακόμη και οχήματα, τα οποία ενσωματώνουν τεχνολογίες IoT. Η διασύνδεση αυτή καθιστά δυνατή την άμεση συλλογή, ανάλυση και αξιοποίηση δεδομένων, επιτρέποντας έξυπνες αποφάσεις και αυτοματοποιημένες διαδικασίες [2].



Σχήμα 1.1: Διαδίκτυο των πραγμάτων [3]

1.3 Εξέλιξη του IoT

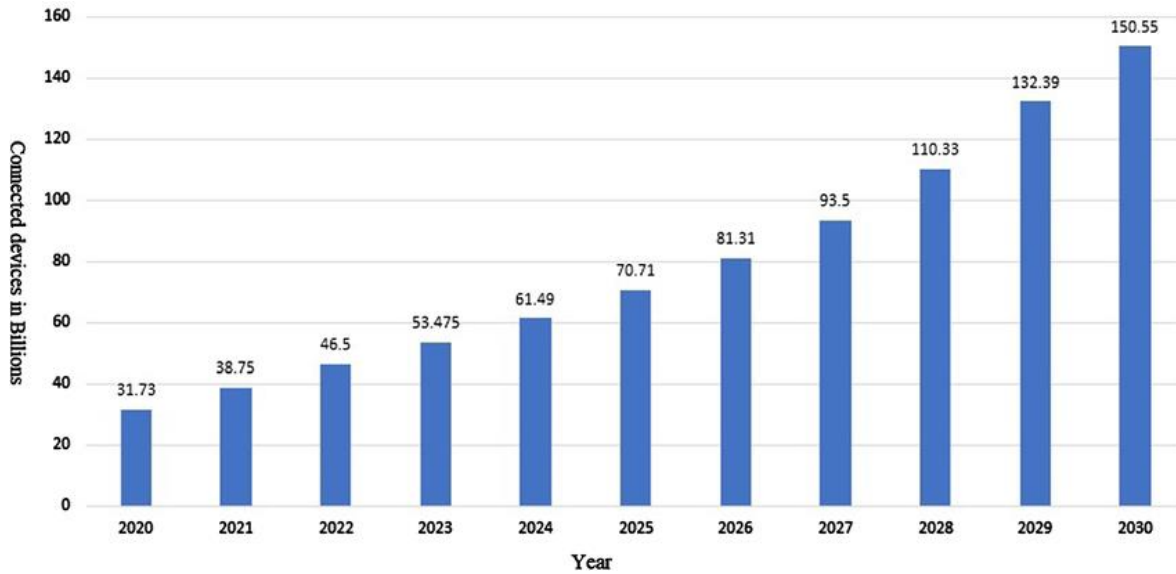
Η ανάπτυξη του IoT μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις βασικές φάσεις:

Πρώιμα ενσωματωμένα συστήματα (Πριν το 1990): Τα πρώτα συνδεδεμένα συστήματα αφορούσαν κυρίως βιομηχανικές εφαρμογές, όπως τα M2M (Machine-to-Machine) συστήματα, που επέτρεπαν τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ μηχανών.

Εμφάνιση του όρου IoT (1999): Ο όρος «Internet of Things» επινοήθηκε από τον Kevin Ashton, ενώ εργαζόταν σε συστήματα RFID για την παρακολούθηση προϊόντων σε εφοδιαστικές αλυσίδες, όταν ανέφερε ότι τα αντικείμενα θα μπορούσαν να έχουν δική τους ταυτότητα και να επικοινωνούν μεταξύ τους. Από τότε, το IoT έχει εξελιχθεί σε μια παγκόσμια τεχνολογία που καλύπτει πολλούς τομείς, από την έξυπνη οικιακή τεχνολογία, έως τη βιομηχανική παραγωγή, την υγεία και την αγροτική ανάπτυξη. Αυτή η τεχνολογία παρέχει δυνατότητες για τη σύνδεση των αντικειμένων με το διαδίκτυο και, μέσω αυτής της σύνδεσης, τη δυνατότητα εξυπηρέτησης πολλαπλών αναγκών της κοινωνίας [4].

Διείσδυση στην καθημερινότητα (2000-2010): Η εξάπλωση του Wi-Fi, των smartphones και των έξυπνων συσκευών επέτρεψε την ευρεία χρήση του IoT στην καθημερινή ζωή, όπως τα έξυπνα σπίτια (smart homes) και τις έξυπνες πόλεις (smart cities). Τη δεκαετία του 2000, ιδρύθηκαν πολλά κέντρα έρευνας όπως το Auto-ID Lab στο MIT. Επιπρόσθετα, η χρήση τεχνολογιών όπως το RFID (Radio Frequency Identification) και οι αισθητήρες άρχισαν να εφαρμόζονται πιλοτικά σε βιομηχανικές αλυσίδες εφοδιασμού, όπως στις εταιρείες Walmart και P&G. Παράλληλα, το διαδίκτυο ξεκίνησε να γίνεται πιο προσβάσιμο, γεγονός που δημιούργησε το υπόβαθρο για τη μαζική σύνδεση συσκευών και αντικειμένων [5], [6].

Έκρηξη της υιοθέτησης (2010-σήμερα): Η πρόοδος σε 5G, AI και cloud computing επέτρεψε την ταχύτερη διάδοση των IoT εφαρμογών. Από το 2010 και μετά, το IoT εισέρχεται σε εμπορική και καταναλωτική εφαρμογή. Πολλές συσκευές καθημερινής χρήσης, όπως ψυγεία, θερμοστάτες, ρολόγια, αυτοκίνητα, έχουν πλέον τη δυνατότητα να συνδέονται στο διαδίκτυο. Ακόμη, η Cisco το 2011 πρόβλεψε ότι μέχρι το 2020 θα υπάρχουν πάνω από 50 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές, ενισχύοντας την ιδέα ενός «δικτύου πραγμάτων» που συλλέγει και αναλύει δεδομένα, πρόβλεψη η οποία επιβεβαιώνεται σήμερα, καθώς το IoT βρίσκεται στο επίκεντρο της ψηφιακής μεταμόρφωσης [5], [6], [7].

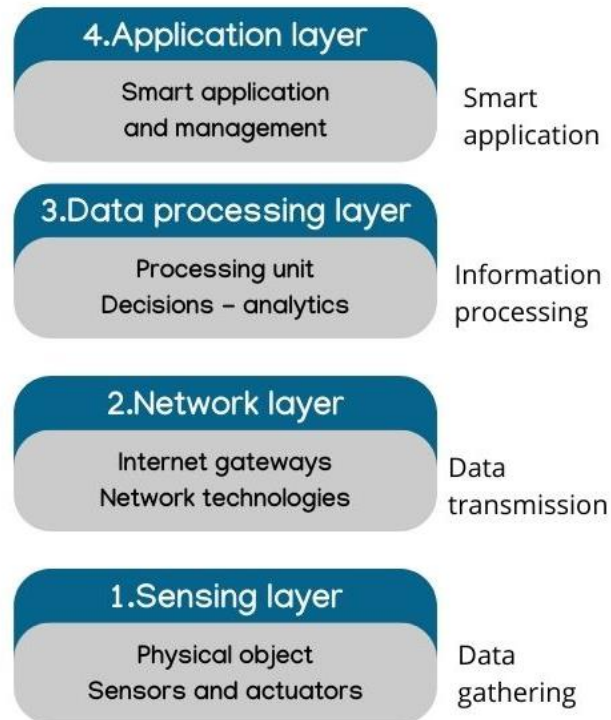


Σχήμα 1.2: Αύξηση συνδεδεμένων συσκευών από το 2020 έως το 2030 σε δισεκατομμύρια [8]

1.4 Επίπεδα αρχιτεκτονικής και τεχνολογίες του IoT

Η τεχνολογία του IoT βασίζεται στην αλληλεπίδραση και στην ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ έξυπνων συσκευών και συστημάτων. Αυτή η διαδικασία ανταλλαγής δεδομένων γίνεται μέσα από μία πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική που επιτρέπει τη συλλογή, μεταφορά και επεξεργασία δεδομένων με αποδοτικό τρόπο [9]. Στο επίκεντρο αυτής της αρχιτεκτονικής, βρίσκονται τέσσερα βασικά επίπεδα:

- 1. Επίπεδο αντίληψης (Sensing Layer):** Περιλαμβάνει τους αισθητήρες που συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον και τους ενεργοποιητές, που χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν τις εντολές που λαμβάνουν από τους αισθητήρες σε κάποια μορφή δράσης.
- 2. Επίπεδο δικτύου (Network Layer):** Διαχειρίζεται τη μεταφορά των δεδομένων από το επίπεδο αντίληψης στα συστήματα επεξεργασίας, μέσω δικτυακών πρωτοκόλλων και τεχνολογιών.
- 3. Επίπεδο επεξεργασίας δεδομένων (Data Processing Layer):** Αναλύει τα δεδομένα, χρησιμοποιώντας cloud, fog ή edge computing.
- 4. Επίπεδο εφαρμογών (Application Layer):** Περιλαμβάνει τις εφαρμογές που αξιοποιούν τα δεδομένα για υπηρεσίες όπως έξυπνα σπίτια και βιομηχανικές λύσεις.



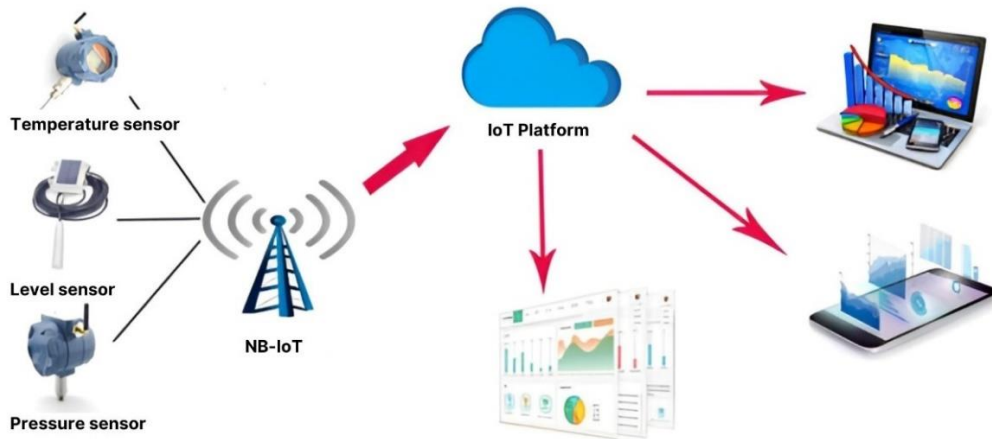
Σχήμα 1.3: Βασικά επίπεδα αρχιτεκτονικής IoT [9]

1.4.1 Επίπεδο αντίληψης (Sensing Layer)

Το επίπεδο αντίληψης είναι το πρώτο επίπεδο της αρχιτεκτονικής του IoT και στον πυρήνα του περιλαμβάνει τους αισθητήρες, τους ενεργοποιητές, καθώς και άλλες συσκευές που συλλέγουν δεδομένα από το φυσικό περιβάλλον. Όσον αφορά τους αισθητήρες, αποτελούν ένα από τα πιο βασικά στοιχεία στο επίπεδο αυτό, καθώς επιτρέπουν την αποστολή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για επεξεργασία και ανάλυση. Οι ενεργοποιητές, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούνται για να μετατρέψουν τις εντολές που λαμβάνουν σε κάποια μορφή δράσης, όπως η ενεργοποίηση ενός κινητήρα ή η ρύθμιση ενός διακόπτη.

Παράλληλα, οι συσκευές του επιπέδου αντίληψης μπορούν να είναι εξοπλισμένες με διάφορες τεχνολογίες όπως RFID, Bluetooth, Wi-Fi, για αναγνώριση αντικειμένων, αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, πίεσης, φωτός ή αερίων, για μέτρηση παραμέτρων του περιβάλλοντος, κάμερες και μικρόφωνα για εικόνα και ήχο, GPS για εντοπισμό και κίνηση και βιομετρικούς αισθητήρες ή wearables για εφαρμογές στην υγεία.

Το επίπεδο αντίληψης, είναι η «είσοδος» του IoT στον πραγματικό κόσμο μιας και η λειτουργία του είναι να μετατρέπει τα φυσικά σήματα σε ψηφιακά δεδομένα για να τα μεταδώσει προς τα ανώτερα επίπεδα (network layer, data processing layer, application layer). Με αυτό τον τρόπο, επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια και την αξιοπιστία των δεδομένων αυτών, παίζοντας κρίσιμο ρόλο στην ενεργοποίηση έξυπνων λειτουργιών, όπως η αυτόματη ρύθμιση θερμοκρασίας, η ανίχνευση κίνησης, οι ειδοποιήσεις κινδύνου κ.ά. [7], [10], [11].



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα λειτουργίας αισθητήρων IoT [12]

1.4.2 Επίπεδο δικτύου (Network layer)

Το επίπεδο δικτύου αποτελεί το δεύτερο επίπεδο της αρχιτεκτονικής του IoT και είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά των δεδομένων που συλλέγονται από το επίπεδο αντίληψης προς τα διάφορα κέντρα επεξεργασίας και τις τελικές εφαρμογές. Με στόχο την αποτελεσματική και αξιόπιστη μεταφορά των δεδομένων, χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως είναι τα IPv6, 6LoWPAN, MQTT, CoAP και τεχνολογιών όπως ZigBee, LoRa και NB-IoT. Σημαντική είναι επίσης η υποστήριξη του δικτύου από τεχνολογίες που διευκολύνουν τη σύνδεση μεταξύ των συσκευών και την ανταλλαγή δεδομένων, με μικρή καθυστέρηση και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Τέτοιες τεχνολογίες είναι τα 5G δίκτυα και τα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks).

Ένας επιπλέον παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο επίπεδο δικτύου, είναι η διαχείριση των δεδομένων και η εξασφάλιση ότι η ροή της πληροφορίας είναι ομαλή και συνεχής. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης μηχανισμών δρομολόγησης (routing) που διασφαλίζουν την αξιόπιστη μεταφορά των δεδομένων, ανεξάρτητα από τυχόν αστοχίες ή προβλήματα στο δίκτυο.

Πέρα από τη μεταφορά και διαχείριση δεδομένων, το επίπεδο αυτό πρέπει να αντιμετωπίσει προκλήσεις όπως η κλιμάκωση, η ενεργειακή απόδοση, η ασφάλεια και η ετερογένεια συσκευών. Όπως γίνεται αντιληπτό, η αξιόπιστη λειτουργία του είναι κρίσιμη για την επιτυχία κάθε εφαρμογής IoT, είτε πρόκειται για έξυπνες πόλεις, είτε για βιομηχανικά δίκτυα.

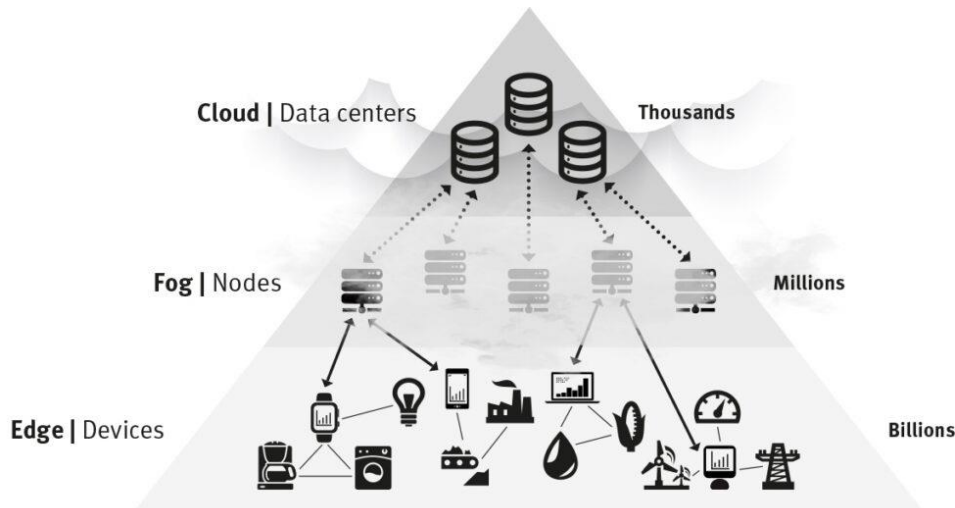
Συνεπώς, το επίπεδο δικτύου είναι το «νευρικό σύστημα» του IoT, που συνδέει αισθητήρες, συσκευές και εφαρμογές. Χάρη στις προηγμένες τεχνολογίες δικτύωσης και τα ευέλικτα πρωτόκολλα επικοινωνίας, επιτρέπει την αξιόπιστη και ασφαλή ροή δεδομένων, αποτελώντας κρίσιμο πυλώνα για τη λειτουργία κάθε έξυπνης εφαρμογής [7], [10], [13], [14].

1.4.3 Επίπεδο επεξεργασίας δεδομένων (Data Processing Layer)

Με την περισυλλογή δεδομένων από τις συσκευές και τους αισθητήρες του επιπέδου αντίληψης και στην μετέπειτα μεταφορά τους μέσω πρωτοκόλλων επικοινωνίας στο επίπεδο δικτύου, δημιουργούνται τεράστιοι όγκοι δεδομένων οι οποίοι χρειάζονται επεξεργασία, ώστε να αποκτήσουν νόημα και να υποστηρίξουν λήψη αποφάσεων. Το επίπεδο επεξεργασίας δεδομένων, είναι υπεύθυνο για τη συλλογή, το φιλτράρισμα, τον καθαρισμό, την ανάλυση και την αποθήκευση των δεδομένων αυτών, ώστε να αξιοποιηθούν ορθά. Ο ρόλος αυτός καθιστά το επίπεδο επεξεργασίας δεδομένων ζωτικής σημασίας και αποτελεί βασικό στοιχείο των σύγχρονων IoT συστημάτων.

Ποιο συγκεκριμένα, οι βασικές του λειτουργίες περιλαμβάνουν το φιλτράρισμα και τον καθαρισμό των δεδομένων, δηλαδή την απομάκρυνση θορύβου, τη διόρθωση σφαλμάτων και την ενοποίηση δεδομένων από ετερογενείς πηγές. Επίσης, περιλαμβάνει τη συμπίεση των δεδομένων για αποδοτική μετάδοση και την αποθήκευσή τους σε βάσεις δεδομένων τοπικά (edge/fog) ή στο cloud. Επιπλέον, το επίπεδο αυτό εφαρμόζει ανάλυση σε πραγματικό χρόνο μέσω αλγορίθμων, που επιτρέπουν την άμεση λήψη αποφάσεων με βάση την κατάσταση του περιβάλλοντος ή των συσκευών. Τέλος, χρησιμοποιείται η τεχνητή νοημοσύνη (AI) για την εκπαίδευση και τη χρήση μοντέλων μηχανικής μάθησης (machine learning), με στόχο την πρόβλεψη, τη βελτιστοποίηση και την ανίχνευση ανωμαλιών.

Η επεξεργασία μπορεί να πραγματοποιηθεί σε τρία διαφορετικά σημεία. Στο πρώτο σημείο (edge computing), η επεξεργασία γίνεται σε κοντινές προς τους αισθητήρες συσκευές με σκοπό την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων. Στο δεύτερο σημείο (fog computing), όπου πραγματοποιείται διανεμημένη επεξεργασία σε κόμβους που βρίσκονται ενδιάμεσα μεταξύ edge και cloud και τέλος, στο τρίτο σημείο (cloud computing), η επεξεργασία γίνεται κεντρικά με μεγάλη υπολογιστική ισχύ και δυνατότητες αποθήκευση. Παρακάτω στο Σχήμα 1.5, παρουσιάζεται η ιεραρχία των σημείων αυτών, με χρήση πυραμίδας [7], [11].



Σχήμα 1.5: Ιεραρχία Edge, Fog, και Cloud Computing [15]

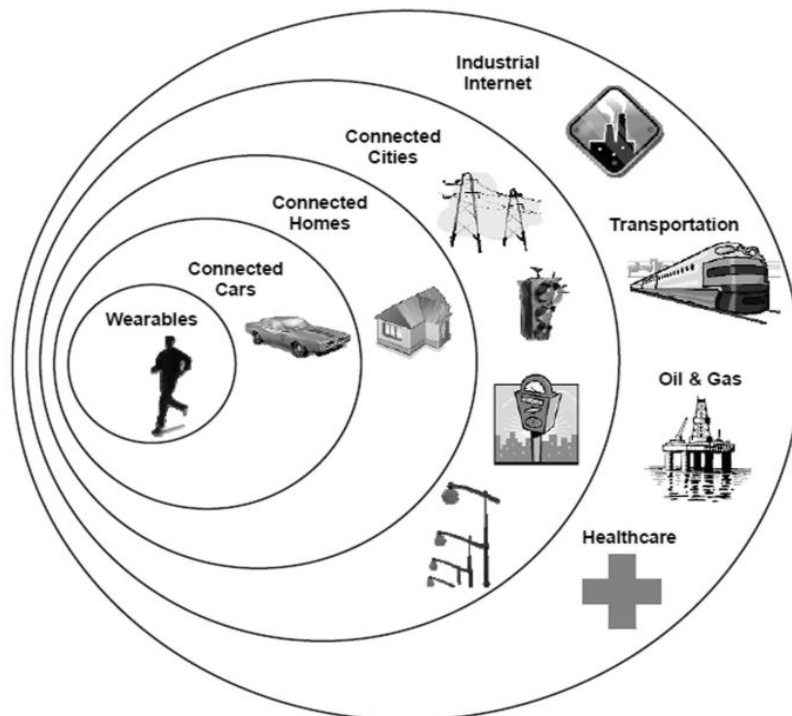
Το επίπεδο επεξεργασίας δεδομένων αποτελεί τη «νοημοσύνη» πίσω από το IoT. Διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο σε ποικίλες εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στις έξυπνες πόλεις, όπου χρησιμοποιείται για την ανάλυση της κυκλοφορίας, της κατανάλωσης ενέργειας και της ρύπανσης. Μέσω της στοχευμένης ανάλυσης και ερμηνείας δεδομένων, το IoT μετατρέπεται από μια απλή τεχνολογία αισθητήρων, σε ένα ισχυρό εργαλείο λήψης αποφάσεων με εφαρμογές σε όλους τους τομείς της ζωής [7], [10], [16], [17].

1.4.4 Επίπεδο εφαρμογών (Application Layer)

Το επίπεδο εφαρμογών του IoT είναι υπεύθυνο για την αλληλεπίδραση του συστήματος με τους τελικούς χρήστες και την παροχή υπηρεσιών σε συγκεκριμένους τομείς εφαρμογών. Αποτελεί το ανώτερο στρώμα στην αρχιτεκτονική του IoT και χρησιμοποιεί τα δεδομένα που έχουν συλλεγεί και υποστεί επεξεργασία από τα κατώτερα επίπεδα, ώστε να προσφέρει συγκεκριμένες λειτουργίες στον χρήστη.

Κάθε εφαρμογή έχει διαφορετικές απαιτήσεις από πλευράς ποιότητας υπηρεσιών (Quality of Service, QoS), ασφάλειας, ιδιωτικότητας και διαλειτουργικότητας. Επομένως, το επίπεδο εφαρμογών περιλαμβάνει την υλοποίηση πρωτοκόλλων και διεπαφών χρήστη (Graphical User Interface, GUIs και Application Programming Interface, APIs), καθώς και την ενσωμάτωση υπηρεσιών βασισμένων σε τεχνολογίες cloud, τεχνητής νοημοσύνης και ανάλυσης μεγάλων δεδομένων (big data).

Το επίπεδο αυτό παρέχει, επίσης, μηχανισμούς διαχείρισης εφαρμογών, προσωποποίησης και απόκρισης σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, σε μία εφαρμογή υγείας, το επίπεδο εφαρμογών μπορεί να εμφανίσει ειδοποιήσεις σε ιατρούς και ασθενείς ή να παρέχει στατιστικά στοιχεία σε διαχειριστές νοσοκομείων. Η αποτελεσματική σχεδίαση και λειτουργία του επιπέδου αυτού είναι κρίσιμη για την επιτυχία κάθε IoT λύσης, καθώς καθορίζει άμεσα την εμπειρία του τελικού χρήστη και την αξιοποίηση της τεχνολογίας στην πράξη [7], [10], [11], [18].



Σχήμα 1.6: Τοπίο εφαρμογών IoT [19]

Όπως παρουσιάζεται και στο παραπάνω Σχήμα 1.6, το επίπεδο εφαρμογών λειτουργεί ως η «γέφυρα» μεταξύ των τεχνολογιών του IoT και των πραγματικών αναγκών των ανθρώπων. Είναι το σημείο στο οποίο η τεχνολογία μετατρέπεται σε πρακτική αξία για την κοινωνία. Μέσα από εφαρμογές σε τομείς όπως η υγεία, η ενέργεια, οι μεταφορές και η γεωργία, το επίπεδο αυτό φέρνει τις δυνατότητες του IoT στην καθημερινότητα, συμβάλλοντας σε έναν πιο «έξυπνο» και αποδοτικό κόσμο.

1.5 Δυνατότητες και εφαρμογές του IoT

Γίνεται αντιληπτό, πως το Internet of Things εισέρχεται στον πραγματικό κόσμο μέσω του επιπέδου αντίληψης, συνδέει αισθητήρες, συσκευές και εφαρμογές χάρη στις προηγμένες τεχνολογίες δικτύωσης που το απαρτίζουν. Στη συνέχεια, αναλύει ευφυώς σε πραγματικό χρόνο τα δεδομένα που συλλέγονται, μέσω αλγορίθμων που επιτρέπουν την άμεση λήψη αποφάσεων και έτσι γεφυρώνει τις ανθρώπινες ανάγκες με την τεχνολογία επηρεάζοντας καταλυτικά την καθημερινότητά μας. Οι εφαρμογές του IoT στην κοινωνία, καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τομέων όπως:

- **Έξυπνα σπίτια (Smart Homes):** Συσκευές όπως θερμοστάτες, φώτα και κάμερες ασφαλείας, χρησιμοποιούν το IoT για την σύνδεσή τους, επιτρέποντας τον έλεγχό τους από απόσταση μέσω εφαρμογών κινητών τηλεφώνων. Οι χρήστες μπορούν να ενεργοποιήσουν τον φωτισμό ή τη θέρμανση πριν επιστρέψουν στο σπίτι, ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται η εξοικονόμηση ενέργειας.
- **Έξυπνες πόλεις (Smart Cities):** Το IoT χρησιμοποιείται για τη διαχείριση και παρακολούθηση υποδομών, όπως οι δημόσιες συγκοινωνίες, η διαχείριση απορριμμάτων και ο έλεγχος κυκλοφορίας, διευκολύνοντας έτσι τη ροή της καθημερινότητας και την ποιότητα ζωής. Παράλληλα, μέσω του IoT ελέγχεται ο δημόσιος φωτισμός ανάλογα με την κίνηση και τις συνθήκες φωτός, εξοικονομώντας ενέργεια και παρακολουθείται η ποιότητα του αέρα και του νερού, μέσω περιβαλλοντικών αισθητήρων, για την πρόληψη ρύπανσης. Αυτό σημαίνει ότι οι πολίτες μπορούν να απολαμβάνουν καλύτερες υπηρεσίες, ενώ οι δημοτικές αρχές μπορούν να λαμβάνουν καλύτερες αποφάσεις για τη διαχείριση των πόρων και των υποδομών της πόλης.
- **Υγεία (e-Health):** Επιτρέπει την απομακρυσμένη παρακολούθηση των ασθενών μέσω "έξυπνων" ιατρικών συσκευών και wearables που καταγράφουν καρδιακούς παλμούς, επίπεδα οξυγόνου ή γλυκόζης. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για τη βελτίωση της φροντίδας των ασθενών, την παροχή συνεχούς παρακολούθησης για κρίσιμες καταστάσεις υγείας, καθώς και τη μείωση του κόστους φροντίδας, καθώς σε επείγουσες περιπτώσεις, το σύστημα ειδοποιεί άμεσα τον θεράποντα ιατρό ή τις υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης.
- **Βιομηχανία (Industrial IoT, IIoT):** Το IoT αναπτύσσει το πρότυπο του Industry 4.0, όπου τα εργοστάσια μπορούν να παρακολουθούν την παραγωγή τους σε πραγματικό χρόνο και να αυτοματοποιούνται οι γραμμές παραγωγής ανάλογα με τη ζήτηση και τα αποθέματα, βελτιώνοντας με τον τρόπο αυτό την αποδοτικότητα. Επίσης, μέσω της παρακολούθησης κραδασμών ή αυξομειώσεων της θερμοκρασίας, επιτυγχάνεται η έγκαιρη συντήρηση μηχανημάτων, ώστε να αποφεύγονται οι βλάβες.
- **Γεωργία ακριβείας (Precision Agriculture):** Μέσω του IoT, γίνεται εφικτή η παρακολούθηση σημαντικών παραμέτρων όπως η υγρασία του εδάφους, η θερμοκρασία και η ηλιοφάνεια, και με βάση αυτά τα δεδομένα, ενεργοποιούνται αυτόματα αρδευτικά συστήματα για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής και την εξοικονόμηση πόρων. Έτσι, η χρήση του IoT δημιουργεί έξυπνα συστήματα άρδευσης και παρακολούθησης καλλιεργειών, με απώτερο σκοπό, την δημιουργία έξυπνων γεωργικών πρακτικών που ενισχύουν την παραγωγή, την αποτελεσματικότητα και την βιωσιμότητα [7], [10], [18], [20], [21], [22].

Όπως γίνεται αντιληπτό, το IoT αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τον ψηφιακό μετασχηματισμό ποικίλων τομέων της καθημερινής ζωής, της βιομηχανίας και της δημόσιας διοίκησης, ενώ οι εφαρμογές και οι δυνατότητές του, καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τομέων και είναι επί της ουσίας απεριόριστες. Η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών αιχμής, όπως το cloud computing, η τεχνητή νοημοσύνη και τα δίκτυα 5G, ενισχύει ακόμη περισσότερο τις προοπτικές και τις επιδόσεις του IoT, καθιστώντας το απαραίτητο εργαλείο για τη διαχείριση των πολύπλοκων προκλήσεων του σύγχρονου κόσμου.

1.6 Επίλογος

Σε αυτό το εισαγωγικό κεφάλαιο, παρουσιάζεται η πορεία του Internet of Things από την αρχική του σύλληψη έως τη σημερινή του υλοποίηση, καταδεικνύοντας μία διαρκή εξέλιξη σε επίπεδο τεχνολογιών, υποδομών και εφαρμογών. Το IoT σήμερα δεν αποτελεί απλώς μία καινοτομία, αλλά έναν

θεμελιώδη πυλώνα της ψηφιακής εποχής, με εφαρμογές που διαπερνούν κάθε τομέα της ανθρώπινης δραστηριότητας.

2. Μοντέλα αρχιτεκτονικής και πρωτόκολλα επικοινωνίας IoT

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα εξεταστούν λεπτομερώς τα αρχιτεκτονικά μοντέλα που χρησιμοποιεί το IoT για την επίτευξη αυτοματισμών και έξυπνης λειτουργικότητας, καθώς ακόμη θα γίνει διερεύνηση όσων αφορά την σχέση των μοντέλων αυτών με τα πρότυπα μοντέλα δικτύων OSI και TCP/IP. Στη συνέχεια, θα γίνει σχολαστική αναφορά και ανάλυση στα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στο IoT και στις εφαρμογές στις οποίες συμβάλλουν καθοριστικά.

2.2 Μοντέλα αρχιτεκτονικής IoT

Στο πρώτο κεφάλαιο, έγινε εισαγωγή στα τέσσερα βασικά επίπεδα αρχιτεκτονικής του IoT, το επίπεδο αντίληψης, το επίπεδο δικτύου, το επίπεδο επεξεργασίας δεδομένων και το επίπεδο εφαρμογών. Στην πραγματικότητα όμως, δεν υπάρχει μία ενιαία, παγκοσμίως αποδεκτή αρχιτεκτονική για το IoT. Πολλές αρχιτεκτονικές έχουν προταθεί, προσαρμοσμένες σε διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας και απαιτήσεων. Ορισμένοι υποστηρίζουν ότι η αρχιτεκτονική του IoT έχει τρία επίπεδα, ενώ άλλοι υποστηρίζουν το μοντέλο των τεσσάρων επιπέδων, καθώς θεωρούν ότι το μοντέλο των τριών επιπέδων δεν καλύπτει πλήρως τις απαιτήσεις σύγχρονων εφαρμογών. Στο υποκεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα παρακάτω αρχιτεκτονικά μοντέλα επιπέδων, με αναφορά στις βασικές συνιστώσες τους, τις δυνατότητες που προσφέρουν και τα σενάρια εφαρμογής τους [23]:

- **Μοντέλο τριών επιπέδων (3-Layer Architecture):** Το πιο βασικό και ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο, το οποίο χωρίζει το σύστημα σε τρία λειτουργικά επίπεδα.
- **Μοντέλο πέντε επιπέδων (5-Layer Architecture):** Επέκταση του μοντέλου των τριών επιπέδων, εισάγοντας ενδιάμεσα επίπεδα για βελτίωση της λειτουργικότητας και της διαχείρισης.
- **Μοντέλο έξι επιπέδων (6-Layer Architecture):** Αυτή η αρχιτεκτονική αναδεικνύει τη σημασία της ασφάλειας και ανάλυσης δεδομένων προσθέτοντας επίπεδα που καλύπτουν κενά των προηγούμενων.
- **Μοντέλο επτά επιπέδων (7-Layer Architecture):** Εμπνευσμένη σε μεγάλο βαθμό από το μοντέλο OSI και αρχιτεκτονικές υπηρεσίες πληροφορικής. Δίνει μεγαλύτερη έμφαση σε κατανομή ρόλων και εξειδικευμένα υποσυστήματα.

2.2.1 Μοντέλο τριών επιπέδων (3-Layer Architecture)

Η αρχιτεκτονική τριών επιπέδων, είναι η πιο θεμελιώδης μορφή μοντελοποίησης του IoT. Είναι ιδανική για απλές εφαρμογές, όπου η πολυπλοκότητα και οι απαιτήσεις για ασφάλεια και επεξεργασία είναι περιορισμένες. Απαρτίζεται από τα εξής επίπεδα:

1. **Επίπεδο αντίληψης (Perception Layer):** Αποτελεί το φυσικό επίπεδο, που περιλαμβάνει στοιχεία όπως αισθητήρες, κάμερες και ενεργοποιητές.
2. **Επίπεδο δικτύου (Network Layer):** Μεταφέρει τα δεδομένα που συλλέγονται από το επίπεδο αντίληψης προς άλλα μέρη του συστήματος. Περιλαμβάνει τεχνολογίες όπως Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, 4G/5G και πρωτόκολλα όπως MQTT και CoAP.
3. **Επίπεδο εφαρμογών (Application Layer):** Σε αυτό το επίπεδο γίνεται η παρουσίαση των δεδομένων και η διασύνδεση με τον τελικό χρήστη. Οι εφαρμογές κυμαίνονται από συστήματα παρακολούθησης θερμοκηπίων, έως και εφαρμογές έξυπνων σπιτιών.



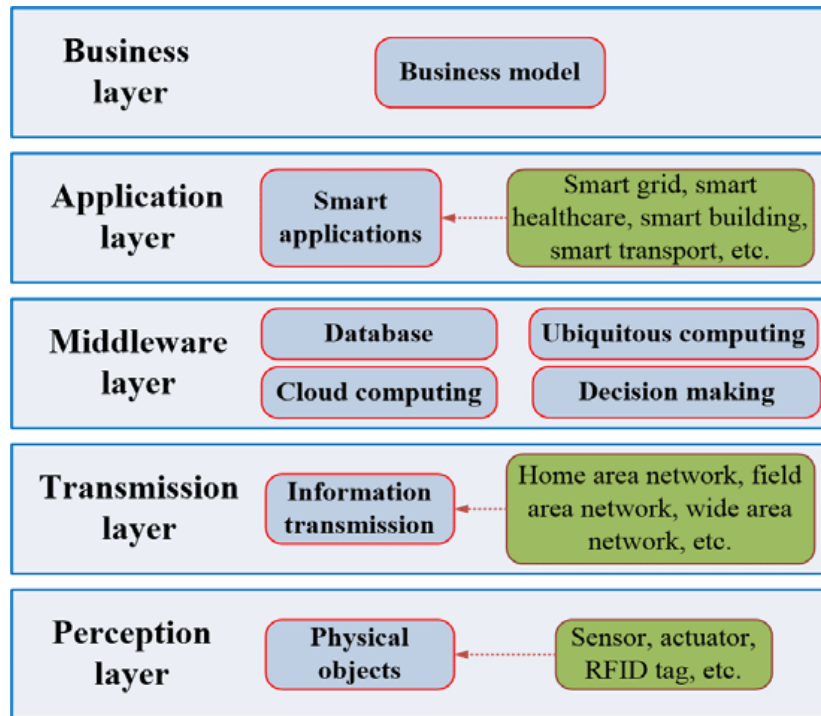
Σχήμα 2.1: Αρχιτεκτονική τριών επιπέδων IoT [24]

Το μοντέλο τριών επιπέδων είναι ιδανικό για μικρής κλίμακας υλοποιήσεις λόγω της απλότητάς του, αλλά δεν είναι επαρκές για πιο σύνθετες ανάγκες, όπως η ασφάλεια, η ανάλυση δεδομένων ή η διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων [25].

2.2.2 Μοντέλο πέντε επιπέδων (5-Layer Architecture)

Το αρχιτεκτονικό μοντέλο πέντε επιπέδων, αναπτύχθηκε ως απάντηση στους περιορισμούς της τριεπίπεδης αρχιτεκτονικής, με στόχο να εξυπηρετήσει πιο σύνθετα περιβάλλοντα IoT. Εισάγει δύο κρίσιμα επίπεδα, το ενδιάμεσο επίπεδο και το επιχειρησιακό επίπεδο, τα οποία επιτρέπουν καλύτερη διαχείριση των δεδομένων και ευθυγράμμιση των λειτουργιών του IoT με επιχειρησιακούς στόχους [7]. Αναλυτικότερα (Σχήμα 2.2):

- **Ενδιάμεσο επίπεδο (Middleware Layer):** Εδώ λαμβάνει χώρα η ενοποίηση δεδομένων από διαφορετικές πηγές και τεχνολογίες, με στόχο τη δημιουργία μιας ομογενοποιημένης ροής πληροφορίας. Εκτελούνται βασικές λειτουργίες όπως φιλτράρισμα δεδομένων, μετατροπή format και αποθήκευση προσωρινών ή μόνιμων. Επιπλέον, το ενδιάμεσο επίπεδο είναι υπεύθυνο για την ενσωμάτωση υπηρεσιών με υποδομές cloud και edge, προσφέροντας λειτουργίες όπως service discovery, διαχείριση ροών εργασίας και υποστήριξη API. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα παρακολούθησης αποθήκης, το επίπεδο αυτό μπορεί να ενοποιεί δεδομένα θερμοκρασίας, υγρασίας και τοποθεσίας από διαφορετικούς αισθητήρες και να τα προωθεί σε μια εφαρμογή διαχείρισης αποθεμάτων σε πραγματικό χρόνο.
- **Επιχειρησιακό επίπεδο (Business Layer):** Κύριος ρόλος του επιχειρησιακού επιπέδου είναι η μετάφραση των τεχνικών αποτελεσμάτων σε πληροφορία που έχει αξία για τη λήψη αποφάσεων και την επιχειρησιακή στρατηγική. Συλλέγει και αναλύει δεδομένα από τα κατώτερα επίπεδα, εφαρμόζοντας δείκτες απόδοσης (Key Performance Indicators, KPIs) και τεχνικές επιχειρηματικής ευφυΐας (Business Intelligence, BI), ώστε να παρέχει αναλυτικά dashboards, στατιστικά και προβλέψεις. Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα έξυπνης γεωργίας, το επιχειρησιακό επίπεδο μπορεί να συγκρίνει την παραγωγικότητα συγκεκριμένων περιοχών με τις εισροές (π.χ. νερό, λίπασμα) και να προτείνει αλλαγές στο πλάνο καλλιέργειας για μεγιστοποίηση απόδοσης.



Σχήμα 2.2: Αρχιτεκτονική πέντε επιπέδων IoT [26]

Συνοψίζοντας, αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει την ανάπτυξη πιο εξελιγμένων και ευέλικτων συστημάτων, ικανών να διαχειρίζονται τεράστιες ποσότητες δεδομένων από ετερογενείς πηγές, να ανταποκρίνονται δυναμικά σε διαφορετικά φορτία και απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας, καθώς και να διατηρούν υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας και ασφάλειας. Μέσω της ενσωμάτωσης υπηρεσιών τρίτων (π.χ. APIs από συστήματα πληρωμών, πλατφόρμες logistics), ενισχύεται η διαλειτουργικότητα και προσφέρεται η δυνατότητα ανάπτυξης ενοποιημένων οικοσυστημάτων υπηρεσιών. Τέλος, η αρχιτεκτονική αυτή διευκολύνει την υλοποίηση λύσεων edge και fog computing, οι οποίες μειώνουν την καθυστέρηση και το φορτίο των cloud υποδομών, καθιστώντας την κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν άμεση απόκριση, όπως αυτόνομα οχήματα ή βιομηχανικός αυτοματισμός [7],[23],[27].

2.2.3 Μοντέλο έξι επιπέδων (6-Layer Architecture)

Το αρχιτεκτονικό μοντέλο έξι επιπέδων, προέκυψε ως απάντηση στην ανάγκη για μεγαλύτερη ευελιξία, ασφάλεια και αποτελεσματική διαχείριση δεδομένων στο IoT επεκτείνοντας τα απλούστερα μοντέλα (3 και 5 επιπέδων) με πιο εξειδικευμένες λειτουργίες. Συγκεκριμένα, αποτελεί μία φυσική εξέλιξη του μοντέλου πέντε επιπέδων, εισάγοντας δύο κρίσιμα νέα επίπεδα, την επεξεργασία δεδομένων (Data Processing Layer) και τη διαχείριση υπηρεσιών (Service Management Layer).

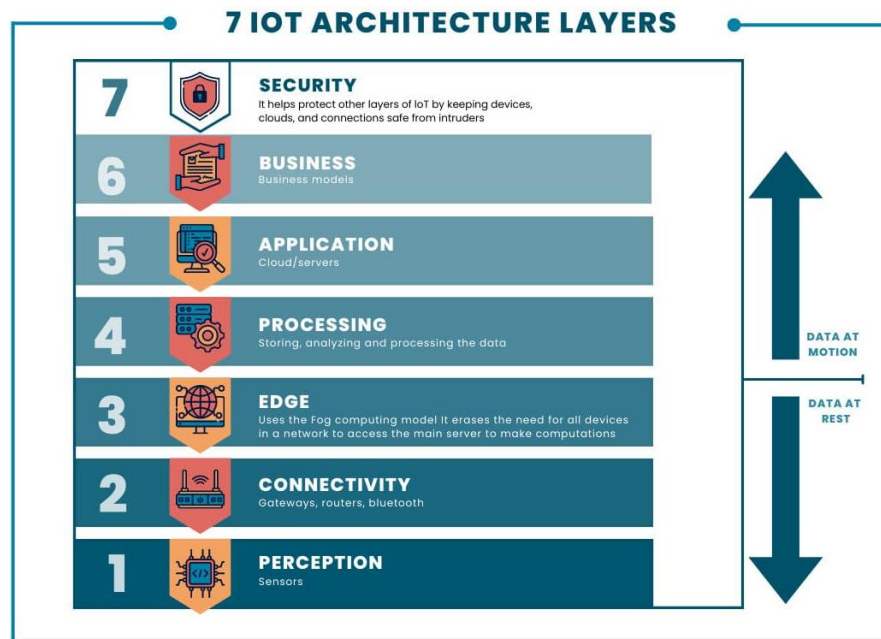
Το επίπεδο επεξεργασίας δεδομένων αναλαμβάνει την τοπική ή αποκεντρωμένη επεξεργασία δεδομένων μέσω edge, fog και cloud computing, ενώ στο επίπεδο διαχείρισης υπηρεσιών, εξασφαλίζεται η ομαλή, συνεπής και ασφαλής παροχή υπηρεσιών μεταξύ των κατώτερων τεχνολογικών επιπέδων και των εφαρμογών του χρήστη. Η λειτουργία του είναι παρόμοια με αυτή ενός middleware, γεφυρώνει δηλαδή το τεχνικό υπόβαθρο (αισθητήρες, δίκτυα, υποδομή cloud) με τις τελικές εφαρμογές, διαχειριζόμενο τη λογική λειτουργίας, τη ροή των δεδομένων και την ενσωμάτωση υπηρεσιών. Κύριες λειτουργίες του επιπέδου αυτού, είναι το Service Discovery (Ανακάλυψη Υπηρεσιών), το Orchestration (Ενορχήστρωση) και το Security & Access Control (Ασφάλεια και Έλεγχος πρόσβασης).

Το Service Discovery, εντοπίζει και καταγράφει δυναμικά τις υπηρεσίες που είναι διαθέσιμες από τις διάφορες συσκευές IoT. Όταν, για παράδειγμα, ένας αισθητήρας θερμοκρασίας ενεργοποιείται σε ένα έξυπνο σπίτι, το Service Discovery τον καταχωρεί, ώστε να είναι διαθέσιμος προς χρήση από εφαρμογές. Το Orchestration συντονίζει πολλαπλές υπηρεσίες, ώστε να παρέχουν σύνθετες λειτουργίες. Παραδείγματος χάριν, σε μία βιομηχανική εφαρμογή, η ενορχήστρωση μπορεί να συνδυάζει αισθητήρες, κάμερες και μηχανισμούς ψύξης για την ενεργοποίηση διαδικασιών ελέγχου. Τέλος το Security & Access Control ορίζει ποιος έχει πρόσβαση, σε ποιες υπηρεσίες και με ποιον τρόπο. Περιλαμβάνει μηχανισμούς ταυτοποίησης, εξουσιοδότησης και ελέγχου πρόσβασης σε πραγματικό χρόνο όπως για παράδειγμα, μια εφαρμογή ασφαλείας μπορεί να αποκτήσει πρόσβαση μόνο σε αισθητήρες κίνησης σε προκαθορισμένες ώρες. [7],[25],[27], [28], [29],[30],[31]

2.2.4 Μοντέλο επτά επιπέδων (7-Layer Architecture)

Το αρχιτεκτονικό μοντέλο επτά επιπέδων, αποτελεί μια εκτενή προσέγγιση για την κατανόηση και την υλοποίηση του IoT. Σε αντίθεση με απλούστερα μοντέλα, όπως των τριών και πέντε επιπέδων, το μοντέλο επτά επιπέδων παρέχει μεγαλύτερη σαφήνεια ως προς τις επιμέρους λειτουργίες των συστημάτων IoT, προσφέροντας μια πληρέστερη θεώρηση της ροής δεδομένων, της επεξεργασίας, της ασφάλειας και της επιχειρησιακής αξιοποίησης. Αναπτύχθηκε για να καθορίσει ένα καθολικό πλαίσιο σχεδίασης IoT συστημάτων, εστιάζοντας στην αποσύνδεση φυσικού και ψηφιακού κόσμου και στη δυνατότητα διαλειτουργικότητας [30]. Τα επίπεδα που το απαρτίζουν είναι τα παρακάτω:

1. **Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer):** Περιλαμβάνει τους αισθητήρες, τους ενεργοποιητές, καθώς και άλλες συσκευές που συλλέγουν δεδομένα από το φυσικό περιβάλλον [7].
2. **Δικτυακό Επίπεδο (Network Layer):** Αυτό το επίπεδο φροντίζει για τη μεταφορά των δεδομένων που συλλέγονται από το perception layer προς τα επόμενα επίπεδα. Υποστηρίζει τόσο ενσύρματες, όσο και ασύρματες τεχνολογίες όπως Wi-Fi, ZigBee, 4G/5G, Bluetooth, και πρωτόκολλα όπως IP, TCP/UDP [7].
3. **Επίπεδο Επεξεργασίας Δεδομένων (Data Processing Layer):** Αποτελεί τη «γέφυρα» μεταξύ της συλλογής και της χρήσης των δεδομένων. Σε αυτό το επίπεδο εφαρμόζονται τοπικά μοντέλα ανάλυσης, φίλτραρίσματος και προεπεξεργασίας, ώστε να μειωθεί ο όγκος των δεδομένων που αποστέλλονται στο cloud. Η Cisco προτείνει την περαιτέρω διάσπασή του σε: Edge Computing, Layer Data Accumulation Layer και Data Abstraction Layer [33].
4. **Επίπεδο Διαχείρισης Υπηρεσιών (Service Management Layer):** Σε αυτό το επίπεδο γίνεται η διασύνδεση των δεδομένων με υπηρεσίες, όπως APIs, middleware και πλατφόρμες cloud. Στο παρόν επίπεδο ελέγχεται ποια υπηρεσία θα έχει πρόσβαση σε ποια δεδομένα, με βάση πολιτικές, κανόνες ασφαλείας και προφίλ χρηστών. Παράλληλα, επιβλέπεται η κατανομή των πόρων (resource orchestration) [27],[31].
5. **Επίπεδο Εφαρμογών (Application Layer):** Περιλαμβάνει συγκεκριμένες εφαρμογές IoT, ανάλογα με τον κλάδο: έξυπνες πόλεις, υγεία, γεωργία, βιομηχανία, μεταφορές κ.ά. Τα δεδομένα παρουσιάζονται σε ανθρώπινα αναγνώσιμη μορφή και παρέχονται υπηρεσίες προς τους χρήστες, ή προς άλλα συστήματα [29].
6. **Επίπεδο Επιχειρησιακής Λογικής (Business Layer):** Πραγματοποιείται η ανάλυση των δεδομένων για λήψη αποφάσεων και υποστήριξη στρατηγικής. Γίνεται η εξαγωγή KPIs, μοντέλων κόστους-οφέλους και επιχειρηματικών προβλέψεων (π.χ. predictive maintenance) [27],[29].
7. **Επίπεδο Ασφαλείας (Security Layer):** Αν και ορισμένες προσεγγίσεις ενσωματώνουν την ασφάλεια σε όλα τα επίπεδα, το επταεπίπεδο μοντέλο τη διατηρεί ως κάθετο επίπεδο που διατρέχει όλη την αρχιτεκτονική. Τεχνικές όπως: η κρυπτογράφηση, ο έλεγχος ταυτότητας, η διαχείριση κλειδιών, οι πολιτικές πρόσβασης και η προστασία προσωπικών δεδομένων (privacy) εντάσσονται σε αυτό το επίπεδο [27],[30].



Σχήμα 2.3: Αρχιτεκτονική επτά επιπέδων IoT [32]

Το μοντέλο αυτό, καλύπτει όχι μόνο τις βασικές τεχνικές διεργασίες συλλογής και μεταφοράς δεδομένων, αλλά ενσωματώνει την επιχειρησιακή και τη στρατηγική διάσταση, μέσα από επίπεδα όπως το Service Management, το Business Layer και το Security Layer. Η σαφής διάκριση των επιπέδων βοηθά στην οργάνωση και βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των IoT συστημάτων, στη διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών συσκευών και υποδομών και στην ενίσχυση της ασφάλειας, μέσω κατανομής της προστασίας σε κάθε επίπεδο. Παράλληλα, η έμφαση στο edge computing καθιστά το μοντέλο κατάλληλο για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, όπου η καθυστέρηση και το εύρος ζώνης αποτελούν κρίσιμους παράγοντες.

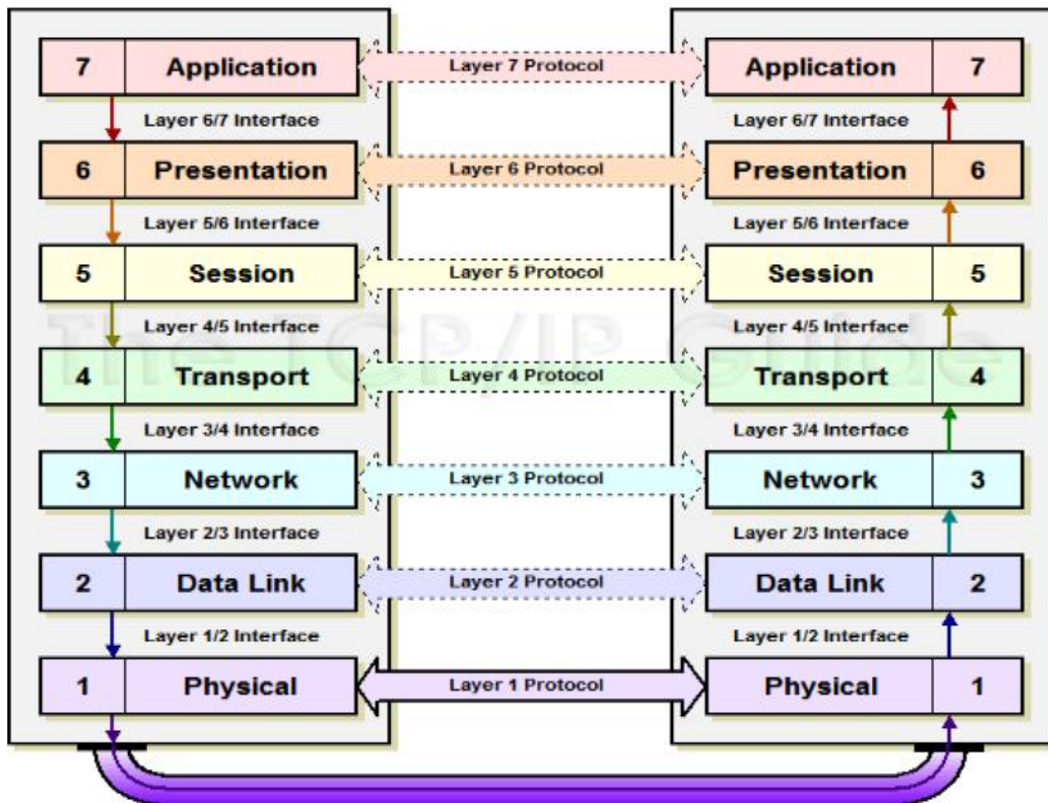
Τέλος, μοντέλο επτά επιπέδων όπως αυτό που προτείνει η Cisco, συνιστά ένα θεμελιώδες εργαλείο για τον σχεδιασμό επεκτάσιμων, ασφαλών και ευέλικτων IoT λύσεων, ικανών να ανταποκριθούν στις μελλοντικές ανάγκες της ψηφιακής κοινωνίας.

2.3 Μοντέλο OSI (Open Systems Interconnection)

Η ανάγκη για ένα κοινά αποδεκτό πλαίσιο επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών υπολογιστικών συστημάτων και δικτυακών υποδομών, οδήγησε στην ανάπτυξη του μοντέλου OSI από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO). Η εργασία κορυφώθηκε το 1983 με την έκδοση ενός ενιαίου προτύπου που περιέγραφε τη λογική αρχιτεκτονική των ανοικτών συστημάτων (open systems), δηλαδή συστήματα με δημόσια διαθέσιμες και ελεύθερα προσβάσιμες προδιαγραφές. Συνολικά, το OSI προσφέρει ένα λογικό και τυποποιημένο πλαίσιο για την περιγραφή της επικοινωνίας δικτυακών συστημάτων.

Η θεμελιώδης αρχή του OSI είναι η κατακόρυφη οργάνωση (layering), κατά την οποία η επικοινωνία διαιρείται σε επτά ανεξάρτητα, αλλά συνεργαζόμενα επίπεδα (layers) (Σχήμα 2.4). Μέσα σε κάθε επίπεδο, μία ή περισσότερες οντότητες (entities) υλοποιούν τη λειτουργία του. Κάθε οντότητα αλληλοεπιδρά άμεσα μόνο με το αμέσως κατώτερο επίπεδο, ενώ παρέχει υπηρεσίες (services) στο επίπεδο που βρίσκεται από πάνω. Τα πρωτόκολλα, επιτρέπουν σε μια οντότητα ενός υπολογιστή (host) σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο, να επικοινωνεί με μια αντίστοιχη οντότητα στο ίδιο επίπεδο σε έναν άλλον υπολογιστή. Οι υπηρεσίες, περιγράφουν, αφηρημένα, τι παρέχεται από ένα επίπεδο N-1 στο

αμέσως ανώτερο επίπεδο N, όπου το N αντιστοιχεί σε ένα από τα επτά επίπεδα πρωτοκόλλων που λειτουργούν στον τοπικό υπολογιστή [34].



Σχήμα 2.4: Απεικόνιση των επτά επιπέδων του μοντέλου OSI [34]

1. **Physical Layer:** Παρέχει αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων πάνω σε φυσικό μέσο (π.χ. Ethernet, MAC διευθύνσεις). Ορίζει τα φυσικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της σύνδεσης μεταξύ συσκευών, όπως τον καθορισμό της τάσης, τη σύνδεση καλωδίων, καθώς και συσκευών όπως hubs, και adapters. Είναι υπεύθυνο για τη φυσική μετάδοση bits καθώς και για τη διαμόρφωση (modulation) των σημάτων, ώστε τα δεδομένα να μετατραπούν σε αναγνώσιμη μορφή από το μέσο μετάδοσης.
2. **Data Link Layer:** Βασίζεται πάνω στο Physical Layer και είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά δεδομένων με αξιοπιστία μεταξύ δύο άμεσα συνδεδεμένων κόμβων. Για να επιτευχθεί η αξιοπιστία της μεταφοράς των δεδομένων, χρησιμοποιεί μηχανισμούς εντοπισμού και διόρθωσης λαθών, όπως ο Κυκλικός Έλεγχος Πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check, CRC). Αν τα δύο τελικά συστήματα που επικοινωνούν δεν συνδέονται άμεσα, τότε η επικοινωνία τους θα περάσει από πολλαπλούς συνδέσμους δεδομένων, όπου ο καθένας λειτουργεί ανεξάρτητα. Σε αυτή την περίπτωση, είναι ευθύνη των υψηλότερων στρωμάτων να παρέχουν αξιόπιστη μετάδοση από άκρο σε άκρο (end-to-end).
3. **Network Layer:** Είναι υπεύθυνο για την εύρεση της διαδρομής και την παροχή λογικής διευθυνσιοδότησης. Διαχειρίζεται την αποστολή πακέτων από κόμβο σε κόμβο μέσα στο δίκτυο, είτε αυτά κατευθύνονται σε κοντινούς, είτε σε απομακρυσμένους προορισμούς. Εφαρμόζει τεχνικές δρομολόγησης και μπορεί να διασπάσει μηνύματα σε μικρότερα πακέτα για ευκολότερη μεταφορά και επανένωση.
4. **Transport Layer:** Παρέχει επικοινωνία από άκρο σε άκρο ανάμεσα σε εφαρμογές που εκτελούνται σε διαφορετικούς υπολογιστές. Προσφέρει μηχανισμούς αξιόπιστης μεταφοράς, έλεγχο συμφόρησης και ροής, διαχείριση διευθύνσεων θυρών (ports) και διαπραγμάτευση

ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Είναι επίσης υπεύθυνο για τη σύναψη, χρήση και τερματισμό συνδέσεων. Το TCP και το UDP είναι τα πιο γνωστά πρωτόκολλα αυτού του επιπέδου.

5. **Session Layer:** Επιτρέπει τη διαχείριση συνεχόμενων συνεδριών επικοινωνίας ανάμεσα σε εφαρμογές. Αναλαμβάνει την έναρξη, παρακολούθηση και τερματισμό των συνεδριών, καθώς και τη διαχείριση συγχρονισμού με σημεία ελέγχου (checkpoints), ώστε να αποφευχθεί επανεκκίνηση μετά από διακοπή. Περιλαμβάνει, επίσης, διαχείριση διαλόγου (dialog control) και μηχανισμούς για την αποτροπή ταυτόχρονων ενεργειών από τα δύο άκρα της σύνδεσης.
6. **Presentation Layer:** Δρα ως «μεταφραστής» και είναι υπεύθυνο για τη μετατροπή, συμπίεση και κρυπτογράφηση δεδομένων μεταξύ των εφαρμογών και των κατώτερων επιπέδων. Εφαρμόζει τεχνικές όπως μετατροπή χαρακτήρων (π.χ. ASCII σε EBCDIC), μετατροπές μορφής (π.χ. integer σε floating point), καθώς και συμπίεση και κρυπτογράφηση κωδικών ή αρχείων για λόγους αποδοτικότητας και ασφάλειας.
7. **Application Layer:** Αποτελεί το σημείο στο οποίο οι χρήστες και οι εφαρμογές αλληλοεπιδρούν άμεσα με το δίκτυο. Υποστηρίζει εφαρμογές όπως περιήγηση στο διαδίκτυο, email, απομακρυσμένη πρόσβαση και μεταφορά αρχείων. Περιλαμβάνει πρωτόκολλα όπως HTTP, SMTP, FTP, DNS και SSH και φροντίζει για την αναγνώριση των επικοινωνιακών εταιρών, την αυθεντικοποίηση χρηστών και την τήρηση περιορισμών συντακτικής μορφής δεδομένων.

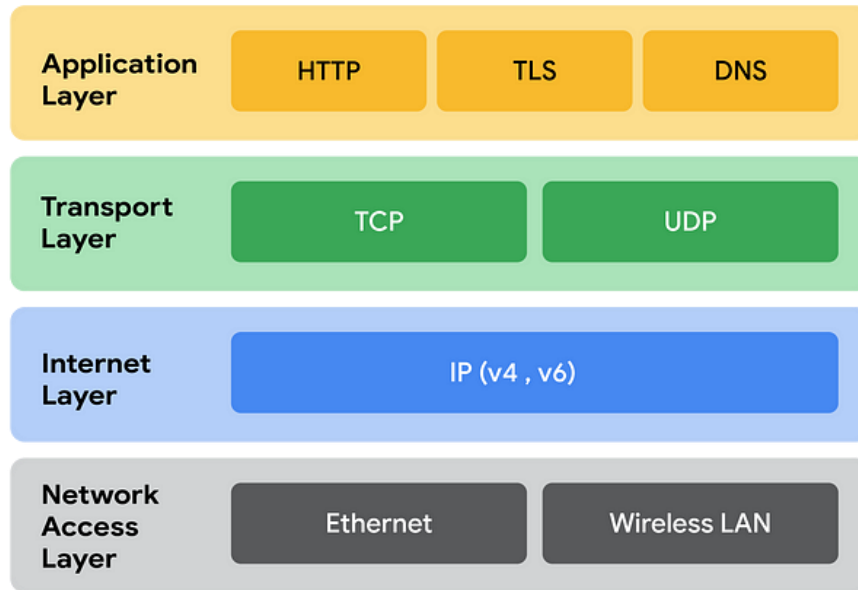
Συνολικά, το OSI προσφέρει ένα λογικό και τυποποιημένο πλαίσιο για την περιγραφή της επικοινωνίας δικτυακών συστημάτων. Αν και δεν κατέστη το κυρίαρχο πρότυπο υλοποίησης (όπως συνέβη με το TCP/IP), παραμένει σημαντικό εργαλείο εκπαίδευσης, ανάλυσης και τεκμηρίωσης πολύπλοκων συστημάτων και χρησιμοποιείται ακόμη ευρέως ως εννοιολογικό υπόβαθρο για την κατανόηση σύγχρονων αρχιτεκτονικών όπως το IoT [34].

2.4 Μοντέλο TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol)

Το μοντέλο TCP/IP, αποτελεί το πρακτικό υπόβαθρο του σύγχρονου Διαδικτύου, και βασίζεται σε αρχές που δίνουν έμφαση στη διαλειτουργικότητα, την ευελιξία και την υλοποίηση πάνω από διαφορετικές τεχνολογικές πλατφόρμες. Σε αντίθεση με το OSI, που σχεδιάστηκε πρώτα ως θεωρητικό πλαίσιο, ώστε να ακολουθήσει η ανάπτυξη πρωτοκόλλων, το TCP/IP εξελίχθηκε μέσα από την πρακτική χρήση υπαρχόντων πρωτοκόλλων, όπως το IP και το TCP, τα οποία έδωσαν το όνομά τους στο μοντέλο και αποτελούν την ραχοκοκαλιά της λειτουργίας του.

Η ευρεία αποδοχή του, οφείλεται αρχικά στο γεγονός ότι υιοθετήθηκε από το ARPANET, τον πρόδρομο του Διαδικτύου. Επιπλέον, η ανοιχτή και δημόσια τεκμηρίωση των προτύπων του, η υποστήριξη για μεγάλο εύρος τεχνολογιών, καθώς και η ενσωμάτωση της υποστήριξης νέων τεχνολογιών όπως το IPv6 και το IoT, κατέστησαν το TCP/IP βασικό δομικό στοιχείο όλων των σύγχρονων δικτύων. Παρόλο που υστερεί σε επίπεδο διαστρωμάτωσης σε σχέση με το OSI (που διαθέτει επτά επίπεδα), το TCP/IP πλεονεκτεί σε απλότητα, αποδοτικότητα και υλοποίηση [35].

Η λειτουργική του προσέγγιση, μπορεί να βασιστεί σε τέσσερα ή πέντε επίπεδα. Σε αυτήν την μελέτη, θα ασχοληθούμε με την διαστρωμάτωση τεσσάρων επιπέδων (Σχήμα 2.5), τα οποία παρέχουν υπηρεσίες το ένα στο άλλο, από το φυσικό μέσο μετάδοσης έως την εφαρμογή του τελικού χρήστη. Κάθε επίπεδο εξυπηρετεί συγκεκριμένες λειτουργίες στο πλαίσιο της επικοινωνίας, και «χτίζει» πάνω στις υπηρεσίες του κατώτερου επιπέδου.



Σχήμα 2.5: Απεικόνιση των τεσσάρων επιπέδων της στοίβας TCP/IP [36]

- 1. Network Access Layer:** Το κατώτερο επίπεδο είναι υπεύθυνο για την πρόσβαση στο φυσικό μέσο και τη μετάδοση πλαισίων στο τοπικό δίκτυο. Περιλαμβάνει υλικό (π.χ. κάρτες δικτύου) και είναι αρμόδιο για τη φυσική μετάδοση δεδομένων μέσα από τοπικά ή ευρείας ζώνης δίκτυα. Περιλαμβάνει τεχνολογίες όπως Ethernet, Wi-Fi (IEEE 802.11), Token Ring, PPP (Point-to-Point Protocol) και Frame Relay. Το επίπεδο αυτό ενσωματώνει λειτουργίες των επιπέδων Physical και Data Link του OSI, επιτρέποντας μεγάλη ευελιξία, καθώς δεν επιβάλλει χρήση συγκεκριμένης τεχνολογίας [37].
- 2. Internet Layer:** Πρόκειται για το κεντρικό επίπεδο του μοντέλου, καθώς υλοποιεί το πρωτόκολλο IP (IPv4/IPv6). Το IP λειτουργεί ως πρωτόκολλο χωρίς σύνδεση (connectionless), και παρέχει μόνο βασικές υπηρεσίες (best effort delivery) χωρίς εγγύηση αξιοπιστίας που επιτρέπει τη δρομολόγηση πακέτων μέσα από ετερογενή δίκτυα. Συνοδευτικά πρωτόκολλα είναι το ICMP (Internet Control Message Protocol), για αναφορές σφαλμάτων και μηνυμάτων ελέγχου, το ARP (Address Resolution Protocol) και RARP (Reverse Address Resolution Protocol) για την μετατροπή διευθύνσεων IP σε MAC [35].
- 3. Transport Layer:** Το επίπεδο αυτό εξασφαλίζει επικοινωνία από άκρο σε άκρο μεταξύ εφαρμογών, παρέχοντας δυνατότητες όπως αξιόπιστη μεταφορά, χαμηλή καθυστέρηση, αναγνώριση θυρών (ports) και έλεγχο ροής. Τα παραπάνω επιτυγχάνονται με τη χρήση δύο βασικών πρωτοκόλλων:
 - TCP (Transmission Control Protocol):** Αξιόπιστο, προσανατολισμένο σε σύνδεση, με αριθμούς ακολουθίας για την σωστή παράδοση των πακέτων, ενώ υποστηρίζει επικοινωνία με επιβεβαιώσεις και ελέγχους ροής και συμφόρησης.
 - UDP (User Datagram Protocol):** Μη αξιόπιστο, χωρίς έλεγχο, αλλά με πολύ χαμηλό φορτίο, ιδανικό για εφαρμογές πραγματικού χρόνου, καθώς προσφέρει πιο ελαφριά επικοινωνία χωρίς εγγυήσεις παράδοσης. Το επίπεδο αυτό λειτουργεί πάνω από το IP και προσθέτει κρίσιμες δυνατότητες για υπηρεσίες πραγματικού χρόνου και web εφαρμογές [35].
- 4. Application Layer:** Περιλαμβάνει όλα τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούν οι εφαρμογές για να επικοινωνούν μέσω του δικτύου. Ενδεικτικά: HTTP/HTTPS, FTP, SMTP/POP3/IMAP, DNS, Telnet και SSH. Σε αντίθεση με το OSI, εδώ δεν υπάρχουν ξεχωριστά επίπεδα Presentation και Session οι λειτουργίες τους (κωδικοποίηση, ασφάλεια, συγχρονισμός) περιλαμβάνονται στο Application Layer [35].

Χάρη στην υψηλή ευελιξία και ανεξαρτησία από το υλικό που το χρησιμοποιεί, το TCP/IP καθίσταται συμβατό με κάθε τύπο δικτύου και λειτουργικού συστήματος. Τα ανοιχτά και τεκμηριωμένα πρότυπα που χρησιμοποιεί, είναι προσβάσιμα χωρίς κόστος, γεγονός που ενίσχυσε στην παγκόσμια υιοθέτησή του. Καθώς εξελίχθηκε από τη πράξη και όχι ως θεωρητική κατασκευή, ενσωματώθηκε σε πραγματικές ανάγκες της κοινωνίας, ενώ παράλληλα η συνεχής επεκτασιμότητά του με την υποστήριξη νέων τεχνολογιών όπως IPv6 και IoT το εδραίωσαν ως το κυρίαρχο μοντέλο αρχιτεκτονικής στον χώρο των επικοινωνιών.

2.5 Αντιστοίχιση των μοντέλων OSI και TCP/IP με τις αρχιτεκτονικές του IoT

Τα δικτυακά μοντέλα OSI και TCP/IP, λειτουργούν ως θεμέλια επικοινωνίας για όλα τα συστήματα πληροφορικής, συμπεριλαμβανομένων των αρχιτεκτονικών του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Αν και τα IoT μοντέλα διαμορφώνονται με βάση τις ανάγκες συλλογής δεδομένων, έξυπνης επεξεργασίας, διαχείρισης υπηρεσιών και επιχειρησιακής λογικής, πολλά από τα λειτουργικά τους επίπεδα αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα στρώματα των OSI και TCP/IP. Ο παρακάτω Πίνακας 2.1 παρουσιάζει αυτή την αντιστοίχιση:

Πίνακας 2.1: Αντιστοίχιση των μοντέλων OSI και TCP/IP με τις αρχιτεκτονικές του IoT

IoT Επίπεδο	Λειτουργία	Αντίστοιχο OSI	Αντίστοιχο TCP/IP
Perception Layer	Συλλογή φυσικών δεδομένων μέσω αισθητήρων	Physical + Data Link Layer	Link Layer
Network Layer (IoT)	Μετάδοση δεδομένων, δρομολόγηση	Network + Transport Layer	Internet + Transport Layer
Middleware / Service Layer	Επεξεργασία, διαχείριση υπηρεσιών, ενδιάμεσο λογισμικό	Session + Presentation Layer	Μέρος του Application Layer
Application Layer (IoT)	Διασύνδεση με τελικές εφαρμογές	Application Layer	Application Layer
Business Layer	Ανάλυση δεδομένων, KPI, αποφάσεις	–	–
Security Layer	Κρυπτογράφηση, έλεγχος πρόσβασης	–	–

Με γνώμονα τον παραπάνω πίνακα, μπορούμε να προχωρήσουμε στην ανάλυση της συσχέτισης της αρχιτεκτονικής επτά επιπέδων του IoT, με τα μοντέλα OSI και TCP/IP, ανά επίπεδο:

- **Perception Layer:** Το επίπεδο αντίληψης του IoT αφορά τη συλλογή πληροφοριών, μέσω φυσικών μέσων, όπως αισθητήρες, κάμερες και έξυπνοι μετρητές. Οι τεχνολογίες αυτές, λειτουργούν στα κατώτερα επίπεδα του OSI (Physical, Data Link) και στο Link Layer του TCP/IP.
- **Network Layer:** Σε αυτό το επίπεδο, εντάσσονται τα πρωτόκολλα IP, TCP, UDP, αλλά και ειδικά πρωτόκολλα IoT όπως το 6LoWPAN. Η δρομολόγηση, η μεταφορά και η ασφάλεια επικοινωνίας από κόμβο σε κόμβο, βασίζονται στη λειτουργία των επιπέδων Network και Transport.

- **Middleware και Service Layer:** Το επίπεδο αυτό παρέχει υπηρεσίες επεξεργασίας, ενοποίησης και διαμεσολάβησης, μεταξύ των «πρωτογενών» δεδομένων και των εφαρμογών. Η αντιστοίχιση, γίνεται με τα μεσαία επίπεδα του OSI Session & Presentation layers, τα οποία, παραδοσιακά, σχετίζονται με συνεδρίες, συγχρονισμό και παρουσίαση δεδομένων. Στο TCP/IP δεν υπάρχει ξεχωριστό layer, οπότε αυτά ενσωματώνονται στο Application Layer.
- **Application Layer (IoT):** Η επικοινωνία μεταξύ τελικών εφαρμογών, χρηστών ή εξωτερικών συστημάτων, γίνεται μέσω του Application Layer. Πρωτόκολλα όπως HTTP, CoAP, MQTT και AMQP ανήκουν σε αυτό το επίπεδο. Τόσο το μοντέλο OSI, όσο και το TCP/IP, διαθέτουν ξεχωριστό Application layer.
- **Business Layer:** Το επιχειρησιακό επίπεδο του IoT δεν έχει άμεση αντιστοίχιση με το OSI ή το TCP/IP. Αφορά τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, την εξαγωγή γνώσης και την υλοποίηση KPIs, δηλαδή, λειτουργίες που σχετίζονται περισσότερο με το λογισμικό εφαρμογών, ή με πλατφόρμες ανάλυσης δεδομένων (π.χ. cloud analytics, AI).
- **Security Layer:** Αν και δεν αποτελεί ξεχωριστό επίπεδο στα μοντέλα OSI και TCP/IP, η ασφάλεια θεωρείται διαστρωματική λειτουργία, με τεχνικές που εφαρμόζονται σε όλα τα επίπεδα. Από τη φυσική ασφάλεια (Physical Layer), έως την κρυπτογράφηση εφαρμογών (Application Layer), πρωτόκολλα όπως TLS, IPsec και DTLS είναι παραδείγματα ασφαλούς λειτουργίας εντός αυτών των επιπέδων.

Συμπερασματικά καταλήγουμε, πως παρά τις διαφορές στη φιλοσοφία και την υλοποίησή τους, τα μοντέλα OSI και TCP/IP παρέχουν τη βάση πάνω στην οποία σχεδιάζονται και λειτουργούν τα αρχιτεκτονικά μοντέλα του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Το OSI μοντέλο, που καθορίστηκε από τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO) τη δεκαετία του 1980, δομείται σε επτά διακριτά επίπεδα που οριοθετούν, με σαφήνεια, τη λειτουργικότητα κάθε στρώσης. Η προσέγγισή του, δίνει ιδιαίτερη έμφαση στη δομική καθαρότητα και την ανεξαρτησία των επιπέδων, αποτελώντας ένα ισχυρό εργαλείο εκπαίδευσης, ανάλυσης και τεκμηρίωσης [38], [39].

Αντιθέτως, το TCP/IP μοντέλο εξελίχθηκε από την πράξη, με βάση υπαρκτά πρωτόκολλα και δομείται σε τέσσερα επίπεδα. Δεν διαθέτει αυστηρή διαστρωμάτωση, αλλά εστιάζει στη λειτουργική απόδοση και τη διαλειτουργικότητα, με σαφή προσανατολισμό στην υλοποίηση σε πραγματικά περιβάλλοντα. Έγινε το κυρίαρχο πρότυπο, λόγω της ευρείας υιοθέτησής του από το ARPANET και της δημόσιας διαθεσιμότητας των προτύπων του [35], [37].

Όσον αφορά το IoT και τα μοντέλα αρχιτεκτονικής του, η αντιστοίχιση με τα επίπεδα του OSI και TCP/IP δείχνει ότι τα κατώτερα επίπεδα (Perception, Network), βασίζονται άμεσα στις αρχές και τα πρωτόκολλα των OSI και TCP/IP, ενώ τα ανώτερα επίπεδα (Application, Business) υπερβαίνουν τα παραδοσιακά δίκτυα και αγγίζουν τη σφαίρα της πληροφοριακής ανάλυσης, της αυτονομίας συσκευών και της λήψης αποφάσεων. Ειδικά το Business Layer του IoT, το οποίο ασχολείται με KPIs, πολιτικές λειτουργίας και ανάλυση δεδομένων, δεν έχει άμεση αντιστοίχιση με τα επίπεδα του OSI ή TCP/IP, καθώς αφορά λειτουργίες πάνω από το επίπεδο εφαρμογής, που ανήκουν περισσότερο στο πεδίο της επιχειρησιακής πληροφορικής. Το ίδιο ισχύει για το Security Layer, που αντιμετωπίζεται ως διαστρωματική λειτουργία και όχι ως ξεχωριστό επίπεδο, αλλά εφαρμόζεται στο σύνολο του OSI/TCP-IP, μέσω πρωτοκόλλων όπως TLS, IPsec, DTLS [38], [40].

Εν κατακλείδι, τα IoT μοντέλα δανείζονται τη δομή και τις αρχές των μοντέλων OSI και TCP/IP, αλλά τις επεκτείνουν, ώστε να καλύψουν τις ειδικές ανάγκες ενός οικοσυστήματος που

περιλαμβάνει εκατομμύρια συσκευές, περιορισμένους πόρους, απαιτήσεις χαμηλής καθυστέρησης (latency) και έμφαση στην ασφάλεια και την επιχειρησιακή αξιοποίηση των δεδομένων.

2.6 Πρωτόκολλα επικοινωνίας στο IoT

Η επικοινωνία μεταξύ συσκευών είναι το θεμέλιο, πάνω στο οποίο βασίζεται ολόκληρο το οικοσύστημα του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Όλες οι συσκευές, από αισθητήρες και μικροελεγκτές, μέχρι πύλες (gateways) και cloud servers, πρέπει να ανταλλάσσουν δεδομένα με τρόπο αποδοτικό, αξιόπιστο και συχνά σε πραγματικό χρόνο. Επειδή όμως λειτουργούν υπό περιορισμούς, όπως χαμηλή υπολογιστική ισχύ, περιορισμένο εύρος ζώνης και αυστηρή διαχείριση ενέργειας, απαιτούνται εξειδικευμένα και ελαφριά πρωτόκολλα επικοινωνίας. Τα πρωτόκολλα αυτά, καλύπτουν διαφορετικά επίπεδα του μοντέλου OSI και TCP/IP, που αναλύθηκαν παραπάνω και καθορίζουν τη μορφή, τη ροή και την ασφάλεια της ανταλλαγής πληροφοριών. Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας κατηγοριοποιούνται σε δύο κύρια επίπεδα:

5. **Πρωτόκολλα Υψηλού Επιπέδου (Application Layer):** Εστιάζουν στην ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ εφαρμογών και υπηρεσιών.
6. **Πρωτόκολλα Χαμηλού Επιπέδου (Network & Transport Layer):** Ασχολούνται με τη φυσική και δικτυακή συνδεσιμότητα μεταξύ των συσκευών.

Σε αυτή την μελέτη, θα ασχοληθούμε με τα πρωτόκολλα του χαμηλού επιπέδου επικοινωνίας. Ωστόσο, θα γίνει εισαγωγή στα πρωτόκολλα του χαμηλού και του υψηλού επιπέδου, έτσι ώστε να υπάρχει πληρέστερη εικόνα για τον τρόπο διασύνδεσης και επικοινωνίας των IoT συσκευών.

2.6.1 Πρωτόκολλα υψηλού επιπέδου (Εφαρμογών)

Έχοντας αποκτήσει μια ολοκληρωμένη κατανόηση της αρχιτεκτονικής δομής των IoT συστημάτων, η προσοχή στρέφεται τώρα στα συγκεκριμένα πρωτόκολλα εφαρμογής που λειτουργούν σε αυτό το επίπεδο. Με την υποστήριξη των τεχνολογιών που αναφέρονται παρακάτω, κάθε πρωτόκολλο συμβάλλει ξεχωριστά, στην ικανότητα του IoT να επεξεργάζεται, να αξιολογεί και να αντιδρά στα δεδομένα που συλλέγονται. Αυτά τα πρωτόκολλα, λειτουργούν κυρίως στο επίπεδο εφαρμογής του μοντέλου TCP/IP και διευκολύνουν την ανταλλαγή δεδομένων, μεταξύ των συσκευών IoT και των εφαρμογών ή υπηρεσιών cloud:

- **MQTT (Message Queuing Telemetry Transport):** Το MQTT, είναι ένα ελαφρύ πρωτόκολλο δημοσίευσης/εγγραφής, σχεδιασμένο για συσκευές με περιορισμένους πόρους και δίκτυα χαμηλού εύρους ζώνης. Λειτουργεί πάνω από το TCP/IP και χρησιμοποιεί έναν μεσολαβητή (broker), για τη διαχείριση των μηνυμάτων. Η απλότητά του και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, το καθιστούν ιδανικό για εφαρμογές IoT, όπως η οικιακή αυτοματοποίηση και η παρακολούθηση αισθητήρων. Ο broker αποτελεί το ενδιάμεσο στοιχείο μεταξύ αποστολέων (publishers) και παραληπτών (subscribers) μηνυμάτων, διευκολύνοντας την αποσύνδεση (decoupling) των endpoints [41].
- **CoAP (Constrained Application Protocol):** Ένα πρωτόκολλο που βασίζεται στο UDP και παρέχει λειτουργίες παρόμοιες με το HTTP, αλλά με μικρότερο αποτύπωμα, καθιστώντας το κατάλληλο για περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους. Υποστηρίζει μοντέλα επικοινωνίας πελάτη-διακομιστή και είναι κατάλληλο για εφαρμογές όπου η χαμηλή καθυστέρηση είναι κρίσιμη, συμβάλλοντας στην ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσης του δικτύου [42].
- **AMQP (Advanced Message Queuing Protocol):** Το AMQP, είναι ένα ανοιχτό πρότυπο πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων, που προσφέρει αξιόπιστη και ασφαλή μεταφορά δεδομένων. Είναι κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία και εγγυημένη

παράδοση μηνυμάτων, όπως οι βιομηχανικές εφαρμογές και τα χρηματοοικονομικά συστήματα [43].

- **DDS (Data Distribution Service):** Πρόκειται για πρωτόκολλο δημοσίευσης/εγγραφής, που υποστηρίζει real-time επικοινωνία, με δυνατότητες Quality of Service. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία, όπως η βιομηχανική αυτοματοποίηση, συστήματα ελέγχου και ρομποτικά συστήματα [44].
- **HTTP/HTTPS:** Το HTTP και το ασφαλές του αντίστοιχο HTTPS, είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα σε εφαρμογές web, αν και είναι πιο απαιτητικό από πλευράς πόρων. Παρόλο που δεν είναι σχεδιασμένα ειδικά για το IoT, χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου η διαλειτουργικότητα με υπάρχουσες web υπηρεσίες είναι απαραίτητη [45].
- **XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol):** Πρωτόκολλο βασισμένο σε XML, αρχικά σχεδιασμένο για instant messaging, αλλά επεκτάθηκε, για να υποστηρίξει real-time ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ συσκευών IoT, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο ευελιξία και επεκτασιμότητα [46].

2.6.2 Πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου (Συνδεσιμότητας)

Αυτά τα πρωτόκολλα, λειτουργούν στα κατώτερα επίπεδα του δικτυακού μοντέλου και είναι υπεύθυνα, για τη φυσική μετάδοση των δεδομένων και τη δρομολόγησή τους μέσω των δικτύων. Αποτελούν, το κύριο αντικείμενο μελέτης της εργασίας και θα αφιερωθεί ξεχωριστό κεφάλαιο για την λεπτομερή ανάλυσή τους. Στο παρόν υποκεφάλαιο, γίνεται η ενδεικτική αναφορά στον τρόπο λειτουργίας και στις εφαρμογές τους στη καθημερινότητα:

- **Wi-Fi (IEEE 802.11):** Το Wi-Fi, είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα ασύρματης επικοινωνίας, που επιτρέπει στις συσκευές να συνδέονται στο διαδίκτυο και μεταξύ τους χωρίς καλώδια. Χρησιμοποιεί ραδιοκύματα για τη μετάδοση δεδομένων, μεταξύ ενός δρομολογητή και συσκευών με δυνατότητα Wi-Fi. Ο δρομολογητής λειτουργεί ως κεντρικός κόμβος, μεταδίδοντας σήματα εντός της εμβέλειάς του. Οι συσκευές, που είναι εξοπλισμένες με προσαρμογείς Wi-Fi, λαμβάνουν αυτά τα σήματα και τα μετατρέπουν σε δεδομένα, επιτρέποντας την πρόσβαση στο διαδίκτυο και την επικοινωνία σε τοπικό δίκτυο. Παρέχει υψηλό εύρος ζώνης και είναι κατάλληλο για εφαρμογές, όπου υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Παρότι δεν είναι ιδανικό για ενεργειακά αυτόνομες συσκευές, χρησιμοποιείται ευρέως σε περιβάλλοντα που διαθέτουν σταθερή τροφοδοσία ρεύματος [37], [47].
- **Zigbee:** Βασισμένο στο πρότυπο IEEE 802.15.4, σχεδιάστηκε για να χρησιμοποιεί μια τοπολογία δικτύου πλέγματος (mesh), όπου κάθε συσκευή ή κόμβος, μπορεί να επικοινωνεί με οποιονδήποτε άλλο κόμβο εντός της εμβέλειάς του, δημιουργώντας ένα ανθεκτικό και αυτοθεραπευόμενο δίκτυο. Αυτή η αρχιτεκτονική πλέγματος, ενισχύει την αξιοπιστία και την κάλυψη του δικτύου, καθώς τα δεδομένα μπορούν να «πηδούν» από κόμβο σε κόμβο για να φτάσουν στον προορισμό τους, παρακάμπτοντας εμπόδια και επεκτείνοντας την αποτελεσματική εμβέλεια του δικτύου. Τα δίκτυα Zigbee μπορούν να υποστηρίξουν χιλιάδες κόμβους, γεγονός που τα καθιστά εξαιρετικά επεκτάσιμα [48].
- **Bluetooth Low Energy (BLE):** Αποτελεί επέκταση του κλασικού Bluetooth, σχεδιασμένη για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Σε σύγκριση με το κλασικό Bluetooth, το BLE προσφέρει σημαντικά μειωμένη κατανάλωση ενέργειας και χαμηλότερο κόστος, διατηρώντας παράλληλα παρόμοια εμβέλεια επικοινωνίας. Αν και οι εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο αντιμετωπίζουν περιορισμούς λογισμικού, που μειώνουν τη διαμεταγωγή δεδομένων, το BLE χάρη στην εξοικονόμηση ενέργειας και τον βελτιστοποιημένο σχεδιασμό του για επικοινωνία μικρής εμβέλειας, είναι ιδανικό για συσκευές IoT που απαιτούν μεγάλη διάρκεια ζωής μπαταρίας και αξιόπιστη απόδοση [49].

- **LoRaWAN (Long Range Wide Area Network):** Είναι πρωτόκολλο, που επιτρέπει την επικοινωνία σε μεγάλες αποστάσεις με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, παρατείνοντας τη ζωή της μπαταρίας των συσκευών που το χρησιμοποιούν. Είναι κατάλληλο για εφαρμογές, όπως η παρακολούθηση περιβάλλοντος και η αγροτική τεχνολογία, όπου οι συσκευές πρέπει να επικοινωνούν σε μεγάλη απόσταση και να έχουν μεγάλη διάρκεια μπαταρίας [50].
- **NB-IoT (Narrowband IoT):** Το NB-IoT είναι μια τεχνολογία LPWA (Low Power Wide Area), η οποία λειτουργεί σε υπάρχοντα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, προσφέροντας ευρεία κάλυψη και υποστήριξη, για μεγάλο αριθμό συσκευών, με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Το πλεονέκτημα της μετάδοσης narrowband (στενής ζώνης), έγκειται στην παροχή, τόσο επεκταμένης κάλυψης, όσο και αυξημένης χωρητικότητας. Η τεχνολογία NB-IoT, είναι κατάλληλη για χρήστες που μεταδίδουν δεδομένα μικρού όγκου, αραιά και με ανοχή σε καθυστέρηση. [51].
- **6LoWPAN (IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks):** Πρωτόκολλο, που επιτρέπει τη μετάδοση πακέτων IPv6 μέσω δικτύων IEEE 802.15.4, καθιστώντας δυνατή τη χρήση του πρωτοκόλλου IP, σε συσκευές με περιορισμένους πόρους. Επαναχρησιμοποιώντας, τα δοκιμασμένα στο χρόνο, πρωτόκολλα TCP/IP στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων, το καθιστά μια φυσική και μελλοντικά ασφαλή επιλογή για τα δικτυακά πρωτόκολλα του IoT [52].
- **Wireless M-Bus:** Το Wireless M-Bus είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας που σχεδιάστηκε ειδικά για την ασύρματη μετάδοση μετρήσεων από έξυπνους μετρητές, όπως για παράδειγμα μετρητές κατανάλωσης νερού, αερίου και θερμότητας. Βασίζεται στην ενσύρματη έκδοση M-Bus (Meter-Bus), η οποία αρχικά καθιερώθηκε για συσκευές μέτρησης χαμηλής ισχύος και τυποποιείται από το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13757 [53].
- **RFID (Radio Frequency Identification):** Το RFID, επιτρέπει την αυτόματη συλλογή δεδομένων από αντικείμενα, διευκολύνοντας την ενσωμάτωσή τους σε ψηφιακά συστήματα, για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση. Είναι μια τεχνολογία ασύρματης επικοινωνίας, που χρησιμοποιεί ραδιοκύματα για την αναγνώριση και παρακολούθηση αντικειμένων εξοπλισμένων με ετικέτες RFID. Σε αυτές τις ετικέτες, μπορούν να προγραμματιστούν διάφορα χαρακτηριστικά, όπως όνομα, σειριακός αριθμός και ημερομηνία. Οι πληροφορίες αυτές, μπορούν στη συνέχεια να διαβαστούν μέσω αναγνωστών RFID [54].
- **NFC (Near Field Communication):** Η τεχνολογία NFC, βασίζεται σε υπάρχοντα πρότυπα RFID και αποτελείται από ένα σύνολο πρωτοκόλλων επικοινωνίας, που επιτρέπει την ασύρματη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ δύο ηλεκτρονικών συσκευών, σε πολύ κοντινή απόσταση. Χρησιμοποιεί την επαγωγή μαγνητικού πεδίου, για να επιτρέψει την επικοινωνία μεταξύ μιας ενεργής συσκευής και μιας παθητικής συσκευής. Όταν η ενεργή συσκευή δημιουργεί μαγνητικό πεδίο, αυτό επάγει ρεύμα στην παθητική συσκευή, την ενεργοποιεί και διευκολύνει τη μεταφορά δεδομένων. Η διαδικασία είναι γρήγορη και δεν απαιτεί σύζευξη, ή χειροκίνητη ρύθμιση, γεγονός που καθιστά το NFC ιδιαίτερα φιλικό προς τον χρήστη. [55].

2.7 Επίλογος

Με την ολοκλήρωση αυτού του κεφαλαίου, η εργασία έχει εισάγει όλες τις βασικές και απαραίτητες συνιστώσες του IoT, έτσι, ώστε ο αναγνώστης να έχει μια πλήρη εικόνα, για τον τρόπο λειτουργίας του Διαδικτύου των Πραγμάτων. Οι τεχνολογίες και η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική του IoT, αποτελούν τον πυρήνα της υλοποίησης σύγχρονων έξυπνων και συχνά αυτόνομων συστημάτων, που μετασχηματίζουν ριζικά τον τρόπο με τον οποίο αλληλοεπιδρούμε με το περιβάλλον και τις υποδομές. Είναι φανερό, πως το Internet of Things έχει διεισδύσει σε πολλούς τομείς της κοινωνίας και της βιομηχανίας, επιφέροντας αλλαγές στην καθημερινότητα και στη λειτουργία σημαντικών συστημάτων. Η δυνατότητα συλλογής, ανάλυσης και χρήσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, έχει καταστήσει το IoT μια απαραίτητη τεχνολογία για τη βελτίωση της αποδοτικότητας, της ασφάλειας και της ποιότητας των υπηρεσιών.

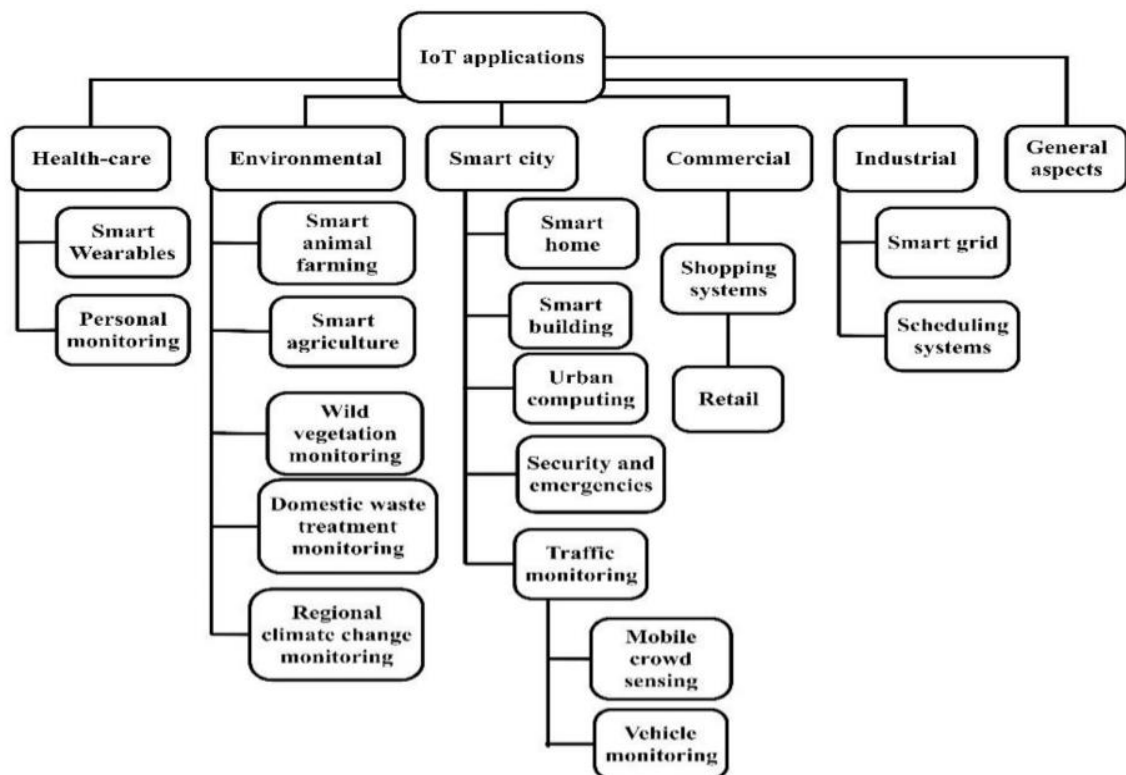
3. Πρωτόκολλα επικοινωνίας χαμηλού επιπέδου IoT και οι εφαρμογές τους

3.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί, η έρευνα θα εστιάσει στο κύριο αντικείμενό της, τη συγκριτική μελέτη στις πρακτικές εφαρμογές των πρωτοκόλλων επικοινωνίας χαμηλού επιπέδου IoT. Επίσης, θα εμβαθύνει στα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, με απώτερο σκοπό, να αναλυθούν οι τεχνικές προδιαγραφές τους, όπως επίσης να συγκριθούν και να εξεταστούν, τα κριτήρια επιλογής του καθενός για τις διάφορες εφαρμογές που αξιοποιούνται

3.2 Εφαρμογές πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου IoT

Αναλύοντας τα πρωτόκολλα επικοινωνίας του υψηλού και του χαμηλού επιπέδου σε προηγούμενο κεφάλαιο, έγινε κατανοητή η πληθώρα των εφαρμογών που υποστηρίζει το IoT. Ταυτόχρονα, έγινε αντιληπτό, πως η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου επικοινωνίας πρέπει να γίνεται με προσοχή, λαμβάνοντας υπόψη τα συγκεκριμένα κριτήρια και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, διασφαλίζεται η βέλτιστη απόδοση, ασφάλεια και λειτουργικότητα του συστήματος.



Σχήμα 3.1: Ταξινόμηση των εφαρμογών IoT

Σε αυτό το σημείο, θα παρουσιαστούν οι εφαρμογές που χρησιμοποιούν πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου IoT και ο τρόπος με τον οποίο αξιοποιούνται. Οι τομείς που θα αναπτυχθούν είναι: η βιομηχανία, η υγεία, η γεωργία, η εκπαίδευση, τα logistics, τα smart homes, οι smart cities, το smart metering και το smart grid.

3.2.1 Στη βιομηχανία (Industrial Internet of Things, IIoT)

Η χρήση πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου στο βιομηχανικό διαδίκτυο των πραγμάτων (Industrial IoT, IIoT), είναι θεμελιώδης για τη διασφάλιση αξιοπιστίας, χρονικά καθορισμένης και αποδοτικής επικοινωνίας μεταξύ αισθητήρων, ενεργοποιητών και συστημάτων ελέγχου. Πρωτόκολλα που βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στο IIoT είναι αυτά που βασίζονται στο IEEE 802.15.4. Λόγω της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και της δυνατότητας για πλέγμα δικτύωσης, χρησιμοποιούνται σε περιβάλλοντα όπου τοποθετούνται πολλαπλοί αισθητήρες, όπως σε εργοστάσια παραγωγής ή αυτοματοποιημένες γραμμές συναρμολόγησης [56].

Το **Zigbee**, χρησιμοποιείται ευρέως για ασύρματη μεταφορά δεδομένων αισθητήρων, σε εργοστασιακά συστήματα SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition), καθώς και για τον έλεγχο του φωτισμού, της θέρμανσης ή συστημάτων HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), όπου απαιτείται ευέλικτη, αλλά ενεργειακά αποδοτική επικοινωνία [25]. Για μεγαλύτερες αποστάσεις με μικρότερη απαίτηση σε ταχύτητα μεταφοράς, το **LoRaWAN** δίνει τη λύση στη διασύνδεση εξωτερικών βιομηχανικών εγκαταστάσεων, όπως δεξαμενές, ή απομακρυσμένα μηχανήματα. Η ικανότητά του για μεγάλη εμβέλεια και πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, το καθιστά ιδανικό για παρακολούθηση παραμέτρων, όπως υγρασία, δόνηση ή στάθμη.

Το **BLE**, χρησιμοποιείται για προσωρινές, ή κινητές λύσεις εντοπισμού εργαζομένων και εξοπλισμού μέσα σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, λόγω του μικρού ενεργειακού αποτυπώματος και της υποστήριξης προσωπικών περιοχών επικοινωνίας (Personal Area Networks) [57], [58].

Σε εφαρμογές παρακολούθησης κατανάλωσης ενέργειας και πόρων, καθώς και σε συστήματα διαχείρισης εγκαταστάσεων, χρησιμοποιείται το **Wireless M-Bus**. Παραδείγματα εφαρμογών αποτελούν, εγκαταστάσεις σε μεγάλες βιομηχανικές μονάδες, όπου η τοπολογία σημείο-πολλαπλούς (one-to-many) είναι αρκετή και δεν απαιτείται πλήρες δίκτυο επικοινωνίας, όπως και χρήση ως υποσύστημα, σε μεγάλα συστήματα ενεργειακής διαχείρισης, όπου οι μετρητές καταναλώσεων συνδέονται ασύρματα με κόμβους συλλογής δεδομένων [53].

Επιπλέον, το **NFC** μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ασφαλή και τοπική ταυτοποίηση εργαζομένων, ή εξαρτημάτων, σε περιβάλλοντα όπου δεν επιτρέπεται η χρήση ασύρματων σημάτων υψηλής ισχύος (π.χ. εκρηκτικές ατμόσφαιρες). Τέλος, το **Wi-Fi**, αν και ενεργειακά μη αποδοτικό, αξιοποιείται σε περιπτώσεις, όπου οι απαιτήσεις για ταχύτητα και εύρος ζώνης είναι μεγάλες, όπως σε ρομποτικές μονάδες, ή μονάδες επεξεργασίας εικόνας σε γραμμές ποιοτικού ελέγχου [59], [60].

Συνολικά, η επιλογή πρωτοκόλλου εξαρτάται από τις απαιτήσεις του εκάστοτε βιομηχανικού σεναρίου, όπως η απόσταση, η κατανάλωση ενέργειας, ο ρυθμός μετάδοσης και η αξιοπιστία, με κάθε τεχνολογία να καλύπτει εξειδικευμένες ανάγκες.

3.2.2 Στην υγεία (H-IIoT)

Στον τομέα της υγείας, τα πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη συλλογή και μετάδοση βιομετρικών δεδομένων, στον εντοπισμό ασθενών και προσωπικού, καθώς και στη διαχείριση κρίσιμου ιατρικού εξοπλισμού. Το **BLE**, είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο πρωτόκολλο σε φορητές ιατρικές συσκευές (wearables), όπως έξυπνα ρολόγια, μετρητές καρδιακού ρυθμού και συσκευές παρακολούθησης γλυκόζης. Χάρη στην εξοικονόμηση ενέργειας και της απλής συνδεσιμότητας με κινητές συσκευές, το BLE επιτρέπει τη συνεχή συλλογή δεδομένων χωρίς να διαταράσσεται η καθημερινότητα των ασθενών [57].

Χάρη στη δυνατότητα mesh networking, το πρωτόκολλο **Zigbee** χρησιμοποιείται σε νοσοκομειακά περιβάλλοντα για την ασύρματη διασύνδεση αισθητήρων, που καταγράφουν παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και επίπεδα οξυγόνου στα δωμάτια των ασθενών. Επιπλέον, εξυπηρετεί στην ασφάλεια των αποθεμάτων, καθώς επιτρέπει την επιτήρηση ψυκτικών θαλάμων φαρμάκων και εμβολίων. Έχοντας ως βασικό υπόβαθρο το IEEE 802.15.4, εξασφαλίζεται η αξιόπιστη επικοινωνία αισθητήρων χαμηλής ισχύος, σε περιβάλλοντα με υψηλό ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο, όπως τα ιατρικά εργαστήρια ή τα χειρουργεία. Με τη σειρά του, το **6LoWPAN**, επιτρέπει τη μετάδοση IPv6 πακέτων πάνω από δίκτυα χαμηλού εύρους, ενισχύοντας τη διαλειτουργικότητα μεταξύ ιατρικών συσκευών και κεντρικών πληροφοριακών συστημάτων [25], [56], [61].

Η απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών σε αγροτικές ή απομονωμένες περιοχές, είναι μείζονος σημασίας. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές, εφαρμόζεται το **LoRaWAN**, παρέχοντας δυνατότητα μετάδοσης ιατρικών δεδομένων σε μεγάλη απόσταση, με ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση, ακόμα και χωρίς πρόσβαση σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας [58].

Το **NFC** χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση φαρμάκων, την παρακολούθηση της λήψης δόσεων και την ασφάλεια ασθενών μέσω συσκευών που επιβεβαιώνουν την ταυτότητα του ασθενούς πριν τη χορήγηση αγωγής, μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες ιατρικών λαθών [59].

Τέλος, αν και το **Wi-Fi** καταναλώνει περισσότερη ενέργεια, αξιοποιείται σε κρίσιμες εφαρμογές, όπου απαιτείται μετάδοση μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, όπως για τη συνεχή παρακολούθηση ζωτικών λειτουργιών σε Μονάδες Εντατικής Θεραπείας (ΜΕΘ), αλλά και για τη διαχείριση ηλεκτρονικών φακέλων ασθενών [60].

3.2.3 Στη γεωργία (Smart Agriculture, Agri-IoT)

Η έξυπνη γεωργία, αξιοποιεί το IoT για την παρακολούθηση καλλιεργειών, τη διαχείριση νερού, τη βέλτιστη χρήση λιπασμάτων και την παρακολούθηση ζώων. Τα πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου, καλούνται να λειτουργήσουν αξιόπιστα σε απομακρυσμένες, ή εκτεταμένες αγροτικές περιοχές, όπου η δικτυακή κάλυψη είναι ανεπαρκής και η παροχή ενέργειας περιορισμένη. Βασίζεται σε δίκτυα αισθητήρων και αυτόνομων συστημάτων, για την παρακολούθηση παραμέτρων όπως η υγρασία του εδάφους, η θερμοκρασία, η ποιότητα του αέρα και του νερού, καθώς και η υγεία των φυτών και των ζώων. Λόγω της ανάγκης για κάλυψη μεγάλων γεωγραφικών εκτάσεων και για χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, το **LoRaWAN** αποτελεί ένα από τα βασικά πρωτόκολλα στον αγροτικό τομέα. Παρέχει μεγάλη εμβέλεια και δυνατότητα λειτουργίας για χρόνια με χρήση μπαταρίας, υποστηρίζοντας εφαρμογές όπως η απομακρυσμένη μέτρηση υγρασίας εδάφους, η εντολή άρδευσης και η παρακολούθηση μελισσοσμηνών [62].

Σε εγκαταστάσεις θερμοκηπίων, όπου απαιτείται αξιόπιστη επικοινωνία μεταξύ αισθητήρων για την παρακολούθηση θερμοκρασίας, υγρασίας και φωτεινότητας, η δυνατότητα δημιουργίας πλέγματος επιτρέπει τη σταθερή λειτουργία του συστήματος, ακόμα και σε περιβάλλοντα με παρεμβολές, το οποίο κάνει το **Zigbee** ευρέως χρήσιμο, μιας και αξιοποιεί τοπολογία δικτύου πλέγματος. Στη συνέχεια το **6LoWPAN** επιτρέπει τη διασύνδεση αυτών των αισθητήρων στο διαδίκτυο, δίνοντας στους γεωργούς τη δυνατότητα να διαχειρίζονται δεδομένα μέσω cloud πλατφορμών [56], [63].

Το **BLE** εφαρμόζεται σε λύσεις εντοπισμού ζώων, ιδίως σε εκτροφές, με αισθητήρες που τοποθετούνται σε περιλαίμια, για την παρακολούθηση της υγείας και των κινήσεων. Καθώς οι αποστάσεις είναι σχετικά μικρές και η ενεργειακή απόδοση είναι κρίσιμη, το BLE είναι ιδανικό για τέτοιες εφαρμογές. Όπως το BLE, έτσι και το **NFC**, εφαρμόζεται σε μικρές αποστάσεις και

χρησιμοποιείται για τον έλεγχο ταυτότητας και την ιχνηλασιμότητα γεωργικών προϊόντων, όπως και για τη σάρωση γεωργικού εξοπλισμού σε σημεία ελέγχου και αποθήκευσης [58], [59].

Το **Wi-Fi** ενδέχεται να χρησιμοποιείται σε αγροκτήματα υψηλής τεχνολογίας, ή ερευνητικά θερμοκήπια, όπου απαιτείται μετάδοση δεδομένων σε υψηλό ρυθμό, όπως για παράδειγμα από κάμερες παρακολούθησης, μετρητές ανάπτυξης φυτών, ή σταθμούς μετεωρολογικών δεδομένων [60].

Η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου εξαρτάται από τις εκάστοτε ανάγκες: LoRaWAN υπερτερεί σε μεγάλες αποστάσεις και περιοχές χωρίς υποδομή, Zigbee και 6LoWPAN παρέχουν σταθερότητα σε τοπικό επίπεδο, ενώ BLE και NFC καλύπτουν κινητές ή προσωρινές εφαρμογές μικρής κλίμακας.

3.2.4 Στην εκπαίδευση (Smart Education, EdTech IoT)

Η ενσωμάτωση του IoT στην εκπαίδευση, έχει αναδείξει ένα νέο μοντέλο διδασκαλίας και διαχείρισης μέσω έξυπνων τάξεων, απομακρυσμένης παρακολούθησης και διαχείρισης περιβάλλοντος μάθησης. Η αξιοποίηση του Διαδικτύου των Πραγμάτων στην εκπαίδευση, επεκτείνεται στη διαχείριση χώρων και βελτίωση της εμπειρίας των μαθητών, μέσω τεχνολογικά εμπλουτισμένων περιβαλλόντων. Επομένως, τα πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην υποδομή των IoT εφαρμογών σε εκπαιδευτικά ιδρύματα.

Το **BLE** χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπως το localization και το asset tracking, σε πανεπιστήμια και σχολικές εγκαταστάσεις. Μικροί BLE φάροι (beacons) επιτρέπουν την αναγνώριση παρουσιών φοιτητών, την ενεργοποίηση διαδραστικών περιεχομένων κοντά στον μαθητή και την πλοήγηση σε μεγάλες πανεπιστημιούπολεις [58].

Πρωτόκολλα όπως το **6LoWPAN** και **Zigbee**, ενσωματώνονται σε συστήματα αισθητήρων που παρακολουθούν την ατμόσφαιρα, τη θερμοκρασία, το CO₂ και τον θόρυβο σε αίθουσες διδασκαλίας. Έπειτα, στέλνουν τα δεδομένα σε έξυπνες εφαρμογές διαχείρισης σχολικών εγκαταστάσεων, δημιουργώντας, περιβαλλοντικά, φιλικούς χώρους μάθησης. Επιπλέον, το **Zigbee** αξιοποιείται και σε συστήματα διαχείρισης φωτισμού, θέρμανσης και εξαερισμού (HVAC) σε έξυπνες τάξεις και βιβλιοθήκες, επιτρέποντας την εξοικονόμηση ενέργειας [56], [63].

Το **Wi-Fi** παραμένει βασικό πρωτόκολλο μετάδοσης δεδομένων σε περιβάλλοντα υψηλής χωρητικότητας, όπως αίθουσες με διαδραστικούς πίνακες, υπολογιστές και αισθητήρες παρακολούθησης ποιότητας αέρα. Σε συνδυασμό με τεχνολογίες όπως AR/VR (Augmented Reality, Virtual Reality) και συσκευές IoT, επιτρέπει την πραγματοποίηση συνεργατικών δραστηριοτήτων και πειραμάτων σε πραγματικό χρόνο [60].

Το **NFC** χρησιμοποιείται για την αναγνώριση μαθητών/φοιτητών, για τη διαχείριση εισόδου σε αίθουσες και εργαστήρια, καθώς και για εύκολη και ασφαλή πρόσβαση σε προσωποποιημένες υπηρεσίες, όπως βιβλιοθήκες και αυτόματα μηχανήματα [59].

Το **LoRaWAN** δεν χρησιμοποιείται εκτενώς σε εσωτερικούς χώρους, μπορεί όμως να φανεί χρήσιμο στη διασύνδεση εξωτερικών αισθητήρων σε πανεπιστημιούπολεις μεγάλων διαστάσεων, για τη μέτρηση παραμέτρων περιβάλλοντος ή την παρακολούθηση συσκευών ασφαλείας (π.χ. σειсмоγράφων, ανιχνευτών πλημμύρας) [62].

Η επιλογή πρωτοκόλλου εξαρτάται από τις τεχνικές απαιτήσεις της εκπαιδευτικής υποδομής. Τα πρωτόκολλα BLE και NFC, είναι κατάλληλα για εξατομικευμένες εφαρμογές με φυσική αλληλεπίδραση, τα Zigbee και 6LoWPAN για υποδομές αισθητήρων, ενώ το Wi-Fi καλύπτει την ανάγκη για υψηλής ταχύτητας επικοινωνία και πολυμέσα.

3.2.5 Στα logistics (Εξυπνη Εφοδιαστική Αλυσίδα)

Ο τομέας των Logistics και της εφοδιαστικής αλυσίδας, αξιοποιούν ευρύ φάσμα τεχνολογιών IoT για την παρακολούθηση αποθεμάτων, την ιχνηλάτηση φορτίων, τη διαχείριση αποθηκών και την αποδοτικότερη εκτέλεση μεταφορών. Τα πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου διασφαλίζουν αξιόπιστη, αποδοτική και ενεργειακά φιλική επικοινωνία ανάμεσα σε αισθητήρες, συσκευές και κέντρα δεδομένων.

Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας του **BLE**, το καθιστά ιδανικό για μακροχρόνια λειτουργία, ενώ εφαρμόζεται σε ετικέτες τοποθετημένες σε προϊόντα, ή παλέτες, επιτρέποντας την ακριβή παρακολούθηση της θέσης και της κατάστασής τους εντός αποθηκών ή οχημάτων μεταφοράς. Στην ίδια φιλοσοφία, το **NFC** είναι κατάλληλο για διαδικασίες ταυτοποίησης προϊόντων και εργαζομένων, απογραφής εμπορευμάτων και ασφάλειας πρόσβασης σε αποθήκες. Ετικέτες NFC επιτρέπουν τη γρήγορη ανάγνωση πληροφοριών με κινητές συσκευές, χωρίς ανάγκη εξωτερικής τροφοδοσίας. Οι τεχνολογίες BLE και NFC διαπρέπουν, όταν εφαρμόζονται σε συνθήκες εσωτερικών χώρων. [58], [59].

Το **6LoWPAN**, εφαρμόζεται σε μεγάλης κλίμακας αποθηκευτικούς χώρους για τη δικτύωση χαμηλής κατανάλωσης αισθητήρων που παρακολουθούν συνθήκες αποθήκευσης (π.χ. φαρμακευτικά προϊόντα ή τρόφιμα) Οι συσκευές αυτές επικοινωνούν απευθείας μέσω IPv6 με πλατφόρμες logistics. Στη συνέχεια, το **Zigbee** είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην αυτοματοποίηση αποθηκών και logistics hubs, για εφαρμογές όπως η παρακολούθηση θερμοκρασίας και υγρασίας, καθώς και η διαχείριση φωτισμού και μηχανημάτων μεταφοράς [56], [61], [63].

Σε εσωτερικά δίκτυα logistics για την αποστολή μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων από συσκευές όπως scanners, tablets και συστημάτων παρακολούθησης οχημάτων, αξιοποιούνται συχνά cloud πλατφόρμες για την άμεση επικοινωνία με τα πληροφοριακά συστήματα. Σε τέτοιες εφαρμογές είναι που χρησιμοποιείται κυρίως το **Wi-Fi**, μιας και παρέχει υψηλό εύρος ζώνης και είναι κατάλληλο για εφαρμογές όπου υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις σε ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. [60].

Το **LoRaWAN** διακρίνεται στην εφαρμογή του σε εξωτερικούς χώρους για τη μεγάλη εμβέλεια και τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας το ιδανικό για την παρακολούθηση φορτίων σε μεγάλα γεωγραφικά εύρη (π.χ. διεθνείς μεταφορές, container tracking), καθώς και για αισθητήρες σε εξωτερικούς χώρους λιμένων ή αποθηκών [62].

Η ενσωμάτωση αυτών των πρωτοκόλλων επιτρέπει την επίτευξη real-time visibility, predictive analytics και δυναμικής αναδιάταξης των πόρων, βελτιώνοντας σημαντικά την αποδοτικότητα και τη διαφάνεια της εφοδιαστικής αλυσίδας.

3.2.6 Σε Smart Home

Οι έξυπνες κατοικίες ενσωματώνουν αισθητήρες, ενεργοποιητές και συσκευές ελεγχόμενες μέσω IoT για να προσφέρουν άνεση, ασφάλεια, εξοικονόμηση ενέργειας και αυτοματισμό. Τα πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου αποτελούν τον πυρήνα της επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών, επιτρέποντας την απρόσκοπτη και αποδοτική λειτουργία του οικιακού περιβάλλοντος.

Κυρίαρχο πρωτόκολλο στον χώρο των smart homes, είναι το **Zigbee**. Λόγω της σταθερής λειτουργίας του σε mesh topologies. Χρησιμοποιείται σε αισθητήρες πόρτας/παραθύρου, ανιχνευτές κίνησης, φωτιστικά, πρίζες και θερμοστάτες. Πολλές εμπορικές πλατφόρμες όπως Philips Hue και Samsung SmartThings βασίζονται στο Zigbee για την λειτουργία τους. Επιπρόσθετα, το **Wi-Fi** αποτελεί το βασικό μέσο σύνδεσης για κάμερες, φωνητικούς βοηθούς, έξυπνες τηλεοράσεις και routers. Παρότι

απαιτεί περισσότερη ενέργεια, παρέχει υψηλό εύρος ζώνης για εφαρμογές με αυξημένες απαιτήσεις δεδομένων (π.χ. video streaming, cloud control) [60], [63].

Μέσω του **6LoWPAN**, γίνεται εφικτή η δημιουργία ελαφρών, IPv6-βασισμένων οικιακών δικτύων IoT, κατάλληλων για αισθητήρες φωτός, θερμοκρασίας και ποιότητας αέρα, ενώ παράλληλα διευκολύνεται τη διασύνδεση με το ευρύτερο διαδίκτυο. [56], [61].

Το **BLE** αποτελεί βασικό παράγοντα για την επικοινωνία με φορητές συσκευές, έξυπνες κλειδαριές, αισθητήρες παρουσίας, φωτισμό και θερμοστάτες. Η χαμηλή ενεργειακή απαίτηση και η εγγενής υποστήριξη από smartphones καθιστούν το BLE ιδανικό για τον έλεγχο έξυπνων οικιακών συσκευών. Παράλληλα, εφαρμογές στην ασφάλεια και ελέγχου πρόσβασης, κάνουν το **NFC** εξαιρετικά χρήσιμο. Εφαρμόζεται για την ενεργοποίηση έξυπνων κλειδαριών ή τη σύνδεση συσκευών μέσω απλής επαφής. Παράλληλα, βοηθάει στη γρήγορη ρύθμιση και pairing οικιακών συσκευών [58], [59].

Αν και σπανιότερο σε εσωτερικά περιβάλλοντα, το **LoRaWAN** εφαρμόζεται σε απομονωμένες ή μεγάλες κατοικίες (π.χ. αγροικίες), όπου απαιτείται παρακολούθηση μέσω μεγάλων αποστάσεων, π.χ. για ανίχνευση εισβολής ή αισθητήρες δεξαμενών [62].

Η διαλειτουργικότητα μεταξύ αυτών των πρωτοκόλλων, συχνά μέσω ενός home gateway ή controller, επιτρέπει την πλήρη ενοποίηση της οικιακής εμπειρίας με δυνατότητες απομακρυσμένου ελέγχου, αυτοματοποίησης και έξυπνης προσαρμογής των συνθηκών διαβίωσης.

3.2.7 Σε Smart Cities

Οι έξυπνες πόλεις ενσωματώνουν τεχνολογίες του IoT σε πλήθος αστικών υποδομών, με στόχο τη βελτιστοποίηση των υπηρεσιών, την αύξηση της βιωσιμότητας και την ενίσχυση της ποιότητας ζωής των πολιτών. Τα πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου αποτελούν τον συνδετικό κρίκο για τη διασύνδεση αισθητήρων, ενεργοποιητών και κεντρικών συστημάτων. Παίζουν κρίσιμο ρόλο στην υποστήριξη υποδομών που στοχεύουν στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών, της βιωσιμότητας και της αποδοτικότητας υπηρεσιών.

Το **LoRa/LoRaWAN** είναι ένα από τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιείται εκτενώς για τη σύνδεση απομακρυσμένων αισθητήρων και αποτελεί βασική τεχνολογία για πλήθος εφαρμογών έξυπνης πόλης, λόγω της μεγάλης εμβέλειας, της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και του χαμηλού κόστους υποδομής. Χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της ποιότητας αέρα, της στάθμης απορριμμάτων σε κάδους, την καταγραφή καιρικών δεδομένων και τη διαχείριση στάθμευσης [57].

Εφαρμογές όπως έξυπνος φωτισμός οδών, εποπτεία υδρομετρητών και παρακολούθηση της δομικής υγείας γεφυρών και κτιρίων αξιοποιούν το πρωτόκολλο **NB-IoT**, καθώς προσφέρει ευρεία κάλυψη και χαμηλό κόστος εγκατάστασης μέσω των υπαρχόντων κυψελοειδών δικτύων [64].

Όπως και στις προηγούμενες εφαρμογές που αξιοποιούν **6LoWPAN**, έτσι και στις έξυπνες πόλεις επιτρέπει την υλοποίηση κατανεμημένων δικτύων αισθητήρων, πλήρως εναρμονισμένων με το πρωτόκολλο IPv6, για εφαρμογές όπως η μέτρηση περιβαλλοντικών μεταβλητών, η ελεγχόμενη κυκλοφορία και η ενεργειακή εποπτεία δημόσιων κτιρίων [66].

Το **Zigbee** χρησιμοποιείται για τοπικά δίκτυα φωτισμού, έλεγχο σηματοδοτών και συστημάτων ειδοποίησης σε δημόσιους χώρους. Η αρχιτεκτονική mesh που υποστηρίζει επιτρέπει την αξιοπιστία της επικοινωνίας σε σύνθετα αστικά περιβάλλοντα [67].

Για ποιο τοπικές εφαρμογές, το **BLE** αποτελεί αξιόπιστη λύση μιας και προσφέρει ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο και επικοινωνία με smartphones πολιτών για προσωποποιημένες υπηρεσίες σε συστήματα πλοήγησης, σε δημόσια κτίρια (π.χ. μουσεία, σταθμοί), σε έξυπνες στάσεις λεωφορείων και σε λύσεις τύπου beacon, για την παροχή προσωποποιημένων πληροφοριών σε τουρίστες ή επισκέπτες μουσείων και δημοσίων χώρων [65], [68].

Τέλος, το **Wireless M-Bus** συναντάται κυρίως σε εφαρμογές τηλεμετρίας κατανάλωσης ύδατος και ενέργειας, ιδίως σε πολυκατοικίες ή δημόσια κτήρια που ενσωματώνονται σε αστικές πλατφόρμες διαχείρισης πόρων [25].

Τα ανωτέρω πρωτόκολλα συνδυάζονται συχνά με πλατφόρμες cloud και edge υπολογιστικής, δημιουργώντας ένα πολύπλοκο οικοσύστημα επικοινωνίας, ελέγχου και επεξεργασίας δεδομένων που μεταμορφώνει την παραδοσιακή πόλη σε ένα διασυνδεδεμένο, αποδοτικό και ευφυές περιβάλλον.

3.2.8 Στο Smart Grid

Τα Smart Grids (έξυπνα δίκτυα ενέργειας) απαιτούν διαρκή επικοινωνία μεταξύ πλήθους αισθητήρων, μετρητών, διακοπών και υποσταθμών. Τα πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου παίζουν κρίσιμο ρόλο στην αξιόπιστη, ασφαλή και χρονικά αποδοτική μετάδοση δεδομένων, υποστηρίζοντας την αυτοματοποίηση, την πρόβλεψη κατανάλωσης και την ευφυή διανομή της ενέργειας.

Η διάδοση του **Zigbee** στα AMI (Advanced Metering Infrastructure) συστήματα και σε οικιακές συσκευές με δυνατότητα συμμετοχής στη διαχείριση φορτίου (demand response), επιτρέπουν τον έλεγχο κατανάλωσης σε πραγματικό χρόνο, ενώ την ίδια στιγμή το **6LoWPAN** επιτρέπει τη χρήση IPv6 σε περιορισμένους κόμβους και ενσωματώνεται σε αισθητήρες δικτύου που παρακολουθούν τάση, ρεύμα ή θερμοκρασία σε υποσταθμούς και μετασχηματιστές, υποστηρίζοντας την ευφυή εποπτεία και συντήρηση [66], [67].

Το γεγονός ότι το **NB-IoT** βασίζεται σε υφιστάμενα κυψελοειδή δίκτυα, επιτρέπει ευρεία κάλυψη και μειωμένο κόστος ανάπτυξης για επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας. Αξιοποιείται ευρέως για επικοινωνία με έξυπνους μετρητές και αισθητήρες σε απομακρυσμένα ή υπόγεια σημεία [64].

Το **Wireless M-Bus** αξιοποιείται για συλλογή δεδομένων σε πολυκατοικίες και αστικά περιβάλλοντα, ειδικά για μετρητές θερμότητας και κατανάλωσης νερού, που συχνά σχετίζονται με ενεργειακή διαχείριση. Το **LoRa/LoRaWAN** από την άλλη, βρίσκει εφαρμογή στην εποπτεία απομακρυσμένων περιοχών του δικτύου μεταφοράς και διανομής ενέργειας, επιτρέποντας την εγκατάσταση αισθητήρων σε υποσταθμούς, πυλώνες ή καλώδια, ακόμα και σε τοποθεσίες χωρίς πρόσβαση σε ισχύ [25], [57].

Παρότι δεν είναι κατάλληλο για συνεχή παρακολούθηση, το **BLE** διευκολύνει τον τεχνικό έλεγχο και χρησιμοποιείται για προσωρινές συνδέσεις συντήρησης ή τοπικής ανάγνωσης δεδομένων από συσκευές που βρίσκονται σε δύσβατες ή επικίνδυνες θέσεις [65].

3.2.9 Στο Smart Metering

Το Smart Metering αφορά την αυτόματη καταγραφή και μετάδοση δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας, φυσικού αερίου και ύδατος, με στόχο τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης πόρων, τη δυναμική τιμολόγηση και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Τα πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου συμβάλουν καθοριστικά στη συλλογή, τοπική επεξεργασία και αποστολή των δεδομένων από τους μετρητές σε κεντρικά πληροφοριακά συστήματα (Τηλεμετρία).

Η βασική τεχνολογία για απομακρυσμένη συλλογή δεδομένων από μετρητές, είναι το **LoRa/LoRaWAN** λόγω της μεγάλης εμβέλειας και της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, εφαρμόζεται

ευρέως σε smart metering υποδομές ύδρευσης και φυσικού αερίου σε αγροτικές ή ημιαστικές περιοχές. Επιτρέπει την αποστολή δεδομένων από χιλιάδες μετρητές σε μία μόνο πύλη (gateway), μειώνοντας το κόστος εγκατάστασης [57], [62].

Εξίσου βασική τεχνολογία, είναι το **NB-IoT**, μιας και αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες κυψελοειδείς τεχνολογίες για έξυπνους μετρητές, ειδικά σε μεγάλης κλίμακας υποδομές ύδρευσης, αερίου και ηλεκτρισμού. Υποστηρίζει τη μετάδοση μικρών πακέτων δεδομένων από μετρητές που λειτουργούν με μπαταρία για πάνω από 10 χρόνια, χάρη στην κάλυψη μεγάλης εμβέλειας (LPWAN), τη δυνατότητα διεύθυνσης σε υπόγειες ή απομακρυσμένες τοποθεσίες και τη χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση. Επιπλέον, αξιοποιεί υπάρχουσες υποδομές δικτύων κινητής τηλεφωνίας, μειώνοντας το κόστος ανάπτυξης [64].

Για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων από μετρητές ύδρευσης και θερμότητας, χρησιμοποιείται ευρέως και το **Wireless M-Bus**, ειδικά σε χώρες της Ευρώπης. Λειτουργεί σε χαμηλές συχνότητες (868 MHz) και υποστηρίζει πολλαπλές λειτουργίες (S, T, C modes), παρέχοντας αξιοπιστία σε πυκνοκατοικημένες περιοχές. Περιορισμένη εμβέλεια έχει και το πρωτόκολλο **BLE**, αλλά παρά το γεγονός αυτό, έχει αξιοποιηθεί κυρίως σε φορητές συσκευές ανάγνωσης μετρητών (walk-by ή drive-by) όπου απαιτείται προσωρινή σύνδεση σε μικρή απόσταση, προσφέροντας παράλληλα χαμηλή κατανάλωση ισχύος και ευκολία ενσωμάτωσης [25], [65].

Το **Zigbee** χρησιμοποιείται ευρέως σε έξυπνους μετρητές ενέργειας και φυσικού αερίου σε οικιακά περιβάλλοντα. Η υποστήριξη του πρωτοκόλλου Zigbee Smart Energy επιτρέπει ασφαλή και τυποποιημένη επικοινωνία μεταξύ μετρητών και συσκευών πελατών, ενισχύοντας την ενεργειακή διαχείριση. Συμπληρωματικά, το **6LoWPAN** αξιοποιείται σε δίκτυα μετρητών που απαιτούν ενσωμάτωση με IPv6 δίκτυα, διευκολύνοντας τη διασύνδεση με το Διαδίκτυο και επιτρέποντας διαλειτουργικότητα με άλλες IP συσκευές [66], [67].

3.2.10 Ανασκόπηση εφαρμογών

Η επιλογή και υιοθέτηση κατάλληλων πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχή υλοποίηση λύσεων IoT σε κάθετο επίπεδο. Κάθε πρωτόκολλο παρουσιάζει μοναδικά χαρακτηριστικά όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, την εμβέλεια, τη συχνότητα λειτουργίας, την πολυπλοκότητα και τη δυνατότητα ενσωμάτωσης σε ευρύτερα δίκτυα. Στον τομέα της βιομηχανίας, η αξιοπιστία και ο συγχρονισμός είναι κρίσιμα στοιχεία, ενώ στην υγεία, κυριαρχεί η ανάγκη για ασφάλεια και χαμηλή καθυστέρηση. Στη γεωργία και στα logistics, κυρίαρχο ρόλο παίζουν η εμβέλεια και η αυτονομία, ενώ στις έξυπνες κατοικίες και πόλεις, απαιτείται συνδυασμός ευελιξίας, επεκτασιμότητας και διαλειτουργικότητας.

Η ενσωμάτωση πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου IoT όπως τα LoRa/LoRaWAN, NB-IoT, Zigbee, BLE, 6LoWPAN και Wireless M-Bus, σε εξειδικευμένα συστήματα, επιτρέπει την υλοποίηση ευφυών υπηρεσιών, με στόχο την αύξηση της αποδοτικότητας, της ασφάλειας και της βιωσιμότητας. Η τεχνολογική εξέλιξη και η συνεχής ωρίμανση του οικοσυστήματος IoT ενισχύουν ακόμη περισσότερο τον ρόλο αυτών των πρωτοκόλλων, καθιστώντας τα θεμέλιο της σύγχρονης ψηφιακής μετάβασης σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας.

3.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου στο IoT

Στο οικοσύστημα του Διαδικτύου των Πραγμάτων, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας χαμηλού επιπέδου διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο, καθώς διαχειρίζονται την επικοινωνία μεταξύ των φυσικών συσκευών, αισθητήρων και πύλων (gateways) διασφαλίζοντας τη συνδεσιμότητα στο υλικό επίπεδο. Η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου βασίζεται σε τεχνικά και λειτουργικά κριτήρια όπως η εμβέλεια,

το εύρος ζώνης (bandwidth), η κατανάλωση ενέργειας, η φασματική αποδοτικότητα, η ασφάλεια επικοινωνίας, η διείσδυση σήματος καθώς και η υποστήριξη συγκεκριμένων τοπολογιών δικτύου. Παράγοντες όπως το φάσμα λειτουργίας (frequency band), ο ρυθμός και η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, αλλά και το μέγιστο μέγεθος πακέτου (payload), είναι καθοριστικής σημασίας για τον σχεδιασμό αποδοτικών και ενεργειακά βιώσιμων λύσεων στο IoT.

Στη συνέχεια, εξετάζονται αναλυτικά τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά εννέα ευρέως χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου στο IoT, με στόχο την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς τους σε διαφορετικά σενάρια εφαρμογής.

1. **LoRaWAN**
2. **Zigbee**
3. **Bluetooth Low Energy (BLE)**
4. **Narrowband IoT (NB-IoT)**
5. **Wi-Fi6**
6. **LoWPAN**
7. **RFID**
8. **NFC**
9. **Wireless M-Bus**

Για καθένα από τα παραπάνω πρωτόκολλα, παρουσιάζονται αναλυτικά οι παράμετροι ρυθμού και ταχύτητας μετάδοσης δεδομένων, εύρους ζώνης, μέγιστου payload, ασφάλειας επικοινωνίας, εμβέλειας και υποστηριζόμενων τοπολογιών.

Παρατίθεται επίσης, συγκεντρωτικός πίνακας τεχνικών χαρακτηριστικών, ο οποίος συγκεντρώνει και συνοψίζει τις βασικές παραμέτρους και αποτελεί εργαλείο σύγκρισης που θα αξιοποιηθεί στο επόμενο κεφάλαιο της μελέτης.

3.3.1 LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)

Το LoRaWAN αποτελεί ένα πρωτόκολλο επικοινωνίας που βασίζεται στην τεχνολογία LoRa και είναι σχεδιασμένο για δίκτυα ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (LPWAN). Χρησιμοποιεί μια αρχιτεκτονική τύπου «αστέρι των αστεριών» (star-of-stars), στην οποία οι κόμβοι (αισθητήρες ή συσκευές τελικού χρήστη) επικοινωνούν απευθείας με πύλες (gateways), οι οποίες με τη σειρά τους συνδέονται με έναν δικτυακό server. Το πρωτόκολλο λειτουργεί σε μη αδειοδοτημένες ζώνες συχνοτήτων του φάσματος ISM (Industry Science Medicine), με πιο χαρακτηριστικές τις 868 MHz για την Ευρώπη, τις 915 MHz για τις Ηνωμένες Πολιτείες και τις 433 MHz για ορισμένες περιοχές της Ασίας, με το εύρος ζώνης (Bandwidth) να βρίσκεται συνήθως μεταξύ 125 kHz, 250 kHz και 500 kHz, ανάλογα με τη διαμόρφωση και την επιθυμητή απόδοση. Η ταχύτητα μετάδοσης κυμαίνεται μεταξύ 0.3 kbps και 50 kbps, ανάλογα με τον Spreading Factor (SF) που χρησιμοποιείται. Οι μεγαλύτεροι SF προσφέρουν καλύτερη εμβέλεια, αλλά χαμηλότερη ταχύτητα, ενώ το μέγιστο μέγεθος payload εξαρτάται από τη χώρα και τις ρυθμιστικές αρχές. Ξεκινάει από 51 bytes με SF12, αλλά μπορεί να φτάσει θεωρητικά έως 242 bytes για SF7.

Η ευελιξία αυτή το καθιστά κατάλληλο για παγκόσμια χρήση χωρίς σημαντικούς ρυθμιστικούς περιορισμούς. Όσον αφορά τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, το LoRaWAN υποστηρίζει ταχύτητες που κυμαίνονται από 0,3 kbps έως 50 kbps. Ο ρυθμός καθορίζεται δυναμικά μέσω του μηχανισμού Adaptive Data Rate (ADR), ο οποίος βελτιστοποιεί την κατανάλωση ενέργειας και την αξιοπιστία της σύνδεσης. Η εμβέλεια επικοινωνίας είναι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας: σε αστικά

περιβάλλοντα μπορεί να φτάσει τα 2–5 χιλιόμετρα, ενώ σε αγροτικές ή πεδινές περιοχές ενδέχεται να ξεπεράσει τα 15–20 χιλιόμετρα.

Η ενεργειακή αποδοτικότητα είναι εξαιρετική. Οι συσκευές που υποστηρίζουν LoRaWAN μπορούν να λειτουργούν για αρκετά χρόνια (συνήθως 5 έως 10) με μία απλή μπαταρία, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για εγκατάσταση σε δυσπρόσιτα σημεία ή σε εφαρμογές όπου η συντήρηση είναι δύσκολη ή κοστοβόρα. Το πρωτόκολλο υιοθετεί μηχανισμούς ασφαλείας πολλαπλών επιπέδων. Η επικοινωνία προστατεύεται με αλγορίθμους κρυπτογράφησης AES-128 τόσο σε επίπεδο δικτύου όσο και σε επίπεδο εφαρμογής, προσφέροντας αυξημένη προστασία έναντι κακόβουλων παρεμβάσεων ή υποκλοπών. Επίσης, λόγω της λειτουργίας σε χαμηλές συχνότητες, το σήμα έχει υψηλή διεισδυτικότητα και διατηρεί καλή ποιότητα ακόμη και σε κλειστούς χώρους και υποδομές με εμπόδια.

Παρά τα πλεονεκτήματά του, η περιορισμένη χωρητικότητα μεταφοράς δεδομένων το καθιστά ακατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλους όγκους ή συνεχή ροή πληροφορίας. Επίσης, η δυνατότητα για αμφίδρομη επικοινωνία είναι περιορισμένη, καθώς δίνει προτεραιότητα στην αποστολή δεδομένων από τους κόμβους προς το δίκτυο (uplink), με τις απαντήσεις από το δίκτυο να είναι ασύγχρονες και περιορισμένες. Συνολικά, το LoRaWAN αποτελεί μια εξαιρετική λύση για εφαρμογές που απαιτούν μακρινή ασύρματη επικοινωνία με χαμηλό ενεργειακό αποτύπωμα, όπως έξυπνη γεωργία, smart metering και δίκτυα αισθητήρων σε ευρεία γεωγραφική κάλυψη [69], [70], [71], [72].

3.3.2 Zigbee

Το Zigbee είναι ένα πρωτόκολλο χαμηλής ισχύος που βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.4 και προορίζεται κυρίως για ασύρματα προσωπικά δίκτυα WPANs (Wireless Personal Area Networks). Λειτουργεί στις συχνότητες ISM των 2.4 GHz παγκοσμίως με 16 κανάλια εύρους 2 MHz το καθένα, ενώ σε ορισμένες περιοχές υποστηρίζονται και οι μπάντες 868 MHz και 915 MHz, με bandwidth 600 kHz και 2 MHz αντίστοιχα. Όντας βασισμένο στο πρότυπο IEEE 802.15.4, η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων εξαρτάται από το φυσικό επίπεδο (PHY) και είναι 250 kbps στο PHY των 2.4 GHz. Το μέγιστο μέγεθος payload σε ένα πακέτο Zigbee μπορεί να φτάσει περίπου τα 104 bytes χρήσιμων δεδομένων, αν και το συνολικό MAC frame size μπορεί να φτάσει έως 127 bytes.

Η βασική του αρχιτεκτονική περιλαμβάνει τρεις τύπους κόμβων: τον συντονιστή (coordinator), τους δρομολογητές (routers) και τις τελικές συσκευές (end devices), επιτρέποντας τη δημιουργία τοπολογιών τύπου αστέρα (star), δέντρου (tree) ή πλέγματος (mesh). Η λειτουργία σε τοπολογία mesh είναι από τα κύρια πλεονεκτήματα του Zigbee, καθώς επιτρέπει την αναμετάδοση δεδομένων μέσα από πολλούς κόμβους, αυξάνοντας την εμβέλεια του δικτύου και παρέχοντας πλεονάζουσες διαδρομές σε περίπτωση αποτυχίας ενός κόμβου. Η κατανάλωση ενέργειας είναι πολύ χαμηλή, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση του σε συσκευές με περιορισμένες ενεργειακές απαιτήσεις, όπως αισθητήρες και ενεργοποιητές, χωρίς συχνές αλλαγές μπαταρίας. Η απόδοση όσον αφορά τον ρυθμό μετάδοσης φτάνει τα 250 kbps, επαρκής για την αποστολή μικρών πακέτων δεδομένων, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αυτοματισμού και παρακολούθησης.

Το Zigbee εξασφαλίζει εμπιστευτικότητα και ακεραιότητα στις μεταδόσεις μέσω κρυπτογράφησης AES 128-bit, η οποία συνδυάζεται με μηχανισμούς πιστοποίησης κόμβων και διαχείρισης κλειδιών. Η τυπική εμβέλεια κυμαίνεται μεταξύ 10 και 100 μέτρων, ανάλογα με το περιβάλλον λειτουργίας, όμως μπορεί να επεκταθεί σημαντικά με την αξιοποίηση της mesh δομής. Το Zigbee υποστηρίζει επίσης ταχεία αφύπνιση (fast wake-up) και λειτουργία ύπνου, καθιστώντας το κατάλληλο για περιβάλλοντα με sporadic data traffic.

Από πλευράς εφαρμογών, το Zigbee χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα Smart Home, έξυπνου φωτισμού, παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων, βιομηχανικό αυτοματισμό, συστήματα HVAC, ακόμα και σε συστήματα ασφαλείας, χάρη στην αξιοπιστία, την επεκτασιμότητα και τη χαμηλή ενεργειακή απαίτηση που προσφέρει [73], [74], [75], [76].

3.3.3 Bluetooth Low Energy (BLE)

Το Bluetooth Low Energy (BLE) είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, σχεδιασμένο κυρίως για εφαρμογές όπου απαιτείται περιστασιακή μετάδοση μικρών ποσοτήτων δεδομένων. Εισήχθη στην έκδοση Bluetooth 4.0 και αποτελεί θεμελιώδη τεχνολογία για IoT συσκευές όπως wearables, αισθητήρες και συσκευές υγειονομικής φροντίδας.

Λειτουργεί στο φάσμα ISM των 2.4 GHz και χρησιμοποιεί 40 κανάλια (3 κανάλια διαφήμισης και 37 δεδομένων), εφαρμόζοντας Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) για ανθεκτικότητα σε παρεμβολές. Το bandwidth του συστήματος ανά κανάλι είναι 1 MHz, το οποίο επιτρέπει μεταφορά δεδομένων με ταχύτητα έως 1 Mbps, ενώ στις νεότερες εκδόσεις (BLE 5.0 και άνω) υποστηρίζεται και ταχύτητα 2 Mbps μέσω του PHY "LE 2M". Από άποψη δομής πακέτων, το BLE μπορεί να μεταδώσει δεδομένα με μέγιστο payload έως 251 bytes, δίχως να υπολογίζεται το πρωτόκολλο επικεφαλίδας (header).

Η σύνδεση πραγματοποιείται μέσω ενός μοντέλου master-slave (σήμερα central-peripheral) και υποστηρίζει τόσο point-to-point και broadcast επικοινωνία όσο και mesh δίκτυα. Η αρχιτεκτονική του BLE βασίζεται στο Generic Attribute Profile (GATT), το οποίο δομεί την επικοινωνία σε μορφή χαρακτηριστικών (characteristics) και υπηρεσιών (services). Αυτό επιτρέπει διαλειτουργικότητα μεταξύ συσκευών και διευκολύνει την υλοποίηση διαφόρων προτύπων εφαρμογών. Η ασφάλεια στο BLE διασφαλίζεται μέσω μηχανισμών όπως AES-128 encryption, ενώ στις εκδόσεις 4.2 και νεότερες υιοθετείται η χρήση του Secure Connections pairing με Elliptic Curve Diffie-Hellman (ECDH) για ανταλλαγή κλειδιών, εξασφαλίζοντας ισχυρή ταυτοποίηση και προστασία των επικοινωνιών

Σε σύγκριση με το κλασικό Bluetooth, το BLE μειώνει δραστικά την ενεργειακή κατανάλωση μέσω γρήγορης συνόδου (low duty cycle) και sleep modes, καθιστώντας το ιδανικό για συσκευές που λειτουργούν με μπαταρία για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Η εμβέλεια κυμαίνεται από 10 έως 100 μέτρα, ανάλογα με την ισχύ μετάδοσης και το περιβάλλον, αν και στις τελευταίες εκδόσεις (BLE 5.0+) μπορεί να φτάσει ακόμη και τα 200 μέτρα σε long-range mode, με χαμηλότερο ρυθμό μετάδοσης.

Η υιοθέτηση του BLE είναι ευρεία σε τομείς όπως η υγεία, το smart home, η βιομηχανία 4.0 και η εφοδιαστική αλυσίδα [77], [78], [79].

3.3.4 NB-IoT (Narrowband Internet of Things)

Το NB-IoT είναι ένα κυψελοειδές πρωτόκολλο χαμηλής ισχύος και μεγάλης εμβέλειας (LPWAN), σχεδιασμένο για να υποστηρίζει τεράστιο αριθμό απλών, χαμηλής κατανάλωσης συσκευών στο διαδίκτυο των πραγμάτων. Αναπτύχθηκε από την 3GPP και ενσωματώθηκε στις προδιαγραφές τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας και δικτύωσης κινητών συσκευών LTE Release 13 και μεταγενέστερες. Χρησιμοποιεί στενό εύρος ζώνης 180 kHz και μπορεί να λειτουργήσει σε τρεις τρόπους φάσματος:

- **In-band** (μέσα στο LTE φάσμα)
- **Guard-band** (σε αχρησιμοποίητο μέρος του LTE φάσματος)

- **Standalone** (σε φάσμα GSM)

Το μέγιστο payload ανά μήνυμα μπορεί να φτάσει έως και 1600 bytes, αλλά η αποτελεσματική χωρητικότητα εξαρτάται από το προφίλ επικοινωνίας (uplink/downlink, repetitions, QoS). Το NB-IoT έχει βελτιστοποιηθεί για μη συχνή αποστολή μικρών πακέτων δεδομένων και υποστηρίζει μονόδρομη ή αμφίδρομη επικοινωνία, αλλά με περιορισμένη καθυστέρηση, γεγονός που το καθιστά ακατάλληλο για εφαρμογές χαμηλού latency. Η τεχνολογία είναι προσανατολισμένη στην επικοινωνία uplink, με δυνατότητα υποστήριξης έως 50.000 συσκευών ανά κυψέλη. Χάρη στην εξαιρετικά αποδοτική διαχείριση ενέργειας, μία συσκευή NB-IoT μπορεί να λειτουργήσει για έως 10 χρόνια με μπαταρία, γεγονός που την καθιστά ιδανική για αισθητήρες απομακρυσμένης παρακολούθησης, μετρητές και εφαρμογές υποδομών

Το NB-IoT χρησιμοποιεί τεχνικές όπως Power Saving Mode (PSM) και Extended Discontinuous Reception (eDRX) για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, ενώ υποστηρίζει αξιόπιστη ασφάλεια μέσω LTE encryption mechanisms (EPS security, 3GPP confidentiality and integrity algorithms).

Η εμβέλειά του μπορεί να φτάσει έως 10–15 km σε αγροτικές περιοχές, ενώ η μέγιστη ταχύτητα μετάδοσης είναι 62.5 kbps downlink / 26 kbps uplink, επαρκής για τη διαβίβαση δεδομένων από αισθητήρες ή μετρητές. Είναι κατάλληλο για εφαρμογές όπως smart metering, έξυπνος φωτισμός, παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών και έξυπνες πόλεις, όπου απαιτείται αξιόπιστη και χαμηλού κόστους σύνδεση [80], [81]. [82].

3.3.5 Wi-Fi

Το Wi-Fi είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης τοπικής δικτύωσης (WLAN), βασισμένο στο πρότυπο IEEE 802.11, που χρησιμοποιείται ευρέως όχι μόνο σε καταναλωτικές συσκευές αλλά και σε εφαρμογές του IoT, κυρίως εκεί όπου απαιτείται υψηλός ρυθμός μετάδοσης δεδομένων και υπάρχει σταθερή πρόσβαση σε ενέργεια. Οι πιο διαδεδομένες παραλλαγές του Wi-Fi σε εφαρμογές IoT είναι οι 802.11n (Wi-Fi 4), 802.11ac (Wi-Fi 5), 802.11ax (Wi-Fi 6) και 802.11be (Wi-Fi 7)

Η τεχνολογία λειτουργεί σε δύο κύριες συχνότητες: 2.4 GHz και 5 GHz, με δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων που φτάνει τα 9.6 Gbps (Wi-Fi 6) και 46.1 Gbps (Wi-Fi 7) σε βέλτιστες συνθήκες. Ωστόσο, για IoT εφαρμογές προτιμώνται συχνά τα 2.4 GHz, λόγω της μεγαλύτερης εμβέλειας και καλύτερης διείσδυσης σε εμπόδια. Το βασικό πλεονέκτημα του Wi-Fi στο IoT είναι η υψηλή ταχύτητα και η δυνατότητα μετάδοσης μεγάλου όγκου δεδομένων. Ανάλογα με την έκδοση του πρωτοκόλλου, το Bandwidth ποικίλει από 20 MHz έως και 160 MHz (ή και 320 MHz σε Wi-Fi 7) καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις σε throughput, όπως κάμερες επιτήρησης, έξυπνα συστήματα ψυχαγωγίας και σύνθετους αισθητήρες. Το μέγιστο payload σε ένα πακέτο MAC μπορεί να φτάσει περίπου τα 7935 bytes, ωστόσο η αποτελεσματική μεταφορά δεδομένων εξαρτάται από το συνολικό overhead και τις ρυθμίσεις του δικτύου.

Η τοπολογία του Wi-Fi βασίζεται σε δομημένα δίκτυα τύπου σταθμός-πρόσβασης (infrastructure), όπου μια συσκευή (Access Point) λειτουργεί ως σημείο σύνδεσης για άλλες. Υποστηρίζεται επίσης ad hoc λειτουργία, στην οποία οι συσκευές επικοινωνούν άμεσα χωρίς access point, αλλά αυτή χρησιμοποιείται σπάνια σε IoT. Ωστόσο, το Wi-Fi παρουσιάζει υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με άλλα πρωτόκολλα LPWAN, και δεν είναι κατάλληλο για απομακρυσμένες ή αυτόνομες IoT συσκευές με περιορισμένη ισχύ.

Παρέχει ισχυρή ασφάλεια, καθώς υποστηρίζει πρωτόκολλα όπως WPA3, με μηχανισμούς κρυπτογράφησης AES, αυθεντικοποίησης και προστασίας από επιθέσεις MITM (Man-in-the-Middle).

Όσο για την εμβέλεια, κυμαίνεται από 30 έως 100 μέτρα για 2.4 GHz, με μικρότερη κάλυψη στα 5 GHz λόγω υψηλότερης απορρόφησης. Οι ταχύτητες μετάδοσης εξαρτώνται από το πρότυπο: π.χ., το Wi-Fi 4 (802.11n) φτάνει έως 600 Mbps, το Wi-Fi 5 (802.11ac) έως 1.3 Gbps, το Wi-Fi 6 (802.11ax) τα 9.6 Gbps, ενώ το Wi-Fi 7 (802.11be) φτάνει θεωρητικά τα 46.1 Gbps [83], [84], [85].

3.3.6 6LoWPAN (IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks)

Το 6LoWPAN είναι ένα πρωτόκολλο που επιτρέπει τη μετάδοση πακέτων IPv6 μέσω ασύρματων δικτύων χαμηλής κατανάλωσης που βασίζονται στο πρότυπο IEEE 802.15.4. Ουσιαστικά, αποτελεί ένα επίπεδο προσαρμογής (adaptation layer) που μεταφράζει και συμπιέζει πακέτα IPv6 ώστε να μπορούν να μεταδοθούν αποτελεσματικά μέσω περιορισμένων υποδομών. Η βασική του συνεισφορά στο IoT είναι ότι καθιστά δυνατή την απευθείας σύνδεση IoT συσκευών στο διαδίκτυο, υποστηρίζοντας αρχιτεκτονικές end-to-end IP επικοινωνίας, κάτι που απλοποιεί τη διαχείριση και την ασφάλεια του δικτύου. Λειτουργεί σε συχνότητες 2.4 GHz (όπως ορίζει το IEEE 802.15.4) αλλά και σε 868 MHz και 915 MHz σε ορισμένες περιφέρειες, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία σε επιλογές καναλιών και εμβέλειας.

Η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων φτάνει τα 250 kbps στη ζώνη των 2.4 GHz, ενώ η εμβέλεια κυμαίνεται μεταξύ 10 και 100 μέτρων, σε εσωτερικό ή αστικό περιβάλλον, ανάλογα με την ισχύ εκπομπής και τα εμπόδια. Το 6LoWPAN φέρει περιορισμούς ως προς το μέγεθος πλαισίου, που σημαίνει πως το διαθέσιμο payload για χρήση από τα ανώτερα επίπεδα είναι περίπου 81–102 bytes. Μέσω του 6LoWPAN υποστηρίζεται κατακερματισμός πακέτων (fragmentation), επιτρέποντας τη μετάδοση μεγαλύτερων IPv6 πακέτων που μπορούν να φτάσουν, θεωρητικά, τα 1280 bytes. Παρότι δεν υποστηρίζει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, είναι ιδανικό για αισθητήρες, ενεργοποιητές και άλλες απλές IoT συσκευές καθώς υποστηρίζει διάφορες τοπολογίες, μεταξύ των οποίων:

- **Star** (μέσω ενός δρομολογητή)
- **Mesh** (χρησιμοποιώντας multi-hop routing)
- **Tree** (με ιεραρχική δρομολόγηση)

Η κατανάλωση ενέργειας του 6LoWPAN είναι εξαιρετικά χαμηλή, καθώς προορίζεται για μπαταριοκίνητες συσκευές μακράς διάρκειας. Επιπλέον, χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με το πρωτόκολλο RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks), το οποίο βελτιστοποιεί την πολυπηγική δρομολόγηση (multipoint-to-point routing).

Τέλος, η ασφάλεια βασίζεται στα μηχανισμούς του IEEE 802.15.4 (π.χ. AES-128), αλλά μπορεί να ενσωματωθεί και σε μοντέλα IP ασφάλειας, όπως το IPsec, προσφέροντας επεκτάσιμες δυνατότητες κρυπτογράφησης και αυθεντικοποίησης [66] [86] [87].

3.3.7 RFID (Radio Frequency Identification)

Το RFID είναι τεχνολογία ασύρματης αναγνώρισης που χρησιμοποιεί ραδιοκύματα για την ανάγνωση και τη μεταφορά δεδομένων από ετικέτες (tags) σε συσκευές ανάγνωσης (readers), χωρίς να απαιτείται φυσική επαφή ή οπτική ευθυγράμμιση. Η βασική δομή ενός συστήματος RFID περιλαμβάνει έναν reader, ένα ή περισσότερα tags και, συνήθως, μια βάση δεδομένων για την επεξεργασία των πληροφοριών.

Τα RFID tags διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες και το μέγεθος των δεδομένων που μπορούν να αποθηκευτούν και να μεταδοθούν εξαρτάται από τον τύπο του tag:

- **Passive:** 64–512 bits ή λίγα KB (για EPC ή ID). Δεν έχουν δική τους πηγή ενέργειας· ενεργοποιούνται από το σήμα του reader.
- **Active:** έως και 128 KB. Το πρωτόκολλο EPCglobal Gen2 για UHF RFID επιτρέπει περιορισμένο payload (~128–512 bits), κατάλληλο για ταυτοποίηση, όχι για μαζική αποθήκευση. Διαθέτουν δική τους μπαταρία και μπορούν να μεταδίδουν σήμα σε μεγαλύτερες αποστάσεις.
- **Semi-passive:** Έχουν μπαταρία για την υποστήριξη του κυκλώματος, αλλά απαιτούν reader για τη μετάδοση.

Οι συχνότητες λειτουργίας διαφέρουν ανάλογα με την εφαρμογή και την περιοχή. Ως εκ τούτου, το bandwidth είναι περιορισμένο και εξαρτάται από τη περιοχή συχνότητας και το πρωτόκολλο. Χαρακτηριστικές τιμές:

- **LF (Low Frequency):** 125–134 kHz, μικρή εμβέλεια (έως 10 cm), για εφαρμογές όπως κλειδιά αυτοκινήτου.
- **HF (High Frequency):** 13.56 MHz, εμβέλεια έως 1 m, χρησιμοποιείται ευρέως σε κάρτες πρόσβασης και πληρωμές.
- **UHF (Ultra High Frequency):** 860–960 MHz, μεγαλύτερη εμβέλεια (έως 10 μέτρα για passive και πάνω από 100 μέτρα για active tags).
- **Microwave:** ~1 MHz, προσφέρει ταχύτερη μετάδοση, αλλά μικρότερη διείσδυση

Η κατανάλωση ενέργειας διαφέρει ριζικά ανάλογα με τον τύπο του tag: τα passive RFID tags έχουν πρακτικά μηδενική κατανάλωση (παθητικά), ενώ τα active tags απαιτούν συνεχή παροχή ενέργειας, γεγονός που περιορίζει τη διάρκεια ζωής τους (συνήθως έως 10 χρόνια).

Πρόκληση αποτελεί η ασφάλεια, ιδιαίτερα στα παθητικά tags, που συχνά στερούνται ενσωματωμένων μηχανισμών κρυπτογράφησης. Αν και υπάρχουν πρότυπα που υποστηρίζουν κρυπτογράφηση και αυθεντικοποίηση (π.χ. ISO/IEC 14443 για HF RFID), σε πολλές εμπορικές εφαρμογές εφαρμόζονται εξωτερικά πρωτόκολλα για την ενίσχυση της ασφάλειας. Οι εφαρμογές του RFID είναι πολυάριθμες: από ανίχνευση προϊόντων σε logistics, έξυπνα ράφια, έλεγχο πρόσβασης, πληρωμές, έως και ιχνηλάτηση ζώων ή ιατρικό εξοπλισμό [88], [89].

3.3.8 NFC (Near Field Communication)

Το NFC είναι ένα πρωτόκολλο ασύρματης επικοινωνίας μικρής εμβέλειας (έως 10 cm), σχεδιασμένο για γρήγορη και ασφαλή ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ δύο συσκευών σε πολύ κοντινή απόσταση. Αναπτύχθηκε πάνω σε υπάρχοντα πρότυπα RFID, κυρίως ISO/IEC 14443, και προσφέρει συμβατότητα με πολλές υπάρχουσες RFID εφαρμογές.

Η τεχνολογία NFC υποστηρίζει τρεις τρόπους λειτουργίας:

- **Reader/Writer Mode:** Η συσκευή NFC λειτουργεί ως αναγνώστης δεδομένων από παθητικές ετικέτες NFC.
- **Peer-to-Peer Mode:** Δύο ενεργές συσκευές NFC ανταλλάσσουν δεδομένα (π.χ., ανταλλαγή επαφών, αρχείων).
- **Card Emulation Mode:** Η συσκευή NFC λειτουργεί ως έξυπνη κάρτα (π.χ., ανέπαφες πληρωμές).

Το NFC λειτουργεί αποκλειστικά στη συχνότητα των 13.56 MHz (HF band), το Bandwidth είναι περίπου 1.7 MHz και χρησιμοποιεί ASK (Amplitude Shift Keying) ή FSK (Frequency Shift Keying)

για τη διαμόρφωση σήματος. Η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων κυμαίνεται μεταξύ 106, 212 και 424 kbps, με δυνατότητα για κρυπτογράφηση δεδομένων, ειδικά όταν χρησιμοποιείται για ευαίσθητες συναλλαγές (π.χ., πληρωμές). Το μέγιστο μέγεθος πακέτου στο NFC εξαρτάται από τη λειτουργία και τον τύπο του tag ή της σύνδεσης. Σε Reader/Writer Mode, τα υποστηριζόμενα NFC Forum Tags επιτρέπουν NDEF payload από 48 έως 256, ενώ σε Type 4 tags με EEPROM μεγάλης χωρητικότητας μπορεί να φτάσει και 32 KB. Σε Peer-to-Peer Mode (P2P), το μέγιστο payload μπορεί να φτάσει επίσης έως και 32 KB, χρησιμοποιώντας μηχανισμούς fragmenting και chaining, αν και τυπικά κυμαίνεται στα 4–8 KB για πιο σταθερή μετάδοση.

Λόγω της πολύ περιορισμένης εμβέλειας, η κατανάλωση ενέργειας είναι χαμηλή, ενώ η εγγύτητα καθιστά δύσκολη την υποκλοπή ή την παρεμβολή, αυξάνοντας έτσι την ασφάλεια επικοινωνίας. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται επιπλέον προστασία, υιοθετούνται μηχανισμοί όπως SSL/TLS, AES encryption, και tokenization (όπως στο Google Pay, Apple Pay). Οι βασικές εφαρμογές του NFC περιλαμβάνουν ανέπαφες πληρωμές, εισιτήρια μεταφορών, ταυτοποίηση χρηστών, έξυπνες ετικέτες, και συσκευές pairing σε IoT περιβάλλοντα (π.χ., σύνδεση κινητού με ακουστικά ή έξυπνες οικιακές συσκευές) [59], [90], [91].

3.3.9 Wireless M-Bus

Το Wireless M-Bus (W-MBus) είναι ένα πρότυπο επικοινωνίας που έχει αναπτυχθεί για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων μετρητών (νερού, ηλεκτρικού ρεύματος, φυσικού αερίου, θερμότητας), ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα Smart Metering και Smart Grid. Βασίζεται στο ευρωπαϊκό πρότυπο EN 13757-4, το οποίο καθορίζει τη χρήση συχνοτήτων, τρόπων μετάδοσης και προτύπων κρυπτογράφησης.

Το W-MBus υποστηρίζει διάφορους τρόπους λειτουργίας, οι οποίοι επηρεάζουν την ενεργειακή απόδοση και τη συχνότητα επικοινωνίας:

- **S-mode (stationary):** Χρησιμοποιείται για σταθερές εγκαταστάσεις (π.χ., πολυκατοικίες) με περιοδική αποστολή δεδομένων.
- **T-mode (frequent transmit):** Κατάλληλο για συχνότερη αποστολή.
- **C-mode (compact):** Για διπλή κατεύθυνση επικοινωνίας (uplink/downlink).
- **N-mode (narrowband):** Πρόσφατη προσθήκη για στενότερες μπάντες και εξοικονόμηση ενέργειας.

Λειτουργεί κυρίως στις ασύρματες ISM μπάντες και το εύρος ζώνης εξαρτάται από το modulation και τη συχνότητα λειτουργίας. Οι πιο κοινές συχνότητες στην Ευρώπη είναι:

- **169 MHz (C-mode):** bandwidth περίπου 12.5 kHz
- **868 MHz (S/T-modes):** bandwidth 25 kHz έως 50 kHz

Υποστηρίζει FSK (Frequency Shift Keying) για διαμόρφωση σήματος, με τη ταχύτητα μετάδοσης να ποικίλλει ανάλογα με τη συχνότητα και τον τρόπο λειτουργίας. Κυμαίνεται από 2.4 kbps έως 100 kbps και οι επικοινωνίες είναι συνήθως μονόδρομες (unidirectional), αν και υποστηρίζονται και διπλής κατεύθυνσης λύσεις, ιδιαίτερα σε πιο πρόσφατες υλοποιήσεις με mesh ή star αρχιτεκτονική. Το μέγιστο payload εξαρτάται και αυτό από τη λειτουργία και τον ρυθμό μετάδοσης, με το μέγιστο να φτάνει 240 bytes, αλλά τυπικά χρησιμοποιούνται μικρότερα payloads (20–120 bytes) για την αποστολή μετρητικών δεδομένων, όπως κατανάλωση και timestamps.

Η κατανάλωση ενέργειας είναι πολύ χαμηλή, επιτρέποντας μακρόχρονη λειτουργία μπαταρίας (έως 10 ή και 15 χρόνια). Σημαντικό πλεονέκτημα είναι η υψηλή αξιοπιστία μετάδοσης σε εσωτερικούς

χώρους και πυκνό αστικό ιστό, καθώς και η μακρά εμβέλεια, η οποία μπορεί να φτάσει τα 2–3 km σε εξωτερικές συνθήκες, ειδικά με χρήση της μπάντας 169 MHz.

Το W-MBus υποστηρίζει μηχανισμούς ασφάλειας όπως κρυπτογράφηση AES-128 και authentication, αν και η υλοποίηση ποικίλλει ανάλογα με τον προμηθευτή και τη συσκευή. Οι εφαρμογές του περιλαμβάνουν συστήματα έξυπνης μέτρησης (Smart Metering), έξυπνα δίκτυα (Smart Grid) και παρακολούθηση κατανάλωσης σε βιομηχανικά και αστικά περιβάλλοντα [92], [93], [94].

3.3.10 Ανασκόπηση πρωτοκόλλων

Πραγματοποιήθηκε μια εις βάθος ανάλυση των πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου που χρησιμοποιούνται στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων, με έμφαση στα τεχνικά τους χαρακτηριστικά. Κάθε πρωτόκολλο εξετάστηκε ως προς την κατανάλωση ενέργειας, τη ταχύτητα μετάδοσης, την εμβέλεια, την ασφάλεια επικοινωνίας, αλλά και επιπρόσθετα, με στοιχεία για το εύρος ζώνης (bandwidth), το μέγιστο μέγεθος πακέτου (payload) και τις τοπολογίες που υποστηρίζονται.

Η ανάλυση ανέδειξε τις σημαντικές διαφορές μεταξύ των πρωτοκόλλων, οι οποίες απορρέουν από τον σχεδιαστικό τους προσανατολισμό, όπως για παράδειγμα, πρωτόκολλα σαν το LoRaWAN και το NB-IoT στοχεύουν σε ευρεία κάλυψη με εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση, ενώ άλλα όπως το Wi-Fi εστιάζουν σε υψηλό ρυθμό μετάδοσης σε μικρότερη ακτίνα. Επιπλέον, είδαμε ότι η υποστήριξη topology (π.χ. mesh, star) παίζει καθοριστικό ρόλο στην ευελιξία του κάθε δικτύου.

Η παρακάτω συγκεντρωτική απεικόνιση διευκολύνει την κατανόηση των διαφορών μεταξύ των πρωτοκόλλων και θα χρησιμεύσει ως βάση για το επόμενο κεφάλαιο, όπου θα πραγματοποιηθεί συγκριτική αξιολόγηση και επιλογή κατάλληλων πρωτοκόλλων ανά εφαρμογή.

Πίνακας 3.1: Τεχνικά χαρακτηριστικά πρωτοκόλλων επικοινωνίας χαμηλού επιπέδου IoT

	Κατανάλωση Ενέργειας	Εμβέλεια	Ταχύτητα Μετάδοσης	Εύρος Ζώνης	Μέγιστο Payload	Topologies	Security
LoRaWAN	Πολύ χαμηλή	2–5 km αστικό, 10–15 km αγροτικές περιοχές	0.3 – 50 kbps	125 – 500 kHz	~242 bytes	Star	AES-128
Zigbee	Χαμηλή	10–100 m (επεκτάσιμη μέσω mesh).	Έως 250 kbps	2 MHz (2.4 GHz)	127 bytes	Mesh, Star, Tree	AES-128
BLE	Πολύ χαμηλή	10–100 μέτρα (με δυνατότητα long-range σε BLE 5.0)	Έως 2 Mbps	1 – 2 MHz (2.4 GHz)	251 bytes	Star, Mesh (BLE 5)	AES-CCM
NB-IoT	Πολύ χαμηλή	10–15 χλμ.	Έως 250 kbps	180 kHz (LTE band)	~1600 bytes	Star (cellular)	LTE-level encryption
Wi-Fi	Υψηλή	Έως 100 m (2.4 GHz), μειώνεται στα 5 και 6 GHz	Έως 600 Mbps (Wi-Fi 4)	20 – 160 MHz	~2312 bytes	Star, Point-to-Point	WPA2 / WPA3
6LoWPAN	Χαμηλή	10 - 100 μέτρα	Έως 250 kbps (IEEE 802.15.4)	250 kHz (ISM bands)	1280 bytes (IPv6 adaptation)	Mesh, Star, Tree	IPsec, DTLS (application layer)
RFID	Πολύ χαμηλή	Έως 10 cm (LF), 1 m (HF), 10–100 m (UHF active)	106 kbps – 424 kbps (HF)	13.56 MHz (HF) / UHF	128–512 bits (tags)	Point-to-Point	Proprietary / Password / AES
NFC	Πολύ χαμηλή	Έως 10 cm	Έως 424 kbps	13.56 MHz	48 B – 32 KB (ανάλογα με τύπο tag ή P2P)	P2P, Point-to-Point	NFC-SEC, AES
Wireless M-Bus	Πολύ χαμηλή	300 m έως 2–3 km	2.4 – 100 kbps	12.5 – 50 kHz	~240 bytes	Star, Point-to-Point	AES-128

3.4 Συγκριτική μελέτη πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου στο IoT

Η ανάπτυξη συστημάτων IoT βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου επικοινωνίας χαμηλού επιπέδου, καθώς αυτό επηρεάζει άμεσα την απόδοση, την κατανάλωση ενέργειας, την εμβέλεια και τη δυνατότητα σύνδεσης των συσκευών. Καθώς το πλήθος των διαθέσιμων πρωτοκόλλων έχει αυξηθεί σημαντικά, η ανάγκη για μια συστηματική συγκριτική προσέγγιση καθίσταται επιτακτική. Η παρούσα μελέτη επιχειρεί να συγκρίνει διεξοδικά τα σημαντικότερα από αυτά, λαμβάνοντας υπόψη μια σειρά κρίσιμων τεχνικών παραμέτρων.

Η σύγκριση εστιάζει σε χαρακτηριστικά που αποτυπώνουν την τεχνολογική ωριμότητα και την καταλληλότητα κάθε πρωτοκόλλου για συγκεκριμένες κατηγορίες εφαρμογών. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται η εμβέλεια, η κατανάλωση ενέργειας, η ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων, το εύρος ζώνης, το μέγιστο μέγεθος πακέτου, η ασφάλεια της επικοινωνίας και οι υποστηριζόμενες τοπολογίες δικτύωσης. Η σύγκριση βασίζεται στον συνοπτικό πίνακα τεχνικών χαρακτηριστικών που προηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και επεκτείνεται με σχολιασμό και ερμηνεία ανά παράμετρο.

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι να προσφέρει στον αναγνώστη ένα πρακτικό εργαλείο κατανόησης των διαφορών μεταξύ των πρωτοκόλλων και να διευκολύνει την επιλογή του πλέον κατάλληλου για κάθε σενάριο χρήσης. Μέσα από αυτήν την ανάλυση αναδεικνύονται επίσης οι τεχνολογικοί συμβιβασμοί που συχνά απαιτούνται στον σχεδιασμό λύσεων IoT.

3.4.1 Εμβέλεια μετάδοσης

Η εμβέλεια μετάδοσης αποτελεί έναν από τους πλέον κρίσιμους παράγοντες κατά την επιλογή ενός πρωτοκόλλου επικοινωνίας για εφαρμογές IoT, καθώς καθορίζει την απόσταση στην οποία μπορεί να μεταδοθεί ένα σήμα χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσων κόμβων ή ενισχυτών. Η απαίτηση για μεγάλη ή μικρή εμβέλεια εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το εκάστοτε περιβάλλον εφαρμογής.

Τα πρωτόκολλα μεγάλης εμβέλειας, όπως το **LoRaWAN** και το **NB-IoT**, είναι σχεδιασμένα για να καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις (μέχρι και 10–15 km σε αγροτικές περιοχές για το LoRaWAN) με πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές όπως έξυπνες αγροτικές καλλιέργειες, παρακολούθηση υποδομών και logistics.

Το **Wireless M-Bus**, παρότι αναπτύχθηκε για μετρητές ενέργειας, μπορεί να προσφέρει εμβέλεια μέχρι και 2 km σε λειτουργία S (868 MHz), καθιστώντας το κατάλληλο για περιβάλλοντα έξυπνων μετρήσεων ενέργειας σε κατοικημένες περιοχές.

Το **Wi-Fi**, αν και ευρέως χρησιμοποιούμενο, έχει μέση εμβέλεια της τάξης των 50–100 μέτρων και υψηλότερη κατανάλωση, με συνέπεια να είναι καταλληλότερο για εφαρμογές όπου υπάρχει διαθέσιμη πηγή ενέργειας και απαιτούνται υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης.

Αντίθετα, πρωτόκολλα όπως τα **Zigbee**, **6LoWPAN** και **BLE** προσφέρουν μικρότερη εμβέλεια (συνήθως από 10 έως 100 μέτρα), εστιάζοντας κυρίως σε εφαρμογές εσωτερικών χώρων με υψηλή πυκνότητα κόμβων, όπως τα έξυπνα σπίτια και τα κτίρια αυτοματισμού.

Τέλος, ειδική περίπτωση αποτελούν τα **RFID** και **NFC**, όπου η εμβέλεια περιορίζεται σημαντικά, στα λίγα εκατοστά για το NFC και μέχρι μερικά μέτρα για παθητικά RFID tags. Αυτά τα πρωτόκολλα προορίζονται κυρίως για αναγνώριση ταυτότητας και ελέγχους πρόσβασης [21] [95], [96], [97][98].

3.4.2 Κατανάλωση ενέργειας

Κρίσιμο παράγοντα στον σχεδιασμό και την επιλογή πρωτοκόλλων επικοινωνίας στο IoT αποτελεί η κατανάλωση ενέργειας, ειδικά σε σενάρια όπου οι συσκευές λειτουργούν με μπαταρίες και

είναι εγκατεστημένες σε απομακρυσμένες ή δύσκολα προσβάσιμες περιοχές. Ο βέλτιστος συνδυασμός ενεργειακής αποδοτικότητας και επικοινωνιακής απόδοσης εξαρτάται από την υλοποίηση του πρωτοκόλλου, το λειτουργικό πρότυπο, την τεχνολογία μετάδοσης και το υπόστρωμα υλικού.

Τα πρωτόκολλα **LoRaWAN** και **NB-IoT** σχεδιάστηκαν με γνώμονα τη μέγιστη διάρκεια ζωής μπαταρίας. Το LoRaWAN μπορεί να προσφέρει έως και 10 έτη διάρκειας ζωής σε κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας (σποραδική μετάδοση, μικρό μέγεθος πακέτου). Το NB-IoT υποστηρίζει λειτουργίες όπως Power Saving Mode (PSM) και Extended Discontinuous Reception (eDRX), οι οποίες επιτρέπουν ανάλογες επιδόσεις.

Το **RFID** και το **NFC** λειτουργούν με εξαιρετικά χαμηλή έως και μηδενική ενεργειακή απαίτηση στην πλευρά του tag, ειδικά στις παθητικές υλοποιήσεις, καθώς η ενέργεια παρέχεται από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο του αναγνώστη. Ιδιαίτερα αποδοτικό στην εκπομπή πακέτων ανά μεγάλα χρονικά διαστήματα, προσφέροντας μακρά διάρκεια ζωής μπαταρίας (έως 15 έτη) είναι το **Wireless M-Bus** το οποίο έχει αναπτυχθεί για απομακρυσμένες μετρήσεις

Από την άλλη πλευρά, το **BLE** σχεδιάστηκε ειδικά για μικρές συσκευές με ανάγκες μικρής κατανάλωσης, όπως wearables, αισθητήρες και ιατρικές συσκευές, με ενεργειακή κατανάλωση που μπορεί να φτάσει κάτω από 1 mW κατά τη λειτουργία. Τα **Zigbee** και **6LoWPAN** λόγω του χαμηλού τους throughput και της υποστήριξης sleep modes, επίσης προσφέρουν εξαιρετικά αποδοτική λειτουργία για περιβάλλοντα με περιορισμένο ενεργειακό προϋπολογισμό.

Αντίθετα, το **Wi-Fi** χαρακτηρίζεται από υψηλότερη κατανάλωση λόγω συνεχούς σύνδεσης και υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης. Αν και είναι διαθέσιμες εκδόσεις χαμηλής κατανάλωσης, το τυπικό Wi-Fi καταναλώνει σημαντικά περισσότερο ενέργεια σε σύγκριση με άλλες λύσεις [21], [57], [75], [92], [95], [97], [99].

3.4.3 Ταχύτητα και ρυθμός μετάδοσης δεδομένων

Η ταχύτητα και ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων (data rate) αποτελούν βασικές τεχνικές παραμέτρους στον σχεδιασμό συστημάτων IoT, καθορίζοντας το πόσο γρήγορα μπορούν να μεταδοθούν δεδομένα από μία συσκευή προς άλλη ή προς έναν κόμβο συγκέντρωσης (gateway). Η επιλογή πρωτοκόλλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ανάγκες της εφαρμογής. Για παράδειγμα, η αποστολή σύντομων μετρήσεων θερμοκρασίας διαφέρει ουσιαστικά από τη μετάδοση video stream.

Τις υψηλότερες ταχύτητες, τις πετυχαίνει σαφώς το **Wi-Fi**. Έως 600 Mbps για Wi-Fi 4 (802.11n), 1.3 Gbps για Wi-Fi 5 (802.11ac) και ακόμα υψηλότερα για Wi-Fi 6/6E, αλλά με υψηλότερη κατανάλωση.

Παρόλο που το **NFC** μπορεί να φτάσει τα 424 kbps σε ρυθμό μετάδοσης, περιορίζεται λόγω του μικρού εύρους εφαρμογών του (π.χ. ταυτοποίηση, πληρωμές), ενώ το **Wireless M-Bus** το οποίο ταχύτητες 300 bps έως 100 kbps, ανάλογα με τη λειτουργία (mode S, T, R), είναι επαρκές για μεγαλύτερο εύρος εφαρμογών, όπως η καταγραφή μετρήσεων αερίου και νερού από έξυπνους μετρητές.

Το **NB-IoT** παρέχει υψηλές ταχύτητες, φτάνοντας έως 250 kbps (uplink) και downlink έως 226.7 kbps, χρησιμοποιώντας Narrowband OFDMA και λειτουργώντας εντός των κυψελοειδών δικτύων LTE.

Το **Zigbee** στα 2.4 GHz και το **6LoWPAN** χάρη στις δυνατότητες IPv6 μετάδοσης, παρέχουν 250 kbps. Σε χαμηλότερα φάσματα (868/915 MHz), το Zigbee φτάνει τα 20 με 40 kbps και παρόλο που η ταχύτητά του είναι περιορισμένη, επαρκεί για εφαρμογές αισθητήρων και αυτοματισμού.

Το **RFID** (παθητικό) έχει πολύ χαμηλό ρυθμό μετάδοσης (0.1–640 kbps, ανάλογα το πρότυπο), αλλά επαρκεί για την αποστολή μικρών κωδικών αναγνώρισης.

Το **LoRaWAN** επιτυγχάνει ταχύτητες από 0.3 έως 50 kbps, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση τύπου Chirp Spread Spectrum (CSS), που προσφέρει μεγάλη ανοχή σε παρεμβολές με χαμηλό data rate. Είναι κατάλληλο για περιοδική αποστολή μικρών πακέτων, ενώ το **BLE** προσφέρει ρυθμό μετάδοσης έως 2 Mbps στις νεότερες εκδόσεις (Bluetooth 5.0 και άνω), καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογές με ελαφρύ ή μεσαίο όγκο δεδομένων [21], [57], [75], [77], [88], [95], [100], [101].

3.4.4 Bandwidth / Εύρος ζώνης

Το εύρος ζώνης (bandwidth) ενός πρωτοκόλλου καθορίζει τη φασματική περιοχή εντός της οποίας πραγματοποιείται η μετάδοση των σημάτων. Συνδέεται με τη δυνατότητα μεταφοράς πληροφορίας ανά μονάδα χρόνου και επηρεάζει την ταχύτητα, τη φασματική αποδοτικότητα και τις απαιτήσεις φάσματος ενός συστήματος. Η κατανόηση του εύρους ζώνης είναι ουσιώδης στον σχεδιασμό IoT συστημάτων, ειδικά όταν αυτά λειτουργούν σε περιοχές περιορισμένου φάσματος ή υπό αυστηρούς ρυθμιστικούς περιορισμούς. Ταυτόχρονα όμως, η διεισδυτικότητα του σήματος παίζει κρίσιμο ρόλο σε εφαρμογές όπου απαιτείται επικοινωνία μέσα από εμπόδια ή σε υπόγειες/βιομηχανικές συνθήκες

Το **Wi-Fi** διακρίνεται για το ευρύ εύρος ζώνης. Το 802.11n χρησιμοποιεί 20 ή 40 MHz, το 802.11ac φτάνει τα 80 ή 160 MHz, ενώ τα νεότερα Wi-Fi 6/6E φτάνουν έως 320 MHz, παρέχοντας υψηλό throughput. Ωστόσο, λόγω της υψηλής συχνότητας (2.4 GHz ή 5 GHz), η διεισδυτικότητα είναι περιορισμένη, ειδικά στο 5 GHz.

Τόσο το **Zigbee** όσο και το **6LoWPAN** χρησιμοποιούν εύρος 2 MHz στο φάσμα των 2.4 GHz, το οποίο προσφέρει μέτρια ταχύτητα αλλά περιορισμένη διεισδυτικότητα. Σε χαμηλότερες συχνότητες, όπως 868 MHz (Ευρώπη) ή 915 MHz (ΗΠΑ), το Zigbee μπορεί να χρησιμοποιεί ακόμα μικρότερα εύρη (200–600 kHz), βελτιώνοντας τη διεισδυτικότητα σε βάρος της ταχύτητας. Από την άλλη, το **BLE** χρησιμοποιεί κανάλια 2 MHz εύρους, με σύνολο 40 καναλιών στο φάσμα των 2.4 GHz. Η τεχνολογία frequency hopping ενισχύει την αξιοπιστία και μειώνει τις παρεμβολές, αλλά η διεισδυτικότητα παραμένει περιορισμένη λόγω της υψηλής συχνότητας.

Το **NFC**, ως επέκταση του HF RFID, λειτουργεί στα 13.56 MHz με εύρος ζώνης περίπου 1.7 MHz, αξιοποιώντας ASK διαμόρφωση. Λόγω της πολύ χαμηλής ισχύος και της υψηλής απορρόφησης σε αυτή τη συχνότητα, η διεισδυτικότητα είναι σχεδόν μηδενική, με αποτέλεσμα η απόσταση λειτουργίας να περιορίζεται σε λίγα εκατοστά.

Το **LoRaWAN** χρησιμοποιεί δυναμικά εύρη ζώνης από 7.8 έως 500 kHz, ανάλογα με τη χώρα και τις παραμέτρους μετάδοσης (π.χ. Spreading Factor, Bandwidth). Στην Ευρώπη (868 MHz), τα συνήθη εύρη είναι 125 ή 250 kHz, όπου η χρήση χαμηλών συχνοτήτων και στενού εύρους ζώνης προσφέρει εξαιρετική διεισδυτικότητα, ιδανική για απομακρυσμένες ή υπόγειες εφαρμογές.

Το **NB-IoT** λειτουργεί σε φάσμα 180 kHz για κάθε διάυλο, είτε αυτός χρησιμοποιείται εντός ζώνης LTE, είτε ως αυτόνομο (standalone) φάσμα. Η στενή φασματική χρήση σε συνδυασμό με τη χρήση χαμηλών συχνοτήτων (π.χ. 800–900 MHz) προσδίδει πολύ καλή διεισδυτικότητα, ακόμα και σε εσωτερικούς ή υπόγειους χώρους, καθιστώντας το κατάλληλο για Smart Metering.

Αναλόγως τον τύπο και το φάσμα, Το **RFID** παρουσιάζει διαφοροποίηση ανάλογα με τη ζώνη. Τα UHF RFID (860–960 MHz) λειτουργούν με εύρος ζώνης περίπου 200 kHz προσφέροντας καλή εμβέλεια και μέτρια διεισδυτικότητα, ενώ τα HF RFID (13.56 MHz) έχουν εύρος <100 kHz αλλά πολύ μικρή διεισδυτικότητα και εμβέλεια.

Το **Wireless M-Bus** λειτουργεί σε φάσματα 433 MHz, 868 MHz ή 169 MHz, με εύρος ζώνης από 12.5 έως 100 kHz ανάλογα με τη λειτουργία (mode S, T, R). Λόγω των χαμηλών συχνοτήτων και του περιορισμένου bandwidth, η διεισδυτικότητα είναι υψηλή, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για ενεργειακές εφαρμογές με ανάγκη για αξιόπιστη μετάδοση από απομακρυσμένους ή υπόγειους μετρητές. [25], [73], [92], [101], [102], [103], [104], [105].

3.4.5 Μέγιστο Payload

Το ωφέλιμο φορτίο (payload) κάθε πρωτοκόλλου, αναφέρεται στο μέγιστο μέγεθος δεδομένων που μπορεί να μεταφερθεί εντός ενός πλαισίου (frame) ή πακέτου, εξαιρώντας την επικεφαλίδα (header), τον κυκλικό έλεγχο πλεονασμού (Cyclic Redundancy Check, CRC) και άλλα μεταδεδομένα. Η τιμή αυτή εξαρτάται από το συνολικό μέγεθος πλαισίου, το πρωτόκολλο πρόσβασης στο μέσο (MAC layer), την παρουσία μηχανισμών ασφάλειας ή επαναμετάδοσης, καθώς και από τις ιδιαιτερότητες κάθε τεχνολογίας (π.χ. fragmentation, segmentation).

Το **Wi-Fi (IEEE 802.11)** υποστηρίζει πολύ μεγάλο payload, έως και 2312 bytes ανά MAC frame, ενώ σε επίπεδο IP (μετά από κατακερματισμό) μπορεί να μεταφέρει πολύ μεγαλύτερα φορτία. Η υψηλή ταχύτητα και ο μεγάλος χώρος μεταφοράς το καθιστούν ιδανικό για εφαρμογές με έντονη ροή δεδομένων (π.χ. video, τηλεμετρία).

Το **NB-IoT** υποστηρίζει payload έως 1600 bytes ανά μεταφορά UDP, αν και στην πράξη συνιστώνται μικρότερα μεγέθη (π.χ. 512 bytes) για μείωση της καθυστέρησης και εξοικονόμηση ενέργειας. Η χρήση TCP, ασφαλούς επιπέδου (TLS) ή διαδοχικών μεταδόσεων επηρεάζει αρνητικά το ωφέλιμο φορτίο ανά πακέτο.

Το **NFC**, σχεδιασμένο για πολύ μικρές αποστάσεις (έως 10 cm), μεταδίδει δεδομένα σε μορφή frames, με μέγεθος frame payload που κυμαίνεται συνήθως από 46 έως 254 bytes, ανάλογα με τη λειτουργία (NFC-A, NFC-B, NFC-F) και το αν χρησιμοποιείται passive ή active mode. Στην επικοινωνία peer-to-peer, η πλήρης μετάδοση application-level payload (όπως NDEF) μπορεί να φτάσει έως και 32 KB, με χρήση πολλαπλών frames.

Το **6LoWPAN**, που ενθυλακώνει πακέτα IPv6 πάνω από IEEE 802.15.4, χρησιμοποιεί κατακερματισμό (fragmentation) για να υπερκεράσει το όριο των 127 bytes. Αν και το φυσικό επίπεδο περιορίζεται, το 6LoWPAN επιτρέπει την παράδοση πακέτων έως 1280 bytes, το ελάχιστο IPv6 MTU (Maximum Transmission Unit) μέσω κατακερματισμού, με επιβάρυνση σε καθυστέρηση και ενέργεια.

Όσον αφορά το payload, το **RFID** παρουσιάζει μεγάλη ποικιλία. Στα HF RFID tags (13.56 MHz), το payload περιορίζεται σε 32–128 bytes, ανάλογα με τον τύπο της ετικέτας, ενώ στα UHF RFID, είναι τυπικά 96 ή 128 bits, με δυνατότητα επεκτάσεων. Ωστόσο, σε ενεργές εφαρμογές RFID, όπως για παράδειγμα sensor tags, μπορεί να υποστηριχθεί payload έως 512 bytes.

Το **BLE**, στην έκδοση 5.0 και άνω, υποστηρίζει μέγιστο payload 251 bytes, συνολικά ανά πακέτο (Link Layer), εφόσον χρησιμοποιηθεί η δυνατότητα Data Length Extension (DLE). Χωρίς DLE, το payload περιορίζεται σε 27 bytes. Η αύξηση του payload μειώνει το overhead και βελτιώνει την ενεργειακή απόδοση σε περιόδους συνεχούς μετάδοσης.

Το **Wireless M-Bus**, ανάλογα με τη λειτουργία (mode S, T, R), υποστηρίζει payload μέχρι 240 bytes (πλαίσιο με πλήρη CRC, χωρίς encryption). Σε secure μεταδόσεις, ο χώρος μειώνεται λόγω κρυπτογράφησης.

Το **LoRaWAN** έχει μεταβλητό μέγεθος payload, το οποίο εξαρτάται από τον Spreading Factor (SF) και το Bandwidth (BW). Στο τυπικό εύρος ζώνης 125 kHz, το μέγιστο payload κυμαίνεται από 51

bytes έως 242 bytes. Η επιλογή μεγαλύτερου SF αυξάνει την ευαισθησία και την εμβέλεια, αλλά μειώνει δραστικά το μέγεθος payload.

Το **Zigbee** (IEEE 802.15.4) έχει συνολικό μέγεθος πλαισίου 127 bytes στο φυσικό επίπεδο (PHY), από τα οποία το ωφέλιμο φορτίο φτάνει συνήθως τα 72–100 bytes, ανάλογα με το επίπεδο ασφάλειας και τη διευθυνσιοδότηση. Η περιορισμένη χωρητικότητα καθιστά το Zigbee κατάλληλο για εφαρμογές με μικρά, περιοδικά μηνύματα, όπως αισθητήρες θερμοκρασίας [77], [69], [98], [100], [101], [102], [103].

3.4.6 Τοπολογίες δικτύου

Η τοπολογία δικτύου ορίζει τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται και επικοινωνούν οι συσκευές (κόμβοι) μεταξύ τους σε ένα σύστημα IoT. Ανάλογα με το πρωτόκολλο, υποστηρίζονται διαφορετικές τοπολογίες όπως αστέρος (star), δέντρο (tree), πλέγμα (mesh) ή συνδυασμοί αυτών, οι οποίες επηρεάζουν την αξιοπιστία, την επεκτασιμότητα και την πολυπλοκότητα του δικτύου.

Το **Zigbee**, βασισμένο στο πρότυπο IEEE 802.15.4, υποστηρίζει πλέγμα, αστέρα και δένδρο, με τη mesh τοπολογία να επιτρέπει την αναμετάδοση πακέτων μέσω ενδιάμεσων κόμβων, αυξάνοντας την κάλυψη και την ανθεκτικότητα του δικτύου. Όπως και το Zigbee, το **6LoWPAN**, λόγω της ενσωμάτωσης στο IEEE 802.15.4, μπορεί να υποστηρίξει αστέρα, δένδρο και πλέγμα, κυρίως μέσω του πρωτοκόλλου δρομολόγησης RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks).

Αντιθέτως, το **LoRaWAN** βασίζεται σε αστεροειδή τοπολογία, όπου οι τερματικές συσκευές επικοινωνούν άμεσα με τις πύλες, χωρίς ενδιάμεση δρομολόγηση. Η απουσία mesh υποδομής περιορίζει τη δυνατότητα αυτοεπιδιόρθωσης, αλλά μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας και την πολυπλοκότητα.

Το **Wireless M-Bus**, ανάλογα με τη λειτουργική του λειτουργία (S, T, C, N, F mode), μπορεί να υποστηρίξει αστέρα ή ημι-duplex master-slave επικοινωνία, καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογές μέτρησης ενέργειας και ύδρευσης σε περιορισμένα δίκτυα.

Παρά το γεγονός, πως το **BLE** υποστηρίζει κυρίως τοπολογία αστέρα, με την εισαγωγή του Bluetooth Mesh, είναι δυνατή και η υλοποίηση πλέγματος για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές, όπως έξυπνος φωτισμός και κτίρια.

Το **NB-IoT** λειτουργεί μέσω του κυψελοειδούς δικτύου, χρησιμοποιώντας αστεροειδή τοπολογία, όπου οι συσκευές επικοινωνούν άμεσα με τον σταθμό βάσης του δικτύου LTE ή 5G, ενώ το **Wi-Fi** υποστηρίζει κυρίως τοπολογία αστέρα μέσω πρόσβασης σε σημείο (access point). Αν και υπάρχει δυνατότητα λειτουργίας ad hoc για peer-to-peer επικοινωνία μεταξύ συσκευών, δεν υποστηρίζει mesh τοπολογία από τη φύση του, χωρίς επιπλέον υποδομή.

Το **RFID** δεν σχηματίζει δίκτυο με την παραδοσιακή έννοια. Πρόκειται για point-to-point επικοινωνία μεταξύ αναγνώστη και ετικέτας, οπότε δεν υφίσταται υποστήριξη για σύνθετες τοπολογίες. Αντίστοιχα, το **NFC** χρησιμοποιεί τοπολογία ζεύγους peer-to-peer, κατάλληλη για εφαρμογές όπου δύο συσκευές βρίσκονται σε πολύ κοντινή απόσταση [25], [69], [98], [100], [102], [103], [104], [105].

3.4.7 Ασφάλεια επικοινωνίας

Κρίσιμη πτυχή αποτελεί η ασφάλεια επικοινωνίας στα πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου του IoT, ιδίως όταν τα δεδομένα που μεταφέρονται είναι ευαίσθητα. Οι βασικές απαιτήσεις περιλαμβάνουν εμπιστευτικότητα, ακεραιότητα, αυθεντικοποίηση και προστασία από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση.

Το **LoRaWAN** ενσωματώνει ισχυρή ασφάλεια βασισμένη σε 128-bit AES encryption, η οποία διακρίνεται σε δύο επίπεδα: το Network Session Key (NwkSKey) για τον έλεγχο της αυθεντικότητας και της ακεραιότητας του πακέτου, και το Application Session Key (AppSKey) για την κρυπτογράφηση των δεδομένων της εφαρμογής.

Όντας υποσύνολο του LTE, το **NB-IoT**, ακολουθεί τις προδιαγραφές του 3GPP, υιοθετώντας προηγμένες τεχνικές ασφάλειας όπως επαλήθευση ταυτότητας SIM, κρυπτογράφηση με βάση το SNOW 3G ή AES, και προστασία επιπέδου πρόσβασης.

Το **Wi-Fi**, ειδικά στις εκδόσεις Wi-Fi 4 και μεταγενέστερες, εφαρμόζει ισχυρούς μηχανισμούς όπως WPA2/WPA3, που χρησιμοποιούν AES και μηχανισμούς για forward secrecy. Παρόλα αυτά, αποτελεί συχνό στόχο επιθέσεων, λόγω της ευρείας χρήσης του. Το **6LoWPAN** από μόνο του δεν παρέχει ασφάλεια, αλλά βασίζεται στα πρωτόκολλα του IPv6 και μπορεί να συνδυαστεί με IPsec ή DTLS για end-to-end ασφάλεια, γεγονός που προσφέρει ευελιξία αλλά και αυξημένο υπολογιστικό κόστος.

Όπως και το LoRaWAN, έτσι και το **Zigbee** υποστηρίζει AES-128 encryption, μηχανισμούς αυθεντικοποίησης καθώς και έλεγχο κλειδιών μέσω Trust Center, διότι βασίζεται στην αρχιτεκτονική του IEEE 802.15.4. Παρ' όλα αυτά, έχει δεχθεί κριτική για ορισμένες αδυναμίες διαχείρισης κλειδιών και για την προεπιλεγμένη χρήση μη ασφαλών δικτυακών κλειδιών.

Το Bluetooth Low Energy (**BLE**) εφαρμόζει από την έκδοση 4.2 και εξής LE Secure Connections, με AES-CCM 128-bit encryption, και υποστηρίζει numeric comparison pairing και Just Works. Ωστόσο, η ασφάλεια εξαρτάται σημαντικά από το είδος του pairing που χρησιμοποιείται.

Η ασφάλεια μέσω κρυπτογράφησης (AES-128) είναι προαιρετική στο **Wireless M-Bus**, ανάλογα με το mode λειτουργίας. Παρόλο που θεωρείται ικανοποιητικό για απλές μετρητικές εφαρμογές, η απουσία προηγμένων μηχανισμών ασφαλείας τον καθιστά ευάλωτο σε ορισμένα σενάρια

Το **RFID** παρουσιάζει σοβαρούς περιορισμούς λόγω περιορισμένων υπολογιστικών πόρων. Οι παθητικές ετικέτες συχνά στερούνται κρυπτογράφησης και είναι ευάλωτες σε παρακολούθηση και cloning. Αντίστοιχα, το **NFC**, αν και προσφέρει peer-to-peer ασφάλεια με NFC-SEC, χρησιμοποιείται συχνά χωρίς επιπρόσθετη κρυπτογράφηση. Επειδή η εμβέλειά του είναι πολύ μικρή, βασίζεται κυρίως στην φυσική εγγύτητα ως μέσο ασφαλείας [25], [100], [101], [102], [103], [104], [105].

3.4.8 Συμπεράσματα για τη συγκριτική αποτίμηση των πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου IoT

Από τη συγκριτική μελέτη των βασικών πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου που χρησιμοποιούνται σε περιβάλλοντα IoT, καθίσταται σαφές ότι δεν υπάρχει μία ενιαία τεχνολογία που να υπερέχει απόλυτα σε όλες τις κατηγορίες τεχνικών χαρακτηριστικών. Η καταλληλότητα κάθε πρωτοκόλλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το συγκεκριμένο σενάριο εφαρμογής, τις απαιτήσεις του περιβάλλοντος και τους περιορισμούς που τίθενται (ενεργειακούς, δικτυακούς ή οικονομικούς).

Πιο συγκεκριμένα:

- Το **LoRaWAN** προσφέρει μεγάλη εμβέλεια και πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, καθιστώντας το ιδανικό για εφαρμογές smart metering και γεωργίας ακριβείας, αλλά περιορίζεται από χαμηλό ρυθμό μετάδοσης και στενό εύρος ζώνης.
- Το **NB-IoT**, αξιοποιώντας υποδομές κινητής τηλεφωνίας, εξασφαλίζει αξιοπιστία, υψηλό επίπεδο ασφάλειας και υποστήριξη μαζικής σύνδεσης συσκευών, αλλά έχει περιορισμένο εύρος ζώνης και μεγαλύτερη κατανάλωση σε σχέση με τεχνολογίες LPWAN.

- Το **Zigbee** απευθύνεται σε εφαρμογές τοπικών δικτύων αισθητήρων με μέτρια κατανάλωση και επαρκή ασφάλεια, αλλά περιορισμένη εμβέλεια.
- Το **BLE** προσφέρει εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση και απλοποιημένη υλοποίηση, ιδανικό για wearables και προσωπικά δίκτυα, αλλά περιορίζεται σε τοπολογίες μικρής κλίμακας.
- Το **Wi-Fi** προσφέρει υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, όμως η ενεργειακή του απαίτηση το καθιστά ακατάλληλο για συσκευές μακράς διάρκειας λειτουργίας χωρίς παροχή ρεύματος.
- Το **6LoWPAN**, με την ενθυλάκωση IPv6 πακέτων, προσφέρει διαλειτουργικότητα και επεκτασιμότητα, αλλά απαιτεί πιο σύνθετη αρχιτεκτονική.
- Το **RFID** και το **NFC** καλύπτουν διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης μικρής εμβέλειας (π.χ. ετικέτες προϊόντων ή ανέπαφες πληρωμές), με περιορισμένες δυνατότητες σε πολυπλοκότερα σενάρια επικοινωνίας.
- Το **Wireless M-Bus** στοχεύει σε εφαρμογές μέτρησης, όπως ύδρευσης και φυσικού αερίου, με σταθερές τοπολογίες και συνήθως μονόδρομη μετάδοση δεδομένων.

Η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας συνεπώς οφείλει να βασίζεται σε σαφή τεχνικά κριτήρια, όπως η εμβέλεια, η συχνότητα μετάδοσης, η ενεργειακή απόδοση, η ασφάλεια, η ευκολία ενσωμάτωσης και η υποστήριξη από την αγορά. Παράλληλα, η χρήση υβριδικών λύσεων (π.χ. Wi-Fi + BLE ή NB-IoT + LoRa) μπορεί να προσφέρει τον βέλτιστο συνδυασμό επιδόσεων και ευελιξίας σε πολυσύνθετες εφαρμογές.

3.5 Κριτήρια επιλογής κατάλληλου πρωτοκόλλου ανά εφαρμογή

Η επιλογή κατάλληλου πρωτοκόλλου επικοινωνίας στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) δεν είναι μια ουδέτερη διαδικασία, αλλά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το εκάστοτε πεδίο εφαρμογής και τις λειτουργικές του απαιτήσεις. Το IoT χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλομορφία εφαρμογών — από έξυπνες κατοικίες και γεωργικά περιβάλλοντα, έως βιομηχανικές εγκαταστάσεις και κρίσιμα δίκτυα ενέργειας. Καθεμία από αυτές τις εφαρμογές επιβάλλει ιδιαίτερες προδιαγραφές ως προς την κατανάλωση ενέργειας, την εμβέλεια, την ταχύτητα και αξιοπιστία της μετάδοσης, την ασφάλεια των δεδομένων και τη δυνατότητα επέκτασης των δικτύων.

Για παράδειγμα, εφαρμογές σε αγροτικά ή αστικά περιβάλλοντα απαιτούν συχνά πρωτόκολλα με μεγάλη εμβέλεια και χαμηλή κατανάλωση (όπως το LoRaWAN ή το NB-IoT), ενώ άλλες, όπως οι φορητές ιατρικές συσκευές ή οι έξυπνοι αισθητήρες σε σπίτια, δίνουν έμφαση στην ενεργειακή απόδοση, στην ασφάλεια, και στην υποστήριξη προσωπικών δικτύων μικρής εμβέλειας (όπως το BLE ή το Zigbee).

Επιπλέον, η επιλογή ενός πρωτοκόλλου δεν γίνεται απομονωμένα, αλλά με βάση σύνολα τεχνικών χαρακτηριστικών που συνδυάζονται για να καλύψουν συγκεκριμένα σενάρια χρήσης. Χαρακτηριστικά όπως το bandwidth, το μέγιστο μέγεθος πακέτου (payload) και η τοπολογία υποστήριξης (π.χ. star, mesh, tree) επηρεάζουν σημαντικά την απόδοση ενός συστήματος IoT.

Σε αυτή την ενότητα, αναλύονται τα βασικά κριτήρια επιλογής πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου IoT με βάση εννέα βασικές εφαρμογές: Βιομηχανία, Υγεία, Γεωργία, Εκπαίδευση, Logistics, Smart Home, Smart Metering, Smart Cities και Smart Grid. Για κάθε εφαρμογή, παρουσιάζονται οι λειτουργικές απαιτήσεις και καταδεικνύεται πώς συγκεκριμένα πρωτόκολλα ανταποκρίνονται καλύτερα σε αυτές. Η ανάλυση βασίζεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά που συγκεντρώθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και αποσκοπεί στην τεκμηριωμένη αντιστοίχιση εφαρμογών–πρωτοκόλλων [21], [73], [102], [104].

3.5.1 Στη βιομηχανία (Industrial IoT)

Η βιομηχανία αποτελεί έναν από τους πιο απαιτητικούς και ώριμους τομείς εφαρμογής του IoT. Ο βιομηχανικός αυτοματισμός, η παρακολούθηση παραγωγικών διαδικασιών, η συντήρηση εξοπλισμού μέσω αισθητήρων (predictive maintenance), αλλά και η ιχνηλασιμότητα πρώτων υλών και προϊόντων, βασίζονται σε αξιόπιστη και συχνά χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία. Οι απαιτήσεις σε αυτό το πλαίσιο είναι ιδιαίτερα αυστηρές ως προς την αξιοπιστία, τη διαθεσιμότητα και την επεκτασιμότητα των επικοινωνιών. Βασικά κριτήρια επιλογής πρωτοκόλλου, για τις ποικίλες εφαρμογές του IoT στη βιομηχανία αποτελούν:

- Υψηλή αξιοπιστία και ανοχή σε παρεμβολές (κυρίως σε περιβάλλοντα με μέταλλο και ηλεκτρομαγνητική συμβολή).
- Χαμηλή καθυστέρηση επικοινωνίας για κρίσιμες διεργασίες.
- Δυνατότητα λειτουργίας σε μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις (εμβέλεια, δικτυακή υποδομή).
- Υψηλό επίπεδο ασφάλειας και προστασίας δεδομένων.
- Υποστήριξη πολυάριθμων κόμβων και αισθητήρων (επέκταση δικτύου).
- Ενεργειακή αποδοτικότητα για συσκευές με περιορισμένη τροφοδοσία.

Συνεπώς, τα καταλληλότερα πρωτόκολλα που επιλέγονται για χρήση έτσι ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες του πεδίου αυτού είναι τα παρακάτω:

- **Zigbee:** Παρέχει πλέγματος (mesh) τοπολογία που επιτρέπει μεγάλη κάλυψη σε εργοστασιακά περιβάλλοντα, με ικανοποιητική αξιοπιστία, ασφάλεια (128-bit AES), και χαμηλή κατανάλωση ενέργειας για αισθητήρες παραγωγής. Η υποστήριξη πολλών κόμβων το καθιστά ιδανικό για εκτεταμένα συστήματα αισθητήρων σε γραμμές παραγωγής και αποθήκες.
- **LoRaWAN:** Ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή κατανάλωση και μεγάλη εμβέλεια, όπως απομακρυσμένη παρακολούθηση δεξαμενών ή εξοπλισμού. Αν και δεν ενδείκνυται για εφαρμογές με απαιτήσεις πραγματικού χρόνου λόγω καθυστερήσεων, προσφέρει υψηλή διεύθυνση σήματος σε κλειστά περιβάλλοντα και λειτουργία χωρίς ανάγκη συνεχούς ισχύος.
- **NB-IoT:** Κατάλληλο για βιομηχανικά περιβάλλοντα όπου απαιτείται κάλυψη σε εσωτερικούς και απομακρυσμένους χώρους. Προσφέρει ασφαλή μετάδοση δεδομένων και λειτουργεί εντός του δικτύου κινητής τηλεφωνίας, καθιστώντας το ιδανικό για μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις και εργοστάσια. Ωστόσο, έχει υψηλότερη κατανάλωση από Zigbee ή LoRaWAN και μεγαλύτερη καθυστέρηση.
- **BLE:** Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται παρακολούθηση εξοπλισμού ή εργαζομένων εντός περιορισμένων αποστάσεων, για παράδειγμα εργαλεία με ενσωματωμένους αισθητήρες, το BLE προσφέρει λύση χαμηλής κατανάλωσης. Ωστόσο, η περιορισμένη εμβέλεια και τοπολογία (αστέρας κυρίως) μειώνουν την επεκτασιμότητά του σε μεγάλη κλίμακα.

Χρήσιμα, αλλά λιγότερο κατάλληλα είναι τα παρακάτω:

- **Wi-Fi:** Αν και προσφέρει υψηλό ρυθμό μετάδοσης, η κατανάλωση ενέργειας και η ευαισθησία σε παρεμβολές το καθιστούν λιγότερο κατάλληλο για δικτύωση αισθητήρων χαμηλής ισχύος και αξιοπιστίας σε βιομηχανικά περιβάλλοντα.
- **RFID & NFC:** Μπορούν να αξιοποιηθούν για ιχνηλασιμότητα και έλεγχο ταυτοτήτων σε logistics ή εφοδιαστική αλυσίδα, αλλά δεν υποστηρίζουν ενεργή δικτύωση και συνεχή επικοινωνία κόμβων.
- **Wireless M-Bus:** Χρήσιμο για έξυπνους μετρητές σε βιομηχανικές μονάδες, αλλά όχι για δικτυωμένη και χρονικά κρίσιμη παρακολούθηση.

- **6LoWPAN:** Κρίνεται ακατάλληλο, λόγω του περιορισμένου μεγέθους payload, της μικρής εμβέλειας και διεισδυτικότητας, καθώς και της ευαισθησίας του σε παρεμβολές στο φάσμα των 2.4 GHz. Επιπλέον, η ανάγκη για πολύπλοκη ρύθμιση IPv6 και mesh το καθιστά δύσχρηστο σε εφαρμογές που απαιτούν αξιοπιστία και υψηλή διαθεσιμότητα. [21], [102], [103], [104], [105].

3.5.2 Υγεία (e-Health)

Η εφαρμογή του IoT στον τομέα της υγείας αφορά την απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών, τη διαχείριση φαρμακευτικών αποθεμάτων, τα έξυπνα νοσοκομεία, καθώς και τη χρήση φορητών συσκευών για συνεχή καταγραφή βιομετρικών δεδομένων. Πρόκειται για έναν από τους πιο κρίσιμους τομείς, καθώς η αξιοπιστία και η ασφάλεια των δεδομένων αποτελούν απολύτως θεμελιώδεις απαιτήσεις. Οι απαιτήσεις των εφαρμογών IoT στην υγεία, συνοψίζονται παρακάτω:[77], [80], [102].

- Υψηλή αξιοπιστία και διαθεσιμότητα υπηρεσιών, ιδίως σε κρίσιμες εφαρμογές όπως καρδιοπαρακολούθηση.
- Χαμηλή καθυστέρηση για real-time εφαρμογές, όπως η τηλεϊατρική.
- Εξαιρετικά υψηλό επίπεδο ασφάλειας και προστασίας προσωπικών δεδομένων.
- Υποστήριξη προσωπικών συσκευών με χαμηλή κατανάλωση.
- Αρκετό bandwidth για εφαρμογές όπως streaming βίντεο σε μονάδες τηλεϊατρικής.
- Δικτυακή σταθερότητα σε εσωτερικούς χώρους νοσοκομείων ή κατοικιών.

Σύμφωνα με τις παραπάνω προδιαγραφές, η υλοποίηση των παρακάτω τεχνολογίες εξυπηρετούν καλύτερα τον τομέα της υγείας:

- **BLE:** Ιδανικό για φορητές ιατρικές συσκευές και wearables που παρακολουθούν ζωτικά σημεία, καθώς συνδυάζει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, αξιοπιστία και επαρκή ρυθμό μετάδοσης για περιοδικά δεδομένα (π.χ. σφυγμοί, οξυγόνο, πίεση). Χρησιμοποιείται ευρέως σε συσκευές όπως οξύμετρα και smart watches υγείας.
- **Wi-Fi:** Παρέχει τη δυνατότητα για σταθερές συνδέσεις υψηλής ταχύτητας, ιδανικές για τηλεϊατρική, μεταφορά εικόνων όπως ακτινογραφίες, ή monitoring σε νοσοκομειακά περιβάλλοντα. Το μειονέκτημα είναι η αυξημένη κατανάλωση, που το καθιστά ακατάλληλο για συσκευές χωρίς σταθερή τροφοδοσία.
- **NB-IoT:** Εξαιρετική επιλογή για απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών σε κατοικίες ή αγροτικές περιοχές, καθώς προσφέρει μεγάλη εμβέλεια και ασφαλή μετάδοση μέσω των δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Αν και δεν είναι ιδανικό για real-time μετάδοση, καλύπτει επαρκώς καθημερινή καταγραφή ιατρικών δεδομένων.
- **Zigbee:** Χρήσιμο για νοσοκομειακά δίκτυα αισθητήρων σε κτίρια, όπως θερμοκρασίες θαλάμων, επίπεδα CO₂ ή παρακολούθηση περιβαλλοντικών συνθηκών. Η τοπολογία πλέγματος ενισχύει την αξιοπιστία της κάλυψης.

Τα παρακάτω συστήματα, προσφέρουν λιγότερο χρήσιμες εφαρμογές:

- **LoRaWAN:** Αν και μπορεί να αξιοποιηθεί για απομακρυσμένη παρακολούθηση, η περιορισμένη χωρητικότητα δεδομένων και η καθυστέρηση καθιστούν το πρωτόκολλο αυτό ακατάλληλο για κρίσιμες ιατρικές εφαρμογές.
- **RFID & NFC:** Κατάλληλα μόνο για ταυτοποίηση ασθενών, ιχνηλασιμότητα φαρμάκων ή πρόσβαση σε εξοπλισμό, όχι για ενεργή μετάδοση δεδομένων υγείας.
- **Wireless M-Bus και 6LoWPAN:** Περιορισμένη εφαρμογή στον χώρο της υγείας λόγω έλλειψης ενοποίησης με ιατρικά πρότυπα και χαμηλής εξάπλωσης στον συγκεκριμένο τομέα [21], [73], [77], [103].

3.5.3 Γεωργία (Smart Agriculture)

Η υιοθέτηση του IoT στη γεωργία ενισχύει την ακρίβεια, την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα των καλλιεργειών μέσω τεχνολογιών όπως αισθητήρες εδάφους, παρακολούθηση καιρού, απομακρυσμένο έλεγχο άρδευσης, εντοπισμό ζώων και drones παρακολούθησης. Οι απαιτήσεις είναι συνδυασμός μεγάλης εμβέλειας, χαμηλής κατανάλωσης και αξιοπιστίας, καθώς οι συσκευές συχνά λειτουργούν σε απομακρυσμένες περιοχές με περιορισμένη πρόσβαση σε ηλεκτρικό ρεύμα. Αναλυτικότερα:

- Μεγάλη εμβέλεια για κάλυψη εκτεταμένων εκτάσεων.
- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας για μακροχρόνια λειτουργία με μπαταρία ή ηλιακή ενέργεια.
- Ικανοποιητική αξιοπιστία και ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικές συνθήκες.
- Δυνατότητα υποστήριξης πολλαπλών κόμβων σε απομακρυσμένες τοποθεσίες.
- Επαρκές bandwidth για περιοδική μεταφορά αισθητηριακών δεδομένων.
- Χαμηλό κόστος εξοπλισμού και συντήρησης.

Τα πρωτόκολλα που εφαρμόζονται κατά κόρων στη γεωργία, είναι τα παρακάτω:

- **LoRaWAN:** Μεγάλη εμβέλεια (έως και 10 km σε αγροτικές περιοχές) και εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση, καθιστούν το LoRaWAN ιδανικό για διασπορά αισθητήρων σε ευρείες γεωργικές εκτάσεις. Υποστηρίζει περιοδική μετάδοση μικρών πακέτων δεδομένων με αξιόπιστο τρόπο.
- **Zigbee:** Χρήσιμο σε μικρότερες εκτάσεις ή θερμοκήπια, όπου η τοπολογία πλέγματος αυξάνει την αξιοπιστία και διευκολύνει τη δικτύωση πολλών αισθητήρων σε περιορισμένη περιοχή.
- **NB-IoT:** Εφαρμόζεται σε περιοχές με κάλυψη δικτύου κινητής τηλεφωνίας, κατάλληλο για μετάδοση αισθητηριακών δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε απομακρυσμένα σημεία.
- **6LoWPAN:** Επιτρέπει την ενοποίηση IP-based δικτύων σε μικρές έως μεσαίες εκτάσεις, με χαμηλή κατανάλωση και δυνατότητα διασύνδεσης με άλλα δίκτυα.

Αντιθέτως, τα παρακάτω βρίσκουν περιορισμένη εφαρμογή στον τομέα αυτόν:

- **Wi-Fi:** Η περιορισμένη εμβέλεια και η υψηλή κατανάλωση ενέργειας το καθιστούν μη βέλτιστο για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές σε ανοιχτούς χώρους.
- **BLE:** Περιορισμένη εμβέλεια και μικρός αριθμός υποστηριζόμενων κόμβων το καθιστούν πιο κατάλληλο για εφαρμογές μικρού βεληνεκούς.
- **RFID και NFC:** Περιορίζονται κυρίως σε εφαρμογές ταυτοποίησης και ιχνηλασιμότητας προϊόντων, όχι για συνεχή συλλογή δεδομένων πεδίου.
- **Wireless M-Bus:** Δεν είναι ευρέως διαδεδομένο σε αγροτικές εφαρμογές [21], [73], [102], [103].

3.5.4 Εκπαίδευση (Smart Education)

Η ενσωμάτωση του IoT στον τομέα της εκπαίδευσης μετασχηματίζει ριζικά το σχολικό και πανεπιστημιακό περιβάλλον, εισάγοντας «έξυπνες» τάξεις, διαδραστικά βοηθήματα, παρακολούθηση παρουσιών, έλεγχο φωτισμού και κλιματισμού, καθώς και εξατομικευμένη μάθηση. Οι απαιτήσεις σε αυτό το πλαίσιο σχετίζονται κυρίως με συνεχή σύνδεση, ικανοποιητικό bandwidth, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, ασφάλεια προσωπικών δεδομένων, καθώς και υποστήριξη τοπολογιών με πολλαπλές συσκευές. Κύρια κριτήρια επιλογής πρωτοκόλλου αποτελούν τα παρακάτω:

- Αρκετό bandwidth και αξιοπιστία για διαχείριση video/audio ροών ή αισθητήρων.
- Χαμηλή καθυστέρηση (latency) σε αλληλεπιδραστικές εφαρμογές.
- Υποστήριξη σύνδεσης πολλών κόμβων στην ίδια τάξη ή κτίριο.

- Ασφαλής διαχείριση δεδομένων μαθητών και προσωπικού.

Τα καταλληλότερα πρωτόκολλα, που πληρούν αποτελεσματικότερα τις παραπάνω προϋποθέσεις, είναι τα κάτωθι:

- **Wi-Fi:** Χάρη στο υψηλό bandwidth και την ευρεία διαθεσιμότητά του, είναι το κυρίαρχο πρωτόκολλο σε εκπαιδευτικούς χώρους. Επιτρέπει ροή βίντεο, πρόσβαση στο διαδίκτυο και ελεγχόμενη επικοινωνία μεταξύ συσκευών και υποδομών (π.χ. έξυπνοι πίνακες, tablets). Όμως, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας το καθιστά λιγότερο κατάλληλο για αισθητήρες με μπαταρία μεγάλης διάρκειας.
- **Zigbee:** Ιδανικό για δίκτυα αισθητήρων χαμηλής κατανάλωσης σε τάξεις ή εργαστήρια, όπως π.χ. αισθητήρες φωτεινότητας, παρουσίας ή CO₂. Παρέχει ικανοποιητική κλιμάκωση και ασφάλεια, αν και το χαμηλό bandwidth το περιορίζει από χρήσεις που απαιτούν έντονη δικτυακή δραστηριότητα.
- **BLE:** Κατάλληλο για προσωπικές εφαρμογές όπως συσκευές παρακολούθησης (π.χ. wearables για φοιτητές), αλλά με περιορισμένη εμβέλεια και χαμηλή χωρητικότητα σύνδεσης πολλών κόμβων.
- **6LoWPAN:** Αν και λιγότερο διαδεδομένο στην εκπαίδευση, είναι χρήσιμο για δικτυωμένες συσκευές μικρού φορτίου σε περιβάλλοντα όπου το IPv6 απαιτείται για ενοποίηση με άλλες υπηρεσίες του campus (smart building management).

Χρήσιμες, αλλά λιγότερο κατάλληλες εφαρμογές, παρουσιάζουν τα παρακάτω πρωτόκολλα:

- **LoRaWAN** και **NB-IoT:** Δεν είναι πρακτικά για εσωτερικές, πυκνές τοπολογίες και υψηλή διαδραστικότητα.
- **RFID** και **NFC:** Μπορεί να αξιοποιηθούν επικουρικά για αναγνώριση παρουσίας ή έλεγχο πρόσβασης, όχι όμως ως κύρια δίκτυα επικοινωνίας.
- **Wireless M-Bus:** Σχεδιάστηκε κυρίως για εφαρμογές μέτρησης (smart metering) και όχι για γενική επικοινωνία αισθητήρων ή φορητών συσκευών. Παρουσιάζει περιορισμένο ρυθμό μετάδοσης, μικρό εύρος payload και απουσία υποστήριξης για δυναμική διασύνδεση πολλών κόμβων, κάτι που είναι απαραίτητο σε έξυπνες τάξεις ή περιβάλλοντα IoT μάθησης.

3.5.5 Logistics (Εξυπνες Εφοδιαστικές Αλυσίδες)

Η υιοθέτηση IoT τεχνολογιών στον τομέα των logistics στοχεύει στη βελτίωση της παρακολούθησης και διαχείρισης προϊόντων σε όλα τα στάδια της αλυσίδας εφοδιασμού – από την παραγωγή, την αποθήκευση, τη μεταφορά, έως και την τελική διανομή. Κρίσιμες εφαρμογές περιλαμβάνουν ιχνηλασιμότητα παλετών και προϊόντων, παρακολούθηση συνθηκών μεταφοράς (θερμοκρασία, υγρασία), εντοπισμό οχημάτων και ελέγχους πρόσβασης, ενώ οι απαιτήσεις του πεδίου κατονομάζονται παρακάτω:

- Υποστήριξη κινητικότητας και δυνατότητα παρακολούθησης γεωγραφικής θέσης.
- Δυνατότητα ιχνηλασιμότητας μέσω ταυτοποίησης και αποθήκευσης δεδομένων.
- Χαμηλή κατανάλωση για αισθητήρες σε παλέτες ή εμπορευματοκιβώτια.
- Επαρκές bandwidth για αποστολή δεδομένων περιβαλλοντικών συνθηκών.
- Υψηλή αξιοπιστία επικοινωνίας σε ποικίλα περιβάλλοντα (αποθήκες, οχήματα, εξωτερικοί χώροι).
- Ενσωμάτωση με υπάρχοντα πληροφοριακά συστήματα ERP/WMS.

Καταλληλότερα πρωτόκολλα για τις παραπάνω προδιαγραφές είναι:

- **NB-IoT:** Κατάλληλο για παρακολούθηση εμπορευμάτων σε κίνηση, με χαμηλή κατανάλωση και ευρεία κάλυψη μέσω υφιστάμενων κυψελοειδών δικτύων. Παρέχει αξιόπιστη σύνδεση σε αστικές και αγροτικές περιοχές.
- **LoRaWAN:** Ιδανικό για εσωτερική παρακολούθηση παλετών σε αποθήκες ή σταθμούς μεταφόρτωσης, χάρη στη μεγάλη εμβέλεια και δυνατότητα λειτουργίας χωρίς κυψελοειδές δίκτυο.
- **RFID:** Ευρέως χρησιμοποιούμενο για ταυτοποίηση προϊόντων, ετικετοποίηση και ιχνηλασιμότητα. Οι παθητικές RFID ετικέτες είναι εξαιρετικά οικονομικές και δεν απαιτούν μπαταρία.
- **NFC:** Κατάλληλο για κοντινή ταυτοποίηση σε σημεία ελέγχου ή παράδοσης, ειδικά σε αστικές διανομές.
- **Wi-Fi:** Εφαρμόζεται σε αποθηκευτικούς χώρους ή οχήματα με σταθερή παροχή ρεύματος, για συνεχή σύνδεση με ERP/WMS.

Λιγότερο κατάλληλα πρωτόκολλα, αποδεικνύονται τα κάτωθι:

- **Zigbee και BLE:** Παρότι προσφέρουν χαμηλή κατανάλωση, η περιορισμένη εμβέλεια και η μειωμένη υποστήριξη κινητικότητας τα καθιστούν λιγότερο κατάλληλα για εφαρμογές με υψηλή γεωγραφική διασπορά.
- **Wireless M-Bus:** Δεν έχει σχεδιαστεί για σενάρια μετακινούμενων οντοτήτων, όπως εμπορεύματα σε κίνηση.
- **6LoWPAN:** Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αποθήκες, αλλά απαιτεί πιο πολύπλοκη υποδομή και διασύνδεση IP [21], [80], [101], [102], [105].

3.5.6 Έξυπνο σπίτι (Smart Home)

Η τεχνολογία IoT στα έξυπνα σπίτια εστιάζει στον αυτοματισμό και στην απομακρυσμένη διαχείριση λειτουργιών του οικιακού περιβάλλοντος. Εφαρμογές περιλαμβάνουν τον έλεγχο φωτισμού, θέρμανσης/ψύξης, ασφάλειας, οικιακές συσκευές και διαχείριση ενέργειας. Οι απαιτήσεις ενός smart home, συνοψίζονται παρακάτω:

- Χαμηλή κατανάλωση ενέργειας για αισθητήρες και ενεργοποιητές με τροφοδοσία από μπαταρία.
- Υποστήριξη δικτύων mesh ή άλλων τοπολογιών εντός του σπιτιού.
- Επαρκής ασφάλεια για αποτροπή παραβίασης δεδομένων και συστημάτων.
- Χαμηλή καθυστέρηση σε λειτουργίες αυτοματισμού (π.χ. ενεργοποίηση φωτισμού).
- Συμβατότητα με hubs ή συσκευές gateway για ενοποίηση των υποσυστημάτων.
- Εύκολη εγκατάσταση και συντήρηση από μη ειδικούς χρήστες.

Κατάλληλα πρωτόκολλα, για εφαρμογές smart home, είναι τα κάτωθι:

- **Zigbee:** Πολύ διαδεδομένο σε προϊόντα έξυπνου σπιτιού λόγω υποστήριξης mesh τοπολογίας, χαμηλής κατανάλωσης και αξιοπιστίας. Ιδανικό για αισθητήρες, ενεργοποιητές, και smart switches.
- **BLE:** Χρησιμοποιείται σε προσωπικές συσκευές και wearable controllers. Με υποστήριξη BLE Mesh, επεκτείνει τη λειτουργικότητά του σε εφαρμογές έξυπνων σπιτιών.
- **Wi-Fi:** Χρησιμοποιείται ευρέως για συσκευές με αυξημένες απαιτήσεις bandwidth όπως κάμερες, φωνητικοί βοηθοί και media centers. Παρότι έχει αυξημένη κατανάλωση, η μόνιμη σύνδεση σε ρεύμα το καθιστά κατάλληλο σε πολλές περιπτώσεις.

- **6LoWPAN:** Λειτουργεί σε IP-based δίκτυα για αισθητήρες και ενεργοποιητές. Είναι λιγότερο διαδεδομένο, αλλά χρήσιμο σε ενσωματωμένες υποδομές που απαιτούν IPv6.

Ωστόσο, τα παρακάτω πρωτόκολλα αδυνατούν να καλύψουν τις απαιτήσεις ενός smart home:

- **LoRaWAN** και **NB-IoT:** Η μεγάλη εμβέλεια είναι περιττή για εφαρμογές περιορισμένου χώρου, ενώ οι χαμηλοί ρυθμοί μετάδοσης και το υψηλό latency τα καθιστούν ακατάλληλα για real-time αυτοματισμούς.
- **RFID** και **NFC:** Μπορούν να χρησιμοποιηθούν επικουρικά για αναγνώριση ταυτότητας ή ενεργοποίηση λειτουργιών (π.χ. κλειδαριές), όχι όμως ως κύρια μέθοδος επικοινωνίας.
- **Wireless M-Bus:** Προορίζεται κυρίως για μετρητές κατανάλωσης ενέργειας και όχι για ευρύτερο οικιακό αυτοματισμό [21], [77], [104].

3.5.7 Έξυπνες Πόλεις (Smart Cities)

Ο όρος Smart Cities αναφέρεται στη χρήση τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνιών για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών, τη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα της αστικής διακυβέρνησης. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν διαχείριση απορριμμάτων, έξυπνο φωτισμό, παρακολούθηση ατμοσφαιρικής ρύπανσης, κυκλοφοριακή διαχείριση, στάθμευση και έξυπνες μεταφορές. Απαραίτητες προϋποθέσεις, για την υλοποίηση των εφαρμογών έξυπνων πόλεων, είναι οι παρακάτω:

- Υποστήριξη μεγάλου αριθμού αισθητήρων διασκορπισμένων γεωγραφικά.
- Μεγάλη εμβέλεια επικοινωνίας με περιορισμένη ανάγκη για ενδιάμεσους κόμβους.
- Χαμηλή κατανάλωση για αισθητήρες που λειτουργούν με μπαταρία.
- Διαφοροποίηση στις ανάγκες bandwidth, από bytes έως video.
- Δυνατότητα λειτουργίας σε υπαίθριο και αστικό περιβάλλον.
- Υψηλή αξιοπιστία και ασφάλεια σε κρίσιμες υποδομές.

Τα πρωτόκολλα, που παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εφαρμογή των παραπάνω, είναι τα κάτωθι:

- **LoRaWAN:** Ιδανικό για εφαρμογές όπως διαχείριση απορριμμάτων, έξυπνος φωτισμός ή περιβαλλοντικοί αισθητήρες. Μεγάλη εμβέλεια και πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας επιτρέπουν τη μακρόχρονη χρήση σε πυκνά ή απομακρυσμένα σημεία της πόλης.
- **NB-IoT:** Παρέχει υψηλή αξιοπιστία, υποστήριξη για μεγάλο αριθμό στατικών αισθητήρων και αξιοποιεί υπάρχοντα κυψελοειδή δίκτυα. Κατάλληλο για εφαρμογές στάθμευσης, έξυπνης μέτρησης ή διαχείρισης πόρων.
- **Zigbee:** Κατάλληλο για εφαρμογές σε μικρότερες περιοχές ή εσωτερικούς χώρους, όπως φωτισμός κτιρίων, αισθητήρες θερμοκρασίας ή παρουσίας, λόγω της δυνατότητας mesh δικτύωσης και χαμηλής κατανάλωσης.

Από την άλλη, τα πρωτόκολλα που δεν προτείνονται για εφαρμογή στις έξυπνες πόλεις, είναι:

- **Wi-Fi:** Παρά το μεγάλο εύρος ζώνης, η κατανάλωση ενέργειας και η ανάγκη σταθερής παροχής ρεύματος το καθιστούν ακατάλληλο για εγκαταστάσεις σε απομακρυσμένα σημεία χωρίς συνεχή παροχή ενέργειας.
- **BLE:** Περιορίζεται από τη μικρή εμβέλεια και την περιορισμένη δυνατότητα σύνδεσης πολλών κόμβων. Χρησιμοποιείται κυρίως επικουρικά (π.χ. σε beacon εφαρμογές).

- **RFID και NFC:** Παρά το ρόλο τους σε συστήματα αναγνώρισης ή ελέγχου πρόσβασης, δεν εξυπηρετούν ως βασική υποδομή επικοινωνίας για έξυπνες πόλεις λόγω περιορισμένης εμβέλειας και παθητικής λειτουργίας.
- **6LoWPAN:** Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για IPv6 δίκτυα αισθητήρων σε μικρής κλίμακας έργα, αλλά η εμβέλεια και η ωριμότητα της υποδομής περιορίζουν τη γενικευμένη χρήση του.
- **Wireless M-Bus:** Η περιορισμένη του υποστήριξη για αμφίδρομη επικοινωνία, μικρό εύρος ζώνης και περιορισμένο payload, το καθιστούν ακατάλληλο για πιο σύνθετες, διαδραστικές, ή πραγματικού χρόνου υπηρεσίες που απαιτούν τα έξυπνα αστικά περιβάλλοντα [21], [77], [80], [102].

3.5.8 Έξυπνα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας (Smart grid)

Τα έξυπνα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας αξιοποιούν το IoT για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης ενέργειας. Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν παρακολούθηση φορτίου, ανίχνευση σφαλμάτων, έξυπνους μετρητές, αυτόματη επαναφορά γραμμών και διαχείριση μικροδικτύων. Πρόκειται για κρίσιμες υποδομές που απαιτούν υψηλή αξιοπιστία, ασφάλεια και διαθεσιμότητα. Οι απαιτήσεις, ενός έξυπνου δικτύου ενέργειας, είναι οι παρακάτω:

- Υψηλή αξιοπιστία και ανοχή σε σφάλματα.
- Αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ μετρητών, υποσταθμών και κέντρων ελέγχου.
- Κλιμάκωση για εκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές.
- Χαμηλή κατανάλωση για απομακρυσμένα σημεία.
- Δυνατότητα λειτουργίας σε διαφορετικά περιβάλλοντα (αστικά/αγροτικά).
- Ισχυρή κρυπτογράφηση και ασφάλεια δεδομένων.

Τα πρωτόκολλα που αξιοποιούνται και πληρούν τις παραπάνω προδιαγραφές, είναι τα παρακάτω:

- **NB-IoT:** Χάρη στη μεγάλη κάλυψη, την αξιοποίηση των υφιστάμενων κυψελοειδών δικτύων και την αξιοπιστία του, είναι κατάλληλο για απομακρυσμένες και διάσπαρτες ενεργειακές υποδομές, όπως μετρητές ή υποσταθμούς. Προσφέρει ασφάλεια και δυνατότητα λειτουργίας σε υπόγειες ή απομονωμένες εγκαταστάσεις [103].
- **Wireless M-Bus:** Έχει αναπτυχθεί ειδικά για εφαρμογές μέτρησης και υποστηρίζει ασφάλεια, χαμηλή κατανάλωση και λειτουργία σε μεγάλες αποστάσεις. Ιδανικό για συστήματα έξυπνης μέτρησης, ιδιαίτερα στην Ευρώπη, όπου αποτελεί καθιερωμένο πρότυπο [100].
- **LoRaWAN:** Χρήσιμο για συμπληρωματικές εφαρμογές, όπως αισθητήρες παρακολούθησης περιφερειακών συστημάτων ή για λειτουργίες που δεν απαιτούν συχνή αποστολή δεδομένων. Η μεγάλη εμβέλεια και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας αποτελούν πλεονεκτήματα [102].

Τεχνολογίες οι οποίες δεν βρίσκουν χρήση στις εφαρμογές του smart grid, είναι οι παρακάτω:

- **Wi-Fi:** Αν και διαθέτει μεγάλο bandwidth, απαιτεί συνεχή τροφοδοσία και δεν ενδείκνυται για εγκαταστάσεις σε απομακρυσμένα σημεία ή για μακροχρόνια λειτουργία χωρίς συντήρηση.
- **Zigbee και 6LoWPAN:** Παρότι είναι κατάλληλα για δίκτυα αισθητήρων σε μικρότερη κλίμακα (π.χ. μέσα σε κτίρια), δεν προσφέρουν την απαιτούμενη εμβέλεια ή αξιοπιστία για κρίσιμες εφαρμογές ηλεκτρικής ενέργειας σε ευρεία κλίμακα.
- **BLE, RFID και NFC:** Δεν καλύπτουν τις ανάγκες για μεγάλη εμβέλεια, συνεχόμενη μετάδοση δεδομένων ή υποστήριξη πολλών κόμβων, και επομένως δεν χρησιμοποιούνται σε αυτόν τον τομέα [21], [53], [102], [103].

3.5.9 Smart Metering

Το πεδίο του Smart Metering περιλαμβάνει την απομακρυσμένη και αυτόματη καταγραφή κατανάλωσης ενέργειας, νερού ή φυσικού αερίου, τη μετάδοση των δεδομένων στους παρόχους και τη δυνατότητα ενημέρωσης και αλληλεπίδρασης με τον καταναλωτή. Αφορά κυρίως εφαρμογές από επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και έξυπνες πόλεις. Για την κάλυψη των αναγκών του smart metering, τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται, πρέπει να πληρούν τις κάτωθι προδιαγραφές:

- Πολύ χαμηλή κατανάλωση ενέργειας για αισθητήρες με μακρά διάρκεια ζωής μπαταρίας (10+ έτη).
- Υποστήριξη περιοδικής και αξιόπιστης αποστολής μικρού όγκου δεδομένων.
- Υψηλή εμβέλεια για διασύνδεση διασκορπισμένων μετρητών.
- Υψηλή αξιοπιστία και ασφάλεια κατά τη μεταφορά δεδομένων.
- Υποστήριξη μεγάλης πυκνότητας κόμβων σε αστικά περιβάλλοντα.

Τα πρωτόκολλα που ανταπεξέρχονται καλύτερα στις ανωτέρω απαιτήσεις και συμβάλουν στη λειτουργία του smart metering, είναι:

- **NB-IoT:** Σχεδιασμένο για εφαρμογές μαζικού IoT, προσφέρει χαμηλή κατανάλωση, μεγάλη εμβέλεια και υψηλή αξιοπιστία επικοινωνίας, ακόμη και σε υπόγειες ή απομακρυσμένες περιοχές. Ιδανικό για στατικές συσκευές όπως οι έξυπνοι μετρητές.
- **Wireless M-Bus:** Ειδικά σχεδιασμένο για την ασύρματη μετάδοση δεδομένων από μετρητές κατανάλωσης, με υποστήριξη για μοντέλα μονής κατεύθυνσης (S, T mode) και αμφίδρομης επικοινωνίας (C mode). Έχει χαμηλή κατανάλωση και μεγάλη εμβέλεια.
- **LoRaWAN:** Κατάλληλο για εγκαταστάσεις σε αγροτικές ή αραιοκατοικημένες περιοχές λόγω της μεγάλης εμβέλειας και της υποστήριξης uplink traffic. Χαμηλή κατανάλωση και καλή διεύθυνση σε εσωτερικούς χώρους.

Αντιθέτως, τα παρακάτω δεν πληρούν τις προδιαγραφές του smart metering σε ικανοποιητικό βαθμό, για να αξιοποιηθούν στη πράξη:

- **Wi-Fi** και **BLE:** Παρότι ευρέως διαθέσιμα, η υψηλή κατανάλωση (Wi-Fi) και η μικρή εμβέλεια/ικανότητα σύνδεσης πολλών κόμβων (BLE) τα καθιστούν ακατάλληλα για αυτόνομα δίκτυα μακράς διάρκειας.
- **Zigbee** και **6LoWPAN:** Παρέχουν χαμηλή κατανάλωση και mesh δυνατότητες, αλλά δεν επαρκούν για αποστάσεις που συχνά απαιτούνται στις εγκαταστάσεις smart metering χωρίς χρήση repeater ή gateway σε κάθε εγκατάσταση.
- **RFID** και **NFC:** Δεν ενδείκνυνται για αυτόνομη επικοινωνία μετρητών, καθώς βασίζονται σε παθητική ή πολύ βραχυπρόθεσμη επικοινωνία εγγύτητας [21], [80], [100], [102].

3.6 Συμπερασματική ανασκόπηση

Η παρούσα συγκριτική μελέτη, ανέδειξε τη σημασία της ορθής επιλογής πρωτοκόλλου επικοινωνίας στο πλαίσιο του Internet of Things, βάσει των ειδικών αναγκών κάθε εφαρμογής. Καθώς οι IoT εφαρμογές ποικίλλουν σημαντικά, ως προς τις απαιτήσεις, σε ενεργειακή αποδοτικότητα, εμβέλεια, ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, ασφάλεια, υποστήριξη τοπολογιών και μέγιστο φορτίο ανά πακέτο, η επιλογή πρωτοκόλλου δεν μπορεί να είναι γενική, αλλά θα πρέπει να βασίζεται σε εμπειριστατωμένα κριτήρια. Τα κύρια συμπεράσματα, που μπορούν να αντληθούν από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε, είναι τα παρακάτω:

- **Δεν υπάρχει «καθολικά βέλτιστο» πρωτόκολλο:** Κάθε πρωτόκολλο (π.χ. LoRaWAN, Zigbee, NB-IoT) ανταποκρίνεται καλύτερα σε συγκεκριμένες συνθήκες και απαιτήσεις. Για παράδειγμα, ενώ το Wi-Fi είναι κατάλληλο για εφαρμογές υψηλού bandwidth όπως η εκπαίδευση ή τα smart homes, δεν είναι ιδανικό για απομακρυσμένους αισθητήρες ή περιοχές χωρίς συνεχή τροφοδοσία.
- **Η εμβέλεια και η κατανάλωση ενέργειας, βρίσκονται συχνά σε αντίστροφη σχέση:** Πρωτόκολλα μεγάλης εμβέλειας όπως το LoRaWAN ή το NB-IoT επιτυγχάνουν κάλυψη χιλιομέτρων, αλλά με περιορισμένο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων. Αντίθετα, πρωτόκολλα όπως το Wi-Fi ή το BLE προσφέρουν μεγαλύτερη ταχύτητα, αλλά σε μικρότερες αποστάσεις και με υψηλότερη κατανάλωση.
- **Η ασφάλεια και η αξιοπιστία είναι κρίσιμες σε βιομηχανικές και κρίσιμες υποδομές:** Εφαρμογές όπως το Smart Grid ή η υγειονομική περίθαλψη απαιτούν πρωτόκολλα με ισχυρά μέτρα κρυπτογράφησης, αξιόπιστη μετάδοση και δυνατότητα λειτουργίας σε περιβάλλοντα με παρεμβολές ή υψηλή πυκνότητα κόμβων. Το NB-IoT, το Wireless M-Bus και το Zigbee προσφέρουν αξιόπιστες λύσεις στους τομείς αυτούς.
- **Η τυποποίηση και η διαλειτουργικότητα παραμένουν προκλήσεις:** Πρωτόκολλα όπως το 6LoWPAN ενισχύουν τη διαλειτουργικότητα μέσω της χρήσης IPv6, καθιστώντας τα ελκυστικά για εφαρμογές όπου απαιτείται ενοποίηση με υφιστάμενα δίκτυα.

Συνολικά, η μελέτη ανέδειξε ότι η επιλογή πρωτοκόλλου δεν μπορεί να βασίζεται σε έναν μόνο δείκτη, όπως η ταχύτητα ή η απόσταση, αλλά απαιτεί πολυκριτηριακή προσέγγιση. Οι εφαρμογές IoT, από τη γεωργία έως τα έξυπνα δίκτυα ενέργειας, διαφοροποιούνται, τόσο σε τεχνικές απαιτήσεις, όσο και σε περιβαλλοντικούς περιορισμούς, καθιστώντας αναγκαία την ενδελεχή ανάλυση των χαρακτηριστικών κάθε διαθέσιμου πρωτοκόλλου.

4. Το IoT στη γεωργία

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το σημείο της μελέτης, γίνεται μια ξεχωριστή αναφορά στον τομέα της γεωργίας και τους τρόπους με τους οποίους το IoT, ιδιαίτερα τα πρωτόκολλα επικοινωνίας χαμηλού επιπέδου, έχουν φέρει την επανάσταση στη βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας, την μείωση στις απώλειες και την καλύτερη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων από τους παραγωγούς. Στόχος του κεφαλαίου, είναι να αναδείξει τη σημασία και τον ρόλο του IoT στη γεωργία, μέσα από παραδείγματα εφαρμογών και μελέτες περιπτώσεων (case studies), καθώς δείχνουν πώς το IoT εφαρμόζεται στην πράξη σε πραγματικά αγροτικά περιβάλλοντα, καταδεικνύοντας τη στρατηγική σημασία της τεχνολογίας αυτής, για το μέλλον της αγροτικής παραγωγής.

4.2 Η γεωργία του σήμερα

Παρότι κατά το δεύτερο μισό του 20ού αιώνα υιοθετήθηκαν σημαντικές τεχνολογικές καινοτομίες, όπως μηχανοποίηση, χημική λίπανση και γενετική βελτίωση καλλιεργειών, ο σύγχρονος αγροτικός τομέας εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σοβαρές προκλήσεις, όπως:

- Κλιματική αλλαγή και ακραία καιρικά φαινόμενα.
- Υπερκατανάλωση υδάτινων πόρων.
- Υποβάθμιση του εδάφους και απώλεια βιοποικιλότητας.
- Ελλείψεις σε εργατικό δυναμικό.
- Ανάγκη για αύξηση παραγωγής με περιορισμένα μέσα.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η γεωργία ακριβείας (precision agriculture) και ειδικότερα το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, έχουν αναδειχθεί ως καταλύτες ενός τεχνολογικού μετασχηματισμού, που υπόσχεται να μεταμορφώσει ριζικά τις αγροτικές πρακτικές. Μέσω της ενσωμάτωσης αισθητήρων, συστημάτων συλλογής δεδομένων, δικτυακής συνδεσιμότητας και ανάλυσης πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο, το IoT επιτρέπει στον γεωργό:

- Να καταγράφει και να παρακολουθεί κρίσιμες παραμέτρους όπως η υγρασία του εδάφους, η θερμοκρασία, η υγεία των φυτών ή των ζώων.
- Να λαμβάνει τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με την άρδευση, τη λίπανση ή την πρόληψη ασθενειών.
- Να αυτοματοποιεί λειτουργίες όπως το πότισμα, ο αερισμός ή η καταγραφή δεδομένων.
- Να μειώνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των αγροτικών δραστηριοτήτων.

Η υιοθέτηση του IoT στον αγροτικό τομέα δεν αποτελεί μια μονοδιάστατη διαδικασία, αλλά εκτείνεται σε πολλαπλές περιοχές δραστηριότητας. Σε εφαρμογές όπως η έξυπνη άρδευση (Smart Irrigation), οι αγρότες μπορούν να παρακολουθούν την κατάσταση των καλλιεργειών τους σε πραγματικό χρόνο και να εφαρμόζουν στοχευμένη άρδευση, μέσω αισθητήρων υγρασίας και θερμοκρασίας εδάφους. Οι αυτοματισμοί ενεργοποιούν αντλίες ή βαλβίδες μόνο όταν είναι απαραίτητο, μειώνοντας την κατανάλωση νερού. Τυπικά χρησιμοποιούμενα πρωτόκολλα στην έξυπνη άρδευση, είναι τα LoRaWAN, Zigbee, NB-IoT και Wireless M-Bus, επιτυγχάνοντας μείωση σπατάλης νερού έως και 30%, αυξημένη απόδοση καλλιεργειών και προστασία από υπεράρδευση.

Παράλληλα, μέσω της παρακολούθησης καλλιεργειών (Crop Monitoring), οι αγρότες έχουν την δυνατότητα να παρακολουθούν τα επίπεδα θρεπτικών συστατικών, καθώς και πιθανές ασθένειες στα

σπαρτά τους, με τη χρήση αισθητήρων που τοποθετούνται, είτε στο έδαφος, είτε σε drones για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με την υγεία των φυτών. Σε αυτό συμβάλουν, καθοριστικά, πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως LoRaWAN, NB-IoT και 6LoWPAN, πετυχαίνοντας έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων και στοχευμένη επέμβαση, με λιγότερα φυτοφάρμακα ή λιπάσματα.

Στην ίδια φιλοσοφία με την παρακολούθηση καλλιεργειών, λειτουργεί και η παρακολούθηση ζωικού κεφαλαίου (Livestock Monitoring). Με χρήση αισθητήρων θερμοκρασίας, GPS, και επιταχυνσιόμετρων ενσωματωμένων σε wearable συσκευές, οι αγρότες μπορούν να παρακολουθούν την υγεία, την κίνηση και την αναπαραγωγική κατάσταση των ζώων. Με αυτόν τον τρόπο, εξασφαλίζουν τη βελτίωση της υγείας του κοπαδιού, την έγκαιρη ανίχνευση ασθενειών και την πρόληψη απώλειας ζώων.

Επιπλέον, η γεωργία ακριβείας συνδυάζει πληροφορίες από πολλαπλές πηγές (αισθητήρες, δορυφορικές εικόνες, IoT πλατφόρμες), για να δημιουργήσει χάρτες μεταβλητής εφαρμογής (variable rate maps), που επιτρέπουν την τοπικά προσαρμοσμένη λίπανση, σπορά ή φυτοπροστασία. Ενώ μέσω δικτυωμένων ελεγκτών και cloud υπηρεσιών, ο αγρότης μπορεί να διαχειρίζεται από απόσταση θερμοκήπια, δεξαμενές νερού, συστήματα εξαερισμού, ακόμα και τις πύλες των εκτροφείων. Έτσι, επιτυγχάνεται η μείωση ανάγκης για ανθρώπινη παρουσία, ο έλεγχος κρίσιμων συστημάτων σε πραγματικό χρόνο, η ορθολογική χρήση εισροών, η προστασία του περιβάλλοντος.

Η εφαρμογή του IoT στη γεωργία δεν αποτελεί πια θεωρητική έννοια αλλά απτή πραγματικότητα σε πολλές περιοχές του κόσμου, που χρησιμοποιούν κινητές πλατφόρμες παρακολούθησης. Η ψηφιοποίηση του αγροτικού τομέα διαμορφώνει μια νέα εποχή «έξυπνης γεωργίας» (smart farming), στην οποία η παραγωγή είναι περισσότερο αποδοτική, βιώσιμη και προσαρμοσμένη στις ανάγκες της εποχής [21], [73], [87], [100], [102], [103].

4.3 Μελέτες Περίπτωσης (Case Studies)

Η εφαρμογή του IoT στη γεωργία δεν παραμένει θεωρητική αλλά έχει ήδη υλοποιηθεί σε διάφορα γεωγραφικά και αγροτικά περιβάλλοντα, με εντυπωσιακά αποτελέσματα. Ακολουθούν ορισμένες χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογών που αναδεικνύουν τη συμβολή διαφορετικών πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου σε πραγματικά αγροτικά έργα.

4.3.1 Έξυπνη άρδευση με LoRaWAN στην Πέτα Αχαΐας (Πλατφόρμα AREThOU5A)

Στο χωριό Πέτα Αχαΐας, στην περιφέρεια της Πελοποννήσου, αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε πιλοτικά μια καινοτόμος IoT πλατφόρμα για την έξυπνη άρδευση ελαιώνων, στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου AREThOU5A (Advancing Rational Exploitation of Water Irrigation Using 5G-IoT Capabilities). Η υλοποίηση βασίστηκε στο πρωτόκολλο LoRaWAN, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα της μεγάλης εμβέλειας και της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας που προσφέρει, ιδανικά για γεωργικά περιβάλλοντα μεγάλης κλίμακας και χαμηλής πυκνότητας.

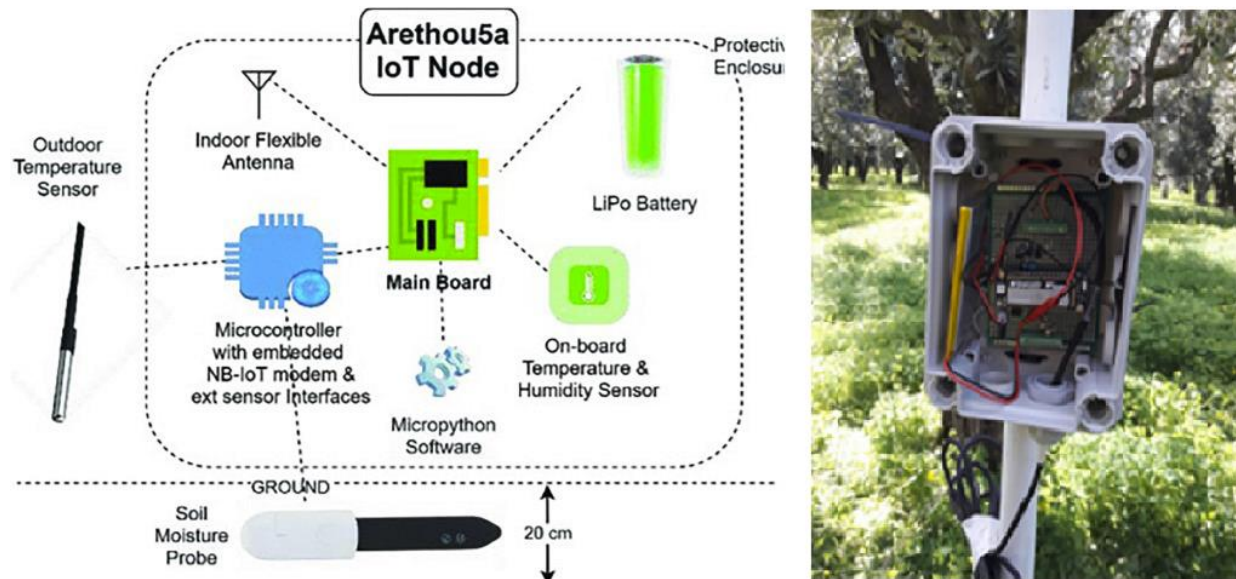


Σχήμα 4.1: Κάτοψη του ελαιώνα 22 στρεμμάτων που εφαρμόστηκε το σύστημα [106]

Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε σε ελαιώνα έκτασης 22 στρεμμάτων, με περίπου 300 ελαιόδεντρα ποικιλίας Καλαμών, άνω των 40 ετών (Εικόνα 4.1). Ο ελαιώνας διέθετε εγκατεστημένο στάγδην σύστημα άρδευσης, ενώ η μέχρι πρότινος διαχείριση της άρδευσης γινόταν εμπειρικά από τον παραγωγό. Το σύστημα βασίστηκε σε τετραεπίπεδη αρχιτεκτονική:

1. **Κόμβοι αισθητήρων IoT:** Χρησιμοποιήθηκαν Rysom LoPy4 μικροελεγκτές με αισθητήρες υγρασίας εδάφους EC-5 και θερμοκρασίας, οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε βάθη 30, 60 και 90 cm. Οι κόμβοι τροφοδοτούνταν από μπαταρίες Li-Po και μετρούσαν δεδομένα ανά ώρα, μεταδίδοντας τα ασύρματα μέσω LoRaWAN.
2. **LoRaWAN Gateway:** Εγκατεστημένος κοντά στον ελαιώνα, ο σταθμός πρόσβασης (gateway) λάμβανε τα δεδομένα των κόμβων και τα μετέφερε στο cloud μέσω 4G.
3. **Κεντρική δικτυακή υποδομή:** Υλοποιήθηκε backend με LoRaWAN packet forwarder, που υποστηρίζει σύνδεση, ασφάλεια (με κρυπτογράφηση), και μετατροπή σε πρωτόκολλα IP (π.χ. MQTT).
4. **Cloud-based πλατφόρμα:** Ανέπτυξε αποθήκευση (InfluxDB), dashboards παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο και API επικοινωνίας με τρίτα συστήματα. Η πλατφόρμα βασίζεται σε Dockerized μικρο-υπηρεσίες για ευελιξία και επεκτασιμότητα.

Παρακάτω στο Σχήμα 4.2, παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική δομή και η υλική απεικόνιση του κόμβου AREThOU5A, που εφαρμόστηκε πιλοτικά στο παραπάνω σημείο.



Σχήμα 4.2: Αρχιτεκτονική του κόμβου AREThOU5A [106]

Το σύστημα λειτούργησε για 2 χρόνια, από το 2019 έως το 2021, με συνεχή παρακολούθηση υγρασίας και θερμοκρασίας εδάφους, καθώς και καταγραφή διαγνωστικών στοιχείων. Παρατηρήθηκε μείωση της κατανάλωσης νερού κατά 42% το 2020 και 25% το 2021, σε σύγκριση με το έτος βάσης 2019. Τα αποτελέσματα και τα οφέλη αυτής της εφαρμογής ήταν σημαντικά, καθώς η πλατφόρμα επέτρεψε στον παραγωγό, να εφαρμόζει πολιτικές άρδευσης βάσει δεδομένων, αυξάνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας τις απώλειες. Επίσης, η λύση αυτή υιοθέτησε ανοιχτή αρχιτεκτονική, μειώνοντας το κόστος και επιτρέποντας την επεκτασιμότητα σε άλλες αγροτικές εκτάσεις.

Με αυτόν τον τρόπο, η χρήση της τεχνολογίας LoRaWAN σε αστικό ελληνικό περιβάλλον, επιβεβαίωσε την αποτελεσματικότητά της στην αγροτική πράξη, ενώ παράλληλα υλοποιήθηκε μια ενιαία πλατφόρμα παρακολούθησης και ελέγχου, φιλική προς τον τελικό χρήστη, με δυνατότητα ιστορικής ανάλυσης και υποστήριξη λήψης αποφάσεων [106].

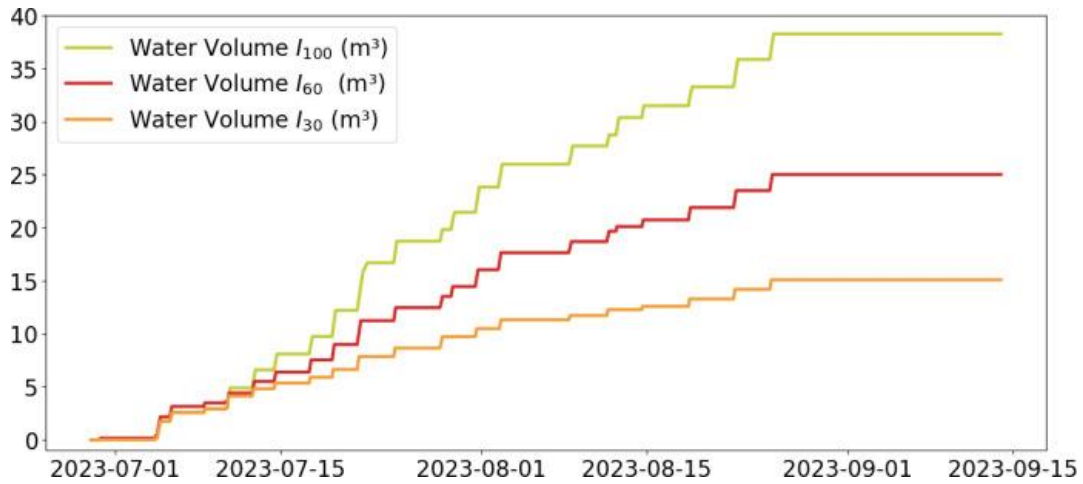
4.3.2 Εφαρμογή IoT για βελτιστοποίηση άρδευσης στην καλλιέργεια τομάτας στην Ιταλία

Η χρήση τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) βρίσκει ιδιαίτερα αποδοτική εφαρμογή στην καλλιέργεια βιομηχανικής τομάτας, καθώς επιτρέπει την ακριβή παρακολούθηση των μικροκλιματικών και φυτοφυσιολογικών παραμέτρων που επηρεάζουν την ανάπτυξη και την παραγωγικότητα των φυτών. Στην περιοχή της Πάρμας, στο πειραματικό αγρόκτημα Azienda Agraria Sperimentale Stuard, εφαρμόστηκε μια ολοκληρωμένη IoT πλατφόρμα με στόχο την εξοικονόμηση νερού και την προσαρμογή της άρδευσης στις πραγματικές ανάγκες των φυτών.

Η μελέτη βασίστηκε στην πλατφόρμα Agriware, η οποία λειτουργεί ως σύστημα συγκέντρωσης, επεξεργασίας και απεικόνισης δεδομένων πεδίου. Η επικοινωνία των αισθητήρων έγινε μέσω LoRaWAN, με εγκατεστημένους αισθητήρες που καταγράφουν:

- υγρασία και θερμοκρασία εδάφους
- θερμοκρασία και υγρασία αέρα
- κατανάλωση και θερμοκρασία του νερού άρδευσης

Η καλλιέργεια αφορούσε την ποικιλία HEINZ 1301 και η άρδευση γινόταν με στάγδην σύστημα και ελεγχόταν πλήρως από το σύστημα Agriware. Εξετάστηκαν τρία σενάρια άρδευσης, όπως φαίνεται και στο σχήμα:



Σχήμα 4.3: Όγκος νερού για τα τρία σενάρια άρδευσης στην πειραματική καλλιέργεια (I100, I60, I30) [107]

- **I100:** 100% της συνιστώμενης ποσότητας (βάσει του ιταλικού συστήματος Irriframe)
- **I60:** 60% (ήπιο υδατικό stress)
- **I30:** 30% (έντονο stress)

Παρατηρήθηκε, πως το σενάριο I60 εμφάνισε βέλτιστη απόδοση ως προς την εξοικονόμηση νερού, χωρίς να μειωθεί ουσιαστικά η παραγωγικότητα. Αντίθετα, το σενάριο I30 οδήγησε σε σημαντική μείωση της εμπορεύσιμης παραγωγής και αύξηση του φαινομένου Blossom-End Rot (BER).

Εν κατακλείδι, η πλατφόρμα IoT λειτούργησε αποτελεσματικά ως εργαλείο πρόβλεψης και ανάλυσης, παρέχοντας δεδομοκεντρική λήψη αποφάσεων και βελτιώνοντας την ακρίβεια της άρδευσης. Η μελέτη αυτή, ανέδειξε τον καθοριστικό ρόλο του IoT στη βιώσιμη γεωργία, προσφέροντας δυνατότητες αυτοματοποιημένης παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, εξοικονόμησης φυσικών πόρων και προσαρμογής των πρακτικών καλλιέργειας στις ανάγκες του κάθε αγρού [107].

4.3.3 Παρακολούθηση ζώων στην Αυστραλία με Ceres Tag και NB-IoT/δορυφορική σύνδεση.

Η Αυστραλία, με τις τεράστιες εκτάσεις βοσκοτόπων και την έντονη εκτροφή βοοειδών, αντιμετωπίζει σοβαρές προκλήσεις στον εντοπισμό, την παρακολούθηση και τη διαχείριση μεγάλων κοπαδιών. Στο πλαίσιο αυτό, η αυστραλιανή εταιρεία Ceres Tag, ανέπτυξε μια καινοτόμο λύση βασισμένη σε IoT τεχνολογία για έξυπνη παρακολούθηση ζώων, χωρίς την ανάγκη φυσικής εγγύτητας ή παραδοσιακών δικτύων κινητής τηλεφωνίας.

Η ανάγκη για τον ακριβή εντοπισμό των ζώων σε απομακρυσμένες εκτάσεις εκατοντάδων χιλιομέτρων, η παρακολούθηση της υγείας και της συμπεριφοράς τους, καθώς και η πρόληψη απώλειας ζώων λόγω τραυματισμών, αρπαγών ή φυσικών καταστροφών, οδήγησε στην ανάπτυξη ενός φορητού συστήματος εντοπισμού και ανάλυσης δεδομένων που λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο. Το Ceres Tag είναι μια έξυπνη και αυτόνομη ετικέτα αυτιού, η οποία περιλαμβάνει:

- GPS για εντοπισμό θέσης των ζώων ανά πάσα στιγμή.
- Αισθητήρες επιταχυνσιόμετρου και θερμοκρασίας, που εντοπίζουν την κινητική δραστηριότητα, την ανάπαυση, πιθανή ασθένεια ή ακινησία.
- Δορυφορική επικοινωνία, σε περιοχές χωρίς NB-IoT κάλυψη, μέσω των Globalstar και Iridium, με δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων χωρίς την ύπαρξη κυψελοειδούς υποδομής.
- Μπαταρία μεγάλης διάρκειας (άνω των 5 ετών), χωρίς ανάγκη φόρτισης ή αλλαγής.
- Cloud-based πλατφόρμα, στην οποία αποστέλλονται τα δεδομένα των ζώων και παρουσιάζονται σε dashboard στον αγρότη ή διαχειριστή του κοπαδιού.

Χάρη στην δορυφορική παρακολούθηση, η εταιρεία κατέγραψε περιστατικά εύρεσης ζώων σε περιοχές, όπου δεν υπήρχε καμία προηγούμενη δυνατότητα εντοπισμού. Ανιχνεύθηκε, έγκαιρα, περιορισμός της ζωικής δραστηριότητας, παραδείγματος χάριν από τραυματισμό, επιτρέποντας ταχεία επέμβαση. Επιπλέον, Η τοποθεσία των ζώων ήταν διαθέσιμη ανά πάσα στιγμή, αποτρέποντας παραβιάσεις και απώλειες, ενώ το σύστημα ήταν εύχρηστο και λειτουργικό, χωρίς τεχνική εξειδίκευση, επιτρέποντας στους ίδιους τους αγρότες να αναλύουν τα δεδομένα.

Αν και η Ceres Tag χρησιμοποιεί κυρίως δορυφορική σύνδεση, η ίδια αρχιτεκτονική είναι τεχνικά συμβατή και με NB-IoT όπου υπάρχει υποδομή. Στην Αυστραλία, λόγω της χαμηλής πυκνότητας κάλυψης NB-IoT, η επιλογή δορυφορικής τεχνολογίας είναι πιο λειτουργική, ειδικά σε βοσκοτόπια [21], [108].

4.4 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση τεχνολογιών IoT στον αγροτικό τομέα, έχει αναδείξει νέες δυνατότητες για βιώσιμη και αποδοτική γεωργία, προσφέροντας λύσεις που υπερβαίνουν τις παραδοσιακές μεθόδους διαχείρισης καλλιεργειών. Οι μελέτες περίπτωσης που εξετάστηκαν, από την άρδευση ελαιώνων στην Πέτα Αχαΐας, έως την παρακολούθηση ζώων στην Αυστραλία, επιβεβαιώνουν τον μετασχηματιστικό χαρακτήρα του IoT στη σύγχρονη γεωργική πρακτική.

Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου και της τεχνολογικής αρχιτεκτονικής εξαρτάται από το εκάστοτε αγρονομικό σενάριο. Το LoRaWAN, ήταν καταλυτικό για την έξυπνη άρδευση σε απομακρυσμένα αγροκτήματα χωρίς υπάρχουσες δικτυακές υποδομές, χάρη στην υψηλή εμβέλεια και τη χαμηλή κατανάλωση ενέργειας. Επίσης, η καλλιέργεια τομάτας με χρήση IoT στην Ιταλία (με LoRaWAN και το Agriware σύστημα), ανέδειξε την εξοικονόμηση νερού και την υποστήριξη αποφάσεων μέσω αναλυτικών εργαλείων και τεχνητής νοημοσύνης, ενώ η παρακολούθηση ζωικού κεφαλαίου μέσω Ceres Tag (με δορυφορική συνδεσιμότητα) επιβεβαίωσε την αναγκαιότητα αξιοποίησης IoT και σε εκτεταμένες περιοχές χωρίς NB-IoT κάλυψη.

Οφέλη από την αξιοποίηση του IoT στη γεωργία, αναδεικνύονται στους συνεχείς αυτοματισμός και μείωση ανθρώπινης παρέμβασης, όπου η συνεχιζόμενη συλλογή δεδομένων και η απομακρυσμένη διαχείριση ελαχιστοποιούν την ανάγκη για επί τόπου έλεγχο. Η αποδοτικότερη χρήση πόρων, ιδιαίτερα στο νερό και την ενέργεια, είναι μείζονος σημασίας και οι τεχνολογίες IoT συμβάλλουν σημαντικά στη βιώσιμη χρήση τους. Στην αύξηση παραγωγικότητας, η προσαρμογή πρακτικών καλλιέργειας βάσει δεδομένων οδηγεί σε βελτιωμένες αποδόσεις, καθώς και στην έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων μέσω παρακολούθησης κίνησης και συμπεριφοράς ζώων.

Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματα, υπάρχουν ακόμα προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Η διαλειτουργικότητα συσκευών και πρωτοκόλλων, ειδικά όταν εμπλέκονται πολλοί κατασκευαστές, αποτελεί σημαντικό εμπόδιο στην ορθή και αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων, που απαιτούν αξιόπιστη συνεργασία μεταξύ των συσκευών. Επίσης, εμπόδιο αποτελούν οι απαιτήσεις ενεργειακής αυτονομίας, ιδιαίτερα σε απομονωμένες περιοχές και η ανάγκη για κατάλληλη εκπαίδευση των αγροτών ώστε να αξιοποιούν τα δεδομένα αποτελεσματικά. Αυτό συνοδεύεται από την ανεπαρκή επέκταση της κάλυψης δικτύων LPWAN, ή NB-IoT στις αγροτικές περιοχές.

Παρόλα αυτά, η δυναμική του IoT στη γεωργία είναι ξεκάθαρη και αποδεικνύει, πως το μέλλον της καλλιέργειας είναι ψηφιακό, άμεσα συνδεδεμένο και βασισμένο στη γνώση που προέρχεται από δεδομένα πραγματικού χρόνου όπως και στην ορθή εκμετάλλευσή τους.

4.5 Επίλογος

Η μετάβαση προς μια έξυπνη και βιώσιμη αγροδιατροφή δεν αποτελεί πλέον ένα θεωρητικό ενδεχόμενο, αλλά μια πραγματικότητα που υλοποιείται σταδιακά μέσα από στοχευμένες παρεμβάσεις και τεχνολογικές εφαρμογές στον πρωτογενή τομέα. Τα παραδείγματα από την Ελλάδα, την Ιταλία και την Αυστραλία καταδεικνύουν ότι, παρά τις γεωγραφικές και κλιματικές διαφοροποιήσεις, η αξιοποίηση του Διαδικτύου των Πραγμάτων μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη: εξοικονόμηση πόρων, αυτοματοποίηση, ενίσχυση της παραγωγικότητας και, κυρίως, λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων.

Πέρα από τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις αποδόσεις των πρωτοκόλλων, αυτό που αναδεικνύεται ως κοινός παρονομαστής είναι η ανάγκη για ανοιχτές, επεκτάσιμες και χρηστικές λύσεις, που να ενσωματώνουν τις τεχνολογικές δυνατότητες χωρίς να επιβαρύνουν τον τελικό χρήστη. Η εφαρμογή των συστημάτων αυτών στην αγροτική παραγωγή αποτελεί ουσιαστικά γέφυρα μεταξύ της τεχνολογικής καινοτομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης, προετοιμάζοντας τον αγροτικό τομέα για τις προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής και της παγκόσμιας επισιτιστικής ασφάλειας. Η πορεία αυτή απαιτεί όχι μόνο τεχνογνωσία και υποδομές, αλλά και διεπιστημονική συνεργασία, εκπαίδευση των παραγωγών και ενίσχυση της τοπικής καινοτομίας. Τα case studies που παρουσιάστηκαν δεν είναι παρά τα πρώτα βήματα ενός ευρύτερου μετασχηματισμού, ο οποίος βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη.

5. Μελλοντικές προοπτικές και ΑΙ για τα πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου στο ΙοΤ

5.1 Εισαγωγή

Τα πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου αποτελούν τη ραχοκοκαλιά των ΙοΤ δικτύων, καθώς διαχειρίζονται την ασύρματη σύνδεση των αισθητήρων, σε περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους, ειδικές απαιτήσεις εμβέλειας, αξιοπιστίας και κατανάλωσης ενέργειας. Με τις ανάγκες των εφαρμογών να εξελίσσονται και τον αριθμό των συνδεδεμένων συσκευών να αυξάνεται ραγδαία, καθίσταται επιτακτική η ενσωμάτωση προηγμένων μηχανισμών αυτοπροσαρμογής και νοημοσύνης στο επίπεδο των πρωτοκόλλων επικοινωνίας.

Σε αυτό το πλαίσιο, η τεχνητή νοημοσύνη αναδεικνύεται ως καταλύτης για τη δυναμική διαχείριση ραδιοδιαύλου, την πρόβλεψη συμπεριφοράς δικτύου, την εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς και την ανίχνευση και απόκριση σε ανωμαλίες ασφαλείας.

5.2 ΑΙ-Driven βελτιστοποίηση παραμέτρων και διαχείριση ενέργειας

Η τεχνητή νοημοσύνη (Artificial Intelligence, AI) και τα Machine Learning (ML) μοντέλα προσφέρουν λύσεις για δυναμική και προγνωστική βελτιστοποίηση. Μελετώντας σε πραγματικό χρόνο μετρήσεις όπως RSSI, SNR και κατανάλωση ενέργειας κόμβων, τα συστήματα ΑΙ μπορούν να προσαρμόζουν αυτόματα ρυθμίσεις, ώστε να βελτιστοποιούν τη διατήρηση ενέργειας και την αξιοπιστία μετάδοσης. Επιπλέον, η τοποθέτηση edge-AI επιτρέπει την τοπική λήψη αποφάσεων, μειώνοντας το latency και το backhaul, ενώ παράλληλα υποστηρίζει προληπτική συντήρηση μέσω ανίχνευσης ανωμαλιών στο δίκτυο. Τέλος, τα ΑΙ-ενισχυμένα πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου, μπορούν να ενσωματώσουν έξυπνα σενάρια ασφάλειας, όπως προγνωστική ανίχνευση jamming και adaptive κρυπτογράφηση.

Οι μηχανισμοί Adaptive Data Rate (ADR) στα πρωτόκολλα LoRaWAN, επιδιώκουν τη βελτιστοποίηση του Data Rate, του airtime και της κατανάλωσης ενέργειας, αλλά η τυπική υλοποίησή τους παραμένει στατική και κυρίως εξαρτώμενη από το μέσο SNR (Signal to Noise Ratio) και το RSSI (Received Signal Strength Indicator) που λαμβάνει ο server. Το ΑΙ και η μηχανική μάθηση (machine learning, ML), χρησιμοποιούνται για την ανάλυση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων που συλλέγονται από ΙοΤ συσκευές. Αυτό επιτρέπει την αυτοματοποίηση διαδικασιών και την πρόβλεψη πιθανών βλαβών σε μηχανήματα. Επίσης, οι αλγόριθμοι ML βοηθούν στη βελτιστοποίηση της απόδοσης των ΙοΤ συστημάτων, ενώ η ενσωμάτωση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης ενισχύει τη δυνατότητα των συστημάτων ΙοΤ να λαμβάνουν αυτόνομες αποφάσεις και να προβλέπουν καταστάσεις. Με αυτόν τον τρόπο, καθίσταται δυνατή η προγνωστική ρύθμιση παραμέτρων όπως το Spreading Factor (SF) και η ισχύς εκπομπής, με βάση πλούσια χαρακτηριστικά (features) όπως RSSI, SNR, απόσταση κόμβου-gateway, και ιστορικά προφίλ κατανάλωσης

Παρομοίως, πρωτόκολλα όπως το Wireless M-Bus, που λειτουργούν με duty-cycle, μπορούν να επωφεληθούν από reinforcement learning, ώστε να προβλέπουν φορτίο κυκλοφορίας στο κανάλι και να ρυθμίζουν αυτόματα τον χρόνο αφύπνισης (wake-up) και αδράνειας (sleep), εξοικονομώντας ενέργεια όταν η κίνηση είναι χαμηλή.

Επιπρόσθετα, τα ML μοντέλα εκπαίδευσης σε δεδομένα φόρτου και τάσης μπαταρίας, επιτρέπουν την πρόβλεψη της υπολειπόμενης διάρκειας ζωής ενός κόμβου και τη μετατόπιση μη κρίσιμων

επικοινωνιών, σε περιόδους με καλύτερα κανάλια, διασφαλίζοντας συνεχή λειτουργία χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Με αυτούς τους τρόπους, το AI «αποδομεί» την παραδοσιακή, χειροκίνητα ρυθμιζόμενη λειτουργία των πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου, μετατρέποντάς τα σε έξυπνα, αυτοβελτιούμενα συστήματα, που προσαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο στο περιβάλλον και στις ανάγκες της εφαρμογής [109], [110], [111].

5.3 Edge-AI για διαχείριση δικτύου

Καθώς τα IoT δίκτυα επεκτείνονται σε απομακρυσμένες περιοχές και σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλή καθυστέρηση, η μεταφορά των υπολογιστικών διεργασιών προς την «άκρη» του δικτύου (edge) γίνεται κρίσιμη. Η χρήση τεχνικών Edge AI, δίνει τη δυνατότητα σε πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου (όπως LoRaWAN, Zigbee, BLE, NB-IoT), να λαμβάνουν τοπικές αποφάσεις, χωρίς να χρειάζεται επικοινωνία με τον κεντρικό server, μειώνοντας την καθυστέρηση, την κατανάλωση και τη συμφόρηση του backhaul.

5.3.1 Τοπική ανίχνευση ανωμαλιών σήματος (Anomaly Detection)

Οι αισθητήρες σε πρωτόκολλα όπως το LoRaWAN, μπορούν να ενσωματώσουν ελαφριούς αλγορίθμους, όπως decision trees ή threshold-based models, για να εντοπίζουν ανωμαλίες σε δείκτες ποιότητας σήματος (RSSI, SNR), ταχύτητας μετάδοσης, και χρόνων απόκρισης. Καθαυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται:

- Προληπτική διάγνωση πιθανών αστοχιών κόμβου ή πύλης (gateway)
- Ανίχνευση φαινομένων συμφόρησης
- Προσαρμογή τοπικών παραμέτρων χωρίς την ανάγκη επικοινωνίας με το cloud

Έρευνα έχει δείξει, ότι η εφαρμογή lightweight ML μοντέλων σε edge κόμβους για εντοπισμό αστοχιών μετάδοσης, μπορεί να αυξήσει την αξιοπιστία του δικτύου και να μειώσει την απώλεια πακέτων.

5.3.2 Δυναμική αναδρομολόγηση & τοπική λήψη αποφάσεων

Σε mesh πρωτόκολλα όπως το Zigbee και το 6LoWPAN, το AI μπορεί να επιτρέψει δυναμική αναδρομολόγηση (dynamic rerouting) μέσω reinforcement learning, ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση ενέργειας και τη συμφόρηση στο κανάλι. Οι κόμβοι μαθαίνουν, βάσει εμπειρίας, ποιιο «γειτονικοί» κόμβοι είναι σταθεροί και αποδοτικοί ως ενδιάμεσοι δρομολογητές (relays).

Επίσης, σε περιβάλλοντα με περιορισμένο ρεύμα (όπως αισθητήρες σε χωράφια ή δασικές περιοχές), το Edge-AI μπορεί να προβλέψει τον κύκλο αφύπνισης (wake-up) και να ενεργοποιήσει τον κόμβο μόνο όταν η πιθανότητα σημαντικής δραστηριότητας είναι υψηλή, μεγιστοποιώντας τη διάρκεια ζωής του συστήματος.

5.3.3 Συγχρονισμός με το Cloud για Συλλογική Μάθηση

Ένα ανερχόμενο πεδίο είναι η συνεργατική εκπαίδευση μοντέλων (federated learning), όπου οι edge κόμβοι μαθαίνουν τοπικά από τα δικά τους δεδομένα και στέλνουν μόνο τα παραγόμενα μοντέλα στο cloud, όχι τις πρώτες ύλες δεδομένων. Έτσι εξασφαλίζεται:

- Μικρότερη κατανάλωση bandwidth
- Προστασία ιδιωτικότητας
- Βελτίωση της ακρίβειας των μοντέλων με συλλογική γνώση

Ένα πιλοτικό έργο χρησιμοποίησε Edge-AI σε κόμβους NB-IoT για πρόβλεψη φορτίου και κατανάλωσης σε γεωργικές αντλίες, επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση ενέργειας μέσω real-time τοπικών αποφάσεων [112], [113].

5.4 Ασφάλεια & έξυπνα υβριδικά πρωτόκολλα με AI

Καθώς τα IoT δίκτυα που βασίζονται σε πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου επεκτείνονται, καθίσταται όλο και πιο επιτακτική η ανάγκη για αυξημένη ασφάλεια επικοινωνιών, χωρίς όμως την επιβάρυνση των περιορισμένων πόρων των συσκευών. Η ενσωμάτωση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης (AI) μπορεί να προσφέρει προληπτική ανίχνευση επιθέσεων, έξυπνη διαχείριση κρυπτογράφησης και προσαρμογή των μηχανισμών ασφάλειας ανάλογα με το πρωτόκολλο και το περιβάλλον.

Αρκετά πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου, όπως το LoRaWAN ή το 802.15.4 (το υπόβαθρο του Zigbee), είναι ευάλωτα σε επιθέσεις τύπου: jamming (παρεμβολή σήματος), spoofing (παραποίηση ταυτότητας κόμβου) και replay attacks (αναμετάδοση παλαιών πακέτων). Με τη χρήση ML αλγορίθμων κατηγοριοποίησης, είναι εφικτό να αναγνωριστούν «παράτυπα μοτίβα» μετάδοσης, όπως ξαφνικές αυξήσεις του αριθμού πακέτων, αλλαγές στο RSSI, ή ασυνήθιστη συμπεριφορά κόμβων, τα οποία υποδεικνύουν επίθεση. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τον προληπτικό αποκλεισμό κακόβουλων κόμβων, την αλλαγή καναλιού λειτουργίας σε περιπτώσεις παρεμβολής και την ενεργοποίηση επιπλέον επιπέδων κρυπτογράφησης μόνο όταν χρειάζεται.

Ένας σημαντικός παράγοντας ασφαλούς επικοινωνίας, όπου συμβάλει ενεργά το AI είναι κρυπτογράφηση. Η παραδοσιακή προσέγγιση στην κρυπτογράφηση, εφαρμόζει σταθερά επίπεδα ασφάλειας, ανεξαρτήτως των συνθηκών του δικτύου. Η είσοδος του AI σε αυτήν τη διαδικασία, επιτρέπει την προσαρμογή των μηχανισμών κρυπτογράφησης με βάση παράγοντες, όπως η ευαισθησία των μεταδιδόμενων δεδομένων, η ενεργειακή κατάσταση των συσκευών, και οι συνθήκες του περιβάλλοντος επικοινωνίας. Για παράδειγμα, σε ένα δίκτυο LoRaWAN, οι αισθητήρες που μεταδίδουν κρίσιμα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιούν ισχυρότερη κρυπτογράφηση, ενώ άλλοι με λιγότερο ευαίσθητα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιούν ελαφρύτερους μηχανισμούς, εξοικονομώντας ενέργεια και πόρους.

Επιπλέον, σε περιβάλλοντα όπου συνυπάρχουν πολλαπλά πρωτόκολλα επικοινωνίας, το AI μπορεί να διαχειριστεί δυναμικά τη δρομολόγηση και την επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου, με βάση την ποιότητα του σήματος, το φορτίο του δικτύου και τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Η εφαρμογή τεχνικών ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning) επιτρέπει στα δίκτυα να μαθαίνουν και να προσαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο, επιλέγοντας την καλύτερη διαδρομή ή πρωτόκολλο για τη μετάδοση δεδομένων, βελτιώνοντας την απόδοση και την αξιοπιστία του συστήματος [114].

5.5 Επίλογος

Η μελέτη των πρωτοκόλλων χαμηλού επιπέδου στο IoT ανέδειξε τη θεμελιώδη σημασία τους στην επιτυχία και βιωσιμότητα των σύγχρονων εφαρμογών, από τις πιο απλές μέχρι τις πλέον απαιτητικές. Μέσα από την τεχνική ανάλυση, τις εφαρμογές, τα κριτήρια επιλογής και τις μελλοντικές προοπτικές με επίκεντρο την τεχνητή νοημοσύνη, έγινε σαφές πως τα εν λόγω πρωτόκολλα δεν αποτελούν απλώς τεχνολογικά μέσα, αλλά δυναμικούς πυλώνες ενός ευφυούς, προσαρμοστικού και βιώσιμου IoT οικοσυστήματος. Το μέλλον τους διαφαίνεται εξελικτικό και αλληλένδετο με την πρόοδο της υπολογιστικής νοημοσύνης, ανοίγοντας τον δρόμο για ακόμη πιο αποδοτικά, ασφαλή και αυτοδύναμα δίκτυα.

6. Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις

Η παρούσα εργασία, ανέλυσε σε βάθος το οικοσύστημα του Διαδικτύου των Πραγμάτων, εστιάζοντας ιδιαίτερα στα πρωτόκολλα επικοινωνίας χαμηλού επιπέδου, τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά και τις εφαρμογές τους σε κρίσιμους τομείς της σύγχρονης κοινωνίας, όπως η βιομηχανία, η υγεία, η γεωργία και οι έξυπνες πόλεις.

Τα πρωτόκολλα χαμηλού επιπέδου, τα οποία αναλύθηκαν: LoRaWAN, Zigbee, BLE, NB-IoT, Wi-Fi, 6LoWPAN, RFID, NFC και Wireless M-Bus, συνιστούν το λειτουργικό θεμέλιο της ασύρματης επικοινωνίας σε IoT δίκτυα. Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε αποκάλυψε ότι η επιλογή του κατάλληλου πρωτοκόλλου εξαρτάται από έναν συνδυασμό παραμέτρων, όπως:

- Κατανάλωση ενέργειας και διάρκεια ζωής μπαταρίας,
- Ταχύτητα και ρυθμός μετάδοσης δεδομένων,
- Εμβέλεια και συχνότητα λειτουργίας,
- Υποστηριζόμενες τοπολογίες δικτύου,
- Επάρκεια σε μηχανισμούς ασφάλειας και αξιοπιστία επικοινωνίας.

Στο πλαίσιο των εφαρμογών, καταδείχθηκε ότι η βέλτιστη απόδοση επιτυγχάνεται όχι μέσω ενός «καθολικά καλύτερου» πρωτοκόλλου, αλλά μέσα από στοχευμένη αντιστοίχιση απαιτήσεων και τεχνικών δυνατοτήτων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη γεωργία ακριβείας, όπου μελέτες περίπτωσης επιβεβαίωσαν τη συμβολή του IoT, μέσω LPWAN και έξυπνων πλατφορμών, στη μείωση κόστους, τη βελτίωση της απόδοσης και την ενίσχυση της βιωσιμότητας των καλλιεργειών.

Μελλοντικά, καθώς το IoT συνεχίζει να εξελίσσεται, τα πρωτόκολλα του μέλλοντος θα πρέπει να διαθέτουν δυνατότητες αυτο-προσαρμογής, βασισμένες σε μηχανισμούς AI, τόσο σε επίπεδο παραμέτρων επικοινωνίας, όσο και στην ασφάλεια. Η υλοποίηση μοντέλων πρόβλεψης για την κατανάλωση, την αξιοπιστία σύνδεσης και τη βέλτιστη διαχείριση καναλιών, αναμένεται να μειώσει σημαντικά το ενεργειακό και υπολογιστικό αποτύπωμα.

Επιπλέον, η παραδοσιακή «στατική» κρυπτογράφηση, αντικαθίσταται από ευφυή σχήματα που λαμβάνουν υπόψη τον τύπο δεδομένων, την ευαισθησία εφαρμογής και το ενεργειακό προφίλ των κόμβων. Τέλος, η ανάγκη για πράσινες τεχνολογίες, θα οδηγήσει στην ανάπτυξη ενεργειακά αυτόνομων IoT κόμβων, με υποστήριξη ενεργειακής συγκομιδής (energy harvesting) και ultra-low-power πρωτοκόλλων. Το IoT δεν είναι πλέον τεχνολογική καινοτομία του μέλλοντος, είναι ήδη εδώ. Η βαθύτερη κατανόηση και αξιολόγηση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας χαμηλού επιπέδου, αποτελεί θεμέλιο για τον σχεδιασμό καινοτόμων, αποδοτικών και βιώσιμων συστημάτων. Η τεχνητή νοημοσύνη, η αυτονομία και η ασφάλεια θα είναι οι πυλώνες πάνω στους οποίους θα στηριχθεί η επόμενη γενιά IoT.

Βιβλιογραφία

- [1] Atzori, L., Iera, A., & Morabito, (2010). *The Internet of Things: A survey*. Computer Networks.
- [2] Evans, D. (2011). *The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything*. Cisco.
- [3] Durgesh Kekare (2023) *IoT and Data Connectivity: Building a Smart World*. DataExpertise Available: <https://www.dataexpertise.in/iot-data-connectivity-building-smart-world/>
- [4] Ashton, K. (2009). *That 'Internet of Things' Thing*. RFID Journal.
- [5] McKinsey & Company (2020). *The future of IoT connectivity*.
- [6] Evans, D. (2011). *The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything*. Cisco White Paper.
- [7] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). *Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions*. Future Generation Computer Systems
- [8] Mandeep Kaur1 Rajni Aron, (2021) *A systematic study of load balancing approaches in the fog computing environment* The Journal of Supercomputing
- [9] *Layers of IoT Architecture*, bclabs. Accessed: 20/02/2025. [ONLINE]. Available: <https://bcalabs.org/subject/iot-architectural-view-iot-sources-and-m2m-communication>
- [10] Al-Fuqaha, A. et al. (2015). *Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols and Applications*. IEEE Communications Surveys & Tutorials.
- [11] Zhang, Y., & Wen, J. (2017). *An IoT electric business model based on the protocol of BitCoin*. In Proceedings of the 2017 2nd International Conference on Crowd Science and Engineering.
- [12] *What are the Roles of IoT sensors?* Renkeer. Accessed: 20/02/2025. [ONLINE]. Available: <https://www.renkeer.com/iot-sensors-applications/>
- [13] Rayes, A. & Salam, S. (2017) *Internet of Things: From Hype to Reality*. Springer.
- [14] Buyya, R., & Dastjerdi, A. V. (2016). *Internet of Things: Principles and Paradigms*. Morgan Kaufmann.
- [15] *Did you know: Why is the platform so important and what does it have to do with fog?* Microtronics. Available: <https://microtronics.com/en/blog-en/did-you-know-why-is-the-platform-so-important-and-what-does-it-have-to-do-with-fog/>
- [16] Bonomi, F., Milito, R., Zhu, J., Addepalli, S. (2014). *Fog Computing and Its Role in the Internet of Things*. ACM MCC.
- [17] Zhou, Z., et al. (2019). *Edge Intelligence: Paving the Last Mile of Artificial Intelligence with Edge Computing*. Proceedings of the IEEE, 107(8), 1738–1762.
- [18] Khan, R., Khan, S. U., Zaheer, R., & Khan, S. (2012). *Future Internet: The Internet of Things Architecture, Possible Applications and Key Challenges*. 2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology.

- [19] *Big Data Quality Challenges for the Internet of Things (IoT)*, Vassilis Christophides INRIA Paris (MUSE team). Available: <https://slideplayer.com/slide/10517675/>
- [20] Zhang, Y., Qiu, M., Tsai, C. W., Hassan, M. M., & Alamri, A. (2017). Health-CPS: *Healthcare Cyber-Physical System Assisted by Cloud and Big Data*. IEEE Systems Journal
- [21] Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). *Internet of Things for Smart Cities*. IEEE Internet of Things Journal
- [22] Da Xu, L., He, W., & Li, S. (2014). *Internet of Things in Industries: A Survey*. IEEE Transactions on Industrial Informatics
- [23] *IoT Elements, Layered Architectures and Security Issues: A Comprehensive Survey* Muhammad Burhan
- [24] Akshet Patel “*Connecting to the future with IoT.*” Wordpress Available: <https://connectwithiot.wordpress.com/2020/11/01/device-layer/>
- [25] Al-Fuqaha, A., et al. (2015). *Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications*. IEEE Communications Surveys & Tutorials.
- [26] “*Overview of Spintronic Sensors, Internet of Things, and Smart Living*” Liu Xuyang K.H. Lam Prewitt K. Zhu[...] Philip W. T. Pong
- [27] Ahmad, R. W., et al. (2020). *Security for Smart Devices: Challenges and Solutions*. Computers & Electrical Engineering.
- [28] Natalia G. Miloslavskaya Alexander Tolstoy (2020) *IoTBlockSIEM for information security incident management in the internet of things ecosystem* Available: https://www.researchgate.net/figure/Generalized-six-layer-IoT-architecture_fig3_342533068
- [29] Kim, J., et al. (2017). *A Survey on the Evolution of the Internet of Things Architectures and Technologies*. Journal of Information Processing Systems.
- [30] IoT-A Project. (2013). *Internet of Things Architecture (IoT-A) – Deliverables and Reference Model*.
- [31] Bandyopadhyay, D., & Sen, J. (2011). *Internet of Things: Applications and Challenges in Technology and Standardization*. Wireless Personal Communications.
- [32] Robert Agar (2022) *IoT Architecture Guide. Major and Additional Layers of IoT System*. Available: <https://www.helpwire.app/blog/iot-architecture/>
- [33] N.M.Masoodhu, C.Sujatha *IoT Architecture - Cisco IBM Intel* Cisco Systems. (2017).
- [34] Sumit Kumar, Sumit Dalal, Vivek Dixit (2014) *The OSI model: Overview on the seven layers of computer networks* International Journal of Computer Science and Information Technology Research
- [35] Mohammed M. Alani (2014) *Guide to OSI and TCP/IP Models* SpringerBriefs in Computer Science
- [36] Victor Aaron Winnercoz (2023) *What is TCP/IP Model* Linux Diary. Available: <https://medium.com/linux-diary/what-is-tcp-ip-model-9410b9a4776b>
- [37] Kurose, J. F., & Ross, K. W. (2017). *Computer Networking: A Top-Down Approach* (7th ed.)
- [38] Kumar, S., Dalal, S., & Dixit, V. (2014). *The OSI Model: Overview on the Seven Layers of Computer Networks*. *Int. J. of Computer Science and Information Technology Research Computer Networks*

Βιβλιογραφία

- [39] Tanenbaum, A. S., & Wetherall, D. J. (2011). *Computer Networks* (5th ed.)
- [40] Muhammad Burhan, Rana Asif Rehman, Bilal Khan, Byung-Seo Kim *IoT Layered Architectures with Security Attacks*. Sensors 2018
- [41] A Novel MQTT Security Framework in Generic IoT Model. *Procedia Computer Science*, 2020.
- [42] Analysis of CoAP Implementations for Industrial Internet of Things. *Procedia Computer Science*, 2017.
- [43] *Performance evaluation of AMQP over QUIC in the internet-of-thing*. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 2023.
- [44] G. Pardo-Castellote, (2003) *OMG Data-Distribution Service: architectural overview*
- [45] D. Gourley, B. Totty (2002) *HTTP The Definitive Guide*.
- [46] XMPP: A Communication Protocol for the IoT. *Open Source For You*, 2019.
- [47] Weiping S., Okhwan L., Yeonchul S., Seongwon K., Changmok Y., Hyoil K. (2014) *Wi-Fi Could Be Much More*. IEEE Communications Magazine
- [48] *End-to-end communication protocol in IoT-enabled ZigBee network*. Internet of Things, 2023
- [49] *Evolution of Bluetooth Technology: BLE in the IoT Ecosystem*. Sensors, 2025.
- [50] *Experimental Analysis of IoT Networks Based on LoRa/LoRaWAN*. Procedia Computer Science, 2021.
- [51] *Narrowband Internet of Things: A Comprehensive Study*. Computer Networks, 2020.
- [52] Z. Yang, C. Hwa Chang (2019) *6LoWPAN Overview and Implementations*. EWSN, 2019.
- [53] Zillmann, A., et al. (2010). *The Wireless M-Bus: Efficient protocol and low power wireless communication standard for smart metering*. Proceedings of the Smart Metering Workshop.
- [54] *RFID and Its Applications in the Internet of Things (IOT)* Available: <https://www.rfidcard.com/rfid-and-its-applications-in-the-internet-of-things-iot/>
- [55] Zolix Instruments (2024) *Wireless Communication Protocols: NFC, Bluetooth, WiFi, and More* Available: <https://www.findlight.net/blog/wireless-communication-protocols/>
- [56] Jiang, W., Xu, H., Song, H., & Duong, T. Q. (2020). *A survey on the internet of things: Architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications*. IEEE Internet of Things Journal
- [57] Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). *Low Power Wide Area Networks: An Overview*. IEEE Communications Surveys & Tutorials
- [58] Darroudi, S. M., & Gomez, C. (2017). *Bluetooth Low Energy Mesh Networks: A Survey*. Sensors.
- [59] Coskun, V., Ozdenizci, B., & Ok, K. (2013). *Near Field Communication (NFC): From Theory to Practice*. Wiley.
- [60] Sicari, S., Rizzardi, A., Grieco, L. A., & Coen-Porisini, A. (2015). *Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead*. Computer Networks
- [61] Farhan, L., Kharel, R., Chalhoub, G., & Al-Karaki, J. N. (2021). *IoT Security: Review, Blockchain Solutions, and Open Challenges*. Future Generation Computer Systems

- [62] Vermesan, O., & Friess, P. (Eds.). (2017). *Digitising the Industry - Internet of Things Connecting the Physical, Digital and Virtual Worlds*. River Publishers.
- [63] Ray, P. P. (2018). *A Survey on Internet of Things Architectures*. Journal of King Saud University, Computer and Information Sciences
- [64] Ali, M. S., Vecchio, M., Pincheira, M., Rehmani, M. H., & Antonelli, F. (2021). *Applications of Narrowband Internet of Things (NB-IoT): A Survey*. IEEE Internet of Things Journal
- [65] Silva, B. N., Khan, M., & Han, K. (2020). *Internet of Things: A Comprehensive Review of Enabling Technologies, Security and Privacy, and Future Research Directions*. IEEE Access
- [66] Shelby, Z., & Bormann, C. (2012). *6LoWPAN: The Wireless Embedded Internet*. John Wiley & Sons.
- [67] Rahman, M. A., Islam, M. M., Islam, M. R., & Kwak, K. S. (2019). *Zigbee-based smart metering system for energy efficiency*. Journal of Communications and Networks
- [68] Faragher, R., & Harle, R. (2015). *Location Fingerprinting With Bluetooth Low Energy Beacons*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications
- [69] LoRa Alliance. (2020). *LoRaWAN Specification v1.0.3*.
- [70] Centenaro, M., Vangelista, L., Zanella, A., & Zorzi, M. (2016). *Long-Range Communications in Unlicensed Bands: The Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios*. IEEE Wireless Communications
- [71] Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. (2016). *A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things*. Sensors
- [72] Semtech Corporation. (2021). *LoRa Modulation Basics*
- [73] IEEE Computer Society. (2020). *IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks (IEEE Std 802.15.4-2020)*.
- [74] Kouicem, D. E., Bouabdallah, A., & Lakhlef, H. (2018). *Internet of Things Security: A Top-Down Survey*. Computer Networks
- [75] Zigbee Alliance. (2020). *Zigbee Specification: Zigbee Document 05-3474-21 Revision*
- [76] Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). *Low Power Wide Area Networks: A Survey*. IEEE Communications Surveys & Tutorials
- [77] Bluetooth SIG. (2020). *Bluetooth Core Specification v5.2*. Available: <https://www.bluetooth.com/specifications/bluetooth-core-specification/>
- [78] Kuilboer, P., & Schaad, A. (2017). *Bluetooth Low Energy: The Next Generation of Bluetooth for Low Power, Low Latency Wireless Communication*. Journal of Electrical Engineering & Technology,
- [80] Ratasuk, R., Vejlggaard, B., Mangalvedhe, N., & Ghosh, A. (2016). *NB-IoT system for M2M communication*. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)
- [81] Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). *A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment*. ICT Express,
- [82] 3GPP. (2017). *Technical Specification Group Radio Access Network; NB-IoT; Overall description*. 3GPP TS

Βιβλιογραφία

- [83] IEEE Std 802.11-2020. *IEEE Standard for Information Technology–Telecommunications and information exchange between systems–Local and metropolitan area networks–Specific requirements–Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*
- [84] Cisco (2022). *Wi-Fi 6 and Wi-Fi 6E Technology Overview*. White Paper.
- [85] Sauter, M. (2021). *From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G*. Wiley.
- [86] Hui, J., & Thubert, P. (2011). *Compression Format for IPv6 Datagrams in 6LoWPAN Networks*. RFC
- [87] Raza, S., Wallgren, L., & Voigt, T. (2013). *SVELTE: Real-time intrusion detection in the Internet of Things*. Ad hoc networks
- [88] Finkenzeller, K. (2010). *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication*. Wiley.
- [89] Juels, A. (2006). *RFID Security and Privacy: A Research Survey*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications
- [90] Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015). *Internet of Things (IoT): A literature review*. Journal of Computer and Communications
- [91] Madlmayr, G., Langer, J., Kantner, C., & Scharinger, J. (2008). *NFC Devices: Security and Privacy*. In *2008 Third International Conference on Availability, Reliability and Security*. IEEE
- [92] EN 13757-4:2019. *Communication systems for meters and remote reading of meters – Part 4: Wireless meter readout (Radio meter reading for operation in the 868 MHz SRD band)*.
- [93] Sánchez, L., Muñoz, L., Galache, J. A., Sotres, P., Santana, J. R., & Gutierrez, V. (2014). *SmartSantander: IoT experimentation over a smart city testbed*. Computer Networks
- [94] Deventer, M. O. (2014). *Wireless M-Bus Protocol Stack for Smart Metering Applications*. Journal of Communications.
- [95] Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., & Watteyne, T. (2017). *Understanding the Limits of LoRaWAN*. IEEE Communications Magazine
- [96] Sánchez-Iborra, R., & Cano, M. D. (2016). *State of the art in LP-WAN solutions for Industrial IoT*. Sensors
- [97] Want, R. (2006). *An introduction to RFID technology*. IEEE Pervasive Computing
- [98] Kushalnagar, N., Montenegro, G., & Schumacher, C. (2007). *IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals*. IETF RFC
- [99] Siekkinen, M., Hienkari, M., Nurminen, J. K., & Nieminen, J. (2012). *How low energy is Bluetooth Low Energy?* IEEE PerCom Workshops
- [100] EN 13757-4. (2013). *Wireless M-Bus Specification*
- [101] NFC Forum. (2020). *NFC Digital Protocol Technical Specification*
- [102] Semtech. (2023). *LoRa Modem Design Guide*. Camarillo, CA: Semtech Corporation Available: <https://www.semtech.com/>

- [103] Ratasuk, R., Mangalvedhe, N., & Ghosh, A. (2016). *NB-IoT system for M2M communication 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*
- [104] Bluetooth Special Interest Group (SIG). (2021). *Bluetooth Core Specification Version 5.3*. Kirkland, Available: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-3/>
- [105] Finkenzeller, K. (2010). *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication (3rd ed.)*. Chichester, UK: Wiley
- [106] Liopa-Tsakalidi, A., Thomopoulos, V., Barouchas, P., Boursianis, A.D., & Goudos, S.K. (2024). *A LoRaWAN-based IoT platform for smart irrigation in olive groves*. Smart Agricultural Technology
- [107] Galaverni, M., Oddi, G., Preite, L., Belli, L., Davoli, L., Marchioni, I., Rodolfi, M., Solari, F., Beghè, D., Ganino, T., Vignali, G., Ferrari, G. (2025). *An IoT-based data analysis system: A case study on tomato cultivation under different irrigation regimes*. Computers and Electronics in Agriculture
- [108] Dr Mulrooney K., Dr Harkness A. (2022) *Ceres Tag: An Evaluation for the Prevention, Interruption and Reduction of Livestock Theft* University of New England, Centre for Rural Criminology
- [109] Serati R., Teymuri B., Anagnostopoulos N., Rasti M. (2022) *ADR-Lite: A Low-Complexity Adaptive Data Rate Scheme for the LoRa Network*. IEEE
- [110] Prakash A., Choudhury N., Hazarika A., Gorrela A. (2025) *Effective Feature Selection for Predicting Spreading Factor with ML in Large LoRaWAN-Based Mobile IoT Networks*. IEEE
- [111] Kufakunesu R., Hancke G., Abu-Mahfouz A. (2020) *A Survey on Adaptive Data Rate Optimization in LoRaWAN: Recent Solutions and Major Challenges* Sensors
- [112] Fotis Foukalas & Athanasios Tziouvaras, (2021) *Edge Artificial Intelligence for Industrial Internet of Things Applications: An Industrial Edge Intelligence Solution*. IEEE Industrial Electronics Magazine
- [113] Khan, Z., Ahmad, A., & Latif, A. (2020). *Energy-efficient edge AI architecture for predictive maintenance in LPWANs*. Sensors
- [114] Moussa Aboubakar, Mounir Kellil, Pierre Roux (2022) *A review of IoT network management: Current status and perspectives* Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences