



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διαλειτουργικά πρωτόκολλα επικοινωνίας στο IoT

Χαλκιάπουλος Γεώργιος

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2019



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Διαλειτουργικά πρωτόκολλα επικοινωνίας στο ΙοΤ

Χαλκιάπουλος Γεώργιος

Επιβλέπων: Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15^η Ιουλίου 2019

.....
Π. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χ. Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γ. Φικιώρης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2019

.....
Γεώργιος Χ. Χαλκιάπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών
Ε.Μ.Π.

Copyright © Γεώργιος Χ. Χαλκιάπουλος, 2019
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Περίληψη

Το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση του IoT, των τεχνολογιών που καθιστούν δυνατή την υλοποίησή του και η ανάλυση των βασικότερων προκλήσεων που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν για την επιτυχή ενσωμάτωση του. Δεδομένου ότι η έννοια του IoT υπάρχει πολλά χρόνια, αλλά μόλις πρόσφατα άρχισε να γίνεται πραγματικότητα, παρουσιάζονται πολλά προβλήματα όσον αφορά την υλοποίησή του, καθώς υπάρχει έλλειψη προτυποποίησης. Σε αυτό το πλαίσιο, έχουν δημιουργηθεί οργανισμοί και ομάδες προτυποποίησης από διεθνείς ακαδημαϊκούς, κυβερνητικούς και βιομηχανικούς φορείς, οι οποίοι προτείνουν αρχιτεκτονικές και πρότυπα, τα οποία θα συμβάλλουν στην ομαλότερη ενσωμάτωση του IoT αλλά και την βιωσιμότητά του. Καθώς ο αριθμός των συσκευών αυξάνεται εκθετικά, οι υπάρχουσες τεχνολογίες cloud για την συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται από αυτές παρουσιάζουν περιορισμούς. Συνεπώς νέοι όροι, όπως edge/fog-computing έχουν κάνει την εμφάνισή τους, οι οποίοι ωθούν την επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων κοντά στις συσκευές (ή ακόμα και στις ίδιες τις συσκευές) ακολουθώντας μια αρχιτεκτονική με επίκεντρο επεξεργασίας δεδομένων τη συσκευή (device-centric). Τέλος, ένα από τα βασικά, αν όχι το βασικότερο, χαρακτηριστικά του IoT είναι η ετερογένεια των συσκευών με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η διαλειτουργικότητα. Διαφορετικές συσκευές πρέπει να είναι σε θέση να ανταλλάσσουν δεδομένα με κριτήρια την αξιοπιστία, την καθυστέρηση, την κατανάλωση ενέργειας κ.α. Έτσι είναι απαραίτητο για κάθε εφαρμογή να γίνεται λεπτομερής και σωστή επιλογή πρωτοκόλλων.

Όσον αφορά τη δομή της διπλωματικής εργασίας, στο 1^ο κεφάλαιο 1 γίνεται μια γενική εισαγωγή στο IoT. Το κεφάλαιο ξεκινά με μια σύντομη επισκόπηση της ιστορίας του IoT και των βασικών ορισμών της και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κύρια αρχιτεκτονικά μοντέλα και μοντέλα αναφοράς που προτάθηκαν τελευταία. Το κεφάλαιο αυτό παρέχει επίσης μια καλή επισκόπηση των βασικών τεχνολογιών του IoT, των κύριων τομέων εφαρμογής καθώς και των προκλήσεων που θα εμφανιστούν κατά την υλοποίησή του. Στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική με την οποία υλοποιείται το edge/fog computing για ανάλυση δεδομένων στις συσκευές στο IoT. Το 3^ο κεφάλαιο εξετάζει τους εγγενείς περιορισμούς και τα θέματα διαλειτουργικότητας του IoT. Αξιολογεί τα πρωτόκολλα που βασίζονται στο μοντέλο OSI και προτείνει κριτήρια επιλογής πρωτοκόλλων για διαφορετικές εφαρμογές του Διαδικτύου. Το κεφάλαιο παρουσιάζει οκτώ παραδείγματα περιπτώσεων χρήσης για να βοηθήσουν τους χρήστες να επιλέξουν τα σωστά πρωτόκολλα / τεχνολογίες επικοινωνίας για τα συστήματα IoT.

Λέξεις – Κλειδιά

IoT, Internet of Things, πρότυπα, πρωτόκολλα, διαλειτουργικότητα, edge computing, fog computing, device-centric

Abstract

The goal of this diploma thesis is to cover of IoT, explore the technologies that enable IoT to be implemented and highlight of the main challenges that need to be addressed for its successful integration. The concept of IoT exists for many years, but it was only recently that it has started to become a reality, hence, there are many problems with its implementation, as there is a lack of standardization. In this context, organizations and standardization teams have been set up by international academics, governmental and industrial stakeholders, who propose architectures and standards that will contribute to a smoother integration of IoT and its sustainability. As the number of devices grows exponentially, existing cloud technologies for collecting and processing data, collected from them, are restricted. So new terms such as edge / fog-computing have made their appearance that push data processing and analysis close to devices (or even the devices themselves) by following a device-centric data processing architecture. Finally, one of the most important, if not the most important, features of IoT is the heterogeneity of the devices, thus that interoperability is required. Different devices need to be able to exchange data based on reliability, delay, power consumption, and so on. It is therefore necessary for each application to make a detailed and correct selection of protocols.

Concerning the structure of this diploma thesis, a general introduction to IoT is made in Chapter 1. The chapter begins with a brief overview of the history of IoT and its basic definitions and then presents the main architectural models and reference models proposed lately. This chapter also provides a good overview of the core IoT technologies, the main areas of implementation and the challenges that will emerge during its implementation. Chapter 2 presents a multi-layered architecture that implements edge/fog computing for data analysis in IoT devices. Chapter 3 examines the inherent limitations and interoperability issues of IoT, evaluates protocols based on the OSI model and proposes protocol selection criteria for different Internet applications. The chapter presents eight examples of use cases to help users choose the right protocols/communication technologies for IoT systems.

Key words

IoT, Internet of Things, standards, protocols, interoperability, edge computing, fog computing

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, κ. Παναγιώτη Κωττή, όχι απλά σαν επιβλέποντα της διπλωματικής αυτής εργασίας, αλλά σαν καθηγητή και άνθρωπο. Στάθηκε δίπλα μου από τα πρώτα βήματά μου στη σχολή μέχρι το τέλος, και η προθυμία του να βοηθήσει τόσο στον ακαδημαϊκό, όσο και στον επαγγελματικό τομέα ήταν αξιοθαύμαστη. Οι γνώσεις που εξέλαβα από τις διαλέξεις, όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και από την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας αποδείχθηκαν πολύ σημαντικές καθώς καθορίσαν τις αποφάσεις μου για την κατεύθυνση που ακολούθησα στη σχολή και μετέπειτα στον επαγγελματικό τομέα. Κ. Κωττή σας ευχαριστώ για ότι έχετε κάνει για εμένα, για το ενδιαφέρον που δείξατε να γίνω καλύτερος φοιτητής αλλά και για την πολύτιμη βοήθεια σας στον επαγγελματικό τομέα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου που όλα αυτά τα χρόνια με στήριξε, σεβάστηκε τις επιλογές μου και ήταν πάντα δίπλα μου προσφέροντας πάντα τα καλύτερα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, και ιδιαίτερα τον Ξενοφόντα, τον Δημήτρη, τον Βαγγέλη, την Αγγελική και τον Στέλαρα (ε είσαι φίλος) οι οποίοι με στήριξαν και με βοήθησαν, ο καθένας με τον δικό του ξεχωριστό τρόπο, και χωρίς τους οποίους δεν θα είχε γίνει πραγματικότητα η απόκτηση του διπλώματος.

Στην οικογένειά μου

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων.....	5
Κατάλογος Πινάκων.....	7
1. Εισαγωγή στο IoT.....	9
1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	9
1.2 Ορισμός του IoT.....	12
1.3 Προτεινόμενες Αρχιτεκτονικές και Μοντέλα αναφοράς.....	14
1.3.1 IoT-A.....	17
1.3.2 IoT RA.....	19
1.3.3 IEEE P2413.....	20
1.3.4 Βιομηχανικές Αρχιτεκτονικές Αναφοράς.....	20
1.3.5 Άλλα Μοντέλα Αναφοράς και Αρχιτεκτονικές για το IoT.....	22
1.4 Βασικές τεχνολογίες.....	25
1.4.1 Ταυτοποίηση και Αναγνώριση.....	26
1.4.2 Σχήματα Επικοινωνίας και Πρωτόκολλα.....	27
1.4.3 Συσκευές και Αισθητήρες.....	30
1.5 Επισκόπηση Τομέων εφαρμογής.....	31
1.5.1 Τομέας μεταφορών και εφοδιασμού.....	31
1.5.2 Τομέας υγείας και πρόνοιας.....	34
1.5.3 Τομέας έξυπνων κτηρίων.....	35
1.5.4 Τομέας κοινωνικής δικτύωσης και αναψυχής.....	36
1.5.5 Μελλοντικές εφαρμογές.....	37
1.6 Προκλήσεις.....	39
1.6.1 Διαλειτουργικότητα.....	40
1.6.2 Συνδεσιμότητα.....	40
1.6.3 Προστασία, Ασφάλεια, Εμπιστοσύνη.....	40
1.6.4 Επεκτασιμότητα.....	41
1.6.5 Αντιμετώπιση Λαθών.....	42
1.7 Συμπεράσματα.....	43
2. Device-Centric IoT συστήματα (Fog/Edge Computing σε συστήματα IoT).....	45
2.1 Εισαγωγή.....	45
2.2 Ο ρόλος των αναλύσεων στα συστήματα IoT.....	47
2.2.1 Περιγραφικές διαδικασίες Ανάλυσης.....	48
2.2.2 Προγνωστικές διαδικασίες Ανάλυσης.....	48
2.2.3 Ρυθμιστικές διαδικασίες ανάλυσης.....	49

2.3	Η ανάπτυξη των Device-Centric IoT συστημάτων	50
2.3.1	Immobile Device-Centric IoT συστήματα	50
2.3.2	Mobile Device-Centric IoT συστήματα	51
2.4	Προτεινόμενη πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική Device-Centric εφαρμογών.....	52
2.4.1	Επίπεδο 1: ροή δεδομένων.....	53
2.4.2	Επίπεδο 2: ανάκτηση και προσαρμογή δεδομένων.....	53
2.4.3	Επίπεδο 3: Προεπεξεργασία δεδομένων, συγχώνευση και διαχείριση δεδομένων ...	54
2.4.4	Επίπεδο 4: Ανάλυση δεδομένων και ενσωμάτωση προτύπων γνώσης.....	54
2.4.5	Επίπεδο 5: Ασφάλεια και προστασία δεδομένων.....	54
2.4.6	Επίπεδο 6: Εφαρμογές και ενεργοποιητές.....	55
2.4.7	Επίπεδο 7: Διαχείριση συστήματος.....	55
2.5	Η εξέλιξη των Device-Centric πολυεπίπεδων αρχιτεκτονικών	56
2.5.1	Αρχιτεκτονική MOSDEN	56
2.5.2	Αρχιτεκτονική CARDAP	58
2.5.3	Αρχιτεκτονική UniMiner	59
2.6	Συμπεράσματα.....	61
3.	Διαλειτουργικά πρωτόκολλα επικοινωνίας στο IoT	63
3.1.	Εισαγωγή.....	63
3.2.	Περιορισμοί διαλειτουργικότητας	64
3.3.	Αξιολόγηση Πρωτοκόλλων που Εφαρμόζονται σε Υποδομές IoT.....	66
3.3.1.	Επίπεδο Σύνδεσης.....	66
3.3.2.	Επίπεδο Δικτύου	67
3.3.3.	Επίπεδο Μεταφοράς.....	69
3.3.4.	Επίπεδο Εφαρμογής	69
3.4.	Case-Based επιλογή πρωτοκόλλων για εφαρμογές IoT	70
3.4.1.	Σενάριο 1: Εφαρμογές IoT χαμηλού κόστους με το εξωτερικές συσκευές χαμηλής κατανάλωσης	72
3.4.2.	Σενάριο 2: Web-based εφαρμογές IoT με αμελητέους περιορισμούς ισχύος σε εξωτερικό περιβάλλον	72
3.4.3.	Σενάριο 3: Εφαρμογές IoT που απαιτούν μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και ικανότητες πολυεκπομπής από συσκευές.....	73
3.4.4.	Σενάριο 4: Εφαρμογές IoT για εξωτερικές εφαρμογές με μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις και περιορισμένο εύρος ζώνης	73
3.4.5.	Σενάριο 5: Εφαρμογές IoT με γνώμονα τα μηνύματα για περιβάλλοντα περιορισμένων πόρων	74
3.4.6.	Σενάριο 6: Εφαρμογές IoT με μεγάλους όγκους δεδομένων και απαιτήσεις ανοιχτής χρήση και διαλειτουργικότητας.....	74

3.4.7. Σενάριο 7: Java-based Εφαρμογή IoT με περιορισμούς γλώσσας/πλατφόρμας Java.....	75
3.4.8. Σενάριο 8: Εφαρμογή IoT για περιβάλλον με περιορισμό ισχύος και απαίτηση σύνδεσης μεγάλη εμβέλειας	75
3.5. Συμπεράσματα.....	76
Βιβλιογραφία.....	79
Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα – Ακρωνύμια	89

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Ο αριθμός των Things συνδεδεμένων στο Internet (Πηγή: Statista.com).....	11
Σχήμα 1.2: Το μερίδιο του IoT στην αγορά (Πηγή: Forbes.com).....	11
Σχήμα 1.3: Το Μοντέλο Αναφοράς που προτάθηκε από την IoT-A [22].	18
Σχήμα 1.4: Οι προοπτικές και οι προθέσεις της IoT-A [22].	19
Σχήμα 1.5: Η σχέση των CM, RM, RA.....	19
Σχήμα 1.6: Το RAMI 4.0.....	22
Σχήμα 1.7: Το IoT RM της Cisco.	23
Σχήμα 1.7: Η Αρχιτεκτονική RILA.	24
Σχήμα 1.8: Οι βασικές εφαρμογές του IoT.	39
Σχήμα 2.1: Η τοπολογία των σύγχρονων συστημάτων IoT.	45
Σχήμα 2.2: Η λειτουργική προσέγγιση ενός συστήματος IoT (layer-based προσέγγιση).	46
Σχήμα 2.3: Λειτουργίες ανακάλυψης γνώσης.	48
Σχήμα 2.4: Προτεινόμενη πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική device-centric εφαρμογών.	52
Σχήμα 2.5: Η αρχιτεκτονική MODSEN.....	57
Σχήμα 2.6: Η αρχιτεκτονική CARDAP.	59
Σχήμα 2.6: Η αρχιτεκτονική UniMiner.	60

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Επισκόπηση του IIRA: Απόψεις, Ανησυχίες και Ενδιαφερόμενα μέρη.....	20
Πίνακας 1.2 Επισκόπηση βασικών τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων και προτύπων του ΙοΤ.....	29
Πίνακας 1.3 Επισκόπηση βασικών τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων και προτύπων του ΙοΤ.....	31
Πίνακας 2.1 Οι πιο διαδεδομένες πλατφόρμες για Cloud-Based συστήματα ανάλυσης.....	49
Πίνακας 3.1 Case-Based επιλογή πρωτοκόλλων για εφαρμογές ΙοΤ.....	71

1. Εισαγωγή στο IoT

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Το 1989 υπήρχαν περίπου 100,000 hosts συνδεδεμένοι στο Internet [1] και ο παγκόσμιος ιστός (WWW: World Wide Web) δημιουργήθηκε ένα χρόνο αργότερα, από τον Tom Berners-Lee, στο CERN έχοντας μόνο μια ιστοσελίδα (<http://info.cern.ch/>). Δέκα χρόνια αργότερα, μια καινούργια σειρά δυνατοτήτων άρχισε να παρουσιάζεται όταν ο Kevin Ashton από το MIT εφήυρε τον όρο Internet of Things [2]. Την ίδια χρονιά ο Neil Gershenfeld δημοσίευσε την έρευνα του η οποία σχετιζόταν με αντικείμενα (things) που σκέφτονται (think) όπου οραματίστηκε την εξέλιξη του παγκόσμιου ιστού σε μια πλατφόρμα όπου “τα αντικείμενα αρχίζουν να χρησιμοποιούν το Internet έτσι ώστε να μην χρειάζεται να το χρησιμοποιούν οι άνθρωποι” [3]. Παράλληλα στο εργαστήριο Xerox PAC στην Καλιφόρνια, η Τρίτη Γενιά των υπολογιστικών συστημάτων ξημέρωνε με το Mark Weiser να παρουσιάζει το Concept την “Πανταχού Παρούσα Ηλεκτρονική Τεχνολογία» (ubiquitous computing) στο paper του *Scientific American* [4]. Σε αυτό η χρήση κινητών συσκευών, ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και αισθητήρων ήταν τα θεμέλια για την τεχνολογία του μέλλοντος, και σε συνδυασμό με αδιάληπτη πρόσβαση σε ασύρματα δίκτυα η εμπειρία του χρήστη θα είναι αβίαστη.

Το 1999 ο αριθμός των host ξεπέρασε τα 2 εκατομμύρια και ο αριθμός των ιστοσελίδων έφτασε τα 4 εκατομμύρια [1]. Το πρωτόκολλο 802.11b (Wi-Fi) του Ινστιτούτου Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE) είχε μόλις δημοσιευτεί με ρυθμούς μετάδοσης έως 11Mbps/s, το GSM αναπτυσσόταν γρήγορα αλλά τα κινητά τηλέφωνα δεν ήταν ακόμη “έξυπνα”. Η δυνατότητές τους περιοριζόντουσαν σε φωνητικές κλήσεις και αποστολή σύντομων μηνυμάτων. Το GPS για τους πολίτες ήταν πολυτέλεια, με περιορισμένη πρόσβαση, και οι δέκτες ήταν ακριβοί και ογκώδεις. Η ιδέα Ασύρματων Δικτύων Αισθητήρων (WSN: wireless sensor network) άρχισε να παρουσιάζεται την ίδια δεκαετία ως ενός δικτύου πολλών μικρών συσκευών οι οποίες μπορούν να μετρούν, να καταγράφουν, να στέλνουν δεδομένα και να επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω ενός ασύρματου δικτύου.

Μπαίνοντας στον 21^ο αιώνα, η τεχνολογική ανάπτυξη επιταχύνθηκε με έναν πρωτοφανή ρυθμό. Αν και οι εκθέσεις που δημοσιεύθηκαν 10 και 20 χρόνια μετά το όραμα του Weiser έδειξαν ότι δεν ήταν όλα όπως τα είχε οραματιστεί, εισήχθησαν σημαντικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο η τεχνολογία έχει επηρεάσει την καθημερινότητα. Οι συνήθειες άλλαξαν, η αλληλεπίδραση με την τεχνολογία άλλαξε και ο τρόπος που ο άνθρωπος μεγαλώνει, παίζει, μελετά, δουλεύει και επικοινωνεί επίσης αλλάζουμε.

Το 2005 η Διεθνής Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU) δημοσίευσε την πρώτη έκθεση για το Internet of Things (IoT), αναφέροντας:

“Οι M2M (machine-to-machine) επικοινωνίες και οι P2C (Person-to-Computer) θα επεκταθούν σε things, από καθημερινά οικιακά αντικείμενα έως αισθητήρες που παρακολουθούν την κίνηση της γέφυρας Golden Gate ή ανιχνεύουν τις δονήσεις της γης. Τα πάντα από τα ελαστικά μέχρι τις οδοντόβουρτσες θα έχουν δυνατότητα διασύνδεσης, σηματοδοτώντας την αυγή μιας νέας εποχής, στην οποία το σημερινό διαδίκτυο (των δεδομένων και των ανθρώπων) δίνει τη θέση του στο IoT του μέλλοντος.” [5]

Τρία χρόνια αργότερα, το 2008, ο αριθμός των συσκευών συνδεδεμένες στο Internet ξεπέρασε για πρώτη φορά τον πληθυσμό της γης. Η ανάπτυξη του πρωτοκόλλου IPv6

(Internet Protocol version 6), που χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα, έλυσε το πρόβλημα της εξάντλησης των διευθύνσεων που παρείχε το πρωτόκολλο IPv4. Οι τελευταίες διευθύνσεις IPv4 παραδόθηκαν σε ειδική τελετή στις 3 Φεβρουαρίου 2011 στο Μαϊάμι. [6]. Το πρώτο παγκόσμιο συνέδριο για το IoT έγινε τον Μάρτιο του 2008 όπου παρουσιάστηκαν εμπορικές και ακαδημαϊκές προτάσεις για την υλοποίηση και την ανάπτυξη της καινούργιας ιδέας του IoT. Τα επόμενα χρόνια ο αριθμός των συνεδρίων και εκδηλώσεων για το IoT αυξήθηκε δραματικά.

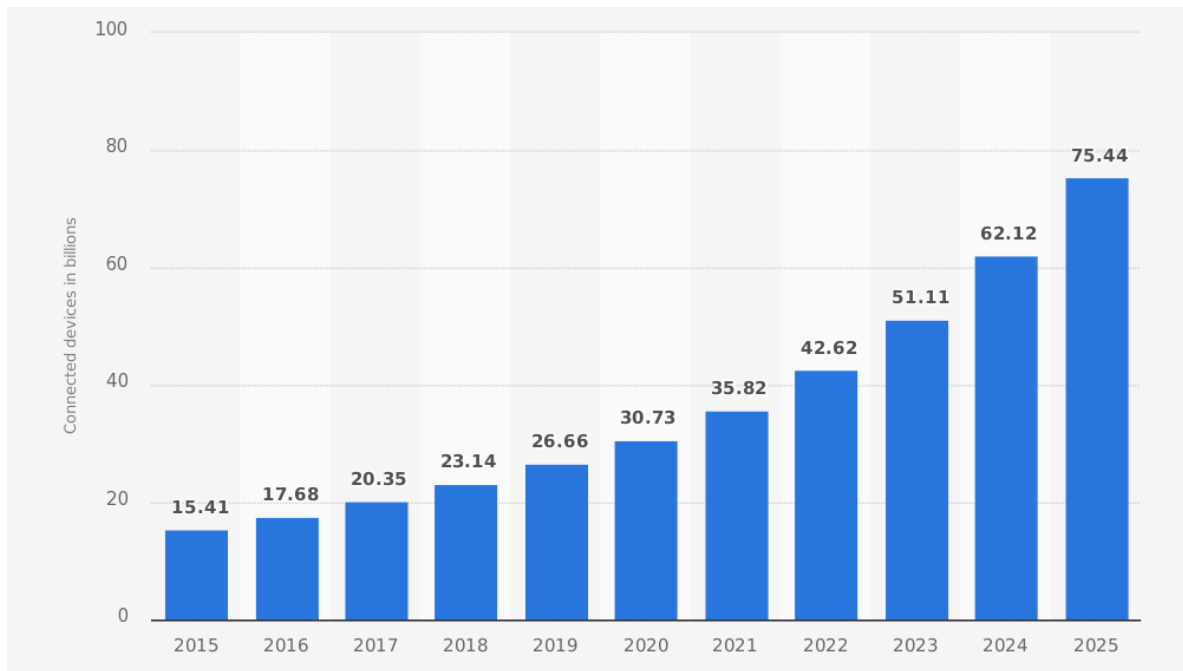
Μικροελεγκτές ανοικτού κώδικα (Open-Source) όπως το Arduino, που εισήχθησαν στην αγορά μεταξύ 2005 και 2008, κατέστησαν δυνατή την υλοποίηση τεράστιου αριθμού εφαρμογών για αυτοματισμούς κατοικιών και χώρων εργασίας, εκπαιδευτικά και ψυχαγωγικά project. Άλλα παραδείγματα μικροελεγκτών (SBC) ακολούθησαν όπως: Raspberry Pi, BeagleBone Black, Intel Edison κ.α. Σήμερα παρέχεται η δυνατότητα σε οποιονδήποτε να αγοράσει έναν μικροελεγκτή με λιγότερο από 50€, να το συνδέσει στο Internet, και με μια πληθώρα αισθητήρων και ενεργοποιητών να συλλέξει και να αναλύσει gigabytes δεδομένων φτιάχνοντας ενδιαφέρουσες εφαρμογές αυτοματισμού με δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο. Εναλλακτικά δίνεται η δυνατότητα απομακρυσμένης χρήσης δικτύων αισθητήρων τοποθετημένα για πειραματικούς σκοπούς για τη δοκιμή εφαρμογών, όπως παρέχει η OneLab.

Το 2009, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε μια έκθεση σχετικά με το σχέδιο δράσης για το IoT στην Ευρώπη. Η κίνηση αυτή έδειξε το πολύ υψηλό επίπεδο σπουδαιότητας του IoT μεταξύ των ευρωπαϊκών πολιτικών, εμπορικών και βιομηχανικών εταιρών και ερευνητών [7]. Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια, σε μορφή συζητήσεων και συνεδρίων, για την προτυποποίηση των τεχνολογιών που σχετίζονται με το IoT σε παγκόσμιο επίπεδο. Για παράδειγμα το oneM2M δημιουργήθηκε το 2012 ως ένα παγκόσμιο πρότυπο για τις τεχνολογίες M2M και IoT, για τεχνολογικές απαιτήσεις, αρχιτεκτονικές και Εφαρμογές Διεπαφής Προγραμματισμού (API) καθώς και για θέματα ασφαλείας για διαλειτουργικότητας.

Το 2015 η Ευρωπαϊκή επιτροπή δημιούργησε τη Συμμαχία για το IoT (AIOTI) για να ενθαρρύνει την αλληλεπίδραση και συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερόμενων φορέων του IoT. Το Cloud Computing, η μείωση του κόστους και του μεγέθους των αισθητήρων και μικροελεγκτών, καθώς και η δυνατότητα ασύρματης διασύνδεσης οποιασδήποτε συσκευής οπουδήποτε (πανταχού παρούσα συνδεσιμότητα) κατέστησαν δυνατή την υλοποίηση του IoT το οποίο θα αλλάξει την καθημερινότητα τα επόμενα χρόνια.

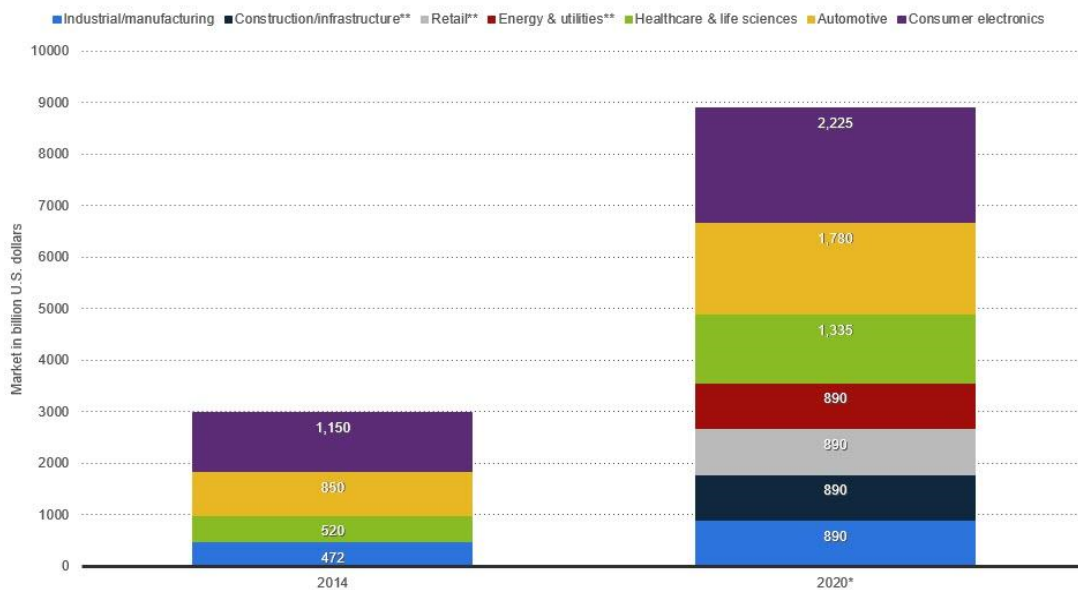
Σύμφωνα με έρευνες, οι 4 πυλώνες για την ψηφιακή αλλαγή είναι το σύννεφο (cloud), η φορητότητα (mobility), τα μεγάλα δεδομένα (big data) και η κοινωνική δικτύωση (social networking) και το IoT βασίζεται σε αυτά [8][9].

Η Gartner πρόβλεψε το 2013 ότι μέχρι το 2020 θα υπάρχουν πάνω από 20 δισεκατομμύρια Things συνδεδεμένα στο Internet [10]. Αυτός ο αριθμός ξεπεράστηκε το 2017 και η νέα πρόβλεψη για τον αριθμό των Things έως το 2020 είναι 30 δισεκατομμύρια, αριθμός που θα φτάσει τα 75 δισεκατομμύρια μέχρι το 2025 (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1 Ο αριθμός των Things συνδεδεμένων στο Internet (Πηγή: Statista.com).

Όσον αφορά την επίδραση του IoT στην αγορά, οι προβλέψεις αναφέρουν εκθετική αύξηση. Αθροιστικά, η αγορά του IoT εκτιμάται ότι ήταν \$2.99 Τρισεκατομμύρια το 2014 με πρόβλεψη για \$8.9 Τρισεκατομμύρια μέχρι το 2020, ετήσια αύξηση της τάξεως του 20%. Σε αυτό συμπεριλαμβάνονται βιομηχανικές εφαρμογές (\$472Δις) και εφαρμογές υγείας και περίθαλψης (\$520Δις) (Σχήμα 1.2.) [11]. Οι 4 κυριότεροι τομείς στους οποίους θα κυριαρχήσει το IoT είναι: έξυπνες πόλεις (26%), βιομηχανικές εφαρμογές (24%), εφαρμογές υγείας (20%) και έξυπνα σπίτια (14%), με άλλους τομείς να ακολουθούν όπως τα έξυπνα αυτοκίνητα (7%), τα έξυπνα εργαλεία (4%) και τα φορητά αντικείμενα (3%) [12].



Σχήμα 1.2 Το μερίδιο του IoT στην αγορά (Πηγή: Forbes.com).

Καθώς το IoT γίνεται πραγματικότητα υπάρχει ανάγκη για προτυποποίηση σε παγκόσμιο επίπεδο, τόσο των αρχιτεκτονικών όσο και των πρωτοκόλλων. Στη συνέχεια θα γίνει

επισκόπηση των βασικών αρχιτεκτονικών και πρωτοκόλλων του IoT καθώς και παρουσίαση των βασικών προτάσεων που υπάρχουν για τη μελλοντική ανάπτυξη του IoT από τους μεγαλύτερους φορείς, οι οποίοι επηρεάζουν την εξέλιξη του. Σε έναν βαθμό υπάρχει συμφωνία σχετικά με τις απαιτήσεις που πρέπει να καλυφθούν αλλά εξακολουθεί να υπάρχει περιθώριο βελτίωσης και μεγαλύτερη συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων. Για παράδειγμα, η ταυτοποίηση συσκευών, η δομή των συστημάτων, η ασφάλεια, η προστασία προσωπικών δεδομένων και η μείωση του κόστους είναι ζητήματα που μελετώνται και χρειάζονται περεταίρω συζήτηση και δράσεις.

Αυτό το κεφάλαιο καλύπτει τα θεμελιώδη στοιχεία του IoT, τους τομείς εφαρμογής του και τις κύριες προκλήσεις που πρέπει να ξεπεραστούν. Η δομή του κεφαλαίου χωρίζεται ως εξής: Στην ενότητα 1.2 γίνεται επισκόπηση των βασικών ορισμών και εννοιών. Ορισμένες από τις προτεινόμενες αρχιτεκτονικές και μοντέλα αναφοράς (RMs) περιγράφονται στην Ενότητα 1.3. Η ενότητα 1.4 περιλαμβάνει μια επισκόπηση των τεχνολογιών που επιτρέπουν την υλοποίηση του IoT και τις προσπάθειες αρκετών φορέων και κοινοπραξιών να δημιουργήσουν πρότυπα για το IoT. Στην ενότητα 1.5 παρουσιάζεται μια γενική εικόνα των κύριων τομέων εφαρμογής των IoT και στην ενότητα 1.6 επισημαίνονται οι κύριες προκλήσεις όσον αφορά την εφαρμογή του IoT. Το τελευταίο τμήμα παρουσιάζει τα κύρια συμπεράσματα του κεφαλαίου και περιγράφει τις τρέχουσες τάσεις.

1.2 Ορισμός του IoT

Αρκετοί διεθνείς οργανισμοί και ερευνητικά κέντρα συμμετείχαν στη δημιουργία κοινών αποδεκτών προτύπων για το IoT. Ένα από τα πρώτα βήματα για τη διαδικασία αυτή είναι η εύρεση ενός κοινού ορισμού. Οι πρώτοι ορισμοί συνδέθηκαν στενά με την “ταυτοποίηση μέσω ραδιοσυχνότητας” (RFID) πάνω στην οποία έκανε έρευνα το εργαστήριο Auto-ID στο MIT, όπου πρωτοεμφανίστηκε ο όρος. Καθώς η ιδέα του IoT άρχισε να γίνεται διδεδομένη σε παγκόσμιο επίπεδο ο ορισμός άρχισε να παίρνει πιο γενική μορφή. Για τον Kevin Ashton, η έννοια του IoT και οι συνέπειες εφαρμογής του στο περιβάλλον είναι οι ακόλουθες [2]:

“Αν είχαμε υπολογιστές που γνώριζαν τα πάντα σχετικά με τα αντικείμενα - χρησιμοποιώντας δεδομένα που συγκέντρωναν χωρίς καμία βοήθεια από εμάς - θα μπορούσαμε να εντοπίσουμε και να μετρήσουμε τα πάντα και να μειώσουμε σημαντικά τα απόβλητα, τις απώλειες και το κόστος. Θα γνωρίζαμε τότε τα αντικείμενα θα έπρεπε να αντικατασταθούν, να επισκευαστούν ή να ανακληθούν, και αν (τα τρόφιμα) ήταν φρέσκα. Πρέπει να εξελίξουμε τους υπολογιστές ώστε με τα δικά τους μέσα συγκέντρωσης πληροφοριών να μπορούν, χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση, να δουν, να ακούσουν και να μυρίσουν τον κόσμο”.

Ένας ακόμη ορισμός είναι ο παρακάτω [13]:

“Η βασική ιδέα αυτής της έννοιας είναι η συνεχής παρουσία γύρω μας μιας ποικιλίας πραγμάτων ή αντικειμένων (things) - όπως ετικέτες (tags) ταυτοποίησης μέσω ραδιοσυχνότητας (RFID tags), αισθητήρες,

ενεργοποιητές, κινητά τηλέφωνα κ.λπ. - τα οποία, μέσω μοναδικών συστημάτων διευθυνσιοδότησης, είναι μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και να συνεργάζονται με τα γειτονικά τους για να επιτύχουν κοινούς στόχους".

Η Ομάδα Μελέτης 20 (SG 20) δημιουργήθηκε το 2015 ως αποτέλεσμα της δεκαετούς περιόδου έρευνας που ακολούθησε τη δημοσίευση της πρώτης έκθεσης της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU) για το IoT το 2005 και τα συμπεράσματα της έρευνας της Ομάδας του Κλάδου Προτυποποίησης Τηλεπικοινωνιών της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών (ITU-T) για τις έξυπνες βιώσιμες πόλεις, η οποία ολοκληρώθηκε το 2015. Στο έγγραφο αναφοράς της SG20 Y.2060 [14] του SG 20, δίνεται ο ακόλουθος ορισμός:

"IoT: Μια παγκόσμια υποδομή για την κοινωνία της πληροφορίας η οποία επιτρέπει προηγμένες υπηρεσίες μέσω διασύνδεσης (φυσικής και εικονικής) αντικειμένων που βασίζονται σε υπάρχουσες και εξελισσόμενες τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ 1: Με την αξιοποίηση των δυνατοτήτων αναγνώρισης, καταγραφής, επεξεργασίας και επικοινωνίας, το IoT αξιοποιεί πλήρως τα αντικείμενα για να προσφέρει υπηρεσίες σε κάθε είδους εφαρμογές, εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι πληρούνται οι απαιτήσεις ασφάλειας και προστασίας των προσωπικών δεδομένων.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ 2 - Από μια ευρύτερη προοπτική, το IoT μπορεί να θεωρηθεί ως όραμα με τεχνολογικές και κοινωνικές επιπτώσεις."

Στο ίδιο έγγραφο η ITU-T δίνει μια ακόμα διάσταση στην «πανταχού παρούσα» επικοινωνία, η οποία είναι εφικτή με την εξέλιξη των τηλεπικοινωνιών. Τα "Things" ορίζονται ως φυσικά ή εικονικά αντικείμενα που έχουν τη δυνατότητα διασύνδεσης και επικοινωνίας. Τα φυσικά αντικείμενα είναι κάθε λογής καθημερινά πράγματα που υπάρχουν στον περίγυρο και έχουν αισθητήρες, ενεργοποιητές και δυνατότητες διασύνδεσης (πχ, οικιακές συσκευές, βιομηχανικά μηχανήματα κ.α.). Τα εικονικά αντικείμενα υπάρχουν στο ψηφιακό κόσμο και μπορούν να αποθηκευτούν, να είναι προσβάσιμα από το χρήστη και να έχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας. Το λογισμικό είναι ένα τέτοιο εικονικό αντικείμενο.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) ίδρυσε το Ευρωπαϊκό Ινστιτούτο Έρευνας για το IoT (IERC) ως μια πλατφόρμα για ερευνητικά έργα πάνω στο IoT (Fp7: 7th Framework Programme for Research and Technological Development). Το IERC είναι η βασική ομάδα εργασίας (Working Group 1) της ΑΙΟΤΙ, η οποία δημιουργήθηκε για να ενθαρρύνει τη συνεργασία και επικοινωνία μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων ανάπτυξης, προτυποποίησης και υλοποίησης του IoT.

Ο ορισμός που δημοσιεύτηκε στην ιστοσελίδα του IERC [15] αναφέρει ότι το IoT είναι:

"Μια διαδραστική υποδομή ενός παγκόσμιου δικτύου με δυνατότητες αυτοπροσαρμογής βασισμένο σε προτυποποιημένα για διαλειτουργικά πρωτόκολλα επικοινωνίας όπου φυσικά και εικονικά αντικείμενα (Things) έχουν ταυτότητες, φυσικά χαρακτηριστικά και εικονικές προσωπικότητες και

χρησιμοποιούν έξυπνες διεπαφές και ενσωματώνονται αδιάληπτα στο δίκτυο πληροφοριών.”

Άλλοι ορισμοί έχουν προταθεί από φορείς όπως η Κοινή Τεχνική Επιτροπή 1 (JTC1) του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης/Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (ISO/IEC), η οποία ιδρύθηκε το 1987 και είναι υπεύθυνη για την έκδοση περισσότερων από 3000 προτύπων, το 2015 [16]. Το IEEE δημοσίευσε μια μελέτη με μια επισκόπηση των εφαρμογών του IoT και μια πρόταση ενός ορισμού που θα ξεκινήσει μια συζήτηση, και θα δώσει στα μέλη της κοινότητας την ευκαιρία να συνεισφέρουν στη διαμόρφωση του τελικού ορισμού του IoT. Ο ορισμός χωρίζεται σε 2 κατηγορίες, μια για εφαρμογές μικρή κλίμακας και μια για μεγάλης [17].

Σε μια προσπάθεια συλλογής των ορισμών που έχουν προταθεί, το [18] συγκέντρωσε τους ορισμούς και τους χώρισε σε 2 κατηγορίες: αυτούς που ορίζουν το IoT σαν μια ιδέα και αυτούς που ορίζουν το IoT σαν μια υποδομή. Με βάση τα παραπάνω καταλήγει στον παρακάτω ορισμό, επιχειρώντας να γεφυρώσει τους δύο ορισμούς:

“Ένα ευρέως αναπτυγμένο σύνολο εφαρμογών πληροφορικής/επικοινωνιών και/ή συστήματος εφαρμογής-κατανάλωσης, το οποίο αναπτύσσεται σε τοπικό (L-IoT), μητροπολιτικό (M-IoT), περιφερειακό (R-IoT), ή παγκόσμιο (G-IoT) επίπεδο, (α) που αποτελείται από κατανεμημένα όργανα μέτρησης (Things) με ενσωματωμένες επικοινωνίες μονόδρομης ή αμφίδρομης επικοινωνίας και ορισμένες (ή, κατά καιρούς, όχι) υπολογιστικές δυνατότητες, (β) όπου αντικείμενα είναι προσβάσιμα μέσω μιας πληθώρας ασύρματων ή ενσύρματων τοπικών και/ή οικουμενικών δικτύων, (γ) των οποίων τα εισερχόμενα δεδομένα και/ή εξερχόμενες εντολές διοχετεύονται ή εκδίδονται από ένα σύστημα (ή εφαρμογή) με (υψηλό) βαθμό (ανθρώπινη ή υπολογιστική) νοημοσύνης. ”

Παρόλο που οι ορισμοί διαφέρουν μεταξύ τους, είναι εμφανές ότι υπάρχουν κάποια κοινά σημεία σε όλους. Για παράδειγμα, το IoT αποτελείται από (φυσικά ή εικονικά) αντικείμενα με δυνατότητα διακριτής αναγνώρισης, ικανά να λάβουν μετρήσεις (αισθητήρες) και να μεταδώσουν ή να λάβουν δεδομένα μέσω του Internet. Στην ειδική περίπτωση των ενεργοποιητών, μπορούν να αλλάζουν την κατάστασή τους, ή αυτή άλλων αντικειμένων, με ελάχιστη ή, ιδανικά, καμία ανθρώπινη παρέμβαση.

1.3 Προτεινόμενες Αρχιτεκτονικές και Μοντέλα αναφοράς

Ο απώτερος στόχος των IoT συστημάτων είναι να επιτευχθεί συνεργία μεταξύ διαφορετικών συστημάτων, δηλαδή να υπάρχει διαλειτουργικότητα και επικοινωνία για την παροχή καινοτόμων υπηρεσιών στους χρήστες. Ως εκ τούτου, απαιτείται η τυποποίηση για να διασφαλιστεί ότι οι πλατφόρμες του IoT θα επιτρέψουν την αξιόπιστη διαλειτουργικότητα των συστημάτων.

Παρόλο που το IoT αναμένεται να επιφέρει θετικές αλλαγές σε όλους του κλάδους της οικονομίας και της καθημερινότητας, θα δημιουργήσει έναν τεράστιο όγκο δεδομένων. Αυτό φέρνει νέες προκλήσεις όσον αφορά την διαχείριση, επεξεργασία και μεταφορά των δεδομένων, αλλά πάνω απ' όλα δημιουργεί ανησυχίες για την ασφάλεια αυτών. Συνεπώς, μαζί με τα πρότυπα για τη διαλειτουργικότητα των συστημάτων απαιτείται καθιέρωση αυστηρών προτύπων ασφαλείας που θα προστατεύουν τα άτομα, τις επιχειρήσεις και τις κυβερνήσεις που θα χρησιμοποιούν IoT συστήματα [19] [20].

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει – και συνεχίζουν να γίνονται – προσπάθειες για την ίδρυση Αρχών Εγγραφής (RA) από Οργανισμούς Προτυποποίησης, βιομηχανίες και πανεπιστήμια. Παρόλαυτά η προτυποποίηση είναι δύσκολο να επιτευχθεί και γι' αυτό οι RA είναι απαραίτητες για την προτυποποίηση καθώς δίνουν οδηγίες για την υλοποίηση συστημάτων IoT [21]. Με στόχο, λοιπόν, να καταστεί δυνατή η διαλειτουργικότητα μεταξύ των συστημάτων IoT, έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα αναφοράς, οργανωμένα σε επίπεδα [22][23][24]. Πολλοί Φορείς προτυποποίησης (SDO) έχουν εμπλακεί σε αυτή τη διαδικασία, όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Οι προδιαγραφές της oneM2M εστιάζουν στη δημιουργία ενός πλαισίου για την υποστήριξη εφαρμογών και υπηρεσιών, όπως τα smart grid, τα έξυπνα αυτοκίνητα, η δημόσια ασφάλεια και η υγεία. Κατά τη διάρκεια ενός συνεδρίου του Ευρωπαϊκού Ινστιτούτου Τηλεπικοινωνιακών Προτύπων (ETSI), το Νοέμβριο του 2016, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή τόνισε την ανάγκη μια κοινή RA για του IoT, η οποία θα επιτρέψει την υλοποίηση διαφόρων υπηρεσιών, για εφαρμογές που σχετίζονται αποκλειστικά με την έξυπνη πόλη [25].

Το IEEE έχει εκδώσει πάνω από 80 πρότυπα που έχουν σχέση με τα συστήματα IoT και έχει περίπου 60 τρέχοντα προγράμματα για την ανάπτυξη νέων προτύπων που σχετίζονται με το IoT. Από όλα τα πρότυπα, προγράμματα και συνέδρια που έχει οργανώσει το IEEE, δύο πρωτοβουλίες ξεχωρίζουν. Αρχικά, ο Συνεταιρισμός Προτύπων του IEEE (IEEE-SA) ενέπλεξε τους ενδιαφερόμενους σε κύριες περιοχές του κόσμου για τη δημιουργία της Μελέτης Οικοσυστήματος του IoT, που περικλείει τρεις βασικούς τομείς: της αγοράς, της τεχνολογίας και των προτύπων. Επιπρόσθετα εξετάζει το ρόλο των πανεπιστημίων και ερευνητικών κέντρων στην εξέλιξη του IoT καθώς και τη σπουδαιότητα της αποδοχής, των νέων τεχνολογιών, από τους χρήστες. Η Ομάδα Μελέτης P2413 του IEEE εστιάζει στη δημιουργία μιας τυποποιημένης αρχιτεκτονικής για το IoT, την «IoT αρχιτεκτονική». Το πρότυπο ορίζει ένα αρχιτεκτονικό πλαίσιο για το IoT, περιγράφει τους διαφορετικούς τομείς του, ορίζει τους περιορισμούς που έχουν οι διάφοροι τομείς και εντοπίζει κοινά σημεία σε αυτούς.

Ο Σύνδεσμος του GMS (GSMA) έχει συγκεντρώσει σχεδόν 800 παρόχους κινητής τηλεφωνίας και 300 εταιρίες παγκοσμίως εστιάζοντας σε 4 τομείς της κινητής τηλεφωνίας: “Personal Data (Σχέση εμπιστοσύνης μέσω ψηφιακής ταυτότητας), Connected Living (Φέρνοντας στη ζωή το IoT), Network 2020 (Το μέλλον το κινητών επικοινωνιών), Digital Commerce (εξορθολογισμός των αλληλεπιδράσεων και συναλλαγών)” [26]. Τον Αύγουστο του 2015, το GSMA καθιέρωσε ένα νέο πρόγραμμα με την επωνυμία. Mobile IoT Initiative, με την υποστήριξη μιας ομάδας 26 κορυφαίων παρόχων κινητής τηλεφωνίας παγκοσμίως, κατασκευαστών εξοπλισμού και εταιριών υποδομών, προκειμένου να αναπτυχθούν υπηρεσίες εκμεταλλευόμενες τις τεχνολογίες της ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (LPWA) στο αδειοδοτημένο φάσμα.

Επίσης, το Φεβρουάριο του 2016 το πρόγραμμα του GSM Connected LP, δημοσίευσε νέες κατευθυντήριες γραμμές σχεδιασμένες να προωθήσουν την ασφαλή ανάπτυξη υπηρεσιών για την αγορά του IoT. Το αποτέλεσμα είναι ένα έγγραφο με τίτλο “GSMA IoT Security Guidelines”, το οποίο αναπτύχθηκε σε συνεργασία με τους παρόχους κινητής τηλεφωνίας και παρέχει σε εταιρείες, οι οποίες αναπτύσσουν IoT υπηρεσίες, πρακτικές λύσεις για τη διαχείριση θεμάτων ασφαλείας και προστασίας των δεδομένων για IoT εφαρμογές.

Για το 2017, το GSMA Connected LP επικεντρώνεται σε τέσσερις νέους στόχους: (1) το Mobile IoT, το οποίο απευθύνεται κυρίως στην αύξηση της ευαισθητοποίησης της αγοράς και της υποστήριξης των αδειοδοτημένων λύσεων LPWA του ραδιοφάσματος, (2) την ολοκλήρωση των τεχνικών προδιαγραφών της παροχής απομακρυσμένης ενεργοποίησης SIM σε καταναλωτές (3) τη συνεργασία με παρόχους κινητής τηλεφωνίας ως βασικοί εταίροι IoT μέσω της παράδοσης data sets και API και (4) την υποστήριξη των φορέων παροχή υπηρεσιών για την υλοποίηση και ανάπτυξη την έξυπνης πόλης.

Η ITU δημιούργησε την Πρωτοβουλία Παγκόσμιων Προτύπων για το IoT (IoT-GSI), η οποία είχε ως στόχο να καθορίσει, λεπτομερώς, τις απαιτήσεις για την ανάπτυξη των προτύπων που είναι απαραίτητα για την εφαρμογή του IoT σε παγκόσμια κλίμακα, λαμβάνοντας υπόψη τις έρευνες που έχουν γίνει σε άλλους SDO. Το 2015 ίδρυσε την SG20 η οποία εστιάζει στο “IoT και οι εφαρμογές του σε πόλεις και κοινότητες”. Μέχρι στιγμής πάνω από 300 έγγραφα σχετικά με το IoT έχουν εκδοθεί μέχρι σήμερα.

Προκειμένου αξιοποιηθούν οι τεχνολογίες που προσφέρει το IoT για την αύξηση της αποδοτικότητας της βιομηχανικής παραγωγής – είτε βελτιώνοντας την ίδια την παραγωγή είτε βελτιώνοντας την εφοδιαστική αλυσίδα – αναπτύχθηκαν 2 πρότυπα για την αρχιτεκτονική των μοντελων: το Industrial Internet Reference Architecture (IIRA) και το Reference Architecture Model for Industrie 4.0 (RAMI 4.0).

Η Αρχιτεκτονική Αναφοράς Αισθητήρων Δικτύου (SNRA), με τη σειρά της, παρέχει μια γενική εικόνα των χαρακτηριστικών ενός δικτύου αισθητήρων και της οργάνωσης των οντοτήτων που περιλαμβάνουν ένα τέτοιο δίκτυο. Περιγράφει επίσης τις γενικές απαιτήσεις που προσδιορίζονται για τα δίκτυα αισθητήρων, τα οποία σχετίζονται με συστήματα IoT, δεδομένου ότι τα δίκτυα αισθητήρων χρησιμοποιούνται από τα συστήματα IoT ως εργαλείο συλλογής δεδομένων. Μια ομάδα εργασίας που δημιουργήθηκε από το ISO / IEC, με τη συμμετοχή του βιομηχανικού και εμπορικού τομέα, ακαδημαϊκών και ερευνητικών φορέων και της κυβέρνησης, εργάζεται για την ανάπτυξη μιας Αρχιτεκτονικής Αναφοράς (IoT RA-IoT Reference Architecture) του IoT που αποσκοπεί στην περιγραφή των χαρακτηριστικών και των πτυχών των IoT συστημάτων, καθορίζει τους τομείς του IoT, περιγράφει τα συστήματα RM των IoT συστημάτων και περιγράφει τη διαλειτουργικότητα των φορέων του διαδικτύου [27]. Σκοπός του ISO/IEC είναι να γίνει η κοινή αναφορά για όλες τις RA που έχουν ήδη προταθεί από άλλους οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένου του Internet of Things-Architecture (IoT-A) και των προτύπων που αναπτύχθηκαν από την ITU [28].

Καθώς, λοιπόν, δεν υπάρχει ένας κοινά αποδεκτός ορισμός για το IoT, οι διάφορες ομάδες αναπτύσσουν διαφορετικές προσεγγίσεις ανάλογα με τον τομέα στον οποίο δραστηριοποιούνται [29].

Επιπρόσθετα, η GS1, μια μη κερδοσκοπική οργάνωση που δραστηριοποιείται στον τομέα της τυποποίησης των barcode, υποστηρίζει ότι η εξέλιξη των προτύπων για το IoT έχει ακολουθήσει μια πορεία όπου από εκεί που δεν υπάρχουν πρότυπα, πλέον υπάρχουν πάρα πολλά, οδηγώντας σε δύσκολες επιλογές για τη σχεδίαση IoT εφαρμογών [30]. Αυτές οι δυσκολίες γίνονται πιο έντονες λόγω κατασκευαστών που προσπαθούν να προστατεύσουν τα προϊόντα και τις λύσεις τους και δεν ενδιαφέρονται, αναγκαστικά, για την υιοθέτηση ανοικτών προτύπων ή τη διασφάλιση διαλειτουργικών λύσεων.

Το 2013, μια κοινοπραξία με βιομηχανικούς και πανεπιστημιακούς εταίρους, όπως η Alcatel-Lucent, η IBM, η NEC Siemens, το Πανεπιστήμιο Sapienza της Ρώμης και το Πανεπιστήμιο Surrey, δημιούργησαν ένα αρχιτεκτονικό μοντέλο αναφοράς (ARM) για το IoT, το οποίο ονομάστηκε IoT-A [22]. Για τους εταίρους, η επίτευξη διαλειτουργικότητας μεταξύ των προϊόντων σε διάφορες πλατφόρμες θα μπορούσε να εξασφαλιστεί μόνο μέσω της διαλειτουργικότητας τόσο σε επίπεδο επικοινωνίας όσο και σε επίπεδο υπηρεσιών. Στο τέλος του έργου, χρηματοδοτούμενο από την ΕΕ, τα οφέλη από την αναπτυγμένη αρχιτεκτονική αποδείχθηκαν με την υλοποίηση της σε εφαρμογές και υπηρεσίες που χρησιμοποιούνται στην αγορά.

Στις επόμενες ενότητες περιγράφονται μερικές από τις πιο διαδεδομένες RA. Καθώς ακόμα βρίσκονται σε στάδιο ανάπτυξης, ενδέχεται να υπάρξουν νέες ενημερώσεις σε αυτόν τον τομέα.

1.3.1 IoT-A

Επί του παρόντος, το προτζεκτ IoT-A δεν είναι πλέον ενεργό. Ωστόσο, το IoT-A περιγράφεται εδώ, επειδή χρησιμοποιείται ως βάση για την ανάπτυξη άλλων αρχιτεκτονικών, όπως το IoT RA ή το IOT Layered Architecture Reference (RILA), τα οποία επίσης συζητούνται στις επόμενες ενότητες.

Το ARM του IoT-A δημιουργήθηκε για να επιτευχθεί η διαλειτουργικότητα μεταξύ των διαφόρων συστημάτων [22]. Το ARM του IoT ορίζεται με απλό και περιεκτικό τρόπο ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αναφορά για τη δημιουργία περίπλοκων αρχιτεκτονικών συστημάτων. Αποτελείται από ένα RM και μια RA.

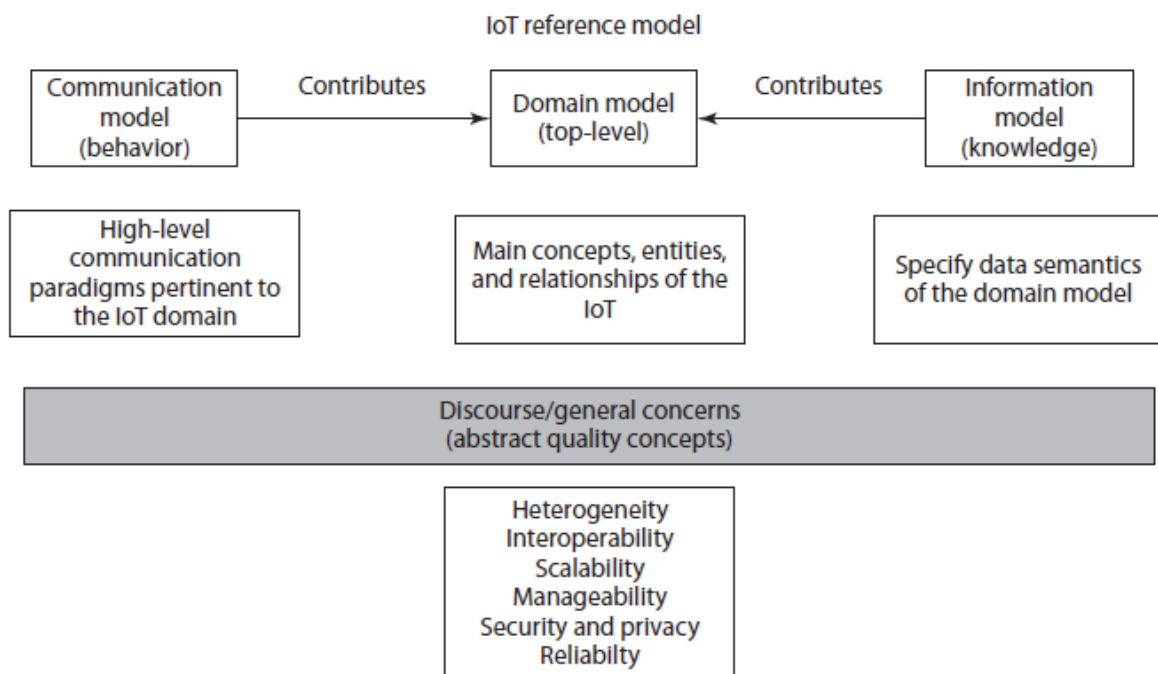
Το RM, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3, παρέχει μια επισκόπηση του τομέα IoT, διαμορφώνοντας τις διάφορες έννοιες και τις σχέσεις που έχουν. Όπως και το μοντέλο Ανοικτών Συστημάτων Διασύνδεσης (OSI), το IoT RM από μόνο του δεν καθορίζει τις τεχνικές λεπτομέρειες ενός συστήματος IoT.

Το μοντέλο τομέα (Domain Model) θεωρεί μια ανώτατη περιγραφή των εννοιών και οντοτήτων (φυσικές οντότητες, συσκευές, πόροι και υπηρεσίες) που αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένες πτυχές του τομέα IoT και καθορίζει τις σχέσεις τους. Επομένως, το μοντέλο τομέα μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως ταξινόμηση του IoT.

Το μοντέλο πληροφοριών (Information Model) προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά των δεδομένων του μοντέλου τομέα, δηλαδή αφορά τις γνώσεις και τη συμπεριφορά των

φορέων που εξετάζονται στο μοντέλο τομέα, δεδομένου ότι είναι υπεύθυνοι είτε για την παρακολούθηση ορισμένων πληροφοριών είτε για την εκτέλεση συγκεκριμένων καθηκόντων (περιγράφει το είδος των πληροφοριών για τις οποίες είναι υπεύθυνες οι οντότητες).

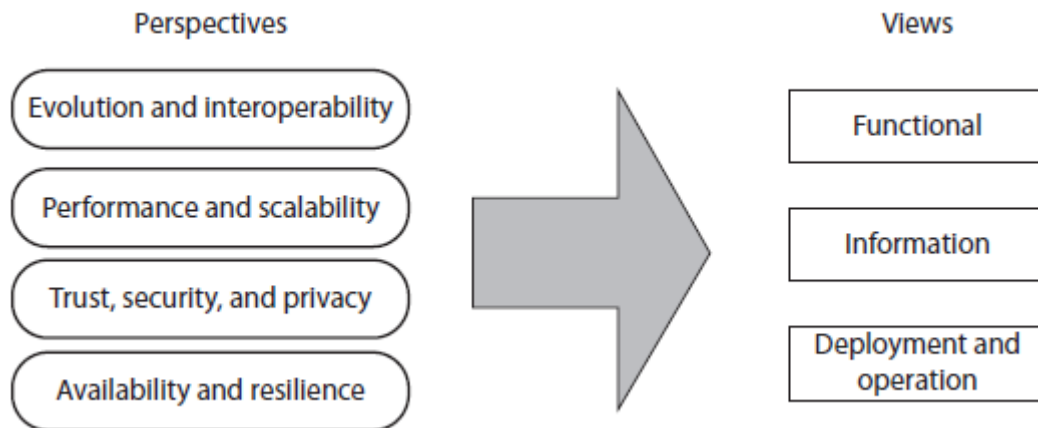
Τέλος, το μοντέλο επικοινωνίας (Information Model) αφορά τα βασικά πρωτόκολλα επικοινωνίας που είναι απαραίτητα για τη σύνδεση οντοτήτων, διασφαλίζοντας τη διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών δικτύων. Το προτεινόμενο μοντέλο επικοινωνίας είναι δομημένο σε μια στοίβα επτά στρώσεων και περιγράφει τον τρόπο διαχείρισης της επικοινωνίας από κάθε στρώμα, προκειμένου να επιτευχθούν τα χαρακτηριστικά διαλειτουργικότητας που απαιτούνται στο IoT. Περιγράφει επίσης τους συντελεστές (επικοινωνούντα στοιχεία) και το κανάλι μετάδοσης για επικοινωνία στο IoT.



Σχήμα 1.3 Το Μοντέλο Αναφοράς που προτάθηκε από την IoT-A [22].

Η RA του IoT-A αποτελείται κυρίως από "προθέσεις" (views) και "προοπτικές" (perspectives), οι οποίες ποικίλλουν ανάλογα με τις απαιτήσεις κάθε συγκεκριμένης εφαρμογής. Το Σχήμα 1.4 δείχνει ότι σε όλες τις οι προοπτικές "εξέλιξη και διαλειτουργικότητα", "απόδοση και κλιμάκωση", "εμπιστοσύνη, ασφάλεια και προστασία της των προσωπικών δεδομένων" και "διαθεσιμότητα και ανθεκτικότητα" εφαρμόζονται σε όλες τις προθέσεις: "λειτουργικότητα", "πληροφορία" και "ανάπτυξη και λειτουργία", αντίστοιχα.

Ενώ εφαρμόζονται προοπτικές στις προθέσεις, δεν επηρεάζεται κάθε πρόθεση από τις προοπτικές με τον ίδιο τρόπο ή βαθμό. Για παράδειγμα, οι προοπτικές έχουν μεγαλύτερη επίδραση όταν εφαρμόζονται στην πρόθεση "λειτουργία".

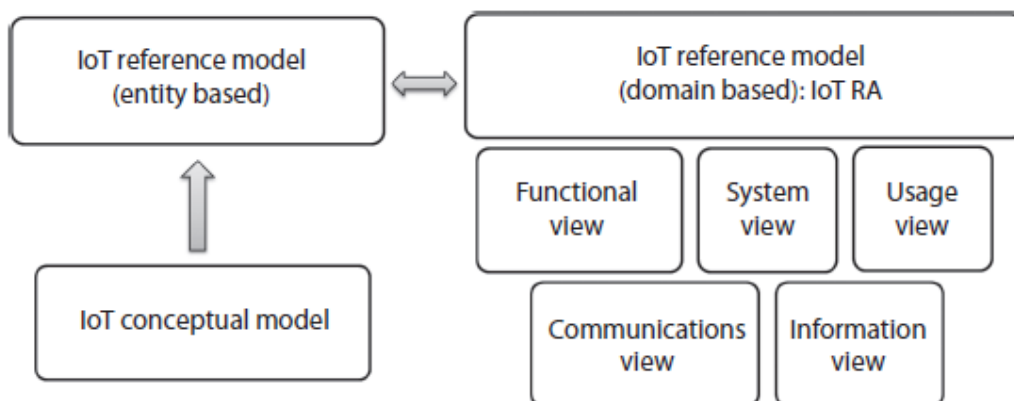


Σχήμα 1.4 Οι προοπτικές και οι προθέσεις της IoT-A [22].

1.3.2 IoT RA

Η IoT RA, που δημιουργήθηκε από τον ISO/IEC (CD 30141), προβλέπει την κατασκευή ενός συστήματος IoT που βασίζεται σε ένα γενικό εννοιολογικό πρότυπο IoT (CM) που περιλαμβάνει τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά και τομείς του IoT. Στη συνέχεια, χρησιμοποιεί το CM ως βάση για να δημιουργήσει ένα υψηλού επιπέδου σύστημα βασισμένο σε RM. Αυτό το μοντέλο αναφοράς, με τη σειρά του, είναι δομημένο σε πέντε αρχιτεκτονικούς τομείς (λειτουργικός τομέας, τομέας συστήματος, τομέας χρήστη, τομέας πληροφοριών και τομέας επικοινωνιών) από διαφορετικές οπτικές γωνίες, οι οποίες συνθέτουν την ίδια την RA. Το σχήμα 1.5 δείχνει τη σχέση μεταξύ αυτών των τριών συνιστωσών (CM, RM, και RA).

Στην ουσία, το IoT RA παρέχει τα βασικά στοιχεία για να δημιουργηθεί μια δομημένη αρχιτεκτονική ενός συστήματος. Η IoT RA θεωρείται αρχιτεκτονική σχεδιασμένη για εφαρμογές ή "αρχιτεκτονική συστήματος προορισμού", δεδομένου ότι η RA μπορεί να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις ενός συγκεκριμένου συστήματος, όπως το γεωργικό σύστημα, το έξυπνο σπίτι/ κτίριο, η έξυπνη πόλη κ.ο.κ.



Σχήμα 1.5 Η σχέση των CM, RM, RA.

1.3.3 IEEE P2413

Το IEEE P2413 βασίζεται στο πρότυπο ISO / IEC / IEEE 42010: 2011: "Περιγραφή Αρχιτεκτονικής Μηχανικών Συστημάτων και Λογισμικού". Ο στόχος δεν είναι να δημιουργηθεί ένα νέο πρότυπο αλλά να αναδειχθούν οι κοινές πτυχές των διαφόρων τομέων εφαρμογής του IoT. Η ομάδα εργασίας του IEEE συνεργάζεται, μεταξύ άλλων, με τον ISO, την ITU-T και την Κοινοπραξία Βιομηχανικού Διαδικτύου (IIC), με κοινό στόχο την επίτευξη καλύτερων προτύπων για το IoT σε όλους τους τομείς εφαρμογής του. Το επίκεντρο είναι η επίτευξη της διαλειτουργικότητας, σε συνδυασμό με άλλα χαρακτηριστικά, όπως η ασφάλεια, η προστασία των προσωπικών δεδομένων κ.α. Ορισμένες από αυτές τις προκλήσεις εξετάζονται περαιτέρω στην Ενότητα 1.6.

1.3.4 Βιομηχανικές Αρχιτεκτονικές Αναφορές

Το IIRA είναι μια ανοικτή αρχιτεκτονική για τα Βιομηχανικά Συστήματα Internet (IIS), που προτείνεται από την Ομάδα Εργασίας της Τεχνολογίας της IIC, της οποίας μέλη είναι εταιρείες όπως η AT&T, η Cisco, η IBM, η General Electric και η Intel. Το Βιομηχανικό Διαδίκτυο θεωρείται σύστημα IoT, που υλοποιεί έξυπνες βιομηχανικές λύσεις και εστιάζει στα βασικά χαρακτηριστικά συστημάτων αυτού του είδους: προστασία, ασφάλεια και ανθεκτικότητα. Οι υπηρεσίες IIS καλύπτουν την ενέργεια, την υγειονομική περίθαλψη, τη παραγωγή, τις μεταφορές και τα συναφή βιομηχανικά συστήματα.

Το Πλαίσιο Βιομηχανικής Διαδικτυακής Αρχιτεκτονικής (IIAF) βασίζεται στο πρότυπο ISO/IEC/IEEE 42010: 2011 και ως εκ τούτου χρησιμοποιεί τις ίδιες δομές και κοινούς όρους, όπως είναι η άποψη (viewpoints), οι ανησυχίες (Concerns) και τα ενδιαφερόμενα μέρη (Stakeholders), καθώς και οι προθέσεις και τα μοντέλα. Το IIRA είναι το αποτέλεσμα της εφαρμογής του IIAF στα συστήματα Βιομηχανικής Διασύνδεσης. Ο πίνακας 1.1 παρουσιάζει μια επισκόπηση του IIRA. Κάθε άποψη επηρεάζει τις απόψεις που ακολουθούν. Με τη σειρά τους, οι χαμηλότερες απόψεις επικυρώνουν και μερικές φορές προκαλούν αναθεωρήσεις στις υψηλότερες απόψεις. Υπάρχουν ορισμένες καθολικές ανησυχίες, όπως η προστασία και η ασφάλεια, οι οποίες συζητούνται σε άλλες εκθέσεις της IIC.

Πίνακας 1.1 Επισκόπηση του IIRA: Απόψεις, Ανησυχίες και Ενδιαφερόμενα μέρη.

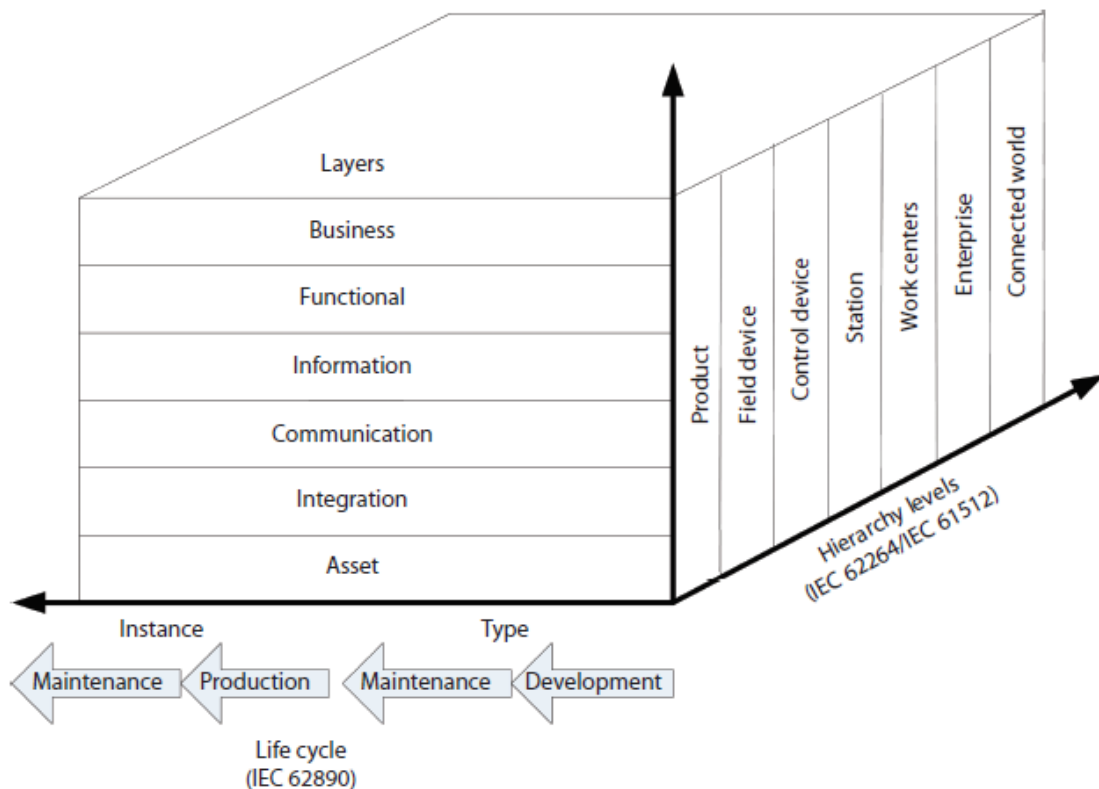
Viewpoints	Concerns	Crosscutting Concerns		Stakeholders
Business	Identification of stakeholders, business vision, values, and objectives of an Industrial IoT system	Safety	Security	Decision makers, product managers, system engineers
Usage	Expected system usage			System engineers, product managers, other users

Functional	Functional components, interfaces and interactions between them	System architects, developers, integrators
Implementation	Technologies needed, communication protocols, life cycle	System architects, developers, integrators, system operators

Αρχικά σχεδιασμένο για τη γερμανική βιομηχανία, το RAMI 4.0, με τη σειρά του, είναι αποτέλεσμα συνεργασίας μεταξύ της Plattform Industrie 4.0 (Industrie 4.0 [I4.0]: θεωρείται εξειδίκευση στο IoT), ορισμένων γερμανικών ενώσεων, όπως η BITKOM, η VDMA και η ZVEI και αρκετών γερμανικών εταιριών [31]. Ο κύριος στόχος τους ήταν να επιτευχθεί μια κοινή κατανόηση του τι απαιτείται για εξελιχθούν οι σημερινές βιομηχανίες και να γίνει το I4.0 πραγματικότητα. Για να γίνει αυτό, ήταν απαραίτητο να αναπτυχθεί ένα μοντέλο αρχιτεκτονικής που θα χρησιμοποιούνταν ως αναφορά σε αυτή τη αλλαγή.

Το RAMI 4.0 επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση των κεντρικών βιομηχανικών διαδικασιών, δηλαδή της έρευνας και ανάπτυξης, της παραγωγής, του εφοδιασμού και της εξυπηρέτησης. Περιγράφει τις δομές και τις λειτουργίες των συνιστωσών του I4.0, βάσει των υφιστάμενων και σχετικών προτύπων.

Το σχήμα 1.6 δείχνει το μοντέλο αρχιτεκτονικής RAMI 4.0, το οποίο είναι ένα τρισδιάστατο μοντέλο, όπου ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει τον κύκλο ζωής των συστημάτων ή προϊόντων, διαχωρίζοντας τον "τύπο" (type) (κύκλος ζωής ενός προϊόντος από την ιδέα στο προϊόν, μέσω σχεδιασμού, ανάπτυξης και δοκιμής) και "γεγονότος" (instance) (αντιπροσωπεύει την παραγωγή ενός τύπου· ο κύκλος ζωής του πηγαινει από την κατασκευή, την πώληση και την παράδοση στον πελάτη, ώστε να εγκατασταθεί σε ένα συγκεκριμένο σύστημα). Ο κάθετος άξονας (έξι στρώματα), με τη σειρά του, αντιστοιχεί στην προοπτική του IT ενός τομέα του I4.0, πράγμα που σημαίνει ότι σπάει σύνθετα έργα σε μικρότερα τμήματα, όπως επιχειρηματικές διαδικασίες, λειτουργικές περιγραφές, στοιχεία επικοινωνίας και hardware. Τέλος, ο τρίτος άξονας αντιπροσωπεύει μια λειτουργική ιεραρχία, η οποία δεν αναφέρεται σε κατηγορίες εξοπλισμού ή ιεραρχικά επίπεδα της πυραμίδας αυτοματισμού, αλλά στην ομαδοποίηση λειτουργιών και ευθυνών μέσα στα εργοστάσια. Περιέχει βασικές πτυχές του I4.0, όπως η συσκευή πεδίου, η συσκευή ελέγχου, ο σταθμός, τα κέντρα εργασίας και η επιχείρηση, αλλά επεκτείνει τα επίπεδα ιεραρχίας του προτύπου IEC 62264 προσθέτοντας "προϊόν" και "συνδεδεμένο κόσμο".



Σχήμα 1.6 To RAMI 4.0.

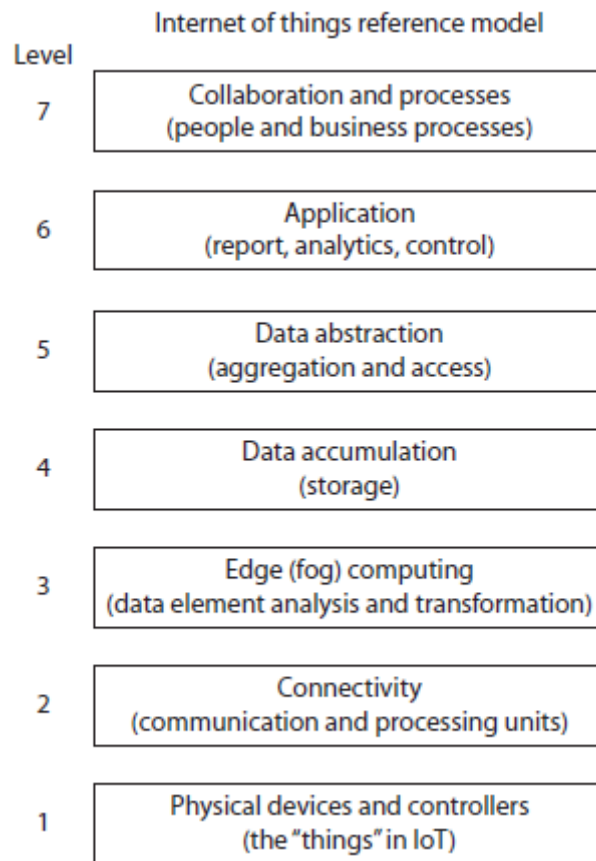
1.3.5 Άλλα Μοντέλα Αναφοράς και Αρχιτεκτονικές για το IoT

Μέχρι στιγμής, έχουν υπάρξει αρκετές συμβολές για τη δημιουργία RM για IoT, τα περισσότερα από τα οποία βασίζονται στο IoT-A. Στην πραγματικότητα, μέχρι σήμερα έχουν προταθεί αρκετές αρχιτεκτονικές, αλλά επειδή έχουν σχεδιαστεί για μια συγκεκριμένη εφαρμογή IoT, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αναφορά, αφού δεν προσαρμόζονται στις απαιτήσεις άλλων εφαρμογών [32][33][34][35][36]. Μια εναλλακτική αρχιτεκτονική στοίβα για τον "ιστό των πραγμάτων" αποτελείται από "επίπεδα λειτουργικότητας", με κάθε επίπεδο να αποτελείται από ένα σύνολο πρωτοκόλλων και εργαλείων εφαρμογής [37]. Η ιδέα είναι να παρέχονται στους προγραμματιστές τα απαραίτητα εργαλεία για την υλοποίηση προϊόντων και εφαρμογών IoT και για τη μεγιστοποίηση της επαναχρησιμοποίησης και της διαλειτουργικότητας. Σε αυτή την ενότητα, περιγράφονται συνοπτικά μόνο ορισμένες από τις σημαντικότερες προτάσεις που θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως αναφορές.

1.3.5.1 Μοντέλο αναφοράς της Cisco

Το 2014, η Cisco πρότεινε ένα RM επτά επιπέδων [38], το οποίο παρουσιάζεται στο σχήμα 1.7 δίνοντας μια πιο πρακτική οπτική γωνία. Το κατώτατο στρώμα περιέχει τις φυσικές συσκευές και τους ελεγκτές (τα things), το επόμενο τη συνδεσιμότητα, και στη συνέχεια το Mobile Edge Computing (MEC) όπου μπορεί να γίνει μια αρχική επεξεργασία και των δεδομένων, όπως συσσωμάτωση και εξάλειψη της αλληλεπικάλυψης. Τα χαμηλότερα τρία

επίπεδα θεωρούνται λειτουργική τεχνολογία (OT). Τα επόμενα τέσσερα επίπεδα αφορούν το IT. Το χαμηλότερο επίπεδο στο IT είναι η αποθήκευση και ακολουθείται, πηγαίνοντας προς τα πάνω, από την αφαίρεση περιττών δεδομένων, τις εφαρμογές και, τέλος, τις διαδικασίες και συνεργασίες (επιχειρηματικές).

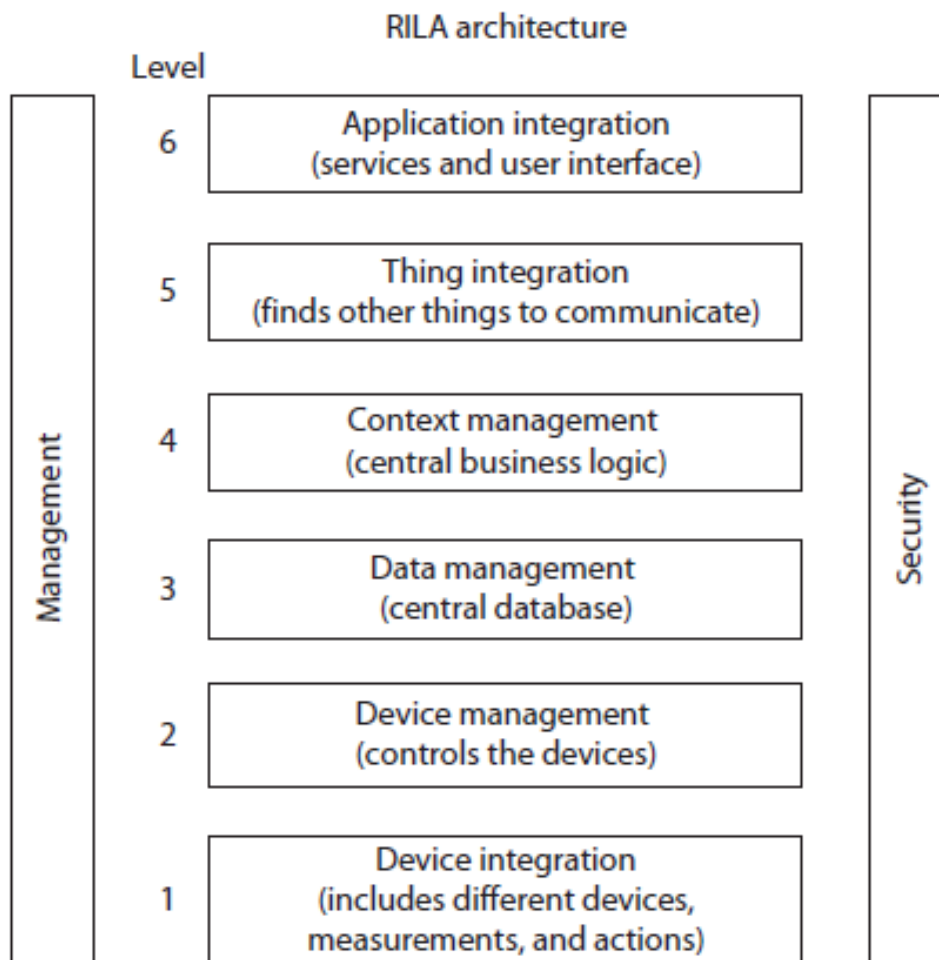


Σχήμα 1.7 Το IoT RM της Cisco.

1.3.5.2 Αρχιτεκτονική αναφοράς επιπέδων IoT (RILA)

Κάθε IoT RA πρέπει να περιλαμβάνει ορισμένα βασικά στοιχεία, όπως τα στοιχεία διαλειτουργικότητας και ενσωμάτωσης, context-aware τεχνικές επεξεργασίας και οδηγίες ασφάλειας για ολόκληρη την αρχιτεκτονική [39]. Η προκύπτουσα προτεινόμενη αρχιτεκτονική είναι η RILA. Η RILA είναι μια πιο δομημένη αρχιτεκτονική, με σκοπό να είναι πιο εύκολη στην κατανόηση για τους πελάτες και τη βιομηχανία σε σχέση με την υψηλού επιπέδου IoT-A. Δεν παρέχει μόνο κατευθυντήριες γραμμές για τον τρόπο εφαρμογής του IoT-A στην πράξη, αλλά δείχνει επίσης ότι αυτή η αρχιτεκτονική μπορεί πραγματικά να εφαρμοστεί χρησιμοποιώντας πραγματικές περιπτώσεις χρήσης. Το RILA δρα μεταξύ των πραγμάτων, των συσκευών και του χρήστη.

Το RILA αποτελείται από έξι επίπεδα, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.8. Εκτός από αυτά τα επίπεδα, υπάρχουν δύο επίπεδα διατομής, "ασφάλεια" και "διαχείριση", που επηρεάζουν όλα τα άλλα επίπεδα.



Σχήμα 1.7 Η Αρχιτεκτονική RILA.

Το επίπεδο ενοποίησης συσκευών περιλαμβάνει όλους τους διαφορετικούς τύπους συσκευών, λαμβάνει τις μετρήσεις τους και εκτελεί ενέργειες. Αυτό το στρώμα μπορεί να θεωρηθεί ως μεταφραστής που μιλάει πολλές γλώσσες [39]. Η έξοδος των αισθητήρων και των ετικετών (tags), καθώς και η είσοδος των ενεργοποιητών, εξαρτάται από το πρωτόκολλο που χρησιμοποιούν.

Το επίπεδο διαχείρισης συσκευών είναι υπεύθυνο για την καταχώρηση συσκευών και τη λήψη μετρήσεων από τους αισθητήρες, από το επίπεδο ενοποίησης συσκευών, και για την ενημέρωση των ενεργοποιητών για αλλαγή κατάστασης στο επίπεδο ενοποίησης συσκευών. Αυτό, με την σειρά του, ελέγχει αν η αλλαγή κατάστασης (δηλαδή η ενέργεια) συμμορφώνεται με τον αντίστοιχο ενεργοποιητή και μεταβιβάζει την αλλαγή κατάστασης στον ενεργοποιητή. Το επίπεδο διαχείρισης συσκευών ελέγχει τις συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο σύστημα. Κάθε αλλαγή στην καταχώριση μιας συσκευής καθώς και νέα δεδομένα μέτρησης θα πρέπει να κοινοποιούνται από το επίπεδο ενοποίησης συσκευών στο επίπεδο διαχείρισης συσκευών, έτσι ώστε οι πληροφορίες να μπορούν να ενημερώνονται και να αποθηκεύονται.

συμμορφώνεται με τον αντίστοιχο ενεργοποιητή και μεταβιβάζει την αλλαγή κατάστασης στον ενεργοποιητή. Το επίπεδο διαχείρισης συσκευών ελέγχει τις συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο σύστημα. Κάθε αλλαγή στην καταχώριση μιας συσκευής καθώς και νέα δεδομένα μέτρησης θα πρέπει να κοινοποιούνται από το επίπεδο ενοποίησης συσκευών στο επίπεδο διαχείρισης συσκευών, έτσι ώστε οι πληροφορίες να μπορούν να ενημερώνονται και να αποθηκεύονται.

Κανονικά, το *επίπεδο διαχείρισης δεδομένων* είναι μια κεντρική βάση δεδομένων (αλλά μπορεί επίσης να είναι μια αποθήκη δεδομένων ή ακόμα και μια πλήρη μονάδα δεδομένων, στην περίπτωση μεγαλύτερων συστημάτων IoT) που αποθηκεύει όλα τα δεδομένα ενός αντικειμένου. Έτσι, η εφαρμογή του στρώματος διαχείρισης δεδομένων εξαρτάται έντονα από την περίπτωση χρήσης [39].

Το *επίπεδο διαχείρισης συμφραζομένων* (Context) καθορίζει την κεντρική επιχειρησιακή λογική και είναι υπεύθυνο για τα καθήκοντα όπως ο καθορισμός των στόχων των things, η κατανάλωση και η παραγωγή των καταστάσεων των πραγμάτων (things), η αξιολόγηση της κατάστασης σε σχέση με τους στόχους, η ενεργοποίηση δράσεων που θα συμβάλουν στην επίτευξη του στόχου σύμφωνα με τους κανόνες και, τέλος, δημοσίευση καταστάσεων για άλλα πράγματα (things).

Το *στρώμα ενσωμάτωσης πραγμάτων* είναι υπεύθυνο για την εύρεση άλλων things, και την επικοινωνία με αυτά, επαληθεύει εάν είναι δυνατή η επικοινωνία με το νέο πράγμα και είναι υπεύθυνο για το μηχανισμό εγγραφής.

Το *στρώμα ενσωμάτωσης εφαρμογών* συνδέει το χρήστη με το πράγμα. Είναι δηλαδή το στρώμα υπηρεσιών ή ακόμα και ένα απλό περιβάλλον εργασίας χρήστη. Η συγκεκριμένη εφαρμογή του στρώματος εξαρτάται από την περίπτωση χρήσης.

1.4 Βασικές τεχνολογίες

Στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκαν ορισμένοι διεθνείς οργανισμοί που ασχολούνται με τη θεμελίωση ενός ορισμού και την ανάπτυξη κοινών προτύπων για το IoT. Πολλοί από αυτούς ενσωματώνονται σε συμμαχίες και κοινοπραξίες που περιλαμβάνουν μέλη από τη βιομηχανία, τους SDO, τους κατασκευαστές, τους παρόχους δικτύων και υπηρεσιών, τον ακαδημαϊκό χώρο και τα ερευνητικά εργαστήρια. Η oneM2M για παράδειγμα αποτελείται από έξι σημαντικούς SDO από όλον τον κόσμο (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TTA, TTC) οι οποίοι έχουν συνεργαστεί με έξι μέλη από τη βιομηχανία (Broadband Forum, Continua Alliance, GlobalPlatform, HGI, Next Generation M2M Consortium, και OMA) και περισσότερους από 200 οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένου και εταιριών (Alcatel, Nokia, Huawei, Deutsche Telekom, Qualcomm κ.α.) καθώς και πανεπιστήμια.

Η Ομάδα Εργασίας 10 (WG 10) του ISO δημιούργησε έναν πολύ ενδιαφέρον και ολοκληρωμένο χάρτη νοημοσύνης (Mind map) με έξι τομείς που σχετίζονται με το IoT: απαιτήσεις, τεχνολογίες, εφαρμογές, ενδιαφερόμενα μέλη, πρότυπα και λουπά ζητήματα. Ο χάρτης είναι διαθέσιμος στην ιστοσελίδα του ISO ως ένα παράρτημα της έκθεσης, για το IoT, που δημοσιεύτηκε το 2015 [40]. Όσον αφορά τις τεχνολογίες, δημιουργήθηκε ένας

ξεχωριστός χάρτης νοημοσύνης, λόγω του μεγάλου αριθμού υφιστάμενων και αναπτυσσόμενων τεχνολογιών καθώς πολλοί φορείς προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν τη δικιά τους τεχνολογία ως βάση για το IoT. Ο χάρτης δεν είναι εξαντλητικός εξαιτίας των περιορισμών του χώρου, αλλά μπορούν να προστεθούν και άλλες λεπτομέρειες εύκολα στους υφιστάμενους κλάδους, οι οποίες πιθανόν να δημιουργούν έναν ή περισσότερους ξεχωριστούς χάρτες νοημοσύνης για κάθε κλάδο.

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει μια σύντομη επισκόπηση ορισμένων από τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό και την ανακάλυψη συνδεδεμένων αντικειμένων, την επικοινωνία μεταξύ τους και των συσκευών που χρησιμοποιούνται. Στο τελευταίο μέρος της ενότητας, θα παρουσιαστούν κάποιες από τις διαθέσιμες διαδικτυακές πλατφόρμες για πρωτότυπα, ανάπτυξη και δοκιμές ενός έργου IoT.

1.4.1 Ταυτοποίηση και Αναγνώριση

Προκειμένου να γίνει διακριτή ταυτοποίηση των αντικειμένων σε ένα καταμεμημένο δίκτυο, απαιτείται ένας μοναδικός ταυτοποιητής για κάθε αντικείμενο. Στο IoT ένα αντικείμενο μπορεί να είναι οτιδήποτε· από ένα φυσικό ή εικονικό αντικείμενο, μέχρι ένα γεγονός ή ένας άνθρωπος. Δεδομένα όπως ο χρόνος και η θέση – είτε γεωγραφική (συντεταγμένες) είτε μέσα σε ένα δίκτυο (URI και IP) – μπορούν να χρησιμοποιηθούν για λόγους ταυτοποίησης. Ο Ηλεκτρονικός Κωδικός Προϊόντος (EPC) χρησιμοποιείται κυρίως για την καταμέτρηση και την παρακολούθηση αγαθών στις αλυσίδες εφοδιασμού χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Ενώ οι EPC, με γνώμονα την RFID, συνδέονται με τα φυσικά αντικείμενα, ο URI και η IP επιτρέπουν την αναγνώριση και την ταυτοποίηση ενός αντικειμένου στο διαδίκτυο. Το HyperCat, για παράδειγμα, είναι μια λύση που επιτρέπει την αναζήτηση οποιουδήποτε URI μαζί με πρόσθετες πληροφορίες που είναι συνημμένες σε αυτόν στη μορφή RDF (Resource Description Framework).

Οι διευθύνσεις IP χρησιμοποιούνται, επίσης, ως αναγνωριστικά για δικτυωμένα αντικείμενα, μαζί με ετικέτες ονομάτων, και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πιο εύκολη ταυτοποίηση και την ανακάλυψη πόρων χρησιμοποιώντας μια υπηρεσία ονομασίας, όπως το mDNS. Το mDNS είναι ένα έργο της IETF (Τακτική Δύναμη Μηχανικών Internet) που στοχεύει στην προσαρμογή του καθιερωμένου Συστήματος Ονομάτων Τομέων (DNS) σε μικρά δίκτυα όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμοι διακομιστές.

Οι άνθρωποι, από την άλλη, μπορούν να ταυτοποιηθούν μέσω των συσκευών που μεταφέρουν ή μέσω πιο εξελιγμένων τεχνικών όπως βιομετρικά δεδομένα που λαμβάνονται μέσω αναγνώρισης προσώπου, δαχτυλικών αποτυπωμάτων κ.α. Ο χάρτης που ISO IoT περιλαμβάνει περισσότερες τεχνολογίες ταυτοποίησης και πιθανές λύσεις.

Το 2016, ο ISO/IEC δημοσίευσε το πρότυπο 29161 [41], το οποίο αποσκοπεί στη διασφάλιση της πλήρους συμβατότητας μεταξύ των διαφόρων μορφών ταυτοποίησης.

1.4.2 Σχήματα Επικοινωνίας και Πρωτόκολλα

Σε ένα έγγραφο της IETF (RFC 7452) περιγράφονται τέσσερα βασικά σχήματα επικοινωνίας για περιβάλλοντα IoT: συσκευής-με-συσκευή (device-to-device), συσκευής-με-σύννεφο (device-to-cloud), συσκευής-με-πύλη (device-to-gateway) και πρότυπο κοινής χρήσης δεδομένων (back-end data sharing).

Η device-to-device επικοινωνία εφαρμόζεται όταν δύο συσκευές επικοινωνούν απευθείας, συνήθως χρησιμοποιώντας ένα ασύρματο δίκτυο. Υπάρχουν αρκετά διαθέσιμα πρωτόκολλα για τη διεξαγωγή αυτού του τύπου επικοινωνίας ανάλογα με το σενάριο χρήσης. Μερικά από τα πιο διαδεδομένα είναι: Bluetooth ή IEEE 802.15.4, IPv6, User Datagram Protocol (UDP) και Constrained Application Protocol (CoAP).

Το πρότυπο επικοινωνίας device-to-cloud χρησιμοποιείται όταν τα δεδομένα που συλλέγονται από τη συσκευή, από το περιβάλλον, αποστέλλονται σε έναν παροχέα υπηρεσιών εφαρμογών. Η επικοινωνία βασίζεται στην IP, αλλά όταν ο κατασκευαστής της συσκευής και ο πάροχος υπηρεσιών εφαρμογών είναι οι ίδιοι, η ενσωμάτωση άλλων συσκευών μπορεί να είναι δύσκολη. Για να μην συμβεί αυτό, πρέπει να είναι διαθέσιμα τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία με το διακομιστή.

Το πρότυπο επικοινωνίας device-to-gateway μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν το σύστημα περιέχει συσκευές οι οποίες δεν χρησιμοποιούν IP, όταν απαιτείται υποστήριξη για συσκευές παλαιού τύπου ή όταν πρέπει να εφαρμοστούν πρόσθετες λειτουργίες ασφαλείας. Οι πύλες μπορούν επίσης να είναι κινητές, παρέχοντας μόνο προσωρινές συνδέσεις στο Internet. Τα smartphones είναι ένα παράδειγμα αυτών.

Το πρότυπο back-end data sharing χρησιμοποιείται όταν χρειάζεται να αναλυθούν συνδυασμένα δεδομένα από διάφορες πηγές. Τα RESTful API, ένα πρωτόκολλο που αναπτύχθηκε για την αμφίδρομη μεταφορά και επεξεργασία δεδομένων μέσω του internet, μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αν και δεν είναι τυποποιημένα. Αυτό το πρωτόκολλο μπορεί να επιτρέψει στους χρήστες να μεταφέρουν τα δεδομένα τους από μια υπηρεσία IoT σε άλλη [42].

Πέρα από ορισμένα γνωστά πρότυπα επικοινωνίας, όπως το Bluetooth, το Wi-Fi και το GSM, τα συστήματα IoT χρησιμοποιούν πολύ περισσότερα. Αξίζει να σημειωθεί ότι αναπτύσσονται νέα πρότυπα επικοινωνίας, ειδικά για ορισμένα σενάρια IoT. Για παράδειγμα, όταν το σύστημα αποτελείται από συσκευές με περιορισμένους πόρους σε δίκτυα ευρείας περιοχής, πρέπει να εφαρμοστούν λύσεις δικτύου χαμηλής ισχύος ευρείας περιοχής (LPWAN).

Από τη μία, οι τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν επιφέρει τεράστια ανάπτυξη στον τομέα των κινητών τηλεπικοινωνιών, με συσκευές που έχουν όλο και περισσότερους πόρους όσον αφορά τους επεξεργαστές, τη μνήμη, τους αισθητήρες και τη συνδεσιμότητα. Ως εκ τούτου, το 3GPP και οι φορείς παροχής κινητής τηλεφωνίας καταβάλλουν τεράστια προσπάθεια για νέα πρότυπα για κινητές επικοινωνίες με ακόμη μεγαλύτερα bandwidth, υψηλότερα bit rate και υποστήριξη για streaming πολυμέσων.

Από την άλλη, οι λύσεις για τα σενάρια που δεν θα περιλαμβάνουν τόσο πλούσιες, σε πόρους, συσκευές (resource-rich device), αλλά κυρίως συσκευές με περιορισμένες πηγές (resource-constrained device), έμειναν πίσω και εμφανίστηκαν πρόσφατα. Το 2016, το 3GPP εξέδωσε ένα νέο πρότυπο για το IoT που αποκαλείται NB-IoT [43], το οποίο υποστηρίζεται από κορυφαίους κατασκευαστές και από τους 20 μεγαλύτερους φορείς κινητής τηλεφωνίας στον κόσμο [44]. Το NB-IoT είναι μια τεχνολογία που επιτρέπει την αμφίδρομη και ασφαλή σύνδεση πολλαπλών αισθητήρων και συσκευών με απαιτήσεις χαμηλού εύρους ζώνης. Πρόκειται για μια τεχνολογία που απαιτεί χαμηλή κατανάλωση ενέργειας (περισσότερα από 10 χρόνια αυτονομίας) και επιτρέπει την ισχυρή διεύθυνση του ραδιοσήματος σε εσωτερικά περιβάλλοντα.

Παράλληλα, πολλές λύσεις χαμηλής κατανάλωσης για δίκτυα ευρείας περιοχής, όπως το LoRa, το NWave και το Sigfox, έχουν αναπτυχθεί και υιοθετηθεί από πολλές εφαρμογές IoT. Είναι αναπόφευκτο να υπάρξει σύγκλιση μεταξύ αυτών των τεχνολογιών στο εγγύς μέλλον και ορισμένες από αυτές θα επικρατήσουν τελικά, ενώ άλλοι θα εξαφανιστούν ή θα παραμείνουν σε χρήση σε εφαρμογές παλαιού τύπου. Ο πίνακας 1.2 συνοψίζει ορισμένα από τα πρωτόκολλα και τα πρότυπα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Πίνακας 1.2 Επισκόπηση βασικών τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων και προτύπων του IoT.

Name	Frequency	Range	Examples	Standards
BLE	2.4 GHz	1–100 m > 100 m	Headsets, wearables, sports and fitness, healthcare, proximity, automotive	IEEE 802.15.1 Bluetooth SIG
EnOcean	315, 868, 902 MHz	300 m outdoor 30 m indoors	Monitoring and control systems, building automation, transportation, logistics	ISO/IEC 14543-3-10
GSM	Europe: 900 MHz and 1.8 GHz United States: 1.9 GHz and 850 MHz		Mobile phones, asset tracking, smart meter, M2M	3GPP
LoRa	Sub-1 GHz ISM band	2–5 km urban 15 km suburban 45 km rural	Smart city, long range, M2M	LoRaWAN
NB-IoT	700–900 MHz	10–15 km rural deep indoor penetration	Smart meters, event detectors, smart city, smart home, industrial monitoring	3GPP LTE Release 13
NFC	13.56 MHz	Under 0.2 m	Smart wallets, smart cards, action tags, access control	ISO/IEC 18092 ISO/IEC 14443-2, -3, -4 JIS X6319-4
NWave	Sub-1 GHz ISM band	Up to 10 km	Agriculture, smart city, smart meter, logistics, environmental	Weightless
RFID	120–150 kHz (LF), 13.56 MHz (HF), 2450–5800 MHz (microwave), 3.1–10 GHz (microwave), 433 MHz (UHF), 865–868 MHz (Europe), 902–928 MHz (North America) (UHF)	10 cm–200 m 0–5 km	Road tolls, building access, inventory, goods tracking, building automation, smart energy, smart city logistics	ISO 18000
Sigfox	900 MHz	3–10 km urban 30–50 km rural	Smart meters, remote monitoring, security	
Weightless	470–790 MHz	Up to 10 km	Smart meters, traffic sensors, industrial monitoring	Weightless
Wi-Fi	2.4 GHz, 3.6 GHz, 4.9/5 GHz	Up to 100 m	Routers, tablets, smartphones, laptops	IEEE 802.11
Z-Wave	ISM band 865–926 MHz	100 m	Monitoring and control for home and light commercial environments	Z-Wave Recommendation ITU G.9959
ZigBee	2.4 GHz; 784 MHz in China, 868 MHz in Europe, and 915 MHz in the United States and Australia	10–20 m	Home and building automation, WSN, industrial control	IEEE 802.15.4

1.4.3 Συσκευές και Αισθητήρες

Ένα ευρύ φάσμα εξειδικευμένων αισθητήρων καθώς και αισθητήρων πολλαπλών χρήσεων διατίθενται στην αγορά, καθώς και πολλά SBC με ενσωματωμένους αισθητήρες ή με υποστήριξη για σύνδεση με διάφορους αισθητήρες και ενεργοποιητές. Ταυτόχρονα, ο αριθμός των χρηστών που χρησιμοποιούν φορητές συσκευές, ειδικά στον τομέα της παρακολούθησης αθλημάτων και σωματικών δραστηριοτήτων, αυξάνεται εκθετικά χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψη τα smartphones τα οποία είναι εξοπλισμένα με αρκετούς ενσωματωμένους αισθητήρες.

Οι αισθητήρες επιτρέπουν σε συσκευές να καταγράφουν δεδομένα από το περιβάλλον τους. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διαφορετικούς τρόπους. Ακολουθεί ένας συνοπτικός κατάλογος πιθανών κατηγοριών και μερικά παραδείγματα εφαρμογών:

- *Τοποθεσία: GPS, GLONASS, Galileo, Wi-Fi, Bluetooth, Ultra-wideband (UWB)*
- *Βιομετρία: Δακτυλικό αποτύπωμα, ίριδα, αναγνώριση προσώπου*
- *Ακουστική: Μικρόφωνο*
- *Περιβάλλον: Θερμοκρασία, υγρασία, πίεση*
- *Κίνηση: Επιταχυνσιόμετρο, γυροσκόπιο*

Οι ενεργοποιητές, με τη σειρά τους, επιτρέπουν στις συσκευές να δρουν στο περιβάλλον τους και μπορεί να είναι διαφόρων τύπων, όπως υδραυλικοί, πνευματικοί, ηλεκτρικοί, μηχανικοί ή πιεζοηλεκτρικοί.

Τα SBC γίνονται όλο και πιο δημοφιλή μεταξύ των χομπίστων και των ερευνητών. Είναι χαμηλού κόστους (λιγότερο από 50€), παρέχουν επαρκή επεξεργαστική ισχύ και μνήμη RAM, έχουν μερικές φορές ενσωματωμένους αισθητήρες ή υποστηρίζουν τη σύνδεση εξωτερικών αισθητήρων και υποστηρίζουν ασύρματη συνδεσιμότητα (Wi-Fi, Bluetooth Low Energy [BLE] και ZigBee). Κατά βάση αυτές οι συσκευές έχουν λειτουργικό Linux. Τα πιο δημοφιλή παραδείγματα είναι τα Arduino, Raspberry Pi, BeagleBone Black, Intel Edison και Pine 64. Τα χαρακτηριστικά τους συνοψίζονται στον Πίνακα 1.3.

Ως εναλλακτική λύση για την τοποθέτηση των αισθητήρων στο χώρο εφαρμογής χωρίς δοκιμή, υπάρχουν εργαστήρια σε όλο τον κόσμο όπου βρίσκονται φυσικές συσκευές και μπορούν να δοκιμαστούν εξ αποστάσεως, ειδικά για δοκιμές εφαρμογών μεγάλης κλίμακας. Μερικά από αυτά είναι το εργαστήριο FIT IoT-lab, που βρίσκεται στη Γαλλία. το III-IoT Lab, στην Ταϊβάν και το iMinds, στο Βέλγιο. Όλα είναι τμήματα της OneLab, τα οποία προσφέρουν πολλά δοκιμαστικό εξοπλισμό δίνοντας στους προγραμματιστές ένα μέσο για την ταχεία υλοποίηση και δοκιμή των έργων τους σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα, που είναι σε θέση να τα αξιολογηθούν πριν από την τελική τοποθέτηση.

Η OneLab δεν περιορίζεται στην περιοχή του IoT, προσφέρει επίσης δοκιμαστικό εξοπλισμό για άλλες περιοχές εφαρμογής, όπως το cloud computing ή τα Software-Defined Network. Όσον αφορά τις δοκιμαστικές συσκευές για το IoT, υπάρχει δοκιμαστικός εξοπλισμός ειδικά σχεδιασμένος για εφαρμογές έξυπνων πόλεων και ένα άλλο για συνδεδεμένο εμπόριο, το οποίο αφορά την παρακολούθηση της εφοδιαστικής αλυσίδας (π.χ. παρακολούθηση της ποιότητας των τροφίμων και της μεταφοράς τους σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού).

Πίνακας 1.3 Επισκόπηση βασικών τηλεπικοινωνιακών πρωτοκόλλων και προτύπων του IoT.

	Models	CPU	RAM	Operating System	Price (\$)	Connectivity	Embedded Sensors
Arduino	20+ models	ATmega, ATSAM, AR9331, etc.	0.5 kB–16 MB	Linux	30	Ethernet, Wi-Fi, extension boards	Extensions
Beagle board	BeagleBone Black	AM335x, 1 GHz; ARM Cortex A8	512 MB–1 GB	Linux	50	Ethernet	Extensions
Intel	Edison, Joule, Galileo	Intel Atom, Intel Quark	256 MB–4 GB	Linux	20–60	Wi-Fi, Bluetooth	
Pine 64	Pine A64, Pine A64+	ARM Cortex A53, 1.2 GHz	512 MB–2 GB	Linux, Android, Windows IoT	15–29	Ethernet	
Raspberry Pi	"Zero, RPi 1 A+, RPi 2 B+, RPi 3 B	ARM1176, 1 GHz; ARM1176; ARM Cortex A7; ARMv8, 1.2 GHz	512 MB–1 GB	Linux, Windows IoT	20-40	Wi-Fi, BLE, Ethernet, extensions	SenseHAT, other

1.5 Επισκόπηση Τομέων εφαρμογής

Οι δυνατότητες που προσφέρει το IoT (Internet of Things) καθιστούν δυνατή την ανάπτυξη ενός μεγάλου αριθμού εφαρμογών, εκ των οποίων μόνο ένα μικρό μέρος είναι διαθέσιμο προς το παρόν. Νέες εφαρμογές αναπτύσσονται για να βελτιώσουν την καθημερινότητα σε ποικίλους τομείς και περιβάλλοντα: στο σπίτι, στη δουλειά, σε ταξίδια, κατά τη διάρκεια της άσκησης κ.α. Αυτοί οι χώροι (περιβάλλοντα) είναι εξοπλισμένοι με συσκευές (things) οι οποίες, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, δεν έχουν τη δυνατότητα διασύνδεσης. Δίνοντας σε αυτές τις συσκευές τη δυνατότητα να επικοινωνούν η μία με την άλλη και να επεξεργάζονται τα σήματα και τις πληροφορίες που λαμβάνονται από τον περιβάλλοντα χώρο, μπορεί να αναπτυχθεί ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι βασικοί τομείς στους οποίους κατατάσσονται είναι:

- Τομέας μεταφορών και εφοδιασμού
- Τομέας υγείας και πρόνοιας
- Τομέας έξυπνων κτηρίων
- Τομέας κοινωνικής δικτύωσης και αναψυχής

Οι εφαρμογές που βρίσκουν εφαρμογή στους παραπάνω τομείς διακρίνονται σε αυτές που έχουν ήδη αναπτυχθεί, ή αναπτύσσονται με τις παρούσες τεχνολογίες, και σε αυτές που δεν μπορούν να υλοποιηθούν με τις παρούσες τεχνολογίες. Στη συνέχεια παρατίθενται κάποιες πιθανές εφαρμογές για κάθε έναν από τους 4 τομείς του IoT.

1.5.1 Τομέας μεταφορών και εφοδιασμού

Το επίπεδο ελέγχου των σύγχρονων μέσων μεταφοράς (αυτοκίνητα, τρένα, ποδήλατα κ.α.) καθώς και των δρόμοι και των σιδηροδρομικών γραμμών όλο και αυξάνεται με περισσότερους αισθητήρες και μεγαλύτερη επεξεργαστική ισχύ. Επίσης, τα προϊόντα που

μεταφέρονται είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες οι οποίοι στέλνουν δεδομένα για τη θέση καθώς και την κατάσταση τους. Έτσι παρέχεται η δυνατότητα για καλύτερη επισκόπηση και αποστολή πληροφοριών σε περιοχές ελέγχου, καλύτερη πλοήγηση των οχημάτων για αποφυγή της κίνησης, καλύτερη διαχείριση των αποθηκών εμπορευμάτων, καλύτερη ενημέρωση των πολιτών και τουριστών για την κατάσταση των ΜΜΜ. Παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικές εφαρμογές του τομέα μεταφορών και εφοδιασμού

1.5.1.1 Εφοδιασμός

Τα Συστήματα Αυτόματου Προσδιορισμού, όπως το NFC (Near-Field Communication) και το RFID (Radio-Frequency Identification) επιτρέπουν την παρακολούθηση της πλειοψηφίας της αλυσίδας παραγωγής σε πραγματικό χρόνο. Έτσι καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση του σχεδιασμού των προϊόντων, της αγοράς πρώτων υλών, της παραγωγής, της μεταφοράς, της αποθήκευσης, της διανομής, της πώλησης καθώς και της εξυπηρέτησης των πελατών μετά από αυτή. Επιπρόσθετα μπορούν να συλλέγονται λεπτομερείς πληροφορίες για τα προϊόντα άμεσα ώστε οι επιχειρήσεις να μπορούν να ανταποκρίνονται γρήγορα και αποτελεσματικά σε απαιτήσεις και αλλαγές στην αγορά. Η χρήση τέτοιων τεχνικών έχει σαν αποτέλεσμα να μειώνεται κατά πολύ η διαδικασία της παραγωγής και να βελτιώνεται ο χρόνος απόκρισης των επιχειρήσεων. Όπως αναφέρεται στα [45],[46] ο χρόνος που απαιτείται από μια επιχείρηση η οποία δεν χρησιμοποιεί τεχνολογίες IoT για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της αγοράς (για όλη τη διαδικασία παραγωγής) είναι περίπου 120 μέρες. Αντίθετα, επιχειρήσεις που έχουν υιοθετήσει τεχνολογίες IoT μπορούν να ανταποκριθούν στις ίδιες απαιτήσεις σε μόλις λίγες ημέρες, βελτιώνοντας την εξυπηρέτηση πελατών, μειώνοντας παράλληλα το απόθεμα ασφαλείας. Τέλος η χρήση Συστημάτων Ενδοεπιχειρησιακού Σχεδιασμού (Enterprise Resource Planning) βοηθάει τα τμήματα εξυπηρέτησης πελατών στην καλύτερη ενημέρωση σε θέματα διαθεσιμότητας αλλά και πληροφοριών για τα ίδια τα προϊόντα [47].

1.5.1.2 Υποβοηθούμενη οδήγηση

Όπως αναφέρθηκε, τα μέσα μεταφοράς καθώς και οι δρόμοι-σιδηρόδρομοι, όταν είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες και με την κατάλληλη διαχείριση των δεδομένων που λαμβάνονται, μπορούν να παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σε οδηγούς και επιβάτες και να βελτιώσουν την ασφάλεια αυτών. Η αποφυγή ατυχημάτων και η παρακολούθηση μεταφοράς εύφλεκτων ουσιών είναι μόνο δύο από αυτές. Οι φορείς ρύθμισης της κυκλοφορίας μπορούν να ελέγξουν καλύτερα την κίνηση και τη ροή των αυτοκινήτων έχοντας πιο ακριβείς πληροφορίες. Επαγγελματίες οδηγοί μπορούν να μειώσουν το χρόνο μεταφοράς αγαθών και πελατών έχοντας περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την κίνηση στους δρόμους και πιθανά ατυχήματα στους δρόμους. Επίσης, οι επιχειρήσεις ανεφοδιασμού ή μεταφορών μπορούν να βελτιώσουν το σχεδιασμό της διαδρομής των φορτηγών τους αυξάνοντας την εξοικονόμηση ενέργειας και να παρακολουθούν την κατάσταση των οχημάτων για την πρόβλεψη βλαβών και την άμεση αντιμετώπιση τους. Τόσο οι πελάτες όσο και οι επιχειρηματίες μπορούν να παρακολουθούν σε πραγματικό

χρόνο τα προϊόντα και να ενημερώνονται σχετικά με το χρόνο παράδοσης, καθυστερήσεις και βλάβες. Αυτή η πληροφορία μπορεί να συνδυαστεί με πληροφορίες σχετικά με τις αποθήκες των προϊόντων για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας ανεφοδιασμού.

1.5.1.3 Υπηρεσίες έκδοσης εισιτηρίων

Οι αφίσες ή οι πίνακες που περιέχουν πληροφορίες (περιγραφή, τιμή, δρομολόγια) σχετικά με υπηρεσίες μεταφοράς μπορούν να εξοπλιστούν με NFC ή/και ειδικά σημεία για σάρωση. Ο χρήστης θα μπορεί να χρησιμοποιεί τη λειτουργία NFC του κινητού του ή να σαρώνει τα απαραίτητα στοιχεία, μέσω της κάμερας, ώστε να λαμβάνει πληθώρα πληροφοριών για τα δρομολόγια που τον ενδιαφέρουν. Έτσι λαμβάνονται αυτόματα πληροφορίες για τις στάσεις, το κόστος, τον αριθμό των επιβατών, τις διαθέσιμες θέσεις κλπ χωρίς ο χρήστης να κάνει σύνθετες και χρονοβόρες αναζητήσεις στο διαδίκτυο, επιτρέποντας παράλληλα την ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο για τυχόν αλλαγές αλλά και την έκδοση εισιτηρίων [48].

1.5.1.4 Παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων

Τα ευπαθή αγαθά όπως φρούτα, λαχανικά, φρέσκα κρέατα, γαλακτοκομικά προϊόντα αποτελούν βασικό κομμάτι της διατροφής. Από την παραγωγή μέχρι την κατανάλωση τους διανύουν χιλιάδες χιλιόμετρα κατά τη διάρκεια τη μεταφοράς οι συνθήκες αποθήκευσης (θερμοκρασία, υγρασία, πίεση) πρέπει να ελέγχονται ώστε να διασφαλίζεται το επίπεδο ποιότητας. Οι τεχνολογίες απομακρυσμένης παρακολούθησης καθώς και οι τεχνολογίες αισθητήρων μπορούν να διπλασιάσουν την αποδοτικότητα της παραγωγής τέτοιων προϊόντων [49][50]

1.5.1.5 Εικονικοί χάρτες

Οι τουριστικοί χάρτες μπορεί να είναι εξοπλισμένοι με ετικέτες (tags) οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα σε κινητά με NFC να αλληλοεπιδρούν με αυτούς λαμβάνοντας πληροφορίες για ξενοδοχεία, εστιατόρια και εκδηλώσεις στην περιοχή που βρίσκεται ο χρήστης [51]. Μερικές από τις τεχνικές που μπορούν εφαρμοστούν χρησιμοποιώντας Αλληλεπίδραση Κινητών-Φυσικών Συσκευών (Physical Mobile Interaction) για την αύξηση των πληροφοριών των χαρτών παρουσιάζονται παρακάτω:

- Σάρωση σημείων του χάρτη για την εμφάνιση επιπρόσθετων πληροφοριών
- Επιλογή και αποθήκευση μεμονωμένων σημείων πάνω στο χάρτη κατά τη σάρωση
- Επιλογή και αποθήκευση πολλαπλών σημείων
- Σχεδίαση διαδρομών ή σχημάτων στο χάρτη τα οποία καθορίζουν περιοχές ενδιαφέροντος
- Αυτόματη αφαίρεση σημείου κατά την άφιξη του χρήστη σε ένα από τα αποθηκευμένα σημεία
- Εμφάνιση μενού με περισσότερες επιλογές όλης της περιοχής κατά τη σάρωση σε κατάλληλα σημεία στο χάρτη [52]

1.5.2 Τομέας υγείας και πρόνοιας

Υπάρχουν πάρα πολλά πλεονεκτήματα της χρήσης τεχνολογιών IoT στο τομέα της υγείας και πρόνοιας και οι βασικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι εφαρμογές που προκύπτουν είναι: παρακολούθηση αντικειμένων και ανθρώπων (προσωπικό και ασθενείς), ταυτοποίηση και έγκριση πρόσβασης, συλλογή και ανάλυση δεδομένων και τηλεσκόπηση [53].

1.5.2.1 Αυτόματη παρακολούθηση

Η αυτόματη παρακολούθηση είναι η διαδικασία αναγνώρισης ενός ανθρώπου ή ενός αντικειμένου που βρίσκεται σε κίνηση. Αυτό εμπεριέχει παρακολούθηση θέσης σε πραγματικό χρόνο, για εφαρμογές όπως ο έλεγχος της ροής του αριθμού των ασθενών σε νοσοκομεία για βελτιστοποίηση της απόδοσης, και παρακολούθηση θέσης μέσω σημείων αναφοράς, όπως η παραχώρηση πρόσβασης σε συγκεκριμένους χώρους. Όσον αφορά τα φαρμακευτικά προϊόντα η παρακολούθηση εφαρμόζεται για τη συλλογή δεδομένων που βοηθούν τη συντήρηση και διαθεσιμότητα τους καθώς και την χρήση τους κατά τη διάρκεια χειρουργείων ή αποκατάστασης ασθενών.

1.5.2.2 Αναγνώριση και έγκριση πρόσβασης

Περιλαμβάνει αναγνώριση ασθενών για την απαλοιφή επιβλαβών συμβάντων στους ασθενείς (όπως λανθασμένες/καθυστερημένες δόσεις/φάρμακα), κατανοητά και ενημερωμένα ηλεκτρονικά ιστορικά ασθενών (σε οποιαδήποτε θέση αυτά ζητηθούν), και αναγνώριση νεογνών σε μαιευτήρια για αποφυγή λαθών. Η αναγνώριση και παρακολούθηση του προσωπικού χρησιμοποιείται κυρίως για να παρέχεται πρόσβαση σε διάφορους τομείς του νοσοκομείου και με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται το αίσθημα ασφάλειας τόσο των εργαζομένων όσο και των ασθενών. Έτσι μπορούν να καλύπτονται όλες οι απαιτήσεις ασφάλειας που απαιτούνται για την ασφαλή μεταφορά φαρμακευτικών προϊόντων και εξοπλισμού και να αποφεύγονται κλοπές και καταστροφές αυτών.

1.5.2.3 Συλλογή δεδομένων

Η αυτόματη συλλογή δεδομένων και μεταφορά αυτών έχει ως πρωταρχικό στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου επεξεργασίας, την αυτοματοποίηση της διαδικασίας (συμπεριλαμβανομένου της δειγματοληψίας και αναγνώρισης λαθών), αυτόματη πρόγνωση και περίθαλψη και διαχείριση φαρμακευτικών προϊόντων. Αυτές οι εφαρμογές συμπεριλαμβάνουν τη χρήση τεχνολογιών RFID σε συνδυασμό με άλλες πληροφορίες και εφαρμογές σε ένα νοσοκομείο και δίνουν τη δυνατότητα για μελλοντική ανάπτυξη ενός μεγάλου δικτύου συλλογής πληροφοριών όχι μόνο σε νοσοκομεία αλλά ποικίλες τοποθεσίες.

1.5.2.4 Τηλεσκοπία

Οι αισθητήρες επιτρέπουν τη διάγνωση ασθενειών, παρέχοντας πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση της υγείας των ασθενών. Οι εφαρμογές που επωφελούνται από συσκευές αισθητήρων περιλαμβάνουν συστήματα τηλεδιαχείρισης, παρακολούθηση της αντίδρασης των ασθενών σε διάφορες φαρμακευτικές αγωγές και ειδοποιήσεις για την ευεξία των ασθενών.

1.5.3 Τομέας έξυπνων κτηρίων

Ένα έξυπνο περιβάλλον (έξυπνος χώρος) είναι αυτό το οποίο καθιστά την παραμονή του σε αυτό ευχάριστη, χάρη στα έξυπνα αντικείμενα και συσκευές που περιέχει, είτε αυτό είναι ένα σπίτι, ένας χώρος εργασίας, μια βιομηχανική μονάδα ή ένας χώρος αναψυχής.

1.5.3.1 Σπίτια και χώροι εργασίας

Οι έξυπνοι αισθητήρες και μετρητές σε σπίτια και χώρους εργασίας μπορούν να βελτιώσουν την παραμονή σε αυτούς με διάφορους τομείς: ο κλιματισμός μπορεί να προσαρμόζεται ανάλογα με τις προσωπικές προτιμήσεις και τον καιρό, περιστατικά ενδοοικογενειακής βίας μπορούν να αποφεύγονται με κατάλληλη παρακολούθηση και συστήματα συναγερμού και η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να αυξηθεί με την αυτόματη απενεργοποίηση συσκευών όταν αυτές δεν χρησιμοποιούνται. Έτσι σε συνδυασμό με τους πάροχους ρεύματος μπορεί να μειωθεί η υπερφόρτωση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση μεταβλητής τιμής αγοράς ηλεκτρικού ρεύματος. Ένα κεντρικό σύστημα διαχείρισης μπορεί να ελέγχει την κατανάλωση ενέργειας, και κατ' επέκταση το συνολικό κόστος, σύμφωνα με την τιμή αγοράς ηλεκτρικού ρεύματος η οποία παρέχεται μέσω μια κεντρικής πλατφόρμας και προκύπτει από την τρέχουσα παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας. Όταν η τιμή είναι χαμηλή το σύστημα μπορεί να λαμβάνει αποφάσεις για την χρήση οικιακών συσκευών όπως φόρτιση μπαταριών, ενεργοποίηση πλυντηρίων κ.α. [54].

1.5.3.2 Βιομηχανικές μονάδες

Τα έξυπνα περιβάλλοντα βοηθούν στην αυτοματοποίηση της παραγωγής σε βιομηχανικές μονάδες με την χρήση ετικετών RFID (RFID tags) στα προϊόντα. Ένα σενάριο χρήσης περιγράφεται παρακάτω: καθώς το προϊόν πλησιάζει το επόμενο στάδιο στη διαδικασία παραγωγής ένας RFID reader αναγνωρίζει το tag. Ο reader λαμβάνει όλα τα απαραίτητα στοιχεία για το προϊόν, τα οποία μπορεί αν είναι αποθηκευμένα τοπικά ή στο δίκτυο, και τα μεταφέρει στο μηχάνημα επεξεργασίας του προϊόντος (ρομπότ/βραχίονας/μηχανή). Αυτό με τη σειρά του ταυτοποιώντας το tag με τα δεδομένα που έχει από το φορέα παραγωγής λαμβάνει τις απαραίτητες ενέργειες για την περαιτέρω επεξεργασία του προϊόντος. Επίσης τα μηχανήματα παραγωγής μπορούν να είναι εξοπλισμένα με ασύρματους αισθητήρες οι οποίοι να σταματάνε τη λειτουργία τους σε περίπτωση που οι μετρήσεις ξεπεράσουν κάποιες προκαθορισμένες τιμές ή στέλνουν ειδοποιήσεις στο προσωπικό για τυχόν συντηρήσεις και ανωμαλίες στην παραγωγή. Έτσι προστατεύονται τα μηχανήματα καθώς και

όλη η παραγωγή, ενημερώνεται αυτόματα το ERP (Enterprise Resource Planning) και λαμβάνονται γρηγορότερα αποφάσεις σχετικά με την επίδραση της βλάβης στην αλυσίδα παραγωγής. Τέλος με το IoT όλοι οι ενδιαφερόμενοι μπορούν να έχουν πρόσβαση σε αυτές τις πληροφορίες οπότε υπάρχει άμεση και πλήρης ενημέρωση στον πελάτη [55].

1.5.3.3 Έξυπνα μουσεία και γυμναστήρια

Όσον αφορά τα έξυπνα περιβάλλοντα αναψυχής, τα μουσεία και τα γυμναστήρια είναι δύο παραδείγματα στα οποία οι εφαρμογές IoT μπορούν να βοηθήσουν στην αξιοποίηση τους στο έπακρο. Στα μουσεία, για παράδειγμα, τα εκθέματα μπορεί να προέρχονται από διάφορες ιστορικές περιόδους και περιοχές (Αρχαία Αίγυπτος ή εποχή των παγετώνων) με διαφορετικά κλίματα. Τα κτήρια μπορούν να προσαρμόζουν τη θερμοκρασία του κάθε δωματίου ανάλογα με τα εκθέματα λαμβάνοντας υπ' όψη και την εξωτερική θερμοκρασία. Στο γυμναστήριο, ο γυμναστής, μπορεί να ανεβάζει το πρόγραμμα των ασκήσεων για κάθε ασκούμενο στα μηχανήματα, ο οποίος αναγνωρίζεται από αυτά μέσω ενός RFID tag. Διάφοροι παράμετροι υγείας μπορούν να παρακολουθούνται καθόλη τη διάρκεια της άσκησης και τα αποτελέσματα να ελέγχονται έτσι ώστε ο ασκούμενος να γνωρίζει εάν πιέζεται υπερβολικά ή αν πρέπει να αυξήσει την επίδοσή του.

1.5.4 Τομέας κοινωνικής δικτύωσης και αναψυχής

Οι εφαρμογές οι οποίες υπάγονται σε αυτό τον τομέα είναι αυτές που επιτρέπουν στο χρήστη να αλληλοεπιδρά με άλλους ανθρώπους για να διατηρεί και να χτίζει νέες κοινωνικές επαφές. Μέσω των μέσων κοινωνικής δικτύωσης μπορούν να αποστέλλονται αυτόματα μηνύματα για γεγονότα που έχουν λάβει μέρος στο παρόν ή το παρελθόν. Έτσι ο κοινωνικός περίγυρος του χρήστη μπορεί να ειδοποιείται για ταξίδια, νέες δουλειές, αθλητικές δραστηριότητες του χρήστη χωρίς να απαιτείται κάποια δράση από αυτόν [56]. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι βασικές εφαρμογές.

1.5.4.1 Κοινωνική δικτύωση

Αυτές οι εφαρμογές σχετίζονται με την αυτόματη ενημέρωση των πληροφοριών των μέσων κοινωνικής δικτύωσης, όπως το Twitter ή το Facebook. Με τη χρήση RFID tags καθίσταται δυνατή η ενημέρωση, σε πραγματικό χρόνο, των δράσεων του χρήστη στα μέσα κοινωνικής δικτύωσης και με αυτά τα δεδομένα μπορεί να δημιουργείται ένα τοπικό δίκτυο με χρήστες που βρίσκονται στον ίδιο χώρο. Τέλος οι χρήστες μπορούν να βλέπουν τις εκδηλώσεις στις οποίες οι φίλοι τους έχουν παραβρεθεί ή θα παραβρεθούν και να επιλέξουν σε ποιες από αυτές θα παραβρεθούν οι ίδιοι.

1.5.4.2 Ιστορικό δραστηριοτήτων

Το ιστορικό του χρήστη για συσκευές και εκδηλώσεις επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των συνηθειών του. Αυτό μπορεί να είναι πολύ χρήσιμο για εφαρμογές που αφορούν

μακροχρόνιες δραστηριότητες όπως projects και επαγγελματικές συνεργασίες. Οι δράσεις στο χρήστη μπορούν να αποθηκεύονται σε ένα ηλεκτρονικό ημερολόγιο όπως το Google Calendar και να χρησιμοποιείται στο μέλλον για αξιολόγηση της απόδοσης. Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί αυτά τα ημερολόγια για να γνωρίζει πως, και με ποιον, ξόδεψε το χρόνο του. Μέσω του ιστορικού του χρήστη μπορούν να αυτόματα να εξάγονται διαγράμματα μέσω του google charts API στα οποία να εμφανίζεται πού, πώς και με ποιον ο χρήστης αφιέρωσε το χρόνο του, σε μία περίοδο όπου η αποδοτικότητά του ήταν χαμηλή.

1.5.4.3 Παρακολούθηση αντικειμένων

Μία συσκευή αναζήτησης για αντικείμενα είναι εργαλείο το οποίο βοηθάει στην εύρεση αντικειμένων που ο χρήστης δε θυμάται που άφησε. Η πιο απλή διαδικτυακή εφαρμογή, με χρήση RFID, είναι μία μηχανή αναζήτησης για αντικείμενα που επιτρέπει στο χρήστη να δει την τελευταία αποθηκευμένη τοποθεσία για αυτά ή να ψάξει την τοποθεσία ενός συγκεκριμένου αντικειμένου. Μία επέκταση αυτής της εφαρμογής χρησιμοποιεί συμβάντα, που ορίζονται από το χρήστη, για να τον ενημερώνουν όταν η τελευταία καταγεγραμμένη θέση ενός αντικειμένου αντιστοιχεί σε κάποιες συνθήκες.

1.5.4.4 Κλοπές

Μία εφαρμογή, παρόμοια με την προηγούμενη, μπορεί να επιτρέπει στο χρήστη να γνωρίζει αν κάποια αντικείμενα έχουν μετακινηθεί από κάποια προκαθορισμένη περιοχή (το σπίτι ή το γραφείο) το οποίο μπορεί να είναι δείγμα ότι το αντικείμενο έχει κλαπεί. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να υπάρχει άμεση ειδοποίηση του χρήστη και/ή της ασφάλειας. Για παράδειγμα, η εφαρμογή μπορεί να στέλνει ένα γραπτό μήνυμα στους χρήστες όταν τα αντικείμενα βγαίνουν από το χώρο χωρίς άδεια (όπως για παράδειγμα ένα laptop, ένα πορτοφόλι ή ένα κόσμημα).

1.5.5 Μελλοντικές εφαρμογές

Οι εφαρμογές που περιγράφηκαν στις προηγούμενες ενότητες είναι ρεαλιστικές καθώς εφαρμόζονται ήδη ή μπορούν να εφαρμοστούν βραχυπρόθεσμα, καθώς οι απαραίτητες τεχνολογίες για την υλοποίησή τους είναι διαθέσιμες. Πέρα από αυτές, υπάρχουν κάποιες εφαρμογές τις οποίες μπορούμε να χαρακτηρίσουμε σαν φουτουριστικές (*Futuristic*) καθώς βασίζονται σε κάποιες τεχνολογίες (τηλεπικοινωνίες, αισθητήρες, υλικά κλπ) οι οποίες είτε είναι πολύ περίπλοκες είτε δεν έχουν εμφανιστεί ακόμα. Αυτές οι εφαρμογές είναι πολύ ενδιαφέρουσες όσον αφορά την απαραίτητη έρευνα και την πιθανή επίδραση που θα έχουν. Μία ενδιαφέρουσα ανάλυση αυτών των εφαρμογών παρουσιάζεται το [57] εκ των οποίων οι τρεις πιο ενδιαφέρουσες παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1.5.5.1 Ταξί Ρομποτ

Στις πόλεις του μέλλοντος τα ρομποτ ταξί θα κινούνται σε μία ομάδα παρέχοντας, έγκαιρα και αποτελεσματικά, υπηρεσίες εκεί που απαιτείται. Τα ταξί ρομπότ ανταποκρίνονται στα κυκλοφοριακά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και σχεδιάζονται ώστε να μειώνουν την κυκλοφοριακή συμφόρηση στην πόλη εξυπηρετώντας παράλληλα τις πιο πολυσύχναστες περιοχές. Με ή χωρίς οδηγό κινούνται εντός και εκτός της κυκλοφορίας προσαρμόζοντας την ταχύτητά τους σε αυτήν, αποφεύγοντας ατυχήματα μέσω αισθητήρων απόστασης. Οι χρήστες μπορούν να καλούν από την πλευρά του δρόμου μέσω χειρονομιών η κατευθύνοντας το κινητό τους τηλέφωνο σε αυτά. Η τοποθεσία του χρήστη παρακολουθείται αυτόματα μέσω GPS και του επιτρέπει να καλέσει ένα ταξί σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία οποιαδήποτε στιγμή απλώς επιλέγοντας το από το χάρτη. Σε περιπτώσεις που δε χρησιμοποιούνται, το ταξί κατευθύνονται στα Pit stops, παρκάρουν αυτόματα, με βέλτιστο τρόπο για εξοικονόμηση χώρου, και μέσω αισθητήρων ενεργοποιείται η φόρτωση μπαταριών και ο διαγνωστικός έλεγχος για ανίχνευση βλαβών. Τα pit-stops επικοινωνούν μεταξύ τους για να εξασφαλίσουν ότι θα υπάρξει διαμοιρασμός στη χρήση των ταξί [57].

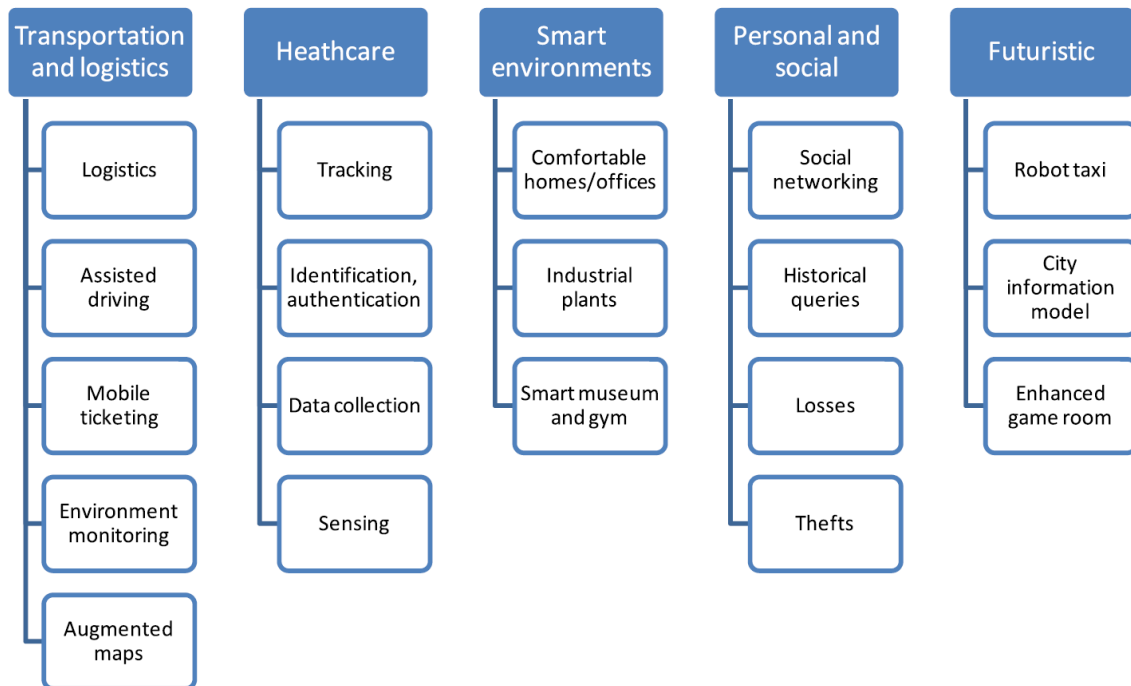
1.5.5.2 City Information Model (CIM)

Το City Information Model βασίζεται στην ιδέα ότι η κατάσταση και οι επιδόσεις κάθε κτιρίου και δομικών υλικών, όπως πεζόδρομοι, ποδηλατόδρομοι, υπόνομοι, σιδηροδρομικές γραμμές και λεωφορειοίδρομοι, παρακολουθούνται συνεχώς από τις αρμόδιες αρχές της πόλης και διατίθενται σε τρίτους μέσω μιας σειράς API, διατηρώντας παράλληλα κάποιες πληροφορίες εμπιστευτικές. Έτσι, τίποτα δεν μπορεί να κατασκευαστεί νόμιμα αν δεν είναι συμβατό με το CIM. Οι υπηρεσίες διαχείρισης κτιρίων συνεργάζονται μεταξύ τους, και μέσω του CIM διαχειρίζονται την κατανάλωση ενέργειας και την διαμοιράζουν με αποδοτικό τρόπο. Με αυτόν τον τρόπο, ο σχεδιασμός είναι μία συνεχής διαδικασία, στην οποία οι επιδόσεις κάθε στοιχείου καταγράφονται και παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο. Οι αλλαγές στον πληθυσμό, η κίνηση των πολιτών, η κατανάλωση ενέργειας, καθώς και η συνολική απόδοση των προϊόντων και των κτιρίων μπορεί να αξιολογείται μέσω του μοντέλου.

1.5.5.3 Παιχνίδια εικονικής πραγματικότητας

Το δωμάτιο εικονικής πραγματικότητας καθώς και οι παίκτες είναι εξοπλισμένοι με μία σειρά συσκευών για την ανίχνευση θέσης, κίνησης, επιτάχυνσης, υγρασίας, θερμοκρασίας, θορύβου, φωνής, καρδιακού παλμού και αρτηριακής πίεσης. Το δωμάτιο χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες η αναμέτρηση το επίπεδο ενθουσιασμού και ενέργειας ώστε να προσαρμόσει το παιχνίδι ανάλογα με την κατάσταση του παίκτη. Διάφορα αντικείμενα τοποθετούνται στο δωμάτιο και ο σκοπός του παιχνιδιού είναι να χρησιμοποιούν οι παίκτες αυτά τα αντικείμενα για να μην ακουμπήσουν το έδαφος. Ένας στόχος τοποθετείται σε μία οθόνη σε κάποιον τοίχο του δωματίου. Ο σκοπός του παιχνιδιού είναι οι παίκτες να φτάσουν πρώτοι σε αυτόν. Κάθε παίκτης είναι εξοπλισμένος με ένα χειριστήριο το οποίο αναγνωρίζει RFID Tags σε αντικείμενα του δωματίου. Έτσι καθώς το παιχνίδι εξελίσσεται

γίνεται όλο και δυσκολότερο και παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο τις κινήσεις των παικτών προσαρμόζει τη δυσκολία ώστε αυτοί να μπορούν να συμβαδίσουν. Με αυτό τον τρόπο διατηρείται ένα υψηλό επίπεδο ενθουσιασμού για παίκτες διαφορετικών επιπέδων.



Σχήμα 1.8. Οι βασικές εφαρμογές του IoT.

1.6 Προκλήσεις

Αυτήν την περίοδο, το IoT είναι ένας από τους βασικούς τομείς που διαμορφώνουν τις νέες τεχνολογίες, καθώς έχει την δυνατότητα να αλλάξει την κοινωνία και την οικονομία. Έτσι, όλα τα ενδιαφερόμενα μέλη, τα οποία περιλαμβάνουν ερευνητές, κατασκευαστές, εταιρίες και χρήστες, αντιμετωπίζουν δυσκολίες που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Η τεχνογνωσία που προέρχεται από τομείς όπως τα παράλληλα και κατακευμασμένα συστήματα, τα δίκτυα, την πανταχού παρούσα τεχνολογία κλπ μπορεί να βοηθήσει στην επίλυση ζητημάτων που σχετίζονται με την διαλειτουργικότητα, την ασφάλεια, την επεκτασιμότητα κ.α. των συστημάτων IoT.

1.6.1 Διαλειτουργικότητα

Η διαλειτουργικότητα ήταν πάντα πρόκληση για τα κατακευμασμένα συστήματα καθώς ένα σύνολο δικτύων, λογισμικών, υλικών και λειτουργικών συστημάτων άρχισαν να συνυπάρχουν μέσα στο ίδιο σύστημα. Τα συστήματα IoT του μέλλοντος θα περιλαμβάνουν ανθρώπους, μηχανές και αντικείμενα και ομάδες αυτών. Για την σωστή λειτουργία τέτοιων

συστημάτων η αδιάληπτη λειτουργία και συνεργασία μεταξύ όλων των στοιχείων είναι κρίσιμη [58]. Οι κατασκευαστές και οι προγραμματιστές πρέπει να είναι έτοιμοι να αντιμετωπίσουν κατανομημένα συστήματα με πληθώρα διαφορετικών συσκευών, αδιάληπτη λειτουργία και μεγάλη δυναμική και να προσαρμόσουν και να ενημερώσουν τις προγραμματιστικές τους δεξιότητες σε αυτά τα νέα δεδομένα [46].

Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν πολλές προκλήσεις για το IoT, η διαλειτουργικότητα παραμένει ένας από τους πιο απαιτητικούς στόχους για τα συστήματα IoT, εκτός εάν αναπτυχθεί μια RA και ένα σύνολο προτύπων [13]. Έχει γίνει προσπάθεια από τον ISO/IEC να δημιουργήσει μια RA, IoT RA, η οποία βρίσκεται σε εξέλιξη. Αυτή η αρχιτεκτονική έχει λάβει τη συναίνεση πολλών οργανισμών [28]. Επίσης, για την επίτευξη της διαλειτουργικότητας, τα στοιχεία του IoT πρέπει να είναι αναγνωρίσιμα και να μπορούν να εντοπιστούν από άλλα στοιχεία [59] όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 1.1. Μετά την αναγνώριση και την ταυτοποίηση, τα στοιχεία του συστήματος πρέπει να είναι σε θέση να επικοινωνούν με ποικίλους τρόπους, θέμα το οποίο απασχολεί την επιστημονική κοινότητα και αποτελεί αντικείμενο μελέτης των τελευταίων ετών [60] [61] [62] [63].

Στην ενότητα 1.2 παρουσιάστηκαν τα πρωτόκολλα και τα πρότυπα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται και αναπτύσσονται επί του παρόντος. Είναι επιτακτικό στο άμεσο μέλλον, οι υφιστάμενες και οι νέες ασύρματες τεχνολογίες, όπως οι NB-IoT, LoRaWAN και Sigfox, να δοκιμαστούν διεξοδικά και να αναπτυχθούν περαιτέρω, ώστε να επιτευχθούν βήματα προς την κατεύθυνση της ύπαρξης προτύπων για συνδεσιμότητα μεταξύ των συσκευών IoT.

1.6.2 Συνδεσιμότητα

Η συνδεσιμότητα ενός συστήματος αναφέρεται στο βαθμό στον οποίο αυτό μπορεί να επεκταθεί και να επαναχρησιμοποιηθεί με νέους τρόπους και τεχνολογίες. Τα συστήματα IoT πρέπει να είναι έτοιμα να μοιράσουν τα δεδομένα και τους πόρους τους με άλλα συστήματα, πολλές φορές με μη συμβατικούς τρόπους [64]. Προκείμενου να γίνουν βιώσιμα τα συστήματα IoT «η συνδεσιμότητα πρέπει να παρέχει μια ισορροπία μεταξύ λειτουργικότητας, ανθρώπινης αλληλεπίδρασης, και ασφάλειας και προστασίας» [62].

1.6.3 Προστασία, Ασφάλεια, Εμπιστοσύνη

Εκτός από το ήδη πολύπλοκο περιβάλλον ασφάλειας και προστασίας των προσωπικών δεδομένων, το IoT εισάγει σημαντικά περισσότερα ζητήματα ασφάλειας δεδομένων και ιδιωτικότητας. Συχνά, τα συστήματα IoT βασίζονται σε ασύρματες επικοινωνίες που δημιουργούν εγγενώς προβλήματα ασφαλείας. Επιπλέον, ο μεγάλος όγκος των δεδομένων που δημιουργούνται εγείρει νέες ανησυχίες όχι μόνο για τη διαχείριση, την επεξεργασία και την ανάλυση αυτού του όγκου δεδομένων, αλλά και για τον τρόπο με τον οποίο διασφαλίζεται το απόρρητο των δεδομένων. Τα συστήματα IoT, ειδικά εκείνα που συλλέγουν ευαίσθητα δεδομένα (π.χ. συστήματα υγειονομικής περίθαλψης), πρέπει να είναι πλήρως ασφαλή σε όλα τα επίπεδα, από το φυσικό στρώμα έως το στρώμα εφαρμογής.

Οι υπάρχουσες συσκευές IoT και τα αναπτυσσόμενα συστήματα έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα ευάλωτα σε επιθέσεις άρνησης υπηρεσιών (DoS). Συνεπώς απαιτείται η εφαρμογή επαρκών μηχανισμών ασφαλείας και προστασίας δεδομένων, σε όλα τα επίπεδα των συστημάτων του IoT, από το στάδιο σχεδίασης (Development Σχήμα 1.6), προκειμένου αυτά να εδραιωθούν στην αγορά και να κερδίσουν την εμπιστοσύνη από τους χρήστες [58].

Ο τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή από τους προγραμματιστές, ιδιαίτερα όσον αφορά τη διασφάλιση της ανωνυμίας τους, έως ότου οι επίσημες αρχές προστασίας δεδομένων κάνουν επίσημες συστάσεις που θα μπορείς να υιοθετηθούν από τους ενδιαφερόμενους φορείς. Στην πραγματικότητα, πρόκειται για έναν τομέα συνεχιζόμενης έρευνας και χρειάζεται περισσότερη έρευνα για να μπορέσουν να ξεπεραστούν αυτά τα ζητήματα. Πολλές εταιρείες και πελάτες τελικού χρήστη καταδεικνύουν την ασφάλεια ως τον κύριο λόγο για τον οποίο το IoT δεν έχει υιοθετηθεί σε μεγάλη κλίμακα [20], ενώ άλλοι θεωρούν ότι η προστασία δεδομένων και η ιδιωτικότητα είναι τα μεγαλύτερα εμπόδια στην ανάπτυξη του IoT [66]. Πρέπει να διεξαχθεί αξιολόγηση του βαθμού στον οποίο οι ισχύοντες κανονισμοί και οι υπάρχουσες τεχνολογίες για την προστασία των δεδομένων καλύπτουν επαρκώς τις απαιτήσεις στις σύγχρονες εφαρμογές IoT προκειμένου να καθοριστούν οι ενέργειες που πρέπει να αναληφθούν. Πρέπει επίσης να συζητηθούν τα βασικά νομικά ζητήματα που ενδέχεται να καθυστερήσουν την ανάπτυξη του IoT, προτείνοντας παράλληλα τρόπους για την επίλυση αυτών των ζητημάτων. Πρόσφατα, η ΕΕ δημοσίευσε μια αναθεωρημένη έκδοση των κανονισμών και οδηγιών σχετικά με την επεξεργασία προσωπικών δεδομένων (GDPR), η οποία τέθηκε σε ισχύ το 2018 σε όλα τα κράτη μέλη [67].

Μέχρι στιγμής έχουν προταθεί ορισμένα πλαίσια ασφάλειας για την παροχή εμπιστευτικότητας, ακεραιότητας και πιστοποίησης. Ωστόσο, αυτά τα πλαίσια προσθέτουν επιπρόσθετα έξοδα επικοινωνίας και επεξεργασίας για να επιτύχουν το στόχο τους. Οι απαιτήσεις ασφάλειας για συστήματα IoT μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τέσσερα σύνολα [63]: ασφαλής πιστοποίηση και εξουσιοδότηση, ασφαλής διαμόρφωση και μεταφορά δεδομένων, ασφαλής αποθήκευση δεδομένων και ασφαλής πρόσβαση σε δεδομένα. Για όλες αυτές τις απαιτήσεις, είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψη ότι πολλές συσκευές IoT έχουν περιορισμούς ισχύος και πόρων. Ως εκ τούτου, ορισμένες από τις συμβατικές τεχνικές μπορεί να μην είναι επαρκείς και πρέπει να αναπτυχθούν νέες (π.χ., ελαφριά κρυπτογραφία).

1.6.4 Επεκτασιμότητα

Ένα επεκτάσιμο σύστημα είναι αυτό το οποίο συνεχίζει να λειτουργεί αποτελεσματικά παρά την αύξηση του αριθμού των χρηστών και την αύξηση του όγκου πληροφορίας. Προβλέπεται ότι 20 δισεκατομμύρια συσκευές θα είναι συνδεδεμένες στο Internet μέχρι το 2020, πολλές από τις οποίες θα είναι κινητές και θα έχουν χαμηλή ισχύ και ασταθή σύνδεση. Ως εκ τούτου, οι τρέχουσες λύσεις ενδέχεται να μην επαρκούν για να διασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία των δικτύων. Τουλάχιστον δύο επίπεδα επεκτασιμότητας μπορούν να ληφθούν υπόψη στο πεδίο εφαρμογής του IoT: δυνατότητα κλιμάκωσης του δικτύου και δυνατότητα κλιμάκωσης δεδομένων [63]. Καθώς αυξάνεται το δίκτυο διασυνδεδεμένων αντικειμένων, πρέπει να

διασφαλίζεται η διαλειτουργικότητα, καθώς και η ασφάλεια των δεδομένων και η ιδιωτικότητα. Τέλος, ζητήματα που σχετίζονται με την κατανάλωση ενέργειας πρέπει επίσης να αντιμετωπιστούν.

Ο όγκος και η ποικιλομορφία των δεδομένων που δημιουργούνται, και θα συνεχίσουν να δημιουργούνται με αυξανόμενο ρυθμό, από το IoT είναι συντριπτικός. Καθώς τα δεδομένα που παράγονται προέρχονται από μεγάλο αριθμό διαφορετικών συσκευών, υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους τα δεδομένα αυτά ενδέχεται να αποθηκευτούν σε διαφορετικές βάσεις δεδομένων: ο υπερβολικά μεγάλος όγκος δεδομένων, για να μπορέσουν να αποθηκευτούν σε ένα σημείο· η κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για τη μεταφορά δεδομένων από και προς τη βάση δεδομένων μπορεί να είναι μεγάλη και να μην μπορεί να υποστηριχτεί από το σύστημα, επομένως απαιτείται η ανάκτηση δεδομένων ξεχωριστά από τη διαδικασία δημιουργίας δεδομένων· οι συσκευές ενδέχεται να είναι γεωγραφικά χωρισμένες και είναι σκόπιμο να γίνεται τοπική επεξεργασία των δεδομένων προκειμένου να επιτευχθεί βελτιστοποίηση της επεξεργασίας· μπορεί να υπάρχει η ανάγκη διαχωρισμού των ακατέργαστων δεδομένων από δεδομένα που αντιπροσωπεύουν ένα συμβάν· και τέλος, μπορεί να απαιτούνται διαφορετικά είδη επεξεργασίας δεδομένων. Για τους λόγους αυτούς, το επίπεδο αφαίρεσης δεδομένων πρέπει να λαμβάνει υπόψιν πολλούς παράγοντες, όπως την ενσωμάτωση πολλαπλών μορφών δεδομένων από διαφορετικές πηγές. Τέλος, η διασφάλιση ότι τα δεδομένα που μεταφέρονται στα υψηλότερα επίπεδα, των αρχιτεκτονικών IoT, είναι πλήρη και χωρίς λάθη είναι εξίσου σημαντική.

1.6.5 Αντιμετώπιση Λαθών

Η αντιμετώπιση λαθών περιλαμβάνει την ανίχνευση, την κάλυψη και τη διαχείριση λαθών καθώς και την αποκατάσταση του συστήματος μετά από βλάβη. Σε ένα τόσο περίπλοκο, δυναμικό και ετερογενές περιβάλλον, όπως είναι το IoT, «τα συστήματα πρέπει να είναι ικανά για αυτοδιαμόρφωση, αυτοδιάγνωση, και αυτοεπιδιόρθωση» [62]. Οι πύλες (gateways), ένα από τα στοιχεία του IoT με τη μεγαλύτερη ροή δεδομένων, μπορεί να είναι το καταλληλότερο μέρος για την εφαρμογή λειτουργιών αυτοελέγχου, διαμόρφωσης, υπολογισμού, απόδοσης και ασφάλειας (FCAPS).

Τα συστήματα που διαχειρίζονται επιτυχώς τις απαιτήσεις που αφορούν την αντιμετώπιση λαθών θα κερδίσουν ταχύτερα την εμπιστοσύνη των χρηστών. Ωστόσο, αυτό θα καταστήσει πολύ πιο δύσκολο το έργο των προγραμματιστών, καθώς θα πρέπει να βρεθεί η σωστή ισορροπία μεταξύ εφαρμογής και χειρισμού των σφαλμάτων [59].

1.7 Συμπεράσματα

Μέχρι το 2020 θα υπάρχουν πάνω από 20 δισεκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές IoT, καταλαμβάνοντας πάνω από 8 Δις στην αγορά. Σύμφωνα με τον ETSI [25] ο κάθε άνθρωπος θα έχει κατά μέσο όρο 4 συνδεδεμένες συσκευές. Παρ' όλα αυτά, τα συστήματα του IoT είναι περίπλοκα, με πολλά επίπεδα (layers) και εκατοντάδες εμπλεκόμενους, όπως πωλητές συσκευών, παρόχους επικοινωνιών, πωλητές λογισμικών κ.α.

Αυτό το κεφάλαιο παρουσίασε τα βασικά θέματα που απασχολούν την κοινότητα του IoT, όπως ορισμούς, μοντέλα και αρχιτεκτονικές αναφορές, τεχνολογίες, πρότυπα, κύριοι τομείς εφαρμογής καθώς και προκλήσεις. Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, διεθνείς οργανισμοί, επιχειρήσεις, ερευνητές καθώς και η βιομηχανία συνεργάζονται για τη δημιουργία ενός κοινού ορισμού και μιας κοινής αρχιτεκτονικής αναφοράς, για το IoT, καθώς και τη δημοσίευση προτύπων τα οποία θα επιτρέψουν τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων. Επίσης, γίνεται έρευνα για την επίλυση και βελτιστοποίηση προκλήσεων όπως η ασφάλεια και προστασία των προσωπικών δεδομένων, η προσβασιμότητα, η επεκτασιμότητα και η αντιμετώπιση λαθών. Πολλές πλατφόρμες έχουν προταθεί, με νέες να κάνουν συνεχώς την εμφάνισή τους. Από τις, περίπου, 300 IoT πλατφόρμες που υπάρχουν σήμερα στην αγορά, μακροπρόθεσμα, αναμένεται να επικρατήσουν μόλις 6-7 από αυτές [68].

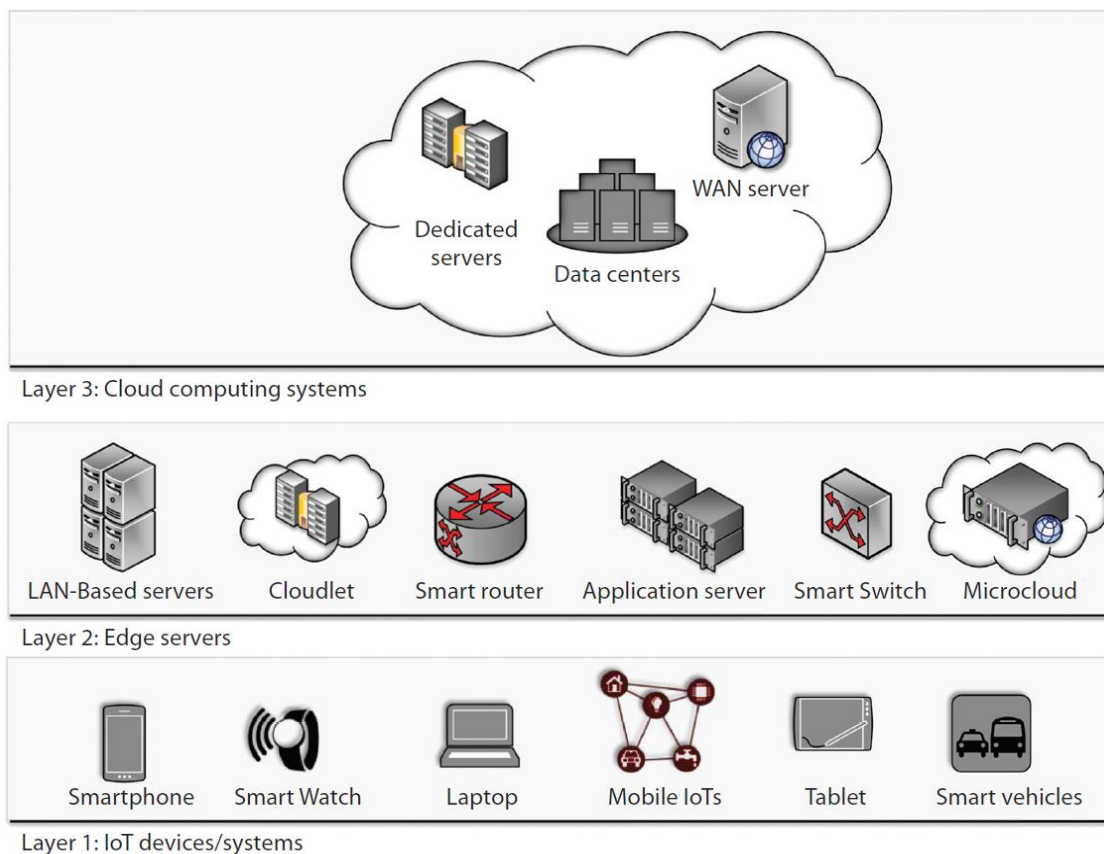
Καθώς το IoT αποτελεί ένα δίκτυο, συνδεδεμένων, συσκευών που αλληλοεπιδρούν χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση, έχει κοινωνικές, προσωπικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αναμένεται, οι τεχνολογίες του IoT, να έχουν θετικές επιπτώσεις σε αρκετούς τομείς της κοινωνίας, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.5, όπου δόθηκε μια επισκόπηση των βασικών περιοχών εφαρμογής. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη των έξυπνων πόλεων, σε θέματα υποδομών, μετακινήσεων, και κατασκευών έχει ένα πολύ σημαντικό κοινωνικό αντίκτυπο μέσω της βελτίωσης της αποτελεσματικότητας και της βιωσιμότητας όλου του εύρους των αστικών υπηρεσιών. Επιπρόσθετα, το IoT έχει επίσης σημαντικό ρόλο στο I4.0, στο οποίο οι βιομηχανικοί χώροι μετασχηματίζονται, μέσω ευφυών, διασυνδεδεμένων αντικειμένων που μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση, να μειώσουν το κόστος και να αυξήσουν την αξιοπιστία τους.

Σύμφωνα με το Tech Republic, η Τεχνητή νοημοσύνη, η επαυξημένη και εικονική πραγματικότητα, οι εφαρμογές “έξυπνης” υγείας, οι βιομηχανικές εφαρμογές, και οι φερετές συσκευές, είναι μερικές από τις βασικές τάσεις του IoT [69]. Το δυναμικό του IoT, που συνδέεται με αυτές τις τάσεις, προμηνύει ένα ελπιδοφόρο μέλλον. Σύντομα, αναμένεται να γίνουν εμφανή τα αποτελέσματα του συνεργατικού έργου που έχει γίνει από τις διάφορες ομάδες που συγκροτούνται από τη βιομηχανία, τον ακαδημαϊκό χώρο και τους εκπροσώπους τους SDO.

2. Device-Centric IoT συστήματα (Fog/Edge Computing σε συστήματα IoT)

2.1 Εισαγωγή

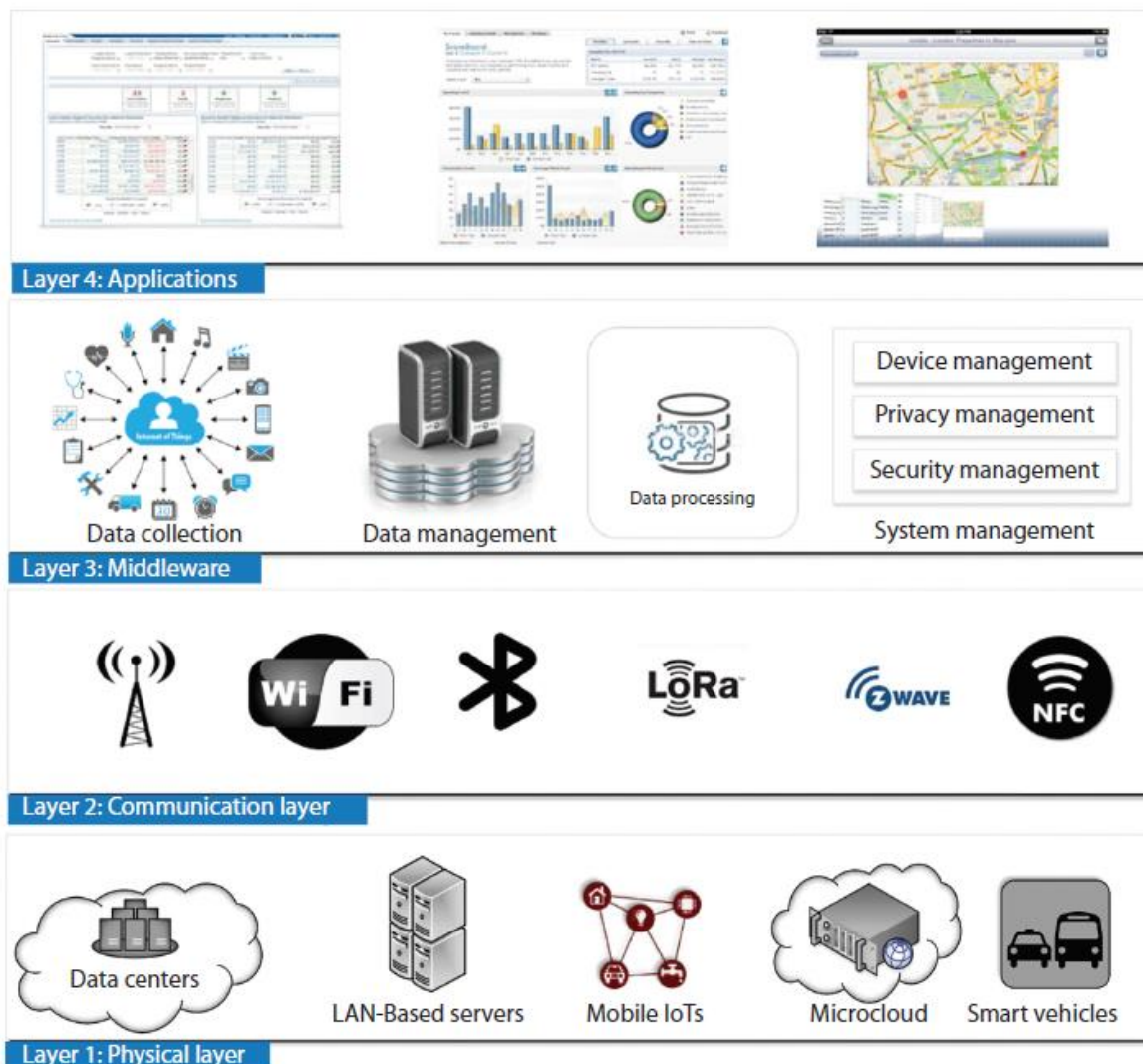
Η ραγδαία ανάπτυξη των συσκευών και συστημάτων IoT έχει δημιουργήσει πολλές ευκαιρίες για έρευνα και ανάπτυξη [70]. Απόρροια αυτής της ανάπτυξης είναι η δημιουργία ενός τεράστιου όγκου δεδομένων, ο οποίος θα μεγαλώνει καθώς αυξάνονται οι συσκευές IoT και των οποίων η επεξεργασία και ανάλυση απαιτεί περίπλοκα συστήματα τα οποία θα εξάγουν χρήσιμη πληροφορία από τις ληφθέντες μετρήσεις [71][72]. Η τοπολογία των σύγχρονων συστημάτων βασίζεται σε τρία επίπεδα: συσκευές IoT, Διακομιστές άκρων (Edge servers), Κέντρα δεδομένων σύννεφων (Cloud data centers) (βλ. Σχήμα 2.1) [73]. Στο πρώτο επίπεδο, οι συσκευές IoT πραγματοποιούν συλλογή δεδομένων παρακολουθώντας το περιβάλλον γύρω τους μέσω ενσωματωμένων αισθητήρων. Επιπλέον, οι συσκευές εκτελούν διαδικασίες φιλτραρίσματος δεδομένων και ενεργοποίησης για να αλληλοεπιδρούν με το εξωτερικό περιβάλλον. Στο δεύτερο επίπεδο, οι κοντινοί edge servers συλλέγουν τη ροή δεδομένων των συνδεδεμένων IoT συσκευών και πραγματοποιούν τοπική επεξεργασία δεδομένων έτσι ώστε να μειωθεί ο όγκος των δεδομένων που θα μεταφερθεί στα cloud data centers. Στο τρίτο επίπεδο τα data center παρέχουν αδιάληπτες υπηρεσίες cloud για συσκευές και εφαρμογές IoT. Οι εφαρμογές IoT καλύπτουν και τα τρία επίπεδα, αλλά ο έλεγχος της εκτέλεσης της εφαρμογής παραμένει πάντα στο επίπεδο του cloud [73]. Αυτή η προσέγγιση αυξάνει την εξάρτηση από τις συνδέσεις Internet και επιβάλλει στις συσκευές να μεταφέρουν τις ροές δεδομένων σε Cloud data centers πριν από οποιαδήποτε λειτουργία αναλύσεων.



Σχήμα 2.1. Η τοπολογία των σύγχρονων συστημάτων IoT.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα κατανεμημένο σύστημα ανάλυσης που βασίζεται σε συσκευές (Device-centric). Τέτοια συστήματα βασίζονται σε fog/edge computing αρχιτεκτονικές. Η προσέγγιση cloud-first αυξάνει το κόστος επικοινωνίας και την κίνηση των δεδομένων δικτύου στα cloud data centers [74][75]. Υπάρχουν πολλοί τομείς εφαρμογών όπου οι τοπικές αναλύσεις σε συσκευές IoT είναι επωφελείς και έχουν προτεραιότητα έναντι των αναλύσεων των δεδομένων στα cloud data centers. Τα συστήματα IoT με επίκεντρο τη συσκευή έχουν πολλαπλά οφέλη [76]. Οι συσκευές IoT εκτελούν τοπικές αναλύσεις που μειώνουν την εξάρτηση από edge servers και cloud data centers. Επίσης, οι λειτουργίες ανάλυσης σε επίπεδο συσκευής εκτελούνται με πολύ μικρότερη καθυστέρηση σε σύγκριση με τις αναλύσεις δεδομένων που βασίζονται σε cloud. Επιπλέον, η ενσωμάτωση των τοπικών προτύπων γνώσης (knowledge patterns) για τη διαμόρφωση παγκόσμιων προτύπων απαιτεί λιγότερους πόρους από την επεξεργασία ακατέργαστων ροών δεδομένων σε περιβάλλοντα cloud [77][78].

Πριν γίνει η αναφορά στα κατανεμημένα συστήματα ανάλυσης, απαιτείται η κατανόηση της λειτουργικής πλευράς του IoT (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2. Η λειτουργική προσέγγιση ενός συστήματος IoT (layer-based προσέγγιση).

Τα συστήματα IoT λειτουργούν σε τέσσερα επίπεδα [79]: (1) φυσικό επίπεδο, (2) επίπεδο επικοινωνίας, (3) ενδιάμεσο επίπεδο και (4) επίπεδο εφαρμογής. Το φυσικό επίπεδο βασίζεται σε τρεις τοπολογίες: των συσκευών IoT, των Edge servers και των Data cloud centers, όπως παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Μια πληθώρα συσκευών και συστημάτων συμβάλλουν, στην παρούσα φάση, στην παροχή πόρων ανίχνευσης, επεξεργασίας και αποθήκευσης για εφαρμογές IoT. Το στρώμα επικοινωνίας εμπεριέχει πολλαπλές διεπαφές επικοινωνίας και πρωτόκολλα για Device-to-Device και Device-to-cloud επικοινωνίες. Σε αυτές περιλαμβάνονται πρωτόκολλα όπως: Wi-Fi, ZigBee, Z-Wave, 6LoWPAN, 4G, NFC, LoRaWAN και Ethernet κ.α. Το ενδιάμεσο στρώμα επιτρέπει την παρακολούθηση, τη μεταφορά, τη διαχείριση, την αποθήκευση και τις λειτουργίες επεξεργασίας δεδομένων και χρησιμοποιεί πολιτικές διαχείρισης συσκευών, ιδιωτικού απορρήτου και ασφάλειας για τη διαχείριση του συστήματος από άκρο σε άκρο (end-to-end). Τέλος, το επίπεδο εφαρμογής παρέχει τη λειτουργικότητα για την ανάπτυξη διαφορετικών εφαρμογών IoT και Big Data τόσο στο επίπεδο της συσκευής IoT όσο και στα cloud data Centers.

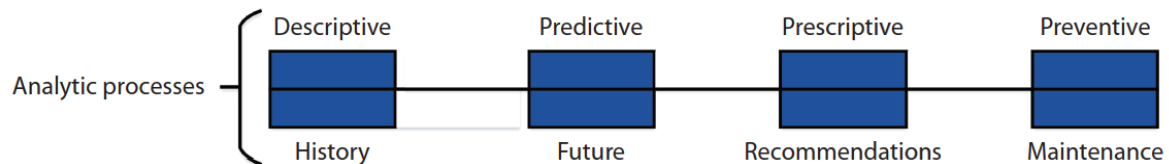
Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η παρουσίαση των συστημάτων ανάλυσης IoT με επίκεντρο τη συσκευή (Device-centric), και η επισκόπηση των τριών σημαντικότερων συμβολών στον κλάδο: Mobile Sensor Data Processing Engine (MOSDEN) [80], Context-Aware Real-time Data Analytics Platform (CARDAP) [81], and UniMiner [78] [82]. Το υπόλοιπο κεφάλαιο οργανώνεται ως εξής. Η ενότητα 2.2 καθορίζει το ρόλο των αναλυτικών στοιχείων στα συστήματα IoT και εξετάζει παραλλαγές των μεθόδων ανάλυσης και των συστημάτων ανάλυσης που βασίζονται σε σύννεφο για τις πολιτικές IoT. Η ενότητα 2.3 παρουσιάζει τα κινητά και σταθερά συστήματα IoT με επίκεντρο τη συσκευή. Η ενότητα 2.4 παρουσιάζει την προτεινόμενη πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική για τα κεντρικά καταναμημένα συστήματα ανάλυσης. Η ενότητα 2.5 παρουσιάζει μια επισκόπηση των MOSDEN, CARDAP και UniMiner. Τέλος, η ενότητα 2.6 ολοκληρώνει το κεφάλαιο.

2.2 Ο ρόλος των αναλύσεων στα συστήματα IoT

Πρωτίστως, οι συσκευές IoT συλλέγουν έναν τεράστιο όγκο δεδομένων, με συνεχή ροή, χρησιμοποιώντας ενσωματωμένους αισθητήρες [70]. Οι διαδικασίες ανάλυσης στα συστήματα IoT επιτρέπουν τη μετατροπή αυτών των ακατέργαστων ροών δεδομένων σε χρήσιμη πληροφορία [73]. Συνήθως, οι διαδικασίες ανάλυσης λειτουργούν όπως αναφέρεται στη συνέχεια [83]. Οι συσκευές και τα συστήματα IoT συλλέγουν, αρχικά, δεδομένα, τα οποία εισέρχονται στο σύστημα σαν ροή δεδομένων, που μετασχηματίζονται σε επεξεργάσιμη πληροφορία μέσω διαδικασιών αποθρομβοποίησης. Επιπλέον, εξάγονται χρήσιμα χαρακτηριστικά για την ανάπτυξη ποιοτικών μαθησιακών μοντέλων και την εκτέλεση λειτουργιών ανακάλυψης γνώσης (knowledge discovery operations). Μια πληθώρα μαθησιακών μοντέλων θα μπορούσε να αναπτυχθεί για την πραγματοποίηση ταξινόμησης, ομαδοποίησης και για την εύρεση κανόνων σύνδεσης μεταξύ διαφορετικών σημείων. Στο επόμενο βήμα, τα μαθησιακά μοντέλα αξιολογούνται χρησιμοποιώντας δοκιμαστικές ροές δεδομένων και αναπτύσσονται σε διαφορετικά επίπεδα στα συστήματα IoT, δηλαδή στις συσκευές IoT, στους edge servers και τα cloud data centers. Τα αναπτυγμένα μοντέλα βοηθούν στην ανακάλυψη προτύπων γνώσης (π.χ. τάξεις, ομάδες και κανόνες

σύνδεσης) και τα αποτελέσματα παρακολουθούνται. Ωστόσο, οι διαδικασίες ανάλυσης επαναλαμβάνονται συνεχώς προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι απρόβλεπτες ροές δεδομένων και να βελτιωθεί, αναλόγως, η ποιότητα των προτύπων γνώσης.

Οι λειτουργίες ανακάλυψης γνώσης σε συστήματα διαδικτύου ποικίλουν για να εκτελούν (1) περιγραφικές, (2) προγνωστικές (3) ρυθμιστικές και (4) προληπτικές διαδικασίες ανάλυσης (Σχήμα 2. 3).



Σχήμα 2.3. Λειτουργίες ανακάλυψης γνώσης.

2.2.1 Περιγραφικές διαδικασίες Ανάλυσης

Οι περιγραφικές διαδικασίες ανάλυσης βοηθούν στην ανάλυση των ιστορικών δεδομένων στα συστήματα IoT και βρίσκουν τα κρυμμένα πρότυπα γνώσης από τις ροές δεδομένων των αισθητήρων [84]. Η πλειονότητα αυτών των μεθόδων περιλαμβάνει βασικές στατιστικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την εύρεση τιμών όπως του μέσου όρου, της διάμεσης και επικρατούσας τιμής, της τυπικής απόκλισης και της διακύμανσης. Μερικές σύνθετες μέθοδοι περιλαμβάνουν τους αλγόριθμους εξόρυξης δεδομένων (data mining) για την εύρεση συχνών και σπάνιων στοιχείων και κανόνων σύνδεσης σε ιστορικά δεδομένα. Οι περιγραφικές μέθοδοι στα συστήματα Διαδικτύου χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ιστορικών δεδομένων των συσκευών. Επιπλέον, αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ροών δεδομένων συμβάντων για περαιτέρω ανάλυση και προσομοίωση σε περιβάλλοντα cloud.

2.2.2 Προγνωστικές διαδικασίες Ανάλυσης

Οι προγνωστικές διαδικασίες ανάλυσης επιτρέπουν την εκμάθηση των χαρακτηριστικών των ιστορικών δεδομένων και να την πρόβλεψη για τη μελλοντική συμπεριφορά μεταγενέστερων δεδομένων [85]. Η προγνωστική μοντελοποίηση είναι ο πυρήνας των προγνωστικών διαδικασιών ανάλυσης, με την οποία διάφοροι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης (machine learning) και data mining αναπτύσσονται για την εκμάθηση της συμπεριφοράς των ιστορικών δεδομένων. Αυτά τα προγνωστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται περαιτέρω για την αναγνώριση, ανίχνευση, εύρεση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς των νέων εισερχόμενων ροών δεδομένων. Ένα πλεονέκτημα της προγνωστικής μοντελοποίησης στα συστήματα IoT είναι η ανίχνευση των μελλοντικών συμπεριφορών των συσκευών. Κατά κύριο λόγο, χρησιμοποιούνται μέθοδοι machine learning και data mining για την ταξινόμηση, την ομαδοποίηση και την ανάλυση παλινδρόμησης στην προγνωστική μοντελοποίηση.

2.2.3 Ρυθμιστικές διαδικασίες ανάλυσης

Οι ρυθμιστικές διαδικασίες ανάλυσης δεν επιτρέπουν μόνο την προγνωστική μοντελοποίηση, αλλά και βοηθούν στη σχεδίαση των μελλοντικών ενεργειών που θα ακολουθήσει το σύστημα [86]. Τα ρυθμιστικά μοντέλα λειτουργούν αναπτύσσοντας πρώτα τα μαθησιακά μοντέλα μέσω των ιστορικών δεδομένων και, βάσει των προβλέψεων, αυτά τα μοντέλα προτείνουν περαιτέρω εναλλακτικές ενέργειες προκειμένου να βρεθούν οι καλύτερες δυνατές λύσεις. Παρόλο που στην υπάρχουσα βιβλιογραφία υπάρχει έλλειψη μοντέλων για ρυθμιστικές διαδικασίες ανάλυσης, για τα συστήματα IoT, αυτές οι μέθοδοι μπορούν να βελτιστοποιήσουν τις επιχειρηματικές λειτουργίες, όπως τον προγραμματισμό απογραφών και τη βελτίωση των συστημάτων διαχείρισης της αλυσίδας εφοδιασμού.

2.2.4 Προληπτικές διαδικασίες ανάλυσης

Οι προληπτικές διαδικασίες ανάλυσης παρακολουθούν την απόδοση των συσκευών IoT [87]. Τα προληπτικά μοντέλα αφορούν κυρίως τις εφαρμογές ανάλυσης συστημάτων, όπου τα μοντέλα αυτά προβλέπουν τα προβλήματα μείωσης της απόδοσης πολύ πριν την αποτυχία των συστημάτων, ή μέρους αυτών. Η προληπτική μοντελοποίηση βελτιώνει την προληπτική συντήρηση και είναι χρήσιμη για συνθήκες όπου η αποτυχία ορισμένων συσκευών IoT ενδέχεται να υποβαθμίσει τη συνολική απόδοση των συστημάτων IoT.

Τα περισσότερα από τα υπάρχοντα συστήματα IoT εκτελούν διαδικασίες ανάλυσης χρησιμοποιώντας υπολογιστικούς πόρους, δικτύωση και αποθηκευτικούς πόρους [88]. Αυτή η προσέγγιση μειώνει την υπολογιστική κατανάλωση και την κατανάλωση ενέργειας για επεξεργασία δεδομένων των συσκευών IoT. Ωστόσο, επηρεάζει το κόστος της επικοινωνίας δεδομένων (data communication cost), από την πλευρά της χρήσης του εύρους ζώνης, την κατανάλωση ενέργειας κατά τη μεταφορά δεδομένων και την κίνηση δεδομένων δικτύου σε Cloud data Centers [89][90]. Επιπλέον, η συσσώρευση και ο συνυπολογισμός της ακατάπαυστης ροής δεδομένων σε cloud data centers αυξάνουν το κόστος επεξεργασίας δεδομένων για τη χρήση υπηρεσιών cloud, καθώς και τους προγραμματιστικούς πόρους για τη διαχείριση και επεξεργασία των ακατέργαστων ροών δεδομένων. Ο Πίνακας 2.1 περιγράφει τα πιο διαδεδομένα συστήματα που βασίζονται σε cloud για αναλύσεις IoT. Όλα αυτά τα συστήματα επιτρέπουν την προσέγγιση που βασίζεται στο σύννεφο (cloud centric approach).

Πίνακας 2.1 Οι πιο διαδεδομένες πλατφόρμες για Cloud-Based συστήματα ανάλυσης

	Πλατφόρμα	Ηλ. διεύθυνση
1	Autodesk Fusion Connect	http://autodeskfusionconnect.com/
2	AWS IoT	https://aws.amazon.com/iot/getting-started/
3	Cisco	https://developer.cisco.com/site/iot/
4	DellvStatistica	https://software.dell.com/products/statistica/

5	GEvPredix	https://www.predix.io/
6	GooglevCloudvIoT	https://cloud.google.com/solutions/iot/
7	IBMVWatson	https://www.ibm.com/internet-of-things/
8	IBM Bluemix	https://console.ng.bluemix.net/
9	Intel	https://shopiotmarketplace.com/iot/index.html#/home
10	Kaa	http://www.kaaproject.org/
11	Microsoft Azure	https://azure.microsoft.com/en-us/
12	Pentaho	http://www.pentaho.com/internet-of-things-analytics
13	RTI	http://www.rti.com/
14	Salesforce	https://www.salesforce.com/iot-cloud/
15	SiteWhere	http://www.sitewhere.org/
16	Splunk	https://www.splunk.com/en_us/download-5.html
17	Tellient	http://tellient.com/index.html
18	ThingSpeak	https://thingspeak.com/
19	ThingWorX	https://www.thingworx.com/
20	VitriaIoT	http://www.vitria.com/iot-analytics

2.3 Η ανάπτυξη των Device-Centric IoT συστημάτων

Τα Device-centric IoT συστήματα έχουν σχεδιαστεί για να μεταβιβάσουν τον έλεγχο της εκτέλεσης της εφαρμογής στο τέλος της συσκευής, δηλαδή στο πρώτο επίπεδο της τοπολογίας του IoT. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τις συσκευές IoT ως την κύρια πλατφόρμα για την εκτέλεση αναλυτικών διαδικασιών. Εντούτοις, τα Device-centric IoT συστήματα αναπτύσσονται ως κινητά (Mobile) συστήματα ή σταθερά (immobile) συστήματα για την αντιμετώπιση διαφορετικών προκλήσεων.

2.3.1 Immobile Device-Centric IoT συστήματα

Τα σταθερά συστήματα IoT διευκολύνουν την ανάπτυξη συσκευών και συστημάτων IoT σε εικονικά οριοθετημένες περιοχές επικοινωνίας, όπως το Τοπικά δίκτυα (LAN), τα προσωπικά δίκτυα (PAN), τα δίκτυα στρωμάτων (BAN) ή είναι συνδεδεμένα στο internet μέσα δικτύων ευρείας περιοχής (WAN) [91]. Οι συσκευές IoT σε ακίνητα συστήματα χρησιμοποιούν πρωτίστως συνδέσεις Ethernet για τη μεταφορά δεδομένων και συνεπώς δε χρειάζεται να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της συνεχούς πρόσβασης στο διαδίκτυο. Επιπλέον, οι σταθερές συσκευές τροφοδοτούνται συνήθως με ρεύμα, επομένως, το θέμα της περιορισμένης χωρητικότητας της μπαταρίας δεν προκύπτει σε αυτά τα συστήματα. Η υψηλή διαθεσιμότητα των συνδέσεων Internet και της ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνει τη χρησιμότητα των σταθερών συστημάτων, αλλά το περιορισμένο εύρος ανίχνευσης της συσκευής IoT μπορεί να εισάγει θόρυβο ή ατέλεια στις ροές δεδομένων. Επομένως, τα ακίνητα συστήματα IoT πρέπει να αναπτύξουν περισσότερους κόμβους ανίχνευσης προκειμένου να επιτευχθεί μέγιστη κάλυψη στις περιοχές μέτρησης.

Μερικές συνήθεις εφαρμογές των σταθερών IoT συστημάτων είναι το έξυπνο οικιακό δίκτυο, τα συστήματα παρακολούθησης ασθενών σε μονάδες εντατικής θεραπείας, το έξυπνο

πάρκινγκ, τα συστήματα ασφάλειας και επιτήρησης και τα συστήματα παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα. Για παράδειγμα, σε ένα έξυπνο οικιακό δίκτυο, ηλεκτρικές συσκευές όπως η τηλεόραση, το ψυγείο και ο φούρνος μικροκυμάτων συνδέονται μέσω ενός τοπικού διακομιστή άκρης (IoT hub) στο σπίτι. Οι συσκευές μπορούν να λαμβάνουν συνεχώς μετρήσεις, να επεξεργάζονται και να αναλύουν τις ροές δεδομένων χρησιμοποιώντας ενσωματωμένα υπολογιστικά στοιχεία, όπως μονάδες επεξεργασίας γραφικών (GPU) και κάρτες μνήμης (SD). Σε περίπτωση που ανιχνευτούν σημαντικές αλλαγές στα πρότυπα γνώσης ή γίνει ανίχνευση συγκεκριμένων συμβάντων, οι συσκευές μεταφέρουν τις ροές δεδομένων σε edge servers ή cloud data centers. Ομοίως, οι συσκευές IoT μπορούν να ανιχνεύσουν και να επεξεργαστούν τους βιοδείκτες για τους ασθενείς και να ενημερώσουν το προσωπικό των νοσοκομείων όποτε ο ασθενής βρεθεί σε κρίσιμη κατάσταση. Στην περίπτωση του έξυπνου χώρου στάθμευσης, οι συσκευές IoT μπορούν να παρακολουθούν περιοδικά χώρους στάθμευσης χρησιμοποιώντας υπέρυθρους αισθητήρες και κάμερες και να εκτελούν τοπικές αναλύσεις για τον εντοπισμό κενών χώρων. Παρομοίως, κάμερες και συσκευές παρακολούθησης του περιβάλλοντος τοποθετούνται σε δρόμους, πολυσύχναστες περιοχές και σε άλλους καθορισμένους χώρους για τη συλλογή και επεξεργασία των ροών δεδομένων.

2.3.2 Mobile Device-Centric IoT συστήματα

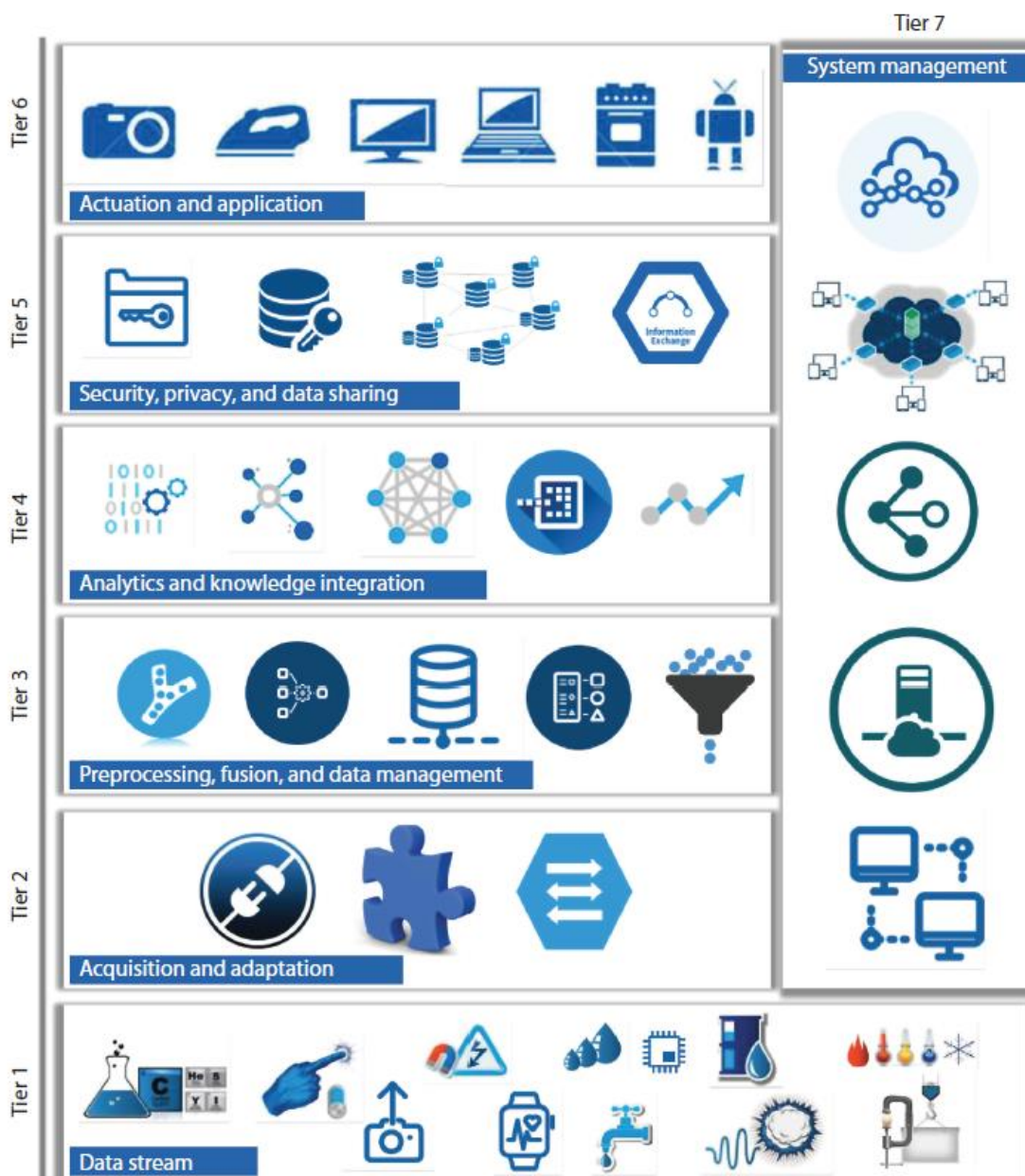
Σε αντίθεση με τα σταθερά συστήματα, η κινητικότητα σε συσκευές IoT δημιουργεί διάφορα ζητήματα και προκλήσεις [92]. Το μέγεθος των συσκευών πρέπει να είναι μικρό για να μετακινούνται εύκολα και οι συσκευές πρέπει να επιτρέπουν πολλαπλές διεπαφές επικοινωνίας, όπως Wi-Fi, Bluetooth και GSM, για τη μεταφορά δεδομένων μέσω διαφορετικών δικτύων. Τα κινητά Device-Centric IoT συστήματα είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούν αποτελεσματικά περιορισμένους υπολογιστικούς και ενεργειακούς πόρους, πετυχαίνοντας παράλληλα μέγιστη επεξεργασία δεδομένων, καταναλώνοντας ελάχιστη ισχύ/μπαταρία. Παρόλο που η τα δίκτυα ευρείας περιοχής αποτελούν πλεονέκτημα των συσκευών κινητής τηλεφωνίας, ο προσανατολισμός και η θέση των συσκευών επηρεάζουν σημαντικά την ποιότητα των συλλεχθέντων ροών δεδομένων, γεγονός που επηρεάζει έμμεσα την ποιότητα των προτύπων γνώσης. Λαμβάνοντας, από τη μία, υπόψη την κινητικότητα, τους περιορισμένους πόρους, τους προσανατολισμούς και τις θέσεις κινητών συσκευών IoT και, από την άλλη, τα ζητήματα της υψηλής χρήσης του εύρους ζώνης και της αυξημένης κίνησης δεδομένων εντός του δικτύου στα data centers, η Device-Centric προσέγγιση βοηθάει στην απλοποίηση και αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων.

Τα Device-Centric IoT συστήματα θα μπορούσαν να αναπτυχθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τα κινητά IoT μπορούν να βοηθήσουν στην ανάπτυξη συστημάτων ανάλυσης προσωπικών δεδομένων που χρησιμοποιούνται για μια πληθώρα εξατομικευμένων υπηρεσιών για τον τελικό χρήστη. Επίσης μας επιτρέπουν επίσης να διατηρούμε την ιδιωτικότητα και την ασφάλεια των συσκευών και των χρηστών μεταβιβάζοντας τον πλήρη έλεγχο της εκτέλεσης της εφαρμογής και της ανταλλαγής δεδομένων στο τέλος της συσκευής

(Device end). Αυτή η προσέγγιση συμβάλλει στη μείωση της εξάρτησης από τους edge centers και τα cloud data centers και επομένως ελαχιστοποιεί τους κινδύνους που σχετίζονται με την προστασία της ιδιωτικής ζωής και την ασφάλεια των προσωπικών δεδομένων.

2.4 Προτεινόμενη πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική Device-Centric εφαρμογών

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει μια προτεινόμενη αρχιτεκτονική Device-centric ανάλυσης κατακευματισμένων δεδομένων εφαρμογών σε συστήματα IoT (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4. Προτεινόμενη πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική device-centric εφαρμογών.

Η αρχιτεκτονική βασίζεται σε επτά βαθμίδες στοιχείων, προκειμένου να μετατραπούν οι ακατέργαστες ροές δεδομένων σε χρήσιμα και device-centric πρότυπα γνώσης. Επιπλέον, τα στοιχεία της εφαρμογής εξασφαλίζουν τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ των συσκευών, των edge servers και των cloud data centers με ασφαλή τρόπο ώστε να προστατεύεται η ιδιωτικότητα του χρήστη. Επίσης, η αρχιτεκτονική device-centric εφαρμογών ενσωματώνει διάφορα στοιχεία διαχείρισης συστήματος, προκειμένου να μεταβάλει την εκτέλεση της εφαρμογής μεταξύ της αρχιτεκτονικής τριών επιπέδων, η οποία παρουσιάστηκε νωρίτερα στο Σχήμα 2.1.

2.4.1 Επίπεδο 1: ροή δεδομένων

Οι συσκευές IoT παράγουν ροές δεδομένων από μια πληθώρα αισθητήριων και άλλων πηγών δεδομένων, οι οποίες περιλαμβάνουν ενσωματωμένους και μη αισθητήρες και πηγές δεδομένων διαδικτυακών και κοινωνικών μέσων που βασίζονται στο Διαδίκτυο [93]. Αυτές οι ροές δεδομένων εμφανίζονται σε πολλαπλές μορφές, όπως δομημένα, αδόμητα και ημιδομημένα πακέτα δεδομένων που στην πλειοψηφία έχουν διαφορετικούς τύπους, όπως αριθμητικά δεδομένα, δεδομένα κειμένου, πολυμέσα και αδόμητα σήματα. Τα συστήματα IoT πρέπει να είναι ικανά να διαχειρίζονται μια μαζική ετερογένεια σε αυτό το στρώμα για να επιτρέψουν την αποτελεσματικότερη μεταφορά δεδομένων στις ανώτερες βαθμίδες.

2.4.2 Επίπεδο 2: ανάκτηση και προσαρμογή δεδομένων

Οι συσκευές IoT παράγουν ροές δεδομένων πολλαπλών μορφών στην πρώτη βαθμίδα, οι οποίες ποικίλουν ως προς τον όγκο και την ταχύτητα που παράγονται, ανάλογα με τις απαιτήσεις εφαρμογής [82]. Επομένως, η 2^η βαθμίδα αποτελείται από στοιχεία τα οποία είναι ικανά να υποστηρίζουν επικοινωνία με πολλαπλές πηγές δεδομένων ώστε να βοηθούν στο χειρισμό του όγκου και της ταχύτητας λήψης των δεδομένων. Οι προσθήκες (plug-ins) παρέχουν τις λειτουργίες για σύνδεση με πηγές δεδομένων από την πρώτη βαθμίδα. Επιπλέον, συμβάλλουν στην αναδιαμόρφωση του ρυθμού λήψης των δεδομένων καθώς και του μεγέθους των εισερχόμενων ροών δεδομένων σύμφωνα με τις απαιτήσεις εφαρμογής. Για παράδειγμα, ορισμένες εφαρμογές IoT, όπως οι εφαρμογές παρακολούθησης του περιβάλλοντος, χρειάζονται συνεχείς ροές δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, ορισμένες εφαρμογές χρειάζονται περιοδικές ροές δεδομένων ή δεδομένα που βασίζονται σε γεγονότα, όπως ειδοποίηση γιατρών όταν η αρτηριακή πίεση ενός ασθενούς αυξάνεται από ένα συγκεκριμένο επίπεδο ή η ενεργοποίηση μερικών οικιακών συσκευών όταν ένα άτομο εισέρχεται στο σπίτι. Στην ουσία, οι στρατηγικές ανάκτησης και προσαρμογής δεδομένων ποικίλλουν σε κάθε σύστημα και ως εκ τούτου, το σύστημα IoT πρέπει να παρέχει γενική λειτουργικότητα.

2.4.3 Επίπεδο 3: Προεπεξεργασία δεδομένων, συγχώνευση και διαχείριση δεδομένων

Δεδομένου ότι τα ρεύματα δεδομένων που συλλέγονται στο 2^ο επίπεδο προέρχονται κυρίως από πολλαπλές πηγές δεδομένων σε ακατέργαστη μορφή [82], τα συστήματα IoT πρέπει να διεξάγουν διαδικασίες προεπεξεργασίας ενοποίησης δεδομένων για να αυξήσουν την αξία των ροών δεδομένων και να προετοιμάσουν το σύστημα για την ανακάλυψη προτύπων γνώσης. Η συνεχής συλλογή ροών δεδομένων ενδέχεται να επιβαρύνει τους υπολογιστικούς πόρους των IoT συσκευών με αποτέλεσμα να απαιτούνται αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης δεδομένων. Η διαχείριση δεδομένων είναι απαραίτητη για τα Device-centric IoT συστήματα, καθώς οι συσκευές IoT χρησιμοποιούνται ως κύρια πλατφόρμα για την επεξεργασία δεδομένων. Επιπλέον, η κινητικότητα των συσκευών μπορεί να επηρεάσει τη διαδικασία μεταφοράς δεδομένων από συσκευές IoT σε cloud data centers. Ως εκ τούτου, η διαχείριση δεδομένων βοηθά στην ελαχιστοποίηση των λαθών κατά τη δεδομένων. Μια πληθώρα βιβλιοθηκών (libraries) και στοιχείων λογισμικού προβλέπεται να πλαισιώνουν την προεπεξεργασία δεδομένων για την ανίχνευση λαθών, την εξαγωγή χαρακτηριστικών, την αποθορυβοποίηση και τη διαχείριση ελλειπουσών σημείων δεδομένων. Επιπλέον, οι βιβλιοθήκες πρέπει να επιτρέπουν τη χρήση πολλών μεθόδων ενοποίησης δεδομένων, όπως η ενοποίηση ακατέργαστων δεδομένων, η ενοποίηση δεδομένων από προ-επεξεργασμένα δεδομένα και η ενοποίηση δεδομένων που εισάγει διακρίσεις. Τέλος, τα στοιχεία του λογισμικού χρειάζονται για τη διαχείριση των παροδικών και συνεχών ροών δεδομένων σε συσκευές IoT και cloud data centers.

2.4.4 Επίπεδο 4: Ανάλυση δεδομένων και ενσωμάτωση προτύπων γνώσης

Το επίπεδο ανάλυσης δεδομένων και ενσωμάτωσης προτύπων γνώσης παρέχει τα βασικά συστατικά στοιχεία και υπηρεσίες για την ανάλυση δεδομένων σε συσκευές IoT, καθώς και σε περιβάλλοντα cloud [76] [94]. Τα στοιχεία της ανάλυσης δεδομένων παρέχουν τις λειτουργίες για τη δημιουργία και τη βελτιστοποίηση των μαθησιακών μοντέλων από ιστορικά δεδομένα και την ανακάλυψη νέων προτύπων γνώσης. Αυτά τα στοιχεία υλοποιούν εποπτευόμενα, μη εποπτευόμενα και ημι-εποπτευόμενα μοντέλα μάθησης, με τα οποία επιτυγχάνεται η ταξινόμηση, η ομαδοποίηση, η εξόρυξη κανόνων συσχέτισης και η παλινδρόμηση. Επιπλέον, τα στοιχεία αυτά παρέχουν μεθόδους στατιστικής ανάλυσης δεδομένων για περιγραφικές αναλύσεις. Προηγούμενες μελέτες δείχνουν ότι τα συστατικά στοιχεία της ανάλυσης παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές όσον αφορά την υπολογιστική ισχύ και την κατανάλωση ενεργειακών πόρων στις συσκευές IoT και, επομένως, οι υπολογιστικές πολυπλοκότητες αυτών των στοιχείων πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πριν από τη σχεδίαση των Device-centric συστημάτων IoT.

2.4.5 Επίπεδο 5: Ασφάλεια και προστασία δεδομένων

Η αύξηση του αριθμού των συσκευών IoT, ειδικά όταν λειτουργούν σε κινητό περιβάλλον, αυξάνει τις ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια και την προστασία των προσωπικών

δεδομένων [81]. Επιπλέον, τα στοιχεία της ανάλυσης στο τέλος της συσκευής παράγουν, αφού ολοκληρωθεί η επεξεργασία ακατέργαστων ροών δεδομένων, ευαίσθητες πληροφορίες. Τα στοιχεία ασφαλείας στο 5^ο επίπεδο επιτρέπουν την ασφαλή μεταφορά των ροών δεδομένων σε συσκευές IoT και μεταξύ συσκευών IoT και Cloud data centers [96]. Η διαφύλαξη της ιδιωτικής ζωής είναι επίσης απαραίτητη λόγω της ευαισθησίας των προσωπικών δεδομένων και των device-centric δεδομένων. Η παραμικρή διαρροή αυτής της ροής δεδομένων θα μπορούσε εύκολα να οδηγήσει σε καταστροφικές καταστάσεις. Τα στοιχεία προστασίας των δεδομένων σε αυτό το επίπεδο είναι χρήσιμα για τη διατήρηση της ιδιωτικότητας επιτρέποντας στους αλγόριθμους να προστατεύουν τα δεδομένα και να εισάγουν στοιχεία ανωνυμότητας όταν αυτά περάσουν αυτό το επίπεδο.

2.4.6 Επίπεδο 6: Εφαρμογές και ενεργοποιητές

Τα πρότυπα γνώσης που έχουν προκύψει από αναλύσεις στο τέλος της συσκευής έχουν πολλαπλές εφαρμογές. Οι ίδιες οι συσκευές IoT εκτελούν περαιτέρω ενέργειες χρησιμοποιώντας ενεργοποιητές, για παράδειγμα, ενεργοποιώντας ή απενεργοποιώντας τις οικιακές συσκευές όταν οι άνθρωποι εισέρχονται σε έξυπνες κατοικίες. Ομοίως, τα αποκτηθέντα πρότυπα γνώσης είναι απαραίτητα για τις big data εφαρμογές, όπου οι ροές δεδομένων που αποκτήθηκαν από πολλαπλές συσκευές IoT επεξεργάζονται και χρησιμοποιούνται για ανακάλυψη προτύπων γνώσης μεγάλης κλίμακας. Για παράδειγμα, Big Data εφαρμογές στην έξυπνη πόλη μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα πρότυπα γνώσης των κινητών συσκευών για την παρακολούθηση της ηχορύπανσης στις πόλεις. Στην ουσία, αυτό το επίπεδο υλοποιεί τη χρήση των ενεργοποιητών και των εφαρμογών IoT και πρέπει να είναι σε θέση να χειριστεί μια τεράστια ποσότητα ετερογένειας όσον αφορά τις συσκευές και εφαρμογές IoT.

2.4.7 Επίπεδο 7: Διαχείριση συστήματος

Το επίπεδο διαχείρισης συστήματος περιέχει τα στοιχεία που εκτελούνται παράλληλα με όλες τις προαναφερθείσες βαθμίδες, με αποτέλεσμα την ομαλή εκτέλεση εφαρμογών IoT [97]. Αυτό το επίπεδο περιλαμβάνει πολλαπλές λειτουργίες εφαρμογής για διαχείριση περιβάλλοντος, διαχείριση πόρων, επικοινωνία μεταξύ χρηστών, επικοινωνία συσκευής-cloud και εκτέλεση παράλληλης επεξεργασίας δεδομένων. Η ετερογένεια στα συστήματα IoT είναι τεράστια όσον αφορά τις συσκευές και τις πλατφόρμες επεξεργασίας δεδομένων, δηλαδή συσκευές IoT, edge servers και cloud data centers. Τα συστατικά στοιχεία διαχείρισης του IoT περιβάλλοντος παρέχουν τη λειτουργικότητα της συλλογής δεδομένων με συμφραζομένα (context collection), την αυτών και την εξαγωγή των σωστών συνθηκών για την επεξεργασία δεδομένων σε ετερογενή συστήματα IoT. Οι συσκευές IoT λειτουργούν συνήθως σε περιβάλλοντα περιορισμένου πόρου, όπως οριοθετημένη CPU και μνήμη και περιορισμένη χωρητικότητα μπαταρίας. Τα στοιχεία παρακολούθησης των πόρων στις συσκευές IoT επιτρέπουν την παρακολούθηση και ρύθμιση των ενσωματωμένων στοιχείων και αυτές οι πληροφορίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περαιτέρω για την εύρεση της κατάλληλης πλατφόρμας επεξεργασίας δεδομένων.

Τα στοιχεία επικοινωνίας σε αυτή τη βαθμίδα επιτρέπουν την Peer-to-Peer επικοινωνία σε device-to-device ή μεγαλύτερα σενάρια με πολλαπλές συσκευές. Αυτά τα στοιχεία παρέχουν επίσης λειτουργικότητα που επιτρέπει την επικοινωνία μεταξύ συσκευών IoT και cloud data centers. Τα παράλληλα στοιχεία επεξεργασίας δεδομένων είναι χρήσιμα για τον προγραμματισμό ροών δεδομένων, την εκτέλεση υπολογισμών και εκφορτώσεων δεδομένων, το συγχρονισμό των δεδομένων και των προτύπων γνώσης σε συστήματα IoT καθώς και τη διασφάλιση της πλήρους μεταφοράς δεδομένων, λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή απόδοση στις συσκευές IoT.

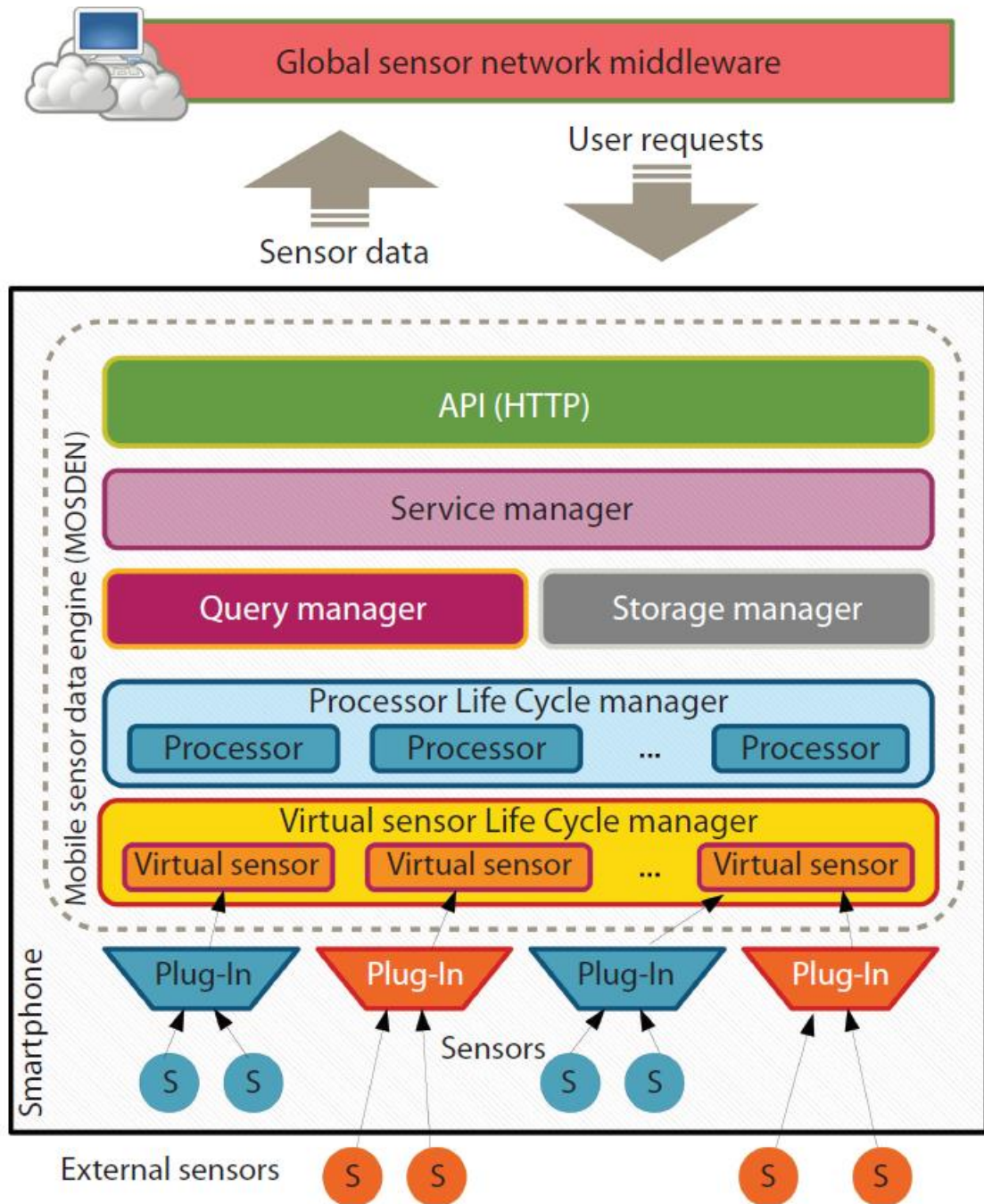
2.5 Η εξέλιξη των Device-Centric πολυεπίπεδων αρχιτεκτονικών

Η προαναφερθείσα πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική περιλαμβάνει μαζική ετερογένεια σε όλες τις βαθμίδες. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική υποστηρίζει μια τεράστια ποικιλία εργασιών. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζονται τρεις παραλλαγές της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής, στις επόμενες ενότητες, οι οποίες αποτελούν βάση για τη μελλοντική ανάπτυξη των Edge Computing αρχιτεκτονικών.

2.5.1 Αρχιτεκτονική MOSDEN

Η MOSDEN λειτουργεί ως μεσολαβητής για συσκευές IoT με περιορισμένη χρήση πόρων [98]. Κατά κύριο λόγο, η MOSDEN εκτελεί συλλογή δεδομένων και επεξεργασία δεδομένων μειώνοντας τις απαιτήσεις για προγραμματισμό αυτών των λειτουργιών από τους developer. Η MOSDEN βασίζεται στη λήψη μετρήσεων από το περιβάλλον και ενσωματώνεται σε άλλες εφαρμογές σε οποιαδήποτε συσκευή Android, συμπεριλαμβανομένων των smartphones και άλλων συσκευών IoT [98]. Το πλεονέκτημα της MOSDEN είναι η ικανότητά της να μειώνει τις απαιτήσεις προγραμματισμού, καθώς οι χρήστες δε χρειάζεται να προγραμματίζουν τις συσκευές συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων. Είναι κυρίως χρήσιμη για εφαρμογές που αφορούν μετρήσεις από πολλούς χρήστες και έχουν ως επίκεντρο τον ίδιο το χρήστη, και όχι το περιβάλλον (opportunistic sensing applications), και αναφέρεται κυρίως σε μοντέλα ροής δεδομένων που βασίζονται σε push-based και pull-based μοντέλα (Τα Push-based πρωτόκολλα επικοινωνίας αφορούν τη σύνδεση χρήστη και cloud, στα οποία ο χρήστης είναι υπεύθυνος για την πραγματοποίηση της σύνδεσης, η οποία παραμένει μέχρι να τη διακόψει ο χρήστης. Αντίθετα στα Pull-Based πρωτόκολλα ο χρήστης οφείλει να στέλνει αίτημα για κάθε σύνδεση, η οποία διαρκεί μόνο για το διάστημα που γίνεται μεταφορά δεδομένων).

Η ουσία του MOSDEN είναι η ενεργοποίηση της αρχιτεκτονικής των plug-in, έτσι ώστε οι προγραμματιστές να μπορούν να επαναχρησιμοποιήσουν, να επαναπροσδιορίσουν και να αναπτύξουν τα plug-in για αλληλεπίδραση με αισθητήρες υλικού. Η αρχιτεκτονική MOSDEN παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5 και παρουσιάζεται λεπτομερώς στο [98]



Σχήμα 2.5. Η αρχιτεκτονική MOSDEN.

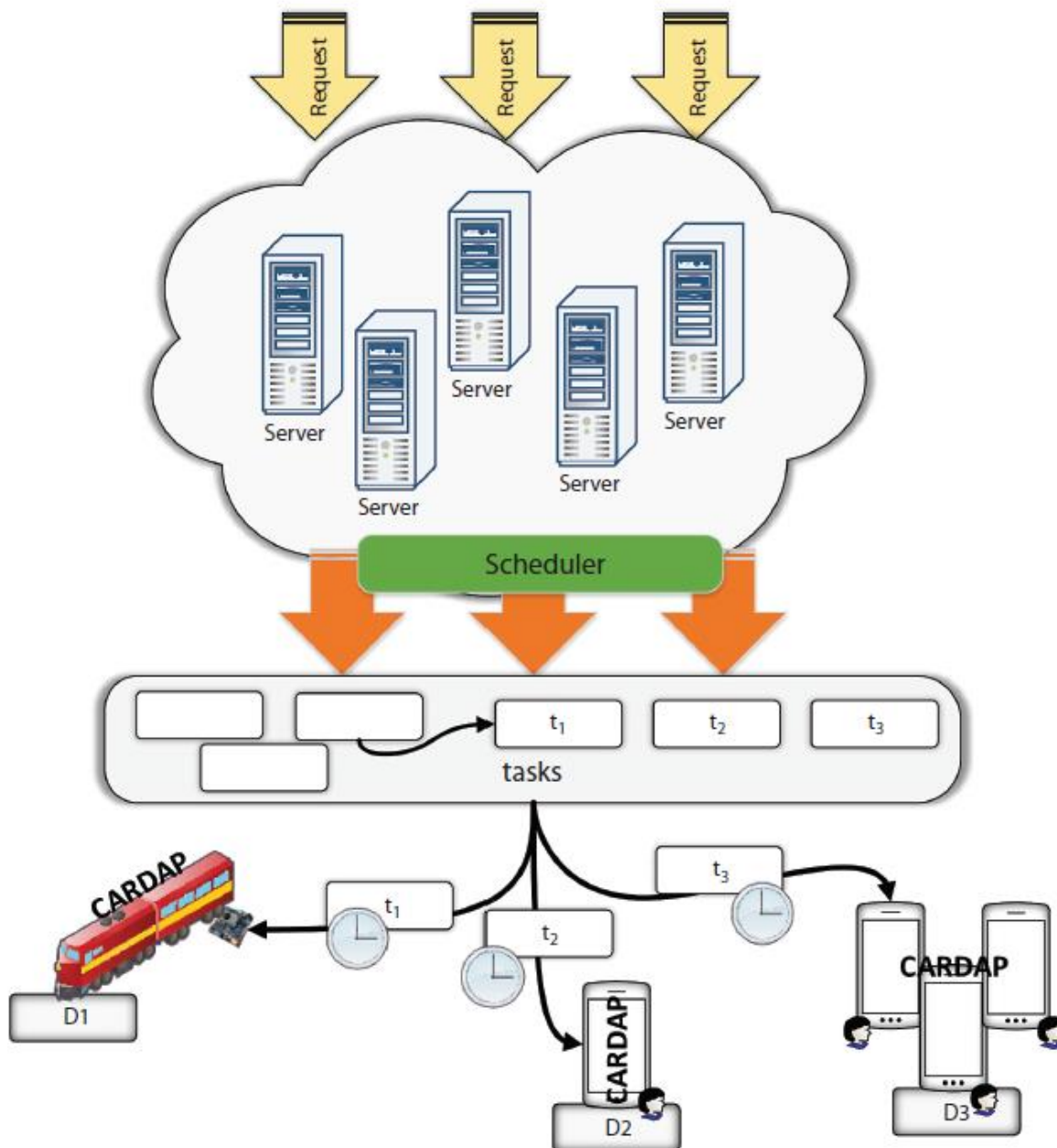
Το plug-in Επίπεδο στη MOSDEN επιτρέπει την τροποποίηση των διεπαφών με διαφορετικούς αισθητήρες, ενσωματωμένους ή μη, σε συστήματα IoT. Ο εικονικός διαχειριστής κύκλου ζωής αισθητήρων (virtual sensor life cycle manager) είναι υπεύθυνος για τις διαδικασίες που απαιτούνται για τη συλλογή των δεδομένων μέσω αποθορυβοποίησης, ενώ ο διαχειριστής κύκλου ζωής του επεξεργαστή (Processor Life Cycle manager) επιτρέπει την επεξεργασία των ρών δεδομένων και την πραγματοποίηση διαδικασιών εξόρυξης δεδομένων. Το MOSDEN παρέχει επίσης διαχειριστή αιτημάτων

(query manager) και διαχειριστή αποθήκευσης (storage manage) για τη διαχείριση των επεξεργασμένων ροών δεδομένων. Ο διαχειριστής υπηρεσίας (service manager) διευκολύνει τη σύνδεση με εξωτερικές συσκευές και cloud data centers. Το MOSDEN δοκιμάστηκε σε σενάρια server και client και βρέθηκαν πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, την αποδοτική χρήση των πόρων και την επεκτασιμότητα. Παρατηρήθηκε ότι το MOSDEN είναι κατάλληλο για συλλογή και επεξεργασία δεδομένων σε εφαρμογές, με επίκεντρο τον ίδιο το χρήστη, μεγάλης κλίμακας.

2.5.2 Αρχιτεκτονική CARDAP

Η CARDAP επιτρέπει την ανάλυση κατανεμημένων δεδομένων κινητής τηλεφωνίας [89]. Λειτουργεί σε ένα περιβάλλον cloud για κινητά, όπου οι κινητές συσκευές εκτελούν τοπικές αναλύσεις για τη μείωση των δεδομένων και οι υπηρεσίες cloud επεξεργάζονται περαιτέρω τα μειωμένα δεδομένα. Το CARDAP διευκολύνει την on-demand αναζήτηση στην τοπική αποθήκευση, διαχωρίζοντας την ανίχνευση από την ανάλυση (Σχήμα 2.6). Επιπλέον, εξετάζονται τα θέματα που σχετίζονται με το MOSDEN, χειρίζονται μέσω επεξεργασίας στις κινητές συσκευές [89].

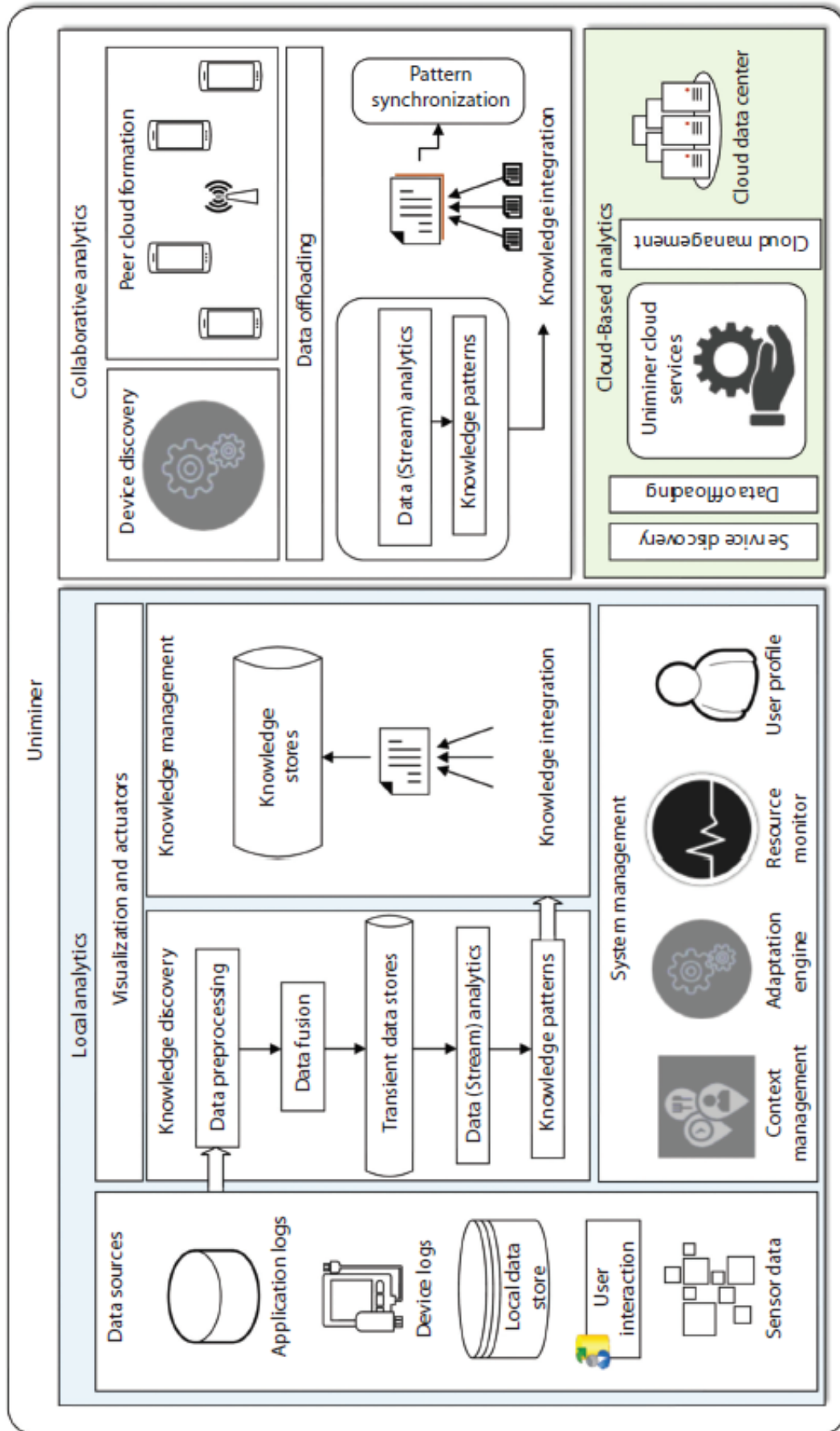
Η αρχιτεκτονική CARDAP βασίζεται στα ακόλουθα πέντε βασικά στοιχεία: (1) συλλογή ροών δεδομένων, (2) ανάλυση, (3) εξόρυξη δεδομένων, (4) μεταφορά δεδομένων, και (5) αποθήκευση και ανάκτηση. Το στοιχείο της λήψης των ροών δεδομένων βασίζεται σε εικονικούς αισθητήρες και plug-ins. Οι εικονικοί αισθητήρες συλλέγουν δεδομένα από μη φυσικές πηγές δεδομένων, οι οποίες περιλαμβάνουν πηγές δεδομένων που βασίζονται στο Internet και συστήματα τελικού χρήστη. Από την άλλη πλευρά, τα plug-ins παρέχουν τη διασύνδεση για τη συλλογή δεδομένων από εξωτερικές πηγές δεδομένων. Το CARDAP υποστηρίζει πολλαπλούς ενσωματωμένους και μη, αισθητήρες και αλληλεπιδρά με τα IoT στοιχεία ανίχνευσης, για παράδειγμα το Raspberry Pi. Το στοιχείο της ανάλυσης βασίζεται στο πρότυπο αναγνώρισης δραστηριότητας που αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας το StreamAR [99]. Το στοιχείο εξόρυξης δεδομένων παρέχει αλγόριθμους εξόρυξης δεδομένων, οι οποίοι χρησιμοποιούν λίγους υπολογιστικούς πόρους, για το CARDAP. Το στοιχείο μεταφοράς δεδομένων επιτρέπει τη μεταφόρτωση δεδομένων σε εξωτερικούς συνδέσμους, για παράδειγμα σε υπηρεσίες cloud και, τέλος, η αποθήκευση και η ανάκτηση επιτρέπει την αποθήκευση τοπικών δεδομένων, τα οποία στη συνέχεια μπορούν να προσπελαστούν με τη χρήση του RESTful API μέσω HTTP. Επιπλέον, οι συγγραφείς πρότειναν ορισμένα μοντέλα για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος. Τα μοντέλα περιλαμβάνουν το μοντέλο κόστους μεταφοράς δεδομένων (για τη μείωση των δεδομένων) και το μοντέλο κόστους χρήσης ενέργειας (για τη κατανάλωση ενέργειας).



Σχήμα 2.6. Η αρχιτεκτονική CARDAP.

2.5.3 Αρχιτεκτονική UniMiner

Το UniMiner είναι μια αρχιτεκτονική τριών επιπέδων για την εξόρυξη καταναμημένων ρών δεδομένων σε συστήματα υπολογιστών mobile edge cloud [76]. Το πλεονέκτημα του είναι η ικανότητά του να υποστηρίζει την εκτέλεση device centric εφαρμογών σε συστήματα IoT. Το UniMiner αναπτύσσεται χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση ανάπτυξης εφαρμογών βασισμένη σε εξαρτήματα, προκειμένου να διευκολυνθεί η προγραμματισιμότητα και η δυνατότητα επέκτασης της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής. Η αρχιτεκτονική UniMiner λειτουργεί σε τρία επίπεδα: (1) τοπικό επίπεδο ανάλυσης, (2) συλλογικό επίπεδο ανάλυσης και 3) επίπεδο ανάλυσης cloud. Το σχήμα 2.7 παρουσιάζει τα στοιχεία των εφαρμογών UniMiner.



Σχήμα 2.6. Η αρχιτεκτονική UniMiner.

Το τοπικό επίπεδο ανάλυσης αφορά κυρίως τα στοιχεία εφαρμογής των συσκευών IoT σε επίπεδο χρήστη. Ο έλεγχος της εκτέλεσης της εφαρμογής παραμένει στο τέλος της συσκευής και, ως εκ τούτου, μειώνει την εξάρτηση της μόνιμης σύνδεσης στο Διαδίκτυο για επικοινωνία cloud-device. Το τοπικό επίπεδο ανάλυσης περιέχει πέντε στοιχεία για την εκτέλεση λειτουργιών αναλύσεων που χρησιμοποιούν συσκευές IoT. Η μονάδα συλλογής δεδομένων και προσαρμογής παρέχει τις λειτουργίες για τη συλλογή των ροών δεδομένων από διάφορους αισθητήρες και παθητικές πηγές δεδομένων. Επιπλέον, επιτρέπει την ρύθμιση του όγκου και της ταχύτητας των ροών δεδομένων. Η μονάδα εντοπισμού γνώσης διευκολύνει την απόδοση της προεπεξεργασίας δεδομένων, της σύντηξης δεδομένων και των εργασιών εξόρυξης δεδομένων μέσω συνεχούς βελτιστοποίησης των εισερχόμενων δεδομένων. Η μονάδα διαχείρισης της γνώσης παρέχει συστατικά στοιχεία εφαρμογής για απισκόνησμάτωση της γνώσης και την ομαδοποίηση. Οι μονάδες απεικόνισης και ενεργοποίησης παρέχουν συστατικά στοιχεία για απεικόνιση δεδομένων επί οθόνης, καθώς και κοινή χρήση δεδομένων σε εξωτερικά περιβάλλοντα, όπως ενεργοποιητές σε συστήματα IoT, Big Data συστήματα και cloud data centers. Η μονάδα διαχείρισης συστήματος διευκολύνει την ελεύθερη εκτέλεση εφαρμογών μεταξύ των κινητών συσκευών, των edge servers και των cloud data centers. Επίσης, παρέχει στοιχεία για τη συλλογή δεδομένων με συμπραζόμενα, την παρακολούθηση πόρων, τη δημιουργία προφίλ χρηστών και την εκφόρτωση των υπολογιστικών εργασιών σε edge servers και cloud data centers [18]

Το συλλογικό επίπεδο ανάλυσης παρέχει στοιχεία που επιτρέπουν την εκτέλεση λειτουργιών εντοπισμού συσκευών για την εξεύρεση επαρκών υπολογιστικών πόρων σε διαθέσιμες κινητές συσκευές στο ίδιο δίκτυο LAN. Επιπλέον, παρέχει τα συστατικά στοιχεία για το σχηματισμό δικτύων ad hoc από όμοιους (peer) χρήστες, την εκφόρτωση ροής δεδομένων, την ανακάλυψη γνώσεων, το συγχρονισμό γνώσεων και τις λειτουργίες συλλογής «απορριμμάτων» σε mobile edge servers. Τέλος, το επίπεδο ανάλυσης cloud της UniMiner παρέχει υπηρεσίες cloud την ανίχνευση άλλων υπηρεσιών, την εκφόρτωση δεδομένων, την προεπεξεργασία δεδομένων, την εξόρυξη δεδομένων, τη διαχείριση γνώσεων και τη συλλογή «απορριμμάτων» για αποτελεσματική χρήση πόρων αποθήκευσης σε cloud data centers. Περισσότερες λεπτομέρειες για την πειραματική αξιολόγηση παρουσιάζονται στο [78].

2.6 Συμπεράσματα

Τα device-centric συστήματα διανομής IoT χρησιμοποιούν συσκευές IoT και edge servers ως βασικές πλατφόρμες εκτέλεσης εφαρμογών. Αυτή η προσέγγιση όχι μόνο μειώνει την καθυστέρηση στις εφαρμογές ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο, αλλά μειώνει και την κίνηση δεδομένων εντός δικτύου και το κόστος χρήσης των υπηρεσιών cloud. Σε αυτό το κεφάλαιο, συζητήθηκε η εμφάνιση edge-centric πλατφορμών αναλύσεων IoT. Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική καθορίζει τα βασικά στοιχεία και ανοίγει νέους ορίζοντες για περαιτέρω μελέτη.

Παρόλο που οι MOSDEN, CARDAP και UniMiner αντιπροσωπεύουν τις υπάρχουσες έρευνες, απαιτούνται πολλές ερευνητικές προσπάθειες για την πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού αυτού του σημαντικού ερευνητικού κλάδου. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα device-centric καταναμημένα IoT συστήματα αναλύσεων θα οδηγήσουν στην ανάπτυξη ενός νέου οικοσυστήματος χωρίς cloud και χωρίς sever. Επιπλέον, θα οδηγήσει σε εξατομικευμένες, προσαρμοστικές και σε πραγματικού χρόνου υπηρεσίες ανάλυσης για προσωπική και συλλογική χρήση.

Λαμβάνοντας υπόψη την εμπορευματοποίηση και τις ερευνητικές ευκαιρίες, γίνεται αντιληπτό ότι τα καταναμημένα Device-Centric IoT συστήματα αναλύσεων θα είναι ένα από τα σημαντικότερα αντικείμενα μελέτης τόσο στον εμπορικό όσο και στον ακαδημαϊκό κλάδο.

3. Διαλειτουργικά πρωτόκολλα επικοινωνίας στο IoT

3.1. Εισαγωγή

Το IoT θα παίξει καθοριστικό ρόλο στην εξέλιξη του Internet διευκολύνοντας τις διασυνδέσεις μεταξύ ανόμοιων αντικειμένων, έξυπνων αντικειμένων και συστημάτων, όχι μόνο μεταξύ αυτών αλλά και με το Διαδίκτυο, με αποτέλεσμα τη δημιουργία διαλειτουργικών υπηρεσιών και εφαρμογών προστιθέμενης αξίας.

Το 3GPP, μια κοινοπραξία επτά οργανισμών ανάπτυξης τηλεπικοινωνιακών προτύπων (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA Korea, TTC Japan) και το Ινστιτούτο Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Ηλεκτρονικών Μηχανικών (IEEE), ορίζουν τη διαλειτουργικότητα ως:

"η ικανότητα δύο ή περισσότερων συστημάτων ή εξαρτημάτων να ανταλλάσσουν δεδομένα και να χρησιμοποιούν πληροφορίες" [101]

Σύμφωνα με μια έκθεση της McKinsey, η διαλειτουργικότητα καταλαμβάνει το 40% της συνολικής δυνητικής οικονομικής αξίας από την ενσωμάτωση του IoT [102]. Ο McKinsey τάσσεται υπέρ της υιοθέτησης ανοικτών προτύπων και της εφαρμογής ανοικτών συστημάτων ή / και πολλαπλών πλατφορμών που επιτρέπουν σε διαφορετικά συστήματα IoT να επικοινωνούν μεταξύ τους.

Καθώς οι προβλέψεις για το IoT αναφέρουν δισεκατομμύρια διασυνδεδεμένες συσκευές, τα δίκτυα πρέπει όχι μόνο να εξυπηρετούν τον αυξανόμενο αριθμό συσκευών αλλά και να είναι ικανά να χειρίζονται διαφορετικά χαρακτηριστικά για τις διάφορες εφαρμογές όσον αφορά την αξιοπιστία, την καθυστέρηση και την ανοχή καθυστέρησης. Δυστυχώς, το 3GPP έχει αναγνωρίσει τους περιορισμούς των συμβατικών ασύρματων δικτύων πρόσβασης για την αντιμετώπιση αυτής της ανάγκης και έχει ξεκινήσει πρωτοβουλίες για τη διαχείριση των βραχυπρόθεσμων αναγκών. Ωστόσο, οι μακροπρόθεσμες ανάγκες εξακολουθούν να απαιτούν προσδιορισμό και τυποποίηση.

Οι κυβερνητικές οργανώσεις και οι οργανισμοί τυποποίησης συνεργάζονται επίσης για να αντιμετωπίσουν αυτήν την πρόκληση - για παράδειγμα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέθεσε οδηγίες (M/411 και M/490) σε ευρωπαϊκούς οργανισμούς τυποποίησης [Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης [CEN], Ευρωπαϊκή Επιτροπή Ηλεκτροτεχνικής Τυποποίησης [CENELEC] και ETSI) σχετικά με τη θέσπιση προτύπων διαλειτουργικότητας για έξυπνους μετρητές και έξυπνα δίκτυα [103].

Αυτό το κεφάλαιο εξετάζει τα σχετικά πρότυπα και πρωτόκολλα στρώματος IoT ανοικτού συστήματος διασύνδεσης (OSI) στο επίπεδο σύνδεσης, το επίπεδο δικτύου, το επίπεδο μεταφοράς και το επίπεδο εφαρμογής. Με βάση τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα κάθε πρωτοκόλλου, προτείνονται συνδυασμοί πρωτοκόλλων σε όλα τα επίπεδα OSI για χρήση σε διαφορετικές περιπτώσεις εφαρμογής. Το υπόλοιπο κεφάλαιο οργανώνεται ως εξής. Η ενότητα 3.2 προσδιορίζει ορισμένες από τις προκλήσεις που καθιστούν δυνατή τη διαλειτουργικότητα του IoT. Η ενότητα 3.3 κάνει μια βαθιά κατάδυση στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων πρωτοκόλλων στρώματος OSI. Η ενότητα 3.4 παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ομαδοποίηση υποψήφιων συνόλων πρωτοκόλλων στρώματος

OSI για διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης. Το τμήμα 9.5 συνοψίζει τα προηγούμενα κεφάλαια και παρέχει μελλοντικές κατευθύνσεις για την έρευνα.

3.2. Περιορισμοί διαλειτουργικότητας

Η διαλειτουργικότητα μπορεί να ταξινομηθεί ευρέως σε τεχνικές και συντακτικές κατηγορίες. Η *τεχνική διαλειτουργικότητα* συνδέεται τυπικά με υλικό, λογισμικό, συστήματα και πλατφόρμες που επιτρέπουν την επικοινωνία μεταξύ συσκευών (D2D). Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας σε συνδυασμό με την υποδομή του συστήματος είναι καθοριστικής σημασίας για την επίτευξη αυτής της μορφής διαλειτουργικότητας. Η *συντακτική διαλειτουργικότητα* συσχετίζεται συνήθως με τις μορφές των δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων της σύνταξης και της κωδικοποίησης [104].

Η διαλειτουργικότητα συνήθως υλοποιείται με το σχεδιασμό προτύπων εντός και μεταξύ τομέων (ένας τομέας αναφέρεται σε έναν συγκεκριμένο οργανισμό, επιχείρηση ή βιομηχανία που υλοποιεί ένα σύστημα IoT). Σε έναν τομέα, τα πρότυπα παρέχουν μακροπρόθεσμη αποδοτικότητα λύσεων, ενώ μεταξύ τομέων, τα πρότυπα ενθαρρύνουν τη συνεργασία μεταξύ αυτών. Το αποτέλεσμα είναι μειωμένο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας (TCO), ταχύτερος χρόνος αγοράς και οικονομίες κλίμακας. Ωστόσο, η υφιστάμενη τοπογραφία της τεχνολογίας D2D είναι εξαιρετικά βραχυπρόθεσμη, εμποδίζοντας έτσι τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης. Ακόμη και σε ένα συγκεκριμένο τομέα, χρησιμοποιούνται και προωθούνται πολλαπλά ανταγωνιστικά πρότυπα και τεχνολογίες (για να εμποδιστεί η αποκλειστικότητα ενός προμηθευτή κ.λπ.). Αυτή η πολυμορφία προάγει μη τυποποιημένες μορφές δεδομένων - εμποδίζοντας έτσι την ενσωμάτωση με το υπόλοιπο δίκτυο. Τα μελλοντικά δίκτυα IoT θα χαρακτηρίζονται ως ετερογενή, προερχόμενα από διαφορετικούς προμηθευτές, διαθέτοντας διαφορετικές υπηρεσίες και σε μεγάλο βαθμό διασκορπισμένα. Ο εγγενής κίνδυνος της μη διαλειτουργικότητας είναι η έλλειψη αποτελεσματικών υπηρεσιών IoT που σχετίζονται με την υγεία και τις καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Επίσης, οι χρήστες και οι εφαρμογές ενδέχεται να χάσουν βασικές πληροφορίες λόγω της έλλειψης διαλειτουργικότητας του IoT.

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (EC) [105] η προαγωγή μιας συνεπούς, διαλειτουργικής και προσβάσιμης χρήσης του IoT σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της τυποποίησης, παραμένει μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις. Αυτό οφείλεται στα ακόλουθα τέσσερα εγγενή χαρακτηριστικά του IoT:

- Πολύπλευρικότητα: Λόγω της συνύπαρξης πολλών διαφορετικών συστημάτων (όπως συσκευές, αισθητήρες και εξοπλισμός) που μπορεί να χρειαστεί να επικοινωνούν μεταξύ τους. Για παράδειγμα, τα οχήματα διαθέτουν πολυσυστήματα για τον έλεγχο του κινητήρα, την επικοινωνία, την ασφάλεια και ούτω καθεξής. Ομοίως, τα κτίρια διαθέτουν πολυάριθμα συστήματα για τον κλιματισμό, τη θέρμανση, την ασφάλεια, τον φωτισμό και ούτω καθεξής.
- Υψηλή ποικιλομορφία: Λόγω πολλαπλών συστημάτων που σχεδιάζονται από διαφορετικούς κατασκευαστές, με την πάροδο του χρόνου, και έχουν σχεδιαστεί

για ποικίλους τομείς εφαρμογών, καθιστώντας έτσι εξαιρετικά δύσκολη τη διατύπωση παγκόσμιων συμφωνιών και κοινώς αποδεκτών προδιαγραφών.

- Δυναμικότητα και μη-γραμμικότητα: Λόγω των νέων "πραγμάτων" που εφευρέθηκαν και εισήχθησαν και τα οποία υποστηρίζουν νέες απρόβλεπτες δομές και πρωτόκολλα.
- Πολύπλοκη ποιότητα δεδομένων: Λόγω της ύπαρξης πολλών μορφών δεδομένων, πολύμορφων γλωσσών, διαφορετικών μοντέλων δεδομένων και κατασκευών και πολύπλοκων αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των δεδομένων. Τα δεδομένα που συλλέγονται από διάφορες συσκευές και αισθητήρες από τον πραγματικό κόσμο είναι δυναμικά και εξαρτώνται από την τοποθεσία και το χρόνο και η ποιότητα των δεδομένων ποικίλλει ανάλογα με τις διάφορες συσκευές. Αυτή η συνδυασμένη πολυπλοκότητα που εκδηλώθηκε σε ένα σημαντικό όγκο συσκευών δημιουργεί έναν κατακλυσμό ετερογενών δεδομένων.

Ένας περιορισμός του IoT είναι η ύπαρξη άφθονων συσκευών χαμηλής ισχύος, οι οποίες μπορεί να έχουν ελάχιστη πιθανότητα ή προσβασιμότητα για επαναφόρτιση για μήνες ή χρόνια. Σε αυτό Προστέθηκε είναι η ανάγκη για αυτές τις συσκευές να ανταλλάσσουν δεδομένα μέσω των δικτύων "lossy". Οι συσκευές που συνδέονται με καλώδιο και/ή οι αντικαταστάσεις μπαταριών είναι δύσκολη και δαπανηρή διαδικασία όταν πρόκειται για συσκευές σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Στο μέλλον, οι συσκευές συλλογής ενέργειας, όπως οι ηλιακές κυψέλες, οι πιεζοηλεκτρικές συσκευές και οι θερμοηλεκτρικές γεννήτριες, θα αντικαταστήσουν τις μπαταρίες. Οι πρόοδοι στην κατασκευή μικρο-, πικο-και φεμτοκυττάρων (σταθμών βάσης) θα παρέχουν εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους και υψηλότερη απόδοση. Κατά συνέπεια, για μεγάλης κλίμακας και αυτάρκη συστήματα IoT, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι τεχνολογίες χαμηλότερης ισχύος, οι μπαταρίες υψηλής απόδοσης και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σε πρόσφατη μελέτη, διαπιστώθηκε ότι η ηλεκτρική απόδοση των υπολογιστικών διαδικασιών σχεδόν διπλασιάζεται κάθε 18 μήνες (επίσης αναφέρεται ως νόμος του Koomey) [106] [107].

Μια πρόσφατη μελέτη του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (ISO) αποκάλυψε πάνω από 400 πρότυπα που σχετίζονταν με το IoT [108]. Αυτή η πληθώρα προτύπων εντείνει το διαρκές δίλημμα που αντιμετωπίζουν οι τεχνικοί αρχιτέκτονες και οι ενδιαφερόμενοι που εργάζονται με τις εφαρμογές IoT, όσον αφορά την επιλογή προτύπων, καθώς κάθε πάροχος IoT να διαμορφώνει και προωθεί τα δικά του πρότυπα. Η άποψη ενός πωλητή είναι συνήθως προκατειλημμένη από τις προσφορές του. Οι προμηθευτές μικροελεγκτών επικεντρώνονται σε πρωτόκολλα σε επίπεδο συσκευής, ενώ οι μικροεπεξεργαστές σε πρωτόκολλα στο επίπεδο του δρομολογητή. Ομοίως, οι πωλητές που προσφέρουν υπηρεσίες cloud επικεντρώνονται σε πρωτόκολλα εφαρμογής υψηλότερου επιπέδου. Οι πάροχοι IoT βλέπουν συχνά την αγορά με μια επιθετική επεκτατική πολιτική - υποθέτουν ότι με τη εδραίωση της δικής τους τεχνολογίας, μπορούν να έχουν αποκλειστικότητα με τους πελάτες τους και έτσι να αυξήσουν το μερίδιο αγοράς. Εντούτοις, η τωρινή εικόνα της αγοράς υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει ένας μοναδικός ηγέτης στα πρότυπα IoT. Ο φόβος της αποκλειστικότητας των πωλητών είναι ένα άλλο κίνητρο που θα συνεχίσει να ενθαρρύνει πολλαπλά πρότυπα που θα ευδοκιμήσουν στην αγορά.

3.3. Αξιολόγηση Πρωτοκόλλων που Εφαρμόζονται σε Υποδομές ΙοΤ

Για να διευκολυνθεί η διαδικασία λήψης αποφάσεων, αυτή η ενότητα παρέχει συνοπτική παρουσίαση των κορυφαίων προτύπων και πρωτοκόλλων που είναι διαθέσιμα στα διάφορα επίπεδα του μοντέλου OSI, δηλαδή στο επίπεδο σύνδεσης, το επίπεδο δικτύου, το επίπεδο μεταφοράς και το επίπεδο εφαρμογής. Κάθε πρότυπο έχει τα πλεονεκτήματά του και τα μειονεκτήματά του - ως εκ τούτου είναι απαραίτητο να αναλύονται οι απαιτήσεις σε κάθε περίπτωση ξεχωριστά, προτού γίνει η τελική επιλογή των πρωτοκόλλων και προτύπων που θα χρησιμοποιηθούν.

3.3.1. Επίπεδο Σύνδεσης

Τα πρωτόκολλα στο επίπεδο σύνδεσης ελέγχουν και πραγματοποιούν τις ανταλλαγές πακέτων μέσω του φυσικού στρώματος ή μέσω του δικτύου (π.χ. ραδιοκύματα και καλώδια). Το εύρος του επιπέδου σύνδεσης είναι η σύνδεση τοπικού δικτύου με το οποίο είναι συνδεδεμένη η συσκευή. Το επίπεδο σύνδεσης καθορίζει τον τρόπο κωδικοποίησης και σηματοδότησης των πακέτων μέσω του μέσου στο οποίο είναι συνδεδεμένη η συσκευή. Ακολουθούν ορισμένα από τα σχετικά πρότυπα του επιπέδου σύνδεσης:

- Το IEEE 802.3 είναι μια συλλογή από ενσύρματα πρότυπα Ethernet για το επίπεδο σύνδεσης. Αυτά τα πρότυπα παρέχουν ταχύτητες δεδομένων από 10 Mbps έως 40 Gbps και υψηλότερα. Το μέσο μεταφοράς (ομοαξονικό καλώδιο, σύρμα twisted-pair ή οπτική ίνα) πραγματοποιεί τις επικοινωνίες για όλες τις συσκευές στο δίκτυο. Έτσι, τα δεδομένα που αποστέλλονται από μια συσκευή μπορούν να ληφθούν από όλες τις συσκευές που υπόκεινται σε ρυθμίσεις μετάδοσης και στις δυνατότητες του πομπού και του δέκτη [109].
- Το IEEE 802.11 είναι μια συλλογή προτύπων επικοινωνίας ασύρματου τοπικού δικτύου (WLAN) για το Επίπεδο σύνδεσης. Αυτά τα πρότυπα παρέχουν ταχύτητες δεδομένων από 1 Mbps έως 6,75 Gbps [110].
- Καθώς το αρχικό πρότυπο IEEE 802.11 δεν ήταν αποτελεσματικό για απαιτήσεις ΙοΤ που οφείλονταν σε γενικές δαπάνες και κατανάλωση ενέργειας, το IEEE 802.11 AH είναι μια έκδοση χαμηλής ενέργειας του IEEE 802.11 που σχεδιάστηκε για να υποστηρίζει απαιτήσεις χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και επιβάρυνσης [111].
- Η τεχνολογία Bluetooth βασίζεται στο πρότυπο IEEE 802.15.1 και λειτουργεί σε βιομηχανική, επιστημονική και ιατρική (ISM) ζώνη 2,4 GHz. Το Bluetooth, το οποίο αναπτύχθηκε αρχικά από την Ericsson, είναι μια ασύρματη τεχνολογία μικρής εμβέλειας που χρησιμοποιείται για φορητές προσωπικές συσκευές [112]. Το Bluetooth, το οποίο υπάρχει στα περισσότερα τηλέφωνα, συνδέεται συνήθως σε απόσταση 50-100 μέτρων με ενίσχυση ισχύος.
- Μια νέα έκδοση Bluetooth, το Bluetooth Low Energy (BLE), είναι ένα υποσύνολο του Bluetooth v4.0. Το BLE προσφέρει χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και κόστος, παρέχοντας το ίδιο εύρος επικοινωνιών με το Bluetooth 4.0. Χρησιμοποιείται σε

εφαρμογές στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, των αυτοματισμών οικίας και της ασφάλειας [113].

- Το IEEE 802.15.4 είναι μια συλλογή προτύπων για ασύρματα προσωπικά δίκτυα χαμηλής ταχύτητας (LR-WPAN). Αυτά τα πρότυπα παρέχουν επικοινωνία χαμηλού κόστους και χαμηλής ταχύτητας για συσκευές που έχουν περιορισμένη ισχύ. Ο περιορισμός ισχύος περιορίζει τις αποστάσεις μετάδοσης σε οπτική επαφή 10-100m και ρυθμό μεταφοράς από 40 έως 250 Kbps [114]. Το ZigBee είναι μια χαμηλού κόστους ασύρματη τεχνολογία βασισμένη στο πρότυπο IEEE 802.15.4 που καταναλώνει λιγότερη ενέργεια και προσφέρει μεγάλη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Τέλος καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από το Bluetooth.
- Τα 2G/3G/4G είναι πρότυπα κινητών επικοινωνιών, τα οποία περιλαμβάνονται στη δεύτερη γενιά (2G, η οποία περιλαμβάνει το GSM και το CDMA), στην Τρίτη γενιά (UMTA, EDGE και CDMA2000) και την τέταρτη γενιά (4G, LTE). Ο ρυθμός μετάδοσης για αυτά τα πρότυπα κυμαίνεται από 9,6 Kbps (για 2G) έως 100 Mbps (για 4G) [115].
- Το IEEE 802.16 είναι μια συλλογή σταθερών ασύρματων ευρυζωνικών προτύπων (WiMax) για το επίπεδο σύνδεσης. Τα πρότυπα WiMax παρέχουν ταχύτητες δεδομένων από 1,5 Mbps έως 1 Gbps.
- Το πρότυπο IEEE 802.22 είναι ένα πρότυπο για δίκτυα μεταφοράς μεγάλης απόστασης χαμηλής ισχύος (LORA). Λειτουργεί εντός white spaces (αχρησιμοποίητων ήδη υπάρχοντων συχνοτήτων) του τηλεοπτικού φάσματος στις αγροτικές περιοχές. Παρέχει κάλυψη σε απόσταση έως 32km με ρυθμό από 54 έως 864Mhz [116].
- Το WirelessHART είναι ένα πρωτόκολλο που λειτουργεί πάνω από το φυσικό επίπεδο του IEEE 802.15.4. Προσφέρει peer-to-peer ασφάλεια χρησιμοποιώντας έναν προηγμένο μηχανισμό κρυπτογράφησης για την κρυπτογράφηση μηνυμάτων. Σχεδιάζεται κυρίως για βιομηχανικές εφαρμογές που έχουν αρχιτεκτονική mesh με αυτοθεραπεία [117].
- Η τεχνολογία Insteon είναι μια άλλη μοναδική τεχνολογία στρώματος συνδέσμων που χρησιμοποιείται κυρίως για οικιακό αυτοματισμό, καθώς συνδέει όλες τις συσκευές που χρησιμοποιούν τις γραμμές του ηλεκτρικού ρεύματος του κτιρίου ή/και ραδιοσυχνότητες (RF). Διαθέτει δίκτυο χαμηλού κόστους και ταχύτητα 38,4kbps [118]. Το Insteon βασίζεται σε δύο πρωτόκολλα - το πρωτόκολλο Insteon RF (για την επικοινωνία μεταξύ συσκευών που χρησιμοποιούν RF) και το πρωτόκολλο γραμμής ισχύος Insteon (για επικοινωνία μεταξύ συσκευών γραμμών ισχύος).

3.3.2. Επίπεδο Δικτύου

Το επίπεδο δικτύου είναι υπεύθυνο για την αποστολή πακέτων από το δίκτυο πηγής στο δίκτυο προορισμού. Αυτό το επίπεδο εκτελεί τη διευθύνσιοδότηση κεντρικού υπολογιστή (host) και τη δρομολόγηση πακέτων. Η αναγνώριση από το host πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας συστήματα διευθύνσεων IP όπως:

- Πρωτόκολλο Internet 4 (IPv4), το οποίο χρησιμοποιεί ένα σχήμα διευθύνσεων 32bit που επιτρέπει συνολικά 2^{32} διευθύνσεις. Καθώς όλο και περισσότερες συσκευές έχουν συνδεόντουσαν στο Internet, οι διευθύνσεις αυτές εξαντλήθηκαν το 2011. Οι διευθύνσεις IP δημιουργούν συνδεσιμότητα στο επίπεδο πακέτων, αλλά δεν εγγυώνται την παράδοση πακέτων. Η εγγυημένη παράδοση και η ακεραιότητα των δεδομένων αντιμετωπίζονται από πρωτόκολλα (όπως το TCP) στο επίπεδο μεταφοράς [119].
- Η έκδοση πρωτοκόλλου Internet 6 (IPv6) χρησιμοποιεί σχήμα διευθύνσεων 128bit που επιτρέπει συνολικά 2^{128} διευθύνσεις.

Πέρα από αυτά τα δύο πρωτόκολλα, υπάρχουν ορισμένα πρωτόκολλα, στο επίπεδο δικτύου, που αναφέρονται σε πολύ συγκεκριμένα περιβάλλοντα. Αυτά τα πρωτόκολλα υπάρχουν σε δύο υποστρώματα του δικτύου, δηλαδή στο υποστρώμα δρομολόγησης, για τη δρομολόγηση των πακέτων από την πηγή στον προορισμό και στο υποστρώμα ενθυλάκωσης (encapsulation layer) [120]. Το υποστρώμα ενθυλάκωσης χρησιμοποιεί διαφορετικά πλαίσια στρώματος ζεύξης δεδομένων για να ξεπεράσει τους περιορισμούς του μεγέθους του επιτρεπτού πλαισίου διασύνδεσης στα δεδομένα IoT, το οποίο δεν μπορεί να ικανοποιήσει τις μακρές διευθύνσεις IPv6.

- Πρωτόκολλο δρομολόγησης υποστρώματος
 - Το RPL (επίσης γνωστό ως πρωτόκολλο δρομολόγησης "Ripple") είναι ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης IPv6 για δίκτυα χαμηλής κατανάλωσης και απώλειας (LLNs). Το πρωτόκολλο βασίζεται στον υπολογισμό της βέλτιστης διαδρομής, που βασίζεται σε ένα Κατευθυνόμενος άκυκλος γράφο (DODAG) χρησιμοποιώντας μια αντικειμενική συνάρτηση και ένα σύνολο μετρήσεων και περιορισμών [121].
- Πρωτόκολλα ενθυλάκωσης υποστρώματος
 - 6LoWPAN: Το IPv6 μέσω δικτύων προσωπικής περιοχής χαμηλής κατανάλωσης (6LoWPAN) υλοποιεί την διευθυνσιοδότηση IP σε συσκευές χαμηλής κατανάλωσης ισχύος που έχουν περιορισμένες δυνατότητες επεξεργασίας. Λειτουργεί σε συνδυασμό με το πρωτόκολλο επιπέδου σύνδεσης 802.15.4 [122].
 - 6TISCH: Αναπτύχθηκε από την ομάδα IETF (Internet Engineering Task Force) και επιτρέπει στα πακέτα IPv6 να μεταφέρονται με την λειτουργία TSCH (timed-slot hopping hopping) σε δίκτυα δεδομένων IEEE 802.15.4e για να μειώσουν τις παρεμβολές από ασύρματα συστήματα στο ίδιο φάσμα [123]. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός πίνακα διανομής καναλιών όπου οι "κατανεμημένες συχνότητες" αποθηκεύονται στις στήλες και οι "διαθέσιμες χρονικές θυρίδες" στις σειρές. Κάθε στοιχείο του πίνακα που περιέχει το χρόνο και τη συχνότητα είναι γνωστό σε όλους τους κόμβους που είναι συνδεδεμένοι στο δίκτυο.
 - 6Lo: Αυτό αναπτύσσεται από την ομάδα του IETF, κυρίως για IPv6 σε δίκτυα περιορισμένων πόρων. Παραδείγματα συμπεριλαμβάνουν την εφαρμογή του IPv6 μέσω του BLE και του IPv6 μέσω NFC [124].

3.3.3. Επίπεδο Μεταφοράς

Το επίπεδο μεταφοράς παρέχει λειτουργίες όπως έλεγχος σφάλματος, κατάτμηση πακέτων, έλεγχος ροής και έλεγχος συμφόρησης. Ακολουθούν τα δύο επικρατέστερα πρωτόκολλα του επιπέδου μεταφοράς:

- Το πρωτόκολλο TCP είναι ένα γνωστό πρωτόκολλο του επιπέδου μεταφοράς που χρησιμοποιείται από προγράμματα περιήγησης και προγράμματα μεταφοράς αρχείων και αλληλογραφίας. Το TCP εξασφαλίζει την αξιόπιστη και τακτική μετάδοση των πακέτων και τη δυνατότητα ανίχνευσης σφαλμάτων, ώστε να μπορούν να απορρίπτονται τα διπλά πακέτα και τα πακέτα που δεν παραδόθηκαν να αναμεταδίδονται ξανά [125]. Η δυνατότητα ελέγχου ροής του TCP εξασφαλίζει ότι ο ρυθμός μετάδοσης δεδομένων του αποστολέα δεν είναι πολύ υψηλός ώστε ο παραλήπτης να μπορεί να επεξεργαστεί την εισορχόμενη πληροφορία.
- Το πρωτόκολλο UDP είναι ένα πρωτόκολλο του επιπέδου μεταφοράς που χρησιμοποιείται για εφαρμογές ευαίσθητες στο χρόνο, όπου η απόρριψη πακέτων είναι προτιμότερη έναντι της αργοπορημένης άφιξης αυτών. Οι εφαρμογές UDP δεν διαθέτουν ούτε επικεφαλίδες των ρυθμίσεων σύνδεσης ούτε απαιτήσεις για την ταξινόμηση μηνυμάτων, την εξάλειψη των αντιγράφων και τον έλεγχο συμφόρησης [126].

3.3.4. Επίπεδο Εφαρμογής

Τα πρωτόκολλα επιπέδου εφαρμογής λειτουργούν στο τελικό επίπεδο του μοντέλου OSI και ενεργοποιούν και ορίζουν την επικοινωνία δεδομένων μεταξύ εφαρμογών και συσκευών IoT (σε συνεργασία με τα πρωτόκολλα χαμηλότερου επιπέδου). Τα ακόλουθα είναι μερικά από τα κυριότερα πρωτόκολλα επιπέδου εφαρμογής που χρησιμοποιούνται για το IoT:

- Το πρωτόκολλο μεταφοράς HTTP (Hypertext Transfer Protocol) είναι πρωτόκολλο αίτησης-απόκρισης (request-response) όπου ένας πελάτης στέλνει αιτήματα σε ένα διακομιστή χρησιμοποιώντας εντολές HTTP [127]. Το HTTP είναι ένα πρωτόκολλο “ανιθαγένειας” όπου κάθε αίτημα HTTP είναι ανεξάρτητο από τα άλλα αιτήματα. Ένας client HTTP μπορεί να είναι ένα πρόγραμμα περιήγησης ή μια εφαρμογή που εκτελείται σε μια συσκευή IoT.
- Το AMQP είναι ένα πρωτόκολλο εφαρμογών ανοιχτού κώδικα για τα μηνύματα των επιχειρήσεων. Το AMQP υποστηρίζει μοντέλα από σημείο-σε-σημείο και εκδότη-συνδρομητή. Οι διαμεσολαβητές της AMQP λαμβάνουν μηνύματα από τους εκδότες (π.χ. συσκευές) και τις μεταφέρουν σε καταναλωτές (εφαρμογές που επεξεργάζονται δεδομένα) μέσω μηχανισμών αναμονής. Τα μηνύματα παραδίδονται στους καταναλωτές που έχουν εγγραφεί στις ουρές ή οι καταναλωτές μπορούν να τραβήξουν τα μηνύματα από τις ουρές [128].
- Το εκτεταμένο πρωτόκολλο μηνυμάτων και παρουσίας (XMPP) είναι ένα άλλο πρωτόκολλο σε επίπεδο εφαρμογής που χρησιμοποιεί streaming XML δεδομένα μεταξύ οντοτήτων δικτύου [129]. Το XMPP είναι ένα αποκεντρωμένο πρωτόκολλο

που χρησιμοποιεί μια αρχιτεκτονική πελάτη-διακομιστή. Το XMPP υποστηρίζει τις μονοπάτια επικοινωνίας μεταξύ πελάτη-διακομιστή και διακομιστή-διακομιστή.

- Το MQTT είναι ένα πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων που είναι κατάλληλο για ελαφρές εφαρμογές. Χρησιμοποιεί μια αρχιτεκτονική πελάτη-διακομιστή όπου ο πελάτης (συσκευές) συνδέεται με τον διακομιστή (μεσίτης MQTT), ο οποίος με τη σειρά του προωθεί τα μηνύματα σε άλλους συνδρομητές. Το MQTT είναι κατάλληλο για περιορισμένα περιβάλλοντα όπου οι συσκευές έχουν περιορισμένους πόρους επεξεργασίας και μνήμης και το εύρος ζώνης δικτύου είναι χαμηλό [130]. Μια πρόσφατη εφαρμογή του MQTT είναι τα μηνύματα του Facebook για την σίγουρη και ταχύτερη παράδοση μηνυμάτων.
- Το πρωτόκολλο περιορισμένης εφαρμογής (CoAP) είναι ένα πρωτόκολλο για εφαρμογές D2D που προορίζονται για περιβάλλοντα με περιορισμένες συσκευές και δίκτυα. Το CoAP είναι ένα πρωτόκολλο μεταφοράς ιστού και χρησιμοποιεί ένα μοντέλο απόκρισης αιτήματος. Ωστόσο, τρέχει πάνω από το UDP αντί του TCP στο επίπεδο μεταφοράς. Το πλεονέκτημα της χρήσης UDP είναι η χαμηλή επιβάρυνση, η υψηλή ταχύτητα μετάδοσης και η υποστήριξη multicast, επιτρέποντας την ταυτόχρονη μετάδοση σε πολλαπλές συσκευές. Ως εκ τούτου, το CoAP είναι το πρωτόκολλο επιλογής για τα LLN όπου είναι επιθυμητή η ελάχιστη επιβάρυνση [131].
- Το DDS είναι ένα πρότυπο D2D για ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και υψηλής απόδοσης. Το DDS χρησιμοποιεί ένα μοντέλο δημοσίευσης-εγγραφής όπου οι εκδότες (συσκευές που παράγουν δεδομένα) δημιουργούν θέματα στα οποία μπορούν να εγγραφούν συνδρομητές (συσκευές που καταναλώνουν δεδομένα). Το DDS χρησιμοποιεί επίσης το UDP αντί του TCP στο μεταφορικό του στρώμα [132].
- Το JMS είναι ένα πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων μόνο για πλατφόρμες που βασίζονται σε Java καθώς επιτρέπει την αποστολή και λήψη μηνυμάτων μεταξύ πελατών Java. Το JMS είναι ένα πρωτόκολλο στο επίπεδο εφαρμογής που τρέχει πάνω από το TCP. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές Java που βρίσκονται σε κινητά, tablet και φορητούς υπολογιστές, αλλά και σε εφαρμογές έξυπνων δικτύων [133].

Δεδομένου ότι κάθε πρωτόκολλο έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά, η επιλογή του σωστού συνόλου πρωτοκόλλων απαιτεί βαθύτερη ανάλυση για κάθε περίπτωση χρήσης. Στην ενότητα 3.4 προτείνεται μια ομαδοποίηση πρωτοκόλλων μεταξύ των επιπέδων του OSI για προσαρμογή σε διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης.

3.4. Case-Based επιλογή πρωτοκόλλων για εφαρμογές IoT

Σε αυτή την ενότητα προτείνεται μια ομαδοποίηση πρωτοκόλλων μεταξύ των επιπέδων OSI για διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης. Ο στόχος είναι να παρασχεθούν κατευθυντήριες αρχές για την επιλογή των πρωτοκόλλων στις τεχνολογίες IoT. Η λανθασμένη επιλογή πρωτοκόλλων των επιπέδου του OSI μπορεί, μερικές φορές, να είναι πολύ δύσκολη και

δαπανηρή να διορθωθεί, με αποτέλεσμα την αποτυχία υλοποίησης του IoT. Για παράδειγμα, ένας πελάτης που επιλέγει μια σειρά πρωτοκόλλων με προσανατολισμό τις εφαρμογές μηνυμάτων όπως το XMPP σε περιβάλλον IoT με περιορισμένο πόρο, ή αν επιλέξει ένα πρωτόκολλο στρώματος σύνδεσης 2G/3G/4G/BLE για συνδεσιμότητα μεγάλης εμβέλειας θα αντιμετωπίσει σίγουρα προκλήσεις.

Για κάθε περίπτωση χρήσης που παρουσιάζεται παρακάτω, συζητούνται τα σχετικά πρωτόκολλα στρώματος OSI και πραγματικές εφαρμογές. Οι επιλογές πρωτοκόλλου που βασίζονται σε περιπτώσεις περιγράφονται συνοπτικά, στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Case-Based επιλογή πρωτοκόλλων για εφαρμογές IoT.

#	Σενάριο	Επίπεδο εφαρμογής	Επίπεδο μεταφοράς	Επίπεδο Δικτύου	Επίπεδο Σύνδεσης
1	Εφαρμογές IoT χαμηλού κόστους με το εξωτερικές συσκευές χαμηλής κατανάλωσης	COAP	UDP	6LoWPAN /RPL	IEEE 802.15.4/IEEE 802.11 AH/BLE/ Insteon
2	Web-Based IoT με αμελητέους περιορισμούς ισχύος σε εξωτερικό περιβάλλον	HTTP	TCP	IPv4/IPv6	2G/3G/4G/IEEE 802.11/IEEE 802.16
3	Εφαρμογές IoT που απαιτούν μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και ικανότητες πολυεκπομπής από συσκευές	DDS	UDP	IPv6	IEEE 802.11
4	Εφαρμογές IoT για εξωτερικές εφαρμογές με μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις και περιορισμένο εύρος ζώνης	MQTT	TCP	6LoWPAN /6Lo/ 6TiSCH	IEEE 802.15.4 (WirelessHART)/ IEEE 802.11
5	Εφαρμογές IoT με γνώμονα τα μηνύματα για περιβάλλοντα περιορισμένων πόρων	XMPP	TCP	IPv6	IEEE 802.11
6	Εφαρμογές IoT με μεγάλο όγκο δεδομένων και απαιτήσεων ανοιχτής χρήση και διαλειτουργικότητα	AMPQ	TCP	IPv6	IEEE 802.11
7	Java-based Εφαρμογή IoT με περιορισμούς γλώσσας και πλατφόρμας Java	JMS	TCP	IPv6	IEEE 802.11
8	Εφαρμογές IoT για περιβάλλον με περιορισμό ισχύος και απαίτηση σύνδεσης μεγάλης εμβέλειας	MQTT	TCP	6LoWPAN	IEEE 802.22 LORA/SIGFOX/ NEUL

3.4.1. Σενάριο 1: Εφαρμογές IoT χαμηλού κόστους με το εξωτερικές συσκευές χαμηλής κατανάλωσης

Σε αυτό το σενάριο, το CoAP είναι το κατάλληλο πρωτόκολλο για το επίπεδο εφαρμογής, δεδομένου ότι έχει σχεδιαστεί για περιβάλλοντα με περιορισμένη χρήση πόρων, με δυνατότητες χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, μνήμης και επεξεργασίας. Δεδομένου ότι το CoAP λειτουργεί μόνο με UDP, έχει χαμηλό κόστος (σε σύγκριση με το TCP), το οποίο το καθιστά ιδανικό για χρήση σε περιορισμένες συσκευές [134]. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1, το 6LoWPAN μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το υποστρώμα ενθυλάκωσης του δικτύου, δεδομένου ότι έχει σχεδιαστεί για LLNs, τα οποία χρησιμοποιούν λιγότερο εύρος ζώνης και έχουν χαμηλή επιβάρυνση πακέτων και ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Για το επίπεδο δρομολόγησης δικτύου, προτείνεται το πρωτόκολλο RPL, καθώς παρέχει ένα μηχανισμό για ειδικές απαιτήσεις εφαρμογών για περιορισμένους κόμβους. Στο επίπεδο σύνδεσης, κατάλληλες τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι το ZigBee (IEEE 802.15.4), το BLE και το Insteon.

Παραδείγματα εφαρμογής αυτού του σεναρίου χρήσης περιλαμβάνουν το έξυπνο δίκτυο, αυτοματισμούς κτιρίων, θερμοστάτες που ανιχνεύουν τη θερμοκρασία μιας περιοχής και στέλνουν ειδοποιήσεις προς το χρήστη, αισθητήρες έξυπνου αέρα σχεδιασμένοι για την παρακολούθηση της ποσότητας CO και NO₂ σε οικιακό περιβάλλον, αισθητήρες συναγερμού διαρρήξεως μέχρι και συσκευή καφέ η οποία αποστέλλει ειδοποιήσεις μέσω του τηλεφώνου του χρήστη. Πρότυπα όπως το δίκτυο αυτοματισμού και ελέγχου κτιρίων (BACnet) έχουν υλοποιηθεί και σχεδιαστεί βασιζόμενα στο CoAP [135]. Οι πολλαπλές διασυνδέσεις CoAP μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνίες αποτελεσματικής ομάδας, για παράδειγμα, μεταξύ παρόμοιων τύπων αισθητήρων σε ένα δωμάτιο. Τέλος το CoAP έχει χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο των drones και τη ροή ζωντανών δεδομένων αισθητήρων για εφαρμογές γεωργίας IoT [136].

3.4.2. Σενάριο 2: Web-based εφαρμογές IoT με αμελητέους περιορισμούς ισχύος σε εξωτερικό περιβάλλον

Το δεύτερο σενάριο, από τον Πίνακα 3.1, αναφέρεται σε εφαρμογές IoT χωρίς περιορισμούς ισχύος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το HTTP κρίνεται ως καταλληλότερο στο επίπεδο εφαρμογής. Το HTTP είναι ένα πρωτόκολλο αίτησης-απόκρισης (request-response) που χρησιμοποιείται συνήθως στην επικοινωνία εφαρμογών προγραμμάτων περιήγησης σε αρχιτεκτονικές client-server [134]. Παρόλο που δεν είναι αποδοτικό για τις επικοινωνίες, το HTTP είναι αξιόπιστο δεδομένου ότι τρέχει πάνω από το TCP. Η διευθυνσιοδότηση στο επίπεδο δικτύου μπορεί να είναι IPv4/IPv6, η οποία επιτρέπει την αναγνώριση διαφορετικών συσκευών που είναι συνδεδεμένες μέσω του δικτύου και παρέχει επίσης δυνατότητα κλιμάκωσης, επέκτασης διευθύνσεων, δυνατότητες plug-and-play και ασφάλεια. Στην περίπτωση των κινητών IoT εφαρμογών μπορούν να χρησιμοποιηθούν 2G/3G/4G, ενώ τα WiMax (IEEE 802.16) και Wi-Fi (IEEE 802.11) είναι κατάλληλα για σταθερές ασύρματες και μη κινητές εφαρμογές, αντίστοιχα.

Υπάρχουν πολλά παραδείγματα χρήσεων για αυτό το σενάριο σε έξυπνες εφαρμογές web, όπως η εφαρμογή Uber [137]. Ο θερμοστάτης NEST είναι μια real-time εφαρμογή IoT που αναπτύχθηκε από τη Google που παρακολουθεί και ελέγχει τη θερμοκρασία των σπιτιών [138]. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές που βασίζονται σε cloud και άλλες κινητές συσκευές, όπως υπολογιστές, tablet και τηλέφωνα.

3.4.3. Σενάριο 3: Εφαρμογές IoT που απαιτούν μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και ικανότητες πολυεκπομπής από συσκευές

Το DDS είναι ένα πρωτόκολλο στο επίπεδο της εφαρμογής κατάλληλο για τη μετάδοση δεδομένων "σε πραγματικό χρόνο". Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο ανταλλαγής μηνυμάτων D2D που εκτελείται πάνω από το UDP (Πίνακας 3.1), το οποίο υποστηρίζει χαμηλή επιβάρυνση (overhead). Επιτρέπει την αυτοανακάλυψη που συνδέει αυτόματα τους κατάλληλους εκδότες με τους συνδρομητές. Το DDS προέκυψε κυρίως μέσω της αεροδιαστημικής κοινότητας και των αμυντικών εφαρμογών για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων διανομής δεδομένων των κρίσιμων, για την αποστολή, συστημάτων [139]. Στο επίπεδο δικτύου, το IPv6 παρέχει επαρκείς διευθύνσεις για τον εντοπισμό κάθε συσκευής μέσω του δικτύου. Στο επίπεδο σύνδεσης, το Wi-Fi (IEEE 802.11) επιτρέπει τη σύνδεση με διάφορους αισθητήρες και άλλες ενσωματωμένες συσκευές σε ακτίνα 10 km με ικανοποιητική ταχύτητα.

Παραδείγματα εφαρμογής αυτού του σεναρίου εντοπίζονται όχι μόνο σε εφαρμογές που σχετίζονται με την άμυνα αλλά και σε οικονομικά επαγγέλματα, στον έλεγχο της εναέριας κυκλοφορίας, στη μεταφορά, στην ιατρική και στη διαχείριση έξυπνων δικτύων [140]. Το DDS έχει επίσης χρησιμοποιηθεί σε συστήματα παρακολούθησης ασθενών όπου τα δεδομένα αισθητήρων αποστέλλονται μέσω του σταθμού της νοσοκόμου και ακόμη και σε κινητή συσκευή ιατρού [141].

3.4.4. Σενάριο 4: Εφαρμογές IoT για εξωτερικές εφαρμογές με μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις και περιορισμένο εύρος ζώνης

Το MQTT είναι το προτεινόμενο πρωτόκολλο επιπέδου εφαρμογής για αυτό το σενάριο. Το MQTT έχει ένα σταθερό μέγεθος κεφαλίδας τουλάχιστον 2 bytes, με αποτέλεσμα να είναι μικρό το συνολικό μέγεθος πακέτου και επομένως επιτυγχάνεται χαμηλή επιβάρυνση και καθυστέρηση. Το MQTT τρέχει πάνω από το TCP (Πίνακας 3.1), καθώς το MQTT χρειάζεται να έχει ζωντανή σύνδεση για να ενημερώνει τους πελάτες όταν αλλάζει μια κατάσταση. Το MQTT χρησιμοποιείται για να επιτρέψει στις μικρότερες συσκευές να μεταφέρουν τα δεδομένα σε μια υψηλότερου επιπέδου υποδομή, όπως το σύννεφο [142]. Στο επίπεδο δικτύου, το MQTT υποστηρίζει τεχνολογίες όπως οι 6LoWPAN, 6Lo και 6TiSCH, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί για να λειτουργούν σε κόμβους περιορισμένης πρόσβασης και χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Στο στρώμα συνδέσεων, οι πιθανές υποψήφιες χώρες περιλαμβάνουν το IEEE 802.15.4 (π.χ. WirelessHART) και το IEEE 802.11 (Wi-Fi).

Παραδείγματα χρήσης για αυτό το σενάριο περιλαμβάνουν την παρακολούθηση πετρελαιαγωγών για διαρροές, την παρακολούθηση της κατανάλωσης ενέργειας, τον έλεγχο φωτισμού και έξυπνη κηπουρική. Το Facebook χρησιμοποιεί το MQTT στις κινητές του εφαρμογές με σκοπό την επίτευξη χαμηλής κατανάλωσης και περιορισμό της χρήσης του εύρους ζώνης δικτύου [143].

3.4.5. Σενάριο 5: Εφαρμογές IoT με γνώμονα τα μηνύματα για περιβάλλοντα περιορισμένων πόρων

Το XMPP είναι το προτεινόμενο στρώμα εφαρμογής για αυτό το σενάριο, καθώς υποστηρίζει ένα μικρό αποτύπωμα μηνυμάτων και ανταλλαγή μηνυμάτων χαμηλού λανθάνοντος χρόνου. Το XMPP είναι εύκολα επεκτάσιμο και μπορεί να αλληλεπιδρά άμεσα με άλλα αντικείμενα που χρησιμοποιούν XMPP. Χρησιμοποιώντας ένα μηχανισμό ώθησης-έλξης (push-pull), μπορεί να αποθηκεύσει τα περιεχόμενα εάν η οντότητα λήψης βρίσκεται σε κατάσταση αναστολής ή εκτός λειτουργίας [144]. Το XMPP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση του θερμοστάτη στο σπίτι ή οποιασδήποτε ηλεκτρονικής συσκευής σε έναν διακομιστή ιστού και μπορεί να έχει πρόσβαση σε πληροφορίες μέσω τηλεφώνου. Διαθέτει διευθυνσιοδότηση, ασφάλεια και δυνατότητα κλιμάκωσης, καθιστώντας την ιδανική για εφαρμογές IoT με γνώμονα τον καταναλωτή. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1, το XMPP τρέχει πάνω από το TCP και υποστηρίζει τη διευθυνσιοδότηση IPv6. Η σύνδεση στο Internet μπορεί να υλοποιείται μέσω Wi-Fi (IEEE 802.11), το οποίο έχει προσαρμόσιμες και καλύτερες ταχύτητες δεδομένων σε μια δεδομένη απόσταση. Το XMPP δεν είναι κατάλληλο για συσκευές με περιορισμένη χρήση πόρων, αφού καταναλώνει πολλή ισχύ. Ως εκ τούτου, για να γίνει ελαφρύ το XMPP, έχει επανασχεδιαστεί ώστε να εκτελείται σε UDP, γεγονός που μειώνει τα γενικά έξοδα στο δίκτυο [145].

Παραδείγματα περιπτώσεων χρήσης IoT περιλαμβάνουν υπηρεσίες ειδοποίησης XMPP που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση οχημάτων. Το XMPP χρησιμοποιείται επίσης ευρέως για την οικοδόμηση ταυτότητας και υπηρεσιών εξουσιοδότησης, όπως το OpenID και το OAuth [146]. Ωστόσο, το XMPP έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό σε εφαρμογές που δεν θεωρούνται IoT, όπως η ανταλλαγή άμεσων μηνυμάτων, οι τηλεοπτικές και φωνητικές κλήσεις, το google talk και οι εφαρμογές παιχνιδιών.

3.4.6. Σενάριο 6: Εφαρμογές IoT με μεγάλους όγκους δεδομένων και απαιτήσεις ανοιχτής χρήση και διαλειτουργικότητας

Το προτινόμενο πρωτόκολλο στο επίπεδο της εφαρμογής για αυτό το σενάριο είναι το AMQP, το οποίο χειρίζεται την αξιόπιστη σειρά αναμονής, την ανταλλαγή μηνυμάτων με βάση τη θεματολογία, την ευέλικτη δρομολόγηση και την ασφάλεια [147]. Το AMQP είναι ένα πρωτόκολλο με επίκεντρο τα μηνύματα που παρέχει διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφόρων πελατών που διαθέτουν υλοποιήσεις από διαφορετικούς προμηθευτές. Το AMQP επιτρέπει τη μεταφορά μεγάλων όγκων δεδομένων, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνει ενημερώσεις για το ίδιο κανάλι επικοινωνίας. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1, το AMQP τυπικά

υλοποιείται με TCP και υποστηρίζει την διευθυνσιοδότηση IPv6, χρησιμοποιώντας παράλληλα το πρότυπο IEEE 802.11 στο στρώμα σύνδεσης.

Παραδείγματα των περιπτώσεων χρήσης περιλαμβάνουν το έργο Aadhar στην Ινδία, το οποίο είναι μία από τις μεγαλύτερες βιομετρικές βάσεις δεδομένων στον κόσμο, με 1,2 δισεκατομμύρια αρχεία ταυτότητας [101], καθώς και την Ocean Observatories Initiative, η οποία συλλέγει 8 terabytes δεδομένων κάθε μέρα από αισθητήρες σε όλο τον κόσμο. Τέλος, ένα παράδειγμα χρήσης σε MES εφαρμογές είναι η χρήση του AMQP σε συνδυασμό με το επίπεδο επικοινωνίας Open Platform Communications (OPC) σε εποπτικό έλεγχο και την εξαγωγή δεδομένων (SCADA) για την εξάλειψη των γενικών εξόδων της διαχείρισης των ετικετών (overhead) και της ενσωμάτωσης των δεδομένων.

3.4.7. Σενάριο 7: Java-based Εφαρμογή IoT με περιορισμούς γλώσσας/πλατφόρμας Java

Αυτό το σενάριο υποθέτει ότι τα συστήματα IoT χρησιμοποιούν ήδη διεπαφές βασισμένες σε Java. Σε τέτοια σενάρια, το JMS είναι το προτιμώμενο πρωτόκολλο για το επίπεδο εφαρμογής. Το JMS ορίζει την τυπική διεπαφή API για πλατφόρμες και πελάτες που βασίζονται σε Java (αποκλειστικά). Χρησιμοποιεί μηνύματα για να αλληλεπιδρά με τα στοιχεία της εφαρμογής και επίσης επιτρέπει στα συστατικά μέρη να στέλνουν, να λαμβάνουν αλλά και να διαβάζουν μηνύματα [148]. Ωστόσο, οι υλοποιήσεις JMS από διαφορετικούς προμηθευτές ενδέχεται να μην αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1, το JMS τρέχει πάνω από το TCP και χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το Wi-Fi στο επίπεδο σύνδεσης.

Τα παραδείγματα περιπτώσεων χρήσης περιλαμβάνουν τα συστήματα ανταλλαγής μηνυμάτων, τις μεγάλες επιχειρησιακές εφαρμογές, τις εφαρμογές έξυπνων δικτύων με αισθητήρες που χρησιμοποιούν διεπαφή Java και εφαρμογές Java σε κινητά και tablet που έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιούν το JMS [149].

3.4.8. Σενάριο 8: Εφαρμογή IoT για περιβάλλον με περιορισμό ισχύος και απαίτηση σύνδεσης μεγάλη εμβέλεια

Ένα κατάλληλο πρωτόκολλο για το επίπεδο σύνδεσης για αυτό το σενάριο είναι το IEEE 802.22 (γνωστό ως LoRa), το οποίο παρέχει συνδεσιμότητα μεγάλης εμβέλειας σε αρκετούς κόμβους που λειτουργούν με χαμηλή ισχύ. Λειτουργεί εντός λευκών χώρων του φάσματος συχνοτήτων τηλεόρασης μεταξύ 54 και 864MHz, ιδιαίτερα σε αγροτικές περιοχές όπου η χρήση του φάσματος είναι συγκριτικά χαμηλή [150]. Έχει εύρος έως και 15 χιλιόμετρα σε αγροτικές περιοχές έναντι 2-5 χιλιομέτρων σε αστικές περιοχές και είναι σε θέση να εξαλείψει τις παρεμβολές, γεγονός που συμβάλλει στη βελτίωση της αποδοτικότητας του δικτύου. Η τεχνολογία DASH7, βασισμένη στην τεχνολογία LORA, προσφέρει υπηρεσίες χαμηλής κατανάλωσης μεγάλης εμβέλειας με εύρος μέχρι και 10 χλμ. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.1, το LORA μπορεί να χρησιμοποιηθεί με τα πρωτόκολλα 6LoWPAN, TCP και MQTT

στα υψηλότερα επίπεδα για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, καθώς και να παρέχει συνδεσιμότητα μεγάλης εμβέλειας.

Μια εναλλακτική τεχνολογία LPWAN είναι η Sigfox, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως σε ευρωπαϊκές χώρες. Το Sigfox μπορεί να μεταδίδει δεδομένα με καλύτερους ρυθμούς μετάδοσης στο στενό φάσμα χρησιμοποιώντας χαμηλή ισχύ. Ως εκ τούτου, είναι κατάλληλο για συσκευές IoT που συνήθως περιορίζονται από παράγοντες όπως η ισχύς, η μνήμη και η ενέργεια. Χρησιμοποιεί την τεχνολογία ultra narrowband (UNB), η οποία καταναλώνει περίπου 50μW για μετάδοση στην οποία η κυψελοειδείς τεχνολογία καταναλώνει περισσότερα από 5000μW αντίστοιχα [151]. Δεδομένου ότι το φάσμα που καλύπτεται από το Sigfox είναι 30-50 χλμ., θεωρείται καλύτερη εναλλακτική λύση από Wi-Fi, η οποία καλύπτει μόνο ένα μικρό εύρος και είναι επίσης αρκετά δαπανηρή στη χρήση. Επίσης, το Sigfox παρέχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας για τις συνδεδεμένες συσκευές.

Μια άλλη τεχνολογία, παρόμοια με τη Sigfox by Neul - προσφέρει συνδεσιμότητα χαμηλού κόστους, υψηλής απόδοσης και μεγάλης κάλυψης (έως 10χλμ.). Η Weightless παρέχει πρόσβαση στο φάσμα υψηλής ραδιοσυχνότητας (UHF) υψηλής ποιότητας χρησιμοποιώντας white space radio, το οποίο είναι τώρα διαθέσιμο λόγω της μετάβασης από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεόραση. Πρόκειται για μια νέα τεχνολογία ασύρματης δικτύωσης ευρείας περιοχής που έχει σχεδιαστεί για το IoT που ανταγωνίζεται σε μεγάλο βαθμό τις υφιστάμενες τεχνολογίες GPRS, CDMA, 3G και LTE WAN. Οι ρυθμοί μετάδοσης δεδομένων κυμαίνονται από μερικά bit ανά δευτερόλεπτο έως και 100kbps και οι συσκευές μπορούν να καταναλώνουν μόλις 20-30mA από δύο μπαταρίες AA, πράγμα που ισοδυναμεί με διάρκεια μπαταρίας 10-15 ετών.

Παραδείγματα χρήσης περιλαμβάνουν εφαρμογές IoT για αυτόματες συσκευές ανάγνωσης μετρητών, συσκευές παρακολούθησης GPS, εφαρμογές εφοδιασμού, γεωργίας, έξυπνες μετρήσεις, εφαρμογές ασφάλειας και έξυπνη εξόρυξη [152].

3.5. Συμπεράσματα

Ορισμένα από τα προαναφερθέντα πρωτόκολλα έχουν παρόμοιες δυνατότητες και κατά συνέπεια μπορούν να αποτελέσουν δίλημμα για τον υπεύθυνο λήψης αποφάσεων. Για παράδειγμα, τόσο τα MQTT όσο και το CoAP είναι κατάλληλα για συσκευές χαμηλής κατανάλωσης σε περιορισμένα περιβάλλοντα. Ωστόσο, υπάρχουν ειδικά χαρακτηριστικά κάθε πρωτοκόλλου που τα καθιστούν κατάλληλα για διαφορετικές εφαρμογές.

Συνοψίζοντας, κάθε πρωτόκολλο έχει τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες του. Ως εκ τούτου, η επιλογή του κατάλληλου συνόλου πρωτοκόλλων απαιτεί βαθύτερη ανάλυση της περίπτωσης χρήσης. Το κεφάλαιο πρότεινε μια ολιστική προσέγγιση για την επιλογή του κατάλληλου συνόλου πρωτοκόλλων για κάθε περίπτωση χρήσης εξετάζοντας τις δυνάμεις, τις αδυναμίες και τη συμβατότητα των πρωτοκόλλων σε κάθε ένα από τα επίπεδα OSI. Αυτοί οι προτεινόμενοι συνδυασμοί μπορεί να εξελίσσονται και να μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου καθώς τα πρωτόκολλα επανασχεδιάζονται για να ξεπεράσουν τις αδυναμίες τους και τα όρια συμβατότητας. Επίσης, ένα περιβάλλον IoT δεν χρειάζεται να περιορίζεται μόνο

σε ένα σύνολο πρωτοκόλλων. Ένας συνδυασμός πρωτοκόλλων μπορεί να συνυπάρχει μεταξύ τους και να συνδεθεί μέσω πυλών (gateways). Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρξει μια κατάσταση όπου το CoAP over UDP (από συσκευές IoT) χρειάζεται να συνδεθεί με μια υποδομή cloud που χρησιμοποιεί το TCP με μια υπάρχουσα υποδομή επιχείρησης. Μια πύλη TCP-to-UDP μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο όριο του cloud για να επικοινωνήσει με τη συσκευή IoT που βασίζεται σε UDP [153].

Καθώς η τυποποίηση θα πρέπει να καθοδηγείται από οργανισμούς ανάπτυξης προτύπων (SDO), η συνεργασία είναι απαραίτητη με τις κοινότητες ανοιχτού κώδικα, τις ομάδες ειδικών συμφερόντων και τα ομάδες πιστοποίησης. Πρέπει επίσης να αξιοποιηθεί η βέλτιστη πρακτική από τη βιομηχανία των κινητών συσκευών, όπου η διαλειτουργικότητα επιτεύχθηκε όχι μόνο με τη θέσπιση παγκόσμιων προτύπων αλλά και μέσω του παγκόσμιου φόρουμ πιστοποίησης (Global Certification Forum), το οποίο ήταν μια κοινή εταιρική σχέση που αποτελούνταν από κατασκευαστές κινητών τηλεφώνων, κατασκευαστές κινητών συσκευών δοκιμών και φορείς εκμετάλλευσης δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Ως εκ τούτου, η πιστοποίηση θα λκαταλάβει επίσης πρωταγωνιστικό ρόλο στη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας στο Διαδίκτυο.

Τέλος, δίνεται μεγάλη έμφαση στα πρωτόκολλα/πρότυπα επικοινωνίας στα στρώματα του OSI, αλλά δεν γίνεται η ίδια μελέτη στην τυποποίηση των εφαρμογών IoT σε επίπεδο τομέα (domain). Αξιοσημείωτα παραδείγματα μελετών σε επίπεδο τομέα είναι τα πρότυπα BACnet και KNX που δημιουργήθηκαν για τους τομείς αυτοματισμού κτιρίων. Καθώς η ταχύρρυθμη αύξηση των εφαρμογών IoT θα επηρεάσει, πιθανότατα, τους περισσότερους τομείς, τις βιομηχανίες και τις ανθρώπινες ζωές, υπάρχει μια έντονη ανάγκη να κλείσει το χάσμα αυτό το νωρίτερο. Μια πιθανή επέκταση της παραπάνω έρευνας θα ήταν μια λεπτομερής ανάλυση και σύγκριση των υφιστάμενων προτύπων σε επίπεδο τομέα.

Βιβλιογραφία

- [1] Zakon, R. H. 2016. Hobbes' Internet Timeline 23. The Definitive ARPAnet & Internet History. <https://www.zakon.org/robert/internet/timeline/#Growth>.
- [2] Ashton, K. 2009. That ' Internet of things' thing. *RFID Journal* 22 (7): 97– 114.
- [3] Gershenfeld, N. 1999. *When Things Start to Think* . New York: Henry Holt and Co.
- [4] Weiser, M. 1991. The computer for the 21st century. *Scientific American* 265 (3): 94– 104.
- [5] ITU-T (International Telecommunications Union Telecommunication Standardization Sector). 2005. *ITU Internet reports, the Internet of things*. Geneva: ITU-T.
- [6] ICANN. 2011. Available Pool of Unallocated IPv4 Internet Addresses Now Completely Emptied.
- [7] Commission of the European Communities. 2009. Internet of things— An action plan for Europe. COM (2009) 278 final. Brussels: European Union. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2009:0278:FIN:EN:PDF>.
- [8] IDC. 2015. IDC predicts the emergence of ' the DX economy' in a critical period of widespread digital transformation and massive scale up of 3rd platform technologies in every industry. November 4. <http://www.businesswire.com/news/home/20151104005180 /en/IDC-PredictsEmergence-DX-Economy-Critical-Period>.
- [9] i-SCOOP. 2015. Digital transformation: Online guide to digital transformation. February 1. <http://www.iscoop.eu/digital-transformation/>.
- [10] Gartner, Inc. 2013. Gartner says the Internet of things installed base will grow to 26 billion units by 2020. December 12. <http://www.gartner.com/newsroom/id/2636073>.
- [11] Statista, Size of the Internet of Things market worldwide in 2014 and 2020, by industry (in billion U.S. dollars)
- [12] 12 – GrowthEnabler. 2017. Market Pulse Report, Internet of Things (IoT)
- [13] Atzori, L., A. Iera, and G. Morabito. 2010. The Internet of things: A survey. *Computer Networks* 54 (15): 2787– 2805.
- [14] ITU-T (International Telecommunications Union Telecommunication Standardization Sector). 2012. Overview of the Internet of things. Y.2060. https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.2060-201206-I!!PDFE&type=items.
- [15] http://www.internet-of-things-research.eu/about_iot.htm 2014
- [16] ISO/IEC JTC1. 2015. Internet of things (IoT) preliminary report 2014. ISO/IEC. http://www.iso.org/iso/internet_of_things_report-jtc1.pdf.
- [17] IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). 2015. Towards a definition of the Internet of things (IoT). http://iot.ieee.org/images/files/pdf/IEEE_IoT_Towards_Definition_Internet_of_Things_Revision1_27MAY15.pdf.
- [18] Minoli, D. 2013. *Building the Internet of things with IPv6 and MIPv6: The Evolving World of M2M Communications* . Hoboken, NJ: Wiley.
- [19] Dahmen-Lhuissier, S. 2016. *Internet of things*. Valbonne, France: ETSI. Accessed October 18. <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/internet-of-things>.

- [20] Ixia. 2016. Key building blocks of Internet of things (IOT). <https://www.ixiacom.com/resources/key-building-blocks-internet-things-iot>.
- [21] Weyrich, M. and C. Ebert. 2016. Reference architectures for the Internet of things. *IEEE Software* 33 (1): 112– 16.
- [22] Bassi, A., M. Bauer, M. Fiedler, T. Kramp, R. Van Kranenburg, S. Lange, and S. Meissner. 2013. Enabling Things to Talk: Designing IoT Solutions with the IoT Architectural Reference Model , 163– 211. Berlin: Springer.
- [23] Bauer, M., N. Bui, J. De Loof, C. Magerkurth, A. Nettsträter, J. Stefa, and J. W. Walewski. 2013. IoT reference model. In *Enabling Things to Talk: Designing IoT Solutions with the IoT Architectural Reference Model* , edited by A. Bassi et al., 113– 162. Berlin: Springer.
- [24] Gubbi, J., R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami. 2013. Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems* 29 (7): 1645– 1660.
- [25] Antipolis, S. 2016. ETSI IoT-M2M Workshop: Approaching a smarter world. November 25. <http://www.etsi.org/index.php/news-events/news/1144-2016-11-news-etsi-iot-m2m-workshop-approaching-a-smarter-world>.
- [26] GSMA (GSM Association). 2016. Annual report 2016. http://www.gsma.com/aboutus/wp-content/uploads/2016/09/GSMA_AnnualReport_2016_FINAL.pdf.
- [27] ISO/IEC JTC1. 2016. Information technology— Internet of Things Reference Architecture (IoT RA). ISO/
- [28] Yoo, S. 2015. ISO/IEC JTC1/WG 10 Working Group on Internet of Things. June 16. <http://iot-week.eu/wpcontent/uploads/2015/06/07-JTC-1-WG-10-Introduction.pdf>.
- [29] ISO/IEC (International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission). 2014. Study report on IoT reference architectures/frameworks. https://www.itu.int/md/T13-SG17-150408-TDPLEN-1688/_page.print.
- [30] GS1. 2016. GS1 and the Internet of things. Final. <http://www.gs1.org/sites/default/files/images/standards/internet-of-things/gs1-and-the-internet-of-things-iot.pdf>.
- [31] Adolphs, P., H. Bedenbender, M. Ehlich, U. Epple, M. Hankel, R. Heidel, M. Hoffmeister, et al. 2015. ReferenceArchitecture Model for Industrie 4.0 (RAMI 4.0). https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2016/januar/GMA_Status_Report__Reference_Architecture_Model_Industrie_4.0__RAMI_4.0_/GMA-Status-Report-RAMI-40-July-2015.pdf.
- [32] Yin, C. T., Z. Xiong, H. Chen, J. Yuan Wang, D. Cooper, and B. David. 2015. A literature survey on smart cities. *Science China Information Sciences* 58 (10): 1– 18.
- [33] Pang, Z. 2013. Technologies and architectures of the Internet-of-Things (IoT) for health and well-being. Doctoral thesis, KTH, School of Information and Communication Technology (ICT), Electronic Systems, Kista, Sweden.
- [34] Vlacheas, P., R. Giaffreda, V. Stavroulaki, D. Kelaidonis, V. Foteinos, G. Poullos, P. Demestichas, A. Somov, A. Rahim Biswas, and K. Moessner. 2013. Enabling smart cities through a cognitive management framework for the Internet of Things. *IEEE Communications Magazine* 51 (6): 102– 111.

- [35] Domingo, M. C. 2012. An overview of the Internet of things for people with disabilities. *Journal of Network and Computer Applications* 35 (2): 584– 596.
- [36] Yun, M., and B. Yuxin. 2010. Research on the architecture and key technology of Internet of things (IoT) applied on smart grid. In *2010 International Conference on Advances in Energy Engineering (ICAEE)*, Beijing, 69– 72.
- [37] Guinard, D. and V. Trifa. 2016. *Building the Web of Things*. Shelter Island, NY: Manning Publications.
- [38] Cisco. 2014. The Internet of things reference model. http://cdn.iotwf.com/resources/71/IoT_Reference_Model_White_Paper_June_4_2014.pdf.
- [39] Karzel, D., H. Marginean, and T-S. Tran. 2016. A reference architecture for the Internet of things. January 29. <https://www.infoq.com/articles/internet-of-things-reference-architecture>.
- [40] ISO (International Organization for Standardization). 2017. ISO/IEC JTC 1— Information technology. Accessed January 15. http://www.iso.org/iso/home/standards_development/list_of_iso_technical_committees/jtc1_home.htm.
- [41] ISO/IEC (International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission). 2016. Information technology— Data structure— Unique identification for the Internet of things. ISO/IEC 29161:2016. August. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-iec:29161:ed-1:v1:en>.
- [42] Rose, K., S. Eldridge, and L. Chapin. 2015. *The Internet of things: An overview*. Reston, VA: Internet Society. <https://pdfs.semanticscholar.org/6d12/bda69e8fcbbf1e9a10471b54e57b15cb07f6.pdf>.
- [43] 3GPP. 2016. Standardization of NB-IOT completed. June 22. http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1785-nb_iot_complete.
- [44] Vodafone Group. 2016. Vodafone completes the world’s first trial of standardised NB-IoT on a live commercial network. September 20. <https://www.vodafone.com/content/index/what/technology-blog/nbiotcommercial.html#>.
- [45] R. Yuan, L. Shumin, Y. Baogang, *Value Chain Oriented RFID System Framework and Enterprise Application*, Science Press, Beijing, 2007.
- [46] METRO Group Future Store Initiative, <<http://www.futurestore.org/>>.
- [47] S. Karpischek, F. Michahelles, F. Resatsch, E. Fleisch, Mobile sales assistant – an NFC-based product information system for retailers, in: *Proceedings of the First International Workshop on Near Field Communications 2009*, Hagenberg, Austria, February 2009.
- [48] G. Broll, E. Rukzio, M. Paolucci, M. Wagner, A. Schmidt, H. Hussmann, PERCI: pervasive service interaction with the internet of things, *IEEE Internet Computing* 13 (6) (2009) 74–81.
- [49] A. Ilic, T. Staake, E. Fleisch, Using sensor information to reduce the carbon footprint of perishable goods, *IEEE Pervasive Computing* 8 (1) (2009) 22–29.
- [50] A. Dada, F. Thiesse, Sensor applications in the supply chain: the example of quality-based issuing of perishables, in: *Proceedings of Internet of Things 2008*, Zurich, Switzerland, May 2008.

- [51] D. Reilly, M. Welsman-Dinelle, C. Bate, K. Inkpen, Just point and click? Using handhelds to interact with paper maps, in: Proceedings of ACM MobileHCI'05, University of Salzburg, Austria, September 2005.
- [52] R. Hardy, E. Rukzio, Touch & interact: touch-based interaction of mobile phones with displays, in: Proceedings of ACM MobileHCI '08, Amsterdam, The Netherlands, September 2008.
- [53] A.M. Vilamovska, E. Hattziandreu, R. Schindler, C. Van Oranje, H. De Vries, J. Krapelse, RFID Application in Healthcare – Scoping and Identifying Areas for RFID Deployment in Healthcare Delivery, RAND Europe, February 2009.
- [54] C. Buckl, S. Sommer, A. Scholz, A. Knoll, A. Kemper, J. Heuer, A. Schmitt, Services to the field: an approach for resource constrained sensor/actor networks, in: Proceedings of WAINA'09, Bradford, United Kingdom, May 2009.
- [55] P. Spiess, S. Karnouskos, D. Guinard, D. Savio, O. Baecker, L. Souza, V. Trifa, SOA-based integration of the internet of things in enterprise services, in: Proceedings of IEEE ICWS 2009, Los Angeles, Ca, USA, July 2009.
- [56] E. Welbourne, L. Battle, G. Cole, K. Gould, K. Rector, S. Raymer, M. Balazinska, G. Borriello, Building the internet of things using RFID: the RFID ecosystem experience, IEEE Internet Computing 13 (3) (2009) 48-55.
- [57] SENSEI FP7 Project, Scenario Portfolio, User and Context Requirements, Deliverable 1.1, <<http://www.sensei-project.eu/>>.
- [58] Ortiz, A. M., D. Hussein, S. Park, S. N. Han, and N. Crespi. 2014. The cluster between Internet of things and social networks: Review and research challenges. IEEE Internet of Things Journal 1 (3): 206– 215.
- [59] Taivalsaari, A. and T. Mikkonen. 2017. A roadmap to the programmable world: Software challenges in the IoT era. IEEE Software 34 (1): 72– 80.
- [60] Serbanati, A., C. Maria Medaglia, and U. Biader Ceipidor. 2011. Building Blocks of the Internet of Things.
- [61] Al-Fuqaha, A., M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash. 2015. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. IEEE Communications Surveys Tutorials 17 (4): 2347– 76. doi:10.1109/COMST.2015.2444095.
- [62] Alur, R., E. Berger, A. W. Drobnis, L. Fix, K. Fu, G. D. Hager, D. Lopresti, et al. 2016. Systems computing challenges in the Internet of things. ArXiv Preprint ArXiv:1604.02980. <http://arxiv.org/abs/1604.02980>.
- [63] Borgia, E. 2014. The Internet of things vision: Key features, applications and open issues. Computer Communications 54: 1– 31.
- [64] Miorandi, D., S. Sicari, F. De Pellegrini, and I. Chlamtac. 2012. Internet of things: Vision, applications and research challenges. Ad Hoc Networks 10 (7): 1497– 1516.
- [65] Perera, C., A. Zaslavsky, P. Christen, and D. Georgakopoulos. 2014. Context aware computing for the Internet of things: A survey. IEEE Communications Surveys and Tutorials 16 (1): 414– 454.
- [66] Foster, T. 2017. Regulation of the Internet of things. Accessed January 17. <http://www.scl.org/site.aspx?i=ed47967>.

- [67] <https://eurlex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?qid=1493140462765&uri=CELEX:32016R0679>.
- [68] Skerrett, I. 2016. IoT trends to watch in 2017. December 19. <https://ianskerrett.wordpress.com/2016/12/19/iot-trends-to-watch-in-2017/>.
- [69] Maddox, T. 2017. 9 IoT Global Trends for 2017. TechRepublic . January 2. <http://www.techrepublic.com/article/9-iot-global-trends-for-2017/>.
- [70] Gubbi, J., et al. 2013. Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems* 29 (7): 1645– 1660.
- [71] Mukherjee, A., H. S. Paul, S. Dey, and A. Banerjee. 2014. Angels for distributed analytics in iot. In *2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT)* , Seoul, South Korea, 6– 8 March, 565– 570.
- [72] Hassan, Q. F. 2016a. *Innovative Research and Applications in Next-Generation High Performance Computing* . Hershey, PA: IGI Global.
- [73] Satyanarayanan, M., et al. 2015. Edge analytics in the Internet of things. *IEEE Pervasive Computing* 14 (2): 24– 31.
- [74] Lea R. and M. Blackstock. 2014. City hub: A cloud-based iot platform for smart cities. In *2014 IEEE 6th International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CloudCom)* , Singapore, 15 December 2014, 799– 804.
- [75] Hassan, Q. F. 2016b. An outlook into novel concepts of high performance computing. In *Innovative Research and Applications in Next-Generation High Performance Computing* , xxiii– lii. Hershey, PA: IGI Global.
- [76] Rehman, M. H., C. S. Liew, and T. Y. Wah. 2014a. UniMiner: Towards a unified framework for data mining. In *Fourth World Congress on Information and Communication Technologies (WICT)* , Bandar Hilir, Malaysia, December 2014, 134– 139.
- [77] Sherchan W., P. P. Jayaraman, S. Krishnaswamy, A. Zaslavsky, S. Loke, and A. Sinha. 2012. Using on-the-move mining for mobile crowdsensing. In *2012 IEEE 13th International Conference on Mobile Data Management (MDM)* , Bengaluru, Karnataka, India, 23 July 2012, 115– 124.
- [78] Rehman, M. H., A. Batool, and A. R. Khan. 2016. Big data analytics in mobile and cloud computing environments. In *Innovative Research and Applications in Next-Generation High Performance Computing* , 349– 367. Hershey, PA: IGI Global.
- [79] Bonomi, F., et al. 2014. Fog computing: A platform for Internet of things and analytics. In *Big Data and Internet of Things: A Roadmap for Smart Environments* , 169– 186. Berlin: Springer International Publishing.
- [80] Perera, C., P. P. Jayaraman, A. Zaslavsky, D. Georgakopoulos, and P. Christen. 2014. Mosden: An internet of things middleware for resource constrained mobile devices. In *2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)* , Waikoloa, HI, 6 January 2014, 1053– 1062.
- [81] Jayaraman, P. P., C. Perera, D. Georgakopoulos, S. Dustdar, D. Thakker, and R. Ranjan. 2017. Analytics-as-a-service in a multi-cloud environment through semantically-enabled hierarchical data processing. *Software: Practice and Experience* , 47 (8): 1139– 1156.

- [82] ur Rehman M. H., C. Sun, T. Y. Wah, A. Iqbal, P. P. Jayaraman. 2016. Opportunistic computation offloading in mobile edge cloud computing environments. In 2016 17th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM) , Porto, Portugal, 13 June 2016, vol. 1, 208– 213.
- [83] Rehman, M. H., V. Chang, A. Batool, and Y. W. Teh. 2016. Big data reduction framework for value creation in sustainable enterprises. *International Journal of Information Management* 36 (6): 917– 928.
- [84] Delen, D. and H. Demirkan. 2013. Data, information and analytics as services. *Decision Support Systems* 55 (1): 359– 363.
- [85] Waller, M. A. and S. E. Fawcett. 2013. Data science, predictive analytics, and big data: A revolution that will transform supply chain design and management. *Journal of Business Logistics* 34 (2): 77– 84.
- [86] Basu, A. 2013. Five pillars of prescriptive analytics success. *Analytics Magazine* , 8– 12.
- [87] Wilkerson, G. and A. Gupta. 2016. Sports injuries and prevention analytics: Conceptual framework & research opportunities. Presented at AMCIS 2016 Proceedings , San Diego, Chili.
- [88] Jayaraman, P. P., J. B. Gomes, H. L. Nguyen, Z. S. Abdallah, S. Krishnaswamy, and A. Zaslavsky. 2014. Cardap: A scalable energy-efficient context aware distributed mobile data analytics platform for the fog. In *East European Conference on Advances in Databases and Information Systems* , Springer, Prague, Czech Republic, 7 September 2014, 192– 206.
- [89] Khan, A. U. R., M. Othman, A. N. Khan, S. Akhtar, and S. A. Madani. 2015. MobiByte: An application development model for mobile cloud computing. *Journal of Grid Computing* 13 (4): 605– 628.
- [90] Khan, A. U.R., M. Othman, S. A. Madani, and S. U. Khan. 2014. A survey of mobile cloud computing application models. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 16 (1): 393– 413.
- [91] Fan, Y. J., Y. H. Yin, L. Da Xu, Y. Zeng, and F. Wu. 2014. IoT-based smart rehabilitation system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 10 (2): 1568– 1577.
- [92] Mavromoustakis, C. X., G. Mastorakis, and J. M. Batalla. 2016. *Internet of Things (IoT) in 5G Mobile Technologies* . Berlin: Springer.
- [93] Rehman, M. H., C. S. Liew, T. Y. Wah, J. Shuja, and B. Daghighi. 2015. Mining personal data using smartphones and wearable devices: A survey. *Sensors* 15 (2): 4430– 4469.
- [94] Haghghi, P. D., S. Krishnaswamy, A. Zaslavsky, M. M. Gaber, A. Sinha, and B. Gillick. 2013. Open mobile miner: A toolkit for building situation-aware data mining applications. *Journal of Organizational Computing and Electronic Commerce* 23 (3): 224– 248.
- [95] Daghighi, B., M. L. M. Kiah, S. Iqbal, M. H. Rehman, and K. Martin. 2017. Host mobility key management in dynamic secure group communication. *Wireless Networks* : 1– 19.
- [96] Daghighi, B., M. L. M. Kiah, S. Shamshirband, and M. H. Rehman. 2015. Toward secure group communication in wireless mobile environments: Issues, solutions, and challenges. *Journal of Network and Computer Applications* 50: 1– 14.

- [97] Rehman, M. H., V. Chang, A. Batool, and Y. W. Teh. 2016. Big data reduction framework for value creation in sustainable enterprises. *International Journal of Information Management* 36 (6): 917– 928.
- [98] Perera, C., A. Zaslavsky, P. Christen, and D. Georgakopoulos. 2014. Sensing as a service model for smart cities supported by Internet of things. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies* 25 (1): 81– 93.
- [99] Zahraa Said Abdallah , Mohamed Medhat Gaber, Bala Srinivasan*and Shonali Krishnaswamy. *StreamAR: Incremental and Active Learning with Evolving Sensory Data for Activity Recognition*
- [100] Shuja, J., A. Gani, M. H. Rehman, E. Ahmed, S. A. Madani, M. K. Khan, and K. Ko. 2016. Towards native code offloading based MCC frameworks for multimedia applications: A survey. *Journal of Network and Computer Applications* 75: 335– 354.
- [101] Sutaria, R. and R. Govindachari. 2013. Understanding the Internet of things, *Electronic Design* , May 1, 2013.
- [102] Manyika, J., M. Chui, P. Bisson, J. Woetzel, R. Dobbs, J. Bughin, and D. Aharon. 2015. Unlocking the potential of the Internet of things, McKinsey Global Institute Report, McKinsey, Washington, DC.
- [103] Scarrone, E. and D. Boswarthick. 2012. Welcome to the world of standards: Overview of ETSI TC M2M activities. https://portal.etsi.org/m2m/M2M_presentation.pdf.
- [104] Veer, H. and A. Wiles. 2006. Achieving technical interoperability: The ETSI approach, ETSI White Paper, European Telecommunications Standards Institute, Valbonne, France, vol. 3.
- [105] Walewski, J., et al. 2011. The Internet-of-things architecture, European Commission, Brussels.
- [106] Keysight Technologies. 2015. Battery life challenges in IoT wireless sensors and the implications for test, Keysight Technologies.
- [107] Keysight Technologies. 2016. IoT: With great power comes great challenges, Keysight Technologies.
- [108] ISO/IEC JTC 1. 2014. Internet of things (IoT), Preliminary Report.
- [109] Ray, A. 2015. Internet of things: Tomorrow is today, CIO Review (India Edition) , December 2015, <https://www.cioreviewindia.com/magazine/Internet-of-Things--Tomorrow-is-Today-JHCR602293226.html>.
- [110] Wong, W. 2014. IoT— The Industrial Way, O’ Reilly. *Electronic Design*.
- [111] Rahman, A. 2015. Comparison of Internet of Things (IoT) Data Link Protocols , 1st ed. Student Report, Last modified on November 30, 2015, https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse57015/ftp/iot_dlc.pdf.
- [112] Bandara, D. 2016. Other types of networks: Bluetooth, Zigbee, & NFC. <http://www.slideshare.net/DilumBandara/other-types-of-networks-2015-3>.
- [113] Andersson, M. 2014. Use case possibilities with Bluetooth Low Energy in IoT applications, Ublox Whitepaper, 1– 16. http://www.spezial.de/sites/default/files/bluetoothlowenergy-iot-applications_whitepaper_ubx-14054580.pdf.

- [114] Gubbi, J., R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswamia. 2013. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions, *Future Generation Computer Systems* , 29 (7).
- [115] Bahga, A. and V. Madiseti. 2015. *Internet of Things: A Hands-On Approach* , Hyderabad, India: Orient Blackswan Private Limited.
- [116] i-SCOOP. 2017. LoRaWAN across the globe: LoRa Internet of things networks overview. Accessed January 31. <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things/iot-network-lora-lorawan/>.
- [117] Al-Fuqaha, A., M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash. 2015. Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols and applications, *IEEE Communications Surveys and Tutorials* 17(4).
- [118] Gazis V., G. Manuel, H. Marco, L. Alessandro, M. Kostas, W. Alexander, Z. Florian, and V. Emmanouil. 2015. A survey of technologies for the Internet of things, Presented at International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC) . University of Dubrovnik, Dubrovnik, Croatia.
- [119] Wong, B. 2016. These software trends will influence IoT strategies, *Electronic Design* , April 22, 2016.
- [120] Salman, T. 2016. Internet of things protocols and standards. http://www.cse.wustl.edu/~jain/cse570-15/ftp/iot_prot/.
- [121] Vasseur, J. P., et al. 2011. RPL: The IP routing protocol designed for low power and lossy networks, IPSO Alliance. <http://www.ipso-alliance.org/wp-content/media/rpl.pdf>.
- [122] RS Components. 2015. 11 Internet of things (IoT) protocols you need to know about, April 20, 2015. <https://www.rs-online.com/designspark/eleven-internet-of-things-iot-protocols-you-need-to-know-about>.
- [123] IETF. 2017a. IPv6 over networks of resource-constrained nodes. <https://datatracker.ietf.org/wg/6lo/charter/>.
- [124] IETF. 2017b. IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4e. <https://datatracker.ietf.org/wg/6tisch/about/>.
- [125] Greengard, S. 2015. *Internet of Things* , MIT Press, Cambridge, MA.
- [126] Cole, B. 2011. UDP and the embedded wireless Internet of things. <http://www.embedded.com/electronics-blogs/cole-bin/4229531/UDP---the-embedded-wireless--Internet-of-Things>.
- [127] Chen, S., H. Xu, D. Liu, B. Hu, and H. Wang. 2014. A vision of IoT: Applications, challenges, and opportunities with China perspective, *IEEE Internet of Things Journal* 1(4).
- [128] vFabric-Team. 2016. Choosing your messaging protocol: AMQP, MQTT, or STOMP, VMware vFabric Blog, VMware Blogs. <http://blogs.vmware.com/vfabric/2013/02/choosing-your-messaging-protocol-amqpmqtt-or-stomp.html>.
- [129] Schneider, S. 2013. Understanding the protocols behind the Internet of things, *Electronic Design* , October 9, 2013.
- [130] Stansberry, J. 2015. MQTT and CoAP: Underlying protocols for the IoT, *Electronic Design*, October 7, 2015.

- [131] Ishaq, I., J. Hoebeke, I. Moerman, and P. Demeester. 2016, Experimental evaluation of unicast and multicast CoAP group communication, *Sensors (Basel)* 16 (7).
- [132] Pardo-Castellote, G. 2008. Introduction to DDS, Presented at OMG Real-Time Workshop, Washington DC, July 2008.
- [133] Parizo, C. 2014. IoT technology can revive interest in JMS: Top five use cases for Java messaging, November 24 2014. Accessed January 31.
<http://searchmicroservices.techtarget.com/photostory/2240235284/Top-five-use-cases-for-Java-messaging/5/IoT-technology-can-revive-interest-in-JMS>.
- [134] Minoli, D. 2013. Building the Internet of Things with IPv6 and MIPv6 , 1st ed., Hoboken, NJ: Wiley.
- [135] Jaisinghani, D. and P. Maini. 2013. CoAP: Constrained Application Protocol, April 5.
<https://www.iiitd.edu.in/~amarjeet/EmSys2013/CoAPv5.1.pdf>.
- [136] Johnson, S. 2017. Constrained application protocol: CoAP is IoT' s “ modern” protocol, IoT Agenda. Accessed January 31.
<http://internetofthingsagenda.techtarget.com/feature/Constrained-Application-Protocol-CoAP-is-IoTs-modern-protocol>.
- [137] Uber Developers. 2017. Riders API reference. Accessed January 31.
<https://developer.uber.com/docs/api-overview>.
- [138] En.wikipedia.org. 2017. Internet of things. Accessed January 31.
https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_things.
- [139] Corsaro, A. 2014. Building the Internet of things with DDS, PrismTech White Paper, PrismTech, Woburn, MA.
- [140] Schmidt, D. C. 2016. Accelerating the industrial Internet with the OMG Data Distribution Service, White Paper.
https://www.rti.com/whitepapers/OMG_DDS_Industrial_Internet.pdf.
- [141] Foster, A. 2017. Using DDS for scalable, high performance, real-time data sharing between medical devices in next generation healthcare systems. Accessed January 31.
<http://www.prismtech.com/sites/default/files/documents/DDS-Healthcare-Medical-WP-050914.pdf>.
- [142] Foster, A. 2015. Messaging technologies for the industrial Internet and the Internet of things, White Paper, PrismTech, Woburn, MA, vol. 1.
- [143] Sovani, K. 2017. Which is the best protocol to use for IOT implementation: MQTT, CoAP, XMPP, SOAP, UPnP— Quora. Accessed January 31.
<https://www.quora.com/Which-is-the-best-protocol-to-usefor-IOT-implementation-MQTT-CoAP-XMPP-SOAP-UPnP>.
- [144] Wang, P., H. Wang, and W. Wu. 2014. Design and implementation of XMPP for wireless sensor networks based on IPv6, Presented at International Conference on Logistics Engineering , Management and Computer Science . Shenyang, China
- [145] Postscapes. n.d. IoT standards and protocols. <https://www.postscapes.com/internet-of-things-protocols/>.
- [146] Barrett, K. 2016. What can you do with XMPP, O' Reilly FYI Blog.
<http://fyi.oreilly.com/2009/05/what-canyou-do-with-xmpp.html>.
- [147] Open AMQ. 2009. Enterprise AMPQ messaging. <http://www.openamq.org/doc:amqp-background>.

- [148] DZone/Java Zone. 2016. All about JMS messages. <https://dzone.com/articles/all-about-jms-messages>.
- [149] Xavient Information Systems. 2016. Introduction to messaging technologies. <https://techblog.xavient.com/introduction-to-messaging/>.
- [150] Yomas, A. K. J. and E. J. Sebastian. 2015. A review on IoT protocols for long distance and low power, IRACST— Engineering Science and Technology: An International Journal (ESTIJ) 5 (4): 2250– 3498.
- [151] Radio Electronics. 2016. LoRa wireless for M2M and IoT. <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/lora/basics-tutorial.php>.
- [152] RF Wireless World. 2012. Sigfox wireless technology basics in M2M and IoT. <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/SIGFOX-technology-basics.html>.
- [153] Bormann, C., et al. 2016. CoAP (Constrained Application Protocol) over TCP, TLS, and WebSockets, draftietf-core-coap-tcp-tls-04. <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-core-coap-tcp-tls-04.html>.

Συντομογραφίες - Αρκτικόλεξα – Ακρωνύμια

3GPP	Third Generation Partnership Project
6LoWPAN	IPv6 over Low-Power Personal Area Networks
AIOTI	Alliance for the Internet of Things
AMQP	Advanced Message Queuing Protocol
API	Application Program Interface
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses
ARM	Architectural Reference Model
ATIS	Alliance for Telecommunications Industry Solutions
BACnet	Building Automation and Control Network
BAN	Personal Area Network
BLE	Bluetooth Low Energy
CARDAP	Context Aware Real-time Data Analytics Platform
CCSA	China Communications Standards Association
CDMA	Code Division Multiple Access
CEN	European Committee for Standardization
CENELEC	European Committee for Electrotechnical Standardization
CM	Conceptual Model
COAP	Constrained Application Protocol
Connected LP	Connected Living Programme
D2D	Device-to-Device
DDS	Data Distribution Service
DODAG	Destination-Oriented Directed Acyclic Graph
DOS	Denial of Service
EC	European Commission
EDGE	Enhanced Data for Global Evolution
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU	European Union
FCAPS	Fault, Configuration, Accounting, Performance, and Security
FP7	7th Framework Programme for Research and Technological Development
GDPR	General Data Protection Regulation
GPRS	General Packet Radio Service
GSI	Global Standards Initiative
GSM	Global System for Mobile Communication
GSMA	GSM Association
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEEE-SA	IEEE Standards Association
IERC	IoT European Research Cluster
IETF	Internet Engineering Task Force
IETF	Internet Engineering Task Force
IIAF	Industrial Internet Architecture Framework
IIC	Industrial Internet Consortium
IIS	Industrial Internet Systems
IoT	Internet of things
IoT-A	Internet of things Architecture

IoT-GSI	Internet of Things Global Standards Initiative
IoT-RA	Internet of things Reference Architecture
IPv6	Internet Protocol Version 6
IRA	Industrial Internet Reference Architecture
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ISO	International Organization for Standardization
ISO/IEC	International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission
ITU	International Telecommunications Union
ITU-T	International Telecommunications Union Telecommunication Standardization Sector
JMS	Java Messaging Service
JTC1	Joint Technical Committee 1
LAN	local area network
LLN	Low-power and Lossy Networks
LoRa	Low Power Long Range
LPWA	Low-Power Wide Area
LPWAN	Low-Power wide area network
LR-WPAN	Low-Rate Wireless Personal Area Network
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine-to-Machine
MEC	Mobile Edge Computing
MES	Manufacturing Execution System
MODSEN	Mobile Sensor Data Processing Engine
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NB-IoT	NarrowBand-Internet of thing
NFC	Near-Field Communication
OPC	Open Platform Communications
OSI	Open Systems Interconnection
P2C	Person-to-Computer
P2C	Person-to-Computer
PAN	Personal Area Network
RA	Reference Architecture
RAMI 4.0	Reference Architecture Model for Industrie 4.0
RF	Radio Frequency
RFID	Radio-Frequency Identification
RILA	Reference IoT Layered Architecture
RM	Reference Model
SBC	Session Border Controller
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SDO	Standards Development Organizations
SG 20	Study Group 20
SNRA	Sensor Network Reference Architecture
TCO	Total Cost of Ownership
TCP	Transmission Control Protocol
TSCH	Time-Slotted Channel-Hopping
TSDSI	Telecommunications Standards Development Society of India
TTA	Telecommunications Technology Association
TTC	Telecommunication Technology Committee

UDP	User Datagram Protocol
UDP	User Datagram Protocol
UHF	Ultra-HighFrequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications Service
UNB	Ultra-Narrowband
WAN	wide area network
WSN	Wireless Sensor Network
XMPP	Extensible Messaging and Presence Protocol