



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

**Επισκόπηση της χρήσης της Αλυσίδας Συστοιχίας
(Blockchain) στο IoT**

(Survey on the use of Blockchain in IoT)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΧΑΡΠΑΝΤΙΔΗ ΝΙΚΟΛΑΟΥ

Επιβλέπων: Αν. Καθηγητής Κρητικός Κυριάκος

Μέλη εξεταστικής επιτροπής: Καθηγητής Γκουμόπουλος Χρήστος, Αν. Καθηγητής Σκούτας Δημήτριος

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη σύζευξη των τεχνολογιών Blockchain και Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT), εστιάζοντας στις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις, τις τεχνικές προσεγγίσεις που έχουν προταθεί, και τις εφαρμογές της σύζευξης αυτής σε κρίσιμους τομείς, όπως η υγεία, οι έξυπνες πόλεις, η γεωργία και η εφοδιαστική αλυσίδα. Μέσα από μια συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση, η εργασία εντοπίζει τις κυριότερες εφαρμογές, αξιολογεί συγκριτικά τις επιλεγμένες προσεγγίσεις με βάση πολλαπλά κριτήρια και αναδεικνύει τόσο τα οφέλη όσο και τις προκλήσεις που απορρέουν από τη σύζευξη των δύο τεχνολογιών. Η ανάλυση δομείται γύρω από ερευνητικά ερωτήματα που αφορούν την τεχνολογική ενσωμάτωση, την ενίσχυση της ασφάλειας και της διαλειτουργικότητας, τις τεχνικές δυσκολίες (όπως η επεκτασιμότητα και η κατανάλωση ενέργειας), αλλά και την πρακτική υλοποιησιμότητα των λύσεων που έχουν προταθεί. Η εργασία προσφέρει κριτήρια σύγκρισης, πίνακες αξιολόγησης ανά θεματική κατηγορία, καθώς και συμπεράσματα, τόσο τοπικά ανά κατηγορία όσο και καθολικά, ως προς την αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα των προσεγγίσεων.

Επιπρόσθετα, η εργασία παρουσιάζει τα σημαντικότερα ερευνητικά κενά, όπως η έλλειψη προτύπων, οι νομικές και ρυθμιστικές προκλήσεις, καθώς και η ανάγκη για πραγματικές υλοποιήσεις. Τέλος, προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, με έμφαση στην ανάπτυξη ελαφριών αρχιτεκτονικών blockchain, την ενσωμάτωση τεχνολογιών, όπως το edge/fog computing, και την τήρηση πλαισίων κανονιστικής συμμόρφωσης. Η εργασία στοχεύει να αποτελέσει ένα οργανωμένο και χρήσιμο σημείο αναφοράς για την επιστημονική κοινότητα, τη βιομηχανία/αγορά και τους τεχνολόγους που ασχολούνται με την ενοποίηση των τεχνολογιών IoT και Blockchain.

Λέξεις κλειδιά: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση, Διαδίκτυο των Πραγμάτων, Αλυσίδα Συστοιχίας, Ασφάλεια και Ιδιωτικότητα, Έξυπνες Εφαρμογές, Σύζευξη Τεχνολογιών.

Abstract

This thesis explores the convergence of Blockchain and the Internet of Things (IoT) technologies, focusing on their mutual interactions, technical integration approaches, and real-world applications across key domains, such as healthcare, smart cities, agriculture, and supply chains. Through a systematic literature review, the study identifies major application areas, performs a comparative evaluation of the selected approaches using multiple criteria, and highlights both the benefits and challenges associated with combining these two technologies. The analysis is structured around specific research questions concerning technological integration, enhancement of security and interoperability, technical difficulties, such as scalability and energy consumption, and the practical feasibility of the proposed solutions. The thesis includes comparison criteria, category-specific evaluation tables, and conclusive insights, both at the global and the local level of each category, into the performance and effectiveness of existing solutions.

Furthermore, the thesis presents key research gaps, including the lack of standards, legal and regulatory concerns, and the limited presence of large-scale real-world deployments. It also outlines future research directions, emphasizing the need for lightweight blockchain architectures, the adoption of edge/fog computing models, and compliance with data protection frameworks.

This work aims to serve as a structured and valuable reference for researchers, the industry and technologists working on the integration of IoT and Blockchain technologies.

Keywords: Literature Review, Internet of Things - IoT, Blockchain, Security and Privacy, Smart Applications, Technology Integration.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

1.1 Blockchain και Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT)	11
1.2 Συνεισφορά της Πτυχιακής Εργασίας	11
1.3 Δομή της Αναφοράς	12

Κεφάλαιο 2. Μεθοδολογία Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης

2.1 Διαδικασία Ανασκόπησης	15
2.2 Σκοπός Επισκόπησης και Ερευνητικά Ερωτήματα	15
2.3 Αναζήτηση Άρθρων	17
2.4 Φιλτράρισμα Άρθρων	18
2.5 Ποσοτική Ανάλυση	19
2.5.1 Κατανομή Πηγών ανά Τύπο	19
2.5.2 Κατανομή Άρθρων ανά Εκδοτικό Φορέα	20
2.5.3 Χρονική Κατανομή Πηγών (2013–2024)	22
2.5.4 Συμπεράσματα Ποσοτικής Ανάλυσης	22

Κεφάλαιο 3. Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT)

3.1 Ορισμός του IoT	25
3.2 Ιστορική Αναδρομή	25
3.3 Χαρακτηριστικά	27
3.4 Αρχιτεκτονικές του IoT	28
3.5 Πρωτόκολλα του Διαδικτύου των Πραγμάτων	38

3.6 Οφέλη και Εφαρμογές	43
3.6.1 Εφαρμογές του IoT	44
3.6.2 Οφέλη του IoT	46
3.7 Μειονεκτήματα και Προβλήματα	56
3.7.1 Ασφάλεια και Ευπάθειες στο IoT	57
3.7.2 Έλλειψη Προστασίας Προσωπικών Δεδομένων	58
3.7.3 Έλλειψη Τυποποίησης και Προβλήματα Διαλειτουργικότητας	59
3.7.4 Υψηλό Κόστος Εγκατάστασης και Συντήρησης	59
3.7.5 Ελλιπές Νομικό Πλαίσιο και Ζητήματα Διακυβέρνησης	60
3.7.6 Ενεργειακή Κατανάλωση και Διαχείριση Πόρων	61
3.7.7 Κίνδυνοι από Αποτυχίες και Συμβατότητα Υλικού και Λογισμικού	62
3.7.8 Εξάρτηση από τη Συνδεσιμότητα και Αστάθεια Δικτύου	63
3.7.9 Προβλήματα Κλιμάκωσης και Μελλοντικής Επέκτασης	63
3.7.10 Χαμηλό Επίπεδο Εκπαίδευσης και Ευαισθητοποίησης των Χρηστών	64
 Κεφάλαιο 4. Αλυσίδα Συστοιχίας (Blockchain)	
4.1 Ορισμός Blockchain	67
4.2 Ιστορική Αναδρομή	68
4.3 Χαρακτηριστικά	69
4.4 Αρχιτεκτονική του Blockchain	71
4.5 Δομή Μπλοκ στο Blockchain	75
4.6 Τύποι Blockchain	76
4.7 Πρωτόκολλα και Μηχανισμοί Συναίνεσης	78

4.8 Έξυπνα Συμβόλαια	
4.8.1 Ορισμός & Ανάλυση	80
4.8.2 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί	81
4.9 Πλατφόρμες Blockchain	82
4.10 Εφαρμογές Blockchain	85
4.11 Μειονεκτήματα και Προκλήσεις	
4.11.1 Μειονεκτήματα	89
4.11.2 Προκλήσεις	93
Κεφάλαιο 5. Συγκριτική Αξιολόγηση Προσεγγίσεων	
5.1 Ιεραρχική Κατηγοριοποίηση Επιλεγμένων Πηγών	97
5.2 Σύζευξη Τεχνολογιών Blockchain & IoT	98
5.2.1 Συνεισφορά του Blockchain στο IoT	98
5.2.2 Συνεισφορά του IoT στο Blockchain	102
5.3 Ανάλυση Άρθρων Ανά Κατηγορία	105
5.3.1 Έξυπνα Περιβάλλοντα	105
5.3.2 Βιομηχανία & Εφοδιαστική	108
5.3.3 Έξυπνη Γεωργία	112
5.3.4 Υγεία & Ασφάλεια	115
5.4 Σύγκριση Προσεγγίσεων	119
5.4.1 Κριτήρια Σύγκρισης	119
5.4.2 Αποτελέσματα Σύγκρισης	123
5.4.3 Βασικά Συμπεράσματα	131

Κεφάλαιο 6. Ερευνητικά Κενά και Μελλοντικές Κατευθύνσεις	136
6.1 Περιορισμοί Επεκτασιμότητας και Απόδοσης	138
6.2 Διαλειτουργικότητα και Έλλειψη Προτύπων	139
6.3 Ζητήματα Ιδιωτικότητας και Κανονιστικής Συμμόρφωσης	140
6.4 Ανάγκη για Πραγματικές Υλοποιήσεις και Πειραματικά Αποτελέσματα	141
6.5 Ενιαία Αρχιτεκτονικά Πλαίσια και Διαλειτουργικότητα	142
6.6 Πρακτική Εφαρμοσιμότητα και Υιοθέτηση	143
6.7 Νομικά και Ρυθμιστικά Ζητήματα	143
6.8 Συλλογικά Συμπεράσματα και Ερευνητικές Κατευθύνσεις	145
 Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα	
7.1 Συνεισφορά της Διπλωματικής Εργασίας	148
7.2 Προσωπική Εμπειρία που Αποκομίσθηκε	148
7.3 Σημαντικές Κατευθύνσεις Άμεσης Έρευνας	148
 Κεφάλαιο 8. Αναφορές	150

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Κατανομή πηγών ανά τύπο σε μορφή πίτας	19
Εικόνα 2. Κατανομή ανά εκδοτικό φορέα σε μορφή πίτας	21
Εικόνα 3. Χρονική κατανομή πηγών (2013–2024) σε στήλη	22
Εικόνα 4. Αρχιτεκτονική 3 επιπέδων (3-Layer Architecture)	30
Εικόνα 5. Αρχιτεκτονική 4 επιπέδων (4-Layer Architecture)	30
Εικόνα 6. Αρχιτεκτονική βασισμένη στο υπολογιστικό νέφος (Cloud Computing-Based Architecture)	32
Εικόνα 7. Αρχιτεκτονική 3 επιπέδων (Fog Computing Architecture)	33
Εικόνα 8. Αρχιτεκτονική 5 επιπέδων (Edge Computing Architecture)	35
Εικόνα 9. Αρχιτεκτονική 6 επιπέδων (6-Layer Architecture)	38
Εικόνα 10. Αρχιτεκτονική Blockchain 5 επιπέδων	74
Εικόνα 11. Σύνδεση των μπλοκ	76
Εικόνα 12. Ιεραρχικό δέντρο κατηγοριοποίησης άρθρων	98

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Πίνακας πρωτοκόλλων του IoT	40
Πίνακας 2: Βασικές συνεισφορές του Blockchain στην ενίσχυση των συστημάτων IoT	101
Πίνακας 3: Συνεισφορά του IoT στη λειτουργικότητα και πρακτική αξιοποίηση του Blockchain	104
Πίνακας 4: Πίνακας κριτηρίων αξιολόγησης	120
Πίνακας 5: Ερωτήματα αξιολόγησης προσεγγίσεων	122
Πίνακας 6: Πίνακας αξιολόγησης των αποτελεσμάτων στα Έξυπνα Περιβάλλοντα	123
Πίνακας 7: Πίνακας αξιολόγησης των αποτελεσμάτων στη Βιομηχανία & Εφοδιαστική	126
Πίνακας 8: Πίνακας αξιολόγησης των αποτελεσμάτων στην Έξυπνη Γεωργία	128
Πίνακας 9: Πίνακας αξιολόγησης των αποτελεσμάτων στην Υγεία & Ασφάλεια	130
Πίνακας 10: Καλύτερες εργασίες ανά κατηγορία	133
Πίνακας 11: Εργασίες με περιορισμένη τεχνική πληρότητα	134
Πίνακας 12: Πίνακας ερευνητικών κενών και κατευθύνσεων	137

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1 Blockchain και Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT)

Η ψηφιακή εποχή έχει οδηγήσει στην ταχεία εξάπλωση τεχνολογιών που επιτρέπουν τη διασύνδεση, ανταλλαγή και διαχείριση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Δύο από τις πιο καινοτόμες τεχνολογίες αυτής της εποχής είναι το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) και το Blockchain (Αλυσίδα Συστοιχίας).

Το IoT αποτελεί μια αρχιτεκτονική που επιτρέπει σε «έξυπνες» συσκευές να επικοινωνούν, να συνεργάζονται και να αλληλεπιδρούν αυτόνομα, επιτρέποντας την ανάπτυξη έξυπνων σπιτιών, πόλεων, εργοστασίων και συστημάτων υγείας. Ωστόσο, το τεράστιο εύρος, η ποικιλομορφία και η ετερογένεια των IoT συσκευών, σε συνδυασμό με τους περιορισμένους πόρους τους, καθιστούν ιδιαίτερα δύσκολη τη διαχείριση της ασφάλειας, της ιδιωτικότητας και της διαλειτουργικότητας στο πλαίσιο των έξυπνων συστημάτων που τις ενσωματώνουν. Πολλές συσκευές IoT λειτουργούν με περιορισμένη υπολογιστική ισχύ και δεν υποστηρίζουν εξελιγμένα πρωτόκολλα κρυπτογράφησης, ενώ η ετερογένεια των συσκευών και των προτύπων επικοινωνίας που χρησιμοποιούν καθιστά την ενοποίηση ιδιαίτερα περίπλοκη. Επιπλέον, η συλλογή ευαίσθητων δεδομένων από τις καθημερινές δραστηριότητες δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις για προστασία της ιδιωτικότητας, οι οποίες συχνά παραβλέπονται λόγω κόστους ή έλλειψης κοινών προτύπων.

Από την άλλη πλευρά, το Blockchain, μια τεχνολογία κατακευματισμένου καθολικού (distributed ledger) με έμφαση στην αποκέντρωση, την ακεραιότητα και τη διαφάνεια, έχει προσελκύσει έντονο ενδιαφέρον. Η δυνατότητα αποθήκευσης δεδομένων με ασφάλεια και αμεταβλητότητα, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης κεντρικής αρχής, το καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο για περιβάλλοντα όπου η εμπιστοσύνη μεταξύ μερών δεν είναι δεδομένη. Η σύζευξη των δύο τεχνολογιών μπορεί να προσφέρει λύσεις στα δομικά προβλήματα του IoT: το Blockchain μπορεί να διασφαλίσει την ταυτότητα των συσκευών, να επιτρέψει αξιόπιστη καταγραφή δεδομένων και να υποστηρίξει τη λήψη αυτόνομων αποφάσεων με χρήση έξυπνων συμβολαίων.

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα αυτής της συνδυαστικής προσέγγισης, η εφαρμογή του Blockchain σε περιβάλλοντα IoT συνοδεύεται και από περιορισμούς. Το υψηλό υπολογιστικό κόστος, η κατανάλωση ενέργειας, τα ζητήματα καθυστέρησης (latency) και οι περιορισμένοι πόροι των συσκευών αποτελούν σημαντικές προκλήσεις για τη λειτουργική ενσωμάτωση του Blockchain σε αποκεντρωμένα IoT συστήματα.

1.2 Συνεισφορά της Πτυχιακής Εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποσκοπεί στην εις βάθος διερεύνηση της τεχνολογικής και λειτουργικής διασύνδεσης μεταξύ του Blockchain και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), μέσω μιας συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Η βασική της συνεισφορά εστιάζει στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο το Blockchain μπορεί να ενισχύσει την ασφάλεια, την εμπιστευτικότητα και την επεκτασιμότητα

των IoT εφαρμογών, προσφέροντας αποκεντρωμένες λύσεις υψηλής αξιοπιστίας. Παράλληλα, διερευνάται και η αμφίδρομη επίδραση, δηλαδή ο ρόλος που διαδραματίζει το IoT στην υποστήριξη και ενίσχυση της λειτουργικότητας του Blockchain, κυρίως μέσω της παροχής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και της δημιουργίας νέων εφαρμογών που βασίζονται σε έξυπνα συμβόλαια.

Η εργασία καινοτομεί ως προς τη μεθοδολογική της προσέγγιση, καθώς δεν περιορίζεται σε μια γενική ή θεωρητική παρουσίαση των δύο τεχνολογιών, αλλά προχωρά σε μια πολυεπίπεδη και θεματικά δομημένη αξιολόγηση. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται αναλυτική θεματική κατηγοριοποίηση των υπαρχουσών εφαρμογών που συνδυάζουν IoT και Blockchain, γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των τεχνικών προσεγγίσεων με βάση σαφή και τεκμηριωμένα κριτήρια, ενώ εντοπίζονται επίσης οι σημαντικότερες τεχνικές, λειτουργικές και ερευνητικές προκλήσεις που απασχολούν τη σύγχρονη επιστημονική κοινότητα καθώς και σχετικές ερευνητικές κατευθύνσεις αντιμετώπισής τους.

Η ανάλυση καλύπτει ένα ευρύ φάσμα πρακτικών εφαρμογών σε κρίσιμους τομείς, όπως οι έξυπνες πόλεις, η ψηφιακή υγεία, η εφοδιαστική αλυσίδα και η γεωργική παραγωγή. Μέσω της παρουσίασης πραγματικών παραδειγμάτων, περιπτώσιολογικών μελετών και λειτουργικών μοντέλων, η εργασία στοχεύει να προσφέρει μια σφαιρική εικόνα του επιπέδου ωριμότητας των διαθέσιμων τεχνολογικών λύσεων και να αναδείξει τα πεδία που συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον. Το τελικό αποτέλεσμα φιλοδοξεί να λειτουργήσει ως ένα συγκροτημένο πλαίσιο αναφοράς για ακαδημαϊκούς, επαγγελματίες του χώρου, ερευνητές και τεχνολόγους που ενδιαφέρονται για τη σύζευξη αυτών των δύο ραγδαία αναπτυσσόμενων τεχνολογικών περιοχών.

1.3 Δομή της Αναφοράς

Η παρούσα εργασία διαρθρώνεται σε επτά κεφάλαια, τα οποία συνθέτουν ένα συνεκτικό, τεκμηριωμένο και λογικά οργανωμένο ερευνητικό πλαίσιο. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία της συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Διατυπώνονται τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα, περιγράφεται η στρατηγική αναζήτησης και επιλογής των πηγών, καθώς και τα στάδια φιλτραρίσματος και αξιολόγησης του υλικού.

Το τρίτο κεφάλαιο αναλύει διεξοδικά το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT). Εξετάζονται η ιστορική του εξέλιξη, τα τεχνικά χαρακτηριστικά, οι αρχιτεκτονικές, τα σχετικά πρωτόκολλα, καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας, με έμφαση σε ζητήματα ασφάλειας, ενεργειακής κατανάλωσης και διαλειτουργικότητας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζεται η τεχνολογία Blockchain. Παρουσιάζονται η αρχιτεκτονική και η λειτουργία της, οι τύποι Blockchain, οι μηχανισμοί συναίνεσης, τα έξυπνα συμβόλαια, καθώς και οι βασικές πλατφόρμες και εφαρμογές. Επίσης, αναλύονται τα μειονεκτήματα και οι προκλήσεις που σχετίζονται με την υλοποίησή της.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη συγκριτική αξιολόγηση των τεχνικών προσεγγίσεων που έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία. Οι προσεγγίσεις αυτές οργανώνονται ανά θεματική κατηγορία εφαρμογών

και αξιολογούνται βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων, όπως η ασφάλεια, η αποδοτικότητα και η υλοποιησιμότητα.

Το έκτο κεφάλαιο εντοπίζει τα βασικά ερευνητικά κενά και καταγράφει τις προκλήσεις που αντιμετωπίζει η σύζευξη των τεχνολογιών Blockchain και IoT. Παρουσιάζονται επίσης οι σημαντικότερες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, με έμφαση στη διαλειτουργικότητα, τη συμμόρφωση με πρότυπα και την ανάγκη για πρακτικές υλοποιήσεις.

Τέλος, το έβδομο κεφάλαιο συνοψίζει τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας. Αναδεικνύεται η συμβολή της στην κατανόηση της τεχνολογικής σύγκλισης των δύο πεδίων και διατυπώνονται προτάσεις για την περαιτέρω αξιοποίησή τους στο ερευνητικό και τεχνολογικό πεδίο.

Κεφάλαιο 2 - Συστηματική Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Το δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας εστιάζει στη μεθοδολογική προσέγγιση που υιοθετήθηκε για την ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας και την επιλογή επιστημονικών πηγών σχετικών με τη διασύνδεση του Blockchain και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Η ενότητα αυτή περιγράφει αναλυτικά τα στάδια της έρευνας, τη διαδικασία εντοπισμού και φιλτραρίσματος των άρθρων, καθώς και τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση και κατηγοριοποίησή τους. Επιπλέον, παρουσιάζεται μια πρώτη ποσοτική ανάλυση των επιλεγμένων πηγών, η οποία περιλαμβάνει τον αριθμό των άρθρων καθώς και τη κατανομή τους χρονολογικά, ανά τύπο/είδος και ανά εκδότη.

Η μεθοδολογία ανασκόπησης που ακολουθήθηκε προσδιορίζεται στην Ενότητα 2.1 ενώ τα βασικά βήματά της μαζί με τα αποτελέσματα εφαρμογής τους αναλύονται αντιστοίχως στις Ενότητες 2.2 έως 2.5 του τρέχοντος κεφαλαίου.

2.1 Διαδικασία Ανασκόπησης

Η παρούσα βιβλιογραφική επισκόπηση βασίζεται σε μια μεθοδική και τεκμηριωμένη προσέγγιση [1], με στόχο τη συγκέντρωση και αξιολόγηση επιστημονικών πηγών σχετικών με τη σύζευξη της τεχνολογίας Blockchain με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT).

Η διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βασικά στάδια:

- Διατύπωση ερευνητικών ερωτημάτων, που οριοθετούν το θεματικό πλαίσιο της ανασκόπησης.
- Αναζήτηση επιστημονικών άρθρων και εργασιών σε έγκυρες βάσεις δεδομένων και αποθετήρια, με χρήση συνδυασμένων λέξεων-κλειδιών και φίλτρων.
- Εφαρμογή κριτηρίων ένταξης και αποκλεισμού, για τον εντοπισμό των πλέον συναφών και ποιοτικά έγκυρων πηγών.
- Ποσοτική και θεματική επεξεργασία του τελικού συνόλου, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα και να καλυφθούν τα ερευνητικά ερωτήματα.

Τα επιμέρους στάδια της μεθοδολογίας αναλύονται στις Ενότητες 2.2 έως 2.5, αντίστοιχα. Σημειώνεται πως η Ενότητα 2.5 πραγματοποιεί κυρίως μια ποσοτική ανάλυση του τελικού συνόλου των πηγών. Ενώ περαιτέρω ανάλυση και θεματική επεξεργασία του συνόλου αυτού πραγματοποιείται σε επόμενα κεφάλαια.

2.2 Σκοπός Επισκόπησης και Ερευνητικά Ερωτήματα

Ο σκοπός της παρούσας βιβλιογραφικής επισκόπησης είναι να αναλυθεί αφενός πώς εφαρμόζεται η τεχνολογία blockchain στα διάφορα περιβάλλοντα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT), καθώς και να καταγραφούν οι προσεγγίσεις που έχουν προταθεί για την ενίσχυση της ασφάλειας, της διαλειτουργικότητας και της επεκτασιμότητας σε τέτοια περιβάλλοντα. Αφετέρου, διερευνάται και η αντίστροφη κατεύθυνση, δηλαδή πώς τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του IoT – όπως η αποκέντρωση, η διάχυση αισθητήρων, η επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο και η ενσωμάτωσή τους σε φυσικά περιβάλλοντα – μπορούν να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα, την κλιμακωσιμότητα και τη λειτουργική αξία του blockchain. Μέσα από τη μελέτη δημοσιευμένων επιστημονικών άρθρων και ακαδημαϊκών εργασιών, επιδιώκεται η κατανόηση των τεχνολογικών πλεονεκτημάτων, περιορισμών και

ερευνητικών κενών που προκύπτουν κατά την ενσωμάτωση των δύο τεχνολογιών, σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως τα έξυπνα σπίτια, οι έξυπνες πόλεις, η υγεία, η εφοδιαστική αλυσίδα και η αγροτική παραγωγή.

Η ανασκόπηση οργανώνεται γύρω από τα εξής βασικά ερευνητικά ερωτήματα:

- *Ποιες είναι οι κυριότερες εφαρμογές της τεχνολογίας blockchain στον τομέα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), ανά θεματική κατηγορία;* Το ερώτημα αυτό απαντάται στις Ενότητες 5.1 και 5.3, μέσω της ανάλυσης και κατηγοριοποίησης επιστημονικών προσεγγίσεων σε επιμέρους περιοχές εφαρμογής (π.χ. Έξυπνα Περιβάλλοντα, Βιομηχανία & Εφοδιαστική κ.λπ.).
- *Ποιες τεχνικές προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί για τη σύζευξη των δύο τεχνολογιών και πώς συγκρίνονται μεταξύ τους;* Το ερώτημα αυτό αναλύεται στις Ενότητες 5.2 και 5.4. Συγκεκριμένα, στην Ενότητα 5.2 παρουσιάζονται οι τεχνικές προσεγγίσεις σύζευξης, ειδικότερα μέσω της Υπο-Ενότητας 5.2.1 (συνεισφορά του Blockchain στο IoT) και της Υπο-Ενότητας 5.2.2 (συνεισφορά του IoT στο Blockchain), όπου περιγράφονται τα μοντέλα ενσωμάτωσης, τα επίπεδα αρχιτεκτονικής και οι ρόλοι των κόμβων σε συστήματα που συνδυάζουν τις τεχνολογίες αυτές. Η σύγκριση των τεχνικών προσεγγίσεων σύζευξης πραγματοποιείται στην Ενότητα 5.4 με βάση ένα συγκεκριμένο σύνολο από κριτήρια.
- *Με ποιους τρόπους ενισχύει το Blockchain την ασφάλεια, την εμπιστοσύνη και τη διαλειτουργικότητα στα συστήματα IoT;* Το ερώτημα αυτό καλύπτεται στην Ενότητα 5.2.1, όπου αναλύεται η συμβολή του Blockchain στην ενίσχυση της ασφάλειας, της εμπιστοσύνης και της διαλειτουργικότητας μέσω αποκέντρωσης, διαφάνειας και έξυπνων συμβολαίων. Συμπληρωματικά, εξετάζονται σχετικές προκλήσεις και δυνατότητες στις Ενότητες 6.2, 6.3 και 6.5, όπου αναλύονται οι ανάγκες για διαλειτουργικές λύσεις και ενιαία αρχιτεκτονικά πλαίσια που ενισχύουν την ασφάλεια και τη συνεργασία των συστημάτων.
- *Ποιες είναι οι βασικές τεχνικές και πρακτικές προκλήσεις που εντοπίζονται στη σύζευξη Blockchain και IoT;* Το ερώτημα αυτό απαντάται στο Κεφάλαιο 6. Οι ενότητες στο κεφάλαιο αυτό καλύπτουν τεχνικά εμπόδια (όπως latency, computational cost, storage, scalability), πρακτικά ζητήματα (υλοποιησιμότητα, πρότυπα, ενοποίηση) και θεσμικές/κανονιστικές δυσκολίες.
- *Ποιος είναι ο βαθμός πρακτικής υλοποιησιμότητας και τεχνολογικής ωριμότητας των υφιστάμενων λύσεων;* Το ερώτημα αυτό αξιολογείται στις Ενότητες 6.6 και 6.4, σχετικά με την πρακτική εφαρμοσιμότητα και την ανάγκη για πραγματικές υλοποιήσεις. Επίσης, η Ενότητα 5.4.3 συνθέτει τα συγκριτικά αποτελέσματα και αποτυπώνει τον βαθμό τεχνολογικής ωριμότητας ανά κατηγορία εφαρμογών.
- *Σε ποιον βαθμό έχουν προταθεί κοινά πρότυπα ή πρωτόκολλα για τη διαλειτουργικότητα μεταξύ IoT κόμβων και blockchain συστημάτων;* Το ερώτημα αυτό εξετάζεται κυρίως στην Ενότητα 6.2, όπου αναλύεται η έλλειψη καθολικά αποδεκτών προτύπων και η ανάγκη για διαλειτουργικές λύσεις. Συμπληρωματικά, η Ενότητα 6.5 εστιάζει στην ανάγκη για ενιαία αρχιτεκτονικά πλαίσια, ενώ σχετικές τεχνικές προσεγγίσεις περιγράφονται και στην Ενότητα 5.2.
- *Πώς μπορεί το IoT να συμβάλει στην εξέλιξη ή/και βελτιστοποίηση της λειτουργικότητας του ίδιου του Blockchain;* Το ερώτημα αυτό αναλύεται στην Ενότητα 5.2.2, όπου περιγράφεται η συνεισφορά του IoT στο Blockchain, κυρίως μέσω της παροχής μεγάλης κλίμακας, πραγματικού χρόνου δεδομένων, που μπορούν να αξιοποιηθούν για αυτοματοποίηση μέσω έξυπνων συμβολαίων, καθώς και για τη βελτίωση της αποκέντρωσης και της δυναμικής συμμετοχής

κόμβων στο οικοσύστημα blockchain.

- *Ποιες είναι οι κυριότερες ερευνητικές κατευθύνσεις και προτάσεις για το μέλλον της σύζευξης Blockchain και IoT;* Το ερώτημα αυτό καλύπτεται στην Ενότητα 6.8, όπου συνοψίζονται οι βασικές ερευνητικές κατευθύνσεις. Συμπληρωματικά, ερευνητικές προτάσεις παρέχονται και αναλύονται στις Ενότητες 6.1 έως 6.7, με έμφαση σε θέματα κλιμακωσιμότητας, διαλειτουργικότητας, ασφάλειας, πρακτικής υλοποίησης και ρυθμιστικών πλαισίων.

Η απάντηση στα παραπάνω ερωτήματα επιχειρείται μέσω της ανάλυσης και σύγκρισης των εργασιών (ελληνικών και διεθνών) που επιλέχθηκαν στο πλαίσιο της τρέχουσας ανασκόπησης, με στόχο τη συνολική αποτύπωση του ερευνητικού τοπίου και τον εντοπισμό τεχνολογικών και επιστημονικών τάσεων στο πεδίο.

2.3 Αναζήτηση Άρθρων

Η αναζήτηση των πηγών πραγματοποιήθηκε σε έγκυρες επιστημονικές βάσεις δεδομένων και αποθετήρια, όπως οι Google Scholar, IEEE Xplore, SpringerLink, ResearchGate κλπ, καθώς και στις ψηφιακές βιβλιοθήκες ελληνικών πανεπιστημίων. Για τη διατύπωση των ερωτημάτων αναζήτησης χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός ελληνικών και αγγλικών λέξεων-κλειδιών, προσαρμοσμένων στις επιμέρους θεματικές περιοχές της πτυχιακής εργασίας. Η αναζήτηση βασίστηκε σε Boolean τελεστές (AND, OR) και εφαρμόστηκε χρονολογικό φίλτρο (2009–2024), ώστε να διασφαλιστεί η επιστημονική επικαιρότητα του υλικού.

Ενδεικτικό Boolean μοτίβο αναζήτησης:

(blockchain OR "distributed ledger") AND ("IoT" OR "Internet of Things" OR IIoT OR "smart devices") AND (security OR interoperability OR architecture OR privacy OR implementation OR solution OR method OR approach OR technique).

Αγγλόφωνοι όροι αναζήτησης:

- Blockchain and Internet of Things
- IoT and data security
- Smart Homes and distributed ledger
- Industrial IoT and blockchain
- AgriTech and Blockchain
- Survey and blockchain and IoT
- Blockchain and logistics
- Blockchain and healthcare
- Blockchain and smart cities

Ελληνόγλωσσοι όροι αναζήτησης:

- «Blockchain» και «Διαδίκτυο των Πραγμάτων»
- «Εξυπνα σπίτια» και «Blockchain»
- «Εφοδιαστική αλυσίδα» και «Blockchain»
- «Γεωργία» και «Τεχνολογία IoT»

- «Διαλειτουργικότητα» και «Πρωτόκολλα»
- «Διακυβέρνηση Δεδομένων» και «Έξυπνες Πόλεις»

Οι παραπάνω λέξεις-κλειδιά σχεδιάστηκαν ώστε να εντοπίζουν θεωρητικές, εφαρμοσμένες και ερευνητικές εργασίες που εστιάζουν στη σύζευξη των τεχνολογιών blockchain και IoT, με έμφαση σε θεματικές περιοχές όπως: έξυπνα σπίτια, έξυπνες πόλεις, ασφάλεια και ιδιωτικότητα, logistics, γεωργία, υγεία, διαλειτουργικότητα, και αρχιτεκτονικές. Εκτός από τις επιστημονικές πηγές που εντοπίστηκαν βάσει των παραπάνω όρων, η εργασία αξιοποιεί ορισμένες πρόσθετες πηγές παραδειγμάτων (π.χ. εταιρικές αναφορές, επίσημοι ιστότοποι οργανισμών), με στόχο την ενίσχυση της πρακτικής τεκμηρίωσης. Αυτές δεν αποτελούν προϊόν της συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης, αλλά λειτουργούν επικουρικά ως τεκμήρια εφαρμογής.

2.4 Φιλτράρισμα Άρθρων

Η φάση του φιλτραρίσματος πραγματοποιήθηκε μετά τον αρχικό εντοπισμό των πηγών και είχε ως στόχο τη διασφάλιση της ποιότητας, της συνάφειας και της τεχνικής πληρότητας του υλικού. Από το αρχικό σύνολο των περίπου 80 πηγών, εφαρμόστηκαν τα παρακάτω κριτήρια αποκλεισμού και ποιότητας, τα οποία αφορούν την θεματική συνάφεια με το αντικείμενο της εργασίας, την επιστημονική εγκυρότητα των πηγών, την πληρότητα των τεχνικών πληροφοριών, καθώς και τη σαφήνεια και τη κατανόηση του περιεχομένου.

- *Έλλειψη τεχνικής τεκμηρίωσης:* Αφαιρέθηκαν πηγές που δεν περιλάμβαναν παραδείγματα, αρχιτεκτονικές προσεγγίσεις ή ανάλυση λειτουργικών χαρακτηριστικών της σύζευξης Blockchain–IoT.
- *Έλλειψη συνάφειας με το ερευνητικό αντικείμενο:* Αφαιρέθηκαν πηγές που αναφέρονταν γενικά στο IoT ή το blockchain χωρίς άμεση σύνδεση των δύο τεχνολογιών.
- *Μη επιστημονικός χαρακτήρας:* Αποκλείστηκαν ειδησεογραφικά άρθρα, ιστολόγια, εμπορικά κείμενα και μη αξιολογημένες (non peer-reviewed) εργασίες. Αντιθέτως, έγιναν αποδεκτές πηγές με ακαδημαϊκή αξιοπιστία, όπως άρθρα δημοσιευμένα σε επιστημονικά περιοδικά, αξιολογημένα άρθρα συνεδρίων, βιβλία, κεφάλαια βιβλίων και επιλεγμένες (μεταπτυχιακές/διδακτορικές) διπλωματικές εργασίες με σχετική θεματολογία και τεκμηριωμένη μεθοδολογία.
- *Υπόβαθρο χωρίς ερευνητική προσέγγιση:* Εργασίες που προσέφεραν μόνο θεωρητική περιγραφή του IoT ή του blockchain χωρίς εφαρμοστική ή αναλυτική εστίαση φιλτραρίστηκαν.
- *Ασάφεια & δυσκολία κατανόησης:* Πηγές που παρουσιάζουν σημαντική ασάφεια ή ήταν ιδιαίτερα δυσνόητες, αποκλείστηκαν.

Με βάση την παραπάνω διαδικασία φιλτραρίσματος, επιλέχθηκαν τελικά 52 πηγές. Από αυτές:

- 36 πηγές αξιοποιούνται συστηματικά στη βιβλιογραφική ανασκόπηση.
- 16 πηγές από το τελικό σύνολο των πηγών επιλέχθηκαν με σκοπό να χρησιμοποιηθούν ως παραδείγματα εφαρμογών ή τεκμηρίωσης (π.χ. case studies, επίσημοι ιστότοποι οργανισμών) και

δεν εντάσσονται στο corpus της ανασκόπησης.

Η επόμενη ενότητα ολοκληρώνει τη μεθοδολογική τεκμηρίωση της ανασκόπησης και προετοιμάζει το έδαφος για την ανάλυση των αποτελεσμάτων στα επόμενα κεφάλαια.

2.5 Ποσοτική Ανάλυση

Η παρούσα ποσοτική αποτίμηση στοχεύει στην παρουσίαση βασικών στατιστικών χαρακτηριστικών του συνόλου των 52 πηγών που αξιοποιούνται στη διπλωματική εργασία. Η ανάλυση επικεντρώνεται:

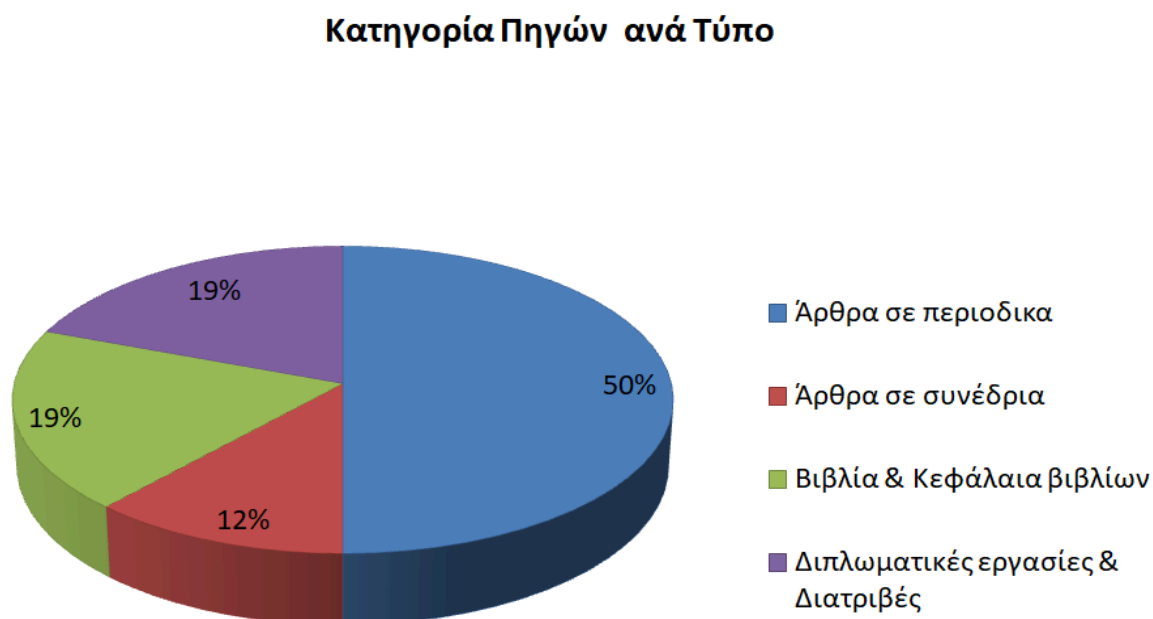
- Στην κατανομή των πηγών ανά τύπο (επιστημονικά άρθρα, διπλωματικές, μεταπτυχιακές και πτυχιακές εργασίες).
- Στην κατανομή των πηγών ανά εκδοτικό τους φορέα,
- Στη χρονολογική κατανομή των πηγών.

2.5.1 Κατανομή Πηγών ανά Τύπο

Η συνολική βιβλιογραφία περιλαμβάνει:

- Άρθρα σε περιοδικα (26)
- Άρθρα σε συνέδρια (6)
- Βιβλία & Κεφάλαια βιβλίων (10)
- Διπλωματικές εργασίες & Διατριβές (10)

Αυτή η κατανομή παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 1. Κατανομή πηγών ανά τύπο σε μορφή πίτας.

Το κυκλικό διάγραμμα απεικονίζει την κατανομή των βιβλιογραφικών πηγών που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη, ταξινομημένων σε τέσσερις βασικές κατηγορίες.

Η κυρίαρχη κατηγορία είναι τα άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά, τα οποία αντιστοιχούν στο 50% του συνόλου των πηγών. Αυτό δείχνει έντονη προσήλωση σε τεκμηριωμένο και αξιολογημένο επιστημονικό υλικό, κάτι που ενισχύει την εγκυρότητα και αξιοπιστία της εργασίας.

Στη δεύτερη θέση, με ίσο ποσοστό 19%, βρίσκονται οι βιβλιογραφικές πηγές που προέρχονται από βιβλία και κεφάλαια βιβλίων, καθώς και οι διπλωματικές εργασίες και διατριβές. Η πρώτη ομάδα προσφέρει θεωρητικό υπόβαθρο και εδραιωμένες επιστημονικές γνώσεις, ενώ η δεύτερη αποτελεί πηγή σύγχρονης ερευνητικής δραστηριότητας, ιδιαίτερα διότι αφορά διδακτορικές διατριβές ή μεταπτυχιακές εργασίες με σαφή μεθοδολογική προσέγγιση.

Τέλος, τα άρθρα που προέρχονται από συνέδρια αποτελούν το 12% του συνόλου, ποσοστό που αντικατοπτρίζει τη χρήση πρόσφατων και εφαρμοσμένων ερευνητικών εργασιών. Αν και το ποσοστό είναι μικρότερο σε σύγκριση με τις υπόλοιπες κατηγορίες, παραμένει σημαντικό, καθώς τα συνέδρια συχνά φιλοξενούν καινοτόμες ιδέες και τρέχουσες επιστημονικές τάσεις.

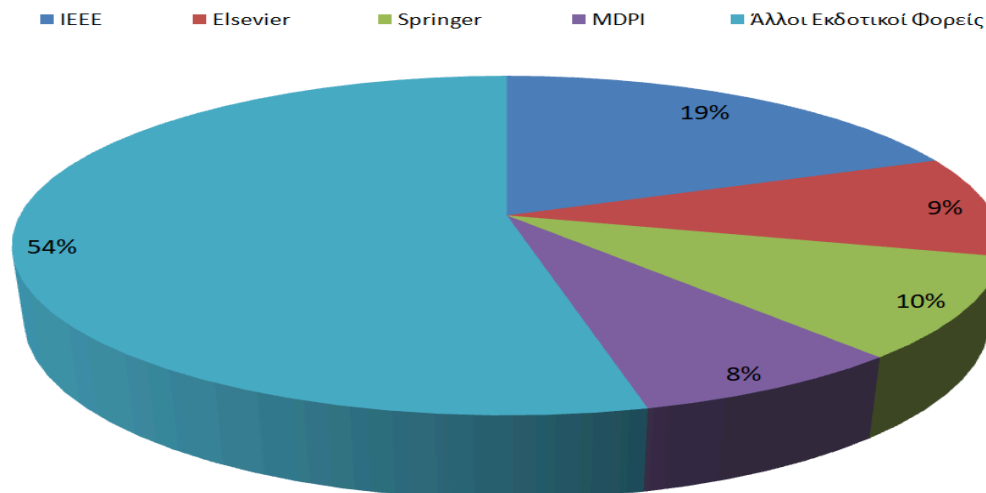
Συνολικά, το διάγραμμα δείχνει μια ισορροπημένη χρήση τόσο καθιερωμένων όσο και πιο εξειδικευμένων ή σύγχρονων πηγών, στοιχείο που συμβάλλει στη συνολική ποιότητα και εγκυρότητα της ερευνητικής εργασίας.

2.5.2 Κατανομή Άρθρων ανά Εκδοτικό Φορέα

Στο υποσύνολο των 52 πηγών που αξιολογούνται, οι κυριότεροι εκδοτικοί φορείς είναι:

- IEEE (10)
- Elsevier (5)
- Springer (5)
- MDPI (4)
- Άλλοι Εκδοτικοί Φορείς (28)

Ποσοστά άρθρων ανά εκδοτικό φορέα



Εικόνα 2. Κατανομή ανά εκδοτικό φορέα σε μορφή πίτας.

Το κυκλικό διάγραμμα απεικονίζει την κατανομή των επιστημονικών άρθρων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη με βάση τον εκδότη τους.

Η πλειοψηφία των άρθρων (54%) προέρχεται από την κατηγορία «Άλλοι Εκδοτικοί Φορείς» η οποία περιλαμβάνει εκδότες πρακτικών συνεδρίων, βιβλίων και περιοδικών, γεγονός που καταδεικνύει την πολυμορφία των πηγών και τη διάθεση για αναζήτηση υλικού πέρα από τους μεγάλους και καθιερωμένους εκδοτικούς οίκους. Αυτή η επιλογή ενδέχεται να εμπλουτίζει τη θεματολογία με πιο εξειδικευμένες ή πρόσφατες δημοσιεύσεις από ανεξάρτητους ή θεματικά στοχευμένους εκδότες.

Ο εκδοτικός οργανισμός IEEE ακολουθεί με ποσοστό 19%, ένδειξη της υψηλής αξιοποίησης άρθρων που σχετίζονται με την τεχνολογία, την πληροφορική και τις επιστήμες μηχανικής. Τα άρθρα του IEEE είναι γνωστά για τη μεθοδολογική αυστηρότητα και την τεχνολογική εξειδίκευση.

Οι εκδοτικοί οίκοι Springer και Elsevier συνεισφέρουν με 10% και 9% αντίστοιχα. Πρόκειται για διεθνώς αναγνωρισμένους εκδότες επιστημονικών περιοδικών υψηλού κύρους, γεγονός που υποδηλώνει την αναφορά σε πηγές αξιόπιστες και αξιολογημένες μέσω peer-review.

Τέλος, η συμμετοχή του εκδοτικού φορέα MDPI αντιστοιχεί σε 8%. Ο συγκεκριμένος εκδότης έχει αναπτυχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, ειδικά στον τομέα της ανοικτής πρόσβασης, και περιλαμβάνει άρθρα σε αναδυόμενα επιστημονικά πεδία.

Συνολικά, το διάγραμμα αποτυπώνει μια ισορροπημένη κατανομή μεταξύ αναγνωρισμένων εκδοτικών οργανισμών και άλλων εξειδικευμένων πηγών, γεγονός που ενισχύει την ποικιλομορφία, τη θεματική κάλυψη και την εγκυρότητα της βιβλιογραφικής βάσης της μελέτης.

2.5.3 Χρονική Κατανομή Πηγών (2013–2024)

Η χρονική κατανομή των πηγών αναδεικνύει μια σταθερά αυξανόμενη ερευνητική δραστηριότητα από το 2016 και έπειτα, με αποκορύφωμα το έτος 2022. Η τάση αυτή αντικατοπτρίζει την αυξανόμενη ωριμότητα και σημασία του επιστημονικού διαλόγου γύρω από τη σύζευξη των τεχνολογιών Blockchain και Internet of Things (IoT), οι οποίες αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη εφαρμογή σε κρίσιμους τομείς όπως η υγεία, η ενέργεια και οι έξυπνες πόλεις.

Η μείωση στον αριθμό δημοσιεύσεων για τα έτη 2023 και ιδιαίτερα το 2024 δεν φαίνεται να οφείλεται σε πραγματική πτώση του ερευνητικού ενδιαφέροντος, αλλά πιθανότατα σχετίζεται με τον χρόνο κατά τον οποίο πραγματοποιήθηκε η βιβλιογραφική αναζήτηση. Δεδομένου ότι η αναζήτηση έγινε εντός του πρώτου εξαμήνου του 2024, είναι αναμενόμενο να μην έχουν καταγραφεί ακόμη όλες οι σχετικές δημοσιεύσεις του έτους αυτού.



Εικόνα 3. Χρονική Κατανομή Πηγών (2013–2024) σε στήλη.

2.5.4 Συμπεράσματα Ποσοτικής Ανάλυσης

Η κατανομή των πηγών δείχνει ότι η εργασία βασίζεται κατά κύριο λόγο σε επιστημονικά τεκμηριωμένες δημοσιεύσεις (άρθρα και ακαδημαϊκές εργασίες). Η ποικιλία των τύπων πηγών προσδίδει πληρότητα στην

ανάλυση, ενώ η πρόσφατη χρονολογική συγκέντρωση δηλώνει την επικαιρότητα και ενεργή ερευνητική δραστηριότητα στο πεδίο.

Κεφάλαιο 3 - Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT)

3.1 Ορισμός του IoT

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων επινοήθηκε από τον Kevin Ashton τη δεκαετία του '90 [6]. Υπάρχουν ποικίλοι διαδεδομένοι ορισμοί που χρησιμοποιούνται από ερευνητές, εταιρείες κλπ., για να εκφράσουν το IoT. Μερικοί από αυτούς είναι οι ακόλουθοι:

- Το Internet Architecture Board (IaB) αναγράφει πως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων χρησιμοποιεί ενσωματωμένες συσκευές, οι οποίες βασίζονται σε υπηρεσίες επικοινωνίας που παρέχονται από τα πρωτόκολλα Διαδικτύου. Ένα μέρος των συσκευών αναφέρονται ως «έξυπνα αντικείμενα», τα οποία δεν λειτουργούν απευθείας από τον άνθρωπο, αλλά υπάρχουν ως εξαρτήματα σε κτίρια ή οχήματα ή διασκορπίζονται σε όλο το περιβάλλον. [53]
- Το IEEE Communications Magazine αναφέρει πως το IoT αποτελεί ένα πλαίσιο (framework) όπου κάθε αντικείμενο αποκτά μια διαδικτυακή ταυτότητα και παρουσία. Σκοπός του είναι να δημιουργήσει νέες δυνατότητες και υπηρεσίες, συνδέοντας και ενοποιώντας τον φυσικό με τον ψηφιακό κόσμο. [54]

Σε πιο γενικό επίπεδο, το IoT αναφέρεται στη διαδικτυακή σύνδεση συσκευών που διαθέτουν λογισμικό, αισθητήρες και δυνατότητα επικοινωνίας δεδομένων. Οι συσκευές αυτές μπορεί να είναι είτε ενσωματωμένες σε φυσικά αντικείμενα – όπως αισθητήρες, ενεργοποιητές, θερμοστάτες, έξυπνες οικιακές συσκευές – είτε αυτόνομες, όπως έξυπνα τηλέφωνα, πύλες (gateways) και εξυπηρετητές. Η συνεργασία των δύο τύπων συσκευών δημιουργεί ένα ενιαίο οικοσύστημα, στο οποίο επιτυγχάνεται η συλλογή, ανάλυση και ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, με στόχο την υποστήριξη λειτουργιών παρακολούθησης, αυτοματοποίησης και απόκρισης.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι αισθητήρες θερμοκρασίας που είναι ενσωματωμένοι σε συστήματα ψύξης: προβάλλουν μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο και μπορούν να εκδώσουν ειδοποιήσεις σε περίπτωση απόκλισης, επιτρέποντας την άμεση αντίδραση του χρήστη.

Το πραγματικά καινοτόμο χαρακτηριστικό της τεχνολογίας αυτής είναι η δυνατότητα δημιουργίας αυτόνομων IoT συστημάτων, τα οποία είναι σε θέση να λειτουργούν χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση, λαμβάνοντας αποφάσεις βασισμένες σε δεδομένα και προκαθορισμένους κανόνες. Τέτοια συστήματα έχουν ήδη εισέλθει στην καθημερινότητα, από τον οικιακό αυτοματισμό έως τη βιομηχανική παραγωγή και τις έξυπνες πόλεις. [5], [53], [54]

3.2 Ιστορική Αναδρομή

Η ιδέα του Internet of Things (IoT) εξελίχθηκε σταδιακά με βάση την ανάπτυξη της τεχνολογίας υπολογιστών, των τηλεπικοινωνιών και της μικροηλεκτρονικής. Ας εμβαθύνουμε περισσότερο στην ιστορική αναδρομή του (IoT), εξετάζοντας την εξέλιξή του ανά δεκαετία:

- *1980 - 1990*

Αναφέρεται ως η αρχή της ιδέας που αργότερα θα εξελισσόταν σε IoT. Αυτήν την περίοδο, οι τεχνολογίες δικτύων υπολογιστών και το Διαδίκτυο βρίσκονται ακόμη σε αρχικό στάδιο. Για παράδειγμα, έχουμε την δημιουργία του ARPANET, που αργότερα θα μετεξελιχθεί στο σύγχρονο Διαδίκτυο. Η δημιουργία αυτή

ανέδειξε τις δυνατότητες της επικοινωνίας μεταξύ υπολογιστικών συστημάτων, δημιουργώντας τις βάσεις για την ιδέα της διασύνδεσης συσκευών.

Ακόμη, στις αρχές της δεκαετίας του 1990, το πείραμα του John Romkey, ο οποίος συνέδεσε μια τοστιέρα στο Διαδίκτυο, θεωρείται η πρώτη ενδεικτική εφαρμογή του IoT, καθώς επεσήμανε την προοπτική ελέγχου απλών συσκευών μέσω του Διαδικτύου. [9], [62]

- *1990 - 2000*

Αυτή η δεκαετία έθεσε τις βάσεις για το IoT, όπως το γνωρίζουμε σήμερα. Διότι οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούμε σήμερα άρχισαν να διαμορφώνονται και να υλοποιούνται τότε. Μάλιστα, το 1999, ο Kevin Ashton πρότεινε και τον όρο "Internet of Things" κατά τη διάρκεια μιας παρουσίασης για την Procter & Gamble.

Η χρήση της τεχνολογίας RFID (Radio-Frequency Identification) για την παρακολούθηση και διαχείριση αποθεμάτων αποτελεί σημείο καμπής για την ανάπτυξη του IoT. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι αισθητήρες έγιναν πιο μικροί, φθηνότεροι και αποδοτικότεροι, καθιστώντας δυνατή την τοποθέτησή τους σε διάφορες συσκευές και αντικείμενα. Αυτή η τεχνολογία έθεσε τις βάσεις για τη σύνδεση φυσικών αντικειμένων στο Διαδίκτυο. [5], [32], [11], [54]

- *2000 - 2010*

Η δεκαετία αυτή σηματοδοτεί την περαιτέρω ανάπτυξη των βασικών τεχνολογιών που καθιστούν το IoT πραγματικότητα. Πλέον, το IoT δεν αποτελεί μόνο μια θεωρητική έννοια, αλλά αρχίζει να αποκτά συγκεκριμένες εφαρμογές.

Μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις ήταν η ανάπτυξη του Wi-Fi και η διάδοση του Bluetooth, που έκαναν την ασύρματη επικοινωνία πιο προσιτή και αξιόπιστη. Αυτές οι τεχνολογίες επέτρεψαν σε διαφορετικές συσκευές να επικοινωνούν μεταξύ τους χωρίς τη χρήση καλωδίων, γεγονός που αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για το IoT.

Εξίσου καθοριστική ήταν η ανάπτυξη του IPv6, καθώς έλυσε το πρόβλημα της περιορισμένης διευθυνσιοδότησης στο Διαδίκτυο. Με την υιοθέτησή του, έγινε δυνατή η σύνδεση απεριόριστου αριθμού συσκευών, διευκολύνοντας τη μαζική εξάπλωση του IoT.

Παράλληλα, η έννοια των έξυπνων σπιτιών και έξυπνων συσκευών άρχισε να διαμορφώνεται. Στην αγορά εμφανίστηκαν πρωτότυπα προϊόντα, όπως ψυγεία που μπορούσαν να παρακολουθούν τα αποθέματα τροφίμων, προμηνύοντας την επανάσταση του IoT στον οικιακό αυτοματισμό. [11], [62], [59]

- *2010 - 2020*

Η δεκαετία αυτή ήταν η περίοδος της μαζικής υιοθέτησης και ανάπτυξης του IoT, καθώς η τεχνολογία γίνεται πιο προσιτή και υιοθετείται από την αγορά. Τα έξυπνα σπίτια έγιναν δημοφιλή, με συσκευές όπως οι έξυπνοι θερμοστάτες, τα έξυπνα φώτα και τα έξυπνα ηχεία να κατακλύζουν την αγορά. Εταιρείες, όπως η Google, η Amazon και η Apple, άρχισαν να επενδύουν σημαντικά στο IoT.

Η έννοια του IoT, από την άλλη, επεκτάθηκε και στη βιομηχανία με την ανάπτυξη του Βιομηχανικού IoT (IIoT), το οποίο αξιοποίησε αισθητήρες και συνδεδεμένες συσκευές για τη βελτιστοποίηση παραγωγικών διαδικασιών, τη διαχείριση πόρων και την πρόβλεψη συντήρησης. Σημαντική διασύνδεση είναι η ενσωμάτωση του IoT με την τεχνητή νοημοσύνη και την ανάλυση μεγάλων δεδομένων όπου έδωσε τη δυνατότητα για προγνωστική ανάλυση και λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Η δυνατότητα

συλλογής και ανάλυσης δεδομένων από εκατομμύρια συνδεδεμένες συσκευές βελτίωσε σημαντικά τη λειτουργικότητα και τις δυνατότητες του IoT. [11], [14], [54], [28], [25]

- *2020 και Μετά*

Μετά το 2020, το IoT συνεχίζει να επεκτείνεται και να εξελίσσεται με την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών. Συγκεκριμένα, η ανάπτυξη των δικτύων 5G βελτίωσε σημαντικά την ταχύτητα και την αξιοπιστία της επικοινωνίας μεταξύ συσκευών, δίνοντας ώθηση στην ανάπτυξη νέων εφαρμογών IoT, όπως τα αυτόνομα οχήματα και οι έξυπνες πόλεις.

Παράλληλα, η μαζική χρήση του IoT έθεσε νέες προκλήσεις στην ασφάλεια και την προστασία των δεδομένων. Για την αντιμετώπισή τους, αναπτύσσονται νέες προδιαγραφές και μέθοδοι κρυπτογράφησης, ενώ η επεξεργασία των δεδομένων μετατοπίζεται σταδιακά προς την περιφέρεια του δικτύου (edge computing), μειώνοντας την καθυστέρηση και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα των συστημάτων.

Αξιοσημείωτο είναι ότι τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να αναπτύσσεται και η σύζευξη του IoT με την αλυσίδα συστοιχίας (blockchain). Η ενσωμάτωση των δύο τεχνολογιών προσφέρει ένα επιπλέον επίπεδο ασφάλειας, διαφάνειας και αξιοπιστίας στις συναλλαγές μεταξύ συσκευών. Η τάση αυτή δείχνει πως έχουμε εισέλθει σε μια νέα περίοδο εξέλιξης του IoT, όπου η σύζευξη με το blockchain δημιουργεί νέα δεδομένα στον τρόπο που διαχειριζόμαστε και προστατεύουμε τις πληροφορίες.

Αυτή η σύγχρονη δυναμική θέτει το πλαίσιο για τη δική μας εργασία, η οποία εξετάζει ακριβώς αυτή τη σύζευξη των 2 αυτών τεχνολογιών και τους τρόπους με τους οποίους το blockchain μπορεί να ενισχύσει την ασφάλεια και την αξιοπιστία σε εφαρμογές IoT καθώς και τους τρόπους με τους οποίους το IoT μπορεί να συνεισφέρει στο blockchain.

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων έχει αναδειχθεί ως μια από τις πιο σημαντικές τεχνολογικές τάσεις, επηρεάζοντας τόσο την καθημερινή ζωή όσο και τη βιομηχανία. Κάθε δεκαετία, το IoT εξελίσσεται και προσαρμόζεται στις νέες τεχνολογικές και κοινωνικές απαιτήσεις, ενώ η ταχύτητα ανάπτυξης αυξάνεται συνεχώς με νέες εφαρμογές και καινοτομίες.[10], [6], [47], [56], [57], [14]

3.3 Χαρακτηριστικά

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) αποτελείται από διαδικτυακές ή μη συσκευές, οι οποίες αναθέτουν με τη χρήση αισθητήρων, λογισμικού και άλλων τεχνολογικών μέσων την επεξεργασία των πληροφοριών / δεδομένων. Τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά του IoT εμπεριέχουν την επικοινωνία/συνδεσιμότητα, την ευφυή ανάλυση δεδομένων, τη διαλειτουργικότητα, την αποδοτικότητα ενέργειας και την αυτοματοποίηση, με κύριο στόχο τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας, της ακρίβειας και της ευελιξίας σε πολλούς τομείς της καθημερινής ζωής και της βιομηχανίας.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του IoT είναι η συνδεσιμότητα. Τα αντικείμενα (εξαρτήματα ή συσκευές) συνδέονται με το διαδίκτυο αλλά και μεταξύ τους μέσω πολλαπλών πρωτοκόλλων, λόγου χάρη του Wi-Fi ή του Bluetooth ή/και μέσω δικτύων κινητής τηλεφωνίας. Η διασύνδεση αυτή, προωθεί την ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, διευκολύνοντας την παρακολούθηση και τον έλεγχο απομακρυσμένων συστημάτων. Είναι αξιοσημείωτο να αναφερθεί, πως η συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες, όπως δεδομένων θερμοκρασίας, υγρασίας, κίνησης και άλλων περιβαλλοντικών στοιχείων, οδηγεί στη συνέχεια στην επεξεργασία τους καθώς και στην εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών και γνώσης (πχ. για την βελτιστοποίηση λειτουργιών, υπηρεσιών ή διαδικασιών). [46], [53], [62], [7], [9], [32]

Η ευφυής ανάλυση των δεδομένων είναι επίσης ένα χαρακτηριστικό του IoT, το οποίο καθιστά δυνατή τη μετατροπή των πρωτογενών δεδομένων σε χρήσιμες πληροφορίες ή γνώσεις μέσω προηγμένων αλγορίθμων και τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης. Αυτό επιτρέπει τη λήψη αποφάσεων με βάση επικαιροποιημένη πληροφορία/γνώση, βελτιώνοντας τη λειτουργικότητα των συστημάτων και μειώνοντας το ανθρώπινο λάθος.

Εκτός από αυτό, η αυτοματοποίηση και ο έλεγχος είναι επίσης βασικά χαρακτηριστικά του IoT, καθώς το IoT επιτρέπει την υλοποίηση αυτόνομων συστημάτων που λειτουργούν χωρίς την άμεση παρέμβαση του ανθρώπου, όπως τα αυτόνομα οχήματα, οι έξυπνοι θερμοστάτες και οι βιομηχανικές μηχανές.[54], [53], [14], [11]

Η διαλειτουργικότητα είναι επίσης μια σημαντική πτυχή του IoT, καθώς οι συσκευές μπορεί να προέρχονται από διαφορετικούς κατασκευαστές και να πρέπει να συνεργάζονται απρόσκοπτα. Η επίτευξη διαλειτουργικότητας γίνεται μέσω προτύπων επικοινωνίας, κοινών API και πρωτοκόλλων που επιτρέπουν στις διαφορετικές συσκευές να ανταλλάσσουν δεδομένα και να λειτουργούν ενιαία σε ένα IoT οικοσύστημα. [66], [58], [32]

Η αποδοτικότητα ενέργειας αποτελεί ένα ακόμη σημαντικό χαρακτηριστικό, καθώς οι IoT συσκευές συχνά λειτουργούν με περιορισμένους πόρους, όπως χαμηλή υπολογιστική ισχύ και περιορισμένη διάρκεια μπαταρίας. Ως εκ τούτου, οι τεχνολογίες χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας (π.χ. LoRaWAN, Bluetooth Low Energy - BLE) και οι στρατηγικές διαχείρισης ενέργειας είναι κρίσιμες για τη βιωσιμότητα των IoT εφαρμογών. [66], [32]

Εκτός από τα χαρακτηριστικά, υπάρχουν απαιτήσεις που το IoT πρέπει να καλύπτει, όπως η ασφάλεια και η προστασία της ιδιωτικότητας. Δεδομένου ότι το IoT χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που αφορούν προσωπικά δεδομένα (όπως έξυπνα σπίτια και διαχείριση εταιρικών πόρων), είναι ζωτικής σημασίας η διασφάλιση της ακεραιότητας, της εμπιστευτικότητας και της διαθεσιμότητας των δεδομένων. Για να επιτευχθεί αυτό, απαιτείται η χρήση τεχνικών ασφάλειας, όπως η κρυπτογράφηση, ο έλεγχος πρόσβασης και τα ασφαλή πρωτόκολλα επικοινωνίας. [58], [66], [12], [8], [49]

Συνοψίζοντας τα παραπάνω χαρακτηριστικά, είναι φανερό ότι το IoT δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την ανάπτυξη έξυπνων λύσεων σε ποικίλους τομείς, όπως η υγεία, η γεωργία, οι μεταφορές και το οικιακό περιβάλλον. Μέσω της διασύνδεσης συσκευών, της αυτοματοποίησης και της ευφυούς ανάλυσης δεδομένων, καθίσταται δυνατή η καλύτερη διαχείριση πόρων, η αύξηση της αποδοτικότητας και η ενίσχυση της λειτουργικής ευελιξίας. Παρότι οι επιδράσεις αυτές εξαρτώνται από τον εκάστοτε τομέα εφαρμογής, η ευρεία υιοθέτηση του IoT δύναται να δημιουργήσει σημαντικές ευκαιρίες για την οικονομική και κοινωνική πρόοδο. [46], [57], [62], [14], [27]

3.4 Αρχιτεκτονικές του IoT

Στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT), οι αρχιτεκτονικές συστημάτων σχεδιάζονται με στόχο τη συλλογή, μεταφορά και επεξεργασία/ανάλυση δεδομένων από διάφορες συσκευές και αισθητήρες, επιτρέποντας την αλληλεπίδραση με το φυσικό περιβάλλον μέσω έξυπνων λειτουργιών. Αυτές οι αρχιτεκτονικές βασίζονται συνήθως σε **κοινά επίπεδα** υλικού, λογισμικού και δικτύωσης, διασυνδέοντας φυσικά αντικείμενα μέσω του Διαδικτύου.

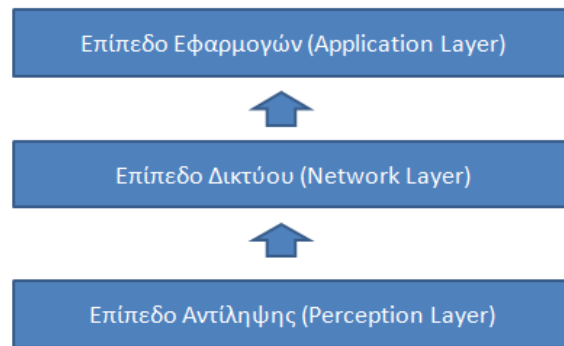
Αν και οι βασικές αρχές είναι κοινές, κάθε αρχιτεκτονική μπορεί να προσαρμοστεί στις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής – είτε πρόκειται για βιομηχανικά περιβάλλοντα, έξυπνες πόλεις, είτε για οικιακές λύσεις. Η επιλογή της κατάλληλης αρχιτεκτονικής καθορίζεται από παράγοντες, όπως οι απαιτήσεις σε καθυστέρηση (latency), υπολογιστική ισχύ, αξιοπιστία, ασφάλεια και ενεργειακή αποδοτικότητα.

1. Αρχιτεκτονική 3 επιπέδων

Η αρχιτεκτονική των 3 επιπέδων του IoT αποτελεί την πιο βασική και κλασική δομή σχεδιασμού συστημάτων IoT. Χρησιμοποιήθηκε αρχικά ως η πρώτη προσέγγιση στον σχεδιασμό IoT, καθώς προσφέρει απλότητα και άμεση διασύνδεση των συσκευών με τις εφαρμογές. Αποτελείται από τα ακόλουθα τρία επίπεδα:

- Το *Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer)* αποτελεί το πρώτο στάδιο στην αρχιτεκτονική του IoT. Περιλαμβάνει αισθητήρες και ενεργοποιητές, οι οποίοι συλλέγουν πληροφορίες από το φυσικό περιβάλλον και επιτρέπουν στο σύστημα να ανταποκρίνεται σε πραγματικό χρόνο στις εκάστοτε φυσικές συνθήκες. Οι αισθητήρες καταγράφουν φυσικές παραμέτρους, όπως θερμοκρασία, κίνηση, υγρασία και πίεση, μετατρέποντάς τες σε ψηφιακά δεδομένα. Στη συνέχεια, οι ενεργοποιητές χρησιμοποιούν αυτά τα δεδομένα (άμεσα ή έμμεσα μέσω εντολών που φθάνουν σε αυτούς από το IoT σύστημα) για να προκαλέσουν τις κατάλληλες προσαρμογές στο περιβάλλον, επιτρέποντας στο σύστημα να ενδίδει δυναμικά και αυτόβουλα στα φυσικά φαινόμενα. Για παράδειγμα, εάν οι αισθητήρες εντοπίσουν αύξηση της θερμοκρασίας, ένας ενεργοποιητής μπορεί να δράσει ενεργοποιώντας ένα σύστημα ψύξης για την σωστή θερμοκρασία. Αν οι αισθητήρες ανιχνεύσουν κίνηση σε έναν σκοτεινό χώρο, οι ενεργοποιητές μπορούν να ενεργοποιήσουν αυτόματα το σύστημα φωτισμού. Ο ρόλος αυτού του επιπέδου είναι να μετατρέπει φυσικές παραμέτρους σε ψηφιακά δεδομένα, αλλά επίσης να επιτρέπει την εφαρμογή ενεργειών που βελτιώνουν την αυτονομία και την απόκριση των IoT συστημάτων στις αλλαγές του περιβάλλοντος.
- Το *Επίπεδο Δικτύου (Network Layer)* συνδέει το επίπεδο αντίληψης με το επίπεδο εφαρμογών, διασφαλίζοντας τη μεταφορά δεδομένων από τους αισθητήρες στα υπόλοιπα μέρη του συστήματος. Για την επικοινωνία, χρησιμοποιεί τεχνολογίες, όπως Bluetooth, Zigbee, Wi-Fi, LoRaWAN και 5G, που επιτρέπουν την ασύρματη μετάδοση δεδομένων. Σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται αυξημένη ασφάλεια και σταθερότητα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ενσύρματα δίκτυα, όπως το Ethernet.
- Το *Επίπεδο Εφαρμογών (Application Layer)* αποτελεί το ανώτερο επίπεδο της αρχιτεκτονικής IoT και είναι υπεύθυνο για την επεξεργασία των δεδομένων και την παροχή κατάλληλων υπηρεσιών στους χρήστες. Μέσω αυτού του επιπέδου, οι χρήστες μπορούν να λαμβάνουν ειδοποιήσεις, να αλληλεπιδρούν με το σύστημα και να χειρίζονται διάφορες λειτουργίες ελέγχου, όπως η ενεργοποίηση συσκευών ή η ανάλυση των δεδομένων που συλλέγονται.

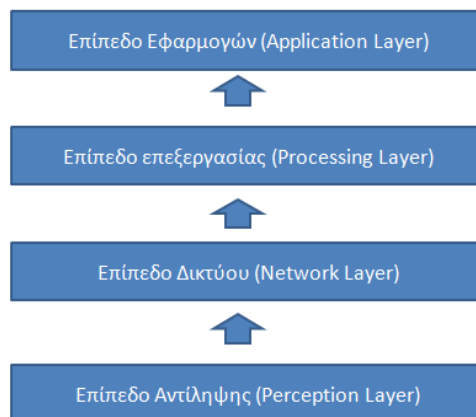
Η αρχιτεκτονική 3 επιπέδων είναι μια απλή και εύκολα κατανοητή δομή, η οποία διευκολύνει την ανάπτυξη και την υλοποίηση συστημάτων IoT. Το μειωμένο κόστος της, σε σύγκριση με πιο σύνθετες αρχιτεκτονικές, καθιστά την προσέγγιση αυτή ιδανική για μικρά IoT συστήματα που δεν απαιτούν ενδιάμεση ή πολύπλοκη επεξεργασία δεδομένων. Ωστόσο, παρουσιάζει και σημαντικές αδυναμίες. Η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται αποκλειστικά στο νέφος, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερήσεις στην ανταπόκριση των εφαρμογών, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις όπου απαιτείται χαμηλή καθυστέρηση (latency). Επίσης, η απουσία ενδιάμεσου επιπέδου για τοπική ανάλυση δεδομένων αυξάνει την εξάρτηση από το δίκτυο και το υπολογιστικό νέφος, επιβαρύνοντας τη χρήση του εύρους ζώνης. Επιπλέον, η ασφάλεια του συστήματος είναι περιορισμένη, καθώς τα δεδομένα μεταδίδονται απευθείας από τους αισθητήρες στις εφαρμογές χωρίς ενδιάμεσους μηχανισμούς προστασίας ή φιλτραρίσματος, γεγονός που το καθιστά πιο ευάλωτο σε επιθέσεις και παραβιάσεις ασφαλείας. [32], [54], [65]



Εικόνα 4: Αρχιτεκτονική 3 επιπέδων (3-Layer Architecture).

2. Αρχιτεκτονική 4 επιπέδων

Η αρχιτεκτονική τεσσάρων επιπέδων εισάγει ένα επιπλέον επίπεδο μεταξύ του επιπέδου δικτύου και του επιπέδου εφαρμογών, γνωστό ως Επίπεδο Επεξεργασίας (Processing Layer). Το επίπεδο αυτό επιτρέπει την τοπική επεξεργασία των δεδομένων μέσω έξυπνων κόμβων (smart nodes), μειώνοντας τον φόρτο του δικτύου και βελτιώνοντας την ταχύτητα απόκρισης των συστημάτων. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγεται η άμεση μεταφορά όλων των δεδομένων στο επίπεδο εφαρμογών, γεγονός που βελτιώνει τη συνολική αποδοτικότητα του συστήματος. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές που απαιτούν ανάλυση σε πραγματικό χρόνο, όπως στη βιομηχανία και στα συστήματα έξυπνου ελέγχου (smart control systems). [65], [16]



Εικόνα 5: Αρχιτεκτονική 4 επιπέδων (4-Layer Architecture).

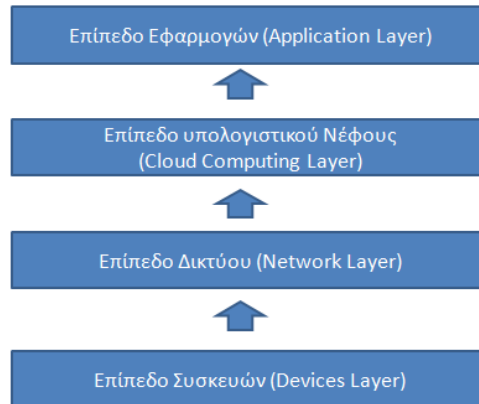
3. Αρχιτεκτονική 4 επιπέδων βασισμένη στο υπολογιστικό νέφος

Η αρχιτεκτονική βασισμένη στο υπολογιστικό νέφος (cloud-based), διαφέρει σε δύο βασικά σημεία σε σχέση με την κλασική αρχιτεκτονική τεσσάρων επιπέδων:

- Το Επίπεδο Συσκευών (Device Layer) είναι το πρώτο επίπεδο της αρχιτεκτονικής IoT τεσσάρων επιπέδων βασισμένης στο υπολογιστικό νέφος (Cloud-Based 4-Layer Architecture). Είναι υπεύθυνο για τη συλλογή δεδομένων από αισθητήρες, οι οποίοι παρακολουθούν παραμέτρους του φυσικού περιβάλλοντος, όπως θερμοκρασία, κίνηση και υγρασία. Σε αντίθεση με το Επίπεδο Αντίληψης (Perception Layer) που υπάρχει σε άλλες αρχιτεκτονικές, το Επίπεδο Συσκευών στη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική συνδυάζει τη συλλογή δεδομένων με την αρχική επικοινωνία με το δίκτυο. Ωστόσο, οι περισσότερες IoT συσκευές δεν διαθέτουν απευθείας διαδικτυακή συνδεσιμότητα, οπότε τα δεδομένα τους δεν αποστέλλονται απευθείας στο νέφος. Αντίθετα, διαβιβάζονται πρώτα μέσω του Επιπέδου Δικτύου, το οποίο περιλαμβάνει δικτυακές συσκευές που επιτρέπουν τη μεταφορά τους προς το νέφος. Η συλλογή δεδομένων στο Επίπεδο Συσκευών είναι κρίσιμη για την επιτυχή λειτουργία του IoT οικοσυστήματος, καθώς εξασφαλίζει ότι το σύστημα λαμβάνει αξιόπιστες πληροφορίες από τον φυσικό κόσμο. Οι αισθητήρες μετατρέπουν φυσικές παραμέτρους σε ψηφιακά δεδομένα, τα οποία στη συνέχεια προωθούνται για περαιτέρω ανάλυση στο υπολογιστικό νέφος.
- Το Επίπεδο Υπολογιστικού Νέφους (Cloud Computing Layer) είναι το τρίτο επίπεδο της τετραεπίπεδης αρχιτεκτονικής IoT βασισμένης στο υπολογιστικό νέφος και αναλαμβάνει την αποθήκευση, την επεξεργασία και την ανάλυση των δεδομένων που προέρχονται από τις IoT συσκευές. Όλη η υπολογιστική επεξεργασία μεταφέρεται στο νέφος, αντικαθιστώντας οποιαδήποτε τοπική επεξεργασία που θα μπορούσε να γίνει στις IoT συσκευές ή στους δικτυακούς κόμβους. Αυτό σημαίνει ότι οι έξυπνοι κόμβοι (smart nodes) δεν εκτελούν τοπική ανάλυση, αλλά αποστέλλουν τα δεδομένα στο νέφος, όπου γίνεται η αποθήκευση και περαιτέρω επεξεργασία τους. Το Επίπεδο Υπολογιστικού Νέφους παρέχει υψηλή υπολογιστική ισχύ, επιτρέποντας την εκτέλεση αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης (AI) και μηχανικής μάθησης (ML) για την ανάλυση και πρόβλεψη συμπεριφορών του IoT οικοσυστήματος. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης του είναι οι έξυπνες πόλεις, όπου τεράστιοι όγκοι δεδομένων από αισθητήρες και κάμερες αναλύονται για τη βελτίωση της κυκλοφορίας, της διαχείρισης ενέργειας και των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Η κύρια θετική πτυχή αυτής της αρχιτεκτονικής είναι ότι αξιοποιεί την ισχύ του υπολογιστικού νέφους, εξασφαλίζοντας υψηλή υπολογιστική ισχύ και δυνατότητες αποθήκευσης, χωρίς να απαιτείται πολύπλοκη επεξεργασία στις ίδιες τις IoT συσκευές. Αυτό την καθιστά ιδανική για εφαρμογές που χρειάζονται μεγάλη υπολογιστική ισχύ, όπως ανάλυση δεδομένων σε έξυπνες πόλεις και προηγμένα βιομηχανικά συστήματα. Ωστόσο, υπάρχουν και αρνητικά στοιχεία. Η εξάρτηση από το νέφος μπορεί να προκαλέσει καθυστερήσεις (latency), καθώς τα δεδομένα πρέπει να μεταφέρονται πρώτα στο νέφος πριν γίνει οποιαδήποτε επεξεργασία. Σε αυτό το σημείο πρέπει να διευκρινιστεί ότι το Επίπεδο Συσκευών & Αντίληψης παραμένει ουσιαστικά κοινό μεταξύ της cloud-based και της γενικής τετραεπίπεδης αρχιτεκτονικής. Η κύρια διαφορά εντοπίζεται στο πού πραγματοποιείται η επεξεργασία των δεδομένων: στην cloud-based προσέγγιση μεταφέρεται στο υπολογιστικό νέφος, ενώ στην κλασική 4-layer αρχιτεκτονική μπορεί να εκτελείται τοπικά, μειώνοντας την καθυστέρηση και την ανάγκη συνεχούς μεταφοράς δεδομένων. Το ενδιάμεσο επίπεδο επεξεργασίας (Processing Layer) σε τοπικό επίπεδο επιτελεί κρίσιμο ρόλο σε αυτό, αποτελώντας βασική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο μοντέλων. Επιπλέον, η συνεχής μεταφορά δεδομένων μέσω δικτύου αυξάνει τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης (bandwidth) και μπορεί να επιφέρει υψηλό κόστος λειτουργίας. Επίσης, η αποθήκευση όλων των δεδομένων στο νέφος εγείρει ζητήματα ασφάλειας και ιδιωτικότητας, καθώς οι πληροφορίες είναι ευάλωτες σε επιθέσεις ή μη

εξουσιοδοτημένη πρόσβαση, ιδιαίτερα λόγω της αυξημένης επιφάνειας επιθέσεων που επιδεικνύεται στο νέφος (ειδικά όταν αυτό είναι δημόσιο). [16], [32]



Εικόνα 6: Αρχιτεκτονική βασισμένη στο υπολογιστικό νέφος (Cloud Computing-Based Architecture).

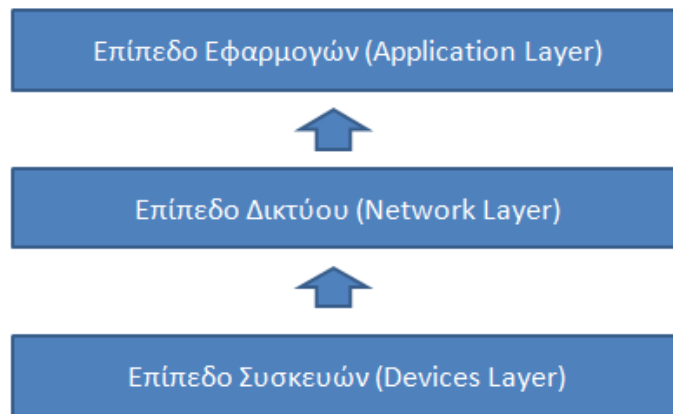
4. Αρχιτεκτονική Ομιχλώδους Υπολογισμού (Fog Computing Architecture)

Η αρχιτεκτονική Ομιχλώδους Υπολογισμού (Fog Computing) αποτελεί μια ενδιάμεση λύση ανάμεσα στο Υπολογιστικό Νέφος και τις IoT συσκευές, δίνοντας τη δυνατότητα για τοπική επεξεργασία δεδομένων πριν αυτά αποσταλούν στο νέφος. Η αρχιτεκτονική αυτή αποτελείται από 3 επίπεδα. Στο πρώτο επίπεδο θα συναντήσουμε το επίπεδο συσκευών, όπου οι αισθητήρες πραγματοποιούν συλλογή των δεδομένων. Στη συνέχεια, το επόμενο επίπεδο είναι το επίπεδο δικτύου, το οποίο περιλαμβάνει τους κόμβους ομίχλης (fog nodes), όπου γίνεται η προεπεξεργασία των δεδομένων, μειώνοντας την άμεση ανάγκη για συνεχή επικοινωνία με το νέφος και βελτιώνοντας την ανταπόκριση του συστήματος. Το τελευταίο επίπεδο έρχεται να συμπληρωθεί με το επίπεδο εφαρμογών (όπου δεσπόζει το υπολογιστικό νέφος), όπου οι χρήστες μπορούν να αποκτήσουν πρόσβαση στις επεξεργασμένες πληροφορίες μέσω των εφαρμογών που προσφέρει το IoT.

Η αρχιτεκτονική ομιχλώδους υπολογισμού μπορεί και μειώνει την καθυστέρηση και εξοικονομεί εύρος ζώνης, αλλά και βελτιώνει την αποδοτικότητα των IoT συστημάτων, ειδικά σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Μπορούμε να θεωρήσουμε πως μοιάζει με την αρχιτεκτονική 4 επιπέδων όπου τα δύο ενδιάμεσα επίπεδα ενώνονται σε ένα, παρέχοντας τόσο λειτουργικότητα δικτυακής διασύνδεσης αλλά και (προ-)επεξεργασία δεδομένων.

Η αρχιτεκτονική Ομιχλώδους Υπολογισμού έχει πολλά πλεονεκτήματα. Καταρχάς, μειώνει την καθυστέρηση (latency), καθώς η επεξεργασία πραγματοποιείται κοντά στις IoT συσκευές, βελτιώνοντας την απόκριση του συστήματος. Επιπλέον, εξοικονομεί εύρος ζώνης, αφού τα μη απαραίτητα δεδομένα μπορούν να φιλτράρονται και να μην αποστέλλονται στο νέφος. Η κατανεμημένη φύση της αυξάνει την αξιοπιστία του συστήματος, καθώς η αποθήκευση και η επεξεργασία δεν εξαρτώνται αποκλειστικά από το νέφος, μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο διακοπής της υπηρεσίας λόγω αποτυχίας ενός κεντρικού διακομιστή (που λειτουργεί στο νέφος).

Ωστόσο, η προσέγγιση του Ομιχλώδους Υπολογισμού παρουσιάζει και ορισμένα μειονεκτήματα. Η διαχείριση πολλών κατανεμημένων κόμβων ομίχλης αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος και μπορεί να καταστήσει τη συντήρησή του απαιτητική. Επίσης, αν και η αποκεντρωμένη φύση του μειώνει την εξάρτηση από το νέφος, δημιουργεί προκλήσεις ασφαλείας, καθώς οι κόμβοι ομίχλης (λιγότερο ισχυροί από τους διακομιστές, εικονικού ή φυσικούς, στο νέφος) μπορούν να γίνουν στόχος (επιτυχών) κυβερνοεπιθέσεων. Τέλος, η υλοποίηση της προσέγγισης αυτής απαιτεί πρόσθετη υποδομή και εξοπλισμό, αυξάνοντας το κόστος ανάπτυξης σε σχέση με μια πιο απλή προσέγγιση που βασίζεται στο νέφος. [16], [4]



Εικόνα 7: Αρχιτεκτονική 3 επιπέδων (Fog Computing Architecture).

5. Αρχιτεκτονική 5 επιπέδων (Edge Computing Architecture)

Η αρχιτεκτονική 5 επιπέδων βασισμένη στον υπολογισμό στην άκρη του δικτύου (Edge Computing) μπορεί να θεωρηθεί ως παραλλαγή και επέκταση της αρχιτεκτονικής υπολογιστικού νέφους, με την προσθήκη ενός επιπλέον επιπέδου – του επιπέδου ακμής (Edge Processing Layer). Σε αντίθεση με το μοντέλο του Ομιχλώδους Υπολογισμού (Fog Computing), όπου η επεξεργασία διαμοιράζεται σε ενδιάμεσα επίπεδα μεταξύ νέφους και συσκευών, το Edge Computing επικεντρώνεται στη μεταφορά της υπολογιστικής ισχύος όσο το δυνατόν πλησιέστερα στις ίδιες τις IoT συσκευές.

Το επίπεδο ακμής λειτουργεί ως συμπληρωματικό στρώμα επεξεργασίας πριν την αποστολή δεδομένων στο νέφος, επιτρέποντας σε τοπικούς κόμβους (Edge Nodes) να λαμβάνουν αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, στο κατώτερο επίπεδο (Device Layer), εφόσον υπάρχει επεξεργαστική δυνατότητα, μπορεί να εκτελείται πρωτογενής ανάλυση δεδομένων, γεγονός που μειώνει περαιτέρω την ανάγκη επικοινωνίας με ανώτερα επίπεδα.

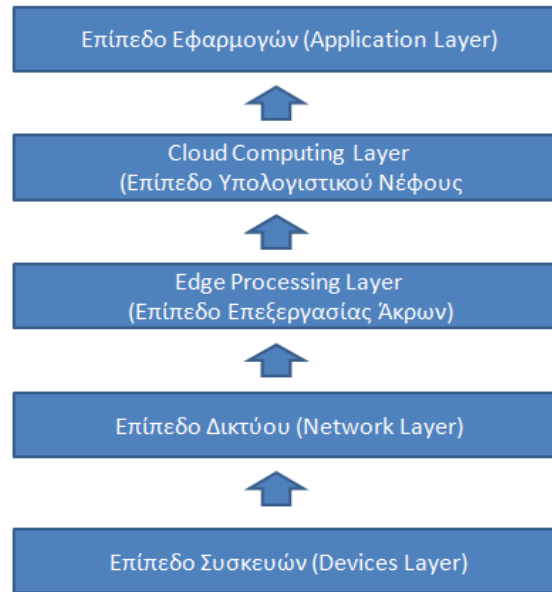
- Επίπεδο Συσκευών (Device Layer) – Οι IoT συσκευές κάνουν συλλογή και μια πρώτη επεξεργασία δεδομένων, εφόσον αυτό είναι εφικτό (έχουν δηλ. τη σχετική δυνατότητα επεξεργασίας).
- Επίπεδο Δικτύου (Network Layer) – Παρέχει τη δυνατότητα μετάδοσης των δεδομένων/πληροφοριών ανάμεσα στις IoT/τελικές συσκευές και τους κόμβους ακμής (Edge Nodes).
- Επίπεδο Επεξεργασίας Άκρων (Edge Processing Layer) – Μια ιεραρχία από mini-servers στις ακμές του δικτύου που επεξεργάζονται τα δεδομένα πριν αυτά αποσταλούν στο νέφος, εφόσον το τελευταίο χρειαστεί.

- Επίπεδο Υπολογιστικού Νέφους (Cloud Computing Layer) – Το επίπεδο αυτό επιτελεί τη μόνιμη αποθήκευση και την βαριά ανάλυση των δεδομένων.
- Επίπεδο Εφαρμογών (Application Layer) – Παροχή εφαρμογών και υπηρεσιών βασισμένων στην επεξεργασία δεδομένων του νέφους, προς χρήση και διαχείριση από τον τελικό χρήστη.

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της αρχιτεκτονικής υπολογισμού στην άκρη του δικτύου είναι η δυνατότητα λήψης αποφάσεων τοπικά, με ελάχιστη καθυστέρηση, καθώς η επεξεργασία πραγματοποιείται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στις ίδιες τις συσκευές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) [32], [16]. Αυτό καθιστά την προσέγγιση ιδανική για εφαρμογές που απαιτούν άμεση απόκριση, όπως αυτόνομα οχήματα, βιομηχανικά συστήματα αυτοματισμού και «έξυπνα» ενεργειακά δίκτυα [14]. Όπως και η αρχιτεκτονική ομιχλώδους υπολογισμού (Fog Computing), προσφέρει πλεονεκτήματα, όπως η αποκέντρωση της υπολογιστικής ισχύος, η αποσυμφόρηση του υπολογιστικού νέφους και η δυνατότητα επεξεργασίας κοντά στην πηγή των δεδομένων [8], [11]. Επιπλέον, ο υπολογισμός στην άκρη του δικτύου ενισχύει την αυτονομία των συστημάτων IoT σε περιβάλλοντα με περιορισμένη συνδεσιμότητα, καθώς επιτρέπει στους τοπικούς κόμβους να λειτουργούν ανεξάρτητα χωρίς συνεχή σύνδεση με το νέφος [7], [12].

Ωστόσο, και οι δύο αρχιτεκτονικές – ομιχλώδης και ακμής – αντιμετωπίζουν κοινές προκλήσεις. Λόγω της κατανεμημένης φύσης τους, απαιτούν προηγμένες λύσεις για τη διαχείριση της ασφάλειας και τη φυσική προστασία των κόμβων επεξεργασίας, οι οποίοι συχνά βρίσκονται εκτός προστατευμένων υποδομών και είναι πιο εκτεθειμένοι σε κινδύνους [9], [48]. Επιπλέον, προκύπτουν δυσκολίες που σχετίζονται με την ετερογένεια των συσκευών, την αποδοτικότητα της κατανάλωσης ενέργειας και την ανάγκη συντήρησης κατανεμημένου λογισμικού σε τοπικό επίπεδο [62].

Σε σύγκριση με την αρχιτεκτονική ομιχλώδους υπολογισμού, η αρχιτεκτονική ακμής μεταφέρει περαιτέρω την υπολογιστική ισχύ στην περιφέρεια του δικτύου, μειώνοντας ακόμη περισσότερο την καθυστέρηση και ενισχύοντας την αποκέντρωση [16], [32]. Αντίθετα, η ομιχλώδης υποδομή βασίζεται σε ενδιάμεσους κόμβους, όπως πύλες (gateways) ή τοπικούς εξυπηρετητές, με μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ αλλά και μεγαλύτερη καθυστέρηση [11], [7]. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο έγκειται στο σημείο όπου πραγματοποιείται η επεξεργασία των δεδομένων και στον βαθμό αυτονομίας των κόμβων. Η αρχιτεκτονική ακμής προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία (ολοκλήρωσης λειτουργικότητας σε τοπικό επίπεδο) σε περιπτώσεις όπου απαιτείται ελάχιστη καθυστέρηση ή όπου δεν είναι εφικτή μια σταθερή σύνδεση με το νέφος, ενώ η αρχιτεκτονική ομιχλώδους υπολογισμού ενδεχομένως διατηρεί έναν περισσότερο κεντρικά ελεγχόμενο χαρακτήρα [8], [12].



Εικόνα 8: Αρχιτεκτονική 5 επιπέδων (Edge Computing Architecture).

6. Αρχιτεκτονική 6 επιπέδων

Η αρχιτεκτονική 6 επιπέδων στο IoT προσφέρει μια πιο λεπτομερή και οργανωμένη προσέγγιση στη διαχείριση δεδομένων και υπηρεσιών, επιτρέποντας την ενεργειακά αποδοτική διαχείριση των IoT συστημάτων.

- Στην αρχιτεκτονική 6 επιπέδων του IoT, που ονομάζεται αρχιτεκτονική διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας (energy-efficiency management), το **Φυσικό Επίπεδο (Physical Layer)** παίζει κεντρικό ρόλο στη συλλογή, διαχείριση και ανάλυση των δεδομένων από αισθητήρες και ενεργοποιητές. Ωστόσο, σε αντίθεση με απλούστερες αρχιτεκτονικές, όπως των 3 ή 5 επιπέδων, το Φυσικό Επίπεδο δεν ασχολείται αποκλειστικά με τη συλλογή δεδομένων αλλά ενσωματώνει επιπλέον μηχανισμούς ενεργειακής διαχείρισης. Αυτό σημαίνει ότι οι αισθητήρες δεν καταγράφουν απλώς δεδομένα, αλλά μπορούν να ανιχνεύσουν και να βελτιστοποιήσουν την κατανάλωση ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι έξυπνοι αισθητήρες σε ενεργειακά αποδοτικά σπίτια, οι οποίοι προσαρμόζουν τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας με βάση την κατανάλωση και τη διαθεσιμότητα ενέργειας.

- **Επίπεδο Δικτύου και Ομίχλης (Network & Fog Layer)**

Το Επίπεδο Δικτύου και Ομίχλης αποτελεί το δεύτερο επίπεδο της αρχιτεκτονικής και ενσωματώνει λειτουργίες τόσο μεταφοράς όσο και τοπικής επεξεργασίας δεδομένων. Σε αντίθεση με τα κλασικά πολυεπίπεδα μοντέλα όπου το επίπεδο δικτύου λειτουργεί αποκλειστικά ως μηχανισμός επικοινωνίας, εδώ συγχωνεύεται λειτουργικά με το επίπεδο ομίχλης (Fog Computing), το οποίο διαθέτει αυξημένη υπολογιστική ικανότητα και μπορεί να εκτελέσει ανάλυση δεδομένων πλησίον των IoT συσκευών. Αρχικά, το υποσύστημα επικοινωνίας βασίζεται σε πρωτόκολλα, όπως Wi-Fi, ZigBee, 5G και Ethernet, εξασφαλίζοντας την ασφαλή μετάδοση

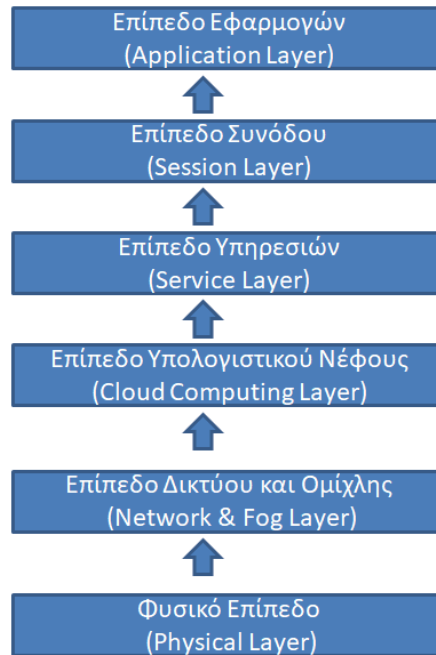
των δεδομένων ανάμεσα στο φυσικό επίπεδο, τους ενδιάμεσους κόμβους και το νέφος. Παράλληλα, οι fog κόμβοι (που ενδέχεται να βρίσκονται στα άκρα του δικτύου ή σε κοντινές τοποθεσίες) αναλαμβάνουν την προεπεξεργασία, φιλτράρισμα και επιλογή κρίσιμων δεδομένων που αξίζει να αποσταλούν στο υπολογιστικό νέφος, μειώνοντας σημαντικά το απαιτούμενο εύρος ζώνης και τη συμφόρηση του συστήματος. Επιπλέον, η δυνατότητα ενσωμάτωσης αλγορίθμων μηχανικής μάθησης σε υποδομές ομίχλης δίνει τη δυνατότητα λήψης τοπικών αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο, κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές όπως τα έξυπνα σπίτια, τα έξυπνα δίκτυα και η βιομηχανική παραγωγή. Έτσι, το Επίπεδο Δικτύου και Ομίχλης παύει να είναι ένα αποκλειστικά επικοινωνιακό στρώμα και εξελίσσεται σε κρίσιμο τμήμα της συνολικής αρχιτεκτονικής επεξεργασίας.

- Στην αρχιτεκτονική 6 επιπέδων, το **Επίπεδο Υπολογιστικού Νέφους (Cloud Computing Layer)** αναλαμβάνει την αποθήκευση, ανάλυση και διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων σε βάθος χρόνου. Σε αντίθεση με τα κατώτερα επίπεδα, τα οποία επικεντρώνονται κυρίως στη συλλογή και τη μετάδοση δεδομένων, το επίπεδο αυτό αξιοποιεί τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης (AI) και Μηχανικής Μάθησης (ML) για την προβλεπτική ανάλυση και τη βελτιστοποίηση των συστημάτων IoT. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής του επιπέδου αυτού είναι οι έξυπνες πόλεις, όπου τεράστιοι όγκοι δεδομένων από αισθητήρες και κάμερες παρακολούθησης αναλύονται σε συστήματα νέφους για τη βελτίωση της κυκλοφορίας και της διαχείρισης πόρων.
- Το **Επίπεδο Υπηρεσιών (Service Layer)** αποτελεί το τέταρτο επίπεδο της αρχιτεκτονικής IoT έξι επιπέδων και έχει ως βασικό ρόλο τη διαχείριση, οργάνωση και διάθεση υπηρεσιών που βασίζονται στα δεδομένα του Επιπέδου Υπολογιστικού Νέφους. Το επίπεδο αυτό δεν εκτελεί την επεξεργασία των δεδομένων, αλλά αναλαμβάνει να συγκεντρώσει και να προσφέρει τυποποιημένες λειτουργίες και δυνατότητες, με τη μορφή υπηρεσιών (APIs), στις ανώτερες εφαρμογές. Οι υπηρεσίες αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν έλεγχο πρόσβασης, ασφάλεια, αποθήκευση, ενεργοποίηση συσκευών, κλπ., και υλοποιούνται τεχνικά στο επίπεδο του νέφους ή σε άλλους πόρους του συστήματος (ανάλογα με τη φύση τους), αλλά οργανώνονται και καθίστανται προσβάσιμες μέσω του Επιπέδου Υπηρεσιών. Επομένως, οι εφαρμογές IoT έχουν πρόσβαση σε αυτές τις δυνατότητες όχι απευθείας, αλλά μέσω των διασυνδέσεων που παρέχει το τρέχον επίπεδο. Ο ρόλος του Επιπέδου Υπηρεσιών είναι λειτουργικά διακριτός από αυτόν του Επιπέδου Συνόδου: το Επίπεδο Υπηρεσιών προσφέρει τις διαθέσιμες υπηρεσίες, ενώ το Επίπεδο Συνόδου διαχειρίζεται την επικοινωνία, τη συνεδρία και τη χρονική συνοχή αυτής της πρόσβασης. Δηλαδή, η ενορχήστρωση σε επίπεδο υποδομής γίνεται από το Επίπεδο Υπηρεσιών, ενώ η λειτουργική και χρονική σύνδεση των εφαρμογών με τις υπηρεσίες (π.χ. παρακολούθηση μιας ενεργής σύνδεσης, επανασύνδεση, session management) γίνεται στο Επίπεδο Συνόδου. Με αυτόν τον διαχωρισμό, αποφεύγεται η σύγχυση και εξασφαλίζεται ευελιξία, επεκτασιμότητα και καλύτερος έλεγχος της επικοινωνίας και λειτουργίας των IoT εφαρμογών. Σε σύγκριση με πιο απλές αρχιτεκτονικές, το Επίπεδο Υπηρεσιών λειτουργεί ως αυτόνομο επίπεδο παροχής υπηρεσιών, προσφέροντας πρόσβαση σε λειτουργίες που υλοποιούνται στα κατώτερα επίπεδα, ενώ διατηρεί σαφή ρόλο στην υποδομή και την αρχιτεκτονική του συστήματος.
- Το **Επίπεδο Συνόδου** αποτελεί το πέμπτο επίπεδο της αρχιτεκτονικής IoT έξι επιπέδων και έχει ως βασική αποστολή τη διαχείριση των συνδέσεων και της επικοινωνίας μεταξύ του Επιπέδου Υπηρεσιών (Service Layer) και του Επιπέδου Εφαρμογών (Application Layer). Η κύρια λειτουργία του είναι η διατήρηση ενεργών συνδέσεων (sessions), ο συγχρονισμός επικοινωνίας και η αποκατάσταση διακοπών σε περιπτώσεις αστάθειας δικτύου. Σε εφαρμογές, όπως οι έξυπνες πόλεις, τα έξυπνα δίκτυα ενέργειας και οι βιομηχανικοί αυτοματισμοί, όπου απαιτείται συνεχής και αξιόπιστη ανταλλαγή πληροφοριών, το Επίπεδο Συνόδου εξασφαλίζει τη σταθερή ροή επικοινωνίας, ακόμα και όταν παρουσιαστούν προβλήματα διασύνδεσης. Ενώ το Επίπεδο Υπηρεσιών είναι υπεύθυνο για τη διάθεση λειτουργιών μέσω τυποποιημένων APIs, όπως τα

RESTful APIs, η λειτουργική ευθύνη για τη διατήρηση της σύνδεσης και τον έλεγχο συνόδων ανήκει στο Επίπεδο Συνόδου. Τα RESTful APIs ανήκουν τεχνικά στο Επίπεδο Υπηρεσιών, όπου και υλοποιούνται ως διεπαφές που παρέχουν πρόσβαση σε λειτουργίες. Ωστόσο, η χρήση αυτών των APIs και η διαχείριση της επικοινωνίας που βασίζεται σε αυτά γίνεται από το Επίπεδο Συνόδου. Δηλαδή, το Επίπεδο Συνόδου φροντίζει ώστε οι συνδέσεις που χρησιμοποιούν RESTful APIs ή WebSockets να παραμένουν ενεργές, ασφαλείς και συγχρονισμένες. Επιπλέον, το επίπεδο αυτό διαχειρίζεται μηχανισμούς ταυτοποίησης και επανασύνδεσης, υποστηρίζοντας ασφαλή πρόσβαση μόνο από εξουσιοδοτημένες εφαρμογές και χρήστες. Έτσι, μειώνεται ο κίνδυνος μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης και διασφαλίζεται η σταθερή και ασφαλή λειτουργία των IoT εφαρμογών. Η παρουσία του Επιπέδου Συνόδου εξασφαλίζει λειτουργική συνέχεια στην επικοινωνία, χωρίς επανεκκίνηση της συνόδου κάθε φορά που υπάρχει παροδικό πρόβλημα στο δίκτυο, γεγονός κρίσιμο για εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις αξιοπιστίας και χαμηλής καθυστέρησης.

- Το **Επίπεδο Εφαρμογής** είναι το έκτο και τελευταίο επίπεδο της αρχιτεκτονικής IoT έξι επιπέδων και λειτουργεί ως το σημείο αλληλεπίδρασης ανάμεσα στον χρήστη και στο IoT οικοσύστημα. Αποτελεί τον τελικό αποδέκτη των λειτουργιών και πληροφοριών που έχουν δημιουργηθεί στα κατώτερα επίπεδα, δίνοντας στον χρήστη τη δυνατότητα να παρακολουθεί, να διαχειρίζεται και να αλληλεπιδρά με τις συσκευές και τις υπηρεσίες του συστήματος. Σε αυτό το επίπεδο, οι εφαρμογές IoT δεν εκτελούν ανάλυση δεδομένων, αλλά κάνουν χρήση λειτουργιών και υπηρεσιών που προσφέρονται από τα προηγούμενα επίπεδα – κυρίως από το Επίπεδο Υπηρεσιών, το οποίο παρέχει τυποποιημένα APIs και δομημένες δυνατότητες. Αυτά τα APIs είναι υπεύθυνα για την εκτέλεση λειτουργιών, όπως η ενεργοποίηση συσκευών, ο έλεγχος πρόσβασης ή η ανάκτηση δεδομένων, και δεν προέρχονται από το Επίπεδο Συνόδου. Το τελευταίο έχει αποκλειστικό ρόλο στον συγχρονισμό και τη διατήρηση των επικοινωνιών κατά τη χρήση των υπηρεσιών – όχι στην παροχή τους. Η λειτουργικότητα του Επιπέδου Εφαρμογής επεκτείνεται σε πλήθος περιπτώσεων χρήσης, όπως έξυπνα σπίτια (smart homes), έξυπνες πόλεις, βιομηχανικοί αυτοματισμοί και εφαρμογές υγειονομικής περίθαλψης. Οι χρήστες μπορούν μέσω κατάλληλων διεπαφών χρήστη (User Interfaces – UI) και εφαρμογών να εκτελούν ενέργειες, να λαμβάνουν ειδοποιήσεις, να παρακολουθούν δεδομένα αισθητήρων ή να αυτοματοποιούν διαδικασίες. Η σημαντική αξία αυτού του επιπέδου έγκειται στην επέκταση και διαλειτουργικότητα: με τη χρήση επαναχρησιμοποιήσιμων APIs από το Επίπεδο Υπηρεσιών, οι εφαρμογές μπορούν εύκολα να ενσωματώσουν νέες υπηρεσίες ή να προσαρμοστούν σε διαφορετικά IoT περιβάλλοντα. Αυτό προσφέρει ευελιξία στον σχεδιασμό εφαρμογών, διαχωρισμό αρμοδιοτήτων ανά επίπεδο, και καλύτερη επεκτασιμότητα συνολικά στο IoT οικοσύστημα.

Η κύρια δύναμη αυτής της αρχιτεκτονικής είναι η σαφής κατανομή ρόλων μεταξύ των επιπέδων, γεγονός που εξασφαλίζει βελτιωμένη απόδοση, ασφάλεια και αποδοτικότητα πόρων. Ωστόσο, η πολυπλοκότητά της μπορεί να οδηγήσει σε υψηλό κόστος υλοποίησης, καθώς απαιτεί προηγμένα συστήματα διαχείρισης και μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ. Επιπλέον, η συντονισμένη επικοινωνία μεταξύ των επιπέδων πρέπει να σχεδιαστεί προσεκτικά, καθώς οι καθυστερήσεις στη μεταφορά ή επεξεργασία δεδομένων είναι εν πολλοίς αναπόφευκτες σε τόσο πολυεπίπεδες αρχιτεκτονικές. Η σωστή σχεδίαση μπορεί να μετριάσει τις επιπτώσεις αυτών των καθυστερήσεων, βελτιστοποιώντας τη ροή δεδομένων και μειώνοντας τον χρόνο απόκρισης στις κρίσιμες εφαρμογές. [14], [17], [31], [32], [8]



Εικόνα 9: Αρχιτεκτονική 6 επιπέδων (6-Layer Architecture).

3.5 Πρωτόκολλα του Διαδικτύου των Πραγμάτων

Η αρχιτεκτονική των συστημάτων IoT απαιτεί την ομαλή επικοινωνία μεταξύ ετερογενών συσκευών, αισθητήρων, κόμβων επεξεργασίας και υποδομών νέφους. Για να εξασφαλιστεί αυτή η πολυεπίπεδη επικοινωνία, χρησιμοποιούνται εξειδικευμένα πρωτόκολλα που καλύπτουν κάθε επίπεδο της αρχιτεκτονικής — από το φυσικό επίπεδο, μέχρι και το επίπεδο εφαρμογών.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, υιοθετείται μια εξαεπίπεδη αρχιτεκτονική IoT, με στόχο την ενεργειακά αποδοτική και ευέλικτη διαχείριση των λειτουργιών του συστήματος. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται σε σχετικές προτάσεις της βιβλιογραφίας [28] και παρουσιάζεται αναλυτικά στην Ενότητα 3.4. Κύρια διαφοροποίηση της συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής αποτελεί η συγχώνευση του Επιπέδου Δικτύου με το Fog Layer, διαμορφώνοντας ένα ενιαίο Επίπεδο Δικτύου και Ομίχλης (Network & Fog Layer), το οποίο επιτρέπει την ταυτόχρονη διαχείριση επικοινωνίας και τοπικής επεξεργασίας δεδομένων σε περιβάλλοντα IoT.

Η χρήση κατάλληλων πρωτοκόλλων ανά επίπεδο εξυπηρετεί:

- τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας,
- τη μείωση της καθυστέρησης μετάδοσης (latency),
- την αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο,
- και τη διασφάλιση της ασφάλειας και της διαλειτουργικότητας.

Ακολουθεί ένας συγκεντρωτικός πίνακας που παρουσιάζει τα βασικά πρωτόκολλα επικοινωνίας του IoT, ανά επίπεδο, συνοδευόμενος από τα βασικά χαρακτηριστικά τους, τους περιορισμούς, και τις κύριες χρήσεις τους. Η επιλογή των πρωτοκόλλων βασίστηκε αποκλειστικά σε εκείνα που έχουν σχεδιαστεί ή χρησιμοποιούνται ευρέως σε περιβάλλοντα IoT.

Πίνακας 1: Πίνακας πρωτοκόλλων του IoT.

Όνομα Πρωτοκόλλου	Επίπεδα Επικοινωνίας	Βασικά Χαρακτηριστικά	Περιορισμοί	Τυπικές Χρήσεις
<i>IEEE 802.15.4</i>	Φυσικό	Χαμηλής ισχύος, μικρής εμβέλειας, υποστήριξη πολυπλεξίας	Χαμηλό εύρος ζώνης, περιορισμένη εμβέλεια	Βάση για ZigBee, ασύρματοι αισθητήρες
<i>ZigBee</i>	Φυσικό	Mesh topologies, χαμηλή κατανάλωση	Μικρή ταχύτητα δεδομένων	Οικιακό αυτοματισμό, έξυπνα δίκτυα
<i>Bluetooth Low Energy (BLE)</i>	Φυσικό	Εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση	Περιορισμένο εύρος και ρυθμός δεδομένων	Φορητές συσκευές, ιατρικά συστήματα
<i>6LoWPAN</i>	Δίκτυο και Ομίχλης	Συμπίεση IPv6 για περιορισμένους κόμβους	Μικρή υποστήριξη TCP	Ενσωμάτωση IoT με internet
<i>RPL</i>	Δίκτυο και Ομίχλης	Δρομολόγηση για ασύρματα δίκτυα αισθητήρων	Συχνή ανανέωση δέντρων δρομολόγησης	Δίκτυα IoT σε εξωτερικούς χώρους
<i>MQTT</i>	Δίκτυο και Ομίχλης/ Υπολογιστικού Νέφους / Συνόδου / Εφαρμογών	Ελαφρύ, αρχιτεκτονική δημοσίευσης/εγγραφής(publish/ subscribe) μέσω broker, μπορεί να λειτουργεί σε fog κόμβους για τοπική επεξεργασία	Απαραίτητος broker, περιορισμένη εγγενής υποστήριξη QoS, ζητήματα ασφάλειας αν δεν υλοποιηθεί σωστά	Smart homes, βιομηχανικές εφαρμογές, cloud IoT
<i>CoAP</i>	Συνόδου / Υπηρεσιών/ Εφαρμογών	RESTful επικοινωνία πάνω από UDP, σχεδιασμένο για συσκευές με περιορισμένους πόρους	Δεν υποστηρίζει TCP, περιορισμένα QoS	Αισθητήρες, δίκτυα περιορισμένων συσκευών, ελαφριές IoT εφαρμογές
<i>AMQP</i>	Υπολογιστικού Νέφους / Υπηρεσιών / Συνόδου	Υψηλή αξιοπιστία, queues	Απαιτείται περισσότερη υπολογιστική ισχύς	Βιομηχανικά συστήματα, οικονομικά δεδομένα

<i>HTTP(S)</i>	Υπηρεσιών / Συνόδου / Εφαρμογών	Ευρεία υποστήριξη, βασισμένο σε TCP	Overhead TCP, latency	Web APIs, IoT εφαρμογές
<i>WebSockets</i>	Υπηρεσιών / Συνόδου / Εφαρμογών	Διπλής κατεύθυνσης επικοινωνία, real-time	Πιο περίπλοκο από HTTP	Εφαρμογές real-time, dashboards
<i>OPC UA</i>	Ομίχλης / Υπηρεσιών / Εφαρμογών	Ασφάλεια, τυποποίηση, υποστήριξη edge/cloud, βιομηχανική χρήση	Υψηλή πολυπλοκότητα	Βιομηχανικός αυτοματισμός, διασύνδεση SCADA, real-time IoT
<i>SOAP</i>	Υπηρεσιών / Συνόδου / Εφαρμογών	XML-based, υποστήριξη συνόδων	Βαρύ, όχι αποδοτικό για μικρές συσκευές	Εταιρικά περιβάλλοντα, web services

- **Φυσικό Επίπεδο**

Στο φυσικό επίπεδο βρίσκονται τα πρωτόκολλα που σχετίζονται με την ασύρματη επικοινωνία μικρής εμβέλειας και χαμηλής ισχύος. Το IEEE 802.15.4 αποτελεί θεμέλιο για ασύρματα αισθητήρια δίκτυα, με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και υποστήριξη για πολυπλεξία. Παρά τη μικρή εμβέλεια και το περιορισμένο εύρος ζώνης, χρησιμοποιείται ευρέως ως βάση για το ZigBee, που υποστηρίζει mesh topologies και βρίσκεται εφαρμογή σε συστήματα οικιακού αυτοματισμού και έξυπνα δίκτυα [11], [32], [54]. Το Bluetooth Low Energy (BLE), επίσης μέρος του φυσικού επιπέδου, διακρίνεται για την εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, αν και με περιορισμένο εύρος και ρυθμό μετάδοσης. Χρησιμοποιείται ευρέως σε φορητές συσκευές και ιατρικά συστήματα [54].

- **Επίπεδο Δικτύου και Ομίχλης**

Το ενοποιημένο επίπεδο δικτύου και ομίχλης περιλαμβάνει πρωτόκολλα που διασφαλίζουν τη μεταφορά και τη δρομολόγηση των δεδομένων από τις IoT συσκευές προς ανώτερα στρώματα, ενώ επιτρέπουν και επεξεργασία σε τοπικό επίπεδο (Fog). Το 6LoWPAN είναι ένα πρωτόκολλο συμπίεσης IPv6 για χρήση σε κόμβους με περιορισμένους πόρους, διευκολύνοντας τη διασύνδεση IoT συστημάτων με το Διαδίκτυο. Περιορίζεται κυρίως από τη μικρή υποστήριξη TCP [32]. Το RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία και διατήρηση δέντρων δρομολόγησης. Παρότι προσφέρει ευελιξία, η συχνή ανανέωση των δέντρων ενδέχεται να επιβαρύνει τους πόρους του συστήματος. Χρησιμοποιείται κυρίως σε εξωτερικά IoT δίκτυα όπως έξυπνες πόλεις και αγροτικά δίκτυα αισθητήρων [16], [32].

Επιπλέον, ορισμένα πρωτόκολλα που συνήθως κατατάσσονται σε ανώτερα επίπεδα, όπως το MQTT και το OPC UA, μπορούν επίσης να λειτουργήσουν στο επίπεδο της ομίχλης, ιδιαίτερα σε βιομηχανικά σενάρια όπου απαιτείται τοπική επεξεργασία δεδομένων με αξιοπιστία και ασφάλεια [16], [32].

- **Επίπεδο Υπολογιστικού Νέφους**

Στο επίπεδο του νέφους ανήκουν πρωτόκολλα που διευκολύνουν την ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ συσκευών και υπηρεσιών μέσω brokers. Το MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) είναι ένα ελαφρύ πρωτόκολλο βασισμένο σε αρχιτεκτονική δημοσίευσης/εγγραφής (publish/subscribe) και είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές με περιορισμένους πόρους, όπως τα έξυπνα σπίτια (smart homes). Ωστόσο, απαιτεί την ύπαρξη broker και η υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας (QoS) δεν είναι εγγενής [54], [55]. Το AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) είναι ένα πρωτόκολλο ουράς μηνυμάτων που υποστηρίζει αξιόπιστη επικοινωνία και μηχανισμούς διασφάλισης παράδοσης, όπως μία φορά το πολύ (at-most-once), τουλάχιστον μία φορά (at-least-once) και ακριβώς μία φορά (exactly-once). Το AMQP είναι κατάλληλο για επιχειρησιακές εφαρμογές και για διασύνδεση συστημάτων σε περιβάλλοντα υπολογιστικού νέφους, προσφέροντας υψηλή ασφάλεια, δυνατότητες δρομολόγησης και διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών συστημάτων. Το CoAP (Constrained Application Protocol), μολονότι χρησιμοποιείται ευρέως στο επίπεδο εφαρμογών, μπορεί επίσης να ενταχθεί στο επίπεδο νέφους, καθώς επιτρέπει RESTful επικοινωνία με χαμηλό latency μέσω UDP και υποστηρίζει εφαρμογές περιορισμένων πόρων. Παρότι δεν υποστηρίζει TCP, παραμένει ευέλικτο για επικοινωνία συσκευών σε περιβάλλον IoT [11].

- **Επίπεδο Υπηρεσιών**

Στο επίπεδο υπηρεσιών λειτουργούν πρωτόκολλα που παρέχουν πρόσβαση σε δεδομένα μέσω web APIs. Το OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture) αποτελεί πρότυπο βιομηχανικής επικοινωνίας και διαλειτουργικότητας. Παρέχει ισχυρή ασφάλεια, δομημένη πρόσβαση σε δεδομένα και

ανεξαρτησία από πλατφόρμες. Αν και η πολυπλοκότητά του είναι αυξημένη, είναι ευρέως αποδεκτό σε βιομηχανικά περιβάλλοντα [32].

Επιπλέον, τα HTTP(S), WebSockets και SOAP είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα στο επίπεδο υπηρεσιών, καθώς επιτρέπουν την εκτέλεση και κατανάλωση υπηρεσιών μέσω διαδικτυακών διεπαφών. Το HTTP/HTTPS είναι η βασική τεχνολογία για client-server εφαρμογές, το WebSocket επιτρέπει συνεχή αμφίδρομη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο, ενώ το SOAP, παρότι πιο βαρύ λόγω χρήσης XML, παρέχει αυστηρή τυποποίηση και είναι κατάλληλο για επιχειρησιακές πλατφόρμες [16], [32].

Το CoAP μπορεί επίσης να ενταχθεί στο επίπεδο υπηρεσιών, καθώς παρέχει RESTful web διεπαφές με πολύ χαμηλό αποτύπωμα και καθυστέρηση, γεγονός που το καθιστά ιδανικό για υπηρεσίες μεταξύ IoT κόμβων σε περιορισμένα περιβάλλοντα [11].

- **Επίπεδο Συνόδου**

Το επίπεδο συνόδου είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση ενεργών συνδέσεων μεταξύ συσκευών και υπηρεσιών, καθώς και τη διατήρηση συνεδριών επικοινωνίας. Το AMQP αποτελεί ένα session-based πρωτόκολλο με προηγμένες δυνατότητες διαχείρισης ουρών, αξιόπιστης παράδοσης και ασφαλούς routing μηνυμάτων. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για βιομηχανικές και επιχειρησιακές εφαρμογές που απαιτούν σταθερή συνδεσιμότητα [11], [55]. Το MQTT, αν και συχνά εντάσσεται στο επίπεδο εφαρμογών ή υπηρεσιών, μπορεί να λειτουργεί και στο επίπεδο συνόδου, καθώς περιλαμβάνει μηχανισμούς διατήρησης συνδέσεων και επιλογής QoS, γεγονός που το καθιστά κατάλληλο για επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο και παρακολούθηση καταστάσεων [55]. Τα πρωτόκολλα HTTP(S) και WebSocket εντάσσονται επίσης στο επίπεδο συνόδου, καθώς εμπλέκονται άμεσα στην έναρξη, διαχείριση και διατήρηση επικοινωνιών μεταξύ συσκευών και servers. Το WebSocket προσφέρει σταθερή και συνεχή σύνδεση χωρίς την ανάγκη επαναλαμβανόμενων αιτήσεων, ενώ το HTTP/HTTPS χειρίζεται τις βασικές λειτουργίες αιτήσεων και απαντήσεων [32]. Το SOAP, παρόλο που είναι πρωτόκολλο επιπέδου υπηρεσιών, ενσωματώνει και στοιχεία συνεδρίας μέσω μηχανισμών WS-Security και WS-ReliableMessaging, και για αυτό μπορεί να αναφέρεται και στο επίπεδο συνόδου [55].

- **Επίπεδο Εφαρμογών**

Το επίπεδο εφαρμογών είναι υπεύθυνο για την αλληλεπίδραση του τελικού χρήστη με το IoT σύστημα και αξιοποιεί πλήρως τα πρωτόκολλα που υλοποιούν τη λειτουργικότητα των υπηρεσιών. Εκτός από τα HTTP/HTTPS και WebSocket που συνήθως χρησιμοποιούνται σε web εφαρμογές ή πίνακες ελέγχου (dashboards), στο επίπεδο αυτό αξιοποιούνται επίσης τα MQTT, CoAP, OPC UA και SOAP.

Το MQTT υποστηρίζει την επικοινωνία εφαρμογών με IoT κόμβους σε πραγματικό χρόνο, ενώ το CoAP επιτρέπει RESTful λειτουργίες για εφαρμογές με περιορισμένους πόρους. Το OPC UA προσφέρει την ενοποιημένη πρόσβαση και χρήση δεδομένων σε βιομηχανικές εφαρμογές, ενώ το SOAP επιτρέπει τη χρήση δομημένων μηνυμάτων XML για διασυνδέσεις με legacy ή enterprise συστήματα [32], [54], [55].

3.6 Οφέλη και Εφαρμογές

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) είναι ένα σύστημα που συνδέει φυσικές συσκευές, αισθητήρες και άλλες τεχνολογίες μέσω του Διαδικτύου για να επιτρέψει τη συλλογή, ανταλλαγή και ανάλυση δεδομένων. Οι εφαρμογές του IoT είναι ποικίλες και παρέχουν σημαντικά οφέλη σε πολλούς τομείς. Οι εφαρμογές και τα πλεονεκτήματα του IoT περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες δύο υπο-ενότητες.

3.6.1 Εφαρμογές του IoT

- **Έξυπνα εργοστάσια (Smart Factories):**

Στα έξυπνα εργοστάσια, η ενσωμάτωση του IoT επαναπροσδιορίζει τη λειτουργία της βιομηχανίας, προσφέροντας αυτοματοποιημένη παρακολούθηση και διαχείριση διαδικασιών. Μέσω αισθητήρων που παρακολουθούν κρίσιμες παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία και η πίεση, μπορούν να εντοπίζονται προβλήματα πριν αυτά εξελιχθούν, μειώνοντας τον χρόνο και το κόστος συντήρησης. Επιπλέον, τεχνολογίες, όπως το RFID, επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη διαχείριση αποθήκης, εξασφαλίζοντας την αποδοτική διανομή υλικών και προϊόντων. Αυτές οι λύσεις εφαρμόζονται ευρέως σε προηγμένα βιομηχανικά περιβάλλοντα για τη βελτίωση της παραγωγικότητας και της αποδοτικότητας.

Η Bosch, για παράδειγμα, αξιοποιεί IoT αισθητήρες σε γραμμές παραγωγής για την παρακολούθηση μηχανημάτων σε πραγματικό χρόνο. Οι αισθητήρες αυτοί, όπως προαναφέρθηκε, συλλέγουν δεδομένα, τα οποία αναλύονται για την ανίχνευση ανωμαλιών. Λόγου χάρη, αν ανιχνευτεί υπερβολική θερμοκρασία σε έναν κινητήρα, το σύστημα μπορεί να ειδοποιήσει τους τεχνικούς να διορθώσουν το πρόβλημα, χωρίς κάποια απώλεια χρόνου και χρημάτων. [19]

Από την άλλη πλευρά, η Rolls-Royce χρησιμοποιεί IoT για τη δημιουργία των μηχανών αεροσκαφών της. Οι αισθητήρες καταγράφουν δεδομένα κατά τη διάρκεια της πτήσης, όπως ταχύτητα, κατανάλωση καυσίμου και κραδασμούς. Αυτά τα δεδομένα αποστέλλονται σε κέντρα δεδομένων, όπου αναλύονται για να προβλέψουν αστοχίες πριν επηρεάσουν την ασφάλεια των πτήσεων, μειώνοντας τους χρόνους διακοπής των αεροσκαφών. [18]

- **Έξυπνα αυτοκίνητα (Smart Cars):**

Τα έξυπνα αυτοκίνητα κάνουν τη μετακίνηση ασφαλέστερη και αποδοτικότερη. Για παράδειγμα, μέσω αισθητήρων και συστημάτων V2V (Vehicle-to-Vehicle Communication), ένα αυτοκίνητο μπορεί να ειδοποιήσει άλλα πχ. για απότομο φρενάρισμα, μειώνοντας τον κίνδυνο καραμπόλας. Επιπλέον, η τεχνολογία IoT επιτρέπει την αυτόνομη οδήγηση. Ένα όχημα που χρησιμοποιεί αισθητήρες πχ. lidar και κάμερες μπορεί να εντοπίσει πεζούς σε μια διάβαση και να σταματήσει αυτόματα. Ταυτόχρονα, οι οδηγοί μπορούν να ενημερώνονται για τη κυκλοφοριακή συμφόρηση ή αλλαγές στις συνθήκες δρόμου σε πραγματικό χρόνο μέσω δεδομένων που συλλέγονται από αισθητήρες στις (κυκλοφοριακές) υποδομές.

Ένα παράδειγμα χρήσης αυτόνομης οδήγησης (Autopilot) αφορά τα προϊόντα της εταιρείας Tesla, τα οποία χρησιμοποιούν κάμερες, αισθητήρες και λογισμικό που βασίζεται σε IoT για να συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Με αυτό τον τρόπο, το αυτοκίνητο μπορεί να εντοπίσει εμπόδια στον δρόμο, να προσαρμόσει την ταχύτητα και να αλλάξει λωρίδες με ασφάλεια. Όλα τα δεδομένα αναλύονται συνεχώς και ενημερώνουν το σύστημα για βελτιώσεις, κάνοντας τα οχήματα πιο ασφαλή με την πάροδο του χρόνου. [20]

Μια ακόμη εξελιγμένη εταιρεία αυτοκινήτων που χρησιμοποιεί IoT είναι η BMW. Συγκεκριμένα, η εταιρεία έχει ενσωματώσει στις υπηρεσίες των μοντέλων της το ConnectedDrive, δηλαδή ένα σύνολο «έξυπνων» υπηρεσιών και εφαρμογών που προσφέρουν στον χρήστη πληροφόρηση και ψυχαγωγία μέσα στο αυτοκίνητο του. Με αυτό τον τρόπο, οι προσφερόμενες υπηρεσίες της έχουν πλέον ενισχυθεί, περιλαμβάνοντας πληροφορίες κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο, ενημερώσεις για διαθέσιμους χώρους στάθμευσης και απομακρυσμένο έλεγχο του οχήματος μέσω έξυπνων κινητών (smartphones). Το ConnectedDrive βελτιώνει την οδηγική εμπειρία, διευκολύνοντας την καθημερινή ζωή των οδηγών. [21]

- **Έξυπνες υποδομές (Smart Infrastructures):**

Οι υποδομές γίνονται πιο ανθεκτικές και αποδοτικές μέσω του IoT. Για παράδειγμα, αισθητήρες σε μια γέφυρα μπορούν να καταγράψουν μικροκινήσεις ή ρωγμές στο υλικό, παρέχοντας πληροφορίες για τη στατική της κατάσταση. Έπειτα, οι μηχανικοί μπορούν να αναλύσουν τα δεδομένα αυτά και να πραγματοποιήσουν προληπτική συντήρηση προτού προκύψουν σοβαρά προβλήματα. Στις αστικές περιοχές, αισθητήρες κυκλοφορίας συνδεδεμένοι με φανάρια ρυθμίζουν τη ροή οχημάτων ανάλογα με την κίνηση, μειώνοντας τη συμφόρηση και τις καθυστερήσεις.

Δύο παραδείγματα έξυπνων υποδομών είναι τα εξής:

- Η Γέφυρα Akashi Kaikyo στην Ιαπωνία, η οποία είναι εξοπλισμένη με αισθητήρες για την ανίχνευση κραδασμών και δομικών φθορών, παρέχοντας έγκαιρες ειδοποιήσεις για συντήρηση. [22]
 - Το Σιδηροδρομικό Δίκτυο της Deutsche Bahn στη Γερμανία που χρησιμοποιεί αισθητήρες IoT για την παρακολούθηση της κατάστασης των σιδηροδρομικών γραμμών και των τρένων, διασφαλίζοντας την ασφάλεια και την έγκαιρη συντήρηση. [23]
- **Έξυπνα κτίρια (Smart Buildings):**

Στα έξυπνα κτίρια, η τεχνολογία IoT παρέχει εργαλεία για ενεργειακή αποδοτικότητα και άνεση. Για παράδειγμα, οι θερμοστάτες που βασίζονται στο IoT μπορούν να προσαρμόζουν αυτόματα τη θερμοκρασία ανάλογα με την παρουσία ατόμων στο χώρο, μειώνοντας τη σπατάλη ενέργειας. Αντίστοιχα, συστήματα φωτισμού μπορούν να σβήνουν αυτόματα σε δωμάτια που δεν χρησιμοποιούνται. Στην ασφάλεια, οι έξυπνες κάμερες παρακολουθούν τις εισόδους και ειδοποιούν τους ενοίκους μέσω εφαρμογών αν ανιχνευθεί ύποπτη κίνηση. Όλα αυτά τα συστήματα συνδέονται με εφαρμογές που επιτρέπουν στους χρήστες να ελέγχουν το σπίτι ή το γραφείο τους από μακριά.

Παραδείγματα σχετικών προϊόντων είναι τα ακόλουθα:

- The Edge (Άμστερνταμ): Το κτίριο χρησιμοποιεί IoT για την παρακολούθηση ενέργειας, φωτισμού και χώρων εργασίας, παρέχοντας εξαιρετική ενεργειακή απόδοση. [24]
 - Burj Khalifa (Ντουμπάι): Χρησιμοποιεί IoT για απομακρυσμένη διαχείριση φωτισμού, ανελκυστήρων και κλιματισμού, επιτρέποντας πρόβλεψη βλαβών και συντήρηση χωρίς διακοπές. [25]
- **Έξυπνες πόλεις (Smart Cities):**

Οι έξυπνες πόλεις χρησιμοποιούν το IoT για να βελτιώσουν τις δημόσιες υπηρεσίες τους. Για παράδειγμα, σε πολλές πόλεις έχουν εγκατασταθεί έξυπνοι κάδοι απορριμμάτων που διαθέτουν αισθητήρες για να ανιχνεύουν πότε είναι γεμάτοι. Με αυτό τον τρόπο, οι υπηρεσίες καθαριότητας λαμβάνουν ειδοποιήσεις και προγραμματίζουν τις διαδρομές συλλογής με αποδοτικό τρόπο, μειώνοντας τα καύσιμα και τον χρόνο. Επίσης, οι αισθητήρες ποιότητας αέρα μπορούν να παρακολουθούν τη ρύπανση σε πραγματικό χρόνο, βοηθώντας τις αρχές να λαμβάνουν μέτρα για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής. Τέλος, μέσω συστημάτων διαχείρισης νερού, οι διαρροές εντοπίζονται και επιδιορθώνονται πριν προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα.

Παραδείγματα έξυπνων πόλεων:

- Σιγκαπούρη: Το έξυπνο σύστημα φαναριών με IoT ρυθμίζει τη ροή κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο, μειώνοντας τη συμφόρηση και δίνοντας προτεραιότητα σε οχήματα έκτακτης ανάγκης. [26]
- Βαρκελώνη: Χρήση έξυπνων κάδων απορριμμάτων με αισθητήρες που ενημερώνουν πότε πρέπει να αδειάζουν, μειώνοντας τη σπατάλη πόρων. [27]

- **Τομέας ενέργειας (Energy Sector):**

Στον ενεργειακό τομέα, το IoT προσφέρει λύσεις τόσο για καταναλωτές όσο και για παρόχους. Ένα παράδειγμα είναι οι έξυπνοι μετρητές ηλεκτρικού ρεύματος, οι οποίοι δίνουν τη δυνατότητα στους καταναλωτές να βλέπουν πόση ενέργεια καταναλώνουν κάθε στιγμή και να προσαρμόζουν τις συνήθειές τους. Για τους παρόχους, οι μετρητές αυτοί στέλνουν δεδομένα για τη συνολική κατανάλωση, επιτρέποντας καλύτερο προγραμματισμό της παραγωγής και διανομής ενέργειας. Τα έξυπνα δίκτυα (smart grids) ενσωματώνουν επίσης ηλιακή και αιολική ενέργεια, μειώνοντας την ανάγκη για εργοστάσια παραγωγής με καύσιμα. Σε περίπτωση υπερφόρτωσης του δικτύου, τα δεδομένα IoT επιτρέπουν την άμεση ανακατεύθυνση ενέργειας σε περιοχές με χαμηλότερη ζήτηση.

Παραδείγματα έξυπνων λύσεων σε αυτό τον τομέα:

- Enel (Ιταλία): Ανάπτυξη έξυπνων δικτύων IoT που επιτρέπουν τη διαχείριση και ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. [28]
- Pacific Gas & Electric (ΗΠΑ): Χρήση έξυπνων μετρητών για την παρακολούθηση κατανάλωσης ενέργειας και τη βελτίωση της απόδοσης των δικτύων. [29]

3.6.2 Οφέλη του IoT

- **Αυτοματοποίηση**

Η αυτοματοποίηση μέσω του IoT αποτελεί μία από τις σημαντικότερες τεχνολογικές εξελίξεις, που επιτρέπει την εκτέλεση λειτουργιών χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης. Αυτή η διαδικασία βασίζεται στη διασύνδεση συσκευών, αισθητήρων και συστημάτων μέσω του διαδικτύου (ή άλλων δικτύων), επιτρέποντας την ανταλλαγή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Οι συσκευές που είναι εξοπλισμένες με τεχνολογία IoT μπορούν να συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον τους, να τα αναλύουν και να ενεργούν αυτόνομα με βάση προκαθορισμένους κανόνες ή μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης [2], [5].

Στο οικιακό περιβάλλον, η αυτοματοποίηση βελτιώνει την ποιότητα ζωής, εξοικονομώντας χρόνο και ενέργεια. Για παράδειγμα, ένα σύστημα έξυπνης θέρμανσης μπορεί να ρυθμίζει αυτόματα τη θερμοκρασία του σπιτιού με βάση τις προτιμήσεις των χρηστών, την εξωτερική θερμοκρασία και το αν οι κάτοικοι είναι παρόντες ή όχι. Ένα έξυπνο σύστημα φωτισμού μπορεί να προσαρμόζει την ένταση και το χρώμα του φωτός ανάλογα με την ώρα της ημέρας ή τις δραστηριότητες των χρηστών, δημιουργώντας ένα ευχάριστο και ενεργειακά αποδοτικό περιβάλλον. Συσκευές, όπως οι έξυπνες πρίζες, τα συστήματα ασφαλείας και οι κάμερες παρακολούθησης, επιτρέπουν τον απομακρυσμένο έλεγχο και την αυτοματοποίηση λειτουργιών, όπως το άνοιγμα των φώτων, το κλείδωμα των πορτών και η ενεργοποίηση συναγερμών [63], [65], [2].

Στον βιομηχανικό τομέα, η αυτοματοποίηση μέσω IoT βελτιώνει την παραγωγικότητα και μειώνει το κόστος λειτουργίας. Τα συστήματα παρακολούθησης μηχανημάτων εξοπλισμένα με αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύουν την κατάσταση και τις επιδόσεις του εξοπλισμού σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας δόνησης σε μια μηχανή παραγωγής μπορεί να εντοπίσει ανωμαλίες στη λειτουργία της και να ειδοποιήσει το σύστημα διαχείρισης για την ανάγκη προληπτικής συντήρησης, προτού συμβεί κάποια σοβαρή βλάβη. Με αυτόν τον τρόπο, αποφεύγονται δαπανηρές διακοπές παραγωγής και μειώνονται τα λειτουργικά έξοδα [2], [8], [11].

Ένα ακόμη παράδειγμα αυτοματοποίησης στον βιομηχανικό τομέα είναι η χρήση ρομποτικών συστημάτων που εκτελούν εργασίες, όπως η συναρμολόγηση, η συσκευασία και η αποθήκευση προϊόντων, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Αυτά τα συστήματα είναι συνδεδεμένα με το διαδίκτυο και μπορούν να ανταλλάσσουν δεδομένα με άλλα μηχανήματα ή να λαμβάνουν εντολές από κεντρικά συστήματα διαχείρισης [2], [11].

Στον τομέα της γεωργίας, η αυτοματοποίηση μέσω IoT επιτρέπει την παρακολούθηση της κατάστασης των καλλιεργειών και την ακριβή εφαρμογή λιπασμάτων και νερού. Οι αγρότες μπορούν να χρησιμοποιούν συστήματα αυτόματης άρδευσης που προσαρμόζονται με βάση τις κλιματικές συνθήκες, τη θερμοκρασία του εδάφους και την υγρασία. Αυτό μειώνει την κατανάλωση νερού και ενισχύει τη βιωσιμότητα της γεωργίας [2], [66].

Η αυτοματοποίηση μέσω IoT είναι η κινητήρια δύναμη πίσω από την ανάπτυξη των έξυπνων πόλεων, όπου φανάρια, συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων και υπηρεσίες ύδρευσης λειτουργούν αυτόματα, με στόχο τη βελτίωση της ζωής των πολιτών και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Τα φανάρια κυκλοφορίας μπορούν να προσαρμόζουν τις ρυθμίσεις τους ανάλογα με την κίνηση στους δρόμους, μειώνοντας τη συμφόρηση και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Οι αισθητήρες σε δοχεία απορριμμάτων μπορούν να ειδοποιούν τις δημοτικές αρχές όταν γεμίζουν, βελτιώνοντας τη συχνότητα και την αποδοτικότητα της αποκομιδής [2], [11].

Η αυτοματοποίηση μέσω IoT προσφέρει σημαντικά οφέλη σε διάφορους τομείς, μειώνοντας τα έξοδα, βελτιώνοντας την παραγωγικότητα και ενισχύοντας την ποιότητα ζωής.

- **Βελτίωση απόδοσης**

Η βελτίωση της απόδοσης αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς τομείς εφαρμογής του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), καθώς η τεχνολογία επιτρέπει τη συλλογή και ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες και γνώσεις για τη βελτίωση συστημάτων και διαδικασιών. Οι συσκευές IoT εξοπλισμένες με αισθητήρες και συνδεδεμένες πλατφόρμες μπορούν να παρακολουθούν, να μετρούν και να αναλύουν συνεχώς την απόδοση μιας επιχείρησης ή ενός συστήματος, επιτρέποντας στους διαχειριστές να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις βάσει των δεδομένων που συλλέγονται [2], [8].

Στον βιομηχανικό τομέα, η βελτίωση της απόδοσης μέσω του IoT αφορά κυρίως την παρακολούθηση της κατάστασης του εξοπλισμού και των γραμμών παραγωγής. Οι αισθητήρες καταγράφουν δεδομένα σχετικά με τη λειτουργία των μηχανημάτων, όπως τη θερμοκρασία, τις δονήσεις και την κατανάλωση ενέργειας. Αυτά τα δεδομένα αναλύονται για να ανιχνεύσουν ανωμαλίες και να προβλέψουν πιθανές βλάβες, επιτρέποντας στους διαχειριστές να προγραμματίσουν τη συντήρηση πριν από την εμφάνιση σοβαρών προβλημάτων. Αυτό μειώνει τις διακοπές λειτουργίας και βελτιστοποιεί τη χρήση των πόρων, συμβάλλοντας στη μείωση του κόστους λειτουργίας [2], [8], [11].

Στον τομέα της εφοδιαστικής αλυσίδας και της διαχείρισης αποθεμάτων, το IoT βοηθά στην παρακολούθηση των προϊόντων καθ' όλη τη διάρκεια της παραγωγικής και μεταφορικής διαδικασίας. Οι επιχειρήσεις μπορούν να γνωρίζουν ακριβώς τη θέση και την κατάσταση των εμπορευμάτων τους, αποφεύγοντας καθυστερήσεις, απώλειες ή φθορές. Για παράδειγμα, οι εταιρείες επιμελητείας (logistics) χρησιμοποιούν συσκευές GPS και αισθητήρες θερμοκρασίας για τη μεταφορά ευαίσθητων προϊόντων, όπως φαρμακευτικά προϊόντα ή τρόφιμα, διασφαλίζοντας την ποιότητα και την ασφάλειά τους [66].

Στον τομέα της γεωργίας, η βελτίωση της απόδοσης μέσω του IoT επιτυγχάνεται με τη χρήση αισθητήρων που παρακολουθούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως την υγρασία του εδάφους, τη θερμοκρασία και τις καιρικές συνθήκες. Οι αγρότες μπορούν να προσαρμόζουν την άρδευση, τη λίπανση και την

προστασία των καλλιεργειών με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται, εξοικονομώντας νερό, ενέργεια και χημικά προϊόντα. Αυτή η προσέγγιση βελτιώνει τις αποδόσεις της παραγωγής, ενώ παράλληλα μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις [66].

Στον τομέα της υγείας, το IoT βελτιώνει την απόδοση των υπηρεσιών υγειονομικής περίθαλψης μέσω συνδεδεμένων ιατρικών συσκευών που παρακολουθούν τη φυσική κατάσταση και τις ζωτικές ενδείξεις των ασθενών σε πραγματικό χρόνο. Οι γιατροί μπορούν να παρακολουθούν εξ αποστάσεως την κατάσταση των ασθενών, να λαμβάνουν ειδοποιήσεις για κρίσιμες αλλαγές και να προσαρμόζουν τις θεραπείες ανάλογα με τις ανάγκες. Αυτό μειώνει τις ανάγκες για φυσικές επισκέψεις στα νοσοκομεία, ενισχύοντας την αποδοτικότητα του συστήματος υγείας και εξοικονομώντας πολύτιμους πόρους [2].

Στα έξυπνα κτίρια, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης επιτυγχάνεται μέσω της παρακολούθησης και της αυτοματοποίησης συστημάτων φωτισμού, θέρμανσης και κλιματισμού. Οι αισθητήρες IoT καταγράφουν την παρουσία των ενοίκων, τη θερμοκρασία και το φυσικό φως, προσαρμόζοντας δυναμικά τη λειτουργία των συστημάτων ανάλογα με τις πραγματικές ανάγκες.

Για παράδειγμα, σε ένα κτίριο με γραφεία, εάν ένας χώρος δεν χρησιμοποιείται, τα φώτα και ο κλιματισμός απενεργοποιούνται αυτόματα, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας. Έρευνες δείχνουν ότι τέτοιου είδους αυτοματισμοί μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση έως και 30%, προσφέροντας άμεση εξοικονόμηση κόστους για τον διαχειριστή του κτιρίου. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το Empire State Building, το οποίο μετά από την υιοθέτηση τεχνολογιών IoT και ενεργειακής διαχείρισης, πέτυχε μείωση ενεργειακής κατανάλωσης κατά 38% και ετήσια εξοικονόμηση κόστους πάνω από 4 εκατομμύρια δολάρια [31]. Έτσι, η χρήση IoT στα έξυπνα κτίρια δεν περιορίζεται μόνο στην άνεση, αλλά συνδέεται άμεσα με την αύξηση της ενεργειακής και λειτουργικής απόδοσης.

Στις έξυπνες πόλεις, το IoT συμβάλλει στην αποδοτικότερη διαχείριση των αστικών πόρων. Συστήματα παρακολούθησης της κυκλοφορίας, των δικτύων ύδρευσης και των συστημάτων διαχείρισης απορριμμάτων βοηθούν στη βελτίωση των δημόσιων υπηρεσιών, μειώνοντας τη σπατάλη και εξοικονομώντας πόρους. Τα φανάρια κυκλοφορίας προσαρμόζουν τη λειτουργία τους με βάση την κυκλοφοριακή συμφόρηση, ενώ οι αισθητήρες στα δοχεία απορριμμάτων ενημερώνουν τις δημοτικές υπηρεσίες όταν γεμίζουν, βελτιώνοντας τη συχνότητα συλλογής απορριμμάτων [2].

Η βελτίωση της απόδοσης μέσω του IoT στηρίζεται στην έξυπνη χρήση δεδομένων και τη συνεχή ανάλυση τους. Οι επιχειρήσεις και οι οργανισμοί που αξιοποιούν αυτήν την τεχνολογία μπορούν να προσαρμόζουν τις στρατηγικές τους, να εξοικονομούν πόρους και να ανταποκρίνονται πιο γρήγορα στις μεταβαλλόμενες ανάγκες της αγοράς ή των πολιτών. Παράλληλα, η πρόοδος στις τεχνολογίες ανάλυσης μεγάλων δεδομένων και μηχανικής μάθησης προσφέρει νέες δυνατότητες, ενισχύοντας την αυτοματοποίηση και τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων με βάση αξιόπιστες πληροφορίες [8].

- **Μείωση κόστους**

Η μείωση του κόστους μέσω της χρήσης του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους λόγους υιοθέτησης της τεχνολογίας αυτής από επιχειρήσεις και οργανισμούς. Η βασική αρχή πίσω από αυτήν την εξοικονόμηση είναι η δυνατότητα απομακρυσμένης διαχείρισης συσκευών, υποδομών και συστημάτων, γεγονός που επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση και την έγκαιρη παρέμβαση, μειώνοντας έτσι τα λειτουργικά έξοδα και τις ανάγκες συντήρησης [2], [8].

Στον βιομηχανικό τομέα, η μείωση του κόστους επιτυγχάνεται μέσω της παρακολούθησης της κατάστασης του εξοπλισμού και της προληπτικής συντήρησης. Οι αισθητήρες IoT που είναι εγκατεστημένοι σε μηχανήματα μπορούν να ανιχνεύσουν προβλήματα στη λειτουργία, όπως υπερβολική κατανάλωση ενέργειας, φθορά εξαρτημάτων ή αύξηση της θερμοκρασίας. Όταν ανιχνεύονται τέτοια

προβλήματα, οι υπεύθυνοι λαμβάνουν ειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την έγκαιρη επισκευή, προτού η βλάβη εξελιχθεί σε σοβαρή δυσλειτουργία που θα διακόψει την παραγωγική διαδικασία και θα αυξήσει τα κόστη επισκευής και αντικατάστασης εξοπλισμού [2], [8].

Στον τομέα της εφοδιαστικής αλυσίδας, το IoT μειώνει το κόστος παρακολούθησης και διαχείρισης αποθεμάτων. Οι αισθητήρες παρακολουθούν τη θέση και την κατάσταση των προϊόντων σε όλη τη διαδικασία μεταφοράς και αποθήκευσης, επιτρέποντας την ακριβή πρόβλεψη των αναγκών εφοδιασμού. Για παράδειγμα, οι εταιρείες επιμελητείας μπορούν να προγραμματίσουν πιο αποτελεσματικά τις διαδρομές μεταφοράς, να αποφεύγουν καθυστερήσεις και να μειώνουν το κόστος καυσίμων μέσω της βέλτιστης διαχείρισης των οχημάτων τους [66].

Στον τομέα της ενέργειας, η χρήση έξυπνων μετρητών επιτρέπει στους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας να παρακολουθούν την κατανάλωση σε πραγματικό χρόνο, να προβλέπουν αιχμές ζήτησης και να διαχειρίζονται πιο αποδοτικά την παραγωγή και τη διανομή. Οι καταναλωτές ενημερώνονται επίσης για την κατανάλωση ενέργειας και μπορούν να προσαρμόζουν τη χρήση τους, μειώνοντας το κόστος των λογαριασμών τους. Επιπλέον, οι επιχειρήσεις μπορούν να εφαρμόσουν συστήματα αυτοματισμού στα κτίρια τους για να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας και άρα το αντίστοιχο κόστος, ρυθμίζοντας αυτόματα το φωτισμό, τη θέρμανση και την ψύξη ανάλογα με την παρουσία των εργαζομένων και τις περιβαλλοντικές συνθήκες [29].

Στα έξυπνα κτίρια, η απομακρυσμένη διαχείριση και ο αυτοματισμός βοηθούν στη μείωση του κόστους συντήρησης. Οι αισθητήρες IoT παρακολουθούν τη λειτουργία συστημάτων, όπως ανελκυστήρες, κλιματιστικά και συστήματα θέρμανσης. Όταν εντοπίζεται κάποιο πρόβλημα, οι υπεύθυνοι τεχνικοί ειδοποιούνται αμέσως και μπορούν να προχωρήσουν σε αποκατάσταση προτού το ζήτημα επηρεάσει τη λειτουργία ολόκληρου του κτιρίου, αποφεύγοντας δαπανηρές βλάβες και καθυστερήσεις [31].

Στον τομέα της γεωργίας, η μείωση του κόστους επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης συστημάτων αυτόματης άρδευσης, λίπανσης και παρακολούθησης των καιρικών συνθηκών. Οι αγρότες μπορούν να γνωρίζουν ακριβώς πότε να ποτίσουν ή να εφαρμόσουν φυτοφάρμακα, εξοικονομώντας νερό, λιπάσματα και άλλα γεωργικά εφόδια. Η χρήση drones και αισθητήρων IoT μειώνει το κόστος των φυσικών επιθεωρήσεων των καλλιεργειών, καθώς η συλλογή δεδομένων γίνεται αυτόματα και με μεγαλύτερη ακρίβεια [66].

Στις έξυπνες πόλεις, το IoT συμβάλλει στη μείωση του κόστους δημόσιων υπηρεσιών. Οι αισθητήρες σε δοχεία απορριμμάτων επιτρέπουν την αποκομιδή απορριμμάτων μόνο όταν είναι γεμάτα, μειώνοντας τα έξοδα συλλογής και τη σπατάλη καυσίμων. Τα φανάρια κυκλοφορίας που προσαρμόζουν τη λειτουργία τους ανάλογα με την κίνηση εξοικονομούν ενέργεια και βελτιώνουν τη ροή των οχημάτων, μειώνοντας έτσι τη χρήση καυσίμων (και άρα το κόστος αγοράς τους) από τους οδηγούς και τις δημόσιες μεταφορές [2],[26].

Τέλος, η απομακρυσμένη διαχείριση των συσκευών IoT εξοικονομεί και ανθρώπινους πόρους. Οι υπεύθυνοι τεχνικοί μπορούν να διαχειρίζονται πολλά συστήματα από κεντρικές πλατφόρμες, περιορίζοντας την ανάγκη για φυσική παρουσία σε πολλαπλές τοποθεσίες. Η δυνατότητα πρόβλεψης και ανίχνευσης προβλημάτων μέσω ανάλυσης δεδομένων μειώνει τις μη προγραμματισμένες επισκέψεις και τα έξοδα ταξιδιών, καθιστώντας τη διαχείριση πιο αποδοτική [8].

Συνολικά, η χρήση του IoT επιτρέπει στις επιχειρήσεις και τους οργανισμούς να ελαχιστοποιούν τις απώλειες, να διαχειρίζονται πιο αποτελεσματικά τους πόρους τους και να μειώνουν το συνολικό κόστος λειτουργίας. Οι έξυπνες λύσεις IoT ενισχύουν τη βιωσιμότητα, τη λειτουργικότητα και τη μακροπρόθεσμη κερδοφορία σε πολλούς διαφορετικούς τομείς της οικονομίας.

- **Καλύτερη εμπειρία χρήστη**

Η βελτίωση της εμπειρίας χρήστη μέσω του IoT βασίζεται στην παροχή εξατομικευμένων υπηρεσιών που προσαρμόζονται στις ανάγκες, τις προτιμήσεις και τις συνήθειες των χρηστών. Οι συσκευές IoT είναι εξοπλισμένες με αισθητήρες, επεξεργαστές και συστήματα τεχνητής νοημοσύνης, τα οποία συλλέγουν δεδομένα από το περιβάλλον τους και μαθαίνουν τις συμπεριφορές των χρηστών, ώστε να παρέχουν προσωποποιημένες υπηρεσίες. Αυτό έχει σημαντικό αντίκτυπο σε διάφορους τομείς της καθημερινής ζωής, βελτιώνοντας την άνεση, την ευκολία και την αποτελεσματικότητα [2].

Στα έξυπνα σπίτια, οι συσκευές IoT διευκολύνουν την αυτόματη προσαρμογή των συστημάτων φωτισμού, θέρμανσης και κλιματισμού με βάση τις προτιμήσεις των ενοίκων. Ένα σύστημα έξυπνου φωτισμού μπορεί να ρυθμίσει την ένταση και το χρώμα των φώτων ανάλογα με την ώρα της ημέρας ή τις δραστηριότητες που πραγματοποιούνται, δημιουργώντας μια ευχάριστη ατμόσφαιρα. Ο θερμοστάτης μπορεί να ενεργοποιείται αυτόματα πριν την επιστροφή των ενοίκων στο σπίτι, εξασφαλίζοντας μια ιδανική θερμοκρασία χωρίς σπατάλη ενέργειας. Οι έξυπνες τηλεοράσεις και τα συστήματα οικιακής ψυχαγωγίας μπορούν να προσαρμόζουν τις προτάσεις τους με βάση τις προτιμήσεις των χρηστών, προσφέροντας μια πιο διαδραστική και ευχάριστη εμπειρία ψυχαγωγίας [63], [65].

Στον τομέα της υγείας, οι φορητές συσκευές IoT, όπως έξυπνα ρολόγια και βραχιόλια, παρακολουθούν την υγεία των χρηστών σε πραγματικό χρόνο, καταγράφοντας παραμέτρους, όπως ο καρδιακός ρυθμός, τα επίπεδα δραστηριότητας και ο ύπνος. Οι χρήστες λαμβάνουν εξατομικευμένες συμβουλές για την υγεία τους, ενώ οι γιατροί μπορούν να παρακολουθούν εξ αποστάσεως την κατάσταση των ασθενών, ενισχύοντας την πρόληψη και τη θεραπεία [2].

Στα έξυπνα οχήματα, τα συστήματα IoT διευκολύνουν την οδήγηση παρέχοντας εξατομικευμένες ρυθμίσεις καθισμάτων, κλιματισμού και μουσικής. Επιπλέον, τα συστήματα πλοήγησης προσαρμόζονται στις προτιμήσεις των οδηγών, προσφέροντας τις καλύτερες δυνατές διαδρομές και αποφεύγοντας την κίνηση. Οι οδηγοί λαμβάνουν επίσης ειδοποιήσεις για την κατάσταση του οχήματός τους, μειώνοντας την πιθανότητα βλαβών και επιτρέποντας την προληπτική συντήρηση των οχημάτων [20].

Στον τομέα του λιανικού εμπορίου, τα καταστήματα που χρησιμοποιούν τεχνολογίες IoT προσφέρουν πιο εξατομικευμένες εμπειρίες αγορών. Οι έξυπνοι αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύουν τις προτιμήσεις των πελατών και να προτείνουν προϊόντα ή προσφορές που ταιριάζουν στις ανάγκες τους. Τα συστήματα πληρωμών χωρίς επαφή διευκολύνουν τις συναλλαγές, μειώνοντας τον χρόνο αναμονής στα ταμεία [2].

Στις έξυπνες πόλεις, η εμπειρία των πολιτών βελτιώνεται μέσω συστημάτων που προσαρμόζουν τις δημόσιες υπηρεσίες στις ανάγκες τους. Οι εφαρμογές δημόσιων μεταφορών ενημερώνουν σε πραγματικό χρόνο για δρομολόγια και καθυστερήσεις, ενώ οι υπηρεσίες στάθμευσης καθοδηγούν τους οδηγούς σε διαθέσιμες θέσεις στάθμευσης, μειώνοντας το άγχος και εξοικονομώντας χρόνο [26].

Η δυνατότητα των συσκευών IoT να παρέχουν προσωποποιημένες υπηρεσίες βασίζεται στη συνεχή συλλογή και ανάλυση δεδομένων. Αυτή η λειτουργία εξασφαλίζει ότι οι χρήστες λαμβάνουν υπηρεσίες που ανταποκρίνονται στις ανάγκες τους, ενώ παράλληλα μειώνονται οι περιττές ενέργειες και βελτιώνεται η συνολική εμπειρία χρήστη. Ωστόσο, η χρήση αυτών των τεχνολογιών απαιτεί προσεκτική διαχείριση των προσωπικών δεδομένων, ώστε να διασφαλιστεί η ιδιωτικότητα και η ασφάλεια των χρηστών [66].

- **Ανάλυση μεγάλων δεδομένων (Big Data Analytics)**

Η ανάλυση μεγάλων δεδομένων (Big Data Analytics) αποτελεί έναν από τους πιο ισχυρούς τομείς εφαρμογής του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), καθώς η συνεχής ροή δεδομένων από συσκευές, αισθητήρες και συστήματα δημιουργεί έναν ανεκτίμητο πλούτο πληροφοριών. Οι συσκευές IoT συλλέγουν και μεταδίδουν τεράστιες ποσότητες δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, τα οποία περιλαμβάνουν παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η κατανάλωση ενέργειας, οι συνήθειες χρηστών και πολλές άλλες μεταβλητές που αφορούν κάθε κλάδο της οικονομίας και της καθημερινής ζωής [2]. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων επιτρέπει στις επιχειρήσεις και τους οργανισμούς να εξάγουν χρήσιμες πληροφορίες και γνώσεις, να εντοπίζουν τάσεις και να λαμβάνουν αποφάσεις που βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα αντί για υποθέσεις [3].

Στον τομέα των επιχειρήσεων, η ανάλυση μεγάλων δεδομένων μέσω IoT επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των αναγκών και των προτιμήσεων των πελατών. Οι εταιρείες λιανικής μπορούν να χρησιμοποιήσουν δεδομένα από αισθητήρες στα καταστήματα τους για να παρακολουθούν τις αγοραστικές συνήθειες των καταναλωτών, όπως οι συχνότητες επισκέψεων, τα προϊόντα που εξετάζουν και οι χρόνοι που παραμένουν σε συγκεκριμένες περιοχές των καταστημάτων. Μέσω αυτής της ανάλυσης, μπορούν να εξατομικεύουν τις προωθητικές καμπάνιες, να προσαρμόζουν τις προσφορές και να βελτιώνουν τη συνολική αγοραστική εμπειρία [2].

Στον τομέα της βιομηχανίας, η ανάλυση μεγάλων δεδομένων συμβάλλει στη βελτίωση της αποδοτικότητας των παραγωγικών διαδικασιών. Οι αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι στα μηχανήματα παρακολουθούν την κατάσταση και την απόδοσή τους, συλλέγοντας δεδομένα για παραμέτρους, όπως η κατανάλωση ενέργειας, οι δονήσεις και η θερμοκρασία λειτουργίας. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων επιτρέπει την πρόβλεψη βλαβών και τη βελτιστοποίηση της παραγωγής, μειώνοντας τις διακοπές και το κόστος συντήρησης [11].

Στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, τα δεδομένα από συσκευές παρακολούθησης της υγείας, όπως έξυπνα ρολόγια και ιατρικά βραχιόλια, επιτρέπουν την συνεχή παρακολούθηση της κατάστασης των ασθενών σε πραγματικό χρόνο. Οι συσκευές αυτές καταγράφουν μεγάλο όγκο δεδομένων, όπως καρδιακούς παλμούς, επίπεδα οξυγόνου, ύπνο και φυσική δραστηριότητα, τα οποία αποθηκεύονται και αναλύονται σε βάθος [2], [66].

Αυτός ο όγκος, η ποικιλία και η ταχύτητα παραγωγής δεδομένων κατατάσσει τη συγκεκριμένη εφαρμογή στις τεχνολογίες μεγάλων δεδομένων (Big Data). Οι γιατροί μπορούν να λαμβάνουν ειδοποιήσεις για κρίσιμες αλλαγές στις ζωτικές ενδείξεις, ενώ αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης επεξεργάζονται τα δεδομένα για να εντοπίσουν τάσεις ή προειδοποιητικά σημάδια [3]. Ταυτόχρονα, οι ασθενείς αποκτούν πρόσβαση σε προσωποποιημένες προτάσεις φροντίδας, βασισμένες στη συνεχή ανάλυση των δεδομένων τους, γεγονός που ενισχύει τόσο την πρόληψη όσο και τη θεραπεία. Έτσι, η εφαρμογή του IoT στον τομέα της υγείας δεν περιορίζεται στη συλλογή πληροφοριών, αλλά συμβάλλει ενεργά στην έξυπνη ανάλυση μεγάλων δεδομένων, με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας ζωής και της ιατρικής φροντίδας [66].

Στις έξυπνες πόλεις, η ανάλυση δεδομένων από συστήματα IoT χρησιμοποιείται για τη βελτίωση των δημόσιων υπηρεσιών. Τα δεδομένα από τους αισθητήρες κυκλοφορίας επιτρέπουν τη δυναμική διαχείριση της κυκλοφορίας, μειώνοντας τη συμφόρηση και τις εκπομπές ρύπων. Τα δεδομένα από τα συστήματα ύδρευσης βοηθούν στον εντοπισμό διαρροών και στην πρόβλεψη της ζήτησης νερού, ενώ οι αισθητήρες στους κάδους απορριμμάτων επιτρέπουν τη βελτίωση των υπηρεσιών καθαριότητας μέσω της έγκαιρης αποκομιδής απορριμμάτων [26].

Στον τομέα της γεωργίας, η ανάλυση δεδομένων από αισθητήρες που παρακολουθούν τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως την υγρασία του εδάφους, τη θερμοκρασία και τις προβλέψεις καιρού, επιτρέπει την

ακριβή διαχείριση των καλλιεργειών. Οι αγρότες μπορούν να αποφασίζουν πότε να ποτίσουν ή να εφαρμόσουν λιπάσματα, μειώνοντας τη σπατάλη πόρων και αυξάνοντας τις αποδόσεις [66].

Η χρήση δεδομένων μέσω του IoT δεν περιορίζεται μόνο στη συλλογή, αλλά επεκτείνεται και στην προγνωστική ανάλυση. Μέσω αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, τα δεδομένα μπορούν να αναλυθούν για να προβλεφθούν μελλοντικές τάσεις, να εντοπιστούν προβλήματα προτού εμφανιστούν και να ληφθούν προληπτικά μέτρα [3]. Αυτή η διαδικασία μειώνει το κόστος, αυξάνει την αποτελεσματικότητα και ενισχύει τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων.

Παρόλα αυτά, η διαχείριση μεγάλων δεδομένων απαιτεί ισχυρές υποδομές πληροφορικής, εξελιγμένα συστήματα ασφαλείας και αυστηρές πολιτικές προστασίας της ιδιωτικότητας. Η επιτυχής ανάλυση μεγάλων δεδομένων εξαρτάται από τη σωστή συλλογή, αποθήκευση και ανάλυση των πληροφοριών, καθώς και από την αξιοποίησή τους με τρόπους που προσθέτουν αξία στους οργανισμούς και στους πολίτες.

- **Ενεργειακή Αποδοτικότητα**

Η ενεργειακή αποδοτικότητα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους στόχους του IoT, καθώς η διασύνδεση και η έξυπνη διαχείριση των συσκευών προσφέρει δυνατότητες δραστηκής μείωσης της κατανάλωσης ενέργειας. Το IoT, με τη βοήθεια αισθητήρων, συστημάτων αυτοματισμού και αναλυτικών εργαλείων, επιτρέπει τον συνεχή έλεγχο της ενεργειακής χρήσης σε πραγματικό χρόνο και την άμεση προσαρμογή της λειτουργίας των συστημάτων σύμφωνα με τις εκάστοτε ανάγκες.

Στα έξυπνα κτίρια, η ενεργειακή αποδοτικότητα επιτυγχάνεται μέσω της αυτοματοποιημένης διαχείρισης του φωτισμού, της θέρμανσης, της ψύξης και του εξαερισμού. Για παράδειγμα, αισθητήρες παρουσίας και φωτεινότητας μπορούν να απενεργοποιούν τα φώτα και να ρυθμίζουν τη θερμοκρασία όταν ένας χώρος είναι άδειος ή όταν υπάρχει φυσικός φωτισμός. Αυτή η δυναμική προσαρμογή μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας χωρίς να επηρεάζει την άνεση των χρηστών.

Σύμφωνα με μελέτες του U.S. Department of Energy [30], η χρήση έξυπνων ενεργειακών συστημάτων μπορεί να μειώσει την κατανάλωση έως και 30%. Ένα εμβληματικό παράδειγμα είναι το Empire State Building, το οποίο μετά την εγκατάσταση συστημάτων διαχείρισης IoT, πέτυχε μείωση ενεργειακής κατανάλωσης κατά 38%, εξοικονομώντας πάνω από 4 εκατομμύρια δολάρια ετησίως σε κόστος ενέργειας [31].

Στον βιομηχανικό τομέα, το IoT επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης μέσω παρακολούθησης της κατανάλωσης ενέργειας σε μηχανήματα και γραμμές παραγωγής. Με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται, οι επιχειρήσεις μπορούν να αναλύσουν τα ενεργοβόρα σημεία, να προσαρμόσουν τη χρήση εξοπλισμού και να επιτύχουν βέλτιστη απόδοση με τη μικρότερη δυνατή ενεργειακή δαπάνη.

Στον οικιακό τομέα, η χρήση έξυπνων θερμοστατών, φωτισμού LED με αισθητήρες κίνησης, smart πριζών και έξυπνων μετρητών προσφέρει στον καταναλωτή πλήρη εικόνα και έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας, συμβάλλοντας στη μείωση των λογαριασμών και του οικολογικού αποτυπώματος.

Στις έξυπνες πόλεις, το IoT προσφέρει ενεργειακή αποδοτικότητα σε δημόσιες υπηρεσίες, όπως ο φωτισμός δρόμων, ο οποίος προσαρμόζεται δυναμικά βάσει παρουσίας οχημάτων ή πεζών. Επιπλέον, τα δίκτυα ύδρευσης και αποχέτευσης διαχειρίζονται πιο αποδοτικά μέσω ανάλυσης κατανάλωσης πραγματικού χρόνου, μειώνοντας την ενέργεια που απαιτείται για άντληση ή καθαρισμό νερού.

Πολλά πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται στο IoT έχουν σχεδιαστεί ειδικά για να υποστηρίζουν λειτουργία με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, συμβάλλοντας έτσι στη συνολική ενεργειακή αποδοτικότητα των συστημάτων. Πρωτόκολλα όπως το Bluetooth Low Energy (BLE), το ZigBee, το IEEE 802.15.4, το 6LoWPAN και το LoRaWAN χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές όπου η κατανάλωση ενέργειας πρέπει να διατηρείται στο ελάχιστο, όπως σε φορητές ή απομακρυσμένες συσκευές με περιορισμένες δυνατότητες μπαταρίας [32], [62], [55], [54].

Η ενεργειακή αποδοτικότητα μέσω IoT δεν αποτελεί μόνο τεχνολογικό πλεονέκτημα, αλλά και στρατηγικό εργαλείο για την προστασία του περιβάλλοντος, τη μείωση κόστους λειτουργίας και την ευαισθητοποίηση των πολιτών προς μία βιώσιμη κατανάλωση ενέργειας. [30], [31], [32], [62]

- **Προληπτική Συντήρηση**

Η προληπτική συντήρηση (predictive maintenance) αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους τομείς εφαρμογής του Διαδικτύου των Πραγμάτων, ειδικά στον βιομηχανικό τομέα, τις μεταφορές, τις υποδομές και τις έξυπνες πόλεις. Μέσω της συνεχούς συλλογής δεδομένων από αισθητήρες και της χρήσης αναλυτικών εργαλείων, επιτυγχάνεται η πρόβλεψη πιθανών αστοχιών ή φθορών στον εξοπλισμό πριν αυτές εκδηλωθούν, δίνοντας τη δυνατότητα για έγκαιρη παρέμβαση και περιορίζοντας σημαντικά τα κόστη και τις διακοπές λειτουργίας [11], [22], [23].

Οι αισθητήρες IoT που είναι εγκατεστημένοι σε μηχανήματα, οχήματα και υποδομές παρακολουθούν παραμέτρους, όπως οι δονήσεις, η θερμοκρασία, η πίεση, η κατανάλωση ενέργειας και άλλους κρίσιμους δείκτες απόδοσης. Τα δεδομένα αυτά αποστέλλονται σε πλατφόρμες νέφους ή ακμής, όπου επεξεργάζονται από αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης, με στόχο την έγκαιρη ανίχνευση ανωμαλιών και την πρόβλεψη πιθανών βλαβών [11],[50].

Στη βιομηχανία, τέτοια συστήματα επιτρέπουν την παρακολούθηση της κατάστασης των μηχανημάτων σε πραγματικό χρόνο και τη λήψη αποφάσεων για συντήρηση πριν εμφανιστεί κάποιο πρόβλημα. Για παράδειγμα, ένας αισθητήρας δόνησης μπορεί να εντοπίσει μεταβολές στη λειτουργία ενός κινητήρα παραγωγής και να ειδοποιήσει το σύστημα διαχείρισης για την ανάγκη συντήρησης, αποτρέποντας διακοπή της παραγωγικής διαδικασίας [62]. Στον τομέα των μεταφορών, η Deutsche Bahn χρησιμοποιεί IoT για την προγνωστική συντήρηση των σιδηροδρόμων της, συλλέγοντας δεδομένα από αισθητήρες στα βαγόνια και στους σταθμούς για να ανιχνεύσει έγκαιρα φθορές στα φρένα, στους άξονες και σε άλλα κρίσιμα συστήματα [23].

Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται επίσης σε υποδομές, όπως η γέφυρα **Akashi Kaikyo** στην Ιαπωνία [22], όπου αισθητήρες μετρούν τη δομική καταπόνηση και ειδοποιούν σε περίπτωση υπερβολικών πιέσεων ή κινδύνου αστοχίας [22]. Στην αυτοκινητοβιομηχανία, κατασκευαστές όπως η Tesla χρησιμοποιούν προγνωστικά μοντέλα για τη συντήρηση των οχημάτων τους, βασισμένοι σε δεδομένα τηλεμετρίας (telemetry) που αποστέλλονται συνεχώς στο νέφος, επιτρέποντας την εξ αποστάσεως παρακολούθηση της κατάστασης των οχημάτων και την ενεργοποίηση υποστήριξης σε περίπτωση βλάβης [11].

Τα οφέλη από την προληπτική συντήρηση μέσω IoT είναι πολλαπλά: ελαχιστοποιείται ο μη προγραμματισμένος χρόνος διακοπής λειτουργίας, μειώνονται τα κόστη επισκευής και αντικατάστασης, αυξάνεται η διάρκεια ζωής των μηχανημάτων και ενισχύεται η συνολική παραγωγικότητα και ασφάλεια. Οι οργανισμοί αποκτούν καλύτερη πρόβλεψη των εξόδων και του χρονοπρογραμματισμού των λειτουργιών τους, μεταβαίνοντας από ένα αντιδραστικό μοντέλο συντήρησης σε ένα δυναμικό, βασισμένο σε δεδομένα, προληπτικό και αποδοτικό μοντέλο [50], [62].

- **Περιβαλλοντική Βιωσιμότητα**

Η συμβολή του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα αποτελεί ένα από τα πλέον δυναμικά και ελπιδοφόρα πεδία εφαρμογής της τεχνολογίας. Μέσω της ενσωμάτωσης αισθητήρων, έξυπνων συστημάτων και αυτοματοποιημένων διαδικασιών, το IoT δίνει τη δυνατότητα για παρακολούθηση, έλεγχο και βελτιστοποίηση της χρήσης φυσικών πόρων, μειώνοντας έτσι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε κρίσιμους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Στον τομέα της ενέργειας, το IoT ενισχύει την περιβαλλοντική βιωσιμότητα με την εφαρμογή έξυπνων μετρητών, δικτύων διανομής και συστημάτων ενεργειακής διαχείρισης. Οι έξυπνοι μετρητές καταγράφουν σε πραγματικό χρόνο την κατανάλωση ενέργειας, δίνοντας τη δυνατότητα στους καταναλωτές να κατανοούν και να περιορίζουν τη χρήση τους, ενώ παράλληλα επιτρέπουν στους παρόχους να εξισορροπούν τη ζήτηση και να μειώνουν τις απώλειες ενέργειας στο δίκτυο. Η πρόβλεψη αιχμών κατανάλωσης και η δυναμική διαχείριση των φορτίων μειώνει την ανάγκη για ενεργοβόρες εφεδρικές λύσεις παραγωγής, συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [25], [28], [30].

Στις έξυπνες πόλεις, η περιβαλλοντική διάσταση του IoT αποτυπώνεται μέσα από την αποδοτικότερη διαχείριση των απορριμμάτων, του φωτισμού, των συγκοινωνιών και της ποιότητας του αέρα. Αισθητήρες σε κάδους απορριμμάτων επιτρέπουν τη συλλογή μόνο όταν είναι γεμάτοι, μειώνοντας έτσι τις μετακινήσεις απορριμματοφόρων και τη σχετική κατανάλωση καυσίμων. Παράλληλα, τα έξυπνα φανάρια και τα συστήματα στάθμευσης βελτιστοποιούν τη ροή της κυκλοφορίας, μειώνοντας τη συμφόρηση και τις εκπομπές ρύπων από τα οχήματα [26], [27], [63].

Στον τομέα της γεωργίας, το IoT υποστηρίζει βιώσιμες πρακτικές καλλιέργειας με τη χρήση αισθητήρων εδάφους και περιβαλλοντικών συνθηκών, που επιτρέπουν την ακριβή και περιορισμένη χρήση νερού, λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων. Οι έξυπνες τεχνολογίες, όπως οι συσκευές παρακολούθησης καλλιέργειών και τα αυτόματα συστήματα άρδευσης, συμβάλλουν στην αποφυγή σπατάλης πόρων και στη μείωση της ρύπανσης, ενισχύοντας τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα των γεωργικών εκμεταλλεύσεων [50], [57].

Η βιομηχανία αποτελεί έναν ακόμη τομέα όπου το IoT ενισχύει την περιβαλλοντική απόδοση, παρακολουθώντας την κατανάλωση ενέργειας και πρώτων υλών στις γραμμές παραγωγής, ενώ υποστηρίζει στρατηγικές ανακύκλωσης και κυκλικής οικονομίας. Μέσω της συνεχιζόμενης ανάλυσης δεδομένων από αισθητήρες, εντοπίζονται σπατάλες ή περιττές διαδικασίες, επιτρέποντας την επανασχεδίαση παραγωγικών μοντέλων με γνώμονα τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων [20], [21], [23], [31].

Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι η χρήση τεχνολογιών IoT σε κτίρια και υποδομές – ιδίως σε σύγχρονα πράσινα κτίρια – έχει αποδειχθεί πως οδηγεί σε σημαντική μείωση κατανάλωσης ενέργειας, νερού και άλλων πόρων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το κτήριο “The Edge” στο Άμστερνταμ, που θεωρείται το πιο βιώσιμο κτήριο γραφείων στον κόσμο, χάρη στη χρήση εκτεταμένων IoT λύσεων για την παρακολούθηση και βελτιστοποίηση όλων των συστημάτων του [24].

Εν κατακλείδι, το IoT αποτελεί έναν ισχυρό καταλύτη για τη βιώσιμη ανάπτυξη, ενισχύοντας την αποδοτικότητα, μειώνοντας τις εκπομπές και επιτρέποντας μια πιο υπεύνητη χρήση των φυσικών πόρων. Καθώς η ανάγκη για πράσινες τεχνολογίες αυξάνεται, η υιοθέτηση IoT λύσεων αναμένεται να ενισχύσει ακόμη περισσότερο τις προσπάθειες για την προστασία του περιβάλλοντος και την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής.

- **Ευφυή Λήψη Αποφάσεων**

Η ευφυής λήψη αποφάσεων είναι ένα από τα πιο κρίσιμα και καινοτόμα οφέλη που προσφέρει το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), καθώς βασίζεται στη δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, προκειμένου να παραχθούν αυτοματοποιημένες, ακριβείς και έγκαιρες αποφάσεις. Οι συσκευές IoT συλλέγουν διαρκώς δεδομένα από το περιβάλλον ή από χρήστες, τα οποία στη συνέχεια αναλύονται με τη βοήθεια τεχνολογιών, όπως η μηχανική μάθηση, τα νευρωνικά δίκτυα και τα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης. Αυτό επιτρέπει στα συστήματα να προβλέπουν τάσεις, να εντοπίζουν αποκλίσεις και να ενεργούν προληπτικά ή βελτιστοποιημένα, χωρίς καθυστέρηση και χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης σε κάθε στάδιο.

Στον βιομηχανικό τομέα, για παράδειγμα, οι αισθητήρες που είναι εγκατεστημένοι σε μηχανήματα συλλέγουν δεδομένα για τη θερμοκρασία, τις δονήσεις ή την πίεση. Μέσω αλγορίθμων πρόβλεψης, τα συστήματα μπορούν να εντοπίσουν απόκλιση από τη φυσιολογική λειτουργία και να ενεργοποιήσουν διαδικασίες συντήρησης πριν την εμφάνιση σοβαρής βλάβης. Αυτή η προγνωστική ικανότητα βελτιώνει τη λήψη αποφάσεων σχετικά με το πότε απαιτείται τεχνική παρέμβαση, περιορίζοντας έτσι το κόστος και τον χρόνο αδράνειας. [62], [11].

Στον τομέα της γεωργίας, η ευφυής λήψη αποφάσεων υποστηρίζεται από δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες για την υγρασία του εδάφους, τη θερμοκρασία, την ηλιοφάνεια ή τις καιρικές συνθήκες. Οι αγρότες μπορούν να λάβουν συστάσεις σχετικά με τον καλύτερο χρόνο άρδευσης, λίπανσης ή συγκομιδής, βελτιώνοντας τις αποδόσεις και μειώνοντας τη χρήση φυσικών πόρων [50], [57].

Στις έξυπνες πόλεις, η λήψη αποφάσεων γίνεται μέσω ανάλυσης δεδομένων από συστήματα παρακολούθησης κυκλοφορίας, ρύπανσης, κατανάλωσης ενέργειας και χρήσης υποδομών. Οι δημοτικές αρχές μπορούν να ρυθμίζουν δυναμικά τα φανάρια, να προσαρμόζουν τις δημόσιες συγκοινωνίες ή να ενεργοποιούν έκτακτα μέτρα αντιμετώπισης κρίσεων με βάση προβλέψεις για κυκλοφοριακή συμφόρηση, ατμοσφαιρική ρύπανση ή καιρικά φαινόμενα [26], [27], [30].

Στον τομέα της υγείας, τα δεδομένα που συλλέγονται από φορητές συσκευές και ιατρικούς αισθητήρες επιτρέπουν την ανάλυση συμπεριφοράς του ασθενή και την πρόβλεψη κρίσιμων καταστάσεων, όπως εμφράγματα ή κρίσεις υπέρτασης. Τα νοσοκομεία ή οι θεράποντες ιατροί μπορούν να ενημερωθούν αυτόματα και εγκαίρως για την ανάγκη παρέμβασης, βασισμένοι σε τεκμηριωμένα και εξατομικευμένα δεδομένα [12], [55].

Η χρήση ευφών συστημάτων στο IoT οδηγεί έτσι στη δημιουργία μιας νέας γενιάς ψηφιακής λήψης αποφάσεων, όπου οι αποφάσεις βασίζονται όχι μόνο στην εμπειρία και τη διαίσθηση, αλλά κυρίως σε δεδομένα, υπολογιστικά μοντέλα και αυτόματη επεξεργασία. Η σύζευξη με τεχνολογίες όπως το η νεφο-υπολογιστική και ο υπολογισμός στις ακμές του δικτύου εξασφαλίζει ότι οι αποφάσεις μπορούν να ληφθούν είτε κεντρικά είτε τοπικά, ανάλογα με το σενάριο, εξασφαλίζοντας τόσο ταχύτητα όσο και ακρίβεια. Επιπλέον, η συνδυαστική χρήση της ευφυούς λήψης αποφάσεων με το blockchain προσφέρει ένα πλαίσιο εμπιστοσύνης και διαφάνειας, καταγράφοντας κάθε βήμα της απόφασης με ανιχνεύσιμο και ασφαλή τρόπο [6], [15], [66].

Καθώς το IoT συνεχίζει να αναπτύσσεται, η δυνατότητα του να υποστηρίζει αποφάσεις που βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα ενισχύει τόσο την αποτελεσματικότητα των συστημάτων όσο και την ποιότητα ζωής των χρηστών, συμβάλλοντας παράλληλα στη βιώσιμη ανάπτυξη και την κοινωνική ευημερία.

- **Διαλειτουργικότητα**

Η διαλειτουργικότητα αποτελεί θεμελιώδες χαρακτηριστικό και όφελος του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), καθώς σε ένα περιβάλλον όπου πλήθος ετερογενών συσκευών, αισθητήρων και συστημάτων καλούνται να συνεργαστούν, η απρόσκοπτη επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας. Το IoT ενώνει τεχνολογίες από διαφορετικούς κατασκευαστές, πλατφόρμες και βιομηχανικούς κλάδους – από οικιακές συσκευές και βιομηχανικά μηχανήματα, μέχρι δίκτυα πόλεων και πλατφόρμες νέφους – και απαιτεί συμβατότητα σε επίπεδο υλικού, λογισμικού και πρωτοκόλλων.

Η επίτευξη διαλειτουργικότητας επιτυγχάνεται μέσα από τη χρήση κοινών προτύπων, ανοικτών APIs και πρωτοκόλλων επικοινωνίας που διευκολύνουν τη συνεργασία διαφορετικών συσκευών, ακόμα κι αν προέρχονται από διαφορετικούς προμηθευτές. Τεχνολογίες, όπως το REST, το MQTT και το CoAP, που βασίζονται σε ελαφριά και ευέλικτα μοντέλα επικοινωνίας, διευκολύνουν τη σύνδεση μεταξύ του φυσικού, ομίχλης και νέφους επιπέδων, ανεξάρτητα από την πλατφόρμα ανάπτυξης. [32], [62]

Στον βιομηχανικό τομέα, η διαλειτουργικότητα επιτρέπει σε μηχανές, ρομπότ και λογισμικά ελέγχου να συνυπάρχουν και να λειτουργούν ως ένα ενιαίο σύστημα, ακόμη και αν σχεδιάστηκαν με διαφορετικές τεχνολογίες. Αυτό διευκολύνει την εφαρμογή Industry 4.0 λύσεων, καθώς επιτρέπει την ενσωμάτωση καινοτόμων υπηρεσιών πάνω σε υφιστάμενα μηχανήματα ή υποδομές χωρίς ανάγκη αντικατάστασης. [19]

Στις έξυπνες πόλεις, η ανάγκη για διαλειτουργικότητα είναι ιδιαίτερα έντονη, καθώς τα διάφορα υποσυστήματα – όπως τα φανάρια, τα μέσα μεταφοράς, οι κάδοι απορριμμάτων και τα δίκτυα ύδρευσης – πρέπει να συνδέονται και να επικοινωνούν με κεντρικά πληροφοριακά συστήματα. Όταν επιτυγχάνεται αυτός ο βαθμός συνεργασίας, δημιουργείται ένα ενοποιημένο και αποδοτικό δίκτυο υπηρεσιών που βελτιώνει την αποδοτικότητα και την εμπειρία του πολίτη. Αντίθετα, η απουσία διαλειτουργικότητας μπορεί να οδηγήσει σε κατακερματισμένα “νησιά” πληροφορίας, περιορίζοντας σημαντικά τα οφέλη του IoT [26], [27].

Η ανάγκη για διαλειτουργικότητα είναι ακόμη πιο έντονη στην υγειονομική περίθαλψη, όπου συσκευές παρακολούθησης ασθενών, εφαρμογές καταγραφής ιατρικών δεδομένων και πληροφοριακά συστήματα νοσοκομείων πρέπει να επικοινωνούν μεταξύ τους με ασφάλεια και ακρίβεια. Τα ανοιχτά πρότυπα, όπως το HL7 και το FHIR, υποστηρίζουν τη διαλειτουργικότητα, επιτρέποντας τη διασύνδεση και την ασφαλή διαχείριση αυτών των ευαίσθητων πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο [12], [55].

Παρότι η επίτευξη πλήρους διαλειτουργικότητας εξακολουθεί να αποτελεί τεχνική πρόκληση, οι εξελίξεις σε τομείς, όπως ο σημασιολογικός ιστός (semantic web), η τεχνητή νοημοσύνη και τα συστήματα ταυτοτήτων βασιζόμενα στη blockchain (blockchain-based identity systems), ανοίγουν τον δρόμο για μια ευρύτερη, ασφαλή και αξιόπιστη ενσωμάτωση συσκευών. Το IoT, όταν υλοποιείται με γνώμονα τη διαλειτουργικότητα, ενισχύει τη δυνατότητα επέκτασης, συνεργασίας και βιώσιμης ανάπτυξης, καθιστώντας δυνατή τη δημιουργία σύνθετων, αλλά αποδοτικών οικοσυστημάτων.

3.7 Μειονεκτήματα και Προβλήματα

Παρά τα πολυάριθμα οφέλη και τις καινοτομίες που προσφέρει το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η ευρεία εφαρμογή του συνοδεύεται από σημαντικά μειονεκτήματα και προκλήσεις. Η φύση του IoT, που βασίζεται στη συνεχή διασύνδεση συσκευών, στην ανταλλαγή δεδομένων και στην αυτοματοποιημένη λήψη αποφάσεων, εγείρει ζητήματα τόσο τεχνικά όσο και κοινωνικά. Τα κυριότερα προβλήματα

σχετίζονται με την ασφάλεια των δικτύων και την προστασία της ιδιωτικότητας, καθώς η αυξημένη συλλογή και διαχείριση προσωπικών δεδομένων καθιστά τα συστήματα ευάλωτα σε σχετικές επιθέσεις και παραβιάσεις. Επιπλέον, η έλλειψη τυποποίησης, η πολυπλοκότητα στην υλοποίηση, καθώς και οι υψηλές απαιτήσεις σε υποδομές και τεχνογνωσία, δυσχεραίνουν την ομαλή ενσωμάτωση του IoT σε υφιστάμενα περιβάλλοντα. Παράλληλα, εμφανίζονται κοινωνικές και νομικές ανησυχίες, όπως η αβεβαιότητα ως προς το κανονιστικό πλαίσιο και οι ηθικές συνέπειες της συνεχούς παρακολούθησης. Η αδυναμία διασφάλισης της κλιμακωσιμότητας και η ενεργειακή κατανάλωση αποτελούν επίσης κρίσιμα ζητήματα, ειδικά σε περιβάλλοντα μεγάλης κλίμακας. Η κατανόηση αυτών των μειονεκτημάτων είναι απαραίτητη για την υπεύθυνη ανάπτυξη και εφαρμογή λύσεων IoT που δεν θα περιορίζονται μόνο στην τεχνολογική καινοτομία, αλλά θα λαμβάνουν υπόψη και θα ικανοποιούν σχετικές ανάγκες ασφάλειας, αξιοπιστίας και κοινωνικής αποδοχής.

3.7.1 Ασφάλεια και Ευπάθειες στο IoT

Η ασφάλεια στο Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) αποτελεί έναν από τους πιο κρίσιμους και πολυσύνθετους παράγοντες για την επιτυχημένη και ασφαλή ενσωμάτωσή του σε επιχειρήσεις, δημόσιες υπηρεσίες και την καθημερινότητα των πολιτών. Η βασική αρχή του IoT – η διασύνδεση τεράστιου αριθμού ετερογενών συσκευών μέσω του διαδικτύου – δημιουργεί εκτεταμένες επιφάνειες επίθεσης και πολλαπλά σημεία ευπάθειας, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν από κακόβουλους χρήστες [2].

Πολλές IoT συσκευές είναι σχεδιασμένες για χαμηλό κόστος και ελάχιστη ενεργειακή κατανάλωση, παραλείποντας βασικά μέτρα προστασίας, όπως ισχυρή κρυπτογράφηση, αυθεντικοποίηση χρηστών, τείχη προστασίας (firewalls) ή προστασία από κακόβουλο λογισμικό (antivirus/anti-malware) [55]. Χρησιμοποιούνται συχνά προκαθορισμένοι ή ανύπαρκτοι κωδικοί πρόσβασης, ενώ η υποστήριξη αυτόματων ενημερώσεων λογισμικού είναι ελλιπής ή ανύπαρκτη. Επιπλέον, πολλά πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως το MQTT, δεν έχουν σχεδιαστεί με γνώμονα την ασφάλεια, με αποτέλεσμα να αφήνουν ευάλωτα τα κανάλια μεταφοράς δεδομένων [66].

Η απουσία ενιαίων πολιτικών ασφάλειας και διεθνών τυποποιημένων προτύπων οδηγεί σε σοβαρές ευπάθειες. Οι επιθέσεις τύπου Man-in-the-Middle (παρεμβολής), η υποκλοπή ή παραποίηση δεδομένων, η έγχυση κακόβουλου λογισμικού (malware injection), και η διείσδυση μέσω μη ασφαλών API ή ανοιχτών θυρών είναι συχνά φαινόμενα σε περιβάλλοντα IoT [2], [67]. Ειδικά τα σημεία ενοποίησης, όπως οι πύλες και οι κόμβοι περιφερειακής επεξεργασίας (edge/fog nodes), αποτελούν ιδανικούς στόχους για επιθέσεις, λόγω του όγκου και της ευαισθησίας των δεδομένων που διαχειρίζονται [55].

Επιπρόσθετα, σημαντικά προβλήματα προκαλούνται από τρωτά APIs, σφάλματα λογισμικού (τόσο βασικού όσο και τρίτων μερών), ελαττωματικά υλικά εξαρτήματα, ανεπαρκείς μηχανισμούς ελέγχου πρόσβασης, και κακό σχεδιασμό μηχανισμών ασφάλειας. Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλούν και οι επιθέσεις πλευρικού καναλιού (side-channel attacks) (π.χ. από ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές ή κατανάλωση ενέργειας) και οι εκμεταλλεύσεις μηδενικής ημέρας (zero-day exploits), που εκμεταλλεύονται άγνωστες ακόμη ευπάθειες σε συσκευές ή λογισμικό, καθιστώντας το IoT εξαιρετικά ευάλωτο [67].

Η περίπτωση της πλατφόρμας BMW ConnectedDrive [21] αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα των πρακτικών κινδύνων. Ευπάθειες που εντοπίστηκαν επέτρεψαν σε επιτιθέμενους να ξεκλειδώσουν πόρτες αυτοκινήτων απομακρυσμένα, μέσω κινητών εφαρμογών, χωρίς φυσική πρόσβαση και χωρίς έγκριση από τον ιδιοκτήτη, λόγω ανεπαρκούς ελέγχου πρόσβασης και ασφάλειας λογισμικού [21].

Οι επιπτώσεις από τέτοιες επιθέσεις μπορεί να είναι καταστροφικές, ιδιαίτερα σε κρίσιμα περιβάλλοντα, όπως η υγειονομική περίθαλψη, η βιομηχανία και οι έξυπνες πόλεις. Εκεί, η διαθεσιμότητα των

συστημάτων και η φυσική ασφάλεια των πολιτών εξαρτώνται άμεσα από την ακεραιότητα και την αξιοπιστία των τεχνολογικών υποδομών [2], [66].

Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις, απαιτείται μια πολυεπίπεδη και ολιστική στρατηγική: σχεδίαση ασφαλούς λογισμικού, χρήση πιστοποιημένων και ισχυρών πρωτοκόλλων επικοινωνίας, αυστηρή αυθεντικοποίηση και διαβαθμισμένος έλεγχος πρόσβασης, προστασία από κακόβουλο λογισμικό, τακτική και ασφαλής ενημέρωση του λογισμικού, συνεχής παρακολούθηση της συμπεριφοράς των συσκευών (logging), καθώς και ενσωμάτωση αρχών “security by design” ήδη από το στάδιο της ανάπτυξης [55], [66].

3.7.2 Έλλειψη Προστασίας Προσωπικών Δεδομένων

Η διαχείριση και προστασία προσωπικών δεδομένων στο πλαίσιο του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) αποτελεί μία από τις πιο κρίσιμες προκλήσεις για χρήστες και οργανισμούς. Οι IoT συσκευές συλλέγουν καθημερινά τεράστιο όγκο πληροφοριών που αφορούν την τοποθεσία, τις συνήθειες, τη φυσική κατάσταση και άλλες ευαίσθητες παραμέτρους του χρήστη. Αυτά τα δεδομένα συχνά μεταδίδονται μέσω ασύρματων καναλιών χωρίς επαρκή μέτρα προστασίας, καθιστώντας τα ευάλωτα σε παραβιάσεις και μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση [2], [66].

Παράλληλα, πολλές συσκευές δεν ενημερώνουν επαρκώς τον χρήστη σχετικά με το ποια δεδομένα συλλέγονται και πώς πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Αυτή η έλλειψη διαφάνειας περιορίζει τη δυνατότητα του χρήστη να δώσει τεκμηριωμένη και ουσιαστική συγκατάθεση, παραβιάζοντας θεμελιώδεις αρχές ιδιωτικότητας. Αν και ο Γενικός Κανονισμός Προστασίας Δεδομένων (GDPR) στην Ευρωπαϊκή Ένωση επιβάλλει συγκεκριμένες υποχρεώσεις, πολλές IoT εφαρμογές δεν συμμορφώνονται, λόγω της πολυπλοκότητας και της αποκεντρωμένης φύσης των τεχνολογιών τους [16], [55].

Η παραβίαση ιδιωτικότητας μπορεί να προκύψει από πολλαπλά επίπεδα. Σε διαδικασίες αυθεντικοποίησης ή εξουσιοδότησης, δεν αποκλείεται να αποκαλυφθούν στοιχεία της ταυτότητας του χρήστη. Επιπλέον, εφαρμογές που παρακολουθούν την τοποθεσία ή τη χρήση συσκευών μπορούν να δημιουργήσουν λεπτομερή προφίλ συμπεριφοράς, τα οποία αν διαρρεύσουν ή χρησιμοποιηθούν καταχρηστικά, θέτουν σε κίνδυνο την ασφάλεια και την ιδιωτική ζωή του ατόμου [66].

Πέρα από την απουσία ισχυρής κρυπτογράφησης, πολλές IoT λύσεις δεν εφαρμόζουν βασικά μέτρα, όπως ανωνυμοποίηση ή ψευδωνυμοποίηση δεδομένων. Επιπλέον, λείπουν πολιτικές ασφαλούς αποθήκευσης και διατήρησης με χρονικούς περιορισμούς, με αποτέλεσμα τα δεδομένα να παραμένουν προσβάσιμα για μεγάλα διαστήματα [2], [16]. Σε αυτό το πλαίσιο, η απουσία μηχανισμών πρόληψης διαρροής δεδομένων (Data Leakage Prevention - DLP) εντείνει τους κινδύνους.

Η προστασία της ιδιωτικότητας πρέπει να ενσωματώνεται εξ αρχής στον σχεδιασμό των IoT συστημάτων (privacy by design). Απαιτείται η ανάπτυξη εφαρμογών που παρέχουν στον χρήστη μεγαλύτερο έλεγχο, βασισμένες σε ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα κρυπτογράφησης, μηχανισμούς συγκατάθεσης και ελαφριά επεξεργασίας (lightweight security mechanisms), ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ακόμη και σε περιβάλλοντα περιορισμένων πόρων [55], [66].

3.7.3 Έλλειψη Τυποποίησης και Προβλήματα Διαλειτουργικότητας

Η πολυπλοκότητα και η έλλειψη τυποποίησης αποτελούν βασικά εμπόδια στην καθολική εφαρμογή και αποτελεσματική λειτουργία του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT). Το οικοσύστημα του IoT περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα συσκευών, αισθητήρων, πλατφορμών, εφαρμογών και πρωτοκόλλων, που συχνά προέρχονται από διαφορετικούς κατασκευαστές. Η απουσία κοινών προτύπων και πρωτοκόλλων δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στη διαλειτουργικότητα, καθιστώντας δύσκολη την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών συσκευών και συστημάτων [11], [16].

Η κάθε συσκευή IoT μπορεί να χρησιμοποιεί δική της γλώσσα επικοινωνίας, δικά της APIs και ξεχωριστή πλατφόρμα λογισμικού. Αυτό το γεγονός όχι μόνο αυξάνει το τεχνικό κόστος ενσωμάτωσης, αλλά και περιπλέκει τη συντήρηση και την ασφάλεια των συστημάτων, καθώς απαιτείται εξειδικευμένη γνώση για κάθε διαφορετική υποδομή [55]. Σε πολλές περιπτώσεις, οι συσκευές δεν μπορούν να ανταλλάξουν πληροφορίες μεταξύ τους ή δεν είναι συμβατές με ενιαία δίκτυα διαχείρισης, οδηγώντας σε κατακερματισμό των δεδομένων και μείωση αποδοτικότητας [66].

Η έλλειψη τυποποίησης δημιουργεί επίσης εμπόδια στην ασφάλεια, καθώς η απουσία ενιαίων κρυπτογραφικών και αυθεντικοποιητικών προτύπων καθιστά αδύνατη την υιοθέτηση κοινών πολιτικών προστασίας δεδομένων σε διαφορετικά περιβάλλοντα [16]. Επιπλέον, η απουσία θεσμικών πλαισίων που να ορίζουν ελάχιστα τεχνικά πρότυπα ασφάλειας και λειτουργίας έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση χαμηλής ποιότητας και ασφάλειας λύσεων IoT, που δεν μπορούν να επεκταθούν ή να υποστηριχθούν με αξιοπιστία σε μεγάλη κλίμακα [2].

Η πολυπλοκότητα του IoT συχνά συνδέεται και με την ανάγκη χρήσης πολλών ενδιάμεσων τεχνολογιών, όπως πύλες, κόμβους ακμής/ομίχλης και πλατφόρμες μεσισμικού (middleware), οι οποίες ενσωματώνονται μεταξύ της συσκευής και του τελικού χρήστη. Αυτές οι ενδιάμεσες τεχνολογίες, αν και απαραίτητες για την ομαλή ροή και επεξεργασία δεδομένων, προσθέτουν νέα επίπεδα διαχείρισης & συντήρησης, έξτρα πολυπλοκότητα και δυνητικά σημεία αποτυχίας [11].

Χωρίς την ύπαρξη ενιαίων διεθνών προτύπων, το IoT παραμένει ένα τεχνολογικά πολυδιάσπαρτο και δύσκολο διαχειρίσιμο πεδίο. Για να επιτευχθεί η ευρεία υιοθέτηση και η βιώσιμη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του, απαιτείται η υιοθέτηση παγκόσμιων πλαισίων τυποποίησης και διαλειτουργικότητας, με τη συμμετοχή τόσο των κυβερνήσεων όσο και των κατασκευαστών και φορέων ανάπτυξης [16], [55], [66].

3.7.4 Υψηλό Κόστος Εγκατάστασης και Συντήρησης

Παρόλο που το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) υπόσχεται αύξηση της αποδοτικότητας και μείωση του κόστους σε βάθος χρόνου, η αρχική του εγκατάσταση και η διαρκής συντήρησή του συνεπάγονται σημαντικές οικονομικές απαιτήσεις για οργανισμούς και επιχειρήσεις. Η υιοθέτηση λύσεων IoT απαιτεί την προμήθεια εξειδικευμένων συσκευών, αισθητήρων, δικτυακού εξοπλισμού, καθώς και την ανάπτυξη ή προσαρμογή κατάλληλου λογισμικού διαχείρισης, με αποτέλεσμα αυξημένες κεφαλαιουχικές δαπάνες [16], [50].

Πέρα από την υλικοτεχνική υποδομή, απαιτείται και σημαντική επένδυση σε ανθρώπινο δυναμικό. Η εγκατάσταση, η διαχείριση, η παρακολούθηση και η συντήρηση των IoT συστημάτων απαιτούν εξειδικευμένους τεχνικούς και μηχανικούς με εμπειρία στον χώρο. Επιπλέον, η συνεχής τεχνολογική

πρόσδοξ επιβάλλει την τακτική εκπαίδευση και αναβάθμιση των δεξιοτήτων του προσωπικού, γεγονός που συνεπάγεται επιπρόσθετο και μακροχρόνιο κόστος [55].

Ιδιαίτερα σε τομείς με κρίσιμες υποδομές – όπως η βιομηχανία, η ενέργεια ή η υγειονομική περίθαλψη – η ανάγκη για συνεχή τεχνική υποστήριξη, προληπτική συντήρηση και 24/7 ετοιμότητα ανεβάζει κατακόρυφα τα λειτουργικά έξοδα [54]. Παράλληλα, η ταχύτατη εξέλιξη των τεχνολογιών IoT απαιτεί συχνές αναβαθμίσεις ή αντικατάσταση εξοπλισμού, ώστε να διατηρείται η συμβατότητα με τις σύγχρονες πλατφόρμες ή τα διεθνή πρότυπα. Η γήρανση των συσκευών και η διακοπή υποστήριξης από τους κατασκευαστές μπορεί να καθιστά τα συστήματα ευάλωτα ή μη λειτουργικά, χωρίς επιπλέον επενδύσεις για αναβάθμιση [16], [11].

Το κόστος επιβαρύνεται περαιτέρω όταν το IoT πρέπει να ενσωματωθεί σε παλαιότερες εγκαταστάσεις, απαιτώντας προσαρμογές των υφιστάμενων υποδομών ή εγκατάσταση υποστηρικτικών τεχνολογιών (όπως πύλες, διακομιστές, και υποδομές νέφους). Επίσης, η διαχείριση ενέργειας για τη συνεχή λειτουργία των συσκευών, ειδικά σε περιβάλλοντα με 24ωρη χρήση, προσθέτει στα έξοδα [50], [66].

Αν και η μακροπρόθεσμη χρήση του IoT μπορεί να οδηγήσει σε μείωση κόστους μέσω αυτοματισμού, προγνωστικής συντήρησης και βελτιστοποίησης διαδικασιών, η αρχική οικονομική επιβάρυνση και η διαρκής ανάγκη εξειδικευμένου προσωπικού και συνεχιζόμενης εκπαίδευσης εξακολουθούν να αποτελούν σοβαρό μειονέκτημα – ιδίως για μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις με περιορισμένους πόρους [16], [11], [55].

3.7.5 Ελλιπές Νομικό Πλαίσιο και Ζητήματα Διακυβέρνησης

Η ραγδαία εξάπλωση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) έχει ξεπεράσει τις δυνατότητες των νομικών και ρυθμιστικών πλαισίων να προσαρμοστούν με τον ίδιο ρυθμό. Αν και οι IoT τεχνολογίες έχουν πλέον υιοθετηθεί σε κρίσιμους τομείς – όπως η υγειονομική περίθαλψη, η μετακίνηση, η ενέργεια και η δημόσια διοίκηση – τα ισχύοντα νομικά πλαίσια παραμένουν ασαφή, αποσπασματικά ή ανεπαρκή. Σημαντικά ζητήματα, όπως η ιδιοκτησία και η ευθύνη επί των δεδομένων, η λογοδοσία σε περιπτώσεις παραβιάσεων, αλλά και η συμμόρφωση με κανονισμούς ιδιωτικότητας, παραμένουν χωρίς ξεκάθαρες απαντήσεις [16], [54], [66].

Η εφαρμογή του Γενικού Κανονισμού για την Προστασία Δεδομένων (GDPR) στην Ευρωπαϊκή Ένωση παρέχει ένα νομικό υπόβαθρο για την επεξεργασία προσωπικών δεδομένων. Ωστόσο, πολλές IoT συσκευές και πλατφόρμες δεν είναι σχεδιασμένες εξ αρχής για να συμμορφώνονται με αυτές τις απαιτήσεις, κυρίως λόγω της αποκεντρωμένης φύσης του IoT και της τεχνικής πολυπλοκότητας. Η έλλειψη διαφάνειας και ενημέρωσης του χρήστη ως προς τη συγκατάθεση και τη χρήση των δεδομένων του, παραμένει βασική πρόκληση [55], [66].

Επιπλέον, η απουσία διεθνών συμφωνιών ή εναρμονισμένων προτύπων για την κυβερνοασφάλεια και τη διαχείριση δεδομένων οδηγεί σε ρυθμιστική ασυνέπεια μεταξύ κρατών. Αυτό δυσχεραίνει ιδιαίτερα τη διασυνοριακή λειτουργία των IoT συστημάτων, καθώς κάθε κράτος μπορεί να υιοθετεί διαφορετικά πρότυπα, επιβάλλοντας διοικητικά ή τεχνικά εμπόδια στην ανάπτυξη διεθνών λύσεων [16], [54].

Πέρα από τη νομική συμμόρφωση, καθίσταται κρίσιμο και το ζήτημα της διακυβέρνησης του IoT. Η κατανομή ρόλων και ευθυνών μεταξύ κυβερνήσεων, φορέων τεχνολογίας, παρόχων υποδομών και τελικών χρηστών είναι συχνά ασαφής ή αλληλοεπικαλυπτόμενη. Σύμφωνα με τον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (OECD), η διακυβέρνηση των δεδομένων στις «έξυπνες

πόλεις» – ένα από τα πιο χαρακτηριστικά πεδία εφαρμογής του IoT – χαρακτηρίζεται από θολές γραμμές αρμοδιοτήτων, έλλειψη συντονισμού και ανεπαρκή κανονιστική καθοδήγηση, δημιουργώντας σοβαρούς κινδύνους για την προστασία της ιδιωτικότητας και τη δημοκρατική λογοδοσία [69].

Καταληκτικά, η θεμελίωση ενός συνεκτικού, διατομεακού και ευέλικτου πλαισίου διακυβέρνησης, το οποίο να συνοδεύεται από σαφείς κανονισμούς, μηχανισμούς ελέγχου και διεθνή συνεργασία, είναι απαραίτητη για την ασφαλή και βιώσιμη ενσωμάτωση του IoT. Η ενίσχυση της διακυβέρνησης δεν αφορά μόνο τη νομική συμμόρφωση, αλλά και την ενδυνάμωση της εμπιστοσύνης πολιτών, επιχειρήσεων και δημόσιων φορέων στην τεχνολογία.

3.7.6 Ενεργειακή Κατανάλωση και Διαχείριση Πόρων

Η αυξανόμενη εξάρτηση από συσκευές IoT εγείρει σοβαρά ερωτήματα σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας και τη βιώσιμη διαχείριση των πόρων. Παρόλο που η τεχνολογία προωθεί την αποδοτικότητα, η ίδια η λειτουργία χιλιάδων ή και εκατομμυρίων συνδεδεμένων συσκευών συνεπάγεται συνεχή κατανάλωση ενέργειας, ειδικά όταν πρόκειται για δίκτυα μεγάλης κλίμακας σε έξυπνες πόλεις, βιομηχανίες ή εγκαταστάσεις παραγωγής [11], [16].

Κάθε συσκευή απαιτεί ενέργεια για την καταγραφή, επεξεργασία και μετάδοση δεδομένων, καθώς και για τη λειτουργία των επικοινωνιακών της διεπαφών (π.χ. Wi-Fi, Bluetooth, LTE). Σε πολλές περιπτώσεις, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας των συσκευών είναι περιορισμένη, και η αντικατάστασή της σε μαζικά περιβάλλοντα, όπως έξυπνοι αισθητήρες σε υποδομές ή σε αγροτικές καλλιέργειες, ενδέχεται να αυξήσει δραματικά τα λειτουργικά έξοδα και να περιορίσει τη βιωσιμότητα του συστήματος [50], [66].

Η πρόκληση γίνεται ακόμα πιο έντονη όταν απαιτείται συνεχής επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (ακόμη και στο φυσικό επίπεδο, ειδικότερα σε σενάρια edge computing), που οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση από επεξεργαστές και μονάδες μετάδοσης, ενώ η ανάγκη για συνεχή συνδεσιμότητα αυξάνει το φορτίο στα δικτυακά υποσυστήματα. Οι τεχνολογίες edge και fog computing προωθούνται ως λύσεις για τη μείωση της κεντρικής επεξεργασίας και της ενεργειακής επιβάρυνσης των κέντρων δεδομένων (data centers), αλλά προσθέτουν νέα σημεία κατανάλωσης στην περιφέρεια του συστήματος [16].

Επιπλέον, η διαχείριση των φυσικών πόρων που απαιτούνται για την κατασκευή και λειτουργία των συσκευών IoT – όπως πολύτιμα μέταλλα, πλακέτες, μικροεπεξεργαστές και αισθητήρες – εγείρει ζητήματα περιβαλλοντικής και οικονομικής βιωσιμότητας. Η ανακύκλωση των υλικών αυτών, καθώς και η χρήση ενεργειακά αποδοτικών κυκλωμάτων, αποτελεί ακόμη ανεκμετάλλευτο και ανεξερευνητο πεδίο για πολλούς κατασκευαστές [66].

Σε εφαρμογές, όπως οι έξυπνες πόλεις και τα έξυπνα κτίρια, η ενεργειακή κατανάλωση των ίδιων των συστημάτων αυτοματισμού μπορεί να αντισταθμίσει τα οφέλη της εξοικονόμησης που επιδιώκει να επιτύχει. Αν δεν υπάρξει ισορροπημένος σχεδιασμός, υπάρχει ο κίνδυνος η υιοθέτηση του IoT να οδηγήσει σε αυξημένη κατανάλωση ενέργειας αντί για μείωση [50].

Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του προβλήματος απαιτείται η ενσωμάτωση αρχών «πράσινης πληροφορικής» (green IT), η ανάπτυξη συσκευών χαμηλής κατανάλωσης και η χρήση τεχνικών, όπως η

δυναμική ενεργοποίηση (duty cycling¹) καθώς και οι ενσωματωμένοι μηχανισμοί εξοικονόμησης πόρων [16].

3.7.7 Κίνδυνοι από Αποτυχίες και Συμβατότητα Υλικού και Λογισμικού

Η επιτυχής και ασφαλής λειτουργία του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) προϋποθέτει τη συνεχή και απρόσκοπτη συνεργασία υλικού (hardware) και λογισμικού (software) σε απαιτητικά περιβάλλοντα πραγματικού χρόνου. Η εξάρτηση από τεχνικά μέσα χαμηλού κόστους και περιορισμένων δυνατοτήτων καθιστά τα IoT συστήματα ιδιαίτερα ευάλωτα σε αστοχίες και προβλήματα συμβατότητας, που επηρεάζουν τη λειτουργικότητα, την απόδοση και την ασφάλεια [11], [16].

Πολλές IoT συσκευές σχεδιάζονται με έμφαση στη χαμηλή κατανάλωση και το μικρό κόστος, γεγονός που οδηγεί συχνά σε μειωμένη ποιότητα κατασκευής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα φαινόμενα, όπως υπερθέρμανση, αστοχίες συνδεσιμότητας, απρόσμενες διακοπές λειτουργίας και αυξημένο ρίσκο υλικών αποτυχιών [55]. Ταυτόχρονα, το λογισμικό που χρησιμοποιείται – είτε πρόκειται για βασικό λογισμικό είτε για τρίτες εφαρμογές – μπορεί να περιλαμβάνει σφάλματα, ατελή τεκμηρίωση ή κενά ασφαλείας, ειδικά όταν δεν ακολουθούνται πρότυπα ασφαλούς ανάπτυξης [66].

Η κατάσταση περιπλέκεται περισσότερο λόγω της ταχείας τεχνολογικής εξέλιξης. Κατασκευαστές χρησιμοποιούν διαφορετικά λειτουργικά συστήματα, πρότυπα και πρωτόκολλα, οδηγώντας σε δυσκολίες ενσωμάτωσης και αυξανόμενες απαιτήσεις για προσαρμογή. Σε αυτό το πλαίσιο, πολλά συστήματα δεν υποστηρίζουν over-the-air ενημερώσεις ή παρουσιάζουν ασυμβατότητες μεταξύ παλαιότερου υλικού και νεότερου λογισμικού. Η αδυναμία επικαιροποίησης δημιουργεί στασιμότητα, ενισχύει την ευαλωτότητα σε επιθέσεις (όπως έγκυση κακόβουλου υλικολογισμικού) και συχνά οδηγεί σε πρόωρη απόσυρση εξοπλισμού, παρότι αυτός λειτουργεί μηχανικά [66].

Ιδιαίτερα ανησυχητική είναι η πιθανότητα οι τεχνικές αποτυχίες να μετατραπούν σε κενά ασφαλείας. Έχουν καταγραφεί περιστατικά όπου αποτυχημένες ή μη δοκιμασμένες ενημερώσεις υλικολογισμικού (firmware) προκάλεσαν παραβίαση συστημάτων ή έκχυση κακόβουλου λογισμικού, θέτοντας σε κίνδυνο την ακεραιότητα των δεδομένων και των λειτουργιών [61]. Επιπλέον, η απουσία μηχανισμών αυτοδιάγνωσης, ειδοποιήσεων σφαλμάτων ή η περιορισμένη τεχνική γνώση των χρηστών δυσχεραίνει την έγκαιρη αναγνώριση και αντιμετώπιση προβλημάτων [16].

Η αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων απαιτεί εφαρμογή υψηλών προτύπων ποιότητας στην κατασκευή, ασφαλή σχεδιασμό λογισμικού, δυνατότητα απομακρυσμένου εντοπισμού σφαλμάτων και σταδιακή εφαρμογή αναβαθμίσεων με πλήρη συμβατότητα. Παράλληλα, η ενσωμάτωση ανοικτών προτύπων και αρθρωτών (modular) αρχιτεκτονικών μπορεί να ενισχύσει τη δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης και ευελιξίας, μειώνοντας τους κινδύνους και το λειτουργικό κόστος. Ωστόσο, η γενικευμένη υιοθέτηση τέτοιων πρακτικών παραμένει περιορισμένη [11], [16], [55].

¹ Το "duty cycling" αναφέρεται στην τεχνική όπου οι συσκευές ενεργοποιούνται περιοδικά μόνο για σύντομες χρονικές περιόδους ώστε να εκτελέσουν λειτουργίες, παραμένοντας το υπόλοιπο διάστημα σε κατάσταση χαμηλής κατανάλωσης ή αδράνειας. Έτσι επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας.

3.7.8 Εξάρτηση από τη Συνδεσιμότητα και Αστάθεια Δικτύου

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), όπως δηλώνει και η ονομασία του, βασίζεται θεμελιωδώς στη συνεχή συνδεσιμότητα των συσκευών. Αυτή η εξάρτηση από την αδιάλειπτη δικτυακή λειτουργία δημιουργεί σοβαρές ευπάθειες, καθώς οποιαδήποτε διακοπή σύνδεσης, καθυστέρηση ή αστάθεια στο δίκτυο μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση υπηρεσιών, απώλεια δεδομένων ή ακόμα και σε επικίνδυνες καταστάσεις (π.χ. μη λήψη ειδοποίησης από αισθητήρα διαρροής αερίου ή καθυστέρηση σε αυτόματο σύστημα πυρόσβεσης), ειδικά σε κρίσιμα περιβάλλοντα [11], [16].

Η λειτουργικότητα των IoT συσκευών συχνά εξαρτάται από υπηρεσίες νέφους, αλλά και από κόμβους ομίχλης ή ακμής (fog/edge nodes), οι οποίοι αναλαμβάνουν επεξεργασία δεδομένων κοντά στην πηγή. Όταν το δίκτυο είναι ασταθές ή δεν υπάρχει καθόλου σύνδεση, οι συσκευές αδυνατούν να λειτουργήσουν όπως προβλέπεται, οδηγώντας σε καθυστερήσεις, διακοπές λειτουργιών ή πλήρη απενεργοποίηση κρίσιμων μηχανισμών [55].

Σε απομακρυσμένες περιοχές, η έλλειψη τηλεπικοινωνιακής υποδομής δυσχεραίνει περαιτέρω την αξιοποίηση του IoT. Εφαρμογές όπως η παρακολούθηση καλλιεργειών, οι αισθητήρες ποιότητας νερού ή οι περιβαλλοντικοί σταθμοί, απαιτούν σταθερή σύνδεση σε πραγματικό χρόνο – κάτι που δεν είναι πάντα εφικτό [50].

Αν και τεχνολογίες όπως Wi-Fi, 4G/5G, LoRaWAN ή NB-IoT προσφέρουν εναλλακτικές δυνατότητες διασύνδεσης, αντιμετωπίζουν περιορισμούς. Το Wi-Fi απαιτεί σταθερή τροφοδοσία και έχει περιορισμένη εμβέλεια, τα δίκτυα 4G/5G συνεπάγονται υψηλότερο κόστος και κατανάλωση, ενώ το LoRaWAN παρουσιάζει χαμηλό ρυθμό μετάδοσης και ενδέχεται να μην είναι κατάλληλο για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλο όγκο δεδομένων ή χαμηλό latency [16], [66].

Η εξάρτηση από το δίκτυο ενέχει και κινδύνους ασφαλείας. Κατά τη διάρκεια μιας διακοπής σύνδεσης, ορισμένες συσκευές μπορεί να ενεργοποιηθούν ή να απενεργοποιηθούν ακούσια – συχνά λόγω μη σωστής εφαρμογής τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας, όπως το duty cycling (π.χ. η συσκευή «ξυπνά» αλλά δεν βρίσκει σύνδεση και αποτυγχάνει στη λειτουργία της). Επιπλέον, ορισμένα συστήματα επανεκκινούν αυτόματα μετά από απώλεια σύνδεσης για να αποκαταστήσουν λειτουργίες, χωρίς όμως να διαθέτουν επαρκείς ελέγχους ασφαλείας – με αποτέλεσμα να λειτουργούν με προεπιλεγμένες ρυθμίσεις ή χωρίς έλεγχο ταυτότητας [2], [55].

Η ανάγκη για εναλλακτικούς μηχανισμούς λειτουργίας σε περιπτώσεις απώλειας σύνδεσης είναι πλέον επιτακτική. Η τοπική επεξεργασία δεδομένων μέσω edge computing αποτελεί μία κρίσιμη κατεύθυνση, η οποία όμως δεν υλοποιείται πάντα λόγω κόστους ή τεχνικών περιορισμών [11], [16]. Χωρίς τέτοιες λύσεις, τα συστήματα καθίστανται εξαρτώμενα, εύθραυστα και λιγότερο αξιόπιστα.

3.7.9 Προβλήματα Κλιμάκωσης και Μελλοντικής Επέκτασης

Καθώς το οικοσύστημα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) επεκτείνεται ραγδαία, αναδύονται σοβαρές προκλήσεις που αφορούν την κλιμάκωση των υποδομών και τη δυνατότητα μελλοντικής επέκτασης των συστημάτων. Η μετάβαση από πιλοτικές ή τοπικές εφαρμογές σε πλήρως ανεπτυγμένα, μαζικά δίκτυα συσκευών απαιτεί σημαντικούς πόρους, στρατηγικό σχεδιασμό και τεχνολογική ετοιμότητα, παράγοντες που δεν είναι πάντα διαθέσιμοι ή προβλεπόμενοι εξ αρχής [11], [16].

Ένα από τα βασικά προβλήματα είναι η ασυμβατότητα μεταξύ συσκευών διαφορετικών κατασκευαστών. Η απουσία διεθνών και κοινώς αποδεκτών προτύπων σημαίνει ότι πολλές IoT λύσεις είναι σχεδιασμένες για συγκεκριμένα οικοσυστήματα και δεν υποστηρίζουν διαλειτουργικότητα, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα σε μεγαλύτερα, ετερογενή περιβάλλοντα [16], [55]. Επιπλέον, συχνά προκύπτει η ανάγκη για συνεχή αναβάθμιση του υλικού, καθώς παλαιότερες συσκευές δεν υποστηρίζουν νέες λειτουργίες ή δεν είναι συμβατές με μεταγενέστερα δίκτυα ή πλατφόρμες [11].

Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των συσκευών που συνδέονται σε ένα σύστημα, η διαχείριση των δεδομένων γίνεται εξαιρετικά απαιτητική. Οι υποδομές που δεν έχουν σχεδιαστεί για υψηλό όγκο ταυτόχρονων ροών πληροφορίας κινδυνεύουν από καθυστερήσεις, bottlenecks και απώλεια δεδομένων, υποβαθμίζοντας την αξιοπιστία και τη λειτουργικότητα της πλατφόρμας [2], [50]. Παράλληλα, η ανάγκη για ενημερώσεις λογισμικού και διαχείριση ασφάλειας σε μεγάλο αριθμό συσκευών καθιστά τη συντήρηση πολύπλοκη και χρονοβόρα.

Η κλιμάκωση επιβαρύνει επίσης τις επενδυτικές και λειτουργικές απαιτήσεις. Οικονομικά, η μετάβαση από ένα μικρής κλίμακας σύστημα σε ένα εθνικό ή διατομεακό δίκτυο απαιτεί επανασχεδιασμό των υποδομών, προσλήψεις εξειδικευμένου προσωπικού και εξασφάλιση διαλειτουργικών λύσεων – παράγοντες που λειτουργούν αποτρεπτικά, ιδίως για μικρότερες επιχειρήσεις [55].

Σημαντική πρόκληση αποτελεί και η συντήρηση της ποιότητας και της ασφάλειας όσο το δίκτυο επεκτείνεται. Πολλές εφαρμογές που λειτουργούν άρτια σε περιορισμένο περιβάλλον δεν μπορούν να διατηρήσουν την ίδια σταθερότητα και απόδοση σε ευρύτερη κλίμακα, λόγω έλλειψης επεκτάσιμης αρχιτεκτονικής και κατάλληλων τεχνολογιών υποστήριξης [66].

Η μελλοντική επέκταση του IoT προϋποθέτει αρχιτεκτονικές με δυνατότητα δυναμικής προσαρμογής, καθώς και τη σταδιακή υιοθέτηση διεθνών προτύπων που θα επιτρέπουν την ασφαλή, διαλειτουργική και βιώσιμη ανάπτυξη συστημάτων σε μεγάλη κλίμακα [16].

3.7.10 Χαμηλό Επίπεδο Εκπαίδευσης και Ευαισθητοποίησης των Χρηστών

Η επιτυχία της υιοθέτησης και της ασφαλούς χρήσης τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από το επίπεδο εκπαίδευσης και ευαισθητοποίησης όλων των χρηστών – τόσο των τελικών χρηστών, όσο και των διαχειριστών (administrators) ή φορέων υποστήριξης. Ένα από τα βασικά προβλήματα που παρατηρούνται ευρέως είναι η έλλειψη γνώσης σχετικά με τη λειτουργία, τις δυνατότητες, αλλά και τους κινδύνους των IoT συσκευών, τόσο σε οικιακά όσο και σε επαγγελματικά περιβάλλοντα [16], [66].

Πολλοί τελικοί χρήστες (δηλαδή ιδιώτες, καταναλωτές ή προσωπικό μη τεχνικού προφίλ που αλληλεπιδρά απευθείας με τις συσκευές) χειρίζονται IoT τεχνολογίες χωρίς να κατανοούν επαρκώς τις απαιτήσεις ασφαλείας. Συνηθισμένα φαινόμενα είναι η μη αλλαγή των προεπιλεγμένων κωδικών πρόσβασης, η απενεργοποίηση ενημερώσεων ασφαλείας ή η σύνδεση σε μη ασφαλή δίκτυα Wi-Fi, γεγονότα που επιτρέπουν εύκολη κακόβουλη πρόσβαση [2], [55].

Αντίστοιχα, σε επαγγελματικά περιβάλλοντα, η έλλειψη εκπαίδευσης αφορά και τους τεχνικούς διαχειριστές συστημάτων, οι οποίοι σε πολλές περιπτώσεις δεν διαθέτουν την απαραίτητη τεχνογνωσία για να παραμετροποιήσουν ορθά το δίκτυο IoT ή να ανταποκριθούν σε περιστατικά ασφαλείας. Αυτό οδηγεί σε χρήση μη συμβατών λύσεων, παραβλέψεις κρίσιμων ρυθμίσεων και αδυναμία εντοπισμού πιθανών απειλών εγκαίρως [11].

Η κατάσταση επιδεινώνεται από την ανεπαρκή παροχή τεκμηρίωσης και οδηγιών από τους κατασκευαστές. Πολλές συσκευές δεν συνοδεύονται από πρακτικά και κατανοητά εγχειρίδια, ενώ η έλλειψη ειδοποιήσεων για ενημερώσεις ή αλλαγές ασφάλειας μειώνει την αποτελεσματική χρήση τους [63]. Επιπλέον, η έλλειψη πρόσβασης σε κατάλληλο εκπαιδευτικό υλικό, αλλά και η μη ένταξη σχετικής ύλης στην επαγγελματική κατάρτιση περιορίζουν τη διάδοση της τεχνογνωσίας.

Η ελλιπής ευαισθητοποίηση επεκτείνεται και σε θέματα ιδιωτικότητας και ηθικής. Πολλοί χρήστες δεν αντιλαμβάνονται την κρισιμότητα της προστασίας των προσωπικών δεδομένων, ακόμη και σε φαινομενικά αθώες εφαρμογές, όπως τα έξυπνα φώτα ή οι βοηθοί φωνής. Υποτιμούν τους κινδύνους παρακολούθησης ή διαρροής ευαίσθητων πληροφοριών [16], [55].

Η αντιμετώπιση του προβλήματος απαιτεί συντονισμένες ενέργειες από την πολιτεία, τους εκπαιδευτικούς φορείς και τους κατασκευαστές. Η δημιουργία εκπαιδευτικών προγραμμάτων, η υποστήριξη της δια βίου μάθησης και η προώθηση οδηγιών καλών πρακτικών αποτελούν βασικά βήματα. Επίσης, η ενσωμάτωση ενημερωτικών και προειδοποιητικών μηνυμάτων στις ίδιες τις συσκευές ή κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στη βελτίωση της χρήσης και της ασφάλειας [66].

Κεφάλαιο 4 - Αλυσίδα Συστοιχίας (Blockchain)

4.1 Ορισμός Blockchain

Το Blockchain είναι μια τεχνολογία κατακεντρωμένου και αποκεντρωμένου καθολικού (distributed and decentralized ledger), η οποία επιτρέπει την καταγραφή και αποθήκευση δεδομένων με τρόπο που διασφαλίζει την ακεραιότητα, την ασφάλεια και τη διαφάνεια των συναλλαγών, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης κεντρικής αρχής ή διαχειριστή [56]. Με τον όρο “αποκεντρωμένο καθολικό” εννοούμε ότι οι πληροφορίες δεν τηρούνται σε έναν κεντρικό διακομιστή, αλλά διαμοιράζονται σε όλους τους κόμβους του δικτύου, με ισότιμη πρόσβαση και ευθύνη [6].

Τα δεδομένα μπορεί να περιλαμβάνουν ποικίλους τύπους πληροφορίας, όπως χρηματοοικονομικές συναλλαγές, ψηφιακά πιστοποιητικά, αισθητηριακά δεδομένα ή μεταδεδομένα εγγραφών [15]. Αυτά οργανώνονται σε διαδοχικά "μπλοκ", τα οποία συνδέονται μέσω κρυπτογραφικών κατακερματισμών (hashes), ώστε να διασφαλίζεται ότι κάθε πιθανή αλλοίωση γίνεται άμεσα αντιληπτή [10]. Η χρήση όρων όπως «υπογραφές» αποδίδεται τεχνικά σε μηχανισμούς ψηφιακών υπογραφών και κρυπτογράφησης, οι οποίοι υποστηρίζουν την εγκυρότητα και αυθεντικότητα των καταχωρήσεων [56].

Το Blockchain δεν βασίζεται σε μια κεντρική αρχή για την επαλήθευση των δεδομένων, αλλά σε συλλογικούς μηχανισμούς συναίνεσης, όπως το Proof-of-Work (PoW) ή το Proof-of-Stake (PoS) [65], οι οποίοι εξασφαλίζουν την αποδοχή των πληροφοριών από όλους τους κόμβους [6]. Με αυτόν τον τρόπο, ενισχύεται η εμπιστοσύνη των χρηστών προς το σύστημα, καθώς δεν απαιτείται εμπιστοσύνη σε έναν ενδιάμεσο οργανισμό ή διαχειριστή [6].

Η τεχνολογία βρίσκει εφαρμογή σε τομείς όπως:

- οι οικονομικές συναλλαγές,
- η έκδοση πτυχίων ή μικρο-διαπιστευτηρίων (micro-credentials) στην εκπαίδευση [60], [61],
- η ιχνηλασιμότητα προϊόντων στην εφοδιαστική αλυσίδα [49], [57],
- και η διαχείριση ψηφιακής ταυτότητας.

Επιπλέον, υποστηρίζει την αυτοματοποίηση διαδικασιών μέσω "έξυπνων συμβολαίων" (smart contracts), τα οποία εκτελούνται αυτόματα όταν πληρούνται προκαθορισμένοι όροι, επιτρέποντας διαχειρισσιμότητα, συνέπεια και νομική ασφάλεια [61], [15]

4.2 Ιστορική Αναδρομή

Η τεχνολογία Blockchain έχει σημειώσει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, από τη σύλληψή της το 2008 έως σήμερα, εξελισσόμενη από μια θεωρητική προσέγγιση σε μια ισχυρή τεχνολογία για την ασφάλεια δεδομένων.

❖ 2008 - 2013: Η Γέννηση του Blockchain

Στις 31 Οκτωβρίου, ο Satoshi Nakamoto έδωσε στη δημοσιότητα ένα επίσημο έγγραφο για την ιδεολογία του Bitcoin [64], αναλύοντας ένα σύστημα ηλεκτρονικών συναλλαγών τύπου peer-to-peer (P2P) (δηλ. ομοτίμων) χωρίς την ανάγκη κάποιου κεντρικού μεσολαβητή. Το πρώτο μπλοκ, ονομαζόμενο μπλοκ γένεσης (Genesis block), εξορύχθηκε το 2009, δημιουργώντας την βάση για ένα αμετάβλητο και αποκεντρωμένο σύστημα συναλλαγών. Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται από την έναρξη του Bitcoin έως την πρώτη λειτουργική εφαρμογή στο Blockchain.

❖ 2014 - 2018: Προέκταση και Νέες Χρήσεις

Η ανάπτυξη της Τεχνολογίας του Blockchain, έφερε το 2015 μια νέα πλατφόρμα πέρα από το Bitcoin, ως μια εναλλακτική λύση σε πιο ευρύ φάσμα. Η πλατφόρμα αυτή ονομάστηκε Ethereum, η οποία διαχειρίζεται έξυπνα συμβόλαια ώστε να επιτρέπει να πραγματοποιούνται αυτόματες συναλλαγές χωρίς κάποιον ενδιάμεσο. Στο διάστημα αυτό, η τεχνολογία του Blockchain ξεκίνησε να εφαρμόζεται και σε διάφορους άλλους τομείς, όπως οι εφοδιαστικές αλυσίδες ή οι ψηφιακές ταυτότητες.

❖ 2019 - 2023: Υιοθέτηση και Εμπορική Χρήση

Η αυξανόμενη εμπορική αφομοίωση της τεχνολογίας Blockchain άρχισε να αναπτύσσεται σε μεγάλες εταιρείες, όπως η Maersk και η IBM, για τη δημιουργία ενός συστήματος διαχείρισης της εφοδιαστικής τους αλυσίδας βασισμένου στην τεχνολογία του Blockchain. Αυτό δεν άργησε να επεκταθεί και σε κυβερνήσεις, οι οποίες άρχισαν να αναλύουν τη χρήση του Blockchain για την αντιμετώπιση οικονομικών απατών και τη διαχείριση δημόσιων δεδομένων [6].

❖ 2024 και Μετά: Προοπτικές Ανάπτυξης

Η συνεχής ανάπτυξη της τεχνολογίας Blockchain ενισχύει τη δυνατότητα εξέλιξής της, με βασικούς στόχους τη βελτίωση της ικανότητας επεξεργασίας συναλλαγών, τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης των συστημάτων που την υποστηρίζουν μέσω αποδοτικότερων μηχανισμών συναίνεσης, καθώς και την προσφορά ακόμη πιο υψηλού επιπέδου ασφάλειας για τις καταγραφές δεδομένων και τις ψηφιακές συναλλαγές [6], [63], [61].

Οι αποκεντρωμένες εφαρμογές (dApps), όπως οι χρηματοοικονομικές υπηρεσίες (DeFi), τα NFTs (Non-Fungible Tokens, δηλ. Μη Ανταλλάξιμα Διακριτικά) και οι έξυπνες πόλεις, αποτελούν πλέον αντικείμενα καθημερινής μελέτης και συζήτησης αναφορικά με τις προοπτικές ανάπτυξης αυτής της τεχνολογίας [15] [64].

Ταυτόχρονα, οι παγκόσμιες συνεργασίες ενισχύουν τη χρήση του Blockchain σε τομείς που σχετίζονται τόσο με την οικονομική διακυβέρνηση όσο και με την κοινωνική οργάνωση και βιωσιμότητα [60] [61].

Η τεχνολογία Blockchain έχει εξελιχθεί από την αρχική της εφαρμογή, το Bitcoin, σε μια διευρυμένη τεχνολογία με ασκούμενες δυνατότητες. Οι προκλήσεις που σχετίζονται με την ασφάλεια και την επεκτασιμότητα της τεχνολογίας αυτής αντιμετωπίζονται καθημερινά. Ωστόσο η τεχνολογία Blockchain αναμένει την διεξόδου της σε μεγαλύτερο βαθμό στην καθημερινότητα και στις επιχειρηματικές διαδικασίες ατενίζοντας προς το μέλλον.

4.3 Χαρακτηριστικά

Το Blockchain αποτελεί μια καινοτόμο τεχνολογία, η οποία εισάγει μια σύγχρονη προσέγγιση στον τρόπο αποθήκευσης, μεταφοράς και διαχείρισης των δεδομένων. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες διαχείρισης πληροφορίας, οι οποίες είναι κεντριοποιημένες και επομένως πιο ευάλωτες σε αλλοίωση δεδομένων, απώλεια ή κακόβουλες επιθέσεις, το Blockchain βασίζεται σε κατακεντρωμένα δίκτυα και μηχανισμούς συναίνεσης για την εγγραφή και επιβεβαίωση των συναλλαγών [6], [10], [64].

Η τεχνολογία αυτή έχει διευρυμένες δυνατότητες εφαρμογής σε κρίσιμους τομείς, όπως τα χρηματοοικονομικά, η εφοδιαστική αλυσίδα, ο τομέας της υγείας, αλλά και η ενέργεια, προσφέροντας ασφάλεια, αξιοπιστία και διαφάνεια [15], [57], [61]. Η αξιοπιστία της τεχνολογίας blockchain στηρίζεται σε μια σειρά βασικών χαρακτηριστικών, όπως η αποκέντρωση, η αμεταβλητότητα, η διαφάνεια, η ασφάλεια, η ανιχνευσιμότητα και ο αυτοματισμός μέσω έξυπνων συμβολαίων. Τα χαρακτηριστικά αυτά προσδίδουν στο blockchain σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς την ανθεκτικότητα, την εμπιστοσύνη και τη λειτουργικότητα σε πολύπλοκα και απαιτητικά ψηφιακά περιβάλλοντα.[6], [15], [61].

- **Αποκέντρωση**

Ένα κύριο χαρακτηριστικό του Blockchain είναι η αποκέντρωση, η οποία αποτελεί θεμέλιο της λειτουργίας του. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές βάσεις δεδομένων, όπου η αποθήκευση και η διαχείριση πραγματοποιούνται μέσω ενός κεντρικού διακομιστή και ελεγκτή, το Blockchain λειτουργεί με τη συνδρομή κατακεντρωμένων κόμβων σε ένα ομότιμο δίκτυο (peer-to-peer). Κάθε κόμβος διατηρεί ένα πλήρες αντίγραφο του καθολικού και συμμετέχει ενεργά στην επικύρωση των συναλλαγών, γεγονός που εκμηδενίζει την ανάγκη για κεντρικό έλεγχο [47], [6].

Η αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική του συστήματος ενισχύει την ανθεκτικότητά του σε κυβερνοεπιθέσεις και τεχνικά σφάλματα, καθώς δεν υπάρχει ένα μοναδικό σημείο αποτυχίας που θα μπορούσε να επηρεάσει τη συνολική λειτουργία του. Επιπλέον, αυξάνει την εμπιστοσύνη των χρηστών, αφού η διαχείριση των δεδομένων γίνεται συλλογικά και διαφανώς, χωρίς την ανάγκη εμπιστοσύνης σε έναν τρίτο φορέα ή ενδιάμεσο. Αυτό οδηγεί σε μείωση κόστους, βελτίωση της ασφάλειας και εξάλειψη των μεσαζόντων, με άμεσες επιπτώσεις στη βελτιστοποίηση των συναλλαγών και των διαδικασιών [56], [15], [64].

Η αποκέντρωση, επομένως, δεν αποτελεί μόνο τεχνικό γνώρισμα, αλλά και στρατηγικό πλεονέκτημα που προσδίδει στο blockchain χαρακτηριστικά αυτονομίας, ανθεκτικότητας, και θεσμικής ανεξαρτησίας καθιστώντας το κατάλληλο για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή αξιοπιστία και διαφάνεια [47], [6], [64]

- **Αμεταβλητότητα**

Ως απόρροια της διαδικασίας καταγραφής τους, το αμετάβλητο των δεδομένων στο Blockchain συνιστά έναν από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που ενισχύουν τη φήμη του ως ασφαλές και αξιόπιστο σύστημα καταγραφής. Μόλις μια συναλλαγή ολοκληρωθεί και επικυρωθεί, ενσωματώνεται οριστικά στην αλυσίδα των μπλοκ, χωρίς δυνατότητα τροποποίησης ή διαγραφής της, γεγονός που αποτρέπει την παραποίηση ιστορικών δεδομένων [6][15].

Αυτή η αμεταβλητότητα οφείλεται σε δύο βασικούς μηχανισμούς: πρώτον, στην κρυπτογραφική σύνδεση των μπλοκ μέσω κατακερματισμού (hashing), και δεύτερον, στη χρήση μηχανισμών συναίνεσης, όπως τους PoW και PoS, οι οποίοι επικυρώνουν κάθε νέο μπλοκ (που αποτελείται μια σειρά από νέες εγγραφές) μέσω συλλογικής συμφωνίας του δικτύου [12], [52]. Η αλλοίωση ενός μόνο μπλοκ απαιτεί την ανακατασκευή όλων των επόμενων μπλοκ της αλυσίδας (διότι ένα επόμενο μπλοκ αναφέρεται κρυπτογραφικά στον κατακερματισμό του αμέσως προηγούμενου μπλοκ), κάτι το οποίο είναι υπολογιστικά εξαιρετικά απαιτητικό και εύκολα ανιχνεύσιμο σε αποκεντρωμένα περιβάλλοντα [10], [56].

Η ιδιότητα αυτή καθιστά το Blockchain ιδανικό για εφαρμογές που απαιτούν υψηλό βαθμό εμπιστοσύνης, λογιστική διαφάνεια και ιστορικό έλεγχο, όπως είναι η οικονομική διαχείριση, η ιχνηλασιμότητα προϊόντων στην εφοδιαστική αλυσίδα, αλλά και η ψηφιακή πιστοποίηση δεδομένων [15], [47], [64]

- **Διαφάνεια**

Ένα από τα πιο καθοριστικά χαρακτηριστικά του Blockchain είναι η διαφάνεια των συναλλαγών, ειδικά στα δημόσια δίκτυα blockchain, όπως το Bitcoin και το Ethereum. Σε αυτά τα δίκτυα, όλες οι συναλλαγές είναι πλήρως ορατές και προσβάσιμες από οποιονδήποτε συμμετέχει στο σύστημα, καθώς καταγράφονται σε ένα κοινό καθολικό (ledger) που διατηρείται ταυτόχρονα σε πολλούς κόμβους [10], [47].

Η εγγενής αυτή διαφάνεια του συστήματος ενισχύει την εμπιστοσύνη των χρηστών, καθώς καμία συναλλαγή δεν μπορεί να τροποποιηθεί, διαγραφεί ή αποκρυφτεί χωρίς να γίνει άμεσα αντιληπτό από το δίκτυο. Η χρήση κρυπτογραφίας και μηχανισμών συναίνεσης διασφαλίζει την αυθεντικότητα κάθε εγγραφής, καθιστώντας το blockchain ένα σύστημα πλήρους ιχνηλασιμότητας και ελέγχου [6], [15].

Αυτή η διαφάνεια καθιστά την τεχνολογία ιδιαίτερα χρήσιμη σε εφαρμογές όπου απαιτείται λογοδοσία και εμπιστοσύνη, όπως η παρακολούθηση δωρεών, η διαχείριση δημόσιων πόρων, η ηλεκτρονική διακυβέρνηση, αλλά και η έκδοση ψηφιακών πιστοποιητικών [47], [56]. Η δυνατότητα δημόσιας επαλήθευσης ενισχύει την αντιμετώπιση της διαφθοράς, περιορίζει τις αδιαφανείς πρακτικές, και ενθαρρύνει ένα πιο συμμετοχικό και αξιόπιστο περιβάλλον διαχείρισης δεδομένων και συναλλαγών [64].

- **Ασφάλεια**

Το Blockchain ενσωματώνει προηγμένες κρυπτογραφικές τεχνικές με σκοπό την ενίσχυση της ασφάλειας του συστήματος. Κάθε block της αλυσίδας διαθέτει έναν μοναδικό κατακερματισμό (hash), καθώς και μια αναφορά στο hash του προηγούμενου block, σχηματίζοντας μία αλυσίδα ακεραιότητας, η οποία διασφαλίζει ότι κάθε αλλαγή σε ένα σημείο της αλυσίδας γίνεται άμεσα ανιχνεύσιμη [10], [56].

Σε περίπτωση που κάποιος επιδιώξει να αλλοιώσει τα δεδομένα ενός block, θα πρέπει να επανυπολογίσει όλα τα επόμενα hash της αλυσίδας, κάτι που είναι υπολογιστικά σχεδόν ανέφικτο, ειδικά όταν το δίκτυο είναι μεγάλο και λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο [10].

Η αποκεντρωμένη και κατανεμημένη φύση του Blockchain ενισχύει ακόμη περισσότερο την ανθεκτικότητα και την ασφάλεια. Όλοι οι κόμβοι του δικτύου διατηρούν ένα κοινό, ενημερωμένο αντίγραφο του καθολικού (ledger), γεγονός που καθιστά εξαιρετικά δύσκολη οποιαδήποτε απόπειρα παραποίησης δεδομένων ή στοχευμένης επίθεσης [6], [64].

Επιπλέον, οι μηχανισμοί συναίνεσης, όπως οι PoW και PoS, διασφαλίζουν την έγκριση συναλλαγών χωρίς την ανάγκη ύπαρξης κεντρικής αρχής, προσδίδοντας ανθεκτικότητα σε επιθέσεις τύπου Denial-of-Service (DDoS) και άλλες κακόβουλες επιθέσεις [15], [64].

Η συνδυαστική εφαρμογή της κρυπτογραφίας, της αποκέντρωσης και της συναίνεσης καθιστά το Blockchain μία από τις πιο ασφαλείς τεχνολογίες καταγραφής και διαχείρισης δεδομένων.

- **Ανιχνευσιμότητα**

Το Blockchain παρέχει πλήρη ανιχνευσιμότητα για κάθε block στην αλυσίδα του, καθώς κάθε πραγματοποιημένη συναλλαγή καταγράφεται με μοναδικό αναγνωριστικό, χρονολογική σήμανση και ακριβή θέση μέσα στην αλυσίδα [6], [10]. Η δομή αυτή επιτρέπει την επικύρωση και επαναφορά κάθε συναλλαγής, διατηρώντας την ιστορικότητα και την ακεραιότητα των δεδομένων στο σύστημα.

Η ανιχνευσιμότητα καθιστά το Blockchain πολύτιμο εργαλείο σε διάφορους τομείς. Στην εφοδιαστική αλυσίδα, διευκολύνει την ιχνηλασιμότητα προϊόντων από την παραγωγή έως την κατανάλωση. Στον χώρο της υγείας, διασφαλίζει τη διατήρηση και το αδιάβλητο ιατρικών αρχείων. Επιπλέον, υποστηρίζει τη διαχείριση ευαίσθητων ή κρίσιμων πληροφοριών με εγγυημένη ασφάλεια και διαφάνεια [15], [57].

- **Αυτοματισμός μέσω Έξυπνων Συμβολαίων**

Τα έξυπνα συμβόλαια (smart contracts) είναι κωδικοποιημένα προγραμματιστικά συμβόλαια που αποθηκεύονται στο blockchain και εκτελούνται αυτόματα εφόσον οι προκαθορισμένες συνθήκες του συμβολαίου ικανοποιούνται. Η εκτέλεση πραγματοποιείται χωρίς την ανάγκη παρέμβασης τρίτου μέρους, γεγονός που αυξάνει την αποτελεσματικότητα, την ταχύτητα, αλλά και τη διαφάνεια στις διαδικασίες [15], [61].

Η χρήση τους εξαλείφει την ανάγκη εμπιστοσύνης μεταξύ μερών, επιτρέποντας την αυτόνομη ολοκλήρωση συναλλαγών και εντολών με προκαθορισμένο τρόπο. Τα έξυπνα συμβόλαια βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε χρηματοοικονομικές υπηρεσίες, όπως αυτόματες πληρωμές, δανειοδοτήσεις, αλλά και σε τομείς όπως η ασφάλιση, η εφοδιαστική αλυσίδα, η αυτοματοποιημένη φορολογία, και η δημόσια διοίκηση [60], [61].

4.4 Αρχιτεκτονική του Blockchain

Η αρχιτεκτονική του Blockchain (δείτε Εικόνα 5) βασίζεται σε μια πολυεπίπεδη δομή, σχεδιασμένη ώστε να διαχωρίζει τις κύριες λειτουργίες του συστήματος και να διασφαλίζει την ασφαλή, αποκεντρωμένη και αμετάβλητη διαχείριση δεδομένων και συναλλαγών. Κάθε επίπεδο επιτελεί συγκεκριμένη λειτουργία: το επίπεδο δεδομένων διαχειρίζεται τις εγγραφές και τις συνδέσεις των μπλοκ, το επίπεδο δικτύου καθορίζει την επικοινωνία μεταξύ των κόμβων του δικτύου μέσω ομότιμων (peer-to-peer) μηχανισμών, το επίπεδο συναίνεσης διασφαλίζει την αποδοχή των εγγραφών με τη χρήση αλγορίθμων όπως PoW ή PoS, το επίπεδο έξυπνων συμβολαίων υποστηρίζει την αυτόματη εκτέλεση προκαθορισμένων κανόνων και, τέλος, το επίπεδο εφαρμογής περιλαμβάνει την πρακτική χρήση του Blockchain σε τομείς, όπως οι χρηματοοικονομικές συναλλαγές, η εκπαίδευση και η εφοδιαστική αλυσίδα [47], [49], [6].

➤ Επίπεδο Δεδομένων (Data Layer)

Το επίπεδο δεδομένων αποτελεί τη θεμελιώδη υποδομή του Blockchain, καθώς εδώ αποθηκεύονται όλες οι πληροφορίες με τρόπο που εξασφαλίζει την ακεραιότητα και την αμεταβλητότητα των δεδομένων. Οι πληροφορίες οργανώνονται σε διαδοχικά μπλοκ, καθένα από τα οποία περιέχει ένα σύνολο συναλλαγών μαζί με τα αντίστοιχα μεταδεδομένα τους – όπως τη χρονική σφραγίδα (timestamp), το hash του προηγούμενου μπλοκ και άλλες πληροφορίες απαραίτητες για την ταυτοποίηση και τη σύνδεση των δεδομένων.

Τα μπλοκ συνδέονται μεταξύ τους με κρυπτογραφικούς κατακερματισμούς (hashes), σχηματίζοντας μια «αλυσίδα» στην οποία κάθε καταχώριση εξαρτάται από την προηγούμενη, καθιστώντας εξαιρετικά δύσκολη οποιαδήποτε αλλοίωση ενός μπλοκ διότι αυτή απαιτεί την ανακατασκευή όλων των επόμενων μπλοκ, κάτι που πρακτικά είναι εξαιρετικά δύσκολο σε αποκεντρωμένα δίκτυα [47], [49], [6]. Αυτό σημαίνει πως το σύστημα blockchain είναι ανθεκτικό σε οποιαδήποτε προσπάθεια αλλοίωσης. τροποποιήσεις: . Επιπλέον, μέσω μηχανισμών όπως τα Merkle Trees, το επίπεδο αυτό διευκολύνει την ταχεία επαλήθευση και την αποδοτική αναζήτηση συναλλαγών μέσα σε ένα μπλοκ, χωρίς την ανάγκη ελέγχου ολόκληρης της αλυσίδας [6].

➤ Επίπεδο Δικτύου (Network Layer)

Το επίπεδο δικτύου είναι υπεύθυνο για τη διασύνδεση και επικοινωνία μεταξύ των συμμετεχόντων στο Blockchain, δηλαδή των κόμβων (nodes). Η επικοινωνία βασίζεται σε δίκτυο τύπου peer-to-peer (P2P), όπου όλοι οι κόμβοι είναι ισότιμοι και συνεργάζονται για την ανταλλαγή πληροφοριών, όπως συναλλαγές και μπλοκ. Δεν υπάρχει κεντρικός διακομιστής· κάθε κόμβος μπορεί να αποστείλει, να λάβει και να επαληθεύσει πληροφορίες [47], [49].

Ο ρόλος του δικτύου είναι καθοριστικός για τη διάδοση (propagation) των νέων συναλλαγών και των νέων μπλοκ που δημιουργούνται. Όταν ένας κόμβος προσθέσει ένα νέο μπλοκ, το μεταδίδει στο δίκτυο ώστε να ενημερωθούν οι υπόλοιποι κόμβοι. Με αυτόν τον τρόπο διατηρείται η συνοχή και η ενημέρωση του καθολικού σε όλο το σύστημα [6]. Επιπλέον, το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει διαδικασίες, όπως η ανακάλυψη νέων κόμβων, η σύνδεση με ομότιμους (peers) και η ασφαλής μετάδοση δεδομένων, μέσω πρωτοκόλλων και κανόνων που καθορίζονται από την υλοποίηση κάθε συστήματος Blockchain (π.χ. Bitcoin, Ethereum) [47], [6].

➤ Επίπεδο Συναίνεσης (Consensus Layer)

Το επίπεδο συναίνεσης αποτελεί τον μηχανισμό μέσω του οποίου οι κόμβοι του δικτύου συμφωνούν για την εγκυρότητα των συναλλαγών και την προσθήκη νέων μπλοκ στην αλυσίδα. Δεδομένου ότι το Blockchain λειτουργεί σε αποκεντρωμένο περιβάλλον χωρίς κεντρικό έλεγχο, απαιτείται ένας ασφαλής και αποδοτικός τρόπος συντονισμού για να διασφαλίζεται ότι όλοι οι συμμετέχοντες έχουν μια κοινή και έγκυρη εκδοχή του καθολικού [47], [6]. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω αλγορίθμων συναίνεσης, οι οποίοι καθορίζουν τους κανόνες που πρέπει να τηρηθούν ώστε ένα νέο μπλοκ να θεωρηθεί έγκυρο.

Από τους πιο διαδεδομένους αλγορίθμους συναίνεσης είναι ο Proof-of-Work (PoW), ο οποίος απαιτεί την επίλυση ενός μαθηματικού προβλήματος με υψηλή υπολογιστική ισχύ, όπως συμβαίνει στο δίκτυο Bitcoin· ο Proof-of-Stake (PoS), ο οποίος βασίζεται στην ποσότητα των κρυπτονομισμάτων που διαθέτει και δεσμεύει ένας κόμβος ως εγγύηση· και ο PBFT (Practical Byzantine Fault Tolerance), ο οποίος χρησιμοποιείται κυρίως σε ιδιωτικά ή εταιρικά blockchain με περιορισμένο αριθμό κόμβων, καθώς προσφέρει ταχύτατη επίτευξη συναίνεσης και υψηλή

ανθεκτικότητα απέναντι σε παραπλανητικούς ή αποτυχημένους κόμβους (faulty nodes) σε περιβάλλοντα με προδιαγεγραμμένη εμπιστοσύνη [47], [49].

Το επίπεδο συναίνεσης είναι θεμελιώδες για τη λειτουργική ασφάλεια, την αποκέντρωση και την ανθεκτικότητα του συστήματος, καθώς αποτρέπει φαινόμενα, όπως η διπλή δαπάνη (double spending)², δηλαδή την προσπάθεια χρήσης των ίδιων ψηφιακών νομισμάτων σε περισσότερες από μία συναλλαγές, γεγονός που – αν επιτυγχάνονταν – θα υπονόμει την αξιοπιστία του καθολικού και ολόκληρου του συστήματος. Έτσι διασφαλίζεται ότι όλοι οι χρήστες μπορούν να εμπιστευθούν τη συνολική κατάσταση του blockchain [6].

➤ Επίπεδο Έξυπνων Συμβολαίων (Contract Layer)

Το επίπεδο των έξυπνων συμβολαίων είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση προκαθορισμένων λογικών κανόνων εντός του blockchain. Τα έξυπνα συμβόλαια (smart contracts) είναι προγράμματα που αποθηκεύονται στην αλυσίδα και ενεργοποιούνται αυτόματα όταν πληρούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Με τον τρόπο αυτό αντικαθιστούν την ανάγκη για ενδιάμεσους φορείς ή ανθρώπινη παρέμβαση σε διαδικασίες που μπορούν να αυτοματοποιηθούν [47], [6].

Για παράδειγμα, ένα έξυπνο συμβόλαιο μπορεί να ορίζει ότι, μόλις ολοκληρωθεί μια πληρωμή, θα εκδοθεί αυτόματα ένα πιστοποιητικό ή θα εγκριθεί μια παραγγελία. Το επίπεδο αυτό προσφέρει διαφάνεια, νομική σαφήνεια και αυτοματισμό, καθώς το συμβόλαιο εκτελείται ακριβώς όπως έχει προγραμματιστεί, χωρίς δυνατότητα αυθαίρετης τροποποίησης [61].

Η χρήση έξυπνων συμβολαίων είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε πλατφόρμες, όπως το Ethereum, και αξιοποιείται σε τομείς, όπως η εκπαίδευση, οι δημόσιες συμβάσεις, η διαχείριση ψηφιακής ταυτότητας και η εφοδιαστική αλυσίδα, επιτρέποντας την αξιόπιστη και αυτοματοποιημένη διαχείριση δεδομένων και συναλλαγών [47], [61].

➤ Επίπεδο Εφαρμογών (Application Layer)

Το επίπεδο εφαρμογών αποτελεί το ανώτερο λειτουργικό επίπεδο του Blockchain και σχετίζεται με την πρακτική αξιοποίηση της τεχνολογίας μέσω αποκεντρωμένων εφαρμογών (dApps) σε διάφορους τομείς της κοινωνίας και της οικονομίας. Είναι το σημείο όπου οι τελικοί χρήστες αλληλεπιδρούν με το σύστημα, μέσω ψηφιακών πορτοφολιών, έξυπνων συμβολαίων, εξειδικευμένων πλατφορμών ή web διεπαφών που καθιστούν αυτές τις υπηρεσίες προσβάσιμες ακόμη και σε μη τεχνικούς χρήστες [47], [6].

Αυτό το επίπεδο αξιοποιεί τις δυνατότητες των υποκείμενων επιπέδων – δεδομένων, συναίνεσης, δικτύου και έξυπνων συμβολαίων – για να προσφέρει λειτουργικότητα και υπηρεσίες που μπορούν να εμπιστευτούν τόσο οι οργανισμοί όσο και οι πολίτες. Η πρακτική σημασία του έγκειται στο ότι μετατρέπει την τεχνολογική υποδομή του blockchain σε απτές λύσεις, ενισχύοντας την κοινωνική, οικονομική και επιχειρησιακή υιοθέτηση της τεχνολογίας [6].

Η αρχιτεκτονική του Blockchain (δείτε Εικόνα 10), όπως αναλύθηκε στα επιμέρους επίπεδά της, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα που την καθιστούν καινοτόμα και κατάλληλη για πλήθος εφαρμογών. Όμως, συνοδεύεται και από ορισμένους περιορισμούς, οι οποίοι σχετίζονται με την τεχνική της φύση και τις προκλήσεις που προκύπτουν κατά την υλοποίησή της [47],[6].

² Η διπλή δαπάνη (double spending) αναφέρεται στην απόπειρα χρήσης των ίδιων ψηφιακών χρημάτων σε δύο ή περισσότερες διαφορετικές συναλλαγές. Χωρίς σωστό μηχανισμό συναίνεσης, τέτοιες επιθέσεις θα μπορούσαν να παραποιήσουν το καθολικό και να καταστρέψουν την αξιοπιστία του συστήματος.

Από την πλευρά των πλεονεκτημάτων, το Blockchain προσφέρει υψηλή ασφάλεια και ακεραιότητα δεδομένων, χάρη στη χρήση κρυπτογραφικών μηχανισμών, κατακερματισμών και αλγορίθμων συναίνεσης. Η αποκεντρωμένη δομή του δικτύου ενισχύει την εμπιστοσύνη των χρηστών, καθώς η διαχείριση των πληροφοριών δεν εξαρτάται από έναν κεντρικό φορέα. Επιπλέον, τα έξυπνα συμβόλαια εισάγουν αυτοματισμό σε πολύπλοκες διαδικασίες, μειώνοντας την ανάγκη για μεσάζοντες και άρα το συνολικό κόστος. Το επίπεδο εφαρμογών διευκολύνει την προσαρμογή της τεχνολογίας σε τομείς, όπως η εκπαίδευση, η οικονομία και η εφοδιαστική αλυσίδα [47], [61].

Ωστόσο, υπάρχουν και προβληματικά σημεία. Ορισμένοι αλγόριθμοι συναίνεσης, όπως ο Proof-of-Work, απαιτούν υψηλή κατανάλωση ενέργειας και υπολογιστική ισχύ, με αρνητικές συνέπειες στη βιωσιμότητα, ιδίως σε μεγάλη κλίμακα. Η χαμηλή ταχύτητα συναλλαγών και η δυσκολία στην κλιμάκωση περιορίζουν τη χρησιμότητα του συστήματος σε περιβάλλοντα με μεγάλο όγκο δεδομένων. Η πολυπλοκότητα υλοποίησης των επιπέδων απαιτεί εξειδικευμένη τεχνογνωσία, ενώ η αμετάβλητη φύση της τεχνολογίας καθιστά δύσκολη τη διόρθωση σφαλμάτων. Τέλος, παραμένουν νομικά και ρυθμιστικά ζητήματα, όπως η συμμόρφωση με την προστασία προσωπικών δεδομένων (π.χ. GDPR) και η απουσία σαφούς ρυθμιστικού πλαισίου [6], [47], [49].

Συνολικά, η αρχιτεκτονική του Blockchain αποτελεί ένα ισχυρό και εξελίξιμο μοντέλο για την καταγραφή και διαχείριση δεδομένων, αρκεί να συνοδεύεται από προσεκτικό σχεδιασμό που λαμβάνει υπόψη τόσο τις τεχνικές, όσο και τις θεσμικές και οργανωσιακές προκλήσεις – όπως η ανάγκη για διαλειτουργικότητα με υπάρχοντα συστήματα, η προσαρμογή σε εθνικά νομικά πλαίσια, αλλά και η εκπαίδευση του προσωπικού και η αποδοχή της τεχνολογίας από τους τελικούς χρήστες.



Εικόνα 10: Αρχιτεκτονική Blockchain 5 επιπέδων.

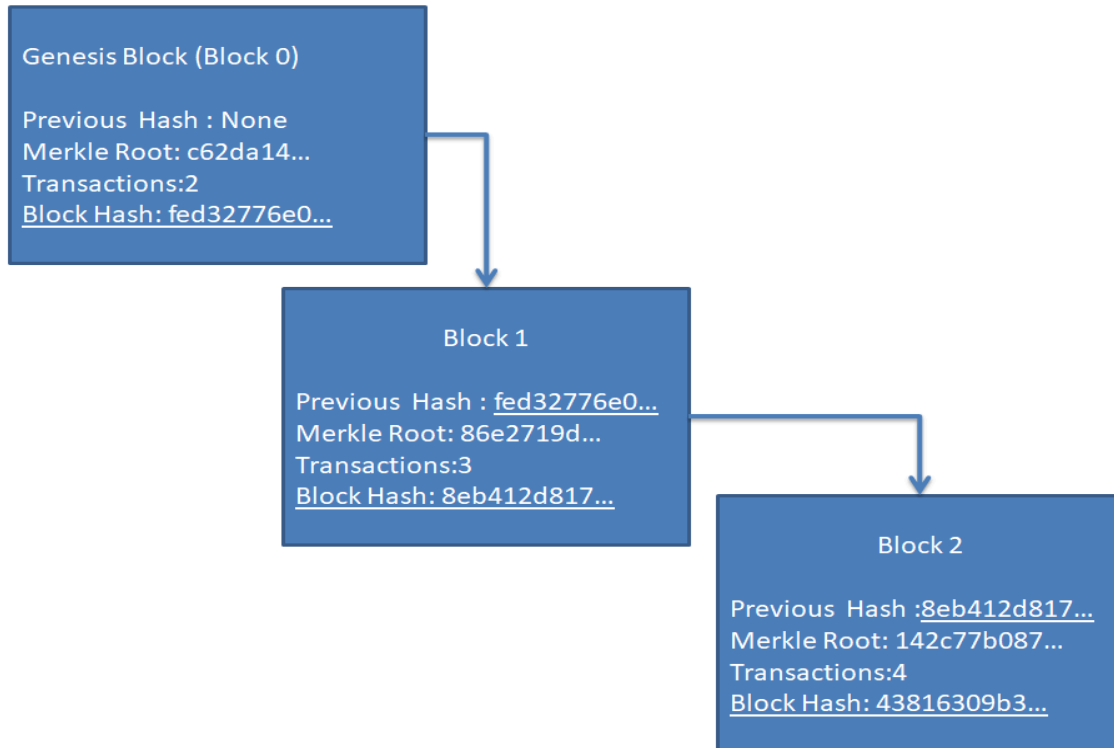
4.5 Δομή Μπλοκ στο Blockchain

Κάθε μπλοκ στο Blockchain αποτελείται από δύο κύρια μέρη: την κεφαλίδα (header) και το σώμα (body). Η κεφαλίδα περιλαμβάνει μεταδεδομένα που επιτρέπουν τη σύνδεση και την επαλήθευση του μπλοκ, ενώ το σώμα περιέχει επικυρωμένες συναλλαγές, ή πιο συγκεκριμένα, τα μεταδεδομένα που τις περιγράφουν και όχι απαραίτητα το πλήρες περιεχόμενό τους [47], [6].

Η κεφαλίδα του μπλοκ περιλαμβάνει το hash του προηγούμενου μπλοκ, το οποίο συνδέει το τρέχον μπλοκ με το αμέσως προηγούμενο στην αλυσίδα. Περιέχει επίσης το Merkle Root, που αποτελεί κρυπτογραφική σύνοψη όλων των συναλλαγών του μπλοκ, καθώς και τη χρονοσφραγίδα (timestamp), που καταγράφει την ακριβή ημερομηνία και ώρα δημιουργίας του. Επιπλέον, περιλαμβάνει την τιμή nonce, η οποία σχετίζεται με τον μηχανισμό συναίνεσης (όπως το Proof-of-Work), και το τελικό hash του ίδιου του μπλοκ, το οποίο λειτουργεί ως μοναδικό ψηφιακό αποτύπωμά του και υπολογίζεται βάσει του συνόλου της κεφαλίδας και των συναλλαγών που περιλαμβάνει. Το σώμα του μπλοκ περιλαμβάνει τις επικυρωμένες εγγραφές συναλλαγών, συνοδευόμενες από τις ψηφιακές υπογραφές που διασφαλίζουν την αυθεντικότητα και την εγκυρότητα των συναλλαγών μεταξύ των συμμετεχόντων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το Genesis Block, δηλαδή το πρώτο μπλοκ της αλυσίδας. Το συγκεκριμένο μπλοκ δεν περιέχει το hash προηγούμενου μπλοκ και δεν προκύπτει μέσω κάποιου μηχανισμού συναίνεσης, αλλά εισάγεται χειροκίνητα στον κώδικα του συστήματος κατά την αρχικοποίηση του δικτύου. Παρόλο που ακολουθεί την ίδια δομή με τα υπόλοιπα μπλοκ, η μοναδική του θέση το καθιστά σημείο αναφοράς για την εκκίνηση του κατακευματισμένου καθολικού.

Η σύνδεση των μπλοκ επιτυγχάνεται μέσω του hash του προηγούμενου, το οποίο ενσωματώνεται στην κεφαλίδα του επόμενου, δημιουργώντας έτσι μια αλυσίδα κρυπτογραφικών εξαρτήσεων. Οποιαδήποτε αλλοίωση σε ένα μπλοκ επηρεάζει το hash του, προκαλώντας ασυμφωνία στα επόμενα και οδηγώντας στην απόρριψη της από το δίκτυο. Αυτή η αρχιτεκτονική ενισχύει τη διαφάνεια και την ανθεκτικότητα του συστήματος, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα και τη μη αναστρεψιμότητα των καταχωρίσεων [6], [47].



Εικόνα 11: Σύνδεση των μπλοκ.

4.6 Τύποι Blockchain

Η τεχνολογία Blockchain έχει εξελιχθεί ώστε να εξυπηρετεί διαφορετικές ανάγκες, οδηγώντας στην ανάπτυξη διαφορετικών τύπων blockchain, ανάλογα με τον τρόπο συμμετοχής, διακυβέρνησης και πρόσβασης των χρηστών στο δίκτυο. Οι τρεις κύριες κατηγορίες blockchain είναι: δημόσιο (public), ιδιωτικό (private) και κοινοπρακτικό (consortium).

➤ Δημόσιο Blockchain (Public Blockchain)

Το δημόσιο blockchain είναι ένα πλήρως ανοιχτό και προσβάσιμο δίκτυο, το οποίο επιτρέπει σε οποιονδήποτε να συμμετέχει ως κόμβος, δηλαδή να διαβάζει, να καταγράφει συναλλαγές και να συμμετέχει στη διαδικασία συναίνεσης. Συνεπώς, οι χρήστες δεν χρειάζονται άδεια για να αλληλεπιδράσουν με το δίκτυο ή να επικυρώσουν συναλλαγές [47], [64].

Αυτού του τύπου τα blockchain είναι απολύτως αποκεντρωμένα και στηρίζονται κυρίως σε μηχανισμούς συναίνεσης, όπως τους PoW και PoS, ώστε να εξασφαλίζεται η ακεραιότητα του συστήματος χωρίς την ύπαρξη κεντρικού διαχειριστή. Παράλληλα, προσφέρουν υψηλό επίπεδο διαφάνειας, καθώς όλες οι συναλλαγές είναι δημόσια προσβάσιμες, και ισχυρή ασφάλεια λόγω της κατανεμημένης φύσης τους [47].

Ωστόσο, τα δημόσια blockchain συχνά εμφανίζουν χαμηλή αποδοτικότητα, καθώς η διαδικασία συναίνεσης είναι χρονοβόρα και ενεργειακά απαιτητική, ειδικά όταν

εφαρμόζεται ο PoW. Επιπλέον, το υψηλό ενεργειακό κόστος μπορεί να τα καθιστά μη βιώσιμα σε μαζική κλίμακα. Ενδεικτικά παραδείγματα τέτοιων συστημάτων αποτελούν το Bitcoin και το Ethereum, τα οποία παραμένουν τα πιο γνωστά και διαδεδομένα δημόσια blockchain [64].

➤ Ιδιωτικό Blockchain (Private Blockchain)

Το ιδιωτικό blockchain λειτουργεί υπό τον έλεγχο ενός φορέα ή οργανισμού, ο οποίος καθορίζει ποιοι έχουν δικαίωμα πρόσβασης και συμμετοχής στο δίκτυο. Σε αντίθεση με τα δημόσια δίκτυα, το ιδιωτικό blockchain δεν είναι προσβάσιμο από το ευρύ κοινό, ενώ η διαχείρισή του είναι συγκεντρωτική, με περιορισμένη διαφάνεια [46]. Αυτός ο τύπος blockchain χρησιμοποιείται κυρίως σε επιχειρησιακά περιβάλλοντα, όπου είναι κρίσιμη η υψηλή απόδοση, ο εσωτερικός έλεγχος και η ασφαλής διαχείριση ευαίσθητων δεδομένων. Το κλειστό αυτό μοντέλο επιτρέπει ταχύτερη επεξεργασία συναλλαγών και χαμηλότερο κόστος λειτουργίας, ενώ προσφέρει τη δυνατότητα εφαρμογής προσαρμοσμένων κανόνων συναίνεσης ανάλογα με τις ανάγκες του οργανισμού [46]. Παρότι υστερεί σε επίπεδο αποκέντρωσης και διαφάνειας σε σύγκριση με τα δημόσια blockchain, η δομημένη του φύση το καθιστά ιδανική λύση για εσωτερική χρήση σε τράπεζες, βιομηχανίες και φορείς που απαιτούν αυστηρό έλεγχο πρόσβασης και συμμόρφωση με νομικά ή κανονιστικά πλαίσια.

➤ Κοινοπρακτικό Blockchain (Consortium Blockchain)

Το κοινοπρακτικό (ή συνεργατικό) blockchain αποτελεί μια ενδιάμεση μορφή μεταξύ του δημόσιου και του ιδιωτικού μοντέλου. Η διαχείριση του δικτύου πραγματοποιείται από μια ομάδα οργανισμών, οι οποίοι συνεργάζονται και συναποφασίζουν για τους κανόνες λειτουργίας, μοιράζοντας την ευθύνη της διακυβέρνησης [64]. Η πρόσβαση στο δίκτυο είναι περιορισμένη σε εγκεκριμένους συμμετέχοντες, αλλά δεν ελέγχεται από έναν μόνο φορέα, όπως στο ιδιωτικό blockchain. Αυτή η υβριδική προσέγγιση προσφέρει μεγαλύτερη αποκέντρωση σε σύγκριση με τα ιδιωτικά δίκτυα, διατηρώντας παράλληλα την ασφάλεια και τον έλεγχο που απαιτούν ορισμένα θεσμικά περιβάλλοντα [64].

Το κοινοπρακτικό blockchain θεωρείται ιδανικό για εφαρμογές όπου απαιτείται κατανεμημένη εμπιστοσύνη μεταξύ ανεξάρτητων οντοτήτων, όπως είναι οι τραπεζικές συνεργασίες (banking consortia), οι φορείς υγειονομικής περίθαλψης ή τα δίκτυα εφοδιαστικής αλυσίδας, όπου η συνεργασία είναι κρίσιμη αλλά απαιτείται έλεγχος πρόσβασης και κοινή διακυβέρνηση.

➤ Υβριδικό Blockchain (Hybrid Blockchain)

Το υβριδικό blockchain αποτελεί ένα μικτό μοντέλο που συνδυάζει χαρακτηριστικά τόσο από τα δημόσια όσο και από τα ιδιωτικά ή κοινοπρακτικά δίκτυα. Σε αυτό το είδος blockchain, ορισμένα δεδομένα ή λειτουργίες είναι δημόσια προσβάσιμα, ενώ άλλα περιορίζονται σε εγκεκριμένους συμμετέχοντες. Η διαχείριση πραγματοποιείται από έναν οργανισμό ή κοινοπραξία, ο οποίος ορίζει ποια στοιχεία είναι ανοιχτά και ποια παραμένουν ιδιωτικά [60]. Αυτή η αρχιτεκτονική επιτρέπει ισορροπία μεταξύ διαφάνειας και ελέγχου, προσφέροντας τη δυνατότητα χρήσης κατανεμημένων μηχανισμών συναίνεσης και ταυτόχρονα ενισχυμένου ελέγχου πρόσβασης. Το υβριδικό μοντέλο είναι κατάλληλο για οργανισμούς που θέλουν να διατηρήσουν ορισμένα δεδομένα εμπιστευτικά, αλλά επιθυμούν να αξιοποιήσουν τα πλεονεκτήματα του blockchain, όπως η ασφάλεια, η ανιχνευσιμότητα και η αξιοπιστία του συστήματος [60]. Το υβριδικό blockchain βρίσκει εφαρμογή σε θεσμικά και δημόσια περιβάλλοντα, όπως η εκπαίδευση, η υγεία ή οι αγροδιατροφικές εφοδιαστικές αλυσίδες, όπου απαιτείται κατανεμημένη εμπιστοσύνη και ταυτόχρονα συμμόρφωση με κανονιστικά πλαίσια.

4.7 Πρωτόκολλα και Μηχανισμοί Συναίνεσης

Οι μηχανισμοί και τα πρωτόκολλα συναίνεσης αποτελούν θεμελιώδεις συστατικό της αρχιτεκτονικής του blockchain, επιτρέποντας στα αποκεντρωμένα δίκτυα να συμφωνούν για την προσθήκη νέων μπλοκ στην αλυσίδα χωρίς την παρουσία κεντρικής αρχής [6]. Κάθε πρωτόκολλο συναίνεσης ορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι κόμβοι επικυρώνουν τις συναλλαγές, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα και ασφάλεια του κατανεμημένου καθολικού.

Η επιλογή κατάλληλου πρωτοκόλλου επηρεάζει άμεσα την απόδοση, την ενεργειακή αποδοτικότητα, τον βαθμό αποκέντρωσης και τη δυνατότητα κλιμάκωσης του συστήματος. Μεταξύ των πιο διαδεδομένων μηχανισμών περιλαμβάνονται οι Proof-of-Work (PoW), Proof-of-Stake (PoS), Delegated Proof-of-Stake (DPoS) και Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT), ενώ συχνά υιοθετούνται υβριδικά σχήματα που συνδυάζουν διαφορετικούς αλγορίθμους για βέλτιστα αποτελέσματα [6], [8], [47], [61].

➤ Proof-of-Work (PoW)

Ο μηχανισμός Proof-of-Work (PoW) είναι ιστορικά ο πρώτος που εφαρμόστηκε σε περιβάλλοντα blockchain, με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα την περίπτωση του Bitcoin [6]. Στο PoW, οι κόμβοι του δικτύου, γνωστοί ως «ανθρακωρύχοι» (miners), επιλύουν πολύπλοκα μαθηματικά προβλήματα, τα οποία απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Ο πρώτος κόμβος που θα επιλύσει σωστά το πρόβλημα αποκτά το δικαίωμα προσθήκης του επόμενου μπλοκ στην αλυσίδα και λαμβάνει ανταμοιβή σε μορφή κρυπτονομίσματος [6], [8].

Αυτός ο μηχανισμός προσφέρει ισχυρή ασφάλεια, καθώς η τροποποίηση ενός ήδη καταχωρημένου μπλοκ απαιτεί την επανεπίλυση των προβλημάτων για όλα τα επόμενα μπλοκ, καθιστώντας την παραποίηση πρακτικά αδύνατη. Ωστόσο, το PoW εμφανίζει σοβαρούς περιορισμούς, όπως η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση και η χαμηλή ταχύτητα επεξεργασίας συναλλαγών, γεγονός που το καθιστά μη βιώσιμο για πολλές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας [8].

Για τον λόγο αυτό, σε ορισμένα σύγχρονα blockchain συστήματα, το PoW είτε συνδυάζεται με άλλους μηχανισμούς συναίνεσης, είτε αντικαθίσταται από αποδοτικότερες λύσεις, όπως ο Proof-of-Stake ή ο Delegated Proof-of-Stake, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη ισορροπία μεταξύ ασφάλειας, ταχύτητας και κατανάλωσης πόρων [6].

➤ Proof-of-Stake (PoS)

Ο μηχανισμός Proof-of-Stake (PoS) αναπτύχθηκε ως ενεργειακά αποδοτική εναλλακτική του Proof-of-Work, ανταποκρινόμενος στην ανάγκη για περιβαλλοντικά βιώσιμα και πιο αποδοτικά συστήματα blockchain [6]. Σε αντίθεση με τον PoW, όπου οι κόμβοι ανταγωνίζονται μέσω υπολογιστικής ισχύος, στον PoS η επιλογή του επικυρωτή για την προσθήκη ενός νέου μπλοκ βασίζεται στο ποσοστό συμμετοχής (stake) που έχει δεσμεύσει ο κάθε κόμβος στο δίκτυο [8].

Όσο μεγαλύτερο είναι το stake – δηλαδή η ποσότητα κρυπτονομισμάτων που κατέχει και έχει "κλειδώσει" ένας κόμβος – τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητά του να επιλεγεί για την επικύρωση του επόμενου μπλοκ. Αυτός ο μηχανισμός μειώνει δραστικά την ενεργειακή κατανάλωση, εφόσον δεν απαιτεί επίλυση μαθηματικών προβλημάτων, και βελτιώνει την επεκτασιμότητα των blockchain συστημάτων [6], [8].

Ωστόσο, ο PoS εισάγει νέες προκλήσεις, κυρίως τον κίνδυνο συγκέντρωσης εξουσίας σε λίγους μεγάλους συμμετέχοντες που διαθέτουν σημαντικά αποθέματα κεφαλαίων. Η πιθανή ολιγοπωλία της εξουσίας

επικύρωσης αντιστρατεύεται τον στόχο της πλήρους αποκέντρωσης, κάτι που έχει οδηγήσει στη δημιουργία παραλλαγών του PoS, όπως ο Delegated Proof-of-Stake (DPoS) ή υβριδικά μοντέλα που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα διαφορετικών προσεγγίσεων [6].

Ο PoS αποτελεί σήμερα δημοφιλή επιλογή για σύγχρονα blockchain έργα που επιδιώκουν αποδοτικότητα, οικολογική συμβατότητα και ταχύτητα, ειδικά σε περιβάλλοντα, όπως τα δημόσια blockchain δεύτερης και τρίτης γενιάς³ [8].

➤ Delegated Proof-of-Stake (DPoS)

Ο μηχανισμός Delegated Proof-of-Stake (DPoS) ή Εκχωρημένη Απόδειξη Κατοχής αποτελεί παραλλαγή του PoS (Απόδειξη Κατοχής) και σχεδιάστηκε με σκοπό τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της ταχύτητας στην επικύρωση των μπλοκ. Σε αυτό το μοντέλο, οι κάτοχοι των ψηφιακών νομισμάτων (tokens) δεν συμμετέχουν απευθείας στη διαδικασία συναίνεσης· αντίθετα, εκχωρούν την ψήφο τους σε ένα περιορισμένο σύνολο εκπροσώπων, οι οποίοι αναλαμβάνουν την ευθύνη για την επικύρωση και προσθήκη των νέων μπλοκ [6], [8], [47], [62].

Οι εκπρόσωποι αυτοί (γνωστοί και ως μάρτυρες ή επαληθευτές) επιλέγονται μέσω ψηφοφορίας από τους χρήστες του δικτύου. Η επιλογή τους βασίζεται στην εμπιστοσύνη και την αξιοπιστία, ενώ η κοινότητα διατηρεί το δικαίωμα να αντικαταστήσει οποιονδήποτε δεν ανταποκρίνεται στις προσδοκίες ή ενεργεί καταχρηστικά. Αυτός ο μηχανισμός μειώνει τον αριθμό των ενεργών κόμβων, επιτρέποντας ταχύτερες συναλλαγές και μικρότερη κατανάλωση ενέργειας, χωρίς να θυσιάζει πλήρως την αποκέντρωση [6], [47].

Η εκχωρημένη απόδειξη κατοχής θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή απόδοση, παρέχοντας ένα ισορροπημένο μοντέλο μεταξύ αποκέντρωσης, ταχύτητας και ενεργειακής αποδοτικότητας [8], [61].

➤ PBFT (Practical Byzantine Fault Tolerance)

Ο μηχανισμός Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT) προτάθηκε για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα των «Βυζαντινών Σφαλμάτων» (Byzantine Faults), δηλαδή την περίπτωση κατά την οποία ορισμένοι κόμβοι του δικτύου ενδέχεται να λειτουργούν λανθασμένα ή κακόβουλα, προσπαθώντας να διαστρεβλώσουν τη διαδικασία συναίνεσης [6].

Ο PBFT επιτρέπει στο σύστημα να καταλήξει σε έγκυρη απόφαση, ακόμη και όταν έως και το 1/3 των κόμβων είναι μη αξιόπιστοι. Ο αλγόριθμος βασίζεται στη συνεργασία ενός προκαθορισμένου αριθμού κόμβων, οι οποίοι ανταλλάσσουν μηνύματα μεταξύ τους και επιτυγχάνουν συμφωνία μέσω πλειοψηφίας. Δεν απαιτεί υψηλή υπολογιστική ισχύ, γεγονός που τον καθιστά αποδοτικό σε ταχύτητα και ενεργειακή κατανάλωση, σε σύγκριση με άλλους μηχανισμούς, όπως ο PoW [6].

Ωστόσο, ο PBFT παρουσιάζει περιορισμούς κλιμακωσιμότητας, καθώς η επικοινωνιακή επιβάρυνση αυξάνεται σημαντικά όσο μεγαλώνει το δίκτυο. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως σε ιδιωτικά ή κοινοπρακτικά blockchain, όπου ο αριθμός των κόμβων είναι περιορισμένος και ελεγχόμενος. Παρόλα αυτά, παραμένει δημοφιλής επιλογή για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ακρίβεια και άμεση επίτευξη συναίνεσης σε περιβάλλοντα εμπιστοσύνης.

➤ Υβριδικοί Μηχανισμοί Συναίνεσης

³ Η πρώτη γενιά αφορά τα αρχικά blockchain, όπως το Bitcoin, που υποστηρίζουν βασικές συναλλαγές. Η δεύτερη γενιά (π.χ. Ethereum) εισάγει έξυπνα συμβόλαια και προγραμματιζόμενες λειτουργίες. Η τρίτη γενιά εστιάζει στην επεκτασιμότητα, τη διαλειτουργικότητα και τη βελτιωμένη ενεργειακή αποδοτικότητα, υιοθετώντας μηχανισμούς όπως το PoS

Σε ορισμένα σύγχρονα συστήματα Blockchain υιοθετείται η χρήση υβριδικών μοντέλων συναίνεσης, τα οποία συνδυάζουν περισσότερους από έναν αλγορίθμους, με στόχο την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων τους και την ταυτόχρονη άμβλυνση των αδυναμιών τους [6], [8]. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η πλατφόρμα Decred, η οποία χρησιμοποιεί συνδυασμό των Proof-of-Work (PoW) και Proof-of-Stake (PoS).

Στο υβριδικό αυτό μοντέλο, ο PoW μηχανισμός χρησιμοποιείται για τη δημιουργία των νέων μπλοκ μέσω της επίλυσης ενός υπολογιστικά απαιτητικού μαθηματικού προβλήματος – παρόμοια με την προσέγγιση που χρησιμοποιεί το Bitcoin. Ο πρώτος κόμβος (ανθρακωρύχος) που θα λύσει επιτυχώς το πρόβλημα, προτείνει ένα νέο μπλοκ.

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά PoW συστήματα, όπου όλοι οι κόμβοι συμμετέχουν στην επικύρωση, στο υβριδικό μοντέλο του Decred, το προτεινόμενο μπλοκ δεν προστίθεται αυτόματα στην αλυσίδα, αλλά υπόκειται σε δεύτερο στάδιο επικύρωσης μέσω PoS. Στο στάδιο αυτό, μόνο ένα περιορισμένο σύνολο επικυρωτών (validators) – δηλαδή κατόχων tokens που έχουν δεσμεύσει τα νομίσματά τους – συμμετέχει σε ψηφοφορία για την αποδοχή του μπλοκ. Εφόσον εγκριθεί από την πλειοψηφία, το μπλοκ ενσωματώνεται. Έτσι, η επικύρωση δεν απαιτεί καθολική συμμετοχή και υπολογιστική ισχύ όπως στα παραδοσιακά PoW συστήματα, γεγονός που βελτιώνει την ενεργειακή αποδοτικότητα χωρίς να παραβλέπεται η ασφάλεια που παρέχει ο αρχικός PoW. [58][37]

Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ ασφάλειας και ενεργειακής αποδοτικότητας, διατηρώντας τη συμβολή του PoW στην αποτροπή επιθέσεων, αλλά ενισχύοντας τη συμμετοχή και τον έλεγχο από την κοινότητα μέσω του PoS [6], [8].

Τα υβριδικά μοντέλα συναίνεσης θεωρούνται ιδιαίτερα αποτελεσματικά σε εφαρμογές υψηλής κρισιμότητας, όπως συστήματα οικονομικών συναλλαγών, ασφαλή δίκτυα IoT ή κοινοπρακτικά blockchain, όπου απαιτείται ισορροπία μεταξύ ταχύτητας, κόστους και θεσμικής εμπιστοσύνης. Η ευελιξία που παρέχουν τα καθιστά κατάλληλα για ποικίλες χρήσεις, από δημόσια έως ιδιωτικά περιβάλλοντα, επιτρέποντας την προσαρμογή του μηχανισμού συναίνεσης στις εκάστοτε λειτουργικές ανάγκες του δικτύου [8].

4.8 Έξυπνα Συμβόλαια

4.8.1 Ορισμός & Ανάλυση

Όπως παρουσιάστηκε στην ανάλυση της αρχιτεκτονικής του blockchain, τα έξυπνα συμβόλαια (smart contracts) εντοπίζονται στο επίπεδο των συμβολαίων (Contract Layer) και αποτελούν κρίσιμη λειτουργική συνιστώσα του blockchain οικοσυστήματος. Στην παρούσα ενότητα εξετάζονται αναλυτικότερα η φύση, η λειτουργικότητα και η εφαρμογή τους σε αποκεντρωμένα περιβάλλοντα [6].

Τα έξυπνα συμβόλαια είναι προγράμματα υπολογιστή που αποθηκεύονται στο blockchain και ενεργοποιούνται αυτόματα όταν πληρούνται συγκεκριμένες προϋποθέσεις. Επιτρέπουν την αυτόματη εκτέλεση προκαθορισμένων λογικών εντολών, χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης ή μεσολάβησης από κάποιον τρίτο φορέα. Η εκτέλεσή τους είναι διαφανής, μη τροποποιήσιμη και εγγυημένη από το αποκεντρωμένο σύστημα που τα φιλοξενεί [6], [15].

Η κύρια λειτουργία των έξυπνων συμβολαίων είναι η αυτοματοποίηση διαδικασιών μεταξύ μερών που δεν εμπιστεύεται το ένα το άλλο. Μέσω της χρήσης τους, ενέργειες, όπως πληρωμές, εγγραφές, έγκριση

ενεργειών ή παροχή πρόσβασης σε δεδομένα, εκτελούνται αυτόματα, μόλις πληρούνται οι όροι που περιγράφονται στον κώδικα του συμβολαίου [6], [15].

Τα έξυπνα συμβόλαια βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε περιβάλλοντα που αφορούν την υλοποίηση αυτόνομων πληρωμών και μικροσυναλλαγών, τη διαχείριση ταυτοτήτων και προσβάσεων, την ψηφιακή πιστοποίηση και επαλήθευση εγγράφων, τις αποκεντρωμένες αγορές δεδομένων (IoT marketplaces), καθώς και τη διαχείριση συμβολαίων υπηρεσιών σε περιβάλλοντα νέφους [6], [15], [12].

Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελεί η πλατφόρμα Saranyu, ένα σύστημα διαχείρισης χρηστών (tenants) σε υποδομές νέφους, που αξιοποιεί έξυπνα συμβόλαια για την αυτοματοποιημένη διαχείριση ταυτοποίησης, εξουσιοδότησης και παροχής υπηρεσιών [6]. Αντίστοιχα, η πλατφόρμα Cowry, μια αποκεντρωμένη αγορά δεδομένων IoT (IoT data marketplace), χρησιμοποιεί έξυπνα συμβόλαια για να διευκολύνει τη διαδικασία καταχώρησης, αγοράς, πώλησης και αξιολόγησης δεδομένων χωρίς την ανάγκη μεσολάβησης τρίτων [15].

Η αξιοποίηση των έξυπνων συμβολαίων ενισχύει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ συστημάτων, μειώνει τη γραφειοκρατία, και εξασφαλίζει υψηλά επίπεδα διαφάνειας και εμπιστοσύνης. Για τους λόγους αυτούς, αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο των αποκεντρωμένων εφαρμογών που βασίζονται στο blockchain [12].

Συνολικά, τα έξυπνα συμβόλαια αποτελούν θεμελιώδη συνιστώσα της αρχιτεκτονικής του blockchain, ωστόσο η αξιοποίησή τους απαιτεί προσεκτική ανάλυση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών τους, οι οποίοι θα παρουσιαστούν στην επόμενη ενότητα.

4.8.2 Πλεονεκτήματα και Περιορισμοί

Τα έξυπνα συμβόλαια προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην υλοποίηση αποκεντρωμένων συστημάτων, αποτελώντας βασικό παράγοντα για την ενίσχυση της αξιοπιστίας και της αυτοματοποίησης σε περιβάλλοντα blockchain [6]. Η κύρια συμβολή τους εντοπίζεται στην αυτοματοποίηση διαδικασιών, καθώς επιτρέπουν την άμεση εκτέλεση προκαθορισμένων ενεργειών χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης. Αυτό οδηγεί σε αυξημένη ταχύτητα, χαμηλότερα λειτουργικά κόστη και μείωση της εξάρτησης από τρίτους φορείς [6], [8].

Η αποθήκευση των έξυπνων συμβολαίων εντός του blockchain προσδίδει εγγενή χαρακτηριστικά ασφάλειας, αφού διασφαλίζεται η αμεταβλητότητα και η διαφάνεια των κανόνων που τα διέπουν. Όλοι οι συμμετέχοντες γνωρίζουν εκ των προτέρων τους όρους και δεν υπάρχει δυνατότητα τροποποίησής τους εκ των υστέρων, γεγονός που ενισχύει την εμπιστοσύνη στο σύστημα και την προβλεψιμότητα των αποτελεσμάτων [15].

Ωστόσο, τα έξυπνα συμβόλαια συνοδεύονται και από σημαντικούς περιορισμούς. Η αμεταβλητότητά τους, παρότι ενισχύει την ασφάλεια, καθιστά δύσκολη τη διόρθωση σφαλμάτων στον κώδικα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το περιστατικό του **DAO (Decentralized Autonomous Organization)** το 2016, μιας αποκεντρωμένης επενδυτικής πλατφόρμας που βασιζόταν εξ ολοκλήρου σε έξυπνα συμβόλαια. Σε εκείνη την περίπτωση, εντοπίστηκε ένα κρίσιμο κενό ασφαλείας στον κώδικα, το οποίο επέτρεψε σε κακόβουλο χρήστη να μεταφέρει το 1/3 των κεφαλαίων – περίπου 60 εκατομμύρια δολάρια – σε έναν νέο λογαριασμό.

Η τεχνική αδυναμία αναίρεσης του συμβολαίου, λόγω της αμεταβλητότητας του blockchain, οδήγησε σε βαθιά διχογνωμία στην κοινότητα. Η λύση που επιλέχθηκε ήταν η **δημιουργία ενός hard fork**, δηλαδή η διαίρεση του αρχικού δικτύου σε δύο ανεξάρτητες αλυσίδες. Έτσι προέκυψαν:

- το **Ethereum (ETH)**, που συνέχισε την πορεία του, αφαιρώντας τη ζημιογόνο συναλλαγή από την ιστορία του blockchain, και
- το **Ethereum Classic (ETC)**, το οποίο κράτησε ανέπαφη την αρχική αλυσίδα ως απόδειξη αμεταβλητότητας και αρχών αποκέντρωσης.

Η διάσπαση αυτή αποτέλεσε ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα των προκλήσεων που μπορεί να προκαλέσει η χρήση αμετάβλητου κώδικα χωρίς πρόβλεψη για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης [6], [8].

Επιπλέον, η έλλειψη νομικής σαφήνειας και πλαισίου όσον αφορά την ερμηνεία και εκτέλεση των έξυπνων συμβολαίων δημιουργεί προκλήσεις για την ευρύτερη αποδοχή και εφαρμογή τους, ειδικά σε τομείς που απαιτούν ρυθμιστική συμμόρφωση. Παράλληλα, η σχεδίαση και υλοποίησή τους απαιτεί υψηλό βαθμό τεχνικής εξειδίκευσης, ενώ η απουσία μηχανισμών ευέλικτου ελέγχου ή ακύρωσης αυξάνει τον κίνδυνο από λανθασμένες υλοποιήσεις ή κακόβουλες επιθέσεις (που π.χ. εκμεταλλεύονται τρωτότητες στα συμβόλαια αυτά) [15].

Συνεπώς, παρόλο που τα έξυπνα συμβόλαια αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για την ενίσχυση της λειτουργικότητας του blockchain, η χρήση τους προϋποθέτει σωστή ανάλυση κινδύνων, κατάλληλο τεχνικό σχεδιασμό και νομική πρόβλεψη για τη διαχείριση εξαιρέσεων και απρόβλεπτων καταστάσεων.

4.9 Πλατφόρμες Blockchain

Η τεχνολογία blockchain έχει εξελιχθεί από την αρχική της χρήση στα κρυπτονομίσματα σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, χάρη στην ανάπτυξη ποικίλων πλατφορμών με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά και φιλοσοφία σχεδίασης. Πλατφόρμες όπως το Bitcoin, το Ethereum και το Hyperledger Fabric, αποτελούν αντιπροσωπευτικά παραδείγματα των δυνατοτήτων της τεχνολογίας κατακευματισμένου καθολικού, με κάθε μία να εξυπηρετεί διαφορετικές ανάγκες σε ό,τι αφορά την αποκέντρωση, την επεκτασιμότητα, την ασφάλεια και τη διακυβέρνηση. Η ανάλυση αυτών των πλατφορμών είναι καθοριστική για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η τεχνολογία blockchain αξιοποιείται σε διαφορετικά περιβάλλοντα, από δημόσια οικονομικά δίκτυα μέχρι ιδιωτικές εταιρικές εφαρμογές. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί των σημαντικότερων πλατφορμών που τεκμηριώνονται στη σχετική βιβλιογραφία.

Η τεχνολογία blockchain έχει εξελιχθεί πέρα από τις ρίζες της στα κρυπτονομίσματα, αναδεικνυόμενη ως υποδομή ευρείας χρήσης σε τομείς, όπως τα χρηματοοικονομικά, η υγειονομική περίθαλψη, η εφοδιαστική αλυσίδα και η δημόσια διοίκηση. Πίσω από την ποικιλία των εφαρμογών βρίσκονται διαφορετικές πλατφόρμες blockchain, οι οποίες διαφοροποιούνται ως προς την αρχιτεκτονική, τα πρωτόκολλα συναίνεσης, το επίπεδο αποκέντρωσης και τις απαιτήσεις απόδοσης. Ένα κρίσιμο ζήτημα που έχει έρθει στο προσκήνιο, ιδίως τα τελευταία χρόνια, αφορά την ενεργειακή κατανάλωση των δικτύων blockchain. Πλατφόρμες όπως το Bitcoin βασίζονται σε εξαιρετικά ενεργοβόρους μηχανισμούς συναίνεσης (όπως το Proof-of-Work), ενώ άλλες, όπως το Ethereum (μετάβαση στο Proof-of-Stake) και το Hyperledger Fabric, επιδιώκουν υψηλή απόδοση με μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις. Η επιλογή πλατφόρμας πλέον δεν εξαρτάται μόνο από τις τεχνικές δυνατότητες, αλλά και από παράγοντες βιωσιμότητας και περιβαλλοντικής αποδοτικότητας, ιδιαίτερα σε ευαίσθητους τομείς ή μεγάλης κλίμακας εφαρμογές. Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται οι πιο γνωστές και περισσότερο τεκμηριωμένες πλατφόρμες με βάση τη σχετική βιβλιογραφία: Bitcoin, Ethereum και Hyperledger Fabric, αναδεικνύοντας τις ιδιαιτερότητες και τους τομείς στους οποίους εφαρμόζονται [6], [8], [47], [61].

➤ Bitcoin

Το Bitcoin αποτελεί την πρώτη και πλέον αναγνωρίσιμη εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain, η οποία εισήχθη το 2008 από έναν άγνωστο δημιουργό ή ομάδα υπό το ψευδώνυμο Satoshi Nakamoto. Στόχος του ήταν η δημιουργία ενός ψηφιακού νομίσματος χωρίς την ανάγκη ενδιάμεσων φορέων (όπως τράπεζες ή κρατικοί μηχανισμοί), επιτρέποντας την άμεση, ασφαλή και αποκεντρωμένη μεταφορά αξίας μέσω του διαδικτύου [6], [8].

Η πλατφόρμα του Bitcoin βασίζεται σε μια δημόσια και αποκεντρωμένη αλυσίδα μπλοκ, όπου κάθε συναλλαγή καταγράφεται μόνιμα και επαληθεύεται από ένα δίκτυο κόμβων (nodes). Ο μηχανισμός συναίνεσης που χρησιμοποιείται είναι ο Proof-of-Work (PoW), μέσω του οποίου οι "ανθρακωρύχοι" (miners) διαγωνίζονται για την επίλυση πολύπλοκων μαθηματικών προβλημάτων, προκειμένου να προσθέσουν το επόμενο μπλοκ στην αλυσίδα και να ανταμειφθούν με Bitcoin [6], [47]. Η ασφάλεια και η ακεραιότητα του συστήματος διασφαλίζονται από τη δυσκολία τροποποίησης των μπλοκ: για να αλλοιώσει κάποιος το ιστορικό συναλλαγών, θα έπρεπε να ανακατασκευάσει όλα τα επόμενα μπλοκ με τεράστιο υπολογιστικό κόστος, κάτι που καθιστά το δίκτυο ιδιαίτερα ανθεκτικό σε επιθέσεις [8].

Ωστόσο, το Bitcoin παρουσιάζει και σημαντικούς περιορισμούς. Η διαδικασία εξόρυξης είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα, καθώς απαιτεί συνεχή και έντονη υπολογιστική δραστηριότητα, με αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και το σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα του δικτύου [47], [8]. Επιπλέον, η χαμηλή ταχύτητα επεξεργασίας συναλλαγών (μόλις 3-7 συναλλαγές ανά δευτερόλεπτο) και τα σχετικά υψηλά τέλη συναλλαγών το καθιστούν λιγότερο κατάλληλο για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας ή καθημερινής/ευρείας χρήσης. Παρόλα αυτά, το Bitcoin παραμένει το πιο ευρέως διαδεδομένο και αναγνωρίσιμο παράδειγμα blockchain, λειτουργώντας ως πρότυπο αναφοράς για την εξέλιξη των επόμενων γενιών τεχνολογιών κατανεμημένου καθολικού (DLT).

➤ Ethereum

Το Ethereum παρουσιάστηκε το 2015 από τον Vitalik Buterin και μια ομάδα προγραμματιστών, ως μια δεύτερης γενιάς blockchain πλατφόρμα, με στόχο να ξεπεράσει τους λειτουργικούς περιορισμούς του Bitcoin. Ενώ το Bitcoin επικεντρώνεται στην απλή μεταφορά ψηφιακής αξίας, το Ethereum εισήγαγε τη δυνατότητα δημιουργίας και εκτέλεσης έξυπνων συμβολαίων (smart contracts), δηλαδή προγραμματισμένων λογικών κανόνων που ενεργοποιούνται αυτόματα υπό συγκεκριμένες συνθήκες [6], [47]. Η πλατφόρμα λειτουργεί μέσω του κρυπτονομίσματος Ether (ETH), το οποίο χρησιμοποιείται για την πληρωμή των "gas fees" — δηλαδή των τελών που απαιτούνται για την εκτέλεση συναλλαγών και συμβολαίων στο δίκτυο. Η εισαγωγή της Ethereum Virtual Machine (EVM) αποτέλεσε καινοτομία, επιτρέποντας σε προγραμματιστές να δημιουργήσουν αποκεντρωμένες εφαρμογές (dApps) που εκτελούνται πάνω στο blockchain [6].

Αρχικά, το Ethereum βασίστηκε στον μηχανισμό συναίνεσης Proof-of-Work (PoW), παρόμοιο με αυτόν του Bitcoin. Ωστόσο, λόγω των περιορισμών του PoW σε κατανάλωση ενέργειας και επεκτασιμότητα, η κοινότητα του Ethereum προχώρησε σε μετάβαση στον μηχανισμό Proof-of-Stake (PoS), μέσω της αναβάθμισης Ethereum 2.0 (The Merge), η οποία ολοκληρώθηκε το 2022. Αυτή η εξέλιξη οδήγησε σε δραστική μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης κατά πάνω από 99%, καθιστώντας το Ethereum σημαντικά πιο φιλικό προς το περιβάλλον [6], [47], [8].

Το Ethereum αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη ενός ολόκληρου οικοσυστήματος εφαρμογών, όπως αποκεντρωμένα χρηματοοικονομικά συστήματα (DeFi), πλατφόρμες διαχείρισης ψηφιακής ταυτότητας, συστήματα ψηφοφορίας και αγορές μη ανταλλάξιμων διακριτικών (NFTs). Η

ευελιξία, η προγραμματιζόμενη λογική και η ενεργή κοινότητα ανάπτυξης έχουν καταστήσει το Ethereum κομβική πλατφόρμα για την καινοτομία στον χώρο της τεχνολογίας blockchain.

Ωστόσο, το Ethereum εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά την επεκτασιμότητα, τη συμφόρηση του δικτύου και το υψηλό κόστος συναλλαγών. Αυτά τα ζητήματα είναι ιδιαίτερα έντονα σε περιβάλλοντα με αυξημένες απαιτήσεις, όπως τα συστήματα IoT, όπου απαιτούνται χαμηλή καθυστέρηση και υψηλός ρυθμός επεξεργασίας συναλλαγών. Οι δημόσιες πλατφόρμες blockchain, όπως το Ethereum, έχουν περιορισμένη απόδοση σε αριθμό συναλλαγών ανά δευτερόλεπτο, κάτι που οδηγεί σε καθυστερήσεις επικύρωσης και αύξηση των τελών (gas fees) σε περιόδους αιχμής [10].

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, προτείνονται τεχνικές όπως οι *πλαϊνές αλυσίδες* (sidechains) και το *Plasma* [64]. Οι πλαϊνές αλυσίδες δρουν ως παράλληλες blockchain αλυσίδες που συνδέονται με την κύρια αλυσίδα του Ethereum, επιτρέποντας την εκτέλεση συναλλαγών με μειωμένο φόρτο στο βασικό δίκτυο. Το Plasma, από την άλλη, επιτρέπει τη δημιουργία υπο-αλυσίδων (child chains) που επεξεργάζονται δεδομένα ανεξάρτητα και επικοινωνούν περιοδικά με την κύρια αλυσίδα για λόγους ασφάλειας και πιστοποίησης.

➤ Hyperledger Fabric

Το Hyperledger Fabric είναι μία από τις πιο διαδεδομένες πλατφόρμες ιδιωτικού (permissioned) blockchain, σχεδιασμένη από το Linux Foundation στο πλαίσιο του έργου Hyperledger. Βασικός του στόχος είναι να εξυπηρετήσει επιχειρηματικές και βιομηχανικές ανάγκες που απαιτούν ιδιωτικότητα, ευελιξία και επεκτασιμότητα, καθιστώντας το ιδανικό για λύσεις που απαιτούν υψηλό βαθμό ελέγχου, διαφάνειας και απόδοσης [6], [8]. Σε αντίθεση με δημόσιες πλατφόρμες, όπως το Bitcoin ή το Ethereum, το Hyperledger Fabric υποστηρίζει αρθρωτή (modular) αρχιτεκτονική, η οποία επιτρέπει την αντικατάσταση ή προσαρμογή επιμέρους υποσυστημάτων (π.χ. μηχανισμών συναίνεσης, συστημάτων ταυτοποίησης, λειτουργικών καναλιών).

Μία βασική καινοτομία του Fabric είναι η χρήση καναλιών (channels), τα οποία επιτρέπουν σε υποομάδες των συμμετεχόντων να δημιουργούν ιδιωτικές υπο-αλυσίδες, ενισχύοντας την εμπιστευτικότητα των συναλλαγών [6]. Η πλατφόρμα χρησιμοποιεί τον μηχανισμό συναίνεσης Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT) ή παραλλαγές του, προσφέροντας γρήγορη συναίνεση χωρίς την ανάγκη έντονης υπολογιστικής ισχύος, όπως απαιτείται σε PoW μηχανισμούς. Παράλληλα, ενσωματώνει ένα πλούσιο σύστημα ταυτοποίησης (Membership Services Provider), το οποίο ελέγχει τα δικαιώματα πρόσβασης κάθε κόμβου και επιτρέπει την αυστηρή παρακολούθηση και ιχνηλασιμότητα [6], [8].

Ως προς την ενεργειακή αποδοτικότητα, το Fabric καταναλώνει σημαντικά λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με δημόσιες πλατφόρμες που βασίζονται σε PoW, καθιστώντας το φιλικότερο προς το περιβάλλον και κατάλληλο για επιχειρήσεις που επιδιώκουν βιωσιμότητα και συμμόρφωση με ESG κριτήρια. Η χρήση του Hyperledger Fabric επεκτείνεται σε τομείς, όπως η εφοδιαστική αλυσίδα, η τραπεζική, η ασφάλιση, η υγειονομική περίθαλψη, και η δημόσια διοίκηση, όπου απαιτούνται πολλαπλά επίπεδα εμπιστευτικότητας και ρυθμιστικός έλεγχος [6], [8].

4.10 Εφαρμογές Blockchain

- Εφοδιαστική Αλυσίδα

Η τεχνολογία blockchain προσφέρει σημαντικές δυνατότητες στην εφοδιαστική αλυσίδα, καθώς αντιμετωπίζει μακροχρόνια προβλήματα, όπως η έλλειψη διαφάνειας, η δυσκολία παρακολούθησης της προέλευσης των προϊόντων και η περιορισμένη εμπιστοσύνη μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων. Μέσω της αποκεντρωμένης φύσης του blockchain, κάθε εμπλεκόμενο μέρος (παραγωγός, διανομέας, μεταφορέας, λιανέμπορος, καταναλωτής) έχει πρόσβαση σε ένα κοινό, αδιάβλητο καθολικό, όπου καταγράφονται όλες οι συναλλαγές και κινήσεις των προϊόντων [49].

Στην πράξη, κάθε προϊόν μπορεί να φέρει μοναδικό ψηφιακό αναγνωριστικό, το οποίο καταγράφεται στο blockchain μαζί με πληροφορίες, όπως η ημερομηνία παραγωγής, η τοποθεσία αποθήκευσης, οι όροι μεταφοράς και η θερμοκρασία διατήρησης. Αυτή η καταγραφή επιτρέπει πλήρη ιχνηλασιμότητα σε κάθε σημείο της αλυσίδας [49].

Η χρήση έξυπνων συμβολαίων ενισχύει την αυτοματοποίηση, καθώς μπορούν να ενεργοποιούν αυτόματα πληρωμές ή να εκδίδουν παραστατικά μόλις ολοκληρωθεί μια συναλλαγή ή πληρούνται συγκεκριμένες προδιαγραφές. Για παράδειγμα, εάν ένα φορτίο τροφίμων φτάσει στον προορισμό του εντός των προβλεπόμενων θερμοκρασιακών ορίων, τότε το συμβόλαιο μπορεί να ενεργοποιήσει την πληρωμή στον προμηθευτή [51].

Επιπλέον, η ενσωμάτωση του blockchain με το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) επιτρέπει την αυτόματη ενημέρωση της αλυσίδας μέσω αισθητήρων, όπως για παράδειγμα στην παρακολούθηση ψυχρής εφοδιαστικής (cold chain logistics), όπου καταγράφονται θερμοκρασίες, χρόνοι και δονήσεις κατά τη μεταφορά [57].

Η χρήση blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα ενισχύει την εμπιστοσύνη μεταξύ των συμμετεχόντων, μειώνει τα κόστη συντονισμού, εντοπίζει προβλήματα εγκαίρως και καθιστά πιο αποτελεσματική την διαχείριση κινδύνου και συμμόρφωσης. Συνολικά, η τεχνολογία αυτή προάγει ένα περιβάλλον διαφάνειας, ασφάλειας και ταχύτητας στην παγκόσμια εφοδιαστική (αλυσίδα).

• **Εκπαίδευση**

Η τεχνολογία blockchain προσφέρει καινοτόμες λύσεις στον τομέα της εκπαίδευσης, κυρίως μέσω της ασφάλειας, της διαφάνειας και της διαλειτουργικότητας που προσφέρει στην έκδοση και επαλήθευση ακαδημαϊκών εγγράφων. Πτυχία, πιστοποιητικά, συμμετοχές σε σεμινάρια ή ακόμα και βαθμολογίες μπορούν να καταγράφονται σε ένα αποκεντρωμένο καθολικό, διασφαλίζοντας την αυθεντικότητα των εγγράφων και την προστασία από παραποίηση [47].

Οι φοιτητές μπορούν να έχουν έναν μοναδικό ψηφιακό φάκελο (academic digital identity), στον οποίο αποθηκεύονται όλες οι πιστοποιημένες ακαδημαϊκές τους πληροφορίες. Οι εργοδότες ή εκπαιδευτικά ιδρύματα μπορούν να έχουν πρόσβαση με ασφάλεια και να επαληθεύουν τη γνησιότητα των εγγράφων χωρίς την ανάγκη διαμεσολάβησης από τρίτους [47].

Η τεχνολογία blockchain μπορεί επίσης να εφαρμοστεί στην αξιολόγηση της εκπαιδευτικής διαδικασίας, στην παρακολούθηση της προόδου των φοιτητών και στη δημιουργία συστημάτων μικρο-πιστοποιήσεων (micro-credentials) για δεξιότητες που αποκτώνται κατά τη διάρκεια σύντομων προγραμμάτων εκπαίδευσης ή σεμιναρίων [60].

Η διαφάνεια και η ακεραιότητα που προσφέρει το blockchain μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση της γραφειοκρατίας μεταξύ εκπαιδευτικών οργανισμών, στην αναγνώριση τίτλων σπουδών σε διεθνές επίπεδο και στην ενίσχυση της εμπιστοσύνης του κοινού προς τα εκπαιδευτικά ιδρύματα [60].

• **Υγειονομική Περίθαλψη**

Η υγειονομική περίθαλψη είναι ένας από τους πιο κρίσιμους τομείς όπου η ασφάλεια, η ιδιωτικότητα και η διαχείριση των δεδομένων αποτελούν ύψιστης σημασίας ζητήματα. Η τεχνολογία blockchain προσφέρει τη δυνατότητα αποθήκευσης ιατρικών αρχείων σε αποκεντρωμένο καθολικό με υψηλά επίπεδα ασφάλειας και προστασίας προσωπικών δεδομένων [15].

Κάθε ασθενής μπορεί να διατηρεί ένα μοναδικό ψηφιακό ιατρικό προφίλ, στο οποίο οι γιατροί και τα ιδρύματα μπορούν να έχουν πρόσβαση μόνο με κατάλληλη εξουσιοδότηση. Οι πληροφορίες αποθηκεύονται με τρόπο που εγγυάται την ακεραιότητα και το ιστορικό των δεδομένων, χωρίς να είναι δυνατή η παραποίηση ή η διαγραφή παλαιών στοιχείων [15].

Παράλληλα, το blockchain επιτρέπει την ασφαλή διαχείριση της φαρμακευτικής εφοδιαστικής αλυσίδας, παρακολουθώντας την προέλευση και τη διακίνηση φαρμάκων με ακρίβεια, αποτρέποντας έτσι την κυκλοφορία παραποιημένων προϊόντων [8].

Η τεχνολογία μπορεί επίσης να υποστηρίξει την αποδοτική καταγραφή και διαχείριση της συμμετοχής ασθενών σε κλινικές μελέτες, διασφαλίζοντας τη διαφάνεια στη συλλογή δεδομένων και την επαλήθευση των αποτελεσμάτων [8].

- **Δημόσια Διοίκηση και Διακυβέρνηση**

Η τεχνολογία blockchain προσφέρει ένα σύγχρονο και αξιόπιστο πλαίσιο για την αναδιοργάνωση της δημόσιας διοίκησης και της διακυβέρνησης, επιλύοντας διαχρονικά προβλήματα, όπως η γραφειοκρατία, η αδιαφάνεια και η έλλειψη εμπιστοσύνης μεταξύ των πολιτών και των κρατικών υπηρεσιών. Λόγω της αποκεντρωμένης και αμετάβλητης φύσης της τεχνολογίας, καθίσταται ιδανική για την αποθήκευση και διαχείριση δημόσιων εγγράφων, εγγυώμενη ότι οι πληροφορίες που καταγράφονται είναι αυθεντικές και δεν μπορούν να τροποποιηθούν χωρίς καταγραφή ή έγκριση από το δίκτυο [61].

Συγκεκριμένα, μπορούν να δημιουργηθούν αδιάβλητα μητρώα για πιστοποιητικά γεννήσεων, ιδιοκτησιακά δικαιώματα, δημόσιες συμβάσεις, καθώς και ψηφιακές ταυτότητες πολιτών. Η καταχώρηση και η επαλήθευση αυτών των εγγράφων μέσω blockchain εξαλείφει την ανάγκη μεσαζόντων και ενδιάμεσων γραφειοκρατικών βημάτων, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση χρόνου και κόστους [15].

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα εφαρμογής έξυπνων συμβολαίων στις διοικητικές διαδικασίες, μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η αυτοματοποιημένη υλοποίηση πολιτικών ή διαδικασιών, όπως π.χ. η αυτόματη καταβολή επιδοτήσεων σε δικαιούχους, όταν πληρούνται προκαθορισμένες προϋποθέσεις [67]. Η χρήση τέτοιων συμβολαίων αυξάνει τη διαφάνεια και την προβλεψιμότητα των ενεργειών του δημοσίου τομέα, ενώ περιορίζει τη διαφθορά, την αυθαιρεσία και τα λάθη.

Τέλος, το blockchain μπορεί να συμβάλει ριζικά στη διαδικασία της ηλεκτρονικής ψηφοφορίας, διασφαλίζοντας την ταυτοποίηση των ψηφοφόρων, την ακρίβεια της ψήφου και την αδυναμία αλλοίωσης του αποτελέσματος. Σε μία εποχή όπου η εμπιστοσύνη στα θεσμικά όργανα δοκιμάζεται, η αξιοποίηση του blockchain προσφέρει τη βάση για μια νέα εποχή ψηφιακής δημοκρατίας, με θεσμική διαφάνεια, άμεση πρόσβαση στην πληροφορία και ενισχυμένη λογοδοσία από την πλευρά του κράτους [15], [61].

- **Χρηματοοικονομικά και Τραπεζικές Υπηρεσίες**

Η τεχνολογία blockchain φέρνει ριζικές αλλαγές στο χρηματοπιστωτικό σύστημα, παρέχοντας τη δυνατότητα εκτέλεσης χρηματοοικονομικών συναλλαγών χωρίς τη μεσολάβηση τρίτων και με ελάχιστα κόστη. Η αποκέντρωση, η διαφάνεια και η ταχύτητα καθιστούν το blockchain εξαιρετικά ελκυστικό για υπηρεσίες, όπως οι διασυννοριακές πληρωμές, η διαχείριση περιουσιακών στοιχείων και η έκδοση

ασφαλιστικών συμβολαίων. Οι διαδικασίες γίνονται πιο ασφαλείς, γρήγορες και ανθεκτικές στη νοθεία ή στα λάθη, αφού βασίζονται σε έξυπνα συμβόλαια, τα οποία εκτελούν τις συναλλαγές αυτόματα όταν πληρούνται προκαθορισμένοι όροι [64].

Στην πράξη, εταιρείες και τράπεζες αξιοποιούν το blockchain για την υλοποίηση έξυπνων ομολόγων (smart bonds), αυτόματων πληρωμών και μικρο-ασφαλίσεων. Επίσης, παραδοσιακές υπηρεσίες μεταφοράς χρημάτων, όπως τα εμβάσματα, αντικαθίστανται από αποκεντρωμένα συστήματα που μειώνουν τον χρόνο εκκαθάρισης και το κόστος συναλλαγών. Πλατφόρμες όπως το Ripple χρησιμοποιούνται ήδη από χρηματοπιστωτικά ιδρύματα για ταχύτερες διατραπεζικές συναλλαγές [61].

- **Βιομηχανία και Ενέργεια**

Η ενσωμάτωση του blockchain στη βιομηχανία και στον ενεργειακό τομέα έχει στόχο την αυτοματοποίηση διαδικασιών, την ενίσχυση της ασφάλειας και τη βελτίωση της διαφάνειας σε κρίσιμα επιχειρησιακά περιβάλλοντα. Στη βιομηχανία, το blockchain χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της παραγωγής, της ποιότητας των υλικών και της καταγραφής κάθε φάσης της βιομηχανικής διαδικασίας, από την προμήθεια πρώτων υλών έως την τελική διανομή [10].

Στον ενεργειακό τομέα, η τεχνολογία χρησιμοποιείται για την υλοποίηση έξυπνων δικτύων (smart grids), όπου οι συναλλαγές ενέργειας μεταξύ καταναλωτών και παρόχων γίνονται μέσω έξυπνων συμβολαίων. Έτσι, επιτυγχάνεται δυναμική διαχείριση της προσφοράς και της ζήτησης σε πραγματικό χρόνο, ενώ η αποκεντρωμένη καταγραφή επιτρέπει τη διαφανή τιμολόγηση και την ιχνηλασιμότητα της κατανάλωσης [15]. Επιπλέον, ομοτίμες πλατφόρμες εμπορίας ενέργειας (όπως μεταξύ καταναλωτών με ηλιακά πάνελ) χρησιμοποιούν blockchain για να διαχειρίζονται αυτόματα τις αγοραπωλησίες ενέργειας και τις πληρωμές [64].

- **Ψηφιακή Πιστοποίηση και Ταυτοποίηση**

Η τεχνολογία blockchain προσφέρει ισχυρές λύσεις στον τομέα της ψηφιακής ταυτοποίησης και πιστοποίησης, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα και την αυθεντικότητα των προσωπικών δεδομένων χωρίς την ανάγκη ύπαρξης κεντρικού φορέα. Μέσω αποκεντρωμένων συστημάτων ταυτοποίησης (Decentralized Identifiers – DIDs), κάθε χρήστης μπορεί να διαχειρίζεται την ψηφιακή του ταυτότητα με ασφάλεια, παρέχοντας μόνο τις απαραίτητες πληροφορίες σε κάθε περίπτωση [6].

Η χρήση blockchain σε αυτόν τον τομέα επιτρέπει τη δημιουργία μηχανογραφημένων μητρώων για επαλήθευση ταυτότητας σε εφαρμογές, όπως τραπεζικές υπηρεσίες, ψηφιακή διακυβέρνηση (e-Government), ψηφιακή υγεία, πρόσβαση σε υπηρεσίες και έλεγχο πρόσβασης σε συστήματα IoT και νέφους [15]. Τα δεδομένα δεν αποθηκεύονται σε κεντρικούς διακομιστές αλλά διαμοιράζονται κρυπτογραφημένα σε κόμβους του δικτύου, αυξάνοντας την ασφάλεια και μειώνοντας τον κίνδυνο παραβίασης [61].

Επιπλέον, η προσβασιμότητα και η διαλειτουργικότητα που προσφέρει το blockchain επιτρέπουν σε οργανισμούς να υλοποιούν κοινά πρότυπα επαλήθευσης, διευκολύνοντας την υιοθέτηση ψηφιακών ταυτοτήτων σε παγκόσμιο επίπεδο [6].

- **Έξυπνες Πόλεις**

Η έννοια των έξυπνων πόλεων (Smart Cities) βασίζεται στη χρήση τεχνολογιών αιχμής για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών, την αποδοτικότερη διαχείριση των πόρων και τη βιώσιμη αστική ανάπτυξη. Το blockchain αποτελεί κρίσιμο εργαλείο σε αυτή τη μετάβαση, καθώς παρέχει τη βάση για ασφαλή, διαφανή και αυτοματοποιημένη διαχείριση των αστικών υποδομών και υπηρεσιών [8].

Σε ένα οικοσύστημα έξυπνης πόλης, τεράστιοι όγκοι δεδομένων παράγονται από αισθητήρες, κάμερες, έξυπνα κτίρια, μέσα μαζικής μεταφοράς και εφαρμογές κινητών τηλεφώνων. Η αποθήκευση και διαχείριση αυτών των δεδομένων με ασφάλεια και χωρίς αλλοιώσεις είναι απαραίτητη. Το blockchain, μέσω της αποκεντρωμένης φύσης του και της αμετάβλητης καταγραφής, προσφέρει ένα ανθεκτικό περιβάλλον για την παρακολούθηση και την επαλήθευση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο [15].

Η χρήση έξυπνων συμβολαίων ενισχύει την αυτοματοποίηση σε τομείς, όπως η διαχείριση ενέργειας, η συλλογή απορριμμάτων, η κυκλοφορία και η στάθμευση, μέσω της εκτέλεσης προκαθορισμένων ενεργειών όταν πληρούνται συγκεκριμένες συνθήκες. Για παράδειγμα, έξυπνοι μετρητές μπορούν να καταγράφουν την κατανάλωση ενέργειας και να εκκινούν αυτόματα τιμολόγηση ή πληρωμές μέσω του blockchain [15].

Επιπλέον, το blockchain ενισχύει τη λογοδοσία και τη διαφάνεια στις σχέσεις μεταξύ του κράτους και των πολιτών. Συστήματα δημόσιας διοίκησης, επιδοτήσεων ή δημοσίων μεταφορών μπορούν να λειτουργούν μέσω αποκεντρωμένων πλατφορμών όπου οι συναλλαγές και οι ενέργειες είναι πλήρως καταγεγραμμένες και προσβάσιμες, περιορίζοντας τη διαφθορά και τα λάθη [60].

Τέλος, η ενσωμάτωση του blockchain με το IoT προσφέρει ένα συνεκτικό πλαίσιο για τη συλλογή, ανταλλαγή και ανάλυση δεδομένων σε αστικά περιβάλλοντα, ενισχύοντας τη διαλειτουργικότητα και την ασφάλεια των υπηρεσιών έξυπνης πόλης [63].

- **Ηλεκτρονική Ψηφοφορία**

Η τεχνολογία blockchain προσφέρει ένα πρωτοφανές επίπεδο ασφάλειας, διαφάνειας και αξιοπιστίας στην υλοποίηση ηλεκτρονικών ψηφοφοριών. Η καταγραφή κάθε ψήφου σε ένα αποκεντρωμένο, αμετάβλητο καθολικό διασφαλίζει ότι δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί αλλοίωση, διαγραφή ή διπλή καταγραφή ψήφων. Επιπλέον, κάθε ψηφοφόρος μπορεί να επιβεβαιώσει ότι η ψήφος του έχει καταγραφεί και συμπεριληφθεί σωστά στο τελικό αποτέλεσμα χωρίς να θίγεται η ανωνυμία του [17].

Η πλατφόρμα Follow My Vote αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, προσφέροντας πλήρως επαληθεύσιμες, ανώνυμες και διαφανείς ψηφοφορίες [17]. Αντίστοιχα, το σύστημα E-Residency της Εσθονίας αποδεικνύει την πρακτική δυνατότητα ταυτοποίησης και συμμετοχής σε εκλογικές διαδικασίες μέσω blockchain [31].

Τα συστήματα αυτά μπορούν να εφαρμοστούν σε εθνικές εκλογές, εσωτερικές ψηφοφορίες κομμάτων, φοιτητικές εκλογές, ακόμα και σε δημόσιες διαβουλεύσεις ή συμμετοχικούς προϋπολογισμούς. Παράλληλα, περιορίζεται η πιθανότητα νοθείας και ενισχύεται η εμπιστοσύνη του πολίτη στη διαδικασία [56].

- **Πνευματική Ιδιοκτησία & Ψηφιακά Περιουσιακά Στοιχεία (IP & NFTs)**

Η τεχνολογία blockchain παρέχει καινοτόμες λύσεις στον τομέα της πνευματικής ιδιοκτησίας και της διαχείρισης ψηφιακών περιουσιακών στοιχείων, αξιοποιώντας κυρίως την αμεταβλητότητα και τη διαφάνεια της κατανεμημένης εγγραφής. Με τη χρήση του blockchain, κάθε δημιουργός μπορεί να

καταχωρήσει με ακρίβεια την ημερομηνία δημιουργίας ενός έργου, την ταυτότητα του δημιουργού και τους όρους χρήσης του έργου, δημιουργώντας ένα ψηφιακό αποτύπωμα αυθεντικότητας [15].

Η απόδειξη ιδιοκτησίας ενός έργου (proof-of-ownership) ενισχύεται περαιτέρω με τη χρήση NFTs (Non-Fungible Tokens), τα οποία λειτουργούν ως μοναδικά ψηφιακά αναγνωριστικά στοιχείων, επιτρέποντας τη μεταβίβαση, την εμπορία και τη συλλογή δημιουργιών, όπως ψηφιακή τέχνη, μουσική, βίντεο και άλλα πολιτισμικά αντικείμενα [15]. Πλατφόρμες όπως η Ascribe και η OpenSea χρησιμοποιούν blockchain για να αποδίδουν, να ελέγχουν και να διαχειρίζονται την ιδιοκτησία έργων μέσω NFTs.

Παράλληλα, μέσω των έξυπνων συμβολαίων (smart contracts), κάθε μεταπώληση ή χρήση ενός έργου μπορεί να ενεργοποιεί αυτόματα την καταβολή αμοιβής στον δημιουργό, προσφέροντας διαφάνεια και δικαιοσύνη στις αλυσίδες αξίας του ψηφιακού περιεχομένου [60]. Αυτό συμβάλλει στον περιορισμό της πειρατείας, της παραποίησης και της μη εξουσιοδοτημένης χρήσης, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη δημιουργών και καταναλωτών.

- **Blockchain στην Καταπολέμηση Πλαστογραφιών & Παραποιήσεων**

Η τεχνολογία blockchain αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την αντιμετώπιση της πλαστογράφησης και της παραποίησης προϊόντων, εγγράφων και δεδομένων, χάρη στην ικανότητά της να παρέχει ανιχνευσιμότητα, διαφάνεια και αμετάβλητη καταγραφή των πληροφοριών. Κάθε προϊόν, αρχείο ή συναλλαγή μπορεί να αποκτήσει ένα μοναδικό ψηφιακό αποτύπωμα (hash), το οποίο αποθηκεύεται στο blockchain και χρησιμεύει ως απόδειξη αυθεντικότητας [15].

Ενδεικτικά, στον τομέα της εφοδιαστικής αλυσίδας, το blockchain χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της πορείας ευαίσθητων ή πολύτιμων αγαθών, όπως τα διαμάντια ή τα φάρμακα. Πλατφόρμες όπως το Everledger αξιοποιούν την τεχνολογία αυτή για να καταγράφουν την προέλευση, τις ιδιότητες και τις μετακινήσεις πολύτιμων αντικειμένων, αποτρέποντας έτσι την εισαγωγή πλαστών προϊόντων στην αλυσίδα εφοδιασμού [61].

Παράλληλα, το blockchain μπορεί να ενισχύσει την εγκυρότητα πιστοποιητικών, βιομηχανικών εγγράφων, αποδείξεων και τιμολογίων, καθώς κάθε αλλαγή στο περιεχόμενο καταγράφεται διαφανώς και αμετάκλητα. Η δυνατότητα επαλήθευσης των πληροφοριών από όλους τους συμμετέχοντες στο δίκτυο περιορίζει τη δυνατότητα απάτης και εξασφαλίζει την εμπιστοσύνη στις διαδικασίες [6].

4.11 Μειονεκτήματα και Προκλήσεις

4.11.1 Μειονεκτήματα

- **Υψηλή Κατανάλωση Ενέργειας και Περιβαλλοντικός Αντίκτυπος**

Ένα από τα πιο έντονα επικρινόμενα μειονεκτήματα της τεχνολογίας blockchain είναι η εξαιρετικά υψηλή κατανάλωση ενέργειας, ιδιαίτερα σε δημόσια δίκτυα που χρησιμοποιούν τον μηχανισμό συναίνεσης PoW. Ο συγκεκριμένος μηχανισμός απαιτεί την επίλυση πολύπλοκων μαθηματικών προβλημάτων από τους κόμβους (miners), οι οποίοι καταναλώνουν τεράστια ποσά ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της εξόρυξης (mining). Η διαδικασία αυτή, γνωστή ως «υπολογιστική απόδειξη», συμβάλλει σημαντικά στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), θέτοντας περιβαλλοντικά και ηθικά διλήμματα για τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας [10], [15], [65].

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το Bitcoin, το μεγαλύτερο δίκτυο blockchain παγκοσμίως, έχει κατά καιρούς συγκριθεί με ολόκληρα κράτη ως προς την κατανάλωση ενέργειας, προκαλώντας ανησυχία στους φορείς χάραξης πολιτικής και τους περιβαλλοντικούς οργανισμούς. Επίσης, οι συνεχείς αναβαθμίσεις εξοπλισμού από τους ανθρακωρύχους (miners) για αύξηση της αποδοτικότητας εντείνουν την παραγωγή ηλεκτρονικών αποβλήτων, επιβαρύνοντας περαιτέρω το οικοσύστημα [10].

Η ανάγκη για αποδοτικότερους και οικολογικά βιώσιμους μηχανισμούς έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη εναλλακτικών. όπως ο Proof-of-Stake (PoS), ο οποίος δεν απαιτεί ενεργοβόρες πράξεις και μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, η μετάβαση σε τέτοια συστήματα παραμένει αργή και περιορισμένη σε συγκεκριμένες πλατφόρμες [15], [64].

• Χαμηλή Απόδοση και Καθυστέρηση Συναλλαγών

Η χαμηλή απόδοση (low throughput) και οι καθυστερήσεις στην επεξεργασία συναλλαγών (latency) αποτελούν κρίσιμες αδυναμίες των περισσότερων blockchain συστημάτων, ιδιαίτερα σε δημόσια δίκτυα, όπως το Bitcoin και το Ethereum. Οι περιορισμοί αυτοί σχετίζονται με τον τρόπο που επιτυγχάνεται η συναίνεση στο δίκτυο, καθώς και με το μέγεθος των μπλοκ καθώς και τη συχνότητα προσθήκης τους στην αλυσίδα [10], [15].

Για παράδειγμα, το δίκτυο του Bitcoin υποστηρίζει μόλις 7 συναλλαγές ανά δευτερόλεπτο (tps), ενώ το Ethereum φτάνει περίπου τις 15–30 tps, τη στιγμή που παραδοσιακά συστήματα πληρωμών, όπως η Visa, μπορούν να διαχειριστούν πάνω από 24.000 tps. Αυτή η ασυμβατότητα περιορίζει τη χρήση του blockchain ως προς εφαρμογές που απαιτούν άμεση επεξεργασία συναλλαγών και υψηλή διαθεσιμότητα [15].

Επιπλέον, όσο περισσότερη συμφόρηση δημιουργείται στο δίκτυο – κυρίως λόγω μεγάλης ζήτησης – τόσο αυξάνεται και ο χρόνος επιβεβαίωσης των συναλλαγών. Αυτό οδηγεί σε αυξημένα τέλη (transaction fees) για ταχύτερη επεξεργασία, δημιουργώντας μια άνιση εμπειρία για τους χρήστες [10], [64].

Η έρευνα και ανάπτυξη τεχνολογιών όπως τα Layer 2 δίκτυα (π.χ. Lightning Network για Bitcoin και Rollups για Ethereum) προσπαθεί να απαντήσει στα προβλήματα αυτά, ωστόσο η ενσωμάτωσή τους παραμένει τεχνικά σύνθετη ενώ παραμένει ακόμη σε εξέλιξη [15].

• Πολυπλοκότητα στην Ανάπτυξη και Συντήρηση

Η τεχνολογία blockchain, παρότι προσφέρει καινοτόμες λύσεις σε πληθώρα εφαρμογών, συνοδεύεται από σημαντική πολυπλοκότητα στον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τη συντήρησή της. Τα συστήματα blockchain απαιτούν εξειδικευμένες γνώσεις σε τομείς, όπως η κρυπτογραφία, τα κατανεμημένα δίκτυα, οι αλγόριθμοι συναίνεσης και η ασφάλεια δεδομένων, κάτι που περιορίζει την ευρεία και άμεση υιοθέτησή τους από οργανισμούς και προγραμματιστές [10], [47].

Επιπλέον, η δημιουργία και συντήρηση έξυπνων συμβολαίων καθιστά το περιβάλλον ανάπτυξης πιο απαιτητικό, καθώς αυτά πρέπει να είναι άψογα γραμμένα και απαλλαγμένα από ευπάθειες. Η αμεταβλητότητα των καταχωρήσεων στο blockchain σημαίνει ότι ένα λάθος στον κώδικα μπορεί να έχει μόνιμες συνέπειες, όπως συνέβη χαρακτηριστικά στην περίπτωση του DAO το 2016 [10].

Ταυτόχρονα, η ενσωμάτωση blockchain σε υφιστάμενα πληροφοριακά συστήματα απαιτεί σημαντική αναδιάρθρωση υποδομών και αναπροσαρμογή των ροών εργασίας, γεγονός που συνεπάγεται υψηλό τεχνικό κόστος και ανάγκη για διαρκή τεχνική υποστήριξη [47], [64].

Συνολικά, η πολυπλοκότητα του οικοσυστήματος καθιστά δύσκολη τη μαζική υιοθέτηση της τεχνολογίας από μικρούς οργανισμούς και ομάδες που δεν διαθέτουν την απαιτούμενη τεχνογνωσία και πόρους.

- **Δυσκολία Διόρθωσης Λαθών λόγω Αμεταβλητότητας**

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του blockchain είναι η αμεταβλητότητα των δεδομένων, δηλαδή η αδυναμία τροποποίησης ή διαγραφής μιας καταγραφής μετά την ένταξή της στην αλυσίδα. Αν και αυτό εξασφαλίζει υψηλά επίπεδα ασφάλειας και διαφάνειας, παράλληλα δημιουργεί σημαντικές δυσκολίες σε περιπτώσεις όπου απαιτείται διόρθωση λαθών ή ανάκληση ενεργειών [10], [47].

Για παράδειγμα, αν ένα έξυπνο συμβόλαιο περιέχει κάποιο σφάλμα ή ευπάθεια, δεν υπάρχει τρόπος τροποποίησής του χωρίς να δημιουργηθεί νέο συμβόλαιο και να γίνει εκ νέου ανάθεση και επικύρωση. Η περίπτωση του DAO αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα: ένα σφάλμα (bug) στον κώδικα του έξυπνου συμβολαίου επέτρεψε σε επιτιθέμενους να αποσπάσουν κεφάλαια, γεγονός που τελικά οδήγησε σε hard fork του Ethereum [10].

Επιπλέον, ακόμα και απλά λάθη στη μεταφορά ή καταγραφή δεδομένων μπορεί να έχουν μη αναστρέψιμες συνέπειες. Το blockchain δεν διαθέτει εγγενείς μηχανισμούς ανάκλησης ή αναθεώρησης, γεγονός που περιορίζει τη λειτουργική ευελιξία και απαιτεί απόλυτη ακρίβεια κατά την ανάπτυξη και χρήση της τεχνολογίας [64].

Αν και η αμεταβλητότητα αποτελεί πλεονέκτημα από πλευράς ασφάλειας, συνιστά ουσιαστικό μειονέκτημα σε εφαρμογές που απαιτούν περιθώριο διόρθωσης ή δυνατότητα νομικής αναθεώρησης. Η έλλειψη σχετικής ευελιξίας καθιστά το blockchain λιγότερο κατάλληλο για περιβάλλοντα όπου οι αλλαγές ή οι εξαιρέσεις είναι αναγκαίες.

- **Περιορισμένη Κλιμακωσιμότητα**

Η κλιμακωσιμότητα αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις της τεχνολογίας blockchain, ιδίως όταν εφαρμόζεται σε περιβάλλοντα με υψηλό φόρτο συναλλαγών ή ανάγκη για ταχύτητα απόκρισης. Τα δημόσια blockchain, όπως το Bitcoin και το Ethereum, εμφανίζουν περιορισμένη δυνατότητα επεξεργασίας συναλλαγών ανά δευτερόλεπτο, με το Bitcoin να διαχειρίζεται περίπου 7 tps (transactions per second) και το Ethereum περίπου 15–30 tps – νούμερα που υπολείπονται σημαντικά σε σχέση με τα δεκάδες χιλιάδες tps που επεξεργάζονται παραδοσιακά συστήματα πληρωμών, όπως το Visa [10], [15].

Ο βασικός λόγος για αυτή την καθυστέρηση εντοπίζεται στη φύση της διαδικασίας συναίνεσης. Μηχανισμοί όπως ο PoW απαιτούν σημαντικό χρόνο και υπολογιστική ισχύ για την επικύρωση των μπλοκ, ενώ ακόμη και πιο σύγχρονες εναλλακτικές, όπως ο PoS ή ο PBFT, δεν επιλύουν πλήρως το πρόβλημα της κλιμακωσιμότητας, ιδιαίτερα σε δίκτυα μεγάλης κλίμακας [64].

Επιπλέον, όσο αυξάνεται ο αριθμός των χρηστών και των συναλλαγών, μεγαλώνει αντίστοιχα και το μέγεθος της αλυσίδας (blockchain size), απαιτώντας αυξημένους αποθηκευτικούς πόρους και προκαλώντας καθυστερήσεις στη λήψη, επαλήθευση και συγχρονισμό των μπλοκ από τους κόμβους [9].

Για την αντιμετώπιση αυτών των περιορισμών, αναπτύσσονται νέες τεχνικές λύσεις, όπως τα Layer 2 πρωτόκολλα (π.χ. Lightning Network), καθώς και τεχνολογίες sharding και sidechains. Το sharding (κατατεμαχισμός) είναι μία τεχνική διαμερισμού της βάσης δεδομένων σε μικρότερα, ανεξάρτητα τμήματα (shards), τα οποία επεξεργάζονται παράλληλα, αυξάνοντας την αποδοτικότητα. Τα sidechains είναι ανεξάρτητες αλυσίδες που «συνδέονται» με την κύρια αλυσίδα και επιτρέπουν την εκτέλεση συναλλαγών ή έξυπνων συμβολαίων εκτός της κύριας αλυσίδας, αποφορτίζοντας τη συνολική δραστηριότητα.

Ωστόσο, η πλήρης υιοθέτηση των παραπάνω τεχνολογιών βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό ή πρώιμο στάδιο, ενώ συνοδεύεται από τεχνικές και αρχιτεκτονικές προκλήσεις ως προς την ασφάλεια και την ακεραιότητα των δεδομένων.

- **Έλλειψη Ανθρώπινου Δυναμικού με Εξειδίκευση**

Η έλλειψη καταρτισμένου ανθρώπινου δυναμικού στον τομέα του blockchain αποτελεί ένα σημαντικό μειονέκτημα για την υιοθέτηση και την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας. Η πολυπλοκότητα της ίδιας της τεχνολογίας, που απαιτεί γνώσεις σε πεδία όπως κρυπτογραφία, κατακεντρωμένα συστήματα, έξυπνα συμβόλαια και μηχανισμούς συναίνεσης, καθιστά δύσκολη την εκπαίδευση και την εύρεση εξειδικευμένων επαγγελματιών [10], [64].

Πολλοί οργανισμοί αναφέρουν δυσκολίες στην πρόσληψη ειδικών με επαρκή εμπειρία, ενώ η ταχεία εξέλιξη των πρωτοκόλλων και των εργαλείων ανάπτυξης επιβάλλει συνεχή επιμόρφωση και προσαρμογή. Επιπλέον, δεν υπάρχουν ακόμη επαρκώς εδραιωμένα ακαδημαϊκά προγράμματα σπουδών που να καλύπτουν ολιστικά τις τεχνολογίες blockchain, με αποτέλεσμα το κενό γνώσης να διευρύνεται [15].

Αυτό το έλλειμμα επιδρά άμεσα στην ικανότητα των οργανισμών να σχεδιάσουν, να υλοποιήσουν και να διαχειριστούν με ασφάλεια λύσεις blockchain, καθυστερώντας την υιοθέτηση και περιορίζοντας την καινοτομία στον κλάδο.

- **Οικονομικό Κόστος για Υλοποίηση και Εξοπλισμό**

Η εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain συνεπάγεται σημαντικό οικονομικό κόστος, κυρίως λόγω των υποδομών που απαιτούνται για την ανάπτυξη, εγκατάσταση και συντήρηση του συστήματος. Η επένδυση σε εξειδικευμένο υλικό εξοπλισμό (όπως ισχυρούς υπολογιστές ή ASICs σε δίκτυα PoW), η εξασφάλιση υπολογιστικών πόρων, καθώς και η δημιουργία ασφαλούς αρχιτεκτονικής καθιστούν την είσοδο στην τεχνολογία ιδιαίτερα δαπανηρή για μικρές επιχειρήσεις ή δημόσιους οργανισμούς [10].

Επιπλέον, το κόστος δεν περιορίζεται μόνο στην υλικοτεχνική υποστήριξη. Περιλαμβάνει και έξοδα για την πρόσληψη εξειδικευμένου προσωπικού, την εκπαίδευση υφιστάμενων στελεχών, καθώς και την προσαρμογή των υφιστάμενων συστημάτων για διαλειτουργικότητα με blockchain υποδομές [61]. Αν προστεθεί και το κόστος των αρχικών δοκιμών, των νομικών συμβουλών και της συμμόρφωσης με κανονιστικά πλαίσια, τότε το συνολικό κόστος υιοθέτησης μπορεί να καταστεί απαγορευτικό.

Ιδιαίτερα σε έργα που αφορούν δημόσιες διοικήσεις ή μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις, η ανάγκη εξεύρεσης οικονομικών πόρων για την υλοποίηση blockchain εφαρμογών αναφέρεται συχνά ως ανασταλτικός παράγοντας.

- **Εξάρτηση από Αλγόριθμους Συναίνεσης με Μειονεκτήματα**

Η λειτουργία των συστημάτων blockchain βασίζεται στους αλγόριθμους συναίνεσης, οι οποίοι καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι κόμβοι συμφωνούν για την εγκυρότητα των συναλλαγών και τη σειρά καταγραφής τους. Ωστόσο, πολλοί από αυτούς τους αλγόριθμους ενσωματώνουν σημαντικά μειονεκτήματα, που επηρεάζουν τόσο την απόδοση όσο και τη βιωσιμότητα των συστημάτων blockchain.

Ο πιο χαρακτηριστικός αλγόριθμος, ο Proof of Work (PoW), απαιτεί τεράστιους υπολογιστικούς πόρους για την επίλυση κρυπτογραφικών προβλημάτων, γεγονός που οδηγεί σε υψηλή κατανάλωση ενέργειας και αυξημένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα [10]. Παράλληλα, ενισχύει τον ανταγωνισμό μεταξύ κόμβων και δημιουργεί φαινόμενα συγκέντρωσης ισχύος σε δεξαμενές εξόρυξης (mining pools) με μεγαλύτερη υπολογιστική ικανότητα, μειώνοντας την αποκέντρωση του δικτύου [56].

Ακόμη και οι νεότεροι αλγόριθμοι, όπως ο Proof of Stake (PoS), αν και ενεργειακά αποδοτικότεροι, αντιμετωπίζουν προκλήσεις, όπως η συγκέντρωση συμμετοχών σε λίγους πλούσιους κόμβους (stake centralization) και η εμφάνιση του προβλήματος "Nothing at Stake" – μιας κατάστασης όπου οι επικυρωτές δεν έχουν αντικίνητρα για να αποτρέψουν την επικύρωση πολλαπλών αλυσίδων ταυτόχρονα, αφού δεν υπάρχει κόστος για αυτούς, οδηγώντας έτσι σε πιθανή διπλή δαπάνη ή διχασμό του (καταναμεμένου) καθολικού [61].

Η εξάρτηση από αυτούς τους μηχανισμούς συναίνεσης αναδεικνύει μια δομική αδυναμία του blockchain, καθώς περιορίζει τη γενικευμένη εφαρμογή του σε ευαίσθητους τομείς, όπου απαιτείται ταχύτητα, διαφάνεια, αποδοτικότητα και ισότητα συμμετοχής.

4.11.2 Προκλήσεις

- **Νομικά και Κανονιστικά Ζητήματα**

Η τεχνολογία blockchain, παρά τα σημαντικά της πλεονεκτήματα, εισάγει και μία σειρά από νομικές και κανονιστικές προκλήσεις που παραμένουν ανοιχτές σε πολλές χώρες. Η αμεταβλητότητα των δεδομένων, η αποκέντρωση, καθώς και η χρήση έξυπνων συμβολαίων, εγείρουν ερωτήματα σχετικά με τη νομική ισχύ, την ερμηνεία και την ορθότητα και δυνατότητα εκτέλεσης (executability) των συναλλαγών που καταγράφονται στο blockchain [61].

Ένα από τα βασικότερα ζητήματα αφορά τη νομική αναγνώριση των έξυπνων συμβολαίων. Παρότι αυτά εκτελούνται αυτόματα όταν πληρούνται προκαθορισμένες συνθήκες, δεν είναι πάντα σαφές αν πληρούν τα παραδοσιακά κριτήρια εγκυρότητας ενός συμβολαίου, όπως η συναίνεση, η νομική ικανότητα και η πρόθεση δέσμευσης [15]. Επιπλέον, σε περίπτωση σφάλματος στον κώδικα ή αμφισβήτησης, δεν υπάρχει σαφές νομικό πλαίσιο για την επίλυση της διαφοράς, αφήνοντας ένα θεσμικό κενό [34].

Η προστασία προσωπικών δεδομένων αποτελεί επίσης ένα σοβαρό ζήτημα, ιδίως σε σχέση με τη νομοθεσία GDPR στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Το blockchain, από τη φύση του, καταγράφει δεδομένα με τρόπο αμετάβλητο και καταναμεμένο, γεγονός που έρχεται σε σύγκρουση με δικαιώματα, όπως αυτό της διαγραφής ("δικαίωμα στη λήθη") [64].

Παράλληλα, η ανωνυμία ή ψευδωνυμία των χρηστών στα δημόσια δίκτυα δημιουργεί δυσκολίες στην ταυτοποίηση υπευθύνων σε περιπτώσεις παραβίασης, απάτης ή εγκληματικής δραστηριότητας [10]. Επιπλέον, λόγω της έλλειψης κεντρικής εποπτικής αρχής, καθίσταται δύσκολη η επιβολή ρυθμίσεων και η απονομή δικαιοσύνης σε διασυνοριακές συναλλαγές.

Τέλος, υπάρχει σημαντική κανονιστική ασυμμετρία μεταξύ κρατών, καθώς η υιοθέτηση της τεχνολογίας blockchain προηγείται της δημιουργίας ενιαίου ρυθμιστικού πλαισίου. Αυτό δημιουργεί ένα περιβάλλον νομικής αβεβαιότητας που μπορεί να ανακόψει επενδύσεις και καινοτομία, ιδίως σε ευαίσθητους τομείς όπως οι χρηματοπιστωτικές υπηρεσίες ή η δημόσια διοίκηση [68].

- **Διαλειτουργικότητα μεταξύ Συστημάτων και Πλατφορμών**

Η διαλειτουργικότητα αποτελεί μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις για την ευρεία υιοθέτηση του blockchain, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα όπου απαιτείται αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών συστημάτων, πλατφορμών ή blockchains. Η ύπαρξη πολλών ετερογενών τεχνολογικών στοιβών,

διαφορετικών πρωτοκόλλων συναίνεσης, μορφών δεδομένων και μηχανισμών επικοινωνίας καθιστά δύσκολη τη συνεργασία μεταξύ τους [6].

Στο σημερινό τοπίο του blockchain, κυριαρχούν πολλές ασύμβατες πλατφόρμες (όπως Bitcoin, Ethereum, Hyperledger Fabric κ.λπ.), καθεμία με τη δική της αρχιτεκτονική, γλώσσα συμβολαίων και δομή δεδομένων. Η έλλειψη προτύπων και κοινών APIs περιορίζει τη δυνατότητα μεταφοράς δεδομένων, εκτέλεσης διασυννοριακών συναλλαγών ή συγχώνευσης λειτουργιών μεταξύ διαφορετικών blockchains [56].

Η ανάγκη για διαλειτουργικότητα είναι ιδιαίτερα έντονη σε τομείς, όπως η προμήθεια αγαθών, η υγειονομική περίθαλψη ή οι κυβερνητικές υπηρεσίες, όπου απαιτείται συνεχής ροή και επικύρωση δεδομένων μεταξύ οργανισμών ή χωρών. Για παράδειγμα, ένα πιστοποιητικό καταλληλότητας που καταγράφεται σε ένα blockchain του παραγωγού τροφίμων πρέπει να μπορεί να αναγνωριστεί και από το blockchain του τελωνείου ή της λιανικής αλυσίδας [64].

Παρότι γίνονται προσπάθειες για ανάπτυξη λύσεων διασύνδεσης (όπως τα πρωτόκολλα cross-chain ή τα blockchain bridges-γέφυρες), αυτές βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο και συχνά δεν παρέχουν το ίδιο επίπεδο ασφάλειας ή αξιοπιστίας με τις εγγενείς λειτουργίες της κάθε πλατφόρμας [15].

Επιπλέον, η διαλειτουργικότητα περιλαμβάνει και την τεχνική πρόκληση εναρμόνισης των μηχανισμών ταυτοποίησης, διαχείρισης κλειδιών, ελέγχου πρόσβασης και επεξεργασίας δεδομένων που διαφέρουν σημαντικά από πλατφόρμα σε πλατφόρμα, δυσχεραίνοντας την ανάπτυξη ολιστικών λύσεων [56].

- **Αποδοτική Αποθήκευση και Διαχείριση Δεδομένων**

Ένα από τα βασικά τεχνικά προβλήματα του blockchain αφορά την αποθήκευση και τη διαχείριση δεδομένων με τρόπο που να διατηρείται η απόδοση του συστήματος όσο η αλυσίδα μεγαλώνει. Καθώς κάθε κόμβος του δικτύου διατηρεί ένα πλήρες αντίγραφο όλων των συναλλαγών, το συνολικό μέγεθος του blockchain αυξάνεται εκθετικά με την πάροδο του χρόνου, προκαλώντας προβλήματα αποθήκευσης και απόδοσης, ειδικά σε δημόσια δίκτυα με υψηλό ρυθμό συναλλαγών [10].

Η μη δυνατότητα διαγραφής ή συμπίεσης παλιών δεδομένων – λόγω της αρχής της αμεταβλητότητας – σημαίνει ότι το κόστος αποθήκευσης αυξάνεται συνεχώς. Αυτό όχι μόνο επιβαρύνει τη λειτουργία των κόμβων, αλλά και αποκλείει τη συμμετοχή συσκευών με περιορισμένους πόρους, όπως κινητά ή IoT συσκευές, περιορίζοντας τη δυνατότητα επέκτασης του δικτύου [15].

Επιπλέον, η αποθήκευση ευαίσθητων ή μεγάλων δεδομένων απευθείας στο blockchain θεωρείται πρακτικά μη αποδοτική και ανασφαλής. Για τον λόγο αυτό, συχνά χρησιμοποιούνται υβριδικές προσεγγίσεις, όπου το blockchain διατηρεί μόνο το αποτύπωμα (hash) των δεδομένων, ενώ τα ίδια τα αρχεία αποθηκεύονται εκτός αλυσίδας (off-chain), σε αποκεντρωμένα συστήματα, όπως το IPFS ή σε αποθήκες νέφους [64].

Ωστόσο, η προσέγγιση αυτή εισάγει νέες προκλήσεις ασφάλειας και απαιτεί αξιόπιστους μηχανισμούς ελέγχου συνέπειας μεταξύ on-chain και off-chain δεδομένων. Η απουσία κοινών προτύπων και ενιαίων πολιτικών για τη δομή και την προσβασιμότητα των αποθηκευμένων πληροφοριών περιορίζει περαιτέρω την αποδοτικότητα της συνολικής αρχιτεκτονικής [56].

- **Αποδοχή και Εμπιστοσύνη από Οργανισμούς και Κοινό**

Η ευρεία αποδοχή της τεχνολογίας blockchain εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εμπιστοσύνη που δείχνουν σε αυτήν τόσο οι οργανισμοί όσο και το ευρύ κοινό. Παρά τα τεχνικά της πλεονεκτήματα, η

καινοτόμος και ριζικά διαφορετική φύση του blockchain δημιουργεί σκεπτικισμό, ειδικά σε παραδοσιακούς τομείς, όπως η δημόσια διοίκηση, η εκπαίδευση και η υγειονομική περίθαλψη [67]. Πολλοί οργανισμοί εξακολουθούν να διστάζουν να υιοθετήσουν πλήρως αποκεντρωμένες υποδομές λόγω φόβων σχετικά με τη διακυβέρνηση των συστημάτων, την επάρκεια τεχνογνωσίας και την προσαρμοστικότητα στις υπάρχουσες διαδικασίες [47].

Ταυτόχρονα, το κοινό ενδέχεται να συνδέει το blockchain με αμφιλεγόμενες εφαρμογές, όπως τα κρυπτονομίσματα, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει αμφιβολίες ως προς την ασφάλεια ή τη νομιμότητα των λύσεων που βασίζονται σε αυτό [10]. Η πολυπλοκότητα της τεχνολογίας και η έλλειψη διαφώτισης ή εκπαίδευσης για τους τελικούς χρήστες εντείνουν αυτή την αποστασιοποίηση, περιορίζοντας τη συμμετοχή σε πιλοτικά ή παραγωγικά έργα blockchain [60].

Για την ενίσχυση της εμπιστοσύνης, απαιτείται εκτεταμένη ενημέρωση, διαφάνεια στις υλοποιήσεις, συμμετοχή των πολιτών στον σχεδιασμό λύσεων, καθώς και ισχυρά νομικά και ηθικά πλαίσια διαχείρισης δεδομένων και λογοδοσίας.

• Ευπάθειες στην Αρχική Υλοποίηση Έξυπνων Συμβολαίων

Τα έξυπνα συμβόλαια, αν και αποτελούν μία από τις πιο καινοτόμες λειτουργίες της τεχνολογίας blockchain, συνοδεύονται από σοβαρούς κινδύνους κατά την αρχική τους υλοποίηση. Καθώς ο κώδικας τους καταγράφεται μόνιμα στην αλυσίδα, οποιοδήποτε σφάλμα ή ευπάθεια είναι πρακτικά αδύνατο να διορθωθεί εκ των υστέρων χωρίς να δημιουργηθεί νέο συμβόλαιο και να επαναληφθεί όλη η διαδικασία ανάθεσης και επαλήθευσης [10], [64].

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το περιστατικό του DAO στο Ethereum, όπου ελλιπής εσωτερικός έλεγχος επέτρεψε την εκμετάλλευση ενός κενού ασφαλείας, οδηγώντας στην απώλεια σημαντικών ποσών και τελικά σε διάσπαση του δικτύου (hard fork) [65]. Η απουσία τυποποιημένων πρακτικών για τη δημιουργία ασφαλών έξυπνων συμβολαίων εντείνει τον κίνδυνο, ιδιαίτερα όταν αυτά χρησιμοποιούνται σε επιχειρησιακά κρίσιμα περιβάλλοντα [60].

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, έχουν αναπτυχθεί τεχνικές που επιτρέπουν την έμμεση αναβάθμιση των έξυπνων συμβολαίων, χωρίς να επηρεάζεται η αποθηκευμένη κατάστασή τους.

Η πιο διαδεδομένη προσέγγιση είναι η χρήση proxy contracts, δηλαδή έξυπνων συμβολαίων-«ενδιάμεσων» που προωθούν τις εντολές σε άλλο συμβόλαιο, το οποίο μπορεί να αντικατασταθεί εάν χρειαστεί, διατηρώντας παράλληλα τα ίδια δεδομένα.

Η τεχνική versioning εφαρμόζεται όταν διατηρούνται πολλαπλές εκδόσεις ενός συμβολαίου, ώστε να μπορεί να γίνει αναφορά στην εκάστοτε τρέχουσα, με δυνατότητα επιστροφής σε παλαιότερη εφόσον απαιτείται.

Τέλος, τα controller contracts λειτουργούν ως κεντρική «μονάδα ελέγχου», δίνοντας τη δυνατότητα για εναλλαγή, ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση επιμέρους έξυπνων συμβολαίων, π.χ. σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ή αναβάθμισης.

Αυτές οι προσεγγίσεις προσφέρουν ευελιξία και λειτουργική ασφάλεια, χωρίς να παραβιάζουν τη θεμελιώδη αρχή της αμεταβλητότητας. [47], [64].

Κεφάλαιο 5 - Συγκριτική Αξιολόγηση Προσεγγίσεων

Η βασική δομή του Κεφαλαίου 5 εστιάζει στη συγκριτική αξιολόγηση επιστημονικών προσεγγίσεων που αφορούν τη σύζευξη των τεχνολογιών Blockchain και Internet of Things (IoT). Αρχικά, γίνεται ιεραρχική κατηγοριοποίηση των πηγών σε θεματικές περιοχές εφαρμογής (π.χ. Έξυπνα Περιβάλλοντα, Βιομηχανία & Εφοδιαστική, Υγεία & Ασφάλεια, Έξυπνη Γεωργία), με στόχο την εννοιολογική οργάνωση και την αποδοτική αποτίμηση. Στη συνέχεια, αναλύονται οι αμοιβαίες συνεισφορές των δύο τεχνολογιών, παρουσιάζοντας τεκμηριωμένα πλεονεκτήματα και τεχνικές δυνατότητες. Το κυρίως σώμα του κεφαλαίου (Ενότητα 5.3) εξετάζει, ανά κατηγορία, σχετικές επιστημονικές εργασίες, αξιολογώντας τα πλεονεκτήματά τους, τους περιορισμούς και το επίπεδο υλοποίησής τους. Τέλος, η Ενότητα 5.4 συγκρίνει συστηματικά τις επιλεγμένες μελέτες/προσεγγίσεις βάσει επτά κοινών κριτηρίων (όπως ασφάλεια, ιδιωτικότητα, αποδοτικότητα, καινοτομία), οδηγώντας σε συμπεράσματα για τη συνολική τεχνική πληρότητα και πρακτική ωριμότητα της κάθε προσέγγισης.

5.1 Ιεραρχική Κατηγοριοποίηση Επιλεγμένων Πηγών

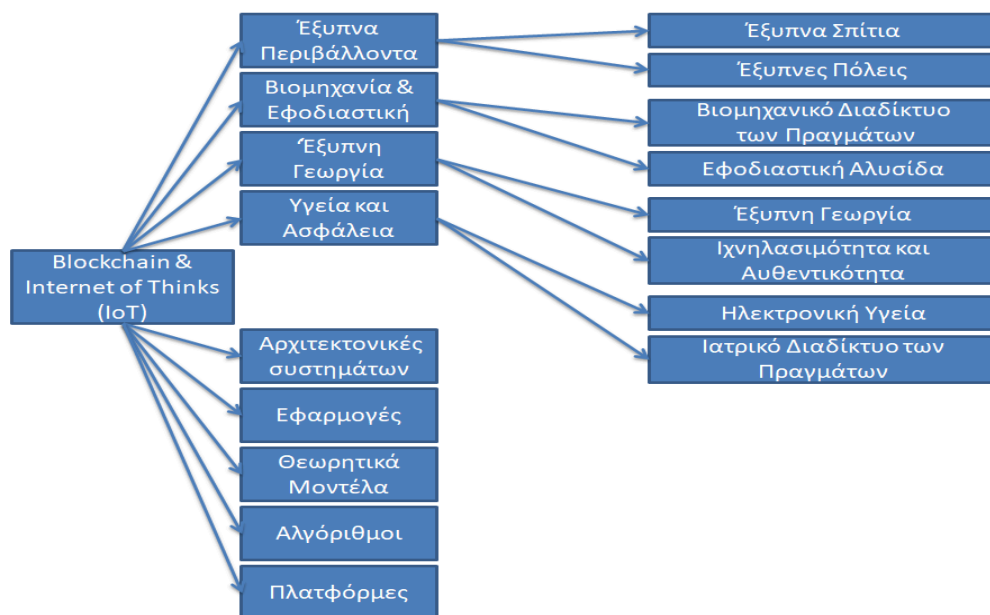
Για την αποδοτικότερη ανάλυση και συγκριτική αξιολόγηση των επιστημονικών προσεγγίσεων που εντοπίστηκαν κατά την ανασκόπηση, υιοθετείται μία θεματική κατηγοριοποίησή τους βάσει του γενικού πλαισίου εφαρμογής τους. Η δομή αυτή στοχεύει στην εννοιολογική οργάνωση του ερευνητικού πεδίου της σύζευξης Blockchain και Internet of Things (IoT), διευκολύνοντας την εστιασμένη αποτίμηση.

Η ιεραρχική αυτή ομαδοποίηση περιλαμβάνει τέσσερις βασικές θεματικές περιοχές, οι οποίες αντανakλούν τις κύριες κατευθύνσεις της τεχνολογικής έρευνας και ανάπτυξης στο διασυνδεδεμένο αυτό πεδίο:

- Έξυπνα Περιβάλλοντα
- Βιομηχανία & Εφοδιαστική
- Υγεία & Ασφάλεια
- Έξυπνη Γεωργία

Η συγκεκριμένη θεματική διάκριση επιτρέπει τη συγκέντρωση των επιλεγμένων πηγών σε ενοποιημένα ερευνητικά συμφραζόμενα, διασφαλίζοντας την εγκυρότητα της ανάλυσης που ακολουθεί. Η επιλογή περιορίζεται σε έργα που τεκμηριώνουν τεχνικές αρχιτεκτονικές λύσεις, λειτουργικά πλαίσια ή συστήματα υψηλής εφαρμοσιμότητας.

Εναλλακτικά, μία δεύτερη διάσταση κατηγοριοποίησης μπορεί να βασίζεται στο είδος της προτεινόμενης λύσης, όπως: αρχιτεκτονικές συστημάτων, εφαρμογές, θεωρητικά μοντέλα, αλγόριθμοι ή πλατφόρμες. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να αξιοποιηθεί σε επόμενο στάδιο ως εργαλείο σύγκρισης.



Εικόνα 12: Ιεραρχικό δέντρο κατηγοριοποίησης άρθρων

5.2 Σύζευξη Τεχνολογιών Blockchain & IoT

Η σύζευξη των τεχνολογιών Blockchain και Internet of Things (IoT) αποτελεί εστιακό σημείο έρευνας και τεχνολογικής καινοτομίας, δεδομένου ότι συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των αποκεντρωμένων κατακευκαμένων καταγραφών (δηλ. του blockchain) με τη διασυνδεσιμότητα και τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η παρούσα ενότητα εξετάζει τις δύο βασικές κατευθύνσεις συνεισφοράς που προκύπτουν από την ενδελεχή μελέτη των επιλεγμένων επιστημονικών εργασιών/προσεγγίσεων:

- Τη συνεισφορά του Blockchain στην ενίσχυση και επέκταση των δυνατοτήτων των συστημάτων IoT.
- Τη συνεισφορά του IoT στην ενίσχυση της πρακτικής αξίας και αξιοπιστίας των εφαρμογών Blockchain.

Συνεπώς, μέσω της ενότητας αυτής, αναλύονται οι τρόποι με τους οποίους οι δύο τεχνολογίες συνεργάζονται αμφίδρομα, με παραπομπές στις σχετικές πηγές και τεκμηριωμένες τεχνικές αναφορές.

5.2.1 Συνεισφορά του Blockchain στο IoT

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει τις βασικές συνεισφορές του Blockchain στο IoT, τεκμηριώνοντας κάθε πτυχή με τεχνικά χαρακτηριστικά και βιβλιογραφικές αναφορές (δείτε Πίνακα 2). Η ανάλυση εστιάζει σε τομείς, όπως η προστασία ιδιωτικότητας, ο αυτοματισμός μέσω έξυπνων συμβολαίων, η διαχείριση συσκευών και η εμπορική αξιοποίηση δεδομένων.

➤ *Ασφάλεια, Ακεραιότητα και Ιχνηλασιμότητα Δεδομένων*

Η τεχνολογία Κατανεμημένου Καθολικού (Distributed Ledger Technology - DLT) του Blockchain ενισχύει σημαντικά την ασφάλεια και την ακεραιότητα των δεδομένων στο IoT. Η δυνατότητα αμετάβλητης καταγραφής (immutability) κάθε αλληλεπίδρασης εξασφαλίζει ότι τα δεδομένα από αισθητήρες και συσκευές δεν μπορούν να παραποιηθούν εκ των υστέρων [40]. Η χρήση ψηφιακής υπογραφής, χρονικής σήμανσης (timestamping) και αλγορίθμων κατακερματισμού (hashing) διασφαλίζει την αυθεντικότητα και την ιχνηλασιμότητα των πληροφοριών [39]. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι κρίσιμα σε εφαρμογές υψηλής ευαισθησίας, όπως η ιατρική παρακολούθηση [38] ή η παρακολούθηση τροφίμων [43].

➤ *Αποκεντρωμένος και Αποδοτικός Συντονισμός Συσκευών*

Το Blockchain μπορεί να υποστηρίξει έναν αποκεντρωμένο μηχανισμό συντονισμού μεταξύ των IoT συσκευών, χωρίς την ανάγκη κεντρικής διαχείρισης ή διακομιστών. Αυτό επιτρέπει στις συσκευές να αλληλεπιδρούν αυτόνομα και ασφαλώς, βασιζόμενες σε κανόνες που έχουν οριστεί μέσω έξυπνων συμβολαίων (smart contracts). Η προσέγγιση αυτή μειώνει τον κίνδυνο μοναδικού σημείου αστοχίας (Single Point of Failure) και είναι κατάλληλη για μεγάλης κλίμακας εφαρμογές όπως οι έξυπνες πόλεις [37] [13].

➤ *Διαχείριση Διαμορφώσεων και Υλικολογισμικού*

Μέσω του Blockchain μπορούν να καταγράφονται όλες οι αλλαγές στο λογισμικό και υλικολογισμικό (firmware) των IoT συσκευών. Αυτό δημιουργεί ένα μη παραποιήσιμο ιστορικό ενημερώσεων που ενισχύει τη συμμόρφωση με ρυθμιστικά πλαίσια και επιτρέπει την ανίχνευση μη εξουσιοδοτημένων παρεμβάσεων [41]. Αυτή η λειτουργία είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε τομείς, όπως η υγειονομική περίθαλψη [39] ή τα βιομηχανικά συστήματα [35]. Για περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους απαιτούνται ενεργειακά αποδοτικές και ελαφριές αρχιτεκτονικές blockchain, ώστε να εξασφαλιστεί η ασφάλεια χωρίς υψηλή υπολογιστική επιβάρυνση [36].

➤ *Ενίσχυση Διαλειτουργικότητας Μεταξύ Πλατφορμών*

Η χρήση του Blockchain διευκολύνει την ενσωμάτωση ετερογενών συσκευών και προτύπων, προσφέροντας καθολικά αποδεκτές διαπαφές επικοινωνίας. Σε συνδυασμό με πρότυπα πρωτόκολλα (π.χ. MQTT, CoAP) και έξυπνα συμβόλαια, επιτυγχάνεται η οριζόντια διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών οικοσυστημάτων IoT [57] [43]. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε τομείς, όπως η γεωργία ακριβείας, όπου πολλαπλοί φορείς και προμηθευτές αλληλεπιδρούν [49].

➤ *Προστασία Ιδιωτικότητας και Προσωπικών Δεδομένων*

Η τεχνολογία Blockchain προσφέρει προηγμένους μηχανισμούς προστασίας της ιδιωτικότητας, κρίσιμους σε εφαρμογές όπου διαχειρίζονται ευαίσθητα δεδομένα, όπως στην Ηλεκτρονική/Ψηφιακή Υγεία (e-Health). Μέσω της χρήσης ιδιωτικών ή αδειοδοτημένων blockchain, οι προσβάσεις μπορούν να περιοριστούν [39] [38]. Επιπλέον, με τεχνολογίες όπως το Federated Learning (Κατανεμημένη Μάθηση) ή οι αποδείξεις μηδενικής γνώσης (Zero-Knowledge Proofs), επιτυγχάνεται η ασφαλής και ανώνυμη επεξεργασία δεδομένων [44].

➤ *Αυτοματοποίηση Διαδικασιών με Έξυπνα Συμβόλαια*

Η σύζευξη Blockchain και IoT επιτρέπει την αυτοματοποίηση όχι μόνο ενεργειών αλλά και πλήρων επιχειρησιακών διαδικασιών (business processes), αξιοποιώντας έξυπνα συμβόλαια σε συνδυασμό με τεχνολογίες BPM (Business Process Management). Ένα χαρακτηριστικό

παράδειγμα αποτελεί η αλυσίδα εφοδιασμού (supply chain), όπου η ολοκλήρωση της παραλαβής μιας αποστολής μπορεί να πυροδοτήσει αυτόματα την πληρωμή στον προμηθευτή [35] [37]. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνονται τα λειτουργικά κόστη, ενισχύεται η διαφάνεια και επιταχύνονται οι συναλλαγές.

➤ *Εμπορική Αξιοποίηση Δεδομένων (Data Monetization)*

Το Blockchain επιτρέπει τη δημιουργία αγορών δεδομένων (data marketplaces), όπου συσκευές IoT μπορούν να μοιράζονται ή να πωλούν τα δεδομένα που συλλέγουν με ασφάλεια και διαφάνεια. Μέσω συμβολαίων μικροπληρωμών (micropayments) και διακριτικών αξίας (tokens), ενισχύεται η ψηφιακή οικονομία του IoT, ανοίγοντας νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες [44] [45].

Πίνακας 2 : Βασικές συνεισφορές του Blockchain στην ενίσχυση των συστημάτων IoT

Συνεισφορά	Περιγραφή	Τεκμηρίωση
<i>Ασφάλεια, ακεραιότητα & ιχνηλασιμότητα δεδομένων</i>	Χρήση αλγορίθμων κρυπτογράφησης / κατακερματισμού, χρονικής σήμανσης και αδιάβλητης καταγραφής	[40], [39], [38], [43]
<i>Αποκεντρωμένος & αποδοτικός συντονισμός συσκευών</i>	Υλοποίηση αποκεντρωμένου μηχανισμού συντονισμού μέσω έξυπνων συμβολαίων	[37], [13]
<i>Διαχείριση διαμορφώσεων & υλικολογισμικού</i>	Καταγραφή αλλαγών σε λογισμικό & υλικολογισμικό στο blockchain για αποτροπή tampering και επίτευξη συμμόρφωσης με ρυθμιστικά πλαίσια	[41], [39], [35],[36]
<i>Ενίσχυση διαλειτουργικότητας μεταξύ πλατφορμών</i>	Συνδυασμός καθολικά αποδεκτών διεπαφών επικοινωνίας, προτύπων ανταλλαγής δεδομένων / πρωτοκόλλων και έξυπνων συμβολαίων για επίτευξη διαλειτουργικότητας μεταξύ IoT πλατφορμών και οικοσυστημάτων	[57], [43], [49]
<i>Προστασία ιδιωτικότητας και προσωπικών δεδομένων</i>	Χρήση ιδιωτικών ή αδειοδοτημένων blockchain, καθώς και τεχνολογιών όπως Federated Learning και Zero-Knowledge Proofs για περιορισμένη πρόσβαση και ανώνυμη επεξεργασία ευαίσθητων δεδομένων	[39], [38],[44]
<i>Αυτοματοποίηση διαδικασιών με έξυπνα συμβόλαια</i>	Αυτόματη εκτέλεση ενεργειών αλλά και επιχειρησιακών διαδικασιών μέσω έξυπνων συμβολαίων σε συνδυασμό με τεχνολογίες BPM	[35], [37]
<i>Εμπορική αξιοποίηση δεδομένων</i>	Ανταλλαγή και πώληση δεδομένων μεταξύ οντοτήτων σε αγορές δεδομένων υλοποιήσιμες μέσω συμβολαίων μικροπληρωμών & διακριτικών αξίας	[44], [45]

5.2.2 Συνεισφορά του IoT στο Blockchain

Η τεχνολογία του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) ενισχύει ουσιαστικά τη λειτουργικότητα και τη χρηστικότητα των συστημάτων Blockchain, προσφέροντας δυνατότητες συλλογής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από τον φυσικό κόσμο. Μέσω των αισθητήρων, των φορητών συσκευών και των δικτυωμένων αντικειμένων, το IoT λειτουργεί ως ο κρίσιμος “τροφοδότης” δεδομένων που καθιστούν τα Blockchain οικοσυστήματα δυναμικά, διασυνδεδεμένα και άμεσα εφαρμόσιμα σε πραγματικά περιβάλλοντα. Σε αυτό το πλαίσιο, οι σημαντικότερες συνεισφορές του IoT στο blockchain (δείτε Πίνακα 3) προδιαγράφονται ως εξής:

➤ Εμπλουτισμός με Δεδομένα Πραγματικού Κόσμου

Οι IoT συσκευές αποτελούν τον κύριο τροφοδότη του Blockchain με δεδομένα πραγματικού χρόνου. Η δυνατότητα παρακολούθησης μεταβλητών, όπως θερμοκρασία, τοποθεσία, υγρασία και κίνηση, είναι ζωτικής σημασίας για εφαρμογές ιχνηλασιμότητας, ελέγχου ποιότητας και ασφάλειας. Τα δεδομένα αυτά καταγράφονται με τρόπο αδιάβλητο στο Blockchain, διασφαλίζοντας αυθεντικότητα και ιστορικότητα [37] [34] [43].

➤ Αυτοματοποίηση Καταγραφών και Λειτουργιών

Το IoT ενισχύει τη λειτουργικότητα των έξυπνων συμβολαίων, επιτρέποντας την αυτόματη ενεργοποίηση δράσεων βάσει περιβαλλοντικών ερεθισμάτων. Για παράδειγμα, η υπέρβαση θερμοκρασίας σε αποθήκη τροφίμων μπορεί να ενεργοποιήσει αυτόματα συναγερμό ή μια αναφορά στο Blockchain ώστε να ενημερωθεί το κατάλληλο προσωπικό και να προχωρήσει στην πιο ενδεδειγμένη δράση προσαρμογής/αντιμετώπισης. Έτσι μειώνεται η ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης και επιτυγχάνεται υψηλότερος βαθμός αυτοματοποίησης επιχειρησιακών διαδικασιών [39] [40].

➤ Αξιοπιστία & Επαλήθευση δεδομένων

Η ύπαρξη πολλαπλών αισθητήρων για την ίδια μέτρηση επιτρέπει τη διασταύρωση και την αναγνώριση αποκλίσεων, αυξάνοντας την αξιοπιστία των δεδομένων που εισάγονται στο Blockchain, τα οποία θα μπορούν να ελέγχονται από έξυπνα συμβόλαια πριν την εισαγωγή τους. Αυτή η δυνατότητα επαλήθευσης είναι κρίσιμη σε εφαρμογές υγείας, γεωργίας και βιομηχανίας όπου η ακρίβεια των μετρήσεων επηρεάζει τη λήψη αποφάσεων [38] [33].

➤ Στήριξη της Έννοιας της “Ψηφιακής Ταυτότητας Αντικειμένων”

Το IoT επιτρέπει την απόδοση μοναδικής ταυτότητας σε κάθε φυσικό αντικείμενο ή συσκευή, καθιστώντας εφικτή την παρακολούθηση του κύκλου ζωής τους στο Blockchain. Αυτή η ψηφιακή αναπαράσταση επιτρέπει όχι μόνο την ιχνηλασιμότητα, αλλά και την καταγραφή συμβάντων, μεταφορών ή ακόμη και χρήσεων κάθε οντότητας [44] [45].

➤ Ενεργειακά Αποδοτική και Κατανεμημένη Συλλογή Δεδομένων

Η τεχνολογία του IoT, σε συνδυασμό με την εξέλιξη του Blockchain, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη υβριδικών αρχιτεκτονικών που ενσωματώνουν lightweight πρωτόκολλα επικοινωνίας και κρυπτογράφησης (όπως CoAP, MQTT) μαζί με ενεργειακά αποδοτικά πρωτόκολλα

συναίνεσης (όπως Proof of Authority, DAG-based Tangle ή hybrid BFT⁴). Αυτή η σύμπραξη επιτρέπει την αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων κοντά στην πηγή (edge/fog computing), περιορίζοντας την ανάγκη συνεχούς σύνδεσης με το κεντρικό blockchain δίκτυο. Το αποτέλεσμα είναι ένα ενεργειακά αποδοτικό, αποκεντρωμένο σύστημα συλλογής και επιβεβαίωσης δεδομένων, ιδανικό για σενάρια, όπως γεωργία ακριβείας, απομακρυσμένη ιατρική ή βιομηχανικά περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους.

Έτσι, η συνεισφορά του IoT στο blockchain γίνεται εμφανής όχι μόνο μέσω των συσκευών αλλά και μέσω της υιοθέτησης σχεδιαστικών πρακτικών που υποστηρίζουν την αποδοτική, κλιμακούμενη συνεργασία μεταξύ των δύο τεχνολογιών. [57] [45]

➤ Ανάπτυξη Αποκεντρωμένων Οικοσυστημάτων Συνεργασίας

Το IoT επιτρέπει τη διασύνδεση πολλών εμπλεκόμενων (π.χ. παραγωγών, παρόχων, καταναλωτών) σε κοινό Blockchain περιβάλλον, με άμεση πρόσβαση σε δεδομένα και συμβάντα. Αυτό ενισχύει τη διαφάνεια, τη συνεργασία και την αμοιβαία εμπιστοσύνη μεταξύ διαφορετικών οντοτήτων [42] [41].

⁴ Το **Proof of Authority (PoA)** είναι ένας αλγόριθμος συναίνεσης που στηρίζεται στην ταυτοποίηση έμπιστων κόμβων, προσφέροντας υψηλή απόδοση και χαμηλή κατανάλωση πόρων. Η **DAG-based Tangle** (όπως στο IOTA) [35] χρησιμοποιεί κατευθυνόμενους άκυκλους γράφους αντί παραδοσιακών μπλοκ για να εξαλείψει τις χρεώσεις συναλλαγών και να ενισχύσει την ταχύτητα. Το **hybrid BFT** συνδυάζει Byzantine Fault Tolerance με άλλα μοντέλα για ανθεκτικότητα και ενεργειακή αποδοτικότητα σε IoT περιβάλλοντα. Αυτά τα συστήματα είναι ιδανικά για αποκεντρωμένες εφαρμογές που απαιτούν ελαφριά και αξιόπιστη λειτουργία, όπως το IoT.

Πίνακας 3 : Συνεισφορά του IoT στη λειτουργικότητα και πρακτική αξιοποίηση του Blockchain

Συνεισφορά	Περιγραφή	Τεκμηρίωση
<i>Εμπλουτισμός με δεδομένα πραγματικού κόσμου</i>	Τροφοδότηση του blockchain με μετρήσεις πραγματικού χρόνου / δεδομένα φυσικού κόσμου	[37], [34], [43]
<i>Αυτοματοποίηση καταγραφών και λειτουργιών</i>	Ενεργοποίηση ενεργειών ή επιχειρησιακών διαδικασιών υλοποιούμενων από έξυπνα συμβόλαιο από ερεθίσματα αισθητήρων	[39], [40]
<i>Αξιοπιστία & επαλήθευση δεδομένων</i>	Διασταύρωση μετρήσεων/δεδομένων από πολλαπλές πηγές	[38], [33]
<i>Στήριξη της έννοιας της “Ψηφιακής Ταυτότητας Αντικειμένων”</i>	Μοναδική ταυτοποίηση αντικειμένων και παρακολούθηση του κύκλου ζωής τους	[44], [45]
<i>Ενεργειακά αποδοτική και κατανεμημένη συλλογή δεδομένων</i>	Αισθητήρες χαμηλής κατανάλωσης με δυνατότητα blockchain σε συνδυασμό με τη χρήση ελαφριών πρωτοκόλλων επικοινωνίας, κρυπτογράφησης και συναίνεσης	[57], [45]
<i>Ανάπτυξη αποκεντρωμένων οικοσυστημάτων συνεργασίας</i>	Διασύνδεση & διαμοιρασμός πληροφορίας μεταξύ φορέων / εμπλεκόμενων και οικοσυστημάτων	[42], [41]

5.3 Ανάλυση Άρθρων Ανά Κατηγορία

Σε αυτή την ενότητα πραγματοποιείται στοχευμένη ανάλυση επιστημονικών προσεγγίσεων που υλοποιούν ή αξιοποιούν τη σύζευξη των τεχνολογιών Blockchain και Internet of Things (IoT). Η ανάλυση βασίζεται στην κατηγοριοποίηση που παρουσιάστηκε στην Ενότητα 5.1, εστιάζοντας στις επιμέρους περιοχές εφαρμογής όπου η σύζευξη έχει πρακτική σημασία και τεκμηριωμένη παρουσία στη βιβλιογραφία.

Για κάθε κατηγορία (π.χ. Έξυπνα Περιβάλλοντα, Βιομηχανία & Εφοδιαστική) παρουσιάζονται και αξιολογούνται επιλεγμένα επιστημονικά άρθρα που πληρούν τα εξής κριτήρια:

- Περιγράφουν συγκεκριμένες αρχιτεκτονικές λύσεις, συστήματα ή πλαίσια υλοποίησης.
- Εστιάζουν άμεσα στη συνέργεια Blockchain και IoT, αποφεύγοντας γενικές επισκοπήσεις.
- Περιλαμβάνουν τεχνική ανάλυση, πειραματικά αποτελέσματα ή τεκμηριωμένες λύσεις ασφάλειας, ιχνηλασιμότητας ή διαχείρισης δεδομένων.

Η ανάλυση αποσκοπεί στην κατανόηση των τεχνολογικών λύσεων και στην ανάδειξη της ερευνητικής αξίας κάθε προσέγγισης, εντοπίζοντας συνεισφορές και περιορισμούς ανά θεματική κατηγορία.

5.3.1 Έξυπνα Περιβάλλοντα

Τα έξυπνα περιβάλλοντα αποτελούν έναν ταχέως αναπτυσσόμενο τομέα στον οποίο συνδυάζονται τεχνολογίες του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) με καινοτομίες όπως το Blockchain, ώστε να επιτυγχάνεται υψηλότερο επίπεδο αυτοματοποίησης, ασφάλειας και αποδοτικότητας στη διαχείριση χώρων και υποδομών. Βασική αρχή των έξυπνων περιβαλλόντων είναι η συνεχής συλλογή και αξιοποίηση δεδομένων από αισθητήρες και συνδεδεμένες συσκευές, επιτρέποντας την ευφυή αλληλεπίδραση ανθρώπων και συστημάτων στο πλαίσιο μιας κατοικίας (Έξυπνα Σπίτια) ή μιας ευρύτερης αστικής υποδομής (Έξυπνες Πόλεις). Η ενσωμάτωση τεχνολογιών Blockchain σε αυτά τα περιβάλλοντα απαντά σε κρίσιμες προκλήσεις που σχετίζονται με την ασφάλεια, την ακεραιότητα και την ιδιωτικότητα των δεδομένων. Μέσα από την αποκεντρωμένη φύση του Blockchain και τις δυνατότητές του για ιχνηλασιμότητα και αδιαμφισβήτητα αρχεία συναλλαγών, επιτυγχάνεται ενίσχυση της εμπιστοσύνης στις διαδικασίες και στις αλληλεπιδράσεις των συσκευών.

Η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται σε δύο βασικές κατηγορίες έξυπνων περιβαλλόντων:

- *Έξυπνα Σπίτια (Smart Homes)*: Ιδιωτικοί χώροι εξοπλισμένοι με τεχνολογίες που επιτρέπουν την αυτοματοποίηση λειτουργιών και την εξ αποστάσεως διαχείριση, με έμφαση στην ασφάλεια και την ιδιωτικότητα.
- *Έξυπνες Πόλεις (Smart Cities)*: Πολυεπίπεδα αστικά οικοσυστήματα που βασίζονται σε συνδεδεμένες υποδομές για τη βελτίωση των δημόσιων υπηρεσιών και της ποιότητας ζωής των πολιτών.

Για κάθε κατηγορία παρουσιάζονται δύο επιλεγμένες/σχετικές επιστημονικές μελέτες που αξιολογούν πειραματικά ή θεωρητικά τη σύζευξη IoT και Blockchain, επισημαίνοντας τα πλεονεκτήματα, τους περιορισμούς και τη συνεισφορά τους στον ευρύτερο τομέα της ασφάλειας και της λειτουργικότητας των έξυπνων περιβαλλόντων.

5.3.1.1 Έξυπνα Σπίτια

Η κατηγορία των έξυπνων σπιτιών (Smart Homes) αναφέρεται στην αξιοποίηση του Internet of Things (IoT) για τον έλεγχο και την αυτοματοποίηση οικιακών λειτουργιών, όπως φωτισμός, θέρμανση, ασφάλεια και παρακολούθηση. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών Blockchain σε τέτοια περιβάλλοντα αποσκοπεί κυρίως στη διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων που συλλέγονται από αισθητήρες, καθώς και στην ενίσχυση της εμπιστοσύνης και της ιδιωτικότητας των χρηστών. Παρακάτω αναλύονται δύο χαρακτηριστικές επιστημονικές προσεγγίσεις που εξετάζουν τη σύζευξη αυτών των τεχνολογιών.

Mohanty, S. P. (2016). NEW FRAMEWORKS FOR SECURE IMAGE COMMUNICATION IN THE INTERNET OF THINGS (IoT) (Doctoral dissertation, UNIVERSITY OF NORTH TEXAS)

Η διδακτορική διατριβή [13] προτείνει νέα πλαίσια ασφαλούς επικοινωνίας εικόνας και πληροφορίας για IoT περιβάλλοντα, με εφαρμογή τόσο σε ιατρικά όσο και σε οικιακά συστήματα. Εστιάζει κυρίως στη χρήση τεχνικών ενθυλάκωσης και κρυπτογράφησης, με στόχο τη διασφάλιση της εμπιστευτικότητας των δεδομένων που προέρχονται από έξυπνες συσκευές, ενώ το Blockchain χρησιμοποιείται ως μηχανισμός εξασφάλισης της ακεραιότητας και της ιχνηλασιμότητας.

Πλεονεκτήματα:

- Παρουσιάζει πλήρως ανεπτυγμένα μοντέλα αρχιτεκτονικής με ενσωματωμένες τεχνικές ασφάλειας.
- Συνδυάζει διαφορετικές μεθόδους προστασίας (όπως κρυπτογράφηση και blockchain) για την αποτροπή παραποίησης δεδομένων.
- Παρέχει αναλυτική μελέτη σχεδιασμού για ενσωμάτωση σε ενσωματωμένα συστήματα IoT.

Περιορισμοί:

- Η εργασία επικεντρώνεται κυρίως σε θεωρητικό επίπεδο και δεν συνοδεύεται από υλοποιήσεις ή μετρήσεις σε πραγματικό περιβάλλον.
- Δεν αναλύονται ζητήματα απόδοσης (π.χ. καθυστέρηση, κατανάλωση ενέργειας).
- Η εστίαση είναι περισσότερο σε ασύρματη μετάδοση εικόνας και λιγότερο σε ολοκληρωμένα σενάρια λειτουργίας οικιακού IoT.

Η εργασία αποτελεί μία από τις πρώτες τεχνικά πλήρεις απόπειρες ενσωμάτωσης Blockchain σε εφαρμογές έξυπνων συσκευών, συμβάλλοντας θεωρητικά στη θεμελίωση ενός ασφαλούς πλαισίου επικοινωνίας στο οικιακό IoT.

Lee, Y., Rathore, S., Park, J. H., & Park, J. H. (2020). A blockchain-based smart home gateway architecture for preventing data forgery. Human-centric Computing and Information Sciences, 10(1), 9.

Η μελέτη [40] παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική πύλης (gateway) για έξυπνα σπίτια, η οποία βασίζεται σε τριεπίπεδη σχεδίαση (IoT → Πύλη → Υπολογιστικό νέφος) με ενσωμάτωση μηχανισμών Blockchain. Η προτεινόμενη πύλη λειτουργεί ως μεσολαβητής ανάμεσα στις οικιακές συσκευές και το υπολογιστικό νέφος, εφαρμόζοντας διαδικασίες επαλήθευσης και καταγραφής δεδομένων μέσω blockchain, ώστε να αποτρέπεται η παραποίηση των μετρήσεων και των εντολών.

Πλεονεκτήματα:

- Περιλαμβάνει πλήρως υλοποιημένο σύστημα με δομημένη αρχιτεκτονική τριών επιπέδων.
- Το blockchain χρησιμοποιείται ως μηχανισμός ασφάλειας με σαφώς καθορισμένο ρόλο στη ροή δεδομένων.
- Υποστηρίζει αρθρωτή σχεδίαση και εύκολη επέκταση για χρήση με πλήθος συσκευών.

Περιορισμοί:

- Η εργασία δεν παρουσιάζει αναλυτικά αποτελέσματα απόδοσης σε όρους καθυστέρησης ή χρήσης πόρων.
- Δεν αναλύονται σενάρια κλιμάκωσης ή αποτυχίας των επικοινωνιών.
- Υπάρχει εξάρτηση από υπηρεσίες νέφους, γεγονός που ενδέχεται να δημιουργεί εμπόδια ως προς την ιδιωτικότητα σε πραγματικά περιβάλλοντα.

Η μελέτη αποτελεί μία από τις πιο πρακτικά εφαρμόσιμες προσεγγίσεις στον τομέα της ασφάλειας έξυπνων σπιτιών, προσφέροντας ένα παράδειγμα πραγματικής ενσωμάτωσης blockchain σε κρίσιμα σημεία του οικιακού IoT κύκλου ζωής.

5.3.1.2 Έξυπνες Πόλεις

Η ενότητα των Έξυπνων Πόλεων (Smart Cities) αφορά την εφαρμογή τεχνολογιών Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things - IoT) για τη βελτιστοποίηση κρίσιμων λειτουργιών σε αστικά περιβάλλοντα, όπως μεταφορές, διαχείριση ενέργειας, απορριμμάτων και ασφάλειας. Η ενσωμάτωση του Blockchain σε τέτοιες εφαρμογές επιτρέπει την αποκεντρωμένη διαχείριση, την ενίσχυση της ασφάλειας, την ιχνηλασιμότητα και τη διαφάνεια των δεδομένων μεταξύ πολλών εμπλεκόμενων φορέων. Ακολουθεί η αξιολόγηση δύο χαρακτηριστικών ερευνητικών εργασιών που εξετάζουν τη σύζευξη των δύο τεχνολογιών στο πλαίσιο των έξυπνων πόλεων.

Sagirlar, G., Carminati, B., Ferrari, E., Sheehan, J. D., & Ragnoli, E. (2018, July). Hybrid-iot: Hybrid blockchain architecture for internet of things-pow sub-blockchains. In 2018 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCoM) and IEEE Smart Data (SmartData) (pp. 1007-1016). IEEE

Η εργασία [36] προτείνει την αρχιτεκτονική Hybrid-IoT, η οποία αποτελεί ένα υβριδικό μοντέλο βασισμένο στην τεχνολογία Blockchain για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας σε έξυπνες πόλεις. Ο πυρήνας της πρότασης είναι ο συνδυασμός δημόσιου και ιδιωτικού blockchain, επιτρέποντας την ευέλικτη διαχείριση της πρόσβασης στα δεδομένα ανάλογα με τη σημασία και την ευαισθησία τους. Η αρχιτεκτονική αυτή επιτρέπει τόσο την απόδοση όσο και την ασφάλεια.

Πλεονεκτήματα:

- Υιοθετεί υβριδικό μηχανισμό blockchain, ενσωματώνοντας πλεονεκτήματα και των δύο τύπων (δημόσιου και ιδιωτικού).
- Προσφέρει διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική κατάλληλη για εφαρμογή σε πραγματικά περιβάλλοντα.

- Παρουσιάζει σενάριο χρήσης σε έξυπνη πόλη, ενισχύοντας την πρακτική τεκμηρίωση της πρότασης.

Περιορισμοί:

- Δεν περιλαμβάνει πειραματική αξιολόγηση της πλατφόρμας ή μετρήσεις απόδοσης.
- Η περιγραφή υλοποίησης παραμένει σε θεωρητικό επίπεδο χωρίς συγκριτική μελέτη με άλλες λύσεις.
- Υπάρχει εξάρτηση από έναν κεντρικό φορέα για την αρχική διαχείριση, περιορίζοντας τη πλήρη αποκέντρωση.

Η εργασία αποτελεί μια σημαντική συνεισφορά στην κατεύθυνση της αξιοποίησης του Blockchain για την ενίσχυση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας των υποδομών των έξυπνων πόλεων.

Khalil, U., Malik, O. A., Hong, O. W., & Uddin, M. (2022). DSCOT: An NFT-based blockchain architecture for the authentication of IoT-enabled smart devices in smart cities. arXiv preprint arXiv:2211.04803.

Η μελέτη [44] παρουσιάζει ένα αποκεντρωμένο μοντέλο έξυπνης πόλης βασισμένο σε NFTs (Μη Ανταλλάξιμα Ψηφιακά Tokens). Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική DSCoT (Decentralized Smart City of Things) αξιοποιεί NFTs για την αναγνώριση και καταγραφή φυσικών και ψηφιακών στοιχείων της πόλης. Η αρχιτεκτονική αποτελείται από πέντε βασικά επίπεδα: συσκευές IoT, blockchain, διεπαφές προγραμματισμού εφαρμογών (APIs), χρήστες και εφαρμογές.

Πλεονεκτήματα:

- Εισάγει την πρωτοποριακή χρήση των NFTs για ταυτοποίηση πόρων σε έξυπνη πόλη.
- Η προτεινόμενη πλατφόρμα ενισχύει την ιχνηλασιμότητα και τη διαφάνεια μέσω blockchain.
- Περιλαμβάνει τεχνική περιγραφή των λειτουργικών επιπέδων και προτεινόμενο μοντέλο υλοποίησης.

Περιορισμοί:

- Η χρήση NFTs ενδέχεται να συνεπάγεται αυξημένο υπολογιστικό κόστος και πολυπλοκότητα.
- Δεν έχει πραγματοποιηθεί δοκιμή σε πραγματικό περιβάλλον έξυπνης πόλης.
- Δεν αναλύονται ζητήματα κανονιστικού πλαισίου και προστασίας προσωπικών δεδομένων.

Η εργασία συμβάλλει σημαντικά στην καινοτομία του σχεδιασμού έξυπνων πόλεων μέσω της ενσωμάτωσης NFTs και blockchain, παρουσιάζοντας μία εναλλακτική κατεύθυνση για την ασφάλεια και τη διαχείριση δημοτικών πόρων.

5.3.2 Βιομηχανία & Εφοδιαστική

Η σύζευξη των τεχνολογιών Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και Blockchain δημιουργεί νέα πρότυπα στην ψηφιακή μεταρρύθμιση της βιομηχανίας και της εφοδιαστικής αλυσίδας. Σε βιομηχανικά

περιβάλλοντα, το IoT επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση και αυτοματοποίηση διεργασιών παραγωγής, ενώ το Blockchain εξασφαλίζει την ασφάλεια, τη διαφάνεια και την ακεραιότητα των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ συστημάτων. Η ενσωμάτωσή τους ενδυναμώνει την αξιοπιστία σε κρίσιμες λειτουργίες, όπως η προληπτική συντήρηση, η παρακολούθηση πόρων και η ταυτοποίηση συσκευών.

Αντίστοιχα, στην εφοδιαστική αλυσίδα, η χρήση έξυπνων αισθητήρων IoT για την καταγραφή συνθηκών μεταφοράς, σε συνδυασμό με την κατανεμημένη φύση του Blockchain, επιτρέπει την ιχνηλασιμότητα και τον έλεγχο ποιότητας σε πραγματικό χρόνο. Οι τεχνολογίες αυτές απαντούν σε διαχρονικές προκλήσεις του τομέα, όπως η παραχάραξη προϊόντων, η έλλειψη διαφάνειας και η αναποτελεσματική καταγραφή γεγονότων, μετασχηματίζοντας την αλυσίδα αξίας προς ένα ασφαλές, διαφανές και αυτοματοποιημένο οικοσύστημα.

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικές ερευνητικές εργασίες που αναλύουν την εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών στο Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (ΠoT) και στην ψηφιακή διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, αναδεικνύοντας πλεονεκτήματα, περιορισμούς και τεχνικές προσεγγίσεις.

5.3.2.1 Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Η κατηγορία του Βιομηχανικού Διαδικτύου των Πραγμάτων (Industrial IoT - ΠoT) περιλαμβάνει εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε βιομηχανικά περιβάλλοντα, όπως η αυτοματοποίηση παραγωγής, η προληπτική συντήρηση εξοπλισμού και η παρακολούθηση κρίσιμων υποδομών. Η σύζευξη των τεχνολογιών IoT και Blockchain σε αυτόν τον τομέα στοχεύει στην ενίσχυση της ασφάλειας, της αξιοπιστίας και της διαφάνειας κατά την επεξεργασία και ανταλλαγή βιομηχανικών δεδομένων. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικές ερευνητικές εργασίες.

Yang, Q., Wang, H., Wu, X., Wang, T., Zhang, S., & Liu, N. (2022). Secure blockchain platform for industrial IoT with trusted computing hardware. IEEE Internet of Things Magazine, 4(4), 86-92

Η εργασία [35] προτείνει μια ασφαλή πλατφόρμα βασισμένη σε τεχνολογίες Blockchain για τη διαχείριση του Βιομηχανικού IoT, ενσωματώνοντας μηχανισμούς αξιόπιστου υπολογισμού (Trusted Computing). Η πλατφόρμα χρησιμοποιεί τεχνολογία απομονωμένης εκτέλεσης Intel SGX, ώστε ο κώδικας και τα δεδομένα να επεξεργάζονται εντός ασφαλών περιβαλλόντων. Το Blockchain λειτουργεί ως αδιάβλητο μητρώο (καθολικό) για την καταγραφή ενεργειών μεταξύ των βιομηχανικών μονάδων.

Πλεονεκτήματα:

- Ο συνδυασμός Blockchain με απομονωμένα υπολογιστικά περιβάλλοντα ενισχύει την εμπιστοσύνη μεταξύ συστημάτων διαφορετικών προμηθευτών.
- Η αρχιτεκτονική οργανώνεται σε επίπεδα (αντίληψης, δικτύου, υπηρεσιών) και υποστηρίζεται από πειραματική αξιολόγηση σε περιβάλλον “έξυπνου εργοστασίου”.
- Παρέχονται μετρήσεις απόδοσης, όπως χρόνος καθυστέρησης και ρυθμός μεταφοράς δεδομένων (throughput).

Περιορισμοί:

- Η λύση εξαρτάται από συγκεκριμένο υλικό (Intel SGX), κάτι που περιορίζει την ευρύτερη υιοθέτησή της.
- Δεν αναλύεται το κόστος εφαρμογής σε μεγάλης κλίμακας βιομηχανικά συστήματα.
- Δεν περιλαμβάνει υποστήριξη για εξωτερική αποθήκευση δεδομένων (off-chain storage), η οποία είναι απαραίτητη για τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων αισθητήρων και μηχανών που δεν μπορούν να καταχωρηθούν αποδοτικά εντός του blockchain, λόγω περιορισμένου αποθηκευτικού χώρου, υψηλού κόστους και καθυστερήσεων στην εγγραφή.

Ghovanloooy Ghajar, F., Sikora, A., & Welte, D. (2022). Schloss: Blockchain-based system architecture for secure industrial iot. Electronics, 11(10), 1629

Η μελέτη [41] παρουσιάζει μια αρχιτεκτονική συστήματος βασισμένη σε Blockchain για την ενίσχυση της ασφάλειας στο Βιομηχανικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Η προτεινόμενη λύση διαρθρώνεται σε τρία επίπεδα: επίπεδο αισθητήρων (perception), επίπεδο δικτύου (blockchain) και επίπεδο εφαρμογών. Βασικός στόχος είναι η αποκεντρωμένη ταυτοποίηση συσκευών, ο έλεγχος πρόσβασης και η διασφάλιση της καταγραφής κρίσιμων γεγονότων.

Πλεονεκτήματα:

- Χρησιμοποιεί την πλατφόρμα Hyperledger Fabric, προσφέροντας παραμετροποιήσιμη και αρθρωτή σχεδίαση.
- Υποστηρίζει τεχνολογίες edge computing, καθιστώντας δυνατή την επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο.
- Περιλαμβάνει μοντέλο ασφάλειας με σαφή διαχωρισμό ρόλων και μηχανισμούς εξουσιοδότησης.

Περιορισμοί:

- Δεν συνοδεύεται από εκτενή πειραματική αξιολόγηση (π.χ. χρόνους απόκρισης, φορτίο συστήματος).
- Η εφαρμογή παραμένει σε θεωρητικό επίπεδο, χωρίς δοκιμή σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον.
- Δεν παρέχεται ενσωμάτωση με άλλες υπάρχουσες πλατφόρμες ή βιομηχανικά πρότυπα.

5.3.2.2 Εφοδιαστική Αλυσίδα

Η εφοδιαστική αλυσίδα αποτελεί κρίσιμο πεδίο εφαρμογής της σύζευξης των τεχνολογιών Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και Blockchain, λόγω της ανάγκης για αυξημένη διαφάνεια, ιχνηλασιμότητα και ασφάλεια δεδομένων κατά τη μεταφορά, αποθήκευση και διαχείριση αγαθών. Ο συνδυασμός των δύο τεχνολογιών επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση φυσικών παραμέτρων μέσω αισθητήρων IoT και τη μη αλλοίωση των πληροφοριών μέσω καταναμετημένων ψηφιακών καταγραφών με χρήση Blockchain.

Ακολουθούν δύο χαρακτηριστικές επιστημονικές εργασίες που αναδεικνύουν πώς μπορεί να ενισχυθεί η αξιοπιστία και η ασφάλεια της εφοδιαστικής αλυσίδας μέσω της τεχνολογικής αυτής σύζευξης.

Mondal, S., Wijewardena, K. P., Karuppuswami, S., Kriti, N., Kumar, D., & Chahal, P. (2019). Blockchain inspired RFID-based information architecture for food supply chain. IEEE Internet of Things Journal, 6(3), 5803-5813

Η εργασία [37] προτείνει μια πληροφοριακή αρχιτεκτονική για την αλυσίδα τροφίμων, η οποία βασίζεται στη χρήση τεχνολογιών RFID και Blockchain. Η πρόταση αξιοποιεί αισθητήρες για την παρακολούθηση των προϊόντων καθ' όλη τη διάρκεια της μεταφοράς και αποθήκευσης, ενώ μέσω της τεχνολογίας blockchain επιτυγχάνεται η αδιάβλητη καταγραφή των δεδομένων και η ενίσχυση της ιχνηλασιμότητας.

Πλεονεκτήματα:

- Ενσωματώνει αισθητήρες RFID που παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο τις συνθήκες αποθήκευσης.
- Η χρήση Blockchain εξασφαλίζει τη διαφάνεια και την ακεραιότητα των πληροφοριών.
- Παρουσιάζει συγκεκριμένο σενάριο χρήσης με απεικόνιση λειτουργικής αρχιτεκτονικής.

Περιορισμοί:

- Η μελέτη περιορίζεται κυρίως σε θεωρητικό επίπεδο και δεν συνοδεύεται από πειραματική εφαρμογή.
- Δεν αναλύονται ζητήματα απόδοσης, όπως η καθυστέρηση ή η κατανάλωση υπολογιστικών πόρων.
- Οι μηχανισμοί ασφαλείας πέραν της ιχνηλασιμότητας δεν παρουσιάζονται αναλυτικά.

Η εργασία αποτελεί αξιολογή συμβολή στον σχεδιασμό ψηφιακών λύσεων για την εφοδιαστική αλυσίδα τροφίμων, βασισμένων σε συνδυασμό αισθητήρων IoT και blockchain για την αξιόπιστη καταγραφή γεγονότων.

Βολίκα, Ν. (2024). Blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα (Μεταπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Πειραιώς).

Η διπλωματική μεταπτυχιακή εργασία [49] εστιάζει στην εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η μελέτη περιλαμβάνει πλήρη ανάλυση της τεχνικής αρχιτεκτονικής ενός συστήματος που ενσωματώνει αισθητήρες IoT, έξυπνα συμβόλαια (smart contracts) και δομές καταγραφής δεδομένων με χρήση Blockchain. Αναλύονται σενάρια πραγματικής χρήσης και παρουσιάζονται διαγράμματα λειτουργικής σχεδίασης.

Πλεονεκτήματα:

- Η εργασία βασίζεται σε ρεαλιστικό επιχειρησιακό παράδειγμα, συνδέοντας τεχνολογία και εφαρμογή.
- Περιλαμβάνει αναλυτικά λειτουργικά διαγράμματα που απεικονίζουν τις ροές δεδομένων.
- Ενσωματώνει τεχνολογίες αισθητήρων, Blockchain και έξυπνων συμβολαίων, καλύπτοντας ολοκληρωμένα τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Περιορισμοί:

- Δεν παρέχεται ποσοτική αξιολόγηση (π.χ. χρόνοι απόκρισης, υπολογιστική κατανάλωση).

- Δεν εξετάζεται η εφαρμογή σε περιβάλλοντα μεγάλης κλίμακας.
- Δεν περιλαμβάνεται ενεργειακή ή οικονομική αποτίμηση της λύσης, γεγονός που δυσχεραίνει την αξιολόγηση της βιωσιμότητάς της σε πραγματικά επιχειρησιακά περιβάλλοντα.

Η εργασία ξεχωρίζει για την πρακτική της προσέγγιση και την τεχνική πληρότητα της προτεινόμενης λύσης, αποτελώντας πρότυπο για τη χρήση των νέων τεχνολογιών στην ψηφιακή παρακολούθηση και διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας.

5.3.3 Έξυπνη Γεωργία

Η Έξυπνη Γεωργία (Smart Agriculture) αποτελεί έναν δυναμικά αναπτυσσόμενο τομέα στον οποίο αξιοποιούνται τεχνολογίες Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και Blockchain, με στόχο την αναβάθμιση της αγροτικής παραγωγής και της εφοδιαστικής αλυσίδας τροφίμων. Η χρήση αισθητήρων IoT επιτρέπει τη συνεχή παρακολούθηση καλλιεργητικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων (όπως υγρασία, θερμοκρασία, ποιότητα εδάφους και συνθήκες αποθήκευσης), παρέχοντας πολύτιμη πληροφόρηση σε πραγματικό χρόνο. Παράλληλα, η ενσωμάτωση του Blockchain εγγυάται την ακεραιότητα, την αυθεντικότητα και την ιχνηλασιμότητα των δεδομένων, ενισχύοντας τη διαφάνεια σε όλα τα στάδια της αγροδιατροφικής αλυσίδας — από την παραγωγή έως την κατανάλωση. Η τεχνολογική σύζευξη αυτών των δύο καινοτομιών δημιουργεί νέες δυνατότητες για βιώσιμη και έξυπνη γεωργική ανάπτυξη, με εφαρμογές τόσο στη διαχείριση αγροτικών πόρων όσο και στην πιστοποίηση ποιότητας των προϊόντων. Οι τεχνολογίες αυτές αποκτούν ιδιαίτερη σημασία σε ένα περιβάλλον αυξανόμενων απαιτήσεων για ασφάλεια τροφίμων, διαφάνεια και συμμόρφωση με κανονιστικά πλαίσια, αλλά και σε ένα πλαίσιο περιορισμένων φυσικών πόρων και κλιματικής αβεβαιότητας.

Στο πλαίσιο αυτό, παρουσιάζονται τέσσερις αντιπροσωπευτικές μελέτες που καλύπτουν δύο βασικές θεματικές περιοχές:

- Την *έξυπνη γεωργία*, η οποία περιλαμβάνει τη διαχείριση αγροτικής παραγωγής και agrolistics με τη χρήση αισθητήρων και Blockchain.
- Τη *συστηματική ιχνηλασιμότητα και επαλήθευση αυθεντικότητας* τροφίμων μέσω κατανεμημένων συστημάτων και έξυπνων συμβολαίων.

Οι εργασίες που αναλύονται αναδεικνύουν ποικίλες τεχνικές αρχιτεκτονικές, πρακτικές εφαρμογές και πιλοτικά παραδείγματα, καλύπτοντας από την καλλιέργεια και την αποθήκευση μέχρι την κατανάλωση και την πιστοποίηση ποιότητας.

5.3.3.1 Έξυπνη Γεωργία

Η Έξυπνη Γεωργία αξιοποιεί το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT) και την τεχνολογία Blockchain για τη βελτίωση της παραγωγικότητας, της ποιότητας και της διαχείρισης των πόρων στον αγροτικό τομέα. Η ενσωμάτωση αισθητήρων επιτρέπει την παρακολούθηση συνθηκών, όπως η υγρασία, η θερμοκρασία, η ποιότητα εδάφους ή οι μεταβολές στην εφοδιαστική. Παράλληλα, η χρήση του Blockchain ενισχύει τη διαφάνεια και την ιχνηλασιμότητα, επιτρέποντας την αξιοπιστία των δεδομένων σε όλα τα στάδια της αγροδιατροφικής αλυσίδας. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο αντιπροσωπευτικές εργασίες που εστιάζουν στη σύζευξη Blockchain και IoT στον αγροτικό τομέα.

Πούλος, Σ. (2024). Το Διαδίκτυο των πραγμάτων και τα Agrolistics (Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας του διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) και του blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα του αγροτροφικού τομέα) (Μεταπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Πειραιώς)

Η διπλωματική μεταπτυχιακή εργασία [57] εξετάζει την εφαρμογή τεχνολογιών IoT και Blockchain στον αγροδιατροφικό τομέα, εστιάζοντας κυρίως στα Agrolistics. Η προτεινόμενη πλατφόρμα βασίζεται σε αισθητήρες για τη μέτρηση παραμέτρων, όπως η υγρασία, η θερμοκρασία και η κίνηση, ενώ τα δεδομένα καταγράφονται σε Blockchain ώστε να διασφαλιστεί η ακεραιότητα και η ιχνηλασιμότητα.

Πλεονεκτήματα:

- Παρουσιάζει πραγματικό σενάριο χρήσης και δομημένη αρχιτεκτονική.
- Εστιάζει στην παρακολούθηση της αγροτικής εφοδιαστικής (agrolistics), καλύπτοντας την παραγωγή έως τη διανομή.
- Περιλαμβάνει αναλυτικά λειτουργικά διαγράμματα και τεκμηρίωση σχεδίασης.

Περιορισμοί:

- Περιορισμένη αξιολόγηση απόδοσης σε όρους ενέργειας και κλιμάκωσης.
- Η εφαρμογή παρουσιάζεται κυρίως σε θεωρητικό/μοντελοποιημένο επίπεδο χωρίς εκτενή πειραματικά δεδομένα.
- Δεν εξετάζεται το κόστος υλοποίησης ή συντήρησης της προτεινόμενης λύσης, κάτι που αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την πρακτική εφαρμογή της, ιδίως σε μικρές ή μεσαίες αγροτικές επιχειρήσεις

Η εργασία συμβάλλει ουσιαστικά στην ενίσχυση της ασφάλειας δεδομένων και την προστασία των έξυπνων γεωργικών εφαρμογών μέσω της τεχνολογίας blockchain και IoT.

Aliyu, A. A., & Liu, J. (2023). Blockchain-Based Smart Farm Security Framework for the Internet of Things. Sensors, 23(18), 7992.

Η εργασία [33] προτείνει ένα πλήρες αρχιτεκτονικό πλαίσιο ασφάλειας για Έξυπνες Γεωργικές Εκμεταλλεύσεις, συνδυάζοντας blockchain με τεχνολογίες Διαδικτύου των Πραγμάτων. Εστιάζει στην αποτροπή παραποίησης δεδομένων και στην ενίσχυση της εμπιστοσύνης, αξιοποιώντας καταναεμένη επαλήθευση, μηχανισμούς συναίνεσης (Proof-of-Work) και έξυπνα συμβόλαια. Το πλαίσιο εφαρμόζεται σε σενάρια αγροτικής παρακολούθησης, στοχεύοντας στη βελτίωση της κυβερνοασφάλειας και της λειτουργικής αξιοπιστίας.

Πλεονεκτήματα:

- Η εργασία παρουσιάζει πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική με διαχωρισμό σε επίπεδα αντίληψης, δικτύου και εφαρμογών, ενσωματώνοντας intrusion detection και blockchain για την ασφάλεια των αισθητήρων.
- Εφαρμόζει lightweight πρωτόκολλα κατάλληλα για περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους, διατηρώντας χαμηλή καθυστέρηση και κατανάλωση ενέργειας.
- Η τεχνική αξιολόγηση περιλαμβάνει πειραματικές μετρήσεις latency, energy consumption και throughput.

- Παρουσιάζεται proof-of-concept υλοποίηση με παραδείγματα χρήσης σε συστήματα άρδευσης και παρακολούθησης εδάφους, ενισχύοντας την ωριμότητα της λύσης.

Περιορισμοί:

- Δεν παρέχεται σύγκριση με εναλλακτικές προσεγγίσεις για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας.
- Δεν αναλύονται ζητήματα συμμόρφωσης με κανονιστικά ή νομικά πλαίσια, ούτε διαλειτουργικότητας με υπάρχουσες γεωργικές πλατφόρμες.

Η μελέτη αυτή ενισχύει τον διάλογο γύρω από την ασφάλεια των συστημάτων έξυπνης γεωργίας, προσφέροντας μία πρακτική και τεχνικά εφαρμόσιμη προσέγγιση για την προστασία των δεδομένων και την αξιοπιστία των IoT εφαρμογών σε πραγματικό περιβάλλον

5.3.3.2 Ιχνηλασιμότητα και Αυθεντικότητα

Η ιχνηλασιμότητα και η αυθεντικότητα τροφίμων αποτελούν ζωτικής σημασίας παραμέτρους στον αγροδιατροφικό τομέα. Ο συνδυασμός του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) με την τεχνολογία Blockchain προσφέρει τη δυνατότητα αδιάλειπτης παρακολούθησης και επαλήθευσης των δεδομένων σε κάθε στάδιο της αλυσίδας εφοδιασμού. Η χρήση αισθητήρων επιτρέπει τη συνεχή συλλογή κρίσιμων περιβαλλοντικών παραμέτρων (όπως θερμοκρασία, υγρασία, κ.ά.), ενώ η αποθήκευση των δεδομένων σε blockchain εγγυάται την ακεραιότητα, τη διαφάνεια και την απουσία παραποίησης.

Ακολουθούν δύο αντιπροσωπευτικές επιστημονικές προσεγγίσεις που αναδεικνύουν τη συμβολή των τεχνολογιών αυτών στην ιχνηλασιμότητα τροφίμων.

Ferrández-Pastor, F. J., Mora-Pascual, J., & Díaz-Lajara, D. (2022). Agricultural traceability model based on IoT and Blockchain: Application in industrial hemp production. Journal of Industrial Information Integration, 29, 100381

Η μελέτη [34] προτείνει ένα μοντέλο ιχνηλασιμότητας βασισμένο σε IoT και Blockchain για την παραγωγή βιομηχανικής κάνναβης. Η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει αισθητήρες που συλλέγουν δεδομένα από το χωράφι και το στάδιο μεταποίησης, ενώ οι πληροφορίες αποθηκεύονται σε κατανεμημένο καθολικό με χρήση έξυπνων συμβολαίων για την επαλήθευση των σταδίων παραγωγής.

Πλεονεκτήματα:

- Παρέχεται ολοκληρωμένο λειτουργικό διάγραμμα της αρχιτεκτονικής.
- Εφαρμόζεται σε συγκεκριμένη γεωργική καλλιέργεια με ιδιαίτερες απαιτήσεις (κάνναβη).
- Χρησιμοποιείται Blockchain για πιστοποίηση συμβάντων, με δυνατότητα ελέγχου από τρίτους.

Περιορισμοί:

- Δεν περιλαμβάνονται μετρήσεις απόδοσης ή κατανάλωσης πόρων.
- Η εφαρμογή παραμένει σε πιλοτικό στάδιο χωρίς ανάλυση για μεγάλης κλίμακας παραγωγή.

- Δεν αναλύεται το κόστος υλοποίησης ή η συμμόρφωση με ρυθμιστικά πλαίσια.

Vitaskos, V., Demestichas, K., Karetsos, S., & Costopoulou, C. (2024). Blockchain and Internet of Things Technologies for Food Traceability in Olive Oil Supply Chains. *Sensors*, 24(24), 8189

Η εργασία [43] επικεντρώνεται στην ιχνηλασιμότητα ελαιολάδου μέσω σύζευξης IoT και Blockchain. Οι ερευνητές σχεδίασαν μία πλατφόρμα που καταγράφει σε πραγματικό χρόνο κρίσιμες παραμέτρους παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς, και αποθηκεύει τις πληροφορίες σε Blockchain ώστε να εξασφαλίζεται η αυθεντικότητα και η διαφάνεια.

Πλεονεκτήματα:

- Εφαρμογή σε προϊόν υψηλής προστιθέμενης αξίας με αυξημένες απαιτήσεις ποιότητας.
- Υιοθέτηση έξυπνων συμβολαίων για τη διαχείριση παραμέτρων του κύκλου ζωής του προϊόντος.
- Ανάλυση τεχνολογικών επιλογών και αρχιτεκτονικής με στόχο την πραγματική εφαρμογή.

Περιορισμοί:

- Δεν περιλαμβάνεται πειραματική αξιολόγηση της πλατφόρμας (π.χ. χρόνοι απόκρισης).
- Η χρήση Blockchain δεν συνοδεύεται από μελέτη κόστους ή ενεργειακού αποτυπώματος.
- Δεν συζητείται η ενσωμάτωση σε υπάρχουσες πλατφόρμες εφοδιαστικής ή ERP συστήματα.

Η σύγκριση των παραπάνω εργασιών αναδεικνύει τη δυνατότητα προσαρμογής κοινών τεχνολογικών λύσεων (IoT + Blockchain) σε διαφορετικούς γεωργικούς τομείς, με κοινό στόχο την αδιάλειπτη παρακολούθηση και πιστοποίηση της ποιότητας των τροφίμων.

5.3.4 Υγεία & Ασφάλεια

Η Ηλεκτρονική Υγεία (eHealth) συνιστά έναν στρατηγικής σημασίας τομέα για την εφαρμογή τεχνολογιών Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) και Blockchain, καθώς απαντά στην ανάγκη για αποτελεσματική, ασφαλή και διαφανή διαχείριση ιατρικών δεδομένων. Η υιοθέτηση των τεχνολογιών αυτών στοχεύει στη βελτιστοποίηση της παροχής υγειονομικών υπηρεσιών, τη μείωση της καθυστέρησης στη διάγνωση και παρακολούθηση ασθενών και την ενίσχυση της ιδιωτικότητας και του ελέγχου από τον ασθενή.

Το IoT προσφέρει τη δυνατότητα συλλογής δεδομένων υγείας σε πραγματικό χρόνο από συσκευές όπως wearables, αισθητήρες και ιατρικά όργανα, ενώ το Blockchain διασφαλίζει ότι τα δεδομένα αυτά αποθηκεύονται με ασφάλεια, είναι αναλλοίωτα και μπορούν να ελεγχθούν αποκεντρωμένα, χωρίς την εξάρτηση από κεντρικούς παρόχους. Ο συνδυασμός των δύο τεχνολογιών αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο πλαίσιο για τη διαχείριση συγκατάθεσης, την προστασία ιδιωτικότητας, την ακεραιότητα πληροφοριών και την επιβεβαίωση των ιατρικών πράξεων.

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει δύο θεματικούς άξονες:

- Την *Ηλεκτρονική Υγεία (eHealth)* με έμφαση στη διαχείριση προσωπικών ιατρικών δεδομένων και έλεγχο πρόσβασης μέσω έξυπνων συμβολαίων.
- Το *Ιατρικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoMT)*, το οποίο ενσωματώνει συσκευές σε δίκτυα χαμηλής καθυστέρησης και δίνει έμφαση στη λειτουργική ασφάλεια και αποδοτικότητα σε

περιβάλλοντα περιορισμένων πόρων.

Οι τέσσερις επιστημονικές εργασίες που αναλύονται παρακάτω (δύο ανά θεματικό άξονα) περιλαμβάνουν αρχιτεκτονικές καινοτομίες, παραδείγματα εφαρμογής, καθώς και πιλοτικά σενάρια, αποκαλύπτοντας τις προκλήσεις και τις δυνατότητες ενσωμάτωσης αυτών των τεχνολογιών στον τομέα της υγείας.

5.3.4.1 Ηλεκτρονική Υγεία

Ο τομέας της Ηλεκτρονικής Υγείας (eHealth) αξιοποιεί τεχνολογίες Πληροφορικής και Επικοινωνιών για την παροχή ιατρικών υπηρεσιών εξ αποστάσεως, τη διαχείριση ιατρικών δεδομένων και την υποστήριξη διαγνωστικών διαδικασιών. Η σύζευξη των τεχνολογιών IoT και Blockchain στον χώρο της Ηλεκτρονικής Υγείας στοχεύει στην ενίσχυση της εμπιστευτικότητας, της ιχνηλασιμότητας και της διαφάνειας των ιατρικών δεδομένων, επιτρέποντας την ασφαλή ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ ασθενών, γιατρών και παρόχων υπηρεσιών. Ακολουθούν δύο επιλεγμένες επιστημονικές εργασίες που παρουσιάζουν διαφορετικές αρχιτεκτονικές προσεγγίσεις για την εφαρμογή των τεχνολογιών αυτών στον χώρο της υγείας.

Al-Nbhan, W. A. N. A., Zahary, A. T., & Al-Shargabi, A. A. (2023). Blockchain-IoT healthcare applications and trends: A review. ResearchGate.

Η εργασία [38] προσφέρει μία αναλυτική επισκόπηση των σύγχρονων τάσεων και εφαρμογών του Blockchain σε συνδυασμό με IoT στο πεδίο του eHealth. Εστιάζει σε κρίσιμους τομείς, όπως η τηλεϊατρική, η απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών και η ασφαλής διαχείριση ιατρικών δεδομένων. Παρουσιάζονται επιλεγμένα τεχνικά χαρακτηριστικά και στρατηγικές για τη διασφάλιση ασφάλειας και ιδιωτικότητας, ενώ εξετάζονται οι προκλήσεις και μελλοντικές κατευθύνσεις στο πεδίο.

Πλεονεκτήματα:

- Παρουσιάζει πολυάριθμες περιπτώσεις χρήσης σε πραγματικά σενάρια eHealth (τηλεϊατρική, αποθήκευση, παρακολούθηση).
- Αναλύει τεχνικές για την ενίσχυση της ασφάλειας, όπως κατανεμημένη πιστοποίηση, smart contracts και blockchain consensus.
- Δίνει κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, εντοπίζοντας κρίσιμες προκλήσεις και τεχνολογικά κενά.
- Συνοψίζει και συγκρίνει υπάρχουσες λύσεις και μελέτες σε συγκριτικούς πίνακες.

Περιορισμοί:

- Δεν περιλαμβάνεται υλοποίηση ή λειτουργικό πρωτότυπο – πρόκειται για βιβλιογραφική ανασκόπηση.
- Απουσιάζουν μετρήσεις απόδοσης ή ενεργειακής κατανάλωσης των μελετώμενων αρχιτεκτονικών.
- Δεν γίνεται αναλυτική αναφορά σε πρότυπα διαλειτουργικότητας, όπως HL7 ή FHIR.
- Δεν αναλύεται η οικονομική βιωσιμότητα των τεχνολογικών λύσεων που παρουσιάζονται.

Pawar, P., Parolia, N., Shinde, S., Edoh, T. O., & Singh, M. (2022). eHealthChain—a blockchain-based personal health information management system. *Annals of Telecommunications*, 77(1), 33-45

Η μελέτη [39] παρουσιάζει το eHealthChain, ένα σύστημα διαχείρισης προσωπικών ιατρικών δεδομένων βασισμένο σε Blockchain. Η αρχιτεκτονική συνδυάζει IoT ιατρικές συσκευές με αποκεντρωμένη καταγραφή και μηχανισμούς συγκατάθεσης (consent management), επιτρέποντας στον χρήστη να ελέγχει την πρόσβαση στα δεδομένα του μέσω έξυπνων συμβολαίων.

Πλεονεκτήματα:

- Δίνει έμφαση στον έλεγχο από τον ασθενή μέσω μηχανισμών συγκατάθεσης.
- Προβλέπει την ενσωμάτωση πολλών τύπων IoT συσκευών και διασυνδέσεων με συστήματα Ηλεκτρονικού Ιατρικού Φακέλου (Electronic Medical Records – EMR).
- Προτείνεται συγκεκριμένο σενάριο χρήσης με περιγραφή τεχνικών επιπέδων.

Περιορισμοί:

- Δεν παρουσιάζεται πειραματική υλοποίηση ή επιδόσεις σε πραγματικό περιβάλλον.
- Δεν αναλύεται η συμμόρφωση με κανονιστικά πλαίσια όπως GDPR ή HIPAA.
- Απουσιάζει ανάλυση για θέματα διαθεσιμότητας, συντηρησιμότητας και επεκτασιμότητας της πλατφόρμας.

Οι παραπάνω εργασίες επιβεβαιώνουν τη σημασία της αποκεντρωμένης διαχείρισης ιατρικών δεδομένων μέσω IoT και Blockchain, προσφέροντας τεχνολογικές λύσεις που συνδυάζουν ασφάλεια, έλεγχο πρόσβασης και δυνατότητα επεκτασιμότητας για εφαρμογή σε εθνικά ή παγκόσμια συστήματα υγείας.

5.3.4.2 Ιατρικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων

Το Ιατρικό Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoMT) περιλαμβάνει την εφαρμογή IoT συσκευών ειδικά στον ιατρικό τομέα για την παρακολούθηση, διάγνωση και θεραπεία ασθενών σε πραγματικό χρόνο. Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας Blockchain στο IoMT στοχεύει στην ενίσχυση της ασφάλειας των δεδομένων υγείας, στην πιστοποίηση της προέλευσης των ιατρικών πράξεων και στη διατήρηση της ακεραιότητας των μετρήσεων.

Ακολουθούν δύο πρόσφατες εργασίες που παρουσιάζουν καινοτόμες προσεγγίσεις για την ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών:

Pelekoudas-Oikonomou, F., Zachos, G., Papaioannou, M., De Ree, M., Ribeiro, J. C., Mantas, G., & Rodriguez, J. (2022). Blockchain-based security mechanisms for IoMT Edge networks in IoMT-based healthcare monitoring systems. *Sensors*, 22(7), 2449

Η εργασία [42] προτείνει μηχανισμούς ασφάλειας βασισμένους σε Blockchain για δίκτυα Edge στο IoMT. Οι ερευνητές ενσωματώνουν την τεχνολογία σε ένα πολυεπίπεδο σύστημα παρακολούθησης υγείας, στο

οποίο τα δεδομένα των αισθητήρων συλλέγονται και υποβάλλονται σε επεξεργασία στην περιφέρεια του δικτύου (edge), μειώνοντας την καθυστέρηση και ενισχύοντας την ιδιωτικότητα.

Πλεονεκτήματα:

- Περιγράφεται πλήρης αρχιτεκτονική edge-IoMT με ενσωμάτωση Blockchain για ασφάλεια.
- Το σύστημα εφαρμόζεται σε σενάρια πραγματικού χρόνου για απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών.
- Υποστηρίζεται από τεχνικά διαγράμματα και λειτουργικά σενάρια.

Περιορισμοί:

- Δεν συνοδεύεται από αναλυτική πειραματική αξιολόγηση της απόδοσης.
- Δεν αναλύεται ο βαθμός ενεργειακής κατανάλωσης ή το κόστος ενσωμάτωσης σε υπάρχουσες υποδομές.
- Η λειτουργία του Blockchain περιορίζεται κυρίως στο επίπεδο πιστοποίησης χωρίς επεξεργασία μεγάλης κλίμακας δεδομένων.

Awotunde, J. B., Misra, S., & Pham, Q. T. (2022, November). A secure framework for internet of medical things security based system using lightweight cryptography enabled blockchain. In International Conference on Future Data and Security Engineering (pp. 258-272). Singapore: Springer Nature Singapore

Η μελέτη [45] παρουσιάζει ένα ασφαλές πλαίσιο για συστήματα IoMT βασισμένο σε Blockchain και τεχνικές ελαφριάς κρυπτογράφησης (lightweight cryptography). Το προτεινόμενο σύστημα επικεντρώνεται στην προστασία της επικοινωνίας μεταξύ ιατρικών συσκευών, χρησιμοποιώντας έξυπνα συμβόλαια και ελαφριά μοντέλα ασφάλειας (lightweight security models) για περιβάλλοντα περιορισμένων πόρων.

Πλεονεκτήματα:

- Υιοθετεί ελαφριές τεχνικές κρυπτογράφησης, κατάλληλες για IoT ιατρικές συσκευές.
- Περιλαμβάνει αξιολόγηση ασφάλειας έναντι επιθέσεων (e.g., replay, spoofing).
- Προτείνει εφαρμογή σε δίκτυα πραγματικού χρόνου με χαμηλή καθυστέρηση.

Περιορισμοί:

- Δεν υλοποιείται ολοκληρωμένη πλατφόρμα· περιορίζεται στην παρουσίαση θεωρητικού πλαισίου.
- Η πειραματική αξιολόγηση είναι περιορισμένη σε προσομοιώσεις, όχι σε πραγματικά συστήματα.
- Δεν εξετάζεται η διαλειτουργικότητα με υπάρχοντα νοσοκομειακά/ιατρικά πληροφοριακά συστήματα.

Οι δύο μελέτες υπογραμμίζουν τη σημασία της ασφαλούς επεξεργασίας και διαχείρισης ιατρικών δεδομένων σε περιβάλλοντα IoMT, και τη δυνατότητα αξιοποίησης τεχνολογιών Blockchain τόσο στο επίπεδο ελέγχου πρόσβασης όσο και στη διασφάλιση ακεραιότητας σε δίκτυα περιορισμένων πόρων.

5.4 Σύγκριση Προσεγγίσεων

Η ενότητα αυτή στοχεύει στην αντικειμενική, συστηματική και τεκμηριωμένη σύγκριση των 16 επιστημονικών εργασιών που αναλύθηκαν στην Ενότητα 5.3. Σκοπός είναι να αναδειχθούν τα ισχυρά και αδύναμα σημεία κάθε προσέγγισης που συνδυάζει τις τεχνολογίες Blockchain και IoT, με έμφαση στις διαστάσεις ασφάλειας, αποδοτικότητας, υλοποιησιμότητας και καινοτομίας.

Η σύγκριση βασίζεται σε επτά σαφώς καθορισμένα κριτήρια (βλ. Ενότητα 5.4.1), τα οποία προσδιορίστηκαν βάσει σχετικής βιβλιογραφίας και των απαιτήσεων αξιολόγησης λύσεων που αξιοποιούν τεχνολογίες αιχμής. Για λόγους αναλυτικής ακρίβειας, κάθε εργασία αποτιμάται με αριθμητική βαθμολόγηση ανά κριτήριο, από 0 έως 3, όπου η κάθε τιμή αντιστοιχεί σε ποιοτικό χαρακτηρισμό (*Μηδενική, Χαμηλή, Μέτρια & Υψηλή* απόδοση).

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ανά κατηγορία εφαρμογής (Smart Homes, Smart Cities, Industrial IoT κ.λπ.), ώστε να είναι δυνατή η ενδοκατηγορική και διακατηγορική σύγκριση. Κάθε πίνακας συνοδεύεται από σύντομη ερμηνευτική ανάλυση, η οποία οδηγεί σε συμπεράσματα σχετικά με την τεχνική αρτιότητα και την ωριμότητα των λύσεων που εξετάζονται.

Με τον τρόπο αυτό, η παρούσα ενότητα συμβάλλει στην κριτική αποτίμηση του ερευνητικού πεδίου, στηρίζοντας με τεκμήρια τα συμπεράσματα του Κεφαλαίου 5.4.3.

5.4.1 Κριτήρια Σύγκρισης

Για τη συγκριτική αποτίμηση των 16 επιστημονικών εργασιών που εξετάζουν λύσεις σύζευξης των τεχνολογιών Blockchain και IoT, καθορίστηκαν επτά θεμελιώδη κριτήρια αξιολόγησης. Κάθε κριτήριο επιλέχθηκε με βάση τη συχνότητα εμφάνισής του στη σχετική επιστημονική βιβλιογραφία και τη σημασία του για την αξιοπιστία, την τεχνική πληρότητα και την πρακτική υλοποιησιμότητα των προτεινόμενων αρχιτεκτονικών λύσεων.

Για κάθε κριτήριο παρέχεται:

- Ο ορισμός και η σημασιολογική ερμηνεία του στο πλαίσιο του Blockchain-IoT.
- Η μέθοδος αποτίμησης με σαφείς αριθμητικές τιμές από 0 έως 3, ώστε να διευκολύνεται η αντικειμενική σύγκριση.

Ο πίνακας που ακολουθεί (Πίνακας 4) καλύπτει κυρίως τον ορισμό και τη σημασιολογική ερμηνεία του κάθε κριτηρίου. Ενώ ο Πίνακας 5 καλύπτει εν μέρει την μέθοδο αποτίμησης, παρέχοντας συγκεκριμένες ερωτήσεις ανά κριτήριο, η απάντηση των οποίων οδηγεί στην παραγωγή κατάλληλης τιμής αξιολόγησης για την κάθε προσέγγιση από τις 16 που μελετήθηκε.

Πίνακας 4: Πίνακας κριτηρίων αξιολόγησης

Κριτήριο	Ορισμός & Σημασία	Αποτίμηση (0–3)
<i>Ασφάλεια (Security)</i>	Η ικανότητα της προσέγγισης να διασφαλίζει ακεραιότητα, αυθεντικότητα, εμπιστευτικότητα και μη αποποίηση των δεδομένων μέσω μηχανισμών, όπως το Blockchain, κρυπτογράφηση & έξυπνα συμβόλαια.	0 = Μηδενική 1 = Χαμηλή 2 = Μέτρια 3 = Υψηλή
<i>Ιδιωτικότητα (Privacy)</i>	Η προστασία των προσωπικών δεδομένων των χρηστών και των συσκευών, μέσω τεχνικών όπως ανωνυμοποίηση, ψευδωνυμοποίηση, έλεγχος πρόσβασης και περιορισμός αποθήκευσης προσωπικών στοιχείων.	0 = Μηδενική 1 = Χαμηλή 2 = Μέτρια 3 = Υψηλή
<i>Διαλειτουργικότητα (Interoperability)</i>	Η δυνατότητα του συστήματος της εκάστοτε προσέγγισης να συνεργάζεται με διαφορετικά IoT πρωτόκολλα, πλατφόρμες και υποδομές, καθώς και με άλλες blockchain τεχνολογίες.	0 = Μηδενική 1 = Χαμηλή 2 = Μέτρια 3 = Υψηλή
<i>Κλιμακωσιμότητα (Scalability)</i>	Η ικανότητα της λύσης/προσέγγισης να διατηρεί την αποδοτικότητα και σταθερότητά της καθώς αυξάνεται ο αριθμός κόμβων, δεδομένων ή χρηστών.	0 = Μηδενική 1 = Χαμηλή 2 = Μέτρια 3 = Υψηλή
<i>Αποδοτικότητα (Efficiency)</i>	Η επίδοση του συστήματος της προσέγγισης ως προς την κατανάλωση ενέργειας, καθυστέρηση, χρήση δικτύου και επεξεργαστικών πόρων.	0 = Μηδενική 1 = Χαμηλή 2 = Μέτρια 3 = Υψηλή
<i>Ωριμότητα Εφαρμογής (Deployment Maturity)</i>	Το επίπεδο υλοποίησης της λύσης/προσέγγισης (αν είναι θεωρητικό μοντέλο, proof-of-concept, ή πλήρως ανεπτυγμένο σύστημα σε πραγματικό περιβάλλον).	0 = Θεωρητικό Μοντέλο 1 = Χαμηλή / Ημι-Υλοποιημένη Αρχιτεκτονική 2 = Μέτρια / Πρωτότυπο (Lab) 3 = Υψηλή / Σύστημα ανεπτυγμένο σε πραγματικό περιβάλλον
<i>Καινοτομία (Innovation)</i>	Η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών ή συνδυαστικών προσεγγίσεων, όπως NFTs, federated learning,	0 = Μηδενική 1 = Χαμηλή

	μηχανισμοί αυτοματισμού, υβριδικά συστήματα ή νέα πρότυπα.	2 = Μέτρια 3 = Υψηλή
--	--	-------------------------

Συμπληρωματικά, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αντικειμενικότητα και η επαναληψιμότητα της βαθμολόγησης/αξιολόγησης, κάθε κριτήριο συνοδεύεται από τέσσερα συγκεκριμένα ερωτήματα αξιολόγησης.

Η βαθμολογία (0–4) ανά εργασία/προσέγγιση για το εκάστοτε κριτήριο αποδίδεται με βάση τον αριθμό ερωτημάτων που καλύπτονται ως εξής:

- Κάλυψη 0/4: Βαθμός 0
- Κάλυψη 1/4: Βαθμός 1
- Κάλυψη 2–3/4: Βαθμός 2
- Κάλυψη 4/4: Βαθμός 3

Παρακάτω αποτυπώνονται τα ερωτήματα αξιολόγησης για κάθε κριτήριο με την μορφή ενός πίνακα.

Πίνακας 5: Ερωτήματα αξιολόγησης προσεγγίσεων

Κριτήριο	Ερώτηση 1	Ερώτηση 2	Ερώτηση 3	Ερώτηση 4
Ασφάλεια (Security)	Ενσωματώνονται κρυπτογραφικές τεχνικές για προστασία δεδομένων ή επικοινωνίας; (π.χ. end-to-end encryption, υπογραφές, TLS)	Παρέχεται έλεγχος ταυτότητας ή πρόσβασης με σύγχρονες μεθόδους; (π.χ. decentralized ID)	Περιγράφονται μηχανισμοί εντοπισμού/αντιμετώπισης επιθέσεων ή ακεραιότητας; (π.χ. IDS, anomaly detection, Merkle Trees)	Υπάρχει απομόνωση, ασφαλής ζώνη ή trusted hardware; (π.χ. TEE, TPM, enclave-based ασφάλεια)
Ιδιωτικότητα (Privacy)	Υιοθετούνται τεχνικές ανωνυμοποίησης ή ψευδωνυμοποίησης προσωπικών δεδομένων;	Περιγράφεται δυναμικός έλεγχος πρόσβασης με βάση ρόλους ή ιδιότητες;	Παρέχεται επιλεκτική αποκάλυψη ή ιδιωτική επεξεργασία δεδομένων; (π.χ. ZKPs, FL, secure MPC)	Υπάρχει δυνατότητα ελέγχου ιδιωτικότητας από τον ίδιο τον χρήστη; (user-centric privacy management)
Διαλειτουργικότητα (Interoperability)	Υποστηρίζονται διεθνή πρότυπα επικοινωνίας ή πρωτόκολλα; (π.χ. MQTT, OPC-UA, HL7)	Παρέχονται APIs ή middleware για ενσωμάτωση σε τρίτα συστήματα;	Υπάρχει δυνατότητα συνεργασίας με ετερογενείς ή παλαιότερες υποδομές (legacy systems);	Γίνεται χρήση πλατφόρμας ή εργαλείου που διευκολύνει τη διαλειτουργικότητα;
Κλιμακωσιμότητα (Scalability)	Αναφέρεται η δυνατότητα αύξησης αριθμού κόμβων ή συσκευών;	Υποστηρίζεται διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων; (π.χ. batching, compression, sharding)	Υπάρχει πρόβλεψη για ανάπτυξη σε πολλαπλές τοποθεσίες ή δίκτυα;	Παρουσιάζεται μετρημένη ή τεκμηριωμένη αξιολόγηση της κλιμακωσιμότητας; (π.χ. latency, throughput benchmarks)
Αποδοτικότητα (Efficiency)	Περιγράφεται μέτρηση latency, throughput ή κατανάλωσης ενέργειας; (π.χ. ms, Mbps, Watt)	Χρησιμοποιούνται τεχνικές edge/fog computing;	Χρησιμοποιούνται, εκτός από edge/fog computing, και επιπλέον τεχνικές βελτιστοποίησης αποθήκευσης/υπολογισμού; (π.χ. caching, lightweight consensus)	Παρουσιάζονται, με βάση τις μετρήσεις, ενδείξεις μείωσης κόστους ή περιορισμού πόρων;

Ωριμότητα Εφαρμογής (Deployment Maturity)	Υπαρξη ημι-υλοποιημένης αρχιτεκτονικής;	Έγιναν δοκιμές σε προσομοιωμένο ή εργαστηριακό περιβάλλον;	Η λύση εφαρμόστηκε ή προσαρμόστηκε σε πραγματικό επιχειρησιακό/βιομηχα νικό πλαίσιο;	Υπάρχει διαθέσιμο πλήρες πρωτότυπο ή open-source repository;
Καινοτομία (Innovation)	Υιοθετείται ριζικά διαφορετική αρχιτεκτονική ή τεχνολογία από προηγούμενες λύσεις;	Επιλύεται υπαρκτό πρόβλημα μέσω νέας μεθόδου/προσέγγισης; (π.χ. νέα τεχνική για authentication ή consensus)	Συνδυάζονται τεχνολογίες για ενίσχυση απόδοσης ή ασφάλειας; (π.χ. Blockchain + AI)	Εισάγεται νέο μοντέλο λειτουργίας ή διαλειτουργικότητας; (π.χ. data marketplace, tokenization)

5.4.2 Αποτελέσματα Σύγκρισης

Η ενότητα αυτή παρουσιάζει τη συγκριτική αποτίμηση των επιλεγμένων επιστημονικών εργασιών με βάση τις τέσσερις κατηγορίες εφαρμογής της σύζευξης Blockchain και IoT. Για κάθε κατηγορία, επιλέχθηκαν τέσσερις αντιπροσωπευτικές μελέτες που συγκρίνονται αρχικά βάσει πίνακα αποτίμησης και έπειτα με κριτικό σχολιασμό. Η σύγκριση στοχεύει όχι μόνο στην ανάδειξη της βέλτιστης προσέγγισης ανά τομέα, αλλά και στην επισήμανση των αδυναμιών, οι οποίες εντοπίζονται σε επίπεδο σχεδίασης, υλοποίησης ή αξιολόγησης και σχετίζονται με κακή απόδοση στα σχετικά κριτήρια που έχουν επιλεγεί.

➤ Κατηγορία: Έξυπνα Περιβάλλοντα

Πίνακας 6: Πίνακας αξιολόγησης των αποτελεσμάτων στα Έξυπνα Περιβάλλοντα

Κριτήριο	[36]	[40]	[44]	[13]
Ασφάλεια (Security)	2	2	2	2
Ιδιωτικότητα (Privacy)	0	1	0	0
Διαλειτουργικότητα (Interoperability)	2	1	1	0
Κλιμακωσιμότητα (Scalability)	2	1	2	2

<i>Αποδοτικότητα (Efficiency)</i>	2	2	0	3
<i>Ωριμότητα Εφαρμογής (Deployment Maturity)</i>	2	2	0	2
<i>Καινοτομία (Innovation)</i>	2	1	3	2

Η εργασία του [36] περιγράφει μια υβριδική multi-chain blockchain αρχιτεκτονική, βασισμένη σε PoW και BFT. Στην Ασφάλεια καλύπτονται η (ερώτηση 1) με χρήση hashing και η (ερώτηση 2) με authentication μέσω consensus, χωρίς ωστόσο τεκμηριωμένους μηχανισμούς integrity (ερώτηση 3) ή trusted execution (ερώτηση 4), επομένως ο βαθμός είναι 2. Στην Ιδιωτικότητα δεν προτείνονται συγκεκριμένες τεχνικές, πέρα από τη βασική χρήση blockchain, η οποία δεν θεωρείται επαρκής, συνεπώς ο βαθμός είναι 0. Η Αποδοτικότητα αξιολογείται ως μέτρια, αφού καλύπτονται η (ερώτηση 1) με μετρήσεις latency, η (ερώτηση 2) με αξιοποίηση edge/fog computing και η (ερώτηση 3) με βελτιστοποίηση block size, αποδίδοντας βαθμό 2. Η Ωριμότητα Εφαρμογής είναι μέτρια, καθώς καλύπτονται η (ερώτηση 1) με ύπαρξη ημι-υλοποίησης, η (ερώτηση 2) με εργαστηριακές δοκιμές και η (ερώτηση 4) με prototype, δίνοντας βαθμό 2. Στην Καινοτομία καλύπτονται η (ερώτηση 1) με την υβριδική αρχιτεκτονική, η (ερώτηση 2) με νέα μέθοδο που συνδυάζει PoW και BFT και η (ερώτηση 3) με συνδυασμό τεχνολογιών (blockchain, consensus μηχανισμών PoW–BFT και edge/fog computing), αποδίδοντας βαθμό 2. Η Διαλειτουργικότητα καλύπτει τις (ερώτηση 1) και (ερώτηση 3), καθώς υπάρχει υποστήριξη διεθνών πρωτοκόλλων και συνεργασία με legacy υποδομές, οπότε αποδίδεται βαθμός 2. Στην Κλιμακωσιμότητα καλύπτονται η (ερώτηση 1) για δυνατότητα επέκτασης, η (ερώτηση 2) με υποστήριξη μεγάλου όγκου δεδομένων και η (ερώτηση 4) με benchmarks latency και throughput, επομένως ο βαθμός είναι 2.

Η εργασία του [13] εστιάζει στην ασφαλή επικοινωνία εικόνων στο IoT μέσω κρυπτογράφησης, υδατοσήμανσης και βελτιστοποιημένων αρχιτεκτονικών SoC. Στην Ασφάλεια καλύπτονται η (ερώτηση 1) με ισχυρή κρυπτογράφηση και η (ερώτηση 3) με μηχανισμούς προστασίας ακεραιότητας και ανθεκτικότητας σε επιθέσεις, ενώ απουσιάζουν σύγχρονα authentication σχήματα (ερώτηση 2) και trusted hardware (ερώτηση 4), αποδίδοντας βαθμό 2. Στην Ιδιωτικότητα δεν προτείνονται τεχνικές ανωνυμοποίησης, access control ή user-centric privacy, συνεπώς ο βαθμός είναι 0. Στη Διαλειτουργικότητα δεν αναφέρονται πρότυπα, APIs ή υποστήριξη legacy, επομένως ο βαθμός είναι 0. Στην Κλιμακωσιμότητα καλύπτονται η (ερώτηση 1) με πρόβλεψη για πολυάριθμες IoT συσκευές, η (ερώτηση 2) με διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων μέσω compression και η (ερώτηση 4) με μετρήσεις latency και throughput, χωρίς όμως multi-site ανάπτυξη (ερώτηση 3), αποδίδοντας βαθμό 2. Στην Αποδοτικότητα καλύπτονται όλες οι ερωτήσεις: παρουσιάζονται μετρήσεις latency/ενέργειας (ερώτηση 1), χρήση distributed/edge επεξεργασίας (ερώτηση 2), compression optimizations (ερώτηση 3) και ενδείξεις μείωσης κατανάλωσης/κόστους (ερώτηση 4), αποδίδοντας βαθμό 3. Η Ωριμότητα Εφαρμογής είναι μέτρια, με ημι-υλοποιημένη αρχιτεκτονική (ερώτηση 1), εργαστηριακές δοκιμές (ερώτηση 2) και prototype hardware (ερώτηση 4), χωρίς όμως βιομηχανική εφαρμογή, αποδίδοντας βαθμό 2. Τέλος, στην Καινοτομία καλύπτονται η (ερώτηση 1) με νέα αρχιτεκτονική (Secure BPG), η (ερώτηση 2) με νέα μέθοδο sensor-aware keys και η (ερώτηση 3) με συνδυασμό τεχνολογιών (IoT + encryption + watermarking), χωρίς όμως νέο επιχειρησιακό μοντέλο (ερώτηση 4), αποδίδοντας βαθμό 2.

Η εργασία του [40] προτείνει μια τριεπίπεδη αρχιτεκτονική για «έξυπνα σπίτια», όπου τα δεδομένα συλλέγονται από IoT συσκευές, διέρχονται από μία ενδιάμεση πύλη και καταλήγουν στο υπολογιστικό

νέφος. Η πύλη λειτουργεί ως κόμβος ασφάλειας, αξιοποιώντας blockchain για την αποτροπή παραποίησης δεδομένων. Στο κριτήριο της Ασφάλειας καλύπτονται η (ερώτηση 1) με χρήση hashing, η (ερώτηση 2) με authentication και access control μέσω της πύλης, καθώς και η (ερώτηση 3) με φίλτρα για αποτροπή επιθέσεων. Δεν ικανοποιείται η (ερώτηση 4) για trusted hardware, συνεπώς ο βαθμός είναι 2. Στην Ιδιωτικότητα καλύπτεται μόνο η (ερώτηση 3), με τοπική επεξεργασία δεδομένων ώστε να μην αποστέλλονται προσωπικές πληροφορίες στο cloud, οπότε αποδίδεται βαθμός 1. Η Διαλειτουργικότητα αξιολογείται χαμηλά: απαντάται μόνο η (ερώτηση 4) λόγω της προσφοράς σχετικής πύλης, συνεπώς ο βαθμός είναι 1. Η Κλιμακωσιμότητα αξιολογείται ως χαμηλή, αφού καλύπτεται μόνο η (ερώτηση 1) με γενική αναφορά σε δυνατότητα επέκτασης, χωρίς τεχνική τεκμηρίωση, με αποτέλεσμα ο βαθμός να είναι 1. Στην Αποδοτικότητα καλύπτονται η (ερώτηση 1) με μετρήσεις καθυστέρησης και η (ερώτηση 2) με χρήση offloading στην πύλη, αποδίδοντας βαθμό 2. Η Ωριμότητα Εφαρμογής είναι μέτρια, καθώς καλύπτονται η (ερώτηση 1) με μερική υλοποίηση, η (ερώτηση 2) με εργαστηριακές δοκιμές και η (ερώτηση 4) με διαθέσιμο prototype, επομένως ο βαθμός είναι 2. Στην Καινοτομία καλύπτεται μόνο η (ερώτηση 1), καθώς προτείνεται διαφοροποιημένη τριεπίπεδη αρχιτεκτονική, οπότε αποδίδεται βαθμός 1.

Η εργασία του [44] προτείνει την αρχιτεκτονική DSCOT για «έξυπνες πόλεις», αξιοποιώντας NFTs για την ταυτοποίηση IoT συσκευών. Στο κριτήριο της Ασφάλειας καλύπτονται η (ερώτηση 1) με χρήση κρυπτογράφησης μέσω blockchain και η (ερώτηση 2) με authentication βασισμένο σε NFTs, ενώ απουσιάζουν μηχανισμοί integrity (ερώτηση 3) και trusted hardware (ερώτηση 4), αποδίδοντας βαθμό 2. Στην Ιδιωτικότητα δεν καλύπτεται καμία από τις ερωτήσεις, καθώς δεν προτείνεται συγκεκριμένος μηχανισμός ιδιωτικότητας πέρα από τη γενική χρήση blockchain, οπότε ο βαθμός είναι 0. Η Διαλειτουργικότητα καλύπτει μόνο τη (ερώτηση 3), με αναφορά σε συνεργασία με ετερογενείς υποδομές, επομένως ο βαθμός είναι 1. Στην Κλιμακωσιμότητα καλύπτονται η (ερώτηση 1) για δυνατότητα επέκτασης σε περισσότερους κόμβους και η (ερώτηση 3) για υποστήριξη πολλαπλών δικτύων, αποδίδοντας βαθμό 2. Η Αποδοτικότητα δεν αξιολογείται, καθώς δεν παρουσιάζονται μετρήσεις ή βελτιστοποιήσεις, με αποτέλεσμα βαθμό 0. Η Ωριμότητα Εφαρμογής είναι μηδενική, αφού δεν παρουσιάζεται υλοποίηση, δοκιμές ή prototype, οπότε αποδίδεται βαθμός 0. Στην Καινοτομία καλύπτονται όλες οι ερωτήσεις, καθώς εισάγεται νέα τεχνολογία (NFTs) (ερώτηση 1), επιλύεται πρόβλημα ταυτοποίησης μέσω νέας μεθόδου (ερώτηση 2), συνδυάζονται NFTs με blockchain (ερώτηση 3) και εισάγεται νέο μοντέλο λειτουργίας για διαχείριση ταυτοποίησης συσκευών (ερώτηση 4). Επομένως ο βαθμός είναι 3.

Συνολικά, η εργασία του [36] αναδεικνύεται ως η πιο τεχνικά ώριμη και ισορροπημένη προσέγγιση, με μέτρια-υψηλή επίδοση σε αποδοτικότητα, κλιμακωσιμότητα, καινοτομία και διαλειτουργικότητα. Η εργασία του [13] συμβάλλει ουσιαστικά στην ασφάλεια εικόνων στο IoT, επιτυγχάνοντας υψηλή αποδοτικότητα και μέτρια τεχνική ωριμότητα, αν και υστερεί σε ιδιωτικότητα και διαλειτουργικότητα. Η εργασία του [40] προσφέρει καλό επίπεδο ασφάλειας και πρακτική υλοποίηση με λειτουργικό prototype, αλλά παρουσιάζει χαμηλή κλιμακωσιμότητα, ιδιωτικότητα, διαλειτουργικότητα και περιορισμένη καινοτομία. Τέλος, η εργασία του [44] διαφοροποιείται με έντονη καινοτομία μέσω NFTs, αλλά παραμένει θεωρητική χωρίς υλοποιητική ωριμότητα και με μηδενική αποδοτικότητα.

➤ **Κατηγορία: Βιομηχανία & Εφοδιαστική**

Πίνακας 7: Πίνακας αξιολόγησης των αποτελεσμάτων στη Βιομηχανία & Εφοδιαστική

Κριτήριο	[37]	[35]	[41]	[49]
<i>Ασφάλεια (Security)</i>	3	3	3	2
<i>Ιδιωτικότητα (Privacy)</i>	2	2	2	1
<i>Διαλειτουργικότητα (Interoperability)</i>	2	2	2	1
<i>Κλιμακωσιμότητα (Scalability)</i>	2	2	2	1
<i>Αποδοτικότητα (Efficiency)</i>	2	2	2	1
<i>Ωριμότητα Εφαρμογής (Deployment Maturity)</i>	2	2	2	1
<i>Καινοτομία (Innovation)</i>	3	2	1	2

Η εργασία [37] προτείνει ένα permissioned blockchain για την ασφάλεια και τη διαφάνεια της εφοδιαστικής αλυσίδας. Στο κριτήριο της ασφάλειας καλύπτονται όλες οι ερωτήσεις: (ερώτηση 1) με χρήση hashing, (ερώτηση 2) με authentication, (ερώτηση 3) με μηχανισμούς εντοπισμού κακόβουλων ενεργειών και (ερώτηση 4) με isolation μέσω channel separation. Ο βαθμός είναι 3. Στην ιδιωτικότητα καλύπτονται η (ερώτηση 2) με access policies και η (ερώτηση 3) με ιδιωτική επεξεργασία δεδομένων μέσω channel separation, αποδίδοντας βαθμό 2. Στη διαλειτουργικότητα απαντώνται η (ερώτηση 2) με APIs και η (ερώτηση 4) με πύλες (gateways) που διευκολύνουν την ενσωμάτωση, με αποτέλεσμα βαθμό 2. Στην κλιμακωσιμότητα απαντώνται η (ερώτηση 1) με δυνατότητα επέκτασης κόμβων και η (ερώτηση 4) με benchmarks, αποδίδοντας βαθμό 2. Στην αποδοτικότητα απαντώνται η (ερώτηση 2) με offloading και η (ερώτηση 3) με block filtering, με αποτέλεσμα βαθμό 2. Η ωριμότητα εφαρμογής απαντάται με (ερώτηση 1) proof-of-concept, (ερώτηση 2) εργαστηριακές δοκιμές και (ερώτηση 4) διαθέσιμο prototype, οπότε ο βαθμός είναι 2. Στην καινοτομία απαντώνται όλες οι ερωτήσεις: (ερώτηση 1) νέα permissioned αρχιτεκτονική, (ερώτηση 2) λύση σε πρόβλημα logistics, (ερώτηση 3) συνδυασμός με audit trails και (ερώτηση 4) νέο μοντέλο διαλειτουργίας, άρα βαθμός 3.

Η εργασία [35] εισάγει μια πλατφόρμα για το Βιομηχανικό IoT βασισμένη σε blockchain και Trusted Execution Environments (TEE). Στην ασφάλεια απαντώνται όλες οι ερωτήσεις: (ερώτηση 1) hardware-based encryption, (ερώτηση 2) authentication μέσω TEE, (ερώτηση 3) ανίχνευση επιθέσεων και (ερώτηση 4) isolation μέσω trusted hardware, αποδίδοντας βαθμό 3. Στην ιδιωτικότητα καλύπτονται δύο ερωτήσεις: (ερώτηση 2) δυναμικός έλεγχος πρόσβασης και (ερώτηση 4) privacy policies από τον χρήστη, με αποτέλεσμα βαθμό 2. Στη διαλειτουργικότητα απαντώνται η (ερώτηση 3) με ενσωμάτωση σε ετερογενή περιβάλλοντα και η (ερώτηση 4) με συμβατότητα σε trusted υποδομές, αποδίδοντας βαθμό 2. Στην κλιμακωσιμότητα απαντώνται η (ερώτηση 1) για επέκταση κόμβων και η (ερώτηση 3) για πολλαπλές συσκευές, μερικώς και η (ερώτηση 4) με μετρήσεις, αλλά όχι πλήρως – αποδίδεται βαθμός 2. Στην αποδοτικότητα απαντώνται η (ερώτηση 1) με latency/throughput, η (ερώτηση 2) με χρήση TEE και η (ερώτηση 3) με optimization, αλλά η (ερώτηση 4) δεν καλύπτεται, άρα βαθμός 2. Η ωριμότητα εφαρμογής απαντάται με (ερώτηση 1) υλοποίηση σε ARM, (ερώτηση 2) εργαστηριακές δοκιμές, όχι όμως πλήρως η (ερώτηση 4), άρα βαθμός 2. Στην καινοτομία απαντώνται η (ερώτηση 2) με αποδοτική μέθοδο, η (ερώτηση 3) με συνδυασμό blockchain και TEE, και η (ερώτηση 4) με νέο μοντέλο ΠoT, αλλά όχι πλήρως η (ερώτηση 1)· επομένως βαθμός 2.

Η εργασία [41] εισάγει την αρχιτεκτονική Schloss για ασφαλή ΠoT. Στην ασφάλεια απαντώνται όλες οι ερωτήσεις: (ερώτηση 1) encryption, (ερώτηση 2) authentication engine, (ερώτηση 3) tamper logs για ανίχνευση και (ερώτηση 4) trusted computation, άρα βαθμός 3. Στην ιδιωτικότητα απαντώνται η (ερώτηση 2) με role-based access και η (ερώτηση 3) με selective data separation, επομένως ο βαθμός είναι 2. Στη διαλειτουργικότητα καλύπτονται οι (ερώτηση 1), (ερώτηση 2) και (ερώτηση 3) με υποστήριξη προτύπων, middleware και legacy integration· η (ερώτηση 4) δεν καλύπτεται, οπότε ο βαθμός είναι 2. Στην κλιμακωσιμότητα απαντώνται η (ερώτηση 1) με scalability plan και η (ερώτηση 3) με multi-location support, με αποτέλεσμα βαθμό 2. Στην αποδοτικότητα καλύπτονται η (ερώτηση 1) με latency και η (ερώτηση 2) με offloading, επομένως βαθμός 2. Η ωριμότητα εφαρμογής καλύπτει (ερώτηση 1) υλοποίηση, (ερώτηση 2) δοκιμές και (ερώτηση 4) prototype, άρα βαθμός 2. Στην καινοτομία απαντάται μόνο η (ερώτηση 1) με την αρχιτεκτονική Schloss, συνεπώς βαθμός 1.

Η εργασία [49] παρουσιάζει μια μελέτη για την εφαρμογή του blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα. Στην ασφάλεια απαντώνται η (ερώτηση 1) με χρήση blockchain και η (ερώτηση 2) με access control, χωρίς όμως μηχανισμούς εντοπισμού επιθέσεων (ερώτηση 3) ή trusted hardware (ερώτηση 4), άρα βαθμός 2. Στην ιδιωτικότητα απαντάται μόνο η (ερώτηση 2) με έλεγχο πρόσβασης μέσω ρόλων, επομένως βαθμός 1. Στη διαλειτουργικότητα απαντάται μόνο η (ερώτηση 3) με αναφορά σε συνεργασία επιχειρησιακών υποδομών, άρα βαθμός 1. Στην κλιμακωσιμότητα υπάρχει μόνο γενική αναφορά σε πολλαπλούς κόμβους (ερώτηση 1), χωρίς τεχνικές μετρήσεις, οπότε βαθμός 1. Στην αποδοτικότητα δεν υπάρχουν σαφείς τεχνικές μετρήσεις· η αναφορά σε «ροή αγαθών» δεν τεκμηριώνει τεχνική βελτιστοποίησης, επομένως απαντάται μόνο η (ερώτηση 4) με ένδειξη κόστους και βαθμός 1. Η ωριμότητα εφαρμογής λαμβάνει βαθμό 1, καθώς περιγράφεται μόνο σε θεωρητικό επίπεδο χωρίς prototype, αλλά με κάποια ένδειξη ημι-υλοποίησης. Στην καινοτομία απαντώνται η (ερώτηση 2) με λύση σε πρακτικό πρόβλημα και η (ερώτηση 4) με νέο επιχειρησιακό μοντέλο, επομένως βαθμός 2.

Συνολικά, οι εργασίες [35] και [37] εμφανίζουν τα πιο ολοκληρωμένα και τεχνικά ώριμα αποτελέσματα: η [35] ξεχωρίζει για την ασφάλεια μέσω TEE, ενώ η [37] υπερέχει σε καινοτομία και ασφάλεια. Η εργασία [41] έρχεται τρίτη, παρουσιάζοντας υψηλή ασφάλεια και μέτρια απόδοση στα περισσότερα από τα

υπόλοιπα κριτήρια, ενώ η [49] ως τελευταία στην κατάταξη παρουσιάζει μέτρια απόδοση στην ασφάλεια και στην καινοτομία και χαμηλή απόδοση στα υπόλοιπα κριτήρια.

➤ Κατηγορία: Έξυπνη Γεωργία

Πίνακας 8 : Πίνακας αξιολόγησης των αποτελεσμάτων στην Έξυπνη Γεωργία

Κριτήριο	[34]	[43]	[33]	[57]
<i>Ασφάλεια (Security)</i>	2	3	3	2
<i>Ιδιωτικότητα (Privacy)</i>	1	2	1	2
<i>Διαλειτουργικότητα (Interoperability)</i>	2	1	1	2
<i>Κλιμακωσιμότητα (Scalability)</i>	1	1	1	1
<i>Αποδοτικότητα (Efficiency)</i>	2	2	1	2
<i>Ωριμότητα Εφαρμογής (Deployment Maturity)</i>	2	3	2	0
<i>Καινοτομία (Innovation)</i>	2	0	1	0

Η εργασία [34] προτείνει ένα σύστημα ιχνηλασιμότητας για γεωργικά προϊόντα. Στην ασφάλεια απαντώνται η (ερώτηση 1) με χρήση blockchain και η (ερώτηση 2) με access control, ενώ δεν ενσωματώνονται τεχνικές ανίχνευσης επιθέσεων ή trusted hardware, αποδίδοντας βαθμό 2. Στην ιδιωτικότητα απαντάται μόνο η (ερώτηση 2) με ελεγχόμενη πρόσβαση, άρα ο βαθμός είναι 1. Η διαλειτουργικότητα λαμβάνει 2, καθώς απαντώνται η (ερώτηση 2) με RESTful APIs και η (ερώτηση 3) με συνεργασία διαφορετικών αισθητήρων. Η αποδοτικότητα αξιολογείται με 2, αφού απαντάται η (ερώτηση 2) με χρήση edge devices και η (ερώτηση 4) με ένδειξη χαμηλού latency. Στην κλιμακωσιμότητα απαντάται μόνο η (ερώτηση 1) με δυνατότητα υποστήριξης νέων κόμβων, χωρίς benchmarks, επομένως βαθμός 1. Η ωριμότητα εφαρμογής είναι μέτρια, αφού υπάρχει prototype (ερώτηση 4) και δοκιμές σε αγρό (ερώτηση 2), άρα βαθμός 2. Στην καινοτομία απαντώνται δύο ερωτήσεις: η (ερώτηση 2) καθώς δίνεται λύση σε πραγματικό πρόβλημα traceability και η (ερώτηση 3) με συνδυασμό blockchain, edge processing και αισθητήρων· επομένως ο βαθμός είναι 2.

Η εργασία [43] επικεντρώνεται στην ιχνηλασιμότητα τροφίμων στην αλυσίδα ελαιολάδου. Στην ασφάλεια απαντώνται όλες οι ερωτήσεις: (ερώτηση 1) με smart contracts, (ερώτηση 2) με access policies, (ερώτηση 3) με μηχανισμούς integrity μέσω auditing και (ερώτηση 4) με εμπιστευτική επεξεργασία σε υποδομές, αποδίδοντας βαθμό 3. Στην ιδιωτικότητα απαντώνται η (ερώτηση 2) με role-based access και η (ερώτηση 4) με user-centric έλεγχο, δίνοντας βαθμό 2. Η διαλειτουργικότητα περιορίζεται σε μία απάντηση: (ερώτηση 2) με APIs, χωρίς πρότυπα ή συνεργασία legacy συστημάτων, επομένως ο βαθμός είναι 1. Η αποδοτικότητα απαντάται με δύο τρόπους: (ερώτηση 1) μέσω μετρήσεων latency και (ερώτηση 3) με batch processing για παρτίδες, δίνοντας βαθμό 2. Η κλιμακωσιμότητα καλύπτει μόνο την (ερώτηση 3) με υποστήριξη πολλαπλών αλυσίδων, αποδίδοντας βαθμό 1. Η ωριμότητα εφαρμογής είναι υψηλή: (ερώτηση 1 & 4) ύπαρξη prototype, (ερώτηση 2) εργαστηριακές δοκιμές και (ερώτηση 3) εφαρμογή σε επιχειρήσεις (άρα πραγματικά περιβάλλοντα), δίνοντας βαθμό 3. Στην καινοτομία δεν απαντάται καμία ερώτηση, καθώς εφαρμόζονται μόνο υπάρχουσες τεχνολογίες χωρίς νέα προσέγγιση, επομένως ο βαθμός είναι 0.

Η εργασία [33] προτείνει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο ασφάλειας για «έξυπνα αγροκτήματα» με χρήση blockchain και IoT. Στην ασφάλεια απαντώνται όλες οι ερωτήσεις: (ερώτηση 1) με χρήση κρυπτογράφησης, (ερώτηση 2) με μηχανισμούς ελέγχου πρόσβασης, (ερώτηση 3) με εντοπισμό επιθέσεων μέσω event detection και (ερώτηση 4) με αξιοποίηση Trusted Modules, αποδίδοντας βαθμό 3. Στην ιδιωτικότητα καλύπτεται μόνο η (ερώτηση 2), με έλεγχο πρόσβασης, χωρίς να παρέχονται τεχνικές ανωνυμοποίησης ή user-centric μηχανισμοί· επομένως η βαθμολογία είναι 1. Η αποδοτικότητα αξιολογείται με 1, αφού απαντάται μεν η (ερώτηση 2) με επεξεργασία στο edge, αλλά δεν υπάρχουν μετρήσεις (ερώτηση 1) ούτε άλλες βελτιστοποιήσεις. Η διαλειτουργικότητα είναι περιορισμένη, καθώς καλύπτεται μόνο η (ερώτηση 4) με βασική σύνδεση αισθητήρων και gateway, χωρίς APIs ή πρότυπα, αποδίδοντας βαθμό 1. Η κλιμακωσιμότητα αναφέρεται θεωρητικά με δυνατότητα προσθήκης κόμβων (ερώτηση 1), χωρίς benchmarks ή αξιολογήσεις, επομένως η βαθμολογία είναι 1. Η ωριμότητα εφαρμογής είναι μέτρια: υπάρχει prototype (ερώτηση 1 & 4) και δοκιμές σε προσομοιωμένο περιβάλλον (ερώτηση 2), με αποτέλεσμα βαθμό 2. Στην καινοτομία απαντάται μόνο η (ερώτηση 2), καθώς παρουσιάζεται νέα μέθοδος έξυπνης διαχείρισης μέσω smart contracts, επομένως ο βαθμός είναι 1.

Η εργασία [57] προτείνει μια θεωρητική προσέγγιση για τα agrologistics. Στην ασφάλεια απαντώνται η (ερώτηση 1) με χρήση blockchain/DLT και η (ερώτηση 2) με μηχανισμούς access control, χωρίς ωστόσο εντοπισμό επιθέσεων ή trusted hardware, αποδίδοντας βαθμό 2. Στην ιδιωτικότητα απαντώνται δύο ερωτήσεις: (ερώτηση 2) με role-based access και (ερώτηση 4) με user-centric έλεγχο, επομένως ο βαθμός είναι 2. Στην αποδοτικότητα καλύπτεται η (ερώτηση 2) με χρήση edge υποδομών και η (ερώτηση 4) με αναφορά σε μείωση latency, οπότε βαθμολογείται με 2. Στη διαλειτουργικότητα καλύπτονται δύο ερωτήσεις: (ερώτηση 1) με υποστήριξη MQTT και (ερώτηση 3) με συνεργασία υποδομών, επομένως ο βαθμός είναι 2. Η κλιμακωσιμότητα υποστηρίζεται θεωρητικά μόνο στην (ερώτηση 1), χωρίς πειραματικά δεδομένα, αποδίδοντας βαθμό 1. Η ωριμότητα εφαρμογής είναι μηδενική, καθώς πρόκειται για καθαρά θεωρητικό μοντέλο χωρίς prototype ή δοκιμές, οπότε ο βαθμός είναι 0. Στην καινοτομία δεν απαντάται καμία ερώτηση, αφού χρησιμοποιούνται γνωστές τεχνολογίες (IoT και blockchain) χωρίς νέα μεθοδολογία, άρα ο βαθμός είναι 0.

Συνολικά, η εργασία [43] ξεχωρίζει ως η καλύτερη προσέγγιση της κατηγορίας, χάρη στο συνδυασμό υψηλής ασφάλειας και ωριμότητας εφαρμογής. Η εργασία [34] αποτελεί μια ισορροπημένη τεχνική προσέγγιση με μέτρια απόδοση σε πολλά κριτήρια, ενώ η [33], αν και έχει υψηλή ασφάλεια και μέτρια ωριμότητα, έχει χαμηλή απόδοση στα υπόλοιπα κριτήρια. Η εργασία [57] έχει μέτρια απόδοση στην ασφάλεια, ιδιωτικότητα, διαλειτουργικότητα και αποδοτικότητα αλλά υστερεί σε ωριμότητα εφαρμογής και καινοτομία.

➤ **Κατηγορία: Υγεία & Ασφάλεια**

Πίνακας 9: Πίνακας αξιολόγησης των αποτελεσμάτων στην Υγεία & Ασφάλεια

Κριτήριο	[45]	[42]	[39]	[38]
<i>Ασφάλεια (Security)</i>	2	2	2	2
<i>Ιδιωτικότητα (Privacy)</i>	2	2	2	1
<i>Διαλειτουργικότητα (Interoperability)</i>	1	2	1	1
<i>Κλιμακωσιμότητα (Scalability)</i>	2	1	1	1
<i>Αποδοτικότητα (Efficiency)</i>	1	1	1	0
<i>Ωριμότητα Εφαρμογής (Deployment Maturity)</i>	2	2	2	0
<i>Καινοτομία (Innovation)</i>	1	1	1	0

Η εργασία [45] προτείνει πλαίσιο προστασίας eHealth δεδομένων με lightweight κρυπτογραφία και blockchain. Στην ασφάλεια απαντώνται η (ερώτηση 1) με κατακευματισμένο ledger (κρυπτογραφικές δυνατότητες) και η (ερώτηση 2) με access control, χωρίς μηχανισμούς integrity ή trusted hardware – βαθμός 2. Στην ιδιωτικότητα καλύπτονται οι (ερώτηση 2) access policies και (ερώτηση 3) έλεγχος αποκάλυψης – βαθμός 2. Η αποδοτικότητα καλύπτει μόνο την (ερώτηση 2), με χρήση edge-fog για μείωση latency – βαθμός 1. Στη διαλειτουργικότητα απαντάται μόνο η (ερώτηση 2) με APIs για διασύνδεση υπηρεσιών – βαθμός 1. Στην κλιμακωσιμότητα απαντώνται η (ερώτηση 1) με πολλούς κόμβους και η (ερώτηση 3) με ανάπτυξη σε παράλληλα περιβάλλοντα, δίνοντας βαθμό 2. Η ωριμότητα εφαρμογής καλύπτει την ύπαρξη prototype (ερώτηση 1 & 4) και την αξιολόγηση σε πειραματικό περιβάλλον (ερώτηση 2), με βαθμό 2. Στην καινοτομία απαντάται η (ερώτηση 2), καθώς προτείνεται νέα μέθοδος με συνδυασμό blockchain και edge computing, χωρίς όμως νέα αρχιτεκτονική – βαθμός 1.

Η εργασία [42] εξετάζει το σύστημα Schloss για ασφαλή αρχιτεκτονική IoMT edge δικτύων στην υγειονομική φροντίδα. Στην ασφάλεια καλύπτονται η (ερώτηση 1) με χρήση κρυπτογράφησης και blockchain για ακεραιότητα, η (ερώτηση 2) με role-based access, και η (ερώτηση 3) με καταγραφή μεταβολών για εντοπισμό αλλοιώσεων. Δεν αξιοποιείται dedicated trusted hardware, συνεπώς δεν απαντάται η (ερώτηση 4) και ο βαθμός είναι 2. Στην ιδιωτικότητα απαντώνται η (ερώτηση 2) με έλεγχο

ρόλων και η (ερώτηση 3) με περιορισμένη γνωστοποίηση δεδομένων, δίνοντας βαθμό 2. Η αποδοτικότητα βαθμολογείται με 1, καθώς αναφέρεται αποδοτική αρχιτεκτονική με ενδείξεις περιορισμού κόστους (ερώτηση 4), χωρίς όμως σαφείς τεχνικές βελτιστοποίησης. Η διαλειτουργικότητα καλύπτει την (ερώτηση 2) με middleware/APIs και την (ερώτηση 3) με συνεργασία με legacy υποδομές – βαθμός 2. Η κλιμακωσιμότητα περιορίζεται σε γενική αναφορά για πολλαπλά επίπεδα υγειονομικού δικτύου, χωρίς benchmarking, συνεπώς βαθμός 1. Η ωριμότητα εφαρμογής καλύπτει την ύπαρξη πρωτοτύπου (ερώτηση 4) και πιλοτική εφαρμογή σε περιορισμένα περιβάλλοντα (ερώτηση 2), με συνολικό βαθμό 2. Στην καινοτομία, απαντάται η (ερώτηση 2) καθώς εισάγεται νέα μέθοδος συμμόρφωσης με ρυθμιστικές απαιτήσεις – βαθμός 1.

Η εργασία [39] παρουσιάζει το eHealthChain, ένα σύστημα διαχείρισης προσωπικών δεδομένων υγείας. Στην ασφάλεια απαντώνται η (ερώτηση 1) με εφαρμογή RSA/AES, η (ερώτηση 2) με real-time authentication και access control, και η (ερώτηση 3) με κατανομημένη αποθήκευση και auditing. Δεν απαντάται η (ερώτηση 4) για trusted hardware, συνεπώς ο βαθμός είναι 2. Στην ιδιωτικότητα καλύπτονται η (ερώτηση 1) με ψευδωνυμοποίηση και η (ερώτηση 4) με granular user-centric έλεγχο, οπότε ο βαθμός είναι 2. Η αποδοτικότητα αξιολογείται με 1, καθώς γίνεται χρήση ελαφρών smart contracts (ερώτηση 3), χωρίς benchmarks ή edge optimizations. Η διαλειτουργικότητα περιορίζεται σε APIs (ερώτηση 2), χωρίς πρότυπα HL7/FHIR, οπότε ο βαθμός είναι 1. Η κλιμακωσιμότητα απαντάται με (ερώτηση 1) δυναμική διαχείριση κόμβων, που ουσιαστικά καλύπτει μόνο μία ερώτηση – βαθμός 1. Η ωριμότητα εφαρμογής είναι 2, αφού υπάρχει prototype και αξιολόγηση σε testbed. Στην καινοτομία απαντάται η (ερώτηση 2) καθώς προτείνεται νέα μέθοδος διαχείρισης PHR με blockchain, αλλά χωρίς ριζικά διαφορετική αρχιτεκτονική – βαθμός 1.

Η εργασία [38] έχει την εξής απόδοση. Στην ασφάλεια απαντώνται οι (ερώτηση 1) κρυπτογράφηση και (ερώτηση 2) access control, χωρίς τεκμηριωμένους μηχανισμούς integrity ή trusted hardware – βαθμός 2. Στην ιδιωτικότητα καλύπτεται μόνο η (ερώτηση 4) με user-centric policies, οπότε βαθμός 1. Η αποδοτικότητα βαθμολογείται με 0, αφού γίνονται μόνο γενικές αναφορές σε lightweight μηχανισμούς χωρίς συγκεκριμένες τεχνικές. Η διαλειτουργικότητα περιορίζεται σε συνεργασία μεταξύ υπηρεσιών, χωρίς αναφορά σε πρότυπα ή legacy integration – βαθμός 1. Η κλιμακωσιμότητα αναφέρεται θεωρητικά για πολλαπλά περιβάλλοντα (ερώτηση 3), χωρίς μετρήσεις, άρα βαθμός 1. Η ωριμότητα εφαρμογής είναι μηδενική, αφού δεν υπάρχει κάποια υλοποίηση – βαθμός 0. Στην καινοτομία δεν απαντάται καμία ερώτηση – βαθμός 0.

Συνολικά, η εργασία [45] & [42] αναδεικνύονται ως οι καλύτερες προσεγγίσεις της κατηγορίας, χάρη στη συνδυαστική της επίδοση στην ασφάλεια, ιδιωτικότητα και ωριμότητα εφαρμογής. Η [45] υπερέχει της [42] όσον αφορά την κλιμακωσιμότητα και η [42] της [45] ως προς την διαλειτουργικότητα. Η εργασία [39] βρίσκεται ένα σκαλί παρακάτω, διότι παρουσιάζει χαμηλό επίπεδο κλιμακωσιμότητας και διαλειτουργικότητας αλλά την ίδια απόδοση με τις προαναφερόμενες στα υπόλοιπα κριτήρια. Η εργασία [38] καταγράφεται ως η πιο αδύναμη, λόγω του θεωρητικού της χαρακτήρα και της έλλειψης πρακτικής εφαρμογής.

5.4.3 Βασικά Συμπεράσματα

Η συγκριτική αξιολόγηση των επιλεγμένων επιστημονικών εργασιών, με βάση τα επτά κοινά κριτήρια (Ασφάλεια, Ιδιωτικότητα, Διαλειτουργικότητα, Επεκτασιμότητα, Αποδοτικότητα, Ωριμότητα Εφαρμογής,

Καινοτομία), πραγματοποιήθηκε με βάση τέσσερις βασικές κατηγορίες εφαρμογής των τεχνολογιών IoT και Blockchain:

- Κατηγορία 1: Έξυπνα Περιβάλλοντα
- Κατηγορία 2: Βιομηχανία & Εφοδιαστική
- Κατηγορία 3: Έξυπνη Γεωργία
- Κατηγορία 4: Υγεία & Ασφάλεια

Η νέα αυτή ταξινόμηση επιτρέπει τη συνδυαστική αποτίμηση τόσο της τεχνικής πληρότητας όσο και της πρακτικής υλοποιησιμότητας κάθε κατηγορίας, προσφέροντας ενιαία και συγκρίσιμα συμπεράσματα.

➤ Καλύτερη & Χερίστη Προσέγγιση Συνολικά

Η καλύτερη συνολική προσέγγιση αναδεικνύεται στην εργασία [37], η οποία εντάσσεται στην κατηγορία «Βιομηχανία & Εφοδιαστική». Η εργασία συγκεντρώνει την υψηλότερη συνολική βαθμολογία (16/21) και καλύπτει σχεδόν όλα τα επιμέρους κριτήρια με ιδιαίτερη έμφαση στην ασφάλεια και την καινοτομία.

Εργασία [37] – Βιομηχανία & Εφοδιαστική:

- Ασφάλεια: 3
- Ιδιωτικότητα: 2
- Αποδοτικότητα: 2
- Διαλειτουργικότητα: 2
- Επεκτασιμότητα: 2
- Ωριμότητα Εφαρμογής: 2
- Καινοτομία: 3

Η εργασία αξιοποιεί permissioned blockchain με isolation μέσω channel separation, auditing και APIs, παρέχοντας proof-of-concept και prototype. Συγκεντρώνει σε όλα (7/7) τα κριτήρια βαθμολογία ≥ 2 και καταγράφεται ως η πιο πλήρης και τεχνικά ώριμη προσέγγιση.

Η χερίστη προσέγγιση συνολικά εντοπίζεται στην εργασία [38] στην κατηγορία «Υγεία & Ασφάλεια». Συγκεντρώνει τη χαμηλότερη συνολική βαθμολογία (5/21) και χαρακτηρίζεται από τον καθαρά θεωρητικό της χαρακτήρα, χωρίς τεχνική υλοποίηση ή αξιολόγηση.

- Ασφάλεια: 2
- Ιδιωτικότητα: 1
- Αποδοτικότητα: 0
- Διαλειτουργικότητα: 1
- Επεκτασιμότητα: 1
- Ωριμότητα Εφαρμογής: 0
- Καινοτομία: 0

Η εργασία περιορίζεται σε βιβλιογραφική ανασκόπηση εφαρμογών Blockchain-IoT, χωρίς προτεινόμενη αρχιτεκτονική, prototype ή μετρήσεις, και καταγράφεται ως η πιο αδύναμη σε επίπεδο τεχνικής πληρότητας και πρακτικής αξίας.

➤ Καλύτερο & Χερίστο Κριτήριο Συνολικά

- **Καλύτερο Κριτήριο:**
Η Ασφάλεια εμφανίζει τον υψηλότερο μέσο όρο (≈ 2.31). Η πλειονότητα των εργασιών περιλαμβάνει τεχνικές, όπως κρυπτογράφηση, blockchain ledger, έλεγχο πρόσβασης (access control) και αυθεντικοποίηση (authentication) για την προστασία των δεδομένων – ανεξαρτήτως πεδίου εφαρμογής.
 - **Χείριστο Κριτήριο:**
Το κριτήριο της Ιδιωτικότητας αναδεικνύεται ως το πιο αδύναμο, με μέσο όρο ίσο περίπου με 1.3. Οι περισσότερες εργασίες περιορίζονται σε βασικό έλεγχο πρόσβασης (access control), χωρίς ανωνυμοποίηση, user-centric privacy ή τεχνικές ελαχιστοποίησης δεδομένων. Η έλλειψη αυτή περιορίζει τη συμμόρφωση με κανονιστικά πλαίσια και μειώνει την πρακτική αξιοποίηση των λύσεων.
- **Καλύτερη & Χείριστη Κατηγορία Συνολικά**
- **Καλύτερη Κατηγορία**
- Η κατηγορία της Βιομηχανίας & Εφοδιαστικής αναδεικνύεται ως η ισχυρότερη, με τον υψηλότερο συνολικό μέσο όρο (13.5/21). Οι εργασίες [35], [37], [41] παρουσιάζουν πλήρη κάλυψη στα περισσότερα κριτήρια, με ανεπτυγμένη ασφάλεια (TEE, permissioned blockchain), ωριμότητα εφαρμογής (proof-of-concept, prototypes) και υψηλή τεχνική πληρότητα. Η διαλειτουργικότητα και η καινοτομία ενισχύουν τη θέση της ως την πιο ολοκληρωμένη κατηγορία.
- **Χείριστη Κατηγορία**
- Η κατηγορία της Υγείας & Ασφάλειας καταγράφεται ως η πιο αδύναμη, με τον χαμηλότερο συνολικό μέσο όρο (9.25/21). Οι εργασίες παρουσιάζουν περιορισμένη αποδοτικότητα και χαμηλή καινοτομία καθώς και χαμηλή διαλειτουργικότητα και κλιμακωσιμότητα στις περισσότερες περιπτώσεις.

Η αξιοποίηση του Blockchain στο IoT ενισχύει την ασφάλεια, την ιχνηλασιμότητα και την εμπιστοσύνη. Ωστόσο, η περιορισμένη πρακτική υλοποίηση πολλών προσεγγίσεων παραμένει εμπόδιο για ευρεία εφαρμογή. Οι Πίνακες 10 και 11 συνοψίζουν τις πιο ισχυρές και τις πιο αδύναμες εργασίες ανά κατηγορία.

Πίνακας 10: Καλύτερες εργασίες ανά κατηγορία

Κατηγορία	Εργασία	Τεκμηρίωση Υπεροχής
<i>Έξυπνα Περιβάλλοντα</i>	[36]	Μέτρια επίδοση στα περισσότερα κριτήρια: αποδοτικότητα (2), κλιμακωσιμότητα (2), διαλειτουργικότητα (2) και καινοτομία (2) μέσω υβριδικής multi-chain αρχιτεκτονικής (PoW-BFT) με edge/fog και prototype (σύνολο 12/21).
<i>Βιομηχανία & Εφοδιαστική</i>	[37]	Καλύπτονται όλα (7/7) τα κριτήρια με βαθμολογίες ≥ 2 : κορυφαία ασφάλεια (3), καινοτομία (3) και σταθερή, μέτρια απόδοση στα υπόλοιπα κριτήρια.

<i>Έξυπνη Γεωργία</i>	[43], [34]	Η [43] ξεχωρίζει με ασφάλεια (3), αποδοτικότητα (2) και υψηλή ωριμότητα εφαρμογής (3) σε επιχειρησιακό περιβάλλον, αν και υστερεί σε καινοτομία. Η [34] παρουσιάζει επίσης συνολική βαθμολογία 12/21, χωρίς μηδενικά, και συμβάλλει με ισορροπημένη τεχνική προσέγγιση στην ιχνηλασιμότητα.
<i>Υγεία & Ασφάλεια</i>	[45],[42]	Η [45] προσφέρει ισορροπημένη προσέγγιση με ασφάλεια (2), ιδιωτικότητα (2), κλιμακωσιμότητα (2) και ωριμότητα (2), αξιοποιώντας blockchain με edge/fog για αποδοτικότητα (1). Η [42] επιτυγχάνει επίσης συνολική βαθμολογία 11/21 υπερτερεί στην ιδιωτικότητα και διαλειτουργικότητα, παρουσιάζοντας ισοπαλία με την [45].

Πίνακας 11: Χειρότερες εργασίες ανά κατηγορία

Κατηγορία	Εργασία	Αδυναμίες
<i>Έξυπνα Περιβάλλοντα</i>	[44]	Πολύ χαμηλή συνολική απόδοση (8/21). Δεν παρέχει μετρήσεις αποδοτικότητας (0). Παρά την καινοτομία (NFTs, 3), η ωριμότητα εφαρμογής και ιδιωτικότητα είναι μηδενικές.
<i>Βιομηχανία & Εφοδιαστική</i>	[49]	Χαμηλή συνολική βαθμολογία (9/21). Περιορισμένη ιδιωτικότητα (1), διαλειτουργικότητα (1), αποδοτικότητα (1), κλιμακωσιμότητα (1) και ωριμότητα (1). Θεωρητική προσέγγιση χωρίς κάποιο πρωτότυπο, με ελλιπή τεκμηρίωση.
<i>Έξυπνη Γεωργία</i>	[57]	Παρά τη μέτρια επίδοση σε ασφάλεια, ιδιωτικότητα, διαλειτουργικότητα και αποδοτικότητα (βαθμολογίες: 2), υστερεί σημαντικά σε κλιμακωσιμότητα (1), ενώ έχει μηδενική απόδοση σε ωριμότητα εφαρμογής και καινοτομία (βαθμολογίες: 0). Πρόκειται για θεωρητικό μοντέλο χωρίς κάποιο πρωτότυπο.
<i>Υγεία & Ασφάλεια</i>	[38]	Πολύ χαμηλή συνολική επίδοση (5/21). Αποδοτικότητα 0, καινοτομία 0, ωριμότητα 0· μόνο μέτρια ασφάλεια (2) και ελάχιστη ιδιωτικότητα/διαλειτουργικότητα/κλιμακωσιμότητα (1).

Κεφάλαιο 6 - Ερευνητικά Κενά και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Η σύζευξη των τεχνολογιών Blockchain και IoT, αν και παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες και έχει αναδειχθεί σε πληθώρα εφαρμογών, εξακολουθεί να συνοδεύεται από σημαντικά ερευνητικά κενά και περιορισμούς. Τα κενά αυτά σχετίζονται τόσο με τεχνικές προκλήσεις (όπως η κλιμακωσιμότητα και η διαλειτουργικότητα), όσο και με επιχειρησιακά ή κανονιστικά ζητήματα (όπως η συμμόρφωση με νομικά πλαίσια και η προστασία προσωπικών δεδομένων). Στο παρών κεφάλαιο, επιχειρείται η κατηγοριοποιημένη ανάδειξη αυτών των ερευνητικών κενών, βάσει της βιβλιογραφικής ανάλυσης, καθώς και η παρουσίαση ενδεικτικών κατευθύνσεων για μελλοντική έρευνα. Σκοπός είναι η δημιουργία ενός πλαισίου αναφοράς που μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μελλοντικές προσπάθειες βελτιστοποίησης της σύζευξης των δύο αυτών τεχνολογιών, δηλ. του Blockchain και του IoT.

Πίνακας 12: Πίνακας ερευνητικών κενών και κατευθύνσεων

Ερευνητικά Ζητήματα	Κατευθύνσεις Αντιμετώπισης
<i>Περιορισμοί Κλιμακωσιμότητας και Απόδοσης</i>	Ομιχλώδης υπολογισμός (fog computing), Ελαφρείς μηχανισμοί συναίνεσης, Πλαϊνές αλυσίδες & τεχνολογία Plasma, Κίνητρα μέσω διακριτικών, Αποθήκευση εκτός αλυσίδας
<i>Διαλειτουργικότητα και Έλλειψη Προτύπων</i>	Middleware πλατφόρμες (π.χ. OpenIoT), Κοινά APIs και πρότυπα πρωτοκόλλων επικοινωνίας, σημασιολογική διαλειτουργικότητα σε επίπεδο δεδομένων, ενιαία πρότυπα
<i>Ζητήματα Ιδιωτικότητας σε IoT–Blockchain Περιβάλλοντα</i>	Κρυπτογράφηση και περιορισμένη πρόσβαση, Εκλεπτυσμένη πρόσβαση και ισχυρός έλεγχος ταυτότητας, Προηγμένες τεχνικές ιδιωτικότητας (zk-SNARKs)
<i>Ανάγκη για Πραγματικές Υλοποιήσεις και Πειραματικά Αποτελέσματα</i>	Πειραματικά testbeds, Καθολικά αποδεκτές μεθοδολογίες αξιολόγησης, Μελέτες περίπτωσης σε πραγματικά περιβάλλοντα
<i>Ενιαία Αρχιτεκτονικά Πλαίσια και Διαλειτουργικότητα</i>	Πολυεπίπεδες αρχιτεκτονικές πλαισίων, ενοποιημένα APIs, μοντέλα αναφοράς και κατευθυντήριες οδηγίες
<i>Πρακτική Εφαρμοσιμότητα και Υιοθέτηση</i>	Εξειδικευμένες αρθρωτές λύσεις IoT, ενοποιημένες πλατφόρμες και πρότυπα, μείωση κόστους εγκατάστασης και τεχνικής υποστήριξης
<i>Νομικά και Ρυθμιστικά Ζητήματα</i>	Συμμόρφωση με GDPR, Νομική ισχύς έξυπνων συμβολαίων, Ρυθμιστικά συμμορφούμενες αρχιτεκτονικές, Εναρμόνιση διεθνών ρυθμίσεων & πρότυπα

Συλλογικά Συμπεράσματα και Ερευνητικές Κατευθύνσεις	Αρθρωτές και ρυθμιστικά συμμορφούμενες αρχιτεκτονικές, Ενιαία πρότυπα & εργαλεία διαλειτουργικότητας, Πειραματική επαλήθευση & υλοποιήσεις σε ρεαλιστικά σενάρια, Διεπιστημονική συνεργασία & εκπαίδευση
--	---

6.1 Περιορισμοί Κλιμακωσιμότητας και Απόδοσης

Ένα από τα σημαντικότερα ερευνητικά κενά στη σύζευξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) με την τεχνολογία Blockchain αφορά την ανεπαρκή κλιμακωσιμότητα (scalability) και τη χαμηλή υπολογιστική απόδοση των υπάρχοντων λύσεων. Το IoT βασίζεται σε μεγάλο πλήθος συσκευών που λειτουργούν σε πραγματικό χρόνο, με συνεχείς ροές δεδομένων, περιορισμένους υπολογιστικούς πόρους και ανάγκες για άμεση ανταπόκριση. Αντίθετα, τα δημόσια blockchains – όπως το Ethereum – υποστηρίζουν μικρό αριθμό συναλλαγών ανά δευτερόλεπτο και παρουσιάζουν σημαντικές καθυστερήσεις επικύρωσης (latency) [2], [6], [7].

Η ανάγκη των μηχανισμών συναίνεσης (consensus mechanisms), όπως η Απόδειξη Εργασίας (Proof-of-Work), για υψηλή υπολογιστική ισχύ καθιστά τη συμμετοχή τυπικών IoT κόμβων αδύνατη [4], [55]. Οι συσκευές αισθητήρων διαθέτουν περιορισμένη μνήμη, ενέργεια και υπολογιστική δυνατότητα, αδυνατώντας να λειτουργήσουν ως πλήρεις κόμβοι blockchain. Ενώ έχουν προταθεί τεχνικές αντιμετώπισης του τρέχοντος ζητήματος, η εφαρμογή τους παραμένει κυρίως θεωρητική ή πειραματική [2], [7], [16].

Κατευθύνσεις αντιμετώπισης

Ομιχλώδης Υπολογισμός (Fog Computing):

Η υιοθέτηση της αρχιτεκτονικής fog computing προτείνεται ως λύση αποφόρτισης του blockchain, μέσω ενδιάμεσων κόμβων μεταξύ των IoT συσκευών και του κατακευκμένου καθολικού. Οι fog κόμβοι αναλαμβάνουν την τοπική επεξεργασία των δεδομένων και την αποστολή συναλλαγών προς το blockchain, μειώνοντας τη συνολική καθυστέρηση και τον όγκο δεδομένων [4], [9].

Ελαφρείς Μηχανισμοί Συναίνεσης (Lightweight Consensus):

Νέες μέθοδοι συναίνεσης, όπως η Απόδειξη Εξουσιοδότησης (Proof-of-Authority), σχεδιάζονται με γνώμονα την ελαχιστοποίηση του υπολογιστικού κόστους και τη δυνατότητα εφαρμογής σε περιβάλλοντα περιορισμένων πόρων. Επίσης, permissioned blockchains με περιορισμένο αριθμό έμπιστων κόμβων ενδείκνυνται προς χρήση σε IoT δίκτυα [7], [55], [58].

Πλαϊνές Αλυσίδες και Plasma (Sidechains & Plasma):

Οι sidechains επιτρέπουν τη μεταφορά μέρους της δραστηριότητας εκτός του κύριου blockchain, διατηρώντας συμβατότητα αλλά και αυτονομία. Το Plasma, συγκεκριμένα, επιτρέπει τη δημιουργία θυγατρικών blockchain αλυσίδων για μικρότερους όγκους συναλλαγών, βελτιώνοντας τη συνολική κλιμακωσιμότητα [16], [64].

Κίνητρα μέσω Διακριτικών (Tokenized Incentives):

Η παροχή κινήτρων μέσω tokens αναφέρεται στη χρήση ψηφιακών ανταμοιβών (π.χ. κρυπτονομισμάτων) προς κόμβους ή συσκευές που συμμετέχουν ενεργά σε λειτουργίες του δικτύου, όπως η επαλήθευση συναλλαγών ή η αποθήκευση δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο ενθαρρύνεται η συνεισφορά ελαφρών ή εξωτερικών IoT κόμβων, ακόμη και σε περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους. Η χρήση ενεργειακά αποδοτικών blockchain, όπως το IOTA, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα που επιτρέπει την ευρύτερη ένταξη τέτοιων συσκευών με χαμηλή κατανάλωση [7], [13].

Αποθήκευση Εκτός Αλυσίδας (Off-Chain Storage):

Η χρήση εξωτερικών συστημάτων αποθήκευσης, όπως IPFS (InterPlanetary File System), μειώνει το μέγεθος του blockchain και τον όγκο των συναλλαγών. Έτσι διατηρείται η ακεραιότητα των δεδομένων με παράλληλη μείωση των απαιτήσεων σε χώρο και ενέργεια [2], [16].

6.2 Διαλειτουργικότητα και Έλλειψη Προτύπων

Η σύζευξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) με την τεχνολογία blockchain αναδεικνύει σημαντικές προκλήσεις ως προς τη διαλειτουργικότητα (interoperability), τόσο σε επίπεδο επικοινωνίας όσο και σε επίπεδο δεδομένων. Ο κατακερματισμός των τεχνολογικών πλατφορμών, οι διαφορετικοί κατασκευαστές και τα ποικίλα πρότυπα συνιστούν εμπόδιο για την ενιαία λειτουργία συστημάτων που επιχειρούν να συνδυάσουν τις δυνατότητες και των δύο τεχνολογιών.

Κατευθύνσεις αντιμετώπισης

Πλατφόρμες Ενδιάμεσου Λογισμικού:

Η χρήση ενδιάμεσου λογισμικού (middleware) έχει αναδειχθεί ως κρίσιμο εργαλείο για τη γεφύρωση της ασυμβατότητας μεταξύ ετερογενών συσκευών και εφαρμογών. Μέσω πλατφορμών, όπως το OpenIoT, επιτυγχάνεται η αφαιρετική διαχείριση ετερογενών πόρων, η κατηγοριοποίηση των συσκευών, η ανωνυμοποίηση των δεδομένων και η δυναμική δρομολόγηση πληροφοριών. [63] Επιπλέον, πλατφόρμες βασισμένες σε Service-Oriented Architectures (SOA), όπως η OSGi, επιτρέπουν τη δημιουργία επεκτάσιμων και επαναχρησιμοποιήσιμων υπηρεσιών, ενώ αφαιρούν την ανάγκη για άμεση συμβατότητα μεταξύ των φυσικών συσκευών και των εφαρμογών. [66]

Υιοθέτηση Κοινών Διεπαφών (APIs) και Πρότυπων Πρωτοκόλλων Επικοινωνίας:

Ένα κρίσιμο βήμα προς τη διαλειτουργικότητα είναι η υιοθέτηση κοινών APIs και τυποποιημένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Η ετερογένεια σε επίπεδο συνδεσιμότητας (Wi-Fi, ZigBee, LoRa, Bluetooth) μπορεί να εξομαλυνθεί μέσω κοινών διεπαφών στο middleware επίπεδο, όπως φαίνεται στη μελέτη για τα Agrologistics που εφαρμόζει ενδιάμεσα επίπεδα φιλτραρίσματος και μετάφρασης δεδομένων μεταξύ IoT και blockchain. [57]

Σημασιολογική Διαλειτουργικότητα σε Επίπεδο Δεδομένων:

Η σημασιολογική διαλειτουργικότητα (semantic interoperability) επιτρέπει την ερμηνεία και την αξιοποίηση των δεδομένων από διαφορετικά συστήματα, ανεξάρτητα από το σχήμα ή τη μορφή τους. Η χρήση οντολογιών και σημασιολογικών μοντέλων (semantic web, RDF, OWL) εντός πλατφορμών

middleware διευκολύνει την αντιστοίχιση μεταξύ ετερογενών μορφών δεδομένων, κάτι που είναι απαραίτητο για την ακριβή ερμηνεία και την ανάλυση δεδομένων μεταξύ IoT και blockchain συστημάτων. [63]

Ανάγκη για Ενιαία Πρότυπα:

Η έλλειψη ενιαίων προτύπων (standards) σε παγκόσμιο επίπεδο δημιουργεί προβλήματα όχι μόνο στην ενοποίηση διαφορετικών τεχνολογιών αλλά και στην ευρύτερη υιοθέτηση λύσεων blockchain σε IoT περιβάλλοντα. Η ανάγκη για ενιαίες αρχιτεκτονικές και συμβατά μοντέλα δεδομένων είναι αναπόφευκτη για τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας αυτών των λύσεων. [64]

6.3 Ζητήματα Ιδιωτικότητας σε IoT–Blockchain Περιβάλλοντα

Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας Blockchain σε εφαρμογές του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) φέρνει στο προσκήνιο κρίσιμα ζητήματα που αφορούν την **προστασία της ιδιωτικότητας των δεδομένων**, ιδίως όταν χρησιμοποιείται για την αποθήκευση ευαίσθητων πληροφοριών που παράγονται σε πραγματικό χρόνο από συσκευές IoT.

Καθώς οι περισσότερες υπάρχουσες λύσεις είτε δεν εστιάζουν επαρκώς στην προστασία της ιδιωτικότητας είτε παραμένουν σε πειραματικό στάδιο, είναι απαραίτητο η έρευνα να προσανατολιστεί στην ανάπτυξη τεχνολογιών και προτύπων που γεφυρώνουν το χάσμα μεταξύ τεχνικής και νομικής απαίτησης. Στο πλαίσιο αυτό, αναδεικνύονται τέσσερις κύριες ερευνητικές κατευθύνσεις.

Κατευθύνσεις αντιμετώπισης

Προστασία Δεδομένων μέσω Κρυπτογράφησης και Περιορισμένης Πρόσβασης:

Ένα βασικό μέτρο για την προστασία της ιδιωτικότητας είναι η χρήση ισχυρής κρυπτογράφησης κατά την αποθήκευση και μετάδοση δεδομένων. Σε συνδυασμό με πολιτικές περιορισμένης/εκλεπτυσμένης πρόσβασης, είναι δυνατή η αποτροπή μη εξουσιοδοτημένων προσβάσεων, ακόμη και σε περιβάλλοντα με πολλαπλούς φορείς ή παρόχους. Η εφαρμογή τέτοιων τεχνικών επιτρέπει στα συστήματα IoT–Blockchain να λειτουργούν χωρίς να θυσιάζεται η ασφάλεια των ευαίσθητων πληροφοριών, όπως συμβαίνει σε ιατρικές ή αγροδιατροφικές εφαρμογές. [57]

Εκλεπτυσμένη Πρόσβαση και Ισχυρός Έλεγχος Ταυτότητας:

Η υλοποίηση μηχανισμών εκλεπτυσμένης πρόσβασης επιτρέπει τον καθορισμό επιπέδων εξουσιοδότησης ανά ρόλο ή συσκευή, ελαχιστοποιώντας τον κίνδυνο έκθεσης δεδομένων. Η ενσωμάτωση ισχυρού ελέγχου ταυτότητας, όπως πολυπαραγοντική πιστοποίηση, ενισχύει τη διαφάνεια και την ανιχνευσιμότητα των ενεργειών, καθιστώντας το σύστημα ελεγχόμενο από άκρο σε άκρο, όπως απαιτείται από τις ρυθμιστικές αρχές. [57]

Προηγμένες Τεχνικές Ιδιωτικότητας:

Τεχνολογίες όπως τα zk-SNARKs (Zero-Knowledge Succinct Non-Interactive Argument of Knowledge, δηλαδή Συνοπτικά Μη Διαδραστικά Επιχειρήματα Μηδενικής Γνώσης) επιτρέπουν την επαλήθευση μιας πληροφορίας χωρίς να αποκαλύπτεται το ίδιο το περιεχόμενο. Αυτές οι μέθοδοι προσφέρουν δυνατότητες

για σχεδόν πλήρη ανωνυμία, κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές που διαχειρίζονται ευαίσθητα ή προσωπικά δεδομένα. Παρότι βρίσκονται ακόμη υπό εξέλιξη, αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση για το μέλλον της ασφαλούς και συμμορφούμενης σύζευξης Blockchain–IoT [64].

6.4 Ανάγκη για Πραγματικές Υλοποιήσεις και Πειραματικά Αποτελέσματα

Η ακαδημαϊκή βιβλιογραφία γύρω από τη σύζευξη Blockchain και Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) παρουσιάζει πλούτο θεωρητικών προσεγγίσεων, προτεινόμενων αρχιτεκτονικών και εννοιολογικών πλαισίων. Ωστόσο, παρατηρείται σαφής έλλειψη πραγματικών υλοποιήσεων και ποσοτικών αξιολογήσεων σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα. Τα περισσότερα έργα εστιάζουν σε εργαστηριακά παραδείγματα μικρής κλίμακας ή βασίζονται σε προσομοιώσεις, γεγονός που καθιστά αβέβαιη τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε συστήματα παραγωγής ή κρίσιμες υποδομές, όπως η υγεία, οι έξυπνες πόλεις και η εφοδιαστική αλυσίδα. [57]

Η ανάγκη για μετάβαση από τη θεωρία στην πράξη οδηγεί σε συγκεκριμένες ερευνητικές κατευθύνσεις.

Κατευθύνσεις αντιμετώπισης

Δημιουργία Πειραματικών Πλαισίων (Testbeds):

Τα πειραματικά πλαίσια (testbeds) αποτελούν ελεγχόμενα περιβάλλοντα προσομοίωσης πραγματικών συνθηκών, στα οποία μπορούν να δοκιμαστούν λύσεις Blockchain–IoT με πολλαπλούς κόμβους, αλληλεπιδρώντα συστήματα και φορτία δεδομένων. Η δημιουργία τέτοιων υποδομών δίνει τη δυνατότητα ποσοτικής αξιολόγησης της απόδοσης, της καθυστέρησης και της ενεργειακής κατανάλωσης, παρέχοντας κρίσιμες ενδείξεις για τη βιωσιμότητα των λύσεων. [64]

Ανάπτυξη Μεθοδολογιών Αξιολόγησης Απόδοσης:

Η ελλιπής χρήση καθολικά αποδεκτών μεθοδολογιών αξιολόγησης καθιστά δύσκολη τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών έργων. Πρέπει να καθοριστούν πρότυπα μέτρησης για παραμέτρους, όπως χρόνος επικύρωσης συναλλαγών, χρήση πόρων, αξιοπιστία μετάδοσης και ρυθμός απωλειών. Η σταθερή υιοθέτηση τέτοιων μεθόδων θα επιτρέψει τη γενίκευση των συμπερασμάτων και την εμπιστοσύνη στην τεχνολογική λύση.

Μελέτες Περίπτωσης σε Πραγματικά Περιβάλλοντα:

Η υλοποίηση μελετών περίπτωσης (case studies) σε πραγματικά περιβάλλοντα αποτελεί το επόμενο βήμα μετά τα testbeds. Παραδείγματα περιλαμβάνουν την παρακολούθηση εφοδιαστικής αλυσίδας αγροτικών προϊόντων μέσω IoT αισθητήρων και καταγραφή των δεδομένων σε Blockchain, ή την υγειονομική παρακολούθηση ασθενών με χρήση έξυπνων συσκευών. Η επιτυχής εφαρμογή τέτοιων μελετών θα αποδείξει την επιχειρησιακή εφικτότητα και θα ενισχύσει τη διάχυση των τεχνολογιών στην αγορά [57]

6.5 Ενιαία Αρχιτεκτονικά Πλαίσια και Διαλειτουργικότητα

Η απουσία ενιαίων αρχιτεκτονικών πλαισίων που να καθοδηγούν τη σύζευξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) με την τεχνολογία Blockchain αποτελεί ένα κρίσιμο και διαρκώς επισημαινόμενο ερευνητικό κενό. Σήμερα, η πλειονότητα των υλοποιήσεων βασίζεται σε προσαρμοσμένες, μεμονωμένες λύσεις, οι οποίες δεν εξασφαλίζουν ούτε κλιμακωσιμότητα (scalability) ούτε καθολική διαλειτουργικότητα (interoperability) μεταξύ ετερογενών συστημάτων. [64]

Οι δυσκολίες εντείνονται από την τεχνολογική πολυμορφία και στις δύο πλευρές: από τη μία, το IoT χρησιμοποιεί ποικίλα πρωτόκολλα επικοινωνίας (π.χ. MQTT, CoAP, LoRa, Zigbee), και από την άλλη, οι υλοποιήσεις Blockchain βασίζονται σε διαφορετικούς μηχανισμούς συναίνεσης (όπως Proof of Work, Proof of Stake) και τρόπους αποθήκευσης των δεδομένων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία "κλειστών" λύσεων (silos), που δεν επικοινωνούν μεταξύ τους, ούτε υποστηρίζουν την ενσωμάτωσή τους σε πολυεπίπεδες υποδομές ή σε ευρύτερα πληροφοριακά οικοσυστήματα. [6]

Κατευθύνσεις αντιμετώπισης

Ανάπτυξη Πολυεπίπεδων Αρχιτεκτονικών Πλαισίων:

Απαιτείται η σχεδίαση πολυεπίπεδων αρχιτεκτονιών που να οριοθετούν με σαφήνεια τη λειτουργία κάθε επιπέδου: από το επίπεδο αισθητήρων (sensor layer), την ενδιάμεση επεξεργασία (middleware), έως το επίπεδο κατανεμημένου καθολικού (blockchain ledger). Ένα τέτοιο πρότυπο πλαίσιο πρέπει να ενσωματώνει αφαιρετικά μοντέλα (abstraction models), τα οποία διαχωρίζουν τις υλοποιήσεις από τις λειτουργικές απαιτήσεις, προσφέροντας ευελιξία και γενικευσιμότητα. Ο όρος αφαίρεση εδώ αναφέρεται στη δημιουργία γενικών επιπέδων διαχείρισης που απομονώνουν τις τεχνικές λεπτομέρειες του υλικού από την ανώτερη λογική της εφαρμογής. [64]

Ενίσχυση Διαλειτουργικότητας με Ενοποιημένα APIs:

Η διαλειτουργικότητα δεν μπορεί να επιτευχθεί χωρίς κοινές συμφωνίες διεπαφής μεταξύ διαφορετικών υποσυστημάτων. Εν προκειμένω, απαιτείται η ενοποίηση διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (Application Programming Interfaces – APIs), μέσω της χρήσης κοινών λεξιλογίων και σημασιολογικής συμβατότητας (semantic alignment). Μέσω του συνδυασμού ενδιάμεσων επιπέδων λογισμικού (middleware layers), τα οποία λειτουργούν ως γέφυρα μεταξύ των IoT συσκευών και των blockchain υποδομών, και της χρήσης ενοποιημένων APIs, συστήματα με διαφορετικά πρότυπα μπορούν να επικοινωνούν αποδοτικά, χωρίς απώλειες πληροφορίας ή κινδύνους ασυμβατότητας. [48]

Δημιουργία Μοντέλων Αναφοράς και Κατευθυντήριων Οδηγιών:

Η κοινότητα οφείλει να καταλήξει σε κοινώς αποδεκτά μοντέλα αναφοράς (reference models), τα οποία θα παρέχουν σαφείς ορισμούς για τη ροή δεδομένων, τα σημεία ελέγχου, την ευθύνη κάθε συστατικού στοιχείου (αισθητήρες, κόμβοι, συμβόλαια). Αυτά τα πρότυπα μοντέλα λειτουργούν ως "χάρτης" για προγραμματιστές, μηχανικούς και αρχιτέκτονες συστημάτων, διευκολύνοντας την επαναχρησιμοποίηση λύσεων και την ενοποίηση με άλλα πλαίσια.

6.6 Πρακτική Εφαρμοσιμότητα και Υιοθέτηση

Παρά τις θεωρητικές δυνατότητες που προσφέρει η σύζευξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) με την τεχνολογία Blockchain, η πρακτική της υιοθέτησης παραμένει εξαιρετικά περιορισμένη. Τα περισσότερα έργα βρίσκονται ακόμη σε πιλοτικό ή εργαστηριακό στάδιο, χωρίς ουσιαστικές εφαρμογές σε κρίσιμες υποδομές ή περιβάλλοντα μεγάλης κλίμακας, όπως η υγειονομική περίθαλψη, η ενέργεια ή οι έξυπνες πόλεις [6], [15], [57]. Η περιορισμένη διάδοση αποδίδεται σε τεχνικά, οικονομικά και οργανωτικά εμπόδια που καθιστούν την εφαρμογή τέτοιων συστημάτων ιδιαίτερα απαιτητική.

Κατευθύνσεις αντιμετώπισης

Ανάπτυξη Εξειδικευμένων Αρθρωτών (Modular) Λύσεων για IoT:

Η σχεδίαση επεκτάσιμων και ευέλικτων αρχιτεκτονικών, προσαρμόσιμων σε διαφορετικά περιβάλλοντα (όπως έξυπνες οικίες, γεωργικά δίκτυα, μεταφορές), μπορεί να μειώσει το κόστος ενσωμάτωσης και να επιτρέψει την ευκολότερη προσαρμογή σε συγκεκριμένες ανάγκες. Μέσα από τέτοιες λύσεις, ενισχύεται η πρακτική εφαρμοσιμότητα και αντιμετωπίζεται η δυσκολία υλοποίησης σε επιχειρησιακό επίπεδο [7], [55], [64].

Δημιουργία Προτύπων και Ενοποιημένων Πλατφορμών:

Η απουσία καθολικά αποδεκτών προτύπων και βιβλιοθηκών, καθώς και η ανωριμότητα των υπαρχουσών πλατφορμών, λειτουργούν αποτρεπτικά για επιχειρήσεις και οργανισμούς που επιθυμούν να πειραματιστούν με Blockchain-IoT συστήματα. Ενοποιημένα περιβάλλοντα με εργαλεία καθοδήγησης και έτοιμα σενάρια χρήσης μπορούν να ενισχύσουν την εμπιστοσύνη και να επιταχύνουν τη μετάβαση από τη θεωρία στην πράξη [2], [16], [57].

Μείωση Κόστους Εγκατάστασης και Τεχνικής Υποστήριξης:

Η δημιουργία οικονομικά βιώσιμων λύσεων με απλή εγκατάσταση, αυτοματοποιημένες λειτουργίες και ελάχιστες απαιτήσεις τεχνικής υποστήριξης είναι κρίσιμη για την υιοθέτηση από μικρομεσαίες επιχειρήσεις ή φορείς με περιορισμένους πόρους. Το υψηλό κόστος εισαγωγής και συντήρησης αποτελεί σημαντικό εμπόδιο για την ευρεία διάδοση των τεχνολογιών αυτών [47], [57].

Η επιτυχής μετάβαση από θεωρητικά μοντέλα σε ρεαλιστικά επιχειρησιακά σενάρια απαιτεί διεπιστημονική προσέγγιση, συνεργασία μεταξύ ερευνητών και βιομηχανίας, καθώς και επικέντρωση στη δημιουργία φιλικών προς τον χρήστη, αξιόπιστων και δοκιμασμένων λύσεων. Μόνο με αυτόν τον τρόπο μπορεί η σύζευξη Blockchain-IoT να καταστεί πραγματικά εφαρμόσιμη και εμπορικά αξιοποιήσιμη.

6.7 Νομικά και Ρυθμιστικά Ζητήματα

Η σύζευξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) με την τεχνολογία Blockchain θέτει πολύπλοκες προκλήσεις σε νομικό και ρυθμιστικό επίπεδο, ιδίως όταν η εφαρμογή της γίνεται σε τομείς υψηλής ευαισθησίας, όπως η υγεία, οι μεταφορές ή οι έξυπνες πόλεις. Παρά τα τεχνικά πλεονεκτήματα που

προσφέρει το Blockchain (όπως η ακεραιότητα των δεδομένων και η διαφάνεια), η εγγενής του φύση – όπως η αμεταβλητότητα των καταχωρήσεων και η δημόσια προσβασιμότητα – συγκρούεται συχνά με κανονιστικές απαιτήσεις περί προστασίας δεδομένων, ιδιωτικότητας και νομικής υπευθυνότητας.

Η αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων αποτελεί κρίσιμο ερευνητικό πεδίο, το οποίο απαιτεί τη συνεργασία μεταξύ τεχνολόγων, νομικών και φορέων χάραξης πολιτικής. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι βασικές κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Κατευθύνσεις αντιμετώπισης

Συμμόρφωση με Γενικό Κανονισμό Προστασίας Δεδομένων (GDPR):

Τι είναι:

Ο Γενικός Κανονισμός για την Προστασία Δεδομένων (GDPR) της Ε.Ε. θεσπίζει δικαιώματα όπως το «δικαίωμα στη λήθη» και την τροποποίηση δεδομένων. Ωστόσο, η αμεταβλητότητα των δεδομένων στο Blockchain, ιδίως σε δημόσιες αλυσίδες, καθιστά δύσκολη τη συμμόρφωση.

Γιατί είναι κρίσιμο:

Η μη δυνατότητα διαγραφής ή τροποποίησης προσωπικών δεδομένων, ακόμη και αν αυτά είναι ψευδωνυμοποιημένα, μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρές νομικές παραβάσεις. Αυτό καθιστά την τεχνολογία δύσχρηστη για κρίσιμες εφαρμογές.

Ποιο κενό καλύπτει:

Την έλλειψη αρχιτεκτονικών που να συνδυάζουν την προστασία της ιδιωτικότητας με την αμεταβλητότητα της τεχνολογίας Blockchain [10], [15], [51], [61].

Νομική Ισχύς Έξυπνων Συμβολαίων (Smart Contracts):

Τι είναι:

Τα έξυπνα συμβόλαια (smart contracts) είναι προγραμματιζόμενοι αλγόριθμοι που εκτελούν αυτόματα συμφωνίες. Παρ' όλα αυτά, η νομική τους ισχύς παραμένει ασαφής σε πολλές χώρες.

Γιατί είναι κρίσιμο:

Η αυτοεκτέλεση χωρίς ανθρώπινη εποπτεία δημιουργεί ερωτήματα σχετικά με την ευθύνη σε περίπτωση σφαλμάτων, παραλείψεων ή κακόβουλης χρήσης.

Ποιο κενό καλύπτει:

Την απουσία καθολικά αποδεκτού νομικού πλαισίου που να αναγνωρίζει τα έξυπνα συμβόλαια ως δεσμευτικές συμφωνίες [51], [61].

Ανάπτυξη Ρυθμιστικά Συμμορφούμενων Αρχιτεκτονικών (Regulatory-Compliant Architectures):

Τι είναι:

Προτείνεται η δημιουργία υβριδικών αρχιτεκτονικών που ενσωματώνουν πολιτικές διαχείρισης προσωπικών δεδομένων, όπως έλεγχος πρόσβασης, ανωνυμοποίηση και δυνατότητα περιορισμένης αποθήκευσης.

Γιατί είναι κρίσιμο:

Μια τέτοια αρχιτεκτονική μπορεί να λειτουργεί εντός των ορίων του GDPR και άλλων κανονισμών, καθιστώντας την τεχνολογία εφαρμόσιμη χωρίς νομικά ρίσκα.

Ποιο κενό καλύπτει:

Την ανάγκη για συστήματα που να εξισορροπούν τις απαιτήσεις της καινοτομίας με τις απαιτήσεις της συμμόρφωσης και του νομικού πλαισίου [15], [51], [61].

Εναρμόνιση Διεθνών Ρυθμίσεων και Πρότυπα:

Τι είναι:

Σήμερα παρατηρείται κατακερματισμός ως προς τη ρύθμιση IoT–Blockchain τεχνολογιών. Άλλες χώρες υιοθετούν «sandbox» περιβάλλοντα για πειραματισμό, ενώ άλλες επιβάλλουν αυστηρούς περιορισμούς.

Γιατί είναι κρίσιμο:

Η απουσία εναρμονισμένων κανόνων δυσκολεύει την υιοθέτηση λύσεων σε πολυεθνικά περιβάλλοντα ή σε παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού. Προκαλεί νομική αβεβαιότητα και μειώνει την εμπιστοσύνη στην τεχνολογία.

Ποιο κενό καλύπτει:

Το εμπόδιο της νομικής ασυμβατότητας που περιορίζει την παγκόσμια εφαρμογή Blockchain–IoT λύσεων [47], [61].

Συνοπτικό Συμπέρασμα

Η επιτυχής ενσωμάτωση του Blockchain στο IoT εξαρτάται όχι μόνο από τεχνικές παραμέτρους, αλλά και από τη συμμόρφωση με νομικά και ρυθμιστικά πλαίσια. Η ερευνητική και βιομηχανική κοινότητα καλείται να αναπτύξει αρχιτεκτονικές που να προστατεύουν τα δικαιώματα των χρηστών, να εξασφαλίζουν νομική λογοδοσία και να συμμορφώνονται με πολυεπίπεδες νομοθεσίες. Η διεπιστημονική προσέγγιση που εμπλέκει τεχνολόγους, νομικούς και πολιτικούς φορείς είναι πλέον επιτακτική.

6.8 Συλλογικά Συμπεράσματα και Ερευνητικές Κατευθύνσεις

Η σύζευξη των τεχνολογιών Blockchain και IoT ενσωματώνει σημαντικές προκλήσεις σε τεχνικό, νομικό και οργανωτικό επίπεδο. Παρότι έχουν προταθεί επιμέρους λύσεις, απαιτείται πλέον μια πιο ολιστική και διεπιστημονική προσέγγιση, ώστε να καταστεί εφικτή η βιώσιμη και ευρεία εφαρμογή τέτοιων συστημάτων.

Με βάση τη βιβλιογραφική ανάλυση και τα ευρήματα των προηγούμενων ενοτήτων, διατυπώνονται οι ακόλουθες διασταυρούμενες κατευθύνσεις έρευνας που απαντούν σε πολλαπλά ερευνητικά κενά:

1. Σχεδίαση Αρθρωτών και Ρυθμιστικά Συμμορφούμενων Αρχιτεκτονικών

Απαιτείται η ανάπτυξη αρθρωτών συστημάτων που προσαρμόζονται σε διαφορετικά περιβάλλοντα (π.χ. έξυπνες πόλεις, logistics, ενέργεια), με ενσωματωμένες πολιτικές συμμόρφωσης από το στάδιο του σχεδιασμού (“compliance-by-design”). Η σύγκλιση τεχνικών προτύπων και νομικών απαιτήσεων είναι κρίσιμη για την πραγματική υιοθέτηση.

2. Ορισμός Ενιαίων Προτύπων και Εργαλείων Διαλειτουργικότητας

Η απουσία ενοποιημένων APIs, σημασιολογικών μοντέλων και μοντέλων αναφοράς περιορίζει τη συνεργασία μεταξύ διαφορετικών υποδομών. Η εστίαση στην τυποποίηση διεπαφών και στην υιοθέτηση κοινών λεξιλογίων θα επιτρέψει την ενιαία λειτουργία σε πολυεπίπεδα δίκτυα και ετερογενή οικοσυστήματα.

3. Πειραματική Επαλήθευση και Υλοποιήσεις σε Ρεαλιστικά Σενάρια

Η μετάβαση από τη θεωρία στην πράξη προϋποθέτει την ανάπτυξη πειραματικών πλαισίων (testbeds), την ποσοτική αξιολόγηση και την εκτέλεση πιλοτικών έργων σε πραγματικές συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο θα καταστεί δυνατή η αξιολόγηση της βιωσιμότητας των λύσεων σε κρίσιμους τομείς, όπως η υγεία, τα agtologistics και οι μεταφορές.

4. Διεπιστημονική Συνεργασία και Εκπαίδευση

Η επιτυχής υλοποίηση Blockchain-IoT απαιτεί στενή συνεργασία μεταξύ τεχνολόγων, νομικών, φορέων χάραξης πολιτικής και τελικών χρηστών. Παράλληλα, είναι αναγκαία η δημιουργία εκπαιδευτικών εργαλείων και οδηγιών για τον σχεδιασμό, την εφαρμογή και τη διαχείριση τέτοιων συστημάτων, με στόχο την αύξηση της εμπιστοσύνης και της υιοθέτησης από την αγορά.

Συνολικά, η ερευνητική κοινότητα καλείται να προσεγγίσει τη σύζευξη Blockchain και IoT με συνδυασμό τεχνολογικής, νομικής και κοινωνικής οπτικής, προκειμένου να διαμορφώσει λύσεις που να είναι όχι μόνο καινοτόμες, αλλά και πρακτικά εφαρμόσιμες, επεκτάσιμες και βιώσιμες σε πραγματικά περιβάλλοντα.

Κεφάλαιο 7 - Συμπεράσματα

7.1 Συνεισφορά της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανέδειξε τη δυναμική σχέση και τις αμοιβαίες επιδράσεις μεταξύ των τεχνολογιών Blockchain και Internet of Things (IoT). Μέσα από μια συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση, ταξινομήθηκαν θεματικά οι κυριότερες εφαρμογές και μελετήθηκαν οι τρόποι με τους οποίους το Blockchain μπορεί να ενισχύσει την ασφάλεια, την αξιοπιστία και τη διαλειτουργικότητα των IoT συστημάτων. Παράλληλα, αναδείχθηκαν τα πεδία στα οποία το IoT δρα ως καταλύτης εξέλιξης για το Blockchain, κυρίως μέσα από την παροχή πραγματικών δεδομένων και τη δυνατότητα εκτέλεσης έξυπνων συμβολαίων σε αποκεντρωμένα περιβάλλοντα.

Η εργασία προσέφερε ένα σφαιρικό πλαίσιο αξιολόγησης τεχνολογικών λύσεων, βάσει κριτηρίων, όπως η ασφάλεια, η αποδοτικότητα, η κλιμακωσιμότητα και η πρακτική υλοποιησιμότητα. Η συγκριτική ανάλυση εφαρμογών σε τομείς, όπως οι έξυπνες πόλεις, η υγεία, η γεωργία και η εφοδιαστική αλυσίδα, επιτρέπει μια πιο εμπεριστατωμένη κατανόηση του επιπέδου ωριμότητας των υφιστάμενων λύσεων. Επιπρόσθετα, εντοπίστηκαν σημαντικά ερευνητικά κενά, όπως η έλλειψη προτύπων, οι τεχνικές προκλήσεις υλοποίησης και η ανάγκη για κανονιστική συμμόρφωση, προσφέροντας έτσι χρήσιμες βάσεις για μελλοντική επιστημονική εργασία και πρακτική αξιοποίηση.

7.2 Προσωπική Εμπειρία που Αποκομίσθηκε

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε μια ουσιαστική εμπειρία ενίσχυσης των ακαδημαϊκών και ερευνητικών δεξιοτήτων. Κατά την πορεία της μελέτης, εμβαθύνθηκε η κατανόηση πολύπλοκων τεχνολογικών εννοιών, όπως τα κατανεμημένα καθολικά, τα έξυπνα συμβόλαια και οι αρχιτεκτονικές IoT. Η αναζήτηση και η αξιολόγηση έγκυρων επιστημονικών πηγών ενίσχυσαν την ικανότητα κριτικής σκέψης και μεθοδολογικής προσέγγισης σύνθετων προβλημάτων.

Η προσωπική ενασχόληση με τις τεχνικές, λειτουργικές και νομικές προκλήσεις που προκύπτουν από τη σύζευξη IoT και Blockchain διεύρυνε τον ορίζοντα τόσο ως προς την τεχνολογική καινοτομία όσο και ως προς την κατανόηση των ορίων και δυνατοτήτων της εφαρμοσμένης πληροφορικής. Επιπλέον, η εργασία προσέφερε εμπειρία στη σύνθεση πληροφορίας από πολλαπλές πηγές, στη χρήση συγκριτικών πινάκων και στην τεκμηριωμένη διατύπωση ερευνητικών συμπερασμάτων.

7.3 Σημαντικές Κατευθύνσεις Άμεσης Έρευνας

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ανέδειξε διάφορες κατευθύνσεις που μπορούν να αποτελέσουν αντικείμενο άμεσης ερευνητικής ενασχόλησης. Μία από τις σημαντικότερες αφορά την ανάγκη ανάπτυξης ελαφριών αρχιτεκτονικών blockchain, οι οποίες να είναι κατάλληλες για περιβάλλοντα με περιορισμένους πόρους, όπως είναι οι IoT συσκευές. Η σύγκλιση με τεχνολογίες, όπως το edge και fog computing, αναδεικνύεται ως ιδιαίτερα υποσχόμενη για τη μείωση της καθυστέρησης και της εξάρτησης από το υπολογιστικό νέφος.

Εξίσου κρίσιμη είναι η μελέτη ενοποιημένων πλαισίων για τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων IoT και blockchain, καθώς και η ανάπτυξη κοινών προτύπων ασφαλείας και πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Παράλληλα, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση σε θέματα κανονιστικής συμμόρφωσης, προστασίας ιδιωτικότητας και νομικής λογοδοσίας, ιδίως σε εφαρμογές που διαχειρίζονται ευαίσθητα προσωπικά ή βιομηχανικά δεδομένα.

Τέλος, προτείνεται η υλοποίηση και αξιολόγηση πιλοτικών εφαρμογών σε πραγματικές συνθήκες, προκειμένου να εξαχθούν αξιόπιστα συμπεράσματα ως προς τη λειτουργικότητα, την αποδοτικότητα και την αποδοχή των τεχνολογιών αυτών σε βιομηχανικό, οικιακό ή δημόσιο πλαίσιο.

Κεφάλαιο 8- Αναφορές

Ξένες Αναφορές

1. Kitchenham, B., Brereton, O. P., Budgen, D., Turner, M., Bailey, J., & Linkman, S. (2009). Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 51(1), 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009>
2. Hassija, V., Chamola, V., Saxena, V., Jain, D., Goyal, P. and Sikdar, B., (2019). A survey on IoT security: application areas, security threats, and solution architectures. *IEEE Access*, 7, pp.82721–82743. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2924045>
3. Ganesh, N.S.G., Venkatesh, N.G.M., Prasad, D.V.V. (2022). A Systematic Literature Review on Forensics in Cloud, IoT, AI & Blockchain. In: Misra, S., Arumugam, C. (eds) *Illumination of Artificial Intelligence in Cybersecurity and Forensics. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 109. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93453-8_9.
4. Alwakeel, A.M., (2021). An overview of fog computing and edge computing security and privacy issues. *Sensors*, 21(24), p.8226. <https://doi.org/10.3390/s21248226>
5. Ashton, K., 2009. That ‘internet of things’ thing. *RFID Journal*, 22(7), pp.97–114.
6. Li, W., Wu, J., & Cao, J., Chen, N., Zhang, Q., & Buyya, R. (2021). Blockchain-based trust management in cloud computing systems: a taxonomy, review and future directions. *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*, 10, Article 35. <https://doi.org/10.1186/s13677-021-00247-5>
7. Hassan, W.H., 2019. Current research on Internet of Things (IoT) security: A survey. *Computer Networks*, 148, pp.283–294. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.11.025>
8. Aly, M., Khomh, F., Haoques, M., Quintero, A. and Yacout, S., 2019. Enforcing security in Internet of Things frameworks: A systematic literature review. *Internet of Things*, 6, p.100050. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2019.100050>
9. Gokhale, P., Bhat, O. and Bhat, S., 2018. Introduction to IOT. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*, 5(1), pp.41–44. <http://dx.doi.org/10.17148/IARJSET.2018.517>
10. Golosova, J. and Romanovs, A., 2018. The advantages and disadvantages of the blockchain technology. In: 2018 IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE), pp.1–6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/AIEEE.2018.8592253>
11. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. and Palaniswami, M., 2013. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), pp.1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
12. Jurcut, A.D., Ranaweera, P. and Xu, L., (2020). Introduction to IoT security. In: *IoT Security: Advances in Authentication*, pp.27–64. <https://doi.org/10.1002/9781119527978.ch2>
13. Mohanty, S.P., (2016). New frameworks for secure image communication in the Internet of Things (IoT). Doctoral dissertation. University of North Texas.
14. Nikitas, A., Michalakopoulou, K., Tchouamou Njoya, E. T., & Karampatzakis, D. (2020). Artificial Intelligence, Transport and the Smart City: Definitions and Dimensions of a New Mobility Era. *Sustainability*, 12(7), 2789. <https://doi.org/10.3390/su12072789>

15. Odiete, O., Lomotey, R.K., Deters, R. (2018). Using Blockchain to Support Data and Service Management in IoV/IoT. In: Peng, SL., Wang, SJ., Balas, V., Zhao, M. (eds) Security with Intelligent Computing and Big-data Services. SICBS 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 733. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-76451-1_33
16. Kassab, W.A. and Darabkh, K.A., 2020. A–Z survey of Internet of Things: Architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations. *Journal of Network and Computer Applications*, 163, p.102663. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102663>
17. Kutseva, M., 2022. Adaptation of seven-layered IOT architecture for energy efficiency management in Smart House. In: 2022 10th International Scientific Conference on Computer Science (COMSCI), pp.1–5. IEEE. <https://doi.org/10.1109/COMSCI55378.2022.9912604>
18. Rolls-Royce., 2022. The IntelligentEngine: How digital twins improve aircraft performance. Available at: <https://www.rolls-royce.com/innovation/digital/digital-twin.aspx> [Accessed 27 July 2025].
19. Bosch., 2021. Industry 4.0: Smart production and IoT solutions. Available at: <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/industry-4-0-at-bosch-the-power-of-an-idea-177024.html> [Accessed 27 July 2025].
20. Tesla., n.d. Autopilot and Full Self-Driving Capability. Available at: https://www.tesla.com/el_gr/support/autopilot [Accessed 27 July 2025].
21. BMW., n.d. BMW ConnectedDrive: Digital services & connectivity. Available at: <https://www.bmw.gr/el/shop/ls/cp/connected-drive> [Accessed 27 July 2025].
22. Honjo, K., 2020. Bridge monitoring using IoT: Akashi Kaikyo Bridge case. Available at: <https://www.britannica.com/topic/Akashi-Strait-Bridge> [Accessed 27 July 2025].
23. Deutsche Bahn., n.d. Predictive maintenance with IoT technology. Available at: <https://db-engineering-consulting.com/en/projects/predictive-maintenance-diana-analysis-and-diagnosis-platform-at-db-netz-ag/> [Accessed 27 July 2025].
24. Deloitte., n.d. The Edge: The world's most sustainable office building. Available at: <https://www.avex-int.com/en/en/deloitte-edge-smartest-building-world/> [Accessed 27 July 2025].
25. Honeywell., 2019. IoT and smart building technology at Burj Khalifa. Available at: <https://www.mepmiddleeast.com/business/70772-burj-khalifa-honeywell-mark-10-year-iot-milestone> [Accessed 27 July 2025].
26. GovTech Singapore., n.d. Smart Traffic Light System in Singapore. Available at: <https://www.intellistride.sg/blog/how-singapores-smart-traffic-system-is-redefining-urban-mobility/> [Accessed 27 July 2025].
27. Smart City Expo World Congress., n.d. Barcelona: A global model of a smart city. Available at: <https://www.bcn-advisors.com/barcelona-una-ciudad-inteligente-lider> [Accessed 27 July 2025].
28. Enel., n.d. Smart Grids: Enel's vision for a sustainable energy future. Available at: <https://www.enel.com/media/explore/search-news/news/2015/07/cybersecurity-smart-grids-enel-awarded-united-nations> [Accessed 27 July 2025].
29. Pacific Gas & Electric., n.d. SmartMeter™ Program Overview. Available at: <https://www.alamy.com/stock-photo-pge-smartmeter-residential-electric-meter-31073834.html> [Accessed 27 July 2025].
30. U.S. Department of Energy. (2016). Benefits of Intelligent Efficiency. CFDA Number: 81.086. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/01/f34/intelligent_efficiency_report.pdf
31. Rocky Mountain Institute, Johnson Controls, & Clinton Climate Initiative. (2013). Empire State Building deep energy retrofit achieves 38% energy reduction and USD 4.4 million annual savings (Case Study). NYSERDA.

<https://www.nyserda.ny.gov/-/media/Project/Secure-Media/Partners/CRE/cs/EES-CI-empirestatebldg-cs.pdf>

32. Khan, J.Y. and Iqbal, J., 2016. Internet of Things: Architectures, Protocols and Applications. Technical report. University of New South Wales. <https://doi.org/10.1155/2017/9324035>
33. Aliyu, A. A., & Liu, J. (2023). Blockchain-Based Smart Farm Security Framework for the Internet of Things. *Sensors*, 23(18), 7992. <https://doi.org/10.3390/s23187992>
34. Ferrández-Pastor, F.J., Mora-Pascual, J. and Díaz-Lajara, D., 2022. Agricultural traceability model based on IoT and Blockchain: Application in industrial hemp production. *Journal of Industrial Information Integration*, 29, p.100381. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2022.100381>
35. Yang, Q., Wang, H., Wu, X., Wang, T., Zhang, S. and Liu, N., 2022. Secure blockchain platform for industrial IoT with trusted computing hardware. *IEEE Internet of Things Magazine*, 4(4), pp.86–92. <https://doi.org/10.1109/IOTM.001.2100043>
36. Sagirlar, G., Carminati, B., Ferrari, E., Sheehan, J.D. and Ragnoli, E., 2018. Hybrid-iot: Hybrid blockchain architecture for internet of things-pow sub-blockchains. In: 2018 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData), pp.1007–1016. IEEE. https://doi.org/10.1109/Cybermatics_2018.2018.00189
37. Mondal, S., Wijewardena, K.P., Karuppuswami, S., Kriti, N., Kumar, D. and Chahal, P., 2019. Blockchain inspired RFID-based information architecture for food supply chain. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3), pp.5803–5813. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2907658>
38. Al-Nbhan, W. A. N. A., Zahary, A. T., & Al-Shargabi, A. A. (2023). Blockchain-IoT healthcare applications and trends: A review. *ResearchGate*. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3349187>
39. Pawar, P., Parolia, N., Shinde, S. et al. eHealthChain—a blockchain-based personal health information management system. *Ann. Telecommun.* 77, 33–45 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12243-021-00868-6>
40. Lee, Y., Rathore, S., Park, J.H. et al. A blockchain-based smart home gateway architecture for preventing data forgery. *Hum. Cent. Comput. Inf. Sci.* 10, 9 (2020). <https://doi.org/10.1186/s13673-020-0214-5>
41. Ghovanlooy Ghajar, F., Sikora, A. and Welte, D., 2022. Schloss: Blockchain-based system architecture for secure industrial IoT. *Electronics*, 11(10), p.1629. <https://doi.org/10.3390/electronics11101629>
42. Pelekoudas-Oikonomou, F., Zachos, G., Papaioannou, M., De Ree, M., Ribeiro, J.C., Mantas, G. and Rodriguez, J., 2022. Blockchain-based security mechanisms for IoMT Edge networks in IoMT-based healthcare monitoring systems. *Sensors*, 22(7), p.2449. <https://doi.org/10.3390/s22072449>
43. Vitaskos, V., Demestichas, K., Karetos, S. and Costopoulou, C., 2024. Blockchain and Internet of Things Technologies for Food Traceability in Olive Oil Supply Chains. *Sensors*, 24(24), p.8189. <https://doi.org/10.3390/s24248189>
44. Khalil, U., Malik, O.A., Hong, O.W. and Uddin, M., 2022. DSCOT: An NFT-based blockchain architecture for the authentication of IoT-enabled smart devices in smart cities. *arXiv preprint, arXiv:2211.04803*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.04803>
45. Awotunde, J.B., Misra, S., Pham, Q.T. (2022). A Secure Framework for Internet of Medical Things Security Based System Using Lightweight Cryptography Enabled Blockchain. In: Dang, T.K., Küng, J., Chung, T.M. (eds) *Future Data and Security Engineering. Big Data, Security and*

Ελληνικές Αναφορές

46. Αργυρίου, Π., 2019. Διαδίκτυο των πραγμάτων. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
47. Βέτσος, Α., 2023. Τεχνολογία blockchain και ακαδημαϊκά δεδομένα. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
48. Βλαχοδημητρόπουλος, Γ., 2018. Διανεμημένα πρωτόκολλα ασφαλείας για το διαδίκτυο των πραγμάτων. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
49. Βολικά, Ν., 2024. Blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα. Master's thesis. Πανεπιστήμιο Πειραιώς.
50. Γιοτσίδης, Α., 2024. Εφαρμογές τεχνολογίας Internet of Things στη διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας. Master's thesis. Πανεπιστήμιο Πειραιώς.
51. Ιωάννου, Α., 2022. Η τεχνολογία blockchain και η εφαρμογή της στην εφοδιαστική αλυσίδα. Master's thesis. Πανεπιστήμιο Πειραιώς.
52. Κλαδίσκος, Λ., 2020. Διαδίκτυο των Πραγμάτων. Master's thesis. Πανεπιστήμιο Πειραιώς.
53. Κρητικού, Ι., 2020. Ψηφιακός μετασχηματισμός αεροδρομίων με χρήση των big data-μια μελέτη για το διεθνές αεροδρόμιο Αθηνών "Ελευθέριος Βενιζέλος". Πανεπιστήμιο Αιγαίου
54. Μητρόπουλος, Σ., & Δουληγέρης, Χ. (2023). Κατανεμημένα Πληροφοριακά Συστήματα και Διαχείρισή τους [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-304>
55. Μπαλαφούτης, Χ., 2020. Ανάλυση ασφάλειας πρωτοκόλλων δικτύου για συστήματα (IoT). Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου
56. Ντοά, Γ., 2017. Blockchain και η εφαρμογή του στο Internet of Things (IoT). Master's thesis. Πανεπιστήμιο Πειραιώς.
57. Πούλος, Σ., 2024. Το Διαδίκτυο των πραγμάτων και τα Agrolistics (Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας του διαδικτύου των πραγμάτων (IoT) και του blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα του αγροτροφικού τομέα). Master's thesis. Πανεπιστήμιο Πειραιώς.
58. Ρήτας, Ν., 2020. Ασφάλεια στο διαδίκτυο των πραγμάτων. Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής
59. Ροδίτης, Δ.Α., 2018. Internet of things. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας
60. Σαλαγιάννης, Δ.Σ., Σαλαγιάννης, Γ.Σ., Αρμακόλας, Σ. και Μικρογιαννίδης, Α., 2022. Η τεχνολογία Blockchain στην εκπαίδευση και οι νέες προοπτικές (Blockchain technology in education and the new perspectives). Διεθνές Συνέδριο για την Ανοικτή & εξ Αποστάσεως Εκπαίδευση, 11(2Α), σσ.134-140.
61. Σαρμπάνη, Χ., χ.χ. Τεχνολογία blockchain και έξυπνες συμβάσεις στον δημόσιο τομέα - οφέλη και νομικές προκλήσεις. Πανεπιστήμιο Μακεδονίας, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
62. Τραϊφόρου, Σ., 2020. Internet of Things. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πελοποννήσου
63. Φιωτάκης, Γ. και Τρίτσης, Ν., 2019. Τεχνολογίες Internet of Things επικεντρωμένες σε υπηρεσίες smart home. Πανεπιστήμιο Αιγαίου
64. Χαϊντούτης, Κ., 2019. Blockchain and IoT: προβλήματα ενοποίησης και προκλήσεις. Master's thesis. Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

65. Χρονοπούλου, Σ., 2023. Συσκευές internet of things (IOT) και smart homes: εξέλιξη, διείσδυση και οι δυνατότητες που παρέχονται στην αλλαγή της καθημερινότητας.Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο
66. Χρυσάϊδος, Ι., 2018. Κρυπτογραφία και ασφάλεια στο διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT): Αλγόριθμοι, μηχανισμοί και υλοποιήσεις. Ανοικτό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Ηλεκτρονικές Πηγές

67. Internet Architecture Board (IAB), n.d. Internet Architecture Board. [online] Available at: <https://www.iab.org/> [Accessed 27 Jul. 2025].
68. DBLP, n.d. Computer Communications, Volume 55. [online] Available at: https://dblp.org/db/journals/cm/cm55.html?utm_source [Accessed 27 Jul. 2025].
69. OECD, 2023. Smart city data governance: Achieving better data and better outcomes. [online] Available at: <https://www.oecd.org/publications/smart-city-data-governance-e57ce301-en.htm> [Accessed 27 Jul. 2025].