



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
«Blockchain στην υπηρεσία των έξυπνων πόλεων »



Του φοιτητή
Παπαδόπουλου Ηλία
Αρ. Μητρώου: 2020125

Επιβλέπων
Ηλιούδης Χρήστος
Βαθμίδα: Καθηγητής

Ημερομηνία 15 Δεκεμβρίου 2025

Τίτλος Δ.Ε: Blockchain στην υπηρεσία των έξυπνων πόλεων

Κωδικός Δ.Ε: 25190

Όνοματεπώνυμο φοιτητή: Παπαδόπουλος Ηλίας

Όνοματεπώνυμο εισηγητή: Χρήστος Ηλιούδης

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε: 01/07/2025

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε: 15/12/2025

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

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

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

«Σε αυτούς που είναι πάντα δίπλα μου»

Πρόλογος

Η επιλογή του θέματος προέκυψε από το έντονο ενδιαφέρον μου για τις ανερχόμενες τεχνολογίες και τον τρόπο με τον οποίο μπορούν να συμβάλουν στη βελτίωση της καθημερινότητας στις σύγχρονες κοινωνίες. Το blockchain αποτελεί ένα καινοτόμο εργαλείο που αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο σε κρίσιμους τομείς των έξυπνων πόλεων.

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας μελέτησα και κατανόησα σε βάθος τόσο το τεχνολογικό υπόβαθρο όσο και τις πραγματικές εφαρμογές του blockchain, καθώς και τις προκλήσεις που ανακύπτουν κατά την υλοποίησή του.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην ενσωμάτωση της τεχνολογίας blockchain στις έξυπνες πόλεις. Αρχικά, παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο της έρευνας, ο σκοπός και οι στόχοι της τεχνολογίας blockchain, καθώς και μια σύντομη αναφορά στη μεθοδολογία PRISMA. Επίσης, αναλύεται το τεχνολογικό περιβάλλον και παρουσιάζονται σημαντικές πλατφόρμες blockchain και τα χαρακτηριστικά τους. Στη συνέχεια γίνεται λόγος για τις εφαρμογές του blockchain στους τομείς των έξυπνων πόλεων, συνοδευόμενες από ενδεικτικά παραδείγματα τεχνολογιών. Επιπλέον, εξετάζονται κρίσιμα ζητήματα ασφαλείας, περιγράφονται πιθανοί κίνδυνοι και προτείνονται λύσεις για την αντιμετώπισή τους. Η εργασία περιλαμβάνει επίσης μελέτη περίπτωσης για την εφαρμογή blockchain στον Δήμο Θεσσαλονίκης. Τέλος, συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας και προτείνονται προτάσεις για μελλοντική βελτίωση και επέκταση της έρευνας.

«Blockchain at the service of smart cities»

«Hlias Papadopoulos»

Abstract

This thesis focuses on the integration of blockchain technology in smart cities. First, it presents the general research framework, the purpose and objectives of blockchain technology, as well as a brief reference to the PRISMA methodology. It also analyzes the technological environment and presents important blockchain platforms and their characteristics. It then discusses the applications of blockchain in the areas of smart cities, accompanied by illustrative examples of technologies. In addition, critical security issues are examined, potential risks are described, and solutions to address them are proposed. The paper also includes a case study on the application of blockchain in the Municipality of Thessaloniki. Finally, the main conclusions of the paper are summarized and suggestions are made for future improvement and expansion of the research.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους για την συνεχή υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια της εργασίας.

Ιδιαίτερα, ευχαριστώ τον επιβλέποντα της εργασίας μου, καθηγητή κ. Χρήστο Ηλιούδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθώς και για την ομαλή συνεργασία που υπήρξε.

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος	IV
Περίληψη	V
Abstract.....	VI
Ευχαριστίες	VII
Πίνακας Περιεχομένων	VIII
Κατάλογος Πινάκων – Εικόνων – Σχημάτων	XI
I. Εισαγωγή.....	1
1.1. Σκοπός και στόχοι εργασίας	1
1.2. Ερευνητικά ερωτήματα	1
1.3. Μεθοδολογία PRISMA	1
1.4. Δομή εργασίας.....	2
II. Θεωρητικό Υπόβαθρο	3
2.1. Τι είναι το Blockchain	3
2.1.1. Ορισμός και βασικές έννοιες	3
2.1.2. Ιστορική αναφορά.....	4
2.1.3. Χαρακτηριστικά του blockchain.....	4
2.1.4. Μηχανισμοί συναίνεσης.....	5
Proof of Work	5
Proof of Stake	5
2.1.5. Μοντέλα Blockchain	6
Δημόσιο.....	6
Ιδιωτικό	6
Κοινοπρακτικό	6
Υβριδικό.....	7
2.1.6. Έξυπνα συμβόλαια	7
2.2. Έξυπνες Πόλεις (SmartCities)	8
2.2.1. Ορισμός	8

2.2.2.	Πυλώνες έξυπνης πόλης.....	9
	Οικονομία.....	9
	Μετακίνηση.....	9
	Περιβάλλον.....	10
	Πολίτες	10
	Τρόπος ζωής	10
	Διακυβέρνηση	11
2.2.3.	Τεχνολογίες χρήσης των έξυπνων πόλεων.....	11
2.3.	Σημεία σύγκλισης blockchain& έξυπνων πόλεων	12
2.4.	Επίλογος	13
III.	Μεθοδολογία Έρευνας (PRISMA).....	14
3.1.	Τι είναι η μέθοδος PRISMA	14
3.2.	Στάδια της PRISMA.....	14
	Αναγνώριση (Identification).....	15
	Αρχικός έλεγχος (Screening).....	15
	Έλεγχος επιλεξιμότητας (Eligibility)	15
	Τελική ένταξη (Included).....	15
3.3.	Εφαρμογή στη διπλωματική	16
IV.	Κεφάλαιο 4: Ανάλυση Τεχνολογικού Περιβάλλοντος	18
4.1.	Παρουσίαση κύριων πλατφόρμων Blockchain	18
	Ethereum.....	18
	HyperledgerFabric.....	19
	Quorum	19
	ΙΟΤΑ.....	20
4.2.	On-chain vs off-chain δεδομένα	20
4.3.	Συγκριτική αξιολόγηση πλατφόρμων	21
4.4.	Επίλογος	22
V.	Εφαρμογές Blockchain στις Έξυπνες Πόλεις.....	23
5.1.	Ψηφιακή ταυτότητα και αυθεντικοποίηση.....	24

5.1.1.	Σύστημα ψηφιακής ταυτοποίησης με DIDs και Verifiable Credentials	26
5.2.	Εκλογές και ηλεκτρονική ψηφοφορία (e-voting)	28
5.2.1.	Το e-voting σύστημα BCvoteMDE για πολυεπίπεδες εκλογές	29
5.3.	Κτηματολόγιο και διαχείριση περιουσιακών στοιχείων.....	30
5.3.1.	Σύστημα καταγραφής και μεταβίβασης γης σε blockchain	31
5.4.	Οικονομική διαφάνεια, δημόσιες συμβάσεις και φορολογία	32
5.4.1.	Πλατφόρμα BlockchainasaService (BaaS) για ηλεκτρονικούς διαγωνισμούς (e-tendering).....	34
5.5.	Ηλεκτρονικός ιατρικός φάκελος και δεδομένα υγείας.....	35
5.5.1.	Σύστημα ηλεκτρονικού ιατρικού φακέλου βασισμένο σε blockchain.....	37
5.6.	Έξυπνες υποδομές, μεταφορές και βιώσιμη διαχείριση πόρων	39
5.6.1.	Το σύστημα STUB 2.0 για έξυπνο ticketing σε πολυτροπικές μεταφορές	40
5.7.	Επίλογος	42
VI.	Ασφάλεια και Προκλήσεις	43
6.1.	Προβλήματα ιδιωτικότητας και GDPR	43
6.2.	Επιθέσεις σε blockchain	44
6.2.1.	Επιθέσεις στο δίκτυο και στον μηχανισμό συναίνεσης	44
6.2.2.	Επιθέσεις σε έξυπνα συμβόλαια και οικονομικά πρωτόκολλα	45
6.3.	Κλιμάκωση και απόδοση.....	46
6.4.	Νομικά και ηθικά ζητήματα.....	48
6.4.1.	Νομικό πλαίσιο και ρυθμιστικές προκλήσεις.....	48
6.4.2.	Ηθικές διαστάσεις της τεχνολογίας	49
6.5.	Επίλογος	51
VII.	Μελέτη Περίπτωσης: Η Έξυπνη Πόλη της Θεσσαλονίκης	52
7.1.	Εισαγωγή και κίνητρο επιλογής.....	52
VIII.	Συμπεράσματα – Προτάσεις	55
8.1.	Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα	55
8.2.	Κύρια ευρήματα	55
8.3.	Περιορισμοί της μελέτης.....	56
8.4.	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα ή εφαρμογή	56

ΙΧ.	Βιβλιογραφία.....	58
-----	-------------------	----

Κατάλογος Πινάκων – Εικόνων – Σχημάτων

Πίνακας 1.	Συγκριτική αξιολόγηση <i>Ethereum, Hyperledger, Quorum, IOTA</i>	22
------------	---	----

Εικόνα 1.	Θεσσαλονίκη: κλιματικά ουδέτερη & έξυπνη πόλη μέχρι το 2030 [81].....	52
-----------	---	----

Σχήμα 1.	Ο κύκλος ζωής των έξυπνων συμβολαίων: δημιουργία, ανάπτυξη, εκτέλεση και ολοκλήρωση. [1].....	7
Σχήμα 2.	Βασικοί πυλώνες μιας έξυπνης πόλης [12].....	9
Σχήμα 3.	Διάγραμμα ροής PRISMA[16].....	16
Σχήμα 4.	Διάγραμμα ροής PRISMA του Blockchain στην υπηρεσία των έξυπνων πόλεων [17].....	17
Σχήμα 5.	Τομείς ενσωμάτωσης τεχνολογίας blockchain [36].....	24
Σχήμα 6.	Self-Sovereign Identity (SSI) [32].....	26
Σχήμα 7.	Αρχιτεκτονική του μοντέλου ψηφιακή ταυτότητα [34].....	27
Σχήμα 8.	Η αρχιτεκτονική του e-voting συστήματος: BCvoteMDE[37].....	30
Σχήμα 9.	Διάγραμμα ροής του συστήματος [45].....	32
Σχήμα 10.	Απεικόνιση της αρχιτεκτονικής του συστήματος.....	35
Σχήμα 11.	Αρχιτεκτονική συστήματος ηλεκτρονικού ιατρικού φακέλου [52].....	39
Σχήμα 12.	Αρχιτεκτονική συστήματος STUB 2.0.....	42
Σχήμα 13.	Πως πραγματοποιείται η επίθεση 51%.....	45
Σχήμα 14.	Το τρίλλημα του blockchain.....	46
Σχήμα 15.	Λύσεις κλιμάκωσης 1ου Επιπέδου [69].....	47
Σχήμα 16.	Παραδείγματα λύσεων 2ου Επιπέδου [69].....	48
Σχήμα 17.	Διάγραμμα ροής των αξιών του Ethical Blockchain Development [75].....	50
Σχήμα 18.	Βασικοί πυλώνες μιας ευφυούς πόλης [82].....	53

I. Εισαγωγή

1.1. Σκοπός και στόχοι εργασίας

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό τη διερεύνηση του ρόλου και των εφαρμογών της τεχνολογίας blockchain στο πλαίσιο των έξυπνων πόλεων, με έμφαση στη διαφάνεια, την ασφάλεια και την προστασία δεδομένων. Με τη ραγδαία εξέλιξη των ψηφιακών τεχνολογιών, το blockchain αναδεικνύεται ως μια καινοτόμος λύση με σημαντικές δυνατότητες για τη βελτίωση της διαχείρισης δεδομένων και συναλλαγών. Η ενσωμάτωσή του στις αστικές υποδομές συμβάλλει στη δημιουργία αξιόπιστων, αποκεντρωμένων και αυτοματοποιημένων μηχανισμών λειτουργίας. Μέσα από βιβλιογραφική ανάλυση και συστηματική μελέτη, επιδιώκεται η κατανόηση των βασικών αρχών λειτουργίας του blockchain, η αποτύπωση των σημαντικότερων πεδίων εφαρμογής του (όπως η ψηφιακή ταυτότητα, οι εκλογές, η υγεία και οι δημόσιες υπηρεσίες), καθώς και η ανάδειξη των τεχνικών και οργανωτικών προκλήσεων που σχετίζονται με την υιοθέτησή του. Τελικός στόχος είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη συμβολή της τεχνολογίας αυτής στη βελτίωση της διακυβέρνησης, της αποδοτικότητας και της εμπιστοσύνης των πολιτών στα ψηφιακά οικοσυστήματα των έξυπνων πόλεων.

1.2. Ερευνητικά ερωτήματα

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, η εργασία καθοδηγείται από ορισμένα βασικά ερευνητικά ερωτήματα, τα οποία αποσκοπούν στην αποσαφήνιση των τρόπων ενσωμάτωσης του blockchain στις έξυπνες πόλεις. Πρωταρχικά διερευνάται πώς το blockchain μπορεί να ενισχύσει τη διαφάνεια, τη λογοδοσία και την εμπιστοσύνη στις δημόσιες υπηρεσίες και στα πληροφοριακά συστήματα που τα υποστηρίζουν. Εξετάζεται επίσης ποια είναι τα κύρια τεχνικά, οργανωτικά και λειτουργικά εμπόδια που επηρεάζουν την ευρύτερη υιοθέτησή του, καθώς και σε ποιους τομείς (όπως η ψηφιακή ταυτότητα, οι εκλογικές διαδικασίες, η υγεία και η διαχείριση πόρων) έχει ήδη επιδείξει αποτελεσματικές εφαρμογές. Επιπλέον, αναλύονται ζητήματα κυβερνοασφάλειας και προστασίας προσωπικών δεδομένων. Μέσα από την απάντηση αυτών των ερωτημάτων, επιδιώκεται η διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης εικόνας για τις δυνατότητες και τις προοπτικές του blockchain στην οικοδόμηση ασφαλών και βιώσιμων ψηφιακών πόλεων του μέλλοντος.

1.3. Μεθοδολογία PRISMA

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία βασίζεται στη διαδικασία συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης σύμφωνα με το πρωτόκολλο PRISMA. Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε καθώς προσφέρει μια δομημένη και διαφανή προσέγγιση στη συλλογή, αξιολόγηση και ανάλυση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας. Η αναζήτηση των επιστημονικών πηγών πραγματοποιήθηκε σε διεθνείς βάσεις δεδομένων, όπως IEEE Xplore, Scopus και Google Scholar, με τη χρήση στοχευμένων λέξεων-κλειδιών σχετικών με το blockchain και τις έξυπνες πόλεις. Από τα αποτελέσματα της αναζήτησης εφαρμόστηκαν κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού, ώστε να επιλεγούν οι πιο πρόσφατες και συναφείς μελέτες, ενώ απορρίφθηκαν άρθρα που δεν σχετίζονταν άμεσα με το αντικείμενο της έρευνας ή δεν πληρούσαν τα απαραίτητα επιστημονικά πρότυπα. Τα στάδια της μεθόδου PRISMA (αναγνώριση, αρχικός έλεγχος, έλεγχος επιλεξιμότητας και τελική ένταξη) παρουσιάζονται συνοπτικά στο παρόν κεφάλαιο και αναλυτικά στο 3^ο κεφάλαιο της εργασίας.

1.4. Δομή εργασίας

Στο παρόν **πρώτο** κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο γενικότερο πλαίσιο στο οποίο εντάσσεται η παρούσα διπλωματική εργασία, δίνονται κάποιες πληροφορίες για τον σκοπό και τους στόχους της τεχνολογίας blockchain. Επίσης, γίνεται μία μικρή αναφορά για τη μεθοδολογία PRISMA που έχει χρησιμοποιηθεί.

Στο **δεύτερο** κεφάλαιο εξηγείται λεπτομερώς το θεωρητικό υπόβαθρο του blockchain καθώς και οι βασικές αρχές που το διέπουν. Επιπλέον αναλύεται η ιδέα της έξυπνης πόλης, παρουσιάζοντας σημαντικές ανερχόμενες τεχνολογίες της.

Το **τρίτο** κεφάλαιο αναλύει εκτενώς τη μεθοδολογία PRISMA. Περιγράφεται ο σκοπός χρήσης της, τα στάδια δημιουργίας της βιβλιογραφίας και η εφαρμογή της στη διπλωματική εργασία.

Ακολουθεί το **τέταρτο** κεφάλαιο, στο οποίο γίνεται η ανάλυση του τεχνολογικού περιβάλλοντος. Εδώ αναλύονται κάποιες από τις σημαντικότερες τεχνολογίες που βασίζονται στο blockchain (Ethereum, Hyperledger , Quorum, IOTA) και πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση των χαρακτηριστικών τους.

Το **πέμπτο** κεφάλαιο αποτελεί το σημαντικότερο της διπλωματικής εργασίας, καθώς σε αυτό αναλύονται οι εφαρμογές blockchain για την ανάπτυξη των τομέων των έξυπνων πόλεων. Για κάθε τομέα, δίνεται ένα παράδειγμα τεχνολογίας blockchain, το οποίο αποσκοπεί στην αντιμετώπιση των προκλήσεων στα παραδοσιακά συστήματα.

Κατόπιν, στο **έκτο** κεφάλαιο περιλαμβάνεται η ανάλυση σχετικά με ζητήματα ασφαλείας των δεδομένων. Γίνεται λόγος για τις επιθέσεις που αντιμετωπίζουν τα συστήματα blockchain και προτείνονται λύσεις αντιμετώπισης.

Στο **έβδομο** κεφάλαιο παρουσιάζεται η περίπτωσης μελέτης μια εφαρμογής blockchain στην πόλη της Θεσσαλονίκης. Αναλύονται τα κίνητρα και τα κριτήρια επιλογής της πόλης, η υφιστάμενη κατάσταση που επικρατεί και προτείνεται ένα ενιαίο σύστημα blockchain, το οποίο θα λειτουργεί ως υποδομή εμπιστοσύνης για όλα τα συστήματα του Δήμου.

Τέλος, στο **όγδοο** και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα και οι πιθανές προτάσεις βελτίωσης σε μελλοντικές επεκτάσεις της εφαρμογής.

II. Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1. Τι είναι το Blockchain

Το blockchain είναι μια νέα τεχνολογία καταγραφής δεδομένων, όπου κάθε εγγραφή (block) συνδέεται με την προηγούμενη μέσω κρυπτογράφησης, σχηματίζοντας μια αλυσίδα. Αντί να υπάρχει σε έναν κεντρικό υπολογιστή, αποθηκεύεται σε πολλά αντίγραφα ταυτόχρονα (distributed ledger), εξασφαλίζοντας διαφάνεια, ασφάλεια και αμεταβλητότητα. Οι συναλλαγές που πραγματοποιούνται στα blockchain κάνουν χρήση δικτύων peer to peer. Σύμφωνα με αυτό το δίκτυο, οι υπολογιστές που ανήκουν στο σύστημα μοιράζονται ισόποσα τους πόρους και ακολουθούν το πρωτόκολλο επικοινωνίας με σκοπό την επικύρωση των νέων μπλοκ. Χαρακτηριστική περίπτωση χρήση του blockchain αποτελεί το bitcoin. Το πρωτόκολλο bitcoin βασίζεται σε ένα blockchain. Σύμφωνα με μια ερευνητική εργασία που παρουσίαζε το ψηφιακό νόμισμα, ο ψευδώνυμος δημιουργός του Bitcoin, Satoshi Nakamoto, το χαρακτήρισε ως «ένα νέο ηλεκτρονικό σύστημα μετρητών που είναι πλήρως peer-to-peer, χωρίς αξιόπιστο τρίτο μέρος».

2.1.1. Ορισμός και βασικές έννοιες

Η τεχνολογία blockchain είναι ένα αποκεντρωμένο και κατανεμημένο σύστημα ψηφιακού καθολικού που χρησιμοποιείται για την καταγραφή συναλλαγών σε ένα δίκτυο κόμβων (υπολογιστών). Με άλλα λόγια αποτελεί, μια βάση δεδομένων που διατηρεί ένα συνεχώς αυξανόμενο σύνολο αρχείων δεδομένων. Οι συναλλαγές που υλοποιούνται μεταξύ υλικών ή και άυλων περιουσιακών στοιχείων πραγματοποιούνται μέσα σε ένα άμεσο, κοινόχρηστο και ασφαλές περιβάλλον. Όλοι οι κόμβοι του δικτύου θεωρούνται ίσοι και έχουν ίσα δικαιώματα και τα δεδομένα αποθηκεύονται σε όλους τους κόμβους του δικτύου.

Το blockchain διαθέτει κάποιες βασικές εννοιές οι οποίες χρήζουν περαιτέρω ανάλυση. Αρχικά, κάθε συναλλαγή που λαμβάνει χώρα καταγράφεται στα blocks, δημιουργώντας μια αλυσίδα συναλλαγών, η οποία είναι εμφανής προς όλους τους συμμετέχοντες. Όλες οι συναλλαγές κρυπτογραφούνται και αποθηκεύονται σε αυτά και τα δεδομένα τους δεν μπορούν να αλλοιωθούν. Η σημασία του block είναι μεγάλη καθώς αποτελεί τη βασική μονάδα λειτουργίας ενός blockchain. Το πρώτο μπλοκ ενός blockchain ονομάζεται genesis μπλοκ διότι δεν έχει γονικό μπλοκ [1].

Κάθε μπλοκ συνδέεται με το προηγούμενό του μέσω κρυπτογραφικών κατακερματισμών (Hash), σχηματίζοντας μια «αλυσίδα». Η αλυσίδα των blocks αποτελεί το blockchain. Καθένα συνδέεται με το προηγούμενο μέσω του hash του. Το hash είναι ένα κρυπτογραφικό αποτύπωμα των δεδομένων του block. Δηλαδή, κάθε μπλοκ διαθέτει το hash του τρέχοντος αλλά και του προηγούμενου μπλοκ ώστε να διασφαλίζεται η σειρά αυτών. Σε περίπτωση που πραγματοποιηθεί αλλαγή στο περιεχόμενο του μπλοκ, τότε το hash αλλάζει εντελώς, γεγονός που εξασφαλίζει την ακεραιότητα του συστήματος.[3]

Τα μπλοκ διαθέτουν ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο το οποίο είναι η χρονοσφραγίδα. Σκοπός της αποτελεί η καταγραφή της χρονικής στιγμής κατά την οποία το block δημιουργήθηκε ή επαληθεύτηκε. Επίσης, είναι υπεύθυνη για την καταγραφή των συναλλαγών με τη σωστή σειρά αλλά και για την προστασία από διπλοπληρωμές σε περίπτωση που δύο συναλλαγές επιχειρούν να

χρησιμοποιήσουν τα ίδια χρήματα. Παράλληλα, βοηθά στη διατήρηση συγχρονισμένης λειτουργίας των κόμβων (nodes) σε ένα αποκεντρωμένο περιβάλλον.

2.1.2. Ιστορική αναφορά

Οι πρώτες έννοιες σχετικά με το blockchain έλαβαν χώρα στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Συγκεκριμένα, οι David Chaum, Stuart Haber και W. Scott Stornetta παρουσίασαν κρυπτογραφικά ασφαλείς αλυσίδες μπλοκ. Το 1992, οι ίδιοι ερευνητές πρόσθεσαν στις αλυσίδες δεδομένων τους τις λεγόμενες Merkle trees. Το γεγονός αυτό βοήθησε στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του σχεδιασμού επιτρέποντας έτσι τη συλλογή πολλών πιστοποιητικών εγγράφων σε ένα μπλοκ.

Η πρώτη ιστορικά εφαρμογή του blockchain ήταν στο ψηφιακό νόμισμα Bitcoin, όπως περιλήφθηκε στη λευκή βίβλο του Satoshi Nakamoto το 2008 [2]. Η πρόταση αυτή προέβλεπε ένα σύστημα ψηφιακών συναλλαγών χωρίς εμπιστοσύνη και λειτούργησε ως δημόσιο κατανεμημένο καθολικό χωρίς ανάγκη κεντρικής εξουσίας. Μετά το 2011 κυκλοφόρησαν κρυπτονομίσματα όπως Litecoin και Namecoin, και αργότερα Peercoin (2012) και Dogecoin (2013) [6]. Το 2015 παρουσιάστηκε το Ethereum στο οποίο ενσωματώθηκαν τα έξυπνα συμβόλαια (smart contracts) και κάποιες αποκεντρωμένες εφαρμογών (dApps και NFTs).

Με την πάροδο των χρόνων, δημιουργήθηκαν νέοι μηχανισμοί συναίνεσης, παράλληλες υποαλυσίδες και ιδιωτικά δίκτυα για να αντιμετωπίσουν ζητήματα στις συναλλαγές και στους χρόνους επεξεργασίας. Ο αλγόριθμος proof-of-work αποτέλεσε ένα από τα βασικά εργαλεία που προώθησε την αποκέντρωση του συστήματος, βοηθώντας το να λειτουργεί με ασφάλεια και αξιοπιστία, ανοίγοντας τον δρόμο για χιλιάδες άλλα ψηφιακά νομίσματα και εφαρμογές blockchain. Πολλές εφαρμογές blockchain πλέον δεν εμπλέκουν κρυπτονομίσματα, αλλά χρησιμοποιούνται σε τομείς όπως η υγεία, η διαχείριση ταυτότητας, εφοδιαστικές αλυσίδες και η ψυχαγωγία [5].

2.1.3. Χαρακτηριστικά του blockchain

Η τεχνολογία blockchain προσφέρει μια ασφαλή και αμετάβλητη καταγραφή δεδομένων, καθιστώντας πιο δύσκολη την αλλοίωση ή την παραβίαση τους που μεταφέρονται μέσω δικτύων. Μόλις ένα block προστεθεί στην αλυσίδα, δεν μπορεί να τροποποιηθεί χωρίς να αλλάξει όλη η αλυσίδα που ακολουθεί. Σε μία τέτοια περίπτωση πρέπει να τροποποιηθούν όλα τα μπλοκ που προστέθηκαν μετά από αυτό και περισσότεροι από τους μισούς κόμβους του δικτύου να συμφωνήσουν με αυτή την αλλαγή. Αυτός ο τρόπος συναίνεσης και κατανεμημένου καθολικού καθιστά το blockchain αμετάβλητο και αξιόπιστο [1],[3]. Η ύπαρξη της αλυσίδας βοηθάει στην παρακολούθηση των συναλλαγών από την αρχή ως το τέλος. Με άλλα λόγια, η ιχνηλασιμότητα επιτρέπει να γνωρίζουμε ακριβώς τι έγινε και με ποια χρονική σειρά πραγματοποιήθηκε η κάθε συναλλαγή [4].

Στα δημόσια blockchains ο καθένας μπορεί να δει ή να ελέγξει τις συναλλαγές που έχουν πραγματοποιηθεί. Άξιο αναφοράς είναι πως παρότι η πληροφορίες των συναλλαγών είναι προσβάσιμες, δεν σημαίνει ότι αποκαλύπτονται ταυτοποιήσιμα προσωπικά δεδομένα [2]. Η ανοικτή πρόσβαση των δεδομένων και των πληροφοριών ενισχύει τη διαφάνεια καθώς όλες οι συναλλαγές που αποθηκεύονται στην αλυσίδα είναι ορατές από όλους τους συμμετέχοντες (ιδίως στα δημόσια blockchains). Ένα ακόμα κύριο χαρακτηριστικά του blockchain είναι η αποκεντρωμένη φύση του [3]. Αυτό σημαίνει ότι οι συσκευές μπορούν να επικοινωνούν και να πραγματοποιούν συναλλαγές

απευθείας μεταξύ τους χωρίς την ανάγκη ενός κεντρικού διαμεσολαβητή, μειώνοντας έτσι τα σημεία αποτυχίας και βελτιώνοντας την αποδοτικότητα. Δεν υπάρχει κάποια κεντρική εξουσία (όπως μια τράπεζα ή μια κυβέρνηση) η οποία να ελέγχει το blockchain. Μέσα από τη συγκεκριμένη τεχνολογία υποστηρίζεται η λειτουργία κόμβων με ίσα δικαιώματα.

Επιπλέον, τα πρόσωπα των συμμετεχόντων στο δίκτυο δεν είναι ίδια, αλλά είναι ίσα μεταξύ τους αναφορικά με οποιαδήποτε διαδικασία εκλογής ή και επιλογής μεταξύ αυτών. Δηλαδή, δεν υπάρχει κάποιο πρόσωπο του δικτύου που να υπερέχει έναντι κάποιου άλλου προσώπου κατ' οποιονδήποτε τρόπο, οπότε υπάρχει απουσία προτεραιότητας, κάποιου προσώπου έναντι κάποιου άλλου. Παρόλο που οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους για την υλοποίηση ενός blockchain, ταυτόχρονα χαρακτηρίζεται για την ανεξαρτησία και την ανθεκτικότητα τους. Σε περίπτωση που ένας κόμβος υποστεί βλάβη (κατάρρευση διακομιστή ή διακοπή ρεύματος), το υπόλοιπο δίκτυο συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά. Χάρη στο τρόπο λειτουργίας του είναι ανθεκτικό σε επιθέσεις στο κυβερνοχώρο (π.χ. hackers, κακόβουλοι κόμβοι) αλλά και σε φυσικές καταστροφές [1].

2.1.4. Μηχανισμοί συναίνεσης

Η τεχνολογία blockchain διαθέτει τους μηχανισμούς συναίνεσης που χρησιμοποιούνται για την επαλήθευση συναλλαγών και τη διατήρηση της ακεραιότητάς του. Σύμφωνα με αυτή τη διαδικασία όλα τα μέλη του δικτύου συμφωνούν ποια δεδομένα (συναλλαγές, blocks) είναι έγκυρα και θα προστεθούν στην αλυσίδα. Επειδή το blockchain είναι αποκεντρωμένο, δεν υπάρχει κεντρική αρχή να αποφασίσει [1]. Άρα απαιτείται ένας τρόπος ώστε όλοι οι κόμβοι να συμφωνούν χωρίς να εμπιστεύονται ο ένας τον άλλο. Ο μηχανισμός συναίνεσης είναι θεμέλιο της ασφάλειας και αξιοπιστίας του blockchain. Χωρίς αυτόν, δεν μπορεί να λειτουργήσει αξιόπιστα ένα αποκεντρωμένο σύστημα. Οι δυο πιο γνωστοί μηχανισμοί είναι το Proof of Work (PoW) και το Proof of Stake (PoS).

Proof of Work

Σε αυτόν τον μηχανισμό οι κόμβοι (miners) ανταγωνίζονται μεταξύ τους για να λύσουν ένα σύνθετο μαθηματικό πρόβλημα προκειμένου να προσθέσουν το επόμενο μπλοκ στο blockchain. Κάθε κόμβος στο κατακεντρωμένο δίκτυο P2P μπορεί να συμμετάσχει στη διαδικασία επικύρωσης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται "εξόρυξη" (mining). Ο πρώτος που βρίσκει τη λύση δημιουργεί νέο block και το προσθέτει στην αλυσίδα. Στη συνέχεια, μεταδίδει τα αποτελέσματα επικύρωσης σε ολόκληρο το σύστημα blockchain [1]. Βασικό μειονέκτημά του είναι πως απαιτεί υψηλή υπολογιστική ισχύ και ενέργεια. Επίσης οι συναλλαγές τους χαρακτηρίζονται από χαμηλές ταχύτητες. Στο Bitcoin, στο οποίο εφαρμόστηκε για πρώτη φορά το PoW, μια συναλλαγή χρειάζεται περίπου 10 λεπτά.

Proof of Stake

Το PoS αποτελεί έναν μηχανισμό οποίος έχει σχεδιαστεί για αντιμετώπιση συγκεκριμένα μειονεκτήματα του PoW. Σε αυτή τη περίπτωση οι κόμβοι (validators) επικυρώνουν συναλλαγές και blocks με βάση τα νομίσιμα που έχουν "ποντάρει". Δηλαδή, αντί για υπολογιστική ισχύ, η πιθανότητα επιλογής ενός κόμβου βασίζεται στο ποσοστό κρυπτονομισμάτων (stake) που έχει δεσμεύσει. Το stake αντιπροσωπεύει το ποσό κρυπτονομισμάτων που κατέχουν οι επικυρωτές ως εγγύηση. Όσο περισσότερα έχει "ποντάρει" κάποιος, τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα έχει να προσθέσει το επόμενο block [1]. Αποτέλεσμα αυτών είναι το PoS να έχει αρκετά χαμηλή ενεργειακή

κατανάλωση και ταχύτερες συναλλαγές. Από την άλλη πλευρά, ο μηχανισμός αυτός ευνοεί τους validators με τα μεγαλύτερα πονταρίσματα, καθώς μπορούν να επιλεγούν περισσότερες φορές για δημιουργία νέου μπλοκ προκαλώντας ανισότητα. Το Ethereum 2.0 καθώς και άλλες πλατφόρμες χρησιμοποιούν το PoS.

2.1.5. Μοντέλα Blockchain

Υπάρχουν διαφορετικά μοντέλα Blockchain στα οποία διαφοροποιούνται κάποια από τα χαρακτηριστικά με την λειτουργία να παραμένει ως έχει. Τα μοντέλα αυτά διακρίνονται σε δημόσια, ιδιωτικά, κοινοπρακτικά και υβριδικά.

Δημόσιο

Στα δημόσια Blockchain δεν υπάρχουν δικαιώματα. Οποιοσδήποτε που διαθέτει σύνδεση στο διαδίκτυο μπορεί να δει οποιαδήποτε στιγμή λεπτομέρειες μιας συναλλαγής, από άκρη σε άκρη, μιας αλυσίδας. Επίσης, μπορεί να εγγραφεί και να χρησιμοποιήσει το σύστημα. Ένας κόμβος στη δημόσια αλυσίδα μπλοκ μπορεί να λαμβάνει νέες συναλλαγές, να τις επαληθεύει και να τις διαδίδει στο δίκτυο. Αυτή η επαλήθευση γίνεται συλλογικά από πολλούς κόμβους και όχι από κάποια κεντρική αρχή. Ωστόσο, δεδομένου ότι οποιοσδήποτε μπορεί να ενταχθεί και να χρησιμοποιήσει ένα δημόσιο blockchain είναι λιγότερο ασφαλές. Τα Bitcoin και Ethereum αποτελούν τα πιο δημοφιλή παραδείγματα του συγκεκριμένου μοντέλου.[1],[3]

Ιδιωτικό

Αντίθετα, στα ιδιωτικά μοντέλα έχουν πρόσβαση μόνο εξουσιοδοτημένοι χρήστες. Σε ένα ιδιωτικό blockchain, ο έλεγχος ασκείται από μια συγκεκριμένη αρχή ή οργανισμό (τράπεζα, κρατικός φορέας, διαχειριστής συστήματος, κτλ.). Για να μπορέσει ένας χρήστης να αποκτήσει τα δικαιώματα που αναφέρονται στα δημόσια μοντέλα πρέπει να το επιτρέψουν οι παραπάνω διαχειριστές. Σε αυτό το μοντέλο ο διαχειριστής μπορεί να τροποποιεί κανόνες στο πρωτόκολλο και να επεμβαίνει σε συναλλαγές, κυρίως σε ειδικές περιπτώσεις. Επίσης, είναι έχει τη δυνατότητα να διαγράψει ή να αποκλείσει έναν χρήστη από το δίκτυο. Το Hyperledger Fabric είναι ένα ιδιωτικό blockchain πλαίσιο ανοιχτού κώδικα. Είναι ειδικά σχεδιασμένο για επιχειρηματικές εφαρμογές, όπου απαιτείται ιδιωτικότητα, έλεγχος πρόσβασης και υψηλή απόδοση. [1],[3]

Κοινοπρακτικό

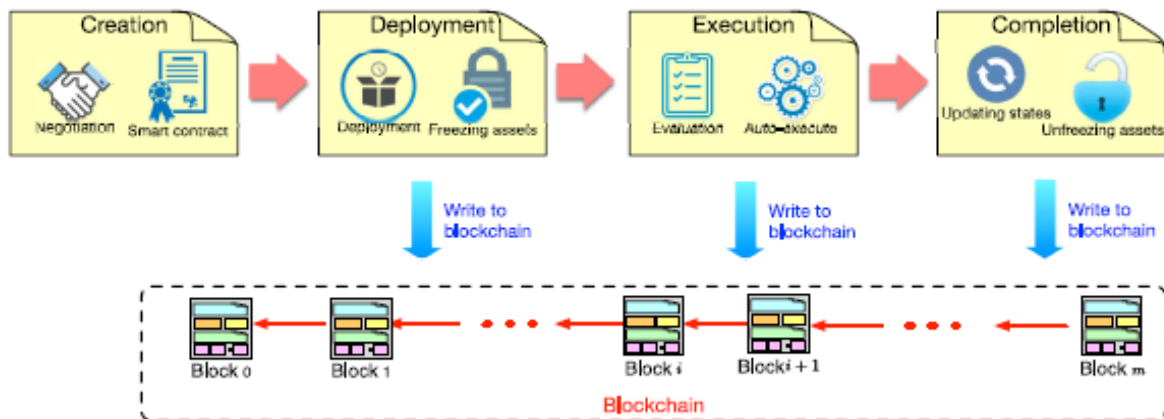
Το κοινοπρακτικό blockchain είναι ένα ιδιωτικό αλλά πολυμελές blockchain, στο οποίο οι διαχειριστές αποτελούνται από μια ομάδα οργανισμών ή εταιρειών. Αυτοί είναι υπεύθυνοι για την διακυβέρνηση και τον έλεγχο αυτής της τεχνολογίας. Το κοινοπρακτικό μοντέλο blockchain χαρακτηρίζεται από μια μορφή ιεραρχίας μεταξύ των κόμβων, όσον αφορά τα δικαιώματα πρόσβασης, επικύρωσης και διαχείρισης. Η ομάδα ελέγχου αποτελείται από περιορισμένο αριθμό εμπιστων κόμβων, οι οποίοι διαθέτουν την πλήρη πρόσβαση στα δεδομένα. Έπειτα, υπάρχουν τα μέλη-κόμβοι, οι οποίοι συμμετέχουν στο δίκτυο αλλά δεν έχουν δικαίωμα επικύρωσης. Τέλος, οι παρατηρητές αποτελούν τους κόμβους όπου έχουν μόνο δικαίωμα ανάγνωσης. Ο σκοπός της ύπαρξης ιεραρχίας είναι για την καλύτερη κατανομή της εξουσίας μεταξύ των οργανισμών που συμμετέχουν. Ενισχύεται ακόμα περισσότερο η ασφάλεια και ο έλεγχος των συστημάτων με τον διαχωρισμό ρόλων μεταξύ των κόμβων.[3]

Υβριδικό

Όσον αφορά το υβριδικό μοντέλο αποτελεί συνδυασμό του δημόσιου και του ιδιωτικού blockchain. Αυτό σημαίνει ότι ορισμένα δεδομένα είναι δημόσια, δηλαδή είναι ορατά από όλους τους χρήστες, ενώ άλλα είναι ιδιωτικά επιτρέποντας μόνο στους εξουσιοδοτημένους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε αυτά. Το μοντέλο αυτό είναι κατάλληλο για οργανισμούς που θέλουν δημόσιο έλεγχο χωρίς να εκθέτουν τα πάντα, προσφέροντας ευελιξία αλλά και ιδιωτικότητα στα συστήματά τους. Από την άλλη πλευρά, τα υβριδικά μοντέλα χαρακτηρίζονται για την πολυπλοκότητα στην υλοποίησή τους. Επίσης, απαιτούν σωστό σχεδιασμό για να αποφευχθεί σύγχυση μεταξύ δημόσιου και ιδιωτικού μέρους. [3]

2.1.6. Έξυπνα συμβόλαια

Τα έξυπνα συμβόλαια (Smart contracts) είναι αυτοματοποιημένα προγράμματα που εκτελούνται αυτόματα σε ένα blockchain όταν πληρούνται συγκεκριμένες συνθήκες. Η τεχνολογία blockchain επιτρέπει τη δημιουργία και την εκτέλεση έξυπνων συμβολαίων με ασφαλή και αποκεντρωμένο τρόπο. Ο κύκλος ζωής των έξυπνων συμβολαίων αποτελείται από τέσσερις διαδοχικές φάσεις: δημιουργία, ανάπτυξη, εκτέλεση και ολοκλήρωση [1].



Σχήμα 1. Ο κύκλος ζωής των έξυπνων συμβολαίων: δημιουργία, ανάπτυξη, εκτέλεση και ολοκλήρωση. [1]

Αρχικά, για τη δημιουργία ενός έξυπνου συμβολαίου οι εμπλεκόμενες πλευρές διαπραγματεύονται τις υποχρεώσεις, τα δικαιώματα και τις απαγορεύσεις των συμβολαίων. Αφού η συμφωνία έχει επιτευχθεί, συντάσσεται ένα αρχικό συμβατικό συμφωνητικό. Στη συνέχεια, οι μηχανικοί λογισμικού μετατρέπουν αυτό το συμφωνητικό που είναι γραμμένο σε φυσική γλώσσα σε ένα έξυπνο συμβόλαιο γραμμένο σε γλώσσες υπολογιστών. Αξίζει να αναφερθεί ότι η δημιουργία έξυπνων συμβολαίων είναι μια επαναληπτική διαδικασία που περιλαμβάνει πολλαπλούς γύρους διαπραγματεύσεων και επαναλήψεων.

Στη συνέχεια, τα πλέον επικυρωμένα συμβόλαια είναι έτοιμα να χρησιμοποιηθούν στα συστήματα blockchains. Άξιο αναφοράς αποτελεί ότι δεν μπορεί να υπάρξει τροποποίηση ενός έξυπνου συμβολαίου μετά την αποθήκευσή του σε ένα blockchain, λόγω της αμεταβλητότητάς του.

Κεφάλαιο II

Οποιαδήποτε τροποποίηση απαιτεί τη δημιουργία ενός νέου συμβολαίου. Σε αυτή τη φάση τα ψηφιακή περιουσία των εμπλεκόμενων μερών κλειδώνεται μέσω της δέσμευσης των αντίστοιχων ψηφιακών πορτοφολιών. Δηλαδή, τυχόν μεταφορές νομισμάτων (εισερχόμενες ή εξερχόμενες) στα πορτοφόλια που σχετίζονται με το συμβόλαιο μπλοκάρονται μέχρι την ολοκλήρωση της διαδικασίας.

Έπειτα, ακολουθεί η εκτέλεσή τους. Ένα έξυπνο συμβόλαιο αποτελείται από μια σειρά δηλωτικών προτάσεων με λογικές συνδέσεις. Αυτό σημαίνει ότι, τη στιγμή που θα ενεργοποιηθεί μια συνθήκη, τότε ο η συναλλαγή εκτελείται αυτόματα από τους miners και έπειτα να επικυρώνεται στο blockchain.

Το τελευταίο στάδιο είναι η ολοκλήρωση της διαδικασίας του έξυπνου συμβολαίου. Οι νέες καταστάσεις των εμπλεκόμενων μερών καθώς και οι συναλλαγές κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης ενημερώνονται και αποθηκεύονται στα μπλοκς. Τα ψηφιακά περιουσιακά στοιχεία έχουν μεταφερθεί από το ένα μέρος στο άλλο. Επομένως, τα έξυπνα συμβόλαια ξεκλειδώνουν τις ψηφιακές περιουσίες των εμπλεκόμενων για τη δημιουργία νέων συναλλαγών. Άξιο αναφοράς αποτελεί πως κατά τη διάρκεια των φάσεων της ανάπτυξης, της εκτέλεσης και της ολοκλήρωσης ενός έξυπνου συμβολαίου, εκτελούνται αρκετές ενέργειες για την επίτευξη των συναλλαγών. Γι' αυτό και οι τρεις φάσεις οφείλουν να γράφουν και να αποθηκεύουν τα δεδομένα στα blockchains.[1]

Στα δίκτυα IoT, τα έξυπνα συμβόλαια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αυτοματοποίηση διαδικασιών, όπως η ενεργοποίηση μιας συσκευής όταν η θερμοκρασία φτάσει σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο ή η αυτόματη τιμολόγηση και πληρωμή για υπηρεσίες.

2.2. Έξυπνες Πόλεις (Smart Cities)

2.2.1. Ορισμός

Ο όρος έξυπνη πόλη αναφέρεται σε μια αστική περιοχή στην οποία η τεχνολογία και η συλλογή δεδομένων συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών, στην αποτελεσματικότητα των υπηρεσιών και στην ενίσχυση της βιωσιμότητας. Σε μία έξυπνη πόλη, το ανθρώπινο δυναμικό αξιοποιεί την τεχνολογία προκειμένου να το βοηθήσει στην αντιμετώπιση προβλημάτων σε διάφορους τομείς όπως στην υγειονομική περίθαλψη, στις μεταφορές, στην εκπαίδευση, στις υποδομές κ.λπ. Εξίσου σημαντικό είναι πως συμβάλλει στην ενοποίηση των παραπάνω τομέων και επιτρέπει την αλληλεπίδραση πολιτών, επιχειρήσεων και αρχών σε πραγματικό χρόνο.

Στη σημερινή εποχή, υπάρχουν ήδη περισσότερες από 100 έξυπνες πόλεις σε όλο τον κόσμο. Ενδεικτικά παραδείγματα είναι η Κοπεγχάγη, το Ελσίνκι, το Άμστερνταμ, το Παρίσι, η Βιέννη και η Στοκχόλμη. Τεχνολογίες όπως το AI, το IoT, οι ΤΠΕ, τα Big Data και το Blockchain αποτελούν σημαντικά παραδείγματα τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια. Οι παραπάνω τεχνολογίες συμβάλλουν στη λήψη αποφάσεων και στην πρόβλεψη αναγκών για τη βελτίωση των υπηρεσιών. Οι πληροφορίες που αποκτούν οι κυβερνήσεις από αυτά τις εν λόγω τεχνολογίες, δίνει τη δυνατότητα συνεργασίας με τους κατοίκους, την υποστήριξη της επιχειρηματικής ανάπτυξης και την προώθηση των προσπαθειών βιωσιμότητας [7].

2.2.2. Πυλώνες έξυπνης πόλης

Ο σχεδιασμός των έξυπνων πόλεων βασίζεται σε κάποια βασικά θεμέλια πάνω στα οποία οικοδομείται η λειτουργία, η διακυβέρνηση και η βιωσιμότητά τους. Σύμφωνα με διεθνή πρότυπα (ISO 37122 [10], EU Smart City Framework) παρακάτω παρουσιάζονται οι 6 βασικοί πυλώνες μίας έξυπνης πόλης.



Σχήμα 2. Βασικοί πυλώνες μιας έξυπνης πόλης [12]

Οικονομία

Η έξυπνη οικονομία αφορά τη χρήση της τεχνολογίας και της καινοτομίας για να ενισχυθεί η οικονομική δραστηριότητα και η ανταγωνιστικότητα της πόλης [9]. Ο συνδυασμός της καινοτομίας και της επιχειρηματικής δραστηριότητας καθίσταται αναγκαίος, με επίκεντρο τις νέες τεχνολογίες. Βασικός στόχος αποτελεί η δημιουργία όσο και περισσότερων λύσεων και προϊόντων για τη βελτίωση της καθημερινότητας των πολιτών. Χαρακτηριστικό της οικονομίας είναι πως οι εταιρείες μεταβαίνουν στη ψηφιοποίηση των επιχειρήσεών τους. Δημιουργούν ηλεκτρονικά καταστήματα στα οποία οι πολίτες μπορούν να αγοράζουν προϊόντα ή υπηρεσίες, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και μειώνοντας το κόστος τους. Με αυτόν τον τρόπο η έξυπνη οικονομία βοηθάει στην ανάπτυξη επαγγελματιών που σχετίζονται με τις νέες τεχνολογίες. Προγραμματιστές, αναλυτές δεδομένων, ειδικοί κυβερνοασφάλειας και τεχνικοί δικτύων αποτελούν σημαντικά παραδείγματα. Εξίσου σημαντικό είναι πως οι επιχειρήσεις διαθέτουν προγράμματα εκπαίδευσης και κατάρτισης με τα οποία οι πολίτες μπορούν να αποκομίσουν την απαραίτητη γνώση και να ενσωματωθούν σε αυτές.

Μετακίνηση

Στη σημερινή εποχή, η συνεχής αύξηση του πληθυσμού και των οχημάτων στις πόλεις, προκαλεί αρκετά προβλήματα στην καθημερινότητα των πολιτών. Η ύπαρξη έξυπνων συγκοινωνιών αποτελεί σημαντικό προσόν μια έξυπνης πόλης. Σε μία έξυπνη πόλη τα μέσα μαζικής μεταφοράς διαθέτουν συστήματα εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο καθώς και δυναμικά δρομολόγια τα οποία προσαρμόζονται στις καθημερινές ανάγκες των πολιτών. Συγκεκριμένα, το ευφυές σύστημα μεταφορών (ITS) αποτελεί μια μέθοδο ανίχνευσης οχημάτων βασισμένη στο διαδίκτυο, στη

Κεφάλαιο II

τεχνολογία GPS και στη βάση δεδομένων. Αυτό βοηθά στη διαχείριση της κυκλοφορίας, στην έξυπνη προειδοποίηση για τη μείωση των ατυχημάτων [8].

Επίσης, υποστηρίζεται η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων με την εγκατάσταση σταθμών φόρτισης EV σε δημόσιους ή ιδιωτικούς χώρους. Ακόμα, έχουν αναπτυχθεί πλατφόρμες από τις οποίες μπορούν οι πολίτες να νοικιάσουν ηλεκτρικά πατίνια, ποδήλατα ή αμάξια. Μέσα από τη χρήση αυτών των μέσων μεταφοράς περιορίζονται σημαντικά οι ρύποι και υπάρχει ενεργειακή αποδοτικότητα, αποτελώντας οικολογικές λύσεις.

Περιβάλλον

Το περιβάλλον αποτελεί σημαντικό αγαθό για την κοινωνία. Η προστασία του αλλά και η εξέλιξη του καθιστάται αναγκαία ώστε να συνεχίσουμε να απολαμβάνουμε αυτά που μας προσφέρει. Έχουν δημιουργηθεί συστήματα για την παρακολούθηση ρύπων και την ποιότητα του αέρα. Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από αισθητήρες, οι οποίοι ανιχνεύουν την ποιότητα του αέρα και τα δεδομένα αναλύονται με τη βοήθεια αλγορίθμων μηχανικής μάθησης. Για την ανίχνευση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης χρησιμοποιούνται τεχνικές παλινδρόμησης (Random Forest, decision tree, gradient boosting, multi-layer perceptron). [8]

Επίσης, μια έξυπνη πόλη έχει τη δυνατότητα να διαχειρίζεται αποτελεσματικά τα απορρίμματά της. Η εγκατάσταση αισθητήρων σε κάδους σε συνδυασμό με την ύπαρξη δυναμικών δρομολογίων των απορριμματοφόρων αποτελούν κύρια παραδείγματα. Τα δεδομένα που προκύπτουν αναλύονται με αποτέλεσμα τα απόβλητα να παρακολουθούνται και η απομάκρυνσή τους μπορεί να προγραμματίζεται αυτόματα. Για αυτή τη μέθοδο, το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS) βοηθά στην καταγραφή των επιπέδων αποβλήτων και παρέχει καλή εξυπηρέτηση.[8]

Μια έξυπνη πόλη διαθέτει έξυπνα συστήματα διαχείρισης του νερού. Τα συστήματα αυτά παρακολουθούν τη στάθμη και την ποιότητα του νερού καθώς και συμβάλλουν στην αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με το νερό.

Πολίτες

Οι πολίτες οφείλουν να διαθέτουν σωστή νοοτροπία σχετικά με τις εξελίξεις. Είναι βασικό να μπορούν να χρησιμοποιούν τις ψηφιακές υπηρεσίες και να συμμετέχουν στην ψηφιακή ζωή της πόλης. Γι' αυτό και η κοινωνία πρέπει να εκπαιδεύσει τους πολίτες στις νέες τεχνολογίες μέσα από σεμινάρια και ημερίδες. Επίσης, οι πολίτες πρέπει να συμμετέχουν ενεργά στις αποφάσεις και τις πολιτικές, προωθώντας μια κοινωνία συνεργατική και χωρίς αποκλεισμούς. Μια πόλη γίνεται πραγματικά "έξυπνη" όταν οι ίδιοι οι πολίτες της αισθάνονται ικανοί, πληροφορημένοι και ενδυναμωμένοι να συνδιαμορφώσουν το μέλλον της. Γι' αυτό και η καλλιέργεια ψηφιακής συνείδησης, η εκπαίδευση σε ζητήματα ασφάλειας και προστασίας προσωπικών δεδομένων και η καλλιέργεια εμπιστοσύνης στις τεχνολογικές δομές αποτελούν αναγκαία βήματα για μια κοινωνία ανοιχτή, συμμετοχική και ανθεκτική στις προκλήσεις της ψηφιακής εποχής.[9]

Τρόπος ζωής

Η έννοια του Έξυπνου Τρόπου Ζωής αφορά τη βελτίωση της καθημερινότητας των πολιτών μέσω της τεχνολογίας. Περιλαμβάνει την έξυπνη υγεία, με υπηρεσίες όπως η τηλεϊατρική και η απομακρυσμένη παρακολούθηση ασθενών, που ενισχύουν την πρόσβαση στην περίθαλψη [9]. Η

ενσωμάτωση τεχνολογιών όπως IoT και AI δημιουργούν ένα μοντέλο πρόβλεψης ασθενειών, ανίχνευσης ασθενειών και ανάλυσης της σοβαρότητάς τους. [8] Η έξυπνη εκπαίδευση φέρνει την ψηφιοποίηση στα σχολεία, με e-learning πλατφόρμες και διασυνδεδεμένα εκπαιδευτικά δίκτυα. Παράλληλα, η δημόσια ασφάλεια ενισχύεται με έξυπνο φωτισμό, συστήματα επιτήρησης και ειδοποιήσεις σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

Διακυβέρνηση

Ο πυλώνας της Έξυπνης Διακυβέρνησης αφορά τη χρήση ψηφιακών τεχνολογιών για τον εκσυγχρονισμό της δημόσιας διοίκησης και την ενίσχυση της διαφάνειας. Υποχρέωση της κυβέρνησης αποτελεί η διατήρηση μιας σωστής και ειλικρινής σχέσης με τους πολίτες. Τα μέσα κοινωνικής δικτύωσης βοηθούν στην ενδυνάμωση της σχέσης, μοιράζοντας πληροφορίες προς όλους τους πολίτες με ταχύτερο τρόπο. Επίσης, μέσω της ψηφιακής διοίκησης (e-Government), οι πολίτες μπορούν να εξυπηρετούνται ηλεκτρονικά, υποβάλλοντας αιτήσεις, πληρώνοντας τέλη ή λαμβάνοντας πιστοποιητικά χωρίς φυσική παρουσία. Αυτό μειώνει τη γραφειοκρατία και διευκολύνει την πρόσβαση στις υπηρεσίες του κράτους.

Παράλληλα, η έννοια των ανοικτών δεδομένων (Open Data) ενισχύει τη λογοδοσία, προσφέροντας σε πολίτες, ερευνητές και επιχειρήσεις πρόσβαση σε κρίσιμα δεδομένα της πόλης. Η συμμετοχή των πολιτών ενισχύεται μέσω ψηφιακών δημοσκοπήσεων, πλατφόρμων διαβούλευσης και εργαλείων άμεσης δημοκρατίας, επιτρέποντας τη συνδιαμόρφωση πολιτικών και αποφάσεων. Έτσι, η έξυπνη διακυβέρνηση φέρνει το κράτος πιο κοντά στον πολίτη, με διαφάνεια, ευελιξία και αξιοπιστία.

2.2.3. Τεχνολογίες χρήσης των έξυπνων πόλεων

Βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις έξυπνες πόλεις είναι οι τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών (ΤΠΕ) και το διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT). Οι ΤΠΕ είναι ένα σύνολο τεχνολογιών αποτελούμενο από δίκτυα επικοινωνίας, υπολογιστικά συστήματα, εφαρμογές λογισμικού, ψηφιακές υποδομές και συστήματα πληροφόρησης και ανταλλαγής δεδομένων. Ο συνδυασμός των παραπάνω τεχνολογιών αποτελεί το σημαντικότερο πλεονέκτημα, καθώς βοηθάει στην ενοποίηση των συστημάτων μιας πόλης (κυκλοφορία, ενέργεια, υγεία, απορρίμματα). Οι ΤΠΕ βελτιώνουν την ποιότητα, την απόδοση και την διαδραστικότητα των αστικών υπηρεσιών, μειώνουν το κόστος και την κατανάλωση πόρων και ενισχύουν την σχέση πολιτών και κυβέρνησης.[9]

Η τεχνολογία IoT χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση των υπηρεσιών της πόλης και τη σύνδεση με τους πολίτες. Αποτελείται από ένα δίκτυο αισθητήρων και "έξυπνων" συσκευών που συνδέονται μεταξύ τους μέσω ορισμένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας και εκτελούν λειτουργίες όπως ανίχνευση, αναγνώριση, έλεγχος, παρακολούθηση, ανάλυση δεδομένων, διαχείριση κτλ. [8]. Οι δυνατότητες του IoT βελτιώνουν σημαντικά τις βασικές υποδομές των πόλεων όπως τον φωτισμό, τις συγκοινωνίες, τα απορρίμματα, το νερό, την υγεία και άλλες πολλές. Σκοπός τους αποτελεί η υποστήριξη και βελτίωση της καθημερινότητας αυξάνοντας και την ποιότητα ζωής των πολιτών. Οι συσκευές IoT μπορούν να εντοπίσουν ακριβώς ποιες πληροφορίες είναι χρήσιμες και να τις εκμεταλλευτούν κατάλληλα. Η δυνατότητα αυτή μπορεί να αυτοματοποιήσει επαναλαμβανόμενες, χρονοβόρες ή ακόμα και επικίνδυνες εργασίες.

Κεφάλαιο II

Η χρήση τεχνολογιών AI και ML αποτελεί σημαντική βοήθεια στην ανάπτυξη των τομέων μιας έξυπνης πόλης. Παρέχουν προγνωστική συντήρηση κρίσιμων υποδομών και χρησιμοποιούν μοντέλα διαχείρισης της ενέργειας και του νερού. Τα συστήματα ML προβλέπουν την κυκλοφοριακή συμφόρηση και μπορούν να Ρυθμίζουν αυτόματα τα φανάρια για αποδοτικότερη ροή κυκλοφορίας. Η εφαρμογή των AI και ML έχει πολλαπλούς στόχους, οι οποίοι στοχεύουν στην ενίσχυση διαφορετικών πτυχών της αστικής ζωής, της διακυβέρνησης και της βιωσιμότητας. Αρχικά, ο τεράστιος όγκος δεδομένων που διαθέτουν τους βοηθά στην λήψη αποφάσεων για τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών της πόλης. Οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να προβλέψουν κινδύνους ή κρίσιμες καταστάσεις, προτείνοντας λύσεις πριν εμφανιστεί κάποιο πρόβλημα. Επίσης, μειώνουν το κόστος και τη σπατάλη πόρων και βελτιώνουν την εμπειρία του πολίτη.[8]

Το Big Data αποτελεί θεμέλιο λίθο στη λειτουργία των έξυπνων πόλεων, καθώς επιτρέπει τη συλλογή, ανάλυση και αξιοποίηση τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων που παράγονται καθημερινά από αισθητήρες, συσκευές IoT, εφαρμογές πολιτών, δίκτυα συγκοινωνιών και άλλες πηγές. Μέσω της επεξεργασίας αυτών των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, οι δημοτικές αρχές μπορούν να λαμβάνουν έξυπνες αποφάσεις για τη διαχείριση της κυκλοφορίας, της ενέργειας, των απορριμμάτων, της ασφάλειας και της υγείας. Η τεχνολογία Big Data συνδυάζεται συχνά με τεχνητή νοημοσύνη και μηχανική μάθηση, επιτρέποντας την πρόβλεψη προβλημάτων πριν αυτά προκύψουν, τη βελτιστοποίηση πόρων και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των πολιτών. Έτσι, το Big Data καθιστά την πόλη πιο αποδοτική, βιώσιμη και προσαρμοστική στις πραγματικές της ανάγκες.

Προφανώς, η τεχνολογία blockchain πρόκειται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στις έξυπνες πόλεις, προσφέροντας έναν ασφαλή, διαφανή και αποκεντρωμένο τρόπο διαχείρισης και ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ πολλών διαφορετικών φορέων. Αποτελεί μια τεχνολογία στην οποία δεν υπάρχει κάποιος κεντρικός διαχειριστής και επιτρέπει την ανταλλαγή πληροφοριών με αξιοπιστία, μειώνοντας τον κίνδυνο απάτης και λαθών.

2.3. Σημεία σύγκλισης blockchain& έξυπνων πόλεων

Η τεχνολογία Blockchain συγκλίνει με τον σχεδιασμό και τη λειτουργία των έξυπνων πόλεων σε πλήθος τομέων, προσφέροντας διαφάνεια, ασφάλεια και αποκέντρωση σε κρίσιμες λειτουργίες. Προσφέρει σημαντική βοήθεια σε κτηματολογικά ζητήματα και στη διαχείριση περιουσιακών στοιχείων, επιτρέποντας ασφαλή καταγραφή τίτλων ιδιοκτησίας και μεταβιβάσεων χωρίς μεσάζοντες. Αποτελεί βασικό μετρώ αυθεντικοποίηση και μέσω της ενσωμάτωσής της στις ψηφιακές ταυτότητες, οι πολίτες αποκτούν έναν ενιαίο, αδιάβλητο τρόπο ταυτοποίησης σε όλες τις δημόσιες και ιδιωτικές υπηρεσίες. Χρησιμοποιείται σε συστήματα ψηφοφορίας και εκλογών προσφέροντας διαφάνεια, ανωνυμία και αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Παράλληλα, εφαρμόζεται σε δημόσιες συμβάσεις και προμήθειες, αλλά και χάρη στα έξυπνα συμβόλαια επιτρέπει ασφαλείς και άμεσες πληρωμές στις οικονομικές συναλλαγές και τη φορολογία.

Άξιο αναφοράς είναι πως συμβάλλει στη διαχείριση απορριμμάτων, στην αειφορία και στην εφοδιαστική αλυσίδα, προσφέροντας ενιαία παρακολούθηση και επαλήθευση της διαδρομής προϊόντων σε πραγματικό χρόνο. Υποστηρίζει τη χορήγηση κοινωνικών επιδομάτων με διαφάνεια, καθώς και τον ηλεκτρονικό φάκελο υγείας, προστατεύοντας το απόρρητο των ιατρικών δεδομένων του κάθε πολίτη. Τέλος, στα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς, χρησιμοποιείται για την έκδοση εισιτηρίων,

την αποθήκευση ιστορικού μετακινήσεων και την αποδοτική χρέωση, παρέχοντας καλύτερη και γρηγορότερη εξυπηρέτηση.

2.4. Επίλογος

Σε αυτό το κεφάλαιο έγινε η παρουσίαση σε θεωρητικό επίπεδο της τεχνολογίας blockchain και των έξυπνων πόλεων. Έγινε αναφορά βασικών εννοιών του blockchain και αναλύθηκαν βασικοί μηχανισμοί συναίνεσης (PoW, PoS) καθώς και η χρήση των έξυπνων συμβολαίων. Στη συνέχεια αναλύθηκε η σημασία των έξυπνων πόλεων εστιάζοντας στους πυλώνες δημιουργίας τους. Σημαντική είναι η αναφορά των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται σε μια έξυπνη πόλη (ΤΠΕ, IoT, AI, Big Data). Ο σκοπός αυτής της διπλωματικής είναι η μελέτη των εφαρμογών blockchain στις υπηρεσίες των έξυπνων πόλεων. Γι' αυτό κι έγινε αναφορά των εφαρμογών που μπορούν να ενσωματωθούν στη τεχνολογία blockchain, όμως η πλήρη ανάλυση τους πρόκειται να γίνει στο 4ο κεφάλαιο.

III. Μεθοδολογία Έρευνας (PRISMA)

3.1. Τι είναι η μέθοδος PRISMA

Η μέθοδος PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) αποτελεί μια τυποποιημένη διαδικασία που χρησιμοποιείται για την ορθή οργάνωση και παρουσίαση της διαδικασίας μίας συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Για να διασφαλιστεί ότι μία συστηματική ανασκόπηση είναι χρήσιμη για τους χρήστες, οι συγγραφείς πρέπει να προετοιμάσουν μια διαφανή, πλήρη και ακριβή περιγραφή του λόγου για τον οποίο πραγματοποιήθηκε η ανασκόπηση, του τι έκαναν (ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίστηκαν και επιλέχθηκαν οι μελέτες) και του τι βρήκαν (δηλαδή τα χαρακτηριστικά των μελετών που συνέβαλαν και τα αποτελέσματα των μετα-αναλύσεων) [13]. Ο σκοπός δημιουργίας αυτής της μεθόδου είναι να διασφαλίσει ότι η διαδικασία συλλογής, επιλογής και ανάλυσης των πηγών είναι διαφανής και αναπαραγώγιμη.

Η μέθοδος PRISMA παρουσιάστηκε το 2009 ως διάδοχος της οδηγίας QUOROM (Quality of Reporting of Meta-analyses, 1999) [15]. Ο στόχος της ήταν να αντιμετωπίσει το πρόβλημα ανεπαρκούς και μη τυποποιημένης αναφοράς στις συστηματικές βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις και μετα-αναλύσεις. Η αρχική έκδοση χρησιμοποιούσε μια λίστα ελέγχου με 27 σημεία και ένα διάγραμμα ροής, τα οποία βοηθούσαν στη δημιουργία μιας πλήρους και διαφανούς αναφοράς [14]. Με αυτό τον τρόπο, η PRISMA έγινε διεθνές πρότυπο για την αναφορά συστηματικών ανασκοπήσεων σε πολλούς επιστημονικούς τομείς (υγεία, εκπαίδευση, κοινωνικές επιστήμες). Επίσης, εγκρίθηκε από εκατοντάδες επιστημονικά περιοδικά και οργανισμούς (π.χ. Cochrane, Campbell Collaboration)[13]. Η εισαγωγή νέων τεχνολογιών (μηχανική μάθηση, επεξεργασία φυσικής γλώσσας) οδήγησε το 2020 στην αναθεωρημένη έκδοση PRISMA 2020. Σε αυτή ενσωματώθηκαν βελτιώσεις όπως αναλυτικότερη περιγραφή στρατηγικών αναζήτησης, ενσωμάτωση χρήσης αυτοματοποιημένων εργαλείων, αξιολόγηση βεβαιότητας τεκμηρίων και παροχή σαφέστερων οδηγιών για ειδικούς τύπους ανασκοπήσεων. Σήμερα, η PRISMA 2020 αποτελεί το διεθνές πρότυπο αναφοράς για την παρουσίαση συστηματικών ανασκοπήσεων σε διάφορους επιστημονικούς τομείς [13-14].

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, η PRISMA εφαρμόζεται ώστε να τεκμηριωθεί η διαδικασία εύρεσης και επιλογής επιστημονικών δημοσιεύσεων σχετικών με τις υπηρεσίες του blockchain στις έξυπνες πόλεις. Η χρήση της κρίνεται απαραίτητη, καθώς το αντικείμενο καλύπτει πολλούς διαφορετικούς τομείς (π.χ. αστική κινητικότητα, ψηφιακή ταυτότητα, ενέργεια, υγεία, ασφάλεια), και απαιτείται μια συστηματική προσέγγιση για να διασφαλιστεί η εγκυρότητα και η πληρότητα της ανασκόπησης.

3.2. Στάδια της PRISMA

Υπάρχουν 4 βασικά στάδια της PRISMA που χρησιμοποιούνται διεθνώς και βοηθούν στην δημιουργία οποιαδήποτε συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Τα εν λόγω στάδια είναι τα εξής: αναγνώριση, αρχικός έλεγχος, έλεγχος επιλεξιμότητας και τελική ένταξη [16].

Αναγνώριση (Identification)

Στο πρώτο στάδιο συγκεντρώνονται όλες οι πιθανές σχετικές πηγές για το θέμα της εργασίας. Για την εύρεση των κατάλληλων πηγών, οι χρήστες αναζητούν σε βάσεις δεδομένων (π.χ. Scopus, Web of Science, PubMed, IEEE Xplore, Google Scholar) και ορίζουν κατάλληλες λέξεις-κλειδιά και συνδυασμούς τους με Boolean operators (AND, OR, NOT). Στη συνέχεια γίνεται η καταγραφή των αποτελεσμάτων από κάθε βάση, αποτελώντας το σύνολο των πηγών που έχουν εντοπιστεί.

Αρχικός έλεγχος (Screening)

Ο σκοπός αυτού του σταδίου είναι η αφαίρεση των διπλότυπων πηγών και ο αποκλεισμός εγγράφων που δε σχετίζονται επαρκώς με το θέμα της εργασίας. Τα διπλότυπα είναι οι πηγές που έχουν την ίδια μελέτη και εμφανίζονται σε διαφορετικές βάσεις δεδομένων. Η αφαίρεση διπλότυπων μπορεί να υλοποιηθεί με τη χρήση κατάλληλων εργαλείων όπως Mendeley, Zotero, EndNote ή ακόμα και Excel. Επίσης, σε αυτό το στάδιο γίνεται έλεγχος κυρίως στους τίτλους και τις περιλήψεις των πηγών. Με αυτό τον τρόπο γίνονται αντιληπτά τα άρθρα τα οποία είναι εκτός του θεματικού πεδίου της έρευνας ή δεν πληρούν τα βασικά κριτήρια (π.χ. γλώσσα, είδος πηγής).

Έλεγχος επιλεξιμότητας (Eligibility)

Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιείται εκτενής μελέτη των υπόλοιπων πηγών. Συγκεκριμένα, μελετάται το πλήρες κείμενο κάθε πηγής που πέρασε από το στάδιο screening. Οι συγγραφείς εφαρμόζουν ένα σύνολο κριτηρίων ένταξης ή αποκλεισμού αυτών των πηγών. Κριτήρια ένταξης αποτελούν το χρονικό διάστημα της δημοσίευσης και το peer-reviewed, δηλαδή ότι το άρθρο ή η μελέτη έχει υποβληθεί σε αξιολόγηση από άλλους ειδικούς (ομότιμους) στο ίδιο επιστημονικό πεδίο πριν δημοσιευθεί. Από την άλλη πλευρά, σε περίπτωση που ένα άρθρο ανήκει σε διαφορετικό επιστημονικό πεδίο ή παρουσιάζει εκτεταμένη θεωρητική περιγραφή χωρίς να περιέχει μεθοδολογίες ή αποτελέσματα, αποτελεί κριτήριο αποκλεισμού.

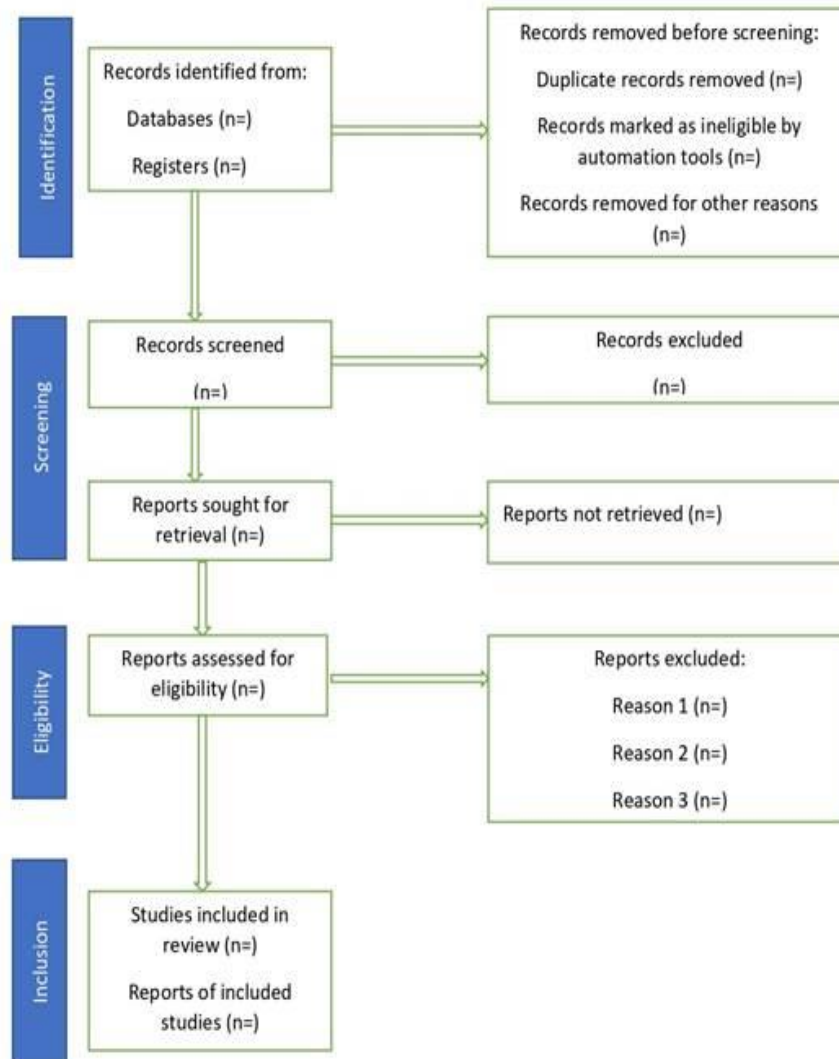
Τελική ένταξη (Included)

Τα άρθρα που πληρούν όλα τα παραπάνω κριτήρια συμπεριλαμβάνονται στην τελική βιβλιογραφική ανασκόπηση. Δημιουργείται ένας πίνακας όπου καταγράφονται βασικές πληροφορίες όπως οι συγγραφείς, το έτος δημοσίευσης, το θέμα ή ο στόχος της μελέτης, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και τα κύρια ευρήματα. Στη συνέχεια, οι μελέτες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε θεματικές κατηγορίες, όπως εφαρμογές, τεχνολογίες ή προκλήσεις, ανάλογα με το αντικείμενο της ανασκόπησης. Σε αυτό το στάδιο μπορεί να πραγματοποιηθεί ποιοτική σύνθεση των ευρημάτων ή, εφόσον υπάρχουν ομοιογενή και κατάλληλα δεδομένα, ποσοτική σύνθεση (meta-analysis). Επομένως, η τελική αυτή λίστα αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία στηρίζεται η ποιοτική ή ποσοτική ανάλυση καθώς και τα συμπεράσματα της έρευνας.

Τα παραπάνω στάδια αποτελούν τους 4 σταθμούς που αποτυπώνονται οπτικά στο διάγραμμα ροής της PRISMA όπως βλέπουμε και στην εικόνα 3.1. Στο διάγραμμα ροής απεικονίζονται τα βήματα της διαδικασίας. Συγκεκριμένα, φαίνονται οι εγγραφές που βρέθηκαν, τα διπλότυπα που αφαιρέθηκαν, αυτές που απορρίφθηκαν για να καταλήξουμε στις τελικές πηγές, οι οποίες θα αποτελέσουν και τη βιβλιογραφία της εργασίας [16]. Τα στάδια της PRISMA είναι από τα κυριότερα σημεία της μεθόδου διότι προσφέρουν στους ερευνητές έναν σαφή και λογικό τρόπο να οργανώσουν την πορεία της βιβλιογραφικής τους έρευνας. Επιπλέον, τεκμηριώνουν τις αποφάσεις των ερευνητών,

καθώς κάθε στάδιο συνοδεύεται από σαφώς ορισμένα κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού, διασφαλίζοντας τη διαφάνεια και την αντικειμενικότητα της επιλογής των μελετών. Τέλος, καθιστούν την ανασκόπηση αναπαραγώγιμη, δίνοντας τη δυνατότητα σε άλλους ερευνητές να επαναλάβουν τη διαδικασία και να επιβεβαιώσουν ή να επεκτείνουν τα αποτελέσματα.

Here is the PRISMA 2020 flow diagram



Σχήμα 3. Διάγραμμα ροής PRISMA [16]

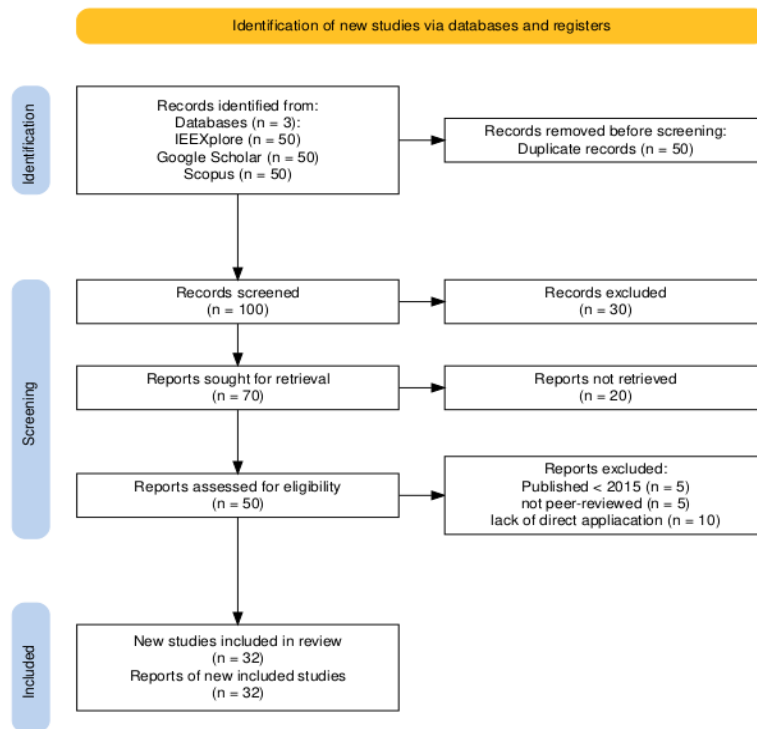
3.3. Εφαρμογή στη διπλωματική

Η διαδικασία αναζήτησης και επιλογής μελετών ακολούθησε τις οδηγίες PRISMA 2020. Αρχικά πραγματοποιήθηκε αναζήτηση σε τρεις βάσεις δεδομένων (Scopus, IEEE Xplore και Google Scholar) χρησιμοποιώντας συνδυασμούς λέξεων-κλειδιών όπως "Blockchain" AND "Smart cities", "Distributed ledger" AND "Urban innovation", "Blockchain applications" AND "Smart city services".

Συνολικά εντοπίστηκαν 150 εγγραφές, εκ των οποίων 50 ήταν διπλότυπες και αφαιρέθηκαν, αφήνοντας 100 μοναδικές εγγραφές.

Στο στάδιο του αρχικού ελέγχου, έγινε αξιολόγηση τίτλων και περιλήψεων για τη συνάφεια με τα ερευνητικά ερωτήματα. Αποκλείστηκαν 30 εγγραφές που δεν πληρούσαν τα κριτήρια, κυρίως λόγω εστίασης σε τεχνολογίες χωρίς άμεση σχέση με το blockchain ή σε εφαρμογές εκτός έξυπνων πόλεων. Στη συνέχεια, διαβάστηκε το πλήρες κείμενο των υπόλοιπων άρθρων και εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα κριτήρια ένταξης: Δημοσίευση από το 2015 και μετά, peer-reviewed άρθρα και περιγραφή εφαρμογής blockchain σε τομείς έξυπνων πόλεων (π.χ. μεταφορές, ενέργεια, υγεία, διακυβέρνηση). Αποκλείστηκαν 20 άρθρα κυρίως λόγω έλλειψης άμεσης εφαρμογής, θεωρητικού χαρακτήρα χωρίς μεθοδολογία, ή παλαιότητας.

Τελικά προστέθηκαν άλλες 32 μελέτες, οι οποίες πληρούν τα παραπάνω κριτήρια, συμπεριλήφθηκαν στην ποιοτική ανάλυση και χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις εφαρμογές του blockchain στις έξυπνες πόλεις. Η συνολική διαδικασία απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής PRISMA (Σχήμα 3.2), το οποίο δημιουργήθηκε σύμφωνα με το επίσημο εργαλείο της μεθόδου [17].



Σχήμα 4. Διάγραμμα ροής PRISMA του Blockchain στην υπηρεσία των έξυπνων πόλεων[17]

IV. Κεφάλαιο 4: Ανάλυση Τεχνολογικού Περιβάλλοντος

Η κατανόηση του τεχνολογικού περιβάλλοντος αποτελεί κρίσιμο βήμα για την αξιολόγηση και την υιοθέτηση καινοτόμων λύσεων όπως η τεχνολογία blockchain. Στη σύγχρονη εποχή, οι υποδομές χαρακτηρίζονται από την αυξανόμενη χρήση πολλαπλών και ετερογενών τεχνολογιών, όπως τα δίκτυα νέας γενιάς, το cloud computing, το edge computing, το Internet of Things και η τεχνητή νοημοσύνη. Ο συνδυασμός αυτών των τεχνολογιών παράγει τεράστιους όγκους δεδομένων με εκθετικά αυξανόμενο ρυθμό, απαιτώντας ασφάλεια, επεξεργαστική ισχύ και μηχανισμούς διαφάνειας.

Σε αυτό το πλαίσιο, η τεχνολογία blockchain έρχεται να ενισχύσει την αξιοπιστία και την ακεραιότητα της πληροφορίας, παρέχοντας μηχανισμούς αποκέντρωσης, επαληθευσιμότητας και εμπιστευτικότητας. Ενώ στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας και οι τομείς εφαρμογής της, το παρόν κεφάλαιο επικεντρώνεται στην ανάλυση των πλατφόρμων και των μηχανισμών που αποτελούν το τεχνολογικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη τέτοιων εφαρμογών.

4.1. Παρουσίαση κύριων πλατφόρμων Blockchain

Ethereum

Το Ethereum είναι ένα αποκεντρωμένο και ανοιχτού κώδικα λογισμικό που βασίζεται στην τεχνολογία blockchain. Δημιουργήθηκε το 2015, από τον Vitalik Buterin [18-20], με στόχο να επεκτείνει τις δυνατότητες του Bitcoin, προσφέροντας όχι μόνο ένα ψηφιακό νόμισμα αλλά και μια υποδομή για την ανάπτυξη αποκεντρωμένων εφαρμογών (DApps).

Η βασική του καινοτομία είναι τα έξυπνα συμβόλαια, δηλαδή προγράμματα που εκτελούνται αυτόματα στο blockchain όταν πληρούνται προκαθορισμένες συνθήκες, εξαλείφοντας την ανάγκη για μεσολαβητές. Η λειτουργία τους υποστηρίζεται από την Ethereum Virtual Machine (EVM), ένα Turing-complete περιβάλλον που επιτρέπει την εκτέλεση γενικού τύπου υπολογισμών σε παγκόσμια κλίμακα [20]. Το εγγενές κρυπτονόμισμα του δικτύου είναι το Ether (ETH), το οποίο χρησιμοποιείται τόσο ως μέσο πληρωμών όσο και για την κάλυψη του κόστους εκτέλεσης συναλλαγών και συμβολαίων (gas fees) [19]. Αρχικά το δίκτυο βασιζόταν στον μηχανισμό συναίνεσης Proof of Work, ωστόσο πλέον λειτουργεί με Proof of Stake, βελτιώνοντας την ενεργειακή αποδοτικότητα και την κλιμάκωση.

Οι εφαρμογές του Ethereum εκτείνονται σε πολλούς τομείς, με τη δημιουργία νέων ψηφιακών νομισμάτων (tokens) να αποτελεί έναν από αυτούς [21]. Επίσης, το Ethereum εισήγαγε το πρότυπο ERC-20, επιτρέποντας τη δημιουργία νέων tokens και stablecoins, ενώ με το ERC-721 εισήγαγε τα NFTs, προσφέροντας δυνατότητες πιστοποίησης ιδιοκτησίας, τίτλων και ψηφιακών περιουσιακών στοιχείων [18]. Παράλληλα, υποστηρίζει τη δημιουργία αποκεντρωμένων οργανώσεων (DAOs) που διευκολύνουν τη συλλογική λήψη αποφάσεων, καθώς και συστήματα ψηφιακής ταυτότητας και ηλεκτρονικής ψηφοφορίας με διαφάνεια και αμεταβλητότητα. Επίσης, η λειτουργία των DAOs βασίζεται σε έξυπνα συμβόλαια αντί για κλασικές διοικητικές δομές [18],[20]. Το σύστημα DeFi στο Ethereum επιτρέπει δανεισμό, ανταλλαγές και χρηματοδοτήσεις χωρίς την ανάγκη τράπεζων, προσφέροντας εργαλεία για συμμετοχική οικονομία στις έξυπνες πόλεις. Τέλος, η σύνδεση

με το όραμα του Web3 καθιστά το Ethereum θεμελιώδη υποδομή για ένα νέο, αποκεντρωμένο διαδίκτυο, όπου οι πολίτες διατηρούν τον έλεγχο των δεδομένων και της ψηφιακής τους ταυτότητας.

Hyperledger Fabric

Το Hyperledger Fabric δημιουργήθηκε το 2015 από το Linux Foundation σε συνεργασία με μεγάλες εταιρείες (IBM, Intel κ.ά.), με στόχο την ανάπτυξη μιας ανοιχτού κώδικα πλατφόρμας blockchain προσαρμοσμένης σε επιχειρησιακές ανάγκες [22]. Σε αντίθεση με τα δημόσια δίκτυα, το Fabric αποτελεί ένα permissioned blockchain, στο οποίο μόνο εξουσιοδοτημένοι συμμετέχοντες έχουν πρόσβαση και δικαιώματα.

Βασικό χαρακτηριστικό του είναι η modular αρχιτεκτονική, η οποία επιτρέπει την προσαρμογή κρίσιμων μηχανισμών, όπως η συναίνεση (π.χ. Raft, Kafka, PBFT) και η διαχείριση ταυτοτήτων μέσω Membership Service Providers (MSPs). Σε επίπεδο έξυπνων συμβολαίων, το Fabric υποστηρίζει την ανάπτυξη chaincode, τα οποία μπορούν να υλοποιηθούν σε γλώσσες γενικής χρήσης όπως Go, Java και Node.js, και εκτελούνται σε απομονωμένα περιβάλλοντα Docker containers για μεγαλύτερη ασφάλεια [22-23]. Επιπλέον, εισάγει το μοντέλο execute order validate, το οποίο βελτιώνει την απόδοση σε σχέση με το παραδοσιακό order execute των άλλων πλατφόρμων, ενώ παρέχει δυνατότητα δημιουργίας ιδιωτικών καναλιών (channels) για απομόνωση συναλλαγών μεταξύ συγκεκριμένων μερών.

Παρέχει υψηλή απόδοση με χαμηλή καθυστέρηση και μεγάλη δυνατότητα throughput. Σε ενεργειακό επίπεδο αποδεικνύεται πιο αποδοτικό από το Ethereum, καθώς δεν βασίζεται σε μηχανισμούς εξόρυξης. Το χαρακτηριστικό αυτό το καθιστά κατάλληλο για IoT εφαρμογές και περιβάλλοντα έξυπνων πόλεων, όπου απαιτείται αποδοτική διαχείριση μεγάλων όγκων δεδομένων με χαμηλό ενεργειακό κόστος.

Στις έξυπνες πόλεις, το Hyperledger Fabric είναι ιδανικό σε τομείς που απαιτούν ασφάλεια, έλεγχο πρόσβασης και εμπιστευτικότητα. Μπορεί να αξιοποιηθεί σε συστήματα υγείας (ασφαλής ανταλλαγή ιατρικών δεδομένων), φορολογίας και δημόσιων συμβάσεων, αλλά και σε εφοδιαστικές αλυσίδες όπου απαιτείται ιδιωτικότητα και έλεγχος πρόσβασης.

Quorum

Το Quorum αναπτύχθηκε το 2016 από την J.P. Morgan ως παραλλαγή του Ethereum ειδικά σχεδιασμένη για τον χρηματοοικονομικό και επιχειρησιακό τομέα [24-26]. Το 2020 ενσωματώθηκε στην ConsenSys, έχοντας υποστήριξη από μια από τις μεγαλύτερες blockchain εταιρείες [25]. Αποτελεί ένα permissioned blockchain, το οποίο βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στη τεχνολογία του Ethereum. Ωστόσο έχει προσαρμοστεί για να είναι πιο γρήγορο, ιδιωτικό και κατάλληλο για επιχειρησιακές χρήσεις. Ένας ακόμη λόγος ανάπτυξης του Quorum είναι η αντιμετώπιση των τεχνικών και επιχειρησιακών μειονεκτημάτων των κλασικών blockchain, προσφέροντας ένα περιβάλλον γρήγορο, ασφαλές, ιδιωτικό και συμβατό με τις ανάγκες των επιχειρήσεων.

Το Quorum επιλύει ζητήματα που σχετίζονται με την έλλειψη ιδιωτικότητας, την περιορισμένη ταχύτητα εκτέλεσης συναλλαγών και την αστάθεια στο κόστος τους. Εισάγει πιο αποδοτικούς μηχανισμούς συναίνεσης, όπως το Raft για γρήγορη και αξιόπιστη λειτουργία σε περιβάλλοντα εμπιστοσύνης και το IBFT για αυξημένη ανθεκτικότητα σε σφάλματα [26]. μέσω της υπηρεσίας Tessera, προσφέρει τη δυνατότητα πραγματοποίησης ιδιωτικών συναλλαγών που είναι

Κεφάλαιο IV

ορατές μόνο στα εμπλεκόμενα μέρη, ενισχύοντας την προστασία ευαίσθητων δεδομένων. Επιπλέον, η συμβατότητά του με το Ethereum Virtual Machine (EVM) και η υποστήριξη των smart contracts σε Solidity καθιστούν δυνατή τη χρήση υφιστάμενων εργαλείων και προτύπων (ERC-20, ERC-721), διευκολύνοντας έτσι τους προγραμματιστές να αξιοποιήσουν την τεχνολογία χωρίς να χρειαστεί να μάθουν νέα γλώσσα [25].

Λόγω της αρχιτεκτονικής του, το Quorum είναι κατάλληλο για περιβάλλοντα όπου χρειάζεται ιδιωτικότητα, υψηλή απόδοση και κανονιστική συμμόρφωση. Στις έξυπνες πόλεις, βρίσκει εφαρμογή σε χρηματοοικονομικές συναλλαγές, διαχείριση φόρων, καθώς και σε έργα που απαιτούν ιδιωτικές αλλά και επαληθεύσιμες συναλλαγές μεταξύ δημοσίων και ιδιωτικών φορέων [24-26].

IOTA

Το IOTA είναι μια permissionless πλατφόρμα κατανεμημένου καθολικού, που διαφοροποιείται από τα παραδοσιακά blockchains καθώς βασίζεται στο Directed Acyclic Graph (DAG) που ονομάζεται Tangle [27-28]. Παρουσιάστηκε το 2015 από το IOTA Foundation με στόχο τη δημιουργία ενός «Machine Economy», όπου οι συσκευές θα ανταλλάσσουν αξία και δεδομένα αυτόνομα.

Κύρια χαρακτηριστικά της πλατφόρμας είναι ότι δεν έχει τέλη συναλλαγών (zero fees), πραγματοποιεί συναλλαγές σε πραγματικό χρόνο και καθιστάται ιδανικό για μικρό-συναλλαγές σε IoT περιβάλλοντα [27]. Επιπλέον, παρέχει δίκτυα τα οποία μπορούν να επεκτείνονται και να διαχειρίζονται μεγάλο όγκο συναλλαγών ή δεδομένων χωρίς να χάνουν σε ταχύτητα ή απόδοση. Προσφέρει μηχανισμούς για ασφαλή επικοινωνία συσκευών (Masked Authenticated Messaging) και διαθέτει smart contracts (IOTA Smart Contracts) με δυνατότητα αυτοματοποίησης.

Στο πλαίσιο των έξυπνων πόλεων, το IOTA είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή κλιμάκωση και χαμηλό κόστος. Συμβάλει στη διαχείριση αισθητήρων περιβάλλοντος, στη μεταφορά και κινητικότητα, καθώς και σε ενεργειακά δίκτυα όπου πολλές συσκευές επικοινωνούν μεταξύ τους σε πραγματικό χρόνο. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία αποκεντρωμένων και επαληθεύσιμων ταυτοτήτων καθώς και παρέχει τη δυνατότητα για ασφαλή διαχείριση ιατρικών δεδομένων [27-28].

4.2. On-chain vs off-chain δεδομένα

Η επιλογή του τρόπου αποθήκευσης και διαχείρισης δεδομένων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ανάπτυξη εφαρμογών blockchain. Οι δυο κυριότεροι τρόποι συναλλαγής των δεδομένων είναι οι on-chain και οι off-chain συναλλαγές. Η πρώτη αναφέρεται σε συναλλαγές που πραγματοποιούνται σε δίκτυα blockchain από την αρχή μέχρι το τέλος με απευθείας καταγραφή των δεδομένων στο blockchain. Η δεύτερη περίπτωση εστιάζει στις συναλλαγές που βρίσκονται εκτός του blockchain και μπορούν να ολοκληρωθούν μέσω μιας ποικιλίας τεχνικών [31]. Οι off-chain συναλλαγές μπορούν να επιβεβαιωθούν μέσω συμφωνίας μεταβίβασης μεταξύ δύο μερών ή με χρήση τρίτου μέρους, γνωστού ως εγγυητή, για την επίβλεψη της συναλλαγής, όπως το PayPal [30]. Ένας ακόμη τρόπος είναι η αποστολή σε άλλο μέρος των ιδιωτικών κλειδιών για ένα πορτοφόλι, το οποίο διατηρεί την αξία του κρυπτονομίσματος μέσα στο πορτοφόλι, ενώ παράλληλα μεταβιβάζει την κυριότητα του πορτοφολιού σε κάποιον άλλο [31].

Οι συναλλαγές εντός αλυσίδας χαρακτηρίζονται από απόλυτη διαφάνεια και ασφάλεια. Μπορούν να επαληθευτούν από όλους με εύκολο τρόπο και δεν βασίζονται σε κάποια κεντρική αρχή, πράγμα που σημαίνει ότι δεν υπάρχει ουσιαστικά κανένας κίνδυνος κάποιος ενδιάμεσος να παραβιάσει την εμπιστοσύνη ή να χειραγωγήσει τη ροή δεδομένων [29]. Ωστόσο, η ταχύτητα των συναλλαγών ενδέχεται να μην είναι η καλύτερη δυνατή καθώς σχετίζεται άμεσα με τη ταχύτητα του δικτύου (στο Bitcoin μπορεί να χρειαστούν λεπτά ή και μέρες [30]). Σε περιπτώσεις υψηλού όγκου συναλλαγών, αυξάνονται και οι χρεώσεις δικτύου. Γι' αυτό και σε περιόδους υψηλής ζήτησης, η χρήση του δικτύου μπορεί να γίνει εξαιρετικά ακριβή. Ένα ακόμα μειονέκτημα είναι η πως η διαδικασία συναλλαγών εντός αλυσίδας καταναλώνει μεγάλη ποσότητα υπολογιστικής ισχύος και ενέργειας.

Από την άλλη πλευρά, οι συναλλαγές εκτός αλυσίδας δεν χρειάζεται να περιμένουν το κύριο δίκτυο blockchain να επιβεβαιώσει μια συναλλαγή, παρέχοντας ταχύτερους ρυθμούς συναλλαγών. Χαρακτηρίζονται από ελάχιστες έως καθόλου χρεώσεις επειδή δεν απαιτείται η διαδικασία επικύρωσης μέσω εξόρυξης ή staking [30]. Επίσης, προσφέρουν μεγαλύτερη ανωνυμία επειδή τα δεδομένα δεν μεταδίδονται δημόσια στο δίκτυο. Τα μειονεκτήματα των μεθόδων εκτός αλυσίδας ποικίλλουν ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται. Οι συναλλαγές που πραγματοποιούνται εκτός αλυσίδας δεν ακολουθούν το ίδιο πρωτόκολλο με ένα blockchain, μειώνοντας τη διαφάνεια και την ανθεκτικότητα σε παραποίηση. Σε αυτή τη περίπτωση χρειάζεται εμπιστοσύνη σε τρίτους ή σε εξωτερικούς μηχανισμούς.

Οι δυο παραπάνω περιπτώσεις συναλλαγών αποτελούν ιδιαίτερα σημαντικές για τις ανάγκες των έξυπνων πόλεων. Οι συναλλαγές εντός αλυσίδας είναι ιδανικές για ψηφοφορίες, δημόσιες προμήθειες ή διαχείριση κτηματολογίου στις οποίες απαιτείται απόλυτη διαφάνεια και ακεραιότητα [29]. Αντιθέτως, η χρήση συναλλαγών εκτός αλυσίδας προτιμάται όταν οι συναλλαγές είναι χαμηλής αξίας ή για μικροπληρωμές [29],[31], όπου η ταχύτητα και το χαμηλό κόστος έχουν μεγαλύτερη σημασία από την απόλυτη αμετάβλητη φύση. Είναι κατάλληλη για μεγάλα δεδομένα IoT, ιατρικούς φακέλους ή αισθητήρες.

4.3. Συγκριτική αξιολόγηση πλατφόρμων

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας blockchain έχει οδηγήσει στην εμφάνιση διαφορετικών πλατφόρμων που καλύπτουν εξειδικευμένες ανάγκες επιχειρήσεων, οργανισμών και έξυπνων πόλεων. Παρότι όλες στηρίζονται σε μια κοινή βάση, την αποκεντρωμένη αποθήκευση δεδομένων και την ακεραιότητα συναλλαγών, κάθε πλατφόρμα διαφοροποιείται ως προς τον τύπο δικτύου, τον μηχανισμό συναίνεσης, τη χρήση έξυπνων συμβολαίων, την ταχύτητα και το κόστος συναλλαγών. Επίσης, παρουσιάζονται οι τομείς και οι ανάγκες των έξυπνων πόλεων, όπου θα βελτιωθούν από τη χρήση τους. Ο παρακάτω πίνακας αποτελεί μια συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ των πλατφόρμων (Ethereum, Hyperledger, Quorum, IOTA).

Πίνακας 1. Συγκριτική αξιολόγηση *Ethereum, Hyperledger, Quorum, IOTA*.

Πλατφόρμα	Τύπος Δικτύου	Consensus	Smart Contracts	Ταχύτητα / Throughput	Κόστος Συναλλαγών	Καταλληλότητα για Smart Cities
Ethereum	Public / Permissionless	Proof of Stake (πρώην PoW)	Ναι (Solidity, EVM)	~15–30 tx/sec	Υψηλό (gas fees, μεταβλητό)	Δημόσιες προμήθειες, ψηφοφορία, διαφάνεια
Hyperledger Fabric	Permissioned (Private/Consortium)	Modular (Raft, Kafka, PBFT)	Ναι (Chaincode σε Go/Java/Node.js)	Έως χιλιάδες tx/sec	Χαμηλό (δεν υπάρχουν gas fees)	Εφοδιαστική αλυσίδα, υγεία, διαχείριση φορολογίας
Quorum	Permissioned (Ethereum-based)	Raft, IBFT, Clique (PoA)	Ναι (Solidity, EVM)	Εκατοντάδες tx/sec	Χαμηλό, με υποστήριξη private tx	Χρηματοοικονομικές συναλλαγές, δημόσια-ιδιωτικά έργα
IOTA (Tangle)	Permissionless (DAG, όχι κλασικό blockchain)	Weight-based tip selection	Ναι (IOTA Smart Contracts)	Πολύ υψηλό (scalable IoT tx/sec)	Μηδενικό (zero fees)	IoT αισθητήρες, smart mobility, ενεργειακά δίκτυα

4.4. Επίλογος

Στόχος του κεφαλαίου αποτελεί η τεχνολογική ανάλυση βασικών πλατφόρμων χρήσης blockchain τεχνολογίας. Μέσα από την ανάλυση των Ethereum, Hyperledger, Quorum και IOTA αναδεικνύονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε πλατφόρμας. Παράλληλα, παρουσιάζονται οι δυο κύριοι τρόποι διαχείρισης συναλλαγών (on-chain και off-chain). Από τη μια πλευρά, τονίζεται η έμφαση στην ασφάλεια και τη διαφάνεια, ενώ από την άλλη η ταχύτητα και η μείωση του κόστους.

Η συγκριτική αξιολόγηση που ακολούθησε έδειξε ότι καμία πλατφόρμα δεν μπορεί να θεωρηθεί «καθολικά ανώτερη», αλλά κάθε μία ανταποκρίνεται καλύτερα σε διαφορετικές απαιτήσεις και σενάρια χρήσης. Έτσι, γίνεται φανερό ότι η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από το εκάστοτε περιβάλλον εφαρμογής, προσφέροντας λύσεις που καλύπτουν συγκεκριμένες ανάγκες στις υπηρεσίες των έξυπνων πόλεων. Η κατανόηση αυτών των διαφορών αποτελεί θεμέλιο για την περαιτέρω ανάλυση των εφαρμογών blockchain που ακολουθεί.

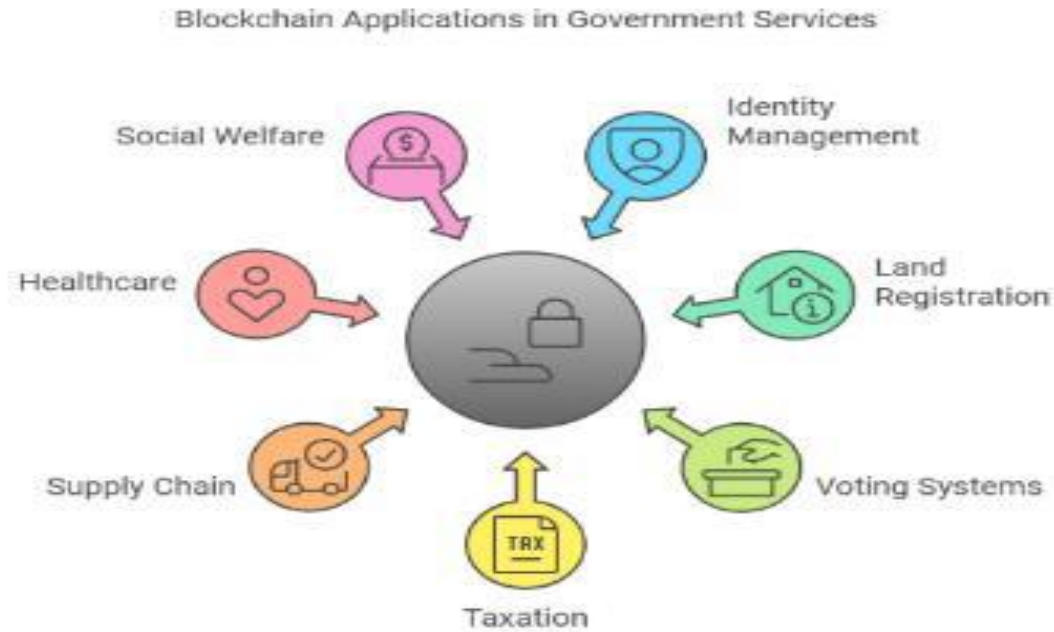
V. Εφαρμογές Blockchain στις Έξυπνες Πόλεις

Οι έξυπνες πόλεις αποτελούν τη σύγχρονη απάντηση στις προκλήσεις της αστικοποίησης, της διαφάνειας και της βιώσιμης ανάπτυξης, αξιοποιώντας προηγμένες τεχνολογίες για την παροχή αποδοτικότερων και πιο αξιόπιστων υπηρεσιών προς τους πολίτες. Στο πλαίσιο αυτό, η τεχνολογία Blockchain προσφέρει μια επαναστατική προσέγγιση για τη διαχείριση δεδομένων και διαδικασιών, παρέχοντας αμεταβλητότητα, ασφάλεια, αποκέντρωση και διαφάνεια. Τα χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας βελτιώνουν τη λειτουργία των δημόσιων υπηρεσιών, ενισχύσουν την εμπιστοσύνη των πολιτών και μειώνουν τη γραφειοκρατία.

Η παρούσα ενότητα βασίζεται στη συστηματική ανάλυση των επιστημονικών μελετών που επιλέχθηκαν μέσω της **μεθοδολογίας PRISMA**, όπως παρουσιάστηκε στο 3ο κεφάλαιο. Μετά τη διαδικασία εντοπισμού, αξιολόγησης και φιλτραρίσματος της σχετικής βιβλιογραφίας, τα επιλεγμένα άρθρα μελετήθηκαν διεξοδικά με στόχο τον εντοπισμό επαναλαμβανόμενων θεματικών μοτίβων ως προς τις εφαρμογές του blockchain στο πλαίσιο των έξυπνων πόλεων.

Η θεματική ανάλυση των μελετών κατέδειξε ότι οι εφαρμογές του blockchain συγκεντρώνονται σε συγκεκριμένους λειτουργικούς τομείς, στους οποίους παρατηρείται αυξημένο ερευνητικό ενδιαφέρον και πληθώρα προτεινόμενων ή υλοποιημένων λύσεων. Βάσει αυτής της ανάλυσης, τα άρθρα ομαδοποιήθηκαν **σε έξι (6) διακριτά πεδία** εφαρμογής, τα οποία προέκυψαν από τη βιβλιογραφία και δεν αποτελούν αυθαίρετη κατηγοριοποίηση. Συγκεκριμένα, τα πεδία εφαρμογής που αναδείχθηκαν είναι: η ψηφιακή ταυτότητα, οι ηλεκτρονικές εκλογές, το κτηματολόγιο, η φορολογία, η υγεία και οι έξυπνες υποδομές. Κάθε ένα από τα παραπάνω πεδία εκπροσωπείται από πλήθος επιστημονικών μελετών που εξετάζουν διαφορετικές αρχιτεκτονικές, σενάρια χρήσης, πλεονεκτήματα και περιορισμούς της τεχνολογίας blockchain στο αντίστοιχο πλαίσιο εφαρμογής.

Στις υποενότητες που ακολουθούν, κάθε πεδίο εφαρμογής αναλύεται ξεχωριστά, με αναφορά στα βασικά ευρήματα της βιβλιογραφίας, τις προτεινόμενες λύσεις και τις κοινές τάσεις που προκύπτουν από τη σύγκριση των επιμέρους μελετών. Αξίζει να σημειωθεί πως σε κάθε τομέα πραγματοποιείται ανάλυση μίας **ενδεικτικής εφαρμογής blockchain**. Με τον τρόπο αυτό, επιδιώκεται η σύνδεση της θεωρητικής ανάλυσης με πρακτικά παραδείγματα εφαρμογής της τεχνολογίας blockchain στις έξυπνες πόλεις.



Σχήμα 5. Τομείς ενσωμάτωσης τεχνολογίας blockchain [36]

5.1. Ψηφιακή ταυτότητα και αυθεντικοποίηση

Η παρούσα υποενότητα βασίζεται σε **πέντε (5) επιστημονικές μελέτες** που εξετάζουν την εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain στον τομέα της ψηφιακής ταυτότητας και της αυθεντικοποίησης. Οι μελέτες αυτές εστιάζουν κυρίως σε αποκεντρωμένα μοντέλα διαχείρισης ταυτότητας και προσεγγίσεις Self-Sovereign Identity, με έμφαση στην προστασία της ιδιωτικότητας, όπως οι αποδείξεις μηδενικής γνώσης.

Η ανάγκη για μία ασφαλή, αξιόπιστη και διαλειτουργική διαχείριση της ψηφιακής ταυτότητας αποτελεί μια απ' τις σημαντικότερες υποχρεώσεις των έξυπνων πόλεων. Ο σκοπός των ψηφιακών ταυτοτήτων αντιπροσωπεύει μια εξωτερική οντότητα, είτε πρόκειται για πρόσωπο, επιχείρηση, πρόγραμμα ή αντικείμενο και χρησιμεύει ως βάση για την αυτόματη πρόσβαση σε υπηρεσίες (υγεία, μεταφορές, ηλεκτρονική διακυβέρνηση, ηλεκτρονικό εμπόριο) [32]. Βασική προϋπόθεση είναι η παροχή αυθεντικοποιήσεων για την εγγύηση της ιδιωτικότητας, της προστασίας των προσωπικών δεδομένων και της άμεσης επαλήθευσης. Ωστόσο, η βιβλιογραφία καταδεικνύει ότι στα συστήματα ταυτοποίησης ελλοχεύουν αρκετοί κίνδυνοι και προκλήσεις, οι οποίοι μπορεί να οδηγήσουν σε κρίσιμες καταστάσεις. Η ενσωμάτωση τεχνολογίας blockchain αποτελεί τον καταλυτικό παράγοντα ενίσχυσης των εν λόγω συστημάτων.

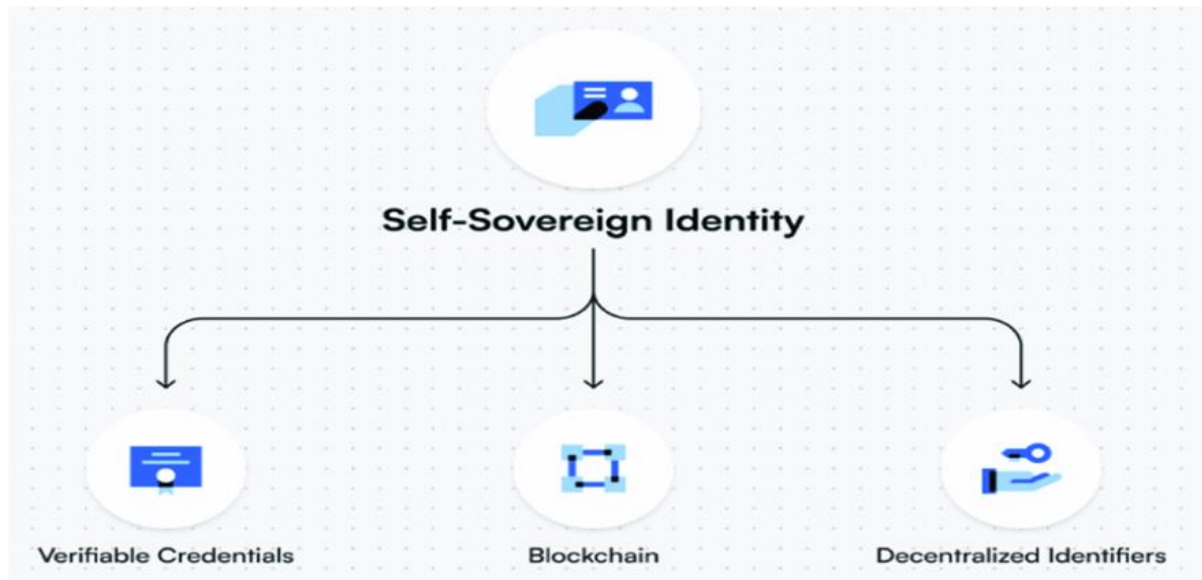
Αρχικά, το σύνολο των υπαρχουσών τεχνολογιών βασίζονται κυρίως σε κεντροποιημένα μοντέλα. Σε περίπτωση που το σύστημα δεχτεί επίθεση, παρουσιάσει τεχνικό σφάλμα ή διακοπή, κανένας χρήστης δεν μπορεί να «τακτοποιηθεί» και η υπηρεσία σταματά να λειτουργεί. Τέτοιοι τύποι κινδύνων ονομάζονται single point of failure [34-36]. Σήμερα τα περισσότερα συστήματα λειτουργούν σε διαφορετικά πρότυπα και μηχανισμούς αυθεντικοποίησης, οδηγώντας σε περιορισμένη διαλειτουργικότητα. Έτσι, ο χρήστης είναι υποχρεωμένος να δημιουργεί ξεχωριστούς λογαριασμούς ή να περνάει από πολύπλοκες διαδικασίες για κάθε υπηρεσία. Αυτό καθιστά δύσκολη

την υλοποίηση cross-domain authentications ανάμεσα σε διαφορετικούς οργανισμούς ή κράτη [34]. Η διαδικασία της αυθεντικοποίησης βασίζεται συχνά σε τρίτους φορείς, με αποτέλεσμα οι πολίτες να μην έχουν ουσιαστικό έλεγχο στη χρήση των προσωπικών τους δεδομένων [34-36]. Τέλος, η αυξανόμενη συχνότητα περιστατικών διαρροής δεδομένων και η δυσκολία κλιμάκωσης των παραδοσιακών λύσεων δημιουργούν επιπλέον προκλήσεις που επιβραδύνουν την παροχή ασφαλών και αξιόπιστων υπηρεσιών [33],[35].

Το blockchain πρόκειται να εισάγει ένα νέο μοντέλο διαχείρισης ψηφιακής ταυτότητας, προσανατολισμένο στην ασφάλεια, τη διαφάνεια και τον έλεγχο από τον ίδιο τον πολίτη. Όπως αναδεικνύεται στη σχετική βιβλιογραφία, αποτελεί την υποδομή υλοποίησης του μοντέλου Self-Sovereign Identity (SSI), στο οποίο τα δεδομένα ανήκουν και ελέγχονται αποκλειστικά από τον κάτοχο, ο οποίος μπορεί να επιλέξει ποια στοιχεία θα κοινοποιήσει και σε ποιον. Το σύστημα SSI βασίζεται στον συνδυασμό αυτών των τριών τεχνολογικών στοιχείων: **Verifiable Credentials**, το **Blockchain** και τα **Decentralized Identifiers**. Τα DIDs επιτρέπουν τη μοναδική και αποκεντρωμένη αναγνώριση των χρηστών, ενώ τα Verifiable Credentials παρέχουν τη δυνατότητα ασφαλούς και επιλεκτικής κοινοποίησης πιστοποιημένων πληροφοριών. Το blockchain λειτουργεί ως μηχανισμός εμπιστοσύνης, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα, τη διαφάνεια και την αμεταβλητότητα των δεδομένων επαλήθευσης, χωρίς την αποθήκευση προσωπικών πληροφοριών. Το σχήμα 6 απεικονίζει το SSI και τους επιμέρους μηχανισμούς του.

Παράλληλα, οι μελέτες επισημαίνουν τη σημασία της χρήσης κρυπτογραφικών τεχνικών, όπως οι αποδείξεις μηδενικής γνώσης (Zero-Knowledge Proofs - ZKP). Η χρήση ZKP επιτρέπει την επαλήθευση ιδιοτήτων χωρίς αποκάλυψη περιττών προσωπικών πληροφοριών. Για παράδειγμα, μπορεί να αποδείξει μία ιδιότητά του (π.χ. ότι είναι ενήλικος) χωρίς να αποκαλύπτει όλη την ταυτότητα του, ενισχύοντας την ιδιωτικότητα [32]. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει σημαντικά την ιδιωτικότητα και θεωρείται κρίσιμη για εφαρμογές ψηφιακής ταυτότητας σε περιβάλλοντα έξυπνων πόλεων, όπου η προστασία δεδομένων αποτελεί πρωταρχικό ζήτημα

Επιπλέον, το blockchain λειτουργεί σε διεθνή πρότυπα (W3CDIDs, VCs) τα οποία ενισχύουν τη διαλειτουργικότητα, επιτρέποντας την εφαρμογή ενιαίας ταυτότητας σε διαφορετικά πεδία, από την υγεία και τις μεταφορές έως την ηλεκτρονική διακυβέρνηση (ενίσχυση cross-domain authentications) [35].



Σχήμα6. *Self-Sovereign Identity (SSI)* [32]

Τέλος, η βιβλιογραφία αναφέρει συγκεκριμένες πλατφόρμες blockchain που θεωρούνται κατάλληλες για την υλοποίηση συστημάτων ψηφιακής ταυτότητας, όπως τα **Hyperledger Indy** και **Quorum**. Μέσα από τη διεξαγωγή πειραμάτων έχει αποδειχτεί ότι, οι διαδικασίες επαλήθευσης απαιτούν ελάχιστο χρόνο (λιγότερο από δευτερόλεπτο). Με αυτό το τρόπο, τα συστήματα μπορούν να εξυπηρετήσουν τους μεγάλους όγκους αιτήσεων για της ανάγκες των έξυπνων πόλεων [33]. Η αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική σε συνδυασμό με την αμετάβλητη φύση του, μειώνουν τον κίνδυνο παραποίησης και παραβιάσεων δεδομένων.

5.1.1. Σύστημα ψηφιακής ταυτοποίησης με DIDs και Verifiable Credentials

Χαρακτηριστικό παράδειγμα blockchain συστήματος ταυτοποίησης περιγράφεται στο άρθρο [34]. Γίνεται χρήση των προτύπων Decentralized Identifiers (DIDs) και Verifiable Credentials (VCs), τα οποία έχουν τυποποιηθεί από το World Wide Web Consortium (W3C). Σκοπός του προτεινόμενου μοντέλου είναι να ξεπεράσει τις αδυναμίες των παραδοσιακών συστημάτων που ειπώθηκαν παραπάνω. Το Σχήμα 7 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική του μοντέλου.

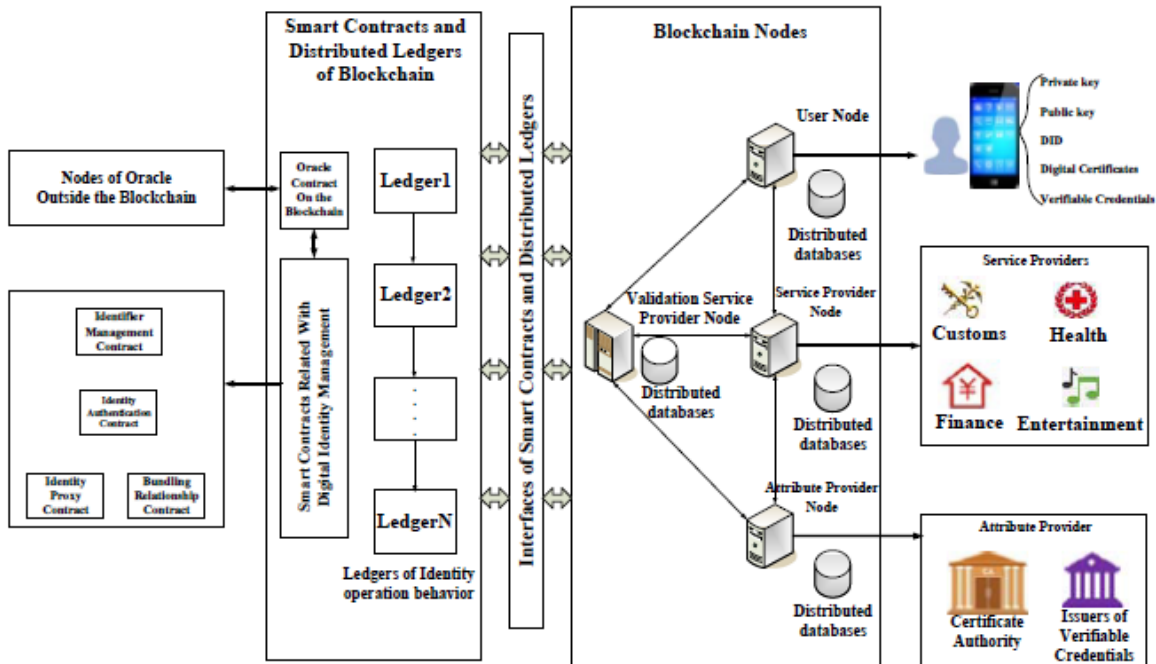
Αρχικά, γίνεται αντιληπτό ότι το σύστημα διακρίνεται σε τρία βασικά μέρη. Τα έξυπνα συμβόλαια και τα κατανεμημένα καθολικά, τους κόμβους Oracle και τους κόμβους blockchain. Στο πρώτο μέρος εμφανίζονται τα καθολικά όπου περιέχουν καταχωρήσεις ταυτότητας. Παράλληλα, τα έξυπνα συμβόλαια διαχωρίζονται σε τέσσερις τύπους, το καθένα από τα οποία είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο συγκεκριμένων λειτουργιών. Η σύμβαση διαχείρισης αναγνωριστικών (Identifier Management Contract) χρησιμοποιείται για την καταχώριση και διαχείριση των DIDs. Η σύμβαση πληροφορίας πραγματικής ταυτότητας (Bundling Relationship Contract) συνδέει το DID του χρήστη με τα VCs που έχουν εκδοθεί από επίσημους φορείς. Η σύμβαση αυθεντικοποίησης (Identity Authentication Contract) επαληθεύει αν τα πιστοποιητικά που παρουσιάζει ο χρήστης είναι γνήσια και έχουν εκδοθεί από έγκυρους φορείς. Τέλος, η σύμβαση ταυτότητας αντιπροσώπου (Proxy Identity Contract) δημιουργεί μια εγγραφή που αποδεικνύει ότι η ψηφιακή ταυτότητα είναι έγκυρη και μπορεί

να χρησιμοποιηθεί σε υπηρεσίες. Ο ρόλος τους είναι να εξασφαλίζουν ότι οι διαδικασίες ταυτοποίησης γίνονται αυτόματα, διαφανώς και με αδιάβλητο τρόπο [34].

Στο δεύτερο μέρος, οι κόμβοι Oracle επικοινωνούν με το blockchain παρέχοντας εξωτερικές πληροφορίες που χρειάζονται τα έξυπνα συμβόλαια. Το τρίτο μέρος αποτελείται από τέσσερις διαφορετικούς κόμβους,

οι οποίοι συνδέονται με το blockchain με αποκεντρωμένο και ασφαλή τρόπο και διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες. Αρχικά, ο user node αποθηκεύει και διαχειρίζεται την προσωπική του ψηφιακή ταυτότητα. Ο service provider node παρέχει υπηρεσίες στον πολίτη (π.χ. υγεία, συγκοινωνίες, e-government) εφόσον επιβεβαιωθεί η ταυτότητά του. Ο attribute provider node εκδίδει τα απαραίτητα πιστοποιητικά από τους φορείς. Τέλος ο validation service provider node ελέγχει αν η ταυτότητα και τα διαπιστευτήρια είναι γνήσια, χρησιμοποιώντας smart contracts και blockchain [34].

Στα δεξιά του σχήματος 7 διακρίνεται η πρακτική χρήση του μοντέλου. Κάθε χρήστης αποδεικνύει την ταυτότητά του με το κινητό του για πρόσβαση σε διάφορες υπηρεσίες. Έτσι, οι πάροχοι υπηρεσιών ελέγχουν την εγκυρότητα των στοιχείων μέσω blockchain, χωρίς να χρειάζεται να αποθηκεύουν ή να γνωρίζουν όλα τα προσωπικά δεδομένα. Συνολικά, το προτεινόμενο μοντέλο συστήματος μπορεί να συμβάλει στην κατασκευή ενός ασφαλούς και αξιόπιστου συστήματος διαχείρισης ψηφιακής ταυτότητας.



Σχήμα 7. Αρχιτεκτονική του μοντέλου ψηφιακή ταυτότητας [34]

5.2. Εκλογές και ηλεκτρονική ψηφοφορία (e-voting)

Η παρούσα υποενότητα βασίζεται σε **έξι (6) επιστημονικές μελέτες** που εξετάζουν την εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain στον τομέα της ηλεκτρονικής ψηφοφορίας. Οι μελέτες αυτές εστιάζουν σε blockchain-based αρχιτεκτονικές e-voting, με έμφαση στην ασφάλεια, τη διαφάνεια, την ανωνυμία και την επαληθευσσιμότητα της εκλογικής διαδικασίας. Παράλληλα, εξετάζουν τα πλεονεκτήματα των αποκεντρωμένων λύσεων, καθώς και τις κύριες τεχνικές και οργανωτικές προκλήσεις που προκύπτουν κατά την ενσωμάτωσή τους σε περιβάλλοντα έξυπνων πόλεων.

Ο τομέας των εκλογών αποτελεί κρίσιμο πυλώνα της δημοκρατικής λειτουργίας των έξυπνων πόλεων, καθώς διασφαλίζει τη συμμετοχή των πολιτών και την αντιπροσωπευτικότητα των θεσμών. Η βιβλιογραφία καταγράφει τη σταδιακή μετάβαση από την παραδοσιακή ψηφοφορία με χαρτί προς ηλεκτρονικές μορφές ψηφοφορίας. Η μετάβαση στα e-voting συστήματα στοχεύει στη βελτίωση της προσβασιμότητας, της ταχύτητας και της αποδοτικότητας της διαδικασίας. Ωστόσο, οι ίδιες μελέτες επισημαίνουν ότι η υιοθέτηση συστημάτων e-voting συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις, που θέτουν υπό αμφισβήτηση την αξιοπιστία τους.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, στις σύγχρονες εκλογικές διαδικασίες παρατηρούνται σημαντικά προβλήματα στην ασφάλεια, στην διαφάνεια, στην εμπιστοσύνη και στην ανωνυμία. Τα παραδοσιακά e-voting συστήματα είναι εύαλατα σε κυβερνοεπιθέσεις και αλλοιώσεις δεδομένων, λόγω της κεντροποιημένης φύσης τους [38-40]. Επίσης, πολλές φορές χαρακτηρίζονται από περιορισμένη επαληθευσσιμότητα, καθώς ο ψηφοφόρος δεν έχει πάντα τρόπο να ελέγξει αν η ψήφος του καταγράφηκε με σωστό τρόπο [41]. Η έλλειψη αξιόπιστων μηχανισμών ταυτοποίησης δημιουργεί τον κίνδυνο διπλοψηφίας ή πλαστοπροσωπίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η παραδοχή της Εκλογικής Επιτροπής της Νότιας Ουαλίας (NSW), το 2015, ότι ο ιστότοπος iVote διέρρευσε έως και 66.000 εκλογικές ψήφους [42]. Σε αρκετά συστήματα, έχουν προκύψει προβλήματα παραβίασης της ανωνυμίας, καθώς τα δεδομένα ταυτοποίησης μπορούν να συνδεθούν με την ψήφο, παραβιάζοντας τη μυστικότητα της διαδικασίας. Οι μελέτες επισημαίνουν ότι, οι εφαρμογές ηλεκτρονικής ψηφοφορίας ενδέχεται να αντιμετωπίσουν προβλήματα κλιμάκωσης όταν καλούνται να εξυπηρετήσουν μεγάλο αριθμό ταυτόχρονων ψηφοφόρων. Η υλοποίηση ασφαλών και αξιόπιστων εκλογικών διαδικασιών απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές και εξειδικευμένη τεχνογνωσία [37-40].

Η ανάλυση της βιβλιογραφίας αναδεικνύει το blockchain ως μία κατάλληλη τεχνολογική λύση για την αντιμετώπιση των παραπάνω προβλημάτων. Με την καταγραφή των ψήφων στα blocks, διασφαλίζεται ότι τα αποτελέσματα δεν τροποποιούνται εκ των υστέρων, καθώς δεν μπορούν να αλλοιωθούν χωρίς συναίνεση του δικτύου [38],[40]. Η καταγραφή κάθε ψήφου στο δημόσιο καθολικό επιτρέπει σε οποιοδήποτε χρήστη να επαληθεύσει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Μέσω προηγμένων κρυπτογραφικών τεχνικών (π.χ. blind signatures, identity mixers, ψηφιακά κλειδιά), η ψήφος αποσυνδέεται από την ταυτότητα του ψηφοφόρου, εξασφαλίζοντας ανωνυμία [41]. Επιπλέον, οι μελέτες τονίζουν τον ρόλο των έξυπνων συμβολαίων, καθώς εκτελούν αυτόματα και χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση την καταμέτρηση των αποτελεσμάτων. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται ο κίνδυνος λαθών και παρατυπιών, εμπνέοντας εμπιστοσύνη στη διαδικασία. Το Hyperledger Fabric αποτελεί την ιδανική πλατφόρμα blockchain για την υλοποίηση ηλεκτρονικής ψηφοφορίας. Η υψηλή απόδοση σε συνδυασμό με τη χαμηλή καθυστέρηση μπορούν να αντιμετωπίσουν τυχόν προβλήματα κλιμάκωσης. E-voting συστήματα μπορούν να βασιστούν και στο Ethereum, ενώ πλατφόρμες όπως

Multichain ή Quorum χρησιμοποιούνται σε πιο εξειδικευμένα σενάρια. Άξιο αναφοράς αποτελεί πως η αποκεντρωμένη φύση του blockchain περιορίζει την ανάγκη για μεσάζοντες και φυσικές υποδομές, οδηγώντας σε ταχύτερη και οικονομικότερη εκλογική διαδικασία.

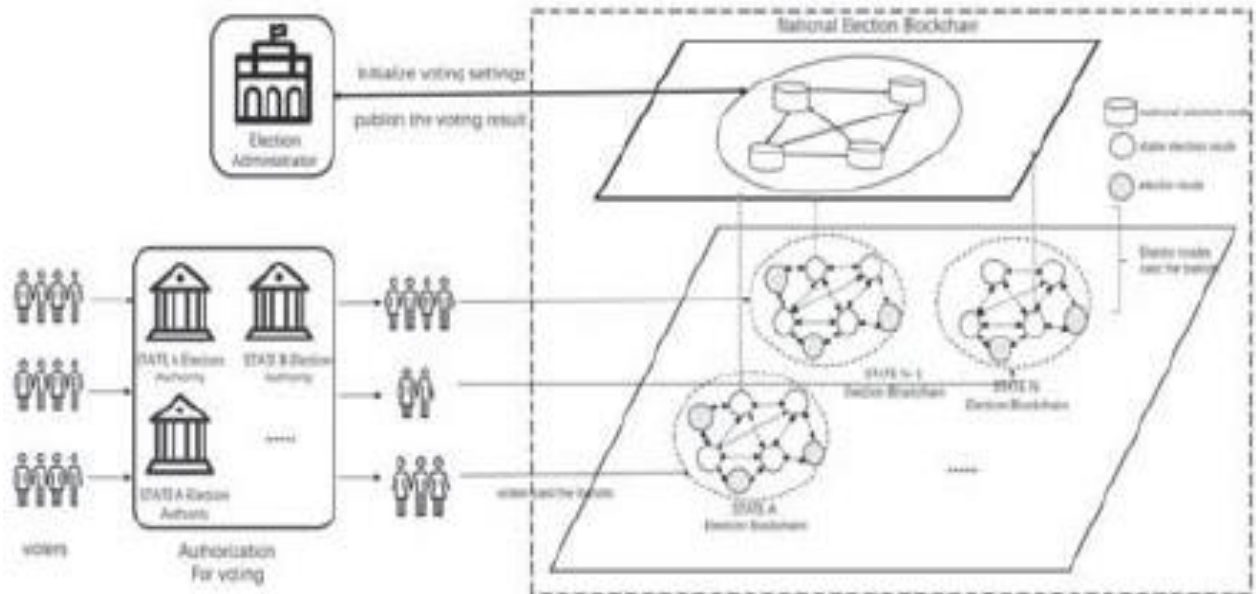
5.2.1. Το e-voting σύστημα BCvoteMDE για πολυεπίπεδες εκλογές

Το BCvoteMDE αποτελεί ένα e-voting σύστημα βασισμένο σε τεχνολογία blockchain με αρχιτεκτονική δύο επιπέδων για την υποστήριξη πολλαπλών εκλογικών περιφερειών. Στόχος του είναι η παροχή μίας εύκολης διαδικασίας καταμέτρησης και συνένωσης ψήφων σε διαφορετικές εκλογικές περιφέρειες.

Η αρχιτεκτονική του συστήματος αποτελείται από δυο επίπεδα. Στο κατώτερο καταγράφονται οι ψήφοι των ψηφοφόρων ενώ στο ανώτερο οι ψήφοι των εκλογέων. Η λειτουργία του βασίζεται στη δημιουργία ξεχωριστών έξυπνων συμβολαίων για κάθε εκλογική περιφέρεια, τα οποία διαχειρίζονται την καταγραφή και καταμέτρηση των ψήφων σε τοπικό επίπεδο. Με τον τρόπο αυτό, κάθε περιφέρεια έχει το δικό της «υπολογιστικό χώρο» στο blockchain, χωρίς την ανάγκη ενός κεντρικού φορέα που θα συγκεντρώνει όλα τα δεδομένα. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα από τις επιμέρους περιφέρειες συνδυάζονται αυτόματα μέσα στο δίκτυο, εξασφαλίζοντας ενιαίο και αξιόπιστο τελικό αποτέλεσμα [37].

Η λειτουργία του BCvoteMDE βασίζεται σε τέσσερις οντότητες οι οποίες είναι οι ψηφοφόροι, η εθνική εκλογική αρχή (NEA), ο διαχειριστής εκλογών (EA) και το δίκτυο blockchain. Αρχικά, οι ψηφοφόροι καταθέτουν τις ψήφους τους μέσω μιας διεπαφής. Κάθε ψήφος υπογράφεται ψηφιακά για να διασφαλιστεί η αυθεντικότητά του. Η NEA είναι υπεύθυνη να επιβλέπει τη διαδικασία της ψηφοφορίας, να συγκεντρώνει και να επικυρώνει τα αποτελέσματα που καταγράφονται στα επιμέρους smart contracts των εκλογικών περιφερειών. Ο EA είναι υπεύθυνος για την έναρξη των εκλογών αλλά και για την αρχικοποίηση των ρυθμίσεων στο δίκτυο. Οι ρυθμίσεις περιλαμβάνουν τον κατάλογο υποψηφίων, τον αριθμό ταυτότητας των εκλογών, την ώρα έναρξης και λήξης των εκλογών. Τέλος, το δίκτυο βασίζεται σε ένα blockchain κοινοπραξίας δύο επιπέδων. Το κατώτερο επίπεδο αφορά τις κρατικές εκλογές και χωρίζεται σε μικρότερα blockchain, ανάλογα με την εκλογική περιφέρεια. Κάθε ένα από αυτά δέχεται ψήφους από τους ψηφοφόρους της συγκεκριμένης πολιτείας. Από την άλλη, το ανώτερο επίπεδο αφορά τις εθνικές εκλογές και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο, την καταμέτρηση και την ανακοίνωση των αποτελεσμάτων [37]. Το Σχήμα 8 που ακολουθεί, παρουσιάζει την αρχιτεκτονική του συστήματος.

Το σύστημα BCvoteMDE είναι κατάλληλο για την υποστήριξη εκλογών μεγάλης κλίμακας. Χάρη στην αρχιτεκτονική του, το φορτίο συναλλαγών δεν συγκεντρώνεται σε ένα μόνο σημείο, αλλά κατανέμεται. Επιπλέον, η διαδικασία καταμέτρησης γίνεται αυτόματα μέσω του blockchain, εξαλείφοντας την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης και μειώνοντας τον κίνδυνο λαθών ή αλλοιώσεων. Τέλος, το σύστημα συμβάλλει στη μείωση του κόστους και του χρόνου σε σχέση με τις παραδοσιακές, χειροκίνητες διαδικασίες, καθώς δεν απαιτείται φυσική υποδομή για τη συλλογή και μεταφορά ψηφοδελτίων, ενώ τα αποτελέσματα είναι άμεσα διαθέσιμα και επαληθεύσιμα από όλους τους εμπλεκόμενους φορείς [37].



Σχήμα 8.Η αρχιτεκτονική του e-voting συστήματος: BCvoteMDE[37]

5.3. Κτηματολόγιο και διαχείριση περιουσιακών στοιχείων

Η παρούσα υποενότητα βασίζεται σε πέντε (5) επιστημονικές μελέτες που εξετάζουν την εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain στον τομέα της καταγραφής και διαχείρισης ακίνητης και κινητής περιουσίας. Οι μελέτες εστιάζουν σε συστήματα κτηματολογίου και διαχείρισης περιουσιακών στοιχείων με στόχο την ενίσχυση της ασφάλειας, της διαφάνειας και της αξιοπιστίας των συναλλαγών. Παράλληλα, αναλύουν τα πλεονεκτήματα των αποκεντρωμένων προσεγγίσεων, καθώς και τις τεχνικές και θεσμικές προκλήσεις που σχετίζονται με την υιοθέτησή τους σε περιβάλλοντα έξυπνων πόλεων.

Η διαχείριση και καταγραφή της ακίνητης περιουσίας αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την οικονομική ανάπτυξη, την ασφάλεια συναλλαγών και τη διαφάνεια των διοικητικών διαδικασιών. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η καταγραφή γης αναφέρεται στην καταγραφή θεμάτων που αφορούν την ιδιοκτησία γης, καθώς και πρόσθετων δικαιωμάτων, προκειμένου να παρέχονται αποδεικτικά στοιχεία τίτλου, να διευκολύνονται οι συναλλαγές και να αποτρέπονται παράνομες δραστηριότητες [43-44]. Τα περιουσιακά στοιχεία, είτε πρόκειται για ακίνητα (γη, κτίρια) είτε για κινητά (εξοπλισμός, οχήματα, υποδομές), αντιπροσωπεύουν κεφάλαιο και αξία για κάθε πολίτη και οργανισμό. Η ορθή καταγραφή, κατοχύρωση και μεταβίβασή τους αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την προστασία της ιδιοκτησίας και την οικονομική ανάπτυξη.

Ωστόσο, οι επιλεγμένες μελέτες επισημαίνουν ότι τα παραδοσιακά συστήματα κτηματολογίου και διαχείρισης παρουσιάζουν σημαντικές αδυναμίες, οι οποίες αξίζει να επισημανθούν και να αναλυθούν. Αρχικά, το πλήθος των καταχωρίσεων πραγματοποιείται μέσω κεντρικών βάσεων δεδομένων, γεγονός που αυξάνει τους κινδύνους διαφθοράς, παραποίησης εγγράφων και μη αξιόπιστων ενημερώσεων. Οι πλατφόρμες αποθήκευσης δε διαθέτουν ισχυρούς μηχανισμούς ασφαλείας, με αποτέλεσμα να είναι ευάλωτες σε παραβιάσεις [43-44]. Έτσι, αυξάνονται οι πιθανότητες πρόσβασης μη εξουσιοδοτημένων χρηστών, οδηγώντας σε παράνομες

αλλαγές ή διαγραφές εγγραφών [45]. Η διαδικασία μεταβίβασης ιδιοκτησίας ή ακινήτου καθιστάται αργή, δαπανηρή και αρκετές φορές αναποτελεσματική. Αυτό συμβαίνει διότι απαιτείται η εμπλοκή πολλαπλών υπηρεσιών για την έκδοση πιστοποιητικών και την υπογραφή συμβολαιογράφων, προκαλώντας σύγχυση στους πολίτες [43]. Οι εγγραφές στα παλαιά κτηματολόγια δεν παρέχουν πλήρες ιστορικό των μεταβιβάσεων, ενώ οι τροποποιήσεις γίνονται χωρίς διαφάνεια ή παρακολούθηση. Η έλλειψη πλήρους ιστορικού μεταβιβάσεων προκαλεί νομικές διαμάχες και αμφισβητήσεις τίτλων, καθώς δεν υπάρχει μηχανισμός για την ανίχνευση όλων των αλλαγών στην ιδιοκτησία [45]. Το ζήτημα αυτό επεκτείνεται και στα κινητά περιουσιακά στοιχεία αναφέροντας ότι η ασυμμετρία πληροφόρησης μεταξύ αγοραστών και πωλητών είναι σημαντικό εμπόδιο για την ορθή αποτίμηση και τη ρευστότητα της αγοράς [46].

Η ανάλυση της βιβλιογραφίας αναδεικνύει το Blockchain ως μια κατάλληλη τεχνολογική λύση για την αντιμετώπιση αυτών των παραπάνω ευπαθειών και ελαττωμάτων. Κάθε εγγραφή επικυρώνεται μέσω μηχανισμών συναίνεσης και αποθηκεύεται σε καταναμημένο καθολικό, καθιστώντας αδύνατη την αλλοίωση ή διαγραφή δεδομένων. Χρησιμοποιείται, επίσης, για τη δημιουργία και προβολή δημόσιων επαληθεύσιμων κτηματολογικών αρχείων [45]. Τα δεδομένα μπορούν να μεταβληθούν μόνο από εξουσιοδοτημένους χρήστες, χάρη στις κρυπτογραφικές τεχνικές της αλυσίδας μπλοκ. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται εφαρμογές κρυπτογραφίας, όπως Elliptic Curve Cryptography (ECC) και στο Hyperledger Sawtooth Blockchain για ψηφιακή υπογραφή, επαλήθευση εγγραφών και για προστασία δεδομένων σε αγροτικά περιουσιακά δίκτυα, αποτρέποντας αλλοιώσεις και επιθέσεις τύπου DDoS [43-44].

Επιπλέον, τα έξυπνα συμβόλαια επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη εκτέλεση συναλλαγών μόλις πληρούνται οι προκαθορισμένοι όροι, εξαλείφοντας την ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση. Εκτελούν αυτόματα διαδικασίες όπως μεταβίβαση τίτλων, υποθήκες ή διαθήκες, ενσωματώνοντας μηχανισμούς διπλής συναίνεσης για την επιβεβαίωση αγοραστή και πωλητή [45]. Με τον τρόπο αυτό, μειώνεται ο χρόνος και το κόστος των συναλλαγών και ενισχύεται η διαφάνεια της διαδικασίας. Τέλος, αρκετές μελέτες αναφέρουν ότι το blockchain βοηθάει και στη μετατροπή των φυσικών περιουσιακών στοιχείων σε ψηφιακά tokens ή NFTs. Αυτά λειτουργούν ως απόδειξη ιδιοκτησίας, διευκολύνοντας την ιχνηλασιμότητα και τη διαχείρισή τους στο πλαίσιο των έξυπνων πόλεων.

5.3.1. Σύστημα καταγραφής και μεταβίβασης γης σε blockchain

Το σύστημα που προτείνεται στο άρθρο [45] έχει ως βασικό σκοπό τη δημιουργία ενός ασφαλούς, αμετάβλητου και διαφανούς συστήματος καταγραφής και μεταβίβασης γης μέσω της τεχνολογίας blockchain. Η προσέγγιση αυτή στοχεύει στην αντικατάσταση των υφιστάμενων συγκεντρωτικών και επιρρεπών σε απάτες συστημάτων κτηματολογίου. Επίσης, βοηθάει στην εξαλείφει των μεσαζόντων, μεταφέροντας την ευθύνη επαλήθευσης στο ίδιο το δίκτυο blockchain. Το σύστημα είναι υλοποιημένο στην πλατφόρμα Ethereum, χρησιμοποιώντας τη γλώσσα Solidity, και κάνει χρήση του μοντέλου token ERC-20 για την αναπαράσταση των μεριδίων γης. Κάθε token αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο τεμάχιο γης και αποθηκεύεται σε ένα αποκεντρωμένο καθολικό (ledger). Η καταγραφή κάθε μεταβίβασης πραγματοποιείται μέσω έξυπνων συμβολαίων, τα οποία εκτελούνται αυτόματα όταν πληρούνται οι όροι μιας συναλλαγής.

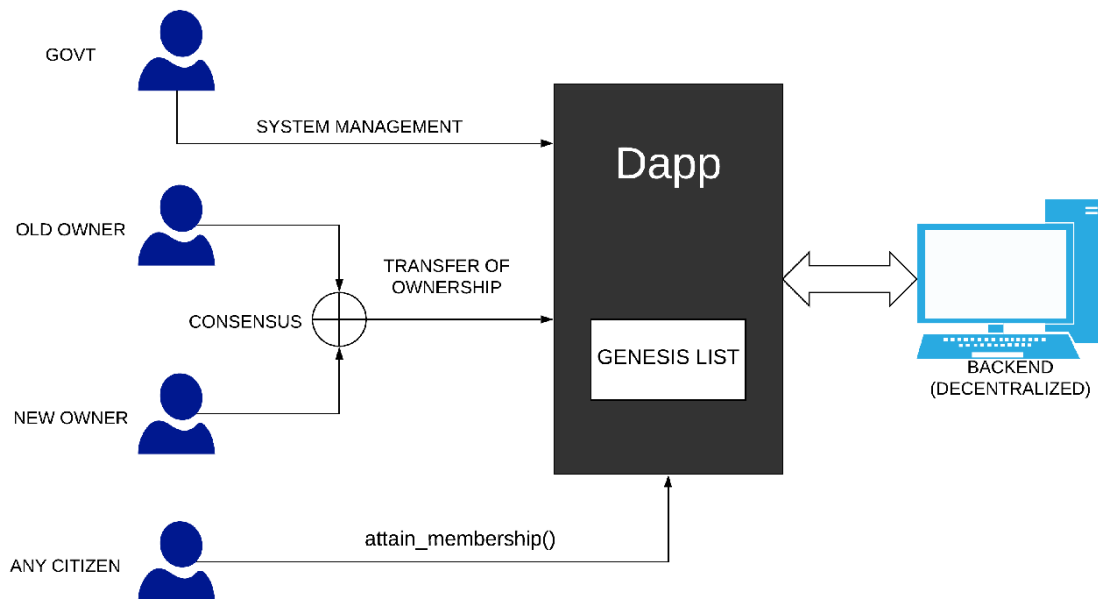
Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η επικοινωνία μεταξύ των οντοτήτων του συστήματος. Το σύστημα αποτελείται από τη κυβέρνηση (Govt), τον ιδιοκτήτη (Old Owner), τον νέο ιδιοκτήτη (New

Κεφάλαιο V

Owner) και τους πολίτες (Any Citizen). Αυτά επικοινωνούν με την αποκεντρωμένη εφαρμογή (Dapp), η οποία λειτουργεί ως διεπαφή προς το Blockchain Backend. Στο εσωτερικό της Dapp υπάρχει το κρίσιμο υποσύστημα Genesis List, δηλαδή το μητρώο ιδιοκτησίας όπου καταγράφονται όλες οι πράξεις μεταβίβασης [45].

Η κυβέρνηση δημιουργεί το αρχικό Genesis Block και έχει ρόλο εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος. Το Genesis Block περιλαμβάνει τη λίστα όλων των καταγεγραμμένων τεμαχίων γης (plotIDs) και των αρχικών ιδιοκτητών τους. Κάθε ιδιοκτήτης έχει μια μοναδική blockchain διεύθυνση, συνδεδεμένη με τα plotIDs που του ανήκουν. Οι ιδιοκτησίες του αντιπροσωπεύονται από tokens, τα οποία μπορούν να μεταβιβαστούν ολικώς ή μερικώς σε άλλους κόμβους. Ο παλιός και ο νέος ιδιοκτήτης συμμετέχουν σε ένα μηχανισμό διπλής συναίνεσης (dual consensus). Εφόσον και τα δυο μέρη επιβεβαιώσουν την πράξη, τα έξυπνα συμβόλαια εκτελούν τη διαδικασία και ενημερώνουν αυτόματα το Genesis List και το Blockchain Backend. Οποιοδήποτε πολίτης μπορεί να κάνει αίτηση συμμετοχής στο σύστημα ώστε να γίνει μέλος του blockchain. Μετά την επαλήθευσή του μπορεί να παρακολουθήσει ή ακόμα και να συμμετάσχει στις συναλλαγές [45].

Πρόκειται για ένα πρακτικά εφαρμόσιμο μοντέλο με σαφή νομική και τεχνολογική υπόσταση, που αποδεικνύει πώς το blockchain μπορεί να μετασχηματίσει ριζικά το κτηματολόγιο, εξαλείφοντας τις αδυναμίες των παραδοσιακών συστημάτων.



Σχήμα 9. Διάγραμμα ροής του συστήματος [45]

5.4. Οικονομική διαφάνεια, δημόσιες συμβάσεις και φορολογία

Η παρούσα υποενότητα βασίζεται σε πέντε (5) επιστημονικές μελέτες που εξετάζουν την εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain στους τομείς της οικονομικής διαφάνειας, των δημόσιων συμβάσεων και της φορολογίας. Οι μελέτες αυτές επιλέχθηκαν μέσω της μεθοδολογίας PRISMA και

εστιάζουν σε αποκεντρωμένα συστήματα διαχείρισης δημόσιων οικονομικών διαδικασιών, με έμφαση στη διαφάνεια, τη λογοδοσία, την αυτοματοποίηση και την καταπολέμηση φαινομένων διαφθοράς και φοροδιαφυγής. Παράλληλα, αναλύουν τα πλεονεκτήματα των blockchain-based προσεγγίσεων, καθώς και τις τεχνικές και θεσμικές προκλήσεις που συνοδεύουν την υιοθέτησή τους στο πλαίσιο των έξυπνων πόλεων.

Οι δημόσιες συμβάσεις και προμήθειες καθώς και η φορολογία και οι οικονομικές συναλλαγές αποτελούν εξίσου σημαντικούς πυλώνες λειτουργίας μιας έξυπνης πόλης. Οι δημόσιες συμβάσεις αφορούν συμφωνίες που συνάπτουν δημόσιοι φορείς (π.χ. υπουργεία, δήμοι, οργανισμοί, νοσοκομεία, πανεπιστήμια κ.ά.) με ιδιωτικές εταιρείες ή προμηθευτές, για την προμήθεια αγαθών, υπηρεσιών ή έργων απαραίτητων για τη λειτουργία του κράτους και την εξυπηρέτηση των πολιτών. Μερικά παραδείγματα αποτελούν οι κατασκευές δρόμων, σχολείων, η προμήθεια εξοπλισμού για νοσοκομεία και η παροχή υπηρεσιών καθαριότητας για δημόσιους οργανισμούς. Στόχος τους είναι η κάλυψη κοινωνικών αναγκών και η βελτίωση των δημόσιων υποδομών. Η βιβλιογραφία υπογραμμίζει ότι μέσω των προμηθειών διασφαλίζεται ότι οι κρατικές δαπάνες πραγματοποιούνται αποδοτικά και δίκαια, προστατεύοντας το δημόσιο συμφέρον και αποτρέποντας φαινόμενα διαφθοράς ή σπατάλης πόρων [47-48].

Αντίστοιχα, η φορολογία και οι οικονομικές συναλλαγές μεταξύ κράτους, επιχειρήσεων και πολιτών αποτελούν βασικούς μηχανισμούς χρηματοδότησης των δημόσιων υπηρεσιών, της κοινωνικής πρόνοιας, της εκπαίδευσης και της υγείας. Οι οικονομικές συναλλαγές αναφέρονται σε όλες τις χρηματοοικονομικές ροές μεταξύ κράτους, επιχειρήσεων και πολιτών, όπως πληρωμές φόρων, επιδοτήσεις, δημόσιες επενδύσεις ή προμήθειες. Οι επιλεγμένες μελέτες αναδεικνύουν τη συμβολή τους στη δίκαιη αναδιανομή των πόρων και ενισχύουν τη σταθερότητα και την εμπιστοσύνη στην οικονομία [51]. Συνολικά, οι δύο αυτοί τομείς καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την οικονομική σταθερότητα, την κοινωνική δικαιοσύνη και την αποδοτικότητα των έξυπνων πόλεων.

Ωστόσο, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, τα παραδοσιακά συστήματα αντιμετωπίζουν αρκετές προκλήσεις που περιορίζουν τη διαφάνεια, την αποδοτικότητα και τη λογοδοσία στη διαχείριση δημόσιων πόρων. Αρχικά, οι διαδικασίες ανάθεσης έργων και προμηθειών εκτελούνται συχνά μέσα από πολύπλοκα και γραφειοκρατικά συστήματα, τα οποία βασίζονται σε έντυπα έγγραφα και πολλαπλές εγκρίσεις. Η έλλειψη ενός ενιαίου συστήματος παρακολούθησης οδηγεί σε καθυστερήσεις πληρωμών, δυσκολίες επαλήθευσης των συμβάσεων και περιορισμένη συμμετοχή των πολιτών στην παρακολούθηση των έργων. Παράλληλα, η απουσία ύπαρξης ισχυρών μηχανισμών ελέγχου και ασφάλειας αυξάνει τον κίνδυνο παραποίησης των δεδομένων και μειώνει τη λογοδοσία στη διαχείριση δημόσιων πόρων [48-50].

Παρόμοιες προκλήσεις εντοπίζονται και στον τομέα της φορολογίας και των οικονομικών συναλλαγών. Η περιορισμένη διαλειτουργικότητα μεταξύ των εθνικών πληροφοριακών συστημάτων σε συνδυασμό με την ανεπαρκή αυτοματοποίηση των διαδικασιών ελέγχου, οδηγεί σε καθυστερήσεις και μειωμένη αποδοτικότητα. Οι μελέτες αναφέρουν ότι η φοροδιαφυγή και άλλες μορφές οικονομικής απάτης εντείνονται, καθώς καθίσταται δύσκολος ο έγκαιρος εντοπισμός ψευδών δηλώσεων και μη καταγεγραμμένων συναλλαγών [48-50].

Η ανάλυση της βιβλιογραφίας αναδεικνύει ότι το blockchain πρόκειται να καλύψει πολλά από τα κενά των παραδοσιακών διοικητικών συστημάτων, προσφέροντας ένα αποκεντρωμένο,

διαφανές και αξιόπιστο πλαίσιο συναλλαγών. Οι διαδικασίες ανάθεσης, εκτέλεσης και πληρωμής ενός έργου μπορεί να γίνεται αυτόματα, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση και χωρίς δυνατότητα παραποίησης, μέσω της χρήσης των έξυπνων συμβολαίων. Η ύπαρξη ενός αδιάβλητου συστήματος όπου καταγράφονται όλες οι ενέργειες, από την υποβολή προσφορών έως την αξιολόγηση και την ολοκλήρωση του έργου, θα διασφαλίσει ίσες ευκαιρίες και άμεσες πληρωμές [47]. Το blockchain παρέχει τη δυνατότητα στους πολίτες να ελέγχουν και να αξιολογούν την ποιότητα των έργων. Δημιουργείται, έτσι, ένα νέο μοντέλο συμμετοχικής διακυβέρνησης, όπου η κοινωνία έχει ενεργό ρόλο στη διαφύλαξη της διαφάνειας και της δημόσιας λογοδοσίας. Πρόσφατες μελέτες επιβεβαιώνουν ότι η ενσωμάτωση του blockchain στην δημόσια διοίκηση μείωσε τις καθυστερήσεις στις διαδικασίες κατά 35%, βελτίωσε την ακεραιότητα των δεδομένων και προσομοίωσε αύξηση της εμπιστοσύνης των πολιτών από 43% σε 81% [48].

Σύμφωνα με τις μελέτες, το blockchain εισάγει την έννοια της φορολογικής συμμόρφωσης “by design”, όπου οι κανόνες συμμόρφωσης ενσωματώνονται απευθείας μέσα στις επιχειρησιακές διαδικασίες μέσω έξυπνων συμβολαίων [51]. Με αυτό τον τρόπο, οι φορολογικές υποχρεώσεις ελέγχονται σε πραγματικό χρόνο, παρέχοντας αυτοματοποιημένη τεκμηρίωση και μειώνοντας την ανάγκη για πολλαπλά πληροφοριακά συστήματα. Επιπλέον, η χρήση μηχανισμών κρυπτογράφησης και ψηφιακών ταυτοτήτων ενισχύει την ασφάλεια και την ιδιωτικότητα. Προχωρημένες τεχνικές όπως οι zero-knowledge proofs (zk-SNARKs) προσφέρουν τη δυνατότητα ελέγχου εγκυρότητας χωρίς αποκάλυψη ευαίσθητων οικονομικών πληροφοριών [51].

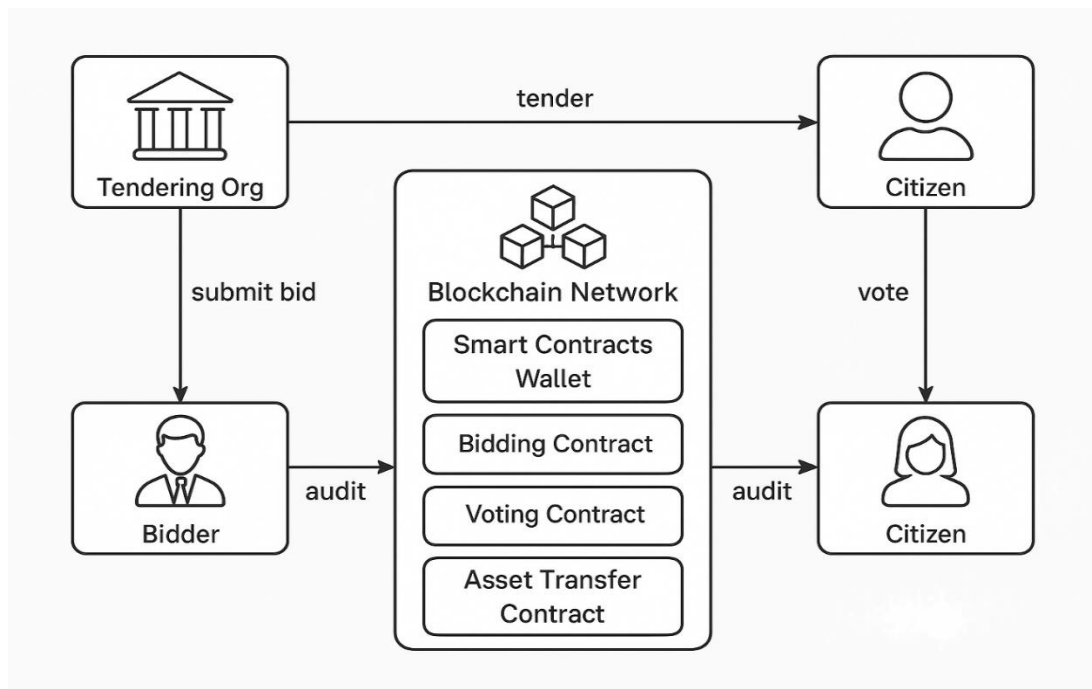
5.4.1. Πλατφόρμα Blockchain as a Service (BaaS) για ηλεκτρονικούς διαγωνισμούς (e-tendering)

Χαρακτηριστικό παράδειγμα τεχνολογίας blockchain στον τομέα των δημόσιων συμβάσεων και προμηθειών αποτελεί η πλατφόρμα «Blockchain as a Service (BaaS)» για τη διαχείριση του ηλεκτρονικού συστήματος διαγωνισμών (e-tendering). Αξιοποιώντας τεχνολογίες όπως smart contracts, ψηφιακών ταυτοτήτων και κατανεμημένων καθολικών, το σύστημα στοχεύει σε μια πιο διαφανείς και αμερόληπτης διαδικασίας ανάθεσης δημόσιων έργων. Το BaaS πρόκειται να αντικαταστήσει τις χρονοβόρες και ευάλωτες διαδικασίες, παρέχοντας ένα αποκεντρωμένο, ασφαλές και συμμετοχικό πλαίσιο στο οποίο όλα τα στάδια του διαγωνισμού εκτελούνται μέσω blockchain [48].

Η αρχιτεκτονική του συστήματος αποτελείται από τέσσερις βασικούς ρόλους. Αρχικά ο οργανισμός υποβολής προσφορών (Tendering Organization) εκκινεί τη διαδικασία δημοπρασίας, ανεβάζοντας στην αλυσίδα μπλοκ την προκήρυξη του έργου, τους όρους συμμετοχής και τις προθεσμίες. Μετά τη λήξη του διαγωνισμού, η αρχή βλέπει αυτόματα τα αποτελέσματα και την αξιολόγηση των υποψηφίων, χωρίς να έχει τη δυνατότητα να τροποποιήσει ή να αποκρύψει στοιχεία. Κάθε υποψήφιος αγοραστής (Bidder) καταθέτει την προσφορά του κρυπτογραφημένα, ώστε να μην είναι ορατή στους συμμετέχοντες. Παράλληλα, οι πολίτες (Citizen) έχουν τη δυνατότητα να παρακολουθούν την πρόοδο του έργου, να ψηφίζουν και να υποβάλλουν σχόλια στο σύστημα. Τέλος, υπάρχει ο ελεγκτής (Auditor), ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο των συμβάσεων και την πιστοποίηση των σταδίων υλοποίησης. Δεν μπορεί να διαγράψει ή να τροποποιήσει τα δεδομένα. Το σύστημα βασίζεται σε τρία είδη έξυπνων συμβολαίων. Το Bidding Contract όπου διαχειρίζεται την υποβολή και αξιολόγηση προσφορών, το Voting Contract για τη καταγραφή των αξιολογήσεων και

των ψήφων των πολιτών και το Asset Transfer Contract, όπου ελέγχει την αποδέσμευση πληρωμών με βάση την πρόοδο του έργου [48].

Όσον αφορά το τεχνολογικό υπόβαθρο, η εφαρμογή έχει υλοποιηθεί σε Hyperledger Fabric, ένα permissioned blockchain που προσφέρει έλεγχο πρόσβασης, ασφάλεια και υψηλή ταχύτητα συναλλαγών. Το front-end μπορεί να αναπτυχθεί με Flutter ή Web3, ενώ η επιχειρησιακή λογική των smart contracts υλοποιείται με Solidity ή Vyper. Οι χρήστες συνδέονται μέσω blockchain wallets για την υπογραφή των ενεργειών τους, διασφαλίζοντας αυθεντικότητα και ιχνηλασιμότητα. Το Σχήμα 10 απεικονίζει την αρχιτεκτονική του συστήματος Baas [48].



Σχήμα 10. Απεικόνιση της αρχιτεκτονικής του συστήματος

5.5. Ηλεκτρονικός ιατρικός φάκελος και δεδομένα υγείας

Η συγκεκριμένη υποενότητα βασίζεται σε **τέσσερις (4) επιστημονικές μελέτες** που εξετάζουν την εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain στη διαχείριση ηλεκτρονικών ιατρικών φακέλων και δεδομένων υγείας. Οι μελέτες εστιάζουν σε αποκεντρωμένα μοντέλα αποθήκευσης και διαμοιρασμού ιατρικών δεδομένων, με έμφαση στην ασφάλεια, την ιδιωτικότητα, την ιχνηλασιμότητα και τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών φορέων υγείας. Παράλληλα, αναλύουν τα πλεονεκτήματα των blockchain-based προσεγγίσεων, καθώς και τις τεχνικές και οργανωτικές προκλήσεις που σχετίζονται με την υιοθέτησή τους σε σύγχρονα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης.

Κεφάλαιο V

Η διαχείριση των ιατρικών δεδομένων αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για τα σύγχρονα συστήματα υγείας. Η αποθήκευση και επεξεργασία ευαίσθητων πληροφοριών, όπως ιστορικά νοσηλείας, διαγνώσεις, εξετάσεις ή συνταγογραφήσεις αποτελούν καίριες λειτουργίες τους. Η μετάβαση από τον παραδοσιακό έντυπο φάκελο στον ηλεκτρονικό ιατρικό φάκελο (Electronic Medical Record – EMR) σχεδιάστηκε για να βελτιώσει την ακρίβεια, την ταχύτητα και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων [55]. Όπως καταδεικνύεται στη βιβλιογραφία, τα παραδοσιακά συστήματα διαχείρισης ιατρικών αρχείων στηρίζονται σε κεντρικές βάσεις δεδομένων, οι οποίες ελέγχονται από το ίδιο το νοσοκομείο ή από έναν εξωτερικό πάροχο υπηρεσιών πληροφορικής [53].

Οι μελέτες επισημαίνουν ότι κάθε οργανισμός υγείας διατηρεί συνήθως τη δική του αυτόνομη πλατφόρμα EMR, με περιορισμένη ή μηδενική διαλειτουργικότητα με άλλους φορείς. Ως αποτέλεσμα, τα δεδομένα ενός ασθενούς δεν είναι εύκολα προσβάσιμα από διαφορετικές κλινικές ή επαγγελματίες υγείας, γεγονός που οδηγεί σε κατακερματισμό της πληροφορίας και καθυστερήσεις στη διάγνωση και τη θεραπεία [52]. Παράλληλα, τα δεδομένα αποθηκεύονται σε τοπικούς servers, όπου απαιτείται εξουσιοδοτημένος χρήστης (π.χ. γιατρός ή διοικητικός υπάλληλος) για να πραγματοποιήσει προσθήκες, τροποποιήσεις ή εξαγωγές δεδομένων [53]. Τα δεδομένα αυτά συχνά οργανώνονται σε ιεραρχικές βάσεις ή συστήματα πελατών-εξυπηρετητών (client-server), στα οποία η πρόσβαση γίνεται μέσω εφαρμογών εσωτερικού δικτύου. Οι χρήστες μπορούν να εισάγουν πληροφορίες σχετικά με ιστορικό ασθενών, εργαστηριακές εξετάσεις ή φαρμακευτικές θεραπείες, ενώ οι διαχειριστές του συστήματος είναι υπεύθυνοι για την ασφάλεια και τη συντήρηση των αρχείων [55]. Ωστόσο, λόγω της κεντρικής αρχιτεκτονικής, οποιαδήποτε βλάβη στον server ή παραβίαση ασφαλείας μπορεί να οδηγήσει σε ολική απώλεια ή αλλοίωση δεδομένων (single point of failure) [52].

Παρά τη σημαντική πρόοδο που έφεραν τα EMR, τα συστήματα αυτά παραμένουν ευάλωτα σε κυβερνοεπιθέσεις, είναι δυσλειτουργικά στην ανταλλαγή δεδομένων και αδύναμα στον έλεγχο πρόσβασης. Επίσης, τα ιατρικά αρχεία περιέχουν εξαιρετικά ευαίσθητες πληροφορίες και η ύπαρξη ενός κεντρικού σημείου αποθήκευσης τα καθιστά εύκολο στόχο για κακόβουλες επιθέσεις και παραβιάσεις εμπιστευτικότητας [52]. Επιπλέον, οι διαφορετικές πλατφόρμες EMR που χρησιμοποιούνται από νοσοκομεία και κλινικές δεν είναι συμβατές μεταξύ τους, δημιουργώντας κατακερματισμένα δεδομένα που δυσκολεύουν την πρόσβαση σε πλήρες ιατρικό ιστορικό και προκαλούν καθυστερήσεις στη διάγνωση και θεραπεία [53]. Ένα ακόμη πρόβλημα αφορά την περιορισμένη κυριότητα του ασθενούς επί των δεδομένων του. Συνήθως, ο ασθενής δεν έχει άμεση πρόσβαση στο ιατρικό του αρχείο και εξαρτάται από τους παρόχους υγείας για οποιαδήποτε ενημέρωση ή μεταφορά πληροφοριών σε άλλο φορέα [52]. Τέλος, οι μελέτες τονίζουν ότι η απουσία πλήρους ιχνηλασιμότητας δυσχεραίνει τον εντοπισμό και τον έλεγχο των αλλαγών ή τροποποιήσεων που πραγματοποιούνται στα δεδομένα από διαφορετικούς χρήστες ή φορείς, γεγονός που υπονομεύει τη διαφάνεια και περιορίζει τη λογοδοσία [53].

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το blockchain λειτουργεί ως αποκεντρωμένο καθολικό (distributed ledger) που προσφέρει αμετάβλητη καταγραφή των ιατρικών συναλλαγών, καθιστώντας σχεδόν αδύνατη την αλλοίωση ή διαγραφή δεδομένων χωρίς ανίχνευση [55]. Εξαλείφει την ανάγκη για έναν “κεντρικό φύλακα δεδομένων”, μειώνοντας έτσι το ρίσκο παραβίασης ή κακόβουλης αλλοίωσης πληροφοριών, μέσω της κατανεμημένης επαλήθευσης κάθε εγγραφής από πολλαπλούς κόμβους [54]. Επιπλέον, με την κρυπτογράφηση hash και τη χρήση ψηφιακών υπογραφών, οι

ασθενείς και οι πάροχοι μπορούν να επαληθεύουν την προέλευση και την ακεραιότητα κάθε ιατρικού εγγράφου [52].

Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά EMR, όπου ο έλεγχος των δεδομένων ανήκει κυρίως στους παρόχους υγείας, τα blockchain-based συστήματα προσφέρουν κυριότητα στον ασθενή. Ο κάθε ασθενής διαθέτει κλειδί πρόσβασης (public/private key pair) που του επιτρέπει να αποφασίζει ποιος μπορεί να δει ή να τροποποιήσει τα δεδομένα του [53]. Τα έξυπνα συμβόλαια διαχειρίζονται αυτόματα τις άδειες πρόσβασης, καταγράφοντας κάθε αίτημα ή συναλλαγή στο δίκτυο, εξασφαλίζοντας έτσι πλήρη ιχνηλασιμότητα και διαφάνεια. Η αποθήκευση των ίδιων των δεδομένων μπορεί να γίνεται off-chain (σε ασφαλείς αποθήκες ή cloud servers), ενώ στο blockchain αποθηκεύονται μόνο τα metadata και τα logs πρόσβασης, ώστε να διασφαλίζεται η απόδοση και η εμπιστευτικότητα [54].

Οι μελέτες διακρίνουν τα blockchain συστήματα υγείας σε δύο βασικές κατηγορίες. Απ' τη μία, τα δημόσια blockchains, όπου όλοι οι συμμετέχοντες έχουν πρόσβαση και η ασφάλεια εξασφαλίζεται μέσω ανοιχτής συναίνεσης (π.χ. Proof of Work). Απ' την άλλη, τα Private ή Permissioned blockchains, όπου μόνο εξουσιοδοτημένοι φορείς (νοσοκομεία, ασφαλιστικοί οργανισμοί, δημόσιες αρχές) συμμετέχουν στο δίκτυο. Η δεύτερη κατηγορία, η οποία βασίζεται κυρίως σε τεχνολογία Hyperledger Fabric, θεωρείται πιο κατάλληλη για το περιβάλλον της υγειονομικής περιθάλησης, καθώς συνδυάζει αποκέντρωση και έλεγχο πρόσβασης.

Πέρα από την ασφάλεια, το blockchain βελτιώνει και τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών συστημάτων. Μέσω ενιαίων προτύπων ανταλλαγής δεδομένων όπως τα HL7 και FHIR, οι πληροφορίες μπορούν να κοινοποιούνται με ασφάλεια μεταξύ διαφορετικών οργανισμών και χωρών, διευκολύνοντας τη συνεργασία τους. Επιπλέον, η βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι η off-chain αποθήκευση μεγάλων αρχείων, όπως ιατρικές εικόνες ή βιοσημειολογικά δεδομένα, τα οποία συνδέονται με το blockchain μέσω κρυπτογραφικών κατακερματισμών, ενισχύει την απόδοση και την επεκτασιμότητα των προτεινόμενων αρχιτεκτονικών [52-53].

5.5.1. Σύστημα ηλεκτρονικού ιατρικού φακέλου βασισμένο σε blockchain

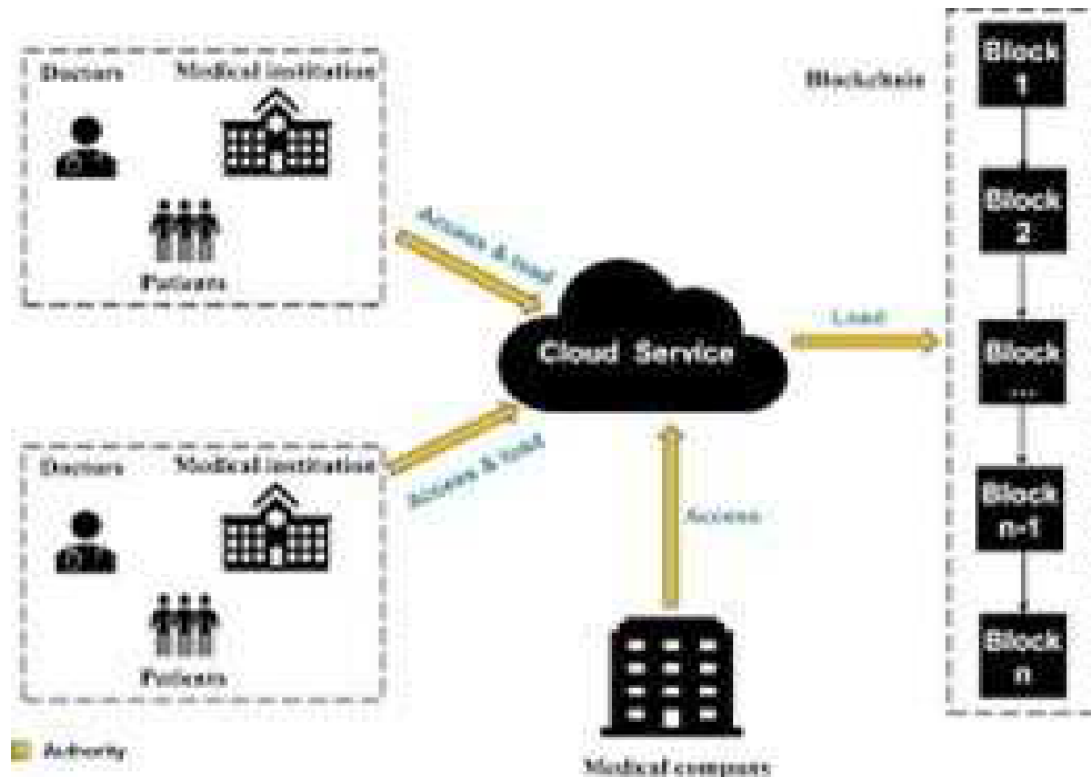
Το προτεινόμενο σύστημα που περιγράφεται στο άρθρο [52], ενσωματώνει τη τεχνολογία blockchain στο σύστημα υγειονομικής περιθάλησης. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά EMR, τα οποία διατηρούν δεδομένα σε κεντρικές βάσεις δεδομένων, αυτό το σύστημα αποθηκεύει ιατρικά αρχεία σε ένα δίκτυο blockchain. Στοχεύει στη διαχείριση ηλεκτρονικών ιατρικών φακέλων, όπου ο ασθενής αποκτά πλήρη έλεγχο των δεδομένων του και οι πάροχοι υγείας αποκτούν πρόσβαση βάσει εξουσιοδότησης.

Τα ιατρικά δεδομένα των ασθενών αποθηκεύονται στη Μονάδα Αποθήκευσης και Διαχείρισης Δεδομένων. Τα πραγματικά δεδομένα (ιατρικές εξετάσεις, απεικονίσεις, φαρμακευτικές αγωγές) αποθηκεύονται off-chain, δηλαδή σε ασφαλή cloud υπηρεσία. Στο blockchain αποθηκεύονται μόνο hash values και metadata των αρχείων, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα και την αυθεντικότητα τους. Η Μονάδα Ελέγχου Πρόσβασης και Δικαιωμάτων αποτελεί το πιο κρίσιμο κομμάτι της αρχιτεκτονικής. Μέσω των έξυπνων συμβολαίων καθορίζει τους χρήστες που έχουν πρόσβαση στα δεδομένα (γιατρός, ασθενής, ερευνητής), τις ενέργειες που μπορούν να εκτελέσουν (προβολή, προσθήκη, ενημέρωση) και το χρονικό διάστημα της άδειας πρόσβασής τους. Επιπλέον, η Μονάδα Διαλειτουργικότητας επιτρέπει την ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μεταξύ

Κεφάλαιο V

διάφορων συστημάτων υγειονομικής περίθαλψης. Τα διεθνή πρότυπα HL7 (Health Level Seven) και FHIR (Fast Healthcare Interoperability Resources) αποσκοπούν στην ανταλλαγή ιατρικών δεδομένων και στην παρουσίαση τους σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Το σύστημα προστατεύει τα προσωπικά δεδομένα των ασθενών του μέσω της Μονάδας Ασφαλείας. Μέσω των ρυθμιστικών πλαισίων HIPAA και GDPR, διασφαλίζεται η τήρηση των νομικών προτύπων για τον χειρισμό των πληροφοριών των ασθενών. Άξιο αναφοράς αποτελεί ότι το σύστημα παρέχει τις απαραίτητες διεπαφές για τη σύνδεση μεταξύ του blockchain και των υπάρχοντων πληροφοριακών συστημάτων υγείας (EHR, LIS, billing, insurance). Παρέχει APIs ώστε οι πάροχοι να μπορούν να ενσωματώσουν την blockchain λειτουργικότητα χωρίς να χρειάζεται να αντικαταστήσουν τα υπάρχοντα συστήματά τους [52].

Ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος βασίζεται στη συνεργασία του cloud με το blockchain, ώστε να εξασφαλίζεται ταυτόχρονα η αποδοτικότητα και η ασφάλεια των ιατρικών δεδομένων. Όταν ένας γιατρός εισάγει ή ενημερώνει τον ηλεκτρονικό φάκελο ενός ασθενή, τα δεδομένα αποθηκεύονται αρχικά στο cloud, όπου είναι διαθέσιμα για γρήγορη πρόσβαση. Παράλληλα, ενεργοποιείται ένα smart contract το οποίο επαληθεύει την ταυτότητα του χρήστη και την εγκυρότητα της ενέργειας, σύμφωνα με τα δικαιώματα πρόσβασης που έχει ορίσει ο ασθενής. Αν η πράξη είναι νόμιμη, το σύστημα δημιουργεί αυτόματα μια νέα εγγραφή στο blockchain, που περιλαμβάνει το αποτύπωμα (hash) της συναλλαγής, την ώρα και το αναγνωριστικό των εμπλεκόμενων μερών. Ο ασθενής, μέσω του δικού του περιβάλλοντος χρήστη, μπορεί να παρακολουθεί ποιος έχει πρόσβαση στα δεδομένα του ή να ανακαλεί άδειες οποιαδήποτε στιγμή. Κάθε νέα ενέργεια (όπως προσθήκη εξέτασης ή ενημέρωση διάγνωσης) δημιουργεί ένα επιπλέον block στην αλυσίδα, σχηματίζοντας ένα χρονολογικό ιστορικό όλων των ιατρικών γεγονότων που συνδέονται με τον φάκελο του ασθενή. Το Σχήμα 11 παρουσιάζει την αρχιτεκτονική του εν λόγω συστήματος [52].



Σχήμα 11. Αρχιτεκτονική συστήματος ηλεκτρονικού ιατρικού φακέλου [52]

5.6. Έξυπνες υποδομές, μεταφορές και βιώσιμη διαχείριση πόρων

Η παρούσα υποενότητα βασίζεται σε πέντε (5) επιστημονικές μελέτες που εξετάζουν την εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain στον τομέα των έξυπνων υποδομών, της αστικής κινητικότητας και της βιώσιμης διαχείρισης πόρων. Οι μελέτες αυτές εστιάζουν σε αποκεντρωμένα συστήματα διαχείρισης μεταφορών και απορριμμάτων, με έμφαση στη διαλειτουργικότητα, την ενεργειακή αποδοτικότητα, τη διαφάνεια και τη βιωσιμότητα. Παράλληλα, αναλύουν τα οφέλη των blockchain-based προσεγγίσεων, καθώς και τις τεχνικές και οργανωτικές προκλήσεις που σχετίζονται με την υιοθέτησή τους σε αστικά περιβάλλοντα.

Η διαχείριση της αστικής κινητικότητας και των απορριμμάτων αποτελούν δύο από τους σημαντικότερους πυλώνες για τη διαμόρφωση βιώσιμων και έξυπνων πόλεων. Τα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς (MMM) και τα συστήματα διαχείρισης απορριμμάτων βρίσκονται στο επίκεντρο των πολιτικών αειφορίας, καθώς επηρεάζουν άμεσα την ενεργειακή κατανάλωση, τις εκπομπές ρύπων και την ποιότητα ζωής των πολιτών. Παρά τη ραγδαία πρόοδο των τεχνολογιών που σχετίζονται με τα έξυπνα μέσα μεταφοράς και τη βιώσιμη διαχείριση απορριμμάτων, τα σημερινά αστικά συστήματα εξακολουθούν να αντιμετωπίζουν σοβαρές λειτουργικές, περιβαλλοντικές και τεχνολογικές προκλήσεις.

Οι επιλεγμένες μελέτες αναδεικνύουν ότι τα σημερινά συστήματα μεταφορών χαρακτηρίζονται από κατακερματισμό των δεδομένων μεταξύ διαφορετικών παρόχων και πλατφόρμων, γεγονός που δυσχεραίνει την ανταλλαγή πληροφοριών. Η απουσία ενός ενιαίου μηχανισμού οδηγεί σε καθυστερήσεις στη διασταύρωση και επαλήθευση συναλλαγών, σε αυξημένα

λειτουργικά κόστη λόγω πολλαπλών βάσεων δεδομένων και δυσκολεύει τη δίκαιη κατανομή εσόδων μεταξύ παρόχων [57]. Επίσης, η διαχείριση εισιτηρίων, οι συναλλαγές και η κατανομή εσόδων γίνονται συχνά μέσω κεντρικών συστημάτων, στα οποία εγκυμονούνται κίνδυνοι απάτης, διαρροής δεδομένων και καθυστερημένων ενημερώσεων. Επιπλέον, η ενεργειακή κατανάλωση στα μέσα μεταφοράς (λεωφορεία, μετρό, τρένα) και η περιορισμένη διασύνδεση με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μειώνουν τη συνολική αποδοτικότητα. Τα παραδοσιακά μοντέλα ticketing, ακόμη και σε ψηφιακή μορφή, βασίζονται σε ενδιάμεσους φορείς (third-party providers) και κεντρικές βάσεις δεδομένων, δημιουργώντας σημεία αποτυχίας και αυξάνοντας το λειτουργικό κόστος. Επίσης, εξαρτώνται συχνά από τεχνολογίες GPS ή Bluetooth, οι οποίες είναι ενεργοβόρες και ευάλωτες σε παραβιάσεις ή απάτες (fraud attacks) [56]. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι η ενσωμάτωση του blockchain σε έξυπνα συστήματα εισιτηρίων μπορεί να επιφέρει έως και 55% μείωση στην ενεργειακή κατανάλωση των συναλλαγών και αυτόματη κατανομή εσόδων μεταξύ παρόχων [60].

Αντίστοιχες προκλήσεις εντοπίζονται και στον τομέα της διαχείρισης αστικών αποβλήτων. Παρά τη χρήση έξυπνων κάδων και IoT αισθητήρων, τα δεδομένα συχνά δεν είναι επαληθεύσιμα ή διαλειτουργικά μεταξύ των δήμων και των ιδιωτικών φορέων. Η βιβλιογραφία επισημαίνει την έλλειψη διαφάνειας στην αλυσίδα ανακύκλωσης, με αποτέλεσμα η ιχνηλασιμότητα των υλικών (π.χ. πλαστικό, γυαλί, μέταλλο) να περιορίζεται στο επίπεδο του τοπικού συλλέκτη και όχι του τελικού ανακυκλωτή. Η έλλειψη τυποποιημένων μηχανισμών επιβεβαίωσης για την προέλευση, το είδος και την ποσότητα απορριμμάτων δυσχεραίνει τη λογοδοσία και τη μέτρηση της περιβαλλοντικής απόδοσης. Επομένως, η παραδοσιακή διαχείριση απορριμμάτων χαρακτηρίζεται από περιορισμένη ιχνηλασιμότητα στη ροή των αποβλήτων, ανεπαρκή επαλήθευση των δεδομένων ανακύκλωσης και ελλείψεις στη διαφάνεια των προμηθειών και των συμβάσεων [59].

Με βάση τη βιβλιογραφία, το blockchain πρόκειται να συνδέσει ετερογενή δεδομένα μεταφορών (εισιτήρια, διαδρομές, χρόνοι άφιξης, εκπομπές CO₂ οχημάτων) μέσα σε ένα ενιαίο κατανεμημένο καθολικό (ledger) [57]. Παρομοίως, μπορεί να επεκταθεί και στη διαχείριση απορριμμάτων. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα που προέρχονται από αισθητήρες και οχήματα συλλογής (IoT bins, σταθμούς ανακύκλωσης, οχήματα συλλογής) μπορούν να αποθηκεύονται με χρονική σφραγίδα και αμετάβλητη εγγραφή, εξασφαλίζοντας διαφάνεια και λογοδοσία σε όλη την αλυσίδα [59]. Επιπλέον, τα έξυπνα συμβόλαια διασφαλίζουν αυτόματες και ασφαλείς συναλλαγές σε πραγματικό χρόνο.

Η ίδια αρχή μπορεί να εφαρμοστεί και στη διαχείριση απορριμμάτων, όπου συμβόλαια μεταξύ δήμων, εργολάβων καθαριότητας και ανακυκλωτών μπορούν να εκτελούνται αυτόματα μόλις επαληθευθεί η ολοκλήρωση μιας εργασίας (π.χ. συλλογή, διαλογή, επεξεργασία) [56]. Επίσης, η βιβλιογραφία αναφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας ψηφιακών tokens (π.χ. green credits, mobility tokens), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιούνται ως κίνητρα για βιώσιμες επιλογές. Για παράδειγμα οι πολίτες που χρησιμοποιούν δημόσια μέσα μεταφοράς μπορούν να κερδίζουν tokens, τα οποία εξαργυρώνονται σε εκπτώσεις ή επιδοτήσεις, ενώ όσοι συμμετέχουν ενεργά σε προγράμματα ανακύκλωσης ή διαχωρισμού απορριμμάτων μπορούν να ανταμείβονται μέσω του ίδιου δικτύου.

5.6.1. Το σύστημα STUB 2.0 για έξυπνο ticketing σε πολυτροπικές μεταφορές

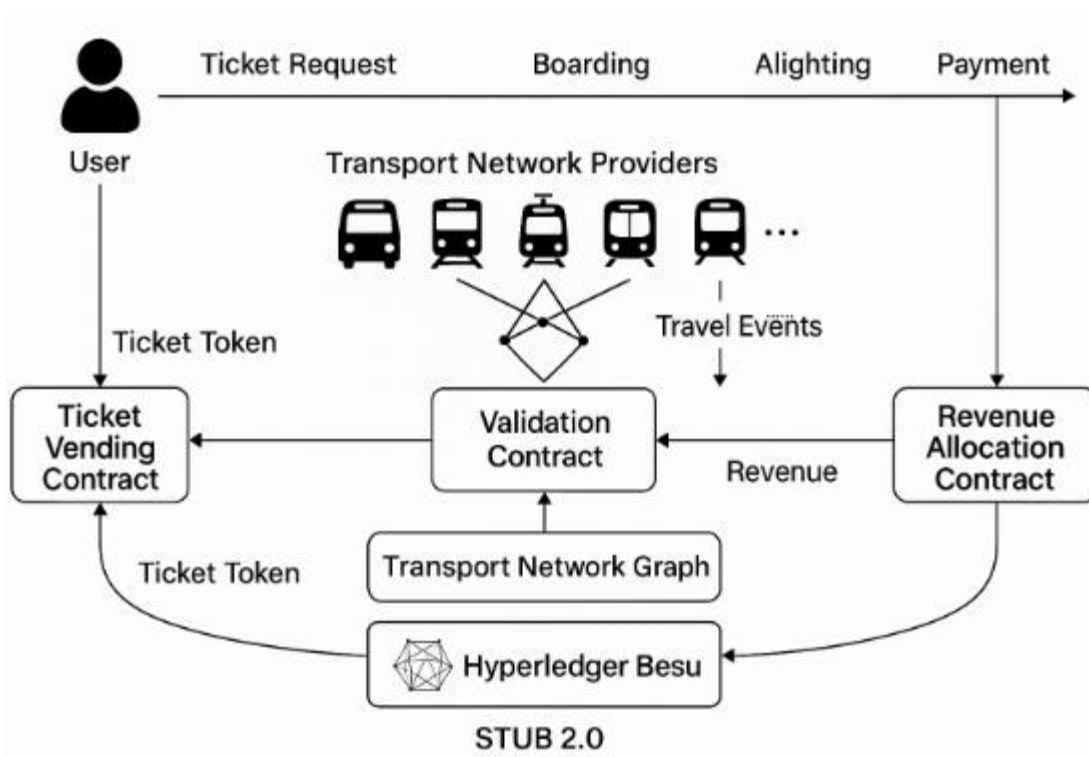
Το STUB 2.0 (System for Ticketing Ubiquity with Blockchains) αποτελεί ένα από τα πιο πρόσφατα παραδείγματα blockchain σε πολυτροπικές μεταφορές [58]. Το σύστημα αυτό

αναπτύχθηκε με σκοπό τη δημιουργία ενός ενιαίου, διαφανούς και αποκεντρωμένου συστήματος έκδοσης, διαχείρισης και επικύρωσης εισιτηρίων. Ο στόχος του είναι να αντικαταστήσει τα παραδοσιακά μεμονωμένα ticketing συστήματα με μια καθολική blockchain πλατφόρμα όπου καταγράφει τις μετακινήσεις, τα εισιτήρια, καθώς οι πληρωμές-έσοδα κατανέμονται αυτόματα. Παράλληλος στόχος είναι η περιβαλλοντική αειφορία, μέσω μείωσης φυσικών εισιτηρίων, η παροχή ενεργειακά αποδοτικού μηχανισμού συναίνεσης και προώθησης της βιώσιμης κινητικότητας [57].

Το σύστημα βασίζεται στο Hyperledger Besu. Αυτό συμβαίνει διότι το Besu είναι ένας πελάτης Ethereum ανοιχτού κώδικα. Αυτό βοηθάει στην ανάπτυξη εξελιγμένων τεχνολογιών Ethereum (όπως η σύνταξη έξυπνων συμβολαίων σε Solidity και η δοκιμή σε υπάρχοντα δοκιμαστικά δίκτυα) αλλά και στην τελική εφαρμογή για το κύριο δίκτυο Ethereum, εάν αυτό απαιτηθεί [58]. Επίσης, ο τύπος δικτύου του ανήκει στα permissioned blockchain, καθώς συμμετέχουν μόνο πιστοποιημένοι φορείς. Τα έξυπνα συμβόλαια του STUB 2.0 διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες. Τα Ticket Vending Contract χρησιμοποιούνται για έκδοση εισιτηρίων σε token μορφή, τα Validation Contract για επαλήθευση εισιτηρίων κατά τη μετακίνηση ενώ τα Revenue Allocation Contract για αυτόματους υπολογισμούς και διανομή εσόδων. Κάθε εισιτήριο αποτελεί ένα μοναδικό ψηφιακό token και βρίσκεται στο ψηφιακό πορτοφόλι του χρήστη. Η επαλήθευση γίνεται χωρίς ενδιάμεσο φορέα (trustless) [57].

Αρχικά, ο επιβάτης χρησιμοποιεί μια εφαρμογή (ή smartcard) για να ζητήσει εισιτήριο. Το Vending Smart Contract δέχεται το αίτημα και δημιουργεί ένα μοναδικό token, συσχετίζοντάς το με το δημόσιο κλειδί του χρήστη. Το token αποθηκεύεται στο blockchain όπου κάθε block περιλαμβάνει τα στοιχεία της διαδρομής, τον τύπο μεταφοράς, τη χρονική σφραγίδα (timestamp) και τον μοναδικό hash του εισιτηρίου. Κατά την επιβίβαση, το Validation Smart Contract ελέγχει σε πραγματικό χρόνο την εγκυρότητα του εισιτηρίου, ποια διαδρομή/μέσο αφορά και αν έχει ήδη χρησιμοποιηθεί. Η επαλήθευση γίνεται on-chain, χωρίς πρόσβαση σε κεντρικούς διακομιστές, εξαλείφοντας πιθανούς κινδύνους. Μετά την αποβίβαση, το Validation Contract υπολογίζει την πραγματική απόσταση ή ζώνη μετακίνησης, και το κόμιστρο καταγράφεται στο blockchain. Τέλος, το Revenue Allocation Contract διανέμει αυτόματα τα έσοδα στους παρόχους μεταφορών (λεωφορεία, μετρό, τραμ κ.ά.), ανάλογα με τη συμμετοχή τους στη διαδρομή, τη διάρκεια/συχνότητα χρήσης και τους όρους που ορίζουν τα έξυπνα συμβόλαια. Όλες οι ενέργειες καταγράφονται με χρονική σφραγίδα, διασφαλίζοντας την ιχνηλασιμότητα και την ακεραιότητα των δεδομένων [57].

Το STUB 2.0 προσφέρει πολλαπλά οφέλη σε μία έξυπνη πόλη. Ενώνει τα μέσα μεταφοράς σε ένα κοινό πλαίσιο, βελτιώνοντας την αποδοτικότητα των υποδομών και μειώνει το διοικητικό κόστος. Χάρη στον ενεργειακά φιλικό μηχανισμό και την κατάργηση των φυσικών εισιτηρίων ενισχύει την αειφορία. Το STUB 2.0 μετατρέπει τη διαδικασία μετακίνησης σε πλήρως αυτοματοποιημένη, διαφανή και “πράσινη” εμπειρία, όπου κάθε συναλλαγή, από την αγορά εισιτηρίου μέχρι την κατανομή των εσόδων, υλοποιείται και καταγράφεται με ασφάλεια στο blockchain [57].



Σχήμα12. Αρχιτεκτονική συστήματος STUB 2.0

5.7. Επίλογος

Συνοψίζοντας, η ενσωμάτωση του blockchain στις έξυπνες πόλεις αποδεικνύεται καθοριστικής σημασίας για τη μετάβαση προς ένα πιο διαφανές, ασφαλές και αποδοτικό αστικό περιβάλλον. Η τεχνολογία αυτή δεν περιορίζεται απλώς στη βελτίωση των υφιστάμενων διαδικασιών, αλλά επαναπροσδιορίζει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο οι πόλεις διαχειρίζονται δεδομένα, πόρους και υπηρεσίες. Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν οι σημαντικότερες προκλήσεις και ανάγκες των παραδοσιακών συστημάτων για κάθε τομέα. Στη συνέχεια, δόθηκε έμφαση στον ρόλο του blockchain, παρουσιάζοντας παραδείγματα χρήσης της εν λόγω τεχνολογίας. Από την ψηφιακή ταυτότητα και τη συμμετοχική δημοκρατία, έως τη διαχείριση της δημόσιας οικονομίας, των περιουσιακών στοιχείων και των δεδομένων υγείας, το blockchain συμβάλλει στην οικοδόμηση ακεραιότητας, εμπιστοσύνης και συνεργασίας μεταξύ πολιτών και θεσμών. Παράλληλα, μέσω των έξυπνων υποδομών και των βιώσιμων εφαρμογών, στηρίζει τη μετάβαση σε πόλεις πιο πράσινες, ψηφιακές και ανθεκτικές. Η ανάλυση των παραπάνω τομέων αποδεικνύει ότι το blockchain δεν αποτελεί μεμονωμένη τεχνολογική καινοτομία, αλλά καταλύτη ενός νέου μοντέλου διακυβέρνησης και αστικής ανάπτυξης.

VI. Ασφάλεια και Προκλήσεις

6.1. Προβλήματα ιδιωτικότητας και GDPR

Η ταχεία υιοθέτηση του blockchain έχει επιφέρει σημαντικές αλλαγές στη διαχείριση και στη προστασία δεδομένων. Παράλληλα, έχει αναδείξει μία σειρά προκλήσεων σε σχέση με τον Γενικό Κανονισμό Προστασίας Δεδομένων (GDPR). Ο κανονισμός αυτός, που εφαρμόζεται από το 2018 στην Ευρωπαϊκή Ένωση, έχει ως κύριο στόχο την κατοχύρωση των δικαιωμάτων των πολιτών ως προς τη συλλογή, επεξεργασία και αποθήκευση των προσωπικών τους δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, το blockchain εισάγει αρχές όπως αποκέντρωση, αμεταβλητότητα και διαφάνεια, οι οποίες, αν και ευνοούν την ασφάλεια και την εμπιστοσύνη, έρχονται συχνά σε σύγκρουση με βασικές αρχές του GDPR [62-63].

Η αμεταβλητότητα του blockchain, δηλαδή η αδυναμία διαγραφής ή τροποποίησης δεδομένων μετά την εγγραφή τους, αποτελεί το σημαντικότερο σημείο τριβής με το άρθρο 17 του GDPR, το οποίο κατοχυρώνει το «δικαίωμα στη λήθη». Μόλις τα δεδομένα αποθηκευτούν σε ένα block, δεν μπορούν να τροποποιηθούν ή να διαγραφούν χωρίς να αλλοιωθεί η ακεραιότητα ολόκληρης της αλυσίδας. Παρόμοια προβλήματα εντοπίζονται και στο άρθρο 16 (δικαίωμα διόρθωσης), καθώς η αμεταβλητότητα δεν επιτρέπει την επικαιροποίηση ή διόρθωση των δεδομένων που αφορούν τον χρήστη. Επιπλέον, η αρχή της ελαχιστοποίησης δεδομένων (άρθρο 5(1c)) δυσκολεύεται να εφαρμοστεί, αφού κάθε συναλλαγή αναπαράγεται σε πολλούς κόμβους του δικτύου, αυξάνοντας το πλήθος των αντιγράφων των προσωπικών πληροφοριών. Επίσης, δεν υπάρχει ένας σαφής υπεύθυνος για την επεξεργασία ή τη διαγραφή των δεδομένων, όπως απαιτεί ο GDPR. Η απουσία κεντρικής αρχής σε αυτά τα συστήματα αποτελεί ένα από τα πιο σύνθετα νομικά ζητήματα [62-63].

Παρ' όλα αυτά, το blockchain και το GDPR διαθέτουν ορισμένα κοινά χαρακτηριστικά. Η διαφάνεια, η ακεραιότητα και η ιχνηλασιμότητα των συναλλαγών μπορούν να ενισχύσουν τη λογοδοσία και να προσφέρουν υψηλότερη εμπιστοσύνη στη διαχείριση δεδομένων. Χάρη στη λειτουργία των έξυπνων συμβολαίων εξασφαλίζεται ότι η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται μόνο υπό νόμιμες και προκαθορισμένες συνθήκες. Η μελέτη των Khazaei και Arabsorkhi [62], έδειξε ότι τα smart contracts είναι η πιο υποσχόμενη τεχνολογική δυνατότητα για συμμόρφωση με τον GDPR, συνεισφέροντας σε ποσοστό 22% στις περιπτώσεις επιτυχούς εφαρμογής κανονιστικών απαιτήσεων. Παράλληλα, μηχανισμοί όπως η κρυπτογράφηση και η ψευδωνυμοποίηση μπορούν να μειώσουν τον κίνδυνο αποκάλυψης ταυτότητας και να προστατεύσουν την ιδιωτικότητα των χρηστών [61].

Σε πρακτικό επίπεδο, η διεθνής βιβλιογραφία προτείνει τεχνικές λύσεις που επιτρέπουν την ισορροπία μεταξύ της αμεταβλητότητας του blockchain και των δικαιωμάτων του GDPR. Η πιο διαδεδομένη είναι η off-chain αποθήκευση, όπου τα προσωπικά δεδομένα αποθηκεύονται εκτός της αλυσίδας, ενώ στο blockchain παραμένει μόνο ένα κρυπτογραφημένο hash που λειτουργεί ως απόδειξη ύπαρξης. Με αυτόν τον τρόπο, αν κάποιος χρήστης ζητήσει διαγραφή, το σύστημα μπορεί να καταστρέψει το κλειδί πρόσβασης (logical deletion), καθιστώντας τα δεδομένα μη ανακτήσιμα, χωρίς να αλλοιώνεται η αλυσίδα. Επιπλέον, προτείνονται προηγμένες κρυπτογραφικές τεχνικές, όπως Zero-Knowledge Proofs, Chameleon Hashing, Merkle Trees και Secure Multi- Party Computation

(SMPC), οι οποίες επιτρέπουν την επαλήθευση δεδομένων χωρίς να αποκαλύπτεται το περιεχόμενό τους, προσφέροντας έτσι συμβατότητα με την αρχή της ελαχιστοποίησης και της ασφάλειας δεδομένων [1].

Τέλος, νεότερες έρευνες προτείνουν τη σύνθεση του blockchain με άλλες τεχνολογίες, όπως το Federated Learning (FL), προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη συμβατότητα με τον GDPR. Σε ένα Blockchain-Empowered Federated Learning Framework, τα δεδομένα παραμένουν τοπικά στις συσκευές των χρηστών (data available but not visible), ενώ το blockchain χρησιμοποιείται για τη διαχείριση συναίνεσης, ελέγχου πρόσβασης και επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων μάθησης. Η προσέγγιση αυτή μειώνει δραστικά τον κίνδυνο παραβίασης ιδιωτικότητας, ελαχιστοποιεί τη μεταφορά προσωπικών δεδομένων και διευκολύνει τη συμμόρφωση με τον κανονισμό [61].

6.2. Επιθέσεις σε blockchain

Η ραγδαία εξάπλωση των εφαρμογών blockchain έχει οδηγήσει σε αυξημένο ενδιαφέρον για την ασφάλεια και τις πιθανές ευπάθειες των συστημάτων αυτών. Παρόλο που η τεχνολογία εξασφαλίζει διαφάνεια και ακεραιότητα μέσω αποκεντρωμένων μηχανισμών συναίνεσης, οι επιθέσεις σε blockchain εξελίσσονται συνεχώς, επηρεάζοντας τόσο το επίπεδο του πρωτοκόλλου όσο και το επίπεδο των εφαρμογών. Σύμφωνα με μελέτες έχουν εντοπιστεί 147 διαφορετικοί τύποι επιθέσεων, καταναμημένοι σε έξι κύριες κατηγορίες: επιθέσεις στο peer-to-peer δίκτυο, στο μηχανισμό συναίνεσης, στη λογική on-chain και off-chain εφαρμογών, στις εικονικές μηχανές και στα πορτοφόλια χρηστών [65]. Οι πιο συχνές είναι οι επιθέσεις στο μηχανισμό συναίνεσης και στη λογική των έξυπνων συμβολαίων, οι οποίες αντιπροσωπεύουν περίπου το 50% όλων των καταγεγραμμένων επιθέσεων.

6.2.1. Επιθέσεις στο δίκτυο και στον μηχανισμό συναίνεσης

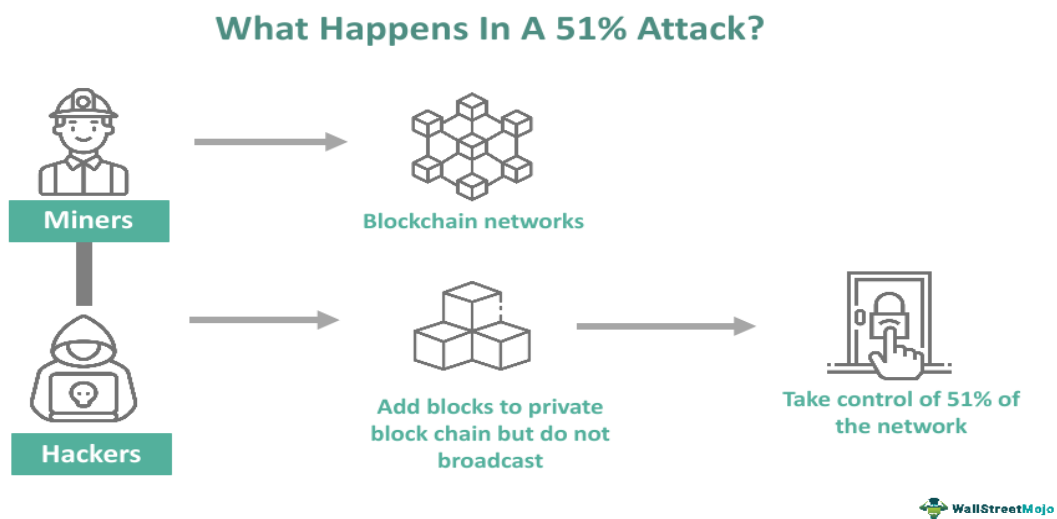
Η ασφάλεια του blockchain εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αξιοπιστία των κόμβων και τη διαφάνεια του μηχανισμού συναίνεσης. Όπως σημειώνουν οι Zhang et al. [64], τα Proof of Work (PoW) δίκτυα, όπως το Bitcoin, είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε επιθέσεις τύπου Selfish Mining, Sybil και Eclipse, που μπορούν να επηρεάσουν τη διαδικασία επικύρωσης των blocks.

Η επίθεση **Selfish Mining** επιτρέπει σε έναν επιτιθέμενο να αποκρύπτει blocks που έχει εξορύξει, δημιουργώντας ένα ιδιωτικό chain με σκοπό να αποκτήσει πλεονέκτημα έναντι των ειλικρινών miners. Όταν ο επιτιθέμενος αποκαλύπτει το ιδιωτικό chain του τη σωστή στιγμή, μπορεί να αναγκάσει το δίκτυο να απορρίψει blocks άλλων χρηστών, μειώνοντας έτσι τα έσοδα των “τίμιων” miners [64]. Όταν η επίθεση αυτή συνδυαστεί με τη δημιουργία ψευδών κόμβων (Sybil nodes), προκύπτει η σύνθετη Selfish & Sybil DoS Attack, η οποία επιτρέπει σε έναν περιορισμένο αριθμό κακόβουλων κόμβων να μειώσει την αποδοτικότητα του δικτύου έως 25 % ακόμα και όταν διαθέτει λιγότερο από 1/4 της συνολικής υπολογιστικής ισχύος [64].

Η επίθεση **Sybil**, από την άλλη, βασίζεται στη δημιουργία ψεύτικων ταυτοτήτων ή κόμβων μέσα στο δίκτυο. Οι ψευδείς αυτοί κόμβοι ελέγχονται από τον ίδιο επιτιθέμενο και χρησιμοποιούνται για να επηρεάσουν τη διάδοση των blocks ή να διακόψουν τη σωστή επικοινωνία στο peer-to-peer δίκτυο. Τέτοιες επιθέσεις μπορούν να διαταράξουν τη συναίνεση, να οδηγήσουν σε διπλές δαπάνες (double-spending) και να μειώσουν σημαντικά την απόδοση του δικτύου. Ο εισβολέας δημιουργεί καθυστερήσεις διάδοσης μπλοκ εκτελώντας μια επίθεση sybil, όπου χρειάζεται να ελέγχει μόνο το

32% της συνολικής υπολογιστικής ισχύος για να ξεκινήσει με επιτυχία μια επίθεση διπλής δαπάνης [64]. Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο σε δημόσια δίκτυα, όπου η ταυτότητα των κόμβων δεν είναι επαληθεύσιμη, επιτρέποντας στους επιτιθέμενους να αποκτήσουν τεχνητά μεγάλο “βάρος ψήφου” [66].

Η επίθεση **51%** συμβαίνει όταν ένας επιτιθέμενος (μόνος ή ομάδα/συνδυασμός mining pools) αποκτά έλεγχο μεγαλύτερου του 50% της συνολικής υπολογιστικής ισχύος (hashrate) σε ένα Proof-of-Work δίκτυο ή αντίστοιχα, περισσότερο από το 50% του “σταθμισμένου” μεριδίου σε κάποια Proof-of-Stake συστήματα. Με αυτό το μονοπώλιο ισχύος, ο επιτιθέμενος μπορεί να χειραγωγήσει την παραγωγή blocks και, κατά συνέπεια, να επηρεάσει την ακεραιότητα της αλυσίδας. Επιτρέπει double spending, όπου ο επιτιθέμενος ξοδεύει το ίδιο ψηφιακό νόμισμα περισσότερες από μία φορές, ενώ μέσω αναστροφών αλυσίδας μπορεί να ακυρώνει προηγούμενες επιβεβαιώσεις συναλλαγών. Αυτό υπονομεύει την ασφάλεια και την εμπιστοσύνη των χρηστών, μειώνοντας τη ρευστότητα και την αξία του κρυπτονομίσματος, οδηγώντας σε λογοκρισία και άρνηση εξυπηρέτησης συγκεκριμένων διευθύνσεων ή υπηρεσιών. Συνολικά, μια τέτοια επίθεση αλλοιώνει το οικονομικό και λειτουργικό υπόβαθρο του δικτύου, καθιστώντας το αναξιόπιστο για αξιόπιστες εμπορικές ή κρίσιμες υποδομές [64].



Σχήμα 13. Πως πραγματοποιείται η επίθεση 51%

6.2.2. Επιθέσεις σε έξυπνα συμβόλαια και οικονομικά πρωτόκολλα

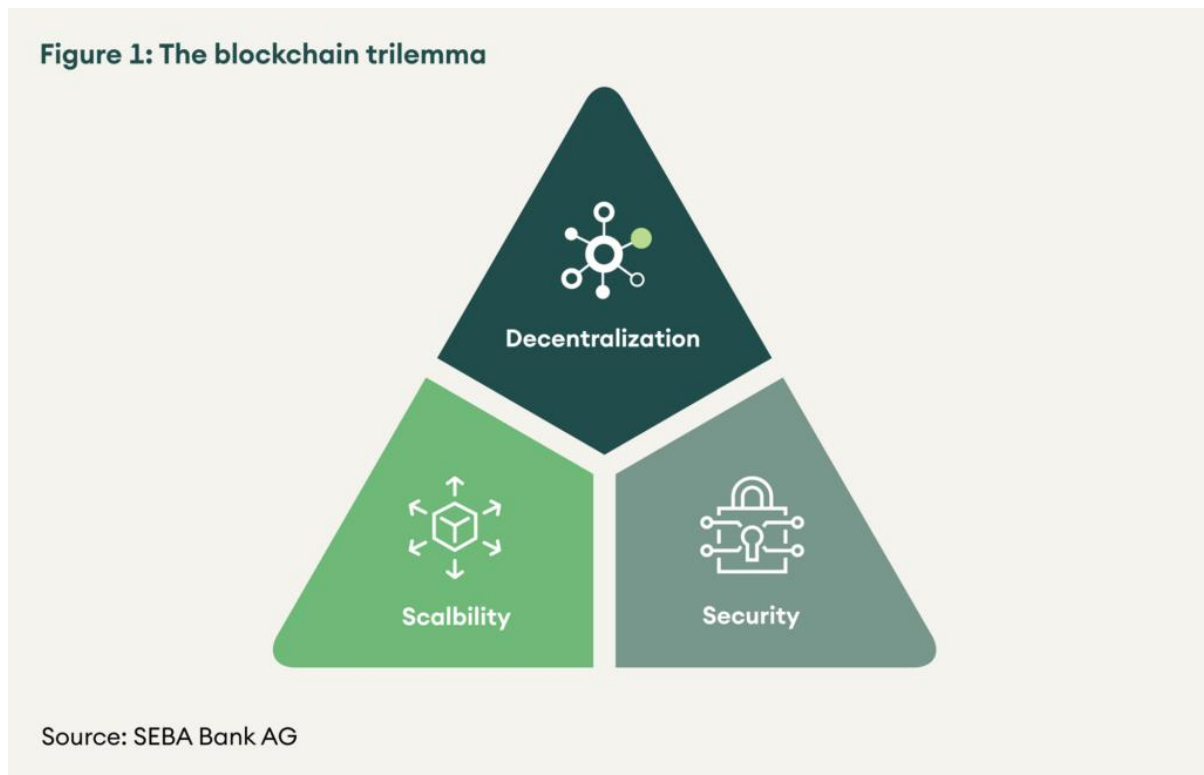
Οι επιθέσεις στα έξυπνα συμβόλαια αποτελούν ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα ασφαλείας στα σύγχρονα blockchain συστήματα. Η ανοιχτή και διαφανής φύση του κώδικα επιτρέπει σε κακόβουλους χρήστες να εντοπίζουν και να εκμεταλλεύονται ευπάθειες.

Η **reentrancy attack** επιτρέπει την επαναλαμβανόμενη ανάκληση συναρτήσεων πριν ολοκληρωθεί μια προηγούμενη, οδηγώντας σε ακούσια εκροή κεφαλαίων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το περιστατικό του DAO το 2016 στο Ethereum. Άλλες συχνές επιθέσεις περιλαμβάνουν integer overflow και underflow, όπου σφάλματα αριθμητικών πράξεων αλλάζουν τα υπόλοιπα λογαριασμών, λογικές αδυναμίες (logic flaws) στις συνθήκες πρόσβασης ή στη ροή του

συμβολαίου. Οι Wang et al.[67] ανέπτυξαν ένα πλήρες αναλυτικό πλαίσιο για επιθέσεις τύπου front-running, που αποτελούν σήμερα μία από τις πιο επικερδείς μορφές εκμετάλλευσης στα permissionless blockchains. Στις front-running attacks, οι επιτιθέμενοι εκμεταλλεύονται τη διαφάνεια του mempool για να εκτελούν δικές τους συναλλαγές πριν από τις αντίστοιχες του θύματος, αποκομίζοντας παράνομα κέρδη. Με τον τρόπο αυτό, ο επιτιθέμενος “προλαβαίνει” τη συναλλαγή του θύματος και υφαρπάζει το κέρδος (π.χ. από ένα token swap ή ένα arbitrage) [67].

6.3. Κλιμάκωση και απόδοση

Το scalability trilemma που εισήγαγε ο Vitalik Buterin αποτελεί μια από τις πιο γνωστές θεωρητικές προκλήσεις στην εξέλιξη των blockchain συστημάτων. Όπως εξηγείται στο άρθρο [70] είναι μαθηματικά αδύνατο ένα blockchain να επιτύχει ταυτόχρονα υψηλό επίπεδο ασφάλειας, αποκέντρωσης και κλιμάκωσης. Η μελέτη τους απέδειξε ότι η σχέση μεταξύ των τριών αυτών παραμέτρων είναι αντιστρόφως ανάλογη, η βελτίωση της μιας οδηγεί αναπόφευκτα σε επιδείνωση των άλλων δύο. Για παράδειγμα, η αύξηση του αριθμού των συναλλαγών ανά δευτερόλεπτο (TPS) μέσω ταχύτερης παραγωγής blocks συνεπάγεται μεγαλύτερο ρυθμό fork και κατά συνέπεια, χαμηλότερη ασφάλεια. Αντίστοιχα, η ενίσχυση της ασφάλειας μέσω πιο απαιτητικών μηχανισμών συναίνεσης περιορίζει την ταχύτητα και την επεκτασιμότητα. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές στα δημόσια δίκτυα Proof of Work, όπου η ανάγκη για αποκέντρωση και ισχυρή προστασία από επιθέσεις 51% οδηγεί σε σημαντικά αυξημένο ενεργειακό κόστος και μειωμένη απόδοση [70-71].

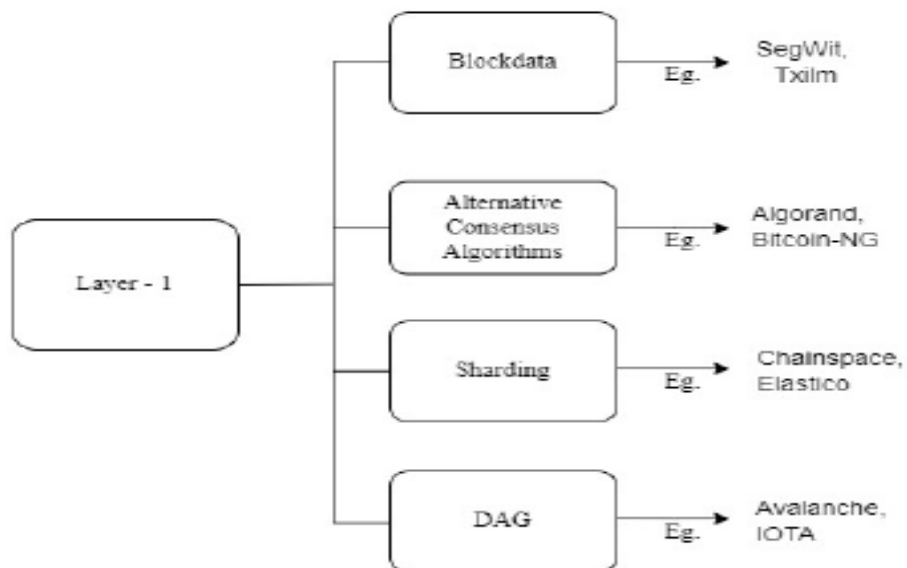


Σχήμα 14. Το τρίλλημα του blockchain

Τα τρέχοντα προβλήματα κλιμάκωσης συνδέονται κυρίως με τον χαμηλό αριθμό συναλλαγών που μπορούν να επεξεργαστούν τα υπάρχοντα blockchain, την υψηλή καθυστέρηση στη δημιουργία νέων blocks και το μεγάλο ενεργειακό αποτύπωμα των μηχανισμών συναίνεσης. Το Bitcoin επιτυγχάνει μόλις 7 συναλλαγές ανά δευτερόλεπτο, έναντι χιλιάδων σε συστήματα πληρωμών όπως η Visa. Η καθυστέρηση επιβεβαίωσης συναλλαγών, που συχνά φθάνει τα 10 λεπτά, δημιουργεί προβλήματα χρήσης σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Επιπλέον, ο μηχανισμός Proof of Work απαιτεί τεράστια υπολογιστική ισχύ, γεγονός που οδηγεί σε υπερβολική κατανάλωση ενέργειας και αυξημένο περιβαλλοντικό κόστος. Αυτοί οι περιορισμοί καθιστούν επιτακτική την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, όπως τα Layer-2 πρωτόκολλα και οι εναλλακτικοί μηχανισμοί συναίνεσης, ώστε να επιτευχθεί καλύτερη ισορροπία ανάμεσα στην ασφάλεια, την αποκέντρωση και την απόδοση των σύγχρονων blockchain [68-69].

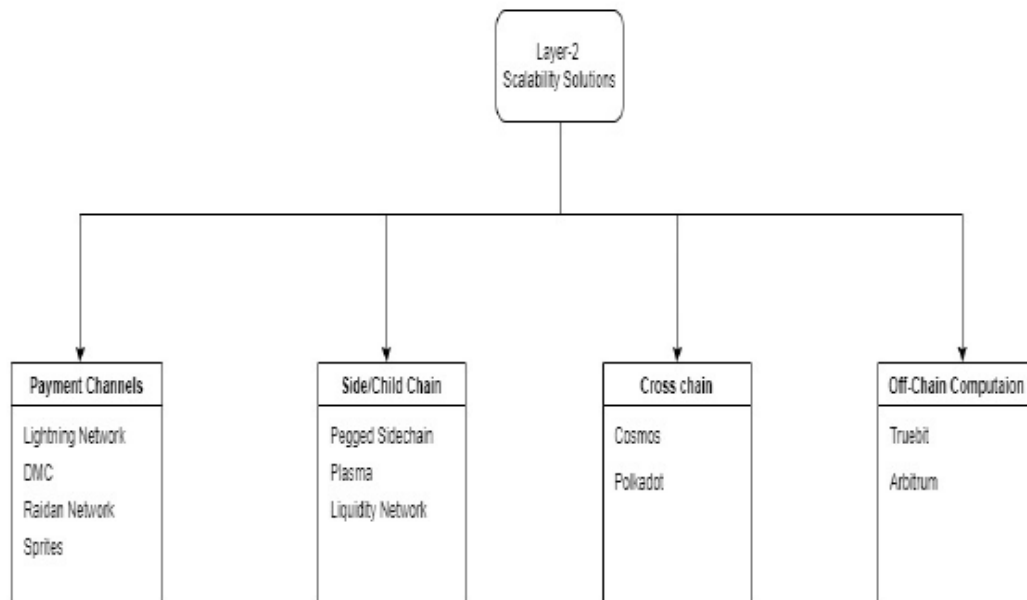
Οι πιο πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη τεχνολογικών λύσεων για τη βελτίωση της κλιμάκωσης και της απόδοσης των blockchain χωρίς να θυσιάζεται η ασφάλεια ή η αποκέντρωση. Οι λύσεις αυτές χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: Layer-1 και Layer-2 προσεγγίσεις.

Οι Layer-1 τεχνικές στοχεύουν σε βελτιώσεις on-chain. Η αλλαγή του μηχανισμού συναίνεσης (π.χ. μετάβαση από Proof of Work σε Proof of Stake ή Byzantine Fault Tolerance), η εφαρμογή sharding για κατακερματισμό του δικτύου σε μικρότερα υποσύνολα κόμβων που επεξεργάζονται συναλλαγές παράλληλα, καθώς και η χρήση DAG (Directed Acyclic Graph) δομών που επιτρέπουν ταυτόχρονες επικυρώσεις αποτελούν σημαντικά παραδείγματα. Επίσης, η αύξηση ή βελτιστοποίηση των δεδομένων του block (π.χ. SegWit, TxIm), βοηθάει στη ταχύτερη επεξεργασία και μείωση του μεγέθους συναλλαγών. Οι λύσεις Layer-1 αλλάζουν τον τρόπο λειτουργίας του ίδιου του blockchain, αλλά συχνά επηρεάζουν τη συμβατότητα και την ασφάλεια [69],[71].



Σχήμα 15. Λύσεις κλιμάκωσης 1ου Επιπέδου [69]

Από την άλλη πλευρά, οι Layer-2 λύσεις λειτουργούν off-chain και έχουν αποδειχθεί εξαιρετικά αποτελεσματικές στη μείωση του φόρτου του κύριου δικτύου. Ενδεικτικά παραδείγματα είναι το Lightning Network για το Bitcoin και το Raiden Network για το Ethereum, τα οποία ανήκουν στη κατηγορία των Payment Channels. Επιτρέπουν πολλαπλές μικρο-συναλλαγές μεταξύ δύο χρηστών εκτός blockchain, με μόνο την αρχική και τελική συναλλαγή να εγγράφονται στην κύρια αλυσίδα. Τα side/child chains είναι παράλληλες αλυσίδες που συνδέονται με το κύριο blockchain μέσω “two-way peg” (π.χ. Plasma, Liquidity Network) για επιπλέον επεξεργαστική ικανότητα. Τα cross-chain πρωτόκολλα τύπου Cosmos επεκτείνουν τη λειτουργικότητα των blockchain, επιτρέποντας αλληλεπιδράσεις μεταξύ διαφορετικών αλυσίδων και διαμοιρασμό του φόρτου συναλλαγών. Τέλος, οι τεχνικές off-chain computation, όπως το Truebit, επιτρέπουν την εκτέλεση υπολογιστικά απαιτητικών smart contracts εκτός blockchain, με επαλήθευση αποτελεσμάτων εντός της κύριας αλυσίδας [69],[71].



Σχήμα 16. Παραδείγματα λύσεων 2ου Επιπέδου [69]

Συνολικά, οι λύσεις αυτές στοχεύουν στη βελτίωση του throughput και latency των συναλλαγών, συμβάλλοντας στην προσέγγιση μιας πιο ισορροπημένης σχέσης μεταξύ ασφάλειας, αποκέντρωσης και αποδοτικότητας, που συνιστά και την ουσία του blockchain trilemma.

6.4. Νομικά και ηθικά ζητήματα

6.4.1. Νομικό πλαίσιο και ρυθμιστικές προκλήσεις

Αρχικά, το blockchain δημιουργεί σημαντικά ζητήματα συμμόρφωσης και εποπτείας λόγω της απουσίας ενός ενιαίου νομικού πλαισίου. Λόγω της αποκεντρωμένης φύσης του δεν υπάρχει καμία αρχή υπεύθυνη να την εφαρμογή των κανόνων ή για την επιβολή κυρώσεων [75]. Αυτό οδηγεί στην έλλειψη απονομής δικαιοσύνης σε περιπτώσεις παραβίασης ή κατάχρησης. Στο άρθρο [72],

επισημαίνεται ότι η παραδοσιακή ρύθμιση, βασισμένη σε κεντρικά εποπτικά όργανα, δεν μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά σε περιβάλλοντα χωρίς ενιαίο έλεγχο.

Προκειμένου να ρυθμιστούν οι παραπάνω προκλήσεις προτείνεται η ενσωμάτωση της ρύθμισης μέσα στο ίδιο το τεχνολογικό σύστημα, μέσω μηχανισμών “traceability and compliance regulation”. Δηλαδή, αυτές οι τεχνικές αυτοματοποιούν την εφαρμογή των κανονισμών μέσω των έξυπνων συμβολαίων. Επιπλέον, η χρήση dual-chain μοντέλων (δημόσια και ιδιωτικά blockchain) διευκολύνει την εποπτεία συναλλαγών χωρίς να παραβιάζεται η ιδιωτικότητα. Έτσι, οι κανονιστικοί μηχανισμοί μετασχηματίζονται από νομικές ρυθμίσεις σε τεχνολογικές διαδικασίες συμμόρφωσης [72].

6.4.2. Ηθικές διαστάσεις της τεχνολογίας

Η τεχνολογία blockchain εγείρει πολλαπλά ηθικά ζητήματα που συνδέονται με την ισορροπία μεταξύ διαφάνειας και ιδιωτικότητας, αποκέντρωσης και λογοδοσίας, καθώς και τεχνολογικής και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Παρότι η διαφάνεια ενισχύει την εμπιστοσύνη και την ανιχνευσιμότητα των συναλλαγών, η υπερβολική ορατότητα μπορεί να οδηγήσει σε παραβίαση προσωπικών δεδομένων ή σε αποκάλυψη εμπορικά ευαίσθητων πληροφοριών [75]. Παράλληλα, η αποκέντρωση ενισχύει τη δημοκρατική συμμετοχή, μειώνοντας την εξάρτηση από ενδιάμεσους φορείς. Ωστόσο, δημιουργούνται προβλήματα λογοδοσίας, αφού δεν υπάρχει κεντρική αρχή υπεύθυνη για σφάλματα ή παραβιάσεις. Τα έξυπνα συμβόλαια εισάγουν νέες νομικές και ηθικές προκλήσεις, επειδή η “κωδικοποιημένη” λογική τους μπορεί να έρχεται σε σύγκρουση με την ερμηνευτική φύση του νόμου. Επιπλέον, η περιβαλλοντική βιωσιμότητα των μηχανισμών Proof of Work τίθεται ως ηθικό ζήτημα, με προτάσεις μετάβασης σε “πράσινους” μηχανισμούς (Proof of Stake, renewable energy mining).

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω οι αρχές προτείνουν ένα πλαίσιο «Ethical Blockchain Development», το οποίο στοχεύει στη δημιουργία τεχνολογιών που ενσωματώνουν την ηθική και τη νομιμότητα από το στάδιο του σχεδιασμού τους. Οι κυριότερες αρχές είναι οι εξής: συμπεριληπτικότητα και ποικιλομορφία, διαφάνεια, ιδιωτικότητα εκ σχεδιασμού, περιβαλλοντική ευθύνη, εκπαίδευση των χρηστών και συνεχής αξιολόγηση. Με αυτό τον τρόπο δίνεται έμφαση στις ηθικές αξίες, ενθαρρύνεται η καινοτομία με συνείδηση και επιδιώκεται η δημιουργία ενός θετικού και βιώσιμου αντίκτυπου στην κοινωνία. Το σχήμα 6.4.2.1 παρουσιάζει συνοπτικά τις αρχές του Ethical Blockchain Development.



Σχήμα17. Διάγραμμα ροής των αξιών του Ethical Blockchain Development [75]

6.4.3 Ενσωματωμένη ηθική και κανονιστική συμμόρφωση στην τεχνολογία Blockchain

Η ηθική διάσταση του blockchain συνδέεται άμεσα με τη συμμόρφωση στους κανονισμούς, τη βιώσιμη ανάπτυξη και τη μετάβαση προς ένα ενιαίο πλαίσιο ηθικής και νομικής διακυβέρνησης. Το άρθρο [74] αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα, προτείνοντας ένα blockchain-based framework για την παρακολούθηση κανονισμών κατασκευών στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα. Ο συνδυασμός IoT αισθητήρων και έξυπνων συμβολαίων του συστήματος βοηθάει στην ανίχνευση περιβαλλοντικών παραβάσεων και την άμεση ειδοποίηση των αρμόδιων φορέων. Έτσι, η τεχνολογία λειτουργεί ως εργαλείο “ethics by design”, ενσωματώνοντας τη διαφάνεια, τη λογοδοσία και την περιβαλλοντική υπευθυνότητα στον ίδιο της τον πυρήνα, ενώ μειώνει τη γραφειοκρατία και διασφαλίζει την ακεραιότητα των δεδομένων [73-74].

Παράλληλα, τα ευρύτερα νομικά και ηθικά ζητήματα του blockchain σχετίζονται με την ανάγκη εξισορρόπησης μεταξύ τεχνολογικής αυτονομίας και κοινωνικής ευθύνης. Η σύγχρονη βιβλιογραφία υπογραμμίζει τη σημασία ενός ενιαίου πλαισίου “Regulation and Ethics by Design”, στο οποίο οι κανόνες συμμόρφωσης και οι ηθικές αρχές θα υλοποιούνται μέσα στον ίδιο τον κώδικα των συστημάτων μέσω έξυπνων συμβολαίων και μηχανισμών ελέγχου (auditing systems). Το μοντέλο αυτό, συνδυάζοντας πολιτικές όπως το EBSI, το AI Act και το Data Governance Act, επιδιώκει τη διασφάλιση τόσο της νομικής ασφάλειας όσο και της υπεύθυνης και βιώσιμης τεχνολογικής ανάπτυξης. Κατ’ αυτόν τον τρόπο, το blockchain παύει να αποτελεί απλώς τεχνολογία

αποκέντρωσης και μετατρέπεται σε μέσο αναδιαμόρφωσης της έννοιας του νόμου και της εμπιστοσύνης, όπου η συμμόρφωση και η ηθική ενσωματώνονται δομικά στο ίδιο το σύστημα [73-74].

6.5. Επίλογος

Ολοκληρώνοντας το Κεφάλαιο 6, καθίσταται σαφές ότι η ασφάλεια και οι προκλήσεις των συστημάτων blockchain αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την ευρεία και αξιόπιστη υιοθέτησή τους στις έξυπνες πόλεις και γενικότερα σε ψηφιακές υποδομές. Από τα ζητήματα ιδιωτικότητας και τη συμμόρφωση με το GDPR, έως τις πολυεπίπεδες επιθέσεις στο δίκτυο, στα έξυπνα συμβόλαια και στους μηχανισμούς συναίνεσης, γίνεται φανερό ότι παρότι το blockchain παρέχει ενισχυμένη διαφάνεια και ακεραιότητα, δεν είναι απαλλαγμένο από τεχνικούς και θεσμικούς κινδύνους.

Παράλληλα, τα προβλήματα της κλιμάκωσης εξακολουθούν να αποτελούν βασικά εμπόδια, με τις λύσεις Layer-1 και Layer-2 (sharding, νέα μοντέλα συναίνεσης, off-chain υπολογισμοί), να προσπαθούν να εξισορροπήσουν το blockchain trilemma. Τέλος, τα νομικά και ηθικά ζητήματα που αναδεικνύονται γύρω από τη διακυβέρνηση, τη λογοδοσία, την προστασία δεδομένων και τη βιωσιμότητα καθιστούν σαφές ότι η τεχνολογία χρειάζεται όχι μόνο τεχνική ενίσχυση αλλά και υπεύθυνο σχεδιασμό. Συνολικά, το κεφάλαιο αυτό δείχνει ότι η ανάπτυξη του blockchain πρέπει να ακολουθεί μια πολυδιάστατη προσέγγιση που συνδυάζει ασφάλεια, ρυθμιστική συμμόρφωση και ηθική ευθύνη, ώστε η τεχνολογία να μπορεί να υποστηρίξει αξιόπιστα κρίσιμες εφαρμογές του μέλλοντος.

VII. Μελέτη Περίπτωσης: Η Έξυπνη Πόλη της Θεσσαλονίκης



Εικόνα 1. Θεσσαλονίκη: κλιματικά ουδέτερη & έξυπνη πόλη μέχρι το 2030 [81]

7.1. Εισαγωγή και κίνητρο επιλογής

Η Θεσσαλονίκη αποτελεί μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες ελληνικές πόλεις στον τομέα των έξυπνων τεχνολογιών και της ψηφιακής διακυβέρνησης. Τα τελευταία χρόνια έχει ενταχθεί σε ευρωπαϊκά προγράμματα, όπως το Intelligent Cities Challenges της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, ενώ υλοποιεί πλήθος πρωτοβουλιών σε τομείς όπως η έξυπνη κινητικότητα, η ενεργειακή αποδοτικότητα και η διαχείριση δεδομένων των πολιτών. Το 2025 χαρακτηρίστηκε ως η πιο «έξυπνη πόλη» της Ελλάδας, κερδίζοντας το βραβείο Smart City of the Year για τον ψηφιακό της μετασχηματισμό και τις καινοτόμες δράσεις της [76].

Λαμβάνοντας υπόψη τις υφιστάμενες ψηφιακές υποδομές και τα έργα καινοτομίας, η επιλογή της Θεσσαλονίκης ως μελέτης περίπτωσης είναι ιδιαίτερα εύστοχη, καθώς διαθέτει το απαραίτητο τεχνολογικό υπόβαθρο για την ενσωμάτωση της τεχνολογίας blockchain. Παράλληλα, η πόλη φιλοξενεί ένα ανεπτυγμένο δίκτυο πανεπιστημίων, ερευνητικών κέντρων και ιδιωτικών φορέων που δραστηριοποιούνται ενεργά στον χώρο της ψηφιακής καινοτομίας, γεγονός που καθιστά εφικτή την υλοποίηση ενός πλαισίου “Smart City powered by Blockchain” [76].

Ωστόσο, παρά τις προόδους αυτές, η πόλη εξακολουθεί να αντιμετωπίζει προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαλειτουργικότητα μεταξύ συστημάτων, την προστασία των δεδομένων και την απουσία ενιαίου μηχανισμού εμπιστοσύνης για τις ψηφιακές υπηρεσίες του Δήμου και των συνεργαζόμενων φορέων. Τα ζητήματα αυτά αναδεικνύουν την ανάγκη για πιο αξιόπιστες και αποκεντρωμένες λύσεις διαχείρισης δεδομένων.

7.2 Υφιστάμενη κατάσταση

Η Θεσσαλονίκη έχει ήδη προχωρήσει στην ανάπτυξη και υλοποίηση διαφόρων έργων “έξυπνης πόλης”. Μεταξύ αυτών συγκαταλέγονται τα έξυπνα συστήματα στάθμευσης, η τηλεματική αστικών συγκοινωνιών, τα έξυπνα δίκτυα φωτισμού και οι ηλεκτρονικές υπηρεσίες εξυπηρέτησης πολιτών μέσω εφαρμογών όπως το “MyCity” και το “City of ThessalonikiApp”. Παράλληλα, ο Δήμος συμμετέχει σε προγράμματα βιώσιμης κινητικότητας και συλλογής δεδομένων για την περιβαλλοντική παρακολούθηση, ενώ έχουν τοποθετηθεί εκατοντάδες αισθητήρες σε διάφορα σημεία της πόλης [77].



Σχήμα 18. Βασικοί πυλώνες μιας ευφυούς πόλης [82]

Ωστόσο, η υφιστάμενη ψηφιακή υποδομή χαρακτηρίζεται από αποσπασματικότητα. Τα συστήματα λειτουργούν μεμονωμένα, συχνά υπό διαφορετικά πρότυπα ασφάλειας και χωρίς κοινή βάση δεδομένων ή μηχανισμό ταυτοποίησης χρηστών. Η έλλειψη ενιαίας αρχιτεκτονικής δεδομένων οδηγεί σε περιορισμένη αξιοποίηση της πληροφορίας, αυξάνει τον κίνδυνο μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης και μειώνει την εμπιστοσύνη των πολιτών στις ψηφιακές υπηρεσίες. Επιπλέον, δεν υπάρχει μηχανισμός επαλήθευσης της ακεραιότητας των δεδομένων που συλλέγονται από αισθητήρες ή διαμοιράζονται μεταξύ φορέων, γεγονός που δυσχεραίνει τη λογοδοσία και τον έλεγχο [77].

7.3 Πρόταση λύσης με χρήση blockchain

Η προτεινόμενη λύση βασίζεται στη δημιουργία μιας ενιαίας πλατφόρμας blockchain για τη διαχείριση των λειτουργιών και των δεδομένων της Θεσσαλονίκης ως έξυπνης πόλης. Η πλατφόρμα αυτή προτείνεται να λειτουργεί ως αποκεντρωμένο μητρώο εμπιστοσύνης, επιτρέποντας την ασφαλή ταυτοποίηση χρηστών, την καταγραφή συναλλαγών και γεγονότων, καθώς και την αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων ανάμεσα σε δημόσιους και ιδιωτικούς φορείς. Με αυτόν τον τρόπο αντιμετωπίζονται οι βασικές προκλήσεις που σχετίζονται με τη διαλειτουργικότητα, την προστασία δεδομένων και την ανάγκη διαφάνειας στη διαχείριση των δημοτικών υπηρεσιών [78].

Η αρχιτεκτονική του συστήματος προτείνεται να βασιστεί σε ένα permissioned blockchain, όπως το Hyperledger Fabric, το οποίο επιτρέπει ελεγχόμενη πρόσβαση και υψηλό επίπεδο ιδιωτικότητας. Οι κύριοι κόμβοι (nodes) θα ανήκουν σε θεσμικούς φορείς, όπως ο Δήμος Θεσσαλονίκης, το Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος, το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

– Ιατρικό Κέντρο, καθώς και σε ιδιωτικές επιχειρήσεις τεχνολογίας που δραστηριοποιούνται στην περιοχή [76],[79].

Τα βασικά υποσυστήματα της πλατφόρμας θα περιλαμβάνουν τη ψηφιακή ταυτότητα πολιτών (Self-Sovereign Identity) με δυνατότητα ασφαλούς πρόσβασης σε δημοτικές υπηρεσίες χωρίς ενδιάμεσους φορείς. Τα έξυπνα συμβόλαια για την αυτοματοποίηση διαδικασιών, όπως αιτήσεις αδειών, πληρωμές τελών και συμβάσεις προμηθειών. Το Blockchain ledger δεδομένων αισθητήρων, όπου καταγράφονται με ασφάλεια δεδομένα περιβαλλοντικών μετρήσεων, κυκλοφορίας και ενέργειας, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα και την ιχνηλασιμότητά τους. Τέλος, το σύστημα διαχείρισης δεδομένων υγείας και πρόνοιας, που θα επιτρέπει την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ νοσοκομείων και δημοτικών υπηρεσιών με πλήρη συμμόρφωση στον Γενικό Κανονισμό Προστασίας Δεδομένων (GDPR) [76],[79].

Η λειτουργία του συστήματος θα βασίζεται σε μηχανισμό συναίνεσης Proof of Authority (PoA), κατάλληλο για δίκτυα με θεσμικά μέλη και χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ ασφάλειας, ταχύτητας και αποδοτικότητας [76].

7.4 Συμπεράσματα μελέτης περίπτωσης

Η υιοθέτηση μιας πλατφόρμας blockchain πρόκειται να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα. Επίσης, η αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική επιτρέπει την ασφαλή διαμοίραση δεδομένων μεταξύ δημοσίων και ιδιωτικών φορέων, αυξάνοντας τη διαλειτουργικότητα και τη συνεργασία σε κρίσιμους τομείς, όπως η κινητικότητα, η ενέργεια και η υγεία. Ωστόσο, η υλοποίηση δεν είναι απαλλαγμένη από προκλήσεις. Απαιτείται σημαντική τεχνική εξειδίκευση, προσαρμογή σε νομικά πλαίσια όπως ο GDPR, καθώς και αντιμετώπιση οργανωτικών αντιστάσεων προς νέες τεχνολογίες [80].

Συνολικά, η εφαρμογή του blockchain στο οικοσύστημα της Θεσσαλονίκης αναδεικνύεται ως μια ιδιαίτερα υποσχόμενη λύση για την ενίσχυση της ψηφιακής διακυβέρνησης και την επιτάχυνση του αστικού μετασχηματισμού. Η ενσωμάτωσή της σε κρίσιμες λειτουργίες, όπως η ταυτοποίηση πολιτών, η διαχείριση δεδομένων και οι συναλλαγές μεταξύ φορέων, συμβάλλει ουσιαστικά στη δημιουργία μιας αξιόπιστης, ασφαλούς και διαφανούς έξυπνης πόλης [80].

Παρά τις προκλήσεις σε επίπεδο τεχνικής εφαρμογής και θεσμικού πλαισίου, η υιοθέτηση του blockchain μπορεί να ενισχύσει τη βιωσιμότητα, τη λογοδοσία και την εμπιστοσύνη των πολιτών, καθιστώντας τη Θεσσαλονίκη πρότυπο για άλλες ελληνικές και ευρωπαϊκές πόλεις. Η μελέτη αυτή καταδεικνύει ότι το blockchain δεν αποτελεί απλώς τεχνολογική καινοτομία, αλλά εργαλείο κοινωνικής και διοικητικής αναβάθμισης, ικανό να αναμορφώσει τον τρόπο με τον οποίο οι πόλεις διαχειρίζονται, προστατεύουν και αξιοποιούν τα δεδομένα τους [80].

VIII. Συμπεράσματα – Προτάσεις

8.1. Απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο τη συστηματική μελέτη των εφαρμογών του blockchain στο οικοσύστημα των έξυπνων πόλεων. Η εργασία εστιάζει τόσο στις τεχνολογικές πτυχές όσο και σε πραγματικές μελέτες περίπτωσης και παραδείγματα της εν λόγω τεχνολογίας. Τα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν αρχικά μπορούν πλέον να απαντηθούν με σαφήνεια βάσει των ευρημάτων της εργασίας.

Αρχικά, στο 5ο κεφάλαιο αναδεικνύει ότι το blockchain πρόκειται να αναπτύξει και να ενισχύσει τις δημοτικές υπηρεσίες. Οι πιο ώριμες και πρακτικά εφαρμόσιμες λύσεις εντοπίζονται στους τομείς της ψηφιακής ταυτοποίησης, της ηλεκτρονικής ψηφοφορίας, του κτηματολογίου, της οικονομικής διαφάνειας και των δημοσίων συμβάσεων, των ιατρικών δεδομένων, των κοινωνικών παροχών και των έξυπνων μεταφορών. Στόχος τους αποτελεί η μείωση της γραφειοκρατίας, η ενίσχυση της ασφάλειας και της διαφάνειας για τη διαχείριση δημοτικών λειτουργιών. Το blockchain αποτελεί μια τεχνολογία η οποία προσφέρει υψηλή ακεραιότητα δεδομένων, αποκέντρωση, διαφάνεια, ανθεκτικότητα σε αλλοιώσεις και αυτοματοποίηση διαδικασιών μέσω smart contracts. Ωστόσο, όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 6, συνοδεύεται από σημαντικές προκλήσεις, όπως ζητήματα κλιμάκωσης, υψηλό ενεργειακό κόστος ορισμένων μηχανισμών συναίνεσης, επιθέσεις σε έξυπνα συμβόλαια, ανάγκη συμμόρφωσης με το GDPR και ρυθμιστικές αβεβαιότητες σε ευρωπαϊκό επίπεδο.

Το κεφάλαιο 4 κατέδειξε ότι οι δημοτικές υπηρεσίες εννοούνται περισσότερο από τη χρήση permissioned blockchain πλατφόρμων. Το Hyperledger Fabric και το Quorum αποτελούν ιδανικές πλατφόρμες καθώς διαθέτουν ελεγχόμενο περιβάλλον πρόσβασης, ισχυρούς μηχανισμούς ταυτοποίησης, καλύτερη ενεργειακή απόδοση και συμμορφώνονται με περιορισμούς περί προστασίας προσωπικών δεδομένων. Αντίθετα, τα δημόσια blockchains, ενώ προσφέρουν μεγαλύτερη διαφάνεια, δεν ενδείκνυνται για κρίσιμες υπηρεσίες ενός δήμου. Επίσης, η μελέτη περίπτωσης του 7^{ου} κεφαλαίου αναδεικνύει ότι η πόλη της Θεσσαλονίκης διαθέτει ψηφιακές υποδομές που μπορούν να επωφεληθούν από την υιοθέτηση blockchain. Η προτεινόμενη λύση περιλαμβάνει τη δημιουργία μιας ενιαίας blockchain πλατφόρμας για ταυτοποίηση πολιτών, διαφάνεια συμβολαίων, έξυπνες μεταφορές και διασύνδεση με υπάρχουσες υπηρεσίες. Η ενσωμάτωση blockchain εκτιμάται ότι θα ενισχύσει τη διαλειτουργικότητα, την ασφάλεια και την εμπιστοσύνη των πολιτών προς τις ψηφιακές υπηρεσίες του δήμου.

8.2. Κύρια ευρήματα

Το blockchain δεν είναι απλώς μια τεχνολογία αλλά ο βασικός πυλώνας αναβάθμισης των ψηφιακών υπηρεσιών. Το blockchain προσφέρει ουσιαστική ενίσχυση της εμπιστοσύνης σε συστήματα όπου η διαφάνεια, η ακεραιότητα και η αξιοπιστία των δεδομένων είναι κρίσιμες παράμετροι. Οι έξυπνες πόλεις αποτελούν το ιδανικό περιβάλλον ενσωμάτωσης της τεχνολογίας, καθώς εμπλέκουν μεγάλο αριθμό φορέων, συστημάτων και χρηστών. Συγκεκριμένα, η έννοια της ψηφιακής ταυτότητας είναι απαραίτητη στις εφαρμογές ενός σύγχρονου δήμου, και τα μοντέλα DIDs/VCs δίνουν λύσεις σε χρόνια προβλήματα ταυτοποίησης. Άξιο αναφοράς αποτελεί το γεγονός πως υπάρχουν πλατφόρμες blockchain με διαφορετικά προφίλ χρήσης. Με αυτό τον τρόπο, για την

υλοποίηση κάποιας εφαρμογής χρησιμοποιείται πάντα η πλατφόρμα που πληροί τις προϋποθέσεις. Για δημοτικές υπηρεσίες οι ιδιωτικές/κοινοπρακτικές πλατφόρμες είναι σαφώς καταλληλότερες. Η βιβλιογραφία της εργασίας αποδεικνύει ότι η αυτή η τεχνολογία μελετάται και «δοκιμάζεται» παγκοσμίως, με σημαντικές υλοποιήσεις σε Ευρώπη, Ασία και Αμερική. Προς το παρόν βρίσκεται σε φάση ωρίμανσης, αλλά δεν έχει φτάσει ακόμη σε επίπεδο καθολικής ενσωμάτωσης στους δήμους. Τέλος, η μελέτη περίπτωση της Θεσσαλονίκης επιβεβαιώνει ότι υπάρχουν ρεαλιστικές προϋποθέσεις για πιλοτική εφαρμογή.

8.3. Περιορισμοί της μελέτης

Η βιβλιογραφία της εργασίας υλοποιήθηκε με βάση τη μέθοδο PRISMA. Η τελική επιλογή άρθρων, αν και αυστηρά φιλτραρισμένη, δεν καλύπτει πλήρως όλες τις διεθνείς εφαρμογές, ειδικά τις πολύ πρόσφατες. Επίσης, η μελέτη περίπτωσης για τη πόλη της Θεσσαλονίκης δεν συνοδεύτηκε από υλοποίηση πραγματικού πιλοτικού έργου σε δήμο, αλλά περιορίστηκε σε θεωρητική μοντελοποίηση. Προς το παρόν, η Ελλάδα βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο στον τομέα του blockchain και οι εφαρμογές παραμένουν ελάχιστες, κάτι που περιορίσει την αξιοποίηση τοπικών case studies. Επιπλέον, δεν υπάρχει ακόμη ενιαίο και πλήρως καθορισμένο πλαίσιο για την υιοθέτηση blockchain σε δημοτικές υπηρεσίες στην Ελλάδα. Οι γρήγοροι ρυθμοί εξέλιξης της τεχνολογίας προκαλούν τεχνολογικές αβεβαιότητες. οι λύσεις και οι πλατφόρμες που θεωρούνται καινοτόμες σήμερα ενδέχεται να γίνουν λιγότερο αποτελεσματικές ή παρωχημένες στο άμεσο μέλλον.

8.4. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα ή εφαρμογή

Με βάση τα ευρήματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προκύπτουν σημαντικές προοπτικές για μελλοντική έρευνα και περαιτέρω εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain στο πλαίσιο των έξυπνων πόλεων. Παρότι οι εφαρμογές που παρουσιάστηκαν καταδεικνύουν το δυναμικό της τεχνολογίας σε κρίσιμους τομείς, όπως η ψηφιακή ταυτότητα, η ηλεκτρονική διακυβέρνηση, η υγεία, οι μεταφορές και η διαχείριση δημόσιων πόρων, η υιοθέτηση του blockchain βρίσκεται ακόμη σε μεταβατικό στάδιο. Το γεγονός αυτό, δημιουργεί ανάγκη για περαιτέρω επιστημονική διερεύνηση και πιλοτική εφαρμογή σε πραγματικά αστικά περιβάλλοντα.

Συγκεκριμένα, η εργασία μπορεί να βοηθήσει στη ανάπτυξη συγκριτικών μελετών απόδοσης μεταξύ διαφορετικών permissioned blockchain πλατφόρμων, στοχεύοντας στην αξιολόγηση κρίσιμων παραμέτρων. Η επεκτασιμότητα, η καθυστέρηση συναλλαγών, η κατανάλωση υπολογιστικών και ενεργειακών πόρων, καθώς και η ανθεκτικότητα σε σφάλματα ή επιθέσεις, αποτελούν μερικούς από αυτούς. Οι permissioned αρχιτεκτονικές θεωρούνται πιο κατάλληλες για εφαρμογές έξυπνων πόλεων, λόγω του ελεγχόμενου χαρακτήρα τους και της χαμηλότερης υπολογιστικής επιβάρυνσης. Ωστόσο, κρίνεται αναγκαία η συστηματική πειραματική αξιολόγηση, ώστε να τεκμηριωθεί η καταλληλότητα κάθε πλατφόρμας σε διαφορετικά σενάρια χρήσης, όπως περιβάλλοντα υψηλού ρυθμού συναλλαγών ή εφαρμογές με αυξημένες απαιτήσεις ασφάλειας.

Παράλληλα, αναδεικνύεται η ανάγκη εμβάθυνσης στη συμβατότητα των blockchain συστημάτων με τον Γενικό Κανονισμό Προστασίας Δεδομένων (GDPR). Η αποκεντρωμένη και αμετάβλητη φύση του blockchain δημιουργεί προκλήσεις σε έννοιες όπως το δικαίωμα στη λήθη και η τροποποίηση ή διαγραφή προσωπικών δεδομένων. Μελλοντική έρευνα μπορεί να εστιάσει στη σχεδίαση νέων αρχιτεκτονικών που ενσωματώνουν μηχανισμούς προστασίας προσωπικών

δεδομένων. Τέτοιοι μηχανισμοί είναι η off-chain αποθήκευση, κρυπτογραφικές τεχνικές επιλεκτικής αποκάλυψης και zero-knowledge proofs, διασφαλίζοντας παράλληλα τη συμμόρφωση με το κανονιστικό πλαίσιο και την κοινωνική αποδοχή των συστημάτων.

Επίσης, ο συνδυασμός της τεχνολογίας blockchain με τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης (AI) αποτελεί ιδιαίτερα υποσχόμενη κατεύθυνση μελλοντικής έρευνας. Η αξιοποίηση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, πάνω σε αξιόπιστα και αμετάβλητα δεδομένα που καταγράφονται στο blockchain, μπορεί να υποστηρίξει λειτουργίες όπως η ανίχνευση απάτης, η προγνωστική ανάλυση δεδομένων και η αυτοματοποιημένη επαλήθευση συναλλαγών. Ταυτόχρονα, το blockchain μπορεί να λειτουργήσει ως μηχανισμός διασφάλισης της ακεραιότητας των δεδομένων εκπαίδευσης των μοντέλων AI, περιορίζοντας φαινόμενα αλλοίωσης δεδομένων ή μεροληψίας. Με αυτό τον τρόπο, πρόκειται να ενισχυθούν σημαντικά η αποδοτικότητα και η αξιοπιστία των έξυπνων αστικών συστημάτων.

Σημαντική επίσης είναι η μελέτη υβριδικών (hybrid) αρχιτεκτονικών, που συνδυάζουν blockchain με off-chain αποθήκευση δεδομένων και υποδομές cloud ή edge computing. Τέτοιες προσεγγίσεις μπορούν να αντιμετωπίσουν περιορισμούς που σχετίζονται με την απόδοση και την κλιμάκωση, επιτρέποντας την αποδοτική διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων, όπως δεδομένα αισθητήρων, ιατρικές πληροφορίες ή δεδομένα μεταφορών. Επίσης, απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση βιώσιμων μηχανισμών συναίνεσης κατάλληλων για έξυπνες πόλεις, όπως οι Proof of Authority (PoA) και Proof of History (PoH). Έτσι επιτυγχάνεται χαμηλότερη κατανάλωση πόρων και αυξημένη απόδοση σε σύγκριση με παραδοσιακούς μηχανισμούς συναίνεσης.

Παράλληλα με τις ερευνητικές κατευθύνσεις, η εργασία αναδεικνύει και συγκεκριμένες πρακτικές εφαρμογές για τους οργανισμούς τοπικής αυτοδιοίκησης. Ενδεικτικά, προτείνεται η υλοποίηση πιλοτικών έργων σε τομείς όπως η ψηφιακή ταυτότητα δημοτών, η διαχείριση δημοσίων συμβάσεων και προμηθευτών, τα έξυπνα συστήματα μεταφορών και ticketing, οι ψηφιακές άδειες και η πολεοδομία, καθώς και η καταγραφή και διαχείριση κοινωνικών παροχών. Η πιλοτική εφαρμογή τέτοιων συστημάτων μπορεί να λειτουργήσει ως πεδίο αξιολόγησης της τεχνολογίας σε πραγματικές συνθήκες, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα για τη μελλοντική τους κλιμάκωση.

Τέλος, ιδιαίτερη σημασία έχει η σταδιακή ενσωμάτωση της τεχνολογίας blockchain σε υφιστάμενες ψηφιακές υπηρεσίες, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη διαδημοτικών συνεργασιών για τη δημιουργία κοινών υποδομών blockchain. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να μειώσει το κόστος υλοποίησης, να ενισχύσει τη διαλειτουργικότητα και να προωθήσει την υιοθέτηση κοινών προτύπων, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη βελτίωση της διαφάνειας, της αποδοτικότητας και της λογοδοσίας στη δημόσια διοίκηση. Μέσα από τέτοιες συνεργασίες, οι έξυπνες πόλεις μπορούν να αξιοποιήσουν το blockchain όχι ως απομονωμένη τεχνολογική λύση, αλλά ως βασικό δομικό στοιχείο ενός σύγχρονου και βιώσιμου μοντέλου αστικής διακυβέρνησης.

ΙΧ. Βιβλιογραφία

- [1] H. -N. Dai, Z. Zheng and Y. Zhang, "Blockchain for Internet of Things: A Survey," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 8076-8094, Oct. 2019, doi: 10.1109/IIOT.2019.2920987.
- [2] S. Dange and M. Chatterjee, "A Broad Perspective On Integrating Internet Of Things With Blockchain," *2020 5th International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS)*, Patna, India, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCCS49678.2020.9277062.
- [3] M. Rakhee and S. Elayidom, "Blockchain Technology as a Solution for Vulnerabilities in Internet of Things-A Survey," *2023 Advanced Computing and Communication Technologies for High Performance Applications (ACCTHPA)*, Ernakulam, India, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/ACCTHPA57160.2023.10083337.
- [4] J. M. Montes, C. E. Ramirez, M. C. Gutierrez and V. M. Larios, "Smart Contracts for supply chain applicable to Smart Cities daily operations," *2019 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, Casablanca, Morocco, 2019, pp. 565-570, doi: 10.1109/ISC246665.2019.9071650.
- [5] D. Yaga, P. Mell, N. Roby and K. Scarfone, "Blockchain Technology Overview," NISTIR 8202, National Institute of Standards and Technology, 2018.
- [6] Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. (2017). *An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends*. IEEE Access, vol. 5, pp. 557–564.
- [7] H. Ahvenniemi, A. Huovila, I. Pinto-Seppä and M. Airaksinen, "What are the differences between sustainable and smart cities?", *Cities*, vol. 60, pp. 234–245, 2017.
- [8] S. Umamaheswari, K. H. Priya and S. A. Kumar, "Technologies used in Smart City Applications – An Overview," *2021 International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)*, Coimbatore, India, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICAECA52838.2021.9675707.
- [9] U. T. Khan and M. F. Zia, "Smart city technologies, key components, and its aspects," *2021 International Conference on Innovative Computing (ICIC)*, Lahore, Pakistan, 2021, pp. 1-10, doi: 10.1109/ICIC53490.2021.9692989.
- [10] V. Zdraveski, K. Mishev, D. Trajanov and L. Kocarev, "ISO-Standardized Smart City Platform Architecture and Dashboard," in *IEEE Pervasive Computing*, vol. 16, no. 2, pp. 35-43, April-June 2017, doi: 10.1109/MPRV.2017.31
- [11] S. Sarjana, "Smart City in Supporting Sustainable Cities," *2023 10th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, Semarang, Indonesia, 2023, pp. 365-370, doi: 10.1109/ICITACEE58587.2023.10277619.

- [12] M. Teliceanu, G. C. Lazaroiu and V. Dumbrava, "Consumption profile optimization in smart city vision," 2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 2017, pp. 876-881, doi: 10.1109/ATEE.2017.7905120.
- [13] PageMJ, McKenzieJE, BossuytPM, BoutronI, HoffmannTC, MulrowCDetal. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews *BMJ* 2021; 372 :n71 doi:10.1136/bmj.n71
- [14] Page M J, Moher D, Bossuyt P M, Boutron I, Hoffmann T C, Mulrow C D et al. PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews *BMJ* 2021; 372 :n160 doi:10.1136/bmj.n160
- [15] Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses, https://en.wikipedia.org/wiki/Preferred_Reporting_Items_for_Systematic_Reviews_and_Meta-Analyses#cite_note-1
- [16] PRISMA Flow Diagram 2020, Published at: July 28, 2022.[Online]. Available: <https://www.cibnp.com/prisma-flow-diagram-2020/>
- [17] <https://www.prisma-statement.org/>
- [18] M. Wohrer and U. Zdun, "Smart contracts: security patterns in the ethereum ecosystem and solidity," 2018 *International Workshop on Blockchain Oriented Software Engineering (IWBOSE)*, Campobasso, Italy, 2018, pp. 2-8, doi: 10.1109/IWBOSE.2018.8327565.
- [19] Z. Zheng, S. Xie, H. Dai, X. Chen and H. Wang, "Blockchain Challenges and Opportunities: A Survey," *Int. J. Web and Grid Services*, vol. 14, no. 4, pp. 352–375, 2018.
- [20] Shehar Bano, Alberto Sonnino, Mustafa Al-Bassam, Sarah Azouvi, Patrick McCorry, Sarah Meiklejohn, and George Danezis. 2019. SoK: Consensus in the Age of Blockchains. In *Proceedings of the 1st ACM Conference on Advances in Financial Technologies (AFT '19)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 183–198. <https://doi.org/10.1145/3318041.3355458>
- [21] S. S. D. Arigela and P. Voola, "Blockchain Open Source Tools: Ethereum and Hyperledger Fabric," 2023 *International Conference on Artificial Intelligence and Knowledge Discovery in Concurrent Engineering (ICECONF)*, Chennai, India, 2023, pp. 1-8, doi: 10.1109/ICECONF57129.2023.10084256.
- [22] Cachin, C. (2016, July). Architecture of the hyperledger blockchain fabric. In *Workshop on distributed cryptocurrencies and consensus ledgers* (Vol. 310, No. 4, pp. 1-4).
- [23] Elli Androulaki, Artem Barger, Vita Bortnikov, Christian Cachin, Konstantinos Christidis, Angelo De Caro, David Enyeart, Christopher Ferris, Gennady Laventman, Yacov Manevich, Srinivasan Muralidharan, Chet Murthy, Binh Nguyen, Manish Sethi, Gari Singh, Keith Smith, Alessandro Sorniotti, Chrysoula Stathakopoulou, Marko Vukolić, Sharon Weed Cocco, and Jason Yellick. 2018. Hyperledger fabric: a distributed operating system for permissioned blockchains. In *Proceedings of the Thirteenth EuroSys Conference (EuroSys '18)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Article 30, 1–15. <https://doi.org/10.1145/3190508.3190538>
- [24] Dannen, Chris. *Introducing Ethereum and solidity*. Vol. 1. Berkeley: Apress, 2017.

Κεφάλαιο ΙΧ

- [25] Tenorio-Fornés, Ámbar, et al. "Decentralizing science: Towards an interoperable open peer review ecosystem using blockchain." *Information Processing & Management* 58.6 (2021): 102724.
- [26] Xu, X., Weber, I., & Staples, M. (2019). Architecture for blockchain applications.
- [27] Popov, Serguei. "The tangle." *White paper* 1.3 (2018): 30.
- [28] Ferraro, Pietro, Christopher King, and Robert Shorten. "IOTA-based directed acyclic graphs without orphans." *arXiv preprint arXiv:1901.07302* (2018).
- [29] M. Crosby, P. Pattanayak, S. Verma and V. Kalyanaraman, "Blockchain Technology: Beyond Bitcoin," Applied Innovation Review, no. 2, pp. 6–19, 2016.
- [30] J. Poon and T. Dryja, "The Bitcoin Lightning Network: Scalable Off-Chain Instant Payments," White Paper, 2016.
- [31] "On Scaling Decentralized Blockchains," International Conference on Financial Cryptography and Data Security (FC), Barbados, 2016, pp. 106–125.
- [32] A. R. Raipurkar, S. Bobde, A. Tripahi and M. Sahu, "Digital Identity System Using Blockchain-based Self Sovereign Identity & Zero Knowledge Proof," *2023 OITS International Conference on Information Technology (OCIT)*, Raipur, India, 2023, pp. 611-616, doi: 10.1109/OCIT59427.2023.10430981.
- [33] S. Choudhari, S. K. Das and S. Parasher, "Interoperable Blockchain Solution For Digital Identity Management," *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Maharashtra, India, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/I2CT51068.2021.9418220.
- [34] Z. Song and Y. Yu, "The Digital Identity Management System Model Based on Blockchain," *2022 International Conference on Blockchain Technology and Information Security (ICBCTIS)*, Huaihua City, China, 2022, pp. 131-137, doi: 10.1109/ICBCTIS55569.2022.00040.
- [35] T. K. Saragih, E. Tanuwijaya and G. Wang, "The Use of Blockchain for Digital Identity Management in Healthcare," *2022 10th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)*, Yogyakarta, Indonesia, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/CITSM56380.2022.9935935.
- [36] S. Sharma and D. Kumar, "IT-Enabled Inclusive Development: Blockchain Adoption for Transparent Tribal Resource Governance," *2025 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI)*, Gwalior, India, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/IATMSI64286.2025.10985174.
- [37] H. Zhu, L. Feng, J. Luo, Y. Sun, B. Yu and S. Yao, "BCvoteMDE: A Blockchain-based E-Voting Scheme for Multi-District Elections," *2022 IEEE 25th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, Hangzhou, China, 2022, pp. 950-955, doi: 10.1109/CSCWD54268.2022.9776193.
- [38] S. Swar, S. Shinde, A. B. S. K. Reddy, P. Nimkar and T. Lotlikar, "Cryptcast: E-Voting System Utilizing Blockchain," *2023 6th International Conference on Advances in Science and Technology (ICAST)*, Mumbai, India, 2023, pp. 267-270, doi: 10.1109/ICAST59062.2023.10455047.

- [39] S. Tandon, N. Singh, S. Porwal, Satiram and A. K. Maurya, "E-Matdaan: A Blockchain based Decentralized E-Voting System," *2022 IEEE Students Conference on Engineering and Systems (SCES)*, Prayagraj, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/SCES55490.2022.9887759.
- [40] A. K. Pandey, A. Tripathi and A. K. Yadav, "Establishing Trust in Online Voting: Blockchain Solutions for Secure Elections with Immutability and Efficiency," *2024 International Conference on IoT, Communication and Automation Technology (ICICAT)*, Gorakhpur, India, 2024, pp. 893-897, doi: 10.1109/ICICAT62666.2024.10923486.
- [41] S. Vidwans, A. Deshpande, P. Thakur, A. Verma and S. Palwe, "Permissioned Blockchain Voting System using Hyperledger Fabric," *2022 International Conference on IoT and Blockchain Technology (ICIBT)*, Ranchi, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICIBT52874.2022.9807702.
- [42] The Guardian, "NSW election result could be challenged over iVote security flaw," *The Guardian*, Mar. 23, 2015. [Online]. Available: <https://www.theguardian.com/australia-news/2015/mar/23/nsw-election-result-could-be-challenged-over-ivote-security-flaw>
- [43] R. T. Prabu, S. Diwakaran, R. Hemalatha, V. Senthilkumar, M. M and B. Thiyaneswaran, "A Novel Design of Secured BlockChain Assisted Land Registration Mechanism by using Enhanced Verification Principles," *2023 International Conference on Research Methodologies in Knowledge Management, Artificial Intelligence and Telecommunication Engineering (RMKMATE)*, Chennai, India, 2023, pp. 1-9, doi: 10.1109/RMKMATE59243.2023.10369546.
- [44] O. Friha, M. A. Ferrag, L. Shu and M. Nafa, "A Robust Security Framework based on Blockchain and SDN for Fog Computing enabled Agricultural Internet of Things," *2020 International Conference on Internet of Things and Intelligent Applications (ITIA)*, Zhenjiang, China, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ITIA50152.2020.9312286.
- [45] M. Nandi, R. K. Bhattacharjee, A. Jha and F. A. Barbhuiya, "A secured land registration framework on Blockchain," *2020 Third ISEA Conference on Security and Privacy (ISEA-ISAP)*, Guwahati, India, 2020, pp. 130-138, doi: 10.1109/ISEA-ISAP49340.2020.235011.
- [46] J. Wu, W. -Y. Chiu, W. Meng and B. Lampe, "BlockPAT: A Blockchain-Enabled Second-Hand Physical Asset Tokenization Management System," *2023 IEEE 43rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, Hong Kong, Hong Kong, 2023, pp. 1041-1042, doi: 10.1109/ICDCS57875.2023.00135.
- [47] H. P. A, M. Latha, A. M. S and R. Chinnaiyan, "BlockchainAs a Service (BaaS) Framework for Government Funded Projects e-Tendering Process Administration and Quality Assurance using Smart Contracts," *2021 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, Coimbatore, India, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICCCI50826.2021.9402348.
- [48] A. Mohan and G. Jayalakshmi, "Blockchain-Enabled Transparency and Accountability in Public Sector Governance," *2025 International Conference on Intelligent and Cloud Computing (ICoICC)*, Bhubaneswar, India, 2025, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICoICC64033.2025.11052060.
- [49] D. Čeke, N. Buzadija and S. Kunosić, "Enhancing transparency and fairness in public procurement process with the support of blockchain technology: a smart contract based

Κεφάλαιο ΙΧ

approach," *2022 21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/INFOTEH53737.2022.9751322.

[50] R. A. Wadekar, A. Srivastava, B. Mishra, V. Tatsavi, S. G. Mohite and S. Jadhav, "Smart Procurement and Contract Management Solution Using Blockchain," *2024 8th International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA)*, Pune, India, 2024, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICCUBEA61740.2024.10775137.

[51] F. Fatz, P. Hake and P. Fettke, "Towards Tax Compliance by Design: A Decentralized Validation of Tax Processes Using Blockchain Technology," *2019 IEEE 21st Conference on Business Informatics (CBI)*, Moscow, Russia, 2019, pp. 559-568, doi: 10.1109/CBI.2019.00071.

[52] S. Agnal, V. R. C K, D. K. S and A. U. G, "Blockchain Based Electronic Medical Health Records Framework," *2025 International Conference on Computing and Communication Technologies (ICCCT)*, Chennai, India, 2025, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCCT63501.2025.11019651.

[53] A. Martínez, C. Molina and D. Subauste, "Electronic Medical Records Management in Health Organizations using a Technology Architecture based on Blockchain," *2020 IEEE ANDESCON*, Quito, Ecuador, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/ANDESCON50619.2020.9271998.

[54] T.-T. Kuo, H. Z. Rojas, and L. Ohno-Machado, "Comparison of blockchain platforms: a systematic review and healthcare examples," **Journal of the American Medical Informatics Association**, vol. 26, no. 5, pp. 462–478, May 2019, doi: 10.1093/jamia/ocy185.

[55] H. Wang and R. Zhou, "The Application of Blockchain to Electronic Health Record Systems: A Review," *2021 International Conference on Information Technology and Biomedical Engineering (ICITBE)*, Nanchang, China, 2021, pp. 397-401, doi: 10.1109/ICITBE54178.2021.00092.

[56] T. -M. Grønli, A. Lakhan and S. Memon, "A Novel BIBO Automated Ticketing System Based on Blockchain Mobile Sensors for Public Transport Modes," *2024 IEEE 99th Vehicular Technology Conference (VTC2024-Spring)*, Singapore, Singapore, 2024, pp. 01-05, doi: 10.1109/VTC2024-Spring62846.2024.10683170.

[57] J. D. Preece, C. Morris and J. M. Easton, "Towards STUB 2.0: Using Graph-Based World States in Hyperledger Besu to Facilitate Distributed Transport Ticketing," *2022 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, Osaka, Japan, 2022, pp. 3838-3844, doi: 10.1109/BigData55660.2022.10020309.

[58] T. T. Harmanda *et al.*, "Systematic Literature Review of the Use of Blockchain as a Secure Technology in E-Ticketing Systems," *2024 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS)*, Palembang, Indonesia, 2024, pp. 308-313, doi: 10.1109/ICECOS63900.2024.10791105.

[59] L. Desmomid and M. Salama, "Integrating Blockchain & Emerging Technologies for Sustainability Assurance in the Built Environment," *2023 IEEE International Conference on Artificial Intelligence, Blockchain, and Internet of Things (AIBThings)*, Mount Pleasant, MI, USA, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/AIBThings58340.2023.10292472.

- [60] A. Alofi, M. A. Bokhari, R. Bahsoon and R. Hendley, "Optimizing the Energy Consumption of Blockchain-Based Systems Using Evolutionary Algorithms: A New Problem Formulation," in *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, vol. 7, no. 4, pp. 910-922, 1 Oct.-Dec. 2022, doi: 10.1109/TSUSC.2022.3160491.
- [61] L. Xiao, D. Han, S. Zhou, N. Xu, L. Chen and S. Xie, "A Blockchain-empowered Federated Learning Framework Supporting GDPR-compliance," *2023 IEEE 10th International Conference on Cyber Security and Cloud Computing (CSCloud)/2023 IEEE 9th International Conference on Edge Computing and Scalable Cloud (EdgeCom)*, Xiangtan, Hunan, China, 2023, pp. 399-404, doi: 10.1109/CSCloud-EdgeCom58631.2023.00074.
- [62] E. Khazaei and A. Arabsorkhi, "Comparative Studies: Blockchain Technology Applications in GDPR - Representing an Applicability Model," *2024 10th International Conference on Web Research (ICWR)*, Tehran, Iran, Islamic Republic of, 2024, pp. 187-194, doi: 10.1109/ICWR61162.2024.10533322.
- [63] A. B. Haque, A. K. M. N. Islam, S. Hyrinsalmi, B. Naqvi and K. Smolander, "GDPR Compliant Blockchains—A Systematic Literature Review," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 50593-50606, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3069877
- [64] J. Zhang, C. Zha, Q. Zhang and S. Ma, "A Denial-of-Service Attack Based on Selfish Mining and Sybil Attack in Blockchain Systems," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 170309-170320, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3499350.
- [65] E. Lubes and J. M. Pelletier, "A Tree-Mapped Taxonomy of Blockchain Attacks," *2023 7th Cyber Security in Networking Conference (CSNet)*, Montreal, QC, Canada, 2023, pp. 233-237, doi: 10.1109/CSNet59123.2023.10339731.
- [66] G. M, D. J Y, R. K C and S. SK, "Efficient Determent of Sybil Attacks in Blockchain," *2025 International Conference on Multi-Agent Systems for Collaborative Intelligence (ICMSCI)*, Erode, India, 2025, pp. 268-272, doi: 10.1109/ICMSCI62561.2025.10894178.
- [67] Z. Wang, Y. Wang, C. Yuan, N. Ruan, J. Li and J. Lou, "Taking Attacks to the Next Level: A Framework for Front-Running Attacks on Blockchain Systems," *2025 IEEE Global Blockchain Conference (GBC)*, Shanghai, China, 2025, pp. 1-7, doi: 10.1109/GBC60041.2025.11134471.
- [68] T. A. Alghamdi, R. Khalid and N. Javaid, "A Survey of Blockchain Based Systems: Scalability Issues and Solutions, Applications and Future Challenges," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 79626-79651, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3408868
- [69] S. Shirodkar, K. Kulkarni, R. Khanjode, S. Kohle, P. Deshmukh and P. Patil, "Layer 2 Solutions to Improve the Scalability of Blockchain," *2022 5th International Conference on Advances in Science and Technology (ICAST)*, Mumbai, India, 2022, pp. 54-57, doi: 10.1109/ICAST55766.2022.10039486
- [70] T. Nakai, A. Sakurai, S. Hironaka and K. Shudo, "The Blockchain Trilemma Described by a Formula," *2023 IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain)*, Danzhou, China, 2023, pp. 41-46, doi: 10.1109/Blockchain60715.2023.00016.

Κεφάλαιο ΙΧ

- [71] M. Chaudhary and S. Bhunia, "Understanding Blockchain Trilemma, Causes and Solutions," *2024 IEEE International Conferences on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing & Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical & Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData) and IEEE Congress on Cybermatics*, Copenhagen, Denmark, 2024, pp. 609-616, doi: 10.1109/iThings-GreenCom-CPSCom-SmartData-Cybermatics62450.2024.00111.
- [72] P. Shen *et al.*, "A Survey on Safety Regulation Technology of Blockchain Application and Blockchain Ecology," *2022 IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain)*, Espoo, Finland, 2022, pp. 494-499, doi: 10.1109/Blockchain55522.2022.00076.
- [73] C. C. Esposito, G. Attademo and F. Miano, "Blockchain and AI Ethics: Implications for Defence and Security," *2024 IEEE International Workshop on Technologies for Defense and Security (TechDefense)*, Naples, Italy, 2024, pp. 295-300, doi: 10.1109/TechDefense63521.2024.10863108.
- [74] M. Al Suwaidi, M. Humaid Almarri, O. A. Rahmeh and K. Almiani, "Blockchain-based Framework for Construction Regulations Monitoring," *2024 6th International Conference on Blockchain Computing and Applications (BCCA)*, Dubai, United Arab Emirates, 2024, pp. 538-541, doi: 10.1109/BCCA62388.2024.10844399.
- [75] B. Singh, M. A. Basit Ur Rahim, S. Hussain, M. A. Rizwan and J. K. Bali, "Unravelling Ethical Dimensions in Blockchain Technology: A Comprehensive Analysis," *2024 4th Interdisciplinary Conference on Electrics and Computer (INTCEC)*, Chicago, IL, USA, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/INTCEC61833.2024.10603151.
- [76] B. Bhushan, P. Sinha, A. Khamparia, S. Sagayam, A. Sharma, and S. Ahad, "Blockchain for smart cities: A review of architectures and applications," *Sustainable Cities and Society*, vol. 61, p. 102360, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102360.
- [77] A. Rejeb, K. Rejeb, S. Keogh, and J. G. Treiblmaier, "Blockchain technology in the smart city: A bibliometric review," *Sustainability*, vol. 13, no. 13, p. 7266, 2021, doi: 10.3390/su13137266.
- [78] F. Z. Chentouf, M. Daidj, B. Bouikhalene, and A. Eddaoui, "Blockchain for sustainable smart cities: Motivations and implementation," **Digital**, vol. 5, no. 1, p. 9, 2025, doi: 10.3390/digital5010009.
- [79] M. Casino, T. K. Dasaklis and C. Patsakis, "A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues," *Telematics and Informatics*, vol. 36, pp. 55-81, 2019.
- [80] M. Allessie, M. Sobolewski and L. Vaccari, "Blockchain for Digital Government: An Assessment of Pioneering Use Cases in Europe," European Commission, Joint Research Centre (JRC), 2019.
- [81] Michanikos.gr, "Θεσσαλονίκη: Κλιματικά ουδέτερη έξυπνη πόλη μέχρι το 2030," Michanikos.gr, [Online]. Available: <https://www.michanikos.gr/index/articles/περιβάλλον/θεσσαλονίκη-κλιματικά-ουδέτερη-έξυπνη-πόλη-μέχρι-το-2030-r13405/>

[82] OpenGov Thessaloniki, “Smart City Overview,” OpenGov Thessaloniki, n.d. [Online]. Available:<https://opengov.thessaloniki.gr/smart-city/smart-overview>