



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Αξιολόγηση των Εμποδίων της Εφαρμογής Τεχνολογίας Blockchain στον Ενεργειακό Τομέα με τη Χρήση της Πολυ- κριτήριας Μεθόδου Analytical Hierarchy Process

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννα Ε. Ανδρεουλάκη

Επιβλέπων : Ευάγγελος Μαρινάκης
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

Αξιολόγηση των Εμποδίων της Εφαρμογής Τεχνολο- γίας Blockchain στον Ενεργειακό Τομέα με τη Χρήση της Πολυκριτήριας Μεθόδου Analytical Hierarchy Pro- cess

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννα Ε. Ανδρεουλάκη

Επιβλέπων : Ευάγγελος Μαρινάκης
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 12^η Ιουλίου 2023.

.....

Ευάγγελος Μαρινάκης

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Ιωάννης Ψαρράς

Καθηγητής ΕΜΠ

.....

Χρυσόστομος Δούκας

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2023

.....

Ιωάννα Ε. Ανδρεουλάκη

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

Copyright © Ιωάννα Ε. Ανδρεουλάκη, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



Περίληψη

Λόγω της κλιματικής κρίσης και της προσπάθειας περιορισμού των συνεπειών της, ο ενεργειακός μετασχηματισμός έχει πλέον αναχθεί σε προτεραιότητα. Για να πραγματοποιηθεί ο μετασχηματισμός αυτός, κρίνεται απαραίτητος ο εκσυγχρονισμός των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η δημιουργία νέων επιχειρηματικών μοντέλων, μέσω των οποίων διαφορετικοί εμπλεκόμενοι φορείς συνεργάζονται για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα. Ο περιορισμός των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, η αύξηση της διασπαρμένης παραγωγής, η μετάβαση σε πιο ευέλικτα συστήματα και δίκτυα, καθώς και η ένταξη των prosumers στην αγορά ενέργειας, απαιτούν προσεκτικό σχεδιασμό έτσι ώστε να πραγματοποιηθούν με βέλτιστο, αποδοτικό και βιώσιμο τρόπο. Νέες τεχνολογίες, όπως η τεχνολογία blockchain, δύνανται να υποστηρίξουν τον ενεργειακό μετασχηματισμό.

Στόχος της παρούσας εργασίας αποτελεί η αξιολόγηση της ενσωμάτωσης της τεχνολογίας blockchain στον ενεργειακό τομέα. Ειδικότερα, μέσω βιβλιογραφικής ανασκόπησης προσδιορίζονται οι ενεργειακές εφαρμογές οι οποίες μπορούν να υποστηριχθούν από τη συγκεκριμένη τεχνολογία: τα έξυπνα δίκτυα και τα μικροδίκτυα, η διαχείριση, η εμπορία και η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, τα ηλεκτρικά οχήματα, η εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών, οι έξυπνοι μετρητές και οι ανανεώσιμες πηγές. Στη συνέχεια αξιολογούνται οι πολιτικοί, οικονομικοί, κοινωνικοί, τεχνολογικοί, νομικοί και περιβαλλοντολογικοί παράγοντες που αφορούν την ένταξη του blockchain στον τομέα της ενέργειας, μέσω της ανάλυσης PESTLE (Political, Economic, Social, Technological, Legal, Environmental), ενώ προσδιορίζονται και τα σχετικά πλεονεκτήματα, αδυναμίες, ευκαιρίες και κίνδυνοι μέσω της ανάλυσης SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats). Χάρη στις προαναφερθείσες αναλύσεις οδηγούμαστε στην ταυτοποίηση των κυρίαρχων εμποδίων εφαρμογής του blockchain σε ενεργειακές εφαρμογές. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η κατάταξή τους, μέσω της πολυκριτήριας μεθόδου Analytical Hierarchy Process (AHP).

Τα εξαγόμενα αποτελέσματα και συμπεράσματα αναδεικνύουν τόσο τις δυνατότητες, όσο και τις προκλήσεις που σχετίζονται με τις εφαρμογές του blockchain στην ενέργεια. Συνεπώς, τα συμπεράσματα μπορούν να βοηθήσουν και να καθοδηγήσουν φορείς που πρόκειται να ασχοληθούν με το συγκεκριμένο θέμα, προσφέροντας προοπτικές για περαιτέρω εμβάθυνση σε πρακτικό ή ερευνητικό επίπεδο.

Λέξεις Κλειδιά: Τεχνολογία Κατανεμημένου Καθολικού, Ενέργεια, Ανάλυση PESTLE, Ανάλυση SWOT, Πολυκριτήρια Ανάλυση.

Abstract

To alleviate the consequences of the climate crisis, the energy transition has become a priority. Not only the modernization of energy systems, but also the creation of new business models involving different stakeholders, are considered necessary to achieve this transition in the best way possible. Reduction of carbon emissions, increase of distributed energy resources, transition to flexible systems, grids and distribution networks, as well as integration of prosumers in energy markets, must be designed carefully in order to be implemented optimally, efficiently and in a viable manner. Novel technologies, such as blockchain technology, can support the energy transition.

This thesis aims to evaluate the adoption of blockchain technology in the energy sector. More specifically, the main energy applications, which can be supported by blockchain, are revealed through literature review. These applications include smart grids and microgrids, energy management, trading and storage, electric vehicles, emission trading, smart meters and renewable sources. Furthermore, the Political, Economic, Social, Technological, Legal and Environmental factors of blockchain integration in the energy sector are evaluated through a PESTLE analysis. Related Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats are specified through SWOT analysis. Based on those analyses, the main barriers of blockchain application in the energy field are identified. The Analytical Hierarchy Process (AHP) multicriteria method is utilized to rank those barriers.

The ensued results and conclusions reveal not only the potential, but also the challenges related to energy blockchain applications. Consequently, the conclusions can assist and guide stakeholders who aim to implement blockchain technology in the energy field, while simultaneously offering prospects for further research on this topic.

Keywords: Distributed Ledger Technology, Energy, PESTLE Analysis, SWOT Analysis, Multicriteria Decision Aid.

Πρόλογος

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των ερευνητικών δραστηριοτήτων του Εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2022-2023 και την περίοδο Δεκεμβρίου 2022-Ιουνίου 2023. Το Εργαστήριο υπάγεται στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Η εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Βαγγέλη Μαρινάκη, Επίκουρου Καθηγητή ΕΜΠ, στην Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, τον οποίο ευχαριστώ ιδιαίτερα για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, καθώς ανταποκρίνεται πλήρως στα ενδιαφέροντά μου.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας, η οποία αποσκοπεί στην αναγνώριση και την αξιολόγηση των προοπτικών και των προκλήσεων, αλλά και την ταυτοποίηση των εμποδίων της ενσωμάτωσης της τεχνολογίας blockchain σε ενεργειακές εφαρμογές. Σε συνέχεια του προσδιορισμού των εμποδίων πραγματοποιείται η αξιολόγηση και η κατάταξή τους μέσω της πολυκριτήριας ανάλυσης. Η τελική κατάταξη των εμποδίων θα μπορούσε να καθοδηγήσει φορείς, οι οποίοι πρόκειται να ασχοληθούν με τις εφαρμογές του blockchain στην ενέργεια, αναδεικνύοντας τα πιο σημαντικά προβλήματα που ενδέχεται να προκύψουν κατά τον σχεδιασμό ενεργειακών συστημάτων υποστηριζόμενων από τεχνολογία κατανεμημένου καθολικού.

Επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά τους ερευνητές του εργαστηρίου Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης Κατερίνα Παπαποστόλου και Σωκράτη Διβόλη, για την ουσιαστική και καθοριστικής σημασίας συμβολή τους στην υλοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας, την επίλυση αποριών και τη βοήθεια που μου προσέφεραν μέσω των εύστοχων παρατηρήσεων και των προτάσεών τους. Η καθοδήγησή τους συνέβαλε τα μέγιστα στην επιτυχημένη ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας.

Τέλος, επιθυμώ να ευχαριστήσω την οικογένεια και το στενό φιλικό κύκλο μου για την συνεχή συμπαράσταση και στήριξη που μου προσέφεραν κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ιωάννα Ανδρεουλάκη
Ιούνιος, 2023

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή.....	16
1.1	Αντικείμενο-Σκοπός.....	16
1.2	Φάσεις Υλοποίησης.....	17
1.3	Οργάνωση Εργασίας	19
2	Blockchain κι Εφαρμογές	23
2.1	Εισαγωγή στο Blockchain.....	23
2.1.1	Χαρακτηριστικά και Βασικά Είδη Blockchain	23
2.1.2	Δομή των Blocks.....	24
2.1.3	Hashing Functions	25
2.1.4	P2P (Peer-to-Peer) Δίκτυο	26
2.1.5	Αλγόριθμοι Συναίνεσης	27
2.2	Εφαρμογές του Blockchain	28
2.2.1	Κρυπτονομίσματα και Οικονομία	29
2.2.2	Εφαρμογές του Blockchain σε Τομείς εκτός της Οικονομίας	30
3	Blockchain στον Τομέα της Ενέργειας.....	39
3.1	Blockchain και Ενέργεια: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση και Πεδία Εφαρμογών.....	40
3.1.1	Έξυπνα Δίκτυα	43
3.1.2	Διαχείριση Ενέργειας	45
3.1.3	Εμπορία Ενέργειας	47
3.1.4	Αποθήκευση Ενέργειας	49
3.1.5	Ηλεκτρικά Οχήματα	50
3.1.6	Εμπορία Δικαιωμάτων Εκπομπών	52
3.1.7	Έξυπνοι Μετρητές	52
3.1.8	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	53
3.2	Πρακτικές Εφαρμογές του Blockchain στην Ενέργεια	54
4	Ανάλυση Αγοράς και Ταυτοποίηση Εμποδίων	62
4.1	Ανάλυση PESTLE	63
4.1.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο Ανάλυσης PESTLE.....	63
4.1.2	Ανάλυση PESTLE του Blockchain στην Ενέργεια	64
4.2	Ανάλυση SWOT	74
4.2.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο Ανάλυσης SWOT	74
4.2.2	Ανάλυση SWOT του Blockchain στην Ενέργεια	75
4.3	Ταυτοποίηση των Εμποδίων.....	78
5	Πολυκριτήρια Ανάλυση	83
5.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο Πολυκριτήριας Ανάλυσης	84

5.2	Πολυκριτηριακές Μέθοδοι στην Ενέργεια	84
5.2.1	Παραδείγματα χρήσης των Πολυκριτηριακών Μεθόδων στον Ενεργειακό Σχεδιασμό	85
5.2.2	Οι πιο Συχνά Χρησιμοποιούμενες Μέθοδοι και τα Συνήθη Κριτήρια	86
5.3	Η Μέθοδος Analytical Hierarchy Process	88
5.3.1	Θεωρητικό Υπόβαθρο της Μεθόδου AHP	88
5.3.2	Εφαρμογή της Μεθόδου AHP.....	89
5.3.3	Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	103
6	Συμπεράσματα και Προοπτικές.....	109
6.1	Συμπεράσματα	109
6.2	Προοπτικές	111
7	Βιβλιογραφία	115
8	Παράρτημα.....	140
8.1	Κατάλογος Συντομογραφιών.....	140
8.2	Έργα με Εφαρμογές του Blockchain στην Ενέργεια.....	142
8.3	Ερωτηματολόγιο για την Εφαρμογή της AHP	148
8.4	Βιβλιογραφία Παραρτήματος.....	158

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1: Κατηγορίες blockchain	24
Πίνακας 2: 5 ιδιότητες των hashing functions	25
Πίνακας 3: Σύγκριση διαφορετικών αλγορίθμων	27
Πίνακας 4: Λίστα λέξεων - κλειδίων για την αναζήτηση επιστημονικών άρθρων	40
Πίνακας 5: Κατηγοριοποίηση με βάση το κύριο πεδίο των επιστημονικών άρθρων	41
Πίνακας 6: Αριθμός άρθρων ανά κατηγορία	41
Πίνακας 7: Τεχνικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του blockchain	70
Πίνακας 8: Συνήθη κριτήρια αξιολόγησης	86
Πίνακας 9: Παραδείγματα χρήστη της μεθόδου ΑΗΡ στον τομέα της ενέργειας	88
Πίνακας 10: Η θεμελιώδης κλίμακα της ΑΗΡ	90
Πίνακας 11: Κατηγορίες εμποδίων, αποφασίζων 1	92
Πίνακας 12: Κατηγορίες εμποδίων, αποφασίζων 2	92
Πίνακας 13: Κατηγορίες εμποδίων, αποφασίζων 3	92
Πίνακας 14: Κατηγορίες εμποδίων, αποφασίζων 4	93
Πίνακας 15: Κατηγορίες εμποδίων, αποφασίζων 5	93
Πίνακας 16: Κατηγορίες εμποδίων, συνολικός πίνακας	93
Πίνακας 17: Τεχνολογικά εμπόδια, συμβολισμός	94
Πίνακας 18: Τεχνολογικά εμπόδια, αποφασίζων 1	94
Πίνακας 19: Τεχνολογικά εμπόδια, αποφασίζων 2	94
Πίνακας 20: Τεχνολογικά εμπόδια, αποφασίζων 3	95
Πίνακας 21: Τεχνολογικά εμπόδια, αποφασίζων 4	95
Πίνακας 22: Τεχνολογικά εμπόδια, αποφασίζων 5	96
Πίνακας 23: Τεχνολογικά εμπόδια, συνολικός πίνακας	96
Πίνακας 24: Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια, αποφασίζων 1	97
Πίνακας 25: Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια, αποφασίζων 2	97
Πίνακας 26: Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια, αποφασίζων 3	97
Πίνακας 27: Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια, αποφασίζων 4	98
Πίνακας 28: Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια, αποφασίζων 5	98
Πίνακας 29: Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια, συνολικός πίνακας	98
Πίνακας 30: Οικονομικά εμπόδια, αποφασίζων 1	99
Πίνακας 31: Οικονομικά εμπόδια, αποφασίζων 2	99
Πίνακας 32: Οικονομικά εμπόδια, αποφασίζων 3	99
Πίνακας 33: Οικονομικά εμπόδια, αποφασίζων 4	100
Πίνακας 34: Οικονομικά εμπόδια, αποφασίζων 5	100
Πίνακας 35: Οικονομικά εμπόδια, συνολικός πίνακας	100
Πίνακας 36: Νομικά εμπόδια, αποφασίζων 1	101
Πίνακας 37: Νομικά εμπόδια, αποφασίζων 2	101
Πίνακας 38: Νομικά εμπόδια, αποφασίζων 3	101
Πίνακας 39: Νομικά εμπόδια, αποφασίζων 4	102
Πίνακας 40: Νομικά εμπόδια, αποφασίζων 5	102
Πίνακας 41: Νομικά εμπόδια, συνολικός πίνακας	103
Πίνακας 42: Τελική κατάταξη των εμποδίων	103

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Μεθοδολογία της εργασίας.....	18
Εικόνα 2: Βήματα εισαγωγής στο blockchain.....	23
Εικόνα 3: Δομή του block (Πηγή Zheng et al. 2017 [5]).....	24
Εικόνα 4: Παράδειγμα αρχιτεκτονικής blockchain (Πηγή Zheng et al. 2017 [5]).....	25
Εικόνα 5: Merkle Tree (Πηγή Nakamoto 2008 [2]).....	26
Εικόνα 6: Καταγραφές συναλλαγών με τρίτο κεντρικό φορέα (αριστερά), διαμοιρασμός των καταγραφών σε όλο το P2P δίκτυο (δεξιά) (Πηγή METI, Japan, 2016 [10]).....	26
Εικόνα 7: Εκπομπές CO2 και κατανάλωση ενέργειας ανά συναλλαγή: Bitcoin, Ethereum, Visa (Πηγή Kohli et al 2022 [12]).....	27
Εικόνα 8: Εφαρμογές blockchain.....	28
Εικόνα 9: Δίκτυο συνύπαρξης από λέξεις κλειδιά (Πηγή: Boakye et al., 2022 [14]).....	29
Εικόνα 10: Βήματα προσδιορισμού των εφαρμογών του blockchain στην ενέργεια.....	39
Εικόνα 11: Κύρια πεδία των επιστημονικών άρθρων σχετικών με την εφαρμογή του blockchain στην ενέργεια.....	42
Εικόνα 12: Αριθμός άρθρων ανά κατηγορία.....	42
Εικόνα 13: Smart grid βασισμένο σε blockchain (Πηγή: Guo et al. 2022 [279]).....	43
Εικόνα 14: Εφαρμογές blockchain σε δίκτυα και μικροδίκτυα.....	44
Εικόνα 15: Εφαρμογές blockchain στη διαχείριση ενέργειας.....	46
Εικόνα 16: “Παραδοσιακές” διαδικασίες εμπορίας ενέργειας (Πηγή: PwC [283]).....	47
Εικόνα 17: Εμπορία ενέργειας βασισμένη σε blockchain (Πηγή: PwC [283]).....	48
Εικόνα 18: Εφαρμογές blockchain στην εμπορία ενέργειας.....	49
Εικόνα 19: Εφαρμογές blockchain στα ηλεκτρικά οχήματα.....	50
Εικόνα 20: Σχεδιάγραμμα συστήματος εμπορίας ενέργειας για ηλεκτρικά οχήματα μέσω blockchain (Πηγή Samuel et al. 2022 [285]).....	51
Εικόνα 21: Εφαρμογές blockchain στις ΑΠΕ.....	53
Εικόνα 22: Έργα ενσωμάτωσης του blockchain στην ενέργεια.....	55
Εικόνα 23: Κατηγοριοποίηση πρακτικών εφαρμογών blockchain στην ενέργεια.....	56
Εικόνα 24: Εφαρμογές blockchain στη διαχείριση ενέργειας.....	57
Εικόνα 25: Εφαρμογές blockchain στη διαχείριση ανθρακικού αποτυπώματος.....	58
Εικόνα 26: Εφαρμογές blockchain στις επενδύσεις και τις πληρωμές.....	58
Εικόνα 27: Βήματα προσδιορισμού των εφαρμογών του blockchain στην ενέργεια.....	62
Εικόνα 28: Ανάλυση PESTLE.....	73
Εικόνα 29: Ανάλυση SWOT.....	78
Εικόνα 30: Εμπόδια ένταξης του blockchain στην ενέργεια.....	79
Εικόνα 31: Βήματα επιλογής πολυκριτήριας μεθόδου.....	83
Εικόνα 32: Κατανομή των μεθόδων σε 4 κατηγορίες προβλημάτων ενεργειακού σχεδιασμού (Πηγή Diakoulaki et al. 2005 [339]).....	87
Εικόνα 33: Πολυκριτηριακές μέθοδοι στον τομέα της ενέργειας.....	87



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο-Σκοπός

Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής έχει αναθίσει σε σοβαρό πρόβλημα, δημιουργώντας μια περιβαλλοντολογική κρίση παγκόσμιας κλίμακας. Οι πολιτικοί φορείς σε όλον τον κόσμο αναγνωρίζουν όλο και περισσότερο τις συνέπειες του φαινομένου και την αναγκαιότητα έγκαιρης αντιμετώπισής του. Η ευαισθητοποίηση αυξάνεται συνεχώς και σε κοινωνικό επίπεδο, αφού οι άνθρωποι ενημερώνονται για τα αρνητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από την κλιματική κρίση, η οποία αποτελεί επακόλουθο του φαινομένου του θερμοκηπίου. Το συγκεκριμένο φαινόμενο αναφέρεται στη μεγάλη συγκέντρωση ορισμένων αερίων στην ατμόσφαιρα, όπως το διοξείδιο του άνθρακα [1].

Ο ενεργειακός τομέας συμβάλει σημαντικά στην εκπομπή αερίων, για αυτό τον λόγο έχουν προταθεί διάφορες λύσεις, ώστε να εξασφαλιστεί η βιωσιμότητα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και η αειφόρος ανάπτυξή τους. Για παράδειγμα, ενθαρρύνεται η αποτελεσματική διαχείριση ενέργειας, ο κατάλληλος συγχρονισμός της παραγωγής και της κατανάλωσης, η μετάβαση σε ευέλικτα συστήματα και έξυπνα δίκτυα με αυξημένη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών συνδυασμένη με αποθήκευση ενέργειας, η παρακολούθηση της κατανάλωσης μέσω έξυπνων μετρητών, η χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων, η εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών, καθώς και η εξοικονόμηση ενέργειας σε γενικότερο πλαίσιο. Οι προαναφερθείσες εφαρμογές δύνανται να βελτιστοποιηθούν και να γίνουν αποδοτικότερες μέσω των νέων τεχνολογιών, όπως είναι η τεχνητή νοημοσύνη, η μηχανική μάθηση, η ανάλυση δεδομένων και η τεχνολογία κατακευματισμένου καθολικού ή αλλιώς blockchain. Συνεπώς, όπως σε πληθώρα διαφορετικών τομέων, έτσι και στον ενεργειακό τομέα παρατηρείται ότι πολλά από τα υπάρχοντα συστήματα τείνουν να ψηφιοποιηθούν.

Συνεπώς, στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύονται οι δυνατότητες ένταξης του blockchain σε ενεργειακές εφαρμογές. Πρόκειται για μία αρκετά νέα τεχνολογία που προέρχεται από τον οικονομικό τομέα και συγκεκριμένα από τα κρυπτονομίσματα. Εφαρμόστηκε πρώτη φορά το 2008 στα πλαίσια της λειτουργίας των bitcoin [2], όμως έχει ήδη εξεταστεί η εξάπλωσή του σε πολλούς τομείς. Είναι φανερό ότι πρωταρχική λειτουργία του blockchain αποτελεί η πραγματοποίηση συναλλαγών, όμως σε πληθώρα εφαρμογών έχει προταθεί και η χρήση του ως βάση δεδομένων, ενώ πολύ ενδιαφέρουσα εφαρμογή του blockchain αποτελούν και τα έξυπνα συμβόλαια (smart contracts). Συνεπώς, πρόκειται για μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία όσον αφορά τον ενεργειακό τομέα, με την πλειοψηφία των υποψήφιων εφαρμογών να αφορούν την εμπορία ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, η αύξηση των prosumers, δηλαδή των χρηστών των ηλεκτρικών δικτύων που είναι ταυτόχρονα παραγωγοί και καταναλωτές, κάνει τις διαδικασίες ενεργειακών συναλλαγών πολύπλοκες. Το blockchain μπορεί να συνεισφέρει στην ομαλή ένταξη των prosumers στις αγορές ενέργειας. Επιπλέον, μπορεί να βοηθήσει στη συλλογή και τον ασφαλή διαμοιρασμό δεδομένων που προκύπτουν από έξυπνους μετρητές, στην επιβράβευση των χρηστών για την εξοικονόμηση που πετυχαίνουν ή για την τοπική παραγωγή ενέργειας, για παράδειγμα από ηλιακά πάνελ, στην αποδοτική διαχείριση ευφυών δικτύων με αυξημένα ποσοστά ανανεώσιμων πηγών, στον προγραμματισμό της φόρτισης μονάδων αποθήκευσης ή ηλεκτρικών οχημάτων, στην επικοινωνία ανάμεσα σε έξυπνα οχήματα, ενώ μοντέλα για την εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών μπορούν να βασιστούν στην εν λόγω τεχνολογία.

Ωστόσο, η ένταξη του blockchain στις προαναφερθείσες εφαρμογές αποτελεί μία περίπλοκη διαδικασία και πληθώρα παραμέτρων είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψιν. Για παράδειγμα, είναι σημαντικό να προσδιοριστεί ο ρόλος των πολιτικών φορέων, η βιωσιμότητα των επενδύσεων και το κόστος του blockchain, η κοινωνική αποδοχή της τεχνολογίας και τα πιθανά κοινωνικά οφέλη που μπορεί να προκύψουν από την εφαρμογή της σε ενεργειακά συστήματα, η ωριμότητα των τεχνολογιών καταναμεμένου καθολικού, τα προνομιούχα χαρακτηριστικά τους αλλά και οι τεχνικοί περιορισμοί, ο βαθμός στον οποίον το νομικό πλαίσιο είναι επαρκές ή όχι, καθώς και η επίδραση των ενεργειακών εφαρμογών του blockchain στο περιβάλλον. Μέσω των προαναφερθέντων παραγόντων είναι δυνατό να εξαχθούν τόσο τα θετικά όσο και τα αρνητικά στοιχεία, οι προοπτικές αλλά και οι δυσκολίες, οι προκλήσεις και τα εμπόδια της εφαρμογής του blockchain στον τομέα της ενέργειας. Για την αξιολόγηση όλων των παραπάνω επιλέγονται οι κατάλληλες μέθοδοι ανάλυσης, οι οποίες παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες. Τελικό στόχο της εργασίας αποτελεί η εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων, αλλά και προοπτικών για περαιτέρω εμβάθυνση στο θέμα της ένταξης της τεχνολογίας blockchain στον ενεργειακό τομέα.

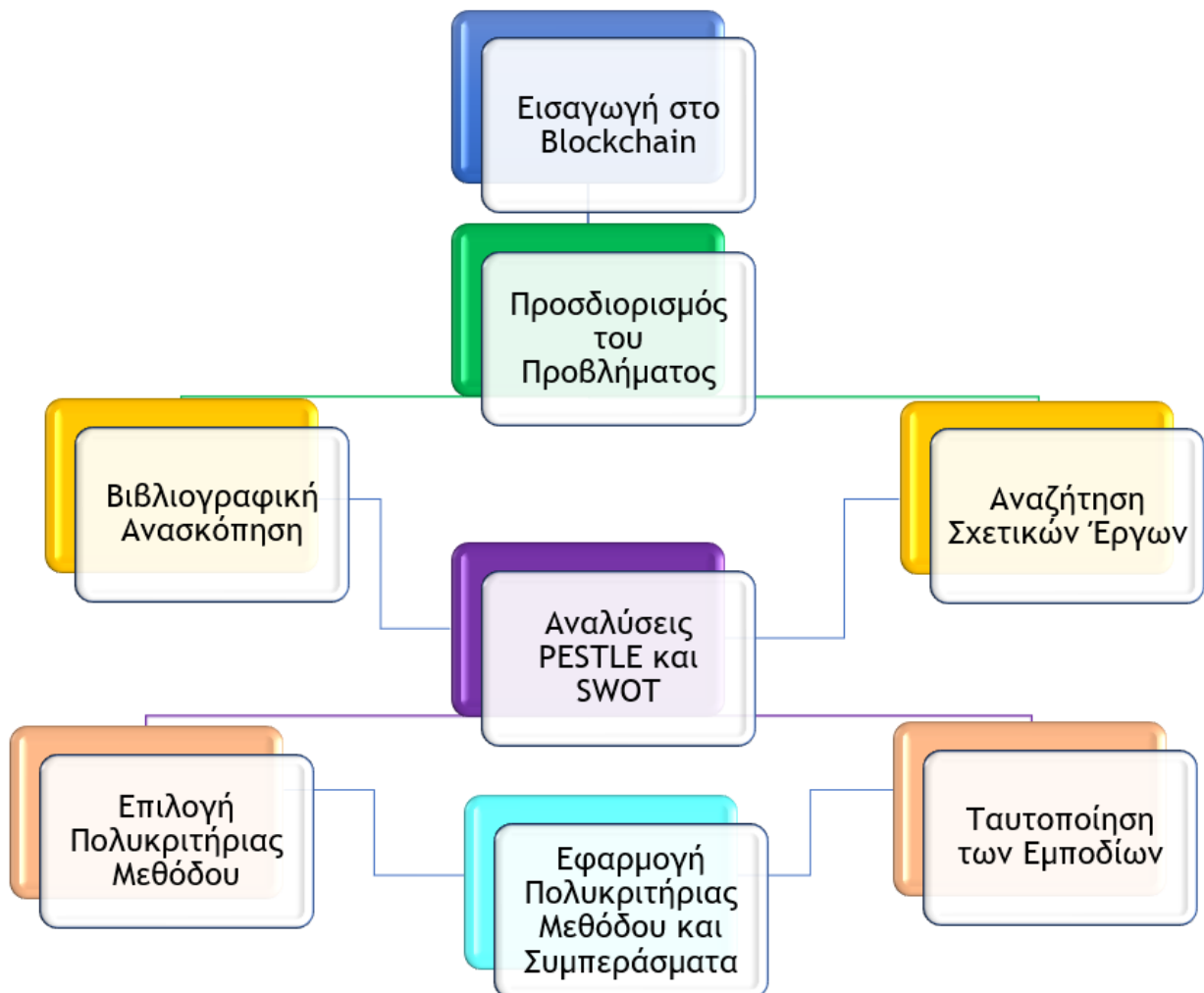
1.2 Φάσεις Υλοποίησης

Η υλοποίηση της παρούσας εργασίας διακρίνεται στις ακόλουθες φάσεις, κάθε μια από τις οποίες περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω:

1. **Επεξήγηση των Βασικών Στοιχείων του Blockchain:** Αρχικά παρουσιάζονται και εξηγούνται οι κύριες έννοιες που είναι απαραίτητες για την κατανόηση της τεχνολογίας, ενώ παρουσιάζονται και οι διάφοροι τομείς στους οποίους μπορεί να εφαρμοστεί το blockchain.
2. **Προσδιορισμός του Προβλήματος:** Επεξηγείται η ενδεχόμενη χρησιμότητα του blockchain σε συγκεκριμένες ενεργειακές εφαρμογές, πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση και προσδιορίζονται τα πιο συχνά πεδία εφαρμογής του blockchain στην ενέργεια, ενώ παρουσιάζονται και σχετικά έργα.
3. **Ανάλυση PESTLE και SWOT:** Οι πολιτικοί, οικονομικοί, κοινωνικοί, τεχνολογικοί, νομικοί και περιβαλλοντολογικοί παράγοντες καθώς και τα πλεονεκτήματα, οι αδυναμίες, οι ευκαιρίες και οι κίνδυνοι που σχετίζονται με το θέμα προσδιορίζονται και οργανώνονται στις παραπάνω αναλύσεις.
4. **Ταυτοποίηση των Εμποδίων:** Οι αδυναμίες και οι κίνδυνοι της ανάλυσης SWOT συνοψίζονται σε μία λίστα εμποδίων και χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες: τεχνολογικά, νομικά, κοινωνικοπολιτικά και οικονομικά εμπόδια.
5. **Επιλογή της Κατάλληλης Πολυκριτήριας Μεθόδου:** Πραγματοποιείται σύντομη ανασκόπηση της χρήσης των πολυκριτηριακών μεθόδων στον τομέα της ενέργειας, ενώ γίνεται αναφορά και σε ορισμένα επιστημονικά άρθρα σχετικά με το blockchain, στα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί μέθοδοι υποστήριξης αποφάσεων. Τελικά, κρίνεται ότι η μέθοδος AHP (Analytical Hierarchy Process) είναι η πλέον κατάλληλη για την κατάταξη των εμποδίων που προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο βήμα.
6. **Εφαρμογή της Πολυκριτήριας Μεθόδου:** Συντάσσονται ερωτηματολόγια, τα οποία δίνονται σε εμπειρογνώμονες - αποφασίζοντες. Από αυτά εξάγονται οι απαραίτητες πληροφορίες και αφού πραγματοποιηθούν οι υπολογισμοί, προκύπτει η τελική κατάταξη των εμποδίων.

7. Αποτελέσματα Πολυκριτήριας Μεθόδου και Συμπεράσματα: Στο συγκεκριμένο στάδιο συγκεντρώνονται, αξιολογούνται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που έδωσε η πολυκριτήρια μέθοδος και δίνονται τα γενικότερα συμπεράσματα σχετικά με την εφαρμογή του blockchain στον ενεργειακό τομέα.

Η μεθοδολογία που περιγράφεται παραπάνω παρουσιάζεται και στην εικόνα 1, ενώ στα αντίστοιχα κεφάλαια δίνονται κι άλλα σχεδιαγράμματα που αποτυπώνουν αναλυτικότερα τη διαδικασία για κάθε ένα από τα βήματα:



Εικόνα 1: Μεθοδολογία της εργασίας

1.3 Οργάνωση Εργασίας

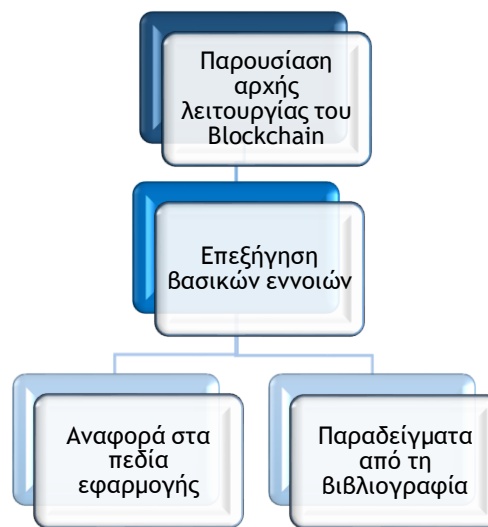
Η εργασία οργανώνεται ως εξής, στο 2^ο κεφάλαιο δίνονται οι πρωταρχικές αρχές λειτουργίας και οι βασικές έννοιες που σχετίζονται με το blockchain, ενώ αναλύονται οι υποψήφιοι τομείς εφαρμογής των τεχνολογιών καταναμεμημένου καθολικού και δίνονται αντίστοιχα παραδείγματα από τη βιβλιογραφία. Στο 3^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση εστιασμένη στις εφαρμογές του blockchain στον τομέα της ενέργειας. Ειδικότερα, εξηγούνται οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εν λόγω τεχνολογία σε συγκεκριμένες ενεργειακές εφαρμογές, μετά από ανασκόπηση σε 200 σχετικά επιστημονικά άρθρα από την πιο πρόσφατη βιβλιογραφία (από το 2017 και μετά). Με βάση αυτό το δείγμα άρθρων οι εφαρμογές του blockchain στην ενέργεια χωρίζονται σε οκτώ κατηγορίες και εξάγονται αντίστοιχα στατιστικά στοιχεία. Στο ίδιο κεφάλαιο παρουσιάζονται περαιτέρω στοιχεία που προκύπτουν από 70 πραγματικά έργα που έχουν εφαρμόσει το blockchain στον ενεργειακό τομέα. Η αναλυτική λίστα των έργων, τα οποία έχουν διεξαχθεί ή ακόμα διεξάγονται κυρίως από πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα, εταιρείες και νεοφυείς επιχειρήσεις, δίνεται στο παράρτημα της εργασίας. Το 4^ο κεφάλαιο αφορά τις αναλύσεις PESTLE και SWOT. Γίνεται σύντομη επεξήγηση των συγκεκριμένων αναλύσεων και των εφαρμογών τους, πραγματοποιείται η ανάλυση PESTLE για την ενσωμάτωση του blockchain στην ενέργεια και τα στοιχεία της PESTLE οργανώνονται εκ νέου σε ανάλυση SWOT. Από τις αδυναμίες και τους κινδύνους της SWOT εξάγεται η λίστα των βασικών εμποδίων της εφαρμογής του blockchain στον τομέα της ενέργειας, τα οποία χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες. Εφόσον στόχο της εργασίας αποτελεί η αξιολόγηση των κριτηρίων χρησιμοποιώντας πολυκριτήρια ανάλυση, στο 5^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται ανασκόπηση των πολυκριτήριων μεθόδων στην ενέργεια και δίνονται μερικά παραδείγματα χρήσης των μεθόδων υποστήριξης αποφάσεων σε επιστημονικά άρθρα που σχετίζονται με το blockchain, αποσκοπώντας στην επιλογή της κατάλληλης πολυκριτήριας μεθόδου για το πρόβλημα που τίγεται στην παρούσα εργασία. Τελικά επιλέγεται η μέθοδος AHP, οπότε περιγράφεται και εφαρμόζεται η συγκεκριμένη μέθοδος, ώστε να προκύψει η κατάταξη των εμποδίων ανά κατηγορία, ενώ κατατάσσουμε και τις ίδιες τις κατηγορίες με βάση την ίδια μέθοδο. Τέλος, στο 6^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα εξαγόμενα συμπεράσματα, καθώς και οι ενδεχόμενες προοπτικές για περαιτέρω έρευνα και μελέτη στο μέλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Blockchain και Εφαρμογές

2 Blockchain κι Εφαρμογές

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένες βασικές έννοιες που σχετίζονται με την τεχνολογία blockchain. Ειδικότερα, αναλύονται οι κύριες αρχές λειτουργίας, αναφέρονται τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά και τα είδη του blockchain και εξηγείται η δομή των blocks. Στη συνέχεια, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση της τεχνολογίας, γίνεται αναφορά στις διαδικασίες hash, εξηγείται η έννοια του P2P δικτύου, ενώ παρουσιάζονται και οι ιδιότητες των αλγορίθμων συναίνεσης που χρησιμοποιούνται σε ένα blockchain. Τέλος, αναφερόμαστε στα πεδία εφαρμογής της τεχνολογίας. Η δομή του κεφαλαίου αποτυπώνεται και στην εικόνα 2:



Εικόνα 2: Βήματα εισαγωγής στο blockchain

2.1 Εισαγωγή στο Blockchain

2.1.1 Χαρακτηριστικά και Βασικά Είδη Blockchain

Το blockchain αποτελεί μία επαναστατική τεχνολογία, η οποία μας δίνει τη δυνατότητα να μετατρέψουμε ριζικά τις πλατφόρμες που υποστηρίζουν και διαχειρίζονται συναλλαγές [3]. Εφαρμόστηκε πρώτα στις χρηματοοικονομικές συναλλαγές το 2009, αφού προτάθηκε το 2008, στο πλαίσιο των κρυπτονομισμάτων και ειδικότερα του bitcoin [2], [4]. Η σημασία της τεχνολογίας αυτής έγκειται στο γεγονός ότι μπορεί να αλλάξει όλη τη νοοτροπία μας σχετικά με την εμπιστοσύνη σε εφαρμογές όπου απαιτούνται αξιόπιστες συναλλαγές, καθώς αυτές μπορούν πλέον να βασίζονται σε μία αποκεντρωμένη και κρυπτογραφικά ασφαλή πλατφόρμα, χωρίς να χρειάζεται η εμπλοκή κάποιου τρίτου κεντρικού φορέα [4]. Εκτός από την αποκέντρωση και την αξιοπιστία, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας αυτής είναι η ανωνυμία που προσφέρει [5].

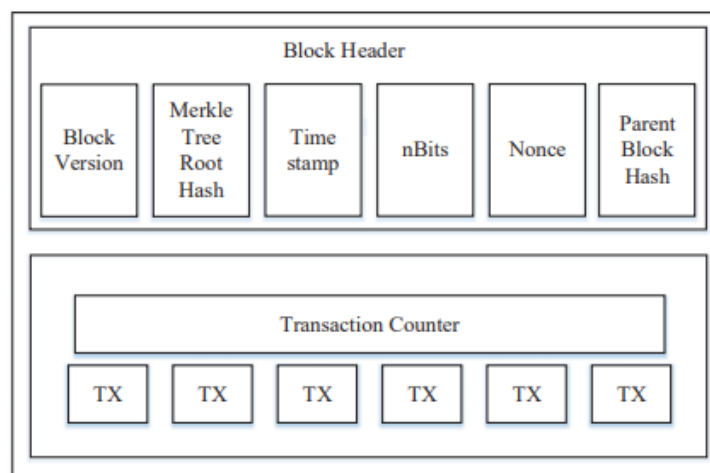
Μπορούμε να θεωρήσουμε το blockchain ως ένα δημόσιο καθολικό (public ledger). Ξεχωρίζουμε τις τρεις βασικές κατηγορίες blockchain στον πίνακα 1 [5]:

Πίνακας 1: Κατηγορίες blockchain

Είδος Blockchain	Επεξήγηση
Δημόσιο (Public)	Όλα τα δεδομένα είναι ορατά στο κοινό και όλοι μπορούν να συμμετέχουν
Ιδιωτικό (Private)	Μόνο οι κόμβοι που ανήκουν σε έναν συγκεκριμένο οργανισμό μπορούν να συμμετέχουν
Κοινοπραξίας (Consortium)	Κάποιοι προεπιλεγμένοι κόμβοι μπορούν να συμμετέχουν

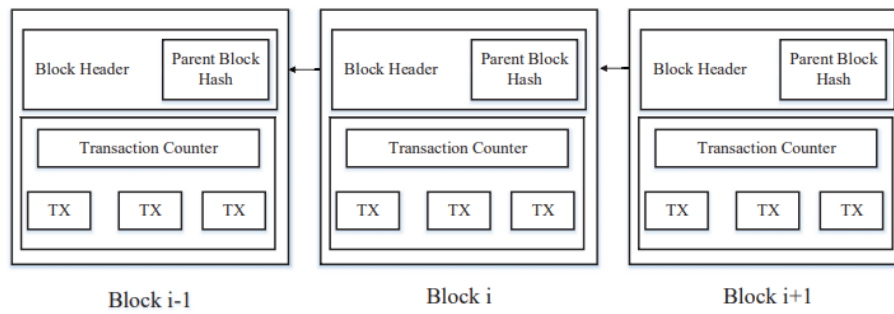
2.1.2 Δομή των Blocks

Σε ένα blockchain, το πρώτο block αποτελεί το genesis block. Όλα τα υπόλοιπα block διαθέτουν ένα parent block, ενώ αναλυτικότερα η δομή ενός block φαίνεται στην εικόνα 3 [5].



Εικόνα 3: Δομή του block (Πηγή Zheng et al. 2017 [5])

Το κάθε block αποτελείται από την επικεφαλίδα του (header) και το σώμα του (body). Αναλυτικότερα για τα πεδία της επικεφαλίδας, από το block version φαίνεται ποιοι είναι οι κανόνες για την επιβεβαίωση του συγκεκριμένου block. Οι hash values των συναλλαγών αποθηκεύονται σε ένα Merkle Tree, από όπου προκύπτει και το δεύτερο πεδίο της επικεφαλίδας “Merkle Tree Root Hash”. Οι διαδικασίες hashing, που παίζουν σημαντικό ρόλο στην ασφάλεια του blockchain, εξετάζονται στην επόμενη ενότητα. Το time stamp αποτυπώνει τον τρέχοντα χρόνο σε seconds θεωρώντας ως αρχή την 1η Ιανουαρίου του 1970. Το πεδίο nBits αντιστοιχεί στο κατώφλι (target threshold) ενός έγκυρου block hash. Με κάθε νέο υπολογισμό hash, η τιμή του nonce αυξάνεται. Τέλος το parent block hash δείχνει το hash του προηγούμενου block, οπότε μία συνεχόμενη αλληλουχία από blocks σχηματικά έχει τη μορφή που φαίνεται στην εικόνα 4 [5], [6]:



Εικόνα 4: Παράδειγμα αρχιτεκτονικής blockchain (Πηγή Zheng et al. 2017 [5])

2.1.3 Hashing Functions

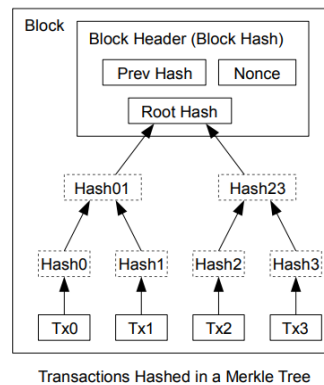
Όπως αναφέραμε, οι διαδικασίες hash αποτελούν ένα ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι της τεχνολογίας blockchain. Πρόκειται για μαθηματικές εξισώσεις, με ιδιότητες σημαντικές για την κρυπτογραφία, οι οποίες συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα (πίνακας 2) [7]:

Πίνακας 2: 5 ιδιότητες των hashing functions

Ιδιότητες	Επεξήγηση
Προκαθορισμένο μέγεθος (fixed size)	Μία διαδικασία hash παράγει έξοδο συγκεκριμένου μεγέθους, ανεξάρτητα από το μέγεθος της εισόδου της.
Αντίσταση σε επιθέσεις στην προεικόνα (preimage resistance)	Είναι εύκολο να υπολογιστεί η έξοδος ενός hash δεδομένης της εισόδου, αλλά όχι το αντίθετο.
Δεύτερη αντίσταση σε επιθέσεις στην προεικόνα (2nd preimage resistance)	Είναι αδύνατο με γνωστή είσοδο και αντίστοιχη έξοδο, να βρεθεί δεύτερη είσοδος με την ίδια έξοδο.
Αντίσταση σε σύγκρουση (collision resistance)	Είναι αδύνατο δύο διαφορετικές εισόδους να παράγουν την ίδια έξοδο.
Μεγάλη αλλαγή (big change)	Με αλλαγή ενός μόνο bit στην είσοδο αλλάζει ολόκληρη η έξοδος.

Η πρώτη ιδιότητα είναι πολύ χρήσιμη όσον αφορά τις ψηφιακές υπογραφές, καθώς μέσω του hash μπορεί να κωδικοποιηθεί και να συμπυκνωθεί οποιοδήποτε μήνυμα. Επιπλέον, αξίζει να τονίσουμε ότι είναι αδύνατο να αποκρυπτογραφηθεί η έξοδος του hash και να βρεθεί το περιεχόμενο της αρχικής εισόδου, εκτός αν κάποιος δοκιμάσει τυχαίες εισόδους μέχρι να βρεθεί η αντίστοιχη έξοδος, πράγμα απίθανο. Κομβικής σημασίας είναι και η μοναδικότητα των εξόδων των hash, αφού αυτές μπορούν να αντιστοιχούν μονάχα σε μία είσοδο [7], [8].

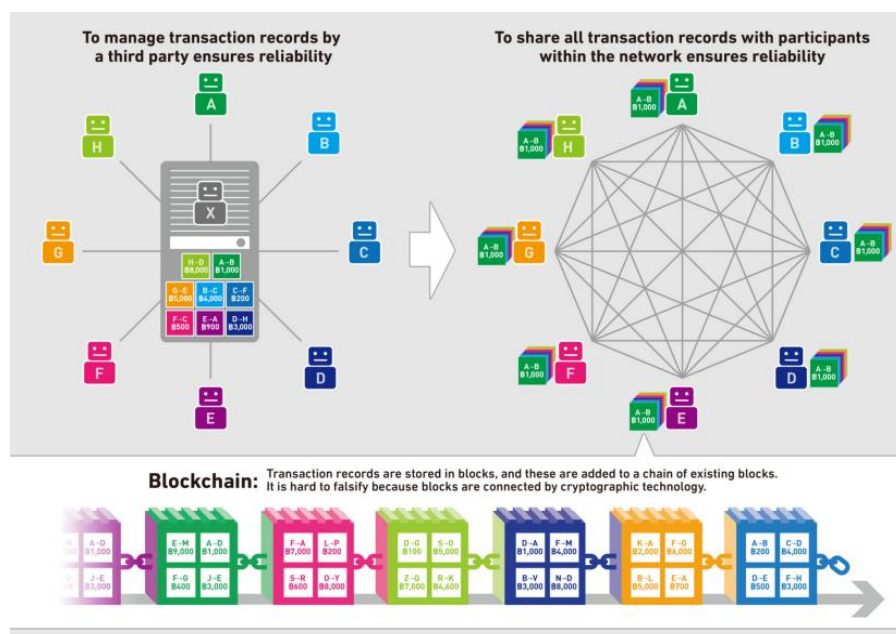
Οι hash values αποθηκεύονται, όπως προαναφέρθηκε, σε Merkle Trees (εικόνα 5) [2]:



Εικόνα 5: Merkle Tree (Πηγή Nakamoto 2008 [2])

2.1.4 P2P (Peer-to-Peer) Δίκτυο

Για την τεχνολογία blockchain χρησιμοποιείται ένα P2P δίκτυο, δηλαδή ένα δίκτυο στο οποίο οι κόμβοι μοιράζονται ισότιμα τους πόρους. Ο λόγος που χρησιμοποιείται αυτό το είδος δικτύου είναι το γεγονός ότι δεν απαιτείται μία κεντρική αρχή για τη λειτουργία του, είναι δηλαδή αποκεντρωμένο (decentralized, εικόνα 6) [9].



Εικόνα 6: Καταγραφές συναλλαγών με τρίτο κεντρικό φορέα (αριστερά), διαμοιρασμός των καταγραφών σε όλο το P2P δίκτυο (δεξιά) (Πηγή METI, Japan, 2016 [10])

Όταν μία συναλλαγή υπογράφεται ψηφιακά, εκπέμπεται σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Στην πρώτη εφαρμογή του blockchain στο bitcoin, στο P2P δίκτυο χρησιμοποιούταν αλγόριθμος proof-of-work για την καταγραφή του ιστορικού συναλλαγών. Στην επόμενη ενότητα θα αναφέρουμε και άλλους, εναλλακτικούς αλγορίθμους. Εάν οι “τίμιοι” κόμβοι (honest nodes) του δικτύου ελέγχουν το μεγαλύτερο κομμάτι της υπολογιστικής δύναμης, μία επίθεση με σκοπό την αλλαγή του ιστορικού συναλλαγών καθίσταται αδύνατη [2].

2.1.5 Αλγόριθμοι Συναίνεσης

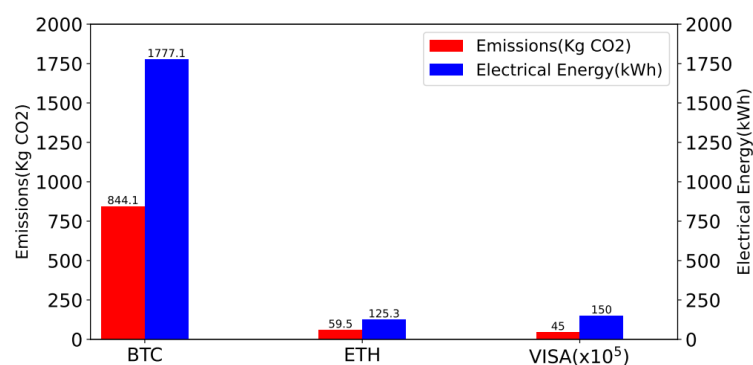
Ο αλγόριθμος proof-of-work (PoW), ο πρώτος και πιο διαδεδομένος όσον αφορά τις εφαρμογές blockchain, δυστυχώς απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ και αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας [11]. Με σκοπό να μετριάσει το προαναφερθέν πρόβλημα έχουν προταθεί και άλλοι αλγόριθμοι, η σύγκριση των οποίων αποτυπώνεται στον πίνακα 3 [5], [7]:

Πίνακας 3: Σύγκριση διαφορετικών αλγορίθμων

Ιδιότητες	PoW	PoS	DPoS	PoET	PBFT
Είδος blockchain	Δημόσιο χωρίς άδεια ή ιδιωτικό	Δημόσιο χωρίς άδεια ή ιδιωτικό	Δημόσιο ή ιδιωτικό	Ιδιωτικό με άδεια ή χωρίς άδεια	Ιδιωτικό με άδεια
Ενεργειακή απόδοση	Πολύ χαμηλή	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	Μέτρια
Επίθεση πλειοψηφίας (Majority attack, 51%)	Οι κακόβουλοι κόμβοι πρέπει να είναι περισσότεροι από 25%	Μειωμένη πιθανότητα επίθεσης	Διευκολύνεται η επίθεση αν οι κακόβουλοι συνεργαστούν και ενώσουν τη δύναμή τους	Μειωμένη πιθανότητα επίθεσης	Οι κακόβουλοι κόμβοι πρέπει να είναι περισσότεροι από το 1/3

Εκτός από τους αλγορίθμους PoS (proof-of-stake), DPoS (delegated-proof-of-stake), PoET (proof-of-elapsed-time) και PBFT (Practical Byzantine Fault Tolerance), υπάρχουν οι DAG (Directed Acyclic Graph), Ripple και Tendermint [5], [7].

Για παράδειγμα, το κρυπτονόμισμα ETH (Ethereum), με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, αντικατέστησε τον αλγόριθμο PoW με τον PoS (εικόνα 7) [12]. Θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στα κρυπτονομίσματα σε επόμενη ενότητα.



Εικόνα 7: Εκπομπές CO2 και κατανάλωση ενέργειας ανά συναλλαγή: Bitcoin, Ethereum, Visa (Πηγή: Kohli et al 2022 [12])

2.2 Εφαρμογές του Blockchain

Στην εικόνα 8, μπορούμε να δούμε την επέκταση της τεχνολογίας blockchain σε μεγάλη ποικιλία εφαρμογών σε διάφορους τομείς, ενώ στη συνέχεια θα τους αναλύσουμε και θα αναφέρουμε αντίστοιχα παραδείγματα [7].



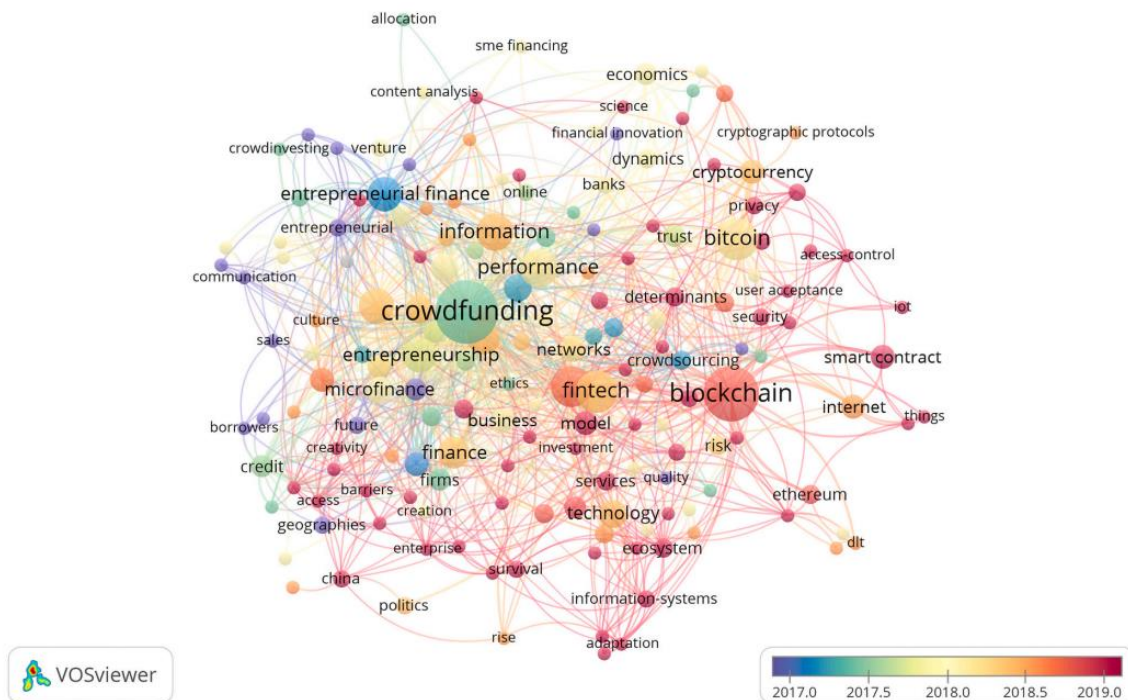
Εικόνα 8: Εφαρμογές blockchain

2.2.1 Κρυπτονομίσματα και Οικονομία

Το bitcoin αποτελεί το πρώτο κρυπτονόμισμα, χάρη στο οποίο εισήχθη και η τεχνολογία blockchain. Η έκδοση του Bitcoin πραγματοποιείται μέσω της διαδικασίας “εξόρυξης” (mining). Ο κόμβος εξόρυξης, δηλαδή ο miner λαμβάνει μία επιβράβευση σε BTC, όταν ένα block γίνεται δεκτό αφού ο κόμβος έχει καταφέρει να βρει την κατάλληλη nonce value. Ο μέγιστος αριθμός Bitcoin ανέρχεται στα 21 εκατομμύρια BTC. Εκτός από το Bitcoin έχουν δημιουργηθεί χιλιάδες κρυπτονόμισμα, όπως το Ethereum (ETH), το Cardano (ADA), το Polkadot, (DOT), το Litecoin (LTC), το Bitcoin Cash (BCH), το EOS και το IOTA [7], [13].

Στα πλεονεκτήματα των κρυπτονομισμάτων περιλαμβάνονται τα εξής: το γεγονός ότι απο-
τελούν την πιο διαδεδομένη και δοκιμασμένη εφαρμογή του blockchain, το ότι οι πληρωμές
γίνονται άμεσα από το ένα άτομο στο άλλο και το ότι δεν υπάρχουν καθυστερήσεις ούτε όρια
στις συναλλαγές. Ωστόσο, η έλλειψη ελέγχου μπορεί να διευκολύνει τη συναλλαγή μαύρου
χρήματος, το θεσμικό πλαίσιο δεν είναι επαρκές και πολλοί υποστηρίζουν ότι οι επενδύσεις
σε κρυπτονομίσματα ενέχουν μεγάλο ρίσκο [7].

Το 2022 οι Boakye et al. δημοσίευσαν μία λεπτομερή μελέτη για την οποία συγκέντρωσαν 157 επιστημονικά άρθρα σχετικά με τις εφαρμογές του blockchain στον τομέα των χρηματοοικονομικών. Συμπέραναν ότι σε αυτό το πεδίο έρευνας κυριαρχούν εκτός των κρυπτονομισμάτων οι τομείς της συλλογικής χρηματοδότησης και των συμμετοχικών επενδύσεων (crowdfunding/equity crowdfunding), της επιχειρηματικότητας, της χρηματοοικονομικής τεχνολογίας (fintech) και των κεφαλαίων επιχειρηματικού κινδύνου (venture capital). Άλλοι σχετικοί τομείς φαίνονται στην εικόνα 9 [14].



Εικόνα 9: Δίκτυο συνύπαρξης από λέξεις κλειδιά (Πηγή: Boakye et al., 2022 [14])

2.2.2 Εφαρμογές του Blockchain σε Τομείς εκτός της Οικονομίας

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η εφαρμογή του blockchain εξετάζεται, πλέον, σε πληθώρα τομέων και δεν περιορίζεται στην οικονομία και τα κρυπτονομίσματα. Η επιστημονική κοινότητα δείχνει αξιοσημείωτο ενδιαφέρον για την τεχνολογία κατανεμημένου καθολικού μετά από την αύξηση της δημοφιλίας των κρυπτονομισμάτων, καθώς μέσω αυτών αναδείχθηκαν μέσα σε λίγα χρόνια οι δυνατότητες και οι προοπτικές του blockchain. Οι πιο σημαντικοί τομείς τους οποίους, σύμφωνα με τους ερευνητές, θα μπορούσε να συνεισφέρει θετικά η τεχνολογία blockchain παρουσιάζονται στο παρόν υποκεφάλαιο, ενώ οι εφαρμογές του blockchain στην ενέργεια παρουσιάζονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια σε δεύτερο χρόνο.

Διαδίκτυο Πραγμάτων

Το διαδίκτυο πραγμάτων (Internet of Things - IoT) αποτελεί μία περίπλοκη αλλά πολλά υποσχόμενη τεχνολογία [15]. Δίνει τη δυνατότητα παροχής υπηρεσιών που μπορούν να αλλάξουν πολλές υποδομές, όμως απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, καθώς πολλές συσκευές συνδέονται στο διαδίκτυο και συλλέγονται αντίστοιχα δεδομένα, στα οποία ενδέχεται να αποκτήσουν πρόσβαση μη εξουσιοδοτημένα άτομα, δηλαδή hackers. Για αυτό το λόγο η ασφάλεια στο IoT αποτελεί άμεση προτεραιότητα. Μία τεχνολογία κατανεμημένου καθολικού όπως το blockchain μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς σε αυτή είναι δυνατό να βασιστεί ένα σύστημα εντοπισμού εισβολής (intrusion detection) [16].

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και το IIoT, δηλαδή το Industrial Internet of Things. Πρόκειται για βιομηχανικό εξοπλισμό, στον οποίο εγκαθίστανται αισθητήρες που συλλέγουν δεδομένα και συνδέονται ασύρματα στο δίκτυο. Το IIoT αποτελεί ένα σύστημα διεσπαρμένο και ετερογενές, συνεπώς η διαχείρισή του συστήματος και η επικοινωνία μέσα σε αυτό δεν είναι εύκολη. Το blockchain μπορεί να λειτουργήσει ως ένα αποτελεσματικό και αξιόπιστο μέσο επικοινωνίας, εφαρμόζοντας έξυπνα συμβόλαια και δίνοντας τη δυνατότητα αυτοδιαχείρισης των μηχανών και των συσκευών, αυξάνοντας την παραγωγικότητα και την αποδοτικότητα στο IIoT [17].

Ο συνδυασμός blockchain και διαδικτύου πραγμάτων έχει συζητηθεί αρκετά στη βιβλιογραφία, το οποίο γίνεται φανερό και από το πλήθος ανασκοπήσεων και ερευνών που αναφέρονται στο συγκεκριμένο θέμα, όπως οι [18], [19], [20], [21].

Ασφάλεια και ιδιωτικότητα

Η αποκέντρωση, η αμεταβλητότητα και η ανιχνευσιμότητα, ως κεντρικά χαρακτηριστικά του blockchain, το καθιστούν ιδανική τεχνολογία για εφαρμογές στις οποίες απαιτείται η προστασία των προσωπικών δεδομένων, του απορρήτου και της ιδιωτικότητας [22].

Παράδειγμα εφαρμογής του blockchain στην ασφάλεια στο διαδίκτυο αποτελεί το περιβάλλον BitAV, το οποίο έχει σκοπό να προστατέψει τους τελικούς χρήστες του διαδικτύου από ιούς και γενικότερα κακόβουλο λογισμικό [23]. Ένα άλλο παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή Healthchain, η οποία εξασφαλίζει - χάρη στο blockchain - την προστασία των ιατρικών δεδομένων των ασθενών [24]. Η συγκεκριμένη εφαρμογή αποτελεί ένδειξη των δυνατοτήτων ένταξης του blockchain σε υπηρεσίες ιατροφαρμακευτικής περίθαλψης, οι οποίες θα αναλυθούν πιο διεξοδικά στη συνέχεια. Τέλος, αξιοσημείωτο παράδειγμα χρήσης του blockchain για την εξασφάλιση της ιδιωτικότητας και της προστασίας δεδομένων αποτελεί η εφαρμογή του στη διαχείριση δεδομένων από μη επανδρωμένα σκάφη (UAV - Unmanned Aerial Vehicles ή αλλιώς drones) το οποίο ενδεχομένως συνδέεται και με τις πιθανές χρήσεις του blockchain στην άμυνα που επίσης θίγονται στη συνέχεια [25].

Διαχείριση ταυτότητας

Κατά τη διαχείριση ψηφιακής ταυτότητας, η προστασία του απορρήτου κρίνεται καίριας σημασίας. Αποκεντρωμένες εφαρμογές - που μπορούν να υλοποιηθούν μέσω blockchain - έχουν τη δυνατότητα να καταγράφουν το απαραίτητο περιεχόμενο που διευκολύνει την προσωποποιημένη παροχή υπηρεσιών για τον χρήστη, να ιχνηλατούν τις δραστηριότητες των παρόχων υπηρεσιών και το περιεχόμενο το οποίο αυτοί προσπέλασαν, να διαχειρίζονται τα APIs (Application Programming Interfaces), χωρίς να κινδυνεύει η ιδιωτικότητα και η ταυτότητα των χρηστών [26], [27]. Το πιο σημαντικό όφελος των συστημάτων διαχείρισης ταυτότητας βασισμένα σε blockchain είναι το γεγονός ότι ο χρήστης έχει ο ίδιος τον έλεγχο της ταυτότητάς του [27].

Τέτοιες εφαρμογές είναι πολύ χρήσιμες, για παράδειγμα, σε οικοσυστήματα ανοικτής τραπεζικής (Open Banking, OB), καθώς, με σκοπό την εύρεση των βέλτιστων συμφωνιών για τους χρήστες αλλά και την αναβάθμιση της εμπειρίας τους, είναι απαραίτητη η πρόσβαση σε οικονομικά δεδομένα από εξωτερικούς παρόχους υπηρεσιών. Συνεπώς, η τεχνολογία διευκολύνει την εμπιστοσύνη σε τρίτους χωρίς συμβιβασμούς στην ασφάλεια και την προστασία δεδομένων [26].

Ιδιοκτησία δεδομένων

Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, όπως το διαδίκτυο πραγμάτων, συνοδεύονται από την παραγωγή μεγάλων όγκων δεδομένων, δημιουργώντας έτσι την ανάγκη σύστασης μίας αγοράς δεδομένων στην οποία καθίσταται δυνατή η αγοροπωλησία τους, δηλαδή ο διαμοιρασμός τους έναντι χρηματικών ποσών [28], [29].

Ωστόσο, είναι πολύ πιθανό τα δεδομένα αυτά να μεταπωλούνται ή να διαμοιράζονται χωρίς την άδεια του αρχικού τους κατόχου, να μεταποιούνται από τρίτους με αποτέλεσμα τον διαμοιρασμό ψεύτικων ή παραποιημένων δεδομένων, ενώ κάποιο άτομο ενδέχεται να ισχυριστεί ότι είναι ιδιοκτήτης κάποιων δεδομένων χωρίς αυτό να είναι αλήθεια. Λόγω των χαρακτηριστικών του (διαφάνεια, ιχνηλασιμότητα), το blockchain μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη ενός νέου επιχειρηματικού μοντέλου αγοράς δεδομένων αντιμετωπίζοντας αποτελεσματικά τα παραπάνω προβλήματα [29]. Το blockchain θα μπορούσε επίσης να δώσει κίνητρα - επιβραβεύσεις σε ιδιοκτήτες δεδομένων έτσι ώστε αυτοί να τα διαμοιράζουν σε ερευνητές για επιστημονικούς σκοπούς [30].

Συστήματα φήμης

Τα reputations systems συνδυάζονται συχνά με το blockchain, καθώς πρόκειται για μοντέλα που δίνουν τη δυνατότητα ποσοτικοποίησης της εμπιστοσύνης σε συγκεκριμένα άτομα, τα οποία προσφέρουν κάποια προϊόντα ή υπηρεσίες [31].

Οι Fernandes et al. ανέπτυξαν ένα τέτοιο σύστημα, βασισμένο σε blockchain, με στόχο την ενίσχυση εφαρμογών οι οποίες παρέχουν ειδοποιήσεις κινδύνου σε οδηγούς οχημάτων, έτσι ώστε να συνεισφέρουν στην ασφαλή οδήγηση. Όταν ένας χρήστης προειδοποιεί για κάποιον κίνδυνο, η εγκυρότητα της προειδοποίησής του αξιολογείται με βάση το reputation system. Έτσι αποφεύγεται η σύγχυση που ενδέχεται να προκληθεί από ένα λανθασμένο μήνυμα κινδύνου. Ταυτόχρονα όμως η επαλήθευση ενός μηνύματος δεν αργεί υπερβολικά, το οποίο είναι πολύ θετικό καθώς η έγκαιρη ενημέρωση είναι πιθανό να αποτρέψει ατυχήματα [32].

Τα συστήματα φήμης μπορούν επίσης να φανούν πολύ χρήσιμα στο ηλεκτρονικό εμπόριο. Η αποκέντρωση των reputation scores των εμπλεκόμενων στο ηλεκτρονικό εμπόριο - τόσο των αγοραστών όσο και των πωλητών - μπορεί να συνεισφέρει στην αποφυγή λαθών και απατών [33].

Ψηφιακά έγγραφα

Τα έγγραφα και τα πιστοποιητικά που χρησιμοποιούμε στην καθημερινή μας ζωή μπορούν να έχουν φυσική ή ψηφιακή μορφή, όμως η ψηφιοποίηση εφαρμόζεται όλο και περισσότερο λόγω της πρακτικότητας και της ευκολίας που προσφέρει. Η εφαρμογή του blockchain στη διαχείριση ψηφιακών εγγράφων δύναται να εγγυηθεί την απλοποίηση των διαδικασιών επαλήθευσης στοιχείων και τη μείωση του κόστους αυτών. Πολλοί ερευνητές προτείνουν ως σχετικές λύσεις μοντέλα public key infrastructure (PKI) και certificate authority (CA) [34].

Παράδειγμα μοντέλου PKI αποτελεί η πρόταση των Kamil et al. για ένα σύστημα διαχείρισης ψηφιακών εγγράφων για την ανώτατη εκπαίδευση στην Ινδονησία [35]. Επιπλέον έχει προταθεί μοντέλο certificate authority με βάση το blockchain, επίσης για την ανώτατη εκπαίδευση, με σκοπό την εξασφάλιση της κυβερνοασφάλειας, από τους Maulani et al. [36]. Σε επόμενη παράγραφο θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση των δυνατοτήτων του blockchain να λειτούργησει υποστηρικτικά σε διάφορες εφαρμογές της εκπαίδευσης.

Εφοδιαστική αλυσίδα

Το γεγονός ότι σε ένα blockchain όλες οι συναλλαγές γίνονται ορατές σε κάθε εξουσιοδοτημένο χρήστη καθιστά την τεχνολογία αυτή πολύ ελκυστική για εφαρμογές διαχείρισης και διαμοιρασμού δεδομένων σε εφοδιαστικές αλυσίδες [7].

Το blockchain παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων που θα μπορούσαν να ωφεληθούν τη διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας. Πρώτον, η διαχείριση δεδομένων εντός της αλυσίδας ή και ανάμεσα σε πολλαπλές εφοδιαστικές αλυσίδες γίνεται αξιόπιστη, ασφαλής και αποτελεσματική, ενώ δίνεται η δυνατότητα καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο [37], [38]. Επιπλέον, τα έξυπνα συμβόλαια δίνουν τη δυνατότητα αυτόματης εκτέλεσης διεργασιών, χωρίς την επέμβαση τρίτων προσώπων, πράγμα πολύ χρήσιμο για τις εφοδιαστικές αλυσίδες, καθώς η πολυπλοκότητα των διαδικασιών μπορεί να μειωθεί σημαντικά χάρη στο blockchain [39]. Μία σχετική λύση εφαρμογής του blockchain σε εφοδιαστική αλυσίδα έχει προταθεί από την IBM [7].

Ιατροφαρμακευτική περίθαλψη

Ο τομέας της υγείας προσφέρεται για την εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain, καθώς είναι πολύ σημαντικό τα ευαίσθητα προσωπικά και ιατρικά δεδομένα των ασθενών να επεξεργάζονται και να διαμοιράζονται με ασφαλή και αδιάβλητο τρόπο [40].

Ως τώρα, αυτή η τεχνολογία έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως σε εφαρμογές που αφορούν την ηλεκτρονική καταγραφή του ιατρικού ιστορικού, όμως το blockchain θα μπορούσε να επεκταθεί και σε άλλες ιατρικές εφαρμογές σχετικές με συστήματα αυτόματης διάγνωσης ή δίκτυο πραγμάτων [40]. Ειδικότερα, το διαδίκτυο πραγμάτων μπορεί να συνεισφέρει στη συλλογή δεδομένων από αισθητήρες ή άλλες συσκευές που υποδεικνύουν την κατάσταση της υγείας του ασθενούς. Συνεπώς, το blockchain θα μπορούσε να επιτρέψει την απομακρυσμένη παρακολούθηση των ασθενών [41], [42].

Στον τομέα της υγείας ως γενικότερο πλαίσιο, το blockchain θα μπορούσε να βρει εφαρμογή στην επαλήθευση ταυτότητας (το οποίο σχετίζεται με τη διαχείριση ταυτότητας που θίγεται στη συνέχεια), αλλά και στις κλινικές δοκιμές, όπως έχουν προτείνει οι Shae et al. [43]. Επιπλέον, όπως έχει ήδη αναφερθεί οι τεχνολογίες κατακευκασμένου καθολικού είναι κατάλληλες για τη διαχείριση εφοδιαστικών αλυσίδων, και η εφοδιαστική αλυσίδα της φαρμακοβιομηχανίας δεν αποτελεί εξαίρεση [42]. Μια ειδικότερη μελέτη περίπτωσης αποτελεί η προσπάθεια πρόληψης της απάτης στη συνταγογράφηση φαρμάκων μέσω blockchain [44].

Αυτοκινητοβιομηχανία

Στη νέα αυτοκινητοβιομηχανία, όπου οι νέες τεχνολογίες διαδραματίζουν όλο και πιο σημαντικό ρόλο, η ασφάλεια, η ιδιωτικότητα, η διαχείριση δεδομένων, η ιχνηλασιμότητα, η διαφάνεια, η αξιοπιστία αλλά και η βιωσιμότητα αποτελούν πολύ σημαντικά στοιχεία, τα οποία η τεχνολογία blockchain δύναται να προσφέρει ή να ενισχύσει [45]. Οι εφαρμογές blockchain που αφορούν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και την αυτόματη οδήγηση περιγράφονται αναλυτικότερα στο κεφάλαιο των ενεργειακών εφαρμογών.

Ωστόσο, το blockchain βρίσκει εφαρμογή και στην “παραδοσιακή” αυτοκινητοβιομηχανία. Πιο συγκεκριμένα, όπως ήδη αναφέρθηκε, το blockchain μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμο στη διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας, που αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό κομμάτι της αυτοκινητοβιομηχανίας. Για αυτόν τον λόγο οι Dehshiri et al. αξιολόγησαν τα κριτήρια εφαρμογής της τεχνολογίας blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα της BMW χρησιμοποιώντας πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων [46].

Διαχείριση περιουσιακών στοιχείων

Όπως το blockchain μπορεί να βοηθήσει στη διαχείριση μίας εφοδιαστικής αλυσίδας, έτσι μπορεί να φανεί χρήσιμο και στη διαχείριση περιουσιακών στοιχείων (asset tracking ή asset management) [47].

Για παράδειγμα, οι van Groesen et al. μελέτησαν την εφαρμογή του blockchain και των QR codes στο asset tracking και γενικότερα στην ημι-αυτοματοποίηση των ροών εργασιών [47]. Επιπλέον οι Kuhle et al. προτείνουν ένα σύστημα ψηφιακής διαχείρισης περιουσιακών στοιχείων για την εμπορική ενοικίαση αεροσκαφών [48].

Πνευματικά δικαιώματα

Το blockchain βρίσκει εφαρμογή και στην τέχνη, αφού οι πλατφόρμες που απαιτούν την προστασία πνευματικών δικαιωμάτων μουσικών έργων είναι δυνατό να βασιστούν στην τεχνολογία αυτή. Μάλιστα, οι κάτοχοι των πνευματικών δικαιωμάτων επωφελούνται οικονομικά. Επομένως δημιουργούνται οι κατάλληλες προϋποθέσεις για μία δίκαιη για τους δημιουργούς μουσική βιομηχανία [49].

Ένας σχετικός αλγόριθμος έχει προταθεί από τους Xiao et al. Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στον σχεδιασμό ενός κατανεμημένου μηχανισμού τυχαίας ενσωμάτωσης και μιας συνάρτησης χαρτογράφησης θέσης, η οποία επιτρέπει την ανίχνευση της πληροφορίας υπό πνευματική ιδιοκτησία. Ο αλγόριθμος, ιδιαίτερα σε σχέση με άλλα συστήματα προστασίας πνευματικών δικαιωμάτων, παρουσιάζει αυξημένη αξιοπιστία, σταθερότητα, ιχνηλασιμότητα και ασφάλεια [50].

Τίτλοι κυριότητας

Οι τίτλοι κυριότητας συνοδεύονται από χρονοβόρες και περίπλοκες διαδικασίες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι διαφορετικοί κρατικοί μηχανισμοί επεξεργάζονται πληθώρα εγγράφων, με αποτέλεσμα η γραφειοκρατία να διευκολύνει τις απάτες [51].

Οι Alam et al. προτείνουν ένα μοντέλο βασισμένο στο blockchain για τη διαχείριση τίτλων κυριότητας στο Μπαγκλαντές, μία ιδιαίτερη μελέτη περίπτωσης καθώς πρόκειται για την πιο πυκνοκατοικημένη χώρα του κόσμου. Το μοντέλο παρέχει συγχρονισμό των δεδομένων, διαφάνεια και εύκολη πρόσβαση, εξασφαλίζοντας την αμεταβλητότητα των εγγράφων, την ταχύτητα και τη μείωση του κόστους [51]. Επιπλέον, υπάρχει η πιθανότητα η αγοραπωλησία τίτλων κυριότητας να μπορούσε να υποστηριχθεί από το blockchain [52].

Αγροτικός τομέας

Η γεωργία αποτελεί έναν ακόμα τομέα που μπορεί να επωφεληθεί από το blockchain, βελτιώνοντας την ασφάλεια και την ποιότητα του φαγητού [53].

Ο αγροτικός τομέας αντιμετωπίζει σοβαρά προβλήματα τα τελευταία χρόνια, λόγω της αύξησης του πληθυσμού. Συγκεκριμένα, λόγω της αυξημένης παγκόσμιας ζήτησης σε τροφή, οι αγρότες χρησιμοποιούν παρασιτοκτόνα, έτσι ώστε να αυξήσουν την ποσότητα του φαγητού. Η κατανάλωση, όμως, τροφής που έχει προέλθει από καλλιέργειες στις οποίες έχει γίνει κατάχρηση παρασιτοκτόνων ενδέχεται να μειώσει το προσδόκιμο ζωής των ανθρώπων. Είναι, λοιπόν, απαραίτητο να εφαρμόζονται μοντέλα έξυπνης γεωργίας (smart agriculture) στα οποία η τεχνητή νοημοσύνη και άλλες καινοτόμες τεχνολογίες παίζουν κεντρικό ρόλο. Σε αυτό το πλαίσιο, οι Jadan et al. προτείνουν ένα μοντέλο έξυπνης γεωργίας υποστηριζόμενο από blockchain, το οποίο έχει ως στόχο να συνεισφέρει στο να παραμένουν τα παρασιτοκτόνα κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο [54].

Ψηφοφορίες

Σε πολλές χώρες, όπου οι εκλογές συνεχίζουν να γίνονται με φυσικό τρόπο, εγείρεται το ερώτημα της αξιοπιστίας και της αποτελεσματικότητας της ψηφοφορίας. Ένα αδιάβλητο σύστημα βασισμένο στο blockchain μπορεί να εγγυηθεί την ασφάλεια, τα χαμηλά κόστη, τη μείωση ή και εξάλειψη των χρόνων αναμονής, την ελαχιστοποίηση των λαθών που μπορεί να οφείλονται σε λανθασμένες εξουσιοδοτήσεις, ενώ προσφέρεται η δυνατότητα συμμετοχής στην ψηφοφορία από το σπίτι [55].

Το γεγονός ότι το blockchain είναι μία πολλά υποσχόμενη τεχνολογία στον τομέα των ψηφοφοριών γίνεται φανερό από την πληθώρα σχετικών δημοσιεύσεων, όπως για παράδειγμα οι [56], [57], [58], [59].

Εκπαίδευση

Οι τεχνολογίες κατακευκαμένου καθολικού μπορούν να αναβαθμίσουν και την εκπαίδευση [60]. Στο εσωτερικό των blocks μίας αλυσίδας είναι δυνατό να αποθηκεύονται, να προστατεύονται και να μοιράζονται με ασφαλή τρόπο αρχεία σχετικά με την εκπαιδευτική διαδικασία ή βαθμοί εξετάσεων. Επιπλέον, θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα είδος “εκπαιδευτικής οικονομίας”. Λειτουργώντας με παρόμοιο τρόπο όπως τα κρυπτονομίσματα, θα ήταν δυνατό να δημιουργηθεί ένα σύστημα που επιβραβεύει τους μαθητές όταν αυτοί ολοκληρώνουν με επιτυχία τα καθήκοντά τους. Με αυτό τον τρόπο χτίζεται ένα είδος reputation system, το οποίο θα μπορούσε ακόμα και να συνδέσει τα εκπαιδευτικά ιδρύματα με εταιρείες. Πρόκειται για ένα blockchain κοινοπραξίας στο οποίο διακινείται ένα “εκπαιδευτικό νόμισμα φήμης”, ανάμεσα σε ανθρώπους που διεξάγουν πνευματική εργασία και στους αναγνωρισμένους οργανισμούς, εκπαιδευτικούς και μη. Έτσι, άνθρωποι που δρουν στην εκπαίδευση ή ακόμα και συγγραφείς μπορούν να έχουν ένα εικονικό “πορτοφόλι” μέσω του οποίου μπορούν να διακινούν το προαναφερθέν εικονικό νόμισμα φήμης. Για παράδειγμα, ένα πανεπιστημιακό ίδρυμα θα επιβράβευε τους φοιτητές με αυτό το νόμισμα όταν αυτοί λαμβάνουν κάποια πιστοποίηση, ένα βραβείο, το πτυχίο τους ή ακόμα και για κάποια πρωτότυπη ιδέα, μία δημιουργική εργασία και ούτω καθ’ εξής [61].

Όσον αφορά τη διαδικτυακή εκπαίδευση, η οποία έχει ενταχθεί στις ζωές μας και έχει αναδειχθεί ως ένα πολύ χρήσιμο μέσο ιδιαίτερα μετά την πανδημία της COVID-19, αντίθετα με την παραδοσιακή εκπαίδευση, αναδεικνύεται η ανάγκη ανάπτυξης μοντέλων ασφαλούς διαμοιρασμού δεδομένων. Το blockchain μπορεί να δράσει υποστηρικτικά και σε αυτόν τον τομέα [62], [63].

Διαφήμιση

Υπάρχουν αρκετές υποψήφιες χρήσεις του blockchain στον τομέα του marketing [64]. Οι Ullah et al. πρότειναν, για παράδειγμα, ένα μοντέλο βασισμένο σε Blockchain το οποίο προορίζεται για διαφημίσεις σε εφαρμογές κινητού. Επειδή συνήθως οι συγκεκριμένες διαφημίσεις βασίζονται στη δραστηριότητα του χρήστη στο διαδίκτυο, άρα κατ' επέκταση στα προσωπικά δεδομένα του, το Blockchain προσφέρει μία αποτελεσματική λύση, χωρίς να παραβιάζει την ιδιωτικότητα [65].

Ένα ακόμα παράδειγμα εφαρμογής του blockchain στη διαφήμιση αποτελεί η πρόταση των Ding et al., οι οποίοι εκμεταλλευόμενοι τα χαρακτηριστικά του blockchain και κυρίως την αξιοπιστία του, έφτιαξαν ένα μοντέλο που στοχεύει στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που επιφέρει η χαμηλή ποιότητα διαδικτυακών διαφημίσεων ή ακόμα και η απάτη μέσω ψηφιακού μάρκετινγκ [66].

Ασφάλιση

Όπως έχει ήδη επισημανθεί, πολλοί μελετητές υποστηρίζουν ότι το blockchain θα αλλάξει τον τρόπο που λειτουργούν οι οικονομικές υπηρεσίες, συμπεριλαμβανομένης και της ασφάλισης [67].

Εφόσον η ασφαλιστική βιομηχανία ενέχει πολλές τυποποιημένες διαδικασίες που μπορούν να βελτιστοποιηθούν μέσω νέων τεχνολογιών, έχουν προταθεί συστήματα βασισμένα στο blockchain ώστε να γίνει αυτοματοποίηση των διαδικασιών χάρη στα έξυπνα συμβόλαια [68].

Επιπλέον, η διαφθορά και η απάτη αποτελούν δύο πάγια προβλήματα πολλών κρατών όσον αφορά την ασφάλιση. Ωστόσο, το blockchain θα μπορούσε να δώσει κάποιες λύσεις για τα προβλήματα αυτά. Για παράδειγμα, οι Anokye et al. σχεδίασαν ένα σύστημα με βάση το blockchain, με σκοπό την προστασία του NHIS (National Health Insurance Scheme) της Γκάνα από οικονομική κατάρρευση [69].

Άμυνα

Χάρη στα χαρακτηριστικά του (αποκεντρωμένη εμπιστοσύνη, ακεραιότητα, προστασία δεδομένων, ικνηλασιμότητα, διαφάνεια, ορατότητα), με τις κατάλληλες πλατφόρμες, το blockchain μπορεί να φέρει την επανάσταση και να αλλάξει ριζικά την αεροδιαστημική βιομηχανία, καθώς και τα μοντέρνα οικοσυστήματα άμυνας [70].

Μία διαφορετική προσέγγιση της συγκεκριμένης κατηγορίας εφαρμογών blockchain θα μπορούσε να αναφέρεται στην άμυνα εναντίον κυβερνοεπιθέσεων, κάτι που εντάσσεται περισσότερο στην κατηγορία “ασφάλεια και ιδιωτικότητα” που παρουσιάστηκε νωρίτερα. Υπάρχει πληθώρα σχετικών δημοσιεύσεων, όπως οι [71], [72], [73].

Ενέργεια

Ο ενεργειακός τομέας αποτελεί το κέντρο του ενδιαφέροντος για πολλούς φορείς τα τελευταία χρόνια, καθώς ο εκσυγχρονισμός των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές προτεραιότητες για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής [74]. Καθώς υπάρχει πληθώρα δημοσιεύσεων, αλλά και αρκετές προσπάθειες στη βιομηχανία (από εταιρείες, νεοφυείς επιχειρήσεις κ.α.) για να ενταχθεί το blockchain σε ενεργειακές εφαρμογές, οι τεχνολογίες κατανεμημένου καθολικού στην ενέργεια παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

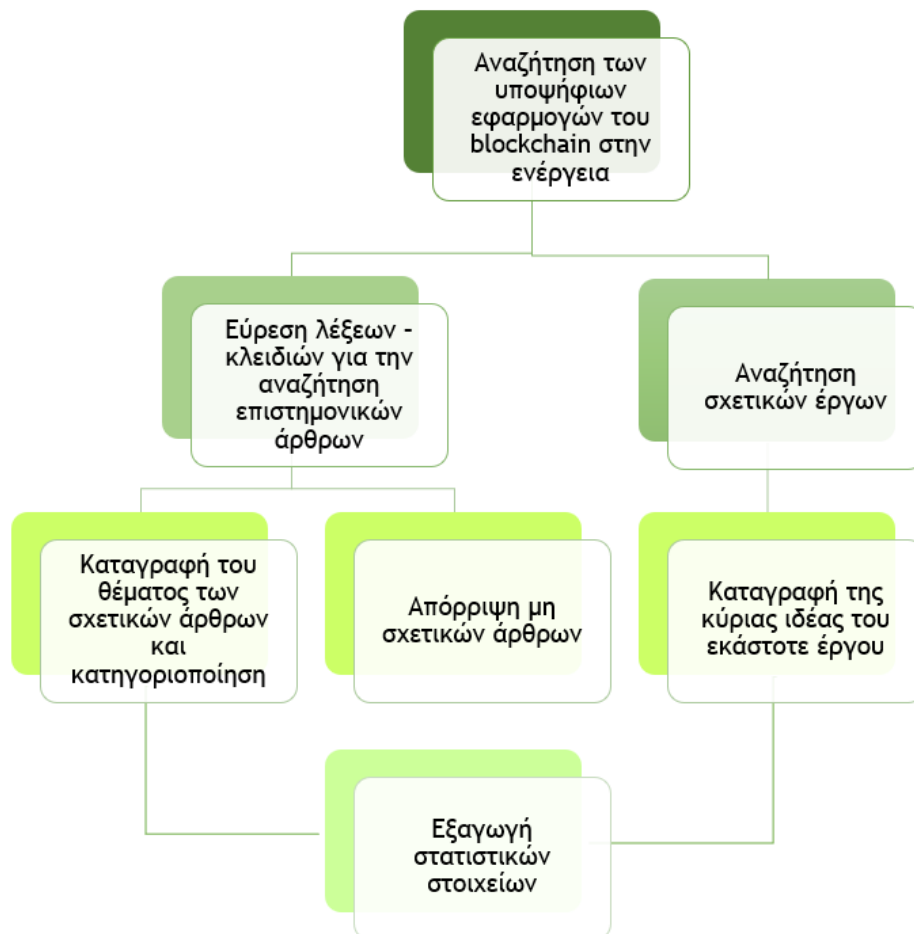
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Blockchain στον Τομέα της Ενέργειας

3 Blockchain στον Τομέα της Ενέργειας

Έχοντας παρουσιάσει την εισαγωγή του blockchain και των εφαρμογών του, οδηγούμαστε στο επιστημονικό ερώτημα της παρούσας εργασίας, που δεν είναι άλλο από την αξιολόγηση της εφαρμογής της τεχνολογίας αυτής στον τομέα της ενέργειας.

Στο κεφάλαιο αυτό, σκοπός είναι ο εντοπισμός των επιμέρους πεδίων του ενεργειακού τομέα, στα οποία δύναται να αξιοποιηθεί το blockchain με τέτοιο τρόπο ώστε να ενισχύσει την ενεργειακή αποδοτικότητα και να αυξήσει την αποτελεσματικότητα της λειτουργίας διαφόρων συστημάτων. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση. Προκειμένου να μην παρουσιαστεί μόνο η θεωρητική προσέγγιση στο συγκεκριμένο θέμα, αλλά και η πρακτική εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain σε ενεργειακές εφαρμογές, αναζητούνται και σχετικά έργα που έχουν υλοποιηθεί από διάφορους οργανισμούς, όπως ερευνητικά ιδρύματα, εταιρείες που ασχολούνται με την ενέργεια ή με την τεχνολογία, αλλά και νεοφυείς επιχειρήσεις. Τέλος, εξάγονται στατιστικά στοιχεία με σκοπό την καλύτερη εποπτεία των δυνατοτήτων του blockchain στον τομέα της ενέργειας, καθώς εντοπίζονται οι τομείς που είναι πιο “δημοφιλείς” για την εφαρμογή τεχνολογίας κατακεντρωμένου καθολικού στην ενέργεια, τόσο στην επιστημονική κοινότητα όσο και στη βιομηχανία, ενώ παρατηρείται και πώς συνδυάζονται οι συγκεκριμένοι τομείς. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται στην εικόνα 10:



Εικόνα 10: Βήματα προσδιορισμού των εφαρμογών του blockchain στην ενέργεια

3.1 Blockchain και Ενέργεια: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση και Πεδία Εφαρμογών

Σε αυτό το υποκεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Παρόμοιες ανασκοπήσεις έχουν πραγματοποιηθεί και στο παρελθόν (για παράδειγμα [75], [76], [77]) αποκαλύπτοντας τις προοπτικές της εφαρμογής του blockchain στον ενεργειακό τομέα. Στην ακόλουθη ανασκόπηση, εστιάζουμε στις πιο πρόσφατες δημοσιεύσεις, από το 2017 ως το 2023, χρησιμοποιώντας τις λέξεις κλειδιά που δίνονται στον πίνακα 4. Σε παρενθέσεις δίνονται και οι αγγλικοί όροι με τους οποίους πραγματοποιήθηκε η αναζήτηση, εφόσον η ανασκόπηση βασίζεται σε διεθνή βιβλιογραφία.

Πίνακας 4: Λίστα λέξεων - κλειδιών για την αναζήτηση επιστημονικών άρθρων

Λέξεις Κλειδιά
Blockchain, Κατανεμημένο Καθολικό (Distributed Ledger), Αποκεντρωμένο (Decentralized), Ethereum, Έξυπνα Συμβόλαια (Smart Contracts), Κρυπτονόμισμα (Cryptocurrency)
Έξυπνο Δίκτυο (Smart Grid), Μικροδίκτυο (Microgrid), Έξυπνη Κοινότητα (Smart Community), Έξυπνη πόλη (Smart City), Έξυπνοι Μετρητές (Smart Metering)
Διαχείριση, Διακυβέρνηση, Εποπτεία, Έλεγχος Ενέργειας (Energy Management, Governance, Supervision, Control), Διαχείριση Ζήτησης (Demand Side Management)
Εμπορία Ενέργειας (Energy Trading), P2P, peer-to-peer, Εμπορία Ηλεκτρισμού (Electricity Trading), Εμπορία Ισχύος (Power Trading), Ενεργειακή Συναλλαγή (Energy Transaction), Αγορά Ενέργειας (Energy Market)
Ηλεκτρικά Οχήματα (Electric Vehicles, EV), Δίκτυα Οχημάτων (Vehicular Network), Διαδίκτυο οχημάτων (IoV, Internet of Vehicles), Φόρτιση Ηλεκτρικών Οχημάτων (EV Charging), Αποθήκευση Ενέργειας (Energy Storage), Όχημα σε Δίκτυο (Vehicle to Grid, V2G), Αυτόνομα Οχήματα (Autonomous Vehicles)
Εμπορία Δικαιωμάτων Εκπομπών (Emission Trading, Carbon Trading), Ανθρακικό Αποτύπωμα (Carbon Footprint), Πιστοποιητικά Ανανεώσιμων (Renewable Certificates)

Έχοντας συλλέξει 200 επιστημονικά άρθρα, πραγματοποιήθηκε κατηγοριοποίηση στους ακόλουθους τομείς: έξυπνα δίκτυα και μικροδίκτυα, διαχείριση ενέργειας, εμπορία ενέργειας, αποθήκευση ενέργειας, ηλεκτρικά οχήματα, εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών, έξυπνοι μετρητές και, τέλος, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το κυρίαρχο πεδίο κάθε άρθρου φαίνεται στον πίνακα 5, ενώ στον πίνακα 6 δίνεται το πλήθος των άρθρων ανά κατηγορία, καθώς σε πολλά άρθρα συνδυάζονται παραπάνω από ένα από τα προαναφερθέντα πεδία έρευνας. Στην τελευταία στήλη δίνεται ο συνολικός αριθμός άρθρων για κάθε κατηγορία.

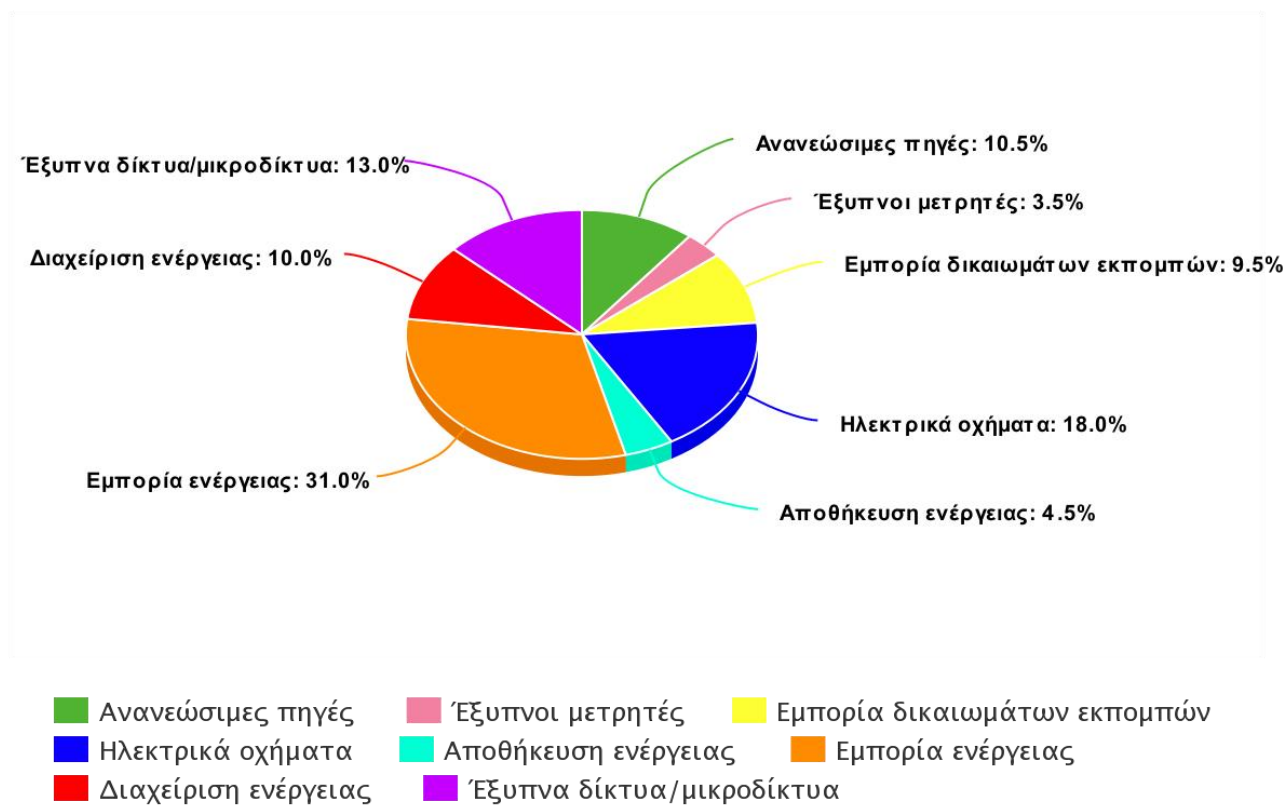
Με βάση τις πληροφορίες που δίνονται στον πίνακα 5, κατασκευάστηκε το κυκλικό διάγραμμα της εικόνας 11, στο οποίο φαίνονται τα ποσοστά των κύριων πεδίων του δείγματος επιστημονικών άρθρων που εξετάστηκε. Ομοίως, το ιστόγραμμα της εικόνας 12 αποδίδει περιληπτικά την πληροφορία που δίνεται στον πίνακα 6.

Πίνακας 5: Κατηγοριοποίηση με βάση το κύριο πεδίο των επιστημονικών άρθρων

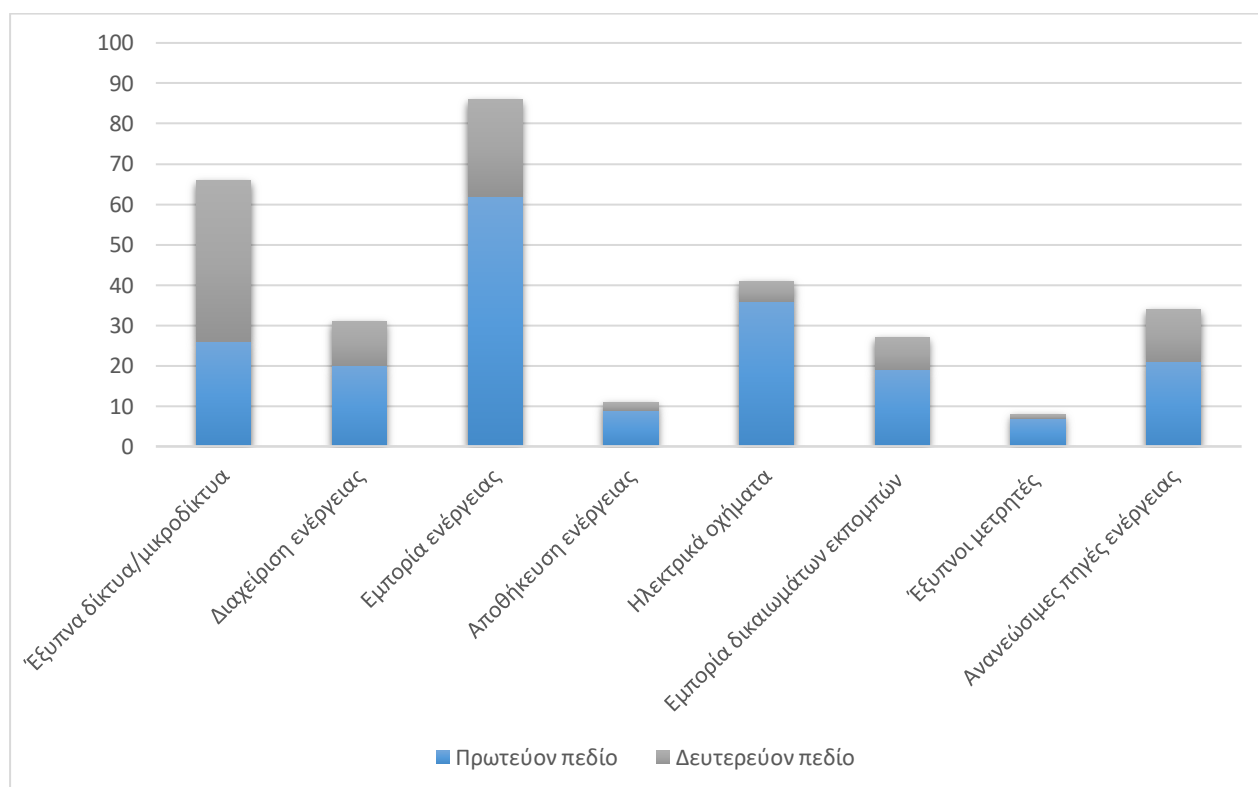
Κύριο Πεδίο	Πηγές
Έξυπνα δίκτυα/ μικροδίκτυα	[78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [89], [90], [91], [92], [93], [94], [95], [96], [97], [98], [99], [100], [101], [102], [103]
Διαχείριση ενέργειας	[104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [116], [117], [118], [119], [120], [121], [122], [123]
Εμπορία ενέργειας	[124], [125], [126], [127], [128], [129], [130], [131], [132], [133], [134], [135], [136], [137], [138], [139], [140], [141], [142], [143], [144], [145], [146], [147], [148], [149], [150], [151], [152], [153], [154], [155], [156], [157], [158], [159], [160], [161], [162], [163], [164], [165], [166], [167], [168], [169], [170], [171], [172], [173], [174], [175], [176], [177], [178], [179], [180], [181], [182], [183], [184], [185]
Αποθήκευση ενέργειας	[186], [187], [188], [189], [190], [191], [192], [193], [194]
Ηλεκτρικά οχήματα	[195], [196], [197], [198], [199], [200], [201], [202], [203], [204], [205], [206], [207], [208], [209], [210], [211], [212], [213], [214], [215], [216], [217], [218], [219], [220], [221], [222], [223], [224], [225], [226], [227], [228], [229], [230]
Εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών	[231], [232], [233], [234], [235], [236], [237], [238], [239], [240], [241], [242], [243], [244], [245], [246], [247], [248], [249]
Έξυπνοι μετρητές	[250], [251], [252], [253], [254], [255], [256]
Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	[257], [258], [259], [260], [261], [262], [263], [264], [265], [266], [267], [268], [269], [270], [271], [272], [273], [274], [275], [276], [277]

Πίνακας 6: Αριθμός άρθρων ανά κατηγορία

Κατηγορίες	Πρωτεύον Πεδίο	Δευτερεύον Πεδίο	Σύνολο
Έξυπνα δίκτυα/ μικροδίκτυα	26 Άρθρα	40 Άρθρα	66 Άρθρα
Διαχείριση ενέργειας	20 Άρθρα	11 Άρθρα	31 Άρθρα
Εμπορία ενέργειας	62 Άρθρα	24 Άρθρα	86 Άρθρα
Αποθήκευση ενέργειας	9 Άρθρα	2 Άρθρα	11 Άρθρα
Ηλεκτρικά οχήματα	36 Άρθρα	5 Άρθρα	41 Άρθρα
Εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών	19 Άρθρα	8 Άρθρα	27 Άρθρα
Έξυπνοι μετρητές	7 Άρθρα	1 Άρθρο	8 Άρθρα
Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	21 Άρθρα	13 Άρθρα	34 Άρθρα



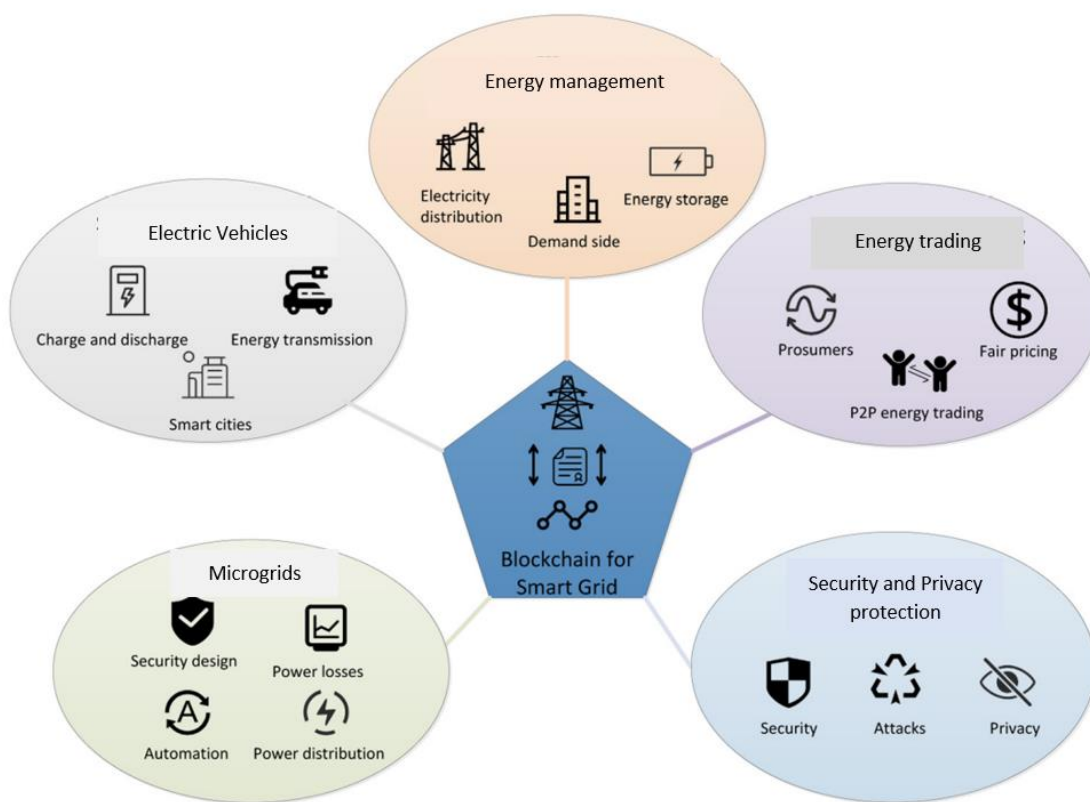
Εικόνα 11: Κύρια πεδία των επιστημονικών άρθρων σχετικών με την εφαρμογή του blockchain στην ενέργεια



Εικόνα 12: Αριθμός άρθρων ανά κατηγορία

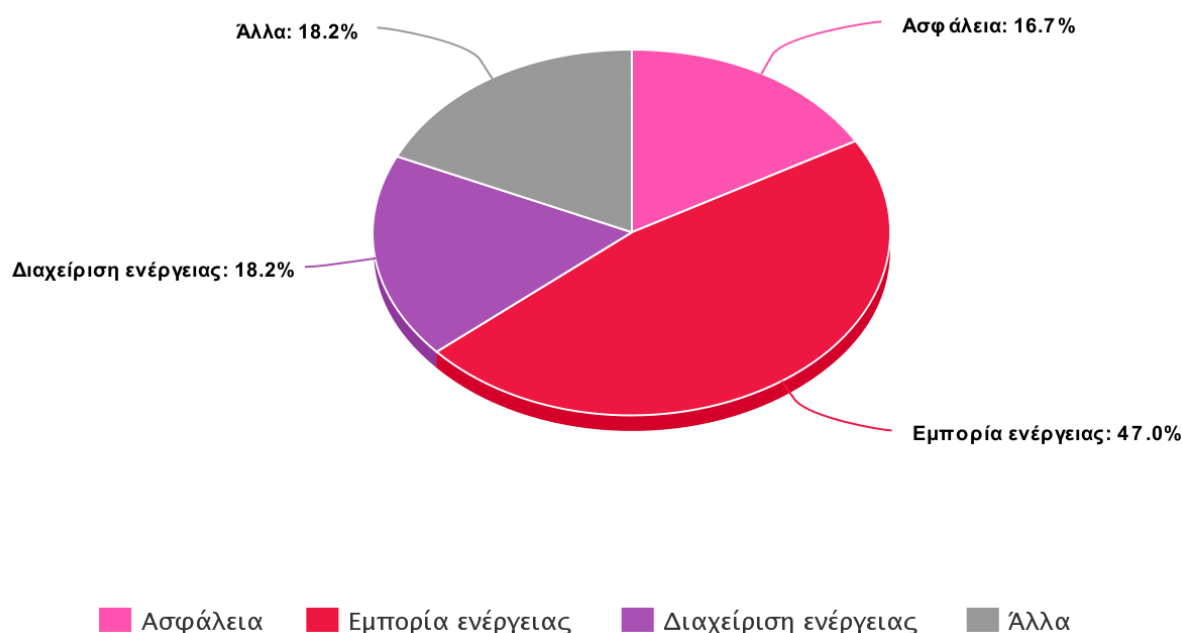
3.1.1 Έξυπνα Δίκτυα

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της αυξημένης διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών, βασίζονται όλο και περισσότερο στη διασπαρμένη παραγωγή [278]. Τα έξυπνα δίκτυα αποτελούν την εξέλιξη των παραδοσιακών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς προσφέρουν ελαστικότητα και βελτιστοποιούν τη διανομή. Έχουν προταθεί πολλές λύσεις για τα smart grids με βάση το blockchain, οι οποίες στοχεύουν στην επίτευξη καλύτερης λειτουργικότητας των δικτύων, στην έξυπνη διαχείριση και συναλλαγή ενέργειας, στην εξασφάλιση της προστασίας της ιδιωτικότητας και στη βελτίωση της διαχείρισης των μικροδικτύων. Στην εικόνα 13 συνοψίζονται μερικές από τις εφαρμογές του blockchain στα έξυπνα δίκτυα [279].



Εικόνα 13: Smart grid βασισμένο σε blockchain (Πηγή: Guo et al. 2022 [279])

Στα εξεταζόμενα άρθρα, πολλές από τις προτεινόμενες λύσεις βασισμένες στο blockchain για έξυπνα δίκτυα και μικροδίκτυα στοχεύουν στην εξασφάλιση της ιδιωτικότητας και της προστασίας των χρηστών, καθιστώντας δυνατή την ασφαλή επικοινωνία και τον διαμοιρασμό δεδομένων μέσα στο δίκτυο [79], [81], [84], [85], [88], [92], [93], [98], [100], [102], [103]. Blockchain μοντέλα έχουν προταθεί και για τη συναλλαγή ενέργειας σε έξυπνες κοινότητες [80], [82], [86], [87], [89], [93], [95], [96]. Η βελτιστοποίηση των λειτουργιών και η διαχείριση των πόρων θα μπορούσαν επίσης να υποβοηθηθούν από την τεχνολογία blockchain [83], [97], [99], [101]. Τα προαναφερθέντα πεδία εφαρμογής του blockchain, όπως αυτά αποτυπώνονται στα επιστημονικά άρθρα που μελετήθηκαν, φαίνονται στην εικόνα 14.



Εικόνα 14: Εφαρμογές blockchain σε δίκτυα και μικροδίκτυα

Παρατηρείται ότι η εμπορία ενέργειας αποτελεί την πιο διαδεδομένη προτεινόμενη χρήση του blockchain στα έξυπνα δίκτυα, ενώ σημαντικό ρόλο παίζει και η διαχείριση ενέργειας. Αυτό συμβαίνει, διότι οι παραδοσιακές μη αποκεντρωμένες μέθοδοι διαχείρισης δικτύων δεν είναι αρκετά αποτελεσματικές όσον αφορά τα έξυπνα δίκτυα. Ο έλεγχος ενός δυναμικού διασπαρμένου συστήματος είναι πολύ δύσκολο να γίνεται από μία κεντρική μονάδα, ειδικά όταν αυξάνεται ο αριθμός των prosumers (producer και consumer), δηλαδή των ανθρώπων που είναι και παραγωγοί και καταναλωτές στο δίκτυο. Η έγκαιρη και αποδοτική ανταπόκριση στη ζήτηση αποτελεί πρόκληση, όσον αφορά την αποτελεσματικότητα αλλά και το κόστος. Αντίθετα, ένα αποκεντρωμένο σύστημα ελέγχου μπορεί να πετύχει καλύτερη εποπτεία και να ανταποκριθεί στην εξισορρόπηση προσφοράς και ζήτησης ενέργειας [279].

Όσον αφορά τα μικροδίκτυα, αυτά περιορίζονται σε συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή, οπότε είναι σημαντικό να ελέγχεται αυστηρά το ποιος έχει πρόσβαση στα δεδομένα που τα αφορούν, ενώ πρέπει να είναι αποτελεσματική και η διαχείριση ταυτότητας, που όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι εφικτή μέσω blockchain [86], [279]. Επίσης, μέσω της τεχνολογίας κατανεμημένου καθολικού διευκολύνεται η μεταφορά ενέργειας σε μικρή απόσταση και μειώνεται το κόστος [279]. Επιπρόσθετα, το blockchain σε συνδυασμό με τα έξυπνα συμβόλαια επιτρέπει την καλύτερη λειτουργία του μικροδικτύου, με διαφάνεια και αποδοτικότητα [120].

Από την εικόνα 14 παρατηρούμε ότι σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η ασφάλεια στα έξυπνα δίκτυα και τα μικροδίκτυα. Ειδικότερα, το μη αποκεντρωμένο μοντέλο ελέγχου του παραδοσιακού δικτύου δεν προσφέρει επαρκή προστασία όταν εφαρμόζεται σε έξυπνα δίκτυα, καθώς οι απαιτήσεις είναι υψηλές λόγω του μεγάλου πλήθους έξυπνων συσκευών. Επιπλέον, οι έξυπνοι αισθητήρες παράγουν μεγάλο πλήθος δεδομένων που είναι δύσκολα διαχειρίσιμα από μία κεντρική αρχή. Σημαντικές οικονομικές απώλειες έχουν προκληθεί σε έξυπνα δίκτυα εξαιτίας κακόβουλων επιθέσεων και παραβιάσεων του απορρήτου των δεδομένων. Το

blockchain αποτελεί κατάλληλη λύση για την ασφάλεια των έξυπνων δικτύων καθώς η ταυτότητα των εμπλεκόμενων προστατεύεται από την ανωνυμία, ενώ δεν είναι απαραίτητη η συμμετοχή εξωτερικών τρίτων προσώπων τα οποία μπορεί να είναι υπεύθυνα για τη διαρροή των δεδομένων [280].

Η προστασία απορρήτου στα έξυπνα δίκτυα χωρίζεται σε προστασία δεδομένων και προστασία ταυτότητας [22]:

Προστασία δεδομένων

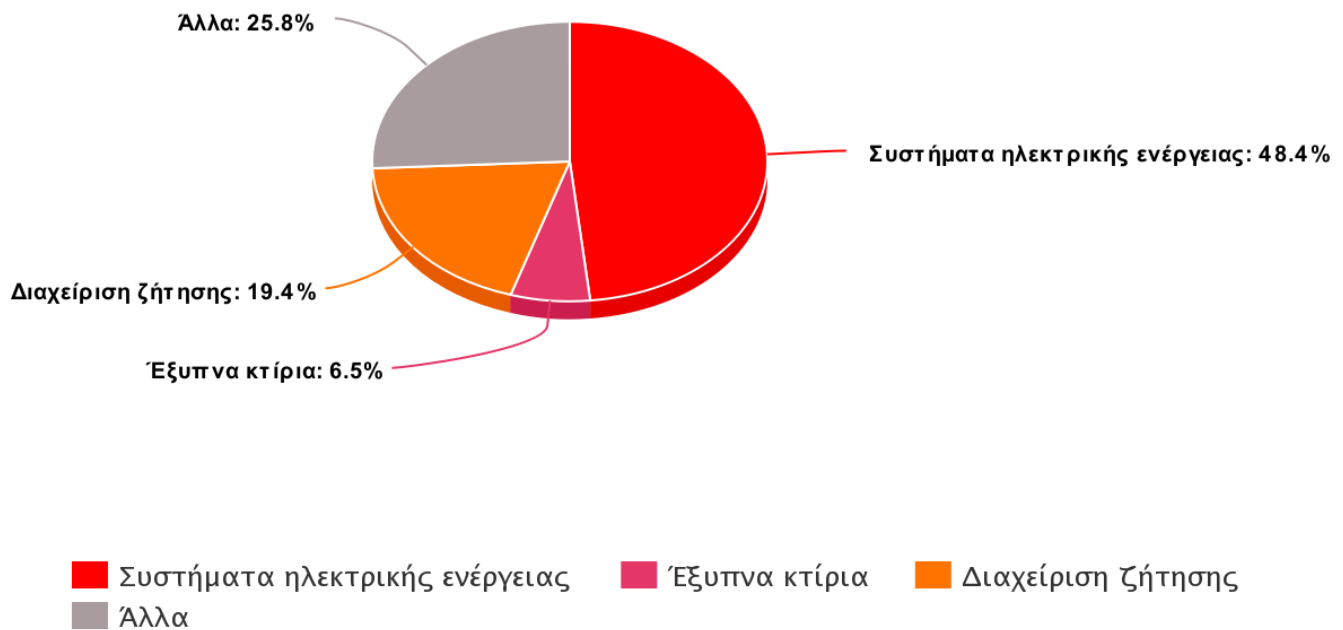
Ένα παράδειγμα αποτελεί η πρόταση των Wang et al., οι οποίοι έχτισαν ένα σύστημα ενεργειακής διαχείρισης για μικροδίκτυα, με βάση το blockchain και συγκεκριμένα την αρχιτεκτονική Hyperledger, εστιάζοντας στην προστασία δεδομένων. Αναλυτικότερα, μέσω της ασυμμετρικής κρυπτογραφίας και της τεχνολογίας zero - knowledge proof, τα δεδομένα που προκύπτουν από τις ενεργειακές συναλλαγές χωρίζονται σε διαφορετικά κανάλια. Το σύστημα απομονώνει τα δεδομένα ακόμα και για τους κόμβους που ανήκουν στο ίδιο κανάλι, όταν αυτά πρέπει να παραμείνουν ιδιωτικά [107].

Προστασία ταυτότητας

Η διαρροή των ταυτοτήτων σε ένα έξυπνο δίκτυο μπορεί δυστυχώς να οδηγήσει και στην αποκάλυψη επιπλέον πληροφοριών όπως η τοποθεσία του εκάστοτε χρήστη και τα χρονικά διαστήματα που χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια [22]. Οι Aitzhan και Svetinovic, σχεδίασαν ένα αποκεντρωμένο σύστημα εμπορίας ενέργειας το οποίο προστατεύει τις ταυτότητες των συμμετεχόντων στην αγορά παρέχοντας μοναδικές συμβολοσειρές για να διατηρηθεί η ανωνυμία [281]. Αντίστοιχα οι Umoren et al. προτείνουν τη χρήση τυχαίων ψευδωνύμων για παραγωγούς και καταναλωτές σε έξυπνα δίκτυα [282].

3.1.2 Διαχείριση Ενέργειας

Ως “διαχείριση ενέργειας” ορίζεται ο σχεδιασμός, ο προγραμματισμός, η οργάνωση, η εποπτεία, η επιτήρηση και ο έλεγχος των διαδικασιών της παραγωγής, της διανομής, της μετατροπής, της αποθήκευσης και της κατανάλωσης ενέργειας [279]. Σύμφωνα με τα άρθρα που εξετάστηκαν, το blockchain θα μπορούσε να υποστηρίξει τη διαχείριση ενέργειας σε ποικιλία ενεργειακών συστημάτων, όπως στις έξυπνες πόλεις, τα μικροδίκτυα, τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και τις εικονικές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής [105], [106], [107], [108], [109], [110], [114], [115], [116], [117], [122]. Επιπλέον, έχουν προταθεί μοντέλα βασισμένα σε blockchain για την ενεργειακή διαχείριση σε κτίρια και σε κοινότητες έξυπνων κτιρίων [112], [115]. Το blockchain μπορεί επίσης να βοηθήσει στη διαχείριση ζήτησης, η οποία εξηγείται αναλυτικότερα στη συνέχεια [108], [113], [119], [120], [121], [123]. Οι προαναφερθείσες εφαρμογές του blockchain στη διαχείριση ενέργειας σύμφωνα με τα άρθρα της ανασκόπησης φαίνονται και στην εικόνα 15:



Εικόνα 15: Εφαρμογές blockchain στη διαχείριση ενέργειας

Σε γενικότερο πλαίσιο, μπορούμε να χωρίσουμε τη διαχείριση ενέργειας σε δύο βασικούς τομείς [279]:

Αποτελεσματική διανομή ενέργειας

Η βέλτιστη διανομή διευκολύνει σημαντικά τους διαχειριστές των δικτύων, προσφέροντας ελαστικότητα και εξασφαλίζοντας μείωση του κόστους. Για να πετύχουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα της διανομής, οι Alskaif et al. προτείνουν ένα μοντέλο βέλτιστης ροής ισχύος, βασισμένο σε ένα ιδιωτικό blockchain και σε αλγόριθμο βελτιστοποίησης ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) [109].

Διαχείριση της ζήτησης

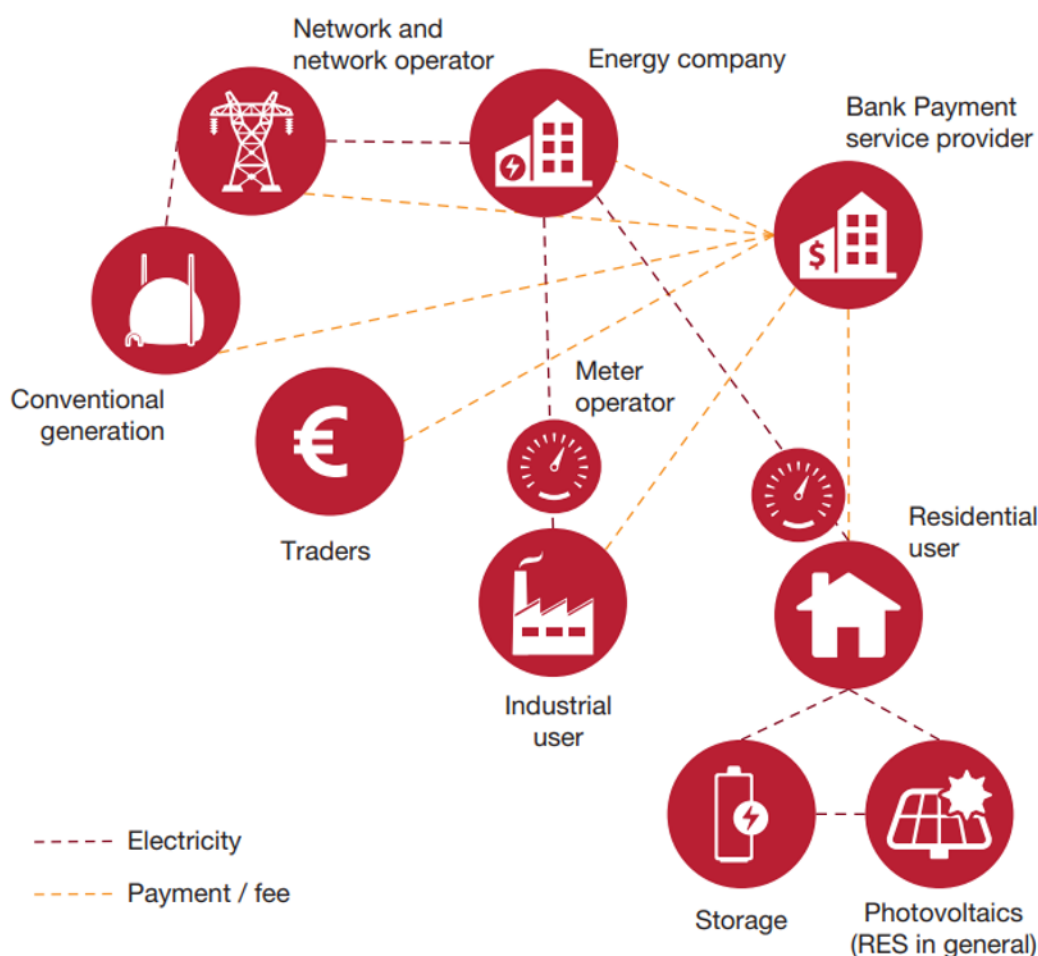
Το demand side management (DSM) βελτιώνει την αξιοπιστία, εξισορροπώντας την παραγωγή και τη ζήτηση, ιδιαίτερα σε συστήματα όπου οι υπάρχουσες υποδομές δεν επιτρέπουν την ικανοποίηση οσοδήποτε μεγάλης ζήτησης ανά πάσα στιγμή [108]. Επομένως η διαχείριση της ζήτησης μπορεί να επεκτείνει τις δυνατότητες του δικτύου χωρίς να είναι απαραίτητη η επέκταση του φυσικού εξοπλισμού του, ελαχιστοποιώντας, για παράδειγμα, την απώλεια ενέργειας με αποκεντρωμένο προγραμματισμό της αποθήκευσης [279]. Το blockchain μπορεί να λειτουργήσει ως ένα βοηθητικό δίκτυο, με κόμβους τα μέλη του ενεργειακού συστήματος, τα οποία συμμετέχουν μέσω των δεδομένων που προκύπτουν από τις καταναλώσεις τους και τη ζήτησή τους, δημιουργώντας μία κοινή βάση δεδομένων. Ένα τέτοιο δίκτυο blockchain καθιστά δυνατό τον χειρισμό και τη μείωση των ενεργειακών καταναλώσεων, βελτιώνοντας ταυτόχρονα τους λόγους PAR (Peak to Average Ratios) του φορτίου [280].

3.1.3 Εμπορία Ενέργειας

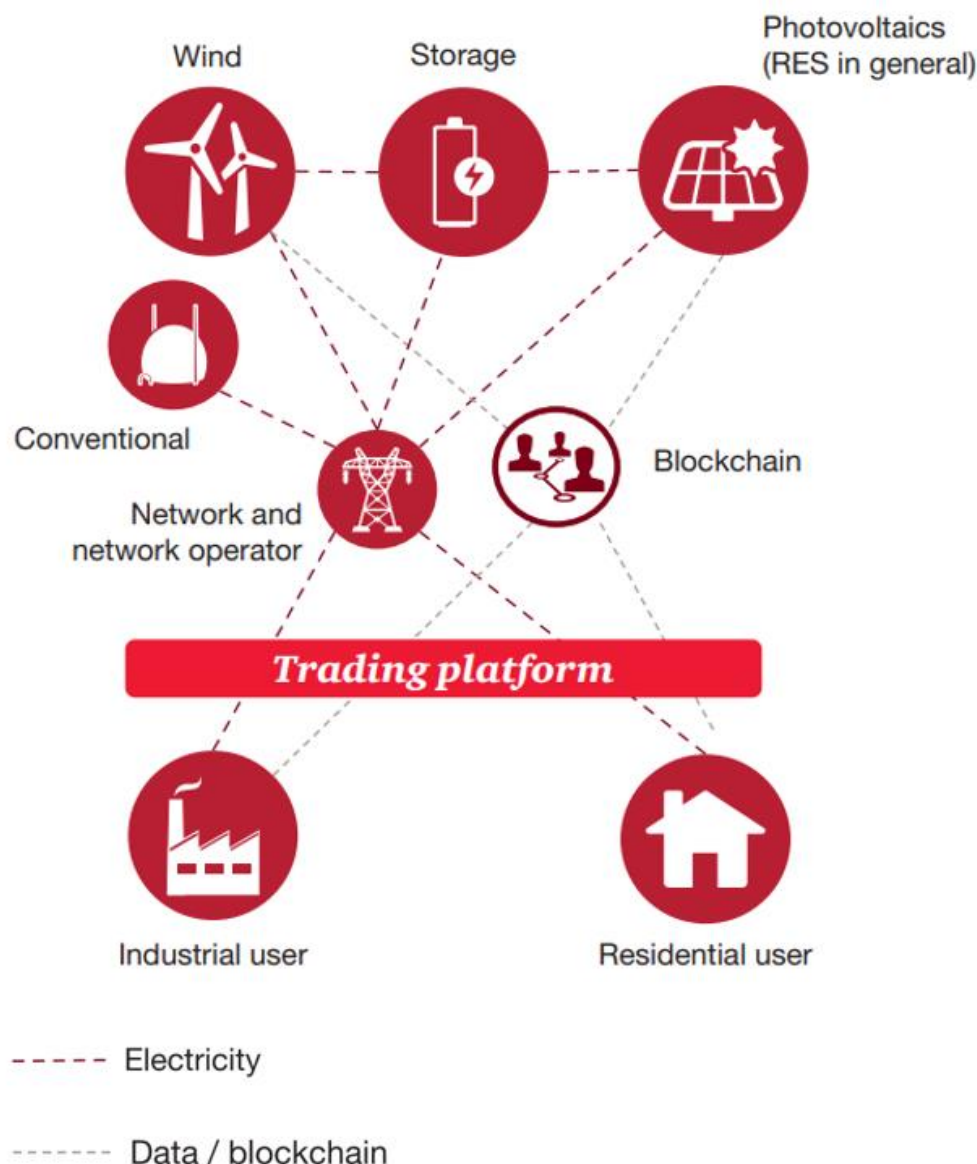
Το blockchain αποτελεί μία ιδανική λύση σε ότι αφορά τον τομέα της εμπορίας ενέργειας, δηλαδή των ενεργειακών συναλλαγών, ειδικά στα έξυπνα δίκτυα αφού η τεχνολογία έχει χρησιμοποιηθεί αρχικά για χρηματοοικονομικές συναλλαγές. Σε ένα παραδοσιακό δίκτυο η συγκεντρωτική φύση της εμπορίας ενέργειας προκαλεί πιο εύκολα τη δημιουργία μονοπωλίου. Αντίθετα, σε ένα έξυπνο δίκτυο με πολλούς prosumers, η διαδικασία των συναλλαγών είναι ουσιαστικά P2P trading, το οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί με διαφάνεια, αξιοπιστία και ασφάλεια μέσω blockchain. Η συχνότητα των συναλλαγών μπορεί να αυξηθεί και το φράγμα εισόδου στην αγορά να μειωθεί [108], [279].

Τα κρυπτονομίσματα έχουν ήδη αποδείξει την αποτελεσματικότητα της συγκεκριμένης τεχνολογίας στις συναλλαγές, ενώ όπως ήδη αναφέρθηκε, η εμπορία ενέργειας στα έξυπνα δίκτυα μπορεί να γίνει με ακόμα ελαστικότερο και βολικότερο τρόπο με τη βοήθεια έξυπνων συμβολαίων, τα οποία δίνουν τη δυνατότητα ευέλικτης τιμολόγησης και διακανονισμών ανάμεσα στους prosumers [108], [279].

Στις εικόνες 16 και 17 φαίνονται οι διαφορές ανάμεσα στο παραδοσιακό μοντέλο συναλλαγών και το μοντέλο με βάση το blockchain [283]:

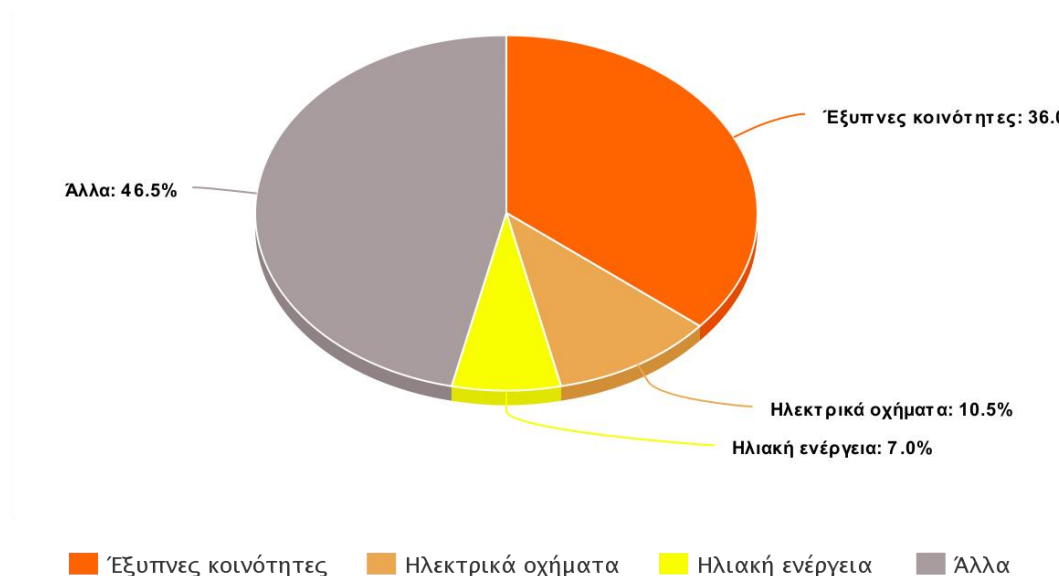


Εικόνα 16: “Παραδοσιακές” διαδικασίες εμπορίας ενέργειας (Πηγή: PwC [283])



Εικόνα 17: Εμπορία ενέργειας βασισμένη σε blockchain (Πηγή: PwC [283])

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε, γίνεται φανερό ότι η εμπορία ενέργειας αποτελεί την πιο “συζητημένη” εφαρμογή του blockchain στον ενεργειακό τομέα. Σύμφωνα με τα άρθρα [124-185], χάρη στην αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας κατανομμένου καθολικού σε ό,τι αφορά τις συναλλαγές, καθώς και χάρη στην αποκεντρωμένη φύση του blockchain, έχουν προταθεί ποικίλες πλατφόρμες με βάση αυτή την τεχνολογία, οι οποίες έχουν σκοπό την υλοποίηση εμπορίου σε μορφή P2P trading σε ενεργειακές αγορές, ή ανάμεσα σε prosumers. Τέτοιες πλατφόρμες βρίσκουν εφαρμογή σε δίκτυα διανομής [127], [143], [144], καθώς και σε έξυπνες κοινότητες και μικροδίκτυα [124], [126], [129], [130], [131], [137], [138], [140], [142], [145], [146], [148], [150], [151], [154], [155], [157], [159], [160], [170], [171], [174], [183]. Το blockchain μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις ενεργειακές αγορές και για σκοπούς πρόβλεψης [162]. Επιπλέον, όπως φαίνεται στην εικόνα 18, αρκετές εφαρμογές του blockchain στην εμπορία ενέργειας αφορούν τα ηλεκτρικά οχήματα και την ηλιακή ενέργεια, για αυτό τον λόγο γίνεται εκτενέστερη εξήγηση αυτών των εφαρμογών σε επόμενα υποκεφάλαια.



Εικόνα 18: Εφαρμογές blockchain στην εμπορία ενέργειας

3.1.4 Αποθήκευση Ενέργειας

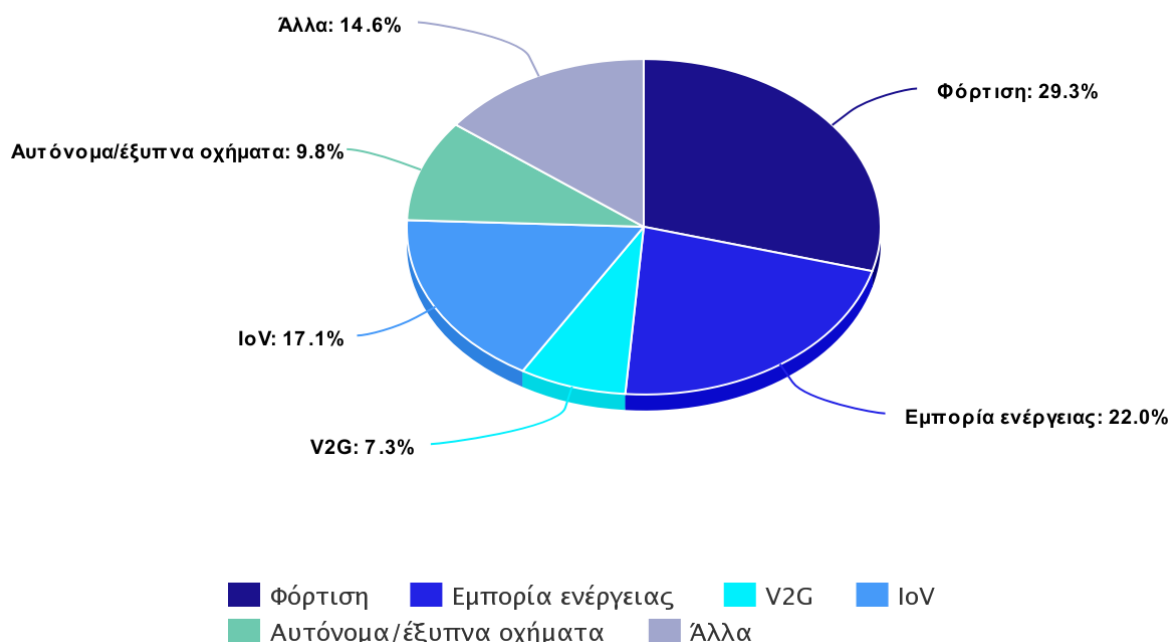
Η αύξηση των ανανεώσιμων πηγών, σε συνδυασμό με την κυμαινόμενη ζήτηση, εισάγουν πληθώρα προκλήσεων στη διαχείριση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Στη μεγαλύτερη ευελιξία αλλά και στην αξιοπιστία των δικτύων θα μπορούσε να συμβάλλει η αποθήκευση ενέργειας. Ειδικότερα, οι μονάδες αποθήκευσης διευκολύνουν την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών, μειώνοντας ταυτόχρονα το κόστος [209]. Επιπρόσθετα, όταν το φορτίο είναι αυξημένο, η κάλυψη της ζήτησης πραγματοποιείται αποτελεσματικότερα αν συμμετέχουν και μονάδες αποθήκευσης σε αυτή. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι, σε περίπτωση σφαλμάτων, οι μονάδες αυτές μπορούν να λειτουργήσουν ως backup, αποτρέποντας ένα ενδεχόμενο blackout [189].

Ωστόσο, η αποθήκευση εισάγει περαιτέρω πολυπλοκότητα στους μηχανισμούς συναλλαγών ενέργειας. Επιπλέον, είναι επιτακτική η ανάγκη του συντονισμού της φόρτισης των διαφόρων μονάδων, στις οποίες μπορεί να συμπεριλαμβάνονται και ηλεκτρικά οχήματα, ώστε να μην προκύψει υπερβολικός φόρτος στο σύνολο του δικτύου. Σε ένα σύστημα συντονισμού είναι απαραίτητη η συλλογή δεδομένων, όπως το αν μία μονάδα απαιτεί φόρτιση ή όχι, το ποσό που απαιτείται και ο χρόνος που απομένει μέχρι την πλήρη φόρτιση. Τέτοια δεδομένα αποκαλύπτουν εμμέσως και άλλες πληροφορίες που δεν πρέπει να διαρρεύσουν, όπως είναι οι δραστηριότητες σε μία κατοικία, το αν κάποιος βρίσκεται ή όχι σε αυτήν, το αν ο ιδιοκτήτης της λείπει για μεγάλο χρονικό διάστημα, ενώ μέσω της φόρτισης μπορεί να αποκαλυφθεί και η τοποθεσία των ηλεκτρικών οχημάτων [209].

Ο συντονισμός της φόρτισης θα μπορούσε να ανατεθεί σε έναν κεντρικό συντονιστή, ο οποίος επεξεργάζεται τα αιτήματα φόρτισης και αποφασίζει ποιες μονάδες έχουν προτεραιότητα. Ωστόσο, σε περιπτώσεις κακόβουλων επιθέσεων εκτίθενται δεδομένα από όλους τους χρήστες και κανένα από τα αιτήματα φόρτισης δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί [209]. Γίνεται, λοιπόν, φανερό ότι η ασφάλεια, η διαφάνεια, η αξιοπιστία, η αποδοτικότητα, η ιδιωτικότητα και ο αποκεντρωμένος χαρακτήρας του blockchain το καθιστούν ιδανική λύση για την υποστήριξη ενός μηχανισμού συντονισμού αποθήκευσης ενέργειας [189], [209].

3.1.5 Ηλεκτρικά Οχήματα

Υπάρχουν αρκετές πολλά υποσχόμενες εφαρμογές του blockchain στον τομέα των ηλεκτρικών οχημάτων, όπως φαίνεται και στην εικόνα 19. Πιο συγκεκριμένα, έχουν προταθεί αρκετά μοντέλα για τη φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων, με σκοπό, μεταξύ άλλων, την υποστήριξη της διαχείρισης της μπαταρίας, τον συγχρονισμό και τον προγραμματισμό της φόρτισης, καθώς και την πραγματοποίηση σχετικών πληρωμών [195], [197], [207], [209], [212], [218], [222], [223], [224], [225], [226], [228]. Άλλοι ερευνητές έχουν προτείνει μοντέλα εμπορίας ενέργειας για ηλεκτρικά οχήματα με βάση το blockchain [196], [208], [211], [213], [215], [216], [217], [218], [220]. Το blockchain έχει επίσης εξεταστεί ως πιθανό εργαλείο για τη σύνδεση των οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο (Vehicle to Grid, V2G) [198], [199], [206], αλλά και για δίκτυα οχημάτων ή αλλιώς διαδίκτυο οχημάτων (Internet of Vehicles, IoV) [200], [201], [202], [203], [204], [214], [219], όπως και σε εφαρμογές σχετικές με αυτόνομα ή έξυπνα οχήματα [205], [210], [227], [229].



Εικόνα 19: Εφαρμογές blockchain στα ηλεκτρικά οχήματα

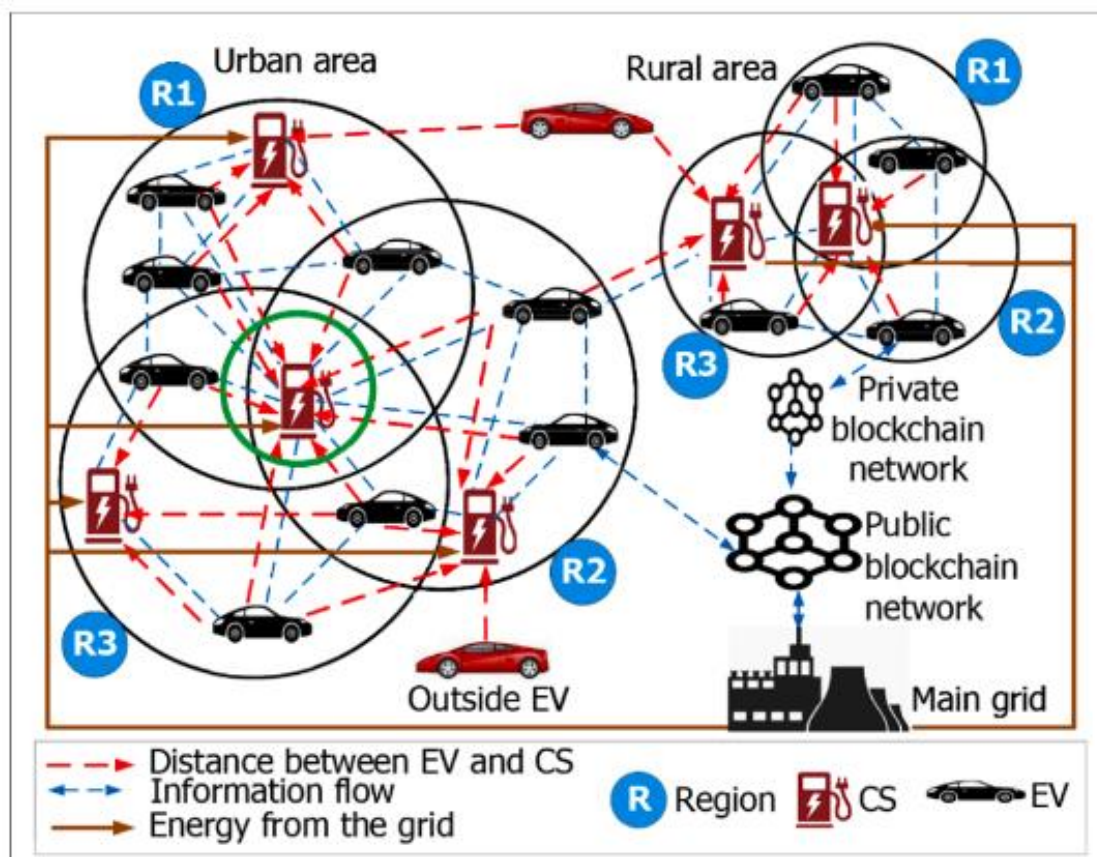
Φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

Τα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούνται από όλο και περισσότερους ανθρώπους, ενώ πολλές χώρες ενθαρρύνουν την αγορά τους. Είναι, όμως, αναγκαίο να βρεθούν αποτελεσματικές λύσεις ώστε οι χρήστες του οδικού δικτύου να μη δυσκολεύονται στην εύρεση διαθέσιμου σταθμού φόρτισης. Σε αυτό το πλαίσιο, γεννήθηκε η ιδέα της διαμοιρασμένης φόρτισης. Ειδικότερα, αδρανείς ή ιδιωτικοί σταθμοί φόρτισης δύνανται να αυξήσουν τον βαθμό χρησιμοποίησής τους, αφού διαμοιράζονται με σκοπό την εξυπηρέτηση των αναγκών φόρτισης όσο το δυνατόν περισσότερων οχημάτων. Η εφαρμογή αυτής της ιδέας μπορεί να υποστηριχθεί από τεχνολογία blockchain, καθώς απαιτείται μία πλατφόρμα στην οποία εμπλέκονται

πολλά μέλη: οι χρήστες των ηλεκτρικών οχημάτων, οι χειριστές ή οι ιδιοκτήτες των σταθμών φόρτισης και άλλοι [284]. Επιπλέον, σε αυτή την πλατφόρμα είναι πολύ σημαντική η εμπιστοσύνη, η ασφάλεια και η βελτιστοποίηση του χρονικού προγραμματισμού της φόρτισης [209], [284]. Λαμβάνοντας υπόψιν πληθώρα παραγόντων, όπως την τοποθεσία των οχημάτων και των σταθμών φόρτισης, τους χρόνους αναμονής και την ταχύτητα των οχημάτων, είναι θεμιτό η πλατφόρμα να προγραμματίζει τη διαδικασία της φόρτισης με τέτοιο τρόπο, ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος και να μεγιστοποιείται η ικανοποίηση των χρηστών [284].

Ηλεκτρικά οχήματα στο δίκτυο (V2G)

Το V2G (Vehicle to Grid) network και η εμπορία ενέργειας μέσω ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να υποστηριχθούν από το blockchain. Το κάθε όχημα φορτίζεται και αποφορτίζεται (άρα συναλλάσσει ενέργεια με το δίκτυο) και μπορεί να λειτουργήσει ως κόμβος-miner του δικτύου, αφού η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται είναι συμβατή με τα ηλεκτρικά οχήματα (όταν χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι χαμηλής ισχύος) [279]. Οι Samuel et al. προτείνουν ένα ασφαλές μοντέλο για τα ηλεκτρικά οχήματα σε έξυπνες ενεργειακές κοινότητες. Στο μοντέλο αυτό ένα ιδιωτικό blockchain προστατεύει τις προσωπικές πληροφορίες των ιδιοκτητών των οχημάτων από κακόβουλες επιθέσεις, ενώ ένα δημόσιο blockchain εξασφαλίζει την αποδοτική συναλλαγή ενέργειας. Το προαναφερθέν σύστημα αποτυπώνεται σχηματικά στην εικόνα 12 [285].



Εικόνα 20: Σχεδιάγραμμα συστήματος εμπορίας ενέργειας για ηλεκτρικά οχήματα μέσω blockchain (Πηγή Samuel et al. 2022 [285])

3.1.6 Εμπορία Δικαιωμάτων Εκπομπών

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα οικοσυστήματα, την υγεία των ανθρώπων και την οικονομία είναι γνωστές και αυταπόδεικτες [286]. Μεγάλη συνεισφορά στις εκπομπές αερίων, οι οποίες συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και κατ' επέκταση στην προαναφερθείσα κλιματική αλλαγή, παρουσιάζει η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας [236]. Σε αυτό το πλαίσιο έχουν δημιουργηθεί σχήματα emission trading (συναλλαγών εκπομπών αερίων), δηλαδή μηχανισμοί - αγορές που ενθαρρύνουν τη μείωση των εκπομπών αερίων, για παράδειγμα διοξειδίου του άνθρακα [236], [237]. Η παρακολούθηση του περιορισμού των εκπομπών στο πλαίσιο αυτών των μηχανισμών μπορεί να υποστηριχθεί από το blockchain, καθώς με αυτή την τεχνολογία εξασφαλίζεται η ακεραιότητα των συστημάτων και το δίκαιο “εμπόριο” εκπομπών, ευνοώντας το πραγματικό όφελος για το περιβάλλον, αντί για την προσπάθεια μείωσης κόστους και αύξησης κέρδους των εταιρειών [236].

Σύμφωνα με τα άρθρα που εξετάστηκαν στα πλαίσια της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, το blockchain μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών για σκοπούς βελτιστοποίησης των διαδικασιών, παρακολούθησης των εκπομπών, αλλά και πρόληψης των απατών [231-249]. Δύο από τις εξεταζόμενες δημοσιεύσεις μελετούν συνδυασμό εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών με εμπορία ενέργειας [239], [241]. Η διαχείριση πιστοποιητικών ανανεώσιμων πηγών μπορεί επίσης να υλοποιηθεί μέσω blockchain [247], [249].

3.1.7 Έξυπνοι Μετρητές

Οι έξυπνοι μετρητές (smart meters) είναι σημαντικό κομμάτι των έξυπνων σπιτιών (smart homes), καθώς είναι υπεύθυνοι για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με την κατανάλωση ενέργειας από διάφορες συσκευές. Τα συγκεκριμένα δεδομένα αποστέλλονται στο κέντρο ελέγχου, με σκοπό την παρακολούθηση και την πρόβλεψη του φορτίου, την ανταπόκριση στη ζήτηση και την τιμολόγηση της κατανάλωσης. Ενημερώνοντας τους χρήστες, το κέντρο ελέγχου τους βοηθάει να διαχειριστούν την κατανάλωσή τους και να εξοικονομήσουν χρήματα [250-256].

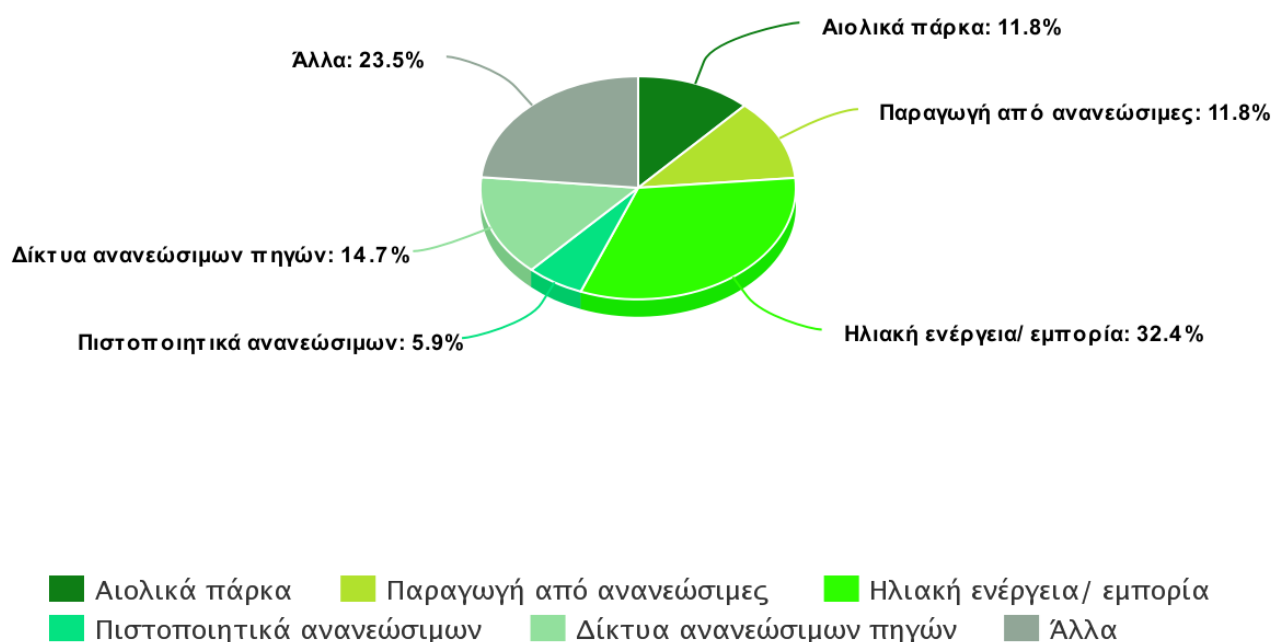
Αυτή η αμφίδρομη ροή πληροφοριών είναι μεν χρήσιμη, προκαλεί δε αρκετά θέματα ασφάλειας, κυρίως κινδύνους διαρροής των προσωπικών πληροφοριών των καταναλωτών και παραβίασης του απορρήτου τους. Επομένως είναι αναγκαίο να εξεταστεί η ασφάλεια διαφόρων διαδικασιών απαραίτητων για τη λειτουργία των έξυπνων σπιτιών και των έξυπνων μετρητών, όπως η επαλήθευση ταυτότητας των χρηστών και η πρόσβαση στις συσκευές και στα δεδομένα που προκύπτουν από αυτές. Μέσω του blockchain, γίνεται εφικτή η πραγματοποίηση αυτών των διαδικασιών ελαχιστοποιώντας το ρίσκο της έκθεσης πληροφοριών, όπως είναι οι ώρες εργασίας ενός χρήστη, τα χρονικά διαστήματα που βρίσκεται εντός και εκτός σπιτιού και οι χρόνοι χρήσης συγκεκριμένων συσκευών [250-256].

Σημειώνεται ότι η λογική του κεντρικού ελέγχου είναι δύσκολο να εφαρμοστεί, καθώς είναι δύσκολο να βρεθεί ένας κεντρικός κόμβος - φορέας τον οποίο να εμπιστεύονται όλοι οι χρήστες. Επιπλέον, μία επίθεση στον κεντρικό κόμβο μπορεί να οδηγήσει σε έκθεση ή και απώλεια μεγάλου όγκου δεδομένων πολλών χρηστών [250-256].

3.1.8 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Από τις προηγούμενες ενότητες γίνεται φανερό ότι ο εκσυγχρονισμός των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και η ένταξη νέων τεχνολογιών όπως το blockchain αποτελούν απαραίτητες ενέργειες, κυρίως λόγω της ανάγκης να ενταχθούν όσο το δυνατόν περισσότερες ανανεώσιμες πηγές στα δίκτυα, με τέτοιο τρόπο ώστε να περιοριστεί η συμβατική παραγωγή σε τέτοιο βαθμό που να επιτρέπει την ικανοποίηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να εκλύονται αλόγιστα αέρια του θερμοκηπίου. Ωστόσο είναι απαραίτητο η ενεργειακή μετάβαση να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορούμε να διαχειριστούμε βέλτιστα τα νέα αποκεντρωμένα και περίπλοκα συστήματα.

Στο πλαίσιο αυτό, όσον αφορά την παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές, έχουν προταθεί λύσεις με βάση το blockchain για την αιολική ενέργεια [261], [262], [263] και για την ηλιακή ενέργεια [267], [271], [273], και ειδικότερα για την παραγωγή από φωτοβολταϊκά πλαίσια [257], [258], [274] και τις συναλλαγές ηλιακής ενέργειας [264], [265], [266], [267], [269], [272]. Η κατανομή των προαναφερθέντων θεμάτων στα επιστημονικά άρθρα που εξετάστηκαν για τη βιβλιογραφική ανασκόπηση φαίνονται στην εικόνα 21.



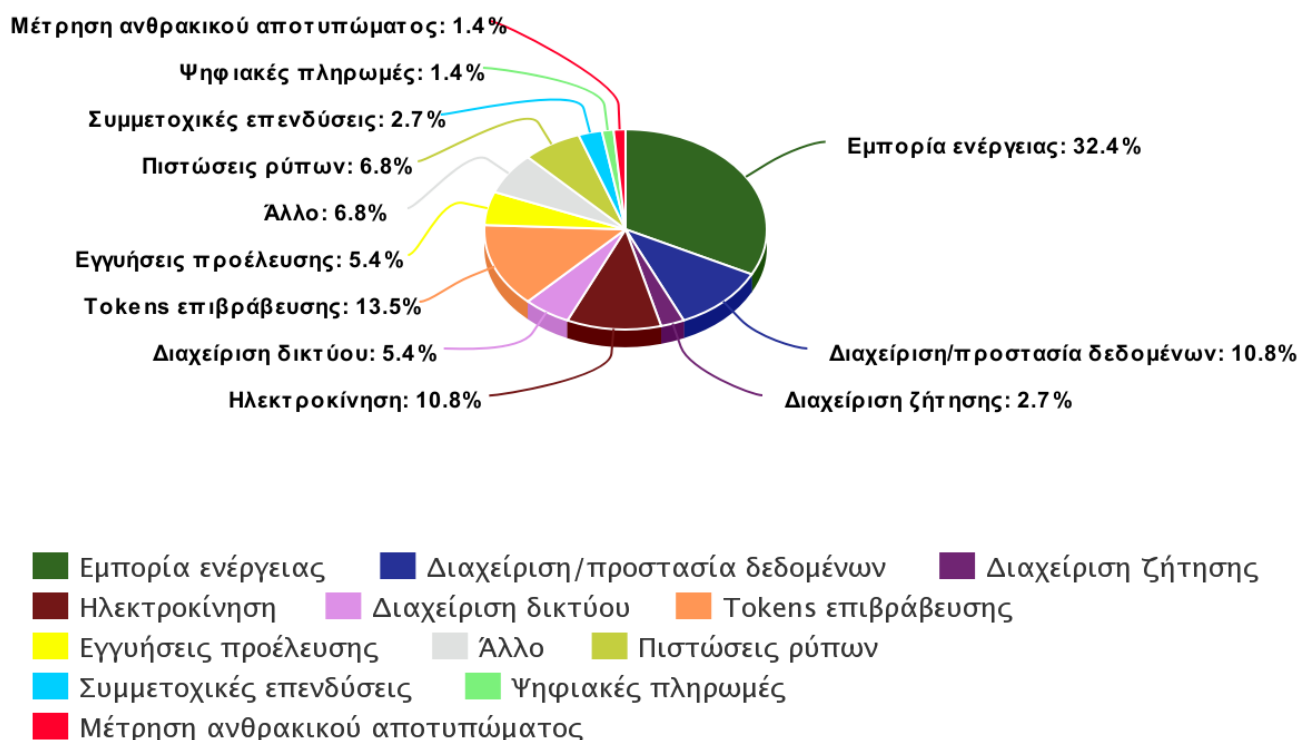
Εικόνα 21: Εφαρμογές blockchain στις ΑΠΕ

3.2 Πρακτικές Εφαρμογές του Blockchain στην Ενέργεια

Έχοντας μελετήσει τις θεωρητικές προσεγγίσεις σχετικά με την εφαρμογή του blockchain στον ενεργειακό τομέα, είναι σημαντικό να εξεταστούν και οι σχετικές προσπάθειες που έχουν γίνει στη βιομηχανία, κυρίως μέσω πιλοτικών έργων. Στις προσπάθειες αυτές εντάσσονται ορισμένα έργα που έχουν χρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση και στα οποία συμμετέχουν διάφοροι οργανισμοί, όπως πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα, αλλά και πραγματικοί συντελεστές της αγοράς, δηλαδή εταιρείες που δραστηριοποιούνται είτε στον ενεργειακό τομέα, είτε στην υλοποίηση τεχνολογιών καταναμεμένου καθολικού. Αρκετές από αυτές τις προσπάθειες έχουν καταγραφεί από το EU Blockchain Observatory and Forum [287]. Υπάρχουν, όμως, και αρκετά έργα που έχουν υλοποιηθεί από μεγάλες και γνωστές εταιρείες, ως πιλοτικά προγράμματα. Επιπρόσθετα, το blockchain αποτελεί τομέα ενδιαφέροντος για πολλές νεοφυείς επιχειρήσεις, και αρκετές έχουν προτείνει πλατφόρμες βασισμένες σε αυτή την τεχνολογία οι οποίες σκοπεύουν να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες του ενεργειακού τομέα.

Οι πρακτικές εφαρμογές του blockchain, σύμφωνα με τα 70 έργα που εξετάστηκαν και που περιγράφονται σύντομα στο παράρτημα, αφορούν σε μεγάλο βαθμό τους τομείς που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3.1 της παρούσας εργασίας. Αναλυτικότερα, υπάρχουν αρκετές εφαρμογές που αφορούν έξυπνα δίκτυα και ιδιαίτερα τοπικά μικροδίκτυα. Σε αρκετές από τις εφαρμογές σε δίκτυα παίζει σημαντικό ρόλο η διαχείριση ενέργειας, ενώ δίνεται βάση και στη διαχείριση της ζήτησης. Η εμπορία ενέργειας δεν κυριαρχεί μόνο στη βιβλιογραφία, αλλά είναι και η πιο συχνή εφαρμογή του blockchain στην ενέργεια και σε πρακτικό επίπεδο, αφού έχει δημιουργηθεί πληθώρα σχετικών μοντέλων και πολλές πλατφόρμες που στοχεύουν κυρίως στην ένταξη prosumers και μικρών παραγωγών τόσο σε τοπικές όσο και σε μεγαλύτερες αγορές. Όπως είναι αναμενόμενο, τέτοιες εφαρμογές συνδυάζονται συχνά με την υλοποίηση έξυπνων δικτύων, ωστόσο οι συναλλαγές μέσω blockchain στα δίκτυα δεν αφορούν μόνο την εμπορία ενέργειας. Αντίθετα, έχει δοκιμαστεί η χρήση τεχνολογίας καταναμεμένου καθολικού και για τη διαχείριση και τον διαμοιρασμό δεδομένων, αλλά και για την προστασία του απορρήτου. Όσον αφορά την αποθήκευση ενέργειας αυτή καθαυτή, όπως και στη βιβλιογραφία, οι προσεγγίσεις είναι περιορισμένες και συνήθως συνδυάζονται με άλλες εφαρμογές. Παρόλα αυτά, υπάρχουν αρκετά μοντέλα που αφορούν τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία είναι η πιο συχνή εφαρμογή του blockchain στην ηλεκτροκίνηση. Όσον αφορά την εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών, οι λύσεις που έχουν υλοποιηθεί εντάσσονται συχνά και τη διαχείριση άλλων πιστοποιητικών ή ενεργειακών στοιχείων σχετικών με τις ανανεώσιμες πηγές, όπως οι Εγγυήσεις Προέλευσης (Guarantees of Origin, GoOs). Πρόκειται για εγγυήσεις που πιστοποιούν αν η ενέργεια που καταναλώνεται, για παράδειγμα από έναν οργανισμό, προήλθε από συμβατικές ή ανανεώσιμες πηγές. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο καθώς αρκετοί χρήστες των ενεργειακών δικτύων και ιδιαίτερα εταιρείες που θέλουν να παρακολουθούν το περιβαλλοντολογικό τους αποτύπωμα έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν το ενεργειακό τους μίγμα. Επιπρόσθετα, οι εφαρμογές σχετικά με τους έξυπνους μετρητές αφορούν τη διαχείριση δεδομένων μέσω blockchain. Τέλος, οι προσεγγίσεις σχετικά με τις ανανεώσιμες πηγές είναι αρκετά διαδεδομένες, ειδικά σε ό,τι αφορά την ηλιακή ενέργεια.

Επιπλέον, στις πρακτικές εφαρμογές του blockchain στην ενέργεια εντάσσονται διάφορα ενεργειακά κρυπτονομίσματα, ή tokens, που εξυπηρετούν διάφορους σκοπούς, από την εμπορία ενέργειας μέχρι την επιβράβευση της καλής ενεργειακής συμπεριφοράς. Μία ακόμα εφαρμογή που καθίσταται δυνατή μέσω του blockchain είναι η χρηματοδότηση έργων ενεργειακής αναβάθμισης μέσα από πλατφόρμες συμμετοχικών επενδύσεων (crowdfunding).



Εικόνα 22: Έργα ενσωμάτωσης του blockchain στην ενέργεια

Στην εικόνα 22 παρουσιάζεται το κυκλικό διάγραμμα που προέκυψε από τα 70 έργα που εξετάστηκαν. Αξίζει να σημειωθεί ότι, για την εξαγωγή του διαγράμματος, έργα που κάλυπταν παραπάνω από μία περιοχές μετρήθηκαν ως ξεχωριστά έργα (δηλαδή για παράδειγμα μία πλατφόρμα διαχείρισης ενέργειας έξυπνου δικτύου η οποία δίνει και τη δυνατότητα συναλλαγών εντάσσεται και στο ποσοστό της “Διαχείρισης δικτύου” και στο ποσοστό της “Εμπορίας ενέργειας”. Παρατηρούμε ότι, όπως αναφέρθηκε, η εμπορία ενέργειας είναι κυρίαρχη και καλύπτει σχεδόν το ένα τρίτο των εξεταζόμενων έργων.

Αξιοσημείωτο είναι το ποσοστό των κρυπτονομισμάτων που λειτουργούν σαν επιβράβευση για την παραγωγή ενέργειας, ή για την συμπεριφορική ενεργειακή αποδοτικότητα. Οι συγκεκριμένες ενεργειακές εφαρμογές παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς παρόλο που έχουν γίνει αρκετές σχετικές προσπάθειες στη βιομηχανία, στο δείγμα επιστημονικών άρθρων που μελετήθηκε δεν ήταν πολλές οι αντίστοιχες προσεγγίσεις. Γίνεται, λοιπόν, φανερό, ότι στην πράξη είναι ίσως ευκολότερο και πιο λογικό οι εταιρείες, οι επιχειρήσεις και άλλοι οργανισμοί ή εμπλεκόμενοι φορείς της βιομηχανίας να καταφεύγουν στην πιο “δοκιμασμένη” εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας, που δεν είναι άλλη από τα ψηφιακά νομίσματα.

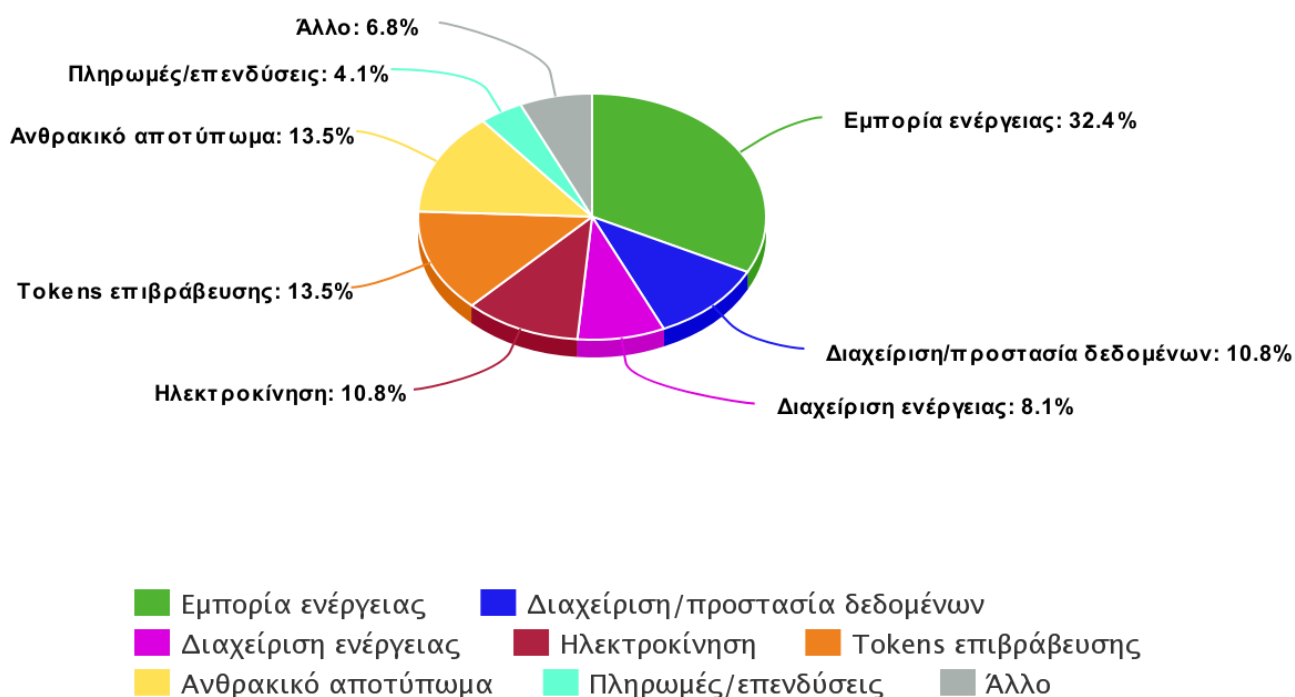
Ισάριθμο ποσοστό προέκυψε για την “Ηλεκτροκίνηση” και τη “Διαχείριση/προστασία δεδομένων”. Οι εφαρμογές ηλεκτροκίνησης αφορούν σχεδόν αποκλειστικά τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Η διαχείριση και η προστασία δεδομένων ήταν αντικείμενο αρκετών έργων, τόσο αυτόνομα όσο και συνδυαστικά.

Σε ποσοστό ακολουθούν οι πιστώσεις ρύπων, οι πρακτικές εφαρμογές των οποίων αφορούν αρχικά τη διαχείριση των πιστώσεων, αλλά και την εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών όπως αυτή αναλύθηκε στο υποκεφάλαιο 3.1.6.

Ισάριθμο ποσοστό βρέθηκε για τις “Εγγυήσεις προέλευσης” και τη “Διαχείριση Δικτύου”. Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι ενώ στη βιβλιογραφία η διαχείριση ενέργειας διαδραματίζει αρκετά σημαντικότερο ρόλο σε σχέση με τις εγγυήσεις προέλευσης, στην πράξη αυτές έχουν αποσπάσει αξιοσημείωτο ενδιαφέρον, καθώς φαίνεται πως η παρακολούθηση και ο έλεγχος του ενεργειακού μίγματος ανάγονται σε όλο και πιο σημαντική προτεραιότητα για τη βιομηχανία.

Ακολουθούν πεδία με μικρότερα ποσοστά. Ανάμεσά τους η διαχείριση της ζήτησης, ως παρακλάδι της διαχείρισης της ενέργειας, που παρουσιάστηκε και στο κεφάλαιο 3.1.2. Όπως ήδη αναφέρθηκε, στα εξεταζόμενα έργα υπήρχαν και παραδείγματα συμμετοχικών επενδύσεων, τα οποία μάλιστα έχουν και πλεονεκτήματα κοινωνικού χαρακτήρα καθώς διευκολύνουν την ενεργειακή μετάβαση του αναπτυσσόμενου κόσμου. Οι ψηφιακές πληρωμές, από την άλλη πλευρά, δίνουν τη δυνατότητα προπληρωμής του ρεύματος που πρόκειται να καταναλωθεί. Τέλος, το blockchain έχει χρησιμοποιηθεί πιλοτικά και για τη μέτρηση/βελτίωση του ανθρακικού αποτυπώματος.

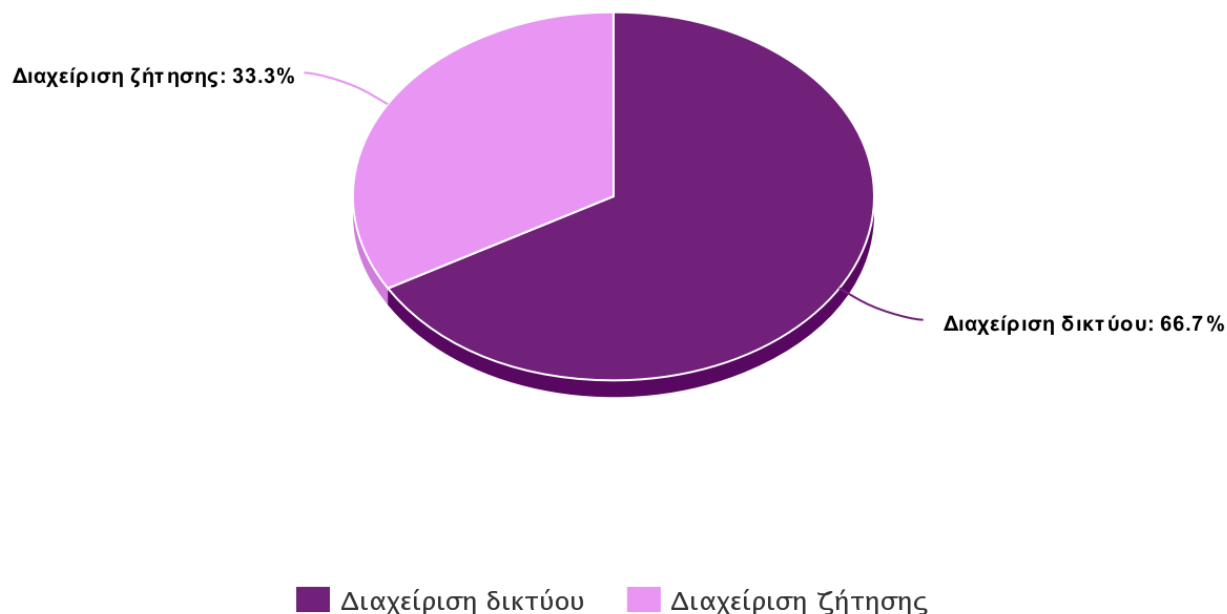
Μερικές ακόμα μεμονωμένες προσπάθειες ένταξης του blockchain στην ενέργεια που δεν εντάσσονται σε κάποια από τις προαναφερθείσες κατηγορίες περιλαμβάνουν πλατφόρμες που στοχεύουν στη γενικότερη προσαρμογή της τεχνολογίας καταμετρημένου καθολικού για τον ενεργειακό τομέα, εντάσσοντας πληθώρα ενεργειακών υπηρεσιών, αλλά και στη μετατροπή φυσικών εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών σε αντίστοιχες εικονικές ψηφιακές οντότητες.



Εικόνα 23: Κατηγοριοποίηση πρακτικών εφαρμογών blockchain στην ενέργεια

Προκειμένου να πετύχουμε καλύτερη εποπτεία των έργων blockchain στον ενεργειακό τομέα, πραγματοποιήθηκε μία περαιτέρω κατηγοριοποίηση των έργων που αναλύθηκαν παραπάνω, η οποία φαίνεται στην εικόνα 23.

Ειδικότερα, η διαχείριση ζήτησης και η διαχείριση δικτύου συμψηφίστηκαν ως “Διαχείριση ενέργειας”. Όπως φαίνεται στην εικόνα 24, και όπως είναι αναμενόμενο, η διαχείριση του δικτύου υπερτερεί της διαχείρισης ζήτησης, η οποία είναι μία πιο εξειδικευμένη εφαρμογή, και χρησιμοποιείται στο ένα τρίτο των σχετικών έργων.

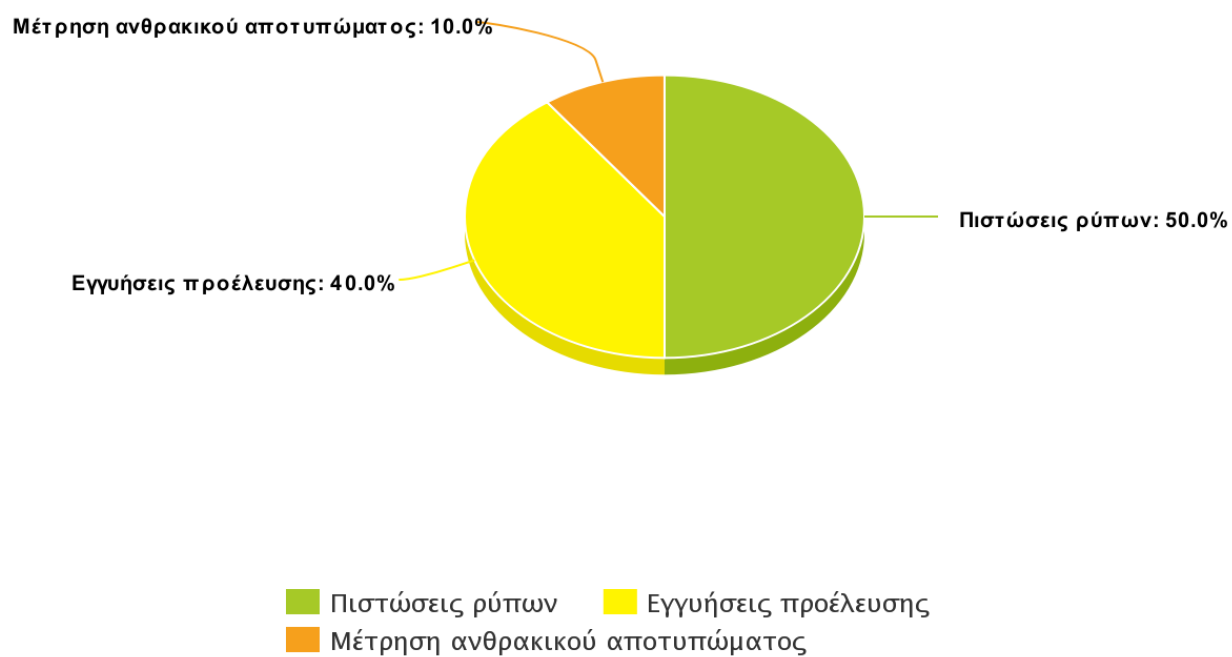


Εικόνα 24: Εφαρμογές blockchain στη διαχείριση ενέργειας

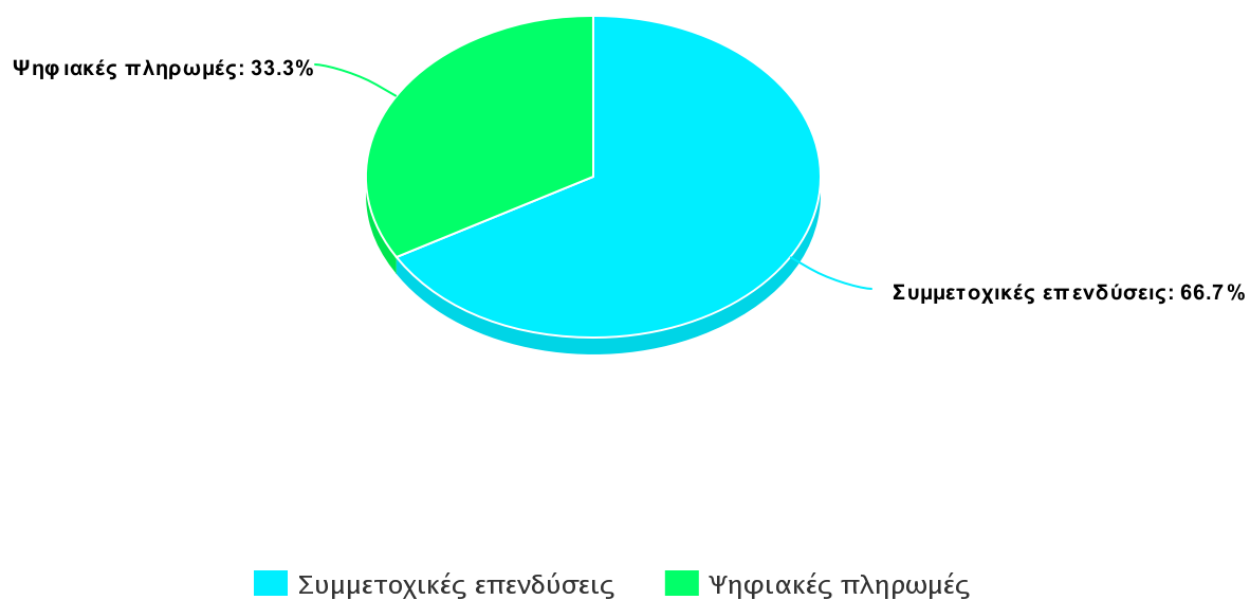
Αντίστοιχα, οι πιστώσεις ρύπων, οι εγγυήσεις προέλευσης και η μέτρηση ανθρακικού αποτυπώματος ομαδοποιήθηκαν στην κατηγορία “Ανθρακικό αποτύπωμα”. Από την εικόνα 23 παρατηρούμε ότι, μέσω της ομαδοποίησης αυτής, αναδεικνύεται το γεγονός ότι το blockchain χρησιμοποιείται αρκετά σε αυτή την κατηγορία καθώς το ποσοστό γίνεται αρκετά σημαντικό, ισάριθμο με τα “Tokens επιβράβευσης”.

Στην εικόνα 25, δίνεται μέσω κυκλικού διαγράμματος η κατανομή των τριών προαναφερθεισών υποκατηγοριών του ανθρακικού αποτυπώματος. Παρατηρούμε ότι τα μισά έργα σε αυτή την κατηγορία αφορούσαν τις πιστώσεις ρύπων, όπως είναι αναμενόμενο καθώς σε αυτή την υποκατηγορία εντάσσεται και η εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών.

Τέλος, στην εικόνα 26 παρατηρείται ότι, περισσότερα έργα βασίζονταν σε πλατφόρμες συμμετοχικών επενδύσεων από ότι σε εφαρμογές ψηφιακών πληρωμών ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 25: Εφαρμογές blockchain στη διαχείριση ανθρακικού αποτυπώματος



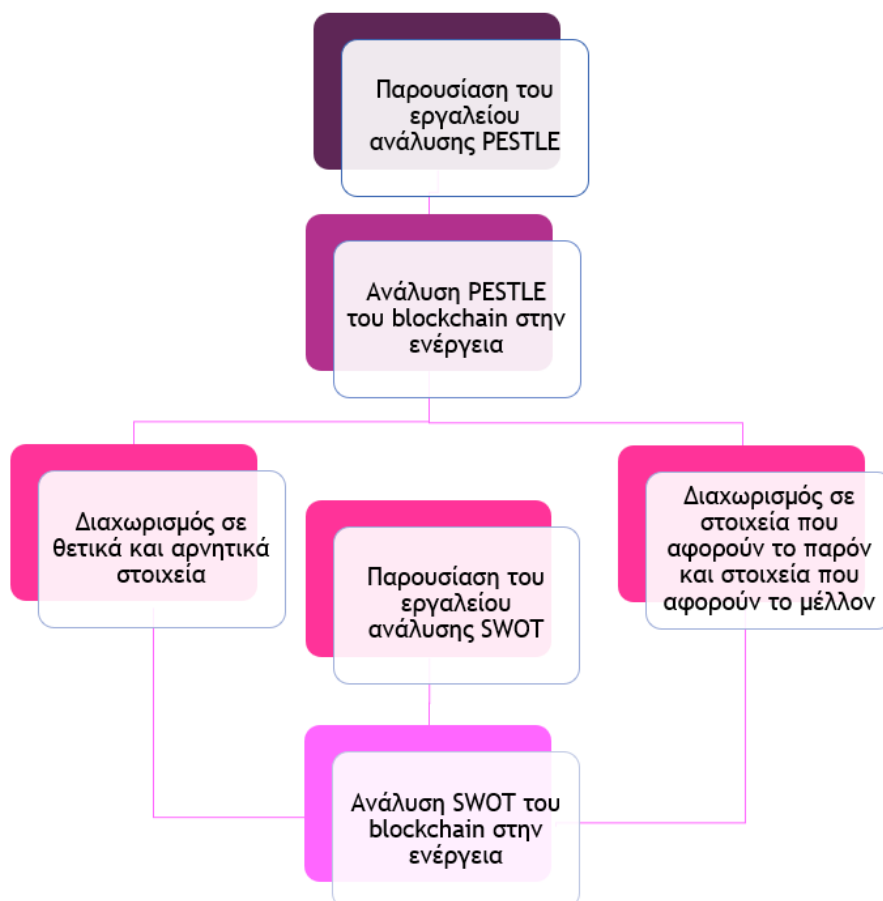
Εικόνα 26: Εφαρμογές blockchain στις επενδύσεις και τις πληρωμές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Ανάλυση Αγοράς και Ταυτοποίηση Εμποδίων

4 Ανάλυση Αγοράς και Ταυτοποίηση Εμποδίων

Έχοντας εξετάσει τις διάφορες εφαρμογές του blockchain στον τομέα της ενέργειας, τόσο από θεωρητική όσο και από πρακτική σκοπιά, γίνεται φανερό ότι οι υποψήφιες εφαρμογές είναι αρκετές, όμως οι προσπάθειες πραγματικής ενσωμάτωσης της τεχνολογίας αυτής σε ενεργειακές υπηρεσίες είναι ακόμα σε μεγάλο βαθμό πιλοτικές. Για να πραγματοποιηθεί, λοιπόν, η ένταξη της τεχνολογίας κατανεμημένου καθολικού στην ενέργεια, με τρόπο αποτελεσματικό, αποδοτικό και ωφέλιμο, είναι απαραίτητο να εντοπιστούν και να αναλυθούν οι προοπτικές και οι προκλήσεις που περιλαμβάνονται σε αυτή την ένταξη, ώστε να προσδιοριστούν τα συγκεκριμένα εμπόδια και να αντιμετωπιστούν. Σε αυτό το πλαίσιο, στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μία ανάλυση SWOT για τον εντοπισμό των δυνατών σημείων, των αδυναμιών, των ευκαιριών και των κινδύνων ένταξης του blockchain στην ενέργεια, αφού αναλυθούν οι πολιτικοί, οικονομικοί, κοινωνικοί, τεχνολογικοί, νομικοί και περιβαλλοντικοί παράγοντες του θέματος μέσω ανάλυσης PESTLE. Στη συνέχεια, από τις αναλύσεις αυτές απομονώνονται τα εμπόδια εφαρμογής του blockchain στην ενέργεια που ταυτοποιήθηκαν, και κατηγοριοποιούνται. Η μεθοδολογία διεξαγωγής των δύο αναλύσεων δίνεται στην εικόνα 27:



Εικόνα 27: Βήματα προσδιορισμού των εφαρμογών του blockchain στην ενέργεια

4.1 Ανάλυση PESTLE

4.1.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο Ανάλυσης PESTLE

Το εργαλείο ανάλυσης PESTLE αποτελεί μία παραλλαγή της ανάλυσης PEST. Το ακρωνύμιο PEST αντιστοιχεί στους όρους Political, Economic, Social, Technological, δηλαδή περιγράφει τους πολιτικούς, οικονομικούς, κοινωνικούς και τεχνολογικούς παράγοντες ενός θέματος. Η παραλλαγή PESTLE επεκτείνεται και σε νομικούς (Legal) και περιβαλλοντολογικούς (Environmental) παράγοντες [288]. Αναλυτικότερα [289]:

Πολιτικοί παράγοντες

Οι πολιτικοί παράγοντες αναφέρονται σε κυβερνητικές παρεμβάσεις ή δραστηριότητες που μπορεί να επηρεάσουν το θέμα που αναλύεται στο πλαίσιο της PEST.

Οικονομικοί παράγοντες

Οι οικονομικοί παράγοντες καλύπτουν κυρίως το μακροοικονομικό περιβάλλον και τις εξωτερικές οικονομικές συνθήκες, ενώ μπορεί να περιλαμβάνουν και στοιχεία εποχιακότητας.

Κοινωνικοί παράγοντες

Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται, εκτός από τους κοινωνικούς παράγοντες, πολιτιστικά ή δημογραφικά στοιχεία που μπορεί να είναι σημαντικά για το θέμα που εξετάζεται.

Τεχνολογικοί παράγοντες

Αυτοί οι παράγοντες είναι πιθανό να περιλαμβάνουν τεχνολογικές δραστηριότητες, τεχνολογικά κίνητρα, τεχνολογικές εξελίξεις, τεχνολογικό εξοπλισμό και άλλα.

Η Ανάλυση PEST χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την αξιολόγηση των παραγόντων που ενδέχεται να επηρεάζουν ένα προϊόν ή μία υπηρεσία. Ωστόσο, η εφαρμογή της ανάλυσης αυτής πλέον δεν περιορίζεται στον τομέα των επιχειρήσεων. Ειδικότερα, η PEST και οι παραλλαγές της χρησιμοποιούνται πλέον και στην έρευνα αλλά και σε εφαρμογές της μηχανικής, καθώς αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για την ταυτοποίηση των πιθανών προοπτικών, εμποδίων και ρίσκων [290], [291].

Το συγκεκριμένο εργαλείο ανάλυσης προήλθε από την ιδέα του Francis Aguilar, καθηγητή του πανεπιστημίου Harvard. Ειδικότερα, ο Aguilar αναφερόταν στους τέσσερις παράγοντες εξωτερικού περιβάλλοντος οι οποίοι είναι αναγκαίο να εξετάζονται για να αξιολογούνται οι επιχειρηματικές στρατηγικές, ως ETPS. Αναφερόταν, λοιπόν, στο οικονομικό, τεχνολογικό, πολιτικό και κοινωνικό περιβάλλον. Επομένως, πρόκειται για τους ίδιους παράγοντες που εξετάζονται στην PEST ανάλυση [292], [293].

4.1.2 Ανάλυση PESTLE του Blockchain στην Ενέργεια

Η ανάλυση PESTLE έχει χρησιμοποιηθεί στην έρευνα για διάφορα θέματα σχετικά με την ενέργεια και τη βιωσιμότητα [294], [295], [296]. Επιπλέον, έχουν διεξαχθεί αναλύσεις PESTLE που αφορούν το blockchain κυρίως στον τομέα της οικονομίας και ειδικότερα των κρυπτονομισμάτων [297], [298], [299]. Ωστόσο, δεν υπάρχει κάποια ανάλογη ανάλυση που να αφορά τις εφαρμογές του blockchain στην ενέργεια, πέρα από κάποιες μεμονωμένες προσπάθειες που αφορούν συγκεκριμένους τομείς της ενέργειας [300], [301]. Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μία διεξοδική ανάλυση που αφορά το σύνολο των ενεργειακών εφαρμογών του blockchain, που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3.

4.1.2.1 Πολιτικοί παράγοντες

Τα πρώτα μας τέσσερα ευρήματα αφορούν την πολιτική διάσταση της ένταξης του blockchain στον ενεργειακό τομέα. Πρώτον, εξαιτίας της κλιματικής κρίσης, οι στόχοι για την ενεργειακή μετάβαση έχουν γίνει ένα αναπόσπαστο κομμάτι της πολιτικής ατζέντας [302]. Σε αυτούς τους στόχους συμπεριλαμβάνεται η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και η στροφή προς καθαρότερες μορφές ενέργειας. Όπως έχει αναφερθεί, το blockchain δύναται να συνεισφέρει στη διαχείριση περίπλοκων ενεργειακών συστημάτων, ακόμα κι όταν το ποσοστό της ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές είναι υψηλό, αλλά και σε άλλες δράσεις που έχουν ως στόχο τον περιορισμό των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής όπως τα σχήματα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών [236], [302], [303], [304].

Δεύτερον, ο συνδυασμός ενέργειας και blockchain έχει κινήσει το ενδιαφέρον των Ευρωπαϊκών θεσμών. Πιο συγκεκριμένα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή στοχεύει στην αποτελεσματική ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών σε ενεργειακά συστήματα και των prosumers στις ενεργειακές αγορές. Ως αποτέλεσμα, προκύπτει μία πληθώρα διαφορετικών προκλήσεων. Ωστόσο, το blockchain θα μπορούσε να παρέχει επαρκείς λύσεις και να βοηθήσει να αντιμετωπιστούν πολλά από τα προβλήματα που προκύπτουν, και συνεπώς η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξετάζει τις πιθανές του εφαρμογές σε ενεργειακές υπηρεσίες [303], [305].

Τρίτον, είναι απαραίτητο να σημειωθεί ότι είναι πιθανό να υπάρχει μία ανεπάρκεια γνώσης σχετικά με το blockchain, λόγω του γεγονότος ότι πρόκειται για μία νέα τεχνολογία. Η άγνοια είναι πιθανό να εμποδίζει τους πολιτικούς φορείς από το να αποκτήσουν πλήρη εικόνα των προοπτικών και των πλεονεκτημάτων της εφαρμογής του blockchain, αλλά και το κατά πόσο ορισμένες υποψήφιες εφαρμογές είναι εφικτές [306].

Το τέταρτο εύρημα προέρχεται από την προαναφερθείσα άγνοια. Ειδικότερα, η έλλειψη επαρκούς κατανόησης της τεχνολογίας κατανεμημένου καθολικού επιφέρει αβεβαιότητες στην υιοθέτησή του. Εφόσον οι πολιτικοί τείνουν να αποφεύγουν το ρίσκο, αυτές οι αβεβαιότητες είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψιν ως ένα αξιοσημείωτο εμπόδιο της ευρείας εφαρμογής του blockchain στην ενέργεια [307], [308].

4.1.2.2 Οικονομικοί παράγοντες

Οι οικονομικές παράγοντες συνοψίζονται σε εφτά ευρήματα. Πρώτον, πρέπει να ληφθεί υπόψη η επιτυχία των κρυπτονομισμάτων στον οικονομικό τομέα. Τα κρυπτονομίσματα έχουν φέρει την επανάσταση στις συναλλαγές, με αποτέλεσμα να “απειλούν” να μεταμορφώσουν τις λειτουργίες του χρηματοοικονομικού τομέα [306], [309]. Τα ψηφιακά νομίσματα αποτελούν την πρώτη εφαρμογή του blockchain και έχουν αναχθεί στην κυρίαρχη εφαρμογή της τεχνολογίας κατανεμημένου καθολικού ως και σήμερα. Επομένως, η αποτελεσματικότητα και η επιτυχία του blockchain σε ό,τι αφορά τις χρηματικές συναλλαγές έχει ήδη αποδειχθεί, και η επέκτασή του σε άλλους τύπους συναλλαγών είναι πολλά υποσχόμενη [302].

Δεύτερον, τα έξυπνα συμβόλαια επίσης υπόσχονται να αλλάξουν τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιούνται οι πληρωμές. Ειδικότερα, μπορεί να επιτευχθεί απευθείας σύνδεση με τον εκάστοτε πάροχο, με αποτέλεσμα οι ενδιάμεσοι φορείς να γίνονται περιττοί. Επιπλέον, έχουν γίνει προσπάθειες ένταξης δεδομένων από τον πραγματικό κόσμο στα συγκεκριμένα συμβόλαια [305], [309].

Τρίτον, η ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών σε ποικίλους τομείς, όπως στον ενεργειακό τομέα, μπορεί να επιφέρει οικονομικά οφέλη, καθώς προκύπτουν νέες διασυνδέσεις ανάμεσα σε ετερογενείς εμπλεκόμενους φορείς. Όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 3.2, για να υλοποιηθούν έργα που ενσωματώνουν το blockchain στην ενέργεια, νεοφυείς επιχειρήσεις, πάροχοι ενεργειακών υπηρεσιών και οικονομικοί θεσμοί χρειάζεται να συνεργαστούν, να δημιουργήσουν καινοτόμες στρατηγικές και νέα επιχειρηματικά μοντέλα, που μπορεί να φέρουν στην επιφάνεια νέες ευκαιρίες και οφέλη όχι μόνο για τους καταναλωτές αλλά και για ολόκληρο το ενεργειακό σύστημα [302], [310].

Τέταρτον, ο συνδυασμός blockchain και ενέργειας θα μπορούσε να δημιουργήσει επενδυτικές ευκαιρίες [302]. Ωστόσο, παρατηρείται ότι τα στελέχη εταιρειών δείχνουν ακόμη αρκετό σκεπτικισμό. Παρότι το blockchain έχει ήδη τραβήξει την προσοχή αρκετών νεοφυών επιχειρήσεων, πολλές εταιρείες του ενεργειακού τομέα θα δίσταζαν αρκετά να επενδύσουν σε αυτή την τεχνολογία, λόγω των ρίσκων που εμπεριέχονται στην αλλαγή των υφιστάμενων επιχειρηματικών τους μοντέλων, σε συνδυασμό με την έλλειψη επαρκούς υποβάθρου τεχνολογικής τεχνογνωσίας αλλά και την εγγενή αβεβαιότητα των νέων τεχνολογιών. Επιπλέον, μπορεί πολλές επιχειρήσεις να μην έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιήσουν μια τέτοια επένδυση λόγω των υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων του blockchain. Οι μικρομεσαίες επιχειρήσεις ίσως να μην μπορούν να υποστηρίξουν οικονομικά την απαιτούμενη αναβάθμιση του hardware των υπάρχοντων πόρων τους, η οποία πιθανώς θα ήταν αναγκαία προκειμένου να μπορέσουν να εντάξουν το blockchain στις υπηρεσίες που παρέχουν [302], [306]. Επιπρόσθετα, ακόμα δεν υπάρχει συγκεκριμένη νομοθεσία για το blockchain. Η νομική πολυπλοκότητα και αβεβαιότητα θα μπορούσαν να γίνουν ένα σημαντικό πρόβλημα για την υιοθέτηση του blockchain, αφού σε αυτή την περίπτωση θα απαιτηθούν συμβουλευτικές υπηρεσίες για να βοηθήσουν τις εταιρείες να συμβαδίζουν με τους κανονισμούς. Κάτι τέτοιο θα αύξανε τις συνολικές δαπάνες [302]. Η απόδοση των επενδύσεων σε τεχνολογία κατανεμημένου καθολικού αποτελεί ακόμα μία μείζονα ανησυχία. Όπως εξηγείται στο επόμενο (πέμπτο) εύρημα, τα αρχικά κόστη της εγκατάστασης των συστημάτων blockchain είναι γενικά υψηλά, με αποτέλεσμα οι υποψήφιοι επενδυτές να ανησυχούν ότι το περιθώριο κέρδους μπορεί να αποδειχθεί υπερβολικά χαμηλό [311].

Πέμπτον, πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση του blockchain στο κόστος. Το αρχικό κόστος εγκατάστασης, αλλά και τα κόστη συντήρησης, θεωρούνται αρκετά υψηλά, το οποίο αποτελεί ένα λογικό μειονέκτημα αν αναλογιστεί κανείς το πρώιμο στάδιο στο οποίο βρίσκεται η συγκεκριμένη τεχνολογία. Ως νέα και καινοτόμα, η τεχνολογία blockchain απαιτεί εξειδικευμένους παρόχους υπηρεσιών προκειμένου να εφαρμοστεί [306], [312]. Όσον αφορά το κόστος συναλλαγής, η επιστημονική κοινότητα δεν έχει φτάσει ακόμα σε ένα κοινό συμπέρασμα σχετικά με το αν αυτό θα αυξηθεί ή θα μειωθεί χάρη στο blockchain. Μερικοί υποστηρίζουν

ότι η μείωση της χρέωσης της συναλλαγής, ο περιορισμός των αποτυχημένων συναλλαγών και η απαλλαγή από τον έλεγχο τρίτων μερών θα οδηγήσουν σε μία συνολική μείωση του κόστους συναλλαγής. Από την άλλη πλευρά, η ενεργειακή κατανάλωση που απαιτείται για τη συναλλαγή μπορεί να αυξηθεί, αυξάνοντας συνεπώς και το κόστος. Το blockchain έχει επίσης προταθεί ως λύση για τη μείωση του κόστους της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Συμπερασματικά, το πώς το blockchain θα επηρεάσει το κόστος εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή και τα χαρακτηριστικά του συστήματος, παρόλο που γενικά ο προσεκτικός σχεδιασμός, η σωστή εγκατάσταση και η αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών αυξάνει τις πιθανότητες για μείωση του κόστους μακροπρόθεσμα [312].

Έκτον, στους οικονομικούς παράγοντες εντάσσουμε τις ενεργειακές αγορές, καθώς και τις αγορές μέτρησης της κατανάλωσης (metering market). Οι ενεργειακές αγορές τείνουν να γίνουν όλο και πιο απελευθερωμένες. Η ένταξη των prosumers στις υπάρχουσες αγορές μπορεί, όπως έχουμε αναφέρει, να υποστηριχθεί από το blockchain, ενισχύοντας την ανεξαρτησία των καταναλωτών από προμηθευτές, διαχειριστές και άλλους τρίτους φορείς ή ενδιάμεσες οντότητες, χάρη στην αποκεντρωμένη φύση της τεχνολογίας [303], [310]. Χωρίς μία κεντρική αρχή, η εμπορία ενέργειας δεν είναι τόσο εύκολο να χειραγωγηθεί, καθώς η χειραγώγηση θα εντοπιζόταν εύκολα χάρη στη διαφάνεια που προσφέρει το blockchain [305]. Το φράγμα εισόδου στην αγορά μπορεί επίσης να μειωθεί. Επιπλέον, πολλές εφαρμογές βασισμένες σε τεχνολογία κατανεμημένου καθολικού, ειδικά σε έξυπνα δίκτυα και συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτούν τη χρήση δεδομένων που προκύπτουν από έξυπνους μετρητές. Ωστόσο, στην παρούσα φάση τα δεδομένα αυτά είναι διαθέσιμα μόνο σε συγκεκριμένες οντότητες και διαχειρίζονται αποκλειστικά από αυτές, κάτι το οποίο αποτελεί εμπόδιο για την υιοθέτηση του blockchain. Το γεγονός ότι η αγορά μέτρησης της κατανάλωσης δεν είναι ακόμα ανοιχτή και απελευθερωμένη πρέπει να ληφθεί υπόψη ως ένα σημαντικό εμπόδιο για την εφαρμογή του blockchain σε έξυπνα δίκτυα [302]. Εκτός από την προσβασιμότητα των δεδομένων μέτρησης κατανάλωσης, ένα ακόμα πρόβλημα μπορεί να είναι το πλήθος έξυπνων μετρητών, που μπορεί να μην είναι ακόμα επαρκές έτσι ώστε να μπορούν να υποστηριχθούν πλατφόρμες βασισμένες στο blockchain [308].

Έβδομον, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.2, πλατφόρμες συμμετοχικών επενδύσεων βασισμένες στο blockchain μπορούν να διευκολύνουν τη χρηματοδότηση έργων βιωσιμότητας σε όλο τον κόσμο, ενθαρρύνοντας την επίτευξη στόχων ενεργειακής μετάβασης και την πρόσβαση σε ενέργεια και επιφέροντας οφέλη και από κοινωνική σκοπιά [302].

4.1.2.3 Κοινωνικοί παράγοντες

Όσον αφορά τους κοινωνικούς παράγοντες, λαμβάνονται υπόψη έξι ευρήματα. Το πρώτο εύρημα αφορά την κοινωνική αποδοχή της αποκεντρωμένης P2P εμπορίας ενέργειας. Σύμφωνα με έρευνα που διεξήχθη από τους Borges et al., υπάρχει μία κοινωνική στροφή προς τις P2P ψηφιακές συναλλαγές ρεύματος. Συγκεκριμένα, το 66% των ερωτηθέντων υποψήφιων prosumers θεώρησαν την P2P εμπορία ενέργειας ως μία θετική εξέλιξη. Ωστόσο, αρκετοί συμμετέχοντες στην έρευνα παρέμειναν σκεπτικοί. Ένα μη αμελητέο ποσοστό των υποψήφιων prosumers θεώρησε την αποκέντρωση του συστήματος συναλλαγών και την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών σε αυτό αρκετά επισφαλείς. Πιο συγκεκριμένα, το 30% των συμμετεχόντων είχαν αμφιβολίες σχετικά με την ασφάλεια του ψηφιοποιημένου συστήματος [311]. Η λειτουργικότητα των έξυπνων σπιτιών στα έξυπνα δίκτυα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον διαμοιρασμό δεδομένων, αλλά αρκετοί prosumers μπορεί να μην αισθάνονται άνετα με αυτό και να μην είναι πρόθυμοι να μοιραστούν ενεργειακά δεδομένα. Επιπρόσθετα, υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με το ενδεχόμενο ο αλγόριθμος να ευνοήσει συγκεκριμένους συμμετέχοντες στο δίκτυο στα πρώιμα στάδια της εξέλιξής του. Άλλες ανησυχίες αφορούν την αξιοπιστία του ψηφιακού συστήματος, τις νομικές αβεβαιότητες αλλά και τα πιθανά λάθη που ίσως να μην είναι εύκολα αναστρέψιμα [308], [309], [311]. Η μη αντιστρεψιμότητα του

blockchain αποτελεί ένα αξιοσημείωτο πρόβλημα, που αναλύεται πιο διεξοδικά στους τεχνολογικούς παράγοντες της ανάλυσης PESTLE. Για παράδειγμα, δεν είναι σίγουρο αν ένα λάθος σε ένα έξυπνο συμβόλαιο θα μπορούσε να διορθωθεί. Εξάλλου, η αποκέντρωση δεν είναι απαραίτητα κοινωνικά αποδεκτή, αφού πολλοί συμμετέχοντες στο δίκτυο είναι πιθανό να νιώθουν μεγαλύτερη ασφάλεια αν μία εξωτερική αρχή διαχειρίζεται το σύστημα. Τέλος, πολλοί υποψήφιοι prosumers δεν εμπιστεύονται ένα εντελώς ψηφιοποιημένο σύστημα, χωρίς εναλλακτική χειροκίνητου ελέγχου. Υπάρχουν αμφιβολίες σχετικά με τη συμπεριφορά του συστήματος σε απρόβλεπτες ή μη συνηθισμένες καταστάσεις, όπως για παράδειγμα κατά την περίοδο των διακοπών. Σχέδια έκτακτης ανάγκης θα μπορούσαν να κατευνάσουν τον κοινωνικό δισταγμό απέναντι σε ψηφιακά και P2P σχήματα συναλλαγών [311].

Δεύτερον, η κοινωνία βλέπει το bitcoin και το blockchain ως δύο συνυφασμένες πρωτοποριακές τεχνολογίες, πράγμα το οποίο δημιουργεί παρανοήσεις [306]. Το bitcoin έχει αποκτήσει αρνητική χροιά για πολλά μέλη της κοινωνίας, καθώς έχει συνδεθεί με παράνομες ενέργειες, όπως ξέπλυμα χρήματος, χακαρίσματα και απάτες [306], [313]. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει έλλειψη εμπιστοσύνης σε σχέση με τις τεχνολογίες καταμετρημένου καθολικού, και συνεπώς, οι πιθανές εφαρμογές τους σε πεδία πέραν της οικονομίας αγνοούνται [306].

Οι προαναφερθείσες παρανοήσεις ενισχύονται από τη γενικότερη έλλειψη κατανόησης και επαρκούς γνώσης του blockchain. Η τεχνολογία αυτή θεωρείται αρκετά περίπλοκη. Έτσι, η έλλειψη εμπιστοσύνης στην τεχνολογία ενθαρρύνεται από το γεγονός ότι τα τεχνικά χαρακτηριστικά της δε γίνονται κατανοητά [306].

Το τέταρτο εύρημα προκύπτει από τα δύο προηγούμενα. Οι παρανοήσεις και η έλλειψη κατανόησης της τεχνολογίας οδηγούν σε αίσθημα αβεβαιότητας. Επομένως, η υιοθέτηση του blockchain θεωρείται επισφαλής και η κοινωνία τείνει γενικά να νιώθει αποστροφή ως προς το ρίσκο [306], [307], [314].

Η αποστροφή και η αποφυγή του ρίσκου είναι πιθανό να συνδέεται με το γεγονός ότι νέες τεχνολογίες, η λειτουργία των οποίων δεν έχει προλάβει να ελεγχθεί ευρέως, θεωρούνται αμέσως και εγγενώς αναξιόπιστες. Το blockchain θα μπορούσε να αυξήσει την κοινωνική αποδοχή του αν διεξάγονταν περισσότερα τεστ που θα έλεγχαν την ασφάλεια και την αξιοπιστία του σε πραγματικές εφαρμογές [302], [303], [308].

Τέλος, δεν πρέπει να αμεληθεί η πιθανή θετική επίδραση του συνδυασμού ενέργειας και blockchain για τις χώρες του αναπτυσσόμενου κόσμου. Όπως αναφέρθηκε και στους οικονομικούς παράγοντες της ανάλυσης PESTLE, η τεχνολογία καταμετρημένου καθολικού μπορεί να υποστηρίξει εναλλακτικά χρηματοδοτικά μοντέλα, όπως οι συμμετοχικές επενδύσεις. Τέτοια μοντέλα δύνανται να ενισχύσουν την κοινωνική πρωτοβουλία και να επιφέρουν σημαντικά οφέλη. Για παράδειγμα, η πλατφόρμα συμμετοχικών επενδύσεων Usizo, βασισμένη στο blockchain και σε εγκατεστημένους έξυπνους μετρητές, επιτρέπει δωρεές που συνεισφέρουν στην αποπληρωμή λογαριασμών ρεύματος σχολείων στη Νότια Αφρική [302].

4.1.2.4 Τεχνολογικοί παράγοντες

Η εξέταση των τεχνολογικών παραγόντων των εφαρμογών του blockchain στον ενεργειακό τομέα θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως το πιο ουσιαστικό κομμάτι της ανάλυσης PESTLE. Παρουσιάζονται επτά ευρήματα. Πρώτον, η τάση ψηφιοποίησης κυριαρχεί σε πολλούς τομείς, και ο ενεργειακός τομέας δεν αποτελεί εξαίρεση. Πρωτοποριακές τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένου του blockchain, υπόσχονται να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα των ενεργειακών συστημάτων. Χάρη στην ψηφιοποίηση, η ενσωμάτωση και η συμμετοχή πολλών χρηστών σε ενεργειακές αγορές θα μπορούσε να επισπευστεί [306], [308].

Δεύτερον, αναλύονται τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά του blockchain που ενδέχεται να διευκολύνουν την ένταξή του σε ενεργειακές εφαρμογές. Επίσης θα αξιολογηθούν οι τεχνικοί περιορισμοί που εμποδίζουν την υιοθέτηση του blockchain. Αυτά τα χαρακτηριστικά και περιορισμοί συνοψίζονται και στον πίνακα 7. Αρχικά, η αποκεντρωμένη φύση του blockchain το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές P2P εμπορίας ενέργειας [303]. Τα P2P συστήματα συναλλαγών δεν μπορούν εύκολα να υποστηριχθούν από τα παραδοσιακά μη αποκεντρωμένα μοντέλα. Χάρη στο αποκεντρωμένο blockchain, μπορούν να εξαλειφθούν τα προβλήματα που θα προκύπταν από την αποτυχία τρίτων εξωτερικών φορέων ελέγχου [312]. Ένα ακόμα σημαντικό στοιχείο του blockchain είναι η διαφάνεια που προσφέρει, καθώς αυτό είναι πολύ χρήσιμο στις ενεργειακές εφαρμογές. Για παράδειγμα, εφόσον οι συναλλαγές και οι δραστηριότητες θα μεταδίδονταν και θα παρακολουθούνταν από όλους τους κόμβους του δικτύου, η χειραγώγηση της ενεργειακής αγοράς και οι απάτες σε σχήματα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών θα μπορούσαν να αποφευχθούν [236], [305], [308], [312], [315]. Τα δεδομένα που αποθηκεύονται στο blockchain είναι γενικά αμετάβλητα. Η αμεταβλητότητα είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό, για παράδειγμα, σε εφαρμογές για τις οποίες χρειάζεται να ανιχνεύεται η προέλευση της ενέργειας που καταναλώνεται [305], [308], [316]. Η αμεταβλητότητα του blockchain εξασφαλίζει σε μεγάλο βαθμό την εγκυρότητα των δεδομένων [309]. Η δομή του blockchain είναι τέτοια, ώστε μόλις ένα block προστεθεί στην αλυσίδα, δεν μπορεί πλέον να γίνει επεξεργασία ή διαγραφή του. Επιπλέον, τα δεδομένα παραμένουν προσπελάσιμα μόλις ενταχθούν στην αλυσίδα [312]. Τα συστήματα βασισμένα στο blockchain θεωρούνται γενικά αξιόπιστα και αρκετά ασφαλή, εφόσον όλοι οι συμμετέχοντες στο δίκτυο μπορούν να δημιουργήσουν blocks και να διατηρήσουν ένα αντίγραφο των δεδομένων. Συνεπώς, δεν είναι εύκολο να προκληθεί σοβαρή βλάβη στο δίκτυο [305]. Η ασφάλεια αυξάνεται περαιτέρω χάρη στην αποκεντρωμένη φύση του blockchain, αλλά και χάρη στους αλγόριθμους κρυπτογραφίας. Επιπλέον, η προστασία της ταυτότητας των χρηστών εξασφαλίζεται από την ανωνυμία που προσφέρει η εν λόγω τεχνολογία. Η αποκέντρωση είναι ιδιαίτερα σημαντική στις έξυπνες κοινότητες και τα έξυπνα δίκτυα, αφού οι συναλλαγές παρακολουθούνται από όλους τους κόμβους του δικτύου. Τα δεδομένα που αποθηκεύονται στην αλυσίδα περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με τις συναλλαγές. Οι προσωπικές πληροφορίες των συμμετεχόντων στο δίκτυο δεν αποκαλύπτονται, συνεπώς η ταυτότητά τους παραμένει προστατευμένη, και η ιδιωτικότητά τους δεν παραβιάζεται [312].

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η ασφάλεια του blockchain οφείλεται στην κρυπτογραφία, ωστόσο, δεν μπορούν να αποκλειστούν πιθανά ελαττώματα των κρυπτογραφικών αλγορίθμων στην πορεία των επόμενων ετών. Με άλλα λόγια, τα τρέχοντα πρωτόκολλα κρυπτογράφησης μπορεί να γίνουν ευάλωτα όσο η επιστήμη της κρυπτογραφίας εξελίσσεται [305], [317]. Ειδικότερα, η ανάπτυξη των κβαντικών υπολογιστών θα μπορούσε να βάλει σε κίνδυνο τους μηχανισμούς κρυπτογραφίας του blockchain, γιατί θεωρητικά ένας ισχυρός κβαντικός υπολογιστής θα ήταν ικανός να τους αποκρυπτογραφήσει [305], [318]. Η πιθανότητα αποκρυπτογράφησης κάποιων δεδομένων στο μέλλον, που αυτή τη στιγμή προστατεύονται χάρη στην κρυπτογραφία, αποκαλύπτει έναν κίνδυνο που ελλοχεύει στον αποκεντρωμένο χαρακτήρα του blockchain. Συγκεκριμένα, αφού τα κρυπτογραφημένα δεδομένα είναι διαθέσιμα σε όλους τους κόμβους του δικτύου, ένας κακόβουλος συμμετέχων θα μπορούσε να αποκρυπτογραφήσει δεδομένα που είχαν αποθηκευτεί στο blockchain στο παρελθόν, ακόμα και αν οι αλγόριθμοι κρυπτογράφησης γίνουν ανθεκτικότεροι στην πορεία. Έτσι, μη εξουσιοδοτημένοι χρήστες θα μπορούσαν να προσπελάσουν ιδιωτικές ή ευαίσθητες πληροφορίες [305], [311]. Υπάρχουν, επίσης, ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια των ιδιωτικών και δημόσιων κλειδιών που χρησιμοποιούνται σε διαδικασίες συναλλαγών, τα οποία αναπαρίστανται από συμβολοσειρές αλφαριθμητικών χαρακτήρων. Όσον αφορά την προστασία της ταυτότητας

των χρηστών, έχουν εντοπιστεί τεχνικές κατάργησης της ανωνυμίας [306], [319]. Κατά συνέπεια, παρόλο που η ασφάλεια, οι κρυπτογραφικοί αλγόριθμοι, η ιδιωτικότητα των δεδομένων, η προστασία ταυτότητας και η ανωνυμία είναι καίρια πλεονεκτήματα του blockchain, τα πιθανά ευάλωτα σημεία και οι κίνδυνοι δεν πρέπει να αμελούνται. Η μη αντιστρεψιμότητα και η πιθανότητα διαγραφής δεδομένων είναι επίσης αξιοσημείωτα προβλήματα των εφαρμογών του blockchain. Έχει ήδη αναφερθεί ότι ένα λάθος σε ένα έξυπνο συμβόλαιο είναι δύσκολο να διορθωθεί αφού το συμβόλαιο εισέλθει στην αλυσίδα. Η έξοδος που προκύπτει από τον κώδικα του έξυπνου συμβολαίου δεν μπορεί να αλλάξει ή να αποτραπεί. Επιπρόσθετα, μία πιθανώς λάθος συναλλαγή δεν μπορεί να αναιρεθεί. Ως αποτέλεσμα, αν ένας κόμβος δεχτεί μία ψηφιακή πληρωμή από λάθος, η συναλλαγή δε θα αντιστραφεί. Η ταυτότητα του συμμετέχοντα που δέχτηκε την λανθασμένη πληρωμή δε θα είναι εύκολο να εντοπιστεί αφού στο blockchain επικρατεί η ανωνυμία [306], [311], [320]. Γενικά, οι αλλαγές στον κώδικα ενός blockchain αποτελούν πρόκληση και η απαιτούμενη προσπάθεια είναι μη αμελητέα, αφού πρέπει η πλειοψηφία των κόμβων να εγκρίνουν τη νέα έκδοση του κώδικα [305]. Η περιορισμένη επεκτασιμότητα αποτελεί ένα μείζον θέμα που θίγεται συχνά στη σχετική στη βιβλιογραφία. Ο όρος “επεκτασιμότητα” περιγράφει την ικανότητα ενός συστήματος να λειτουργεί σωστά, ακόμα και όταν απαιτείται σημαντική αύξηση του όγκου εργασίας, λόγω της επέκτασης της κλίμακας του συστήματος [321], [322]. Τα προβλήματα επεκτασιμότητας επηρεάζουν τη διεκπεραιωτική ικανότητα, την καθυστέρηση και την ταχύτητα. Η ταχύτητα της συναλλαγής εξαρτάται επίσης από τον χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο συναίνεσης. Για παράδειγμα, ο αλγόριθμος PoW, ο οποίος χρησιμοποιείται στο bitcoin, μπορεί να παράγει περίπου επτά συναλλαγές το δευτερόλεπτο. Η αλυσιδωτή δομή δεδομένων του blockchain καθιστά τη διαδικασία των συναλλαγών χρονοβόρα, αφού όλες οι καταγραφές πρέπει να διασχίσουν όλους τους κόμβους της αλυσίδας. Επιπλέον, η ταχύτητα του blockchain είναι σημαντικά περιορισμένη όταν αυτό λειτουργεί σαν βάση δεδομένων. Ειδικότερα, αυτό το θέμα αναφέρεται στη σχετική βιβλιογραφία ως “αργή αναζήτηση” (slow query). Για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος αυτού, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μία σύγκριση με την ταχύτητα ενός συχνά χρησιμοποιούμενου database, όπως το MySQL. Ο χρόνος που απαιτείται για μία συναλλαγή σε ένα Ethereum blockchain είναι 80 με 2000 φορές μεγαλύτερο από τον αντίστοιχο χρόνο στο MySQL [311], [312], [321]. Η γεωγραφική θέση, όπως και ο αριθμός των κόμβων του δικτύου σε ένα αποκεντρωμένο blockchain μπορούν επίσης να επηρεάσουν την ταχύτητα. Μεγάλος αριθμός από miners, σε συνδυασμό με αυξημένη αποκέντρωση, μπορεί να οδηγήσει σε κακή απόδοση [305]. Επιπλέον, το μέγεθος των block μπορεί να επιφέρει ορισμένα θέματα. Τα block έχουν προκαθορισμένο μέγεθος. Θεωρητικά, αυτό αυξάνει τη διεκπεραιωτική ικανότητα, ωστόσο, δεν ισχύει το ίδιο σε ένα μεγάλης κλίμακας σύστημα blockchain. Η ταχύτητα υποβολής αιτημάτων μπορεί να ξεπεράσει την ταχύτητα παραγωγής των block, το οποίο θα μπορούσε να οδηγήσει σε συμφόρηση του εξυπηρετητή, μη επεξεργάσιμα αιτήματα, καθυστέρηση απόκρισης και, στη χειρότερη περίπτωση, αδυναμία εξυπηρέτησης. Επιπλέον, αν τα δεδομένα εισόδου είναι ογκώδη, μπορεί να χρειαστεί να αποθηκευτούν σε παραπάνω από ένα block, το οποίο είναι καταστροφικό για τη διεκπεραιωτική ικανότητα του συστήματος. Ωστόσο, υπερβολικά μεγάλα block θα δημιουργούσαν άλλα προβλήματα [321]. Ένα ακόμα θέμα αφορά τη διαδικασία αποθήκευσης σε μοντέλα βασισμένα στο blockchain. Εφόσον το αρχείο των συναλλαγών αποθηκεύεται και αντιγράφεται από όλους τους miners, περιττά δεδομένα παραμένουν στην αλυσίδα. Αυτό ενδέχεται να προκαλέσει προβλήματα σε μεγάλα δίκτυα. Για αυτό τον λόγο, είναι απαραίτητο να ενσωματώνονται κατάλληλοι μηχανισμοί αποθήκευσης και πόροι που δίνουν τη δυνατότητα διαχείρισης μεγάλων όγκων δεδομένων, για να διατηρείται το επιθυμητό αντίγραφο της αλυσίδας [75], [306], [323], [324], [325], [326], [327].

Πίνακας 7: Τεχνικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του blockchain

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Αποκέντρωση	Μη αντιστρεψιμότητα
Διαφάνεια	Περιορισμένη επεκτασιμότητα
Μη μεταβλητότητα	Περιορισμένη ταχύτητα
Εγκυρότητα δεδομένων	Αργή αναζήτηση
Προσβασιμότητα δεδομένων	Δεδομένο μέγεθος block
Ασφάλεια, κρυπτογραφεία	Κακή απόδοση
Ιδιωτικότητα, ανωνυμία	Αποθήκευση περιττών δεδομένων

Τρίτον, όπως όλα τα ψηφιακά συστήματα έτσι και οι πλατφόρμες blockchain μπορεί να υπόκεινται σε κυβερνοεπιθέσεις (π.χ. double spending, 51% attack, selfish mining, with-holding attack, balance attack, nothing-at-stake attack, bribery attack, long-range attack, eclipse attack, distributed Denial-of-Service (DDoS) attack, Sybil attack, και quantum computing attack) [305]. Για παράδειγμα, μία επίθεση μπορεί να στοχεύει στην αλλαγή των τιμών του ρεύματος σε ένα σύστημα εμπορίας ενέργειας [311]. Μία επίθεση 51% έχει μεγαλύτερες πιθανότητες να πετύχει όταν το δίκτυο blockchain βρίσκεται σε αρχικά στάδια, επειδή οι ενεργοί miners είναι λιγότεροι και η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για τις συναλλαγές είναι περιορισμένη [306].

Τέταρτον, το blockchain δύναται να προσφέρει την ευελιξία που τα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα και δίκτυα διανομής απαιτούν. Πιο συγκεκριμένα, η ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως φωτοβολταϊκά πλαίσια και αιολικά πάρκα, παρουσιάζει διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για αυτό τον λόγο, η διαχείριση ενέργειας γίνεται δυσκολότερη. Γεννάται η ανάγκη για αποτελεσματική διαχείριση ζήτησης, παρακολούθηση και συγχρονισμό διαφορετικών πηγών αλλά και μονάδων αποθήκευσης, όπως και εφεδρικών μονάδων παροχής ενέργειας σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Η αποτελεσματική και αποδοτική διαχείριση μπορεί να επιτευχθεί μέσω της χρήσης υπηρεσιών blockchain σε συνδυασμό με έξυπνους μετρητές και αισθητήρες. Για να μπορούν τα δεδομένα πραγματικού χρόνου να διαμοιράζονται με αξιοπιστία είναι απαραίτητη η επικοινωνία ανάμεσα σε φυσικό εξοπλισμό και ψηφιακές πλατφόρμες, και το blockchain μπορεί να υποβοηθήσει την επικοινωνία αυτή [302].

Πέμπτον, ως τώρα οι εφαρμογές που συνδυάζουν το blockchain με την ενέργεια έχουν δοκιμαστεί κυρίως μέσω προσομοιώσεων ή έργων μικρής κλίμακας. Δεν έχουν διεξαχθεί αρκετές πραγματικές δοκιμές σε μεγάλη κλίμακα και, ως αποτέλεσμα, η συμπεριφορά του εξωτερικού συστήματος δεν μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια. Το ρίσκο εφαρμογής του blockchain σε υπάρχουσες υποδομές θεωρείται μεγάλο, καθώς πρόκειται για εξοπλισμό διανομής και μεταφοράς ενέργειας, του οποίου η λειτουργία δεν μπορεί να μπει σε κίνδυνο. Συνεπώς, είναι αμφίβολο το αν θα ήταν αποδεκτή η διακινδύνευση της παροχής ενέργειας και της ομαλής λειτουργίας των υφιστάμενων συστημάτων, προκειμένου να δοκιμαστεί η ένταξη του blockchain. Τα επίπεδα τάσης, οι αρμονικές, η συχνότητα και η ροή ισχύος μπορεί να αλλάξουν σημαντικά αν ένα δίκτυο blockchain ενταχθεί σε ένα πραγματικό σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Περισσότερες πρακτικές δοκιμές σε μεγάλη κλίμακα μπορεί να αποκαλύψουν περαιτέρω τεχνικούς περιορισμούς και εμπόδια της εφαρμογής του blockchain σε ενεργειακά συστήματα [302]. Λύσεις βασισμένες σε τεχνολογία καταμεμημένου καθολικού

ίσως να μην μπορούν να προσφέρουν όλες τις υπηρεσίες που υλοποιούν οι τρέχουσες υποδομές, ειδικά κατά τα αρχικά στάδια ένταξης της τεχνολογίας στον υπάρχον εξοπλισμό [306].

Έκτον, τα ενεργειακά δεδομένα που αποθηκεύονται στο blockchain δεν εξαρτώνται από το ίδιο το μοντέλο, αντίθετα, παράγονται από το εξωτερικό σύστημα. Για αυτό, ο προσεκτικός σχεδιασμός της ίδιας της πλατφόρμας blockchain δεν είναι αρκετός, αν δεν μπορεί να λειτουργήσει επαρκώς και το σύστημα εκτός της αλυσίδας, παρέχοντας αξιόπιστα και έγκυρα δεδομένα. Συνεπώς, η διαλειτουργικότητα και η αποδοτική επικοινωνία ανάμεσα στο ενεργειακό σύστημα και την εκάστοτε πλατφόρμα blockchain είναι καίριας σημασίας [303], [312].

Τέλος, άλλες σύγχρονες τεχνολογίες όπως η τεχνητή νοημοσύνη, η μηχανική μάθηση, το διαδίκτυο πραγμάτων αλλά και τεχνικές ανάλυσης δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας όταν εξετάζεται η εφαρμογή του blockchain στον ενεργειακό τομέα. Για παράδειγμα, δεδομένα από τον πραγματικό κόσμο μπορούν να μεταφέρονται και να ενσωματώνονται σε έξυπνα συμβόλαια με τη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης. Ανησυχίες σχετικές με την ιδιωτικότητα και την προστασία προσωπικών δεδομένων θα μπορούσαν να αμβλυνθούν χάρη στις τεχνικές βαθιάς μάθησης, επειδή ίσως δοθεί στους χρήστες αυξημένη δυνατότητα ελέγχου των δικαιωμάτων τους σχετικά με τα δεδομένα τους. Προχωρημένες τεχνικές ανάλυσης δεδομένων θα μπορούσαν να ενισχύσουν τη διαφάνεια του blockchain εντοπίζοντας μη φυσιολογικές δραστηριότητες. Η επικοινωνία ανάμεσα σε hardware και software θα μπορούσε να διευκολυνθεί από το διαδίκτυο πραγμάτων και η διαλειτουργικότητα με εξοπλισμό έξυπνων μετρητών μπορεί να διευκολυνθεί μέσω ψηφιακών διδύμων [308], [321].

4.1.2.5 Νομικοί παράγοντες

Πέντε ευρήματα παρουσιάζονται στους νομικούς παράγοντες της εφαρμογής του blockchain στην ενέργεια. Πρώτον, υπάρχει μία γενικότερη αβεβαιότητα σχετικά με τις πολιτικές που ισχύουν γύρω από την τεχνολογία blockchain [302]. Εφόσον το blockchain αποτελεί μία σχετικά καινούρια τεχνολογική εξέλιξη, δεν έχει σχηματιστεί σχετικός κανονισμός, πράγμα που δυσχεραίνει την υιοθέτηση του blockchain σε διάφορους τομείς [306]. Το νομικό κενό είναι ένα σημαντικό εμπόδιο καθώς, σε αρκετές περιπτώσεις, μπορεί να χρειαστεί η παρέμβαση ενός νομικού αντιπροσώπου προκειμένου να διευθετηθεί κάποιο θέμα, ωστόσο δεν υπάρχουν ακόμα συγκεκριμένες κατευθυντήριες γραμμές που να δύναται να ακολουθήσει ο εκάστοτε νομικός αντιπρόσωπος ή σύμβουλος [317], [328].

Δεύτερον, ακόμα και όταν κάποιο σχετικό νομικό πλαίσιο δημιουργηθεί, αναμένεται ότι θα είναι αρκετά περίπλοκο και πιθανόν να διαφέρει ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή. Η πολυπλοκότητα της νομοθεσίας μπορεί να αποθαρρύνει πολιτικούς φορείς, μέλη ης βιομηχανίας αλλά και της κοινωνίας, με αποτέλεσμα να μείνει ανεκμετάλλευτο το φάσμα δυνατοτήτων του blockchain [302], [308].

Τρίτον, δεν υπάρχουν ακόμη συγκεκριμένα πρότυπα που να είναι νομικώς εκτελεστά. Η προτυποποίηση κρίνεται ζωτικής σημασίας, ειδικά όταν πρόκειται για εφαρμογές διαχείρισης ψηφιακής ταυτότητας ή APIs (Application Programming Interface). Η διαλειτουργικότητα ανάμεσα σε διάφορες τεχνολογίες και φυσικό εξοπλισμό εμποδίζεται από την έλλειψη αναγνωρισμένων προτύπων [305], [306], [329].

Τέταρτον, παρόλο που έχει αρχίσει να εξερευνάται το πιθανό νομικό πλαίσιο για τις αγορές βασισμένες σε blockchain και κυρίως για τα κτυπτονομίσματα, έχει αμεληθεί η αξιολόγηση

της νομικής υπόστασης των έξυπνων συμβολαίων. Αντίθετα με τα συμβατικά συμβόλαια, τα έξυπνα συμβόλαια γράφονται σε κώδικα και τα επεξεργάζονται υπολογιστές. Το νομικά εκτελέσιμο και η συμμόρφωση με τους κανονισμούς εξασφαλίζεται στα συμβατικά συμβόλαια, μέσω της κατάλληλης νομικής γλώσσας και ορολογίας. Για να είναι νομικά έγκυρα, τα συμβόλαια πρέπει να πληρούν ορισμένες προϋποθέσεις, όπως την αμοιβαία συναίνεση, τη διατύπωση και έγκριση μίας έγκυρης πρότασης, τη σωστή, επαρκή και λεπτομερή εξέταση της, αλλά και τη νομιμότητά της. Γίνεται, λοιπόν, φανερό ότι αρκετά πλεονεκτήματα εξασφαλίζονται από την ενσωμάτωση έξυπνων συμβολαίων σε ενεργειακές υπηρεσίες, όμως τα εμπλεκόμενα μέρη πρέπει να λάβουν σοβαρά υπόψιν και να αξιολογήσουν νομικά και πρακτικά ζητήματα [311].

Πέμπτον, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψιν η συμμόρφωση των δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα σε πλατφόρμες βασισμένες στο blockchain με τον γενικό κανονισμό προστασίας δεδομένων (General Data Protection Regulation, GDPR) της Ευρωπαϊκής Ένωσης [305]. Ακόμα δεν έχει ξεκαθαριστεί και για αυτό τον λόγο παραμένει αβέβαιο το αν οι προσωπικές πληροφορίες των κατοίκων της Ευρωπαϊκής Ένωσης μπορούν να συμπεριλαμβάνονται και να είναι διαθέσιμα σε έξυπνα συμβόλαια [305], [311].

4.1.2.6 Περιβαλλοντικοί παράγοντες

Λαμβάνονται υπόψιν τέσσερα ευρήματα που αφορούν τους περιβαλλοντολογικούς παράγοντες της ένταξης του blockchain στην ενέργεια. Πρώτον, όπως αναφέρθηκε και στους πολιτικούς παράγοντες, η ψηφιοποίηση των ενεργειακών συστημάτων με τη χρήση blockchain και άλλων τεχνολογιών θα μπορούσε να βελτιώσει τη διαχείριση ενεργειακών συστημάτων με τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολύνεται η επίτευξη στόχων ενεργειακής μετάβασης, μέσω των οποίων αμβλύνονται οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής [302], [303].

Δεύτερον, το blockchain μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σχήματα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών. Ειδικότερα, η τεχνολογία αυτή εγγυάται τη διαφάνεια και θα μπορούσε συνεπώς να αποτρέψει τις απάτες ή άλλα θέματα που μπορεί να προκύψουν στην εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών [236], [308].

Τρίτον, οι πλατφόρμες με βάση το blockchain μπορούν να γίνουν χρήσιμο εργαλείο όσον αφορά τον εντοπισμό της πηγής της χρησιμοποιούμενης ηλεκτρικής ενέργειας [308]. Η ενθάρρυνση των καταναλωτών να γνωρίζουν και να ελέγχουν το ενεργειακό τους μίγμα θα μπορούσε να έχει θετική επίδραση στο περιβάλλον [311].

Τέταρτον, η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για την εφαρμογή των αλγορίθμων συναίνεσης οδηγεί σε υψηλή κατανάλωση ενέργειας. Αλγόριθμοι όπως ο PoW (Proof of Work) εγγυώνται την ασφάλεια του συστήματος, την ειλικρίνεια χρηστών και καθιστούν δυνατή την επαλήθευση των συναλλαγών. Για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, έχουν προταθεί εναλλακτικοί αλγόριθμοι συναίνεσης όπως ο PoS (Proof of Stake). Για παράδειγμα, η μετάβαση του Ethereum από PoW σε PoS είχε ως αποτέλεσμα πολύ σημαντική μείωση της απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος [306], [308].

Η σύνοψη της PESTLE ανάλυσης δίνεται στην εικόνα 28.



Εικόνα 28: Ανάλυση PESTLE

4.2 Ανάλυση SWOT

4.2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο Ανάλυσης SWOT

Η δημιουργία του εργαλείου ανάλυσης SWOT, του οποίου το ακρωνύμιο σημαίνει Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats, προέκυψε από την ανάγκη των επιχειρήσεων να διαπιστώσουν τις κυριότερες αιτίες εξαιτίας των οποίων αποτύγχανε η στρατηγική ή ο σχεδιασμός τους [330], [331]. Με την ανάλυση SWOT οι επιχειρήσεις εντοπίζουν τους παράγοντες εκείνους (εσωτερικού ή εξωτερικού περιβάλλοντος) που μπορούν να επηρεάσουν και να καθορίσουν με άμεσο τρόπο το μέλλον τους [332]. Συγκεκριμένα πρόκειται για τους εξής παράγοντες [333]:

Πλεονεκτήματα

Θετικοί εσωτερικοί παράγοντες (ή θετικοί παράγοντες που αφορούν το παρόν).

Αδυναμίες

Αρνητικοί εσωτερικοί παράγοντες (ή αρνητικοί παράγοντες που αφορούν το παρόν).

Ευκαιρίες

Θετικοί εξωτερικοί παράγοντες (ή θετικοί παράγοντες που αφορούν το μέλλον).

Κίνδυνοι

Αρνητικοί εξωτερικοί παράγοντες (ή αρνητικοί παράγοντες που αφορούν το μέλλον).

Οι ιστορία της ανάλυσης SWOT ξεκινά τη δεκαετία του 1960, ωστόσο υπάρχει έντονη αβεβαιότητα σχετικά με την προέλευσή της [334]. Θεωρείται ότι κύριος εμπνευστής των βασικών παραδοχών στις οποίες στηρίχθηκε η ανάλυση SWOT ήταν ο πρωτοπόρος στον τομέα των κοινωνικών επιστημών K. Lewin, ο οποίος ανέπτυξε μια τεχνική διαχείρισης που είχε ονομαστεί Force Field Analysis στην οποία πιθανώς να βασίστηκε η δημιουργία της SWOT [335]. Το κύριο πλεονέκτημα της ανάλυσης SWOT εντοπίζεται στον αρκετά απλό τρόπο εφαρμογής της, γεγονός που έχει οδηγήσει στην συνεχόμενη χρησιμοποίησή της από μεγάλες εταιρείες, αλλά πλέον χρησιμοποιείται και από ακαδημαϊκές κοινότητες στα πλαίσια της έρευνας [336].

4.2.2 Ανάλυση SWOT του Blockchain στην Ενέργεια

Η ανάλυση PESTLE που προηγήθηκε κάνει ξεκάθαρο το γεγονός ότι η εφαρμογή του blockchain στον ενεργειακό τομέα θα επιφέρει αρκετά πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα που δεν πρέπει να αμεληθούν. Όσον αφορά τον πολιτικό παράγοντα, εντοπίζονται δύο πλεονεκτήματα: η πιθανή υποστήριξη της ενεργειακής μετάβασης, που γίνεται όλο και περισσότερο προτεραιότητα για τους πολιτικούς θεσμούς, μέσω του blockchain, και το γεγονός ότι τα ευρωπαϊκά θεσμικά όργανα διερευνούν τις πιθανές εφαρμογές του blockchain στον ενεργειακό τομέα. Ο επόμενος παράγοντας, δηλαδή ο οικονομικός, έχει επτά πλεονεκτήματα που είναι η επιτυχία των κρυπτονομισμάτων στον χρηματοπιστωτικό τομέα, η δυνατότητα ευκολότερων πληρωμών μέσω έξυπνων συμβολαίων, τα αναδυόμενα νέα επιχειρηματικά μοντέλα, η πιθανή μείωση του κόστους συναλλαγών, η απελευθέρωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και η υποστήριξη έργων βιωσιμότητας μέσω μοντέλων συμμετοχικών επενδύσεων που βασίζονται σε blockchain. Όσον αφορά τον κοινωνικό παράγοντα, υπάρχουν δύο πλεονεκτήματα, τα οποία είναι πρώτον μια πολιτιστική στροφή προς τις συναλλαγές P2P και δεύτερον, ο θετικός αντίκτυπος των κοινωνικών πρωτοβουλιών για έργα βιωσιμότητας, που ενθαρρύνονται μέσα από πλατφόρμες συμμετοχικής χρηματοδότησης blockchain. Όσον αφορά τον τεχνολογικό παράγοντα, υπάρχουν τέσσερα πλεονεκτήματα: η τάση ψηφιοποίησης στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, τα τεχνικά πλεονεκτήματα του blockchain (αποκέντρωση, διαφάνεια, μη μεταβλητότητα, εγκυρότητα δεδομένων, προσβασιμότητα δεδομένων, ασφάλεια, κρυπτογραφία, απόρρητο δεδομένων, προστασία ταυτότητας και ανωνυμία), την ανάγκη για ευελιξία στα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα και την άνθιση άλλων καινοτόμων και μη τεχνολογιών (τεχνητή νοημοσύνη, ανάλυση δεδομένων και μηχανική μάθηση). Τα τέσσερα πλεονεκτήματα του συνδυασμού της ενέργειας και του blockchain για το περιβάλλον είναι ο δυνητικός θετικός αντίκτυπος της τεχνολογίας αυτής σε σύγχρονα συστήματα που είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον προκειμένου να συμβαδίζουν με τις απαιτήσεις για την άμβλυνση των επιπτώσεων της κλιματικής κρίσης, η πρόληψη της απάτης στην εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών, η διαχείριση GoOs και RECs από μοντέλα blockchain και τέλος, οι εναλλακτικοί, λιγότερο ενεργοβόροι μηχανισμοί συναίνεσης.

Από την άλλη πλευρά, τα δύο μειονεκτήματα του πολιτικού παράγοντα περιλαμβάνουν την άγνοια που περιβάλλει την τεχνολογία blockchain και την τάση των πολιτικών να αποφεύγουν το ρίσκο. Όσον αφορά τον οικονομικό παράγοντα, υπάρχουν τρία μειονεκτήματα: οι αμφιβολίες για το εάν μια επένδυση σε τεχνολογία blockchain θα έχει αξιόλογη απόδοση, το πιθανό υψηλό κόστος και η έλλειψη απελευθέρωσης της αγοράς μέτρησης κατανάλωσης. Υπάρχουν πέντε μειονεκτήματα σχετικά με τον κοινωνικό παράγοντα, τα οποία είναι η πιθανή έλλειψη κοινωνικής αποδοχής της αποκεντρωμένης εμπορίας ενέργειας, οι ανησυχίες και οι παρανοήσεις σχετικά με το blockchain, η έλλειψη κατανόησης της τεχνολογίας, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή του ρίσκου, καθώς και το γεγονός ότι οι νέες τεχνολογίες θεωρούνται αναξιόπιστες. Ο επόμενος παράγοντας, δηλαδή ο τεχνολογικός, έχει τέσσερα μειονεκτήματα: τους τεχνικούς περιορισμούς του blockchain (μη αντιστρεψιμότητα, περιορισμένη επεκτασιμότητα, περιορισμένη ταχύτητα, αργή αναζήτηση, σταθερό μέγεθος μπλοκ, κακή απόδοση, αποθήκευση περιττών δεδομένων), τις κυβερνοεπιθέσεις, την ανάγκη διαλειτουργικότητας μεταξύ του blockchain και της φυσικής υποδομής που οδηγεί σε αβεβαιότητα σχετικά με τη συμπεριφορά του εξωτερικού συστήματος, και την έλλειψη πρακτικών δοκιμών μεγάλης κλίμακας. Όσον αφορά τον νομικό παράγοντα, υπάρχουν πέντε μειονεκτήματα, τα οποία είναι η αβεβαιότητα σχετικά με τις πολιτικές, η πολυπλοκότητα των κανονισμών, η έλλειψη τυποποίησης, η αμφισβητήσιμη νομική επιβολή των έξυπνων συμβολαίων και η αβεβαιότητα σχετικά με τη συμμόρφωση των εφαρμογών blockchain με το νόμο

GDPR. Τέλος, όσον αφορά τον περιβαλλοντικό παράγοντα, υπάρχει ένα μειονέκτημα, το οποίο είναι η υψηλή κατανάλωση ενέργειας του αλγορίθμου PoW.

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προέκυψαν από την ανάλυση PESTLE οργανώνονται σε μία ανάλυση SWOT. Η ανάλυση συνοψίζεται και στην εικόνα 29.

4.2.2.1 Πλεονεκτήματα

Τα τρέχοντα δυνατά σημεία σχετικά με το ενεργειακό blockchain παρατίθενται σε αυτήν την ενότητα. Πρώτον, η αποτελεσματικότητα του blockchain σε εφαρμογές συναλλαγών έχει αποδειχθεί από την επιτυχία των κρυπτονομισμάτων. Δεύτερον, τα έξυπνα συμβόλαια μειώνουν την αναγκαιότητα της ανθρώπινης παρέμβασης και διευκολύνουν τις δραστηριότητες εντός των ενεργειακών συστημάτων. Τρίτον, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί αλγόριθμοι συναίνεσης που είναι λιγότερο ενεργοβόροι από τον PoW. Τέταρτον, η διαφάνεια του blockchain αποτρέπει τις απάτες, τη χειραγώγηση και διευκολύνει τον εντοπισμό των ύποπτων δραστηριοτήτων. Πέμπτον, τα δεδομένα είναι πάντα προσβάσιμα μετά την εισαγωγή τους στο blockchain. Έκτον, η μη μεταβλητότητα διασφαλίζει την εγκυρότητα των δεδομένων. Έβδομον, οι μηχανισμοί κρυπτογράφησης αυξάνουν την ασφάλεια του blockchain. Όγδοον, η ταυτότητα των συμμετεχόντων προστατεύεται χάρη στην ανωνυμία. Ένατον, η δυνατότητα αποκέντρωσης του blockchain το καθιστά ιδανική λύση για μια μεγάλη ποικιλία ενεργειακών εφαρμογών.

4.2.2.2 Αδυναμίες

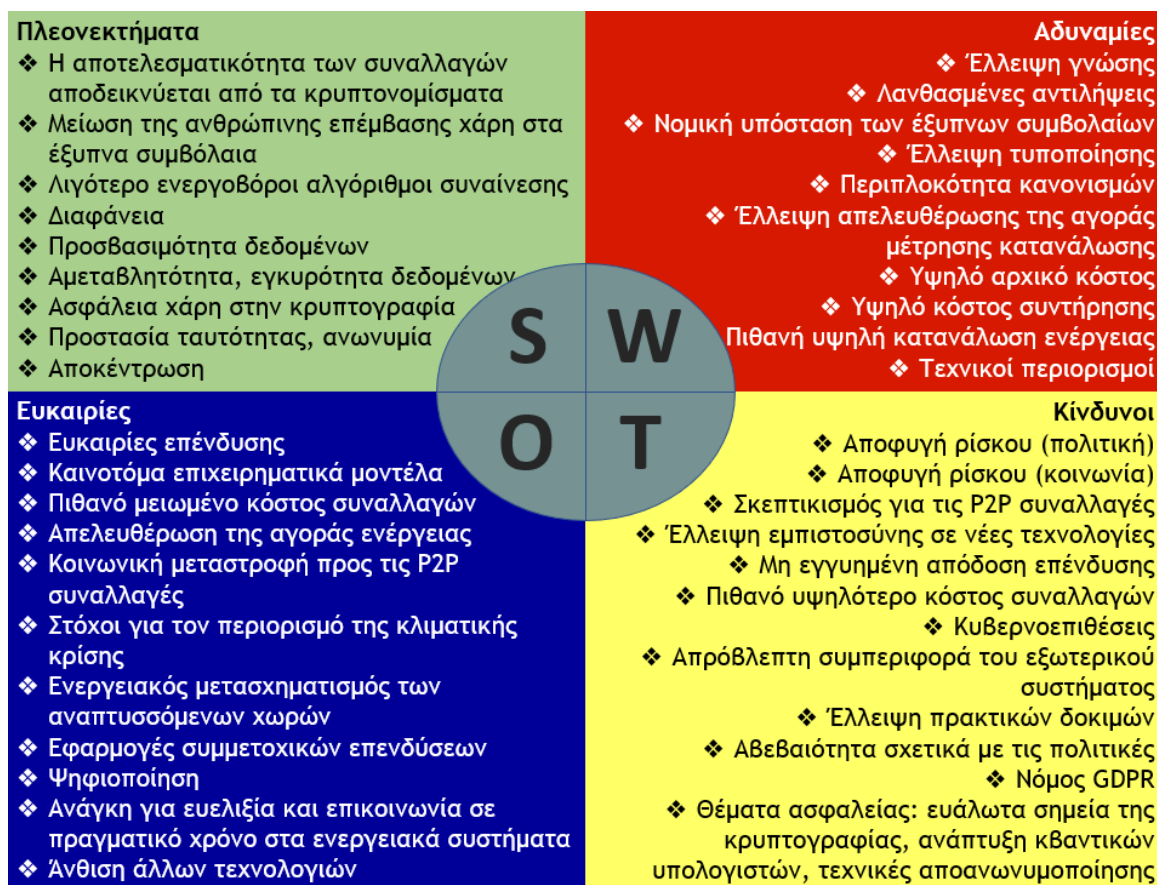
Τα τρέχοντα μειονεκτήματα σχετικά με το ενεργειακό blockchain παρατίθενται σε αυτήν την ενότητα. Πρώτον, υπάρχει έλλειψη επαρκούς γνώσης σχετικά με το blockchain. Αυτή η άγνοια αφορά και τους πολιτικούς θεσμούς, και την κοινωνία και τις επιχειρήσεις. Δεύτερον, η συσχέτιση του bitcoin με χακαρίσματα και παράνομες δραστηριότητες έχει δημιουργήσει λανθασμένες αντιλήψεις σχετικά με το blockchain. Τρίτον, υπάρχουν αρκετοί τεχνολογικοί περιορισμοί: μη αντιστρεψιμότητα, περιορισμένη επεκτασιμότητα, περιορισμένη ταχύτητα, αργή αναζήτηση, σταθερό μέγεθος μπλοκ, κακή απόδοση και αποθήκευση περιττών δεδομένων. Τέταρτον, είναι αμφίβολο εάν ένα έξυπνο συμβόλαιο μπορεί να θεωρηθεί νομικά εκτελεστό. Πέμπτον, υπάρχει έλλειψη τυποποίησης που εμποδίζει την ευρεία υιοθέτηση του blockchain. Έκτον, η πολυπλοκότητα των κανονισμών προκαλεί σημαντικό αριθμό ζητημάτων. Έβδομον, το αρχικό κόστος εγκατάστασης του blockchain θεωρείται υψηλό. Όγδοον, το κόστος συντήρησης είναι επίσης σημαντικό. Ένατον, η αγορά μέτρησης κατανάλωσης δεν έχει ακόμη απελευθερωθεί. Τέλος, η κατανάλωση ενέργειας του αλγορίθμου συναίνεσης PoW είναι σημαντική.

4.2.2.3 Ευκαιρίες

Ο παράγοντας «ευκαιρίες» αφορά τα πλεονεκτήματα που ενδέχεται να προκύψουν από τις εφαρμογές ενεργειακού blockchain. Πρώτον, το blockchain δημιουργεί επενδυτικές ευκαιρίες. Δεύτερον, αναπτύσσονται καινοτόμα επιχειρηματικά μοντέλα όπου συνεργάζονται πολλά μέλη της αγοράς από διαφορετικούς τομείς. Τρίτον, το κόστος συναλλαγής θα μπορούσε να μειωθεί χάρη στο blockchain. Τέταρτον, η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ενθαρρύνει την υιοθέτηση του blockchain. Πέμπτον, υπάρχει μια κοινωνική και πολιτιστική στροφή προς την P2P εμπορία ενέργειας. Έκτον, η ενσωμάτωση του blockchain στον ενεργειακό τομέα θα μπορούσε να βοηθήσει τη διαχείριση σύγχρονων ενεργειακών συστημάτων με ανανεώσιμες πηγές και μεγάλο αριθμό prosumers. Αυτού του είδους τα συστήματα είναι απαραίτητα για την επίτευξη των στόχων της ενεργειακής μετάβασης, που θα συμβάλουν στον περιορισμό των συνεπειών της κλιματικής αλλαγής. Έβδομον, το blockchain μπορεί να υποστηρίξει την ενεργειακή μετάβαση στις αναπτυσσόμενες χώρες. Όγδοον, το blockchain επιτρέπει εφαρμογές συμμετοχικών επενδύσεων, οι οποίες θα μπορούσαν να ενθαρρύνουν κοινωνικές πρωτοβουλίες με στόχο την ενίσχυση της βιωσιμότητας. Ένατον, η τάση ψηφιοποίησης στον ενεργειακό τομέα είναι μια σημαντική ευκαιρία για την υιοθέτηση του blockchain. Δέκατον, υπάρχει ανάγκη για ευελιξία και ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στα ενεργειακά συστήματα, η οποία μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ένταξης του blockchain. Τέλος, η ανάπτυξη άλλων πρωτοποριακών τεχνολογιών θα μπορούσε να βοηθήσει στην υιοθέτηση του blockchain αυξάνοντας την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα των μοντέλων που βασίζονται στην τεχνολογία αυτή.

4.2.2.4 Κίνδυνοι

Υπάρχουν δώδεκα πιθανοί κίνδυνοι που θα μπορούσαν να εμποδίσουν την επιτυχή υιοθέτηση του blockchain στην ενέργεια. Πρώτον, οι πολιτικοί θεσμοί μπορεί να προσπαθήσουν να αποφύγουν τα πιθανά ρίσκα της εφαρμογής του blockchain στην ενέργεια, παραμελώντας έτσι τις δυνατότητες χρήσης του. Δεύτερον, η κοινωνία επίσης τείνει να αποφεύγει το ρίσκο. Τρίτον, επειδή οι νέες, ανατρεπτικές και καινοτόμες τεχνολογίες θεωρούνται επικίνδυνες, όχι μόνο η κοινωνία και οι πολιτικοί θεσμοί και οι επιχειρήσεις ενδέχεται να μην τις εμπιστεύονται. Τέταρτον, η απόδοση της επένδυσης δεν μπορεί να είναι εγγυημένη. Πέμπτον, πολλοί υποστηρίζουν ότι το κόστος συναλλαγής μπορεί να αυξηθεί αντί να μειωθεί. Έκτον, υπάρχει σκεπτικισμός γύρω από την αποκεντρωμένη εμπορία ηλεκτρικής ενέργειας P2P που μπορεί να οδηγήσει σε απροθυμία υιοθέτησής της. Έβδομον, οι κυβερνοεπιθέσεις απειλούν την αξιοπιστία και την ασφάλεια των συστημάτων. Όγδοον, υπάρχει ανάγκη για διαλειτουργικότητα μεταξύ του blockchain και της εξωτερικής υποδομής, ωστόσο, η συμπεριφορά του εξωτερικού συστήματος δεν μπορεί να προβλεφθεί. Έναντον, περισσότερα ζητήματα ενδέχεται να αποκαλυφθούν εάν διεξαχθούν πρακτικές δοκιμές ενεργειακού blockchain μεγαλύτερης κλίμακας. Δέκατον, δεν υπάρχει επαρκές νομικό πλαίσιο. Ενδέκατον, δεν είναι σαφές εάν οι πιθανές εφαρμογές blockchain συμμορφώνονται με το νόμο GDPR. Τέλος, η ασφάλεια του blockchain μπορεί να απειληθεί από τεχνικές κατάργησης της ανωνυμίας ή την ανάπτυξη κβαντικών υπολογιστών που θα μπορούσαν να αποκρυπτογραφήσουν τα δεδομένα που είναι αποθηκευμένα σε πλατφόρμες blockchain.



Εικόνα 29: Ανάλυση SWOT

4.3 Ταυτοποίηση των Εμποδίων

Δίνοντας έμφαση στις αδυναμίες και τους κινδύνους της ανάλυσης SWOT, ταυτοποιήθηκαν 24 εμπόδια ένταξης του blockchain σε ενεργειακές υπηρεσίες και διαχωρίστηκαν σε 4 κατηγορίες όπως φαίνεται στην εικόνα 30.

Τεχνολογικά εμπόδια

Στην πρώτη κατηγορία, συγκεντρώνονται δέκα τεχνολογικοί περιορισμοί που αφορούν τη λειτουργικότητα του ίδιου του blockchain, καθώς και τα τεχνικά εμπόδια που προκαλούνται από εξωτερικούς παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα, η μη αναστρέψιμη φύση του blockchain καθιστά δύσκολη τη διόρθωση πιθανών λαθών και η αλλαγή ενός κώδικα μετά την εισαγωγή του στην αλυσίδα είναι γενικά πρόκληση. Η περιορισμένη επεκτασιμότητα αναφέρεται στα προβλήματα που προκύπτουν όταν η αλυσίδα γίνεται μεγαλύτερη και μπορεί να προκαλέσει περιορισμένη ταχύτητα, αργή αναζήτηση και κακή απόδοση. Άλλα ζητήματα περιλαμβάνουν την κατανάλωση ενέργειας του blockchain, την αποθήκευση περιττών δεδομένων και το σταθερό μέγεθος μπλοκ. Οι εξωτερικοί παράγοντες μπορεί να περιλαμβάνουν απειλές ασφαλείας, όπως κυβερνοεπιθέσεις, τεχνικές αποανωνυμοποίησης που απειλούν την προστασία ταυτότητας και αποκρυπτογράφηση κρυπτογραφημένων δεδομένων, επειδή οι κρυπτογραφικοί αλγόριθμοι μπορεί να είναι εύθραυστοι, ειδικά μετά την περαιτέρω ανάπτυξη κβαντικών υπολογιστών. Μπορεί επίσης να προκύψουν ζητήματα λόγω της ανάγκης συνεργασίας

του blockchain με εξωτερική υποδομή. Η έλλειψη πρακτικών δοκιμών καθιστά τη συμπεριφορά του εξωτερικού συστήματος αβέβαιη και απρόβλεπτη. Επιπλέον, οι τρέχοντες έξυπνοι μετρητές ενδέχεται να μην είναι σε θέση να υποστηρίξουν συστήματα blockchain, καθώς δεν είναι υπολογιστικά ισχυροί ούτε αρκετοί σε πλήθος για να υποστηρίξουν τη διαλειτουργικότητα που απαιτείται.

Οικονομικά εμπόδια

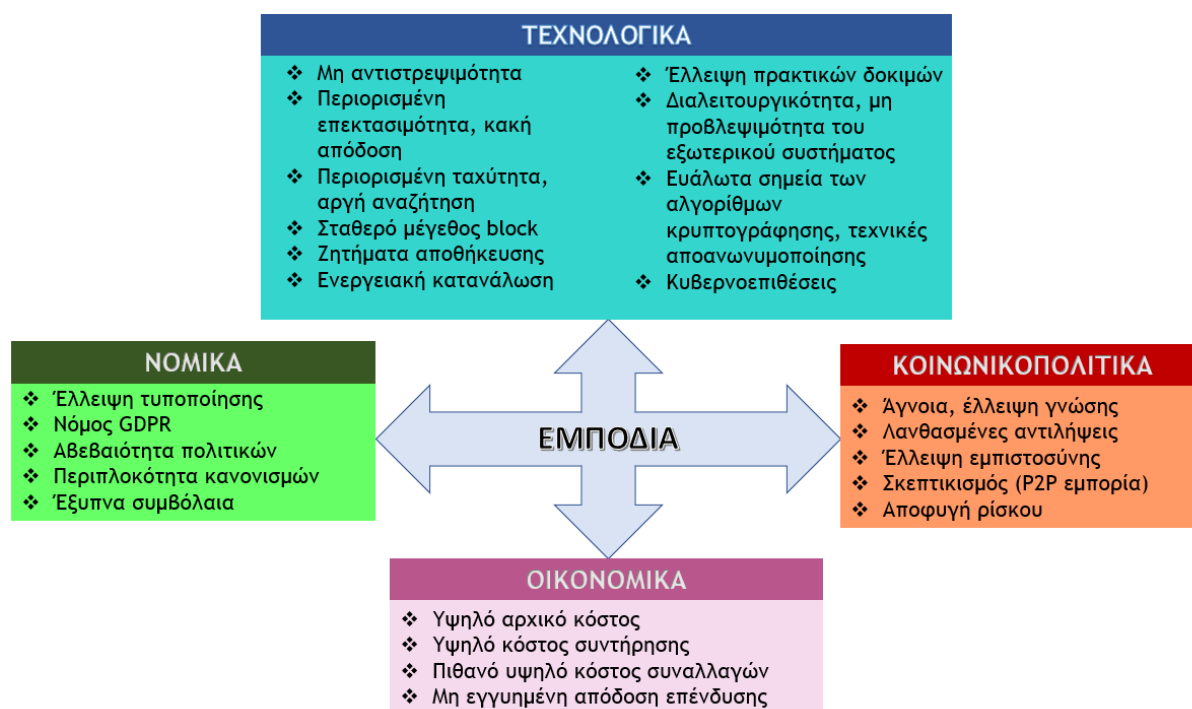
Τα οικονομικά εμπόδια μπορεί να κάνουν τις επιχειρήσεις δύσπιστες σχετικά με την υιοθέτηση της τεχνολογίας blockchain. Αρχικά, το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης των συστημάτων blockchain δεν είναι αμελητέο, ενώ και η μείωση του κόστους συναλλαγής δεν είναι εγγυημένη. Επομένως, η απόδοση της επένδυσης είναι αβέβαιη. Επιπλέον, μπορεί να υπάρχει ανεπαρκής γνώση του blockchain, καθώς η τεχνολογία είναι σχετικά νέα.

Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια

Η έλλειψη εμπιστοσύνης στις νέες τεχνολογίες, η άγνοια, η έλλειψη κατανόησης και οι λανθασμένες αντιλήψεις γύρω από το blockchain, ο σκεπτικισμός για τις συναλλαγές P2P και η γενική αποστροφή για το ρίσκο τόσο από την κοινωνία όσο και από τους πολιτικούς θεσμούς, αποτελούν αξιοσημείωτα εμπόδια για την ενσωμάτωση του blockchain στον ενεργειακό τομέα.

Νομικά εμπόδια

Τα νομικά εμπόδια περιλαμβάνουν την έλλειψη τυποποίησης, την αμφισβητήσιμη συμμόρφωση των εφαρμογών blockchain με το νόμο GDPR, τη γενική αβεβαιότητα πολιτικής και την πιθανή περιπλοκότητα των κανονισμών, καθώς και την αμφισβητήσιμη νομική επιβολή των έξυπνων συμβολαίων.



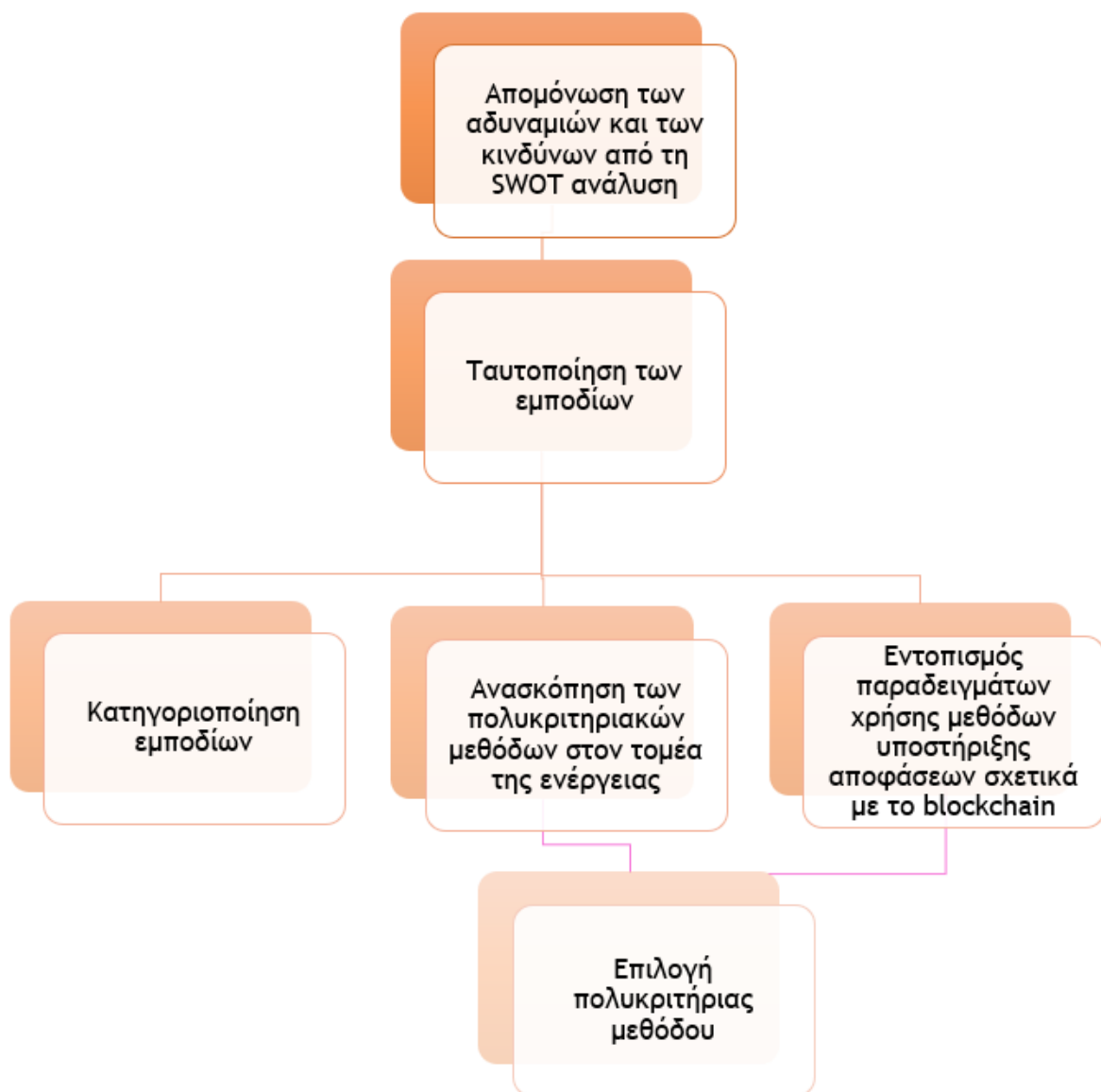
Εικόνα 30: Εμπόδια ένταξης του blockchain στην ενέργεια

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Πολυκριτήρια Ανάλυση

5 Πολυκριτήρια Ανάλυση

Έχοντας καταλήξει στην τελική λίστα εμποδίων εφαρμογής του blockchain σε ενεργειακές εφαρμογές, ο επόμενος στόχος είναι η κατάταξή τους με την κατάλληλη πολυκριτήρια μέθοδο. Στο τρέχον κεφάλαιο, παρουσιάζεται μία εισαγωγή στην πολυκριτήρια ανάλυση και ειδικότερα στη χρήση ορισμένων μεθόδων στον τομέα της ενέργειας. Μετά από αυτή τη διαδικασία επιλέγεται και εφαρμόζεται η καταλληλότερη πολυκριτήρια μέθοδος για την κατάταξη των εμποδίων. Για την εφαρμογή της μεθόδου δόθηκαν ερωτηματολόγια σε εμπλεκόμενους φορείς από ένα σχετικό Ευρωπαϊκό έργο. Τα ερωτηματολόγια που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή της τελικής κατάταξης είναι διαθέσιμα στο παράρτημα της εργασίας. Η μεθοδολογία που ακολουθείται φαίνεται και στην εικόνα 31:



Εικόνα 31: Βήματα επιλογής πολυκριτηριακής μεθόδου

5.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο Πολυκριτήριας Ανάλυσης

Η πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων αποτελεί έναν κλάδο-υποσύνολο των συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων. Η ιδιαιτερότητά του κλάδου αυτού είναι το γεγονός ότι δύναται να αντιμετωπίσει προβλήματα απόφασης με πολλαπλά κριτήρια [337]. Ορισμένα πολυκριτηριακά μοντέλα είναι σχετικά απλά στην εφαρμογή, ενώ άλλα απαιτούν τη χρήση αρκετά περίπλοκων μεθόδων μαθηματικού προγραμματισμού [338]. Για παράδειγμα, μία προσέγγιση που χρησιμοποιείται σε κάποιες μεθόδους είναι ο ορισμός μίας αντικειμενικής συνάρτησης την οποία επιθυμούμε να βελτιστοποιήσουμε, λαμβάνοντας υπόψιν συγκεκριμένους περιορισμούς. Μία άλλη προσέγγιση είναι η αξιολόγηση κάποιων εναλλακτικών σε σχέση με τα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν στην εκάστοτε περίπτωση, ενώ στη συνέχεια μπορούμε να κατατάξουμε τις εναλλακτικές [337], [338]. Οι διάφορες μέθοδοι μπορούν να είναι είτε ντετερμινιστικές, είτε στοχαστικές είτε ασαφείς. Σε πολλά προβλήματα χρησιμοποιείται συνδυασμός των διαφορετικών προσεγγίσεων [337].

Το σημαντικό πλεονέκτημα των πολυκριτηριακών μεθόδων είναι η δυνατότητά τους να συνδυάζουν τόσο ποσοτικές όσο και ποιοτικές προσεγγίσεις. Για αυτό τον λόγο, είναι ιδανικές όταν πρέπει να δοθούν λογικές λύσεις σε ένα περιβάλλον αβεβαιότητας, στο οποίο παίζουν ρόλο και υποκειμενικές παράμετροι [339].

Ο ενεργειακός τομέας είναι αναμφίβολα ένα τέτοιο περιβάλλον, καθώς εκτός από τα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, παίζουν ρόλο και τα περιβαλλοντικά και τα κοινωνικά, ενώ είναι σημαντικό και το νομικό πλαίσιο. Επιπλέον, οι προαναφερθέντες παράγοντες υπόκεινται σε διαρκείς μεταβολές, γεγονός που καθιστά την αξιολόγησή τους με τις κατάλληλες μεθόδους απαραίτητη [339], [340].

5.2 Πολυκριτηριακές Μέθοδοι στην Ενέργεια

Μέχρι τη δεκαετία του 1970 οι κύριοι στόχοι του ενεργειακού σχεδιασμού περιορίζονταν στην ελαχιστοποίηση του κόστους και στην πρόβλεψη της ζήτησης [337]. Ωστόσο, η αυξανόμενη ευαισθητοποίηση σχετικά με τα περιβαλλοντολογικά ζητήματα και η ανάγκη επίτευξης περιβαλλοντολογικών στόχων, οι οποίοι έρχονται συχνά σε σύγκρουση με τα οικονομικά συμφέροντα, αύξησαν την πολυπλοκότητα στον ενεργειακό τομέα ήδη από τις αρχές του 1980 [339]. Συγκεκριμένα, η ενεργειακή κρίση της δεκαετίας του 1970 κλόνισε τη μέχρι τότε νοοτροπία και οι παραδοσιακές μέθοδοι, όπως η ανάλυση κόστους-οφέλους και η αξιολόγηση των μακροοικονομικών δεικτών, δεν ήταν πλέον επαρκή εργαλεία [339], [341]. Σε συνδυασμό με την άνοδο των τιμών, ήρθαν στο προσκήνιο οι προβληματισμοί σχετικά με το περιβάλλον και τις επιπτώσεις της αλόγιστης χρήσης των συμβατικών πηγών ενέργειας. Η ανάγκη διαχείρισης αυτής της πολυπλοκότητας, αφού πλέον το κόστος αποτελούσε μόνο ένα από τα πολλά κριτήρια, υπήρξε η πρώτη αφορμή για τη χρήση πολυκριτηριακών μεθόδων υποστήριξης αποφάσεων, οι οποίες αναπτύχθηκαν περαιτέρω παράλληλα με τις εξελίξεις στον τομέα της ενέργειας [339].

5.2.1 Παραδείγματα χρήσης των Πολυκριτηριακών Μεθόδων στον Ενεργειακό Σχεδιασμό

Αποφάσεις σχετικά με την παραγωγή, την επέκτασή της και το είδος των πηγών ενέργειας που θα χρησιμοποιηθούν, τη βέλτιστη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, την ένταξη των νέων τεχνολογιών, ακόμα και αποφάσεις σχετικά με την τοποθεσία νέων εγκαταστάσεων, έχει αποδειχθεί ότι μπορούν να υποστηριχθούν με επιτυχία από την πολυκριτήρια ανάλυση [339].

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την επέκταση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, παίρνονται αποφάσεις σχετικά με την ισχύ που θα εγκατασταθεί στο προβλεπόμενο χρονικό διάστημα, το πλήθος και το είδος των μονάδων παραγωγής, την τεχνολογία μετατροπής ενέργειας που θα χρησιμοποιηθεί και την τελική ισχύ εξόδου τόσο των νέων όσο και των ήδη εγκατεστημένων μονάδων. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους, των ρυπογόνων εκπομπών, των ραδιενεργών αποβλήτων, των γενικότερων αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον και του πιθανού ρίσκου, ενώ είναι θεμιτή η μεγιστοποίηση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας του συστήματος. Οι αντίστοιχοι συνήθεις περιορισμοί αφορούν τη διαθεσιμότητα των πόρων, τις απαιτήσεις σχετικά με τα ελάχιστα φορτία και την ικανοποίηση της ζήτησης, καθώς και την ανάγκη ύπαρξης διαφορετικών πηγών για λόγους ασφαλείας. Υπάρχουν επίσης τεχνολογικοί, οικονομικοί αλλά και νομικοί περιορισμοί [339], [342].

Επιπλέον, οι πολυκριτηριακές μέθοδοι αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για τον προγραμματισμό της παραγωγής με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται η ελαχιστοποίηση του κόστους και η επίτευξη περιβαλλοντολογικών στόχων, όταν αυτό απαιτείται. Οι περιορισμοί είναι κυρίως λειτουργικής φύσεως. Για παράδειγμα, πρέπει να αποφευχθεί η υπερφόρτωση των γραμμών και η απόκλιση από τις προδιαγεγραμμένες τιμές [339], [343].

Ένας άλλος τομέας του ενεργειακού σχεδιασμού στον οποίο μπορεί να φανεί χρήσιμη η πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων είναι τα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, είναι αναγκαίο να προσδιοριστεί η κατάλληλη τοποθεσία και το μέγεθος των νέων εγκαταστάσεων δικτύων διανομής, καθώς και ο χρονικός ορίζοντας έτσι ώστε να καλυφθεί έγκαιρα και αξιόπιστα η αυξανόμενη ζήτηση, λαμβάνοντας υπόψιν όχι μόνο τους τεχνικούς αλλά και τους περιβαλλοντολογικούς στόχους, εξισορροπώντας ταυτόχρονα την παράμετρο του κόστους. Φυσικά προκύπτουν περιορισμοί λόγω της αναγκαιότητας να μην επηρεαστεί η λειτουργικότητα του υπάρχοντος δικτύου, ενώ άλλοι περιορισμοί αφορούν την έκθεση των ανθρώπων σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και τη μέγιστη επιτρεπόμενη πτώση τάσης σε γραμμές μεταφοράς. Επιπλέον, τον σχεδιασμό μπορεί να επηρεάσουν τα θεσμοθετημένα θερμικά όρια, οι πιθανές επιπτώσεις σε οικοσυστήματα και τέλος η επίδραση στην αισθητική των περιοχών στις οποίες τοποθετούνται οι εγκαταστάσεις [339], [344].

Οι πολυκριτηριακές μέθοδοι μπορούν να φανούν χρήσιμες και στον έλεγχο της τάσης, μέσω για παράδειγμα της αντιστάθμισης αέργου ισχύος. Ειδικότερα, πυκνωτές αντιστάθμισης συνδέονται σε κατάλληλα σημεία του δικτύου διανομής, με σκοπό τη μείωση των απωλειών, τη βελτίωση της ποιότητας ισχύος και του προφίλ της τάσης. Το πλήθος, το μέγεθος και η τοποθεσία των πυκνωτών παίζουν καθοριστικό ρόλο στο ενδεχόμενο οικονομικό και λειτουργικό όφελος [339], [345], [346].

Σε ό,τι αφορά τη διαχείριση του φορτίου και της ζήτησης, πρακτικές όπως η εφαρμογή κατάλληλων περικοπών στη ζήτηση οδηγούν σε καλύτερο συντελεστή φορτίου, μειώνοντας την αιχμή του. Με αυτόν τον τρόπο ελαχιστοποιούνται οι απώλειες και μειώνεται το κόστος. Η μεγάλη διακύμανση των τιμών ενέργειας κι η ανάγκη αντιμετώπισης προβλημάτων όπως

η συμφόρηση στο δίκτυο διανομής ή η μη επαρκής παραγωγή, καθιστούν τη διαχείριση φορτίου πολύ σημαντική όχι μόνο για οικονομικούς λόγους, αλλά και για την εξασφάλιση της αξιοπιστίας του συστήματος. Σε πολυκριτηριακά μοντέλα κατάλληλα για την υποστήριξη της διαχείρισης της ζήτησης, υπάρχουν οικονομικοί και τεχνικοί περιορισμοί [339], [347], [348].

Μερικοί ακόμη προβληματισμοί στον τομέα της ενέργειας, οι οποίοι μπορούν να υποστηριχθούν από την πολυκριτήρια ανάλυση, αφορούν τη σωστή τιμολόγηση, τις διαδικασίες αδειοδότησης νέων έργων, την αντιμετώπιση απρόσμενων καταστάσεων και προβλημάτων κατά τη λειτουργία του συστήματος, τη διαχείριση των μεταφορών με στόχο τον περιορισμό των ρύπων, τη μελέτη της αλληλοσυσχέτισης ενέργειας και οικονομίας, ή την επιλογή ανάμεσα σε ανταγωνιστικά έργα, έτσι ώστε να προσδιοριστεί το έργο εκείνο που θα μεγιστοποιήσει την αποδοτικότητα, θα ελαχιστοποιήσει τις περιβαλλοντολογικές συνέπειες και θα ικανοποιήσει στο μεγαλύτερο δυνατό βαθμό τα εμπλεκόμενα μέρη [337], [339], [349].

5.2.2 Οι πιο Συχνά Χρησιμοποιούμενες Μέθοδοι και τα Συνήθη Κριτήρια

Μπορούμε, λοιπόν, να συνοψίσουμε και να χωρίσουμε τα πιο συνήθη κριτήρια αξιολόγησης προβλημάτων ενεργειακού σχεδιασμού στις κατηγορίες που φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα [339], [350]:

Πίνακας 8: Συνήθη κριτήρια αξιολόγησης

Τεχνικά	Οικονομικά	Περιβαλλοντολογικά	Κοινωνικά
Αποδοτικότητα	Κόστος επένδυσης	Εκπομπές αερίων	Κοινωνικό όφελος
Ασφάλεια	Κόστος συντήρησης	Απαιτούμενη έκταση	Κοινωνική αποδοχή
Αξιοπιστία	Κόστος λειτουργίας	Μόλυνση	
Ωριμότητα τεχνολογίας	Καθαρή παρούσα αξία	Θόρυβος	Δημόσια υγεία
Συντελεστής πρωτογενούς ενέργειας	Ισοδύναμο ετήσιο κόστος	Επιπτώσεις σε οικοσυστήματα	Νέες θέσεις εργασίας

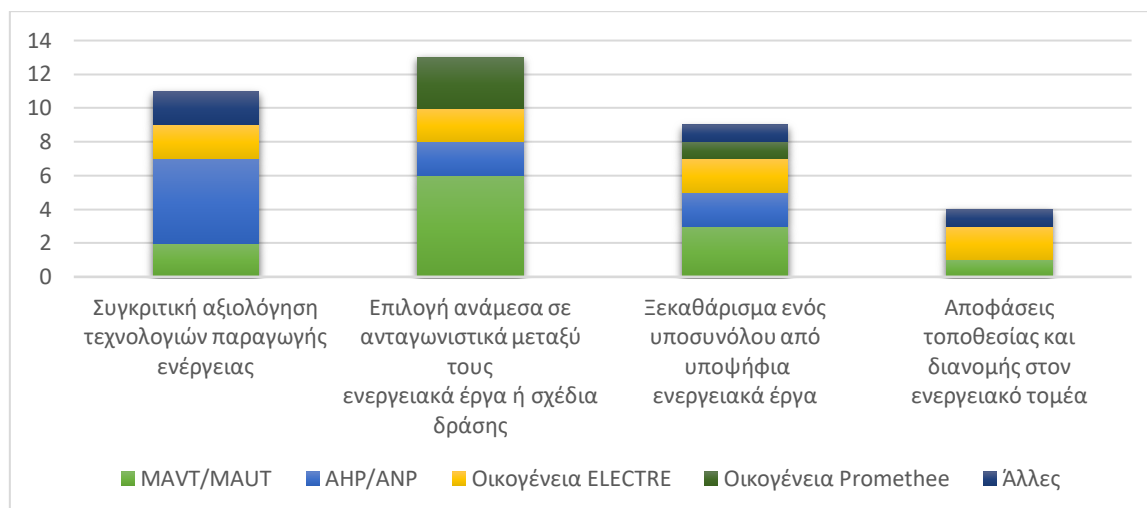
Στον ενεργειακό τομέα, συνήθως χρησιμοποιούνται οι παρακάτω πολυκριτηριακές μέθοδοι [337], [341]:

MAVT/MAUT: Multi-attribute value theory, multi-attribute utility theory

AHP/ANP: Analytic Hierarchy Process, analytic network process

PROMETHEE: Preference ranking organization method for enrichment evaluation

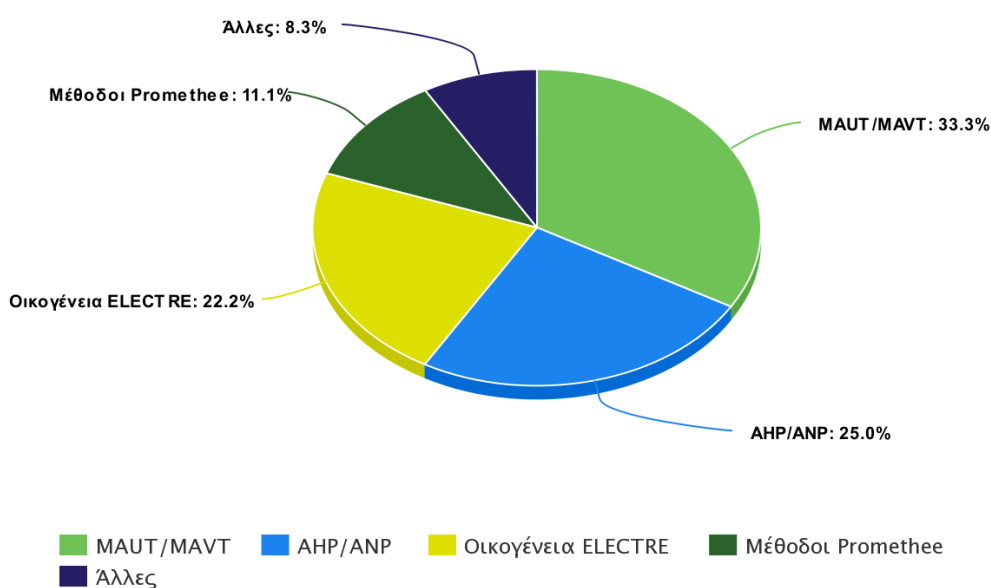
Οικογένεια μεθόδων ELECTRE



Εικόνα 32: Κατανομή των μεθόδων σε 4 κατηγορίες προβλημάτων ενεργειακού σχεδιασμού (Πηγή Diakoulaki et al. 2005 [339])

Όπως φαίνεται στην εικόνα 32, για συγκρίσεις τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται συχνότερα οι μέθοδοι AHP/ANP, ακολουθούμενες από τις μεθόδους της οικογένειας ELECTRE, καθώς και τις MAVT/MAUT. Οι τελευταίες είναι προτιμότερες για την επιλογή ανάμεσα σε έργα ή πλάνα, ανταγωνιστικά μεταξύ τους. Για τον ίδιο σκοπό χρησιμοποιούνται, λιγότερο συχνά, οι PROMETHEE, αλλά και οι ELECTRE και οι AHP/ANP. Όλες οι προαναφερθείσες μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό ενός κατάλληλου υποσυνόλου ανάμεσα σε διάφορα υποψήφια έργα, ενώ και σε αυτή την περίπτωση οι MAVT/MAUT προτιμώνται. Οι μέθοδοι ELECTRE είναι οι πιο συνηθισμένες σε προβλήματα που σχετίζονται με την τοποθεσία νέων εγκαταστάσεων [339].

Η συνολική κατανομή των μεθόδων, σύμφωνα με τους Diakoulaki et al., φαίνεται στην εικόνα 33 [339]:



Εικόνα 33: Πολυκριτηριακές μέθοδοι στον τομέα της ενέργειας

5.3 Η Μέθοδος Analytical Hierarchy Process

Μετά από την παραπάνω σύντομη ανασκόπηση, εξάγεται το συμπέρασμα ότι η πιο κατάλληλη μέθοδος για την κατάταξη των εμποδίων εφαρμογής του blockchain στον τομέα της ενέργειας είναι η Analytical Hierarchy Process ή αλλιώς AHP. Επιλέγεται αυτή η μέθοδος διότι χρησιμοποιείται αρκετά συχνά στον ενεργειακό σχεδιασμό, όπως φαίνεται και από την εικόνα 33, ενώ είναι κατάλληλη για συγκριτική αξιολόγηση. Για αυτό τον λόγο χρησιμοποιείται συχνά και σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους για να υποβοηθήσει τη βαροδότηση κριτηρίων. Επιπλέον, δύναται να χρησιμοποιηθεί και σε προβλήματα με πολλούς αποφασίζοντες. Περισσότερες λεπτομέρειες για τη συγκεκριμένη μέθοδο δίνονται στο ακόλουθο κεφάλαιο.

5.3.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο της Μεθόδου AHP

Η μέθοδος AHP αναπτύχθηκε το 1980 από τον Saaty. Διερευνά τον προσδιορισμό της σχετικής σημασίας που χαρακτηρίζει ένα σύνολο από πιθανές δραστηριότητες ή εναλλακτικές σε ένα πολυκριτήριο πρόβλημα [351]. Η μέθοδος δίνει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης κρίσεων στο πρόβλημα απόφασης, λαμβάνοντας υπόψιν τόσο ποιοτικά όσο και αντίστοιχα ποσοτικά κριτήρια [352], [353]. Η AHP βασίζεται σε τρεις σημαντικές αρχές [354]:

1. Στη δομή του υπάρχοντος προβλήματος προς επίλυση.
2. Στις διμερείς συγκρίσεις μεταξύ των εναλλακτικών λύσεων/ κριτηρίων.
3. Στη σύνθεση των προτεραιοτήτων για την λήψη της βέλτιστης απόφασης.

Η μέθοδος AHP χρησιμοποιείται με αρκετά συχνά και καλύπτει αρκετά μεγάλη ποικιλία προβλημάτων απόφασης, γεγονός που σε μεγάλο βαθμό οφείλεται στην απλότητα και την ευελιξία της [355], [356], [357]. Εφόσον η πλειοψηφία των προβλημάτων καθορισμού στρατηγικής περιλαμβάνουν διάφορα ιεραρχικά κριτήρια με αρκετές εναλλακτικές λύσεις, και είναι αναγκαίο να αξιολογηθούν από μια ομάδα ειδικών ή εμπειρογνομόνων με διαφορετικές απόψεις και προτιμήσεις, τα μοντέλα AHP συμβάλλουν στην εύρεση της βέλτιστης στρατηγικής στον τομέα της έρευνας και της ανάπτυξης [358].

Η μέθοδος AHP έχει χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα τομέων, όπως στην οικονομία, την εκπαίδευση, την γεωργία, το εμπόριο, τον κατασκευαστικό τομέα, τη διαχείριση έργων, τη βιομηχανία των αεροσκαφών, την υγεία, και φυσικά βρίσκει εφαρμογές στην ενέργεια και το περιβάλλον [359], [360], [361], [362], [363], [364], [365]. Στον πίνακα 9 δίνονται ορισμένα παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου AHP σε ενεργειακές εφαρμογές.

Πίνακας 9: Παραδείγματα χρήσης της μεθόδου AHP στον τομέα της ενέργειας

Πηγή	Περιγραφή
[366]	Υλοποίηση offshore αιολικών πάρκων για την εκμετάλλευση αιολικής ενέργειας.
[367]	Υιοθέτηση κατάλληλης στρατηγικής για την ενίσχυση του τομέα των υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων στο Νεπάλ.
[368]	Αξιολόγηση της βιομάζας ως καθαρής πηγής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα της Αιγύπτου.
[369]	Αξιολόγηση των εμποδίων των ανανεώσιμων πηγών για την βιώσιμη ανάπτυξη στο Πακιστάν.

[370]	Ιεράρχηση των εμποδίων της ενέργειας από βιομάζα.
[371]	Προτεραιοποίηση ανανεώσιμων πηγών για την παραγωγή ενέργειας.
[372]	Μοντέλο AHP για την ανάπτυξη βιώσιμης εφοδιαστικής αλυσίδας για τον τομέα των ανανεώσιμων πηγών.
[373]	Εύρεση της βέλτιστης τοποθεσίας ηλιακών πάνελ στην Ινδονησία.
[374]	Ανάλυση AHP για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίων.
[375]	Ανάλυση ρίσκου βασισμένη στην AHP για συμβάσεις ενεργειακών επιδόσεων (Energy Performance Contracting, EPC).

5.3.2 Εφαρμογή της Μεθόδου AHP

Παρατηρείται ότι η μέθοδος AHP στην ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως σε σχέση με τις ανανεώσιμες πηγές. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή είναι επίσης κατάλληλη για την αξιολόγηση της ένταξης νέων τεχνολογιών στον ενεργειακό τομέα, για τους λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω.

Ως τώρα, δεν έχει πραγματοποιηθεί ξανά αξιολόγηση της εφαρμογής του blockchain στην ενέργεια με πολυκριτήρια μέθοδο. Υπάρχουν μόνο ορισμένες προσεγγίσεις με βάση συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, σε τομείς εκτός της ενέργειας (κυρίως σε εφοδιαστικές αλυσίδες) ή σε συγκεκριμένα ενεργειακά πεδία (φόρτιση αυτοκινήτων και εμπορία ενέργειας) [46], [376], [377], [378], [379], [380], [381], [382], [383], [384], [385]. Επομένως, η εφαρμογή της μεθόδου AHP δύναται να δώσει νέα οπτική στο θέμα του blockchain στην ενέργεια και να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα.

Για την εφαρμογή της μεθόδου, συντάχθηκε ερωτηματολόγιο με βάση τα εμπόδια που ταυτοποιήθηκαν στο κεφάλαιο 4.3 της παρούσας εργασίας. Το ερωτηματολόγιο διαμοιράστηκε σε εμπειρογνώμονες ειδικούς είτε στον τομέα της ενέργειας είτε στο blockchain. Οι εμπειρογνώμονες ήταν μέλη του ευρωπαϊκού έργου InEExS (Innovative Energy (Efficiency) Service Models for Sector Integration via Blockchain), μίας πρωτοβουλίας χρηματοδοτούμενης από την Ευρωπαϊκή Ένωση, η οποία στοχεύει στην ένταξη της τεχνολογίας καταμετρημένου καθολικού στην ενέργεια [386]. Εφόσον επρόκειτο για εμπειρογνώμονες από διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες, το ερωτηματολόγιο συντάχθηκε στην Αγγλική γλώσσα. Αναλυτικότερα, οι αποφασίζοντες είχαν τις εξής θέσεις στους οργανισμούς τους:

1. Διαχειριστής έργων έρευνας και ανάπτυξης σε εταιρεία - ενεργειακό πάροχο στην Ελλάδα.
2. Γενικός διευθυντής σε εταιρεία ενεργειακής συμβουλευτικής στην Ισπανία.
3. Ερευνητής στην τεχνολογία blockchain από τεχνολογική εταιρεία στην Ελλάδα.
4. Επικεφαλής έρευνας blockchain σε τεχνολογική εταιρεία στην Ελλάδα.
5. Μέλος ερευνητικού ινστιτούτου πληροφορικής στη Γερμανία.

Για να μπορέσουν να ληφθούν υπόψιν οι απαντήσεις όλων των αποφασιζόντων, επιλέχθηκε η μέθοδος row geometric mean prioritization. Αυτή η μέθοδος υλοποιείται μέσω των ακόλουθων βημάτων:

Βήμα 1

Ορίζεται το πρόβλημα απόφασης και πραγματοποιούνται διμερείς συγκρίσεις, σε μία κλίμακα 1 ως 9 [351]:

Πίνακας 10: Η θεμελιώδης κλίμακα της AHP

Στάθμιση	Ορισμός	Εξήγηση
1	Ίση σημασία	Οι δύο παράγοντες συμβάλλουν εξίσου στο στόχο.
3	Ασθενής Προτίμηση	Η εμπειρία ή κρίση ευνοεί ελαφρά τον έναν παράγοντα σε σχέση με τον άλλον.
5	Ισχυρή Προτίμηση	Η εμπειρία ή η κρίση ευνοεί καθαρά τον έναν παράγοντα σε σχέση με τον άλλον.
7	Αποδεδειγμένη Προτίμηση	Η κυριαρχία του ενός παράγοντα ως προς τον άλλον έχει αποδειχθεί στην πράξη.
9	Απόλυτη Προτίμηση	Έχει αποδειχθεί στον υπερθετικό βαθμό η κυριαρχία του ενός παράγοντα στην επίτευξη του στόχου.
2, 4, 6, 8	Ενδιάμεσες τιμές	Αν υπάρχει ανάγκη για υποδιαιρέσεις.

Βήμα 2

Οι διμερείς συγκρίσεις μεταφέρονται σε πίνακες. Ειδικότερα:

Έστω $C = \{C_j \mid j = 1, 2, 3, \dots, n\}$ το σύνολο των κριτηρίων, τα οποία πρέπει να αξιολογηθούν για την επίλυση του προβλήματος απόφασης. Στην τρέχουσα περίπτωση πρόκειται για τα εμπόδια, ανά κατηγορία, και τις ίδιες τις κατηγορίες εμποδίων. Ο πίνακας A διαστάσεων $n \times n$, κάθε στοιχείο του οποίου είναι το πηλίκο των βαρών των κριτηρίων με βάση την παραπάνω κλίμακα, συνοψίζει τις διμερείς συγκρίσεις και έχει τη μορφή:

$$A = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \cdots & \alpha_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{n1} & \cdots & \alpha_{nn} \end{pmatrix}$$

όπου ως α_{ij} ορίζεται η σύγκριση του ζεύγους των κριτηρίων i και j , και ισχύουν τα ακόλουθα:

1. $\alpha_{ij} > 1$, εφόσον το κριτήριο i προτιμάται έναντι του κριτηρίου j ,
2. $\alpha_{ij} < 1$, εφόσον το κριτήριο j προτιμάται έναντι του κριτηρίου i ,
3. $\alpha_{ij} = 1/\alpha_{ji}$, $\forall i, j$, και
4. $\alpha_{ii} = 1$, με δεδομένο ότι τα στοιχεία αυτά δηλώνουν την σύγκριση ενός κριτηρίου με τον εαυτό του.

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι το σύνολο των πιθανών διαβαθμίσεων των προτιμήσεων του κάθε αποφασίζοντα, για κάθε κριτήριο είναι το σύνολο: $\{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9\}$, όπου οι αντίστροφες τιμές των βαρών 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 και 9, δηλώνουν τις αντίστροφες προτιμήσεις του αποφασίζοντα. Εάν δηλαδή ο αποφασίζοντας βαθμολογήσει το κριτήριο i σε σχέση με το κριτήριο j με α_{ij} , τότε αυτομάτως βαθμολογεί και το κριτήριο j σε σχέση με το κριτήριο i με $\alpha_{ji} = 1/\alpha_{ij}$.

Βήμα 3

Το επόμενο βήμα είναι ο υπολογισμός του γραμμικού γεωμετρικού μέσου όρου (RGMM) για κάθε κριτήριο και για κάθε αποφασίζοντα, με βάση τον τύπο [387]:

$$w_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \left(\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \right)} \quad (1)$$

Βήμα 4

Ελέγχεται η συνέπεια του αποφασίζοντα [388]:

$$GCI(A) = \frac{2}{(n-1)(n-2)} \sum_{i < j} [\ln(a_{ij}) - \ln(w_i) + \ln(w_j)]^2 \quad (2)$$

Θεωρούμε τα εξής ανώτατα όρια για τον δείκτη GCI, προκειμένου οι απαντήσεις του αποφασίζοντα να θεωρούνται συνεπείς [389]:

$$\overline{GCI} = 0.31, \quad n = 3 \quad (3)$$

$$\overline{GCI} = 0.35, \quad n = 4 \quad (4)$$

$$\overline{GCI} = 0.37, \quad n > 4 \quad (5)$$

Βήμα 5

Για να προχωρήσουμε στον συμψηφισμό των επιμέρους κρίσεων επιλέγουμε τη μέθοδο AIJ (Aggregation of Individual Judgements). Έτσι προκύπτει ο συνολικός πίνακας [390]:

$$a_{ij}^{(c)} = \prod_{k=1}^m (a_{ij}^{(k)})^{\lambda_k} \quad (6)$$

Όπου λ τα βάρη των αποφασιζόντων. Στη συνέχεια υπολογίζεται το διάνυσμα προτεραιότητας για τον συνολικό πίνακα μέσω προσαρμογής της σχέσης (1).

$$w_i^{(c)} = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}^{(c)}}}{\sum_{i=1}^n \left(\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}^{(c)}} \right)} \quad (7)$$

Βήμα 6

Ελέγχεται η συναίνεση του κάθε αποφασίζοντα με τον συνολική κρίση των αποφασιζόντων:

$$GCCI(A^{(k)}) = \frac{2}{(n-1)(n-2)} \sum_{i < j} [\ln(a_{ij}^{(k)}) - \ln(w_i^{(c)}) + \ln(w_j^{(c)})]^2 \quad (8)$$

Γενικά, ισχύει ότι όσο πιο μικρός ο δείκτης $GCCI$, τόσο περισσότερο σύμφωνος είναι ο εκάστοτε αποφασίζων με το υπόλοιπο σύνολο. Στην ουσία, δεν υπάρχει συγκεκριμένο ανώτατο όριο για τον δείκτη αυτόν [391]. Αντίθετα, κάθε αποφασίζων δύναται να ορίσει ένα δικό του όριο. Στο πρόβλημά μας οι αποφασίζοντες δεν όρισαν κάποιο τέτοιο όριο, και επομένως μπορούμε να παραλείψουμε το 6^ο βήμα. Δηλαδή, για τις συνολικές κατηγορίες εμποδίων, καθώς και για τα εμπόδια ανά κατηγορία, θα καταλήξουμε σε ένα διάνυσμα προτεραιότητας που θα αποτυπώνει τη συνολική άποψη των αποφασίζοντων.

5.3.2.1 Κατηγορίες εμποδίων

Πίνακας 11: Κατηγορίες εμποδίων, αποφασίζων 1

Κατηγορίες	Τεχνολογικά εμπόδια	Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	Νομικά εμπόδια	Οικονομικά εμπόδια	Wi
Τεχνολογικά εμπόδια	1	4	0,125	3	0,167808
Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	0,25	1	0,125	1	0,063753
Νομικά εμπόδια	8	8	1	7	0,697605
Οικονομικά εμπόδια	0,333333	1	0,142857	1	0,070833

$$GCI = 0,295048$$

Πίνακας 12: Κατηγορίες εμποδίων, αποφασίζων 2

Κατηγορίες	Τεχνολογικά εμπόδια	Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	Νομικά εμπόδια	Οικονομικά εμπόδια	Wi
Τεχνολογικά εμπόδια	1	4	1	3	0,339948
Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	0,25	1	0,142857143	0,25	0,056145
Νομικά εμπόδια	1	7	1	7	0,483243
Οικονομικά εμπόδια	0,333333333	4	0,142857143	1	0,120664

$$GCI = 0,346654$$

Πίνακας 13: Κατηγορίες εμποδίων, αποφασίζων 3

Κατηγορίες	Τεχνολογικά εμπόδια	Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	Νομικά εμπόδια	Οικονομικά εμπόδια	Wi
Τεχνολογικά εμπόδια	1	0,2	0,142857	0,5	0,061186

Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	5	1	0,5	5	0,332776
Νομικά εμπόδια	7	2	1	5	0,511916
Οικονομικά εμπόδια	2	0,2	0,2	1	0,094123

$$GCI = 0,101278$$

Πίνακας 14: Κατηγορίες εμποδίων, αποφασίζων 4

Κατηγορίες	Τεχνολογικά εμπόδια	Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	Νομικά εμπόδια	Οικονομικά εμπόδια	Wi
Τεχνολογικά εμπόδια	1	5	1	9	0,445055
Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	0,2	1	0,142857	1	0,070647
Νομικά εμπόδια	1	7	1	5	0,417953
Οικονομικά εμπόδια	0,111111	1	0,2	1	0,066345

$$GCI = 0,076451$$

Πίνακας 15: Κατηγορίες εμποδίων, αποφασίζων 5

Κατηγορίες	Τεχνολογικά εμπόδια	Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	Νομικά εμπόδια	Οικονομικά εμπόδια	Wi
Τεχνολογικά εμπόδια	1	0,166667	0,166667	2	0,485492
Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	6	1	1	4	2,213364
Νομικά εμπόδια	6	1	1	4	2,213364
Οικονομικά εμπόδια	0,5	0,25	0,25	1	0,420448

$$GCI = 0,201158$$

Πίνακας 16: Κατηγορίες εμποδίων, συνολικός πίνακας

Κατηγορίες	Τεχνολογικά εμπόδια	Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	Νομικά εμπόδια	Οικονομικά εμπόδια	Wi
Τεχνολογικά εμπόδια	1	1,267077	0,378745	2,339931	0,206181
Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	0,789218	1	0,249364	1,410864	0,145392
Νομικά εμπόδια	2,640302	4,010209	1	5,409005	0,550993
Οικονομικά εμπόδια	0,427363	0,708786	0,184877	1	0,097434

Για τους αποφασίζοντες, ανάλογα με το πόσο εξειδικευμένοι και καταρτισμένοι είναι, επιλέχθηκαν τα βάρη:

$$\lambda = \{0,1, 0,2, 0,3, 0,3, 0,1\}$$

5.3.2.2 Τεχνολογικά εμπόδια

Για μεγαλύτερη ευκολία στην ανάγνωση του πίνακα, εφόσον πρόκειται για την κατηγορία με τα περισσότερα εμπόδια, ορίζουμε τις εξής συντομογραφίες για καθένα από αυτά:

Πίνακας 17: Τεχνολογικά εμπόδια, συμβολισμός

Εμπόδιο	Συμβολισμός
Μη αντιστρεψιμότητα	C1
Περιορισμένη επεκτασιμότητα/κακή απόδοση	C2
Περιορισμένη ταχύτητα/αργή αναζήτηση	C3
Σταθερό μέγεθος block	C4
Ζητήματα αποθήκευσης	C5
Ενεργειακή κατανάλωση	C6
Έλλειψη πρακτικών δοκιμών	C7
Διαλειτουργικότητα/μη προβλεψιμότητα της συμπεριφοράς του εξωτερικού συστήματος	C8
Ευάλωτα σημεία των μηχανισμών κρυπτογράφησης/τεχνικές αποανωνυμοποίησης	C9
Κυβερνοεπιθέσεις	C10

Πίνακας 18: Τεχνολογικά εμπόδια, αποφασίζων 1

Τεχνολογικά εμπόδια	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Wi
C1	1	3	3	1	0,1667	6	0,2	0,1667	0,1429	0,1429	0,0364
C2	0,3333	1	1	0,3333	0,125	4	0,125	0,125	0,1111	0,1111	0,0193
C3	0,3333	1	1	0,3333	0,125	3	0,125	0,1111	0,1111	0,1111	0,0185
C4	1	3	3	1	0,1667	6	0,2	0,1667	0,1429	0,1429	0,0364
C5	6	8	8	6	1	8	2	0,5	0,3333	0,3333	0,13
C6	0,1667	0,25	0,3333	0,1667	0,125	1	0,1429	0,125	0,1111	0,1111	0,0116
C7	5	8	8	5	0,5	7	1	0,5	0,25	0,25	0,1016
C8	6	8	9	6	2	8	2	1	0,3333	0,3333	0,1511
C9	7	9	9	7	3	9	4	3	1	1	0,2475
C10	7	9	9	7	3	9	4	3	1	1	0,2475

$$GCI = 0,259165$$

Πίνακας 19: Τεχνολογικά εμπόδια, αποφασίζων 2

Τεχνολογικά εμπόδια	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Wi
C1	1	4	1	7	7	3	1	0,5	0,2	4	0,1156
C2	0,25	1	0,3333	6	6	1	0,3333	0,3333	0,1429	1	0,0494
C3	1	3	1	7	7	3	0,5	1	0,25	3	0,1116
C4	0,1429	0,1667	0,1429	1	1	0,2	0,1667	0,1429	0,1111	0,5	0,0166
C5	0,1429	0,1667	0,1429	1	1	0,2	0,1667	0,1429	0,1111	0,5	0,0166
C6	0,3333	1	0,3333	5	5	1	0,25	0,2	0,1429	1	0,0453
C7	1	3	2	6	6	4	1	0,3333	0,2	4	0,1154

C8	2	3	1	7	7	5	3	1	0,3333	5	0,1631
C9	5	7	4	9	9	7	5	3	1	7	0,3296
C10	0,25	1	0,3333	2	2	1	0,25	0,2	0,1429	1	0,0366

$$GCI = 0,211028$$

Πίνακας 20: Τεχνολογικά εμπόδια, αποφασίζων 3

Τεχνο- λογικά εμπό- δια	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Wi
C1	1	3	1	1	0,1667	1	2	0,1667	0,3333	0,2	0,0431
C2	0,3333	1	0,5	0,3333	0,125	0,5	0,5	0,125	0,2	0,1667	0,0207
C3	1	2	1	1	0,125	2	0,3333	1	2	0,3333	0,0543
C4	1	3	1	1	0,1667	1	2	0,1667	0,3333	0,2	0,0431
C5	6	8	8	6	1	7	8	2	5	2	0,2959
C6	1	2	0,5	1	0,1429	1	1	0,1429	0,25	0,1667	0,0333
C7	0,5	2	3	0,5	0,125	1	1	0,1429	0,25	0,1667	0,0343
C8	6	8	1	6	0,5	7	7	1	3	0,1667	0,153
C9	3	5	0,5	3	0,2	4	4	0,3333	1	0,1111	0,0746
C10	5	6	3	5	0,5	6	6	6	9	1	0,2478

$$GCI = 0,293195$$

Πίνακας 21: Τεχνολογικά εμπόδια, αποφασίζων 4

Τεχνο- λογικά εμπό- δια	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Wi
C1	1	0,1429	0,1429	1	0,1111	1	0,1111	0,25	0,1429	0,1429	0,0189
C2	7	1	1	7	1	5	5	5	2	4	0,2162
C3	7	1	1	7	1	5	5	5	4	5	0,2369
C4	1	0,1429	0,1429	1	0,1111	1	0,1111	0,25	0,1429	0,1429	0,0189
C5	9	1	1	9	1	1	1	1	1	1	0,1139
C6	1	0,2	0,2	1	1	1	0,5	0,3333	0,5	0,3333	0,0371
C7	9	0,2	0,2	9	1	2	1	1	1	1	0,0885
C8	4	0,2	0,2	4	1	3	1	1	0,3333	0,3333	0,0629
C9	7	0,5	0,25	7	1	2	1	3	1	0,25	0,0916
C10	7	0,25	0,2	7	1	3	1	3	4	1	0,1149

$$GCI = 0,334055$$

Πίνακας 22: Τεχνολογικά εμπόδια, αποφασίζων 5

Τεχνολογικά εμπόδια	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Wi
C1	1	5	5	4	2	7	1	0,3333	0,3333	0,3333	0,0971
C2	0,2	1	1	1	0,3333	2	0,2	0,125	0,125	0,125	0,0244
C3	0,2	1	1	2	0,3333	3	0,1667	0,125	0,125	0,125	0,0267
C4	0,25	1	0,5	1	3	1	0,1429	0,1111	0,1111	0,1111	0,0253
C5	0,5	3	3	0,3333	1	0,25	0,3333	0,2	0,2	0,2	0,0328
C6	0,1429	0,5	0,3333	1	4	1	0,1429	0,1111	0,1111	0,1111	0,022
C7	1	5	6	7	3	7	1	0,5	0,5	0,5	0,123
C8	3	8	8	9	5	9	2	1	1	1	0,2162
C9	3	8	8	9	5	9	2	1	1	1	0,2162
C10	3	8	8	9	5	9	2	1	1	1	0,2162

$$GCI = 0,268269$$

Πίνακας 23: Τεχνολογικά εμπόδια, συνολικός πίνακας

Τεχνολογικά εμπόδια	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	Wi
C1	1	1,1098	0,6226	1,2148	0,2565	1,3351	0,5811	0,2513	0,2519	0,2771	0,0486
C2	0,9011	1	0,679	1,2382	0,4229	1,4109	0,8938	0,5134	0,4274	0,5942	0,0648
C3	1,6063	1,4727	1	1,9513	0,4295	2,664	0,7915	1,301	1,3977	0,9357	0,1059
C4	0,8232	0,8076	0,5125	1	0,2112	1,0184	0,4858	0,2217	0,2375	0,225	0,04
C5	3,898	2,3644	2,3283	4,7353	1	2,2827	2,0584	1,0134	1,3692	1,1031	0,1683
C6	0,749	0,7088	0,3754	0,9819	0,4381	1	0,5821	0,2284	0,3083	0,282	0,0436
C7	1,7209	1,1188	1,2635	2,0586	0,4858	1,7180	1	0,3838	0,4257	0,4884	0,078
C8	3,9792	1,9479	0,7687	4,5103	0,9867	4,3791	2,6053	1	1,7321	0,3696	0,1473
C9	3,9699	2,34	0,7159	4,2103	0,7304	3,2439	2,3492	0,5774	1	0,3328	0,1222
C10	3,6093	1,6829	1,0687	4,4436	0,9066	3,5467	2,0477	2,7053	3,0047	1	0,1813

Για τους αποφασίζοντες επιλέχτηκαν τα βάρη:

$$\lambda = \{0,1, 0,1, 0,4, 0,3, 0,1\}$$

5.3.2.3 Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια

Πίνακας 24: Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια, αποφασίζων 1

Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	Άγνοια/έλλειψη γνώσεων	Λανθασμένες αντιλήψεις	Έλλειψη εμπιστοσύνης	Σκεπτικισμός (P2P εμπορία)	Αποφυγή ρίσκου	Wi
Άγνοια/έλλειψη γνώσεων	1	0,333333	0,142857	0,333333	0,111111	0,035878
Λανθασμένες αντιλήψεις	3	1	0,2	1	0,142857	0,078012
Έλλειψη εμπιστοσύνης	7	5	1	4	0,5	0,298243
Σκεπτικισμός (P2P εμπορία)	3	1	0,25	1	0,125	0,079423
Αποφυγή ρίσκου	9	7	2	8	1	0,508444

$$GCI = 0,141222$$

Πίνακας 25: Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια, αποφασίζων 2

Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	Άγνοια/έλλειψη γνώσεων	Λανθασμένες αντιλήψεις	Έλλειψη εμπιστοσύνης	Σκεπτικισμός (P2P εμπορία)	Αποφυγή ρίσκου	Wi
Άγνοια/έλλειψη γνώσεων	1	4	0,25	3	0,25	0,132522
Λανθασμένες αντιλήψεις	0,25	1	0,166667	0,333333	0,166667	0,041704
Έλλειψη εμπιστοσύνης	4	6	1	5	1	0,36569
Σκεπτικισμός (P2P εμπορία)	0,333333	3	0,2	1	0,142857	0,068939
Αποφυγή ρίσκου	4	6	1	7	1	0,391145

$$GCI = 0,205361$$

Πίνακας 26: Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια, αποφασίζων 3

Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	Άγνοια/έλλειψη γνώσεων	Λανθασμένες αντιλήψεις	Έλλειψη εμπιστοσύνης	Σκεπτικισμός (P2P εμπορία)	Αποφυγή ρίσκου	Wi
Άγνοια/έλλειψη γνώσεων	1	5	7	4	2	0,472918
Λανθασμένες αντιλήψεις	0,2	1	2	1	0,5	0,111061
Έλλειψη εμπιστοσύνης	0,142857	0,5	1	0,5	0,2	0,057033
Σκεπτικισμός (P2P εμπορία)	0,25	1	2	1	0,5	0,116129
Αποφυγή ρίσκου	0,5	2	5	2	1	0,242859

$$GCI = 0,361275$$

Πίνακας 27: Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια, αποφασίζων 4

Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	Άγνοια/έλλειψη γνώσεων	Λανθασμένες αντιλήψεις	Έλλειψη εμπιστοσύνης	Σκεπτικισμός (P2P εμπορία)	Αποφυγή ρίσκου	Wi
Άγνοια/έλλειψη γνώσεων	1	3	1	5	5	0,365655
Λανθασμένες αντιλήψεις	0,333333	1	0,25	1	0,2	0,067987
Έλλειψη εμπιστοσύνης	1	4	1	6	1	0,291139
Σκεπτικισμός (P2P εμπορία)	0,2	1	0,166667	1	0,166667	0,054576
Αποφυγή ρίσκου	0,2	5	1	6	1	0,220642

$$GCI = 0,36402$$

Πίνακας 28: Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια, αποφασίζων 5

Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	Άγνοια/έλλειψη γνώσεων	Λανθασμένες αντιλήψεις	Έλλειψη εμπιστοσύνης	Σκεπτικισμός (P2P εμπορία)	Αποφυγή ρίσκου	Wi
Άγνοια/έλλειψη γνώσεων	1	8	1	1	6	0,346858
Λανθασμένες αντιλήψεις	0,125	1	0,125	0,125	0,5	0,03998
Έλλειψη εμπιστοσύνης	1	8	1	1	1	0,242394
Σκεπτικισμός (P2P εμπορία)	1	8	1	1	1	0,242394
Αποφυγή ρίσκου	0,166667	2	1	1	1	0,128375

$$GCI = 0,201158$$

Πίνακας 29: Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια, συνολικός πίνακας

Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια	Άγνοια/έλλειψη γνώσεων	Λανθασμένες αντιλήψεις	Έλλειψη εμπιστοσύνης	Σκεπτικισμός (P2P εμπορία)	Αποφυγή ρίσκου	Wi
Άγνοια/έλλειψη γνώσεων	1	2,759459	0,757858	1,820564	1,107566	0,233954
Λανθασμένες αντιλήψεις	0,36239	1	0,290905	0,529612	0,260102	0,075256
Έλλειψη εμπιστοσύνης	1,319508	3,437544	1	2,267933	0,630957	0,25503
Σκεπτικισμός (P2P εμπορία)	0,54928	1,888175	0,44093	1	0,271973	0,115632
Αποφυγή ρίσκου	0,90288	3,844642	1,584893	3,676833	1	0,320129

Θεωρήθηκαν ίδια Βάρη για όλους τους αποφασίζοντες.

5.3.2.4 Οικονομικά εμπόδια

Πίνακας 30: Οικονομικά εμπόδια, αποφασίζων 1

Οικονομικά εμπόδια	Υψηλό αρχικό κόστος	Υψηλό κόστος συντήρησης	Πιθανότητα αύξησης του κόστους συναλλαγής	Μη εγγυημένη απόδοση επένδυσης	Wi
Υψηλό αρχικό κόστος	1	4	3	0,111111	0,318719
Υψηλό κόστος συντήρησης	0,25	1	1	0,125	0,318719
Πιθανότητα αύξησης του κόστους συναλλαγής	0,333333	1	1	0,125	0,318719
Μη εγγυημένη απόδοση επένδυσης	9	8	8	1	0,318719

$$GCI = 0,318719$$

Πίνακας 31: Οικονομικά εμπόδια, αποφασίζων 2

Οικονομικά εμπόδια	Υψηλό αρχικό κόστος	Υψηλό κόστος συντήρησης	Πιθανότητα αύξησης του κόστους συναλλαγής	Μη εγγυημένη απόδοση επένδυσης	Wi
Υψηλό αρχικό κόστος	1	4	3	4	0,527699
Υψηλό κόστος συντήρησης	0,25	1	2	3	0,22187
Πιθανότητα αύξησης του κόστους συναλλαγής	0,333333	0,5	1	3	0,168585
Μη εγγυημένη απόδοση επένδυσης	0,25	0,333333	0,333333	1	0,081847

$$GCI = 0,275586$$

Πίνακας 32: Οικονομικά εμπόδια, αποφασίζων 3

Οικονομικά εμπόδια	Υψηλό αρχικό κόστος	Υψηλό κόστος συντήρησης	Πιθανότητα αύξησης του κόστους συναλλαγής	Μη εγγυημένη απόδοση επένδυσης	Wi
Υψηλό αρχικό κόστος	1	7	3	6	0,615346
Υψηλό κόστος συντήρησης	0,142857	1	1	0,5	0,09495
Πιθανότητα αύξησης του κόστους συναλλαγής	0,333333	1	1	0,333333	0,106039
Μη εγγυημένη απόδοση επένδυσης	0,166667	2	3	1	0,183665

$$GCI = 0,36527$$

Πίνακας 33: Οικονομικά εμπόδια, αποφασίζων 4

Οικονομικά εμπόδια	Υψηλό αρχικό κόστος	Υψηλό κόστος συντήρησης	Πιθανότητα αύξησης του κόστους συναλλαγής	Μη εγγυημένη απόδοση επένδυσης	Wi
Υψηλό αρχικό κόστος	1	8	6	5	0,67021
Υψηλό κόστος συντήρησης	0,125	1	3	1	0,13325
Πιθανότητα αύξησης του κόστους συναλλαγής	0,166667	0,333333	1	1	0,082669
Μη εγγυημένη απόδοση επένδυσης	0,2	1	1	1	0,113872

$$GCI = 0,281909$$

Πίνακας 34: Οικονομικά εμπόδια, αποφασίζων 5

Οικονομικά εμπόδια	Υψηλό αρχικό κόστος	Υψηλό κόστος συντήρησης	Πιθανότητα αύξησης του κόστους συναλλαγής	Μη εγγυημένη απόδοση επένδυσης	Wi
Υψηλό αρχικό κόστος	1	4	3	0,111111	0,156968
Υψηλό κόστος συντήρησης	0,25	1	1	0,125	0,061417
Πιθανότητα αύξησης του κόστους συναλλαγής	0,333333	1	1	0,125	0,065997
Μη εγγυημένη απόδοση επένδυσης	9	8	8	1	0,715618

$$GCI = 0,318719$$

Πίνακας 35: Οικονομικά εμπόδια, συνολικός πίνακας

Οικονομικά εμπόδια	Υψηλό αρχικό κόστος	Υψηλό κόστος συντήρησης	Πιθανότητα αύξησης του κόστους συναλλαγής	Μη εγγυημένη απόδοση επένδυσης	Wi
Υψηλό αρχικό κόστος	1	5,824792	1,732051	2,358848	0,486058
Υψηλό κόστος συντήρησης	0,17168	1	1,597138	0,821876	0,151625
Πιθανότητα αύξησης του κόστους συναλλαγής	0,57735	0,62612	1	0,591112	0,149622
Μη εγγυημένη απόδοση επένδυσης	0,423936	1,216729	1,691726	1	0,212696

Για τους αποφασίζοντες, ανάλογα με το πόσο εξειδικευμένοι και καταρτισμένοι είναι, επιλέχθηκαν τα βάρη:

$$\lambda = \{0,1, 0,2, 0,3, 0,3, 0,1\}$$

5.3.2.5 Νομικά εμπόδια

Πίνακας 36: Νομικά εμπόδια, αποφασίζων 1

Νομικά εμπόδια	Έλλειψη τυποποίησης	GDPR	Αβεβαιότητα πολιτικών	Πολυπλοκότητα κανονισμών	Νομική υπόσταση των έξυπνων συμβολαίων	Wi
Έλλειψη τυποποίησης	1	0,166667	3	1	0,5	0,097548
GDPR	6	1	9	7	8	0,639359
Αβεβαιότητα πολιτικών	0,333333	0,111111	1	0,25	1	0,05046
Πολυπλοκότητα κανονισμών	1	0,142857	4	1	1	0,115086
Νομική υπόσταση των έξυπνων συμβολαίων	2	0,125	1	1	1	0,097548

$$GCI = 0,282718$$

Πίνακας 37: Νομικά εμπόδια, αποφασίζων 2

Νομικά εμπόδια	Έλλειψη τυποποίησης	GDPR	Αβεβαιότητα πολιτικών	Πολυπλοκότητα κανονισμών	Νομική υπόσταση των έξυπνων συμβολαίων	Wi
Έλλειψη τυποποίησης	1	1	0,333333	0,25	0,25	0,082726
GDPR	1	1	2	0,333333	0,333333	0,132816
Αβεβαιότητα πολιτικών	3	0,5	1	1	1	0,194585
Πολυπλοκότητα κανονισμών	4	3	1	1	1	0,294936
Νομική υπόσταση των έξυπνων συμβολαίων	4	3	1	1	1	0,294936

$$GCI = 0,332075$$

Πίνακας 38: Νομικά εμπόδια, αποφασίζων 3

Νομικά εμπόδια	Έλλειψη τυποποίησης	GDPR	Αβεβαιότητα πολιτικών	Πολυπλοκότητα κανονισμών	Νομική υπόσταση των έξυπνων συμβολαίων	Wi
Έλλειψη τυποποίησης	1	5	0,166667	0,2	1	0,101171
GDPR	0,2	1	0,125	0,142857	0,25	0,03555
Αβεβαιότητα πολιτικών	6	8	1	1	3	0,391166
Πολυπλοκότητα κανονισμών	5	7	1	1	2	0,338616

Νομική υπόσταση των έξυπνων συμβολαίων	1	4	0,333333	0,5	1	0,133496
--	---	---	----------	-----	---	----------

$$GCI = 0,363699$$

Πίνακας 39: Νομικά εμπόδια, αποφασίζων 4

Νομικά εμπόδια	Έλλειψη τυποποίησης	GDPR	Αβεβαιότητα πολιτικών	Πολυπλοκότητα κανονισμών	Νομική υπόσταση των έξυπνων συμβολαίων	Wi
Έλλειψη τυποποίησης	1	1	1	1	1	0,2
GDPR	1	1	1	1	1	0,2
Αβεβαιότητα πολιτικών	1	1	1	1	1	0,2
Πολυπλοκότητα κανονισμών	1	1	1	1	1	0,2
Νομική υπόσταση των έξυπνων συμβολαίων	1	1	1	1	1	0,2

$$GCI = 0$$

Πίνακας 40: Νομικά εμπόδια, αποφασίζων 5

Νομικά εμπόδια	Έλλειψη τυποποίησης	GDPR	Αβεβαιότητα πολιτικών	Πολυπλοκότητα κανονισμών	Νομική υπόσταση των έξυπνων συμβολαίων	Wi
Έλλειψη τυποποίησης	1	4	3	2	0,5	0,274658
GDPR	0,25	1	0,5	0,25	0,25	0,063316
Αβεβαιότητα πολιτικών	0,333333	2	1	0,5	0,333333	0,107673
Πολυπλοκότητα κανονισμών	0,5	4	2	1	0,5	0,191939
Νομική υπόσταση των έξυπνων συμβολαίων	2	4	3	2	1	0,362414

$$GCI = 0,339851$$

Εφόσον ο αποφασίζων 4 ουσιαστικά δεν έδωσε απάντηση σε αυτή την κατηγορία εμποδίων, υπολογίζουμε τον συνολικό πίνακα από του υπόλοιπου αποφασίζοντες θεωρώντας ίσα βάση.

Πίνακας 41: Νομικά εμπόδια, συνολικός πίνακας

Νομικά εμπόδια	Έλλειψη τυποποίησης	GDPR	Αβεβαιότητα πολιτικών	Πολυπλοκότητα κανονισμών	Νομική υπόσταση των έξυπνων συμβολαίων	Wi
Έλλειψη τυποποίησης	1	0,56811	0,840896	0,302138	0,379918	0,103776
GDPR	1,760223	1	0,707107	0,438691	0,521695	0,14428
Αβεβαιότητα πολιτικών	1,189207	1,414214	1	0,408248	1,316074	0,181751
Πολυπλοκότητα κανονισμών	3,309751	2,279507	2,44949	1	0,707107	0,310113
Νομική υπόσταση των έξυπνων συμβολαίων	2,632148	1,916829	0,759836	1,414214	1	0,26008

5.3.3 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων

Τα συνολικά αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου AHP δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 42: Τελική κατάταξη των εμποδίων

Κατάταξη κατηγοριών εμποδίων
Νομικά εμπόδια
Τεχνολογικά εμπόδια
Κοινωνικοπολιτικά εμπόδια
Οικονομικά εμπόδια
Κατάταξη νομικών εμποδίων
Πολυπλοκότητα κανονισμών
Νομική υπόσταση των έξυπνων συμβολαίων
Αβεβαιότητα πολιτικών
GDPR
Έλλειψη τυποποίησης
Κατάταξη τεχνολογικών εμποδίων
Κυβερνοεπιθέσεις
Ζητήματα αποθήκευσης
Διαλειτουργικότητα/μη προβλεψιμότητα της συμπεριφοράς του εξωτερικού συστήματος
Ευάλωτα σημεία των μηχανισμών κρυπτογράφησης/τεχνικές αποανωνυμοποίησης
Περιορισμένη ταχύτητα/αργή αναζήτηση
Έλλειψη πρακτικών δοκιμών
Περιορισμένη επεκτασιμότητα/κακή απόδοση
Μη αντιστρεψιμότητα

Έλλειψη πρακτικών δοκιμών
Σταθερό μέγεθος block
Κατάταξη κοινωνικοπολιτικών εμποδίων
Αποφυγή ρίσκου
Έλλειψη εμπιστοσύνης
Άγνοια/έλλειψη γνώσης
Σκεπτικισμός (P2P εμπορία)
Λανθασμένες αντιλήψεις
Κατάταξη οικονομικών εμποδίων
Υψηλό αρχικό κόστος
Μη εγγυημένη απόδοση επένδυσης
Υψηλό κόστος συντήρησης
Μη εγγυημένη απόδοση επένδυσης

Σημειώνεται ότι ο δείκτης συνέπειας όλων των επιμέρους πινάκων ήταν εντός των αποδεκτών ορίων.

Από την τελική λίστα εξάγεται το συμπέρασμα ότι η έλλειψη νομικού πλαισίου και τα διάφορα εμπόδια που αυτή συνεπάγεται θεωρούνται μείζονος σημασίας, καθώς όχι μόνο είναι πρώτα συνολικά, αλλά και κάθε ένας από τους αποφασίζοντες ανέδειξε ως πρώτη τη συγκεκριμένη κατηγορία εμποδίων. Παρόλα αυτά, ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι ο αποφασίζων 4 προτίμησε να μην κατατάξει τα συγκεκριμένα κριτήρια, θεωρώντας πιθανώς ότι δεν έχει την απαραίτητη εξειδίκευση και γνώση για να πραγματοποιήσει αξιόπιστες διμερείς συγκρίσεις.

Ακολουθεί η κατηγορία των τεχνολογικών εμποδίων, τα οποία είναι και τα πολυπληθέστερα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι οι αποφασίζοντες που δραστηριοποιούνται στον τομέα της ενέργειας κατέταξαν υψηλότερα τα τεχνολογικά εμπόδια, σε σχέση με αυτούς που ασχολούνται με τον τομέα της πληροφορικής. Σε αυτή την κατηγορία δόθηκαν υψηλότερα βάρη στους αποφασίζοντες που εξειδικεύονται στο blockchain. Εκείνοι πέτυχαν και τους μικρότερους συντελεστές GCI. Παρόλο που οι συγκεκριμένοι συντελεστές δεν αποδεικνύουν την εγκυρότητα των απαντήσεων, χαμηλές τιμές δεικτών GCI αποτελούν ένδειξη ότι ο αποφασίζων έχει αρκετά ξεκάθαρη εικόνα της σχετικής σημασίας των κριτηρίων. Στην κατηγορία αυτή αναδείχθηκαν ως πιο σημαντικοί οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την ασφάλεια του blockchain. Γίνεται, λοιπόν, φανερό, ότι οι εμπλεκόμενοι φορείς δίνουν περισσότερη βαρύτητα σε θέματα ασφάλειας από ότι σε θέματα που σχετίζονται με την απόδοση ή την ταχύτητα του blockchain, παρόλο που και αυτά τα ζητήματα είναι αρκετά σημαντικά. Δεν πρέπει φυσικά να αμελείται το γεγονός ότι, οι αποφασίζοντες κατά τη συμπλήρωση των ερωτηματολογίων δεν έλαβαν υπόψιν μόνο τη σημασία των εμποδίων αυτή καθαυτή, αλλά και το πόσο εύκολα ή δύσκολα μπορούν να ξεπεραστούν αυτά τα εμπόδια. Ενδιαφέρον εύρημα αποτελεί το γεγονός ότι το πρόβλημα της αποθήκευσης περιττών δεδομένων στο blockchain είναι δεύτερο στην τελική κατάταξη μετά τις κυβερνοεπιθέσεις, παρόλο που το συγκεκριμένο θέμα δε θίγεται ιδιαίτερα συχνά στη βιβλιογραφία, και σίγουρα αναφέρεται λιγότερο σε σχέση με άλλες τεχνολογικές αδυναμίες, όπως για παράδειγμα το πρόβλημα της επεκτασιμότητας.

Όσον αφορά τα κοινωνικοπολιτικά εμπόδια, φαίνεται πως επρόκειτο για δύσκολο τομέα για τους αποφασίζοντες, καθώς σε αυτή την κατηγορία βρέθηκαν οι υψηλότεροι συντελεστές

GCI. Αυτό μπορεί να οφείλεται και στο γεγονός ότι τα εμπόδια στη συγκεκριμένη κατηγορία είναι περισσότερο συναφή και παρόμοια μεταξύ τους, καθιστώντας δυσκολότερη τη σύγκριση. Μπορεί, όμως, η αβεβαιότητα των απαντήσεων να αποτελεί μία ένδειξη ότι οι εμπλεκόμενοι φορείς στην ένταξη του blockchain στην ενέργεια δεν έχουν ξεκάθαρη εικόνα σχετικά με την κοινωνική διάσταση του θέματος. Παρόλα αυτά δε θεωρούν ασήμαντα τα κοινωνικοπολιτικά εμπόδια, καθώς αυτά είναι υψηλότερα από τα οικονομικά στην κατάταξη.

Τέλος, στα οικονομικά κριτήρια φαίνεται πως κατά κοινή ομολογία το αρχικό κόστος εγκατάστασης συστημάτων βασισμένων στο blockchain αποτελεί τον αποτρεπτικό παράγοντα υιοθέτησής του. Από την άλλη πλευρά, η πιθανότητα αύξησης του κόστους συναλλαγής φαίνεται να μην επηρεάζει τόσο την ένταξη του blockchain στην ενέργεια, σύμφωνα με τους αποφασίζοντες. Ίσως αυτό αποτελεί ένδειξη ότι στην πραγματικότητα είναι πιθανότερο το κόστος συναλλαγής να μειωθεί, ιδιαίτερα χάρη στην ανάπτυξη μη ενεργοβόρων αλγορίθμων συναίνεσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα και Προοπτικές

6 Συμπεράσματα και Προοπτικές

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις που διεξήχθησαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Επιπλέον, αναφέρονται οι προοπτικές για περαιτέρω έρευνα στο θέμα του blockchain στην ενέργεια αλλά και ειδικότερα στην εφαρμογή των πολυκριτηριακών μεθόδων, ενώ γίνεται αναφορά και στο πως θα μπορούσε να αξιοποιηθεί η παρούσα εργασία τόσο από την ερευνητική κοινότητα όσο και από φορείς εμπλεκόμενους στην αγορά.

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία γίνεται διεξοδική ανάλυση της εφαρμογής της τεχνολογίας blockchain στον ενεργειακό τομέα. Από την πληθώρα προτεινόμενων εφαρμογών του blockchain, σε πολλούς τομείς όπως στην οικονομία, στο διαδίκτυο πραγμάτων, στην ασφάλεια και την ιδιωτικότητα, στη διαχείριση ψηφιακής ταυτότητας, στην ιδιοκτησία και την αγοραπωλησία δεδομένων, στα συστήματα φήμης, στη διαχείριση ψηφιακών εγγράφων, στις εφοδιαστικές αλυσίδες, στον ιατρικό τομέα, στην αυτοκινητοβιομηχανία, στη διαχείριση περιουσιακών στοιχείων, στην προστασία πνευματικών δικαιωμάτων, στους τίτλους κυριότητας, στον αγροτικό τομέα, στις ψηφοφορίες, στην εκπαίδευση, στη διαφήμιση, στην ασφάλιση, ακόμα και στην άμυνα, ο ενεργειακός τομέας αναμφίβολα ξεχωρίζει.

Η εφαρμογή του blockchain σε ενεργειακές υπηρεσίες έχει εξεταστεί αρκετά διεξοδικά από την επιστημονική κοινότητα, παρά το γεγονός ότι η τεχνολογία αυτή είναι αρκετά νέα. Έχουν δημοσιευτεί πολλά σχετικά επιστημονικά άρθρα και έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές προσπάθειες ένταξης του blockchain στην ενέργεια σε πιλοτικά έργα.

Ειδικότερα, το blockchain μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα έξυπνα δίκτυα και στα μικροδίκτυα προκειμένου να διευκολύνει τη διαχείριση των αποκεντρωμένων πόρων και της διεσπαρμένης παραγωγής. Πολλές υποψήφιες εφαρμογές επικεντρώνονται στην υλοποίηση εμπορίας ενέργειας peer-to-peer, που γίνεται όλο και πιο σημαντική όσο περισσότεροι καταναλωτές γίνονται ταυτόχρονα και ενεργοί παραγωγοί. Επιπλέον, το blockchain δίνει τη δυνατότητα αυτόματης εκτέλεσης ροών εργασιών μέσω έξυπνων συμβολαίων, κάτι που μπορεί να φανεί χρήσιμο σε διάφορες ενεργειακές εφαρμογές. Επιπρόσθετα, το blockchain δύναται να χρησιμοποιηθεί για την εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών, τη βελτιστοποίηση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, ενώ, επειδή μπορεί να λειτουργήσει και ως βάση δεδομένων, είναι δυνατή η διαχείριση ενεργειακών δεδομένων που προκύπτουν από έξυπνους μετρητές ή αισθητήρες, μέσω blockchain. Άλλες εφαρμογές του blockchain στην ενέργεια αποτελούν οι πλατφόρμες συμμετοχικών επενδύσεων που δίνουν τη δυνατότητα σε επενδυτές από όλο τον κόσμο να συμμετέχουν σε έργα βιώσιμης ανάπτυξης, αλλά και τα ψηφιακά νομίσματα που επιβραβεύουν την παραγωγή ενέργειας και την καλή ενεργειακή συμπεριφορά.

Προκειμένου να αξιολογηθούν οι προαναφερθείσες υποψήφιες εφαρμογές, στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ανάλυση της αγοράς μέσω PESTLE, οπότε αναλύθηκαν οι πολιτικές, οικονομικές, κοινωνικές, τεχνολογικές, νομικές και περιβαλλοντολογικές παράμετροι της ένταξης του blockchain στην ενέργεια. Από την ανάλυση PESTLE προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: οι πολιτικοί φορείς έχουν αναγνωρίσει την επιτακτική ανάγκη εκσυγχρονισμού των ενεργειακών συστημάτων, ωστόσο ίσως ακόμη να μην έχουν δώσει τη δέουσα σημασία στις προοπτικές του blockchain καθώς, ως νέα τεχνολογία, εμπεριέχει κινδύνους

και ρίσκα. Ωστόσο, αρκετές επιχειρήσεις έχουν αποπειραθεί να δοκιμάσουν τις δυνατότητες του blockchain στην ενέργεια, δημιουργώντας ευκαιρίες για νέες συνεργασίες ανάμεσα σε ετερογενή μέλη της αγοράς και για νέα επιχειρηματικά μοντέλα. Ωστόσο υπάρχει ακόμα δυσκολία και δισταγμός απέναντι στις επενδύσεις στο blockchain που σχετίζονται με τα υψηλά κόστη εγκατάστασης και συντήρησης αλλά και την έλλειψη σχετικού νομικού πλαισίου. Χωρίς θεσμοθετημένα πρότυπα, η υιοθέτηση νέων τεχνολογιών γίνεται ακόμα δυσκολότερη. Εξάλλου, οι νέες τεχνολογίες απαιτούν πάντα χρόνο μέχρι να ενταχθούν στη ζωή των ανθρώπων καθώς εγγενώς θεωρούνται αναξιόπιστες από το κοινωνικό σύνολο, μέχρι οι δυνατότητές τους και τα οφέλη που μπορούν να προσφέρουν να αποδειχθούν.

Φυσικά, ο δισταγμός και η αποστροφή ως προς το ρίσκο υιοθέτησης του blockchain δεν είναι αδικαιολόγητη, αφού πράγματι υπάρχουν ακόμα πολλοί τεχνικοί περιορισμοί και προβλήματα που πρέπει να ξεπεραστούν. Αυτά τα προβλήματα είτε αφορούν την απόδοση του blockchain, όπως το πρόβλημα της επεκτασιμότητας ή της ταχύτητας, είτε τη λειτουργικότητα του blockchain με τον υπόλοιπο εξοπλισμό, είτε θέματα ασφαλείας όπως κυβερνοεπιθέσεις.

Γίνεται, λοιπόν, φανερό ότι υπάρχουν και πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όσον αφορά την εφαρμογή του blockchain στην ενέργεια. Για αυτό τον λόγο, επιλέγεται η οργάνωση αυτών των στοιχείων σε μία ανάλυση SWOT. Η ανάλυση αυτή αποκαλύπτει ότι στοιχεία του blockchain όπως η διαφάνεια, ο αποκεντρωμένος χαρακτήρας, η μη μεταβλητότητα των δεδομένων και η εξασφάλιση της προστασίας της ιδιωτικότητας μέσω της κρυπτογραφίας και της ανωνυμίας κάνουν το blockchain αρκετά ελκυστικό για ενεργειακές εφαρμογές, ιδιαίτερα αν αναλογιστεί κανείς και τις σύγχρονες ανάγκες του ενεργειακού τομέα που ευνοούν την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών. Ωστόσο, από την ίδια SWOT ανάλυση αναδεικνύονται και πολλά εμπόδια της ενσωμάτωσης του blockchain στην ενέργεια. Τα εμπόδια αυτά χωρίζονται στις κατηγορίες των τεχνολογικών, κοινωνικοπολιτικών, οικονομικών και νομικών εμποδίων.

Επομένως, προκειμένου να υποστηριχθεί ο στρατηγικός σχεδιασμός της ένταξης του blockchain σε ενεργειακές εφαρμογές, κρίνεται αναγκαία η αξιολόγηση των εμποδίων προκειμένου αυτά να ιεραρχηθούν, παρέχοντας, με αυτόν τον τρόπο, ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για τους φορείς που εμπλέκονται στις ενεργειακές εφαρμογές της εν λόγω τεχνολογίας.

Για αυτό τον λόγο εξερευνάται ο ρόλος της πολυκριτήριας ανάλυσης στον στρατηγικό σχεδιασμό στον τομέα της ενέργειας, προκειμένου να επιλεγεί η κατάλληλη μέθοδος για το πρόβλημα που προσδιορίστηκε. Τελικά, επιλέγεται η μέθοδος AHP για πολλαπλούς αποφασίζοντες.

Η AHP έχει αποδειχθεί η κατάλληλη μέθοδος για προβλήματα κατάταξης, και στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται η εφαρμογή της με πολλαπλούς αποφασίζοντες καθώς αναγνωρίζεται η αναγκαιότητα να ληφθούν υπόψιν οι απόψεις τόσο των μελών της αγοράς που ασχολούνται με την ενέργεια όσο και αυτών που ασχολούνται με την πληροφορική και το blockchain. Για την επίτευξη καλύτερων και πιο αξιόπιστων αποτελεσμάτων δίνονται βάρη στους διαφορετικούς αποφασίζοντες.

Μέσω της εφαρμογής της μεθόδου εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα πιο σημαντικά εμπόδια είναι αυτά που αφορούν τη νομική πλευρά των εφαρμογών του blockchain σε ενεργειακά συστήματα, με πιο σημαντικό εμπόδιο την αναμενόμενη πολυπλοκότητα των κανονισμών αν και εφόσον θεσπιστεί ένα συγκεκριμένο θεσμικό πλαίσιο για την τεχνολογία κατανεμημένου καθολικού στην ενέργεια. Ακολουθούν τα τεχνολογικά εμπόδια, με πιο σημαντικό εμπόδιο τις απειλές που σχετίζονται με την ασφάλεια, δηλαδή τις κυβερνοεπιθέσεις. Ακολουθούν τα

κοινωνικοπολιτικά εμπόδια, όπου ως κυρίαρχο εμπόδιο αναγνωρίστηκε η αποφυγή του ρίσκου της ενσωμάτωσης νέων τεχνολογιών σε υπηρεσίες τόσο από την κοινωνία όσο και από τους πολιτικούς θεσμούς. Τέλος, όσον αφορά την οικονομική σκοπιά, ως κυρίαρχο εμπόδιο αναγνωρίστηκε το υψηλό κόστος της εγκατάστασης του blockchain, το οποίο μπορεί να είναι αποθαρρυντικό για τους υποψήφιους επενδυτές, ιδιαίτερα αν δεν μπορούν να είναι σίγουροι για την απόδοση και το περιθώριο κέρδους της εκάστοτε επένδυσης.

Ως τελικό συμπέρασμα, λοιπόν, γίνεται κατανοητό ότι υπάρχουν και προοπτικές και προκλήσεις στην εφαρμογή του blockchain στην ενέργεια, για αυτό απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός και κατάλληλο μεθοδολογικό πλαίσιο προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα εμπόδια. Η αναγνώριση και ιεράρχηση των εμποδίων αποτελεί ένα πρώτο και αναγκαίο βήμα για τη χάραξη στρατηγικών, ενώ καθίσταται σαφές ότι πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν οι οπτικές τόσο από την ενεργειακή όσο και από την τεχνολογική σκοπιά.

6.2 Προοπτικές

Η έρευνα που διεξήχθη στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μπορεί να αποτελέσει τη βάση για περαιτέρω εμβάθυνση στο θέμα του blockchain στον ενεργειακό τομέα. Ειδικότερα, η τελική λίστα των εμποδίων μπορεί να αποτελέσει οδηγό για τους φορείς που εμπλέκονται στην εφαρμογή του blockchain στην ενέργεια είτε στο πεδίο της έρευνας είτε στη βιομηχανία. Επιπλέον, θα ήταν δυνατόν μετά την αναγνώριση των εμποδίων και την ιεράρχησή τους, να βρεθούν και να προταθούν πρακτικές λύσεις για αυτά. Εκτός από τη λίστα των εμποδίων, όλη η ανάλυση της αγοράς που διεξάγεται μέσω των αναλύσεων SWOT και PESTLE, αλλά και από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, μπορούν να λειτουργήσουν ως σημείο αναφοράς που ορίζει με σαφήνεια και περιεκτικότητα ένα πολύ μεγάλο μέρος των καίριων εφαρμογών του blockchain στην ενέργεια, των παραγόντων που τις επηρεάζουν και των δυσκολιών αλλά και των θετικών στοιχείων που τις συνοδεύουν.

Επιπρόσθετα, όσον αφορά την πολυκριτήρια μέθοδο, θα μπορούσε να δοθεί περισσότερη βαρύτητα στην εξέταση του κατά πόσο οι αποφασίζοντες συναινούν, μέσω αντίστοιχων δεικτών που μπορούν να αποδείξουν μαθηματικά τη συναίνεση ή μη των συναποφασιζόντων. Έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι που βελτιώνουν τα αποτελέσματα των πολυκριτηριακών μεθόδων όπως της AHP μέσω επεξεργασίας των αρχικών απαντήσεων για να βρεθεί η κατάταξη που ικανοποιεί κατά το δυνατόν όλους τους αποφασίζοντες [391]. Θα μπορούσαν, επίσης, να εξεταστούν εναλλακτικές μέθοδοι για τη συλλογική λήψη αποφάσεων, ή συνδυασμός πολυκριτηριακών μεθόδων για την ανάπτυξη συνολικότερου μεθοδολογικού πλαισίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Βιβλιογραφία

7 Βιβλιογραφία

- [1] Bolin, B., & Doos, B. R. (1989). Greenhouse effect.
- [2] Satoshi Nakamoto, Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. *Decentralized Business Review*, 21260.
- [3] Upadhyay, N. (2019). Blockchain Enabled Cyber-Physical Society Framework. *Procedia Computer Science*, 162, 53-58.
- [4] Prakash, R., Anoop, V. S., & Asharaf, S. (2022). Blockchain technology for cybersecurity: A text mining literature analysis. *International Journal of Information Management Data Insights*, 2(2), 100112.
- [5] Zheng, Z., Xie, S., Dai, H., Chen, X., & Wang, H. (2017, June). An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends. In *2017 IEEE international congress on big data (BigData congress)* (pp. 557-564). Ieee.
- [6] Li, W., He, M., & Haiquan, S. (2021, June). An overview of blockchain technology: applications, challenges and future trends. In *2021 IEEE 11th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC) 2021 IEEE 11th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)* (pp. 31-39). IEEE.
- [7] Guo, H., & Yu, X. (2022). A Survey on Blockchain Technology and its security. *Blockchain: Research and Applications*, 3(2), 100067.
- [8] Wang, M., Duan, M., & Zhu, J. (2018, May). Research on the security criteria of hash functions in the blockchain. In *Proceedings of the 2nd ACM Workshop on Blockchains, Cryptocurrencies, and Contracts* (pp. 47-55).
- [9] Kumari, P. L. S., Thivaharan, S., Srinivas, K., & Damodaram, A. (2022). A Resilient Group Session Key Authentication Methodology for Secured Peer to Peer Networks using Zero Knowledge Protocol. *Optik*, 170345.
- [10] Survey on Blockchain Technologies and Related Services FY2015 Report. (n.d.). https://smallake.kr/wp-content/uploads/2016/06/0531_01e.pdf
- [11] Mishra, S. P., Jacob, V., & Radhakrishnan, S. (2017). Energy consumption-Bitcoin's Achilles heel. *Available at SSRN 3076734*.
- [12] Kohli, V., Chakravarty, S., Chamola, V., Sangwan, K. S., & Zeadally, S. (2022). An Analysis of Energy Consumption and Carbon Footprints of Cryptocurrencies and Possible Solutions. *arXiv preprint arXiv:2203.03717*.
- [13] Konoth, R. K., Vineti, E., Moonsamy, V., Lindorfer, M., Kruegel, C., Bos, H., & Vigna, G. (2018, October). Minesweeper: An in-depth look into drive-by cryptocurrency mining and its defense. In *Proceedings of the 2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security* (pp. 1714-1730).
- [14] Boakye, E. A., Zhao, H., & Ahia, B. N. K. (2022). Emerging research on blockchain technology in finance; a conveyed evidence of bibliometric-based evaluations. *The Journal of High Technology Management Research*, 33(2), 100437.
- [15] Akinbi, A., MacDermott, Á., & Ismael, A. M. (2022). A systematic literature review of blockchain-based Internet of Things (IoT) forensic investigation process models. *Forensic Science International: Digital Investigation*, 42, 301470.
- [16] Babu, E. S., SrinivasaRao, B. K. N., Nayak, S. R., Verma, A., Alqahtani, F., Tolba, A., & Mukherjee, A. (2022). Blockchain-based Intrusion Detection System of IoT urban data with device authentication against DDoS attacks. *Computers and Electrical Engineering*, 103, 108287.
- [17] Wang, E. K., Liang, Z., Chen, C. M., Kumari, S., & Khan, M. K. (2020). PoRX: A reputation incentive scheme for blockchain consensus of IIoT. *Future Generation Computer Systems*, 102, 140-151.
- [18] Fernández-Caramés, T. M., & Fraga-Lamas, P. (2018). A Review on the Use of Blockchain for the Internet of Things. *Ieee Access*, 6, 32979-33001.

- [19] Wang, X., Zha, X., Ni, W., Liu, R. P., Guo, Y. J., Niu, X., & Zheng, K. (2019). Survey on blockchain for Internet of Things. *Computer Communications*, 136, 10-29.
- [20] Dai, H. N., Zheng, Z., & Zhang, Y. (2019). Blockchain for Internet of Things: A survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(5), 8076-8094.
- [21] Conoscenti, M., Vetro, A., & De Martin, J. C. (2016, November). Blockchain for the Internet of Things: A systematic literature review. In *2016 IEEE/ACS 13th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA)* (pp. 1-6). IEEE.
- [22] Cao, Y. N., Wang, Y., Ding, Y., Guo, Z., Wu, Q., & Liang, H. (2022). Blockchain-empowered security and privacy protection technologies for smart grid. *Computer Standards & Interfaces*, 103708.
- [23] Noyes, C. (2016). Bitav: Fast anti-malware by distributed blockchain consensus and feedforward scanning. arXiv preprint arXiv:1601.01405.
- [24] Wang, B., & Li, Z. (2021). Healthchain: A privacy protection system for medical data based on blockchain. *Future Internet*, 13(10), 247.
- [25] Lv, Z., Qiao, L., Hossain, M. S., & Choi, B. J. (2021). Analysis of using blockchain to protect the privacy of drone big data. *IEEE network*, 35(1), 44-49.
- [26] Liao, C. H., Guan, X. Q., Cheng, J. H., & Yuan, S. M. (2022). Blockchain-based identity management and access control framework for open banking ecosystem. *Future Generation Computer Systems*.
- [27] Liu, Y., He, D., Obaidat, M. S., Kumar, N., Khan, M. K., & Choo, K. K. R. (2020). Blockchain-based identity management systems: A review. *Journal of network and computer applications*, 166, 102731.
- [28] Bajoudah, S., Dong, C., & Missier, P. (2019, July). Toward a decentralized, trustless marketplace for brokered IoT data trading using blockchain. In *2019 IEEE international conference on blockchain (Blockchain)* (pp. 339-346). IEEE.
- [29] Gupta, P., Dedeoglu, V., Kanhere, S. S., & Jurdak, R. (2022). TrailChain: Traceability of data ownership across blockchain-enabled multiple marketplaces. *Journal of Network and Computer Applications*, 203, 103389.
- [30] Shrestha, A. K., & Vassileva, J. (2018). Blockchain-based research data sharing framework for incentivizing the data owners. In *Blockchain-ICBC 2018: First International Conference, Held as Part of the Services Conference Federation, SCF 2018, Seattle, WA, USA, June 25-30, 2018, Proceedings 1* (pp. 259-266). Springer International Publishing.
- [31] Almasoud, A. S., Hussain, F. K., & Hussain, O. K. (2020). Smart contracts for blockchain-based reputation systems: A systematic literature review. *Journal of Network and Computer Applications*, 170, 102814.
- [32] Fernandes, C. P., Montez, C., Adriano, D. D., Boukerche, A., & Wangham, M. S. (2022). A Blockchain-based Reputation System for Trusted VANET Nodes. *Ad Hoc Networks*, 103071.
- [33] Zhou, Z., Wang, M., Yang, C. N., Fu, Z., Sun, X., & Wu, Q. J. (2021). Blockchain-based decentralized reputation system in E-commerce environment. *Future Generation Computer Systems*, 124, 155-167.
- [34] Pu, S., & Lam, J. S. L. (2023). The benefits of blockchain for digital certificates: A multiple case study analysis. *Technology in Society*, 72, 102176.
- [35] Kamil, M., Sunarya, P. A., Muhtadi, Y., Adianita, I. R., & Anggraeni, M. (2021, September). BlockCert Higher Education with Public Key Infrastructure in Indonesia. In *2021 9th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM)* (pp. 1-6). IEEE.
- [36] Maulani, G., Gunawan, G., Leli, L., Nabila, E. A., & Sari, W. Y. (2021). Digital certificate authority with blockchain cybersecurity in education. *International Journal of Cyber and IT Service Management*, 1(1), 136-150.

- [37] Wang, Y., Han, J. H., & Beynon-Davies, P. (2019). Understanding blockchain technology for future supply chains: a systematic literature review and research agenda. *Supply Chain Management: An International Journal*, 24(1), 62-84.
- [38] Engelenburg, S. V., Janssen, M., & Klievink, B. (2019). Design of a software architecture supporting business-to-government information sharing to improve public safety and security: Combining business rules, Events and blockchain technology. *Journal of Intelligent information systems*, 52, 595-618.
- [39] Law, A. (2017). *Smart contracts and their application in supply chain management* (Doctoral dissertation, Massachusetts Institute of Technology).
- [40] Merlo, V., Pio, G., Giusto, F., & Bilancia, M. (2022). On the exploitation of the blockchain technology in the healthcare sector: A systematic review. *Expert Systems with Applications*, 118897
- [41] Dey, T., Jaiswal, S., Sunderkrishnan, S., & Katre, N. (2017, December). HealthSense: A medical use case of Internet of Things and blockchain. In *2017 International conference on intelligent sustainable systems (ICISS)* (pp. 486-491). IEEE.
- [42] Agbo, C. C., Mahmoud, Q. H., & Eklund, J. M. (2019, April). Blockchain technology in healthcare: a systematic review. In *Healthcare* (Vol. 7, No. 2, p. 56). MDPI.
- [43] Shae, Z., & Tsai, J. J. (2017, June). On the design of a blockchain platform for clinical trial and precision medicine. In *2017 IEEE 37th international conference on distributed computing systems (ICDCS)* (pp. 1972-1980). IEEE.
- [44] Engelhardt, M. A. (2017). Hitching healthcare to the chain: An introduction to blockchain technology in the healthcare sector. *Technology Innovation Management Review*, 7(10).
- [45] Fraga-Lamas, P., & Fernández-Caramés, T. M. (2019). A review on blockchain technologies for an advanced and cyber-resilient automotive industry. *IEEE access*, 7, 17578-17598.
- [46] Dehshiri, S. J. H., Emamat, M. S. M. M., & Amiri, M. (2022). A novel group BWM approach to evaluate the implementation criteria of blockchain technology in the automotive industry supply chain. *Expert Systems with Applications*, 198, 116826.
- [47] van Groesen, W., & Pauwels, P. (2022). Tracking prefabricated assets and compliance using quick response (QR) codes, blockchain and smart contract technology. *Automation in Construction*, 141, 104420.
- [48] Kuhle, P., Arroyo, D., & Schuster, E. (2021). Building A blockchain-based decentralized digital asset management system for commercial aircraft leasing. *Computers in Industry*, 126, 103393.
- [49] Wang, N., Xu, H., Xu, F., & Cheng, L. (2021). The algorithmic composition for music copyright protection under deep learning and blockchain. *Applied Soft Computing*, 112, 107763.
- [50] Xiao, L., Huang, W., Xie, Y., Xiao, W., & Li, K. C. (2020). A blockchain-based traceable IP copyright protection algorithm. *IEEE Access*, 8, 49532-49542.
- [51] Alam, K. M., Rahman, J. A., Tasnim, A., & Akther, A. (2020). A blockchain-based land title management system for Bangladesh. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*
- [52] Barbieri, M., & Gassen, D. (2017, March). Blockchain-can this new technology really revolutionize the land registry system. In *Responsible Land Governance: Towards an Evidence Based Approach: Proceedings of the Annual World Bank Conference on Land and Poverty* (pp. 1-13).
- [53] Bermeo-Almeida, O., Cardenas-Rodriguez, M., Samaniego-Cobo, T., Ferruzola-Gómez, E., Cabezas-Cabezas, R., & Bazán-Vera, W. (2018). Blockchain in agriculture: A systematic literature review. In *Technologies and Innovation: 4th International Conference, CITI 2018, Guayaquil, Ecuador, November 6-9, 2018, Proceedings 4* (pp. 44-56). Springer International Publishing.

- [54] Jadav, N. K., Rathod, T., Gupta, R., Tanwar, S., Kumar, N., & Alkhayyat, A. (2023). Blockchain and artificial intelligence-empowered smart agriculture framework for maximizing human life expectancy. *Computers and Electrical Engineering*, 105, 108486.
- [55] V. Anitha, Orlando Juan Marquez Caro, R. Sudharsan, S. Yoganandan, M. Vimal, Transparent voting system using blockchain
- [56] Kshetri, N., & Voas, J. (2018). Blockchain-enabled e-voting. *Ieee Software*, 35(4), 95-99.
- [57] Taş, R., & Tanrıöver, Ö. Ö. (2020). A systematic review of challenges and opportunities of blockchain for E-voting. *Symmetry*, 12(8), 1328.
- [58] Hjálmarsson, F. P., Hreiðarsson, G. K., Hamdaqa, M., & Hjálmtýsson, G. (2018, July). Blockchain-based e-voting system. In *2018 IEEE 11th international conference on cloud computing (CLOUD)* (pp. 983-986). IEEE.
- [59] Osgood, R. (2016). The future of democracy: Blockchain voting. *COMP116: Information security*, 1-21.
- [60] Raimundo, R., & Rosário, A. (2021). Blockchain system in the higher education. *European Journal of Investigation in Health, Psychology and Education*, 11(1), 276-293.
- [61] Sharples, M., & Domingue, J. (2016, September). The blockchain and kudos: A distributed system for educational record, reputation and reward. In *European conference on technology enhanced learning* (pp. 490-496). Springer, Cham.
- [62] Sun, H., Wang, X., & Wang, X. (2018). Application of blockchain technology in online education. *International Journal of Emerging Technologies in Learning*, 13(10).
- [63] Wang, Y., Sun, Q., & Bie, R. (2022). Blockchain-Based Secure Sharing Mechanism of Online Education Data. *Procedia Computer Science*, 202, 283-288.
- [64] Peres, R., Schreier, M., Schweidel, D. A., & Sorescu, A. (2022). Blockchain meets marketing: Opportunities, threats, and avenues for future research. *International Journal of Research in Marketing*.
- [65] Ullah, I., Kanhere, S. S., & Boreli, R. (2022). Privacy-preserving targeted mobile advertising: A blockchain-based framework for mobile ads. *Journal of Network and Computer Applications*, 103559.
- [66] Ding, Y., Luo, D., Xiang, H., Liu, W., & Wang, Y. (2021). Design and implementation of blockchain-based digital advertising media promotion system. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 14, 482-496.
- [67] Brophy, R. (2020). Blockchain and insurance: a review for operations and regulation. *Journal of financial regulation and compliance*, 28(2), 215-234.
- [68] Raikwar, M., Mazumdar, S., Ruj, S., Gupta, S. S., Chattopadhyay, A., & Lam, K. Y. (2018, February). A blockchain framework for insurance processes. In *2018 9th IFIP international conference on new technologies, mobility and security (NTMS)* (pp. 1-4). IEEE.
- [69] Amponsah, A. A., Adekoya, A. F., & Weyori, B. A. (2022). Improving the Financial Security of National Health Insurance using Cloud-Based Blockchain Technology Application. *International Journal of Information Management Data Insights*, 2(1), 100081.
- [70] Ahmad, R. W., Hasan, H., Yaqoob, I., Salah, K., Jayaraman, R., & Omar, M. (2021). Blockchain for aerospace and defense: Opportunities and open research challenges. *Computers & Industrial Engineering*, 151, 106982
- [71] Lee, S., & Kim, S. (2021). Blockchain as a cyber defense: opportunities, applications, and challenges. *IEEE Access*, 10, 2602-2618.
- [72] Purohit, S., Calyam, P., Wang, S., Yempalla, R., & Varghese, J. (2020, September). Defensechain: Consortium blockchain for cyber threat intelligence sharing and defense. In *2020 2nd Conference on Blockchain Research & Applications for Innovative Networks and Services (BRAINS)* (pp. 112-119). IEEE.

- [73] Hajizadeh, M., Afraz, N., Ruffini, M., & Bauschert, T. (2020, June). Collaborative cyber attack defense in SDN networks using blockchain technology. In *2020 6th IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft)* (pp. 487-492). IEEE.
- [74] Schletz, M., Cardoso, A., Prata Dias, G., & Salomo, S. (2020). How can blockchain technology accelerate energy efficiency interventions? A use case comparison. *Energies*, 13(22), 5869.
- [75] Khezami, N., Gharbi, N., Neji, B., & Braiek, N. B. (2022). Blockchain Technology Implementation in the Energy Sector: Comprehensive Literature Review and Mapping. *Sustainability*, 14(23), 15826.
- [76] Wang, Q., & Su, M. (2020). Integrating blockchain technology into the energy sector—from theory of blockchain to research and application of energy blockchain. *Computer Science Review*, 37, 100275.
- [77] Wu, J., & Tran, N. K. (2018). Application of blockchain technology in sustainable energy systems: An overview. *Sustainability*, 10(9), 3067.
- [78] Nehai, Z., & Guérard, G. (2017, May). Integration of the blockchain in a smart grid model. In *Proceedings of the 14th international conference of young scientists on energy issues (CYSENI 2017)*, Kaunas, Lithuania (pp. 25-26).
- [79] Cao, Y. N., Wang, Y., Ding, Y., Guo, Z., Wu, Q., & Liang, H. (2022). Blockchain-enabled security and privacy protection technologies for smart grid. *Computer Standards & Interfaces*, 103708.
- [80] Mylrea, M., & Gourisetti, S. N. G. (2017, September). Blockchain for smart grid resilience: Exchanging distributed energy at speed, scale and security. In *2017 Resilience Week (RWS)* (pp. 18-23). IEEE.
- [81] WU, Z., LIANG, Y., KANG, J., YU, R., & HE, Z. (2017). Secure data storage and sharing system based on consortium blockchain in smart grid. *Journal of Computer Applications*, 37(10), 2742.
- [82] Sanseverino, E. R., Di Silvestre, M. L., Gallo, P., Zizzo, G., & Ippolito, M. (2017, June). The blockchain in microgrids for transacting energy and attributing losses. In *2017 IEEE international conference on Internet of Things (iThings) and IEEE green computing and communications (GreenCom) and IEEE cyber, physical and social computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)* (pp. 925-930). IEEE.
- [83] Münsing, E., Mather, J., & Moura, S. (2017, August). Blockchains for decentralized optimization of energy resources in microgrid networks. In *2017 IEEE conference on control technology and applications (CCTA)* (pp. 2164-2171). IEEE.
- [84] Zahoor, A., Mahmood, K., Shamshad, S., Saleem, M. A., Ayub, M. F., Conti, M., & Das, A. K. (2023). An access control scheme in IoT-enabled Smart-Grid systems using blockchain and PUF. *Internet of Things*, 100708.
- [85] Dehalwar, V., Kolhe, M. L., Deoli, S., & Jhariya, M. K. (2022). Blockchain-based trust management and authentication of devices in smart grid. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100481.
- [86] Lei, Y. T., Ma, C. Q., Mirza, N., Ren, Y. S., Narayan, S. W., & Chen, X. Q. (2022). A renewable energy microgrids trading management platform based on permissioned blockchain. *Energy Economics*, 115, 106375.
- [87] Xu, Z., Wang, Y., Dong, R., & Li, W. (2022). Research on multi-microgrid power transaction process based on blockchain Technology. *Electric Power Systems Research*, 213, 108649.
- [88] Badshah, A., Waqas, M., Abbas, G., Muhammad, F., Abbas, Z. H., Vimal, S., & Bilal, M. (2022). LAKE-BSG: Lightweight authenticated key exchange scheme for blockchain-enabled smart grids. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102248.
- [89] Aggarwal, S., Chaudhary, R., Aujla, G. S., Jindal, A., Dua, A., & Kumar, N. (2018, June). Energychain: Enabling energy trading for smart homes using blockchains in smart grid ecosystem. In *Proceedings of the 1st ACM MobiHoc workshop on networking and cybersecurity for smart cities* (pp. 1-6).

- [90] Alcaraz, C., Rubio, J. E., & Lopez, J. (2020). Blockchain-assisted access for federated Smart Grid domains: Coupling and features. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 144, 124-135.
- [91] Bansal, G., Dua, A., Aujla, G. S., Singh, M., & Kumar, N. (2019, May). SmartChain: a smart and scalable blockchain consortium for smart grid systems. In *2019 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)* (pp. 1-6). IEEE.
- [92] Bayati, N., Hajizadeh, A., & Soltani, M. (2020). Blockchain-based protection schemes of DC microgrids. In *Blockchain-Based Smart Grids* (pp. 195-214). Academic Press.
- [93] Zhang, S., Pu, M., Wang, B., & Dong, B. (2019). A privacy protection scheme of microgrid direct electricity transaction based on consortium blockchain and continuous double auction. *IEEE access*, 7, 151746-151753.
- [94] Fan, M., & Zhang, X. (2019). Consortium blockchain based data aggregation and regulation mechanism for smart grid. *IEEE Access*, 7, 35929-35940.
- [95] Ferrag, M. A., & Maglaras, L. (2019). DeepCoin: A novel deep learning and blockchain-based energy exchange framework for smart grids. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 67(4), 1285-1297.
- [96] Gazafroudi, A. S., Mezquita, Y., Shafie-khah, M., Prieto, J., & Corchado, J. M. (2020). Islanded microgrid management based on blockchain communication. In *Blockchain-based Smart Grids* (pp. 181-193). Academic Press.
- [97] Hajizadeh, A., & Hakimi, S. M. (2020). Blockchain in decentralized demand-side control of microgrids. In *Blockchain-Based Smart Grids* (pp. 145-167). Academic Press.
- [98] Samuel, O., Javaid, N., Awais, M., Ahmed, Z., Imran, M., & Guizani, M. (2019, December). A blockchain model for fair data sharing in deregulated smart grids. In *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)* (pp. 1-7). IEEE.
- [99] Stübs, M., Posdorfer, W., & Kalinowski, J. (2020). Business-driven blockchain-mempool model for cooperative optimization in smart grids. In *Smart Trends in Computing and Communications: Proceedings of SmartCom 2019* (pp. 31-39). Springer Singapore.
- [100] Singh, K., & Choube, S. C. (2018, February). Using blockchain against cyber attacks on smart grids. In *2018 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)* (pp. 1-4). IEEE.
- [101] Wang, S., Liu, X., & Ha, J. (2022). Optimal IoT-based decision-making of smart grid dispatchable generation units using blockchain technology considering high uncertainty of system. *Ad Hoc Networks*, 127, 102751.
- [102] Wang, P. B., Li, K. C., Shi, R. H., & Shao, B. S. (2023). VC-DCPS: Verifiable Cross domain Data Collection and Privacy-Persevering Sharing Scheme Based on Lattice in Blockchain-enhanced Smart Grids. *IEEE Internet of Things Journal*.
- [103] Mazhar, T., Irfan, H. M., Khan, S., Haq, I., Ullah, I., Iqbal, M., & Hamam, H. (2023). Analysis of Cyber Security Attacks and Its Solutions for the Smart Grid Using Machine Learning and Blockchain Methods. *Future Internet*, 15(2), 83.
- [104] Kumari, A., Kakkar, R., Gupta, R., Agrawal, S., Tanwar, S., Alqahtani, F., ... & Manea, D. L. (2023). Blockchain-Driven Real-Time Incentive Approach for Energy Management System. *Mathematics*, 11(4), 928.
- [105] Swain, A., Salkuti, S. R., & Swain, K. (2021). An optimized and decentralized energy provision system for smart cities. *Energies*, 14(5), 1451.
- [106] Wang, L., Jiang, S., Shi, Y., Du, X., Xiao, Y., Ma, Y., ... & Li, M. (2023). Blockchain-based dynamic energy management mode for distributed energy system with high penetration of renewable energy. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 148, 108933.

- [107] Wang, L., Jiao, S., Xie, Y., Mubaarak, S., Zhang, D., Liu, J., ... & Li, M. (2021). A permissioned blockchain-based energy management system for renewable energy microgrids. *Sustainability*, 13(3), 1317.
- [108] Noor, S., Yang, W., Guo, M., van Dam, K. H., & Wang, X. (2018). Energy demand side management within micro-grid networks enhanced by blockchain. *Applied energy*, 228, 1385-1398.
- [109] ALSkaif, T., & Van Leeuwen, G. (2019, September). Decentralized optimal power flow in distribution networks using blockchain. In *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)* (pp. 1-6). IEEE.
- [110] Yang, Q., Wang, H., Wang, T., Zhang, S., Wu, X., & Wang, H. (2021). Blockchain-based decentralized energy management platform for residential distributed energy resources in a virtual power plant. *Applied Energy*, 294, 117026.
- [111] Wang, L., Liu, J., Yuan, R., Wu, J., Zhang, D., Zhang, Y., & Li, M. (2020). Adaptive bidding strategy for real-time energy management in multi-energy market enhanced by blockchain. *Applied Energy*, 279, 115866.
- [112] Jia, C., Ding, H., Zhang, C., & Zhang, X. (2021). Design of a dynamic key management plan for intelligent building energy management system based on wireless sensor network and blockchain technology. *Alexandria Engineering Journal*, 60(1), 337-346.
- [113] Wang, X., Yang, W., Noor, S., Chen, C., Guo, M., & van Dam, K. H. (2019). Blockchain-based smart contract for energy demand management. *Energy Procedia*, 158, 2719-2724.
- [114] Khattak, H. A., Tehreem, K., Almogren, A., Ameer, Z., Din, I. U., & Adnan, M. (2020). Dynamic pricing in industrial internet of things: Blockchain application for energy management in smart cities. *Journal of Information Security and Applications*, 55, 102615.
- [115] Van Cutsem, O., Dac, D. H., Boudou, P., & Kayal, M. (2020). Cooperative energy management of a community of smart-buildings: A Blockchain approach. *International Journal of electrical power & energy systems*, 117, 105643.
- [116] Liu, N., Tan, L., Zhou, L., & Chen, Q. (2020). Multi-party energy management of energy hub: A hybrid approach with Stackelberg game and blockchain. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 8(5), 919-928.
- [117] Gong, X., Dong, F., Mohamed, M. A., Abdalla, O. M., & Ali, Z. M. (2020). A secured energy management architecture for smart hybrid microgrids considering PEM-fuel cell and electric vehicles. *Ieee Access*, 8, 47807-47823.
- [118] DeCusatis, C., & Lotay, K. (2018, August). Secure, decentralized energy resource management using the ethereum blockchain. In *2018 17th IEEE International Conference On Trust, Security And Privacy In Computing And Communications/12th IEEE International Conference On Big Data Science And Engineering (TrustCom/Big-DataSE)* (pp. 1907-1913). IEEE.
- [119] Abouyoussef, M., & Ismail, M. (2021, June). Blockchain-based networking strategy for privacy-preserving demand side management. In *ICC 2021-IEEE International Conference on Communications* (pp. 1-6). IEEE.
- [120] Merrad, Y., Habaebi, M. H., Toha, S. F., Islam, M. R., Gunawan, T. S., & Mesri, M. (2022). Fully Decentralized, Cost-Effective Energy Demand Response Management System with a Smart Contracts-Based Optimal Power Flow Solution for Smart Grids. *Energies*, 15(12), 4461.
- [121] Aoun, A., Ibrahim, H., Ghandour, M., & Ilinca, A. (2021). Blockchain-Enabled Energy Demand Side Management Cap and Trade Model. *Energies*, 14(24), 8600.
- [122] Li, Y., Yang, W., He, P., Chen, C., & Wang, X. (2019). Design and management of a distributed hybrid energy system through smart contract and blockchain. *Applied Energy*, 248, 390-405.

- [123] Wu, X., Duan, B., Yan, Y., & Zhong, Y. (2017, December). M2m blockchain: The case of demand side management of smart grid. In 2017 IEEE 23rd International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS) (pp. 810-813). IEEE.
- [124] Wang, X., Liu, Y., Ma, R., Su, Y., & Ma, T. (2023). Blockchain enabled smart community for bilateral energy transaction. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 148, 108997.
- [125] Gaybullaev, T., Kwon, H. Y., Kim, T., & Lee, M. K. (2021). Efficient and privacy-preserving energy trading on blockchain using dual binary encoding for inner product encryption. *Sensors*, 21(6), 2024.
- [126] Sabounchi, M., & Wei, J. (2017, November). Towards resilient networked microgrids: Blockchain-enabled peer-to-peer electricity trading mechanism. In 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2) (pp. 1-5). IEEE.
- [127] Ruan, H., Gao, H., Qiu, H., Gooi, H. B., & Liu, J. (2023). Distributed operation optimization of active distribution network with P2P electricity trading in blockchain environment. *Applied Energy*, 331, 120405.
- [128] Ping, J., Li, D., Yan, Z., Wu, X., & Chen, S. (2023). A trusted peer-to-peer market of joint energy and reserve based on blockchain. *Electric Power Systems Research*, 214, 108802.
- [129] Umar, A., Kumar, D., & Ghose, T. (2022). Blockchain-based decentralized energy intra-trading with battery storage flexibility in a community microgrid system. *Applied Energy*, 322, 119544.
- [130] Zulfiqar, M., Kamran, M., & Rasheed, M. B. (2022). A blockchain-enabled trust aware energy trading framework using games theory and multi-agent system in smart grid. *Energy*, 255, 124450.
- [131] Padghan, P. R., Daniel, S. A., & Pitchaimuthu, R. (2022). Grid-tied energy cooperative trading framework between Prosumer to Prosumer based on Ethereum smart contracts. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 32, 100860.
- [132] Chen, Y., Li, Y., Chen, Q., Wang, X., Li, T., & Tan, C. (2023). Energy trading scheme based on consortium blockchain and game theory. *Computer Standards & Interfaces*, 84, 103699.
- [133] Dong, J., Song, C., Liu, S., Yin, H., Zheng, H., & Li, Y. (2022). Decentralized peer-to-peer energy trading strategy in energy blockchain environment: A game-theoretic approach. *Applied Energy*, 325, 119852.
- [134] Wang, B., Xu, L., & Wang, J. (2023). A privacy-preserving trading strategy for blockchain-based P2P electricity transactions. *Applied Energy*, 335, 120664.
- [135] Yin, S., Ai, Q., Li, J., Li, D., & Guo, Q. (2022). Trading mode design for a virtual power plant based on main-side consortium blockchains. *Applied Energy*, 325, 119932.
- [136] Han, D., Zhang, C., Ping, J., & Yan, Z. (2020). Smart contract architecture for decentralized energy trading and management based on blockchains. *Energy*, 199, 117417.
- [137] Wang, B., Dabbaghjamanesh, M., Kavousi-Fard, A., & Mehraeen, S. (2019). Cyber-security enhancement of power trading within the networked microgrids based on blockchain and directed acyclic graph approach. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(6), 7300-7309.
- [138] Tsao, Y. C., & Thanh, V. V. (2021). Toward sustainable microgrids with blockchain technology-based peer-to-peer energy trading mechanism: A fuzzy meta-heuristic approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136, 110452.
- [139] Li, Z., Kang, J., Yu, R., Ye, D., Deng, Q., & Zhang, Y. (2017). Consortium blockchain for secure energy trading in industrial internet of things. *IEEE transactions on industrial informatics*, 14(8), 3690-3700.

- [140] Gai, K., Wu, Y., Zhu, L., Qiu, M., & Shen, M. (2019). Privacy-preserving energy trading using consortium blockchain in smart grid. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(6), 3548-3558.
- [141] Saxena, S., Farag, H. E., Brookson, A., Turesson, H., & Kim, H. (2020). A permissioned blockchain system to reduce peak demand in residential communities via energy trading: A real-world case study. *IEEE Access*, 9, 5517-5530.
- [142] van Leeuwen, G., AlSkaif, T., Gibescu, M., & van Sark, W. (2020). An integrated blockchain-based energy management platform with bilateral trading for microgrid communities. *Applied Energy*, 263, 114613.
- [143] Luo, F., Dong, Z. Y., Liang, G., Murata, J., & Xu, Z. (2018). A distributed electricity trading system in active distribution networks based on multi-agent coalition and blockchain. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(5), 4097-4108.
- [144] Hayes, B. P., Thakur, S., & Breslin, J. G. (2020). Co-simulation of electricity distribution networks and peer to peer energy trading platforms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 115, 105419.
- [145] Wang, S., Taha, A. F., Wang, J., Kvaternik, K., & Hahn, A. (2019). Energy crowdsourcing and peer-to-peer energy trading in blockchain-enabled smart grids. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 49(8), 1612-1623.
- [146] Wang, B., Zhao, S., Li, Y., Wu, C., Tan, J., Li, H., & Yukita, K. (2021). Design of a privacy-preserving decentralized energy trading scheme in blockchain network environment. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 125, 106465.
- [147] Jiang, Y., Zhou, K., Lu, X., & Yang, S. (2020). Electricity trading pricing among prosumers with game theory-based model in energy blockchain environment. *Applied Energy*, 271, 115239.
- [148] Wang, N., Xu, W., Xu, Z., & Shao, W. (2018). Peer-to-peer energy trading among microgrids with multidimensional willingness. *Energies*, 11(12), 3312.
- [149] Mrunalini, M., & Pavan Kumar, D. (2021). Energy trading using Ethereum blockchain. In *Information and Communication Technology for Intelligent Systems: Proceedings of ICTIS 2020, Volume 2* (pp. 357-365). Springer Singapore.
- [150] Xu, Z., Yang, D., & Li, W. (2019). Microgrid group trading model and solving algorithm based on blockchain. *Energies*, 12(7), 1292.
- [151] Alcarria, R., Bordel, B., Robles, T., Martín, D., & Manso-Callejo, M. Á. (2018). A blockchain-based authorization system for trustworthy resource monitoring and trading in smart communities. *Sensors*, 18(10), 3561.
- [152] Esmat, A., de Vos, M., Ghiassi-Farrokhfal, Y., Palensky, P., & Epema, D. (2021). A novel decentralized platform for peer-to-peer energy trading market with blockchain technology. *Applied Energy*, 282, 116123.
- [153] Wu, Y., Wu, Y., Cimen, H., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2022). P2P energy trading: Blockchain-enabled P2P energy society with multi-scale flexibility services. *Energy Reports*, 8, 3614-3628.
- [154] Zhang, C., Wu, J., Zhou, Y., Cheng, M., & Long, C. (2018). Peer-to-Peer energy trading in a Microgrid. *Applied Energy*, 220, 1-12.
- [155] Bao, Z., Tang, C., Lin, F., Zheng, Z., & Yu, X. (2023). Rating-protocol optimization for blockchain-enabled hybrid energy trading in smart grids. *Science China Information Sciences*, 66(5), 1-2.
- [156] Tanaka, K., Nagakubo, K., & Abe, R. (2017, June). Blockchain-based electricity trading with Digitalgrid router. In *2017 IEEE international conference on consumer electronics-Taiwan (ICCE-TW)* (pp. 201-202). IEEE.
- [157] Chien, I., Karthikeyan, P., & Hsiung, P. A. (2023, January). Peer to Peer Energy Transaction Market Prediction in Smart Grids using Blockchain and LSTM. In *2023 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)* (pp. 1-2). IEEE.

- [158] Pradhan, N. R., Singh, A. P., Sudha, S. V., Reddy, K. H. K., & Roy, D. S. (2023). Performance Evaluation and Cyberattack Mitigation in a Blockchain-Enabled Peer-to-Peer Energy Trading Framework. *Sensors*, 23(2), 670.
- [159] Kumari, A., Chintukumar Sukharamwala, U., Tanwar, S., Raboaca, M. S., Alqahtani, F., Tolba, A., ... & Mihaltan, T. C. (2022). Blockchain-Based Peer-to-Peer Transactional Energy Management Scheme for Smart Grid System. *Sensors*, 22(13), 4826.
- [160] Son, Y. B., Im, J. H., Kwon, H. Y., Jeon, S. Y., & Lee, M. K. (2020). Privacy-preserving peer-to-peer energy trading in blockchain-enabled smart grids using functional encryption. *Energies*, 13(6), 1321.
- [161] Samuel, O., Almogren, A., Javaid, A., Zuair, M., Ullah, I., & Javaid, N. (2020). Leveraging blockchain technology for secure energy trading and least-cost evaluation of decentralized contributions to electrification in Sub-Saharan Africa. *Entropy*, 22(2), 226.
- [162] Kostmann, M., & Härdle, W. K. (2019). Forecasting in blockchain-based local energy markets. *Energies*, 12(14), 2718.
- [163] Wang, D., Du, X., Zhang, H., & Wang, Q. (2023). Blockchain Enabled Credible Energy Trading at the Edge of the Internet of Things. *Mathematics*, 11(3), 630.
- [164] Baig, M. J. A., Iqbal, M. T., Jamil, M., & Khan, J. (2023). Blockchain-Based Peer-to-Peer Energy Trading System Using Open-Source Angular Framework and Hypertext Transfer Protocol. *Electronics*, 12(2), 287.
- [165] Huang, D., Ma, S., Zhou, D., Zhang, C., Han, H., Li, Q., ... & Wang, C. (2022). A Framework for Decentralized Energy Trading Based on Blockchain Technology. *Applied Sciences*, 12(17), 8410.
- [166] Baig, M. J. A., Iqbal, M. T., Jamil, M., & Khan, J. (2022). A Low-Cost, Open-Source Peer-to-Peer Energy Trading System for a Remote Community Using the Internet-of-Things, Blockchain, and Hypertext Transfer Protocol. *Energies*, 15(13), 4862.
- [167] Westphall, J., & Martina, J. E. (2022). Blockchain privacy and scalability in a decentralized validated energy trading context with Hyperledger Fabric. *Sensors*, 22(12), 4585.
- [168] Damisa, U., Nwulu, N. I., & Siano, P. (2022). Towards Blockchain-Based Energy Trading: A Smart Contract Implementation of Energy Double Auction and Spinning Reserve Trading. *Energies*, 15(11), 4084.
- [169] Merrad, Y., Habaebi, M. H., Islam, M. R., Gunawan, T. S., Elsheikh, E. A., Suliman, F. M., & Mesri, M. (2022). Machine Learning-Blockchain Based Autonomic Peer-to-Peer Energy Trading System. *Applied Sciences*, 12(7), 3507.
- [170] Zhao, W., Lv, J., Yao, X., Zhao, J., Jin, Z., Qiang, Y., ... & Wei, C. (2019). Consortium blockchain-based microgrid market transaction research. *Energies*, 12(20), 3812.
- [171] Gajić, D. B., Petrović, V. B., Horvat, N., Dragan, D., Stanisavljević, A., Katić, V., & Popović, J. (2022). A Distributed Ledger-Based Automated Marketplace for the Decentralized Trading of Renewable Energy in Smart Grids. *Energies*, 15(6), 2121.
- [172] Mladenov, V., Chobanov, V., Seritan, G. C., Porumb, R. F., Enache, B. A., Vita, V., ... & Bargiotas, D. (2022). A flexibility market platform for electricity system operators using blockchain technology. *Energies*, 15(2), 539.
- [173] Wu, Y., Wu, Y., Cimen, H., Vasquez, J. C., & Guerrero, J. M. (2022). P2P energy trading: Blockchain-enabled P2P energy society with multi-scale flexibility services. *Energy Reports*, 8, 3614-3628.
- [174] Samy, A., Yu, H., Zhang, H., & Zhang, G. (2021). SPETS: Secure and Privacy-Preserving Energy Trading System in Microgrid. *Sensors*, 21(23), 8121.
- [175] Wu, Y., Li, J., & Gao, J. (2021). Real-time bidding model of cryptocurrency energy trading platform. *Energies*, 14(21), 7216.
- [176] Karandikar, N., Chakravorty, A., & Rong, C. (2021). Blockchain based transaction system with fungible and non-fungible tokens for a community-based energy infrastructure. *Sensors*, 21(11), 3822.

- [177] Wang, L., Xie, Y., Zhang, D., Liu, J., Jiang, S., Zhang, Y., & Li, M. (2021). Credible peer-to-peer trading with double-layer energy blockchain network in distributed electricity markets. *Electronics*, 10(15), 1815.
- [178] Yahaya, A. S., Javaid, N., Alzahrani, F. A., Rehman, A., Ullah, I., Shahid, A., & Shafiq, M. (2020). Blockchain based sustainable local energy trading considering home energy management and demurrage mechanism. *Sustainability*, 12(8), 3385.
- [179] Ashfaq, T., Khalid, M. I., Ali, G., Affendi, M. E., Iqbal, J., Hussain, S., ... & Ma-teen, A. (2022). An Efficient and Secure Energy Trading Approach with Machine Learning Technique and Consortium Blockchain. *Sensors*, 22(19), 7263.
- [180] Seven, S., Yoldas, Y., Soran, A., Yalcin Alkan, G., Jung, J., Ustun, T. S., & Onen, A. (2022). Energy trading on a peer-to-peer basis between virtual power plants using decentralized finance instruments. *Sustainability*, 14(20), 13286.
- [181] Ko, H., & Praça, I. (2021). Design of a Secure Energy Trading Model Based on a Blockchain. *Sustainability*, 13(4), 1634.
- [182] Matsuda, Y., Yamazaki, Y., Oki, H., Takeda, Y., Sagawa, D., & Tanaka, K. (2021). Demonstration of blockchain based peer to peer energy trading system with real-life used PHEV and HEMS charge control. *Energies*, 14(22), 7484.
- [183] Kang, E. S., Pee, S. J., Song, J. G., & Jang, J. W. (2018, April). A blockchain-based energy trading platform for smart homes in a microgrid. In 2018 3rd international conference on computer and communication systems (ICCCS) (pp. 472-476). IEEE.
- [184] Xie, P., Yan, W., Xuan, P., Zhu, J., Wu, Y., Li, X., & Zou, J. (2018, October). Conceptual framework of blockchain-based electricity trading for neighborhood renewable energy. In 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2) (pp. 1-5). IEEE.
- [185] Mannaro, K., Pinna, A., & Marchesi, M. (2017, September). Crypto-trading: Blockchain-oriented energy market. In 2017 AEIT International Annual Conference (pp. 1-5). IEEE.
- [186] Hou, W., Guo, L., & Ning, Z. (2019). Local electricity storage for blockchain-based energy trading in industrial internet of things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(6), 3610-3619.
- [187] Wang, N., Chau, S. C. K., & Zhou, Y. (2021, June). Privacy-Preserving Energy Storage Sharing with Blockchain. In *Proceedings of the Twelfth ACM International Conference on Future Energy Systems* (pp. 185-198).
- [188] Liu, M., Wang, H., Han, D., Yang, J., & Li, Y. (2022). Energy storage capacity competition-based demand response method in blockchain ancillary service market. *Energy Reports*, 8, 344-351.
- [189] Xie, Y. S., Chang, X. Q., Yin, X., & Zheng, H. (2022). Research on the transaction mode and mechanism of grid-side shared energy storage market based on blockchain. *Energy Reports*, 8, 224-229.
- [190] Liu, J., Sun, J., Yuan, H., Su, Y., Feng, S., & Lu, C. (2022). Behavior analysis of photovoltaic-storage-use value chain game evolution in blockchain environment. *Energy*, 260, 125182.
- [191] Habbak, H., Baza, M., Mahmoud, M. M., Metwally, K., Mattar, A., & Salama, G. I. (2022). Privacy-Preserving Charging Coordination Scheme for Smart Power Grids Using a Blockchain. *Energies*, 15(23), 8996.
- [192] Luo, B., Shen, X., & Ping, J. (2020, December). Energy Storage Sharing Mechanism Based on Blockchain. In 2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS) (pp. 913-917). IEEE.
- [193] Mohammadi, F., Sanjari, M., & Saif, M. (2022, April). A real-time blockchain-based state estimation system for battery energy storage systems. In 2022 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC) (pp. 1-4). IEEE.
- [194] Ochoa, J. J., Bere, G., Aenugu, I. R., Kim, T., & Choo, K. K. R. (2020, February). Blockchain-as-a-Service (BaaS) for battery energy storage systems. In 2020 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC) (pp. 1-6). IEEE.

- [195] Zhao, S., Wang, Y., Jiang, Z., Hu, T., & Chu, F. (2022). Research on emergency distribution optimization of mobile power for electric vehicle in photovoltaic-energy storage-charging supply chain under the energy blockchain. *Energy Reports*, 8, 6815-6825.
- [196] Kim, M., Lee, J., Oh, J., Park, K., Park, Y., & Park, K. (2022). Blockchain based energy trading scheme for vehicle-to-vehicle using decentralized identifiers. *Applied Energy*, 322, 119445.
- [197] Li, P., Ou, W., Liang, H., Han, W., Zhang, Q., & Zeng, G. (2023). A zero trust and blockchain-based defense model for smart electric vehicle chargers. *Journal of Network and Computer Applications*, 103599.
- [198] Augello, A., Gallo, P., Sanseverino, E. R., Sciabica, G., & Sciumè, G. (2023). Certifying battery usage for V2G and second life with a blockchain-based framework. *Computer Networks*, 109558.
- [199] Rajasekaran, A. S., Maria, A., Al-Turjman, F., Altrjman, C., & Mostarda, L. (2022). ABRIS: Anonymous blockchain based revocable and integrity preservation scheme for vehicle to grid network. *Energy Reports*, 8, 9331-9343.
- [200] Gupta, D. S., Karati, A., Saad, W., & da Costa, D. B. (2022). Quantum-defended blockchain-assisted data authentication protocol for internet of vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(3), 3255-3266.
- [201] Zhang, J., Lou, W., Sun, H., Su, Q., & Li, W. (2022). Truthful auction mechanisms for resource allocation in the Internet of Vehicles with public blockchain networks. *Future Generation Computer Systems*, 132, 11-24.
- [202] Dibaei, M., Zheng, X., Xia, Y., Xu, X., Jolfaei, A., Bashir, A. K., ... & Vasilakos, A. V. (2021). Investigating the prospect of leveraging blockchain and machine learning to secure vehicular networks: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(2), 683-700.
- [203] Zuhair, M., Bhattacharya, P., Verma, A., & Bodkhe, U. (2021). Blockchain-Enabled Secure Internet of Vehicles: A Solution Taxonomy, Architecture, and Future Directions. In *Blockchain for Information Security and Privacy* (pp. 133-153). Auerbach Publications.
- [204] Yang, Z., Yang, K., Lei, L., Zheng, K., & Leung, V. C. (2018). Blockchain-based decentralized trust management in vehicular networks. *IEEE internet of things journal*, 6(2), 1495-1505.
- [205] Fu, Y., Yu, F. R., Li, C., Luan, T. H., & Zhang, Y. (2020). Vehicular blockchain-based collective learning for connected and autonomous vehicles. *Ieee wireless communications*, 27(2), 197-203.
- [206] Hassija, V., Chamola, V., Garg, S., Krishna, D. N. G., Kaddoum, G., & Jayakody, D. N. K. (2020). A blockchain-based framework for lightweight data sharing and energy trading in V2G network. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(6), 5799-5812.
- [207] Su, Z., Wang, Y., Xu, Q., Fei, M., Tian, Y. C., & Zhang, N. (2018). A secure charging scheme for electric vehicles with smart communities in energy blockchain. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3), 4601-4613.
- [208] Kang, J., Yu, R., Huang, X., Maharjan, S., Zhang, Y., & Hossain, E. (2017). Enabling localized peer-to-peer electricity trading among plug-in hybrid electric vehicles using consortium blockchains. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(6), 3154-3164.
- [209] Huang, X., Zhang, Y., Li, D., & Han, L. (2019). An optimal scheduling algorithm for hybrid EV charging scenario using consortium blockchains. *Future Generation Computer Systems*, 91, 555-562.
- [210] Li, L., Liu, J., Cheng, L., Qiu, S., Wang, W., Zhang, X., & Zhang, Z. (2018). Creditcoin: A privacy-preserving blockchain-based incentive announcement network for communications of smart vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(7), 2204-2220.

- [211] Baza, M., Sherif, A., Mahmoud, M. M., Bakiras, S., Alasmay, W., Abdallah, M., & Lin, X. (2021). Privacy-preserving blockchain-based energy trading schemes for electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(9), 9369-9384.
- [212] Abouyoussef, M., & Ismail, M. (2021). Blockchain-based privacy-preserving networking strategy for dynamic wireless charging of EVs. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 19(2), 1203-1215.
- [213] Baza, M., Amer, R., Rasheed, A., Srivastava, G., Mahmoud, M., & Alasmay, W. (2021, January). A blockchain-based energy trading scheme for electric vehicles. In *2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)* (pp. 1-7). IEEE.
- [214] Chai, H., Leng, S., Chen, Y., & Zhang, K. (2020). A hierarchical blockchain-enabled federated learning algorithm for knowledge sharing in internet of vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(7), 3975-3986.
- [215] Xue, F., Chang, K., Li, W., Wang, Q., Zhao, H., Zhang, H., ... & Xia, W. (2022). Blockchain Smart Contract-Enabled Secure Energy Trading for Electric Vehicles. *Energies*, 15(18), 6733.
- [216] Silva, F. C., A. Ahmed, M., Martínez, J. M., & Kim, Y. C. (2019). Design and implementation of a blockchain-based energy trading platform for electric vehicles in smart campus parking lots. *Energies*, 12(24), 4814.
- [217] Kakkar, R., Gupta, R., Agrawal, S., Bhattacharya, P., Tanwar, S., Raboaca, M. S., ... & Tolba, A. (2022). Blockchain and Double Auction-Based Trustful EVs Energy Trading Scheme for Optimum Pricing. *Mathematics*, 10(15), 2748.
- [218] Khan, P. W., & Byun, Y. C. (2021). Blockchain-based peer-to-peer energy trading and charging payment system for electric vehicles. *Sustainability*, 13(14), 7962.
- [219] Guo, W., Chang, Z., Su, Y., Guo, X., Hämäläinen, T., Li, J., & Li, Y. (2022). Reputation-Based Blockchain for Spatial Crowdsourcing in Vehicular Networks. *Applied Sciences*, 12(21), 11049.
- [220] Akhter, A. S., Arnob, T. Z., Noor, E. B., Hizal, S., & Pathan, A. S. K. (2022). An Edge-Supported Blockchain-Based Secure Authentication Method and a Cryptocurrency-Based Billing System for P2P Charging of Electric Vehicles. *Entropy*, 24(11), 1644.
- [221] Trivedi, M., Kakkar, R., Gupta, R., Agrawal, S., Tanwar, S., Niculescu, V. C., ... & Tolba, A. (2022). Blockchain and Deep Learning-Based Fault Detection Framework for Electric Vehicles. *Mathematics*, 10(19), 3626.
- [222] Kakkar, R., Gupta, R., Agrawal, S., Tanwar, S., Altameem, A., Altameem, T., ... & Raboaca, M. S. (2022). Blockchain and IoT-Driven Optimized Consensus Mechanism for Electric Vehicle Scheduling at Charging Stations. *Sustainability*, 14(19), 12800.
- [223] Ferreira, J. C., Ferreira da Silva, C., & Martins, J. P. (2021). Roaming service for electric vehicle charging using blockchain-based digital identity. *Energies*, 14(6), 1686.
- [224] Dorokhova, M., Vianin, J., Alder, J. M., Ballif, C., Wyrsh, N., & Wannier, D. (2021). A Blockchain-Supported Framework for Charging Management of Electric Vehicles. *Energies*, 14(21), 7144.
- [225] Kim, M., Park, K., Yu, S., Lee, J., Park, Y., Lee, S. W., & Chung, B. (2019). A secure charging system for electric vehicles based on blockchain. *Sensors*, 19(13), 3028.
- [226] Jin, R., Zhang, X., Wang, Z., Sun, W., Yang, X., & Shi, Z. (2019). Blockchain-enabled charging right trading among EV charging stations. *Energies*, 12(20), 3922.
- [227] Florea, B. C., & Taralunga, D. D. (2020). Blockchain IoT for smart electric vehicles battery management. *Sustainability*, 12(10), 3984.
- [228] Javed, M. U., Javaid, N., Aldegheishem, A., Alrajeh, N., Tahir, M., & Ramzan, M. (2020). Scheduling charging of electric vehicles in a secured manner by emphasizing cost minimization using blockchain technology and IPFS. *Sustainability*, 12(12), 5151.

- [229] Khan, P. W., & Byun, Y. C. (2020). Smart contract centric inference engine for intelligent electric vehicle transportation system. *Sensors*, 20(15), 4252.
- [230] Zhang, T., Pota, H., Chu, C. C., & Gadh, R. (2018). Real-time renewable energy incentive system for electric vehicles using prioritization and cryptocurrency. *Applied energy*, 226, 582-594.
- [231] Zhang, T. Y., Feng, T. T., & Cui, M. L. (2023). Smart contract design and process optimization of carbon trading based on blockchain: The case of China's electric power sector. *Journal of Cleaner Production*, 136509.
- [232] Effah, D., Chunguang, B., Appiah, F., Agbley, B. L. Y., & Quayson, M. (2021, December). Carbon emission monitoring and credit trading: the blockchain and IOT approach. In *2021 18th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)* (pp. 106-109). IEEE.
- [233] Zhao, N., Sheng, Z., & Yan, H. (2021). Emission trading innovation mechanism based on blockchain. *Chinese Journal of Population, Resources and Environment*, 19(4), 369-376.
- [234] Muzumdar, A., Modi, C., & Vyjayanthi, C. (2022). A permissioned blockchain enabled trustworthy and incentivized emission trading system. *Journal of Cleaner Production*, 349, 131274.
- [235] Lu, Y., Li, Y., Tang, X., Cai, B., Wang, H., Liu, L., ... & Yu, K. (2022). STRICTs: A Blockchain-enabled Smart Emission Cap Restrictive and Carbon Permit Trading System. *Applied Energy*, 313, 118787.
- [236] Khaqqi, K. N., Sikorski, J. J., Hadinoto, K., & Kraft, M. (2018). Incorporating seller/buyer reputation-based system in blockchain-enabled emission trading application. *Applied energy*, 209, 8-19.
- [237] Al Sadawi, A., Madani, B., Saboor, S., Ndiaye, M., & Abu-Lebdeh, G. (2021). A comprehensive hierarchical blockchain system for carbon emission trading utilizing blockchain of things and smart contract. *Technological Forecasting and Social Change*, 173, 121124.
- [238] Pan, Y., Zhang, X., Wang, Y., Yan, J., Zhou, S., Li, G., & Bao, J. (2019). Application of blockchain in carbon trading. *Energy Procedia*, 158, 4286-4291.
- [239] Hua, W., Jiang, J., Sun, H., & Wu, J. (2020). A blockchain based peer-to-peer trading framework integrating energy and carbon markets. *Applied Energy*, 279, 115539.
- [240] Fu, B., Shu, Z., & Liu, X. (2018). Blockchain enhanced emission trading framework in fashion apparel manufacturing industry. *Sustainability*, 10(4), 1105.
- [241] Zhong, X., Liu, Y., Xie, K., & Xie, S. (2022). A Local Electricity and Carbon Trading Method for Multi-Energy Microgrids Considering Cross-Chain Interaction. *Sensors*, 22(18), 6935.
- [242] Franke, L., Schletz, M., & Salomo, S. (2020). Designing a blockchain model for the paris agreement's carbon market mechanism. *Sustainability*, 12(3), 1068.
- [243] Kim, S. K., & Huh, J. H. (2020). Blockchain of carbon trading for UN sustainable development goals. *Sustainability*, 12(10), 4021.
- [244] Schletz, M., Franke, L. A., & Salomo, S. (2020). Blockchain application for the Paris agreement carbon market mechanism—a decision framework and architecture. *Sustainability*, 12(12), 5069.
- [245] Ju, C., Shen, Z., Bao, F., Weng, P., Xu, Y., & Xu, C. (2022). A Novel Credible Carbon Footprint Traceability System for Low Carbon Economy Using Blockchain Technology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16), 10316.
- [246] Leonhard, R. (2017). Developing the crypto carbon credit on Ethereum's blockchain. Available at SSRN 3000472.
- [247] Delardas, O., & Giannos, P. (2022). Towards Energy Transition: Use of Blockchain in Renewable Certificates to Support Sustainability Commitments. *Sustainability*, 15(1), 258.

- [248] Blumberg, G., & Sibilla, M. (2023). A Carbon Accounting and Trading Platform for the UK Construction Industry. *Energies*, 16(4), 1566.
- [249] Ashley, M. J., & Johnson, M. S. (2018). Establishing a secure, transparent, and autonomous blockchain of custody for renewable energy credits and carbon credits. *IEEE Engineering Management Review*, 46(4), 100-102.
- [250] Zanghi, E., Brown Do Coutto Filho, M., & Stacchini de Souza, J. C. (2023). Collaborative smart energy metering system inspired by blockchain technology. *International Journal of Innovation Science*.
- [251] Zakaret, C., Peladarinos, N., Cheimaras, V., Tserepas, E., Papageorgas, P., Aillerie, M., ... & Agavanakis, K. (2022). Blockchain and Secure Element, a Hybrid Approach for Secure Energy Smart Meter Gateways. *Sensors*, 22(24), 9664.
- [252] Zhang, S., Rong, J., & Wang, B. (2020). A privacy protection scheme of smart meter for decentralized smart home environment based on consortium blockchain. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 121, 106140.
- [253] Olivares-Rojas, J. C., Reyes-Archundia, E., Gutiérrez-Gnecchi, J. A., Cerda-Jacobo, J., & González-Murueta, J. W. (2019). A novel multitier blockchain architecture to protect data in smart metering systems. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 67(4), 1271-1284.
- [254] Mohammadi, F., Sanjari, M., & Saif, M. (2022, April). A real-time blockchain-based multifunctional integrated smart metering system. In *2022 IEEE Kansas Power and Energy Conference (KPEC)* (pp. 1-3). IEEE.
- [255] Abou El Houda, Z., Hafid, A., & Khoukhi, L. (2020, June). Blockchain meets AML: Towards secure advanced metering infrastructures. In *ICC 2020-2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [256] Lee, J. L., BusiReddyGari, P., & Thompson, B. (2021, June). A lightweight smart meter framework using a scalable blockchain for smart cities. In *2021 IEEE 7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)* (pp. 433-438). IEEE.
- [257] Kwak, S., Lee, J., Kim, J., & Oh, H. (2022). EggBlock: Design and Implementation of Solar Energy Generation and Trading Platform in Edge-Based IoT Systems with Blockchain. *Sensors*, 22(6), 2410.
- [258] Enescu, F. M., Bizon, N., Onu, A., Răboacă, M. S., Thounthong, P., Mazare, A. G., & Șerban, G. (2020). Implementing blockchain technology in irrigation systems that integrate photovoltaic energy generation systems. *Sustainability*, 12(4), 1540.
- [259] Tsao, Y. C., & Thanh, V. V. (2021). Toward blockchain-based renewable energy microgrid design considering default risk and demand uncertainty. *Renewable Energy*, 163, 870-881.
- [260] Cheng, X., Tian, W., Shi, F., Zhao, M., Chen, S., & Wang, H. (2022). A blockchain-empowered cluster-based federated learning model for blade icing estimation on iot-enabled wind turbine. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(12), 9184-9195.
- [261] Wang, H., & Wu, B. (2021). Design of wind farm information system based on blockchain technology. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 647, No. 1, p. 012006). IOP Publishing.
- [262] Yu, H., Zhu, S., & Yang, J. (2021). The quality control system of green composite wind turbine blade supply chain based on blockchain technology. *Sustainability*, 13(15), 8331.
- [263] Keivanpour, S., Ramudhin, A., & Ait Kadi, D. (2019). Towards the blockchain-enabled offshore wind energy supply chain. In *Proceedings of the Future Technologies Conference (FTC) 2018: Volume 1* (pp. 904-913). Springer International Publishing.
- [264] Gao, G., Song, C., Bandara, T. T. A., Shen, M., Yang, F., Posdorfer, W., ... & Wen, Y. (2021). FogChain: A blockchain-based peer-to-peer solar power trading system powered by fog AI. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(7), 5200-5215.
- [265] Pipattanasomporn, M., Kuzlu, M., & Rahman, S. (2018, October). A blockchain-based platform for exchange of solar energy: Laboratory-scale implementation. In

- 2018 international conference and utility exhibition on green energy for sustainable Development (ICUE) (pp. 1-9). IEEE.
- [266] Plaza, C., Gil, J., De Chezelles, F., & Strang, K. A. (2018, June). Distributed solar self-consumption and blockchain solar energy exchanges on the public grid within an energy community. In 2018 IEEE international conference on environment and electrical engineering and 2018 IEEE industrial and commercial power systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe) (pp. 1-4). IEEE.
- [267] Wörner, A., Meeuw, A., Ableitner, L., Wortmann, F., Schopfer, S., & Tiefenbeck, V. (2019). Trading solar energy within the neighborhood: field implementation of a blockchain-based electricity market. *Energy Informatics*, 2, 1-12.
- [268] Erol, I., Peker, I., Ar, I. M., Turan, İ., & Searcy, C. (2021). Towards a circular economy: Investigating the critical success factors for a blockchain-based solar photovoltaic energy ecosystem in Turkey. *Energy for Sustainable Development*, 65, 130-143.
- [269] Lin, J., Pipattanasomporn, M., & Rahman, S. (2019, February). Comparative analysis of blockchain-based smart contracts for solar electricity exchanges. In 2019 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT) (pp. 1-5). IEEE.
- [270] Liu, J., Lv, J., Dinçer, H., Yüksel, S., & Karakuş, H. (2021). Selection of renewable energy alternatives for green blockchain investments: A hybrid IT2-based fuzzy modelling. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 1-15.
- [271] Hou, J., Wang, H., & Liu, P. (2018). Applying the blockchain technology to promote the development of distributed photovoltaic in China. *International Journal of Energy Research*, 42(6), 2050-2069.
- [272] Gao, C., Ji, Y., Wang, J., & Sai, X. (2018, May). Application of blockchain technology in peer-to-peer transaction of photovoltaic power generation. In 2018 2nd IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC) (pp. 2289-2293). IEEE.
- [273] Huang, Y., Yang, P., Liu, Z., Lyu, Y., & Chen, Y. (2018, November). A design of photovoltaic plants financing platform based on blockchain technology. In 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON) (pp. 4251-4256). IEEE.
- [274] Zhang, T., Yang, J., Li, J., Yang, Z., & Jin, K. (2021). Research on local consumption method of distributed photovoltaic generation for benefits of multi parties based on blockchain. *Energy Reports*, 7, 185-190.
- [275] Imbault, F., Swiatek, M., de Beaufort, R., & Plana, R. (2017, June). The green blockchain: Managing decentralized energy production and consumption. In 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe) (pp. 1-5). IEEE.
- [276] Mihaylov, M., Razo-Zapata, I., & Nowe, A. (2018). NRGcoin—A blockchain-based reward mechanism for both production and consumption of renewable energy. In *Transforming climate finance and green investment with blockchains* (pp. 111-131). Academic Press.
- [277] Dispenza, J., Garcia, C., & Molecke, R. (2017). Energy efficiency coin (EECoin) a blockchain asset class pegged to renewable energy markets. EnLedger Corp., Lewes, DE, USA, Tech. Rep, 1.
- [278] Ahl, A., Yarime, M., Tanaka, K., & Sagawa, D. (2019). Review of blockchain-based distributed energy: Implications for institutional development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 200-211.
- [279] Guo, Y., Wan, Z., & Cheng, X. (2022). When Blockchain Meets Smart Grids: A Comprehensive Survey. *High-Confidence Computing*, 100059.

- [280] Kolahan, A., Maadi, S. R., Teymouri, Z., & Schenone, C. (2021). Blockchain-based solution for energy demand-side management of residential buildings. *Sustainable Cities and Society*, 75, 103316.
- [281] Aitzhan, N. Z., & Svetinovic, D. (2016). Security and privacy in decentralized energy trading through multi-signatures, blockchain and anonymous messaging streams. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 15(5), 840-852.
- [282] Umoren, I. A., Jaffary, S. S. A., Shakir, M. Z., Katzis, K., & Ahmadi, H. (2020). Blockchain-based energy trading in electric-vehicle-enabled microgrids. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 9(6), 66-71.
- [283] Blockchain - an opportunity for energy producers and consumers? - PWC. (n.d.-a). <https://www.pwc.com/gx/en/industries/assets/pwc-blockchain-opportunity-for-energy-producers-and-consumers.pdf>
- [284] He, Y., Zhang, C., Wu, B., Geng, Z., Xiao, K., & Li, H. (2021). A trusted architecture for EV shared charging based on blockchain technology. *High-Confidence Computing*, 1(2), 100001.
- [285] Samuel, O., Javaid, N., Almogren, A., Javed, M. U., Qasim, U., & Radwan, A. (2022). A secure energy trading system for electric vehicles in smart communities using blockchain. *Sustainable Cities and Society*, 79, 103678.
- [286] Woo, J., Fatima, R., Kibert, C. J., Newman, R. E., Tian, Y., & Srinivasan, R. S. (2021). Applying blockchain technology for building energy performance measurement, reporting, and verification (MRV) and the carbon credit market: A review of the literature. *Building and Environment*, 205, 108199.
- [287] EUBlockchain | Blockchain Applications in the Energy Sector. (n.d.). EUBlockchain. <https://www.eublockchainforum.eu/reports/blockchain-applications-energy-sector>
- [288] Perera, R. (2017). *The PESTLE analysis*. Nerdynaut.
- [289] Ho, J. K. K. (2014). Formulation of a systemic PEST analysis for strategic analysis. *European academic research*, 2(5), 6478-6492.
- [290] Zahari, A. R., & Romli, F. I. (2019). Analysis of suborbital flight operation using PESTLE. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 192, 104901.
- [291] Sammut-Bonnici, T., & Galea, D. (2014). PEST analysis.
- [292] History of the PEST Analysis and It's Limitations. (n.d.). Scribd. <https://www.scribd.com/document/365724336/history-of-the-pest-analysis-and-it-s-limitations>
- [293] Carruthers, H. (2009). Using PEST analysis to improve business performance. In practice, 31(1), 37-39.
- [294] Zalengera, C., Blanchard, R. E., Eames, P. C., Juma, A. M., Chitawo, M. L., & Gondwe, K. T. (2014). Overview of the Malawi energy situation and A PESTLE analysis for sustainable development of renewable energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 335-347.
- [295] Achinas, S., Horjus, J., Achinas, V., & Euverink, G. J. W. (2019). A PESTLE analysis of biofuels energy industry in Europe. *Sustainability*, 11(21), 5981.
- [296] Demirtas, O., Derindag, O. F., Zarali, F., Ocal, O., & Aslan, A. (2021). Which renewable energy consumption is more efficient by fuzzy EDAS method based on PESTLE dimensions?. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(27), 36274-36287.
- [297] Partanen, C. (2018). The viability of cryptocurrency in relation to the response of financial institutions and governments.
- [298] Li, S. (2018). A PESTLE Analysis of the Cryptocurrency Industry: An Investment Perspective.
- [299] O'Dair, M. (2018). Distributed creativity: How blockchain technology will transform the creative economy.
- [300] Kuzior, A., Sira, M., & Brozek, P. (2022). Using Blockchain and Artificial Intelligence in Energy Management as a Tool to Achieve Energy Efficiency. *Virtual Economics*, 5(3), 69-90.

- [301] Mazure, G., & Kalnina, A. (2022). ANALYSIS OF POTENTIAL APPLICATION OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY IN RENEWABLE ENERGY SECTOR. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 22(5.1), 523-532.
- [302] Bürer, M. J., de Lapparent, M., Pallotta, V., Capezzali, M., & Carpita, M. (2019). Use cases for blockchain in the energy industry opportunities of emerging business models and related risks. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106002.
- [303] Diestelmeier, L. (2019). Changing power: Shifting the role of electricity consumers with blockchain technology-Policy implications for EU electricity law. *Energy Policy*, 128, 189-196.
- [304] Juszczak, O., & Shahzad, K. (2022). Blockchain technology for renewable energy: principles, applications and prospects. *Energies*, 15(13), 4603.
- [305] Teufel, B., Sentic, A., & Barmet, M. (2019). Blockchain energy: Blockchain in future energy systems. *Journal of Electronic Science and Technology*, 17(4), 100011.
- [306] Sadhya, V., & Sadhya, H. (2018). Barriers to adoption of blockchain technology.
- [307] Morstyn, T., Farrell, N., Darby, S. J., & McCulloch, M. D. (2018). Using peer-to-peer energy-trading platforms to incentivize prosumers to form federated power plants. *Nature energy*, 3(2), 94-101.
- [308] Ahl, A., Goto, M., Yarime, M., Tanaka, K., & Sagawa, D. (2022). Challenges and opportunities of blockchain energy applications: Interrelatedness among technological, economic, social, environmental, and institutional dimensions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 112623.
- [309] Egelund-Müller, B., Elsmann, M., Henglein, F., & Ross, O. (2017). Automated execution of financial contracts on blockchains. *Business & Information Systems Engineering*, 59, 457-467.
- [310] Risius, M., & Spohrer, K. (2017). A blockchain research framework: What we (don't) know, where we go from here, and how we will get there. *Business & information systems engineering*, 59, 385-409.
- [311] Borges, C. E., Kapassa, E., Touloupou, M., Legarda Macón, J., & Casado-Mansilla, D. (2022). Blockchain application in P2P energy markets: Social and legal aspects. *Connection Science*, 34(1), 1066-1088.
- [312] Erturk, E., Lopez, D., & Yu, W. Y. (2019). Benefits and risks of using blockchain in smart energy: A literature review. *Contemporary Management Research*, 15(3), 205-225.
- [313] Ingram, C., Morisse, M., & Teigland, R. (2015, March). 'A Bad Apple Went Away': Exploring Resilience among Bitcoin Entrepreneurs. In *Twenty-Third European Conference on Information Systems (ECIS)*, Münster, Germany.
- [314] Meiklejohn, S., Pomarole, M., Jordan, G., Levchenko, K., McCoy, D., Voelker, G. M., & Savage, S. (2013, October). A fistful of bitcoins: characterizing payments among men with no names. In *Proceedings of the 2013 conference on Internet measurement conference* (pp. 127-140).
- [315] Beck, R., Czepluch, J. S., Lollike, N., & Malone, S. (2016). Blockchain-the gateway to trust-free cryptographic transactions. In *Twenty-Fourth European Conference on Information Systems (ECIS)*, Istanbul, Turkey, 2016 (pp. 1-14). Springer Publishing Company.
- [316] Notheisen, B., Cholewa, J. B., & Shanmugam, A. P. (2017). Trading real-world assets on blockchain: an application of trust-free transaction systems in the market for lemons. *Business & Information Systems Engineering*, 59, 425-440.
- [317] Zhou, J., Wu, Y., Liu, F., Tao, Y., & Gao, J. (2021). Prospects and obstacles analysis of applying blockchain technology to power trading using a deeply improved model based on the DEMATEL approach. *Sustainable Cities and Society*, 70, 102910.
- [318] Khalifa, A. M., Bahaa-Eldin, A. M., & Sobh, M. A. (2019, December). Quantum attacks and defenses for proof-of-stake. In *2019 14th international conference on computer engineering and systems (ICCES)* (pp. 112-117). IEEE.

- [319] Fabian, B., Ermakova, T., & Sander, U. (2016). Anonymity in bitcoin?-the users' perspective.
- [320] Abramova, S., & Böhme, R. (2016). Perceived benefit and risk as multidimensional determinants of bitcoin use: A quantitative exploratory study.
- [321] Wang, T., Hua, H., Wei, Z., & Cao, J. (2022). Challenges of blockchain in new generation energy systems and future outlooks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 135, 107499.
- [322] Pop, C., Antal, M., Cioara, T., Anghel, I., Sera, D., Salomie, I., ... & Bertoncini, M. (2019). Blockchain-based scalable and tamper-evident solution for registering energy data. *Sensors*, 19(14), 3033.sc
- [323] Xinyi, Y., Yi, Z., & He, Y. (2018, July). Technical characteristics and model of blockchain. In *2018 10th international Conference on communication Software and networks (ICCSN)* (pp. 562-566). IEEE.
- [324] Zheng, Z., Xie, S., Dai, H. N., Chen, X., & Wang, H. (2018). Blockchain challenges and opportunities: A survey. *International journal of web and grid services*, 14(4), 352-375.
- [325] Monrat, A. A., Schelén, O., & Andersson, K. (2019). A survey of blockchain from the perspectives of applications, challenges, and opportunities. *IEEE Access*, 7, 117134-117151.
- [326] Uddin, S. S., Joysoyal, R., Sarker, S. K., Mueen, S. M., Ali, M. F., Hasan, M. M., ... & Tasneem, Z. (2022). Next-generation blockchain enabled smart grid: Conceptual framework, key technologies and industry practices review. *Energy and AI*, 100228.
- [327] Mollah, M. B., Zhao, J., Niyato, D., Lam, K. Y., Zhang, X., Ghias, A. M., ... & Yang, L. (2020). Blockchain for future smart grid: A comprehensive survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(1), 18-43.
- [328] Chiarini, A., & Compagnucci, L. (2022). Blockchain, Data Protection and P2P Energy Trading: A Review on Legal and Economic Challenges. *Sustainability*, 14(23), 16305.
- [329] Brilliantova, V., & Thurner, T. W. (2019). Blockchain and the future of energy. *Technology in Society*, 57, 38-45.
- [330] Helms, M. M., & Nixon, J. (2010). Exploring SWOT analysis-where are we now? A review of academic research from the last decade. *Journal of strategy and management*, 3(3), 215-251.
- [331] Gurl, E. (2017). SWOT analysis: A theoretical review.
- [332] Kangas, J., Kurttila, M., Kajanus, M., & Kangas, A. (2003). Evaluating the management strategies of a forestland estate—the SOS approach. *Journal of environmental management*, 69(4), 349-358.
- [333] Dyson, R. G. (2004). Strategic development and SWOT analysis at the University of Warwick. *European journal of operational research*, 152(3), 631-640.
- [334] Kurttila, M., Pesonen, M., Kangas, J., & Kajanus, M. (2000). Utilizing the analytic hierarchy process (AHP) in SWOT analysis—a hybrid method and its application to a forest-certification case. *Forest policy and economics*, 1(1), 41-52.
- [335] Burnes, B., & Cooke, B. (2013). Kurt Lewin's Field Theory: A Review and Re-evaluation. *International journal of management reviews*, 15(4), 408-425.
- [336] Ghazinoory, S., Abdi, M., & Azadegan-Mehr, M. (2011). SWOT methodology: a state-of-the-art review for the past, a framework for the future. *Journal of business economics and management*, 12(1), 24-48.
- [337] Pohekar, S. D., & Ramachandran, M. (2004). Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning—A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 8(4), 365-381.
- [338] Greening, L. A., & Bernow, S. (2004). Design of coordinated energy and environmental policies: use of multi-criteria decision-making. *Energy policy*, 32(6), 721-735.

- [339] Diakoulaki, D., Antunes, C. H., & Gomes Martins, A. (2005). MCDA and energy planning. *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*, 859-890.
- [340] De Montis, A., De Toro, P., Droste-Franke, B., Omann, I., & Stagl, S. (2004). Assessing the quality of different MCDA methods. In *Alternatives for environmental valuation* (pp. 115-149). Routledge.
- [341] Tsoutsos, T., Drandaki, M., Frantzeskaki, N., Iosifidis, E., & Kiosses, I. (2009). Sustainable energy planning by using multi-criteria analysis application in the island of Crete. *Energy policy*, 37(5), 1587-1600.
- [342] Khan, I. (2019). Power generation expansion plan and sustainability in a developing country: A multi-criteria decision analysis. *Journal of Cleaner Production*, 220, 707-720.
- [343] Nangia, U., Jain, N. K., & Wadhwa, C. L. (2001). Multiobjective optimal load flow based on ideal distance minimization in 3D space. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 23(8), 847-855.
- [344] Chung, T. S., Li, K. K., Chen, G. J., Xie, J. D., & Tang, G. Q. (2003). Multi-objective transmission network planning by a hybrid GA approach with fuzzy decision analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 25(3), 187-192.
- [345] Samaan, S., Momeni, M., Knittel, M., Murglat, M., & Moser, A. (2022). Multi-Criteria based Steady-State and Dynamic Reactive Power Planning for Transmission Systems. *Electric Power Systems Research*, 209, 107929.
- [346] Hsiao, Y. T., Chiang, H. D., Liu, C. C., & Chen, Y. L. (1994). A computer package for optimal multi-objective VAR planning in large scale power systems. *IEEE transactions on power systems*, 9(2), 668-676.
- [347] Gomes, A., Antunes, C. H., & Martins, A. G. (2004). A multiple objective evolutionary approach for the design and selection of load control strategies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2), 1173-1180.
- [348] Manjure, D. P., & Makram, E. B. (2003). Optimal load curtailment as a bi-criteria program. *Electric Power Systems Research*, 66(2), 155-161.
- [349] Niimura, T., & Nakashima, T. (2003). Multiobjective tradeoff analysis of deregulated electricity transactions. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 25(3), 179-185.
- [350] Wang, J. J., Jing, Y. Y., Zhang, C. F., & Zhao, J. H. (2009). Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(9), 2263-2278.
- [351] Saaty, T. (1980, November). The analytic hierarchy process (AHP) for decision making. In *Kobe, Japan* (Vol. 1, p. 69).
- [352] Ramanathan, R., & Ganesh, L. S. (1995). Energy resource allocation incorporating qualitative and quantitative criteria: An integrated model using goal programming and AHP. *Socio-Economic Planning Sciences*, 29(3), 197-218.
- [353] Badri, M. A. (2001). A combined AHP-GP model for quality control systems. *International Journal of Production Economics*, 72(1), 27-40.
- [354] Amiri, M. P. (2010). Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS methods. *Expert systems with applications*, 37(9), 6218-6224.
- [355] Darko, A., Chan, A. P. C., Ameyaw, E. E., Owusu, E. K., Pärn, E., & Edwards, D. J. (2019). Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction. *International journal of construction management*, 19(5), 436-452.
- [356] Karasakal, E., & Aker, P. (2017). A multicriteria sorting approach based on data envelopment analysis for R&D project selection problem. *Omega*, 73, 79-92.
- [357] Martin, H., & Daim, T. U. (2012). Technology roadmap development process (TRDP) for the service sector: A conceptual framework. *Technology in Society*, 34(1), 94-105.

- [358] Grady, C. A., He, X., & Peeta, S. (2015). Integrating social network analysis with analytic network process for international development project selection. *Expert Systems with Applications*, 42(12), 5128-5138.
- [359] Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of operational research*, 169(1), 1-29.
- [360] Darko, A., Chan, A. P. C., Ameyaw, E. E., Owusu, E. K., Pärn, E., & Edwards, D. J. (2019). Review of application of analytic hierarchy process (AHP) in construction. *International journal of construction management*, 19(5), 436-452.
- [361] Al-Harbi, K. M. A. S. (2001). Application of the AHP in project management. *International journal of project management*, 19(1), 19-27.
- [362] Zavadskas, E. K., & Turskis, Z. (2011). Multiple criteria decision making (MCDM) methods in economics: an overview. *Technological and economic development of economy*, 17(2), 397-427.
- [363] Wu, C., Zhang, X. Y., Yeh, I. C., Chen, F. Y., Bender, J., & Wang, T. N. (2013). Evaluating competitiveness using fuzzy analytic hierarchy process—A case study of Chinese airlines. *Journal of advanced transportation*, 47(7), 619-634.
- [364] Raut, R. D., Kamble, S. S., & Jha, M. K. (2016). A combined confirmatory factor analysis and fuzzy-analytic hierarchy process-TOPSIS (CFAT) framework for measurement of airline service quality. *International Journal of Services and Operations Management*, 23(3), 347-386.
- [365] Danner, M., Hummel, J. M., Volz, F., Van Manen, J. G., Wiegard, B., Dintsios, C. M., ... & IJzerman, M. J. (2011). Integrating patients' views into health technology assessment: Analytic hierarchy process (AHP) as a method to elicit patient preferences. *International journal of technology assessment in health care*, 27(4), 369-375.
- [366] Chaouachi, A., Covrig, C. F., & Ardelean, M. (2017). Multi-criteria selection of offshore wind farms: Case study for the Baltic States. *Energy Policy*, 103, 179-192.
- [367] Singh, R. P., & Nachtnebel, H. P. (2016). Analytical hierarchy process (AHP) application for reinforcement of hydropower strategy in Nepal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 43-58.
- [368] Abdulrahman, A. O., & Huisinigh, D. (2018). The role of biomass as a cleaner energy source in Egypt's energy mix. *Journal of Cleaner Production*, 172, 3918-3930.
- [369] Solangi, Y. A., Longsheng, C., & Shah, S. A. A. (2021). Assessing and overcoming the renewable energy barriers for sustainable development in Pakistan: An integrated AHP and fuzzy TOPSIS approach. *Renewable Energy*, 173, 209-222.
- [370] Irfan, M., Elavarasan, R. M., Ahmad, M., Mohsin, M., Dagar, V., & Hao, Y. (2022). Prioritizing and overcoming biomass energy barriers: Application of AHP and G-TOPSIS approaches. *Technological Forecasting and Social Change*, 177, 121524.
- [371] Abdul, D., Wenqi, J., & Tanveer, A. (2022). Prioritization of renewable energy source for electricity generation through AHP-VIKOR integrated methodology. *Renewable Energy*, 184, 1018-1032.
- [372] Mastrocinque, E., Ramírez, F. J., Honrubia-Escribano, A., & Pham, D. T. (2020). An AHP-based multi-criteria model for sustainable supply chain development in the renewable energy sector. *Expert Systems with Applications*, 150, 113321.
- [373] Ruiz, H. S., Sunarso, A., Ibrahim-Bathis, K., Murti, S. A., & Budiarto, I. (2020). GIS-AHP Multi Criteria Decision Analysis for the optimal location of solar energy plants at Indonesia. *Energy Reports*, 6, 3249-3263.
- [374] Beşikçi, E. B., Kecici, T., Arslan, O., & Turan, O. (2016). An application of fuzzy-AHP to ship operational energy efficiency measures. *Ocean engineering*, 121, 392-402.
- [375] Garbuzova-Schlifter, M., & Madlener, R. (2016). AHP-based risk analysis of energy performance contracting projects in Russia. *Energy Policy*, 97, 559-581.
- [376] Lu, W., Wu, L., & Xue, F. (2022). Blockchain technology for projects: A multicriteria decision matrix. *Project Management Journal*, 53(1), 84-99.

- [377] Karaşan, A., Kaya, İ., Erdoğan, M., & Çolak, M. (2021). A multicriteria decision making methodology based on two-dimensional uncertainty by hesitant Z-fuzzy linguistic terms with an application for blockchain risk evaluation. *Applied Soft Computing*, 113, 108014.
- [378] Lai, H., & Liao, H. (2021). A multi-criteria decision making method based on DNMA and CRITIC with linguistic D numbers for blockchain platform evaluation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 101, 104200.
- [379] Erol, I., Ar, I. M., & Peker, I. (2022). Scrutinizing blockchain applicability in sustainable supply chains through an integrated fuzzy multi-criteria decision making framework. *Applied Soft Computing*, 116, 108331.
- [380] Çolak, M., Kaya, İ., Özkan, B., Budak, A., & Karaşan, A. (2020). A multi-criteria evaluation model based on hesitant fuzzy sets for blockchain technology in supply chain management. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 38(1), 935-946.
- [381] Ilieva, G., Yankova, T., Radeva, I., & Popchev, I. (2021). Blockchain software selection as a fuzzy multi-criteria problem. *Computers*, 10(10), 120.
- [382] Kubler, S., Renard, M., Ghatpande, S., Georges, J. P., & Le Traon, Y. (2022). Decision support system for blockchain (DLT) platform selection based on ITU recommendations: A systematic literature review approach. *Expert Systems with Applications*, 118704.
- [383] Su, D., Zhang, L., Peng, H., Saeidi, P., & Tirkolaee, E. B. (2023). Technical challenges of blockchain technology for sustainable manufacturing paradigm in Industry 4.0 era using a fuzzy decision support system. *Technological Forecasting and Social Change*, 188, 122275.
- [384] Akın, Y., Dikkollu, C., Kaplan, B. B., Yayan, U., & Yolaçan, E. N. (2019, November). Ethereum blockchain network-based electrical vehicle charging platform with multi-criteria decision support system. In *2019 1st International Informatics and Software Engineering Conference (UBMYK)* (pp. 1-5). IEEE.
- [385] Zhou, J., Wu, Y., Liu, F., Tao, Y., & Gao, J. (2021). Prospects and obstacles analysis of applying blockchain technology to power trading using a deeply improved model based on the DEMATEL approach. *Sustainable Cities and Society*, 70, 102910.
- [386] InEEsS | EPU-NTUA. (n.d.). <https://www.epu.ntua.gr/ineexs>
- [387] Lai, V. S., Wong, B. K., & Cheung, W. (2002). Group decision making in a multiple criteria environment: A case using the AHP in software selection. *European Journal of Operational Research*, 137(1), 134-144.
- [388] Crawford, G., & Williams, C. (1985). A note on the analysis of subjective judgment matrices. *Journal of mathematical psychology*, 29(4), 387-405.
- [389] Aguarón, J., & Moreno-Jiménez, J. M. (2003). The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European journal of operational research*, 147(1), 137-145.
- [390] Forman, E., & Peniwati, K. (1998). Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 108(1), 165-169.
- [391] Dong, Y., Zhang, G., Hong, W. C., & Xu, Y. (2010). Consensus models for AHP group decision making under row geometric mean prioritization method. *Decision Support Systems*, 49(3), 281-289.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Παράρτημα

8 Παράρτημα

8.1 Κατάλογος Συντομογραφιών

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
APIs	Application Programming Interfaces
AHP	Analytical Hierarchy Process
ANP	Analytical Network Process
BCH	Bitcoin Cash
BTC	Bitcoin
CA	Certificate Authority
DAG	Directed Acyclic Graph
DDoS	Denial-of-Service
DPoS	Delegated Proof of Stake
EPC	Energy Performance Contracting
ETH	Ethereum
EV	Electric Vehicle
GCCI	Geometric Cardinal Consensus Index
GCI	Geometric Consistency Index
GoOs	Guarantees of Origin
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
IoV	Internet of Vehicles
LTC	Litecoin
MAUT	Multi-Attribute Utility Theory
MAVT	Multi-Attribute Value Theory
NHIS	National Health Insurance Scheme
OB	Open Banking
P2P	Peer-to-peer
PBFT	Practical Byzantine Fault Tolerance

PESTLE	Political Economic Social Technological Legal Environmental
PoET	Proof of Elapsed Time
PoS	Proof of Stake
PoW	Proof of Work
PROMETHEE	Preference ranking organization method for enrichment evaluation
PKI	Public Key Infrastructure
RECs	Renewable Energy Certificates
SWOT	Strengths Weaknesses Opportunities Threats
UAV	Unmanned Aerial Vehicles
V2G	Vehicle-to-Grid

8.2 Έργα με Εφαρμογές του Blockchain στην Ενέργεια

Όνομα Έργου	Περιγραφή	Πηγή
INTERFACE	Το έργο αφορά μία πλατφόρμα εμπορίας ευελιξίας στην οποία διαχειριστές συστημάτων μεταφοράς (Transmission System Operator, TSO), διαχειριστές συστημάτων διανομής (Distribution System Operator, DSO) και Prosumers μπορούν να πραγματοποιήσουν ασφαλείς συναλλαγές χωρίς κάποια εξωτερική κεντρική αρχή.	[1], [2]
ACCEPT	Το έργο αφορά μία πλατφόρμα που έχει σκοπό την πραγματοποίηση συναλλαγών P2P ενέργειας και ευελιξίας χάρη στο blockchain και τα έξυπνα συμβόλαια. Εξασφαλίζεται ο βέλτιστος, δίκαιος και διαφανής διαμοιρασμός ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.	[1], [3]
BD4NRG	Το έργο προσφέρει ένα καινοτόμο στρώμα διαχείρισης δεδομένων, συμβατό με το International Data Space Association, καθώς και ένα ψηφιακό P2P marketplace.	[1], [4]
BRIGHT	Το έργο περιλαμβάνει τη χρήση τεχνολογιών blockchain για την υποστήριξη της διαχείρισης της ζήτησης από την πλευρά των καταναλωτών.	[1], [5]
CoordiNet	Πρόκειται για ένα σύστημα με βάση το blockchain, ενσωματωμένο με τη Σουηδική P2P αγορά, για την επιβεβαίωση της ικανότητας συναλλαγής μετά από μία συνεδρία στο marketplace.	[1], [6]
BD4OPEM	Πρόκειται για μία υπηρεσία P2P εμπορίας ενέργειας που στοχεύει στη διευκόλυνση των ενεργειακών συναλλαγών μεταξύ prosumers, καταναλωτών και μικρών παραγωγών, αλλά και στον βέλτιστο έλεγχο των διασπαρμένων πηγών ενέργειας.	[1], [7]
FEVER	Το λογισμικό της πλατφόρμας FEVER βασίζεται στο blockchain, καθώς δίνεται η δυνατότητα P2P εμπορίας ευελιξίας και ενέργειας μέσω ενός ψευδονομίσματος (FlexCoin).	[1], [8]
TwinERGY	Το συγκεκριμένο έργο παρέχει ένα παγκόσμιο πλαίσιο για την ανταλλαγή ενέργειας με βάση το Ethereum blockchain, δίνοντας τη δυνατότητα ενεργειακών συναλλαγών, πρόσβασης στην παραγωγή ενέργειας, και συμμετοχής σε αποκεντρωμένες αγορές ενέργειας. Επιπλέον παρέχεται η υπηρεσία TwinEV, η οποία επιτρέπει την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων τόσο σε δημόσια όσο και σε ιδιωτικά σημεία φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς του δικτύου.	[1], [9]
SENDER	Εκμεταλλευτόμενο τις ικανότητες παροχής ευελιξίας από την ηλεκτροκίνηση μέσω έξυπνης φόρτισης και V2G υπηρεσιών, το έργο SENDER υλοποιεί ένα σύστημα έξυπνης διαχείρισης ενέργειας.	[1], [10]
PEAK	Η πλατφόρμα PEAK δρα σαν διαχειριστής προσβασιμότητας. Στόχος της είναι να εξυπηρετήσει την ενεργειακή βιομηχανία, η οποία έχει ανάγκη από έναν ασφαλή τρόπο ταυτοποίησης του αυξανόμενου αριθμού συμμετεχόντων στην παραγωγή μέσω καθαρών πηγών ενέργειας.	[1], [11]

HESTIA	Το έργο αυτό υλοποιεί ένα ανοιχτό marketplace που δίνει τη δυνατότητα ανταλλαγής της παραγόμενης ενέργειας και ευελιξίας, οπότε οι συμμετέχοντες μπορούν να αλληλοεπιδρούν με τα μέλη της υπόλοιπης ενεργειακής κοινότητας αλλά και με το ίδιο το δίκτυο.	[1], [12]
IANOS	Πρόκειται για μία πλατφόρμα εμπορίας ενέργειας βασισμένη σε τεχνολογία καταμετρημένου καθολικού, που επιτρέπει στους prosumers τοπικού δικτύου να ανταλλάξουν ενέργεια μεταξύ τους απευθείας.	[1], [13]
InterConnect	Το έργο αυτό παρέχει ένα P2P marketplace για αξιόπιστες συναλλαγές δεδομένων σε έξυπνες ενεργειακές κοινότητες, καθώς και έναν μηχανισμό αυτόματης πιστοποίησης διαλειτουργικής συμβατότητας.	[1], [14]
PARITY	Στο συγκεκριμένο έργο μία τοπική αγορά ενέργειας διευκολύνει την αυτοματοποιημένη εμπορία ενέργειας και ευελιξίας ανάμεσα σε prosumers. Χρησιμοποιούνται tokens με σκοπό να επιφέρουν ρευστότητα στην τοπική αγορά.	[1], [15]
PHOENIX	Το έργο PHOENIX δημιουργεί μία ασπίδα προστασίας ηλεκτρικών συστημάτων ενάντια σε περίπλοκα γεγονότα και εκτεταμένες κυβερνοεπιθέσεις ή παραβιάσεις ιδιωτικότητας.	[1], [16]
Platone	Στο έργο αυτό, μέσω tokens, επιβραβεύονται ή ποινικοποιούνται οι χρήστες που εμπλέκονται στη λειτουργία μια αγοράς P2P. Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα διαχείρισης, διαμοιρασμού και πιστοποίησης δεδομένων, καθώς και ελέγχου του δικτύου, αλλά και οικονομικών συναλλαγών.	[1], [17]
ROBINSON	Στο έργο αυτό το blockchain δύναται να χρησιμοποιηθεί για σκοπούς κυβερνοασφάλειας.	[1], [18]
TRINITY	Στο πλαίσιο του TRINITY αναπτύσσεται υπηρεσία έκδοσης εγγυήσεων προέλευσης (Guarantees of Origin, GoOs) βασισμένη σε blockchain.	[1], [19]
VPP4ISLANDS	Στο έργο αυτό το blockchain θα χρησιμοποιηθεί ώστε να παρακολουθείται η εφοδιαστική αλυσίδα εξοπλισμού του δικτύου, την καταγραφή των ενεργειακών ροών αλλά και τις ασφαλείς συναλλαγές.	[1], [20]
Powerpeers	Το έργο Powerpeers από την VATTENFALL επιτρέπει την P2P εμπορίας ενέργειας.	[21], [22]
Exergy	Πρόκειται για μία υπηρεσία δεδομένων που ενισχύει την μετάβαση σε ένα εκσυγχρονισμένο δίκτυο, δίνοντας στους ερευνητές και σε άλλους εμπλεκόμενους φορείς τη δυνατότητα να έχουν πρόσβαση σε δεδομένα από διασπαρμένους ενεργειακούς πόρους.	[23], [24]
Brooklyn Microgrid	Πρόκειται για ένα γνωστό πιλοτικό έργο που συνέδεσε οικίες στο Brooklyn σε ένα τοπικό μικροδίκτυο.	[21], [25]
SolarCoin	Το SolarCoin συνεισφέρει στην παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση επιβραβεύοντας παραγωγούς ηλιακής ενέργειας.	[21], [26]

EnergiToken	Μέσω του EnergiToken επιβραβεύεται η συμπεριφορική ενεργειακή αποδοτικότητα.	[21], [27]
ATOMcoin reward app	Μέσω ενός εικονικού ενεργειακού νομίσματος επιβραβεύεται η συμπεριφορική ενεργειακή αποδοτικότητα.	[28], [29]
IBM blockchain	Η IBM σε συνεργασία με το Energy Blockchain Lab Inc. ανέπτυξε μία αποκεντρωμένη πλατφόρμα για την εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών και άλλων ενεργειακών προσόντων.	[21]
WePower	Η πλατφόρμα του συγκεκριμένου έργου συνδέει απευθείας παραγωγούς ενέργειας με μεμονωμένους αγοραστές από επιχειρήσεις, διευκολύνοντας την αγοραπωλησία ενέργειας σε τιμές κάτω από αυτές της αγοράς.	[21], [30]
NRGcoin	Το κρυπτονόμισμα NRGcoin δίνει τη δυνατότητα ενεργειακών συναλλαγών μέσω έξυπνων συμβολαίων, ενώ επιβραβεύει και ενθαρρύνει την αποδοτική κατανάλωση ανανεώσιμης ενέργειας.	[21], [31]
Sun exchange	Πρόκειται για μία πλατφόρμα συμμετοχικής χρηματοδότησης (crowdfunding) για μικρά ή μεσαία έργα ηλιακής ενέργειας στον αναπτυσσόμενο κόσμο.	[21], [32]
WOZX	Η πλατφόρμα ενεργειακής αποδοτικότητας Efforce χρησιμοποιεί το κρυπτονόμισμα WOZX ως μέσο tokenization της εξοικονόμησης ενέργειας των συμμετεχόντων.	[33], [34]
Sun contract	Η πλατφόρμα P2P εμπορίας ενέργειας Sun Contract προσφέρει ποικιλία δυνατοτήτων για την αγοραπωλησία ανανεώσιμης ενέργειας.	[33], [35]
Greeneum	Σε αυτό το έργο, πράσινα πιστοποιητικά και πιστώσεις ρύπων δίνονται σε μορφή κρυπτονομίσματος ανάλογα με τις kwh ανανεώσιμης ενέργειας που παράγονται.	[21], [36]
Powerledger	Μέσω αυτού του έργου παρέχονται λύσεις ευστάθειας δικτύου, υπηρεσίες ευελιξίας, συναλλαγών ανανεώσιμης ενέργειας, διαχείρισης στόχων βιωσιμότητας, υποστήριξης βιώσιμης ανάπτυξης, ικνηλάτισης υδρογόνου, αλλά και λύσεις σχετικές με την ηλεκτροκίνηση.	[21], [37]
ASTRN energy	Πρόκειται για μία ανώνυμη οντότητα, η οποία χρησιμοποιεί την πλατφόρμα Waves.Exchange για τον σχεδιασμό, την οργάνωση και την υλοποίηση έργων σχετικών με την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας και τη μετατροπή τους σε ένα ψηφιακό εικονικό ενεργειακό έργο.	[21], [38]
The ECO coin	Το ECO coin είναι ένα σύστημα παρακολούθησης, μέτρησης και επιβράβευσης της ενεργειακής αποδοτικότητας και βιωσιμότητας.	[21], [39]
EnergyChain	Πρόκειται για ένα ιδιωτικό blockchain που προορίζεται για ενεργειακές εφαρμογές, παρακολούθηση και επικύρωση δεδομένων, πιστοποιήσεις και άλλα.	[21], [40]

Proof of Environment	Με το συγκεκριμένο πρόγραμμα της EverGreenCoin επιβραβεύονται οι φιλικές προς το περιβάλλον δραστηριότητες.	[21], [41]
Green Energy Wallet	Το συγκεκριμένο έργο στοχεύει στη σύνδεση ηλεκτρικών οχημάτων και οικιακών μπαταριών σε ένα μεγάλο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με σκοπό την εξισορρόπηση του δικτύου.	[21], [42]
Jouliette at De Ceudel	Το έργο αυτό ενισχύει μεμονωμένα άτομα οι κοινότητες μέσω ενός ενεργειακού token που επιτρέπει την εύκολη διαχείριση και διαμοιρασμό τοπικά παραγόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές.	[21], [43]
ImpactPPA	Πρόκειται για μία πλατφόρμα βασισμένη στο blockchain η οποία επιτρέπει στους καταναλωτές ενέργειας να προπληρώσουν την ενέργεια που θα καταναλώσουν μέσω μίας κινητής συσκευής.	[21], [44]
Solar DAO	Η συγκεκριμένη πλατφόρμα στοχεύει στη χρηματοδότηση της εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάνελ σε όλο τον κόσμο.	[21], [45]
Bittwatt	Το έργο αυτό αφορά την αποκεντρωμένη εμπορία ενέργειας, προσφέροντας μέσω της πλατφόρμας μια εύχρηστη λύση για προμήθεια και χρέωση ενέργειας.	[21], [46]
Car eWallet	Το ZF Group ανέπτυξε το συγκεκριμένο έργο για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων μέσω συστήματος βασισμένου στο blockchain.	[21], [47]
CarbonX	Το συγκεκριμένο έργο επιτρέπει την επένδυση σε έργα που στοχεύουν στον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.	[21], [48]
Clearwatt	Στο έργο αυτό χρησιμοποιείται επεκτάσιμη διεσπαρμένη βάση δεδομένων υλοποιούμενη μέσω blockchain για την εκτέλεση και τη διευθέτηση μακροπρόθεσμων συμφωνιών αγοράς ενέργειας, συμβολαίων λειτουργίας και συντήρησης αλλά και επιχορηγήσεων για έργα ανανεώσιμων πηγών.	[21], [49]
DAO IPCI	Το έργο αυτό αφορά την τεχνολογία blockchain στις αγορές εκπομπών αερίων αλλά και άλλων περιβαλλοντολογικών στοιχείων.	[21], [50]
ElectronConnect	Η εν λόγω πλατφόρμα της Electron επιτρέπει τις αλληλεπιδράσεις στην αγορά, δίνοντας τη δυνατότητα στους χρήστες να δημιουργήσουν, να λειτουργήσουν και να συμμετέχουν σε ένα πολλαπλό βελτιστοποιημένο δίκτυο, όπου χιλιάδες προϊόντα και υπηρεσίες αλληλοεπιδρούν με εκατομμύρια ενεργειακά στοιχεία διαφορετικά μεταξύ τους.	[21], [51]
TEO	Πρόκειται για μία εφαρμογή η οποία δημιουργεί “μονοπάτια” που μπορούν να ελεγχθούν έτσι ώστε να επαληθεύσει την προέλευση διαφόρων ενεργειακών στοιχείων σε όλη την αλυσίδα αξίας. Επιπλέον η εφαρμογή παρακολουθεί την επίδραση των χρηστών στο περιβάλλον.	[21], [52]

Every	Πρόκειται για ένα δίκτυο φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που επιτρέπει στους οδηγούς να έχουν εύκολη πρόσβαση αλλά και διαχείριση των σταθμών φόρτισης.	[[21], [53]]
Grid+	Στα πλαίσια του συγκεκριμένου έργου μία νεοφυής επιχείρηση χρησιμοποιεί το Ethereum blockchain προκειμένου να δώσει στους καταναλωτές απευθείας πρόσβαση στις ενεργειακές αγορές.	[[21], [54]]
Omega Grid	Πρόκειται για μία πλατφόρμα επιβράβευσης βασισμένη στο blockchain, που επιβραβεύει την τοπική και καθαρή ενεργειακή χρήση.	[[21], [55]]
CEDISON	Στο έργο CEDISON αναπτύχθηκε ένα εργαλείο ανάλυσης μέσω έξυπνου εικονικού δικτύου, το οποίο ενσωματώνει το blockchain σαν πλατφόρμα εμπορίας ενέργειας. Δίνεται έμφαση στην τοπική εξισορρόπηση, την ανταπόκριση στη ζήτηση, τις ενεργειακές συναλλαγές, ενώ στόχος είναι η επίλυση όποιων προβλημάτων επισημαίνονται από την τοπική κοινότητα.	[[21], [56]]
Tal.markt	Το συγκεκριμένο έργο στοχεύει να δώσει στους χρήστες γνώση και έλεγχο σχετικά με το ενεργειακό τους μίγμα.	[[21], [57]]
Volt markets	Το έργο αυτό οραματίζεται ένα εντελώς διαφανές, αποτελεσματικό και προσιτό παγκόσμιο δημόσιο marketplace βασισμένο στο Ethereum blockchain, που θα βοηθήσει τις ενεργειακές αγορές στο εξελισσόμενο δίκτυο.	[[21], [58][59]]
Veridium Labs	Το marketplace θα αυτοματοποιήσει τις πιστώσεις εκπομπών και άλλων σχετικών διαδικασιών στις εφοδιαστικές αλυσίδες παγκόσμια.	[[21], [60]]
EcoChain	Στα πλαίσια του συγκεκριμένου έργου μετρίεται το περιβαλλοντολογικό αποτύπωμα των προϊόντων, με σκοπό αυτό να βελτιωθεί.	[[21], [60]]
PowerToShare	Το πιλοτικό έργο στο Πράσινο Χωριό στόχευε στην εφαρμογή της ενεργειακής μετάβασης με επιτεύξιμο και επικερδή τρόπο, δημιουργώντας νέες αγορές και δίνοντας τη δυνατότητα σε μεμονωμένους συμμετέχοντες να αποκτούν ενέργεια, να τη μοιράζονται και να κερδίζουν από αυτή.	[[21], [61]]
Tennet	Για το έργο αυτό χρησιμοποιούνται καινοτόμες λύσεις blockchain σε πιλοτικά έργα σε Γερμανία και Ολλανδία, έτσι ώστε να διευκολυνθεί η ευέλικτη πρόσβαση σε αποκεντρωμένα συστήματα. Η καινοτόμα τεχνολογία επιτρέπει την αποκεντρωμένη ανταλλαγή δεδομένων γρήγορα και με ασφάλεια.	[[21], [62]]
Sunchain	Το έργο Sunchain από την Enedis αφορά την πιστοποίηση της προέλευσης της ενέργειας, τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων και την υποστήριξη έργων ψηφιοποίησης του ενεργειακού τομέα.	[[21], [63]]
STROMDAO	Αυτό το έργο αφορά μία εταιρεία λογισμικού ανοικτού κώδικα, η οποία κατασκευάζει και λειτουργεί ένα δίκτυο blockchain για συναλλαγές σε ενεργειακές αγορές.	[[21], [64]]

Pylon network	Στα πλαίσια αυτού του έργου στόχος είναι η ανάπτυξη ενός πλήρως λειτουργικού αλγόριθμου ανοικτού κώδικα, σχεδιασμένου ειδικά για τις ανάγκες του ενεργειακού τομέα.	[[21], [65]]
Prosume	Πρόκειται για μία πλατφόρμα διαχείρισης ενεργειακών δεδομένων μέσω τεχνολογίας blockchain.	[[21], [66]]
EnerChain	Το συγκεκριμένο έργο είναι μία λύση που αναπτύχθηκε από την Ponton με σκοπό την P2P εμπορία ενέργειας μέσω blockchain.	[[21], [67]]
ElectricChain	Στο έργο αυτό παρέχονται λύσεις βασισμένες στο blockchain και το διαδίκτυο πραγμάτων για έργα σχετικά με την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας και τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.	[[21]]
Blockcharge	Το συγκεκριμένο έργο της RWE και της Slock.it σχετίζεται με την φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων μέσω συστήματος βασισμένο στο blockchain.	[23]
EWT	Το συγκεκριμένο τοπικό token της Energy Web Chain, στηρίζει μέσω του blockchain την ανάπτυξη του ενεργειακού τομέα.	[33]
WPP token	Το συγκεκριμένο τοπικό κρυπτονόμισμα επιτρέπει σε συμμετέχοντες της αγοράς να ανταλλάσσουν ενέργεια και παραγόμενο βιοκαύσιμο.	[33]
MWAT	Το συγκεκριμένο κρυπτονόμισμα λειτουργεί στην πλατφόρμα ETH, η οποία επιτρέπει στους παραγωγούς ενέργειας να μετατρέπουν την ενέργεια σε tokens.	[33]
CHG charg coin	Το συγκεκριμένο τοπικό κρυπτονόμισμα συνδέει την ενέργεια με τα χρήματα χρησιμοποιώντας την ισχύ φορτιζόμενων ηλεκτρικών οχημάτων.	[33]
TSL	Το συγκεκριμένο τοπικό κρυπτονόμισμα αναπτύχθηκε από την Energo και την TESLA και υποστηρίζει P2P εμπορία ενέργειας εφαρμόζοντας την τεχνολογία blockchain σε μικροδίκτυο για αποκεντρωμένη ενεργειακή αυτονομία.	[33]

8.3 Ερωτηματολόγιο για την Εφαρμογή της AHP

Distributed Ledger Technology in the Energy Sector: Evaluating Blockchain Adoption Barriers (Questionnaire)

The following text will guide you to fill a questionnaire, which will help us apply the AHP method to rank the most important barriers of blockchain integration in energy services.

1. Instructions

Blockchain is a very promising new technology with great potential regarding energy applications. However, certain barriers might hinder DLT adoption in the energy field. Through literature review, 24 main barriers have been identified. These barriers have been classified in four categories.

In this questionnaire, you are asked to compare each category and each barrier, to determine which one is more important over the other. The scale used is the following (source: Saaty 1980):

- 1 Equal importance
- 3 Moderate importance of one over another
- 5 Strong or essential importance
- 7 Very strong or demonstrated importance
- 9 Extreme importance
- 2,4,6,8 Intermediate values

For instance, if you think that:

- **Technological** barriers are of extreme importance (9) compared to **Sociopolitical** barriers
- **Legal** barriers and **Technological** barriers are equally important (1)
- **Economic** barriers are of strong importance (5) compared to **Technological** barriers

You will select:

	Other Barriers								Equal	Technological Barriers								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Sociopolitical	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	
Legal	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Economic	☐	☐	☐	☐	☒	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

In section 2, the list of barriers per category is presented. A brief explanation of each barrier is also provided. You can use this list for guidance, while filling the questionnaire.

2. Explanation of Barriers

A. Technological barriers

- 1) **Irreversibility:** Possible errors in the blockchain (i.e., a faulty transaction or smart contract) may not be easily reversible.
- 2) **Limited scalability/poor performance:** As the chain becomes larger, the amount of work required increases. This might cause throughput and latency issues, as well as poor performance.
- 3) **Limited speed/slow query:** Transaction speed in blockchain could be considered low, especially in networks with a large number of nodes. Moreover, blockchain used as a database is regarded as slow, compared to other databases. This problem is due to the orderly chained data structure of blockchain and has been referred to as “slow query” in literature.
- 4) **Fixed block size:** The fact that the blocks have a fixed size could cause problems in a large-scale blockchain system. Request submission speed may surpass block generation speed, which could lead to server congestion, unprocessed requests, responding latency and in a worst-case scenario, denial of service.
- 5) **Storage issues:** Since the record of transactions is saved and copied by all miners, redundant data remains in the chain. This can cause considerable problems in a large network due to the fact that a large amount of data needs to be managed.
- 6) **Energy consumption:** The amount of energy required for PoW is enormous. However, there are less computationally intense consensus mechanisms (i.e., PoS).
- 7) **Lack of practical tests:** Since blockchain is a new technology, not enough practical tests have been conducted to prove that it can effectively be applied in non-financial use cases. More real-life tests might reveal more barriers, which could hinder DLT adoption.
- 8) **Interoperability/unpredictability of external system’s behavior:** The proposed blockchain frameworks for energy applications usually interact with external systems, whose behavior cannot be easily predicted. For example, voltage levels, harmonics, frequency and power flow might change significantly if a blockchain network is implemented in a real distribution system. Jeopardizing the functionality of existing infrastructure in order to integrate DLT could be considered too risky.
- 9) **Fragility of cryptographic mechanisms/deanonymization techniques:** The current encryption protocols might become vulnerable in the future (for instance, a powerful quantum computer might be able to crack blockchain encryption). There are also concerns surrounding the security of keys that are utilized in transaction procedures, because the development of deanonymization techniques has been reported.

- 10) **Cyber-attacks:** Blockchain platforms may be susceptible to cyber-attacks. For example, an attack might aim to change the electricity prices of a blockchain based energy trading system.

B. Sociopolitical barriers

- 1) **Ignorance/lack of knowledge:** Society and political institutions might not be informed enough about DLT. Thus, blockchain might not be used to its full potential.
- 2) **Misconceptions:** The association of bitcoin with illegal activities creates misconceptions regarding blockchain.
- 3) **Lack of trust:** New technologies are often considered inherently untrustworthy.
- 4) **Skepticism (P2P trading):** A non-negligible percentage of potential prosumers might be concerned about the reliability and security of blockchain-based P2P trading frameworks. For example, they might be too nervous to share energy related data, or feel safer if the system is coordinated by an external authority instead of being decentralized.
- 5) **Risk aversion:** Lack of solid understanding of DLT, combined with the absence of related policy, creates uncertainty. Therefore, changing the established business models to enable DLT adoption is considered risky, whereas both society and politicians tend to avoid risk.

C. Economic barriers

- 1) **High initial cost:** As a new and innovative technology, blockchain requires skilled service providers in order to be implemented. Subsequently, initial costs of setup and establishment are quite high.
- 2) **High maintenance cost:** High costs of maintenance is another downside stemmed by the infancy of blockchain.
- 3) **Possible higher transaction cost:** When it comes to whether blockchain will lower or increase transaction costs, researchers have not yet reached consensus. Some argue that the reduction of transaction fees, the curtailment of failed transactions and the removal of control by third parties will result in an overall decrease of the transaction cost. On the other hand, the energy use during transactions may rise, thus increasing the cost.
- 4) **No guaranteed return on investment:** Many companies in the energy sector would still be too hesitant to invest in this technology, because they worry that the margin brought by their investment may be too low.

D. Legal barriers

- 1) **Lack of standards:** There are no legally enforceable standards concerning blockchain, since it is a new technology.
- 2) **GDPR framework:** The compliance of activities in blockchain platforms with the General Data Protection Regulation (GDPR) framework of the European Union (EU) is questionable. Whether the personal information of EU residents could be included and available within smart contracts has not yet been clarified.
- 3) **Policy uncertainty:** Blockchain regulation has not yet been formulated. In certain use cases an intervention by a legislator might be required to resolve a conflict, which might ensue for example by a mistaken energy transaction. However, there is a lack of concrete guidelines for the legislator to follow.
- 4) **Regulatory complexity:** Once formulated, regulation is expected to be quite complex or even considerably different depending on the geographical region. Regulatory complexity could discourage blockchain adoption.
- 5) **Smart contracts:** Whether smart contracts can be considered legally valid is questionable, since the legal enforceability and regulatory compliance of conventional contracts is ensured by the appropriate legal language and terminology. However, smart contracts are written in code. Therefore, determining whether a smart contract meets the specific requirements of a legal contractual agreement is challenging.

Before we start, we would like you to provide us with some information regarding the type of institution you are currently working in, or the position you have in your company.

Compare Barriers in the left column to Technological barriers

	Other Barriers								Equal	Technological Barriers								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Sociopolitical	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Legal	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Economic	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

Compare barriers in the left column to Sociopolitical Barriers

	Other Barriers								Equal	Sociopolitical Barriers							
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Legal	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Economic	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Compare Legal to Economic Barriers

Legal Barriers								Equal	Economic Barriers							
9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Compare Barriers in the left column to Irreversibility

	Other Barriers								Equal	Irreversibility							
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Limited Scalability/Poor Performance	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Limited Speed/Slow Query	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fixed Block Size	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Storage issues	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Energy Consumption	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Lack of practical tests	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Interoperability/unpredictability of external's system behavior	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fragility of cryptographic mechanisms/deanonymization techniques	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Cyber-attacks	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Compare Barriers in the left column to Limited Scalability/Poor Performance

	Other Barriers								Equal	Limited Scalability/Poor Performance							
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Limited Speed/Slow Query	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Storage Issues	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Energy Consumption	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Lack of practical tests	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Interoperability/Unpredictability of external system's behavior	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fragility of cryptographic mechanisms/deanonymization techniques	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Cyber-attacks	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Compare Barriers in the left column to Limited Speed/Slow Query

	Other Barriers								Equal	Limited Speed/Slow Query							
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Storage Issues	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Energy Consumption	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Lack of practical tests	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Interoperability/Unpredictability of external system's behavior	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fragility of cryptographic mechanisms/deanonymization techniques	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Cyber-attacks	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Compare Barriers in the left column to Storage Issues

	Other Barriers								Equal	Storage Issues							
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Energy Consumption	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Lack of practical tests	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Interoperability/Unpredictability of external system's behavior	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fragility of cryptographic mechanisms/deanonymization techniques	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Cyber-attacks	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Compare Barriers in the left column to Energy Consumption

	Other Barriers								Equal	Energy Consumption							
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lack of practical tests	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Interoperability/Unpredictability of external system's behavior	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Fragility of cryptographic mechanisms/deanonymization techniques	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Cyber-attacks	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Compare Barriers in the left column to Lack of practical tests

	Other Barriers								Equal	Lack of practical tests								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Interoperability/Unpredictability of external system's behavior	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Fragility of cryptographic mechanisms/deanonymization techniques	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Cyber-attacks	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

Compare Barriers in the left column to Interoperability/Unpredictability of external system's behavior

	Other Barriers								Equal	Interoperability/Unpredictability of external system's behavior								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Fragility of cryptographic mechanisms/deanonymization techniques	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Cyber-attacks	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

Compare Cyber-attacks to Fragility of cryptographic mechanisms/deanonymization techniques

	Cyber-attacks								Equal	Fragility of cryptographic mechanisms/deanonymization techniques								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

Compare Barriers in the left column to Ignorance/Lack of knowledge

	Other Barriers								Equal	Ignorance/Lack of knowledge								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Misconceptions	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Lack of trust	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Skepticism (P2P trading)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Risk Aversion	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

Compare Barriers in the left column to Misconceptions

	Other Barriers								Equal	Misconceptions							
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lack of trust	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Skepticism (P2P trading)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Risk Aversion	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Compare Barriers in the left column to Lack of trust

	Other Barriers								Equal	Lack of trust							
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Skepticism (P2P trading)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Risk Aversion	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Compare Skepticism (P2P trading) to Risk Aversion

	Skepticism (P2P trading)								Equal	Risk Aversion							
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Compare Barriers in the left column to High initial cost

	Other Barriers								Equal	High initial cost							
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
High maintenance cost	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Possible higher transaction cost	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
No guaranteed return on investment	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Compare Barriers in the left column to High maintenance cost

	Other Barriers								Equal	High maintenance cost								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Possible higher transaction cost	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
No guaranteed return on investment	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

Compare Possible higher transaction cost to No guaranteed return on investment

	Possible higher transaction cost								Equal	No guaranteed return on investment								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

Compare Barriers in the left column to Lack of standards

	Other Barriers								Equal	Lack of standards								
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
GDPR framework	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Policy uncertainty	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Regulatory Complexity	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	
Questionable legal enforceability of smart contracts	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	

Compare Barriers in the left column to GDPR framework

	Other Barriers								Equal	GDPR framework							
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Policy uncertainty	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Regulatory Complexity	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Questionable legal enforceability of smart contracts	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Compare Barriers in the left column to Policy uncertainty

	Other Barriers								Equal	Policy uncertainty							
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Regulatory Complexity	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Questionable legal enforceability of smart contracts	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Compare Regulatory Complexity to Questionable legal enforceability of smart contracts

	Regulatory Complexity								Equal	Questionable legal enforceability of smart contracts							
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

8.4 Βιβλιογραφία Παραρτήματος

- [1] EUBlockchain | Blockchain Applications in the Energy Sector. (n.d.). EUBlockchain. <https://www.eublockchainforum.eu/reports/blockchain-applications-energy-sector>
- [2] Kostov, P. (2019, January 29). INTERFACE - Innovation and Networks Executive Agency - European Commission. Innovation and Networks Executive Agency - European Commission. <https://wayback.archive-it.org/12090/20190615080312/https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects/h2020-energy/grids-storage-energy-systems/interrface>
- [3] Accept Project | Home. (n.d.). Accept Project. <https://www.accept-project.eu/>
- [4] Home | BD4NRG. (n.d.). <https://www.bd4nrg.eu/>
- [5] Bright Project. (2022, April 13). Bright Project. Bright Project - Just Another WordPress Site. <https://www.brightproject.eu/>
- [6] Coordinet Project. (n.d.). <https://coordinet-project.eu/>
- [7] BD4OPEM - Big Data for Open Innovation Energy Marketplace. (n.d.). <https://bd4opem.eu/>
- [8] Flexible Energy Production, Demand and Storage-based Virtual Power Plants for Electricity Markets and Resilient DSO Operation | FEVER. (n.d.). Flexible Energy Production, Demand and Storage-based Virtual Power Plants for Electricity Markets and Resilient DSO Operation. <https://fever-h2020.eu/>
- [9] TwinERGY | #DigitalTwin. (n.d.). TwinErgy. <https://www.twinergy.eu/>
- [10] Sender H2020 | Enhance consumer engagement in demand response mechanisms. (2023, June 15). <https://www.sender-h2020.eu/>
- [11] Hsu. (n.d.). Startschuss für Peer-to-Peer Energiehandel auf Blockchain-Basis - Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg. Helmut-Schmidt-Universität / Universität Der Bundeswehr Hamburg. <https://www.hsu-hh.de/startschuss-fuer-peer-to-peer-energiehandel-auf-blockchain-basis>
- [12] AdminHestia. (2021, April 30). Home - HESTIA. HESTIA. <https://hestia-eu.com/>
- [13] IANOS. (2023, March 29). Homepage - IANOS. <https://ianos.eu/>
- [14] Interconnect. (2023, May 11). Interconnect Project - Homepage. <https://interconnectproject.eu/>
- [15] Parity H2020 - Parity H2020. (n.d.). <https://parity-h2020.eu/>
- [16] PHOENIX-H2020. (2021, August 23). Home - PHOENIX - H2020. PHOENIX - H2020. <https://phoenix-h2020.eu/>
- [17] Platone - WELCOME TO PLATONE - Platform for Operation of Distribution Networks. (n.d.). Platone - Platform for Operation of Distribution Networks. <https://www.platone-h2020.eu/>
- [18] ROBINSON. (2021, February 17). ROBINSON - Robinson. Robinson. <https://www.robinson-h2020.eu/>
- [19] Home - Trinity. (2020, December 4). Trinity. <http://trinityh2020.eu/>
- [20] Project. (n.d.). <https://vpp4islands.eu/index.php/project/>
- [21] Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., Abram, S., Geach, D., Jenkins, D., ... & Peacock, A. (2019). Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities. Renewable and sustainable energy reviews, 100, 143-174.
- [22] Powerpeers - 100% groene stroom delen met anderen. (n.d.). Powerpeers. <https://www.powerpeers.nl/>

- [23] Blockchain - an opportunity for energy producers and consumers? - PWC. (n.d.-a). <https://www.pwc.com/gx/en/industries/assets/pwc-blockchain-opportunity-for-energy-producers-and-consumers.pdf>
- [24] Exergy. (n.d.). Exergy. <https://exergyenergy.wordpress.com/>
- [25] Brooklyn Microgrid | Community Powered Energy. (n.d.). Brooklyn Microgrid. <https://www.brooklyn.energy/>
- [26] SolarCoin. (n.d.). SolarCoin. <https://solarcoin.org/>
- [27] Rewarding Energy Saving Behaviour. (2020, March 26). Rewarding Energy Saving Behaviour. <https://energitoken.com/>
- [28] Marinakis, V., Nikolopoulou, C., & Doukas, H. (2018, March). Digitizing energy savings in sustainable smart cities: Introducing a virtual energy-currency approach. In *2018 IEEE international conference on pervasive computing and communications workshops (PerCom workshops)* (pp. 203-208). IEEE.
- [29] About | ATOM. (n.d.). <https://www.atomcoin.gr/about>
- [30] WePower. (2022, March 16). WePower - Medium. Medium. <https://medium.com/wepower>
- [31] NRGcoin. (n.d.). NRGcoin | Smart Contract for green energy. <https://nrgcoin.org/>
- [32] Exchange, S. (n.d.). EARN WITH PURPOSE | The Sun Exchange. The Sun Exchange. <https://thesunexchange.com/>
- [33] MARCHEWKA-BARTKOWIAK, K., & WIŚNIEWSKI, M. (2022). Climate-aligned Tokens as Instruments of Climate Change Financing and Investment-the Case of Energy Tokens. *Fostering Recovery through Metaverse Business Modelling*, 228.
- [34] Efforce. (n.d.). Energy Efficiency. Reinvented. EFFORCE. <https://efforce.io/>
- [35] SunContract. (2023, April 21). Electricity Marketplace for P2P energy trading - SunContract. <https://suncontract.org/>
- [36] Greeneum. (n.d.). Greeneum. <https://www.greeneum.net/>
- [37] Powerledger Energy Projects. (n.d.). <https://www.powerledger.io/>
- [38] Blockchain Solar Asset Staking - ASTRN ENERGY. (2021, February 24). ASTRN ENERGY. <https://astrn.com/>
- [39] The ECO coin: A Sustainable currency for Planet Earth. (n.d.). <https://www.eco-coin.com/>
- [40] EnLedger Asset & Tech Trust. (n.d.). <https://www.enledger.io/>
- [41] EverGreenCoin Foundation, Inc. (2023, June 17). EverGreenCoin - Environmental Green Causes, nurtured by cryptocurrency. EverGreenCoin. <https://evergreen-coin.org/>
- [42] Green Energy Wallet | VentureRadar. (n.d.). <https://www.ventureradar.com/organisation/Green%20Energy%20Wallet/4cfc7c00-0a26-432b-8cde-efc39d35df3e>
- [43] Spectral. (n.d.). Jouliette @ De Ceuvel. <https://www.jouliette.net/>
- [44] Impact PPA | The decentralized energy platform. (n.d.). <https://www.impactppa.com/>
- [45] Solar DAO. (n.d.). <https://solardao.me/>
- [46] Bittwatt price today, BWT to USD live price, marketcap and chart | CoinMarketCap. (n.d.). CoinMarketCap. <https://coinmarketcap.com/currencies/bittwatt/>
- [47] ZF Spins off Car eWallet as a Start-up. (2019, August 26). ZF. https://press.zf.com/press/en/releases/release_2952.html
- [48] CarbonX. (n.d.). CarbonX. <https://www.carbonx.ca/>
- [49] Clearwatts - Climate-KIC. (2017, March 17). Climate-KIC. <https://www.climate-kic.org/start-ups/clearwatts/>
- [50] DAO "Integral Platform for Climate Initiatives." (n.d.). <https://ipci.io/>

- [51] Electron. (2023, June 30). Electron | The Marketplace Tool for Flexible Energy Grids. <https://electron.net/>
- [52] TEO The Energy Origin. (n.d.). <https://theenergyorigin.com/>
- [53] Everty. (2023, April 13). EV Charging Australia: EV Charging Management | Everty. <https://everty.com.au/>
- [54] GridPlus. (n.d.). GridPlus. <https://gridplus.io/>
- [55] Omega Grid : Blockchain Energy Rewards Platform. (n.d.). Omega Grid : Blockchain Energy Rewards Platform. <https://www.omegagrid.com/>
- [56] CEDISON | IES R&D. (n.d.). <https://www.iesve.com/research/intelligent-communities/cedison>
- [57] Privatkunden: Wuppertaler Stadtwerke. (n.d.). <https://www.wsw-online.de/wsw-energie-wasser/privatkunden/>
- [58] Blockchain - Volt Markets. (n.d.). Volt Markets. <https://voltmarkets.com/blockchain/>
- [59] Veridium Labs: The Natural Capital Marketplace. (n.d.). <https://www.veridium.io/>
- [60] LCA Software for Product Footprint calculations. (2023, July 7). Ecochain - LCA Software Company. <https://ecochain.com/>
- [61] Sabine. (2021, February 22). TOBLOCKCHAIN - The Green Village. The Green Village. <https://www.thegreenvillage.org/project/toblockchain/>
- [62] Crowd Balancing Platform - Blockchain Technology. (n.d.). TenneT. <https://www.tennet.eu/about-tennet/innovations/crowd-balancing-platform-blockchain-technology>
- [63] Sunchain. (n.d.). <https://www.sunchain.fr/>
- [64] STROMDAO GmbH. (2023, August 7). STROMDAO GmbH. <https://www.stromdao.de/>
- [65] Pylon Network. (n.d.). TOGETHER WE'LL SHINE BRIGHTER. <https://pylon.network/>
- [66] Giovanni. (2022, December 27). Prosume | Decentralizing Power. PROSUME S.r.l. <https://prosume.io/>
- [67] Merz, M. (n.d.). Enerchain - Decentrally Traded Decentral Energy. <https://enerchain.ponton.de/>