



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

**Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών**  
**«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»**

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – [epminfo@power.ece.ntua.gr](mailto:epminfo@power.ece.ntua.gr)

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**  
**BLOCKCHAIN ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ**

**Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας**

Σιδηρά Μαρία-Φωτεινή

**Επιβλέπων**

**Χατζηαργυρίου Ν, Καθηγητής, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και**  
**Μηχανικών Υπολογιστών**

Αθήνα, Οκτώβριος 2022



## Περιεχόμενα

Σύνοψη .....	7
Περίληψη.....	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	13
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	13
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ .....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1° ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
1.1 Παρουσίαση Θέματος.....	15
1.2 Δομή Εργασίας .....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2° ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Κεντρική Παραγωγή Ενέργειας.....	17
2.3 Ευφυή Δίκτυα .....	18
2.4 Μικροδίκτυα.....	20
2.5 Συστατικά Στοιχεία Ευφών Δικτύων – Μικροδικτύων .....	21
2.5.1 Διεσπαρμένη Παραγωγή.....	22
2.5.2 Αποθήκευση.....	24
2.5.3 Διαχείριση Ζήτησης.....	25
2.5.4 Επικοινωνία.....	26
2.5.5 Συμμετέχοντες.....	27
2.5.6 Έλεγχος.....	29
2.5.7 Έξυπνοι Μετρητές – Ελεγκτές.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ BLOCKCHAIN .....	31
3.1 Εισαγωγή.....	31
3.2 Στοιχειώδεις έννοιες του Blockchain .....	32
3.2.1 Peer-to-Peer networking .....	32
3.2.2 Κρυπτογραφία.....	32
3.2.3 Συναρτήσεις κατακερματισμού και Merkle Trees.....	35
3.3 Bitcoin – Ethereum – Κρυπτονομίσματα - Tokens .....	36
3.4 Δομή και Λειτουργία Blockchain.....	39
3.4.1 Αρχιτεκτονική Blockchain.....	40
3.4.2 Λειτουργική Δομή του Blockchain.....	42
3.5 Συναίνεση .....	43
3.6 Συμμετέχοντες στο Blockchain .....	45
3.7 Έξυπνα Συμβόλαια .....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ BLOCKCHAIN ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ...50	

4.1 Εισαγωγή .....	50
4.2 Ενεργειακές Αγορές .....	50
4.3 Διαχείριση Ενεργειακών συστημάτων .....	61
4.4 Μικροδίκτυα.....	72
4.5 Αποθήκευση και Ηλεκτρικά Οχήματα .....	83
4.6 Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών Άνθρακα και Πράσινα Πιστοποιητικά.....	94
4.7 Εφαρμογές του Blockchain στη Βιομηχανία της Ενέργειας .....	101
4.8 Ερευνητικά Έργα που τρέχουν σήμερα.....	107
4.9 Θεσμικό και νομοθετικό πλαίσιο, υφιστάμενη κατάσταση και προτάσεις χάραξης πολιτικής στην εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain .....	109
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	112
5.1 Οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στον τομέα της ενέργειας.....	112
5.2 Προκλήσεις στην εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στον τομέα της ενέργειας .....	113
Βιβλιογραφία.....	117

## **Ευχαριστίες**

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Νικόλαο Χατζηαργυρίου, καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ και επιβλέποντα καθηγητή αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας, ο οποίος μου έδωσε τη δυνατότητα να καταπιαστώ με ένα τόσο επίκαιρο και ενδιαφέρον θέμα.

Ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αντζελίνα Σύρρη για την πολύτιμη βοήθεια, κατανόηση, και καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Ο χρόνος και οι συμβουλές που μου προσέφερε ήταν καθοριστικές για την περάτωση αυτής της εργασίας.

Στους Ανθρώπους μου

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: Εφαρμογές της τεχνολογίας Blockchain στην ενέργεια  
ΦΟΙΤΗΤΗΣ: Σιδηρά Μαρία-Φωτεινή  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Χατζηαργυρίου Ν., Καθηγητής, Σχολή Ηλεκτρολόγων  
Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ: 2020-2022

## Σύνοψη

Ο ενεργειακός τομέας μεταβαίνει σε μία νέα εποχή και μετασχηματίζεται από τη συμβατική μορφή που τον χαρακτηρίζει εδώ και δεκαετίες. Νέες τεχνολογίες, νέοι συμμετέχοντες, καινοτόμοι τρόποι διαχείρισης των συνεχώς αυξανόμενων απαιτήσεων, είναι μόνο μερικοί από τους τομείς που αλλάζουν. Η έλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η ανάγκη μετασχηματισμού τόσο της δομής του δικτύου όσο και του τρόπου διαχείρισης του, σε συνδυασμό με την αύξηση των συμμετεχόντων στη αγορά της ενέργειας, αλλά και των υποχρεώσεων των κρατών για περιορισμό των εκπομπών άνθρακα, δημιουργούν την απαίτηση επαναξιολόγησης του τρόπου λειτουργίας του ενεργειακού τομέα. Η τεχνολογία Blockchain, ευρέως γνωστή από το Bitcoin, έρχεται να αποτελέσει ένα εργαλείο που είναι πολύ πιθανό να προσφέρει λύση σε προβλήματα που προκύπτουν από το μετασχηματισμό του ενεργειακού τομέα, αξιοποιώντας ήδη θεμελιωμένες τεχνολογίες. Στην παρούσα εργασία γίνεται παρουσίαση της τεχνολογίας Blockchain τόσο σε δομικό όσο και σε λειτουργικό επίπεδο, καθώς και πιθανά σενάρια εφαρμογής της σε τομείς της ενέργειας. Παράλληλα αναλύονται περιπτώσεις χρήσης της τεχνολογίας, και παρουσιάζονται πιλοτικά προγράμματα που την αξιοποιούν. Στόχος είναι να γίνει αντιληπτή η πιθανότητα εφαρμογής της στον ενεργειακό κλάδο, αξιολογώντας τα οφέλη αλλά και τους κινδύνους που πρέπει να ξεπεραστούν έως την πιθανή καθολική εφαρμογή της.

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια η σύσταση των συμβατικών δικτύων ενέργειας που χαρακτηρίζονται από κεντρική παραγωγή ενέργειας, απομακρυσμένη από την κατανάλωση, σταδιακά μεταβάλλεται. Η διείσδυση της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές μεταβάλλει σημαντικά το τοπίο, φέρνοντας την παραγωγή κοντά στην κατανάλωση, ως αποτέλεσμα της απαίτησης για καθαρότερη ενέργεια, δημιουργώντας έτσι την ανάγκη για αποτελεσματικότερη διαχείριση. Τα νέα είδη δικτύων που σταδιακά διαμορφώνονται, ενσωματώνουν τεχνολογίες επικοινωνίας και πληροφοριών στις υποδομές ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, στοχεύοντας στην βελτίωση της λειτουργίας του δικτύου, με γνώμονα την αξιόπιστη και αδιάκοπη παραγωγή ενέργειας που καταλήγει με ασφάλεια στους τελικούς χρήστες. Η μεταβολή του ενεργειακού τομέα προκύπτει από ένα πλήθος παραγόντων όπως οι συμμετέχοντες (παραγωγούς, καταναλωτές, prosumers), οι τεχνολογίες (δισπαρμένη παραγωγή ενέργειας, συστήματα αποθήκευσης, έξυπνοι μετρητές, ηλεκτρικά οχήματα), και κυρίως από την συνεχώς αυξανόμενη απαίτηση για περιορισμό των εκπομπών άνθρακα, ενσωματώνοντας παραγωγή από ΑΠΕ στα δίκτυα, που να συμβαδίζει με τις τεχνικές και λειτουργικές απαιτήσεις του δικτύου, ικανοποιώντας τις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των φορτίων. Τα ευφυή δίκτυα και τα μικροδίκτυα ενσωματώνουν τεχνολογίες ελέγχου, αποθήκευσης και επικοινωνίας, επιδιώκοντας τη διαχείριση της ζήτησης των καταναλωτών.

Η παρούσα εργασία επιδιώκει να παρουσιάσει τον τρόπο με τον οποίο η μετάβαση των ενεργειακών συστημάτων σε μία νέα εποχή μπορεί να διευκολυνθεί, αξιοποιώντας μία νέα τεχνολογία, το Blockchain. Το Blockchain είναι μία ταχέως αναπτυσσόμενη ψηφιακή τεχνολογία που συνδυάζει κρυπτογραφία, μηχανισμούς διαχείρισης δεδομένων, δίκτυα και μηχανισμούς κινήτρων για την εκτέλεση, τον έλεγχο και την καταγραφή αποκεντρωμένων συναλλαγών μεταξύ μερών. Ο όρος συναλλαγή αναφέρεται σε συντονισμό διαδικασιών, πληρωμών, εκτέλεση συμβολαίων κ.ά., οι οποίες εκτελούνται παραδοσιακά υπό την εποπτεία ενός τρίτου αξιόπιστου μέρους. Το Blockchain παρέχει ένα διαφορετικό τρόπο υποστήριξης των συναλλαγών, όπου η εμπιστοσύνη δεν διασφαλίζεται από το τρίτο μέρος, αλλά από τις συλλογική λειτουργία του Blockchain και την ορθότητα της λειτουργίας του. Ως δομή το Blockchain είναι μία λίστα μπλοκ που συνδέονται μεταξύ τους, και κάθε μπλοκ περιέχει μία λίστα συναλλαγών. Η κρυπτογραφία και οι μηχανισμοί κατακερματισμού που αξιοποιούνται στη δομή διασφαλίζουν την αμεταβλητότητα και την ασφάλεια των δεδομένων που είναι αποθηκευμένα στο Blockchain. Η πραγματοποίηση των συναλλαγών χωρίς την ανάγκη ύπαρξης ρυθμιστικής αρχής επιτυγχάνεται με την ύπαρξη μηχανισμών συναίνεσης που διασφαλίζουν την εγκυρότητα των συναλλαγών. Βασικός παράγοντας κατά το σχεδιασμό ενός συστήματος Blockchain είναι τα δικαιώματα των χρηστών επί του συστήματος (δικαίωμα συμμετοχής, εγγραφής, επικύρωσης συναλλαγών κ.ά.). Ανάλογα με τον τύπο του συστήματος που αναπτύσσεται επιλέγεται διαφορετικός μηχανισμός συναίνεσης και διαφορετικά δικαιώματα για τους συμμετέχοντες. Ταυτόχρονα ένα στοιχείο του Blockchain που ενίσχυσε την αξιοποίηση του σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένου του ενεργειακού τομέα, είναι τα έξυπνα συμβόλαια που αναπτύσσονται μέσα στη δομή Blockchain. Πρόκειται ουσιαστικά για προγράμματα που αναπτύσσονται και εκτελούνται μέσα στο σύστημα, υπό συνθήκες που καθορίζονται κατά το σχεδιασμό. Πολλές εφαρμογές της τεχνολογίας Blockchain στηρίζονται στην ύπαρξη των έξυπνων συμβολαίων, και η ανάπτυξη τους είναι δυνατή αποκλειστικά χάρη σε αυτά.

Στόχος της εργασίας είναι να αξιολογηθεί η εφαρμογή της νέας τεχνολογίας Blockchain στον ταχέως μεταβαλλόμενο ενεργειακό τομέα. Αυτό πραγματοποιείται μέσα από την ανασκόπηση μία σειράς ερευνητικών δημοσιεύσεων, άρθρων και μελετών που προτείνουν μηχανισμούς και εφαρμογές που ενσωματώνουν το Blockchain σε διάφορους τομείς της ενέργειας. Έχουν επιλεγεί έξι τομείς στους οποίους διερευνάται η συμπόρευση θεμελιωμένων πρακτικών, τεχνολογιών και μηχανισμών με την τεχνολογία Blockchain. Αρχικά παρουσιάζονται μελέτες στον τομέα των ενεργειακών αγορών που ενσωματώνουν την τεχνολογία Blockchain στη δημιουργία P2P αγορών στις οποίες εφαρμόζονται έξυπνα συμβόλαια, μηχανισμοί δημοπρασίας και ψηφιακά νομίσματα. Στόχος είναι η παρουσίαση μοντέλων αποκεντρωμένων αγορών, για την αυτοματοποιημένη συναλλαγή ενέργειας σε επίπεδο ευφυών δικτύων και μικροδικτύων, χωρίς την απαίτηση παρουσίας και συνεργασίας μεσαζόντων όπως χρηματιστήριο ενέργειας, ρυθμιστικές αρχές, τράπεζες κ.ά. Ταυτόχρονα ενισχύεται η συμμετοχή δισπαρμένων παραγωγών ενέργειας μικρής κλίμακας στην αγορά ενέργειας, γεγονός που έως σήμερα συνοδευόταν από σημαντικά κόστη, που καθιστούν τη συμμετοχή απαγορευτική. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μελέτες που σχετίζονται με την αξιοποίηση της τεχνολογίας Blockchain στη διαχείριση των δικτύων ενέργειας και των μικροδικτύων. Παρουσιάζονται μοντέλα που ενσωματώνουν τα έξυπνα συμβόλαια, αξιοποιώντας στοιχεία του δικτύου όπως οι έξυπνοι μετρητές, για τον καλύτερο έλεγχο και διαχείριση του συστήματος, ενώ παράλληλα προτείνονται μέθοδοι διαχείρισης της ζήτησης των καταναλωτών και εκτέλεσης προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης πάνω σε συστήματα Blockchain. Η τεχνολογία Blockchain είναι ιδανική για την υποστήριξη συστημάτων αμφίδρομης ανταλλαγής πληροφοριών για την βέλτιστη διαχείριση, εποπτεία και έλεγχο του συστήματος, με γνώμονα την ασφάλεια και την ανωνυμία των συμμετεχόντων. Έπειτα παρουσιάζονται δημοσιεύσεις που προσδιορίζουν τρόπους αξιοποίησης του Blockchain στη διαχείριση αποθηκευτικών μέσων και φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Προτείνονται μέθοδοι εφαρμογής της τεχνολογίας σε συστήματα αποθήκευσης, για τη διαχείριση της φόρτισης τόσο των μονάδων όσο και των ηλεκτρικών οχημάτων, αλλά και για το χρονοπρογραμματισμό φόρτισης από σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.



Τέλος αξιολογείται μέσα από μελέτες, η εφαρμογή του Blockchain στον τομέα της εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών, πράσινων πιστοποιητικών και εγγυήσεων προέλευσης. Επιδιώκεται να παρουσιαστεί η ενίσχυση της διαφάνειας σε αυτού του τύπου συναλλαγές με την αξιοποίηση της νέας τεχνολογίας.

Προκειμένου να ενισχυθεί η θέση σχετικά με την αξιοποίηση της τεχνολογίας Blockchain στον ενεργειακό τομέα, παρουσιάζονται μία σειρά από εμπορικές εφαρμογές και πλατφόρμες που έχουν αναπτυχθεί από εταιρίες που δραστηριοποιούνται στον κλάδο της ενέργειας, καθώς και πιλοτικά έργα που λειτουργούν ή αναπτύσσονται από ερευνητικές ομάδες τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Τέλος, παρουσιάζονται μια σειρά προκλήσεων και κινδύνων που πρέπει να αξιολογηθούν και να υπερνικηθούν, πριν τη θεμελίωση της τεχνολογίας Blockchain, ως εργαλείο που θα αξιοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα κλάδων του ενεργειακού τομέα, παρά την πληθώρα πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει η νέα τεχνολογία.

**Λέξεις Κλειδιά:** Blockchain, Έξυπνα Συμβόλαια, Αλγόριθμοι Συναίνεσης, Κρυπτονομίσματα, Ενεργειακά Συστήματα, Διαχείριση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, Απόκριση Ζήτησης, Ενεργειακές Αγορές, Μικροδίκτυα, Ηλεκτρικά Οχήματα, Αποθήκευση, Πράσινα Πιστοποιητικά

POST-GRADUATE THESIS: Blockchain in Energy Systems  
STUDENT: Sidira Maria-Foteini  
SUPERVISOR: Hatziargyriou N, Professor, School of Electrical and Computer Engineering  
ACADEMIC YEAR: 2020-2022

### **Abstract**

The energy sector is moving into a new era and is being transformed from the conventional form that has characterized it for decades. New technologies, new participants, innovative ways to manage ever-increasing demands, are just some of the areas that are changing. Constantly increasing integration of renewable energy sources and the need to transform both the structure of the network and the way it is managed, combined with the increase of participants in the energy market, as well as the obligations of states to limit carbon emissions, create the requirement for re-evaluation of the functioning of the energy sector. Blockchain technology, popularly known by Bitcoin, is coming to be a tool that is very likely to offer a solution to problems arising from the transformation of the energy sector, utilizing already established technologies. In the present thesis, Blockchain technology is presented both at a structural and functional level, as well as possible scenarios of its application in energy sectors. At the same time, use cases of the technology are analyzed, and pilot programs that make use of the technology are presented. The aim is to realize the possibility of its application in the energy sector, evaluating the benefits but also the risks that must be overcome until its possible universal application.

## Summary

In recent years, the composition of conventional power grids, characterized by centralized power generation remote from consumption, has been gradually changing. The penetration of renewable energy production is significantly changing the landscape, bringing production closer to consumption because of the demand for cleaner energy, thus creating the need for more efficient management. The new types of networks that are gradually being developed incorporate communication and information technologies into the electricity infrastructure, aiming to improve the operation of the network, with a view to ensuring reliable and uninterrupted energy production that reaches end users safely. The transformation of the energy sector is driven by several factors such as the participants (producers, consumers, prosumers), the technologies (distributed generation, storage systems, smart meters, electric vehicles), and above all by the ever-increasing requirement to reduce carbon emissions by integrating renewable generation into the networks, in line with the technical and operational requirements of the grid, meeting the ever-increasing demands of cargo. Smart grids and microgrids integrate control, storage, and communication technologies, seeking to manage consumer demand.

This paper seeks to present how the transition of energy systems to a new era can be facilitated by utilizing a new technology, Blockchain. Blockchain is a rapidly developing digital technology that combines cryptography, data management mechanisms, networks, and incentive mechanisms to execute, control and record decentralized transactions between parties. The term transaction refers to the coordination of processes, payments, execution of contracts, etc., which are traditionally performed under the supervision of a third trusted party. The Blockchain provides a different way of supporting transactions, where trust is not ensured by the third party, but by the collective operation of the Blockchain and the correctness of its operation. As a structure the Blockchain is a list of blocks that are connected to each other, and each block contains a list of transactions. The cryptography and hashing mechanisms used in the structure ensure the immutability and security of the data stored in the structure. The realization of transactions without the need for a regulatory authority is achieved through the existence of consent mechanisms that ensure the validity of transactions. A key factor in the design of a Blockchain system is the rights of users on the system (right to participate, register, validate transactions, etc.). Depending on the type of system being developed, a different consent mechanism and different rights for participants are chosen. At the same time an element of Blockchain that has enhanced its utilization in a wide range of applications, including the energy sector, is smart contracts developed within the Blockchain structure. These are essentially programs that are developed and executed within the system, under conditions specified during design. Many applications of Blockchain technology rely on the existence of smart contracts, and their development is possible solely thanks to them.

The aim of the paper is to evaluate the application of the new Blockchain technology in the rapidly changing energy sector. This is done through a review of a series of research publications, articles and studies that propose mechanisms and applications that integrate Blockchain in various energy sectors. Six areas have been selected in which the confluence of established practices, technologies, and mechanisms with Blockchain technology is explored. Firstly, studies in the field of energy markets that integrate Blockchain technology in the creation of P2P markets in which smart contracts, auction mechanisms and digital currencies are applied. The aim is to present models of decentralized markets for automated energy trading at the level of smart grids and microgrids, without requiring the presence and cooperation of intermediaries such as energy exchanges, regulators, banks, etc. At the same time, the participation of dispersed small-scale energy producers in the energy market is enhanced, which until now has been accompanied by significant costs, making participation prohibitive. In the following, studies related to the use of Blockchain technology in the management of energy networks and microgrids are presented. Models are presented that incorporate smart contracts, utilizing network elements such as smart meters, for better control and management of the system, while methods for managing consumer demand and executing demand response programs on top of Blockchain systems are proposed. Blockchain technology is ideal for supporting two-way information exchange systems for optimal management, supervision, and control of the system, with security and anonymity of the participants in mind. Next, publications are presented that identify ways of utilizing Blockchain in the management of storage media and electric vehicle charging. Methods of applying the technology to storage systems, for managing the charging of both units and electric vehicles, and for scheduling charging from electric vehicle charging stations are proposed. Finally, the application of Blockchain in the field of emissions trading, green certificates and guarantees of origin is evaluated through studies. The aim is to demonstrate the enhancement of transparency in this type of transactions by using new technology.

In order to strengthen the position on the use of Blockchain technology in the energy sector, several commercial applications and platforms developed by companies active in the energy sector are presented, as well as pilot projects operating or being developed by research groups both at European and global level. Finally, a series of challenges and risks are presented that need to be evaluated and overcome before the establishment of Blockchain technology as a tool

to be used in a wide range of energy sector industries, despite the abundance of advantages that the new technology presents

**Keywords:** Blockchain, Smart Contract, Consensus Algorithm, Cryptocurrency, Power System, Management of Electric Systems, Demand Response, Energy markets, Microgrids, Electric Vehicles, Energy Storage System, Green Certificates

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

- Πίνακας 1: Σύνοψη χαρακτηριστικών τοπολογιών Blockchain  
Πίνακας 2: Σύνοψη δημοσιεύσεων ενεργειακών αγορών  
Πίνακας 3: Σύγκριση συμβατικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας και συστήματος διαχείρισης ενέργειας με Blockchain  
Πίνακας 4: Σύνοψη δημοσιεύσεων διαχείρισης ενεργειακών συστημάτων  
Πίνακας 5: Μηχανισμός κινήτρων τιμολόγησης ενέργειας  
Πίνακας 6: Σύνοψη δημοσιεύσεων μικροδικτύων  
Πίνακας 7: Σύνοψη δημοσιεύσεων αποθήκευσης και ηλεκτρικών οχημάτων  
Πίνακας 8: Σύνοψη δημοσιεύσεων συστημάτων εμπορίας εκπομπών άνθρακα και πράσινων πιστοποιητικών

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

- Σχήμα 2.1. Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας  
Σχήμα 2.2. Τυπική δομή ευφυούς δικτύου  
Σχήμα 2.3. Βασικοί τομείς έξυπνου δικτύου  
Σχήμα 2.4. Κατανεμημένο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας  
Σχήμα 3.1. Δομή Bitcoin  
Σχήμα 3.2. Δομή Ethereum Blockchain  
Σχήμα 3.3. Γενική δομή Blockchain  
Σχήμα 3.4. Λειτουργική δομή Blockchain  
Σχήμα 3.5. Επισκόπηση του Blockchain  
Σχήμα 3.6. Απλοποιημένη διάγραμμα κύκλου συναλλαγών  
Σχήμα 3.7. Κατηγοριοποίηση Blockchain βάσει δικαιωμάτων συμμετοχής  
Σχήμα 4.1. Διαδικασίες και συμμετέχοντες σε τυπικές συναλλαγές ενεργειακών αγορών  
Σχήμα 4.2. Μετασχηματισμός ενεργειακών αγορών με την εισαγωγή του Blockchain  
Σχήμα 4.3. Προτεινόμενα μοντέλα δημοσίευσης [44]  
Σχήμα 4.4. Απεικόνιση προτεινόμενου συστήματος δημοσίευσης [49]  
Σχήμα 4.5. Απεικόνιση προτεινόμενου συστήματος δημοσίευσης [53]  
Σχήμα 4.6. Σύστημα αποκεντρωμένης εφαρμογής με βάση το Blockchain για την επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής  
Σχήμα 4.7.α. Επισκόπηση δομής έξυπνου σπιτιού σε ένα ιδιωτικό δίκτυο Blockchain  
Σχήμα 4.7.β. Διαδικασία συναλλαγής ενέργειας  
Σχήμα 4.8. Δομή συστήματος πολυμικροδικτύων  
Σχήμα 4.9. Διάγραμμα ροής P2P συναλλαγών δημοσίευσης [52]  
Σχήμα 4.10. Διάγραμμα ροής αποκεντρωμένης διαχείρισης δημοσίευσης [59]  
Σχήμα 4.11. Διάγραμμα ροής έξυπνου συμβολαίου  
Σχήμα 4.12. Διάγραμμα επιλογής σταθμού φόρτισης  
Σχήμα 4.13. Αγορά φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων  
Σχήμα 4.14. Απεικόνιση συστήματος δημοσίευσης [48]  
Σχήμα 4.15. Απεικόνιση συστήματος δημοσίευσης [54]  
Σχήμα 4.16. Επίδραση τιμής προσφοράς του πωλητή και της φήμης στην ορατότητα και την προτεραιότητα  
Σχήμα 4.17. Αρχιτεκτονική συστήματος εργασίας [63]  
Σχήμα 4.18. Πρωτοβουλίες Εφαρμογών Blockchain σε παγκόσμιο επίπεδο

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΣΗΕ	Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΧΤ	Χαμηλή Τάση
ΜΤ	Μέση Τάση
ΥΤ	Υψηλή Τάση
Φ/Β	Φωτοβολταϊκά
Α/Γ	Ανεμογεννήτριες
ΣΗΘ	Συμπαγωγή Ηλεκτρισμού Θερμότητας
ΔΠ	Διεσπαρμένη Παραγωγή
P2P	Peer to Peer
BTC	Bitcoin
DApp	Distributed Application
PoW	Proof of Work
PoS	Proof of Stake
PoAu	Proof of Authority
BFT	Byzantine Fault Tolerance
PBFT	Practical Byzantine Fault Tolerance
CDA	Continuous Double Auction
ΦοΣΕ	Φορείς Σωρευτικής Εκπροσώπισης
PDR	Proxy Demand Resources
CAISO	California Independent System Operator
AI	Artificial Intelligence
IoT	Internet of Things
MMGS	Multi-Microgrid System
SoC	State-of-Charge
TCC	Time-to-complete-charge
M2V	Mobile charging Vehicle-to-Vehicle
V2V	Vehicle-to-Vehicle
G2V	Grid-to-Vehicle
CS	Charging Station
ΣΕΔΕ	Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών
GoO	Guarantee of Origin
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΗΠΑ	Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
BLOSEM	Blockchain for Optimized Security and Energy Management

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Παρουσίαση Θέματος

Η δομή και η λειτουργία των σημερινών κεντρικών συμβατικών συστημάτων ενέργειας, έχει ήδη αρχίσει να μεταβαίνει σε μία πιο αποκεντρωμένη δομή. Η διείσδυση των μονάδων παραγωγής από ΑΠΕ, σε συνδυασμό με τις νέες τεχνολογίες παρακολούθησης και ελέγχου των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργούν την ανάγκη επαναπροσδιορισμού του τρόπου λειτουργίας των σημερινών συστημάτων. Δομικό εργαλείο για αυτή τη μετάβαση μπορεί να αποτελέσει η τεχνολογία Blockchain. Το Blockchain είναι μια δομή (ledger) κατανεμημένων συναλλαγών, ομαδοποιημένες κατά μπλοκ και συνδεδεμένες μεταξύ τους, σε ένα αποκεντρωμένο δίκτυο χωρίς εμπιστοσύνη. Η ασφάλεια των συναλλαγών σε ένα δίκτυο Blockchain προκύπτει από μηχανισμούς κρυπτογράφησης και συναίνεσης. Πρώτη φορά εισήχθη ως η τεχνολογία υποστήριξης τους κρυπτονομίσματος Bitcoin, και έκτοτε έχει συγκεντρώσει τεράστιο ενδιαφέρον και διερευνάται συστηματικά η εφαρμογή του σε πλήθος επιχειρηματικών τομέων (οικονομία, εφοδιαστικές αλυσίδες κ.ά.), συμπεριλαμβανομένου του ενεργειακού τομέα.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση της αναδυόμενης τεχνολογίας και η αποσαφήνιση της δυνατότητας εφαρμογής της στον τομέα της ενέργειας, παρουσιάζοντας μία σειρά δημοσιεύσεων που χρησιμοποιούν το Blockchain ως το μέσο δημιουργίας νέων μοντέλων και επίλυσης ζητημάτων της ενέργειας. Ταυτόχρονα επιδιώκεται η ενίσχυση της θέσης για εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στην ενέργεια μέσα από την παρουσίαση μίας σειράς εμπορικών και πιλοτικών εφαρμογών καθώς και ερευνητικών προγραμμάτων που τρέχουν σήμερα στον τομέα. Οι τομείς εφαρμογής της τεχνολογίας Blockchain περιλαμβάνουν τις ενεργειακές αγορές, τον τομέα διαχείρισης ενεργειακών συστημάτων με έμφαση στα προγράμματα απόκρισης ζήτησης, τα μικροδίκτυα, την αποθήκευση και τα ηλεκτρικά οχήματα, καθώς και το εμπόριο δικαιωμάτων εκπομπών και ενεργειακών πιστοποιητικών.

Παρουσιάζεται μία σειρά ερευνητικών δημοσιεύσεων, εργασιών και άρθρων που καταδεικνύουν την χρησιμότητα της τεχνολογίας Blockchain, σε επίπεδο ασφάλειας και διαφάνειας των συναλλαγών και της επικοινωνίας μεταξύ των συμμετεχόντων σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η αυτοματοποίηση διαδικασιών, υπό το πρίσμα της ασφάλειας, όπως η οικονομική κατανομή των φορτίων ή η ανταπόκριση των καταναλωτών και των Prosumers σε προγράμματα απόκρισης ζήτησης, μέσω των δυνατοτήτων που προσφέρει το Blockchain και τα έξυπνα συμβόλαια είναι μόνο μερικοί από τους τομείς που μπορεί να αξιοποιηθεί η νέα τεχνολογία.

Ταυτόχρονα γίνεται μια εκτενής περιγραφή του τρόπου με τον οποίο, η εξαιρετικά ενεργοβόρα διαδικασία της εξόρυξης κρυπτονομισμάτων όπως του Bitcoin, μπορεί να λειτουργήσει προς όφελος των ενεργειακών συστημάτων.

## 1.2 Δομή Εργασίας

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μία αναλυτική περιγραφή των σύγχρονων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και των συστατικών τους στοιχείων. Γίνεται αποσαφήνιση εννοιών όπως ευφυή δίκτυα, μικροδίκτυα, διαχείριση ζήτησης, αποθήκευση κ.ά., ώστε να αποτελέσουν υπόβαθρο για την μετέπειτα συμπόρευση τους με την τεχνολογία Blockchain.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μία λεπτομερής περιγραφή της τεχνολογίας Blockchain, τόσο σε αρχιτεκτονικό όσο και σε λειτουργικό επίπεδο. Αποσαφηνίζονται οι συστατικές τεχνολογίες που δομούν το Blockchain, όπως αυτές έχουν διαμορφωθεί, από την έλευση του Bitcoin μέχρι και σήμερα.

Το κεφάλαιο 4 περιλαμβάνει μία σειρά ενοτήτων όπου γίνεται βιβλιογραφική αναζήτηση μοντέλων και συστημάτων που αξιοποιούν την τεχνολογία Blockchain στον τομέα των ενεργειακών αγορών, της διαχείρισης των δικτύων και των μικροδικτύων, στην αποθήκευση, τα ηλεκτρικά οχήματα και το εμπόριο δικαιωμάτων εκπομπών και πράσινων πιστοποιητικών. Ταυτόχρονα παρουσιάζεται μία σειρά εμπορικών εφαρμογών και έργων που υλοποιούνται από μικρές ή μεγάλες εταιρίες που εμπλέκονται στον ενεργειακό τομέα, ενώ παράλληλα παρουσιάζεται μία σειρά ενεργών ερευνητικών έργων που τρέχουν μέχρι σήμερα σε ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται μία σύνοψη όλων των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την αναζήτηση σχετικά με την εφαρμογή του Blockchain στον ενεργειακό τομέα. Παρουσιάζονται πιθανά οφέλη της τεχνολογίας αλλά και προκλήσεις που χρήσουν αντιμετώπισης πριν την καθιέρωση της τεχνολογίας στον τομέα της ενέργειας.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>**

### **ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

#### **2.1 Εισαγωγή**

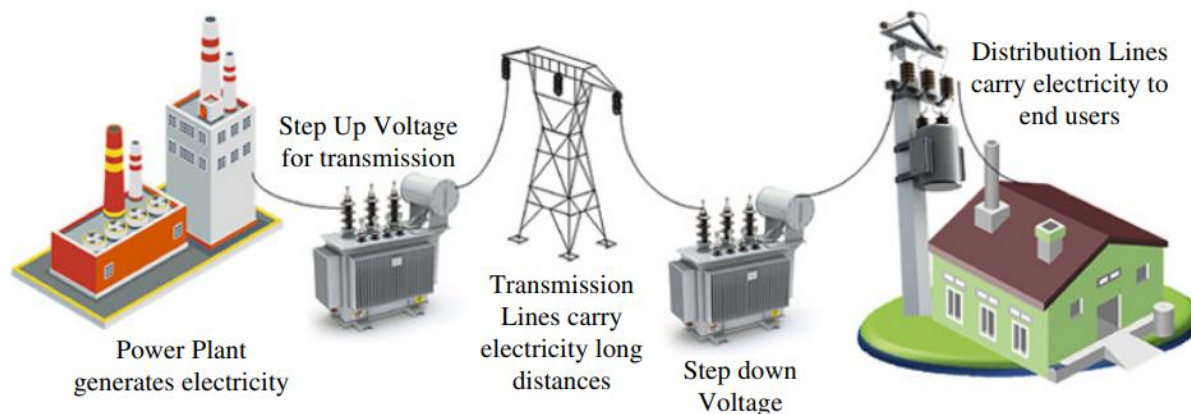
Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από ένα σύνολο συνεργαζόμενων εγκαταστάσεων, που στόχο έχουν την αδιάκοπη και αξιόπιστη τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Βασικός στόχος ενός ΣΗΕ είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση ικανοποιώντας ταυτόχρονα απαιτήσεις για σταθερή τάση και συχνότητα, ποιότητα ισχύος, αξιοπιστία και ασφάλεια τροφοδοσίας. Ακόμη και το μικρότερο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα δίκτυο με μεγάλη πολυπλοκότητα. Η δομή του καθορίζεται κυρίως από το μέγεθος του, καθιστώντας έτσι μια μεγάλη ποικιλία δικτύων ανάλογα με την πολυπλοκότητα τους. Δεν υπάρχουν γενικοί κανόνες που να αφορούν τη δόμηση ενός συστήματος, οι οποίοι να είναι κοινοί για όλα τα συστήματα. Όλα τα συστήματα όμως παρουσιάζουν την εξής ομοιομορφία αναφορικά με τη δομή τους. Εργάζονται σε διάφορα επίπεδα τάσης που χωρίζονται μεταξύ τους με μετασχηματιστές.

Το παραδοσιακό μοντέλο των συστημάτων όπου η συγκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας μέσω του δικτύου μεταφοράς και διανομής ικανοποιεί την κατανάλωση, μεταβάλλεται σταδιακά με την είσοδο μικρότερης κλίμακας αποκεντρωμένης παραγωγής και την χρήση «έξυπνων» εγκαταστάσεων. Η χρήση σύγχρονων πληροφοριακών συστημάτων και η διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων προσφέρουν τεράστια τεχνικά και κοινωνικά οφέλη.

#### **2.2 Κεντρική Παραγωγή Ενέργειας**

Το παραδοσιακό μοντέλο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυτό στο οποίο η παραγωγή είναι απομακρυσμένη από την κατανάλωση. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται στους σταθμούς παραγωγής, οι οποίοι ανάλογα με την πηγή πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιούν, διακρίνονται σε ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, υδροηλεκτρικούς και πυρηνικούς σταθμούς, και βρίσκονται συνήθως κοντά στην πηγή του καυσίμου. Στην Ελλάδα οι βασικές μονάδες παραγωγής είναι κυρίως οι λιγνιτικές μονάδες και οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί που εντοπίζονται γεωγραφικά στην βόρεια Ελλάδα, μακριά από τα μεγάλα αστικά κέντρα.[1]. Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να διακριθεί σε δύο επιμέρους δομές. Το σύστημα υπομεταφοράς και το σύστημα μεταφοράς. Το σύστημα μεταφοράς διαχειρίζεται μεγάλα ποσά ενέργειας και διασυνδέει όλους τους σταθμούς παραγωγής και όλα τα σημεία μεγάλης κατανάλωσης στο σύστημα. Η ενέργεια μπορεί να διακινηθεί προς κάθε επιθυμητή κατεύθυνση μέσω των διάφορων γραμμών του συστήματος μεταφοράς και μάλιστα με τρόπο ώστε να διασφαλίζεται η βέλτιστη οικονομική λειτουργία του συστήματος. Το σύστημα μεταφοράς δέχεται την ενέργεια κατευθείαν από τους σταθμούς παραγωγής μέσω μετασχηματιστών ανύψωσης της τάσης, και είναι δυνατόν να εξυπηρετεί κατευθείαν τους μεγάλους καταναλωτές, ενώ ταυτόχρονα ανταλλάσσει ενέργεια με άλλα γειτονικά ενεργειακά συστήματα. Αναφορικά με τη δομή του, το σύστημα μεταφοράς έχει δομή βρόγχου ώστε να διοχετεύει την ενέργεια σε μεγαλύτερο συνδυασμό κατευθύνσεων.[2] Τα τυπικά επίπεδα τάσης του συστήματος μεταφοράς για το Ελληνικό δίκτυο είναι τα 150 kV και τα

400 kV. Το σύστημα διανομής περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής μέσης και χαμηλής τάσης, και τους μετασχηματιστές διανομής με τους οποίους η μέση τάση (π.χ. 15 kV) υποβιβάζεται σε χαμηλή τάση (π.χ. 220kV). Το σύστημα αυτό τροφοδοτείται από τους υποσταθμούς διανομής και παρέχει ενέργεια σε μικρούς οικιακούς καταναλωτές.[3] Η δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1



Σχήμα 2.1. Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [20]

## 2.3 Ευφυή Δίκτυα

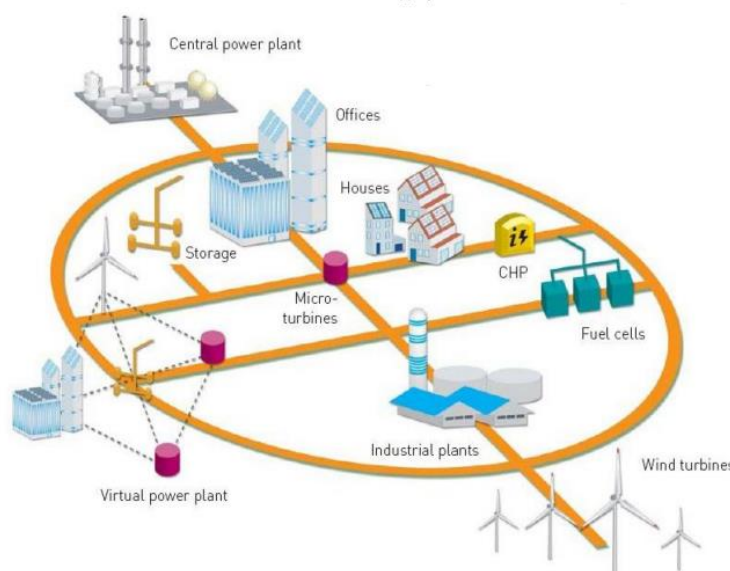
Τα ηλεκτρικά δίκτυα με τις φυσικές υποδομές τους αποτελούν τη ραχοκοκαλιά του συστήματος για την παροχή και κατανάλωση ενέργειας σήμερα. Τα τελευταία χρόνια ωστόσο, έχει δημιουργηθεί η ανάγκη για καθαρότερη ενέργεια και αποτελεσματικότερη διαχείριση της, αφού εγείρονται περιβαλλοντικές ανησυχίες και σταδιακά οι διαθέσιμες μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο μειώνονται. Η αύξηση των απαιτήσεων για ενέργεια δημιουργεί την ανάγκη ελέγχου της ενεργειακής απόδοσης των συστημάτων ώστε να επιτευχθεί ανακούφιση στον ενεργειακό ανεφοδιασμό. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η υδροηλεκτρική, η ηλιακή, ο άνεμος, η βιομάζα και η γεωθερμία παρόλο που βρίσκονται σε αφθονία, ενσωματώνονται δύσκολα στα δίκτυα, δημιουργώντας την απαίτηση ύπαρξης προηγμένων τεχνολογιών για την αξιόπιστη και ασφαλή χρήση τους.

Το Υπουργείο Ενέργειας ορίζει ως Έξυπνο Δίκτυο το σύστημα παράδοσης ηλεκτρικής ενέργειας από σημεία παραγωγής σε σημεία κατανάλωσης, με ενσωματωμένες τεχνολογίες επικοινωνίας και πληροφοριών με στόχο τη βελτίωση της λειτουργίας του δικτύου, την παροχή καλύτερων υπηρεσιών στους καταναλωτές και την προστασία του περιβάλλοντος. Ένα έξυπνο δίκτυο περιλαμβάνει υποδομές ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, πληροφοριακά και επικοινωνιακά συστήματα για την αποτελεσματική και αξιόπιστη παραγωγή ενέργειας, με τον πιο «καθαρό» και ασφαλή τρόπο. Η Ευρωπαϊκή Τεχνολογική Πλατφόρμα (European Technology Platform) ορίζει ως Ευφυές Δίκτυο, ένα ηλεκτρικό δίκτυο που μπορεί έξυπνα να ενσωματώνει στο δίκτυο όλους τους συνδεδεμένους χρήστες του, παραγωγούς και καταναλωτές, για την αποτελεσματική παροχή βιώσιμης, οικονομικής και ασφαλούς ενέργειας. [20] Η επιτυχία των ευφύων δικτύων πηγάζει από το συνδυασμό των φυσικών υποδομών των σύγχρονων δικτύων με συστήματα κυβερνοχώρου. [17] Μια ολοκληρωμένη διάταξη φυσικών και υπολογιστικών διαδικασιών, μεταξύ των οποίων αναπτύσσεται μια στενή σχέση διασύνδεσης και συνεργασίας, όπως ένα

ευφυές δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αναφέρεται ως κυβερνοφυσικό σύστημα (Cyber-physical system). Οι φυσικές διεργασίες παρακολουθούνται και ελέγχονται με βρόγχους ανατροφοδότησης μέσω των οποίων οι υπολογιστικές διαδικασίες επηρεάζουν τις φυσικές, και αντίστροφα. Τα κυβερνοσυστήματα μπορούν να μεταβάλλουν δυναμικά τη δομή τους κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους. Στα δικτυωμένα Κυβερνοφυσικά Συστήματα (Networked Cyber-Physical Systems) τα στοιχεία ελέγχου συνδέονται μεταξύ τους και συντονίζονται για την επίτευξη των στόχων τους.[18]

Από τους παραπάνω ορισμούς προκύπτει ότι το ευφυές δίκτυο είναι ένα ηλεκτρικό δίκτυο που συμπεριλαμβάνει έξυπνες τεχνολογίες, λειτουργίες, και μετρητικά στοιχεία, όπως έξυπνους μετρητές, έξυπνες συσκευές, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ηλεκτρικά οχήματα, ελέγξιμα φορτία, έξυπνους δείκτες και προγράμματα ενεργειακής αποτίμησης, καθώς και έξυπνους τερματικούς χρήστες. Τα εν λόγω δίκτυα συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα προηγμένων τεχνολογιών πληροφορικής και επικοινωνίας, οι οποίες παρέχουν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο, και μπορούν να αξιοποιηθούν για την έξυπνη και οικονομικά αποδοτική ενσωμάτωση όλων των διασυνδεδεμένων χρηστών στο δίκτυο. [20]

Τα ευφυή δίκτυα επομένως, σε αντίθεση με τα παραδοσιακά παθητικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελούν δικτυωμένα κυβερνοφυσικά συστήματα το οποία επιτρέπουν τη αμφίδρομη ροή ισχύος και πληροφορίας και στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους εξισορροπώντας τοπικά τη ζήτηση με την παραγωγή πόρων, μειώνοντας τις ροές ισχύος και τις απώλειες. Στα ευφυή δίκτυα είναι ενσωματωμένα πλήθος διεπαφών (Interfaces) όπως συστήματα διαχείρισης οικιακής ενέργειας (Building Management System - BMS) και αναπτυγμένες υποδομές μετρήσεων (AMI - Advanced Metering Infrastructure). Διαθέτουν επίσης την ικανότητα να συντονίζουν τις ανάγκες και τις δυνατότητες πολλών διαφορετικών παραγωγών, εμπόρων ενέργειας και τελικών καταναλωτών[18] Μια τυπική δομή ενός ευφυούς δικτύου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2. Τυπική δομή ευφυούς δικτύου [2]

Τα ενεργειακά συστήματα χαρακτηρίζονται ανάκαθεν από στοιχεία ευφυΐας στο επίπεδο της μεταφοράς, ωστόσο η απαίτηση για αντίστοιχα έξυπνα στοιχεία προκύπτει από τα εξής:

- Διευκόλυνση της ενσωμάτωσης των ΑΠΕ στην παραγωγή του δικτύου.
- Διαχείριση της ζήτησης σε τοπικό επίπεδο, αλληλοεπιδρώντας με τους καταναλωτές μέσω «έξυπνων» μετρητικών συστημάτων.
- Χρήση μεθόδων αύξησης της ποιότητας, της ασφάλειας και της αξιοπιστίας των στοιχείων, που ήδη εφαρμόζονται στο επίπεδο της μεταφοράς, όπως τεχνικές δυναμικού ελέγχου.[19]

Τα δίκτυα διανομής μετατρέπονται σταδιακά από παθητικά σε ενεργά δίκτυα διανομής, υπό το πρίσμα ότι η λήψη αποφάσεων και ο έλεγχος γίνονται καταναλωμένα, και η ροή ισχύος αμφίδρομη. Αυτός ο τύπος έξυπνων δικτύων διευκολύνει την ενσωμάτωση διεσπαρμένης παραγωγής και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, βελτιώνει την απόκριση στη ζήτηση των καταναλωτών και διευκολύνει την ένταξη μονάδων αποθήκευσης στο σύστημα, ενώ ταυτόχρονα δημιουργεί ευκαιρίες για νέο τεχνολογικό εξοπλισμό και υπηρεσίες οι οποίες θα συμμορφώνονται βάσει κοινών πρωτοκόλλων και προτύπων. Η βασική λειτουργία ενός ενεργού δικτύου διανομής είναι να συνδέει αποτελεσματικά την παραγωγή ενέργειας με τις απαιτήσεις των καταναλωτών, επιτρέποντας και στις δύο πλευρές να καθορίζουν το βέλτιστο τρόπο λειτουργίας τους σε πραγματικό χρόνο.[19]

## 2.4 Μικροδίκτυα

Για την υλοποίηση των ενεργών δικτύων διανομής απαιτείται η εισαγωγή νέων εννοιών στα συστήματα ισχύος. Τα Μικροδίκτυα αποτελούν μια τέτοια μορφή συστημάτων, και χαρακτηρίζονται ως δομικό στοιχείο ενός ευφυούς δικτύου. Η οργάνωση των μικροδικτύων βασίζεται στη δυνατότητα ελέγχου λειτουργιών του δικτύου που αφορούν την καταναλωμένη παραγωγή, κυψέλες καυσίμου και φωτοβολταϊκά, σε συνδυασμό με μονάδες αποθήκευσης και ελεγχόμενα φορτία, στο επίπεδο διανομής. Αυτός ο έλεγχος επί των δικτύων διανομής επιτρέπει στο μικροδίκτυο να λειτουργεί και απομονωμένα από το κεντρικό δίκτυο, σε περίπτωση βλαβών ή άλλων εξωτερικών διαταραχών, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα της προσφερόμενης ενέργειας. Ουσιαστικά ο έλεγχος επί των δικτύων διανομής είναι αυτός που διαχωρίζει τα Μικροδίκτυα από τα καταναλωμένα δίκτυα με διεσπαρμένη παραγωγή.

Ορίζοντας τα μικροδίκτυα πρόκειται για τεχνολογίες που περιλαμβάνουν συστήματα διανομής ΧΤ με διεσπαρμένη παραγωγή(μικροστρόβιλοι, κυψέλες καυσίμου, Φ/Β κλπ) σε συνδυασμό με μονάδες αποθήκευσης (πυκνωτές, μπαταρίες) και ελεγχόμενα φορτία. Τέτοια συστήματα μπορούν να λειτουργήσουν με μη αυτόνομο τρόπο εάν είναι διασυνδεδεμένα στο δίκτυο, ή με αυτόνομο τρόπο όταν είναι αποσυνδεδεμένα από το κύριο δίκτυο. Η λειτουργία μικροπηγών στο δίκτυο προσφέρουν σημαντικά οφέλη για όλο το δίκτυο , στην περίπτωση που διαχειρίζονται και συντονίζονται αποτελεσματικά. [19]

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω βασική ιδιότητα των μικροδικτύων είναι ο έλεγχος και ως εκ τούτου τα στοιχεία που μπορούν να ελεγχθούν. Αυτά είναι:

- **Παραγωγή ΑΠΕ:** Ο περιορισμός της παραγωγής των μονάδων ΑΠΕ προκύπτει πρωτίστως από τους περιοριστικούς φυσικούς παράγοντες. Ο περιορισμός της παραγωγής από ΑΠΕ είναι ανεπιθύμητος δεδομένου του υψηλού επενδυτικού κόστους κατασκευής των μονάδων και του

χαμηλού κόστους λειτουργίας, σε συνδυασμό με τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την παραγωγή ενέργειας από αυτές τις μονάδες. Συνεπώς δε συνίσταται ο περιορισμός της παραγωγής με εξαίρεση τις περιπτώσεις που παρατηρείται υπερφόρτωση των γραμμών μεταφοράς ή παραβίαση των ορίων τάσης του συστήματος.

- **ΣΗΘ και μικροπηγές:** Η δυνατότητα ελέγχου των μονάδων ΣΗΘ εξαρτάται από τον τρόπο που οι μονάδες καλύπτουν την τοπική ζήτηση θερμότητας. Οι περισσότερες μονάδες ΣΗΘ βασίζονται στην τεχνολογία των στρεφόμενων μηχανών, η άεργος ισχύς στην έξοδο των μηχανών περιορίζεται από την ενεργό και τη φαινόμενη ισχύ στην έξοδο. Αναφορικά με τις μικροπηγές, σε ένα μικροδίκτυο με πολλαπλές μικροπηγές, οι οποίες έχουν βελτιωμένη δυνατότητα ελέγχου, απαιτείται μόνο να λυθεί το πρόβλημα της δέσμευσης των μονάδων.
- **Μονάδες Αποθήκευσης:** Μία μονάδα αποθήκευσης μπορεί να λειτουργεί είτε βάσει τιμολογιακών κανόνων, είτε βάσει των απαιτήσεων του συστήματος και των φορτίων, ανάλογα με το σκοπό λειτουργίας της. Ταυτόχρονα προσφέρουν υπηρεσίες εξισορρόπησης του συστήματος είτε βραχυπρόθεσμα (χιλιοστά του δευτερολέπτου έως λεπτά) ή μακροπρόθεσμα (ώρες έως ημέρες). Ειδικά για τις μονάδες αποθήκευσης συνεχούς ρεύματος θα μπορούσαν να συμβάλουν στο ισοζύγιο άεργου ισχύος τους συστήματος χωρίς να επιβαρυνθούν σημαντικά με λειτουργικό κόστος.
- **Απόκριση Ζήτησης:** Είναι μέθοδοι στις οποίες οι καταναλωτές ενθαρρύνονται μέσω κινήτρων να διαφοροποιήσουν την ενεργειακή τους συμπεριφορά, μετατοπίζοντας τις ηλεκτρικές καταναλώσεις τους, παρέχοντας τους τιμολογιακά κίνητρα, όταν οι συνολικές απαιτήσεις των φορτίων και κατ' επέκταση οι ανάγκες για ενέργεια είναι πολύ υψηλές. Τέτοια κίνητρα είναι τα εξής:

*Χρόνος Χρήσης (Time of Use - ToU):* υψηλότερες τιμές ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρας και χαμηλότερες τιμές κατά τις νυχτερινές εκτός αιχμής ώρες.

*Δυναμική Τιμολόγηση:* Τιμολόγηση της ενέργειας σε πραγματικό χρόνο ανάλογα με τις διακυμάνσεις των τιμών της χονδρικής

*Κρίσιμες Τιμές Αιχμής:* Η διάρθρωση της τιμολόγησης είναι παρόμοια με την τιμολογιακή πρακτική του «Χρόνου Χρήσης», αλλά οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας είναι εξαιρετικά υψηλές όταν οι τιμές της χονδρικής αυξάνονται, και κατ' επέκταση η αξιοπιστία του συστήματος διακυβεύεται.[19]

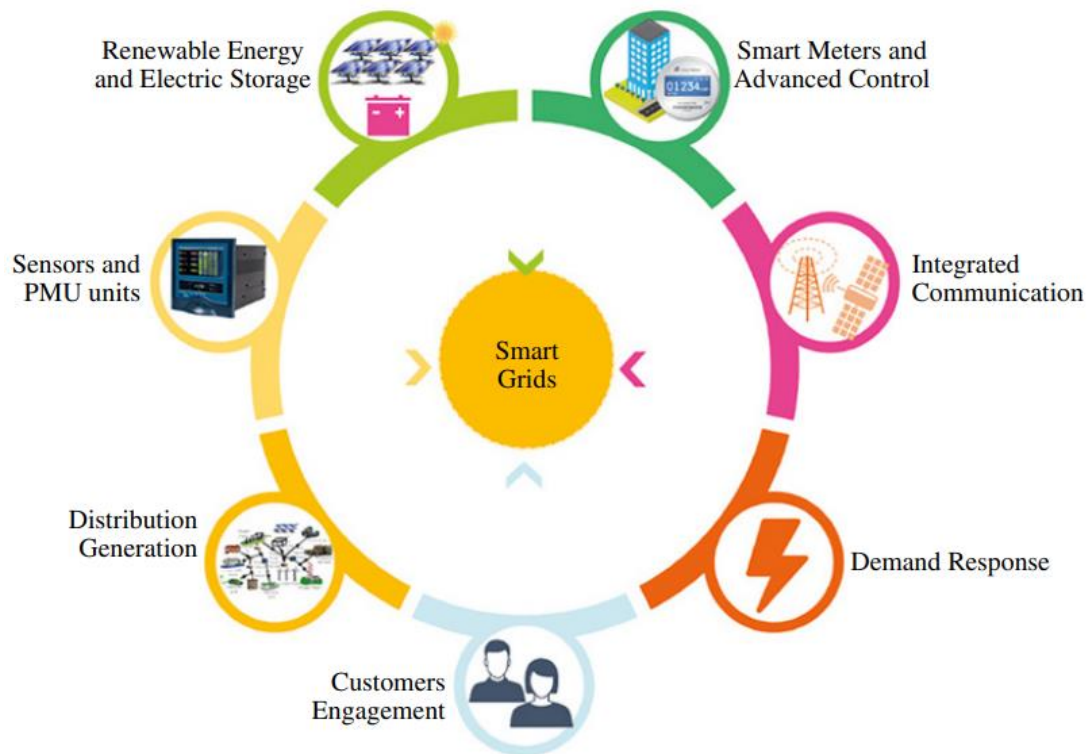
Οι καταναλωτές είτε ενημερώνονται «χειροκίνητα», γνωστοποιώντας τους τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, και έτσι κάνουν οι ίδιοι επιλογή της καταναλωτικής συμπεριφοράς τους, είτε με αυτοματοποιημένες διαδικασίες η κατανάλωση μετακινείται εκτός ωρών αιχμής, έχοντας προγραμματίσει διάφορες εφαρμογές να περιορίζουν την κατανάλωση.

Η λογική της απόκρισης ζήτησης βασίζεται στην πρόβλεψη του φορτίου και της παραγωγής των ΑΠΕ. Απαιτήση για την εφαρμογή αυτής της μεθόδου στα μικροδίκτυα είναι η εγκατάσταση έξυπνων μετρητών και τεχνολογιών έξυπνου ελέγχου στα οικιακά, εμπορικά και αγροτικά φορτία.

## 2.5 Συστατικά Στοιχεία Ευφυών Δικτύων – Μικροδικτύων

Τα έξυπνα δίκτυα περιλαμβάνουν τρία βασικά είδη συστημάτων: ισχύος, επικοινωνιακά και πληροφοριακά. Η αρχιτεκτονική τους μπορεί να αναπαρασταθεί ως μία πολυεπίπεδη δομή όπως

στο Σχήμα 2.3 Ο εκσυγχρονισμός των δικτύων θα κάνει τα δίκτυα πιο ευέλικτα, προσβάσιμα, και η διαχείριση τους θα γίνεται πολυεπίπεδα μέσα από τη διαχείριση μικρότερων υποσυστημάτων που θα χαρακτηρίζονται από μεγάλη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα συστατικά στοιχεία ενός ευφυούς δικτύου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε επτά μεγάλες τεχνολογικές ομάδες. Αυτές οι ομάδες είναι η διεσπαρμένη παραγωγή, τα συστήματα αποθήκευσης, οι έξυπνοι μετρητές, ο προηγμένος έλεγχος, οι ολοκληρωμένες επικοινωνίες, τεχνολογίες ανίχνευσης και μέτρησης, και η απόκριση ζήτησης. [20]



Σχήμα 2.3. Βασικοί τομείς έξυπνου δικτύου [20]

### 2.5.1 Διεσπαρμένη Παραγωγή

Η αναδιάρθρωση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η ανάπτυξη των τεχνολογιών των σχετικά μικρών σε ισχύ μονάδων οδήγησε στην ανάπτυξη της διεσπαρμένης παραγωγής, της παραγωγής η οποία βρίσκεται πλησιέστερα προς τα κέντρα κατανάλωσης. [16] Στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής συγκαταλέγονται μικροί αιολικοί σταθμοί, φωτοβολταϊκά, μικρής κλίμακας ΣΗΘ, μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί, μονάδες βιομάζας-βιοαερίου, μονάδες γεωθερμίας και διεσπαρμένες μονάδες αποθήκευσης, κυρίως μπαταρίες.[1] Η δυνατότητα εγκατάστασης μικρών μονάδων συμπαραγωγής, ακόμα και για οικιακή χρήση, αυξάνει την αποδοτικότητα της παροχής ηλεκτρισμού και θέρμανσης ταυτόχρονα. Το επίπεδο τάσης διασύνδεσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής αρχίζει να μειώνεται και ολοένα και περισσότερες μονάδες εγκαθίστανται ακόμη και στο επίπεδο ΧΤ. Η ανάγκη για χαμηλότερο

επίπεδο τάσης ενισχύεται από την ανάγκη για την αύξηση της αξιοπιστίας, ειδικά σε καταναλωτές ΧΤ με ευαίσθητες συσκευές ή διεργασίες. Τα σημερινά δίκτυα διανομής σχεδιάζονται ώστε η απόδοση των δικτύων ΜΤ και ΧΤ να επιδρά σημαντικά στην ποιότητα παροχής ηλεκτρικής ισχύος στους καταναλωτές, ενώ σφάλματα στα δίκτυα ΥΤ να μην επηρεάζουν τους καταναλωτές που είναι συνδεδεμένοι στη ΜΤ και ΧΤ. Ως βασικά χαρακτηριστικά της διεσπαρμένης παραγωγής προσδιορίζονται τα εξής στοιχεία:[16]

1. Η ισχύς των εγκατεστημένων μονάδων είναι μικρής κλίμακας και κυμαίνεται από 1kW έως 10MW.
2. Οι μονάδες παραγωγής ενέργειας είναι είτε ενσωματωμένοι στην κατανάλωση, είτε πολύ κοντά γεωγραφικά στα φορτία.
3. Η παραγωγή συνδέεται στο δίκτυο διανομής, και συγκεκριμένα μονάδες εγκατεστημένης ισχύος έως 100kW συνδέονται στη ΧΤ και μονάδες έως 100MW συνδέονται στην ΜΤ.

Τα οφέλη που προκύπτουν από την εγκατάσταση διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής εντοπίζονται τόσο για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας όσο και για τους ίδιους τους παραγωγούς-καταναλωτές, και μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Δυνατότητα μείωσης των εκπεμπόμενων ρύπων και ενίσχυση της «καθαρής» ηλεκτροπαραγωγής ειδικά αν χρησιμοποιηθούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Οι μονάδες ΔΠ χαρακτηρίζονται από ευελιξία και ευκολία στην ανάπτυξη τους, λόγω του σημαντικά μικρότερου κεφαλαίου και χρόνου που απαιτείται για την εγκατάστασή τους, συγκριτικά με τις απαιτήσεις κατασκευής των μεγάλων σταθμών παραγωγής.
- Η εγκατάσταση των μονάδων παραγωγής δίπλα στην κατανάλωση συμβάλλει στη μείωση των απωλειών μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, αφού η εξυπηρέτηση των φορτίων γίνεται τοπικά.
- Οι μονάδες ΔΠ συμβάλλουν στη βελτίωση της αξιοπιστίας του συστήματος και της συνεχούς τροφοδότησης των καταναλωτών.
- Όταν παρουσιάζεται αιχμή της ζήτησης από τους καταναλωτές, οι διεσπαρμένες μονάδες καλύπτουν τις εν λόγω αιχμές. Υπό διαφορετικές συνθήκες θα παρουσιαζόταν η απαίτηση επενδύσεων για την ενίσχυση του δικτύου ώστε να καλυφθεί η ζήτηση από την κεντρική παραγωγή.[1]
- Οι μονάδες αυτές μπορούν να παρέχουν βοηθητικές υπηρεσίες στο δίκτυο όπως η παροχή άεργου ισχύος, η υποστήριξη της τάσης του δικτύου, η άμεση απόκριση στη ζήτηση των καταναλωτών και αποφυγή διακοπής της[16]

Στον αντίποδα αυτών των πλεονεκτημάτων η ανάπτυξη της διεσπαρμένης παραγωγής χαρακτηρίζεται από δυσκολίες τόσο σε τεχνικό όσο και σε λειτουργικό επίπεδο. Ορισμένα από αυτά τα εμπόδια παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Κατά την εγκατάσταση μιας μονάδας ΔΠ προκύπτουν ρυθμιστικά προβλήματα που αφορούν την αδειοδότηση των μονάδων, την παροχή αποζημίωσης στους παραγωγούς για την παρεχόμενη ενέργεια και τις βοηθητικές υπηρεσίες που προσφέρουν, το ύψος των επιχορηγήσεων για την ανάπτυξη τέτοιων μονάδων στο δίκτυο.

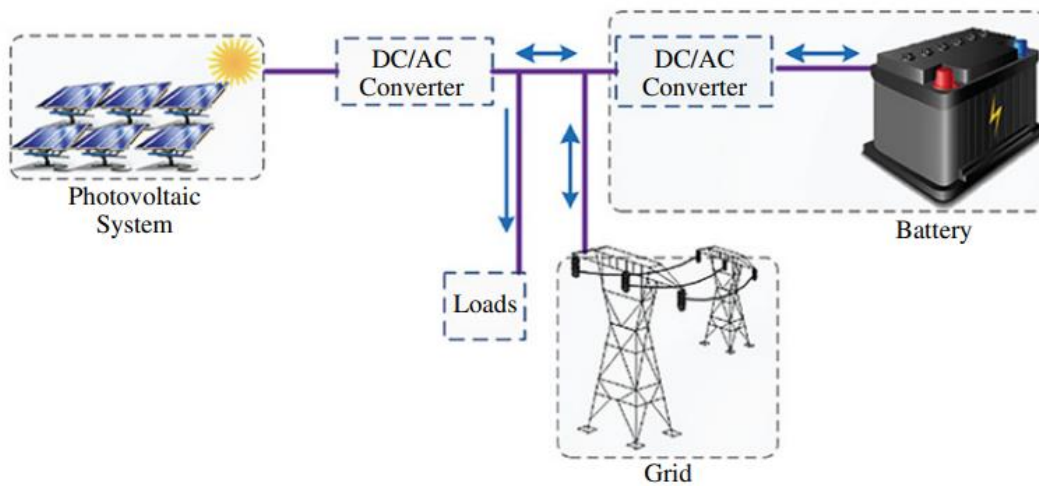


- Τεχνικά προβλήματα που αφορούν την ενσωμάτωση των μονάδων στο δίκτυο. Κατά την εγκατάσταση των αποκεντρωμένων μονάδων στο σύστημα, πρέπει να εξετάζεται η επάρκεια του(μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς κλπ), να γίνεται έλεγχος τόσο της στάθμης βραχυκύκλωσης του συστήματος όσο και της ποιότητας τάσης και ισχύος, τη δημιουργία υπερτάσεων και υποτάσεων κατά την είσοδο και την έξοδο των μονάδων. Επιπλέον ανακύπτουν ζητήματα λειτουργίας και εκμετάλλευσης που συνδέονται με την αντίστροφη ροή ισχύος, τη μείωση του συντελεστή ισχύος των γραμμών μεταφοράς και των υποσταθμών, τη φόρτιση των γραμμών και τις απώλειες στο δίκτυο.
- Η δυσκολία κεντρικής εποπτείας και διαχείρισης του δικτύου.[1]

### 2.5.2 Αποθήκευση

Οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας είναι ένα απαραίτητο τεχνολογικό μέσο για την αποτελεσματική χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζουν την αδιάκοπη παροχή ενέργειας υποστηρίζοντας το δίκτυο.[20] Οι τεχνολογίες αποθήκευσης λοιπόν παρέχουν υπηρεσίες τόσο στο επίπεδο του συστήματος παραγωγής όσο και στο επίπεδο του ηλεκτρικού δικτύου, ενώ σημαντικά είναι τα οφέλη σε επίπεδο χρηστών. Σε επίπεδο παραγωγής οι μονάδες αποθήκευσης συμβάλλουν στη διαχείριση της καμπύλης του φορτίου, περιορίζοντας την αιχμή των καμπυλών και αυξάνοντας το συντελεστή του φορτίου. Δομικές μεταβολές της ζήτησης είναι δυνατό να υποστηριχθούν από την αποθήκευση, περιορίζοντας το κόστος παραγωγής, αφού κατά τη διαχείριση των αιχμών από τα αποθηκευτικά μέσα αποφεύγεται η ένταξη αιχμιακών μονάδων. Τα συστήματα ενέργειας γίνονται πιο ευέλικτα, αφού η αποθήκευση μπορεί να παρέχει υπηρεσίες εξισορρόπησης κατά τη μεταβολή της ζήτησης. Σε επίπεδο δικτύου η αποθήκευση συμβάλλει στη διαχείριση της συμφόρησης και δίνει λύσεις ικανές να αποφύγουν ή να αναβάλλουν πιθανές αναβαθμίσεις στην υποδομή του δικτύου. Σε τοπικό επίπεδο οι μπαταρίες συμβάλλουν στη μείωση των απωλειών και τη ρύθμιση της τάσης. Αναφορικά με τους χρήστες του δικτύου η αποθήκευση προσφέρει οικονομικά οφέλη αφού στο δίκτυο αποφεύγεται η ένταξη μονάδων υψηλότερου κόστους σε περιόδους αιχμής, ενώ η αξιοπιστία της παροχής ισχύος ενισχύεται σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. [72] Οι διεσπαρμένες μπαταρίες εγκαθίστανται σε διάφορες τοποθεσίες εντός και εκτός δικτύου. Αυτού του είδους τα συστήματα διαθέτουν δύο βασικές λειτουργίες, μία για φόρτιση και μία για αμφίδρομη ροή ισχύος (Σχήμα 2.4), υποστηρίζοντας την τάση και τη συχνότητα του δικτύου, ενισχύοντας την εθνική ασφάλεια του δικτύου βελτιώνοντας την ανθεκτικότητά του. [20]





Σχήμα 2.4. Κατανεμημένο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας [20]

Η αποτελεσματικότητα των αποθηκευτικών μέσων έγκειται στην ικανότητα τους να αποθηκεύουν και να εκφορτίζουν ηλεκτρική ενέργεια την απαραίτητη χρονική περίοδο, με τρόπο που βασίζεται σε σαφή σήματα τιμολόγησης που μεταδίδονται σε έξυπνα συστήματα αποθήκευσης. Ωστόσο υπάρχουν σημαντικές προκλήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη στη συμπόρευση των μονάδων αποθήκευσης και δικτύων, όπως:

- Βελτίωση των πολιτικών που αφορούν συστήματα όπως το net metering, την απόκριση ζήτησης, τα πρότυπα αξιοπιστίας των δικτύων.
- Ασαφή τιμολογιακές πολιτικές της ενέργειας λόγω οικονομικών επιδοτήσεων ή έλλειψης τιμολογιακών σημάτων πραγματικού χρόνου.
- Αξιοποίηση διαθέσιμων τεχνολογιών που υπάρχουν σε διάφορους άλλους τομείς.
- Το κόστος των χρησιμοποιούμενων τεχνολογιών
- Ανάγκη ανάπτυξης επιχειρηματικών και οικονομικών μοντέλων.[20]

### 2.5.3 Διαχείριση Ζήτησης

Η ανάπτυξη μεθόδων διαχείρισης της ζήτησης ενός δικτύου προέκυψε ως ανάγκη των διαχειριστών των δικτύων διανομής και μεταφοράς, με στόχο τον περιορισμό της αιχμής και την εξομάλυνση της καμπύλης ζήτησης κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο απλούστερος τρόπος παθητικής διαχείρισης της ζήτησης είναι η μεταβλητή τιμολόγηση της ενέργειας ανάλογα με την ώρα της ημέρας. Οι τεχνικές διαχείρισης της ζήτησης περιλαμβάνουν το συστηματικό σχεδιασμό δράσεων από τις ρυθμιστικές αρχές και τους διαχειριστές των δικτύων, ώστε να μεταβληθεί το μέγεθος ή ο χρονισμός της ζήτησης των καταναλωτών. Οι συνηθέστερες μέθοδοι διαχείρισης είναι η αποκοπή των αιχμών, η χρονική μετατόπιση των φορτίων και η συμπλήρωση των κοιλάδων στην καμπύλη ζήτησης.[31]

Η έννοια της απόκρισης ζήτησης έχει προκύψει ως αποτέλεσμα της ανάγκης ελέγχου της ζήτησης σε ένα μικροδίκτυο. Η χρήση των έξυπνων μετρητών και η αμφίδρομη επικοινωνία στα ευφυή δίκτυα έδωσαν τη δυνατότητα εισαγωγής νέων τεχνολογιών στις ενεργειακές αγορές. Τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης αποτελούν μία επιτυχημένη λύση για τον περιορισμό της αιχμής του φορτίου σε ένα σύστημα, και την εμπλοκή των καταναλωτών στις λειτουργίες των

ενεργειακών αγορών. Μεγάλο πλήθος καταναλωτών που λειτουργούν ενεργητικά εντός ενός δικτύου δύνανται να επηρεάσουν τα καταναλωτικά προφίλ των φορτίων, μεγιστοποιώντας ή ελαχιστοποιώντας τις καταναλώσεις τους ανάλογα με τις ανάγκες του δικτύου. Έτσι τα φορτία συμμορφώνονται με την παραγωγή και πλέον η παραγωγή δεν ακολουθεί τις απαιτήσεις των φορτίων, όπως συμβαίνει σήμερα. [20]

#### 2.5.4 Επικοινωνία

Η επικοινωνιακές υποδομές είναι απαραίτητες για την αποτελεσματική λειτουργία των ευφυών δικτύων. Η εφαρμογή τεχνολογιών επικοινωνίας εγγυάται μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, διασφαλίζει καλύτερη εφαρμογή των έξυπνων δικτύων και παρέχει συντονισμό μεταξύ όλων των στοιχείων που συμμετέχουν στο δίκτυο. Παραδείγματα υφιστάμενων τεχνολογιών επικοινωνίας είναι οι οπτικές ίνες, το WLAN, η επικοινωνία μέσω γραμμής ρεύματος (Power Line Communication - PLC) κ.ά.

Το σύστημα επικοινωνίας συνδέει διάφορα στοιχεία του ευφυούς δικτύου για την επίτευξη ελέγχου, την παρακολούθηση του δικτύου και την αξιοποίηση των συλλεγόμενων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Τα ολοκληρωμένα συστήματα επικοινωνίας αποτελούν τους συνδετικούς κρίκους μεταξύ όλων των επιμέρους συστημάτων του έξυπνου δικτύου και μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρία είδη συστημάτων [20]:

**Home Area Networks (HAN):** Είναι δίκτυα που εγκαθίστανται και χρησιμοποιούνται σε μικρές γεωγραφικές περιοχές της τάξης των δεκάδων μέτρων και ο ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων είναι μερικές εκατοντάδες bits ανά δευτερόλεπτο. Είναι ευρυζωνικού τύπου δίκτυο και χρησιμοποιείται για την επικοινωνία και την κοινή χρήση δεδομένων μεταξύ των συσκευών που συνδέονται στο δίκτυο και τους έξυπνους μετρητές. Το HAN προσφέρει αποτελεσματικότερη διαχείριση της ενέργειας σε επίπεδο οικίας.

**Neighborhood Area Networks (NAN):** Είναι δίκτυα που εγκαθίστανται και λειτουργούν σε γεωγραφικές περιοχές εκατοντάδων μέτρων. Σε ένα NAN μπορούν να συνδεθούν πολλά HANs και να εκπέμπουν δεδομένα σε άλλα τοπικά NAN, ή σε κέντρα δεδομένων για περαιτέρω ανάλυση. Ο ρυθμός μετάδοσης πάνω σε ένα NAN είναι της τάξης των 2Kbps. Τεχνολογίες όπως PLC, Wi-Fi κ.ά. μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία αυτών των δικτύων.

**Wide Area Networks (WAN):** Είναι δίκτυα που εγκαθίστανται σε εφαρμογές που απαιτούν δεκάδες χιλιόμετρα δικτύου και εμπεριέχει πολλά NANs. Η επικοινωνία των στοιχείων του έξυπνου δικτύου, όπως η διεσπαρμένη παραγωγή από ΑΠΕ, η μεταφορά, η διανομή και ο κεντρικός έλεγχος πραγματοποιούνται πάνω σε ένα WAN.

Στα ευφυή δίκτυα προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματική επικοινωνία μεταξύ των στοιχείων, είναι απαραίτητη η συγχώνευση των τεχνολογιών επικοινωνίας που αναφέρθηκαν παραπάνω με τις επικοινωνιακές υποδομές. Τέτοιες τεχνολογίες είναι τα ZigBee, WLAN, Κυψελωτά Δίκτυα και οι επικοινωνίες μέσω γραμμών ρεύματος PLC.

**ZigBee:** Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που απαιτούν χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων, μεγάλη διάρκεια μπαταρίας, χαμηλό κόστος και ασφαλή δικτύωση. Οι εφαρμογές αφορούν ασύρματο έλεγχο του φωτισμού, συστήματα ελέγχου κυκλοφοριακής συμφόρησης, μετρητές για οικιακές οθόνες και επιπλέον οικιακές και βιομηχανικές συσκευές που απαιτούν χαμηλής εμβέλειας μετάδοση δεδομένων σε σχετικά χαμηλό ρυθμό. Ως πλεονεκτήματα στην εφαρμογή του

ZigBee αναφέρονται το χαμηλό κόστος, το μικρό μέγεθος και το σχετικά περιορισμένο bandwidth. Στον αντίποδα, ως μειονεκτήματα της εφαρμογής ZigBee στα ευφυή δίκτυα χαρακτηρίζεται η μικρή μπαταρία που προσφέρει και μικρή διάρκεια ζωής, η μικρή μνήμη, ο χαμηλός ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων και η περιορισμένη δυνατότητα επεξεργασίας που προσφέρει.

**WLAN:** είναι ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο που συνδέει δύο ή περισσότερες συσκευές και παρέχει σύνδεση μεταξύ τους μέσω ενός σημείου πρόσβασης στο διαδίκτυο. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να κινούνται τοπικά στο εύρος του δικτύου και να διατηρούν τη σύνδεση τους με αυτό. Ως πλεονεκτήματα του WLAN είναι το χαμηλό κόστος, οι τεράστιες εγκαταστάσεις του σε παγκόσμια κλίμακα και οι συσκευές Plug and Play που συνδέονται άμεσα στο δίκτυο. Βασικό μειονέκτημα αυτών των δικτύων είναι η πιθανότητα παρεμβολών από άλλες συσκευές που επικοινωνούν με παρόμοιες συχνότητες.

**Κυψελωτά Δίκτυα:** Αυτού του είδους τα δίκτυα χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα σε χώρες που διαθέτουν τις αντίστοιχες υποδομές. Σε ένα ευφυές δίκτυο θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ευρέως για την επικοινωνία μεταξύ διαφόρων εξαρτημάτων και συσκευών. Μερικές από τις τεχνολογίες των κυψελωτών δικτύων είναι οι GSM, GPRS, 3G, 4G, 5G, WiMAX. Βασικό πλεονέκτημα αυτών των δικτύων είναι η διαθέσιμη υποδομή σε ένα τεράστιο γεωγραφικό εύρος, ο υψηλός ρυθμός μετάδοσης των δεδομένων και τα υπάρχοντα συστήματα ασφάλεια που εφαρμόζονται στις κυψελοειδής επικοινωνίες. Βασικό μειονέκτημα για την εφαρμογή σε ένα ευφυές δίκτυο είναι ότι ένα κυψελωτό δίκτυο επικοινωνίας είναι κοινόχρηστο και από χρήστες που δεν αποτελούν τμήμα του δικτύου.

**Power Line Communication – PLC:** Αυτή η τεχνολογία δικτύων επικοινωνίας επιτρέπει την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ συσκευών μέσω των ηλεκτρικών γραμμών. Ουσιαστικά ένα διαμορφωμένο σήμα μεταφέρεται μέσω των καλωδίων τροφοδοσίας. Βασικό πλεονέκτημα του PLC είναι το περιορισμένο κόστος που προκύπτει από την υπάρχουσα υποδομή, ενώ στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται η ύπαρξη αρμονικών στις γραμμές ηλεκτροδότησης που παρεμποδίζουν τα σήματα επικοινωνίας και η περιορισμένη συχνότητα της επικοινωνίας. Η εγκατάσταση έξυπνων μετρητών και επικοινωνιακών υποδομών θα πρέπει να υλοποιείται βάσει τυποποιήσεων και προτύπων που ακολουθούνται από όλες τις εμπλεκόμενες εταιρίες στην κατασκευή ενός ευφυούς δικτύου.

### 2.5.5 Συμμετέχοντες

Στα παραδοσιακά δίκτυα ενέργειας οι πελάτες έχουν παθητικό ρόλο στην αγορά ενέργειας, και η συμπεριφορά τους ήταν αμελητέα αναφορικά με την παρακολούθηση της καταναλισκόμενης ενέργειας τους ελέγχου, της διαχείρισης, της παραγωγής, της αποθήκευσης και του εμπορίου ενέργειας, και αποκλειστικό στόχος ήταν η αδιάκοπη εξυπηρέτηση των φορτίων [20]. Με την έλευση των έξυπνων δικτύων οι ρόλοι των συμμετεχόντων παύουν να είναι τόσο διακριτοί. Η νέα δομή των δικτύων δημιουργεί νέους ρόλους και δυναμικές μεταξύ των συμμετεχόντων οι οποίοι μπορούν να ορισθούν ως εξής [19]:

**Καταναλωτής:** Οι τεχνολογίες των ευφυών δικτύων παρέχουν στους καταναλωτές τη δυνατότητα ενεργούς συμμετοχής σε ενεργειακά ζητήματα μέσω της παρακολούθησης των ενεργειακών τους καταναλώσεων σε πραγματικό χρόνο, τη δυνατότητα παρακολούθησης των μεταβολών των τιμών στην αγορά της ενέργειας, την τοπική παραγωγή από ΑΠΕ και την τοπική αποθήκευση, καθώς και την ανταλλαγή ισχύος.[20] Ο καταναλωτής εκπροσωπεί ένα νοικοκυριό, μια μικρή ή μεσαία

επιχείρηση, συνήθως έχει συμβόλαιο με μία εταιρεία λιανικής για την παροχή ενέργειας, και πρέπει να πληρώσει αντίτιμο στον ιδιοκτήτη του δικτύου διανομής για τη χρήση των υποδομών του δικτύου.[19]

**Ιδιοκτήτης/Διαχειριστής Διεσπαρμένης Παραγωγής:** Συνήθως οι ιδιοκτήτες των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής είναι υπεύθυνοι και τη λειτουργία τους. Η παραγόμενη ενέργεια διοχετεύεται στο δίκτυο κατά προτεραιότητα, με σταθερή τιμολόγηση της παραγόμενης ενέργειας, ειδικότερα για παραγωγή από ΑΠΕ, όπου οι παραγωγοί μπορεί να έχουν συμβόλαια με εταιρίες λιανικής για την πώληση την ενέργειας που παράγουν, ενώ ταυτόχρονα έχουν χρεώσεις για τη χρήση του δικτύου διανομής. Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής είναι εξοπλισμένες με τεχνολογίες παρακολούθησης και πιθανώς ελέγχου της παραγόμενης ενέργειας.

**Prosumer:** Είναι μια ειδική περίπτωση καταναλωτών που έχουν εγκατεστημένη μικρής κλίμακας διεσπαρμένη παραγωγή εγκατεστημένη στην ιδιοκτησία τους. Η ενέργεια που παράγουν μπορεί να καλύψει μερικώς ή πλήρως τις ενεργειακές καταναλώσεις του ιδιοκτήτη, και το πλεόνασμα ενέργειας μπορεί να διοχετευθεί στο κυρίως δίκτυο. Εναλλακτικά η παραγόμενη ενέργεια μπορεί να διοχετευτεί εξολοκλήρου στο δίκτυο, με τον ιδιοκτήτη να απολαμβάνει ευνοϊκή τιμολόγηση για την τροφοδοσία του.

**Πελάτης:** Ως πελάτες χαρακτηρίζονται οι καταναλωτές, οι ιδιοκτήτες διεσπαρμένης παραγωγής και οι prosumers.

**Ρυθμιστική Αρχή Αγοράς:** Η ρυθμιστική αρχή για την ενέργεια είναι ένας ανεξάρτητος φορέας που είναι υπεύθυνος για την ανοικτή, δίκαιη, και διαφανή λειτουργία της αγοράς, διασφαλίζοντας την ανοικτή πρόσβαση στο δίκτυο και τον αποτελεσματικό καταμερισμό του κόστους του δικτύου. Σε ορισμένες περιπτώσεις εγκρίνει τις ταρίφες χρήσης του δικτύου και τις τιμές του τελικού χρήστη.[19]

**Φορείς Σωρευτικής Εκπροσώπησης – ΦΟΣΕ:** Πρόκειται για φορείς ρόλος των οποίων είναι να εκπροσωπούν ένα πλήθος οντοτήτων μικρού μεγέθους όπως σταθμούς ΑΠΕ, καταναλωτές, χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων, παρέχοντας τους τη δυνατότητα συμμετοχής στην αγορά ενέργειας ως μια ισοδύναμη οντότητα. [1]

**Διαχειριστής Δικτύου Διανομής:** Ο διαχειριστής του συστήματος είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία, τη συντήρηση και την ανάπτυξη του συστήματος σε μία δεδομένη γεωγραφική περιοχή, και διαχειρίζεται τα συστήματα διανομής ΜΤ και ΧΤ. Ο διαχειριστής είναι υποχρεωμένος να διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές και να μεριμνά για την απορρόφηση της παραγόμενης από τις διεσπαρμένες μονάδες ενέργεια, στο δίκτυο. Ταυτόχρονα ο ρόλος του είναι ρυθμιστικός και ως εκ τούτου δεν εμπλέκεται σε εμπορικές δραστηριότητες ενέργειας. Στα νέα ευφυή δίκτυα που χαρακτηρίζονται από ευελιξία φορτίου, οι διαχειριστές θα παρέχουν το χώρο πάνω στο οποίο οι προμηθευτές θα προσφέρουν τα προϊόντα τους, διαδραματίζοντας έτσι το ρόλο ενός ουδέτερου διαχειριστή του δικτύου. Η απαίτηση για διαφανές πλαίσιο στις επερχόμενες ανταγωνιστικές συνθήκες είναι ζωτικής σημασίας καθώς οι διαχειριστές θα παρέχουν στους προμηθευτές έγκυρα, πρόσφατα και διαφανή δεδομένα για την πραγματοποίηση των εμπορικών τους συναλλαγών. Οι διαχειριστές του δικτύου έχουν πρόσβαση σε τεχνικά δεδομένα που είναι απαραίτητα για τον έλεγχο και την διαχείριση του δικτύου. Στα μικροδίκτυα όπου η ευελιξία είναι μεγάλη, οι διαχειριστές αποτελούν τον μεσάζοντα τόσο με τους προμηθευτές που χειρίζονται τους χρήστες του μικροδικτύου, όσο και με ιδιώτες παραγωγούς, ώστε να αξιοποιήσουν την ευελιξία των μονάδων τους, για εξισορρόπηση του δικτύου.[19]

## 2.5.6 Έλεγχος

Τεχνολογίες αισθητήρων και παρακολούθησης συλλέγουν δεδομένα για την αξιολόγηση και τον έλεγχο της κατάστασης λειτουργίας και του εξοπλισμού ο οποίος υποστηρίζει το δίκτυο και το καθιστά αξιόπιστο. Η ύπαρξη των τεχνολογιών αυτών εξυπηρετεί τους πελάτες παρέχοντας τους πληροφορίες που αφορούν τις ενεργειακές τους καταναλώσεις. Σε αυτή την κατηγορία τεχνολογιών συμπεριλαμβάνονται αισθητήρες, μονάδες μέτρησης φάσης (PMUs) και προηγμένες μετρητικές υποδομές (AMIs). Όλα αυτά συνδυαστικά υποστηρίζουν συστήματα παρακολούθησης μίας ευρείας περιοχής και παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το χρόνο χρήσης των συσκευών, κοστολόγηση πραγματικού χρόνου και τη γενικότερη λειτουργία του συστήματος. Τα PMUs είναι μονάδες μέτρησης φάσης και αποτελούν ουσιαστικά έναν αισθητήρα υψηλής ταχύτητας συνδεδεμένο στο δίκτυο, που παρέχει γνώση σχετικά με την ποιότητα ισχύος σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Αποτελούν ουσιαστικά ένα δείκτη που προσδιορίζει κατά πόσο το δίκτυο είναι υγιές, καθώς συλλέγει δεδομένα τάσης, φάσης, έντασης για αξιολόγηση του συστήματος. [20]

## 2.5.7 Έξυπνοι Μετρητές – Ελεγκτές

Οι έξυπνοι μετρητές είναι συσκευές αμφίδρομης επικοινωνίας, που σε αντίθεση με τους παραδοσιακούς ηλεκτρομηχανικούς μετρητές που κατέγραφαν αποκλειστικά κατανάλωση ενέργειας, καταγράφουν επιπλέον διάφορες παραμέτρους που αφορούν την ποιότητα ισχύος, διαθέτουν αισθητήρες παρακολούθησης της συχνότητας, της τάσης και της έντασης σε πραγματικό χρόνο, και μπορούν να ανιχνεύσουν υπερτάσεις και υποτάσεις του δικτύου. Οι έξυπνοι μετρητές λειτουργούν ψηφιακά και επιτρέπουν τη μετάδοση πληροφοριών στο διαχειριστή του δικτύου, ενώ από την πλευρά τους οι καταναλωτές έχουν άμεση γνώση των καταναλώσεων τους.

Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών μετρητών είναι οι ευφυείς ηλεκτρονικοί οικιακοί ελεγκτές. Πρόκειται για συσκευές που συνδέονται στον ηλεκτρικό πίνακα του σπιτιού, παρακολουθούν και ελέγχουν εξ αποστάσεως τα οικιακά φορτία, προσφέροντας δυνατότητα για διαχείριση της ζήτησης και εκτέλεση κατανεμημένων αλγορίθμων βελτιστοποίησής. [2]

Μια διαφορετική μετρική τεχνολογία είναι τα AMIs και είναι προηγμένες υποδομές μετρήσεων που περιλαμβάνουν διαφορετικές τεχνολογίες και επιτρέπουν την αμφίδρομη ροή δεδομένων, παρέχοντας σε καταναλωτές και επιχειρήσεις πληροφορίες σχετικές με το κόστος της ενέργειας και τον τρόπο χρήσης της, καθώς επίσης γνώση σχετικά με τους χρόνους και την ποσότητα της ενέργειας που χρησιμοποιείται. Τα AMIs προσφέρουν ένα φάσμα λειτουργιών όπως:

- Απομακρυσμένη αποστολή σημάτων τιμολόγησης, που βοηθούν στην απόκτηση γνώσης σχετικά με την τιμολόγηση και τους χρόνους χρήσης της ενέργειας.
- Δύνανται να συλλέγουν και να αποθηκεύουν στοιχεία που αφορούν τις καταναλώσεις των χρηστών για οποιαδήποτε χρονική περίοδο απαιτείται.
- Παρέχουν γνώση για βελτίωση των διαγνωστικών μέσω λεπτομερών προφίλ των καταναλώσεων των φορτίων.
- Καταγράφουν τον τόπο και τον βαθμό των διακοπών εξ αποστάσεως.

- Δίνουν δυνατότητα απομακρυσμένης σύνδεσης και αποκοπής.
- Επιτρέπουν την αναγνώριση περιπτώσεων ρευματοκλοπής ή απώλειας ενέργειας. [20]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ BLOCKCHAIN

#### 3.1 Εισαγωγή

Το Blockchain είναι μία ταχέως αναπτυσσόμενη ψηφιακή τεχνολογία που συνδυάζει κρυπτογραφία, μηχανισμούς διαχείρισης δεδομένων, δίκτυα και μηχανισμούς κινήτρων για την εκτέλεση, τον έλεγχο και την καταγραφή συναλλαγών μεταξύ μερών. Το Blockchain είναι μια δομή (ledger) κατανεμημένων συναλλαγών, ομαδοποιημένες κατά μπλοκ και συνδεδεμένες μεταξύ τους σε λίστα – αλυσίδα. Τα μέρη που συμμετέχουν στο Blockchain μπορούν να προτείνουν μια συναλλαγή, η οποία θα προστεθεί στη δομή. Οι κόμβοι που διαχειρίζονται τις εν λόγω συναλλαγές μέσα στο Blockchain ελέγχουν την ακεραιότητα τους και τις αποθηκεύουν σε νέο μπλοκ στη δομή. Αντίγραφα του Blockchain αναπαράγονται σε πολλούς γεωγραφικά κατανεμημένους κόμβους. Αυτοί οι κόμβοι επεξεργασίας λειτουργούν από κοινού το σύστημα blockchain, χωρίς τον κεντρικό έλεγχο οποιουδήποτε μεμονωμένου αξιόπιστου τρίτου μέρους, επιτυγχάνοντας συναίνεση για την ακεραιότητα της συναλλαγής και κοινοποιώντας τη σε όλο το σύστημα.

Συναλλαγές όπως πληρωμές, εγγυήσεις, ψηφοφορίες, εκτέλεση συμβολαίων, συντονισμός διαδικασιών είναι θεμελιώδεις λειτουργίες τόσο της βιομηχανίας όσο και των κυβερνήσεων. Παραδοσιακά αυτές οι συναλλαγές πραγματοποιούνταν με την παρουσία ενός αξιόπιστου τρίτου μέρους, όπως είναι οι τράπεζες, οι νομικές εταιρίες, οι κυβερνητικές υπηρεσίες κ.ά. Η έλευση του Blockchain παρέχει ένα διαφορετικό τρόπο υποστήριξης των συναλλαγών, όπου η εμπιστοσύνη δεν διασφαλίζεται από το τρίτο μέρος, αλλά από τις συλλογική λειτουργία του Blockchain και την ορθότητα της λειτουργίας του.

Η τεχνολογία Blockchain χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την πραγματοποίηση συναλλαγών του κρυπτονομίσματος Bitcoin, ωστόσο σήμερα το εύρος εφαρμογής της επεκτείνεται σε πλήθος διαφορετικών πλατφορμών που χρησιμοποιούνται για διαφορετικούς σκοπούς. Όπως οι παραδοσιακές βάσεις δεδομένων, το Blockchain μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση συναλλαγών και πληροφοριών σε διάφορα πεδία εφαρμογών. Διαφέρει όμως σημαντικά από τις βάσεις δεδομένων με τρόπους που επηρεάζουν το σχεδιασμό των συστημάτων που χρησιμοποιούν blockchain.

Η επιτυχημένη λειτουργία ενός συστήματος Blockchain, αποτελεί συνάρτηση πολλών βασικών στοιχείων, όπως:

- Κατάλληλα κριτήρια για τον έλεγχο της ακεραιότητας κάθε συναλλαγής και μπλοκ.
- Την ορθότητα του λογισμικού και των τεχνικών πρωτοκόλλων.
- Ισχυροί μηχανισμοί κρυπτογραφίας για την ταυτοποίηση των μερών και την δικαιοδοσία τους στην προσθήκη νέα συναλλαγής.
- Μια σειρά μηχανισμών παροχής κινήτρων στους κόμβους επεξεργασίας, ώστε να συμμετέχουν στη διαδικασία επεξεργασίας των στοιχείων. [11]

## 3.2 Στοιχειώδεις έννοιες του Blockchain

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας Blockchain βασίστηκε σε σχήματα και τεχνολογίες καθιερωμένες σε διαφορετικά επιστημονικά πεδία, ώστε να επιτευχθεί η ανταλλαγή δεδομένων σε ένα δίκτυο καταναμημένων κόμβων υπό το πρίσμα της ασφάλειας και της ανωνυμίας. Οι επιστημονικοί τομείς που συνείσφεραν στην δόμηση των δικτύων Blockchain είναι αυτός των δικτύων των υπολογιστών και της κρυπτογραφίας. Στη συνέχεια περιγράφονται τα εν λόγω δομικά στοιχεία που έδωσαν το έναυσμα για την υλοποίηση του Blockchain.

### 3.2.1 Peer-to-Peer networking

Κυρίαρχα μοντέλα δικτύων εφαρμογών μέχρι σήμερα είναι αυτό του Πελάτη-Εξυπηρετητή (Client-Server) και των ομότιμων κόμβων. Η αρχιτεκτονική του Client-Server μοντέλου, περιλαμβάνει κόμβους-πελάτες οι οποίοι στηρίζονται στην ύπαρξη του Server για την εξυπηρέτηση των αιτημάτων τους. Ο Server λαμβάνει τα αιτήματα των Clients και ανταποκρίνεται σε αυτά. Τα δίκτυα τύπου Client-Server είναι κεντρικοποιημένα δίκτυα.[37]

Ένα ομότιμο ή Peer-to-Peer (P2P) δίκτυο είναι ένα δίκτυο κόμβων που επιτρέπει σε δύο ή περισσότερους υπολογιστές να μοιράζονται τους πόρους τους ισοδύναμα, χωρίς την απαίτηση ύπαρξης κεντρικού διακομιστή. Όλοι οι κόμβοι του δικτύου έχουν ίσα δικαιώματα, και οι πληροφορίες που βρίσκονται σε έναν κόμβο, ανάλογα με τα δικαιώματα που καθορίζονται, μπορούν να διαβαστούν από όλους τους άλλους, και αντίστροφα.

Ουσιαστικά ένα P2P δίκτυο αποτελείται από ένα καταναμημένο σύνολο χρηστών, στο οποίο δεν υπάρχει συνήθως κεντρικός διαχειριστής ή server. Αντίθετα κάθε κόμβος του P2P δικτύου μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα ως Client όταν αποκτά δεδομένα άλλων κόμβων του δικτύου, και ως Server όταν λειτουργεί ως πηγή από την οποία αποκτούν δεδομένα οι υπόλοιποι χρήστες του δικτύου.[38]

### 3.2.2 Κρυπτογραφία

Η διαδικασία με την οποία ένα αρχικό μήνυμα αποκρύπτει την ουσία του περιεχομένου του, ονομάζεται κρυπτογράφηση. Το αρχικό μήνυμα προς κρυπτογράφηση καλείται plaintext, ενώ το κρυπτογραφημένο μήνυμα καλείται ciphertext. Η διαδικασία μετατροπής του ciphertext στο plaintext καλείται αποκρυπτογράφηση. Οι βασικές υπηρεσίες που παρέχει η κρυπτογραφία είναι [76]:

- **Εμπιστευτικότητα:** Η πληροφορία που μεταδίδεται πρέπει να είναι προσβάσιμη μόνο από τα εξουσιοδοτημένα μέλη, και η κατανόηση της να είναι αδύνατη από οποιονδήποτε τρίτο.
- **Αυθεντικοποίηση:** Η ικανότητα του δέκτη να εξακριβώσει ότι το μήνυμα ανήκει πράγματι στον αποστολέα ή ότι ο αποστολέας είναι πράγματι αυτός που ισχυρίζεται ότι είναι.
- **Ακεραιότητα:** Ο δέκτης του μηνύματος πρέπει να είναι ικανός να εξακριβώσει ότι το μήνυμα δεν έχει τροποποιηθεί κατά τη μεταφορά.
- **Non-Repudiation:** Ο αποστολέας δεν μπορεί να αρνηθεί ψευδώς ότι είναι αυτός που έστειλε το μήνυμα.



Ένας κρυπτογραφικός αλγόριθμος είναι η μαθηματική συνάρτηση που χρησιμοποιείται για την κρυπτογράφηση και την αποκρυπτογράφηση. Γενικά υπάρχουν δύο συναρτήσεις, μία για την κρυπτογράφηση και μια για την αποκρυπτογράφηση.

Αν η ασφάλεια ενός αλγορίθμου είναι βασισμένη στον μυστικό τρόπο λειτουργίας του αλγορίθμου, τότε αυτός είναι ένας περιορισμένος (restricted) αλγόριθμος. Αυτοί οι αλγόριθμοι παρουσιάζουν αποκλειστικά ιστορικό ενδιαφέρον διότι η εφαρμογή τους από μία μεγάλη ή μεταβαλλόμενη ομάδα χρηστών είναι πρακτικά αδύνατη, αφού κάθε φορά που ένας χρήστης αλλάζει ομάδα θα πρέπει να χρησιμοποιήσει και έναν διαφορετικό αλγόριθμο και κάθε ομάδα θα πρέπει να έχει έναν μοναδικό αλγόριθμο.

Η επόμενη γενιά συστημάτων κρυπτογραφίας κάνει χρήση ενός κλειδιού, το οποίο μπορεί να είναι οποιοδήποτε από ένα μεγάλο εύρος τιμών. Η περιοχή των τιμών στις οποίες μπορεί να ανήκει το κλειδί καλείται keyspace. Έστω ότι το κλειδί δηλώνεται από το  $K$ . Τότε οι συναρτήσεις κρυπτογράφησης και αποκρυπτογράφησης είναι:

$$E_K(M)=C \quad (3.1)$$

$$D_K(C)=M \quad (3.2)$$

$$D_K(E_K(M)) = M \quad (3.3)$$

Όπου:

- M: το μήνυμα προς κρυπτογράφηση
- C: το κρυπτογραφημένο μήνυμα
- E(): η συνάρτηση κρυπτογράφησης
- D(): η συνάρτηση αποκρυπτογράφησης

Στις περιπτώσεις όπου αλγόριθμοι χρησιμοποιούν διαφορετικά κλειδιά στην κρυπτογράφηση και στην αποκρυπτογράφηση ( $K_1$  και  $K_2$  αντίστοιχα) οι παραπάνω συναρτήσεις γίνονται:

$$E_{K_1}(M)=C \quad (3.4)$$

$$D_{K_2}(C)=M \quad (3.5)$$

$$D_{K_2}(E_{K_1}(M)) = M \quad (3.6)$$

Η ασφάλεια των αλγορίθμων κρυπτογραφίας με κλειδί ή κλειδιά προκύπτει από την ύπαρξη των κλειδιών και όχι από τις λεπτομέρειες του αλγορίθμου.

### Συμμετρική Κρυπτογραφία:

Η συμβατική κρυπτογραφία αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως συμμετρική κρυπτογραφία ή κρυπτογραφία μυστικού κλειδιού, και αποτελείται από αλγορίθμους που κάνουν χρήση ενός μυστικού κλειδιού. Το σχήμα της συμμετρικής κρυπτογραφίας αποτελείται από [76]:

- Το αρχικό κείμενο που είναι το μήνυμα το οποίο εισάγεται στον αλγόριθμο κρυπτογράφησης
- Τον αλγόριθμο κρυπτογράφησης οποίος πραγματοποιεί τους απαραίτητους μετασχηματισμούς του αρχικού κειμένου για την επίτευξη της κρυπτογράφησης του μηνύματος.

- Το μυστικό κλειδί το οποίο εισάγεται στον αλγόριθμο αποτελώντας είσοδο για την επίτευξη των αντικαταστάσεων και των μετασχηματισμών.
- Το κρυπτογράφημα που παράγεται στην έξοδο του αλγόριθμου κρυπτογράφησης και εξαρτάται από το αρχικό μήνυμα και από το μυστικό κλειδί. Διαφορετικά μυστικά κλειδιά παράγουν στην έξοδο διαφορετικά κρυπτογραφήματα.
- Τον αλγόριθμο αποκρυπτογράφησης, ο οποίος πραγματοποιεί την αντίστροφη διαδικασία, λαμβάνοντας το κρυπτογράφημα και το ίδιο μυστικό κλειδί που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία της κρυπτογράφησης και δίνοντας στην έξοδο του το αρχικό κείμενο.

Η ασφάλεια των συμμετρικών μεθόδων κρυπτογράφησης αποτελεί συνάρτηση της ύπαρξης ενός ισχυρού αλγόριθμου κρυπτογράφησης, ο οποίος μπορεί να είναι δημόσιος, και στην ύπαρξη ενός μυστικού κλειδιού, όπου ο αποστολέας και ο παραλήπτης θα έχουν ασφαλή αντίγραφα του κλειδιού μη προσβάσιμα σε εξωτερικούς παράγοντες.

### Ασύμμετρη κρυπτογραφία

Η κρυπτογράφηση δημόσιου κλειδιού ή ασύμμετρη κρυπτογραφία βασίζεται στη χρήση ενός ζεύγους κλειδιών και την εκτέλεση μαθηματικών συναρτήσεων. Το σχήμα της ασύμμετρης κρυπτογραφίας αποτελείται από[76]:

- Το αρχικό κείμενο που είναι το μήνυμα το οποίο εισάγεται στον αλγόριθμο κρυπτογράφησης
- Τον αλγόριθμο κρυπτογράφησης οποίος πραγματοποιεί τους απαραίτητους μετασχηματισμούς του αρχικού κειμένου για την επίτευξη της κρυπτογράφησης του μηνύματος
- Το ζεύγος ιδιωτικού και δημόσιου κλειδιού που έχει επιλεγεί με τέτοιο τρόπο ώστε το δημόσιο κλειδί του παραλήπτη να χρησιμοποιηθεί για κρυπτογράφηση και το ιδιωτικό κλειδί του παραλήπτη για αποκρυπτογράφηση. Οι ακριβείς μετασχηματισμοί πραγματοποιούνται από τον αλγόριθμο κρυπτογράφησης / αποκρυπτογράφησης και εξαρτώνται από τις τιμές των κλειδιών.
- Το κρυπτογράφημα που είναι το μήνυμα που παράγεται ως έξοδος του αλγορίθμου και εξαρτάται από το αρχικό μήνυμα και το δημόσιο κλειδί του παραλήπτη. Για ένα συγκεκριμένο μήνυμα από δύο διαφορετικά κλειδιά παράγονται από τη συνάρτηση κρυπτογράφησης δύο διαφορετικά κρυπτογραφημένα κείμενα.
- Τον αλγόριθμο αποκρυπτογράφησης που δέχεται ως είσοδο το κρυπτογραφημένο μήνυμα και το ιδιωτικό κλειδί του παραλήπτη και παράγει το πρωτότυπο αρχικό μήνυμα.

Όπως υποδεικνύεται και από τα ονόματά τους, το δημόσιο κλειδί αποσκοπεί σε δημόσια χρήση, ενώ το ιδιωτικό κλειδί, που είναι μοναδικά συσχετιζόμενο με το δημόσιο, το χρησιμοποιεί αποκλειστικά ο κάτοχος του. Τα βήματα που ακολουθούνται στην ασύμμετρη κρυπτογράφηση είναι τα εξής:

Για κάθε χρήστη παράγεται ένα ζεύγος κλειδιών που θα χρησιμοποιηθεί στην κρυπτογράφηση και την αποκρυπτογράφηση των μηνυμάτων. Στη συνέχεια κάθε χρήστης τοποθετεί το δημόσιο κλειδί σε ένα προσβάσιμο αρχείο, ενώ το ιδιωτικό κλειδί «διαφυλάσσεται» διατηρώντας τη μυστικότητα του. Για λόγους λειτουργικότητας απαιτείται η πρόσβαση στα δημόσια κλειδιά οποιουδήποτε χρήστη. Αν ο Χρήστης 1 θέλει να στείλει ένα εμπιστευτικό μήνυμα στο Χρήστη 2, τότε για την κρυπτογράφηση του μηνύματος χρησιμοποιεί το δημόσιο κλειδί του χρήστη 2. Ο χρήστης 2

παραλαμβάνει το κρυπτογραφημένο μήνυμα και χρησιμοποιεί το τι δικό του ιδιωτικό κλειδί για την αποκρυπτογράφηση. Κανένας άλλος δεν γνωρίζει το ιδιωτικό του κλειδί που είναι μοναδικά συσχετιζόμενο με το δημόσιο κλειδί που χρησιμοποιήθηκε στην κρυπτογράφηση.

### 3.2.3 Συναρτήσεις κατακερματισμού και Merkle Trees

Οι **συναρτήσεις κατακερματισμού** αποτελούν πολύτιμο εργαλείο στην αυθεντικοποίηση της πληροφορίας πολλών κρυπτοσυστημάτων. Μια συνάρτηση κατακερματισμού  $H$  δέχεται ως είσοδο ένα μήνυμα  $M$  μεταβλητού μήκους και παράγει στην έξοδο μία τιμή κατακερματισμού σταθερού μεγέθους  $h=H(M)$ . Μια «καλή» συνάρτηση κατακερματισμού έχει την ιδιότητα, όταν ως είσοδος δίνεται ένας μεγάλος όγκος δεδομένων, να παράγει στην έξοδο δεδομένα που είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα και τυχαία. Χαρακτηριστικό αυτών των συναρτήσεων είναι η ακεραιότητα των δεδομένων. Οποιαδήποτε αλλαγή στο μήνυμα  $M$  οδηγεί σε διαφορετική τιμή κατακερματισμού στην έξοδο της συνάρτησης.

Οι βασικές ιδιότητες των συναρτήσεων κατακερματισμού είναι:

1. Μία συνάρτηση κατακερματισμού  $H$  μπορεί να εφαρμοστεί σε δεδομένα μεταβλητού μεγέθους και να παράγει στην έξοδο τιμή κατακερματισμού συγκεκριμένου μεγέθους.
2. Η αποτελεσματικότητα των συναρτήσεων τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και λογισμικού έγκειται στην ικανότητα των συναρτήσεων να παράγουν μία τιμή κατακερματισμού  $h$  από την  $H(x)$  για οποιοδήποτε  $x$ .
3. Είναι υπολογιστικά αδύνατο σε περίπτωση επίθεσης στο σύστημα, για οποιαδήποτε τιμή  $h$  να υπολογιστεί  $x$  τέτοιο ώστε να ικανοποιείται η σχέση  $H(x)=h$ . Αυτό σημαίνει ότι ένας κώδικας μπορεί να παραχθεί με δεδομένο ένα μήνυμα, αλλά είναι πρακτικά αδύνατο να παραχθεί το αρχικό μήνυμα με δεδομένο τον κώδικα. Αυτή είναι η ιδιότητα του μονόδρομου (one-way property)
4. Για οποιαδήποτε τιμή εισόδου  $x$  είναι υπολογιστικά αδύνατο να βρεθεί  $y \neq x$  που να δίνει ίδια τιμή κατακερματισμού, δηλαδή  $H(x)=H(y)$ .
5. Δεν υπάρχει ζεύγος τιμών  $(x,y)$  με  $x \neq y$ , ικανό να παράγει ίδια τιμή κατακερματισμού, δηλαδή  $H(x)=H(y)$ . [14]

Η ιστορία των **Merkle Trees** ξεκινάει το 1979 από το Ralph Merkle ο οποίος δημοσιεύει ένα επιστημονικό άρθρο με τίτλο “A Certified Digital Signature”, στο οποίο περιέγραφε μια μέθοδο δημιουργίας ψηφιακών υπογραφών και το οποίο καθιέρωσε μια νέα εξαιρετικά αποτελεσματική μέθοδο δημιουργίας κρυπτογραφικών αποδείξεων. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται καθ’ επανάληψη στην έκθεση του Satoshi Nakamoto που εισήγαγε την τεχνολογία του Bitcoin, και κατ’ επέκταση τα Merkle Trees βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στην τεχνολογία Blockchain.

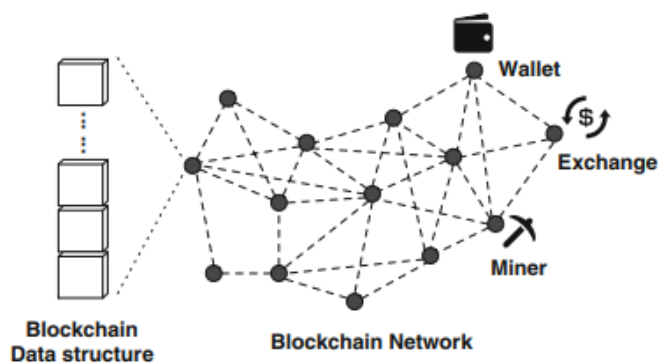
Η μέθοδος των Merkle Trees έχει άμεση συνάφεια με τις συναρτήσεις κατακερματισμού για τη δημιουργία ηλεκτρονικών αποτυπωμάτων για μία συγκεκριμένη είσοδο. Στα δίκτυα Blockchain οι συναρτήσεις κατακερματισμού δημιουργούν ένα τέτοιο αποτύπωμα για κάθε συναλλαγή, με την τιμή κατακερματισμού να είναι η ταυτότητα (ID) της συναλλαγής. Για σχεδόν κάθε πρωτόκολλο Blockchain το αναγνωριστικό κάθε συναλλαγής είναι μια συμβολοσειρά 256 bits. Το

μέγεθος των Blockchain, τα οποία συνήθως αποτελούνται από εκατοντάδες χιλιάδες blocks, καθένα από τα οποία περιλαμβάνει χιλιάδες συναλλαγές, καθιστά την υπολογιστική δύναμη για την επαλήθευση των συναλλαγών εξαιρετικά μεγάλη. Ως εκ τούτου κρίνεται απαραίτητη η χρήση όσο το δυνατόν λιγότερων δεδομένων κατά την επεξεργασία και την επαλήθευση των συναλλαγών.

Τη λειτουργία αυτή πραγματοποιούν τα Merkle Trees τα οποία λαμβάνουν ένα τεράστιο αριθμό ID συναλλαγών, τα δομούν με τρόπο συγκεκριμένο και χρησιμοποιούν κρυπτογραφικές συναρτήσεις κατακερματισμού για να παράγουν μια ενιαία αλφαριθμητική συμβολοσειρά 256bits που είναι το ηλεκτρονικό αποτύπωμα για ολόκληρο το σώμα των δεδομένων που χρήζουν επεξεργασίας. Αυτή η αλφαριθμητική συμβολοσειρά ονομάζεται Merkle Root και επιτρέπει σε κάθε υπολογιστή να επαληθεύει γρήγορα ότι μια συγκεκριμένη συναλλαγή πραγματοποιήθηκε σε ένα συγκεκριμένο block.

### 3.3 Bitcoin – Ethereum – Κρυπτονομίσματα - Tokens

**Bitcoin:** Το 2008 ο Satoshi Nakamoto δημοσιεύει μία έκθεση με τίτλο “Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System” σε ένα φόρουμ κρυπτογραφίας, στο οποίο εξηγούσε πλήρως τις βασικές αρχές της τεχνολογίας Blockchain και του Bitcoin. Αυτή αποτελεί την αρχή της νέας τεχνολογίας που ονομάζεται Blockchain σε διεθνές επίπεδο. Το Bitcoin είναι ένα ομότιμο σύστημα ηλεκτρονικών χρηματικών συναλλαγών. Οποιοσδήποτε έχει πρόσβαση στο σύστημα Bitcoin και μπορεί να πραγματοποιεί συναλλαγές με άλλους χρήστες μέσω ανώνυμων διευθύνσεων. Το νόμισμα ή κρυπτονόμισμα αυτών των συναλλαγών καλείται Bitcoin [BTC]. [12] Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές τράπεζες και τα χρηματοοικονομικά συστήματα το Bitcoin βασίζεται στην αποκεντρωμένη ανάπτυξη εμπιστοσύνης που προκύπτει από τις συναλλαγές διαφορετικών οντοτήτων στο σύστημα. Στο Blockchain Bitcoin υπάρχει μια κατανεμημένη καθολική δομή που αποθηκεύει όλες τις συναλλαγές, αντίγραφα των οποίων αναμεταδίδονται σε πολλούς γεωγραφικά κατανεμημένους κόμβους επεξεργασίας εντός του δικτύου. Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι κόμβων εντός του δικτύου: (1) Χρήστες με «πορτοφόλι» οι οποίοι διαθέτουν ένα ζεύγος δημόσιων και ιδιωτικών κλειδιών, που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ταυτότητας των συναλλαγών που πραγματοποιεί ο χρήστης μέσω των ψηφιακών υπογραφών, (2) οι «εξορύκτες» (miners) που ανταγωνίζονται μεταξύ τους για να προσθέσουν το νέο μπλοκ στην δομή και ουσιαστικά είναι οι κόμβοι εκείνοι που ανακυρρήσουν μία συναλλαγή ως έγκυρη, και (3) τις ανταλλαγές, δηλαδή μέρη όπου οι χρήστες μπορούν να αγοράσουν BTC σε αντάλλαγμα άλλων νομισμάτων. Το Σχήμα 3.1 παρουσιάζει τη δομή του συστήματος Bitcoin. Τα blockchain που υποστηρίζουν ένα κρυπτονόμισμα όπως το Bitcoin θεωρούνται Blockchains πρώτης γενιάς.[11]

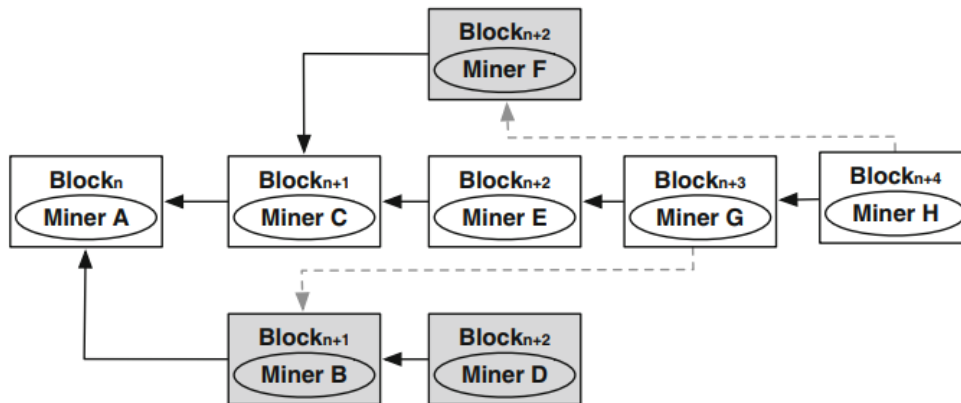


Σχήμα 3.1. Δομή Bitcoin [11]

Οι συναλλαγές σε ένα Bitcoin Blockchain πραγματοποιούνται ως εξής: μία ποσότητα κρυπτονομισμάτων μεταφέρεται από μια διεύθυνση έναρξης σε μία διεύθυνση τέρματος, και οι εισοδοί της μίας συναλλαγής γίνονται οι έξοδοι μίας επόμενης. Αν το άθροισμα των ποσοτήτων στη συναλλαγή δεν είναι ίδιο με το άθροισμα στην έξοδο, σημαίνει ότι ο εξορρύκτης που δημιούργησε το μπλοκ πληρώθηκε για αυτή τη συναλλαγή. Η πληρωμή αυτή αποτελεί ένα κίνητρο για τους κόμβους-εξορύκτες ώστε να προσφέρουν υπολογιστική δύναμη στη διαδικασία για την πραγματοποίηση της συναλλαγής. Συνεπώς οι κόμβοι-εξορύκτες επιλέγουν να «εργαστούν» για τη δημιουργία μπλοκ συναλλαγών που τους προσφέρουν τις υψηλότερες πληρωμές.[11]

**Ethereum:** Το Bitcoin πρωτοστάτησε στην ανάπτυξη των συστημάτων Blockchain πρώτης γενιάς παρέχοντας μια δημόσια δομή για την πραγματοποίηση οικονομικών συναλλαγών με χρήση κρυπτογραφίας. Ωστόσο το Bitcoin παρέχει μικρές δυνατότητες για προγραμματισμένες συναλλαγές, και μόνο πολύ μικρά κομμάτια βοηθητικών δεδομένων μπορούν να ενσωματωθούν στις συναλλαγές και να εξυπηρετήσουν άλλες δραστηριότητες. Τα συστήματα Blockchain δεύτερης γενιάς που έχουν αναπτυχθεί παρέχουν μια δομή γενικής χρήσης που μπορεί να προγραμματιστεί για να εξυπηρετεί όχι μόνο οικονομικές συναλλαγές, αλλά να υποστηρίξει την ανάπτυξη και εκτέλεση προγραμμάτων μέσα στο σύστημα. Το Blockchain Ethereum έχει ως θεμέλιο του τα έξυπνα συμβόλαια και διαθέτει εικονικές μηχανές για την εκτέλεση τους. [11]. Το Ethereum Blockchain παρέχει μία τεχνολογία Blockchain που έχει ενσωματωμένη μία γλώσσα προγραμματισμού για τη σύνταξη των έξυπνων συμβολαίων, δηλαδή το σύνολο των κανόνων βάσει των οποίων τα μέρη που συμμετέχουν σε αυτό το συμβόλαιο συμφωνούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Το Ethereum μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο σύνολο εφαρμογών, καθεμία από τις οποίες ονομάζεται Αποκεντρωμένη Εφαρμογή (Distributed Application - DApp). Η ανάπτυξη των αποκεντρωμένων εφαρμογών και των έξυπνων συμβολαίων σε ένα Ethereum Blockchain απαιτεί την πληρωμή ορισμένων «τελών» που αντικατοπτρίζουν το κίνητρο των συμμετεχόντων κόμβων για συμμόρφωση με το πρωτόκολλο. Η πληρωμή γίνεται με το νόμισμα Ether και τα τέλη αναφέρονται ως “gas” στο Ethereum. Σε αυτό το πλαίσιο ένα συμβόλαιο Ethereum ή ένα σύνολο συμβολαίων που αποτελούν μία αποκεντρωμένη εφαρμογή, δεν πρέπει να θεωρούνται ως το μέσο εκπλήρωσης των όρων του συμβολαίου ή ως μέσο επιβολής συμμόρφωσης των μερών με τους κανόνες, δηλαδή ως νομική σύμβαση, αλλά πρέπει να θεωρούνται ως αυτόνομοι πράκτορες που ζουν στο περιβάλλον εκτέλεσης του συμβολαίου Ethereum, και εκτελούν πάντα ένα συγκεκριμένο κομμάτι κώδικα όταν ληφθεί ένα μήνυμα ή μία συναλλαγή εντός του δικτύου. Το Ethereum είναι

σχεδιασμένο έτσι ώστε οι χρόνοι για τη δημιουργία των μπλοκ να είναι σχετικά μικροί. Οι χρόνοι αυτοί συνήθως δεν είναι μεγαλύτεροι από το χρόνο που απαιτείται για τη διάδοση των πληροφοριών μέσα στο δίκτυο. Έτσι πολλές φορές είναι πιθανό πολλά νέα ανταγωνιστικά μπλοκ να δημιουργούνται σχεδόν ταυτόχρονα. Ένα μπλοκ είναι πιθανό να δημιουργηθεί επιτυχώς από ένα miner, να μεταδοθεί στο δίκτυο, να επικυρωθεί από ορισμένους κόμβους, αλλά εν τέλει να απορριφθεί αν μια μεγαλύτερη αλυσίδα κυριαρχήσει (Σχήμα 3.2) Ένα τέτοιο απορριπτόμενο μπλοκ δημιουργείται όταν ο Miner B και ο miner C εξορύσσουν νέα μπλοκ και τα αναμεταδίδουν σχεδόν ταυτόχρονα.



Σχήμα 3.2. Δομή Ethereum Blockchain [11]

Το Blockchain Ethereum χρησιμοποιεί ένα πρωτόκολλο GHOST (Greedy Heaviest Observed Subtree) για την αντιμετώπιση αυτού το προβλήματος. Στο πρωτόκολλο GHOST οι miners αναφέρονται σε ανταγωνιστικά μπλοκ που εξορύσσονται ανεξάρτητα (Block Miner B και Block Miner F του σχήματος) για να ισχυροποιήσουν την αλυσίδα τους. Στο Ethereum κερδίζει όχι η μακρύτερη αλυσίδα, αλλά η βαρύτερη. [11]

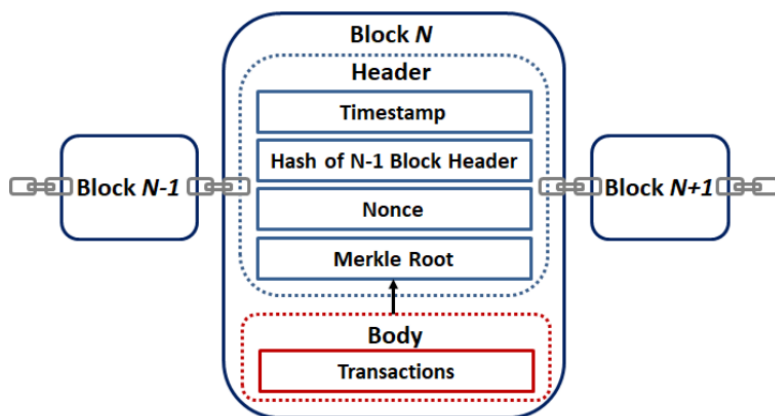
**Κρυπτονομίσματα και Tokens:** Τα κρυπτονομίσματα είναι το βασικό νόμισμα της τεχνολογίας Blockchain. Το Ether είναι το νόμισμα του Ethereum Blockchain και το Bitcoin είναι το νόμισμα του Bitcoin Blockchain. Το σύστημα Blockchain παρακολουθεί την ποσότητα και την ιδιοκτησία των νομισμάτων. Για παράδειγμα, η Αλίκη έχει 2 Ether και θέλει να μεταφέρει 1 Ether στον Μπομπ, με χρέωση 0,01 Ether. Μόλις η συναλλαγή συμπεριληφθεί σε ένα μπλοκ που εξορύχθηκε από τον Τσάρλι, η Αλίκη θα έχει 0,99 Ether, ο Μπομπ θα έχει 1 Ether και ο Τσάρλι θα έχει 0,01 Ether. Το άθροισμα των χρημάτων δεν μεταβάλλεται από αυτές τις συναλλαγές, παρά μόνο το τμήμα του συνόλου που κατέχει κάθε χρήστης. Οι πληρωμή των συναλλαγών γίνεται στο κρυπτονομίσμα του κάθε τύπου Blockchain, αν και ο πελάτης μπορεί να επιλέξει να προσφέρει μηδενική πληρωμή, με κίνδυνο να μην ενταχθεί ή να μειωθεί η ταχύτητα της συναλλαγής. Το ύψος της πληρωμής εξαρτάται συνήθως από το μέγεθος της συναλλαγής και όχι την αξία της. Όσο μεγαλύτερος ο όγκος των δεδομένων κατά την εκτέλεση μια συναλλαγής, όπως πολύπλοκα έξυπνα συμβόλαια και υπολογισμοί, τόσο υψηλότερη η πληρωμή.

Τα Tokens είναι ψηφιακά περιουσιακά στοιχεία που μπορούν να δημιουργηθούν και να συναλλάσσονται σε ένα σύστημα Blockchain. Η δημιουργία τους συνήθως γίνεται με την

εκτέλεση έξυπνων συμβολαίων. Ομοίως με τα κρυπτονομίσματα κάθε token ελέγχεται από κάποιον χρήστη του Blockchain. Αναφορικά με τη χρήση τους, μπορεί να αναπαριστούν μετοχές μιας εταιρίας, δικαιώματα επί των κερδών, ή εικονικό χρυσό σε ένα παιχνίδι. Τα tokens αποτέλεσαν την πρώτη επαναστατική ψηφιακή μονάδα μέτρησης αξίας για την ανάπτυξη εφαρμογών στα Blockchain στις οποίες δεν κυριαρχούν τα κρυπτονομίσματα. [11]

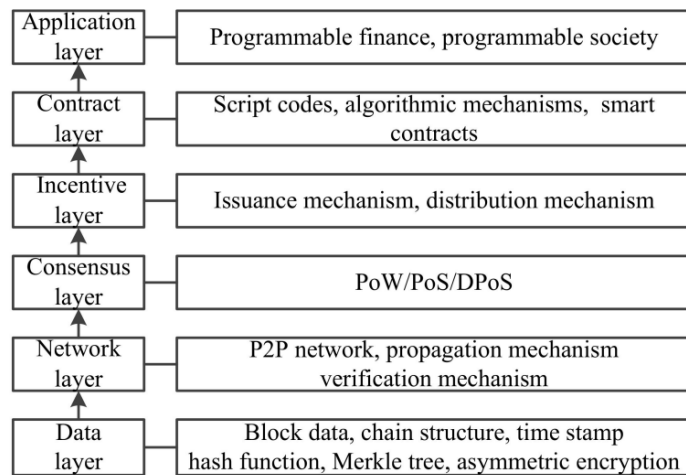
### 3.4 Δομή και Λειτουργία Blockchain

Η τεχνολογία Blockchain αποτελεί μια δομή-βιβλίο συναλλαγών (ledger) σε ένα ομότιμο (peer to peer) δίκτυο, που επιτρέπει ασφαλείς συναλλαγές μεταξύ αποκεντρωμένων χρηστών χωρίς την ανάγκη ύπαρξης κεντρικής ελεγκτικής αρχής. Οι συμμετέχοντες δύνανται να συνάπτουν συμβόλαια, να πραγματοποιούν άμεσες συναλλαγές. [70] Το δίκτυο Blockchain σχηματίζεται από επιμέρους δομές που καλούνται μπλοκ, τα οποία χαρακτηρίζονται από χρονική συνέχεια και αποτελούν βασική μονάδα του δικτύου. Κάθε μπλοκ εμπεριέχει κρυπτογραφημένες πληροφορίες και αρχεία. Αναφορικά με τη δομή τους, αποτελούνται από την επικεφαλίδα (Header), που περιέχει την τιμή κατακερματισμού του προηγούμενου μπλοκ, διασφαλίζοντας έτσι τη σύνδεση των στοιχείων στην αλυσίδα, ένα χρονικό αποτύπωμα (timestamp), ένα τυχαίο μη μηδενικό αριθμό (Nonce) και τη ρίζα του δένδρου Merkle, δηλαδή κωδικοποιημένες συναλλαγές και δεδομένα που ενισχύουν τη ικανότητα επαλήθευσης των στοιχείων του μπλοκ. Το σώμα (Body) του μπλοκ, που περιέχει τις πληροφορίες συναλλαγών, συμβολαίων και συμβαλλόμενων.



Σχήμα 3.3. Γενική δομή Blockchain [68]

Η δομή της τεχνολογία blockchain περιλαμβάνει το επίπεδο δεδομένων, το επίπεδο του δικτύου, το επίπεδο της συναίνεσης, των κινήτρων, του συμβολαίου, και της εφαρμογής.



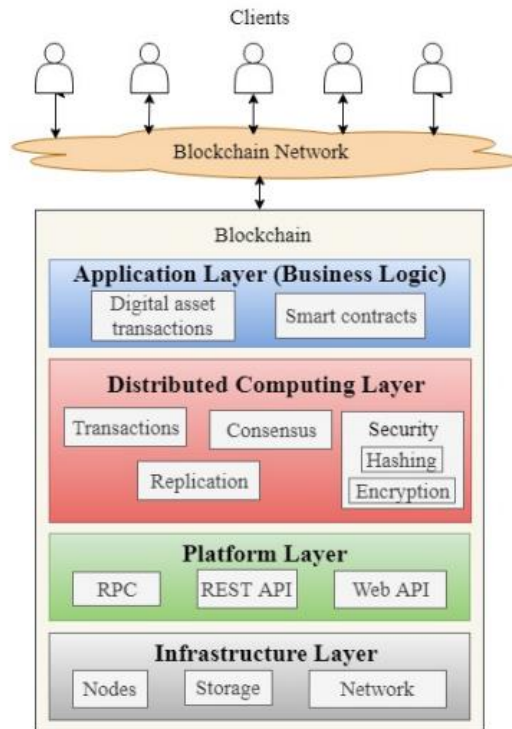
Σχήμα 3.4. Λειτουργική δομή Blockchain [71]

Το επίπεδο δεδομένων, αποτελείται από το μπλοκ που περιλαμβάνει την τιμή κατακερματισμού (hash), το χρονικό αποτύπωμα, τα δεδομένα συναλλαγών του μπλοκ κ.ά. Το επίπεδο δικτύου περιλαμβάνει κυρίως τεχνολογίες εφαρμογής δικτύων Peer to Peer, μηχανισμούς διάδοσης και επαλήθευσης. Το επίπεδο συναίνεσης περιλαμβάνει μηχανισμούς και αλγορίθμους συναίνεσης όπως αυτοί θα αναλυθούν στη συνέχεια, ώστε να διασφαλίζεται η κοινή συναίνεση των συναλλαγών από τους κόμβους που συμμετέχουν στην διαδικασία. Το επίπεδο κινήτρων ενσωματώνει κυρίως οικονομικούς παράγοντες στην τεχνολογία blockchain δημιουργώντας κίνητρα για τους συμμετέχοντες προκειμένου να συμβάλουν στην απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ που απαιτείται από το δίκτυο. Τέλος το επίπεδο συμβολαίων αφορά αλγοριθμικούς μηχανισμούς και έξυπνα συμβόλαια που θεμελιώνουν λειτουργικά το «έργο» που στοχεύει να εξυπηρετήσει η τεχνολογία Blockchain.

### 3.4.1 Αρχιτεκτονική Blockchain

Το Σχήμα 3.5 δείχνει μια επισκόπηση της τεχνολογίας Blockchain, η οποία μπορεί να δομηθεί σε τέσσερα επίπεδα: επίπεδο υποδομής, πλατφόρμα, επίπεδο καταναμημένων υπολογισμών και επίπεδο εφαρμογής. Το επίπεδο υποδομής (Infrastructure Layer) περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που απαιτούνται για δημιουργία του συστήματος, όπως είναι οι κόμβοι, τα μέσα αποθήκευσης και οι εγκαταστάσεις του δικτύου. Οι κόμβοι είναι οι συμμετέχοντες στο δίκτυο και μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες: απλοί κόμβοι, πλήρεις, και κόμβοι εξόρυξης. Ένας απλός κόμβος στο δίκτυο μπορεί απλώς να στέλνει και να λαμβάνει συναλλαγές, χωρίς όμως να αποθηκεύει αντίγραφο του ledger και να επικυρώνει συναλλαγές, σε αντίθεση με έναν πλήρη κόμβο, ο οποίος δύναται να επικυρώνει και να αποθηκεύει. Ένας κόμβος εξόρυξης είναι ένας πλήρης κόμβος, ο οποίος μπορεί να δημιουργήσει ένα νέο μπλοκ. Το στοιχείο αποθήκευσης αποθηκεύει όλες τις συναλλαγές που πραγματοποιούνται. Το επίπεδο της πλατφόρμας (Platform Layer) διευκολύνει διαδικασίες όπως Remote Procedure Calls (RPC), , web Application Programming Interface (API) και REpresentational State Transfer (REST) API's, που χρησιμεύουν στην επικοινωνία μεταξύ των συμμετεχόντων στο σύστημα Blockchain.[13]





Σχήμα 3.5. Επισκόπηση του Blockchain [13]

Το επίπεδο καταναμημένων υπολογισμών (Distributed Computing Layer) εξασφαλίζει τοπική πρόσβαση σε δεδομένα, την ανοχή στο σφάλμα, την αμεταβλητότητα και την ασφάλεια των δεδομένων και την ταυτοποίηση των χρηστών. Αμεταβλητότητα είναι η ιδιότητα του Blockchain να μην επιτρέπει την τροποποίηση των συναλλαγών που έχουν αποθηκευτεί στη δομή. Το Blockchain χρησιμοποιεί αλγορίθμους συναίνεσης για την επίτευξη συμφωνίας σχετικά με τη σειρά πραγματοποίησης των συναλλαγών στο δίκτυο, την ενημέρωση των κόμβων με τις νέες συναλλαγές που πραγματοποιήθηκαν και την επιλογή του επόμενου κόμβου που θα κάνει την εξόρυξη. Επιπλέον αυτό το επίπεδο είναι υπεύθυνο για την ταυτοποίηση, χρησιμοποιώντας τεχνικές κρυπτογραφίας, και για το απόρρητο των δεδομένων χρησιμοποιώντας τεχνικές κατακερματισμού. Το επίπεδο εφαρμογής (Application Layer) είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση των έξυπνων συμβολαίων και τις ψηφιακές συναλλαγές μεταξύ των συμβαλλόμενων. [13]

Όλα τα επίπεδα που απαρτίζουν το σύστημα Blockchain έχουν τα εξής κοινά χαρακτηριστικά:

- **Αποκέντρωση:** Οι συναλλαγές στο σύστημα επεξεργάζονται και επικυρώνονται με τη συναίνεση των κόμβων του συστήματος, εξαλείφοντας την ανάγκη ύπαρξης μεσάζοντα που θα κοινοποιεί και θα αποθηκεύει τις συναλλαγές.
- **Αμεταβλητότητα:** Οι συναλλαγές στο Blockchain αποθηκεύονται σε κάθε μπλοκ. Κάθε μπλοκ στην δομή συνδέεται με το προηγούμενο μέσω μιας συνάρτησης κατακερματισμού. Οποιαδήποτε προσπάθεια τροποποίησης του περιεχομένου ενός μπλοκ θα επηρεάσει και τα επόμενα μπλοκ της αλυσίδας. Συνεπώς, σε ένα σενάριο επίθεσης στη δομή, ο «εισβολέας» θα πρέπει να τροποποιήσει όλα τα επόμενα μπλοκ της αλυσίδας, διαδικασία πολύ δύσκολη υπολογιστικά, δεδομένου ότι τα μπλοκ αναπαράγονται σε πολλαπλούς κόμβους.

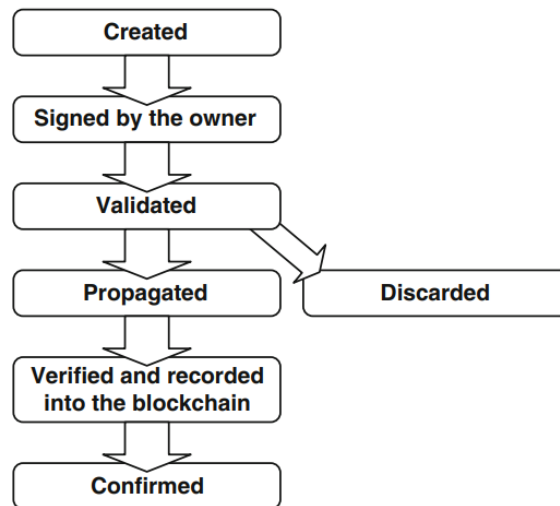
- *Διαφάνεια:* Η δομή ενημερώνεται μόνο εφόσον οι περισσότεροι κόμβοι καταλήξουν σε συναίνεση. Οι αλλαγές στο δίκτυο είναι δημόσια ορατές διασφαλίζοντας έτσι την ασφάλεια του δικτύου.
- *Ιχνηλασιμότητα:* Η κατανεμημένη μορφή και η διαφάνεια που χαρακτηρίζει το Blockchain, δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού οποιασδήποτε μεταβολής και της προέλευσής της.[13]

### 3.4.2 Λειτουργική Δομή του Blockchain

Ως δομή δεδομένων το Blockchain είναι μια λίστα μπλοκ, όπου κάθε μπλοκ περιέχει μια λίστα συναλλαγών. Κάθε μπλοκ του Blockchain συνδέεται με το προηγούμενο της λίστας μέσω της τιμής κατακερματισμού του προηγούμενου μπλοκ. Έτσι το ιστορικό των συναλλαγών που περιέχεται σε κάθε μπλοκ δε μπορεί να διαγραφεί ή να τροποποιηθεί χωρίς να ακυρωθεί η αλυσίδα των τιμών κατακερματισμού. Αυτό σε συνδυασμό με υπολογιστικούς περιορισμούς αλλά και τους μηχανισμούς μέσω των οποίων δημιουργούνται τα μπλοκ αποτρέπει την παραποίηση των πληροφοριών που είναι αποθηκευμένες στη δομή.

Με την πραγματοποίηση μίας συναλλαγής ενημερώνονται οι πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες στο Blockchain. Στις συναλλαγές κρυπτονομισμάτων τα δεδομένα που αποθηκεύονται αφορούν τη διακίνηση των κρυπτονομισμάτων μεταξύ λογαριασμών (διευθύνσεων). Μερικές φορές καταγράφονται επιπλέον δεδομένα συναλλαγών που έχουν νόημα για τους συμμετέχοντες στο σύστημα. Σε blockchains όπως το Ethereum κατά την εκτέλεση των συναλλαγών αποθηκεύονται επιπλέον δεδομένα όπως κώδικας, μεταβλητές ή αποτελέσματα συγκεκριμένων συναρτήσεων. Η διασφάλιση των συναλλαγών επιτυγχάνεται με χρήση κρυπτογραφίας, δημόσιων κλειδιών και ψηφιακών υπογραφών, με τη χρήση των οποίων ταυτοποιούνται οι χρήστες και εξασφαλίζεται ότι μια συναλλαγή μπορεί να πραγματοποιηθεί από εξουσιοδοτημένους χρήστες.

Το Σχήμα 3.6 παρουσιάζει το κύκλο μίας συναλλαγής στο Blockchain. Μόλις η συναλλαγή δημιουργηθεί, υπογράφεται από τον κόμβο που θέλει να την εκκινήσει, ο οποίος δίνει εξουσιοδότηση για χρηματική συναλλαγή, δημιουργία συμβολαίου ή μεταφορά δεδομένων σχετικών με τη συναλλαγή. Έπειτα η προτεινόμενη συναλλαγή αποστέλλεται σε ένα κόμβο του blockchain, ο οποίος ελέγχει την εγκυρότητα της συναλλαγής. Μη έγκυρες συναλλαγές απορρίπτονται. Μετά την αναγνώριση της ως έγκυρη, η συναλλαγή μεταδίδεται και σε άλλους συνδεδεμένους κόμβους, οι οποίοι με τη σειρά τους ελέγχουν την εγκυρότητα της συναλλαγής που έλαβαν και την αναμεταδίδουν ώστε να φτάσει σε κάθε κόμβο του δικτύου. Οι κόμβοι που αποστέλλουν τη συναλλαγή δεν απαιτούν εμπιστοσύνη προς τους κόμβους που θα παραλάβουν τη συναλλαγή, και αντίστοιχα οι κόμβοι-παραλήπτες δεν χρειάζεται να εμπιστευτούν τους αποστολείς, διότι κάθε συναλλαγή είναι υπογεγραμμένη και η επικύρωση της πραγματοποιείται από οποιοδήποτε κόμβο. Όταν η συναλλαγή φτάσει σε ένα κόμβο «εξόρυξης» εγκυροποιείται και προστίθεται στην αλυσίδα. Εξόρυξη καλείται η διαδικασία προσθήκης νέων μπλοκ στην αλυσίδα. Το Blockchain βασίζεται στους «εξορύκτες» για την ανακήρυξη μιας συναλλαγής ως έγκυρη και τη δημιουργία ενός νέου μπλοκ στην δομή. Τα νέα μπλοκ αναμεταδίδονται σε ολόκληρο το δίκτυο έτσι ώστε κάθε κόμβος να έχει ένα επικαιροποιημένο αντίγραφο όλων των συναλλαγών. [11]



Σχήμα 3.6. Απλοποιημένη διάγραμμα κύκλου συναλλαγών [11]

### 3.5 Συναίνεση

Θεμελιώδες στοιχείο της τεχνολογίας Blockchain, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι η δυνατότητα που παρέχεται στους συμμετέχοντες να πραγματοποιούν απευθείας συναλλαγές χωρίς την ανάγκη ύπαρξης κεντρικής ρυθμιστικής αρχής για τη διασφάλιση και την ακεραιότητα των συναλλαγών. Ο μηχανισμός μέσω του οποίου πραγματοποιείται η εν λόγω διασφάλιση είναι οι αλγόριθμοι συναίνεσης, οι οποίοι επιτυγχάνουν τη συναίνεση μεταξύ δύο ή περισσότερων συμβαλλόμενων μερών για την επίτευξη μιας συναλλαγής σε ένα κατακερματισμένο σύστημα. Η επιλογή του κατάλληλου αλγόριθμου συναίνεσης για μια συγκεκριμένη εφαρμογή είναι κρίσιμη για την ενίσχυση της απόδοσης του συστήματος. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί αλγόριθμοι συναίνεσης και η επιλογή τους εξαρτάται από το πεδίο εφαρμογής τους.[68]

**Proof of Work (PoW):** Το Proof of Work είναι μια στρατηγική συναίνεσης ευρέως χρησιμοποιούμενη στα δίκτυα Bitcoin. Η λογική της έγκειται στο γεγονός ότι για την πραγματοποίηση μία συναλλαγής σε ένα κατακερματισμένο δίκτυο, κάποιος από τους κόμβους-συμμετέχοντες πρέπει να καταγράψει τις πραγματοποιούμενες συναλλαγές. Η επιλογή του γίνεται με τρόπο τυχαίο, δεδομένο που κάνει το σύστημα ευάλωτο σε επιθέσεις. Για να προσθέσει ο κόμβος που επιλέχθηκε τυχαία, ένα μπλοκ συναλλαγών στο δίκτυο πρέπει να γίνουν πολλοί υπολογισμοί, ώστε να αποδειχθεί ότι ο κόμβος δε θα επιτεθεί στο δίκτυο. Στον αλγόριθμο PoW κάθε κόμβος υπολογίζει μία τιμή κατακερματισμού (hash value) για την επικεφαλίδα (header) του μπλοκ. Επιπλέον εμπεριέχει μία τυχαία μη μηδενική τιμή (nonce) που μεταβάλλεται τακτικά δίνοντας διαφορετικές τιμές κατακερματισμού. Για να επιτευχθεί συναίνεση απαιτείται υπολογισμός μια τιμής μικρότερης ή ίσης μίας δεδομένης. Όταν ένας κόμβος πετυχαίνει την επιθυμητή τιμή αναμεταδίδει το μπλοκ σε όλους τους κόμβους του δικτύου, οι οποίοι με τη σειρά τους επιβεβαιώνουν αμοιβαία την ορθότητα της τιμής κατακερματισμού. Αν το μπλοκ επικυρωθεί

από τους υπόλοιπους κόμβους, προσκολλάται στην δομή. Οι κόμβοι που υπολογίζουν τις τιμές κατακερματισμού καλούνται εξορύκτες (miners) και η διαδικασία της εκτέλεσης του PoW ονομάζεται εξόρυξη στα δίκτυα Bitcoin.[4] Συνεπώς ο αλγόριθμος συναίνεσης PoW είναι ένας πολύ ενεργοβόρος αλγόριθμος που απαιτεί μεγάλη υπολογιστική δύναμη, και κατά συνέπεια εξαρτάται από το hardware πάνω στο οποίο τρέχει. Επιπλέον χαρακτηρίζεται από μικρές ταχύτητες πραγματοποίησης συναλλαγών. [70]

**Proof of Stake (PoS):** Ο αλγόριθμος συναίνεσης Proof of Stake είναι μια λιγότερο ενεργοβόρα εκδοχή του PoW. Βασική του αρχή είναι ότι η δυναμική κάθε κόμβου για δημιουργία και προσθήκη του νέου μπλοκ στην αλυσίδα, δεν εξαρτάται πλέον από την υπολογιστική ισχύ του κόμβου αλλά στο ποντάρισμα (stake) που κάνει. Έτσι οι ταχύτητες δημιουργίας των μπλοκ και επιβεβαίωσης των συναλλαγών είναι σημαντικά υψηλότερες σε σύγκριση με το μηχανισμό PoW. [6]

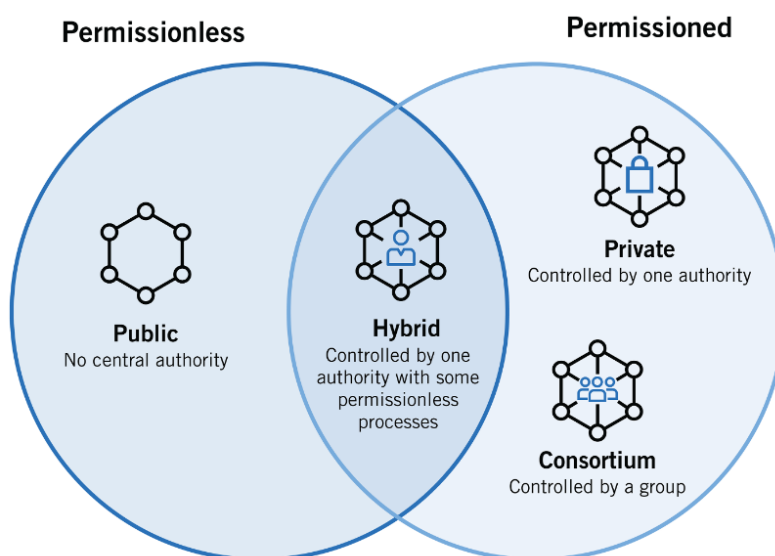
**Proof of Authority (PoAu):** Στη στρατηγική συναίνεσης Proof of Authority (PoAu) η δημιουργία ενός νέου μπλοκ απαιτεί τη χορήγηση άδειας σε ένα ή περισσότερα μέλη του δικτύου να κάνουν αλλαγές στο Blockchain. Για παράδειγμα ένα και μόνο μέλος του δικτύου μπορεί να έχει την ευθύνη της δημιουργίας όλων των μπλοκ της δομής. Ο αλγόριθμος PoAu μπορεί να παρομοιασθεί με τον PoS υπό το πρίσμα ότι το ποντάρισμα του κόμβου που εγκρίνει τη δημιουργία νέων μπλοκ, είναι η δική του ταυτότητα. Τα μέλη του δικτύου εμπιστεύονται τους εξουσιοδοτημένους κόμβους και η δημιουργία ενός μπλοκ πραγματοποιείται μετά την πλειοψηφική επικύρωση από τους κόμβους αυτούς. Οποιοσδήποτε κόμβος μπορεί να λάβει δικαιώματα δημιουργίας νέων μπλοκ αρκεί να υπερψηφιστεί το αίτημα του από τους εξουσιοδοτημένους κόμβους. Παρόλο που το PoAu παρουσιάζει μια πιο κεντρικοποιημένη μέθοδο συναίνεσης στα Blockchain δίκτυα, βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στον ενεργειακό τομέα, σε περιπτώσεις όπου η ασφάλεια και η ακεραιότητα των συναλλασσόμενων είναι αδιαπραγμάτευτη. [21]

**Byzantine Fault Tolerance (BFT):** Ο αλγόριθμος συναίνεσης BFT αφορά το πρόβλημα που βασίζεται σε ένα σύνολο βυζαντινών στρατηγών (ή κόμβων σε ένα περιβάλλον Blockchain), που συμφωνούν σε ένα κοινό σχέδιο δράσης. Για τους βυζαντινούς στρατηγούς το πρόβλημα συνίσταται στο συντονισμό των διαφορετικών τμημάτων ενός στρατού, για να επιτεθούν ταυτόχρονα σε ένα φρούριο. Στην περίπτωση των Blockchains αυτό αντιστοιχίζεται στην επίτευξη συναίνεσης σχετικά με το αν θα επικυρωθεί ένα μπλοκ ή μία συναλλαγή. Η πρόκληση είναι ότι τα μηνύματα μεταξύ των στρατηγών πρέπει να περάσουν μέσα από μια εχθρική επικράτεια και μπορεί να χαθούν, φαινόμενο που αντιστοιχίζεται με τα αναξιόπιστα καταναμημένα συστήματα. Ταυτόχρονα ορισμένοι στρατηγοί μπορεί να είναι αναξιόπιστοι και να σαμποτάρουν την εκστρατεία. Στόχος λοιπόν είναι να διασφαλιστεί ότι πιστοί στρατηγοί μπορούν να φτάσουν σε συναίνεση σχετικά με σχέδιο της επίθεσης, αποφεύγοντας τις παρεμβολές πιθανών προδοτών. Στην ορολογία των Blockchains ένας μικρός αριθμός κακόβουλων κόμβων θα πρέπει να αδυνατεί να επικυρώσει τη δημιουργία ενός μπλοκ ή μίας συναλλαγής. Η ανοχή στο πλήθος των κακόβουλων κόμβων προτείνεται ότι δεν πρέπει να ξεπερνάει το 1/3 των συνολικών κόμβων. Μία εξέλιξη του BFT είναι ο αλγόριθμος **Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT)** ο οποίος

προτείνει την έννοια των πρωτογενών και δευτερευόντων αντιγράφων, όπου τα δευτερεύοντα αντίγραφα ελέγχουν την ορθότητα και την απόκριση του πρωτεύοντος σε δεδομένο χρόνο. Ταυτόχρονα σε περίπτωση μπορούν να μεταβούν σε νέο πρωτογενές σε περίπτωση που το αρχικό παραβιαστεί. Ο αλγόριθμος PBFT αποτελεί δομικό στοιχείο των περισσότερων εφαρμογών Blockchain που φτάνουν σε συναίνεση βάσει ψηφοφορίας. Οι συναλλαγές επαληθεύονται μεμονομένα και υπογράφονται από γνωστούς κόμβους επικύρωσης. Όταν συγκεντρωθεί επαρκής αριθμός κόμβων που επικυρώνουν μία συναλλαγή, τότε αυτή θεωρείται έγκυρη και επιτυγχάνεται η συναίνεση. Το PBFT απαιτεί τα 2/3 των κόμβων του δικτύου να είναι αξιόπιστοι. Με την αύξηση του μεγέθους το δικτύου, η επίτευξη συναίνεσης με χρήση αυτού του αλγορίθμου, επηρεάζει συνολικά την ταχύτητα και την επεκτασιμότητα του δικτύου.[21]

### 3.6 Συμμετέχοντες στο Blockchain

Βασική παράμετρος κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος blockchain είναι το πεδίο εφαρμογής που καλείται να εξυπηρετήσει, και κυρίως ποιοι θα είναι οι συμμετέχοντες στο σύστημα. Ανάλογα λοιπόν με τα δικαιώματα που έχουν οι συμμετέχοντες, ένα δίκτυο Blockchain μπορεί να χαρακτηριστεί πρωτίστως ως δίκτυο που για τη συμμετοχή απαιτείται άδεια, ή δίκτυο στο οποίο οι συμμετέχοντες δε χρειάζονται άδεια. Στα δίκτυα που δεν απαιτείται άδεια για συμμετοχή στο Blockchain οποιοσδήποτε χρήστης έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί ως κόμβος χωρίς να υπόκειται σε έλεγχο ταυτοποίησης, ενώ στα δίκτυα που απαιτείται οι χρήστες να έχουν άδεια προκειμένου να συνδεθούν, μόνο ένας περιορισμένος αριθμός κόμβος με συγκεκριμένα δικαιώματα συμμετέχει. Ταυτόχρονα οι ταυτότητες των κόμβων σε αυτά τα δίκτυα είναι γνωστές σε όλους τους συμμετέχοντες. Στη συνέχεια τα δίκτυα Blockchain κατηγοριοποιούνται, βάσει του ελέγχου που ασκείται σε αυτά, σε δημόσια, ιδιωτικά, υβριδικά και consortium. Το Σχήμα 3.7 παρουσιάζει αυτή την κατηγοριοποίηση των δικτύων Blockchain. [39]



Σχήμα 3.7. Κατηγοριοποίηση Blockchain βάσει δικαιωμάτων συμμετοχής [39]

**Δημόσιο Blockchain:** Δημόσια συστήματα Blockchain είναι εκείνα που επιτρέπουν την συμμετοχή οποιουδήποτε κόμβου στη διαδικασία της συναίνεσης και οποιουδήποτε κόμβος μπορεί να δημιουργήσει το επόμενο έγκυρο μπλοκ στην αλυσίδα. Η ασφάλεια των εν λόγω δικτύων επιτυγχάνεται με τη χρήση αλγορίθμων συναίνεσης όπως οι PoW και PoS που περιεγράφηκαν παραπάνω, ακολουθώντας έτσι τη γενική αρχή ότι ο βαθμός επιρροής ενός κόμβου στο δίκτυο αποτελεί άμεση συνάρτηση της υπολογιστικής ή οικονομικής δυναμικής τους. Παράλληλα η ασφάλεια των δημόσιων blockchain προκύπτει από το μέγεθος τους. Όσο μεγαλύτερο είναι ένα δίκτυο τόσο μεγαλύτερη η διανομή των εγγράφων, άρα και δυσκολότερη η επίθεση σε ολόκληρο το δίκτυο. Το δημόσιο blockchain είναι ανοικτό, και τα δεδομένα διαφανή από όλους τους συμμετέχοντες κόμβους. Αντίγραφα των αρχείων είναι διαθέσιμα σε κάθε κόμβο, διασφαλίζοντας ότι κανείς κόμβος δεν εμφανίζει μια ψεύτικη συναλλαγή ή αποκρύπτει μία υπάρχουσα, αφού κάθε κόμβος έχει ένα ενημερωμένο αντίγραφο της βάσης δεδομένων οποιαδήποτε χρονικής στιγμή. Τα δημόσια Blockchain θεωρούνται πλήρως αποκεντρωμένα. [7] Βασικό μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας δικτύων είναι ο εξαιρετικά χαμηλός ρυθμός πραγματοποίησης μίας συναλλαγής ανά δευτερόλεπτο, λόγω του τεράστιου μεγέθους του δικτύου και του χρόνου επικύρωσης μίας συναλλαγής. Το μέγεθος του δικτύου και οι διαδικασίες επαλήθευσης για την πραγματοποίηση μιας συναλλαγής, καθιστούν επίσης τα δημόσια blockchain εξαιρετικά ενεργοβόρα καθώς απαιτούν ισχυρά υπολογιστικά συστήματα, δημιουργώντας ανησυχίες τόσο από την οικονομική όσο και από την περιβαλλοντική σκοπιά.

**Ιδιωτικό Blockchain:** Ως ιδιωτικά Blockchains χαρακτηρίζονται εκείνα στα οποία η απόφαση για συμμετοχή στη διαδικασία της συναίνεσης και τη δημιουργία επόμενου έγκυρου μπλοκ λαμβάνεται από μια κεντρική διαχειριστική αρχή. Ο διαχειριστής του Blockchain αποφασίζει για τα δικαιώματα των χρηστών επί του δικτύου και την προσβασιμότητα σε αυτό.[7] Ο περιορισμένος αριθμός κόμβων που συμμετέχουν στο δίκτυο καθιστά τα ιδιωτικά δίκτυα εξαιρετικά ταχύτερα από τα δημόσια στην εκτέλεση των συναλλαγών και την προσθήκη των εγκεκριμένων μπλοκ στην αλυσίδα, ενώ ταυτόχρονα παρέχουν στον διαχειριστή ευελιξία ως προς την έκταση του δικτύου, με εύκολη προσθήκη ή αφαίρεση κόμβων από την αλυσίδα. Βασικό μειονέκτημα των ιδιωτικών δικτύων είναι ότι η δομή τους έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τη φιλοσοφία των Blockchain δικτύων, δηλαδή την ανεξαρτητοποίηση από το ενδιάμεσο τρίτο μέρος μίας συναλλαγής και η υψηλή αποκεντροποίηση των χρηστών. Ο διαχειριστής του συστήματος δίνει άδεια στους χρήστες για προσθήκη νέου κόμβου στο δίκτυο και αποφασίζει για την προσβασιμότητα τους στις πληροφορίες που είναι αποθηκευμένες στο Blockchain.[8]

**Υβριδικό Blockchain:** Τα υβριδικά Blockchain είναι ένας συνδυασμός δημόσιων και ιδιωτικών blockchains. Χρησιμοποιεί χαρακτηριστικά και των δύο τύπων δικτύων, δηλαδή μπορείς να έχεις τμήματα του δικτύου που απαιτούν άδεια και τμήματα του δικτύου δημόσια όπου δεν απαιτείται άδεια στους χρήστες. Οι χρήστες μπορούν να ελέγχουν ποιος έχει πρόσβαση και σε ποια αποθηκευμένα δεδομένα, επιλέγοντας μεμονωμένες εγγραφές να είναι δημόσιες και διατηρώντας τις υπόλοιπες ως εμπιστευτικές στο ιδιωτικό δίκτυο. [8] Έτσι όλοι οι χρήστες έχουν δικαίωμα συμμετοχής στην διαδικασία συναίνεσης, αλλά συγκεκριμένοι μόνο κόμβοι μπορούν δημιουργήσουν και να προσθέσουν νέο μπλοκ στην αλυσίδα [5]. Τα υβριδικά δίκτυα χαρακτηρίζονται από ευελιξία καθώς οι χρήστες μπορούν εύκολα να συμμετέχουν σε ένα ιδιωτικό

Blockchain που αποτελείται από πολλά δημόσια Blockchains. Συνήθως οι συναλλαγές εντός του ιδιωτικού δικτύου εγκυροποιούνται εντός αυτού, ωστόσο παρέχεται η δυνατότητα δημοσιοποίησης και στο δημόσιο δίκτυο ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη διαφάνεια και ασφάλεια.[8]

**Consortium Blockchain:** Consortium Blockchain είναι μία ημι-αποκεντρωμένη τοπολογία όπου περισσότεροι του ενός κόμβοι διαχειρίζονται ένα δίκτυο Blockchain. Χαρακτηρίζεται από πολλά από τα πλεονεκτήματα των ιδιωτικών Blockchain όπως αποτελεσματικότητα, δυνατότητα επέκτασης, ταχύτητα και ιδιωτικότητα των συναλλαγών, ωστόσο η διαδικασία της συναίνεσης γίνεται από ένα σύνολο προσυμφωνημένων κόμβων. Τη διαχείριση τους αναλαμβάνει συνήθως ένα σύνολο οργανισμών και όχι μία κεντρική διαχειριστική αρχή όπως στα ιδιωτικά Blockchains. Τα Consortium Blockchain χαρακτηρίζονται λοιπόν από μεγαλύτερη αποκεντροποίηση συγκριτικά με τα ιδιωτικά, οδηγώντας έτσι σε μεγαλύτερη ασφάλεια. Η σύσταση των εν λόγω Blockchain μπορεί να είναι μία δύσκολη διαδικασία, αφού απαιτεί τη συνεργασία διαφορετικών οργανισμών για τη διαχείριση του δικτύου.

Μία συνοπτική παρουσίαση των χαρακτηριστικών των τριών βασικών τύπων Blockchain (δημόσιο, ιδιωτικό, consortium) φαίνεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Σύνοψη χαρακτηριστικών τοπολογιών Blockchain [69]

	<b>Δημόσιο</b>	<b>Ιδιωτικό</b>	<b>Consortium</b>
<b>Πρόσβαση δεδομένων</b>	Οποιοσδήποτε συμμετέχοντας έχει πρόσβαση στα δεδομένα, αποθηκεύει αντίγραφα.	Κεντρική αρχή ορίζει ποιος έχει πρόσβαση και δικαίωμα τροποποίησης των δεδομένων	Δεν είναι όλα τα δεδομένα προσβάσιμα στους συμμετέχοντες
<b>Ασφάλεια</b>	Υψηλή ασφάλεια αφού κάθε μπλοκ διαθέτει αντίγραφα των συναλλαγών	Ο περιορισμένος αριθμός συμμετεχόντων καθιστά το σύστημα ασφαλές;	Διατηρεί το απόρρητο των συναλλαγών. Οι συμμετέχοντες και τα δικαιώματα ανάγνωσης καθορίζονται από τον οργανισμό διαχείρισης
<b>Κόστος</b>	Υψηλό Κόστος	Χαμηλότερο από το δημόσιο Blockchain	Συνήθως χαμηλότερο από το δημόσιο Blockchain
<b>Ταχύτητα</b>	Χαμηλή διότι κάθε συναλλαγή πρέπει να επαληθεύεται και να συγχρονίζεται σε κάθε κόμβο	Υψηλότερη διότι εμπλέκεται μικρός αριθμός συμμετεχόντων	Γρηγορότερο συγκριτικά με το δημόσιο Blockchain αφού οι συμμετέχοντες είναι γνωστοί μεταξύ τους
<b>Μηχανισμός Συναίνεσης</b>	Λόγω του δημόσιου χαρακτήρα, όλοι συμμετέχουν στη διαδικασία της συναίνεσης	Απόφαση για συμμετοχή στη διαδικασία της συναίνεσης έχει αποκλειστικά ο διαχειριστής	Η συναίνεση γίνεται από ένα σύνολο προσυμφωνημένων κόμβων

<b>Συμφόρηση Δικτύου</b>	Υψηλή συμφόρηση λόγω της συχνότητας αύξησης των μπλοκ	Το μέγεθος ενός ιδιωτικού Blockchain μεταβάλλεται ευκολότερα λόγω της ύπαρξης διαχειριστή που παρέχει δικαιώματα πρόσβασης	Μικρότερη συμφόρηση δικτύου διότι ελέγχεται από οργανισμό και μόνο γνωστοί συμμετέχοντες εκτελούν συναλλαγές
<b>Πλήθος Μπλοκ</b>	Το μέγεθος και το πλήθος των μπλοκ είναι συνεχώς αυξανόμενο, απαιτώντας περισσότερους πόρους αφού οποιοσδήποτε συμμετέχει στις συναλλαγές	Το μέγεθος των μπλοκ δεν αποτελεί προβλήματα λόγω του περιορισμένου αριθμού συμμετεχόντων	Το μέγεθος και το πλήθος των μπλοκ είναι ελεγχόμενο από τον οργανισμό διαχείρισης
<b>Σκοπιμότητα</b>	Δεν είναι πάντα βιώσιμη επιλογή λόγω των πόρων που απαιτούνται και του σχετικού κόστους	Εύκολη διατήρηση και χαμηλότερο λειτουργικό κόστος και πόροι	Ίδια πλεονεκτήματα με τα ιδιωτικά Blockchain, και η διαθεσιμότητα των πόρων εξαρτάται από τον οργανισμό διαχείρισης και τα εμπλεκόμενα μέρη

### 3.7 Έξυπνα Συμβόλαια

Οι συναλλαγές που αποθηκεύονται σε ένα Blockchain σύστημα όπως παρουσιάστηκε παραπάνω μπορούν να είναι πολυπλοκότερες από απλές χρηματικές συναλλαγές, και να περιλαμβάνουν αποθήκευση και εκτέλεση προγραμμάτων μέσα στο σύστημα. Τα προγράμματα που αναπτύσσονται ως δεδομένα μέσα στη δομή blockchain και εκτελούνται κατά την πραγματοποίηση των συναλλαγών ονομάζονται Έξυπνα Συμβόλαια. Τα Έξυπνα Συμβόλαια μπορούν να κρατούν και να μεταφέρουν ψηφιακά στοιχεία που διαχειρίζεται το blockchain και να επικαλούνται άλλα έξυπνα συμβόλαια που είναι αποθηκευμένα στο σύστημα. Ο κώδικας των συμβολαίων είναι αμετάβλητος και ντετερμινιστικός.

Το blockchain Bitcoin επιτρέπει αποκλειστικά την εκτέλεση πολύ απλών έξυπνων συμβολαίων, όμως άλλα συστήματα όπως το Ethereum επιτρέπει τη εκτέλεση προγραμμάτων που είναι γραμμένα σε μία γλώσσα Turing. Συνεπώς το Blockchain δεν είναι απλά μια κατανεμημένη βάση δεδομένων, αλλά μια πλατφόρμα εκτέλεσης προγραμμάτων. Αυτή η δυνατότητα των blockchain τα καθιστά ως μια τεχνολογία ικανή να χρησιμοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Τα έξυπνα συμβόλαια μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαχείριση περιουσιακών στοιχείων που αντιπροσωπεύονται από κρυπτονομίσματα. Αν και συνήθως δεν χρησιμοποιούνται ως νομικά συμβόλαια, πολλές φορές τα έξυπνα συμβόλαια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αυτοματοποίηση ή την επίβλεψη της εκτέλεσης τμήματος συμβάσεων. Η χρήση τους εντοπίζεται σε παιχνίδια, λοταρίες ή στοιχήματα. Συνηθέστερος τρόπος χρήσης των έξυπνων συμβολαίων είναι να ορίζουν ένα πρωτόκολλο αλληλεπίδρασης μεταξύ διαφορετικών μερών, όπως η συνεργασία μεταξύ εταιριών. Πολλές εφαρμογές της τεχνολογίας Blockchain στηρίζονται στην



ύπαρξη των έξυπνων συμβολαίων, και η ανάπτυξη τους είναι δυνατή αποκλειστικά χάρη σε αυτά.[11]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>

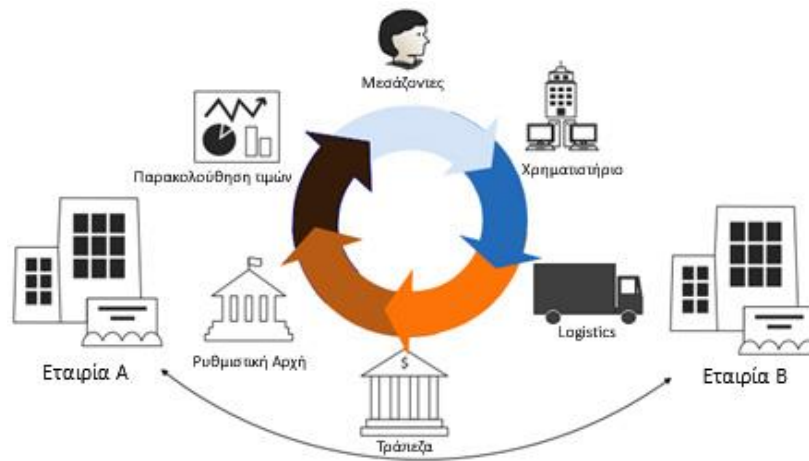
## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ BLOCKCHAIN ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### 4.1 Εισαγωγή

Ο ενεργειακός τομέας βρίσκεται σε στάδιο μετάβασης, γεγονός που προκύπτει τόσο από ρυθμιστικά και πολιτικά μέτρα που λαμβάνονται παγκοσμίως, όσο και από τις τεχνολογικές εξελίξεις. Η αγορά ενέργειας αποτελείται από ένα τεράστιο πλήθος παικτών, δημιουργώντας την απαίτηση για ασφάλεια και αξιοπιστία στα σύγχρονα ενεργειακά συστήματα. Η εκπλήρωση αυτής της απαίτησης σήμερα επιτυγχάνεται με την ύπαρξη μεγάλου αριθμού διαμεσολαβητών στον ενεργειακό τομέα. Τα ενεργειακά συστήματα αποτελούν ένα πρόσφορο έδαφος για την εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στα ενεργειακά συστήματα, αφού είναι δυνατό να ικανοποιήσουν την απαίτηση για ένα πολύ υψηλό βαθμό ασφάλειας και να διευκολύνουν την ανάπτυξη εμπιστοσύνης μεταξύ συμμετεχόντων χωρίς την ανάγκη ύπαρξης ενδιάμεσων ρυθμιστικών οντοτήτων, διατηρώντας την ανωνυμία της ταυτότητάς τους. Ταυτόχρονα η δυνατότητα ανάπτυξης έξυπνων συμβολαίων σε πλατφόρμες όπως το Ethereum ενισχύει την πιθανότητα εφαρμογής του Blockchain στον ενεργειακό τομέα. Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση τόσο από πλευράς βιβλιογραφίας, όσο και από πλευράς εμπορικών εφαρμογών και ερευνητικών έργων, το στάδιο της διείσδυσης της νέας και πολλά υποσχόμενης τεχνολογίας Blockchain στην ενέργεια.

### 4.2 Ενεργειακές Αγορές

Ένας σημαντικός τομέας εφαρμογής της τεχνολογίας Blockchain είναι αυτός της αγοράς της ενέργειας σε επίπεδο παραγωγών και κατ' επέκταση χονδρικής. Το χονδρεμπόριο της ενέργειας όπως είναι διαμορφωμένο σήμερα αποτελείται από πολύπλοκες διαδικασίες που απαιτούν τη συμμετοχή και συνεργασία πολλών ενδιάμεσων παραγόντων. Για την διοχέτευση της παραγωγής στην αγορά παρεμβάλλονται μία σειρά τρίτων μερών που λειτουργούν ως μεσάζοντες, όπως το χρηματιστήριο, πάροχοι, ρυθμιστικές αρχές, τράπεζες κ.ά δημιουργώντας σημαντικά μεγάλους νεκρούς χρόνους στις τρέχουσες διαδικασίες συναλλαγών στην ενέργεια. Το Σχήμα 4.1. παρουσιάζει ενδεικτικά τους βασικούς μεσάζοντες που εμπλέκονται στο χρηματοοικονομικό εμπόριο μεταξύ δύο εταιριών. Οι σημερινές διαδικασίες ενεργειακών χρηματοοικονομικών συναλλαγών απαιτούν χειροκίνητη επεξεργασία και αυξημένες επικοινωνίες μεταξύ των μερών, ώστε να ενοποιηθούν οι πληροφορίες που διατηρεί κάθε μέρος, και να επικυρωθεί η συναλλαγή. Ως αποτέλεσμα οι τρέχουσες διαδικασίες είναι αργές και χρονοβόρες, αφού οι συναλλαγές πρέπει να επαληθεύονται και να επικυρώνονται από πολλαπλούς μεσάζοντες, μέχρι την τελική διευθέτησή τους.

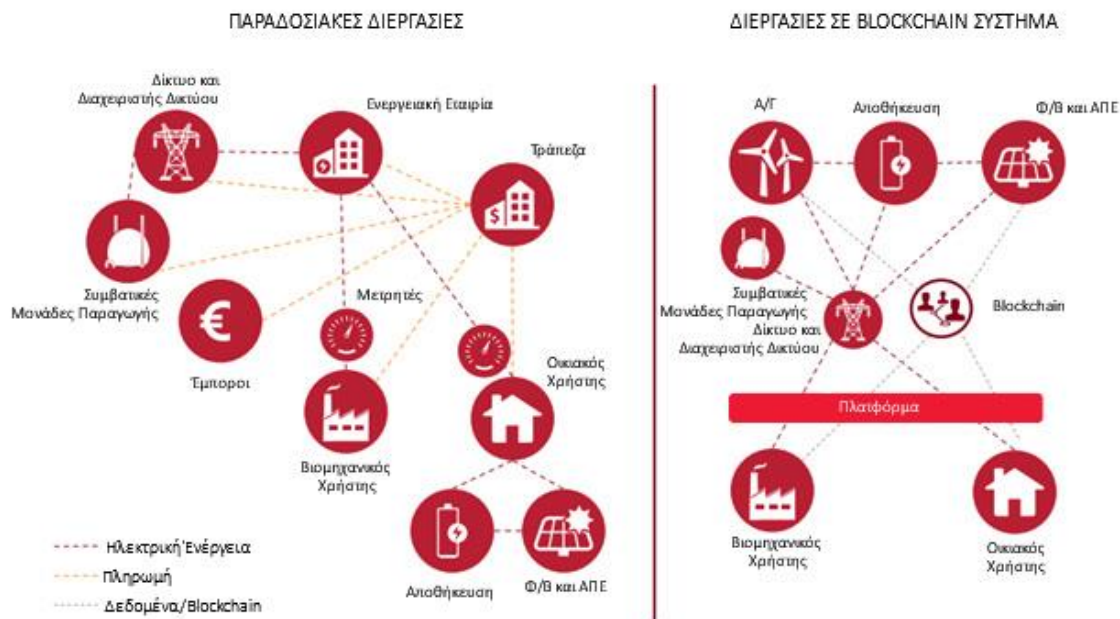


Σχήμα 4.1. Διαδικασίες και συμμετέχοντες σε τυπικές συναλλαγές ενεργειακών αγορών [21]

Η βραδύτητα των συναλλαγών όπως πραγματοποιούνται σήμερα οδηγεί σε σημαντικά κόστη που είναι απαγορευτικά για διεσπαρμένους παραγωγούς μικρής κλίμακας, οι οποίοι στην πράξη εξαιρούνται από την αυτόνομη συμμετοχή τους στην αγορά.

Η τεχνολογία Blockchain και τα έξυπνα συμβόλαια, μπορούν να δώσουν τη δυνατότητα σε διεσπαρμένους παραγωγούς ενέργειας να εμπορεύονται απευθείας με καταναλωτές ή παρόχους ενέργειας, αποκόπτοντας τους μεσάζοντες. Η γενική εικόνα αυτού του τρόπου χρηματοοικονομικών συναλλαγών στην ενέργεια περιλαμβάνει έναν ορισμένο από τον καταναλωτή μεσάζοντα, που εντοπίζει την καλύτερη προσφορά στην αγορά, η οποία ικανοποιεί την προβλεπόμενη ζήτηση του καταναλωτή για μια δεδομένη χρονική περίοδο, και πραγματοποιείται μια άμεση συναλλαγή μεταξύ παραγωγού και πελάτη. Η συμφωνία θα καταγράφεται με ασφάλεια στο blockchain και θα εκτελείται αυτόματα την προκαθορισμένη ώρα, ενώ η πληρωμή της ενέργειας που συναλλάχτηκε θα πραγματοποιείται με την εκτέλεση της μεταφοράς ενέργειας, όπως θα διατυπώνεται στο συμφωνηθέν συμβόλαιο. Τα δεδομένα όλων των συναλλαγών σε αυτή την περίπτωση, είναι διαθέσιμα σε όλους τους συμμετέχοντες στις συναλλαγές, και στο διαχειριστή του δικτύου, μέσω της δομής Blockchain. [21]

Η πιθανότητα εφαρμογής τεχνολογιών Blockchain στο χονδρεμπόριο της ενέργειας επισημαίνεται σε διάφορες εκθέσεις εταιριών consulting [22], οι οποίες προβλέπουν έναν πιθανό μετασχηματισμό των ενεργειακών αγορών του σήμερα, με την έλευση των νέων αυτών συστημάτων. Μία νέα πιθανή δομή των ενεργειακών αγορών φαίνεται στο παρακάτω συγκριτικό Σχήμα 4.2. Η παραγωγή μεγάλης ή μικρής κλίμακας, η αποθήκευση και η διεσπαρμένη παραγωγή από ΑΠΕ, θα εμπλέκονται στις ενεργειακές αγορές μέσω μιας πλατφόρμας συναλλαγών τεχνολογίας Blockchain, και με τη συνεργασία του διαχειριστή του δικτύου θα επιτυγχάνονται συναλλαγές με τους τελικούς χρήστες.[22]



Σχήμα 4.2. Μετασχηματισμός ενεργειακών αγορών με την εισαγωγή του Blockchain [22]

Από πλευράς βιβλιογραφίας ένας μεγάλος αριθμός εργασιών έχει δημοσιευθεί και παρουσιάζουν το ζήτημα της συμπόρευσης των ενεργειακών αγορών με την τεχνολογία Blockchain, τόσο σε επίπεδο ευφών δικτύων όσο και σε μικροδικτύων. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν ερευνητικές εργασίες στις οποίες παρουσιάζονται πλατφόρμες και συστήματα που κάνουν χρήση του Blockchain.

Στην δημοσίευση [23] του Mihail Mihaylon παρουσιάζεται ένα νέο αποκεντρωμένο ψηφιακό νόμισμα που ονομάζεται **NRGcoin**. Σε ένα έξυπνο δίκτυο οι prosumers ανταλλάσσουν την ενέργεια που παράγουν από ΑΠΕ, χρησιμοποιώντας NRGcoins για την πραγματοποίηση των συναλλαγών. Η δημιουργία του νομίσματος και η διακίνηση του είναι παρόμοια με εκείνη του Bitcoin, με τη διαφορά ότι παράγεται με την έγχυση ενέργειας στο δίκτυο, χωρίς να δαπανάται υπολογιστική ισχύ όπως στο Bitcoin. Ταυτόχρονα στην εργασία προτείνεται ένα μοντέλο συναλλαγών για την αγοροπωλησία ενέργειας πάνω στο έξυπνο δίκτυο. Η ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ στο δίκτυο μετατρέπεται απευθείας σε NRGcoins, ανεξάρτητα από την τιμή της ενέργειας στην αγορά. Το νόμισμα μπορεί οποιαδήποτε στιγμή να συναλλαχθεί στο αντίστοιχο νομισματικό του ισοδύναμο (πχ ευρώ, δολάριο, λίρα κλπ.). Στο μοντέλο που παρουσιάζεται στην εργασία, οι παραγωγοί δεν αποθηκεύουν ενέργεια σε περιόδους μηδενικής ζήτησης από τα φορτία, αλλά τη διοχετεύουν συνεχόμενα στο δίκτυο, και η πληρωμή του γίνεται με τη μορφή NRGcoins με βάση την πραγματική χρήση ενέργειας. Οι έξυπνοι μετρητές που υπάρχουν στο δίκτυο αποστέλλουν πληροφορίες σχετικά με την παραγωγή και την ζήτηση στους υποσταθμούς χαμηλής τάσης του δικτύου, που ανήκουν στον διαχειριστή του δικτύου κάθε 15 λεπτά. Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται προκειμένου να προσδιοριστεί η ανταμοιβή που πρέπει να λάβουν οι παραγωγοί για την ενέργεια που εγχέουν στο δίκτυο και οι χρεώσεις που καλούνται να πληρώσουν οι τερματικοί χρήστες για την ενέργεια που καταναλώνουν. Αυτές οι ανταμοιβές ή χρεώσεις παρέχουν κίνητρα στους παράγοντες της αγοράς για εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης ενέργειας, περιορίζοντας έτσι τις αιχμές παραγωγής και ζήτησης. Για παράδειγμα σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και υψηλής παραγωγής ενέργειας, η ενέργεια κοστολογείται με

χαμηλή τιμή, ενώ αντίστοιχα σε περιόδους περιορισμένης παραγωγής και υψηλής ζήτησης, η ενέργεια κοστολογείται ακριβά. Σε επίπεδο γειτονιάς λοιπόν, κάθε υποσταθμός λαμβάνει δεδομένα προσφοράς και ζήτησης και καθορίζει τα αντίστοιχα ποσοστά παραγωγής και κατανάλωσης, διαδραματίζοντας έτσι σε τοπικό επίπεδο παρόμοιο ρόλο με εκείνο του διαχειριστή του δικτύου στις σημερινές ενεργειακές αγορές.

Αναλυτικότερα, ένας prosumer  $P$  παράγει συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας και εγγεί  $x$  ενέργεια στο δίκτυο. Όλοι οι κόμβοι του Blockchain NRGcoin ενημερώνονται ότι ο  $P$  έγχυσε  $x$  ενέργεια στο δίκτυο και πληρώθηκε  $f(x)$  NRGcoins όπως ορίζεται από το πρωτόκολλο NRGcoin. Ο υποσταθμός  $S$  στον οποίο είναι συνδεδεμένος ο  $P$ , έχει μετρήσει για χρονική περίοδο 15 λεπτών, τοπική παραγωγή ενέργειας  $t_p$  και τοπική κατανάλωση ενέργειας  $t_c$ . Για την ενέργεια  $x$  που εγχύθηκε στο δίκτυο ο  $S$  μεταφέρει στον  $P$ ,  $g(x, t_p, t_c)$  NRGcoins ως πληρωμή, όπου  $g()$  η συνάρτηση υπολογισμού της τιμής που θα πληρωθεί ο  $P$  και την καθορίζει ο διαχειριστής του δικτύου. Συνεπώς ο Prosumer  $P$  πληρώνεται τόσο από το πρωτόκολλο NRGcoin (διασφαλίζοντας έτσι τη συνεχή δημιουργία νέων νομισμάτων), όσο και από τον υποσταθμό  $S$ .

Οποιοδήποτε 15λεπτο ο  $P$  μπαίνει στην αγορά ενέργειας για να συναλλάξει  $m$  NRGcoins με ευρώ. Ομοίως ο καταναλωτής  $C$  αποφασίζει να αγοράσει  $n$  NRGcoins προσφέροντας ευρώ και αναγγέλλει στην αγορά αυτή του την πρόθεση. Αν τα δύο αιτήματα έρθουν σε συμφωνία, ο  $P$  απελευθερώνει  $m \leq n$  NRGcoins και λαμβάνει τα αντίστοιχα ευρώ, ενώ ο  $C$  δίνει ευρώ και λαμβάνει τα αντίστοιχα NRGcoins. Τότε ο  $C$  είναι σε θέση να πληρώσει για την  $y$  ποσότητα ενέργειας που κατανάλωσε  $h(y, t_p, t_c)$  NRGcoins στον υποσταθμό  $S$ . Ο  $P$  και ο  $C$  μπορούν να ανήκουν σε διαφορετικούς υποσταθμούς. Η συνάρτηση  $h()$  υπολογίζει τη τιμή που καλείται να πληρώσει ο  $C$  για την ενέργεια που κατανάλωσε και την καθορίζει ο διαχειριστής του δικτύου.

Οι  $g$  και  $h$  είναι σχεδιασμένες ώστε να εξισορροπείται η παραγωγή και η ζήτηση σε επίπεδο γειτονιάς. Τα ποσά με τα οποία αμείβονται οι prosumers για την ενέργεια που εγγέουν εξαρτώνται από την τοπική προσφορά και κατανάλωση, με αποτέλεσμα διαφορετικοί prosumers μπορεί να αμειφθούν διαφορετικά για την ίδια ποσότητα ενέργειας, σε διαφορετικά σημεία του δικτύου. Οι διαφοροποιήσεις στις αποζημιώσεις ή χρεώσεις που καθορίζει ο διαχειριστής του δικτύου, στοχεύουν στην εξισορρόπηση της παραγωγής και της κατανάλωσης, και στον περιορισμό των αιχμών.

Ο ρυθμός με τον οποίο τα NRGcoins παράγονται εξαρτάται αποκλειστικά από την ποσότητα ενέργειας που εγγέεται στο δίκτυο. Αυτή η ποσότητα κοινοποιείται από τον μετρητή του παραγωγού σε όλους του μετρητές του δικτύου που τρέχουν πρωτόκολλο NRGcoin, επιτρέποντας έτσι σε όλους τους συμμετέχοντες του δικτύου να διατηρούν αρχείο με όλες τις συναλλαγές όλων των μετρητών. Σημειώνεται ότι παρόλο που τα δεδομένα που συναλλάσσονται αφορούν τους έξυπνους μετρητές, διατηρούν την ανωνυμία τους σε επίπεδο εσόδων και συναλλαγών. Η δημιουργία των NRGcoins είναι όμοια με αυτή της εξόρυξης στο Bitcoin. Για να προμηθευτούν ή να πουλήσουν NRGcoins οι χρήστες του δικτύου συμμετέχουν στην αγορά συναλλαγών. Ο χρήστης που θέλει να αποκτήσει NRGcoins αναγγέλλει μια προσφορά αγοράς η οποία περιλαμβάνει το ποσό νομισμάτων που επιθυμεί να αγοράσει και την τιμή που προτίθεται να πληρώσει, και αντίστοιχα ο χρήστης με περίσσεια NRGcoins αναγγέλλει μία προσφορά πώλησης στην αγορά των συναλλαγών. Στο αίτημα συναλλαγής συμπεριλαμβάνονται επιπλέον πληροφορίες σχετικές με τη διάρκεια που το αίτημα θα μείνει ενεργό ή την ανάγκη εύρεσης συναλλασσόμενου που να παρέχει ολόκληρο ή μερικώς το ποσό NRGcoins που αιτείται. Κατά

την αναγγελία μιας προσφοράς αγοράς στο δίκτυο, όλοι οι πωλητές με τιμή χαμηλότερη από την τιμή που προτίθεται να πληρώσει ο αγοραστής, «πωλούν» τα NRGcoins μέχρι να συμπληρωθεί το ποσό. Κατά την αναγγελία πώλησης NRGcoins, η συναλλαγή πραγματοποιείται μόνο αν η τιμή αγοράς είναι μεγαλύτερη ή ίση από την τιμή πώλησης.

Στην δημοσίευση [24] αναπτύσσεται ένα πλαίσιο για την αποκεντρωμένη P2P διαχείριση ενέργειας σε επίπεδο τοπικών ενεργειακών αγορών. Οι συγγραφείς αναπτύσσουν μια αυτόνομη και αποκεντρωμένη μέθοδο διαχείρισης του δικτύου, η οποία μεγιστοποιεί τα οφέλη για τους prosumers του δικτύου, αναπτύσσοντας μία P2P αγορά συναλλαγών ενέργειας που αξιοποιεί την τεχνολογία Blockchain και τα έξυπνα συμβόλαια. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται ένα μοντέλο διαδραστικής ενεργειακής αγοράς για P2P αγορές, ένα σύστημα διαχείρισης της ενέργειας βασισμένο στην τεχνολογία Blockchain, και προτείνεται η εκτέλεση ενός έξυπνου συμβολαίου που επιλύει ένα πρόβλημα οικονομικής κατανομής του φορτίου, για τη μεγιστοποίηση του κέρδους των καταναλωτών και των prosumers.

Αναλυτικότερα, στην ενεργειακή αγορά που προτείνεται για ένα P2P αποκεντρωμένο δίκτυο, συστατικά στοιχεία είναι οι κόμβοι που είναι καταναλωτές είτε prosumers, και επιδιώκουν την ανταλλαγή ενέργειας σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Με την είσοδο του στην αγορά ο κόμβος-καταναλωτής κοινοποιεί το προφίλ των ενεργειακών του καταναλώσεων, ενώ ο κόμβος-prosumer κοινοποιεί το προφίλ παραγωγής του και την τιμή πώλησης της ενέργειας που παράγει. Όλοι οι κόμβοι του δικτύου λαμβάνουν αυτά τα δεδομένα που αφορούν όλους τους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου, κάνοντας χρήση ενός έξυπνου συμβολαίου. Έχοντας αυτά τα δεδομένα στη διάθεση του, κάθε κόμβος καλείται να επιλύσει ένα πρόβλημα οικονομικής κατανομής μέσω ενός έξυπνου συμβολαίου, και να υπολογίσει την τιμή εκκαθάρισης της αγοράς, με βάση την οποία όλοι οι συμμετέχοντες στην αγορά θα πραγματοποιήσουν τις συναλλαγές τους. Σημειώνεται ότι όλοι οι κόμβοι επιλύουν το ίδιο πρόβλημα βελτιστοποίησης, με τα ίδια δεδομένα εισόδου, και κατ' επέκταση θα πρέπει να οδηγηθούν σε πανομοιότυπα αποτελέσματα, τα οποία κοινοποιούνται στο δίκτυο. Σε περίπτωση που κάποιος κόμβος δεν κοινοποιεί ταυτόσημα αποτελέσματα, αποκλείεται από την αγορά.

Αναφορικά με τη δομή της εφαρμογής πάνω στην οποία πραγματοποιούνται οι συναλλαγές, πρόκειται για ένα P2P ιδιωτικό δίκτυο Blockchain, που χρησιμοποιεί το Ethereum. Κάθε κόμβος διαθέτει ιστορικό με τα έξυπνα συμβόλαια που εκτελέστηκαν, βιβλιοθήκες για τη συνδεσιμότητα των δεδομένων των αποκεντρωμένων κόμβων, και συναρτήσεις. Η δομή της εφαρμογής περιλαμβάνει δύο επιμέρους συνιστώσες:

- Την αποκεντρωμένη εφαρμογή (Decentralized Application - Dapp) που κυρίως διεκπεραιώνει τις διαδικασίες που απαιτούνται πριν την έναρξη των συναλλαγών. Η απαίτηση για πραγματοποίηση συναλλαγών σε πραγματικό χρόνο καθιστά αναγκαία τη λήψη απόφασης σχετικά με την είσοδο κάθε κόμβου στην αγορά. Η εφαρμογή στοχεύει στον υπολογισμό ακριβής πρόβλεψης των φορτίων του δικτύου, βασιζόμενη σε ιστορικά δεδομένα παραγωγής και κατανάλωσης, καθώς και βάσει εξωγενών πληροφοριών, όπως κλιματικά δεδομένα, χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα σήματα τιμολογιακών πολιτικών για τη λήψη απόφασης.
- Τα έξυπνα συμβόλαια που εμπεριέχουν κώδικες, οι οποίοι διαχειρίζονται τις διαδικασίες για την πραγματοποίηση των συναλλαγών στην αγορά, χρησιμοποιώντας όλα τα δεδομένα που κοινοποιούνται μεταξύ των κόμβων του Blockchain. Οι δύο συναρτήσεις που εκτελούνται στα έξυπνά συμβόλαια είναι:

- Συνάρτηση για τον υπολογισμό της τιμής εκκαθάρισης της αγοράς
- Συνάρτηση για την ανάθεση P2P εικονικών συναλλαγών ενέργειας και τη χρήση ψηφιακού νομίσματος.

Μετά τον υπολογισμό της τιμής εκκαθάρισης της αγοράς, οι κόμβοι που συμμετέχουν στην αγορά υπολογίζουν την ποσότητα ενέργειας που θα διακινηθεί και την πληρωμή που θα δώσει ή θα λάβει κάθε κόμβος, στο χρονικό διάστημα που πραγματοποιείται η διαδικασία.

Κατά την προσομοίωση της πλατφόρμας σε ένα δίκτυο 33 ζυγών, όπου 16 κόμβοι συμμετέχουν στην αγορά και οκτώ από αυτούς είναι prosumers, προέκυψαν αποτελέσματα σχετικά με τους καταναλωτές, οι οποίοι παρατήρησαν μείωση του κόστους της ενέργειας που καταναλώνουν κατά 6%, ενώ αντίστοιχα οι prosumers είχαν αύξηση των κερδών τους από την πώληση ενέργειας κατά 51 %.

Στην δημοσίευση [25] οι συγγραφείς προτείνουν ένα μηχανισμό ανταλλαγής ενέργειας, εφαρμόσιμο στα μικροδίκτυα, που βασίζεται στην τεχνολογία Blockchain και τον μηχανισμό Συνεχούς Διμερούς Δημοπρασίας (Continuous Double Auction - CDA). Οι συμμετέχοντες στην CDA αγορά ενέργειας πραγματοποιούν μία συναλλαγή μετά την επίτευξη συμφωνίας. Οι συχνές διακυμάνσεις των τιμών σε μία CDA αγορά οδηγούν στην εφαρμογή μία «στρατηγικής επιθετικότητας», ώστε οι προσφορές των συμμετεχόντων να προσαρμόζονται γρήγορα στις μεταβολές της αγοράς. Οι παραγωγοί και οι καταναλωτές ανταλλάσσουν ψηφιακά πιστοποιητικά ενέργειας και πραγματοποιούν συναλλαγές πάνω σε ένα δίκτυο Blockchain.

Αναλυτικότερα στον μηχανισμό συνεχούς διπλής δημοπρασίας, οι πωλητές και οι αγοραστές ενέργειας μπορούν να επιτύχουν άμεσα ισορροπία στην αγορά, ενώ ταυτόχρονα εξαλείφεται η ανάγκη ύπαρξης κεντρικού ελέγχου, γεγονός που συμβαδίζει με την αποκεντρωμένη φύση των μικροδικτύων. Ο μηχανισμός CDA αξιοποιεί τις δυναμικές της ελεύθερης αγοράς για την επίτευξη ισοζυγίου, ενώ παράλληλα ένας πολύ μικρός όγκος δεδομένων διακινείται, καθιστώντας έτσι τα υπολογιστικά κόστη αυτού του μηχανισμού εξαιρετικά χαμηλά.

Στην αγορά CDA πωλητές και αγοραστές ενέργειας υποβάλλουν προσφορές οποιαδήποτε χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια μίας περιόδου συναλλαγής που κρατάει 1 ώρα. Η αγορά φτάνει συνεχώς σε εκκαθάριση, ενώ σε κάθε κύκλο συναλλαγών πραγματοποιείται τουλάχιστον 1 συναλλαγή. Οι προσφορές των συμμετεχόντων στην αγορά ταξινομούνται ως εξής: οι προσφορές των αγοραστών ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά και σε περίπτωση ίσων προσφορών, προτεραιότητα λαμβάνει η προγενέστερη, και οι προσφορές των πωλητών ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά, επίσης χρονικά καθοριζόμενες σε περίπτωση ισοτιμίας. Αυτές οι εντολές προσφορών ταξινομούνται σε ένα ψηφιακό βιβλίο που υπόκειται σε τακτική εκκαθάριση. Στην αγορά CDA η υψηλότερη προσφορά αγοραστή καλείται outstanding bid, ενώ η χαμηλότερη προσφορά πωλητή ονομάζεται outstanding ask. Η συναλλαγή πραγματοποιείται όταν το outstanding ask είναι μικρότερο ή ίσο με το outstanding bid. Ένα outstanding bid ταιριάζει με ένα outstanding ask και η τιμή της συναλλαγής είναι ο μέσος όρος τους. Σημειώνεται ότι η αγορά κατά τη διάρκεια των συναλλαγών κοινοποιεί την τιμή της συναλλαγής και τις τιμές των outstanding bid και ask.

Σε αυτή τη μορφή αγοράς οι συμμετέχοντες αντιμετωπίζουν προκλήσεις σχετικά με τις προσφορές που θα υποβάλλουν. Για παράδειγμα οι αγοραστές πρέπει να λάβουν υπόψη όχι μόνο τις προσφορές που θα δώσουν οι υπόλοιποι αγοραστές αλλά και τις τιμές που θα δώσουν οι

πωλητές ενέργειας, και το αντίστροφο. Η δυναμική μορφή της αγοράς με τα τυχαία χαρακτηριστικά της που προκύπτουν από την υποβολή προσφορών σε πραγματικό χρόνο, καθιστούν απαραίτητη την ύπαρξη μίας στρατηγικής ικανής να υπολογίζει τις προσφορές που θα υποβάλλουν οι συμμετέχοντες της αγοράς για να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη τους. Ο μηχανισμός που επιλέγεται σε αυτή τη δημοσίευση είναι η «στρατηγική της επιθετικότητας». Αυτή η προσαρμοστική στρατηγική λαμβάνει υπόψιν επιμέρους παράγοντες και δεδομένα όπως η τιμή συναλλαγής, η τιμή που προσφέρει το outstanding bid και ask, και κάνει μία εκτίμηση σχετικά με την τιμή ισορροπίας της αγοράς στο δεδομένο κύκλο συναλλαγών.

Η ολοκλήρωση της συναλλαγής μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών στο μικροδίκτυο γίνεται με την πληρωμή και την ανταλλαγή πιστοποιητικών ενέργειας για την ποσότητα και την τιμή της ενέργειας που συμφωνήθηκε, σε ένα δίκτυο Blockchain. Οι καταναλωτές μεταφέρουν Bitcoin στους παραγωγούς ως πληρωμή για την ενέργεια που αγοράζουν, και οι παραγωγοί αντίστοιχα μεταφέρουν tokens που λειτουργούν ως ενεργειακά πιστοποιητικά για την πώληση της ενέργειας. Η διαδικασία που λαμβάνει χώρα στο Blockchain περιγράφεται ως εξής:

1. Μετά την επίτευξη συμφωνίας στην αγορά, ο παραγωγός εκδίδει ένα token που είναι ανάλογο της ενέργειας που θα διακινηθεί, ως είσοδο σε ένα αρχείο συναλλαγής.
2. Ο καταναλωτής που συναλλάσσεται με τον παραγωγό εκκινεί μια συναλλαγή μεταφοράς Bitcoins. Τα Bitcoin μεταφέρονται στη διεύθυνση που υποδεικνύει το δημόσιο κλειδί του παραγωγού συνοδευόμενο από ψηφιακή υπογραφή.
3. Ο παραγωγός αφού λάβει τα Bitcoins δημιουργεί μια συναλλαγή, με είσοδο της συναλλαγής τα tokens που θα μεταφέρει στη διεύθυνση που υποδεικνύει το δημόσιο κλειδί του καταναλωτή, συνοδευόμενο από ψηφιακή υπογραφή.

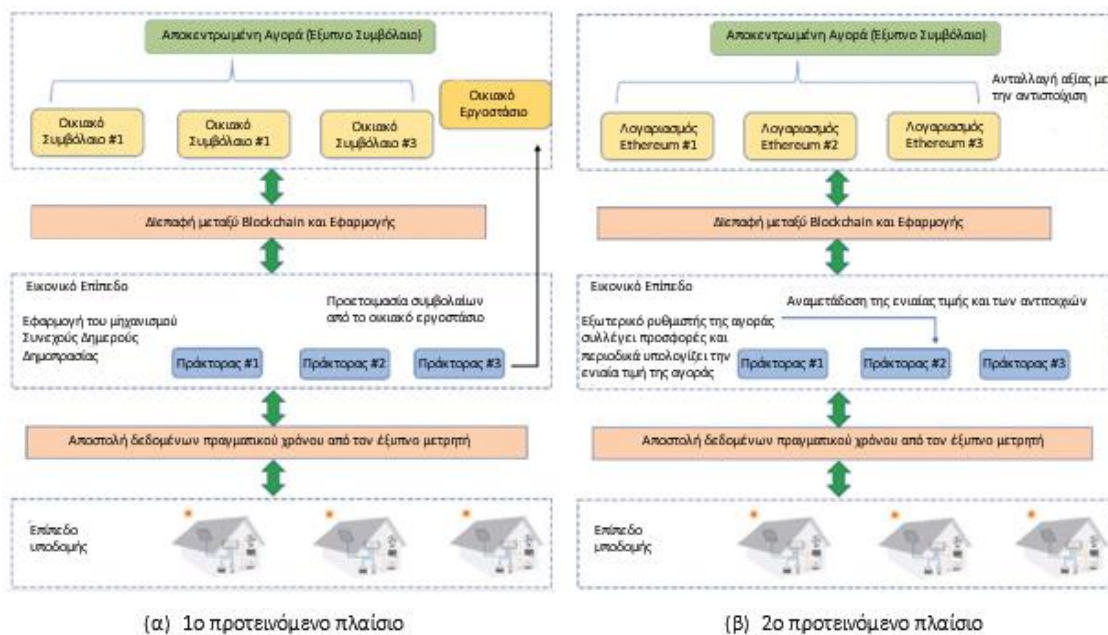
Με την εκτέλεση των παραπάνω βημάτων ολοκληρώνεται η συναλλαγή. Η διαδικασία που περιεγράφηκε ενέχει τον κίνδυνο ο παραγωγός να αρνηθεί να στείλει tokens μετά την παραλαβή των Bitcoins από τον καταναλωτή, ή να αδυνατεί να μεταφέρει τη συμφωνημένη ενέργεια λόγω αστοχίας στο δίκτυο. Λύση σε αυτούς τους κινδύνους έρχεται να δώσει η εφαρμογή πολλαπλών υπογραφών στο βήμα 2. Ο παραγωγός στέλνει στον καταναλωτή ένα αρχείο συναλλαγής που περιλαμβάνει τα δημόσια κλειδιά του παραγωγού, του καταναλωτή και ενός τρίτου ανεξάρτητου μέρους. Ο καταναλωτής ανταποκρίνεται στέλνοντας τα Bitcoin σε ένα αρχείο που περιλαμβάνει τα κλειδιά, ενημερώνοντας και το 3<sup>ο</sup> μέρος για την πραγματοποίηση αυτής της συναλλαγής. Ο παραγωγός για να χρησιμοποιήσει τα Bitcoin που έλαβε, χρειάζεται την υπογραφή δύο εκ των τριών συμμετεχόντων της συναλλαγής.

Στην εργασία [44] αναπτύσσονται δύο πλαίσια P2P ανταλλαγής ενέργειας σε μικροδίκτυα που ενσωματώνουν την τεχνολογία Blockchain και συγκεκριμένα των έξυπνων συμβολαίων. Στα δύο πλαίσια που παρουσιάζουν οι συγγραφείς, συγκεντρώνεται η τοπική ζήτηση και προσφορά του μικροδικτύου μέσω μηχανισμών δημοπρασίας. Η πώληση και η αγορά της ενέργειας για λογαριασμό των αγοραστών γίνεται μέσω των αντιπροσώπων, ενώ παράλληλα επιτρέπονται οι αυτόνομες συναλλαγές αξιοποιώντας τις λειτουργίες των έξυπνων συμβολαίων. Η αξιολόγηση των δύο πλαισίων που προτείνονται στη δημοσίευση γίνεται από οικονομικής σκοπιάς. Στόχος είναι να υπολογιστεί το κόστος που θα πληρώνουν τα νοικοκυριά στο εθνικό δίκτυο για την ενέργεια που λαμβάνουν όταν τα φωτοβολταϊκά τους συστήματα δεν καλύπτουν τα φορτία τους, και αυτά τα δεδομένα να συγκριθούν με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα δύο



προτεινόμενα πλαίσια P2P ανταλλαγής ενέργειας. Αυτές οι αναλύσεις κόστους προσφέρουν μία εικόνα σχετικά με την αποτελεσματική εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στα μικροδίκτυα και στη δημιουργία μίας μικροαγοράς ενέργειας.

Αναλυτικότερα, στο πρώτο μοντέλο P2P ανταλλαγής ενέργειας χρησιμοποιείται εκτενώς η τεχνολογία Blockchain. Κάθε νοικοκυριό του μικροδικτύου διαθέτει έναν έξυπνο μετρητή ο οποίος συνδέεται και ανταλλάσσει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο με τον εκπρόσωπο του. Αυτή η σύνδεση είναι περιορισμένης πρόσβασης και παρέχει όλα τα δεδομένα που χρειάζεται ο εκπρόσωπος προκειμένου να λαμβάνει ορθολογικές αποφάσεις για λογαριασμό του νοικοκυριού. Σε περίπτωση που ένας πράκτορας συνδέεται για πρώτη φορά στο Blockchain, δημιουργείται ένα οικιακό συμβόλαιο από το οικιακό εργοστάσιο, το οποίο επιτρέπει την επικοινωνία στο Blockchain. Το οικιακό εργοστάσιο έχει την αρμοδιότητα να δημιουργεί οικιακά συμβόλαια για λογαριασμό του εκπροσώπου του νοικοκυριού και να τους αποδίδει την διεύθυνση στο Ethereum Blockchain. Αυτό συμβαίνει ώστε να διασφαλιστεί η συνέπεια των έξυπνων συμβολαίων που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, δεδομένου ότι κακόβουλος κώδικας δε θα μπορεί να εισαχθεί στα έξυπνα συμβόλαια από κανέναν συμμετέχοντα, αν όλοι δημιουργούνται από το οικιακό εργοστάσιο. Επιπλέον το οικιακό εργοστάσιο δημιουργεί συμβόλαια στα οποία η αποκεντρωμένη διεύθυνση συναλλαγής δημιουργείται αυτόματα, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί ένα σημείο πρόσβασης για κάθε συμμετέχοντα που θέλει να συλλέξει δημόσια στατιστικά στοιχεία άλλων συμμετεχόντων. Τα νοικοκυριά λοιπόν, έχουν ένα περιορισμένο κανάλι που επικοινωνεί απευθείας με τους εκπροσώπους τους, το οποίο χρησιμεύει ως δίαυλος διακίνησης και αποθήκευσης πληροφοριών. Με την ολοκλήρωση της δημιουργίας του οικιακού συμβολαίου μπορούν να υποβάλουν προσφορές, να τις διαγράψουν από την αγορά και να πραγματοποιούν συναλλαγές όταν επιτευχθεί συμφωνία στην αγορά. Ο μηχανισμός της αγοράς που εφαρμόζεται σε αυτό το πλαίσιο είναι ο μηχανισμός Συνεχούς Διμερούς Δημοπρασίας. Αυτό το αποκεντρωμένο μοντέλο αγοράς λαμβάνει όλες τις προσφορές των πωλητών και των αγοραστών, και τις ταξινομεί με αύξουσα και φθίνουσα σειρά τιμής αντίστοιχα. Έτσι αυτοματοποιείται η διαδικασία αντιστοίχισης προσφορών αγοράς και πώλησης, και μεταδίδονται οι κατάλληλες εντολές συναλλαγών μεταξύ των οικιακών συμβολαίων. Όλες οι συναλλαγές αποθηκεύονται στο Blockchain. Στο δεύτερο πλαίσιο αγοράς που παρουσιάζεται στη δημοσίευση, εφαρμόζεται ο μηχανισμός Διμερούς Δημοπρασίας Ενιαίας Τιμής (uniform-price double-sided auction). Επιπλέον αφαιρούνται από το μοντέλο το οικιακό εργοστάσιο και οι επαφές των νοικοκυριών ώστε να αφαιρεθεί το ενδιάμεσο επίπεδο συναλλαγών στο Blockchain. Οι προσφορές αγοράς και πώλησης δεν αντιστοιχίζονται αυτόματα πλέον στην αποκεντρωμένη αγορά, αλλά τα έξυπνα συμβόλαια λειτουργούν πλέον ως μέσο για την αποθήκευση των πληροφοριών που αναμεταδίδονται από όλους τους διαφορετικούς συμμετέχοντες στο μικροδίκτυο. Σε περιοδικά επαναλαμβανόμενα χρονικά διαστήματα που καθορίζονται ως κύκλοι συναλλαγών, συλλέγονται οι προσφορές των εμπλεκόμενων από ένα εξωτερικό ρυθμιστή της αγοράς, και υπολογίζονται οι καμπύλες προσφοράς και ζήτησης ώστε να καθοριστεί η ενιαία τιμή της αγοράς. Στη συνέχεια εκκινείται ο αλγόριθμος αντιστοίχισης, ο οποίος αναμεταδίδει τις τιμές και τις ποσότητες που αντιστοιχίστηκαν στην αγορά. Ο αλγόριθμος αυτός ενεργοποιεί και τις πληρωμές των συναλλαγών, μεταφέροντας την κατάλληλη ποσότητα Ether από τον ένα λογαριασμό στον άλλο. Το Σχήμα 4.3 παρουσιάζει τις διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο μοντέλων που προτείνει η εργασία.



Σχήμα 4.3. Προτεινόμενα μοντέλα δημοσίευσης [44]

Αναφορικά με τη στρατηγική που εφαρμόζουν οι πράκτορες όταν κάνουν τις προσφορές, το πρώτο βήμα είναι να ελεγχθεί αν το νοικοκυριό έχει πλεόνασμα ή έλλειψη ενέργειας. Στη συνέχεια λαμβάνεται απόφαση σχετικά με τις μπαταρίες των νοικοκυριών. Ο εκπρόσωπος αποφασίζει αν θα αγοράσει ή θα πουλήσει ενέργεια ή αν θα φορτίσει ή θα εκφορτίσει τις μπαταρίες. Αυτή η διαδικασία οδηγεί σε μία λογική στην οποία η ενέργεια πωλείται όταν τιμές είναι υψηλές, και αγοράζεται όταν οι τιμές είναι χαμηλές. Επιπλέον στη διαδικασία υπολογισμού της προσφοράς που θα δώσει ο πράκτορας στην αγορά για την πώληση ή την αγορά ενέργειας, εντάσσεται και μία διαδικασία πρόβλεψης των ενεργειακών απαιτήσεων του νοικοκυριού για τις επόμενες δέκα ώρες. Στόχος της πρόβλεψης σε αυτό το μοντέλο είναι να μιμηθεί τις προβλέψεις που γίνονται στις αγορές ενέργειας σχετικά με την ζήτηση και την προσφορά του δικτύου την επόμενη μέρα. Ταυτόχρονα η λειτουργία της πρόβλεψης επιτρέπει στους πράκτορες να μειώσουν τον αριθμό των συναλλαγών που θα πραγματοποιούν κατά τη διάρκεια της ημέρας, φορτίζοντας τις μπαταρίες τους με την απαιτούμενη ενέργεια που θα χρειαστούν σε περιόδους έλλειψης. Αν δεν υπήρχε η πρόβλεψη, οι πράκτορες θα υπέβαλλαν προσφορές κάθε ώρα, καθιστώντας έτσι το σύστημα πιο δαπανηρό. Στο μοντέλο της εργασία συμπεριλαμβάνεται ένα δίκτυ ασφαλείας στο οποίο οι πράκτορες αγοράζουν ενέργεια από το εθνικό δίκτυο σε περίπτωση που οι μπαταρίες των νοικοκυριών πέφτουν κάτω από το 20% της χωρητικότητας τους.

Για την υλοποίηση των δύο μοντέλων που προτείνονται στην εργασία, αρχικά δημιουργήθηκαν έξυπνα συμβόλαια ώστε να αποθηκεύονται επαρκείς πληροφορίες, τα οποία δίνουν επίσης τη δυνατότητα στα νοικοκυριά να υποβάλλουν προσφορές. Στην συνέχεια αυτά τα έξυπνα συμβόλαια επικοινωνούν με ένα έξυπνο συμβόλαιο που έχει το ρόλο της αποκεντρωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Για την προσομοίωση της αγοράς δημιουργείται μία εφαρμογή στην οποία εισάγονται αρχεία που περιέχουν το ωριαίο φορτίο και τη ζήτηση του κάθε νοικοκυριού ταξινομημένα σε δομές δεδομένων που ονομάζονται πράκτορες, καθέναν από τους οποίους αντιπροσωπεύει ένα

νοικοκυριό με όλα του τα δεδομένα, καθώς και τις λειτουργίες που μπορεί ο πράκτορας να εκτελέσει. Αυτές οι λειτουργίες αφορούν είτε αλληλεπίδραση με τα δικά του δεδομένα είτε αλληλεπίδραση με τα έξυπνα συμβόλαια. Οι πράκτορες είναι προγραμματισμένοι να είναι ανεξάρτητοι και να λαμβάνουν απόφαση με βάση τις ελκυστικότερες συνθήκες τις αγορές. Στο σύστημα δεν υπάρχει συντονισμός μεταξύ των πρακτόρων και σε κάθε κύκλο συναλλαγών δίνεται η δυνατότητα σε κάθε πράκτορα να εκτελέσει τις λειτουργίες του. Με το τέλος της προσομοίωσης τα δεδομένα συλλέγονται και αξιολογούνται υπολογίζοντας το συγκεντρωτικό κόστος της ενέργειας όλων των νοικοκυριών που θα πλήρωναν στο εθνικό δίκτυο, και το κόστος της που προκύπτει από την εφαρμογή των δύο μοντέλων P2P ανταλλαγής ενέργειας με χρήση της τεχνολογίας Blockchain.

Η αξιολόγηση του παραδοσιακού κεντρικού μοντέλου, σε σύγκριση με τα δύο προτεινόμενα πλαίσια μικροδικτύου στα οποία χρησιμοποιούνται τα έξυπνα συμβόλαια, γίνεται από οικονομικής άποψης. Το κόστος χρήσης ενέργειας από το εθνικό δίκτυο είναι περίπου τριπλάσιο από το κόστος που προκύπτει από την προσομοίωση της πλατφόρμας Blockchain για P2P συναλλαγές.

Στη δημοσίευση [57] σχεδιάζεται μια απλοποιημένη αποκεντρωμένη διαδραστική εφαρμογή που στηρίζεται στο Blockchain Ethereum, για αυτοματοποιημένη εφαρμογή συμβάσεων προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας σε αποκεντρωμένες αγορές. Αυτό σημαίνει ότι ένας κεντρικός παράγοντας που θα αναλάμβανε τη λειτουργία της τοπικής αγοράς και την αλληλεπίδραση της με την κεντρική αγορά ενέργειας, αντικαθίσταται από ένα πρωτόκολλο που ακολουθούν οι συμμετέχοντες. Το όριο μιας τέτοιας τοπικής αγοράς θα μπορούσε να είναι είτε μία ενεργειακή κοινότητα είτε ένα μικροδίκτυο.

Αναλυτικότερα, η εργασία περιλαμβάνει το σχεδιασμό και την προσομοίωση ενός απλοποιημένου πρωτοκόλλου για την αυτοματοποίηση των συναλλαγών μεταξύ του προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας και των πελατών, που αναπτύσσεται στο Ethereum Blockchain χρησιμοποιώντας τη γλώσσα Solidity για την ανάπτυξη των έξυπνων συμβολαίων. Γίνεται η υπόθεση ότι το δίκτυο διανομής είναι εξοπλισμένο με έξυπνους μετρητές οι οποίοι μπορούν να επικοινωνήσουν με το Blockchain, διαθέτουν ιδιωτικά κλειδιά που δεν μπορούν να παραβιαστούν, και ο φορέας που διαχειρίζεται τα δεδομένα που καταγράφουν είναι αξιόπιστος. Ο προμηθευτής ηλεκτρικής ενέργειας που δυνητικά μπορεί να είναι μία ενεργειακή κοινότητα ή ο διαχειριστής ενός μικροδικτύου αναπτύσσει ένα έξυπνο συμβόλαιο για την πώληση ενέργειας που έχει αγοράσει από τη χονδρική αγορά ενέργειας, με συγκεκριμένη τιμή σε δεδομένη χρονική περίοδο. Οι παράμετροι που περιλαμβάνονται στο συμβόλαιο κοινοποιούνται στους ενδιαφερόμενους πελάτες. Αυτές οι παράμετροι είναι οι χρονικές περίοδοι που παρέχεται η ενέργεια, η περίοδος που οι ενδιαφερόμενοι δύνανται να εγγραφούν, η περίοδος χειρισμού κατά την οποία οι έξυπνοι μετρητές μετρούν την κατανάλωση ενέργειας, η περίοδος όπου η ενεργειακή κατανάλωση δηλώνεται και η περίοδος πληρωμής. Ο ενδιαφερόμενος πελάτης εγγράφεται στην υπηρεσία προμήθειας ενέργειας και δηλώνει το αναγνωριστικό του έξυπνου μετρητή του, το οποίο αντιστοιχίζεται σε μία διεύθυνση Ethereum. Επιτυχημένη εγγραφή χρήστη σημαίνει έγκυρη διεύθυνση έξυπνου μετρητή, διαδικασία που επιβεβαιώνεται με την κλήση ενός διαφορετικού έξυπνου συμβολαίου που αναπτύσσεται από τον φορέα διαχείρισης των έξυπνων μετρητών. Ταυτόχρονα, ο πελάτης καταθέτει ένα αρχικό ποσό το οποίο εκτιμάται ότι είναι υψηλότερο από το κόστος της ενέργειας που θα αγοραστεί, ως δήλωση ειλικρινούς πρόθεσης απέναντι στην διαδικασία. Η διαφορά μεταξύ της κατάθεσης και του κόστους της ενέργειας επιστρέφεται στον

πελάτη με το πέρας της συναλλαγής. Για να μπορέσει να κάνει ανάληψη των υπολειπόμενων κεφαλαίων, ο αντίστοιχος έξυπνος μετρητής του πελάτη που είχε αρχικά δηλωθεί, πρέπει να παρέχει τη μέτρηση της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας.

Αναφορικά με τα δύο έξυπνα συμβόλαια που παρουσιάζονται για την εφαρμογή του πρωτοκόλλου αυτοματοποιημένης ανταλλαγής ενέργειας στο προτεινόμενο σύστημα, αυτά αναπτύσσονται χρησιμοποιώντας τη γλώσσα Solidity του Ethereum Blockchain. Το πρώτο έξυπνο συμβόλαιο αναπτύσσεται στο Blockchain από το φορέα διαχείρισης των έξυπνων μετρητών, ο οποίος έχει την αποκλειστική δυνατότητα να εγγράψει ένα νέο μετρητή στο δίκτυο. Αρμοδιότητα του είναι ουσιαστικά η επικύρωση του μετρητή του πελάτη που εγγράφηκε στην υπηρεσία αυτοματοποιημένης ανταλλαγής ενέργειας. Όταν χρειάζεται, το έξυπνο συμβόλαιο εκτελείται, εγγράφει έναν νέο μετρητή, και επιβεβαιώνει ότι ένα δεδομένο αναγνωριστικό αντιστοιχεί σε έγκυρο έξυπνο μετρητή. Το δεύτερο έξυπνο συμβόλαιο που αναπτύσσεται στη δημοσίευση αυτοματοποιεί την ανταλλαγή ενέργειας, διαμορφώνοντας τις παραμέτρους που περιεγράφηκαν παραπάνω, καθορίζοντας τις απαιτούμενες χρονικές περιόδους, ενώ ταυτόχρονα ελέγχει την πρόσβαση συγκεκριμένων λογαριασμών και την κλήση ορισμένων συναρτήσεων.

Από τη μοντελοποίηση και τις προσομοιώσεις της εκτέλεσης των δύο έξυπνων συμβολαίων σε ένα δίκτυο 4 κόμβων προέκυψαν θετικά συμπεράσματα που αφορούν τόσο την εφαρμογή των συμβολαίων στο προτεινόμενο πρωτόκολλο, όσο και το πραγματικό κόστος της συγκεκριμένης εφαρμογής.

Ο Πίνακας 2 συνοψίζει τις δημοσιεύσεις που παρουσιάστηκαν σε αυτή την ενότητα, επισημαίνοντας την τεχνολογία και τους μηχανισμούς που χρησιμοποιήθηκαν, το αντικείμενο, και τη συνεισφορά της κάθε δημοσίευσης στην εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στον ενεργειακό τομέα.

Πίνακας 2: Σύνοψη δημοσιεύσεων ενεργειακών αγορών

Αναφ.	Τεχνολογία	Αντικείμενο	Συνεισφορά
[23]	Blockchain Έξυπνοι Μετρητές	Αποκεντρωμένη ενεργειακή αγορά με τη δημιουργία πρωτοκόλλου και ενεργειακού ψηφιακού νομίσματος NRGCoin	Σχεδιασμός συστήματος ανταλλαγής και εμπορίας ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ και διακίνηση της με χρήση νέου ψηφιακού νομίσματος, χωρίς την απαίτηση επαναπροσδιορισμού της αρχιτεκτονικής των συμβατικών δικτύων, δεδομένου ότι οι μετασχηματιστές αποτελούν όριο των υποσυστημάτων, παρέχοντας οφέλη σε επίπεδο διαχείρισης του δικτύου
[24]	Ιδιωτικό Blockchain Ethereum Έξυπνα Συμβόλαια	P2P ενεργειακή αγορά	Δημιουργία μιας αποκεντρωμένης εφαρμογής και έξυπνων συμβολαίων που υλοποιούν το προτεινόμενο μοντέλο αγοράς, εφαρμόζοντας οικονομική κατανομή φορτίου προς όφελος καταναλωτών και prosumers
[25]	Blockchain Μηχανισμός CDA Πολλαπλές υπογραφές	Διμερείς δημοπρασίες στην αγορά ενέργειας	Σχεδιασμός ενός μηχανισμού ανταλλαγής ενέργειας, εφαρμόσιμο στα μικροδίκτυα, που βασίζεται στην τεχνολογία Blockchain και τον μηχανισμό Συνεχούς Διμερούς Δημοπρασίας (CDA)
	Blockchain Έξυπνα Συμβόλαια Έξυπνοι Μετρητές		Σχεδιασμός δύο μοντέλων ανταλλαγής ενέργειας σε επίπεδο μικροδικτύου που βασίζονται σε δύο μηχανισμούς διμερών δημοπρασιών για την

[44]	Μηχανισμός CDA Μηχανισμός uniform-price double-sided auction	Διμερείς δημοπρασίες στην αγορά ενέργειας	οικονομικότερη χρήση της ενέργειας από τους τελικούς καταναλωτές, συγκριτικά με το κόστος χρήσης της ενέργειας από το εθνικό δίκτυο.
[57]	Blockchain Ethereum Έξυπνα Συμβόλαια Έξυπνοι Μετρητές	P2P ενεργειακή αγορά	Σχεδιασμός μια απλοποιημένης αποκεντρωμένης εφαρμογής που στηρίζεται στο Blockchain Ethereum, για αυτοματοποιημένη εφαρμογή συμβάσεων προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας σε αποκεντρωμένες αγορές

### 4.3 Διαχείριση Ενεργειακών συστημάτων

Ο έλεγχος και η επίβλεψη των δικτύων σε πραγματικό χρόνο είναι καθοριστικό παράγοντας για την ανάπτυξη των ευφυών δικτύων και τη διαχείριση τους. Τα νέα ευφυή δίκτυα περιλαμβάνουν πλήθος διεσπαρμένων παραγωγών, καταναλωτών και prosumers, η συμμετοχή των οποίων καθιστά την διαχείριση του δικτύου από μια κεντρική αρχή εξαιρετικά δύσκολη. Ταυτόχρονα, οι συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των φορτίων καθιστούν επιτακτική την ανάγκη ανάπτυξης μεθόδων διαχείρισης της ζήτησης των καταναλωτών. Για την ικανοποίηση αυτής της ανάγκης γίνεται σταδιακά αντιληπτή η αμφίδρομη αλληλεπίδραση που υπάρχει μεταξύ των χρηστών του δικτύου και των ΦΟΣΕ, ώστε να μειώνονται τα φορτία του δικτύου αλλά ταυτόχρονα να ικανοποιούνται τα συμφέροντα και των δύο εμπλεκόμενων.

Στα συμβατικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η διαχείριση των φορτίων του δικτύου περιλαμβάνει μία σταθερή σχέση μεταξύ ΦΟΣΕ και χρήστη, όπου πολλοί χρήστες συνεργάζονται με ένα μόνο φορέα, αλλά ένας φορέας διατηρεί συνεργασία με μεγάλο αριθμό χρηστών. Έτσι εμπίπτει αποκλειστικά στην αρμοδιότητα του η διευθέτηση της απόκρισης της ζήτησης των φορτίων και η οικονομική διευθέτηση των ενδιαφερόμενων χρηστών. Τα προβλήματα που παρουσιάζει το συμβατικό σύστημα διαχείρισης από την πλευρά του διαχειριστή αφορούν κυρίως την συνεργασία με τους χρήστες ώστε να διασφαλίζεται ότι οι τελευταίοι δεν παραποιούν τις ενεργειακές τους καταναλώσεις προβάλλοντας μειωμένα προφίλ φορτίων με στόχο οικονομικά οφέλη, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζεται η δυσκολία αναγνώρισης χρηστών με ιστορικά καλή απόδοση, ώστε να συμμετέχουν από κοινού σε δραστηριότητες μείωσης του φορτίου. Από την πλευρά του χρήστη το πρόβλημα της συμβατικής διαχείρισης των δικτύων αφορά την ασφάλεια των πληροφοριών του, και πως μπορεί να αποτραπεί η διαρροή των δικών του δεδομένων ενέργειας για την ομαλή κατανομή των οικονομικών κινήτρων μεταξύ των χρηστών.

Η τεχνολογία Blockchain λοιπόν, είναι κατάλληλη για να επιλύσει τα προβλήματα αμφίδρομης επικοινωνίας στη διαχείριση του δικτύου που περιεγράφηκαν παραπάνω, δεδομένου ότι σε ένα δίκτυο Blockchain η ασφάλεια της ταυτότητας των συμμετεχόντων, η αμεταβλητότητα των συναλλαγών, η διαφάνεια των δεδομένων και η ιχνηλασιμότητα αποτελούν τα βασικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας. Με τη χρήση της τεχνολογίας Blockchain το πρόβλημα των ευπαθών δεδομένων και της ταυτοποίησης των χρηστών επιλύεται σε επίπεδο κόμβου. Οι ανώνυμες συναλλαγές ενισχύουν την ασφάλεια στο P2P δίκτυο, ενώ οι μη δημόσιες πληροφορίες που εμπλέκονται στη διαχείριση ενός ενεργειακού συστήματος, όπως η ταυτότητα των χρηστών, η πιστοποίηση των περιουσιακών τους στοιχείων που εμπλέκονται στο δίκτυο και τα δεδομένα

της ενεργειακής τους συμπεριφοράς είναι ασφαλή μέσω των διαδικασιών επικύρωσης και κρυπτογραφίας που παρέχει το Blockchain. Η κατακεντρωμένη φύση των δικτύων Blockchain διαχωρίζει τη διαχείριση του δικτύου από κεντρικές κυβερνητικές υπηρεσίες και τράπεζες, επιτρέποντας την άμεση πληρωμή των κινήτρων στους χρήστες και τη διευθέτηση των οφειλών τους, μειώνοντας σημαντικά τους ενδιάμεσους χρόνους και κόστη που προκύπτουν στα συμβατικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας. Ο Πίνακας 3 συγκρίνει την απόδοση του συμβατικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας σε σχέση με εκείνο που βασίζεται στην τεχνολογία Blockchain, υπό το πρίσμα πέντε πτυχών: τον τρόπο πραγματοποίησης των συναλλαγών, την κατανάλωση των πόρων, το κόστος των συναλλαγών, την αποθήκευση και την ασφάλεια των δεδομένων.[51]

Πίνακας 3: Σύγκριση συμβατικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας και συστήματος διαχείρισης ενέργειας με Blockchain

ΕΠΙΔΟΣΗ	ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ BLOCKCHAIN
Δίκτυο Συναλλαγών	Εξάρτηση από κόμβους ανωτέρου επιπέδου	Απευθείας P2P ανταλλαγή ενέργειας
Κατανάλωση Πόρων	Υψηλό	Χαμηλό
Κόστος Συναλλαγών	Υψηλό	Χαμηλό
Αποθήκευση Δεδομένων	Αποθήκευση σε βάση δεδομένων που ανήκει σε κεντρική αρχή	Κατακεντρωμένη αποθήκευση στο Blockchain
Ασφάλεια Δεδομένων	Χαμηλή, δυσκολία ανάκτησης δεδομένων μετά από επίθεση στο σύστημα	Υψηλή, δυνατότητα ανάκτησης αντιγράφων μετά από επίθεση στο σύστημα

Τα τελευταία χρόνια λοιπόν, ο τομέας της διαχείρισης των συνεχώς αυξανόμενης πολυπλοκότητας δικτύων, προσελκύει μεγάλο ενδιαφέρον τόσο σε ακαδημαϊκό, ερευνητικό και βιομηχανικό επίπεδο. Στη βιβλιογραφία συναντώνται συνεχώς νέα μοντέλα που προτείνουν λύσεις, ενώ νέες εμπορικές εφαρμογές αναπτύσσονται. Ο τομέας της διαχείρισης της ζήτησης του δικτύου είναι ένα πρόσφορο έδαφος για ανάπτυξη μοντέλων και εφαρμογών που χρησιμοποιούν την τεχνολογία Blockchain. Η εύρεση λύσεων σε ζητήματα που αφορούν την αυτοματοποιημένη και αποκεντρωμένη διαχείριση και έλεγχο του δικτύου ερευνάται συστηματικά. Από πλευράς βιβλιογραφίας ένας μεγάλος αριθμός εργασιών έχει δημοσιευθεί και προτείνουν διάφορα συστήματα διαχείρισης των ευφυών δικτύων και των μικροδικτύων, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Blockchain. Στη συνέχεια παρουσιάζονται πλατφόρμες και συστήματα που κάνουν χρήση του Blockchain.

Στη μελέτη [27] προτείνεται η χρήση μιας δομής Blockchain για την αποκεντρωμένη διαχείριση, έλεγχο και επικύρωση προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης σε ευφυή δίκτυα, σε πραγματικό χρόνο, με την αξιοποίηση δεδομένων που παρέχονται από έξυπνους μετρητές, ενώ αναπτύσσονται

έξυπνα συμβόλαια για τον προσδιορισμό της διαθέσιμης ενεργειακής ευελιξίας κάθε prosumer και την λειτουργία του δικτύου υπό κανόνες που εξισορροπούν τη ζήτηση σε επίπεδο διανομής.

Αναλυτικότερα, κάθε prosumer διαθέτει μετρητικές συσκευές και καταγράφει δεδομένα σχετικά με την ενεργειακή του παραγωγή και κατανάλωση σε μπλοκ σε ένα δίκτυο Blockchain, στο οποίο κάθε prosumer μοντελοποιείται ως κόμβος. Τα προβλήματα που έρχεται να αντιμετωπίσει η προτεινόμενη μελέτη σχετικά με τα προγράμματα απόκρισης ζήτησης σε κεντροποιημένα δίκτυα που εμπλέκονται prosumers, είναι πρωτίστως το ζήτημα της ασφάλειας και της ιδιωτικότητας των δεδομένων τους. Στο αποκεντρωμένο μοντέλο που προτείνεται, το εμπόδιο αυτό υπερνικάται αφού κάθε κόμβος-prosumer έχει τα στοιχεία του και τα ενεργειακά του δεδομένα τοπικά αποθηκευμένα, και η κοινοποίηση πληροφοριών σε άλλους χρήστες του δικτύου γίνεται με χρήση ψηφιακών μέσων ταυτοποίησης. Ταυτόχρονα η φύση του Blockchain διασφαλίζει την αμεταβλητότητα των συναλλαγών, αφού όλες οι συναλλαγές αντιγράφονται και μοιράζονται σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Η διασφάλιση της ιδιοκτησίας και η ασφάλεια των συναλλαγών επιτυγχάνεται μέσω της κρυπτογραφίας δημόσιου κλειδιού. Οι prosumers χρησιμοποιούν το ιδιωτικό τους κλειδί για την υπογραφή των δικών τους συναλλαγών, οι οποίες γίνονται προσβάσιμες στο δίκτυο Blockchain μέσω του αντίστοιχου δημόσιου κλειδιού. Η ιδιοκτησία διασφαλίζεται μέσω αυτών των συναλλαγών, αφού κάθε καταχωρημένο ενεργειακό στοιχείο συνδέεται μέσω των συναλλαγών με τον αντίστοιχο prosumer. Ένα δεύτερο πρόβλημα στο οποίο έρχεται να δώσει λύση ο προτεινόμενος μηχανισμός αποκεντρωμένης διαχείρισης της ζήτησης, αφορά τον τεράστιο όγκο δεδομένων που πρέπει να αποθηκεύονται, να διακινούνται, και να επεξεργάζονται, ειδικά σε συστήματα πραγματικού χρόνου, σαν αυτό που προτείνεται. Στο εν λόγω δίκτυο, τα δεδομένα λαμβάνονται από τα έξυπνα μετρητικά συστήματα αποθηκεύονται με τη μορφή συναλλαγών σε κάθε κόμβο, και στη συνέχεια διακινούνται και αντιγράφονται στους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου. Το μεγάλο πλήθος ταυτόχρονων συναλλαγών που μπορεί να προκύψει, περιορίζεται με την ταυτόχρονη αποθήκευση πολλών συναλλαγών σε ένα μπλοκ χρησιμοποιώντας τα Merkle Trees.

Αναφορικά με τα έξυπνα συμβόλαια, αυτά χρησιμοποιούνται για τη συμμόρφωση των prosumers με τις απαιτήσεις των προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης. Πρόκειται ουσιαστικά για κώδικα ο οποίος προσδιορίζει την ενεργειακή ευελιξία κάθε prosumer κατά τη συμμετοχή του σε ένα πρόγραμμα διαχείρισης ζήτησης, και τους κανόνες για τη διασφάλιση της ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης στο δίκτυο. Αυτοί οι κανόνες περιγράφουν τη συμπεριφορά των prosumers όταν λάβουν μία εντολή απόκρισης ζήτησης, καθώς και ορισμένους περιορισμούς για τη διατήρηση της ευστάθειας και της αξιοπιστίας του δικτύου. Τα έξυπνα συμβόλαια ενεργοποιούνται αυτόματα με τον εντοπισμό μίας νέας συναλλαγής (πχ δεδομένα από τους έξυπνους μετρητές), και κάθε κόμβος ενημερώνει τα δεδομένα του μετά την εκτέλεση του συμβολαίου. Βασικές παράμετροι των συμβολαίων είναι το τυπικό ενεργειακό προφίλ του prosumer που προκύπτει από παλαιότερα δεδομένα και αντικατοπτρίζει την τυπική συμπεριφορά του σε απουσία εντολής απόκρισης στην ζήτηση, το τωρινό ενεργειακό προφίλ του prosumer που καταγράφεται από τους έξυπνους μετρητές, και το προφίλ διαχείρισης της ζήτησης το οποίο είναι ένα σήμα που αποστέλλεται από το διαχειριστή του δικτύου, αποθηκεύεται στο Blockchain, και καθοδηγεί τον prosumer για μεταβολή του ενεργειακού του προφίλ για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Οι έξυπνοι μετρητές αποθηκεύουν στο μπλοκ τις μετρήσεις που καταγράφουν, και τα έξυπνα συμβόλαια αξιολογούν την απόκλιση μεταξύ των πραγματικών τιμών που κατέγραψε ο μετρητής και την καμπύλη φορτίου που θα έπρεπε να είχε ο Prosumer. Αν παρατηρηθούν

σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ της προβλεπόμενης και της πραγματικής ροής ενέργειας, ενημερώνεται ο διαχειριστής του δικτύου. Οι καταχωρημένες αποκλίσεις εκκινούν νέες εντολές απόκρισης στη ζήτηση, ενώ ταυτόχρονα επιβάλλονται ποινές στους prosumers που παραβιάζουν το έξυπνο συμβόλαιο, και επιβραβεύσεις σε όσους συμμορφώνονται λειτουργώντας ευέλικτα προς όφελος του δικτύου.

Στην μελέτη οι συγγραφείς αναπτύσσουν έξυπνα συμβόλαια όχι μόνο για τη διαχείριση των prosumers, αλλά και για την εφαρμογή κανόνων που στοχεύουν στην ενεργειακή ισορροπία και τη σταθερότητα του δικτύου. Μέσω μίας μεταβλητής  $+-\Delta$  η οποία εκφράζει την απόκλιση μεταξύ της πραγματικής και της αναμενόμενης ροής ισχύος κάθε prosumer, παρακολουθούνται οι ανισορροπίες μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης, και το έξυπνο συμβόλαιο εκκινεί νέες εντολές διαχείρισης της ζήτησης, τις οποίες κοινοποιεί στους ενδιαφερόμενους Prosumers μαζί με τα αντίστοιχα ποσοστά επιβράβευσης ή ποινών. Οι βασικοί παράμετροι των έξυπνων συμβολαίων που στοχεύουν στην εξισορρόπηση της ενέργειας στο δίκτυο είναι: η Ενεργειακή Κατάσταση του Δικτύου, που προσδιορίζει την εξισορρόπηση μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης στο δίκτυο και προκύπτει ως άθροισμα των επιμέρους ανισορροπιών που εντοπίζονται από κάθε prosumer, τα Προφίλ Απόκρισης Ζήτησης υπό τη μορφή σημάτων που αποστέλλονται από το διαχειριστή του δικτύου για επίτευξη του ενεργειακού ισοζυγίου του συστήματος, και τις Επιβραβεύσεις και Ποινές, οι οποίες είναι ποσοστά που καθορίζονται από την συμμόρφωση ή μη του Prosumer, με τις εντολές διαχείρισης ζήτησης που έχει λάβει.

Με την ανάπτυξη του δικτύου ως μία Blockchain εφαρμογή, πραγματοποιείται επαλήθευση της ανταπόκρισης των κόμβων στα αιτήματα του διαχειριστή, και εκτελούνται οικονομικοί διακανονισμοί σε πραγματικό χρόνο, χρησιμοποιώντας δεδομένα που συλλέγονται από τους prosumers, ώστε να διαπιστωθεί η πραγματική συνεισφορά τους στην διαχείριση της ζήτησης του δικτύου. Αυτές οι πληροφορίες καταγράφονται μόνιμα σε ένα μπλοκ και αναπαράγονται σε ολόκληρη τη δομή, καθιστώντας αδύνατη την παραποίηση τους. Στην προτεινόμενη δομή Blockchain οι πληροφορίες που αποθηκεύονται και διακινούνται είναι σχετικές με την ενεργειακή κατάσταση του δικτύου, και τα συμβάντα που σχετίζονται με τις εντολές απόκρισης στη ζήτηση που έλαβαν οι prosumers. Αντί να υπάρχει μια αρχή που διατηρεί κεντρικά αποθηκευμένες όλες τις συναλλαγές, αυτές διαμοιράζονται στους κόμβους του δικτύου, και κάθε φορά που πραγματοποιείται μία συναλλαγή, αυτή ελέγχεται από τα αυτόματα εκτελούμενα συμβόλαια και εφαρμόζονται οι συμφωνημένοι κανόνες.

Ο αλγόριθμος συναίνεσης που προτείνεται σε αυτή την εφαρμογή Blockchain είναι το Proof of Stake. Κάθε κόμβος-prosumer έχει ρόλο να επικυρώνει μια συναλλαγή και να δημιουργεί το επόμενο μπλοκ συναλλαγών. Για κάθε prosumer εκτελούνται αυτόματα συμβόλαια για να διαπιστωθεί αν η ενεργειακή τους συμπεριφορά συμβαδίζει με τις εντολές διαχείρισης ζήτησης που έλαβαν. Όλοι οι κόμβοι της δομής επαληθεύουν τη συναλλαγή και οι συναλλαγές επιβεβαιώνονται μόνο όταν το νέο μπλοκ προστεθεί μόνιμα στην αλυσίδα. Τέλος υπολογίζεται η συνεισφορά κάθε κόμβου στην εξισορρόπηση του δικτύου και υπολογίζονται οι αμοιβές ή οι ποινές που θα λάβει κάθε κόμβος.

Για την προσομοίωση του προτεινόμενου μηχανισμού διαχείρισης της ζήτησης σε ένα ευφυές δίκτυο χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα Blockchain Ethereum. Τα έξυπνα συμβόλαια είναι υλοποιημένα στη γλώσσα Solidity, το νόμισμα που χρησιμοποιείται για την πληρωμή της ενέργειας είναι το Ether, το νόμισμα του Blockchain Ethereum. Κάθε πελάτης έχει τα δικά του



νομίσματα που λαμβάνονται είτε μέσω της διαδικασίας της εξόρυξης είτε μέσω συναλλαγών. Το δίκτυο που προσομοιώθηκε περιελάβανε 12 prosumers, τα ενεργειακά προφίλ των οποίων επιλέχθηκαν τυχαία από μια βάση δεδομένων προφίλ πραγματικής κατανάλωσης και παραγωγής κτηρίων στο Ηνωμένο Βασίλειο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις δείχνουν ότι το δίκτυο είναι σε θέση να προσαρμόζει έγκαιρα την ενεργειακή ζήτηση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, επιτυγχάνοντας ενεργειακή ευελιξία και επικυρώνοντας όλες τις εντολές διαχείρισης της ζήτησης που φθάνουν στους Prosumers.

Στο άρθρο [29] προτείνεται ένας μηχανισμός που βασίζεται στην τεχνολογία Blockchain, για την αποθήκευση και διαχείριση των δεδομένων που παρέχουν οι έξυπνοι μετρητές, για την ασφαλή διαχείριση της ενέργειας σε ένα αποκεντρωμένο δίκτυο.

Βασικό πρόβλημα των παραδοσιακών δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ικανοποίηση της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης των φορτίων και η αδυναμία της κεντρικής παραγωγής να τα καλύψει. Λύση έρχεται να προσφέρει το προτεινόμενο ασφαλές σύστημα ανταλλαγής ενέργειας, όπου σε ένα περιορισμένο γεωγραφικό εύρος εγκαθίστανται μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής μικρής κλίμακας, όπως φωτοβολταϊκά στέγης, μεταφέροντας έτσι μέρος της παραγωγής κοντά στους τελικούς χρήστες. Έτσι οι καταναλωτές γίνονται prosumers, παράγουν, αποθηκεύουν και προμηθεύουν την τοπική αγορά με ενέργεια. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η τοπική διαχείριση της ζήτησης, χωρίς την επιβάρυνση του κεντρικού δικτύου.

Το ασφαλές σύστημα ανταλλαγής ενέργειας που προτείνεται στο άρθρο, προσπαθεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις των φορτίων σε τοπικό επίπεδο, με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά συστήματα. Ο όρος ασφαλές έρχεται να επικυρωθεί με την χρήση της τεχνολογίας Blockchain για τη πραγματοποίηση των συναλλαγών εντός του δικτύου. Στο προτεινόμενο μοντέλο οι καταναλωτές και οι παραγωγοί συνδέονται στο ιδιωτικό δίκτυο Blockchain ως κόμβοι. Ταυτόχρονα υπάρχουν κόμβοι-ελεγκτές που εξουσιοδοτούν τους κόμβους παραγωγής ώστε να πουλήσουν ενέργεια στους κόμβους-καταναλωτές του δικτύου. Ένας κόμβος-παραγωγός δεν έχει τη δικαιοδοσία να πουλήσει ενέργεια στους κόμβους-καταναλωτές άμεσα, και πρέπει αρχικά να στείλει ένα αίτημα στον κόμβο-ελεγκτή του Blockchain, ο οποίος θα του εκχωρήσει αυτό το δικαίωμα. Στη συνέχεια ο παραγωγός δημοσιεύει στο δίκτυο την τιμή πώλησης της ενέργειας, και οποιοσδήποτε μπορεί να την δει και να τη ζητήσει. Αντίστοιχα οι κόμβοι-καταναλωτές χρειάζονται κρυπτονομίσματα για τη συμμετοχή τους στη διαδικασία ανταλλαγής ενέργειας, τα οποία μπορούν να αποκτήσουν πληρώνοντας το αντίστοιχο ποσό στον κόμβο ελεγκτή, με το αντίστοιχο ποσό κρυπτονομισμάτων να αποθηκεύεται στον κόμβο τους. Πριν την εκκίνηση των συναλλαγών καταναλωτές και παραγωγοί δημοσιεύουν την ζήτηση και την προσφορά ενέργειας, διατηρώντας την ανωνυμία και την ιδιωτικότητα τους. Η ανωνυμία το δίκτυο Blockchain επιτυγχάνεται με τη δημιουργία ψευδοδιευθύνσεων για κάθε συμμετέχοντα. Ταυτόχρονα, η ιδιωτικότητα διασφαλίζεται με την απόκρυψή από το δίκτυο, μεγάλου όγκου δεδομένων που αφορούν τη χρήση της ενέργειας. Στη συνέχεια οι παραγωγοί-πωλητές ενέργειας δημοσιεύουν τις ποσότητες και την τιμή που προτίθεται να πουλήσουν στο δίκτυο Blockchain, και αντίστοιχα οι καταναλωτές-αγοραστές δημοσιεύουν τις ποσότητες και την τιμή που προτίθενται να πληρώσουν. Αυτά τα δεδομένα αποθηκεύονται σε ένα πίνακα, βάσει του οποίου θα πραγματοποιηθούν οι συναλλαγές ενέργειας. Αναφορικά με την εκτέλεση των συναλλαγών, όλες αποθηκεύονται στο Blockchain και εκτελούνται με την εφαρμογή αλγορίθμων συναίνεσης.

Ένα αίτημα που ξεκινά από έναν καταναλωτή για αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, παίρνει έγκριση από κόμβο-ελεγκτή πριν φτάσει στον κόμβο παραγωγής, ώστε να διασφαλιστεί ότι διαθέτει επαρκή κρυπτονομίσματα για την πραγματοποίηση της συναλλαγής.

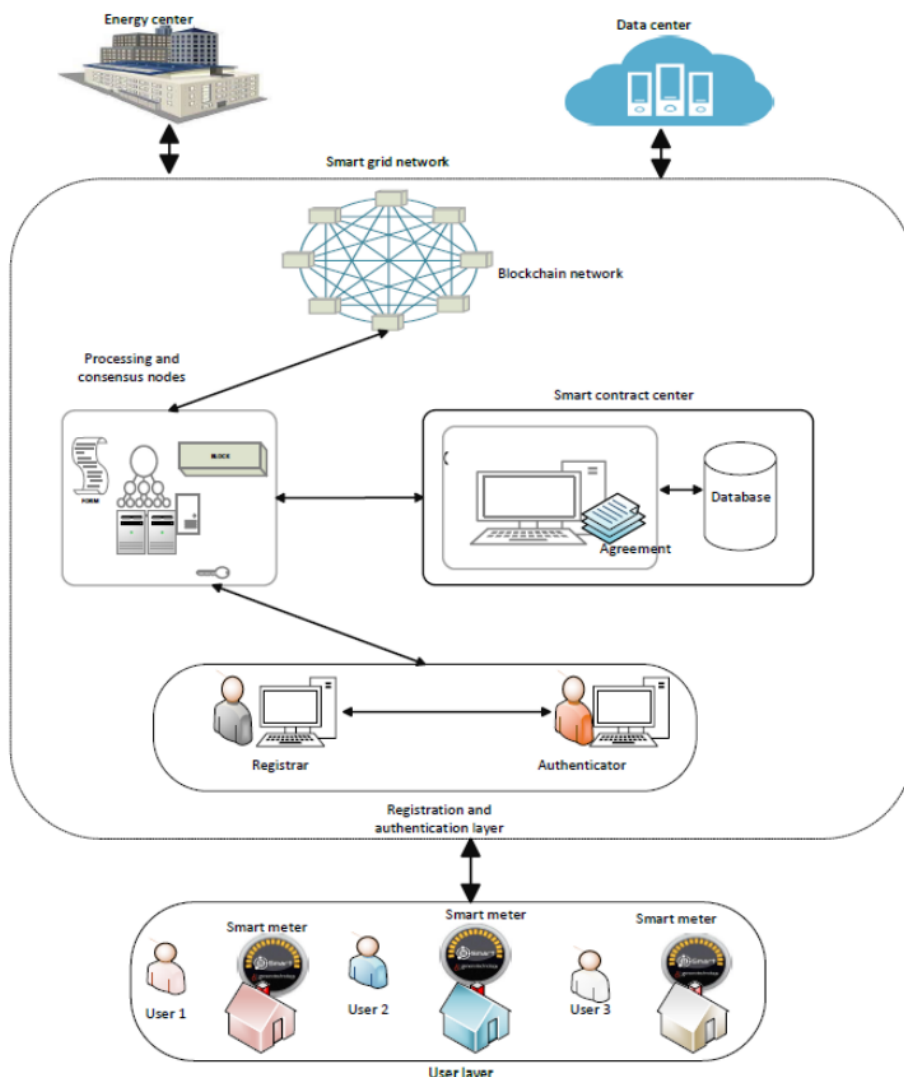
Η αξιολόγηση του προτεινόμενου από το άρθρο μοντέλου γίνεται σε ένα σύστημα που περιέχει 100 κατοικίες που διαθέτουν φωτοβολταϊκά πάνελ με δυνατότητα ημερήσιας παραγωγής 5 kWh, που είναι κόμβοι-μέλη και συμμετέχουν σε ένα ιδιωτικό δίκτυο Blockchain Ethereum. Ένας κόμβος ελεγκτής διατηρεί όλα τα δικαιώματα διαχείρισης του δικτύου. Οι οντότητες του δικτύου είναι κόμβοι παραγωγού, καταναλωτή και ελεγκτή. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βασίζεται σε μετρήσεις απόδοσης που αφορούν το κόστος της επικοινωνίας, το οποίο αυξάνεται με την αύξηση των συναλλαγών και του πλήθους των κόμβων, και το υπολογιστικό κόστος, το οποίο αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι χρόνοι προετοιμασίας των μπλοκ και ο χρόνος της συναλλαγής αυξάνεται με την αύξηση των συναλλαγών.

Στη δημοσίευση [35] παρουσιάζεται ένα πλαίσιο εξέλιξης του προϊόντος Proxy Demand Resources (PDR) που παρέχει η CAISO, η οποία είναι ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής του Συστήματος στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Το PDR επιτρέπει στους πελάτες του δικτύου να λειτουργούν μέσω ενός διαχειριστή ζήτησης και να κάνουν προσφορές απευθείας στην αγορά CAISO για τις υπηρεσίες που παρέχουν σε προγράμματα απόκρισης ζήτησης. Όλοι οι διαθέσιμοι πόροι παρέχονται στην αγορά CAISO μέσω ενός συντονιστή. Για να υποβάλει προσφορές εκ μέρους των τελικών χρηστών, ο διαχειριστής της ζήτησης πρέπει να φέρει είτε την ιδιότητα του συντονιστή είτε να είναι εξουσιοδοτημένος από τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή του Συστήματος.

Η εξέλιξη που προτείνει η εργασία [35] είναι η εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στον υπάρχον σύστημα PDR της CAISO. Οι τερματικοί χρήστες της προτεινόμενης εφαρμογής είναι οι συντονιστές ή οι εξουσιοδοτημένοι διαχειριστές της ζήτησης, οι οποίοι επικοινωνούν με τους κόμβους ταυτοποίησης και εγγραφής του συστήματος Blockchain για την συμμετοχή τους στο σύστημα. Το επίπεδο ταυτοποίησης και εγγραφής επεξεργάζεται τα δεδομένα που λαμβάνει από τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή του Συστήματος. Τα στοιχεία του χρήστη που επιθυμεί να συμμετέχει στη δομή επεξεργάζονται αρχικά από το επίπεδο ταυτοποίησης. Με το αίτημα για εγγραφή στο σύστημα, ένα μοναδικό αναγνωριστικό αποδίδεται στο χρήστη. Κάθε φορά που οι χρήστες εισέρχονται στο σύστημα η ταυτοποίησή τους γίνεται μέσω αυτού του μοναδικού αναγνωριστικού. Οι χρήστες που επιθυμούν να συμμετέχουν στην αγορά εκκινούν ένα αίτημα χρησιμοποιώντας το ιδιωτικό τους κλειδί και το αποστέλλουν στο δίκτυο. Το αίτημα παίρνει έγκριση από τους κόμβους ταυτοποίησης με τη χρήση του δημόσιου κλειδιού. Επιπλέον στο δίκτυο Blockchain προτείνεται η χρήση έξυπνων συμβολαίων, η εκτέλεση των οποίων θα υπολογίζει τα αποτελέσματα της αγοράς και τα κέρδη των χρηστών. Ταυτόχρονα τα έξυπνα συμβόλαια θα εμπεριέχουν τους κανόνες που θα διέπουν την εφαρμογή και η εκτέλεσή τους θα εξάγει αναφορές σχετικά με την κατάσταση του συστήματος για τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή του Συστήματος. Στην εργασία προτείνεται η χρήση τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης για την ανάπτυξη των συμβολαίων.

Στην εργασία [49] προτείνεται ένα σύστημα παρακολούθησης του έξυπνου δικτύου που βασίζεται στο Blockchain και τα έξυπνα συμβόλαια που στοχεύει στη διασφάλιση της προέλευσης και της

αμεταβλητότητας των δεδομένων των έξυπνων μετρητών, ενισχύοντας τη διαφάνεια και την ασφάλεια των δεδομένων στο σύστημα. Το Σχήμα 4.4 περιγράφει το μοντέλο του συστήματος που περιγράφεται στην εργασία.



Σχήμα 4.4. Απεικόνιση προτεινόμενου συστήματος δημοσίευσης [49]

Στο προτεινόμενο μοντέλο επίβλεψης του δικτύου, το επίπεδο χρήστη περιλαμβάνει όλες τις οντότητες που έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια από μία συγκεκριμένη εταιρία κοινής ωφέλειας. Αυτό το επίπεδο συνδέεται και αλληλοεπιδρά απευθείας με το επίπεδο εγγραφής και ταυτοποίησης των χρηστών στο δίκτυο Blockchain, παρέχοντας του τις απαραίτητες πληροφορίες. Ο χρήστης στέλνει τα δεδομένα του, τα οποία λαμβάνονται από τον καταχωρητή και δημιουργείται ένας μοναδικός αριθμός που χρησιμεύει ως αναγνωριστικό του μετρητή του χρήστη, και στη συνέχεια τα δεδομένα κοινοποιούνται στον έλεγχο ταυτότητας. Αυτός με τη σειρά του προωθεί τα δεδομένα στο επίπεδο επεξεργασίας και παρακολούθησης. Όταν τα δεδομένα λαμβάνονται από ένα κόμβο επεξεργασίας και συναίνεσης, προστίθεται στο Blockchain ο κωδικός της περιοχής που μένει ο χρήστης και τα δεδομένα συνδέονται με τον έξυπνο μετρητή που θα εγκατασταθεί στο σπίτι του χρήστη. Μετά την εγκατάσταση του έξυπνου μετρητή το μοναδικό αναγνωριστικό του μετρητή αποστέλλεται στο δίκτυο Blockchain μέσω ενός έξυπνου συμβολαίου, όπου εάν ταυτοποιηθεί, δίνεται στο χρήστη πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια. Σε αυτή την εργασία οι έξυπνοι μετρητές χρησιμοποιούνται για την ψηφιακή αποστολή ενδείξεων από το σπίτι ενός

καταναλωτή στο δίκτυο Blockchain. Οι μετρήσεις που λαμβάνονται στο Blockchain από τον έξυπνο μετρητή, υποβάλλονται σε επεξεργασία σε μπλοκς και στη συνέχεια προστίθενται στην αλυσίδα, αφού πρώτα επαληθευτούν και γίνουν αποδεκτές από την πλειοψηφία των κόμβων επεξεργασίας και συναίνεσης. Επίσης δημιουργούνται έξυπνα συμβόλαια για τη διάδραση μεταξύ των έξυπνων μετρητών και του Blockchain, και ενεργοποιούνται με βάση τη δραστηριότητα που ανιχνεύεται από το σύστημα. Το επίπεδο παρακολούθησης και επεξεργασίας των δεδομένων αποτελείται από τα στοιχεία εκείνα που βοηθούν στην επεξεργασία όλων των δεδομένων που αποστέλλονται στο σύστημα. Οι κόμβοι επεξεργασίας και συναίνεσης διαχειρίζονται τα δεδομένα των πελατών που αφορούν τη χρήση της ενέργειας, καθώς και τα αιτήματά τους για πρόσβαση στο δίκτυο. Τα δεδομένα καταγράφονται σε ένα μπλοκ στο δίκτυο αφού επαληθευτούν από τους κόμβους του δικτύου. Αντίγραφα των δεδομένων που συνδέονται ως νέα μπλοκ στην αλυσίδα, αποστέλλονται επίσης στο κέντρο δεδομένων, και χρησιμοποιούνται από την εταιρία κοινής ωφέλειας για πρόβλεψη και έρευνα.

Αναφορικά με τα έξυπνα συμβόλαια σε αυτή την εργασία, χρησιμοποιούνται ως το μέσο για την μεταφορά των δεδομένων που παρέχει ο έξυπνος μετρητής, αλλά και για την αναφορά παραβιάσεων που συμβαίνουν τόσο στην πλευρά του έξυπνου μετρητή, όσο και στην πλευρά του δικτύου. Αυτό ενισχύει την αξιοπιστία του συστήματος τόσο για τους καταναλωτές όσο και για τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας, καθώς όλα τα δεδομένα που συναλλάσσονται στο σύστημα παρακολουθούνται σε ένα ασφαλές περιβάλλον όπως είναι το Blockchain. Ένα σύνολο προκαθορισμένων κανόνων λειτουργίας του δικτύου αναπτύσσεται στην εργασία, και σε περίπτωση που αυτοί οι κανόνες ισχύουν, ενεργοποιούνται τα έξυπνα συμβόλαια και στέλνουν αναφορές σχετικά με την κατάσταση του δικτύου. Επίσης τα έξυπνα συμβόλαια ενημερώνουν τους καταναλωτές αφήνοντας μηνύματα στις οθόνες των έξυπνων μετρητών.

Έτσι λοιπόν στην εργασία [49] περιγράφεται ένα σύστημα παρακολούθησης του δικτύου, στο οποίο διασφαλίζεται η διαφάνεια, η αμεταβλητότητα και η προέλευση όλων των συναλλαγών ενέργειας εντός του δικτύου, χάρη στην υλοποίηση του με την τεχνολογία Blockchain. Οι ασυνέπειες που μπορεί να προκύπτουν μεταξύ των εταιριών παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και των καταναλωτών σχετικά με την τιμολόγηση και τη χρήση της ενέργειας περιορίζονται.

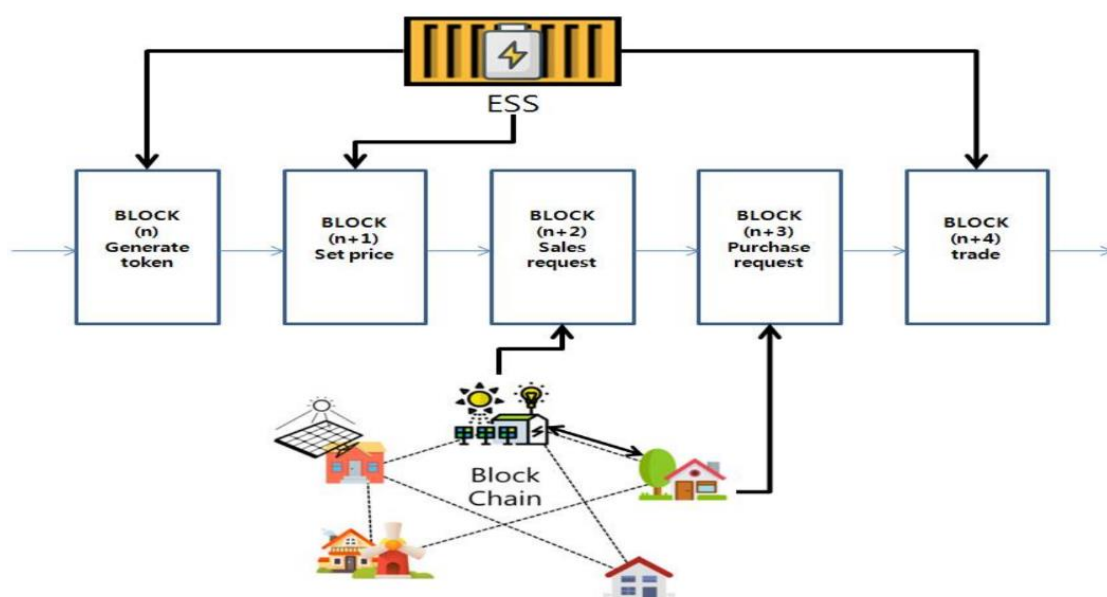
Στην εργασία [53] προτείνεται ένα P2P σύστημα ανταλλαγής ενέργειας που βασίζεται στο Blockchain και τη δημιουργία ERC20 tokens που βασίζονται στα έξυπνα συμβόλαια. Οι συναλλαγές που πραγματοποιούνται στο προτεινόμενο σύστημα γίνονται με την ενέργεια να μεταφέρεται χρησιμοποιώντας το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας στο οποίο ανήκουν οι αγοραστές και οι πωλητές ενέργειας, και η πληρωμή πραγματοποιείται μέσω της συναλλαγής tokens.

Αναλυτικότερα, το σύστημα βασίζεται σε ένα ιδιωτικό Blockchain στο οποίο μπορούν να συμμετέχουν αποκλειστικά εξουσιοδοτημένοι κόμβοι και ο διαχειριστής του συστήματος είναι αυτός που πραγματοποιεί τη έγκριση των συναλλαγών. Συμμετέχοντες στη δομή Blockchain ως κόμβοι, είναι ιδιώτες και εταιρίες που παράγουν και καταναλώνουν ενέργειας. Η ισχύς που παράγεται από κάθε κόμβο διατίθεται στην αγορά ενέργειας. Στο προτεινόμενο σύστημα καθοριστικό ρόλο παίζει το σύστημα αποθήκευσης της ενέργειας. Η ανταλλαγή των tokens για την εμπορία της ενέργειας γίνεται πάνω στο δίκτυο Blockchain, ενώ η μετάδοση της ενέργειας γίνεται μέσω του συστήματος αποθήκευσης. Η μετάδοση των tokens είναι μία άμεση συναλλαγή μεταξύ των κόμβων του δικτύου, ενώ στην περίπτωση της ανταλλαγής ενέργειας το κεντρικό

σύστημα αποθήκευσης χρησιμοποιείται ως μία δομή στην οποία οι πωλητές ενέργειας μεταφέρουν ενέργεια, και αντίστοιχα οι αγοραστές λαμβάνουν ενέργεια. Το σύστημα αποθήκευσης της ενέργειας συνδέεται σε ένα διαφορετικό δίκτυο Blockchain στο οποίο διακινούνται τα δεδομένα των συναλλαγών, ελέγχεται η ποσότητα της ενέργειας που είναι διαθέσιμη στο σύστημα αποθήκευσης και σε περίπτωση ελλείματος συμπληρώνεται ισχύς.

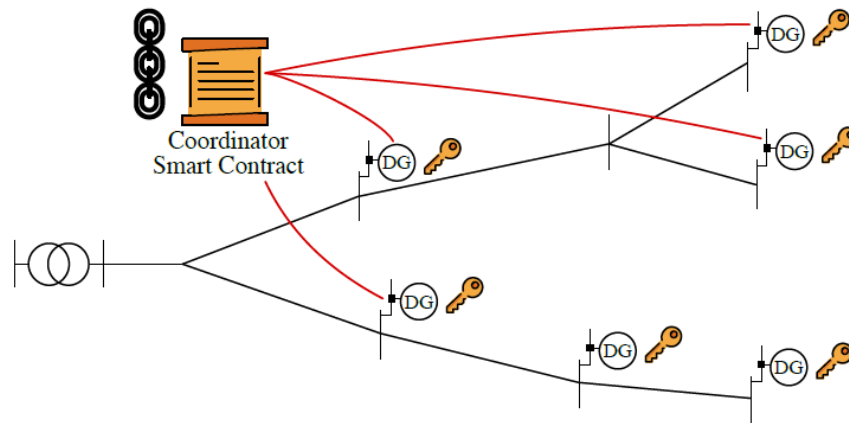
Οι συναλλαγές στο δίκτυο Blockchain πραγματοποιούνται με τη χρήση token τα οποία είναι βασίζονται στο ERC20 token του Ethereum. Πρόκειται για ένα τεχνικό πρότυπο, που περιγράφει ένα σύνολο κανόνων που πρέπει να ακολουθούνται ώστε η ανταλλαγή tokens εντός του Ethereum Blockchain να πραγματοποιείται σωστά. Ο διαχειριστής του συστήματος δημιουργεί token με την υλοποίηση ενός έξυπνου συμβολαίου που κωδικοποιεί τη λογική του μοντέλου και τη καταγράφει στο Blockchain διασφαλίζοντας την αυτοματοποιημένη εκπλήρωση του συμβολαίου.

Μόλις η τιμή της ενέργειας καθοριστεί στην αγορά, ο διαχειριστής του συστήματος εκκινεί μία συναλλαγή ώστε να ενημερωθεί το έξυπνο συμβόλαιο με τη νέα τιμή. Με την ενημέρωση του έξυπνου συμβολαίου κάθε κόμβος εκκινεί ελεύθερα μία συναλλαγή προκειμένου να κοινοποιήσει την πρόθεση του για αγορά ή πώληση ενέργειας. Σημειώνεται ότι ο μηχανισμός καθορισμού της τιμής της ενέργειας δεν αναφέρεται στην παρούσα εργασία. Ο κόμβος που θέλει να αγοράσει ενέργεια μεταδίδει στο δίκτυο Blockchain μια συναλλαγή στην οποία προσδιορίζει την ποσότητα που επιθυμεί και τη διεύθυνση του. Αυτή η πληροφορία καταγράφεται στο Blockchain. Αντίστοιχα κάθε κόμβος που θέλει να πουλήσει ενέργεια εκκινεί μία συναλλαγή στην οποία προσδιορίζει την ποσότητα της ενέργειας που επιθυμεί να πουλήσει και τη δική του διεύθυνση. Αφού συλλεχθεί ικανός αριθμός αιτημάτων αγοράς και πώλησης ενέργειας ο διαχειριστής του συστήματος εκτελεί τις συναλλαγές, συγκρίνοντας τα συνολικά ποσά ενέργειας που επιδιώκεται να διακινηθούν. Η συναλλαγή πραγματοποιείται μόνο στην περίπτωση που η ποσότητα ενέργειας προς πώληση ταυτίζεται με την ποσότητα της ενέργειας προς αγορά. Έπειτα το έξυπνο συμβόλαιο εκτελείται διακινώντας ενέργεια και token μεταξύ των κόμβων που αιτήθηκαν. Το Σχήμα 4.5 παρουσιάζει τη δομή του προτεινόμενου συστήματος ανταλλαγής ενέργειας που στηρίζεται στην τεχνολογία Blockchain.



Σχήμα 4.5. Απεικόνιση προτεινόμενου συστήματος δημοσίευσης [53]

Στη δημοσίευση [58] αναπτύσσεται ένα έξυπνο συμβόλαιο σε μία προσομοίωση του Blockchain Ethereum, που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής του φορτίου σε ένα δίκτυο διεσπαρμένης παραγωγής. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης της οικονομικής κατανομής του φορτίου επιλύεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers) και στη συνέχεια ένα έξυπνο συμβόλαιο παίζει το ρόλο του αποκεντρωμένου συντονιστή και διαχειριστή των δεδομένων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.6. Σύστημα αποκεντρωμένης εφαρμογής με βάση το Blockchain για την επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής [58]

Αναλυτικότερα, για την επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής του φορτίου θεωρείται ένα δίκτυο που περιλαμβάνει τους κόμβους-μονάδες παραγωγής. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους της κάθε γεννήτριας λαμβάνοντας υπόψη τα όρια παραγωγής της και αγνοώντας τους περιορισμούς και τις απώλειες των γραμμών μεταφοράς. Κάθε κόμβος του δικτύου επικοινωνεί με το Blockchain, και έχει τη δυνατότητα να επιλύει τοπικά στον κόμβο ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης για τον υπολογισμό της ισχύος που θα παράγει. Τα όρια παραγωγής της γεννήτριας που λύνει τοπικά το πρόβλημα βελτιστοποίησης λαμβάνονται υπόψη κατά την επίλυση χωρίς να κοινοποιούνται στο υπόλοιπο δίκτυο. Μετά τον υπολογισμό της ισχύος κάθε κόμβος αποθηκεύει την τιμή που υπολόγισε στο έξυπνο συμβόλαιο που αναπτύσσεται στο Blockchain, εκκινώντας μία συναλλαγή. Το έξυπνο συμβόλαιο ταυτοποιεί τις γεννήτριες και αφού λάβει τις τοπικές τιμές ισχύος από όλους τους κόμβους που συμμετέχουν στη διαδικασία επιλύει το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής του φορτίου για τις τιμές που έλαβε και ελέγχει εάν η βέλτιστη λύση βρέθηκε ώστε να ενημερωθούν οι κόμβοι του δικτύου. Σε περίπτωση που επιτευχθεί βέλτιστη λύση, σημαίνει ότι η ισχύς που υπολόγισε κάθε κόμβος τοπικά, είναι και η βέλτιστη με την οποία θα λειτουργήσει. Σε διαφορετική περίπτωση, οι κόμβοι συνεχίζουν την τοπική επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης μέχρι την εύρεση λύσης.

Όπως σημειώθηκε παραπάνω το έξυπνο συμβόλαιο παίζει το ρόλο του διαχειριστή των δεδομένων καθώς και του ταυτοποιητή των κόμβων. Έχει τη δυνατότητα να εκτελεί απλούς υπολογισμούς, και με την ολοκλήρωση της εκτέλεσης του κώδικα, τα αποτελέσματα των καθολικών μεταβλητών είναι διαθέσιμα σε όλες τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής του

συστήματος. Η ταυτοποίηση των κόμβων δεν μελετάται σε αυτή την εργασία, αλλά θεωρείται ότι εφαρμόζεται χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο της εργασίας [57]. Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης αποθηκεύονται στο έξυπνο συμβόλαιο, εξασφαλίζοντας τη διαφάνεια. Οι κόμβοι το δικτύου πρέπει να ανταγωνίζονται για να γράψουν τις τιμές στο Blockchain, διότι ο τελευταίος κόμβος που θα κάνει μία εγγραφή θα πληρώσει σημαντικά μεγαλύτερο «τέλη». Αποφεύγονται έτσι πιθανές καθυστερήσεις από την πλευρά των κόμβων που θα μπορούσαν να καθυστερήσουν την εκτέλεση ολόκληρης της διαδικασίας. Το προτεινόμενο μοντέλο προσομοιώνεται σε συστήματα που περιλαμβάνουν 6, 10, 20 και 50 κόμβους-γεννήτριες και η αξιολόγηση τους γίνεται αναφορικά με το υπολογιστικό κόστος των συναλλαγών σε κάθε σενάριο. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το προτεινόμενο μοντέλο βελτιστοποίησης της οικονομικής κατανομής του φορτίου είναι εφαρμόσιμο και παρέχει δυνατότητες με μείωσης του κόστους των συναλλαγών μεταβάλλοντας την ανοχή στο σφάλμα, ενώ διαφορετικοί τύποι Blockchain είναι δυνατό να περιορίσουν περαιτέρω το κόστος.

Ο Πίνακας 4 συνοψίζει τις δημοσιεύσεις που παρουσιάστηκαν σε αυτή την ενότητα, επισημαίνοντας την τεχνολογία και τους μηχανισμούς που χρησιμοποιήθηκαν, το αντικείμενο, και τη συνεισφορά της κάθε δημοσίευσης στην εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στον ενεργειακό τομέα.

Πίνακας 4: Σύνοψη δημοσιεύσεων διαχείρισης ενεργειακών συστημάτων

Αναφ.	Τεχνολογία	Αντικείμενο	Συνεισφορά
[27]	Blockchain Ethereum Έξυπνα Συμβόλαια Έξυπνοι Μετρητές	Διαχείριση προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης	Χρήση του Blockchain και των έξυπνων συμβολαίων για τη διαχείριση, τον έλεγχο και την επικύρωση προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης σε ευφυή δίκτυα, σε πραγματικό χρόνο, αξιοποιώντας δεδομένα έξυπνων μετρητών και προσδιορίζοντας την ευελιξία που παρέχουν οι Prosumers
[29]	Ιδιωτικό Blockchain Έξυπνα Συμβόλαια	Ασφάλεια Συστήματος Διαχείρισης Ενεργειακού Συστήματος	Δημιουργία μηχανισμού για την ασφαλή διαχείριση της ενέργειας σε αποκεντρωμένο δίκτυο, αξιοποιώντας με ασφαλή τρόπο τα δεδομένα των έξυπνων μετρητών του δικτύου
[35]	Blockchain Έξυπνα Συμβόλαια AI	Διαχείριση προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης	Εξέλιξη του υπάρχοντος συστήματος PDR της CAISO με την εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain για τη διαχείριση προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης.
[49]	Blockchain Έξυπνα Συμβόλαια Έξυπνοι Μετρητές	Παρακολούθηση και ασφάλεια έξυπνου δικτύου	Ένα σύστημα παρακολούθησης του έξυπνου δικτύου που βασίζεται στο Blockchain και τα έξυπνα συμβόλαια και στοχεύει στη διασφάλιση της προέλευσης και της αμεταβλητότητας των δεδομένων των έξυπνων μετρητών
[53]	Ιδιωτικό Blockchain Ethereum Έξυπνα Συμβόλαια	P2P ανταλλαγή ενέργειας	Ένα P2P σύστημα ανταλλαγής ενέργειας, μέσω ενός συστήματος αποθήκευσης, και αξίας, που βασίζεται στο Blockchain και τα έξυπνα συμβόλαια
[58]	Blockchain Ethereum Οικονομική Κατανομή Φορτίου	Διαχείριση Ενεργών Δικτύων Διανομής	Ανάπτυξη ενός έξυπνου συμβολαίου για τη κατανεμημένη επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής του φορτίου.

## 4.4 Μικροδίκτυα

Το μικροδίκτυο μπορεί να περιγραφεί ως ένα σύμπλεγμα φορτίων, διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων και συστημάτων αποθήκευσης τα οποία λειτουργούν συντονισμένα για την αξιόπιστη παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα μικροδίκτυο μπορεί να συνδεθεί με το δίκτυο διανομής, δημιουργώντας έτσι τέσσερις καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρίσκεται: συνδεδεμένο στο δίκτυο, αποσυνδεδεμένο από το δίκτυο, σε νησίδα και σε επανασύνδεση. Σε λειτουργία νησίδας ή σε αυτόνομη λειτουργία, η ισχύς ανταλλάσσεται τοπικά μεταξύ των φορτίων, της παραγωγής και της αποθήκευσης.[67]

Για τον έλεγχο των μικροδικτύων υπάρχουν δύο προσεγγίσεις: κεντρικά και αποκεντρωμένα συστήματα ελέγχου. Σε ένα κεντρικό σύστημα ο ελεγκτής είναι υπεύθυνος για τη λειτουργία ολόκληρου το συστήματος. Ως εκ τούτου απαιτείται μια πολύ ακριβή υποδομή κεντρικών συσκευών ελέγχου για την επεξεργασία των δεδομένων μέτρησης για τη λήψη αποφάσεων σχετικών με τη λειτουργία του μικροδικτύου. Πιθανές αστοχίες του συστήματος είναι πιθανό να επηρεάσουν τη κεντρική διαχείριση του. Αντίθετα σε ένα αποκεντρωμένο σύστημα ελέγχου, οι ταχύτητα επικοινωνίας αυξάνεται. Πιθανές αστοχίες επηρεάζουν τοπικά το σύστημα, χωρίς ιδιαίτερες παρεμβολές στη συνολική λειτουργία του μικροδικτύου. [67]

Η αποκεντρωμένη φύση του Blockchain το καθιστά εφαρμόσιμο στην αποκεντρωμένη προσέγγιση διαχείρισης των μικροδικτύων, τόσο για την εσωτερική διαχείριση του μικροδικτύου όσο και για τη διαχείριση διασυνδεδεμένων μικροδικτύων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δημοσιεύσεις που προτείνουν μοντέλα διαχείρισης της ενέργειας εντός ενός μικροδικτύου ή τη διαχείριση ενός συστήματος διασυνδεδεμένων μικροδικτύων.

Στη δημοσίευση [30] παρουσιάζεται ένα μοντέλο διαχείρισης ζήτησης που βασίζεται στη θεωρία των παιγνίων και κάνει χρήση της τεχνολογίας Blockchain. Το προτεινόμενο μοντέλο διαχείρισης της ζήτησης ενσωματώνει στοιχεία αποθήκευσης, ενώ ταυτόχρονα προσδοκά να ωφελήσει το δίκτυο εξομαλύνοντας βυθίσεις που παρατηρούνται στα προφίλ του δικτύου. Μελετάται ένα μικροδίκτυο που περιλαμβάνει ποικιλία οικιακών προφίλ, και οι συγγραφείς στοχεύουν στη βελτίωση της εμπειρίας τόσο των μεμονωμένων χρηστών, όσο και ολόκληρου του δικτύου.

Αναλυτικότερα, το σύστημα διαθέτει οικιακούς καταναλωτές οι οποίοι διαθέτουν οικιακές συσκευές και μπαταρίες συνδεδεμένες στα σπίτια. Οι έξυπνοι μετρητές που εγκαθίστανται σε κάθε καταναλωτή μεταφέρουν αμφίδρομα δεδομένα μεταξύ του διαχειριστή του δικτύου και των καταναλωτών, όπως τα ωριαία προφίλ κατανάλωσης τους. Το μοντέλο στοχεύει στη διαχείριση της ζήτησης σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Κάθε καταναλωτής έχει το δικό του χρονοδιάγραμμα κατανάλωσης, επομένως οι αιχμές τους ποικίλουν κατά τη διάρκεια της ημέρας, δημιουργώντας την ανάγκη υπολογισμού του συνολικού προφίλ ζήτησης ολόκληρου του μικροδικτύου.

Στο προτεινόμενο σύστημα προσδιορίζεται η αντικειμενική συνάρτηση κόστους της ενέργειας εξαρτάται από δύο βασικές μεταβλητές: Αφ' ενός το ονομαστικό κόστος της ενέργειας που καταναλώνεται, και αφ' εταίρου το κόστος «δυσφορίας». Το ονομαστικό κόστος ενέργειας καθορίζεται από δύο τιμολογιακές πρακτικές. Στην πρώτη το κόστος αυξάνεται κατά τις περιόδους αιχμής και στη δεύτερη είναι πάγιο και καθορίζεται από μία μέγιστη κατανάλωση



ενέργειας, η υπέρβαση της οποίας οδηγεί σε αύξηση της τιμολόγησης. Αντίστοιχα το κόστος δυσφορίας καθορίζεται από τη διαφορά του αρχικού προφίλ κατανάλωσης και του βελτιστοποιημένου προφίλ που προκύπτει μετά την μετατόπιση των φορτίων. Στο μοντέλο εισάγεται μία παράμετρος που προσδιορίζει την προθυμία των χρηστών να μετατοπίσουν την κατανάλωση τους. Κάθε οικιακή συσκευή έχει διαφορετική τιμή για την παράμετρο προθυμίας, καθώς πιο ευκολά μετατοπίζει ο καταναλωτής τη χρήση του πλυντηρίου, και πιο δύσκολα τη χρήση του καταψύκτη. Σημειώνεται ότι οι μονάδες αποθήκευσης των καταναλωτών που λειτουργούν σαν εικονικές μονάδες τροφοδοσίας βοηθώντας στην μετατόπιση της κατανάλωσης, δεν χαρακτηρίζονται από την παράμετρο προθυμίας.

Οι καταναλωτές επιθυμούν την διαχείριση των φορτίων τους ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος της ενέργειας. Κατά το σχεδιασμό του προγράμματος λειτουργίας των οικιακών συσκευών λαμβάνονται υπόψιν οι τεχνικοί περιορισμοί τους. Αρχικά για κάθε συσκευή προγραμματίζονται οι ώρες χειρισμών λειτουργίας και προσδιορίζεται ένα σχετικό επίπεδο ημερήσιας κατανάλωσης. Οι ώρες χειρισμών πρέπει να είναι μεγαλύτερες ή ίσες με τις τυπικές ώρες λειτουργίας μία συσκευής, ώστε να παρέχεται ευελιξία στην μετατόπιση των φορτίων. Επιπλέον, το μοντέλο προσδιορίζει για κάθε συσκευή την ισχύ της σε κατάσταση αναμονής, καθώς και τα μέγιστα όρια ισχύος της. Κατά τις ώρες λειτουργίας, οι συσκευές λειτουργούν εντός αυτών των ορίων, και σε περίπτωση παραβίασης αυτών των ορίων απενεργοποιούνται και η κατανάλωση ισχύος μηδενίζεται.

Το προφίλ των αποθηκευτικών μέσων που διαθέτουν οι καταναλωτές, σχετίζεται με το ρυθμό μεταβολής της κατάστασης φόρτισης των μπαταριών, οι οποίες μπορούν είτε να φορτίζουν, να εκφορτίζουν, είτε να είναι αδρανείς. Η ενέργεια που δύναται να παρέχει μια μονάδα αποθήκευσης εξαρτάται από την κατάσταση φόρτισης, το ρυθμό φόρτισης και εκφόρτισης και την αρχική ενεργειακή κατάσταση, με την προϋπόθεση να μην παραβιάζονται τα τεχνικά όρια των μπαταριών. Σημειώνεται ότι η ενέργεια από τις μονάδες αποθήκευσης χρησιμοποιείται εσωτερικά στην οικία για την κάλυψη των φορτίων και δε διοχετεύεται στο δίκτυο. Σε συστήματα που διαθέτουν ΑΠΕ και υπόκεινται σε περιορισμούς τροφοδοσίας ή σε περίπτωση συμβάντων αποκοπής από το δίκτυο, οι αποθηκευτικές μονάδες λειτουργούν μόνο σε κατάσταση εκφόρτισης ή αδράνειας ώστε να καλύπτουν τα φορτία των καταναλωτών.

Η εφαρμογή το μοντέλου με χρήση της θεωρίας των παιγνίων επιτυγχάνεται με την ύπαρξη δύο αλγορίθμων, όπου ο πρώτος εκτελείται στο κέντρο ελέγχου του συστήματος και ο δεύτερος στους τερματικούς χρήστες – καταναλωτές. Οι παίκτες – καταναλωτές καθορίζουν τα δικά τους χρονοδιαγράμματα κατανάλωσης. Το κέντρο ελέγχου λαμβάνει στην αρχή της ημέρας αυτά τα προγράμματα κατανάλωσης και μεταδίδει το συγκεντρωτικό φορτίο του συστήματος σε όλους τους παίκτες. Οι καταναλωτές βελτιστοποιούν τα προγράμματά τους και εκ' νέου τα στέλνουν στο κέντρο ελέγχου. Αυτή η ανταλλαγή χρονοδιαγραμμάτων μεταξύ του κέντρου ελέγχου και των παικτών συνεχίζεται μέχρι την εύρεση βέλτιστης λύσης, όπου δεν απαιτείται πλέον μεταβολή του προφίλ κατανάλωσης των φορτίων.

Το προτεινόμενο μοντέλο διαχείρισης της ζήτησης επιτρέπει σε κάθε τελικό χρήστη να βελτιστοποιήσει την εμπειρία του στο σύστημα ανταλλάσσοντας πληροφορίες με το κέντρο ελέγχου. Οι συγγραφείς παρουσιάζουν λοιπόν μία εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain που ονομάζεται Power Trading Chain η οποία χρησιμοποιείται ως τεχνολογικό υπόβαθρο για P2P συναλλαγές ενέργειας. Το εν λόγω Blockchain είναι τύπου κοινοπραξίας και βασίζεται στην

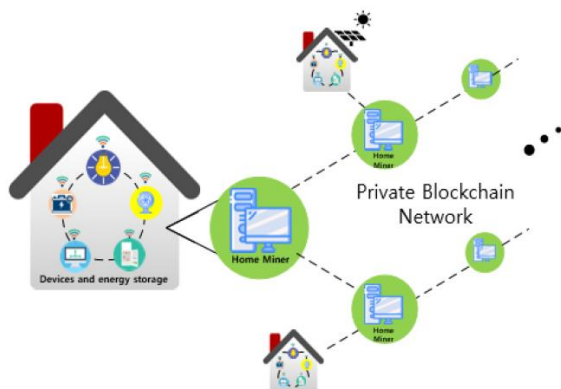
πλατφόρμα Zig-Ledger, που παρέχει το Blockchain υπόβαθρο για την ανάπτυξη εφαρμογών. Από αρχιτεκτονικής άποψης περιλαμβάνει τέσσερις ομότιμους κόμβους, δύο κόμβους πιστοποίησης και ένα κόμβο εντολών. Οι ομότιμοι κόμβοι εγκρίνουν τις συναλλαγές, ενημερώνουν το Blockchain και επαληθεύουν τις ταυτότητες των συμμετεχόντων. Οι κόμβοι πιστοποίησης χρησιμοποιούν Κρυπτογραφία Δημόσιου Κλειδιού και διαχειρίζονται όλες τις πιστοποιήσεις του συστήματος. Ο κόμβος εντολών είναι υπεύθυνος για όλες τις συναλλαγές του συστήματος και τη διατήρηση της δομής του Blockchain.

Μερικές απ' της λειτουργίες που πραγματοποιούνται στην προτεινόμενη εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain σε P2P δίκτυα ανταλλαγής ενέργειας περιγράφονται παρακάτω:

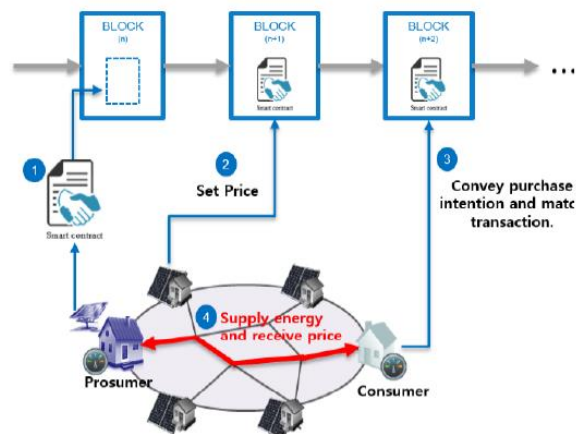
- Με την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου, οι τερματικοί χρήστες του δικτύου μπορούν να πωλούν ενέργεια τις ώρες αιχμής σε σχετικά υψηλότερη τιμή και να αποθηκεύουν ενέργεια εκτός ωρών αιχμής. Η διαδικασία αυτοματοποιείται με την εκτέλεση έξυπνων συμβολαίων. Το δίκτυο ωφελείται με την προσαρμογή των φορτίων στις ώρες αιχμής και προβλέπεται με αποτελεσματικότερο τρόπο η συμπεριφορά των καταναλωτών.
- Οι χρήστες του δικτύου που διαθέτουν δική τους παραγωγή μικρής κλίμακας, όπως φωτοβολταϊκά και μικρές ανεμογεννήτριες, γίνονται prosumers πουλώντας το πλεόνασμα της παραγωγής τους σε γειτονικούς καταναλωτές πάνω στο δίκτυο Blockchain. Αυτού του είδους η μεταφορά ενέργειας σε μικρές αποστάσεις περιορίζει τις απώλειες των γραμμών μεταφοράς και τις προσπάθειες ρύθμισης του δικτύου από την πλευρά του διαχειριστή. Ταυτόχρονα, η προγραμματισμένη πώληση ενέργειας μπορεί να αφομοιωθεί καλύτερα από ενεργειακές πολιτικές λαμβάνοντας υπόψιν τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.
- Ένα μικροδίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως απομονωμένος καταναλωτής ενέργειας, με καλή αυτονομία, ικανός να εξισορροπήσει την παραγωγή και τη ζήτηση ενέργειας εντός του μικροδικτύου, ωφελώντας έτσι το κυρίως δίκτυο.
- Συνολικά το δίκτυο επωφελείται από τις λιγότερο συχνές διακυμάνσεις φορτίου από την πλευρά της ζήτησης, και η συνολικότερη απόδοση του συστήματος βελτιώνεται.

Στην εργασία [50] προτείνεται η ανάπτυξη μία ασφαλούς, αυτοματοποιημένης και αποκεντρωμένης πλατφόρμας ανταλλαγής ενέργειας στο πλαίσιο ενός έξυπνου σπιτιού σε ένα μικροδίκτυο, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Blockchain και τα Ethereum έξυπνα συμβόλαια. Τα έξυπνα σπίτια είναι μία σύγχρονη τεχνολογία που επιτρέπει τον έλεγχο και την παρακολούθηση οικιακών συσκευών και καταναλώσεων μέσω ενός δικτύου επικοινωνίας. Στο προτεινόμενο μοντέλο της εργασίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7.α, το μικροδίκτυο βασίζεται σε ένα ιδιωτικό δίκτυο Blockchain όπου μόνο εξουσιοδοτημένοι κόμβοι έχουν δυνατότητα συμμετοχής, και οι κόμβοι μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε κόμβους καταναλωτών, οι οποίοι καταναλώνουν ενέργεια στα σπίτια τους, και σε κόμβους-prosumers οι οποίοι διαθέτουν φωτοβολταϊκά συστήματα ικανά να καλύπτουν μέρος των φορτίων τους, διαθέτοντας την πλεονάζουσα ενέργεια στο δίκτυο. Κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει ένα έξυπνο σπίτι στο οποίο οι συσκευές είναι συνδεδεμένες στο διαδίκτυο, και ταυτόχρονα κάθε σπίτι διαθέτει μία μονάδα αποθήκευσης ενέργειας στην οποία αποθηκεύεται ενέργεια παρήγαγε ή που προμηθεύτηκε από το μικροδίκτυο. Κάθε έξυπνο σπίτι μπορεί να ελέγχει και να διαχειρίζεται τις μονάδες αποθήκευσης και τις συσκευές που είναι συνδεδεμένες στο διαδίκτυο, και να παρακολουθεί τον τρόπο με τον οποίο παράγει και καταναλώνει ενέργεια. Επιπλέον πραγματοποιεί συναλλαγές με βάσει προγραμματισμένα έξυπνα συμβόλαια εντός του ιδιωτικού Blockchain. Τα δεδομένα που

προκύπτουν σε ένα έξυπνο σπίτι ονομάζονται συναλλαγές. Οι συναλλαγές προστίθενται σε ένα μπλοκ και εσωκλείουν πληροφορίες που αφορούν το είδος της συναλλαγής, τις συσκευές και τον ιδιοκτήτη του σπιτιού. Η προσθήκη του νέου μπλοκ συναλλαγών στη δομή Blockchain πραγματοποιείται αφού ο κόμβος του σπιτιού πετύχει επικύρωση εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο συναίνεσης PoW, και στη συνέχεια αναμεταδίδει το νέο μπλοκ σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Αντίστοιχα οι υπόλοιποι κόμβοι αποδέχονται το μπλοκ εάν και μόνο αν είναι έγκυρο.



Σχήμα 4.7.α. Επισκόπηση δομής έξυπνου σπιτιού σε ένα ιδιωτικό δίκτυο Blockchain [50]

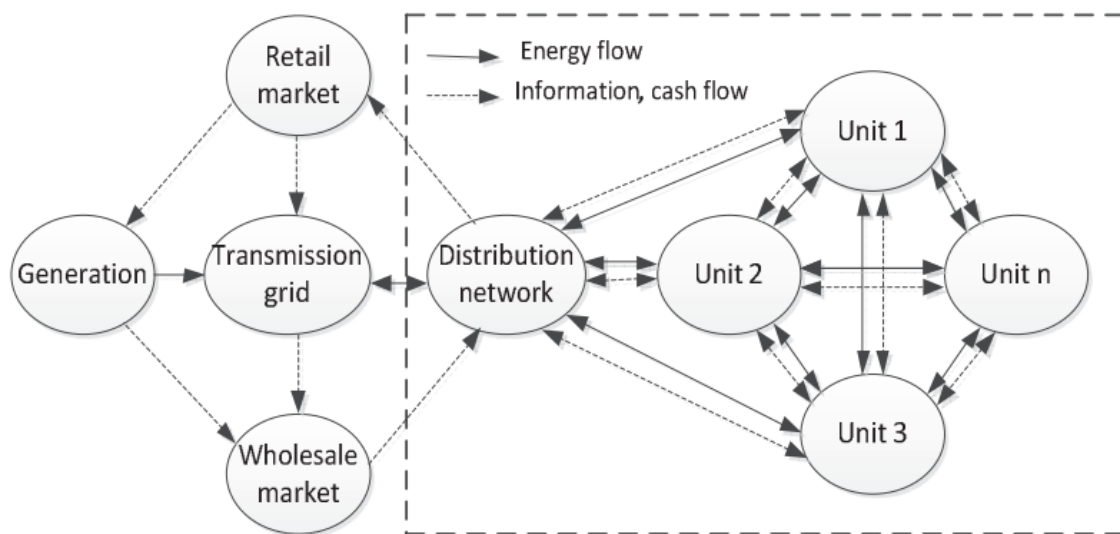


Σχήμα 4.7.β. Διαδικασία συναλλαγής ενέργειας [50]

Το έξυπνο σπίτι παρακολουθεί τη χρήση της ενέργειας και τα αποθέματα σε πραγματικό χρόνο. Σε περίπτωση που παρατηρηθεί ότι η εναπομείνουσα διαθέσιμη ενέργεια είναι κάτω από ένα προκαθορισμένο όριο, ενεργοποιείται ένα έξυπνο συμβόλαιο (Σχήμα 4.7.β) και ξεκινάει η διαδικασία ανταλλαγής ενέργειας για την φόρτιση της μονάδας αποθήκευσης του έξυπνου σπιτιού. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν το έξυπνο συμβόλαιο του Ethereum γραμμένο στη γλώσσα Solidity, ώστε να αναπτύξουν μία πλατφόρμα συναλλαγών μεταξύ καταναλωτών και prosumers. Στο προτεινόμενο μοντέλο υπάρχουν ένας κόμβος-prosumers και ένας κόμβος-καταναλωτή και εκτελούνται αρχεία Java-Script για την εκτέλεση των έξυπνων συμβολαίων. Ο prosumer εκκινεί την εκτέλεση του έξυπνου συμβολαίου το οποίο θέτει σαν προϋπόθεση αποδοχής μίας συναλλαγής η τιμή που ορίζει ο καταναλωτής να είναι μεγαλύτερη ή ίση από την τιμή που θέλει να πουλήσει ο prosumer, διαφορετικά η συναλλαγή απορρίπτεται. Στο συμβόλαιο υπάρχουν μεταβλητές που προσδιορίζουν την τιμή πώλησης που θέτει ο Prosumer, την τιμή που προτίθεται να αγοράσει ο καταναλωτής και την ποσότητα ενέργειας που θα συναλλαχθεί. Όταν το έξυπνο σπίτι αξιολογήσει ότι η υπολειπόμενη ποσότητα ενέργειας του σπιτιού δεν είναι επαρκής, εκτελείται αυτόματα ένα αρχείο ώστε να κοινοποιηθεί στο σύστημα η πρόθεση του για αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Εκτός από τον ορισμό της τιμής, ο καταναλωτής εκτελεί κώδικα προκειμένου να εκκινήσει η διαδικασία αντιστοίχισης των τιμών, κοινοποιώντας την αιτούμενη ποσότητα και τη τιμή αγοράς. Όσο ο καταναλωτής δίνει τιμή μικρότερη από αυτή του Prosumer, η συναλλαγή απορρίπτεται, και κάθε φορά ξαναστέλνει αίτημα με αυξημένη τιμή. Για να επιτευχθεί συμφωνία ο Prosumer εκτελεί ένα αρχείο που περιλαμβάνει την τιμή και την ποσότητα πώλησης του Prosumer, το υπόλοιπο ενέργειας που διαθέτει και τα χρήματα που διαθέτει. Αφού

εκτελεστούν τα δύο αρχεία από τους δύο κόμβους η συναλλαγή εντάσσεται σε ένα μπλοκ. Με την επικύρωση της συναλλαγής, η συμφωνημένη ποσότητα ενέργειας μεταφέρεται στον καταναλωτή και το αντίστοιχο ποσό στον Prosumer.

Στην εργασία [52] προτείνεται μία μέθοδος P2P συναλλαγών ενέργειας σε πολυμικροδίκτυα, βασισμένη στην λογική της αποκεντρωμένης διαπραγμάτευσης. Όλο και περισσότερα μικροδίκτυα ενσωματώνονται σε διεσπαρμένα δίκτυα ενέργειας διαμορφώνοντας σταδιακά ένα σύστημα πολυμικροδικτύων (Multi-Microgrid System - MMGS), το οποίο θα διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στον μελλοντικό ενεργειακό εφοδιασμό. Η δημιουργία κεντρικού ελέγχου για το σύστημα μικροδικτύων όχι μόνο αυξάνει το κόστος της επένδυση, αλλά εγείρει ζητήματα αναφορικά με τη διατήρηση της δικαιοσύνης μεταξύ των χρηστών ενέργειας. Ο προτεινόμενος μηχανισμός έρχεται να φέρει λύση σε αυτό το πρόβλημα ακολουθώντας την παρακάτω συλλογιστική. Αρχικά προτείνεται ένας μηχανισμός διαπραγμάτευσης που βασίζεται στις δημοπρασίες και είναι κατάλληλος για P2P ανταλλαγές ενέργειας, στον οποίο οι συμμετέχοντες ξεκινούν τη δημοπρασία υποβάλλοντας τις προσφορές τους για πώληση ή αγορά ενέργειας. Στη συνέχεια η τιμή εκκαθάρισης της αγοράς προκύπτει από την υλοποίηση ενός αλγορίθμου εκκαθάρισης βάρους. Η προτεινόμενη πλατφόρμα μπορεί να πραγματοποιήσει αποκεντρωμένη και αυτόνομη διαπραγμάτευση ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ των μικροδικτύων μέσα σε ένα πολυμικροδίκτυο. Η μορφή της προτεινόμενης δομής P2P ανταλλαγής ενέργειας φαίνεται στο Σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8. Δομή συστήματος πολυμικροδικτύων [52]

Αναλυτικότερα, η τεχνολογία Blockchain μπορεί να οδηγήσει στο σχεδιασμό ενός αποκεντρωμένου και αξιόπιστου κατανεμημένου συστήματος, επιτρέποντας την επαλήθευση, την αποθήκευση και την μετάδοση δεδομένων σχετικών με τις ενεργειακές συναλλαγές με αποκεντρωμένο τρόπο. Για αυτό το σκοπό εφαρμόζεται ένα μηχανισμός κινήτρων, ώστε να διασφαλιστεί ότι όλα τα μικροδίκτυα μέσα στο πολυμικροδίκτυο μπορούν να συμμετέχουν στην διαδικασία επαλήθευσης των μπλοκ που προστίθενται στη δομή. Κάθε κόμβος στο Blockchain αντιστοιχεί σε ένα μικροδίκτυο του πολυμικροδικτύου. Εάν το πλήθος των μικροδικτύων είναι μικρός μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα δημόσιο Blockchain. Σε αυτή την περίπτωση κάθε κόμβος αποθηκεύει δεδομένα συναλλαγών μικρά σε μέγεθος, επιτυγχάνοντας έτσι σχετικά γρήγορες ταχύτητες συναλλαγών. Σε περίπτωση που το πλήθος των μικροδικτύων στο πολυμικροδίκτυο

είναι μεγάλος επιλέγεται το consortium Blockchain για την ανάπτυξη της εφαρμογής. Σε αυτή την περίπτωση επιλέγονται μεμονωμένοι εξουσιοδοτημένοι κόμβοι για την καταγραφή και τη διαχείριση των συναλλαγών, βελτιώνοντας έτσι την ταχύτητα των συναλλαγών. Σε κάθε γύρο συναλλαγών ο κόμβος που πραγματοποιεί τις καταγραφές των συναλλαγών αλλάζει. Η τεχνολογία Blockchain επιτρέπει επίσης την ανάπτυξη έξυπνων συμβολαίων που αξιοποιούνται στην παρούσα εργασία για την ανάπτυξη του μηχανισμού ανταλλαγής ενέργειας.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην εργασία [52] αναπτύσσεται ένας μηχανισμός ανταλλαγής ενέργειας, οποίος αποτελείται από τρία στάδια: τη δήλωση της τιμής της αγοράς, την εκκαθάριση της αγοράς και τον έλεγχο της ασφάλειας. Κατά την εκκίνηση ενός κύκλου συναλλαγών, το δίκτυο διανομής ενημερώνει το πολυμικροδίκτυο σχετικά με την τιμή που πουλάει  $C_{stg}$  και αγοράζει  $C_{bfg}$  ενέργεια. Έπειτα όλα τα μικροδίκτυα που ανήκουν στο πολυμικροδίκτυο δηλώνουν την δική τους παραγωγή  $G_i$  και κατανάλωση ενέργειας, την τιμή που προτίθενται να αγοράσουν ή να πουλήσουν ενέργεια  $C_i$ , καθώς και το συνολικό φορτίου του μικροδικτύου τους  $L_i$ , όπου

$$C_{stg} \leq C_i \leq C_{bfg} \quad (4.1)$$

Και

$$L_i = G_i - P_i \quad (4.2)$$

Το συνολικό φορτίου αντικατοπτρίζει κατά πόσο εντός του μικροδικτύου καλύπτει η ζήτηση την παραγωγή. Σε περίπτωση που φορτίο του μικροδικτύου είναι μηδενικό, το εν λόγω μικροδίκτυο δε συμμετέχει στις συναλλαγές ενέργειας αφού καλύπτει εσωτερικά τη ζήτηση του. Θετικό φορτίο δικτύου υποδηλώνει πως το μικροδίκτυο συμμετέχει στην αγορά ως μονάδα πώλησης ενέργειας, ενώ αντίστοιχα αρνητική τιμή υποδηλώνει πως ενεργεί ως μονάδα αγοράς ενέργειας. Για τον υπολογισμό της τιμής εκκαθάρισης της αγοράς υπολογίζεται μία μεταβλητή βάρους  $\theta_i$  που λαμβάνει υπόψιν τις εκπομπές CO<sub>2</sub> των μονάδων παραγωγής. Η μεταβλητή  $\theta_i$  αποτελεί συνάρτηση του παράγοντα  $\mu_i$  που δηλώνει τη συμβολή στην προστασία του περιβάλλοντος και το παράγοντα  $\rho_i$  που καθορίζει την κλίμακα των μονάδων παραγωγής. Υπάρχουν  $n$  μικροδίκτυα που πωλούν ενέργεια, στα οποία ο μέσος όρος εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγωγής στο μικροδίκτυο υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_{av} = \sum_{i=1}^n \delta_i W_i / \sum_{i=1}^n W_i \quad (4.3)$$

Όπου  $W_i$  είναι η ποσότητα ενέργειας που πουλάει το  $i$  μικροδίκτυο και  $\delta_i$  οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγωγής.

Ο περιβαλλοντικός δείκτης  $\mu_i$  και ο παράγοντας  $\rho_i$  για το μικροδίκτυο  $i$  υπολογίζονται ως εξής:

$$\mu_i = 1 - \delta_i / E_{av} \quad (4.4)$$

$$\rho_i = W_i / \sum_{i=1}^n W_i \quad (4.5)$$

Η συνολικός δείκτης βάρους του μικροδικτύου  $i$  και η τιμή εκκαθάρισης του συστήματος υπολογίζονται ως εξής:

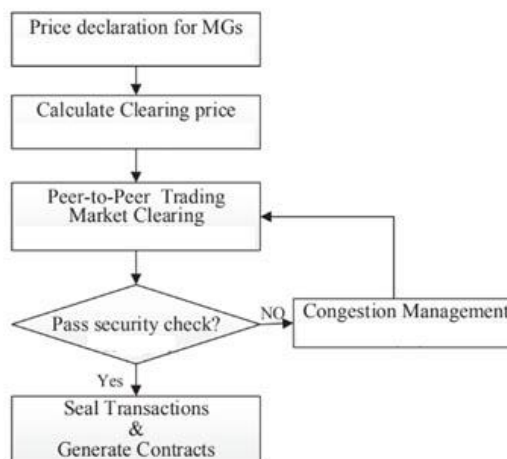
$$\theta_i = (\mu_i + \rho_i) / \sum_{i=1}^n (\mu_i + \rho_i) \quad (4.6)$$

$$C_{cle} = \sum_{i=1}^n \theta_i C_i \quad (4.7)$$

Όπου  $C_i$  τιμή που έχει καθορίσει για την κάθε μικροδίκτυο  $i$ .

Η τελική τιμή εκκαθάρισης της αγοράς υπολογίζεται από τον αλγόριθμος εκκαθάρισης βάρους με τη συμμετοχή όλων των μικροδικτύων στην αγορά. Στη συνέχεια οι προσφορές των μικροδικτύων που πωλούν ενέργεια ταξινομούνται σε αύξουσα σειρά και οι προσφορές των μικροδικτύων που αγοράζουν ενέργεια ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά. Οι προσφορές των πωλητών και αγοραστών αντιστοιχίζονται μία προς μία και η τιμή της ενέργεια καθορίζεται ως ο μέσος όρος των τιμών πώλησης και αγοράς. Η ποσότητα της ενέργειας που ανταλλάσσεται τελικά είναι η μικρότερη από αυτές που ζητά/προσφέρει το ζεύγος μικροδικτύων που ήρθε σε συμφωνία. Σε περίπτωση που οι ποσότητες δεν ταυτίζονται, η υπολειπόμενη ποσότητα ικανοποιείται από τα επόμενα μικροδίκτυα. Αν πάλι μετά το τέλος του κύκλου συναλλαγών συνεχίζει να υπάρχει μικροδίκτυο με περίσσεια ή έλλειψη ενέργεια, τότε συναλλάσσεται με το δίκτυο διανομής στις τιμές που έχει καθορίσει το δίκτυο.

Τέλος, για την ολοκλήρωση του μηχανισμού ανταλλαγής ενέργειας πρέπει να διασφαλιστεί ότι δεν παραβιάζονται τα όρια του συστήματος. Συγκεκριμένα, υπολογίζεται η ροή ισχύος στη γραμμή που συνδέει το μικροδίκτυο με το δίκτυο διανομής χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν παραπάνω, και αυτή συγκρίνεται με τη χωρητικότητα της γραμμής μεταφοράς, ώστε να παρατηρηθεί αν υπάρχει παραβίαση των ορίων. Παράλληλα παρουσιάζεται ένα σύστημα προσαρμογής της παραγωγής των μικροδικτύων ώστε να περιορίζονται περιπτώσεις συμφόρησης. Το διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.9 δείχνει όλες τις διαδικασίες που αναπτύσσονται στον προτεινόμενο μηχανισμό.



Σχήμα 4.9. Διάγραμμα ροής P2P συναλλαγών δημοσίευσης [52]

Στην προτεινόμενη μέθοδος ανταλλαγής ενέργειας που περιεγράφηκε παραπάνω, τα μικροδίκτυα ανταλλάσσουν ενέργεια ανεξάρτητα με το καθένα να συμμετέχει ισότιμα στη διαμόρφωση της τιμής εκκαθάρισης της αγοράς χωρίς την παρουσία κεντρικού συντονιστή. Αυτός ο αυτόνομος, ανεξάρτητος και χωρίς ανάγκη ύπαρξης εμπιστοσύνης μηχανισμός μπορεί να εφαρμοστεί αξιοποιώντας την τεχνολογία Blockchain, συνοψίζοντας τη διαδικασία στις τέσσερις εξής καταστάσεις:

1. Στάδιο Μετάδοσης: Κάθε μικροδίκτυο-κόμβος εκπέμπει δεδομένα για συναλλαγή, όπως την ταυτότητα του, την παραγωγή και την κατανάλωση του, την αναμενόμενη τιμή της ενέργειας και τις εκπομπές άνθρακα ανά μονάδα παραγωγής. Οι κόμβοι λαμβάνουν αυτά τα δεδομένα και πραγματοποιούν προκαταρκτικό έλεγχο για την επικύρωση τους.
2. Στάδιο Συναίνεσης: Αφού οι κόμβοι-μικροδίκτυα ολοκληρώσουν την επαλήθευση των δεδομένων, ξεκινά η διαδικασία εμπορίας ενέργειας βάσει δημοπρασίας και λαμβάνονται κοινές εντολές πώλησης και αγοράς ενέργειας. Οι συναλλαγές που περνούν από τον έλεγχο ασφαλείας εκκινούνται. Κάθε κόμβος που συμμετέχει στην αγορά εκτελεί έναν υπολογισμό μία τιμής κατακερματισμού ώστε να βρει έναν τυχαίο αριθμό ώστε να απεκτήσει το δικαίωμα εγγραφής της συναλλαγής. Επίσης κάθε κόμβος δημιουργεί ένα μπλοκ ευρετήριο με τις ταξινομημένες τιμές αγοράς και πώλησης ενέργειας αντίστοιχα, και το εκπέμπει στο δίκτυο Blockchain.
3. Στάδιο καταγραφής: Αφού το νέο μπλοκ επαληθευτεί από τους κόμβους του δικτύου, η μονάδα που το δημιούργησε αποκτά το δικαίωμα της εγγραφής και προσθέτει το νέο μπλοκ στην αλυσίδα. Ο κόμβος που θα ολοκληρώσει πρώτος αυτή τη διαδικασία ανταμείβεται.
4. Στάδιο υλοποίησης: Το έξυπνο συμβόλαιο ολοκληρώνει αυτόματα τη μεταφορά αξίας βασισμένο στην ενέργεια που μετρήθηκε ότι διακινήθηκε από τους έξυπνους μετρητές. Σε περίπτωση που κάποιος πωλητής ή αγοραστής αθετήσει τους όρους της σύμβασης, επισημαίνεται ως παραβάτης και «τιμωρείται» από το έξυπνο συμβόλαιο, το οποίο και αποζημιώνει το μέρος που ζημιώθηκε. Εν τω μεταξύ ο παραβάτης συναλλάσσεται πλέον αποκλειστικά με το δίκτυο διανομής.

Ο προτεινόμενος μηχανισμός της εργασίας δοκιμάστηκε σε ένα πολυμικροδίκτυο αποτελούμενο από 10 μικροδίκτυα, και τα αποτελέσματα της εφαρμογής τους έδειξαν ότι η P2P ανταλλαγή ενέργειας μπορεί να αυξήσει τα έσοδα των μικροδικτύων και να μειώσει σημαντικά το κόστος των λογαριασμών των καταναλωτών στα μικροδίκτυα. Επίσης παρατηρείται σημαντική μείωση του κόστους χρήσης της ενέργειας σε σύγκριση με τις συμβατικές προσεγγίσεις συναλλαγών.

Στην δημοσίευση [59] αναπτύσσεται ένα μοντέλο διαχείρισης της ενέργειας για διασυνδεδεμένα μικροδίκτυα, που βασίζεται στην τεχνολογία Blockchain. Ορίζεται ένα πλαίσιο στο οποίο η φύση του μικροδικτύου, καθορίζει την προτεραιότητα του στην ανταλλαγή ενέργειας εντός των διασυνδεδεμένων μικροδικτύων, ενώ ταυτόχρονα προτείνεται ένας μηχανισμός κινήτρων, κατά τον οποίο παρέχεται έκπτωση στην τιμή ενέργειας για τα μέρη που αγοράζουν μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας. Επιπλέον αναπτύσσεται ένα στοχαστικό πλαίσιο διαχείρισης των ωριαίων απαιτήσεων του φορτίου και της παραγωγής των μονάδων ΑΠΕ που χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα παραγωγής (π.χ. Φ/Β και Α/Γ). Το πρόβλημα βελτιστοποίησης που αναπτύσσεται στην παρούσα εργασία στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας των διασυνδεδεμένων μικροδικτύων, ικανοποιώντας μία σειρά περιορισμών που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Τα μεμονωμένα μικροδίκτυα διαχειρίζονται τη δική τους παραγωγή και ζήτηση με γνώμονα την ικανοποίηση του ισοζυγίου ενέργειας. Μόλις υπάρξει έλλειμμα ή πλεόνασμα ισχύος, η τεχνολογία

Blockchain θα ελέγχει τη διαχείριση της συναλλασσόμενης ενέργειας και θα επιτρέπει σε μεμονωμένα μικροδίκτυα να ανταλλάσσουν ενέργεια.

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας των διασυνδεδεμένων μικροδικτύων και προκύπτει από τον συνυπολογισμό του κόστους της διεσπαρμένης παραγωγής σε κάθε μικροδίκτυο, του κόστους εκκίνησης ή διακοπής της λειτουργίας των διεσπαρμένων μονάδων και την ενέργεια που πωλείται ή αγοράζεται από κάθε μικροδίκτυο σε χρονικό διάστημα ενός εικοσιτετράωρου. Η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς που είναι:

- Περιορισμός ισοζυγίου ισχύος ώστε να διασφαλίζεται ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης εντός του μικροδικτύου.
- Περιορισμός αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας βάσει της μέγιστης και της ελάχιστης χωρητικότητας του μικροδικτύου.
- Περιορισμός μονάδας παραγωγής, για την ικανοποίηση των ορίων παραγωγής κάθε γεννήτριας εντός του μικροδικτύου.
- Περιορισμοί ράμπας για το ρυθμό με τον οποίο οι μονάδες παραγωγής σε κάθε μικροδίκτυο αυξάνουν ή μειώνουν την παραγωγή τους.
- Περιορισμοί χρόνων εκκίνησης ή αποκοπής των γεννητριών κάθε μικροδικτύου.
- Περιορισμοί αποθήκευσης ενέργειας, διότι κάθε μονάδα αποθήκευσης ενέργειας έχει περιορισμούς στο ρυθμό φόρτισης και εκφόρτισης της, Ταυτόχρονα δεν μπορεί συνεχώς να είναι σε λειτουργία φόρτισης ή εκφόρτισης, και η κατάσταση φόρτισης (State-of-Charge - SoC) λαμβάνεται υπόψιν. Επίσης υπάρχουν περιορισμοί που προκύπτουν από τους χρόνους φόρτισης και εκφόρτισης μιας μονάδας αποθήκευσης ενέργειας.
- Περιορισμοί ροής ισχύος που πρέπει να ισχύουν για να ικανοποιείται το μοντέλο AC ροής ισχύος σε ένα ακτινικό δίκτυο διανομής. Αυτοί οι περιορισμοί διασφαλίζουν το ισοζύγιο ενεργού και άεργου ισχύος στους ζυγούς του συστήματος, και ικανοποιούν το νόμο του Kirchhoff στις γραμμές του συστήματος. Επίσης διασφαλίζεται ότι η τάση σε κάθε κόμβο και η ένταση του ρεύματος στις γραμμές μεταφορές του συστήματος είναι εντός των ορίων λειτουργίας.

Σημειώνεται ότι κάθε μικροδίκτυο εκτελεί τη βελτιστοποίηση ξεχωριστά. Αυτό σημαίνει ότι πρόκειται για ένα πρόβλημα αποκεντρωμένης βελτιστοποίησης στο οποίο η τεχνολογία Blockchain και το συμβόλαιο κινήτρων υιοθετείται για τη διασφάλιση της διαφάνειας και της ασφάλειας των συναλλαγών σε ολόκληρο το δίκτυο. Κάθε μπλοκ στο δίκτυο Blockchain υποδηλώνει συναλλαγή μεταξύ των διασυνδεδεμένων μικροδικτύων. Επίσης αναπτύσσεται ένα συμβόλαιο που καθορίζει την προτεραιότητα εξυπηρέτησης των αιτημάτων συναλλαγών, καθώς και τον μηχανισμό κινήτρων τιμολόγησης της ενέργειας (Πίνακας 5), ώστε να παρέχεται η δυνατότητα στους αγοραστές ενέργειας να επιλέγουν μεταξύ διαφορετικών προσφορών οι οποίες καθορίζονται από την ποσότητα της απαιτούμενης ισχύος. Οι πωλητές έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν τιμές ανάλογες της ζήτησης, λαμβάνοντας υπόψιν τη ισχύ που μπορούν να προσφέρουν. Μια υψηλότερη ζήτηση ισχύος, παρακινεί τον πωλητή να προσφέρει χαμηλότερη τιμή ενέργειας ώστε να επιτύχει τη συναλλαγή, προσφέροντας τη δυνατότητα σε κάθε μικροδίκτυο να μειώσει το κόστος τη συναλλαγής. Ταυτόχρονα το συμβόλαιο δίνει προτεραιότητα συναλλαγής στα μικροδίκτυα που χαρακτηρίζονται από υψηλότερη κρισιμότητα (π.χ. νοσοκομεία), ακολουθούν τα μικροδίκτυα μέσης κρισιμότητας (π.χ. εμπορικά φορτία) και τέλος εξυπηρετούνται τα φορτία χαμηλής κρισιμότητας που είναι τα οικιακά φορτία.



Πίνακας 5: Μηχανισμός κινήτρων τιμολόγησης ενέργειας

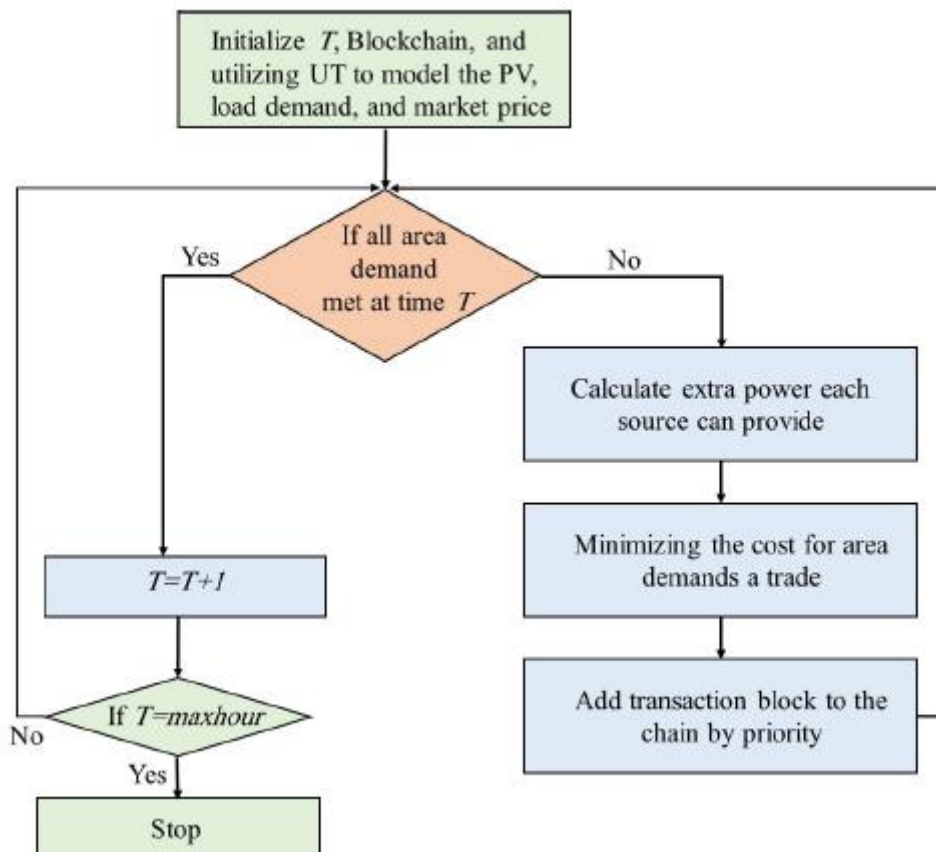
Προσφορά Ισχύος	Τιμή Άμεσης Αγοράς	Τιμή Επόμενης Αγοράς
Μικρότερη από 10%	Κόστος παραγωγής (\$/kWh) της γεννήτριας $i$ του $m$ μικροδικτύου	10% επιπλέον από την Τιμή Άμεσης Αγοράς
10% - 20%	5% έκπτωση από το κόστος παραγωγής (\$/kWh) της γεννήτριας $i$ του $m$ μικροδικτύου	10% επιπλέον από την Τιμή Άμεσης Αγοράς
Μεγαλύτερη από 20%	10% έκπτωση από το κόστος παραγωγής (\$/kWh) της γεννήτριας $i$ του $m$ μικροδικτύου	10% επιπλέον από την Τιμή Άμεσης Αγοράς

Τα λεπτομερή βήματα που ακολουθούνται στην εργασία για την επίλυση του προβλήματος διαχείρισης ενός συστήματος μικροδικτύων, παρουσιάζεται στη συνέχεια.

<b>Βήμα 1:</b>	Καθόρισε τις παραμέτρους: αριθμός μικροδικτύων, αριθμός γεννητριών κάθε μικροδικτύου, χαρακτηριστικά της γεννήτριας, χαρακτηριστικά συστημάτων αποθήκευσης, τα διαγράμματα των τιμών του συμβολαίου κινήτρων, την προτεραιότητα κάθε μικροδικτύου, το πλήθος των αβέβαιων παραμέτρων και τις παραμέτρους τους προβλήματος βελτιστοποίησης
<b>Βήμα 2:</b>	Επίλυσε το στοχαστικό μοντέλο υπολογισμού της ισχύς εξόδου των μονάδων ΑΠΕ (πχ Α/Γ) και της ζήτησης των φορτίων. Επίλυσε το πρόβλημα βελτιστοποίησης από κάθε μικροδίκτυο και υπολόγισε τη μέγιστη παραγόμενη ισχύς από κάθε μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής σε κάθε μικροδίκτυο <b>Αν</b> η μέγιστη παραγωγή ισχύος είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση του φορτίου εντός του μικροδικτύου, <b>τότε:</b>
<b>Βήμα 3:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Υπολόγισε την πλεονάζουσα ισχύ.</li> <li>➤ Επίλυσε το πρόβλημα βελτιστοποίησης για την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας των διασυνδεδεμένων μικροδικτύων.</li> <li>➤ Πήγαινε στο Βήμα 9.</li> </ul> <b>Αλλιώς:</b> Συνέχισε στο Βήμα 4.
<b>Βήμα 4:</b>	Υπολόγισε τη πλεονάζουσα ισχύ κάθε γεννήτριας που θα μοιραστεί σε άλλα μικροδίκτυα.
<b>Βήμα 5:</b>	Αξιολόγησε τη στρατηγική παραγωγής ενέργειας και τις αναντιστοιχίες ενέργειας των υπόλοιπων μικροδικτύων, διαβάζοντας δεδομένα από το Blockchain.
<b>Βήμα 6:</b>	Επίλυσε το πρόβλημα βελτιστοποίησης για την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας των διασυνδεδεμένων μικροδικτύων χρησιμοποιώντας δεδομένα τιμολογιακής πολιτικής
<b>Βήμα 7:</b>	Έλεγξε την προτεραιότητα των μικροδικτύων που επιθυμούν συναλλαγή και πρόσθεσε εκείνο με την υψηλότερη προτεραιότητα σε μπλοκ. Χρησιμοποίησε τιμολογιακά δεδομένα για να αλλάξεις την τιμή της ενέργειας για μικροδίκτυα χαμηλότερης προτεραιότητας.
<b>Βήμα 8:</b>	Ενημέρωσε το Blockchain και έλεγξε αν η ισχύς όλων των μικροδικτύων είναι σε ισορροπία.

- Βήμα 9:** Αξιολόγησε το αναμενόμενο κόστος από την αντικειμενική συνάρτηση, αξιοποιώντας τα οικονομικά κίνητρα και το στοχαστικό υπολογισμό της παραγόμενης ισχύος των ΑΠΕ
- Βήμα 10:** Αξιολόγησε το αποτέλεσμα και ολοκλήρωσε τη διαδικασία, αλλιώς πήγαινε στο βήμα 3

Η διαδικασία της αποκεντρωμένης διαχείρισης του συστήματος Blockchain παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.10.



Σχήμα 4.10. Διάγραμμα ροής αποκεντρωμένης διαχείρισης δημοσίευσης [59]

Το προτεινόμενο μοντέλο διαχείρισης ενός συστήματος μικροδικτύων προσομοιώθηκε και περιελάβανε 3 οικιακά μικροδίκτυα, 1 εμπορικό και 1 μικροδίκτυο νοσοκομείου. Η αξιολόγηση έγινε ως προς τα βέλτιστα επίπεδα παραγωγής των γεννητριών κάθε μικροδικτύου ώστε να καλύπτεται η ζήτηση των φορτίων, και πραγματοποιήθηκαν αντίστοιχες συναλλαγές ενέργειας αξιοποιώντας οικονομικά κίνητρα και βαθμούς προτεραιότητας. Τα αποτελέσματα σχετικά με το κόστος διαχείρισης του συστήματος μικροδικτύων συγκρίνονται με εκείνα διαφορετικών ερευνητικών δημοσιεύσεων, που εφαρμόζουν διαφορετικές προσεγγίσεις διαχείρισης. Συγκεκριμένα παρατηρείται μειωμένο λειτουργικό κόστος κατά την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου τόσο συγκριτικά με τα αποτελέσματα άλλων δημοσιεύσεων, όσο και αναφορικά με την

εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain σε σύγκριση με ένα κεντρικοποιημένο σύστημα διαχείρισης.

Ο Πίνακας 6 συνοψίζει τις δημοσιεύσεις που παρουσιάστηκαν σε αυτή την ενότητα, επισημαίνοντας την τεχνολογία και τους μηχανισμούς που χρησιμοποιήθηκαν, το αντικείμενο, και τη συνεισφορά της κάθε δημοσίευσης στην εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στον ενεργειακό τομέα.

Πίνακας 6: Σύνοψη δημοσιεύσεων μικροδικτύων

Αναφ.	Τεχνολογία	Αντικείμενο	Συνεισφορά
[30]	Blockchain Έξυπνοι Μετρητές Θεωρία Παιγνίων	Διαχείριση Ζήτησης	Ολοκληρωμένο μοντέλο διαχείρισης της ζήτησης εφαρμόζοντας P2P συναλλαγές δεδομένων σε μικροδίκτυο
[50]	Ιδιωτικό Blockchain Ethereum Έξυπνα Συμβόλαια	P2P ανταλλαγή ενέργειας	Μια ασφαλής, αυτοματοποιημένη πλατφόρμα ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ έξυπνων σπιτιών που διαθέτουν Φ/Β σε ένα μικροδίκτυο
[52]	Blockchain Έξυπνα Συμβόλαια	P2P ανταλλαγή ενέργειας σε σύστημα μικροδικτύων	Προτείνεται μία μέθοδος συναλλαγών ενέργειας σε ένα σύστημα μικροδικτύων βασισμένη στη λογική της αποκεντρωμένης διαπραγμάτευσης
[59]	Blockchain Έξυπνα Συμβόλαια	Διαχείριση της ενέργειας σε σύστημα μικροδικτύων	Αναπτύσσεται ένα μοντέλο διαχείρισης της ενέργειας σε ένα σύστημα μικροδικτύων λαμβάνοντας υπόψιν παράγοντες προτεραιότητας, όρια λειτουργίας και τη στοχαστική παραγωγή των ΑΠΕ (Φ/Β και Α/Γ), στοχεύοντας στην ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής της ενέργειας κάθε μονάδας παραγωγής σε κάθε μικροδίκτυο.

## 4.5 Αποθήκευση και Ηλεκτρικά Οχήματα

Η αποθήκευση αποτελεί απαραίτητο εργαλείο τόσο για τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας όσο και για τα ηλεκτρικά οχήματα. Η διεύθυνση συστημάτων παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ έχει αυξηθεί σημαντικά. Παρόλο που η παραγωγή από ΑΠΕ παρέχει καθαρή ενέργεια και συμβάλει στη μείωση των εκπομπών, προκύπτουν μία σειρά τεχνολογικών και λειτουργικών προκλήσεων. Η στοχαστικότητα που χαρακτηρίζει την παραγωγή από ΑΠΕ μπορεί να επιλυθεί με την αξιοποίηση συστημάτων αποθήκευσης. Ταυτόχρονα οι μονάδες αποθήκευσης όπως οι μπαταρίες μπορούν να παρέχουν επικουρικές υπηρεσίες στο σύστημα στις ώρες αιχμής, ενισχύοντας το δίκτυο, και συμβάλλοντας στην οικονομικότερη λειτουργία του τόσο σε επίπεδο διαχείρισης όσο και σε επίπεδο καταναλωτών. Αντίστοιχο ρόλο μπορούν να αποκτήσουν τα ηλεκτρικά οχήματα με χρονοπρογραμματισμό της φόρτισης τους είτε από σταθμούς παραγωγής είτε από άλλα ηλεκτρικά οχήματα συμβάλλοντας στη διαχείριση της ζήτησης του δικτύου.[68]

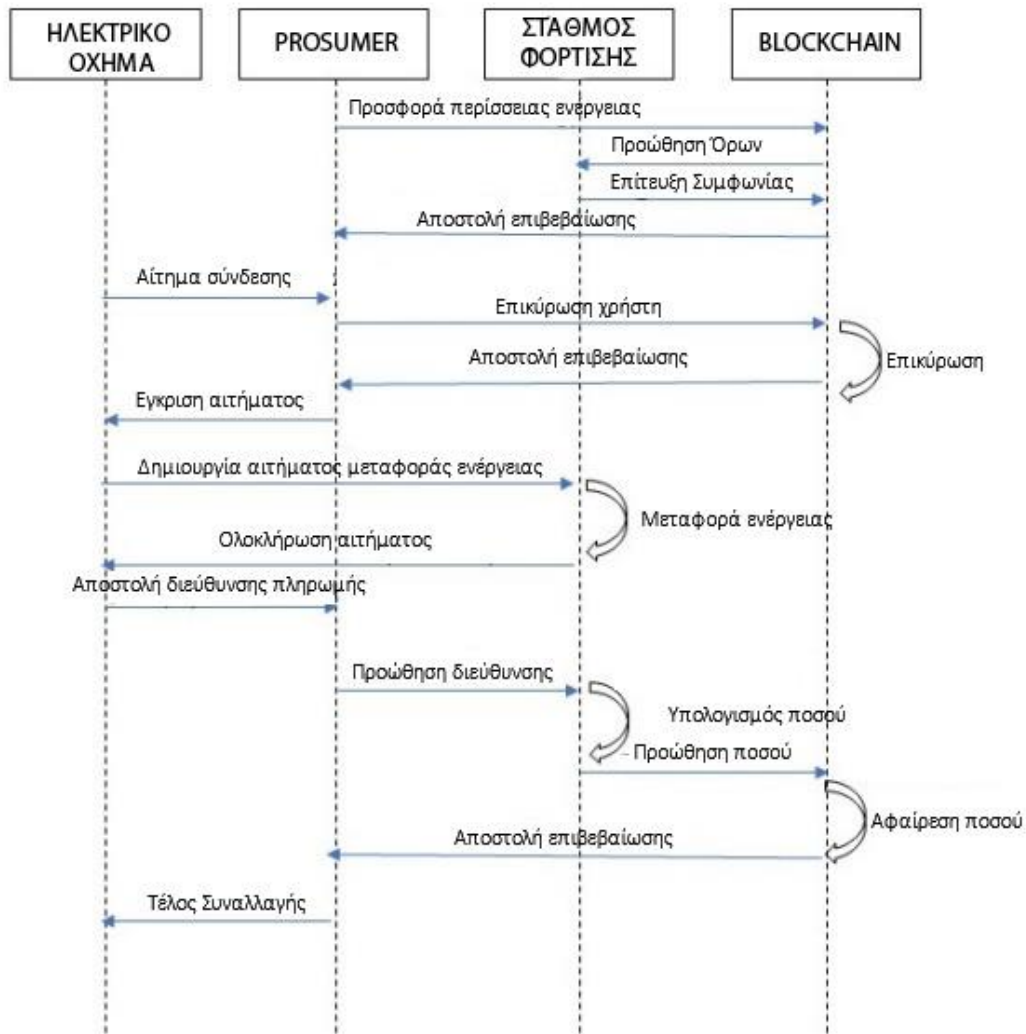
Η τεχνολογία Blockchain μπορεί να εφαρμοστεί στα συστήματα αποθήκευσης, προσφέροντας μία σειρά βελτιώσεων ασφάλειας και απορρήτου σε σύγκριση με την παραδοσιακή προσέγγιση. Τα οφέλη του Blockchain στη λειτουργία των συστημάτων που εξετάζονται αφορούν την ασφάλεια, την εφοδιαστική αλυσίδα, την παρακολούθηση της υγείας των μπαταριών, την κοινή χρήση

δεδομένων και τις ενεργειακές συναλλαγές. Η υιοθέτηση τεχνολογιών IoT σε συνδυασμό με ένα ιδιωτικό Blockchain συμβάλλουν στην διαχείριση των αποθηκευτικών μέσων σε ένα δίκτυο.[68]

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία σειρά μελετών που αφορούν τόσο τη διαχείριση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας όσο και τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Στο άρθρο [45] προτείνεται ένα P2P σύστημα ανταλλαγής και χρέωσης της ενέργειας στο πλαίσιο των ηλεκτρικών οχημάτων που βασίζεται στην τεχνολογία Blockchain. Οι χρήστες του δικτύου με πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν να την πουλήσουν στους σταθμούς φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων κάνοντας χρήση των έξυπνων συμβολαίων. Οι χρήστες των ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να πληρώσουν για τη φόρτιση τους μέσω ηλεκτρονικών πορτοφολιών. Για την ανάπτυξη του συστήματος των αυτόματων ηλεκτρονικών πληρωμών χρησιμοποιείται η πλατφόρμα ανοικτού κώδικα Hyperledger.

Αναλυτικότερα το προτεινόμενο σύστημα περιλαμβάνει τρεις βασικούς συντελεστές. Τους χρήστες ή ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων, το διαχειριστή του σταθμού φόρτισης και τους prosumers. Οι χρήστες δημιουργούν λογαριασμό στο δίκτυο Blockchain και τους παρέχονται μοναδικά ιδιωτικά κλειδιά. Οι πληροφορίες των ηλεκτρικών οχημάτων αποθηκεύονται στο Blockchain. Ο ιδιοκτήτης ενός οχήματος μπορεί να ενεργήσει και ως prosumer στο σύστημα, σε περίπτωση που διαθέτει στις εγκαταστάσεις του ΑΠΕ μικρής κλίμακας, φορτίζοντας το όχημα του και πουλώντας το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας στους σταθμούς φόρτισης. Όλα τα δεδομένα χρέωσης και φόρτισης αποθηκεύονται στο δίκτυο Blockchain με την χρήση των έξυπνων συμβολαίων. Οι prosumers δύνανται να εκκινούν τη διαδικασία πώλησης της περίσσιας ενέργειας μέσω των έξυπνων συμβολαίων. Οι έξυπνοι μετρητές καταγράφουν την κατανάλωση της ενέργειας και αποθηκεύουν αυτήν την πληροφορία στο Blockchain. Οι σταθμοί φόρτισης των οχημάτων μπορούν να αποθηκεύουν όλες τις πληροφορίες χρέωσης και φόρτισης στη δομή. Οι ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να πληρώσουν μέσω ψηφιακών πορτοφολιών. Η πληρωμή αφαιρείται από το πορτοφόλι του χρήστη με την εκτέλεση ενός έξυπνου συμβολαίου. Η πλατφόρμα ανοικτού λογισμικού Hyperledger παρέχει τη δυνατότητα σύνταξης έξυπνων συμβολαίων. Το Σχήμα 4.11 δείχνει τη διαδικασία που ακολουθείται κατά την εκτέλεση των έξυπνων συμβολαίων, για την χρέωση και φόρτιση στην προτεινόμενη P2P αγορά ανταλλαγής ενέργειας.



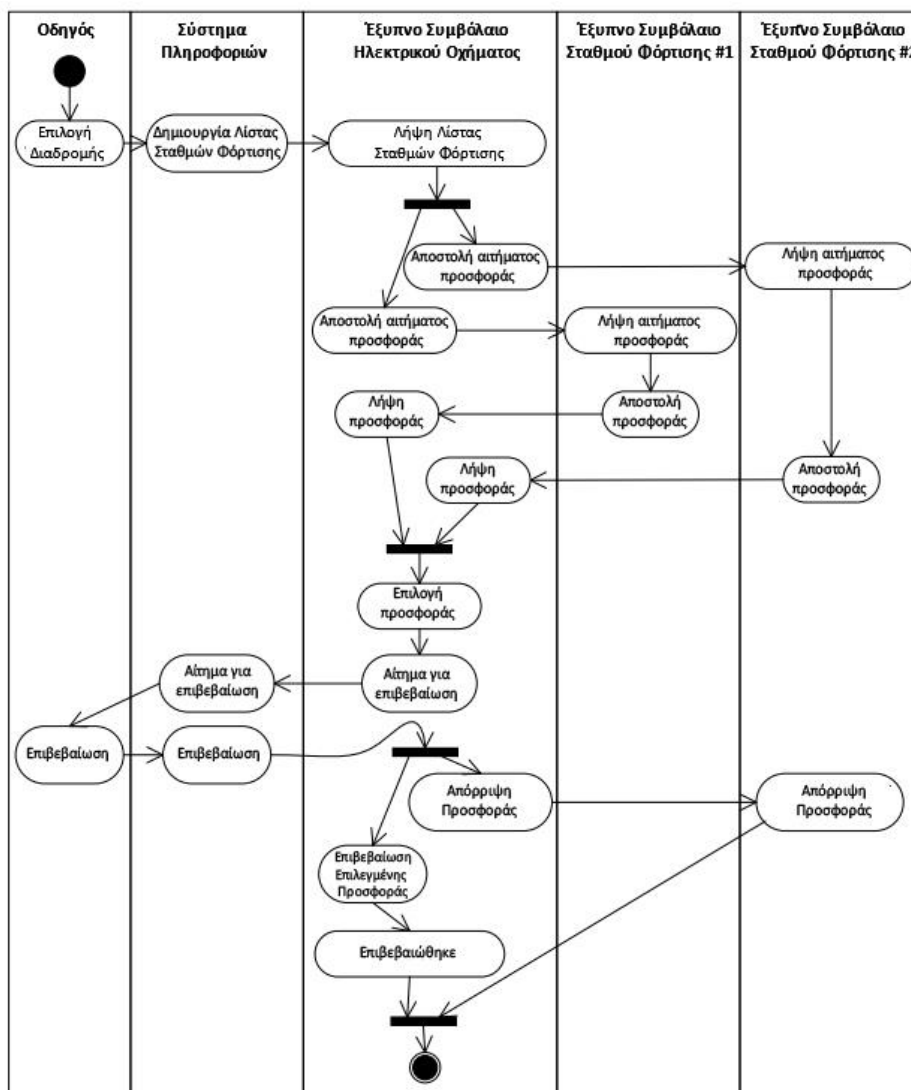
Σχήμα 4.11. Διάγραμμα ροής έξυπνου συμβολαίου [45]

Ο prosumer που διαθέτει περίσσεια ενέργειας μπορεί να την πωλήσει στο σταθμό φόρτισης μέσω ενός έξυπνου συμβολαίου. Αν ο ιδιοκτήτης του σταθμού συμφωνεί με τις συνθήκες και τις τιμές που θέτει ο prosumer για την ανταλλαγή της ενέργειας, στέλνει επιβεβαίωση. Στη συνέχεια, κατά την φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος στο σταθμό, εκκινείται ένα αίτημα σύνδεσης από το χρήστη του οχήματος προς το σταθμό, ο οποίος από τη μεριά του εκκινεί μία διαδικασία επικύρωσης του χρήστη που επιθυμεί να φορτίσει. Μετά την επικύρωση του, ο χρήστης λαμβάνει ειδοποίηση επιβεβαίωσης και ξεκινάει ένα αίτημα προς τον prosumer, ώστε να του μεταφέρει ενέργεια. Μετά τη φόρτιση του οχήματος εκκινείται από το σύστημα μια διαδικασία πληρωμής, στην οποία ο χρήστης κοινοποιεί το δημόσιο κλειδί του στον διαχειριστή του σταθμού. Ο διαχειριστής του σταθμού φόρτισης ζητά από τον prosumer να κάνει μία πληρωμή. Ο prosumer μεταφέρει το ποσό στο έξυπνο συμβόλαιο, το οποίο με τη σειρά του θα αφαιρέσει από το πορτοφόλι του χρήστη του ηλεκτρικού οχήματος το αντίστοιχο ποσό. Το έξυπνο συμβόλαιο περιέχει ένα προκαθορισμένο κώδικα ο οποίος εκτελείται αυτόματα όταν πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις. Στο τέλος της συναλλαγής κάθε συμμετέχοντα λαμβάνει μία ειδοποίηση επιτυχίας. Αναφορικά με τη συναίνεση στο Blockchain, το Hyperledger Fabric Network's Consensus είναι η διαδικασία με την οποία οι κόμβοι στο δίκτυο επικυρώνουν τα μπλοκ που

πρέπει να προστεθούν στη δομή. Όλες οι συναλλαγές του νέου μπλοκ πρέπει να επικυρώνονται μέσω της συναίνεσης η οποία επιτυγχάνεται με τα έξυπνα συμβόλαια. Η εφαρμογή που προτείνεται στο άρθρο στηρίζεται σε Blockchain που απαιτεί την λήψη άδειας για τη συμμετοχή των χρηστών σε αυτό (Permissioned Blockchain). Σε αυτού του είδους τα Blockchain η συναίνεση εξαρτάται από τρεις τύπους κόμβων/peers: τους κόμβους έγκρισης, τους κόμβους εντολών και τους peers δέσμευσης. Πιο συγκεκριμένα ένας πελάτης εκκινεί μια διαδικασία συναλλαγής και τη στέλνει στους κόμβους έγκρισης. Αυτοί οι κόμβοι προσομοιώνουν και εκτελούν τη συναλλαγή, υπογράφοντας τη ως εγκεκριμένη και τη στέλνουν στον πελάτη. Αφού λάβει την εγκεκριμένη συναλλαγή, ο πελάτης την προωθεί στους κόμβους εντολών οι οποίοι με τη σειρά τους επαληθεύουν ότι έχει εγκριθεί και επιτρέπεται να αναγνωσθεί. Στη συνέχεια δίνουν στη συναλλαγή την ικανότητα να εγγραφεί και την προωθούν στους peers δέσμευσης. Τέλος οι peers δέσμευσης ολοκληρώνει τη εισαγωγή των συναλλαγών στο στην αλυσίδα.

Στην εργασία [46] εισάγεται ένα σύστημα αυτόνομης διαπραγμάτευσης για την επιλογή σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, που βασίζεται στην τεχνολογία Blockchain. Μια τέτοια προσέγγιση του προγραμματισμού φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων δεν απαιτεί κεντρικές οντότητες και μπορεί να αυτοματοποιηθεί πλήρως, ακόμα και σε επίπεδο πληρωμής για την ενέργεια που διακινείται. Στοιχεία όπως η προγραμματισμένη διαδρομή, η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας, οι πληροφορίες κυκλοφοριακής συμφόρησης σε πραγματικό χρόνο και οι προτιμήσεις των οδηγών, καθορίζουν το πλαίσιο, στο οποίο ο οδηγός του ηλεκτρικού οχήματος μπορεί να ζητήσει προσφορές από διάφορους σταθμούς κατά μήκος της διαδρομής του, εκτελώντας έξυπνα συμβόλαια που βασίζονται στην τεχνολογία Blockchain. Στην εργασία παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική ενός συστήματος Ethereum Blockchain για την αυτόνομη επιλογή σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και παρέχεται ένα μοντέλο στο οποίο αποσαφηνίζονται όλες οι δραστηριότητες και ο ρόλος όλων των εμπλεκόμενων.

Οι συγγραφείς ασχολούνται αποκλειστικά με την επιλογή του σταθμού φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων και τον έλεγχο της ταυτότητας του οχήματος/χρήστη στο σταθμό φόρτισης που διασφαλίζεται από το μηχανισμό Blockchain. Στο σχήμα της εργασίας λαμβάνονται υπόψιν τρεις παράγοντες, ένας οδηγός, ένα ηλεκτρικό όχημα και ένας σταθμός φόρτισης. Ο οδηγός έχει την απλή ιδιότητα να ξεκινήσει τη διαδικασία επιλογής σταθμού και τελικά να επιβεβαιώσει την προσφορά που του προτείνει το αυτοκίνητο. Το ηλεκτρικό όχημα διαθέτει δύο λειτουργίες, το συμβόλαιο Blockchain του οχήματος, υπεύθυνο για την επικοινωνία στη δομή Blockchain και το σύστημα πληροφοριών του οχήματος που παρέχει δυνατότητα στον οδηγό να επικοινωνήσει με το σύστημα. Όταν απαιτείται κάποια παρέμβαση από την πλευρά του οδηγού στην επικοινωνία Blockchain, το σύστημα πληροφοριών και το συμβόλαιο του οχήματος επικοινωνούν μέσω του Ethereum, όπου η μορφή της επικοινωνίας για το χρήστη θα μπορούσε να είναι μέσω μίας εφαρμογής κινητού τηλεφώνου ή εφαρμογής ενσωματωμένης από τον κατασκευαστή στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 4.12 παρουσιάζεται η προτεινόμενη διαδικασία επιλογής του σταθμού φόρτισης.



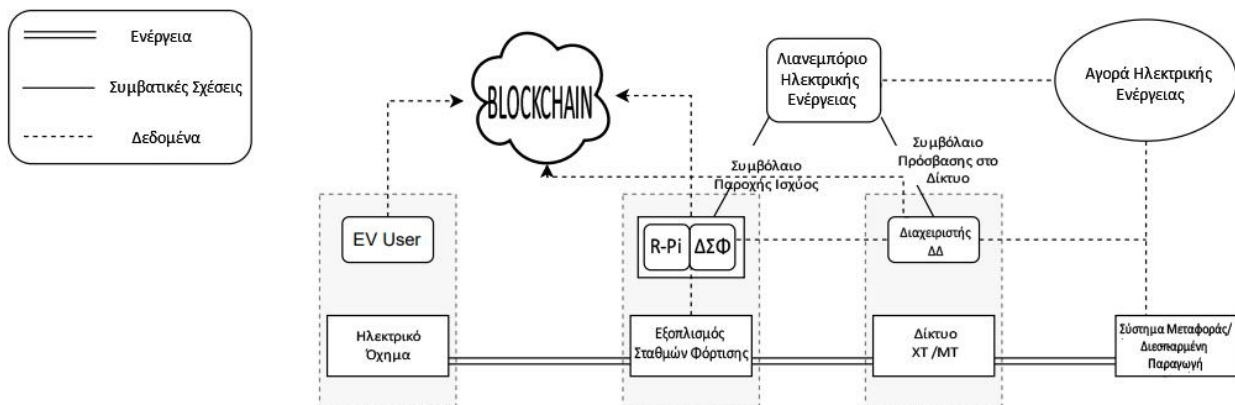
Σχήμα 4.12. Διάγραμμα επιλογής σταθμού φόρτισης [46]

Ο οδηγός του οχήματος ξεκινά επιλέγοντας τη διαδρομή στο σύστημα πληροφοριών του οχήματος, το οποίο ανεξάρτητα από τις μετέπειτα διαπραγματεύσεις φορτώνει μια λίστα πιθανών σταθμών φόρτισης που εμπίπτουν στη διαδρομή που επιλέχθηκε, και μεταβιβάζει αυτές τις διευθύνσεις στο συμβόλαιο του Blockchain του οχήματος. Το έξυπνο συμβόλαιο του οχήματος στέλνει ένα αίτημα προσφοράς στα έξυπνα συμβόλαια της λίστας των σταθμών φόρτισης που ανακτήθηκε νωρίτερα, εκκινώντας έτσι ένα είδος «τυφλής» δημοπρασίας. Στο μοντέλο της εργασίας θεωρείται ότι υπάρχουν δύο πιθανοί σταθμοί φόρτισης που θα στείλουν τις προσφορές τους. Ταυτόχρονα με το αίτημα του οχήματος για προσφορά από τους σταθμούς, ορίζεται και ένα χρονικό διάστημα στο οποίο θα ολοκληρωθεί η διαδικασία. Κάθε προσφορά περιλαμβάνει ένα ζεύγος κλειδιού/προσφοράς, και με την λήξη του χρονικού διαστήματος που ορίστηκε κατά την εκκίνηση, το έξυπνο συμβόλαιο του ηλεκτρικού οχήματος επιλέγει την καλύτερη προσφορά και λαμβάνει επιβεβαίωση από τον οδηγό. Έτσι απορρίπτονται οι μη επιλεγμένοι σταθμοί και επιβεβαιώνεται η ανταλλαγή ενέργειας από τον επιλεγμένο.

Στο άρθρο [47] προτείνεται μία έξυπνη υποδομή φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που βασίζεται σε μία πλατφόρμα Blockchain. Στόχος είναι η παροχή κινήτρων στους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων ώστε να προσαρμόζουν τη φόρτιση τους και να ανταμείβονται για την επιλογή τους να φορτίσουν σε σταθμούς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Λαμβάνονται υπόψιν η ζήτηση της

φόρτισης (kW) και η μέγιστη χρονική διάρκεια που μπορεί να διαθέσει ο χρήστης για τη φόρτιση του οχήματος του, προσδιορίζεται ο βαθμός ευελιξίας του φορτίου το ηλεκτρικού οχήματος και μέσω της έξυπνης φόρτισης επιτυγχάνεται η σταθερότητα του δικτύου. Οι ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων συνδέονται με τους σταθμούς φόρτισης μέσω μίας πλατφόρμας Blockchain και ανταλλάσσουν ευελιξία, με τη μορφή χρόνου και ισχύος, μετατοπίζοντας τη φόρτιση εκτός των ωρών αιχμής.

Αναλυτικότερα, οι χρήστες στέλνουν ένα αίτημα φόρτισης για το όχημα τους, προσδιορίζοντας την ποσότητα ενέργειας που απαιτούν και το μέγιστο χρόνο που μπορούν να διαθέσουν για τη φόρτιση. Στο μοντέλο προσδιορίζεται ένα χρονικό βήμα της τάξης των 15 λεπτών στο οποίο επεξεργάζονται τα εισερχόμενα αιτήματα και αν γίνουν αποδεκτά, η φόρτιση των οχημάτων ξεκινά στο επόμενο χρονικό διάστημα. Όταν λαμβάνεται ένα αίτημα φόρτισης, το μοντέλο ελέγχει εάν αυτό θα οδηγήσει σε συμφόρηση του δικτύου. Αν αυτό δε συμβαίνει το αίτημα γίνεται δεκτό. Σε διαφορετική περίπτωση το μοντέλο θα ελέγξει εάν ο χρήστης πρόσθεσε κάποια ευέλικτη προτίμηση φόρτισης ώστε να μετατοπιστεί το φορτίο συμφόρησης, και να γίνει το αίτημα δεκτό ή αν υπάρχει απαίτηση για ταχεία φόρτιση, όπου το αίτημα γίνεται αυτόματα δεκτό. Εάν δεν ικανοποιείται με κανένα τρόπο το αίτημα απορρίπτεται, και ελέγχεται η διαθεσιμότητα του συστήματος στο επόμενο χρονικό διάστημα, σε περίπτωση που ο χρήστης είναι ακόμη διαθέσιμος. Έτσι λοιπόν η ευελιξία του ηλεκτρικού οχήματος προσδιορίζεται ως ο χρόνος ή η ενέργεια που είναι διατεθειμένος ο χρήστης να ανταλλάξει για οικονομικά κίνητρα με τη μορφή tokens. Αυτό δημιουργεί την απαίτηση για δίκαιη και διαφανή διαχείριση των εισερχόμενων αιτημάτων φόρτισης.



Σχήμα 4.13. Αγορά φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων [47]

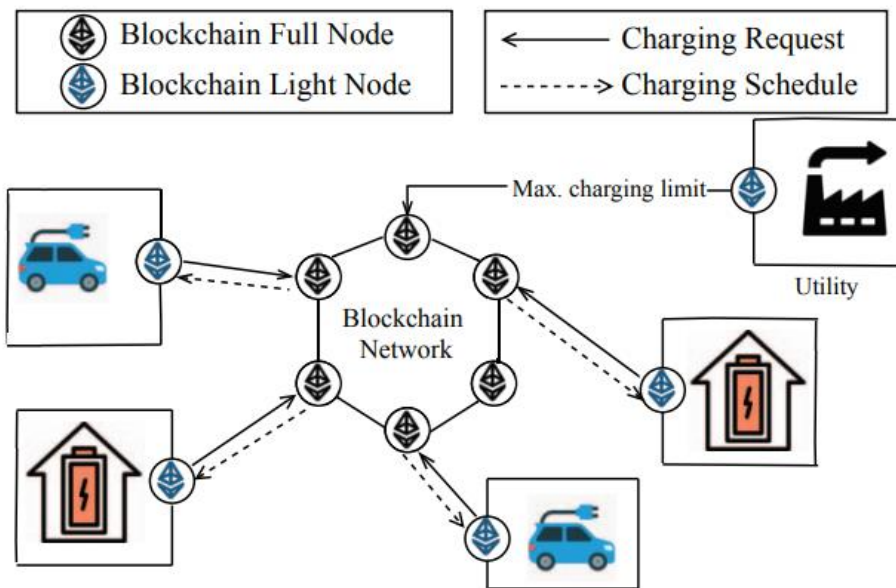
Για την ενσωμάτωση της τεχνολογίας Blockchain στο προτεινόμενο μοντέλο, εγκαθίσταται στον διαχειριστή του σταθμού φόρτισης ένα Raspberry Pi, που χρησιμεύει ως κόμβος του Blockchain. Το Σχήμα 4.13 δείχνει την αρχιτεκτονική της αγοράς φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με χρήση της τεχνολογίας Blockchain. Ο έξυπνος αλγόριθμος φόρτισης και ευελιξίας αναπτύσσεται σε Python. Ένα έξυπνο συμβόλαιο αναπτύσσεται στο δίκτυο Blockchain. Ο έξυπνος αλγόριθμος σε Python αλληλοεπιδρά με το δίκτυο Blockchain κάθε 15 λεπτά μέσω ενός έξυπνου συμβολαίου. Ταυτόχρονα λαμβάνονται τα αιτήματα φόρτισης από τα ηλεκτρικά οχήματα με την αιτούμενη ισχύ και το διαθέσιμο χρόνο, και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ευελιξίας που μπορεί να παρέχει το συγκεκριμένο όχημα στο επόμενο χρονικό διάστημα, σε περίπτωση που γίνει



δεκτό. Τα αποτελέσματα από τον υπολογισμό της ευελιξίας του οχήματος αποθηκεύονται στο Blockchain. Ο διαχειριστής του σημείου φόρτισης αλληλοεπιδρά τόσο με το Blockchain όσο και με μία βάση δεδομένων Cloud που χρησιμεύει ως αντίγραφο ασφαλείας και πηγή του αλγορίθμου φόρτισης και ευελιξίας. Στην περίπτωση που το αίτημα γίνει δεκτό, μετά την ολοκλήρωση της φόρτισης του οχήματος και την επιβεβαίωση από τον κόμβο του σταθμού φόρτισης, ότι το όχημα παρείχε την ευελιξία του, ο χρήστης του οχήματος ανταμείβεται με tokens. Με αυτόν τον τρόπο οι χρήστες των ηλεκτρικών οχημάτων ανταμείβονται για την ευελιξία που παρέχουν είτε με μορφή χρόνου είτε με μορφή ενέργειας.

Στην εργασία [48] προτείνεται ένας μηχανισμός συντονισμού μονάδων αποθήκευσης ενέργειας που βασίζεται στην τεχνολογία Blockchain. Αρχικά οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας πρέπει να χρησιμοποιούν tokens ώστε να ταυτοποιούνται διατηρώντας την ανωνυμία τους. Έπειτα στέλνουν ένα αίτημα φόρτισης στη διεύθυνση του έξυπνου συμβολαίου στο Blockchain, που περιέχει την κατάσταση φόρτισης (State-of-Charge - SoC), το χρόνο έως τη πλήρη φόρτιση (Time-to-complete-charge-TCC) και την ποσότητα ενέργειας που ζητούν. Στη συνέχεια το έξυπνο συμβόλαιο θα εκτελεστεί, εφαρμόζοντας έναν αυτοματοποιημένο μηχανισμό συντονισμού της φόρτισης, ο οποίος θα εξυπηρετεί τις μονάδες αποθήκευσης που έχουν υψηλότερη προτεραιότητα. Ο προτεινόμενος μηχανισμός εφαρμόζεται σε ένα σύστημα Ethereum Blockchain, ενισχύοντας έτσι τη διαφάνεια, την αξιοπιστία και διατηρώντας την ιδιωτικότητα των συμμετεχόντων.

Αναλυτικότερα ο προτεινόμενος μηχανισμός φαίνεται στο Σχήμα 4.14 και περιλαμβάνει τις παρακάτω τρεις κύριες οντότητες. Το δίκτυο Blockchain που είναι υπεύθυνο να λαμβάνει τα αιτήματα φόρτισης από τις μονάδες αποθήκευσης και το συνολικό φορτίο του συστήματος από τον διαχειριστή του συστήματος, και να προγραμματίζει τη φόρτιση των μονάδων με έναν αποκεντρωμένο και διαφανή τρόπο. Το Blockchain υποστηρίζει τα έξυπνα συμβόλαια έτσι ώστε με τη λήψη ενός αιτήματος φόρτισης, αυτά εκτελούνται αυτόματα σε κάθε κόμβο του δικτύου. Οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας που μπορεί να είναι είτε μπαταρίες είτε ηλεκτρικά οχήματα, αλληλοεπιδρούν με το σύστημα μέσω μίας εφαρμογής κινητών τηλεφώνων. Κάθε μονάδα αποθήκευσης έχει μια λίστα πιστοποιημένων ψευδώνυμων πριν εκκινήσει ένα αίτημα φόρτισης. Επίσης δεν είναι απαραίτητο να διαθέτει πλήρες αντίγραφο του Blockchain παρά μόνο τις κεφαλίδες των μπλοκς λειτουργώντας ως light κόμβος, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η υπηρεσία κοινής ωφέλειας είναι υπεύθυνη για την ενημέρωση σχετικά με το μέγιστο φορτίο του συστήματος και τη μέγιστη φόρτιση των μονάδων αποθήκευσης, αλλά όχι για τον προγραμματισμό της φόρτισης. Το Blockchain αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων εξόρυξης που είναι υπεύθυνοι για την επικύρωση των συναλλαγών και την ορθότητα της εκτέλεσης του προτεινομένου πρωτοκόλλου, αλλά όχι για την ιδιωτικότητα των συμμετεχόντων. Στη εργασία οι συγγραφείς υποθέτουν ότι κάθε μονάδα αποθήκευσης ενέργειας διαθέτει πολλαπλά πιστοποιημένα ψευδώνυμα, δηλαδή μία διεύθυνση Blockchain είναι ο κατακερματισμός του δημόσιου κλειδιού, και λόγω των ψηφιακών υπογραφών, μόνο ο κάτοχος του δημόσιου κλειδιού μπορεί να στείλει μηνύματα στη δική του διεύθυνση Blockchain. Συγκεκριμένα ο πιθανός εισβολέας δε μπορεί να αντιστρέψει τον κατακερματισμό μονής κατεύθυνσης ή να παραποιήσει τις ψηφιακές υπογραφές χωρίς το ιδιωτικό κλειδί.



Σχήμα 4.14. Απεικόνιση συστήματος δημοσίευσης [48]

Ο χρονικός συντονισμός της φόρτισης των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας γίνεται ως εξής. Οι μονάδες αντιμετωπίζονται ως σύνολα κοινοτήτων που είναι συνδεδεμένες σε ένα ζυγό του συστήματος με συγκεκριμένο όριο ισχύος. Αντίστοιχα είναι γνωστή η τυπική χωρητικότητα φορτίου μίας συγκεκριμένης κοινότητας για μία δεδομένη περίοδο. Για το σχεδιασμό του μοντέλου ορίζονται χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια των οποίων γίνεται ο παραγραμματισμός της φόρτισης των μονάδων. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι αδύνατο να προγραμματιστεί η φόρτιση όλων των μονάδων που έχουν αιτηθεί σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα εξαιτίας των περιορισμών του συστήματος. Έτσι στην εργασία αναπτύσσεται ένας αλγόριθμος υπολογισμού προτεραιότητας. Οι μονάδες με υψηλότερο δείκτη προτεραιότητας φορτίζονται στο τρέχον χρονικό διάστημα διασφαλίζοντας ότι δεν παραβιάζονται τα όρια του συστήματος, και τα αιτήματα φόρτισης μονάδων που δεν είναι δυνατό να φορτίσουν στο τρέχον χρονικό διάστημα, ικανοποιούνται σε επόμενα. Για τον προσδιορισμό του δείκτη προτεραιότητας βασικό ρόλο παίζουν η κατάσταση φόρτισης (State-of-Charge - SoC) και ο χρόνος έως τη πλήρη φόρτιση (Time-to-complete-charge-TCC). Μία μονάδα μπορεί να λάβει ολόκληρη την ενέργεια που αιτείται σε ένα χρονικό διάστημα. Η υπολειπόμενη χωρητικότητα της κοινότητας θα εκχωρηθεί στην επόμενη μη προγραμματισμένη μονάδα αποθήκευσης που έχει τον υψηλότερο δείκτη προτεραιότητας. Μια τέτοια μονάδα αποθήκευσης που δε θα φορτιστεί πλήρως στο τρέχον χρονικό διάστημα, θα τεθεί σε αναστολή μέχρι το επόμενο, οπότε και θα λάβει την υπόλοιπη ενέργεια που έχει αιτηθεί. Το πρόβλημα του συντονισμού της φόρτισης επιλύεται λοιπόν με τη χρήση ενός άπληστου αλγόριθμου του σακιδίου ο οποίος τελικά θα ταξινομήσει τις μονάδες αποθήκευσης με φθίνουσα σειρά βάσει του βαθμού προτεραιότητας που έχει υπολογιστεί. Οι μονάδες που είναι υψηλότερα στην κατάταξη παραγραμματίζονται για φόρτιση στην τρέχουσα χρονική περίοδο λαμβάνοντας συνεχώς υπόψιν το όριο χωρητικότητας της κοινότητας.

Η δημοσίευση παρουσιάζει στη συνέχεια τον προτεινόμενο μηχανισμό συντονισμού της φόρτισης των μονάδων αποθήκευσης, όπως αυτός υλοποιείται με τη χρήση της τεχνολογίας Blockchain. Ο μηχανισμός λειτουργεί σε τρεις φάσεις: την απόκτηση των ανώνυμων διαπιστευτηρίων, την

υποβολή του αιτήματος φόρτισης και τον προγραμματισμό της φόρτισης. Ο αλγόριθμος συντονισμού της φόρτισης υλοποιείται μέσω ενός έξυπνου συμβολαίου με τη μορφή κώδικα. Το έξυπνο συμβόλαιο στην εργασία ονομάζεται `Charging_Coordination` και αποτελείται από τρεις επιμέρους συναρτήσεις: τη συνάρτηση `Receive_Charging_Request`, τη συνάρτηση `Knapsack` και τη συνάρτηση `Quick_Sort`.

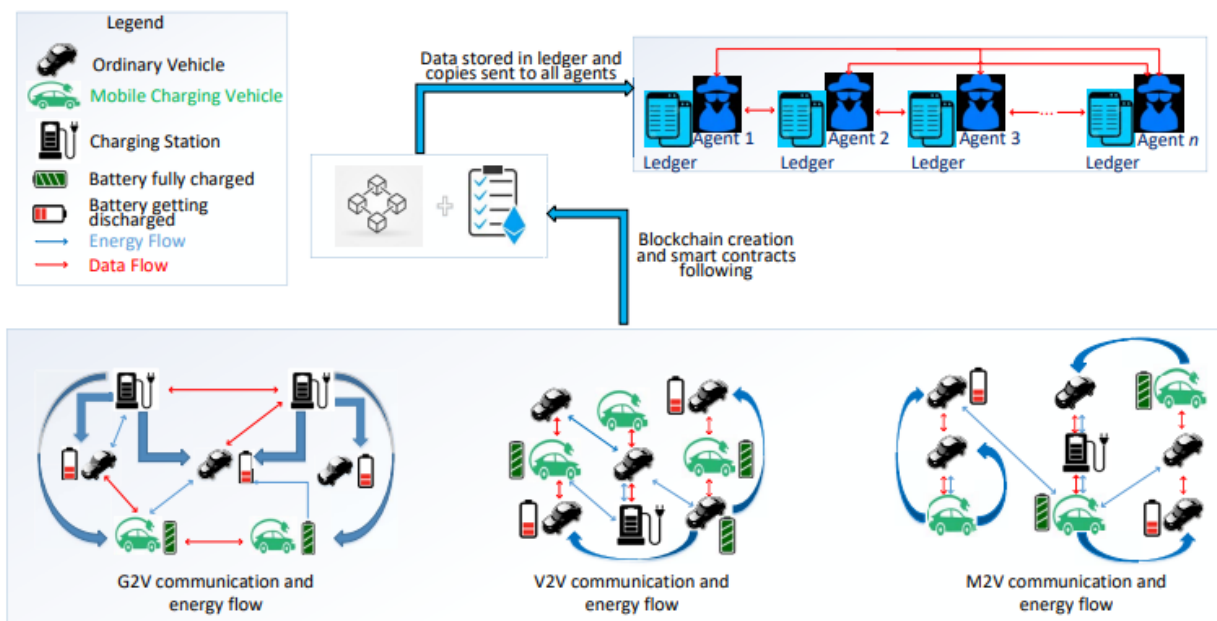
Για να επιτραπεί στο έξυπνο συμβόλαιο να ταυτοποιεί ανώνυμα αιτήματα φόρτισης για μία κοινότητα μονάδων αποθήκευσης, κάθε μονάδα αιτείται από την αρμόδια υπηρεσία την απόκτηση ενός ανώνυμου token, το οποίο αποκτά εφαρμόζοντας ένα σύστημα μερικής τυφλής υπογραφής. Με την ολοκλήρωση του συστήματος μερικής τυφλής υπογραφής, κάθε μονάδα διαθέτει tokens ικανά να την ταυτοποιήσουν στο δίκτυο Blockchain, έχοντας διατηρήσει την ανωνυμία της απέναντι στην αρμόδια υπηρεσία. Στη συνέχεια κατά την υποβολή του αιτήματος φόρτισης κάθε μονάδα διατηρεί την ανωνυμία της χρησιμοποιώντας το δημόσιο κλειδί της και το token που απέκτησε κατά τη διαδικασία απόκτησης ανώνυμων διαπιστευτηρίων που περιγράφηκε παραπάνω. Έτσι στο έξυπνο συμβόλαιο μπορεί να επαληθεύσει ως «νόμιμο» το αίτημα φόρτισης που έλαβε. Η μονάδα αποθήκευσης υπογράφει και στέλνει στο Blockchain το αίτημα φόρτισης που περιλαμβάνει την αιτούμενη ισχύ, την κατάσταση φόρτισης (State-of-Charge - SoC), τον χρόνο έως τη πλήρη φόρτιση (Time-to-complete-charge-TCC) και το μερικώς τυφλά κρυπτογραφημένο δημόσιο κλειδί του. Το Blockchain ταυτοποιεί το αίτημα και ελέγχει ότι το token που το συνοδεύει είναι έγκυρο. Σημειώνεται ότι για τη διατήρηση της ιδιωτικότητας, το δημόσιο κλειδί κάθε μονάδας αλλάζει σε κάθε νέα συναλλαγή. Σε περίπτωση που η συνάρτηση `Receive_Charging_Request` του έξυπνου συμβολαίου αποφανθεί ότι είναι έγκυρο το αίτημα, προσθέτει τα δεδομένα που εσωκλείονται σε μία λίστα αιτημάτων για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Στο τέλος κάθε χρονικού διαστήματος εκτελείται ο άπληστος αλγόριθμος σακιδίου μέσω της συνάρτησης `Knapsack` και καλείται η συνάρτηση `Quick_Sort` για την ταξινόμηση των μονάδων σε φθίνουσα σειρά, σύμφωνα με το δείκτη προτεραιότητας που υπολογίστηκε για κάθε μονάδα και την ισχύ που αιτείται. Έτσι η διαδικασία προγραμματισμού της φόρτισης αυτοματοποιείται πλήρως σε κάθε χρονικό διάστημα χωρίς την παρέμβαση οποιουδήποτε εξωτερικού ρυθμιστή.

Η αξιολόγηση του προτεινόμενου πλαισίου γίνεται αφενός για την ποιότητα του σχεδιασμού της φόρτισης, όπου συγκρίνεται το προτεινόμενο μοντέλο με μία προσέγγιση `First-Come-First-Serve`, όπου όποιο αίτημα φτάνει εξυπηρετείται με τρόπο τυχαίο, χωρίς να προγραμματίζονται τα αιτήματα. Ο προτεινόμενος μηχανισμός εξυπηρετεί ολόένα και περισσότερες μονάδες όσο αυξάνονται τα αιτήματα, σε σύγκριση με την απλοϊκή προσέγγιση, και προσφέρει συνολικά μεγαλύτερη ισχύ φόρτισης στις μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Έπειτα η μέθοδος αξιολογείται ως προς το υπολογιστικό της κόστος, όπου προκύπτει το συμπέρασμα ότι το κόστος για την εκτέλεση των έξυπνων συμβολαίων είναι λογικό για μικρής κλίμακας κοινότητα μονάδων αποθήκευσης.

Στην εργασία [54] εισάγεται μία στρατηγική κινητής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (Mobile charging Vehicle-to-Vehicle - M2V) που καλύπτει και τις συμβατικές Vehicle-to-Vehicle (V2V) και Grid-to-Vehicle (G2V) στρατηγικές, αξιοποιώντας την P2P ανταλλαγή ενέργειας αξιοποιώντας την τεχνολογία Blockchain, για την υπέρβαση προβλημάτων απορρήτου που εγείρονται στον τομέα της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Στόχος της εργασίας είναι η

μείωση του κόστους φόρτισης και η ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού μηχανισμού με τον οποίο θα προγραμματίζεται η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Στην εργασία προτείνονται δύο αλγόριθμοι που ασχολούνται με τον προγραμματισμό της φόρτισης και το χρόνο αναμονής των οχημάτων στους σταθμούς φόρτισης.

Στο προτεινόμενο μοντέλο υπάρχουν τέσσερις διαφορετικές οντότητες που είναι: τα ηλεκτρικά οχήματα (Electric Vehicle - EV) που φορτίζουν, τα ηλεκτρικά οχήματα που εκφορτίζουν, τα κινούμενα οχήματα φόρτισης (Mobile Vehicle - MV) και οι σταθμοί φόρτισης (Charging Station - CS). Όλες οι οντότητες επικοινωνούν και στέλνουν στοιχεία στους πλησιέστερους πράκτορες. Στην εργασία εισάγεται ένα σενάριο φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων από κινούμενα οχήματα φόρτισης, που βασίζεται σε ένα δίκτυο Blockchain στο οποίο αποθηκεύονται όλες οι συναλλαγές. Τα ηλεκτρικά οχήματα που εκφορτίζουν μπορούν να φορτιστούν είτε από τους σταθμούς φόρτισης είτε από τα κινούμενα οχήματα φόρτισης. Όταν ένα όχημα χρειάζεται ενέργεια στέλνει ένα αίτημα στον πράκτορα, ο οποίος με τη σειρά του το προωθεί στις οντότητες φόρτισης. Εν τω μεταξύ οι πράκτορες συλλέγουν και αποθηκεύουν εισερχόμενα αιτήματα ζήτησης ενέργειας και δεδομένα ηλεκτρικών οχημάτων ώστε να διατηρούν έλεγχο στο πλήθος των αιτημάτων που υποβάλλονται. Όλες οι οντότητες του συστήματος διαθέτουν προσωπικούς λογαριασμούς και πορτοφόλια, και κάθε φορά που πραγματοποιούνται συναλλαγές χρησιμοποιείται ένα ψηφιακό νόμισμα. Η αγορά ενέργειας από τους σταθμούς φόρτισης είναι συνήθως ακριβότερη, οπότε οι χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων επιλέγουν συνήθως να προμηθευτούν ενέργεια από το πλησιέστερο κινητό όχημα φόρτισης. Το Σχήμα 4.15 δείχνει τη διαρρύθμιση τριών διαφορετικών σεναρίων φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων όπου σε όλα περιλαμβάνονται όλες οι οντότητες. Τα δεδομένα που αφορούν τη φόρτιση αποθηκεύονται στο Blockchain στο οποίο αναπτύσσονται έξυπνα συμβόλαια. Αντίγραφα της δομής παρέχονται σε όλους τους πράκτορες του δικτύου.



Σχήμα 4.15. Απεικόνιση συστήματος δημοσίευσης [54]

Όπως σημειώθηκε παραπάνω η εργασία στοχεύει στη μείωση του κόστους φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων προτείνοντας δύο αλγόριθμους. Ο αλγόριθμος 1 δίνει τον

χρονοπρογραμματισμό της φόρτισης και ο αλγόριθμος 2 τη διαδικασία αναμονής που ακολουθούν τα ηλεκτρικά οχήματα όταν βρίσκονται στους σταθμούς φόρτισης.

Αλγόριθμος 1: Προγραμματισμός Φόρτισης	Αλγόριθμος 2: Υπολογισμός Αναμονής
1: Αρχικοποίηση	1: Αρχικοποίηση
2: <b>Είσοδος:</b> EV, MV, CS, Απόσταση <sub>G2V</sub> , Απόσταση <sub>M2V</sub> , Απόσταση <sub>V2V</sub>	2: <b>Είσοδος:</b> V, v, τ, Απόσταση <sub>G2V</sub> , δ, diff(V,v)
3: <b>Έξοδος:</b> Χρονοδιάγραμμα Φόρτισης	3: <b>Έξοδος:</b> Χρόνος αναμονής
4: <b>Για</b> (Κάθε EV, EV=1, ..., n)	4: Βρες απόσταση μεταξύ EV και CS, Απόσταση <sub>G2V</sub>
5: Βρες απόσταση μεταξύ EV και MV, Απόσταση <sub>M2V</sub>	5: Βρες αριθμός οχημάτων στο CS, V
6: Βρες απόσταση μεταξύ EV και CS, Απόσταση <sub>G2V</sub>	6: Βρες αριθμός οχημάτων που εισέρχονται στον CS, v
7: Βρες απόσταση μεταξύ EV και EV, Απόσταση <sub>V2V</sub>	7: Βρες τη διαφορά μεταξύ V και v, diff(V,v)
8: <b>Τέλος</b>	8: <b>Αν</b> (Απόσταση <sub>G2V</sub> <= τ) <b>τότε</b>
9: <b>Για</b> (Κάθε EV, EV=1, ..., n)	9: Επέτρεψε στο όχημα να έρθει στον CS
10: Βρες Κατάσταση Φόρτισης(State of Charging – SoC)	10: <b>Αλλιώς αν</b> (Απόσταση <sub>V2S</sub> > τ) <b>τότε</b>
11: <b>Αν</b> (το όχημα εκφορτίζεται) <b>τότε</b>	11: Ζήτα από το όχημα να βρει άλλη πηγή φόρτισης
12: SoC=1	12: <b>Τέλος</b>
13: <b>Αλλιώς αν</b> (το όχημα δεν εκφορτίζεται) <b>τότε</b>	13: <b>Αν</b> (diff(V,v) <= δ) <b>τότε</b>
14: SoC=0	14: Το όχημα μπορεί να φορτιστεί
15: <b>Τέλος</b>	15: <b>Αλλιώς αν</b> (diff(V,v) > δ) <b>τότε</b>
16: <b>Για</b> (κάθε όχημα και σταθμό φόρτισης)	16: Αρνήσου την προσθήκη του οχήματος στην ουρά αναμονής φόρτισης
17: Υπολόγισε κόστος φόρτισης	17: <b>Τέλος</b>
18: Υπολόγισε κόστος απόστασης	18: <b>Για</b> (Απόσταση <sub>V2S</sub> <= τ && diff(V,v) <= δ)
19: Υπολόγισε κόστος αναμονής	19: Υπολόγισε το χρόνο αναμονής
20: Υπολόγισε τιμή ανταμοιβής και τιμής	20: <b>Τέλος</b>
21: <b>Τέλος</b>	
22: Υπολόγισε συνολικό κόστος	

Η επιλογή του μέσου φόρτισης επιλέγεται τελικά από τον χρήστη του ηλεκτρικού οχήματος βάσει της απόστασης και της τιμής της ενέργειας. Εάν η απόσταση μεταξύ του ηλεκτρικού οχήματος και της πηγής είναι μεγάλη τότε η τιμή θα είναι αυτόματα υψηλή. Έτσι ο χρήστης θα απορρίψει αυτή την πηγή και θα ταξιδέψει προς πλησιέστερη πηγή φόρτισης. Κατά την προσομοίωση του προτεινόμενου μοντέλου παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του κόστους φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων που προκύπτει από την αποτελεσματική εφαρμογή των παραπάνω αλγορίθμων. Ταυτόχρονα η τεχνολογία Blockchain χρησιμοποιείται για την εγγραφή των οχημάτων και τη διασφάλιση των συναλλαγών και των δεδομένων των χρηστών. Ο αλγόριθμος συναίνεσης που χρησιμοποιείται είναι το PoW καθιστώντας το σύστημα αξιόπιστο, ενώ ταυτόχρονα όλο και περισσότεροι χρήστες μπορούν να προστεθούν στο δίκτυο.

Ο Πίνακας 7 συνοψίζει τις δημοσιεύσεις που παρουσιάστηκαν σε αυτή την ενότητα, επισημαίνοντας την τεχνολογία και τους μηχανισμούς που χρησιμοποιήθηκαν, το αντικείμενο, και τη συνεισφορά της κάθε δημοσίευσης στην εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στον ενεργειακό τομέα.

Πίνακας 7: Σύνοψη δημοσιεύσεων αποθήκευσης και ηλεκτρικών οχημάτων

Αναφ.	Τεχνολογία	Αντικείμενο	Συνεισφορά
[45]	Blockchain Έξυπνα συμβόλαια	Σύστημα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	Ένα P2P σύστημα ανταλλαγής και χρέωσης της ενέργειας στο πλαίσιο των ηλεκτρικών οχημάτων
[46]	Ιδιωτικό Blockchain Ethereum Έξυπνα συμβόλαια	Σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	Ένα σύστημα αυτόνομης διαπραγμάτευσης για την επιλογή σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων
[47]	Blockchain Έξυπνα Συμβόλαια	Σύστημα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	Ένα μοντέλο έξυπνης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων παρέχοντας κίνητρα στους ιδιοκτήτες των οχημάτων ώστε να προσφέρουν την ευελιξία φόρτισης τους
[48]	Ιδιωτικό Blockchain Ethereum Έξυπνα συμβόλαια	Αποθήκευση ενέργειας	Ένας μηχανισμός συντονισμού μονάδων αποθήκευσης ενέργειας
[54]	Blockchain Έξυπνα συμβόλαια	Προγραμματισμός κινητής φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων	Μία στρατηγική κινητής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (Mobile charging Vehicle-to-Vehicle - M2V) που καλύπτει και τις συμβατικές Vehicle-to- Vehicle (V2V) και Grid-to-Vehicle (G2V) στρατηγικές, αξιοποιώντας την P2P ανταλλαγή ενέργειας

#### 4.6 Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών Άνθρακα και Πράσινα Πιστοποιητικά

Το 1997 περισσότερες από 100 χώρες υπέγραψαν το πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο όριζε το καθήκον των χωρών να μειώσουν τις εκπομπές άνθρακα, με στόχο τον περιορισμό του φαινομένου της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Ένας από τους μηχανισμούς για την επίτευξη της δέσμευσης ήταν η ανάπτυξη του εμπορίου εκπομπών του άνθρακα. [60] Το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΣΕΔΕ) αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής καθώς και το βασικό της εργαλείο για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Το ΣΕΔΕ θέτει ανώτατο όριο στις ποσότητες CO<sub>2</sub> που μπορούν να εκπέμπουν η βιομηχανία και οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συνολικός όγκος των επιτρεπόμενων εκπομπών διανέμεται σε εταιρίες με τη μορφή δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub>, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν και αντικείμενο συναλλαγών[61]. Έχουν διεξαχθεί διάφορες μελέτες και έχουν προταθεί διάφορες λύσεις για την αντιμετώπιση του φαινομένου, συμπεριλαμβανομένης της δέσμευσης του CO<sub>2</sub> για αποθήκευση, χωρίς ωστόσο να υπάρχουν πρωτοβουλίες για εφαρμογή τους λόγω κυρίως της οικονομικής επιβάρυνσης που απαιτούν. Αν και το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών αποτελεί μία πολιτική μείωσης των παραγόμενων εκπομπών, είναι απαραίτητη η διερεύνηση και η εφαρμογή συμπληρωματικών μέτρων για την υποστήριξη μιας πιο μακροπρόθεσμης λύσης[61].

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η μετάβαση που προέκυψε από τη διαίρεση των ευρωπαϊκών μονοπωλίων το 2009, και την ένταξη πολλών μικρών εταιριών στην αγορά ενέργειας, σε συνδυασμό με την αποδοχή και την επιδίωξη κατανάλωσης πράσινης ενέργειας από τους καταναλωτές, οδήγησε στη δημιουργία των Εγγυήσεων Προέλευσης (Guarantee of Origin – GoO). Η προσφορά τιμολογίων πράσινης ενέργειας από παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί βασική τακτική και υποχρέωση

του σήμερα. Η οδηγία του 2009 της Ευρωπαϊκής Ένωσης όρισε ένα μέσο, τις Εγγυήσεις Προέλευσης για τη σήμανση της ενέργειας που προέρχεται από ΑΠΕ. Η συναλλαγή των GoOs πραγματοποιείται στην στο ευρωπαϊκό χρηματιστήριο ενέργειας. Κάθε GoO εμπεριέχει πληροφορίες που αφορούν την πηγή από την οποία προήλθε η ενέργεια, είτε σχετίζεται με ηλεκτρισμό, θέρμανση ή ψύξη, την ταυτότητα, τη θέση, το είδος και τη χωρητικότητα της εγκατάστασης από την οποία προήλθε η ενέργεια.

Στην εργασία [28] προτείνεται ένα μοντέλο συστήματος διαχείρισης ενέργειας που ενσωματώνει όλες τις πηγές ενέργειας, καθορίζει τους ρόλους όλων των εμπλεκόμενων με το δίκτυο μερών, δημιουργεί tokens και ενεργειακά πιστοποιητικά, εκτελεί ενεργειακές συναλλαγές και παρέχει κίνητρα για ευρύτερη χρήση της πράσινης ενέργειας.

Αναλυτικότερα το μοντέλο αναφέρεται στην επιχείρηση της ενέργειας σε P2P αποκεντρωμένα συστήματα, κάνοντας χρήση της τεχνολογίας Blockchain. Οι συγγραφείς προτείνουν ένα σύστημα στο οποίο η ενέργεια από συμβατικές και από ανανεώσιμες πηγές, θα κατηγοριοποιείται και θα προσδιορίζεται με την έκδοση πιστοποιητικών κατά την εκτέλεση του έξυπνου συμβολαίου. Ταυτόχρονα αναγνωρίζεται η έννοια της πράσινης ενέργειας και κατηγοριοποιείται βάσει των εκπομπών άνθρακα και αερίων του θερμοκηπίου κατά τη διαδικασία της παραγωγής.

Η διαδικασία που εφαρμόζεται για τη διαχείριση της ενέργειας, ανάλογα με τον καθορισμό της ως πράσινη ή μη, από το προτεινόμενο μοντέλο, με χρήση της τεχνολογίας Blockchain, περιλαμβάνει τις παρακάτω ενέργειες. Αρχικά γίνεται ταυτοποίηση του κόμβου που επιθυμεί να πραγματοποιήσει μία συναλλαγή. Με την εκκίνηση ενός αιτήματος συναλλαγής από κάποιον κόμβο που μπορεί να είναι είτε prosumer, είτε συμβατικός σταθμός παραγωγής του δικτύου, το αίτημα διαμοιράζεται στους υπόλοιπους κόμβους του δικτύου, που αναλαμβάνουν την επικύρωση της συναλλαγής για την προσθήκη νέου κόμβου στην αλυσίδα, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο συναίνεσης Proof of Stake. Αν η συναλλαγή αξιολογηθεί ως έγκυρη, το νέο μπλοκ δημιουργείται και ο κόμβος αποκτά ένα μοναδικό αναγνωριστικό το οποίο μεταδίδεται σε όλο το δίκτυο, για την ενημέρωση των δεδομένων των υπόλοιπων κόμβων. Κατά την εκκίνηση μιας συναλλαγής εκτελείται ένα έξυπνο συμβόλαιο που κατηγοριοποιεί την ενέργεια ως GREEN ή NON GREEN, ανάλογα με τις εκπομπές άνθρακα και αερίων του θερμοκηπίου που απελευθερώνονται κατά την παραγωγή. Η πληροφορία σχετικά με την «καθαρότητα» της ενέργειας προς ανταλλαγή είναι διαθέσιμη σε όλους τους κόμβους του Blockchain, και οι καταναλωτές επιλέγουν να αγοράσουν βάσει της τιμής της ενέργειας που διατίθεται. Ένα έξυπνο συμβόλαιο εκτελείται ανάμεσα στον προμηθευτή ενέργειας και στον καταναλωτή. Η συναλλαγή στέλνεται για επικύρωση και το νέο μπλοκ προστίθεται στη δομή. Με την ανακήρυξη μίας συναλλαγής ως έγκυρη, ο καταναλωτής χρεώνεται για την ενέργεια που χρησιμοποίησε και λαμβάνει πίστωση σχετικά με το ενεργειακό του αποτύπωμα.

Στη δημοσίευση [62] προτείνεται ένα νέο μοντέλο εμπορίας εκπομπών που ενσωματώνει την τεχνολογία Blockchain για την αντιμετώπιση προβλημάτων διαχείρισης και απάτης σε συστήματα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών. Αναπτύσσεται ένα σχέδιο στο οποίο αξιοποιείται τόσο το Blockchain όσο και η αξιολόγηση των συμμετεχόντων βάσει φήμης. Η τεχνολογία Blockchain επιλέγεται ως αποτελεσματικό εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων διαχείρισης και απάτης

στο σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών, ενώ ταυτόχρονα αποθαρρύνει τους συμμετέχοντες από το να αγοράσουν περισσότερα δικαιώματα. Ταυτόχρονα το σύστημα που βασίζεται στη φήμη είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για τη διασφάλιση της καλής συμπεριφοράς των συμμετεχόντων και τη βελτίωση της ποιότητας της αγοράς. Στο προτεινόμενο μοντέλο η φήμη υποδηλώνει την απόδοση και τη δέσμευση των συμμετεχόντων στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών. Ο δείκτης για τη φήμη ονομάζεται Σημείο Φήμης (Reputation Point - RP) Το σύστημα που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία είναι εφαρμόσιμο σε μία βασική πολιτική ανταλλαγής εκπομπών άνθρακα στην οποία οι πιστώσεις άνθρακα προέρχονται από προγράμματα Καθαρής Ανάπτυξης (CDM) και Κοινής Εφαρμογής (JI). Η τεχνολογία Blockchain και οι έξυπνες συσκευές μέτρησης χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη της πολιτικής εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών, ενισχύοντας τη διαδικασία παρακολούθησης, και επαλήθευσης των συμμετεχόντων. Ταυτόχρονα οι δύο τεχνολογίες υποστηρίζουν το σύστημα φήμης που αποτελεί θεμέλιο για το σύστημα συναλλαγών που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Αντίστοιχα το σύστημα συναλλαγών υποστηρίζεται από δύο μηχανισμούς, το μηχανισμό τμηματοποίησης της αγοράς και το μηχανισμό προτεραιότητας-αξίας-εντολής.

Αναλυτικότερα, το Blockchain ικανοποιεί την απαίτηση για ένα αμετάβλητο και διαφανές αρχείο δικαιωμάτων και φήμης, χωρίς να εγγυάται την αξιοπιστία των δεδομένων που έχουν εισαχθεί, ρόλο που αναλαμβάνουν οι έξυπνοι μετρητές οι οποίοι θεωρούνται ανθεκτικοί και παρέχουν αξιόπιστα δεδομένα. Στο προτεινόμενο μοντέλο υπάρχουν τέσσερις κύριοι ρόλοι που αντιπροσωπεύουν τους φορείς σε ένα σύστημα ανταλλαγής δικαιωμάτων εκπομπών και είναι η Αρχή που είναι ο κυβερνητικός φορέας υπεύθυνος για την επιβολή και τη ρύθμιση του συστήματος, ενώ ταυτόχρονα έχει το δικαίωμα να εκδίδει να διανέμει δικαιώματα που φέρουν την ένδειξη CC στο περιβάλλον Blockchain, η Εταιρία που είναι επιχειρήσεις που συμμετέχουν στο πρόγραμμα και ενεργούν ως πωλητές ή αγοραστές δικαιωμάτων, το Έργο που αντιπροσωπεύει προγράμματα καθαρής ανάπτυξης στοχεύοντας στη δημιουργία και την πώληση πιστοποιημένων μονάδων περιορισμού των εκπομπών, και τέλος ο Ελεγκτής που λειτουργεί ως παράγοντας αξιολόγησης, ελέγχοντας και αξιολογώντας τα ποσοστά των εκπομπών και τις στρατηγικές της εταιρίας για μείωση των εκπομπών και τον προσδιορισμό της φήμης μέσω του δείκτη RP. Αναφορικά με το σύστημα συναλλαγών που βασίζεται στη φήμη, αποτελεί ουσιαστικά τη βασικότερη τροποποίηση του συμβατικού ΣΕΔΕ, και η διαφοροποίηση έγκυται σε δύο παράγοντες. Η πρώτη είναι το σύστημα φήμης και η δεύτερη, οι αποκεντρωμένες συναλλαγές που προκύπτουν από τη φύση της τεχνολογίας Blockchain, όπου τις προσφορές δεν διαχειρίζεται, ταξινομεί και αντιστοιχίζει πλέον μια κεντρική αρχή.

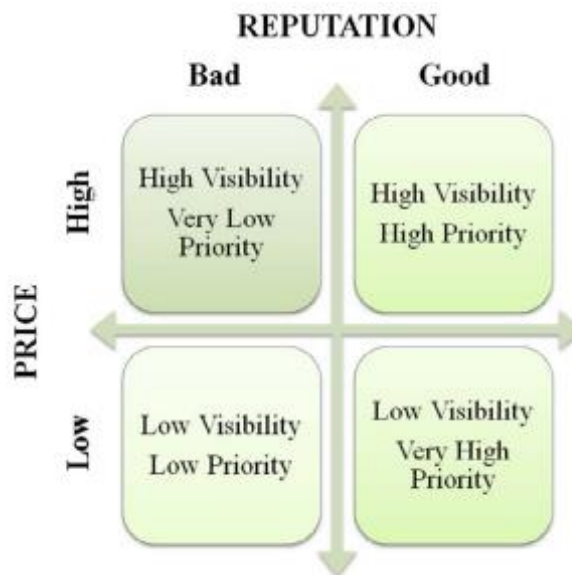
Σε αντίθεση με ένα συμβατικό ΣΕΔΕ που απαιτεί αποκλειστικά τον προσδιορισμό της τιμής πώλησης για την επίτευξη συμφωνίας, το προτεινόμενο μοντέλο αποτελείται μια σειρά διαδικασιών μέχρι την πραγματοποίηση της συναλλαγής. Κάθε συμμετέχοντας που μπορεί να έχει είτε ενεργητική είτε παθητική δράση ανάλογα με το επίπεδο συμμετοχής του στη διαδικασία, πρέπει πρώτα να συγκεντρώσει όλες τις προσφορές, στις οποίες έχει πρόσβαση, που υποβάλλονται από τα υπόλοιπα μέρη. Ενεργή συμμετοχή είναι όταν αναζητά ενεργά μια προσφορά για να ικανοποιήσει τη ζήτηση του και να ολοκληρωθεί η διαδικασία συναλλαγών, ενώ παθητική συμμετοχή είναι όταν δημοσιεύει μια προσφορά για αγορά ή πώληση και αναμένει την επιλογή του από έναν άλλο συμμετέχοντα. Κατά τη διαδικασία συλλογής των προσφορών χρησιμοποιούνται οι πόντοι φήμης για να αποφασιστεί η πρόσβαση των συμμετεχόντων. Όσο καλύτερη η φήμη τόσο καλύτερη η πρόσβαση των συμμετεχόντων. Στη διαδικασία συλλογής και



ταξινόμησης των προσφορών για τον αγοραστή, εκτός από την τιμή λαμβάνεται υπόψιν και η φήμη του μέρους που την έχει δημοσιεύσει. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται μηχανισμός προτεραιότητας-αξίας-εντολής. Προσφορές με χαμηλότερες τιμές δεν τοποθετούνται απαραίτητα υψηλότερα στην κατάταξη, σε αντίθεση με προσφορές χαμηλότερης προτεραιότητας. Η προτεραιότητα προσδιορίζεται από την σχέση (4.8). Ωστόσο η σχέση προτεραιότητας δεν εφαρμόζεται στις προσφορές πώλησης, όπου η ταξινόμηση γίνεται βάσει τιμής. Ο λόγος είναι πως κατά γενικό κανόνα, οι πωλητές έχουν καλύτερη φήμη από τους αγοραστές.

$$PV = \frac{\text{askingprice}}{\text{reputation} - \text{basedfactor}} \quad (4.8)$$

Έτσι λοιπόν ο αγοραστής συλλέγει τις προσφορές των πωλητών στις οποίες έχει πρόσβαση. Η φήμη του αγοραστή επαληθεύεται από το σύστημα ώστε να προσδιοριστεί η ομάδα προσφορών στις οποίες έχει πρόσβαση. Έπειτα οι προσφορές ταξινομούνται με βάση τα PV και οι προσφορές στην κορυφή της λίστας επιλέγονται πρώτες. Σε περίπτωση που η κορυφαία προσφορά δεν ικανοποιήσει την απαίτηση του αγοραστή επιλέγεται και η επόμενη προσφορά της λίστας, μέχρι την πλήρη ικανοποίηση της ζήτησης ή η λίστα να φτάσει στο τέλος της. Αν ο αγοραστής θεωρήσει ότι καμία από τις προσφορές δεν είναι αποδεκτή μπορεί να δημοσιεύσει τη δική του προσφορά. Οποιαδήποτε αγορά προσφοράς ή ζήτησης δημοσιεύεται είναι δεσμευτική και δεν μπορεί να αποσυρθεί σε περίπτωση που επιλεγεί από άλλο συμμετέχοντα. Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται στις προσφορές πώλησης με τη διαφοροποίηση του τρόπου ταξινόμησης των προσφορών. Το Σχήμα 4.16 δείχνει τη επίδραση που έχουν η τιμή και η φήμη στην προτεραιότητα και την ορατότητα για έναν παθητικό πωλητή.



Σχήμα 4.16. Επίδραση τιμής προσφοράς του πωλητή και της φήμης στην ορατότητα και την προτεραιότητα [62]

Ο αγοραστής θεωρεί μια προσφορά με χαμηλή τιμή ότι είναι καλή, λαμβάνοντας υπόψιν ότι έχει χαμηλή ορατότητα. Αντίστοιχα όταν ένας παθητικός πωλητής έχει καλή φήμη οι προσφορές του είτε σε χαμηλές είτε σε υψηλές τιμές μπορούν να έχουν χαμηλό PV και να ταξινομηθούν στην

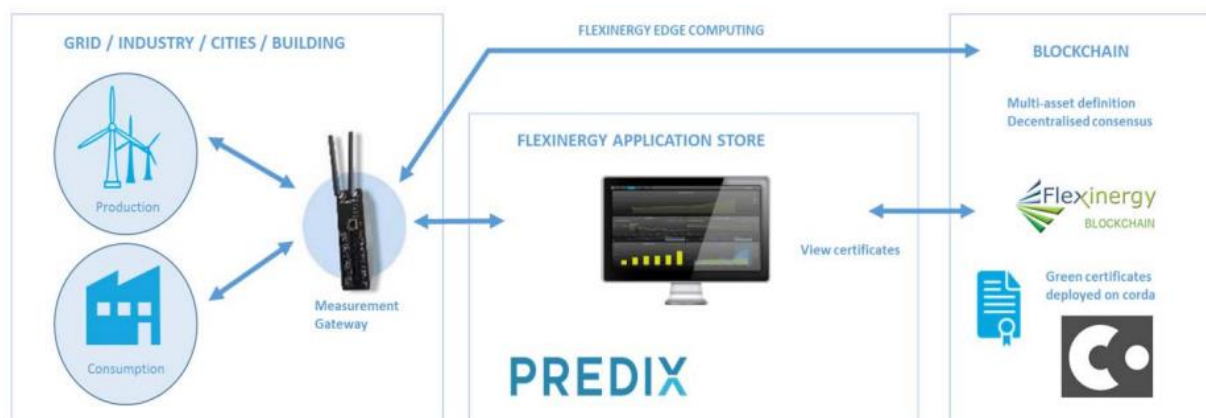
κορυφή της λίστας. Αυτό δε συμβαίνει όταν η φήμη είναι κακή. Για έναν παθητικό αγοραστή μια υψηλή τιμή σημαίνει λιγότερη ορατότητα αλλά υψηλότερη προτεραιότητα, ενώ μια χαμηλή τιμή σημαίνει περισσότερη ορατότητα με χαμηλή προτεραιότητα. Η φήμη του παθητικού αγοραστή δεν παίζει ρόλο στην επιλογή της προσφοράς του από έναν ενεργό αγοραστή.

Η μοντελοποίηση του προτεινόμενου συστήματος έγινε αξιοποιώντας την ανοικτή πλατφόρμα Blockchain Multichain, που δίνει τη δυνατότητα ελέγχου των δικαιωμάτων των συμμετεχόντων, ικανοποιώντας έτσι τους ρόλους που περιεγράφηκαν παραπάνω. Τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν βάσει μιας σειράς κριτηρίων σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών και προέκυψαν ενθαρρυντικά αποτελέσματα που θα το καθιστούν εύκολα εφαρμόσιμο στα συμβατικά σημερινά συστήματα, εφαρμόζοντας παραπλεύρως την προσθήκη μηχανισμών που θα βελτιώναν τη συνολική τους απόδοση.

Στην εργασία [63] σχεδιάζεται ένα σύστημα που βασίζεται στο Blockchain για τη διαχείριση πράσινων πιστοποιητικών και αδειών εκπομπών σε βιομηχανικά συστήματα. Στόχος του συστήματος είναι η λύση προβλημάτων ασφάλειας στην εμπορία ενεργειακών πιστοποιητικών. Η ύπαρξη μητρώων προέλευσης της ενέργειας είναι κρίσιμη για τη διαχείριση του συστήματος σε πολλά επίπεδα. Σε επίπεδο ενεργειακών αγορών τα μητρώα χρησιμοποιούνται τόσο για ενεργειακούς διακανονισμούς όσο και για την τιμολόγηση της ενέργειας. Τα μητρώα της παραγόμενης ενέργειας αποτελούν λύση στην παρακολούθηση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, και τη αποθήκευση και διαχείριση πράσινων πιστοποιητικών, τα οποία αποτελούν ένα βασικό προϊόν που χρησιμοποιείται ως απόδειξη ότι η ηλεκτρική ενέργεια έχει παραχθεί από ΑΠΕ. Τα πράσινα πιστοποιητικά αποθηκεύονται σε εθνικά μητρώα και παρέχουν πληροφορίες για Εγγυήσεις Προέλευσης (Guarantee of Origin - GoO). Ωστόσο τα πιστοποιητικά δεν καλύπτουν τις περιπτώσεις παραγωγής μικρής κλίμακας κάτω του 1 MW, όπου δε συλλέγονται σε εθνικό επίπεδο και δημιουργείται η ανάγκη παρακολούθησης τους με μεγαλύτερη συχνότητα πέρα από την ετήσια δήλωση τους. Ταυτόχρονα τα μητρώα εξυπηρετούν στη διατήρηση ενός αρχείου παρακολούθησης και συντήρησης των εγκαταστάσεων, ώστε να διαπιστώνεται βάσει δεικτών η καλή λειτουργία και η απαίτηση συντήρησης του εξοπλισμού.

Αναλυτικότερα λοιπόν η εργασία στοχεύει στην ανάπτυξη ενός πράσινου Blockchain για τη διαχείριση ενεργειακών πιστοποιητικών και δικαιωμάτων εκπομπών όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.17. Ταυτόχρονα δίνεται έμφαση στο υπολογιστικό κόστος του μοντέλου, ώστε να είναι ενεργειακά αποδοτικό. Στο προτεινόμενο σύστημα παρακολουθείται τόσο η παραγωγή όσο και η κατανάλωση, ενώ ταυτόχρονα οι φορείς έχουν τη δυνατότητα να προβούν σε βελτιωτικές ενέργειες για βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Στόχος είναι η εφαρμογή του μοντέλου σε κάθε τοπική εγκατάσταση εφαρμογής. Τα πράσινα πιστοποιητικά χορηγούνται σε τοπικούς παραγωγούς, ενώ μπορούν να αγοραστούν και από καταναλωτές ενέργειας, με τη συναλλαγή να επικυρώνεται από τον κόμβο ελεγκτή του Blockchain, ο οποίος παίζει και ρόλο κεντρικής μνήμης των συναλλαγών πιστοποιητικών. Η υλοποίηση της εφαρμογής πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο Predix που είναι μια εφαρμογή απλοποίησης προηγμένων επιχειρηματικών αναλύσεων βιομηχανικών λειτουργιών. Υλοποιείται ένα ιδιωτικό Blockchain Corda με δυνατότητες επεκτασιμότητας, στο οποίο οι υπολογιστικές διαδικασίες πραγματοποιούνται κοντά στην πηγή των δεδομένων. Επιπλέον αξιοποιούνται τρία περιβάλλοντα χρήστη για την παρακολούθηση των

ενεργειακών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων που διευκολύνουν την παρακολούθηση των δεδομένων και συμμετοχή των χρηστών.



Σχήμα 4.17. Αρχιτεκτονική συστήματος εργασίας [63]

Κατά την προσομοίωση του προτεινόμενου μοντέλου μέσω του Corda αναπτύχθηκαν κόμβοι που αντιστοιχούν σε τρεις τοποθεσίες που αντιπροσωπεύουν κτήρια που καταναλώνουν ή/και παράγουν ενέργεια. Ένας επιπλέον κόμβος χρησιμοποιείται για την επικύρωση των συναλλαγών στο δίκτυο Blockchain. Στόχος είναι οι κόμβοι να αποθηκεύουν τόσο τα πιστοποιητικά που διακινούνται όσο και την ενέργεια που παράγεται και καταναλώνεται. Οι περιορισμοί του Corda δεν επέτρεψαν την εκτενή εφαρμογή της διαχείρισης των πράσινων πιστοποιητικών. Η εργασία ωστόσο έδωσε το έναυσμα για περαιτέρω διερεύνηση για ανάπτυξη μία αγοράς πιστοποιητικών σε μεγαλύτερης κλίμακας προσομοιώσεις.

Στη δημοσίευση [64] παρουσιάζεται ένα πλαίσιο προσομοίωσης της αγοράς στην οποία συναλλάσσονται Εγγυήσεις Προέλευσης (Guarantees of Origin - GoO), χρησιμοποιώντας το Ethereum Blockchain και έξυπνα συμβόλαια. Σε αυτή την αγορά οι Prosumers μπορούν να πουλήσουν GoOs υπό τη μορφή tokens απευθείας σε καταναλωτές, παρακάμπτοντας τους παρόχους ενέργειας. Στην εργασία προσομοιώνονται δύο μοντέλα αγορών για την πώληση GoOs-tokens. Στο πρώτο μοντέλο Σταθερής Τιμής, οι prosumers πωλούν τα token στο μέσο όρο της τιμής του GoO του 2014, ενώ στο μοντέλο Μεταβλητής Τιμής η πώληση γίνεται σε ένα εύρος τιμών που ορίζεται από τη διαφορά τιμής μεταξύ της «γκρι» και της πράσινης ενέργειας. Στόχος της εργασίας είναι να προσδιοριστεί ποιο μοντέλο αγοράς είναι περισσότερο επικερδές για τους prosumers, επιτρέποντας τη συμμετοχή στην αγορά και μικροπαραγωγών ενέργειας.

Αναλυτικότερα, το προτεινόμενο μοντέλο αγοράς αναπτύσσεται χρησιμοποιώντας το Ethereum Blockchain και ένα έξυπνο συμβόλαιο. Το έξυπνο συμβόλαιο λειτουργεί ταυτόχρονα ως αγορά συναλλαγών και ως διαχειριστής της αγοράς, καθορίζοντας τους κανόνες με τους οποίους πραγματοποιούνται οι συναλλαγές και η εκτέλεση τους. Στόχος του είναι η δημιουργία μιας αγοράς στην οποία θα εμπορεύονται GoOs υπό τη μορφή tokens, άτομα που δεν έχουν πρόσβαση σε ενεργειακές αγορές όπως το Ευρωπαϊκό Χρηματιστήριο Ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα μητρώα συμμετεχόντων και συναλλαγών. Βασικές λειτουργίες του έξυπνου συμβολαίου είναι:

- Η εγγραφή prosumers και καταναλωτών στην αγορά

- Η αδειοδότηση συναλλαγών tokens για Ether μεταξύ Prosumer και καταναλωτών.
- Η διατήρηση βάσης δεδομένων των συμμετεχόντων και των token/Ether που διακινούνται.
- Η αδειοδότηση των αγοραστών για εξαργύρωση.

Το έξυπνο συμβόλαιο μπορεί να κληθεί από οποιονδήποτε κόμβο είναι συνδεδεμένος στο Ethereum Blockchain. Για λόγους προσομοίωσης έχει αναπτυχθεί μια διαδικτυακή εφαρμογή με το αντίστοιχο περιβάλλον χρήστη, η οποία εκκινεί συμβάντα προσομοίωσης, εμφανίζει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και εξάγει τα δεδομένα της προσομοίωσης. Σημειώνεται ότι η αγορά των tokens που λειτουργούν ως GoO είναι ανεξάρτητη από την αγορά ενέργειας. Η διαπραγμάτευση των tokens γίνεται με αντίτιμο το Ether. Εντός της αγοράς κάθε token αντιπροσωπεύει 1MWh παραγόμενης ηλιακής ενέργειας.

Για την προσομοίωση της αγοράς λαμβάνονται δεδομένα 20 νοικοκυριών-prosumers και προσομοιώνονται οι καταναλώσεις τους. Τα token που λαμβάνει κάθε νοικοκυριό υπολογίζονται από την ετήσια παραγωγή αντιστοιχίζοντας 1 token για κάθε 1 MWh παραγόμενης ηλιακής ενέργειας όπου γίνεται η υπόθεση ότι αυτό είναι επαρκές για να αγοράσει επαρκή token ικανά να καλύψουν τις ενεργειακές καταναλώσεις. Σε αυτό το πλαίσιο αναπτύσσονται και συγκρίνονται δύο στρατηγικές αγορών. Στην πρώτη προσέγγιση προσομοιώνεται η πώληση tokens από τον Prosumer απευθείας στην αγορά σε σταθερή τιμή που είναι ο μέσος όρος των τιμών των GoOs. Κάθε prosumer λαμβάνει ένα token ως ανταμοιβή για κάθε 1 MWh ηλιακής ενέργειας που παρήγαγε. Αντί να πουλήσει το token στη συμβατική αγορά, το πουλά στην αγορά Blockchain. Η εκκαθάριση της αγοράς συμβαίνει με τυχαίο τρόπο όταν υπάρξει αντιστοίχιση μεταξύ αιτημάτων πώλησης και αγοράς. Το λειτουργικό κόστος της αγοράς καταγράφεται καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στη δεύτερη προσέγγιση εφαρμόζεται στρατηγική μεταβλητής τιμής. Η τιμή πλέον καθορίζεται από μία τυχαία συνάρτηση που στην έξοδο της δίνει μια τιμή μεταξύ της τιμής πώλησης ενέργειας από συμβατικά καύσιμα και της πράσινης ενέργειας. Η εκκαθάριση της αγοράς και τα λειτουργικά κόστη του μηχανισμού υπολογίζονται όπως στη στρατηγική σταθερής τιμής.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν στην παραπάνω μελέτη, δείχνουν ότι σε γενικές γραμμές το λειτουργικό κόστος του μοντέλου είναι χαμηλό. Ταυτόχρονα επισημαίνεται πως παρόλο που οι καταναλωτές ενέργειας δεν βλέπουν σημαντική μείωση των τιμολογίων τους αξιοποιώντας την προτεινόμενη τεχνολογία, οι μικροπαραγωγοί λαμβάνουν άμεση αποζημίωση για τα tokens που διαθέτουν στην αγορά, ενώ ταυτόχρονα εγγυάται η δυνατότητα πρόσβασης τους στο εν λόγω μοντέλο αγοράς GoOs.

Ο Πίνακας 8 συνοψίζει τις δημοσιεύσεις που παρουσιάστηκαν σε αυτή την ενότητα, επισημαίνοντας την τεχνολογία και τους μηχανισμούς που χρησιμοποιήθηκαν, το αντικείμενο, και τη συνεισφορά της κάθε δημοσίευσης στην εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στον ενεργειακό τομέα.

Πίνακας 8: Σύνοψη δημοσιεύσεων συστημάτων εμπορίας εκπομπών άνθρακα και πράσινων πιστοποιητικών

Αναφ.	Τεχνολογία	Αντικείμενο	Συνεισφορά
[28]	Blockchain Έξυπνα συμβόλαια Ethereum	Διαχείριση και αξιολόγηση της ενέργειας	Ένα μοντέλο για τη διαχείριση της ενέργειας και την αναγνώριση της ως πράσινη ή όχι, και δημιουργία πράσινων πιστοποιητικών.
[62]	Blockchain Έξυπνοι Μετρητές	Σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών	Ένα μοντέλο εμπορίας και συναλλαγής δικαιωμάτων εκπομπών αξιοποιώντας μηχανισμούς φήμης και προτεραιότητας στην αγορά συναλλαγών δικαιωμάτων
[63]	Blockchain	Διαχείριση πράσινων Πιστοποιητικών	Ένα σύστημα για τη διασφάλιση της διαχείρισης και της εμπορίας πράσινων πιστοποιητικών
[64]	Blockchain Ethereum Έξυπνα Συμβόλαια	Αγορά Πράσινων Πιστοποιητικών	Μοντέλο διαχείρισης αγοράς στην οποία συναλλάσσονται εγγυήσεις προέλευσης υπό την μορφή tokens

#### 4.7 Εφαρμογές του Blockchain στη Βιομηχανία της Ενέργειας

Η εκρηκτική ανάπτυξη και εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον όχι μόνο των ερευνητών αλλά και των εταιριών. Ένας σημαντικός αριθμός εμπορικών και πιλοτικών εφαρμογών, πλατφορμών και έργων έχουν αναπτυχθεί από εταιρίες που προσανατολίζονται στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τρέχουσες εφαρμογές του Blockchain από την ενεργειακή βιομηχανία, πιλοτικά έργα και νέα επιχειρηματικά μοντέλα. Το Ευρωπαϊκό Παρατηρητήριο και Φόρουμ για το Blockchain [73] χαρτογραφεί (Σχήμα 4.18) σημαντικές πρωτοβουλίες εφαρμογών σχετικών με το Blockchain, συμπεριλαμβανομένου στον ενεργειακό τομέα. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο παρατηρούνται περισσότερες από 600 τέτοιες πρωτοβουλίες.



*Σχήμα 4.18: Πρωτοβουλίες εφαρμογών σχετικών με το Blockchain σε παγκόσμιο επίπεδο.[73]*

Στην χονδρική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, η εταιρεία **PONTON** ανέπτυξε μία εφαρμογή ώστε να παρέχει έξυπνες λύσεις για την πραγματοποίηση συναλλαγών, χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Blockchain [26]. Η PONTON συνεργάστηκε με περισσότερες από 40 ευρωπαϊκές εταιρείες ενέργειας για την ανάπτυξη μίας P2P εφαρμογής ανταλλαγής ενέργειας, η οποία δημοσιεύθηκε και λειτουργεί από το Μάιο του 2019. Η εφαρμογή Enerchain 1.0 υποστηρίζει την ανάπτυξη των αποκεντρωμένων δικτύων ενέργειας, όπου κάθε περιοχή μπορεί να διαθέτει τη δική της τοπική αγορά ενέργειας, η οποία θα υπόκειται σε διαφορετικές τιμολογιακές πολιτικές και περιορισμούς. Τα πεδία εφαρμογής του **Enerchain** περιλαμβάνουν κυρίως αγορές ηλεκτρικής ενέργειας ή αερίου, καθώς επίσης παρέχει υπηρεσίες ικανές να περιορίσουν ζητήματα συμφόρησης του δικτύου, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης κεντρικού ελέγχου, αλλά με απευθείας ανταλλαγές μεταξύ των καταναλωτών και των prosumers. Το Enerchain είναι μία ταχύτατη εφαρμογή που βασίζεται στην τεχνολογία Blockchain, στην οποία τα μπλοκ οριστικοποιούνται κάθε δευτερόλεπτο και οι συναλλαγές υποβάλλονται για επεξεργασία εντός του δικτύου σε λιγότερο από 1 δευτερόλεπτο. Ορισμένα από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά αυτής της εμπορικής εφαρμογής είναι:

- Η δημιουργία, η τροποποίηση και η εκτέλεση συναλλαγών
- Η χρήση πιστωτικών ορίων ώστε να γίνεται διαλογή των συμμετεχόντων στις συναλλαγές.
- Αυτόματη αποστολή αρχείων συναλλαγών για επεξεργασία από τους κόμβους
- Η ανταλλαγή ενέργειας ή αερίου σε τοπικές ή χονδρεμπορικές αγορές.
- Η πρόσβαση σε στοιχεία όπως καμπύλες φορτίων, αιχμές φορτίων κλπ.
- Το interface της εφαρμογής διευκολύνει την άμεση πρόσβαση των συμμετεχόντων στην αγορά ενέργειας.

Αντίστοιχα ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά της εφαρμογής Enerchain είναι:

- Πρόκειται για ένα Blockchain όπου απαιτείται άδεια για συμμετοχή των χρηστών, που χρησιμοποιεί κρυπτογράφηση δημόσιου κλειδιού για την ταυτοποίηση των συμμετεχόντων.
- Οι χρόνοι των συναλλαγών είναι εξαιρετικά περιορισμένοι καθώς απαιτείται κάθε μπλοκ οριστικοποιείται σε ένα δευτερόλεπτο και η κοινοποίηση των αιτημάτων σε όλους τους κόμβους του δικτύου διαρκεί λιγότερο από 1 δευτερόλεπτο.
- Σε περίπτωση αποτυχίας ενός κόμβου, η ανάκαμψη του δικτύου διαρκεί μερικά δευτερόλεπτα.

Το πιλοτικό έργο **Brooklyn MicroGrid (BMG)** είναι μία πλατφόρμα P2P συναλλαγών ενέργειας που έχει αναπτυχθεί από την **LO3 Energy** σε συνεργασία με τη Siemens. Το μικροδίκτυο βρίσκεται στο Brooklyn στην Νέα Υόρκη και η πλατφόρμα χρησιμοποιείται για την ανταλλαγή ενέργειας που παράγεται από οικιακά Φωτοβολταϊκά μεταξύ των χρηστών του δικτύου. Οι Prosumers μπορούν να πωλούν την περίσσεια της ενέργειας που δεν καταναλώνουν σε γειτονικούς καταναλωτές χρησιμοποιώντας μία πλατφόρμα Blockchain, στην οποία εκτελούνται έξυπνα συμβόλαια Ethereum και η συναίνεση επιτυγχάνεται με τον αλγόριθμο συναίνεσης PBFT. Η πρώτη δοκιμή του έργου περιελάμβανε 5 prosumers και 5 γειτονικούς καταναλωτές οι οποίοι αντάλλαξαν μεταξύ τους επιτυχώς ενέργεια, και αποτέλεσαν την πρώτη καταγεγραμμένη εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στον τομέα της ανταλλαγής ενέργειας παγκοσμίως. Το

πλεόνασμα της ενέργειας μετράται από ειδικά σχεδιασμένους έξυπνους μετρητές που χειρίζονται και καταγράφουν ενεργειακά δεδομένα, και τα μετατρέπουν σε ισοδύναμα ενεργειακά tokens που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην τοπική αγορά. Τα token υποδεικνύουν ότι συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας παράχθηκε από τα φωτοβολταϊκά ενός Prosumer και καταγράφηκε από τους έξυπνους μετρητές, μπορεί να μεταφερθεί από το πορτοφόλι του μετρητή που ανήκει στον Prosumer, στους τελικούς καταναλωτές μέσω της τεχνολογίας Blockchain. Τα tokens διαγράφονται από τον μετρητή του καταναλωτή καθώς η αγορασμένη ενέργεια χρησιμοποιείται στο σπίτι. [21] Οι συμμετέχοντες συμμετέχουν στην τοπική αγορά ενέργειας μέσω μία εφαρμογής κινητού, στην οποία μπορούν να επιλέξουν να πουλήσουν ή να αγοράσουν ενέργεια. [32] Η πλατφόρμα δίνει στους συμμετέχοντες πληροφορίες σχετικές με την τοποθεσία και την τιμή της ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Στα πρώτα στάδια εφαρμογής της πλατφόρμας Brooklyn MicroGrid οι συμμετέχοντες έφταναν σε συμφωνία ανταλλαγής ενέργειας «χειροκίνητα» και οι όροι της συναλλαγής καταγραφόντουσαν στο Blockchain. Το Blockchain καταγράφει τους όρους της συναλλαγής, τα συναλλασσόμενα μέλη, την ποσότητα της ενέργειας που διοχετεύεται στο δίκτυο και καταναλώνεται με τη χρήση των έξυπνων μετρητών, καθώς και τη χρονολογική σειρά με την οποία εκτελούνται οι συναλλαγές. Οι πληρωμές για την ενέργεια που διακινείται, εκκινούνται αυτόματα με την αυτόματη εκτέλεση έξυπνων συμβολαίων. Κάθε μέλος της κοινότητας έχει πρόσβαση στα ιστορικά δεδομένα των συναλλαγών που έχουν πραγματοποιηθεί. Συνεπώς η πιλοτική πλατφόρμα Brooklyn MicroGrid επιτρέπει στους συμμετέχοντες του μικροδικτύου να πωλούν και να αγοράζουν απευθείας και με ασφάλεια ενέργεια, αξιοποιώντας στο βέλτιστο τις προοπτικές της τεχνολογίας Blockchain.

Η εταιρεία **Power Ledger** είναι μια από τις πρώτες εταιρίες παγκοσμίως που δραστηριοποιήθηκαν στην αξιοποίηση της τεχνολογίας Blockchain στη βιομηχανία της ενέργειας. Σήμερα παρέχουν μια ποικιλία διαφορετικών εφαρμογών, καθεμία από τις οποίες προσφέρει διαφορετικές δυνατότητες. Η εφαρμογή **xGrid** επιτρέπει στους πελάτες ενός πωλητή ενέργειας να ανταλλάσσουν ηλιακή ενέργεια στο δίκτυο. Η εφαρμογή επιτρέπει ευέλικτη τιμολόγηση της ενέργειας σε πραγματικό χρόνο. Ταυτόχρονα επιτρέπει σε νοικοκυριά και επιχειρήσεις να πωλούν την ενέργεια που παράγεται από Φωτοβολταϊκά σε άλλους καταναλωτές που είναι συνδεδεμένοι στο ίδιο δίκτυο, ανεξάρτητα από το αν ανήκουν στην ίδια ή σε διαφορετικές επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας, διασφαλίζοντας την παρακολούθηση των συναλλαγών μέσω του Blockchain. Το xGrid αντιστοιχίζει την κατανάλωση με την παραγωγή σε κάθε ορισμένο χρονικό διάστημα, λαμβάνοντας υπόψιν την τιμή που επιθυμεί τόσο ο αγοραστής όσο και ο πωλητής ενέργειας. Δεδομένα συναλλαγών όπως ο όγκος της ενέργειας, η τιμή και οι συμμετέχοντες μπορούν να ενσωματωθούν σε υπάρχοντα συστήματα τιμολόγησης εταιριών. Η εφαρμογή απευθύνεται σε εταιρίες λιανικής πώλησης ενέργειας, δίνοντας τη δυνατότητα στους πελάτες τους να αποφασίσουν οι ίδιοι με ποιον θα συναλλάξουν ενέργεια. Οι χρήστες της πλατφόρμας έχουν την δυνατότητα να επιλέξουν την προέλευση της ενέργειας την οποία θα καταναλώσουν. Μέσω του xGrid διαχειριστής και τερματικοί χρήστες έχουν πρόσβαση σε λεπτομερή δεδομένα χρέωσης, με δυνατότητα σύγκρισης ιστορικών δεδομένων κατανάλωσης ενέργειας. Η εφαρμογή **uGrid** της Power Ledger ενεργοποιεί την παρακολούθηση και εμπορία ενέργειας μεταξύ ευφύων δικτύων και μικροδικτύων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εμπορικά κέντρα, συγκροτήματα διαμερισμάτων, κτήρια γραφείων και χωριά εξοχικών κατοικιών με ατομικές ή ομαδικές ιδιοκτησίες. Η πλατφόρμα της Powerledger χρησιμοποιώντας την τεχνολογία Blockchain, δημιουργεί μία τοπική αγορά ενέργειας, στην οποία παρέχονται δεδομένα σχετικά με τις ανάγκες κατανάλωσης και δίνει τη δυνατότητα στους κατοίκους να ανταλλάσσουν ηλιακή ενέργεια μεταξύ τους και να κερδίζουν χρήματα. Αντίστοιχα σε εμπορικά κέντρα και επαγγελματικά κτήρια, το

uGrid μπορεί να δημιουργήσει μία αγορά με σύνθετα συστήματα ανταλλαγής ενέργειας. Το uGrid χρησιμοποιείται σήμερα σε έναν οικισμό του East Village στην Αυστραλία, όπου με μία κοινόχρηστη μπαταρία 670 kW/h δίνεται η δυνατότητα σε 36 σπίτια με φωτοβολταϊκά στέγης ονομαστικής ισχύος 6.6kW, να ανταλλάσσουν ενέργεια σύμφωνα με τις ανάγκες του καθενός. [33]

Η **Energy Web** είναι μία πλατφόρμα ανοικτού κώδικα που στοχεύει στην ικανοποίηση διαχειριστικών, ρυθμιστικών και εμπορικών αναγκών της βιομηχανίας της ενέργειας, παρέχοντας το υπόβαθρο για την ανάπτυξη αποκεντρωμένων εφαρμογών πάνω στο Energy Web Decentralized Operating System (EW-DOS). Η πλατφόρμα Energy Web Chain είναι ένα δημόσιο Blockchain που βασίζεται στο Ethereum και χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο συναίνεσης Proof Of Authority. Υποστηρίζει την ανάπτυξη εφαρμογών αφού το υπόβαθρο της υποστηρίζει την εκτέλεση έξυπνων συμβολαίων για το EW-DOS και τη δημιουργία αναγνωριστικών για προσδιορισμό οποιουδήποτε στοιχείου όπως περιουσιακά στοιχεία, πελάτες, οργανισμοί. Οι υπηρεσίες που παρέχονται από το EW-DOS πληρώνονται με τα Energy Web Tokens. Η επικύρωση των συναλλαγών και η δημιουργία νέων μπλοκ στο Energy Web Chain γίνεται από τους κόμβους επικύρωσης, οι οποίοι διαδοχικά αναλαμβάνουν αυτή τη λειτουργία. Ο Block explorer είναι μία διεπαφή που παρέχει τις σημαντικότερες πληροφορίες, όπως δεδομένα που αφορούν τα μπλοκ, τις συναλλαγές, τους λογαριασμούς και τα tokens στο Energy Web Chain. Ορισμένα παραδείγματα εφαρμογών που αναπτύσσονται σήμερα από εταιρίες αξιοποιώντας το Energy Web στον τομέα της διαχείρισης της διεσπαρμένης παραγωγής είναι το **Edge** από την AEMO, και είναι μια αγορά διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων στην ανατολική Αυστραλία, όπου οι διαχειριστές του δικτύου τόσο σε επίπεδο μεταφοράς όσο και σε επίπεδο διανομής, μπορούν να ανταλλάσσουν υπηρεσίες που αφορούν το δίκτυο, όπως αγορά ή πώληση ηλιακής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη σε οικιακές μπαταρίες χιλιάδων χρηστών του δικτύου, στοχεύοντας στην εξισορρόπηση του δικτύου. Η συνεργασία της Energy Web με την CAISO, έναν από τους κυριότερους διαχειριστές του δικτύου μεταφοράς στις ΗΠΑ, οδήγησε στην ενίσχυση της υφιστάμενης εφαρμογής **FlexAlert**. Το νέο σύστημα παρέχει στους πολίτες τις Καλιφόρνια τη δυνατότητα να λαμβάνουν ειδοποιήσεις στα κινητά τηλέφωνα ή στα e-mail, στις περιόδους όπου το σύστημα χρήζει διαχείρισης σε επίπεδο ζήτησης. Οι πολίτες ενημερώνουν την CAISO για την πρόθεση τους να συμβάλλουν στην εξισορρόπηση του δικτύου, επιτρέποντας στο διαχειριστή να κάνει πρόβλεψη των απαιτούμενων δράσεων. Η αποκεντρωμένη πλατφόρμα **FlexHub** για λογαριασμό της APG επιτρέπει σε πελάτες που διαθέτουν ενεργειακούς πόρους, όπως συστήματα αποθήκευσης μπαταριών, να προσφέρουν την ευελιξία τους, όταν καλούνται και να αποζημιώνονται για αυτή. Το έργο **ElectraFlex** εστιάζει στην ανάπτυξη μία ψηφιακής εφαρμογής που θα επιτρέπει στην Electra Caldense να αξιοποιεί την ευέλικτη χωρητικότητα των στοιχείων που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο. Αποτελεί την πρώτη ευέλικτη πλατφόρμα παγκοσμίως που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες ενός διαχειριστή συστήματος διανομής. Το **EasyBat** είναι μια λύση ανοικτού κώδικα για τη διαχείριση του κύκλου ζωής της μπαταρίας σε αποκεντρωμένα δίκτυα. Οι κατασκευαστές των μπαταριών, οι διανομείς της ενέργειας, οι εγκαταστάτες και οι διαπιστευμένοι οργανισμοί επιθεώρησης, επαληθεύουν οποιαδήποτε συναλλαγή του συστήματος. Όλες αυτές οι αποκεντρωμένες οντότητες συνεργάζονται πάνω στο EasyBat για τη διαχείριση του κύκλου ζωής των μπαταριών. Στον τομέα της ηλεκτροκίνησης η Energy Web συνεργάζεται με την Volkswagen στο έργο **Smart Green Charging** όπου διερευνάται η ψηφιοποίηση και η ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων και υποδομών φόρτισης σε προγράμματα φόρτισης ηλεκτροκίνησης. Κάθε όχημα μπορεί να



συμμετέχει σε αγορές ενέργειας παγκοσμίως και να λαμβάνει ενέργεια από τοπικές και αξιόπιστες πηγές. Το πρόγραμμα στοχεύει στην αξιόπιστη και επαληθεύσιμη πράσινη φόρτιση οπουδήποτε στον κόσμο. Άλλα έργα της Energy Web είναι το EW Zero θα είναι μία παγκόσμια μηχανή αναζήτησης για ενεργειακά πιστοποιητικά και άλλα προϊόντα σχετικά με την απανθρακοποίηση. Στόχος του εγχειρήματος είναι η απλοποίηση των διαδικασιών προμήθειας, η αύξηση της διαφάνειας των διαθέσιμων επιλογών και η διευκόλυνση της απανθρακοποίησης σε όλο τον κόσμο αντιστοιχίζοντας αγοραστές και πωλητές ενέργειας υπό το συγκεκριμένο πρίσμα. [34]

Το **GREENEUM** είναι μία πλατφόρμα που παρέχει ολοκληρωμένες λύσεις στις σημερινές και πιθανώς στις μελλοντικές αγορές ενέργειας, και αποτελείται από δύο επιμέρους συστήματα. Τα τοπικά συστήματα ανταλλαγής ενέργειας (Greeneum Energy Trading System) και τα παγκόσμια συστήματα δεδομένων (Greeneum Global Data System). Η ανταλλαγή ενέργειας στα συστήματα πραγματοποιείται πάνω στο ηλεκτρικό δίκτυο και στο δίκτυο Blockchain της GREENEUM. Τα δεδομένα αναγνωρίζονται ως έγκυρα με την εφαρμογή διαδικασιών επικύρωσης, και καταγράφονται στο Blockchain. Το σύστημα πραγματοποιεί περιοδικά υπολογισμούς για την παραγωγή και την κατανάλωση του συστήματος και επιτρέπει στους καταναλωτές να πληρώνουν απευθείας τους παραγωγούς με GREENEUM Tokens. Οι παραγωγοί επιβραβεύονται με επιπλέον Tokens, και λαμβάνουν GREENEUM Carbon Credits όταν οι καταναλωτές αγοράζουν πράσινη ενέργεια. Αντίστοιχα το παγκόσμιο σύστημα δεδομένων λειτουργεί πάνω στο δίκτυο GREENEUM. Το σύστημα επικυρώνει τα δεδομένα στο Blockchain, και εφαρμόζει τεχνητή νοημοσύνη για την επεξεργασία τους και την εξαγωγή προβλέψεων. Ο παραγωγός που στέλνει στο σύστημα έγκυρα δεδομένα λαμβάνει Πιστοποιητικά GREENEUM για την πράσινη ενέργεια που παράγει. Αυτό το πιστοποιητικό συσχετίζεται επίσης με GREENEUM Carbon Credits, και ο παραγωγός δύναται να πουλήσει τα πιστοποιητικά του στην αγορά και να λάβει GREENEUM Tokens. Αναφορικά με το δίκτυο Blockchain της πλατφόρμας, πρόκειται για ένα κατακεντρωμένο ενεργειακό δίκτυο που επιτρέπει σε παραγωγούς, καταναλωτές, πωλητές λιανικής και εταιρίες να αλληλοεπιδρούν με ασφάλεια, ενισχύοντας τη διαφάνεια και την εμπιστοσύνη των συναλλαγών. Ταυτόχρονα, η πλατφόρμα διαθέτει το GREEN token που βασίζεται στο Ethereum και απαιτείται για την είσοδο και την πραγματοποίηση συναλλαγών στο δίκτυο. Το GREEN χρησιμοποιεί έξυπνα συμβόλαια και τεχνητή νοημοσύνη και αποτελεί το νόμισμα για όλες τις συναλλαγές στο δίκτυο. Αντίστοιχα τα πιστοποιητικά GREENEUM αποδίδονται από την πλατφόρμα όταν η ενέργεια επικυρωθεί ως πράσινη, αφού καθοριστεί η πηγή της ενέργειας, η ποσότητα και τα αντίστοιχα GREENEUM Carbon Credits, που χορηγούνται στους καταναλωτές κατά την αγορά ενέργειας. Καθ' όλη τη διάρκεια της ανταλλαγής δεδομένων στο σύστημα οι παραγωγοί μπορούν τα πιστοποιητικά τους στην αγορά. [36]

Η εταιρία **SunContract** έχει δημιουργήσει μία πλατφόρμα συναλλαγών ενέργειας που χρησιμοποιεί την τεχνολογία Blockchain. Βασικό χαρακτηριστικό της πλατφόρμας είναι το SunContract Energy Pool, δηλαδή το σύστημα στο οποίο παραγωγοί και καταναλωτές ενέργειας συνδέονται και εμπορεύονται ενέργεια. Για να πραγματοποιήσουν οι συμμετέχοντες ανταλλαγές ενέργειας πρέπει να αποκτήσουν SunContract Tokens (SNC). Η ανταλλαγή ενέργειας πάνω στην πλατφόρμα SunContract Energy Pool απαιτεί από την πλευρά του καταναλωτή να εγγραφεί στην εφαρμογή μέσω κινητού τηλεφώνου, και αυτόματα να ξεκινήσει να αγοράζει ενέργεια. Προϋπόθεση είναι να κατέχει SNCs, τα μπορεί να αγοράσει. Αντίστοιχα οι παραγωγοί θα συνδέονται στην πλατφόρμα για να πουλήσουν την ενέργεια τους.

Η P2P πλατφόρμα SunContract συνδέει τους παραγωγούς ενέργειας με τους καταναλωτές. Οι χρήστες μπορούν να ανταλλάσσουν απευθείας ηλεκτρική ενέργεια, και η τελική τιμή και η ποσότητα της ενέργειας που διακινείται καθορίζεται από αλγόριθμους συναλλαγών που βασίζονται στην εκκαθάριση της αγοράς από δημοπρασία στο Blockchain. Οι παραγωγοί και οι καταναλωτές καθορίζουν την τιμή της προσφερόμενης και της ζητούμενης ποσότητας ενέργειας που προτίθενται να πουλήσουν ή να αγοράσουν, και ο αλγόριθμος συναλλαγών και τα έξυπνα συμβόλαια κάνουν την αντιστοίχιση και τον διακανονισμό της συναλλαγής.

Η εταιρία **WePower** που έχει τη βάση της στη Λιθουανία, παρέχει μία πλατφόρμα ανταλλαγής πράσινης ενέργειας και οικονομικών συναλλαγών που βασίζεται στο Blockchain Ethereum. Βοηθά τους παραγωγούς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας να αυξήσουν τα κεφάλαια τους δημιουργώντας δικά τους ενεργειακά tokens. Το WePower συνδέει τους αγοραστές ενέργειας που είναι είτε τελικοί χρήστες είτε επενδυτές, απευθείας με τους παραγωγούς πράσινης ενέργειας, δημιουργώντας το πλαίσιο για έγκαιρη αγορά ενέργειας σε χαμηλότερες τιμές. Η WePower έχει αναπτύξει tokens που βασίζονται σε έξυπνα συμβόλαια Ethereum με στόχο να τυποποιήσει, να απλοποιήσει και να διευρύνει το παρόν παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα. Η λογική των tokens εξασφαλίζει τη ρευστότητα και διευκολύνει την πρόσβαση στα κεφάλαια. Βασικός στόχος είναι να γεφυρώσει την παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ με τους συμβατικούς φορείς διαχείρισης και εκμετάλλευσης των δικτύων, ώστε να επιτευχθεί ένα μέλλον στο οποίο η ενέργεια θα προέρχεται αποκλειστικά από ΑΠΕ. [55]

Η εταιρία **verv** με τη ανάπτυξη του **vflux** προωθεί τη δημιουργία token VLUX με σκοπό να επιτρέψουν τη συναλλαγή ενέργειας σε μια πλατφόρμα P2P συναλλαγών ανανεώσιμης ενέργειας, συνδυάζοντας τις τεχνολογίες Blockchain, μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης. Σκοπός της εταιρίας είναι η βελτίωση της πρόσβασης καταναλωτών και prosumers σε οικονομικά προσιτή ενέργεια με χαμηλές εκπομπές άνθρακα. Η πρώτη εφαρμογή μιας P2P προσέγγισης ανταλλαγής ενέργειας με Blockchain έγινε από τη vflux το 2018 στο Ηνωμένο Βασίλειο. Κατά την εφαρμογή του πλαισίου vflux ένας τοπικός φορέας συγκεντρώνει vflux tokens από αγορές tokens. Στην τοπική αγορά ενέργειας, όταν ένας Prosumer έχει πλεόνασμα ενέργειας υποβάλλεται αυτόματα ένα αίτημα για πώληση ενέργειας σε συγκεκριμένη τιμή. Αντίστοιχα, ένας καταναλωτής που έχει απαίτηση ενέργεια υποβάλει το αίτημα του. Ο αλγόριθμος αντιστοίχισης αφού λάβει τα αιτήματα επικυρώνει ότι ο καταναλωτής διαθέτει τα χρήματα για να πληρώσει. Αν η αντιστοίχιση των αιτημάτων είναι επιτυχημένη, στέλνεται εντολή για εκπλήρωση της συναλλαγής. Οι συναλλαγές ενέργειας γίνονται με χρήση vflux tokens. Ο καταναλωτής στέλνει ένα ποσό στο φορέα και εκείνος του παρέχει διακριτικά για να ενεργοποιηθεί η συναλλαγή, και φυλάσσονται ως εγγύηση μέχρι την ολοκλήρωση της. Μια ποσότητα ενέργειας στέλνεται από τον Prosumers στον καταναλωτή και με την επιβεβαίωση της το έξυπνο συμβόλαιο εκτελεί τη συναλλαγή αποδεσμεύοντας τα vflux tokens. [65]

Η εταιρία **ELECTRON** μια βρετανική startup ασχολείται με την ανάπτυξη πλατφόρμας εγγραφής έξυπνων μετρητών ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου. Στόχος της πλατφόρμας είναι να προσφέρει αξίας τους καταναλωτές μεγιστοποιώντας τον ανταγωνισμό μεταξύ των παρόχων ηλεκτρικής ενέργειας, και διευκολύνοντας την αλλαγή παρόχου από τους καταναλωτές. Ταυτόχρονα στοχεύει στην ανάπτυξη πλατφόρμας P2P συναλλαγών ενέργειας για την ικανοποίηση αιτημάτων απόκρισης ζήτησης σε μικροδίκτυα. Έχει επίσης δημιουργήσει μία

πλατφόρμα που αναπαριστά την αγορά ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου. Όλα τα έργα της ELECTRON αναπτύσσονται στο Blockchain Ethereum και χρησιμοποιούν τους αλγόριθμους συναίνεσης PoW και PoAu.[66]

#### 4.8 Ερευνητικά Έργα που τρέχουν σήμερα

Σε αυτή την ενότητα της εργασίας παρουσιάζονται ευρωπαϊκά και παγκόσμια ερευνητικά έργα στον τομέα της ενέργειας που εφαρμόζουν την τεχνολογία Blockchain.

Το ερευνητικό πρόγραμμα **PARITY** στοχεύει στην ανάπτυξη μίας πλατφόρμας ευέλικτης αγοράς που βασίζεται στην τεχνολογία Blockchain και το IoT για τα έξυπνα ενεργειακά δίκτυα. Το πρόγραμμα συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και γίνεται υπό το συντονισμό του Εθνικού Κέντρου Έρευνας και Ανάπτυξης στην Θεσσαλονίκη. Σκοπός του είναι να αντιμετωπίσει τη «δομική αδράνεια» των υφιστάμενων δικτύων διανομής μελετώντας ένα διαδραστικό δίκτυο και ένα πλαίσιο αγοράς το οποίο θα ενισχύσει την ανθεκτικότητα και την απόδοση του ηλεκτρικού δικτύου και θα διευκολύνει τη διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα του δικτύου διανομής, σε ποσοστά υψηλότερα του 50%. Το πρόγραμμα PARITY στοχεύει στην υπέρβαση των κλασικών μεθόδων διαχείρισης των δικτύων, παρέχοντας μια πλατφόρμα για τοπικές ευέλικτες αγορές, στην οποία θα ενσωματώνονται οι τεχνολογίες Blockchain και το IoT. Η αγορά πάνω στην οποία θα πραγματοποιούνται αυτόματες ευέλικτες συναλλαγές βασίζεται σε έξυπνα συμβόλαια και στο Blockchain. Η πλατφόρμα θα ενισχύει τη διαφάνεια των συναλλαγών και θα ανταμείβει την ευελιξία μέσω σημάτων πραγματικού χρόνου, που ανταποκρίνονται σε λειτουργικούς περιορισμούς του δικτύου και τη διαθέσιμη ευελιξία των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής. Η τεχνολογία IoT θα ενισχύσει την κατανομημένη νοημοσύνη των δικτύων μέσω μηχανισμών κατανομημένου ελέγχου πραγματικού χρόνου, αξιοποιώντας τα σήματα της ευέλικτης αγοράς που θα διακινούνται πάνω στο δίκτυο Blockchain. Στο πλαίσιο του προγράμματος PARITY οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής θα δημιουργούν συμπλέγματα που θα περιλαμβάνουν αυτοοργανωμένα δίκτυα ενεργών κόμβων-παραγωγών, που θα εξισορροπούν την τοπική και παγκόσμια νοημοσύνη του δικτύου, επιτρέποντας συγκεντρωτικές και P2P συναλλαγές μέσω βελτιωμένων μηχανισμών πρόβλεψης, βελτιστοποίησης και έλεγχου επί της ευελιξίας των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής. Τέλος το πρόγραμμα περιλαμβάνει ένα νέο εργαλείο για την ενεργή διαχείριση των δικτύων διανομής, που θα περιλαμβάνει μια συσκευή που θα βελτιώσει τον έλεγχο και την άντληση πληροφοριών από το διαχειριστή του δικτύου διανομής. Το PARITY θα παρουσιαστεί σε 4 πιλοτικές τοποθεσίες της ΕΕ για να επικυρωθεί η αποτελεσματικότητά του σε διαφορετικές κλιματικές, πολιτισμικές και ρυθμιστικές συνθήκες.[40]

Το ερευνητικό πρόγραμμα **BRIGHT** στοχεύει στην ανάπτυξη προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης μέσω της συστηματικής διάδρασης των καταναλωτών σε επίπεδο κοινότητας, αξιοποιώντας την τεχνολογία Blockchain και ενσωματώνοντας προσεγγίσεις κοινωνικών επιστημών. Το πρόγραμμα συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και γίνεται υπό το συντονισμό του ENGINEERING - INGEGNERIA INFORMATICA SPA στην Ιταλία. Ο συνδυασμός θερμότητας και μεταφορών με τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται πιο συχνός στις μέρες μας.

Η αυξανόμενη διείσδυση των αποκεντρωμένων μονάδων ΑΠΕ δίνει προοπτική για ανάπτυξη προγραμμάτων απόκρισης στη ζήτηση, όχι μόνο σε οικιακό επίπεδο από την πλευρά του τελικού χρήστη-καταναλωτή όπως συμβαίνει μέχρι σήμερα. Οι περιοριστικοί παράγοντες αφορούν κυρίως την τεχνολογία, το ασαφές κανονιστικό και επιχειρηματικό πλαίσιο και την περιορισμένη κατανόηση της αξίας της απόκρισης στη ζήτηση από την πλευρά των καταναλωτών. Το BRIGHT στοχεύει στην αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων φέρνοντας τους τελικούς καταναλωτές στο επίκεντρο και συνδιαμορφώνοντας μαζί τους ένα πλαίσιο εφαρμογής των προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης. Γνώμονας κατά το σχεδιασμό θα είναι οι κοινωνικές επιστήμες που θα προσδιορίζουν τη συμπεριφορά των χρηστών, ενώ παράλληλα θα εξεταστεί η εφαρμογή οικονομικών και μη οικονομικών κινήτρων, και μοντέλων που βελτιώνουν την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των καταναλωτών. Στόχος του προγράμματος είναι η ανάπτυξη P2P Blockchain και έξυπνων συμβολαίων για την καταγραφή των αλληλεπιδράσεων εντός της κοινότητας, την εφαρμογή αλγορίθμων διαχείρισης της ευελιξίας των καταναλωτών και άλλων υπηρεσιών ενέργειας που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη ( ενέργεια, θερμότητα, αέριο, μετακινήσεις έξυπνα σπίτια κ.ά.). Το BRIGHT θα παρουσιαστεί και θα επικυρωθεί σε 4 πιλοτικές τοποθεσίες της ΕΕ, όπου περίπου 1000 καταναλωτές θα συμμετέχουν υπό το πρίσμα κοινοτήτων που ρυθμίζονται διαφορετικά μέσα στην ΕΕ.[41]

Το ερευνητικό πρόγραμμα **PlatOne** χρησιμοποιεί την τεχνολογία Blockchain για τη δημιουργία μιας πλατφόρμας που να ανταποκρίνεται στις ανάγκες διαχείρισης των σύγχρονων συστημάτων ισχύος, αξιοποιώντας μεθόδους διαχείρισης δεδομένων. Το πρόγραμμα συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και γίνεται υπό το συντονισμό του RHEINISCH-WESTFAELISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN στη Γερμανία. Η πλατφόρμα σχεδιάζεται με γνώμονα τους υπάρχοντες κανονισμούς που διέπουν τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, και θα επιτρέπει στους μικρούς παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας να πιστοποιούνται εύκολα, ώστε να μπορούν να πουλήσουν την πλεονάζουσα ενέργεια στο δίκτυο. Η πλατφόρμα θα ενσωματώσει ένα σύστημα ανοικτής αγοράς ώστε να συνδέεται με τους διαχειριστές του συστήματος μεταφοράς. Αναλυτικότερα, για τη διαχείριση της μετάβασης των ενεργειακών δικτύων οι διαχειριστές του συστήματος διανομής χρειάζονται καινοτόμα εργαλεία. Η μεταβλητότητα στην παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ σε συνδυασμό με την δυσκολία πρόβλεψης της ζήτησης, απαιτούν υψηλότερα επίπεδα καταγραφής και παρατήρησης των δικτύων, καθώς και καλύτερη εκμετάλλευση της ευελιξίας των καταναλωτών. Το PlatOne προτείνει μία καινοτόμο προσέγγιση για την κοινή διαχείριση των δεδομένων, της απρόβλεπτης παραγωγής και της κατανάλωσης. Στοχεύει στο σχεδιασμό ενός πολυεπίπεδου συνόλου πλατφορμών που θα καλύψει τις ανάγκες των διαχειριστών, των συνεργατών και των τελικών χρηστών του συστήματος, και θα υπόκειται στο υφιστάμενο ρυθμιστικό πλαίσιο. Η ευελιξία που παρέχουν τόσο οι παραγωγοί όσο και οι πελάτες θα γίνεται ορατή πάνω σε μία πλατφόρμα Blockchain. Ταυτόχρονα πιστοποιημένα δεδομένα και σήματα θα χρησιμοποιούνται σε μια πλατφόρμα που θα ανταποκρίνεται στις ανάγκες του διαχειριστή του συστήματος διανομής, συμβάλλοντας έτσι στην ενίσχυση της ακεραιότητας του συστήματος σε τοπικό επίπεδο και της αξιοπιστίας των λειτουργιών ευελιξίας των παραγωγών και των καταναλωτών. Στη συνέχεια θα σχεδιαστεί μία πλατφόρμα ανοικτής αγοράς που βασίζεται στην τεχνολογία Blockchain, και θα συνδέει το τοπικό σύστημα με το διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς, στοχεύοντας στη συνολική βελτίωση του κόστους του συστήματος. Οι πλατφόρμες

θα δοκιμαστούν σε δοκιμαστούν σε 3 πιλοτικές ευρωπαϊκές τοποθεσίες και θα αναλυθούν σε συνεργασία με μια ερευνητική ομάδα του Καναδά. [42]

Το ερευνητικό πρόγραμμα **BLOSEM** (BLOCKCHAIN FOR OPTIMIZED SECURITY AND ENERGY MANAGEMENT) είναι μία συνεργασία πολλών εργαστηρίων και δημιουργήθηκε για την ανάπτυξη μεθόδων καθοδήγησης, τυποποιημένων μετρήσεων και περιβαλλοντικών δοκιμών, για την ενίσχυση τεχνολογιών που βασίζονται στο Blockchain και σχετίζονται με την ασφάλεια των συσκευών, των επικοινωνιών και την ανθεκτικότητα του δικτύου. Το πρόγραμμα εξελίσσεται υπό το συντονισμό του Εθνικού Εργαστηρίου Ενεργειακής Τεχνολογίας των ΗΠΑ. Αναλυτικότερα, στόχος του προγράμματος είναι η δημιουργία μιας ενοποιημένης πλατφόρμας δοκιμών για την υποστήριξη μεγάλης ποικιλίας Blockchain εφαρμογών. Αυτό το περιβάλλον στο οποίο θα γίνονται οι δοκιμές είναι αντιπροσωπευτικό των μελλοντικών δικτύων ενέργειας, αφού περιλαμβάνει την παραγωγή, τη μεταφορά, τη διανομή της ενέργειας καθώς και τους τελικούς χρήστες-καταναλωτές του δικτύου. Το πρόγραμμα στοχεύει στον εντοπισμό συγκεκριμένων περιπτώσεων όπου τα χαρακτηριστικά του Blockchain θα συμβάλλουν στην πρόληψη, τη μείωση και τον εντοπισμό κυβερνοεπιθέσεων στο δίκτυο, ενώ ταυτόχρονα επιδιώκει την ταχύτερη εφαρμογή μεθόδων ασφάλειας που έχουν αναπτυχθεί σε ερευνητικό επίπεδο, στο πραγματικό δίκτυο. Η αξία του εν λόγω ερευνητικού προγράμματος εγγυάται στο γεγονός ότι είναι το πρώτο παγκοσμίως περιβάλλον δοκιμών που βασίζεται στην τεχνολογία Blockchain για την εξακρίβωση της κυβερνοασφάλειας του δικτύου απ' άκρο σ' άκρο, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής. Ταυτόχρονα το πρόγραμμα στοχεύει στον ασφαλή συντονισμό όλων των καταναλωμένων στοιχείων σε επίπεδο διανομής για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο. Τέλος η δημιουργία μια αρχιτεκτονικής αναφοράς για την κυβερνοασφάλεια των συστημάτων με τη εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain, επιδιώκεται να πραγματοποιηθεί από ερευνητικό πρόγραμμα BLOSEM. [43]

#### **4.9 Θεσμικό και νομοθετικό πλαίσιο, υφιστάμενη κατάσταση και προτάσεις χάραξης πολιτικής στην εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain**

Στην παρούσα ενότητα επιδιώκεται η αξιολόγηση του Blockchain σε θεσμικό και νομικό επίπεδο, καθώς και προτάσεις που τίθενται από αρμόδιους για την χάραξη πολιτικής για την αποτελεσματική εφαρμογή της νέας τεχνολογίας. Η τεχνολογία Blockchain αποτελεί μια καινοτόμο μέθοδο καταγραφής συναλλαγών σε αποκεντρωμένα δίκτυα υπολογιστών. Οι χρηματοοικονομικές υπηρεσίες, ως κατεξοχήν κλάδος που στηρίζεται σε έμπιστα τρίτα μέρη τα οποία παρέχουν υπηρεσίες εμπιστοσύνης και διαμεσολάβησης σε εγχρήματες συναλλαγές, αναμένεται να επηρεαστούν σημαντικά από την ωρίμανση και ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας blockchain. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει αναγκαστικά το τέλος των τραπεζών και του χρηματοοικονομικού συστήματος, όπως το γνωρίζουμε σήμερα. Σε έναν επικείμενο μετασχηματισμό είναι πιο πιθανό οι σημερινοί κυρίαρχοι της αγοράς να ενσωματώσουν την τεχνολογία Blockchain στις υπηρεσίες που παρέχουν, αλλάζοντας στην πορεία τη φύση των εμπορικών συναλλαγών προς ένα πιο αποκεντρωμένο μοντέλο λειτουργίας. η τεχνολογία blockchain προσφέρει τη δυνατότητα η ίδια λειτουργικότητα καταγραφής εμπορικών συναλλαγών

να γίνεται αποκεντρωμένα, χωρίς δηλαδή την ανάγκη ύπαρξης έμπιστων τρίτων μερών. Η πρώτη, και πλέον γνωστή, εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain είναι η ανάπτυξη ψηφιακών αποκεντρωμένων κρυπτονομισμάτων, όπως είναι το Bitcoin.[74]

Αναφορικά με την υιοθέτηση των κρυπτονομισμάτων, χώρες στις οποίες εντοπίζονται τα υψηλότερα επίπεδα υιοθέτησης είναι οι αναπτυσσόμενες οικονομίες. Σε όρους επιχειρηματικής αξιοποίησης ανά χώρα, υπάρχουν τριών ειδών επιχειρηματικά μοντέλα: α) miners (π.χ. Κίνα, Βιετνάμ, Βραζιλία, Αργεντινή), β) innovators (π.χ. Αυστραλία, Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, Ηνωμένο Βασίλειο, Καναδάς), γ) payment enablers (π.χ. Ινδία, Κένυα, Πακιστάν, Νιγηρία). Το πρώτο επιχειρηματικό μοντέλο οφείλεται στο χαμηλό κόστος ενέργειας των χωρών αυτών, ενώ το δεύτερο αποδίδεται στο γόνιμο θεσμικό περιβάλλον για την υλοποίηση επενδύσεων σε καινοτόμες ιδέες που αφορούν το δίκτυο Bitcoin. Τέλος, το τρίτο επιχειρηματικό μοντέλο σχετίζεται με την πληρωμή εμβασμάτων και την πραγματοποίηση εμπορίου ανάμεσα σε διαφορετικές χώρες. Ως προς την τρέχουσα νομοθεσία, υπάρχουν χώρες όπου απαγορεύεται η χρήση κρυπτονομισμάτων (π.χ. Βολιβία), ενώ άλλες χαρακτηρίζονται ως θετικά προσκείμενες στην υιοθέτηση αυτών (π.χ. Πορτογαλία, Ελβετία). Ακόμη, υπογραμμίζεται ότι υφίστανται κράτη με σαφές νομικό πλαίσιο γύρω από τα κρυπτονομίσματα, όπως η Γερμανία, ενώ άλλα έχουν απλώς περιοριστεί σε προειδοποιήσεις για τους κινδύνους που ελλοχεύουν από επενδύσεις σε κρυπτονομίσματα (π.χ. Βέλγιο). Το Ελ Σαλβαδόρ αποτέλεσε το πρώτο κράτος που αναγνώρισε το Bitcoin ως επίσημο νόμισμα (legal tender). [74]

Γενικότερα, σχετικά με την υιοθέτηση της τεχνολογίας Blockchain, η Ελλάδα συγκαταλέγεται στις χαμηλότερες θέσεις ανάμεσα στις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης σύμφωνα με την αξιολόγηση του Ευρωπαϊκού Παρατηρητηρίου και Φόρουμ για το Blockchain (2020), η οποία επικεντρώθηκε στο θεσμικό πλαίσιο και το επιχειρηματικό περιβάλλον.[74] Η Ελλάδα έχει υπογράψει την Ευρωπαϊκή Συνεργασία Blockchain και έχει ανακοινώσει ένα προσχέδιο νόμου για τις αναδυόμενες τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών το 2022. Σύμφωνα με την έκθεση του Ευρωπαϊκού Παρατηρητηρίου και Φόρουμ για το Blockchain η Ελλάδα φιλοξενεί ένα αναδυόμενο οικοσύστημα Blockchain που αποτελείται από εταιρίες και start-ups, και χαρακτηρίζεται τόσο από επίσημες όσο και ανεπίσημες πρακτικές εφαρμογές. Περισσότερες από 15 εταιρίες προσφέρουν υπηρεσίες σε διάφορους τομείς αξιοποιώντας την τεχνολογία Blockchain. Οι ελληνικές αρχές έχουν υιοθετήσει μία παθητική προσέγγιση απέναντι στη νέα τεχνολογία, αφού δεν υπάρχουν σαφείς αναφορές σε εφαρμογές Blockchain και στα κρυπτονομίσματα στην ελληνική νομοθεσία, παρά μόνο έχει υιοθετήσει την οδηγία της ΕΕ για Καταπολέμηση της Νομιμοποίησης Εσόδων από Παράνομες Δραστηριότητες. Το συνολικό μέγεθος και η ωριμότητα του επιχειρηματικού οικοσυστήματος Blockchain και κρυπτονομισμάτων παραμένει μικρό παρά τις προσπάθειες ορισμένων πρωτοβουλιών για την ευαισθητοποίηση και την προώθηση του Blockchain στη χώρα. Ωστόσο, ο αριθμός των μαθημάτων Blockchain που προσφέρονται από διαφορετικά ιδρύματα έχει αυξηθεί.[75] Η αντιπρόεδρος του ευρωπαϊκού κοινοβουλίου σχολιάζει για το μέλλον του Blockchain στον ελλαδικό χώρο, πως ελλείψει εθνικού και νομικού πλαισίου τα ελληνικά οικοσυστήματα Blockchain θα επωφεληθούν σημαντικά από Κανονισμό Πιλοτικού Καθεστώτος (DLT Pilot Regime Regulation - DLT PRR) της ΕΕ και τον κανονισμό για αγορές κρυπτο-περιουσιακών στοιχείων (Regulation for Markets in Crypto Assets -MiCA). Αφενός ο πρώτος όντας ο πρώτος πανευρωπαϊκός κανονισμός που θα δοκιμάσει την ανάπτυξη Blockchain σε χρηματοπιστωτικές υπηρεσίες, παρέχοντας υπηρεσίες καταγραφής, διαπραγμάτευσης, διακανονισμού και φύλλα

μέσω υπό τη μορφή tokens, και ο δεύτερος κανονισμός θα παρέχει την απαραίτητη ασφάλεια δικαίου στους συμμετέχοντες των νέων συστημάτων.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

#### **5.1 Οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στον τομέα της ενέργειας**

Η συνεχώς αυξανόμενη αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργεί ανάγκες για την ανάπτυξη ενός συστήματος ανταλλαγής πληροφοριών στα νέα συνεχώς εξελισσόμενα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Η ταχεία διεύρυνση όλο και περισσότερων μικρών ή μεγάλων μονάδων παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ αποτελεί πρόκληση για την τρέχουσα οργάνωση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, δημιουργώντας την ανάγκη επαναξιολόγησης των συμβατικών συστημάτων διαχείρισης πληροφοριών. Η απαίτηση για συνεχή υποστήριξη της ροής των πληροφοριών απαιτεί τον επαναπροσδιορισμό και την αξιολόγηση τόσο των φυσικών ροών ενέργειας όσο και της ανταλλαγής των σχετικών δεδομένων. Το Blockchain είναι μία τεχνολογία που μπορεί να ενισχύσει τη λειτουργικότητα των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, προσφέροντας μία σειρά από οφέλη σε διάφορα πεδία εφαρμογής του ενεργειακού τομέα.

Όπως έγινε αντιληπτό από την παρουσίαση δημοσιεύσεων, ερευνητικών αποτελεσμάτων, πιλοτικών και εμπορικών εφαρμογών, τα οφέλη της τεχνολογίας Blockchain στον ενεργειακό τομέα μπορούν να αξιοποιηθούν σε πληθώρα πεδίων του τομέα της ενέργειας. Τα εργαλεία που προσφέρει το Blockchain μπορούν να αξιοποιηθούν από οποιαδήποτε εταιρία και να παρέχουν έναν οικονομικά αποδοτικό και ασφαλή τρόπο διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων. Ταυτόχρονα από μία σειρά δημοσιεύσεων προέκυψε το συμπέρασμα, πως η προσβασιμότητα που χαρακτηρίζει τα δίκτυα Blockchain, μπορεί να επιτρέψει σε νέους παίκτες να μπουν στο πεδίο των ενεργειακών αγορών, που προς το παρόν κυριαρχείται σχεδόν αποκλειστικά από μεγάλες εταιρίες ενέργειας.

Στον τομέα των ενεργειακών αγορών η τεχνολογία Blockchain μπορεί να αποτελέσει ένα ανταγωνιστικό, προς τις ώριμες παγιωμένες μεθόδους, εργαλείο που μπορεί να στηρίξει τις αποκεντρωμένες αγορές, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις για ασφάλεια, διαφάνεια και ανωνυμία. Η ανάπτυξη μηχανισμών εμπορίας και συναλλαγών στην ενέργεια πάνω σε ένα δίκτυο Blockchain φαίνεται να αποτελεί μία βιώσιμη λύση. Ταυτόχρονα η χρήση ψηφιακών κρυπτονομισμάτων για ενεργειακές συναλλαγές τόσο σε επίπεδο χονδρικής εμπορίας της ενέργειας, όσο και σε τοπικό επίπεδο παραγωγής ενέργειας από οικιακά φωτοβολταϊκά, σε συνδυασμό με την αποφυγή πλήθους μεσαζόντων που απαιτούνται στις σημερινές ενεργειακές αγορές, μπορεί να ωφελήσει σημαντικά σε οικονομικό επίπεδο τόσο τους παραγωγούς όσο και τους καταναλωτές.

Σε επίπεδο διαχείρισης δικτύου η τεχνολογία Blockchain έχει να επιδείξει σημαντικά οφέλη τόσο σε ευφυή δίκτυα όσο και σε μικροδίκτυα, και να αυτοματοποιήσει διαδικασίες ελέγχου, παρακολούθησης, καταγραφής δεδομένων και συναλλαγών. Η αποκεντρωμένη διαχείριση της ενέργειας αξιοποιώντας ένα δίκτυο Blockchain συνίσταται χαμηλά κόστη λειτουργίας και κατανάλωση πόρων. Ταυτόχρονα διευκολύνεται η εφαρμογή προγραμμάτων απόκρισης ζήτησης και η διαχείριση των αιχμιακών φορτίων του συστημάτων αξιοποιώντας την ευελιξία των καταναλωτών, εφαρμόζοντας P2P συναλλαγές δεδομένων που παρέρχονται από έξυπνους μετρητές. Η αυτοματοποίηση επίλυσης προβλημάτων οικονομικής κατανομής του φορτίου σε δίκτυα διεσπαρμένης παραγωγής χωρίς την απαίτηση ύπαρξης ρυθμιστικών οντοτήτων και



πολλαπλών μεσαζόντων, αποτελεί ένα ακόμη πλεονέκτημα της τεχνολογίας. Αυτά το οφέλη στον τομέα της διαχείρισης των ενεργειακών δικτύων με χρήση της τεχνολογίας Blockchain συμβαδίζουν με την απαίτηση για ανωνυμία, ασφάλεια, διαφάνεια και αμεταβλητότητα των συναλλαγών. Η λειτουργία ενός μικροδικτύου είτε σε απομονωμένη λειτουργία, ή σε κατάσταση σύνδεσης με το κεντρικό δίκτυο, είτε σε περίπτωση σύνδεσης με άλλα μικροδίκτυα μπορεί να ωφεληθεί από την ανάπτυξη πλατφορμών Blockchain τόσο σε λειτουργικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο.

Στη συνέχεια, αναφορικά με τα αποθηκευτικά μέσα και τη διαχείριση φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με την εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain. Ο αποκεντρωμένος έλεγχος και χρονοπρογραμματισμός της φόρτισης τόσο των μονάδων αποθήκευσης όσο και των ηλεκτρικών οχημάτων έρχεται να επιλύσει ζητήματα απόκρισης ζήτησης και συμφόρησης κατά την φόρτιση τους. Η ύπαρξη των έξυπνων συμβολαίων έρχεται να αυτοματοποιήσει διαδικασίες επικοινωνίας και διαπραγμάτευσης με τους σταθμούς φόρτισης.

Τέλος, η ανάπτυξη μοντέλων που αξιοποιούν το Blockchain για τη διαχείριση και εμπορία και ανταλλαγή δικαιωμάτων εκπομπών και πράσινων πιστοποιητικών, έχει ήδη εγκαθιδρυθεί προσφέροντας σημαντικά οφέλη στην αυξανόμενη υιοθέτηση και ενδιαφέρον, τόσο των παραγωγών όσο και των καταναλωτών σχετικά με την ποιότητα της ενέργειας. Η απαίτηση από για μείωση των εκπομπών άνθρακα και η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις της ευρωπαϊκής ένωσης, αποτελεί πρόσφορο έδαφος για τη δημιουργία αγορών Blockchain για συναλλαγές δικαιωμάτων άνθρακα και πράσινων πιστοποιητικών, εξασφαλίζοντας την απαίτηση για διαφάνεια και έλλειψη κακόβουλων δράσεων.

## **5.2 Προκλήσεις στην εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στον τομέα της ενέργειας**

Το Blockchain είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων και εφαρμογών στον ενεργειακό τομέα. Ο μεγάλος αριθμός ενεργειακών εταιριών, επιχειρήσεων κοινής ωφέλειας, ερευνητικών προγραμμάτων που τρέχουν σήμερα, καθώς και το ενδιαφέρον των επενδυτών στον ενεργειακό τομέα, δείχνουν ξεκάθαρα την αξία αυτής της αναδυόμενης τεχνολογίας. Το πρώιμο στάδιο ανάπτυξης στο οποίο βρίσκεται και οι σχετικά μικρής κλίμακας έργα στα οποία έχει δοκιμαστεί η τεχνολογία Blockchain, εγείρει ερωτήματα που χρίζουν απάντησης πριν την εκτενή εφαρμογή της στην ενεργειακή βιομηχανία. Σε αυτή την ενότητα αναλύονται οι βασικότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζει η τεχνολογία Blockchain για την καθολική της εφαρμογή στον ενεργειακό τομέα. [21] Ταυτόχρονα παρουσιάζεται ένα πλαίσιο στο οποίο αντιμετωπίζεται η βασικότερη πρόκληση της νέας τεχνολογίας που αφορά την εξόρυξη κρυπτονομισμάτων, διαδικασία που όπως έχει αποδειχθεί είναι εξαιρετικά ενεργοβόρα, προς όφελος των ενεργειακών συστημάτων.

Η μεγαλύτερη πρόκληση που χρήζει αντιμετώπισης αναφορικά με την τεχνολογία Blockchain, είναι η τεράστια ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται λόγω της υψηλής υπολογιστικής

πολυπλοκότητας, στη διαδικασία εξόρυξης κρυπτονομισμάτων. Σύμφωνα με το Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index (CBECI) ολόκληρο το δίκτυο Bitcoin καταναλώνει περισσότερα από 10,5 GW (δηλαδή περισσότερες από 93 TWh το χρόνο) ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η πτυχή της ενσωμάτωσης της τεχνολογίας Blockchain και ιδιαίτερα των κρυπτονομισμάτων στα σύγχρονα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί σημαντική πρόκληση που χρήζει αντιμετώπισης. Στην εργασία [56] διερευνάται η εφαρμογή διάφορων προσεγγίσεων, σχετικών με μηχανισμούς απόκρισης ζήτησης, για την αντιμετώπιση του σημαντικού ζητήματος που προκύπτει από την εξόρυξη κρυπτονομισμάτων Blockchain. Αρχικά αναλύεται η αντιμετώπιση του ζητήματος ενισχύοντας την ευελιξία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και αντιμετωπίζοντας φαινόμενα αρνητικής τιμολόγησης στην ενέργεια. Η εμφάνιση αρνητικών τιμών στην ενέργεια είναι αποτέλεσμα της εκτεταμένης διείσδυσης της παραγωγής από ΑΠΕ στα δίκτυα και της υψηλής παραγωγής από συμβατικές μονάδες που για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους δεν μειώνουν την παραγωγή σε περιόδους όπου η ζήτηση των φορτίων είναι χαμηλή. Η εξόρυξη κρυπτονομισμάτων μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένας νέος μηχανισμός απόκρισης ζήτησης για την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ ζήτησης και παραγωγής, και την αποφυγή φαινομένων αρνητικών τιμών. Ο αποτελεσματικός προγραμματισμός της διαδικασίας εξόρυξης ψηφιακών κρυπτονομισμάτων δύναται να ανακουφίσει το σύστημα σε περιόδους υψηλής ζήτησης μετατοπίζοντας την εξόρυξη εκτός περιόδων αιχμής, και μεταφέροντας τη σε ώρες με χαμηλή ζήτηση και υψηλή παραγωγή. Προκειμένου να διασφαλιστεί η ανθεκτικότητα και η σταθερή ροή στη διαδικασία εξόρυξης κρυπτονομισμάτων έναντι της διακοπτόμενης παραγωγής ενέργειας, είναι απαραίτητο να υιοθετηθούν αποτελεσματικοί μηχανισμοί απόκρισης ζήτησης, όπως είναι η ελεγχόμενη μετατόπιση από περιόδους υψηλής ζήτησης σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, ώστε να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική λειτουργία του δικτύου. Ένας δεύτερος μηχανισμός που επιτρέπει τη διαχείριση της ενεργοβόρας εξόρυξης κρυπτονομισμάτων είναι η αποθήκευση. Η εξόρυξη μπορεί να αντιμετωπιστεί ως εναλλακτική λύση για αποθήκευση ενέργειας. Η ιδέα βασίζεται στο γεγονός ότι τα συστήματα αποθήκευσης σε περιόδους χαμηλής φόρτισης συμπεριφέρονται ως φορτία και καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια, ενώ σε περιόδους υψηλής παραγωγής και χαμηλής κατανάλωσης βοηθούν το σύστημα να εξισορροπήσει την παραγωγή και την κατανάλωση, απορροφώντας πλεονάζουσα ισχύ μέσω της φόρτισης. Η εξόρυξη των κρυπτονομισμάτων προγραμματίζεται εκτός ωρών αιχμής, όταν οι τιμές της ενέργειας είναι χαμηλότερες, αποθηκεύονται και αξιοποιούνται αργότερα στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας όταν υπάρχει ανάγκη για προμήθεια ενέργειας σε περιόδους υψηλής ζήτησης. Στις περιόδους υψηλής ζήτησης οι τιμές της αγοράς είναι υψηλές. Τότε λοιπόν αξιοποιούνται τα αποθηκευμένα κρυπτονομίσματα, που έχουν παραχθεί με χαμηλή τιμή ενέργειας, και γίνεται κάλυψη της ζήτησης με προμήθεια ενέργειας από γειτονικές ενεργειακές αγορές, οι οποίες θα προσφέρουν χαμηλότερη τιμή. Αυτός ο εναλλακτικός τρόπος αποθήκευσης ενέργειας είναι ικανός να εξομαλύνει αστάθειες που παρατηρούνται στις τιμές της ενέργειας, ακόμα και σε συστήματα ισχύος που έχουν σημαντικές ανάγκες αποθήκευσης, χωρίς επαρκείς υποδομές αποθήκευσης. Η κύρια διαφορά αυτής της προσέγγισης με την προηγούμενη, που αντιμετωπίζει την εξόρυξη κρυπτονομισμάτων ως μηχανισμό απόκρισης ζήτησης, σχετίζεται με τη λήψη απόφασης από τον αρμόδιο υπεύθυνο για προμήθεια ενέργειας από γειτονικές αγορές. Η χρήση των κρυπτονομισμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μία εναλλακτική λύση αναφορικά με τη διαπραγμάτευση ενέργειας εντός του δικτύου, ενώ ταυτόχρονα μπορούν να θεωρηθούν ως μια νέα μέθοδος εξαγωγής παραγόμενης ενέργειας με τη μορφή κρυπτονομισμάτων. Αυτό σημαίνει ότι τα εξορυσσόμενα

κρυπτονομίσματα μπορούν να θεωρηθούν ένας τύπος ενέργειας που έχει υποβληθεί σε μετατροπή έχοντας δυνατότητες ευκολότερης μεταφοράς.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται μία σειρά εμποδίων και προκλήσεων που προκύπτουν από την ανασκόπηση των βιβλιογραφικών εργασιών και αφορούν την υιοθέτηση της τεχνολογίας Blockchain στον ενεργειακό τομέα του μέλλοντος. Αρχικά πρέπει να αποδειχθεί ότι η νέα τεχνολογία Blockchain μπορεί να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις για επεκτασιμότητα, ταχύτητα και ασφάλεια, που απαιτείται για την εκτεταμένη χρήση της στον ενεργειακό τομέα. Η εκτενής έρευνα που συνεχίζεται και σήμερα στο επίπεδο των αλγορίθμων συναίνεσης είναι κρίσιμη για την ικανοποίηση των παραπάνω απαιτήσεων. Ωστόσο παρατηρείται πως η ταυτόχρονη ικανοποίηση τους δεν έχει επιτευχθεί ακόμα. Οι αλγόριθμοι PoW είναι αφενός ώριμοι και ασφαλείς αλλά αφετέρου είναι αργοί και ενεργοβόροι, οδηγώντας έτσι τους σχεδιαστές δικτύων Blockchain να υιοθετούν όλο και περισσότερο αλγόριθμους PoS, που είναι ενεργειακά αποδοτικότεροι, ταχύτεροι και παρέχουν ευκαιρίες επεκτασιμότητας του δικτύου. Η εφαρμογή διάφορων μηχανισμών συναίνεσης που μελετάται συστηματικά αποτελεί σημαντική πρόκληση, δεδομένου ότι νέες προτάσεις μπορεί να οδηγήσουν σε εκπτώσεις στο επίπεδο της ασφάλειας και της αποκέντρωσης του δικτύου. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι η τεχνολογία Blockchain έχει αποδείξει τα σημαντικά της οφέλη για την εφαρμογή της στον ενεργειακό τομέα, απαιτείται ωστόσο περαιτέρω ανάπτυξη για την επίτευξη των τεχνικών και λειτουργικών στόχων που επιβάλλονται για την εκτενή εφαρμογή της στα ενεργειακά συστήματα του μέλλοντος [21].

Η ανθεκτικότητα των δικτύων Blockchain απέναντι σε κινδύνους **ασφάλειας** που μπορεί να προκύπτουν από κακή σχεδίαση του συστήματος ή κακόβουλες επιθέσεις είναι ζωτικής σημασίας. Στα αρχικά στάδια της ανάπτυξης ενός συστήματος Blockchain είναι εξαιρετικά πιθανό να προκύψουν προβλήματα δυσλειτουργίας λόγω της ελλιπούς εμπειρίας σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Όσο η τεχνολογία ωριμάζει και οι αλγόριθμοι που εφαρμόζονται εξελίσσονται τα πιθανά σφάλματα περιορίζονται, χωρίς ωστόσο να εξαλείφονται. Αυτοί οι κίνδυνοι μπορούν να οδηγήσουν σε προβλήματα σχετικά με την ευρεία αποδοχή της από τους καταναλωτές. Η ανθεκτικότητα των συστημάτων σε κακόβουλες επιθέσεις, ειδικά στην περίπτωση εφαρμογών υποδομών ενεργειακών συστημάτων είναι ζωτικής σημασίας [21].

Μια άλλη σημαντική πρόκληση είναι ότι τα συστήματα Blockchain σήμερα, χαρακτηρίζονται από υψηλό **κόστος** ανάπτυξης. Τα Blockchains οδηγούν σε σημαντική εξοικονόμηση πόρων παραλείποντας τους μεσάζοντες, ωστόσο υπάρχουν πολλά σενάρια εφαρμογής τους στα οποία δεν έχουν το πλεονέκτημα έναντι υπάρχουσων λύσεων στις καθιερωμένες αγορές. Για παράδειγμα οι ενεργειακές συναλλαγές αποθηκεύονται σε συμβατικές βάσεις δεδομένων που είναι σχεδιασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να αναγνωρίζουν τις σχέσεις μεταξύ των αποθηκευμένων δεδομένων, ικανοποιώντας αφενός προς το παρόν την απαίτηση για ταχύτητα και χαμηλό κόστος λειτουργίας, χωρίς όμως να διασφαλίζουν την αμεταβλητότητα και τη διαφάνεια των δεδομένων. Η εφαρμογή λοιπόν του Blockchain ενδέχεται να συνοδεύεται από την ανάγκη νέων υποδομών και εξοπλισμών πληροφοριών και επικοινωνίας, το κόστος των οποίων πρέπει να αντισταθμίζεται από τα οφέλη που επιτυγχάνεται με τη χρήση της τεχνολογίας Blockchain. Στην εφαρμογή των έξυπνων μετρητικών συστημάτων όπως οι έξυπνοι μετρητές, δεν παρουσιάζεται προς το παρόν ικανή τεχνολογική εξέλιξη που θα απαιτούσε την ενσωμάτωση του Blockchain στην υπάρχουσα υποδομή, ώστε να αντισταθμιστεί το σημαντικό του κόστος. Προς το παρόν στα συστήματα Blockchain, η μεταφορά των δεδομένων γίνεται με πολύ χαμηλό κόστος, αλλά η επαλήθευση και η επικύρωση των συναλλαγών χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος υλικού και ενέργειας. Λύση

στα υψηλά κόστη επικύρωσης των συναλλαγών ενδέχεται να φέρουν οι αλγόριθμοι συναίνεσης PoS και PoAu. Στον τομέα των επικοινωνιών τα συστήματα Blockchain πρέπει να ανταγωνιστούν τις καθιερωμένες πιο ώριμες και φθηνότερες λύσεις όπως είναι η τηλεμετρία, ενώ στον τομέα της αποθήκευσης των δεδομένων απαιτούνται νέες λύσεις που να περιορίζουν το κόστος της αποθήκευσης όσο το μέγεθος ενός δικτύου Blockchain αυξάνεται [21].

Μία ακόμη σημαντική πρόκληση που αντιμετωπίζει η υιοθέτηση της τεχνολογίας Blockchain στον ενεργειακό τομέα άπτεται των **ρυθμιστικών και νομικών διαδικασιών** που ισχύουν μέχρι σήμερα. Οι ρυθμιστικοί φορείς υποστηρίζουν την ενεργό συμμετοχή των καταναλωτών στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, και χαράσσονται πολιτικές που θεσπίζουν υποστηρικτικά μέτρα για την ανάπτυξη τοπικών ενεργειακών κοινοτήτων που στοχεύουν στην μείωση του κόστους για τους καταναλωτές, την προώθηση τεχνολογιών χαμηλών εκπομπών άνθρακα και την απανθρακοποίηση της παραγωγής. Οι τεχνολογία Blockchain μπορεί να υποστηρίξει και να επιταχύνει αυτούς του στόχους, αφού πρώτα ικανοποιηθεί η απαίτηση για τροποποίηση των υφιστάμενων ρυθμιστικών πλαισίων ώστε να επιτραπεί η ευρύτερη υιοθέτηση της τεχνολογίας. Για παράδειγμα τα τρέχοντα ρυθμιστικά πλαίσια δεν επιτρέπουν την εμπορία ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ καταναλωτών όπως προτείνεται σε διάφορα ερευνητικά έργα P2P ανταλλαγής ενέργειας. Στην πραγματικότητα ενεργειακοί φορείς έχουν χορηγήσει ειδική άδεια σε πιλοτικά έργα που δοκιμάζουν τέτοιες νέες αγορές ώστε να εξεταστούν πιθανά οφέλη για του καταναλωτές και το δίκτυο. Απαιτείται λοιπόν η ανάπτυξη νέων τύπων ρυθμιστικών πλαισίων που να περιγράφουν τις συμφωνίες μεταξύ καταναλωτών και μικροπαραγωγών, ειδικά στην περίπτωση που γίνεται χρήση των υφιστάμενων υποδομών του δικτύου. Ταυτόχρονα εγείρεται η ανάγκη για ανάπτυξη πιο ευέλικτων τιμολογιακών πολιτικών, οι οποίες σήμερα υπόκεινται σε αυστηρές ρυθμίσεις. Οι P2P Πλατφόρμες συναλλαγών ενέργειας που κάνουν χρήση της τεχνολογίας Blockchain βρίσκονται σε πρώιμα στάδια ανάπτυξης και η υιοθέτηση τους είναι περιορισμένη, έχοντας αποδείξει ωστόσο τις δυνατότητες που παρέχουν σε αποκεντρωμένα δίκτυα. Προκλήσεις σχετικές με την εξισορρόπηση, την ενσωμάτωση και το συντονισμό με το κύριο δίκτυο χρίζουν αντιμετώπισης. Όλα αυτά τα ζητήματα απαιτούν σημαντικές ρυθμιστικές αλλαγές οι οποίες μπορούν να οδηγήσουν σε καθυστέρηση ή παρακώλυση της υιοθέτησης του Blockchain στον ενεργειακό τομέα. Τέλος κατά την εφαρμογή του Blockchain είναι συχνά δύσκολο αποσαφηνιστεί ποιος έχει την νομική και τεχνική ευθύνη σε πιθανές αρνητικές συνέπειες που προκύπτουν από τις ενέργειες των εμπλεκόμενων μερών. Για παράδειγμα στο ενδεχόμενο μίας μεγάλης κακόβουλης επίθεσης, δεν υπάρχει κεντρική αρχή στην οποία να μπορεί να απευθυνθεί ο καταναλωτής, όπως συμβαίνει με τη σημερινή δομή των ενεργειακών συστημάτων. Είναι λοιπόν απαραίτητη η ανάπτυξη νομικού πλαισίου που αποσαφηνίζει τέτοια ενδεχόμενα [21].

Τέλος μια ακόμη σημαντική πρόκληση που μπορεί να επιβραδύνει την υιοθέτηση του Blockchain στον ενεργειακό τομέα είναι η **έλλειψη τυποποίησης και ευελιξίας**. Είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν πρότυπα που να αποσαφηνίζουν τις λειτουργικές διαδικασίες που ακολουθούνται όταν συνδυάζονται διαφορετικές τεχνολογίες με το Blockchain. Έχει αποδειχθεί ιστορικά ότι μετά την ανάπτυξη ενός συστήματος Blockchain, οποιεσδήποτε αλλαγές στα πρωτόκολλα ή τον κώδικα πρέπει να εγκρίνονται από όλους τους κόμβους του συστήματος, γεγονός που οδηγεί σε διαφωνίες μεταξύ των εμπλεκόμενων. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να οδηγήσει σε δυσπιστία απέναντι στην τεχνολογία, σε περίπτωση που επιδιωχθεί η υιοθέτησης της στον ενεργειακό τομέα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κακή φήμη που δημιουργήθηκε στις πρώτες μέρες του Bitcoin, όταν συσχετίστηκε με παράνομες δραστηριότητες [21].

## Βιβλιογραφία

- [1] Διαφάνειες Μαθήματος «Διεσπαρμένοι Ενεργειακοί Πόροι», Παπαθανασίου Σ., ΔΠΜΣ: Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας, 2021
- [2] Διαφάνειες Μαθήματος «Διεσπαρμένοι Ενεργειακοί Πόροι», Χατζηαργυρίου Ν., ΔΠΜΣ: Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας, 2021
- [3] Σιδηρά Μ, «Αξιοπιστία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2020
- [4] Zibin Zheng, Shaoan Xie, Hongning Dai, Xiangping Chen, Huaimin Wang, An Overview of “Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends”, 2017 IEEE 6th International Congress on Big Data, 2017
- [5] Suyash Gupta, Mohammad Sadoghi, “Encyclopedia of Big Data Technologies”, Springer International Publishing, 2019
- [6] N C. T. Nguyen, D. T. Hoang, D. N. Nguyen, D. Niyato, H. T. Nguyen and E. Dutkiewicz, "Proof-of-Stake Consensus Mechanisms for Future Blockchain Networks: Fundamentals, Applications and Opportunities," in *IEEE Access*, June 2019
- [7] Vitalik Buterin, “On Public and Private Blockchains.” <https://blog.ethereum.org/2015/08/07/on-public-and-private-blockchains/>,
- [8] Data Flair, Types of Blockchain, <https://data-flair.training/blogs/types-of-blockchain/>
- [9] W. Cai, Z. Wang, J. B. Ernst, Z. Hong, C. Feng and V. C. M. Leung, "Decentralized Applications: The Blockchain-Empowered Software System," in *IEEE Access*, 2018.
- [10] Karim Sultan , Umar Ruhi and Rubina Lakhani, “CONCEPTUALIZING BLOCKCHAINS: CHARACTERISTICS & APPLICATIONS”, 11th IADIS International Conference Information Systems 2018, 2018
- [11] Xiwei Xu, Ingo Weber and Mark Staples, “Architecture for Blockchain Applications”, Springer International Publishing, 2019
- [12] W. Li and M. He, "Comparative Analysis of Bitcoin, Ethereum, and Libra," 2020 *IEEE 11th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, 2020
- [13] Leila Ismail and Huned Materwala, “A Review of Blockchain Architecture and Consensus Protocols: Use Cases, Challenges, and Solutions”, *Symmetry*, 2019
- [14] William Stallings, “CRYPTOGRAPHY AND NETWORK SECURITY PRINCIPLES AND PRACTICE”, Pearson n Education Limited, 2017
- [15] Daniel. (2018, July 19). What’s A Merkle Tree? A Simple Guide To Merkle Trees
- [16] Τσικαλάκης Α, «Συμβολή στον προγραμματισμό λειτουργίας Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης και ανανεώσιμης παραγωγής και συσκευών αποθήκευσης», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2008

- [17] X. Yu and Y. Xue, "Smart Grids: A Cyber-Physical Systems Perspective," in *Proceedings of the IEEE*, May 2016
- [18] Ιάσωνας, Ν. Κουβελιώτης – Λυσίκατος, «Συμβολή στην ανάπτυξη καταναμημένων αλγορίθμων για τον έλεγχο και τη λειτουργία ευφυών δικτύων διανομής», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2019
- [19] Nikos Hatziaargyriou, “*Microgrids: Architectures and Control*”, Wiley-IEEE Press, 2014
- [20] Shady S. Refaat, Omar Ellabban, Sertac Bayhan, Haitham Abu-Rub, Frede Blaabjerg, and Miroslav M. Begovic, “Smart Grid and Enabling Technologies”, Wiley-IEE Press, 2021
- [21] Merlinda Andonia, Valentin Robua, David Flynn, Simone Abramb, Dale Geachc, David Jenkinsd, Peter McCallumd, Andrew Peacockd, “Blockchain technology in the energy sector: A systematic review of challenges and opportunities”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, 2019
- [22] PwC global power & utilities, Blockchain - an opportunity for energy producers and consumers? <https://www.pwc.com/gx/en/industries/assets/pwc-blockchain-opportunity-for-energy-producers-and-consumers.pdf> , 2016
- [23] M. Mihaylov, S. Jurado, N. Avellana, K. Van Moffaert, I. M. de Abril and A. Nowé, "NRGcoin: Virtual currency for trading of renewable energy in smart grids," *11th International Conference on the European Energy Market*, 2014
- [24] K. Nakayama, R. Moslemi and R. Sharma, "Transactive Energy Management with Blockchain Smart Contracts for P2P Multi-Settlement Markets," *2019 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2019
- [25] Jian Wang, Qianggang Wang, Niancheng Zhou and Yuan Chi, “A Novel Electricity Transaction Mode of Microgrids Based on Blockchain and Continuous Double Auction”, *Energies*, 2017
- [26] enerchain.ponton.de
- [27] Claudia Pop, Tudor Cioara, Marcel Antal, Ionut Anghel, Ioan Salomie and Massimo Bertoncini, “Blockchain Based Decentralized Management of Demand Response Programs in Smart Energy Grids”, *sensors*, 2017
- [28] J. Dargan, N. Gupta and L. Singh, "Blockchain Based Energy Management System: A Proposed Model," *2021 International Conference on Technological Advancements and Innovations (ICTAI)*, 2021
- [29] A. Kumari, R. Gupta, S. Tanwar, S. Tyagi and N. Kumar, "When Blockchain Meets Smart Grid: Secure Energy Trading in Demand Response Management," in *IEEE Network*, 2020,
- [30] Sana Noora, Wentao Yangb, Miao Guoa, Koen H. van Dama, Xiaonan Wangc, “Energy Demand Side Management within micro-grid networks enhanced by blockchain”, *Applied Energy*, Elsevier, 2018
- [31] Κουκουλά Δ, «Αποκεντρωμένος έλεγχος διαχείρισης διεσπαρμένων ενεργειακών πόρων στα δίκτυα διανομής για παροχή επικουρικών υπηρεσιών», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2017

- [32] <https://www.brooklyn.energy/>
- [33] <https://www.powerledger.io>
- [34] [Energy Web - Energy Web](#)
- [35] Nazreen Junaidi, Mohamed Shaaban, Md Pauzi Abdullah, "Blockchain Technologies in Electric Energy Systems", in 2020 International Conference on Power and Energy (PECon), 2020
- [36] <https://www.greeneum.net>
- [37] <https://el.wikipedia.org/wiki/Peer-to-peer>
- [38] <https://academy.binance.com/en/articles/peer-to-peer-networks-explained>
- [39] <https://www.foley.com/en/insights/publications/2021/08/types-of-blockchain-public-private-between>
- [40] <https://cordis.europa.eu/>
- [41] <https://cordis.europa.eu/project/id/957816>
- [42] <https://cordis.europa.eu/project/id/864300>
- [43] <https://netl.doe.gov/BLOSEM>
- [44] Guilherme Vieira, Jie Zhang, "Peer-to-peer energy trading in a microgrid leveraged by smart contracts", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2021
- [45] Prince Waqas Khan and Yung-Cheol Byun, "Blockchain-Based Peer-to-Peer Energy Trading and Charging Payment System for Electric Vehicles", sustainability, 2021
- [46] Matevž Pustišek, Andrej Kos, Urban SedlaR, "Blockchain Based Autonomous Selection of Electric Vehicle Charging Station", 2016 International Conference on Identification, Information and Knowledge in the Internet of Things, 2016
- [47] Godwin C. Okwuibe, Zeguang Li, Thomas Brenner, Ole Langniss, "A Blockchain Based Electric Vehicle Smart Charging System with Flexibility", Elsevier, 2020
- [48] M. Baza, M. Nabil, M. Ismail, M. Mahmoud, E. Serpedin and M. Ashiqur Rahman, "Blockchain-Based Charging Coordination Mechanism for Smart Grid Energy Storage Units" 2019 IEEE International Conference on Blockchain, 2019
- [49] J. Gao, "GridMonitoring: Secured Sovereign Blockchain Based Monitoring on Smart Grid," in IEEE Access, 2018
- [50] E. S. Kang, S. J. Pee, J. G. Song and J. W. Jang, "A Blockchain-Based Energy Trading Platform for Smart Homes in a Microgrid," 2018 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), 2018
- [51] T. Li, W. Zhang, N. Chen, M. Qian and Y. Xu, "Blockchain Technology Based Decentralized Energy Trading for Multiple-Microgrid Systems," 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2019

- [52] T. Li, W. Zhang, N. Chen, M. Qian and Y. Xu, "Blockchain Technology Based Decentralized Energy Trading for Multiple-Microgrid Systems," 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration, 2019
- [53] S. J. Pee, E. S. Kang, J. G. Song and J. W. Jang, "Blockchain based smart energy trading platform using smart contract," 2019 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC), 2019
- [54] Javed, Muhammad Umar & Javaid, Nadeem, "Scheduling Charging of Electric Vehicles in a Secured Manner using Blockchain Technology", 2019
- [55] [https://knowledge4policy.ec.europa.eu/foresight/tool/dlt4good/we-power\\_en](https://knowledge4policy.ec.europa.eu/foresight/tool/dlt4good/we-power_en)
- [56] M. Ghorbanian, S. H. Dolatabadi, P. Siano, I. Kouveliotis-Lysikatos and N. D. Hatziargyriou, "Methods for Flexible Management of Blockchain-Based Cryptocurrencies in Electricity Markets and Smart Grids," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020
- [57] I. Kouveliotis-Lysikatos, I. Kokos, I. Lamprinos and N. Hatziargyriou, "Blockchain-Powered Applications for Smart Transactive Grids," 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe), 2019
- [58] I. Kappos, I. Kouveliotis-Lysikatos and N. Hatziargyriou, "A Blockchain Platform for the Decentralized Operation of Active Distribution Networks," 2021 IEEE Madrid PowerTech, 2021
- [59] M. Dabbaghjamesh, B. Wang, A. Kavousi-Fard, N. D. Hatziargyriou and J. Zhang, "Blockchain-Based Stochastic Energy Management of Interconnected Microgrids Considering Incentive Price," in *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, 2021
- [61] Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών - ([ypen.gov.gr](http://ypen.gov.gr))
- [62] Khamila Nurul Khaqia, Janusz J. Sikorskib, Kunn Hadinotoa, Markus Kraft, "Incorporating seller/buyer reputation-based system in blockchain-enabled emission trading application", *Applied Energy*, 2018
- [63] F. Imbault, M. Swiatek, R. de Beaufort and R. Plana, "The green blockchain: Managing decentralized energy production and consumption," 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), 2017
- [64] J. A. F. Castellanos, D. Coll-Mayor and J. A. Notholt, "Cryptocurrency as guarantees of origin: Simulating a green certificate market with the Ethereum Blockchain," 2017 *IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, 2017
- [65] <https://vlux.io>
- [66] [Home - Electron](#)
- [67] A. Goranović, M. Meisel, L. Fotiadis, S. Wilker, A. Treytl and T. Sauter, "Blockchain applications in microgrids an overview of current projects and concepts," *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017



- [68] J. J. Ochoa, G. Bere, I. R. Aenugu, T. Kim and K. -K. R. Choo, "Blockchain-as-a-Service (BaaS) for Battery Energy Storage Systems," 2020 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), 2020
- [69] Asma Khatoon, Piyush Verma, Jo Southernwood, Beth Massey and Peter Corcoran, "Blockchain in Energy Efficiency: Potential Applications and Benefits", Energies. 2019
- [70] A. Yagmur, B. A. Dedetürk, A. Soran, J. Jung and A. Onen, "Blockchain-Based Energy Applications: The DSO Perspective," in IEEE Access, 2021
- [71] Jiani Wu and Nguyen Khoi Tran, "Application of Blockchain Technology in Sustainable Energy Systems: An Overview", sustainability, 2018
- [72] Διαφάνειες Μαθήματος «Διεσπαρμένοι Ενεργειακοί Πόροι», Παπαθανασίου Σ., ΔΠΜΣ: Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας, 2021
- [73] <https://www.eublockchainforum.eu/initiative-map>
- [74] <https://www.economia.gr/dukmar22/>
- [75] [https://www.eublockchainforum.eu/sites/default/files/reports/eu\\_ecosystem\\_report\\_20220909\\_final%20version\\_1.pdf](https://www.eublockchainforum.eu/sites/default/files/reports/eu_ecosystem_report_20220909_final%20version_1.pdf)
- [76] Γεωργακόπουλος Ι, Τεχνολογίες ενίσχυσης Ιδιωτικότητας για Διαχείριση Προσωπικών Δεδομένων, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 2008