



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Μεταπτυχιακό/ Προηγμένες Τεχνολογίες Υπολογιστικών  
Συστημάτων**

**Διπλωματική εργασία**

**“ Η επίδραση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας στην αξία των  
κρυπτονομισμάτων εστιάζοντας στους αλγόριθμους Proof- of-  
Work, Proof-of-stake, Proof-of-Authority”**

**Δεληζήση Άννα**

**A.M.: 21003**

**Εισηγητής : Δρ. Βογιατζής Ιωάννης**

**Αθήνα, 2023**

**(Κενή σελίδα)**

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η διπλωματική αυτή εργασία αποτελεί το τελευταίο σκαλοπάτι ολοκλήρωσης του μεταπτυχιακού μου στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής . Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές του τμήματος για όλες τις γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσαν.

Κατά την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη ψυχολογική βοήθεια που μου προσέφεραν όλο αυτό το διάστημα ώστε να ολοκληρώσω το μεταπτυχιακό μου και την συγκεκριμένη εργασία καθώς και τον ανιψιό μου Λιάκο Ιωάννη . Επίσης θα ήθελα να εκφράσω το πόσο ευγνώμων είμαι στους Επιβλέποντες καθηγητές μου που όποτε κι αν ζήτησα τη βοήθεια τους ανταποκρίθηκαν άμεσα.

**Διπλωματική εργασία**

**“Η επίδραση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας στην αξία των κρυπτονομισμάτων εστιάζοντας στους αλγόριθμους Proof- of-Work, Proof-of-stake, Proof-of-Authority”**

**Δελιζήση Άννα**

**A.M.: 21003**

**Εισηγητές:**

**Δρ. Βογιατζής Ιωάννης**

**Δρ. Βλάχος Βασίλειος**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

<b>ΑΑ</b>	<b>Όνοματεπώνυμο</b>	<b>Υπογραφή</b>
<b>1.</b>	<b>Δρ.Βογιατζής Ιωάννης</b>	
<b>2.</b>	<b>Δρ.Βουτσινάς Στέλιος</b>	
<b>3.</b>	<b>Δρ.Φατούρος Σταύρος</b>	

**Ημερομηνία Εξέτασης:**

**(Κενή σελίδα)**

## **ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ**

"Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάση επιστημονικής παράφρασης. Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Πτυχιακή μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η Πτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δε μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας."

**Η δηλούσα**



**Δελιζήση Άννα**

**(Κενή σελίδα)**

## Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	10
ABSTRACT .....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 <sup>ο</sup> - ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	11
1.1 Εισαγωγή.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 <sup>ο</sup> – BLOCKCHAIN ΚΑΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ.....	13
2.1 Τεχνολογία blockchain.....	13
2.2 Γενική αναφορά στο mining.....	15
2.3 Ο αλγόριθμος proof-of-work.....	15
2.4 Ο αλγόριθμος Proof-of-Stake.....	18
2.5 Ο αλγόριθμος Proof-of-Authority .....	20
2.6 Σύγκριση.....	22
2.7 Διαφορές των αλγορίθμων σχετικά με τις ανάγκες ηλεκτρικού ρεύματος.....	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 <sup>ο</sup> – ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΚΡΥΠΤΟΝΟΜΙΣΜΑΤΑ .....	27
3.1 Χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από τη δραστηριότητα κρυπτογραφικών περιουσιακών στοιχείων.....	27
3.2 Σύγκριση με άλλες χρηματοοικονομικές συναλλαγές.....	30
3.3 Η εξόρυξη κρυπτονομισμάτων μπορεί να επηρεάσει τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας και το δίκτυο .....	32
3.4 Οι προβλέψεις για τη μελλοντική χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από κρυπτονομίσματα είναι αβέβαιες .....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> - ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	38
4.1 Σχετική έρευνα .....	38
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> - ΕΡΕΥΝΑ.....	40
5.1 Μεθοδολογία .....	40
5.2 Αποτελέσματα .....	43
Proof of Work (PoW).....	43
<b>Bitcoin (BTC)</b> .....	43
<b>Ethereum (ETH)</b> .....	44
<b>DigiByte (DGB)</b> .....	45
<b>HiCoin (XHI)</b> .....	46
<b>Dash (DASH)</b> .....	47
<b>LiteCoin (LTC)</b> .....	48
<b>Monero (XMR)</b> .....	49
Proof of Stake (PoS).....	50
<b>Binance Coin (BNB)</b> .....	50
<b>Waves (WAVES)</b> .....	51
<b>Cardano (ADA)</b> .....	52
<b>Tezos (XTZ)</b> .....	53



Proof of Authority (PoA).....	54
<b>POA Network (POA)</b> .....	54
<b>Callisto (CLO)</b> .....	55
<b>VeChain (VET)</b> .....	56
<b>GoChain (GO)</b> .....	57
Σύνοψη Αποτελεσμάτων .....	58
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 <sup>ο</sup> - ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	59
6.1 Συζήτηση – Περιορισμοί.....	59
6.2 Συμπεράσματα.....	61
6.3 Μελλοντική έρευνα .....	63
Βιβλιογραφία .....	64

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μερικά από τα πιο δημοφιλή αποκεντρωμένα δίκτυα κρυπτονομισμάτων έχουν επισύρει ευρεία κριτική για την κατανάλωση τεράστιων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας και έτσι έχουν γίνει στόχοι ρυθμιστικού ενδιαφέροντος. Ωστόσο, στο παρελθόν, οι προσπάθειες επηρεασμού των λειτουργιών δικτύου κρυπτονομισμάτων μέσω πολιτικής για την επιδίωξη της βιωσιμότητας ήταν ευρέως ανεπιτυχείς. Ορισμένα εγκαταλείφθηκαν από φόβο μήπως τεθεί σε κίνδυνο η καινοτομία, ενώ άλλα απέτυχαν λόγω της εξαιρετικά παγκοσμιοποιημένης φύσης των αποκεντρωμένων συστημάτων. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αναφερθούμε στην επίδραση κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας στην αξία των κρυπτονομισμάτων.

## ABSTRACT

Some of the most popular decentralized cryptocurrency networks have drawn widespread criticism for consuming massive amounts of electricity and thus have become targets of regulatory interest. However, in the past, attempts to influence cryptocurrency network operations through policy to pursue sustainability have been largely unsuccessful. Some were abandoned for fear of jeopardizing innovation, while others failed due to the highly globalized nature of decentralized systems. The purpose of this paper is to examine the effect of electricity costs on the value of cryptocurrencies

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Blockchain, Proof- of-Work , Proof-of-Stake, Proof-of-Authority, Κρυπτονομίσματα, Εξορύκτες, Ηλεκτρική Ενέργεια**

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>- ΠΡΟΛΟΓΟΣ

## 1.1 Εισαγωγή

Τα κρυπτονομίσματα έχουν κερδίσει μεγάλη προσοχή τα τελευταία χρόνια ως χρηματοπιστωτικό μέσο, με το Bitcoin να αποτελεί το πιο γνωστό παράδειγμα. Τα κρυπτονομίσματα είναι αποκεντρωμένα ψηφιακά περιουσιακά στοιχεία που χρησιμοποιούν την κρυπτογραφία για την ασφάλεια των συναλλαγών και τον έλεγχο της δημιουργίας νέων μονάδων. Λειτουργούν σε ένα δίκτυο blockchain, το οποίο είναι ένα κατακεντρωμένο βιβλίο που καταγράφει όλες τις συναλλαγές με ασφαλή και διαφανή τρόπο (Hazari, Shihab, and Qusay Mahmoud, 2019).

Ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη βιωσιμότητα των κρυπτονομισμάτων είναι το κόστος της ενέργειας. Η εξόρυξη κρυπτονομισμάτων, η οποία είναι η διαδικασία επαλήθευσης των συναλλαγών και η προσθήκη τους στην αλυσίδα μπλοκ, απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ, η οποία με τη σειρά της απαιτεί σημαντική ποσότητα ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας που συνδέεται με την εξόρυξη κρυπτονομισμάτων έχει αποτελέσει θέμα ανησυχίας, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικό αποτύπωμα άνθρακα και να συμβάλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη (Hazari, Shihab, and Qusay Mahmoud, 2019).

Τα τελευταία χρόνια, το κόστος της ενέργειας έχει γίνει ολοένα και πιο σημαντικός παράγοντας για τη βιωσιμότητα των κρυπτονομισμάτων, καθώς επηρεάζει άμεσα την κερδοφορία των επιχειρήσεων εξόρυξης. Αυτό μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ασφάλεια του δικτύου, καθώς ένας μικρότερος αριθμός εξορύξεων μπορεί να το καταστήσει πιο ευάλωτο σε επιθέσεις 51%, όπου μια ομάδα εξορύξεων μπορεί να ελέγξει το δίκτυο και να χειραγωγήσει τις συναλλαγές (Finansinspektionen, 2021).

Συμπερασματικά, το κόστος της ενέργειας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την ανάπτυξη και την εξέλιξη των κρυπτονομισμάτων, καθώς επηρεάζει άμεσα τη βιωσιμότητά τους. Καθώς τα κρυπτονομίσματα συνεχίζουν να κερδίζουν δημοτικότητα και υιοθέτηση, είναι σημαντικό να αντιμετωπιστεί η κατανάλωση ενέργειας που συνδέεται με την εξόρυξη και να βρεθούν τρόποι για τη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα. Πρόκειται για έναν σημαντικό τομέα έρευνας και ο αντίκτυπος του κόστους της ενέργειας στα

κρυπτονομίσματα είναι ένα σχετικό και επίκαιρο θέμα για περαιτέρω διερεύνηση (Finansinspektionen, 2021).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> – BLOCKCHAIN ΚΑΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

### 2.1 Τεχνολογία blockchain

Η τεχνολογία blockchain είναι ένα αποκεντρωμένο και κατακεντρωμένο ψηφιακό βιβλίο που καταγράφει τις συναλλαγές με ασφαλή, διαφανή και απαραβίαστο τρόπο. Παρουσιάστηκε για πρώτη φορά ως η υποκείμενη τεχνολογία πίσω από το κρυπτονομίσμα Bitcoin, το 2008, αλλά οι πιθανές εφαρμογές της υπερβαίνουν τα κρυπτονομίσματα (Nakamoto, 2008).

Ένα δίκτυο blockchain λειτουργεί σε ένα ομότιμο δίκτυο κόμβων, όπου κάθε κόμβος διαθέτει ένα αντίγραφο ολόκληρου του λογιστικού βιβλίου. Αυτό το καθιστά εξαιρετικά ασφαλές, καθώς δεν υπάρχει κεντρικό σημείο ελέγχου ή αποτυχίας και οι συναλλαγές μπορούν να προστεθούν στο βιβλίο μόνο μέσω συναίνεσης μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Οι συναλλαγές ομαδοποιούνται σε μπλοκ και κάθε μπλοκ συνδέεται με το προηγούμενο μπλοκ με τη χρήση κρυπτογραφικών αλγορίθμων, σχηματίζοντας μια αλυσίδα μπλοκ, εξ ου και η ονομασία blockchain. (Nakamoto, 2008).

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας blockchain είναι η ασφάλεια και το αμετάβλητο. Από τη στιγμή που μια συναλλαγή προστίθεται στο βιβλίο, δεν μπορεί να τροποποιηθεί ή να διαγραφεί χωρίς συναίνεση μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη για μεσάζοντες, όπως οι τράπεζες, για την επαλήθευση των συναλλαγών, μειώνοντας τον κίνδυνο απάτης και αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας συναλλαγών (Nakamoto, 2008).

Ένα άλλο πλεονέκτημα της τεχνολογίας blockchain είναι η διαφάνειά της. Οι συναλλαγές είναι δημόσια ορατές στο λογιστικό βιβλίο, επιτρέποντας μεγαλύτερη λογοδοσία και μειώνοντας τον κίνδυνο διαφθοράς. Αυτό την καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη σε κλάδους όπως η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, όπου η παρακολούθηση της κίνησης των αγαθών μπορεί να γίνει πιο αποτελεσματική και διαφανής (Buterin, 2014).

Η χρήση έξυπνων συμβάσεων είναι μια άλλη σημαντική πτυχή της τεχνολογίας blockchain. Τα έξυπνα συμβόλαια είναι αυτοεκτελούμενες συμβάσεις με τους όρους της συμφωνίας απευθείας γραμμένους στον κώδικα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας εκτέλεσης

συμβάσεων, μειώνοντας την ανάγκη για μεσάζοντες και αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας σύναψης συμβάσεων (Buterin, 2014).

Τα τελευταία χρόνια, έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον και οι επενδύσεις στην τεχνολογία blockchain και στις πιθανές εφαρμογές της πέρα από τα κρυπτονομίσματα. Κλάδοι όπως η χρηματοδότηση, η υγειονομική περίθαλψη, η κυβέρνηση και η κτηματομεσιτική βιομηχανία διερευνούν τη χρήση της τεχνολογίας blockchain για τη βελτίωση των διαδικασιών τους και τη μείωση του κόστους (Swan, 2015).

Για παράδειγμα, στα χρηματοοικονομικά, η τεχνολογία blockchain χρησιμοποιείται για τον εξορθολογισμό των διασυνοριακών πληρωμών και τη μείωση του χρόνου και του κόστους που σχετίζονται με τις παραδοσιακές μεθόδους πληρωμών. Στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, η τεχνολογία blockchain χρησιμοποιείται για την ασφαλή αποθήκευση και ανταλλαγή ιατρικών αρχείων, βελτιώνοντας το απόρρητο των ασθενών και μειώνοντας τον κίνδυνο ιατρικών σφαλμάτων (Swan, 2015).

Στην κυβέρνηση, η τεχνολογία blockchain χρησιμοποιείται για την αύξηση της διαφάνειας και της αποτελεσματικότητας στη διαδικασία ψηφοφορίας, και στην ακίνητη περιουσία, χρησιμοποιείται για τον εξορθολογισμό της διαδικασίας μεταβίβασης ακινήτων και τη μείωση του κινδύνου απάτης (Swan, 2015).

Παρά τα δυνητικά οφέλη της τεχνολογίας blockchain, υπάρχουν επίσης προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις είναι η επεκτασιμότητα, καθώς η τρέχουσα τεχνολογία είναι περιορισμένη ως προς την ικανότητά της να επεξεργάζεται μεγάλο αριθμό συναλλαγών ανά δευτερόλεπτο. Αυτό αποτελεί σημαντικό εμπόδιο για την ευρεία υιοθέτησή της και πρέπει να αντιμετωπιστεί προκειμένου η τεχνολογία blockchain να αξιοποιήσει πλήρως τις δυνατότητές της (Gardner, 2019).

Μια άλλη πρόκληση είναι η κανονιστική αβεβαιότητα, καθώς επί του παρόντος δεν υπάρχουν σαφείς και συνεπείς κανονισμοί για την τεχνολογία blockchain και τα κρυπτονομίσματα. Αυτό μπορεί να δυσχεράνει τη λειτουργία και τις επενδύσεις των επιχειρήσεων και των επενδυτών στην τεχνολογία αυτή και υπάρχει ανάγκη για τη θέσπιση σαφών και συνεπών κανονισμών για την υποστήριξη της ανάπτυξης και της εξέλιξής της (The word bank, 2019).

Συμπερασματικά, η τεχνολογία blockchain έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανιών, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα, την ασφάλεια και τη διαφάνεια. Παρά τις προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν, η ανάπτυξη και οι επενδύσεις στην τεχνολογία δείχνουν ότι ήρθε για να μείνει και έχει τη δυνατότητα να διαμορφώσει το μέλλον πολλών βιομηχανιών (The word bank, 2019).

## **2.2 Γενική αναφορά στο mining**

Οι αλγόριθμοι συναίνεσης είναι ένα κρίσιμο στοιχείο της τεχνολογίας blockchain, καθώς είναι υπεύθυνοι για τη διασφάλιση της ακεραιότητας και της ασφάλειας του λογιστικού βιβλίου διασφαλίζοντας ότι όλοι οι κόμβοι σε ένα δίκτυο blockchain καταλήγουν σε συμφωνία σχετικά με την τρέχουσα κατάσταση του ledger. Ο αλγόριθμος συναίνεσης είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό του τρόπου με τον οποίο προστίθενται οι συναλλαγές στο βιβλίο και του τρόπου με τον οποίο επιλύονται οι συγκρούσεις σε ένα αποκεντρωμένο δίκτυο.

Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τύποι αλγορίθμων συναίνεσης, ο καθένας με τα δικά του πλεονεκτήματα και αδυναμίες και ο καθένας κατάλληλος για διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης. Ορισμένοι από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους αλγόριθμους συναίνεσης περιλαμβάνουν τους αλγόριθμους Proof of Work (PoW), Proof of Stake (PoS).

## **2.3 Ο αλγόριθμος proof-of-work**

Το Proof of Work (PoW) είναι μια μορφή κρυπτογραφικής απόδειξης στην οποία ένα μέρος (ο prover) αποδεικνύει στους άλλους (τους επαληθευτές) ότι έχει δαπανηθεί ένα ορισμένο ποσό μιας συγκεκριμένης υπολογιστικής προσπάθειας. Οι επαληθευτές μπορούν στη συνέχεια να επιβεβαιώσουν αυτή τη δαπάνη με ελάχιστη προσπάθεια εκ μέρους τους. Η ιδέα επινοήθηκε από τους Moni Naor και Cynthia Dwork το 1993 ως τρόπο αποτροπής επιθέσεων άρνησης υπηρεσίας και άλλων καταχρήσεων υπηρεσιών, όπως ανεπιθύμητα μηνύματα σε ένα δίκτυο, απαιτώντας κάποια εργασία από έναν αιτούντα υπηρεσίας, που συνήθως σημαίνει χρόνο επεξεργασίας από έναν υπολογιστή. Ο

όρος "απόδειξη εργασίας" επινοήθηκε για πρώτη φορά και επισημοποιήθηκε σε μια εργασία του 1999 από τους Markus Jakobsson και Ari Juels (Jakobsson, Markus; Juels, Ari, 1999).

Η απόδειξη της δουλειάς διαδόθηκε αργότερα από το Bitcoin ως θεμέλιο συναίνεσης σε ένα αποκεντρωμένο δίκτυο χωρίς άδεια, στο οποίο οι εξορύκτες ανταγωνίζονται για την προσθήκη μπλοκ και την έκδοση νέου νομίσματος, με κάθε εξορύκτη να έχει μια πιθανότητα επιτυχίας ανάλογη με την υπολογιστική προσπάθεια που καταβάλλεται. Το PoW και το PoS (Proof of stake) παραμένουν οι δύο πιο γνωστοί μηχανισμοί αποτροπής Sybil. Στο πλαίσιο των κρυπτονομισμάτων είναι οι πιο συνηθισμένοι μηχανισμοί (Jakobsson, Markus; Juels, Ari, 1999).

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των σχημάτων απόδειξης εργασίας είναι η ασυμμετρία τους: η εργασία - ο υπολογισμός - πρέπει να είναι μετρίως σκληρή (αλλά εφικτός) από την πλευρά του προμηθευτή ή του αιτούντος, αλλά εύκολο να ελεγχθεί για τον επαληθευτή ή τον πάροχο υπηρεσιών. Αυτή η ιδέα είναι επίσης γνωστή ως συνάρτηση κόστους CPU, παζλ πελάτη, υπολογιστικό πάζλ ή συνάρτηση τιμολόγησης CPU. Ένα άλλο κοινό χαρακτηριστικό είναι οι ενσωματωμένες δομές κινήτρων που ανταμείβουν την κατανομή της υπολογιστικής χωρητικότητας στο δίκτυο με αξία με τη μορφή χρημάτων (Kharif, Olga, 2021).

Ο σκοπός των αλγορίθμων απόδειξης εργασίας δεν είναι να αποδείξουν ότι εκτελέστηκε κάποια εργασία ή ότι "λύθηκε" ένα υπολογιστικό πάζλ, αλλά να αποτρέψει τον χειρισμό δεδομένων με τη θέσπιση μεγάλων απαιτήσεων ενέργειας και ελέγχου υλικού για να μπορέσει να γίνει αυτό. Τα συστήματα απόδειξης εργασίας έχουν επικριθεί από περιβαλλοντολόγους για την κατανάλωση ενέργειας (Kharif, Olga, 2021).

Αν και το PoW εγγυάται την τελική συνέπεια στο blockchain, μπορεί να υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις όπου υπάρχουν ανταγωνιστικές διχάλες, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν το δίκτυο καθιστώντας το αργό, ακριβό και αναποτελεσματικό. Η διχάλα μπορεί να οδηγήσει σε πιο αργούς χρόνους διακανονισμού, καθιστώντας τη χρήση του PoW αναποτελεσματική σε ορισμένους τομείς χρηματοοικονομικών υπηρεσιών (για παράδειγμα, πληρωμές). Επί του παρόντος, το Bitcoin Blockchain μπορεί να επεξεργαστεί περίπου 7 συναλλαγές ανά δευτερόλεπτο και παρόλο που η ανάπτυξη του



Lightning Network προσφέρει πολλά υποσχόμενα σε αυτόν τον τομέα (αν και με τα δικά του ελαττώματα), το ποσοστό συναλλαγών του είναι επί του παρόντος πολύ χαμηλότερο από αυτό των παραδοσιακών μηχανισμών πληρωμής όπως η Visa— που αντιστοιχεί κατά μέσο όρο σε περίπου 1.700 συναλλαγές ανά δευτερόλεπτο (Kharif, Olga, 2021).

Οι ασυνέπειες μπορούν επίσης να οδηγήσουν σε κινδύνους για την οριστικότητα του διακανονισμού. Οι συναλλαγές μεταξύ αντισυμβαλλομένων ενέχουν κινδύνους- συμπεριλαμβανομένων πιστωτικών, ρευστότητας, λειτουργικών και νομικών κινδύνων-οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν συστημικούς κινδύνους. Οι κανόνες σχετικά με την οριστικότητα του διακανονισμού στοχεύουν στον μετριασμό αυτών των κινδύνων. Ωστόσο, η πιθανότητα διχάλων σε μια αλυσίδα μπλοκ καθιστά δύσκολη την επίτευξη οριστικού διακανονισμού. Αυτός ο πιθανός διακανονισμός δημιουργεί προκλήσεις σχετικά με τη διασφάλιση της προσαρμογής των blockchains που βασίζονται σε PoW σε ευρύτερους κανονισμούς διακανονισμού, καθώς και του αντίκτυπου που έχει αυτό σε τομείς όπως η φύλαξη. Το προτεινόμενο Sandbox DLT της Ευρωπαϊκής Ένωσης στοχεύει να εντοπίσει —μεταξύ άλλων— πού τέτοια νομικά ζητήματα θα μπορούσαν να επηρεάσουν τα υπάρχοντα ρυθμιστικά πλαίσια. Επιπλέον, το PoW φαίνεται ότι είναι δυνητικά συγκεντρωτικό, γεγονός που θα μπορούσε να αναιρέσει την ασφάλεια που προσφέρει το PoW. Καθώς τα μαθηματικά πάζλ γίνονται όλο και πιο περίπλοκα, απαιτείται πιο ισχυρή υπολογιστική ισχύς για την επίλυσή τους. Δεδομένου του μεγάλου κόστους που συνεπάγεται, μια τέτοια τεχνολογία είναι διαθέσιμη μόνο σε ορισμένα άτομα ή οντότητες ή όπου δημιουργούνται δεξαμενές εξόρυξης. Αυτό το σενάριο μπορεί να εγείρει ερωτήματα σχετικά με τις εξουσίες, τα εργαλεία και τις επιλογές που διαθέτει η ρυθμιστική αρχή για να διορθώσει μια ενδεχόμενη αποτυχία της αγοράς (για παράδειγμα, ένα άτομο που, ή μια οντότητα, γίνεται «πολύ μεγάλο για να αποτύχει») (Kharif, Olga, 2021).

## 2.4 Ο αλγόριθμος Proof-of-Stake

Τα πρωτόκολλα Proof-of-Stake (PoS) είναι μια κατηγορία μηχανισμών συναίνεσης για blockchains που λειτουργούν επιλέγοντας επικυρωτές ανάλογα με την ποσότητα των διαθέσιμων τους στο σχετικό κρυπτονόμισμα. Αυτό γίνεται για να αποφευχθεί το υπολογιστικό κόστος των σχημάτων απόδειξης εργασίας. Η πρώτη λειτουργική χρήση του PoS για κρυπτονομίσματα ήταν το Peercoin το 2012 (Deirmentzoglou, et, al, 2019).

Για να αναγνωριστεί μια συναλλαγή blockchain, πρέπει να προσαρτηθεί στο blockchain. Στο proof-of-stake blockchain οι προσαρτώμενες οντότητες ονομάζονται minters ή validators (στην απόδειξη των blockchain εργασίας αυτή η εργασία εκτελείται από τους miners) στα περισσότερα πρωτόκολλα, οι επικυρωτές λαμβάνουν ανταμοιβή για αυτό. Για να παραμείνει ασφαλές το blockchain, πρέπει να έχει έναν μηχανισμό που να εμποδίζει έναν κακόβουλο χρήστη ή ομάδα να αναλάβει την πλειοψηφία της επικύρωσης. Το PoS το επιτυγχάνει αυτό απαιτώντας από τους επικυρωτές να έχουν κάποια ποσότητα διακριτικών blockchain, απαιτώντας από τους πιθανούς εισβολείς να αποκτήσουν ένα μεγάλο κλάσμα των διακριτικών στο blockchain για να πραγματοποιήσουν μια επίθεση (Deirmentzoglou, et, al, 2019).

Το Proof of Work (PoW), ένας άλλος ευρέως χρησιμοποιούμενος μηχανισμός συναίνεσης, χρησιμοποιεί μια επικύρωση υπολογιστικής ικανότητας για την επαλήθευση των συναλλαγών, απαιτώντας από έναν πιθανό εισβολέα να αποκτήσει ένα μεγάλο κλάσμα της υπολογιστικής ισχύος του δικτύου επικύρωσης. Αυτό δίνει κίνητρα για την κατανάλωση τεράστιων ποσοτήτων ενέργειας. Το PoS είναι πιο ενεργειακά αποδοτικό (Deirmentzoglou, et, al, 2019).

Οι πρώτες υλοποιήσεις PoS μαστίζονταν από μια σειρά από νέες επιθέσεις που εκμεταλλεύονταν τα μοναδικά τρωτά σημεία των πρωτοκόλλων PoS. Τελικά προέκυψαν δύο κυρίαρχα σχέδια: οι λεγόμενες προσεγγίσεις Βυζαντινής ανοχής σφαλμάτων και προσεγγίσεις που βασίζονται σε αλυσίδες (Deirmentzoglou, et, al, 2019).

Οι πρόσθετες ευπάθειες των σχημάτων PoS σχετίζονται άμεσα με το πλεονέκτημά τους, έναν σχετικά χαμηλό αριθμό υπολογισμών που πρέπει να εκτελούνται κατά την κατασκευή μιας αλυσίδας μπλοκ (Deirmentzoglou, et, al, 2019).

Η μικρή ποσότητα υπολογιστικής ισχύος που εμπλέκεται επιτρέπει μια κατηγορία επιθέσεων που αντικαθιστούν ένα μη αμελητέο τμήμα του κύριου blockchain με μια έκδοση που έχει παραβιαστεί. Αυτές οι επιθέσεις ονομάζονται στη λογοτεχνία με διαφορετικά ονόματα, Long-Range, Alternative History, Alternate History, History Revision, και δεν είναι εφικτές στα σχήματα PoW λόγω του τεράστιου όγκου των υπολογισμών που απαιτούνται. Τα πρώτα στάδια ενός blockchain είναι πολύ πιο εύπλαστα για επανεγγραφή, καθώς πιθανότατα έχουν πολύ μικρότερη ομάδα ενδιαφερομένων, απλοποιώντας τη συμπαιγνία. Εάν προσφέρονται οι ανταμοιβές ανά μπλοκ και ανά συναλλαγή, η κακόβουλη ομάδα μπορεί, για παράδειγμα, να επαναλάβει ολόκληρο το ιστορικό και να συγκεντρώσει αυτές τις ανταμοιβές (Xiao et al. 2020).

Δεδομένου ότι οι επικυρωτές δεν χρειάζεται να ξοδέψουν σημαντικό ποσό υπολογιστικής ισχύος (και επομένως χρήματα) στη διαδικασία, είναι επιρρεπείς στην επίθεση Nothing-at-Stake: η συμμετοχή σε μια επιτυχημένη επικύρωση αυξάνει τα κέρδη του επικυρωτή, επομένως υπάρχει μια ενσωματωμένη - ως κίνητρο για τους επικυρωτές να αποδεχτούν όλα τα πιρούνια αλυσίδας που τους υποβλήθηκαν, αυξάνοντας έτσι τις πιθανότητες να κερδίσουν το τέλος επικύρωσης. Τα συστήματα PoS επιτρέπουν τη δημιουργία εναλλακτικών λύσεων blockchain με χαμηλό κόστος ξεκινώντας από οποιοδήποτε σημείο της ιστορίας (προσομοίωση χωρίς κόστος), η υποβολή αυτών των πιρουνιών σε πρόθυμους επικυρωτές θέτει σε κίνδυνο τη σταθερότητα του συστήματος. Εάν αυτή η κατάσταση επιμείνει, μπορεί να επιτρέψει διπλή δαπάνη, όπου ένα ψηφιακό διακριτικό μπορεί να δαπανηθεί περισσότερες από μία φορές. Αυτό μπορεί να μετριαστεί μέσω της τιμωρίας των επικυρωτών που επικυρώνουν αντικρουόμενες αλυσίδες ή με τη διάρθρωση των ανταμοιβών έτσι ώστε να μην υπάρχει οικονομικό κίνητρο για τη δημιουργία συγκρούσεων. Τα PoS που βασίζονται στο Byzantine Fault Tolerance θεωρούνται γενικά ισχυρά έναντι αυτής της απειλής (Xiao et al. 2020).

Η επίθεση δωροδοκίας, όπου οι επιτιθέμενοι παρακινούν οικονομικά ορισμένους επικυρωτές να εγκρίνουν το fork του blockchain τους, ενισχύεται στο PoS, καθώς η επανεγγραφή μεγάλου τμήματος της ιστορίας θα μπορούσε να επιτρέψει τη συμπαιγνία κάποτε πλούσιων ενδιαφερομένων που δεν διακυβεύονται πλέον σημαντικά ποσά για να διεκδικήσουν μία απαραίτητη

πλειοψηφία κάποια στιγμή πίσω στο χρόνο αναπτύσσοντας την εναλλακτική αλυσίδα μπλοκ από εκεί, μια λειτουργία που έγινε δυνατή από το χαμηλό υπολογιστικό κόστος της προσθήκης μπλοκ στο σχήμα PoS (Xiao et al. 2020).

## 2.5 Ο αλγόριθμος Proof-of-Authority

Στα δίκτυα που βασίζονται σε PoA, οι συναλλαγές και τα μπλοκ επικυρώνονται από εγκεκριμένους λογαριασμούς, γνωστούς ως επικυρωτές. Οι επικυρωτές τρέχουν λογισμικό που τους επιτρέπει να τοποθετούν συναλλαγές σε μπλοκ. Η διαδικασία είναι αυτοματοποιημένη και δεν απαιτεί από τους επικυρωτές να παρακολουθούν συνεχώς τους υπολογιστές τους. Ωστόσο, απαιτεί τη διατήρηση του υπολογιστή (τον κόμβο αρχής) χωρίς συμβιβασμούς. Ο όρος επινοήθηκε από τον Gavin Wood, συνιδρυτήτων Ethereum and Parity Technologies (Hasan, 2020).

Με την PoA, τα άτομα κερδίζουν το δικαίωμα να γίνουν επικυρωτές, επομένως υπάρχει ένα κίνητρο να διατηρήσουν τη θέση που έχουν κερδίσει. Με την προσάρτηση μιας φήμης στην ταυτότητα, οι επικυρωτές κινητοποιούνται να υποστηρίξουν τη διαδικασία συναλλαγής, καθώς δεν επιθυμούν την ταυτότητά τους να συνδέεται με μια αρνητική φήμη. Αυτό θεωρείται πιο ισχυρό από το PoS (απόδειξη στοιχήματος) - PoS, ενώ ένα ποντάρισμα μεταξύ δύο μερών μπορεί να είναι ίσο, δεν λαμβάνει υπόψη τις συνολικές συμμετοχές κάθε μέρους. Αυτό σημαίνει ότι τα κίνητρα μπορεί να είναι μη ισορροπημένα. Από την άλλη πλευρά, το PoA επιτρέπει μόνο μη διαδοχική έγκριση μπλοκ από οποιονδήποτε επικυρωτή, πράγμα που σημαίνει ότι ο κίνδυνος σοβαρής ζημιάς συγκεντρώνεται στον κόμβο αρχής. Το PoA είναι κατάλληλο τόσο για ιδιωτικά δίκτυα όσο και για δημόσια δίκτυα, όπως το POA Network ή το Eurus, όπου διανέμεται εμπιστοσύνη (Gavin, 2015).

Ο αλγόριθμος συναίνεσης PoA αξιοποιεί την αξία των ταυτοτήτων, πράγμα που σημαίνει ότι οι επικυρωτές μπλοκ δεν ποντάρουν νομίσματα αλλά τη δική τους φήμη. Επομένως, οι αλυσίδες μπλοκ PoA διασφαλίζονται από τους κόμβους επικύρωσης που επιλέγονται αυθαίρετα ως αξιόπιστες οντότητες (Gavin, 2015).

Το μοντέλο Απόδειξης Αυθεντίας βασίζεται σε περιορισμένο αριθμό επικυρωτών μπλοκ και αυτό είναι που το καθιστά ένα εξαιρετικά επεκτάσιμο

σύστημα. Τα μπλοκ και οι συναλλαγές επαληθεύονται από προεγκεκριμένους συμμετέχοντες, οι οποίοι ενεργούν ως συντονιστές του συστήματος (Gavin, 2015).

Ο αλγόριθμος συναίνεσης PoA μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα σενάρια και θεωρείται επιλογή υψηλής αξίας για εφαρμογές υλικοτεχνικής υποστήριξης. Όταν πρόκειται για αλυσίδες εφοδιασμού, για παράδειγμα, η PoA θεωρείται μια αποτελεσματική και λογική λύση (Gavin, 2015).

Το μοντέλο Απόδειξης Αυθεντίας επιτρέπει στις εταιρείες να διατηρούν το απόρρητό τους ενώ επωφελούνται από τα οφέλη της τεχνολογίας blockchain. Το Microsoft Azure είναι ένα άλλο παράδειγμα όπου εφαρμόζεται το PoA. Με λίγα λόγια, η πλατφόρμα Azure παρέχει λύσεις για ιδιωτικά δίκτυα, με ένα σύστημα που δεν απαιτεί ένα εγγενές νόμισμα όπως το αιθερικό «αέριο», αφού δεν υπάρχει ανάγκη εξόρυξης (Gavin, 2015).

## 2.6 Σύγκριση

Το PoS εξαρτάται από το οικονομικό μερίδιο ενός επικυρωτή στο δίκτυο. Είναι πλαισιωμένο ως πιο φιλικό προς το περιβάλλον επειδή δεν εξαρτάται από μια εξωτερική ενεργοβόρα διαδικασία όπως το PoW. Δεν υπάρχει ανταμοιβή αποκλεισμού στο PoS. Για να πραγματοποιήσετε μια επίθεση 51%, θα χρειαστεί να ελέγξετε το 51% του συνολικού πονταρίσματος. Στην απόδειξη εργασίας, θα χρειαστείτε περισσότερο από το 51% της συνολικής ισχύος κατακερματισμού. Το Proof of Authority είναι μια παραλλαγή του μηχανισμού συναίνεσης Proof of Stake όπου αντί για διακριτικά, οι συμμετέχοντες στο δίκτυο διακυβεύουν την ταυτότητα και τη φήμη τους (Derler, et, al, 2015).

Μαζί με τον τρόπο επικύρωσης των συναλλαγών των εξορυκτών, υπάρχουν δύο άλλες σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο μεθόδων -- κατανάλωση ενέργειας και κίνδυνος επίθεσης (Derler, et, al, 2015).

Μία από τις μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ απόδειξης συμμετοχής και απόδειξης εργασίας είναι η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται. Ένα μεγάλο παράπονο από τους επικριτές των κρυπτονομισμάτων είναι η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Η απόδειξη εργασίας καταναλώνει πολύ περισσότερη ενέργεια λόγω του μοντέλου ελέγχου ταυτότητας που χρησιμοποιεί υπολογιστές υψηλής ισχύος (Derler, et, al, 2015).

Για παράδειγμα, το Πανεπιστήμιο του Κέμπριτζ εκτιμά ότι το Bitcoin - το οποίο χρησιμοποιεί απόδειξη εργασίας για εξόρυξη - καταναλώνει περίπου το 0,39% της ετήσιας ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο. Η εξόρυξη Bitcoin χρησιμοποιεί περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια ετησίως από τις χώρες της Φινλανδίας και του Βελγίου (Derler, et, al, 2015).

Το δίκτυο Ethereum βρίσκεται στη διαδικασία μετάβασης στην απόδειξη πονταρίσματος. Το δίκτυο Ethereum εκτιμά ότι αυτός ο διακόπτης θα χρησιμοποιεί περίπου 99,95% λιγότερη ενέργεια. Η κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντικά μικρότερη, επειδή η απόδειξη πονταρίσματος επιλέγει τυχαία επικυρωτές αντί οι εξορύκτες να ολοκληρώνουν πολύπλοκα παζλ. Οι χρόνοι συναλλαγών είναι επίσης πιο γρήγοροι, γεγονός που καταναλώνει λιγότερη ενέργεια (Derler, et, al, 2015).

Με την απόδειξη εργασίας, οι εξορύκτες πρέπει να συναγωνίζονται για να ολοκληρώσουν τις εξισώσεις. Μόλις ένας εξορύκτης λάβει το blockchain, το σύστημα βασίζεται σε αυτούς τους εξορύκτες για να ακολουθήσουν τους

κανόνες και να είναι αξιόπιστος. Ωστόσο, εάν μια ομάδα εξορυκτών αποκτήσει έλεγχο άνω του 50%, μπορούν να αποτρέψουν την επιβεβαίωση των συναλλαγών και μπορούν επίσης να ξοδέψουν κέρματα δύο φορές -- απάτη γνωστή ως διπλή δαπάνη (Derler, et, al, 2015).

Η απόδειξη πονταρίσματος διαφέρει επειδή επιτρέπει στους εξορύκτες να επικυρώνουν μπλοκ μόνο εάν έχουν κατάθεση ασφαλείας ή "ποντάρισμα". Εάν οι επιτιθέμενοι επιχειρήσουν ανέντιμες διαδικασίες, χάνουν το μερίδιο τους. Δεν υπάρχει πραγματικό όφελος για τους εισβολείς κρυπτονομισμάτων να διαταράξουν το blockchain επειδή δεν μπορούν να δαπανήσουν διπλά νομίσματα ή να κλέψουν νομίσματα χωρίς να χάσουν την επένδυσή τους (Derler, et, al, 2015).

Η αντίληψη του μηχανισμού PoA είναι ότι παραιτείται από την αποκέντρωση. Θα μπορούσε λοιπόν κανείς να πει ότι αυτό το μοντέλο αλγορίθμου συναίνεσης είναι απλώς μια προσπάθεια να γίνουν τα κεντρικά συστήματα πιο αποτελεσματικά. Αν και αυτό καθιστά το PoA ελκυστική λύση για μεγάλες εταιρείες με υλικοτεχνικές ανάγκες, όντως φέρνει κάποιο δισταγμό - ειδικά στο πεδίο εφαρμογής των κρυπτονομισμάτων. Τα συστήματα PoA έχουν υψηλή απόδοση, αλλά οι πτυχές της αμετάβλητης τίθενται υπό αμφισβήτηση όταν πράγματα όπως η λογοκρισία και η μαύρη λίστα μπορούν να επιτευχθούν εύκολα (Schwarz, et, al, 2021).

Μια άλλη κοινή κριτική είναι ότι οι ταυτότητες των επικυρωτών PoA είναι ορατές σε οποιονδήποτε. Το επιχείρημα εναντίον αυτού είναι ότι μόνο καθιερωμένοι παίκτες που μπορούν να κατέχουν αυτή τη θέση θα επιδιώκουν να γίνουν επικυρωτές (ως δημοσίως γνωστός συμμετέχων). Ωστόσο, η γνώση της ταυτότητας των επικυρωτών θα μπορούσε ενδεχομένως να οδηγήσει σε χειραγώγηση τρίτων. Για παράδειγμα, εάν ένας ανταγωνιστής θέλει να διακόψει ένα δίκτυο που βασίζεται σε PoA, μπορεί να προσπαθήσει να επηρεάσει γνωστούς δημόσιους επικυρωτές να ενεργήσουν ανέντιμα προκειμένου να διακυβεύσει το σύστημα εκ των έσω (Schwarz, et, al, 2021).

Το PoW, το PoS ή το PoA έχουν όλα τα δικά τους μοναδικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Είναι γνωστό ότι η αποκέντρωση εκτιμάται ιδιαίτερα στην κοινότητα των κρυπτονομισμάτων και η PoA, ως μηχανισμός συναίνεσης, θυσιάζει την αποκέντρωση προκειμένου να επιτύχει υψηλή απόδοση και επεκτασιμότητα. Τα εγγενή χαρακτηριστικά των συστημάτων PoA είναι μια

έντονη αντίθεση με το πώς λειτουργούσαν μέχρι τώρα τα blockchain. Ωστόσο, το PoA παρουσιάζει μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση και δεν μπορεί να αγνοηθεί ως μια αναδυόμενη λύση blockchain, η οποία μπορεί να ταιριάζει καλά για ιδιωτικές εφαρμογές blockchain (Schwarz, et, al, 2021).



## 2.7 Διαφορές των αλγορίθμων σχετικά με τις ανάγκες ηλεκτρικού ρεύματος

Οι διαφορετικοί αλγόριθμοι συναίνεσης στα κρυπτονομίσματα μπορεί να έχουν διαφορετικές επιπτώσεις στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Ορισμένοι αλγόριθμοι είναι πιο ενεργοβόροι από άλλους και η κατανάλωσή τους μπορεί να έχει σημαντικές περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις (Nayak, et, al, 2016).

Ο αλγόριθμος απόδειξης εργασίας (PoW) είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος συναίνεσης στα κρυπτονομίσματα και είναι επίσης ο πιο ενεργοβόρος. Σε ένα σύστημα PoW, οι εξορύκτες ανταγωνίζονται για την επίλυση πολύπλοκων μαθηματικών προβλημάτων προκειμένου να προσθέσουν μπλοκ στην αλυσίδα μπλοκ. Αυτή η διαδικασία απαιτεί μεγάλες ποσότητες υπολογιστικής ισχύος, η οποία με τη σειρά της απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας (King&Nadal, 2013).

Το σύστημα απόδειξης συμμετοχής (Proof of Stake - PoS) είναι μια πιο ενεργειακά αποδοτική εναλλακτική λύση στο PoW. Σε ένα σύστημα PoS, αντί για την επίλυση πολύπλοκων μαθηματικών προβλημάτων, οι κόμβοι επιλέγονται για την επικύρωση συναλλαγών με βάση το ποσό του κρυπτονομίσματος που κατέχουν και είναι πρόθυμοι να "ποντάρουν" ως εγγύηση. Αυτή η διαδικασία απαιτεί πολύ λιγότερη ενέργεια από το PoW και θεωρείται ως μια πιο φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση (King&Nadal, 2013).

Η Delegated Proof of Stake (DPoS) είναι μια άλλη εναλλακτική λύση για την PoW που στοχεύει στην εξισορρόπηση της ενεργειακής απόδοσης με την αποκέντρωση. Σε ένα σύστημα DPoS, οι κόμβοι εκλέγονται για να επικυρώνουν συναλλαγές και η ισχύς τους είναι ανάλογη με τον αριθμό των ψήφων που λαμβάνουν από άλλους χρήστες. Αυτό το σύστημα είναι λιγότερο ενεργοβόρο από το PoW, αλλά είναι επίσης λιγότερο αποκεντρωμένο από το PoS (Sompolinsky & Zohar, 2015).

Τέλος, υπάρχουν επίσης υβριδικοί αλγόριθμοι συναίνεσης που στοχεύουν στην εξισορρόπηση της ενεργειακής απόδοσης με την αποκέντρωση, όπως η απόδειξη δραστηριότητας (PoA) και η απόδειξη χωρητικότητας (PoC). Αυτοί οι αλγόριθμοι συνδυάζουν στοιχεία των PoW και PoS για να δημιουργήσουν

ένα σύστημα συναίνεσης που είναι και ενεργειακά αποδοτικό και αποκεντρωμένο (Sompolinsky & Zohar, 2015).

Συμπερασματικά, οι διαφορετικοί αλγόριθμοι συναίνεσης στα κρυπτονομίσματα μπορούν να έχουν διαφορετικές επιπτώσεις στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Ενώ ο PoW είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος αλγόριθμος συναίνεσης, είναι επίσης ο πιο ενεργοβόρος. Εναλλακτικοί αλγόριθμοι όπως οι PoS, DPoS, PoA και PoC στοχεύουν στην εξισορρόπηση της ενεργειακής απόδοσης με την αποκέντρωση, αλλά η αποτελεσματικότητα και ο αντίκτυπός τους στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ποικίλλουν (Nayak, et, al, 2016).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> – ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΚΡΥΠΤΟΝΟΜΙΣΜΑΤΑ

### 3.1 Χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από τη δραστηριότητα κρυπτογραφικών περιουσιακών στοιχείων

Ενώ έχουν εκδοθεί χιλιάδες κρυπτογραφικά περιουσιακά στοιχεία παγκοσμίως, δημοσιευμένες μελέτες έχουν επικεντρωθεί σε σχετικά λίγα κρυπτοστοιχεία υψηλής αξίας στην αγορά. Η πλειονότητα των δημοσιευμένων εκτιμήσεων για τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας κρυπτογραφικών στοιχείων έχει επικεντρωθεί στο Bitcoin, το οποίο εκτιμάται ότι καταναλώνει την περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από οποιοδήποτε άλλο κρυπτοστοιχείο, λόγω της υψηλής αγοραίας αξίας, της δημοτικότητάς του μεταξύ επενδυτών και εξορυκτών και του ενεργοβόρου μηχανισμού συναίνεσης PoW. Οι ερευνητές έχουν επίσης υπολογίσει τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για άλλα υψηλής αγοραίας αξίας PoW και PoS κρυπτο-περιουσιακά στοιχεία. Η συνολική χρήση ενέργειας των σημερινών δικτύων κρυπτονομισμάτων δεν μπορεί να παρακολουθηθεί άμεσα, επειδή πολλά κέντρα υπολογιστών ή εξόρυξης δεν αποκαλύπτουν την τοποθεσία τους και δεν αναφέρουν τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να εκτιμηθεί αναλυτικά. Όπως όλες οι χρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας, η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από κρυπτοστοιχεία μετράται σε κιλοβατώρες (kWh): η χρήση ενός κιλοβάτ (kW) ισχύος για μία ώρα. Το μέσο σπίτι των ΗΠΑ χρησιμοποιεί 10.715 kWh ετησίως ή περίπου 900 kWh το μήνα (Uhler, 2022).

Για αναφορά, όλος ο οικιακός φωτισμός των ΗΠΑ καταναλώνει περίπου 59 δισεκατομμύρια kWh ετησίως και η συνολική ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ το 2021 ήταν 3.930 δισεκατομμύρια kWh. Η εκτιμώμενη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για blockchains που υποστηρίζουν κρυπτογραφικά περιουσιακά στοιχεία το 2022 emπίπτει σε ένα εύρος από 120 έως 240 δισεκατομμύρια kWh ετησίως. Αυτό ισοδυναμεί με 0,4% έως 0,9% της ετήσιας παγκόσμιας χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το εύρος είναι συγκρίσιμο με την ετήσια χρήση ηλεκτρικής ενέργειας όλων των συμβατικών κέντρων δεδομένων (δηλαδή, μη κρυπτοστοιχείων) στον κόσμο, τα οποία κατανάλωναν μεταξύ 200 και 250 δισεκατομμύρια kWh. Ωστόσο, η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας των κρυπτονομικών στοιχείων μπορεί να αλλάξει γρήγορα καθώς οι

εξορύκτες αυξάνουν ή μειώνουν τις δραστηριότητές τους ως απάντηση στις διακυμάνσεις της αγοραίας αξίας και καθώς υιοθετούν νέο εξοπλισμό. Ως αποτέλεσμα, μέχρι στιγμής το 2022, το εκτιμώμενο εύρος της παγκόσμιας χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας κρυπτοστοιχείων έχει πέσει από 105 έως 178 και αυξήθηκε από 176 έως και 305 δισεκατομμύρια kWh ετησίως (Uhler, 2022).

Από τον Αύγουστο του 2022, δύο blockchains PoW αντιπροσωπεύουν τη συντριπτική πλειονότητα της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας: το Bitcoin εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 60% έως το 77% και το Ethereum εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει 20% έως 39% της συνολικής παγκόσμιας χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας κρυπτονομισμάτων. Η ετήσια παγκόσμια χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από το blockchain Bitcoin εκτιμάται ότι είναι 90 έως 145 δισεκατομμύρια kWh, με θεωρητικό εύρος από 40 έως 180 δισεκατομμύρια kWh. Η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας blockchain Ethereum εκτιμάται ότι είναι 23 έως 94 δισεκατομμύρια kWh, με ένα κατώτερο όριο 16 δισεκατομμυρίων kWh. Η παγκόσμια χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για τα αναλυμένα κρυπτο-περιουσιακά στοιχεία PoS έχει εκτιμηθεί σε λιγότερο από 0,28 δισεκατομμύρια kWh ετησίως, που είναι λιγότερο από το 0,001% της παγκόσμιας χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας και περίπου το 0,25% του κατώτερου ορίου της συνολικής παγκόσμιας χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας PoW. Δεδομένων των εκτιμήσεων χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, οι περισσότερες συζητήσεις σχετικά με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας κρυπτονομικών περιουσιακών στοιχείων έχουν επικεντρωθεί σε εφαρμογές PoW, ιδιαίτερα στο Bitcoin. Υπήρξαν αυξανόμενες εκκλήσεις για τα blockchains PoW να υιοθετήσουν λιγότερο ενεργοβόρους μηχανισμούς συναίνεσης. Η πιο σημαντική αντίδραση ήταν η υπόσχεση του Ethereum για την κυκλοφορία του blockchain PoS "Ethereum 2.0"(de Vries and Stoll, 2021).

Οι Ηνωμένες Πολιτείες φιλοξενούν αυτήν τη στιγμή τη μεγαλύτερη βιομηχανία εξόρυξης Bitcoin στον κόσμο, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 38% του παγκόσμιου κατακερματισμού δικτύου Bitcoin, από τον Αύγουστο του 2022. Το hashrate είναι η συνολική υπολογιστική ισχύς που χρησιμοποιείται κάθε δευτερόλεπτο για την εξόρυξη και την επεξεργασία αλυσίδων μπλοκ PoW. Καθώς ο αριθμός των εξορυκτών σε μια αλυσίδα μπλοκ PoW αυξάνεται, γίνεται πιο δύσκολη η επίλυση του κρυπτογραφικού μαθηματικού προβλήματος, αυξάνοντας τελικά το hashrate. Υποθέτοντας ότι η χρήση

ηλεκτρικής ενέργειας Bitcoin είναι ανάλογη με το hashrate, το μερίδιο των Ηνωμένων Πολιτειών της παγκόσμιας εκτιμώμενης χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας Bitcoin, από τις 15 Αυγούστου 2022, θα έπεφτε σε ένα εύρος από 33 έως 55 δισεκατομμύρια kWh ετησίως, ή 0,9% έως 1,4% του συνολική χρήση ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ το 2021. Όταν ληφθεί επίσης υπόψη το μερίδιο των ΗΠΑ στην παγκόσμια εξόρυξη Ethereum, η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από εξόρυξη PoW στις ΗΠΑ αυξάνεται σε 36 έως 66 δισεκατομμύρια kWh ετησίως, ή 0,9% έως 1,7% της συνολικής ετήσιας χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ. Αυτό καθιστά τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας εξόρυξης PoW των ΗΠΑ συγκρίσιμη με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας όλων των συμβατικών κέντρων δεδομένων των ΗΠΑ (δηλαδή, μη κρυπτογραφικών στοιχείων), η οποία εκτιμήθηκε πιο πρόσφατα σε 72 δισεκατομμύρια kWh ετησίως. Δεδομένων των διαφορών στις μεθοδολογίες και των ημερομηνιών στις οποίες ισχύουν οι υπάρχουσες εκτιμήσεις χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας, οι εκτιμήσεις ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να ερμηνεύονται με προσοχή. Η εκτιμώμενη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας του blockchain του Bitcoin αυξήθηκε σταθερά καθώς η αγοραία αξία του Bitcoin και οι κατακερματισμοί δικτύου αυξήθηκαν - συνθήκες που μπορεί να προκύψουν για άλλες αλυσίδες μπλοκ PoW που υποστηρίζουν κρυπτογραφικά περιουσιακά στοιχεία. Επιπλέον, οι διαφορές μεταξύ των εκτιμήσεων ανώτερου και κατώτερου ορίου έχουν αυξηθεί με την πάροδο του χρόνου, αντανακλώντας τις αβεβαιότητες σχετικά με τους τύπους εξόρυξης που μπορεί να αναπτυχθούν επικερδώς όταν τα κρυπτογραφικά στοιχεία έχουν υψηλότερες αγοραίες αξίες. Ενώ οι μεγάλες σειρές μπορούν να δώσουν στους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής ενδείξεις για το πόσο μεγάλη θα μπορούσε να είναι η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας PoW, προτείνουν επίσης την ανάγκη για τους εξορύκτες να αναφέρουν την πραγματική τους χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για να μειώσουν τις αβεβαιότητες. Επίσης, για μελέτες χρονολογικών σειρών, μπορεί να υπάρχει διακύμανση στην εκτιμώμενη καθημερινή χρήση ενέργειας, λόγω διακυμάνσεων της αγοραίας αξίας κρυπτονομισμάτων. Η δυναμική της αγοράς μπορεί γρήγορα να καταστήσει μη ενημερωμένη οποιαδήποτε δημοσιευμένη εκτίμηση (de Vries and Stoll, 2021).

### 3.2 Σύγκριση με άλλες χρηματοοικονομικές συναλλαγές

Τα κρυπτογραφικά περιουσιακά στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επενδυτικούς ή κερδοσκοπικούς σκοπούς, ως μέσο πληρωμής ή ως αποθήκευση πλούτου. Ενώ μια συναλλαγή με πιστωτική κάρτα αντιπροσωπεύει μόνο μία πληρωμή μεταξύ των μερών, πολλές συναλλαγές Bitcoin μπορούν να ομαδοποιηθούν σε μία συναλλαγή "on-chain", η οποία μπορεί να συνδυάσει διαφορετικούς τύπους οικονομικών δραστηριοτήτων σε μια ενιαία αναρτημένη συναλλαγή blockchain. Για παράδειγμα, όταν κάποιος αγοράζει ή πουλάει Bitcoin ή αγοράζει έναν καφέ με Bitcoin, το καθένα καταγράφεται ως μεταφορά Bitcoin από τη μια διεύθυνση στην άλλη και μια εγγραφή αυτής της μεταφοράς προστίθεται στο επόμενο μπλοκ μαζί με άλλες συναλλαγές. Ένα μπλοκ στο blockchain του Bitcoin περιέχει συνήθως 1.000-2.000 συναλλαγές, με το ποσό των συναλλαγών ανά μπλοκ να αλλάζει καθημερινά. Ο μέσος χρόνος για την επίλυση του μαθηματικού προβλήματος του PoW και την εγγραφή ενός μπλοκ Bitcoin στο καθολικό είναι περίπου 10 λεπτά, επομένως 52.560 μπλοκ προστίθεται στο blockchain Bitcoin ανά έτος (Blockchain, 2022).

Η τρέχουσα παγκόσμια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του Bitcoin είναι από 90 έως 140 δισεκατομμύρια kWh ετησίως. Αυτό απαιτεί περίπου 1,7 έως 2,7 εκατομμύρια kWh ανά μπλοκ, το οποίο μπορεί να διαιρεθεί περαιτέρω για την εκτίμηση kWh ανά συναλλαγή on chain. Αυτή είναι μόνο μια κατά προσέγγιση εκτίμηση. Με το Bitcoin, όπως και με άλλες συναλλαγές κρυπτονομικών περιουσιακών στοιχείων, οι κεντρικές πλατφόρμες συναλλαγών κρυπτονομισμάτων χρησιμοποιούν συνήθως συναλλαγές εκτός αλυσίδας και χρησιμοποιούν συναλλαγές εντός της αλυσίδας για συγκεκριμένη δραστηριότητα, για παράδειγμα, όταν στέλνουν κρυπτοστοιχεία σε έναν συμμετέχοντα εκτός της πλατφόρμας. Το αποτέλεσμα είναι ότι οι πλατφόρμες κρυπτονομισμάτων στέλνουν μόνο ένα μέρος των συναλλαγών σε ένα blockchain και η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από δραστηριότητα εκτός αλυσίδας είναι απίθανο να αποτυπωθεί στις εκτιμήσεις. Παράγοντες όπως αυτοί δημιουργούν προκλήσεις στην εκτίμηση της πραγματικής συνολικής χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας ανά συναλλαγή σε σύγκριση με άλλες χρηματοοικονομικές υπηρεσίες. Ο συνολικός αριθμός των συναλλαγών κρυπτονομισμάτων εντός της αλυσίδας είναι επί του παρόντος μικρός σε

σύγκριση με εκείνους των παραδοσιακών χρηματοοικονομικών υπηρεσιών. Το 2020, το Bitcoin και το Ethereum μαζί αντιπροσώπευαν περίπου 460 εκατομμύρια αναφερόμενες συναλλαγές on-chain. Την ίδια χρονιά, η Visa, η MasterCard και η American Express επεξεργάστηκαν συλλογικά περίπου 310 δισεκατομμύρια συναλλαγές πληρωμής με πιστωτική κάρτα. Οι έμποροι πιστωτικών καρτών, σε σύγκριση, χρειάζονται επίσημες τραπεζικές σχέσεις για τον διακανονισμό συναλλαγών, επειδή μια συναλλαγή εξουσιοδοτεί μόνο την πληρωμή και δεν διακανονίζει πληρωμές. Για το λόγο αυτό, υπάρχει μια θεμελιώδης διαφορά μεταξύ μιας συναλλαγής ψηφιακού περιουσιακού στοιχείου και μιας συναλλαγής με πιστωτική κάρτα. Σημειώνοντας ότι οι άμεσες συγκρίσεις είναι περίπλοκες, οι Visa, MasterCard και American Express μαζί ανέφεραν περίπου 0,5 δισεκατομμύρια kWh χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας το 2020, συμπεριλαμβανομένων όλων των λειτουργιών, εκτός από τις ηλεκτρονικές πληρωμές. Με άλλα λόγια, αυτές οι τρεις οντότητες κατανάλωσαν λιγότερο από το 1% της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποίησαν το Bitcoin και το Ethereum την ίδια χρονιά, παρά το γεγονός ότι επεξεργάζονταν πολλαπλάσιο τον αριθμό των συναλλαγών εντός της αλυσίδας και υποστηρίζουν τις ευρύτερες εταιρικές τους δραστηριότητες. Η υπεύθυνη ανάπτυξη ψηφιακών περιουσιακών στοιχείων περιλαμβάνει τη διασφάλιση λειτουργιών με δραματικά χαμηλότερη ενεργειακή ένταση, καθώς υιοθετούνται τα ψηφιακά στοιχεία (Mastercard, 2021).

### **3.3 Η εξόρυξη κρυπτονομισμάτων μπορεί να επηρεάσει τους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας και το δίκτυο**

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί κρίσιμη υποδομή για την ανθρώπινη υγεία, την οικονομία και την εθνική ασφάλεια των ΗΠΑ. Είναι επίσης η ραχοκοκαλιά μιας μελλοντικής οικονομίας καθαρής ενέργειας των ΗΠΑ, καθώς η ηλεκτροκίνηση θα εκτοπίζει ολοένα και περισσότερο τα οχήματα με ορυκτά καύσιμα, τα κτίρια και ορισμένες βιομηχανικές διεργασίες. Οι Ηνωμένες Πολιτείες θα πρέπει να επιταχύνουν την ηλεκτροδότηση των τελικών χρήσεων προκειμένου να επιτύχουν τους κλιματικούς στόχους τους. Η δεκαετία του 2020 είναι μια αποφασιστική δεκαετία για τη δράση για το κλίμα στις Ηνωμένες Πολιτείες και πρέπει να προστίθενται στο δίκτυο έως και 100 GW δυναμικότητας καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας κάθε χρόνο για να καλυφθεί η ζήτηση αυτών των πρόσφατα ηλεκτροδοτημένων τελικών χρήσεων. Ταυτόχρονα, οι υποδομές βρίσκονται υπό πίεση από τις σημερινές απαιτήσεις και τις κλιματικές συνθήκες ακραίων καιρικών φαινομένων, και απαιτούν μαζική επανεπένδυση. Διπλάσιες διακοπές ρεύματος έχουν σημειωθεί τα τελευταία έξι χρόνια σε σύγκριση με τα προηγούμενα έξι χρόνια, και η αξιοπιστία θα πρέπει να αυξηθεί για να καλύψει τις νέες απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας. Η ηλεκτρική υποδομή που σχεδιάστηκε για το κλίμα του 20ου αιώνα πρέπει τώρα να αντέχουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες, πιο έντονες καταιγίδες και άλλες ακραίες συνθήκες που επιδεινώνονται από την κλιματική αλλαγή, οι οποίες καταπονούν το δίκτυο και μπορούν να μειώσουν την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παρέχεται όταν οι καταναλωτές τη χρειάζονται περισσότερο. Οι Ηνωμένες Πολιτείες απαιτούν μια αξιόπιστη, οικονομικά προσιτή, καθαρή, δίκαιη και σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έτοιμο για το κλίμα. Οι νέες απαιτήσεις για το σύστημα πρέπει να βοηθήσουν, όχι να εμποδίσουν, τους κλιματικούς στόχους του έθνους μας (Holland, et, al, 2022).

Στα περισσότερα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με χαμηλό κόστος καυσίμων και οι πυρηνικοί σταθμοί αποστέλλονται πρώτα για να καλύψουν τα ηλεκτρικά φορτία. Στη συνέχεια αποστέλλονται ευέλικτοι πόροι με υψηλότερο κόστος καυσίμων, όπως σταθμοί φυσικού αερίου ή άνθρακα, για να παρακολουθούν τις διακυμάνσεις του φορτίου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Καθώς η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται από την εξόρυξη κρυπτονομισμάτων, περισσότεροι σταθμοί φυσικού αερίου και



άνθρακα αποστέλλονται από τους διαχειριστές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτοί οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής κοστίζουν γενικά περισσότερο και ρυπαίνουν περισσότερο από τη μέση ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου, με τη διαφορά μεταξύ των μέσων εκπομπών και των οριακών εκπομπών να διευρύνεται (Holland, et, al, 2022).

Οι λειτουργίες εξόρυξης κρυπτονομισμάτων έχουν συνήθως υψηλούς συντελεστές φορτίου: χρησιμοποιούν σχεδόν συνεχώς ισχύ. Όταν αυτές οι εγκαταστάσεις συνεχίζουν να λειτουργούν σε περιόδους αιχμής ζήτησης, δίνουν έμφαση στην υποδομή ισχύος, η οποία μπορεί να επηρεάσει τη ζωή του εξοπλισμού, να προκαλέσει διακοπές ρεύματος σε άλλους πελάτες και να δημιουργήσει κινδύνους πυρκαγιάς. -οι εξορύκτες περιουσιακών στοιχείων να ανακτήσουν το πρόσθετο κόστος που σχετίζεται με την κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από την εξόρυξη. Η Δημόσια Περιφέρεια της Κομητείας Benton της Ουάσιγκτον υιοθέτησε επίσης μια πολιτική για τους πελάτες κρυπτονομισμάτων, αναφέροντας ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια και την αξιοπιστία του συστήματος διανομής. Η αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από την εξόρυξη κρυπτονομισμάτων μπορεί επίσης να αυξήσει τις τιμές ενέργειας για τους τοπικούς καταναλωτές. Η εξόρυξη κρυπτονομισμάτων στα βόρεια της Νέας Υόρκης αύξησε τους ετήσιους λογαριασμούς ηλεκτρικού ρεύματος για τα νοικοκυριά κατά 82 δολάρια και τους ετήσιους λογαριασμούς ηλεκτρικού ρεύματος για μικρές επιχειρήσεις κατά 164 δολάρια, με τις καθαρές συνολικές ζημίες από τοπικούς καταναλωτές και επιχειρήσεις να εκτιμώνται σε 179 εκατομμύρια δολάρια την περίοδο 2016-2018. Το 2018, το The New York Municipal Power δημιούργησε ένα νέο τιμολόγιο το 2018 για την επεξεργασία δεδομένων μεγάλου όγκου για κρυπτοστοιχεία για να αυξήσει το κόστος της εξόρυξης. Το Plattsburgh, NY ενέκρινε ένα 18μηνο μορατόριουμ στις εργασίες εξόρυξης μετά από παράπονα μελών της κοινότητας και επιχειρήσεων για υψηλούς λογαριασμούς ενέργειας και θόρυβο . Η εξόρυξη θα μπορούσε επίσης να οδηγήσει σε μετατόπιση του κόστους στους τοπικούς πελάτες ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι θα φέρουν τον κίνδυνο εάν οι εργασίες εξόρυξης μετακινηθούν σε διαφορετικά μέρη όταν αλλάξουν οι συνθήκες. Αυτό θα μπορούσε να αφήσει τους τοπικούς πελάτες να πληρώσουν για μη αμειβόμενες αναβαθμίσεις υποδομής για εργασίες εξόρυξης (Ciampoli, 2018).

Πολλοί εξορύκτες κρυπτονομισμάτων έχουν μεταφέρει τις δραστηριότητές τους στο Τέξας. Το Συμβούλιο Αξιοπιστίας Ηλεκτρικής Ενέργειας του Τέξας (ERCOT) είναι ο διαχειριστής του συστήματος δικτύου για την πλειοψηφία του Τέξας και έχει μέγιστη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας το καλοκαίρι περίπου 76 γιγαβάτ (GW) και τρέχουσα δραστηριότητα εξόρυξης κρυπτονομισμάτων περίπου 2 GW. Το ERCOT διαθέτει περίπου 17 GW εγκαταστάσεων κρυπτογράφησης που βρίσκονται σε διαδικασία σύνδεσης στο δίκτυο, με αναμενόμενη νέα ζήτηση 5 έως 6 GW τους επόμενους 12 έως 15 μήνες (ισοδύναμο με τη ζήτηση ενέργειας της πόλης του Χιούστον). Το ERCOT μπορεί επίσης να δει επιπλέον 25 GW κατά την επόμενη δεκαετία. Αν και πολλά από αυτά τα έργα ενδέχεται να μην έχουν ολοκληρωθεί, η προοπτική έως και 25 GW νέας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από την εξόρυξη κρυπτονομισμάτων — που ισοδυναμεί με το ένα τρίτο της υφιστάμενης ζήτησης αιχμής ηλεκτρικής ενέργειας στο Τέξας — εγείρει πιθανές προκλήσεις για τη διατήρηση της αξιοπιστίας της ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά με τις αυξανόμενες απαιτήσεις ενέργειας και τις ακραίες θερμοκρασίες τα τελευταία χρόνια (Ciampoli, 2018).

Οι λειτουργίες εξόρυξης κρυπτονομισμάτων μπορούν να μειώσουν γρήγορα την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται μειώνοντας ή απενεργοποιώντας τις εγκαταστάσεις εξόρυξης. Οι εξορύκτες Bitcoin μπορούν να συμμετέχουν σε προγράμματα κοινής ωφέλειας και δικτύου που πληρώνουν τους μεγάλους χρήστες ηλεκτρικής ενέργειας για να μειώσουν τις καταναλώσεις σε περιόδους αιχμής πίεσης στο δίκτυο ή να εξισορροπήσουν την προσφορά και τη ζήτηση - μια διαδικασία που ονομάζεται απόκριση ζήτησης. Στις 11 Ιουλίου 2022, οι υψηλές θερμοκρασίες και η υψηλή προβλεπόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ανάγκασαν το ERCOT να κηρύξει ένα συμβάν έκτακτης ανάγκης στο δίκτυο και οι εξορύκτες Bitcoin που χρησιμοποιούν 1 GW ισχύος φέρεται να ανταποκρίθηκαν στο αίτημα απόκρισης της ζήτησης του ERCOT και μείωσαν τη χρήση ισχύος εξόρυξης. Σε όλο τον Ιούλιο του 2022, ένας μεμονωμένος εξορύκτης Bitcoin που διαπραγματεύεται στο χρηματιστήριο που διαχειρίζεται μια εγκατάσταση στο Τέξας κέρδισε 9,5 εκατομμύρια δολάρια από το πρόγραμμα ανταπόκρισης στη ζήτηση από το δίκτυο του Τέξας, που ήταν περισσότερο από την αξία των 318 Bitcoin που παράγαγε η εγκατάσταση τον ίδιο μήνα. Ευέλικτη ζήτηση

ηλεκτρικής ενέργειας, ταχεία ζήτηση η ανταπόκριση και η παροχή βοηθητικών υπηρεσιών ηλεκτρικής ενέργειας είναι βασικά χαρακτηριστικά ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας απελευθερωμένου από άνθρακα που αποτελείται από μεταβλητή ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. Η ευελιξία της εξόρυξης Crypto-asset να αυξάνει και να κατεβάζει θα μπορούσε να συμβάλει σε αυτές τις απαραίτητες υπηρεσίες ταχείας απόκρισης. Οι αυξημένες απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας από την εξόρυξη κρυπτονομισμάτων αυξάνουν επίσης το συνολικό επίπεδο αιχμής της ζήτησης δικτύου. Ενώ η μείωση αυτής της αιχμής κατά τη διάρκεια έκτακτης ανάγκης δικτύου είναι πολύτιμη, η αυξημένη αιχμή είναι συχνά ο λόγος για τον οποίο είναι απαραίτητη η ανταπόκριση στη ζήτηση, δημιουργώντας λανθασμένα κίνητρα μεταξύ των εξορύξεων κρυπτονομισμάτων και των χειριστών δικτύου. Η πλήρης διαφάνεια της συμμετοχής απόκρισης ζήτησης και των πληρωμών από εξορύκτες κρυπτονομισμάτων και άλλους συμμετέχοντες απόκρισης ζήτησης είναι απαραίτητη. Η διαφάνεια μειώνει τα κίνητρα για ενοικίαση και τυχερά παιχνίδια, προστατεύει τους τοπικούς καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας και μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία της ηλεκτρικής ενέργειας (Benetton, et, al, 2021).

Σε διεθνές επίπεδο, η νομοθεσία και οι κανονισμοί έχουν αντιμετωπίσει τις περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με τη δραστηριότητα των κρυπτογραφικών στοιχείων. Η εκκρεμής νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για τις αγορές κρυπτονομικών περιουσιακών στοιχείων θα απαιτήσει πιθανώς αυξημένες πληροφορίες για τις περιβαλλοντικές και κλιματικές επιπτώσεις και, εντός δύο ετών, την εισαγωγή υποχρεωτικών ελάχιστων προτύπων βιωσιμότητας για μηχανισμούς συναίνεσης (Benetton, et, al, 2021).

### **3.4 Οι προβλέψεις για τη μελλοντική χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από κρυπτονομίσματα είναι αβέβαιες**

Οι προβλέψεις χρήσης ενέργειας εκτιμώνται από μοντέλα ενεργειακών συστημάτων που καταγράφουν τις σχέσεις μεταξύ των απαιτήσεων για υπηρεσίες, της τεχνολογικής απόδοσης, των επιλογών και των τιμών προσφοράς ενέργειας και των αλλαγών σε μακροοικονομικούς παράγοντες όπως το μέγεθος του πληθυσμού και η οικονομική παραγωγικότητα με την πάροδο του χρόνου. Ωστόσο, τα υπάρχοντα μοντέλα ενεργειακών συστημάτων που το κάνουν δεν αντιπροσωπεύουν επαρκώς τις ψηφιακές τεχνολογίες, όπως τα κέντρα δεδομένων και τα δίκτυα τηλεπικοινωνιών, πόσο μάλλον τα δίκτυα κρυπτονομικών περιουσιακών στοιχείων και blockchain. Αυτό είναι ένα γνωστό κενό μοντελοποίησης που αναστέλλει ισχυρές ενεργειακές προβολές για ψηφιακά συστήματα. Οι μελλοντικές προβολές που καθορίζονται από άλλες μεθόδους εκτίμησης απαιτούν πρόβλεψη κατακερματισμού δικτύου και κερδοφόρες αποδόσεις εξόρυξης, οι οποίες συνδέονται στενά και επηρεάζονται περαιτέρω από την αγοραία αξία ενός κρυπτονομικού περιουσιακού στοιχείου και ισχύουσες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας (Kooomey, 2008).

Υπάρχει επίσης σημαντική αβεβαιότητα σχετικά με τον αριθμό των κρυπτο-περιουσιακών στοιχείων που θα προκύψουν, πόσο δημοφιλή θα γίνουν και ποιους μηχανισμούς συναίνεσης θα υιοθετήσουν. Όλοι αυτοί οι παράγοντες θα επηρεάσουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κίνδυνοι που σχετίζονται με την ανάπτυξη του PoS ή άλλου λιγότερο ενεργοβόρου δικτύου είναι σημαντικά χαμηλότεροι από τους κινδύνους που σχετίζονται με την ανάπτυξη του δικτύου PoW. Ενώ ο κατακερματισμός δικτύου μειώθηκε ως απάντηση στην πτώση της αγοραίας αξίας Bitcoin μεταξύ Ιουλίου και Σεπτεμβρίου 2021, παρόμοια συσχέτιση μεταξύ της αγοράς αξία και κατακερματισμός δικτύου δεν έχει παρατηρηθεί στην τρέχουσα πτώση της αγοραίας αξίας που ξεκίνησε στα τέλη του 2021. Έτσι, οι προβλέψεις για μελλοντικούς κατακερματισμούς δικτύου με βάση τις προβλεπόμενες αγοραίες αξίες νομισμάτων συνοδεύονται από σημαντικές αβεβαιότητες. Η παρέκταση των τρεχουσών συνθηκών στο μέλλον θα πρέπει να αποφεύγεται, καθώς αυτές οι αβεβαιότητες και οι βασικές μεταβλητές του συστήματος μπορούν να αλλάξουν. Στο παρελθόν, απλές παρεκβολές είχαν συχνά αποδώσει μη ρεαλιστικές προβλέψεις ενεργειακής

ζήτησης για πολύπλοκα και εξελισσόμενα συστήματα τεχνολογίας πληροφοριών όπως αυτά που περιλαμβάνουν blockchains (Kooomey, 2008). Μεταξύ Αυγούστου 2016 και Ιουλίου 2022, η μέση εκτιμώμενη ενεργειακή ένταση της εξέδρας μειώθηκε κατά περίπου 85% λόγω βελτιώσεων στην υπολογιστική απόδοση. Την ίδια χρονική περίοδο, οι κατακερματισμοί δικτύου αυξήθηκαν κατά πάνω από 14.000%, οδηγώντας σε αύξηση 2000% στην εκτιμώμενη ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου χρήση. Αυτή η αύξηση δείχνει πώς, ιστορικά, οι βελτιώσεις στην απόδοση της εξόρυξης έχουν ακυρωθεί από την αύξηση των hashrates καθώς ο ανταγωνισμός εξόρυξης έχει αυξηθεί. Ωστόσο, η μελλοντική σχέση μεταξύ των κατακερματισμών δικτύου και της αναπτυσσόμενης απόδοσης εξόρυξης είναι αβέβαιη. Αυτό οφείλεται σε άγνωστα στοιχεία σχετικά με το εναπομένον δυναμικό βελτίωσης της υπολογιστικής απόδοσης για εξόρυξη εξόρυξης και, για ορισμένα κρυπτογραφικά στοιχεία, όπως το Bitcoin, πώς θα επηρεαστούν τα κίνητρα εξόρυξης από μελλοντικές μειώσεις στις ανταμοιβές για εξόρυξη, που μπορεί να περιορίσουν την αύξηση της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας Bitcoin. Αυτές οι αβεβαιότητες και η ικανότητα της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας κρυπτοστοιχείων να αυξάνεται γρήγορα, καταδεικνύουν την ανάγκη απόκτησης καλύτερων δεδομένων για την κατανόηση και την παρακολούθηση της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας από κρυπτοστοιχεία (Kooomey, 2008).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>- ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

### 4.1 Σχετική έρευνα

Έχουν υπάρξει αρκετές μελέτες που έχουν διερευνήσει τον αντίκτυπο του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας στην αξία των κρυπτονομισμάτων.

Οι Papadopoulos et al., (2019) διαπίστωσαν ότι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας έχει σημαντικό αντίκτυπο στην κερδοφορία της εξόρυξης κρυπτονομισμάτων και ότι οι εξορύκτες είναι πιο πιθανό να συμμετάσχουν στην εξόρυξη κρυπτονομισμάτων όταν το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλό. Η μελέτη διαπίστωσε επίσης ότι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην αξία των κρυπτονομισμάτων, καθώς επηρεάζει την οικονομία της εξόρυξης.

Σε μια άλλη μελέτη, οι Kimetal., (2020) διερεύνησαν τη σχέση μεταξύ του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας και της αξίας των κρυπτονομισμάτων. Η μελέτη διαπίστωσε ότι η αύξηση του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί σε μείωση της αξίας των κρυπτονομισμάτων, καθώς η συμμετοχή των εξορυκτών γίνεται λιγότερο κερδοφόρα. Η μελέτη διαπίστωσε επίσης ότι ο τύπος του αλγορίθμου συναίνεσης που χρησιμοποιείται στο κρυπτονομίσμα μπορεί να επηρεάσει το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, τα κρυπτονομίσματα που χρησιμοποιούν αλγόριθμους Proof-of-Work, όπως το Bitcoin, καταναλώνουν περισσότερη ενέργεια και οδηγούν σε υψηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με τα κρυπτονομίσματα που χρησιμοποιούν αλγόριθμους Proof-of-Stake.

Οι Liu κ.ά., (2021) διεξήγαγαν μια μελέτη σχετικά με την ενεργειακή κατανάλωση της βιομηχανίας εξόρυξης κρυπτονομισμάτων. Η μελέτη διαπίστωσε ότι η ενεργειακή κατανάλωση της βιομηχανίας εξόρυξης κρυπτονομισμάτων αυξάνεται ραγδαία, λόγω της αυξανόμενης δημοτικότητας των κρυπτονομισμάτων και της ανάγκης για πιο ενεργοβόρους αλγόριθμους συναίνεσης, όπως οι Proof-of-Work. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η υψηλή ενεργειακή κατανάλωση της βιομηχανίας εξόρυξης κρυπτονομισμάτων έχει σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις και υπογραμμίζει την ανάγκη για πιο ενεργειακά αποδοτικούς αλγόριθμους συναίνεσης.

Μια μελέτη των Chenetal., (2022) διερεύνησε τη σχέση μεταξύ του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας και της κατανομής της ισχύος εξόρυξης στη βιομηχανία

κρυπτονομισμάτων. Η μελέτη διαπίστωσε ότι η συγκέντρωση της ισχύος εξόρυξης σε χώρες με χαμηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί σε συγκεντρωτισμό στη βιομηχανία κρυπτονομισμάτων και μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την αποκέντρωση και την ασφάλεια του δικτύου κρυπτονομισμάτων. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την κατανομή της ισχύος εξόρυξης και την ασφάλεια της βιομηχανίας κρυπτονομισμάτων.

Σε μια πρόσφατη μελέτη, οι Zavarise et al., (2022) διερεύνησαν τον αντίκτυπο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην αξία των κρυπτονομισμάτων. Η μελέτη διαπίστωσε ότι η υιοθέτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη βιομηχανία εξόρυξης κρυπτονομισμάτων μπορεί να μειώσει το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και να αυξήσει την αξία των κρυπτονομισμάτων. Η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει τη δυνατότητα να καταστήσει την εξόρυξη κρυπτονομισμάτων πιο βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον, βελτιώνοντας παράλληλα τα οικονομικά της εξόρυξης.

Συμπερασματικά, αρκετές μελέτες έχουν δείξει ότι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας έχει σημαντικό αντίκτυπο στην αξία των κρυπτονομισμάτων. Η αύξηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας οδηγεί σε μείωση της αξίας των κρυπτονομισμάτων, καθώς καθίσταται λιγότερο επικερδής η συμμετοχή των εξορυκτών. Ο τύπος του αλγορίθμου συναίνεσης που χρησιμοποιείται στο κρυπτονομίσμα μπορεί επίσης να επηρεάσει το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας, με τους αλγορίθμους Proof-of-Work να είναι πιο ενεργοβόροι και να οδηγούν σε υψηλότερο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με τους αλγορίθμους Proof-of-Stake. Η συγκέντρωση της ισχύος εξόρυξης σε χώρες με χαμηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί επίσης να επηρεάσει αρνητικά την αποκέντρωση και την ασφάλεια του δικτύου κρυπτονομισμάτων. Η υιοθέτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη βιομηχανία εξόρυξης κρυπτονομισμάτων έχει τη δυνατότητα να μειώσει το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, να αυξήσει την αξία των κρυπτονομισμάτων και να καταστήσει την εξόρυξη κρυπτονομισμάτων πιο βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>- ΈΡΕΥΝΑ

### 5.1 Μεθοδολογία

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να διερευνήσει τη συσχέτιση μεταξύ των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ και των τιμών των κρυπτονομισμάτων που χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγόριθμους συναίνεσης, δηλαδή Proof of Work (PoW), Proof of Stake (PoS) και Proof of Authority (PoA). Συγκεκριμένα, η μελέτη αποσκοπεί να προσδιορίσει κατά πόσον η τιμή των κρυπτονομισμάτων PoW επηρεάζεται από τις μεταβολές στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ, ενώ τα κρυπτονομίσματα PoS και PoA παραμένουν ανεπηρέαστα.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου, θα χρησιμοποιήσουμε μηνιαίες τιμές κλεισίματος της ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ και θα επιλέξουμε κρυπτονομίσματα που αντιπροσωπεύουν τους τρεις αλγόριθμους συναίνεσης. Συγκεκριμένα, τα κρυπτονομίσματα που θα συμπεριληφθούν στη μελέτη είναι τα **Bitcoin (BTC), Ethereum (ETH), DigiByte (DGB), HiCoin (XHI), Dash (DASH), Litecoin (LTC) και Monero (XMR) για το PoW- Binance Coin (BNB), Waves (WAVES), Cardano (ADA) και Tezos (XTZ) για το PoS- και POA Network (POA), Callisto (CLO), VeChain (VET) και GoChain (GO) για το PoA**. Η επιλογή αυτών των κρυπτονομισμάτων βασίστηκε στην επίτευξη ποικιλομορφίας όσον αφορά τη δημοτικότητα και, δεύτερον, στη διαθεσιμότητα δεδομένων για την υπό εξέταση περίοδο.

Τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για την παρούσα μελέτη θα καλύψουν την περίοδο από την 1η Ιανουαρίου 2018 έως την 31η Δεκεμβρίου 2022. Η χρονική αυτή περίοδος περιλαμβάνει σημαντικά γεγονότα στην αγορά κρυπτονομισμάτων, όπως η πτωτική αγορά του 2018 και η πρόσφατη αύξηση του ενδιαφέροντος για εναλλακτικά κρυπτονομίσματα, όπως το Dogecoin και άλλα νομίσματα meme. Η χρονική περίοδος περιλαμβάνει επίσης σημαντικά παγκόσμια γεγονότα, όπως η πανδημία COVID-19 και ο ουκρανικός πόλεμος, τα οποία είχαν σημαντικό αντίκτυπο στις τιμές της ενέργειας. Ως εκ τούτου, η περίοδος αυτή επιλέχθηκε για να καταγράψει ένα ευρύ φάσμα συνθηκών της αγοράς και σημαντικών γεγονότων που θα μπορούσαν δυνητικά να επηρεάσουν τη συσχέτιση και την αιτιώδη συνάφεια μεταξύ των τιμών της ενέργειας και των επιλεγμένων κρυπτονομισμάτων. Οι ημερήσιες τιμές



κλεισίματος της ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ θα ληφθούν από τον ιστότοπο της Υπηρεσίας Ενεργειακών Πληροφοριών των ΗΠΑ (EIA), ενώ οι τιμές των κρυπτονομισμάτων θα συλλεχθούν από τον ιστότοπο CryptoCompare.

Η μεθοδολογία για την ανάλυση της σχέσης μεταξύ των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας και των τιμών των κρυπτονομισμάτων περιλαμβάνει τη χρήση της ανάλυσης αιτιότητας κατά Granger για τον προσδιορισμό της αιτιώδους σχέσης μεταξύ των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας και των τιμών των κρυπτονομισμάτων. Η ανάλυση αιτιότητας κατά Granger είναι μια στατιστική μέθοδος που χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί κατά πόσον μια χρονοσειρά είναι χρήσιμη για την πρόβλεψη μιας άλλης χρονοσειράς. Η ανάλυση αυτή θα μας βοηθήσει να προσδιορίσουμε αν οι μεταβολές στις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας προκαλούν μεταβολές στις τιμές των κρυπτονομισμάτων ή αν ισχύει το αντίστροφο.

Στην ανάλυση αυτή, οι τιμές  $p$ -value και  $f$ -statistic είναι συνήθως χρησιμοποιούμενα μέτρα για την αξιολόγηση της στατιστικής σημαντικότητας και της ισχύος της αιτιώδους σχέσης μεταξύ των δύο χρονοσειρών. Η  $p$ -value αντιπροσωπεύει την πιθανότητα να ληφθούν τα παρατηρούμενα αποτελέσματα του ελέγχου, υποθέτοντας ότι η μηδενική υπόθεση είναι αληθής. Μια μικρότερη τιμή  $p$ -value υποδηλώνει ισχυρότερη απόδειξη κατά της μηδενικής υπόθεσης και υποστηρίζει την εναλλακτική υπόθεση, ότι δηλαδή υπάρχει αιτιώδης σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών. Η  $f$ -statistic, από την άλλη πλευρά, μετρά την ισχύ της αιτιώδους σχέσης μεταξύ των δύο μεταβλητών. Μια υψηλότερη τιμή  $F$  υποδηλώνει ισχυρότερη αιτιώδη σχέση μεταξύ των μεταβλητών.

Ο έλεγχος αιτιότητας κατά Granger υλοποιείται με τη χρήση του μοντέλου VAR (vector autoregression), το οποίο είναι ένα πολυμεταβλητό μοντέλο χρονολογικών σειρών. Το μοντέλο είναι ικανό να εκτιμήσει την επίδραση μιας χρονοσειράς σε μια άλλη, λαμβάνοντας υπόψη τις καθυστερημένες τιμές και των δύο μεταβλητών. Προκειμένου να προσδιορίσουμε τη βέλτιστη τιμή υστέρησης για την ανάλυσή μας, πραγματοποιούμε διάφορους ελέγχους αιτιότητας κατά Granger χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές υστέρησης. Για τον σκοπό της παρούσας μελέτης, εκτελούμε τον έλεγχο αιτιότητας κατά Granger για διαφορετικές τιμές υστέρησης που κυμαίνονται από 1 έως 4.

Επιλέγουμε τη βέλτιστη τιμή υστέρησης με βάση τα αποτελέσματα του τεστ που εμφανίζουν τη χαμηλότερη τιμή p-value, η οποία υποδηλώνει τη μεγαλύτερη στατιστική σημαντικότητα. Εκτελώντας τον έλεγχο για διαφορετικές τιμές υστέρησης, διασφαλίζουμε ότι τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα και εύρωστα.

Στη συνέχεια, θα συγκρίνουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης αιτιότητας κατά Granger για τα νομίσματα PoW, PoS και PoA για να διαπιστώσουμε αν υπάρχει σημαντική διαφορά στην αιτιώδη σχέση μεταξύ των κρυπτονομισμάτων που χρησιμοποιούν διαφορετικούς αλγόριθμους συναίνεσης. Συγκεκριμένα, θα συγκρίνουμε τις τιμές p-value και τα f-statistic που προκύπτουν από τους ελέγχους αιτιότητας κατά Granger για κάθε μία από τις τρεις ομάδες κρυπτονομισμάτων.

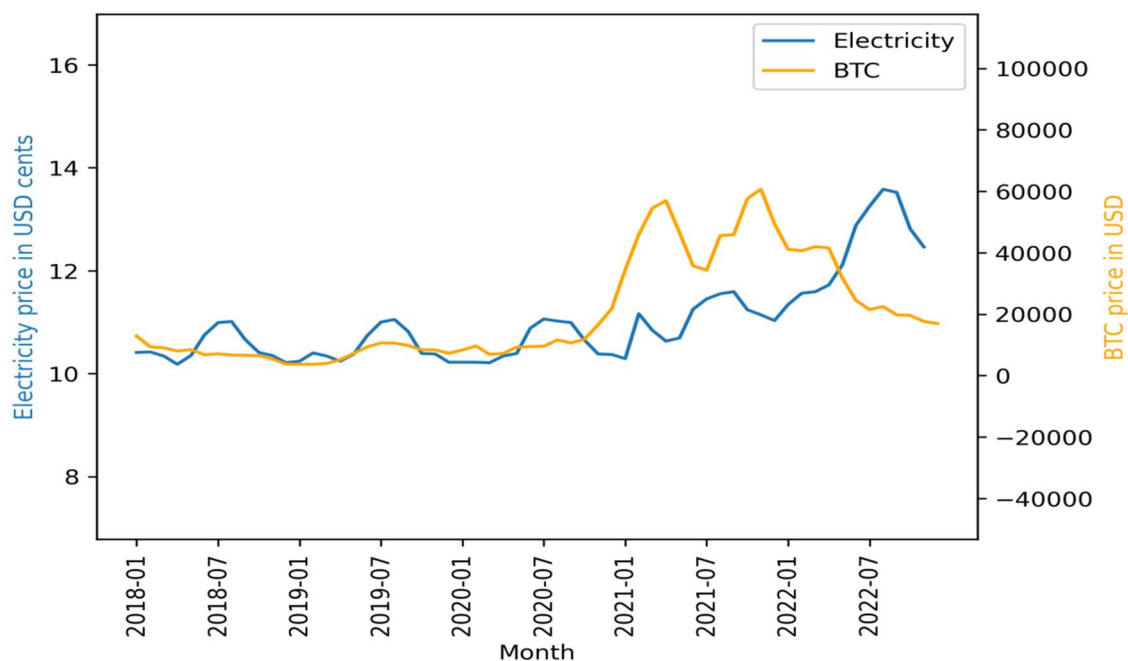
Στην παρούσα μελέτη, χρησιμοποιούμε τη γλώσσα προγραμματισμού Python και διάφορες σχετικές βιβλιοθήκες, όπως οι pandas, statsmodels και matplotlib, για να πραγματοποιήσουμε την ανάλυσή μας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούμε το pandas για τον καθαρισμό και την προεπεξεργασία των δεδομένων μας και το statsmodels για την εκτέλεση του ελέγχου αιτιότητας κατά Granger. Χρησιμοποιούμε επίσης το matplotlib για τη δημιουργία διαγραμμάτων για την οπτικοποίηση των δεδομένων.

Συνοψίζοντας, τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης θα βοηθήσουν να προσδιοριστεί εάν η τιμή των κρυπτονομισμάτων PoW επηρεάζεται από τις μεταβολές στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ, ενώ τα νομίσματα PoS και PoA παραμένουν ανεπηρέαστα.

## 5.2 Αποτελέσματα

### Proof of Work (PoW)

#### Bitcoin (BTC)



Αποτελέσματα ελέγχου αιτιότητας κατά Granger ( $\forall \text{lag} \in [1,4]$ ):

number of lags: 1

ssr based F test:  $F=0.3889$  ,  $p=0.5355$  ,  $df\_denom=55$ ,  $df\_num=1$

ssr based chi2 test:  $chi2=0.4101$  ,  $p=0.5219$  ,  $df=1$

likelihood ratio test:  $chi2=0.4086$  ,  $p=0.5227$  ,  $df=1$

parameter F test:  $F=0.3889$  ,  $p=0.5355$  ,  $df\_denom=55$ ,  $df\_num=1$

number of lags: 2

ssr based F test:  $F=0.9823$  ,  $p=0.3813$  ,  $df\_denom=52$ ,  $df\_num=2$

ssr based chi2 test:  $chi2=2.1534$  ,  $p=0.3407$  ,  $df=2$

likelihood ratio test:  $chi2=2.1137$  ,  $p=0.3475$  ,  $df=2$

parameter F test:  $F=0.9823$  ,  $p=0.3813$  ,  $df\_denom=52$ ,  $df\_num=2$

number of lags: 3

ssr based F test:  $F=1.0746$  ,  $p=0.3686$  ,  $df\_denom=49$ ,  $df\_num=3$

ssr based chi2 test:  $chi2=3.6842$  ,  $p=0.2976$  ,  $df=3$

likelihood ratio test:  $chi2=3.5681$  ,  $p=0.3120$  ,  $df=3$

parameter F test:  $F=1.0746$  ,  $p=0.3686$  ,  $df\_denom=49$ ,  $df\_num=3$

number of lags: 4

ssr based F test:  $F=3.0050$  ,  $p=0.0277$  ,  $df\_denom=46$ ,  $df\_num=4$

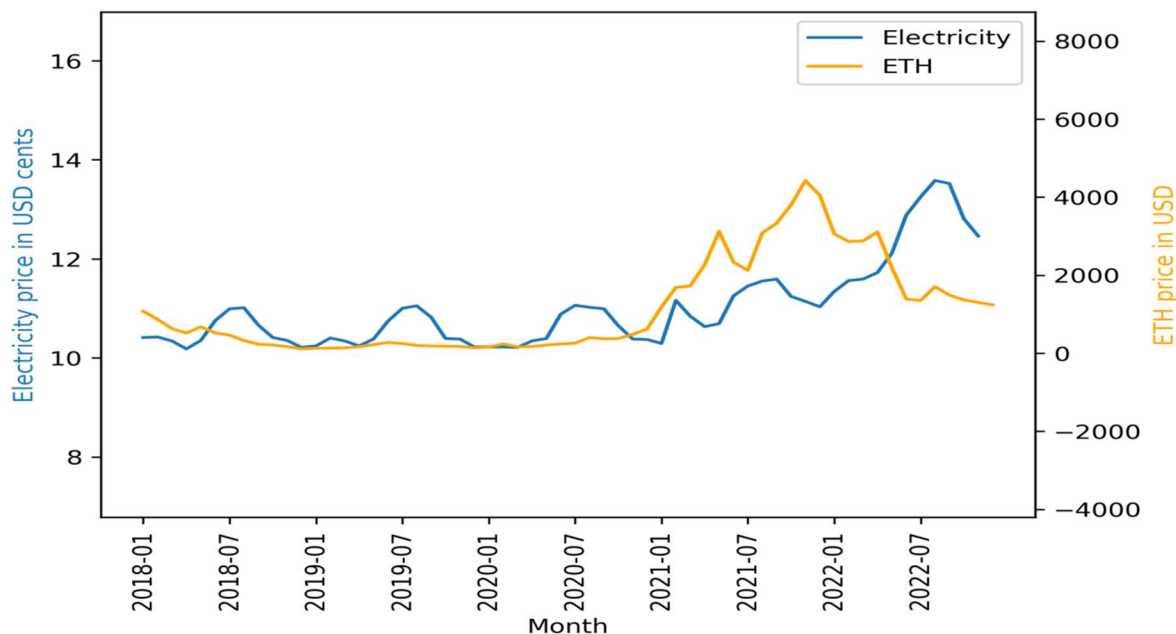
ssr based chi2 test:  $chi2=14.3716$  ,  $p=0.0062$  ,  $df=4$

likelihood ratio test:  $chi2=12.7680$  ,  $p=0.0125$  ,  $df=4$

parameter F test:  $F=3.0050$  ,  $p=0.0277$  ,  $df\_denom=46$ ,  $df\_num=4$

Από το παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχουν ενδείξεις ασθενούς αιτιώδους σχέσης μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών BTC με  $p\text{-value}=0,006$ ,  $f\text{-statistic}=3,004$  για  $\text{lag}=4$ .

## Ethereum (ETH)



Αποτελέσματα ελέγχου αιτιότητας κατά Granger ( $\forall \text{lag} \in [1,4]$ ):

number of lags: 1  
 ssr based F test:  $F=0.0676$  ,  $p=0.7958$  ,  $df_{\text{denom}}=55$ ,  $df_{\text{num}}=1$   
 ssr based chi2 test:  $\text{chi2}=0.0713$  ,  $p=0.7894$  ,  $df=1$   
 likelihood ratio test:  $\text{chi2}=0.0713$  ,  $p=0.7895$  ,  $df=1$   
 parameter F test:  $F=0.0676$  ,  $p=0.7958$  ,  $df_{\text{denom}}=55$ ,  $df_{\text{num}}=1$

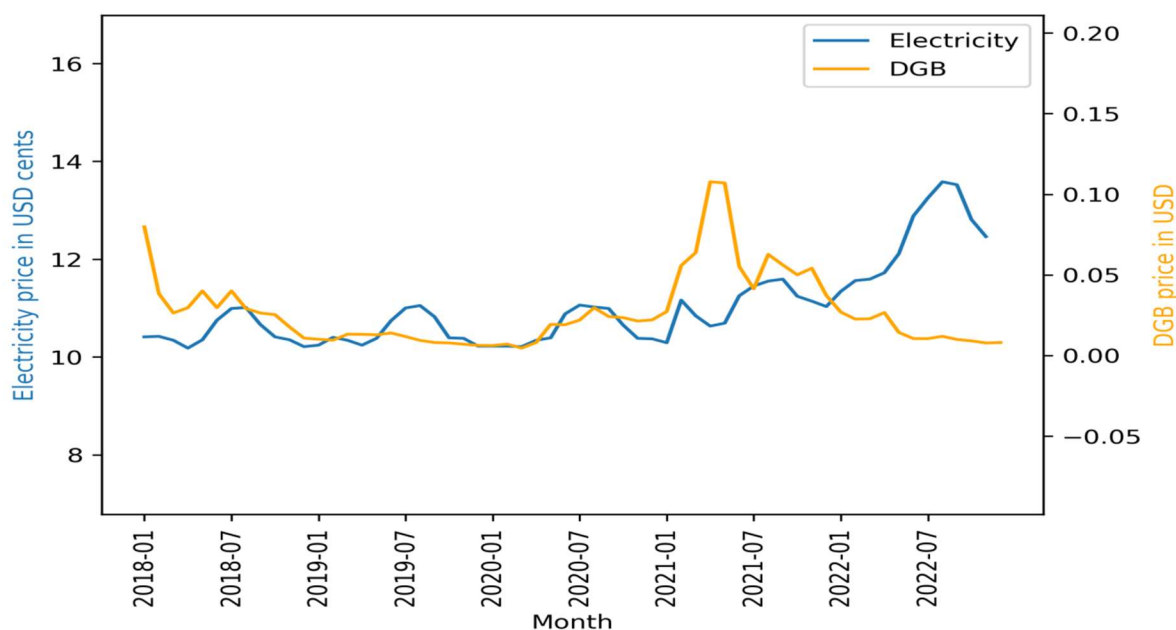
number of lags: 2  
 ssr based F test:  $F=0.2932$  ,  $p=0.7471$  ,  $df_{\text{denom}}=52$ ,  $df_{\text{num}}=2$   
 ssr based chi2 test:  $\text{chi2}=0.6427$  ,  $p=0.7252$  ,  $df=2$   
 likelihood ratio test:  $\text{chi2}=0.6391$  ,  $p=0.7265$  ,  $df=2$   
 parameter F test:  $F=0.2932$  ,  $p=0.7471$  ,  $df_{\text{denom}}=52$ ,  $df_{\text{num}}=2$

**number of lags: 3**  
**ssr based F test:  $F=2.2921$  ,  $p=0.0897$  ,  $df_{\text{denom}}=49$ ,  $df_{\text{num}}=3$**   
**ssr based chi2 test:  $\text{chi2}=7.8585$  ,  $p=0.0490$  ,  $df=3$**   
**likelihood ratio test:  $\text{chi2}=7.3538$  ,  $p=0.0614$  ,  $df=3$**   
**parameter F test:  $F=2.2921$  ,  $p=0.0897$  ,  $df_{\text{denom}}=49$ ,  $df_{\text{num}}=3$**

number of lags: 4  
 ssr based F test:  $F=1.8596$  ,  $p=0.1337$  ,  $df_{\text{denom}}=46$ ,  $df_{\text{num}}=4$   
 ssr based chi2 test:  $\text{chi2}=8.8938$  ,  $p=0.0638$  ,  $df=4$   
 likelihood ratio test:  $\text{chi2}=8.2439$  ,  $p=0.0830$  ,  $df=4$   
 parameter F test:  $F=1.8596$  ,  $p=0.1337$  ,  $df_{\text{denom}}=46$ ,  $df_{\text{num}}=4$

Από το παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχουν ενδείξεις ασθενούς αιτιώδους σχέσης μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών ETH με  $p\text{-value}=0.049$ ,  $f\text{-statistic}=2.292$  για  $\text{lag}=3$ .

## DigiByte (DGB)



Αποτελέσματα ελέγχου αιτιότητας κατά Granger ( $\forall \text{lag} \in [1,4]$ ):

number of lags: 1

ssr based F test:  $F=0.0730$  ,  $p=0.7881$  ,  $df\_denom=55$ ,  $df\_num=1$

ssr based chi2 test:  $chi2=0.0770$  ,  $p=0.7815$  ,  $df=1$

likelihood ratio test:  $chi2=0.0769$  ,  $p=0.7815$  ,  $df=1$

parameter F test:  $F=0.0730$  ,  $p=0.7881$  ,  $df\_denom=55$ ,  $df\_num=1$

number of lags: 2

ssr based F test:  $F=0.1177$  ,  $p=0.8892$  ,  $df\_denom=52$ ,  $df\_num=2$

ssr based chi2 test:  $chi2=0.2580$  ,  $p=0.8790$  ,  $df=2$

likelihood ratio test:  $chi2=0.2574$  ,  $p=0.8792$  ,  $df=2$

parameter F test:  $F=0.1177$  ,  $p=0.8892$  ,  $df\_denom=52$ ,  $df\_num=2$

**number of lags: 3**

**ssr based F test:  $F=7.0684$  ,  $p=0.0005$  ,  $df\_denom=49$ ,  $df\_num=3$**

**ssr based chi2 test:  $chi2=24.2345$  ,  $p=0.0000$  ,  $df=3$**

**likelihood ratio test:  $chi2=20.1377$  ,  $p=0.0002$  ,  $df=3$**

**parameter F test:  $F=7.0684$  ,  $p=0.0005$  ,  $df\_denom=49$ ,  $df\_num=3$**

number of lags: 4

ssr based F test:  $F=5.5320$  ,  $p=0.0010$  ,  $df\_denom=46$ ,  $df\_num=4$

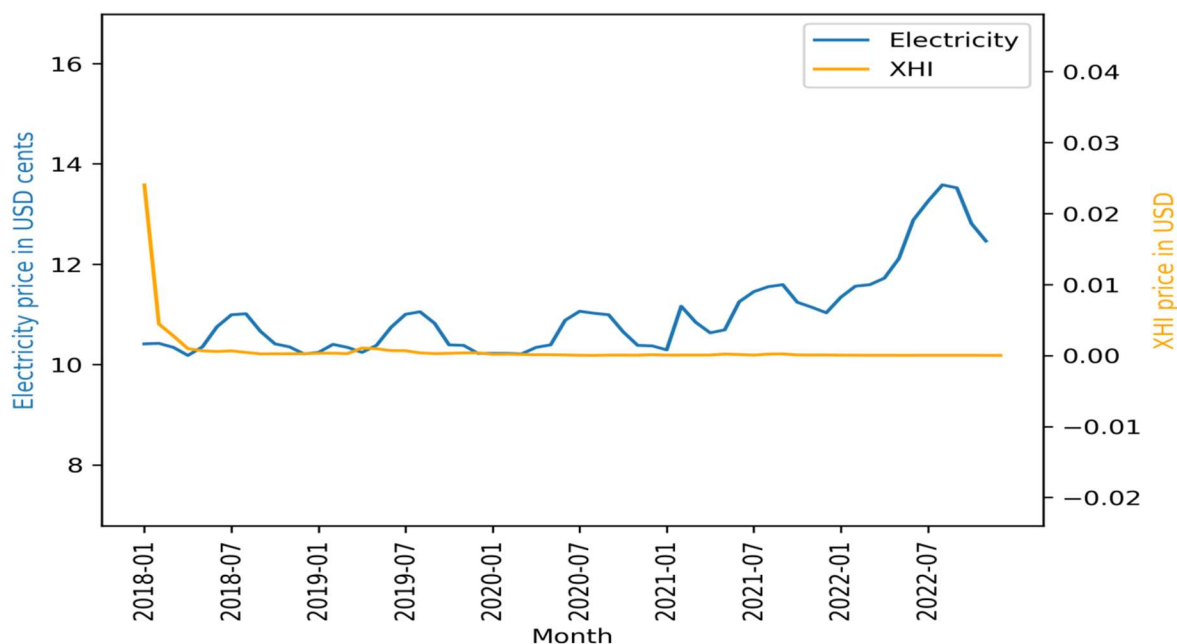
ssr based chi2 test:  $chi2=26.4574$  ,  $p=0.0000$  ,  $df=4$

likelihood ratio test:  $chi2=21.6011$  ,  $p=0.0002$  ,  $df=4$

parameter F test:  $F=5.5320$  ,  $p=0.0010$  ,  $df\_denom=46$ ,  $df\_num=4$

Από το παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχουν ενδείξεις ισχυρής αιτιώδους σχέσης μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών DGB με  $p\text{-value}=0.0005$ ,  $f\text{-statistic}=7.068$  για  $\text{lag}=3$ .

## HiCoin (XHI)



Αποτελέσματα ελέγχου αιτιότητας κατά Granger ( $\forall \text{lag} \in [1,4]$ ):

**number of lags: 1**

ssr based F test:  $F=6.6583$  ,  $p=0.0126$  ,  $df\_denom=55$ ,  $df\_num=1$

ssr based chi2 test:  $chi2=7.0214$  ,  $p=0.0081$  ,  $df=1$

likelihood ratio test:  $chi2=6.6279$  ,  $p=0.0100$  ,  $df=1$

parameter F test:  $F=6.6583$  ,  $p=0.0126$  ,  $df\_denom=55$ ,  $df\_num=1$

number of lags: 2

ssr based F test:  $F=2.4725$  ,  $p=0.0942$  ,  $df\_denom=52$ ,  $df\_num=2$

ssr based chi2 test:  $chi2=5.4204$  ,  $p=0.0665$  ,  $df=2$

likelihood ratio test:  $chi2=5.1779$  ,  $p=0.0751$  ,  $df=2$

parameter F test:  $F=2.4725$  ,  $p=0.0942$  ,  $df\_denom=52$ ,  $df\_num=2$

number of lags: 3

ssr based F test:  $F=0.7426$  ,  $p=0.5318$  ,  $df\_denom=49$ ,  $df\_num=3$

ssr based chi2 test:  $chi2=2.5462$  ,  $p=0.4670$  ,  $df=3$

likelihood ratio test:  $chi2=2.4900$  ,  $p=0.4771$  ,  $df=3$

parameter F test:  $F=0.7426$  ,  $p=0.5318$  ,  $df\_denom=49$ ,  $df\_num=3$

number of lags: 4

ssr based F test:  $F=0.6874$  ,  $p=0.6044$  ,  $df\_denom=46$ ,  $df\_num=4$

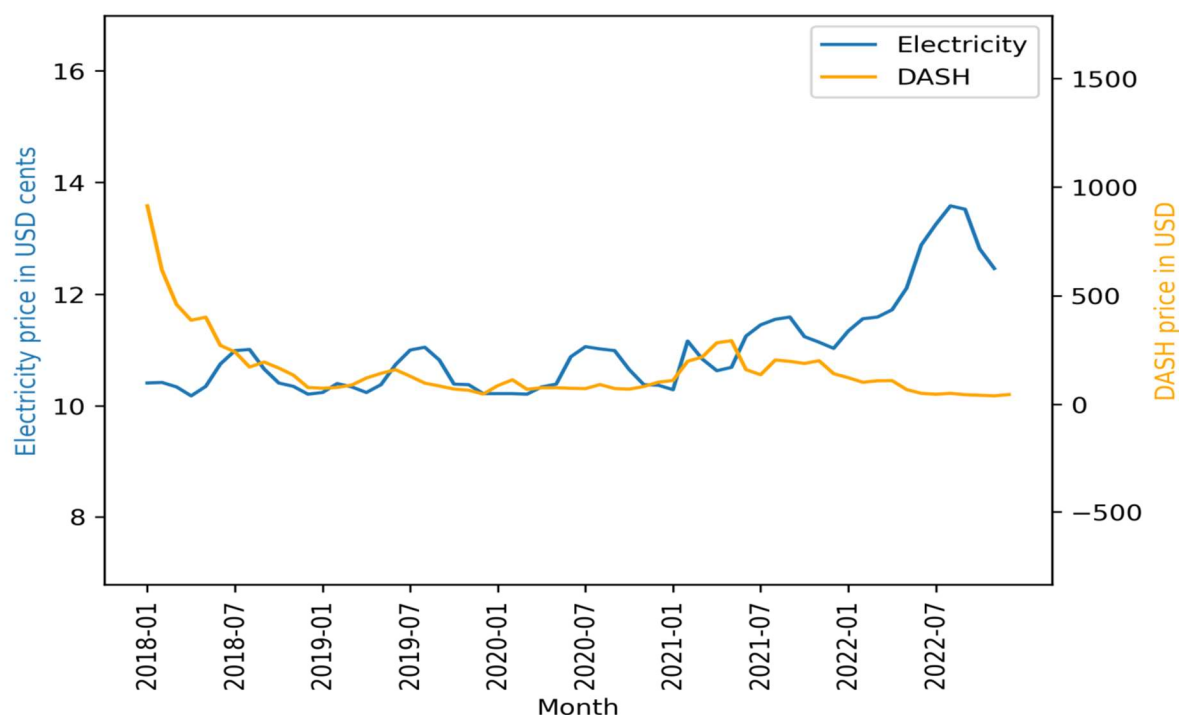
ssr based chi2 test:  $chi2=3.2873$  ,  $p=0.5109$  ,  $df=4$

likelihood ratio test:  $chi2=3.1928$  ,  $p=0.5261$  ,  $df=4$

parameter F test:  $F=0.6874$  ,  $p=0.6044$  ,  $df\_denom=46$ ,  $df\_num=4$

Από το παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχουν ενδείξεις ισχυρής αιτιώδους σχέσης μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών XHI με  $p\text{-value}=0.008$ ,  $f\text{-statistic}=6.658$  για  $\text{lag}=1$ .

## Dash (DASH)



Αποτελέσματα ελέγχου αιτιότητας κατά Granger ( $\forall \text{lag} \in [1,4]$ ):

number of lags: 1

ssr based F test:  $F=1.7753$  ,  $p=0.1882$  ,  $df\_denom=55$ ,  $df\_num=1$

ssr based chi2 test:  $chi2=1.8722$  ,  $p=0.1712$  ,  $df=1$

likelihood ratio test:  $chi2=1.8426$  ,  $p=0.1746$  ,  $df=1$

parameter F test:  $F=1.7753$  ,  $p=0.1882$  ,  $df\_denom=55$ ,  $df\_num=1$

number of lags: 2

ssr based F test:  $F=0.7065$  ,  $p=0.4980$  ,  $df\_denom=52$ ,  $df\_num=2$

ssr based chi2 test:  $chi2=1.5489$  ,  $p=0.4610$  ,  $df=2$

likelihood ratio test:  $chi2=1.5282$  ,  $p=0.4658$  ,  $df=2$

parameter F test:  $F=0.7065$  ,  $p=0.4980$  ,  $df\_denom=52$ ,  $df\_num=2$

**number of lags: 3**

**ssr based F test:  $F=4.1011$  ,  $p=0.0113$  ,  $df\_denom=49$ ,  $df\_num=3$**

**ssr based chi2 test:  $chi2=14.0610$  ,  $p=0.0028$  ,  $df=3$**

**likelihood ratio test:  $chi2=12.5448$  ,  $p=0.0057$  ,  $df=3$**

**parameter F test:  $F=4.1011$  ,  $p=0.0113$  ,  $df\_denom=49$ ,  $df\_num=3$**

number of lags: 4

ssr based F test:  $F=2.8977$  ,  $p=0.0320$  ,  $df\_denom=46$ ,  $df\_num=4$

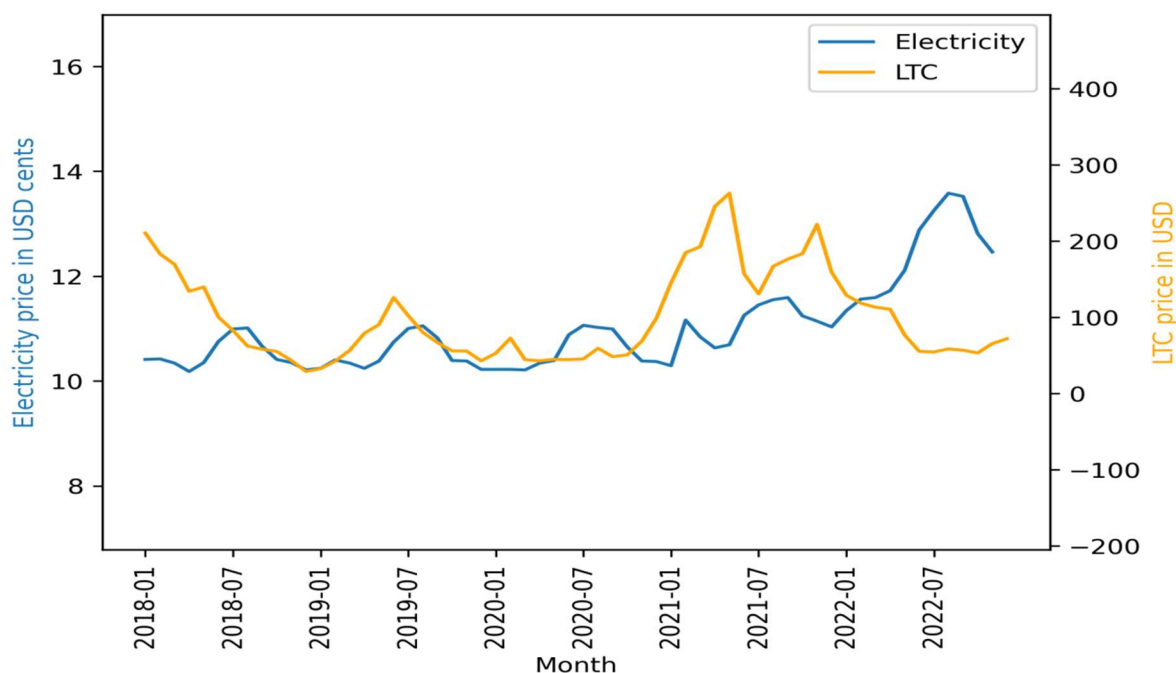
ssr based chi2 test:  $chi2=13.8584$  ,  $p=0.0078$  ,  $df=4$

likelihood ratio test:  $chi2=12.3596$  ,  $p=0.0149$  ,  $df=4$

parameter F test:  $F=2.8977$  ,  $p=0.0320$  ,  $df\_denom=46$ ,  $df\_num=4$

Από το παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχουν ενδείξεις ισχυρής αιτιώδους σχέσης μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών DASH με  $p\text{-value}=0.002$ ,  $f\text{-statistic}=4.101$  για  $\text{lag}=3$ .

## LiteCoin (LTC)



Αποτελέσματα ελέγχου αιτιότητας κατά Granger ( $\forall \text{lag} \in [1,4]$ ):

number of lags: 1  
ssr based F test:  $F=0.1379$  ,  $p=0.7118$  ,  $df\_denom=55$ ,  $df\_num=1$   
ssr based chi2 test:  $chi2=0.1454$  ,  $p=0.7030$  ,  $df=1$   
likelihood ratio test:  $chi2=0.1452$  ,  $p=0.7032$  ,  $df=1$   
parameter F test:  $F=0.1379$  ,  $p=0.7118$  ,  $df\_denom=55$ ,  $df\_num=1$

number of lags: 2  
ssr based F test:  $F=0.6694$  ,  $p=0.5164$  ,  $df\_denom=52$ ,  $df\_num=2$   
ssr based chi2 test:  $chi2=1.4676$  ,  $p=0.4801$  ,  $df=2$   
likelihood ratio test:  $chi2=1.4490$  ,  $p=0.4846$  ,  $df=2$   
parameter F test:  $F=0.6694$  ,  $p=0.5164$  ,  $df\_denom=52$ ,  $df\_num=2$

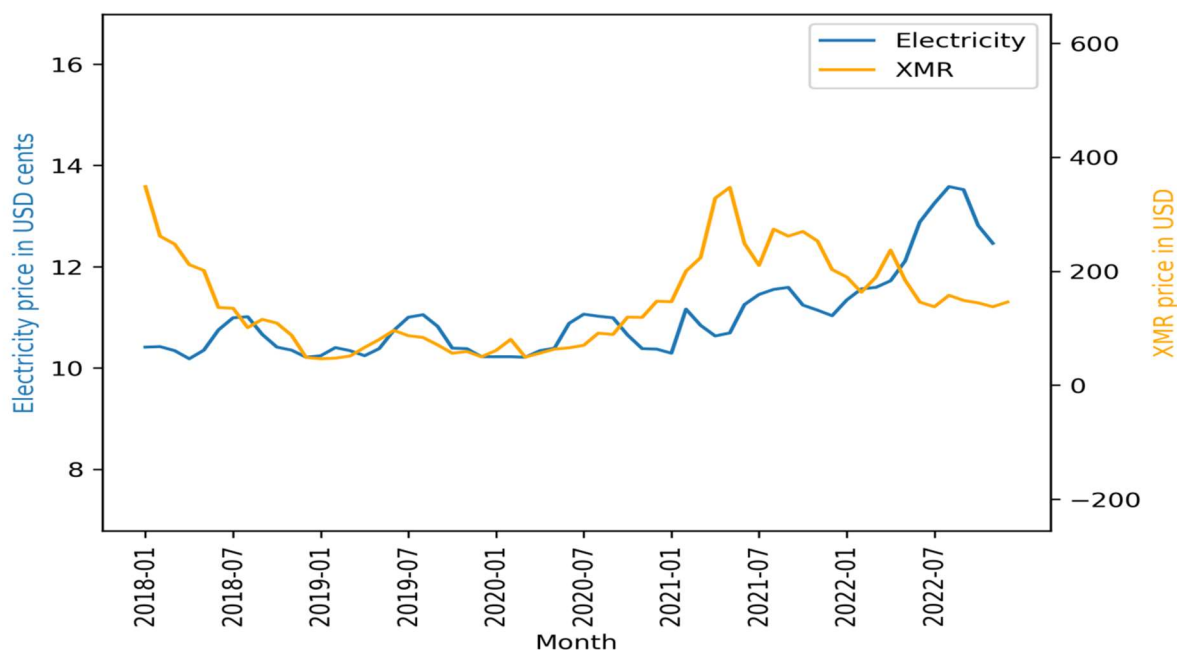
**number of lags: 3**  
**ssr based F test:  $F=2.7474$  ,  $p=0.0528$  ,  $df\_denom=49$ ,  $df\_num=3$**   
**ssr based chi2 test:  $chi2=9.4195$  ,  $p=0.0242$  ,  $df=3$**   
**likelihood ratio test:  $chi2=8.7063$  ,  $p=0.0335$  ,  $df=3$**   
**parameter F test:  $F=2.7474$  ,  $p=0.0528$  ,  $df\_denom=49$ ,  $df\_num=3$**

number of lags: 4  
ssr based F test:  $F=2.1632$  ,  $p=0.0881$  ,  $df\_denom=46$ ,  $df\_num=4$   
ssr based chi2 test:  $chi2=10.3457$  ,  $p=0.0350$  ,  $df=4$   
likelihood ratio test:  $chi2=9.4797$  ,  $p=0.0502$  ,  $df=4$   
parameter F test:  $F=2.1632$  ,  $p=0.0881$  ,  $df\_denom=46$ ,  $df\_num=4$

Από το παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχουν ενδείξεις ασθενούς αιτιώδους σχέσης μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών LTC με  $p\text{-value}=0.024$ ,  $f\text{-statistic}=2.747$  για  $\text{lag}=3$ .



## Monero (XMR)



Αποτελέσματα ελέγχου αιτιότητας κατά Granger ( $\forall \text{lag} \in [1,4]$ ):

number of lags: 1  
ssr based F test:  $F=0.6183$  ,  $p=0.4350$  ,  $df\_denom=55$ ,  $df\_num=1$   
ssr based chi2 test:  $chi2=0.6521$  ,  $p=0.4194$  ,  $df=1$   
likelihood ratio test:  $chi2=0.6484$  ,  $p=0.4207$  ,  $df=1$   
parameter F test:  $F=0.6183$  ,  $p=0.4350$  ,  $df\_denom=55$ ,  $df\_num=1$

number of lags: 2  
ssr based F test:  $F=0.3197$  ,  $p=0.7278$  ,  $df\_denom=52$ ,  $df\_num=2$   
ssr based chi2 test:  $chi2=0.7008$  ,  $p=0.7044$  ,  $df=2$   
likelihood ratio test:  $chi2=0.6965$  ,  $p=0.7059$  ,  $df=2$   
parameter F test:  $F=0.3197$  ,  $p=0.7278$  ,  $df\_denom=52$ ,  $df\_num=2$

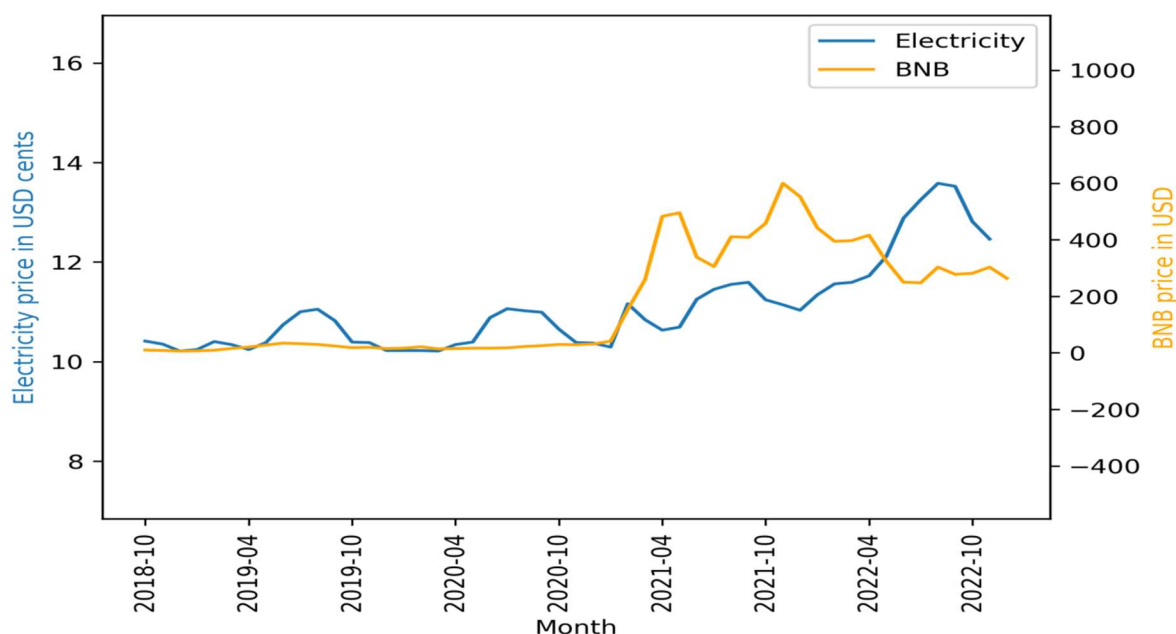
**number of lags: 3**  
**ssr based F test:  $F=6.4710$  ,  $p=0.0009$  ,  $df\_denom=49$ ,  $df\_num=3$**   
**ssr based chi2 test:  $chi2=22.1864$  ,  $p=0.0001$  ,  $df=3$**   
**likelihood ratio test:  $chi2=18.6897$  ,  $p=0.0003$  ,  $df=3$**   
**parameter F test:  $F=6.4710$  ,  $p=0.0009$  ,  $df\_denom=49$ ,  $df\_num=3$**

number of lags: 4  
ssr based F test:  $F=4.8049$  ,  $p=0.0025$  ,  $df\_denom=46$ ,  $df\_num=4$   
ssr based chi2 test:  $chi2=22.9798$  ,  $p=0.0001$  ,  $df=4$   
likelihood ratio test:  $chi2=19.2014$  ,  $p=0.0007$  ,  $df=4$   
parameter F test:  $F=4.8049$  ,  $p=0.0025$  ,  $df\_denom=46$ ,  $df\_num=4$

Από το παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχουν ενδείξεις ισχυρής αιτιώδους σχέσης μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών XMR με  $p\text{-value}=0.0009$ ,  $f\text{-statistic}=6.471$  για  $\text{lag}=3$ .

## Proof of Stake (PoS)

### Binance Coin (BNB)



Αποτελέσματα ελέγχου αιτιότητας κατά Granger ( $\forall \text{lag} \in [1,4]$ ):

number of lags: 1

ssr based F test:  $F=0.2966$  ,  $p=0.5886$  ,  $df\_denom=46$ ,  $df\_num=1$

ssr based chi2 test:  $chi2=0.3160$  ,  $p=0.5740$  ,  $df=1$

likelihood ratio test:  $chi2=0.3150$  ,  $p=0.5747$  ,  $df=1$

parameter F test:  $F=0.2966$  ,  $p=0.5886$  ,  $df\_denom=46$ ,  $df\_num=1$

number of lags: 2

ssr based F test:  $F=0.7363$  ,  $p=0.4848$  ,  $df\_denom=43$ ,  $df\_num=2$

ssr based chi2 test:  $chi2=1.6438$  ,  $p=0.4396$  ,  $df=2$

likelihood ratio test:  $chi2=1.6162$  ,  $p=0.4457$  ,  $df=2$

parameter F test:  $F=0.7363$  ,  $p=0.4848$  ,  $df\_denom=43$ ,  $df\_num=2$

number of lags: 3

ssr based F test:  $F=5.5410$  ,  $p=0.0028$  ,  $df\_denom=40$ ,  $df\_num=3$

ssr based chi2 test:  $chi2=19.5320$  ,  $p=0.0002$  ,  $df=3$

likelihood ratio test:  $chi2=16.3341$  ,  $p=0.0010$  ,  $df=3$

parameter F test:  $F=5.5410$  ,  $p=0.0028$  ,  $df\_denom=40$ ,  $df\_num=3$

**number of lags: 4**

**ssr based F test:  $F=7.4595$  ,  $p=0.0002$  ,  $df\_denom=37$ ,  $df\_num=4$**

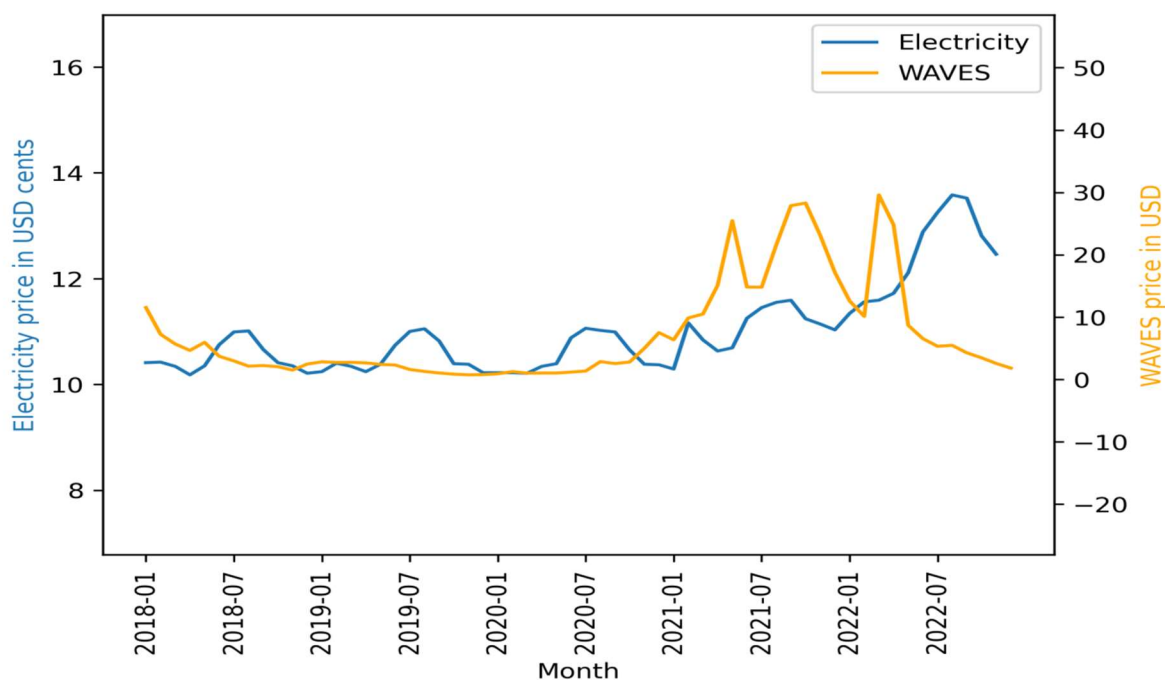
**ssr based chi2 test:  $chi2=37.0961$  ,  $p=0.0000$  ,  $df=4$**

**likelihood ratio test:  $chi2=27.2024$  ,  $p=0.0000$  ,  $df=4$**

**parameter F test:  $F=7.4595$  ,  $p=0.0002$  ,  $df\_denom=37$ ,  $df\_num=4$**

Από το παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχουν ενδείξεις ισχυρής αιτιώδους σχέσης μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών BNB με  $p\text{-value}=0.0002$ ,  $f\text{-statistic}=7.459$  για  $\text{lag}=4$ .

## Waves (WAVES)



Αποτελέσματα ελέγχου αιτιότητας κατά Granger ( $\forall$  lag  $\in [1,4]$ ):

```

number of lags: 1
ssr based F test:      F=0.0206 , p=0.8864 , df_denom=55, df_num=1
ssr based chi2 test:  chi2=0.0217 , p=0.8828 , df=1
likelihood ratio test: chi2=0.0217 , p=0.8828 , df=1
parameter F test:     F=0.0206 , p=0.8864 , df_denom=55, df_num=1

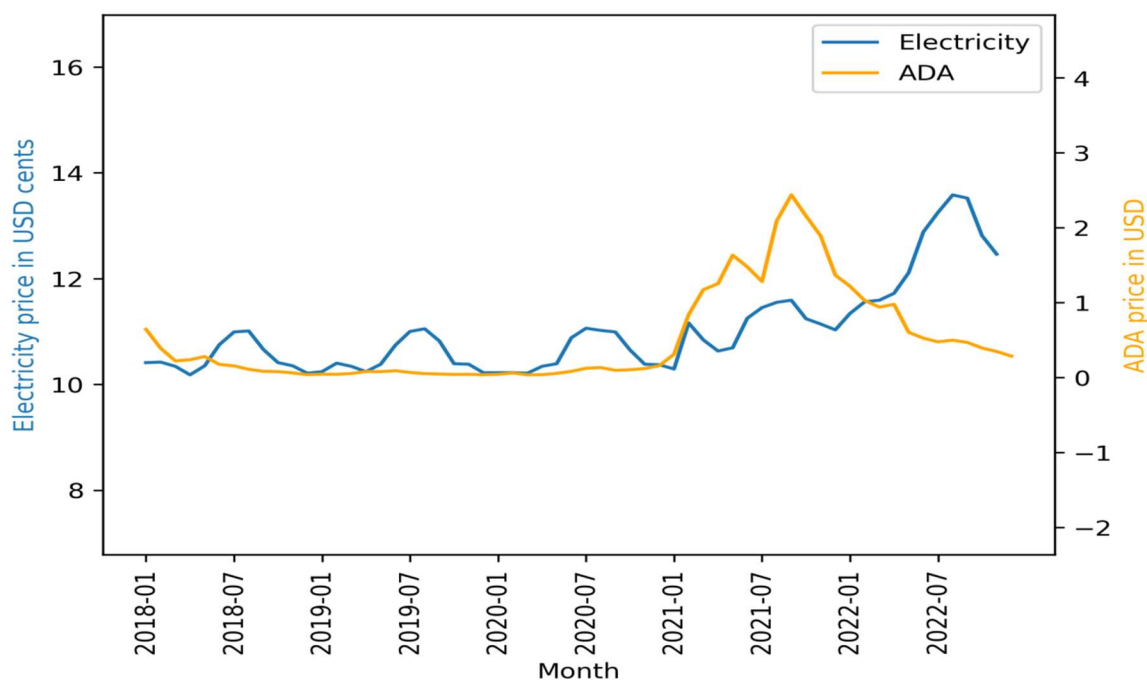
number of lags: 2
ssr based F test:      F=0.0257 , p=0.9747 , df_denom=52, df_num=2
ssr based chi2 test:  chi2=0.0563 , p=0.9723 , df=2
likelihood ratio test: chi2=0.0562 , p=0.9723 , df=2
parameter F test:     F=0.0257 , p=0.9747 , df_denom=52, df_num=2

Granger Causality
number of lags: 3
ssr based F test:      F=1.2739 , p=0.2937 , df_denom=49, df_num=3
ssr based chi2 test:  chi2=4.3675 , p=0.2244 , df=3
likelihood ratio test: chi2=4.2056 , p=0.2401 , df=3
parameter F test:     F=1.2739 , p=0.2937 , df_denom=49, df_num=3

Granger Causality
number of lags: 4
ssr based F test:      F=1.5927 , p=0.1923 , df_denom=46, df_num=4
ssr based chi2 test:  chi2=7.6172 , p=0.1067 , df=4
likelihood ratio test: chi2=7.1339 , p=0.1290 , df=4
parameter F test:     F=1.5927 , p=0.1923 , df_denom=46, df_num=4
    
```

Από το παραπάνω προκύπτει ότι δεν υπάρχουν ενδείξεις αιτιώδους σχέσης μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών WAVES ( $p\text{-value} > 0.005 \forall$  lag  $\in [1,4]$ ).

## Cardano (ADA)



Αποτελέσματα ελέγχου αιτιότητας κατά Granger ( $\forall \text{lag} \in [1,4]$ ):

```
number of lags: 1
ssr based F test:      F=0.1678 , p=0.6837 , df_denom=55, df_num=1
ssr based chi2 test:  chi2=0.1769 , p=0.6740 , df=1
likelihood ratio test: chi2=0.1767 , p=0.6743 , df=1
parameter F test:     F=0.1678 , p=0.6837 , df_denom=55, df_num=1

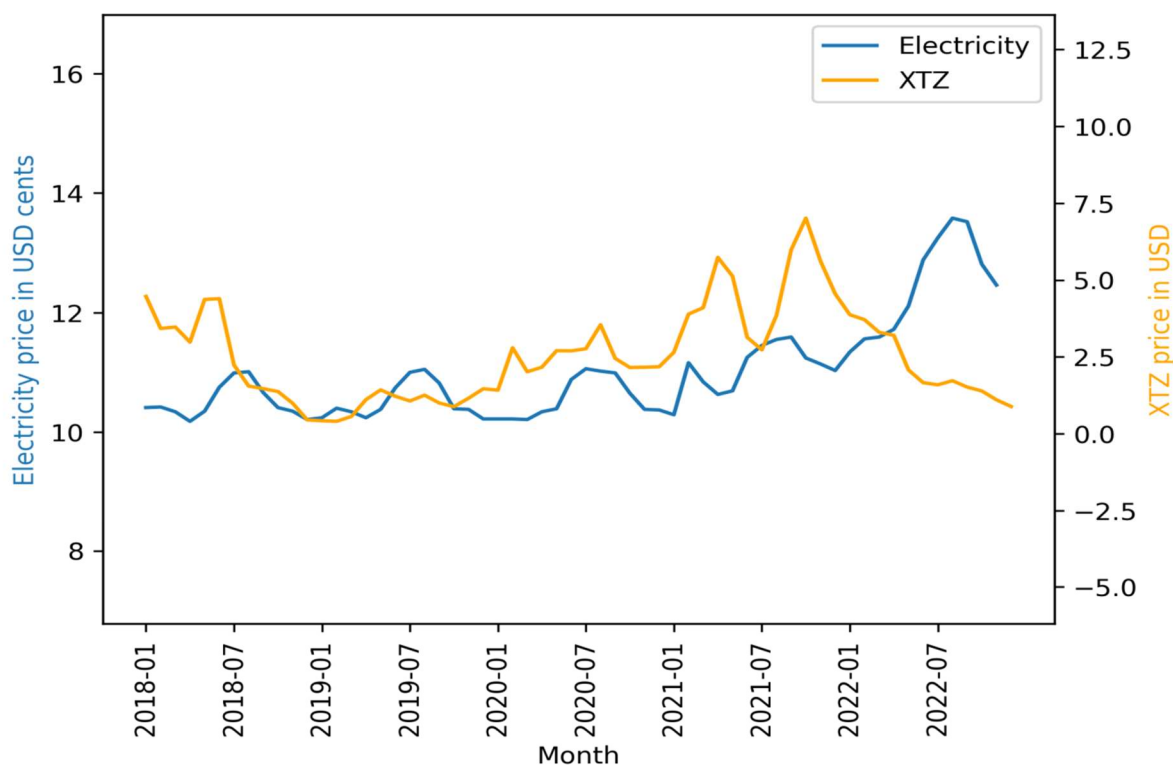
number of lags: 2
ssr based F test:      F=0.1002 , p=0.9048 , df_denom=52, df_num=2
ssr based chi2 test:  chi2=0.2197 , p=0.8960 , df=2
likelihood ratio test: chi2=0.2193 , p=0.8962 , df=2
parameter F test:     F=0.1002 , p=0.9048 , df_denom=52, df_num=2

number of lags: 3
ssr based F test:      F=1.3422 , p=0.2715 , df_denom=49, df_num=3
ssr based chi2 test:  chi2=4.6019 , p=0.2034 , df=3
likelihood ratio test: chi2=4.4226 , p=0.2193 , df=3
parameter F test:     F=1.3422 , p=0.2715 , df_denom=49, df_num=3

number of lags: 4
ssr based F test:      F=1.1848 , p=0.3301 , df_denom=46, df_num=4
ssr based chi2 test:  chi2=5.6665 , p=0.2255 , df=4
likelihood ratio test: chi2=5.3932 , p=0.2493 , df=4
parameter F test:     F=1.1848 , p=0.3301 , df_denom=46, df_num=4
```

Από το παραπάνω προκύπτει ότι δεν υπάρχουν ενδείξεις αιτιώδους σχέσης μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών ADA ( $p\text{-value} > 0.005 \forall \text{lag} \in [1,4]$ ).

## Tezos (XTZ)



Αποτελέσματα ελέγχου αιτιότητας κατά Granger ( $\forall \text{lag} \in [1,4]$ ):

number of lags: 1

ssr based F test:  $F=0.1800$  ,  $p=0.6730$  ,  $df\_denom=55$ ,  $df\_num=1$   
ssr based chi2 test:  $chi2=0.1898$  ,  $p=0.6631$  ,  $df=1$   
likelihood ratio test:  $chi2=0.1895$  ,  $p=0.6633$  ,  $df=1$   
parameter F test:  $F=0.1800$  ,  $p=0.6730$  ,  $df\_denom=55$ ,  $df\_num=1$

number of lags: 2

ssr based F test:  $F=0.0415$  ,  $p=0.9594$  ,  $df\_denom=52$ ,  $df\_num=2$   
ssr based chi2 test:  $chi2=0.0910$  ,  $p=0.9555$  ,  $df=2$   
likelihood ratio test:  $chi2=0.0909$  ,  $p=0.9556$  ,  $df=2$   
parameter F test:  $F=0.0415$  ,  $p=0.9594$  ,  $df\_denom=52$ ,  $df\_num=2$

number of lags: 3

ssr based F test:  $F=2.0935$  ,  $p=0.1132$  ,  $df\_denom=49$ ,  $df\_num=3$   
ssr based chi2 test:  $chi2=7.1776$  ,  $p=0.0664$  ,  $df=3$   
likelihood ratio test:  $chi2=6.7535$  ,  $p=0.0802$  ,  $df=3$   
parameter F test:  $F=2.0935$  ,  $p=0.1132$  ,  $df\_denom=49$ ,  $df\_num=3$

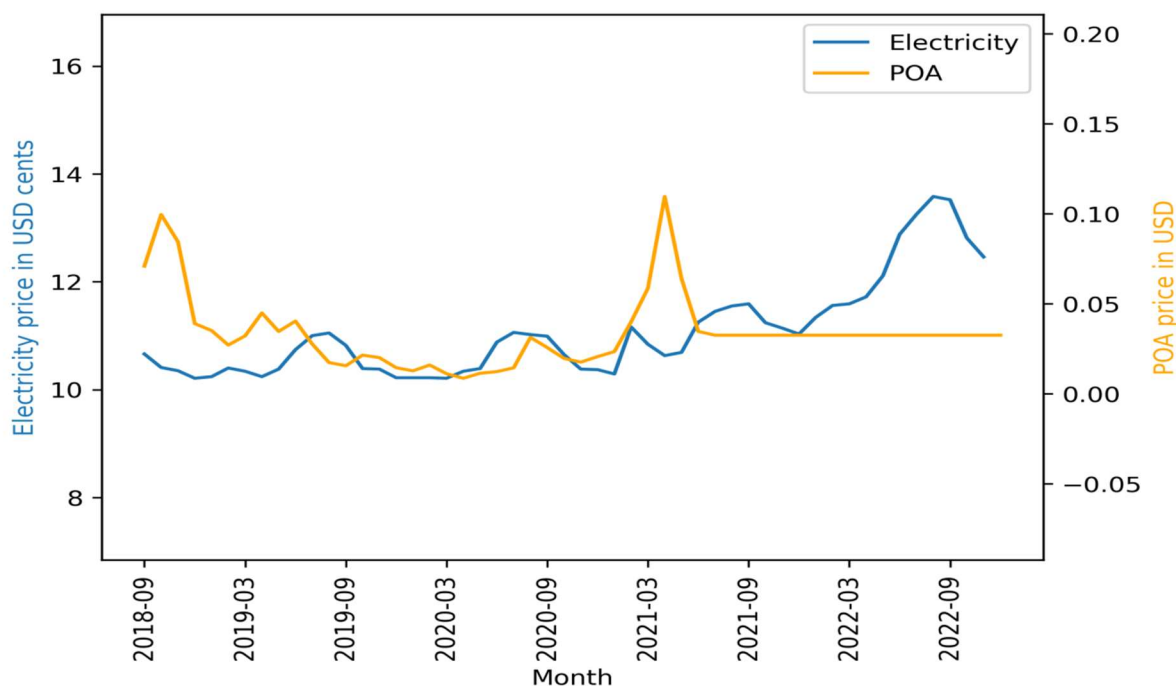
number of lags: 4

ssr based F test:  $F=1.6376$  ,  $p=0.1810$  ,  $df\_denom=46$ ,  $df\_num=4$   
ssr based chi2 test:  $chi2=7.8319$  ,  $p=0.0979$  ,  $df=4$   
likelihood ratio test:  $chi2=7.3222$  ,  $p=0.1198$  ,  $df=4$

Από το παραπάνω προκύπτει ότι δεν υπάρχουν ενδείξεις αιτιώδους σχέσης μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών XTZ ( $p\text{-value} > 0.005 \forall \text{lag} \in [1,4]$ ).

## Proof of Authority (PoA)

### POA Network (POA)



Αποτελέσματα ελέγχου αιτιότητας κατά Granger ( $\forall \text{lag} \in [1,4]$ ):

number of lags: 1

ssr based F test:  $F=0.2737$  ,  $p=0.6033$  ,  $df\_denom=47$  ,  $df\_num=1$   
ssr based chi2 test:  $chi2=0.2912$  ,  $p=0.5894$  ,  $df=1$   
likelihood ratio test:  $chi2=0.2904$  ,  $p=0.5900$  ,  $df=1$   
parameter F test:  $F=0.2737$  ,  $p=0.6033$  ,  $df\_denom=47$  ,  $df\_num=1$

number of lags: 2

ssr based F test:  $F=0.2715$  ,  $p=0.7635$  ,  $df\_denom=44$  ,  $df\_num=2$   
ssr based chi2 test:  $chi2=0.6048$  ,  $p=0.7391$  ,  $df=2$   
likelihood ratio test:  $chi2=0.6011$  ,  $p=0.7404$  ,  $df=2$   
parameter F test:  $F=0.2715$  ,  $p=0.7635$  ,  $df\_denom=44$  ,  $df\_num=2$

number of lags: 3

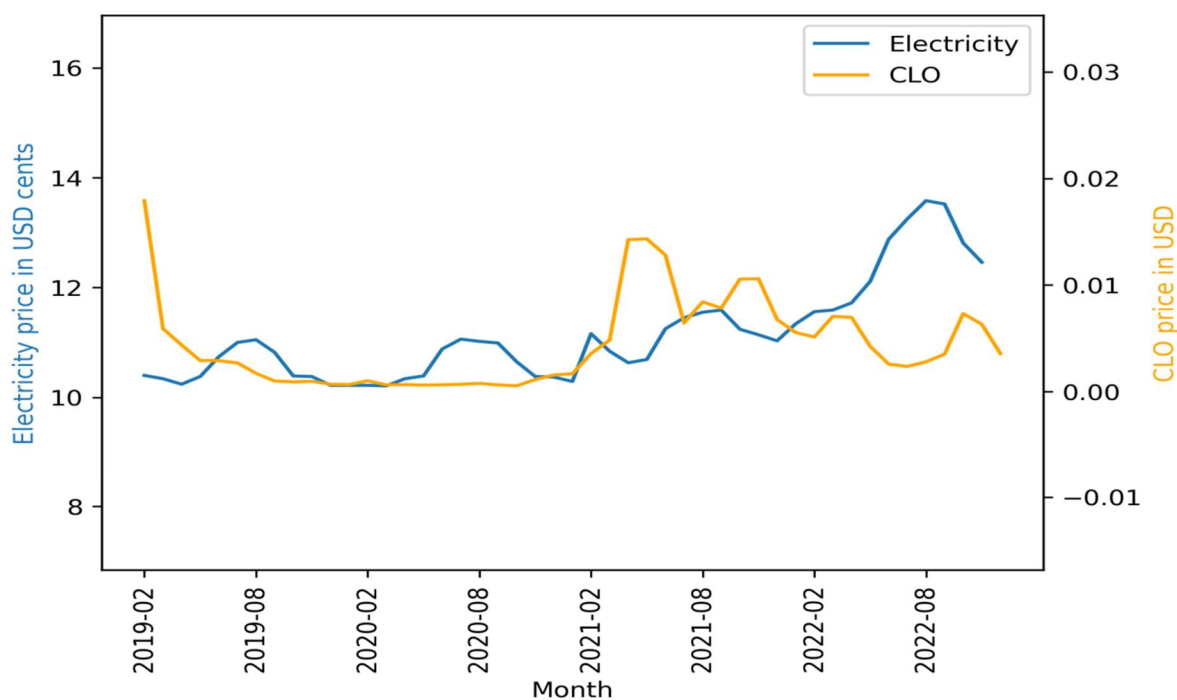
ssr based F test:  $F=4.9425$  ,  $p=0.0051$  ,  $df\_denom=41$  ,  $df\_num=3$   
ssr based chi2 test:  $chi2=17.3589$  ,  $p=0.0006$  ,  $df=3$   
likelihood ratio test:  $chi2=14.8173$  ,  $p=0.0020$  ,  $df=3$   
parameter F test:  $F=4.9425$  ,  $p=0.0051$  ,  $df\_denom=41$  ,  $df\_num=3$

**number of lags: 4**

**ssr based F test:  $F=6.6701$  ,  $p=0.0004$  ,  $df\_denom=38$  ,  $df\_num=4$**   
**ssr based chi2 test:  $chi2=32.9994$  ,  $p=0.0000$  ,  $df=4$**   
**likelihood ratio test:  $chi2=24.9979$  ,  $p=0.0001$  ,  $df=4$**   
**parameter F test:  $F=6.6701$  ,  $p=0.0004$  ,  $df\_denom=38$  ,  $df\_num=4$**

Από το παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχουν ενδείξεις ισχυρής αιτιώδους σχέσης μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών POA με  $p\text{-value}=0.0004$  ,  $f\text{-statistic}=6.670$  για  $\text{lag}=4$ .

## Callisto (CLO)



Αποτελέσματα ελέγχου αιτιότητας κατά Granger ( $\forall \text{lag} \in [1,4]$ ):

number of lags: 1  
 ssr based F test:  $F=2.1238$  ,  $p=0.1525$  ,  $df_{\text{denom}}=42$  ,  $df_{\text{num}}=1$   
 ssr based chi2 test:  $chi2=2.2755$  ,  $p=0.1314$  ,  $df=1$   
 likelihood ratio test:  $chi2=2.2198$  ,  $p=0.1362$  ,  $df=1$   
 parameter F test:  $F=2.1238$  ,  $p=0.1525$  ,  $df_{\text{denom}}=42$  ,  $df_{\text{num}}=1$

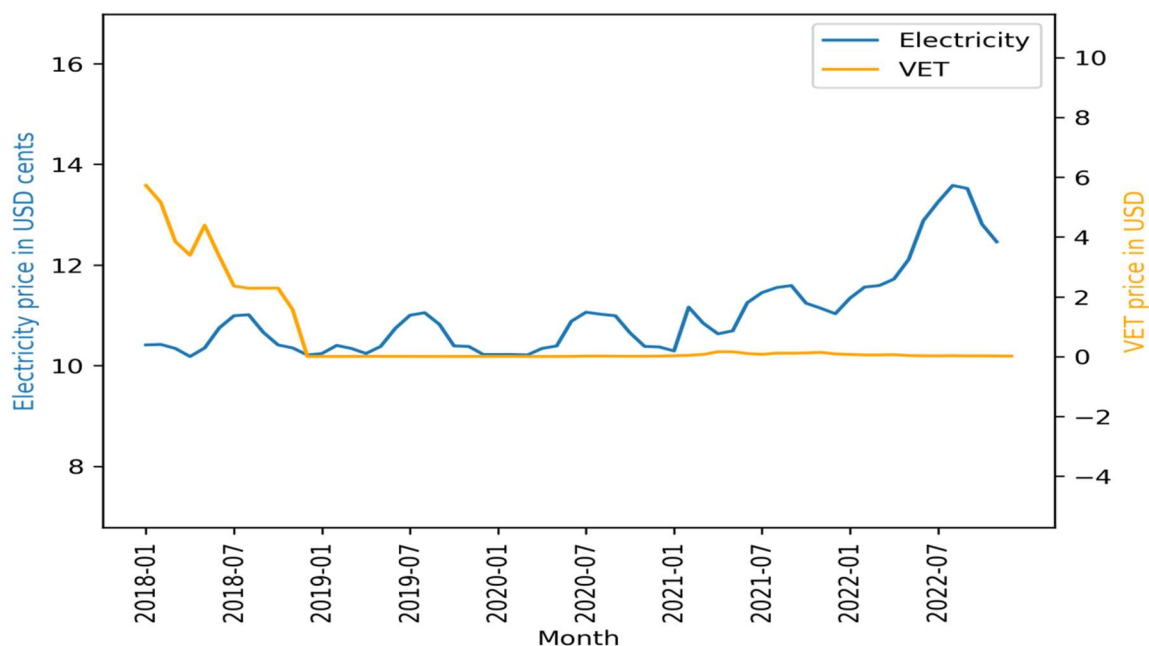
number of lags: 2  
 ssr based F test:  $F=1.3643$  ,  $p=0.2675$  ,  $df_{\text{denom}}=39$  ,  $df_{\text{num}}=2$   
 ssr based chi2 test:  $chi2=3.0784$  ,  $p=0.2146$  ,  $df=2$   
 likelihood ratio test:  $chi2=2.9754$  ,  $p=0.2259$  ,  $df=2$   
 parameter F test:  $F=1.3643$  ,  $p=0.2675$  ,  $df_{\text{denom}}=39$  ,  $df_{\text{num}}=2$

number of lags: 3  
 ssr based F test:  $F=7.4059$  ,  $p=0.0005$  ,  $df_{\text{denom}}=36$  ,  $df_{\text{num}}=3$   
 ssr based chi2 test:  $chi2=26.5376$  ,  $p=0.0000$  ,  $df=3$   
 likelihood ratio test:  $chi2=20.6687$  ,  $p=0.0001$  ,  $df=3$   
 parameter F test:  $F=7.4059$  ,  $p=0.0005$  ,  $df_{\text{denom}}=36$  ,  $df_{\text{num}}=3$

**number of lags: 4**  
**ssr based F test:  $F=6.4354$  ,  $p=0.0006$  ,  $df_{\text{denom}}=33$  ,  $df_{\text{num}}=4$**   
**ssr based chi2 test:  $chi2=32.7622$  ,  $p=0.0000$  ,  $df=4$**   
**likelihood ratio test:  $chi2=24.2190$  ,  $p=0.0001$  ,  $df=4$**   
**parameter F test:  $F=6.4354$  ,  $p=0.0006$  ,  $df_{\text{denom}}=33$  ,  $df_{\text{num}}=4$**

Από το παραπάνω προκύπτει ότι υπάρχουν ενδείξεις ισχυρής αιτιώδους σχέσης μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών CLO με  $p\text{-value}=0.0006$  ,  $f\text{-statistic}=6.435$  για  $\text{lag}=4$ .

## VeChain (VET)



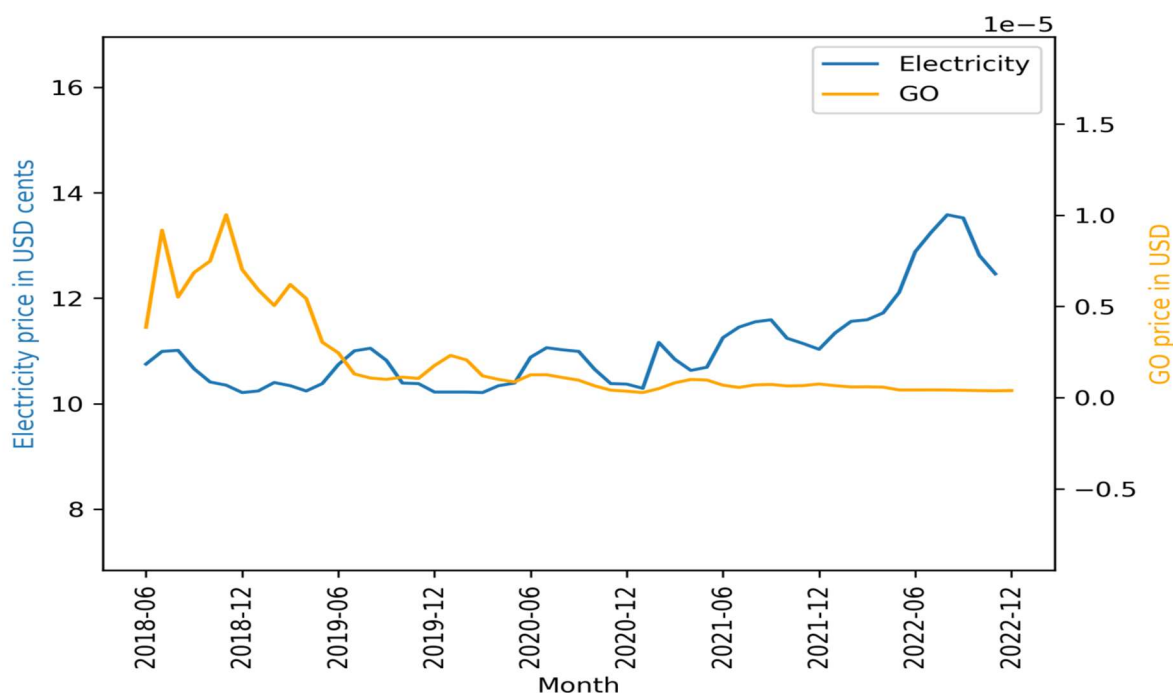
Αποτελέσματα ελέγχου αιτιότητας κατά Granger ( $\forall \text{lag} \in [1,4]$ ):

number of lags: 1
ssr based F test: F=0.0177 , p=0.8947 , df_denom=55, df_num=1
ssr based chi2 test: chi2=0.0187 , p=0.8913 , df=1
likelihood ratio test: chi2=0.0187 , p=0.8913 , df=1
parameter F test: F=0.0177 , p=0.8947 , df_denom=55, df_num=1
number of lags: 2
ssr based F test: F=0.2170 , p=0.8057 , df_denom=52, df_num=2
ssr based chi2 test: chi2=0.4757 , p=0.7883 , df=2
likelihood ratio test: chi2=0.4737 , p=0.7891 , df=2
parameter F test: F=0.2170 , p=0.8057 , df_denom=52, df_num=2
number of lags: 3
ssr based F test: F=0.8281 , p=0.4848 , df_denom=49, df_num=3
ssr based chi2 test: chi2=2.8393 , p=0.4171 , df=3
likelihood ratio test: chi2=2.7697 , p=0.4285 , df=3
parameter F test: F=0.8281 , p=0.4848 , df_denom=49, df_num=3
number of lags: 4
ssr based F test: F=0.8538 , p=0.4988 , df_denom=46, df_num=4
ssr based chi2 test: chi2=4.0832 , p=0.3949 , df=4
likelihood ratio test: chi2=3.9387 , p=0.4144 , df=4
parameter F test: F=0.8538 , p=0.4988 , df_denom=46, df_num=4

Από το παραπάνω προκύπτει ότι δεν υπάρχουν ενδείξεις αιτιώδους σχέσης μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών VET ( $p\text{-value} > 0.005 \forall \text{lag} \in [1,4]$ ).



## GoChain (GO)



Αποτελέσματα ελέγχου αιτιότητας κατά Granger ( $\forall \text{lag} \in [1,4]$ ):

number of lags: 1  
ssr based F test:  $F=0.0976$  ,  $p=0.7560$  ,  $df\_denom=50$  ,  $df\_num=1$   
ssr based chi2 test:  $chi2=0.1034$  ,  $p=0.7477$  ,  $df=1$   
likelihood ratio test:  $chi2=0.1033$  ,  $p=0.7479$  ,  $df=1$   
parameter F test:  $F=0.0976$  ,  $p=0.7560$  ,  $df\_denom=50$  ,  $df\_num=1$

number of lags: 2  
ssr based F test:  $F=0.5276$  ,  $p=0.5935$  ,  $df\_denom=47$  ,  $df\_num=2$   
ssr based chi2 test:  $chi2=1.1675$  ,  $p=0.5578$  ,  $df=2$   
likelihood ratio test:  $chi2=1.1545$  ,  $p=0.5614$  ,  $df=2$   
parameter F test:  $F=0.5276$  ,  $p=0.5935$  ,  $df\_denom=47$  ,  $df\_num=2$

number of lags: 3  
ssr based F test:  $F=0.1318$  ,  $p=0.9407$  ,  $df\_denom=44$  ,  $df\_num=3$   
ssr based chi2 test:  $chi2=0.4582$  ,  $p=0.9280$  ,  $df=3$   
likelihood ratio test:  $chi2=0.4561$  ,  $p=0.9284$  ,  $df=3$   
parameter F test:  $F=0.1318$  ,  $p=0.9407$  ,  $df\_denom=44$  ,  $df\_num=3$

number of lags: 4  
ssr based F test:  $F=0.3883$  ,  $p=0.8158$  ,  $df\_denom=41$  ,  $df\_num=4$   
ssr based chi2 test:  $chi2=1.8940$  ,  $p=0.7552$  ,  $df=4$   
likelihood ratio test:  $chi2=1.8591$  ,  $p=0.7617$  ,  $df=4$   
parameter F test:  $F=0.3883$  ,  $p=0.8158$  ,  $df\_denom=41$  ,  $df\_num=4$

Από το παραπάνω προκύπτει ότι δεν υπάρχουν ενδείξεις αιτιώδους σχέσης μεταξύ ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών GO ( $p\text{-value} > 0.005 \forall \text{lag} \in [1,4]$ ).

## Σύνοψη Αποτελεσμάτων

Νόμισμα	p-value	f-statistic	Αιτιώδης σχέση
BTC	0.006	3.004	Ασθενής
ETH	0.049	2.292	Ασθενής
DGB	0.0005	7.068	Ισχυρή
XHI	0.008	6.658	Ισχυρή
DASH	0.002	4.101	Ισχυρή
LTC	0.024	2.747	Ασθενής
XMR	0.0009	6.471	Ισχυρή
BNB	0.0002	7.459	Ισχυρή
WAVES	-	-	-
ADA	-	-	-
XTZ	-	-	-
POA	0.0004	6.670	Ισχυρή
CLO	0.0006	6.435	Ισχυρή
VET	-	-	-
GO	-	-	-

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>- ΕΠΙΛΟΓΟΣ

### 6.1 Συζήτηση – Περιορισμοί

Η αιτιότητα μεταξύ των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και των τιμών κρυπτονομισμάτων δεν είναι εύκολο να αποδειχθεί λόγω της παρουσίας εξωτερικών παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν και τις δύο μεταβλητές. Για παράδειγμα, οι αλλαγές στους κυβερνητικούς κανονισμούς, τα ποσοστά υιοθέτησης κρυπτονομισμάτων, οι γεωπολιτικές εντάσεις και το γενικότερο κλίμα της αγοράς μπορούν να διαδραματίσουν ρόλο στη δυναμική των τιμών τόσο της ηλεκτρικής ενέργειας όσο και των κρυπτονομισμάτων. Έτσι, είναι δύσκολο να διαχωρίσουμε την αιτιώδη σχέση μεταξύ αυτών των μεταβλητών από τις επιδράσεις άλλων παραγόντων που μπορεί να οδηγούν στις διακυμάνσεις τους.

Ένας άλλος σημαντικός περιορισμός της παρούσας μελέτης είναι η διαθεσιμότητα των δεδομένων. Τα δεδομένα για τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας περιορίζονται σε μηνιαίους μέσους όρους, γεγονός που μειώνει τον αριθμό των παρατηρήσεων που είναι διαθέσιμες για ανάλυση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ημερήσιες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας δεν ήταν διαθέσιμες για την υπό μελέτη περίοδο. Επιπλέον, η ανάλυση των δεδομένων ηλεκτρικής ενέργειας σε ημερήσιο διάστημα δεν θα είχε πολύ νόημα λόγω της φύσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Πρώτον, δεν υπάρχει μεγάλη μεταβολή στις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας σε καθημερινή βάση, και δεύτερον, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μετράται συνήθως στο τέλος του μήνα και το κόστος υπολογίζεται με βάση τη μέση τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας για τον εν λόγω μήνα.

Επιπλέον, τα δεδομένα για τα κρυπτονομίσματα που χρησιμοποιούν αλγόριθμους συναίνεσης, όπως η απόδειξη συμμετοχής και η απόδειξη εξουσιοδότησης, είναι γενικά διαθέσιμα μετά το 2018. Αυτό περιορίζει την ανάλυση σε μια σχετικά σύντομη περίοδο, μειώνοντας τη δυνατότητα εντοπισμού πιο εκτεταμένων τάσεων ή αλλαγών στην αιτιώδη σχέση με την πάροδο του χρόνου.

Ένας άλλος περιορισμός της παρούσας μελέτης είναι η εστίαση σε συγκεκριμένα επιλεγμένα κρυπτονομίσματα. Ενώ τα εν λόγω κρυπτονομίσματα

συγκαταλέγονται μεταξύ των σημαντικότερων βάσει της κεφαλαιοποίησης της αγοράς ή έχουν μοναδικά χαρακτηριστικά, ο αποκλεισμός άλλων κρυπτονομισμάτων μπορεί να περιορίσει τη γενικευσιμότητα των αποτελεσμάτων.

Ακόμη, η παρούσα μελέτη εξετάζει μόνο τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας στις ΗΠΑ. Οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας και οι παράγοντες που τις επηρεάζουν μπορεί να διαφέρουν σημαντικά σε διάφορες περιοχές και χώρες και, ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμα σε άλλες περιοχές.

Αξίζει ακόμη να σημειωθεί πως οι ΗΠΑ αποτελούν ένα μικρό δείγμα του κόστους εξόρυξης κρυπτονομισμάτων καθώς η εξόρυξη λαμβάνει χώρο παγκοσμίως – όπου δηλαδή βρίσκονται τα μέλη του εκάστοτε δικτύου blockchain.

Συνεπώς, η λήψη του κόστους ρεύματος στις ΗΠΑ αποτελεί κλάσμα των δεδομένων που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την εξαγωγή δεδομένων συσχέτισης.

Τέλος, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η αιτιώδης συνάφεια, ακόμη και όταν ανιχνεύεται, δεν συνεπάγεται άμεση αιτιώδη σχέση μεταξύ των μεταβλητών. Τα αποτελέσματα του ελέγχου αιτιότητας κατά Granger υποδηλώνουν μόνο ότι μπορεί να υπάρχει αιτιώδης σχέση, αλλά απαιτείται περαιτέρω ανάλυση και διερεύνηση για την επιβεβαίωση της κατεύθυνσης και του μεγέθους του αιτιώδους αποτελέσματος.

## 6.2 Συμπεράσματα

Μετά τη διεξαγωγή της ανάλυσης αιτιότητας κατά Granger, βρήκαμε στοιχεία για την ύπαρξη αιτιώδους σχέσης μεταξύ των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας και των τιμών των κρυπτονομισμάτων. Η ανάλυση έδειξε ότι οι τιμές των κρυπτονομισμάτων επηρεάζονται από τις μεταβολές στις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας, γεγονός που υποδηλώνει ότι το κόστος της ενέργειας πιθανώς αποτελεί παράγοντα για τον καθορισμό των τιμών των κρυπτονομισμάτων. Ωστόσο, η ισχύς αυτής της σχέσης ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του αλγορίθμου συναίνεσης που χρησιμοποιείται από το κρυπτονομίσμα.

Τα αποτελέσματά μας δείχνουν ότι τα κρυπτονομίσματα που βασίζονται σε αλγόριθμους Proof of Work (PoW) έχουν ισχυρότερη σχέση αιτιότητας με τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με τα κρυπτονομίσματα που βασίζονται σε αλγόριθμους Proof of Stake (PoS) και Proof of Authority (PoA). Αυτό υποδηλώνει ότι η κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται για την εξόρυξη PoW αποτελεί βασικό παράγοντα για τον καθορισμό της αξίας των κρυπτονομισμάτων που βασίζονται σε PoW. Το εύρημα αυτό συνάδει με προηγούμενες μελέτες που έχουν δείξει ότι τα κρυπτονομίσματα PoW έχουν υψηλότερο ποσοστό κατανάλωσης ενέργειας σε σύγκριση με τα κρυπτονομίσματα PoS και PoA.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα για τα κρυπτονομίσματα PoS και PoA ήταν μικτά. Ορισμένα κρυπτονομίσματα εμφάνισαν ισχυρή σχέση αιτιότητας με τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ άλλα όχι. Αυτό υποδηλώνει ότι άλλοι παράγοντες μπορεί επίσης να διαδραματίζουν ρόλο στον καθορισμό της αξίας των κρυπτονομισμάτων PoS και PoA. Πολλοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν τις τιμές των κρυπτονομισμάτων, όπως το κλίμα της αγοράς, η συμπεριφορά των επενδυτών, οι ρυθμιστικές αλλαγές και οι τεχνολογικές εξελίξεις. Ως εκ τούτου, πρέπει να ερμηνεύσουμε τα ευρήματά μας με προσοχή και να λάβουμε υπόψη μας άλλους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τις αγορές κρυπτονομισμάτων.

Συμπερασματικά, ενώ η μελέτη μας παρέχει στοιχεία για μια πιθανή αιτιώδη σχέση μεταξύ των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας και των τιμών των κρυπτονομισμάτων, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη και άλλοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τις τιμές των κρυπτονομισμάτων. Περαιτέρω

έρευνα που θα ενσωματώνει πρόσθετες μεταβλητές και θα χρησιμοποιεί άλλες οικονομετρικές μεθόδους θα μπορούσε να προσφέρει μια πιο ισχυρή κατανόηση των αιτιωδών παραγόντων που οδηγούν τις τιμές των κρυπτονομισμάτων.

### 6.3 Μελλοντική έρευνα

Υπό το πρίσμα των περιορισμών και των δυνατοτήτων περαιτέρω διερεύνησης, υπάρχουν διάφοροι δρόμοι για μελλοντικές εργασίες που θα βασιστούν στα ευρήματα της παρούσας μελέτης.

Πρώτον, οι μελλοντικές μελέτες μπορούν να επεκτείνουν το πεδίο εφαρμογής της παρούσας ανάλυσης εξετάζοντας τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας από άλλες χώρες εκτός από τις Ηνωμένες Πολιτείες. Αυτό θα προσφέρει μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της αιτιώδους σχέσης μεταξύ των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και των τιμών των κρυπτονομισμάτων σε διάφορες περιοχές.

Δεύτερον, θα ήταν ωφέλιμο να επεκταθεί η ανάλυση ώστε να συμπεριλάβει περισσότερα κρυπτονομίσματα και αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Με τη συμπερίληψη περισσότερων δεδομένων, η μελέτη μπορεί να είναι πιο αντιπροσωπευτική των συνολικών τάσεων της αγοράς και να αποτυπώσει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη σχέση μεταξύ των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας και των τιμών των κρυπτονομισμάτων.

Τρίτον, μπορεί να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα σχετικά με τον αντίκτυπο των διαφορετικών αλγορίθμων συναίνεσης στην αιτιώδη σχέση μεταξύ των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας και των τιμών κρυπτονομισμάτων. Η παρούσα μελέτη επικεντρώθηκε στους αλγορίθμους Proof of Work, Proof of Stake και Proof of Authority, αλλά υπάρχουν και άλλοι αλγόριθμοι συναίνεσης, όπως ο Delegated Proof of Stake, Byzantine Fault Tolerance κ.α., οι οποίοι ενδέχεται να παρουσιάζουν διαφορετικές αιτιώδεις σχέσεις.

Τέλος, η παρούσα μελέτη εξέτασε μόνο τη σχέση μεταξύ των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας και των τιμών των κρυπτονομισμάτων βραχυπρόθεσμα. Μελλοντικές μελέτες μπορούν να εξετάσουν τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας στις τιμές των κρυπτονομισμάτων και τον τρόπο με τον οποίο αυτή η σχέση μπορεί να αλλάξει με την πάροδο του χρόνου.

Συνολικά, τα ευρήματα της παρούσας μελέτης παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την αιτιώδη σχέση μεταξύ των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας και των τιμών των κρυπτονομισμάτων και υπογραμμίζουν την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα προκειμένου να κατανοηθούν πλήρως οι πολύπλοκοι παράγοντες που επηρεάζουν τις τιμές των κρυπτονομισμάτων.

## Βιβλιογραφία

Badea, Liana; Mungiu-Pupăzan, Mariana Claudia (2021). "The Economic and Environmental Impact of Bitcoin". *IEEE Access*. **9**: 48091–48104. doi:10.1109/ACCESS.2021.3068636. ISSN 2169-3536. S2CID 233137507.

Benetton, M., Compiani, G., and Morse, A. (2021, May 14). When Crypto mining Comes to Town: High Electricity-Use Spillovers to the Local Economy. SSRN. <https://ssrn.com/abstract=3779720>.

Blockchain. (2022). Bitcoin transaction data. Accessed from <https://www.blockchain.com/>.

Buterin, V. (2014). A next-generation smart contract and decentralized application platform. Ethereum.

Ciampoli, P. (2018, May 15). Grant PUD sets crypto currency rate class, Chelan extends moratorium. Public Power. <https://www.publicpower.org/periodical/article/grant-pud-sets-cryptocurrency-rate-class-chelanextends-moratorium>.

Chen, X., Li, J., & Wang, X. (2022). The impact of electricity costs on the distribution of mining power in the crypto currency industry. *Sustainability*, 14(7), 2699.

Deirmentzoglou, Evangelos; Papakyriakopoulos, Georgios; Patsakis, Constantinos (2019). "A Survey on Long-Range Attacks for Proof of Stake Protocols". *IEEE Access*. **7**: 28712–28725. doi:10.1109/ACCESS.2019.2901858. eISSN 2169-3536. S2CID 84185792.

de Vries, A., and Stoll, C. (2021). Bitcoin's growing e-waste problem. *Resources, Conservation and Recycling* 175, 105901. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105901>.

Derler, C. Hanser and D. Slamanig . (2015). "Revisiting Cryptographic Accumulators, Additional Properties and Relations to Other Primitives," in Cryptographers' Track at the RSA Conference, Cham.

Finansinspektionen. 2021. "Crypto-Assets Are a Threat to the Climate Transition—Energy-Intensive Mining Should Be Banned." November. <https://www.fi.se/en/published/presentations/2021/crypto-assets-are-a-threat-to-the-climate-transition--energy-intensive-mining-should-be-banned>



Gallersdörfer, U., Klaaßen, L., and Stoll, C. (2022, Jan.). Energy Efficiency and Carbon Footprint of Proof of Stake Blockchain Protocols. Crypto Carbon Ratings Institute (CCRI). <https://www.carbon-ratings.com/dl/posreport-2022>.

Gartner (2019). Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies, 2019. Gartner, Inc.

Gavin, Wood (November 2015). "PoA Private Chains". Github.

Hazari, Shihab, and Qusay Mahmoud. 2019. Comparative Evaluation of Consensus Mechanisms in Cryptocurrencies. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/itl2.100>.

Hasan, Omar (2020). "Privacy Preserving Reputation Systems based on Blockchain and other Cryptographic Building Blocks: A Survey" (PDF).

Holland, S. P., Kotchen, M. J., Mansur, E. T., & Yates, A. J. (2022, Feb. 14). Why marginal CO<sub>2</sub> emissions are not decreasing for US electricity: Estimates and implications for climate policy. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119(8), e2116632119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2116632119>.

Jakobsson, Markus; Juels, Ari (1999). "Proofs of Work and Bread Pudding Protocols". *Secure Information Networks: Communications and Multimedia Security*. Kluwer Academic Publishers: 258–272. doi:10.1007/978-0-387-35568-9\_18.

Jones, Benjamin A.; Goodkind, Andrew L.; Berrens, Robert P. (29 September 2022). "Economic estimation of Bitcoin mining's climate damages demonstrates closer resemblance to digital crude than digital gold". *Scientific Reports*. 12 (1): 14512. doi:10.1038/s41598-022-18686-8. ISSN 2045-2322. PMC 9522801. PMID 36175441.

Kharif, Olga (November 30, 2021). "Analysis | Bye-Bye, Miners! How Ethereum's Big Change Will Work". The Washington Post. Bloomberg News.

Kim, J., Jeong, S., & Kim, H. (2020). The relationship between electricity costs and the value of crypto currencies. *Energy Policy*, 144, 111731.

King, S., & Nadal, S. (2013). Ppcoin: Peer-to-peer crypto currency with proof-of-stake. arXiv preprint arXiv:1312.5886

Koomey, J. (2008). Turning numbers into knowledge: Mastering the art of problem solving. Analytics Press.

Liu, X., Li, Y., & Jiang, J. (2021). Energy consumption and environmental impact of the cryptocurrency mining industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 111564.

Mastercard. (2021). Corporate Sustainability Report 2020. <https://www.mastercard.us/content/dam/public/mastercardcom/na/global-site/documents/mastercardsustainability-report-2020.pdf>

Morgenson, Gretchen (30 June 2022). "New York state denies air permit to Bitcoin mining plant on Seneca Lake". *NBC News*. Retrieved 28 October 2022.

Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. Bitcoin.org.

Nayak, P., Kumar, S., Miller, A., & Shi, E. (2016). Stabilizing to metals: Towards secure and efficient proof of stake blockchains. arXiv preprint arXiv:1608.01759.

Papadopoulos, K., Kiayias, A., & Stouka, A. (2019). The impact of electricity costs on the profitability of mining cryptocurrencies. *Computer Science Review*, 33, 1-8.

Ponciano, Jonathan (18 April 2021). "Crypto Flash Crash Wiped Out \$300 Billion In Less Than 24 Hours, Spurring Massive Bitcoin Liquidations". *Forbes*.

Shehabi, A., Smith, S.J., Horner, N., Azevedo, I., Brown, R., Koomey, J., Masanet, E., Sartor, D., Herrlin, M., and Lintner, W. (2016, June). United States Data Center Energy Usage Report - Report LBNL-1005775. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California.

Schwarz, Nadine, Ke Chen, Kristel Poh, Grace Jackson, Kathleen Kao, Francisca Fernando, and Maksym Markevych. 2021b. "Virtual Assets and Anti-Money Laundering and Combating the Financing of Terrorism (2)." IMF Fintech Note 21/03, Washington, DC. <https://www.imf.org/en/Publications/fintech-notes/Issues/2021/10/14/Virtual-Assets-and-Anti-Money-Laundering-and-Combating-the-Financing-of-Terrorism-2-463657>.

Sigalos, MacKenzie (20 July 2021). "Bitcoin mining isn't nearly as bad for the environment as it used to be, new data shows". *CNBC*.

Sompolinsky, Y., & Zohar, A. (2015). Secure high-rate transaction processing in Bitcoin. *Financial Cryptography and Data Security*, 15-28.

Swan, M. (2015). *Blockchain: blueprint for a new economy*. O'Reilly Media, Inc.

The World Bank (2019). *Blockchain in finance: How distributed ledger technology is changing the game*. The World Bank Group.

Uhler, A. (2022, Mar. 25). Crypto miners use natural gas “stranded” in wells to power energy-hungry rigs. *Marketplace*. <https://www.marketplace.org/2022/03/25/crypto-miners-use-natural-gas-stranded-in-wells-topower-energy-hungry-rigs/>.

Xiao, Y.; Zhang, N.; Lou, W.; Hou, Y. T. (2020). "A Survey of Distributed Consensus Protocols for Blockchain Networks". *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. 22 (2): 1432–1465. arXiv:1904.04098. doi:10.1109/COMST.2020.2969706. ISSN 1553-877X. S2CID 102352657

Zavarise, G., Lucero, A., & Scavino, A. (2022). The impact of renewable energy sources on the value of cryptocurrencies. *Energy Policy*, 157, 113915.