

# **Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο**

## **Σχολή Κοινωνικών Επιστημών**



### **Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών**

Τραπεζική, Χρηματοοικονομική και  
Χρηματοοικονομική Τεχνολογία

#### **Διπλωματική εργασία**

“Ανάλυση Διασυνδεσιμότητας & Βελτιστοποίησης  
Χαρτοφυλακίου μεταξύ του τομέα της  
Χρηματοοικονομικής Τεχνολογίας και των επενδύσεων  
σε ακίνητα.”

#### **Συντάκτης:**

Κούστα Αντιγόνη

#### **Επιβλέπων καθηγητής:**

Παντελίδης Θεολόγος

Πάτρα, 2026



Copyright © Κούστα Αντιγόνη, 2026

All rights reserved. Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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

## Σύνοψη (Abstract):

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει εμπειρικά τη δυναμική διασυνδεσιμότητα και τη συγκριτική απόδοση δύο στρατηγικών βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίου μεταξύ τεσσάρων ετερογενών τίτλων: SPY (αμερικανικές μετοχές), VNQ (REITs), AIQ (FinTech/AI) και BTC-USD (κρυπτονομίσματα), κατά την περίοδο 02/01/2019 - 29/10/2025. Η μεθοδολογική προσέγγιση συνδυάζει υποδείγματα ARMA-GARCH για την υπό συνθήκη μεταβλητότητα, το πολυμεταβλητό υπόδειγμα DCC-GARCH για τις δυναμικές συσχετίσεις, το πλαίσιο διασυνδεσιμότητας των Diebold και Yilmaz, καθώς και την κατασκευή του Χαρτοφυλακίου Ελάχιστης Διακύμανσης (MVP) και του Χαρτοφυλακίου Ελάχιστης Συσχέτισης (MCP).

Τα εμπειρικά ευρήματα αναδεικνύουν εξαιρετικά υψηλή επιμονή στη συσχετιστική δομή του δικτύου ( $a + b$  πολύ κοντά στη μονάδα), η οποία απορρίπτει εμπειρικά την υπόθεση της σταθερής υπό συνθήκη συσχέτισης (CCC) και τεκμηριώνει την αναγκαιότητα δυναμικής μοντελοποίησης. Η ανάλυση διασυνδεσιμότητας προσδιορίζει το SPY ως κεντρικό συστημικό κόμβο και καθαρό πομπό πληροφορίας, ενώ το BTC-USD ως τον πιο αυτόνομο τίτλο, με χαρακτηριστική συμπεριφορά decoupling-recoupling σε περιόδους κρίσης. Στη βελτιστοποίηση, το MVP αποκλείει σχεδόν συστηματικά το BTC-USD λόγω υψηλής μεταβλητότητας, ενώ το MCP του αναθέτει σταθερά υψηλά βάρη αξιοποιώντας τη χαμηλή του συσχέτιση. Παρά τις διαφορετικές συνθέσεις, αμφότερα τα χαρτοφυλάκια εκτέθηκαν εξίσου στον συστημικό κίνδυνο του Μαρτίου 2020, επιβεβαιώνοντας ότι η διαφοροποίηση δεν εξαλείφει τον συστηματικό παράγοντα της αγοράς.

**Λέξεις-κλειδιά:** Διασυνδεσιμότητα, DCC-GARCH, Diebold–Yilmaz, Βελτιστοποίηση Χαρτοφυλακίου, FinTech, REITs, Bitcoin, Ελάχιστη Διακύμανση, Ελάχιστη Συσχέτιση.

## Περιεχόμενα

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Εισαγωγή.....                                                              | 5  |
| 2. Βιβλιογραφία - Θεωρητική ανάλυση.....                                      | 7  |
| 2.1 FinTech και επενδυτικά προϊόντα .....                                     | 7  |
| 2.2 Αγορά ακινήτων και REITs .....                                            | 9  |
| 2.3 Διασυνδεσιμότητα στις χρηματοοικονομικές αγορές .....                     | 10 |
| 2.4 Θεωρία χαρτοφυλακίου και βελτιστοποίηση.....                              | 11 |
| 3. Μεθοδολογία.....                                                           | 12 |
| 3.1 ARMA μοντέλο.....                                                         | 12 |
| 3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο GARCH .....                                            | 13 |
| 3.2.1 Υποδείγματα GARCH.....                                                  | 13 |
| 3.2.2 DCC-GARCH .....                                                         | 14 |
| 3.3 Διασυνδεσιμότητα (Diebold - Yilmaz Connectedness).....                    | 16 |
| 3.4 Ανάλυση χαρτοφυλακίου .....                                               | 19 |
| 3.4.1 Χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Διακύμανσης.....                                 | 20 |
| 3.4.2 Χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Συσχέτισης .....                                 | 20 |
| 4. Δεδομένα .....                                                             | 21 |
| 4.1 Συλλογή δεδομένων και χρονική διάρκεια .....                              | 21 |
| 4.2 SPY .....                                                                 | 22 |
| 4.3 VNQ.....                                                                  | 22 |
| 4.4 AIQ.....                                                                  | 22 |
| 4.5 BTC-USD.....                                                              | 23 |
| 5. Εμπειρική Ανάλυση .....                                                    | 23 |
| 5.1 Περιγραφική στατιστική.....                                               | 23 |
| 5.2 Αποτελέσματα Ανάλυσης Χρονοσειρών .....                                   | 27 |
| 5.2.1 Αποτελέσματα ARMA .....                                                 | 27 |
| 5.2.2 Αποτελέσματα ανάλυσης διακύμανσης .....                                 | 32 |
| 5.2.3 Αποτελέσματα ανάλυσης διασυνδεσιμότητας .....                           | 37 |
| 5.3 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίου (portfolio optimization) ..... | 48 |
| 5.3.1 Χαρτοφυλάκιο ελάχιστης Διακύμανσης .....                                | 48 |
| 5.3.2 Χαρτοφυλάκιο ελάχιστης Συσχέτισης .....                                 | 52 |
| 6. Συμπεράσματα.....                                                          | 55 |
| Βιβλιογραφία & Πηγές .....                                                    | 57 |

# 1. Εισαγωγή

Η εξέλιξη των διεθνών χρηματοοικονομικών αγορών την τελευταία δεκαπενταετία χαρακτηρίζεται από δύο παράλληλες, αλληλένδετες δυναμικές. Αφενός, την ταχεία ψηφιοποίηση και τεχνολογική ενσωμάτωση στις χρηματοοικονομικές υπηρεσίες με άνοδο του τομέα της χρηματοοικονομικής τεχνολογίας (Financial Technology, FinTech) και την εδραίωση των κρυπτονομισμάτων (με κορυφαίο εκπρόσωπο το Bitcoin) τα οποία έπαψαν να είναι ένα περιθωριακό φαινόμενο και απέκτησαν θέση διακριτής κατηγορίας περιουσιακών στοιχείων. Αφετέρου, τη διαδοχική εμφάνιση συστημικών διαταραχών που διαδέχθηκαν το ένα το άλλο σε σύντομο χρονικό διάστημα: η πανδημία COVID-19 (2020), η εισβολή της Ρωσίας στην Ουκρανία (2022), ο επιθετικός κύκλος αυξήσεων επιτοκίων της Ομοσπονδιακής Τράπεζας των Ηνωμένων Πολιτειών (περίοδος 2022-2023), η τραπεζική κρίση του Μαρτίου 2023 με την κατάρρευση της Silicon Valley Bank και της Credit Suisse, καθώς και η αλματώδης ανάπτυξη της τεχνητής νοημοσύνης μετά το τέλος του 2022. Σε αυτό το περιβάλλον αυξημένης πολυπλοκότητας, οι παραδοσιακές υποθέσεις της Σύγχρονης Θεωρίας Χαρτοφυλακίου του Markowitz (1952) και, ιδίως, η αρχή ότι η διαφοροποίηση μέσω χαμηλά συσχετισμένων στοιχείων μειώνει συστηματικά τον κίνδυνο, δοκιμάζονται εμπειρικά. Οι συσχετίσεις μεταξύ ετερογενών κατηγοριών περιουσιακών στοιχείων δεν παραμένουν σταθερές στο χρόνο, αλλά αντίθετα μεταβάλλονται δυναμικά και τείνουν να συγκλίνουν προς τη μονάδα ακριβώς εκείνες τις στιγμές που θα χρειαζόμασταν περισσότερο τη διαφοροποίηση, δηλαδή σε περιόδους κρίσεις (Longin & Solnik, 2001).

Η παρούσα διπλωματική εργασία τοποθετείται στο σημείο τομής τριών ερευνητικών αντικειμένων: της οικονομετρικής μοντελοποίησης της υπό συνθήκη μεταβλητότητας και των δυναμικών συσχετίσεων μέσω της οικογένειας υποδειγμάτων Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity (GARCH) και της Δυναμικής Υπό Συνθήκη Συσχέτισης (Dynamic Conditional Correlation, DCC) όπως τη διατύπωσαν οι Engle (2002) και Engle & Sheppard (2001), της ανάλυσης διασυνδεσιμότητας (connectedness) και μετάδοσης μεταβλητότητας (volatility spillovers) μέσω του πλαισίου των Diebold και Yilmaz (2009, 2012, 2014) και τέλος, της δυναμικής βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίου με χρήση των υπό συνθήκη πινάκων συνδιακυμάνσεων που προκύπτουν από το DCC.

Συγκεκριμένα, εξετάζονται τέσσερις διαπραγματεύσιμοι τίτλοι, καθένας από τους οποίους επιλέχθηκε ώστε να λειτουργεί ως αντιπροσωπευτικός δείκτης μιας αναγνωρισμένης κατηγορίας περιουσιακών: το SPDR S&P 500 ETF Trust (SPY) εκπροσωπεί την ευρύτερη αμερικανική μετοχική αγορά και τη γενική οικονομία, το Vanguard Real Estate ETF (VNQ) επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτικός δείκτης της αγοράς ακινήτων μέσω Real Estate Investment Trusts (REITs), το Global X Artificial Intelligence & Technology ETF (AIQ) ως εκπρόσωπος του τομέα της τεχνητής

νοημοσύνης και των ψηφιακών τεχνολογιών και τέλος το Bitcoin εκφρασμένο σε δολάρια Ηνωμένων Πολιτειών (BTC-USD) ως αντιπροσωπευτικός δείκτης της αγοράς κρυπτονομισμάτων. Η περίοδος ανάλυσης εκτείνεται από τις 02/01/2019 έως τις 29/10/2025 και καλύπτει το σύνολο των προαναφερθέντων μακροοικονομικών και γεωπολιτικών διαταραχών, επιτρέποντας τη μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου τόσο σε καθεστώα κανονικότητας όσο και σε φάσεις ακραίας πίεσης.

Το θεμελιώδες ερευνητικό ερώτημα της εργασίας διατυπώνεται ως εξής: σε ποιο βαθμό η ψηφιακή χρηματοοικονομία (μέσω AIQ και BTC-USD) και η παραδοσιακή αγορά ακινήτων (μέσω VNQ) διασυνδέονται μεταξύ τους και με την ευρύτερη μετοχική αγορά (SPY), και πώς η εκμετάλλευση αυτής της δυναμικής δομής εξάρτησης μπορεί να βελτιστοποιήσει την κατανομή κεφαλαίων σε ένα χαρτοφυλάκιο; Επιμέρους ερωτήματα που απορρέουν από το παραπάνω αφορούν: (α) την κατεύθυνση και την ένταση της μετάδοσης κινδύνου μεταξύ των τεσσάρων αγορών, (β) την ταυτότητα του κεντρικού κόμβου (καθαρού πομπού) και των περιφερειακών κόμβων (καθαρών δεκτών) του δικτύου, (γ) τη χρονική μεταβολή των ρόλων αυτών ως απόκριση σε εξωγενή σοκ, και (δ) τη σύγκριση δύο εναλλακτικών στρατηγικών δυναμικής βελτιστοποίησης: του Χαρτοφυλακίου Ελάχιστης Διακύμανσης (Minimum Variance Portfolio, MVP) και του Χαρτοφυλακίου Ελάχιστης Συσχέτισης (Minimum Correlation Portfolio, MCP) ως προς την κατανομή των βαρών και τα προφίλ απόδοσης-κινδύνου που παράγουν.

Η εργασία επιδιώκει να συνεισφέρει στη σχετική βιβλιογραφία με τρεις τρόπους. Καταρχάς, μελετά συνδυαστικά μια τετράδα περιουσιακών στοιχείων που δεν εξετάζεται συχνά μαζί. Η υπάρχουσα βιβλιογραφία της διασυνδεσιμότητας συνήθως εστιάζει είτε σε παραδοσιακές αγορές (μετοχές, ομόλογα, εμπορεύματα) είτε στη σχέση των κρυπτονομισμάτων με τους μετοχικούς δείκτες, αφήνοντας απ' έξω τα ακίνητα και την τεχνητή νοημοσύνη ως αυτόνομους κόμβους του ίδιου δικτύου. Δεύτερον, εξετάζει συστηματικά τις σχέσεις μεταξύ δύο καθιερωμένων δεικτών αναφοράς της αμερικανικής αγοράς (του SPY για τη συνολική μετοχική αγορά και του VNQ για την αγορά ακινήτων) και δύο κατηγοριών περιουσιακών στοιχείων που χαρακτηρίζονται από αυξημένη μεταβλητότητα και χαμηλότερα επίπεδα θεσμικής εμπιστοσύνης, ήτοι του BTC-USD ως αντιπροσωπευτικού κρυπτονομίσματος και του AIQ ως αντιπροσωπευτικού δείκτη του τομέα της τεχνητής νοημοσύνης. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Κεντρική Τράπεζα (ECB, 2022), τα μη υποστηριζόμενα κρυπτονομίσματα εξακολουθούν να εμφανίζουν μεταβλητότητα σημαντικά υψηλότερη από αυτή των διαφοροποιημένων ευρωπαϊκών αγορών μετοχών και ομολόγων, ενώ η συμπεριφορά των τιμών τους κυριαρχείται από κερδοσκοπικές δυναμικές παρά από θεμελιώδεις παραμέτρους αποτίμησης. Παρόμοιες ανησυχίες περί θεμελιωδών αποτιμήσεων έχουν διατυπωθεί τα τελευταία χρόνια και για τον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης. Τέλος, βελτιστοποιεί δυναμικά δύο διαφορετικά χαρτοφυλάκια, και τα συγκρίνει μεταξύ τους, δείχνοντας τι σημαίνει στην πράξη να

αλλάζει κανείς κριτήριο, από τη συνολική μεταβλητότητα στη χαμηλή συσχέτιση. Υπό τις εξαιρετικά δυσμενείς συνθήκες αγοράς της εξεταζόμενης περιόδου (πανδημία, πολεμικές συγκρούσεις, πληθωριστική κρίση, κρίση επιτοκίων) η μελέτη αποκτά πρόσθετο ενδιαφέρον.

Η δομή της εργασίας αναπτύσσεται σε έξι κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η σχετική βιβλιογραφική επισκόπηση και το θεωρητικό υπόβαθρο των τεσσάρων υπό εξέταση κατηγοριών περιουσιακών στοιχείων, καθώς και των κύριων εννοιολογικών εργαλείων (FinTech, REITs, διασυνδεσιμότητα, θεωρία χαρτοφυλακίου). Στο Κεφάλαιο 3 αναπτύσσεται αναλυτικά η οικονομετρική μεθοδολογία: το υπόδειγμα ARMA, η οικογένεια GARCH (sGARCH, eGARCH), η επέκταση DCC-GARCH, το πλαίσιο connectedness των Diebold-Yilmaz και η θεωρία βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίου Markowitz (MVP, MCP). Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφονται τα δεδομένα και οι πηγές τους. Στο Κεφάλαιο 5 παρατίθεται η εμπειρική ανάλυση, η οποία περιλαμβάνει την περιγραφική στατιστική, την εκτίμηση των μονομεταβλητών και πολυμεταβλητών υποδειγμάτων μεταβλητότητας, τη στατική και δυναμική ανάλυση διασυνδεσιμότητας, καθώς και τα αποτελέσματα των δύο εναλλακτικών βελτιστοποιήσεων χαρτοφυλακίου. Τέλος, το Κεφάλαιο 6 συνοψίζει τα ευρήματα της μελέτης.

## 2. Βιβλιογραφία - Θεωρητική ανάλυση

### 2.1 FinTech και επενδυτικά προϊόντα

Οι ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις έχουν αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο διαχειριζόμαστε κάθε πτυχή της ζωής μας και ο χρηματοοικονομικός κλάδος δεν αποτελεί εξαίρεση. Ο όρος «χρηματοοικονομική τεχνολογία» (Financial Technology, FinTech) έχει προκύψει από τον συνδυασμό των λέξεων χρηματοοικονομική και τεχνολογία και αναφέρεται στους τρόπους με τους οποίους η τεχνολογία και η καινοτομία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη, την αναβάθμιση και τη διευκόλυνση των τραπεζικών και των ευρύτερων χρηματοοικονομικών υπηρεσιών. Παρά τη δυναμική παρουσία του όρου στη βιβλιογραφία μέχρι σήμερα, ο σαφής ορισμός του παραμένει ρευστός με το ακριβές εύρος και τα όριά του να μην έχουν αποσαφηνιστεί πλήρως. Ως αποτέλεσμα, η έννοια παραμένει μερικώς ασαφής, με διαφορετικές προσεγγίσεις να δίνουν έμφαση σε επιμέρους χαρακτηριστικά ανάλογα με το πλαίσιο εφαρμογής.

Ενδεικτικά, οι Arner, Barberis και Buckley (2016) έχουν αποδώσει τον εξής ορισμό: *“Ο όρος «χρηματοοικονομική τεχνολογία» ή «FinTech» αναφέρεται σε «χρηματοοικονομικές λύσεις που υλοποιούνται με τη βοήθεια της τεχνολογίας», διευκρινίζοντας ταυτόχρονα ότι «ο όρος δεν περιορίζεται σε συγκεκριμένους τομείς ή επιχειρηματικά μοντέλα, αλλά καλύπτει το σύνολο των υπηρεσιών και προϊόντων*

που παραδοσιακά παρέχονται από τον χρηματοπιστωτικό κλάδο». Σε μια ευρύτερη προσέγγιση, οι Ernst και Young (EY) (2016) ορίζουν την FinTech ως τους «Οργανισμούς που συνδυάζουν καινοτόμα επιχειρηματικά μοντέλα και τεχνολογία, με στόχο να διευκολύνουν, να ενισχύσουν ή να ανατρέψουν τον τρόπο παροχής χρηματοοικονομικών υπηρεσιών». Από την πλευρά των διεθνών οργανισμών, το Διεθνές Νομισματικό Ταμείο (IMF, 2018) αναφέρεται στις «Τεχνολογικές εξελίξεις που έχουν τη δυνατότητα να μεταμορφώσουν την παροχή χρηματοοικονομικών υπηρεσιών, ενθαρρύνοντας την ανάπτυξη νέων επιχειρηματικών μοντέλων, εφαρμογών, διαδικασιών και προϊόντων». Παρά τις διαφοροποιήσεις στη διατύπωση, οι ορισμοί συγκλίνουν σε δύο κοινά χαρακτηριστικά που συνθέτουν τον πυρήνα του όρου: τον συνδυασμό χρηματοοικονομικής υπηρεσίας με ψηφιακή υποδομή και την ανατρεπτική δυναμική του τομέα έναντι των παραδοσιακών μοντέλων διαμεσολάβησης.

Η ανάπτυξη του FinTech δεν είναι ξαφνική, αλλά σταδιακή. Υποστηρίχθηκε από μια ομάδα τεχνολογιών που συχνά λειτουργούν συμπληρωματικά μεταξύ τους: την Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence, AI), την Αναλυτική Μεγάλων Δεδομένων (Big Data Analytics), την Υπολογιστική Νέφους (Cloud Computing), το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT), τη Ρομποτική Αυτοματοποίηση Διεργασιών (Robotic Process Automation, RPA) και την Τεχνολογία Αλυσίδας Συστοιχιών (Blockchain), πάνω στην οποία οικοδομήθηκε ολόκληρο το οικοσύστημα της κρυπτοοικονομίας. Οι τεχνολογίες αυτές χρησιμοποιούνται από τις εταιρείες FinTech τόσο μεμονωμένα όσο και συνδυαστικά, ώστε να προσφέρουν εξελιγμένες υπηρεσίες, ενώ η συνεχής αλληλεπίδρασή τους ωθεί τον κλάδο σε διαρκή μετασχηματισμό. Σήμερα, ο τομέας του FinTech περιλαμβάνει πέντε βασικούς περιοχές εφαρμογής: (1) χρηματοδότηση και επενδύσεις, (2) εσωτερικές λειτουργίες και διαχείριση κινδύνων, (3) πληρωμές και υποδομές, (4) ασφάλεια και νομισματοποίηση δεδομένων, και (5) διεπαφή και αλληλεπίδραση με τον πελάτη (Giglio, 2021).

Από την οπτική του επενδυτή, η ανάδυση του FinTech έχει δημιουργήσει μια εντελώς νέα κατηγορία επενδυτικών επιλογών. Από τη μία πλευρά, εμφανίστηκαν θεματικά διαπραγματεύσιμα αμοιβαία κεφάλαια (Exchange-Traded Funds, ETFs), τα οποία παρέχουν συγκεντρωτική έκθεση σε εταιρείες που δραστηριοποιούνται στην τεχνητή νοημοσύνη, την κυβερνοασφάλεια, τις ψηφιακές πληρωμές και ευρύτερα στις τεχνολογίες που πλαισιώνουν τον τομέα, με χαρακτηριστικό παράδειγμα το Global X Artificial Intelligence & Technology ETF (AIQ), το οποίο εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Από την άλλη, τα κρυπτονομίσματα (με κορυφαίο εκπρόσωπο το Bitcoin) αναδείχθηκαν σε μια εντελώς νέα κατηγορία περιουσιακών στοιχείων, η οποία λειτουργεί ανεξάρτητα από τα παραδοσιακά συστήματα κεντρικής εποπτείας και βασίζεται στην αποκεντρωμένη τεχνολογία blockchain. Η συνύπαρξη αυτών των δύο διαστάσεων, των μετοχικών τίτλων που αντιπροσωπεύουν εταιρείες τεχνολογίας και

των ίδιων των ψηφιακών νομισμάτων, δημιουργεί ένα διευρυμένο φάσμα επενδυτικών επιλογών με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κινδύνου-απόδοσης, η μελέτη του οποίου αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

## 2.2 Αγορά ακινήτων και REITs

Η αγορά ακινήτων αποτελεί διαχρονικά μία από τις πιο σημαντικές κατηγορίες περιουσιακών στοιχείων διεθνώς, τόσο σε όρους κεφαλαιοποίησης όσο και σε όρους συμβολής στην οικονομική δραστηριότητα. Παραδοσιακά, η επένδυση σε ακίνητα γινόταν μέσω της άμεσης απόκτησης φυσικού περιουσιακού στοιχείου, μιας διαδικασίας που χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος εισόδου, περιορισμένη ρευστότητα, μεγάλη γεωγραφική εξειδίκευση και σημαντικά λειτουργικά κόστη διαχείρισης. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθιστούν την άμεση έκθεση στα ακίνητα δύσκολη για τον μέσο επενδυτή και ακόμα δυσκολότερη για την κατασκευή ενός διαφοροποιημένου χαρτοφυλακίου. Ως απάντηση σε αυτούς τους περιορισμούς, αναπτύχθηκε το θεσμικό πλαίσιο των Real Estate Investment Trusts (REITs).

Τα REITs είναι εταιρείες οι οποίες κατέχουν, διαχειρίζονται ή χρηματοδοτούν ακίνητα που παράγουν εισόδημα και διαπραγματεύονται σε οργανωμένα χρηματιστήρια. Λειτουργούν με τρόπο ανάλογο των αμοιβαίων κεφαλαίων, με τη διαφορά ότι το υποκείμενο περιουσιακό στοιχείο είναι ακίνητα και όχι μετοχές ή ομόλογα. Η θεμελιώδης τους ιδιότητα είναι ότι μετασχηματίζουν μια χαμηλής ρευστότητας κατηγορία (real estate) σε ρευστούς, διαπραγματεύσιμους τίτλους, καθιστώντας την προσιτή σε ένα ευρύ φάσμα επενδυτών. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, τα REITs υποχρεούνται από τη φορολογική νομοθεσία να διανέμουν τουλάχιστον το 90% του φορολογητέου εισοδήματός τους ως μερίσματα προς τους μετόχους, ιδιότητα που τα καθιστά ελκυστικά για επενδυτές με προσανατολισμό στο εισόδημα. Ταυτόχρονα, τα REITs δραστηριοποιούνται σε ευρύ φάσμα υποτομέων: εμπορικά ακίνητα, γραφεία, κατοικίες, βιομηχανικά κτίρια, κέντρα logistics, νοσηλευτικές εγκαταστάσεις και κέντρα δεδομένων, γεγονός που τους προσδίδει εσωτερική διαφοροποίηση.

Ένα από τα πιο συζητημένα ερωτήματα στη βιβλιογραφία αφορά τη φύση των REITs ως επενδυτικού στοιχείου: αποτελούν αυτόνομη κατηγορία περιουσιακών στοιχείων ή λειτουργούν ουσιαστικά ως μετοχές με «επένδυση σε ακίνητα»; Η εμπειρική έρευνα δείχνει ότι, στο βραχυχρόνιο ορίζοντα, τα REITs τείνουν να κινούνται μαζί με τις μετοχικές αγορές, αντικατοπτρίζοντας τη διαπραγμάτευσή τους σε οργανωμένα χρηματιστήρια και την κοινή ευαισθησία τους στο επενδυτικό κλίμα (Clayton & MacKinnon, 2003). Στον μακροχρόνιο ορίζοντα όμως, η συμπεριφορά τους προσεγγίζει τη συμπεριφορά της υποκείμενης αγοράς ακινήτων, με τη συσχέτιση με τους γενικούς μετοχικούς δείκτες να εξασθενεί. Οι Boudry et al. (2012) τεκμηριώνουν εμπειρικά αυτή τη συμπεριφορά, δείχνοντας ότι REITs και άμεση αγορά ακινήτων μοιράζονται μια κοινή μακροχρόνια σχέση ισορροπίας (cointegration). Το διττό αυτό προφίλ (μετοχικό βραχυπρόθεσμα, ακινήτου μακροπρόθεσμα) εξηγεί γιατί τα REITs

εξακολουθούν να θεωρούνται χρήσιμα εργαλεία διαφοροποίησης σε ένα ευρύτερο χαρτοφυλάκιο.

Ιδιαίτερη σημασία στη συμπεριφορά των REITs έχει η ευαισθησία τους στα επιτόκια. Καθώς τα επιτόκια αποτελούν θεμελιώδη παράγοντα στις αποτιμήσεις ακινήτων, τόσο μέσω του κόστους δανεισμού όσο και μέσω της προεξόφλησης των μελλοντικών μισθωμάτων, οι μεταβολές της νομισματικής πολιτικής επιδρούν άμεσα στις αποδόσεις των REITs. Οι Morri & Liu (2017) τεκμηριώνουν, για την περίοδο που ακολούθησε την παγκόσμια χρηματοοικονομική κρίση του 2008, ότι οι μεταβολές των μακροχρόνιων επιτοκίων αποτελούν στατιστικά σημαντικό παράγοντα ερμηνείας των αποδόσεων των αμερικανικών REITs, παράλληλα με τον γενικό μετοχικό παράγοντα.

Η συμπεριφορά αυτή έγινε ιδιαίτερα ορατή κατά την εξεταζόμενη περίοδο της παρούσας εργασίας, όπου ο αρχικός κύκλος μηδενικών επιτοκίων και ποσοτικής χαλάρωσης (2020-2021) ευνόησε τις αποτιμήσεις των REITs, ενώ ο μετέπειτα κύκλος επιθετικής σύσφιξης (2022-2023) επέφερε σημαντικές πιέσεις. Στην εμπειρική ανάλυση που ακολουθεί, η συμπεριφορά αυτή θα αποτυπωθεί καθαρά στη δυναμική του δείκτη Vanguard Real Estate ETF (VNQ), ο οποίος επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτικός δείκτης της αγοράς ακινήτων: παρέχει διαφοροποιημένη έκθεση στον αμερικανικό κλάδο REITs και αποτελεί έναν από τους πλέον ρευστούς και ευρέως παρακολουθούμενους τίτλους της κατηγορίας του.

### 2.3 Διασυνδεσιμότητα στις χρηματοοικονομικές αγορές

Η ανάλυση διασυνδεσιμότητας έχει αναδειχθεί σε έναν από τους κυρίαρχους τρόπους με τους οποίους η σύγχρονη οικονομετρία προσεγγίζει τη μετάδοση κινδύνου και πληροφορίας μεταξύ αγορών. Από τη θεμελιώδη εργασία των Diebold & Yilmaz (2009), που εισήγαγε ένα ενιαίο πλαίσιο μέτρησης των διασταυρούμενων μεταδόσεων (spillovers), μέχρι τις μετέπειτα επεκτάσεις των ίδιων συγγραφέων (Diebold & Yilmaz, 2012, 2014) που συνέδεσαν την ανάλυση αυτή με τη θεωρία δικτύων (Network Theory), η βιβλιογραφία έχει εμπλουτιστεί με μια πλειάδα εμπειρικών εφαρμογών που καλύπτουν σχεδόν κάθε κατηγορία περιουσιακών στοιχείων. Συστηματικό εύρημα του συνόλου των μελετών αυτών είναι ότι η ένταση των διασυνδέσεων δεν παραμένει σταθερή στον χρόνο: αυξάνεται απότομα κατά τη διάρκεια συστημικών κρίσεων και υποχωρεί σε περιόδους κανονικότητας, φαινόμενο συμβατό με την παρατήρηση των Longin & Solnik (2001) περί ασύμμετρων ακραίων συσχετίσεων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρούσα εργασία παρουσιάζει η σχετικά πιο πρόσφατη βιβλιογραφία που ενσωμάτωσε τα κρυπτονομίσματα στο δίκτυο των παραδοσιακών χρηματοοικονομικών αγορών. Οι Corbet et al. (2018), διαπίστωσαν ότι σε ομαλές συνθήκες αγοράς το Bitcoin εμφανίζει σχετική απομόνωση από τα συμβατικά περιουσιακά στοιχεία. Στο ίδιο πνεύμα, οι Bouri et al. (2017) ανέδειξαν τη δυνατότητα

του Bitcoin να λειτουργεί ως αποτελεσματικό εργαλείο διαφοροποίησης, παρά την περιορισμένη του αξία ως πλήρους μέσου αντιστάθμισης ή ασφαλούς καταφυγίου.

Η εικόνα αυτή ανατράπηκε ωστόσο κατά την πανδημία: οι Conlon & McGee (2020) και οι Jiang et al. (2022) τεκμηριώνουν απότομη επανασύνδεση (recoupling) του Bitcoin με τις παραδοσιακές αγορές, ακυρώνοντας στην πράξη την υποτιθέμενη ιδιότητά του ως ασφαλούς καταφυγίου, ενώ οι Zhang, Hu & Ji (2020) αναδεικνύουν τον άνευ προηγουμένου συστημικό κίνδυνο που προκάλεσε η COVID-19 ταυτόχρονα σε όλες τις κατηγορίες περιουσιακών στοιχείων. Παρά τον πλούτο της σχετικής βιβλιογραφίας, η συνδυαστική εξέταση των ψηφιακών τεχνολογιών, της αγοράς ακινήτων και του Bitcoin εντός του ίδιου δικτύου διασυνδεσιμότητας παραμένει σχετικά ανεξερεύνητη, κενό το οποίο επιδιώκει να καλύψει η παρούσα εργασία.

## 2.4 Θεωρία χαρτοφυλακίου και βελτιστοποίηση

Η σύγχρονη θεωρία χαρτοφυλακίου, όπως διατυπώθηκε από τον Markowitz (1952), αποτελεί το βασικό θεωρητικό υπόβαθρο της συστηματικής διαχείρισης κινδύνου-απόδοσης και παραμένει το θεμέλιο πάνω στο οποίο οικοδομείται κάθε σύγχρονη προσέγγιση βελτιστοποίησης. Δύο πρακτικά ζητήματα, ωστόσο, έχουν απασχολήσει εκτενώς τη μετέπειτα βιβλιογραφία. Το πρώτο αφορά τη δυσκολία αξιόπιστης εκτίμησης των αναμενόμενων αποδόσεων: μικρές αποκλίσεις στις εκτιμήσεις οδηγούν σε δυσανάλογα μεγάλες μεταβολές στα βέλτιστα βάρη του χαρτοφυλακίου, καθιστώντας το αποτέλεσμα ασταθές και ευαίσθητο σε σφάλματα εκτίμησης. Η διαπίστωση αυτή έχει ωθήσει σημαντικό μέρος της σύγχρονης πρακτικής σε προσεγγίσεις που παρακάμπτουν εντελώς την εκτίμηση των αναμενόμενων αποδόσεων και βασίζονται αποκλειστικά στον πίνακα συνδιακυμάνσεων, όπως ακριβώς το Χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Διακύμανσης που εξετάζεται στην παρούσα εργασία. Οι Clarke, de Silva & Thorley (2006) τεκμηριώνουν εμπειρικά ότι στην αμερικανική μετοχική αγορά, τα χαρτοφυλάκια ελάχιστης διακύμανσης πετυχαίνουν συγκρίσιμες αποδόσεις με τον γενικό δείκτη της αγοράς αλλά με ουσιαστικά χαμηλότερη μεταβλητότητα, ενώ συμπεριφέρονται καλύτερα σε περιόδους πτωτικών αγορών.

Το δεύτερο ζήτημα αφορά τη μεταβλητότητα των συσχετίσεων στον χρόνο. Ως προς τη σταθερότητα των κατανομών, οι Ang & Bekaert (2002) ανέδειξαν ότι οι διεθνείς συσχετίσεις μεταξύ αγορών μετοχών μεταβάλλονται συστηματικά ανάλογα με το καθεστώς της αγοράς (regime): σε φάσεις υψηλής μεταβλητότητας οι συσχετίσεις αυξάνονται, εύρημα συμβατό με τα αποτελέσματα των Longin & Solnik (2001). Η διαπίστωση αυτή κατέστησε εμφανή την ανάγκη ενσωμάτωσης δυναμικών εκτιμητών συνδιακύμανσης στη διαδικασία βελτιστοποίησης και πυροδότησε τη χρήση των πολυμεταβλητών GARCH υποδειγμάτων (ιδίως του DCC) ως εισροών στην κατασκευή δυναμικών χαρτοφυλακίων. Στο ίδιο πνεύμα, αναπτύχθηκε και η εναλλακτική προσέγγιση του Χαρτοφυλακίου Ελάχιστης Συσχέτισης, η οποία αντιμετωπίζει το

πρόβλημα της υπερβολικής συγκέντρωσης βαρών σε στοιχεία χαμηλής μεταβλητότητας, αγνοώντας τις ατομικές διακυμάνσεις και ανταμείβοντας αποκλειστικά τη χαμηλή αλληλεξάρτηση των στοιχείων που συνθέτουν τα χαρτοφυλάκια. Η συγκριτική αξιολόγηση των δύο αυτών προσεγγίσεων αποτελεί έναν από τους πυλώνες της εμπειρικής ανάλυσης που ακολουθεί.

## 3. Μεθοδολογία

### 3.1 ARMA μοντέλο

Στην παρούσα μελέτη, η υπό συνθήκη μέση τιμή των αποδόσεων μοντελοποιείται μέσω ενός υποδείγματος Αυτοπαλίνδρομου Κινητού Μέσου τάξεως  $(p, q)$  το οποίο από εδώ και στο εξής θα αναφέρεται ως ARMA (Autoregressive Moving Average). Πρόκειται για κλασικό υπόδειγμα της θεωρίας χρονοσειρών, η συστηματική ανάπτυξη του οποίου οφείλεται κυρίως στους Box και Jenkins (1970), οι οποίοι διατύπωσαν την επαναληπτική διαδικασία τριών σταδίων για την εξειδίκευση, εκτίμηση και διαγνωστικό έλεγχο τέτοιων υποδειγμάτων (Box et al., 2015). Το υπόδειγμα εφαρμόζεται σε  $d$  διαφορετικές χρονοσειρές αποδόσεων, με δείκτη  $i = 1, 2, \dots, d$  και η γενική του μορφή δίνεται από τη σχέση:

$$x_{t,i} = \mu_i + \sum_{k=1}^p \varphi_{k,i} x_{t-k,i} + \sum_{k=1}^q \theta_{k,i} \varepsilon_{t-k,i} + \varepsilon_{t,i}$$

Όπου  $x_{t,i}$  είναι η απόδοση της χρονοσειράς  $i$  στη χρονική στιγμή  $t$ ,  $\mu_i$  είναι ο σταθερός όρος που αντιπροσωπεύει τη μέση απόδοση,  $\varphi_{k,i}$  και  $\theta_{k,i}$  είναι οι συντελεστές των  $p$  αυτοπαλίνδρομων (AR) και των  $q$  κινούμενων μέσων όρων (MA) αντίστοιχα, ενώ ο όρος  $\varepsilon_{t,i}$  αναπαριστά τον στοχαστικό όρο σφάλματος. Σε αντίθεση με την κλασική υπόθεση κανονικότητας, ο όρος σφάλματος δεν ακολουθεί απαραίτητα την κανονική κατανομή. Οι παράμετροι του υποδείγματος εκτιμώνται με βάση κατάλληλη ασύμμετρη κατανομή που προκύπτει από τα δεδομένα, όπως θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.

Τα τυποποιημένα κατάλοιπα ορίζονται ως:  $v_{t,i} = \frac{\varepsilon_{t,i}}{\sigma_{t,i}}$ , όπου  $\sigma_{t,i}$  είναι η υπό συνθήκη τυπική απόκλιση της απόδοσης.

Το ARMA αποτυπώνει επαρκώς τη γραμμική δυναμική της μέσης τιμής, αλλά δεν επαρκεί για χρηματοοικονομικές αποδόσεις, οι οποίες παρουσιάζουν συστηματικά: (i) volatility clustering: περιόδους υψηλής μεταβλητότητας ακολουθούμενες από αντίστοιχες περιόδους ηρεμίας, (ii) leverage effects: ασύμμετρη αντίδραση της μεταβλητότητας σε θετικά και αρνητικά σοκ και (iii) λεπτοκυρτότητα και βαριές ουρές στα κατάλοιπα (Tsay, 2010). Για τον λόγο αυτό, η υπό συνθήκη διακύμανση  $\sigma_t^2$

μοντελοποιείται στη συνέχεια μέσω υποδειγμάτων τύπου GARCH, τα οποία αναλύονται στην επόμενη ενότητα.

## 3.2 Θεωρητικό υπόβαθρο GARCH

### 3.2.1 Υποδείγματα GARCH

Τα GARCH μοντέλα (*Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity models*) είναι οικογένεια χρονικών υποδειγμάτων μεταβλητότητας χρονοσειρών, που χρησιμοποιούνται ευρέως στη χρηματοοικονομική. Το βασικό μοντέλο εισήχθη το 1986 από τον Tim Bollerslev, γενικεύοντας το ARCH μοντέλο του Robert Engle (1982).

Το αρχικό υπόδειγμα ARCH( $q$ ) που εκφράζει την υπό συνθήκη διακύμανση ως γραμμικό συνδυασμό των  $q$  προηγούμενων τετραγωνισμένων καταλοίπων ορίζεται ως εξής:

$$\sigma_t^2 = \omega + \sum_{k=1}^q a_k \varepsilon_{t-k}^2$$

Στην πράξη, όμως, η αναπαραγωγή της εμπειρικά παρατηρούμενης επιμονής της μεταβλητότητας απαιτεί συνήθως μεγάλη τάξη  $q$ , με αποτέλεσμα να προκύπτει παραμετρική επιβάρυνση. Ο Bollerslev (1986) πρότεινε τη γενίκευση GARCH( $p, q$ ), προσθέτοντας στο αυτοπαλίνδρομο σχήμα και υστερήσεις της ίδιας της υπό συνθήκη διακύμανσης:

$$\sigma_t^2 = \omega + \sum_{k=1}^q a_k \varepsilon_{t-k}^2 + \sum_{l=1}^p \beta_l \sigma_{t-l}^2$$

Όπου:

- $p$  ο αριθμός των υστερήσεων (lags) των προηγούμενων διακυμάνσεων και
- $q$  ο αριθμός των υστερήσεων των τετραγωνισμένων σφαλμάτων
- $a_k, \beta_l$  θετικές μεταβλητές των αυτοπαλλίνδρομων όρων  $\varepsilon_{t-k}^2, \sigma_{t-l}^2$ , αντίστοιχα
- και  $\omega$  ο σταθερός όρος (όπου  $\omega > 0$ ).
- Τέλος, ισχύει ότι  $\sum a_k + \sum \beta_l < 1$ . Η συνθήκη αυτή αναφέρεται ως επιμονή (Persistence) της μεταβλητότητας: όσο πιο κοντά στη μονάδα, τόσο πιο μακροχρόνια διατηρούνται οι επιπτώσεις των σοκ.

Η παραπάνω εξίσωση είναι η ορίζουσα του standard GARCH (sGARCH). Κάθε νέα τιμή της υπό συνθήκη διακύμανσης εξαρτάται τόσο από τα πρόσφατα τετράγωνα σοκ (όρος ARCH) όσο και από την παρελθούσα διακύμανση (όρος GARCH).

Το μοντέλο Exponential GARCH (eGARCH) αποτελεί επέκταση του αρχικού μοντέλου που αναπτύχθηκε από τον Nelson (1991) με στόχο να ληφθεί υπόψιν πιθανή μη γραμμική δυναμική μεταβλητότητα της διακύμανσης.

Πιο συγκεκριμένα, το eGARCH εισάγει έναν ασύμμετρο όρο στη λογαριθμική υπό συνθήκη διακύμανση, επιτρέποντας στην μεταβλητότητα να αντιδρά διαφορετικά σε θετικά και αρνητικά σοκ. Χάρη στη λογαριθμική διατύπωση, δεν απαιτούνται περιορισμοί μη αρνητικότητας των παραμέτρων.

Το eGARCH( $p, q$ ) μοντέλο δίνεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$\log(\sigma_t^2) = \omega + \sum_{k=1}^q \{\alpha_k z_{t-k} + \gamma_k(|z_{t-k}| - E|z_{t-k}|)\} + \sum_{l=1}^p \beta_l \log(\sigma_{t-l}^2)$$

Ο όρος  $\alpha_k z_{t-k}$  αποτυπώνει την επίδραση του προσήμου του σοκ (sign effect). Ένα στατιστικά σημαντικό  $\alpha_k < 0$  προκαλεί το leverage effect: αρνητικά σοκ  $z_{t-k} < 0$  προκαλούν μεγαλύτερη αύξηση της μεταβλητότητας από ότι θετικά σοκ ίσου μεγέθους. Ο όρος  $\gamma_k(|z_{t-k}| - E|z_{t-k}|)$  αποτυπώνει την επίδραση του μεγέθους του σοκ (size effect) ανεξάρτητα από το πρόσημο. Η αφαίρεση του  $E|z_{t-k}|$  εξασφαλίζει πως αυτός ο όρος έχει μηδενική μέση τιμή.

Η επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού (μοντέλο, τάξη, κατανομή) πραγματοποιείται με τη χρήση του Adjusted BIC (Bayesian Information Criterion) επιλέγοντας τον συνδυασμό με την μικρότερη τιμή. Για τον αριθμό των lags που θα χρησιμοποιήσουμε σε κάθε χρονοσειρά, θα γίνει χρήση του Weighted Ljung-Box test.

### 3.2.2 DCC-GARCH

Τα μονομεταβλητά υποδείγματα της ενότητας 3.3.1 αποτυπώνουν τη δυναμική της υπό συνθήκη διακύμανσης κάθε χρονοσειράς ξεχωριστά. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, ωστόσο, ζητούμενο είναι η μοντελοποίηση της κοινής υπό συνθήκη διακύμανσης των αποδόσεων, με ρητή αποτύπωση της χρονικής μεταβολής των συσχετίσεων μεταξύ των τεσσάρων περιουσιακών στοιχείων (VNOQ, SPY, AIQ, BTC-USD). Για τον σκοπό αυτό υιοθετείται το υπόδειγμα της Δυναμικής Υπό Συνθήκη Συσχέτισης (Dynamic Conditional Correlation – DCC), όπως διατυπώθηκε από τον Engle (2002) και Engle & Sheppard (2001), ως επέκταση του μοντέλου Σταθερής Υπό Συνθήκη Συσχέτισης (Constant Conditional Correlation – CCC) του Bollerslev (1990).

Παραγοντοποίηση της υπό συνθήκη συνδιακύμανσης:

Ας θεωρήσουμε ένα διάνυσμα  $r_t = (r_{t,1}, \dots, r_{t,d})'$  διαστάσεων  $d \times 1$ , που περιλαμβάνει τις αποδόσεις  $d$  περιουσιακών στοιχείων. Υπό την προϋπόθεση ότι έχουν αφαιρεθεί τα συστηματικά στοιχεία της υπό συνθήκη μέσης τιμής μέσω των ARMA υποδειγμάτων ισχύει ότι:

$$r_t = \mu_t + \varepsilon_t, \quad \varepsilon_t | F_{t-1} \sim N(0, H_t)$$

Στο πλαίσιο του DCC, η μήτρα συνδιακύμανσης αναλύεται σε:

$$H_t = D_t R_t D_t$$

Όπου  $D_t$  είναι ο διαγώνιος πίνακας διαστάσεων  $n \times n$  με στοιχεία τις υπό συνθήκη τυπικές αποκλίσεις  $\sigma_{it}$  που προκύπτουν από τα μονομεταβλητά υποδείγματα GARCH, και  $R_t$  είναι η υπό συνθήκη μήτρα συσχετίσεων διάστασης  $d \times d$ , με μονάδες στην κύρια διαγώνιο και στοιχεία  $\rho_{ij,t}$  εκτός αυτής.

Η απλούστερη εξειδίκευση της παραπάνω παραγοντοποίησης είναι το CCC του Bollerslev (1990), το οποίο επιβάλλει την παραδοχή ότι ο πίνακας υπό συνθήκη συσχετίσεων παραμένει σταθερός στον χρόνο:

$$R_t = R \quad \forall t$$

Υπό αυτή την υπόθεση, ολόκληρη η δυναμική του  $H_t$  καθορίζεται αποκλειστικά από τα μονομεταβλητά GARCH που περιέχονται στον  $D_t$ , ενώ οι συσχετίσεις  $R$  εκτιμάται μέσω του δειγματικού πίνακα συσχετίσεων των τυποποιημένων καταλοίπων  $v_{t,i}$ .

Παρά την υπολογιστική του απλότητα, το CCC είναι εμπειρικά περιοριστικό για χρηματοοικονομικά δεδομένα: εκτεταμένη εμπειρική βιβλιογραφία (Engle, (2002), Carpiello et al., (2006)) αναδεικνύει ότι οι συσχετίσεις μεταξύ περιουσιακών στοιχείων μεταβάλλονται ουσιαστικά διαχρονικά: αυξάνονται έντονα κατά τις περιόδους κρίσης (φαινόμενο correlation breakdown) και εμφανίζουν ασυμμετρίες σε σχέση με τη φορά των σοκ. Η υπόθεση  $R_t = R$  αναιρείται κατά συνέπεια στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές.

Για να αρθεί ο περιορισμός της σταθερότητας των συσχετίσεων, οι Engle (2002) και Engle & Sheppard (2001) πρότειναν το υπόδειγμα Δυναμικής Υπό Συνθήκη Συσχέτισης (Dynamic Conditional Correlation - DCC), το οποίο επιτρέπει στον πίνακα  $R_t$  να μεταβάλλεται δυναμικά στον χρόνο, διατηρώντας ταυτόχρονα την υπολογιστική δυναμική της εκτίμησης ακόμη και σε υψηλές διαστάσεις  $d$ .

Έστω  $v_t = (v_{t,1}, v_{t,2}, \dots, v_{t,d})'$  το διάνυσμα των τυποποιημένων καταλοίπων που προκύπτουν από τα μονομεταβλητά GARCH, με  $v_{t,i} = \frac{\varepsilon_{t,i}}{\sigma_{t,i}}$ . Οι Engle & Sheppard ορίζουν έναν βοηθητικό ψευδοπίνακα συνδιακυμάνσεων  $Q_t$ , ο οποίος εξελίσσεται μέσω μιας εξίσωσης τύπου GARCH:

$$Q_t = (1 - a - b)\bar{Q} + av_{t-1}v'_{t-1} + bQ_{t-1}$$

Όπου  $\bar{Q}$  είναι ο υπό συνθήκη πίνακας συνδιακυμάνσεων των τυποποιημένων καταλοίπων, ο οποίος εκτιμάται από το εμπειρικό δείγμα ως  $\bar{Q} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T v_t v'_t$  και  $a, b$  είναι μη αρνητικές παράμετροι, οι οποίες μετρούν αντίστοιχα την επίδραση των πιο πρόσφατων τυποποιημένων καταλοίπων (όρος ARCH) και την επιμονή της προηγούμενης συσχετιστικής δομής (όρος GARCH).

Για να εξασφαλιστεί η στασιμότητα της διαδικασίας και η θετική οριστικότητα του  $Q_t$  σε κάθε χρονική περίοδο, απαιτούνται οι ακόλουθοι περιορισμοί:

$$\alpha \geq 0, \quad b \geq 0, \quad a + b < 1$$

Καθώς η ανωτέρω εξίσωση δεν εξασφαλίζει από μόνη της ότι ο  $Q_t$  θα έχει μονάδες στη διαγώνιο (συνθήκη απαραίτητη για να αποτελεί πίνακα συσχετίσεων), ο τελικός πίνακας υπό συνθήκη συσχετίσεων  $R_t$  προκύπτει μέσω τυποποίησης του  $Q_t$ :

$$R_t = (Q_t^*)^{-1/2} Q_t (Q_t^*)^{-1/2}$$

Όπου  $Q_t^*$  είναι ο διαγώνιος πίνακας που περιέχει στη διαγώνιό του τα διαγώνια στοιχεία του  $Q_t$ . Ισοδύναμα, σε επίπεδο στοιχείων, η υπό συνθήκη συσχέτιση μεταξύ των αποδόσεων  $i, j$  τη χρονική στιγμή  $t$  ορίζεται ως:

$$\rho_{ij,t} = \frac{q_{ij,t}}{\sqrt{q_{ii,t}q_{jj,t}}}, \quad i \neq j$$

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η συμμετρική μορφή DCC(1,1), με χρήση του πακέτου `rmgarch` της R (Asymmetric : FALSE).

Η εκτίμηση των παραμέτρων του DCC-GARCH πραγματοποιείται σε δύο διαδοχικά διακριτά στάδια, σύμφωνα με τη μεθοδολογία των Engle & Sheppard (2001). Στο πρώτο στάδιο, εκτιμώνται ξεχωριστά τα μονομεταβλητά υποδείγματα GARCH (που αναλύθηκαν παραπάνω) με την κατάλληλη κατανομή, για καθεμία από τις  $d$  χρονοσειρές αποδόσεων, ώστε να προκύψουν οι υπό συνθήκη τυπικές αποκλίσεις  $\sigma_{t,i}$  και τα αντίστοιχα τυποποιημένα κατάλοιπα  $v_{t,i}$ . Στο δεύτερο στάδιο, οι παράμετροι  $a$  και  $b$  της δυναμικής συσχέτισης εκτιμώνται μέσω της Μεθόδου Μέγιστης Πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood) εφαρμοσμένης στα τυποποιημένα κατάλοιπα του πρώτου σταδίου.

### 3.3 Διασυνδεσιμότητα (Diebold - Yilmaz Connectedness)

Το πλαίσιο διασυνδεσιμότητας (Connectedness Framework) των Diebold και Yilmaz (2009, 2012 & 2014) αποτελεί ένα βασικό οικονομετρικό εργαλείο για τη μέτρηση των μεταδόσεων (spillovers) μεταξύ διαφορετικών μεταβλητών. Βασίζεται στη μέθοδο GFEVD (Generalized Forecast Error Variance Decomposition - Pesaran & Shin, 1998) ενός Διανυσματικού Αυτοπαλίνδρομου Μοντέλου (Vector Autoregression, VAR).

Έστω ένα σύστημα  $N$  μεταβλητών, το οποίο περιγράφεται από ένα στάσιμο VAR( $p$ ) υπόδειγμα της μορφής:

$$x_t = \sum_{k=1}^p \Phi_k x_{t-k} + \varepsilon_t$$

Όπου  $x_t$  είναι ένα  $N \times 1$  διάνυσμα  $N$  ενδογενών μεταβλητών,  $\Phi_k$  είναι οι  $N \times N$  πίνακες των αυτοπαλίνδρομων συντελεστών και  $\varepsilon_t$  είναι ένα  $N \times 1$  διάνυσμα σφαλμάτων (white noise) με μηδενική μέση τιμή και πίνακα συνδιακύμανσης  $\Sigma$ .

Υπό την προϋπόθεση της στασιμότητας, το υπόδειγμα VAR δύναται να μετασχηματιστεί στην αναπαράσταση Κινητού Μέσου (Moving Average - MA) άπειρης τάξης, ως εξής:

$$x_t = \sum_{k=0}^{\infty} A_k \varepsilon_{t-k}$$

Όπου  $A_k$  είναι ο πίνακας συντελεστών  $N \times N$  που υπολογίζονται αναδρομικά μέσω της σχέσης  $A_k = \Phi_1 A_{k-1} + \Phi_2 A_{k-2} + \dots + \Phi_p A_{k-p}$ , με  $A_0$  να αποτελεί τον ταυτοτικό πίνακα μεγέθους  $N \times N$  και  $A_k = 0$  για  $k < 0$ .

Βάσει του πλαισίου της προσέγγισης GFEVD, η συνεισφορά της μεταβλητής  $j$  στη διακύμανση του σφάλματος πρόβλεψης της μεταβλητής  $i$ , για ορίζοντα πρόβλεψης  $H$  βημάτων, συμβολίζεται με  $\theta_{ij}^g(H)$  και ορίζεται ως:

$$\theta_{ij}^g(H) = \frac{\sigma_{jj}^{-1} \sum_{h=0}^{H-1} (e_i' A_h \Sigma e_j)^2}{\sum_{h=0}^{H-1} (e_i' A_h \Sigma A_h' e_i)}$$

Όπου:

- $\sigma_{jj}$  είναι η τυπική απόκλιση του σφάλματος της  $j$ -οστής εξίσωσης.
- $e_i$  είναι ένα διάνυσμα επιλογής διαστάσεων  $N \times N$ , το οποίο λαμβάνει την τιμή 1 στο στοιχείο  $i$  και 0 οπουδήποτε αλλού.

Δεδομένου ότι τα στοιχεία κάθε γραμμής του πίνακα ανάλυσης διακύμανσης δεν αθροίζουν κατ' ανάγκη στη μονάδα (δηλαδή  $\sum_{j=1}^N \theta_{ij}^g(H) \neq 1$ ), η μεθοδολογία απαιτεί την κανονικοποίησή τους (row normalization), διαιρώντας κάθε στοιχείο με το άθροισμα της αντίστοιχης γραμμής:

$$\tilde{\theta}_{ij}^g(H) = \frac{\theta_{ij}^g(H)}{\sum_{j=1}^N \theta_{ij}^g(H)}$$

Με την κανονικοποίηση εξασφαλίζεται ότι  $\sum_{j=1}^N \tilde{\theta}_{ij}^g(H) = 1$  και  $\sum_{i,j=1}^N \tilde{\theta}_{ij}^g(H) = N$ .

Βασιζόμενοι στον κανονικοποιημένο πίνακα ανάλυσης διακύμανσης, προκύπτουν οι παρακάτω μετρικές διασυνδεσιμότητας:

- Total Connectedness (Συνολική Διασυνδεσιμότητα)

Μετρά το συνολικό ποσοστό της διακύμανσης στο σύστημα που οφείλεται σε αλληλεπιδράσεις μεταξύ όλων των μεταβλητών (εξαιρουμένων των επιδράσεων που έχει κάθε μεταβλητή στον εαυτό της). Υπολογίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος των μη-διαγώνιων στοιχείων προς το συνολικό άθροισμα των στοιχείων του πίνακα:

$$C(H) = \frac{\sum_{i,j=1, i \neq j}^N \tilde{\theta}_{ij}^g(H)}{\sum_{i,j=1}^N \tilde{\theta}_{ij}^g(H)} \times 100 = \frac{1}{N} \sum_{i,j=1, i \neq j}^N \tilde{\theta}_{ij}^g(H) \times 100$$

- Directional Connectedness “To” (Μετάδοση ΠΡΟΣ άλλη μεταβλητή)

Η εν λόγω μετρική ποσοτικοποιεί την επίδραση που ασκεί ένα σοκ της μεταβλητής  $i$  στη διακύμανση όλων των υπολοίπων μεταβλητών του συστήματος  $j$  (όπου  $i \neq j$ ):

$$C_{j \leftarrow i}(H) = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^N \tilde{\theta}_{ji}^g(H)}{N} \cdot 100$$

- Directional Connectedness “From” (Μετάδοση ΑΠΟ άλλη μεταβλητή)

Μετρά το αθροιστικό ποσοστό της διακύμανσης της μεταβλητής  $i$  που οφείλεται σε σοκ που προέρχονται από όλες τις υπόλοιπες μεταβλητές του συστήματος  $j$ , (όπου  $i \neq j$ ):

$$C_{i \leftarrow j}(H) = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^N \tilde{\theta}_{ij}^g(H)}{N} \cdot 100$$

- Net Directional Connectedness – NDC (Καθαρή Μετάδοση)

Η καθαρή διασυνδεσιμότητα αποτελεί τη διαφορά μεταξύ των μεταδόσεων που εκπέμπει (To) η μεταβλητή  $i$  στο σύστημα και εκείνων που δέχεται (From) από αυτό. Συνεπώς, είναι η διαφορά μεταξύ των μεταδόσεων ΠΡΟΣ τους άλλους και ΑΠΟ τους άλλους.

$$NetC_i(H) = C_{j \leftarrow i}(H) - C_{i \leftarrow j}(H)$$

Αν  $NetC_i(H) > 0$ , τότε η μεταβλητή θεωρείται ως καθαρός πομπός (Net Transmitter). Αν, αντιθέτως  $NetC_i(H) < 0$ , η μεταβλητή θεωρείται ως καθαρός δέκτης (Net Receiver).

- Net Pairwise Directional Connectedness – NPDC (Καθαρή κατά ζεύγη Μετάδοση)

Μετρά την καθαρή μετάδοση των σοκ μεταξύ ενός συγκεκριμένου ζεύγους μεταβλητών  $i$  και  $j$ . Είναι η διαφορά της μετάδοσης από το  $i$  στο  $j$ , μείον τη μετάδοση από το  $j$  στο  $i$ .

$$NPDC_{ij}(H) = \frac{\tilde{\theta}_{ji}^g(H) - \tilde{\theta}_{ij}^g(H)}{N} \cdot 100$$

- Network Theory Connectedness (Θεωρία Δικτύων)

Οι Diebold και Yilmaz (2014), συνέδεσαν την ανάλυση διακύμανσης με την τοπολογία των δικτύων. Ο πίνακας των κανονικοποιημένων στοιχείων  $\tilde{\theta}_{ij}^g(H)$  ορίζεται ουσιαστικά ως ο Πίνακας Γειτνίασης (Adjacency Matrix) ενός κατευθυνόμενου, σταθμισμένου δικτύου (directed, weighted network). Υπό αυτό το θεωρητικό πρίσμα, εξάγονται οι ακόλουθες αντιστοιχίες:

- Κόμβοι (Nodes): Οι  $N$  μεταβλητές του VAR υποδείγματος,
- Ακμές και Σταθμίσεις (Edges / Weights): Η ένταση και η κατεύθυνση κάθε ακμής προσδιορίζεται αυστηρά από τα στοιχεία  $\tilde{\theta}_{ji}^g(H)$ ,
- Βαθμός Δικτύου (Degrees): Ο σταθμισμένος βαθμός εισερχόμενων ακμών (Weighted In-Degree) ενός κόμβου  $i$  ισούται ακριβώς με την Κατευθυντική Διασυνδεσιμότητα "From"  $C_{i \leftarrow j}(H)$ . Ο σταθμισμένος βαθμός εξερχόμενων ακμών (Weighted Out-Degree) του κόμβου  $i$  ταυτίζεται με την Κατευθυντική Διασυνδεσιμότητα "To"  $C_{j \leftarrow i}(H)$ .
- Πυκνότητα Δικτύου (Network Density): Ο δείκτης Συνολικής Διασυνδεσιμότητας (Total Connectedness) αποτελεί μέτρο της μέσης πυκνότητας του συστήματος, υποδεικνύοντας τον συνολικό βαθμό αλληλεξάρτησης μεταξύ των κόμβων σε δεδομένη χρονική περίοδο. Όσο υψηλότερο είναι το συνολικό index, τόσο πιο συνδεδεμένο είναι το δίκτυο στο σύνολό του.

Στην συγκεκριμένη εργασία, η εκτίμηση της δυναμικής Συνολικής Διασυνδεσιμότητας πραγματοποιήθηκε μέσω της προσέγγισης κυλιόμενου παραθύρου (rolling-window VAR), με χρήση του πακέτου ConnectednessApproach της R. Συγκεκριμένα, υιοθετήθηκε στατικό υπόδειγμα διανυσματικής αυτοπαλίνδομης τάξης  $p = 1$ , εκτιμώμενο διαδοχικά σε κυλιόμενο παράθυρο 100 ημερών διαπραγματεύσεως, με ορίζοντα πρόβλεψης  $H = 10$  βημάτων. Η επιλογή σχετικά βραχέος παραθύρου (100 ημερών) δικαιολογείται από την ανάγκη ανίχνευσης απότομων μετατοπίσεων στο καθεστώς αλληλεξάρτησης, ιδίως κατά τα γεγονότα της πανδημίας και της νομισματικής σύσφιξης.

### 3.4 Ανάλυση χαρτοφυλακίου

Σύμφωνα με τη Σύγχρονη Θεωρία Χαρτοφυλακίου (Modern Portfolio Theory – MPT), ένας ορθολογικός επενδυτής διαμορφώνει τις προτιμήσεις του, είτε επιδιώκοντας τη μεγιστοποίηση της αναμενόμενης απόδοσης για δεδομένο επίπεδο κινδύνου είτε, ισοδύναμα, την ελαχιστοποίηση του κινδύνου για δεδομένο επίπεδο αναμενόμενης απόδοσης.

Έστω χαρτοφυλάκιο που αποτελείται από  $d$  τίτλους, με διάνυσμα βαρών  $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_d)'$ , διάνυσμα αναμενόμενων αποδόσεων  $\boldsymbol{\mu} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_d)'$  και πίνακα συνδιακυμάνσεων  $\boldsymbol{\Sigma}$  διάστασης  $d \times d$ . Η αναμενόμενη απόδοση και η διακύμανση του χαρτοφυλακίου δίνονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$E[R_p] = \mathbf{w}'\boldsymbol{\mu} \quad \text{και} \quad Var[R_p] = \mathbf{w}' \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{w}$$

Τα χαρτοφυλάκια  $p$  που για ορισμένο αριθμό αξιογράφων ( $\alpha$ ) σε δεδομένο επίπεδο κινδύνου προσδίδουν την μεγαλύτερη απόδοση ή ( $\beta$ ) με δεδομένο επίπεδο αναμενόμενης απόδοσης εκθέτουν τον επενδυτή στον χαμηλότερο δυνατό κίνδυνο, ονομάζονται αποτελεσματικά χαρτοφυλάκια (efficient portfolios or mean-variance

portfolios). Ο γεωμετρικός τόπος όλων των αποτελεσματικών χαρτοφυλακίων συγκροτεί το αποτελεσματικό (ή αποδοτικό) σύνορο (efficient frontier) του Markowitz. Η τεχνική η οποία προσδιορίζει αυτό το σύνορο ονομάζεται Μη Γραμμικός Προγραμματισμός 2<sup>ου</sup> βαθμού (Quadratic Programming). Σύμφωνα με τη θεωρία του Markowitz, το χαρτοφυλάκιο το οποίο πρέπει να διατηρεί ο επενδυτής αναφέρεται ως βέλτιστο ή άριστο χαρτοφυλάκιο (optimal portfolio) και εξαρτάται κάθε φορά από τις προτιμήσεις και το προφίλ του εκάστοτε επενδυτή ως προς την ανταλλαγή κινδύνου-απόδοσης.

Αξιοποιώντας την παραπάνω λογική, στην παρούσα εργασία κατασκευάζονται δύο εναλλακτικά δυναμικά χαρτοφυλάκια: το χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Διακύμανσης (Minimum Variance Portfolio - MVP) και το χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Συσχέτισης (Minimum Correlation Portfolio - MCP). Ο στατικός πίνακας συνδιακυμάνσεων  $\Sigma$  αντικαθίσταται από τον δυναμικό υπό συνθήκη πίνακα συνδιακυμάνσεων  $Q_t = \text{diag}(\rho_t)^{-\frac{1}{2}} \rho_t \text{diag}(\rho_t)^{-\frac{1}{2}}$ , που προκύπτει από την εκτίμηση του υποδείγματος DCC-GARCH της ενότητας 3.3.2.

### 3.4.1 Χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Διακύμανσης

Στο αποδοτικό σύνορο, ιδιαίτερο θεωρητικό και πρακτικό ενδιαφέρον παρουσιάζει το αριστερότερο σημείο του, γνωστό ως Χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Διακύμανσης (Minimum Variance Portfolio). Η προσέγγιση της ελάχιστης διακύμανσης προσδιορίζει το διάνυσμα των βαρών που ελαχιστοποιεί τη συνολική δεσμευμένη διακύμανση του χαρτοφυλακίου, χωρίς να απαιτείται η εκτίμηση των αναμενόμενων αποδόσεων. Συνεπώς, οι βέλτιστες αναλογίες του χαρτοφυλακίου ελάχιστης διακύμανσης (δεδομένου ότι επενδύεται το σύνολο του διαθέσιμου κεφαλαίου) κατά τη χρονική στιγμή  $t$  δίνονται από τον τύπο:

$$w^*_{MinVar,t} = \frac{K_t e}{e' K_t e}$$

Όπου  $K_t$ :  $Q_t^{-1}$  ο υπό συνθήκη πίνακας διακυμάνσεων-συνδιακυμάνσεων και  $e = (1, 1, \dots, 1)'$  αποτελεί το  $d$ -διάστατο διάνυσμα μονάδων.

### 3.4.2 Χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Συσχέτισης

Παρότι το MVP εκμεταλλεύεται πλήρως τη δομή του πίνακα συνδιακυμάνσεων, υφίσταται σημαντική επιρροή από τις ατομικές διακυμάνσεις των τίτλων. Συγκεκριμένα, τίτλοι με χαμηλή μεταβλητότητα συγκεντρώνουν δυσανάλογα υψηλά βάρη, ακόμη και όταν η συμβολή τους στη διαφοροποίηση είναι περιορισμένη. Αντιστρόφως, στοιχεία με υψηλή ιδιοσυγκρατική μεταβλητότητα αλλά χαμηλή συσχέτιση με τα υπόλοιπα ενδέχεται να υποεκπροσωπούνται.

Για την άρση αυτής της ασυμμετρίας (Engle, 2002), στο Χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Συσχέτισης ο πίνακας  $\mathbf{Q}_t$  αντικαθίσταται από τον πίνακα υπό συνθήκη συσχετίσεων  $\mathbf{R}_t$ , ο οποίος προκύπτει από την τυποποίηση:

$$\mathbf{R}_t = \text{diag}(\mathbf{Q}_t)^{-\frac{1}{2}} \mathbf{Q}_t \text{diag}(\mathbf{Q}_t)^{-\frac{1}{2}} = \mathcal{L}_t \mathbf{Q}_t \mathcal{L}_t$$

Όπου:  $\mathcal{L}_t = \text{diag}(\mathbf{Q}_t)^{-\frac{1}{2}}$

Οι βέλτιστες αναλογίες, λοιπόν, του MCP με  $K_t = \mathbf{Q}_t^{-1}$  κατά την χρονική στιγμή  $t$  δίνονται από τον τύπο:

$$w_{MinCorr,t} = \frac{[\mathcal{L}_t K_t \mathcal{L}_t]^{-1} \mathbf{e}}{\mathbf{e}' [\mathcal{L}_t K_t \mathcal{L}_t]^{-1} \mathbf{e}}$$

Η θεμελιώδης διαφορά μεταξύ των δύο προσεγγίσεων εντοπίζεται στον τρόπο με τον οποίο αντιμετωπίζεται ο ιδιοσυγκρατικός κίνδυνος κάθε τίτλου: το MVP χρησιμοποιεί τον πλήρη πίνακα συνδιακυμάνσεων  $\mathbf{Q}_t$  (διακυμάνσεις και συνδιακυμάνσεις από κοινού), ενώ το MCP χρησιμοποιεί τον πίνακα συσχετίσεων  $\mathbf{R}_t$ , ο οποίος έχει μοναδιαία διαγώνιο και αγνοεί τις ατομικές διακυμάνσεις, αντιμετωπίζοντας όλους τους τίτλους ως ισοδύναμους από πλευράς ιδιοσυγκρατικού κινδύνου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το MVP να τιμωρεί συστηματικά τα στοιχεία με υψηλή ατομική μεταβλητότητα, ενώ το MCP να τα αντιμετωπίζει ως ισοδύναμα και ανταμείβει αποκλειστικά τη χαμηλή αλληλεξάρτηση μεταξύ των στοιχείων, εύρημα που αναμένεται να αναδειχθεί κατά την εμπειρική ανάλυση της ενότητας 5.3.

Τέλος, σε όλα τα παραπάνω επιβάλλεται επιπροσθέτως ο περιορισμός μη αρνητικών βαρών  $w_i \geq 0$ , για  $i = 1, \dots, d$ , αποκλείοντας τη δυνατότητα ανοικτών πωλήσεων (short selling). Η αριθμητική επίλυση στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στην R μέσω του πακέτου quadprog.

## 4. Δεδομένα

### 4.1 Συλλογή δεδομένων και χρονική διάρκεια

Η συλλογή των δεδομένων της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε μέσω του YahooFinance, η οποία αποτελεί αξιόπιστη δωρεάν πηγή χρηματοοικονομικών δεδομένων. Ορίστηκε, επίσης, ο χρονικός ορίζοντας της ανάλυσης, ο οποίος ξεκινάει από 02/01/2019 και λήγει την 29/10/2025. Τα τρία παραδοσιακά ETFs (SPY, VNO, AIQ) διαπραγματεύονται αποκλειστικά κατά τις εργάσιμες ημέρες των αμερικανικών χρηματιστηρίων, ενώ το BTC-USD διαπραγματεύεται συνεχώς, 24 ώρες το εικοσιτετράωρο και 7 ημέρες την εβδομάδα, χωρίς αργίες. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η χρονική ευθυγράμμιση των τεσσάρων χρονοσειρών και να καταστεί δυνατή η εφαρμογή οικονομετρικών υποδειγμάτων, αφαιρέθηκαν από τη χρονοσειρά του Bitcoin οι παρατηρήσεις που αντιστοιχούν σε Σάββατα, Κυριακές και

αμερικανικές χρηματιστηριακές αργίες, ημερομηνίες κατά τις οποίες τα τρία ETFs δεν διαπραγματεύονται και εμφανίζουν NA τιμές. Συνολικά αφαιρέθηκαν 777 παρατηρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο, και οι τέσσερις χρονοσειρές διαθέτουν κοινό σύνολο ημερομηνιών παρατήρησης. Τέλος, για κάθε asset υπολογίστηκαν οι λογαριθμικές ημερήσιες αποδόσεις (log-returns), από τις ημερήσιες τιμές κλεισίματος. Ο λόγος της επιλογής των log-returns έναντι των αριθμητικών έγινε για την εξομάλυνση τυχόν ακραίων τιμών (outliers).

## 4.2 SPY

Το SPDR S&P 500 ETF Trust (SPY) αποτελεί ένα από τα πιο γνωστά και ευρέως χρησιμοποιούμενα διαπραγματεύσιμα αμοιβαία κεφάλαια διεθνώς. Βασικός του στόχος είναι η παρακολούθηση και αναπαραγωγή της απόδοσης του δείκτη S&P 500, ο οποίος περιλαμβάνει 500 από τις μεγαλύτερες εισηγμένες εταιρείες στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το SPY αντικατοπτρίζει τη συνολική κατάσταση και απόδοση της αμερικανικής χρηματιστηριακής αγοράς και συχνά χρησιμοποιείται ως δείκτης αναφοράς για τα διεθνή χρηματιστήρια. Η υψηλή ρευστότητα και η ευρεία κάλυψη κλάδων το καθιστούν βασικό αντιπρόσωπο της αγοράς μετοχών.

## 4.3 VNQ

Το Vanguard Real Estate ETF (VNQ), ένα διαπραγματεύσιμο αμοιβαίο κεφάλαιο που παρέχει έκθεση στον κλάδο των ακινήτων στις Ηνωμένες Πολιτείες. Το ETF επενδύει κυρίως σε Real Estate Investment Trusts (REITs), τα οποία δραστηριοποιούνται σε διάφορους τομείς της αγοράς ακινήτων που παράγουν εισόδημα, όπως εμπορικά ακίνητα, γραφεία, κατοικίες, βιομηχανικά κτίρια και κέντρα logistics. Το VNQ χρησιμοποιείται συχνά ως αντιπροσωπευτικός δείκτης της αγοράς ακινήτων, καθώς αντικατοπτρίζει τη συνολική απόδοση και τη μεταβλητότητα του real estate τομέα στις χρηματοπιστωτικές αγορές. Είναι, επίσης, δημοφιλής επιλογή μεταξύ επενδυτών που αναζητούν υψηλές αποδόσεις από μερίσματα και διαφοροποίηση εκτός των παραδοσιακών μετοχών και ομολόγων.

## 4.4 AIQ

Το Global X Artificial Intelligence & Technology ETF (AIQ), παρέχει στους επενδυτές έκθεση σε εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον χώρο της τεχνητής νοημοσύνης και προηγμένων ψηφιακών τεχνολογιών. Το ETF περιλαμβάνει επιχειρήσεις από τομείς όπως λογισμικό, ημιαγωγοί, ανάλυση δεδομένων, αυτοματοποίηση, ψηφιακές χρηματοοικονομικές υπηρεσίες και υποδομές οικονομίας, οι οποίες αξιοποιούν ή αναπτύσσουν τεχνολογίες AI. Το AIQ θεωρείται εργαλείο για επενδυτές που επιδιώκουν να συμμετάσχουν στην ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών με δυναμική υψηλής απόδοσης, ενώ ταυτόχρονα ενέχει αυξημένη μεταβλητότητα σε σχέση με τις παραδοσιακές αγορές. Η απόδοσή του συχνά αντανακλά τις τάσεις της σύγχρονης τεχνολογικής καινοτομίας και τις στρατηγικές ανάπτυξης των εταιρειών του κλάδου,

αποτυπώνοντας τις αποδόσεις και τη δυναμική των εταιρειών που σχετίζονται με fintech και αναδυόμενες τεχνολογίες.

## 4.5 BTC-USD

Το BTC-USD αναφέρεται στην τιμή του Bitcoin εκφρασμένη σε δολάρια Ηνωμένων Πολιτειών. Το Bitcoin αποτελεί το πρώτο και μεγαλύτερο σε κεφαλαιοποίηση κρυπτονόμισμα, βασισμένο στην αποκεντρωμένη τεχνολογία blockchain, χωρίς κεντρική διαχείριση ή επίσημη νομισματική υποστήριξη. Η τιμή του καθορίζεται από την προσφορά και τη ζήτηση στις διεθνείς αγορές και χαρακτηρίζεται από υψηλή μεταβλητότητα σε σχέση με παραδοσιακά χρηματοοικονομικά μέσα. Το BTC-USD χρησιμοποιείται συχνά ως αντιπροσωπευτικό μέτρο της αγοράς κρυπτονομισμάτων, προσφέροντας δυνατότητες διαφοροποίησης χαρτοφυλακίου και ανάλυσης συμπεριφοράς σε περιόδους χρηματοοικονομικής αβεβαιότητας ή έντονων διακυμάνσεων στις παραδοσιακές αγορές.

## 5. Εμπειρική Ανάλυση

### 5.1 Περιγραφική στατιστική

Στην ενότητα αυτή, εξετάζουμε τις κεντρικές τάσεις και τη μορφή των κατανομών των αποδόσεων. Οι υπό εξέταση παράμετροι είναι οι εξής: (α) Μέσος (Mean), δηλαδή οι αναμενόμενες ημερήσιες αποδόσεις, (β) η Διακύμανση (variance) που αποτελεί το μέτρο της διασποράς των αποδόσεων γύρω από τη μέση τιμή. Στη συνέχεια εξετάζεται η (γ) Λοξότητα-Ασυμμετρία (Skewness) που υποδηλώνει πόσο συμμετρική είναι η κατανομή, ή αλλιώς εάν οι τιμές συγκεντρώνονται περισσότερο στη μια πλευρά. Εάν είναι αρνητική (left-skewed), η ουρά της κατανομής εκτείνεται προς τα αριστερά (προς τις αρνητικές αποδόσεις), ενώ αντίθετα εάν είναι θετική (right-skewed) τότε η ουρά εκτείνεται προς τα δεξιά (προς τις θετικές αποδόσεις). Επίσης, η (δ) Κύρτωση (Ex. Kurtosis) μας υποδηλώνει πόσο συχνά εμφανίζονται ακραίες τιμές ή αλλιώς πόσο μεγάλο το βάρος των ουρών της κατανομής (ύπαρξη fat tails). Οι παράμετροι κατανομών (κεντρικές ροπές) (γ) και (δ) περιγράφουν πιο εξειδικευμένα το «σχήμα» και την συμπεριφορά της κατανομής. (ε) Ο έλεγχος Jarque-Bera (JB) είναι ένας σύνθετος έλεγχος που εξετάζει ταυτόχρονα την ασυμμετρία και την κύρτωση για να αποφανθεί αν τα δεδομένα ακολουθούν ή αποκλίνουν από την Κανονική Κατανομή. Εν συνεχεία, στο (στ) ελέγχεται η στασιμότητα της χρονοσειράς με τον έλεγχο μοναδιαίας ρίζας ERS (Elliot-Rothenberg-Stock, 1996) και με τους ελέγχους (ζ)  $Q(20)$  και (η)  $Q^2(20)$  ανιχνεύεται η ύπαρξη αυτοσυσχέτισης στις αποδόσεις και στην διακύμανση των αποδόσεων αντίστοιχα, έως 20 υστερήσεις (lags). Τέλος, (θ) θα μετρηθεί πόσο συγχρονισμένα κινούνται οι αποδόσεις με συσχέτιση Kendall (Kendall's Tau -  $\tau$ ).

Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει στοιχεία περιγραφικής στατιστικής των υπό εξέταση τίτλων. Σημειώνεται ότι τα αστεράκια που ακολουθούν τις τιμές δηλώνουν τα διαφορετικά επίπεδα σημαντικότητας (\*\*\*) ( $p < 0.01$ , \*\*  $p < 0.05$ , \*  $p < 0.10$ ). Η απουσία αστερίσκου υποδηλώνει μη απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης σε επίπεδο 10%. Για παράδειγμα όπου συναντάμε (\*\*\*) (επίπεδο 1%), σημαίνει ότι το αποτέλεσμα είναι εξαιρετικά αξιόπιστο. Οι τιμές στις παρενθέσεις αποτυπώνουν το αντίστοιχο p-value.

| Statistic           | VNQ          | SPY          | AIQ         | BTC-USD      |
|---------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| Mean                | 0.000        | 0.001*       | 0.001**     | 0.002*       |
|                     | (0.719)      | (0.054)      | (0.035)     | (0.074)      |
| Variance            | 0            | 0            | 0           | 0.001        |
| Skewness            | -1.590***    | -0.588***    | -0.250***   | -1.170***    |
|                     | (0.000)      | (0.000)      | (0.000)     | (0.000)      |
| Excess Kurtosis     | 24.118***    | 13.859***    | 4.520***    | 17.815***    |
|                     | (0.000)      | (0.000)      | (0.000)     | (0.000)      |
| Jarque-Bera (JB)    | 42287.104*** | 13824.832*** | 1477.892*** | 23071.444*** |
|                     | (0.000)      | (0.000)      | (0.000)     | (0.000)      |
| ERS                 | -12.531***   | -3.621***    | -4.417***   | -8.342***    |
|                     | (0.000)      | (0.000)      | (0.000)     | (0.000)      |
| Q(20)               | 97.720***    | 165.951***   | 41.461***   | 18.104**     |
|                     | (0.000)      | (0.000)      | (0.000)     | (0.038)      |
| Q <sup>2</sup> (20) | 963.918***   | 1634.110***  | 650.792***  | 29.037***    |
|                     | (0.000)      | (0.000)      | (0.000)     | (0.000)      |

Πίνακας 1: Αποτελέσματα Περιγραφικής Στατιστικής (\*\*\*)  $p < 0,01$ , \*\*  $p < 0,05$ , \*  $p < 0,10$ )

(α) Μελετώντας τα αποτελέσματα του παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε πως με αυστηρό επίπεδο σημαντικότητας 5%, μόνο το AIQ εμφανίζει μέσο στατιστικά σημαντικό διαφορετικό από το μηδέν, γεγονός που υποδηλώνει πως υπάρχει αξιόπιστη θετική μέση απόδοση σε σχέση με τα παραδοσιακά ETFs. Τα VNQ, SPY και BTC-USD δεν δείχνουν στατιστικά σημαντικό μέσο στο 5% (SPY και BTC-USD είναι κοντά στο 10% επίπεδο). Ακόμη και στην περίπτωση που ο μέσος είναι στατιστικά σημαντικός (AIQ), το απόλυτο θετικό μέγεθος είναι μικρό. Το VNQ φαίνεται να είναι ο πιο "στατικός" τίτλος ως προς τη μέση τιμή του σε οποιοδήποτε επίπεδο σημαντικότητας.

(β) Τα τρία ETFs (Ακίνητα, S&P 500 και Τεχνητή Νοημοσύνη) παρουσιάζουν σχετικά σταθερή συμπεριφορά και ιδιαίτερα χαμηλή μεταβλητότητα σε ημερήσια βάση με περιορισμένο εύρος διακυμάνσεων (η διακύμανση είναι ίση με 0). Αντιθέτως, το BTC-USD εμφανίζει σημαντικά υψηλότερη διακύμανση (0,001), κάτι που αντανακλά

αυξημένο επενδυτικό κίνδυνο και μεγαλύτερη αβεβαιότητα στις αποδόσεις. Το εύρημα αυτό είναι συνεπές με τη βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία τα κρυπτονομίσματα αποτελούν ένα εξαιρετικά ριψοκίνδυνο περιουσιακό στοιχείο, όπου εμφανίζουν μεγαλύτερη αστάθεια σε σχέση με τις αγορές μετοχών και ακινήτων.

(γ) Και τα τέσσερα περιουσιακά στοιχεία παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική αρνητική ασυμμετρία στο 1% (\*\*\*) , γεγονός που απορρίπτει με μεγάλη αξιοπιστία την υπόθεση συμμετρικών (κανονικών) κατανομών αποδόσεων. Ωστόσο, η ένταση διαφέρει. Ισχυρότερη αρνητική ασυμμετρία παρουσιάζει ο δείκτης VNQ και ελαφρώς πιο ήπια το BTC-USD, κάτι που υποδηλώνει ότι η κατανομή των αποδόσεων έχει μια μακριά αριστερή ουρά, δηλαδή υπάρχει μεγάλη πιθανότητα για σπάνιες αλλά πολύ ισχυρές πτωτικές κινήσεις. Ακολουθεί ο δείκτης SPY, όπου εμφανίζει μέτρια αρνητική ασυμμετρία. Επιβεβαιώνει την τάση των χρηματιστηριακών δεικτών να παρουσιάζουν απότομες πτώσεις κατά τη διάρκεια κρίσεων. Τέλος, ο δείκτης AIQ είναι ο τίτλος με την πλησιέστερη τιμή στο μηδέν. Αν και παραμένει αρνητικά ασύμμετρο, το AIQ παρουσιάζει την πιο ισορροπημένη κατανομή σε σχέση με τα υπόλοιπα ETFs, υποδηλώνοντας λιγότερο έντονο κίνδυνο ακραίων αρνητικών γεγονότων (downside risk).

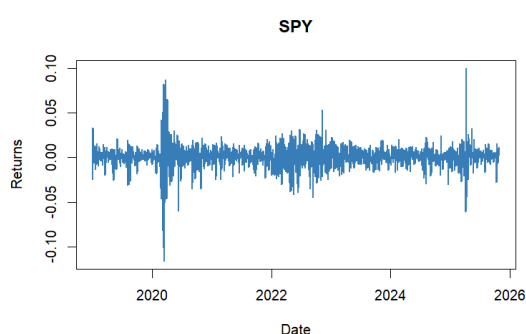
(δ) Στο επόμενο βήμα της ανάλυσης της περιγραφικής στατιστικής, αναλύεται η κύρτωση, η οποία υπολογίστηκε με βάση την προσέγγιση των Anscombe και Glynn (1983). Όλοι οι τίτλοι παρουσιάζουν εξαιρετικά υψηλή και θετική υπέρβαση κύρτωσης, με στατιστική σημαντικότητα στο 1% (\*\*\*) και p-value 0,000. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι κατανομές είναι Λεπτόκυρτες (leptokurtic) γεγονός που αντανάκλα συστημικά σοκ (π.χ. χρηματοπιστωτικές κρίσεις). Η τιμή του δείκτη VNQ (24,118) εμφανίζει την υψηλότερη τιμή του πίνακα και υποδηλώνει ότι η αγορά ακινήτων, κατά την εξεταζόμενη περίοδο, εμφάνισε πολύ συχνά ακραίες διακυμάνσεις, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη fat tails. Το AIQ (4,520) φαίνεται να έχει την πιο ήπια συμπεριφορά όσον αφορά τα ακραία γεγονότα σε σύγκριση με τους υπόλοιπους τίτλους.

(ε) Ο έλεγχος Jarque-Bera (1980) απορρίπτει τη μηδενική υπόθεση της κανονικότητας για όλες τις εξεταζόμενες χρονοσειρές σε επίπεδο σημαντικότητας 1%. Τα αποτελέσματα αυτά, σε συνδυασμό με την αρνητική λοξότητα και την υψηλή υπέρβαση κύρτωσης, τεκμηριώνουν την ύπαρξη μη-κανονικών κατανομών με βαριές ουρές, καθιστώντας τα παραδοσιακά υποδείγματα που βασίζονται στην κανονικότητα ανεπαρκή για την ανάλυση του κινδύνου.

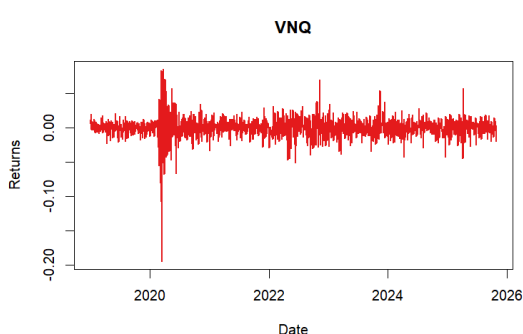
(στ) Οι χρονοσειρές των ημερήσιων αποδόσεων είναι στάσιμες, καθώς η υπόθεση ύπαρξης μοναδιαίας ρίζας απορρίπτεται σε όλες τις περιπτώσεις, γεγονός που επιτρέπει την περαιτέρω οικονομετρική επεξεργασία τους χωρίς τον κίνδυνο εμφάνισης ψευδών συσχετίσεων.

(ζ),(η) Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για όλους τους τίτλους απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση της απουσίας αυτοσυσχέτισης σε επίπεδα σημαντικότητας 1% (VNQ, SPY, AIQ) και 5% (BTC-USD). Οι εξαιρετικά υψηλές τιμές της στατιστικής  $Q^2(20)$  τεκμηριώνουν την παρουσία έντονης ετεροσκεδαστικότητας και φαινομένων συστάδων μεταβλητότητας (volatility clustering). Το εύρημα αυτό καθιστά επιβεβλημένη τη χρήση υποδειγμάτων αυτοπαλίνδρομης υπό συνθήκη ετεροσκεδαστικότητας (GARCH) για την ορθή μοντελοποίηση της μεταβλητότητας των υπό εξέταση περιουσιακών στοιχείων.

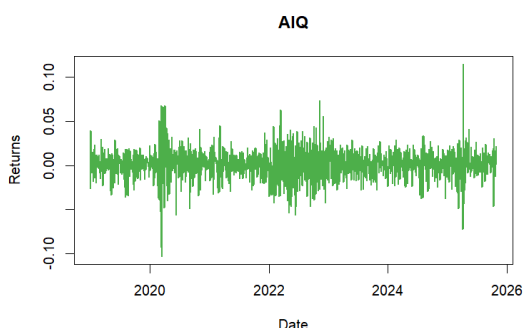
Παρακάτω παρουσιάζονται επίσης οι λογαριθμικές αποδόσεις των τεσσάρων εξεταζόμενων ETFs κατά την περίοδο της ανάλυσης (Διαγράμματα 1–4):



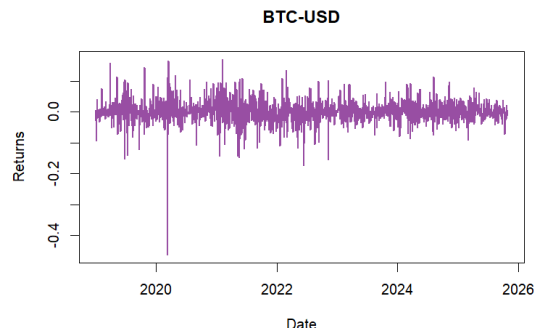
**Διάγραμμα 1:** Διάγραμμα αποδόσεων SPY



**Διάγραμμα 2:** Διάγραμμα αποδόσεων VNQ



**Διάγραμμα 3:** Διάγραμμα αποδόσεων AIQ



**Διάγραμμα 4:** Διάγραμμα αποδόσεων BTC-USD

Συνοπτικά: (i) Σε όλα τα assets παρατηρούνται περίοδοι χαμηλής μεταβλητότητας που εναλλάσσονται με περιόδους υψηλής μεταβλητότητας, με τις ακραίες κινήσεις να συγκεντρώνονται χρονικά (volatility clustering). Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα εμφανές κατά την έναρξη της πανδημίας COVID-19 (Μάρτιος 2020), όπου και οι τέσσερις χρονοσειρές εμφανίζουν την πιο έντονη συστάδα ακραίων αποδόσεων. (ii) Οι σειρές εμφανίζονται οπτικά στάσιμες ως προς τη μέση τιμή, ταλαντευόμενες γύρω από το μηδέν. (iii) Συγκρίνοντας τους κάθετους άξονες, διαπιστώνεται ότι το Bitcoin εμφανίζει σαφώς ευρύτερη κλίμακα ημερήσιων μεταβολών σε σχέση με τα παραδοσιακά assets, υποδηλώνοντας ποιοτικά υψηλότερη μεταβλητότητα. (iv) Ειδικά για το AIQ, εντοπίζεται μια ξεχωριστά έντονη ακραία κίνηση εντός του 2025.

(θ) Συσχετίσεις: Έλεγχος μηδενικής Υπόθεσης  $H_0: \tau = 0$  (απουσία συσχέτισης)

| Kendall | VNQ      | SPY             | AIQ             | BTC-USD  |
|---------|----------|-----------------|-----------------|----------|
| VNQ     | 1.000*** | 0.467***        | 0.326***        | 0.142*** |
| SPY     | 0.467*** | 1.000***        | <b>0.672***</b> | 0.198*** |
| AIQ     | 0.326*** | <b>0.672***</b> | 1.000***        | 0.219*** |
| BTC-USD | 0.142*** | 0.198***        | 0.219***        | 1.000*** |

Πίνακας 2: Αποτελέσματα ελέγχου συσχέτισης Kendall (\*\*\*)  $p < 0,01$ , \*\*  $p < 0,05$ , \*  $p < 0,10$ )

Από τα αποτελέσματα του πίνακα, παρατηρούμε πως όλες οι συσχετίσεις είναι θετικές και στατιστικά σημαντικές σε επίπεδο 1%(\*\*\*). Συνεπώς, η μηδενική υπόθεση περί απουσίας συσχέτισης απορρίπτεται, αναδεικνύοντας τη στατιστική εξάρτηση μεταξύ των υπό εξέταση τίτλων. Μεταξύ SPY και AIQ παρουσιάζεται η υψηλότερη συσχέτιση στο δείγμα (0.672), γεγονός αναμενόμενο καθώς ο δείκτης S&P 500 (SPY) περιλαμβάνει πολλές από τις εταιρείες τεχνολογίας που απαρτίζουν και τον δείκτη Τεχνητής Νοημοσύνης (AIQ).

Αντίθετα, το Bitcoin (BTC-USD) παρουσιάζει τις χαμηλότερες συσχετίσεις με τα υπόλοιπα περιουσιακά παραδοσιακά στοιχεία (0.142, 0.198, 0.219 αντίστοιχα), εύρημα που υπογραμμίζει τον ρόλο του ως εργαλείο διαφοροποίησης σε ένα μικτό χαρτοφυλάκιο.

Το VNQ εμφανίζει τη μεγαλύτερη συσχέτιση του με το SPY σε σχέση με τους υπόλοιπους εξεταζόμενους δείκτες (0.467), καθώς και οι δύο τίτλοι σχετίζονται με την ευρύτερη πορεία της κεφαλαιαγοράς. Ωστόσο η συσχέτιση αυτή παραμένει μέτρια, υποδηλώνοντας πως η αγορά ακινήτων και η γενική χρηματιστηριακή αγορά, αν και επηρεάζονται από κοινούς μακροοικονομικούς παράγοντες (π.χ. επιτόκια), διατηρούν έναν σημαντικό βαθμό αυτονομίας.

## 5.2 Αποτελέσματα Ανάλυσης Χρονοσειρών

### 5.2.1 Αποτελέσματα ARMA

Η εξειδίκευση της δεσμευμένης μέσης τιμής των αποδόσεων πραγματοποιήθηκε μέσω συστηματικής σύγκρισης εναλλακτικών προδιαγραφών ARMA ( $p, q$ ) με  $p, q \in \{0,1,2,\dots\}$ , αξιοποιώντας ως κριτήρια επιλογής τη στατιστική σημαντικότητα των παραμέτρων ARMA σε συνδυασμό με διαγνωστικούς ελέγχους αυτοσυσχέτισης Ljung-Box στα τυποποιημένα κατάλοιπα (Standardized Residuals). Στόχος ήταν ο εντοπισμός της προδιαγραφής που εξαλείφει επαρκώς τη γραμμική αυτοσυσχέτιση των αποδόσεων.

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα ανά χρονοσειρά:

#### Εκτίμηση Παραμέτρων VNQ:

| Παράμετρος | Estimate  | Std. Error | t value | Pr(> t ) | p-value (Robust) |
|------------|-----------|------------|---------|----------|------------------|
| mu         | 0,000392  | 0,000252   | 1,5548  | 0,119991 | 0,086788         |
| ar1        | -0,767229 | 0,203343   | -3,7731 | 0,000161 | 0,000000         |
| ma1        | 0,781349  | 0,197388   | 3,9584  | 0,000075 | 0,000000         |

Πίνακας 3: Εκτιμήσεις Παραμέτρων Μοντέλου ARMA(1,1) για VNQ (Distribution: sstd)

- Σταθερός όρος/Μέση Τιμή ( $\mu$ ): Η εκτιμώμενη μέση τιμή της σειράς των αποδόσεων είναι 0.000392. Με robust p-value 0,0867, ο συντελεστής δεν είναι στατιστικά σημαντικός στο κλασικό επίπεδο σημαντικότητας 5%, αν και είναι οριακά σημαντικός στο 10%. Το αποτέλεσμα αυτό συνάδει με την Υπόθεση της Αποτελεσματικής Αγοράς (ΕΜΗ), καθώς οι ημερήσιες λογαριθμικές αποδόσεις τείνουν να έχουν μέση τιμή στατιστικά μη διακριτή από το μηδέν. Η οριακή σημαντικότητα στο 10% μπορεί να αντανακλά μια μικρή θετική μακροχρόνια τάση συμβατή με το equity risk premium του REIT sector.
- Αυτοπαλίνδρομος Όρος (AR1): Ο συντελεστής AR(1) εκτιμάται στο -0,7672 και είναι εξαιρετικά σημαντικός (p-value < 0,001). Η ισχυρή αρνητική τιμή υποδηλώνει μια τάση βραχυπρόθεσμης αντιστροφής (mean reversion) στις αποδόσεις: μια θετική απόδοση στην προηγούμενη περίοδο τείνει να ακολουθείται από μια αρνητική στην τρέχουσα, και αντίστροφα.
- Όρος Κινητού Μέσου (MA1): Ο συντελεστής MA(1) είναι 0,7813 και είναι επίσης εξαιρετικά σημαντικός (p-value < 0,001). Αυτό υποδηλώνει ότι οι πρόσφατες απρόβλεπτες διαταραχές (innovations) επηρεάζουν σημαντικά και θετικά την απόδοση της τρέχουσας περιόδου.

Σημείωση: Παρατηρείται ότι οι συντελεστές AR(1) και MA(1) έχουν αντίθετα πρόσημα αλλά παρόμοια απόλυτη τιμή ( $|-0,76|$  έναντι  $|0,78|$ ). Αυτό το φαινόμενο υποδηλώνει σχεδόν-ακύρωση των ριζών του αυτοπαλίνδρου και του κινούμενου μέσου όρου (near pole-zero cancellation). Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι η συνδυασμένη δράση των δύο όρων είναι πολύ ασθενέστερη από όσο υποδηλώνει το μέγεθος του καθενός μεμονωμένα, και η δυναμική του υποδείγματος προσεγγίζει εκείνη ενός λευκού θορύβου. Το εύρημα είναι συμβατό με την Υπόθεση της Αποτελεσματικής Αγοράς, υπό την οποία οι ημερήσιες αποδόσεις δεν θα έπρεπε να εμφανίζουν σημαντική γραμμική προβλεψιμότητα.

### Διαγνωστικός Έλεγχος (Επάρκεια Μοντέλου): Ανάλυση Καταλοίπων:

| Υστερήση(Lag) | Statistic | p-value | Συμπέρασμα            |
|---------------|-----------|---------|-----------------------|
| Lag[1]        | 0,04038   | 0,8407  | Μη Απόρριψη της $H_0$ |
| Lag[5]        | 1,48429   | 0,9982  | Μη Απόρριψη της $H_0$ |
| Lag[9]        | 2,67280   | 0,9339  | Μη Απόρριψη της $H_0$ |

Πίνακας 4: Διαγνωστικοί Έλεγχοι Καταλοίπων (Weighted Ljung-Box Test) για VNQ

- Αυτοσυσχέτιση: Ο έλεγχος δείχνει ότι δεν υπάρχει σειραϊκή συσχέτιση στα κατάλοιπα ( $H_0$ : No serial correlation).
- Αποτελέσματα: Σε όλες τις υστερήσεις (Lags 1, 5 και 9), οι τιμές p-value είναι ιδιαίτερα υψηλές (0.8407, 0.9982 και 0.9339 αντίστοιχα).
- Συμπέρασμα: Εφόσον όλες οι τιμές p-value είναι κατά πολύ υψηλότερες από το τυπικό όριο του 0.05, αποτυγχάνουμε να απορρίψουμε τη μηδενική υπόθεση περί μη ύπαρξης συσχέτισης. Αυτό επιβεβαιώνει ότι το μοντέλο ARMA(1,1) είναι επαρκώς προσδιορισμένο και έχει απομακρύνει επιτυχώς τη γραμμική εξάρτηση από τις αποδόσεις του VNQ. Τα κατάλοιπα συμπεριφέρονται ως "λευκός θόρυβος" (white noise), γεγονός που σημαίνει ότι δεν απαιτούνται επιπλέον όροι AR ή MA.

Συμπερασματικά, το μοντέλο επιτελεί επαρκώς τον λειτουργικό του ρόλο: να αφαιρέσει τη γραμμική δομή ώστε τα κατάλοιπα να είναι κατάλληλα για μοντελοποίηση δευτέρας τάξεως (GARCH).

### Εκτίμηση Παραμέτρων SPY:

Για το SPY, η εκτενής ανάλυση οδήγησε στην επιλογή ενός υποδείγματος ARMA(0,0), δηλαδή χωρίς αυτοπαλίνδρομα ή κινητού μέσου συστατικά με κατανομή σφαλμάτων sstd. Η επιλογή προδιαγραφής ARMA(0,0) προέκυψε από εκτεταμένη συγκριτική ανάλυση εναλλακτικών, η οποία ανέδειξε ότι οποιαδήποτε επέκταση του μοντέλου με ARMA όρους: (i) οδηγούσε σε αποτυχία των διαγνωστικών ελέγχων αυτοσυσχέτισης ή (ii) εισήγαγε στατιστικά μη σημαντικούς συντελεστές.

| Παράμετρος | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t ) | p-value (Robust) |
|------------|----------|------------|---------|----------|------------------|
| mu         | 0,000980 | 0,000191   | 5,1325  | 0,000000 | 0,000000         |

Πίνακας 5: Εκτιμήσεις Παραμέτρων Μοντέλου ARMA(0,0) για SPY (Distribution: sstd)

- Σταθερός όρος/Μέση Τιμή ( $\mu$ ): Ο συντελεστής είναι 0,00098 με Robust p-value 0,000000. Σε αντίθεση με το VNQ, εδώ η μέση απόδοση είναι στατιστικά σημαντική. Αυτό υποδηλώνει μια σταθερή, ωστόσο μικρή, θετική τάση της χρονοσειράς κατά την περίοδο εξέτασης.
- Απουσία δυναμικής δομής: Σε αντίθεση με το VNQ, για το SPY δεν εκτιμώνται AR και MA όροι. Η ελάχιστη επαρκής προδιαγραφή ARMA(0,0) είναι θεωρητικά συνεπής με την Υπόθεση Αποτελεσματικής Αγοράς. Ο δείκτης S&P

500, ως ο πιο ρευστός και διαφοροποιημένος δείκτης της αμερικανικής αγοράς, χαρακτηρίζεται από ταχεία ενσωμάτωση της δημόσιας πληροφορίας στις τιμές, καθιστώντας τη γραμμική προβλεψιμότητα των ημερήσιων αποδόσεων στατιστικά αμελητέα.

#### Διαγνωστικός Έλεγχος (Επάρκεια Μοντέλου): Ανάλυση Καταλοίπων:

| Υστέρηση(Lag) | Statistic | p-value | Συμπέρασμα            |
|---------------|-----------|---------|-----------------------|
| Lag[1]        | 0,5985    | 0,4392  | Μη Απόρριψη της $H_0$ |
| Lag[5]        | 0,6071    | 0,6454  | Μη Απόρριψη της $H_0$ |
| Lag[9]        | 2,1218    | 0,5899  | Μη Απόρριψη της $H_0$ |

Πίνακας 6: Διαγνωστικοί Έλεγχοι Καταλοίπων (Weighted Ljung-Box Test) για SPY

- Αυτοσυσχέτιση: Ο έλεγχος δείχνει ότι δεν υπάρχει σειραϊκή συσχέτιση στα κατάλοιπα ( $H_0$ : No serial correlation).
- Τα τυποποιημένα κατάλοιπα του υποδείγματος ARMA(0,0) δεν εμφανίζουν στατιστικά σημαντική εναπομένουσα γραμμική αυτοσυσχέτιση σε κανένα από τα εξεταζόμενα lags. Το εύρημα τεκμηριώνει την επάρκεια της προδιαγραφής για το επόμενο επίπεδο μοντελοποίησης της υπό συνθήκη διακύμανσης.

#### Εκτίμηση Παραμέτρων AIQ:

| Παράμετρος | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t )  | p-value (Robust) |
|------------|----------|------------|---------|-----------|------------------|
| mu         | 0,001226 | 0,000300   | 4,0885  | 0, 000043 | 0,000319         |

Πίνακας 7: Εκτιμήσεις Παραμέτρων Μοντέλου ARMA(0,0) για AIQ (Distribution: sged)

- Σταθερός όρος/Μέση Τιμή ( $\mu$ ): Ο σταθερός όρος ( $\mu = 0,001226$ ) είναι ισχυρά σημαντικός (robust p = 0,0000), αντανakλώντας τη θετική τάση του τομέα τεχνητής νοημοσύνης κατά την εξεταζόμενη περίοδο.

#### Διαγνωστικός Έλεγχος (Επάρκεια Μοντέλου): Ανάλυση Καταλοίπων:

| Υστέρηση(Lag) | Statistic | p-value | Συμπέρασμα            |
|---------------|-----------|---------|-----------------------|
| Lag[1]        | 0,7587    | 0,3837  | Μη Απόρριψη της $H_0$ |
| Lag[5]        | 0,8190    | 0,5609  | Μη Απόρριψη της $H_0$ |
| Lag[9]        | 1,8061    | 0,6649  | Μη Απόρριψη της $H_0$ |

Πίνακας 8: Διαγνωστικοί Έλεγχοι Καταλοίπων (Weighted Ljung-Box Test) για AIQ

- Αυτοσυσχέτιση: Ο έλεγχος δείχνει ότι δεν υπάρχει σειραϊκή συσχέτιση στα κατάλοιπα ( $H_0$ : No serial correlation).
- Ο διαγνωστικός έλεγχος Weighted Ljung-Box στα τυποποιημένα κατάλοιπα (p-values= 0,38, 0,56, 0,66 για lags 1, 2 και 5 αντίστοιχα) επιβεβαιώνει την επάρκεια της προδιαγραφής: τα κατάλοιπα συμπεριφέρονται ως λευκός

θόρυβος και το μοντέλο έχει αποτυπώσει επιτυχώς τη δυναμική των αποδόσεων.

#### Εκτίμηση Παραμέτρων BTC-USD:

| Παράμετρος | Estimate | Std. Error | t value | Pr(> t ) | p-value (Robust) |
|------------|----------|------------|---------|----------|------------------|
| mu         | 0,001342 | 0,000765   | 1,7531  | 0,079592 | 0,104517         |

Πίνακας 9: Εκτιμήσεις Παραμέτρων Μοντέλου ARMA(0,0) για BTC-USD (Distribution: sstd)

- Σταθερός όρος/Μέση Τιμή ( $\mu$ ): Για το BTC-USD η μέση απόδοση δεν διακρίνεται στατιστικά από το μηδέν παρά τη φαινομενικά υψηλή ονομαστική της τιμή. Αυτό το εύρημα αντανακλά την εξαιρετική μεταβλητότητα της αγοράς κρυπτονομισμάτων.
- Η απουσία αυτοπαλίνδρομων ή κινητού μέσου συστατικών υποδηλώνουν ότι οι παρελθούσες αποδόσεις του Bitcoin δεν περιέχουν προβλεπτική πληροφορία για τις μελλοντικές.

#### Διαγνωστικός Έλεγχος (Επάρκεια Μοντέλου): Ανάλυση Καταλοίπων:

| Υστέρηση(Lag) | Statistic | p-value | Συμπέρασμα            |
|---------------|-----------|---------|-----------------------|
| Lag[1]        | 0,003476  | 0,9530  | Μη Απόρριψη της $H_0$ |
| Lag[5]        | 0,141204  | 0,8716  | Μη Απόρριψη της $H_0$ |
| Lag[9]        | 0,995667  | 0,8607  | Μη Απόρριψη της $H_0$ |

Πίνακας 10: Διαγνωστικοί Έλεγχοι Καταλοίπων (Weighted Ljung-Box Test) για BTC-USD

- Αυτοσυσχέτιση: Ο έλεγχος δείχνει ότι δεν υπάρχει σειραϊκή συσχέτιση στα κατάλοιπα ( $H_0$ : No serial correlation): Σε όλες τις εξεταζόμενες υστερήσεις (Lags 1, 5 και 9), τα p-values είναι ιδιαίτερα υψηλά (0,9530, 0,8716 και 0,8607 αντίστοιχα), σαφώς μεγαλύτερα του 0,05. Συνεπώς, αποτυγχάνουμε να απορρίψουμε τη μηδενική υπόθεση περί μη ύπαρξης σειριακής συσχέτισης σε όλες τις υστερήσεις.
- Ο έλεγχος Weighted Ljung-Box στα τυποποιημένα κατάλοιπα παρέχει ισχυρή υποστήριξη για την επάρκεια της προδιαγραφής. Τα κατάλοιπα συμπεριφέρονται ως λευκός θόρυβος, επιβεβαιώνοντας ότι η προδιαγραφή ARMA(0,0) είναι επαρκής και αφαιρεί επιτυχώς οποιαδήποτε γραμμική εξάρτηση από τις αποδόσεις του Bitcoin.

Η επιλογή διαφορετικής προδιαγραφής ARMA για το VNQ σε σχέση με τις υπόλοιπες χρονοσειρές αντικατοπτρίζει τα ιδιαίτερα στατιστικά χαρακτηριστικά της αγοράς ακινήτων. Σε αντίθεση με τον δείκτη S&P 500 (SPY), το ETF τεχνητής νοημοσύνης (AIQ) και το Bitcoin (BTC-USD), για τα οποία η ανάλυση κατέληξε σε προδιαγραφή ARMA(0,0), υποδηλώνοντας απουσία προβλέψιμης γραμμικής δομής στις αποδόσεις, το VNQ παρουσιάζει στατιστικά σημαντικούς όρους AR(1) και MA(1) με ταυτόχρονα στατιστικά σημαντικό έλεγχο καταλοίπων. Η εύρεση αυτή είναι

οικονομικά εύλογη: η αγορά ακινήτων χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη πληροφοριακή αποτελεσματικότητα σε σχέση με τις αγορές μετοχών μεγάλης κεφαλαιοποίησης.

### 5.2.2 Αποτελέσματα ανάλυσης διακύμανσης

Προτού εκτιμηθεί η μήτρα δυναμικών υπό συνθήκη συσχετίσεων (DCC), πραγματοποιήθηκε διαδικασία επιλογής και ελέγχου των μονομεταβλητών υποδειγμάτων GARCH για την κάθε μεμονωμένη χρονοσειρά αποδόσεων. Στόχος ήταν η εύρεση της εξειδίκευσης που προσαρμόζεται βέλτιστα στα δεδομένα (fit) και αποτυπώνει επαρκώς χαρακτηριστικά της μεταβλητότητας, όπως η ασυμμετρία και οι βαριές ουρές. Η επιλογή του βέλτιστου μοντέλου βασίστηκε στο κριτήριο πληροφορίας Bayesian Information Criterion (Adjusted BIC), επιλέγοντας τον συνδυασμό με τη μικρότερη δυνατή τιμή. Για τα VNQ, SPY και BTC-USD επιλέχθηκε η Ασύμμετρη Κατανομή Student-t (sstd - Skewed Student-t), ενώ για το AIQ προέξυψε η Ασύμμετρη Γενικευμένη Κατανομή Σφαλμάτων (sged - Skewed Generalized Error Distribution). Οι επιλογές αυτές επιβεβαιώνουν ότι οι αποδόσεις των στοιχείων δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή, αλλά παρουσιάζουν έντονη λοξότητα και κύρτωση (leptokurtosis).

| Parameter    | VNQ       | SPY       | AIQ       | BTC-USD   |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Dist         | sstd      | sstd      | sged      | sstd      |
| GARCH type   | sGARCH    | eGARCH    | sGARCH    | eGARCH    |
| Adjusted BIC | -10474,19 | 88795,48  | 90220,23  | -7034,941 |
| SignBias     | 1,6295219 | 1,9027185 | 2,4498508 | 0,7064296 |
| pvalue       | 0,1033868 | 0,0572451 | 0,0143912 | 0,4800173 |
| W20          | 9,0540767 | 8,7507252 | 7,0810989 | 0,8440135 |
| pvalue       | 0,6097798 | 0,6435253 | 0,8160785 | 0,9999993 |
| VaR          | 0,0616369 | 0,414757  | 0,6287035 | 0,331998  |
| pvalue       | 0,8039272 | 0,5195648 | 0,4278313 | 0,5644849 |
| CVaR         | -346,3696 | -322,0938 | -361,1349 | -355,2623 |
| pvalue       | 0,2580    | 0,5530    | 0,4870    | 0,6220    |
| VaR_Duration | 1,0352941 | 0,9411765 | 1,0941176 | 1,0705882 |
| pvalue       | 0,3888211 | 0,2388797 | 0,2169331 | 0,4295912 |

Πίνακας 11: Αποτελέσματα επιλογής κατάλληλων GARCH μοντέλων

Για τα στοιχεία VNQ και AIQ, το τυπικό συμμετρικό υπόδειγμα sGARCH κρίθηκε επαρκές. Αντιθέτως, για τον χρηματιστηριακό δείκτη S&P 500 (SPY) και το Bitcoin (BTC-USD), η βέλτιστη προσαρμογή επιτεύχθηκε μέσω του εκθετικού υποδείγματος eGARCH. Αυτό το εύρημα είναι κρίσιμο, καθώς αποδεικνύει την ύπαρξη του φαινομένου μόχλευσης (leverage effect) σε αυτές τις αγορές, επιβεβαιώνοντας ότι τα αρνητικά σοκ αυξάνουν δυσανάλογα την αβεβαιότητα σε σχέση με τα θετικά σοκ ίσου μεγέθους.

Η εμπειρική εκτίμηση του πολυμεταβλητού υποδείγματος DCC-GARCH ολοκληρώνεται παραδοσιακά σε δύο διακριτά στάδια, ακολουθώντας τη μεθοδολογία των Engle και Sheppard (2001). Τα επιμέρους υποδείγματα sGARCH/eGARCH αποτυπώνουν επαρκώς τη δυναμική της διακύμανσης, χωρίς να αφήνουν υπολειπόμενα φαινόμενα ARCH και κρίνονται απολύτως κατάλληλα για να αποτελέσουν τις εισροές (inputs) στο δεύτερο στάδιο της μεθοδολογίας, δηλαδή την εκτίμηση των δυναμικών συσχετίσεων μέσω του υποδείγματος DCC-GARCH. Παρακάτω παρουσιάζονται τα εξαγόμενα αποτελέσματα της διαδικασίας εκτίμησης των συσχετίσεων, όπως υπολογίστηκαν στο r-studio.

| Distribution : mvnorm (multivariate normal copula) |           |            |            |          |
|----------------------------------------------------|-----------|------------|------------|----------|
| DCC order : 1 1                                    |           |            |            |          |
| Asymmetric : FALSE                                 |           |            |            |          |
| Parameter                                          | Estimate  | Std. Error | t value    | Pr(> t ) |
| [VNQ].mu                                           | 0.000398  | 0.000248   | 1.60280    | 0.108980 |
| [VNQ].omega                                        | 0.000004  | 0.000003   | 1.32469    | 0.185272 |
| [VNQ].alpha1                                       | 0.095443  | 0.015665   | 6.09276    | 0.000000 |
| [VNQ].beta1                                        | 0.878920  | 0.022759   | 38.61814   | 0.000000 |
| [VNQ].skew                                         | 0.876397  | 0.031184   | 28.10369   | 0.000000 |
| [VNQ].shape                                        | 6.926805  | 1.073694   | 6.45138    | 0.000000 |
| [SPY].mu                                           | 0.000467  | 0.000175   | 2.66474    | 0.007705 |
| [SPY].omega                                        | -0.276160 | 0.006660   | -41.46559  | 0.000000 |
| [SPY].alpha1                                       | -0.189117 | 0.014630   | -12.92703  | 0.000000 |
| [SPY].beta1                                        | 0.970327  | 0.000408   | 2379.59548 | 0.000000 |
| [SPY].gamma1                                       | 0.135686  | 0.009574   | 14.17275   | 0.000000 |
| [SPY].skew                                         | 0.784076  | 0.031948   | 24.54232   | 0.000000 |
| [SPY].shape                                        | 7.218620  | 1.194810   | 6.04165    | 0.000000 |
| [AIQ].mu                                           | 0.001226  | 0.000371   | 3.30273    | 0.000957 |
| [AIQ].omega                                        | 0.000007  | 0.000021   | 0.33852    | 0.734969 |
| [AIQ].alpha1                                       | 0.122358  | 0.070494   | 1.73571    | 0.082615 |
| [AIQ].beta1                                        | 0.848907  | 0.059795   | 14.19695   | 0.000000 |
| [AIQ].skew                                         | 0.858721  | 0.046320   | 18.53885   | 0.000000 |
| [AIQ].shape                                        | 1.519911  | 0.179934   | 8.44703    | 0.000000 |
| [BTC-USD].mu                                       | 0.001400  | 0.000298   | 4.70215    | 0.000003 |
| [BTC-USD].omega                                    | -0.093121 | 0.004023   | -23.14872  | 0.000000 |
| [BTC-USD].alpha1                                   | 0.011045  | 0.015117   | 0.73063    | 0.465004 |
| [BTC-USD].beta1                                    | 0.985902  | 0.000419   | 2354.60563 | 0.000000 |
| [BTC-USD].gamma1                                   | 0.143544  | 0.024159   | 5.94174    | 0.000000 |
| [BTC-USD].skew                                     | 1.044747  | 0.026558   | 39.33795   | 0.000000 |
| [BTC-USD].shape                                    | 3.273590  | 0.321128   | 10.19402   | 0.000000 |
| [Joint]dcca1                                       | 0.026853  | 0.004373   | 6.14065    | 0.000000 |
| [Joint]dccb1                                       | 0.952349  | 0.009208   | 103.42522  | 0.000000 |

Πίνακας 12: Αποτελέσματα εκτιμήσεων GARCH & DCC-GARCH

Το εκτιμώμενο μοντέλο κάνει χρήση της Πολυμεταβλητής Κανονικής Κατανομής (Multivariate Normal Distribution, mvnorm) με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$\frac{1}{4\pi^2} \det(\Sigma)^{-\frac{1}{2}} e^{\left[-\frac{1}{2}(x-\mu)'\Sigma^{-1}(x-\mu)\right]}$$

όπου  $\mu$  το διάνυσμα των μέσων και  $\Sigma$  ο θετικά ορισμένος πίνακας διακυμάνσεων-συνδιακυμάνσεων.

Η τάξη του υποδείγματος προσδιορίστηκε ως DCC(1,1), που υποδηλώνει ότι οι υστερήσεις των παραμέτρων  $\alpha$  και  $\beta$  είναι ίσες με τη μονάδα. Επίσης, η από κοινού κατανομή των σφαλμάτων του DCC είναι συμμετρική (Asymmetric: False).

Σύμφωνα με τα εξαγόμενα ευρύματα του παραπάνω πίνακα, παρατηρούμε πως:

- VNQ (με sstd κατανομή):

Ο σταθερός όρος omega δεν εκτιμάται με μεγάλη ακρίβεια., καθώς είναι μη στατιστικά σημαντικός. Οι παράμετροι alpha1 (0.095) και beta1 (0.878) είναι αμφότερες στατιστικά σημαντικές (p-value = 0.000). Ο όρος ARCH (alpha1) υποδηλώνει πως περίπου το 9.5% του τετραγώνου του πιο πρόσφατου σοκ μεταφέρεται άμεσα στη μελλοντική διακύμανση, φανερώνοντας μέτρια ταχύτητα αντίδρασης σε νέες πληροφορίες. Το 88% (beta1) της χθεσινής διακύμανσης (όρος GARCH) μεταφέρεται στη σημερινή, κάτι που υποδηλώνει υψηλή μνήμη μεταβλητότητας. Το άθροισμά τους (0.095 + 0.878 = 0.9743) είναι κοντά στο 1, άρα υπάρχει υψηλή επιμονή (persistence) της μεταβλητότητας. Οικονομικά, αυτό φανερώνει πως όταν η αγορά ακινήτων υφίσταται ένα εξωγενές σοκ η αβεβαιότητα (μεταβλητότητα) που δημιουργείται αργεί σημαντικά να αποσβεστεί και να επιστρέψει σε επίπεδα ηρεμίας.

Οι τιμές Skew = 0.876 και shape = 6.93, είναι αμφότερες στατιστικά σημαντικές. Η τιμή skew < 1 υποδηλώνει αρνητική ασυμμετρία στις αποδόσεις του δείκτη, δηλαδή μεγαλύτερη πιθανότητα ακραίων αρνητικών παρά θετικών αποδόσεων, χαρακτηριστική συμπεριφορά μετοχικών αγορών.

- SPY (με sstd κατανομή):

Ο σταθερός όρος omega αναφέρεται στην εξίσωση της λογαριθμικής διακύμανσης (όχι της ίδιας της διακύμανσης) από τη στιγμή που το εκτιμηθέν μοντέλο είναι το eGARCH. Η τιμή του είναι αρνητική (-0.276) και στατιστικά σημαντική. Στο eGARCH το  $\omega$  μπορεί να λάβει αρνητικές τιμές, καθώς όπως έχει εξηγηθεί δεν επιβάλλονται περιορισμοί προσήμου στις παραμέτρους. Το beta1 = 0.970 είναι εξαιρετικά υψηλό, δείχνοντας ότι το S&P 500 έχει τεράστια μνήμη στη μεταβλητότητά του.

Εδώ, υπάρχει ο όρος gamma1 (0.135) ο οποίος είναι και στατιστικά σημαντικός όρος μεγέθους. Η θετική τιμή του, δείχνει ότι ανεξαρτήτως προσήμου, όσο μεγαλύτερο σε ένταση είναι ένα σοκ (σε απόλυτη τιμή), τόσο μεγαλύτερη η αύξηση της μελλοντικής λογαριθμικής μεταβλητότητας.

Το  $\alpha_1$  είναι αρνητικό και στατιστικά σημαντικό (-0.1891). Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ασυμμετρία στη μεταβλητότητα του S&P 500, υποδεικνύοντας ότι η αγορά μετοχών αντιδρά ασύμμετρα στις ειδήσεις. Συγκεκριμένα, οι αρνητικές αποδόσεις (bad news) αυξάνουν τη μελλοντική μεταβλητότητα πολύ περισσότερο από ό,τι οι θετικές αποδόσεις (good news) αντιστοίχου μεγέθους (leverage effect).

Οι τιμές  $\text{Skew} = 0.784$  και  $\text{shape} = 7.22$ , είναι αμφότερες στατιστικά σημαντικές. Η αρνητική ασυμμετρία είναι εντονότερη από εκείνη του VNQ.

- AIQ (με sged κατανομή):

Ο όρος  $\omega = 0.000007$  ( $p = 0.735$ ) δεν είναι στατιστικά σημαντικός. Όπως και στο VNQ, ο σταθερός όρος της διακύμανσης δεν προσδιορίζεται ακριβώς και δεν αποτελεί παράμετρο ερμηνευτικού ενδιαφέροντος.

Η παράμετρος  $\alpha_1$  (0.1223) δεν είναι στατιστικά σημαντική στο συμβατικό επίπεδο του 5% ( $p\text{-value} = 0.0826$ ), αν και γίνεται αποδεκτή στο 10%. Αυτό σημαίνει ότι τα μεμονωμένα, ημερήσια σοκ δεν αποτελούν τον κύριο οδηγό της μελλοντικής αβεβαιότητας του AIQ. Αντίθετα, η μεταβλητότητα οδηγείται κυρίως από την παρελθούσα συμπεριφορά της, καθώς το  $\beta_1$  (0.8489) είναι εξόχως σημαντικό ( $p\text{-value} = 0.000$ ).

Το άθροισμά τους ( $0.1224 + 0.8489 = 0.9713$ ) είναι κοντά στο 1, άρα υπάρχει υψηλή επιμονή (persistence) της μεταβλητότητας. Συμπερασματικά, η μεταβλητότητα στον κλάδο της AI φαίνεται να μην αντιδρά απότομα σε καθημερινά γεγονότα αλλά ακολουθεί πιο δομικές, μακροπρόθεσμες τάσεις που εξελίσσονται πιο αργά αλλά επιμένουν.

Οι τιμές  $\text{Skew} = 0.859$  και  $\text{shape} = 1.52$ , είναι αμφότερες στατιστικά σημαντικές. Στην sged κατανομή, τιμή  $\text{shape}$  μικρότερη του 2 υποδεικνύει λεπτοκυρτή κατανομή με βαριές ουρές, ενώ το  $\text{skew} < 1$  δείχνει αρνητική ασυμμετρία.

- BTC-USD (με sstd κατανομή):

Ο όρος  $\omega$  φανερώνει έναν στατιστικά σημαντικό και αρνητικό σταθερό όρο της εξίσωσης λογαριθμικής διακύμανσης ( $-0.0931$  με  $p\text{-value} = 0.000$ ). Όπως και στο SPY, η αρνητική τιμή δεν αποτελεί πρόβλημα, καθώς στο eGARCH η λογαριθμική μετατροπή εξασφαλίζει αυτόματα τη θετικότητα της διακύμανσης.

Στην περίπτωση του Bitcoin, ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι το  $\alpha_1$  δεν είναι στατιστικά σημαντικό ( $p\text{-value} = 0.465$ ). Σε αντίθεση με το SPY, όπου το  $\alpha$  είναι ισχυρά αρνητικό και επιβεβαιώνει το κλασικό leverage effect των μετοχών, στο BTC δεν διακρίνεται στατιστικά διαφοροποιημένη απόκριση της μεταβλητότητας ανάλογα με το πρόσημο του σοκ.

Αντίθετα, η μεταβλητότητά του, βάσει αυτού του μοντέλου, καθοδηγείται σχεδόν αποκλειστικά από την τεράστια επιμονή του  $\beta_1$  (0.985) και την επίδραση μεγέθους του  $\gamma_1$  (0.1435) τα οποία είναι και τα δύο εξίσου στατιστικά σημαντικά ( $p\text{-value} = 0.000$ ). Σχεδόν το 99% της λογαριθμικής διακύμανσης μεταφέρεται από ημέρα σε ημέρα ( $\beta_1$ ), υποδηλώνοντας ότι δημιουργείται ένα μακροπρόθεσμο καθεστώς υψηλής αβεβαιότητας που αργεί ιδιαίτερα να αποκλιμακωθεί. Αυτό που πραγματικά πυροδοτεί τη μελλοντική μεταβλητότητα του Bitcoin είναι η ένταση των κινήσεων (όχι το πρόσημο): όσο μεγαλύτερη η απόλυτη τιμή ενός σοκ, τόσο δυσανάλογα μεγαλύτερη η αύξηση της επόμενης λογαριθμικής μεταβλητότητας ( $\gamma_1$ ).

Οι τιμές  $\text{Skew} = 1.045$  και  $\text{shape} = 3.27$ , είναι αμφότερες στατιστικά σημαντικές. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά assets, το BTC εμφανίζει θετική ασυμμετρία ( $\text{skew} > 1$  σε  $\text{sstd}$ ), υποδηλώνοντας μεγαλύτερη πιθανότητα ακραίων ανοδικών παρά καθοδικών κινήσεων κατά την εξεταζόμενη περίοδο, εύρημα συνεπές με τον κερδοσκοπικό χαρακτήρα της κρυπτοαγοράς. Επιπλέον, η ιδιαίτερα χαμηλή τιμή  $\text{shape}$  επιβεβαιώνει εξαιρετικά παχιές ουρές στην κατανομή των αποδόσεων.

**Σημείωση:** Το γεγονός ότι τα  $\text{skew}$  και  $\text{shape}$  είναι στατιστικά σημαντικά σε όλα τα assets, επιβεβαιώνει την ορθότητα της επιλογής μη συμμετρικών και λεπτοκυρτών κατανομών ( $\text{sstd}$ ,  $\text{sged}$ ) έναντι της κανονικής, για την ορθή μοντελοποίηση των τυποποιημένων καταλοίπων.

- Συντελεστές DCC-GARCH:

Οι εκτιμήσεις των παραμέτρων του μοντέλου DCC,  $\text{dcca1}$  και  $\text{dccb1}$ , είναι αμφότερες εξαιρετικά στατιστικά σημαντικές ( $p\text{-value} = 0.000$ ). Το γεγονός αυτό απορρίπτει την υπόθεση της Σταθερής Υπό Συνθήκες Συσχέτισης (Constant Conditional Correlation, CCC) και επιβεβαιώνει εμπειρικά την αναγκαιότητα και την καταλληλότητα χρήσης του δυναμικού μοντέλου DCC, καθώς αποδεικνύεται ότι οι συσχετίσεις μεταξύ των εξεταζομένων ETFs μεταβάλλονται ουσιαστικά στον χρόνο.

Μεμονωμένα, το  $\text{dcca1} = 0.0269$  μετρά πόσο έντονα αντιδρά η δομή συσχέτισης σε νέα πληροφορία ( $\text{shock}$ ). Η σχετικά μικρή τιμή σημαίνει ότι μεμονωμένες ημερήσιες κινήσεις δεν αναμορφώνουν δραματικά τον πίνακα  $R_t$ .

Το  $\text{dccb1} = 0.9523$  μετρά την επιμονή της συσχέτισης. Η εξαιρετικά υψηλή τιμή υποδηλώνει ότι ο πίνακας συσχέτισης εξελίσσεται πολύ ομαλά, χωρίς απότομες μεταβολές. Συνεπώς, οι συσχετίσεις κινούνται αργά και εμμένουν για παρατεταμένο χρονικό διάστημα.

Το άθροισμα των δύο παραμέτρων ( $a_{DCC} + b_{DCC} = 0.026853 + 0.952349 = 0.979202$ ) είναι εξαιρετικά κοντά στη μονάδα (αλλά μικρότερο του 1, ικανοποιώντας τη συνθήκη στασιμότητας  $a + b < 1$ ). Αυτό το υψηλό άθροισμα (κοντά στο 0.98) υποδηλώνει πολύ υψηλή επιμονή (high persistence) στις δυναμικές συσχετίσεις. Η επενδυτική

σημασία αυτού του ευρήματος ως προς τη διαχείριση χαρτοφυλακίων έγκειται στο ότι ένα εξωγενές σοκ που θα μεταβάλει τον βαθμό συσχέτισης μεταξύ των εξεταζομένων αγορών (π.χ. μια οικονομική κρίση που οδηγεί σε συγχρονισμένη πτώση των assets), θα χρειαστεί μεγάλο χρονικό διάστημα για να εξομαλυνθεί και να επιστρέψουν οι συσχετίσεις στα μακροχρόνια μέσα επίπεδά τους.

### 5.2.3 Αποτελέσματα ανάλυσης διασυνδεσιμότητας

- Στατική ανάλυση Διασυνδεσιμότητας:

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει την κανονικοποιημένη μήτρα Generalized FEVD για ολόκληρο το δείγμα 02/01/2019 – 29/10/2025. Κάθε στοιχείο  $\theta_{ij}^g$  εκφράζει το ποσοστό της διακύμανσης σφάλματος πρόβλεψης της μεταβλητής της γραμμής  $i$  που αποδίδεται σε σοκ της μεταβλητής της στήλης  $j$ , με τα διαγώνια στοιχεία να αναπαριστούν τη συνεισφορά κάθε μεταβλητής στη δική της διακύμανση (ιδιοσυγκρατική) και τα μη-διαγώνια στοιχεία να αποτυπώνουν τις διασταυρούμενες μεταδόσεις (cross-asset spillovers). Τα αθροίσματα γραμμής ισούνται με 100, διασφαλίζοντας τη συνέπεια της κανονικοποίησης. Σημειώνεται, επίσης, πως οι μέσοι όροι που εμφανίζονται παρακάτω είναι στατικοί και συνεπώς, δεν αρκούν για την πλήρη κατανόηση της δυναμικής του δικτύου, καθώς αποκρύπτουν σημαντικές πληροφορίες χρονικών μεταβολών, οι οποίες θα αναλυθούν στις επόμενες υποενότητες.

|                | VNQ          | SPY          | AIQ          | BTC-USD      | FROM                |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------------|
| <b>VNQ</b>     | <b>57.11</b> | 24.15        | 14.43        | 4.31         | 42.89               |
| <b>SPY</b>     | 18.73        | <b>42.71</b> | 32.63        | 5.93         | <b>57.29</b>        |
| <b>AIQ</b>     | 12.13        | 35.11        | <b>46.17</b> | 6.60         | 53.83               |
| <b>BTC-USD</b> | 5.59         | 9.81         | 9.90         | <b>74.70</b> | 25.30               |
| <b>TO</b>      | 36.45        | <b>69.07</b> | 56.95        | 16.85        | 179.32              |
| <b>Inc.Own</b> | 93.56        | 111.78       | 103.12       | 91.54        | cTCI/TCI            |
| <b>NET</b>     | -6.44        | 11.78        | 3.12         | -8.46        | 59.77/ <b>44.83</b> |
| <b>NPT</b>     | 1.00         | 3.00         | 2.00         | 0.00         |                     |

Πίνακας 13: Στατικός Πίνακας Διασυνδεσιμότητας - Connectedness Matrix

Τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα διασυνδεσιμότητας αποκαλύπτουν τον βαθμό αυτονομίας κάθε τίτλου εντός του δικτύου. Το BTC-USD εμφανίζει με μεγάλη διαφορά την υψηλότερη ιδιοσυγκρατική συνιστώσα (74.70%), υποδηλώνοντας ότι σχεδόν τα τρία τέταρτα της διακύμανσής του εξηγούνται από εσωτερικούς παράγοντες, ανεξάρτητα από τις τρεις υπόλοιπες αγορές. Το εύρημα αυτό συνάδει με τη βιβλιογραφία περί σχετικής απομόνωσης των κρυπτονομισμάτων από τα συμβατικά χρηματοοικονομικά μέσα και ενισχύει την εικόνα ενός σχετικά αυτόνομου περιουσιακού στοιχείου αλλά και της χρήσης του ως στοιχείου διαφοροποίησης έναντι των κυρίων μετοχικών δεικτών. Αντιθέτως, το SPY εμφανίζει τη χαμηλότερη ιδιοσυγκρατική τιμή (42.71%), γεγονός αναμενόμενο δεδομένης της φύσης του ως

δείκτη αναφοράς της αμερικανικής κεφαλαιαγοράς, ο οποίος ενσωματώνει συστηματικά πληροφορίες από όλους τους οικονομικούς κλάδους. Τα VNQ (57.11%) και AIQ (46.17%) τοποθετούνται στο ενδιάμεσο, με το AIQ να παρουσιάζει την αμέσως υψηλότερη αλληλεξάρτηση με το υπόλοιπο σύστημα μετά το SPY.

Η στήλη FROM ποσοτικοποιεί το ποσοστό της διακύμανσης κάθε τίτλου που οφείλεται σε σοκ προερχόμενα από τους υπόλοιπους τίτλους. Το SPY καταγράφει τη μεγαλύτερη εισροή (FROM = 57.29%), κάτι που το χαρακτηρίζει ως καθαρά «ανοιχτό» κόμβο, ικανό να απορροφά πληροφορία από το υπόλοιπο σύστημα. Ακολουθούν με μικρή απόσταση το AIQ (53.83%) και το VNQ (42.89%), ενώ το BTC-USD παρουσιάζει την ελάχιστη εξάρτηση από εξωγενή σοκ μεταξύ των ETFs (FROM = 25.30%). Η ιεράρχηση αυτή επιβεβαιώνει εκ νέου τη μοναδική θέση του Bitcoin εντός του δείγματος.

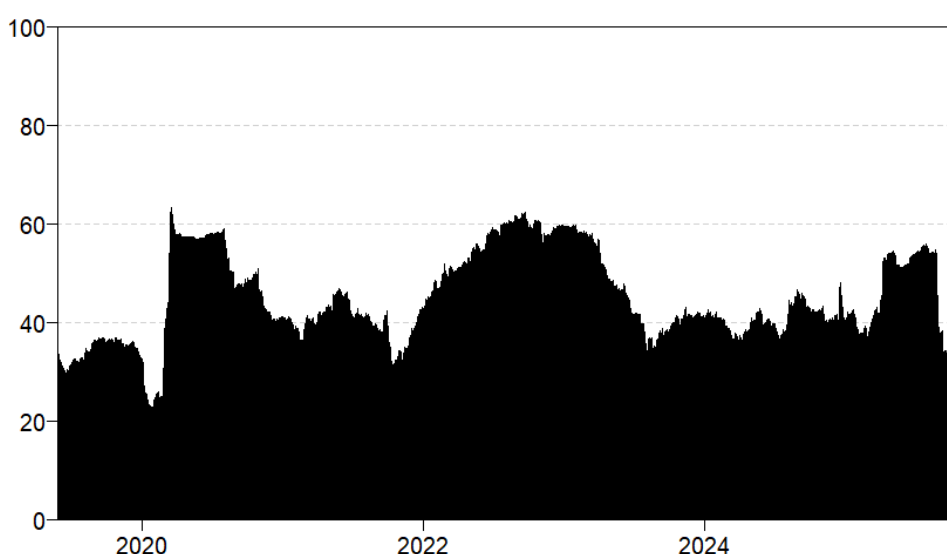
Η γραμμή TO μετρά το ποσοστό της διακύμανσης που μεταδίδει κάθε τίτλος στο υπόλοιπο σύστημα. Εδώ, το SPY αναδεικνύεται και πάλι ως ο κυρίαρχος πομπός σοκ προς το υπόλοιπο δίκτυο (TO = 69.07%), ακολουθούμενο από το AIQ (56.95%), το VNQ (36.45%) και τέλος το BTC-USD (16.85%). Το διπλό μέσο προβάδισμα του SPY, τόσο στις εισροές όσο και στις εκροές, το καθιστά τον αδιαμφισβήτητο συστημικό κόμβο του δικτύου μεταδόσεων.

Η γραμμή NET προσδιορίζει την καθαρή συνεισφορά κάθε τίτλου στο δίκτυο. Δύο τίτλοι αναδεικνύονται ως καθαροί πομποί (Net Transmitters): το SPY (+11.78%) και το AIQ (+3.12%), με το πρώτο να κυριαρχεί σαφώς. Αντιστρόφως, καθαροί δέκτες (Net Receivers) εμφανίζονται να είναι το BTC-USD (-8.46%) και το VNQ (-6.44%). Παρότι το BTC-USD παρουσιάζει την υψηλότερη ιδιοσυγκρατική αυτονομία όπως αναφέρθηκε, σε όρους καθαρής διασυνδεσιμότητας λειτουργεί κυρίως ως απορροφητής σοκ. Το VNQ, αντίστοιχα, λειτουργεί ως ηπιότερος δέκτης, επηρεαζόμενο κυρίως από το SPY (24.15%) λόγω των κοινών μακροοικονομικών παραγόντων (επιτόκια, πιστωτικές συνθήκες) που διέπουν αμφότερες τις αγορές.

Η μετρική NPT ποσοτικοποιεί σε πόσες από τις υπόλοιπες μεταβλητές κάθε τίτλος αποτελεί καθαρό πομπό σοκ. Το SPY είναι καθαρός πομπός σε όλους τους υπόλοιπους τρεις τίτλους (NPT = 3), επιβεβαιώνοντας τον ρόλο του ως ηγέτη πληροφορίας του δικτύου. Το AIQ έπεται με NPT = 2 (καθαρός πομπός προς VNQ και BTC-USD, ωστόσο δέκτης από το SPY), ενώ το VNQ μεταδίδει καθαρά μόνο προς το BTC-USD (NPT = 1). Τέλος, το BTC-USD δεν αναδεικνύεται ως καθαρός πομπός σε κανέναν τίτλο (NPT = 0), εδραιώνοντας τη θέση του στην περιφέρεια του δικτύου. Η ιεραρχία SPY → AIQ → VNQ → BTC-USD συνιστά μια αλυσιδωτή αρχιτεκτονική, στην οποία η πληροφορία ρέει κυρίως από τους κλασικούς δείκτες προς τις πιο εξειδικευμένες ή εναλλακτικές αγορές.

Η τιμή του TCI υποδεικνύει ότι, κατά μέσο όρο, περίπου το 45% της συνολικής διακύμανσης σφάλματος πρόβλεψης οφείλεται σε διασταυρούμενες μεταδόσεις μεταξύ των τεσσάρων ETFs, ενώ το υπόλοιπο 55% αντιστοιχεί σε ιδιοσυγκρατικούς παράγοντες. Το ποσοστό αυτό, κατατάσσει το συγκεκριμένο σύστημα σε καθεστώς μέτριας προς υψηλής αλληλεξάρτησης, παρόλο που τα στοιχεία προέρχονται από ετερογενείς κατηγορίες περιουσιακών στοιχείων (μετοχές, ακίνητα, τεχνολογία AI, κρυπτονομίσματα).

- Συνολική Διασυνδεσιμότητα - Total Connectedness:



Διάγραμμα 5: Συνολική Διασυνδεσιμότητα - Total Connectedness

Το Διάγραμμα 5 αποτυπώνει την εξέλιξη του δείκτη TCI κατά την εξεταζόμενη περίοδο. Ο εμπειρικός μέσος της δυναμικής σειράς συγκλίνει στο 44.83%, τιμή η οποία διαφαίνεται στον στατικό δείκτη TCI του Πίνακα 13. Ωστόσο, ο δείκτης παρουσιάζει αξιοσημείωτη χρονική μεταβλητότητα, με εύρος διακύμανσης από περίπου 22% σε περιόδους ηρεμίας έως 63% περίπου σε φάσεις συστημικής έντασης. Το συγκεκριμένο εύρημα επιβεβαιώνει ότι ο στατικός μέσος αποκρύπτει σημαντική πληροφορία σχετικά με την συνολική συμπεριφορά του δικτύου.

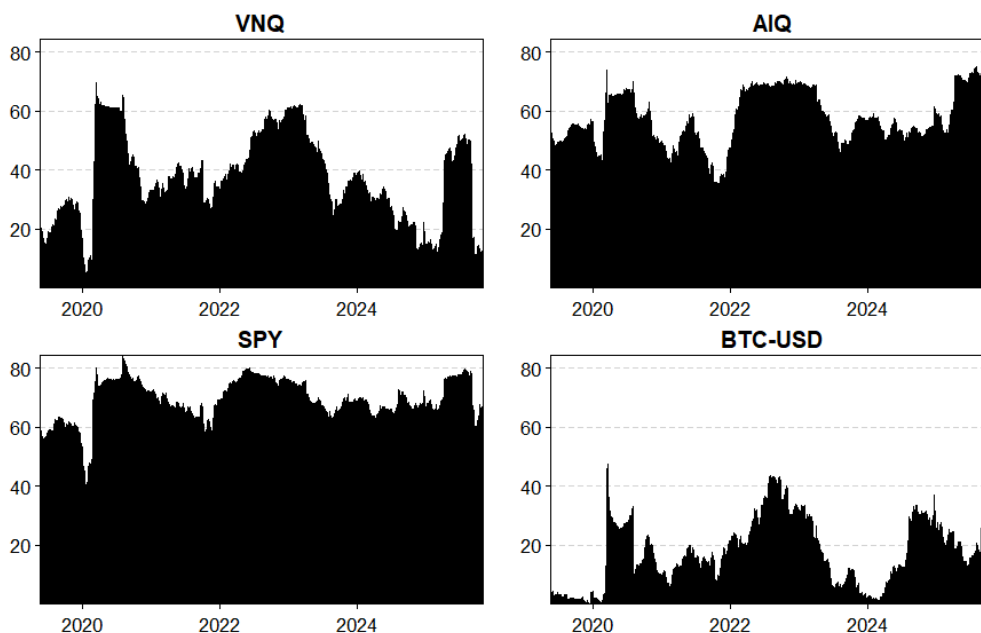
Διακρίνουμε ορισμένα διακριτά καθεστώτα διασυνδεσιμότητας. Στην πρώτη φάση (2019 - αρχές 2020), ο δείκτης κυμαίνεται σταθερά γύρω στο 30-35%, με προσωρινή υποχώρηση προς το 22% στα τέλη του 2019, αντανακλώντας ένα περιβάλλον χαμηλής συστημικής αλληλεξάρτησης πριν την πανδημία. Η επόμενη φάση (Μάρτιος - Δεκέμβριος 2020) σηματοδοτείται από απότομη και έντονη άνοδο: ο δείκτης σχεδόν τριπλασιάζεται σε λίγες εβδομάδες, αγγίζοντας τη μέγιστη τιμή του (63,32%) στις 16/03/2020, ως άμεση συνέπεια της κήρυξης της πανδημίας από τον ΠΟΥ (11 Μαρτίου 2020) και της επακόλουθης παγκόσμιας χρηματοοικονομικής αναταραχής. Στην συνέχεια (2021 - αρχές 2022), ο δείκτης αποκλιμακώνεται σταδιακά προς το 30-40%, υποστηριζόμενος από τα μέτρα νομισματικής στήριξης (μηδενικά επιτόκια,

ποσοτική χαλάρωση) και την ανάκαμψη των αγορών μετοχών. Σημαντικό εύρημα αποτελεί το γεγονός ότι, ακόμη και στις πιο ήπιες στιγμές αυτής της περιόδου, ο δείκτης δεν επανέρχεται στα προ-πανδημικά επίπεδα του 25-30%.

Η περίοδος από τα μέσα του 2022 έως τις αρχές 2023, χαρακτηρίζεται από νέα ανοδική κορύφωση στο 62,07% (13/09/2022), ισοδύναμη με αυτή του 2020. Η κορύφωση αυτή πρέπει να αποδοθεί σε τρεις πηγές αβεβαιότητας: τη ρωσική εισβολή στην Ουκρανία (Φεβρουάριος 2022), τον επιθετικό κύκλο αυξήσεων επιτοκίων της Ομοσπονδιακής Τράπεζας των ΗΠΑ και την τραπεζική αναταραχή του Μαρτίου 2023 (κατάρρευση της Silicon Valley Bank και της Credit Suisse). Σε αυτή την περίοδο, η πτώση μετοχών και ομολόγων αύξησε τη συσχέτιση των περιουσιακών στοιχείων, παρασύροντας και το VNQ που είναι ευαίσθητο στις μεταβολές των επιτοκίων.

Από τα μέσα του 2023 και έπειτα, ο δείκτης ακολουθεί φθίνουσα πορεία προς το 35-40%, εξέλιξη που πιθανώς συνδέεται με την ιδιοσυγκρατική ώθηση του AIQ από το AI rally (έναρξη ChatGPT, τέλη 2022) που αποσυνδέει το ETF Τεχνητής Νοημοσύνης από τα υπόλοιπα στοιχεία του δείγματος. Στο τελευταίο διάστημα (αρχές 2025) παρατηρείται εκ νέου άνοδος προς το 55%, με μια ήπια υποχώρηση στο τέλος του δείγματος (περίπου 40% τον Οκτώβριο του 2025), φανερώνοντας ότι το δίκτυο εξακολουθεί να εναλλάσσεται μεταξύ καθεστώτων υψηλής και χαμηλής αλληλεξάρτησης.

- Εξερχόμενη Κατευθυντική “Προς” Διασυνδεσιμότητα - “Το” Connectedness



Διάγραμμα 6: Εξερχόμενη Κατευθυντική Διασυνδεσιμότητα “Προς” - “Το” Connectedness

Το SPY διατηρεί διαχρονικά τα υψηλότερα επίπεδα εξερχόμενης διασυνδεσιμότητας, με τιμές που σταθεροποιούνται στο εύρος 60-80% για το μεγαλύτερο μέρος του

δείγματος. Από τον Μάρτιο του 2020 και έπειτα, μετά την πανδημική κρίση, η εκπεμπόμενη επίδρασή του παραμένει μονίμως υψηλή, χωρίς να εμφανίζει τις αυξομειώσεις που χαρακτηρίζουν τις εκπομπές των υπολοίπων ETFs. Αυτή η διαχρονική σταθερότητα υψηλών επιπέδων εκπομπής τεκμηριώνει εμπειρικά τον ρόλο του ως καθολικού πληροφοριακού πυρήνα του δικτύου: ως ευρύς δείκτης αναφοράς της αμερικανικής κεφαλαιαγοράς, ενσωματώνει συστηματικά μακροοικονομικές, νομισματικές και κλαδικές πληροφορίες που μεταδίδονται στις υπόλοιπες αγορές. Η αντίστοιχη στατική τιμή  $TO = 69.07\%$  (Πίνακας 13) αντιπροσωπεύει στην ουσία τον σταθμισμένο μέσο αυτής της σταθερά υψηλής σειράς.

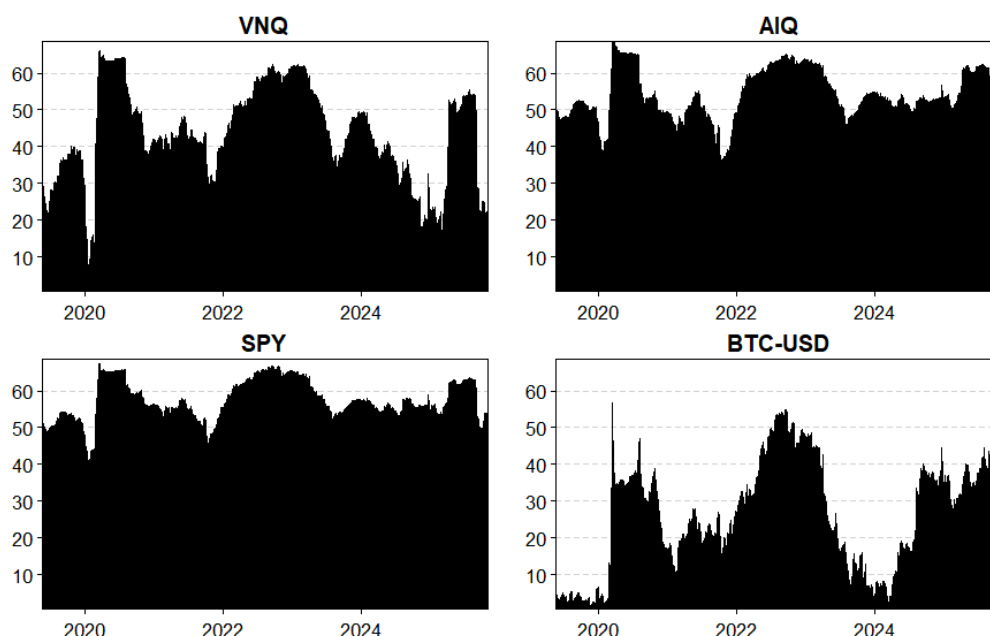
Το AIQ ακολουθεί την εικόνα του SPY, με ελαφρώς χαμηλότερα αλλά σαφώς σημαντικά επίπεδα εκπομπής, ιδίως μετά τα μέσα του 2022. Παρατηρείται μια έντονη ανοδική φάση κατά τη διετία 2022–2023 (επίπεδα 65-75%), η οποία συμπίπτει με την έκρηξη ενδιαφέροντος για την Τεχνητή Νοημοσύνη και την ανάδειξη των τεχνολογικών μετοχών μεγάλης κεφαλαιοποίησης ως κυρίαρχης δύναμης στην αγορά κεφαλαίου. Πιο εντυπωσιακό είναι το νέο μέγιστο που σημειώνεται στο 2025 (75-78%), υποδεικνύοντας ότι ο ρόλος του AIQ ως πομπού πληροφορίας στο δίκτυο ενισχύεται με την πάροδο του χρόνου. Το εύρημα αυτό αξίζει ιδιαίτερης προσοχής: ένα θεματικό ETF Τεχνητής Νοημοσύνης φαίνεται πλέον να ασκεί επιρροή συγκρίσιμη με αυτή του γενικού δείκτη SPY, εξέλιξη η οποία αντικατοπτρίζει τη βαθμιαία μετατόπιση του κέντρου βάρους της αγοράς προς τον τεχνολογικό κλάδο.

Το VNQ παρουσιάζει εμφανώς πιο μεταβλητό προφίλ εκπομπής, με χαμηλά επίπεδα (20-30%) σε περιόδους ηρεμίας και αιχμές που φτάνουν το 60-70% σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Παρατηρούνται τρεις διακριτές κορυφές: (i) τον Μάρτιο του 2020 (70%) στη φάση κατάρρευσης λόγω COVID, (ii) στο διάστημα 2022 - αρχές 2023 (50-55%) κατά τον επιθετικό κύκλο σύσφιξης της Fed που έπληξε ιδιαίτερα τις αξίες των ακινήτων, και (iii) στα μέσα του 2025 (50%). Το μοτίβο αυτό υποδεικνύει ότι το VNQ μετατρέπεται επεισοδικά σε σημαντικό πομπό πληροφορίας, όχι λόγω κάποιας σταθερής συστημικής σημασίας, αλλά όταν συγκεκριμένοι μακροοικονομικοί παράγοντες (π.χ. μεταβολές των επιτοκίων) γίνονται κυρίαρχοι για ολόκληρο το σύστημα.

Σε εμφανή αντίθεση με τα προηγούμενα τρία ETFs, η εξερχόμενη διασυνδεσιμότητα του BTC-USD παραμένει διαρκώς χαμηλή, με τη συντριπτική πλειονότητα των τιμών να κυμαίνεται κάτω από το 30%. Παρατηρούνται μόνο σύντομες αιχμές κατά τον Μάρτιο του 2020 (45%) και κατά τη διετία 2022-2023 (30-40%), οι οποίες συμπίπτουν με τις δύο μείζονες κρίσεις του δείγματος. Σε όλες τις υπόλοιπες περιόδους, η εκπομπή του παραμένει σε χαμηλά επίπεδα 5-20%, απόδειξη ότι το Bitcoin λειτουργεί κατά κανόνα ως απορροφητής σοκ, όχι ως πομπός. Αξιοσημείωτο, ωστόσο, είναι ότι οι λίγες περιόδους όπου το BTC-USD ξεπερνά το 30% αντιστοιχούν αποκλειστικά σε

φάσεις συστημικής έντασης, εύρημα που υποδηλώνει ότι το Bitcoin συμμετέχει ενεργά στις διασταυρούμενες μεταδόσεις μόνο όταν η συνολική διασυνδεσιμότητα του δικτύου ανέρχεται σε ακραία επίπεδα, δηλαδή σε περιόδους κρίσης.

- Εισερχόμενη Κατευθυντική “Από” Διασυνδεσιμότητα - “From” Connectedness



Διάγραμμα 7: Εισερχόμενη Κατευθυντική Διασυνδεσιμότητα “Από” - “From” Connectedness

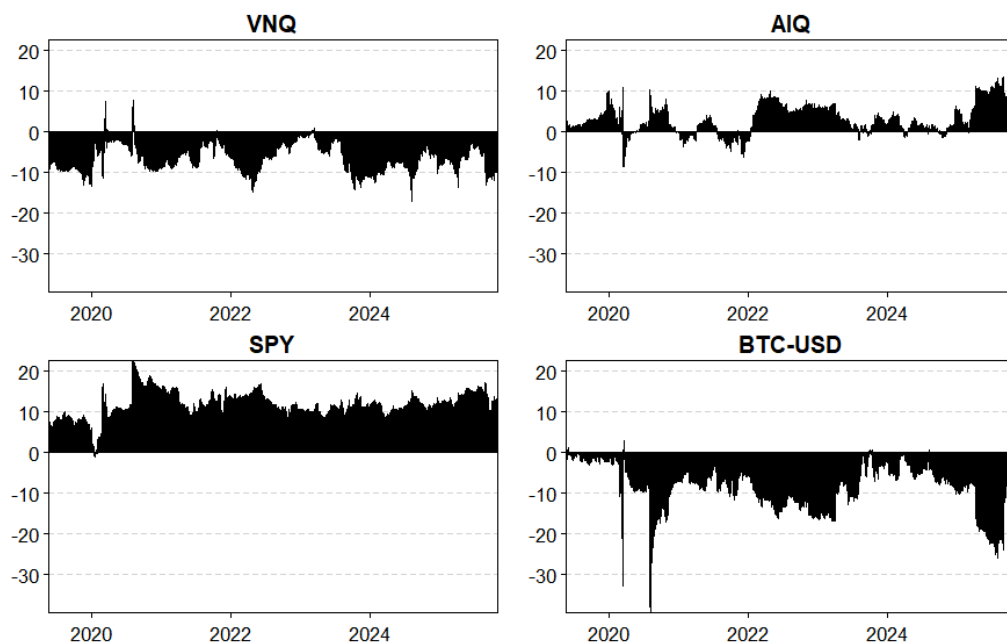
Το SPY διατηρεί διαχρονικά τα υψηλότερα και πιο σταθερά επίπεδα απορρόφησης μεταξύ των τεσσάρων ETFs, με τιμές που κυμαίνονται διαρκώς στο εύρος 50-68%. Η σταθερότητα αυτή ξεχωρίζει σαφώς από το πιο μεταβαλλόμενο προφίλ των υπολοίπων μεταβλητών και είναι απολύτως συμβατή με τον στατικό δείκτη FROM = 57.29% του Πίνακα 13, ο οποίος αποτελεί τον υψηλότερο μεταξύ όλων των ETFs. Το SPY καθίσταται κεντρικός κόμβος αμφίδρομης ροής πληροφορίας, εκπέμποντας συστημικά σήματα προς τις υπόλοιπες αγορές, αλλά ταυτόχρονα ενσωματώνοντας διαρκώς πληροφορία που προέρχεται από αυτές.

Το AIQ ακολουθεί άμεσα το SPY ως δεύτερος ισχυρότερος δέκτης πληροφορίας, με τιμές που κυμαίνονται στο 40-70%, με τις διακυμάνσεις του να είναι αισθητά πιο έντονες από εκείνες του SPY. Το προφίλ αυτό δείχνει ότι το AIQ είναι μόνιμα ενσωματωμένο στο δίκτυο και η συμπεριφορά του εξαρτάται διαχρονικά από τις εξελίξεις της ευρύτερης αμερικανικής αγοράς. Όντας ένα θεματικό ETF, η σύνθεσή του βασίζεται σε εταιρείες υψηλής κεφαλαιοποίησης (Apple, Microsoft, Nvidia, Alphabet) που αποτελούν ταυτόχρονα τον πυρήνα του S&P 500. Έτσι, το AIQ κληρονομεί έντονα την κίνηση του ευρύτερου δείκτη, με αποτέλεσμα η ονομαστική του διαφοροποίηση ως εξειδικευμένης επένδυσης προς τις AI εταιρείες να μην μεταφράζεται σε ουσιαστική ανεξαρτησία από την ευρύτερη αγορά.

Το VNQ παρουσιάζει το πιο έντονα μεταβαλλόμενο προφίλ απορρόφησης, με εύρος που εκτείνεται από περίπου 8%, ενώ σε περιόδους κρίσης να ανέρχεται έως 65-68%. Η εικόνα αυτή τεκμηριώνει εμπειρικά την ευθραυστότητα της αγοράς ακινήτων ως αυτόνομης κατηγορίας: σε φάσεις χρηματοπιστωτικού στρες, το VNQ απορροφά σχεδόν τα δύο τρίτα της διακύμανσής του από εξωγενή σοκ, κυρίως από το SPY, λόγω των κοινών μακροοικονομικών παραγόντων (επιτόκια, πιστωτικές συνθήκες) που διέπουν αμφότερες τις αγορές.

Το BTC-USD παρουσιάζει ένα διαφορετικό προφίλ απορρόφησης σε σχέση με τα υπόλοιπα ETFs, με τιμές που κυμαίνονται διαρκώς σε χαμηλά επίπεδα (5-30%) στο μεγαλύτερο μέρος του δείγματος. Η σαφής χρονική σύμπτωση των τριών αιχμών με τις περιόδους μέγιστου TCI, αποκαλύπτει πως το Bitcoin αποσυνδέεται από τις παραδοσιακές αγορές σε κανονικές συνθήκες, αλλά αναγκαστικά επανασυνδέεται κατά τη διάρκεια συστημικών κρίσεων. Αυτή η εικόνα συμβαδίζει απόλυτα με τη βιβλιογραφία περί "decoupling-recoupling": σε ομαλές συνθήκες, το Bitcoin λειτουργεί ως σχεδόν αυτόνομη κατηγορία περιουσιακών στοιχείων (Corbet et al., (2018), Bouri et al., (2017)), αλλά υπό συνθήκες ακραίας πίεσης, η συσχέτισή του με τις παραδοσιακές αγορές εκτινάσσεται, ακυρώνοντας την υποτιθέμενη ιδιότητά του ως καταφυγίου του χαρτοφυλακίου (Conlon & McGee, (2020), Jiang et al., (2022)).

- Καθαρή Κατευθυντική Διασυνδεσιμότητα – Net Connectedness



Διάγραμμα 8: Καθαρή Κατευθυντική Διασυνδεσιμότητα – Net Connectedness

**SPY - Σταθερά Καθαρός Πομπός:** Το SPY αναδεικνύεται ως ο μοναδικός τίτλος που παραμένει διαρκώς πάνω από τη μηδενική γραμμή καθ' όλη τη διάρκεια του δείγματος, με τιμές NET που κυμαίνονται σταθερά στο εύρος +5% έως +22% περίπου. Η εικόνα αυτή τεκμηριώνει εμπειρικά τον ρόλο του SPY ως θεμελιώδους

πληροφοριακού πυρήνα του δικτύου: ανεξάρτητα από το τρέχον καθεστώς της αγοράς (κρίση ή ηρεμία), το SPY εκπέμπει σταθερά περισσότερη πληροφορία από όση δέχεται. Η στατική τιμή NET = +11.78% (Πίνακας 13) αντιπροσωπεύει τον σταθμισμένο μέσο μιας σειράς που δεν αλλάζει (σχεδόν) ποτέ πρόσημο, σε αντίθεση με τις άλλες τρεις μεταβλητές.

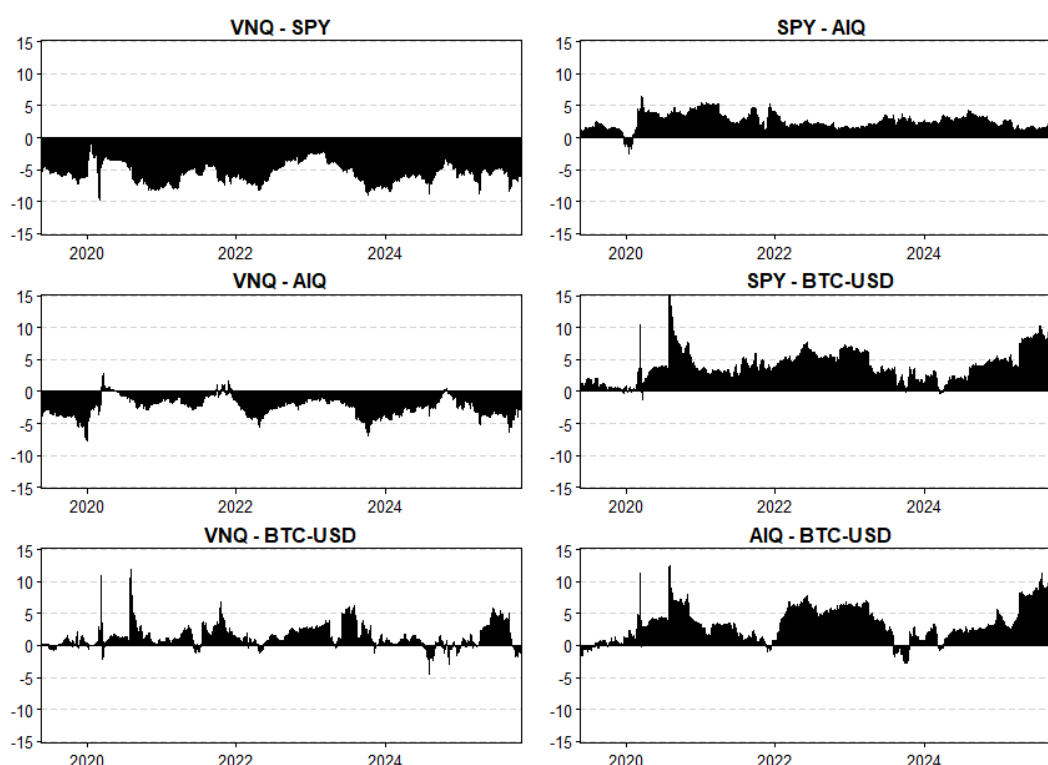
**AIQ - Πομπός με Εναλλαγές Ρόλου:** Το AIQ παρουσιάζει το πιο ενδιαφέρον εξελικτικό προφίλ μεταξύ των τεσσάρων ETFs. Το AIQ λειτουργεί από την αρχή ως οριακά καθαρός πομπός, αλλά με σχετικά χαμηλή ένταση που ενισχύθηκε δραματικά μετά το 2022. Μετά τη βραχεία αρνητική αιχμή του Μαρτίου 2020 (-9%), που αντικατοπτρίζει τη στιγμιαία υπερ-απορρόφηση πληροφορίας κατά τη φάση κατάρρευσης του COVID, η σειρά μεταβαίνει σε μια ομαλή θετική φάση κατά το δεύτερο και τρίτο τρίμηνο του 2020 (+5 έως +10%). Η εξέλιξη αυτή πιθανότατα συνδέεται με τη μαζική στροφή προς τις ψηφιακές υπηρεσίες στο πλαίσιο του lockdown (τηλεργασία, e-commerce, ψηφιοποίηση υπηρεσιών) η οποία ώθησε τις μετοχές υψηλής τεχνολογίας σε εντυπωσιακά κέρδη, καθιστώντας τις προσωρινά πηγή μεταβλητότητας για τις υπόλοιπες αγορές αντί για παθητικό αποδέκτη της κίνησής τους. Από τα μέσα του 2022 και έπειτα, η σειρά μετατοπίζεται σταθερά πάνω από τη μηδενική γραμμή με ελάχιστες πτώσεις υπό το μηδέν και το AIQ μετατρέπεται σε ενεργό πομπό σοκ προς τις υπόλοιπες αγορές. Ο στατικός δείκτης NET = +3.12% του Πίνακα 13 αναπαράγει τον σταθμισμένο μέσο μιας σειράς που, ενώ διατηρεί κατά βάση θετικό πρόσημο, υποτιμά την κλιμάκωση της έντασης που παρατηρείται στο δεύτερο μισό του δείγματος.

**VNQ - Σταθερά Καθαρός Δέκτης:** Το VNQ παραμένει διαρκώς κάτω από τη μηδενική γραμμή καθ' όλο το δείγμα, με τιμές NET που κυμαίνονται κυρίως στο εύρος -5 έως -15% και με αιχμές που προσεγγίζουν το -20% σε φάσεις κρίσης. Οι μοναδικές περίοδοι όπου το ETF λειτούργησε ως οριακός πομπός σοκ συνδέονται με τη βίαιη ανατίμηση κινδύνου στην αγορά ακινήτων κατά την έναρξη της πανδημίας, ενώ η δεύτερη (μέσα 2020) αντανακλά τις κλαδικές ανησυχίες για τη βιωσιμότητα του εμπορικού real estate. Η συνολική εικόνα υποδεικνύει ότι η αγορά ακινήτων υφίσταται δυσανάλογη πίεση χωρίς να αντιδρά εκπέμποντας αντίστοιχα σήματα προς το σύστημα. Η στατική τιμή NET = -6.44% αντιπροσωπεύει τον σταθμισμένο μέσο αυτής της μονόπλευρης σχέσης.

**BTC-USD - Καθαρός Δέκτης με Έντονη Διακύμανση Έντασης.** Το BTC-USD παρουσιάζει το πιο ασταθές προφίλ NET μεταξύ των τεσσάρων ETFs. Κατά την περίοδο 2019-αρχές 2020, η σειρά παραμένει σχεδόν στο μηδέν, αντικατοπτρίζοντας τη σχετική απομόνωσή του από το δίκτυο των παραδοσιακών αγορών. Από τον Μάρτιο του 2020 και έπειτα, η σειρά μετατοπίζεται μόνιμα κάτω από τη μηδενική γραμμή, εμφανίζοντας εντυπωσιακή τοπική κορυφή κατά τη φάση COVID (-33%), η οποία αποτελεί το απόλυτο ελάχιστο ολόκληρου του Διαγράμματος για όλες τις μεταβλητές.

Προς το τέλος του δείγματος, διαφαίνεται ότι το Bitcoin λειτουργεί όλο και πιο έντονα ως απορροφητής συστημικού κινδύνου στις πιο πρόσφατες περιόδους. Παρά τις χαμηλές στατικές συσχετίσεις Kendall του Bitcoin, η συμπεριφορά του σε ακραία γεγονότα συνδέεται στενά με αυτή των παραδοσιακών αγορών, ενώ παραλληλά επιβεβαιώνεται το εύρημα της κατάρρευσης της θέσης του Bitcoin ως υποτιθέμενου ασφαλούς καταφυγίου σε φάσεις στρες. Η στατική τιμή  $NET = -8.46\%$  υποτιμά ιδιαίτερα την πραγματική ένταση της αρνητικής σειράς, ιδίως λόγω της ηπιότερης συμπεριφοράς της προ-πανδημικής περιόδου αλλά και των υπολοίπων περιόδων ηρεμίας που εξομαλύνουν το στατικό αποτέλεσμα.

- Καθαρή Κατά Ζεύγη Διασυνδεσιμότητα - Net Pairwise Connectedness



Διάγραμμα 9: Καθαρή κατά ζεύγη Διασυνδεσιμότητα – Net pairwise Connectedness

**VNQ - SPY (κυρίαρχη ροή  $SPY \rightarrow VNQ$ ):** Η σειρά κινείται διαρκώς κάτω από τη μηδενική γραμμή, στο εύρος  $-2$  έως  $-10\%$ . Το SPY αποτελεί σταθερά καθαρό πομπό προς το VNQ, με την ένταση της μετάδοσης να εντείνεται σε φάσεις κρίσης. Η εξάρτηση αυτή είναι αναμενόμενη: η αγορά ακινήτων επηρεάζεται έντονα από τη γενική κατεύθυνση της αμερικανικής κεφαλαιαγοράς, ιδίως μέσω των κοινών μακροοικονομικών μεταβλητών. Το ζεύγος VNQ-SPY αποτελεί το μοναδικό ζεύγος του δείγματος κατά το οποίο η σχέση διασύνδεσης μεταξύ των στοιχείων είναι ξεκάθαρα και απολύτως μονόπλευρη καθ' όλη τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. Το SPY αποκλειστικά εκπέμπει προς το VNQ, ενώ το VNQ είναι παθητικός δέκτης.

**SPY - AIQ (μέτρια ροή  $SPY \rightarrow AIQ$ ):** Η σειρά παραμένει σταθερά πάνω από τη μηδενική γραμμή, με τιμές  $0$  έως  $+5\%$  περίπου και παρουσιάζοντας σύντομη αρνητική

αιχμή τον Μάρτιο του 2020. Το SPY λειτουργεί ως καθαρός πομπός προς το AIQ, αλλά με σχετικά μέτρια ένταση. Η σχέση αυτή είναι η πιο ομαλή του δικτύου, αντικατοπτρίζοντας τη βαθιά αμοιβαία εξάρτηση των δύο ETFs λόγω της κοινής τους έκθεσης σε εταιρείες υψηλής τεχνολογίας μεγάλης κεφαλαιοποίησης.

**VNQ - AIQ (ασθενής ροή AIQ → VNQ):** Η σειρά κινείται διαρκώς γύρω και ελαφρώς κάτω από το μηδέν (κυρίως στο εύρος 0 έως -5%), με σημαντικές αρνητικές αιχμές τον Μάρτιο του 2020 (περίπου 8%), κατά την περίοδο τέλη 2023-αρχές 2024 και προς τα τέλη του 2025. Το AIQ μεταδίδει καθαρά προς το VNQ, αλλά η ένταση της σχέσης είναι σαφώς ασθενέστερη από εκείνη του SPY προς το VNQ. Η εικόνα αυτή υποδηλώνει ότι η αγορά ακινήτων κληρονομεί στρες και από τον τεχνολογικό κλάδο, ιδίως όταν τα επιτόκια ή οι αποτιμήσεις μετοχών μεγάλης κεφαλαιοποίησης γίνονται κυρίαρχες ανησυχίες της αγοράς.

**SPY - BTC-USD (έντονη ροή SPY → BTC):** Η σειρά παραμένει διαρκώς πάνω από τη μηδενική γραμμή, με τιμές που κυμαίνονται κυρίως 0 έως +10% και αξιοσημείωτες κορυφές κοντά στο +13% στα μέσα του 2020 και στο τέλος του δείγματος (2025). Το SPY λειτουργεί ως ισχυρός καθαρός πομπός προς το BTC-USD, εύρημα που αντικρούει την κυρίαρχη αφήγηση περί απόλυτης αυτονομίας του Bitcoin. Στις περιόδους κρίσης (Μάρτιος 2020, μέσα 2022, αρχές 2025), η ένταση της μετάδοσης από το SPY προς το BTC αυξάνεται σημαντικά.

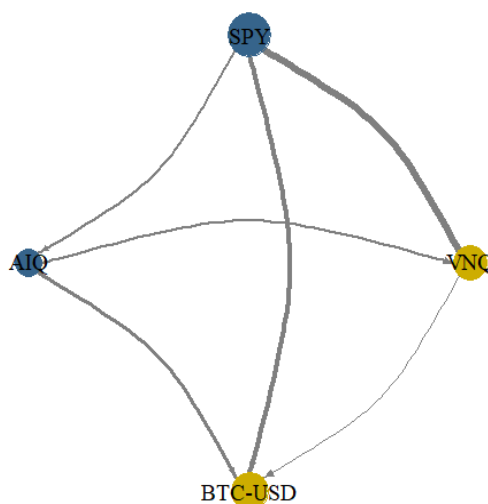
**VNQ - BTC-USD (ήπια ροή VNQ → BTC).** Η σειρά κινείται κυρίως κοντά στο μηδέν αλλά με σαφή θετικό προσανατολισμό (0 έως +5%), με μια έντονη θετική αιχμή κατά το 2020 (+13%). Το VNQ αποτελεί πομπό προς το BTC-USD, εύρημα που μπορεί να φαίνεται αντιφατικό δεδομένου του στατικού NET = -6.44% του VNQ, αλλά αντικατοπτρίζει την ευρύτερη συστηματική θέση του BTC-USD ως καθολικού δέκτη σχεδόν όλων των άλλων ETFs. Ακόμη και ένα παθητικό στοιχείο όπως το VNQ καταλήγει να εκπέμπει περισσότερο προς το Bitcoin από όσο δέχεται από αυτό.

**AIQ - BTC-USD (ισχυρότερη ροή AIQ → BTC).** Η σειρά παρουσιάζει ελαφρώς μεταβαλλόμενο προφίλ μεταξύ των ζευγών με το BTC-USD, με σαφώς θετικές τιμές που κυμαίνονται διαρκώς στο +2 έως +10% και κορυφές κοντά στο +12% κατά το 2020 και στα τέλη του δείγματος. Το AIQ μεταδίδει καθαρά και έντονα στο BTC-USD, με την ένταση της σχέσης να ενισχύεται διαχρονικά. Ο τεχνολογικός κλάδος αποτελεί σημαντικό ενδιάμεσο μέσω του οποίου διαχέεται η συστημική πληροφορία προς το Bitcoin.

- Διασυνδεσιμότητα Δικτύου – Network Theory Connectedness

Το Διάγραμμα 10 παρουσιάζει την απεικόνιση του δικτύου διασυνδεσιμότητας μεταξύ των τεσσάρων ETFs, προσφέροντας μια ολιστική σύνοψη όλων των προηγούμενων ευρημάτων (Διαγράμματα 5-9 και Πίνακας 13) σε μια ενιαία γραφική μορφή. Στη θεωρία δικτύων, όπως αναπτύχθηκε στην Ενότητα 3.3, κάθε κόμβος

αντιστοιχεί σε μία από τις  $N$  μεταβλητές του υποδείγματος. Κάθε ακμή αντιπροσωπεύει την κατευθυνόμενη ροή πληροφορίας μεταξύ δύο κόμβων και φέρει βέλος το οποίο υποδεικνύει την κατεύθυνση της ροής. Το πάχος της ακμής αντικατοπτρίζει την ένταση της καθαρής μετάδοσης (απόλυτη τιμή του NPDC). Επιπροσθέτως, η χρωματική διαφοροποίηση των κόμβων διακρίνει τους καθαρούς πομπούς του συστήματος (μπλε: SPY, AIQ) από τους καθαρούς δέκτες (κίτρινο: VNQ, BTC-USD), σύμφωνα με τα πρόσημα της στήλης NET του Πίνακα 13.



Διάγραμμα 10: Διασυνδεσιμότητα Δικτύου – Network Theory Connectedness

Η πιο εμφανής δομική ιδιότητα του δικτύου είναι η κεντρικότητα του SPY, ο οποίος συνδέεται με ισχυρές ακμές προς όλους τους υπόλοιπους κόμβους, αποτελώντας τον βασικό πομπό προς τους υπόλοιπους δείκτες. Η παχύτερη ακμή ολόκληρου του δικτύου είναι αυτή που συνδέει το SPY με το VNQ και επιβεβαιώνεται από τα έντονα αρνητικά επίπεδα της σειράς NPDC (VNQ - SPY) στο Διάγραμμα 9. Η αγορά ακινήτων κληρονομεί συστηματικά την κίνηση του ευρύτερου χρηματιστηριακού δείκτη χωρίς να τον επηρεάζει αντίστοιχα.

Η ακμή  $AIQ \rightarrow VNQ$  έχει σχετικά λεπτή μορφή, υποδεικνύοντας ότι ο τεχνολογικός κλάδος μεταδίδει μέτρια στρες προς την αγορά ακινήτων, εκφράζοντας τις κοινές ευαισθησίες των δύο ETFs στις νομισματικές συνθήκες. Παρά τις πολύ υψηλές διμερείς ροές μεταξύ SPY και AIQ (35.11% και 32.63% αντίστοιχα), η καθαρή κατευθυντικότητα της σχέσης είναι σχετικά μικρή. Στο γράφημα, η ακμή  $SPY \rightarrow AIQ$  αποτυπώνεται με μέτριο προς λεπτό πάχος, υποδηλώνοντας ότι το SPY αποτελεί έναν οριακά καθαρό πομπό προς το AIQ.

Εν συνεχεία, όλες οι ακμές συνδεδεμένες με το BTC-USD είναι κατευθυνόμενες προς αυτό (κίτρινος δέκτης), εύρημα που οπτικοποιεί συνοπτικά τη συστηματική του θέση ως καθολικού δέκτη του δικτύου, λαμβάνοντας καθαρές ροές από τους υπόλοιπους τρεις κόμβους. Η παχύτερη ακμή προς το Bitcoin προέρχεται από το SPY, ακολουθεί η σχεδόν εφάμιλλη  $AIQ \rightarrow BTC$  και τελευταία η αρκετά λεπτότερη  $VNQ \rightarrow BTC$ . Η

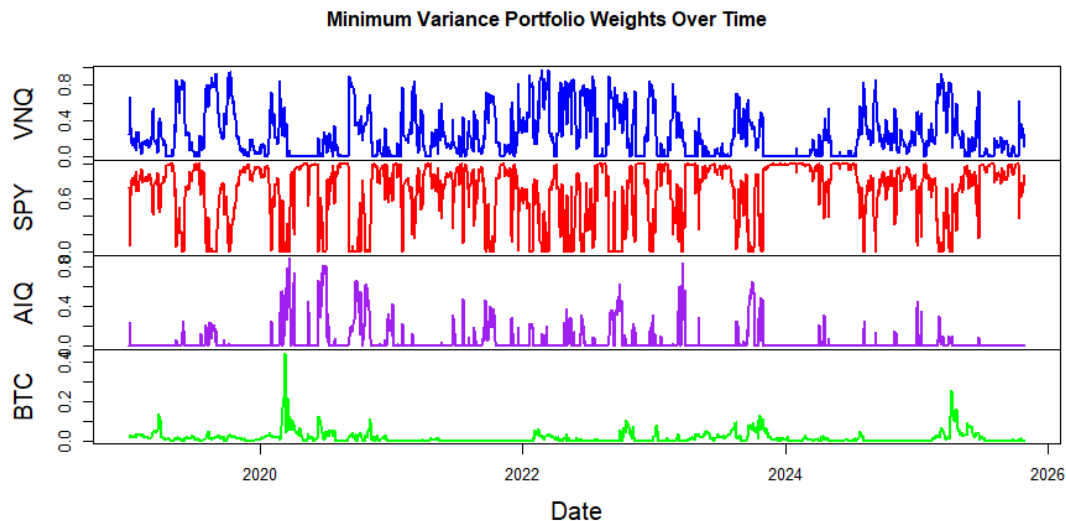
διάταξη αυτή αποκαλύπτει ότι το ευρύ μετοχικό χρηματιστήριο και ο τεχνολογικός κλάδος αποτελούν τις δύο κύριες πύλες πληροφορίας που τροφοδοτούν τη μεταβλητότητα του Bitcoin, ενώ η αγορά ακινήτων διατηρεί την πιο αδύναμη σχέση με αυτό. Σημειώνεται ότι η λεπτότερη ακμή ολόκληρου του δικτύου είναι αυτή VNQ → BTC-USD, αντικατοπτρίζοντας την ασθενέστερη μεταξύ τους σχέση και την ελάχιστη αμοιβαία επίδραση ανάμεσα στα δύο πιο ετερογενών στοιχείων του χαρτοφυλακίου. Αυτό το εύρημα είναι συμβατό με την ελάχιστη συσχέτιση Kendall του ζεύγους VNQ-BTC (0.142) στον Πίνακα 8.

Εν κατακλείδι, η αρχιτεκτονική που αναδύεται από το Διάγραμμα 10 αντιστοιχεί σε μια ιεραρχική δομή ροών όπου η πληροφορία κινείται αποκλειστικά από επάνω προς τα κάτω: από το SPY στην κορυφή, προς τους ενδιάμεσους κόμβους AIQ και VNQ, και τελικά προς το BTC-USD στη βάση. Κυριαρχεί η υψηλή κεντρικότητα εξερχόμενου βαθμού του SPY ( $NPT = 3$ , Πίνακας 13), ενώ διαφαίνεται ο καθολικά εισερχόμενος χαρακτήρας του BTC-USD, ο οποίος δέχεται και από τους τρεις υπόλοιπους κόμβους χωρίς να εκπέμπει σε κανέναν ( $NPT = 0$ ). Το AIQ και το VNQ χαρακτηρίζονται από μικτούς ρόλους. Το AIQ δέχεται από το SPY αλλά εκπέμπει προς VNQ και BTC-USD ( $NPT = 2$ ), λειτουργώντας ως ενδιάμεσος αναμεταδότης, ενώ το VNQ έχει έναν περισσότερο εισερχόμενο χαρακτήρα, ο οποίος δέχεται από SPY και AIQ αλλά εκπέμπει μόνο προς το BTC-USD ( $NPT = 1$ ).

## 5.3 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίου (portfolio optimization)

### 5.3.1 Χαρτοφυλάκιο ελάχιστης Διακύμανσης

Παρακάτω αποτυπώνεται η δυναμική εξέλιξη των βαρών των τεσσάρων ETFs στο χαρτοφυλάκιο ελάχιστης διακύμανσης κατά την περίοδο 2019-2025. Η συνεχής αναπροσαρμογή των βαρών αντιδρά στις μεταβαλλόμενες συνθήκες κινδύνου και συσχέτισης μεταξύ των στοιχείων, αναδεικνύοντας την αναγκαιότητα δυναμικής βελτιστοποίησης έναντι μιας πιο παθητικής στρατηγικής τύπου buy-and-hold, ιδιαίτερα όταν στο χαρτοφυλάκιο συμπεριλαμβάνονται στοιχεία υψηλής μεταβλητότητας, όπως τα κρυπτονομίσματα και η τεχνολογία.



Διάγραμμα 11: Βάρη Χαρτοφυλακίου Ελάχιστης Διακύμανσης ως προς το χρόνο

Στο διάγραμμα παρατηρούνται βίαιες ταλαντώσεις με αισθητά μεγάλο εύρος στα βάρη των επιμέρους στοιχείων.

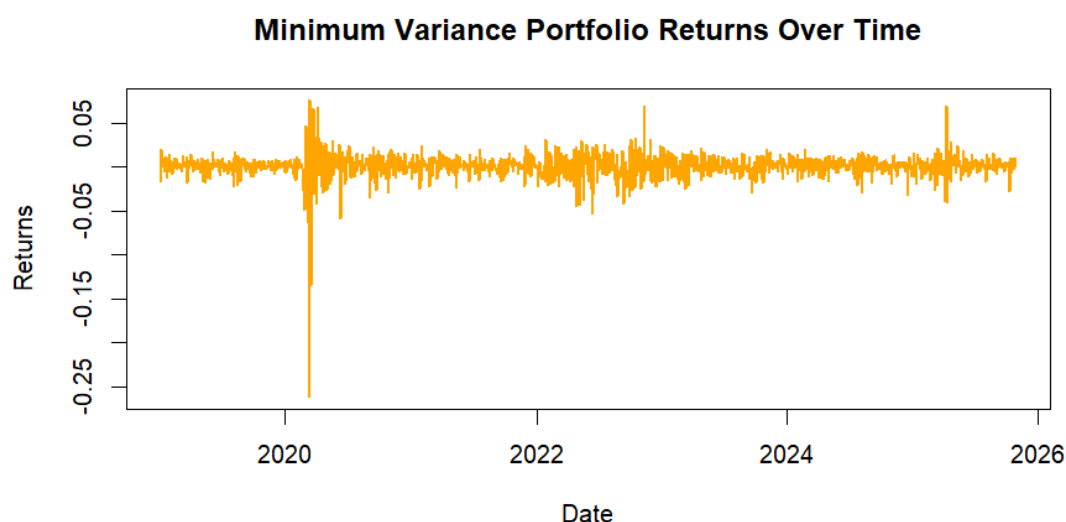
Το πλέον εμφανές χαρακτηριστικό του χαρτοφυλακίου είναι η κυριαρχία του SPY, το οποίο αποτελεί τον βασικό άξονα του χαρτοφυλακίου ελάχιστης διακύμανσης, διατηρώντας σταθερά υψηλά βάρη στο εύρος 50-80%. Η κυριαρχία αυτή αντανακλά την οικονομική του ιδιότητα ως ευρέως διαφοροποιημένου δείκτη με τη χαμηλότερη ιδιοσυγκρατική μεταβλητότητα μεταξύ των τεσσάρων εξεταζόμενων στοιχείων. Το VNQ συμμετέχει επίσης ενεργά, με βάρη που διακυμαίνονται σε ευρύ φάσμα 10-80%, λειτουργώντας ως δευτερεύων πυλώνας του χαρτοφυλακίου χάρη στη μέτρια συσχέτισή του με το SPY.

Αντιθέτως, το BTC-USD λαμβάνει σχεδόν μηδενικά βάρη καθ' όλη την περίοδο, με μοναδική εξαίρεση μια στιγμιαία αιχμή (περίπου στο 40%) κατά τον Μάρτιο του 2020. Αυτή η συμπεριφορά είναι απολύτως αναμενόμενη: η εξαιρετικά υψηλή ατομική του μεταβλητότητα τιμωρείται από τον αλγόριθμο, ο οποίος εστιάζει αποκλειστικά στην ελαχιστοποίηση της συνολικής διακύμανσης, χωρίς να λαμβάνει υπόψιν τα διαφοροποιητικά οφέλη που θα μπορούσε να προσφέρει η χαμηλή του συσχέτιση με τα υπόλοιπα στοιχεία. Η χαμηλή του συσχέτιση κατά Kendall δεν αρκεί από μόνη της για να αντισταθμίσει την υψηλή του διακύμανση.

Παράλληλα, το AIQ εμφανίζεται κατά κανόνα σε μηδενικά επίπεδα, με σπάνιες αιχμές. Το εύρημα είναι συμβατό με την πληροφορία του Πίνακα Συσχετίσεων: το AIQ παρουσιάζει υψηλή Kendall συσχέτιση με το SPY ενώ έχει υψηλότερη μεταβλητότητα. Σε ένα πλαίσιο ελάχιστης διακύμανσης, ο αλγόριθμος αντιμετωπίζει το AIQ ως πλεονασματικό σε σχέση με το SPY και το αποκλείει σχεδόν συστηματικά.

Τέλος, παρατηρείται έντονη διακύμανση των βαρών VNQ-SPY, με συχνές αναπροσαρμογές. Συνολικά, η εικόνα των βαρών του χαρτοφυλακίου ελάχιστης διακύμανσης χαρακτηρίζεται από έντονη μεταβλητότητα στις κατανομές, με συχνές μεταβάσεις μεταξύ των δύο αυτών στοιχείων (SPY και VNQ).

Παρακάτω αποτυπώνεται η διαχρονική εξέλιξη της απόδοσης του χαρτοφυλακίου ελάχιστης διακύμανσης κατά την εξεταζόμενη περίοδο. Το διάγραμμα καταδεικνύει ότι οι ημερήσιες αποδόσεις του κινούνται, κατά το μεγαλύτερο μέρος της περιόδου, περίξ του μηδενός, ενώ ταυτόχρονα αναδεικνύει την ευπάθεια ακόμα και των βελτιστοποιημένων χαρτοφυλακίων απέναντι στον ακραίο συστημικό κίνδυνο.



*Διάγραμμα 12: Απόδοση Χαρτοφυλακίου Ελάχιστης Διακύμανσης διαχρονικά*

Το Διάγραμμα 12 αποτυπώνει τη χρονική εξέλιξη των ημερήσιων αποδόσεων του χαρτοφυλακίου ελάχιστης διακύμανσης κατά την περίοδο 2019-2025. Η συνολική εικόνα είναι απόλυτα συμβατή με τον στόχο της στρατηγική ελάχιστης διακύμανσης, καθώς οι αποδόσεις κινούνται σε στενό κανάλι γύρω από το μηδέν για το μεγαλύτερο μέρος της εξεταζόμενης περιόδου, αντικατοπτρίζοντας την επιδίωξη εξομάλυνσης και περιορισμού της μεταβλητότητας έναντι της μεγιστοποίησης των αποδόσεων.

Ωστόσο, η εικόνα δεν είναι ομοιόμορφη χρονικά. Διακρίνονται τρεις περίοδοι αυξημένης μεταβλητότητας, οι οποίες αναδεικνύουν το φαινόμενο της συστάδας μεταβλητότητας (volatility clustering): η εντονότερη συστάδα εντοπίζεται τον Μάρτιο του 2020 και συμπίπτει με την κορύφωση της πανδημικής κρίσης. Στο πλαίσιο αυτό, οι Zhang, Hu, και Ji (2020) επισημαίνουν πως η πανδημία COVID-19 προκάλεσε έναν πρωτοφανή συστημικό κίνδυνο στις παγκόσμιες χρηματοοικονομικές αγορές. Η δραματική κλίμακα των κινήσεων των τιμών και η έντονη αβεβαιότητα σχετικά με τις παγκόσμιες οικονομικές επιπτώσεις κατέστησαν το περιβάλλον ακραία μεταβλητό, πλήττοντας οριζόντια όλους τους κλάδους και ακυρώνοντας στην πράξη τα οφέλη από την ιδιοσυγκρατική συμπεριφορά των επιμέρους στοιχείων.

Ακολουθεί η περίοδος στα μέσα του 2022, η οποία συνδέεται με τον επιθετικό κύκλο αυξήσεων επιτοκίων της Ομοσπονδιακής Τράπεζας των ΗΠΑ και τέλος μια μικρότερης έντασης αλλά ορατή συστάδα στις αρχές του 2025. Μεταξύ αυτών των περιόδων παρεμβάλλονται διαστήματα ηρεμίας με σχεδόν επίπεδες αποδόσεις, ιδίως κατά τη διάρκεια του 2021 και της περιόδου 2023-2024.

Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό που αξίζει να αναφερθεί είναι η εμφανής ασυμμετρία της κατανομής. Οι αρνητικές αιχμές υπερτερούν των θετικών: η μέγιστη θετική απόδοση φτάνει περίπου το +5%, ενώ η μέγιστη αρνητική αγγίζει το -25%. Αυτή η αρνητική ασυμμετρία είναι χαρακτηριστική των equity-based χαρτοφυλακίων και υποδηλώνει ότι, παρά τη δυναμική βελτιστοποίηση, η κατανομή των αποδόσεων διατηρεί βαρυά αριστερή ουρά.

Το πιο εντυπωσιακό σημείο του διαγράμματος αποτελεί η μοναδική παρατήρηση κοντά στο -25% τον Μάρτιο του 2020, η οποία ξεχωρίζει ως ακραίο γεγονός σε ολόκληρο το δείγμα. Καταδεικνύει με σαφήνεια ότι, παρά τον αμυντικό χαρακτήρα της στρατηγικής, το χαρτοφυλάκιο δεν αποφεύγει τον συστημικό κίνδυνο: όταν όλες οι συσχετίσεις των επιμέρους στοιχείων τείνουν στη μονάδα υπό συνθήκες ακραίας αναταραχής, η διαφοροποίηση χάνει την προστατευτική της λειτουργία. Το εύρημα συμφωνεί με την παρατήρηση των Clarke, de Silva και Thorley (2006). Όπως τεκμηριώνουν, παρά τη διαφοροποίηση, τα χαρτοφυλάκια ελάχιστης διακύμανσης παραμένουν εκτεθειμένα στις πτωτικές κινήσεις της αγοράς κατά τη διάρκεια περιόδων συστημικής χρηματοοικονομικής κρίσης, καθώς ενσωματώνουν σημαντικό βαθμό συστηματικού κινδύνου. Ωστόσο, τα εμπειρικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η ένταση των απωλειών είναι συνήθως πιο περιορισμένη σε σύγκριση με το ευρύτερο χαρτοφυλάκιο της αγοράς. Συνεπώς, σε περιόδους συστημικής κρίσης (όπως το 2020), το χαρτοφυλάκιο είναι μαθηματικά προδιαγεγραμμένο να απορροφήσει μεγάλο μέρος του σοκ της αγοράς, καθώς η έκθεση στο Market Beta υπερτερεί της όποιας ιδιοσυγκρατικής διαφοροποίησης επιτυγχάνεται μέσω του αλγορίθμου.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί η σχετικά γρήγορη επαναφορά του χαρτοφυλακίου στο στενό χρονικό διάστημα ηρεμίας μετά από κάθε επεισόδιο αναταραχής. Τόσο μετά τον Μάρτιο του 2020 όσο και μετά το 2022, οι αποδόσεις επανέρχονται γύρω από το μηδέν χωρίς παρατεταμένες φάσεις υψηλής μεταβλητότητας, γεγονός που πιστοποιεί την αποτελεσματικότητα της δυναμικής αναπροσαρμογής των βαρών στις μεταβαλλόμενες συνθήκες της αγοράς.

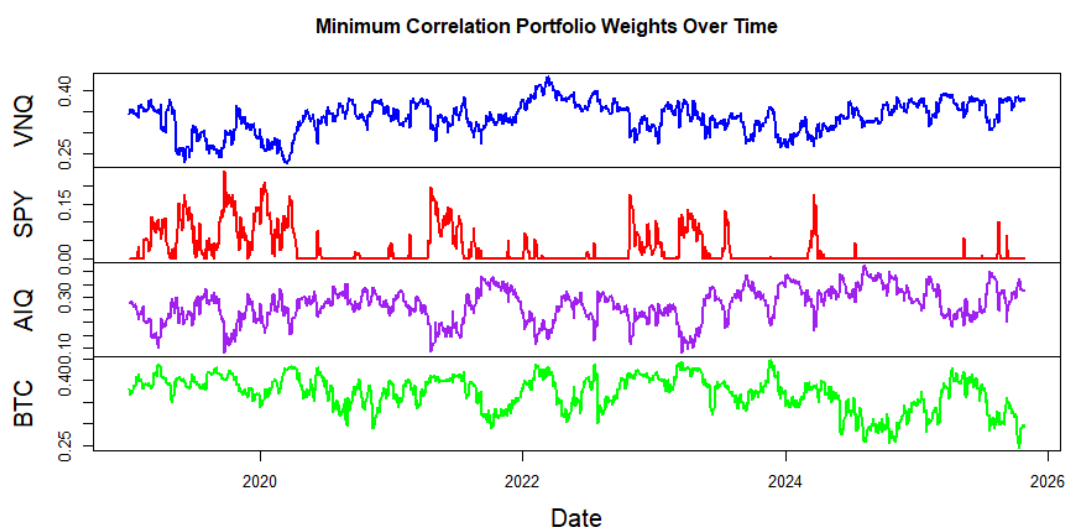
Συνολικά, η εικόνα του διαγράμματος είναι συμβατή με ένα αμυντικό προφίλ απόδοσης-κινδύνου. Το χαρτοφυλάκιο επιτυγχάνει ικανοποιητική σταθερότητα στις περισσότερες ημέρες, διατηρώντας ωστόσο μια υπολειμματική έκθεση σε ακραία συστημικά σοκ που δεν μπορούν να εξαλειφθούν απόλυτα μέσω της διαφοροποίησης, οδηγώντας το χαρτοφυλάκιο σε αποκλίσεις από τη συνήθη συμπεριφορά των αποδόσεων.

### 5.3.2 Χαρτοφυλάκιο ελάχιστης Συσχέτισης

Η μετάβαση από το Χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Διακύμανσης (Minimum Variance Portfolio - MVP) στο Χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Συσχέτισης (Minimum Correlation Portfolio - MCP) αποκαλύπτει μια εντελώς διαφορετική και πολύ πιο ομαλή δομή βαρών.

Η εικόνα που αναδύεται είναι ριζικά διαφορετική από εκείνη του χαρτοφυλακίου ελάχιστης διακύμανσης, αντικατοπτρίζοντας τη θεμελιώδη διαφορά στο κριτήριο επιλογής: ενώ το MVP εστιάζει στην ελαχιστοποίηση της συνολικής μεταβλητότητας, το MCP αγνοεί τις ατομικές διακυμάνσεις και επικεντρώνεται αποκλειστικά στη μείωση της κοινής κίνησης μεταξύ των επιμέρους στοιχείων (δηλαδή την ελαχιστοποίηση της συσχέτισης μεταξύ τους).

Κατά συνέπεια, η κατανομή των βαρών εμφανίζεται λιγότερο δυναμική και προσαρμοστική, καθώς το μοντέλο επιδιώκει να συνδυάσει τους τίτλους με τη χαμηλότερη αλληλεξάρτηση, προκειμένου να ενισχύσει το διαφοροποιητικό όφελος του χαρτοφυλακίου σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.



Διάγραμμα 13: Βάρη Χαρτοφυλακίου Ελάχιστης Συσχέτισης ως προς το χρόνο

Το πλέον εντυπωσιακό χαρακτηριστικό του χαρτοφυλακίου είναι η κυρίαρχη παρουσία του BTC-USD, το οποίο διατηρεί διαχρονικά τα υψηλότερα βάρη μεταξύ των τεσσάρων στοιχείων, κυμαινόμενο σταθερά στο εύρος 25-45%. Η συμπεριφορά αυτή είναι απολύτως συνεπής με τη θεωρία και τα ευρήματα της ανάλυσης συσχέτισης: το Bitcoin εμφανίζει τις χαμηλότερες συσχετίσεις Kendall με όλα τα υπόλοιπα στοιχεία (0.142-0.219, Πίνακας 8), γεγονός που το καθιστά το ιδανικό υποψήφιο asset για τη μεγιστοποίηση του διαφοροποιητικού οφέλους. Ο αλγόριθμος, αγνοώντας πλήρως την υψηλή ατομική μεταβλητότητα του Bitcoin,

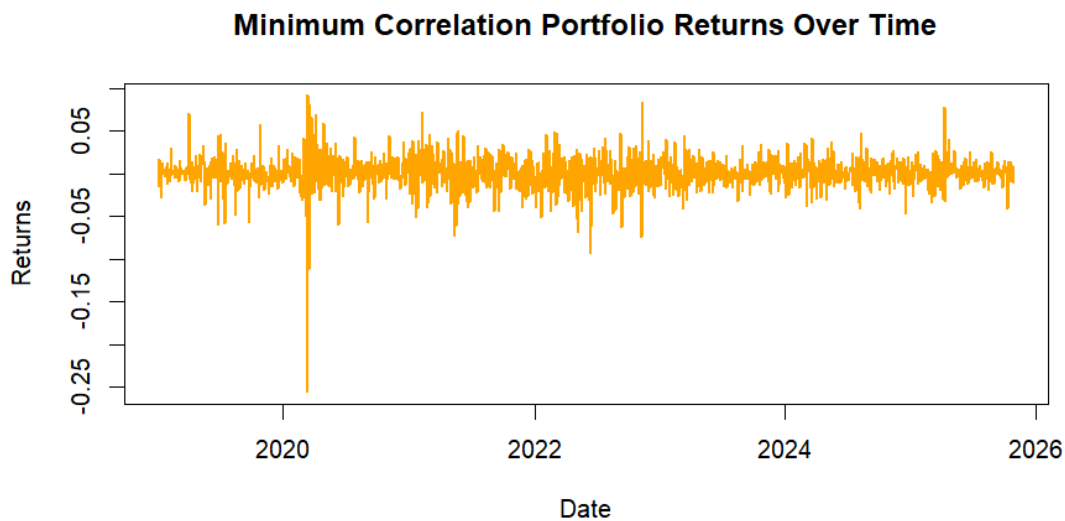
αναγνωρίζει την σχετικά αυτόνομη συμπεριφορά του και του αναθέτει σταθερά υψηλά βάρη.

Σε δεύτερο επίπεδο σημαντικότητας τοποθετείται το VNQ, το οποίο διατηρεί διαχρονικά σχετικά σταθερή συμμετοχή στο εύρος 25-40%, λειτουργώντας ως άγκυρα του χαρτοφυλακίου. Η σχετική σταθερότητα του VNQ αντικατοπτρίζει τον ιδιαίτερο ρόλο του τομέα ακινήτων ως ξεχωριστής κατηγορίας περιουσιακών στοιχείων, η οποία διατηρεί διακριτή δυναμική από τις παραδοσιακές μετοχές παρά τις περιοδικές αυξομειώσεις στη συσχέτιση.

Το AIQ εμφανίζει ενεργή και σχετικά σταθερή συμμετοχή με βάρη που διακυμαίνονται κυρίως στο εύρος 10-30%. Η παρουσία του είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα, καθώς παρά την υψηλή του συσχέτιση με το SPY, ο αλγόριθμος του αναθέτει σημαντικά βάρη επειδή προσφέρει διαφοροποιητικό όφελος έναντι του VNQ και του BTC. Στο γράφημα, παρατηρείται μια αισθητή σχέση ανταγωνιστικότητας μεταξύ AIQ και BTC: σε περιόδους όπου το βάρος του Bitcoin μειώνεται, το AIQ τείνει να αυξάνει τη συμμετοχή του, και αντίστροφα.

Αξιοσημείωτη είναι η συμπεριφορά του SPY, το οποίο σε αντίθεση με την κυριαρχία που εμφανίζει στο χαρτοφυλάκιο ελάχιστης διακύμανσης, εδώ λαμβάνει συστηματικά χαμηλά βάρη, συχνά κοντά στο μηδέν, με σποραδικές μόνο αιχμές που αγγίζουν το 15-18%. Το εύρημα αυτό είναι ιδιαίτερα αποκαλυπτικό: το SPY, ως ευρύς δείκτης της αμερικανικής χρηματιστηριακής αγοράς, παρουσιάζει υψηλές συσχετίσεις τόσο με το AIQ (κλαδική έκθεση στις τεχνολογικές μετοχές) όσο και με το VNQ (κοινή ευαισθησία σε μακροοικονομικούς παράγοντες). Επιπλέον, το SPY αναδείχθηκε στην ανάλυση διασυνδεσιμότητας ως ο πρωταρχικός πομπός σοκ προς τα υπόλοιπα στοιχεία, γεγονός που ενισχύει τη φυσική του αντιπαλότητα με τη λογική ενός χαρτοφυλακίου ελάχιστης συσχέτισης. Ο αλγόριθμος αναγνωρίζει το SPY ως τον κεντρικό κόμβο του δικτύου εξάρτησης και το αποκλείει συστηματικά για να μεγιστοποιήσει το διαφοροποιητικό όφελος του χαρτοφυλακίου.

Όμοια με το χαρτοφυλάκιο ελάχιστης διακύμανσης, στο χαρτοφυλάκιο ελάχιστης συσχέτισης παρατηρούμε πως οι αποδόσεις κινούνται κατά κανόνα γύρω από το μηδέν κατά το μεγαλύτερο μέρος της εξεταζόμενης περιόδου. Η συνολική εικόνα παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες αλλά και διακριτές διαφορές σε σχέση με το χαρτοφυλάκιο ελάχιστης διακύμανσης, αντικατοπτρίζοντας τη διαφορετική μεθοδολογική φιλοσοφία της στρατηγικής.



Διάγραμμα 14: Απόδοση Χαρτοφυλακίου Ελάχιστης Συσχέτισης διαχρονικά

Όπως και στο MVP, οι αποδόσεις κινούνται κατά κανόνα σε στενό εύρος γύρω από το μηδέν για το μεγαλύτερο μέρος της εξεταζόμενης περιόδου. Ωστόσο, στο MCP παρατηρείται εμφανώς υψηλότερη συνολική μεταβλητότητα στο καθημερινό εύρος των αποδόσεων, με πιο πυκνές και πιο έντονες αυξομειώσεις. Αυτό είναι θεωρητικά αναμενόμενο και αποτελεί άμεση συνέπεια του σχεδιασμού της στρατηγικής: το MCP αγνοεί τις ατομικές διακυμάνσεις των στοιχείων και αναθέτει σημαντικά βάρη σε υψηλής μεταβλητότητας περιουσιακά στοιχεία όπως το BTC με αποκλειστικό κριτήριο τη χαμηλή συσχέτιση. Συνεπώς, η συνολική μεταβλητότητα του χαρτοφυλακίου διογκώνεται μηχανικά σε σύγκριση με το MVP, παρόλο που το διαφοροποιητικό όφελος μεταξύ των στοιχείων μεγιστοποιείται.

Διακρίνονται οι ίδιες κρίσιμες περιοχές στο γράφημα που εντοπίστηκαν και στο MVP: η εντονότερη συστάδα τον Μάρτιο του 2020 με την κορύφωση της πανδημικής κρίσης, η περίοδος στα μέσα 2022 που αντανακλά τον επιθετικό κύκλο αυξήσεων επιτοκίων της Fed, καθώς και επιπλέον επεισόδια αναταραχής το 2023 και τις αρχές του 2025. Η συγχρονικότητα των κρίσιμων περιόδων μεταξύ MVP και MCP ενισχύει τη διαπίστωση ότι, σε στιγμές συστημικής πίεσης, οι συσχετίσεις των αγορών συγκλίνουν προς τη μονάδα και τα διαφοροποιητικά οφέλη οποιασδήποτε χρησιμοποιηθείσας στρατηγικής βελτιστοποίησης μειώνονται δραματικά.

Όπως και στο MVP, το πιο εντυπωσιακό σημείο του διαγράμματος αποτελεί η μοναδική παρατήρηση κοντά στο -25% τον Μάρτιο του 2020. Η τιμή αυτή είναι ιδιαίτερα αποκαλυπτική για τα όρια της μεθοδολογίας: παρά το γεγονός ότι το MCP βασίζεται εξ ορισμού σε μετρήσεις χαμηλής συσχέτισης, η ασύμμετρη συμπεριφορά των συσχετίσεων στις ουρές των κατανομών (asymmetric exceedance correlations, Longin & Solnik, 2001) σε περιόδους ακραίας πτωτικής αγοράς, περιορίζει σημαντικά τα προσδοκώμενα οφέλη που επιδιώκει να παράσχει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης

σε σύγκριση με την υλοποίησή του σε ομαλές περιόδους. Όταν οι συσχετίσεις των αρνητικών αποδόσεων μεταξύ SPY, VNO, AIQ και BTC αυξάνονται ραγδαία, το χαρτοφυλάκιο εκτίθεται στον κοινό συστημικό κίνδυνο εξίσου με κάθε άλλη στρατηγική διαφοροποίησης.

Η κατανομή των αποδόσεων εμφανίζει και εδώ έντονη αρνητική ασυμμετρία, με τις αρνητικές αιχμές να υπερτερούν των θετικών σε εύρος. Η μέγιστη θετική απόδοση φτάνει περίπου το +6%, ενώ η μέγιστη αρνητική αγγίζει το -25%, διαμορφώνοντας ένα προφίλ απόδοσης-κινδύνου με βαριά αριστερή ουρά. Σε σύγκριση με το MVP, το MCP εμφανίζει επίσης συχνότερες θετικές αιχμές μεσαίου μεγέθους (στο εύρος +3% έως +6%), γεγονός που υποδεικνύει υψηλότερη εν δυνάμει κερδοφορία ως αντίβαρο της εκθέσεως στον αυξημένο κίνδυνο. Στο MCP, ακόμη και κατά τις ήρεμες περιόδους, οι αποδόσεις εμφανίζουν συνεχή ταλάντωση μεγαλύτερου εύρους, αντικατοπτρίζοντας τη μόνιμη παρουσία υψηλής μεταβλητότητας στοιχείων όπως το BTC στη σύνθεση του χαρτοφυλακίου.

Συνολικά, το χαρτοφυλάκιο ελάχιστης συσχέτισης αναδεικνύει τη βασική θεωρητική του υπόθεση, ότι η μεγιστοποίηση του διαφοροποιητικού οφέλους μέσω χαμηλής συσχέτισης δεν συνεπάγεται απαραίτητα και μειωμένη μεταβλητότητα. Πρόκειται για στρατηγική που επιτυγχάνει διαφοροποίηση σε επίπεδο συμπεριφοράς των στοιχείων αλλά αποδέχεται την υψηλότερη συνολική διακύμανση ως αναπόφευκτο τίμημα. Η ευπάθεια απέναντι στον ακραίο συστημικό κίνδυνο, όπως αποτυπώνεται στο γεγονός του Μαρτίου 2020, αποτελεί κοινό περιορισμό όλων των στρατηγικών διαφοροποίησης αναδεικνύει την ανάγκη συμπληρωματικών μεθοδολογιών για την πληρέστερη αποτύπωση της δυναμικής των αγορών σε ακραίες συνθήκες.

## 6. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιχείρησε μια ολοκληρωμένη οικονομετρική προσέγγιση της δυναμικής συμπεριφοράς των τεσσάρων ετερογενών διαπραγματεύσιμων τίτλων (SPY, VNO, AIQ και BTC-USD) κατά την εξεταζόμενη περίοδο 02/01/2019 - 29/10/2025, μέσω της εφαρμογής υποδειγμάτων ARMA, GARCH, DCC-GARCH, του πλαισίου διασυνδεσιμότητας των Diebold-Yilmaz (2009, 2012, 2014) και, τέλος, της δυναμικής βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίου υπό δύο διακριτά κριτήρια (Ελάχιστης Διακύμανσης και Ελάχιστης Συσχέτισης). Η εξεταζόμενη περίοδος καλύπτει διαδοχικά συστημικά γεγονότα (πανδημία COVID-19, γεωπολιτική κρίση, νομισματική σύσφιξη, τραπεζική κρίση του Μαρτίου 2023, άνοδος της Τεχνητής Νοημοσύνης), προσφέροντας ένα ιδιαίτερα πλούσιο πεδίο εφαρμογής των επιλεχθέντων μεθοδολογιών.

Σε επίπεδο μονομεταβλητής ανάλυσης, η περιγραφική στατιστική (Πίνακας 1) τεκμηρίωσε την αναμενόμενη μη-κανονικότητα των ημερήσιων αποδόσεων, με

αρνητική ασυμμετρία και έντονη λεπτοκύρτωση σε όλους τους τίτλους, καθώς και τη συντριπτική απόρριψη της κανονικότητας μέσω του ελέγχου Jarque-Bera. Η ύπαρξη ισχυρής αυτοσυσχέτισης στα τετράγωνα των αποδόσεων ( $Q^2(20)$ ) τεκμηρίωσε την παρουσία συστάδων μεταβλητότητας και κατέστησε επιβεβλημένη τη χρήση υποδειγμάτων GARCH. Η εξειδίκευση ARMA(1,1) για το VNQ αντικατοπτρίζει τη χαμηλότερη πληροφοριακή αποτελεσματικότητα της αγοράς ακινήτων, ενώ η προδιαγραφή ARMA(0,0) για SPY, AIQ και BTC-USD είναι θεωρητικά συνεπής με την Υπόθεση Αποτελεσματικής Αγοράς. Στη συνέχεια, η επιλογή υποδειγμάτων sGARCH για VNQ και AIQ και eGARCH για SPY και BTC-USD (Πίνακας 9), επιβεβαίωσε την παρουσία του φαινομένου μόχλευσης (leverage effect) στις δύο τελευταίες αγορές, φανερώνοντας πως τα αρνητικά σοκ αυξάνουν δυσανάλογα την υπό συνθήκη μεταβλητότητα σε σχέση με θετικά σοκ ίσου μεγέθους.

Στο πολυμεταβλητό σκέλος, το υπόδειγμα DCC-GARCH (Πίνακας 10) ανέδειξε εξαιρετικά υψηλή επιμονή των δυναμικών συσχετίσεων ( $a+b \approx 0.979$ ), απορρίπτοντας εμπειρικά την υπόθεση CCC και επιβεβαιώνοντας ότι ένα εξωγενές σοκ στη συσχετιστική δομή απαιτεί παρατεταμένο χρόνο εξομάλυνσης. Συμπληρωματικά, η ανάλυση διασυνδεσιμότητας ανέδειξε το SPY ως τον αδιαμφισβήτητο συστημικό κόμβο του δικτύου, με σταθερά καθαρή εκπομπή πληροφορίας προς όλους τους υπόλοιπους τίτλους (NPT = 3 με NET = +11.78%) και το BTC-USD ως καθολικό δέκτη (NPT = 0 με NET = -8.46%). Ο μέσος TCI της τάξης του 45% κατατάσσει το σύστημα σε καθεστώς μέτριας προς υψηλής αλληλεξάρτησης, ενώ η χρονική σύμπτωση των κορυφών του TCI με τις περιόδους συστημικής έντασης (Μάρτιος 2020, Φεβρουάριος 2022, Μάρτιος 2023) επιβεβαιώνει εμπειρικά το φαινόμενο «decoupling-recoupling» του Bitcoin και την κατάρρευση των διαφοροποιητικών οφελών ακριβώς εκεί όπου αυτά θα ήταν περισσότερο χρήσιμα (Longin & Solnik, 2001).

Σε επίπεδο βελτιστοποίησης χαρτοφυλακίου, η συγκριτική μελέτη των δύο στρατηγικών παρήγαγε τα εξής συμπεράσματα: Το Χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Διακύμανσης (MVP) κυριαρχείται από το SPY (50-80%) και απορρίπτει σχεδόν συστηματικά το BTC-USD, τιμωρώντας την υψηλή ατομική του μεταβλητότητα και αγνοώντας πλήρως τη χαμηλή του συσχέτιση. Αντιθέτως, το Χαρτοφυλάκιο Ελάχιστης Συσχέτισης (MCP) αναθέτει σταθερά υψηλά βάρη (25-45%) στο BTC-USD και αποκλείει το SPY ως κεντρικό κόμβο εξάρτησης, αναδεικνύοντας την κρίσιμη μεθοδολογική διάκριση μεταξύ ιδιοσυγκρατικού κινδύνου και κοινής κίνησης. Ωστόσο, και τα δύο χαρτοφυλάκια αποδείχθηκαν εκτεθειμένα στον συστημικό κίνδυνο της κρίσης του Μαρτίου 2020, ενισχύοντας εμπειρικά την επιχειρηματολογία των Clarke, de Silva και Thorley (2006) ότι η διαφοροποίηση δεν εξαλείφει τον συστηματικό παράγοντα Market Beta, καθώς και τη θεωρία εναλλαγής καθεστώτων των Ang και Bekaert (2002).

## Βιβλιογραφία & Πηγές

- Ang, A., & Bekaert, G. (2002).** International asset allocation with regime shifts. *The Review of Financial Studies*, 15(4), p. 1137-1187. [10.1093/rfs/15.4.1137](https://doi.org/10.1093/rfs/15.4.1137)
- Arner, D. W., Barberis, J., & Buckley, R. P. (2015).** The Evolution of Fintech: A New Post-Crisis Paradigm? *Georgetown Journal of International Law*, 47(4), 1271-1319. [10.2139/ssrn.2676553](https://ssrn.com/abstract=2676553)
- Barunik, J. & Krehlik, T. (1986).** Measuring the frequency dynamics of financial connectedness and systemic risk (December 2015, 2017). *Journal of Financial Econometrics*, Volume 16, Issue 2, 2018. <https://ssrn.com/abstract=2627599>
- Bollerslev, T. (1986).** Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity. *Journal of Econometrics*, 31 (1986), p. 307–327. [https://doi.org/10.1016/0304-4076\(86\)90063-1](https://doi.org/10.1016/0304-4076(86)90063-1)
- Bollerslev, T. (1990).** Modelling the Coherence in Short-run Nominal Exchange Rates: A Multivariate Generalized ARCH Model. *Review of Economics and Statistics*, 72(3), 498–505. <https://doi.org/10.2307/2109358>
- Boudry, W. I., Coulson, N. E., Kallberg, J. G., & Liu, C. H. (2012).** On the hybrid nature of REITs. *The Journal of Real Estate Finance and Economics*, 44(1), 230-249. <https://doi.org/10.1007/s11146-011-9339-7>
- Bouri, E., Molnár, P., Azzi, G., Roubaud, D., & Hagfors, L. I. (2017).** On the hedge and safe haven properties of Bitcoin: Is it really more than a diversifier? *Finance Research Letters*, 20, p. 192–198. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2016.09.025>
- Box, G. E. P., & Jenkins, G. M. (1970).** *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. San Francisco: Holden-Day.
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015).** *Time Series Analysis: Forecasting and Control* (5th ed.). Hoboken, NJ: Wiley. [10.1111/jtsa.12194](https://doi.org/10.1111/jtsa.12194)
- Cappiello, L., Engle, R. F., & Sheppard, K. (2006).** Asymmetric Dynamics in the Correlations of Global Equity and Bond Returns. *Journal of Financial Economics*, 4, 537-572. <https://doi.org/10.1093/jfinec/nbl005>
- Clarke, R. G., de Silva, H., & Thorley, S. (2006).** Minimum-variance portfolios in the U.S. equity market. *The Journal of Portfolio Management*, 33(1), p. 10-24. [10.3905/jpm.2006.661366](https://doi.org/10.3905/jpm.2006.661366)
- Clayton, J., & MacKinnon, G. (2003).** The relative importance of stock, bond and real estate factors in explaining REIT returns. *The Journal of Real Estate Finance and Economics*, 27(1), 39-60. <https://doi.org/10.1023/A:1023607412927>

- Conlon, T., & McGee, R. (2020).** Safe haven or risky hazard? Bitcoin during the COVID-19 bear market. *Finance Research Letters*, 35, 101607. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2020.101607>
- Corbet, S., Meegan, A., Larkin, C., Lucey, B., & Yarovaya, L. (2018).** Exploring the dynamic relationships between cryptocurrencies and other financial assets. *Economics Letters*, 165, p. 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2018.01.004>
- Diebold, F. X., & Yilmaz, K. (2009).** Measuring financial asset return and volatility spillovers, with application to global equity markets. *The Economic Journal*, 119(534), p. 158–171. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0297.2008.02208.x>
- Diebold, F. X., & Yilmaz, K. (2012).** Better to give than to receive: Predictive directional measurement of volatility spillovers. *International Journal of Forecasting*, 28(1), Pages 57-66. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2011.02.006>
- Diebold, F. X., & Yilmaz, K. (2014).** On the network topology of variance decompositions: Measuring the connectedness of financial firms. *Journal of Econometrics*, 182(1), 119–134. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2014.04.012>
- Engle, R. F., & Sheppard, K. (2001).** Theoretical and Empirical Properties of Dynamic Conditional Correlation Multivariate GARCH. NBER Working Paper No. 8554. <https://doi.org/10.3386/w8554>
- Engle, R. F. (2002).** Dynamic Conditional Correlation: A Simple Class of Multivariate Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity Models. *Journal of Business & Economic Statistics*, 20(3), 339–350. <https://doi.org/10.1198/073500102288618487>
- Giglio F. (2021).** Fintech: A Literature Review. *European Research Studies Journal* Volume XXIV, Issue 2B, p. 600-627. [10.35808/ersj/2254](https://doi.org/10.35808/ersj/2254)
- Hamilton, J. D. (1994).** *Time Series Analysis*. Princeton, NJ: Princeton University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctv14jx6sm>
- Jiang, Y., Lie, J., Wang, J., & Mu, J. (2022).** Risk transmissions between Bitcoin and traditional financial assets during the COVID-19 era: The role of global uncertainties. *International Review of Financial Analysis*, 80, 102054. <https://doi.org/10.1016/j.irfa.2022.102054>
- Ljung, G. M., & Box, G. E. P. (1978).** On a Measure of Lack of Fit in Time Series Models. *Biometrika*, 65(2), 297-303. <https://doi.org/10.2307/2335207>
- Longin, F., & Solnik, B. (2001).** Extreme correlation of international equity markets. *The Journal of Finance*, 56(2), p. 649-676. <https://doi.org/10.1111/0022-1082.00340>

**Markowitz, H. (1952).** Portfolio Selection, *The Journal of Finance*, Vol. 7, No. 1 (Mar., 1952), p. 77-91. <https://doi.org/10.2307/2975974>

**Morri, G., & Liu, W. (2017).** US REITs' returns sensitivity to interest rates after the Global Financial Crisis. SSRN Working Paper. [10.2139/ssrn.3007609](https://ssrn.com/abstract=3007609)

**Schwarz, G. (1978).** Estimating the Dimension of a Model. *The Annals of Statistics*, 6(2), 461-464. <https://doi.org/10.1214/aos/1176344136>

**Tsay, R. S. (2010).** Analysis of Financial Time Series (3rd ed.). Hoboken, NJ: Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470644560>

**Zhang, D., Hu, M., & Ji, Q. (2020).** Financial markets under the global pandemic of COVID-19. *Finance Research Letters*, 36, 101528. <https://doi.org/10.1016/j.frl.2020.101528>

#### **Εκθέσεις και Αναφορές Διεθνών Οργανισμών:**

**Ernst & Young (2016).** UK FinTech: On the cutting edge. EY Report.

**European Central Bank (2022).** Decrypting financial stability risks in crypto-asset markets. *Financial Stability Review*, May 2022, Special Feature B. European Central Bank, Frankfurt am Main. [https://www.ecb.europa.eu/press/financial-stability-publications/fsr/special/html/ecb.fsrart202205\\_02~1cc6b111b4.en.html](https://www.ecb.europa.eu/press/financial-stability-publications/fsr/special/html/ecb.fsrart202205_02~1cc6b111b4.en.html)

**International Monetary Fund (2018).** The Bali Fintech Agenda. IMF Policy Paper. Press Release No. 18/388. <https://www.imf.org/en/publications/search#cf-type=POPPRS>