



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**Ανάλυση εγκεφαλικών δικτύων σε δεδομένα εγκεφαλογραφήματος σε πειράματα
δημιουργικότητας**

Διπλωματική Εργασία
της
Βαρχαλαμά Στυλιανής

Επιβλέπων : Γεώργιος Ματσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Ανάλυση εγκεφαλικών δικτύων σε δεδομένα εγκεφαλογραφήματος σε πειράματα δημιουργικότητας

Διπλωματική Εργασία
της
Βαρχαλαμά Στυλιανής

Επιβλέπων : Γεώργιος Ματσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή 17 Οκτωβρίου 2024.

(Υπογραφή)

.....
Γ. Ματσόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Α. Παναγόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Π. Τσανάκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

(Υπογραφή)

.....
Βαρχαλαμά Στυλιανή

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

Copyright © Βαρχαλαμά Στυλιανή, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Η μελέτη της ανάπτυξης του ανθρώπινου εγκεφάλου αποτελεί βασικό αντικείμενο έρευνας τα τελευταία χρόνια. Η παρούσα διπλωματική εργασία, αφορά πειράματα δημιουργικότητας, βάση των οποίων γίνεται ανάλυση εγκεφαλικών δικτύων σε δεδομένα εγκεφαλογραφήματος. Στο συγκεκριμένο πείραμα τα δεδομένα προήλθαν από 29 άτομα και πραγματοποιήθηκαν 15 δοκιμές, διάρκειας 60 δευτερολέπτων η κάθε μία ανά συμμετέχοντα. Οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να δημιουργήσουν εναλλακτικές χρήσεις για καθημερινά αντικείμενα (*AU task*). Για την ελεγχόμενη μελέτη, χρησιμοποιήσαμε μια εργασία χαρακτηριστικών αντικειμένου (*OC task*), όπου οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να καταγράψουν τα τυπικά χαρακτηριστικά ή ιδιότητες ενός αντικειμένου. Αρχικά, δημιουργήθηκαν οι μετρικές καθυστέρησης φάσης (*PLI*) και μελετήθηκαν οι μετρικές δικτύων των *Cluster Coefficient*, *Global Efficiency*, *Small-Worldness*, *Characteristic Path Length*, οι οποίες δημιουργούνται για τους πέντε κύριους εγκεφαλικούς ρυθμούς (*alpha*, *beta*, *gamma*, *delta*, *theta*). Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση *paired t-test* στα προαναφερθέντα δεδομένα. Ακολουθώντας την μεθοδολογία αυτή, στόχος ήταν να αναδειχθούν ενδεχόμενες, σημαντικές στατιστικές διαφορές μεταξύ των δεδομένων δημιουργικότητας και να διερευνηθεί η πιο ενεργή συχνότητα των πειραμάτων. Αποδείχθηκε, ότι οι συχνότητες *gamma* συμμετέχουν περισσότερο στη δημιουργική σκέψη και ακολουθούν οι δέλτα και οι *alpha*, ενώ οι *beta* φαίνεται να έχουν μία αρκετά μικρή συμβολή. Ενώ είναι σημαντικό να αναφερθεί, ότι οι ρυθμοί *theta*, στο πείραμα δεν παρουσιάζουν καμία στατιστική διαφοροποίηση, γεγονός που έρχεται σε αντιπαράθεση με προηγούμενες μελέτες.

Λέξεις Κλειδιά: *EEG*, εγκεφαλικοί ρυθμοί, μετρικές δικτύων, *PLI*, στατιστική ανάλυση

Abstract

The study of the development of the human brain has become a fundamental subject of research in recent years. In this dissertation, an analysis of brain networks is conducted using electroencephalogram (EEG) data in creativity experiments. The data for this experiment were obtained from 29 individuals, and 15 trials were conducted, each lasting 60 seconds per participant. Participants were tasked with generating alternative uses for everyday objects (AU task). For the control task, we employed an Object Characteristics task (OC task), where participants were instructed to record the typical features or properties of an object. Initially, phase lag index (PLI) metrics are created, and network metrics such as Cluster Coefficient, Global Efficiency, Small-Worldness, Characteristic Path Length are studied. These metrics are generated for the five main brain rhythms (alpha, beta, gamma, delta, theta). Subsequently, a paired t-test statistical analysis is performed on the aforementioned data. The specific aim of this work is to clarify any potential statistically significant differences between creativity data, specifically identifying which frequency is more active in such experiments. The results indicate that gamma frequencies are the most involved in creative thinking. Following gamma, delta and alpha frequencies emerge, while beta frequencies seem to have a relatively small contribution. Finally, theta rhythms, which in our experiment show no statistically significant difference, contradict previous studies.

Keywords: EEG, brain rhythms, network metrics, PLI, statistical analysis

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Γεώργιο Ματσόπουλο και τον συνεπιβλέπων κ. Ιωάννη Κάκκο για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Η πολύτιμη εμπειρία και οι συμβουλές τους υπήρξαν καταλυτικές για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024
Βαρχαλαμά Στυλιανή

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1.....	7
1.1 Η Υπολογιστική Νευροεπιστήμη.....	7
1.2 Ο ανθρώπινος Εγκέφαλος.....	7
1.2.1 Οι λοβοί του εγκεφάλου.....	9
1.2.2 Η λειτουργία της μνήμης.....	11
1.3 Δημιουργικότητα.....	11
1.3.1 Αποκλίνουσα και Συγκλίνουσα Σκέψη.....	12
1.4 Το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (EEG).....	12
1.4.1 Εγκεφαλικοί Ρυθμοί.....	13
1.4.1.1 Ρυθμοί στην Αποκλίνουσα και Συγκλίνουσα Σκέψη.....	15
1.4.2 Λειτουργία του Εγκεφαλογραφήματος.....	16
Κεφάλαιο 2.....	18
2.1 Εγκεφαλικά Δίκτυα και Συνδεσιμότητα.....	18
2.1.1 Μετρική καθυστέρηση φάσης (PLI).....	19
2.2 Μετρικές Θεωρίας Γράφων.....	20
2.3 Τοπολογική Ανάλυση Δικτύων.....	24
2.4 Στατιστικός Έλεγχος.....	24
2.4.1 T-test.....	25
Κεφάλαιο 3.....	26
3.1 Συμμετέχοντες.....	26
3.2 Πειραματική Διαδικασία.....	26
3.4 Προεπεξεργασία.....	27
Κεφάλαιο 4.....	29
4.1 Πειραματικά Αποτελέσματα.....	29
4.1.1 Ανάλυση Μετρικών Δικτύου.....	29
4.1.2 Αποτελέσματα T-test.....	61
Κεφάλαιο 5.....	63
5.1 Συμπεράσματα.....	63
5.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις.....	65
Βιβλιογραφία.....	66

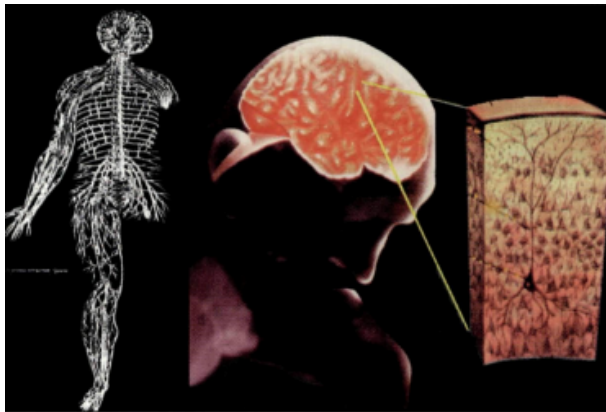
Κεφάλαιο 1

1.1 Η Υπολογιστική Νευροεπιστήμη

Ο ανθρώπινος εγκέφαλος είναι ένα από τα πιο πολύπλοκα όργανα του ανθρώπινου σώματος και αποτελεί το κέντρο της νευρικής δραστηριότητας [1]. Εκεί εκατομμύρια νευρώνες επικοινωνούν μεταξύ τους για τη διαχείριση όλων των λειτουργιών του σώματος, από τις πιο απλές κινήσεις των μυών μέχρι τις πιο πολύπλοκες νοητικές διεργασίες. Στην μελέτη του περιπλοκότερου αυτού οργάνου, στοχεύει η Υπολογιστική Νευροεπιστήμη, συνδυάζοντας την επιστήμη της βιολογίας και της πληροφορικής. Σε αυτόν τον διεπιστημονικό τομέα χρησιμοποιούνται υπολογιστικές μέθοδοι και προσομοιώσεις, μέσω των οποίων επικυρώνονται τα δεδομένα από τις παρατηρήσεις των νευρικών διαδικασιών. Η Υπολογιστική Νευροεπιστήμη εστιάζει τόσο στην περιγραφή των βιολογικών νευρώνων, όσο και στην μεταξύ τους αλληλεπίδραση καθώς και στη φυσιολογία και τη δυναμική τους. Με τον τρόπο αυτό ερμηνεύονται οι γνωστικές ικανότητες και συμπεριφορικά χαρακτηριστικά, βάση των οποίων αναπτύσσονται προηγμένα συστήματα θεραπειών και νέες τεχνολογίες. Τέλος, όλα αυτά συντελούν στη ανάπτυξη διαφόρων τομέων όπως η ρομποτική και η τεχνητή νοημοσύνη [2].

1.2 Ο ανθρώπινος Εγκέφαλος

Ο εγκέφαλος είναι ένα εντυπωσιακό όργανο που έχει βάρος περίπου 1,3 έως 1,4 κιλά και αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα του κεντρικού νευρικού συστήματος, βρίσκεται εντός του εγκεφαλικού κρανίου και περιβάλλεται από τρεις προστατευτικούς υμένες. Είναι το κέντρο ελέγχου όλων των λειτουργιών του ανθρώπινου σώματος και χρησιμεύει τόσο στην αντίληψη των εξωτερικών ερεθισμάτων, όσο και στην επεξεργασία, ερμηνεία και απόκριση σε αυτά. Τα νευρικά κύτταρα του εγκεφάλου δημιουργούν ηλεκτρικούς παλμούς που κυμαίνονται ρυθμικά σε διαφορετικά μοτίβα.



[Εικ. 1] Νευρικό σύστημα διατρέχει ολόκληρο το σώμα (αριστερά). Εγκέφαλος έχει ως δομική και λειτουργική μονάδα τον νευρώνα (μέσον). Πυραμιδικός νευρώνας του φλοιού του εγκεφάλου (δεξιά)
[3]

Το κεντρικό νευρικό σύστημα (ΚΝΣ) αποτελείται από τον εγκέφαλο και το νωτιαίο μυελό. Το περιφερικό νευρικό σύστημα (ΠΝΣ) αποτελείται από τα νωτιαία νεύρα, που εκφύονται από το νωτιαίο μυελό και τα κρανιακά νεύρα, που εκφύονται από τον εγκέφαλο. Ο εγκέφαλος χωρίζεται σε δύο μισά: το δεξιό και το αριστερό ημισφαίριο. Τα ημισφαίρια συνδέονται από μια δέσμη ινών που ονομάζεται μεσολόβιο, η οποία μεταδίδει μηνύματα από τη μια πλευρά στην άλλη.

Τα εγκεφαλικά ημισφαίρια, η παρεγκεφαλίδα και το εγκεφαλικό στέλεχος, διαθέτουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- **Εγκεφαλικά ημισφαίρια:** είναι το μεγαλύτερο μέρος του εγκεφάλου και αποτελείται από το δεξιό και το αριστερό ημισφαίριο. Στα εγκεφαλικά ημισφαίρια επιτελούνται υψηλές λειτουργίες, όπως η ερμηνεία της αφής, της όρασης και της ακοής, καθώς και ο λόγος, η συλλογιστική, τα συναισθήματα, η εκμάθηση και ο λεπτός έλεγχος της κίνησης. Κάθε ημισφαίριο ελέγχει την αντίθετη πλευρά του σώματος, ενώ κάποιες λειτουργίες του εγκεφάλου επιτελούνται αποκλειστικά στο ένα από τα δύο ημισφαίρια. Σε γενικές γραμμές, το αριστερό ημισφαίριο ελέγχει την ομιλία, την κατανόηση, την αριθμητική, τη γραφή και κυριαρχεί στη χρήση των χεριών και της γλώσσας στο 92% περίπου των ανθρώπων. Το δεξιό ημισφαίριο ελέγχει τη δημιουργικότητα και τη χωρική αντίληψη.
- **Η παρεγκεφαλίδα:** βρίσκεται κάτω από τον εγκέφαλο. Η λειτουργία της είναι να συντονίζει τις κινήσεις των μυών, να διατηρεί τη στάση του σώματος και την ισορροπία.
- **Εγκεφαλικό Στέλεχος:** ενεργεί ως κέντρο αναμετάδοσης, που συνδέει τα εγκεφαλικά ημισφαίρια και την παρεγκεφαλίδα με το νωτιαίο μυελό. Είναι υπεύθυνο για πολλές

ακούσιες λειτουργίες όπως η αναπνοή, ο καρδιακός ρυθμός, η θερμοκρασία του σώματος, οι κύκλοι εγρήγορσης και ύπνου, η πέψη, το φτέρνισμα, ο βήχας, ο έμετος και η κατάποση. Επιπλέον, λαμβάνει πληροφορίες μέσω των πέντε αισθήσεών μας τις οποίες επεξεργάζεται με στόχο την αποθήκευσή τους στη μνήμη.



[Εικ.2] Ο κεντρικός ρυθμιστικός ρόλος του νευρικού συστήματος στην προσαρμογή στο περιβάλλον [4]

1.2.1 Οι λοβοί του εγκεφάλου

Τα εγκεφαλικά ημισφαίρια έχουν ξεχωριστές ρωγμές, οι οποίες διαιρούν τον εγκέφαλο σε λοβούς. Κάθε ημισφαίριο έχει 4 λοβούς: μετωπιαίο, κροταφικό, βρεγματικό και ινιακό λοβό. Κάθε λοβός μπορεί να χωριστεί σε περιοχές που εξυπηρετούν πολύ συγκεκριμένες λειτουργίες και δρα συνδυαστικά με τους υπολοίπους λόγω των πολύπλοκων συνδέσεων μεταξύ των λοβών.

Παρακάτω δίνονται κάποιες από τις κύριες ιδιότητες των λοβών όπως έχουν βρεθεί βιβλιογραφικά [4].

Μετωπιαίος λοβός

- Προσωπικότητα, συμπεριφορά, συναισθήματα

- Κρίση, σχεδιασμός, επίλυση προβλημάτων
- Ομιλία: ομιλία και γραφή (περιοχή Broca)
- Κίνηση σώματος (κινητική περιοχή)
- Νοημοσύνη, συγκέντρωση, αυτογνωσία

Βρεγματικός λοβός

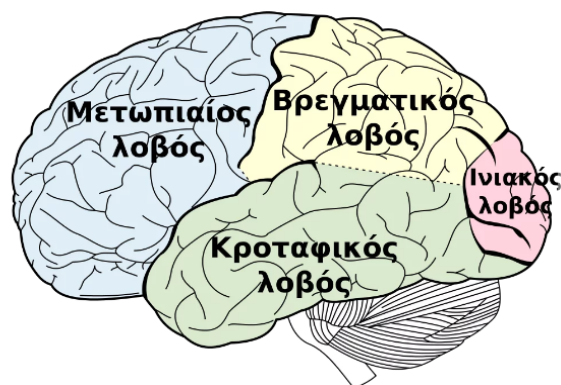
- Ερμηνεύει τη γλώσσα. τις λέξεις
- Αίσθηση αφής, πόνου, θερμοκρασίας (αισθητική περιοχή)
- Ερμηνεύει κινητικά και αισθητικά σήματα, καθώς και σήματα από όραση, ακοή, και μνήμη
- Χωρική και οπτική αντίληψη

Ινιακός λοβός

- Ερμηνεύει την όραση (χρώμα, φως, κίνηση)

Κροταφικός λοβός

- Κατανόηση της γλώσσας (περιοχή Wernicke)
- Μνήμη
- Ακοή
- Ακολουθία και οργάνωση



[Εικ. 3] Τοποθεσία του κάθε λοβού[5]

1.2.2 Η λειτουργία της μνήμης

Η μνήμη είναι μια σύνθετη διαδικασία που περιλαμβάνει τρεις φάσεις: κωδικοποίηση (απόφαση για ποιες πληροφορίες είναι σημαντικές), αποθήκευση και ανάκληση. Διάφορες περιοχές του εγκεφάλου εμπλέκονται σε διαφορετικούς τύπους μνήμης. Ο εγκέφαλος πρέπει να δώσει προσοχή και να επαναλάβει ένα γεγονός, για να μεταφερθεί από τη βραχυπρόθεσμη στη μακροπρόθεσμη μνήμη. Συνεπάγεται ότι:

- Η βραχυπρόθεσμη μνήμη, που ονομάζεται επίσης μνήμη εργασίας, συμβαίνει στον προμετωπιαίο φλοιό. Αποθηκεύει πληροφορίες για περίπου ένα λεπτό και έχει μικρή χωρητικότητα .
- Η μακροπρόθεσμη μνήμη υφίσταται επεξεργασία στον ιππόκαμπο του κροταφικού λοβού και ενεργοποιείται με την συνειδητή μακροπρόθεση απομνημόνευση. Διαθέτει επιπλέον απεριόριστη χωρητικότητα περιεχομένου και διάρκειας. Περιέχει προσωπικές αναμνήσεις καθώς και στοιχεία και αριθμούς.

Η μνήμη δεξιοτήτων υφίσταται επεξεργασία στην παρεγκεφαλίδα, η οποία μεταδίδει πληροφορίες στα βασικά γάγγλια. Αποθηκεύει αυτόματες αναμνήσεις, όπως το παίξιμο ενός μουσικού οργάνου [6].

1.3 Δημιουργικότητα

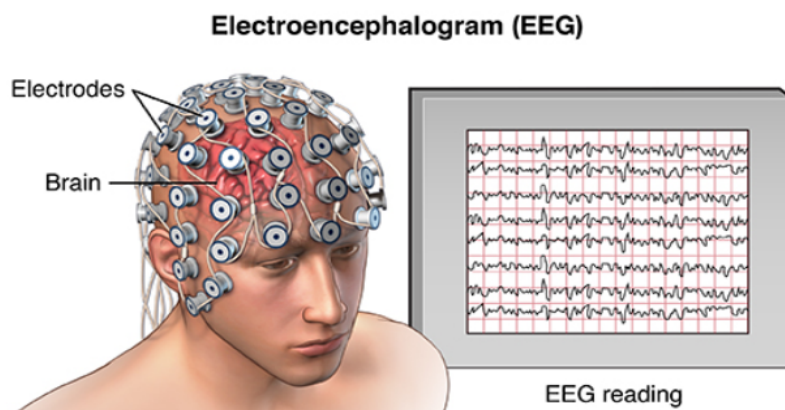
Ένα από τα χαρακτηριστικά που κάνει τον άνθρωπο μοναδικό είναι η δημιουργικότητα του. Ως δημιουργικότητα ορίζεται η ικανότητα του εγκεφάλου να παράγει ιδέες που είναι ταυτόχρονα πρωτότυπες και χρήσιμες. Είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την αποτελεσματική επίλυση προβλημάτων και τη λήψη αποφάσεων, ιδιαίτερα σε συνθήκες αβεβαιότητας και πολυπλοκότητας. Αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της ανθρώπινης εξέλιξης και αποτελεί κινητήριο δύναμη πίσω από την επιστημονική, τεχνολογική και πολιτιστική πρόοδο. Η δημιουργικότητα ως γνωστική λειτουργία δεν είναι μονοσήμαντη, αλλά απαιτεί μία πολύπλευρη νοητική ικανότητα, η οποία είναι αποτέλεσμα πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ συνηθισμένων νοητικών διαδικασιών όπως η μνήμη, η προσοχή, ο εκτελεστικός έλεγχος αλλά και συναισθηματικές διεργασίες. Η δημιουργικότητα συμβαίνει σε διάφορα στάδια και μπορεί να ποικίλει σημαντικά όσον αφορά τον χρόνο. Η πολυπαραγοντική βάση της δημιουργικής σκέψης επισημαίνει ότι και στο επίπεδο της εγκεφαλικής δραστηριότητας δεν μπορεί να υπάρξει αποκλειστικότητα όσον αφορά την υπεύθυνη περιοχή. Αντίθετα, πολλές είναι οι εγκεφαλικές περιοχές οι οποίες ενεργοποιούνται κατά τη διάρκεια της δημιουργικής διαδικασίας και η συνεργασία αυτών είναι που συντελεί στην παραγωγή δημιουργικών ιδεών [7].

1.3.1 Αποκλίνουσα και Συγκλίνουσα Σκέψη

Η Αποκλίνουσα Σκέψη αντιπροσωπεύει ένα είδος σκέψης που χαρακτηρίζεται από τη δημιουργία και την εξερεύνηση πολλών πιθανών λύσεων ή ιδεών για ένα πρόβλημα. Στην ουσία, αυτός ο τύπος σκέψης επιτρέπει την ανάπτυξη πολλαπλών προσεγγίσεων για μια κατάσταση ή μια πρόκληση. Είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται ευρέως στη διαδικασία της δημιουργικότητας, όπου η καινοτομία και η πρωτοτυπία αναδεικνύονται μέσω της εξέτασης ποικίλων επιλογών. Αντίθετα, η Συγκλίνουσα Σκέψη αναφέρεται σε έναν τρόπο σκέψης που επικεντρώνεται στην εύρεση μιας μόνο σωστής λύσης ή ιδέας. Στην ουσία, η συγκλίνουσα σκέψη επιδιώκει τη σύγκλιση των σκέψεων προς μία καθορισμένη κατεύθυνση. Αυτός ο τρόπος σκέψης είναι συχνά χρήσιμος όταν χρειάζεται να επιλυθεί ένα συγκεκριμένο πρόβλημα με μία προσδιορισμένη απάντηση. Η συγκλίνουσα σκέψη εμφανίζεται συχνά σε δομημένες καταστάσεις όπου απαιτείται σαφήνεια και ακρίβεια. Και οι δύο αυτοί τρόποι σκέψης είναι ουσιώδεις για τη διαδικασία της δημιουργικής σκέψης, αν και έχει βρεθεί ότι αυτή στηρίζεται κυρίως στην αποκλίνουσα [7].

1.4 Το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (EEG)

Ο πρώτος που πραγματοποίησε την πρώτη καταγραφή του ηλεκτρικού πεδίου του ανθρώπινου εγκεφάλου ήταν ο Γερμανός ψυχίατρος H.Berger το 1924. Η καταγραφή ονομάστηκε Ηλεκτροεγκεφαλογραφία (EEG) και η μέθοδος αυτή αποτελεί πλέον μια από τις πιο κλασικές τεχνικές καταγραφής της εγκεφαλικής δραστηριότητας, επίσης εντάσσεται στις μη επεμβατικές μεθόδους. Το Ηλεκτροεγκεφαλογράφημα πρόκειται στην ουσία για τη νευροφυσιολογική μέτρηση της ηλεκτρικής δραστηριότητας του εγκεφάλου και βασίζεται στη καταγραφή των διαφορών δυναμικού, τα οποία παρουσιάζονται πάνω στην εξωτερική δερματική επιφάνεια του ανθρώπινου κρανίου και είναι αποτέλεσμα της λειτουργίας του εγκεφάλου. Ακόμη, υπάρχει και το ενδοκρανιακό ηλεκτροεγκεφαλογράφημα, όπου τα ηλεκτρόδια εισάγονται μέσα στο κρανίο και χρησιμοποιείται συνήθως σε κλινικές μελέτες. Το μεγαλύτερο ποσοστό της μετρούμενης ηλεκτρικής δραστηριότητας προέρχεται από τους νευρώνες και μάλιστα είναι αποτέλεσμα των δυναμικών δράσης, των μετασυναπτικών δυναμικών και των χρονικών νευρωνικών αποπολώσεων [8].



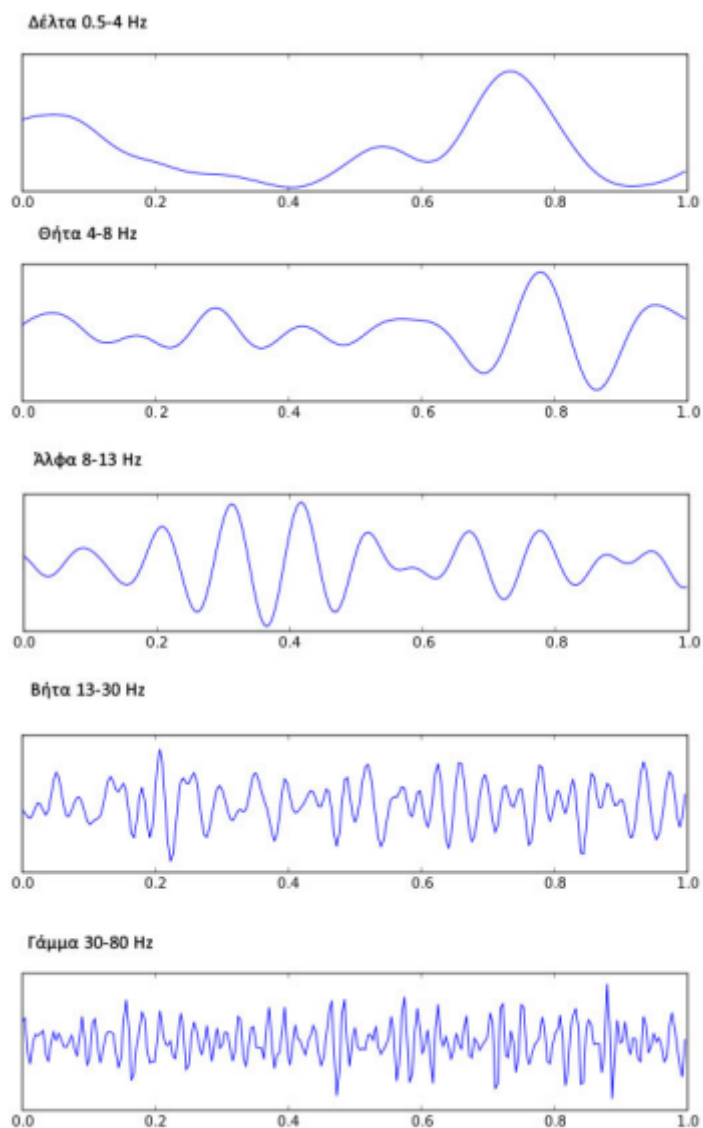
[Εικ. 4] Καταγραφή εγκεφαλικής δραστηριότητας [8]

1.4.1 Εγκεφαλικοί Ρυθμοί

Η ανάλυση του φυσιολογικού ηλεκτροεγκεφαλογράφηματος (HEΓ) βασίζεται στη διάκριση της παρουσίας ή της απουσίας συγκεκριμένων ρυθμών. Τα χαρακτηριστικά αυτών των ρυθμών περιλαμβάνουν τις συχνότητες των αρμονικών που τους συνθέτουν, δηλαδή το φάσμα τους.

- ❖ Ο **δέλτα** ρυθμός, του οποίου η περιοχή συχνοτήτων είναι 0.5-4 Hz. Ο ρυθμός αυτός σχετίζεται με τον ύπνο στο φυσιολογικό άνθρωπο και αποτελεί τον βασικό ρυθμό στα νεογέννητα ως το δεύτερο έτος της ηλικίας τους.
- ❖ Ο **θήτα** ρυθμός, του οποίου η περιοχή συχνοτήτων είναι 4-8 Hz. Ο ρυθμός αυτός στους ενήλικες είναι υπαρκτός σε ορισμένα στάδια του ύπνου και εντοπίζεται στην περιοχή του ιππόκαμπου.
- ❖ Ο **άλφα** ρυθμός, του οποίου η περιοχή συχνοτήτων είναι 8-13 Hz. Ο ρυθμός αυτός ήταν ο πρώτος που μελετήθηκε και συχνά τον συναντάμε με την ονομασία κύματα του Berger. Επίσης, εντοπίζεται στον ινιακό λοβό όταν είμαστε ξύπνιοι ή σε χαλάρωση ή με κλειστά μάτια. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο άνοιγμα των βλεφάρων προκαλείται μείωση του ρυθμού άλφα.
- ❖ Ο **βήτα** ρυθμός, του οποίου η περιοχή συχνοτήτων είναι 13-30 Hz. Ο ρυθμός αυτός εμφανίζεται όταν είμαστε ξύπνιοι και σε φάση πλήρους εγρήγορσης και μαζί με το ρυθμό α αποτελούν έναν από τους δύο βασικούς ρυθμούς που καταγράφονται σε ενήλικες. Μπορεί να χωριστεί περαιτέρω σε τρεις υπορυθμούς: τον χαμηλό β ρυθμό (13-16 Hz) , το β ρυθμό(16.5- 20 Hz) και τον υψηλό β ρυθμό(20.5- 30 Hz).
- ❖ Ο **γάμμα** ρυθμός, του οποίου η περιοχή συχνοτήτων είναι 30-80 Hz. Ο ρυθμός αυτός συνδέεται με μηχανισμούς καταστολής είτε στην είσοδο σε φάση χαλάρωσης είτε σε συνδυασμό με τον βήτα ρυθμό σε φάσεις αυξημένης προσοχής – εγρήγορσης.

Ο διαχωρισμός αυτός των ρυθμών είναι συμβατικός και εμφανίζει μερικές ασάφειες ως προς τα συχνοτικά πλαίσια στα οποία βρίσκονται τα εκάστοτε σήματα ανά τη βιβλιογραφία. Επιπλέον, δεν υπάρχει μονοσήμαντη σχέση ανάμεσα στους εγκεφαλικούς ρυθμούς και τις εγκεφαλικές περιοχές στις οποίες αυτοί εμφανίζονται. Διαφορετικές περιοχές μπορούν να παράγουν τον ίδιο εγκεφαλικό ρυθμό και πολλοί εγκεφαλικοί ρυθμοί μπορούν να είναι ταυτόχρονα παρόντες σε μία περιοχή του εγκεφάλου [8].



[Εικ.] Κυριότεροι ρυθμοί εγκεφαλογραφήματος [11]

Παρακάτω παρουσιάζεται η περιοχή συχνοτήτων και δίνεται και το πλάτος των κυματομορφών.

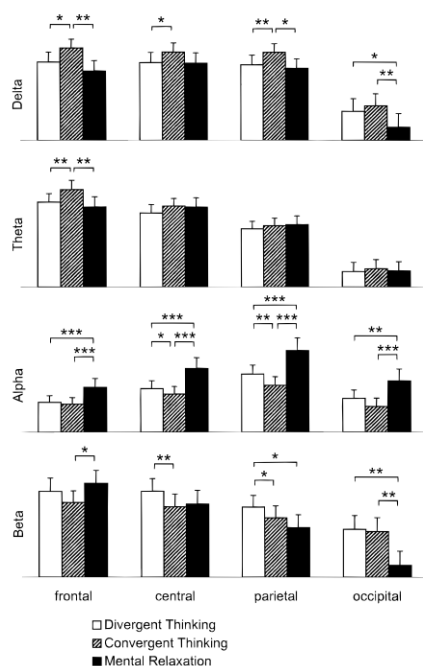
Ρυθμός	Περιοχή Συχνοτήτων (Hz)	Πλάτος (μV)
Δέλτα (δ)	0.5 – 3.5	έως 100 – 200
Θήτα (θ)	4 – 7.5	< 30
Άλφα (α)	8 – 12	30 – 50
Αργός Βήτα (β)	13 – 19	< 20
Ταχύς Βήτα (β)	20 – 30	< 20

[Εικ 6] Περιοχή συχνοτήτων και πλάτος κυματομορφών [8]

1.4.1.1 Ρυθμοί στην Αποκλίνουσα και Συγκλίνουσα Σκέψη

Βιβλιογραφικά φαίνεται να έχουν γίνει πολλές έρευνες για την αποτύπωση των αλλαγών που καταγράφονται στο εγκεφαλογράφημα κατά τη διάρκεια πειραματικών διαδικασιών για την εξέταση της εγκεφαλικής λειτουργίας στην αποκλίνουσα και στην συγκλίνουσα σκέψη [12]. Πιο συγκεκριμένα, παρατίθενται κάποια συγκεντρωτικά στοιχεία για την κάθε μπάντα συχνοτήτων και τις διαφοροποιήσεις τους. Στη βιβλιογραφία εντοπίζονται και αντιδιαμέτρου αντίθετα αποτελέσματα, ενώ σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις γίνεται και τοπογραφική ανάλυση, για να αναδειχθούν οι πιο συχνότερα ενεργοποιούμενες περιοχές.

Εξετάζοντας έτσι κάποια πειράματα δημιουργικότητας, βρέθηκε ότι οι συχνότητες *delta* παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική διαφορά στο μετωπιαίο και κεντρικό σημείο του κρανίου, καθώς επίσης και στο βρεγματικό λοβό, σε αντίθεση με τον ινιακό ο οποίος δεν εμφανίζει διαφορά η μεταξύ των δειγμάτων. Όσον αφορά τα *theta* δεν φάνηκε κάποια στατιστικά σημαντική διαφορά εκτός της περιοχής του μετωπιαίου λοβού. Στην συνέχεια στις *alpha* συχνότητες στατιστικά σημαντικής διαφοράς, συναντάται στο κεντρικό και βρεγματικό λοβό σε αντίθεση με τις *beta* συχνότητες στις οποίες συμβαίνει το αντίθετο. Τέλος και στις δύο περιπτώσεις συχνοτήτων δεν παρατηρείται διαφοροποίηση στο μετωπιαίο και ινιακό λοβό [13].



[Εικ 7] Πειράματα Συγκλίνουσας και Αποκλίνουσας Σκέψης
[12]

Παράλληλα, αναφέρονται αντιφατικά αποτελέσματα όσον αφορά τη *gamma* ζώνη συχνοτήτων. Ορισμένες μελέτες αναφέρουν ότι δεν διαδραματίζουν κανένα ρόλο στη διαδικασία της δημιουργίας [13] ενώ άλλες έχουν αποδείξει το αντίθετο [14]. Επομένως, προκύπτει ότι οι διαφορές ήταν σημαντικά μεγαλύτερες στην κεντρική σε σύγκριση με τη κροταφική περιοχή και στην βρεγματική σε σύγκριση με την ινιακή. Στην συνέχεια όσον αφορά τις *alpha* συχνότητες παρατηρείται στατιστικά σημαντική διαφορά στην κροταφική,

βρεγματική και κεντρική περιοχή παρά στα σημεία του μετωπιαίου και ινιακού λοβού. Τέλος, για τις *beta* μπάντες συχνοτήτων ισχύει ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις του πειράματος οι οποίες βρίσκονται κυρίως στον ινιακό λοβό [15].

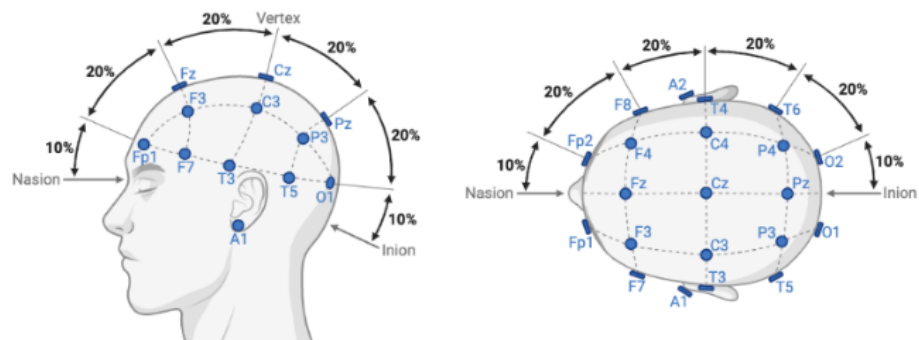
1.4.2 Λειτουργία του Εγκεφαλογράφηματος

Το ηλεκτροεγκεφαλογράφημα (ΗΕΓ) βασίζεται στην καταγραφή των διαφορών δυναμικών μεταξύ δύο σημείων της εξωτερικής επιφάνειας του εγκεφάλου ως αποτέλεσμα της εγκεφαλικής δραστηριότητας. Τα μετρούμενα ηλεκτρικά σήματα είναι τιμές από 1 μV έως 100 μV . Γενικότερα, απαιτείται να υπάρχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ενίσχυση των υπό εξέταση σημάτων καθώς και πυκνότερη κάλυψη του κεφαλιού με ηλεκτρόδια. Κατ' αυτόν τον τρόπο αναμένεται να δημιουργηθεί μία ουσιαστική απεικόνιση της εγκεφαλικής δραστηριότητας με σκοπό να μελετηθεί.

Το πρώτο στάδιο στην εξαγωγή των σημάτων του ΗΕΓ αποτελούν τα ηλεκτρόδια, δηλαδή οι αισθητήρες του συστήματος, οι οποίοι μετατρέπουν το ρεύμα ιόντων από το ανθρώπινο σώμα σε ρεύμα ηλεκτρονίων μέσα στα καλώδια, που με τη σειρά του οδηγείται στα επόμενα στάδια επεξεργασίας. Η επαφή τους με το δέρμα γίνεται μέσω μία κολλώδους ουσίας ή μέσω ενός μικρού δακτυλιδίου, που από τη μία μεριά προσκολλάται στο δέρμα και από την άλλη στο κυρίως ηλεκτρόδιο. Στα σημεία που τοποθετούνται τα ηλεκτρόδια, το δέρμα πρέπει να καθαρίζεται με οινόπνευμα για να πετύχουμε χαμηλή αντίσταση, κάτω των 5 k Ω . Τα απαιτούμενα υλικά των ηλεκτροδίων φάνηκαν ότι είναι ο άργυρος (Ag) και ο χλωριούχος άργυρος (AgCl) σε συνδυασμό με ηλεκτρολύτη που εμπεριέχει κυρίως ανιόντα χλωρίου (Cl^-).

Για να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών καταγραφών ηλεκτροεγκεφαλογραφήματος από ένα άτομο σε ένα άλλο και σε διαφορετικό εργαστήριο, έχουν καθοριστεί ορισμένα πρότυπα για τον καθορισμό της θέσης των ηλεκτροδίων στο κρανίο. Το πιο διαδεδομένο πρότυπο ονομάζεται Διεθνές Σύστημα 10-20. Ο όρος αυτός οφείλεται στην επιλογή του 20% που αντιστοιχεί στην απόσταση μεταξύ δύο ηλεκτροδίων και του 10% που αντιστοιχεί στην απόσταση μεταξύ του αυτιού και του κοντινότερου ηλεκτροδίου. Με αυτόν τον τρόπο τα ηλεκτρόδια προσαρμόζονται ανάλογα με τις διαστάσεις του κρανίου. Τα γράμματα Fp, F, C, T, O και A αντιστοιχούν στις περιοχές Πρόσθιος λοβός (Frontopolar), Μετωπικός (Frontal), Κεντρικός (Central), Κροταφικό τμήμα (Temporal), Ινιακό (Occipital), Α ή αλλιώς M (Mastoid), για την μαστοειδή υπόφυση, πίσω από τα αυτιά. Τα ηλεκτρόδια με περιττό αριθμό τοποθετούνται στο αριστερό ημισφαίριο, με άρτιο στο δεξί και με δείκτη z τοποθετούνται στην κεντρική γραμμή [8].

EEG Electrode Positioning (10/20 System)



[Εικ.8] Τυποποιημένες απαγωγές στην επιφάνεια του κεφαλιού με το Σύστημα 10-20.
[8]

Κεφάλαιο 2

2.1 Εγκεφαλικά Δίκτυα και Συνδεσιμότητα

Ο ανθρώπινος εγκέφαλος λόγω της πολυπλοκότητας θεωρείται ότι οργανώνεται σε σύνθετα δίκτυα, τα οποία αφορούν ενεργές περιοχές και τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Έτσι, προσομοιάζεται η αποτελεσματική μετάδοση πληροφοριών και με αυτό τον τρόπο μελετάται ο εγκέφαλος [16].

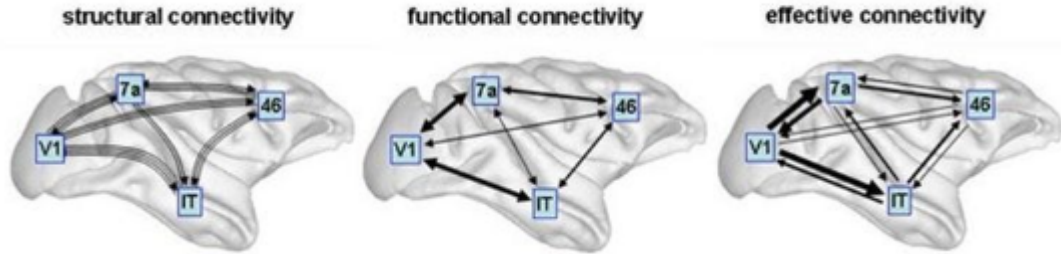
Η αναπαράσταση του εγκεφαλικού δικτύου μπορεί να περιγραφεί από γράφους, όπου δίνονται από τη σχέση:

$$G = (V, E)$$

με V θεωρούμε το σύνολο των κορυφών-κόμβων και E το σύνολο των ακμών. Δεδομένου ότι οι κόμβοι και οι ακμές αποτελούν τα βασικά στοιχεία κάθε εγκεφαλικού δικτύου, οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν διαφορετικούς, λειτουργικά ομοιόμορφους νευρώνες ή ακόμα και ολόκληρες περιοχές του εγκεφάλου. Η ομαδοποίηση αυτή αποσκοπεί στην εκτέλεση της ίδιας εγκεφαλικής λειτουργίας. Αντίστοιχα, οι ακμές αντιστοιχούν στις συνάψεις και αντιπροσωπεύουν τη συνδεσιμότητα μεταξύ των εγκεφαλικών δικτύων.

Υπάρχει μία βασική διάκριση της συνδεσιμότητας ενός εγκεφαλικού δικτύου όσον αφορά την **δομική**, την **λειτουργική** και την **αποτελεσματική** συνδεσιμότητα. Αρχικά, με τον όρο δομική συνδεσιμότητα αναφερόμαστε στην πραγματική, τοπολογική συσχέτιση ανάμεσα σε διαφορετικά νευρωνικά στοιχεία του εγκεφάλου. Μπορεί να αναπαρασταθεί από έναν κατευθυνόμενο γράφο ο οποίος περιέχει βάρη τα οποία αντιπροσωπεύουν την ένταση της σύνδεσης ή από έναν δυαδικό ο οποίος αντιπροσωπεύει την ύπαρξη της σύνδεσης ή όχι. Αντίστοιχα, με τον όρο λειτουργική συνδεσιμότητα αναφερόμαστε στη στατιστική εξάρτηση ανάμεσα στα νευρωνικά στοιχεία του εγκεφάλου, ανεξάρτητα από το αν αυτά συνδέονται ανατομικά ή όχι. Με άλλα λόγια, η λειτουργική συνδεσιμότητα εκφράζει το βαθμό στον οποίο η ενεργοποίηση και οι λειτουργίες μιας εγκεφαλικής περιοχής εξαρτώνται από τις λειτουργίες μιας άλλης περιοχής. Επειδή οι στατιστικές συσχετίσεις ανάμεσα στους νευρώνες αλλάζουν με μεγάλη συχνότητα, η λειτουργική συνδεσιμότητα, σε αντίθεση με τη δομική, εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το χρόνο. Για την αναπαράσταση της σχηματίζεται ένας συμμετρικός πίνακας, καθένα από τα στοιχεία του οποίου αντιπροσωπεύει την στατιστική εξάρτηση ή την εγγύτητα μεταξύ δύο νευρικών στοιχείων (νευρώνες ή σημεία καταγραφής). Επίσης, μπορεί να εφαρμοστεί μία τιμή κατωφλίου σε τέτοιους είδους πίνακες, όπου εκεί προκύπτει ένας δυαδικός μη κατευθυνόμενος γράφος. Τέλος, η αποτελεσματική συνδεσιμότητα μπορεί να θεωρηθεί ως η ένωση της δομικής και της λειτουργικής

συνδεσιμότητας καθώς περιγράφει δίκτυα κατευθυνόμενων επιπτώσεων ενός νευρικού στοιχείου πάνω στο άλλο [17].



[Εικ. 9] Οι γράφοι που προκύπτουν ανάλογα την εγκεφαλική συνδεσιμότητα [18]

2.1.1 Μετρική καθυστέρηση φάσης (PLI)

Με διαθέσιμο ένα σύνολο σημάτων από διαφορετικές περιοχές του εγκεφάλου, απομένει η εφαρμογή ενός μέτρου σε κάθε πιθανό ζευγάρι από αυτά για να εκτιμηθεί η ενδεχόμενη στατιστική τους σχέση και κατ' επέκταση η στατιστική σχέση των δύο εγκεφαλικών περιοχών (λειτουργική συνδεσιμότητα). Ένα τέτοιο μέτρο αποτελεί η μετρική καθυστέρησης φάσης (Phase Lag Index) στην οποία υπάρχει ασυμμετρία στην κατανομή των διαφορών φάσεων δύο σημάτων. Με αυτόν τον τρόπο οι διαφορές φάσης, οι οποίες είναι γύρω από το $0 \bmod \pi$ απορρίπτονται. Η μετρική PLI υπολογίζεται από χρονοσειρές στις οποίες υπάρχουν διαφορές φάσης $\Delta\phi(t_k), k = 1 \dots N$ με τον παρακάτω τρόπο:

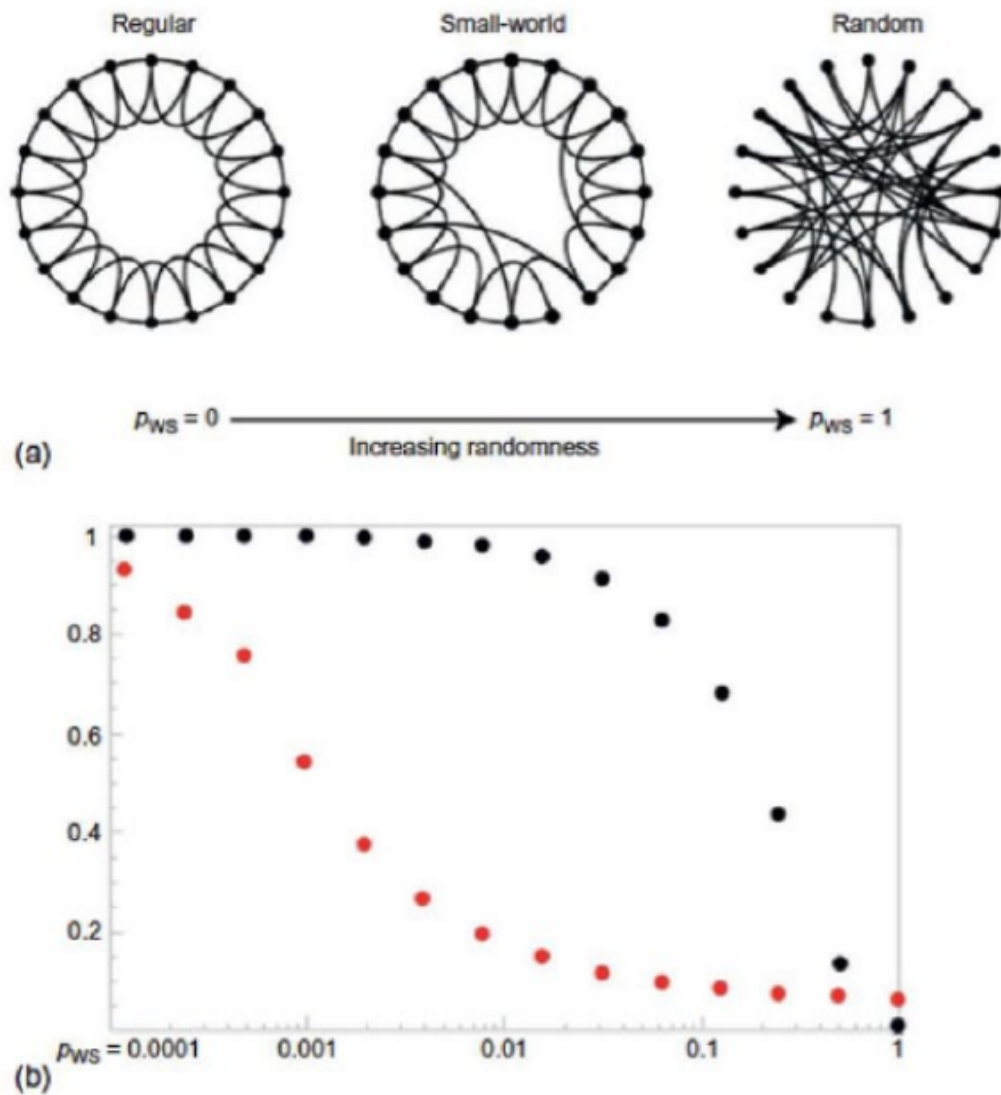
$$PLI = |\langle \text{sign}[\sin(\Delta\phi(tk))] \rangle|$$

Οι τιμές της μετρικής κυμαίνονται από 0 έως 1. Όταν η τιμή είναι ίση με 0 τότε ισχύει ότι τα σήματα δεν είναι συγχρονισμένα ή υπάρχει διαφορά φάσης $0 \bmod \pi$. Αντίστοιχα, αν η τιμή είναι ίση με 1 τότε τα σήματα είναι πλήρως συγχρονισμένα, των οποίων η διαφορά φάσης έχει τιμή όχι ίση με $0 \bmod \pi$ [19]. Χάριν πληρότητας, να σημειωθεί πως για να ληφθεί η ακολουθία των φάσεων για κάθε σήμα πρέπει πρώτα να φιλτραριστεί και να υπολογιστεί ο μετασχηματισμός Hilbert σε αυτό.

2.2 Μετρικές Θεωρίας Γράφων

Οι μετρικές εκτίμησης, αξιολογούν την συνδεσιμότητα μέσα από χρονοσειρές που αντικατοπτρίζουν την εγκεφαλική δραστηριότητα, όπως το εγκεφαλογράφημα. Οι μετρικές εκτίμησης μπορούν να διαχωριστούν σε γραμμικές, μη γραμμικές διμεταβλητές και πολυμεταβλητές, ενώ μπορούν επίσης να διακριθούν με βάση τις ενδείξεις που παρουσιάζουν κατευθυνόμενη συνδεσιμότητα. Βιβλιογραφικά φαίνεται ότι η χρήση μη γραμμικών εκτιμητών δεν συνιστάται, ειδικά σε περιπτώσεις που προέρχονται από εγκεφαλογραφήματα, καθώς αποτελεί εξαίρεση η πιθανότητα ύπαρξης μη γραμμικών σημάτων σε αυτά. Αντίστοιχα, οι γραμμικές μετρικές όπως οι κατευθυνόμενη συνάρτηση μεταφοράς έχει φανεί ότι αποδίδουν καλύτερα σε περιπτώσεις μη γραμμικών σημάτων. Γενικότερα, υπάρχει μία πληθώρα μετρικών που μπορούν να αποδώσουν διάφορα χαρακτηριστικά των γράφων αναλόγως το σκοπό [22].

Παρακάτω μελετούνται τα Τυχαία Δίκτυα (Random Network). Ένα τέτοιο δίκτυο ξεκινάει να κατασκευάζεται με ένα σύνολο αποσυνδεδεμένων κόμβων και στην συνέχεια με τυχαίο τρόπο και με ομοιόμορφη κατανομή συνδέονται οι κόμβοι. Στους κόμβους του τυχαίου δικτύου αποδίδονται βαθμοί σχεδόν ομοιόμορφοι, επομένως και η κατανομή των βαθμών ακολουθεί μία κανονική κατανομή, της οποίας χαρακτηριστικό μέγεθος είναι ο μέσος βαθμός. Τα τυχαία δίκτυα χαρακτηρίζονται από μικρό χαρακτηριστικό μήκος μονοπατιού αλλά και χαμηλό επίπεδο ομαδοποίησης.



[Εικ. 10] Το μοντέλο μικρού κόσμου Watts-Strogatz. Ξεκινώντας από ένα πλέγμα δακτυλίου με κυκλικές οριακές συνθήκες (άνω αριστερά) οι συνδέσεις τυλίγονται τυχαία με πιθανότητα επανασύνδεσης p . Για $p = 0$, το δίκτυο είναι απόλυτα κανονικό, για το $p = 1$ το δίκτυο είναι εντελώς τυχαίο. [23]

Επομένως, μερικά από τα χαρακτηριστικά γράφων που απαιτούνται για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας δίνονται παρακάτω:

➤ **Μήκος Χαρακτηριστικού Μονοπατιού (Characteristic Path Length)**

Το Χαρακτηριστικό Μήκος Μονοπατιού συνήθως υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των ελάχιστων αποστάσεων μεταξύ κόμβων στο γράφημα. Ένα μικρό χαρακτηριστικό μήκος υποδηλώνει ότι υπάρχουν συνήθως σύντομα μονοπάτια που συνδέουν κάθε ζεύγος κόμβων. Ωστόσο, η απόλυτη τιμή του μήκους του μονοπατιού μπορεί να ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος και την πυκνότητα του γραφήματος, παρέχοντας περιορισμένη πληροφορία. Για τον λόγο αυτό, το χαρακτηριστικό μήκος πρέπει να συγκρίνεται με τα μήκη τυχαίων υποδικτύων του γράφου. Το μέγεθος αυτό επηρεάζεται σημαντικά από την ύπαρξη μικρού αριθμού αποσυνδεδεμένων ή απομονωμένων κόμβων.

Για τον ορισμό θεωρούμε ότι i είναι το σύνολο των συνδεδεμένων ζευγαριών και L_i είναι η ελάχιστη διαδρομή που ενώνει το ζεύγος κόμβων i , οπότε και προκύπτει ο τύπος:

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i$$

Επίσης για τυχαίους γράφους έχουμε:

$$L_{random} \simeq \frac{\ln(n)}{\ln(k)}, n \gg k \gg \ln(n) \gg 1$$

Τέλος, έχουμε τη μετρική L_{norm} η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$L_{norm} = \frac{L(n)}{L_{norm}(n)}$$

➤ Συντελεστής Ομαδοποίησης (Cluster Coefficient)

Ο συντελεστής ομαδοποίησης ενός κόμβου μετρά το πόσο συνδεδεμένοι είναι μεταξύ τους οι γείτονες του κόμβου. Όταν οι γείτονες σχηματίζουν ένα πυκνό σύμπλεγμα γύρω από τον κόμβο, μιλάμε για υψηλό συντελεστή ομαδοποίησης. Αντίστροφα, όταν οι γείτονες είναι λιγότερο συνδεδεμένοι, ο συντελεστής ομαδοποίησης είναι χαμηλότερος. Ο μέσος όρος των συντελεστών ομαδοποίησης για όλους τους κόμβους σε ένα γράφο, αποτελεί τον συντελεστή ομαδοποίησης του γράφου. Αυτός ο συντελεστής επηρεάζεται από κόμβους με χαμηλό βαθμό σύνδεσης. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιείται η έννοια της μεταβατικότητας, που είναι ουσιαστικά μια προσαρμογή του συντελεστή συγκέντρωσης. Η μεταβατικότητα παρέχει μια κανονικοποιημένη προσέγγιση του πόσο συνδεδεμένοι είναι οι γείτονες ενός κόμβου, βοηθώντας στην αντιμετώπιση των προβλημάτων που προκύπτουν από κόμβους με χαμηλό βαθμό σύνδεσης [24].

Όσον αφορά τον ορισμό του έχουμε, ότι έστω ένας κόμβος e έχει k_e γείτονες, όλες οι δυνατές συνδέσεις ανάμεσα στους k_e γείτονες είναι $\frac{k_e(k_e-1)}{2}$, άρα πρόκειται για γείτονες που συνιστούν ένα πλήρη γράφο. Επομένως, αν συμβολίσουμε C_e το ποσοστό των δυνατών συνδέσεων, ο συντελεστής ομαδοποίησης ορίζεται ως το μέσο:

$$C = \frac{1}{N} \sum_e C_e$$

Επίσης για τυχαίους γράφους έχουμε:

$$C_{random} \simeq \frac{k}{n}, n \gg k \gg \ln(n) \gg 1$$

Τέλος, έχουμε τη μετρική C_{norm} η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$C_{norm} = \frac{C(n)}{C_{norm}(n)}$$

➤ **Συνολική Αποτελεσματικότητα (Global Efficiency)**

Η συνολική απόδοση αριθμητικά ορίζεται ως ο μέσος όρος του αντιστρόφου του πίνακα αποστάσεων ανάμεσα στους κόμβους του γράφου, κανονικοποιημένος ως προς E_{max} . Ένα πλήρως συνδεδεμένο δίκτυο έχει τη μέγιστη απόδοση αφού όλες οι αποστάσεις είναι ίσες με ένα. Όλα τα ζεύγη κόμβων συνδέονται με ένα άκρο, ενώ ένα πλήρως αποσυνδεδεμένο δίκτυο έχει ελάχιστη απόδοση, αφού όλες οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων είναι άπειρες [17].

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d(i,j)}$$

Στην παραπάνω σχέση έχουμε N τον αριθμό των κόμβων με τους οποίους ασχολούμαστε και d η ελάχιστη απόσταση ανάμεσα στους κόμβους (i, j) . Οπότε σαν συνολική αποτελεσματικότητα έχουμε:

$$E_{glob} = \frac{E}{E_{max}}$$

➤ **“Τα δίκτυα μικρόκοσμοι” (Small-Worldness)**

Τα δίκτυα μικρόκοσμοι ορίζονται ως δίκτυα τα οποία έχουν μεγάλο συντελεστή ομαδοποίησης σε σχέση με τα τυχαία δίκτυα, διατηρώντας παράλληλα μεγαλύτερο ή ίσο χαρακτηριστικό μήκος μονοπατιού [25]. Για την ποσοτικοποίηση αυτής της μεταβλητής έχουμε:

$$SW = \frac{C/C_{rand}}{L/L_{rand}}$$

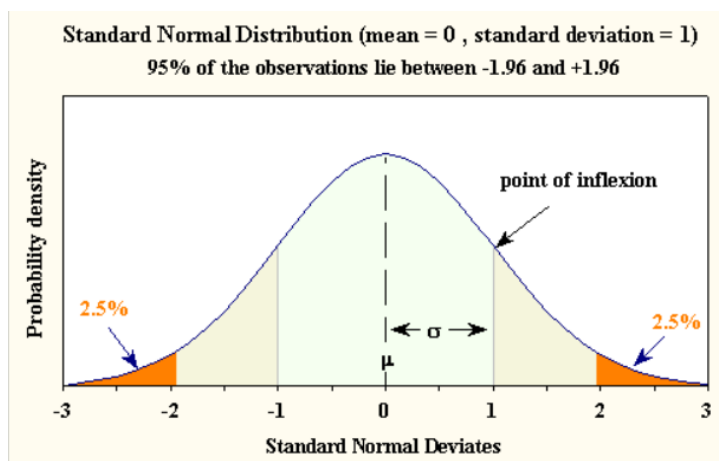
2.3 Τοπολογική Ανάλυση Δικτύων

Για την τοπολογική ανάλυση δικτύων κάνουμε χρήση της έννοιας “*sparsity*”, αναφέρεται στο φαινόμενο όπου μόνο λίγοι κόμβοι ή ακμές έχουν μη μηδενική συμβολή σε ένα γράφο. Σε πολλούς γράφους, η πλειοψηφία των στοιχείων είναι μηδενικά, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση της αποθήκευσης και της απόδοσης σε διάφορες εφαρμογές [26].

Επομένως στη παρούσα μελέτη, προτού γίνει η ανάλυση του δικτύου, εφαρμόστηκε κατώφλι σε κάθε πίνακα δικτύου για τη διατήρηση ενός σταθερού επιπέδου *sparsity*. Αυτό διασφαλίζει το ισοδύναμο κόστος σύνδεσης για καθένα από τα άτομα της μελέτης, καθώς με τον τρόπο αυτό αντιπροσωπεύεται ο λόγος των πραγματικών συνδέσεων προς όλες τις δυνατές συνδέσεις στο δίκτυο. Επιλέχθηκε τιμή από 10% έως 30% με βήμα 0.5%, για να δώσει ένα φυσικό νόημα στον υπολογισμό των μετρικών των εγκεφαλικών δικτύων που αναφέρθηκαν και προηγουμένως.

2.4 Στατιστικός Έλεγχος

Η στατιστική αναλύει τις πιθανότητες. Όταν βγάζουμε συγκριτικά στατιστικά συμπεράσματα δύο ομάδων, δεν βασιζόμαστε σε απόλυτα πρότυπα, αλλά κρίνεται η πιθανότητα ενός γεγονότος. Για παράδειγμα, σε ένα κλινικό τεστ νόσου, αν τα αποτελέσματα είναι ψηλότερα ή χαμηλότερα από το φυσιολογικό, οι γιατροί ενδέχεται να καταλήξουν στο συμπέρασμα ότι ο ασθενής είναι θετικός για τη νόσο, παρότι αυτό δεν αποκλείει την πιθανότητα ότι μπορεί να μην την έχει πραγματικά. Αυτό οφείλεται στο ότι η αξιοπιστία του τεστ ενισχύεται, καθώς οι ανώμαλες τιμές είναι στατιστικά σπάνιες σε φυσιολογικά άτομα, καθιστώντας το συμπέρασμα ότι ο ασθενής πάσχει από τη νόσο πιο αξιόπιστο, αν και υπόκειται σε ελάχιστο ποσοστό παραπλανητικών αποτελεσμάτων. Για να θεωρηθεί κάτι στατιστικά σπάνιο, πρέπει να γνωρίζουμε τα αποτελέσματα του τεστ και την κατανομή πιθανοτήτων τους. Τα κριτήρια για τους κλινικούς δείκτες βασίζονται σε δεδομένα από ολόκληρο τον πληθυσμό ή ένα μεγάλο δείγμα ανθρώπων. Γενικότερα, σε ένα στατιστικό έλεγχο χρησιμοποιούμε δύο συγκεκριμένες διατυπώσεις στατιστικών υποθέσεων. Πιο συγκεκριμένα η στατιστική ανάλυση, χρησιμοποιεί υποθέσεις για τη δοκιμή διαφόρων προσεγγίσεων. Ο όρος “*alternative hypothesis*” (εναλλακτική υπόθεση) αναφέρεται σε μια υπόθεση όπου υποστηρίζεται η ύπαρξη μιας σημαντικής διαφοράς, ενώ ο όρος “*null hypothesis*” (μηδενική υπόθεση) αναφέρεται σε μια υπόθεση όπου δεν υπάρχει σημαντική διαφορά. Η κρίσιμη τιμή “ α ” είναι ο παράγοντας που καθορίζει την αποδοχή ή απόρριψη της μηδενικής απόφασης. Στα πλαίσια των στατιστικών δοκιμών, η σημαντικότητα (*significance level*) καθορίζει το ποσοστό πιθανότητας για το οποίο απορρίπτουμε την μηδενική υπόθεση. Έτσι, αν το επίπεδο σημαντικότητας “ α ” είναι, για παράδειγμα, 0.05, τότε απορρίπτουμε την μηδενική υπόθεση αν η πιθανότητα λάθους είναι μικρότερη από 5%. Η επιλογή του επιπέδου σημαντικότητας εξαρτάται από τις απαιτήσεις και το πλαίσιο της έρευνας. Για να υπάρξει μία απόφαση ελέγχου με σκοπό την αποδοχή ή την απόρριψη ορίζεται ένα επίπεδο εμπιστοσύνης με τιμή ίση με “ $1-\alpha$ ” [27].



[Εικ. 11] Διάγραμμα κανονικής κατανομής για την περιοχή απόρριψης και επίπεδο εμπιστοσύνης [28]

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχουν δύο είδη στατιστικών ελέγχων. Ο χαρακτηρισμός του γίνεται ανάλογα με το αν η παράμετρος ακολουθεί κάποια γνωστή κατανομή ή όχι. Αναλυτικότερα, αν υπάρχει αντιστοιχία με γνωστή κατανομή ονομάζεται παραμετρικός ενώ αν δεν αντιστοιχεί σε κάποια γνωστή ονομάζεται μη παραμετρικός [27].

Τέλος, η τιμή της πιθανότητας ορίζεται ως *p-value*, οπότε για

- $p - value < \alpha$: η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται
- $p - value \geq \alpha$: η μηδενική υπόθεση γίνεται δεκτή

2.4.1 T-test

Το *t-test* αποτελεί μία από τις πολλές μεθόδους ελέγχου υποθέσεων με κριτήριο τη μέση τιμή ενός δείγματος, προερχόμενο από έναν κατανεμημένο πληθυσμό με άγνωστη τυπική απόκλιση. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ελέγχονται οι μηδενικές υποθέσεις, των οποίων τα δεδομένα προέρχονται από ανεξάρτητα δείγματα με κανονικές κατανομές, που έχουν την ίδια μέση τιμή αλλά άγνωστες διασπορές. Ενώ αντίστοιχα, στις εναλλακτικές υποθέσεις τα δεδομένα προέρχονται από ανεξάρτητα δείγματα με κανονικές κατανομές, που έχουν την ίδια μέση τιμή [27].

Υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι *t-test*, ανάλογα των τύπο των δειγμάτων. Συγκεκριμένα, έχουμε:

- Το *Paired t-test* στο οποίο συγκρίνονται μέσοι όροι από την ίδια ομάδα απλά διαφορετικές χρονικές στιγμές.
- Το *Independent t-test* στο οποίο συγκρίνει τους μέσους όρους από δύο διαφορετικές ομάδες.
- Το *t-test* ενός δείγματος στο οποίο ελέγχεται η μέση τιμή μιας ομάδας έναντι ενός γνωστού μέσου όρου.

Κεφάλαιο 3

3.1 Συμμετέχοντες

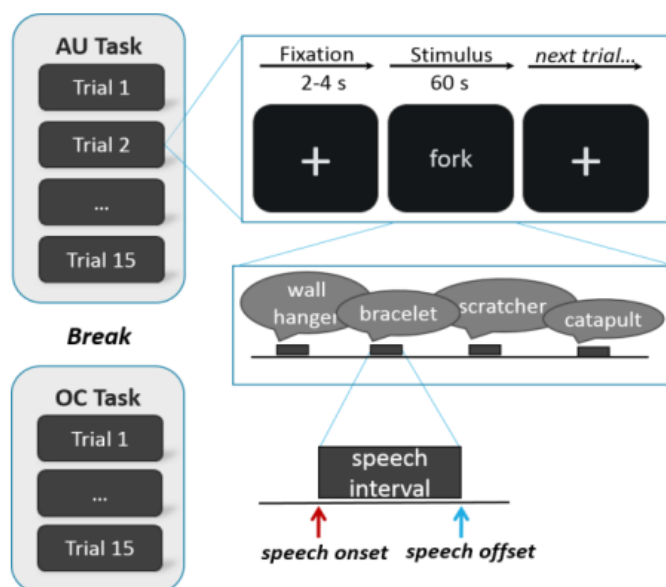
Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας χρειάστηκαν δεδομένα από 30 φοιτητές, οι οποίοι επιλέχθηκαν από το Εθνικό Πανεπιστήμιο της Σιγκαπούρης για τη συμμετοχή τους σε αυτήν τη μελέτη. Αρχικά όλοι οι συμμετέχοντες είχαν τα παρακάτω χαρακτηριστικά δηλαδή ήταν φυσικοί ομιλητές της αγγλικής γλώσσας, δεξιόχειρες, με κανονική όραση ή όραση που αγγίζει τα κανονικά επίπεδα και δεν αναφέρεται στο ιστορικό τους κατανάλωσης φαρμάκων, η οποία μπορεί να επηρεάζει το κεντρικό νευρικό σύστημα, ή να προκαλέσει ψυχικές ή νευρολογικές παθήσεις. Παράλληλα, όλοι παρείχαν γραπτή την ενημέρωση συγκατάθεσης τους και έλαβαν αποζημίωση για τον χρόνο τους. Τα δεδομένα ενός συμμετέχοντα αποκλείστηκαν μετά την προ-επεξεργασία των δεδομένων λόγω υπερβολικών artifacts, με αποτέλεσμα ένα τελικό δείγμα 29 συμμετεχόντων (14 γυναίκες και 13 άνδρες, εύρος ηλικιών: 20-29, μέση ηλικία: 23.11, τυπική απόκλιση: ± 2.06). Η μελέτη εγκρίθηκε από την επιτροπή έρευνας και ηθικής του Εθνικού Πανεπιστημίου της Σιγκαπούρης.

3.2 Πειραματική Διαδικασία

Το πείραμα περιελάμβανε δύο συνθήκες που διαμορφώνουν τη δημιουργικότητα και εφαρμόστηκαν με εναλλαγή της σειράς τους. Συγκεκριμένα, η συγκλίνουσα σκέψη υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη συνθήκη χαρακτηριστικών αντικειμένων (OC), ενώ η συνθήκη Εναλλακτικών Χρήσεων (AU) εισήχθη για να προωθήσει την αποκλίνουσα σκέψη. Συνεπώς, η αποκλίνουσα σκέψη απεικονίζεται από την ικανότητα ενός ατόμου να παράγει πρωτότυπες απαντήσεις που σχετίζονται με ένα πρόβλημα χωρίς σαφή περιγραφή. Από την άλλη πλευρά, η συγκλίνουσα της σκέψης επικεντρώνεται σε ένα καλά καθορισμένο πρόβλημα που παράγει στη συνέχεια περισσότερες συμβατικές απαντήσεις. Και οι δύο συνθήκες αποτελούνταν από 15 δοκιμές, η καθεμία διάρκειας 60 δευτερολέπτων. Κατά τη διάρκεια αυτών των δοκιμών, οι συμμετέχοντες παρουσιάζονταν με αντικείμενα διέγερσης που εμφανίζονται στην οθόνη με τυχαία σειρά, και τους ζητούνταν να αναφέρουν είτε τα τυπικά χαρακτηριστικά τους (OC) είτε να καταγράψουν πιθανές εναλλακτικές χρήσεις (AU) για το κάθε αντικείμενο. Τα ονόματα αντικειμένων που χρησιμοποιήθηκαν ως ερεθίσματα επιλέχθηκαν σύμφωνα με συγκεκριμένες προδιαγραφές, όπως να μην έχουν πολλαπλές σημασίες και να αναγνωρίζονται αμέσως ως ονόματα καθημερινών αντικειμένων που οι άνθρωποι χρησιμοποιούν πολύ συχνά. Για να διασφαλιστεί περαιτέρω έλεγχος για τυχόν επιρροές, σε κάθε δοκιμή, οι συμμετέχοντες έπρεπε να εκφράσουν τις απαντήσεις τους πατώντας ένα κουμπί πριν από κάθε απάντηση, καθώς το αντικείμενο διέγερσης

παρουσιάζοταν στην οθόνη. Μετά από κάθε δοκιμή, εμφανιζόταν ένας λευκός σταυρός εστίασης, ενώ υπάρχει ένα σύντομο διάλειμμα μεταξύ των δύο συνθηκών.

Κατά την εξέλιξη του πειράματος οι συμμετέχοντες ήταν καθισμένοι άνετα σε μία πολυθρόνα μπροστά από μια οθόνη και ένα πληκτρολόγιο. Οι ερευνητές τους εξήγησαν τις δύο εργασίες με κατάλληλα παραδείγματα και τους ζήτησαν να πατήσουν ένα πλήκτρο απόκρισης κάθε φορά που είχαν μια ιδέα και στη συνέχεια να την ανακοινώσουν. Μετά την προφορική έκφραση της ιδέας τους, επρόκειτο να συνεχίσουν να δημιουργούν περισσότερες ιδέες για όσο χρόνο εμφανίζεται το όνομα του αντικειμένου στην οθόνη. Ένας εξεταστής έπρεπε να πατάει ένα πλήκτρο κάθε φορά που οι συμμετέχοντες είχαν ολοκληρώσει την προφορική έκφραση των απαντήσεών τους, έτσι ώστε να σημειώνεται επίσης η παύση του λόγου. Παράλληλα, σημειωνόταν η έναρξη του λόγου όταν οι συμμετέχοντες πατούσαν το πλήκτρο μετά την έλευση της ιδέας στο μυαλό τους. Αυτή η διάταξη επέτρεπε τον διαχωρισμό των περιόδων που καταγράφουν τη διαδικασία σκέψης από τα διαστήματα ομιλίας και απέφευγε τα διαστήματα που επηρεάζονταν από τεχνητά φαινόμενα που προκαλούνται από την ομιλητική δραστηριότητα.



[Εικ. 12] Σχηματική αναπαράσταση των εργασιών. Οι απαντήσεις δείγματος προέρχονται από την εργασία AU. [29]

3.4 Προεπεξεργασία

Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή δεδομένων sculp καλύμμα ηλεκτροδίων EEG με 64 ηλεκτρόδια Ag/AgCl (ASA Lab 4.9.2, ANT Software BV, Netherlands), σύμφωνα με το διεθνές σύστημα 10–20, και με ρυθμό δειγματοληψίας 256 Hz. Επιπλέον, έγινε διπολική καταγραφή του κατακόρυφου και οριζόντιου ηλεκτροοφθαλμογραφήματος (EOG). Είχαν

τοποθετηθεί πάνω και κάτω από το δεξί μάτι και αριστερά και δεξιά από τα δύο μάτια). Για να αποφευχθούν κύριες παρεμβολές, εφαρμόστηκε φιλτράρισμα εξομάλυνσης (0.5 – 70 Hz) και φίλτρο notch στα 50Hz κατά τη διάρκεια των καταγραφών, ενώ η αντίσταση των ηλεκτροδίων διατηρήθηκε κάτω από 10 kΩ κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Τα ακατέργαστα σήματα EEG ψηφιοποιήθηκαν με ρυθμό δειγματοληψίας 256 Hz και φιλτραρίστηκαν offline χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο διέλευσης ζώνης (band-pass filter) από 0.5 έως 40 Hz. Στη συνέχεια, τα δεδομένα επαναπροσαρμόστηκαν με βάση το μέσο των ηλεκτροδίων μαστοειδών δεξιά και αριστερά (M1 και M2), αφαιρέθηκε η τάση (de-trended) και προσαρμόστηκαν στη βάση. Για την αφαίρεση οφθαλμικών artifacts, τα στοιχεία σήματος που είχαν υψηλή συσχέτιση με το κατακόρυφο και οριζόντιο EOG αφαιρέθηκαν χειροκίνητα μέσω ανεξάρτητης ανάλυσης συνιστωσών.

Τα προ-επεξεργασμένα δεδομένα χωρίστηκαν σε εποχές διάρκειας 60 δευτερολέπτων. Τα δεδομένα από έναν συμμετέχοντα απορρίφθηκαν λόγω υψηλού θορύβου. Όλα τα βήματα προεπεξεργασίας πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας το EEGLAB στο Matlab 2017b (The MathWorks Inc, US).

Κεφάλαιο 4

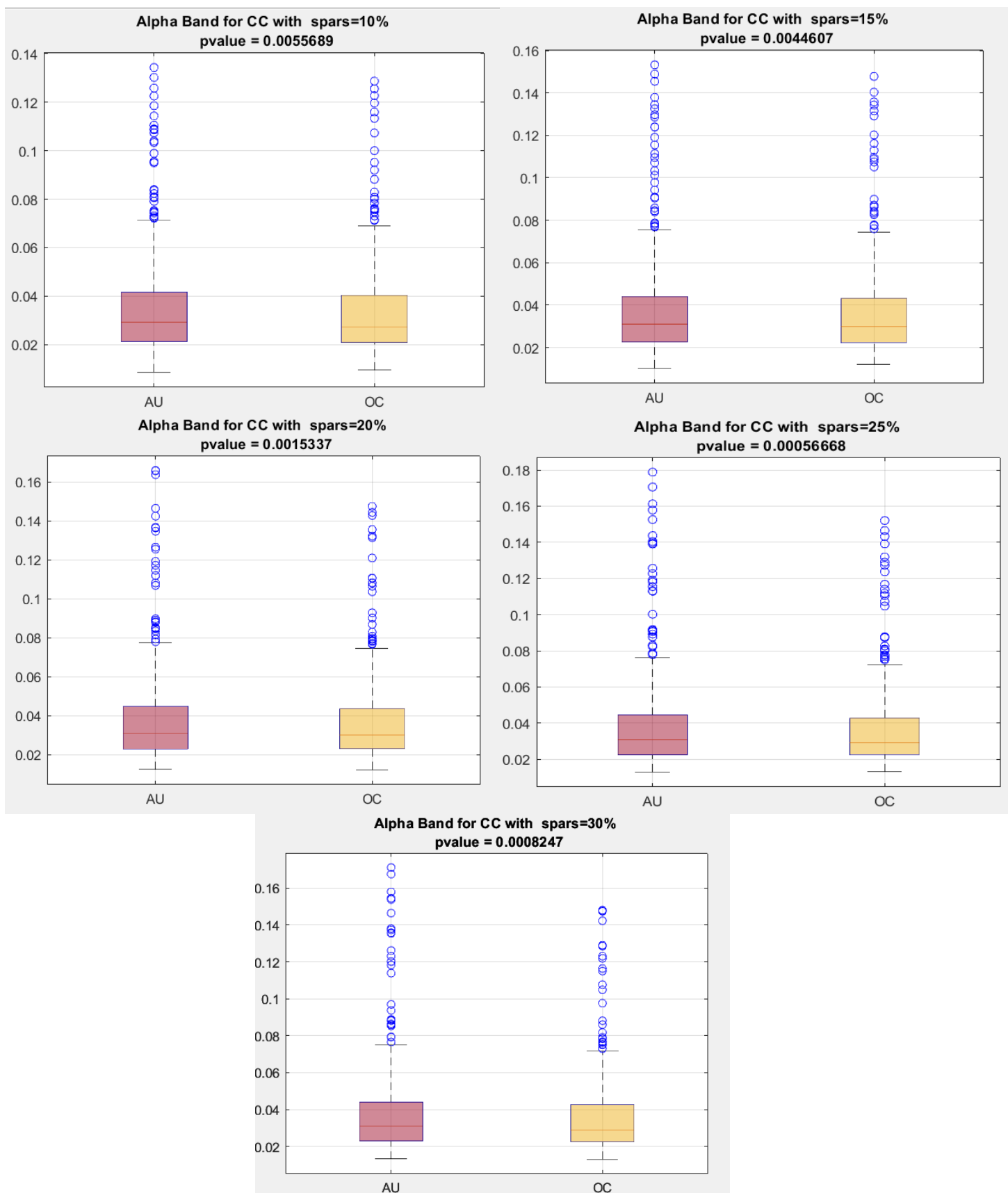
4.1 Πειραματικά Αποτελέσματα

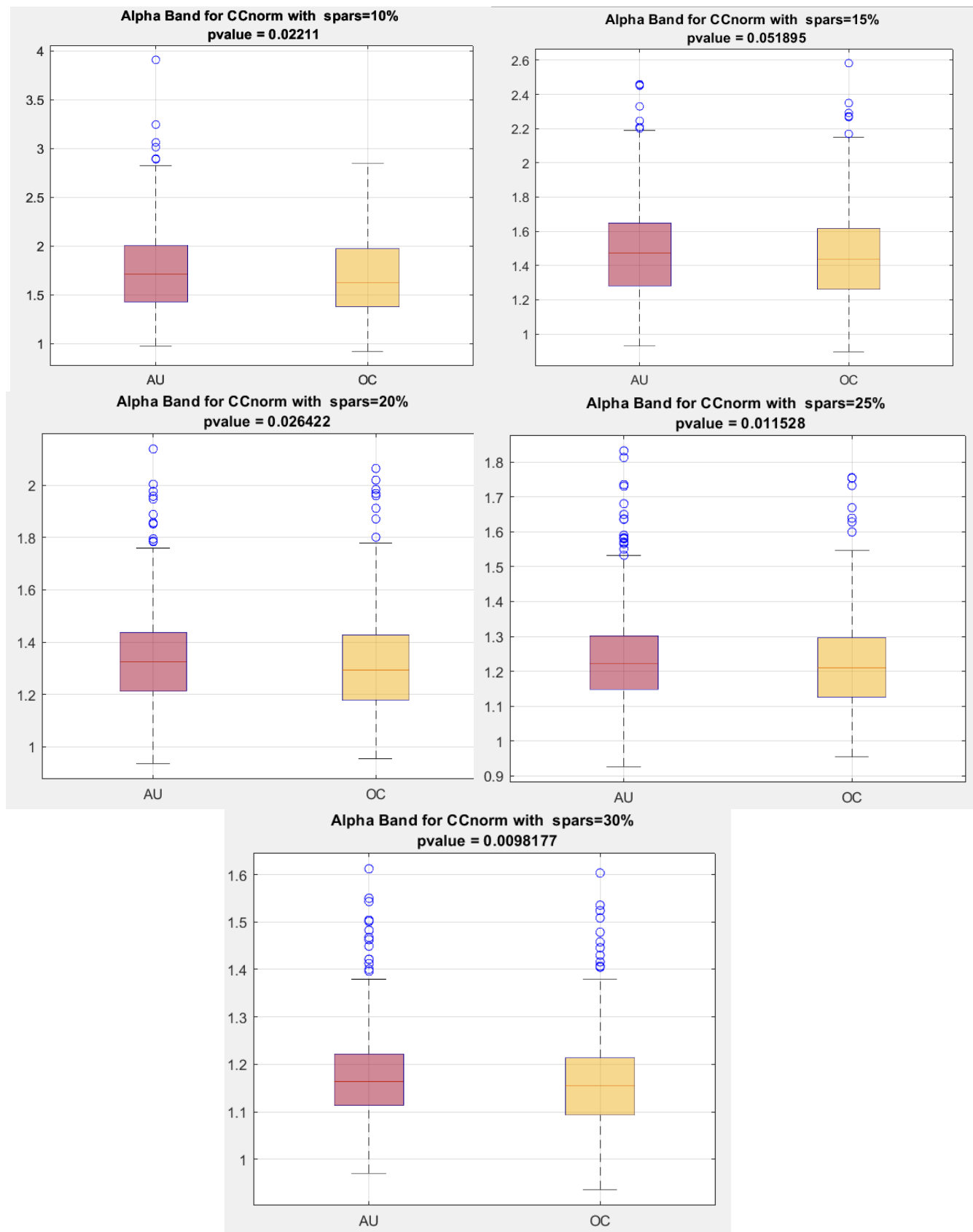
Στο κεφάλαιο αυτό θα αποδοθούν τα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν από τις μετρικές δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε στατιστικό έλεγχος *t-test* στο οποίο διερευνάται εάν υπάρχει κάποια στατιστικά σημαντική διαφορά ανάμεσα στα δεδομένα. Το κριτήριο του *ttest* ήταν να συγκριθούν προφανώς τα δεδομένα AU με αυτά του OC. Επομένως, όλοι οι συμμετέχοντες για την κάθε δοκιμή συγκρίθηκαν σε σχέση με την κάθε μετρική δικτύου που προέκυψε, για να φανεί στο σύνολο τους ποιές είναι οι συχνοτικές διαφορές ανάμεσα στα δύο αυτά πειράματα. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο κάθε δίκτυο έχει εφαρμοστεί και άλλη τιμή *sparsity*. Οπότε κάθε φορά συγκρίνονται τα 29 άτομα από AU για τις 15 δοκιμές που έγιναν με τα 29 άτομα που προέρχονται από το OC, για όλες τις δοκιμές και μόνο για μία συχνοτική ομάδα, εκ των *alpha, beta, gamma, delta, theta band*. Έτσι, θα μπορέσει να φανεί ουσιαστικά και ποιοτικά, ποια συχνότητα εμφανίζει τις περισσότερες στατιστικές διαφορές στις μετρικές δικτύων και στην συνέχεια ποιος είναι ο λόγος.

4.1.1 Ανάλυση Μετρικών Δικτύου

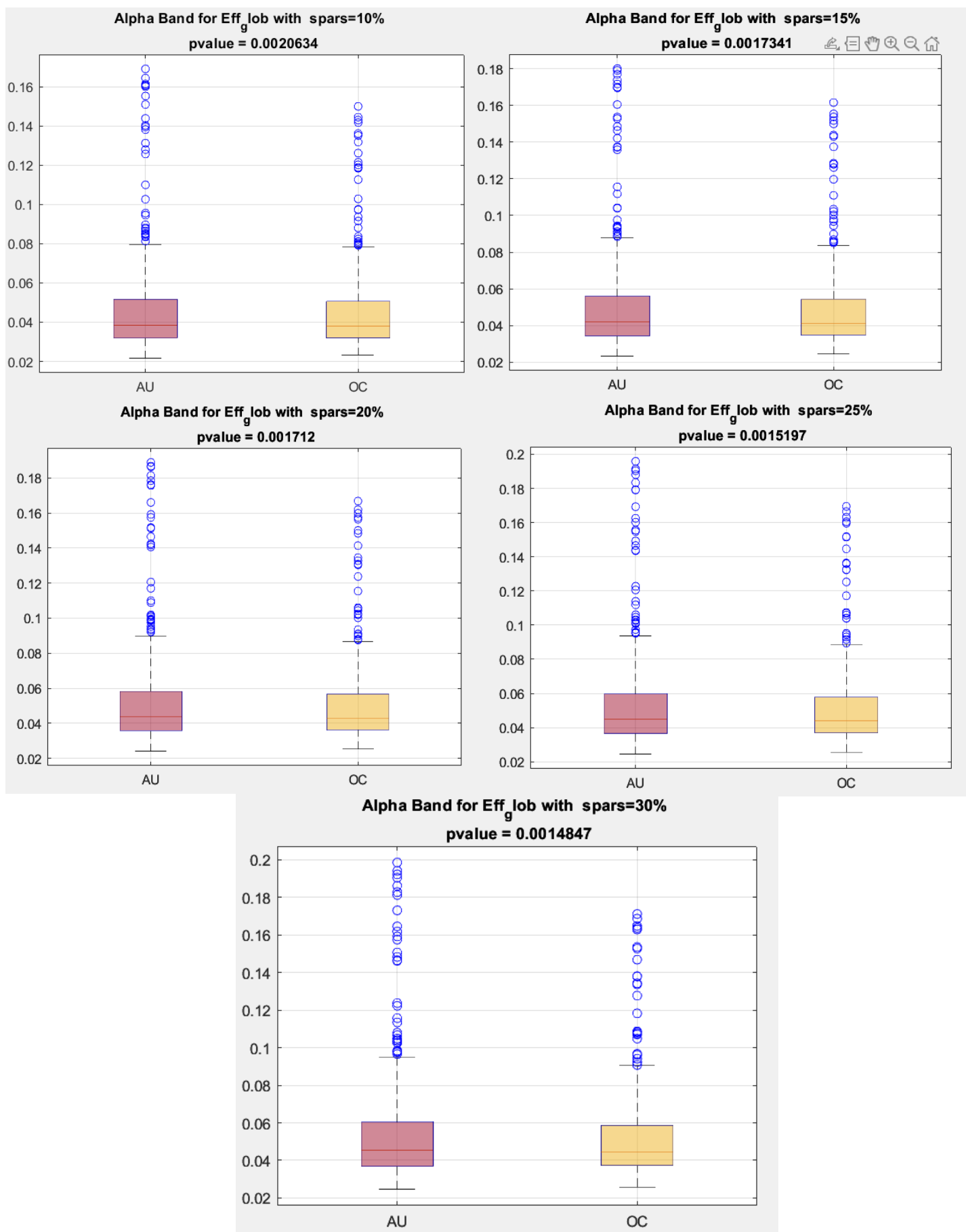
Παρακάτω παρατίθενται η ανάλυση μετρικών δικτύου με τη χρήση θηκογραμμάτων (*boxplots*). Με τη συγκεκριμένη μέθοδο παρουσιάζονται γραφικά οι κατανομές ομαδοποιημένων δεδομένων, με σκοπό την άντληση περισσότερων πληροφοριών [30]. Πρόκειται για ένα χρήσιμο διάγραμμα, ειδικά όσον αφορά τη σύγκριση συνεχών κατανομών σε διαφορετικούς πληθυσμούς. Για τη κατασκευή του δημιουργείται ένα ορθογώνιο πλαίσιο με βάσεις το πρώτο και το τρίτο τεταρτημόριο. Ενδιάμεσα τοποθετείται η διάμεσος, που αποτελεί το 2ο τεταρτημόριο. Παράλληλα, αν υπάρχουν και άλλες τιμές εκτός των οριακών τιμών, αυτές δηλώνονται με αστερίσκους ή κουκκίδες. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των θηκογραμμάτων σύμφωνα με την μπάντα συχνοτήτων, η τιμή του *sparsity* και το *p_value*, για την κάθε μετρική.

Συχνότητες Άλφα Cluster Coefficient

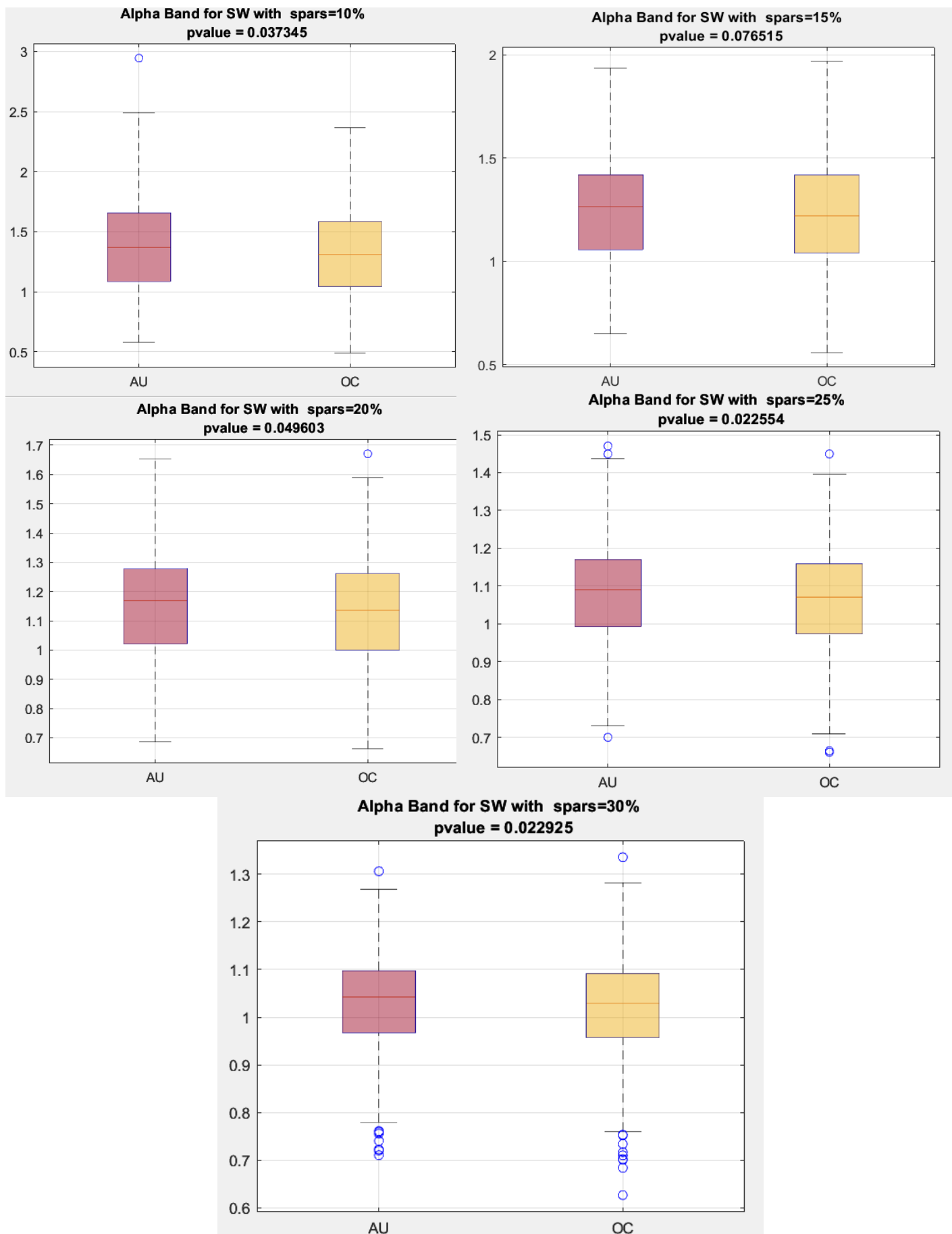


Cluster Coefficient (norm)

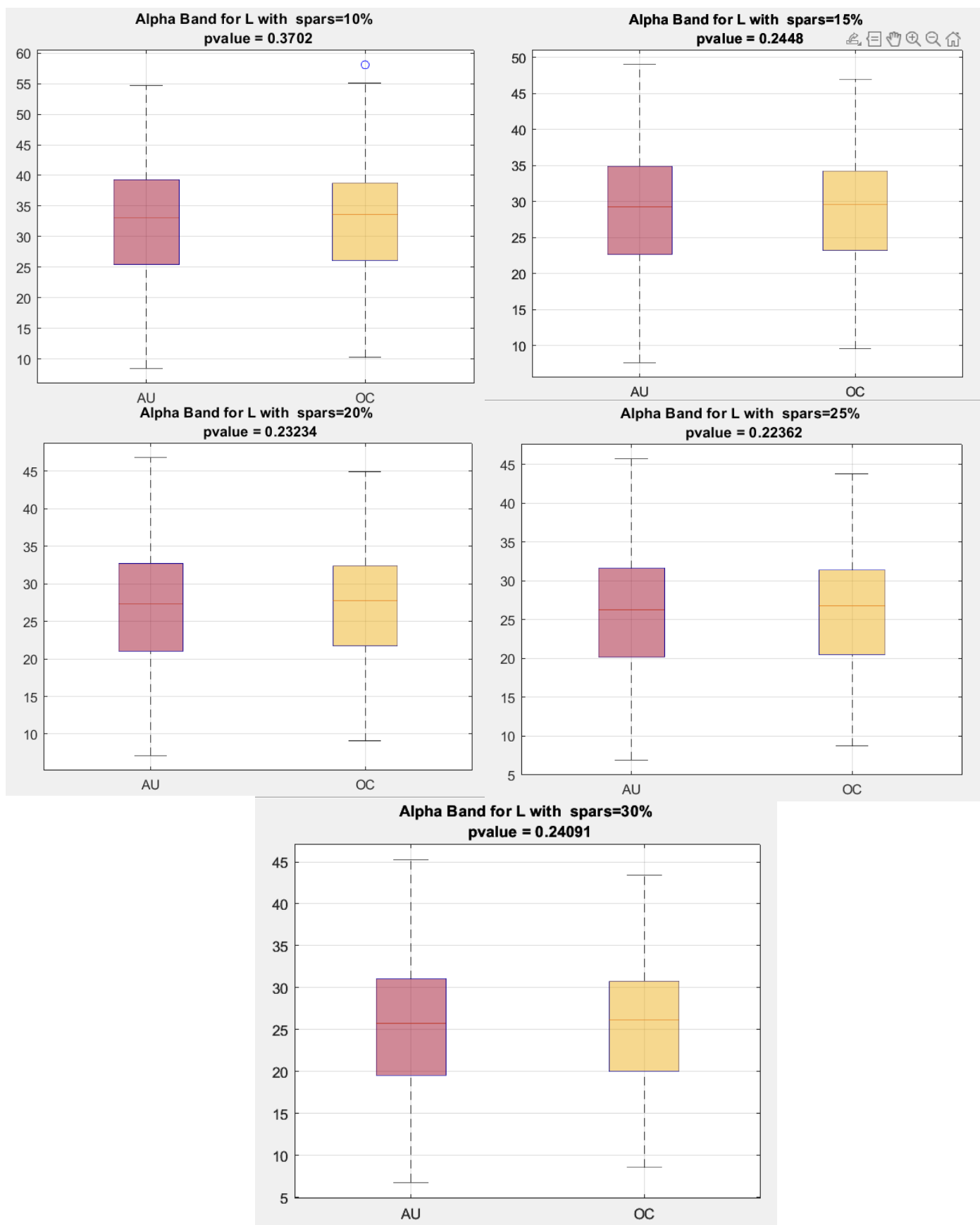
Global Efficiency



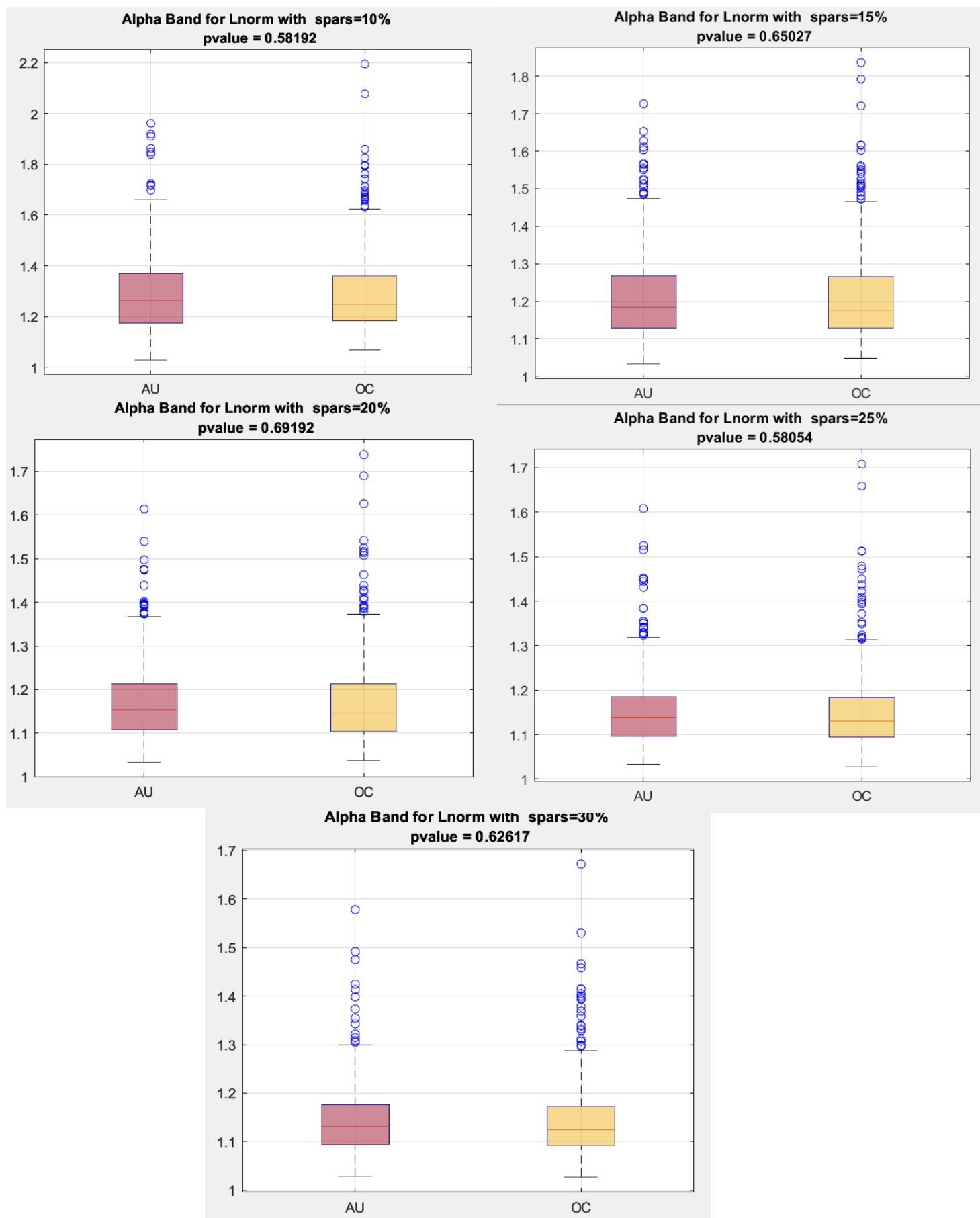
Small-Worldness



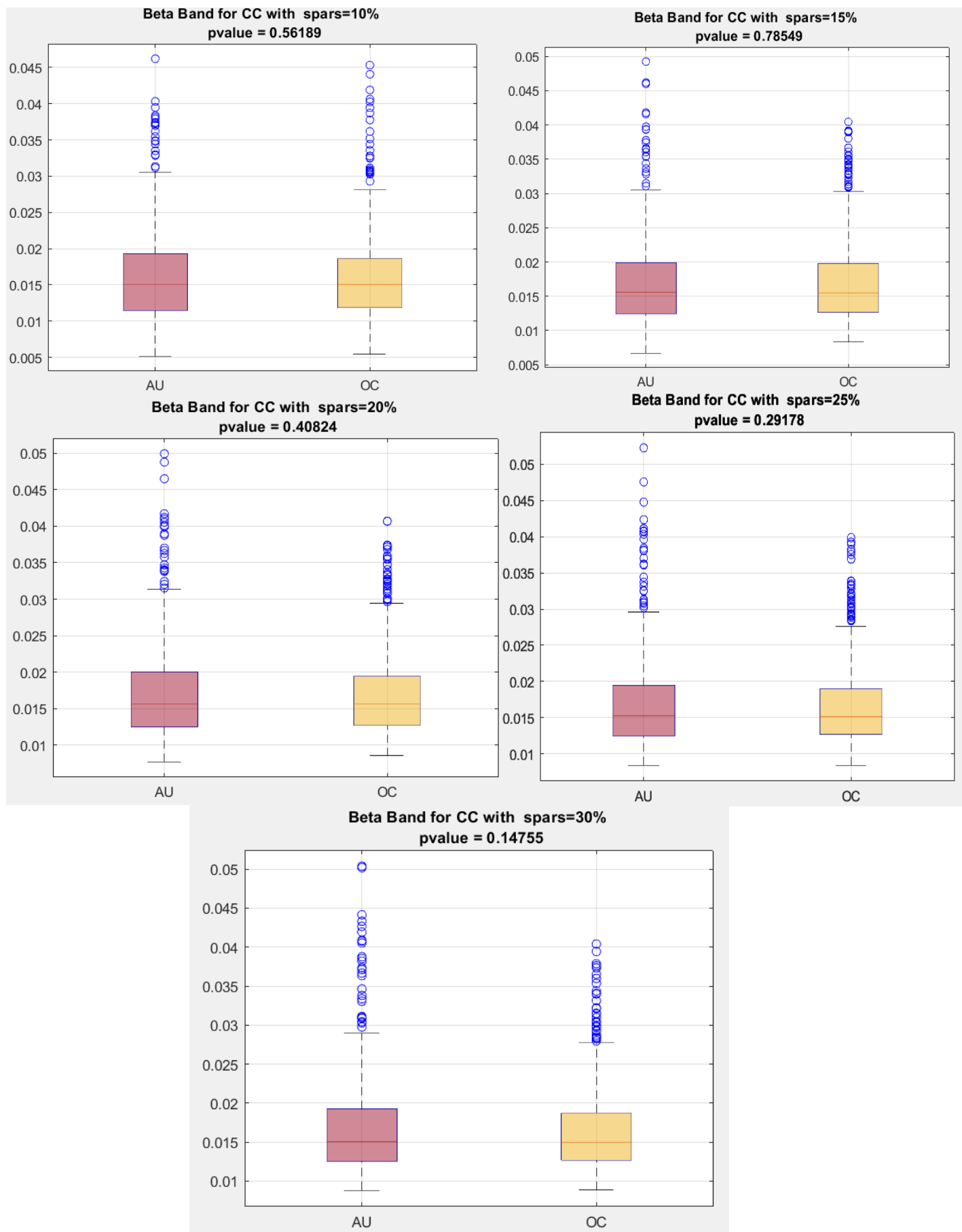
Characteristic Path Length



Characteristic Path Length (normal)

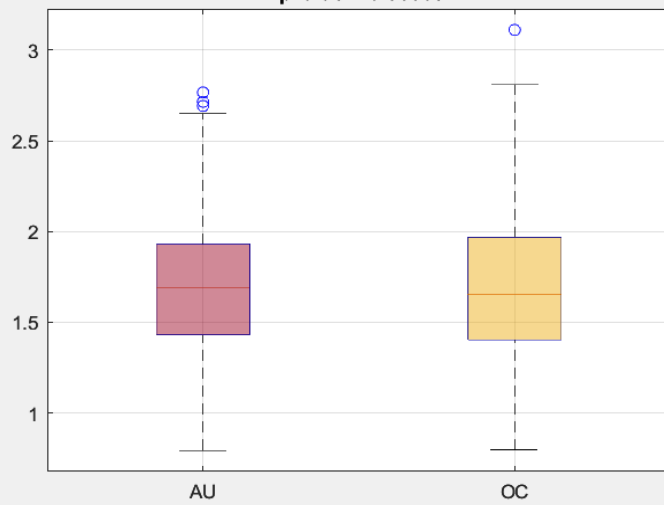


Συχνότητες Βήτα Cluster Coefficient

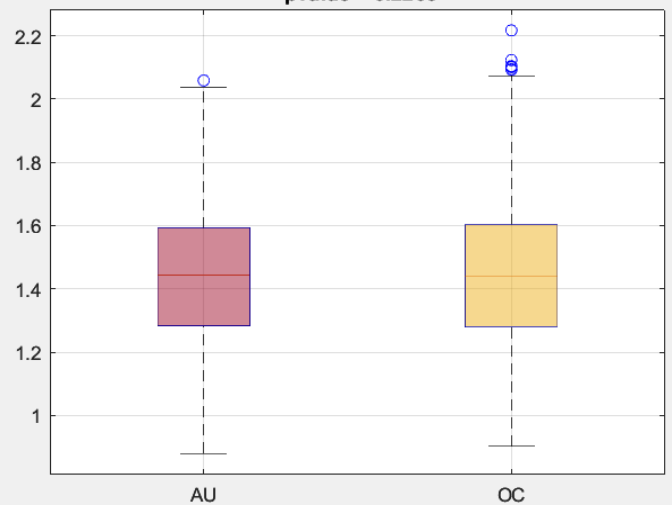


Cluster Coefficient (normal)

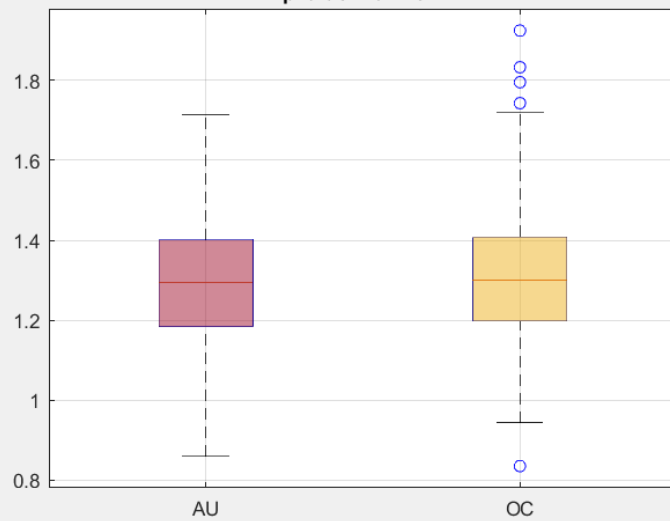
Beta Band for CCnorm with spars=10%
pvalue = 0.95368



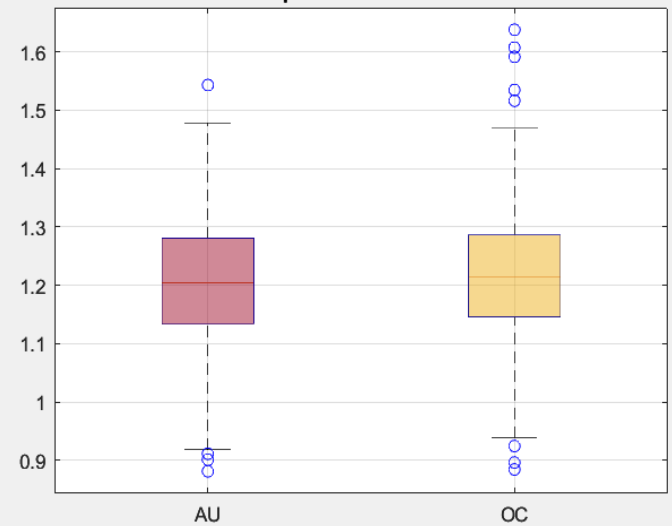
Beta Band for CCnorm with spars=15%
pvalue = 0.2263



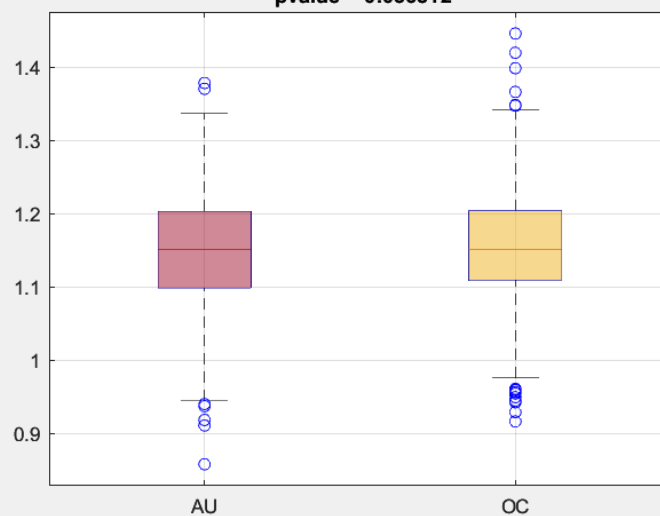
Beta Band for CCnorm with spars=20%
pvalue = 0.17541



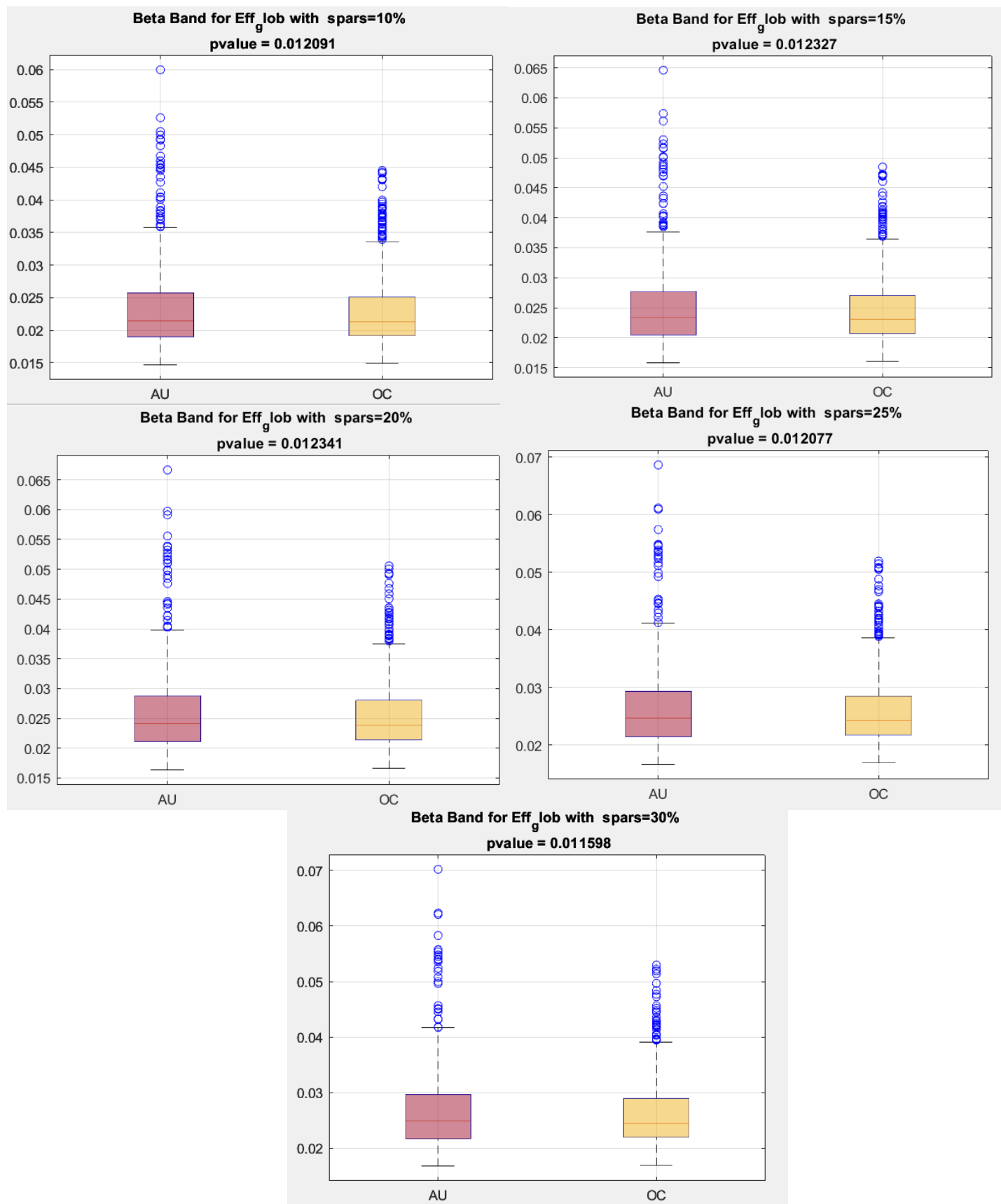
Beta Band for CCnorm with spars=25%
pvalue = 0.08354



Beta Band for CCnorm with spars=30%
pvalue = 0.036812

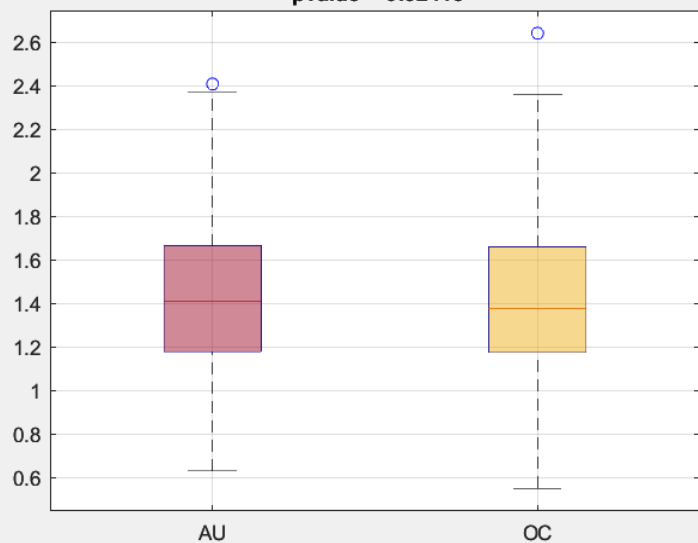


Global Efficiency

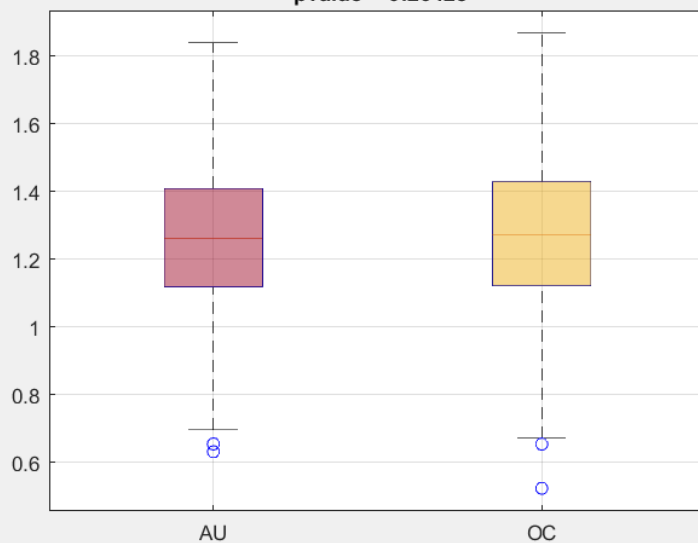


Small-Worldness

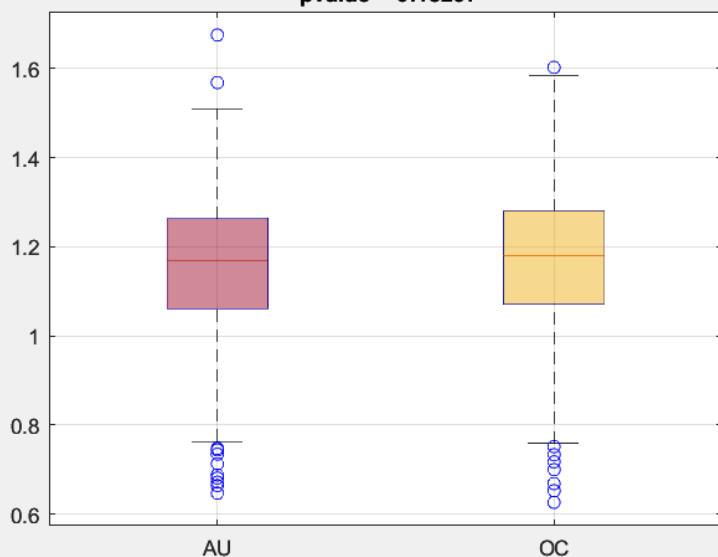
Beta Band for SW with spars=10%
pvalue = 0.92415



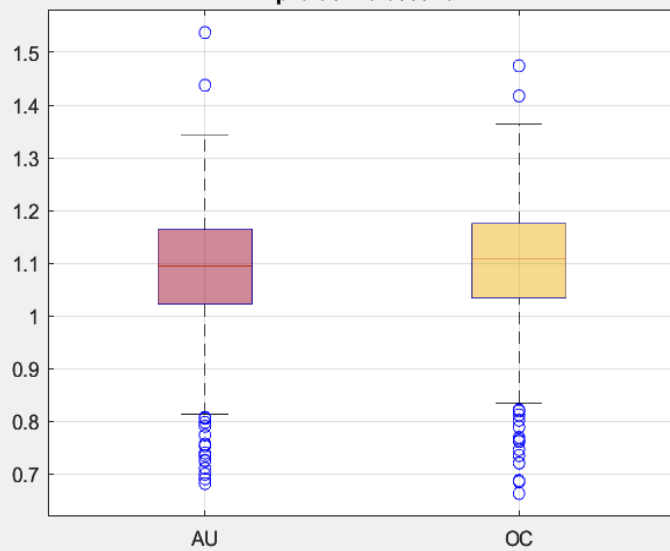
Beta Band for SW with spars=15%
pvalue = 0.26428



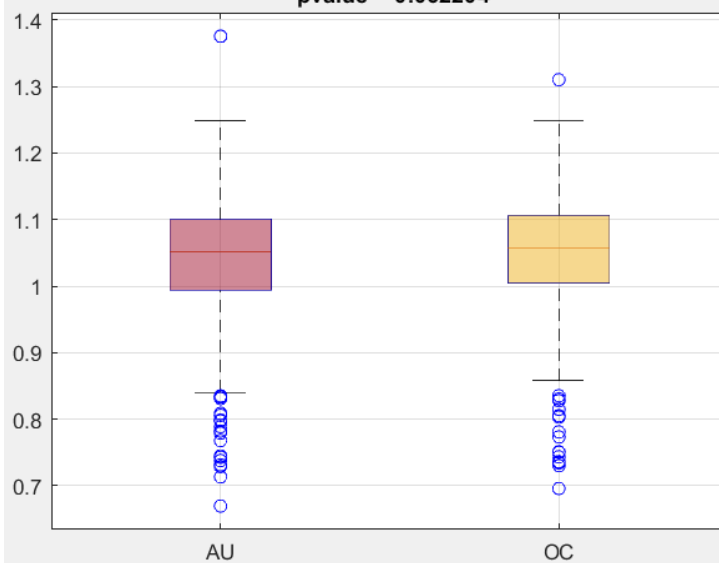
Beta Band for SW with spars=20%
pvalue = 0.18297



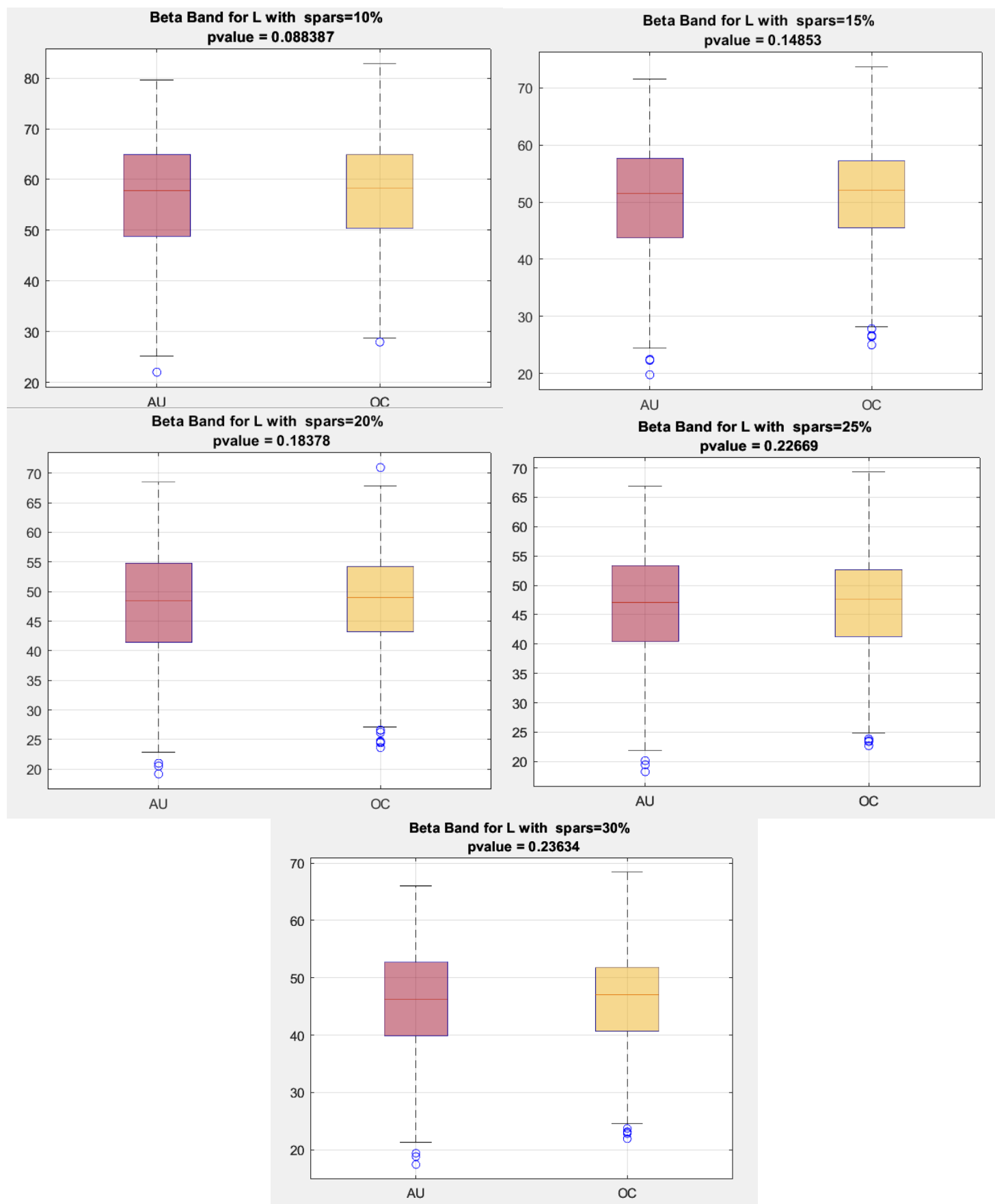
Beta Band for SW with spars=25%
pvalue = 0.088946



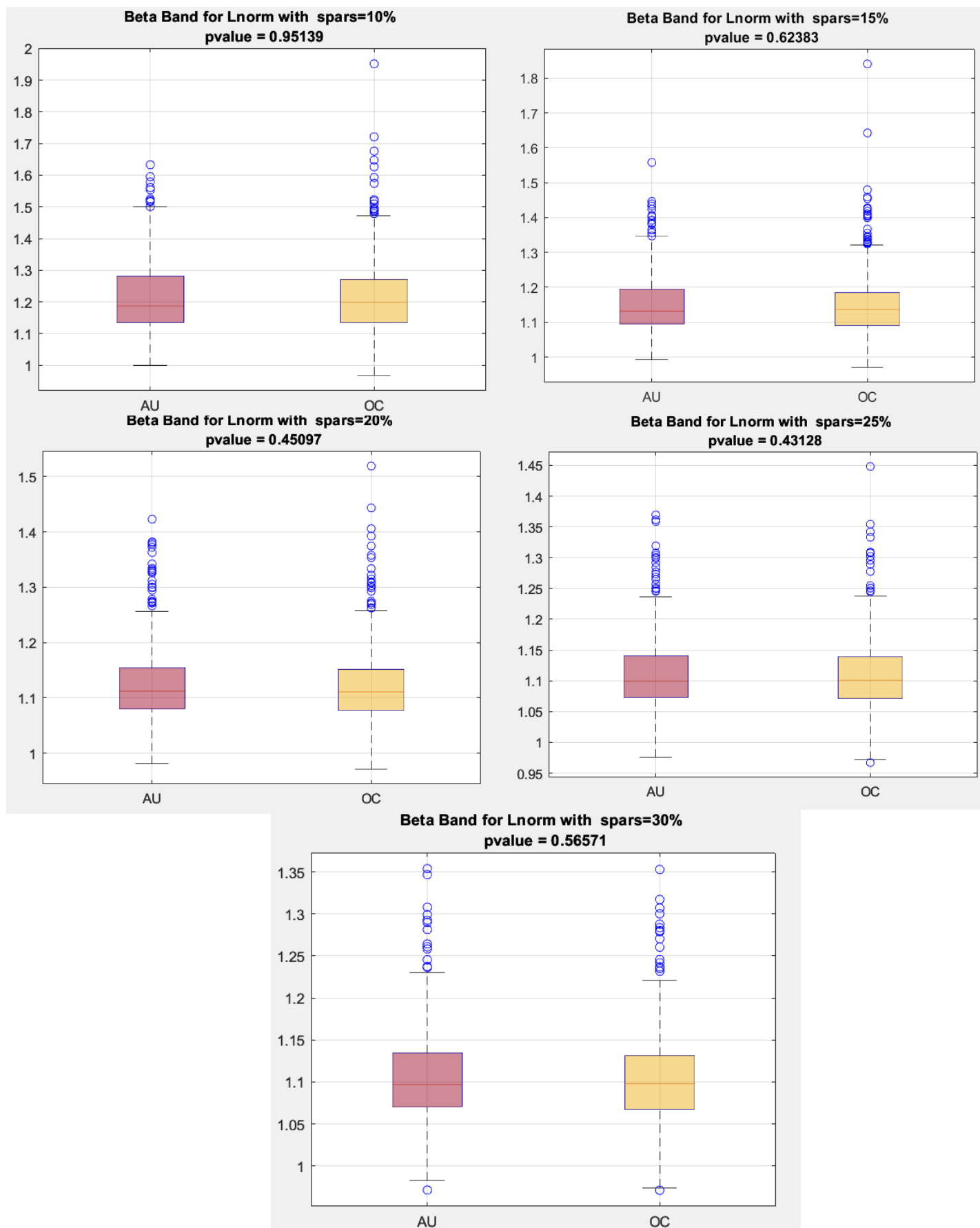
Beta Band for SW with spars=30%
pvalue = 0.062204



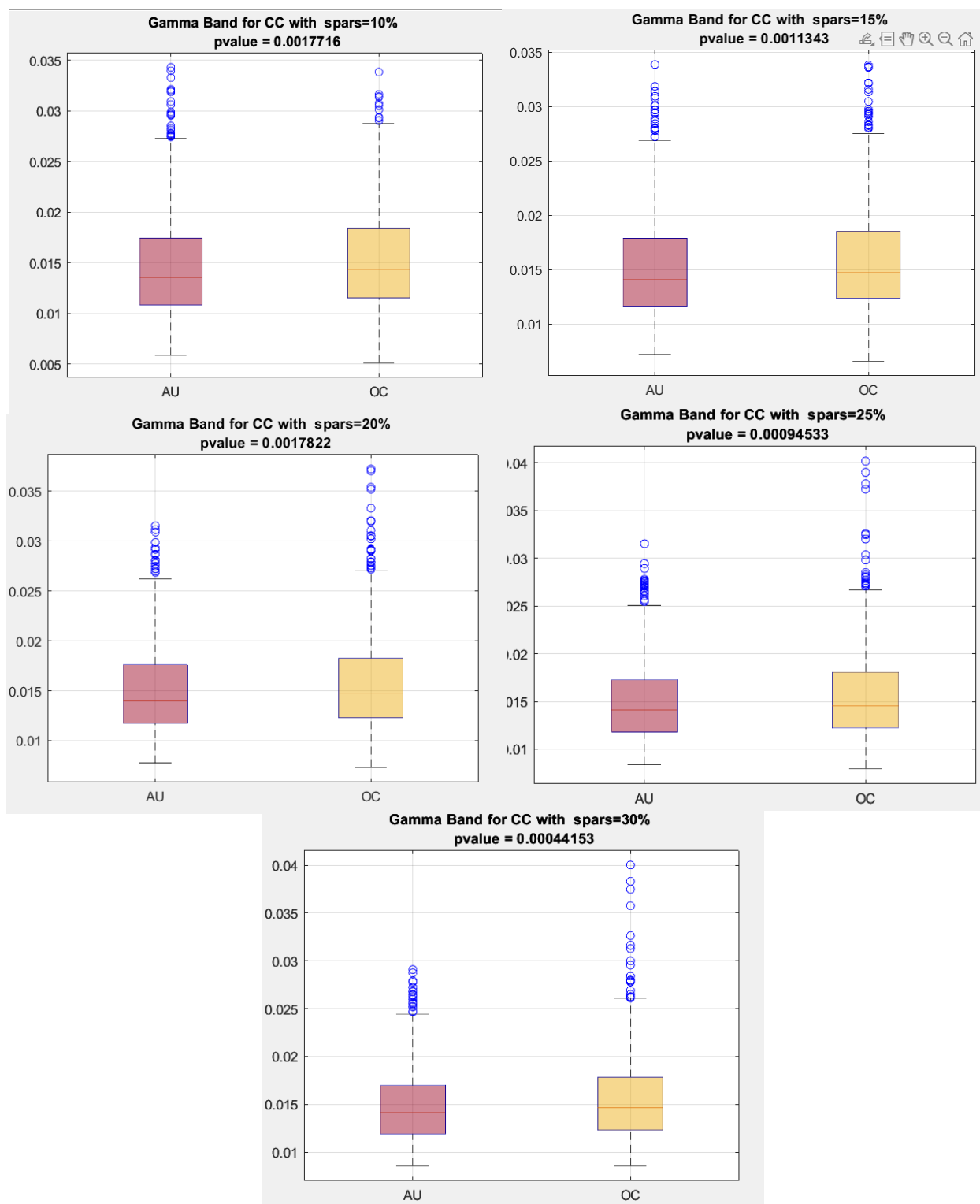
Characteristic Path Length



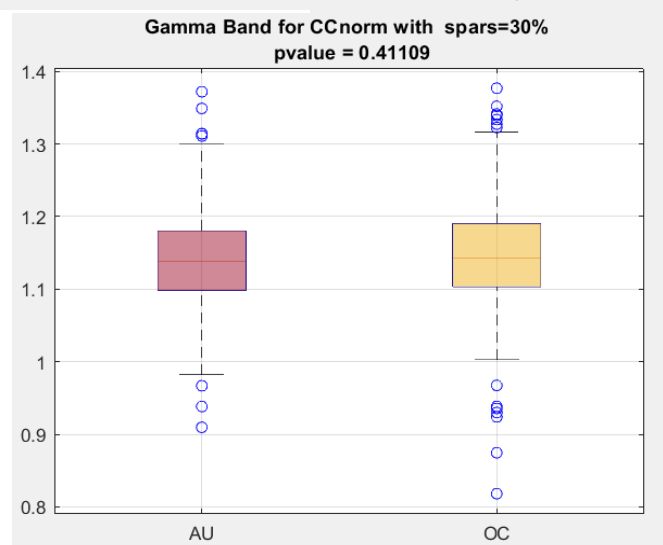
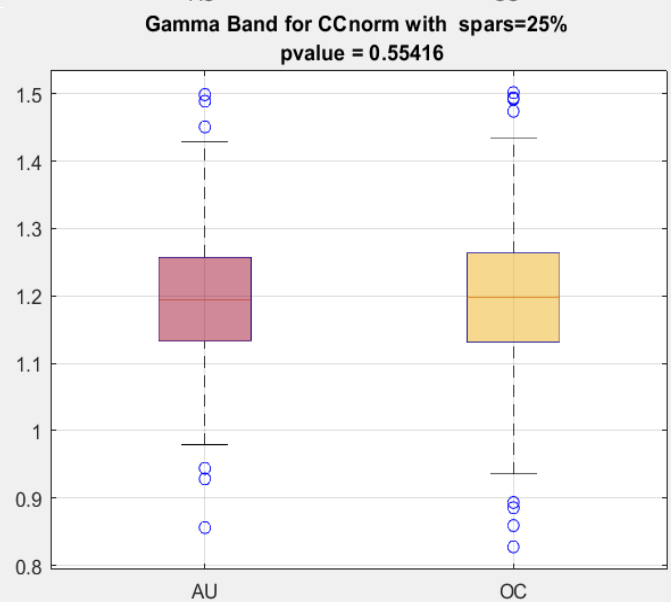
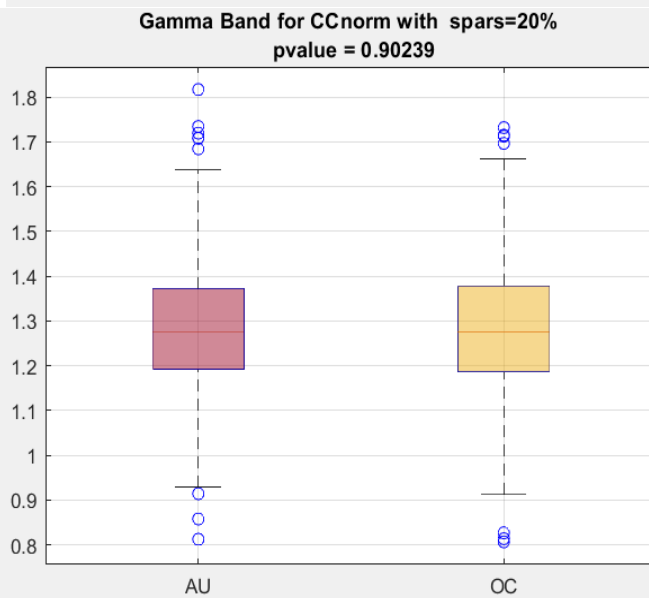
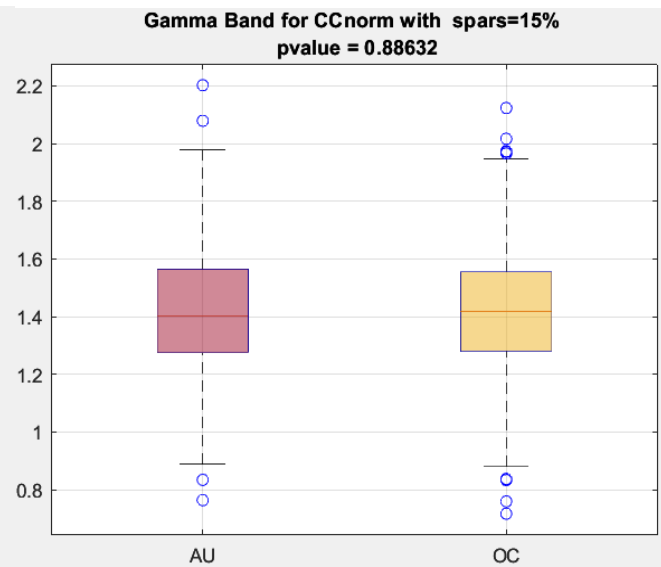
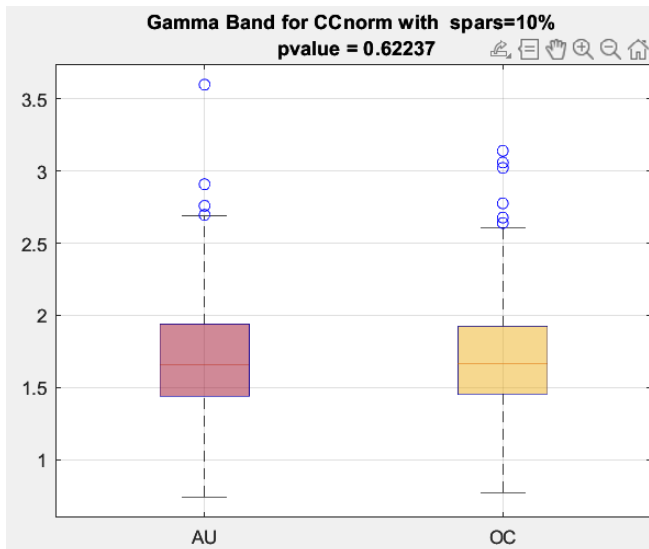
Characteristic Path Length (normal)



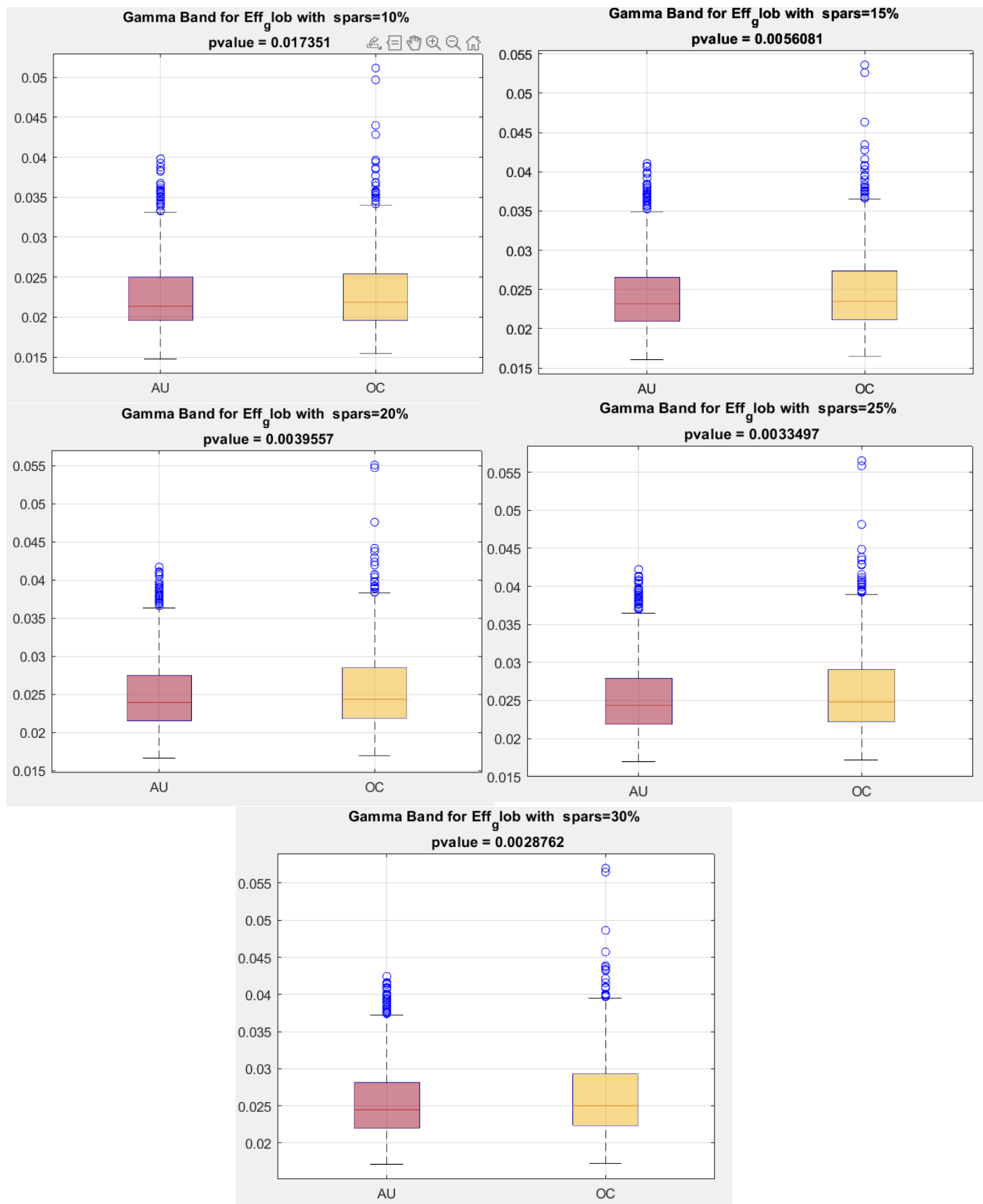
Συχνότητες Γάμμα Cluster Coefficient



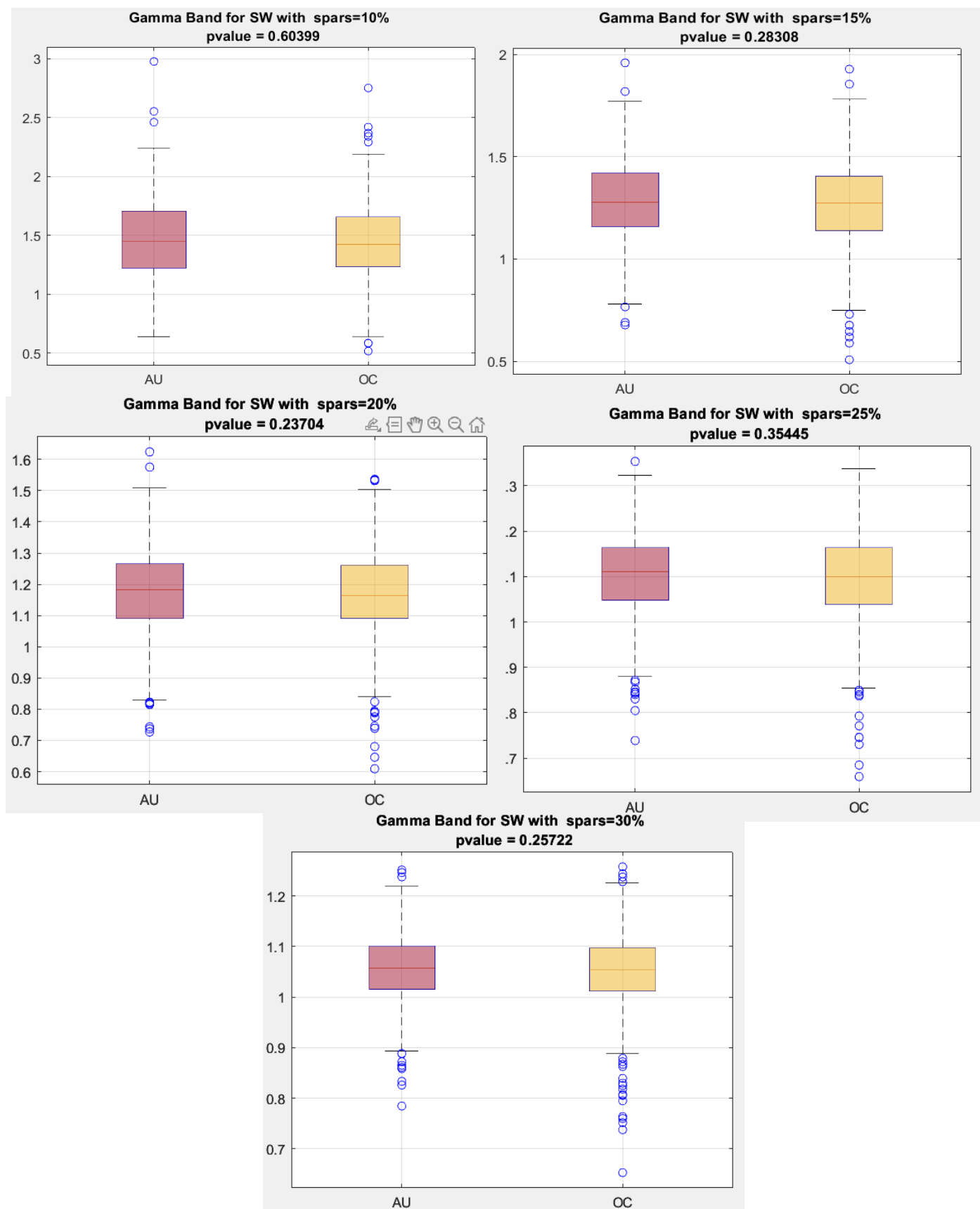
Cluster Coefficient (normal)



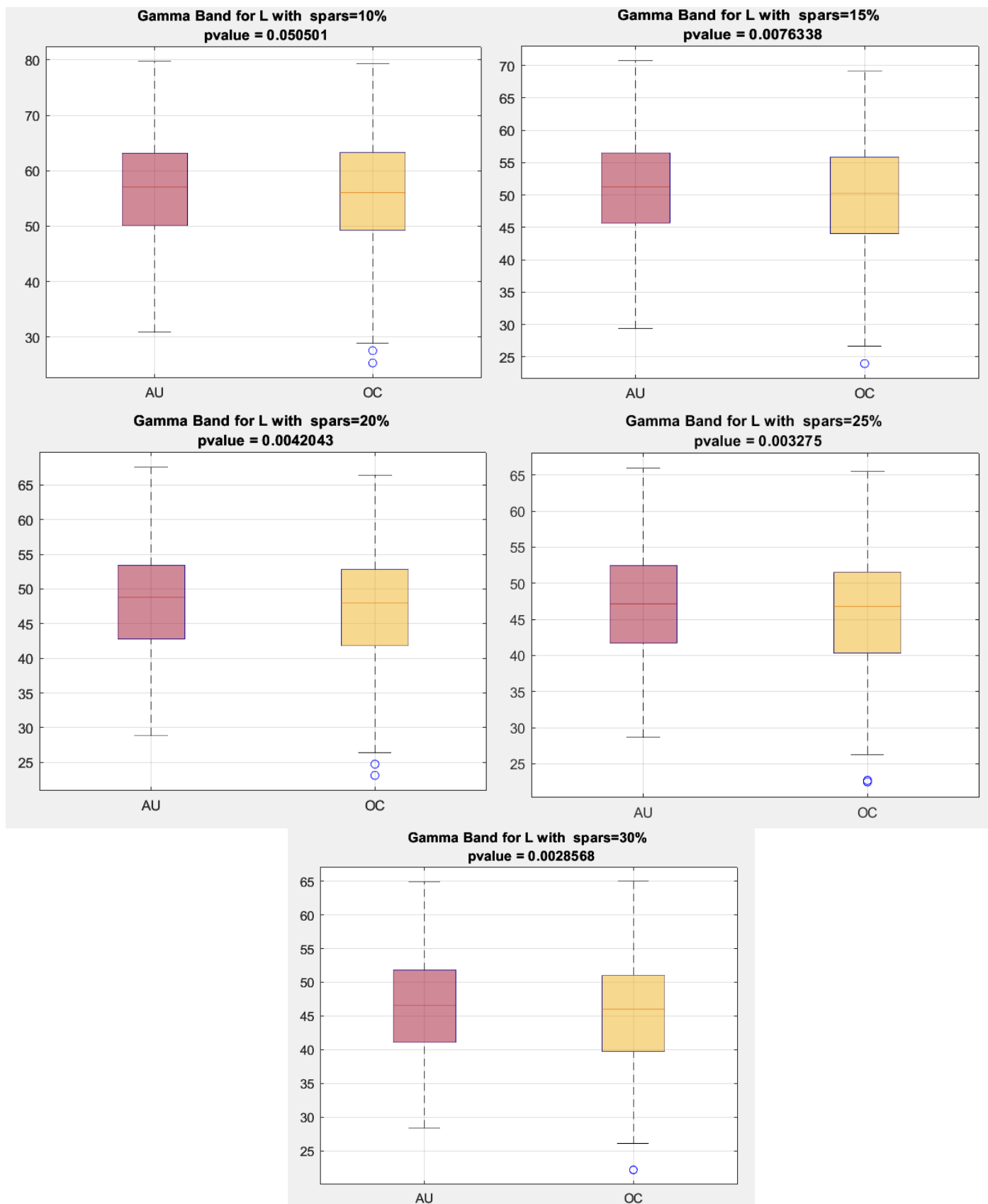
Global Efficiency



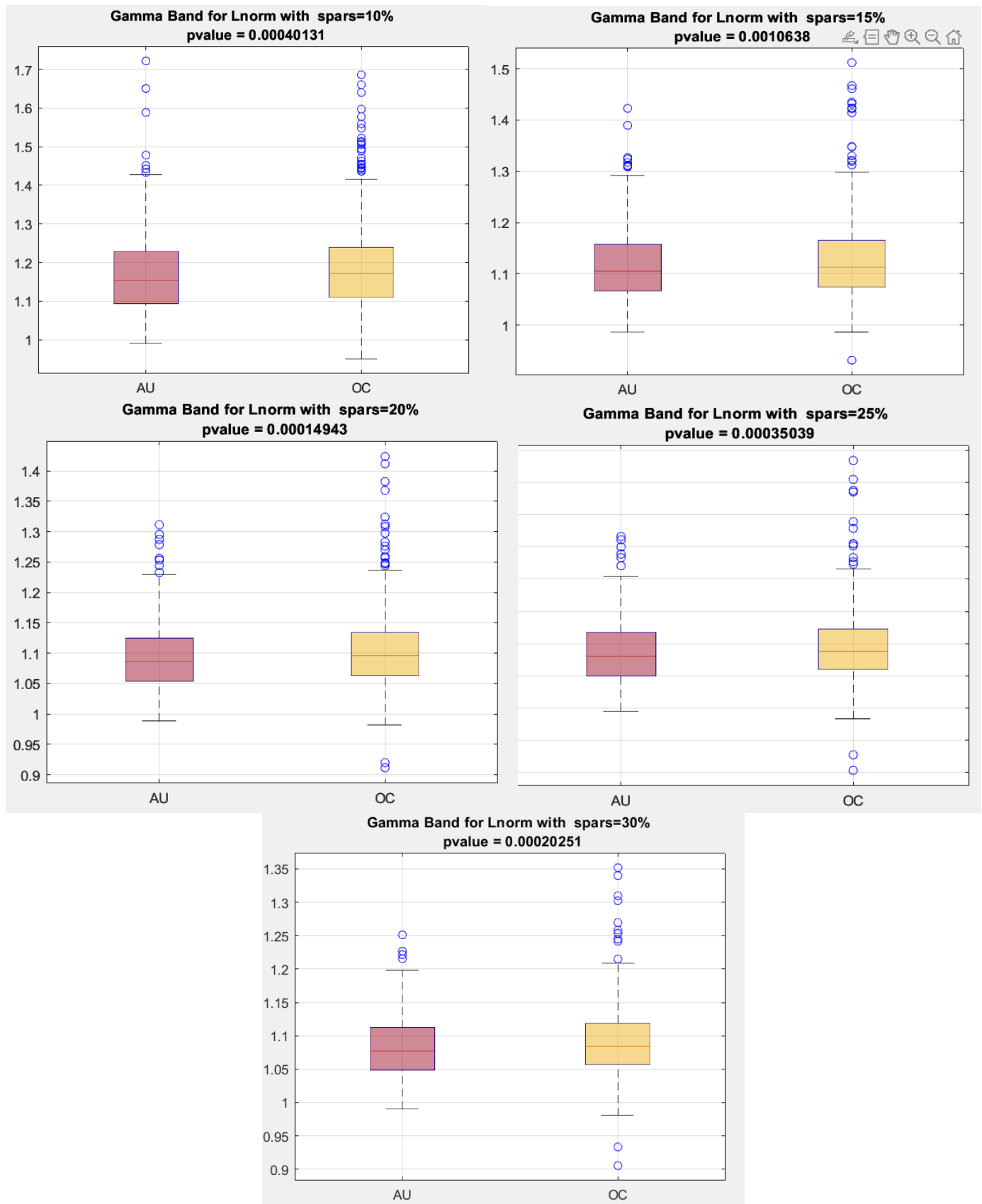
Small-Worldness



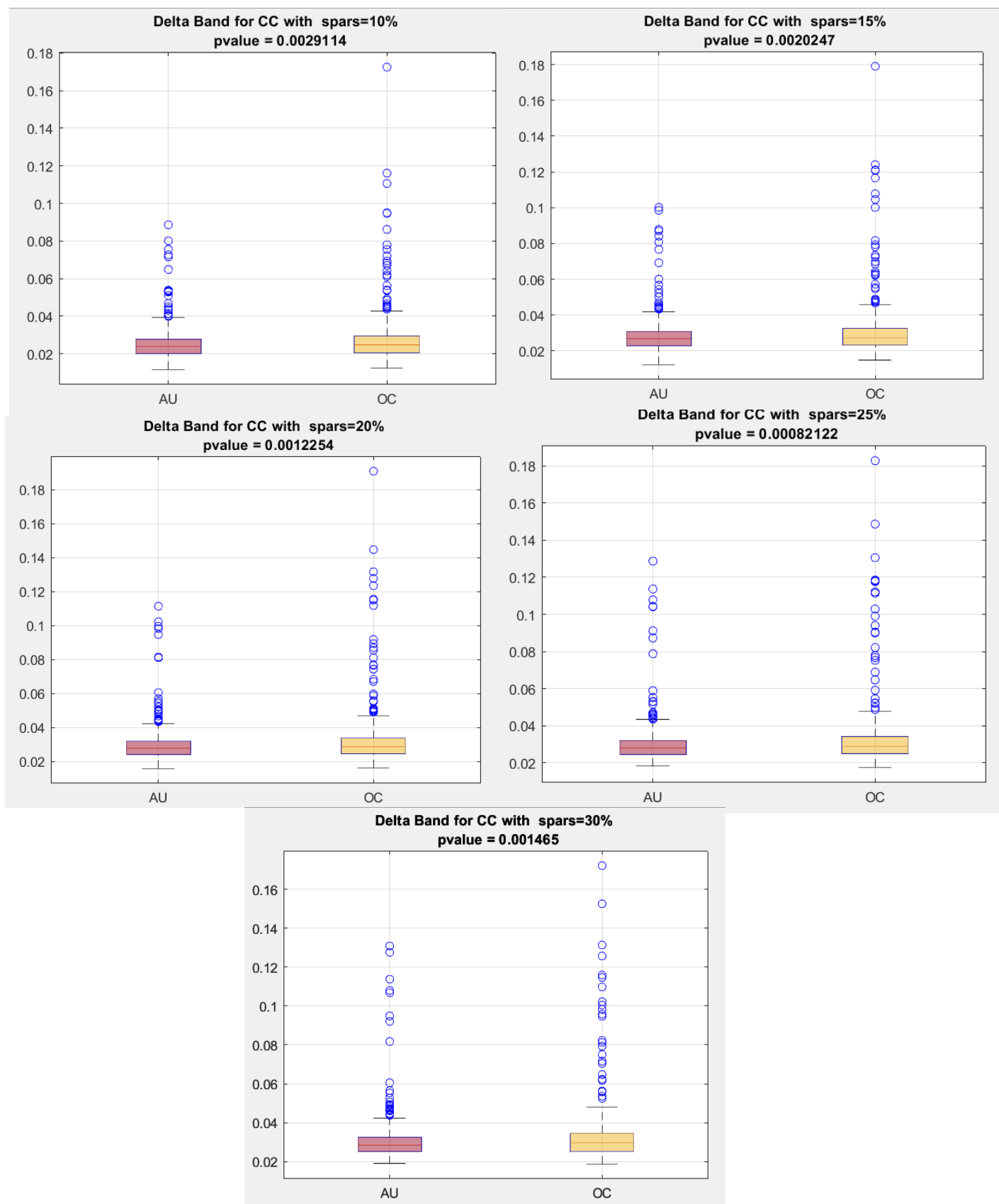
Characteristic Path Length



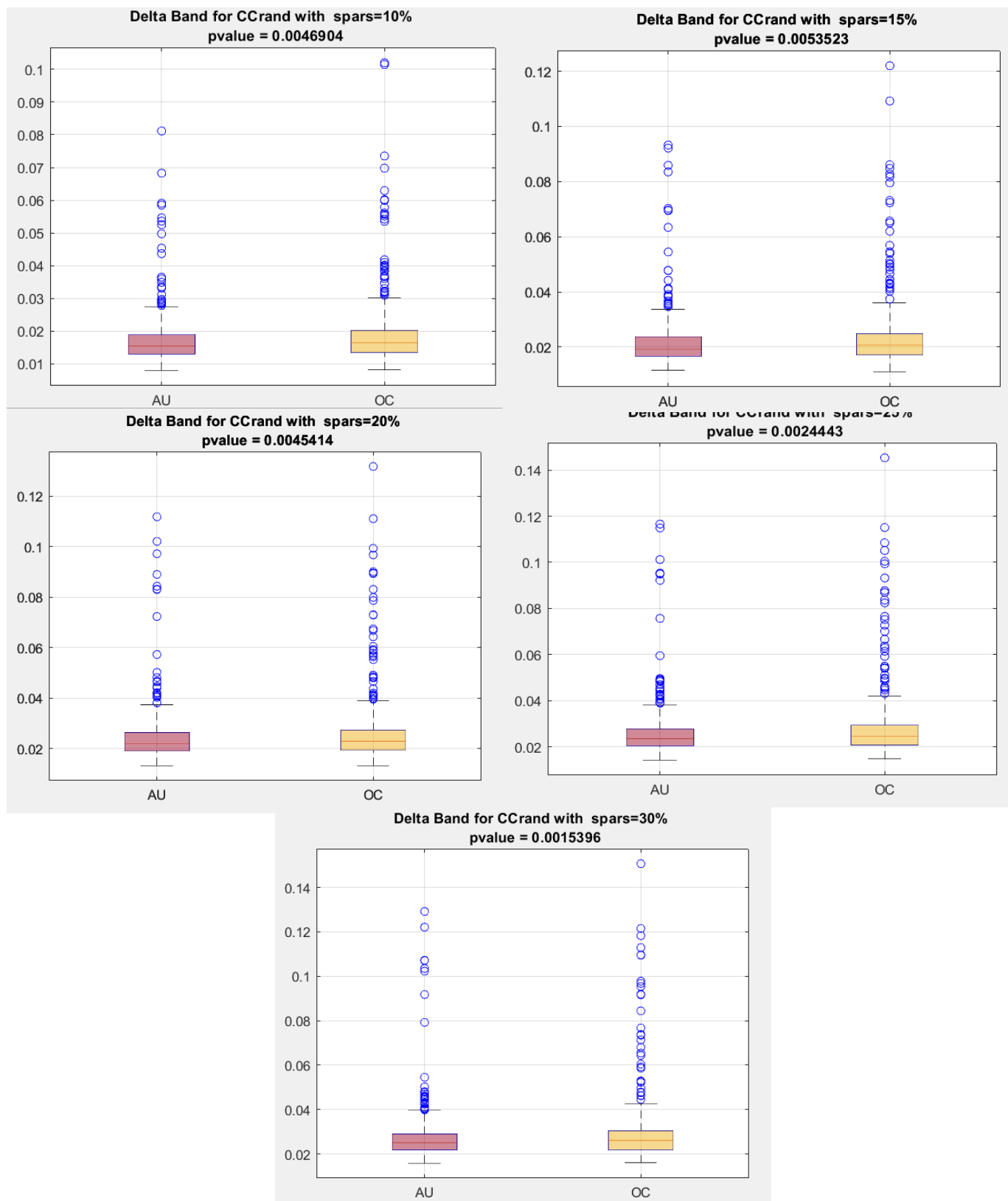
Characteristic Path Length (norm)



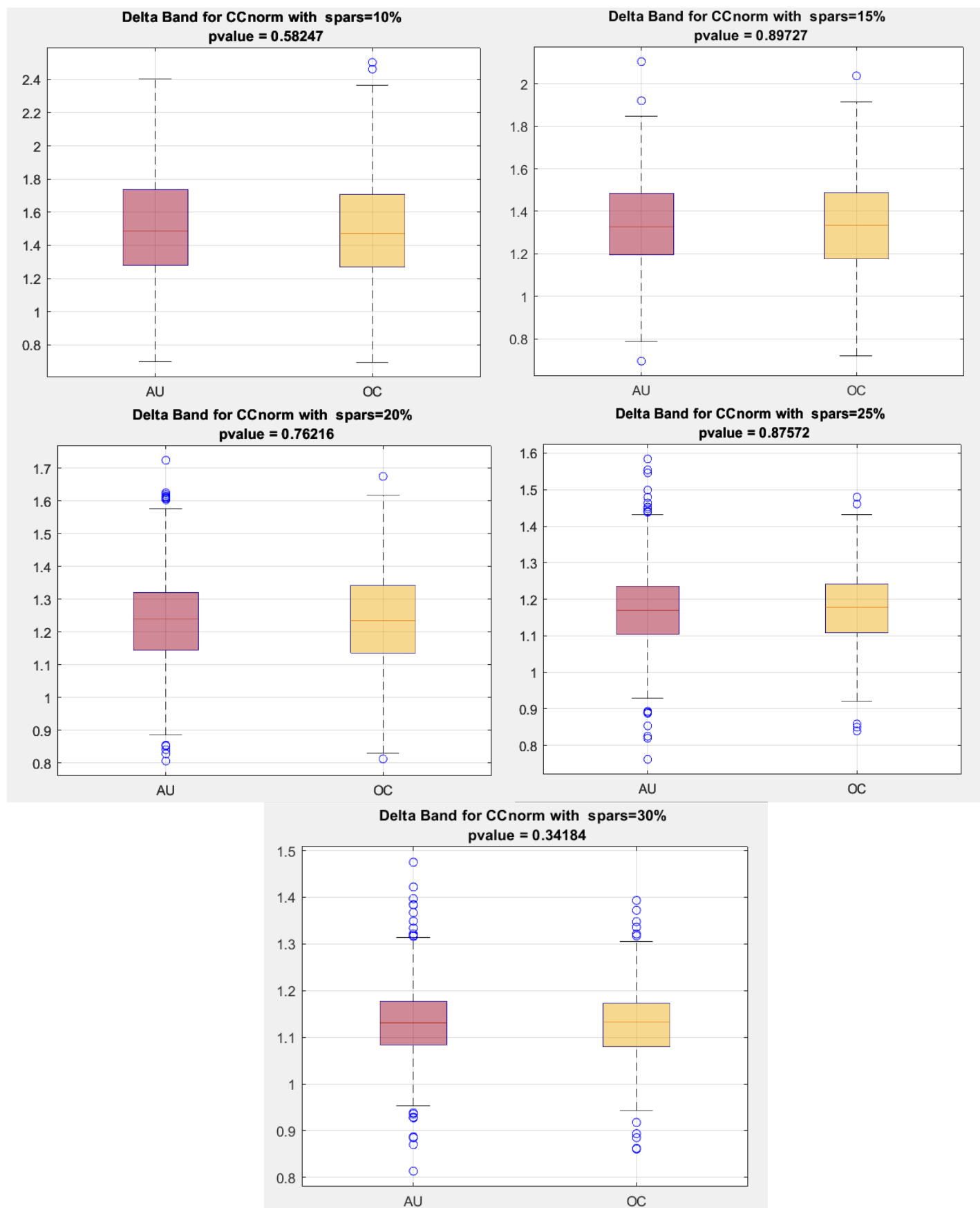
Συχνότητες Δέλτα Cluster Coefficient



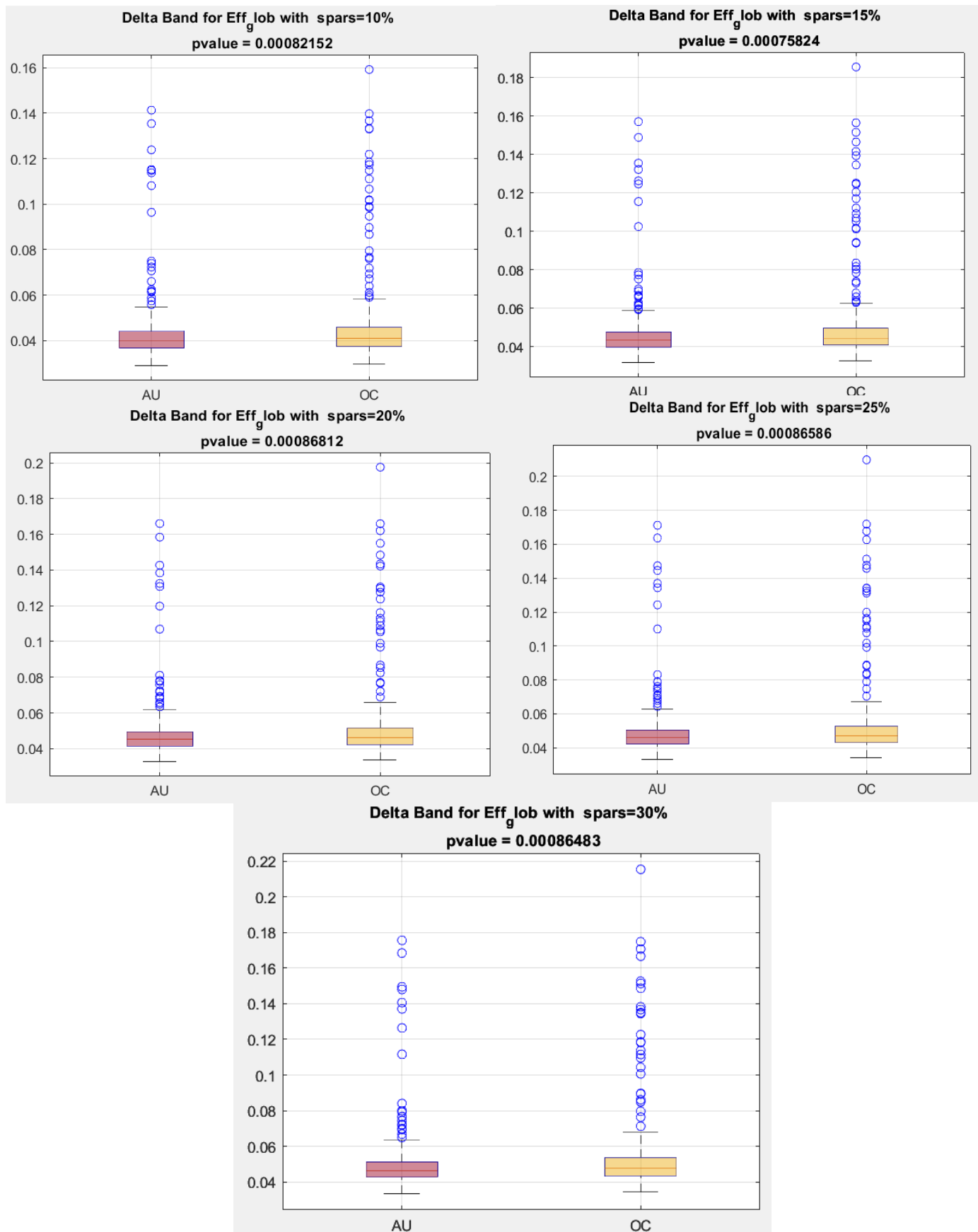
Cluster Coefficient (random)



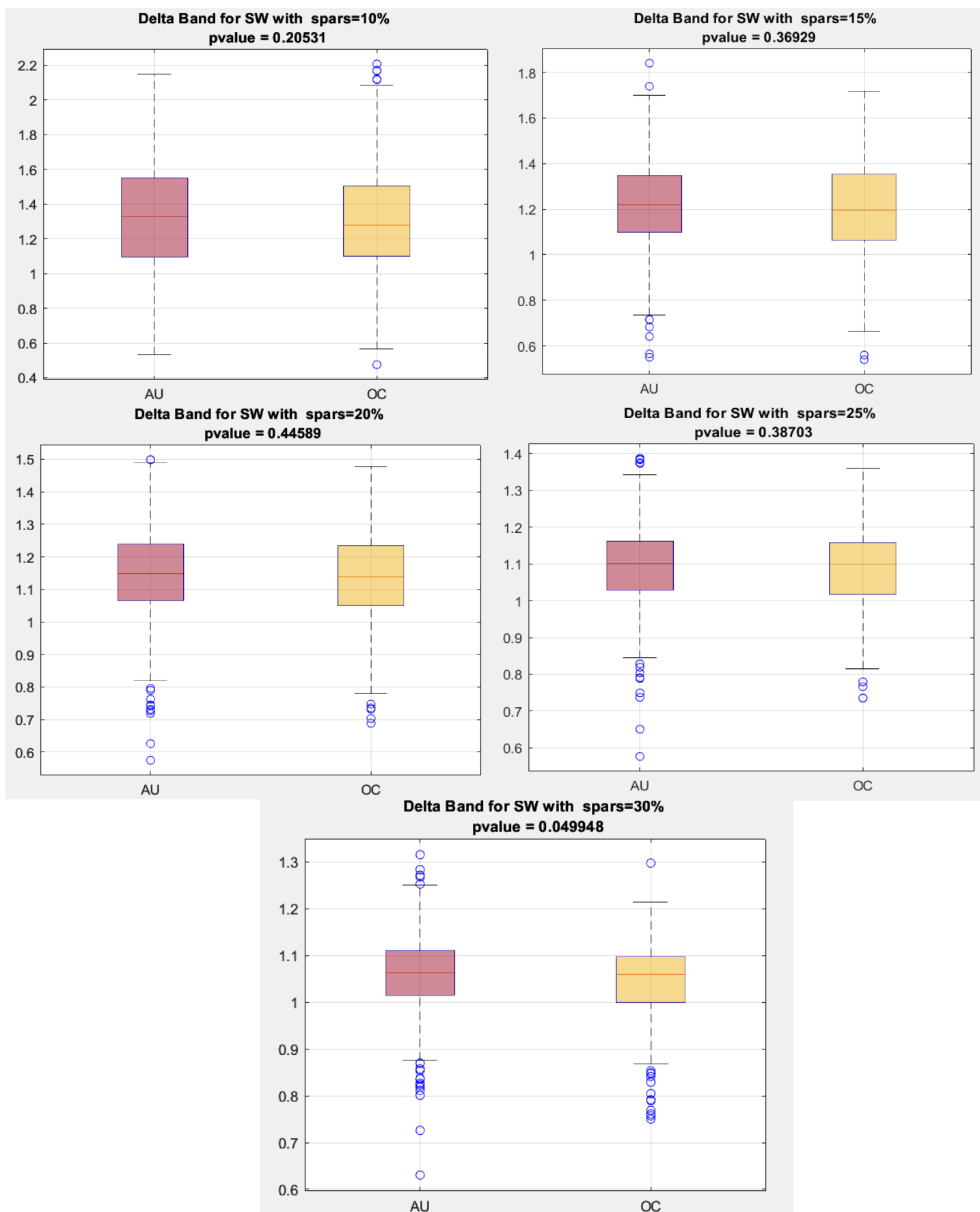
Cluster Coefficient (normal)



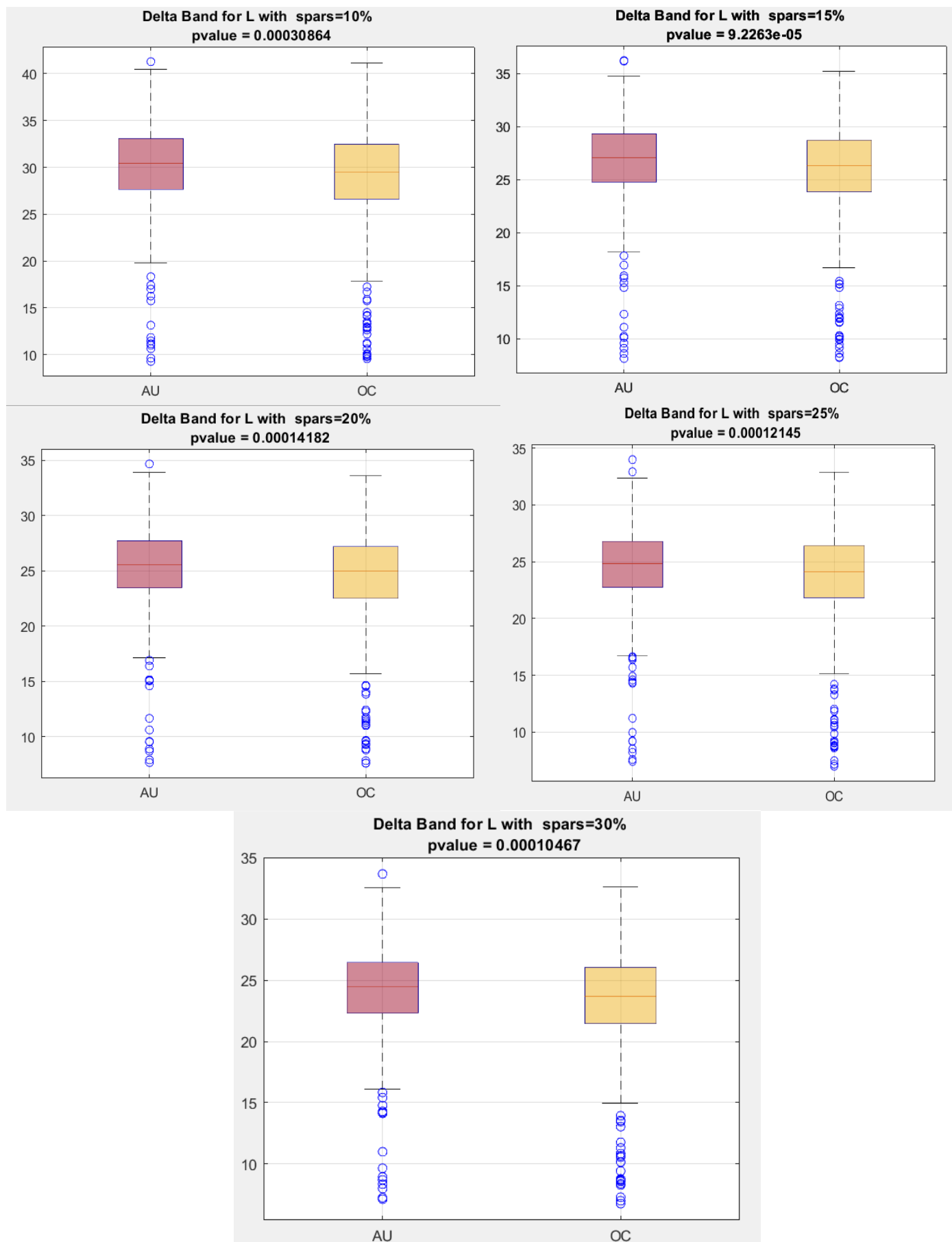
Global Efficiency



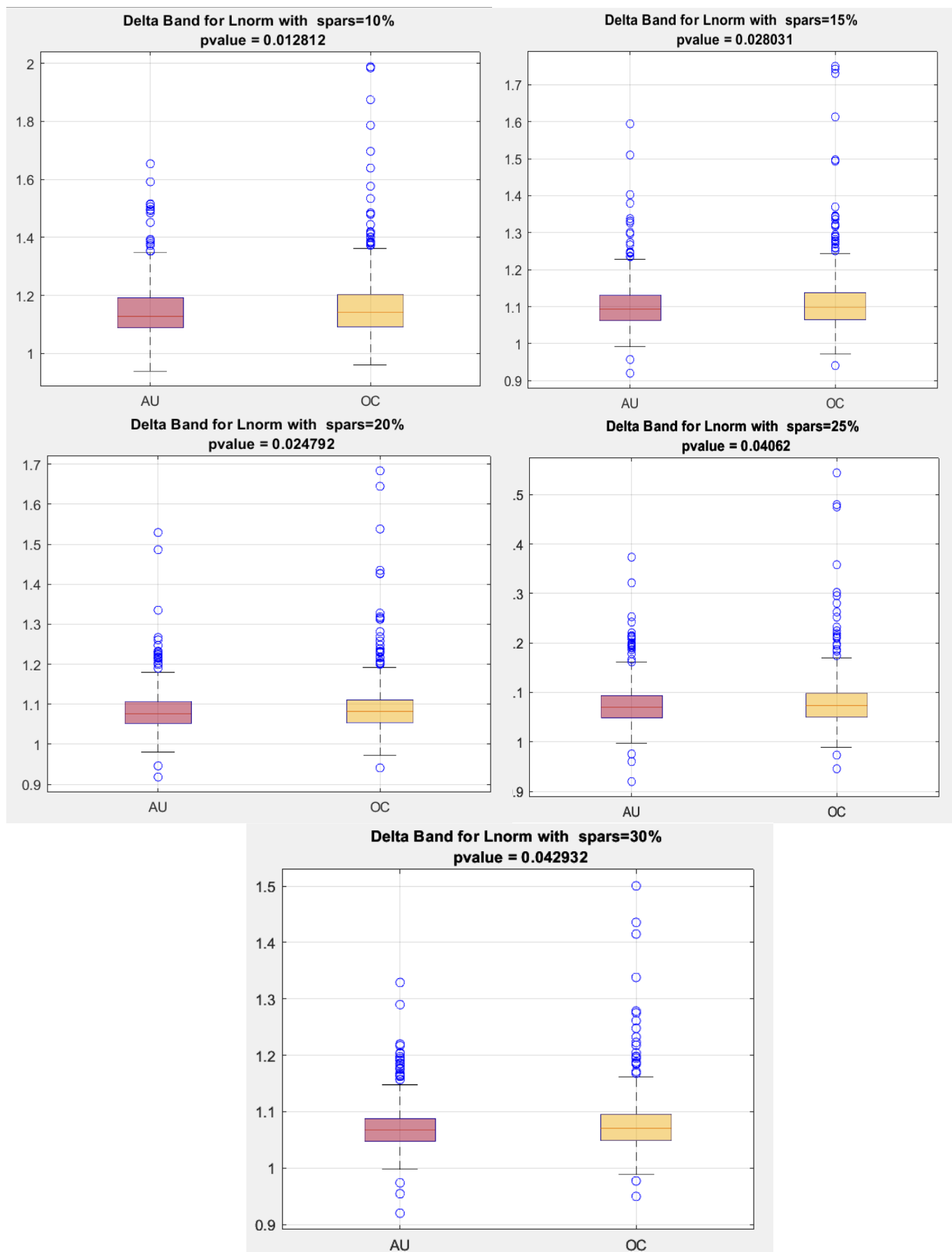
Small-Worldness



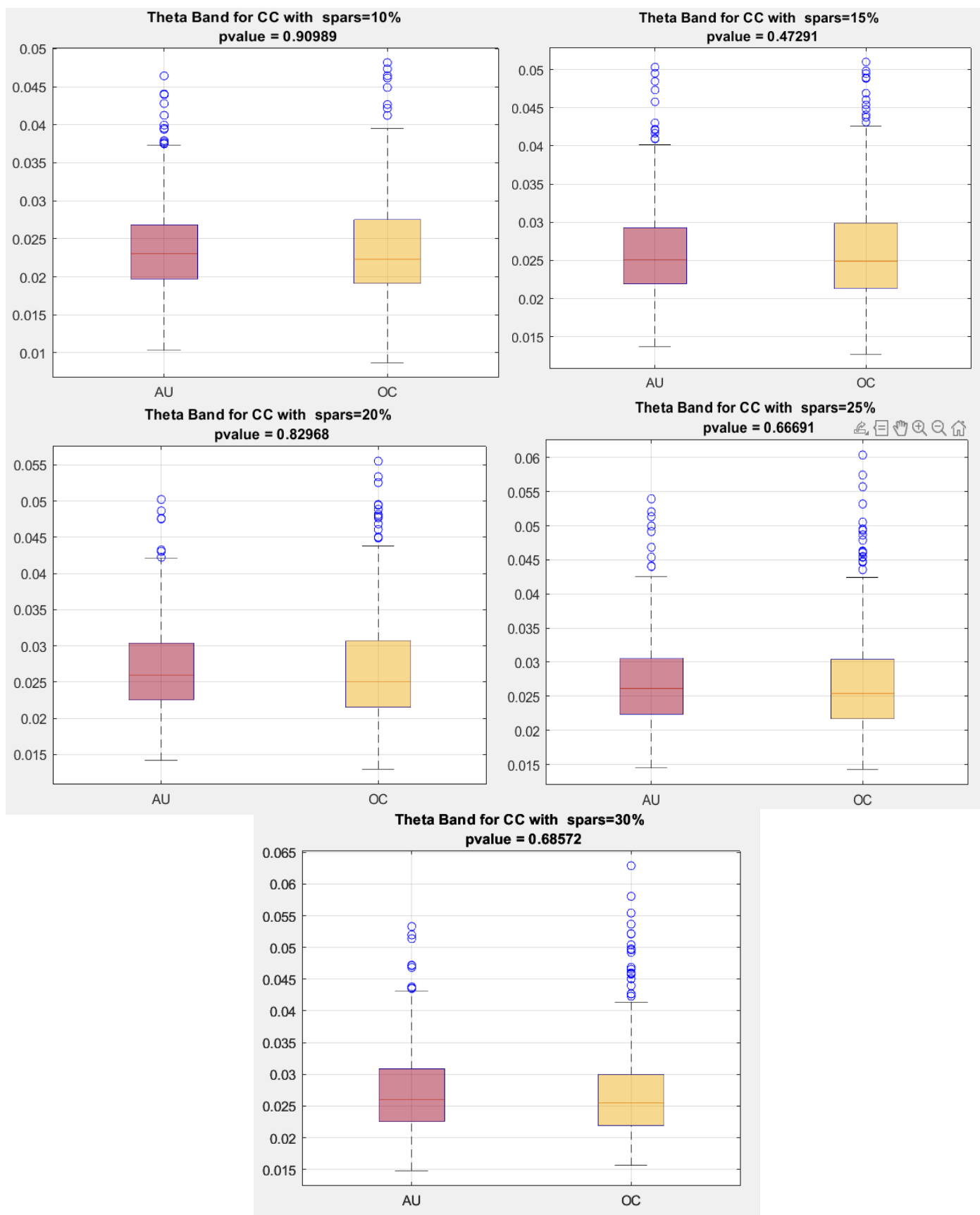
Characteristic Path Length



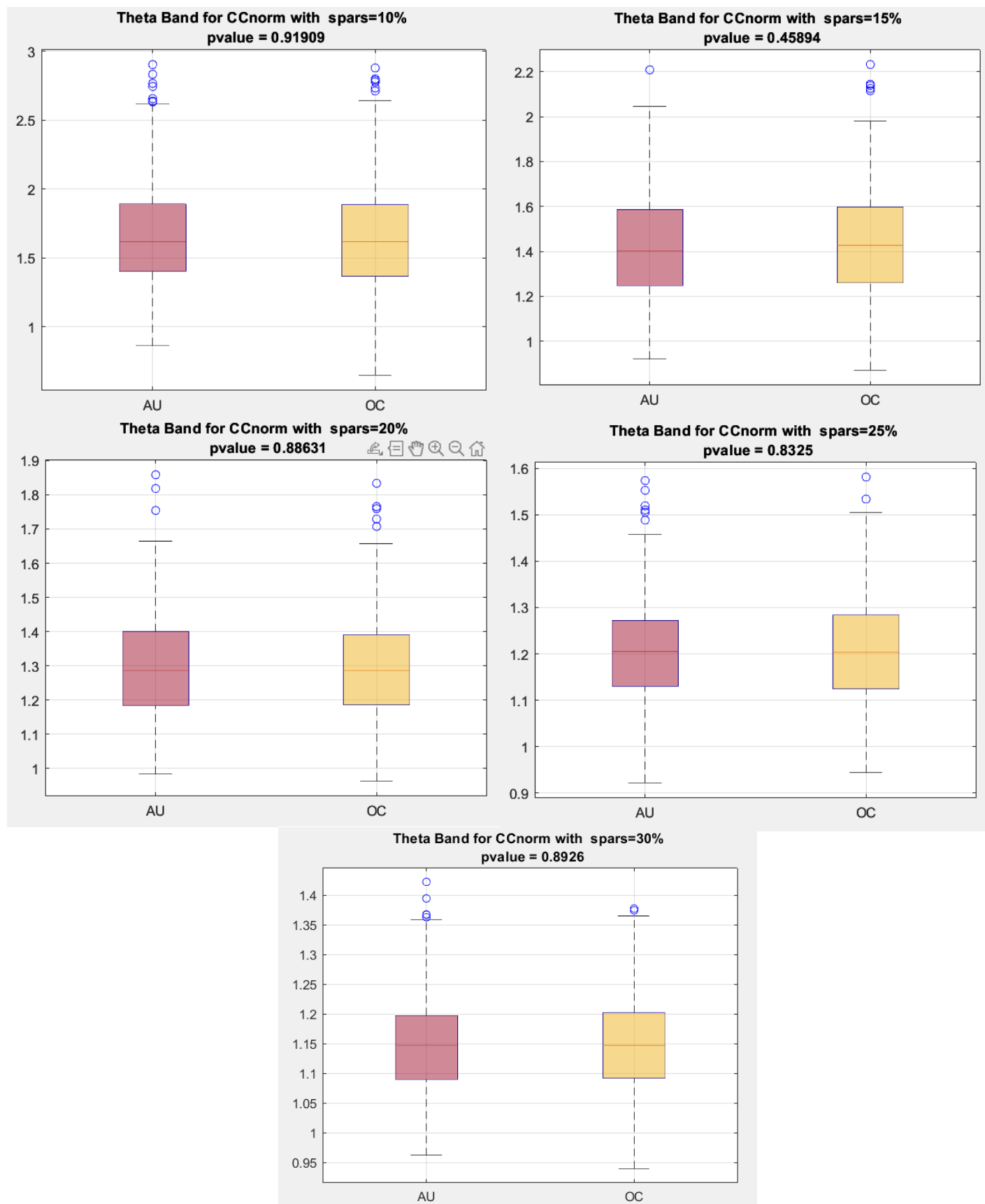
Characteristic Path Length (normal)



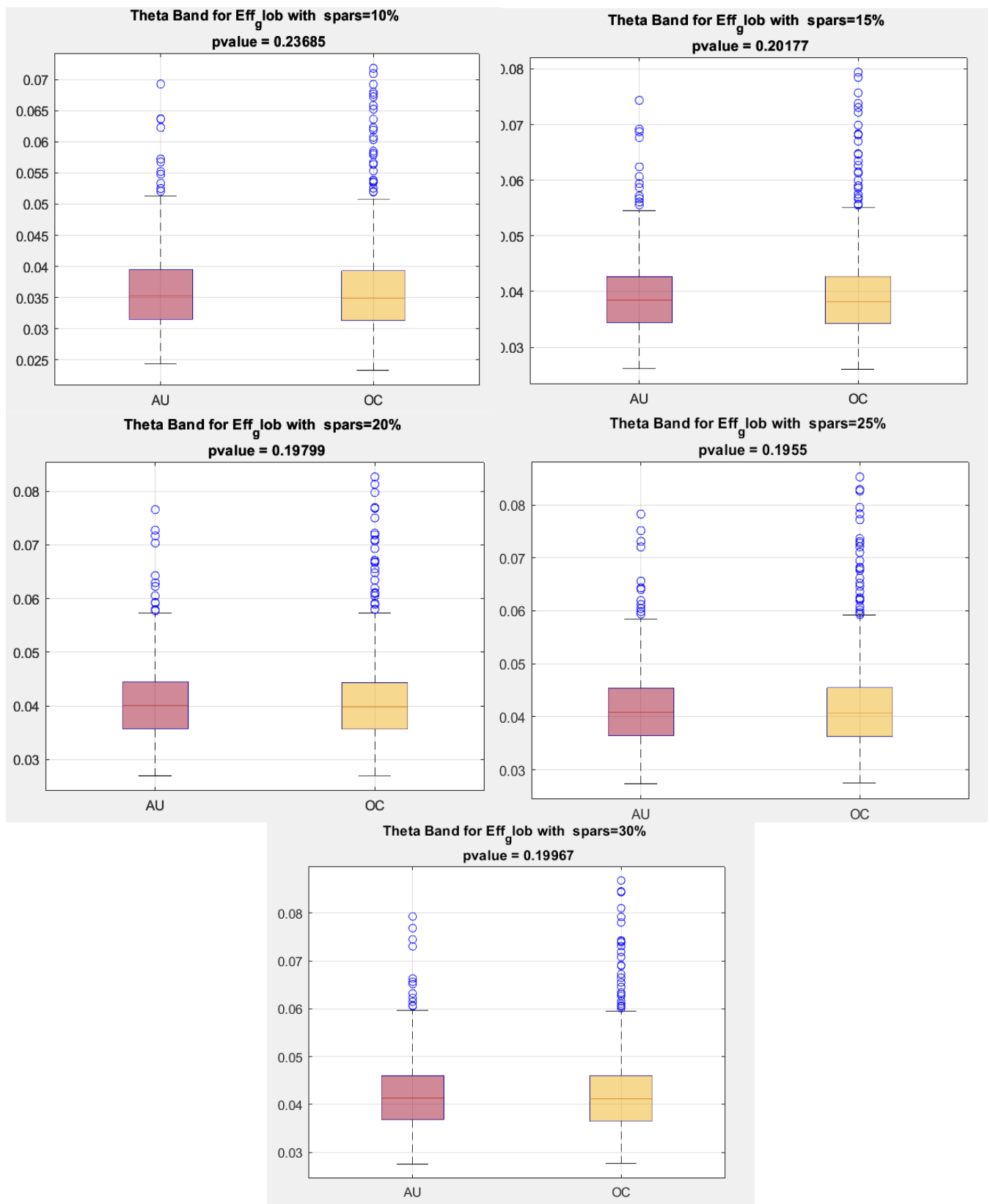
Συχνότητες Θήτα Cluster Coefficient



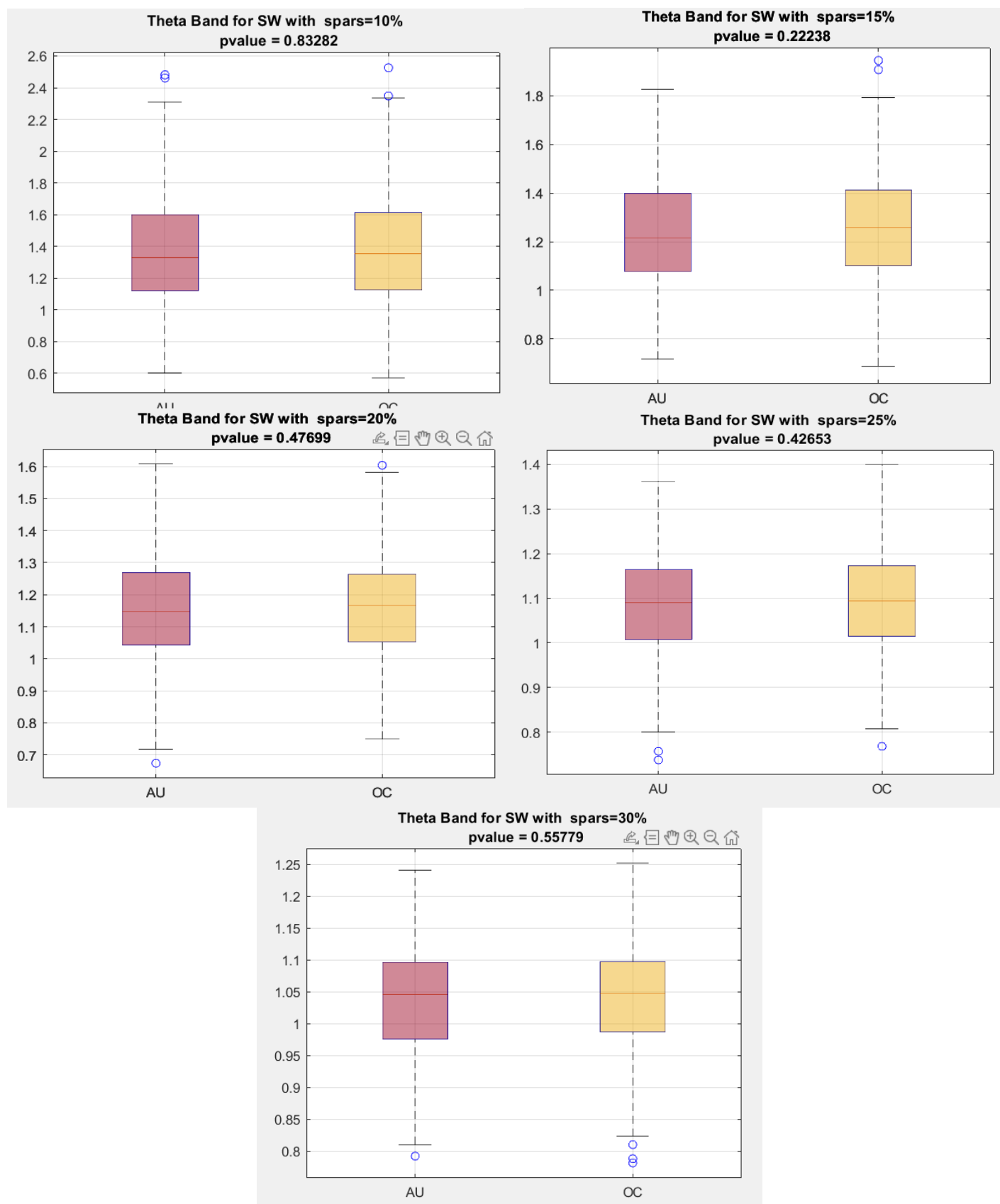
Cluster Coefficient (normal)



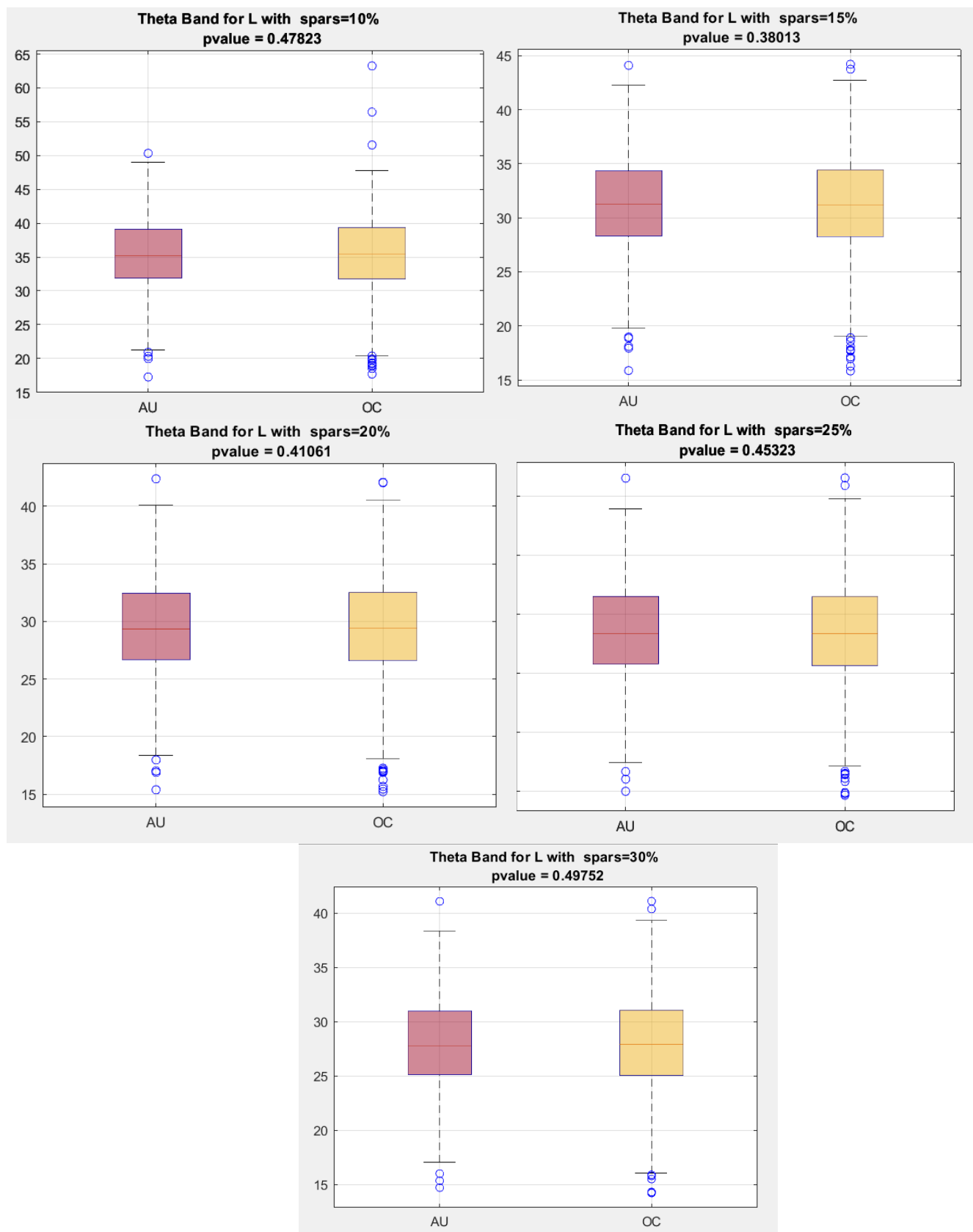
Global Efficiency



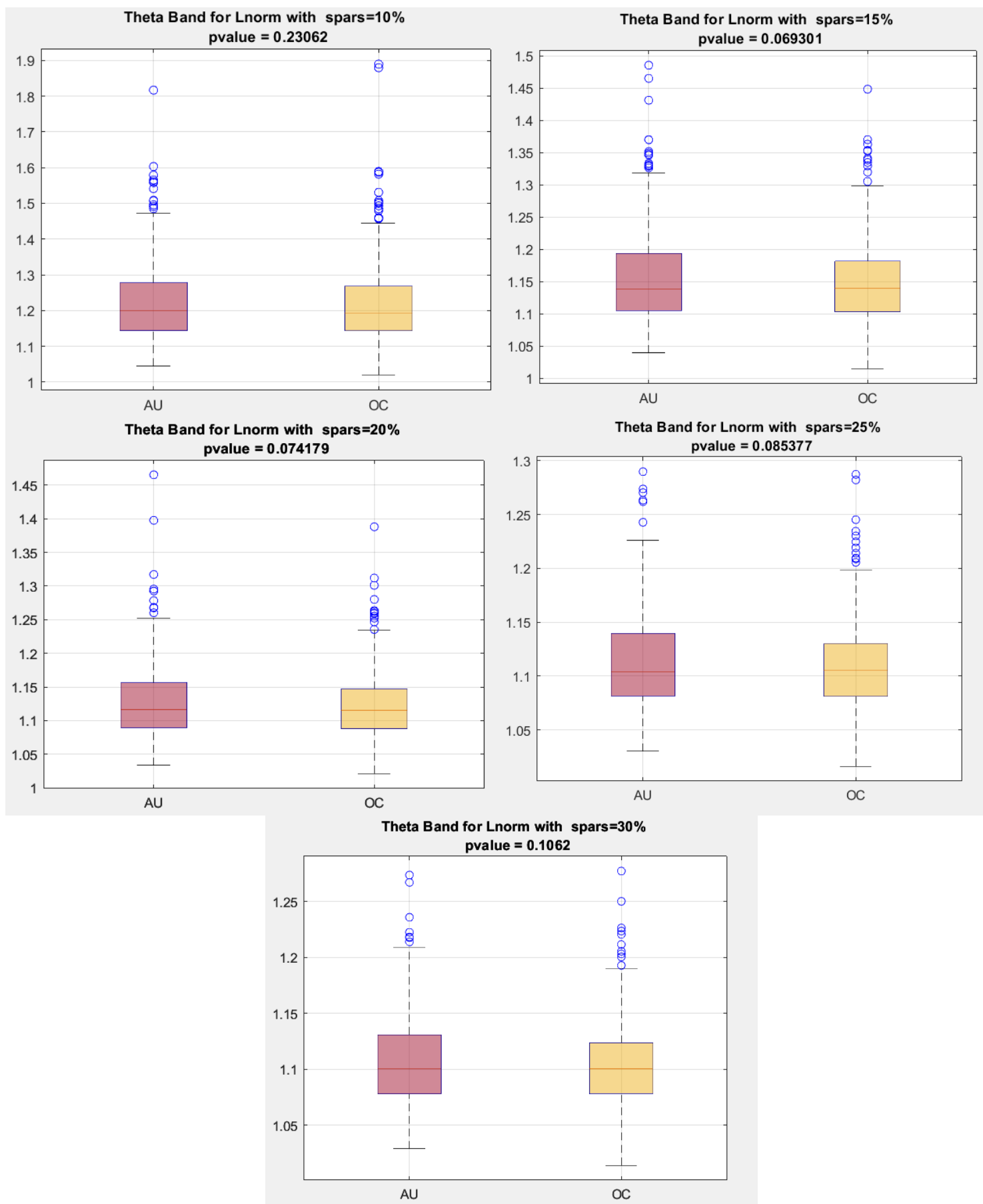
Small-Worldness



Characteristic Path Length



Characteristic Path Length (normal)



4.1.2 Αποτελέσματα *T-test*

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε μία ολοκληρωμένη εικόνα για το ποιά μπάντα συχνοτήτων κυριαρχεί, συμμετέχει και ποια απουσιάζει στα συγκεκριμένα πειράματα. Παρακάτω, παρουσιάζονται οι πίνακες που περιέχουν τις τιμές των *p_value* ανάλογα τη μετρική και τις τιμές του *sparsity*.

Alpha Band

spars.	CC	CC (rand)	CC (norm)	Eff. glob.	SW	L	L (rand)	L (norm)
10%	0.00556	0.3302	0.0221	0.00206	0.00373	0.3702	0.5060	0.58192
15%	0.00446	0.12706	0.05189	0.00173	0.0765	0.2448	0.3724	0.65027
20%	0.00153	0.0356	0.02642	0.00171	0.0496	0.2323	0.3325	0.69192
25%	0.00056	0.0159	0.01528	0.00151	0.0225	0.22362	0.3116	0.58054
30%	0.00082	0.01167	0.00981	0.00148	0.02292	0.02409	0.32003	0.62617

Beta Band

spars.	CC	CC (rand)	CC (norm)	Eff. glob.	SW	L	L (rand)	L (norm)
10%	0.05618	0.60252	0.95368	0.01209	0.92415	0.08838	0.25653	0.95139
15%	0.78549	0.35487	0.2263	0.01232	0.26428	0.14853	0.23413	0.62383
20%	0.40824	0.16311	0.17541	0.01234	0.18297	0.18378	0.25422	0.45097
25%	0.29178	0.10831	0.08354	0.01207	0.08894	0.22669	0.28718	0.43128
30%	0.14755	0.05063	0.0368	0.01158	0.06220	0.23634	0.31278	0.56571

Gamma Band

spars.	CC	CC (rand)	CC (norm)	Eff. glob.	SW	L	L (rand)	L (norm)
10%	0.00177	0.04339	0.62237	0.01735	0.60399	0.05051	0.00046	0.00040
15%	0.00113	0.01198	0.88632	0.0056	0.28308	0.00763	0.00049	0.00106
20%	0.00178	0.01977	0.90239	0.00395	0.23704	0.00420	0.00029	0.00014
25%	0.00094	0.00855	0.55416	0.00349	0.35445	0.00327	0.00042	0.00035
30%	0.00044	0.00328	0.41109	0.00287	0.25722	0.00285	0.00038	0.00020

Delta Band

spars.	CC	CC (rand)	CC (norm)	Eff. glob.	SW	L	L (rand)	L (norm)
10%	0.02911	0.00469	0.58247	0.00082	0.20531	0.00030	6.8e-05	0.01281
15%	0.00202	0.00535	0.89727	0.00075	0.3692	9.2e-05	8.3e-05	0.02803
20%	0.00122	0.00454	0.76216	0.00086	0.44589	0.00014	0.00014	0.02479
25%	0.00082	0.00244	0.87572	0.00086	0.38703	0.00012	0.00018	0.0406
30%	0.00146	0.0015	0.34184	0.00086	0.04994	0.00010	0.00017	0.0429

Theta Band

spars.	CC	CC (rand)	CC (norm)	Eff. glob.	SW	L	L (rand)	L (norm)
10%	0.98098	0.99843	0.91909	0.23685	0.83282	0.47823	0.90975	0.23062
15%	0.47291	0.70304	0.45894	0.20177	0.22238	0.38013	0.97422	0.06931
20%	0.82968	0.82292	0.88631	0.19799	0.47699	0.41061	0.89371	0.07417
25%	0.66691	0.65466	0.8325	0.1955	0.42653	0.45323	0.82581	0.08537
30%	0.68572	0.6131	0.8926	0.19967	0.55779	0.49752	0.83226	0.1062

Κεφάλαιο 5

5.1 Συμπεράσματα

Σκοπός του συγκεκριμένου πειράματος είναι να δώσει ένα συγκεντρωτικό αποτέλεσμα συγκρίνοντας τις πέντε μπάντες συχνοτήτων της εγκεφαλικής δραστηριότητας και να καταλήξει στο συμπέρασμα για το ποιές συχνότητες και για ποιο λόγο φέρουν μεγαλύτερη εμπλοκή. Με μία απλή αποτίμηση των αποτελεσμάτων του προηγούμενου κεφαλαίου προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα γύρω από την ανάλυση δικτύων εγκεφαλογραφήματος σε πειράματα δημιουργικότητας. Φαίνεται σε πολλές περιπτώσεις να συμφωνούν τα αποτελέσματα με την επίσημη βιβλιογραφία, κάτι το οποίο μπορεί να συμβάλλει ενισχυτικά στην θεμελίωση κάποιων ευρέων συμπερασμάτων. Αντίστοιχα, προκύπτουν και κάποια συμπεράσματα που δεν επιβεβαιώνονται από την βιβλιογραφία και έχουν επομένως ερευνητικό ενδιαφέρον. Αρχικά, αξίζει να σημειωθεί ότι βιβλιογραφικά οι περισσότερες αντίστοιχες ερευνητικές εργασίες συμπεριλαμβάνουν στη μελέτη τους στους λοβούς του εγκεφάλου δείχνοντας με αυτόν τον τρόπο ποιες περιοχές ενεργοποιούνται περισσότερο, ενώ την ίδια στιγμή δεν ασχολούνται με τη δημιουργία μετρικών για την στατιστική σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στις συχνότητες *alpha* τα αποτελέσματα φαίνονται αρκετά παρόμοια με αυτά που φαίνονται βιβλιογραφικά. Την ίδια στιγμή, σε αυτή την κατηγορία συχνοτήτων φαίνεται να υπάρχουν πολλές φορές και αντικρουόμενα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, στη δική μας περίπτωση τα αποτελέσματα στηρίζονται στο γεγονός ότι οι ρυθμοί άλφα αυξάνουν την επικοινωνία στο φλοιό του εγκεφάλου και έτσι αυξάνεται η γνωστική λειτουργία [31]. Παράλληλα, όταν αυξάνεται η προσπάθεια για την εκπόνηση μιας πιο δημιουργικής σκέψης τα βλέφαρα κλείνουν με αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού άλφα [32]. Επομένως, τα αμφιλεγόμενα αποτελέσματα μας στηρίζονται αρχικά στο ότι παρόλο που μπορεί να αυξάνεται, κατά την πειραματική διαδικασία, η δραστηριότητα στο φλοιό και υπο φλοιό του εγκεφάλου, την ίδια στιγμή το άνοιγμα ή κλείσιμο των βλεφάρων από τους συμμετέχοντες αναιρεί την καθολική ή όχι συμμετοχή αυτής την μπάντας συχνοτήτων στη δημιουργική σκέψη.

Στην περίπτωση μας, οι συχνότητες *beta* φαίνεται να εμφανίζουν πολύ μικρή εμπλοκή στη δημιουργική σκέψη. Γενικότερα, αυτός ο ρυθμός εμφανίζεται σε φάση πλήρους εγρήγορσης και αποτελεί έναν από τους βασικούς ρυθμούς. Την ίδια στιγμή, κάποια περαιτέρω στοιχεία για αυτό το ρυθμό είναι πως κατά την αποκλίνουσα σκέψη παρατηρείται αποσυγχρονισμός ενώ κατά την συγκλίνουσα συγχρονισμός [33]. Παράλληλα, λόγω του ότι είναι ένας βασικός ρυθμός, απορρέει το συμπέρασμα ότι λειτουργεί και στη φάση της αποκλίνουσας και της συγκλίνουσας σκέψης, με αποτέλεσμα να μην δημιουργείται καμία ποιοτικά στατιστική διαφορά ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις.

Παρατηρώντας τους πίνακες των αποτελεσμάτων, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι συχνότητες *gamma* διαδραματίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο στα πειράματα δημιουργικότητας. Αυτό συμβαίνει, όπως επιβεβαιώνεται και από την βιβλιογραφία [32], καθώς τα χαρακτηριστικά διαφόρων αντικειμένων φαίνεται να αποθηκεύονται στη συνειδητή αντίληψη, παράλληλα η δραστηριότητα των κυμάτων γάμμα φαίνεται να έχουν συσχετιστεί με αισθητηριακές και διαδικασίες μνήμης, με αυτόν τον τρόπο όταν αυξάνονται, η επίλυση ζητημάτων μπορεί να συνδέσει και να εμπλέξει περισσότερες πληροφορίες και έτσι να οδηγήσει στην παραγωγή πιο δημιουργικών αποτελεσμάτων.

Παράλληλα, όσον αφορά τις συχνότητες *delta* φαίνεται στην περίπτωση μας να παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο. Επιβεβαιώνεται λοιπόν ότι οι συχνότητες αυτές συμμετέχουν στη διάρκεια δημιουργικών διαδικασιών καθώς η αύξηση τους φαίνεται να συνδέεται με τη συνεργασία διαφορετικών τμημάτων του εγκεφάλου και τη διακίνηση πληροφοριών μεταξύ αυτών. Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι η αύξηση τους συνδέεται με την επικοινωνία μεταξύ τμημάτων του εγκεφάλου που σχετίζονται με την επεξεργασία συναισθημάτων και τη δημιουργική έκφραση [34]. Αυτή η συνεργασία είναι κρίσιμη για τη διαμόρφωση και έκφραση των συναισθημάτων, που αποτελούν σημαντικό κομμάτι της δημιουργικής διαδικασίας.

Τέλος, εξετάζοντας τον ρυθμό *theta* παρατηρούμε ότι στην ανάλυση μας δεν παρουσιάζει καμία στατιστικά σημαντική διαφορά, βέβαια αυτό το αποτέλεσμα φαίνεται να αντικρούει τη γενικότερη βιβλιογραφία. Αναλυτικότερα, σε άλλες έρευνες υποστηρίζεται ότι αυτή η μπάντα συχνότητων σχετίζεται με τη διεύρυνση της επίγνωσης, την ενίσχυση της ευελιξίας του νοητικού συστήματος και την αυξημένη πρόσβαση σε ασυνείδητες διαδικασίες σκέψης. Η διεύρυνση του εύρους της συνείδησης μπορεί να σημαίνει ότι οι άνθρωποι είναι πιο δεκτικοί σε νέες ιδέες, συνδέσεις και καινοτομίες και άρα καλλιεργείται η δημιουργική τους σκέψη [29]. Την ίδια στιγμή υπάρχουν ευρήματα που δείχνουν ότι χαμηλότερα επίπεδα θήτα στο μετωπιαίο λοβό σχετίζονται με δημιουργική απόδοση, ενώ παρατηρείται επίσης ότι η αυξημένη δημιουργικότητα σχετίζεται με την ενισχυμένη λειτουργική συνδεσιμότητα του αριστερού ινιακού και του μέσου μετωπιαίου [35]. Τα παραπάνω αποτελέσματα έρχονται σε σύγκρουση με αυτό που παρουσιάζεται βιβλιογραφικά. Πιθανή αιτία μπορεί να είναι ότι η μελέτη μας δεν επικεντρώνεται σε κάθε λοβό του εγκεφάλου, κάτι το οποίο συμβαίνει σε όλες τις παραπάνω έρευνες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι μικρές αποκλίσεις ή αλλιώς στατιστικά σημαντικά διαφορές να χάνονται καθώς δεν επικρατούν σε όλο την επιφάνεια του εγκεφάλου αλλά μόνο σε συγκεκριμένα σημεία του μετωπιαίου και του ινιακού λοβού. Παράλληλα, αυτές οι συχνότητες λειτουργίας του εγκεφάλου φαίνονται να επιτελούν πολύ μεγάλο μέρος στο κομμάτι της μνήμης [36]. Η μνήμη είναι ένα στοιχείο το οποίο παρουσιάζεται και στις δύο περιπτώσεις του πειράματός μας, δηλαδή η διαδικασία περιγραφής του αντικειμένου αλλά και η διαδικασία περιγραφής εναλλακτικών χρήσεων, είναι λειτουργίες οι οποίες απαιτούν την ανάκληση πληροφοριών και χρειάζονται τη μνήμη. Επομένως και στις δύο περιπτώσεις το άτομο χρειάζεται να θυμηθεί και σε δεύτερο στάδιο να πραγματοποιήσει μία πιο σύνθετη διαδικασία, με αυτό τον τρόπο μπορεί να αιτιολογηθεί εν μέρη η μη εμφάνιση κάποιας στατιστικής διαφοράς ανάμεσα στα πειράματα.

5.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εξετάστηκαν οι πέντε μόντες συχνότητων με την χρήση μετρικών δικτύων. Το αποτέλεσμα ενδεχομένως επιβεβαιώνει εν μέρη την γενικότερη βιβλιογραφία με μερικές σαφώς διαφοροποιήσεις. Οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται στο ότι βιβλιογραφικά δεν εξετάστηκαν στατιστικά οι μετρικές αλλά αυτούσια τα σήματα. Επομένως, μία μελλοντική επέκταση της τωρινής εργασίας μπορεί να είναι η εξέταση όλων των παραπάνω αλλά σε ένα πιο συγκεκριμένο πλαίσιο, δηλαδή με την περαιτέρω τοπογραφική ανάλυση των δικτύων, μέσω των λοβών. Με αυτόν τον τρόπο θα δοθεί ποια είναι οι μεταξύ επικοινωνία αλλά και επίδραση της κάθε περιοχής στην δημιουργική σκέψη. Παράλληλα, κάτι που δεν υπάρχει βιβλιογραφικά είναι στατιστική αυτή ανάλυση να γίνει σε επίπεδο κάθε *subject*, δηλαδή παίρνοντας και ως παράμετρο κάποια χαρακτηριστικά της προσωπικότητας του κάθε συμμετέχοντα θα μπορεί να υπάρξει κάποιο αποτέλεσμα που θα αξιολογεί τη δημιουργικότητά του σύμφωνα με κάποια προσωπικά χαρακτηριστικά και κοινωνικές δεξιότητες. Οι επεκτάσεις επομένως είναι πολλές, το συγκεκριμένο ζήτημα είναι διεπιστημονικό και αγγίζει το ενδιαφέρον των ειδήμων τόσο της ψυχολογίας όσο και της νευροεπιστήμης. Άρα, όσο περισσότερο διευρυνθεί και μελετηθεί τόσες περισσότερες απαντήσεις θα δοθούν για τη δομή, τη λειτουργία και εν τέλη την διαμόρφωση σε επίπεδο συμπεριφοριστικό.

Βιβλιογραφία

- [1] Bassett, D. S., & Gazzaniga, M. S. (2011). "Understanding complexity in the human brain." *Trends in Cognitive Sciences*, 15(5), 200–209. doi:10.1016/j.tics.2011.03.006
- [2] Sejnowski, T., Koch, C., & Churchland, P. (1988). "Computational neuroscience." *Science*, 241(4871), 1299–1306. doi:10.1126/science.3045969
- [3] "Understanding Biocybernetics in Medical Research and Application." Retrieved from <https://helios-eie.ekt.gr/EIE/bitstream/10442/431/1/M01.026.04.pdf>
- [4] "Pediatric Neurosurgery Anatomy." Retrieved from <https://pediatric-neurosurgery.com/anatomy>
- [5] Squire, L. R., & Zola-Morgan, S. (1988). "Memory: brain systems and behavior." *Trends in Neurosciences*, 11(4), 170–175. doi:10.1016/0166-2236(88)90144-0
- [6] "Biology for High School – A". Retrieved from http://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/2666/Biologia_A-Lykeiou_html-empl/index9.html
- [7] Dietrich, A., & Kanso, R. (2010). "A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight." *Psychological Bulletin*, 136(5), 822–848. doi:10.1037/a0019749
- [8] Κατσουρης Δ., Παυλόπουλος Σ., Πρέντζα Α. (2003). "Εισαγωγή στην Βιοϊατρική Τεχνολογία και ανάλυση Ιατρικών Σημάτων." Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- [9] Buzsáki, G. (2006). *"Rhythms of the Brain."* Oxford University Press.
- [10] Stevens, C. E., & Zabelina, D. L. (2019). "Creativity comes in waves: an EEG-focused exploration of the creative brain." *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 154–162. doi:10.1016/j.cobeha.2019.02.003
- [11] "Electroencephalography." Retrieved from <https://en.wikipedia.org/wiki/Electroencephalography>
- [12] Mölle, M., Marshall, L., Wolf, B., Fehm, H. L., & Born, J. (1999). "EEG complexity and performance measures of creative thinking." *Psychophysiology*, 36(1), 95–104. doi:10.1017/s0048577299961619
- [13] Berkovich-Ohana, A., Glicksohn, J., Ben-Soussan, T. D., & Goldstein, A. (2016). "Creativity Is Enhanced by Long-Term Mindfulness Training and Is Negatively Correlated with Trait Default-Mode-Related Low-Gamma Inter-Hemispheric Connectivity." *Mindfulness*, 8(3), 717–727. doi:10.1007/s12671-016-0649-y
- [14] Danko, S. G., Shemyakina, N. V., Nagornova, Z. V., & Starchenko, M. G. (2009). "Comparison of the effects of the subjective complexity and verbal creativity on EEG spectral power parameters." *Human Physiology*, 35(3), 381–383. doi:10.1134/s0362119709030153
- [15] Mazza, A., Dal Monte, O., Schintu, S., Colombo, S., Michielli, N., Sarasso, P., Törlind, P., Cantamessa, M., Montagna, F., & Ricci, R. (2023). "Beyond alpha-band: The neural correlate of creative thinking." *Neuropsychologia*, 179, 108446. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2022.108446

- [16] He, Y., & Evans, A. (2010). "Graph theoretical modeling of brain connectivity." *Current Opinion in Neurology*, 1. doi:10.1097/wco.0b013e32833aa567
- [17] Sporns, O. (2011). *"Networks of the Brain."* MIT Press.
- [18] "Brain Networks and Small-World Properties." Retrieved from <https://bit.ly/3u8ttj6>
- [19] Stam, C. J., Nolte, G., & Daffertshofer, A. (2007). "Phase lag index: Assessment of functional connectivity from multi-channel EEG and MEG with diminished bias from common sources." *Human Brain Mapping*, 28(11), 1178–1193. doi:10.1002/hbm.20346
- [21] Bassett, D. S., & Bullmore, E. T. (2016). "Small-World Brain Networks Revisited." *The Neuroscientist*, 23(5), 499–516. doi:10.1177/1073858416667720
- [23] Humphries, M. D., & Gurney, K. (2008). "Network 'Small-World-Ness': A Quantitative Method for Determining Canonical Network Equivalence." *PLoS ONE*, 3(4), e0002051. doi:10.1371/journal.pone.0002051
- [24] McAssey, M. P., & Bijma, F. (2015). "A clustering coefficient for complete weighted networks." *Network Science*, 3(2), 183–195. doi:10.1017/nws.2014.26
- [25] Bassett, D. S., & Bullmore, E. T. (2016). "Small-World Brain Networks Revisited." *The Neuroscientist*, 23(5), 499–516. doi:10.1177/1073858416667720
- [26] Nešetřil, J., & Ossona de Mendez, P. (2012). *"Sparsity."* Algorithms and Combinatorics. doi:10.1007/978-3-642-27875-4
- [27] Kim, T. K. (2015). "T test as a parametric statistic." *Korean Journal of Anesthesiology*, 68(6), 540. doi:10.4097/kjae.2015.68.6.540
- [28] "Brain Signal Processing and Analysis." Retrieved from <https://bit.ly/3Rh6RWM>
- [29] Marmpena, M., Dimitriadis, S. I., Thakor, N., & Bezerianos, A. (2016). "Phase to amplitude coupling as a potential biomarker for creative ideation: An EEG study." 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC). doi:10.1109/embc.2016.7590720
- [30] McGill, R., Tukey, J. W., & Larsen, W. A. (1978). "Variations of Box Plots." *The American Statistician*, 32(1), 12–16. doi:10.1080/00031305.1978.1047923
- [31] Roux, F., & Uhlhaas, P. J. (2014). "Working memory and neural oscillations: alpha–gamma versus theta–gamma codes for distinct WM information?" *Trends in Cognitive Sciences*, 18(1), 16–25. doi:10.1016/j.tics.2013.10.010
- [32] Stevens, C. E., & Zabelina, D. L. (2019). "Creativity comes in waves: an EEG-focused exploration of the creative brain." *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 27, 154–162. doi:10.1016/j.cobeha.2019.02.003
- [33] Mazza, A., Monte, O. D., Schintu, S., Colombo, S., Michielli, N., Sarasso, P., Törlind, P., Cantamessa, M., Montagna, F., & Ricci, R. (2023). "Beyond alpha-band: The neural correlate of creative thinking." *Neuropsychologia*, 179, 108446. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2022.108446

- [34] Boot, N., Baas, M., Mühlfeld, E., de Dreu, C. K. W., & van Gaal, S. (2017). "Widespread neural oscillations in the delta band dissociate rule convergence from rule divergence during creative idea generation." *Neuropsychologia*, 104, 8–17. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2017.08.006
- [35] Wokke, M. E., Padding, L., & Kr, R. (2018). "Creative brains show reduced mid-frontal theta." *bioRxiv*. doi:10.1101/370494
- [36] Herweg, N. A., Solomon, E. A., & Kahana, M. J. (2020). "Theta Oscillations in Human Memory." *Trends in Cognitive Sciences*. doi:10.1016/j.tics.2019.12.006