



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ-ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ Ε. ΧΟΡΟΖΟΓΛΟΥ
Πτυχιούχος Μαθηματικός, MSc στην Επιστήμη του Διαδικτύου

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ
ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ
ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2020





ARISTOTLE UNIVERSITY OF THESSALONIKI
FACULTY OF SCIENCES
SCHOOL OF GEOLOGY

DIMITRIOS-EFSTATHIOS E. CHOROZOGLU
Graduate in Mathematics, MSc in Web Science

CONTRIBUTION TO THE SEISMIC HAZARD ASSESSMENT BY
USING MULTIVARIATE SEISMIC TIME SERIES

Ph.D. THESIS

THESSALONIKI
2020





ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ-ΕΥΣΤΑΘΙΟΣ Ε. ΧΟΡΟΖΟΓΛΟΥ

Πτυχιούχος Μαθηματικός, MSc στην Επιστήμη του Διαδικτύου

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ
ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ

Εκπονήθηκε στον Τομέα Γεωφυσικής του Τμήματος Γεωλογίας Α.Π.Θ.

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ. τον Ιανουάριο του 2020

Ημερομηνία Προφορικής εξέτασης: 23/06/2020

Αριθμός Παραρτήματος Επιστημονικής Επετηρίδας Τμήματος Γεωλογίας Νο: 936

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Παπαδημητρίου Ελευθερία, Καθηγήτρια Α.Π.Θ., Επιβλέπουσα

Κουγιουμτζής Δημήτριος, Καθηγητής Α.Π.Θ., Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Τσακλίδης Γεώργιος, Καθηγητής Α.Π.Θ., Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Εξεταστική Επιτροπή

1. Παπαδημητρίου Ελευθερία, Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
2. Κουγιουμτζής Δημήτριος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
3. Τσακλίδης Γεώργιος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
4. Καρακώστας Βασίλειος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
5. Παπαδοπούλου Αλεξάνδρα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Α.Π.Θ.
6. Παπαζάχος Κωνσταντίνος, Καθηγητής Α.Π.Θ.
7. Βαλλιανάτος Φίλιππος, Καθηγητής Ε.Κ.Π.Α.



© Δημήτριος-Ευστάθιος Ε. Χορόζογλου, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΠΟΛΥΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ-Διδακτορική Διατριβή

© Dimitrios-Efstathios E. Chorozoglou, 2020

All rights reserved.

CONTRIBUTION TO THE SEISMIC HAZARD ASSESSMENT BY USING MULTIVARIATE SEISMIC TIME SERIES-Ph.D. Thesis

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 την χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



The important thing in science is not so much to obtain new facts as to discover new ways of thinking about them.

William Lawrence Bragg (1890-1971)





Περιεχόμενα

Δημοσιεύσεις και ανακοινώσεις σε συνέδρια	11
Πρόλογος	15
Ευχαριστίες	17
Περίληψη.....	18
Abstract	20
Κεφάλαιο 1 ^ο -Εισαγωγή	21
1.1 Περιοχή μελέτης.....	21
1.2 Αναφορά σε στατιστικές προσεγγίσεις εκτίμησης σεισμικής δραστηριότητας	22
1.3 Αναφορά ερευνητικής δραστηριότητας στα μέτρα δικτύου.....	24
1.4 Αναφορά ερευνητικής δραστηριότητας στις μη-τετριμμένες ιδιότητες δικτύου.....	26
1.5 Αναφορά ερευνητικής δραστηριότητας στον κανονικοποιημένο συντελεστή συσχέτισης.....	27
Κεφάλαιο 2 ^ο -Μελέτη των μέτρων δικτύου.....	29
2.1 Εισαγωγή.....	29
2.2 Κατασκευή σεισμικού δικτύου.....	29
2.2.1 Κατασκευή σεισμικού δικτύου από την διαδοχή σεισμών.....	31
2.2.2 Κατασκευή σεισμικού δικτύου συσχέτισης	33
2.2.3 Κατασκευή σεισμικού δικτύου επανάληψης.....	35
2.3 Μέτρα δικτύου.....	38
2.3.1 Degree centrality/Strength (Βαθμός της κεντρικότητας/Ισχύς)	38
2.3.2 Characteristic path length (Χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής)	39
2.3.3 Global efficiency (Συνολική αποδοτικότητα)	39
2.3.4 Clustering coefficient (Συντελεστής συσταδοποίησης)	40
2.3.5 Betweenness centrality (Ενδιαμεσότητα της κεντρικότητας)	41
2.3.6 Eigenvector centrality (Ιδιοδιάνυσμα της κεντρικότητας)	41
2.3.7 Assortativity (Ομοιότητα)	42
2.3.8 Eccentricity (Εκκεντρότητα)	42
2.3.9 Diameter (Διάμετρος).....	43
2.4 Κατασκευή τυχαιοποιημένου δικτύου.....	43
2.4.1 Μέθοδος τυχαιοποίησης RNnoddeg.....	44
2.4.2 Μέθοδος τυχαιοποίησης RNavestr	45
2.4.3 Μέθοδος τυχαιοποίησης RNpoisson	47
2.4.4 Αλγόριθμος τυχαιοποίησης IAAFT.....	47
2.4.5 Μέθοδος τυχαιοποίησης RTSweight.....	48
2.4.6 Μέθοδος τυχαιοποίησης RTSbinthr	50
2.4.7 Μέθοδος τυχαιοποίησης RTSbindeg.....	51
2.5 Στατιστικός έλεγχος	52
2.6 Εφαρμογές σε πραγματικά δεδομένα και αποτελέσματα	54

2.6.1 Μελέτη των μέτρων δικτύου μεταξύ κύριων σεισμών.....	54
2.6.2 Μελέτη των μέτρων δικτύου σε μετασεισμικές ακολουθίες	67
Κεφάλαιο 3^ο-Μελέτη των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων δικτύου.....	79
3.1. Εισαγωγή.....	79
3.2 Μη-τετριμμένες ιδιότητες του δικτύου	79
3.2.1 Ιδιότητα του τυχαίου δικτύου (Random network).....	79
3.2.2 Ιδιότητα του μικρόκοσμου (Small-world).....	80
3.2.3 Ιδιότητα της ελεύθερης κλίμακας (Scale-free).....	81
3.3 Στατιστικός έλεγχος	82
3.4 Είδη σφαλμάτων του στατιστικού ελέγχου	84
3.4.1 Σφάλμα τύπου I	84
3.4.2 Σφάλμα τύπου II.....	85
3.5 Μελέτη προσομοίωσης για την δομή του δικτύου	85
3.5.1 Έλεγχος της δομής του τυχαίου δικτύου (έλεγχος της εξειδίκευσης)	86
3.5.2 Έλεγχος της δομής του μικρόκοσμου (έλεγχος της ευαισθησίας)	88
3.6 Εφαρμογές σε πραγματικά δεδομένα και αποτελέσματα	92
3.6.1 Μελέτη των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων δικτύου πριν από κύριους σεισμούς	92
3.6.2 Μελέτη των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων του δικτύου σε μετασεισμικές ακολουθίες	99
3.6.3 Έλεγχος της ανεξαρτησίας των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων του σεισμικού δικτύου από την μεθοδολογία κατασκευής του	102
Κεφάλαιο 4^ο-Μελέτη του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης.....	115
4.1 Εισαγωγή.....	115
4.2 Κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης.....	115
4.3 Στατιστικός έλεγχος	116
4.3.1 Ο παραμετρικός στατιστικός έλεγχος.....	117
4.3.2 Ο μη-παραμετρικός στατιστικός έλεγχος τυχαιοποίησης.....	117
4.4 Μελέτη προσομοίωσης.....	118
4.4.1 Κατασκευή προσομοιωτικών δεδομένων	119
4.4.2 Παράδειγμα προσομοιωτικής μελέτης	121
4.4.3 Ανεξάρτητες μεταβλητές (Έλεγχος εξειδίκευσης)	126
4.4.4 Εξαρτημένες μεταβλητές (Έλεγχος ευαισθησίας).....	127
4.5 Εφαρμογή σε πραγματικά δεδομένα και αποτελέσματα	129
4.6 Εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας για τον Ελληνικό χώρο.....	131
Κεφάλαιο 5^ο-Συμπεράσματα.....	141
Παράρτημα.....	145
Βιβλιογραφία.....	167

Δημοσιεύσεις και ανακοινώσεις σε συνέδρια

Δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά (εντός διδακτορικής διατριβής)

1. **D. Chorooglou**, D. Kugiumtzis and E. Papadimitriou, "Application of complex network theory to the recent foreshock sequences of Methoni (2008) and Kefalonia (2014) in Greece", *Acta Geophysica*, 65(3), 543-553, 2017, DOI 10.1007/s11600-017-0039-4.
2. **D. Chorooglou**, D. Kugiumtzis and E. Papadimitriou, "Testing the structure of earthquake networks from multivariate time series of successive main shocks in Greece", *Physica A*, 499C, 28-39, 2018, DOI: 10.1016/j.physa.2018.01.033.
3. **D. Chorooglou** and D. Kugiumtzis, "Testing the randomness of correlation networks from multivariate time series", *Journal of Complex Networks*, 7(2), 190-209, 2018, DOI: 10.1093/comnet/cny020.
4. **D. Chorooglou** and E. Papadimitriou, "Monitoring earthquake network measures between main shocks in Greece", *Journal of Seismology*, 23(3), 505-519, 2019, DOI: 10.1007/s10950-019-09820-7.
5. **D. Chorooglou**, E. Papadimitriou and D. Kugiumtzis, "Investigating small-world and scale-free structure of earthquake networks in Greece", *Chaos, Solitons & Fractals*, 122C, 143-152, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2019.03.018>.
6. **D. Chorooglou** and E. Papadimitriou, "Investigation of earthquake recurrence networks: the cases of 2014 and 2015 aftershock sequences in Ionian Islands, Greece", *Natural Hazards*, 102(3), 783-805, 2020, DOI: 10.1007/s11069-020-03915-y.

Δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά (εκτός διδακτορικής διατριβής)

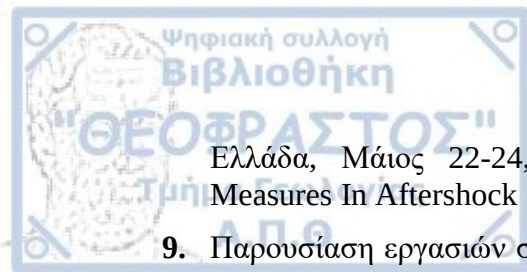
7. **D. Chorooglou**, A. Iliopoulos, C. Kourouklas, O. Mangira and E. Papadimitriou, "Earthquake Networks as a Tool for Seismicity Investigation: a Review", *Pure and Applied Geophysics*, 176(11), 4649-4660, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02253-w>.
8. A. Iliopoulos, **D. Chorooglou**, C. Kourouklas, O. Mangira and E. Papadimitriou, "Superstatistics, complexity and earthquakes: a brief review and application on Hellenic seismicity", *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, 60(4), 531-548, 2019, DOI: 10.4430/bgta0290.
9. O. Mangira, C. Kourouklas, **D. Chorooglou**, A. Iliopoulos and E. Papadimitriou, "Modeling the earthquake occurrence with time-dependent processes: a brief review", *Acta Geophysica*, 67(3), 739-752, 2019, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00284-4>.
10. A. Iliopoulos, **D. Chorooglou**, C. Kourouklas, O. Mangira and E. Papadimitriou, "Memory and Renewal Aging of Strong Earthquakes in Hellenic Seismicity", *Chaos, Solitons & Fractals*, 131, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2019.109511>.
11. C. Kourouklas, O. Mangira, A. Iliopoulos, **D. Chorooglou** and E. Papadimitriou, "A study of short-term spatiotemporal clustering features of Greek seismicity", *Journal of Seismology*, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09928-1>.

Δημοσιεύσεις σε τόμους συνεδρίων με κριτές

12. **D. Chorozoglou**, D. Kugiumtzis and E. Papadimitriou, "*Study of the structure and testing the randomness in correlation earthquake networks from multivariate time series*", 28th Panhellenic Statistics Conference, Athens, Greece, April 15-18, 338-352, 2015, in Greek.
13. **D. Chorozoglou**, D. Kugiumtzis and E. Papadimitriou, "*Small-world property and distinct evolution of complex networks from historical earthquakes in Greece*", submitted to the International Conference "SCience in TEchnology - SCinTE - 2015", Athens, Greece, November 5-7, 258-262, 2015.
14. **D. Chorozoglou**, D. Kugiumtzis and E. Papadimitriou, "*Seismic hazard assessment of earthquakes in Greece using directed earthquake networks*", 29th Panhellenic Statistics Conference, Naousa, Greece, May 4-7, 283-298, 2016.
15. **D. Chorozoglou**, D. Kugiumtzis, E. Papadimitriou and G. Tsaklidis, "*Ranking of seismic zones in Greece using measures of networks formed from earthquake historical data*", 14th International Congress of the Geological Society of Greece, Thessaloniki, Greece, May 25-27, L, 1299-1308, 2016.

Ανακοινώσεις σε συνέδρια (Εθνικά και διεθνή)

1. Παρουσίαση εργασίας στο 28ο Πανελλήνιο Συνέδριο Στατιστικής, «Χωρική Στατιστική και Εφαρμογές της Στατιστικής στη Γενετική και την Πληροφορική», Αθήνα, Ελλάδα, Απρίλιος 15-18, 2015, με τίτλο: "Μελέτη της δομής και έλεγχος τυχαιότητας σεισμικών δικτύων συσχέτισης από πολυμεταβλητές χρονοσειρές".
2. Παρουσίαση εργασίας με αφίσα (poster) στο Διεθνές Συνέδριο Science in technology (SCinTE 2015), Athens, Greece, November 5-7, 2015, με τίτλο: "Small-world property and distinct evolution of complex networks from historical earthquakes in Greece".
3. Παρουσίαση εργασίας στο 29ο Πανελλήνιο Συνέδριο Στατιστικής, «Ανάλυση κινδύνου στο περιβάλλον και την οικονομία», Νάουσα, Ελλάδα, Μάιος 4-7, 2016, με τίτλο: "Seismic hazard assessment of earthquakes in Greece using directed earthquake networks".
4. Παρουσίαση εργασίας στο 14^ο Διεθνές Συνέδριο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας (14th International Congress of the Geological Society of Greece), Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, Μάιος 25-27, 2016, με τίτλο: "Ranking of seismic zones in Greece using measures of networks formed from earthquake historical data".
5. Παρουσίαση εργασίας στο 23ο Θερινό Σχολείο-Συνέδριο «Δυναμικά Συστήματα και Πολυπλοκότητα», Καλάνδρα, Ελλάδα, Αύγουστος-Σεπτέμβριος, 27-03/8-9, 2016, με τίτλο: "Κατασκευή τυχαίων δικτύων από πολυμεταβλητές χρονοσειρές".
6. Παρουσίαση εργασίας στο 31ο Πανελλήνιο Συνέδριο Στατιστικής, «Η Επιστήμη των Δεδομένων στην Πληροφορική και τη Βιοϊατρική», Λαμία, Ελλάδα, Μάιος 4-6, 2018, με τίτλο: "Διερεύνηση της συσχέτισης διαδοχικών σεισμών πριν τον κύριο σεισμό από δεδομένα σεισμικού καταλόγου για τον ελληνικό χώρο".
7. Παρουσίαση εργασίας με αφίσα (poster) στο International Conference of Complex Systems, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα, Σεπτέμβριος 23-28, 2018, με τίτλο: "Monitoring the Measures for Earthquake Networks Between Main Shocks in Greece".
8. Παρουσίαση εργασίας στο 15^ο Διεθνές Συνέδριο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας (14th International Congress of the Geological Society of Greece), Αθήνα,



Ελλάδα, Μάιος 22-24, 2019, με τίτλο: "Monitoring Earthquake Network Measures In Aftershock Sequences In Greece".

9. Παρουσίαση εργασιών στο 32ο Πανελλήνιο Συνέδριο Στατιστικής, «Η Επιστήμη της Στατιστικής και η συμβολή της στη βιώσιμη ανάπτυξη», Ιωάννινα, Ελλάδα, Μάιος-Ιούνιος 30/5-1/6, 2019, με τίτλους: "Testing the structure of earthquake networks from multivariate time series of successive main shocks in Greece" και "Investigation of the correlation of successive earthquakes preceding main shocks in the Greek territory".
10. Παρουσίαση εργασίας με αφίσα (poster) στο 11th International Workshop on Statistical Seismology, Hakone, Japan, August 18-21, 2019, με τίτλο: "Investigation of the correlation of successive earthquakes preceding main shocks in the Greek territory".



Πρόλογος

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η κατασκευή πολυμεταβλητών σεισμικών χρονοσειρών με στόχο την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας όσον αφορά τον ερχόμενο κύριο σεισμό. Οι πολυμεταβλητές σεισμικές χρονοσειρές επιτυγχάνουν την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας είτε μέσω της θεωρίας δικτύου ή μέσω του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης (Canonical Correlation Analysis, CCA).

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελείται από πέντε (5) κεφάλαια. Το πρώτο (1^ο) κεφάλαιο είναι εισαγωγικό και περιλαμβάνει την περιοχή μελέτης και την βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετική με το θέμα της διατριβής.

Στο δεύτερο (2^ο) κεφάλαιο η εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας επιχειρείται μέσω της θεωρίας δικτύου με την διερεύνηση της στατιστικής σημαντικότητας των τιμών βασικών μέτρων δικτύου που υπολογίζονται πριν και μετά από κύριους σεισμούς ($M \geq 6.0$). Αρχικά, θέτουμε τον στόχο του δεύτερου (2^{ου}) κεφαλαίου και στην συνέχεια περιγράφεται η μεθοδολογία σχετική με την κατασκευή του σεισμικού δικτύου και παρουσιάζονται τα εννέα (9) μέτρα δικτύου που υπολογίζονται στην διδακτορική διατριβή. Για να εξεταστεί αν οι τιμές των μέτρων που προκύπτουν από το σεισμικό δίκτυο είναι στατιστικά σημαντικές απαιτείται η σύγκρισή τους με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τα τυχαιοποιημένα δίκτυα. Στην συνέχεια περιγράφονται οι έξι (6) προσεγγίσεις κατασκευής των τυχαιοποιημένων δικτύων. Η σύγκριση του σεισμικού δικτύου με τα τυχαιοποιημένα δίκτυα, για την διερεύνηση αν οι τιμές των μέτρων δικτύου είναι στατιστικά σημαντικές, γίνεται με βάση τον στατιστικό έλεγχο ο οποίος και περιγράφεται ενδελεχώς. Παρουσιάζονται οι εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν όπου κύριος στόχος τους είναι η παρακολούθηση των τιμών των μέτρων δικτύου πριν και μετά από κύριους σεισμούς ($M \geq 6.0$) με στόχο την εκτίμηση μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας.

Στο τρίτο (3^ο) κεφάλαιο η εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας επιχειρείται μέσω της θεωρίας δικτύου με την παρακολούθηση των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων που μπορεί να παρουσιάζει ένα σεισμικό δίκτυο, όπως του μικρόκοσμου (small-world) ή και της ελεύθερης κλίμακας (scale-free), πριν και μετά από κύριους σεισμούς ($M \geq 6.0$). Μελετάται η δομή που αναπτύσσεται στο σεισμικό δίκτυο η οποία μπορεί να είναι τυχαία (random network) ή να παρουσιάζει τις μη-τετριμμένες ιδιότητες του μικρόκοσμου (small-world network) ή και της ελεύθερης κλίμακας (scale-free network) πριν και μετά από κύριους σεισμούς ($M \geq 6.0$). Αρχικά, παρουσιάζεται ο στόχος του τρίτου (3^{ου}) κεφαλαίου και περιγράφονται οι μη-τετριμμένες ιδιότητες, του μικρόκοσμου και ελεύθερης κλίμακας, καθώς και η τυχαία δομή που μπορεί να παρουσιάζει το σεισμικό δίκτυο. Για να εξεταστεί ποια είναι η δομή του σεισμικού δικτύου θα πρέπει να συγκριθεί το δίκτυο με τυχαιοποιημένα δίκτυα τα οποία κατασκευάζονται με τις έξι (6) προσεγγίσεις που περιγράφονται στο δεύτερο (2^ο) κεφάλαιο. Η αποτύπωση της δομής του δικτύου εξασφαλίζεται με στατιστικό έλεγχο, που συγκρίνει το σεισμικό δίκτυο με τα τυχαιοποιημένα δίκτυα, ο οποίος περιγράφεται ενδελεχώς μαζί με σφάλματα που μπορεί να προκύπτουν από αυτόν. Παρουσιάζονται προσομοιώσεις με στόχο τη διερεύνηση ποια από τις έξι (6) προσεγγίσεις κατασκευής τυχαιοποιημένων δικτύων είναι πιο κατάλληλη για τον έλεγχο της δομής του δικτύου. Τέλος, παρουσιάζονται οι εφαρμογές που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την παρακολούθηση της δομής του σεισμικού δικτύου πριν και μετά από κύριους σεισμούς ($M \geq 6.0$) με στόχο την εκτίμηση μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας.

Στο τέταρτο (4^ο) κεφάλαιο η εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας επιχειρείται από την συσχέτιση, μέσω του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης, που παρουσιάζουν οι πολυμεταβλητές χρονοσειρές οι οποίες κατασκευάζονται από τους πέντε (5) τελευταίους χρονικά σεισμούς με μεγέθη $M \leq 5.4$ πριν από κάθε κύριο σεισμό ($M \geq 5.5$) σε καθεμία από τις 10 σεισμικές ζώνες που χωρίζεται η περιοχή μελέτης. Αρχικά, παρουσιάζεται ο στόχος του τέταρτου (4^ο) κεφαλαίου και στην συνέχεια περιγράφεται ο κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της συσχέτισης μεταξύ των πολυμεταβλητών χρονοσειρών. Για να εξεταστεί αν η τιμή της συσχέτισης είναι στατιστικά σημαντική απαιτείται η κατασκευή τυχαιοποιημένης πολυμεταβλητής χρονοσειράς ώστε να συγκριθεί με την αρχική πολυμεταβλητή χρονοσειρά μέσω του μη-παραμετρικού στατιστικού ελέγχου ο οποίος παρουσιάζεται ενδελεχώς. Περιγράφονται δύο (2) προσεγγίσεις για την κατασκευή τυχαιοποιημένης πολυμεταβλητής χρονοσειράς οι οποίες συγκρίνονται με τον κλασικό παραμετρικό στατιστικό έλεγχο μέσω προσομοιώσεων που πραγματοποιούνται με σκοπό την εύρεση της πιο κατάλληλης προσέγγισης για τον στατιστικό έλεγχο της σημαντικότητας της τιμής του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης. Παρουσιάζεται η εφαρμογή για κάθε σεισμική ζώνη όπου ανιχνεύει τυχόν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις μεταξύ των πέντε (5) τελευταίων χρονικά σεισμών, ανά ζεύγη σεισμών, πριν από κύριους σεισμούς ($M \geq 5.5$), με στόχο την εκτίμηση μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας. Επιπρόσθετα, παρουσιάζεται ο χάρτης που αποτυπώνει την πιθανότητα γένεσης ενός επερχόμενου κύριου σεισμού ($M \geq 5.5$) σε κάθε μία από τις 10 σεισμικές ζώνες που θεωρούνται.

Στο πέμπτο (5^ο) κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Ευχαριστίες

Ένα ταξίδι το οποίο κράτησε κάτι περισσότερο από πέντε (5) χρόνια και είχε τερματικό σταθμό την ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής δεν θα μπορούσε να μην είχε τα δικά του πρόσωπα που το σημάδεψαν.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στην επιβλέπουσα της διδακτορικής διατριβής κ. Ελευθερία Παπαδημητρίου, Καθηγήτρια Σεισμολογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ., για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε όλα τα χρόνια για την ομαλή μετάβασή μου στην νέα για εμένα επιστήμη της Σεισμολογίας. Την ευχαριστώ για τη μεθοδικότητα με την οποία μου έμαθε να δουλεύω σε καθημερινή βάση, για την προτροπή της για δημοσιεύσεις σε διεθνή περιοδικά καθώς και την παρότρυνσή της για την παρακολούθηση όσο το δυνατόν περισσότερων τόσο εθνικών όσο και διεθνών συνεδρίων που θα με βοηθήσουν να εξελιχθώ στην μετέπειτα πορεία μου.

Στην συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτριο Κουγιουμτζή, Καθηγητή της Πολυτεχνικής Σχολής του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Α.Π.Θ., μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, ο οποίος ήταν και εκ των πρωταγωνιστών του ταξιδιού καθώς αποτέλεσε τον «ακρογωνιαίο λίθο» για την εξέλιξη και την περάτωση της διδακτορικής διατριβής. Οφείλω να ομολογήσω ότι η αρμονική και επιτυχημένη συνεργασία μας, σε διαπροσωπικό και επιστημονικό επίπεδο, σε προγενέστερο μεταπτυχιακό επίπεδο αποτέλεσε το ερέθισμα και ταυτόχρονα το κίνητρο για την απόφασή μου να συνεχίσω και σε διδακτορικό επίπεδο.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου και στο τρίτο μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, κ. Γεώργιο Τσακλίδη, Καθηγητή Στατιστικής και Επιχειρησιακής Έρευνας του Τμήματος Μαθηματικών, ο οποίος ήταν πάντα πρόθυμος να με βοηθήσει για την εξέλιξη της διδακτορικής διατριβής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής, κ. Καρακώστα, κ. Παπαδοπούλου, κ. Παπαζάχο και κ. Βαλλιανάτο, για τη διόρθωση του τελικού κειμένου και τις παρατηρήσεις τους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου, οι οποίοι είναι άρρηκτα συνδεδεμένοι με ολόκληρη την πορεία του ταξιδιού για την περάτωση της διδακτορικής διατριβής. Πρώτα από όλους, θέλω να ευχαριστήσω τον Νίκο Χατζή, την Αθανασία Κερκένου, την Χαρά Γκαρλαούνη και την Δρ. Ρία Διαμαντή, μέλος ΕΔΙΠ, με τους οποίους μοιράστηκα τον χώρο του γραφείου καθώς με το ευχάριστο κλίμα που δημιουργούσαν σε αυτό οι ώρες που δούλευα στο γραφείο ήταν από τις πιο αποδοτικές. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Ράνια Μαγγίρα, τον Χρήστο Κουρούκλα και τον Πολυζώη Μπουντζή για τις επιστημονικές και όχι μόνο συζητήσεις μας σε καθημερινή βάση καθώς και την Μαρία Μεσημέρη για την βοήθεια που μου παρείχε σε ότι σεισμολογικό θέμα με απασχολούσε.

Στους αφανείς ήρωες του ταξιδιού, τους γονείς και τα αδέρφια μου, τις θερμές ευχαριστίες μου από καρδιάς είναι το λιγότερο που μπορώ να τους καταθέσω. Τέλος, η απέραντη ευγνωμοσύνη μου ανήκει στον επιστήθιο φίλο μου Γεώργιο Βαρδανίδη ο οποίος λειτουργούσε σαν από μηχανής Θεός ώστε το ταξίδι να συνεχίζεται απρόσκοπτα προς τον τερματικό του προορισμό.

Περίληψη

Η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς αποτελεί σημαντική επιστημονική πρόκληση και αναπόσπαστη συνιστώσα ανάπτυξης της γνώσης μας για την σεισμογένεση και την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας. Οι κύριοι σεισμοί (π.χ. $M \geq 6.0$) καθώς και οι μετασεισμοί αυτών μπορούν να προκαλέσουν καταστροφικές συνέπειες με απώλειες ανθρώπινων ζωών. Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας, για τον Ελληνικό χώρο, με βάση τη χρήση πολυμεταβλητών σεισμικών χρονοσειρών.

Στο δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο της διατριβής, η εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας επιχειρείται μέσω της κατασκευής είτε ενός σεισμικού δικτύου συσχέτισης, που προϋποθέτει την δημιουργία πολυμεταβλητής σεισμικής χρονοσειράς, ή δικτύου επανάληψης. Κόμβος του σεισμικού δικτύου συσχέτισης αποτελεί η κάθε μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς που αντιπροσωπεύει είτε καλά καθορισμένη σεισμική ζώνη είτε κυψελίδα η οποία προκύπτει από την διαίρεση του Ελληνικού χώρου. Κάθε παρατήρηση της πολυμεταβλητής σεισμικής χρονοσειράς αποτυπώνει είτε το σύνολο των σεισμών ή την σεισμική ροπή που απελευθερώνεται σε κάθε κόμβο, αντίστοιχα. Οι συνδέσεις του σεισμικού δικτύου συσχέτισης μεταξύ των κόμβων του δίνονται από τον γραμμικό συντελεστή συσχέτισης Pearson που υπολογίζεται για κάθε ζεύγος μεταβλητών της πολυμεταβλητής σεισμικής χρονοσειράς. Αντίθετα, κόμβος του δικτύου επανάληψης αποτελεί ο κάθε σεισμός και οι συνδέσεις του δίνονται όταν η διαφορά της σεισμικής ροπής μεταξύ των κόμβων του είναι μικρότερη από ένα αυθαίρετο κατώφλι. Έχοντας σχηματίσει το σεισμικό δίκτυο, η εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας επιτυγχάνεται είτε μέσω της χρήσης μέτρων δικτύου που το χαρακτηρίζουν ή μέσω της μελέτης των μη-τετριμμένων τοπολογικών ιδιοτήτων του, όπως της δομής του μικρόκοσμου και της ελεύθερης κλίμακας, που μπορεί να παρουσιάζει. Επομένως, η εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας, επιχειρείται από την μελέτη είτε της δυναμικής εξέλιξης των τιμών βασικών μέτρων δικτύου ή της δυναμικής εξέλιξης της δομής του σεισμικού δικτύου που εξετάζεται σε κυλιόμενα χρονικά παράθυρα είτε πριν ή μετά από κύριους σεισμούς ή μετασεισμούς, αντίστοιχα, που έγιναν στον Ελληνικό χώρο και τις γύρω περιοχές κατά την περίοδο 1999-2018. Βρέθηκε, ότι οι τιμές των μέτρων δικτύου, σε αρκετές περιπτώσεις, είναι στατιστικά σημαντικές όπως και ότι το σεισμικό δίκτυο παρουσιάζει την δομή του μικρόκοσμου λίγο πριν τους κύριους σεισμούς.

Στο τέταρτο κεφάλαιο της διατριβής, η εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας επιχειρείται μέσω του κανονικοποιημένου συντελεστή που υπολογίζει την συσχέτιση μεταξύ πολυμεταβλητών χρονοσειρών με την εύρεση γραμμικών συνδυασμών τους που συσχετίζονται ισχυρά. Οι μεταβλητές της πολυμεταβλητής χρονοσειράς παριστάνουν το μέγεθος του παρόντος σεισμού και τη χρονική διαδοχή του, σε ημέρες, μέχρι τον επόμενο σεισμό. Ο κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης χρησιμοποιείται ώστε να εξετάσει αν υπάρχει στατιστική σημαντικότητα, μέσω κατάλληλου στατιστικού ελέγχου, της συσχέτισης στο μέγεθος και στο χρόνο μεταξύ των πέντε τελευταίων σεισμών, ανά ζεύγη, πριν από κύριους σεισμούς που έγιναν στον Ελληνικό χώρο κατά την περίοδο 1964-2018 για κάθε σεισμική ζώνη. Τα αποτελέσματα, στις περισσότερες περιπτώσεις, υπογραμμίζουν την στατιστική σημαντικότητα της συσχέτισης μεταξύ των τελευταίων πέντε διαδοχικών, ανά ζεύγη, σεισμών πριν την γένεση κύριων σεισμών ($M \geq 5.5$) για κάθε σεισμική ζώνη. Τέλος, παρουσιάζεται ο χάρτης που αφορά την πιθανότητα γένεσης



του επερχομένου κύριου σεισμού ($M \geq 5.5$) για κάθε σεισμική ζώνη που συμβάλει στην εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας.

Λέξεις κλειδιά: Δίκτυο συσχέτισης, Δίκτυο επανάληψης, Δίκτυο μικρόκοσμου, Δίκτυο ελεύθερης κλίμακας, Μέτρο δικτύου, Κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης, Πολυμεταβλητή χρονοσειρά, Σεισμική ζώνη, Σεισμική κυψελίδα, Σεισμική ροπή, Κύριος σεισμός, Μετασεισμική ακολουθία.

Abstract

The investigation of the complex seismicity behavior constitutes a major scientific challenge and an indispensable component in improving our knowledge concerning seismogenesis and seismic hazard assessment. The strong earthquakes (e.g. $M > 6.0$) as well as the aftershocks of them can cause catastrophic consequences with losses of human lives. The purpose of this doctoral thesis is the estimation of the future seismic activity for the Greek area, using the multivariate seismic time series.

In the second and third chapter of thesis, the estimation of the future seismic activity is attempted through the construction of either a correlation network or a recurrence plot. The node of the seismic correlation network is each variable of the multivariate seismic time series that represents a seismic zone as the Greek territory is divided. Each observation of multivariate seismic time series captures either the sum of the earthquakes that occurred or the cumulative seismic moment that released at each node, respectively. The connections of the seismic correlation network among of its nodes are given by the Pearson correlation coefficient. On the contrary, the node of the recurrence plot is each earthquake and the connections among of its nodes are given when the difference of magnitudes is less than an arbitrary threshold. Having formed the seismic network, the estimation of the future seismic activity is achieved either through the use of network measures or through the study of its non-trivial topological properties, such as the small-world and scale-free structure. Therefore, the estimation of seismic activity is attempted by studying either the dynamic evolution of network values or the dynamic evolution of network structure in sliding time windows either before or after from main shocks or strong aftershocks, respectively, that occurred in the Greek territory spanning the period 1999-2018. It is revealed that the values of network measures are, in many cases, statistically significant as well as that the seismic network presents the structure of the small-world shortly before the occurrence of main shocks.

In the fourth chapter of the thesis, the estimation of the future seismic activity is attempted through the canonical correlation analysis which calculates the correlation between multivariable time series by finding their strongly correlated linear combinations. The variables of the multivariate time series represent the magnitude of earthquake and its time succession, in days, until the occurrence of next earthquake. The canonical correlation analysis is used to examine whether there is statistical significance, using the appropriate statistical test, of the correlation between the last successive five earthquakes, per pair, that occurred before the occurrence of main shocks in the Greek territory spanning the period 1964-2018 for each seismic zone. The results reveal that the statistical significance of the correlation is present between the last five successive earthquakes, per pair, that occurred before the occurrence of main shocks in each seismic zone. In addition, the map for the probabilities of occurrence of the upcoming main shocks ($M \geq 5.5$) for each seismic zone, is presented, to help the estimation of the future seismic activity for the Greek area.

Keywords: Correlation Network, Recurrence plot, Small-world network, Scale-free network, Network measure, Canonical Correlation Analysis (CCA), Multivariate time series, Seismic zone, Seismic cell, Seismic moment, Main shock, Aftershock sequence.

Κεφάλαιο 1^ο-Εισαγωγή

Στόχος της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η κατασκευή πολυμεταβλητών σεισμικών χρονοσειρών με βάση τον κατάλογο σεισμών που έγιναν στον Ελληνικό χώρο κατά την ενόργανη περίοδο κυρίως (από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα) αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις και ιστορικών σεισμών, σε μια προσπάθεια συμβολής στην εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας του Ελληνικού χώρου και των γύρω περιοχών. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται είτε μέσω της θεωρίας δικτύου, με την μελέτη των τιμών των μέτρων δικτύου (2^ο κεφάλαιο της διατριβής) και των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων του δικτύου (3^ο κεφάλαιο της διατριβής), ή με την διερεύνηση του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης (4^ο κεφάλαιο της διατριβής) πριν από επερχόμενους κύριους σεισμούς ($M \geq 5.5$ ή $M \geq 6.0$), όπου η κατασκευή πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι απαραίτητη.

Το 1^ο κεφάλαιο της διατριβής χωρίζεται σε πέντε (5) ενότητες όπου παρουσιάζεται ο χώρος μελέτης στην ενότητα 1.1 και η βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετική με στατιστικές προσεγγίσεις που στοχεύουν στην εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας στην ενότητα 1.2, με τα μέτρα δικτύου στην ενότητα 1.3, με τις μη-τετριμμένες ιδιότητες δικτύου στην ενότητα 1.4 και με τον κανονικοποιημένο συντελεστή συσχέτισης στην ενότητα 1.5.

1.1 Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης της διδακτορικής διατριβής είναι ο Ελληνικός χώρος με τις γειτονικές του περιοχές. Ο χώρος μελέτης ανήκει στην Ευρασιατική-Μελανησιακή ζώνη του ηπειρωτικού συστήματος διάρρηξης και η ενεργός τεκτονική του οφείλεται στις κινήσεις της Ευρασιατικής, της Αραβικής και της Αφρικανικής λιθοσφαιρικής πλάκας. Τρεις επιμέρους μικροπλάκες, η πλάκα της Ανατολίας, η πλάκα του Αιγαίου και η Απουλία πλάκα συμμετέχουν στην ενεργό τεκτονική της περιοχής μελέτης (Σχ. 1.1, Papazachos et al. 1998). Η Αραβική πλάκα κινείται προς τα Β-ΒΑ με αποτέλεσμα να ωθεί την πλάκα της Ανατολίας σε κίνηση προς τα δυτικά. Η κίνησή της αυτή σχημάτισε τόσο την δημιουργία του αριστερόστροφου ρήγματος της ανατολικής Ανατολίας όσο και του μεγάλου δεξιόστροφου ρήγματος της βόρειας Ανατολίας. Το δεξιόστροφο αυτό ρήγμα, συνεχίζεται στον Ελληνικό χώρο κατά μήκος της Τάφρου του Βορείου Αιγαίου μέσω της θάλασσας του Μαρμαρά, η οποία αποτελείται από μεγάλα δεξιόστροφα ρήγματα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ και κανονικά ρήγματα. Η Τάφρος του Βορείου Αιγαίου αποτελεί και ενεργό όριο μεταξύ της Ευρασιατικής πλάκας και της μικροπλάκας του Αιγαίου (McKenzie 1972).

Η μετατόπιση της πλάκας της Ανατολίας προς τα δυτικά έχει ως αποτέλεσμα την ώθηση της μικροπλάκας του Αιγαίου προς τα ΝΔ. Η κίνηση της μικροπλάκας του Αιγαίου πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτή της Ανατολίας λόγω του ότι η πρώτη περιστρέφεται κατά διαφορετικό τρόπο και πραγματοποιεί γρήγορη γραμμική κίνηση προς τα νοτιοανατολικά με αποτέλεσμα την δημιουργία εφελκυστικού πεδίου διεύθυνσης Β-Ν (Papazachos C. 1999), και της οπισθοκύλισης της καταδύομενης ωκεάνιας λιθόσφαιρας της Ανατολικής Μεσογείου κατά μήκος του Ελληνικού Τόξου στο Νότιο Αιγαίο (Le Pichon & Angelier 1981).

Το σημαντικότερο γεωδυναμικό χαρακτηριστικό της περιοχής μελέτης, είναι η κατάδυση της ωκεάνιας πλάκας της ανατολικής Μεσογείου κάτω από την μικροπλάκα του Αιγαίου κατά μήκος του Ελληνικού τόξου. Κατά μήκος της Ελληνικής Τάφρου υπάρχουν ανάστροφα ρήγματα με ΒΔ παράταξη και ΒΑ κλίση. Στην πλάκα του Αιγαίου υπάρχουν δύο ομάδες ρηγμάτων: η πρώτη αποτελείται από κανονικά ρήγματα Α-Δ διεύθυνσης, λόγω του εφελκυσμού και η δεύτερη ομάδα

περιέχει δεξιόστροφα ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης στα Ιόνια νησιά, με κυριότερο αυτό της Κεφαλονιάς που αποτελεί και το βορειοδυτικό όριο της πλάκας (Scordilis et al. 1985, Papazachos et al. 1994).



Σχ. 1.1: Κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών στην περιοχή της Ελλάδας (Papazachos et al. 1998).

Στο ανατολικό μέρος της πλάκας δεν υπάρχει ορισμένο ενεργό όριο αλλά μία μεταβατική ζώνη με κανονικά ρήγματα διεύθυνσης Α-Δ. Επιπλέον, με τη διεργασία αυτή συνδέονται και τα κανονικά ρήγματα παράταξης Β-Ν της οροσειράς των Ελληνίδων στο νότιο τμήμα της (Κύθηρα, Κρήτη, Κάρπαθος). Η Απουλία μικροπλάκα περιστρέφεται αριστερόστροφα και συγκλίνει με την Ευρασιατική πλάκα κατά μήκος του βόρειου Ιονίου και μέχρι τα παράλια της Αλβανίας δημιουργώντας ανάστροφα ρήγματα με παράταξη ΒΔ-ΝΑ. Αποτέλεσμα αυτών των κινήσεων είναι οι επιφανειακοί σεισμοί και οι σεισμοί ενδιάμεσου βάθους (60-180 km) στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές του περιοχές, ενώ δεν γίνονται σεισμοί μεγάλου βάθους. Σύμφωνα με τη γεωγραφική και κατακόρυφη κατανομή της χρονικά ανεξάρτητης σεισμικότητας στον Ελλαδικό χώρο αποκαλύπτει ότι η επιφανειακή σεισμική δραστηριότητα εξαπλώνεται σε όλη την Ελλάδα με υψηλότερη όμως δραστηριότητα στο Ιόνιο πέλαγος και συγκεκριμένα στα νησιά της Κεφαλονιάς, Λευκάδας και Ζακύνθου. Αντίθετα η σεισμική δραστηριότητα ενδιάμεσου βάθους εμφανίζεται μόνο στο εσωτερικό μέρος του Ελληνικού Τόξου στο νότιο Αιγαίο με μέγιστα εμφανιζόμενα μεγέθη έως 8.0.

1.2 Αναφορά σε στατιστικές προσεγγίσεις εκτίμησης σεισμικής δραστηριότητας

Η διερεύνηση της σεισμικότητας αποτελεί ένα επιστημονικό στόχο που αποτελεί αναπόσπαστη συνιστώσα για την κατανόηση της σειсмоγένεσης και την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας. Με τον όρο εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας εννοούμε, συνήθως, την εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης ενός κύριου σεισμού (π.χ. $M \geq 6.0$) εντός ενός δεδομένου εύρους χώρου, χρόνου και μεγέθους. Η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας αποτελεί έναν από τους κύριους στόχους της Σεισμολογικής έρευνας με σκοπό την συμβολή της στη μείωση των καταστροφικών συνεπειών των κύριων σεισμών.

Από τα πρώιμα επιστημονικά βήματα της Σεισμολογίας πριν από περίπου 130 χρόνια, οι στατιστικές ιδιότητες της σεισμικότητας αποτέλεσαν την βάση για την μελέτη των πολύπλοκων φυσικών μηχανισμών που οδηγούν στην γένεση κύριων σεισμών (Utsu 2002). Οι εμπειρικοί στατιστικοί νόμοι, όπως ο νόμος των Gutenberg-Richter (Gutenberg and Richter 1944) και ο νόμος του Omori (Omori 1894, Utsu 1961, Utsu et al. 1995) βελτίωσαν την κατανόησή μας σχετικά με την πολυπλοκότητα της σειсмоγένεσης. Ο νόμος των Gutenberg-Richter δηλώνει ότι η συχνότητα γένεσης των σεισμών (N) ακολουθεί την κατανομή ενός νόμου δύναμης (power law distribution) σε σχέση με την απελευθερούμενη ενέργεια (M) και δίνεται από την σχέση: $\log N = a - bM$. Η τιμή της παραμέτρου a (a -value), αντιπροσωπεύει το συνολικό ποσοστό σεισμικότητας της περιοχής που εξετάζεται ενώ η κλίση b (b -value) λειτουργεί εμμέσως ως «μετρητής τάσεων» για την ταυτοποίηση των ρηγμάτων, στις εξαιρετικά καταπονημένες περιοχές, όπου είναι πιθανό να προκληθούν μελλοντικές διαρρήξεις (Wiemer & Wyss, 1997, Schorlemmer & Wiemer 2005). Ο νόμος του Omori εκφράζει τον ρυθμό μείωσης των μετασεισμών, δηλαδή των σεισμών που ακολουθούν μετά από κύριο σεισμό, σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Πριν από τη γένεση ενός κύριου σεισμού, ο αριθμός των προσεισμών όταν αυτοί γίνονται, δηλαδή των σεισμών που προηγούνται ενός κύριου σεισμού, εξαρτάται από τον χρόνο. Ο ρυθμός εμφάνισης των προσεισμών αυξάνεται όσο πλησιάζει ο χρόνος γένεσης του κύριου σεισμού και ο οποίος περιγράφεται από μια κατανομή του νόμου δύναμης (Papazachos 1975, Jones και Molnar 1979). Σχετικά ερευνητικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι ο αριθμός των προσεισμών μειώνεται καθώς αυξάνεται η διαφορά του μεγέθους μεταξύ αυτών και του κύριου σεισμού που θα ακολουθήσει (Kagan και Knopoff 1978), και ότι οι κύριοι σεισμοί γίνονται σε περιοχές που διανύουν περίοδο σχετικής σεισμικής ησυχίας, δηλαδή παρουσιάζουν χαμηλό επίπεδο σεισμικότητας, πριν την γένεσή τους (Hainzl et al. 1999). Μελετώντας τον ετήσιο ρυθμό γένεσης των σεισμών, με βάση ένα μοντέλο αντίστροφης ολίσθησης πριν από τη γένεση ισχυρών σεισμών, διαπιστώθηκε ότι σε περιοχές με θετικές μεταβολές του πεδίου τάσεων παρατηρείται μια απότομη αύξηση του αριθμού των σεισμών πριν από την εμφάνιση κύριων σεισμών (Karakostas 2009). Πολλές μελέτες έχουν βρει ποιοτική συμφωνία μεταξύ του πεδίου μεταβολών των στατικών τάσεων και το επίκεντρο των κύριων σεισμών πριν την γένεσή τους (Harris 1998, Steacy et al. 2005a, King 2007). Έχει αποδειχθεί ότι η τιμή της παραμέτρου b (b -value) του νόμου των Gutenberg-Richter στις περιοχές γένεσης των κύριων σεισμών, δέκα (10) ημέρες πριν από την γένεσή τους, ήταν σημαντικά χαμηλότερη από την αντίστοιχη της μετασεισμικής ακολουθίας (Papadopoulos et al. 2010).

Η εκτίμηση γένεσης ενός ισχυρού μετασεισμού (π.χ. $M \geq 5.0$), η οποία είναι ιδιαίτερης σημασίας καθώς οι καταστροφικές συνέπειές του μπορεί να είναι μεγαλύτερες ακόμη και από εκείνες που προκάλεσε ο κύριος σεισμός που προηγήθηκε (Utsu et al. 1995). Επομένως, η διερεύνηση της μετασεισμικής ακολουθίας, η οποία μπορεί να διαρκέσει για χρόνια, αποτελεί μια σημαντική επιστημονική πρόκληση που στόχο έχει την μείωση των καταστροφικών συνεπειών που μπορεί να προκαλέσει ένας ισχυρός μετασεισμός. Ο μεγαλύτερος αριθμός των ισχυρών μετασεισμών σημειώνεται λίγες ώρες μετά από τον κύριο σεισμό, με πιθανότητα γένεσης καταστροφικών μετασεισμών που πλησιάζει την μονάδα (1) (Gerstenberger et al. 2005). Το απότομο άλμα που παρατηρείται στο ρυθμό σεισμικότητας μετά τον κύριο σεισμό οφείλεται στην γένεση ενός μεγάλου αριθμού μετασεισμών. Η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας, ιδίως από μοντέλα που υιοθετούν τον νόμο του Omori, στις πρώτες ώρες μετά τον κύριο σεισμό επηρεάζεται

έντονα από ελλείψεις στα δεδομένα που οφείλονται στην μη καταγραφή μετασεισμών με μικρά μεγέθη εξαιτίας της αλληλοεπικάλυψής τους από μετασεισμούς με μεγαλύτερα μεγέθη.

Το πιο συχνό στατιστικό, μαθηματικό, μοντέλο που χρησιμοποιείται, για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας, είναι το μοντέλο Poisson, που υποθέτει ότι οι κύριοι σεισμοί είναι ανεξάρτητοι στον χώρο και στον χρόνο (Cornell 1968, Lomnitz 1974, Bath 1978, Brillinger 1982, Lomnitz και Nava 1983). Επίσης, το μοντέλο της Μαρκοβιανής αλυσίδας (Markov chain) χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της πιθανότητας εκδήλωσης κύριου σεισμού, το οποίο σε αντίθεση με το μοντέλο Poisson υποθέτει ότι όλοι οι κύριοι σεισμοί εξαρτώνται ο ένας από τον άλλον στον χώρο και στον χρόνο (Howard 1971, Tsapanos και Papadopoulou 1999, Nava et al. 2005, Herrera et al. 2006, Votsi et al. 2013; 2014). Παρόμοιο μοντέλο με το προηγούμενο, της Μαρκοβιανής αλυσίδας, είναι αυτό που βασίζεται στην χρήση της Ημι-Μαρκοβιανής αλυσίδας (Semi-Markov chain). Σύμφωνα με αυτό, ο χώρος γένεσης ενός κύριου σεισμού εξαρτάται από τον προηγούμενο κύριο σεισμό αλλά και από τον χρόνο που μεσολάβησε μεταξύ τους, με την έννοια του χρόνου παραμονής της αλυσίδας στην ίδια κατάσταση ανά t μονάδα χρόνου (Altinok και Kolçak 1999, Pertsinidou et al. 2016a,b). Παρακάτω αναφέρεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετική με τα στατιστικά εργαλεία, της θεωρίας δικτύου και του κανονικοποιημένου συντελεστή συχέτισης, που χρησιμοποιούνται στην διδακτορική διατριβή με στόχο την εκτίμηση μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας.

1.3 Αναφορά ερευνητικής δραστηριότητας στα μέτρα δικτύου

Τα τελευταία χρόνια, η στατιστική ανάλυση, για την μελέτη της σεισμικότητας, πραγματοποιείται με την εφαρμογή σύγχρονων προσεγγίσεων που αποκαλύπτουν γραμμικές χωροχρονικές δομές που διέπουν την σεισμικότητα. Μια τέτοια προσέγγιση, για τη διερεύνηση της χωροχρονικής πολυπλοκότητας της σεισμικότητας, είναι η κατασκευή σεισμικού δικτύου. Η μελέτη των δικτύων βασίζεται στα διακριτά μαθηματικά γνωστά ως θεωρία γράφων (δικτύων). Η θεωρία δικτύου αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο για τη διερεύνηση της δυναμικής εξέλιξης της δομής ενός σύνθετου συστήματος, όπως της σεισμικής δραστηριότητας. Ο πρωτοπόρος της θεωρίας των γράφων ήταν ο Leonhard Euler, ο οποίος δημοσίευσε το 1735 την λύση του προβλήματος της γέφυρας της Πρωσικής πόλης Königsberg στην οποία ο πλανόδιος έμπορος έπρεπε να διασχίσει κάθε μία από τις διόδους της ακριβώς μία φορά. Το δίκτυο ορίζεται από τους κόμβους και τις συνδέσεις που εισάγονται μεταξύ των κόμβων του. Οι κόμβοι του δικτύου αντιπροσωπεύουν μεταβλητές και οι συνδέσεις μεταξύ τους δίνονται από τις αλληλοσυσχετίσεις (σχέσεις) τους. Στο δεύτερο (2^ο) κεφάλαιο η διατριβή περιλαμβάνει την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας μέσω της μελέτης βασικών μέτρων δικτύου πριν και μετά από κύριους σεισμούς που γίνονται στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές του περιοχές. Η χρήση των μέτρων δικτύου παρέχει τοπολογικές πληροφορίες, οι οποίες μπορούν να αποκαλύψουν την γένεση κύριων σεισμών λίγες μέρες πριν γίνουν, σχετικά με την δομή του.

Ευρεία εφαρμογή της θεωρίας του δικτύου έχει επιτευχθεί σε διαφορετικούς επιστημονικούς κλάδους, όπως στα Οικονομικά όπου μελετήθηκε από τους Emmert-Streib και Dehmer (2010) και Billio et al. (2012) ο συστημικός κίνδυνος στους τομείς της χρηματοδότησης και της ασφάλισης, από τον Heiberger (2014) που δημιούργησε δίκτυα σε περιόδους οικονομικής κρίσης, από τον Fiedor (2014) και την Papan et al. (2017) που κατασκεύασαν δίκτυα με βάση τις συσχετίσεις μεταξύ των χρηματιστηριακών μετοχών. Εφαρμογές στην Βιολογία από τους Jeong et al. (2001)

αφορούν την κατασκευή δικτύων πρωτεϊνών και μελέτης της δομής τους μέσω της διερεύνησης των μέτρων τους από τους Girvan και Newman (2002) και Wang και Chen (2003). Στην κλιματολογία οι Donges et al. (2009), Bialonski et al. (2010) και Palus et al. (2011) σχημάτισαν κλιματικά δίκτυα μέσω της συσχέτισης κλιματικών μεταβλητών. Στις νευροεπιστήμες οι Rubinov και Sporns (2010), Bullmore et al. (2016) και ο Fornito et al. 2016 χρησιμοποίησαν μέτρα δικτύου συνδεσιμότητας για την μελέτη του εγκεφάλου και οι Kugiumtzis et al. (2017) μελέτησε την επιληψία μέσω εγκεφαλογραφημάτων. Στην Δασολογία Belkacem et al. (2015) μελέτησαν την διάδοση δασικών πυρκαγιών. Στην Φυσιολογία οι Porta et al. (2016) μελέτησαν τον καρδιαγγειακό έλεγχο. Στις μεταφορές οι Wang et al. (2017) σχημάτισαν το δίκτυο του μετρό και οι Aydin et al. (2017) κατασκεύασαν αστικά οδικά δίκτυα. Στην Φαρμακευτική οι Zhang και Gan (2018) χρησιμοποίησαν μοντέλο διάδοσης ιών σε δίκτυα για τον έλεγχο της διάδοσής του.

Στη Σεισμολογία, η θεωρία δικτύου εισήχθη από τους Abe και Suzuki (2004a) για να μελετήσει την σεισμικότητα ως ένα χωροχρονικό πολύπλοκο σύστημα. Στην προσέγγιση του σεισμικού δικτύου, μια σεισμογενής περιοχή μπορεί να συσχετιστεί με μία άλλη μακρινή της, σε συνέπεια με την έννοια της "απομακρυσμένης ενεργοποίησης της σεισμικότητας" (Hill et al. 1993). Η θεωρία δικτύου παρέχει μια νέα ιδέα και προοπτική στην ανάλυση της σεισμικότητας για την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας (Abe και Suzuki 2004a; 2007, Baiesi και Paczuski 2004; 2005, Barrat et al. 2008, Newman 2010, Daskalaki et al. 2014). Συγκεκριμένα, οι Abe και Suzuki (2007) βρήκαν για την περιοχή της Καλιφόρνιας ότι οι τιμές του συντελεστή συσταδοποίησης (Clustering Coefficient), το οποίο είναι ένα βασικό μέτρο δικτύου, παραμένουν στάσιμες με μικρές τιμές πριν από τη γένεση κύριων σεισμών και απότομα εμφανίζουν μεγάλη άνοδο στον χρόνο γένεσής τους. Οι Baiesi και Paczuski (2004; 2005) και, πρόσφατα, οι Daskalaki et al. (2016) στην Ιταλία χρησιμοποιώντας την κεντρικότητα της ενδιαμεσότητας (betweenness centrality) ως μέτρο δικτύου αποκάλυψαν την γένεση κύριων σεισμών λίγες ημέρες πριν εκδηλωθούν.

Στην παρούσα διατριβή, για τη διερεύνηση της χωροχρονικής πολυπλοκότητας της σεισμικότητας, χρησιμοποιείται και η προσέγγιση του γράφου (δικτύου) επανάληψης (recurrence plot) (Marwan et al. 2009, Donner et al. 2011). Η ιδέα της προσέγγισης εισήχθη από τον Poincaré (1890) ως μέθοδος των χρόνων επανάληψης και έχει πάρει μια σημαντική θέση στην ανάλυση δυναμικών συστημάτων. Μια ποικιλία εφαρμογών σε διάφορους επιστημονικούς τομείς χρησιμοποίησε το δίκτυο επανάληψης. Παραδείγματα εφαρμογών που χρησιμοποίησαν το εργαλείο του δικτύου επανάληψης βρίσκουμε στην Ιατρική από τους Riley et al. (1999) για την ανάλυση σημάτων πίεσης και ο Marwan et al. (2002) για την ανίχνευση στρωματοειδών φάσεων πριν από μια απειλητική για τη ζωή καρδιακή αρρυθμία. Εφαρμογές στην Γεωλογία έγιναν από τους Marwan et al. (2003) οι οποίοι εξέτασαν κατά πόσο οι βροχοπτώσεις συνδέονται (συσχετίζονται) με την εκδήλωση κατολισθήσεων στη βορειοδυτική Αργεντινή και τους Matcharashvili et al. (2008) που εξέτασαν αν υπάρχει επίδραση της διακύμανσης της στάθμης του νερού σε μεγάλη δεξαμενή στη δυναμική της τοπικής σεισμικής δραστηριότητας. Στις Νευροεπιστήμες οι Carrubba et al. (2012) εξέτασαν κατά πόσο η ηλεκτρική δραστηριότητα του εγκεφάλου συσχετίζεται με τη σκλήρυνση κατά πλάκας. Τέλος, στην Υδρολογία οι Sahoo et al. (2019) εκτίμησαν υδρολογικές χρονοσειρές χαμηλής ροής.

1.4 Αναφορά ερευνητικής δραστηριότητας στις μη-τετριμμένες ιδιότητες δικτύου

Η θεωρία δικτύου, όπως έχει αναφερθεί, είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την διερεύνηση ενός πολύπλοκου συστήματος, όπως η σεισμική δραστηριότητα. Η σεισμικότητα μπορεί να διερευνηθεί μέσω του δικτύου εξετάζοντας τα τοπολογικά χαρακτηριστικά του, καθώς οι αλλαγές στη δομή του μπορούν να αποκαλύψουν ιδιότητες στην συμπεριφορά της σεισμικότητας λίγες ημέρες πριν από την γένεση ενός κύριου σεισμού (Abe και Suzuki 2009). Επομένως, από την ανάλυση της δυναμικής εξέλιξης της δομής του δικτύου είναι δυνατή η αναγνώριση κάποιων μη-τετριμμένων ιδιοτήτων του, όπως του τυχαίου δικτύου (Random network) (Erdős και Rényi 1959), του μικρόκοσμου (Small-world) (Watts και Strogatz 1998) και της ελεύθερης κλίμακας (scale-free) (Barabasi και Albert 1999). Στο τρίτο (3^ο) κεφάλαιο η διατριβή θα ασχοληθεί με την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας μέσω της μελέτης της εξέλιξης της δομής του δικτύου πριν και μετά από κύριους σεισμούς που γίνονται στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές του περιοχές.

Οι ιδιότητες του μικρόκοσμου και της ελεύθερης κλίμακας συνδέονται με την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς πληροφορίας εντός του δικτύου και αποκαλύπτουν την απόκλισή του από την τυχαία δομή, την οποία παρουσιάζει ένα τυχαίο δίκτυο που κατασκευάζεται με την προσέγγιση των Erdős και Rényi (1959). Όπως γίνεται αντιληπτό για την εξέταση της δομής του μικρόκοσμου και της ελεύθερης κλίμακας που μπορεί να παρουσιάζει ένα δίκτυο, απαιτείται η σύγκρισή του με τυχαιοποιημένα δίκτυα που κατασκευάζονται σύμφωνα με κάποια μέθοδο τυχαιοποίησης. Η δομή του μικρόκοσμου αποκτάται από ένα τυχαίο δίκτυο με την εισαγωγή συνδέσεων σε αυτό μεγάλης εμβέλειας, δηλαδή συνδέσεων που επιτρέπουν έναν κόμβο να μπορεί να συνδεθεί με οποιονδήποτε άλλον με έναν μικρό αριθμό βημάτων (συνδέσεων). Αντίθετα, η δομή ενός δικτύου ελεύθερης κλίμακας χαρακτηρίζεται από την κατανομή του νόμου δύναμης (power-law distribution) στον βαθμό της συνδεσιμότητας των κόμβων του, δεδομένου ότι υπάρχουν μερικοί κόμβοι, με υψηλό βαθμό συνδεσιμότητας που ονομάζονται hubs. Στη Σεισμολογία, η ιδιότητα του μικρόκοσμου σε ένα σεισμικό δίκτυο υποδηλώνει ότι η σεισμικότητα μεταξύ δύο οποιωνδήποτε περιοχών μπορεί να συσχετίζεται (δηλαδή να υπάρχει σύνδεση) μέσω μερικών άλλων, ενώ η ιδιότητα της ελεύθερης κλίμακας υποδηλώνει ότι υπάρχουν λίγες περιοχές με πολύ υψηλή συσχέτιση σεισμικότητας, δηλαδή μεγάλο αριθμό συνδέσεων σε σχέση με άλλες.

Η πιο δημοφιλής εκδήλωση του μικρόκοσμου είναι οι έξι βαθμοί διαχωρισμού που αποκαλύφθηκαν από τον κοινωνικό ψυχολόγο Milgram (1967). Ο Milgram έστειλε σε δεκάδες ανθρώπους γράμματα με κάποιον άγνωστο παραλήπτη, ο οποίος ζούσε σε άλλη πολιτεία της Αμερικής, ζητώντας τους να προωθήσουν την επιστολή σε κάποιον που ίσως να βρίσκεται πιο κοντά στο στόχο. Τα γράμματα χρειάστηκε να περάσουν από έξι ανθρώπους κατά μέσο όρο πριν φθάσουν στον τελικό τους προορισμό και έτσι προέκυψαν οι έξι βαθμοί διαχωρισμού που χαρακτηρίζουν τα δίκτυα που έχουν την δομή του μικρόκοσμου. Η ιδιότητα του μικρόκοσμου μελετήθηκε σε διάφορους επιστημονικούς τομείς όπως στην Στατιστική (Jimenez et al. 2008, Baek et al. 2011, Ma και Yao 2017), στις Νευροεπιστήμες (Van den Heuvel et al. 2008, Bialonski et al. 2010) και την Μετεωρολογία (Hlinka et al. 2012). Στην Σεισμολογία, οι Abe και Suzuki (2004a; 2006) και οι Abe et al. (2011) έχουν αποδείξει την καθολικότητα της ιδιότητας του μικρόκοσμου για σεισμικά δίκτυα που έχουν κατασκευαστεί για τέσσερις διαφορετικές περιοχές (Καλιφόρνια, Ιαπωνία, Ιράν και Χιλή). Η ιδιότητα του μικρόκοσμου έχει μελετηθεί, επίσης, από τον Jimenez et al.

(2008) για την περιοχή της Καλιφόρνιας, από τους Baek et al. (2011) για την περιοχή της Κορέας, από τους Daskalaki et al. (2014) για την περιοχή της Ιταλίας και από τους León et al. (2018) για την περιοχή της Κολομβίας όπου η ιδιότητα εμφανίζεται στην δομή του δικτύου πριν από κύριους σεισμούς. Αυτό το αποτέλεσμα βρίσκεται σε συμφωνία με την έννοια του «σεισμικού κύκλου», σύμφωνα με τον οποίο η τάση σε ένα ρήγμα συσσωρεύεται και ο ρυθμός σεισμικότητας επιταχύνεται πριν την γένεση κύριων σεισμών (Kagan και Jackson 1991, McGuire 2008).

Η ιδιότητα της ελεύθερης κλίμακας μελετήθηκε στην Σεισμολογία, πρώτα, από τους Abe και Suzuki (2004b) και τους Baiesi και Paczuski (2004) για την περιοχή της νότιας Καλιφόρνιας. Στην συνέχεια, από τους Baek et al. (2011) για την περιοχή της Κορέας, από τον Pastén (2016) για την περιοχή της Χιλής και από τους Janer et al. (2017) για την περιοχή των Φιλιππίνων και της νότιας Καλιφόρνιας.

1.5 Αναφορά ερευνητικής δραστηριότητας στον κανονικοποιημένο συντελεστή συσχέτισης

Στο τέταρτο (4^ο) κεφάλαιο της διατριβής, η εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας θα επιχειρηθεί μέσω του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης που υπολογίζει την γραμμική συσχέτιση μεταξύ σεισμικών πολυμεταβλητών χρονοσειρών με την εύρεση γραμμικών συνδυασμών τους που συσχετίζονται μέγιστα. Ο κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης θα χρησιμοποιηθεί ως στατιστικό εργαλείο για να εκτιμήσει αν υπάρχουν χωροχρονικά πρότυπα σε διαδοχικούς σεισμούς πριν από επερχόμενους κύριους σεισμούς ($M \geq 5.5$). Παρόλο που η εκτίμηση του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης είναι μια κλασική και πολύ ευέλικτη στατιστική προσέγγιση για τη διερεύνηση των γραμμικών συνδυασμών μεταξύ δύο πολυδιάστατων μεταβλητών (δηλαδή, πολυμεταβλητών χρονοσειρών), δεν έχει χρησιμοποιηθεί έως τώρα στην Σεισμολογία για την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας. Το κύριο πλεονέκτημα της προσέγγισης, του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης, είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιήσει και τις τρεις (3) παραμέτρους (χρόνος, χώρος και μέγεθος) σε μια πολυμεταβλητή χρονοσειρά που είναι απαραίτητες για την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας. Στην διατριβή, χρησιμοποιούνται οι παράμετροι του χρόνου και του μεγέθους καθώς η ανάλυση πραγματοποιείται σε συγκεκριμένο χώρο διότι η περιοχή μελέτης έχει χωριστεί σε καλά καθορισμένες σεισμικές ζώνες.

Η συνήθης έννοια της συσχέτισης εισήχθη από την εργασία του Sir Francis Galton (Galton 1889) και διατυπώθηκε μαθηματικά από τον Pearson (1896; 1898). Στη συνέχεια, ο όρος της συσχέτισης έχει γενικευτεί ώστε να περιλαμβάνει μερικές (partials) και διμερείς συσχετίσεις. Οι συσχετίσεις αυτές, μερικές και διμερείς, μετρούν την εξάρτηση (συσχέτιση) μεταξύ δύο τυχαίων μεταβλητών. Αντίθετα, η κανονικοποιημένη συσχέτιση εκτιμά την αλληλεξάρτηση μεταξύ μιας τυχαίας μεταβλητής, που ονομάζεται εξαρτώμενη μεταβλητή, και ενός τυχαίου διανύσματος που ονομάζεται ανεξάρτητη μεταβλητή. Έτσι, αυτό οδηγεί στην μελέτη της αλληλεξάρτησης μεταξύ δύο (2) συνόλων τυχαίων μεταβλητών (δηλαδή, μεταξύ δύο (2) πολυμεταβλητών χρονοσειρών) μέσω της κανονικοποιημένης συσχέτισης. Η κανονικοποιημένη συσχέτιση αναπτύχθηκε από τον Hotelling (1935; 1936) και ορίστηκε ως η μέγιστη συσχέτιση μεταξύ οποιωνδήποτε τυχαίων μεταβλητών δύο συνόλων δεδομένων. Ο κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης βρίσκει διανύσματα βάσης για δύο (2) σύνολα δεδομένων έτσι ώστε η συσχέτιση μεταξύ των προβολών των μεταβλητών, των συνόλων δεδομένων, πάνω στα διανύσματα βάσης να μεγιστοποιείται αμοιβαία. Ο κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορους επιστημονικούς κλάδους όπως στην Ιατρική από τους

Dunn και Doeksen (1977) και Masters και Wallston (2005) οι οποίοι μελέτησαν την συσχέτιση μεταξύ δημογραφικών μεταβλητών και μεταβλητών υγείας. Στην Κλιματολογία οι Statheropoulos et al. (1998) εξέτασαν την ατμοσφαιρική ρύπανση με βάση τα μετεωρολογικά δεδομένα και οι Busuioc et al. (2007) διερεύνησαν την συσχέτιση τριών (3) δεικτών βροχόπτωσης στην περιοχή της Εμίλια-Ρομάνια της Ιταλίας με τις ακραίες καταστροφές που προκαλούν. Στην βιοϊατρική ο Foucart (1999) και οι Alonso et al. (2003) μελέτησαν την συσχέτιση αντιψυχωτικών παραγόντων για την θεραπεία της χρόνιας σχιζοφρένειας, στις μεθόδους εκμάθησης. Οι Harddon et al. (2004) χρησιμοποίησαν τον κανονικοποιημένο συντελεστή συσχέτισης για την ανάκτηση εικόνων με βάση μόνο το περιεχόμενό τους. Στις μεταφορές για το σύστημα ελέγχου των πτήσεων από τους Degani et al. (2006), στην περιβαλλοντολογία οι Iaci et al. (2010) οι οποίοι μελέτησαν την συσχέτιση μεταξύ της θνησιμότητας και των ρύπων στην περιοχή του Λος Άντζελες, στην μελέτη της επιληψίας από τους Wu et al. (2011) και Zwang et al. (2014), στα οικονομικά που οι Todros και Hero (2012) εκτίμησαν την συσχέτιση μεταξύ εταιρειών που διαπραγματεύονται χρηματιστηριακές αγορές, στην Γεωλογία από τον Boronovsky (2014) για τη συσχέτιση του ηλιακού ανέμου με γεωμαγνητικούς δείκτες. Επίσης, οι Theodoulidis et al. (2008) χρησιμοποίησαν τον κανονικοποιημένο συντελεστή συσχέτισης για την εκτίμηση της συσχέτισης μεταξύ της κατανομής των ζημιών και του περιβαλλοντικού θορύβου σε πέντε (5) αστικές περιοχές. Τέλος, στις αγορές που οι Gohary και Hanzae (2014) μελέτησαν τα χαρακτηριστικά της προσωπικότητας ατόμων ως παράγοντες πρόβλεψης των κινήτρων για αγορές και στη βιολογία από τους Cao et al. (2015) για την ανακάλυψη βιοδεικτών.

Κεφάλαιο 2^ο-Μελέτη των μέτρων δικτύου

2.1 Εισαγωγή

Ο σκοπός του δεύτερου (2^{ου}) κεφαλαίου της παρούσας διατριβής είναι η διερεύνηση και υπολογισμός εννέα (9) βασικών μέτρων δικτύου, όπως η κεντρικότητα του βαθμού και ο συντελεστής συσταδοποίησης, ώστε να αποκαλύψει, αν υπάρχει, κάποια χωροχρονική δομή που διέπει την σεισμικότητα στον Ελληνικό χώρο και τις γύρω περιοχές του. Επιχειρείται η παρακολούθηση της εξέλιξης στο χώρο και τον χρόνο των τιμών των εννέα (9) βασικών μέτρων δικτύου, μέσω της κατασκευής σεισμικού δικτύου, μεταξύ κύριων σεισμών, καθώς και μεταξύ των κύριων σεισμών και των μετασεισμών τους, κατά την περίοδο 1999-2018 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του, με στόχο την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας. Η συνεισφορά του δευτέρου (2^{ου}) κεφαλαίου έγκειται στο γεγονός ότι οι τιμές των μέτρων δικτύου εξετάζονται αν είναι στατιστικά σημαντικές, πριν τον επερχόμενο κύριο σεισμό ή μετασεισμό, και όχι μόνο αν είναι υψηλές ή χαμηλές χωρίς στατιστική σημαντικότητα, όπως σε εργασίες που έχουν προαναφερθεί (Abe και Suzuki 2007, Baiesi και Paczuski 2004; 2005, Daskalaki et al. 2016).

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται, πρώτα, η σχετική μεθοδολογία για την κατασκευή του σεισμικού δικτύου. Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα μέτρα δικτύου, ο τρόπος υπολογισμού τους καθώς και οι προσεγγίσεις που αφορούν την κατασκευή τυχαιοποιημένου δικτύου, επειδή είναι απαραίτητη η κατασκευή του ώστε να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος στατιστικής σημαντικότητας. Τέλος, παρουσιάζονται οι εφαρμογές μαζί με τα αποτελέσματα για την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας.

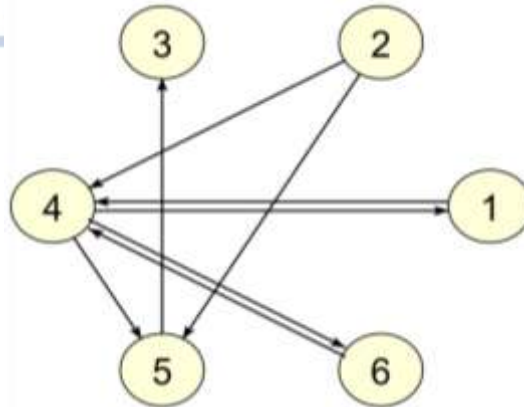
2.2 Κατασκευή σεισμικού δικτύου

Ένα δίκτυο αποτελείται από κόμβους και συνδέσεις. Με τον όρο δίκτυο $G = (K, E)$, όπου K και E είναι το σύνολο των κόμβων και των συνδέσεων του δικτύου, αντίστοιχα, εννοούμε το γράφημα που οι κόμβοι του αντιπροσωπεύουν μεταβλητές και οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων ορίζονται από σχέσεις (συσχετίσεις) μεταξύ των μεταβλητών. Ο τρόπος με τον οποίο ορίζονται οι συσχετίσεις μεταξύ των μεταβλητών (κόμβων) θα αναφερθεί στις ενότητες 2.2.1 με 2.2.3 που αφορούν την ανάπτυξη της μεθοδολογίας σχετικά με την κατασκευή του σεισμικού δικτύου. Ανάλογα με το είδος των συνδέσεων μεταξύ των κόμβων ορίζεται το δίκτυο με διαφορετικούς τρόπους. Έτσι, αν οι συνδέσεις του δικτύου είναι κατευθυνόμενες ή μη καθώς και αν περιέχουν ή όχι βάρη, σχηματίζεται κατευθυνόμενο ή μη καθώς και σταθμισμένο ή μη δίκτυο, αντίστοιχα.

Με τον όρο κατευθυνόμενο δίκτυο (Σχ. 2.1) εννοούμε το δίκτυο στο οποίο οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων του έχουν κατεύθυνση. Για παράδειγμα, όταν υπάρχει σύνδεση, δηλαδή συσχέτιση, από τον κόμβο i στον κόμβο j δεν σημαίνει ότι συνδέεται και ο κόμβος j με τον i . Επομένως, στο δίκτυο με κατευθυνόμενες συνδέσεις δεν υπάρχει αμφίδρομη σχέση μεταξύ των μεταβλητών. Στην αντίθετη περίπτωση όταν οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων του δικτύου δεν έχουν κατεύθυνση τότε το δίκτυο χαρακτηρίζεται ως μη-κατευθυνόμενο.

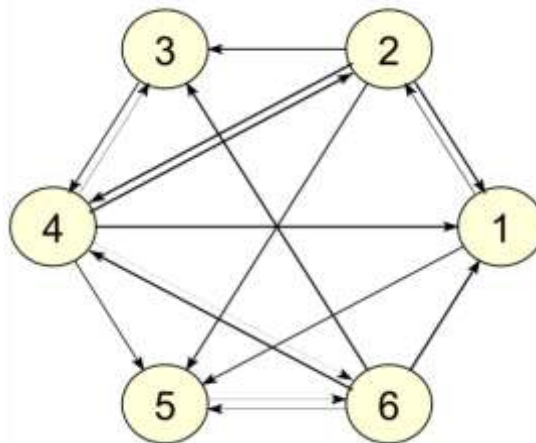
Οι κατευθυνόμενες ή μη συνδέσεις δεν είναι αρκετές από μόνες τους για να αποτυπώσουν την πολυπλοκότητα που παρουσιάζει ένα δίκτυο. Έτσι, αν στις συνδέσεις του δικτύου γίνει είσοδος βαρών (Σχ. 2.2), δηλαδή σχηματίζονται σταθμισμένες συνδέσεις, τότε οι σχέσεις (συσχετίσεις) μεταξύ των μεταβλητών

(κόμβων) ποσοτικοποιούνται ανάλογα με την ένταση της μεταξύ τους αλληλεξάρτησης.



Σχ. 2.1: Κατευθυνόμενο δίκτυο στο οποίο η κάθε σύνδεσή του δηλώνει την ύπαρξη συσχέτισης μεταξύ των κόμβων του.

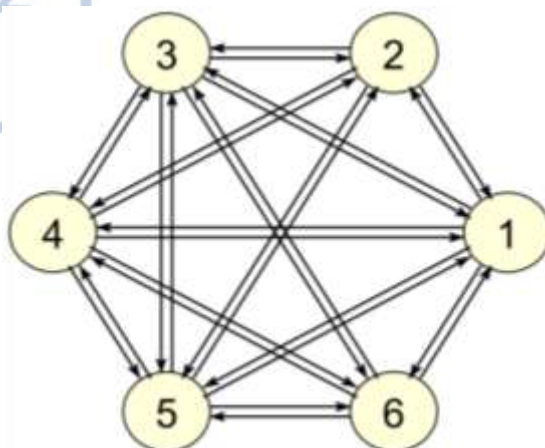
Με αυτόν τον τρόπο αποτυπώνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η σχέση μεταξύ των μεταβλητών (κόμβων) του δικτύου σε σχέση με την ύπαρξη μίας κατευθυνόμενης ή μη σύνδεσης χωρίς βάρη.



Σχ. 2.2: Σταθμισμένο δίκτυο με κατευθυνόμενες συνδέσεις, στο οποίο το πιο έντονο μαύρο χρώμα της κάθε σύνδεσης δηλώνει και ισχυρότερη εισαγόμενη συσχέτιση μεταξύ των κόμβων.

Αντίθετα, όταν εισάγεται μία σύνδεση μεταξύ των κόμβων του δικτύου χωρίς κάποιο βάρος τότε ορίζεται το μη-σταθμισμένο δίκτυο που μπορεί να περιέχει κατευθυνόμενες ή μη συνδέσεις. Στην παρούσα διατριβή θα κατασκευασθεί μη-κατευθυνόμενο δίκτυο καθώς οι στόχοι της θα πραγματοποιηθούν μέσω δικτύου συσχέτισης, που ορίζεται είτε με σταθμισμένες χωρίς αρνητικά βάρη ή με μη-σταθμισμένες συνδέσεις.

Υπάρχουν δύο ακόμα είδη δικτύου το πλήρες (Σχ. 2.3) και το απομονωμένο δίκτυο. Με τον όρο πλήρες δίκτυο εννοούμε ότι σχηματίζονται είτε όλες οι δυνατές συνδέσεις, όταν οι συνδέσεις είναι μη-σταθμισμένες, ή όλες οι δυνατές συνδέσεις με την ίδια τιμή βάρους, όταν οι συνδέσεις είναι σταθμισμένες, μεταξύ των κόμβων του δικτύου, αντίστοιχα. Η αντίθετη περίπτωση ενός πλήρους δικτύου είναι το απομονωμένο δίκτυο. Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζουμε ένα δίκτυο του οποίου όλοι οι κόμβοι του δεν συνδέονται με κανέναν άλλον κόμβο, δηλαδή δεν σχηματίζεται καμία σύνδεση μεταξύ των κόμβων. Η μεθοδολογία κατασκευής του σεισμικού δικτύου, για τις περιπτώσεις που αφορούν δίκτυο με μη-κατευθυνόμενες σταθμισμένες ή μη συνδέσεις, περιγράφεται παρακάτω στις ενότητες 2.2.1 ως 2.2.3.



Σχ. 2.3: Πλήρες δίκτυο με κατευθυνόμενες συνδέσεις στο οποίο σχηματίζεται κάθε πιθανή σύνδεση μεταξύ των κόμβων του.

2.2.1 Κατασκευή σεισμικού δικτύου από την διαδοχή σεισμών

Η πιο απλή μεθοδολογία που ακολουθείται για την κατασκευή του σεισμικού δικτύου με μη-κατευθυνόμενες αλλά με σταθμισμένες ή μη συνδέσεις βασίζεται στην διαδοχή των σεισμών (Abe και Suzuki 2004a, Baiesi και Paczuski 2004). Η διαδοχή των σεισμών προκύπτει από την χρονική τους κατανομή και το σύνολό τους αποτυπώνεται στον κατάλογο σεισμών ο οποίος παρέχει πληροφορίες για τον χρόνο γένεσης, τις γεωγραφικές συντεταγμένες, το εστιακό βάθος και το μέγεθος M του κάθε σεισμού του καταλόγου.

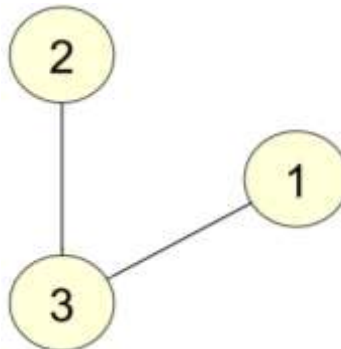
Σύμφωνα με την προσέγγιση των Abe και Suzuki (2004a) και των Baiesi και Paczuski (2004) η περιοχή μελέτης διαιρείται σε K ίσου μεγέθους δυσδιάστατες κυψελίδες. Η κάθε κυψελίδα αποτελεί κόμβο του δικτύου όταν τουλάχιστον ένας (1) σεισμός, που ικανοποιεί το μέγεθος της πληρότητας (M_C) που ορίζεται, γίνει στην αντίστοιχη κυψελίδα. Ως μέγεθος πληρότητας (M_C) ορίζεται το ελάχιστο μέγεθος M πάνω από το οποίο περιέχονται στον κατάλογο όλοι οι σεισμοί που έγιναν σε συγκεκριμένο χώρο και χρόνο που πραγματοποιείται η μελέτη. Η εκτίμηση του μεγέθους πληρότητας (M_C) πρέπει να είναι ακριβής, καθώς πιθανή εσφαλμένη εκτίμησή του οδηγεί σε σεισμικούς καταλόγους με λιγότερα δεδομένα, δηλαδή έχουμε υπερεκτίμηση του M_C , ή σε σεισμικούς καταλόγους με μη-πλήρη δεδομένα, δηλαδή έχουμε υποεκτίμηση του M_C . Στην παρούσα εργασία για τον υπολογισμό του μεγέθους πληρότητας (M_C) χρησιμοποιείται η μέθοδος της καλής προσαρμογής (Goodness of fit) των Wiemer και Wyss (2000). Η πληρότητα των δεδομένων ικανοποιείται και στις δύο (2) επόμενες προσεγγίσεις που αφορούν την κατασκευή του σεισμικού δικτύου, οι οποίες περιγράφονται στις παρακάτω ενότητες 2.2.2 και 2.2.3.

Οι συνδέσεις, δηλαδή οι σχέσεις, μεταξύ των κόμβων του δικτύου δίνονται από την χρονική διαδοχή των σεισμών. Για παράδειγμα, αν γίνει σεισμός στον κόμβο (κυψελίδα) i και ο αμέσως επόμενος χρονικά στον κόμβο (κυψελίδα) j , ανεξάρτητα από τον χρόνο που μεσολάβησε και της μεταξύ τους χωρικής απόστασης, ορίζεται μία αμφίδρομη σύνδεση μεταξύ του κόμβου i και j σχηματίζοντας δίκτυο με μη-κατευθυνόμενες συνδέσεις. Το σύνολο όλων των συνδέσεων του δικτύου αποτυπώνεται από τον πίνακα γειτνίασης A , όταν αυτές είναι απλές (μη-σταθμισμένες), ή από τον πίνακα βαρών W , όταν είναι σταθμισμένες.

Όταν οι συνδέσεις είναι απλές, σχηματίζεται ο συμμετρικός τετραγωνικός πίνακας γειτνίασης $A = \{a_{ij}\}$, $i, j = 1, \dots, K$, μεγέθους $K \times K$, όπου εισάγεται μονάδα

(1) στην θέση a_{ij} όταν υπάρχει σύνδεση μεταξύ των κόμβων i και j , και μηδέν (0), αντίθετα (Σχ. 2.4, για τρεις (3) μεταβλητές). Πολλές διαδοχικές εμφανίσεις σε ένα ζεύγος κόμβων (i, j) θεωρούνται ως μία (1) και εισάγεται στην θέση a_{ij} του πίνακα A μονάδα (1), δηλαδή $a_{ij}=1$. Επίσης, όταν η διαδοχή των σεισμών πραγματοποιηθεί στον ίδιο κόμβο i , δηλαδή έχουμε την εμφάνιση βρόχου (λούπας), τότε αυτή δεν αναγνωρίζεται και εξ ορισμού ορίζεται στην θέση a_{ii} του πίνακα γειτνίασης A , $a_{ii}=0$. Η εμφάνιση βρόχου (λούπας) δεν αναγνωρίζεται και στις υπόλοιπες μεθοδολογίες κατασκευής σεισμικού δικτύου καθώς ενδιαφερόμαστε για συσχετίσεις (ενότητα 2.2.2) ή σχέσεις (ενότητα 2.2.3) μεταξύ των κόμβων του. Ο πίνακας γειτνίασης A παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι δεν αξιοποιεί όλη την πληροφορία του σεισμού που παρέχεται από τον σεισμικό κατάλογο. Ο πίνακας γειτνίασης A δεν λαμβάνει υπόψη το πλήθος των συνδέσεων που παρουσιάζει κάθε ζεύγος κόμβων καθώς και το μέγεθος (M) του σεισμού. Αυτό έχει ως συνέπεια να μην ποσοτικοποιείται με ακριβή τρόπο η σχέση (συσχέτιση) μεταξύ των κόμβων του δικτύου και να εισάγεται σύνδεση (i, j) μεταξύ κόμβων με πιθανή τελείως διαφορετική σεισμική συμπεριφορά διότι απλά πραγματοποιήθηκε μία (1) τουλάχιστον διαδοχή, χρονική, μεταξύ των σεισμών. Τα παραπάνω μειονεκτήματα κάνουν επιτακτική την ανάγκη της κατασκευής δικτύου με σταθμισμένες συνδέσεις, χωρίς αρνητικά βάρη (συσχετίσεις), οι οποίες ορίζονται από τον πίνακα βαρών W .

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$$



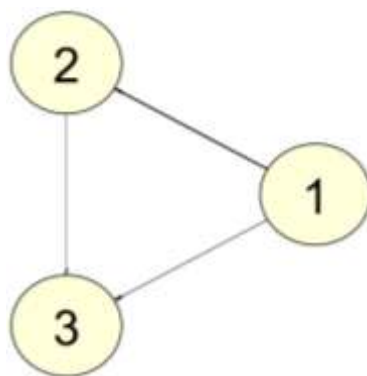
Σχ. 2.4: Παράδειγμα πίνακα γειτνίασης A και του αντίστοιχου δικτύου με απλές συνδέσεις που δημιουργείται από αυτόν.

Για να κατασκευαστεί ο πίνακας βαρών W , θεωρούμε έναν συμμετρικό τετραγωνικό πίνακα $V = \{v_{ij}\}$, $i, j = 1, \dots, K$, μεγέθους $K \times K$. Κάθε στοιχείο v_{ij} του πίνακα V περιέχει είτε έναν ακέραιο αριθμό που δηλώνει πόσες φορές η διαδοχή των σεισμών εμφανίζεται για κάθε ζεύγος κόμβων i και j , ή έναν θετικό πραγματικό αριθμό που ποσοτικοποιεί το μέγεθος M κάθε σεισμού καθώς δηλώνει την σεισμική ροπή M_0 που εκλύεται για κάθε ζεύγος κόμβων i και j . Η σεισμική ροπή M_0 υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση $\log M_0 = 1.5M + 16.01$, όπου M είναι το μέγεθος του σεισμού (Kanamori και Anderson 1975). Η εμπειρική σχέση είναι κατάλληλη για τον υπολογισμό της σεισμικής ροπής M_0 επιφανειακών σεισμών, δηλαδή σεισμών με βάθος μικρότερο από 50 χλμ., στον ελληνικό χώρο (Papazachos et al. 1997).

Για να κατασκευαστεί ο συμμετρικός τετραγωνικός πίνακας βαρών $W = \{w_{ij}\}$, $i, j = 1, \dots, K$, μεγέθους $K \times K$, τα στοιχεία v_{ij} του πίνακα V , είτε στην περίπτωση που δηλώνουν το πλήθος σεισμών ή την σεισμική ροπή M_0 σε κάθε

ζεύγος κόμβων i και j , πρέπει να κανονικοποιηθούν ώστε να ισχύει $0 \leq w_{ij} \leq 1$ (δημιουργία μη αρνητικών βαρών). Έτσι, ο πίνακας βαρών W δίνεται από την σχέση $W = \{w_{ij}\} = v_{ij} / \max(v_{ij})$, όπου $\max(v_{ij})$ είναι η μέγιστη τιμή του πίνακα V (Σχ. 2.5, για τρεις (3) μεταβλητές). Επομένως, ο πίνακας βαρών W ποσοτικοποιεί με σταθμισμένη σύνδεση την σχέση (συσχέτιση) μεταξύ των κόμβων του δικτύου. Επίσης, εξ ορισμού δεν αναγνωρίζεται η ύπαρξη βρόχου (λούπας) στον πίνακα βαρών W και το στοιχείο w_{ii} του πίνακα W ορίζεται ως $w_{ii} = 0$.

$$V = \begin{pmatrix} 0 & 10 & 5 \\ 10 & 0 & 2 \\ 5 & 2 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow W = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0.5 \\ 1 & 0 & 0.2 \\ 0.5 & 0.2 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$$



Σχ. 2.5: Παράδειγμα πίνακα V , στην περίπτωση που μετρά το πλήθος των διαδοχικών σεισμών μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων i και j , από τον οποίο προκύπτει ο πίνακας βαρών W και του αντίστοιχου δικτύου με σταθμισμένες συνδέσεις που δημιουργείται από τον πίνακα βαρών W .

2.2.2 Κατασκευή σεισμικού δικτύου συσχέτισης

Η κατασκευή του σεισμικού δικτύου συσχέτισης βασίζεται στην χρήση της πολυμεταβλητής χρονοσειράς (Jimenez et al. 2008, Tenenbaum et al 2012). Πρώτα, ορίζονται οι κόμβοι του δικτύου να είναι είτε K δισδιάστατες κυψελίδες ίσου μεγέθους ή K καλά καθορισμένες σεισμικές ζώνες της περιοχής μελέτης με βάση σεισμοτεκτονικά κριτήρια όπως τύπος ρήγματος, μηχανισμός γένεσης, ρυθμός έκλυσης σεισμικής ροπής και μέγιστο παρατηρούμενο μέγεθος (Papazachos et al. 1998, Papaioannou και Papazachos 2000, Vamvakaris et al. 2016).

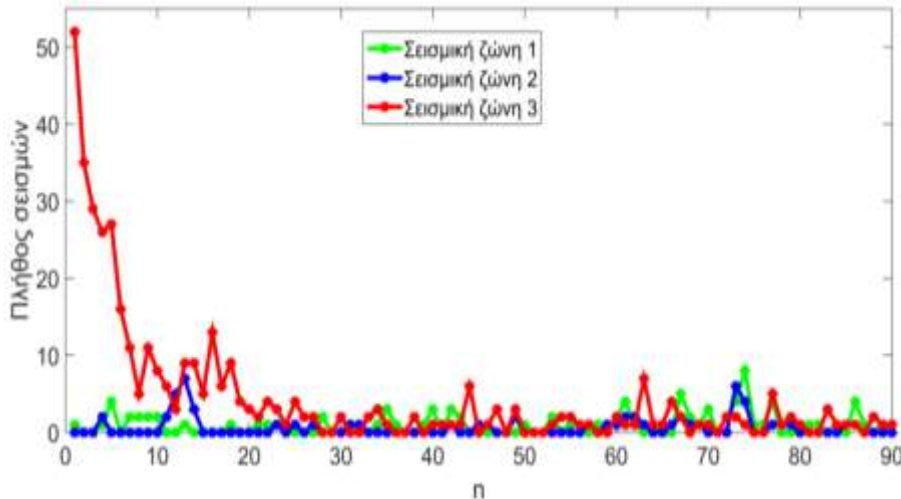
Για την εισαγωγή των συνδέσεων του σεισμικού δικτύου συσχέτισης μεταξύ των κόμβων του απαιτείται η κατασκευή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς. Οι χρονοσειρές χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση των γραμμικών αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των κόμβων (μεταβλητών) του δικτύου, δηλαδή των K κυψελίδων ή των K καλά καθορισμένων σεισμικών ζωνών της περιοχής που είναι υπό εξέταση. Η παρατηρούμενη μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι είτε η σεισμική ροπή M_0 ή το πλήθος των σεισμών (Jimenez et al. 2008, Tenenbaum et al 2012) που παρατηρείται σε κάθε μία από τις K κυψελίδες ή τις K καλά καθορισμένες σεισμικές ζώνες (Σχ. 2.6) ανά μονάδα δειγματοληψίας (π.χ. ανά t ημέρες).

Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης Pearson χρησιμοποιείται ως εκτιμητής των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των μεταβλητών (κόμβων) της πολυμεταβλητής χρονοσειράς, που αντιπροσωπεύονται από την σεισμική δραστηριότητα που παρουσιάζει καθεμία από τις K κυψελίδες ή καθεμία από τις K καλά καθορισμένες σεισμικές ζώνες, καθώς η διατριβή μελετά δίκτυα με μη-κατευθυνόμενες συνδέσεις.

Για δύο μεταβλητές $X = X_i$ και $Y = X_j$, με $i, j \in 1, \dots, K$, ο συντελεστής συσχέτισης Pearson ορίζεται ως

$$\Sigma = r_{XY} = s_{XY} / \sqrt{s_X^2 s_Y^2}, \quad (2.1)$$

όπου $s_{XY} = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})(y_t - \bar{y})$ είναι η δειγματική συνδιασπορά των X και Y και $s_X^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2$ είναι η δειγματική διασπορά της X και $\bar{x}$ είναι ο μέσος όρος. Ο πίνακας συσχέτισης Σ όπου για τις τιμές των παρατηρήσεων του ισχύει $-1 \leq r_{XY} \leq 1$ περιέχει την ποσοτική τιμή των αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των κόμβων (μεταβλητών) του δικτύου συσχέτισης.



Σχ. 2.6: Παράδειγμα με $K = 3$ χρονοσειρές, που δημιουργούνται από το ημερήσιο πλήθος σεισμών ανά σεισμική ζώνη με χρόνο δειγματοληψίας την μία ημέρα για κάθε παρατήρηση, που σχηματίζουν την πολυμεταβλητή χρονοσειρά.

Το σύνολο των συνδέσεων αποτυπώνεται είτε από τον πίνακα βαρών W , για σταθμισμένες συνδέσεις, ή από τον πίνακα γειτνίασης A , για απλές. Ο συμμετρικός τετραγωνικός πίνακας βαρών $W = \{w_{ij}\}$, $i, j = 1, \dots, K$, μεγέθους $K \times K$, προκύπτει από την απόλυτη τιμή του πίνακα συσχέτισης Σ ως: $W = \{w_{ij}\} = |\Sigma| = |r_{XY}|$ (Σχ. 2.7, για τις τρεις (3) μεταβλητές του Σχ. 2.6) ώστε οι σταθμισμένες συνδέσεις να μην έχουν αρνητικά βάρη. Επομένως, ο πίνακας βαρών W περιέχει τις σταθμισμένες συνδέσεις του δικτύου συσχέτισης, όπου για κάθε στοιχείο του πίνακα W ισχύει $0 \leq w_{ij} \leq 1$ (δημιουργία μη αρνητικών βαρών).

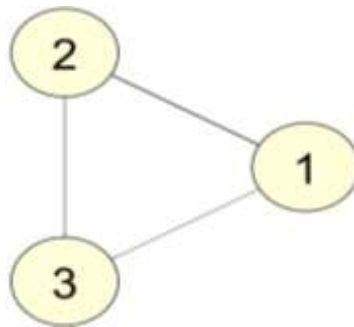
Για τις απλές συνδέσεις, ο συμμετρικός τετραγωνικός πίνακας γειτνίασης $A = \{a_{ij}\}$, $i, j = 1, \dots, K$, μεγέθους $K \times K$, προκύπτει από τον πίνακα συσχέτισης Σ με κάποια μέθοδο που θέτει σύνδεση, εισάγεται μονάδα (1) στον πίνακα γειτνίασης A , όταν η συσχέτιση κρίνεται σημαντική και δεν θέτει σύνδεση, επομένως εισάγεται μηδέν (0) στον πίνακα γειτνίασης A , όταν η συσχέτιση κρίνεται ασήμαντη. Το κριτήριο για να εισαχθεί ή όχι σύνδεση μπορεί να είναι ένα αυθαίρετο κατώφλι ε στον πίνακα συσχέτισης Σ , ή ένα κατώφλι ε στον πίνακα συσχέτισης Σ που αντιστοιχεί σε καθορισμένο πλήθος συνδέσεων, ή να προκύπτει από τον στατιστικό έλεγχο σημαντικότητας των τιμών του πίνακα συσχέτισης Σ (Horvath 2011). Η εισαγωγή των απλών συνδέσεων στην διατριβή δίνεται από την στατιστική σημαντικότητα των τιμών, που προκύπτουν από τον συντελεστή γραμμικής συσχέτισης Pearson, του πίνακα συσχέτισης Σ (Σχ. 2.8, για τις τρεις (3) μεταβλητές του Σχ. 2.6). Επομένως, το κριτήριο για την εισαγωγή των συνδέσεων στο δίκτυο συσχέτισης δίνεται από τον έλεγχο σημαντικότητας των τιμών του πίνακα συσχέτισης

Σ. Σύμφωνα με τον στατιστικό έλεγχο, η μηδενική υπόθεση H_0 θεωρεί ότι: $\rho_{XY} = 0$, όπου ρ_{XY} είναι ο πραγματικός συντελεστής συσχέτισης Pearson. Ο δειγματικός συντελεστής διασυσχέτισης r_{XY} θεωρείται ως το στατιστικό ελέγχου, ο οποίος μετατρέπεται σε t τιμή ως

$$t = r_{XY} \sqrt{\frac{n-2}{1-r_{XY}^2}}, \quad (2.2)$$

που ακολουθεί την κατανομή t-Student (Gosset 1908) με $n - 2$ βαθμούς ελευθερίας.

$$\Sigma = \begin{pmatrix} 1 & 0.29 & -0.01 \\ 0.29 & 1 & -0.03 \\ -0.01 & -0.03 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow W = \begin{pmatrix} 0 & 0.29 & 0.01 \\ 0.29 & 0 & 0.03 \\ 0.01 & 0.03 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$$



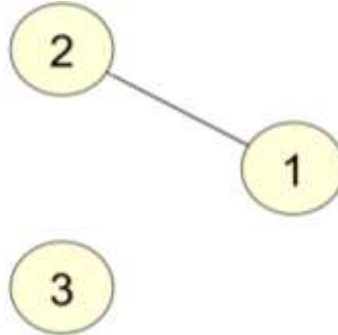
Σχ. 2.7: Παράδειγμα πίνακα συσχέτισης Σ από τον οποίο προκύπτει ο πίνακας βαρών W και του αντίστοιχου δικτύου συσχέτισης με σταθμισμένες συνδέσεις που δημιουργείται από τον πίνακα βαρών W .

Μια σύνδεση μεταξύ των κόμβων i και j εισάγεται, τοποθετείται μονάδα (1) στον πίνακα γειτνίασης A , αν η αντίστοιχη p -τιμή τους που προκύπτει από τον στατιστικό έλεγχο (σχέση (2.2)) είναι μικρότερη από ένα δοσμένο επίπεδο σημαντικότητας α , το οποίο ορίζεται ως $\alpha = 0.05$. Δεν επιλέγεται πιο αυστηρό (π.χ. $\alpha = 0.01$) από το $\alpha = 0.05$ ως επίπεδο σημαντικότητας καθώς θα σχηματίζονται ελάχιστες συνδέσεις και θα αναπτυχθεί η τάση να κατασκευάζονται απομονωμένα δίκτυα αλλά ούτε πιο χαλαρό (π.χ. $\alpha = 0.1$) ώστε να σχηματίζονται πολλές συνδέσεις και το δίκτυο να έχει την τάση να γίνεται πλήρες. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου ισχύει p -τιμή > 0.05 , τοποθετείται μηδέν (0) στην αντίστοιχη θέση (i, j) του πίνακα γειτνίασης A . Ο έλεγχος σημαντικότητας εκτελείται για κάθε ζεύγος κόμβων και ο έλεγχος επαναλαμβάνεται στα ίδια δεδομένα, μια ρύθμιση που αναφέρεται ως πολλαπλές δοκιμές όπου αυξάνει το σφάλμα τύπου I, δηλαδή αυξάνει την πιθανότητα της παραδοχής απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 τυχαία. Η συνθήκη του θετικά ημι-ορισμένου πίνακα συσχέτισης Σ ορίζει αντίστοιχα συνθήκη για τις εφικτές μορφές που μπορεί να έχει ο πίνακας γειτνίασης A . Έτσι, η κάθε μονάδα (1) που υπάρχει στον πίνακα γειτνίασης A δηλώνει σύνδεση μεταξύ των κόμβων του δικτύου συσχέτισης που την περιέχουν. Επομένως, η εισαγωγή των συνδέσεων στο δίκτυο συσχέτισης βασίζεται στην παρόμοια σεισμική δραστηριότητα, μέσω είτε του πλήθους σεισμών ή της έκλυσης της σεισμικής ροπής M_0 , που παρουσιάζουν είτε οι K κυψελίδες ή οι K καλά καθορισμένες σεισμικές ζώνες μεταξύ τους.

2.2.3 Κατασκευή σεισμικού δικτύου επανάληψης

Το σεισμικό δίκτυο επανάληψης, όπως και οι δύο (2) προαναφερθείσες μέθοδοι κατασκευής του σεισμικού δικτύου, αποτυπώνει την εξαρτώμενη από το χρόνο συμπεριφορά της δυναμικής των συστημάτων, όπως της σεισμικής δραστηριότητας.

$$\Sigma = \begin{pmatrix} 1 & 0.29 & -0.01 \\ 0.29 & 1 & -0.03 \\ -0.01 & -0.03 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow p = \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{0.01} & 0.95 \\ \mathbf{0.01} & 0 & 0.75 \\ 0.95 & 0.75 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$$



Σχ. 2.8: Παράδειγμα πίνακα συσχέτισης Σ από τον οποίο προκύπτει, μέσω του στατιστικού ελέγχου (σχέση (2.2)), ο πίνακας p που περιέχει τις p -τιμές. Στην συνέχεια, δημιουργείται από τον πίνακα p , ο πίνακας γειτνίασης A μαζί με το αντίστοιχο δίκτυο συσχέτισης με απλές συνδέσεις που δημιουργείται από τον πίνακα γειτνίασης A . Στον πίνακα p σημειώνονται με κόκκινο χρώμα οι τιμές που είναι στατιστικά σημαντικές, όπως προέκυψαν από την σχέση (2.2) με $\alpha = 0.05$.

Στην διατριβή, η παρατηρούμενη μεταβλητή της χρονοσειράς για την κατασκευή του δικτύου επανάληψης θεωρείται να είναι το μέγεθος M ή η σεισμική ροπή M_0 που εκλύεται από κάθε σεισμό. Επομένως, κατασκευάζεται η χρονοσειρά $X = (x_1, \dots, x_K)$ και κάθε παρατήρησή της, $x_1, \dots, x_K$, είναι το μέγεθος M ή η σεισμική ροπή M_0 του κάθε σεισμού (Σχ. 2.9). Οι παρατηρήσεις της χρονοσειράς θεωρούνται ως οι κόμβοι του σεισμικού δικτύου επανάληψης. Επομένως, οι κόμβοι του σεισμικού δικτύου επανάληψης αντιπροσωπεύονται από το μέγεθος M ή την σεισμική ροπή M_0 του κάθε σεισμού, σε αντίθεση με τις δύο (2) προαναφερθείσες μεθόδους κατασκευής του σεισμικού δικτύου (ενότητες 2.2.1 και 2.2.2) όπου αντιπροσωπεύονταν από κυψελίδες ή καλά καθορισμένες σεισμικές ζώνες.

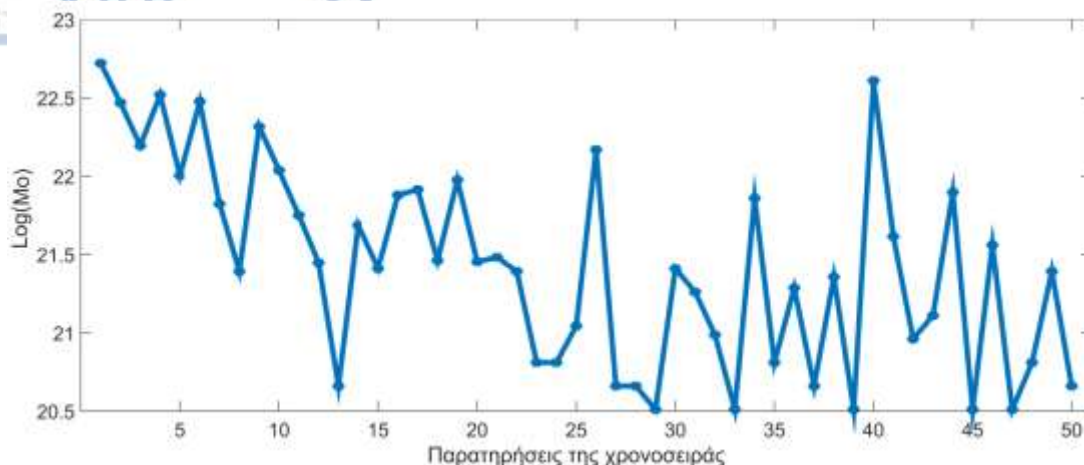
Οι απλές συνδέσεις του δικτύου επανάληψης δίνονται από ένα αυθαίρετο κατώφλι ε στον πίνακα επανάληψης $R_{i,j}(\varepsilon)$ (σχέση (2.3)) που υπολογίζεται από την βηματική συνάρτηση ή συνάρτηση Heaviside. Το κύριο βήμα για την εισαγωγή των συνδέσεων στο δίκτυο επανάληψης είναι ο υπολογισμός του συμμετρικού και τετραγωνικού πίνακα επανάληψης $R_{i,j}(\varepsilon)$, μεγέθους $K \times K$, ο οποίος υπολογίζεται ως εξής:

$$R_{i,j}(\varepsilon) = \theta(\varepsilon - ||x_i - x_j||), i, j = 1, \dots, K, \quad (2.3)$$

όπου ε είναι το κατώφλι (απόσταση) αποκοπής, $|| * ||$ η ευκλείδεια νόρμα και $\theta(x)$ η συνάρτηση Heaviside η οποία θέτει είτε μονάδα (1) στον πίνακα $R_{i,j}(\varepsilon)$ όταν $R_{i,j}(\varepsilon) < \varepsilon$ ή μηδέν (0) όταν $R_{i,j}(\varepsilon) > \varepsilon$.

Ο πίνακας επανάληψης $R_{i,j}(\varepsilon)$ αντιστοιχεί στον πίνακα γειτνίασης A του σεισμικού δικτύου επανάληψης (Σχ. 2.10, αποτύπωση παραδείγματος για τρεις (3) σεισμούς). Επομένως, οι συνδέσεις εισάγονται μεταξύ των κόμβων που έχουν παρόμοια σεισμική συμπεριφορά, καθώς θεωρείται κατώφλι ε , ως προς το μέγεθος M ή την έκλυση σεισμικής ροπής M_0 . Στην περίπτωση που παρουσιάζονται σεισμοί (κόμβοι) με την ίδια τιμή μεγέθους M ή σεισμικής ροπής M_0 θεωρούνται ως ένας (1).

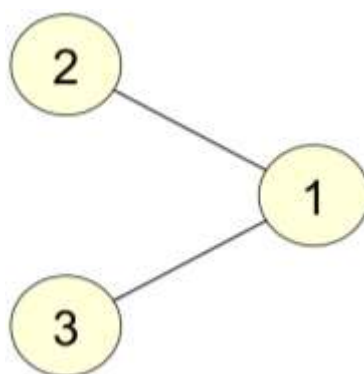
Επίσης, δεν αναγνωρίζονται βρόχοι (λούπες) και ορίζεται εξ ορισμού $\alpha_{ii} = 0$ στον πίνακα γειτνίασης A .



Σχ. 2.9: Παράδειγμα χρονοσειράς που δημιουργείται από την σεισμική ροπή M_0 , σε λογαριθμική κλίμακα, που εκλύεται από κάθε σεισμό και από την οποία προκύπτουν οι κόμβοι του δικτύου επανάληψης.

Πολλές προσεγγίσεις για την επιλογή του αυθαίρετου κατωφλίου ε έχουν προταθεί όπως από τους Schinkel et al. (2008) όπου το κριτήριο για την επιλογή του ε είναι η ισχύς στην ανίχνευση σήματος και από τους Donges et al. (2012) όπου το κριτήριο επιλογής του ε επιλέχθηκε μέσω ενός κατωφλίου διήθησης. Στην διατριβή, θεωρούνται διάφορα αυθαίρετα κατώφλια ε για την κατασκευή του σεισμικού δικτύου επανάληψης. Έτσι, σχηματίζεται διαφορετική πυκνότητα συνδέσεων μεταξύ των κόμβων του σεισμικού δικτύου επανάληψης, καθώς είτε μικρές τιμές του ε θα σχηματίσουν λίγες συνδέσεις (αραιή πυκνότητα συνδέσεων) ή μεγάλες τιμές του ε θα σχηματίσουν αρκετές συνδέσεις (υψηλή πυκνότητα συνδέσεων) μεταξύ των κόμβων του δικτύου.

$$R_{i,j}(\varepsilon) = \begin{pmatrix} 0 & 0.4 & 0.3 \\ 0.4 & 0 & 1.2 \\ 0.3 & 1.2 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightarrow$$



Σχ. 2.10: Παράδειγμα πίνακα επανάληψης $R_{i,j}(\varepsilon)$ από τον οποίο προκύπτει ο πίνακας γειτνίασης A και του αντίστοιχου δικτύου επανάληψης με απλές συνδέσεις που δημιουργείται από τον πίνακα γειτνίασης A . Το αυθαίρετο κατώφλι ε στον πίνακα επανάληψης $R_{i,j}(\varepsilon)$ θεωρείται ως: $\varepsilon = 1.0$. Έτσι, για τις τιμές με το κόκκινο χρώμα στον πίνακα επανάληψης $R_{i,j}(\varepsilon)$ θα τοποθετηθεί μονάδα (1) στις αντίστοιχες θέσεις στον πίνακα γειτνίασης A , καθώς είναι μικρότερες από το κατώφλι ε .

Στην διατριβή, η κατασκευή του σεισμικού δικτύου βασίζεται κατά κύριο λόγο στις μεθοδολογίες που αναπτύσσονται στις ενότητες 2.2.1, δηλαδή όταν το δίκτυο κατασκευάζεται από την διαδοχή των σεισμών, και 2.2.2, όταν το δίκτυο κατασκευάζεται με την χρήση της πολυμεταβλητής χρονοσειράς. Η κατασκευή του σεισμικού δικτύου επανάληψης ακολουθείται σε περιπτώσεις που τα δεδομένα της μελέτης είναι περιορισμένα σε χωρικό και χρονικό εύρος, όπως για παράδειγμα στην μελέτη μιας μετασεισμικής ακολουθίας (αναλύεται στις ενότητες 2.6.2 και 3.6.2).

2.3 Μέτρα δικτύου

Για την μελέτη του σεισμικού δικτύου, το οποίο κατασκευάστηκε με μία από τις προηγούμενες μεθοδολογίες (ενότητες 2.2.1 ως 2.2.3), απαραίτητη είναι η θεώρηση και ο υπολογισμός κάποιων βασικών μέτρων του, η χρήση των οποίων θα παρέχει τις τοπολογικές πληροφορίες σχετικά με την δομή του. Έτσι, εννέα (9) μέτρα δικτύου θεωρούνται και υπολογίζονται, είτε στον πίνακα γειτνίασης A , όταν οι συνδέσεις είναι μη-κατευθυνόμενες και απλές ή στον πίνακα βαρών W , όταν οι συνδέσεις είναι μη-κατευθυνόμενες και σταθμισμένες.

Σε δίκτυο $G = (K, E)$, για δύο οποιαδήποτε κόμβους του i και j η γεωδαισιακή απόσταση τους, d_{ij} για απλές συνδέσεις ή d_{ij}^w για σταθμισμένες συνδέσεις, ορίζεται ως το μήκος της συντομότερης διαδρομής από τον κόμβο i στον j , αν οι κόμβοι είναι συνδεδεμένοι (γείτονες), αλλιώς $d_{ij} = \infty$ ή $d_{ij}^w = \infty$. Η συντομότερη διαδρομή (μονοπάτι) μεταξύ δύο κόμβων είναι η διαδρομή που έχει το ελάχιστο μήκος ανάμεσα σε όλες τις διαδρομές μεταξύ των δύο κόμβων i και j του δικτύου. Η περιγραφή καθώς και η μαθηματική έκφραση (Rubinov και Sporns 2010) των εννέα (9) μέτρων δικτύου παρουσιάζεται παρακάτω.

2.3.1 Degree centrality/Strength (Βαθμός της κεντρικότητα/Ισχύς)

Ο βαθμός της κεντρικότητας, για δίκτυο με απλές συνδέσεις, ή η ισχύς, για δίκτυο με σταθμισμένες συνδέσεις, είναι ένα από το πιο βασικά μέτρα δικτύου που χαρακτηρίζει το δίκτυο. Ο βαθμός της κεντρικότητας μετρά το σύνολο των απλών συνδέσεων ενώ η ισχύς μετρά το άθροισμα (σύνολο) των βαρών, το βάρος χαρακτηρίζει κάθε σταθμισμένη σύνδεση, που παρουσιάζει το δίκτυο. Αντίστοιχα, κάθε κόμβος του δικτύου παρουσιάζει τον δικό του βαθμό κεντρικότητας, αν το δίκτυο παρουσιάζει απλές συνδέσεις, ή ισχύος, αν το δίκτυο παρουσιάζει σταθμισμένες συνδέσεις. Η σχέση με την οποία υπολογίζεται ο βαθμός της κεντρικότητας ή ισχύ για κάθε κόμβο είναι η εξής

$$k_i = \sum_{j \in K} a_{ij}, \text{ για απλές συνδέσεις (2.4),}$$

ή

$$k_i^w = \sum_{j \in K} w_{ij}, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.5).}$$

Με δεδομένο είτε τον βαθμό ή την ισχύ του κάθε κόμβου μπορούμε να ορίσουμε τον μέσο βαθμό ή την μέση ισχύ που παρουσιάζει συνολικά το δίκτυο από την παρακάτω σχέση:

$$\overline{deg}_G = K^{-1} \sum_{i \in G} k_i, \text{ για απλές συνδέσεις (2.6),}$$

ή

$$\overline{deg}_G^w = K^{-1} \sum_{i \in G} k_i^w, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.7).}$$

Στο σεισμικό δίκτυο, οι κόμβοι, δηλαδή οι K δισδιάστατες κυψελίδες ή οι K καλά καθορισμένες σεισμικές ζώνες ή τα K μεγέθη των σεισμών, που παρουσιάζουν υψηλή τιμή του βαθμού της κεντρικότητας ή της ισχύος διαδραματίζουν σημαντικό

ρόλο σε αυτό καθώς παρουσιάζουν τις περισσότερες συσχετίσεις (σχέσεις), μέσω των συνδέσεων τους, μεταξύ του συνόλου των κόμβων του. Επομένως, το μέτρο του βαθμού της κεντρικότητας ή της ισχύος ποσοτικοποιεί το κατά πόσο ένας κόμβος παρουσιάζει παρόμοια πρότυπα σεισμικότητας με άλλους κόμβους στο σεισμικό δίκτυο μέσω των απευθείας συνδέσεων τους.

2.3.2 Characteristic path length (Χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής)

Το μέτρο δικτύου του χαρακτηριστικού μήκους διαδρομής (Characteristic path length) υπολογίζει την μικρότερη δυνατή απόσταση, μέσω των συνδέσεων που έχουν οριστεί στο δίκτυο, μεταξύ δύο οποιαδήποτε κόμβων i και j του δικτύου διαμέσου των υπολοίπων κόμβων, συμπεριλαμβανομένων και των ιδίων i και j . Ο υπολογισμός την μικρότερης δυνατής απόστασης μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων i και j του δικτύου δίνεται από τον πίνακα της απόστασης d_{ij} , για απλές, και d_{ij}^w για σταθμισμένες συνδέσεις, ο οποίος ορίζεται ως εξής

$$d_{ij} = \sum_{a_{uv} \in G_{i \leftarrow \rightarrow j}} d_{uv}, \text{ για απλές συνδέσεις (2.8),}$$

όπου $G_{i \leftarrow \rightarrow j}$ η βραχύτερη γεωδαισιακή απόσταση μεταξύ των κόμβων i και j και d_{uv} οι γεωδαισιακές αποστάσεις μεταξύ των κόμβων του δικτύου, μέσω των απλών συνδέσεων,

$$d_{ij}^w = \sum_{w_{uv} \in G_{i \leftarrow w \rightarrow j}} d_{uv}^w, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.9),}$$

όπου $G_{i \leftarrow w \rightarrow j}$ και d_{uv}^w , αντίστοιχα, για τις σταθμισμένες συνδέσεις.

Επομένως, το μέτρο αυτό αναφέρεται στο σύνολο όλων των ζευγών (i, j) των κόμβων του δικτύου με πεπερασμένο μήκος διαδρομής μεταξύ τους. Αξίζει να σημειώσουμε ότι το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής είναι το μέσο βραχύτερο μήκος διαδρομής του δικτύου. Το μέσο βραχύτερο μήκος διαδρομής ορίζεται ως η μέση συντομότερη απόσταση μεταξύ δύο οποιωνδήποτε κόμβων i και j του δικτύου και χαρακτηρίζει την συνολική συνεκτικότητά του. Το μέτρο υπολογίζεται ως εξής

$$L = \frac{1}{K} \sum_{i \in K} \frac{\sum_{j \in K, j \neq i} d_{ij}}{K-1}, \text{ για απλές συνδέσεις (2.10),}$$

ή

$$L^w = \frac{1}{K} \sum_{i \in K} \frac{\sum_{j \in K, j \neq i} d_{ij}^w}{K-1}, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.11).}$$

Μικρή τιμή του μέσου βραχύτερου μήκους διαδρομής στο δίκτυο δηλώνει ότι, οι κόμβοι του μπορούν να συνδέονται (συσχετίζονται) μεταξύ τους μέσω των ιδίων ή των άλλων με ένα μικρό αριθμό βημάτων (συνδέσεων). Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση οι κόμβοι του σεισμικού δικτύου θα παρουσιάζουν παρόμοια πρότυπα σεισμικότητας καθώς θα μπορούν να συνδέονται μεταξύ τους άμεσα ή έμμεσα μέσω μικρού αριθμού συνδέσεων. Αντίθετα, μία μεγάλη τιμή του μέτρου δηλώνει ότι οι κόμβοι του σεισμικού δικτύου παρουσιάζουν πρότυπα σεισμικότητας τα οποία δεν μπορούν να συσχετιστούν είτε άμεσα ή έμμεσα μεταξύ τους μέσω ενός μικρού αριθμού συνδέσεων.

2.3.3 Global efficiency (Συνολική αποδοτικότητα)

Το μέτρο της τοπικής αποδοτικότητας (local efficiency), από το οποίο προκύπτει το μέτρο της συνολικής αποδοτικότητας (global efficiency), εκφράζει την αποτελεσματικότητα που παρουσιάζει ο κάθε κόμβος σχετικά με την συμβολή του στην μεταφορά της πληροφορίας μέσα στο δίκτυο. Η σχέση με την οποία υπολογίζεται το μέτρο δικτύου, της τοπικής αποδοτικότητας, για κάθε κόμβο είναι η εξής

$$E_i = \frac{\sum_{j,h \in K, j \neq i} a_{ij} a_{ih} [d_{jh}(N_i)]^{-1}}{k_i(k_i-1)}, \text{ για απλές συνδέσεις (2.12),}$$

ή

$$E_i^W = \frac{\sum_{j,h \in K, j \neq i} (w_{ij} w_{ih} [d_{jh}^W(N_i)]^{-1})}{k_i(k_i-1)}, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.13),}$$

όπου $d_{jh}(N_i)$ η βραχύτερη απόσταση μεταξύ των κόμβων j και h μέσω μόνο των γειτόνων του κόμβου i και $d_{jh}^W(N_i)$ με σταθμισμένες συνδέσεις, αντίστοιχα.

Η σχέση με την οποία υπολογίζεται η τιμή του μέτρου, της συνολικής αποδοτικότητας, συνολικά στο δίκτυο είναι η εξής

$$E = \frac{1}{K} \sum_{i \in K} E_i, \text{ για απλές συνδέσεις (2.14),}$$

ή

$$E^W = \frac{1}{K} \sum_{i \in K} E_i^W, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.15).}$$

Μικρή τιμή για το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής του δικτύου δηλώνει ότι οι κόμβοι μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με μικρό αριθμό βημάτων (συνδέσεων), δηλώνει μεγάλη τιμή της αποδοτικότητας του δικτύου σχετικά με την ροή πληροφορίας σε αυτό. Επομένως, στο σεισμικό δίκτυο η συνολική αποδοτικότητα δηλώνει κατά πόσο οι κόμβοι του παρουσιάζουν παρόμοια πρότυπα σεισμικότητας είτε με άμεσο τρόπο, (σύνδεση μεταξύ τους), είτε με έμμεσο, (σύνδεση μέσω άλλων), χαρακτηρίζοντας την αποδοτικότητα του δικτύου.

2.3.4 Clustering coefficient (Συντελεστής συσταδοποίησης)

Ο συντελεστής συσταδοποίησης (clustering coefficient) δηλώνει την πιθανότητα που έχουν δυο κόμβοι του δικτύου να συνδέονται με έναν κοινό τους κόμβο αλλά να είναι συνδεδεμένοι και μεταξύ τους. Η σχέση με την οποία υπολογίζεται ο συντελεστής συσταδοποίησης για κάθε κόμβο είναι η εξής

$$C_i = \frac{1}{K} \sum_{i \in K} \frac{\sum_{j,h \in K} a_{ij} a_{ih} a_{jh}}{k_i(k_i-1)}, \text{ για απλές συνδέσεις (2.16),}$$

ή

$$C_i^W = \frac{1}{K} \sum_{i \in K} \frac{\sum_{j,h \in K} a_{ij}^W a_{ih}^W a_{jh}^W}{k_i(k_i-1)}, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.17).}$$

Η σχέση με την οποία υπολογίζεται η τιμή του συντελεστή συσταδοποίησης συνολικά στο δίκτυο είναι η εξής

$$C = \frac{1}{K} \sum_{i \in K} C_i, \text{ για απλές συνδέσεις (2.18),}$$

ή

$$C^W = \frac{1}{K} \sum_{i \in K} C_i^W, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.19).}$$

Υψηλή τιμή του συντελεστή συσταδοποίησης υποδεικνύει μεγαλύτερη πιθανότητα ύπαρξης “κλικών” στο δίκτυο. Κλίκα χαρακτηρίζουμε μια τριάδα κόμβων στην οποία όλοι οι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους σχηματίζοντας πλήρες δίκτυο. Επομένως, το μέτρο του συντελεστή συσταδοποίησης δείχνει την τάση που έχουν οι κόμβοι να συσταδοποιούνται (συνδέονται) ανά τριάδες μεταξύ τους στο δίκτυο. Έτσι, ο συντελεστής συσταδοποίησης είναι ένα μέτρο της τοπικής συνοχής του δικτύου, ο οποίος λαμβάνει υπόψη την δομή του δικτύου με βάση την αλληλεπίδραση που υπάρχει μεταξύ των κόμβων του που συνδέονται ανά τριάδες. Στο σεισμικό δίκτυο, το μέτρο δηλώνει κατά πόσο οι κόμβοι του, ανά τριάδες, παρουσιάζουν παρόμοια πρότυπα σεισμικότητας σχηματίζοντας συστάδες.

2.3.5 Betweenness centrality (Ενδιαμεσότητα της κεντρικότητας)

Το μέτρο της ενδιαμεσότητας της κεντρικότητας (betweenness centrality) έχει οριστεί ως ο αριθμός των συντομότερων μονοπατιών (διαδρομών), μέσω των συνδέσεων, μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων (h, j) που περνά από έναν συγκεκριμένο κόμβο i . Το μέτρο αξιολογεί κατά πόσο ένας κόμβος i βρίσκεται στο κοντινότερο μονοπάτι μεταξύ δύο άλλων κόμβων h και j . Ο υπολογισμός του μέτρου για κάθε κόμβο του δικτύου δίνεται από την σχέση

$$b_i = \frac{1}{(K-1)(K-2)} \sum_{\substack{h, j \in K \\ h \neq j, h \neq i, j \neq i}} \frac{\rho_{hj}(i)}{\rho_{hj}}, \text{ για απλές συνδέσεις (2.20),}$$

ή

$$b_i^w = \frac{1}{(K-1)(K-2)} \sum_{\substack{h, j \in K \\ h \neq j, h \neq i, j \neq i}} \frac{\rho_{hj}^w(i)}{\rho_{hj}^w}, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.21),}$$

όπου $\rho_{hj}(i)$ ο αριθμός των βραχύτερων μονοπατιών, με απλές συνδέσεις, μεταξύ των κόμβων h και j διαμέσου του κόμβου i και $\rho_{hj}^w(i)$ με σταθμισμένες συνδέσεις, αντίστοιχα. Επίσης, ορίζεται με ρ_{hj} και ρ_{hj}^w ο συνολικός αριθμός των βραχύτερων μονοπατιών από τον κόμβο h στον κόμβο j με απλές και σταθμισμένες συνδέσεις, αντίστοιχα.

Επίσης, η σχέση με την οποία υπολογίζεται η τιμή του μέτρου συνολικά στο δίκτυο είναι η εξής

$$b = \frac{1}{K} \sum_{i \in K} b_i, \text{ για απλές συνδέσεις (2.22),}$$

ή

$$b^w = \frac{1}{K} \sum_{i \in K} b_i^w, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.23).}$$

Ένας σημαντικός κόμβος θα συμπεριλαμβάνεται σε ένα μεγάλο αριθμό από όλα τα συντομότερα μονοπάτια μεταξύ άλλων κόμβων μέσα στο δίκτυο. Επίσης, το μέτρο ποσοτικοποιεί τον βαθμό κατά τον οποίο ένας κόμβος είναι απευθείας συνδεδεμένος μόνο με άλλους κόμβους οι οποίοι δεν είναι απευθείας συνδεδεμένοι μεταξύ τους. Επομένως, το μέτρο εκφράζει την μεταβατική ιδιότητα καθώς αν ο κόμβος i συνδέεται με τον κόμβο j και ο j με την σειρά του με τον κόμβο h τότε και ο κόμβος i συνδέεται με τον κόμβο h μέσω του κόμβου j . Στο σεισμικό δίκτυο, το μέτρο δηλώνει κατά πόσο υπάρχουν κόμβοι που συνδέονται μεταξύ τους μέσω της παρόμοιας σεισμικότητας που παρουσιάζει κάποιος άλλος κόμβος με έναν από αυτούς που συνδέονται.

2.3.6 Eigenvector centrality (Ιδιοδιάνυσμα της κεντρικότητας)

Το μέτρο του ιδιοδιανύσματος της κεντρικότητας (eigenvector centrality) του δικτύου αποτυπώνει την σημαντικότητα ενός κόμβου στο δίκτυο βασισμένο στην αρχή ότι οι κόμβοι με πολλούς γείτονες (συνδέσεις) έχουν υψηλή τιμή και συνεισφέρουν περισσότερο στην ροή της πληροφορίας μέσα στο δίκτυο. Η σχέση με την οποία υπολογίζεται το μέτρο για κάθε κόμβο του δικτύου είναι η εξής

$$X_i = \lambda^{-1} \sum_{j \in K} a_{ij} x_j, \text{ για απλές συνδέσεις (2.24),}$$

ή

$$X_i^w = \lambda^{-1} \sum_{j \in K} w_{ij} x_j, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.25),}$$

όπου λ η μεγαλύτερη ιδιοτιμή της λύσης της εξίσωσης $AX = \lambda X$, για απλές συνδέσεις με A τον πίνακα γειτνίασης, ή της εξίσωσης $WX = \lambda X$, για σταθμισμένες συνδέσεις με W τον πίνακα βαρών.

Η σχέση με την οποία υπολογίζεται η τιμή του μέτρου συνολικά στο δίκτυο είναι η εξής

$$X = \frac{1}{K} \sum_{i \in K} X_i, \text{ για απλές συνδέσεις (2.26),}$$

ή

$$X^W = \frac{1}{K} \sum_{i \in K} X_i^W, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.27).}$$

Το μέτρο αυτό βασίζεται στην ιδέα ότι οι συνδέσεις που ενώνουν κόμβους υψηλού βαθμού συμβάλλουν στην υψηλή βαθμολόγηση του κόμβου. Επομένως, το μέτρο δικτύου αναδεικνύει αν υπάρχουν κόμβοι στο δίκτυο που έχουν την τάση να συνδέονται με κόμβους που έχουν πολλές συνδέσεις. Στο σεισμικό δίκτυο, το μέτρο δηλώνει κατά πόσο υπάρχουν κόμβοι που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο δίκτυο καθώς η σεισμικότητά τους συσχετίζεται με πολλών άλλων κόμβων.

2.3.7 Assortativity (Ομοιότητα)

Το μέτρο της ομοιότητας (assortativity) του δικτύου εκφράζει την τάση που έχει ένας κόμβος του δικτύου να συνδέεται με άλλους που είναι όμοιοί του σε σχέση με κάποιο μέτρο δικτύου. Αν και το συγκεκριμένο μέτρο της ομοιότητας μπορεί να ποικίλει, η ομοιότητα στην διατριβή εξετάζεται από την άποψη του βαθμού ή της ισχύος ενός κόμβου. Η τιμή του μέτρου δικτύου της ομοιότητας προκύπτει από τον συντελεστή συσχέτισης Pearson, ο οποίος υπολογίζει την συσχέτιση όσον αφορά τον βαθμό της κεντρικότητας ή της ισχύος μεταξύ όλων των δυνατών ζευγών των κόμβων του δικτύου. Η σχέση με την οποία υπολογίζεται το μέτρο της ομοιότητας του δικτύου είναι η εξής

$$r = \frac{K^{-1} \sum_{(i,j) \in K} k_i k_j - [K^{-1} \sum_{(i,j) \in K} \frac{1}{2}(k_i^2 + k_j^2)]^2}{K^{-1} \sum_{(i,j) \in K} \frac{1}{2}(k_i^2 + k_j^2) - [K^{-1} \sum_{(i,j) \in K} \frac{1}{2}(k_i^2 + k_j^2)]^2}, \text{ για απλές συνδέσεις (2.28),}$$

ή

$$r^W = \frac{K^{-1} \sum_{(i,j) \in K} w_{ij} k_i^w k_j^w - [K^{-1} \sum_{(i,j) \in K} \frac{1}{2} w_{ij} (k_i^w + k_j^w)]^2}{K^{-1} \sum_{(i,j) \in K} \frac{1}{2} w_{ij} ((k_i^w)^2 + (k_j^w)^2) - [K^{-1} \sum_{(i,j) \in K} \frac{1}{2} w_{ij} (k_i^w + k_j^w)]^2}, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.29),}$$

όπου K το πλήθος των κόμβων του δικτύου και είτε k_i ή k_i^w αναφέρεται στον βαθμό ή την ισχύ του κόμβου i , αντίστοιχα.

Όταν $r = 1$ ή $r^W = 1$, τότε υπάρχει η τάση στο δίκτυο να συνδέονται κόμβοι μεταξύ τους που παρουσιάζουν παρόμοιο βαθμό ή παρόμοια ισχύ, όταν $r = 0$ ή $r^W = 0$, τότε οι κόμβοι του δικτύου που παρουσιάζουν παρόμοιο βαθμό ή ισχύ δεν συνδέονται μεταξύ τους, ενώ, τέλος, όταν $r = -1$ ή $r^W = -1$ στο δίκτυο συνδέονται οι κόμβοι του με αντιστρόφως ανάλογο βαθμό ή ισχύ που παρουσιάζουν μεταξύ τους. Επομένως, το μέτρο δηλώνει την συσχέτιση μεταξύ δύο κόμβων όσον αφορά τον βαθμό της κεντρικότητας ή της ισχύος τους. Στο σεισμικό δίκτυο, το μέτρο δηλώνει αν συνδέονται οι κόμβοι που παρουσιάζουν παρόμοια πρότυπα σεισμικότητας, δηλαδή παρόμοιο βαθμό ή ισχύ, μεταξύ τους.

2.3.8 Eccentricity (Εκκεντρότητα)

Το μέτρο της εκκεντρότητας (eccentricity) ενός κόμβου του δικτύου δηλώνει το μέγιστο μήκος διαδρομής, με βάση τον αριθμό των συνδέσεων, ανάμεσα αυτού και κάθε άλλου κόμβου του δικτύου. Ο υπολογισμός του μέτρου για κάθε κόμβο του δικτύου δίνεται από την σχέση

$$e_i = \max_{x \in K} \{d(i, x)\}, \text{ για απλές συνδέσεις (2.30),}$$

ή

$$e_i^W = \max_{x \in K} \{d^W(i, x)\}, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.31).}$$

Η σχέση με την οποία υπολογίζεται η τιμή του μέτρου συνολικά στο δίκτυο είναι η εξής:

$$e = \frac{1}{K} \sum_{i \in K} e_i, \text{ για απλές συνδέσεις (2.32),}$$

ή

$$e^W = \frac{1}{K} \sum_{i \in K} e_i^W, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.33).}$$

Επομένως, το μέτρο υπολογίζει για όλους τους κόμβους του δικτύου το μέγιστο βραχύτερο μήκος διαδρομής τους που τους συνδέει με κάθε άλλο κόμβο. Στο σεισμικό δίκτυο, το μέτρο δηλώνει κατά πόσο, ανάλογα με τον αριθμό των συνδέσεων ή τα βάρη που σχηματίζονται μεταξύ των κόμβων, ο κάθε κόμβος παρουσιάζει παρόμοια πρότυπα σεισμικότητας με καθέναν από τους υπόλοιπους.

2.3.9 Diameter (Διάμετρος)

Το μέτρο δικτύου της διαμέτρου (diameter) μετρά την μέγιστη απόσταση μεταξύ κάθε ζεύγους των κόμβων του. Η διάμετρος ενός δικτύου είναι η υψηλότερη τιμή της εκκεντρότητας που παρουσιάζει ένας από τους κόμβους του. Ο υπολογισμός του μέτρου συνολικά στο δίκτυο δίνεται από την σχέση

$$d_G = \max_{i \in K} e_i, \text{ για απλές συνδέσεις (2.34)}$$

ή

$$d_G^W = \max_{i \in K} e_i^W, \text{ για σταθμισμένες συνδέσεις (2.35).}$$

Στο σεισμικό δίκτυο, μικρή τιμή του μέτρου δηλώνει ότι υπάρχει παρόμοια σεισμικότητα μεταξύ των κόμβων του που προκύπτει άμεσα με την σύνδεση τους ή έμμεσα με την σύνδεση μέσω άλλων συνδέσεων. Αντίθετα, μεγάλη τιμή του μέτρου αποκαλύπτει ότι υπάρχουν κόμβοι στο σεισμικό δίκτυο με διαφορετικά πρότυπα σεισμικότητας καθώς χρειάζονται αρκετές συνδέσεις ώστε να συσχετιστούν (συνδεθούν) μεταξύ τους.

Για τον υπολογισμό των τιμών των εννέα (9) μέτρων δικτύου χρησιμοποιούνται οι συναρτήσεις του προγραμματιστικού πακέτου της Matlab (Rubinov και Sporns 2010, <https://sites.google.com/site/bctnet/measures>).

2.4 Κατασκευή τυχαιοποιημένου δικτύου

Γενικά, η ιδέα της κατασκευής τυχαιοποιημένων δεδομένων εισήχθη από τους Theiler και Prichard (1992) ώστε να συγκριθούν με τα αρχικά μέσω στατιστικού ελέγχου, παρουσιάζεται στην ενότητα 2.5, με σκοπό την εξέταση αν τα αρχικά δεδομένα είναι τυχαία (ανεξάρτητα) ή όχι μεταξύ τους. Στην ανάλυση δικτύου ένα σημαντικό ερώτημα είναι αν το αρχικό δίκτυο που είναι υπό μελέτη είναι τυχαίο, δηλαδή αν οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων του σχηματίστηκαν τυχαία χωρίς να υπάρχει πραγματική σχέση (συσχέτιση). Έτσι, η κατασκευή ενός τυχαιοποιημένου δικτύου είναι απαραίτητη για τον στατιστικό έλεγχο, ο οποίος παρουσιάζεται στην ενότητα 2.5, αν το αρχικό δίκτυο μελέτης είναι τυχαίο ή όχι. Εν συντομία, ο στατιστικός έλεγχος γίνεται συγκρίνοντας τις τιμές των μέτρων του δικτύου που προκύπτουν από το αρχικό δίκτυο με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από ένα σύνολο B τυχαιοποιημένων δικτύων. Η κατασκευή ενός τυχαιοποιημένου δικτύου βασίζεται στην δημιουργία δικτύου που διατηρεί μερικές από τις ιδιότητες που παρουσιάζει το αρχικό δίκτυο. Έχοντας ένα αρχικό δίκτυο με K κόμβους έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις για να δημιουργηθεί ένα σύνολο B τυχαιοποιημένων δικτύων.

Η πιο διαδεδομένη προσέγγιση στην βιβλιογραφία για την κατασκευή ενός συνόλου B τυχαιοποιημένων δικτύων βασίζεται στην τυχαιοποίηση των συνδέσεων του αρχικού δικτύου με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρούνται κάποια χαρακτηριστικά του. Έτσι, μία απλή προσέγγιση είναι η διατήρηση του συνολικού πλήθους των συνδέσεων (Molly και Reed 1995, Newman 2001, Newman 2003), όταν οι συνδέσεις είναι απλές, ή της συνολικής ισχύος (Newman 2010), όταν οι συνδέσεις είναι σταθμισμένες, του αρχικού στο τυχαιοποιημένο δίκτυο. Μια πιο αυστηρή προσέγγιση για την κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου είναι η τυχαιοποίηση των συνδέσεων του αρχικού δικτύου ώστε να διατηρείται ο βαθμός (Maslov και Sneppen 2002, Del Genio 2010, Viger και Latapy 2015), όταν οι συνδέσεις είναι απλές, ή η ισχύς (Opsahl et al. 2008), όταν οι συνδέσεις είναι σταθμισμένες, του κάθε κόμβου του αρχικού στο τυχαιοποιημένο δίκτυο. Έτσι, ένα σύνολο B τυχαιοποιημένων δικτύων μπορεί να κατασκευαστεί μέσω μιας τυχαίας διαδικασίας με τυχαιοποίηση των συνδέσεων του αρχικού δικτύου. Οι παραπάνω προσεγγίσεις για την κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε όταν το δίκτυο κατασκευάζεται με την χρήση χρονοσειράς, (βλέπε ενότητες 2.2.2 και 2.2.3), ή με την διαδοχή των σεισμών, (βλέπε ενότητα 2.2.1).

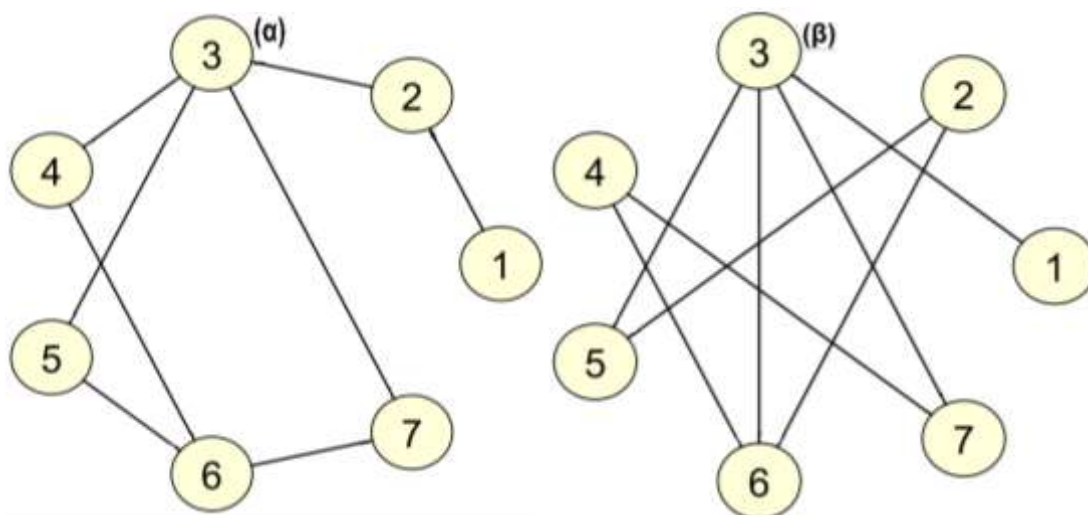
Όταν το αρχικό δίκτυο δημιουργείται με την χρήση της χρονοσειράς, όπως περιγράφεται στην ενότητα 2.2.2 που αφορά την κατασκευή του δικτύου συσχέτισης, το τυχαιοποιημένο δίκτυο μπορεί να κατασκευαστεί με τυχαιοποίηση της αρχικής πολυμεταβλητής χρονοσειράς (Chorozoglou & Kugiumtzis 2014, Chorozoglou & Kugiumtzis 2018) ώστε να προκύψει η αντίστοιχη τυχαιοποιημένη διατηρώντας κάποιες ιδιότητες της αρχικής, όπως η περιθώρια κατανομή και η αυτοσυσχέτισή της. Επομένως, στην περίπτωση που το αρχικό δίκτυο είναι δίκτυο συσχέτισης, πλέον της επιλογής της τυχαιοποίησης των συνδέσεων του αρχικού δικτύου συσχέτισης μπορούμε να τυχαιοποιήσουμε την αρχική πολυμεταβλητή χρονοσειρά για να πραγματοποιηθεί η κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου όπως του αρχικού που περιγράφεται στην ενότητα 2.2.2. Η τυχαιοποίηση της αρχικής πολυμεταβλητής χρονοσειράς για την κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε αρχικά δίκτυα συσχέτισης. Στο 3^ο κεφάλαιο και πιο συγκεκριμένα στην ενότητα 3.5 θα αποδειχθεί μέσω προσομοιώσεων ότι όταν το αρχικό δίκτυο είναι δίκτυο συσχέτισης η πιο κατάλληλη προσέγγιση για την κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου είναι η τυχαιοποίηση της αρχικής πολυμεταβλητής χρονοσειράς και όχι των συνδέσεων του αρχικού δικτύου συσχέτισης.

Όταν το αρχικό δίκτυο δημιουργείται όπως περιγράφεται στην ενότητα 2.2.3, που αφορά την κατασκευή του δικτύου επανάληψης, το τυχαιοποιημένο δίκτυο μπορεί να κατασκευαστεί μόνο με την τυχαιοποίηση των συνδέσεων του αρχικού δικτύου καθώς οι αρχικές συνδέσεις του δεν προκύπτουν από τον πίνακα συσχέτισης Σ , μέσω του συντελεστή συσχέτισης Pearson, αλλά από τον πίνακα επανάληψης $R_{i,j}(\varepsilon)$ (σχέση 2.3). Παρακάτω, παρουσιάζονται οι έξι (6) προσεγγίσεις για την κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου που ακολουθούνται στην διατριβή καθώς και ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την τυχαιοποίηση της αρχικής πολυμεταβλητής χρονοσειράς.

2.4.1 Μέθοδος τυχαιοποίησης RNnoddeg

Μία από τις πιο συχνά παρατηρούμενες προσεγγίσεις που αφορούν την κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου είναι ο αλγόριθμος των Maslov και Sneppen (2002) που εφαρμόζεται σε αρχικά δίκτυα που παρουσιάζουν απλές συνδέσεις (Σχ. 2.11). Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση διατηρείται ο βαθμός του κάθε κόμβου από το αρχικό στο τυχαιοποιημένο δίκτυο.

Επομένως, όταν το αρχικό δίκτυο έχει μη-κατευθυνόμενες και απλές συνδέσεις ο αλγόριθμος εφαρμόζεται ως εξής: Επιλέγονται δύο (2) συνδέσεις του αρχικού δικτύου (i, j) και (k, l) και από την εναλλαγή των κόμβων j και l στα υπάρχοντα ζεύγη συνδέσεων δημιουργούνται δύο (2) νέα ζεύγη (i, l) και (k, j) στο τυχαιοποιημένο. Η εναλλαγή γίνεται στους κόμβους j και l και όχι στους i και k καθώς θέλουμε να διατηρήσουμε τον βαθμό του κάθε κόμβου, i και k , στο τυχαιοποιημένο δίκτυο. Αν οι δύο νέες συνδέσεις (i, l) και (k, j) δεν υπάρχουν στο αρχικό δίκτυο τις αποδεχόμαστε και εισάγονται στο τυχαιοποιημένο δίκτυο. Στην περίπτωση που οι νέες συνδέσεις (i, l) και (k, j) που προκύπτουν υπάρχουν ήδη στο αρχικό δίκτυο τότε επιλέγεται ένα εναλλακτικό ζεύγος συνδέσεων από το αρχικό δίκτυο. Μετά από παρόμοιες επαναλήψεις μέχρι να μη προκύπτει η ίδια σύνδεση στο τυχαιοποιημένο από το αρχικό δίκτυο, ο αλγόριθμος δημιουργεί μία τυχαιοποιημένη παραλλαγή, δηλαδή ένα τυχαιοποιημένο δίκτυο, του αρχικού δικτύου. Έτσι, επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία B φορές δημιουργούνται B τυχαιοποιημένα δίκτυα από το αρχικό. Επομένως, προκύπτουν τυχαιοποιημένα δίκτυα όπου κάθε κόμβος τους έχει ακριβώς την ίδια κατανομή στον βαθμό με τον αντίστοιχο κόμβο του αρχικού δικτύου.



Σχ. 2.11: Μέθοδος τυχαιοποίησης του αρχικού δικτύου με την προσέγγιση RNnoddeg, των Maslon και Sneppen (2002), που διατηρεί τον βαθμό του κάθε κόμβου του αρχικού στο (α) στο τυχαιοποιημένο δίκτυο στο (β).

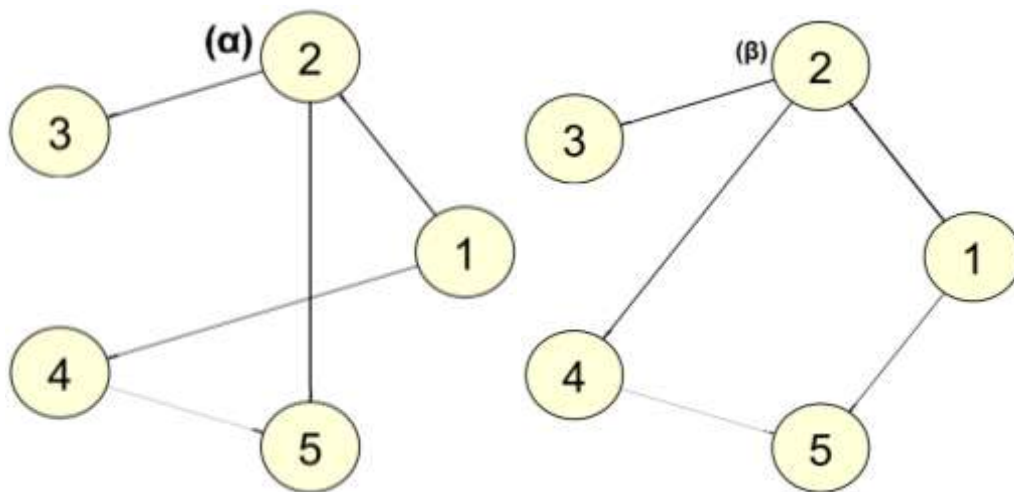
Ο αλγόριθμος των Maslon και Sneppen (2002) μπορεί να εφαρμοστεί και σε αρχικό δίκτυο με κατευθυνόμενες και απλές συνδέσεις αλλά δεν παρουσιάζεται στην διατριβή καθώς η μελέτη επικεντρώνεται σε δίκτυα με μη-κατευθυνόμενες συνδέσεις. Η προσέγγιση των Maslon και Sneppen (2002) θα αναφέρεται στην διατριβή με την ονομασία RNnoddeg, η οποία προκύπτει από τους αγγλικούς όρους Randomized, Network, node και degree. Η ονομασία προκύπτει από την μεθοδολογία που ακολουθείται για την κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου, καθώς τυχαιοποιεί τις συνδέσεις του αρχικού δικτύου διατηρώντας τον βαθμό του κάθε κόμβου του αρχικού δικτύου στο τυχαιοποιημένο.

2.4.2 Μέθοδος τυχαιοποίησης RNavestr

Μία δεύτερη πιο συχνά παρατηρούμενη προσέγγιση που αφορά την κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου από το αρχικό, που παρουσιάζει μη-κατευθυνόμενες και σταθμισμένες συνδέσεις, επιτυγχάνεται τυχαιοποιώντας τις σταθμισμένες συνδέσεις που παρουσιάζει το αρχικό δίκτυο διατηρώντας την συνολική ισχύ του στο τυχαιοποιημένο δίκτυο (Ansmann και Lehnertz 2011). Αυτή η

προσέγγιση είναι λιγότερο αυστηρή από αυτήν των Maslon και Sneppen (2002), δηλαδή την RNnoddeg προσέγγιση, καθώς δεν διατηρεί την συνολική ισχύ του κάθε κόμβου αλλά ολόκληρου του αρχικού δικτύου στο τυχαιοποιημένο (Σχ. 2.12). Σε αντίθεση, με την προσέγγιση RNnoddeg που διατηρεί τον βαθμό κάθε κόμβου και κατ' επέκταση τον συνολικό βαθμό ολόκληρου του αρχικού δικτύου στο τυχαιοποιημένο.

Η προσέγγιση αυτή χρησιμοποιείται όταν το αρχικό δίκτυο παρουσιάζει μη-κατευθυνόμενες και σταθμισμένες συνδέσεις με μη-αρνητικά βάρη. Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται ως εξής: Κάθε σταθμισμένη σύνδεση (i, j) του αρχικού δικτύου τυχαιοποιείται κατά τέτοιον τρόπο ώστε να προκύψει οποιαδήποτε σύνδεση στο τυχαιοποιημένο δίκτυο εκτός από την συγκεκριμένη σύνδεση (i, j) που υπήρχε στο αρχικό. Στην περίπτωση που η σύνδεση (i, j) εξακολουθήσει να υπάρχει στο τυχαιοποιημένο δίκτυο τότε η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Μετά από πολλές παρόμοιες επαναλήψεις, ο αλγόριθμος δημιουργεί μία (1) τυχαιοποιημένη παραλλαγή, δηλαδή ένα (1) τυχαιοποιημένο δίκτυο, του αρχικού δικτύου. Έτσι, επαναλαμβάνοντας την παραπάνω διαδικασία B φορές δημιουργούνται B τυχαιοποιημένα δίκτυα από το αρχικό. Επομένως, προκύπτουν τυχαιοποιημένα δίκτυα η συνολική ισχύς των οποίων είναι ακριβώς ίση με του αρχικού. Επίσης, η ισχύς του κάθε κόμβου του αρχικού δικτύου δεν διατηρείται σταθερή στο τυχαιοποιημένο και αν αυτό συμβεί σε κάποιον από τους κόμβους του τυχαιοποιημένου δικτύου θα προήλθε τυχαία από την αυθαίρετη τυχαιοποίηση των συνδέσεων του αρχικού δικτύου.



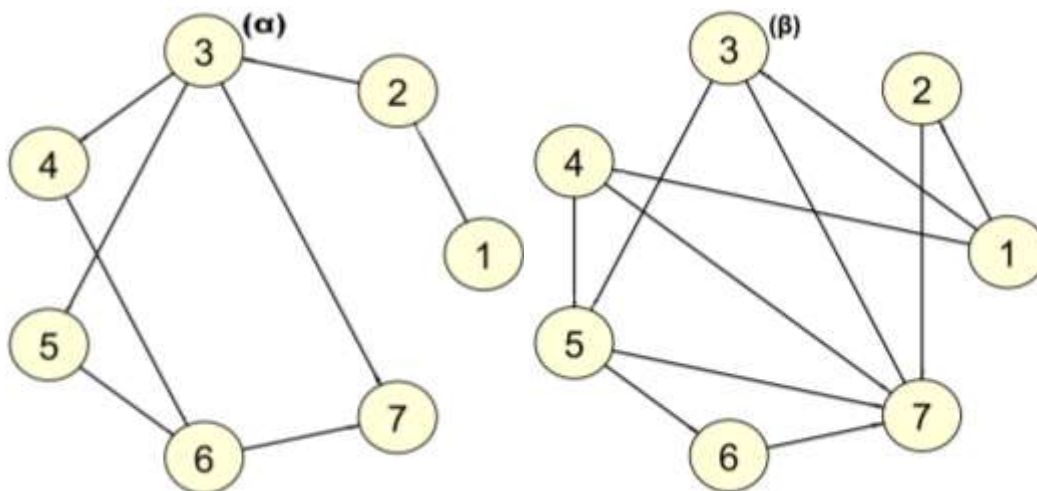
Σχ. 2.12: Μέθοδος τυχαιοποίησης του αρχικού δικτύου με την προσέγγιση RNavestr, των Ansmann και Lehnertz (2011), που διατηρεί την συνολική ισχύ του αρχικού δικτύου στο (α) στο τυχαιοποιημένο δίκτυο στο (β).

Ο αλγόριθμος των Ansmann και Lehnertz (2011) μπορεί να εφαρμοστεί και σε αρχικό δίκτυο με κατευθυνόμενες και σταθμισμένες συνδέσεις με μη-αρνητικά βάρη αλλά δεν παρουσιάζεται στην διατριβή καθώς η μελέτη επικεντρώνεται σε δίκτυα με μη-κατευθυνόμενες συνδέσεις. Η προσέγγιση των Ansmann και Lehnertz (2011) θα αναφέρεται στη διατριβή με την ονομασία RNavestr, η οποία προκύπτει από τους αγγλικούς όρους Randomized, Network, average και strength. Η ονομασία προκύπτει από την μεθοδολογία που ακολουθείται για την κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου, καθώς τυχαιοποιεί τις συνδέσεις του αρχικού δικτύου διατηρώντας την συνολική ισχύ του αρχικού δικτύου στο τυχαιοποιημένο.

2.4.3 Μέθοδος τυχαιοποίησης RNpoisson

Σε μια διαφορετική προσέγγιση σε σχέση με τις προηγούμενες, δηλαδή τις προσεγγίσεις RNnoddeg και RNavestr, το τυχαιοποιημένο δίκτυο δεν σχηματίζεται με την τυχαιοποίηση των συνδέσεων του αρχικού δικτύου αλλά κατασκευάζεται σύμφωνα με την προσέγγιση των Erdős και Rényi (1959) που σχηματίζει τυχαίο δίκτυο (αναφέρεται με περισσότερες λεπτομέρειες στην ενότητα 3.2 της διατριβής). Σύμφωνα με αυτήν, οι συνδέσεις του τυχαιοποιημένου δικτύου προκύπτουν με προκαθορισμένη πιθανότητα p , η οποία αντιστοιχεί στη διατήρηση του μέσου βαθμού των συνδέσεων που παρουσιάζουν οι κόμβοι του αρχικού στο τυχαιοποιημένο δίκτυο (Σχ. 2.13). Επομένως, η κατανομή του βαθμού των κόμβων του τυχαιοποιημένου δικτύου είναι Poisson.

Η προσέγγιση των Erdős και Rényi (1959) θα αναφέρεται στην διατριβή με την ονομασία RNpoisson, η οποία προκύπτει από τους αγγλικούς όρους Randomized, Network και poisson. Η ονομασία προκύπτει από την μεθοδολογία που ακολουθείται για την κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου, καθώς οι συνδέσεις του προκύπτουν με προκαθορισμένη πιθανότητα που δημιουργεί την κατανομή Poisson στον βαθμό των κόμβων του.



Σχ. 2.13: Μέθοδος τυχαιοποίησης του αρχικού δικτύου με την προσέγγιση RNpoisson, των Erdős και Rényi (1959), που διατηρεί τον μέσο βαθμό των συνδέσεων του αρχικού δικτύου στο (α) στο τυχαιοποιημένο δίκτυο στο (β).

2.4.4 Αλγόριθμος τυχαιοποίησης IAAFT

Όπως έχει αναφερθεί το τυχαιοποιημένο δίκτυο όταν το αρχικό δίκτυο είναι δίκτυο συσχέτισης μπορεί να προκύψει και με τις προσεγγίσεις που τυχαιοποιούν τις συνδέσεις του αρχικού δικτύου, δηλαδή με τις προσεγγίσεις RNnoddeg και RNavestr, καθώς και με την προσέγγιση που τοποθετεί με μία προκαθορισμένη πιθανότητα κάθε σύνδεση στο τυχαιοποιημένο δίκτυο, δηλαδή την προσέγγιση RNpoisson. Επίσης, η κατασκευή ενός τυχαιοποιημένου δικτύου όταν το αρχικό δίκτυο είναι δίκτυο συσχέτισης μπορεί να επιτευχθεί με την τυχαιοποίηση της αρχικής πολυμεταβλητής χρονοσειράς (Chorozoglou & Kugiumtzis 2014, Chorozoglou & Kugiumtzis 2018). Στην τελευταία περίπτωση κατασκευάζεται ένα τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης αντί για ένα απλό τυχαιοποιημένο δίκτυο όπως προκύπτει από τις προσεγγίσεις RNnoddeg, RNavestr και RNpoisson.

Για τη δημιουργία της τυχαιοποιημένης πολυμεταβλητής χρονοσειράς εφαρμόζουμε χωριστά σε κάθε μια από τις K χρονοσειρές $\{X_{1,t}, \dots, X_{K,t}\}$ για $t = \{1, \dots, n\}$ τον αλγόριθμο IAAFT (Iterative Amplitude Adjusted Fourier Transform)

των Schreiber και Schmitz (1996). Ο αλγόριθμος βασίζεται στη δημιουργία τυχαιοποιημένης πολυμεταβλητής χρονοσειράς, όπου οι μεταβλητές της έχουν μηδενική διασυσχέτιση, που 'μοιάζει' με την αρχική πολυμεταβλητή χρονοσειρά καθώς διατηρεί την αυτοσυσχέτιση και το ιστόγραμμα της αρχικής πολυμεταβλητής χρονοσειράς. Ο αλγόριθμος IAAFT (Schreiber & Schmitz 1996), που δημιουργεί την τυχαιοποιημένη πολυμεταβλητή χρονοσειρά, τυχαιοποιεί τις n παρατηρήσεις κάθε αρχικής χρονοσειράς διατηρώντας όμως την περιθώρια κατανομή και την συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (Kugiumtzis 2002) ή ισοδύναμα το φάσμα ισχύος (Schreiber και Schmitz 1996) της αρχικής χρονοσειράς στην τυχαιοποιημένη. Χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος IAAFT επειδή είναι κατάλληλος για μικρό μήκος χρονοσειρών ($n \leq 500$), δηλαδή για μικρό πλήθος παρατηρήσεων, όπως χρησιμοποιούνται στην διατριβή καθώς παρέχει την ελάχιστη διακύμανση στην προσαρμογή της αυτοσυσχέτισης της τυχαιοποιημένης πολυμεταβλητής χρονοσειράς.

Παρακάτω παρουσιάζεται μία προσέγγιση τυχαιοποίησης που κατασκευάζει ένα τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης με μη-κατευθυνόμενες αλλά με σταθμισμένες συνδέσεις και δύο (2) προσεγγίσεις τυχαιοποίησης που κατασκευάζουν, επίσης, ένα τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης με μη-κατευθυνόμενες αλλά με απλές συνδέσεις.

2.4.5 Μέθοδος τυχαιοποίησης RTSweight

Η μεθοδολογία κατασκευής ενός τυχαιοποιημένου δικτύου συσχέτισης με μη-κατευθυνόμενες και σταθμισμένες συνδέσεις δίνεται από τα παρακάτω βήματα:

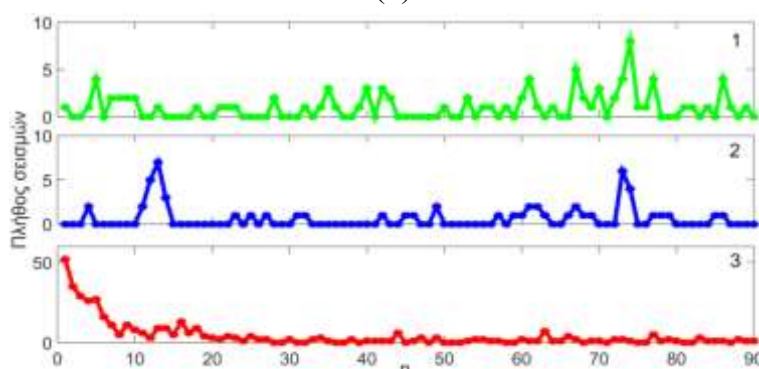
- I. Για κάθε χρονοσειρά $\{X_{i,t}\}$, με $i = \{1, \dots, K\}$ και $t = \{1, \dots, n\}$, της αρχικής πολυμεταβλητής χρονοσειράς, δημιουργείται τυχαιοποιημένη χρονοσειρά, $\{X_{i,t}^*\}$, από τον αλγόριθμο IAAFT (Schreiber και Schmitz 1996). Επομένως, στο πρώτο βήμα κατασκευάζεται η τυχαιοποιημένη πολυμεταβλητή χρονοσειρά $\{X_{1,t}^*, \dots, X_{K,t}^*\}$.
- II. Υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης Pearson για την τυχαιοποιημένη πολυμεταβλητή χρονοσειρά $\{X_{1,t}^*, \dots, X_{K,t}^*\}$ και προκύπτει ο πίνακας συσχέτισης Σ^* με παρόμοιο τρόπο όπως προκύπτει ο πίνακας συσχέτισης Σ από την αρχική πολυμεταβλητή χρονοσειρά $\{X_{1,t}, \dots, X_{K,t}\}$ στην ενότητα 2.2.2.
- III. Κατασκευάζεται το τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης από τον πίνακα βαρών W^* , ο οποίος προκύπτει από τον πίνακα συσχέτισης Σ^* , θέτοντας $\{w_{ij}^*\} = \{|\Sigma_{ij}^*|\}$. Ο πίνακας βαρών W^* προκύπτει από τον πίνακα συσχέτισης Σ^* , όπως ο πίνακας βαρών W από τον πίνακα συσχέτισης Σ που περιγράφηκε στην ενότητα 2.2.2.
- IV. Επαναλαμβάνοντας τα βήματα I) ως III) B φορές κατασκευάζονται B τυχαιοποιημένα δίκτυα συσχέτισης.

Στο πρώτο (I) βήμα δημιουργείται η τυχαιοποιημένη πολυμεταβλητή χρονοσειρά, όπου οι μονο-μεταβλητές χρονοσειρές της είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες, με τυχαιοποίηση της αρχικής. Επομένως, ο πίνακας συσχέτισης Σ^* που σχηματίζεται στο δεύτερο (II) βήμα παίρνει τιμές που κυμαίνονται στα όρια της μηδενικής διασυσχέτισης, δηλαδή οι τιμές των στοιχείων του πίνακα συσχέτισης Σ^* είναι πολύ κοντά στο μηδέν (0). Αντίστοιχα, το τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης που σχηματίζεται στο τρίτο (III) βήμα έχει σταθμισμένες συνδέσεις με μηδενικά βάρη, δηλαδή βάρη που αντιστοιχούν σε μονό-μεταβλητές χρονοσειρές που είναι

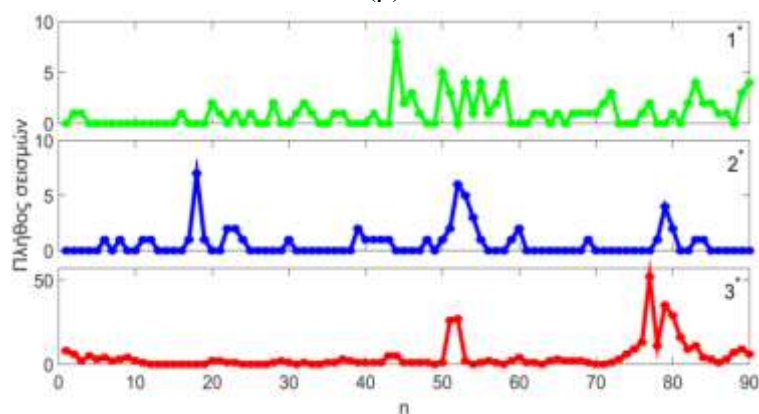
ανεξάρτητες μεταξύ τους. Σημειώνεται ότι τα βάρη, δηλαδή οι τιμές που προκύπτουν από τον συντελεστή συσχέτισης Pearson, δεν είναι απαραίτητα στατιστικά μη-σημαντικά, γιατί η ύπαρξη έντονης αυτοσυσχέτισης δημιουργεί ψευδείς διασυσχετίσεις, που ο παραμετρικός έλεγχος σημαντικότητας (σχέση (2.2)) μπορεί να τις κρίνει ως στατιστικά σημαντικές. Αυτό σημαίνει πως μια σχετικά ισχυρή σύνδεση στο αρχικό δίκτυο συσχέτισης μπορεί να αντιστοιχεί σε ψευδή διασυσχέτιση και τότε παρόμοια ισχυρή σύνδεση αναμένεται να υπάρχει και στο τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης. Δημιουργούμε πολλές (B σε πλήθος) πραγματοποιήσεις σχετικά με την κατασκευή τυχαιοποιημένων δικτύων συσχέτισης στο τέταρτο (IV) βήμα ώστε με μεγαλύτερη ασφάλεια να διερευνηθεί αν οι συνδέσεις μεταξύ των τυχαιοποιημένων μεταβλητών εισέρχονται στο δίκτυο τυχαία λόγω της ψευδούς μεταξύ τους διασυσχέτισης. Η παραπάνω προσέγγιση που κατασκευάζει ένα τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης, με μη-κατευθυνόμενες αλλά σταθμισμένες συνδέσεις, ονομάζεται RTSweight (Σχ. 2.14, για τις αρχικές χρονοσειρές του Σχ. 2.6).

Η ονομασία της προσέγγισης προκύπτει από τους αγγλικούς όρους Randomized, Time Series και weight καθώς σύμφωνα με αυτήν η κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου συσχέτισης με σταθμισμένες συνδέσεις προκύπτει από την τυχαιοποίηση της αρχικής πολυμεταβλητής χρονοσειράς. Για την κατασκευή ενός τυχαιοποιημένου δικτύου συσχέτισης με μη-κατευθυνόμενες αλλά απλές συνδέσεις, η μεθοδολογία είναι παρόμοια με αυτήν της προσέγγισης RTSweight αλλά με αλλαγή στο βήμα III. Παρακάτω παρουσιάζονται οι δύο (2) προσεγγίσεις για την κατασκευή ενός τυχαιοποιημένου δικτύου συσχέτισης με μη-κατευθυνόμενες αλλά απλές (μη-σταθμισμένες) συνδέσεις.

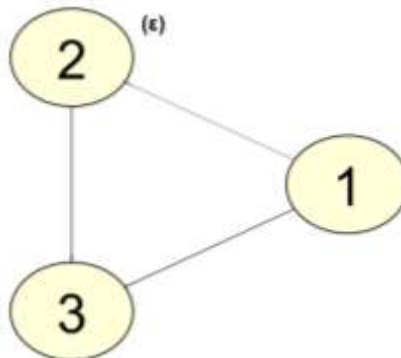
(α)



(β)



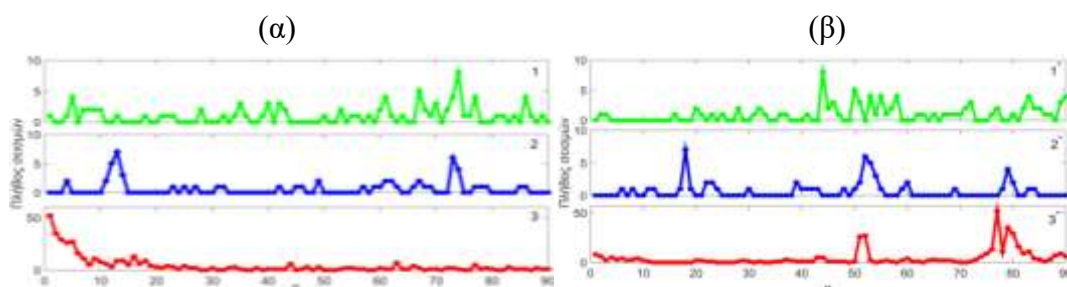
$$\Sigma^* = \begin{pmatrix} 1 & -0.04 & 0.07 \\ -0.04 & 1 & 0.26 \\ 0.07 & 0.26 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow W^* = \begin{pmatrix} 0 & 0.04 & 0.07 \\ 0.04 & 0 & 0.26 \\ 0.07 & 0.26 & 0 \end{pmatrix}$$



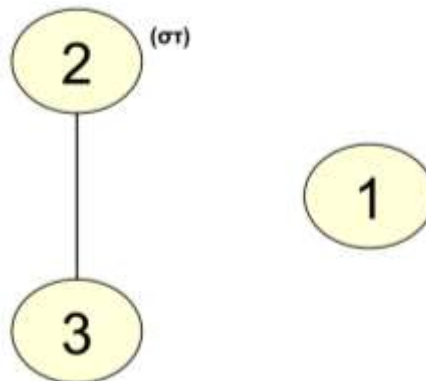
Σχ. 2.14: Μέθοδος τυχαιοποίησης του αρχικού δικτύου συσχέτισης με την προσέγγιση RTSweight, των Chorozoglou & Kugiumtzis (2014; 2018), όπου τυχαιοποιεί μέσω του αλγορίθμου IAAFT την αρχική πολυμεταβλητή χρονοσειρά στο (α) και προκύπτει στο (β) η τυχαιοποιημένη πολυμεταβλητή χρονοσειρά. Στο (γ) υπολογίζεται η συσχέτιση μεταξύ των τυχαιοποιημένων μεταβλητών ώστε να προκύψει ο πίνακας βαρών στο (δ) που με την σειρά του δημιουργεί το τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης στο (ε).

2.4.6 Μέθοδος τυχαιοποίησης RTSbinthr

Η πρώτη από τις δύο προσεγγίσεις, για την κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου συσχέτισης με απλές συνδέσεις, ακολουθεί την ίδια διαδικασία όπως η προσέγγιση RTSweight, που δημιουργεί το τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης με σταθμισμένες συνδέσεις, με την διαφορά ότι πραγματοποιείται μετατροπή του πίνακα συσχέτισης Σ^* σε πίνακα γειτνίασης A^* αντί της μετατροπής του σε πίνακα βαρών W^* . Η μετατροπή αυτή, του πίνακα συσχέτισης Σ^* σε πίνακα γειτνίασης A^* , πραγματοποιείται όπως στο αρχικό δίκτυο συσχέτισης όπου ο μετασχηματισμός του πίνακα συσχέτισης Σ σε πίνακα γειτνίασης A πραγματοποιείται με τον έλεγχο σημαντικότητας (σχέση (2.2), ενότητα 2.2.2). Έτσι, το τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης δεν δημιουργείται από τον πίνακα βαρών W^* αλλά από τον πίνακα γειτνίασης A^* . Σε αυτήν την περίπτωση δεν διατηρείται απαραίτητα είτε ο συνολικός βαθμός του αρχικού δικτύου συσχέτισης ή ο βαθμός κάθε κόμβου του στο τυχαιοποιημένο (Σχ. 2.15, για τις αρχικές χρονοσειρές του Σχ. 2.6). Η παραπάνω προσέγγιση που κατασκευάζει το τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης, με μη-κατευθυνόμενες αλλά απλές συνδέσεις όπου δεν διατηρείται απαραίτητα ο συνολικός βαθμός του αρχικού δικτύου συσχέτισης στο τυχαιοποιημένο αλλά ούτε ο βαθμός του κάθε κόμβου, ονομάζεται RTSbinthr.



$$\Sigma^* = \begin{pmatrix} 1 & -0.04 & 0.07 \\ -0.04 & 1 & 0.26 \\ 0.07 & 0.26 & 1 \end{pmatrix} \rightarrow p\text{-τιμές} = \begin{pmatrix} 0 & 0.68 & 0.50 \\ 0.68 & 0 & \mathbf{0.01} \\ 0.50 & \mathbf{0.01} & 0 \end{pmatrix} \rightarrow A^* = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$



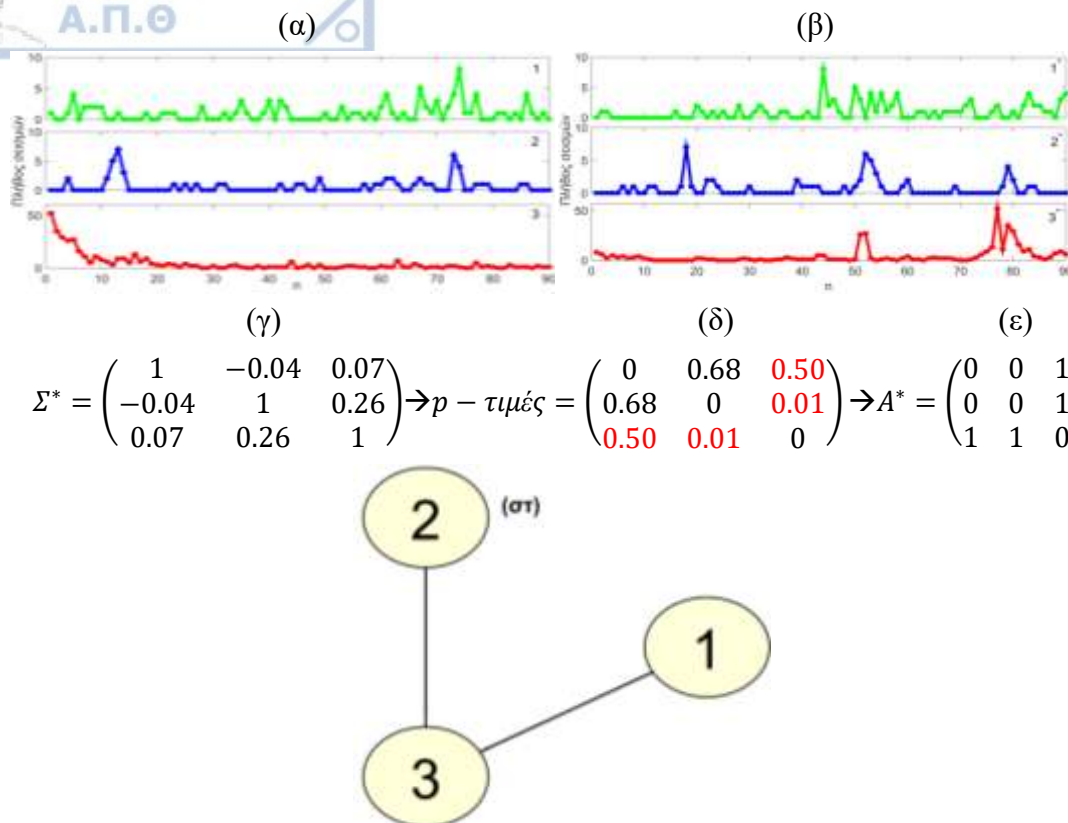
Σχ. 2.15: Προσέγγιση RTSbinthr, των Chorooglou & Kugiumtzis (2014, 2018), για την κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου συσχέτισης με απλές συνδέσεις. Η αρχική πολυμεταβλητή χρονοσειρά στο (α) τυχαιοποιείται μέσω του αλγορίθμου IAAFT και κατασκευάζεται η τυχαιοποιημένη πολυμεταβλητή χρονοσειρά στο (β). Ο πίνακας συσχέτισης Σ^* στο (γ), που προκύπτει από τον συντελεστή συσχέτισης Pearson για την τυχαιοποιημένη πολυμεταβλητή χρονοσειρά, μέσω του ελέγχου σημαντικότητας (σχέση (2.2)) κατασκευάζεται τον πίνακα με τις p-τιμές στο (δ). Με κατώφλι $\alpha = 0.05$ κατασκευάζεται από τον πίνακα με τις p-τιμές (δηλαδή, οι τιμές με το κόκκινο χρώμα εισάγουν τις συνδέσεις) ο πίνακας γειτνίασης A^* στο (ε). Το τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης προκύπτει στο (στ) από τον πίνακα γειτνίασης A^* .

Η ονομασία της προσέγγισης προκύπτει από τους αγγλικούς όρους Randomized, Time Series, binary και threshold καθώς σύμφωνα με αυτήν η κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου συσχέτισης με απλές συνδέσεις προκύπτει από την τυχαιοποίηση της αρχικής πολυμεταβλητής χρονοσειράς με μετατροπή του πίνακα συσχέτισης Σ^* σε πίνακα γειτνίασης A^* μέσω του ελέγχου σημαντικότητας με το κατώφλι να ορίζεται από το επίπεδο σημαντικότητας α , εδώ $\alpha = 0.05$.

2.4.7 Μέθοδος τυχαιοποίησης RTSbindeg

Η δεύτερη προσέγγιση, που αφορά την κατασκευή τυχαιοποιημένου δικτύου συσχέτισης με απλές συνδέσεις, διατηρεί τον συνολικό βαθμό του αρχικού δικτύου συσχέτισης στο τυχαιοποιημένο. Η προσέγγιση θέτει κατώφλι για τα στοιχεία του πίνακα συσχέτισης Σ^* , ο οποίος προκύπτει από τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης Pearson στην τυχαιοποιημένη πολυμεταβλητή χρονοσειρά, τέτοιο ώστε να παρουσιάζει το τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης τον ίδιο αριθμό συνδέσεων με το αρχικό. Για την εύρεση του κατωφλίου πρώτα διατάσσουμε τα στοιχεία του άνω τριγωνικού μέρους του πίνακα συσχέτισης Σ^* σε φθίνουσα σειρά. Το κατώφλι είναι η τιμή του στοιχείου που έχει θέση διάταξης ίση με το συνολικό βαθμό του αρχικού δικτύου συσχέτισης. Η παραπάνω προσέγγιση που κατασκευάζει το τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης, με μη-κατευθυνόμενες αλλά απλές συνδέσεις που διατηρεί τον συνολικό βαθμό του αρχικού δικτύου συσχέτισης στο τυχαιοποιημένο, ονομάζεται RTSbindeg (Σχ. 2.16, για τις αρχικές χρονοσειρές του Σχ. 2.6). Η ονομασία της προσέγγισης προκύπτει από τους αγγλικούς όρους Randomized, Time Series, binary και degree καθώς σύμφωνα με αυτήν η κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου συσχέτισης με απλές συνδέσεις προκύπτει από την τυχαιοποίηση της αρχικής πολυμεταβλητής χρονοσειράς με μετατροπή του πίνακα συσχέτισης Σ^* σε πίνακα

γειννίασης A^* μέσω κατωφλίου στον πίνακα συσχέτισης Σ^* ώστε να προκύπτει ίσο πλήθος συνδέσεων στο τυχαιοποιημένο σε σχέση με το αρχικό δίκτυο συσχέτισης.



Σχ. 2.16: Προσέγγιση RTSbindeg, των Chorozoglou & Kugiumtzis (2014; 2018), που κατασκευάζει το τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης με απλές συνδέσεις. Η αρχική πολυμεταβλητή χρονοσειρά στο (α) τυχαιοποιείται μέσω του αλγορίθμου IAAFT και κατασκευάζεται η τυχαιοποιημένη πολυμεταβλητή χρονοσειρά στο (β). Ο πίνακας συσχέτισης Σ^* στο (γ), που προκύπτει από τον συντελεστή συσχέτισης Pearson (σχέση (2.1)) για την τυχαιοποιημένη πολυμεταβλητή χρονοσειρά, μέσω του ελέγχου σημαντικότητας (σχέση (2.2)) κατασκευάζει τον πίνακα με τις p-τιμές στο (δ). Με κατώφλι $\alpha = 0.05$ κατασκευάζεται από τον πίνακα με τις p-τιμές ο πίνακας γειννίασης A^* στο (ε) ώστε να προκύπτει ο ίδιος αριθμός συνδέσεων (υποθέτουμε ότι υπάρχουν 2 (δύο) συνδέσεις στο αρχικό δίκτυο συσχέτισης) στο τυχαιοποιημένο από το αρχικό δίκτυο συσχέτισης. Το τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης προκύπτει στο (στ) από τον πίνακα γειννίασης A^* .

Οι τρεις (3) προσεγγίσεις, RTSweight, RTSbinthr και RTSbindeg, οι οποίες πραγματοποιούν την τυχαιοποίηση στην αρχική πολυμεταβλητή χρονοσειρά για να σχηματίσουν το τυχαιοποιημένο δίκτυο συσχέτισης, δημιουργούν δίκτυα στα οποία οι συνδέσεις τους θα αντιστοιχούν σε θετικά ημιορισμένους πίνακες συσχέτισης Σ και Σ^* καθώς δεν πραγματοποιείται τυχαία ανάμειξη είτε στον πίνακα γειννίασης A ή στον πίνακα βαρών W όπως στις προσεγγίσεις RNnoddeg και RNvestr, ούτε εισάγονται οι συνδέσεις με προκαθορισμένη πιθανότητα όπως στην προσέγγιση RNpoisson για την κατασκευή του δικτύου.

2.5 Στατιστικός έλεγχος

Οι έλεγχοι υποθέσεων, μέσω στατιστικού ελέγχου, με βάση τα τυχαιοποιημένα δεδομένα έχουν αναδειχθεί ως ένας δημοφιλής τρόπος για να ελέγξουμε αν τα αρχικά δεδομένα είναι τυχαία (ανεξάρτητα) μεταξύ τους. Τα τυχαιοποιημένα δεδομένα δημιουργούνται για να εκπροσωπήσουν την μηδενική

υπόθεση H_0 σε σύγκριση με τα αρχικά δεδομένα μέσω ενός διακριτού στατιστικού q , το οποίο θα απορρίψει ή όχι την μηδενική υπόθεση H_0 .

Α. Επομένως, ο στατιστικός έλεγχος υποθέσεων αποτελείται από την μηδενική υπόθεση H_0 , που υποθέτει ότι τα αρχικά δεδομένα είναι ανεξάρτητα (δηλαδή, δεν υπάρχει στατιστική σημαντικότητα) μεταξύ τους, και από το διακριτό στατιστικό q . Όταν η κατανομή του διακριτού στατιστικού q υπό την μηδενική υπόθεση H_0 είναι γνωστή, η περιοχή απόρριψης της H_0 είναι στις ουρές της κατανομής σύμφωνα με ένα δεδομένο επίπεδο σημαντικότητας α , δηλαδή ισχύει η εναλλακτική υπόθεση H_1 πως υπάρχει στατιστική σημαντικότητα και τα αρχικά δεδομένα είναι εξαρτημένα μεταξύ τους. Διαφορετικά, η κατανομή του διακριτού στατιστικού q σχηματίζεται αριθμητικά, με προσομοιώσεις Monte Carlo, από τις τιμές $q_1, \dots, q_B$ του διακριτού στατιστικού q που υπολογίζεται σε ένα σύνολο B τυχαιοποιημένων δεδομένων σύμφωνα με την μηδενική υπόθεση H_0 (Kugiumtzis 2000). Το διακριτό στατιστικό q είναι μια ενιαία εκτίμηση κάποιου χαρακτηριστικού των δεδομένων, αρχικών και τυχαιοποιημένων, και η διακύμανσή του μας επιτρέπει να αποφασίσουμε αν τα αρχικά δεδομένα είναι συνεπή ή όχι με την υποκείμενη μηδενική υπόθεση H_0 .

Στην περίπτωση μας, η μηδενική υπόθεση H_0 υποθέτει ότι οι τιμές των μέτρων δικτύου του αρχικού δικτύου, που κατασκευάστηκε με οποιαδήποτε από τις τρεις (3) προσεγγίσεις που περιγράφηκαν παραπάνω (ενότητες 2.2.1 ως 2.2.3), είναι τυχαίες (μη στατιστικά σημαντικές). Ως στατιστικό ελέγχου q θεωρούμε κάποιο μέτρο δικτύου, δηλαδή ξεχωριστά καθένα από τα εννέα (9) μέτρα δικτύου που χρησιμοποιούνται στην διατριβή. Δεδομένου ότι η ασυμπτωτική μηδενική κατανομή κάθε διακριτού στατιστικού q δεν είναι γνωστή, αυτή προκύπτει αριθμητικά, με προσομοιώσεις Monte Carlo, από τις τιμές κάθε διακριτού στατιστικού q που υπολογίζεται στα B τυχαιοποιημένα δίκτυα. Έχοντας δημιουργήσει B τυχαιοποιημένα δίκτυα, προχωράμε στην πραγματοποίηση του στατιστικού ελέγχου. Σύμφωνα με αυτόν, κάθε διακριτό στατιστικό (μέτρο δικτύου) q υπολογίζεται τόσο στο αρχικό δίκτυο και έστω η τιμή του είναι q_0 , όσο και στα B τυχαιοποιημένα δίκτυα και έστω οι τιμές τους είναι $q_1, \dots, q_B$. Εξετάζουμε τη θέση r_0 της τιμής q_0 στη διατεταγμένη σειρά των $q_0, q_1, \dots, q_B$, και υπολογίζεται η p -τιμή του στατιστικού ελέγχου, όπου η απόφαση της στατιστικής δοκιμής επιτυγχάνεται με επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$, ως εξής:

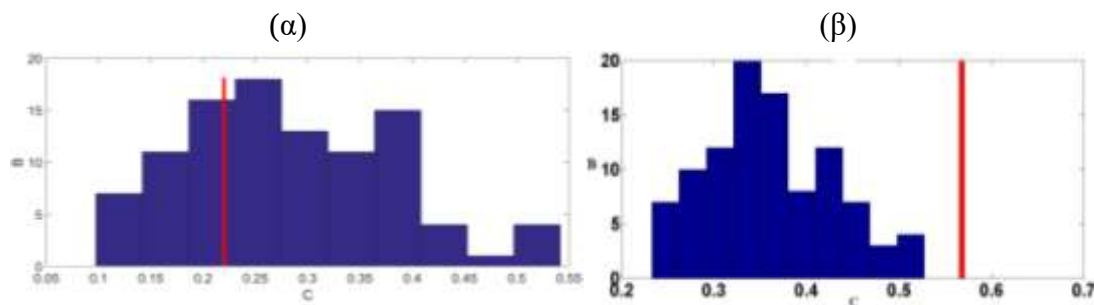
$$p\text{-τιμή} = \begin{cases} \frac{2r_0}{B+1}, & \text{αν } r_0 \leq \frac{B+1}{2} \\ \frac{2(B+1-r_0)}{B+1}, & \text{αν } r_0 > \frac{B+1}{2} \end{cases} \quad (2.36)$$

Έτσι, ο στατιστικός έλεγχος της μηδενικής υπόθεσης H_0 περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- I. Υπολογίζουμε το διακριτικό στατιστικό q , το οποίο είναι κάποιο από τα εννέα (9) μέτρα δικτύου, από το αρχικό δίκτυο που κατασκευάστηκε με οποιαδήποτε από τις τρεις (3) προσεγγίσεις που περιγράφονται στην ενότητα 2.2, και συμβολίζουμε την τιμή του που προκύπτει q_0 .
- II. Με βάση το αρχικό δίκτυο παράγουμε B τυχαιοποιημένα δίκτυα, με οποιαδήποτε από τις έξι (6) προσεγγίσεις τυχαιοποίησης δικτύου που περιγράφονται στην ενότητα 2.4, με προσομοίωση Monte Carlo.
- III. Υπολογίζουμε το ίδιο διακριτό στατιστικό q όπως στο πρώτο (I) βήμα για κάθε ένα από τα B τυχαιοποιημένα δίκτυα, και συμβολίζουμε τις τιμές που προκύπτουν με $q_1, \dots, q_B$.

IV. Εξετάζουμε τον πλήρη κατάλογο των τιμών του διακριτού στατιστικού q , που προκύπτουν από το αρχικό και τα B τυχαιοποιημένα δίκτυα, $\{q_0, q_1, \dots, q_B\}$ και τα καταταγούμε σε αριθμητική σειρά με το r_i να δηλώνει την θέση του q_i , με $i = \{0, 1, \dots, B\}$. Η μικρότερη τιμή του διακριτού στατιστικού q , $\{q_0, q_1, \dots, q_B\}$, έχει θέση r_0 και η μεγαλύτερη έχει θέση r_B .

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η κατάταξη του διακριτού στατιστικού q_0 του αρχικού δικτύου σε σχέση με την κατάταξη των υπολοίπων $q_1, \dots, q_B$ που προκύπτουν από τα τυχαιοποιημένα δίκτυα. Αν η μηδενική υπόθεση H_0 είναι αποδεκτή (δηλαδή, $p - \text{τιμή} > 0.05$), μέσω του στατιστικού ελέγχου, τότε η τιμή του q_0 θα πρέπει να είναι δυσδιάκριτη από τις τιμές $q_1, \dots, q_B$, διαφορετικά η τιμή του q_0 θα είναι εκτός της κατανομής των τιμών $q_1, \dots, q_B$ (δηλαδή, $p - \text{τιμή} < 0.05$ που σημαίνει απόρριψη της H_0) (Σχ. 2.17).



Σχ. 2.17: Ιστογράμματα των τιμών του μέτρου δικτύου του συντελεστή συσταδοποίησης C που προκύπτουν από τα $B = 100$ τυχαιοποιημένα δίκτυα και η κόκκινη γραμμή που παριστά την τιμή του για το αρχικό δίκτυο όταν στο (α) έχουμε αποδοχή της H_0 (δηλαδή, $p - \text{τιμή} > 0.05$), δηλαδή η τιμή του συντελεστή συσταδοποίησης που προκύπτει από το αρχικό δίκτυο δεν είναι στατιστικά σημαντική και στο (β) όπου έχουμε απόρριψη της H_0 (δηλαδή, $p - \text{τιμή} < 0.05$) και η τιμή του είναι στατιστικά σημαντική.

2.6 Εφαρμογές σε πραγματικά δεδομένα και αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται δύο (2) εφαρμογές σχετικές με την μελέτη της εξέλιξης των τιμών εννέα (9) βασικών μέτρων δικτύου είτε μεταξύ κύριων σεισμών, στην ενότητα 2.6.1, ή κατά την διάρκεια μετασεισμικών ακολουθιών, στην ενότητα 2.6.2. Κοινός στόχος και των δύο (2) εφαρμογών είναι να εντοπιστούν χρονικά πρότυπα, μέσω κυλιόμενων χρονικών παραθύρων, που οι τιμές των μέτρων δικτύου παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα κυρίως πριν τους κύριους σεισμούς ή μετασεισμούς αυτών.

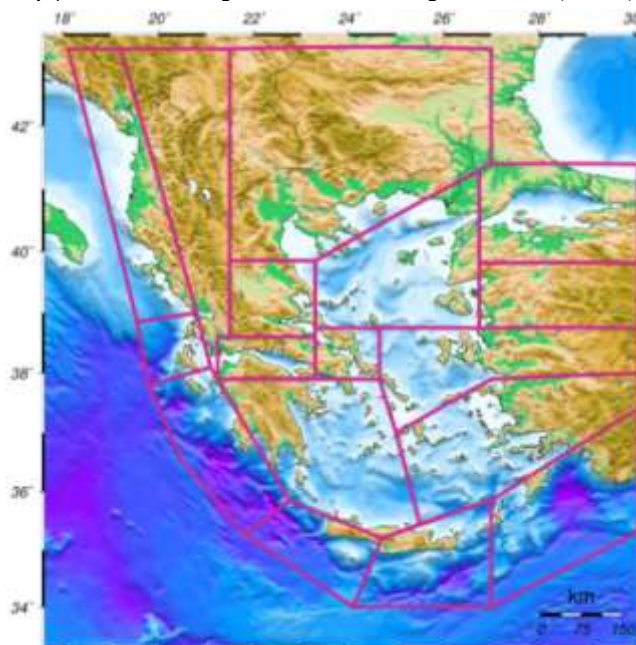
2.6.1 Μελέτη των μέτρων δικτύου μεταξύ κύριων σεισμών

Ο στόχος της εφαρμογής που ακολουθεί είναι να εντοπιστούν χρονικά πρότυπα όπου το σεισμικό δίκτυο συσχέτισης παρουσιάζει διακριτή (ξεχωριστή) εξέλιξη, μέσω των μέτρων δικτύου, πριν από κύριους σεισμούς ($M \geq 6.0$). Επομένως, εξετάζεται αν υπάρχουν χρονικά διαστήματα, μέσω κυλιόμενων χρονικών παραθύρων, πριν από κύριους σεισμούς που οι τιμές των μέτρων δικτύου είναι στατιστικά σημαντικές ώστε να αποκαλύπτεται μία ξεχωριστή εξέλιξη του σεισμικού δικτύου συσχέτισης. Επομένως, για την ξεχωριστή εξέλιξη δεν μας ενδιαφέρει αν η τιμή του μέτρου δικτύου μειώνεται ή αυξάνεται απότομα σε κάποιο χρονικό διάστημα μεταξύ των κύριων σεισμών (Abe και Suzuki 2009, Daskalaki et al. 2016, Chorozoglou et al. 2017) αλλά αν είναι στατιστικά σημαντική.

Ο σεισμικός κατάλογος που χρησιμοποιείται έχει συνταχθεί από τον Τομέα Γεωφυσικής του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου

Θεσσαλονίκης (<http://geophysics.geo.auth.gr/ss/>, Καρακώστας (προσωπική επικοινωνία)). Από τον κατάλογο σεισμών επιλέχθηκαν οι επιφανειακοί σεισμοί με εστιακά βάθη μικρότερα των 50 km και μέγεθος $M \geq 3.0$, οι οποίοι έγιναν κατά την περίοδο 1999-2018 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του. Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγεθος πληρότητας για κάθε μία από τις οχτώ (8) περιπτώσεις μεταξύ κύριων σεισμών παρουσιάζεται να είναι $2.5 \leq M_{thr} \leq 3.7$. Για όλες τις περιπτώσεις που θα εξεταστούν μεταξύ κύριων σεισμών επιλέγεται $M_{thr} \geq 3.0$ καθώς τα δίκτυα είναι ανθεκτικά σε τυχαίες επιθέσεις (Albert et al. 2000), δηλαδή ακόμα και αν δεν ικανοποιείται η πληρότητα στον κατάλογο μπορούν να προκύψουν εύρωστα και αξιόπιστα αποτελέσματα.

Οι κόμβοι του σεισμικού δικτύου συσχέτισης αντιπροσωπεύονται από τις 17 καλά ορισμένες σεισμικές ζώνες (Σχ. 2.18) και η παρατηρούμενη μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι είτε η σεισμική ροπή M_0 είτε το πλήθος των σεισμών που παρατηρείται για κάθε σεισμική ζώνη με χρόνο δειγματοληψίας να ορίζεται η μία (1) ημέρα. Οι 17 σεισμικές ζώνες, που αποτελούν και τους κόμβους του δικτύου, προέκυψαν από την ενοποίηση των 67 σεισμικών ζωνών που προτείνονται στην εργασία των Papaioannou & Papazachos (2000).



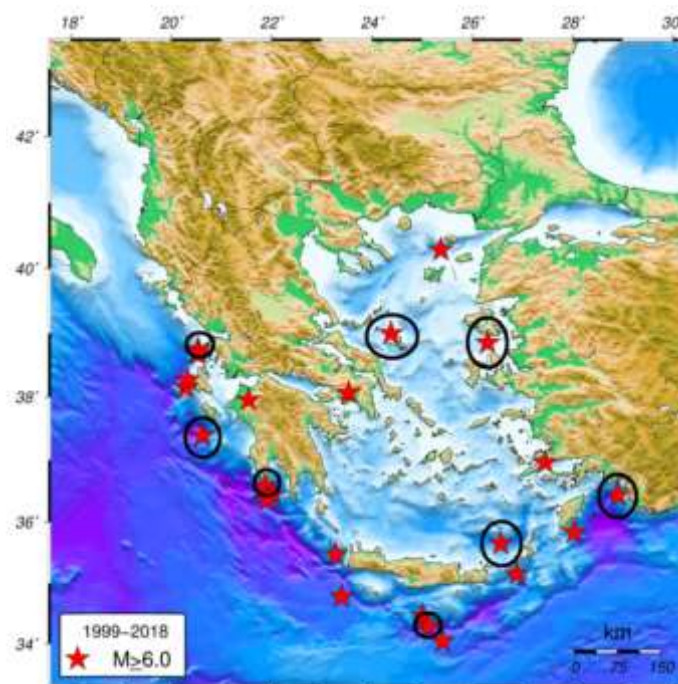
Σχ. 2.18: Παρουσιάζονται οι 17 σεισμικές ζώνες σύμφωνα με τις οποίες διαιρείται ο Ελληνικός χώρος με τις γειτονικές περιοχές του.

Οι συνδέσεις, όταν θεωρούνται σταθμισμένες, δίνονται από το πίνακα βαρών W , ο οποίος σχηματίζεται από την απόλυτη τιμή του πίνακα συσχέτισης Σ (σχέση (2.1)). Όταν οι συνδέσεις είναι απλές δίνονται από τον πίνακα γειτνίασης A μέσω του ελέγχου σημαντικότητας του πίνακα συσχέτισης Σ (σχέση (2.2)). Για την διεύρυνση σχετικά με το αν οι τιμές των μέτρων δικτύου είναι στατιστικά σημαντικές απαιτείται η κατασκευή των τυχαιοποιημένων δικτύων.

Τα τυχαιοποιημένα δίκτυα δημιουργούνται από τις δύο (2) προσεγγίσεις που πραγματοποιούν την τυχαιοποίηση στην αρχική πολυμεταβλητή χρονοσειρά, από τις προσεγγίσεις RTSweight και RTSbinthr. Δεν χρησιμοποιούνται οι δύο (2) προσεγγίσεις, RNnoddeg και RNavestr, που τυχαιοποιούν τις συνδέσεις του αρχικού δικτύου συσχέτισης, η προσέγγιση RNpoisson όπου οι συνδέσεις στο τυχαιοποιημένο δίκτυο εισάγονται με προκαθορισμένη πιθανότητα καθώς και η προσέγγιση RTSbindeg που τυχαιοποιεί την αρχική πολυμεταβλητή χρονοσειρά διότι κρίθηκαν

ακατάλληλες, μέσω προσομοιωτικής μελέτης που παρουσιάζεται στην ενότητα 3.5, όταν το αρχικό δίκτυο είναι δίκτυο συσχέτισης. Οι τέσσερις (4) προσεγγίσεις, RTSbindeg, RNnoddeg, RNvestr και RNpoisson χρησιμοποιούνται σε επόμενες εφαρμογές της διατριβής.

Κατά την διάρκεια της περιόδου μελέτης, δηλαδή κατά την χρονική περίοδο 1999-2018, έγιναν 23 κύριοι σεισμοί μεγέθους $M \geq 6.0$ (Σχ. 2.19). Η μελέτη επικεντρώνεται στην διερεύνηση των τιμών των μέτρων δικτύου, αν είναι στατιστικά σημαντικές, που παρουσιάζουν τα σεισμικά δίκτυα συσχέτισης μεταξύ των κύριων σεισμών. Μόνο για τις οχτώ (8) από τις 22 διαδοχές κύριων σεισμών το χρονικό διάστημα, πάνω από 360 ημέρες, ήταν ικανό ώστε να σχηματιστεί η πολυμεταβλητή χρονοσειρά σε κυλιόμενα χρονικά παράθυρα και να προκύψουν αξιόπιστα αποτελέσματα (Πίνακας 2.1).



Σχ. 2.19: Επίκεντρα των 23 κύριων σεισμών, σε μαύρο κύκλο οι οχτώ (8) κύριοι σεισμοί που εξετάζονται, με μεγέθη $M \geq 6.0$ κατά την χρονική περίοδο 1999-2018 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του.

Εξετάστηκαν τρεις (3) διαφορετικές ρυθμίσεις σχετικά με το μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς, ειδικότερα $n = 60$, $n = 90$ και $n = 120$ ημέρες, με χρόνο δειγματοληψίας για κάθε παρατήρηση της να είναι η μία (1) ημέρα, ώστε να διερευνηθεί κατά πόσο τα αποτελέσματα επηρεάζονται από την επιλογή του n . Δεν πραγματοποιήθηκε επιλογή μικρότερου ή μεγαλύτερου μήκους n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς, επειδή είτε η εκτίμηση της συσχέτισης μεταξύ των σεισμικών ζωνών, για την εισαγωγή των συνδέσεων, θα ήταν αδύνατη (μη εύρωστη) ή ο αριθμός των χρονικών κυλιόμενων παραθύρων θα ήταν ιδιαίτερα μικρός. Επομένως, θεωρούνται οι περιπτώσεις των διαδοχικών κύριων σεισμών όπου η χρονική απόσταση μεταξύ τους είναι πάνω από 360 ημέρες (Πίνακας 2.1), για να επιτευχθεί ο σχηματισμός τουλάχιστον τριών (3) κυλιόμενων χρονικών παραθύρων ώστε να μπορεί να διακριθεί αν υπάρχουν χρονικά πρότυπα στα οποία οι τιμές των μέτρων δικτύου είναι στατιστικά σημαντικές. Το πλήθος των ημερών μεταξύ των διαδοχικών κύριων σεισμών δεν είναι το ίδιο για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, οπότε ο συνολικός αριθμός των χρονικών παραθύρων διαφέρει για κάθε περίπτωση, ενώ το μήκος n της χρονοσειράς για κάθε περίπτωση διατηρείται σταθερό.

Πίνακας 2.1: Πληροφορίες για τους 23 κύριους σεισμούς με μέγεθος $M \geq 6.0$ κατά το χρονικό διάστημα 1999-2018 που έγιναν στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του. Οι κύριοι σεισμοί που θεωρούνται, συνολικά οχτώ (8), παρουσιάζονται με έντονη γραφή.

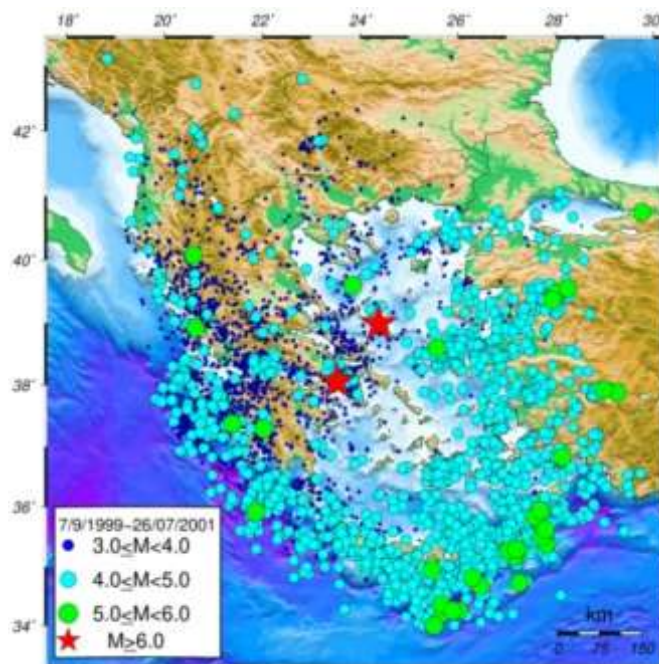
Σεισμοί $M \geq 6.0$	Ημερομηνία	Γεωγραφικό μήκος	Γεωγραφικό Πλάτος	Μέγεθος	Ημέρες διαδοχής
1	7/9/1999	38.06	23.53	6.0	-----
2	26/7/2001	38.99	24.38	6.4	688
3	14/8/2003	38.74	20.53	6.3	749
4	17/3/2004	34.77	23.39	6.0	216
5	14/2/2008	36.57	21.86	6.8	1429
6	14/2/2008	36.43	22.02	6.5	0
7	20/2/2008	36.36	21.90	6.2	6
8	8/6/2008	37.95	21.53	6.4	109
9	15/7/2008	35.83	28.03	6.4	37
10	1/7/2009	34.04	25.41	6.4	351
11	1/4/2011	35.64	26.56	6.1	639
12	10/6/2012	36.44	28.90	6.1	436
13	15/6/2013	34.46	25.01	6.3	370
14	16/6/2013	34.29	25.12	6.1	1
15	12/10/2013	35.47	23.28	6.7	118
16	26/1/2014	38.15	20.28	6.1	106
17	3/2/2014	38.26	20.32	6.0	8
18	24/5/2014	40.28	25.37	6.9	110
19	16/4/2015	35.14	26.88	6.1	327
20	17/11/2015	38.67	20.53	6.5	215
21	12/06/2017	38.84	26.30	6.3	573
22	20/07/2017	36.95	27.45	6.6	38
23	25/10/2018	37.39	20.62	6.8	462

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η παρακολούθηση των τιμών των εννέα (9) μέτρων δικτύου εκτελείται ανά 60, 90 και 120 ημέρες σε κυλιόμενα χρονικά παράθυρα και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τα $B = 100$ τυχαιοποιημένα δίκτυα, που κατασκευάζονται με τις προσεγγίσεις, RTSbinthr και RTSweight. Η σύγκριση των τιμών πραγματοποιείται από τον στατιστικό έλεγχο, που περιγράφηκε στην ενότητα 2.5, σύμφωνα με την σχέση (2.36), η οποία ελέγχει αν υπάρχει στατιστική σημαντικότητα των τιμών των μέτρων δικτύου.

Το ποσοστό απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 , ότι οι τιμές των μέτρων δικτύου που προκύπτουν από το αρχικό δίκτυο είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες των τυχαιοποιημένων (δηλαδή, παρουσιάζουν περίπου τις ίδιες τιμές), για διαφορετικό μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς και παρατηρούμενων μεταβλητών των χρονοσειρών για κάθε έναν από τους οχτώ (8) κύριους σεισμούς που εξετάζονται (έντονη γραφή στον Πίνακα 2.1), χωρίς να γίνεται διάκριση στα μέτρα του δικτύου και στις μεθόδους τυχαιοποίησης που χρησιμοποιούνται, παρουσιάζεται από τα παρακάτω σχήματα (Σχ. 2.20 ως Σχ. 2.35). Επομένως, εξετάζεται για κάθε μία από τις οχτώ (8) περιπτώσεις διαδοχικών κύριων σεισμών αν η μηδενική υπόθεση H_0 τείνει να απορριφθεί, δηλαδή οι τιμές των εννέα (9) μέτρων δικτύου διαφέρουν από τις

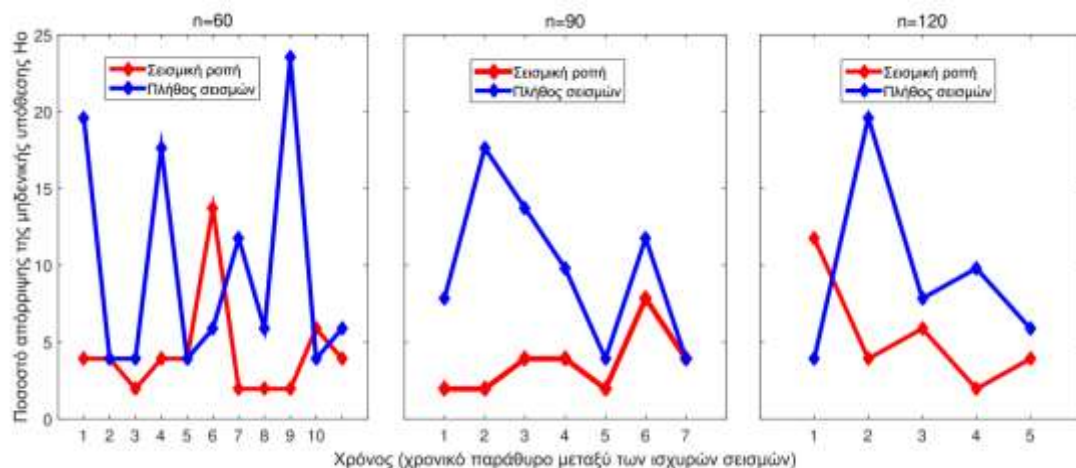
αντίστοιχες των B τυχαιοποιημένων δικτύων και σε ποιο χρονικό παράθυρο συμβαίνει αυτό. Το ποσοστό απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 υπολογίζεται από τον μέσο όρο των αντίστοιχων απορρίψεων της μηδενικής υπόθεσης H_0 που προκύπτει από τις δύο (2) προσεγγίσεις τυχαιοποίησης του αρχικού δικτύου και από τα εννέα (9) μέτρα δικτύου για κάθε κυλιόμενο χρονικό παράθυρο και για κάθε μία από τις οχτώ (8) εξεταζόμενες περιπτώσεις (Σχ. 2.20 ως Σχ. 2.35).

Ο πρώτος κύριος σεισμός που μελετάται έγινε στις 26/7/2001 στο νησί της Σκύρου με $M = 6.4$ ενώ ο αμέσως προηγούμενος κύριος σεισμός έγινε στις 7/9/1999 στην Αθήνα με $M = 6.0$ (Σχ. 2.20).



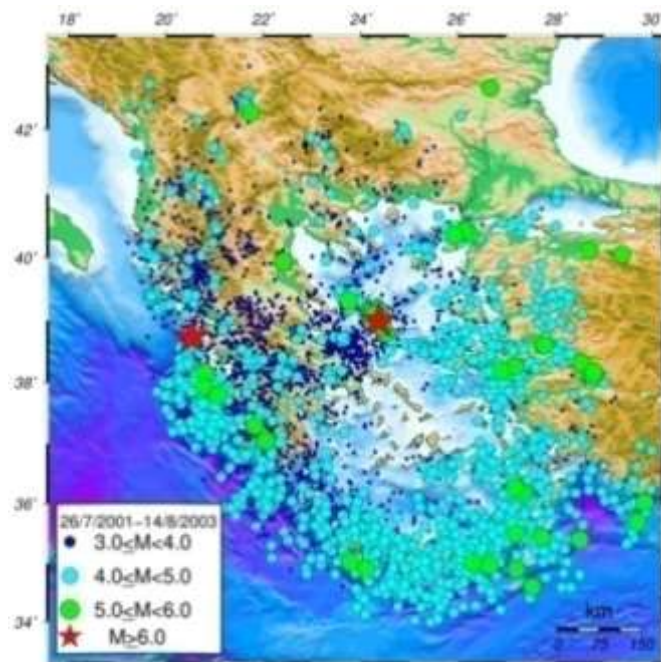
Σχ. 2.20: Τα επίκεντρα των σεισμών με $M \geq 3.0$ μεταξύ των δύο κύριων σεισμών (κόκκινα αστέρια) κατά την χρονική περίοδο 7/9/1999-26/7/2001 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του.

Το ποσοστό απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 φτάνει ως το 25% στην περίπτωση που το μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι $n = 60$, το κυλιόμενο χρονικό παράθυρο είναι το ένατο (9°) (δηλαδή μεταξύ 120 και 180 ημερών πριν από τον κύριο σεισμό που πραγματοποιήθηκε στις 26/07/2001) και ως παρατηρούμενη μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς θεωρείται το πλήθος των σεισμών (Σχ. 2.21). Το ποσοστό απόρριψης της H_0 όταν η σεισμική ροπή M_0 θεωρείται ως παρατηρούμενη μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι χαμηλότερο στην παραπάνω περίπτωση. Γενικά, δεν υπάρχει συγκεκριμένο κυλιόμενο χρονικό παράθυρο στο οποίο να εμφανίζεται συστηματικά υψηλό ποσοστό απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 . Το τελευταίο χρονικό παράθυρο για κάθε περίπτωση του n που θα μπορούσε να προειδοποιήσει, μέσω των υψηλών ποσοστών απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 , για τον επικείμενο κύριο σεισμό παρουσιάζει πολύ χαμηλά ποσοστά απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 , κοντά στο 5% και για τις δύο παρατηρούμενες μεταβλητές και για οποιοδήποτε μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς.



Σχ. 2.21: Το ποσοστό απόρριψης της H_0 , ότι οι τιμές των μέτρων δικτύου των αρχικών δικτύων συσχέτισης με αυτές των τυχαιοποιημένων είναι παρόμοιες, για τον κύριο σεισμό της 26-07-2001, για $n = 60$, $n = 90$ και για $n = 120$ με βάση τον μέσο όρο των απορρίψεων της H_0 για τα εννέα (9) μέτρα δικτύου και για τις δύο (2) προσεγγίσεις τυχαιοποίησης σε κάθε κυλιόμενο χρονικό παράθυρο.

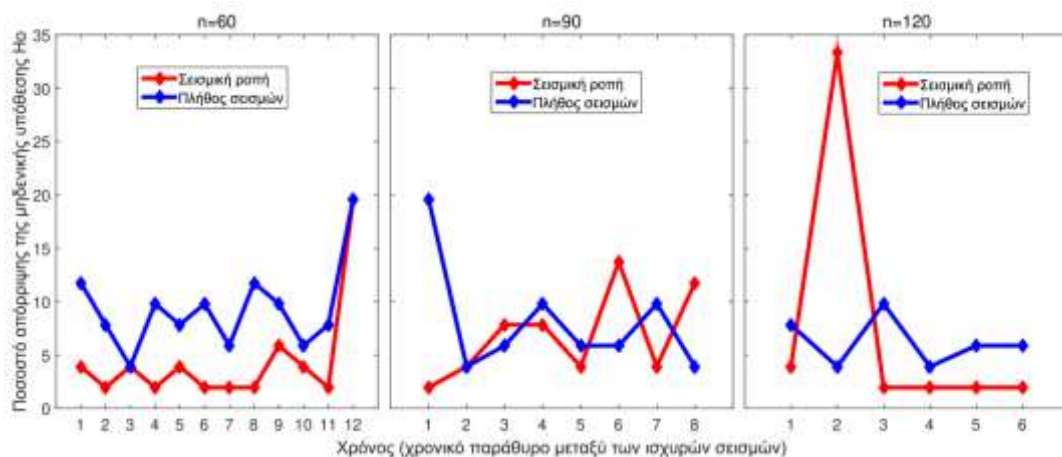
Στην δεύτερη περίπτωση μελέτης ο επερχόμενος κύριος σεισμός έγινε στις 18/8/2003 με $M = 6.3$ στο νησί της Λευκάδας ενώ ο αμέσως προηγούμενος του ήταν ο κύριος σεισμός της Σκύρου όπου αναφέρθηκε προηγουμένως (Σχ. 2.22).



Σχ. 2.22: Τα επίκεντρα των σεισμών με $M \geq 3.0$ μεταξύ των δύο κύριων σεισμών (κόκκινα αστέρια) κατά την χρονική περίοδο 26/7/2001-14/8/2003 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του.

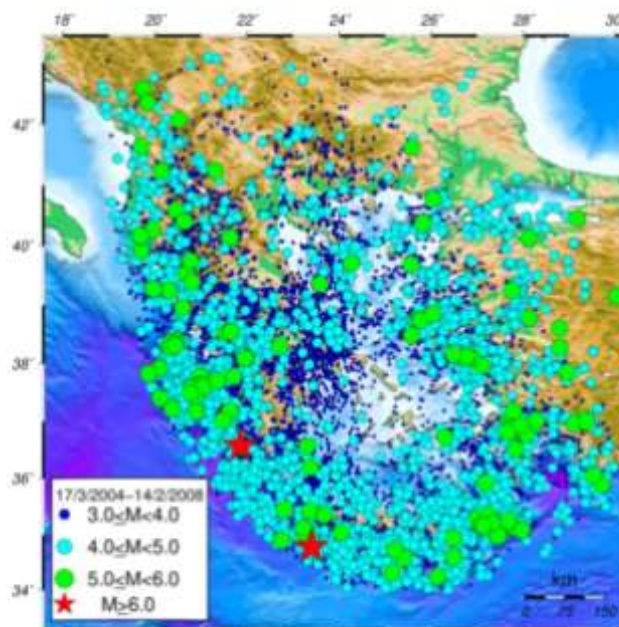
Οι απορρίψεις της H_0 παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα όπως και στην προηγούμενη περίπτωση καθώς τα ποσοστά τους φθάνουν μέχρι το 20% (Σχ. 2.23). Σε μια περίπτωση, όταν το μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι $n = 120$, το χρονικό παράθυρο είναι το δεύτερο (2^ο) (δηλαδή μεταξύ 600 και 720 ημερών πριν από το επικείμενο κύριο σεισμό που έγινε στις 14/08/2003) και όταν ως παρατηρούμενη μεταβλητή θεωρείται η σεισμική ροπή M_0 , το ποσοστό απόρριψης της H_0 προέκυψε ίσο με 35% και σχετίζεται, πιθανόν, με την μετασεισμική

ακολουθία του κύριου σεισμού που έγινε στις 26/7/2001. Επίσης, παρουσιάζεται μια ξεχωριστή εξέλιξη, δηλαδή οι τιμές των 9 μέτρων δικτύου διαφέρουν από τις αντίστοιχες των τυχαιοποιημένων, στο τελευταίο χρονικό διάστημα πριν από τον επερχόμενο κύριο σεισμό της 14/08/2003 σε σχέση με την πρώτη περίπτωση μελέτης. Έτσι, όταν το μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι $n = 60$ και για τις δύο παρατηρούμενες μεταβλητές, το ποσοστό απόρριψης της H_0 φτάνει το 20%, το οποίο υπερβαίνει κατά πολύ το αντίστοιχο ποσοστό απόρριψης για τα υπόλοιπα χρονικά παράθυρα. Επομένως, το τελευταίο χρονικό παράθυρο, για την τελευταία περίπτωση, θα μπορούσε να προειδοποιήσει για τον επικείμενο κύριο σεισμό καθώς παρουσιάζει υψηλά ποσοστά απόρριψης της H_0 , κοντά στο 20%, σε σχέση με τα υπόλοιπα.



Σχ. 2.23: Όμοια όπως στο Σχ. 2.21 αλλά για τον κύριο σεισμό της Λευκάδας στις 14-08-2003.

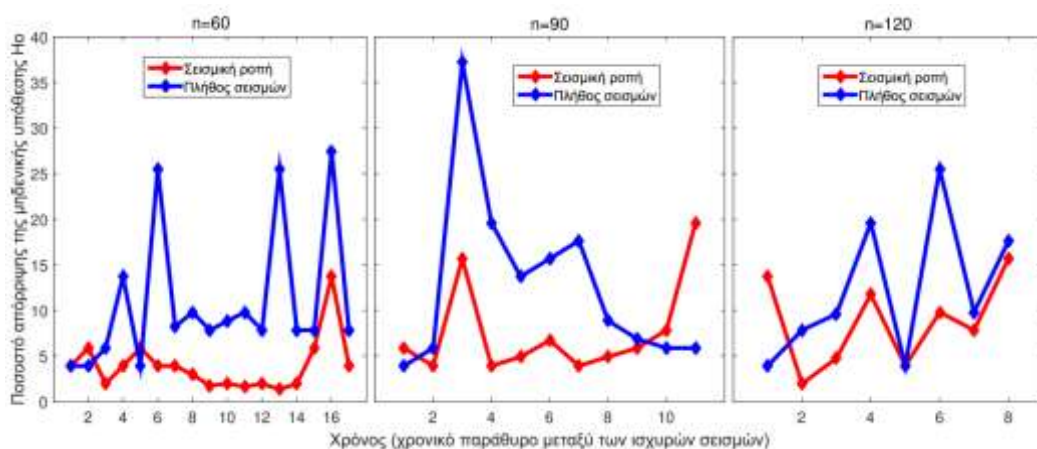
Στην τρίτη περίπτωση μελέτης ο επερχόμενος κύριος σεισμός έγινε στις 14/2/2008 με $M = 6.8$ στην Μεθώνη ενώ ο αμέσως προηγούμενος του έγινε νοτιοδυτικά της Κρήτης στις 17/3/2004 με $M = 6.0$ (Σχ. 2.24).



Σχ. 2.24: Τα επίκεντρα των σεισμών με $M \geq 3.0$ μεταξύ των δύο κύριων σεισμών (κόκκινα αστέρια) κατά την χρονική περίοδο 17/3/2004-14/8/2008 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του.

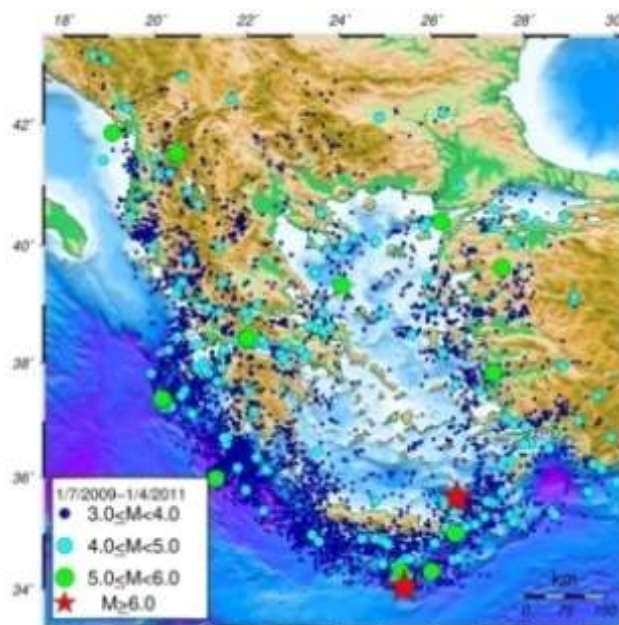
Η περίπτωση αυτή, παρουσιάζει το ίδιο μοτίβο σχετικά με τα ποσοστά απόρριψης της H_0 με τις προηγούμενες περιπτώσεις μελέτης (Σχ. 2.25). Ως εκ τούτου, τα ποσοστά

απόρριψης της H_0 είναι χαμηλότερα όταν η σεισμική ροπή M_0 αντί του πλήθους των σεισμών θεωρείται ως παρατηρούμενη μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς. Όταν, το μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι $n = 90$, το χρονικό παράθυρο είναι το τρίτο (3°) (δηλαδή μεταξύ 630 και 720 ημερών πριν από τον κύριο σεισμό της 14/02/2008) και παρατηρούμενη μεταβλητή είναι το πλήθος των σεισμών, τότε παρατηρείται υψηλό ποσοστό απόρριψης της H_0 εξαιτίας, ίσως, της μετασεισμικής ακολουθίας του κύριου σεισμού της 17/03/2004. Για το τελευταίο χρονικό παράθυρο, το οποίο είναι και το πιο σημαντικό καθώς μπορεί να προειδοποιήσει με υψηλά ποσοστά απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 τον επερχόμενο κύριο σεισμό, όταν το μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι $n = 90$ και η σεισμική ροπή θεωρείται ως παρατηρούμενη μεταβλητή της, το ποσοστά απόρριψης της H_0 είναι κοντά στο 20% το οποίο είναι το υψηλότερο για την περίπτωση αυτήν.



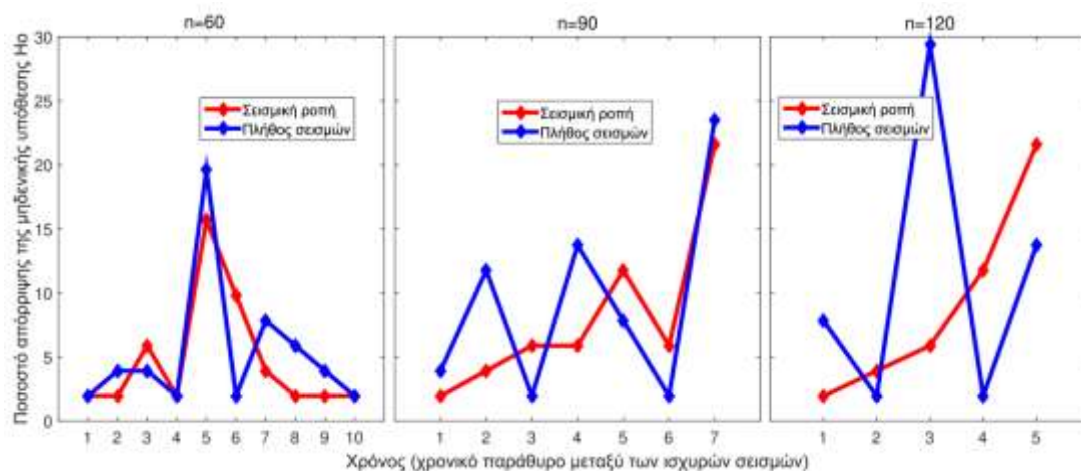
Σχ. 2.25: Όμοια όπως στο Σχ. 2.21 αλλά για τον κύριο σεισμό της Μεθώνης στις 14-02-2008.

Στην τέταρτη περίπτωση μελέτης ο επερχόμενος κύριος σεισμός έγινε στις 1/4/2011 με $M = 6.1$ βορειοανατολικά της Κρήτης ενώ ο αμέσως προηγούμενος στα νότια της Κρήτης στις 1/7/2009 με $M = 6.4$ (Σχ. 2.26).



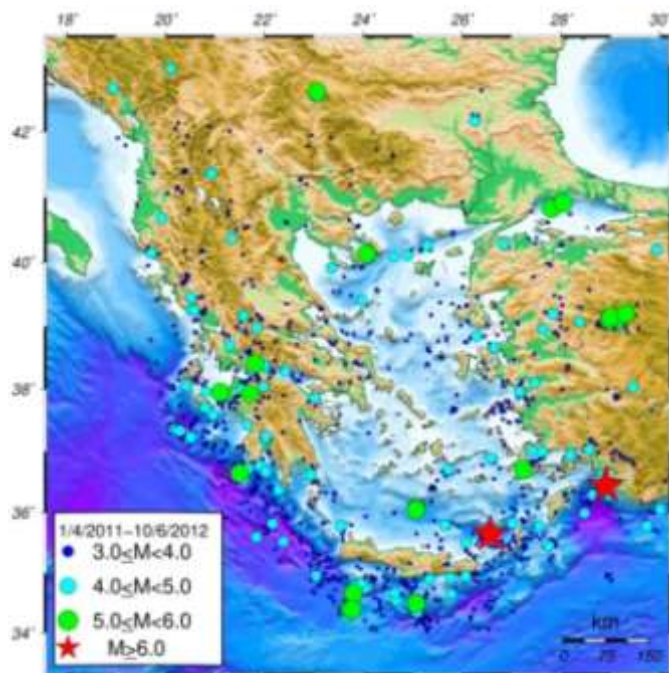
Σχ. 2.26: Τα επίκεντρα των σεισμών με $M \geq 3.0$ μεταξύ των δύο κύριων σεισμών (κόκκινα αστέρια) κατά την χρονική περίοδο 1/7/2009-1/4/2011 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του.

Παρόμοια, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις μελέτης, τα ποσοστά απόρριψης της H_0 είναι χαμηλότερα όταν η σεισμική ροπή θεωρείται ως παρατηρούμενη μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς, αντί του αριθμού των σεισμών που φτάνει ως το 25% (Σχ. 2.27). Όταν το μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι $n = 120$ και η παρατηρούμενη μεταβλητή είναι η σεισμική ροπή M_0 , το ποσοστό απόρριψης της H_0 για το τελευταίο χρονικό παράθυρο, πριν τον κύριο σεισμό της 01/04/2011, είναι πολύ υψηλότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα χρονικά παράθυρα. Παρουσιάζει ποσοστό απόρριψης 25% και αποκαλύπτεται η ξεχωριστή εξέλιξη των τιμών των μέτρων του δικτύου λίγο πριν (120 ημέρες) από την γένεση του κύριου σεισμού.



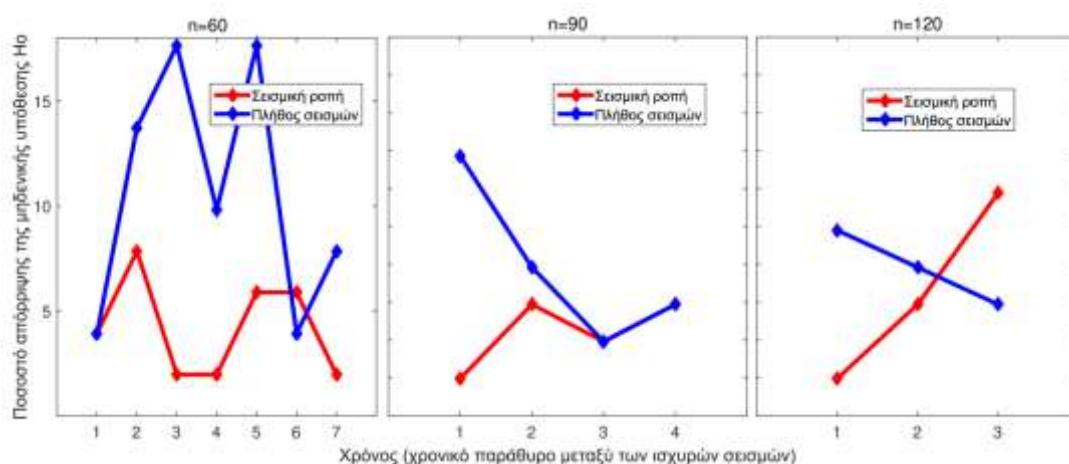
Σχ. 2.27: Όμοια όπως στο Σχ. 2.21 αλλά για τον κύριο σεισμό της Κρήτης στις 01-04-2011.

Στην πέμπτη περίπτωση μελέτης ο επερχόμενος κύριος σεισμός έγινε στις 10/6/2012 με $M = 6.1$ ανατολικά του νησιού της Ρόδου ενώ ο αμέσως προηγούμενος βορειοανατολικά της Κρήτης στις 1/4/2011 όπου αναφέρθηκε προηγουμένως (Σχ. 2.28).



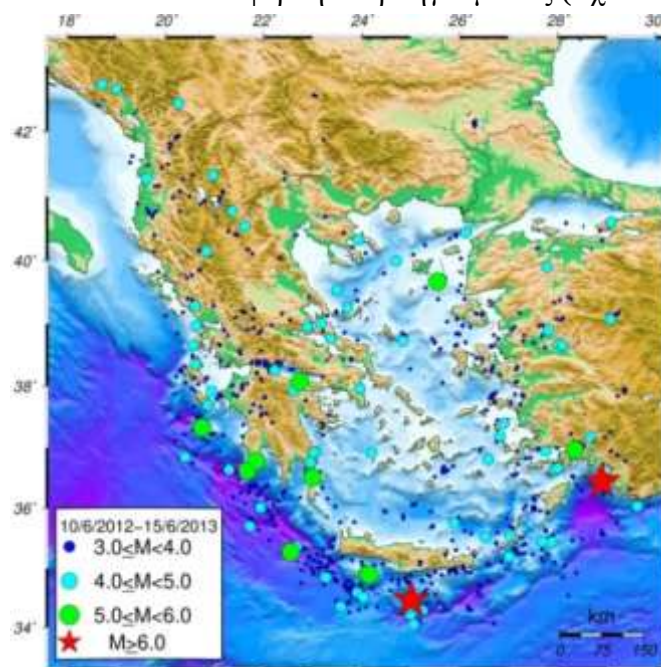
Σχ. 2.28: Τα επίκεντρα των σεισμών με $M \geq 3.0$ μεταξύ των δύο κύριων σεισμών (κόκκινα αστέρια) κατά την χρονική περίοδο 1/4/2011-10/6/2012 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του.

Τα ποσοστά απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 όταν η σεισμική ροπή θεωρείται ως παρατηρούμενη μεταβλητή είναι χαμηλότερα σε σχέση με την περίπτωση του πλήθους των σεισμών, ειδικά για την περίπτωση $n = 60$ (Σχ. 2.29). Η ενθαρρυντική ένδειξη για την διαφορετική εξέλιξη των τιμών των μέτρων του δικτύου στο τελευταίο χρονικό διάστημα παρατηρείται μόνο στην περίπτωση για $n = 120$ όταν η σεισμική ροπή θεωρείται ως μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς όπου το ποσοστό απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 είναι το υψηλότερο, 13%, σε σχέση με τα αντίστοιχα ποσοστά των άλλων χρονικών παραθύρων, που φτάνουν κοντά στο 5%.



Σχ. 2.29: Όμοια όπως στο Σχ. 2.21 αλλά για τον κύριο σεισμό της Ρόδου στις 10-06-2012.

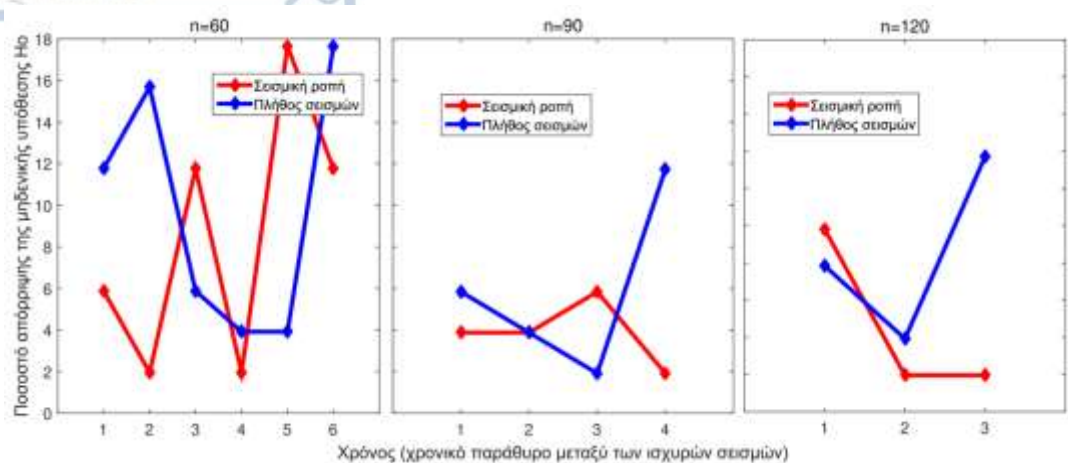
Στην έκτη περίπτωση μελέτης ο επερχόμενος κύριος σεισμός έγινε στις 15/6/2013 με $M = 6.3$ νότια της Κρήτης ενώ ο αμέσως προηγούμενος του ανατολικά της Ρόδου στις 10/6/2012 όπου αναφέρθηκε προηγουμένως (Σχ. 2.30).



Σχ. 2.30: Τα επίκεντρα των σεισμών με $M \geq 3.0$ μεταξύ των δύο κύριων σεισμών (κόκκινα αστέρια) κατά την χρονική περίοδο 10/6/2012-15/6/2013 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του

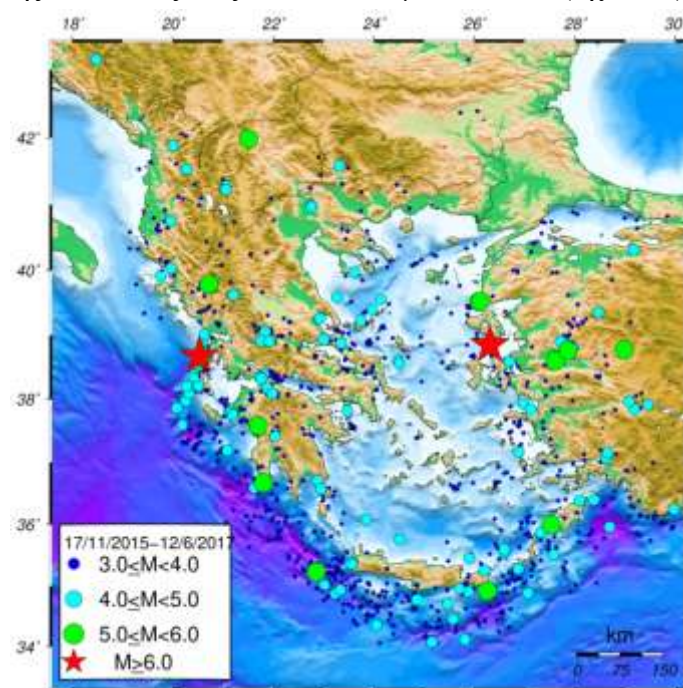
Η σημαντική διαφορά αυτής της περίπτωσης σε σχέση με τις προηγούμενες είναι ότι όταν ο αριθμός των σεισμών θεωρείται ως η παρατηρούμενη μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς, το τελευταίο χρονικό παράθυρο, πριν τον κύριο

σεισμό, παρουσιάζει τα υψηλότερα ποσοστά απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 σε σχέση με τα προηγούμενα ανεξάρτητα από μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς που θεωρείται (Σχ. 2.31).



Σχ. 2.31: Όμοια όπως στο Σχ. 2.21 αλλά για τον κύριο σεισμό της Κρήτης στις 15-06-2013.

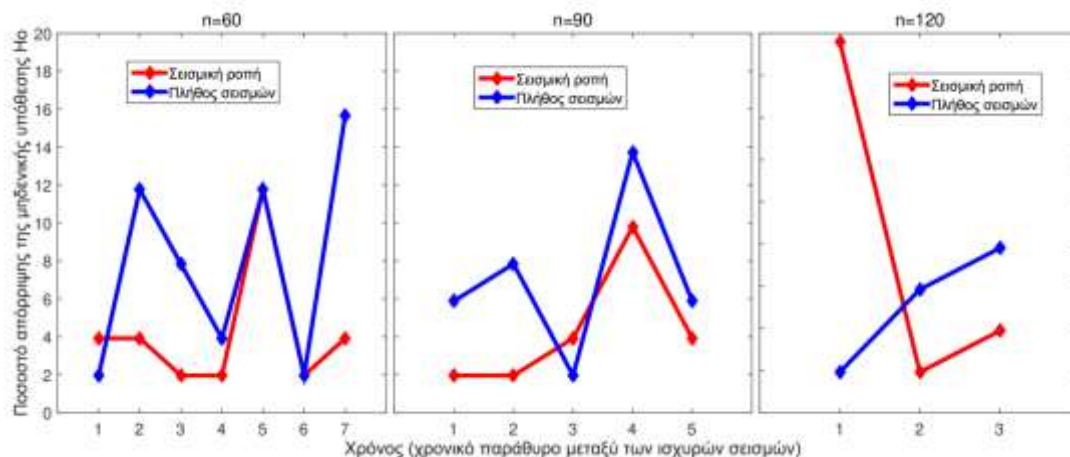
Στην έβδομη περίπτωση μελέτης ο επερχόμενος κύριος σεισμός έγινε στις 12/6/2017 με $M = 6.1$ στο νησί της Λέσβου ενώ ο αμέσως προηγούμενος του ήταν ο κύριος σεισμός της Λευκάδας στις 17/11/2015 με $M = 6.5$ (Σχ. 2.32).



Σχ. 2.32: Τα επίκεντρα των σεισμών με $M \geq 3.0$ μεταξύ των δύο κύριων σεισμών (κόκκινα αστέρια) κατά την χρονική περίοδο 17/11/2015-12/6/2017 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του.

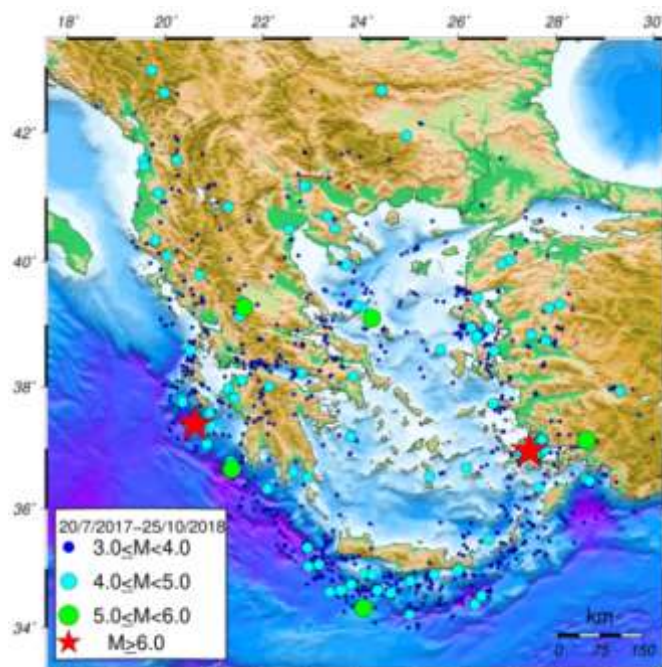
Στην περίπτωση αυτή, παρουσιάζονται δύο (2) ενθαρρυντικές ενδείξεις σχετικά με το ποσοστό απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 που παρουσιάζει το τελευταίο χρονικό παράθυρο, πριν τον κύριο σεισμό της 12/06/2017, καθώς είναι μεγαλύτερο σε σχέση με τα προηγούμενα. Συγκεκριμένα, όταν το μήκος της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι είτε $n = 60$ ή $n = 120$ και παρατηρούμενη μεταβλητή της είναι το πλήθος των σεισμών τότε στο τελευταίο χρονικό παράθυρο παρουσιάζονται τα υψηλότερα ποσοστά απόρριψης της H_0 , κοντά στο 16% και 10%, αντίστοιχα, σε σχέση με τα προηγούμενα (Σχ. 2.33).

Στην τελευταία περίπτωση μελέτης ο επερχόμενος κύριος σεισμός που εκδηλώθηκε στις 25/10/2018 με $M = 6.8$ πραγματοποιήθηκε 30 χλμ. ανοικτά των δυτικών και νοτιοδυτικών ακτών του νησιού της Ζακύνθου ενώ ο αμέσως προηγούμενος του ήταν ο κύριος σεισμός της Κω που συνέβη στις 20/7/2017 με $M = 6.6$ (Σχ. 2.34).



Σχ. 2.33: Όμοια όπως στο Σχ. 2.21 αλλά για τον κύριο σεισμό της Λέσβου στις 12-06-2017.

Τα αποτελέσματα για την περίπτωση αυτή είναι παρόμοια με της προηγούμενης καθώς τα μεγαλύτερα ποσοστά απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 που αφορούν το τελευταίο χρονικό παράθυρο σε σχέση με τα προηγούμενα, πριν τον κύριο σεισμό της 25/10/2018, παρουσιάζονται όταν το μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι $n = 60$ και $n = 120$ και παρατηρούμενη μεταβλητή της είναι το πλήθος των σεισμών (Σχ. 2.35).

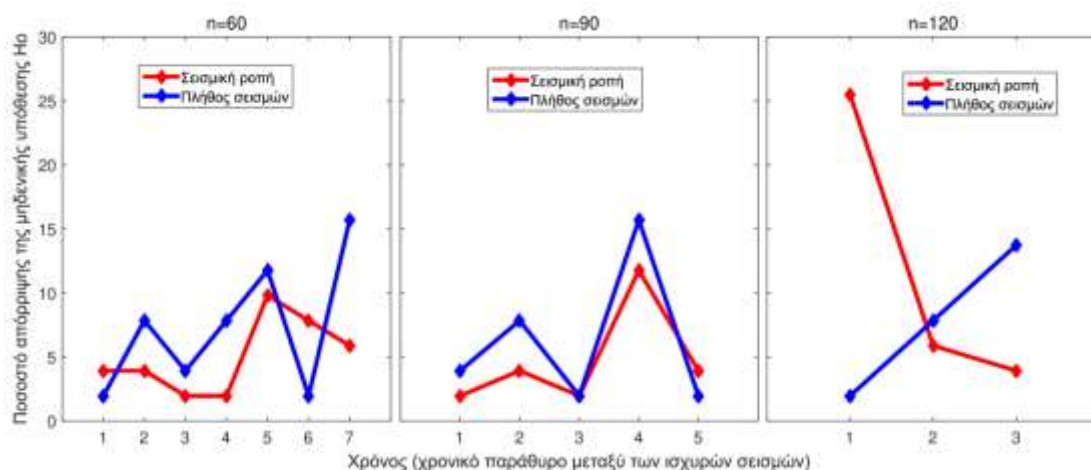


Σχ. 2.34: Τα επίκεντρα των σεισμών με $M \geq 3.0$ μεταξύ των δύο κύριων σεισμών (κόκκινα αστέρια) κατά την χρονική περίοδο 20/7/2017-25/10/2018 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του.

Το Σχ. 2.36 παρουσιάζει το ποσοστό απόρριψης κάθε μέτρου δικτύου που προκύπτει και από τους οχτώ (8) κύριους σεισμούς και τα τρία μήκη n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς. Το ποσοστό απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0

για κάθε χρονικό παράθυρο υπολογίζεται από τον μέσο όρο των αντίστοιχων απορρίψεων της H_0 για το συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο που ορίζεται για κάθε έναν από τους οχτώ (8) κύριους σεισμούς με το διαφορετικό μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς που θεωρήθηκε. Αξίζει να σημειωθεί ότι έγινε κανονικοποίηση των χρονικών παραθύρων των παραπάνω περιπτώσεων (Σχ. 2. 21 ως 2.35) ώστε καθένα από αυτά να αποτυπώνει την χρονική του θέση πριν από τους επερχόμενους κύριους σεισμούς στο Σχ. 2.36. Για παράδειγμα, στο Σχ. 2.35 που σχηματίζονται 7 χρονικά παράθυρα για $n = 60$ τα αποτελέσματα για το έβδομο (7^o) χρονικό παράθυρο αντιστοιχούν στο 17^o χρονικό παράθυρο του σχήματος 2.36, ενώ τα αποτελέσματα του πρώτου (1^{ou}) χρονικού παραθύρου του σχήματος 2.35 αντιστοιχούν στο 11^o χρονικό παράθυρο του σχήματος 2.36. Με αυτόν τον τρόπο το 17^o χρονικό παράθυρο του σχήματος 2.36 (καθώς 17 χρονικά παράθυρα σχηματίζονται στο Σχ. 2.25 για $n = 60$) θα αποτυπώνει το τελευταίο χρονικό παράθυρο για όλες τις περιπτώσεις διαδοχής κύριων σεισμών που εξετάστηκαν ανεξάρτητα του μήκους n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς.

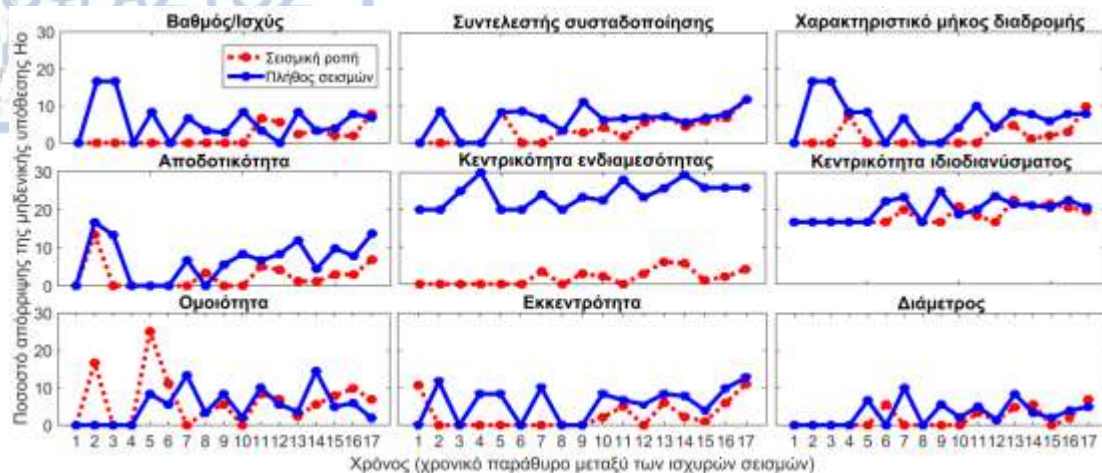
Το ποσοστό απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 για τα μέτρα του δικτύου, του βαθμού της κεντρικότητας ή της ισχύος, του συντελεστή συσταδοποίησης, του χαρακτηριστικού μήκους διαδρομής, της συνολικής αποδοτικότητας, της εκκεντρότητας και της διαμέτρου, στο τελευταίο χρονικό παράθυρο πριν από τους επερχόμενους κύριους σεισμούς είναι πολύ υψηλότερο, φτάνοντας πάνω από το 10% και για τις δύο (2) παρατηρούμενες μεταβλητές της πολυμεταβλητής χρονοσειράς, σε σχέση με τα προηγούμενα χρονικά παράθυρα.



Σχ. 2.35: Όμοια όπως στο Σχ. 2.21 αλλά για τον κύριο σεισμό της Ζακύνθου στις 25-10-2018.

Αυτό συμβαίνει, αν αποκλείσουμε μερικές περιπτώσεις όπου στα πρώτα χρονικά παράθυρα τα ποσοστά απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 είναι υψηλότερα από αυτά των τελευταίων, εξαιτίας, ίσως, της μετασεισμικής ακολουθίας που αναπτύσσεται από τους κύριους σεισμούς που προηγήθηκαν των επερχόμενων.

Η διαπίστωση, ότι οι τιμές των έξι (6) μέτρων δικτύου είναι στατιστικά σημαντικές στο τελευταίο χρονικό διάστημα πριν από τους κύριους σεισμούς, μπορεί να θεωρηθεί ενθαρρυντική για την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας. Τα υπόλοιπα τρία (3) μέτρα δικτύου, δηλαδή της κεντρικότητας της ενδιαμεσότητας, της κεντρικότητας του ιδιοδιανύσματος και της ομοιότητας, δεν παρουσιάζουν ξεχωριστή εξέλιξη στην στατιστική σημαντικότητα των τιμών τους πριν τους κύριους σεισμούς καθώς εμφανίζουν πολύ χαμηλά ποσοστά απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 .



Σχ. 2.36: Ποσοστό απόρριψης της H_0 , ότι οι τιμές για κάθε μέτρο δικτύου των αρχικών δικτύων συσχέτισης με τις αντίστοιχες των τυχαιοποιημένων είναι παρόμοιες, με βάση και τους οχτώ (8) κύριους σεισμούς και τα τρία (3) διαφορετικά μήκη n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς που θεωρήθηκαν.

2.6.2 Μελέτη των μέτρων δικτύου σε μετασεισμικές ακολουθίες

Ο στόχος της δεύτερης εφαρμογής είναι να εντοπιστούν πιθανά χρονικά πρότυπα, σε μετασεισμικές ακολουθίες, που οι τιμές των μέτρων δικτύου παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα στα σεισμικά δίκτυα επανάληψης, κυρίως, πριν από κύριους σεισμούς ή μετασεισμούς τους. Στην δεύτερη εφαρμογή χρησιμοποιούνται δίκτυα σε τρεις (3) μετασεισμικές ακολουθίες, και συγκεκριμένα το ζεύγος κύριων σεισμών της Κεφαλονιάς το 2014 και τον κύριο σεισμό της Λευκάδας το 2015, αντίστοιχα, όπου το χρονικό διάστημα είναι μικρότερο σε σχέση με την προηγούμενη εφαρμογή, δηλαδή της ενότητας 2.6.1, καθώς ο επερχόμενος κύριος σεισμός ή μετασεισμός γίνεται μετά από λίγες ώρες ή ημέρες από τον προηγούμενο κύριο σεισμό. Ως εκ τούτου, ο αριθμός των μετασεισμών μεγέθους $M \geq 3.0$ μεταξύ είτε των κύριων σεισμών ή των κύριων σεισμών και των ισχυρότερων μετασεισμών τους είναι αρκετά μικρός (τελευταία στήλη του Πίνακα 2.2).

Έτσι, θεωρούνται οι μετασεισμικές ακολουθίες κατά τις οποίες ο αριθμός των μετασεισμών τους είναι μεγαλύτερος από 300. Ο αριθμός αυτός καθιστά δυνατή την κατασκευή κυλιόμενων χρονικών παραθύρων με επαρκή αριθμό μετασεισμών στο καθένα με σκοπό την μελέτη της εξέλιξης των τιμών των μέτρων δικτύου κατά την διάρκεια των μετασεισμικών ακολουθιών. Επομένως, η κατασκευή του σεισμικού δικτύου επανάληψης είναι η καταλληλότερη προσέγγιση για την κατασκευή του σεισμικού δικτύου καθώς κάθε μετασεισμός αποτελεί και κόμβο του, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα κατασκευής του σεισμικού δικτύου ακόμα και όταν το χρονικό διάστημα μελέτης είναι αρκετά μικρό.

Ο σεισμικός κατάλογος που χρησιμοποιείται έχει συνταχθεί από τον Τομέα Γεωφυσικής του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης (<http://geophysics.geo.auth.gr/ss/>, Καρακώστας (προσωπική επικοινωνία)). Οι εστιακές συντεταγμένες των σεισμών έχουν επαναπροσδιορισθεί για την μετασεισμική ακολουθία της Κεφαλονιάς το 2014 από τους Karakostas et al. (2015) και για την μετασεισμική ακολουθία του κύριου σεισμού της Λευκάδας το 2015 από τους Papadimitriou et al. (2017).

Η κατανομή των μετασεισμών από το διπλό κύριο σεισμό της Κεφαλονιάς το 2014 αποκαλύπτει μια σεισμική ζώνη που παρουσιάζει κατεύθυνση σχεδόν

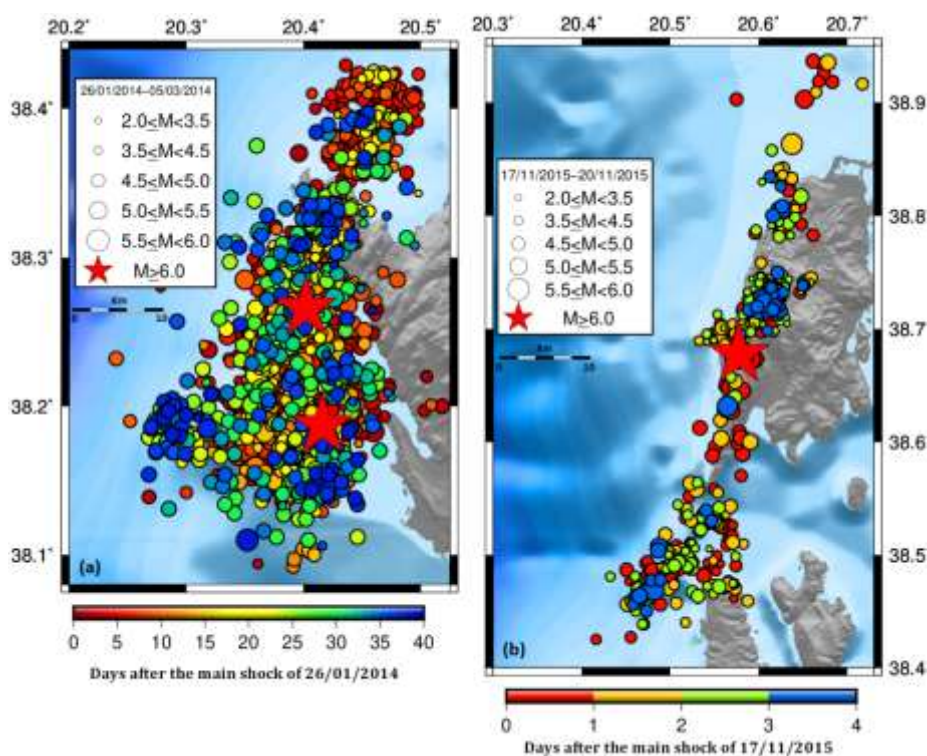
βορειοανατολική/νοτιοδυτική, παράλληλη με τον κύριο άξονα της χερσονήσου της Παλικής, καθώς και με την βόρεια παράκτια περιοχή του κόλπου του Μύρτου (Σχ. 2.37(a)). Για την Λευκάδα το 2015, η μετασεισμική ακολουθία καλύπτει μια στενή ζώνη κατά μήκος και κοντά στη δυτική ακτή της Λευκάδας και αναπτύσσεται σε δύο ακραίες περιοχές πολύ πιο μακριά από το επίκεντρο του κύριου σεισμού (Σχ. 2.37(b)).

Στην ανάλυσή μας, οι κόμβοι του δικτύου επανάληψης αντιστοιχούν στις παρατηρήσεις της χρονοσειράς, οι όποιες σχηματίζονται από τη σεισμική ροπή M_0 που απελευθερώνεται από κάθε μετασεισμό. Οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων δίδονται από το αυθαίρετο κατώφλι ε που εφαρμόζεται στον πίνακα επανάληψης $R_{i,j}(\varepsilon)$ (σχέση (2.3)) που μετρά την διαφορά μεγέθους μεταξύ των σεισμών, δηλαδή μεταξύ των κόμβων του δικτύου επανάληψης.

Πίνακας 2.2: Οι πληροφορίες των 23 κύριων σεισμών με μέγεθος $M \geq 6.0$ του χρονικού διαστήματος 1999-2018 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του. Η τελευταία στήλη του πίνακα παρουσιάζει το πλήθος των σεισμών μεγέθους $M \geq 3.0$ μεταξύ είτε των διαδοχικών κύριων σεισμών ή των κύριων σεισμών και των ισχυρότερων μετασεισμών αυτών. Οι μετασεισμικές ακολουθίες, οι οποίες εξελίσσονται από τους αντίστοιχους κύριους σεισμούς, που θεωρούνται (συνολικά τρεις (3)) παρουσιάζονται με έντονη γραφή.

Σεισμοί $M \geq 6.0$	Ημερομηνία	Γεωγραφικό μήκος	Γεωγραφικό Πλάτος	Μέγεθος	Πλήθος σεισμών ($M \geq 3.0$)
1	7/9/1999	38.06	23.53	6.0	35
2	26/7/2001	38.99	24.38	6.4	14
3	14/8/2003	38.74	20.53	6.3	40
4	17/3/2004	34.77	23.39	6.0	33
5	14/2/2008	36.57	21.86	6.8	25
6	14/2/2008	36.43	22.02	6.5	56
7	20/2/2008	36.36	21.90	6.2	229
8	8/6/2008	37.95	21.53	6.4	4
9	15/7/2008	35.83	28.03	6.4	27
10	1/7/2009	34.04	25.41	6.4	82
11	1/4/2011	35.64	26.56	6.1	19
12	10/6/2012	36.44	28.90	6.1	60
13	15/6/2013	34.46	25.01	6.3	61
14	16/6/2013	34.29	25.12	6.1	86
15	12/10/2013	35.47	23.28	6.7	96
16	26/1/2014	38.15	20.28	6.1	309
17	3/2/2014	38.26	20.32	6.0	1035
18	24/5/2014	40.28	25.37	6.9	18
19	16/4/2015	35.14	26.88	6.1	20
20	17/11/2015	38.67	20.53	6.5	408
21	12/06/2017	38.84	26.30	6.3	90
22	20/07/2017	36.95	27.45	6.6	36
23	25/10/2018	37.39	20.62	6.8	5

Έτσι, το αυθαίρετο κατώφλι ε δημιουργεί τον πίνακα γειτνίασης A όπου υπάρχει σύνδεση (μονάδα (1) στον πίνακα γειτνίασης A) στο σεισμικό δίκτυο επανάληψης όταν η διαφορά μεγέθους μεταξύ δύο κόμβων είναι μικρότερη από το αυθαίρετο κατώφλι ε . Το αυθαίρετο κατώφλι ε αποτυπώνει την διαφορά της σεισμικής ροπής M_0 , με βάση την διαφορά σε λογαριθμική κλίμακα, που σημειώνεται μεταξύ των μετασεισμών. Θεωρούνται τρία (3) διαφορετικά κατώφλια για το ε , συγκεκριμένα $\varepsilon = 2.0$, $\varepsilon = 3.0$ και $\varepsilon = 4.0$, προκειμένου να διερευνηθεί κατά πόσον τα αποτελέσματα επηρεάζονται από την επιλογή του. Δεν επιλέγουμε χαμηλότερο ή υψηλότερο κατώφλι ε διότι είτε όταν είναι χαμηλό τότε θα κατασκευαστούν απομονωμένα σεισμικά δίκτυα επανάληψης (δεν θα σχηματιστούν συνδέσεις) ή όταν είναι υψηλό τότε θα κατασκευαστούν πλήρη σεισμικά δίκτυα επανάληψης (θα σχηματιστούν όλες οι πιθανές συνδέσεις).



Σχ. 2.37: Η μετασεισμική ακολουθία από τον διπλό κύριο σεισμό, με μεγέθη $M = 6.1$ και $M = 6.0$, της Κεφαλονιάς το 2014 στο (α). Η μετασεισμική ακολουθία που προκάλεσε ο κύριος σεισμός της Λευκάδας το 2015, κατά τις πρώτες τέσσερις (4) ημέρες, με μέγεθος $M = 6.5$ στο (b).

Για την διερεύνηση αν οι τιμές των μέτρων δικτύου είναι στατιστικά σημαντικές απαιτείται ο σχηματισμός τυχαιοποιημένων δικτύων. Στην περίπτωση αυτή, τα τυχαιοποιημένα δίκτυα κατασκευάζονται από τις προσεγγίσεις τυχαιοποίησης RNnoddeg και RNpoisson. Οι προσεγγίσεις που τυχαιοποιούν την αρχική χρονοσειρά σε δίκτυα με απλές συνδέσεις, δηλαδή οι προσεγγίσεις RTSbinthr και RTSbindeg, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν καθώς δεν σχηματίζονται δίκτυα συσχέτισης αλλά δίκτυα επανάληψης. Επίσης, οι προσεγγίσεις τυχαιοποίησης RTSweight και RNavestr δεν χρησιμοποιούνται καθώς το δίκτυο επανάληψης δημιουργεί δίκτυο με απλές και όχι σταθμισμένες συνδέσεις όπως σχηματίζουν οι συγκεκριμένες προσεγγίσεις.

Η πληρότητα των σεισμικών καταλόγων έχει ελεγχθεί για κάθε υποσύνολο δεδομένων (Πίνακας 2.3 και Πίνακας 2.4 και Σχ. A1 ως Σχ. A11 του παραρτήματος) μέσω του αλγορίθμου των Wiemer και Wyss (2000). Λόγω της επικάλυψης που

προκαλεί η καταγραφή της κυματομορφής του κύριου σεισμού πολλοί σεισμοί με μικρό μέγεθος δεν καταγράφονται στις πρώτες ημέρες της μετασεισμικής ακολουθίας (Lippiello et al. 2016). Συνεπώς, στις πρώτες ημέρες των μετασεισμικών ακολουθιών το κατώφλι του μεγέθους M_{thr} είναι υψηλό και στη συνέχεια μειώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.3 και στον Πίνακα 2.4.

Η πρώτη περίπτωση που εξετάζεται αφορά την εξέλιξη της μετασεισμικής ακολουθίας του κύριου σεισμού της Κεφαλονιάς με $M = 6.1$ στις 26-01-2014. Κατά την πρώτη ημέρα της μετασεισμικής ακολουθίας οι δύο ισχυρότεροι μετασεισμοί με μεγέθη $M = 5.3$ και $M = 5.0$, αντίστοιχα, έγιναν στις πρώτες ώρες μετά τον κύριο σεισμό (Σχ. 2.38(a)).

Πίνακας 2.3: Το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε χρονικό διάστημα μεταξύ του πρώτου κύριου σεισμού της Κεφαλονιάς στις 26-01-2014 και του τρίτου ισχυρότερου μετασεισμού στις 05-03-2014.

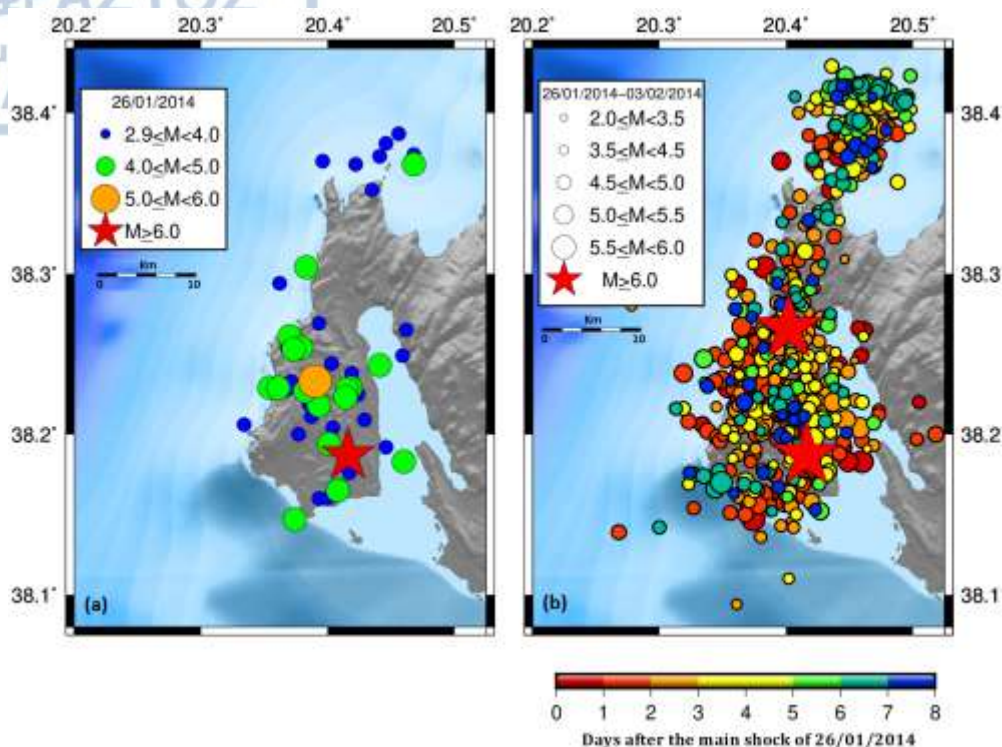
Χρονικό διάστημα	Κατώφλι μεγέθους (M_{thr})
26-01-2014/30-01-2014	2.9
31-01-2014/04-02-2014	2.9
05-02-2014/09-02-2014	2.4
10-02-2014/14-02-2014	2.2
15-02-2014/19-02-2014	2.2
20-02-2014/24-02-2014	2.2
25-02-2014/01-03-2014	2.0
02-03-2014/05-03-2014	2.0

Λόγω του μικρού χρονικού διαστήματος μεταξύ του κύριου σεισμού και του μετασεισμού το δίκτυο επανάληψης δεν μπορεί να κατασκευαστεί λόγω μη επαρκούς πλήθους δεδομένων (μετασεισμών). Έτσι, εξετάζεται η μετασεισμική ακολουθία μέχρι τη γένεση του δεύτερου κύριου σεισμού με μέγεθος $M = 6.0$ στις 03-02-2014.

Πίνακας 2.4: Το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε χρονικό διάστημα κατά την διάρκεια των τεσσάρων (4) πρώτων ημερών της μετασεισμικής ακολουθίας που εξελίχθηκε από τον κύριο σεισμό της Λευκάδας στις 17-11-2015.

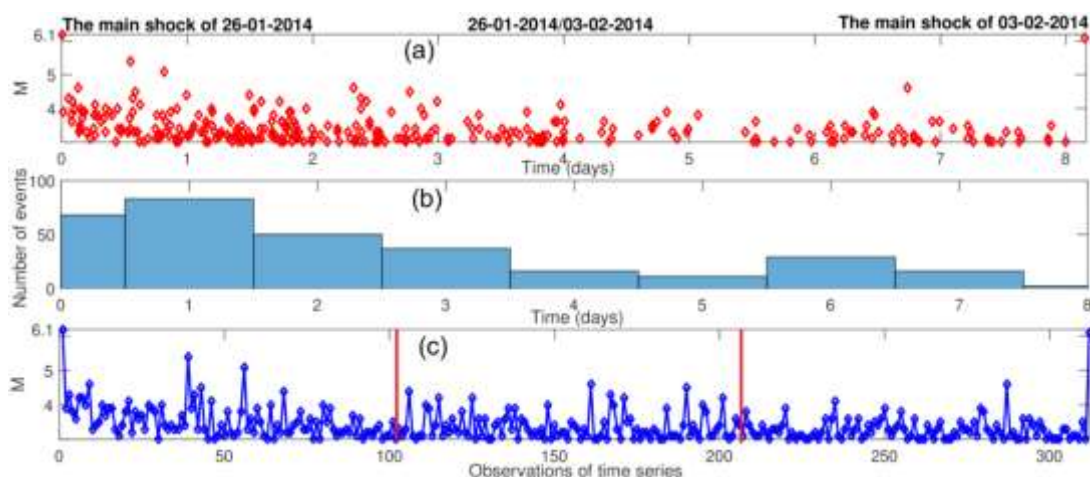
Χρονικό διάστημα	Κατώφλι μεγέθους (M_{thr})
17-11-2015/17-11-2015	2.4
18-11-2015/18-11-2015	2.4
19-11-2015/19-11-2015	2.0
20-11-2015/20-11-2015	2.0

Η μετασεισμική ακολουθία μεταξύ των δύο κύριων σεισμών περιλαμβάνει 309 μετασεισμούς (Σχ. 2.38(b)) και τα τρία (3) σεισμικά δίκτυα επανάληψης κατασκευάζονται με 103 κόμβους το καθένα, δηλαδή θεωρούνται τρία (3) χρονικά κυλιόμενα παράθυρα με ίσο αριθμό μετασεισμών. Για το χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο (2) κύριων σεισμών, το Σχ. 2.39(a) παρουσιάζει την γένεση των μετασεισμών με βάση τις Ιουλιανές ημέρες και το Σχ. 2.39(b) το ιστόγραμμα του ημερήσιου αριθμού των μετασεισμών. Τα μεγέθη που θεωρούνται για την κατασκευή των τριών (3) σεισμικών δικτύων επανάληψης παρουσιάζονται στο Σχ. 2.39(c). Παρατηρούμε στα Σχ. 2.39(a) και 2.39(b) ότι στις πρώτες ημέρες μετά τον πρώτο κύριο σεισμό σημειώνεται μια υψηλή παραγωγικότητα μετασεισμών που μειώνεται βαθμιαία μέχρι τον δεύτερο κύριο σεισμό.

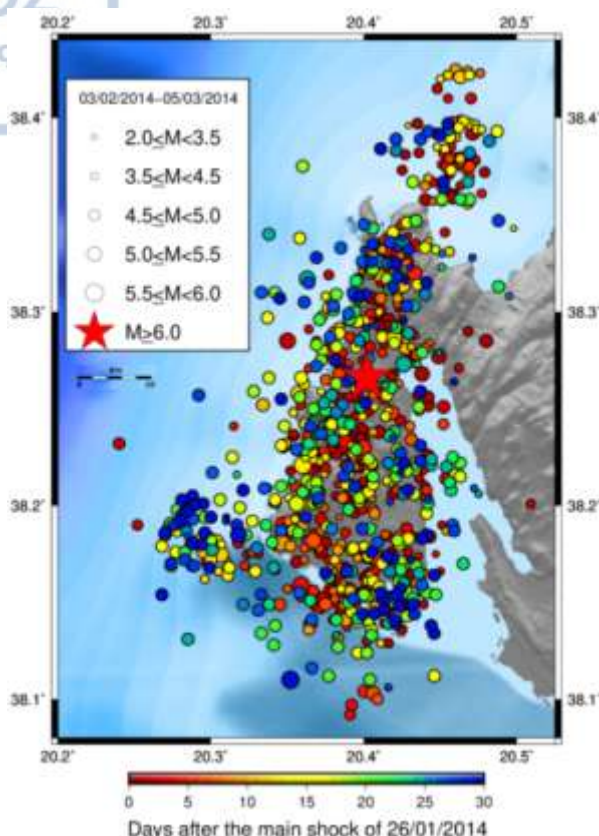


Σχ. 2.38: Η κατανομή των epicέντρων των μετασεισμών με μεγέθη $M_{thr} \geq 2.9$ μεταξύ του κύριου σεισμού με μέγεθος $M = 6.1$ που έγινε στις 26-01-2014 (κόκκινο αστέρι) και των δύο (2) ισχυρότερων μετασεισμών με μεγέθη $M = 5.3$ και $M = 5.0$, αντίστοιχα, που έγιναν την ίδια μέρα με τον κύριο σεισμό στο (a), ενώ η κατανομή των epicέντρων των μετασεισμών με μεγέθη $M \geq 2.9$ μεταξύ των δύο (2) κύριων σεισμών (κόκκινα αστέρια) με μεγέθη $M = 6.1$ και $M = 6.0$ στην Κεφαλονιά στις 26-01-2014 και 03-02-2014, αντίστοιχα, στο (b).

Η δεύτερη περίπτωση μελέτης που εξετάστηκε αφορά την μετασεισμική ακολουθία που εξελίχθηκε μεταξύ του δεύτερου κύριου σεισμού μεγέθους $M = 6.0$ και του ισχυρότερου μετασεισμού (από τις 03-02-2014 και έπειτα) μεγέθους $M = 4.8$ στις 05-03-2014 (Σχ. 2.40).

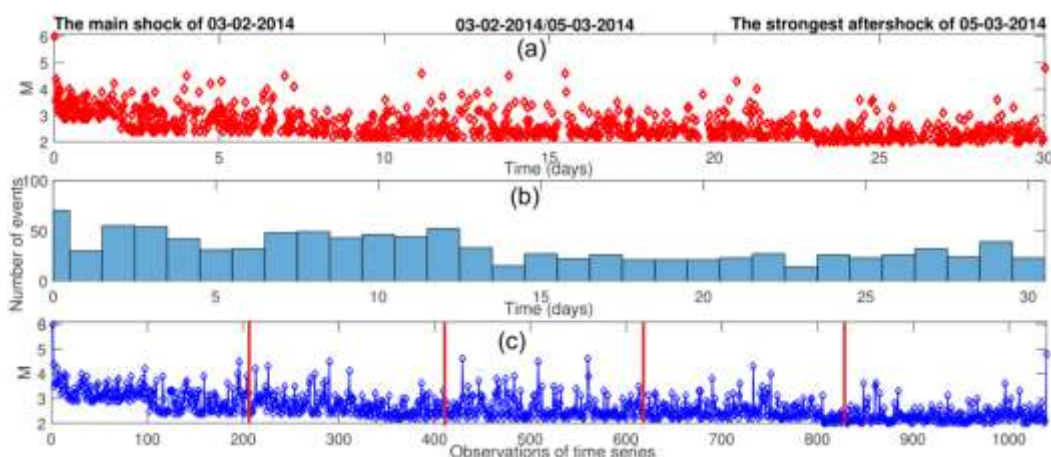


Σχ. 2.39: Οι μετασεισμοί με βάση τις Ιουλιανές ημέρες στο (a), το ιστόγραμμα του αριθμού των μετασεισμών στο (b) και οι τρεις (3) χρονοσειρές, που χωρίζονται με τις κάθετες κόκκινες γραμμές, με 103 παρατηρήσεις για κάθε μία στο (c) που θεωρούνται μεταξύ των δύο (2) κύριων σεισμών, δηλαδή μεταξύ του χρονικού διαστήματος 26-01-2014/03-02-2014.



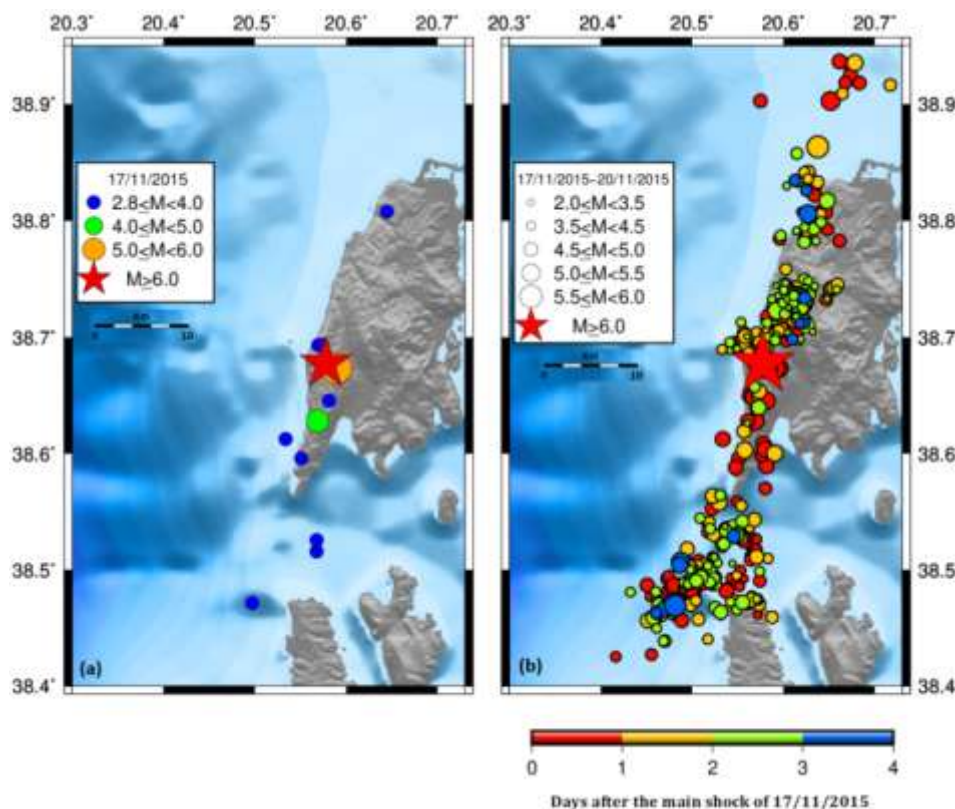
Σχ. 2.40: Η επικεντρική κατανομή των μετασεισμών με μεγέθη $M_{thr} \geq 2.0$ μεταξύ του δεύτερου κύριου σεισμού με $M = 6.0$ (κόκκινο αστέρι) στις 03-02-2014 και τον ισχυρότερο μετασεισμό (μετά τις 03-02-2014) στις 05-03-2014 με $M = 4.8$. Τα μεγέθη των μετασεισμών του σχήματος προέρχονται από τον Πίνακα 2.3 για την αντίστοιχη χρονική περίοδο.

Αυτό το χρονικό διάστημα περιλαμβάνει 1035 μετασεισμούς και τα πέντε (5) σεισμικά δίκτυα επανάληψης κατασκευάζονται με 207 κόμβους το καθένα. Το Σχ. 2.41(a) παρουσιάζει την χρονική, με βάση τις ημέρες από τον κύριο σεισμό, κατανομή των μετασεισμών και το Σχ. 2.41(b) τον ημερήσιο αριθμό μετασεισμών. Τα μεγέθη των σεισμών που θεωρούνται για την κατασκευή των πέντε (5) σεισμικών δικτύων επανάληψης παρουσιάζονται στο Σχ. 2.41(c).



Σχ. 2.41: Οι μετασεισμοί με βάση τις Ιουλιανές ημέρες στο (a), το ιστόγραμμα του αριθμού των μετασεισμών ανά ημέρα στο (b) και οι πέντε (5) χρονοσειρές, που χωρίζονται με τις κάθετες κόκκινες γραμμές, με 207 παρατηρήσεις για κάθε μία στο (c) μεταξύ της χρονικής περιόδου 03-02-2014/05-03-2014.

Η τρίτη περίπτωση μελέτης αφορά την μετασεισμική ακολουθία που εξελίχθηκε από τον κύριο σεισμό της Λευκάδας το 2015. Κατά την πρώτη ημέρα του κύριου σεισμού έγινε και ο ισχυρότερος μετασεισμός με μέγεθος $M = 5.1$ (Σχ. 2.42(a)). Δεδομένου ότι είναι ο 15^{ος} μετασεισμός τα σεισμικά δίκτυα επανάληψης δεν μπορούν να κατασκευαστούν λόγω μη επαρκούς πλήθους δεδομένων. Επομένως, η μετασεισμική ακολουθία εξετάστηκε μεταξύ των δύο ισχυρότερων μετασεισμών, που έγιναν στις 17-11-2015 και 20-11-2015 με μεγέθη $M = 5.1$ και $M = 4.9$, αντίστοιχα (Σχ. 2.42(b)).

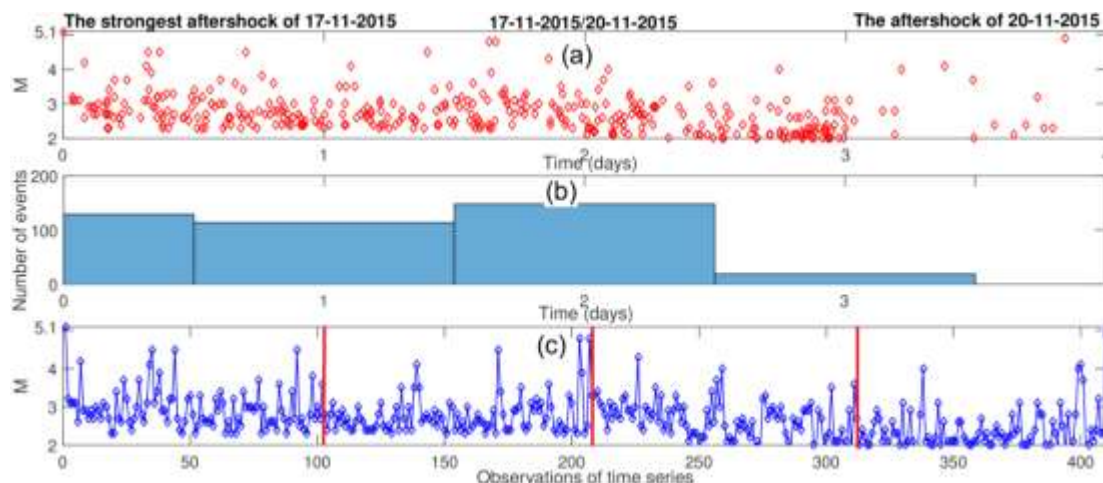


Σχ. 2.42: Η κατανομή των μετασεισμών με μεγέθη $M_{thr} \geq 2.8$ μεταξύ του κύριου σεισμού της Λευκάδας με μέγεθος $M = 6.5$ στις 17-11-20 (κόκκινο αστέρι) και του ισχυρότερου μετασεισμού με μέγεθος $M = 5.1$ που έγινε την ίδια μέρα του κύριου σεισμού στο (a). Η επικεντρική κατανομή των μετασεισμών με μεγέθη $M_{thr} \geq 2.0$ μεταξύ των δύο (2) ισχυρότερων μετασεισμών στις 17-11-2015 και 20-11-2015 με μεγέθη $M = 5.1$ και $M = 4.9$, αντίστοιχα, που προήλθαν από τον κύριο σεισμό με μέγεθος $M = 6.5$ της Λευκάδας στις 17-11-2015 στο (b). Τα μεγέθη των μετασεισμών του σχήματος προέρχονται από τον Πίνακα 2.4 για την αντίστοιχη χρονική περίοδο.

Το σύνολο δεδομένων περιλαμβάνει 408 μετασεισμούς (Σχ. 2.42(b)) και τα σεισμικά δίκτυα επανάληψης κατασκευάζονται με 102 κόμβους για κάθε ένα από αυτά. Το Σχ. 2.43(a) παρουσιάζει την χρονική κατανομή των μετασεισμών και το Σχ. 2.43(b) τον ημερήσιο αριθμό μετασεισμών. Τα μεγέθη των σεισμών που θεωρούνται για την κατασκευή των τεσσάρων (4) σεισμικών δικτύων επανάληψης παρουσιάζονται στο Σχ. 2.43(c).

Η παρακολούθηση των τιμών των οχτώ (8) μέτρων δικτύου πραγματοποιείται σε κυλιόμενα χρονικά παράθυρα καθένα από τα οποία περιλαμβάνει τον ίδιο αριθμό μετασεισμών. Σε σχέση με την προηγούμενη εφαρμογή, στην ενότητα 2.6.1, εξαιρείται το μέτρο δικτύου του βαθμού της κεντρικότητας καθώς οι προσεγγίσεις τυχαιοποίησης που χρησιμοποιούνται, δηλαδή οι προσεγγίσεις RNnoddeg και RNpoisson, σχηματίζουν τυχαιοποιημένα δίκτυα που παρουσιάζουν είτε ακριβώς τον

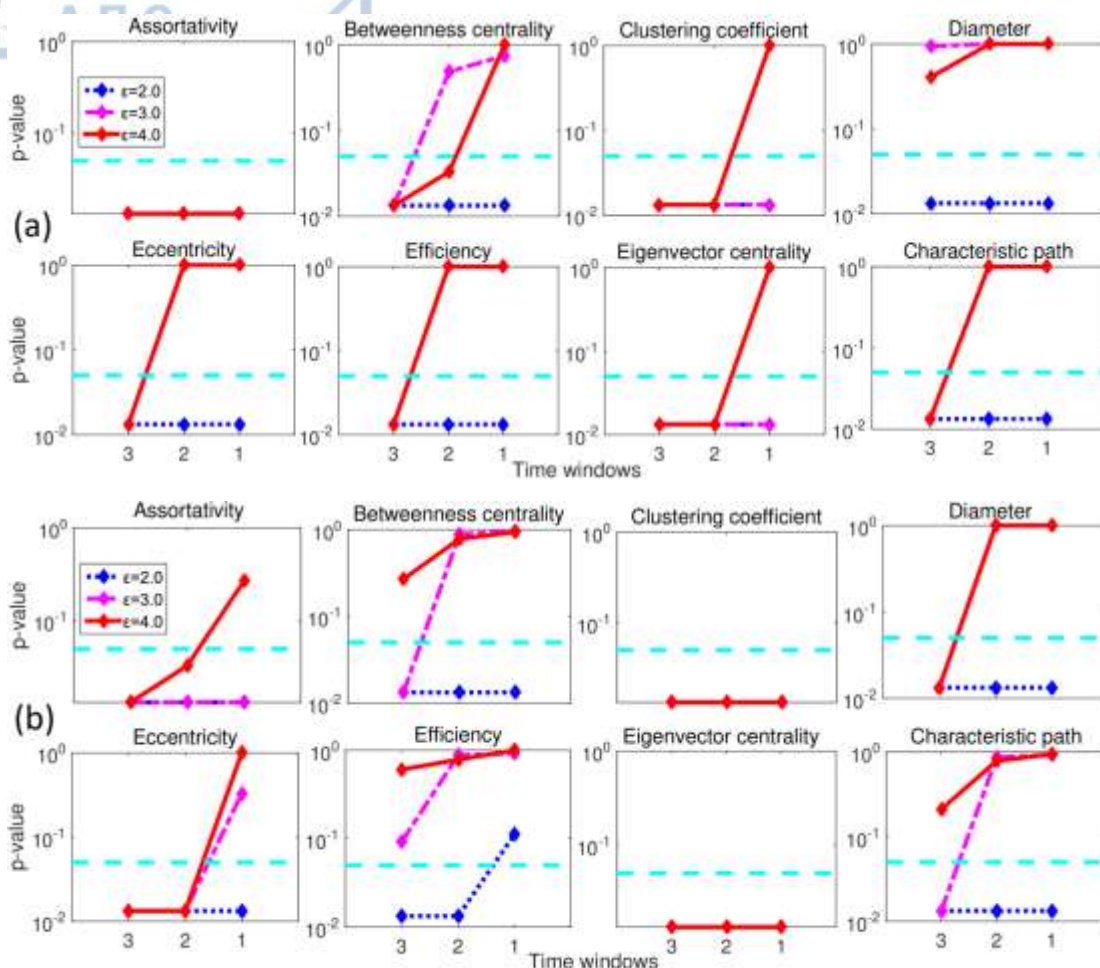
ίδιο αριθμό συνδέσεων με το αρχικό, προσέγγιση RNnoddeg, ή παρόμοιο, προσέγγιση RNpoisson. Οι τιμές των μέτρων δικτύου που λαμβάνονται από τα αρχικά δίκτυα επανάληψης συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από τα $B = 100$ τυχαιοποιημένα δίκτυα, που κατασκευάζονται από τις 2 προσεγγίσεις τυχαιοποίησης, συγκεκριμένα τις RNnoddeg και RNpoisson. Η στατιστική σημαντικότητα των τιμών των μέτρων δικτύου ελέγχεται με τη σχέση (2.36) που πραγματοποιεί τον στατιστικό έλεγχο και υπολογίζει την p -τιμή (p -value). Η μηδενική υπόθεση H_0 υποθέτει ότι οι τιμές των μέτρων δικτύου που παρουσιάζει το αρχικό δίκτυο επανάληψης δεν διαφέρουν από τις αντίστοιχες που προκύπτουν από τα τυχαιοποιημένα δίκτυα, δηλαδή πρέπει να ισχύει $p - value > 0.05$ στην σχέση (2.36). Αντίθετα, για την ύπαρξη της στατιστικής σημαντικότητας των τιμών των μέτρων δικτύου πρέπει να προκύπτει απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης H_0 , δηλαδή πρέπει να ισχύει $p - value < 0.05$ στην σχέση (2.36). Υπενθυμίζουμε ότι ο κύριος στόχος της μελέτης είναι να προσδιοριστεί αν σε κάποιο χρονικό διάστημα οι τιμές των μέτρων δικτύου παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα, κυρίως πριν από την γένεση των κύριων σεισμών ή των μετασεισμών αυτών.



Σχ. 2.43: Οι μετασεισμοί με βάση τις Ιουλιανές ημέρες στο (a), το ιστόγραμμα του αριθμού των μετασεισμών ανά ημέρα στο (b) και οι τέσσερις (4) χρονοσειρές, που χωρίζονται με κάθετες κόκκινες γραμμές, με 102 παρατηρήσεις για κάθε μία στο (c) μεταξύ της χρονικής περιόδου 17-11-2015/20-11-2015.

Το Σχ. 2.44 παρουσιάζει για την πρώτη περίπτωση, και το χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο (2) κύριων σεισμών του 2014 της Κεφαλονιάς, την αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης H_0 ή μη για κάθε μέτρο δικτύου και τιμή του κατώφλιου ε . Η μηδενική υπόθεση H_0 απορρίπτεται όταν ισχύει $p - value < 0.05$, δηλαδή οι παρατηρήσεις βρίσκονται κάτω από την οριζόντια κυανή γραμμή στο Σχ. 2.44 και έτσι αποκαλύπτεται η στατιστική σημαντικότητα της τιμής του μέτρου δικτύου. Παρουσιάζονται πολλές απορρίψεις της μηδενικής υπόθεσης H_0 (δηλαδή, $p - value < 0.05$), για κάθε ένα από τα οκτώ (8) μέτρα δικτύου στο πρώτο χρονικό παράθυρο (τρίτο (3^ο) χρονικό παράθυρο στο Σχ. 2.44) αμέσως μετά τον κύριο σεισμό στις 26-01-2014, ανεξάρτητα από το αυθαίρετο κατώφλι ε και την προσέγγιση τυχαιοποίησης που θεωρείται. Εξάιρεση αποτελεί η περίπτωση που το κατώφλι ε θεωρείται ως $\varepsilon = 4.0$ και η προσέγγιση τυχαιοποίησης είναι η RNpoisson για τα μέτρα δικτύου της κεντρικής ενδιαμεσότητας, της αποδοτικότητας και του χαρακτηριστικού μήκους διαδρομής καθώς οι τιμές τους δεν είναι στατιστικά σημαντικές (Σχ. 2.44(b)). Για το δεύτερο και το τρίτο χρονικό παράθυρο (δεύτερο (2^ο) και πρώτο (1^ο) χρονικό παράθυρο στο Σχ. 2.44) οι τιμές των μέτρων δικτύων δεν

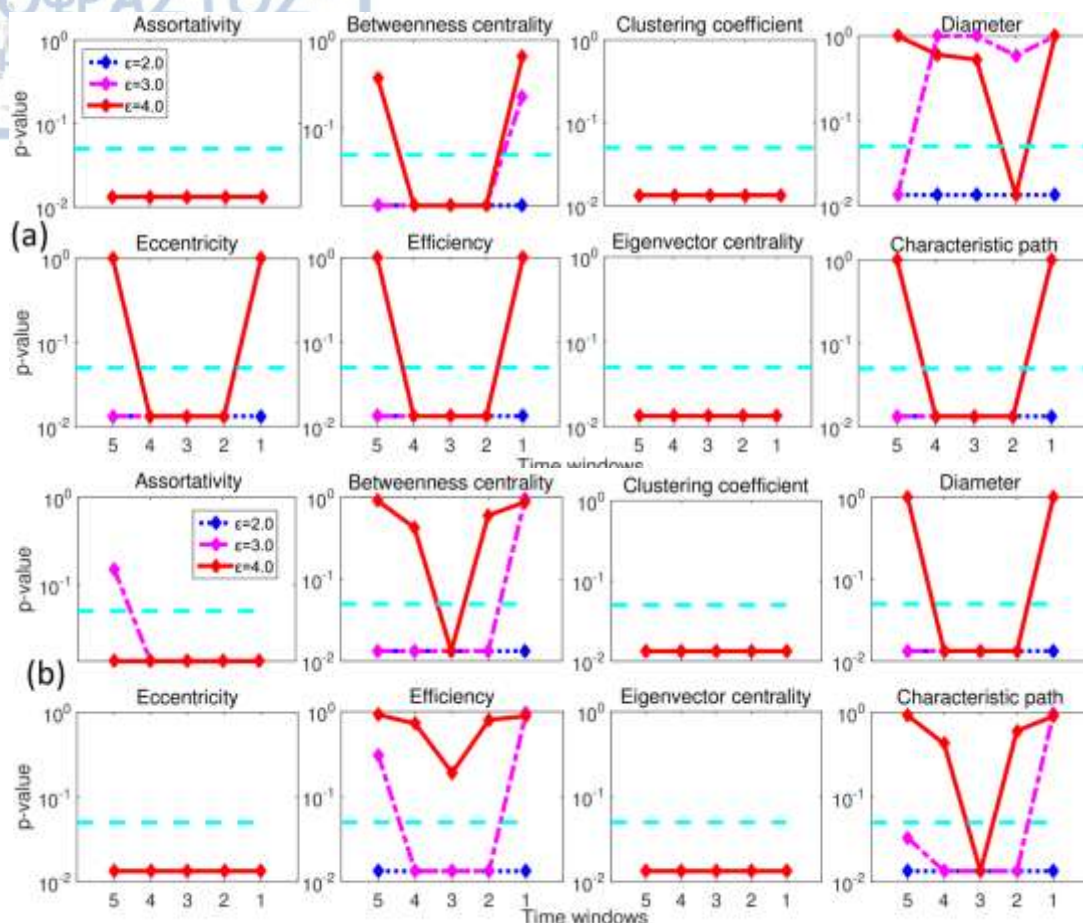
παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα ειδικά όταν το αυθαίρετο κατώφλι είναι $\varepsilon = 4.0$ και για τις δύο προσεγγίσεις τυχαιοποίησης.



Σχ. 2.44: Η στατιστική σημαντικότητα των τιμών κάθε μέτρου δικτύου για το χρονικό διάστημα 26-01-2014/03-02-2014 με βάση τις διαφορετικές τιμές για το κατώφλι ε , το οποίο θεωρείται, και για κάθε χρονικό παράθυρο όταν η προσέγγιση τυχαιοποίησης στο (a) είναι η RNnoddeg και στο (b) είναι η RNpoisson, παρουσιάζεται. Η p-τιμή (p-value) παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Το πρώτο (1^ο) χρονικό παράθυρο δηλώνει το τελευταίο χρονικό διάστημα πριν από τον δεύτερο κύριο σεισμό της 03/02/2014 ενώ το τρίτο (3^ο) χρονικό παράθυρο δηλώνει το πρώτο χρονικό διάστημα μετά τον πρώτο κύριο σεισμό της 26-01-2014.

Επομένως, διαπιστώνεται ότι οι τιμές των μέτρων δικτύου δεν παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα πριν τον επερχόμενο κύριο σεισμό της 03-02-2014 επειδή προκύπτει αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης H_0 .

Για τη δεύτερη περίπτωση, που αφορά το διάστημα της μετασεισμικής ακολουθίας μεταξύ του δεύτερου κύριου σεισμού στις 03-02-2014, με $M = 6.0$, και του ισχυρότερου μετασεισμού στις 05-03-2014, με $M = 4.8$, παρουσιάζονται σχεδόν μόνο απορρίψεις της μηδενικής υπόθεσης H_0 , δηλαδή υπάρχει στατιστική σημαντικότητα των τιμών των μέτρων δικτύου, μεταξύ του δεύτερου και τέταρτου χρονικού παραθύρου (τέταρτο (4^ο) και δεύτερο (2^ο) χρονικό παράθυρο στο Σχ. 2.45) ανεξάρτητα από το αυθαίρετο κατώφλι ε , το μέτρο του δικτύου και την προσέγγιση τυχαιοποίησης που θεωρείται (Σχ. 2.45).

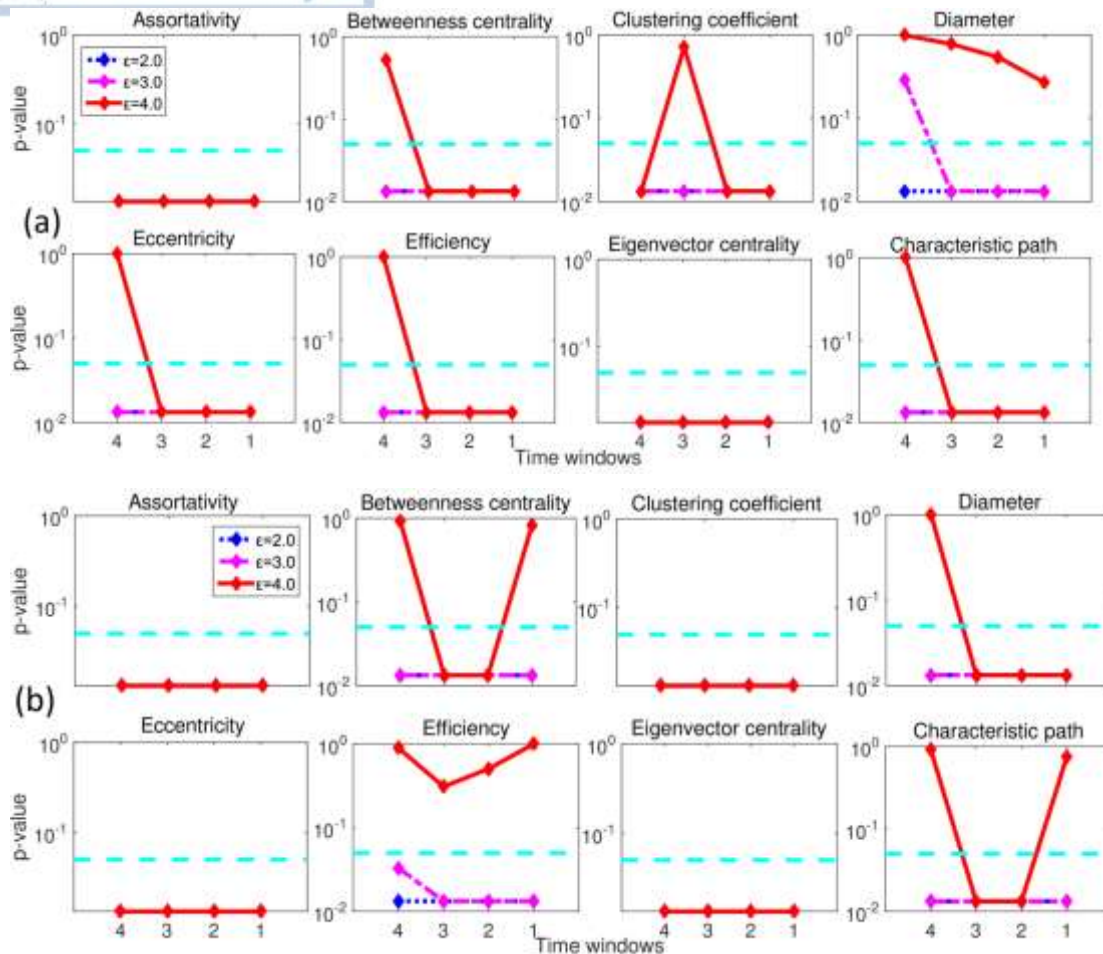


Σχ. 2.45: Όμοια με το Σχ. 2.44 αλλά για το χρονικό διάστημα 03-02-2014/05-03-2014. Το πρώτο (1^ο) χρονικό παράθυρο δηλώνει το τελευταίο χρονικό διάστημα πριν από τον ισχυρότερο μετασεισμό στις 05-03-2014 ενώ το πέμπτο (5^ο) χρονικό παράθυρο δηλώνει το πρώτο χρονικό διάστημα μετά τον κύριο σεισμό στις 03-02-2014.

Η μη στατιστική σημαντικότητα των τιμών των μέτρων δικτύου παρουσιάζεται στο πρώτο χρονικό παράθυρο, δηλαδή αμέσως μετά τον κύριο σεισμό της 03-02-2014, και στο τελευταίο χρονικό διάστημα, πριν τον ισχυρό μετασεισμό της 05-03-2014 (πέμπτο (5^ο) και πρώτο (1^ο) χρονικό παράθυρο στο Σχ. 2.45), όταν το αυθαίρετο κατώφλι είναι $\epsilon = 4.0$, τα μέτρα δικτύου είναι της κεντρικής ενδιαμεσότητας, της αποδοτικότητας, της εκκεντρότητας και του χαρακτηριστικού μήκους διαδρομής και η προσέγγιση τυχαιοποίησης θεωρείται η RN_{noddeg} (Σχ. 2.45(a)), όπου παρουσιάζεται η αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης H_0 . Οι τιμές των μέτρων δικτύου δεν παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα με την προσέγγιση τυχαιοποίησης $RN_{poisson}$ (Σχ. 2.45(b)) στο πρώτο και το τελευταίο χρονικό παράθυρο όταν το αυθαίρετο κατώφλι θεωρείται ως $\epsilon = 3.0$ για το μέτρο δικτύου της αποδοτικότητας και όταν θεωρείται ως $\epsilon = 4.0$ για το μέτρο δικτύου της διαμέτρου.

Για την τρίτη περίπτωση μελέτης, που αφορά την μετασεισμική ακολουθία του κύριου σεισμού της Λευκάδας στις 17-11-2015, παρουσιάζονται αρκετές απορρίψεις της μηδενικής υπόθεσης H_0 ($p - value < 0.05$) (Σχ. 2.46), στο δεύτερο και τρίτο χρονικό παράθυρο ανεξάρτητα από το κατώφλι ϵ , τα μέτρα δικτύου και τις προσεγγίσεις τυχαιοποίησης (Σχ. 2.46). Η μη-στατιστική σημαντικότητα ($p - value > 0.05$) των τιμών των μέτρων δικτύου παρουσιάζεται στο πρώτο και τελευταίο χρονικό παράθυρο (τέταρτο (4^ο) και πρώτο (1^ο) χρονικό παράθυρο στο Σχ. 2.46), όταν το αυθαίρετο κατώφλι ϵ θεωρείται ως $\epsilon = 4.0$ και θεωρούνται τα μέτρα

δικτύου της κεντρικής ενδιαμεσότητας και του χαρακτηριστικού μήκους διαδρομής όταν η προσέγγιση τυχαιοποίησης που ακολουθείται είναι η RNpoisson (Σχ. 2.46(b)) δεδομένου ότι η μηδενική υπόθεση H_0 είναι αποδεκτή.

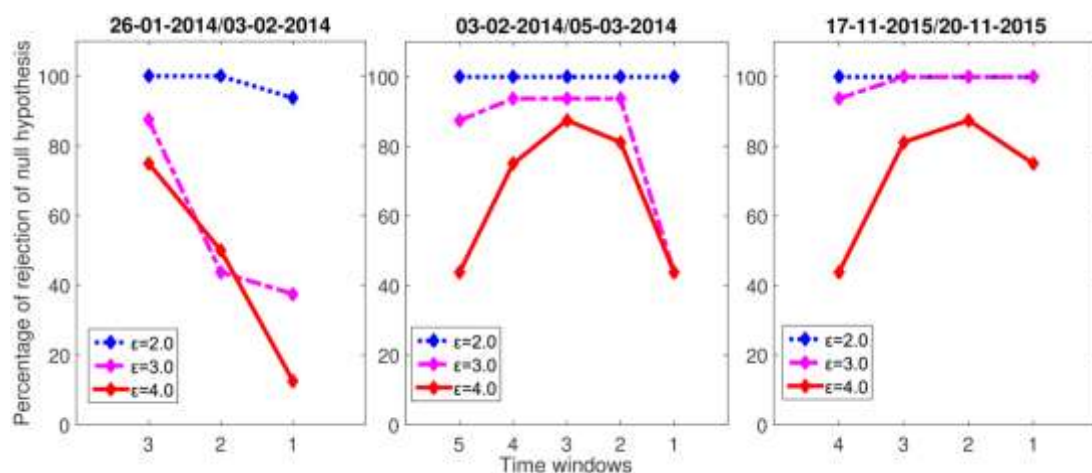


Σχ. 2.46: Όμοια με το Σχ. 2.44 αλλά για το χρονικό διάστημα 17-11-2015/20-11-2015. Το πρώτο (1^ο) χρονικό παράθυρο δηλώνει το τελευταίο διάστημα πριν από τον δεύτερο μεγαλύτερο μετασεισμό στις 20-11-2015, ενώ το τέταρτο (4^ο) χρονικό παράθυρο δηλώνει το πρώτο χρονικό διάστημα πριν από τον ισχυρότερο μετασεισμό στις 17-11-2015 μετά τον κύριο σεισμό της 17-11-2015.

Όταν η προσέγγιση τυχαιοποίησης είναι η RNnoddeg και αυθαίρετο κατώφλι ϵ θεωρείται ως: $\epsilon = 4.0$ για τα μέτρα δικτύου της κεντρικότητας της ενδιαμεσότητας, της αποδοτικότητας, της εκκεντρότητας και του χαρακτηριστικού μήκους διαδρομής, η μη στατιστική σημαντικότητα των τιμών των παραπάνω μέτρων δικτύου απουσιάζει (δηλαδή, $p - value > 0.05$) στο πρώτο χρονικό παράθυρο (τέταρτο (4^ο) χρονικό παράθυρο στο Σχ. 2.46) αμέσως μετά τον ισχυρότερο μετασεισμό που έγινε στις 17-11-2015 (Σχ. 2.46(a)).

Στο Σχ. 2.47 παρουσιάζονται τα ποσοστά απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 που υπολογίζονται από τον μέσο όρο των αντίστοιχων απορρίψεων της μηδενικής υπόθεσης H_0 που προέρχονται από τις δύο (2) προσεγγίσεις τυχαιοποίησης και τα οχτώ (8) μέτρα δικτύου στο αντίστοιχο χρονικό παράθυρο για κάθε τιμή του ϵ και για κάθε μία από τις τρεις (3) εξεταζόμενες περιπτώσεις (Σχ. 2.47). Το Σχ. 2.47 αποκαλύπτει τα χρονικά διαστήματα (παράθυρα) στα οποία τα σεισμικά δίκτυα επανάληψης εμφανίζουν την στατιστική σημαντικότητα ή μη των τιμών των μέτρων δικτύου πιο συστηματικά. Το κύριο χαρακτηριστικό στο Σχ. 2.47 είναι ότι όταν το

αυθαίρετο κατώφλι είναι $\varepsilon = 4.0$, ειδικά για τις δύο τελευταίες περιπτώσεις (στο μέσο και στα δεξιά στο Σχ. 2.47), η μη στατιστική σημαντικότητα των τιμών των μέτρων δικτύου αναγνωρίζεται αμέσως μετά τη γένεση των κύριων σεισμών και λίγο πριν τη γένεση των ισχυρών μετασεισμών, καθώς τα ποσοστά απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 είναι χαμηλότερα στο πρώτο και το τελευταίο χρονικό παράθυρο για κάθε περίπτωση. Αυτό το εύρημα μπορεί να θεωρηθεί ενθαρρυντικό για την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας καθώς η ξεχωριστή δομή (απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης H_0) ακολουθείται από την τυχαία δομή (αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης H_0) των σεισμικών δικτύων επανάληψης πριν από την εμφάνιση ισχυρών μετασεισμών. Για τις υπόλοιπες δύο (2) τιμές του αυθαίρετου κατωφλίου ε , δηλαδή $\varepsilon = 2.0$ και $\varepsilon = 3.0$, η στατιστική σημαντικότητα των τιμών των μέτρων δικτύου δεν παρουσιάζει αξιοσημείωτη εξέλιξη σύμφωνα με τα ποσοστά απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 που φαίνονται στο Σχ. 2.47.



Σχ. 2.47: Το ποσοστό απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 , για παρόμοιες τιμές (μη στατιστικά σημαντικές) των μέτρων δικτύου του αρχικού δικτύου επανάληψης και των τυχαιοποιημένων δικτύων, σε σχέση με το κατώφλι ε για το χρονικό διάστημα 26-01-2014/03-02-2014, 03-02-2014/05-03-2014 και 17-11-2015/20-11-2015, αντίστοιχα, με βάση τον μέσο όρο των απορρίψεων της μηδενικής υπόθεσης H_0 και για τα οχτώ (8) μέτρα δικτύου και τις δύο (2) προσεγγίσεις τυχαιοποίησης.

Κεφάλαιο 3^ο-Μελέτη των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων δικτύου

3.1. Εισαγωγή

Ο σκοπός του τρίτου (3^{ου}) κεφαλαίου είναι η διερεύνηση των τριών (3) μη-τετριμμένων ιδιοτήτων του δικτύου, δηλαδή του τυχαίου δικτύου, του μικρόκοσμου και της ελεύθερης κλίμακας, ώστε να αποκαλύψει αν υπάρχει κάποια δομή στο σεισμικό δίκτυο, το οποίο κατασκευάζεται μέσω χρονοσειράς που αποτυπώνει την σεισμικότητα του Ελληνικού χώρου και των γύρω περιοχών του. Η παρακολούθηση της εξέλιξης της δομής του σεισμικού δικτύου μεταξύ των κύριων σεισμών και μεταξύ των κύριων σεισμών και μετασεισμών αυτών κατά την περίοδο 1999-2018, γίνεται με στόχο την βραχυπρόθεσμη εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας με βάση την αναγνώριση πιθανών χρονικών προτύπων. Επιπλέον, η συνεισφορά του τρίτου (3^{ου}) κεφαλαίου έγκειται στο γεγονός ότι καταδεικνύει, μέσω προσομοιώσεων που πραγματοποιούνται, ποιες προσεγγίσεις που κατασκευάζουν τυχαιοποιημένο δίκτυο είναι κατάλληλες για την εξέταση των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων που μπορεί να παρουσιάζει ένα σεισμικό δίκτυο συσχέτισης. Επίσης, αναδεικνύει πως επηρεάζονται τα αποτελέσματα σχετικά με την διερεύνηση των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων που μπορεί να παρουσιάζει ένα σεισμικό δίκτυο, ανάλογα με την μεθοδολογία που ακολουθείται για την κατασκευή του.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται, πρώτα, οι μη-τετριμμένες ιδιότητες που μπορεί να παρουσιάζει το δίκτυο. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται ο στατιστικός έλεγχος που είναι απαραίτητος για την διερεύνηση των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων καθώς και τα στατιστικά σφάλματα που μπορεί να προκύπτουν από αυτόν. Παρουσιάζονται επίσης οι προσομοιώσεις για την εξέταση της καταλληλότητας κάθε προσέγγισης, που κατασκευάζει τυχαιοποιημένο δίκτυο, με σκοπό την διερεύνηση των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων του δικτύου. Τέλος, παρουσιάζονται οι εφαρμογές μαζί με τα αποτελέσματα για την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας.

3.2 Μη-τετριμμένες ιδιότητες του δικτύου

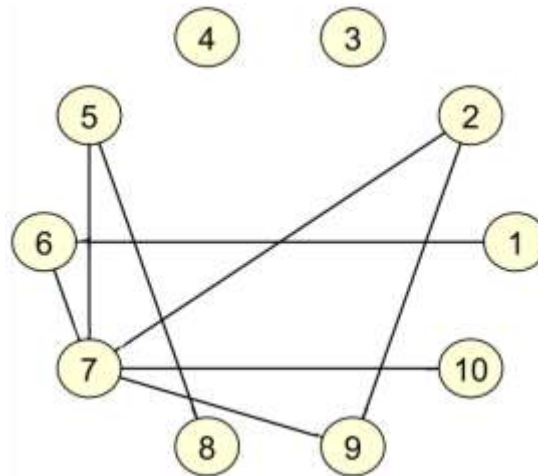
Με τον όρο μη-τετριμμένες ιδιότητες αναφερόμαστε στην ύπαρξη συγκεκριμένης δομής που διέπει το δίκτυο. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται παρακάτω τρεις (3) δομές, του τυχαίου δικτύου, του μικρόκοσμου και της ελεύθερης κλίμακας, που μπορεί να παρουσιάσει το δίκτυο.

3.2.1 Ιδιότητα του τυχαίου δικτύου (Random network)

Το τυχαίο δίκτυο (random network) εισήχθη στην θεωρία των γράφων (δικτύων) για να περιγράψει το δίκτυο που δεν παρουσιάζει κάποια συγκεκριμένη κατανομή σχετικά με τον βαθμό της κεντρικότητας των κόμβων του. Το τυχαίο δίκτυο μελετήθηκε για πρώτη φορά από τους Erdos και Reyni (1959) (Σχ. 3.1). Η ονομασία του βασίζεται στη μεθοδολογία της κατασκευής του. Σύμφωνα με αυτήν, οι συνδέσεις του τυχαίου δικτύου, με K κόμβους, για κάθε ζεύγος των κόμβων του προκύπτουν τυχαία με προκαθορισμένη πιθανότητα p , η οποία αντιστοιχεί σε $K(K-1)/2$ συνδέσεις που παρουσιάζει το τυχαίο δίκτυο και η κατανομή του βαθμού της κεντρικότητας των κόμβων του είναι Poisson. Ως εκ τούτου, η πλειονότητα των κόμβων του τυχαίου δικτύου έχουν βαθμό κοντά στον μέσο βαθμό ολόκληρου του δικτύου, και δεν υπάρχουν κόμβοι με μικρό ή μεγάλο αριθμό συνδέσεων.

Το τυχαίο δίκτυο χαρακτηρίζεται από χαμηλή τιμή του μέτρου δικτύου του συντελεστή συσταδοποίησης, γεγονός που δηλώνει χαμηλή τάση στον σχηματισμό

συνδεδεμένων κόμβων, ανά τριάδες, και από χαμηλή τιμή του μέτρου δικτύου του χαρακτηριστικού μήκους διαδρομής, υποδεικνύοντας ότι δύο κόμβοι του μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με μικρό αριθμό βημάτων (συνδέσεων) (Van den Heuvel et al. 2008).

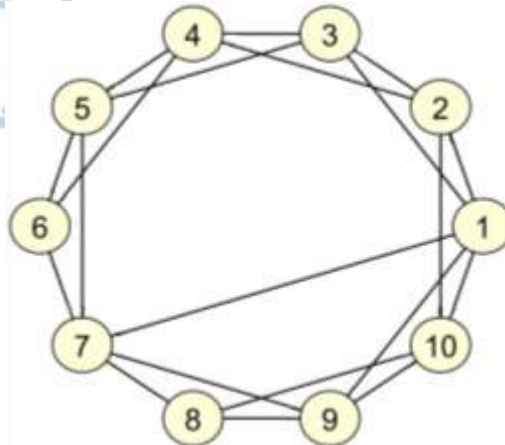


Σχ. 3.1: Τυχαίο δίκτυο (Random network) κατασκευασμένο με την προσέγγιση των Erdős και Rényi (1959).

3.2.2 Ιδιότητα του μικρόκοσμου (Small-world)

Η μη-τετριμμένη ιδιότητα του μικρόκοσμου (Small-world), που μπορεί να παρουσιάσει το δίκτυο, προτάθηκε από τους Watts και Strogatz (1998) (Σχ. 3.2). Όταν ένα δίκτυο παρουσιάζει την ιδιότητα του μικρόκοσμου σημαίνει ότι οι περισσότεροι κόμβοι του δεν είναι γείτονες μεταξύ τους αλλά πολλοί από αυτούς επικοινωνούν (συνδέονται) μεταξύ τους με ένα μικρό αριθμό βημάτων (συνδέσεων). Έτσι, η απόσταση μεταξύ δύο τυχαίων επιλεγμένων κόμβων αυξάνεται αναλογικά με τον αριθμό των κόμβων. Αυτό σημαίνει, ότι παρά το μεγάλο μέγεθος που μπορεί να έχει ένα δίκτυο υπάρχει σχετικά μικρή απόσταση μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους κόμβων μέσα στο δίκτυο. Η ιδιότητα του μικρόκοσμου έχει συσχετιστεί με ορισμένες κατάλληλες ιδιότητες που μπορεί να έχει ένα δίκτυο όπως για παράδειγμα η αποτελεσματικότητα της μεταφοράς πληροφοριών μέσα στο δίκτυο και αυτός είναι ένας από τους λόγους που γίνονται πολλές αναφορές για την δομή της ιδιότητας του μικρόκοσμου στα πραγματικά δίκτυα. Υπάρχουν δίκτυα που παρουσιάζουν την ιδιότητα του μικρόκοσμου στον πραγματικό κόσμο όπως είναι αυτά των οδικών χαρτών, της ηλεκτρικής ενέργειας, της κοινωνικής δικτύωσης και των τηλεφωνικών κλήσεων. Η ιδιότητα του μικρόκοσμου μπορεί να παρατηρηθεί και στην φύση καθώς όλες οι χημικές ουσίες μέσα σε ένα ζωντανό κύτταρο απέχουν κατά μέσο όρο τρεις αντιδράσεις μακριά η μία από την άλλη (Porekar 2002).

Οι Watts και Strogatz (1998) πρότειναν τον όρο του μικρόκοσμου για δίκτυα που έχουν παρόμοια τιμή για το μέτρο δικτύου του χαρακτηριστικού μήκους διαδρομής αλλά πιο υψηλή τιμή για τον συντελεστή συσταδοποίησης σε σύγκριση με τις τιμές που προκύπτουν, αντίστοιχα, σε ένα τυχαίο δίκτυο. Επομένως, για να εξακριβωθεί αν ένα δίκτυο έχει την ιδιότητα του μικρόκοσμου το συγκρίνουμε με ένα τυχαίο δίκτυο που μπορεί να κατασκευαστεί με μία οποιαδήποτε μέθοδο τυχαίωσης του δικτύου. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή το τυχαίο δίκτυο κατασκευάζεται με τις έξι (6) προσεγγίσεις που περιγράφηκαν στο δεύτερο (2^ο) κεφάλαιο στην ενότητα 2.4 της διατριβής.



Σχ. 3.2: Δίκτυο με την ιδιότητα του μικρόκοσμου (Small-world) στην δομή του (σύμφωνα με Watts και Strogatz 1998).

Συνοψίζοντας τα παραπάνω καταλήγουμε στην παραδοχή ότι για να έχει ένα δίκτυο την ιδιότητα του μικρόκοσμου πρέπει να επαληθεύονται τα εξής: $\lambda = \frac{L}{L_{rand}} \approx 1$ και $\gamma = \frac{C}{C_{rand}} \gg 1$, όπου L και C είναι το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής και ο συντελεστής συσταδοποίησης, αντίστοιχα, και L_{rand} και C_{rand} είναι το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής και ο συντελεστής συσταδοποίησης, αντίστοιχα, για το τυχαίο δίκτυο. Υπολογιστικά, οι τιμές των μέτρων δικτύου C_{rand} και L_{rand} προκύπτουν από τον μέσο όρο των τιμών ενός συνόλου B τυχαιοποιημένων δικτύων. Η ιδιότητα του μικρόκοσμου ποσοτικοποιείται από τον δείκτη S που αναφέρεται ως “Small-Worldness index” (Watts και Strogatz 1998, Baek et al. 2011) και ορίζεται για δίκτυο με μη-σταθμισμένες και σταθμισμένες συνδέσεις, αντίστοιχα, από τις σχέσεις:

$$S = \frac{\gamma}{\lambda} = \frac{C/C_{rand}}{L/L_{rand}} \quad (3.1) \text{ και } S^W = \frac{\gamma}{\lambda} = \frac{C^w/C_{rand}^w}{L^w/L_{rand}^w} \quad (3.2)$$

Όταν η τιμή του δείκτη S ή S^W (Small-Worldness index) ξεπερνά κατά πολύ την μονάδα (1) τότε το δίκτυο παρουσιάζει την ιδιότητα του μικρόκοσμου.

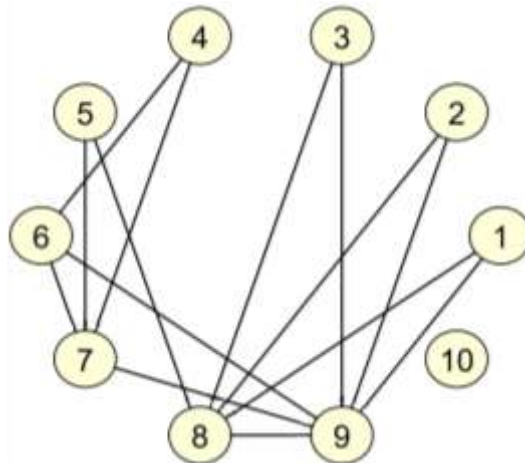
Επειδή, η τιμή του δείκτη του μικρόκοσμου (S ή S^W) που παρουσιάζει ένα δίκτυο εξαρτάται από την επιλογή της προσέγγισης με την οποία θα κατασκευαστεί το τυχαίο δίκτυο, στην ενότητα 3.5 της διατριβής θα εξεταστεί ποιες από τις προσεγγίσεις τυχαιοποίησης είναι κατάλληλες για την διερεύνηση της ιδιότητας του μικρόκοσμου.

3.2.3 Ιδιότητα της ελεύθερης κλίμακας (Scale-free)

Η μη-τετριμμένη ιδιότητα της ελεύθερης κλίμακας (Scale-free), προτάθηκε από τους Barabasi και Albert (1999) (Σχ. 3.3). Το όνομα της ιδιότητας, υποδεικνύει ότι η δομή του δικτύου διατηρείται σταθερή ανεξάρτητα από το πλήθος K των κόμβων του. Η κατασκευή ενός δικτύου ελεύθερης κλίμακας είναι αποτέλεσμα δύο γενικών μηχανισμών, της συνεχούς επέκτασης του δικτύου με την προσθήκη νέων κόμβων και της εισαγωγής νέων συνδέσεων, κατά προτίμηση, σε κόμβους που είναι ήδη καλά συνδεδεμένοι, δηλαδή σε κόμβους που έχουν μεγάλη τιμή του μέτρου δικτύου του βαθμού της κεντρικότητας τους. Ανεξάρτητα από το πλήθος των κόμβων του δικτύου, υπάρχει μη-μηδενική πιθανότητα ώστε ένας κόμβος του να συνδέεται σχεδόν με όλους τους άλλους και αυτό υποδηλώνει ότι η ουρά της κατανομής του βαθμού δεν ελαττώνεται εκθετικά αλλά σύμφωνα με έναν νόμο δύναμης $P(k) \sim k^{-\gamma}$,

όπου k ο βαθμός του δικτύου και ο εκθέτης γ κυμαίνεται μεταξύ $2 \leq \gamma \leq 3$ (Cohen et al. 2000). Έτσι, η μη-τετριμμένη ιδιότητα της ελεύθερης κλίμακας αναφέρεται στην κατανομή του νόμου δύναμης που παρουσιάζουν οι κόμβοι του δικτύου σχετικά με το μέτρο δικτύου του βαθμού της κεντρικότητας. Το δίκτυο που χαρακτηρίζεται από την δομή της ελεύθερης κλίμακας παρουσιάζει έναν μεγάλο αριθμό κόμβων οι οποίοι έχουν μικρό αριθμό συνδέσεων αλλά έναν μικρό αριθμό κόμβων που έχουν πολύ μεγάλο αριθμό συνδέσεων. Αυτό σημαίνει, ότι ορισμένοι κόμβοι (hubs), διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο δίκτυο καθώς έχουν πολλές συνδέσεις σε αυτό.

Η βασική διαφορά μεταξύ ενός τυχαίου δικτύου και ενός που παρουσιάζει την δομή της ελεύθερης κλίμακας έγκειται στην διαφορετική κατανομή του βαθμού που ακολουθούν οι κόμβοι τους. Έτσι, ένα τυχαίο δίκτυο παρουσιάζει την κατανομή Poisson όσον αφορά την συνδεσιμότητα των κόμβων του ενώ το δίκτυο της ελεύθερης κλίμακας τον νόμο δύναμης. Επιπλέον, σε ένα τυχαίο δίκτυο οι περισσότεροι κόμβοι έχουν παρόμοιο βαθμό μεταξύ τους και επομένως δεν συναντάμε κόμβους που χαρακτηρίζονται ως hubs (κόμβοι με πολλές συνδέσεις), αντίθετα σε δίκτυο ελεύθερης κλίμακας οι κόμβοι (hubs) αναμένονται με βεβαιότητα.



Σχ. 3.3: Δίκτυο που παρουσιάζει την ιδιότητα της ελεύθερης κλίμακας (Scale-free) στην δομή του (από Barabasi και Albert 1999).

3.3 Στατιστικός έλεγχος

Για τη διερεύνηση της δομής του αρχικού δικτύου απαραίτητη είναι η κατασκευή τυχαιοποιημένων δικτύων ώστε να εκπροσωπήσουν την μηδενική υπόθεση H_0 στον στατιστικό έλεγχο. Η κατασκευή των τυχαιοποιημένων δικτύων επιτυγχάνεται στην διατριβή με τις έξι (6) προσεγγίσεις που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.4

Για να αναγνωριστεί η δομή του τυχαίου δικτύου σε ένα αρχικό δίκτυο θα πρέπει η τιμή του χαρακτηριστικού μήκους διαδρομής, L , και του συντελεστή συσταδοποίησης, C , για το αρχικό δίκτυο να ανήκει στο εύρος των τιμών L_{rand} και C_{rand} , αντίστοιχα, που προκύπτουν από τα B τυχαιοποιημένα δίκτυα, δηλαδή να ισχύει $L \cong L_{rand}$ και $C \cong C_{rand}$. Αυτή η παραδοχή πρέπει να συμβαίνει διότι οι τιμές των μέτρων δικτύου ενός τυχαίου δικτύου θα πρέπει να είναι παρόμοιες με ένα σύνολο B τιμών που προκύπτει από B τυχαιοποιημένα δίκτυα. Ως εκ τούτου, θεωρούνται δύο (2) μηδενικές H_0 , $C \cong C_{rand}$ και $L \cong L_{rand}$, για τον συντελεστή συσταδοποίησης και για το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής, αντίστοιχα, για την διερεύνηση αν το αρχικό δίκτυο είναι τυχαίο. Για να επικυρωθεί η δομή του τυχαίου δικτύου στο αρχικό πρέπει ο στατιστικός έλεγχος για το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής και για τον συντελεστή συσταδοποίησης να αποδεχθεί τις μηδενικές

υποθέσεις H_0 , $L \cong L_{rand}$ και $C \cong C_{rand}$, αντίστοιχα. Αξίζει να σημειωθεί ότι θα μπορούσαν να επιλεγούν και άλλα μέτρα δικτύου, εκτός από τον συντελεστή συσταδοποίησης και το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής, ως διακριτικά στατιστικά ελέγχου για τον έλεγχο της τυχαία δομής. Όμως, η επιλογή τους για τον στατιστικό έλεγχο της δομής του τυχαίου δικτύου περιορίστηκε σε αυτά τα δύο (2) μέτρα δικτύου, του συντελεστή συσταδοποίησης και του χαρακτηριστικού μήκους διαδρομής, ώστε να είναι σε άμεση σύγκριση με τα, ακριβώς, ίδια μέτρα δικτύου που απαιτούνται για τον στατιστικό έλεγχο της δομής του μικρόκοσμου που περιγράφεται παρακάτω.

Αντίθετα, για να αναγνωριστεί η δομή του μικρόκοσμου σε ένα αρχικό δίκτυο θα πρέπει η τιμή του χαρακτηριστικού μήκους διαδρομής, L , για το αρχικό δίκτυο να ανήκει στο εύρος των τιμών του χαρακτηριστικού μήκους διαδρομής, L_{rand} , που προκύπτουν από τα B τυχαιοποιημένα δίκτυα, δηλαδή $L \cong L_{rand}$, ενώ η τιμή του συντελεστή συσταδοποίησης, C , να είναι υψηλότερη από τις αντίστοιχες τιμές C_{rand} που προκύπτουν από τα B τυχαιοποιημένα δίκτυα, δηλαδή $C \gg C_{rand}$. Έτσι, ο δείκτης του μικρόκοσμου (S ή S^W , σχέσεις 3.1 και 3.2) θα είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από την μονάδα (1), και το αρχικό δίκτυο θα παρουσιάζει την δομή του μικρόκοσμου. Ως εκ τούτου, θεωρούνται δύο (2) μηδενικές H_0 , $C \cong C_{rand}$ και $L \cong L_{rand}$, για τον συντελεστή συσταδοποίησης και για το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής, αντίστοιχα, για την διερεύνηση της ιδιότητας του μικρόκοσμου στο αρχικό δίκτυο. Για να επικυρωθεί η δομή του μικρόκοσμου στο αρχικό δίκτυο πρέπει ο μονόπλευρος στατιστικός έλεγχος από δεξιά για τον συντελεστή συσταδοποίησης να απορρίψει την μηδενική υπόθεση H_0 , $C \cong C_{rand}$, δηλαδή να ισχύει η H_1 , $C \gg C_{rand}$, ενώ για το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής να αποδεχθεί την μηδενική υπόθεση H_0 , $L \cong L_{rand}$.

Για να αναγνωριστεί η δομή της ελεύθερης κλίμακας σε ένα αρχικό δίκτυο θα πρέπει η τιμή του βαθμού του εκθέτη, γ , που δηλώνει κατά πόσο η κατανομή του βαθμού των κόμβων του αρχικού δικτύου ακολουθεί κατανομή νόμου δύναμης, για το αρχικό δίκτυο να μην ανήκει στο εύρος των τιμών γ_{rand} που προκύπτουν από τα B τυχαιοποιημένα δίκτυα, δηλαδή πρέπει να ισχύει $\gamma \gg \gamma_{rand}$. Ως εκ τούτου, θεωρείται η μηδενική H_0 , $\gamma \cong \gamma_{rand}$, για τον βαθμό του εκθέτη, για την διερεύνηση της ιδιότητας της ελεύθερης κλίμακας στο αρχικό δίκτυο. Για να επικυρωθεί η δομή της ελεύθερης κλίμακας στο αρχικό δίκτυο πρέπει ο στατιστικός έλεγχος για τον βαθμό του εκθέτη, γ , να απορρίψει την μηδενική υπόθεση H_0 , $\gamma \cong \gamma_{rand}$, δηλαδή να ισχύει η H_1 , $\gamma \gg \gamma_{rand}$. Εναλλακτικά, η δομή της ελεύθερης κλίμακας για το αρχικό δίκτυο μπορεί να εξεταστεί και από τον στατιστικό έλεγχο καλής προσαρμογής (goodness of fit) της κατανομής του βαθμού των K κόμβων του αρχικού δικτύου. Μια καλά προσαρμοσμένη ευθεία παλινδρόμησης που ακολουθεί την κατανομή νόμου δύναμης στην κατανομή του βαθμού των κόμβων του αρχικού δικτύου, υποδηλώνει την δομή της ελεύθερης κλίμακας για το αρχικό δίκτυο. Για τον έλεγχο της καλής προσαρμογής χρησιμοποιείται ως στατιστικό έλεγχο το στατιστικό μέτρο συσχέτισης R-squared (R^2) (Kasthurirathna et al. 2016) το οποίο ορίζεται από την σχέση

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (f_i - \bar{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3.3)$$

με $i = 1, \dots, K$, f_i και y_i οι αναμενόμενες και οι παρατηρούμενες τιμές για το γ , αντίστοιχα, και $\bar{y}$ η μέση τιμή των y_i . Γενικά, όσο υψηλότερη είναι η τιμή του στατιστικού μέτρου συσχέτισης R^2 , τόσο με περισσότερη ασφάλεια το δίκτυο μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελεύθερης κλίμακας.

Έχοντας δημιουργήσει B τυχαιοποιημένα δίκτυα, προχωράμε στην πραγματοποίηση του στατιστικού ελέγχου όπως περιγράφεται στην ενότητα 2.5, για κάθε περίπτωση σχετικά με την εξέταση της δομής του δικτύου, όπου υπολογίζεται η p -τιμή (p -value) σύμφωνα με την σχέση (2.36) (αναφέρεται στην ενότητα 2.5) για τον δίπλευρο στατιστικό έλεγχο για το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής (L) και την σχέση (3.4) για τον μονόπλευρο στατιστικό έλεγχο από δεξιά για τον συντελεστή συσταδοποίησης (C), και η απόφαση του στατιστικού ελέγχου επιτυγχάνεται με επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$:

$$p\text{-τιμή} = \begin{cases} \frac{2r_0}{B+1}, & \text{αν } r_0 \leq \frac{B+1}{2} \\ \frac{2(B+1-r_0)}{B+1}, & \text{αν } r_0 > \frac{B+1}{2} \end{cases}, \text{για τον δίπλευρο έλεγχο} \quad (2.36)$$

ή

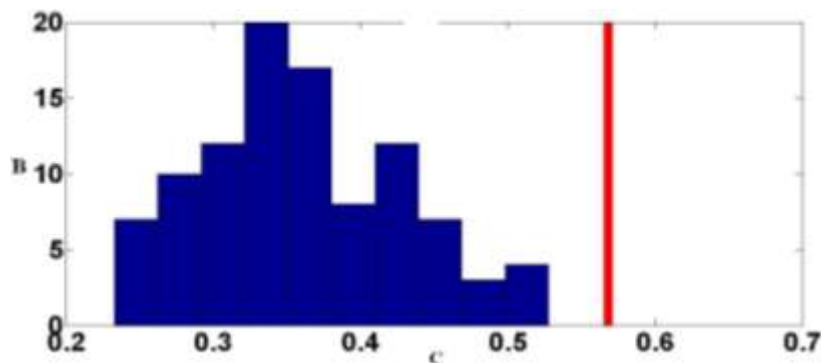
$$p\text{-τιμή} = 1 - \frac{r_0 - 0.326}{B + 1 + 0.348}, \text{για τον μονόπλευρο έλεγχο από δεξιά} \quad (3.4).$$

3.4 Είδη σφαλμάτων του στατιστικού ελέγχου

Στην στατιστική, η μηδενική υπόθεση H_0 εκφράζει την παραδοχή ότι η υπόθεση που εξετάζεται δεν παράγει κάποιο αποτέλεσμα που είναι στατιστικά σημαντικό ή δεν αποδίδει καμία ένδειξη ώστε να απορριφθεί η H_0 . Έτσι, όταν αυτή η παραδοχή, δηλαδή η μηδενική υπόθεση H_0 , ανατρέπεται δημιουργούνται διαφόρων τύπων σφάλματα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 3.1), που προκύπτουν από τον στατιστικό έλεγχο (όπως παρουσιάζεται στην ενότητα 3.3) της μηδενικής υπόθεσης H_0 .

3.4.1 Σφάλμα τύπου I

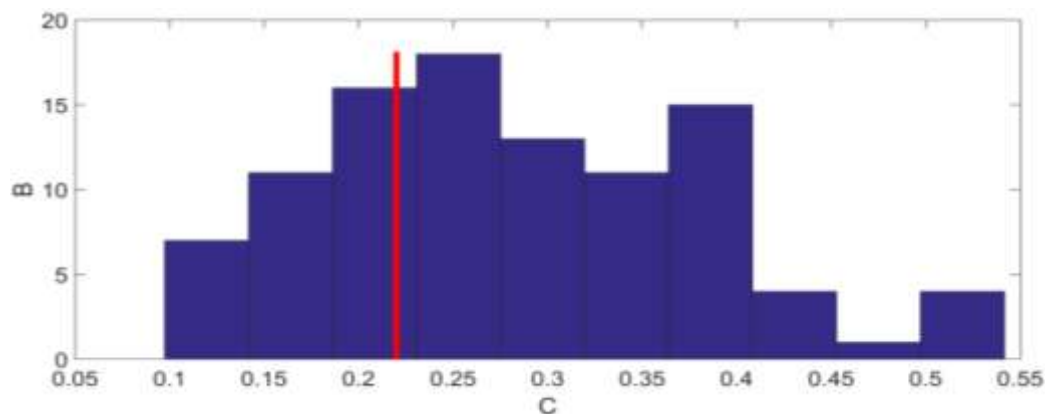
Ένα σφάλμα τύπου I (false positive) είναι η λανθασμένη απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης H_0 όταν αυτή ισχύει. Αυτός ο τύπος σφάλματος οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει μια υποτιθέμενη ισχύς στον έλεγχο της μηδενικής υπόθεσης H_0 που την ανατρέπει, δηλαδή ισχύει η εναλλακτική H_1 , αλλά στην πραγματικότητα δεν συμβαίνει. Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ότι η μηδενική υπόθεση H_0 δηλώνει ότι ένα δίκτυο μελέτης παρουσιάζει τυχαία δομή. Το σφάλμα τύπου I προκύπτει από τον στατιστικό έλεγχο που αποκαλύπτει ότι το δίκτυο μελέτης παρουσιάζει μη τυχαία δομή, δηλαδή θεωρεί ότι ισχύει η εναλλακτική H_1 , ενώ στην πραγματικότητα το δίκτυο παρουσιάζει την τυχαία δομή, δηλαδή ισχύει στην πραγματικότητα η H_0 (Σχ. 3.4).



Σχ. 3.4: Σφάλμα τύπου I (προκύπτει p -τιμή < 0.05 από την σχέση (2.36)) και απόρριψη της H_0 , του τυχαίου δικτύου, ενώ αυτή ισχύει. Η κόκκινη γραμμή, παριστά την τιμή του συντελεστή συσταδοποίησης, C , του αρχικού δικτύου που παρουσιάζει την τυχαία δομή σύμφωνα με την H_0 , αποκλίνει λανθασμένα από τις αντίστοιχες τιμές των $B=100$ τυχαιοποιημένων δικτύων.

3.4.2 Σφάλμα τύπου II

Ένα σφάλμα τύπου II (false negative) εκφράζει την αποτυχία του στατιστικού ελέγχου να απορρίψει μια ψευδή μηδενική υπόθεση H_0 . Αυτός ο τύπος σφάλματος οδηγεί στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει μια υποτιθέμενη ισχύ στην μηδενική υπόθεση H_0 ώστε να την απορρίψει ο στατιστικός έλεγχος ενώ στην πραγματικότητα αυτή συμβαίνει (ισχύει η H_1). Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε ότι η μηδενική υπόθεση H_0 δηλώνει ότι ένα δίκτυο παρουσιάζει τυχαία δομή ενώ στην πραγματικότητα παρουσιάζει την δομή του μικρόκοσμου εκ κατασκευής του, δηλαδή ισχύει η H_1 . Το σφάλμα τύπου II προκύπτει από τον στατιστικό έλεγχο που αποκαλύπτει ότι το δίκτυο μελέτης παρουσιάζει τυχαία δομή, δηλαδή θεωρεί ότι ισχύει η μηδενική υπόθεση H_0 , ενώ στην πραγματικότητα το δίκτυο παρουσιάζει την δομή του μικρόκοσμου, δηλαδή ισχύει στην πραγματικότητα η H_1 (Σχ. 3.5).



Σχ. 3.5: Σφάλμα τύπου II (προκύπτει p – τιμή > 0.05 από την σχέση (2.36)) και αποδοχή της H_0 , του τυχαίου δικτύου, ενώ αυτή δεν ισχύει. Η κόκκινη γραμμή, παριστά την τιμή του συντελεστή συσταδοποίησης, C , του αρχικού δικτύου που παρουσιάζει την δομή του μικρόκοσμου σύμφωνα με την H_1 , περιέχεται λανθασμένα στην κατανομή των αντίστοιχων τιμών που σχηματίζεται από ένα σύνολο $B=100$ τυχαιοποιημένων δικτύων.

Πίνακας 3.1: Πιθανά είδη σφαλμάτων από τον στατιστικό έλεγχο υποθέσεων.

Είδη σφαλμάτων	Αληθής η μηδενική υπόθεση H_0	Ψευδής η μηδενική υπόθεση H_0
Απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης H_0	Σφάλμα τύπου I (False positive)	Σωστή απόρριψη (True positive)
Αποτυχία απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0	Σωστή αποδοχή (True negative)	Σφάλμα τύπου II (False negative)

3.5 Μελέτη προσομοίωσης για την δομή του δικτύου

Η μελέτη προσομοίωσης εκτελείται για να εκτιμηθεί η καταλληλότητα των προσεγγίσεων τυχαιοποίησης, για την κατασκευή τυχαιοποιημένου δικτύου, για την σωστή ταυτοποίηση της δομής που παρουσιάζει το αρχικό δίκτυο.

Η μελέτη προσομοίωσης εφαρμόζεται σε δίκτυο συσχέτισης που κατασκευάζεται όπως περιγράφεται στην ενότητα 2.2.2. Εν συντομία, το δίκτυο συσχέτισης εκτιμάται από τον πίνακα βαρών, W , για σταθμισμένες συνδέσεις με στοιχεία $|r_{xy}|$ (από την σχέση (2.1)) για κάθε ζευγάρι μεταβλητών X και Y , και από τον πίνακα γειτνίασης A , για απλές συνδέσεις, που περιέχει μόνο τις τιμές ένα (1) όταν υπάρχει στατιστική σημαντικότητα στις τιμές του πίνακα συσχέτισης S (από την σχέση (2.2)) και μηδέν (0) όταν δεν υπάρχει. Χρησιμοποιούνται δύο σενάρια για την εξέταση της καταλληλότητας κάθε προσέγγισης τυχαιοποίησης σε δίκτυο συσχέτισης,

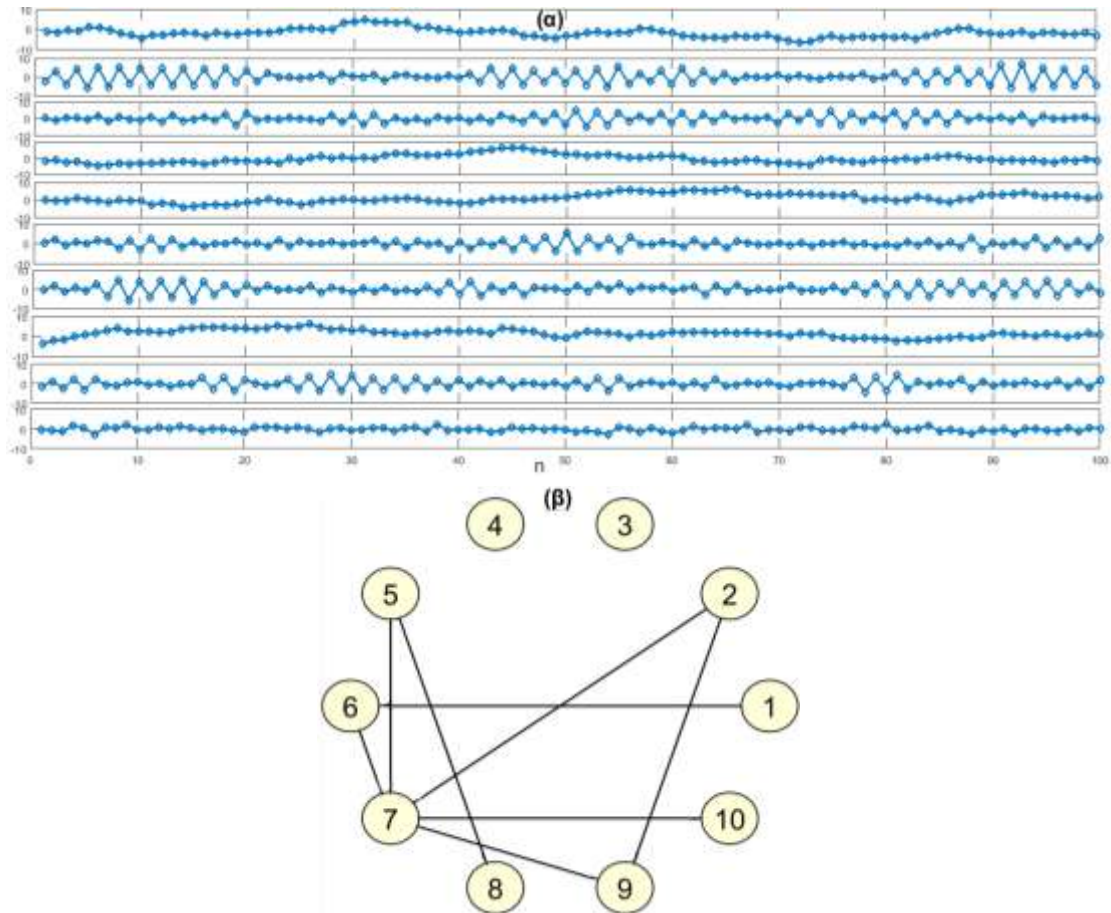
η τυχαία δομή για να εξεταστεί η εξειδίκευση (specificity) και η δομή του μικρόκοσμου για να εξεταστεί η ευαισθησία (sensitivity) της κάθε προσέγγισης. Για τα δύο (2) σενάρια της δομής του αρχικού δικτύου συσχέτισης, εξετάζεται η μηδενική υπόθεση H_0 του τυχαίου δικτύου. Συγκεκριμένα, για την μηδενική υπόθεση H_0 ισχύει ότι $L \cong L_{rand}$ και $C \cong C_{rand}$ και για τα δύο (2) σενάρια της δομής του αρχικού δικτύου. Επομένως, όταν το αρχικό δίκτυο παρουσιάζει τυχαία δομή, δηλαδή το δίκτυο κατασκευάζεται από ανεξάρτητες μεταβλητές της πολυμεταβλητής χρονοσειράς, η μηδενική υπόθεση H_0 είναι αληθής έναντι της εναλλακτικής H_1 , $L \neq L_{rand}$ και $C \neq C_{rand}$. Αντίθετα, όταν το αρχικό δίκτυο παρουσιάζει την δομή του μικρόκοσμου, δηλαδή το δίκτυο κατασκευάζεται από εξαρτημένες μεταβλητές της πολυμεταβλητής χρονοσειράς που δημιουργούν την δομή του μικρόκοσμου στο αρχικό δίκτυο συσχέτισης, η μηδενική υπόθεση H_0 είναι ψευδής έναντι της εναλλακτικής H_1 , $L \cong L_{rand}$ και $C \gg C_{rand}$. Ως εκ τούτου, όταν το αρχικό δίκτυο συσχέτισης παρουσιάζει τυχαία δομή απαιτείται να επαληθεύεται η μηδενική υπόθεση H_0 από τον στατιστικό έλεγχο, ενώ όταν παρουσιάζει την ιδιότητα του μικρόκοσμου απαιτείται η απόρριψή της από τον στατιστικό έλεγχο για κάθε προσέγγιση τυχαιοποίησης του αρχικού δικτύου.

Στην μελέτη προσομοίωσης, θεωρούνται διαφορετικές ρυθμίσεις δεδομένων, όσον αφορά το μήκος n των χρονοσειρών ενώ ο αριθμός των μεταβλητών (κόμβων) είναι σταθερός $K = 17$. Για κάθε διαφορετική ρύθμιση δεδομένων, 100 Monte Carlo πραγματοποιήσεις συμβαίνουν και για κάθε εκτέλεση $B = 100$ τυχαιοποιημένα δίκτυα κατασκευάζονται με τις έξι (6) προσεγγίσεις τυχαιοποίησης του αρχικού δικτύου, δηλαδή τις τρεις (3), RTSweight, RTSbinthr και RTSbindeg που βασίζονται στην τυχαιοποίηση της αρχικής πολυμεταβλητής χρονοσειράς, τις δύο (2), RNavestr και RNnoddeg, που τυχαιοποιούν τις συνδέσεις του αρχικού δικτύου, και από την μέθοδο, RNpoisson, που κατασκευάζει το τυχαιοποιημένο δίκτυο να ακολουθεί την κατανομή Poisson σχετικά με μέτρο δικτύου της κεντρικότητας του βαθμού των κόμβων του. Στην συνέχεια, υπολογίζεται η p -τιμή (p -value) σύμφωνα με την σχέση (2.36) και η απόφαση του στατιστικού ελέγχου σχετικά με την μηδενική υπόθεση H_0 , για κάθε περίπτωση που αφορά την δομή που παρουσιάζει το αρχικό δίκτυο και τις ρυθμίσεις των δεδομένων K και n , επιτυγχάνεται με επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$.

3.5.1 Έλεγχος της δομής του τυχαίου δικτύου (έλεγχος της εξειδίκευσης)

Η πολυμεταβλητή χρονοσειρά από την οποία θα δημιουργηθεί το τυχαίο δίκτυο συσχέτισης κατασκευάζεται από αυτοπαλινδρομούμενο μοντέλο πρώτης τάξης VAR(1), $x_t = Dx_{t-1} + e_t$, όπου D είναι ο διαγώνιος πίνακας μεγέθους $K \times K$ με τον ίδιο συντελεστή φ στην κύρια διαγώνιό του και ο οποίος παρουσιάζει την ισχύ των αυτοσυσχετίσεων σε κάθε μία από τις K χρονοσειρές της πολυμεταβλητής χρονοσειράς. Η αυτοσυσχέτιση, φ , είναι ο συντελεστής συσχέτισης δύο παρατηρήσεων της χρονοσειράς που απέχουν χρονικά t βήματα (στην διατριβή, $t = 1$). Θεωρείται στην διατριβή ως $\varphi = 0.9$, υποδηλώνοντας ότι η αυτοσυσχέτιση είναι αρκετά ισχυρή μεταξύ των παρατηρήσεων κάθε χρονοσειράς. Ο θόρυβος εισόδου e_t είναι λευκός και ο πίνακας συνδιακύμανσης θορύβου Σ_e είναι ο μοναδιαίος πίνακας, έτσι ώστε οι K μεταβλητές να είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη και τυχόν σημαντικές διασυσχετίσεις που εκτιμώνται στην κατασκευασμένη πολυμεταβλητή χρονοσειρά να συμβαίνουν τυχαία. Για παράδειγμα, το Σχ. 3.6 παρουσιάζει το δίκτυο συσχέτισης που σχηματίζεται από 10 προσομοιωτικές ανεξάρτητες μεταξύ τους χρονοσειρές οι οποίες κατασκευάστηκαν από αυτοπαλινδρομούμενο μοντέλο πρώτης τάξης. Οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων στο

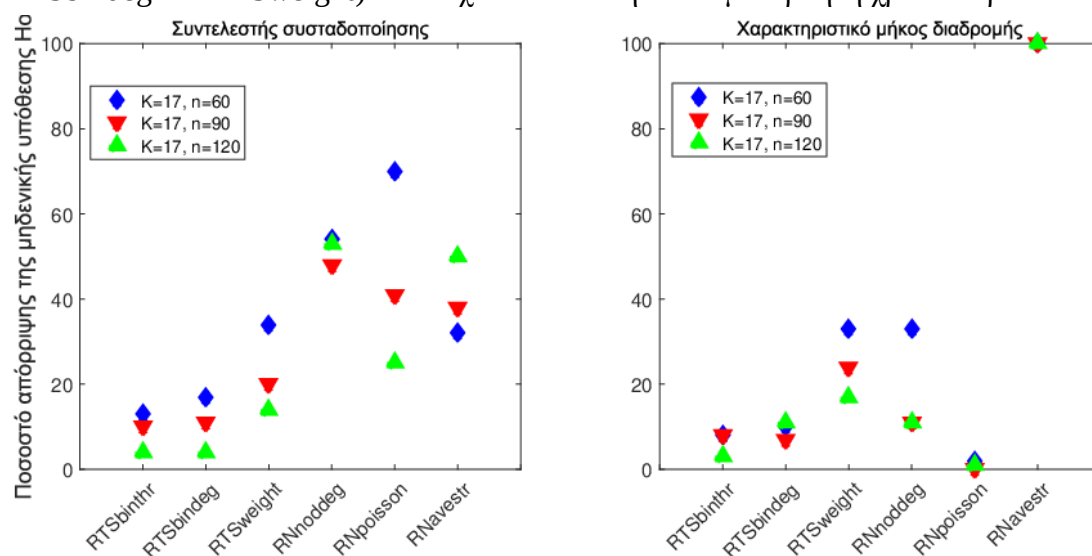
Σχ. 3.6 εισήρθαν τυχαία λόγω ψευδών διασυσχετίσεων που προκάλεσε η υψηλή τιμή της αυτοσυσχέτισης μεταξύ των παρατηρήσεων κάθε χρονοσειράς ($\varphi = 0.9$). Η μηδενική υπόθεση H_0 , ότι το δίκτυο συσχέτισης είναι τυχαίο, απορρίπτεται εσφαλμένα, όταν οι τιμές των μέτρων δικτύων C ή L του αρχικού δικτύου συσχέτισης διαφέρουν από τις αντίστοιχες C_{rand} και L_{rand} των B τυχαιοποιημένων δικτύων, δηλαδή $L \neq L_{rand}$ και $C \neq C_{rand}$ (σφάλμα τύπου I).



Σχ. 3.6: 10 προσομοιωτικές ανεξάρτητες μεταξύ τους χρονοσειρές της πολυμεταβλητής χρονοσειράς που δημιουργήθηκαν από αυτοπαλινδρομούμενο μοντέλο πρώτης τάξης VAR(1) στο (α) ώστε να κατασκευάσουν στο (β) το τυχαίο δίκτυο συσχέτισης.

Το Σχ. 3.7 παρουσιάζει την εκτιμώμενη πιθανότητα της απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 του τυχαίου δικτύου με στατιστικά ελέγχου τον συντελεστή συσταδοποίησης, C , και το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής, L , για διαφορετικό πλήθος παρατηρήσεων n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς ενώ το πλήθος των μεταβλητών (κόμβων) είναι σταθερό. Επιλέχθηκαν τρία (3) διαφορετικά μήκη χρονοσειρών, δηλαδή $n = 60$, $n = 90$ και $n = 120$, καθώς και σταθερό πλήθος, $K = 17$, μεταβλητών (κόμβων) ώστε τα προσομοιωτικά δεδομένα να αντικατοπτρίζουν τα πραγματικά δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν στην ενότητα 3.6.1. Οι τρεις (3) προσεγγίσεις που βασίζονται στην τυχαιοποίηση της αρχικής πολυμεταβλητής χρονοσειράς, δηλαδή οι προσεγγίσεις RTSbinthr, RTSbindeg και RTSweight, παρουσιάζουν όπως ήταν αναμενόμενο, μικρά ποσοστά απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 καθώς αυτή ισχύει και για τις δύο (2) περιπτώσεις, $L \cong L_{rand}$ και $C \cong C_{rand}$. Ειδικότερα, τα καλύτερα αποτελέσματα παρουσιάζονται όταν η ρύθμιση των δεδομένων είναι $K = 17$ και $n = 120$ για τον συντελεστή συσταδοποίησης όπου τα ποσοστά απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 , $C \cong C_{rand}$, είναι κοντά στο επιτρεπόμενο όριο του 5%. Οι άλλες τρεις (3) προσεγγίσεις

τυχαιοποίησης, δηλαδή οι προσεγγίσεις RNnoddeg, RNavestr και RNpoisson, παρουσιάζουν την τάση στο να απορρίπτον, εσφαλμένα, συχνότερα την μηδενική υπόθεση H_0 όταν χρησιμοποιείται ο συντελεστής συσταδοποίησης ως στατιστικό έλεγχο, από τις RTS προσεγγίσεις, δηλαδή τις προσεγγίσεις RTSbinthr, RTSbindeg και RTSweight. Η προσέγγιση τυχαιοποίησης RNavestr παρουσιάζει τα χειρότερα αποτελέσματα καθώς αποτυγχάνει να διατηρήσει τις ίδιες τιμές για το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής μεταξύ του αρχικού δικτύου και των τυχαιοποιημένων για όλους τους συνδυασμούς σχετικά με το K και το n . Οι προσεγγίσεις RNpoisson και RNnoddeg παρουσιάζουν, εσφαλμένα, υψηλό ποσοστό απόρριψης της H_0 , $C \cong C_{rand}$, για τον συντελεστή συσταδοποίησης όταν θεωρείται $K = 17$ και $n = 60$, ενώ για το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής παρουσιάζουν, όπως ήταν αναμενόμενο, για όλους τους συνδυασμούς σχετικά με το K και το n μικρά ποσοστά απόρριψης της H_0 , $L \cong L_{rand}$, όπως για τις προσεγγίσεις (RTSbinthr, RTSbindeg και RTSweight) που τυχαιοποιούν την πολυμεταβλητή χρονοσειρά.

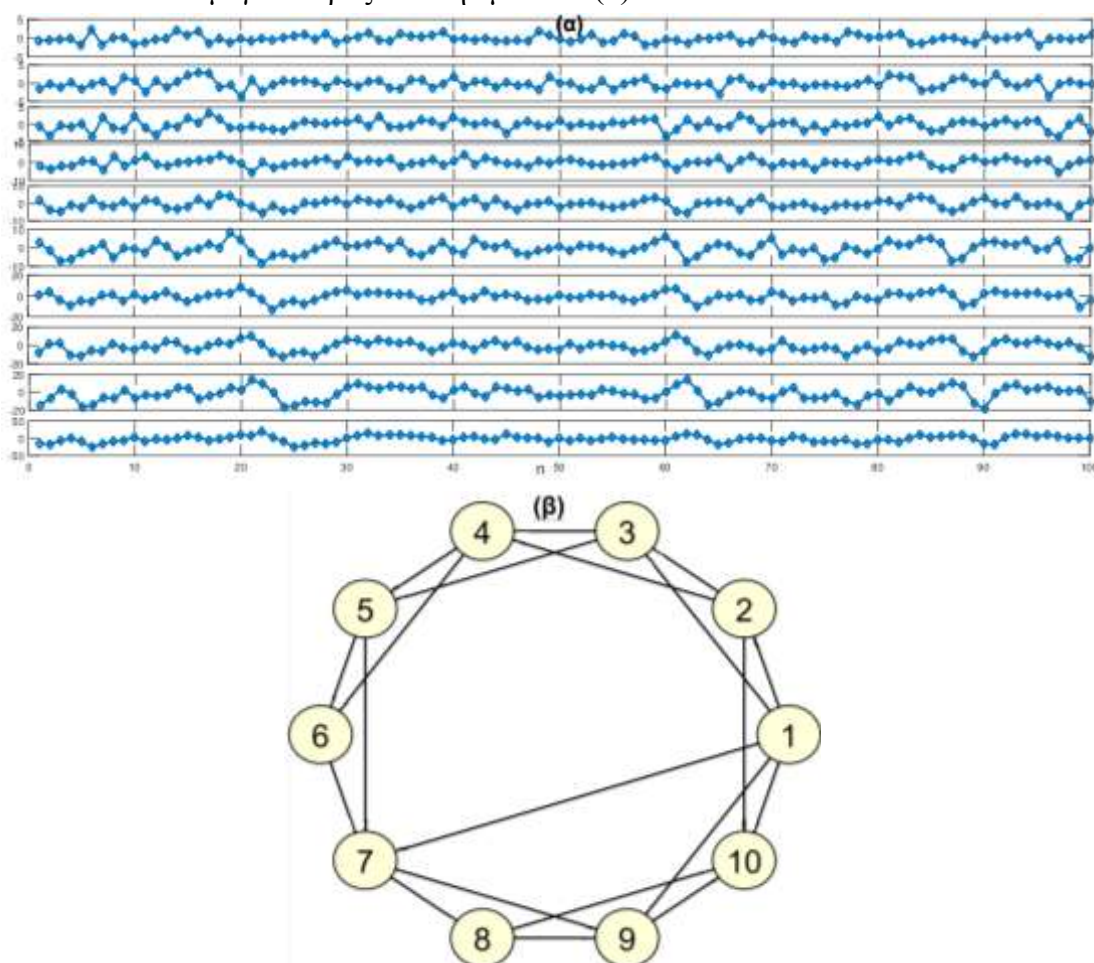


Σχ. 3.7: Το ποσοστό απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 , στην περίπτωση που το αρχικό δίκτυο συσχέτισης παρουσιάζει τυχαία δομή, σε 100 πραγματοποιήσεις για διαφορετικές ρυθμίσεις δεδομένων των K και n , για καθένα ένα από τα δύο (2) μέτρα δικτύου και τις έξι (6) προσεγγίσεις τυχαιοποίησης.

3.5.2 Έλεγχος της δομής του μικρόκοσμου (έλεγχος της ευαισθησίας)

Η διαδικασία παραγωγής ενός αυτοπαλινδρομούμενου μοντέλου πρώτης τάξης VAR(1) χρησιμοποιείται, όπως στην περίπτωση που κατασκευάζει το τυχαίο δίκτυο στην ενότητα 3.5.1, για την κατασκευή ενός δικτύου συσχέτισης που παρουσιάζει την ιδιότητα του μικρόκοσμου. Έτσι, ο πίνακας συνδιακύμανσης θορύβου Σ_e έχει σε αυτήν την περίπτωση μη-διαγώνια στοιχεία έτσι ώστε να παρουσιάζει την δομή του μικρόκοσμου. Η δομή του μικρόκοσμου στο δίκτυο συσχέτισης δημιουργείται από τον κλασικό μηχανισμό παραγωγής που έχει ως εξής: Πρώτα ένα τυχαίο δίκτυο κατασκευάζεται όπου κάθε κόμβος του έχει το ίδιο πλήθος συνδέσεων k (στην διατριβή θεωρείται $k = 4$). Στην συνέχεια, κάθε σύνδεση για έναν κόμβο τυχαία επανασυνδέεται με κάποια πιθανότητα p , που σημαίνει ότι επανατοποθετείται σε οποιαδήποτε τυχαίο επιλεγμένο κόμβο. Για $p = 0.2$, που χρησιμοποιείται στην διατριβή, λίγες συνδέσεις αποκτούν μεγάλη εμβέλεια στο δίκτυο συσχέτισης. Έτσι, είτε ο πίνακας γειτνίασης A ή ο πίνακας βαρών W σχηματίζει τον πίνακα συνδιακύμανσης θορύβου Σ_e υπό τον περιορισμό να είναι θετικά ημι-ορισμένος. Το Σχ. 3.8 παρουσιάζει το δίκτυο συσχέτισης που σχηματίζεται

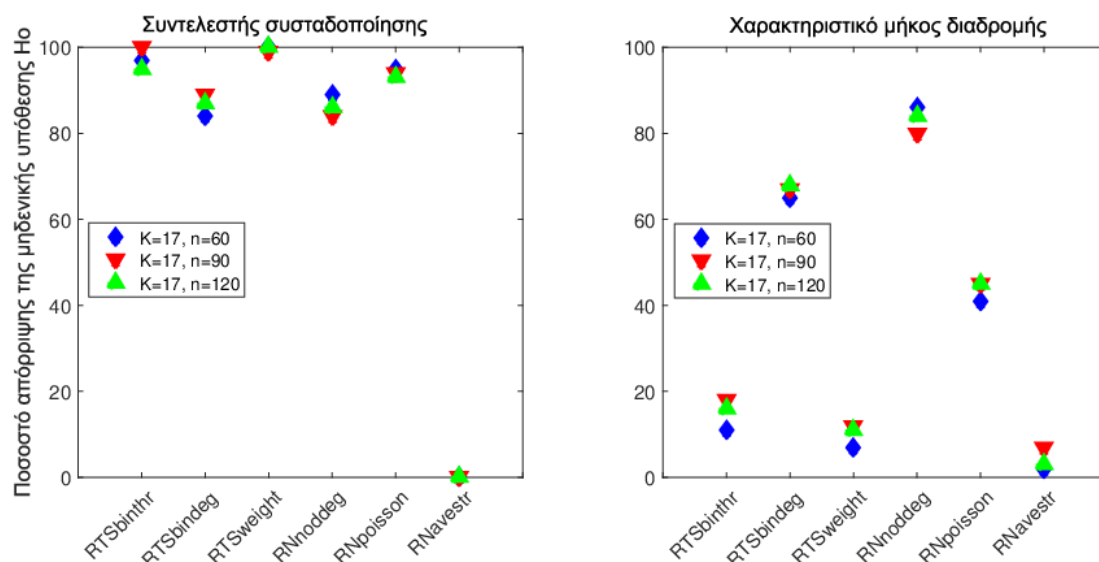
από 10 προσομοιωτικές εξαρτημένες μεταξύ τους χρονοσειρές οι οποίες κατασκευάστηκαν από αυτοπαλινδρομούμενο μοντέλο πρώτης τάξης. Οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων στο Σχ. 3.8 σχηματίστηκαν λόγω των μη-μηδενικών στοιχείων που παρουσιάζει ο πίνακας συνδιακύμανσης θορύβου Σ_e . Προφανώς, η μηδενική υπόθεση H_0 , δηλαδή $L \cong L_{rand}$ και $C \cong C_{rand}$, ότι το αρχικό δίκτυο συσχέτισης είναι τυχαίο, είναι εσφαλμένη καθώς το αρχικό δίκτυο παρουσιάζει την δομή του μικρόκοσμου. Η κατάλληλη εναλλακτική υπόθεση H_1 που θα αναγνωρίσει την δομή του μικρόκοσμου στο αρχικό δίκτυο συσχέτισης απαιτεί την τιμή του χαρακτηριστικού μήκους διαδρομής, L , για το αρχικό δίκτυο συσχέτισης να ανήκει στο εύρος των τιμών L_{rand} που προκύπτει από τα B τυχαιοποιημένα δίκτυα, δηλαδή $L \cong L_{rand}$, ενώ η τιμή του συντελεστή συσταδοποίησης, C , για το αρχικό δίκτυο συσχέτισης να είναι μεγαλύτερη από τις, αντίστοιχες τιμές των C_{rand} , δηλαδή $C \gg C_{rand}$, έτσι ώστε ο δείκτης (S και S^W , σχέσεις 3.1 και 3.2) του μικρόκοσμου να είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από την μονάδα (1).



Σχ. 3.8: 10 προσομοιωτικές εξαρτημένες μεταξύ τους χρονοσειρές της πολυμεταβλητής χρονοσειράς που δημιουργήθηκαν από αυτοπαλινδρομούμενο μοντέλο πρώτης τάξης VAR(1) στο (α) ώστε να κατασκευάσουν στο (β) το δίκτυο συσχέτισης που παρουσιάζει την δομή του μικρόκοσμου.

Από το Σχ. 3.9 προκύπτει ότι οι πέντε (5) από τις έξι (6) προσεγγίσεις τυχαιοποίησης του αρχικού δικτύου, εκτός της προσέγγισης RNavestr, απορρίπτουν την μηδενική υπόθεση H_0 , του τυχαίου δικτύου, είτε με βάση το στατιστικό ελέγχου L ή C ή και των δύο. Το ενδιαφέρον, για την περίπτωση της διερεύνησης της δομής του μικρόκοσμου, βρίσκεται στην εναλλακτική υπόθεση H_1 όπου το κατάλληλο αποτέλεσμα του στατιστικού ελέγχου είναι $L \cong L_{rand}$ και $C \gg C_{rand}$, δηλαδή μη

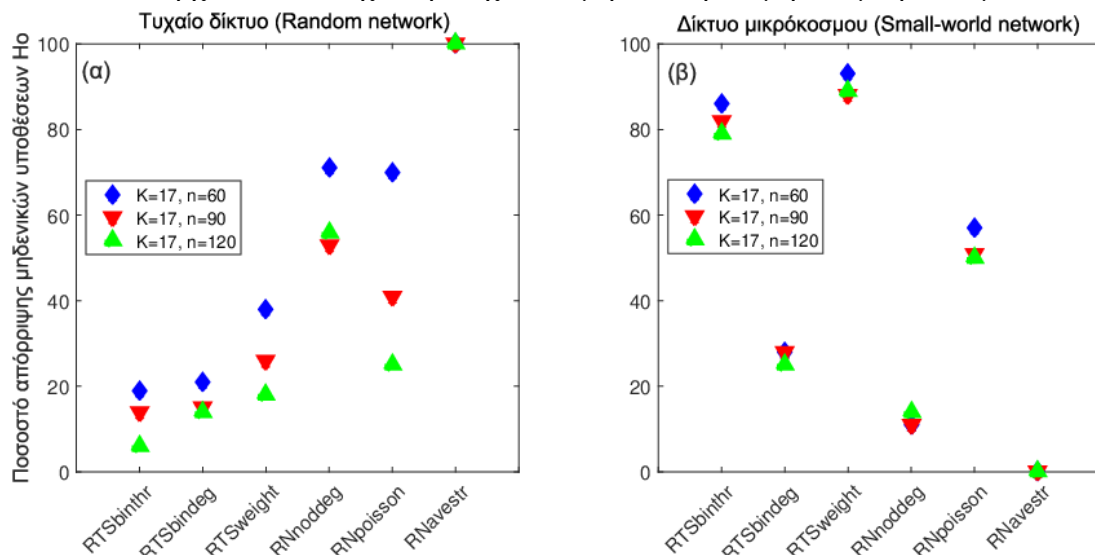
απόρριψη της H_0 με στατιστικό έλεγχο το L και απόρριψη της με στατιστικό έλεγχο το C . Αυτό το πρότυπο, της εναλλακτικής υπόθεσης H_1 , διατηρείται με τις τρεις RTS προσεγγίσεις που βασίζονται στην τυχαιοποίηση της αρχική πολυμεταβλητής χρονοσειράς και, επίσης, από τις προσεγγίσεις τυχαιοποίησης RNnoddeg και RNpoisson που τυχαιοποιούν τις συνδέσεις του αρχικού δικτύου. Η προσέγγιση RTSbindeg αποδεικνύεται λιγότερο αποτελεσματική καθώς αποτυγχάνει πιο συχνά, σε σχέση με τις άλλες δύο προσεγγίσεις RTS, να δημιουργήσει τυχαία δίκτυα με παρόμοιες τιμές του χαρακτηριστικού μήκους διαδρομής σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή του αρχικού δικτύου συσχέτισης καθώς απορρίπτει εσφαλμένα την H_0 , $L \cong L_{rand}$. Οι δύο (2) προσεγγίσεις που τυχαιοποιούν τις συνδέσεις του αρχικού δικτύου συσχέτισης, RNnoddeg και RNpoisson, απορρίπτουν την H_0 , $L \cong L_{rand}$, εσφαλμένα. Επιπλέον, η προσέγγιση τυχαιοποίησης RNavestr δεν βρίσκει, εσφαλμένα, καμία σημαντική διαφορά στην τιμή του συντελεστή συσταδοποίησης του αρχικού δικτύου συσχέτισης και των αντίστοιχων τιμών που προκύπτουν από τα B τυχαιοποιημένα δίκτυα, και, επομένως είναι η πλέον ακατάλληλη προσέγγιση τυχαιοποίησης του αρχικού δικτύου συσχέτισης για την ανίχνευση της ιδιότητας του μικρόκοσμου που παρουσιάζει το αρχικό δίκτυο συσχέτισης.



Σχ. 3.9: Όμοια όπως στο Σχ. 3.7 αλλά το αρχικό δίκτυο συσχέτισης παρουσιάζει την δομή του μικρόκοσμου.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχ. 3.7, για τον έλεγχο της εξειδίκευσης κάθε προσέγγισης τυχαιοποίησης, και στο Σχ. 3.9, για τον έλεγχο της ευαισθησίας κάθε προσέγγισης τυχαιοποίησης, αποκαλύπτουν ότι οι προσεγγίσεις της τυχαιοποίησης που εφαρμόζουν την τυχαιοποίηση στις αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές, ειδικότερα οι προσεγγίσεις τυχαιοποίησης RTSbinthr και RTSweight, για την κατασκευή του τυχαιοποιημένου δικτύου συσχέτισης και όχι στις συνδέσεις του αρχικού δικτύου συσχέτισης είναι πιο κατάλληλες για την ανίχνευση της δομής του τυχαίου δικτύου όταν υπάρχει (ειδικότητα) καθώς και για την ανίχνευση της ιδιότητας του μικρόκοσμου όταν υπάρχει (ευαισθησία). Τα συνοπτικά αποτελέσματα για τα δύο αυτά σενάρια, ειδικότητας και ευαισθησίας, παρουσιάζονται στο Σχ. 3.10. Για το πρώτο σενάριο, αποδίδεται η εσφαλμένη απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης H_0 , του τυχαίου δικτύου, όταν οι τιμές L ή C είναι στατιστικά σημαντικές (δηλαδή, $L \neq L_{rand}$ ή $C \neq C_{rand}$) καθώς το αρχικό δίκτυο συσχέτισης παρουσιάζει τυχαία δομή, ενώ για το δεύτερο σενάριο, η μηδενική υπόθεση H_0 απορρίπτεται, σωστά, όταν ισχύει η εναλλακτική H_1 (δηλαδή, $L \cong L_{rand}$ και $C \gg C_{rand}$) καθώς το αρχικό

δίκτυο συσχέτισης παρουσιάζει την δομή του μικρόκοσμου. Οι προσεγγίσεις, RTSbinthr και RTSweight επιτυγχάνουν και τους δύο στόχους, δηλαδή μικρό ποσοστό απόρριψης της H_0 όταν το αρχικό δίκτυο συσχέτισης είναι τυχαίο και πολύ υψηλό ποσοστό απόρριψης της H_0 όταν το αρχικό δίκτυο συσχέτισης παρουσιάζει την δομή του μικρόκοσμου, ενώ η μέθοδος τυχαιοποίησης RTSbindeg έχει εσφαλμένα μικρότερο ποσοστό απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 , όταν το αρχικό δίκτυο συσχέτισης παρουσιάζει την δομή του μικρόκοσμου. Οι άλλες προσεγγίσεις τυχαιοποίησης του αρχικού δικτύου συσχέτισης αποτυγχάνουν και στις δύο περιπτώσεις (ειδικότητας και ευαισθησίας). Η προσέγγιση τυχαιοποίησης RNavestr αποτυγχάνει εντελώς δίνοντας αντίθετο από το αναμενόμενο ποσοστό απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 και για τις δύο περιπτώσεις, η προσέγγιση RNnoddeg δεν παρουσιάζει ευαισθησία για την ανίχνευση της ιδιότητας του μικρόκοσμου, ενώ η προσέγγιση RNpoisson δίνει παρόμοια και ενδιάμεσα ποσοστά (κοντά στο 60%) απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 και στις δύο περιπτώσεις. Επομένως, η προτεινόμενη μεθοδολογία που τυχαιοποιεί την αρχική χρονοσειρά για την κατασκευή των τυχαιοποιημένων δικτύων, ειδικότερα με τις προσεγγίσεις τυχαιοποίησης RTSbinthr και RTSweight, υπερέχει έναντι της μεθοδολογίας που προτείνεται στην βιβλιογραφία όπου τυχαιοποιεί τις συνδέσεις του αρχικού δικτύου, είτε όταν το αρχικό δίκτυο έχει την τυχαία δομή είτε την δομή του μικρόκοσμου.



Σχ. 3.10: Το ποσοστό της απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 , του τυχαίου δικτύου, από 100 πραγματοποιήσεις κατασκευής τυχαίου δικτύου συσχέτισης στο (α) και δικτύου συσχέτισης που παρουσιάζει την δομή του μικρόκοσμου στο (β), για διαφορετικές ρυθμίσεις δεδομένων των K και n για τις έξι (6) προσεγγίσεις τυχαιοποίησης του αρχικού δικτύου συσχέτισης.

Ο στατιστικός έλεγχος για την εξέταση της δομής της ελεύθερης κλίμακας στο αρχικό δίκτυο, ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε δίκτυο με απλές συνδέσεις, δεν πραγματοποιείται στην μελέτη προσομοίωσης αλλά στην ενότητα 3.6 που αφορά τις εφαρμογές σε πραγματικά δεδομένα. Αυτό, συμβαίνει διότι οι προσεγγίσεις RTSweight και RNavestr που αφορούν την κατασκευή τυχαιοποιημένων δικτύων με σταθμισμένες συνδέσεις καθώς και η προσέγγιση RNnoddeg που σχηματίζει τυχαιοποιημένα δίκτυα στα οποία ο βαθμός κάθε κόμβου είναι ίσος με τον αντίστοιχο του αρχικού δικτύου συσχέτισης, δηλαδή θα ισχύει πάντα $\gamma \cong \gamma_{rand}$, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον στατιστικό έλεγχο της δομής της ελεύθερης κλίμακας που παρουσιάζει το αρχικό δίκτυο. Επομένως, η σύγκριση και των έξι (6) προσεγγίσεων, όπως στις περιπτώσεις του τυχαίου δικτύου και του μικρόκοσμου, θα ήταν ανέφικτη.

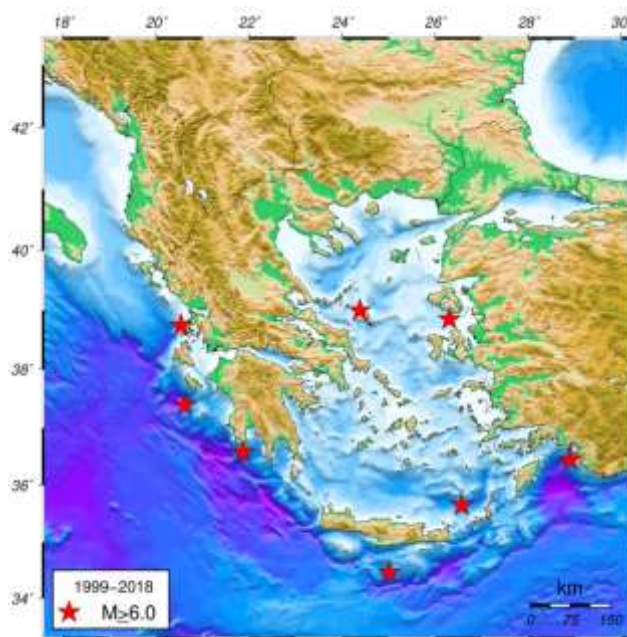
3.6 Εφαρμογές σε πραγματικά δεδομένα και αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τρεις (3) εφαρμογές σε πραγματικά δεδομένα. Οι πρώτες δύο (2) εξετάζουν την εξέλιξη της δομής του σεισμικού δικτύου μεταξύ είτε κύριων σεισμών, στην ενότητα 3.6.1, ή κύριων σεισμών και μετασεισμών τους, στην ενότητα 3.6.2. Στην τρίτη (3^η) εφαρμογή, στην ενότητα 3.6.3, μελετάται κατά πόσο η δομή που μπορεί να παρουσιάζει το σεισμικό δίκτυο εξαρτάται από την μεθοδολογία που ακολουθείται για την κατασκευή του.

3.6.1 Μελέτη των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων δικτύου πριν από κύριους σεισμούς

Στην πρώτη (1^η) εφαρμογή του κεφαλαίου, εξετάζεται η ιδιότητα του μικρόκοσμου και του τυχαίου δικτύου σε δίκτυα συσχέτισης πριν από κύριους σεισμούς ($M \geq 6.0$) κατά την χρονική περίοδο 1999-2018 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του. Ο στόχος της μελέτης είναι να εξεταστεί κατά πόσον η εξέλιξη της δομής του σεισμικού δικτύου συσχέτισης, μεταξύ κύριων σεισμών, μπορεί να αποκαλύψει πρόδρομες μεταβολές των ιδιοτήτων του σεισμικού δικτύου μερικές ημέρες πριν από την γένεσή των κύριων σεισμών. Επομένως, στην ενότητα αυτή εξετάζεται η δομή του σεισμικού δικτύου συσχέτισης μεταξύ των κύριων σεισμών για τις ίδιες ακριβώς περιπτώσεις για τις οποίες εξετάστηκε η στατιστική σημαντικότητα των τιμών των μέτρων δικτύου στην ενότητα 2.6.1.

Οι χρονικές καταγραφές της σεισμικής δραστηριότητας ορίζονται ως τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των κύριων σεισμών μεγέθους $M \geq 6.0$ (Σχ. 3.11 και Πίνακας 2.1). Προκύπτουν 22 τέτοιες καταγραφές, δηλαδή 23 κύριοι σεισμοί, κατά την χρονική περίοδο 1999-2018, όμως εξετάζονται μόνο οι οχτώ (8) από αυτές με δεδομένα που καλύπτουν διάστημα 360 ημερών (όπως στην ενότητα 2.6.1). Θεωρήθηκαν τρεις (3) διαφορετικές ρυθμίσεις σχετικά με το μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς, ειδικότερα $n = 60$, $n = 90$ και $n = 120$ ημέρες, με χρόνο δειγματοληψίας για κάθε παρατήρηση της να είναι η μία (1) ημέρα, ώστε να διερευνηθεί κατά πόσο τα αποτελέσματα επηρεάζονται από την επιλογή του n .



Σχ. 3.11: Επικεντρική κατανομή των 8 κύριων σεισμών με $M \geq 6.0$ που έγιναν την χρονική περίοδο 1999-2018 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του.

Για την κατασκευή του σεισμικού δικτύου συσχέτισης, ο Ελληνικός χώρος με τις γειτονικές του περιοχές χωρίζεται σε 17 καλά ορισμένες σεισμικές ζώνες, με βάση σεισμοτεκτονικά κριτήρια, οι οποίες αποτελούν και τους κόμβους του δικτύου (Σχ. 2.18). Οι 17 σεισμικές ζώνες προέκυψαν από την ενοποίηση των 67 σεισμικών ζωνών που προτείνονται στην εργασία των Παραϊοαννου & Παπαζαχός (2000) ώστε να έχουμε επαρκή αριθμό δεδομένων για κάθε σεισμική ζώνη που αποτελεί και κόμβο του δικτύου. Η κατασκευή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς βασίζεται είτε στην απελευθέρωση της σεισμικής ροπής M_0 ή στο πλήθος των σεισμών που γίνονται σε κάθε σεισμική ζώνη. Οι σταθμισμένες συνδέσεις δίνονται από τον πίνακα βαρών W ο οποίος προκύπτει από την απόλυτη τιμή του πίνακα συσχέτισης Σ (σχέση (2.1)), ενώ οι απλές συνδέσεις δίνονται από τον πίνακα γειτνίασης A που προκύπτει από τον έλεγχο της στατιστικής σημαντικότητας του πίνακα συσχέτισης Σ (σχέση (2.2)). Ο δείκτης μικρόκοσμου S και S^W δίνεται από τις σχέσεις (3.1) και (3.2), αντίστοιχα, ενώ τα τυχαιοποιημένα δίκτυα προκύπτουν χρησιμοποιώντας τις προσεγγίσεις τυχαιοποίησης RTSbinthr, για απλές συνδέσεις, και RTSweight, για σταθμισμένες συνδέσεις, καθώς αποδείχθηκε από την μελέτη προσομοίωσης, στην ενότητα 3.5, ότι είναι οι πιο κατάλληλες για την εξέταση της δομής του σεισμικού δικτύου συσχέτισης.

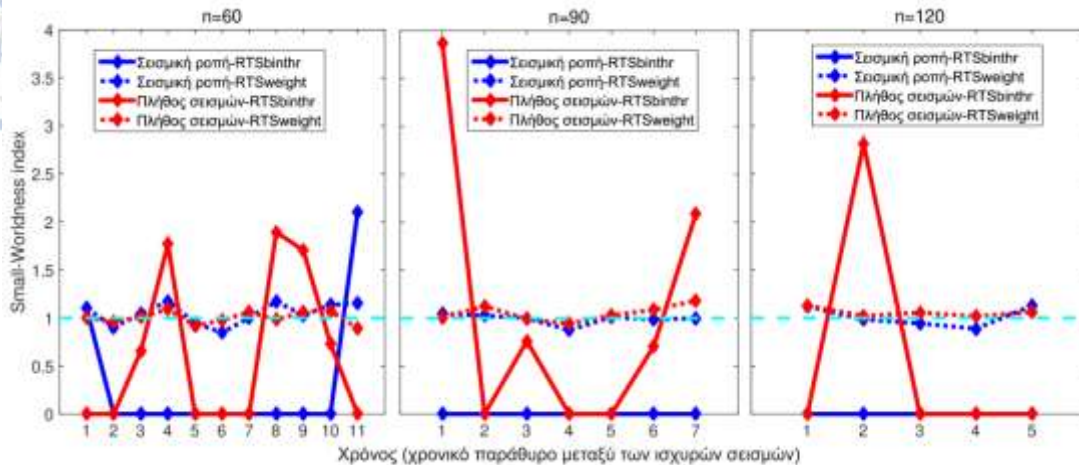
Οι τιμές του δείκτη μικρόκοσμου (S και S^W) για κάθε μία (1) από τις οχτώ (8) περιπτώσεις του Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.12 ως 3.19. Όταν οι τιμές του δείκτη μικρόκοσμου S , για απλές συνδέσεις, και S^W , για σταθμισμένες συνδέσεις, είναι πάνω από την μονάδα (1) τότε το σεισμικό δίκτυο συσχέτισης παρουσιάζει την ιδιότητα του μικρόκοσμου, ενώ όταν αποκτά τιμή κοντά στην μονάδα (1) τότε παρουσιάζει την τυχαία δομή. Έχει αποδειχθεί στην μελέτη προσομοίωσης, στην ενότητα 3.5, ότι όταν οι τιμές του δείκτη μικρόκοσμου είναι μεγαλύτερες από την μονάδα (1) τότε ταυτόχρονα ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις, $L \cong L_{rand}$ και $C \gg C_{rand}$, που απαιτούνται για την αναγνώριση της δομής του μικρόκοσμου στο σεισμικό δίκτυο συσχέτισης, μόνο με τις προσεγγίσεις τυχαιοποίησης RTSweight και RTSbinthr.

Ο δείκτης του μικρόκοσμου παρουσιάζει και για τους οχτώ (8) κύριους σεισμούς τρεις (3) διαφορετικές συμπεριφορές (φάσεις) ανάλογα με το μήκος η και την μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς, όταν το σεισμικό δίκτυο συσχέτισης παρουσιάζει είτε απλές ή σταθμισμένες συνδέσεις (Σχ. 3.12 ως Σχ. 3.19). Η διαδοχή των τριών (3) φάσεων που παρουσιάζεται στην δομή των σεισμικών δικτύων συσχέτισης που σχηματίζονται μεταξύ των κύριων σεισμών αποκαλύπτει την ύπαρξη χρονικών προτύπων που προειδοποιούν για τον επερχόμενο κύριο σεισμό λίγες μέρες πριν την γένεσή του. Στην πρώτη φάση, η οποία παρουσιάζεται αμέσως μετά τον προηγούμενο κύριο σεισμό, το δίκτυο συσχέτισης εμφανίζει την ιδιότητα του μικρόκοσμου διότι ισχύει $S \gg 1$, για τις απλές συνδέσεις, και $S^W > 1$, για τις σταθμισμένες συνδέσεις. Στην δεύτερη φάση, είτε το δίκτυο συσχέτισης παρουσιάζει τυχαία δομή καθώς ισχύει $S \cong 1$ και $S^W \cong 1$ (δηλαδή, $L \cong L_{rand}$ και $C \cong C_{rand}$) είτε δεν παρουσιάζει κάποια δομή καθώς ο δείκτης του μικρόκοσμου παρουσιάζει μηδενικές τιμές, δηλαδή $S = 0$, διότι ο συντελεστής συσταδοποίησης για το αρχικό δίκτυο συσχέτισης με απλές συνδέσεις εμφανίζει την τιμή μηδέν (0). Η δεύτερη φάση έχει μεγάλη χρονική διάρκεια ανεξάρτητα από τη διάρκεια κάθε διαστήματος που μεσολαβεί μεταξύ των κύριων σεισμών, καθώς παραμένει μέχρι και το προτελευταίο χρονικό παράθυρο πριν από τον επερχόμενο κύριο σεισμό. Στην τρίτη φάση, που καλύπτει το τελευταίο χρονικό παράθυρο πριν από τον επερχόμενο κύριο σεισμό, μια σημαντική αλλαγή παρατηρείται στην δομή του σεισμικού δικτύου συσχέτισης καθώς αποκτά ξανά, μετά την πρώτη φάση, την δομή του μικρόκοσμου διότι ο αντίστοιχος

δείκτης παρουσιάζει τιμές κατά πολύ μεγαλύτερες της μονάδας (1) δηλαδή $S \gg 1$ και $S^W > 1$. Η αύξηση της τιμής του δείκτη μικρόκοσμου σηματοδοτεί την εμφάνιση ενός πιο συσταδοποιημένου (αυξημένη τιμή του συντελεστή συσταδοποίησης) σεισμικού δικτύου συσχέτισης. Κάθε μία από τις οχτώ (8) περιπτώσεις μελέτης (Σχήματα 3.12 ως 3.19) περιγράφεται παρακάτω με περισσότερες λεπτομέρειες, σχετικά με την εξέλιξη της τιμής του δείκτη του μικρόκοσμου.

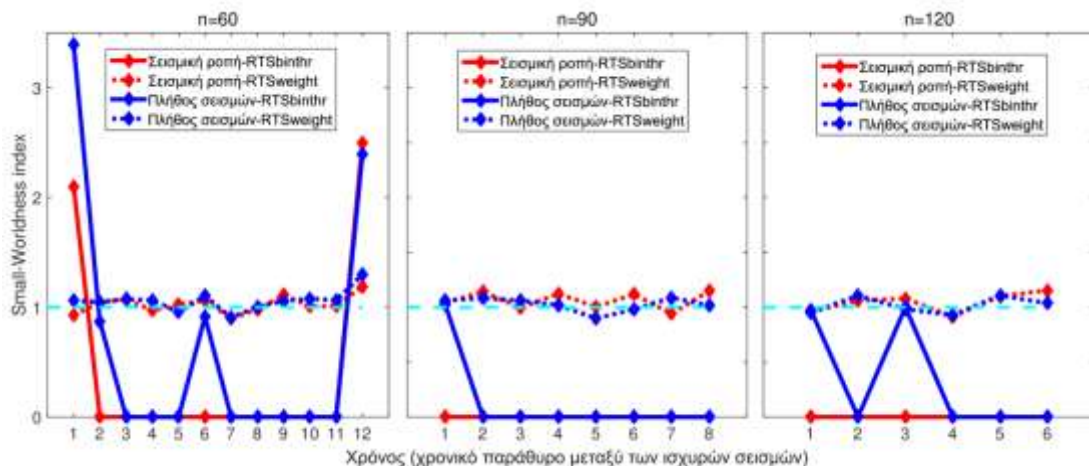
Για την πρώτη περίπτωση μελέτης, ο πρώτος κύριος σεισμός χρονικά έγινε στις 07/09/1999 στην Αττική και ο επερχόμενος κύριος σεισμός στις 26/07/2001 στην Σκύρο (Σχ. 2.20). Για δύο (2) περιπτώσεις, οι τιμές του δείκτη του μικρόκοσμου ακολουθούν το μοτίβο των τριών (3) φάσεων που περιγράφηκε παραπάνω τόσο για τα δίκτυα συχέτισης με σταθμισμένες όσο και με απλές συνδέσεις με ακόμα πιο έντονη μορφή (δηλαδή, με πιο υψηλές τιμές) για αυτές (Σχ. 3.12). Έτσι, όταν το μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι $n = 60$ και $n = 90$ και μεταβλητή της θεωρείται η σεισμική ροπή M_0 και το πλήθος των σεισμών, αντίστοιχα, παρατηρείται η πρώτη φάση μόνο για το πρώτο χρονικό παράθυρο αμέσως μετά τον κύριο σεισμό στις 07/09/1999. Η πρώτη φάση κατά την οποία σχηματίζεται η δομή του μικρόκοσμου, ίσως, συνδέεται με την μετασεισμική ακολουθία που προκύπτει από τον κύριο σεισμό της 07/09/1999. Για τις δύο (2) προαναφερθείσες περιπτώσεις, αναγνωρίζεται η δομή του μικρόκοσμου καθώς παρουσιάζονται τιμές $S = 1.2$ και $S = 3.9$ για το σεισμικό δίκτυο συσχέτισης με απλές συνδέσεις όταν θεωρείται ως μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς η σεισμική ροπή M_0 και το πλήθος των σεισμών, αντίστοιχα. Η δεύτερη φάση, όπου τα δίκτυα συσχέτισης εμφανίζουν είτε την τυχαία δομή (δηλαδή, οι τιμές του μικρόκοσμου κοντά στην μονάδα (1)) ή παρουσιάζουν μηδενικές (0) τιμές του δείκτη του μικρόκοσμου, ξεκινά αμέσως μετά το πρώτο χρονικό παράθυρο και διαρκεί μέχρι και το προτελευταίο χρονικό παράθυρο πριν τον επερχόμενο κύριο σεισμό που έγινε στις 26/07/2001. Στην τρίτη φάση η οποία καλύπτει το τελευταίο χρονικό παράθυρο, πριν τον επερχόμενο κύριο σεισμό στις 26/07/2001, αποκαλύπτεται η δομή του μικρόκοσμου στα σεισμικά δίκτυα συσχέτισης καθώς ο αντίστοιχος δείκτης παρουσιάζει τιμές κοντά στο δύο ($S = 2$) που ξεπερνούν κατά πολύ την μονάδα (1) που απαιτείται για να αναγνωριστεί η συγκριμένη ιδιότητα. Οι τρεις (3) φάσεις αναγνωρίζονται και για τις σταθμισμένες συνδέσεις για τις δύο (2) περιπτώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω αλλά με μικρότερες τιμές για τον δείκτη του μικρόκοσμου. Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις που αφορούν είτε το μήκος n ή της μεταβλητής που θεωρείται για τον σχηματισμό της πολυμεταβλητής χρονοσειράς δεν παρατηρείται κάποιο συγκεκριμένο χρονικό μοτίβο μεταξύ των κύριων σεισμών. Στα αποτελέσματα για τους επόμενους επτά (7) κύριους σεισμούς, που αποτελούν τις υπόλοιπες περιπτώσεις μελέτης, που παρουσιάζονται παρακάτω θα δίνεται έμφαση στις περιπτώσεις που αναγνωρίζονται οι τρεις (3) φάσεις που περιγράφηκαν παραπάνω καθώς αποτελούν σημαντικό εύρημα για την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας διότι αποκαλύπτουν ότι τα σεισμικά δίκτυα συσχέτισης παρουσιάζουν την δομή του μικρόκοσμου λίγο πριν τον επερχόμενο κύριο σεισμό.

Στη δεύτερη περίπτωση μελέτης, ο επερχόμενος κύριος σεισμός έγινε στις 14/08/2003 στο νησί της Λευκάδας (Σχ. 2.22). Οι τρεις (3) φάσεις που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη περίπτωση μελέτης αναγνωρίζονται μόνο στην περίπτωση που το μήκος n είναι $n = 60$ είτε όταν η σεισμική ροπή M_0 ή το πλήθος των σεισμών θεωρείται ως μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς (Σχ. 3.13). Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση οι τιμές του δείκτη μικρόκοσμου (S^W) για τις σταθμισμένες συνδέσεις είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες για τις απλές.



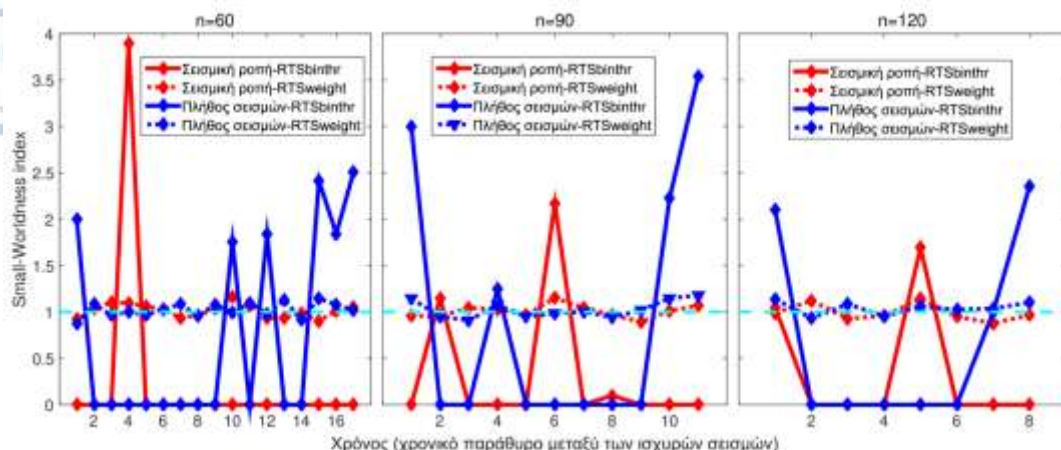
Σχ. 3.12: Ο δείκτης του μικρόκοσμου, για τον κύριο σεισμό της Σκύρου που έγινε στις 26-07-2001, για $n = 60$, $n = 90$ και $n = 120$ με βάση την μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς και την προσέγγιση τυχαιοποίησης από την οποία κατασκευάζονται τα τυχαιοποιημένα δίκτυα, σε κάθε κυλιόμενο χρονικό παράθυρο.

Επομένως, κατά την πρώτη φάση, δηλαδή το πρώτο χρονικό παράθυρο μετά τον κύριο σεισμό της 26/07/2001, και την τρίτη φάση, δηλαδή το τελευταίο χρονικό παράθυρο πριν τον επερχόμενο κύριο σεισμό της 14/08/2003, αποκαλύπτεται η δομή του μικρόκοσμου καθώς οι τιμές του αντίστοιχου δείκτη ξεπερνούν κατά πολύ την μονάδα (1).



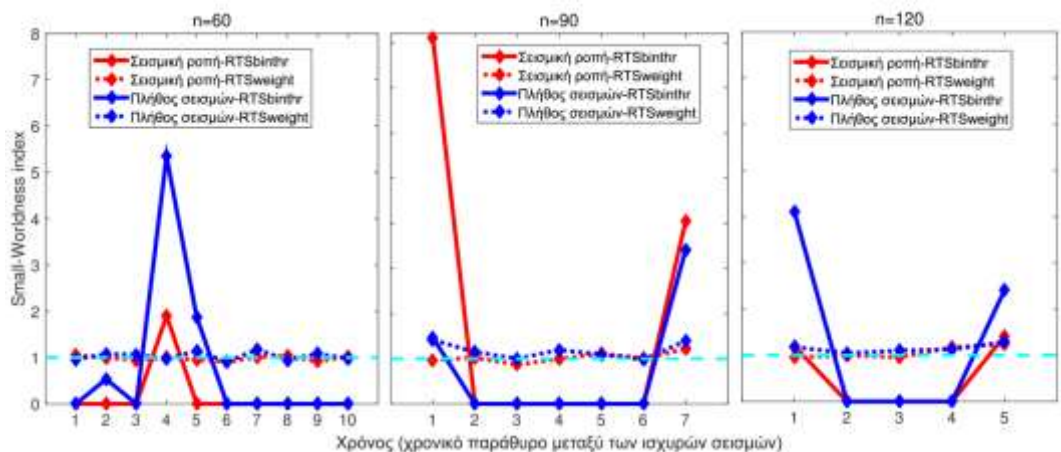
Σχ. 3.13: Όμοια όπως στο Σχ. 3.12 αλλά για τον κύριο σεισμό της Λευκάδας στις 14-08-2003.

Η τρίτη περίπτωση, αναφέρεται στον επερχόμενο κύριο σεισμό που έγινε στις 14/02/2008 στην Μεθώνη (Σχ. 2.24). Η διακριτή εξέλιξη των τιμών του δείκτη του μικρόκοσμου, σύμφωνα με τις τρεις (3) φάσεις, αναγνωρίζεται μόνο σε δύο (2) περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, όταν το μήκος n είναι $n = 90$ και $n = 120$ και το πλήθος των σεισμών θεωρείται ως η μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς ο δείκτης του μικρόκοσμου για το πρώτο και το τελευταίο χρονικό παράθυρο μελέτης παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας (1) διότι ξεπερνούν το δύο (2) για τις απλές συνδέσεις και το 1.2 για τις σταθμισμένες (Σχ. 3.14). Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις η διακύμανση των τιμών του δείκτη του μικρόκοσμου δεν μας επιτρέπει να ανιχνεύσουμε κάποιο χρονικό πρότυπο με σκοπό την προειδοποίηση του επερχόμενου κύριου σεισμού.



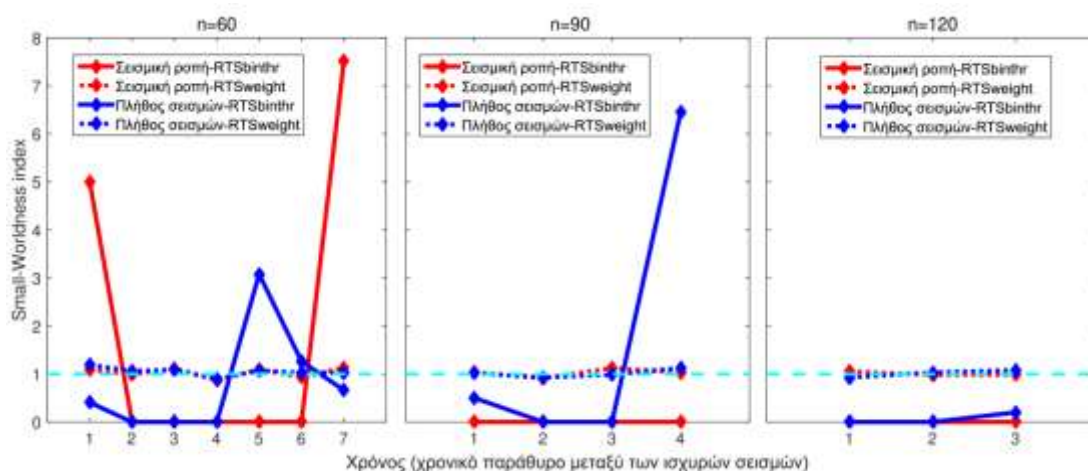
Σχ. 3.14: Όμοια όπως στο Σχ. 3.12 αλλά για τον κύριο σεισμό της Μεθώνης στις 14-02-2008.

Η τέταρτη περίπτωση, στην οποία ο επερχόμενος κύριος σεισμός έγινε την 01/04/2011 στην Κρήτη (Σχ. 2.26) παρουσιάζει, επίσης, τις τρεις (3) φάσεις, σχετικά με την διαδοχή της δομής του σεισμικού δικτύου συσχέτισης μεταξύ των κύριων σεισμών. Έτσι, αυτές διακρίνονται όταν είναι $n = 90$ ανεξάρτητα της μεταβλητής για την κατασκευή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς ή για $n = 120$ όταν ορίζεται το πλήθος σεισμών ως η μεταβλητή της (Σχ. 3.15). Για την πρώτη φάση, η οποία αποκαλύπτει την δομή του μικρόκοσμου ($S \gg 1$) μετά τον κύριο σεισμό της 01/07/2009, ο δείκτης του μικρόκοσμου αποκτά πολύ υψηλή τιμή (ξεπερνά το οχτώ (8)) όταν $n = 90$ και η σεισμική ροπή M_0 θεωρείται ως μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς. Η αυξημένη τιμή του δείκτη του μικρόκοσμου, ίσως, συνδέεται από την μετασεισμική ακολουθία που εξελίχθηκε μετά τον κύριο σεισμό στις 01/07/2009. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις, που αναγνωρίζονται οι τρεις (3) φάσεις, ο δείκτης του μικρόκοσμου παρουσιάζει χαμηλότερες τιμές. Η δεύτερη φάση, παρουσιάζει τιμές μηδενικές (0) για τον δείκτη μικρόκοσμου όταν οι συνδέσεις είναι απλές ενώ κοντά στην μονάδα (1), δηλαδή το δίκτυο συσχέτισης είναι τυχαίο, όταν είναι σταθμισμένες. Στην τρίτη φάση, δηλαδή στο τελευταίο χρονικό παράθυρο πριν τον επερχόμενο κύριο σεισμό της 01/04/2011, η τιμή του μικρόκοσμου παρουσιάζει υψηλότερες τιμές από την μονάδα (1) όπως στην πρώτη φάση, δηλαδή εμφανίζεται η δομή του μικρόκοσμου στο σεισμικό δίκτυο συσχέτισης. Η δομή του μικρόκοσμου που εμφανίζει το σεισμικό δίκτυο συσχέτισης, στο πρώτο και το τελευταίο χρονικό παράθυρο της μελέτης, παρουσιάζεται καλύτερα, δηλαδή με υψηλότερες τιμές του δείκτη του μικρόκοσμου, όταν θεωρούνται απλές αντί για σταθμισμένες συνδέσεις.



Σχ. 3.15: Όμοια όπως στο Σχ. 3.12 αλλά για τον κύριο σεισμό της Κρήτης στις 01-04-2011.

Στην πέμπτη περίπτωση, ο επερχόμενος κύριος σεισμός έγινε στις 10/06/2012 στο νησί της Ρόδου (Σχ. 2.28). Οι τρεις (3) φάσεις αναγνωρίζονται μόνο για μία (1) περίπτωση όταν το μήκος n είναι $n = 60$ και η σεισμική ροπή M_0 θεωρείται ως μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς (Σχ. 3.16). Για την παραπάνω περίπτωση κατά την πρώτη φάση, η οποία αποκαλύπτει την δομή του μικρόκοσμου ($S \gg 1$) μετά τον κύριο σεισμό στις 01/04/2011, η τιμή του μικρόκοσμου είναι κοντά στο πέντε (5) όταν θεωρούνται απλές συνδέσεις. Στην δεύτερη φάση οι τιμές του δείκτη του μικρόκοσμου είναι μηδενικές (0). Κατά την τρίτη φάση, δηλαδή στο τελευταίο χρονικό παράθυρο πριν τον επερχόμενο κύριο σεισμό στις 10/06/2012, η τιμή του δείκτη μικρόκοσμου είναι κοντά στο οχτώ (8) και έτσι αποκαλύπτει την δομή του μικρόκοσμου στο σεισμικό δίκτυο συσχέτισης. Τα σεισμικά δίκτυα συσχέτισης με σταθμισμένες συνδέσεις παρουσιάζουν χαμηλές τιμές του δείκτη μικρόκοσμου κοντά στην μονάδα (1), δηλαδή παρουσιάζουν την τυχαία δομή, σε όλα τα χρονικά παράθυρα για την παραπάνω περίπτωση.

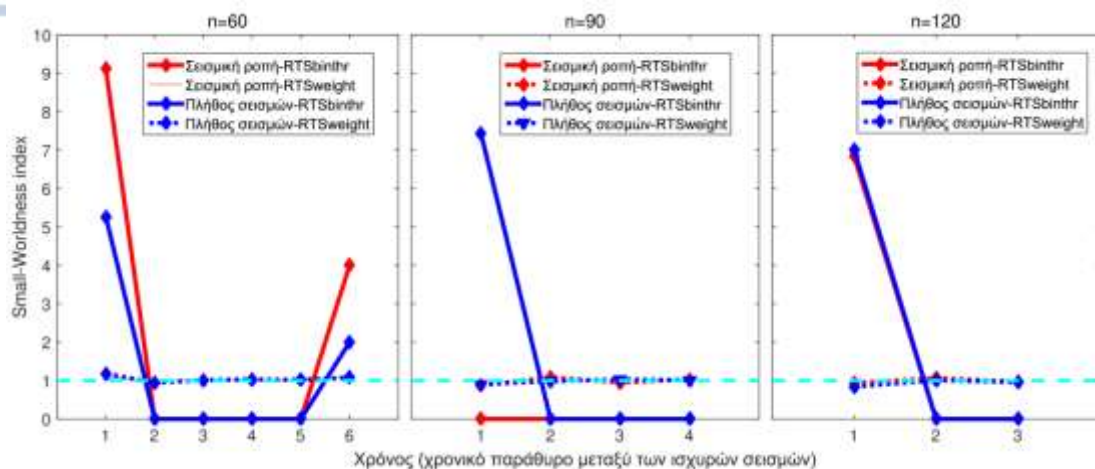


Σχ. 3.16: Όμοια όπως στο Σχ. 3.12 αλλά για τον κύριο σεισμό της Ρόδου στις 10-06-2012.

Η έκτη περίπτωση μελέτης, στην οποία ο επερχόμενος κύριος σεισμός έγινε στις 15/06/2013 στην Κρήτη (Σχ. 2.30) παρουσιάζει, επίσης, τις τρεις (3) φάσεις, σχετικά με την δομή του σεισμικού δικτύου συσχέτισης, για δύο (2) περιπτώσεις όπως στην δεύτερη περίπτωση (Σχ. 3.17). Συγκεκριμένα, οι τρεις (3) φάσεις αναγνωρίζονται μόνο στην περίπτωση που το μήκος n είναι $n = 60$ ανεξάρτητα από την μεταβλητή που ορίζεται για την κατασκευή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς. Αξίζει να σημειωθεί, όταν το μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι $n = 90$ και $n = 120$ και το πλήθος των σεισμών ως η μεταβλητή της κατά το πρώτο χρονικό παράθυρο, μετά τον κύριο σεισμό στις 10/06/2012, οι τιμές του δείκτη του μικρόκοσμου είναι πολύ υψηλότερες της μονάδας (1) αλλά παραμένουν μηδενικές (0) στα υπόλοιπα χρονικά παράθυρα.

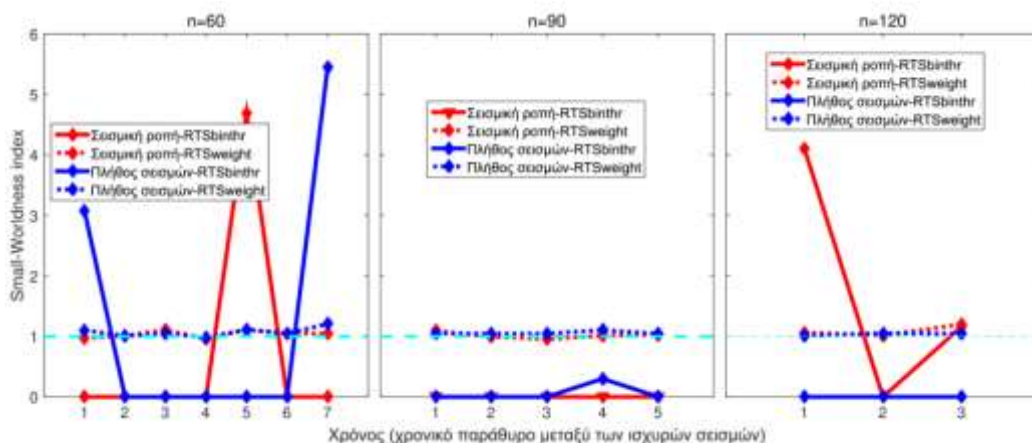
Στην έβδομη περίπτωση, ο επερχόμενος κύριος σεισμός έγινε στις 12/06/2017 στο νησί της Λέσβου (Σχ. 2.32). Οι τρεις (3) φάσεις αναγνωρίζονται μόνο για μία (1) περίπτωση όταν το μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι $n = 60$ και το πλήθος των σεισμών θεωρείται ως μεταβλητή της (Σχ. 3.18). Η πρώτη φάση, ίσως, συνδέεται με την μετασεισμική ακολουθία του κύριου σεισμού στις 17/11/2015 καθώς το σεισμικό δίκτυο συσχέτισης με απλές συνδέσεις εμφανίζει την δομή του μικρόκοσμου διότι παρουσιάζει τιμές του αντίστοιχου δείκτη κοντά στο τρία (3), $S = 3$. Στην δεύτερη φάση το δίκτυο συσχέτισης παρουσιάζει μηδενικές (0) τιμές για τον δείκτη του μικρόκοσμου και επομένως χάνεται η δομή του μικρόκοσμου που εμφάνιζε κατά την πρώτη φάση. Στην τρίτη φάση, δηλαδή στο τελευταίο χρονικό παράθυρο πριν τον επερχόμενο κύριο σεισμό στις 12/06/2017, ο δείκτης του

μικρόκοσμου αποκαλύπτει την μετάβαση του σεισμικού δικτύου συσχέτισης σε δομή του μικρόκοσμου, όπως κατά την πρώτη φάση, καθώς ο αντίστοιχος δείκτης παρουσιάζει τιμή πολύ μεγαλύτερη της μονάδας (1) ($S = 5.5$).



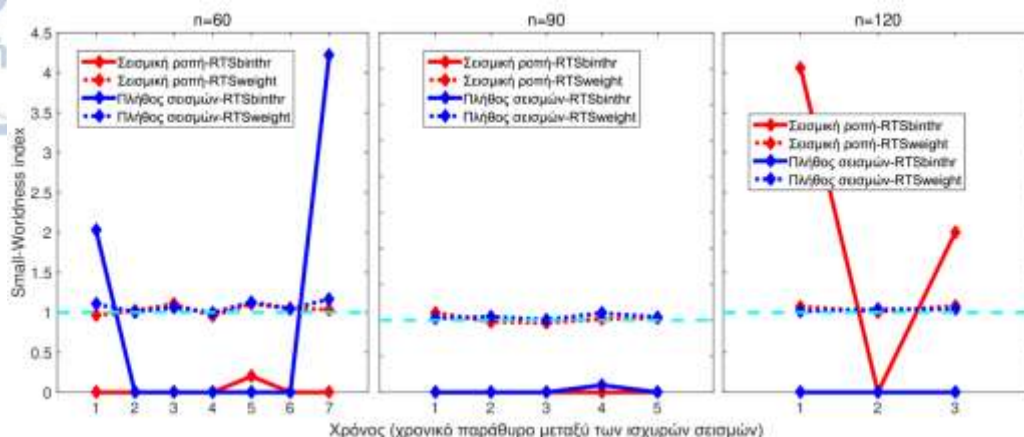
Σχ. 3.17: Όμοια όπως στο Σχ. 3.12 αλλά για τον κύριο σεισμό της Κρήτης στις 15-06-2013.

Επίσης, στην περίπτωση που το μήκος n της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι $n = 120$ και μεταβλητή της θεωρείται η σεισμική ροπή M_0 οι τρεις (3) φάσεις που παρουσιάζει η δομή του σεισμικού δικτύου συσχέτισης τείνουν να εμφανιστούν αλλά με τιμή του δείκτη του μικρόκοσμου κοντά στην μονάδα (1) στο τελευταίο χρονικό παράθυρο πριν τον κύριο σεισμό στις 12-06-2017.



Σχ. 3.18: Όμοια όπως στο Σχ. 3.12 αλλά για τον κύριο σεισμό της Λέσβου στις 12-06-2017.

Η τελευταία περίπτωση μελέτης, στην οποία ο επερχόμενος κύριος σεισμός έγινε στις 25/10/2018 στο νησί της Ζακύνθου (Σχ. 2.34) παρουσιάζει, επίσης, τις τρεις (3) φάσεις, σχετικά με την δομή του σεισμικού δικτύου συσχέτισης, για δύο (2) περιπτώσεις (Σχ. 3.19). Συγκεκριμένα, οι τρεις (3) φάσεις αναγνωρίζονται στην περίπτωση είτε για $n = 60$ και μεταβλητή θεωρείται το πλήθος των σεισμών για την κατασκευή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς ή για $n = 120$ και μεταβλητή την σεισμική ροπή M_0 , αντίστοιχα. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο δείκτης του μικρόκοσμου παρουσιάζει τιμές πάνω από το δύο (2) στο πρώτο και το τελευταίο χρονικό παράθυρο μελέτης, ενώ στα υπόλοιπα χρονικά παράθυρα παρουσιάζει μηδενικές (0) τιμές. Για τις σταθμισμένες συνδέσεις για όλες τις περιπτώσεις, που αφορούν το μήκος n και την μεταβλητή που θεωρείται για την κατασκευή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς, ο δείκτης του μικρόκοσμου παρουσιάζει τιμές κοντά στην μονάδα (1) αποκαλύπτοντας την τυχαία δομή του.



Σχ. 3.19: Όμοια όπως στο Σχ. 3.12 αλλά για τον κύριο σεισμό της Ζακύνθου στις 25-10-2018.

Συμπερασματικά, για όλες τις περιπτώσεις μελέτης η δομή του μικρόκοσμου αποκαλύπτεται στα σεισμικά δίκτυα συσχέτισης στο πρώτο χρονικό παράθυρο, δηλαδή αμέσως μετά τον κύριο σεισμό, και στο τελευταίο, πριν από τον επερχόμενο κύριο σεισμό αλλά χωρίς κάποια συνέπεια ως προς την μεταβλητή από την οποία κατασκευάζεται το δίκτυο και το πλήθος των παρατηρήσεων της χρονοσειράς. Αυτό το εύρημα μπορεί να θεωρηθεί ενθαρρυντικό για την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας καθώς τα σεισμικά δίκτυα συσχέτισης παρουσιάζουν μια ξεκάθαρη δυναμική εξέλιξη της δομής τους μεταξύ των κύριων σεισμών, όπου αποκτούν την δομή του μικρόκοσμου, πριν από τους επερχόμενους κύριους σεισμούς. Επίσης, η δομή του μικρόκοσμου αποκαλύπτεται και σε άλλα χρονικά παράθυρα χωρίς όμως να αποκαλύπτεται κάποιο χρονικό μοτίβο που θα μπορούσε να προειδοποιήσει για την γένεση των επερχόμενων κύριων σεισμών καθώς δεν την παρουσιάζουν σε κάποιο συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο μεταξύ των κύριων σεισμών.

3.6.2 Μελέτη των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων του δικτύου σε μετασεισμικές ακολουθίες

Ο στόχος της δεύτερης εφαρμογής είναι να εντοπιστούν πιθανά χρονικά πρότυπα, σε μετασεισμικές ακολουθίες, που η δομή του δικτύου επανάληψης αποκαλύπτει τον επερχόμενο κύριο σεισμό ή μετασεισμό του λίγες μέρες πριν τη γένεσή του. Στην δεύτερη εφαρμογή χρησιμοποιείται το δίκτυο επανάληψης καθώς μελετώνται δύο (2) μετασεισμικές ακολουθίες, της Κεφαλονιάς το 2014 με δύο κύριους σεισμούς και από τον κύριο σεισμό της Λευκάδας το 2015, αντίστοιχα, όπως περιγράφονται στην ενότητα 2.6.2 (Σχ. 2.37). Επομένως, στην ενότητα αυτή εξετάζεται η δομή των σεισμικών δικτύων επανάληψης κατά τη διάρκεια των ίδιων μετασεισμικών ακολουθιών που παρουσιάζονται στην ενότητα 2.6.2 (Σχ. 2.37), όπου διερευνήθηκε η στατιστική σημαντικότητα των τιμών των μέτρων δικτύου πριν τους επερχόμενους κύριους σεισμούς ή μετασεισμούς τους.

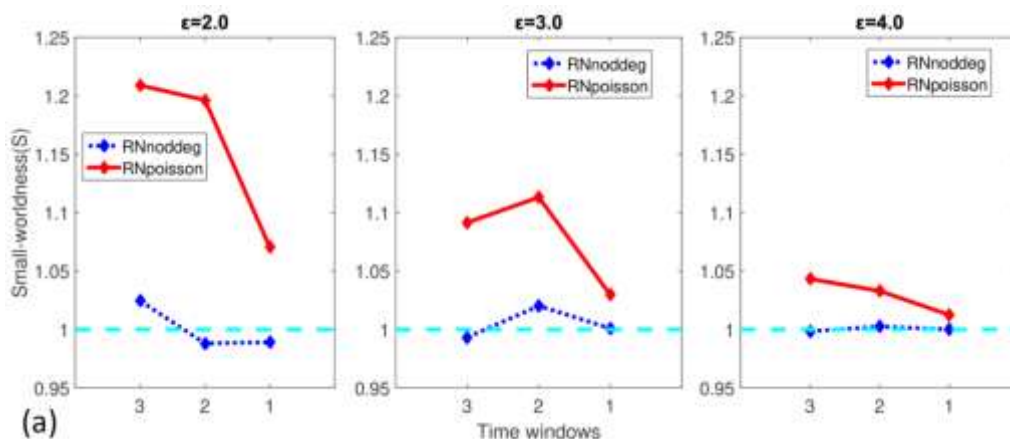
Υπενθυμίζεται ότι οι κόμβοι του δικτύου επανάληψης αντιστοιχούν στις παρατηρήσεις της χρονοσειράς, οι οποίες σχηματίζονται από τη σεισμική ροπή M_0 που απελευθερώνεται από κάθε μετασεισμό. Οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων δίδονται από το αυθαίρετο κατώφλι ε που εφαρμόζεται στον πίνακα επανάληψης $R_{i,j}(\varepsilon)$ (σχέση (2.3)). Θεωρούνται τρία (3) διαφορετικά κατώφλια για το ε , συγκεκριμένα $\varepsilon = 2.0$, $\varepsilon = 3.0$ και $\varepsilon = 4.0$, προκειμένου να διερευνηθεί κατά πόσον τα αποτελέσματα επηρεάζονται από την επιλογή του. Για την διερεύνηση της δομής που μπορεί να παρουσιάζουν τα σεισμικά δίκτυα επανάληψης, που σχηματίζονται από τις μετασεισμικές ακολουθίες, απαιτείται ο σχηματισμός τυχαιοποιημένων

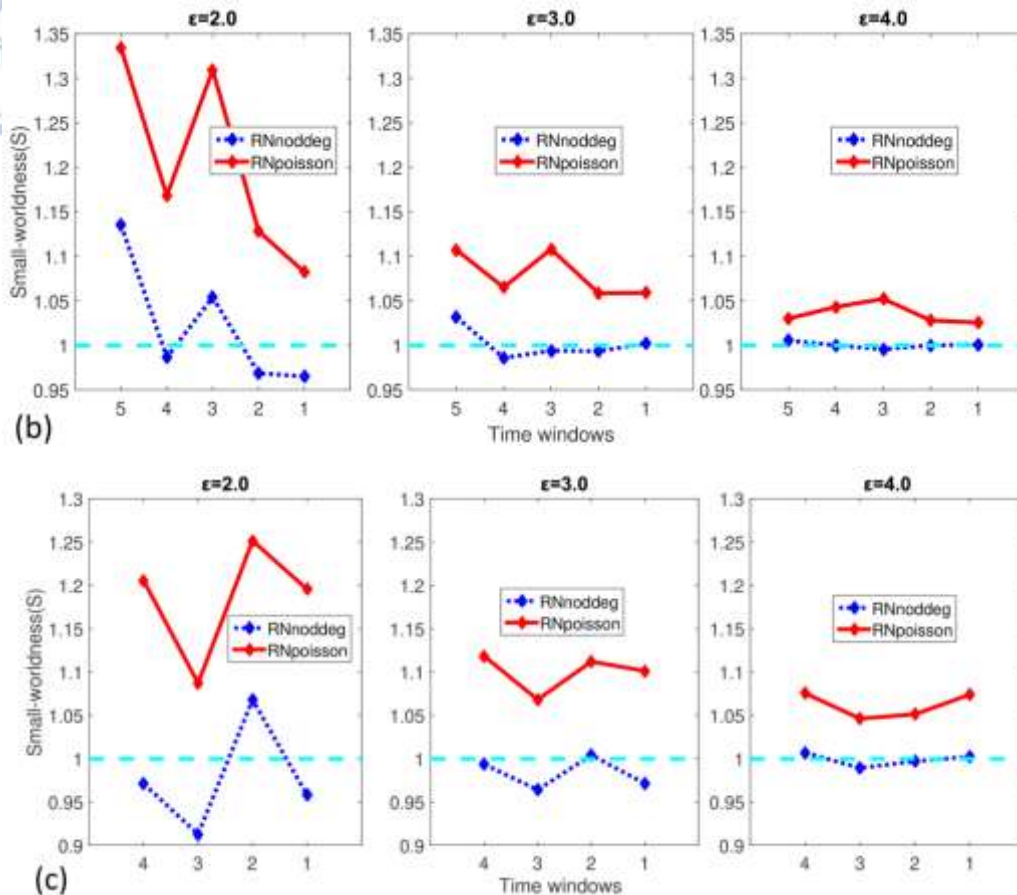
δικτύων από τις κατάλληλες προσεγγίσεις τυχαιοποίησης, RNnoddeg και RNpoisson, για απλές συνδέσεις. Δεν μπορούν να χρησιμοποιούν οι προσεγγίσεις τυχαιοποίησης, RTSbinthr, RTSbindeg και RTSweight, που τυχαιοποιούν την αρχική πολυμεταβλητή χρονοσειρά καθώς δεν κατασκευάζονται δίκτυα συσχέτισης, όπως, και η προσέγγιση τυχαιοποίησης RNavestr καθώς κατασκευάζονται δίκτυα με απλές συνδέσεις.

Θεωρούνται τρεις (3) συνολικά περιπτώσεις μελέτης (Πίνακας 2.2) που είναι ακριβώς οι ίδιες με αυτές που παρουσιάζονται στην ενότητα 2.6.2. Έτσι, εξετάζεται η μετασεισμική ακολουθία μεταξύ των δύο κύριων σεισμών της Κεφαλονιάς το 2014 (Σχ. 2.38(b)), η μετασεισμική ακολουθία που εξελίχθηκε μεταξύ του δεύτερου κύριου σεισμού της Κεφαλονιάς και του ισχυρότερου μετασεισμού (από τις 03-02-2014 και έπειτα, Σχ. 2.40) και η μετασεισμική ακολουθία μεταξύ των δύο ισχυρότερων μετασεισμών που έγιναν μετά τον κύριο σεισμό της Λευκάδας το 2015 (Σχ. 2.42(b)).

Η παρακολούθηση των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων, του μικρόκοσμου και της ελεύθερης κλίμακας, που μπορεί να παρουσιάζει το σεισμικό δίκτυο επανάληψης σε μετασεισμικές ακολουθίες πραγματοποιείται σε κυλιόμενα χρονικά παράθυρα (τα όποια είναι τα ίδια με την εφαρμογή 2.6.2 για κάθε μια από τις τρεις (3) περιπτώσεις μελέτης) καθένα από τα οποία περιλαμβάνει τον ίδιο αριθμό μετασεισμών. Η τιμή του δείκτη του μικρόκοσμου S δίνεται από την σχέση (3.1) ενώ για την ύπαρξη της ιδιότητας της ελεύθερης κλίμακας απαιτείται για τον εκθέτη, γ , να ισχύει $2 \leq \gamma \leq 3$ (Cohen et al. 2000). Όταν οι τιμές του δείκτη του μικρόκοσμου S είναι πάνω από την μονάδα (1), $S > 1$, τότε το σεισμικό δίκτυο επανάληψης παρουσιάζει την ιδιότητα του μικρόκοσμου, ενώ όταν αποκτά τιμή κοντά στην μονάδα (1) τότε παρουσιάζει την τυχαία δομή. Υπενθυμίζουμε ότι ο κύριος στόχος της μελέτης είναι να προσδιοριστεί αν σε κάποιο χρονικό διάστημα (παράθυρο) κατά την διάρκεια της μετασεισμικής ακολουθίας εμφανίζονται οι μη-τετριμμένες ιδιότητες του σεισμικού δικτύου επανάληψης, κυρίως πριν από τους επερχόμενους κύριους σεισμούς ή των μετασεισμών τους.

Το Σχ. 3.20 παρουσιάζει την εξέλιξη της τιμής του μικρόκοσμου (S) για κάθε κατώφλι ε και προσέγγιση τυχαιοποίησης που θεωρείται και για τις τρεις (3) περιπτώσεις μελέτης. Η ιδιότητα του μικρόκοσμου παρουσιάζεται και για τις τρεις (3) περιπτώσεις μελέτης ανεξάρτητα από την τιμή του κατωφλίου ε , μόνο όταν η προσέγγιση τυχαιοποίησης που κατασκευάζει τα τυχαιοποιημένα δίκτυα είναι η RNpoisson καθώς ο δείκτης του μικρόκοσμου παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας (1) για τις παραπάνω περιπτώσεις. Θα αναφερθούμε στην ενότητα 3.6.3 ότι η προσέγγιση τυχαιοποίησης RNpoisson έχει την τάση να σχηματίζει στο αρχικό δίκτυο την δομή του μικρόκοσμου. Επίσης, παρατηρείται ότι όσο μεγαλώνει η τιμή του κατωφλίου ε , τόσο οι τιμές του δείκτη του μικρόκοσμου παρουσιάζονται χαμηλότερες.





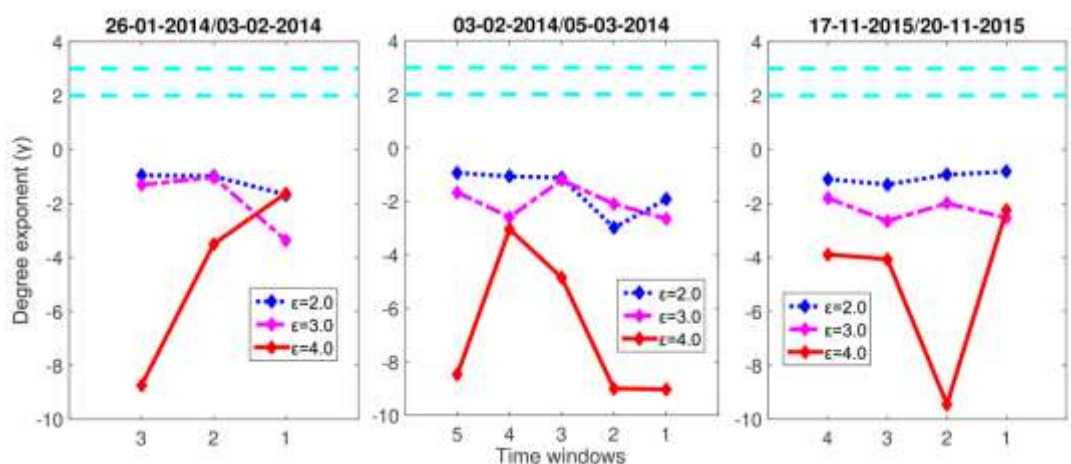
Σχ. 3.20: Η εξέλιξη της τιμής του μικρόκοσμου (S) ανάλογα με την προσέγγιση τυχαιοποίησης και το κατώφλι ε που θεωρείται, στο (a) για το χρονικό διάστημα 26-01-2014/03-02-2014, στο (b) για το χρονικό διάστημα 03-02-2014/05-03-2014 και στο (c) για το χρονικό διάστημα 17-11-2015/20-11-2015.

Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι καθώς η τιμή του κατωφλίου μεγαλώνει αυξάνονται οι συνδέσεις στο σεισμικό δίκτυο επανάλληψης με αποτέλεσμα να γίνεται πιο δύσκολη η διάκριση της δομής του καθώς τείνει να δημιουργηθεί πλήρες δίκτυο. Αντίθετα, σε καμία από τις τρεις (3) περιπτώσεις, ανεξάρτητα της τιμής του κατωφλίου ε , που θεωρείται, η δομή του μικρόκοσμου δεν μπορεί να αναγνωριστεί στα σεισμικά δίκτυα επανάλληψης καθώς δεν πληρείται η προϋπόθεση $S > 1$ όταν προσέγγιση τυχαιοποίησης θεωρείται η RNnoddeg. Τα σεισμικά δίκτυα επανάλληψης κατά την διάρκεια της εξέλιξης των μετασεισμικών ακολουθιών εμφανίζουν την τυχαία δομή ($S = 1$) με την προσέγγιση τυχαιοποίησης RNnoddeg (Σχ. 3.20).

Ο εκθέτης, γ , υπολογίζεται για κάθε τιμή του κατωφλίου ε για τη διερεύνηση της ιδιότητας της ελεύθερης κλίμακας στα σεισμικά δίκτυα επανάλληψης για κάθε περίπτωση μελέτης (Σχ. 3.21). Το Σχ. 3.21 αποδεικνύει ότι δεν εκπληρώνεται η προϋπόθεση $2 \leq \gamma \leq 3$, για την αναγνώριση της δομής της ελεύθερης κλίμακας, για καμία από τις περιπτώσεις μελέτης. Επομένως, τα σεισμικά δίκτυα επανάλληψης δεν παρουσιάζουν την ιδιότητα της ελεύθερης κλίμακας στην δομή τους κατά την διάρκεια των μετασεισμικών ακολουθιών.

Η ιδιότητα του μικρόκοσμου εμφανίζεται σε όλα τα χρονικά παράθυρα για όλες τις μετασεισμικές ακολουθίες που εξετάστηκαν ανεξάρτητα από την τιμή του κατωφλίου ε που θεωρείται όταν προσέγγιση τυχαιοποίησης χρησιμοποιείται η RNpoisson. Αυτό το εύρημα είναι σημαντικό καθώς αποκαλύπτεται η δομή του μικρόκοσμου στα

σεισμικά δίκτυα επανάληψης που κατασκευάζονται κατά την διάρκεια μετασεισμικών ακολουθιών αλλά δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη χρησιμότητα καθώς δεν υποδεικνύει κάποιο συγκεκριμένο χρονικό πρότυπο σχετικά με την μεταβολή της δομής του σεισμικού δικτύου επανάληψης πριν τους κύριους σεισμούς ή μετασεισμούς τους, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.6.1. Αντίθετα, η ιδιότητα της ελεύθερης κλίμακας δεν αναγνωρίζεται στην δομή των σεισμικών δικτύων επανάληψης κατά την διάρκεια των μετασεισμικών ακολουθιών που εξετάστηκαν.



Σχ. 3.21: Η εξέλιξη της τιμής του εκθέτη, γ , για τη διερεύνηση της δομής της ελεύθερης κλίμακας στα σεισμικά δίκτυα επανάληψης ανάλογα με το κατώφλι ϵ που θεωρείται για το χρονικό διάστημα 26-01-2014/03-02-2014, 03-02-2014/05-03-2014 και 17-11-2015/20-11-2015, αντίστοιχα.

3.6.3 Έλεγχος της ανεξαρτησίας των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων του σεισμικού δικτύου από την μεθοδολογία κατασκευής του

Όπως έχει αναφερθεί, οι Abe et al. (2011) έχουν αποδείξει την καθολικότητα της ιδιότητας του μικρόκοσμου στην δομή των σεισμικών δικτύων καθώς αυτή έχει παρουσιαστεί για τέσσερις διαφορετικές περιοχές (Καλιφόρνια, Ιαπωνία, Ιράν και Χιλή). Κατά την προηγούμενη μελέτη, Abe et al. (2011), το σεισμικό δίκτυο κατασκευάστηκε με μόνο μία μεθοδολογία τόσο για το αρχικό (ενότητα 2.2.1 που αφορά την κατασκευή του σεισμικού δικτύου από την διαδοχή των σεισμών) όσο και για το τυχαιοποιημένο δίκτυο (ενότητα 2.4.3 που περιγράφει την προσέγγιση τυχαιοποίησης RNproisson) με σκοπό την διερεύνηση της ύπαρξης της ιδιότητας του μικρόκοσμου στην δομή του αρχικού σεισμικού δικτύου.

Επομένως, στην τρίτη (3^η) εφαρμογή του τρίτου (3^{ου}) κεφαλαίου εξετάζεται κατά πόσο η ύπαρξη κάποιας μη-τετριμμένης ιδιότητας, όπως του μικρόκοσμου και της ελεύθερης κλίμακας, στην δομή του σεισμικού δικτύου εξαρτάται από την μεθοδολογία που ακολουθείται για την κατασκευή του. Έτσι, η διερεύνηση της δομής που μπορεί να παρουσιάζει το σεισμικό δίκτυο πραγματοποιείται για τα διάφορα σενάρια που αφορούν την μεθοδολογία κατασκευής του (Πίνακας 3.2). Ως εκ τούτου, οι κόμβοι του σεισμικού δικτύου αντιπροσωπεύουν είτε σεισμικές κυψελίδες ή σεισμικές ζώνες και οι συνδέσεις του δίνονται είτε από την διαδοχή των σεισμών (προσέγγιση που περιγράφεται στην ενότητα 2.2.1) ή από τον συντελεστή συσχέτισης Pearson (προσέγγιση που περιγράφεται στην ενότητα 2.2.2) για τις διάφορες χρονικές περιόδους, με την αντίστοιχη προϋπόθεση της πληρότητας να ικανοποιείται, που κατασκευάστηκε το σεισμικό δίκτυο (Πίνακας 3.2). Η μελέτη για κάθε χρονική περίοδο πραγματοποιείται για όλο το χρονικό διάστημα χωρίς να δημιουργούνται κυλιόμενα χρονικά παράθυρα.

Αναλυτικότερα, για τον ορισμό των κόμβων του σεισμικού δικτύου η περιοχή μελέτης χωρίζεται είτε σε $K = 17$ (Σχ. 2.18) και $K = 29$ σεισμικές ζώνες (Σχ. 3.22) ή σε $K = 63$ και $K = 108$ σεισμικές κυψελίδες μεγέθους 1.3° και 1.0° , αντίστοιχα. Οι 17 και 29 σεισμικές ζώνες, που αποτελούν και τους κόμβους του δικτύου, προέκυψαν από την ενοποίηση των 67 σεισμικών ζωνών που προτείνονται στην εργασία των Papaioannou & Papazachos (2000). Θεωρείται διαφορετικός αριθμός σεισμικών ζωνών ώστε να προκύψουν δίκτυα με διαφορετικό αριθμό κόμβων και να ελεγχθεί αν επηρεάζονται τα αποτελέσματα από το πλήθος των κόμβων.

Οι συνδέσεις μεταξύ των κόμβων του σεισμικού δικτύου εισάγονται είτε από την χρονική διαδοχή των σεισμών, δηλαδή σύμφωνα με την προσέγγιση που περιγράφεται στην ενότητα 2.2.1, ή από τον συντελεστή συσχέτισης Pearson, δηλαδή σύμφωνα με την προσέγγιση που περιγράφεται στην ενότητα 2.2.2.

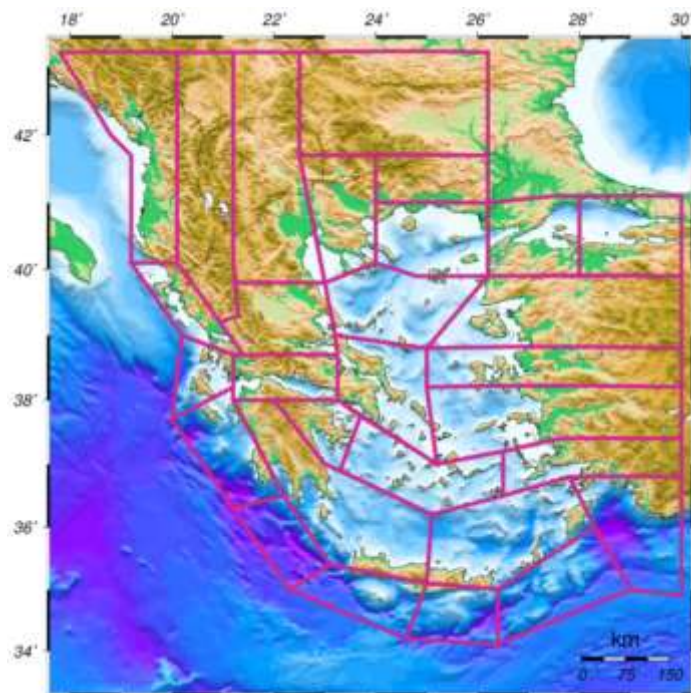
Πίνακας 3.2: Τα σενάρια που αφορούν την κατασκευή των σεισμικών δικτύων για την εξέταση της ύπαρξης των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων στην δομή τους για τις διάφορες χρονικές περιόδους (η χρονολογία δηλώνει την έναρξη της χρονικής περιόδου ενώ όλες οι χρονικές περίοδοι τελειώνουν το 2017) με τα αντίστοιχα μεγέθη M πληρότητας. Στις παρενθέσεις, δίνεται ο αριθμός του πίνακα ή του σχήματος που παρουσιάζει τα αποτελέσματα για το αντίστοιχο σενάριο.

Σεισμικές κυψελίδες	Σεισμικές ζώνες
Οι συνδέσεις δίνονται από την διαδοχή των σεισμών	
1845 με $M \geq 6.5$, (Πίνακες 3.3 και 3.7)	1845 με $M \geq 6.5$, (Πίνακες 3.3 και 3.7)
1911 με $M \geq 6.0$, (Πίνακες 3.4 και 3.7)	1911 με $M \geq 6.0$, (Πίνακες 3.4 και 3.7)
1964 με $M \geq 4.0$, (Πίνακες 3.5 και 3.7)	
1992 με $M \geq 3.5$, (Πίνακες 3.5 και 3.7)	
2010 με $M \geq 3.0$, (Πίνακες 3.5 και 3.7)	
Οι συνδέσεις δίνονται από τον συντελεστή συσχέτισης Pearson	
1964 με $M \geq 4.0$, (Σχ. 3.28 και Πίνακας 3.8)	1964 με $M \geq 4.0$, (Σχ. 3.28 και Πίνακας 3.8)
1992 με $M \geq 3.5$, (Σχ. 3.29 και Πίνακας 3.8)	1992 με $M \geq 3.5$, (Σχ. 3.29 και Πίνακας 3.8)
2010 με $M \geq 3.0$, (Σχ. 3.30 και Πίνακας 3.8)	2010 με $M \geq 3.0$, (Σχ. 3.30 και Πίνακας 3.8)

Η παρατηρούμενη μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι είτε η σεισμική ροπή M_0 ή το πλήθος των σεισμών που παρουσιάζει ο κάθε κόμβος. Τα $B = 100$ τυχαιοποιημένα δίκτυα, που είναι απαραίτητα η κατασκευή τους για την διερεύνηση των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων που μπορεί να παρουσιάζει η δομή του σεισμικού δικτύου, σχηματίζονται από τις έξι (6) προσεγγίσεις τυχαιοποίησης που παρουσιάζονται στην ενότητα 2.4.

Για τις χρονικές περιόδους 1964-2017, 1992-2017 και 2010-2017 όταν η κατασκευή του σεισμικού δικτύου βασίζεται στην χρονική διαδοχή των σεισμών και οι κόμβοι του αντιπροσωπεύονται από τις σεισμικές ζώνες σχηματίζονται πλήρη δίκτυα. Επομένως, οι παραπάνω περιπτώσεις εξαιρέθηκαν από την μελέτη (Πίνακας 3.2) καθώς με πλήρη δίκτυα δεν θα είχε νόημα η κατασκευή τυχαιοποιημένων δικτύων που σχηματίζονται με τυχαιοποίηση των συνδέσεων του αρχικού δικτύου. Παρόμοια, για τις χρονικές περιόδους 1845-2017 και 1911-2017 όταν η κατασκευή του σεισμικού δικτύου βασίζεται στον συντελεστή συσχέτισης Pearson και οι κόμβοι του αντιπροσωπεύονται είτε από τις σεισμικές ζώνες ή τις σεισμικές κυψελίδες τότε σχηματίζονται αρκετά μηδενικά (0) στις παρατηρήσεις των μεταβλητών της

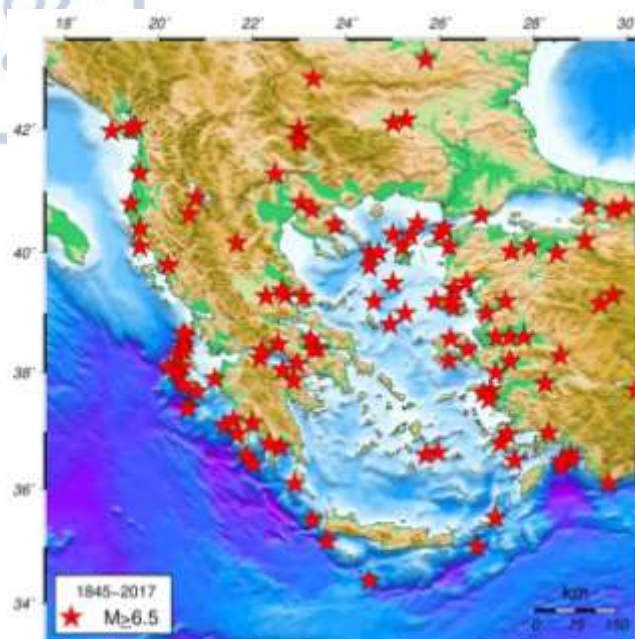
πολυμεταβλητής χρονοσειράς (αν και θεωρείται μεγάλη διάρκεια δειγματοληψίας 365 και 180 ημέρες για κάθε παρατήρηση, αντίστοιχα) λόγω του μεγάλου μεγέθους πληρότητας. Οι παραπάνω περιπτώσεις, επίσης, εξαιρούνται από την εφαρμογή που εκτελείται (Πίνακας 3.2). Αντίθετα, για τις χρονικές περιόδους 1964-2017, 1992-2017 και 2010-2017 όπου ο χρόνος δειγματοληψίας κάθε παρατήρησης της πολυμεταβλητής χρονοσειράς είναι ίσος με 90, 60 και 30 ημέρες, αντίστοιχα, σχηματίζονται περιορισμένα σε πλήθος μηδενικά (0) στην πολυμεταβλητή χρονοσειρά.



Σχ. 3.22: Οι 29 σεισμικές ζώνες στις οποίες διαιρείται ο Ελληνικός χώρος με τις γειτονικές περιοχές του.

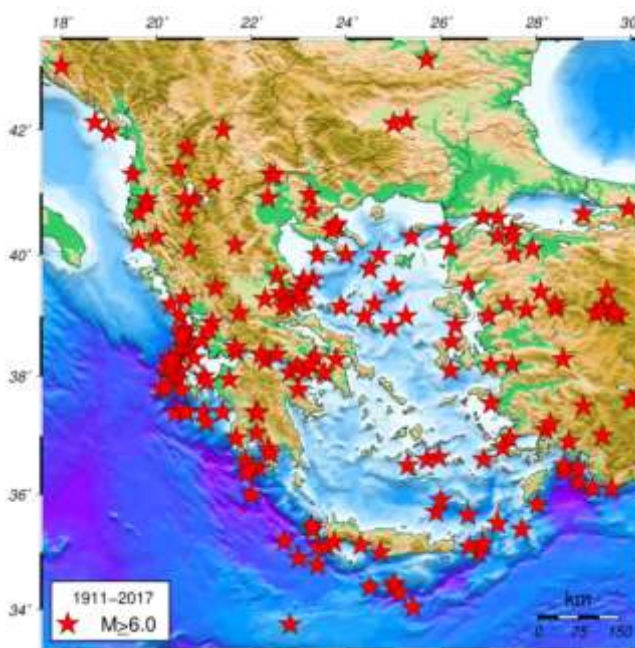
Στους Πίνακες 3.3 ως 3.5 και στα Σχ. 3.28 ως 3.30, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σχετικά με την εξέταση της δομής του μικρόκοσμου στα σεισμικά δίκτυα που κατασκευάζονται για τα διάφορα σενάρια του Πίνακα 3.2. Για την αναγνώριση της δομής του μικρόκοσμου στα σεισμικά δίκτυα απαιτούνται τρεις προϋποθέσεις, η τιμή του δείκτη του μικρόκοσμου (σχέσεις (3.1) και (3.2)) να είναι πάνω από την μονάδα (1) και οι υποθέσεις $L \cong L_{rand}$ (δηλαδή, $pL > 0.05$) και $C \gg C_{rand}$ (δηλαδή, $pC < 0.05$) να ικανοποιούνται από τον στατιστικό έλεγχο που βασίζεται στην σχέση (2.36), όπως εκτελείται στην μελέτη προσομοίωσης στην ενότητα 3.5.2.

Οι Πίνακες 3.3 και 3.4 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα σχετικά με την ιδιότητα του μικρόκοσμου για τις χρονικές περιόδους 1845-2017 (Σχ. 3.23) και 1911-2017 (Σχ. 3.24) όταν το σεισμικό δίκτυο κατασκευάζεται από την διαδοχή των σεισμών.



Σχ. 3.23: Τα επίκεντρα των κύριων σεισμών με $M \geq 6.5$ κατά την χρονική περίοδο 1845-2017 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του.

Σε καμία από τις περιπτώσεις που περιγράφονται στο Πίνακα 3.3 και 3.4, οι οποίες αφορούν τον διαφορετικό σχηματισμό των κόμβων και τις προσεγγίσεις τυχαιοποίησης του αρχικού δικτύου, δεν μπορεί να θεωρηθεί η ιδιότητα του μικρόκοσμου στην δομή των σεισμικών δικτύων, διότι δεν ισχύουν ταυτόχρονα οι απαραίτητες προϋποθέσεις ($S \gg 1$, $pC < 0.05$ και $pL > 0.05$).



Σχ. 3.24: Τα επίκεντρα των κύριων σεισμών με $M \geq 6.0$ κατά την χρονική περίοδο 1911-2017 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του.

Η προσέγγιση τυχαιοποίησης RNpoisson, παρουσιάζει $S \gg 1$ και για τις δύο χρονικές περιόδους (δηλαδή, τις χρονικές περιόδους 1845-2017 και 1911-2017), όταν οι κόμβοι του σεισμικού δικτύου αντιπροσωπεύονται από $K = 63$ ή $K = 108$ σεισμικές κυψελίδες, καθώς οι τιμές του δείκτη του μικρόκοσμου κυμαίνονται μεταξύ 3.7 και 12.3.

Πίνακας 3.3: Η τιμή του δείκτη του μικρόκοσμου (S και S^W), η p -τιμή για τον συντελεστή συσταδοποίησης (pC) και για το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής (pL) για διαφορετικές ρυθμίσεις των κόμβων και των προσεγγίσεων τυχαιοποίησης, για την χρονική περίοδο 1845-2017 όταν το σεισμικό δίκτυο κατασκευάζεται από την διαδοχή των σεισμών.

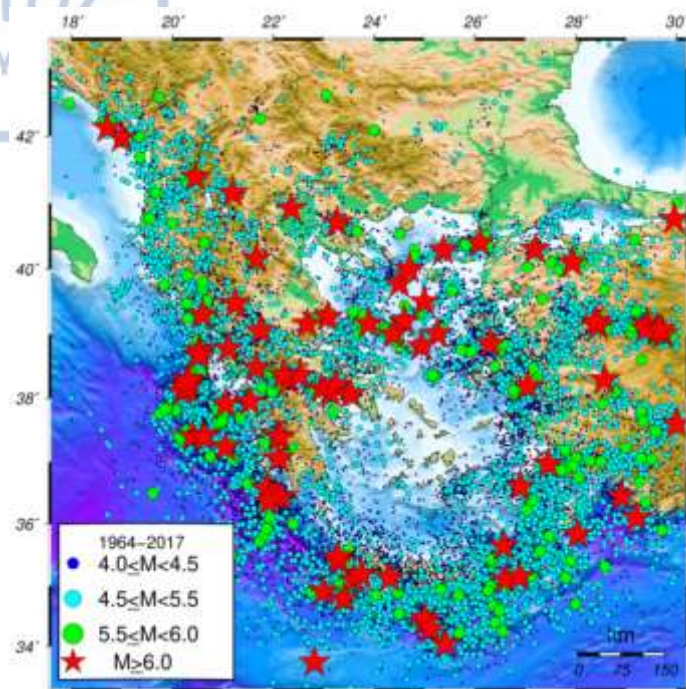
Προσέγγιση τυχαιοποίησης	17 σεισμικές ζώνες	29 σεισμικές ζώνες	63 σεισμικές κυψελίδες	108 σεισμικές κυψελίδες
RNnoddeg	$S=1.08$ $pC=0.29$ $pL=0.17$	$S=1.00$ $pC=0.48$ $pL=0.29$	$S=0.85$ $pC=0.81$ $pL=0.94$	$S=1.31$ $pC=0.26$ $pL=0.92$
RNpoisson	$S=1.15$ $pC=0.046$ $pL=0.58$	$S=1.97$ $pC=0.006$ $pL=0.013$	$S=9.44$ $pC=0.006$ $pL=0.013$	$S=12.33$ $pC=0.006$ $pL=0.013$
RNavestr	$S^W=1.04$ $pC=0.33$ $pL=0.35$	$S^W=0.99$ $pC=0.54$ $pL=0.25$	$S^W=2.24$ $pC=0.0067$ $pL=0.013$	$S^W=1.23$ $pC=0.23$ $pL=0.013$

Οι άλλες δύο (2) προσεγγίσεις τυχαιοποίησης, RNnoddeg και RNavestr, δεν παρουσιάζουν μεγάλες τιμές σχετικά με τον δείκτη του μικρόκοσμου, καθώς η μεγαλύτερη τιμή που παρατηρείται είναι ίση με 2.24 για την προσέγγιση RNavestr όταν θεωρούνται $K = 63$ σεισμικές κυψελίδες ως κόμβοι του σεισμικού δικτύου κατά την χρονική περίοδο 1845-2017. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις, η δομή του μικρόκοσμου στα σεισμικά δίκτυα δεν μπορεί να επιβεβαιωθεί παρόλο που η τιμή του συντελεστή συσταδοποίησης του αρχικού σεισμικού δικτύου είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με τις αντίστοιχες των τυχαιοποιημένων (δηλαδή, $pC < 0.05$), διότι η ίδια υπόθεση ισχύει, εσφαλμένα, και για το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής (δηλαδή, $pL < 0.05$). Επομένως, όταν το σεισμικό δίκτυο κατασκευάζεται από την διαδοχή των σεισμών για τις χρονικές περιόδους 1845-2017 και 1911-2017 η δομή του μικρόκοσμου είναι απύσα.

Πίνακας 3.4: Παρόμοια με τον πίνακα 3.3 αλλά για την χρονική περίοδο 1911-2017.

Προσέγγιση τυχαιοποίησης	17 σεισμικές ζώνες	29 σεισμικές ζώνες	63 σεισμικές κυψελίδες	108 σεισμικές κυψελίδες
RNnoddeg	$S=1.00$ $pC=0.29$ $pL=1.00$	$S=1.01$ $pC=0.60$ $pL=0.59$	$S=1.07$ $pC=0.078$ $pL=0.72$	$S=1.02$ $pC=0.49$ $pL=0.51$
RNpoisson	$S=1.09$ $pC=0.017$ $pL=0.9$	$S=1.22$ $pC=0.006$ $pL=0.51$	$S=3.70$ $pC=0.006$ $pL=0.013$	$S=6.83$ $pC=0.006$ $pL=0.013$
RNavestr	$S^W=0.92$ $pC=0.56$ $pL=0.56$	$S^W=0.97$ $pC=0.47$ $pL=0.013$	$S^W=1.04$ $pC=0.11$ $pL=0.013$	$S^W=0.99$ $pC=0.48$ $pL=0.013$

Τα αποτελέσματα για τις άλλες τρεις (3) χρονικές περιόδους, 1964-2017 (Σχ. 3.25), 1992-2017 (Σχ. 3.26) και 2010-2017 (Σχ. 3.27), σχετικά με την δομή του μικρόκοσμου όταν το σεισμικό δίκτυο κατασκευάζεται από την διαδοχή των σεισμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.5. Μόνο η προσέγγιση τυχαιοποίησης RNpoisson παρουσιάζει τιμές του δείκτη μικρόκοσμου μεγαλύτερες από την μονάδα (1).



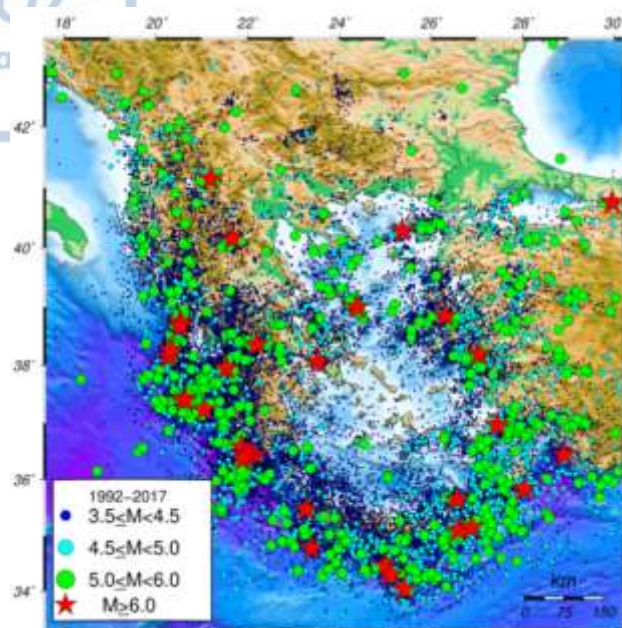
Σχ. 3.25: Τα επίκεντρα των σεισμών με $M \geq 4.0$ κατά την χρονική περίοδο 1964-2017 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του.

Τα σεισμικά δίκτυα για την περίπτωση αυτή, με την προσέγγιση τυχαιοποίησης RNpoisson, δεν παρουσιάζουν την δομή του μικρόκοσμου καθώς η συνθήκη $L \cong L_{rand}$ (δηλαδή, $pL > 0.05$) δεν ικανοποιείται. Επομένως, για τις χρονικές περιόδους, 1964-2017, 1992-2017 και 2010-2017 όταν το σεισμικό δίκτυο κατασκευάζεται από την διαδοχή των σεισμών η δομή του μικρόκοσμου είναι απύουσα.

Πίνακας 3.5: Παρόμοια με τον πίνακα 3.3 αλλά για τις χρονικές περιόδους 1964-2017, 1992-2017 και 2010-2017.

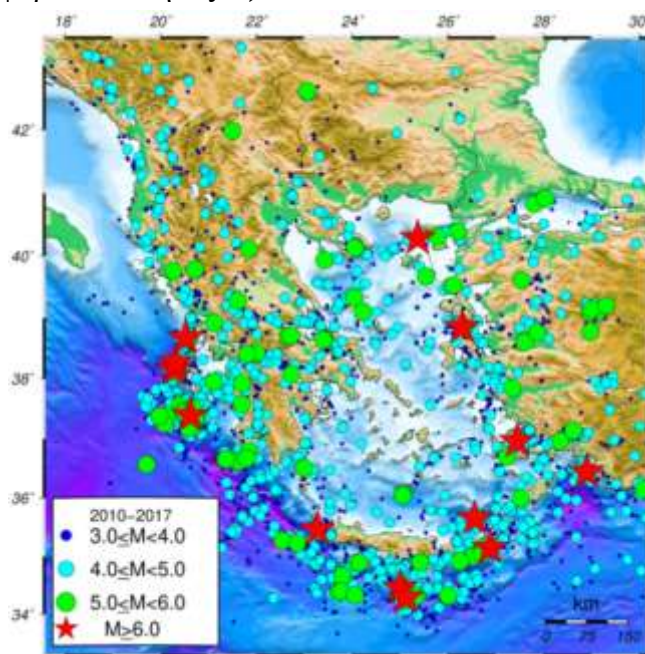
Προσέγγιση τυχαιοποίησης	63 κυψελίδες 1964-2017	108 κυψελίδες 1964-2017	63 κυψελίδες 1992-2017	108 κυψελίδες 1992-2017	63 κυψελίδες 2010-2017	108 κυψελίδες 2010-2017
RNnoddeg	$S=0.99$ $pC=0.81$ $pL=0.53$	$S=0.99$ $pC=0.79$ $pL=0.47$	$S=0.99$ $pC=0.90$ $pL=0.45$	$S=0.99$ $pC=0.74$ $pL=0.31$	$S=1.00$ $pC=0.28$ $pL=0.97$	$S=0.99$ $pC=0.88$ $pL=0.45$
RNpoisson	$S=2.03$ $pC=0.006$ $pL=0.013$	$S=2.49$ $pC=0.006$ $pL=0.013$	$S=2.01$ $pC=0.006$ $pL=0.013$	$S=2.48$ $pC=0.006$ $pL=0.013$	$S=2.47$ $pC=0.006$ $pL=0.013$	$S=3.34$ $pC=0.006$ $pL=0.013$
RNavestr	$S^W=1.00$ $pC=0.14$ $pL=0.013$	$S^W=0.99$ $pC=0.99$ $pL=0.68$	$S^W=1.01$ $pC=0.006$ $pL=0.013$	$S^W=0.99$ $pC=0.74$ $pL=0.013$	$S^W=1.00$ $pC=0.23$ $pL=0.013$	$S^W=0.73$ $pC=0.99$ $pL=0.013$

Τα Σχήματα 3.28 έως 3.30 δείχνουν τα αποτελέσματα για την ιδιότητα του μικρόκοσμου όταν κατασκευάζονται τα σεισμικά δίκτυα συσχέτισης και η σεισμική ροπή M_0 θεωρείται ως μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς. Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις περιπτώσεις που η ιδιότητα του μικρόκοσμου εμφανίζεται στην δομή των σεισμικών δικτύων ανεξάρτητα με την μεταβλητή που λαμβάνεται υπόψη για την κατασκευή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς.



Σχ. 3.26: Τα επίκεντρα των σεισμών με $M \geq 3.5$ κατά την χρονική περίοδο 1992-2017 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του.

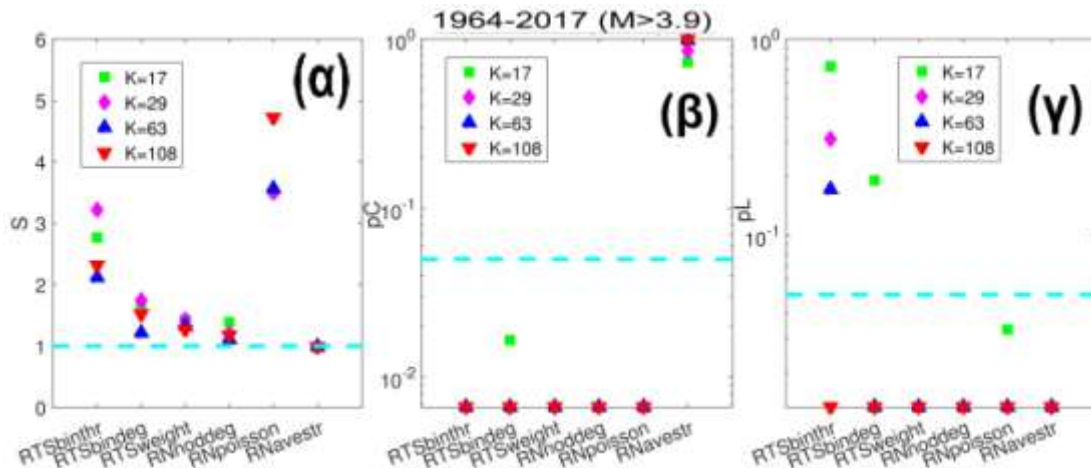
Επομένως, θεωρούνται, επιπλέον, και οι τρεις (3) προσεγγίσεις που τυχαιοποιούν την αρχική πολυμεταβλητή χρονοσειρά καθώς κατασκευάζονται σεισμικά δίκτυα συσχέτισης. Τα αποτελέσματα για την χρονική περίοδο 1964-2017 παρουσιάζονται στο Σχ. 3.28. Μόνο οι προσεγγίσεις τυχαιοποίησης RTSbinthr και RNpoisson, παρουσιάζουν $S > 2$ όπου αυτές οι τιμές παρατηρούνται και για τις τέσσερις (4) περιπτώσεις διαφορετικών τύπων κόμβων (σεισμικές ζώνες ή σεισμικές κυψελίδες με διαφορετικό πλήθος K).



Σχ. 3.27: Τα επίκεντρα των σεισμών με $M \geq 3.0$ κατά την χρονική περίοδο 2010-2017 στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του.

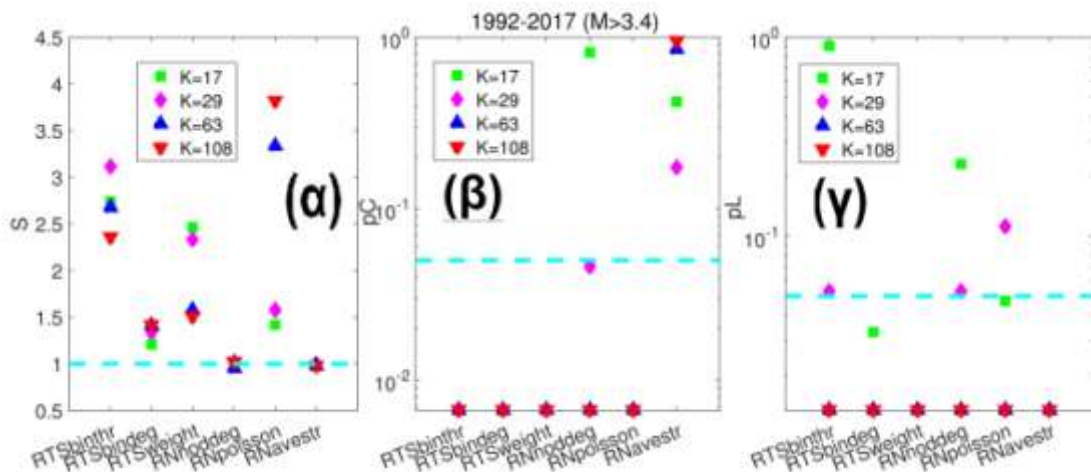
Η συνθήκη $C \gg C_{rand}$ (δηλαδή, $pC < 0.05$) ικανοποιείται για τις δύο (2) προαναφερθείσες προσεγγίσεις τυχαιοποίησης για κάθε τύπο κόμβων, ενώ η συνθήκη $L \cong L_{rand}$ (δηλαδή, $pL > 0.05$) δεν ικανοποιείται με την προσέγγιση RNpoisson. Η

προσέγγιση τυχαιοποίησης RTSbinthr ικανοποιεί όλες τις συνθήκες ($S \gg 1$, $pC < 0.05$ και $pL > 0.05$) για τις τρεις (3) από τις τέσσερις (4) περιπτώσεις κόμβων, όταν θεωρούνται 17 και 29 σεισμικές ζώνες αλλά και 63 σεισμικές κυψελίδες. Επομένως, η δομή του μικρόκοσμου αποκαλύπτεται για την προσέγγιση τυχαιοποίησης RTSbinthr όταν κατασκευάζονται σεισμικά δίκτυα συσχέτισης κατά την χρονική περίοδο 1964-2017.



Σχ. 3.28: Ο δείκτης του μικρόκοσμου στο (α), η p -τιμή για τον συντελεστή συσταδοποίησης (pC) στο (β) και το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής (pL) στο (γ) (και τα δύο σε λογαριθμική κλίμακα), αντίστοιχα, για τις έξι (6) προσεγγίσεις τυχαιοποίησης του αρχικού δικτύου συσχέτισης για διαφορετικό πλήθος κόμβων K κατά την χρονική περίοδο 1964-2017. Τα σεισμικά δίκτυα κατασκευάζονται με την χρήση της πολυμεταβλητής χρονοσειράς.

Για την χρονική περίοδο 1992-2017, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχ. 3.29. Μεγάλες τιμές για τον δείκτη του μικρόκοσμου ($S > 2$) παρατηρούνται για τις προσεγγίσεις τυχαιοποίησης RTSbinthr και RNpoisson, για την τελευταία μόνο όταν οι σεισμικές κυψελίδες ($K = 63$ και $K = 108$) θεωρούνται ως κόμβοι των σεισμικών δικτύων συσχέτισης. Επίσης, παρατηρείται για την προσέγγιση τυχαιοποίησης RTSweight, αλλά μόνο για τις σεισμικές ζώνες ($K = 17$ και $K = 29$) ως κόμβοι των σεισμικών δικτύων συσχέτισης.

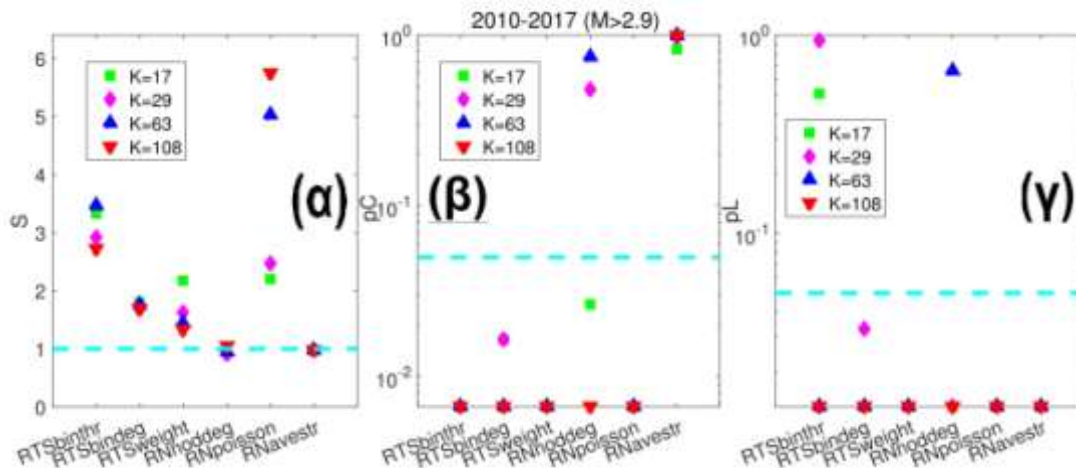


Σχ. 3.29: Όμοια όπως στο Σχ. 3.28 αλλά για την χρονική περίοδο 1992-2017.

Για όλες αυτές τις περιπτώσεις όπου $S > 2$, η συνθήκη $C \gg C_{rand}$ (δηλαδή, $pC < 0.05$) ικανοποιείται, ενώ η συνθήκη $L \cong L_{rand}$ ($pL > 0.05$) δεν ικανοποιείται για τις προσεγγίσεις τυχαιοποίησης RTSweight και RNpoisson. Για την προσέγγιση τυχαιοποίησης RTSbinthr η συνθήκη $L \cong L_{rand}$ ικανοποιείται όταν θεωρούνται οι

σεισμικές ζώνες (οριακά για $K = 29$) ως κόμβοι, και τα σεισμικά δίκτυα μπορούν να χαρακτηριστούν με την δομή του μικρόκοσμου.

Α. Παρόμοια αποτελέσματα (Σχ. 3.30), με τις προηγούμενες χρονικές περιόδους, παρατηρούνται για την χρονική περίοδο 2010-2017, όπου μόνο η προσέγγιση τυχαιοποίησης RTSbinthr εκπληρώνει και τις τρεις (3) προϋποθέσεις ($S \gg 1$, $pC < 0.05$ και $pL > 0.05$) ώστε να παρατηρηθεί η δομή του μικρόκοσμου όταν το σεισμικό δίκτυο έχει ως κόμβους του τις σεισμικές ζώνες.



Σχ. 3.30: Όμοια όπως στο Σχ. 3.28 αλλά για την χρονική περίοδο 2010-2017.

Στον Πίνακα 3.6 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τις περιπτώσεις που τα σεισμικά δίκτυα εμφανίζουν την δομή του μικρόκοσμου ανεξάρτητα από την μεταβλητή που θεωρήθηκε για την κατασκευή των σεισμικών δικτύων συσχέτισης. Από τον Πίνακα 3.6 συμπεραίνουμε ότι για μικρό αριθμό κόμβων, δηλαδή όταν το δίκτυο κατασκευάζεται από τις 17 και 29 σεισμικές ζώνες, και η μεταβλητή θεωρείται η σεισμική ροπή τότε το δίκτυο έχει την τάση να εμφανίζει την δομή του μικρόκοσμου.

Πίνακας 3.6: Τα εννέα (9) σενάρια για τον χαρακτηρισμό των σεισμικών δικτύων ως μικρόκοσμοι, όπου M_0 η σεισμική ροπή και N το πλήθος των σεισμών. Το τυχαιοποιημένο δίκτυο κατασκευάστηκε με την προσέγγιση τυχαιοποίησης RTSbinthr.

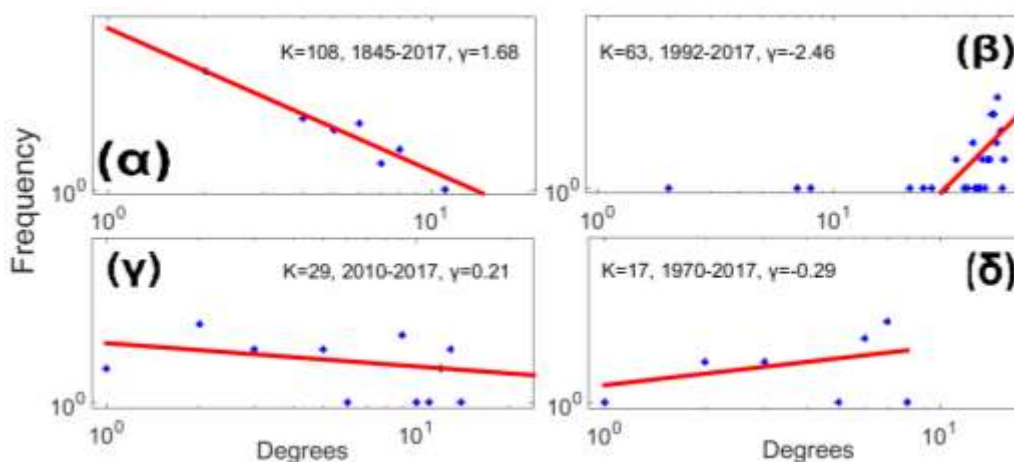
Χρονική περίοδος	Αριθμός K κόμβων	Μεταβλητή χρονοσειράς
1964-2017	17	M_0
1964-2017	29	M_0
1964-2017	29	N
1964-2017	63	M_0
1992-2017	17	M_0
1992-2017	17	N
1992-2017	29	M_0
2010-2017	17	M_0
2010-2017	29	M_0

Η ιδιότητα της ελεύθερης κλίμακας εξετάζεται μόνο σε σεισμικά δίκτυα που κατασκευάζονται με απλές συνδέσεις, διότι η κατανομή του εκθέτη, γ , υπολογίζεται μόνο σε δίκτυα με απλές συνδέσεις. Η τιμή του εκθέτη, γ , που προκύπτει από την σχέση $P(k) \sim k^{-\gamma}$, η p -τιμή ($p\gamma$) για την στατιστική σημαντικότητα του γ που προκύπτει από την σχέση (2.36) και το στατιστικό μέτρο της συσχέτισης R^2 που

προκύπτει από την σχέση (3.3) υπολογίζονται για κάθε χρονική περίοδο, τύπο κόμβων (σεισμικές ζώνες ή σεισμικές κυψελίδες με διαφορετικό αριθμό K κόμβων), τύπο συνδέσεων (δηλαδή από την διαδοχή των σεισμών ή από τον συντελεστή συσχέτισης Pearson) και προσέγγιση τυχαιοποίησης για την διερεύνηση της ύπαρξης της ιδιότητας της ελεύθερης κλίμακας στην δομή των σεισμικών δικτύων (Πίνακες 3.7 και 3.8).

Για την κατασκευή των τυχαιοποιημένων δικτύων θεωρούνται τρεις (3) από τις τέσσερις (4) προσεγγίσεις τυχαιοποίησης του αρχικού δικτύου με απλές συνδέσεις και είναι οι εξής: RTSbinthr, RTSbindeg και RNpoisson, ενώ η προσέγγιση RNnoddeg εξαιρείται καθώς διατηρεί τον βαθμό του κάθε κόμβου και, επομένως, οι κατανομές του βαθμού των κόμβων των τυχαιοποιημένων δικτύων θα είναι ακριβώς οι ίδιες με αυτής του αρχικού δικτύου. Στην εφαρμογή που παρουσιάζεται, οι προϋποθέσεις ώστε το σεισμικό δίκτυο να χαρακτηριστεί με την ιδιότητα της ελεύθερης κλίμακας στην δομή του είναι μία υψηλή τιμή του βαθμού του εκθέτη, γ , τυπικά να ανήκει στο εύρος $2 \leq \gamma \leq 3$, η οποία να είναι ταυτόχρονα στατιστικά σημαντική ($p\gamma < 0.05$, για τον έλεγχο σημαντικότητας σύμφωνα με την σχέση (2.36)) ή μία υψηλή τιμή του στατιστικού μέτρου της συσχέτισης R^2 . Αξίζει να σημειωθεί ότι αν η τιμή του εκθέτη, γ , είναι μικρή ($\gamma < 2$) αλλά σημαντικά υψηλότερη από τις αντίστοιχες τιμές των τυχαιοποιημένων δικτύων (δηλαδή, $p\gamma < 0.05$) αυτό σηματοδοτεί μια αδύναμη δομή της ελεύθερης κλίμακας στο σεισμικό δίκτυο ανεξάρτητα από το γεγονός της μικρής τιμής του γ . Επίσης, η δομή της ελεύθερης κλίμακας είναι δύσκολο να παρουσιαστεί σε σεισμικά δίκτυα μέτριου μεγέθους, όπως αυτά που μελετώνται στην διατριβή, και ως εκ τούτου ο έλεγχος της σημαντικότητας της τιμής του εκθέτη, γ , είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την εφαρμογή αυτή καθώς μπορεί να αποκαλύψει αδύναμες μορφές της δομής της ελεύθερης κλίμακας στα σεισμικά δίκτυα.

Τέσσερα (4) παραδείγματα της κατανομής του βαθμού των κόμβων των σεισμικών δικτύων που κατασκευάζονται από την διαδοχή των σεισμών ή από την χρήση της πολυμεταβλητής χρονοσειράς παρουσιάζονται στο Σχ. 3.31. Το Σχ. 3.31(α) παρουσιάζει $\gamma = 1.68$, όταν το σεισμικό δίκτυο κατασκευάζεται από την διαδοχή των σεισμών και οι κόμβοι του αντιπροσωπεύονται από 108 σεισμικές κυψελίδες κατά την χρονική περίοδο 1845-2017, όπου εμφανίζει την μεγαλύτερη αρνητική κλίση της ευθείας από τις περιπτώσεις που μελετώνται, αποκαλύπτοντας μία αδύναμη μορφή της ιδιότητας της ελεύθερης κλίμακας στην δομή του σεισμικού δικτύου.



Σχ. 3.31: Η τιμή του εκθέτη, γ , για τα σεισμικά δίκτυα με διαφορετικό αριθμό κόμβων K και χρονική περίοδο. Τα σεισμικά δίκτυα κατασκευάζονται από την διαδοχή των σεισμών στο (α) και (β) και από την πολυμεταβλητή χρονοσειρά στο (γ) και (δ).

Σε ορισμένες περιπτώσεις στο Σχ. 3.31 η κλίση του εκθέτη, γ , είναι θετική υποδηλώνοντας αρνητική τιμή του γ ($\gamma = -2.46$), όταν το σεισμικό δίκτυο κατασκευάζεται από την διαδοχή των σεισμών με 63 κυψελίδες να θεωρούνται οι κόμβοι του κατά την χρονική περίοδο 1992-2017 στο Σχ. 3.31(β). Τα αποτελέσματα για την τιμή του εκθέτη, γ , και της αντίστοιχη p -τιμής του ($p\gamma$) όπως, και, η τιμή του στατιστικού μέτρου συσχέτισης R^2 παρουσιάζονται για τα σεισμικά δίκτυα που κατασκευάζονται από την διαδοχή των σεισμών στον Πίνακα 3.7 και από τον συντελεστή συσχέτισης Pearson στον Πίνακα 3.8.

Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.7, όταν τα σεισμικά δίκτυα κατασκευάζονται από την διαδοχή των σεισμών μόνο κατά την χρονική περίοδο 1845-2017 όπου θεωρούνται οι σεισμικές κυψελίδες, $K=63$ και $K=108$, ως οι κόμβοι τους παρουσιάζουν τιμή για τον εκθέτη του βαθμού γ μεγαλύτερη της μονάδας (1), $\gamma = 1.48$ και $\gamma = 1.68$, αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, οι τιμές αυτές βρέθηκαν να είναι στατιστικά σημαντικές από τον έλεγχο σημαντικότητας για το γ ($p\gamma = 0.01$) και οι αντίστοιχες τιμές του στατιστικού μέτρου συσχέτισης R^2 να είναι οι υψηλότερες στον Πίνακα 3.7 ίσες με 0.1584 και 0.1745, αντίστοιχα. Όλα τα υπόλοιπα σενάρια του Πίνακα 3.7 δεν παρουσιάζουν κάποια ένδειξη για την ύπαρξη της ιδιότητας της ελεύθερης κλίμακας στην δομή των σεισμικών δικτύων διότι δεν ικανοποιείται η κατάλληλη συνθήκη ($2 \leq \gamma \leq 3$ και $p < 0.05$ ή υψηλή τιμή του στατιστικού μέτρου συσχέτισης R^2).

Όταν, θεωρείται το σεισμικό δίκτυο συσχέτισης, οι τιμές του εκθέτη, γ , και του στατιστικού μέτρου συσχέτισης R^2 είναι χαμηλές για κάθε περίπτωση όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3.8. Επιπλέον, για τις τρεις (3) περιπτώσεις του Πίνακα 3.8, όπου η τιμή του βαθμού του εκθέτη γ βρέθηκε να παρουσιάζει στατιστική σημαντικότητα εμφανίζεται κοντά στο μηδέν (0). Επομένως, η ιδιότητα της ελεύθερης κλίμακας είναι απύσχα στην δομή των σεισμικών δικτύων όταν αυτά κατασκευάζονται από τον σχηματισμό της πολυμεταβλητής χρονοσειράς ενώ τείνει να παρουσιαστεί σε δύο μόνο περιπτώσεις όταν κατασκευάζονται από την διαδοχή των σεισμών για την χρονική περίοδο 1845-2017 όπου οι σεισμικές κυψελίδες θεωρούνται οι κόμβοι τους.

Πίνακας 3.7: Η τιμή του εκθέτη, γ , η p -τιμή ($p\gamma$) για την στατιστική σημαντικότητα του γ και το στατιστικό μέτρο συσχέτισης (R^2), για τις διαφορετικές περιπτώσεις κόμβων (σεισμικές ζώνες ή σεισμικές κυψελίδες με διαφορετικό αριθμό K κόμβων) και χρονικές περιόδους με προσέγγιση τυχαιοποίησης του αρχικού δικτύου την RN poisson. Τα σεισμικά δίκτυα κατασκευάζονται από την χρονική διαδοχή των σεισμών.

Κόμβοι	Χρονική περίοδος	γ	$p\gamma$	R^2
17 ζώνες	1845-2017	-0.24	0.89	0.0123
17 ζώνες	1911-2017	-0.90	0.92	0.0087
29 ζώνες	1845-2017	0.16	0.41	0.0311
29 ζώνες	1911-2017	-0.44	0.63	0.0111
63 κυψελίδες	1845-2017	1.48	0.01	0.1584
63 κυψελίδες	1911-2017	0.13	0.43	0.0284
63 κυψελίδες	1964-2017	-1.45	0.07	0.0041
63 κυψελίδες	1992-2017	-2.46	0.01	0.00087
63 κυψελίδες	2010-2017	-1.03	0.11	0.0065
108 κυψελίδες	1845-2017	1.68	0.01	0.1745
108 κυψελίδες	1911-2017	0.25	0.13	0.0321

108 κυψελίδες	1964-2017	-0.15	0.94	0.0154
108 κυψελίδες	1992-2017	-0.24	0.98	0.0115
108 κυψελίδες	2010-2017	0.03	0.57	0.0202

Με βάση τα παραπάνω, πλέον της αποκάλυψης για την απουσία των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων της ελεύθερης κλίμακας και του μικρόκοσμου, αν εξαιρέσουμε ελάχιστες περιπτώσεις, στην δομή των σεισμικών δικτύων που κατασκευάστηκαν για τον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές του περιοχές, η διδακτορική διατριβή θέτει ένα ανοιχτό ζήτημα για την εξάρτηση των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων από την μεθοδολογία κατασκευής του σεισμικού δικτύου καθώς και από την γεωγραφική περιοχή που εξετάζεται διότι οι δομές της ελεύθερης κλίμακας και του μικρόκοσμου εμφανίζονται σε σεισμικά δίκτυα σύμφωνα με τους Abe et al. 2011.

Πίνακας 3.8: Όμοια με τον Πίνακα 3.7 αλλά με την κατασκευή του σεισμικού δικτύου μέσω της πολυμεταβλητής χρονοσειράς.

Κόμβοι	Χρονική περίοδος	Στατιστικοί δείκτες	RTSbinthr	RTSbindeg	RNpoisson
17 ζώνες	1964-2017	$\gamma=-0.29$ $R^2=0.0127$	$p\gamma=0.03$	$p\gamma=0.11$	$p\gamma=0.36$
17 ζώνες	1992-2017	$\gamma=-0.44$ $R^2=0.0119$	$p\gamma=0.01$	$p\gamma=0.38$	$p\gamma=0.64$
17 ζώνες	2010-2017	$\gamma=-0.27$ $R^2=0.0135$	$p\gamma=0.06$	$p\gamma=0.19$	$p\gamma=0.36$
29 ζώνες	1964-2017	$\gamma=0.15$ $R^2=0.0294$	$p\gamma=0.01$	$p\gamma=0.91$	$p\gamma=0.58$
29 ζώνες	1992-2017	$\gamma=-0.02$ $R^2=0.0152$	$p\gamma=0.07$	$p\gamma=0.38$	$p\gamma=0.72$
29 ζώνες	2010-2017	$\gamma=0.21$ $R^2=0.0335$	$p\gamma=0.15$	$p\gamma=0.54$	$p\gamma=0.48$
63 κυψελίδες	1964-2017	$\gamma=0.33$ $R^2=0.0415$	$p\gamma=0.21$	$p\gamma=0.36$	$p\gamma=0.19$
63 κυψελίδες	1992-2017	$\gamma=0.21$ $R^2=0.0317$	$p\gamma=0.27$	$p\gamma=0.29$	$p\gamma=0.33$
63 κυψελίδες	2010-2017	$\gamma=0.36$ $R^2=0.0413$	$p\gamma=0.74$	$p\gamma=0.09$	$p\gamma=0.13$
108 κυψελίδες	1964-2017	$\gamma=0.24$ $R^2=0.0374$	$p\gamma=0.35$	$p\gamma=0.99$	$p\gamma=0.31$
108 κυψελίδες	1992-2017	$\gamma=0.22$ $R^2=0.0381$	$p\gamma=0.68$	$p\gamma=0.36$	$p\gamma=0.29$
108 κυψελίδες	2010-2017	$\gamma=0.37$ $R^2=0.0427$	$p\gamma=0.09$	$p\gamma=0.09$	$p\gamma=0.09$



Κεφάλαιο 4^ο-Μελέτη του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης

4.1 Εισαγωγή

Σκοπός του τέταρτου (4^{ου}) κεφαλαίου είναι να διερευνηθεί αν υπάρχουν πρότυπα συσχετίσεων στην σεισμικότητα που παρατηρείται στον Ελληνικό χώρο, μέσω του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης, μεταξύ των πέντε (5) τελευταίων χρονικά διαδοχικών ανά ζεύγη σεισμών με μεγέθη $M_{thr} \geq 4.0$ (Σχ. A12 του παραρτήματος) που έγιναν πριν από τους κύριους σεισμούς ($M \geq 5.5$) ανά σεισμική ζώνη κατά την περίοδο 1964-2018 με σκοπό την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας. Η πολυμεταβλητή χρονοσειρά περιλαμβάνει ως μεταβλητές το μέγεθος του σεισμού και την χρονική, σε ημέρες, διαδοχή του μέχρι τον επόμενο σεισμό. Επιπλέον, η συνεισφορά του τέταρτου (4^{ου}) κεφαλαίου έγκειται στο γεγονός ότι καταδεικνύει, μέσω προσομοιώσεων, αν ο παραμετρικός ή ο μη-παραμετρικός στατιστικός έλεγχος είναι κατάλληλος για την εξέταση της στατιστικής σημαντικότητας της τιμής του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης. Κατασκευάζεται χάρτης στον οποίο δίνονται πληροφορίες για την μελλοντική σεισμική δραστηριότητα καθώς παρέχονται πληροφορίες για τη γένεση των επερχόμενων κύριων σεισμών ($M \geq 5.5$) σε κάθε μία από τις 10 σεισμικές ζώνες στις οποίες διαιρείται ο Ελληνικός χώρος με τις γειτονικές περιοχές του (Σχ. 4.1).

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται, πρώτα, ο κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται ο στατιστικός έλεγχος, ο οποίος εξετάζει αν η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης είναι στατιστικά σημαντική για την διερεύνηση της ύπαρξης ισχυρών συσχετίσεων μεταξύ των πέντε (5) τελευταίων χρονικά σεισμών, ανά ζεύγη, πριν τους κύριους σεισμούς. Επίσης, παρουσιάζεται η μελέτη προσομοίωσης για την εξέταση της καταλληλότητας του παραμετρικού και του μη-παραμετρικού στατιστικού ελέγχου σχετικά με την διερεύνηση της στατιστικής σημαντικότητας του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης. Τέλος, παρουσιάζονται οι εφαρμογές μαζί με τα αποτελέσματα για την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας για κάθε σεισμική ζώνη.

4.2 Κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης

Ο κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης διερευνά τους γραμμικούς συνδυασμούς μεταξύ δύο πολυμεταβλητών χρονοσειρών και επιδιώκει την εύρεση ενός ζεύγους γραμμικών μετασχηματισμών, ένα για κάθε πολυμεταβλητή χρονοσειρά, έτσι ώστε όταν μεταβληθεί το σύνολο των μεταβλητών, οι αντίστοιχες παρατηρήσεις να παρουσιάζουν την μέγιστη δυνατή συσχέτιση (Hotelling 1936, Härdle και Simar 2007). Συγκεκριμένα, βρίσκει δύο διανύσματα βάσεων, ένα για κάθε πολυμεταβλητή χρονοσειρά, τα οποία είναι βέλτιστα σε σχέση με τις συσχετίσεις και, ταυτόχρονα, βρίσκει τις αντίστοιχες συσχετίσεις. Με άλλα λόγια, βρίσκει τα δύο (2) διανύσματα βάσεων στα οποία ο πίνακας συσχέτισης μεταξύ των πολυμεταβλητών χρονοσειρών είναι διαγώνιος και οι συσχετίσεις στη διαγώνιο μεγιστοποιούνται. Οι διαστάσεις αυτών των νέων βάσεων είναι ίσες ή μικρότερες από τη μικρότερη διάσταση που παρουσιάζει μία (1) από τις δύο (2) πολυμεταβλητές χρονοσειρές. Οι γραμμικοί συνδυασμοί αναφέρονται ως κανονικοποιημένες μεταβλητές και οι συσχετίσεις μεταξύ τους λέγονται κανονικοποιημένες συσχετίσεις. Μια σημαντική ιδιότητα των κανονικοποιημένων συσχετίσεων είναι ότι είναι αμετάβλητες σε σχέση με τους μετασχηματισμούς των δύο πολυμεταβλητών

χρονοσειρών ενώ η κλασική ανάλυση συσχέτισης εξαρτάται από το διάνυσμα βάσης στο οποίο περιγράφονται οι μεταβλητές.

Α. Θεωρούμε δύο σύνολα τυχαίων μεταβλητών (δηλαδή, δύο (2) πολυμεταβλητές χρονοσειρές), $X=(X_1, \dots, X_m)$ και $Y=(Y_1, \dots, Y_l) \in R^m \times R^l$ με δειγματική συνδιακύμανση (S_{XX}, S_{YY}) και S_{XY} . Επίσης, θεωρούμε ένα δείγμα n παρατηρήσεων για κάθε μεταβλητή της X όπου δίνεται $\{x_{k,1}, \dots, x_{k,n}\}$ για $k = 1, \dots, m$ και για την μεταβλητή Y , $\{y_{k,1}, \dots, y_{k,n}\}$ για $k = 1, \dots, l$, αντίστοιχα. Ο σκοπός της κανονικοποιημένης συσχέτισης είναι να βρει ζεύγη γραμμικών συνδυασμών των μεταβλητών της X , αναφέρεται ως $w_X^T X$ (όπου το T δηλώνει τον ανάστροφο πίνακα), και της Y , αναφέρεται ως $w_Y^T Y$, που συσχετίζονται μέγιστα:

$$(w_X^*, w_Y^*) = \operatorname{argmax}_{w_X, w_Y} \operatorname{Corr}(w_X^T X, w_Y^T Y) = \operatorname{argmax}_{w_X, w_Y} \frac{w_X^T S_{XY} w_Y}{\sqrt{w_X^T S_{XX} w_X w_Y^T S_{YY} w_Y}}. \quad (4.1)$$

Οι κανονικοποιημένες συσχετίσεις στην σχέση (4.1) δεν επηρεάζονται από το μέγεθος των διανυσμάτων w_X και w_Y . Επομένως, ο παρονομαστής στην σχέση (4.1) μπορεί να είναι ίσος με την μονάδα (1) και να προκύψει το ισοδύναμο πρόβλημα:

$$(w_X^*, w_Y^*) = \operatorname{argmax}_{w_X, w_Y} w_X^T S_{XY} w_Y. \quad (4.2)$$

Όταν η κανονικοποιημένη συσχέτιση βρίσκει πολλαπλά ζεύγη διανυσμάτων (w_X^i, w_Y^i), τα οποία κατασκευάζουν την νέα βάση του χώρου διάστασης $\min(m, l)$ για καθένα από τα X και Y , οι επακόλουθοι μετασχηματισμοί περιορίζονται στο να μην συσχετίζονται με τους προηγούμενους, που σημαίνει $w_X^i S_{XX} w_X^j = w_Y^i S_{YY} w_Y^j = 0$ για $i < j$. Για να επιτευχθεί αυτό, επαναλαμβάνεται το ίδιο βήμα μεγιστοποίησης στις διαφορές του ζεύγους που βρέθηκαν στο προηγούμενο βήμα. Οι αναλυτικές εκφράσεις μπορούν να εξαχθούν για το ζεύγος (w_X^*, w_Y^*) σε κάθε βήμα μέχρι το $\min(m, l)$. Συγκεντρώνοντας τις κορυφαίες k προβολές των διανυσμάτων w_X^j σε στήλες στον πίνακα $A_1 \in R^{m \times k}$ και των διανυσμάτων w_Y^j στον πίνακα $A_2 \in R^{l \times k}$, ακολουθείται η παρακάτω μαθηματική έκφραση (σχέση 4.3) για να προσδιοριστούν οι κορυφαίες $k \leq \min(m, l)$ προβολές:

$$\text{maximize: } \operatorname{tr}(A_1^T S_{XY} A_2), \quad (4.3)$$

επειδή $A_1^T S_{XX} A_1 = A_2^T S_{YY} A_2 = 1$. Η λύση της σχέσης (4.3) δόθηκε από την Mardia et al. (1979). Όρισε Z ως $S_{XX}^{-\frac{1}{2}} S_{XY} S_{YY}^{-\frac{1}{2}}$, και U_k και V_k να είναι οι πίνακες των πρώτων k προβολών των αριστερόστροφων και δεξιόστροφων μοναδιαίων διανυσμάτων του Z και η βέλτιστη λύση να επιτυγχάνεται ως: $(A_1^*, A_2^*) = (S_{XX}^{-\frac{1}{2}} U_k, S_{YY}^{-\frac{1}{2}} V_k)$. Αυτή η λύση υποθέτει ότι οι πίνακες συνδιακύμανσης S_{XX} και S_{YY} δεν είναι οι μοναδικοί πίνακες που μπορούν να οριστούν. Στην διατριβή, ενδιαφερόμαστε μόνο για την πρώτη κανονικοποιημένη συσχέτιση που δίνεται από την πρώτη ιδιοτιμή, r_1 , του πίνακα $S_{XX}^{-1/2} S_{XY} S_{YY}^{-1/2} S_{YX} S_{XX}^{-1/2}$.

4.3 Στατιστικός έλεγχος

Όπως έχει τονιστεί σκοπός της μελέτης είναι η διερεύνηση αν οι πέντε (5) τελευταίοι χρονικά σεισμοί, ανά ζεύγη (δηλαδή, $1^{ος}-2^{ος}$, $2^{ος}-3^{ος}$, $3^{ος}-4^{ος}$ και $4^{ος}-5^{ος}$ πηγαίνοντας πίσω στον χρόνο), που γίνονται πριν από τους κύριους σεισμούς παρουσιάζουν στατιστικά σημαντική τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r_1 , θα συμβολίζεται ως r παρακάτω, που υπολογίζεται στις αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές που κατασκευάζουν. Εξετάζουμε τους πέντε (5)

τελευταίους χρονικά σεισμούς που έγιναν πριν από κύριους σεισμούς ώστε να υπάρχει ικανό πλήθος περιπτώσεων που προκύπτουν στην μελέτη καθώς αν θεωρούσαμε σεισμούς πιο πίσω στο χρόνο σχετικά με τον κύριο σεισμό οι περιπτώσεις μελέτης θα ήταν αρκετά περιορισμένες για κάθε σεισμική ζώνη. Ως πρώτος ($1^{ος}$) αναφέρεται ο τελευταίος χρονικά σεισμός πριν τον κύριο σεισμό. Η αρχική πολυμεταβλητή χρονοσειρά περιλαμβάνει δύο (2) μεταβλητές, το μέγεθος M του σεισμού που εξετάζεται και την χρονική διαδοχή του, σε ημέρες, μέχρι τον επόμενο σεισμό που γίνεται πριν από κάθε κύριο σεισμό ($m = l = 2$).

Η εξέταση της στατιστικής σημαντικότητας της τιμής του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r που μπορεί να παρουσιάζει η αρχική πολυμεταβλητή χρονοσειρά διερευνάται είτε μέσω του μη-παραμετρικού (τυχαιοποιημένου) ή του παραμετρικού στατιστικού ελέγχου. Για να εξεταστεί η καταλληλότητα κάθε στατιστικού ελέγχου, μη-παραμετρικού (τυχαιοποιημένου) και παραμετρικού, για την διερεύνηση της στατιστικής σημαντικότητας της τιμής του κανονικοποιημένου δείκτη συσχέτισης r , που προκύπτει από τις αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές, πραγματοποιείται στην ενότητα 4.4 η μελέτη προσομοίωσης είτε σε ανεξάρτητες ή σε εξαρτημένες αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές. Παρακάτω παρουσιάζεται ο στατιστικός έλεγχος που αφορά στην ενότητα 4.3.1 τον παραμετρικό και στην ενότητα 4.3.2 τον μη-παραμετρικό.

4.3.1 Ο παραμετρικός στατιστικός έλεγχος

Για τον παραμετρικό στατιστικό έλεγχο του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r σημειώνεται ότι αν η πρώτη πραγματική κανονικοποιημένη συσχέτιση r είναι μηδέν (0) τότε όλες οι υπόλοιπες $\min(m, l)$ πραγματικές κανονικοποιημένες συσχετίσεις είναι μηδέν (0), και έτσι η μηδενική υπόθεση H_0 παρουσιάζει την πραγματική συνδιακύμανση Σ_{XY} , δηλαδή $H_0: \Sigma_{XY} = \mathbf{0}$, όπου $\mathbf{0}$ είναι ο μηδενικός πίνακας διάστασης $m \times l$. Το στατιστικό ελέγχου (Bartlett 1947) είναι:

$$\chi^2 = -(n - 1 - 0.5(k + l - 1)) \prod_{i=1}^{\min(k, l)} (1 - r_i^2), \quad (4.4)$$

όπου r_i είναι η i -οστή κανονικοποιημένη συσχέτιση που ορίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως η r_1 . Το χ^2 συγκλίνει ασυμπτωτικά στην κατανομή χ τετράγωνο με ml βαθμούς ελευθερίας, χ_{ml}^2 . Όπως έχει αναφερθεί, στην διατριβή χρησιμοποιείται η πρώτη κανονικοποιημένη συσχέτιση, r_1 , ως το μέτρο της ανάλυσης της κανονικοποιημένης συσχέτισης. Για μικρό μέγεθος δείγματος n , η κατανομή χ^2 ίσως αποκλίνει σημαντικά από την κατανομή χ_{ml}^2 , και ο παραμετρικός στατιστικός έλεγχος ίσως να μην είναι ακριβής.

4.3.2 Ο μη-παραμετρικός στατιστικός έλεγχος τυχαιοποίησης

Θεωρούνται δύο (2) προτεινόμενοι στατιστικοί έλεγχοι τυχαιοποίησης οι οποίοι εφαρμόζονται στον κανονικοποιημένο συντελεστή συσχέτισης r , υποθέτοντας την ίδια μηδενική υπόθεση H_0 με τον παραμετρικό στατιστικό έλεγχο, θεωρώντας το μέτρο (συντελεστή) r ως στατιστικό ελέγχου. Οι δύο (2) στατιστικοί έλεγχοι βασίζονται στην κατασκευή ενός συνόλου τυχαιοποιημένων δειγμάτων που είναι συνεπή με την μηδενική υπόθεση H_0 και στα οποία υπολογίζεται ο κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης r . Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται η μηδενική εμπειρική κατανομή του r . Τα τυχαιοποιημένα δείγματα δημιουργούνται με προσέγγιση απλής περιορισμένης πραγματοποίησης και τυπικής πραγματοποίησης στον πρώτο και δεύτερο στατιστικό έλεγχο τυχαιοποίησης (Theiler και Prichard 1996), αντίστοιχα.

Για τον πρώτο στατιστικό έλεγχο τυχαιοποίησης, οι n παρατηρήσεις των πολυμεταβλητών X και Y τυχαία αναμιγνύονται έτσι ώστε οποιαδήποτε σχέση που ίσως υπάρχει μεταξύ των παρατηρήσεων των μεταβλητών X και Y στον ίδιο δείκτη $i = 1, \dots, n$ να καταστρέφεται. Έτσι, σε κάθε πραγματοποίηση με την τυχαία ανάμειξη σε κάθε ζεύγος των παρατηρήσεων των πολυμεταβλητών X και Y τα νέα ζεύγη παρατηρήσεων δημιουργούν ανεξάρτητες πολυμεταβλητές των X και Y , αντίστοιχα, που είναι συνεπείς με την μηδενική υπόθεση H_0 . Αυτός ο στατιστικός έλεγχος τυχαιοποίησης θα καλείται στην διδακτορική διατριβή ως shuffling test (δοκιμασία ανάμειξης).

Ο δεύτερος στατιστικός έλεγχος δεν ορίζεται γενικά για οποιοδήποτε διάνυσμα των πολυμεταβλητών X και Y , αλλά προκύπτει από το δείγμα δεδομένων. Για το ζευγάρι των πολυμεταβλητών X και Y μιας μέγιστης τάξης, η οποία καλείται i , το τυχαιοποιημένο δείγμα για τις πολυμεταβλητές X και Y μεγέθους n επιλέγεται τυχαία από τους σεισμούς μεγαλύτερης τάξης του i που βρίσκονται στο δείγμα δεδομένων. Έτσι, αν μελετάται το ζεύγος σεισμών $3^{ος}-4^{ος}$ (δηλαδή, $i = 4$) τότε το τυχαιοποιημένο δείγμα για τις πολυμεταβλητές X και Y θα προκύψει από τους σεισμούς τάξης $i \geq 5$. Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, η πιθανή συσχέτιση που οφείλεται στην διαδοχή των σεισμών καταστρέφεται. Αυτός ο στατιστικός έλεγχος τυχαιοποίησης θα καλείται στην διδακτορική διατριβή ως adaptive test (δοκιμασία προσαρμογής).

Για καθέναν από τους δύο (2) στατιστικούς ελέγχους τυχαιοποίησης, κατασκευάζονται $B = 100$ τυχαιοποιημένα δείγματα και υπολογίζεται το μέτρο του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r στις αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές και στα B τυχαιοποιημένα δείγματα, που συμβολίζονται ως $r^{*1}, \dots, r^{*B}$. Η p -τιμή (p -value) για την μονόπλευρη στατιστική δοκιμή προς τα δεξιά (υποθέτοντας ότι είναι απίθανο να έχουμε τιμές του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r στην αριστερή ουρά της μηδενικής κατανομής) δίνεται από την σχέση (3.4), όπου η απόφαση του στατιστικού ελέγχου επιτυγχάνεται με επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$:

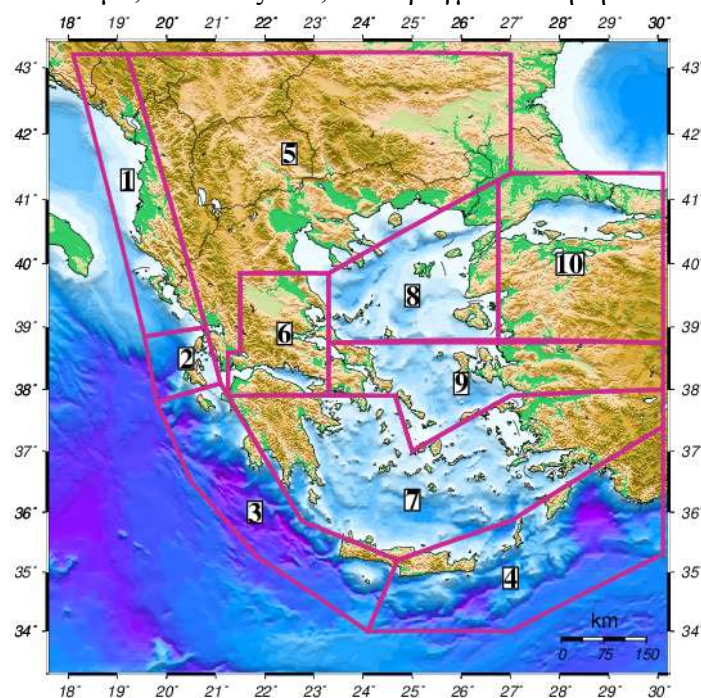
$$p = 1 - \frac{i_0 - 0.326}{B + 1 + 0.348}, \quad (3.4)$$

όπου i_0 είναι η θέση της τιμής του μέτρου r στην διατεταγμένη λίστα των $r, r^{*1}, \dots, r^{*B}$ και η διόρθωση (Yu και Huang 2001) χρησιμοποιείται για την εμπειρική αθροιστική κατανομή.

4.4 Μελέτη προσομοίωσης

Στόχος της μελέτης προσομοίωσης είναι να εξετάσει την καταλληλότητα κάθε στατιστικού ελέγχου, μη-παραμετρικού (τυχαιοποιημένου) και παραμετρικού, για την διερεύνηση της στατιστικής σημαντικότητας της τιμής του κανονικοποιημένου δείκτη συσχέτισης r , που προκύπτει από τις αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές. Έτσι, πρώτα, στην ενότητα 4.4.1, παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθείται για την κατασκευή των προσομοιωτικών δεδομένων, στην συνέχεια παρουσιάζεται η εφαρμογή ενός παραδείγματος στην ενότητα 4.4.2 που στοχεύει στην καλύτερη κατανόηση της μελέτης προσομοίωσης, και τέλος παρουσιάζεται η προσομοιωτική μελέτη με τα αποτελέσματα της που εκτελείται σε ανεξάρτητες (ασυσχέτιστες) πολυμεταβλητές χρονοσειρές, στην ενότητα 4.4.3 για τον έλεγχο της εξειδίκευσης κάθε στατιστικού ελέγχου, και σε εξαρτημένες, στην ενότητα 4.4.4 για τον έλεγχο της ευαισθησίας κάθε στατιστικού ελέγχου.

Οι $K = 10$ σεισμικές ζώνες (Σχ. 4.1), στις οποίες έχει διαιρεθεί ο Ελληνικός χώρος με τις γειτονικές περιοχές του, αποτελούν τις περιπτώσεις μελέτης στην προσομοιωτική μελέτη καθώς και στις εφαρμογές με τα πραγματικά δεδομένα (ενότητες 4.5 και 4.6). Οι $K = 10$ σεισμικές ζώνες (Σχ. 4.1) σχηματίστηκαν από την ενοποίηση των $K = 17$ σεισμικών ζωνών (Σχ. 2.18) για να υπάρχει επαρκής αριθμός δεδομένων σε κάθε σεισμική ζώνη ώστε να παρουσιάζονται εύρωστα αποτελέσματα σχετικά με τον κανονικοποιημένο συντελεστή συσχέτισης. Για κάθε έναν κύριο σεισμό ($M \geq 5.5$) από τους 271 του Ελληνικού χώρου και των γειτονικών περιοχών του κατά την χρονική περίοδο 1964-2018 (Σχ. 4.2), θεωρούνται οι πέντε (5) τελευταίοι χρονικά σεισμοί με μεγέθη $4.0 \leq M \leq 5.4$, με διαφορετικά κατώφλια μεγέθους $4.0 \leq M_{thr} \leq 4.7$, που έγιναν στην ίδια σεισμική ζώνη με κάθε έναν επερχόμενο κύριο σεισμό, από τους 271, που πραγματοποιήθηκε.



Σχ. 4.1: Οι 10 σεισμικές ζώνες στις οποίες διαιρείται ο Ελληνικός χώρος με τις γειτονικές περιοχές του.

Ο κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης r υπολογίζεται από την σχέση (4.1) στις προσομοιωτικές αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές που κατασκευάζονται από την σχέση (4.5), η οποία παρουσιάζεται στην ενότητα 4.4.1, για κάθε μία από τις 10 σεισμικές ζώνες για κάθε ζεύγος σεισμών, $1^{ος}-2^{ος}$, $2^{ος}-3^{ος}$, $3^{ος}-4^{ος}$ και $4^{ος}-5^{ος}$, που έγινε πριν τους επερχόμενους κύριους σεισμούς και στην συνέχεια ο στατιστικός έλεγχος για την σημαντικότητα της τιμής του δείκτη συσχέτισης r πραγματοποιείται από την σχέση (3.4) για τον μη-παραμετρικό και από την σχέση (4.4) για τον παραμετρικό.

4.4.1 Κατασκευή προσομοιωτικών δεδομένων

Η μελέτη προσομοίωσης σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των 271 κύριων σεισμών ($M \geq 5.5$) για τις 10 σεισμικές ζώνες. Θεωρούνται σενάρια για διαφορετικό κατώφλι μεγέθους M_{thr} , $4.0 \leq M_{thr} \leq 4.7$, που παρουσιάζουν οι σεισμοί με ανώτερο μέγεθος $M = 5.4$. Για καθέναν από τους πέντε (5) τελευταίους χρονικά σεισμούς, $i = 1, \dots, 5$, που έγιναν πριν από κάθε επερχόμενο κύριο σεισμό ($M \geq 5.5$) σε κάθε σεισμική ζώνη, υπολογίζεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των μεγεθών, $\mu_{i,m}$ και $\sigma_{i,m}$, και των χρόνων (ημέρες ως τον επόμενο σεισμό), $\mu_{i,t}$ και

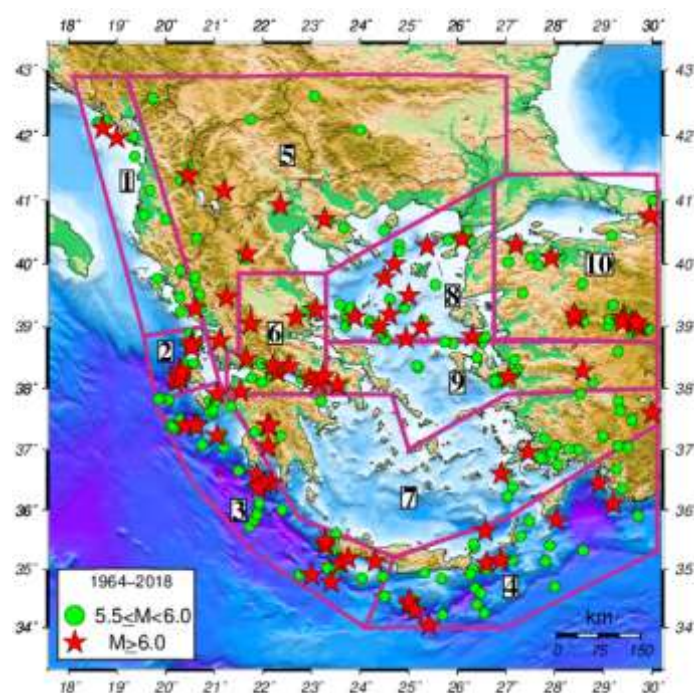
$\sigma_{i,t}$, αντίστοιχα. Θεωρούνται ζεύγη διαδοχικών διατεταγμένων σεισμών, i και $i + 1$, για $i = 1, \dots, 4$, και κατασκευάζεται ένα διμερές δείγμα με n παρατηρήσεις του μεγέθους M και του χρόνου για τους σεισμούς τάξης i και $i + 1$, και δηλώνονται ως $(m_{i,j}, t_{i,j})$ και $(m_{i+1,j}, t_{i+1,j})$, αντίστοιχα, για $j = 1, \dots, n$. Τα μεγέθη των σεισμών τάξης i και $i + 1$ σχηματίζονται από μία διμερή κανονική κατανομή ως:

$$\begin{bmatrix} m_{i,j} \\ m_{i+1,j} \end{bmatrix} \sim N \left(\begin{bmatrix} \mu_{i,m} \\ \mu_{i+1,m} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_{i,m}^2 & \rho_m \sigma_{i,m} \sigma_{i+1,m} \\ \rho_m \sigma_{i,m} \sigma_{i+1,m} & \sigma_{i+1,m}^2 \end{bmatrix} \right), \text{ για } j = 1, \dots, n,$$

Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάζονται και οι χρόνοι (4.5)

$$\begin{bmatrix} t_{i,j} \\ t_{i+1,j} \end{bmatrix} \sim N \left(\begin{bmatrix} \mu_{i,t} \\ \mu_{i+1,t} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_{i,t}^2 & \rho_t \sigma_{i,t} \sigma_{i+1,t} \\ \rho_t \sigma_{i,t} \sigma_{i+1,t} & \sigma_{i+1,t}^2 \end{bmatrix} \right), \text{ για } j = 1, \dots, n,$$

όπου ρ_m και ρ_t είναι ο συντελεστής συσχέτισης Pearson των μεγεθών και των χρόνων σε ημέρες των διαδοχικών σεισμών, αντίστοιχα.



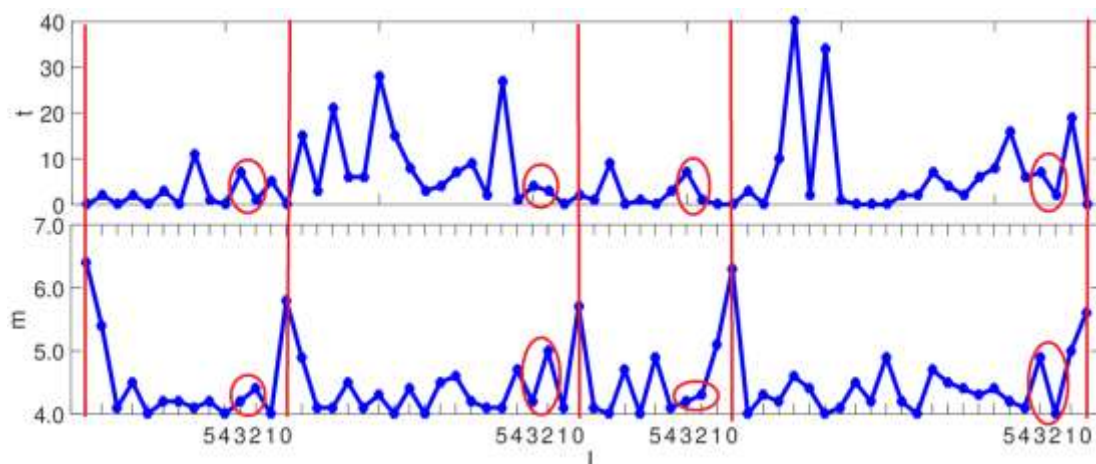
Σχ. 4.2: Η επικεντρική κατανομή των 271 κύριων σεισμών με $M \geq 5.5$ που έγιναν στον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του κατά την περίοδο 1964-2018 στις 10 σεισμικές ζώνες.

Στις προσομοιώσεις, θεωρείται μία ελεύθερη παράμετρος της συσχέτισης και δηλώνεται ως: ρ που αντιστοιχεί στην συσχέτιση μεταξύ των χρονοσειρών του μεγέθους και του χρόνου, αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, το μέγεθος n του δείγματος είναι ίσο με το πλήθος των ζευγών των σεισμών τάξης i και $i + 1$ που έγιναν σε κάθε συγκεκριμένη σεισμική ζώνη. Έτσι, όταν θεωρείται $i = 4$ το μέγεθος n του δείγματος που προκύπτει από τους σεισμούς i και $i + 1$, ίσως, να είναι μικρότερο σε σχέση για $i = 1$ καθώς απαιτούνται τουλάχιστον $i + 1$ σεισμοί μεταξύ των κύριων σεισμών. Επομένως, το μέγεθος n του δείγματος μπορεί να διαφέρει ακόμα και για την μελέτη μιας συγκεκριμένης σεισμικής ζώνης καθώς εξαρτάται από την τάξη i και $i + 1$. Με αυτόν τον τρόπο, κατασκευάζονται προσομοιωτικά ζεύγη διμερών δειγμάτων που περιλαμβάνουν το μέγεθος M και τον χρόνο γένεσης, και τα οποία διατηρούν τις συνθήκες των πραγματικών δεδομένων για κάθε ζεύγος σεισμών i και $i + 1$ και σεισμικής ζώνης έχοντας συσχέτιση που καθορίζεται από την ελεύθερη παράμετρο ρ .

Θεωρούνται δύο (2) κύριες ρυθμίσεις σχετικά με την συσχέτιση που παρουσιάζουν οι σεισμοί τάξης i και $i + 1$, θέτοντας $\rho = 0$ (μηδενική συσχέτιση) για να εκτιμηθεί η εξειδίκευση (specificity) του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r , αναμένοντας χαμηλές τιμές και μη στατιστικά σημαντικές για το r , και $\rho = 0.8$ (ισχυρή συσχέτιση) για να εκτιμηθεί η ευαισθησία (sensitivity) του r , αναμένοντας υψηλές τιμές του r οι οποίες να είναι και στατιστικά σημαντικές. Αντίστοιχα, για $\rho = 0$ εξετάζεται αν ο παραμετρικός έλεγχος και οι δύο στατιστικοί έλεγχοι τυχαιοποίησης λαμβάνουν το σωστό μέγεθος του στατιστικού ελέγχου (πραγματική πιθανότητα απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 στο θεωρούμενο επίπεδο σημαντικότητας, στην διατριβή όπως έχει αναφερθεί θεωρείται ως $\alpha = 0.05$), και για $\rho = 0.8$ συγκρίνεται η ισχύς που επιτυγχάνεται με κάθε έναν από τους τρεις (3) στατιστικούς ελέγχους που ποσοτικοποιήθηκαν από την πραγματική πιθανότητα απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 . Για να προκύψουν τα στατιστικά αποτελέσματα, εκτελέστηκαν 100 Monte Carlo πραγματοποιήσεις για κάθε ρύθμιση και για ένα εύρος τιμών για το κατώφλι μεγέθους M_{thr} ($4.0 \leq M_{thr} \leq 4.7$). Τα στατιστικά αποτελέσματα για τα προσομοιωτικά δεδομένα που διατηρούν τις συνθήκες των πραγματικών δεδομένων των διαδοχικών σεισμών μας επιτρέπουν να διερευνήσουμε τους περιορισμούς, σχετικά με το κατώφλι μεγέθους M_{thr} , στην εκτίμηση του μέτρου r και τους κατάλληλους στατιστικούς ελέγχους που πρέπει να εφαρμοστούν στις εφαρμογές που πραγματοποιούνται, στις ενότητες 4.5 και 4.6, στα πραγματικά δεδομένα.

4.4.2 Παράδειγμα προσομοιωτικής μελέτης

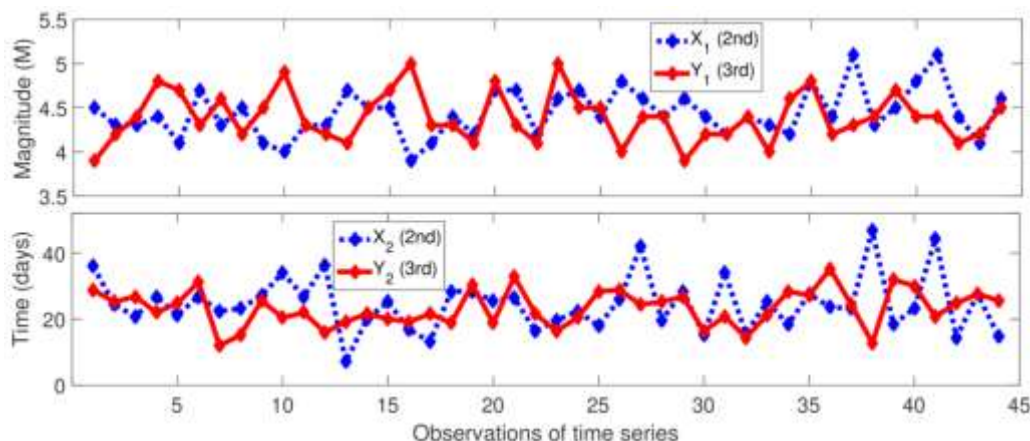
Παρουσιάζονται δύο (2) παραδείγματα ρυθμίσεων των δεδομένων για την επεξήγηση της προσομοιωτικής μελέτης για το ζεύγος που σχηματίζουν ο 2^{ος} και 3^{ος} σεισμός για την σεισμική ζώνη 3 θέτοντας $M_{thr} = 4.0$. Στο Σχ. 4.3, πέντε (5) από τους συνολικά 44 κύριους σεισμούς που πραγματοποιήθηκαν στην σεισμική ζώνη 3 παρουσιάζονται μαζί με τους σεισμούς με μεγέθη $M_{thr} = 4.0$ και $M \leq 5.4$, όπου οι σεισμοί τάξης $i = 2$ και $i = 3$ σημειώνονται με κύκλο.



Σχ. 4.3: Οι χρόνοι (στο επάνω μέρος του σχήματος) και τα μεγέθη (στο κάτω μέρος του σχήματος) των σεισμών που παρουσιάζονται σε μία διατεταγμένη σειρά και περιλαμβάνουν πέντε (5) από τους 44 κύριους σεισμούς ($M \geq 5.5$) που έγιναν στην σεισμική ζώνη 3. Ο χρόνος γένεσης των κύριων σεισμών φαίνεται από τις κόκκινες κάθετες γραμμές. Οι ελλείψεις δείχνουν τους χρόνους σε ημέρες και τα μεγέθη των σεισμών τάξης $i = 2$ και $i = 3$.

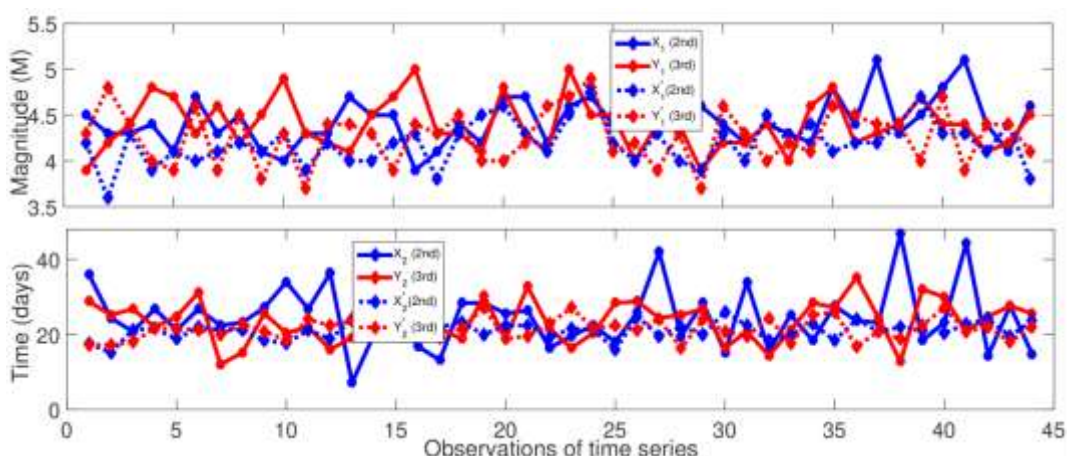
Επομένως, ρυθμίζοντας $p = 0$ στην σχέση (4.5) κατασκευάζονται οι ασυσχέτιστες (ανεξάρτητες) προσομοιωτικές, αρχικές, πολυμεταβλητές χρονοσειρές στο Σχ. 4.4.

Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης r μεταξύ των ασυσχέτιστων πολυμεταβλητών χρονοσειρών $X=(X_1, X_2)$ και $Y=(Y_1, Y_2)$ από την σχέση (4.1). Η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r αναμένεται να είναι χαμηλή καθώς οι πολυμεταβλητές χρονοσειρές X και Y είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους.



Σχ. 4.4: Οι ανεξάρτητες προσομοιωτικές, αρχικές, πολυμεταβλητές χρονοσειρές για το μέγεθος του σεισμού (στο επάνω μέρος) και της χρονικής διαδοχής του από τον επόμενο σεισμό (στο κάτω μέρος), αντίστοιχα.

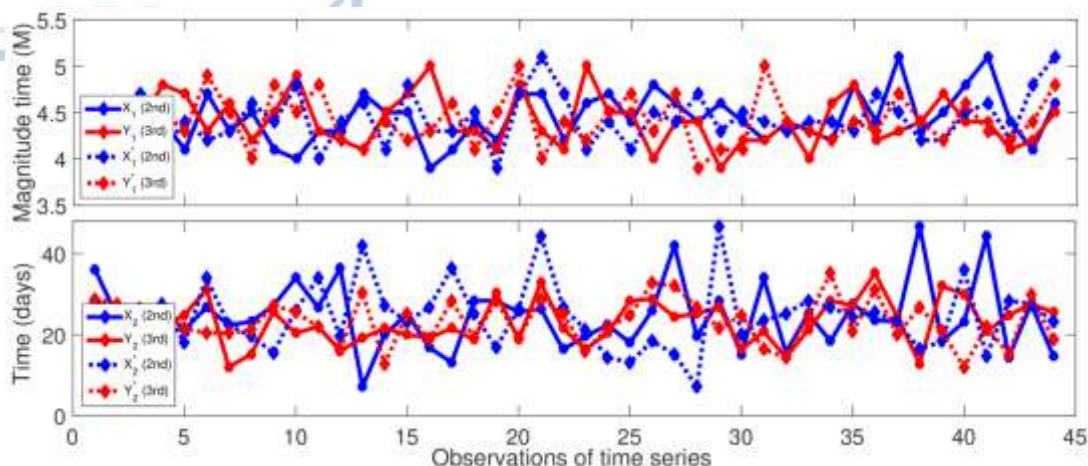
Για την στατιστική σημαντικότητα του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r , με βάση τον μη-παραμετρικό στατιστικό έλεγχο, απαιτείται η κατασκευή των τυχαιοποιημένων πολυμεταβλητών χρονοσειρών, από την προσέγγιση τυχαιοποίησης “adaptive test” (Σχ. 4.5) που υποθέτει ότι οι τυχαιοποιημένες πολυμεταβλητές χρονοσειρές προκύπτουν από την μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των σεισμών τάξης $i \geq 4$ για κάθε ένα από τους 44 κύριους σεισμούς και από την προσέγγιση τυχαιοποίησης “shuffling test” που οι τυχαιοποιημένες πολυμεταβλητές χρονοσειρές προκύπτουν από μία τυχαία ανάμιξη των n παρατηρήσεων κάθε μεταβλητής των αρχικών (Σχ. 4.6).



Σχ. 4.5: Οι τυχαιοποιημένες πολυμεταβλητές χρονοσειρές με την προσέγγιση τυχαιοποίησης “adaptive test”.

Οι τιμές του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r που προκύπτουν από τις τυχαιοποιημένες πολυμεταβλητές χρονοσειρές, $X_{rand}=(X_1'', X_2'')$ και $Y_{rand}=(Y_1'', Y_2'')$, για την προσέγγιση “adaptive test”, και $X_{rand}=(X_1^*, X_2^*)$ και $Y_{rand}=(Y_1^*, Y_2^*)$, για την προσέγγιση “shuffling test”, αναμένεται να είναι το ίδιο χαμηλές με την αντίστοιχη που προκύπτει από τις αρχικές μεταβλητές X και Y , επειδή

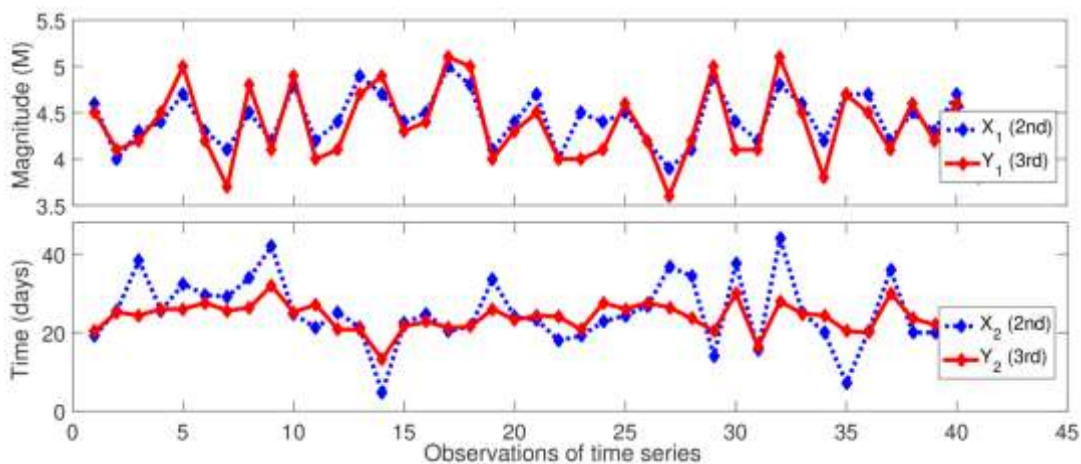
οι τυχαιοποιημένες μεταβλητές είναι πιο τυχαίες και από τις προσομοιωτικές, αρχικές, ανεξάρτητες μεταβλητές.



Σχ. 4.6: Οι τυχαιοποιημένες πολυμεταβλητές χρονοσειρές με την προσέγγιση τυχαιοποίησης "shuffling test".

Στο Σχ. 4.5 οι παρατηρήσεις των τυχαιοποιημένων μεταβλητών έχουν χαμηλότερη τυπική απόκλιση σε σχέση με αυτές των προσομοιωτικών (αρχικών). Αυτό ερμηνεύεται από το γεγονός ότι οι τυχαιοποιημένες μεταβλητές κατασκευάζονται από μεγαλύτερο δείγμα σε σχέση με τις προσομοιωτικές. Στο Σχ. 4.6 οι τυχαιοποιημένες μεταβλητές διατηρούν το ιστόγραμμα των προσομοιωτικών.

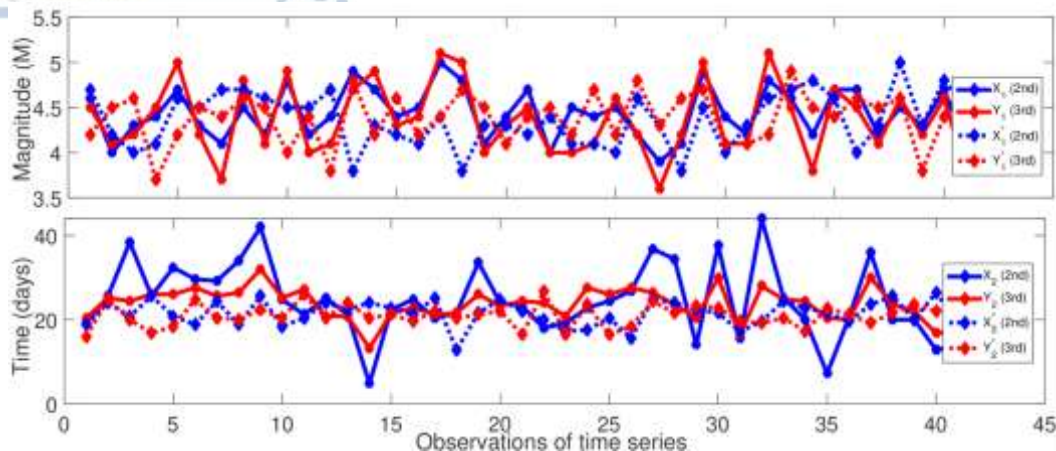
Αντίθετα, ρυθμίζοντας $p = 0.8$ στην σχέση (4.5) δημιουργούνται προσομοιωτικές εξαρτημένες, αρχικές, χρονοσειρές μεταξύ τους στο Σχ. 4.7. Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο κανονικοποιημένος συντελεστής r μεταξύ των αρχικών πολυμεταβλητών χρονοσειρών αλλά τώρα η τιμή του δείκτη συσχέτισης r αναμένεται να είναι υψηλή καθώς οι αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές X και Y είναι εξαρτημένες μεταξύ τους με ισχυρή συσχέτιση $p = 0.8$.



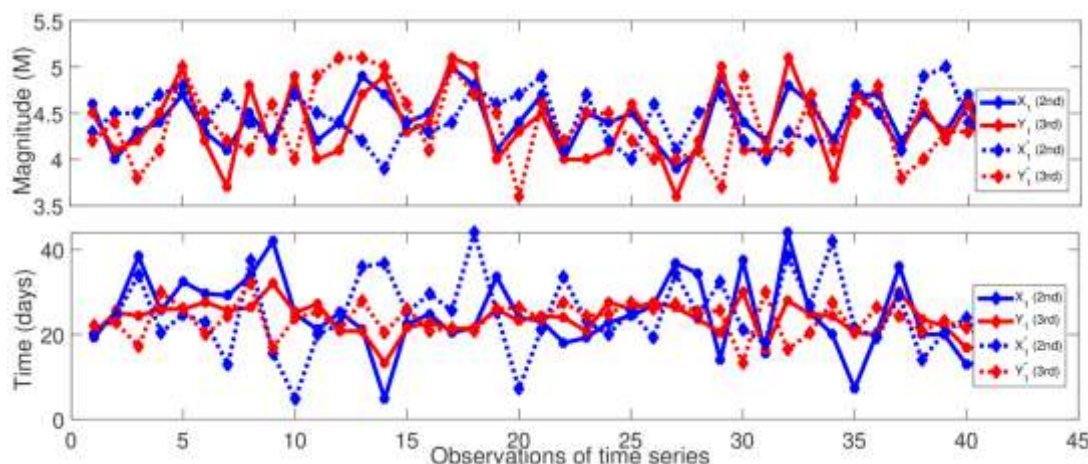
Σχ. 4.7: Οι εξαρτημένες προσομοιωτικές, αρχικές, πολυμεταβλητές χρονοσειρές για το μέγεθος του σεισμού (στο επάνω μέρος) και της χρονικής διαδοχής του από τον επόμενο σεισμό (στο κάτω μέρος), αντίστοιχα.

Στην συνέχεια, οι τυχαιοποιημένες πολυμεταβλητές χρονοσειρές κατασκευάζονται από την προσέγγιση τυχαιοποίησης "adaptive test" (Σχ. 4.8) και από την προσέγγιση τυχαιοποίησης "shuffling test" (Σχ. 4.9). Οι τιμές του δείκτη συσχέτισης r που προκύπτουν από τις τυχαιοποιημένες πολυμεταβλητές χρονοσειρές, $X_{rand} = (X_1'', X_2'')$ και $Y_{rand} = (Y_1'', Y_2'')$ από την προσέγγιση "adaptive test" και $X_{rand} = (X_1^*, X_2^*)$ και $Y_{rand} = (Y_1^*, Y_2^*)$ από την προσέγγιση "shuffling test", αναμένονται

να είναι χαμηλές καθώς οι τυχαιοποιημένες πολυμεταβλητές χρονοσειρές X_{rand} και Y_{rand} δεν παρουσιάζουν την δομή της συσχέτισης όπως φαίνεται στο Σχ. 4.8 και στο Σχ. 4.9 όπως την παρουσιάζουν οι αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές στο Σχ. 4.7.



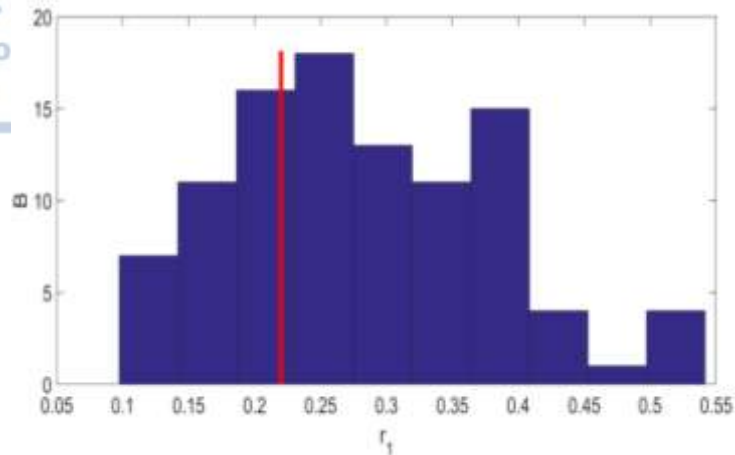
Σχ. 4.8: Οι τυχαιοποιημένες πολυμεταβλητές χρονοσειρές με την προσέγγιση τυχαιοποίησης "shuffling test".



Σχ. 4.9: Οι τυχαιοποιημένες πολυμεταβλητές χρονοσειρές με την προσέγγιση τυχαιοποίησης "shuffling test".

Έπειτα, ο μη-παραμετρικός στατιστικός έλεγχος, για την στατιστική σημαντικότητα του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r , εκτελείται με βάση την σχέση (4.5) για τις δύο (2) προτεινόμενες προσεγγίσεις τυχαιοποίησης. Η μηδενική υπόθεση H_0 θεωρεί ότι οι αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους και ο δείκτης συσχέτισης r θεωρείται ως στατιστικό ελέγχου.

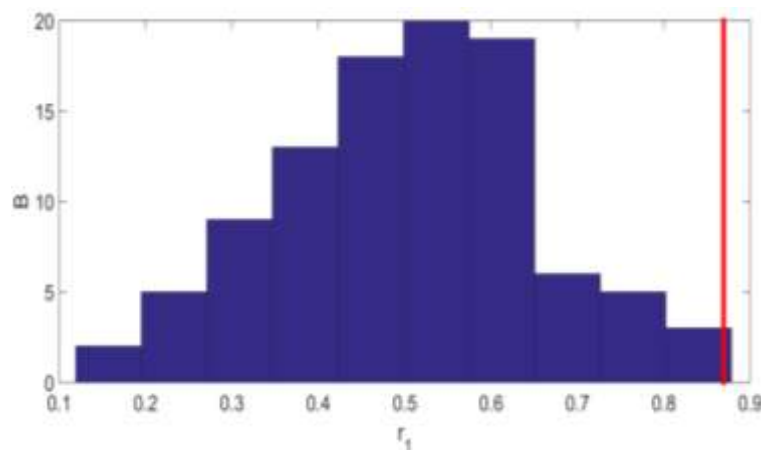
Όταν οι αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους, τότε η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r που υπολογίζεται μεταξύ τους πρέπει να ανήκει στο εύρος των B αντίστοιχων τιμών (r_{rand}), που προκύπτουν μεταξύ των τυχαιοποιημένων πολυμεταβλητών χρονοσειρών από κάποια από τις δύο (2) προτεινόμενες προσεγγίσεις τυχαιοποίησης (Σχ. 4.10). Για τον στατιστικό έλεγχο, θεωρείται η μηδενική υπόθεση H_0 ότι οι δύο αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές είναι ασυσχέτιστες (δηλαδή, τυχαίες και ανεξάρτητες) μεταξύ τους. Για την μελέτη προσομοίωσης, όταν οι προσομοιωτικές, αρχικές, πολυμεταβλητές χρονοσειρές είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους τότε η μηδενική υπόθεση H_0 είναι αληθής και η οποιαδήποτε συσχέτιση που προκύπτει μεταξύ τους σχηματίζεται τυχαία.



Σχ. 4.10: Παράδειγμα της μηδενικής κατανομής του στατιστικού ελέγχου η οποία σχηματίζεται από το ιστόγραμμα που προκύπτει από την κατανομή των $B=100$ τιμών r_{rand} . Η κόκκινη γραμμή παρουσιάζει την τιμή του δείκτη συσχέτισης r που προκύπτει μεταξύ των αρχικών ανεξάρτητων πολυμεταβλητών χρονοσειρών. Αποτυπώνεται, σωστά η αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης H_0 .

Στο Σχ. 4.10, φαίνεται ότι η κατανομή του συνόλου των B τιμών (r_{rand}) (μπλε ράβδοι στο Σχ. 4.10) δεν παρουσιάζει μηδενικές τιμές (δηλαδή $r_{rand} \neq 0$) αλλά έχει μέση τιμή περίπου ίση με 0.25 και καλύπτει ορθώς (δηλαδή, ορθή αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης H_0 καθώς $p = 0.67 \gg 0.05$) τον κανονικοποιημένο δείκτη συσχέτισης r (κόκκινη γραμμή στο Σχ. 4.10) που προκύπτει από τις αρχικές ασυσχέτιστες πολυμεταβλητές χρονοσειρές.

Αντίθετα, όταν οι αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές είναι εξαρτημένες, και η ισχύς της μεταξύ τους συσχέτισης είναι $p = 0.8$ στην σχέση (4.5), ο δείκτης συσχέτισης r δεν πρέπει να ανήκει στην εμπειρική κατανομή του συνόλου r_{rand} (Σχ. 4.11) (δηλαδή, η μηδενική υπόθεση H_0 , σωστά, απορρίπτεται καθώς $p = 0.0067 \ll 0.05$). Όταν οι προσομοιωτικές, αρχικές, πολυμεταβλητές χρονοσειρές είναι εξαρτημένες μεταξύ τους τότε η μηδενική υπόθεση H_0 είναι εσφαλμένη, και οι ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ τους προκύπτουν ως αποτέλεσμα των πραγματικών διασυσχετίσεων που παρουσιάζουν οι προσομοιωμένες πολυμεταβλητές χρονοσειρές μεταξύ τους. Στο Σχ. 4.11 παρατηρούμε ότι ακόμα και για τις τυχαιοποιημένες μεταβλητές οι τιμές του δείκτη συσχέτισης (μπλε μπάρες) παρουσιάζονται να είναι υψηλές λόγω της τάσης του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης να δημιουργεί υψηλές συσχετίσεις μεταξύ των πολυμεταβλητών χρονοσειρών.



Σχ. 4.11: Όμοια με το Σχ. 4.10 αλλά οι αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές είναι εξαρτημένες. Παρουσιάζεται η απόρριψη, ορθά, της μηδενικής υπόθεσης H_0 .

Για τον παραμετρικό στατιστικό έλεγχο, οι τυχαιοποιημένες πολυμεταβλητές χρονοσειρές δεν χρειάζεται να κατασκευαστούν καθώς ο έλεγχος σημαντικότητας της τιμής του κανονικοποιημένου δείκτη συσχέτισης r , που προκύπτει μεταξύ των αρχικών πολυμεταβλητών χρονοσειρών, βασίζεται στην δοκιμασία χ^2 σύμφωνα με την σχέση (4.4).

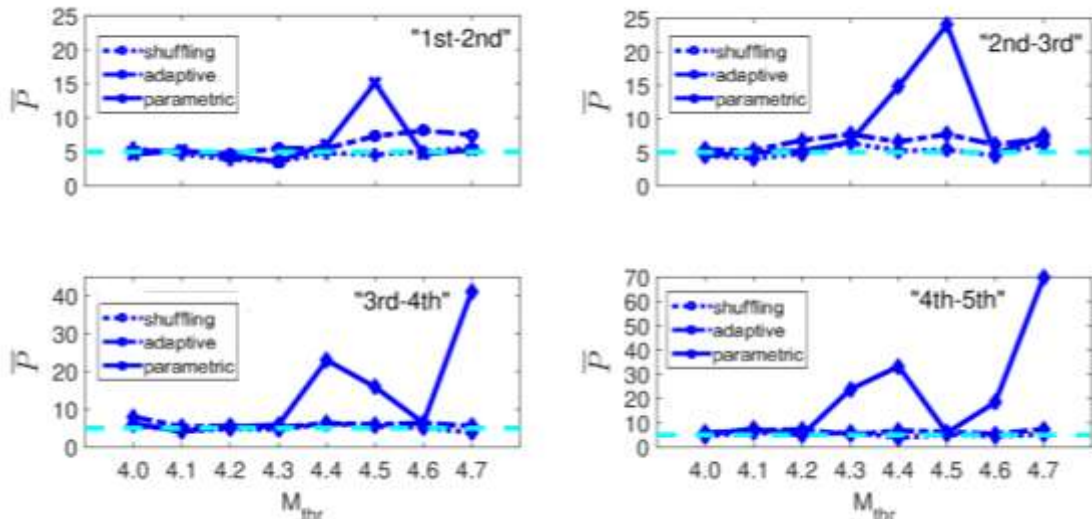
4.4.3 Ανεξάρτητες μεταβλητές (Έλεγχος εξειδίκευσης)

Θεωρούνται, δύο πολυμεταβλητές χρονοσειρές $X=(X_1, X_2)$ και $Y=(Y_1, Y_2)$. Οι μεταβλητές X_1 και Y_1 περιλαμβάνουν το μέγεθος του σεισμού και οι μεταβλητές X_2 και Y_2 την χρονική διαδοχή τους μέχρι τον επόμενο σεισμό (όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.4.1). Οι πολυμεταβλητές χρονοσειρές X και Y κατασκευάζονται από την σχέση (4.5). Η ισχύς της συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών X_1 και Y_1 είναι $p = 0$ (στην σχέση (4.5)), αντίστοιχα, για τις μεταβλητές X_2 και Y_2 . Επομένως, κατασκευάζονται ασυσχέτιστες προσομοιωτικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές που είναι συνεπείς με την μηδενική υπόθεση H_0 των ασυσχέτιστων (ανεξάρτητων) μεταβλητών X και Y . Η μηδενική υπόθεση H_0 , ότι οι αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές είναι ανεξάρτητες, απορρίπτεται, εσφαλμένα, όταν ισχύει $p - value < 0.05$ στην σχέση (3.4) και (4.4), δηλαδή, πραγματοποιείται το σφάλμα τύπου I.

Ο έλεγχος της εξειδίκευσης για κάθε προσέγγιση τυχαιοποίησης, shuffling test και adaptive test, και για τον παραμετρικό έλεγχο, για κάθε ζεύγος σεισμών ($1^{ος}-2^{ος}$, $2^{ος}-3^{ος}$, $3^{ος}-4^{ος}$ και $4^{ος}-5^{ος}$) πραγματοποιείται με διαφορετικές ρυθμίσεις δεδομένων για την μέση τιμή (μ), την τυπική απόκλιση (σ) και το μήκος (n) των πολυμεταβλητών χρονοσειρών που προκύπτουν ανάλογα με το κατώφλι του μεγέθους M_{thr} των σεισμών. Ο μέσος όρος των ποσοστών απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις Monte Carlo που προκύπτουν από τις 10 σεισμικές ζώνες παρουσιάζονται στο Σχ. 4.12, με βάση το κατώφλι μεγέθους M_{thr} , και στο Σχ. 4.13, με βάση το μήκος n των χρονοσειρών που προκύπτει από το κατώφλι του μεγέθους M_{thr} , για τις τρεις (3) προσεγγίσεις, που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο σημαντικότητας του κανονικοποιημένου δείκτη συσχέτισης r , για κάθε ζεύγος σεισμών, αντίστοιχα.

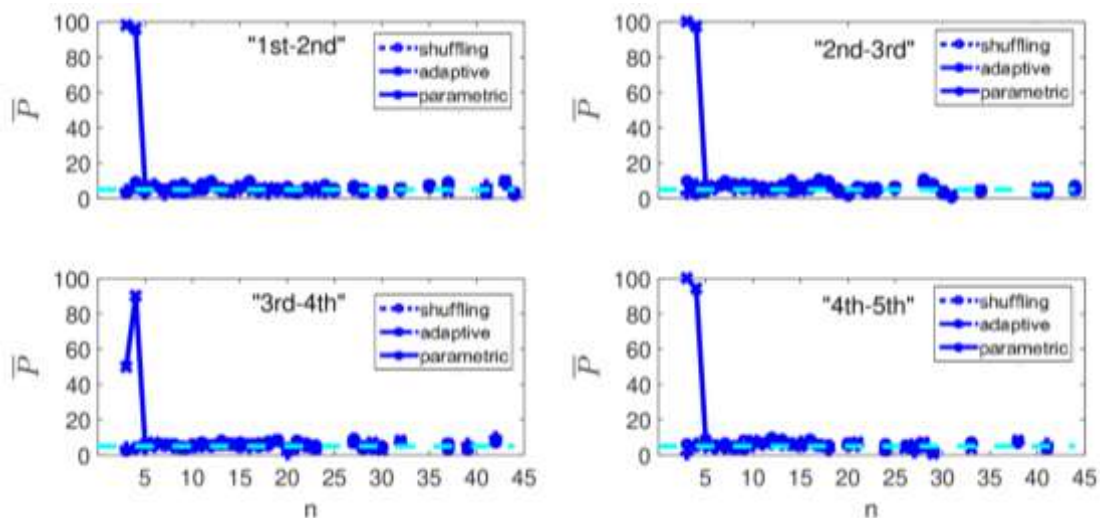
Η κλασική προσέγγιση του παραμετρικού ελέγχου παρουσιάζει την τάση να απορρίπτει, εσφαλμένα, την H_0 με υψηλότερη πιθανότητα από την επιτρεπτή του 0.05 (παρουσιάζει σφάλμα τύπου I), δηλαδή 5%, όταν είτε το κατώφλι μεγέθους είναι υψηλό ($M_{thr} \geq 4.3$) όπως φαίνεται στο Σχ. 4.12 ή όταν το μήκος n των πολυμεταβλητών χρονοσειρών είναι μικρό ($n \leq 4$) όπως παρουσιάζεται στο Σχ. 4.13 για κάθε ζεύγος σεισμών. Για μικρό κατώφλι μεγέθους ($4.0 \leq M_{thr} \leq 4.2$), δηλαδή όταν οι χρονοσειρές έχουν περισσότερες από (4) παρατηρήσεις ($n \geq 5$), ο παραμετρικός έλεγχος σωστά αποδέχεται την μηδενική υπόθεση H_0 . Επομένως, η προσέγγιση του παραμετρικού ελέγχου δεν αποκαλύπτει την τυχαία δομή μεταξύ των αρχικών πολυμεταβλητών χρονοσειρών όταν αυτή υπάρχει (σφάλμα τύπου I), όταν το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) είναι υψηλό (Σχ. 4.12) και οι πολυμεταβλητές χρονοσειρές έχουν λίγες παρατηρήσεις (Σχ. 4.13).

Αντίθετα, και οι δύο προτεινόμενες προσεγγίσεις που τυχαιοποιούν τις αρχικές πολυμεταβλητές παρουσιάζουν ποσοστά απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 στο επιτρεπτό όριο του 5%, υποδεικνύοντας την κατάλληλη εξειδίκευση που προκύπτει από αυτές τις προσεγγίσεις, ανεξάρτητα από το κατώφλι μεγέθους M_{thr} (Σχ. 4.12) και το μήκος n των πολυμεταβλητών χρονοσειρών που σχηματίζεται (Σχ. 4.13).



Σχ. 4.12: Ο έλεγχος της εξειδίκευσης κάθε προσέγγισης με βάση τον μέσο όρο των ποσοστών των απορρίψεων της μηδενικής υπόθεσης H_0 , που προκύπτει από τις 10 σεισμικές ζώνες, στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους M_{thr} , για κάθε ζεύγος σεισμών. Η οριζόντια κυανή διακοπτόμενη γραμμή είναι στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$ (5%).

Μόνο, για τα ζεύγη σεισμών 1^{ος}-2^{ος} και 2^{ος}-3^{ος} όταν το κατώφλι μεγέθους M_{thr} είναι υψηλό, αντίστοιχα το μήκος n των πολύ-μεταβλητών χρονοσειρών είναι χαμηλό, για την προσέγγιση τυχαιοποίησης “adaptive test” το ποσοστό απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 είναι πάνω από το επιτρεπόμενο όριο του 5% αλλά δεν υπερβαίνει το 10% για κάθε περίπτωση.



Σχ. 4.13: Ο έλεγχος της εξειδίκευσης κάθε προσέγγισης με βάση τον μέσο όρο των ποσοστών των απορρίψεων της μηδενικής υπόθεσης H_0 , που προκύπτει από τις 10 σεισμικές ζώνες, στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το μήκος n (όπου ορίζεται) των πολυμεταβλητών χρονοσειρών, για κάθε ζεύγος σεισμών. Η οριζόντια κυανή διακοπτόμενη γραμμή είναι στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$ (5%).

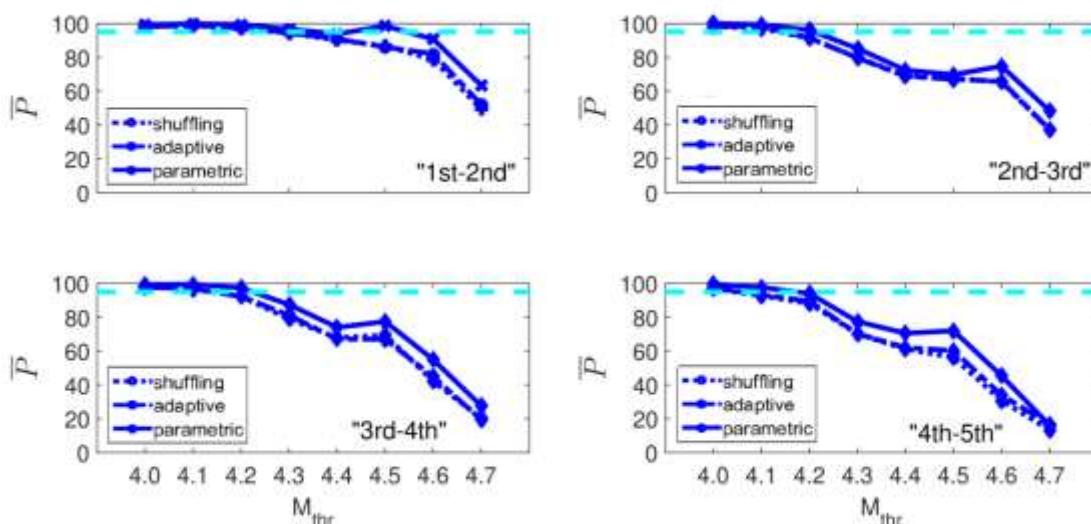
Τα αποτελέσματα της εξειδίκευσης κάθε προσέγγισης, με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}), για κάθε σεισμική ζώνη παρουσιάζονται στο παράρτημα (Σχ. B1 ως Σχ. B10).

4.4.4 Εξαρτημένες μεταβλητές (Έλεγχος ευαισθησίας)

Για τον έλεγχο της ευαισθησίας των προσεγγίσεων τυχαιοποίησης και του παραμετρικού ελέγχου σχετικά με την στατιστική σημαντικότητα του

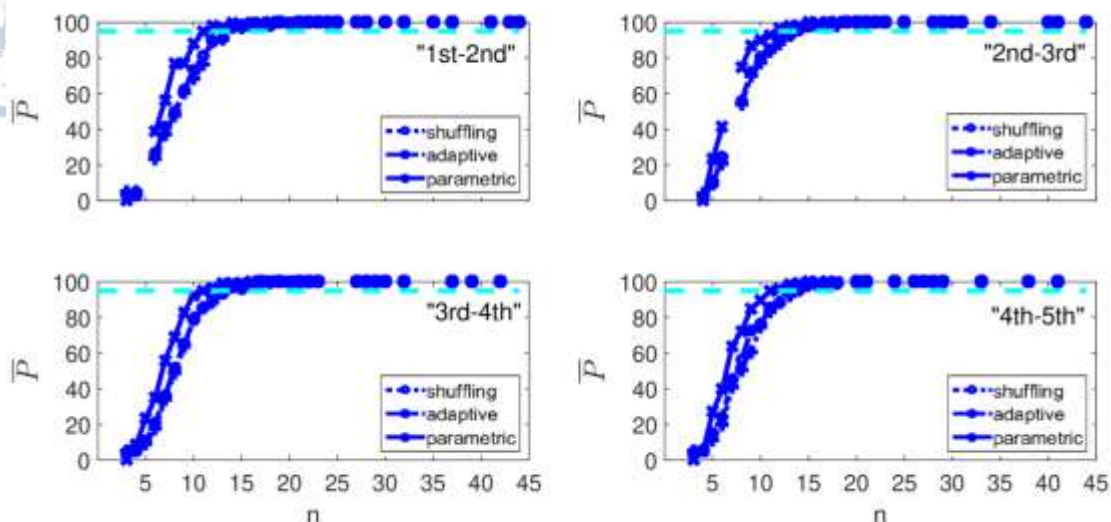
κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r , κατασκευάζονται οι δύο (2) πολυμεταβλητές χρονοσειρές $X=(X_1, X_2)$ και $Y=(Y_1, Y_2)$ από την σχέση (3.4) αλλά τώρα η ισχύς της συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών X_1 και Y_1 είναι $p = 0.8$ (στην σχέση (4.5)), αντίστοιχα, για τις μεταβλητές X_2 και Y_2 . Προφανώς, η μηδενική υπόθεση H_0 , ότι οι πολυμεταβλητές χρονοσειρές είναι ανεξάρτητες, είναι εσφαλμένη καθώς οι μεταβλητές των πολυμεταβλητών χρονοσειρών συσχετίζονται ισχυρά. Η κατάλληλη εναλλακτική υπόθεση H_1 , που θα αναγνώριζε την εξάρτηση μεταξύ των πολυμεταβλητών χρονοσειρών, απαιτεί να ισχύει $p - value < 0.05$ στις σχέσεις (3.4) και (4.4) για τον έλεγχο τυχαιοποίησης και τον παραμετρικό έλεγχο, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα, σχετικά με την ευαισθησία κάθε προσέγγισης, παρουσιάζονται στο Σχ. 4.14 με βάση το κατώφλι μεγέθους M_{thr} και στο Σχ. 4.15 με βάση το μήκος n των πολυμεταβλητών χρονοσειρών που σχηματίζεται για κάθε ζεύγος σεισμών. Το ποσοστό απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 στο Σχ. 4.14 και Σχ. 4.15 προκύπτει ως ο μέσος όρος του ποσοστού απόρριψης της H_0 που προέρχεται και από τις 10 σεισμικές ζώνες.

Επομένως, στον έλεγχο της ευαισθησίας κάθε προσέγγισης ενδιαφερόμαστε για την εναλλακτική υπόθεση H_1 , δηλαδή ότι οι αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές δεν είναι ανεξάρτητες. Η απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης H_0 απαιτείται και για τις τρεις (3) προσεγγίσεις καθώς είναι εσφαλμένη διότι οι αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές είναι εξαρτημένες. Αυτό το πρότυπο, της απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 , διατηρείται και με τις τρεις (3) προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται για τον στατιστικό έλεγχο, καθώς σωστά απορρίπτουν την μηδενική υπόθεση H_0 όταν είτε το κατώφλι μεγέθους M_{thr} είναι χαμηλό ($M_{thr} \leq 4.3$) στο Σχ. 4.14 ή όταν το μήκος n των χρονοσειρών είναι υψηλό ($n \geq 11$) στο Σχ. 4.15 για κάθε ζεύγος σεισμών.



Σχ. 4.14: Ο έλεγχος της ευαισθησίας κάθε προσέγγισης με βάση τον μέσο όρο των ποσοστών των απορρίψεων της μηδενικής υπόθεσης H_0 , που προκύπτει από τις 10 σεισμικές ζώνες, στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους M_{thr} , για κάθε ζεύγος σεισμών. Η οριζόντια κυανή διακοπόμενη γραμμή είναι στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$ (5%).

Οι τρεις (3) προσεγγίσεις αποδεικνύονται λιγότερο αποτελεσματικές όταν το κατώφλι μεγέθους M_{thr} είναι υψηλό ($M_{thr} \geq 4.4$) (Σχ. 4.14) και οι χρονοσειρές έχουν λίγες παρατηρήσεις ($n \leq 10$) (Σχ. 4.15) για κάθε ζευγάρι σεισμών. Τα αποτελέσματα της ευαισθησίας κάθε προσέγγισης, με βάση το κατώφλι μεγέθους M_{thr} που θεωρείται, για κάθε σεισμική ζώνη παρουσιάζονται στο παράρτημα (Σχ. Γ1 ως Σχ. Γ10).



Σχ. 4.15: Ο έλεγχος της ευαισθησίας κάθε προσέγγισης με βάση τον μέσο όρο των ποσοστών των απορρίψεων της μηδενικής υπόθεσης H_0 , που προκύπτει από τις 10 σεισμικές ζώνες, στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το μήκος n (όπου ορίζεται) των πολυμεταβλητών χρονοσειρών, για κάθε ζεύγος σεισμών. Η οριζόντια κυανή διακοπτόμενη γραμμή είναι στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$ (5%).

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της προσομοιωτικής μελέτης, για τον έλεγχο της εξειδίκευσης η προτεινόμενη μέθοδος τυχαιοποίησης, με τις δύο (2) προσεγγίσεις, που εφαρμόζει τον μη-παραμετρικό στατιστικό έλεγχο είναι καταλληλότερη από τον παραμετρικό στατιστικό έλεγχο καθώς σωστά δεν ανιχνεύει την δομή συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών (δηλαδή, οι πολυμεταβλητές χρονοσειρές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους) όταν δεν υπάρχει ανεξάρτητα από το κατώφλι του μεγέθους M_{thr} και το μήκος n των χρονοσειρών που θεωρούνται. Για τον έλεγχο της ευαισθησίας, ο προτεινόμενος μη-παραμετρικός έλεγχος τείνει να ανιχνεύει, σωστά, την δομή της συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών (δηλαδή, οι πολυμεταβλητές χρονοσειρές είναι εξαρτημένες μεταξύ τους) όταν υπάρχει, όπως, επίσης, και ο παραμετρικός έλεγχος όταν το κατώφλι μεγέθους είναι χαμηλό ($M_{thr} \leq 4.3$) και το μήκος των χρονοσειρών είναι υψηλό ($n > 11$). Αντίθετα, και οι τρεις (3) προσεγγίσεις δεν καταδεικνύουν, εσφαλμένα, την δομή συσχέτισης μεταξύ των πολυμεταβλητών χρονοσειρών όταν υπάρχει στην περίπτωση που το κατώφλι μεγέθους είναι υψηλό ($M_{thr} \geq 4.4$) και οι παρατηρήσεις των χρονοσειρών είναι λίγες ($n \leq 10$).

4.5 Εφαρμογή σε πραγματικά δεδομένα και αποτελέσματα

Ο στόχος της εφαρμογής είναι η ανίχνευση χρονικών προτύπων στην σεισμικότητα που παρουσιάζει η κάθε σεισμική ζώνη, μέσω του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r , λίγο πριν την γένεση κύριων σεισμών. Εξετάζεται, αν οι πέντε (5) τελευταίοι χρονικά σεισμοί, ανά ζεύγη σεισμών ($1^{ος}-2^{ος}$, $2^{ος}-3^{ος}$, $3^{ος}-4^{ος}$ και $4^{ος}-5^{ος}$), που έγιναν πριν από τους κύριους σεισμούς συσχετίζονται ισχυρά με σκοπό την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας. Επομένως, διερευνάται η στατιστική σημαντικότητα της τιμής του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r που προκύπτει από την συσχέτιση μεταξύ των πολυμεταβλητών χρονοσειρών οι οποίες περιλαμβάνουν το μέγεθος του σεισμού που εξετάζεται και την χρονική διαδοχή του, σε ημέρες, μέχρι τον επόμενο σεισμό.

Το σύνολο των παρατηρήσεων περιλαμβάνει επιφανειακούς σεισμούς, με εστιακό βάθος μικρότερο των 50 χλμ., μεγέθους $M \geq 4.0$ που έγιναν στον Ελληνικό χώρο με τις γειτονικές περιοχές του κατά την χρονική περίοδο 1964-2018 (Σχ. 4.2). Ο

υπολογισμός του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r εκτιμάται από την σχέση (4.1) για σεισμούς μεγέθους $4.0 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν πριν από 271 κύριους σεισμούς ($M \geq 5.5$) και το κατώφλι μεγέθους M_{thr} στο εύρος $4.0 \leq M_{thr} \leq 4.7$. Η ελληνική περιοχή χωρίζεται σε 10 καλά καθορισμένες σεισμικές ζώνες που αντιπροσωπεύουν τις περιπτώσεις μελέτης (Σχ 4.1). Για την διερεύνηση αν είναι στατιστικά σημαντική η τιμή του μέτρου r , εφαρμόζονται ο παραμετρικός έλεγχος και ο μη-παραμετρικός με τους δύο (2) στατιστικούς ελέγχους τυχαιοποίησης.

Η μελέτη προσομοίωσης, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.4, προτείνει την χρήση του μη-παραμετρικού στατιστικού ελέγχου, και με τις δύο (2) προσεγγίσεις του "shuffling test" και "adaptive test", και του παραμετρικού στατιστικού ελέγχου για την εκτίμηση της στατιστικής σημαντικότητας του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r όταν το κατώφλι μεγέθους M_{thr} θεωρείται χαμηλό, δηλαδή $4.0 \leq M_{thr} \leq 4.3$, καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις το μήκος n των χρονοσειρών είναι υψηλό ($n \geq 11$). Οι παραπάνω ρυθμίσεις δεδομένων παρουσίασαν τα καλύτερα αποτελέσματα στην προσομοιωτική μελέτη της ενότητας 4.4 και σε αυτές τις περιπτώσεις βασίζεται η εφαρμογή σε πραγματικά δεδομένα. Αξίζει να σημειωθεί, για τον μη-παραμετρικό έλεγχο η μελέτη προσομοίωσης για την ειδικότητα παρουσιάζει ότι οι δύο προσεγγίσεις του, που τυχαιοποιούν την αρχική πολυμεταβλητή χρονοσειρά, δεν ανιχνεύουν την δομή της συσχέτισης μεταξύ των πολυμεταβλητών χρονοσειρών όταν δεν υπάρχει ανεξάρτητα από το κατώφλι μεγέθους M_{thr} το οποίο θεωρείται. Συνεπώς, στην εφαρμογή που εκτελείται η ερμηνεία των αποτελεσμάτων βασίζεται στα χαμηλά κατώφλια μεγέθους ($4.0 \leq M_{thr} \leq 4.3$) καθώς η δομή των πραγματικών δεδομένων είναι άγνωστη. Η μηδενική υπόθεση H_0 υποθέτει ότι οι δύο αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές είναι τυχαίες και ο στατιστικός έλεγχος για την στατιστική σημαντικότητα του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r εκτελείται από την σχέση (3.4) για τον μη-παραμετρικό στατιστικό έλεγχο που κατασκευάζονται $B = 100$ τυχαιοποιημένες πολυμεταβλητές χρονοσειρές, και με τις δύο (2) προσεγγίσεις του, και από τον παραμετρικό στατιστικό έλεγχο από την σχέση (4.4), όπως περιγράφονται στην ενότητα 4.3.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1 που παρουσιάζει τις περιπτώσεις που η μηδενική υπόθεση H_0 απορρίπτεται (δηλαδή, $p - τιμή < 0.05$ στις σχέσεις (3.4) και (4.4)), δηλαδή οι αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές δεν είναι ασυσχέτιστες, και αποκαλύπτουν την στατιστική σημαντικότητα της τιμής του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r πριν τους επερχόμενους κύριους σεισμούς. Τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.1 βασίζονται στα χαμηλά κατώφλια μεγέθους M_{thr} που θεωρούνται, δηλαδή $4.0 \leq M_{thr} \leq 4.3$. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής για κάθε προσέγγιση του στατιστικού ελέγχου με βάση όλο το εύρος μεγεθών ($4.0 \leq M_{thr} \leq 4.7$), για κάθε σεισμική ζώνη παρουσιάζονται στο παράρτημα στο Σχ. Δ (Σχ. Δ1 ως Σχ. Δ10).

Συμπερασματικά, για κάθε σεισμική ζώνη, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1, για ορισμένες περιπτώσεις ανάλογα με το κατώφλι μεγέθους M_{thr} και του ζεύγους των σεισμών που εξετάζονται, η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r είναι στατιστικά σημαντική πριν τους επερχόμενους κύριους σεισμούς όχι, όμως, και με τους τρεις (3) στατιστικούς ελέγχους. Σε όλες τις περιπτώσεις η μηδενική υπόθεση H_0 απορρίπτεται, είτε μέσω μόνο του παραμετρικού ελέγχου ή μαζί με τον έναν ή και με τους δύο στατιστικούς ελέγχους τυχαιοποίησης. Αυτό είναι κάπως αναμενόμενο, καθώς η μελέτη προσομοίωσης έδειξε ότι η παραμετρική δοκιμή έχει τάση απόρριψης της H_0 (χαμηλή ειδικότητα). Ακόμα και όταν η μελέτη επικεντρώνεται στους στατιστικούς ελέγχους τυχαιοποίησης, υπάρχουν ακόμα ενδείξεις συσχέτισης μεταξύ των πέντε (5) τελευταίων χρονικά σεισμών πριν τους

επερχόμενους κύριους σεισμούς για κάθε σεισμική ζώνη αλλά όχι με κάποιο συστηματικό τρόπο σε σχέση με το κατώφλι M_{thr} ή το ζεύγος των σεισμών που εξετάζεται. Αυτό το εύρημα μπορεί να θεωρηθεί αρκετά υποσχόμενο για την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμογένεσης καθώς οι τελευταίοι, χρονικά, πέντε (5) σεισμοί παρουσιάζουν ένα ξεχωριστό πρότυπο συσχέτισης μεταξύ τους, ανά ζεύγη, στον Ελληνικό χώρο με τις γειτονικές περιοχές του.

4.6 Εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας για τον Ελληνικό χώρο

Στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου επιχειρείται η εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας, για τον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του, σχετικά με την πιθανότητα γένεσης του επερχόμενου κύριου σεισμού ($M \geq 5.5$) για κάθε μία από τις 10 σεισμικές ζώνες. Η εκτίμηση της μελλοντικής σεισμογένεσης για κάθε σεισμική ζώνη βασίζεται στις ενότητες 4.4 και 4.5.

Πίνακας 4.1: Όταν η μηδενική υπόθεση H_0 απορρίπτεται ($p - value < 0.05$) και αποκαλύπτεται η στατιστική σημαντικότητα της τιμής του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r πριν τους επερχόμενους κύριους σεισμούς, με βάση την σεισμική ζώνη (1^η στήλη), το ζεύγος σεισμών (3^η στήλη), το κατώφλι μεγέθους M_{thr} (4^η στήλη) και προσέγγιση του στατιστικού ελέγχου (5^η στήλη).

Σεισμική ζώνη	Γεωγραφική περιοχή	Ζεύγος σεισμών	M_{thr}	Προσέγγιση
1	Αλβανία-Μαυροβούνιο-Δυτική Ελλάδα	3 ^{ος} -4 ^{ος}	4.2	Parametric
		4 ^{ος} -5 ^{ος}	4.0	Όλες
2	Λευκάδα-Κεφαλονιά	3 ^{ος} -4 ^{ος}	4.1	Όλες
		4 ^{ος} -5 ^{ος}	4.2	
3	Ζάκυνθος-Νοτιοδυτική Πελοπόννησος-Δυτική Κρήτη	2 ^{ος} -3 ^{ος}	4.3	Parametric
		3 ^{ος} -4 ^{ος}	4.1	Shuffling
			4.1	Parametric
		4 ^{ος} -5 ^{ος}	4.0	Shuffling
			4.0	Parametric
			4.1	Shuffling
4	Ανατολική Κρήτη	1 ^{ος} -2 ^{ος}	4.1	Parametric
		3 ^{ος} -4 ^{ος}	4.0	Όλες
5	Μακεδονία	1 ^{ος} -2 ^{ος}	4.1	Όλες
		2 ^{ος} -3 ^{ος}	4.0	Όλες
			4.1	Όλες
		4 ^{ος} -5 ^{ος}	4.0	Shuffling
6	Θεσσαλία-Κορινθιακός κόλπος	1 ^{ος} -2 ^{ος}	4.0	Parametric
		2 ^{ος} -3 ^{ος}	4.0	Shuffling
			4.1	Parametric
		3 ^{ος} -4 ^{ος}	4.0	Shuffling
			4.1	Parametric

Σεισμική ζώνη	Γεωγραφική περιοχή	Ζεύγος σεισμών	M_{thr}	Προσέγγιση
7	Πελοπόννησος-Νότιο Αιγαίο	1 ^{ος} -2 ^{ος}	4.0	Parametric
				Shuffling
			4.2	Parametric
				Shuffling
		2 ^{ος} -3 ^{ος}	4.3	Parametric
				Shuffling
			4.0	Parametric
				Shuffling
		3 ^{ος} -4 ^{ος}	4.1	Parametric
				Shuffling
			4.0	Parametric
				Shuffling
		4 ^{ος} -5 ^{ος}	4.0	Parametric
				Shuffling
			4.1	Parametric
				Shuffling
			4.2	Όλες
				Shuffling
			4.3	Parametric
8	Βόρειο Αιγαίο	1 ^{ος} 2 ^{ος}		Shuffling
			4.0	Parametric
				Shuffling
			4.1	Parametric
		3 ^{ος} -4 ^{ος}	4.2	Parametric
				Shuffling
9	Αθήνα-Νότιο Αιγαίο	4 ^{ος} -5 ^{ος}	4.0	Όλες
				Adaptive
			4.3	Adaptive
				Shuffling
		1 ^{ος} -2 ^{ος}	4.2	Parametric
				Shuffling
			4.1	Parametric
				Shuffling
10	Βορειοδυτική Τουρκία	3 ^{ος} -4 ^{ος}	4.1	Adaptive
				Shuffling
			4.2	Parametric
				Shuffling
		4 ^{ος} -5 ^{ος}	4.0	Parametric
				Shuffling
		2 ^{ος} -3 ^{ος}	4.1	Parametric
				Shuffling
			4.0	Parametric
				Shuffling
		4 ^{ος} -5 ^{ος}	4.1	Parametric
			4.3	Όλες

Ειδικότερα, η προσομοιωτική μελέτη, στην ενότητα 4.4, αποκάλυψε ότι η εξέταση της στατιστικής σημαντικότητας του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r_1 θα πρέπει να βασιστεί και στις δύο (2) προσεγγίσεις του στατιστικού ελέγχου, δηλαδή του μη-παραμετρικού με τις δύο (2) προτεινόμενες μεθοδολογίες και του παραμετρικού στατιστικού ελέγχου, όταν θεωρείται χαμηλό κατώφλι μεγέθους M_{thr}

($4.0 \leq M_{thr} \leq 4.3$). Επίσης, η εφαρμογή σε πραγματικά δεδομένα, στην ενότητα 4.5, αποκάλυψε τις περιπτώσεις (σχετικά με το ζεύγος των σεισμών, το κατώφλι μεγέθους M_{thr} και την προσέγγιση του στατιστικού ελέγχου) για κάθε σεισμική ζώνη όπου υπάρχει στατιστική σημαντικότητα του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r (Πίνακας 4.1). Επομένως, επιχειρείται η αξιολόγηση για κάθε περίπτωση του Πίνακα 4.1 που αφορά την πιθανότητα εκτίμησης του επερχόμενου κύριου σεισμού ($M \geq 5.5$) για κάθε σεισμική ζώνη. Η αξιολόγηση για την επικύρωση της κατάλληλης περίπτωσης από τον Πίνακα 4.1 ανά σεισμική ζώνη πραγματοποιείται με δύο (2) στατιστικούς ελέγχους που αφορούν την εκτίμηση της πιθανότητας για κάθε περίπτωση του Πίνακα 4.1 η οποία είτε σωστά δεν ανιχνεύει τον επερχόμενο κύριο σεισμό όταν δεν γίνεται ή ανιχνεύει σωστά τον επερχόμενο κύριο σεισμό όταν αυτός πρόκειται να γίνει. Η μεθοδολογία της αξιολόγησης περιγράφεται παρακάτω.

Συνολικά έγιναν 271 κύριοι σεισμοί ($M \geq 5.5$) κατά την χρονική περίοδο 1964-2018 στην περιοχή μελέτης. Οι κύριοι σεισμοί που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της κάθε περίπτωσης του Πίνακα 4.1, σχετικά με την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας για την πιθανότητα γένεσης του επερχόμενου κύριου σεισμού για κάθε σεισμική ζώνη, είναι 183. Υπήρχαν αρκετές περιπτώσεις, 88 κύριοι σεισμοί, όπου μεταξύ των κύριων σεισμών δεν έγιναν τουλάχιστον πέντε (5) σεισμοί μεγέθους $4.0 \leq M \leq 5.4$ ώστε να εξεταστεί κάθε ζεύγος σεισμών ($1^{ος}$ - $2^{ος}$, $2^{ος}$ - $3^{ος}$, $3^{ος}$ - $4^{ος}$ και $4^{ος}$ - $5^{ος}$) πριν τον επερχόμενο κύριο σεισμό. Η απόκλιση αυτή, των 88 κύριων σεισμών, οφείλεται στο γεγονός ότι επερχόμενοι κύριοι σεισμοί λειτουργούσαν είτε ως μετασεισμοί των αμέσως προηγούμενων κύριων σεισμών ή ως ισχυροί προσεισμοί πριν από τους επερχόμενους κύριους σεισμούς. Επομένως, η πιθανότητα να γίνει ο επόμενος κύριος σεισμός ($M \geq 5.5$) πριν από την γένεση τουλάχιστον πέντε (5) σεισμών μεγέθους $4.0 \leq M \leq 5.4$ για κάθε σεισμική ζώνη δίνεται από τον Πίνακα 4.2. Η πιθανότητα γένεσης του επερχόμενου κύριου στον Πίνακα 4.2 για κάθε σεισμική ζώνη προκύπτει από το πηλίκο της διαφοράς του συνολικού πλήθους των κύριων σεισμών που έγιναν σε κάθε σεισμική ζώνη ($2^{η}$ στήλη του Πίνακα 4.2) κατά την περίοδο 1964-2018 με το πλήθος των κύριων σεισμών που θεωρήθηκαν ($3^{η}$ στήλη του Πίνακα 4.2), καθώς έγιναν μετά την γένεση τουλάχιστον πέντε (5) σεισμών μεταξύ των κύριων σεισμών, ως προς το συνολικό πλήθος των κύριων σεισμών ($2^{η}$ στήλη του Πίνακα 4.2).

Η αξιολόγηση της κάθε περίπτωσης του Πίνακα 4.1 πραγματοποιείται από τους υπόλοιπους 183 κύριους σεισμούς που αντιστοιχούν σε κάθε σεισμική ζώνη ($3^{η}$ στήλη του Πίνακα 4.2). Συγκεκριμένα, θεωρείται το 80% των κύριων σεισμών της κάθε σεισμικής ζώνης (δηλαδή, θεωρείται το 80% των κύριων σεισμών της $3^{ης}$ στήλης του Πίνακα 4.2 για κάθε σεισμική ζώνη) ως το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιείται στους δύο (2) στατιστικούς ελέγχους από τους οποίους προκύπτει η εκτίμηση των επερχόμενων κύριων σεισμών που αποτελούν το υπόλοιπο 20% (δηλαδή, θεωρείται το 20% των κύριων σεισμών της $3^{ης}$ στήλης του Πίνακα 4.2 για κάθε σεισμική ζώνη).

Το κάθε ζεύγος σεισμών με το αντίστοιχο κατώφλι μεγέθους M_{thr} του Πίνακα 4.1 δημιουργεί τις δύο πολυμεταβλητές χρονοσειρές όπως στις ενότητες 4.4 και 4.5. Πραγματοποιείται η αξιολόγηση της κάθε περίπτωσης του Πίνακα 4.1, σχετικά με την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας που αφορά την πιθανότητα γένεσης του επερχόμενου κύριου σεισμού για κάθε σεισμική ζώνη, με την εκτέλεση δύο (2) στατιστικών ελέγχων (Πίνακας 4.3). Ο πρώτος στατιστικός έλεγχος εκτελείται για το αντίστοιχο ζεύγος σεισμών ($3^{η}$ στήλη του Πίνακα 4.1) για κάθε περίπτωση του Πίνακα 4.1 που περιλαμβάνει τους αντίστοιχους σεισμούς, ανά ζεύγη, που δεν γίνονται πριν την γένεση του επερχόμενου κύριου σεισμού. Αντίθετα, ο

δεύτερος στατιστικός έλεγχος εκτελείται, επίσης, για το αντίστοιχο ζεύγος σεισμών (3^η στήλη του Πίνακα 4.1) για κάθε περίπτωση του Πίνακα 4.1 που περιλαμβάνει τους αντίστοιχούς σεισμούς, ανά ζεύγη, που γίνονται πριν τον επερχόμενο κύριο σεισμό.

Πίνακας 4.2: Η πιθανότητα γένεσης (τελευταία στήλη του πίνακα) του επερχόμενου κύριου σεισμού ($M \geq 5.5$) για κάθε σεισμική ζώνη. Η πιθανότητα αφορά τις περιπτώσεις όπου ο επερχόμενος κύριος σεισμός ($M \geq 5.5$) γίνεται πριν την γένεση τουλάχιστον πέντε (5) σεισμών μεγέθους $4.0 \leq M \leq 5.4$ μεταξύ των κύριων σεισμών.

Σεισμική ζώνη	Συνολικό πλήθος κύριων σεισμών ($M \geq 5.5$)	Πλήθος κύριων σεισμών ($M \geq 5.5$) που θεωρήθηκαν	Πιθανότητα γένεσης του επερχόμενου κύριου σεισμού ($M \geq 5.5$)
1	15	12	0.2
2	15	9	0.4
3	47	41	0.1277
4	38	30	0.2105
5	23	20	0.1304
6	24	16	0.3333
7	28	16	0.4286
8	33	16	0.5152
9	18	12	0.3333
10	30	11	0.6333

Η μηδενική υπόθεση H_0 , που αφορά τους στατιστικούς ελέγχους, υποδηλώνει ότι οι αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους (δηλαδή η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r που προκύπτει μεταξύ των αρχικών πολυμεταβλητών χρονοσειρών είναι μη στατιστικά σημαντική). Οι στατιστικοί έλεγχοι εκτελούνται ανάλογα με την περίπτωση που εξετάζεται (τελευταία στήλη του Πίνακα 4.1), όπως περιγράφηκαν στην ενότητα 4.3. Έτσι, η p-τιμή (p-value) για την στατιστική σημαντικότητα του κανονικοποιημένου δείκτη συσχέτισης r δίνεται από την σχέση (3.4) για τις δύο (2) προσεγγίσεις του μη-παραμετρικού ελέγχου και από την σχέση (4.4) για τον παραμετρικό έλεγχο. Επομένως, όταν πραγματοποιείται ο πρώτος στατιστικός έλεγχος θα πρέπει να προκύπτει η αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης H_0 , δηλαδή ότι οι αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και ότι η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r δεν είναι στατιστικά σημαντική, καθώς ο επερχόμενος κύριος σεισμός δεν γίνεται πριν από το αντίστοιχο ζεύγος σεισμών που εξετάζεται. Αντίθετα, όταν εκτελείται ο δεύτερος στατιστικός έλεγχος θα πρέπει να σημειώνεται η απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης H_0 , δηλαδή ότι οι αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους και ότι η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r είναι στατιστικά σημαντική, καθώς ο επερχόμενος κύριος σεισμός γίνεται πριν από το αντίστοιχο ζευγάρι σεισμών που εξετάζεται.

Για παράδειγμα, για την πρώτη περίπτωση μελέτης του Πίνακα 4.1 (που αφορά την πρώτη (1^η) σεισμική ζώνη όταν το ζεύγος σεισμών είναι ο 3^{ος}-4^{ος}, για κατώφλι μεγέθους $M_{thr} = 4.2$ και ο στατιστικός έλεγχος βασίζεται στον παραμετρικό έλεγχο) θεωρούνται οι σεισμοί μεγέθους $4.2 \leq M \leq 5.4$ που έγιναν μεταξύ των 10

κύριων σεισμών (αποτελούν το 80% των κύριων σεισμών για την πρώτη (1^η) σεισμική ζώνη (Πίνακας 4.2)). Από τους υπόλοιπους δύο (2) κύριους σεισμούς (αποτελούν το 20% των κύριων σεισμών για την πρώτη (1^η) σεισμική ζώνη (Πίνακας 4.2)) θα προκύψει η αξιολόγηση σχετικά με την πιθανότητα, ορθής, εκτίμησης του επερχόμενου κύριου σεισμού για την πρώτη (1^η) σεισμική ζώνη. Μεταξύ των δύο (2) κύριων σεισμών έγιναν 33 και 86 σεισμοί μεγέθους $4.2 \leq M \leq 5.4$, αντίστοιχα. Επομένως, ο πρώτος στατιστικός έλεγχος θα εκτελεστεί 29 και 82 φορές για κάθε κύριο σεισμό, αντίστοιχα, καθώς το ζεύγος σεισμών που εξετάζεται είναι ο 3^{ος}-4^{ος} σεισμός πριν την γένεση του κάθε κύριου σεισμού. Ως εκ τούτου, η πιθανότητα αποδοχής της H_0 (5^η στήλη και 2^η γραμμή στον Πίνακα 4.3) προκύπτει από την επιτυχία του πρώτου (1^{ου}) στατιστικού ελέγχου στους συνολικά 119 (33 και 86 για κάθε κύριο σεισμό, αντίστοιχα) ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν. Αντίθετα, ο δεύτερος στατιστικός έλεγχος θα εκτελεστεί μία φορά για κάθε κύριο σεισμό που εξετάζεται, αντίστοιχα. Επομένως, θα εξεταστεί στον δεύτερο (2^ο) στατιστικό έλεγχο και το τελευταίο ζεύγος σεισμών που αντιστοιχεί ακριβώς στον τρίτο (3^ο) και τέταρτο (4^ο) σεισμό (πηγαίνοντας πίσω στον χρόνο) που έγιναν πριν την γένεση των δύο (2) κύριων σεισμών, αντίστοιχα. Η πιθανότητα απόρριψης της H_0 (6^η στήλη και 2^η γραμμή στον Πίνακα 4.3) προκύπτει από την επιτυχία του δεύτερου (2^{ου}) στατιστικού ελέγχου που πραγματοποιήθηκε δύο (2) φορές, δηλαδή μία φορά για κάθε κύριο σεισμό, αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης που αφορούν το ποσοστό απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης H_0 , ότι η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r είναι στατιστικά σημαντική, για κάθε μία από τις 10 σεισμικές ζώνες, για κάθε κατώφλι μεγέθους M_{thr} ($4.0 \leq M_{thr} \leq 4.3$) και ζεύγους σεισμών, για κάθε προσέγγιση του στατιστικού ελέγχου (παραμετρικού και μη-παραμετρικού με τις δύο μεθόδους τυχαιοποίησης) που εκτελείται για τις δύο (2) περιπτώσεις στατιστικού ελέγχου, παρουσιάζονται στο παράρτημα στο Σχ. Ε (Σχ. Ε1 ως Σχ. Ε10). Επομένως, η τελευταία στήλη του πίνακα 4.3 προκύπτει από την μεγαλύτερη πιθανότητα εκτίμησης του επερχόμενου κύριου σεισμού για κάθε σεισμική ζώνη που αφορά το Σχ. Ε του παραρτήματος ανάλογα του ζεύγους σεισμών, το κατώφλι μεγέθους και της προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου.

Για κάθε μία από τις περιπτώσεις του Πίνακα 4.3 εκτιμάται η πιθανότητα ο ερχόμενος σεισμός να είναι ο κύριος ($M \geq 5.5$) για κάθε σεισμική ζώνη από το 100% των διαθέσιμων δεδομένων (μέχρι και τις 22-01-2019) ώστε να προκύψει η μελλοντική εκτίμηση της σεισμικής δραστηριότητας (Πίνακας 4.4). Επομένως, πραγματοποιείται η ίδια ανάλυση που προηγήθηκε για την αξιολόγηση της εκτίμησης της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας για κάθε περίπτωση του Πίνακα 4.1 αλλά αντί για το 80% των κύριων σεισμών κάθε ζώνης θεωρείται το 100% για κάθε περίπτωση του Πίνακα 4.3. Έτσι, ο ένας στατιστικός έλεγχος που χρειάζεται να εκτελεστεί, καθώς σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι γνωστός ο επερχόμενος κύριος σεισμός, για κάθε περίπτωση του Πίνακα 4.3 αποκαλύπτει αν η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r είναι στατιστικά σημαντική ή όχι.

Έτσι, ο Πίνακας 4.4 αποτυπώνει την εκτίμηση πιθανότητας ώστε ο επόμενος σεισμός να είναι ο κύριος σεισμός για κάθε σεισμική ζώνη, όταν παρουσιάζεται είτε η απόρριψη της H_0 (δηλαδή, η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r είναι στατιστικά σημαντική) ή η αποδοχή της (δηλαδή, η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r δεν είναι στατιστικά σημαντική) και η οποία σημειώνεται με κόκκινο χρώμα. Επομένως, η πιθανότητα απόρριψης της H_0 (2^η στήλη του Πίνακα 4.4) συμπίπτει με την τελευταία στήλη του Πίνακα 4.3 καθώς έχουμε ορθή εκτίμηση ότι ο ερχόμενος σεισμός είναι ο κύριος.

Πίνακας 4.3: Παρουσιάζεται η περίπτωση για κάθε σεισμική ζώνη που αποκτά την μεγαλύτερη πιθανότητα για την εκτίμηση του επερχόμενου κύριου σεισμού (τελευταία στήλη του πίνακα), από αυτές που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 για κάθε σεισμική ζώνη. Η πιθανότητα εκτίμησης του επερχόμενου κύριου σεισμού προκύπτει από το γινόμενο των στοιχείων της 5^{ης} και 6^{ης} στήλης του παρόντος πίνακα.

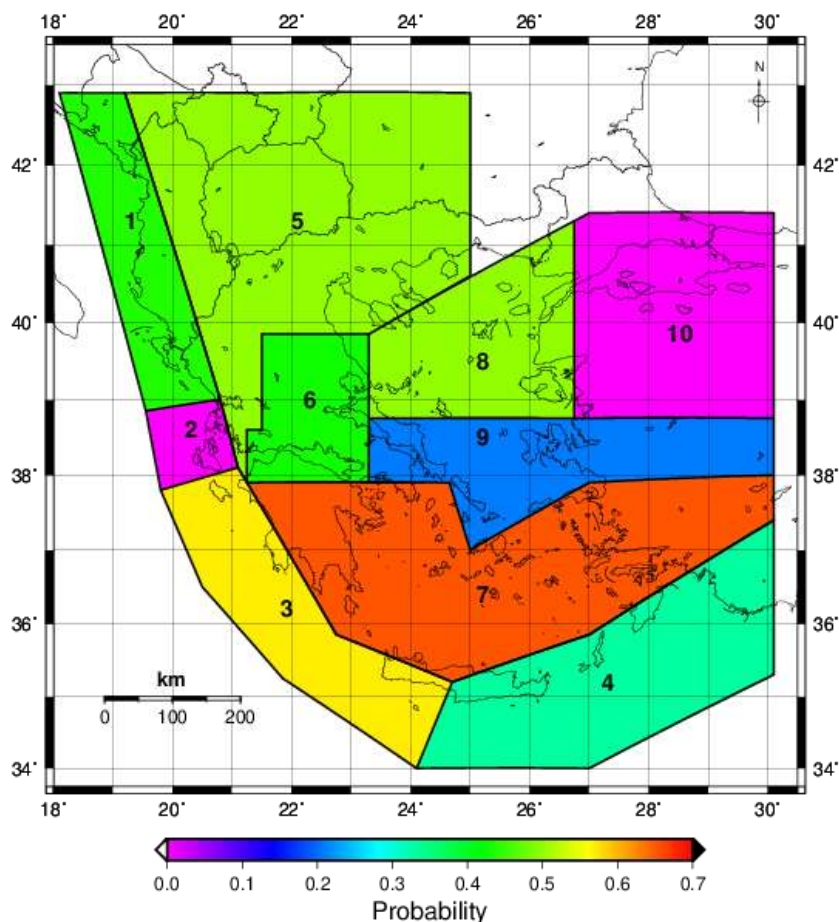
Σεισμική ζώνη	Ζεύγος σεισμών	M_{thr}	Προσέγγιση	Πιθανότητα αποδοχής της H_0 (1 ^{ος} στατιστικός έλεγχος)	Πιθανότητα απόρριψης της H_0 (2 ^{ος} στατιστικός έλεγχος)	Πιθανότητα εκτίμησης του επερχόμενου κύριου σεισμού
1	4 ^{ος} -5 ^{ος}	4.0	Adaptive	0.4375	1	0.4375
2	3 ^{ος} -4 ^{ος}	4.2	Adaptive	0.9545	1	0.9545
3	2 ^{ος} -3 ^{ος}	4.1	Parametric	0.7592	0.75	0.5694
4	3 ^{ος} -4 ^{ος}	4.1	Adaptive	0.4444	0.6667	0.2962
5	4 ^{ος} -5 ^{ος}	4.0	Shuffling	0.8636	0.5	0.4318
6	3 ^{ος} -4 ^{ος}	4.1	Shuffling	0.4286	1	0.4286
7	4 ^{ος} -5 ^{ος}	4.3	Shuffling	0.6538	1	0.6538
8	3 ^{ος} -4 ^{ος}	4.3	Adaptive	0.5	1	0.5
9	3 ^{ος} -4 ^{ος}	4.2	Shuffling	0.2083	1	0.2083
10	4 ^{ος} -5 ^{ος}	4.3	Shuffling	0.3333	1	0.3333

Αντίθετα, η πιθανότητα αποδοχής της H_0 (3^η στήλη του Πίνακα 4.4) συμπίπτει με το συμπλήρωμα της 6^{ης} στήλης του Πίνακα 4.3 καθώς έχουμε σωστή μη εκτίμηση του επερχόμενου κύριου σεισμού όταν αυτός δεν γίνεται.

Πίνακας 4.4: Αποτυπώνεται για κάθε σεισμική ζώνη, για τις περιπτώσεις του Πίνακα 4.3, η πιθανότητα απόρριψης της H_0 (2^η στήλη του πίνακα) όταν η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r παρουσιάζει στατιστική σημαντικότητα και η πιθανότητα αποδοχής της H_0 (3^η στήλη του πίνακα) όταν η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r δεν παρουσιάζει στατιστική σημαντικότητα για το 100% των δεδομένων που θεωρούνται. Η τελευταία στήλη αναφέρει το πλήθος των ημερών όπου αναμένεται να γίνει ο επερχόμενος κύριος σεισμός καθώς προκύπτει από τον μέσο όρο του πλήθους των ημερών μεταξύ του ζεύγους των σεισμών που εξετάζεται και των επερχόμενων κύριων σεισμών που γίνονται κατά την περίοδο 1964-2018. Το κόκκινο χρώμα σε κάθε περίπτωση δηλώνει αν υπάρχει στατιστική σημαντικότητα (πιθανότητα απόρριψης της H_0) ή όχι (πιθανότητα αποδοχής της H_0) της τιμής του μέτρου r για κάθε σεισμική ζώνη.

Σεισμική ζώνη	Πιθανότητα απόρριψης της H_0	Πιθανότητα αποδοχής της H_0	Ημέρες
1	0.4375	0	76
2	0.9545	0	55
3	0.5694	0.25	30
4	0.2963	0.3333	62
5	0.4318	0.5	43
6	0.4286	0	73
7	0.6538	0	67
8	0.5	0	63
9	0.2083	0	61
10	0.3333	0	76

Το Σχ. 4.16 παρουσιάζει την πιθανότητα εκτίμησης, όπου προκύπτει από τον Πίνακα 4.4, ότι ο επερχόμενος σεισμός είναι ο κύριος για κάθε σεισμική ζώνη. Αξίζει να σημειωθεί ότι μέχρι και τις 22-01-2019 έχουν γίνει τουλάχιστον πέντε (5) σεισμοί μεγέθους $M \geq 4.0$ σε κάθε σεισμική ζώνη και, επομένως, για την εκτίμηση της πιθανότητας γένεσης του επερχομένου κύριου σεισμού για κάθε σεισμική ζώνη δεν χρησιμοποιήθηκε ο Πίνακας 4.2.



Σχ. 4.16: Η πιθανότητα ο επερχόμενος σεισμός να είναι ο κύριος σεισμός ($M \geq 5.5$) για κάθε σεισμική ζώνη. Οι πιθανότητες δίνονται σύμφωνα με την χρωματική κλίμακα στο κάτω μέρος του σχήματος, η οποία προκύπτει από τις τιμές με κόκκινο χρώμα του Πίνακα 4.4.

Στην συνέχεια, θα εξετάσουμε από τις 23-01-2019 ως και τις 01-03-2020 αν οι πιθανότητες του Πίνακα 4.4 μπορούν να εκτιμήσουν σωστά την μελλοντική σεισμική δραστηριότητα. Έτσι, εξετάζουμε για κάθε σεισμό είτε είναι κύριος ($M \geq 5.5$) είτε όχι ($4.0 \leq M \leq 5.4$) που έγινε στο παραπάνω χρονικό διάστημα αν έχουμε αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης H_0 , δηλαδή η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης δεν είναι στατιστικά σημαντική, ή την απόρριψή της ώστε να προκύψουν οι αντίστοιχες πιθανότητες από τον Πίνακα 4.4 σχετικά με την γένεση του επερχόμενου κύριου σεισμού.

Στην σεισμική ζώνη 1 έγιναν 14 σεισμοί με μεγέθη από $M = 4.0$ ως $M = 5.2$ και δύο (2) κύριοι σεισμοί με μεγέθη $M = 5.8$ και $M = 6.1$, αντίστοιχα. Αρχικά για τον σεισμό με μέγεθος $M = 4.0$, ορθά, είχαμε αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης H_0 όπου προκύπτει μηδενική πιθανότητα γένεσης του κύριου σεισμού καθώς αυτός δεν πραγματοποιήθηκε. Στην συνέχεια, ορθά απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση H_0 , όπου παρουσιάζει 0.4375 πιθανότητα γένεσης κύριου σεισμού από τον Πίνακα 4.4, καθώς γίνεται ο κύριος σεισμός με μέγεθος $M = 5.8$. Για τους υπόλοιπους 9 σεισμούς η

πιθανότητα γένεσης του ερχόμενου κύριου σεισμού παρουσίαζε πιθανότητα ίση με 0.2 η οποία προκύπτει από τον Πίνακα 4.1 καθώς δεν έχουν γίνει τουλάχιστον πέντε (5) σεισμοί μεταξύ των κύριων σεισμών. Για τους τελευταίους πέντε (5) σεισμούς το βέλτιστο σενάριο, το οποίο παρουσιάζεται στις τρεις (3) από τις πέντε (5) περιπτώσεις σεισμών, είναι να έχουμε αποδοχή της H_0 καθώς παρουσιάζει μικρότερη πιθανότητα γένεσης κύριου σεισμού σε σχέση με την εναλλακτική υπόθεση H_1 διότι κανένας από τους πέντε (5) σεισμούς δεν ήταν κύριος σεισμός.

Στην σεισμική ζώνη 2 έγιναν δύο (2) σεισμοί με μεγέθη $M = 5.3$ και $M = 4.9$, αντίστοιχα, οι οποίοι δεν ήταν κύριοι σεισμοί και σωστά εμφανίζονται μηδενικές πιθανότητες σχετικά με την γένεση κύριου σεισμού (Σχ. 4.17).

Στην σεισμική ζώνη 3 έγιναν 20 σεισμοί με μεγέθη από $M = 4.1$ ως $M = 4.7$ όπου κανένας από αυτούς δεν ήταν κύριος σεισμός (Σχ. 4.17). Η αποδοχής της μηδενικής υπόθεσης H_0 παρουσιάζει πιθανότητα γένεσης κύριου σεισμού 0.25 ενώ η απόρριψή της 0.5694. Το βέλτιστο σενάριο, το οποίο παρουσιάζεται στις 11 από τις 20 περιπτώσεις σεισμών, είναι να έχουμε αποδοχή της H_0 καθώς παρουσιάζει μικρότερη πιθανότητα γένεσης κύριου σεισμού σε σχέση με την εναλλακτική υπόθεση H_1 διότι κανένας από τους 20 σεισμούς δεν ήταν κύριος σεισμός.

Στην σεισμική ζώνη 4 έγιναν 18 σεισμοί με μεγέθη από $M = 4.2$ ως $M = 5.2$ όπου κανένας από αυτούς δεν ήταν κύριος σεισμός (Σχ. 4.17). Η αποδοχής της μηδενικής υπόθεσης H_0 παρουσιάζει πιθανότητα γένεσης κύριου σεισμού 0.2963 ενώ η απόρριψή της 0.3333. Το βέλτιστο σενάριο, το οποίο το παρουσιάζεται στις 6 από τις 18 περιπτώσεις σεισμών, είναι να έχουμε απόρριψη της H_0 καθώς παρουσιάζει μικρότερη πιθανότητα γένεσης κύριου σεισμού σε σχέση με την αποδοχή της διότι κανένας από τους 18 σεισμούς δεν ήταν κύριος σεισμός.

Στην σεισμική ζώνη 5 έγιναν 12 σεισμοί με μεγέθη από $M = 4.1$ ως $M = 4.8$ όπου κανένας από αυτούς δεν ήταν κύριος σεισμός (Σχ. 4.17). Η αποδοχής της μηδενικής υπόθεσης H_0 παρουσιάζει πιθανότητα γένεσης κύριου σεισμού 0.5 ενώ η απόρριψή της 0.4318. Το βέλτιστο σενάριο, το οποίο το παρουσιάζεται στις 5 από τις 12 περιπτώσεις σεισμών, είναι να έχουμε απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης H_0 καθώς παρουσιάζει μικρότερη πιθανότητα γένεσης κύριου σεισμού σε σχέση με την αποδοχή της διότι κανένας από τους 12 σεισμούς δεν ήταν κύριος σεισμός.

Στην σεισμική ζώνη 6 έγιναν τέσσερις (4) σεισμοί με μεγέθη $M = 4.1$, $M = 5.2$, $M = 4.1$ και $M = 4.1$, αντίστοιχα, όπου κανένας από αυτούς δεν ήταν κύριος σεισμός και σωστά εμφανίζονται μηδενικές πιθανότητες σχετικά με την γένεση κύριου σεισμού (Σχ. 4.17).

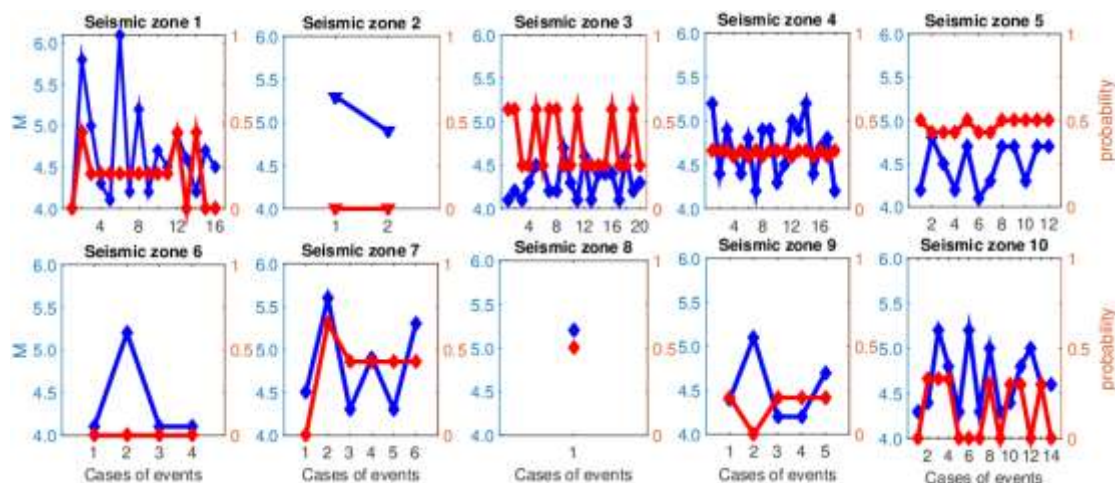
Στην σεισμική ζώνη 7 έγιναν πέντε (5) σεισμοί με μεγέθη $M = 4.5$, $M = 4.3$, $M = 4.9$, $M = 4.3$ και $M = 5.3$, αντίστοιχα, και ένας (1) κύριος σεισμός με μέγεθος $M = 5.6$. Αρχικά για τον σεισμό με μέγεθος $M = 4.5$, ορθά, είχαμε αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης H_0 όπου προκύπτει μηδενική πιθανότητα γένεσης του κύριου σεισμού καθώς αυτός δεν πραγματοποιήθηκε. Στην συνέχεια, ορθά απορρίπτεται η μηδενική υπόθεση H_0 , όπου παρουσιάζει 0.6538 πιθανότητα γένεσης κύριου σεισμού από τον Πίνακα 4.4, καθώς γίνεται ο κύριος σεισμός με μέγεθος $M = 5.6$. Για τους υπόλοιπους τέσσερις (4) σεισμούς η πιθανότητα γένεσης του ερχόμενου κύριου σεισμού παρουσίαζε πιθανότητα ίση με 0.4286 η οποία προκύπτει από τον Πίνακα 4.1 καθώς δεν έχουν γίνει τουλάχιστον πέντε (5) σεισμοί μετά τον κύριο σεισμό.

Στην σεισμική ζώνη 8 έγινε ένας (1) σεισμός με μέγεθος $M = 5.2$ ο οποίος δεν είναι κύριος σεισμός (Σχ. 4.17). Η πιθανότητα να ήταν κύριος ο σεισμός με μέγεθος $M = 5.2$ είχε πιθανότητα 0.5 λόγω ότι η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης βρέθηκε να είναι στατιστικά σημαντική, επομένως, θεωρήθηκε η πιθανότητα απόρριψης της μηδενικής υπόθεσης από τον Πίνακα 4.4. Το

βέλτιστο σενάριο θα ήταν να μην βρεθεί στατιστικά σημαντική η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης και να προέκυπτε μηδενική πιθανότητα, πιθανότητα αποδοχής της μηδενικής υπόθεσης από τον Πίνακα 4.4, καθώς στην πραγματικότητα δεν έγινε κύριος σεισμός.

Στην σεισμική ζώνη 9 έγιναν πέντε (5) σεισμοί με μεγέθη $M = 4.4$, $M = 5.1$, $M = 4.2$, $M = 4.2$ και $M = 4.7$, αντίστοιχα, όπου κανένας από αυτούς δεν ήταν κύριος σεισμός (Σχ. 4.17). Το βέλτιστο σενάριο είναι η αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης H_0 καθώς αντιστοιχεί σε μηδενική πιθανότητα γένεσης κύριου σεισμού (πιθανότητα αποδοχής της μηδενικής υπόθεσης H_0 στον Πίνακα 4.4) καθώς κανένας από τους σεισμούς που έγιναν δεν ήταν κύριος σεισμός. Το βέλτιστο σενάριο πραγματοποιήθηκε στην δεύτερη (2^η) περίπτωση όπου είχαμε αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης H_0 , επομένως, σωστά παρουσιάζεται μηδενική πιθανότητα γένεσης κύριου σεισμού. Στις υπόλοιπες τέσσερις (4) περιπτώσεις είχαμε απόρριψη της μηδενικής υπόθεσης H_0 και πιθανότητα γένεσης κύριου σεισμού ίση με 0.2083 από τον Πίνακα 4.4.

Στην σεισμική ζώνη 10 έγιναν 14 σεισμοί με μεγέθη από $M = 4.3$ ως $M = 5.2$ όπου κανένας από αυτούς δεν ήταν κύριος σεισμός (Σχ. 4.17). Η αποδοχή της μηδενικής υπόθεσης H_0 παρουσιάζει μηδενική πιθανότητα γένεσης κύριου σεισμού ενώ η απόρριψη της 0.3333. Το βέλτιστο σενάριο, το οποίο το παρουσιάζεται στις 7 από τις 12 περιπτώσεις σεισμών, είναι να έχουμε αποδοχή της H_0 καθώς παρουσιάζει μηδενική πιθανότητα γένεσης κύριου σεισμού σε σχέση με την απόρριψη της που παρουσιάζει πιθανότητα 0.3333 διότι κανένας από τους 14 σεισμούς δεν ήταν κύριος σεισμός.



Σχ. 4.17: Η πιθανότητα ο επερχόμενος σεισμός να είναι ο κύριος σεισμός ($M \geq 5.5$) για κάθε σεισμό που έγινε την χρονική περίοδο 23-01-2019/01-03-2020 σε κάθε σεισμική ζώνη.



Κεφάλαιο 5^ο-Συμπεράσματα

Οι κύριοι σεισμοί (π.χ. $M \geq 5.5$ ή $M \geq 6.0$) καθώς και οι ισχυροί μετασεισμοί τους μπορούν να προκαλέσουν καταστροφικές συνέπειες με απώλειες ανθρώπινων ζωών. Για το λόγο αυτό είναι συνεχής η επιστημονική προσπάθεια για την ανάπτυξη μεθόδων, τεχνικών και εργαλείων με σκοπό την αποκρυπτογράφηση του μηχανισμού γένεσης σεισμών καθώς και την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικότητας. Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής ήταν η κατασκευή πολυμεταβλητών σεισμικών χρονοσειρών με στόχο την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικότητας, μέσω είτε του σεισμικού δικτύου συσχέτισης που μπορούν να σχηματίσουν ή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης που υπολογίζει την μεταξύ τους συσχέτιση, για τον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές περιοχές του.

Στο δεύτερο (2^ο) κεφάλαιο της διατριβής, πραγματοποιήθηκε μια διεξοδική ανάλυση της εξέλιξης των τιμών 9 βασικών μέτρων δικτύου με σκοπό να προσδιοριστεί κατά πόσο παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα πριν από κύριους σεισμούς ή και μετασεισμούς που έγιναν κατά την χρονική περίοδο 1999-2018. Η συμβολή έγκειται στο γεγονός ότι δεν εξετάζει αν οι τιμές των μέτρων δικτύου παρουσιάζουν απότομα υψηλές ή χαμηλές τιμές (Abe και Suzuki 2009, Daskalaki et al. 2016, Chorozoglou et al. 2017) αλλά αν είναι στατιστικά σημαντικές, ανεξάρτητα αν προκύπτουν χαμηλές ή υψηλές τιμές, πριν τους κύριους σεισμούς ή μετασεισμούς. Οι τιμές των 9 μέτρων δικτύου υπολογίστηκαν σε κυλιόμενα χρονικά παράθυρα πριν τους κύριους σεισμούς και μετασεισμούς και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από κατάλληλα τυχαιοποιημένα δίκτυα με τις προσεγγίσεις RTSbinthr και RTSweight.

Βρέθηκε ότι οι τιμές έξι (6) μέτρων δικτύου, που είναι η κεντρικότητα του βαθμού ή ισχύς, ο συντελεστής συσταδοποίησης, το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής, η συνολική αποδοτικότητα, η εκκεντρότητα και η διάμετρος, που προέκυψαν από δίκτυα συσχέτισης παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα καθώς διαφέρουν από τις αντίστοιχες τιμές των τυχαιοποιημένων δικτύων κυρίως στο τελευταίο χρονικό παράθυρο πριν από τους επερχόμενους κύριους σεισμούς. Συγκεκριμένα, για τις επτά (7) περιπτώσεις κύριων σεισμών που εξετάστηκαν, δύο (2) στην Κρήτη το 2011 και 2013 και από μία (1) στην Λευκάδα το 2003, Μεθώνη το 2008, Ρόδο το 2012, Λέσβο το 2017 και Ζάκυνθο το 2018, παρουσιάστηκαν υψηλά ποσοστά απόρριψης της H_0 σχετικά με την σημαντικότητα των τιμών των μέτρων του δικτύου λίγο πριν από τους κύριους σεισμούς. Κάθε μία (1) περίπτωση από τις επτά (7) παρουσίαζε διαφορετικό μοτίβο στην απόρριψη της H_0 στο τελευταίο χρονικό παράθυρο πριν τους κύριους σεισμούς ανάλογα με την παρατηρούμενη μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς καθώς και το μήκος n που παρουσίαζε. Αντίθετα, για την περίπτωση της Σκύρου το 2001 δεν υπήρχε υψηλό ποσοστό στην απόρριψη της H_0 στο τελευταίο χρονικό παράθυρο πριν από τον αντίστοιχο κύριο σεισμό.

Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν αν οι τιμές των μέτρων δικτύου είναι στατιστικά σημαντικές μετά από κύριους σεισμούς και πριν από ισχυρούς μετασεισμούς τους δεν κατασκευάστηκαν δίκτυα συσχέτισης αλλά δίκτυα επανάληψης. Για αυτές τις περιπτώσεις, το χρονικό διάστημα μελέτης είναι μικρό διότι μετά από τους κύριους σεισμούς γίνονταν οι ισχυροί μετασεισμοί τους σε λιγότερο από ένα (1) μήνα. Βρέθηκε ότι οι τιμές τεσσάρων (4) μέτρων δικτύου, που είναι η κεντρικότητα του βαθμού ή ισχύς, η συνολική αποδοτικότητα, η εκκεντρότητα και το χαρακτηριστικό μήκος διαδρομής, δεν διαφέρουν από τις αντίστοιχες τιμές των τυχαιοποιημένων δικτύων, δηλαδή είναι τυχαίες και όχι στατιστικά σημαντικές, αμέσως μετά τους κύριους σεισμούς (δηλαδή κατά το πρώτο κυλιόμενο χρονικό

παράθυρο) και πριν από τους επερχόμενους κύριους σεισμούς ή μετασεισμούς τους (δηλαδή κατά το τελευταίο κυλιόμενο χρονικό παράθυρο). Ενώ, στο χρονικό διάστημα μεταξύ των κύριων σεισμών και των επερχόμενων κύριων σεισμών ή μετασεισμών τους οι τιμές των τεσσάρων μέτρων δικτύου, που αναφέρθηκαν παραπάνω, παρουσιάζουν στατιστική σημαντικότητα.

Στο τρίτο (3^ο) κεφάλαιο της διατριβής, πραγματοποιήθηκε μια διεξοδική ανάλυση σχετικά με την εξέλιξη της δομής που παρουσιάζουν τα σεισμικά δίκτυα πριν τους κύριους σεισμούς ή και μετασεισμούς τους που έγιναν κατά την χρονική περίοδο 1999-2018. Έτσι, εξετάστηκαν οι μη-τετριμμένες ιδιότητες που μπορεί να παρουσιάζει ένα σεισμικό δίκτυο όπως η δομή του μικρόκοσμου, της ελεύθερης κλίμακας και του τυχαίου δικτύου πριν από τους κύριους σεισμούς ή και μετασεισμούς τους. Για να εξεταστεί η δομή που μπορεί να παρουσιάζει το σεισμικό δίκτυο απαραίτητη προϋπόθεση είναι η κατασκευή των κατάλληλων τυχαιοποιημένων δικτύων. Στην βιβλιογραφία ακολουθούνται κάποιες κλασικές μέθοδοι τυχαιοποίησης όπου τα τυχαιοποιημένα δίκτυα προκύπτουν είτε με τυχαία ανάμειξη των συνδέσεων του αρχικού δικτύου (δηλαδή οι προσεγγίσεις RNnoddeg και RNavestri που αναφέρονται στην διατριβή) ή με μια προκαθορισμένη πιθανότητα εισαγωγής των συνδέσεων μεταξύ των κόμβων (δηλαδή η προσέγγιση RNproisson). Η συμβολή του τρίτου (3^{ου}) κεφαλαίου έγκειται στο γεγονός ότι αποδεικνύει μέσω προσομοιώσεων ότι αυτές οι προσεγγίσεις δεν είναι κατάλληλες για τη δημιουργία τυχαιοποιημένων δικτύων όταν κατασκευάζεται αρχικό δίκτυο συσχέτισης από πολυμεταβλητές χρονοσειρές και οι συνδέσεις σε αυτό δίδονται από τον συντελεστή συσχέτισης Pearson. Οι κλασικές μέθοδοι τυχαιοποίησης του δικτύου αποτυγχάνουν να κατασκευάσουν κατάλληλα τυχαιοποιημένα δίκτυα με τις απαιτούμενες τιμές του συντελεστή συσταδοποίησης και του χαρακτηριστικού μήκους διαδρομής είτε όταν το αρχικό δίκτυο συσχέτισης παρουσιάζει την τυχαία δομή ή την δομή του μικρόκοσμου. Αντίθετα, οι προτεινόμενες προσεγγίσεις, δηλαδή οι προσεγγίσεις RTSbinthr, RTSbindeg και RTSweight, που εκτελούν την τυχαιοποίηση στις αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές αντί για τις συνδέσεις του αρχικού δικτύου, δημιουργούν τα κατάλληλα τυχαιοποιημένα δίκτυα και για τις δύο (2) περιπτώσεις, δηλαδή της τυχαίας δομής και του μικρόκοσμου που παρουσιάζει το αρχικό δίκτυο συσχέτισης. Ειδικότερα, η προσέγγιση τυχαιοποίησης RTSbinthr, η οποία δεν διατηρεί απαραίτητα τον ίδιο αριθμό συνδέσεων του αρχικού στο τυχαιοποιημένο δίκτυο, και η προσέγγιση τυχαιοποίησης RTSweight, για σταθμισμένες συνδέσεις, κατασκευάζουν πιο κατάλληλα τυχαιοποιημένα δίκτυα από την προσέγγιση RTSbindeg που διατηρεί ακριβώς τον συνολικό βαθμό του αρχικού δικτύου στο τυχαιοποιημένο. Με βάση την προσομοιωτική μελέτη χρησιμοποιήθηκαν οι κατάλληλες προσεγγίσεις τυχαιοποίησης, RTSbinthr και RTSweight, για την κατασκευή των τυχαιοποιημένων δικτύων, στην εφαρμογή με τα πραγματικά δεδομένα σχετικά με την εξέταση της δομής που παρουσιάζει το σεισμικό δίκτυο συσχέτισης πριν από τους κύριους σεισμούς ή και μετασεισμούς. Τα σεισμικά δίκτυα συσχέτισης που κατασκευάστηκαν βρέθηκαν να κατέχουν, σε πολλές περιπτώσεις, την δομή του μικρόκοσμου στο πρώτο κυλιόμενο παράθυρο, δηλαδή μόλις έγινε ο κύριος σεισμός, και στο τελευταίο, δηλαδή λίγο πριν τον επερχόμενο κύριο σεισμό. Συγκεκριμένα, για τις οχτώ (8) περιπτώσεις κύριων σεισμών που εξετάστηκαν, δύο (2) στην Κρήτη το 2011 και το 2013 και από μία (1) στην Σκύρο το 2001, Λευκάδα το 2003, Μεθώνη το 2008, Ρόδο το 2012, Λέσβο το 2017 και Ζάκυνθο το 2018, ο δείκτης του μικρόκοσμου παρουσίαζε υψηλές τιμές λίγο πριν από την πραγματοποίησή τους για διαφορετική ρύθμιση δεδομένων (παρατηρούμενη μεταβλητή της πολυμεταβλητής χρονοσειράς καθώς και το μήκος n που παρουσίαζε

αυτή) για κάθε περίπτωση. Αντίθετα, στις μετασεισμικές ακολουθίες που εξετάστηκαν σε δίκτυα επανάληψης αυτά παρουσιάζουν τυχαία δομή αμέσως μετά τους κύριους σεισμούς και πριν είτε των επερχόμενων κύριων σεισμών ή των μετασεισμών τους.

Ένας δεύτερος στόχος του τρίτου (3^{ου}) κεφαλαίου είναι να εξετάσει αν η δομή που μπορεί να παρουσιάζει το σεισμικό δίκτυο, σε όλο το χρονικό διάστημα μελέτης (δηλαδή, σχηματίζεται μόνο ένα χρονικό παράθυρο μελέτης), είναι ανεξάρτητη από την προσέγγιση που ακολουθείται για να κατασκευαστεί το σεισμικό δίκτυο. Έτσι, ερευνάται αν οι μη-τετριμμένες ιδιότητες, του μικρόκοσμου και της ελεύθερης κλίμακας, είναι παρούσες στα σεισμικά δίκτυα που κατασκευάζονται από την σεισμικότητα που παρουσιάζεται στην περιοχή μελέτης, διότι η αποκάλυψη αυτών των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων ήταν το κοινό εύρημα αρκετών μελετών (Abe και Suzuki 2004a, Abe και Suzuki 2004b, Baiesi και Paczuski 2004, Abe et al. 2011). Συγκεκριμένα, οι Abe και Suzuki (2011) απέδειξαν την καθολικότητα των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων του μικρόκοσμου και της ελεύθερης κλίμακας στην δομή των σεισμικών δικτύων που κατασκευάστηκαν για τέσσερις (4) διαφορετικές περιοχές, της Καλιφόρνιας, της Ιαπωνίας, του Ιράν και της Χιλής. Στις προαναφερθείσες μελέτες, οι κόμβοι των σεισμικών δικτύων αντιπροσωπεύονται από σεισμικές κυψελίδες και οι απλές συνδέσεις μεταξύ των κόμβων τους ορίζονταν από τη διαδοχή των σεισμών ενώ τα τυχαιοποιημένα δίκτυα κατασκευάζονταν είτε από την τυχαιοποίηση των συνδέσεων των αρχικών σεισμικών δικτύων ή με προκαθορισμένη πιθανότητα για την εισαγωγή των συνδέσεων μεταξύ των κόμβων. Επομένως, πρώτα εξετάζεται αν οι μη-τετριμμένες ιδιότητες παρουσιάζονται και στα σεισμικά δίκτυα που κατασκευάζονται από την σεισμικότητα του Ελληνικού χώρου και στην συνέχεια αν επηρεάζεται η αποκάλυψή τους από την μεθοδολογία που ακολουθείται για την δημιουργία των σεισμικών δικτύων. Έτσι, οι κόμβοι των σεισμικών δικτύων είναι είτε σεισμικές ζώνες ή σεισμικές κυψελίδες και οι συνδέσεις στα αρχικά σεισμικά δίκτυα ορίζονται είτε από την χρονική διαδοχή των σεισμών ή από τον συντελεστή συσχέτισης Pearson. Επιπλέον, οι συνδέσεις για τον σχηματισμό των τυχαιοποιημένων δικτύων δίνονται είτε με τις κλασικές προσεγγίσεις τυχαιοποίησης, δηλαδή τις προσεγγίσεις RNnoddeg, RNvestr και RNpoisson, ή με την μέθοδο που εφαρμόζει την τυχαιοποίηση στις αρχικές πολυμεταβλητές χρονοσειρές, δηλαδή τις προσεγγίσεις RTSbinthr, RTSbindeg και RTSweight. Βρέθηκε ότι τα σεισμικά δίκτυα που κατασκευάστηκαν από την σεισμικότητα του Ελληνικού χώρου δεν παρουσιάζουν την δομή της ελεύθερης κλίμακας ενώ η δομή του μικρόκοσμου εμφανίζεται σε λίγες περιπτώσεις σχετικά με την μεθοδολογία κατασκευής του σεισμικού δικτύου. Επομένως, πέρα από την σημασία της εύρεσης της μη παρουσίας των δομών της ελεύθερης κλίμακας και του μικρόκοσμου, αν εξαιρέσουμε ελάχιστες περιπτώσεις, για τον Ελληνικό χώρο και τις γειτονικές του περιοχές, η διατριβή θέτει ένα ανοιχτό ζήτημα για την εξάρτηση των μη-τετριμμένων ιδιοτήτων από την μεθοδολογία κατασκευής του σεισμικού δικτύου.

Τα αποτελέσματα του δεύτερου (2^{ου}) και τρίτου (3^{ου}) κεφαλαίου αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής της θεωρίας δικτύου σε μία περιοχή έντονης σεισμικότητας, όπως ο Ελληνικός χώρος με τις γειτονικές περιοχές του. Συνοψίζοντας, παρουσιάζεται αλλαγή στη δομή του δικτύου καθώς και στατιστική σημαντικότητα στις τιμές αρκετών μέτρων δικτύου λίγες ημέρες πριν από τους κύριους σεισμούς ή ισχυρούς μετασεισμούς τους.

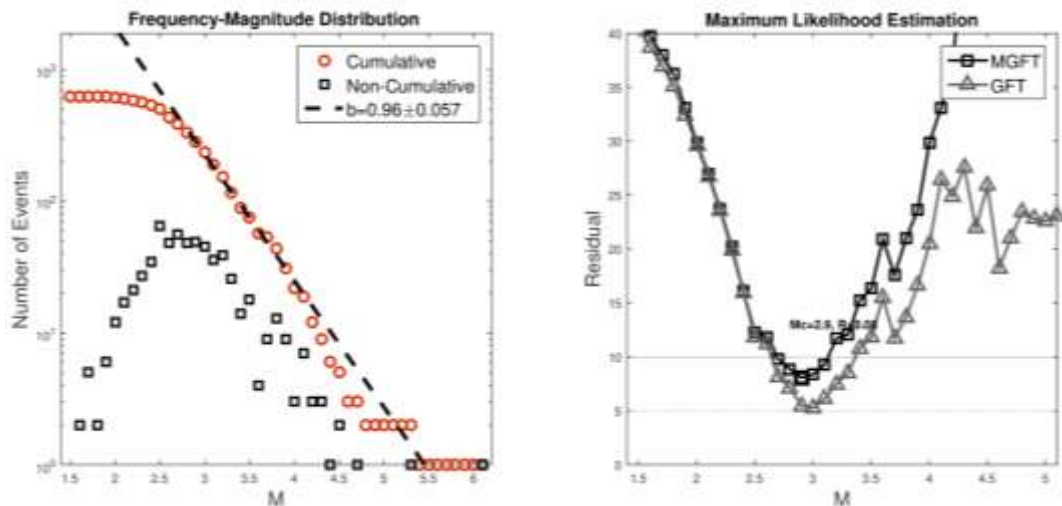
Στο τέταρτο (4^ο) κεφάλαιο της διατριβής, πραγματοποιήθηκε μια διεξοδική ανάλυση σχετικά με το αν η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης, που υπολογίζεται μεταξύ πολυμεταβλητών σεισμικών χρονοσειρών, παρουσιάζει

στατιστική σημαντικότητα πριν από κύριους σεισμούς που έγιναν κατά την χρονική περίοδο 1964-2018. Η συμβολή του τέταρτου (4^{ου}) κεφαλαίου της διατριβής έγκειται στο γεγονός ότι αποδεικνύει μέσω προσομοιώσεων ότι ο παραμετρικός στατιστικός έλεγχος, που υποθέτει ότι οι παρατηρήσεις των πολυμεταβλητών χρονοσειρών ακολουθούν την κανονική κατανομή, δεν είναι κατάλληλος για την εξέταση της σημαντικότητας του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης μεταξύ ανεξάρτητων πολυμεταβλητών χρονοσειρών, σε αντίθεση με την προτεινόμενη μεθοδολογία που πραγματοποιεί τον μη-παραμετρικό έλεγχο, με τον σχηματισμό των τυχαιοποιημένων πολυμεταβλητών χρονοσειρών. Ειδικότερα, ο παραμετρικός στατιστικός έλεγχος δεν αποκαλύπτει την τυχαία δομή που παρουσιάζουν οι ασυσχέτιστες μεταξύ τους πολυμεταβλητές χρονοσειρές, δηλαδή εμφανίζει το σφάλμα τύπου I, όταν σχηματίζονται από λίγες παρατηρήσεις, ενώ ο προτεινόμενος μη-παραμετρικός έλεγχος αποκαλύπτει την τυχαία τους δομή ανεξάρτητα από το μήκος των πολυμεταβλητών χρονοσειρών. Όταν οι πολυμεταβλητές χρονοσειρές παρουσιάζουν εξαρτήσεις μεταξύ τους τότε ο παραμετρικός και ο μη-παραμετρικός έλεγχος αναγνωρίζουν την δομή της συσχέτισης μεταξύ των χρονοσειρών (δεν εμφανίζουν το σφάλμα τύπου II) εκτός από τις περιπτώσεις που το μήκος n των πολυμεταβλητών χρονοσειρών είναι μικρό ($n \leq 10$).

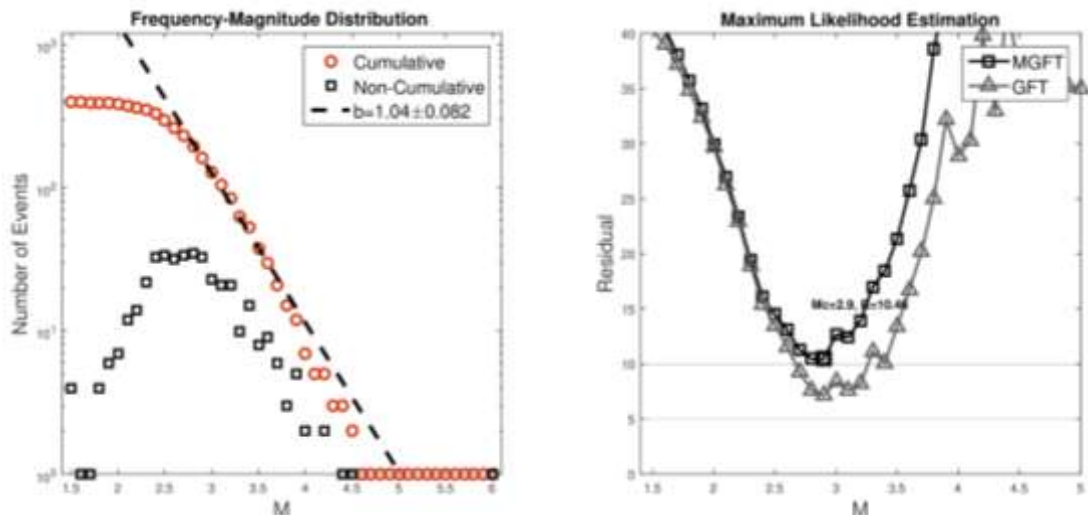
Στην εφαρμογή με τα πραγματικά δεδομένα ο κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης αποκαλύπτει ότι υπάρχει στατιστική σημαντικότητα στην συσχέτιση μεταξύ των πέντε (5) τελευταίων χρονικά σεισμών, ανά ζεύγη, πριν από κύριους σεισμούς για κάθε μία από τις 10 σεισμικές ζώνες που εξετάστηκαν. Ως εκ τούτου, ο κανονικοποιημένος συντελεστής συσχέτισης χρησιμεύσει για την βραχυπρόθεσμη εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας καθώς παρουσιάζει στατιστικά σημαντικές τιμές πριν από κύριους σεισμούς.

Παράρτημα

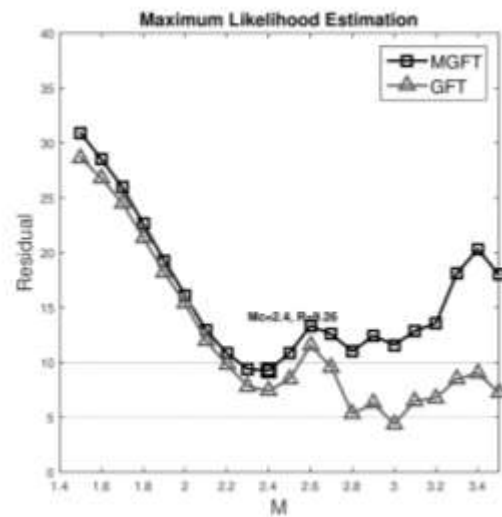
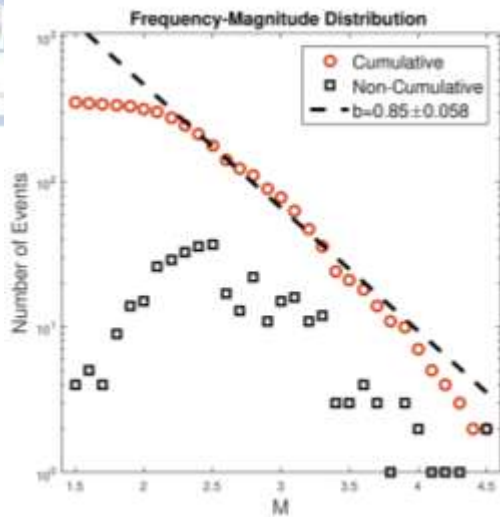
Η πληρότητα των σεισμικών καταλόγων που αφορά τις μετασεισμικές ακολουθίες που εξελίχθηκαν από το ζεύγος κύριων σεισμών της Κεφαλονιάς το 2014 και τον κύριο σεισμό της Λευκάδας το 2015 παρουσιάζεται στο Σχ. Α (Σχ. Α1 ως Σχ. Α11). Η πληρότητα των καταλόγων παρουσιάζεται, επιπρόσθετα, στον Πίνακα 2.3 και 2.4 της ενότητας 2.6.2.



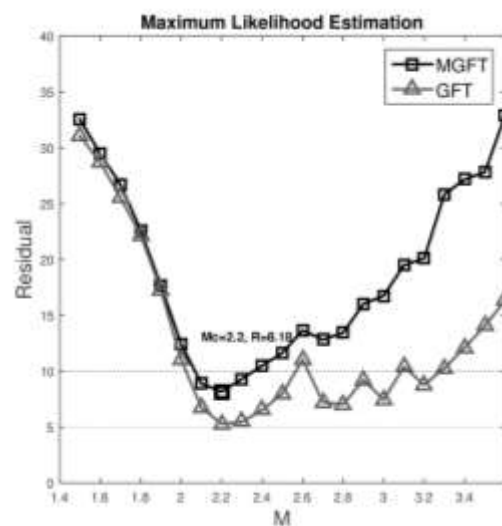
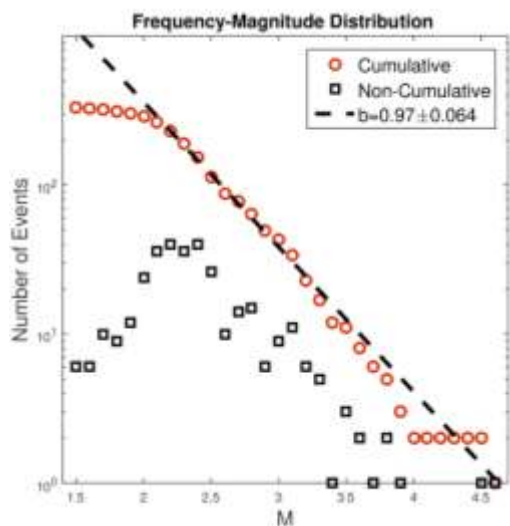
Σχ. Α1: Το μέγεθος πληρότητας κατά το χρονικό διάστημα 26-01-2014/30-01-2014 το οποίο παρουσιάζεται να είναι $M_{thr} = 2.9$.



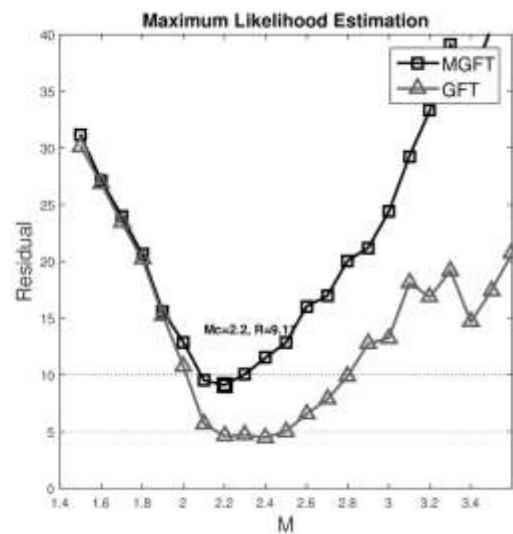
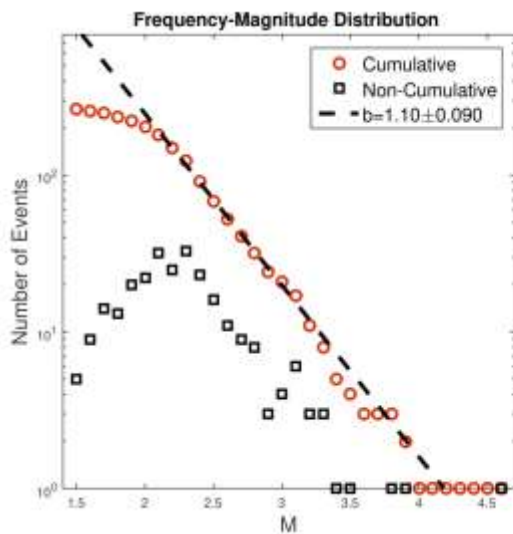
Σχ. Α2: Το μέγεθος πληρότητας κατά το χρονικό διάστημα 31-01-2014/04-02-2014 το οποίο παρουσιάζεται να είναι $M_{thr} = 2.9$.



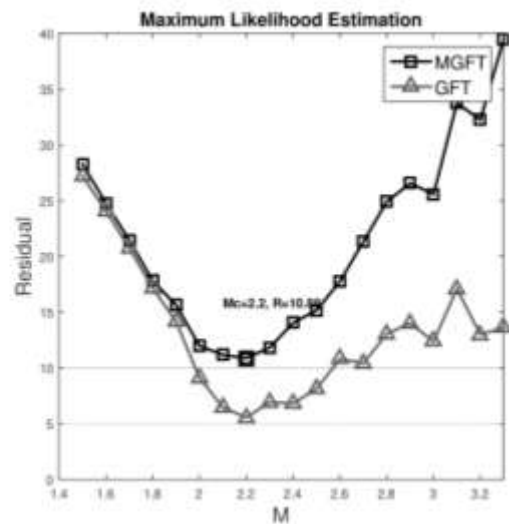
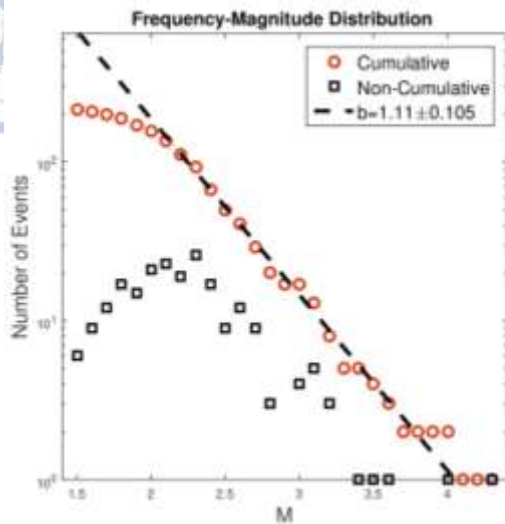
Σχ. A3: Το μέγεθος πληρότητας κατά το χρονικό διάστημα 05-02-2014/09-02-2014 το οποίο παρουσιάζεται να είναι $M_{thr} = 2.4$.



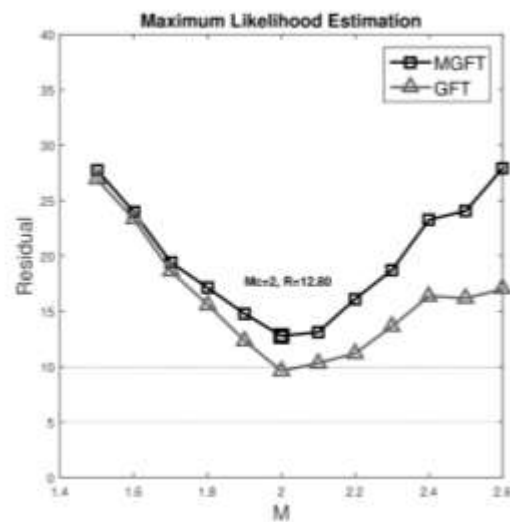
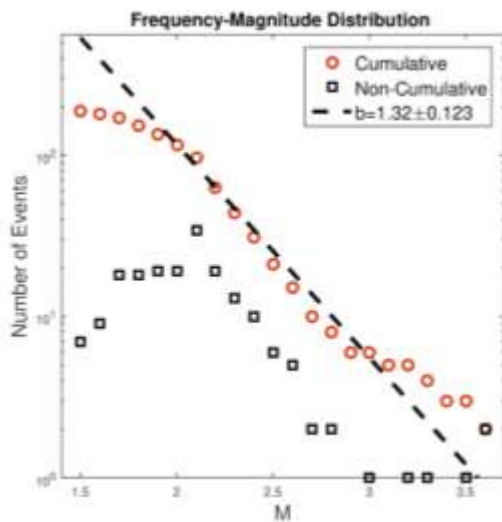
Σχ. A4: Το μέγεθος πληρότητας κατά το χρονικό διάστημα 10-02-2014/14-02-2014 το οποίο παρουσιάζεται να είναι $M_{thr} = 2.2$.



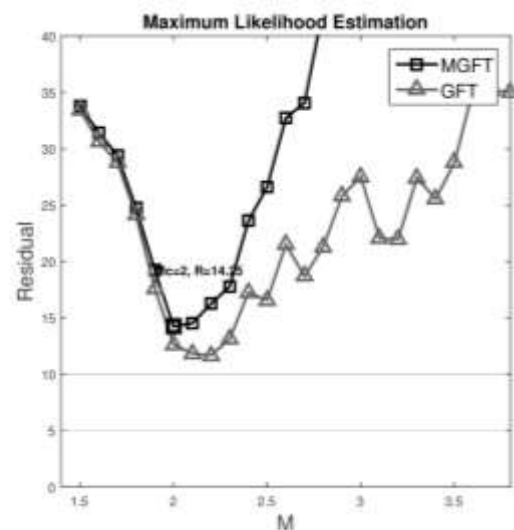
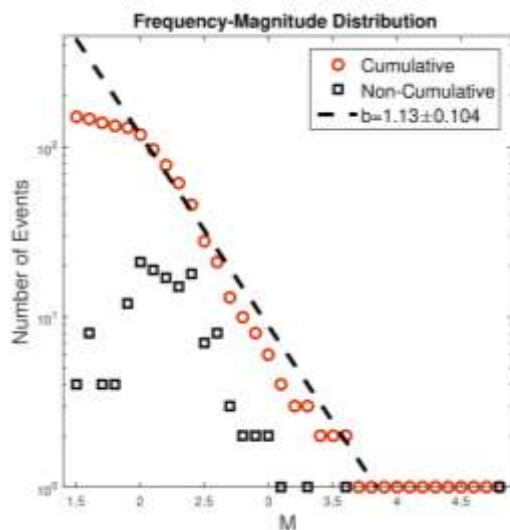
Σχ. A5: Το μέγεθος πληρότητας κατά το χρονικό διάστημα 15-02-2014/19-02-2014 το οποίο παρουσιάζεται να είναι $M_{thr} = 2.2$.



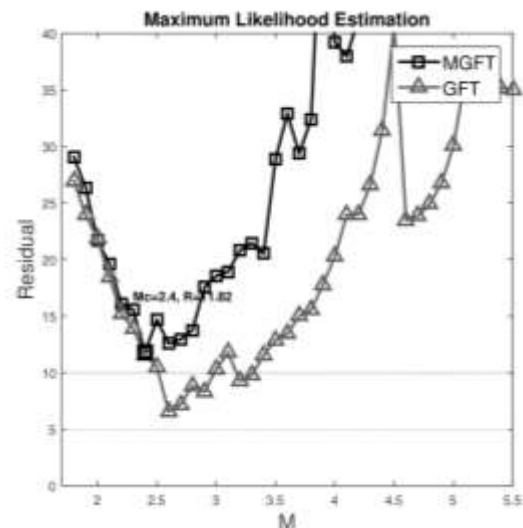
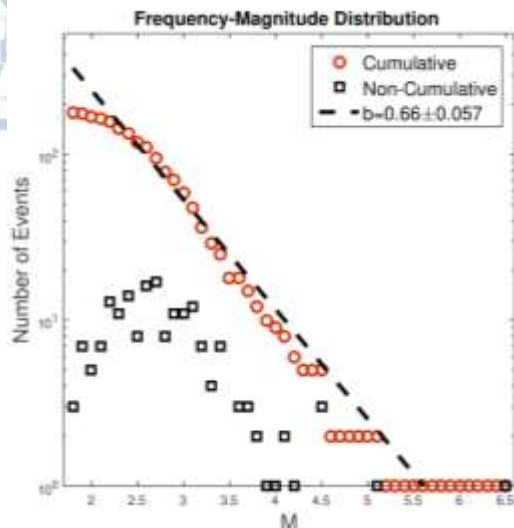
Σχ. A6: Το μέγεθος πληρότητας κατά το χρονικό διάστημα 20-02-2014/24-02-2014 το οποίο παρουσιάζεται να είναι $M_{thr} = 2.2$.



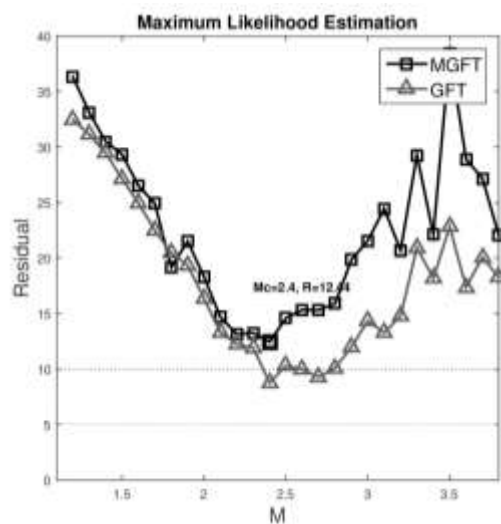
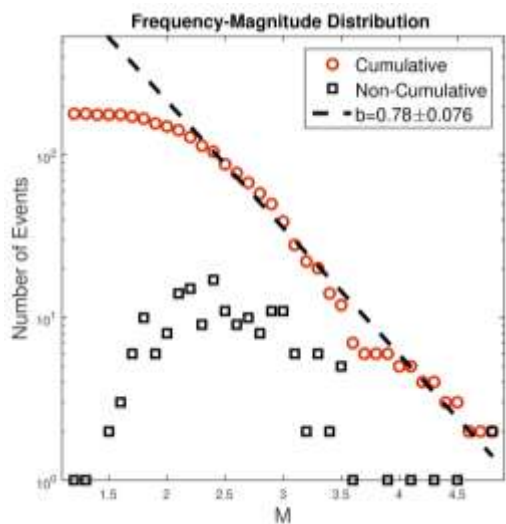
Σχ. A7: Το μέγεθος πληρότητας κατά το χρονικό διάστημα 25-02-2014/01-03-2014 το οποίο παρουσιάζεται να είναι $M_{thr} = 2.0$.



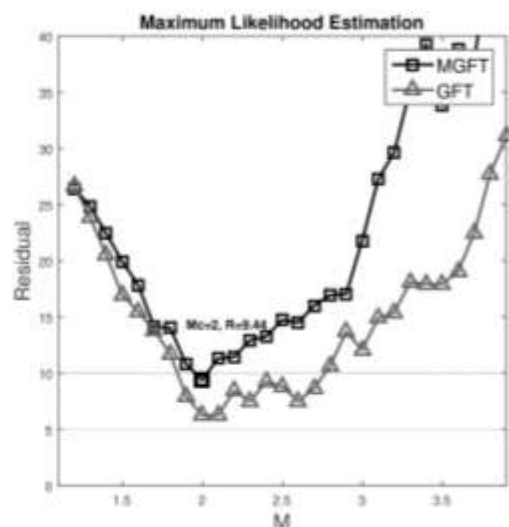
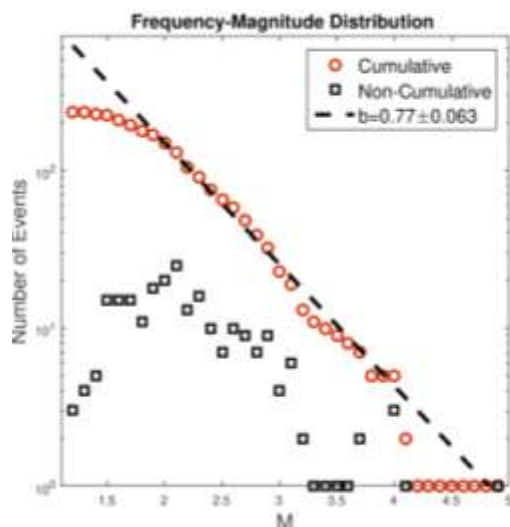
Σχ. A8: Το μέγεθος πληρότητας κατά το χρονικό διάστημα 02-03-2014/05-03-2014 το οποίο παρουσιάζεται να είναι $M_{thr} = 2.0$.



Σχ. A9: Το μέγεθος πληρότητας για τις 17-11-2015 το οποίο παρουσιάζεται να είναι $M_{thr} = 2.4$.

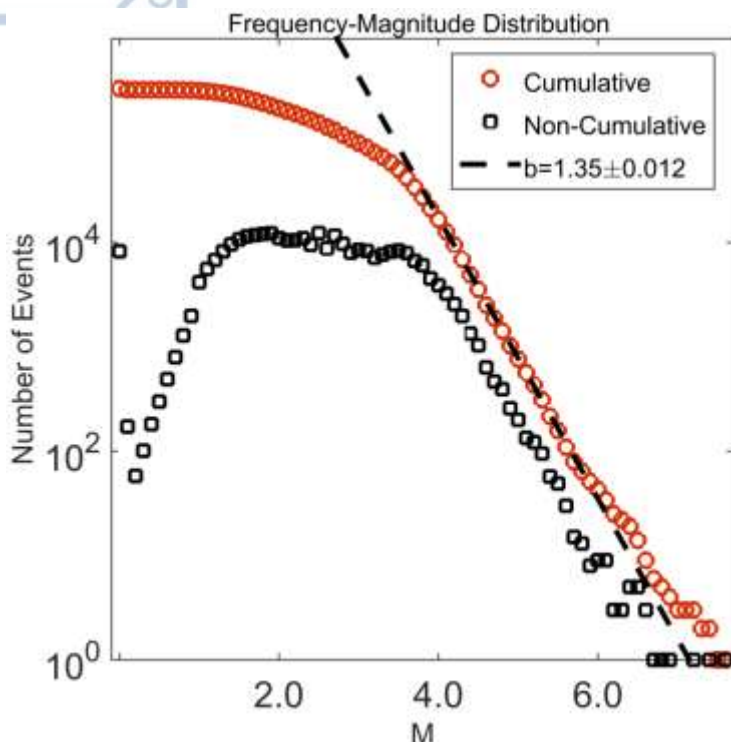


Σχ. A10: Το μέγεθος πληρότητας για τις 18-11-2015 το οποίο παρουσιάζεται να είναι $M_{thr} = 2.4$.



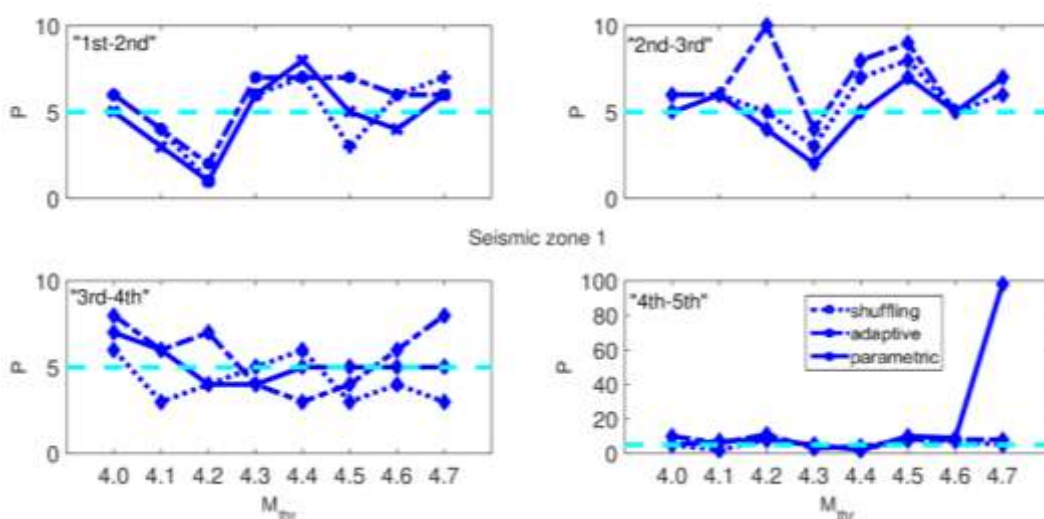
Σχ. A11: Το μέγεθος πληρότητας για τις 19-11-2015 το οποίο παρουσιάζεται να είναι $M_{thr} = 2.0$.

Η πληρότητα του σεισμικού καταλόγου που αφορά το 4^ο Κεφάλαιο της διατριβής σχετικά με την μελέτη του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης παρουσιάζεται στο Σχ. Α12.

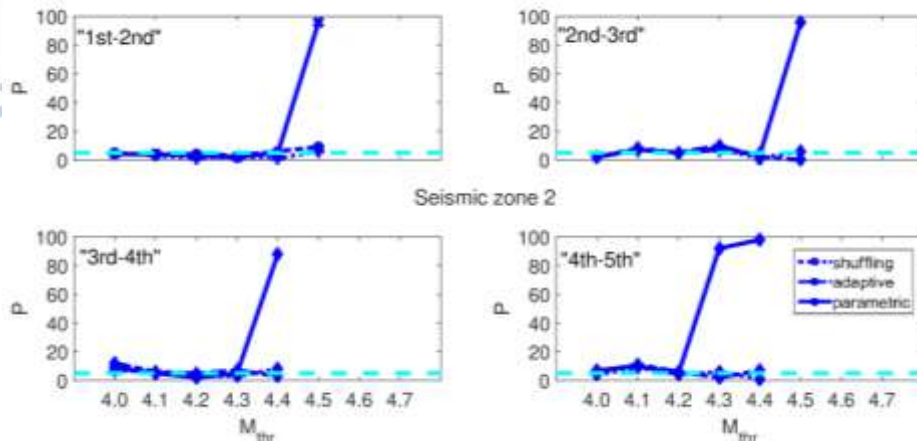


Σχ. Α12: Το μέγεθος πληρότητας κατά το χρονικό διάστημα 1964-2018 το οποίο παρουσιάζεται να είναι $M_{thr} = 4.0$.

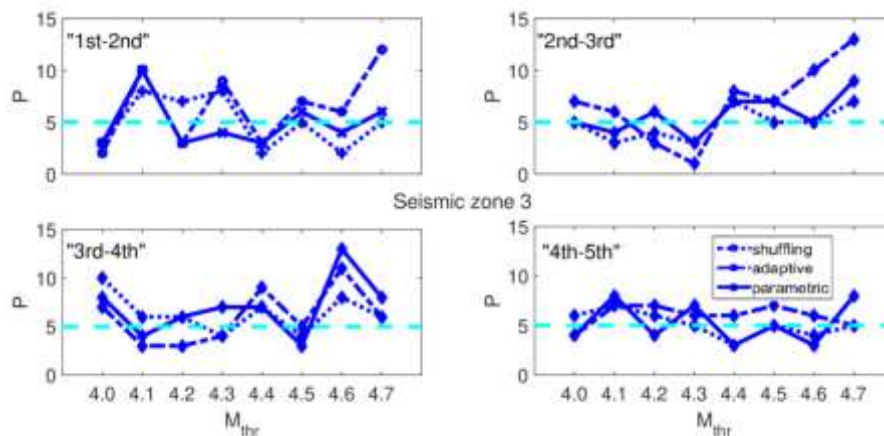
Τα αποτελέσματα της εξειδίκευσης του κανονικοποιημένου συντελεστή r , που αφορούν την προσομοιωτική μελέτη της ενότητας 4.4.3 που εφαρμόστηκε σε ανεξάρτητες μεταβλητές ($\rho = 0$), κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου για κάθε σεισμική ζώνη και για κάθε ζευγάρι σεισμών παρουσιάζονται στο Σχ. Β (Σχ. Β1 ως Σχ. Β10).



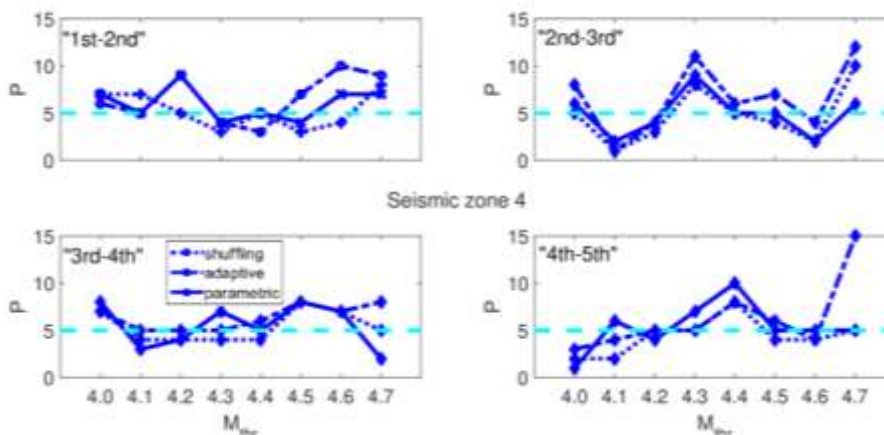
Σχ. Β1: Ο έλεγχος της εξειδίκευσης κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 1.



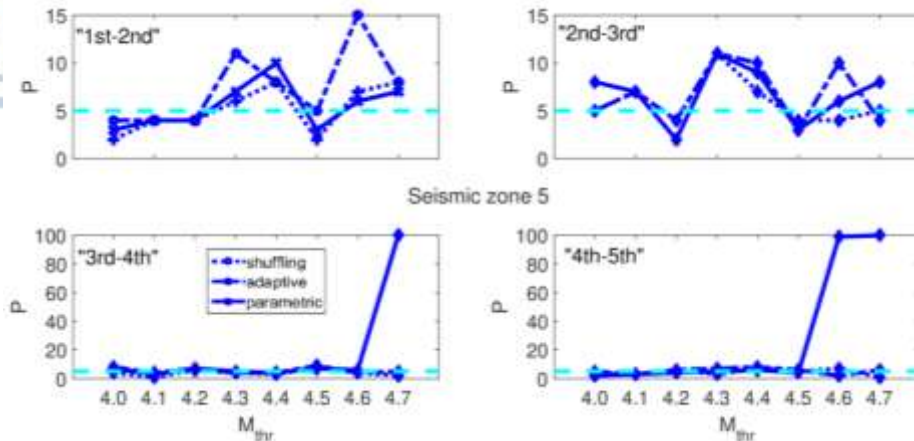
Σχ. Β2: Ο έλεγχος της εξειδίκευσης κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 2. Για κάποια κατώφλια μεγέθους (M_{thr}), ανά ζευγάρι σεισμών, δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα καθώς το μήκος (n) των χρονοσειρών ήταν αρκετά μικρό ($n \leq 2$) και ο υπολογισμός του κανονικοποιημένου συντελεστή r ήταν πρακτικά αδύνατος.



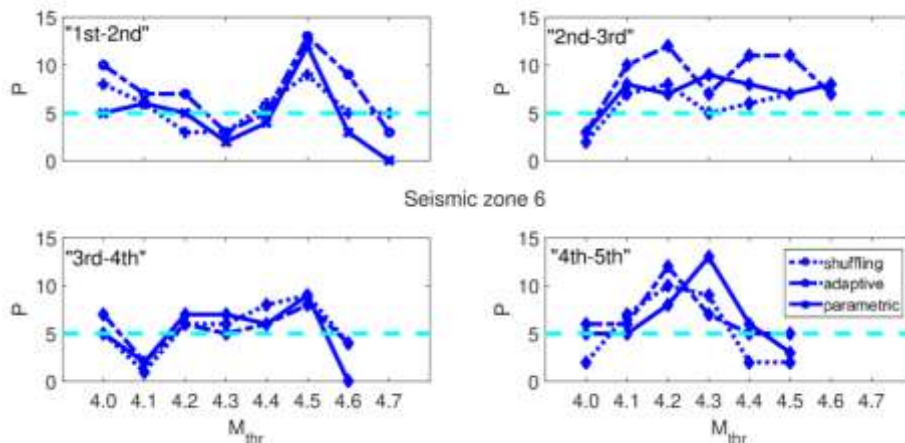
Σχ. Β3: Ο έλεγχος της εξειδίκευσης κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 3.



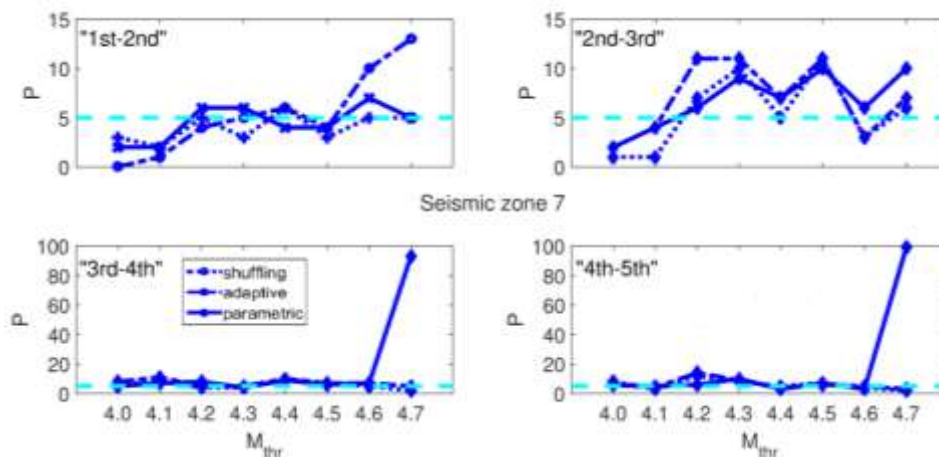
Σχ. Β4: Ο έλεγχος της εξειδίκευσης κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 4.



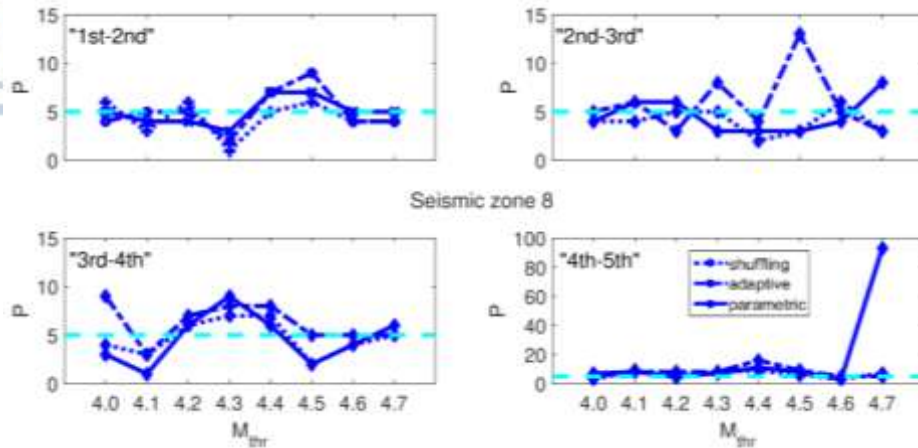
Σχ. Β5: Ο έλεγχος της εξειδίκευσης κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 5.



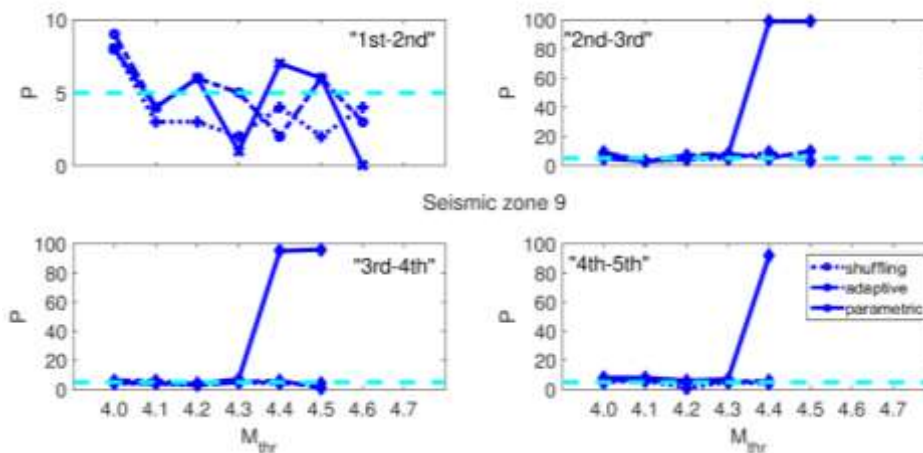
Σχ. Β6: Ο έλεγχος της εξειδίκευσης κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 6. Για κάποια κατώφλια μεγέθους (M_{thr}), ανά ζευγάρι σεισμών, δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα καθώς το μήκος (n) των χρονοσειρών ήταν αρκετά μικρό ($n \leq 2$) και ο υπολογισμός του κανονικοποιημένου συντελεστή r ήταν πρακτικά αδύνατος.



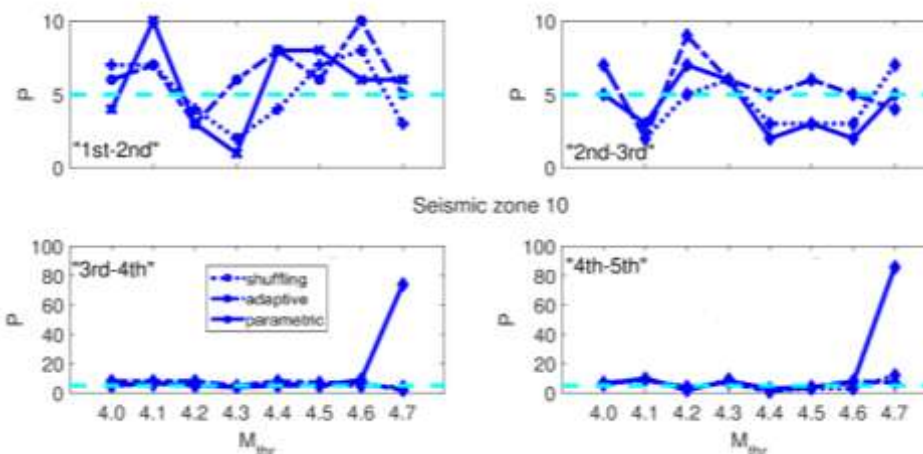
Σχ. Β7: Ο έλεγχος της εξειδίκευσης κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 7.



Σχ. B8: Ο έλεγχος της εξειδίκευσης κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 8.

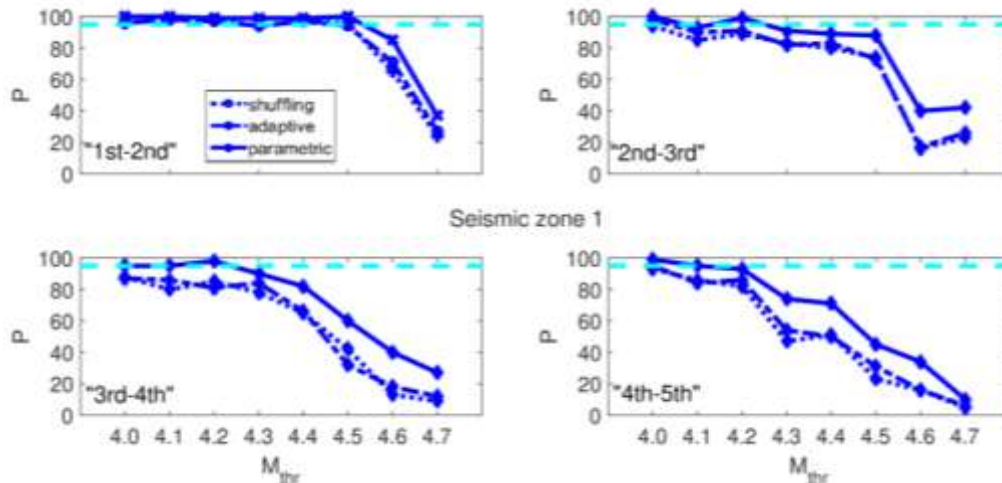


Σχ. B9: Ο έλεγχος της εξειδίκευσης κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 9. Για κάποια κατώφλια μεγέθους (M_{thr}), ανά ζευγάρι σεισμών, δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα καθώς το μήκος (n) των χρονοσειρών ήταν αρκετά μικρό ($n \leq 2$) και ο υπολογισμός του κανονικοποιημένου συντελεστή r ήταν πρακτικά αδύνατος.

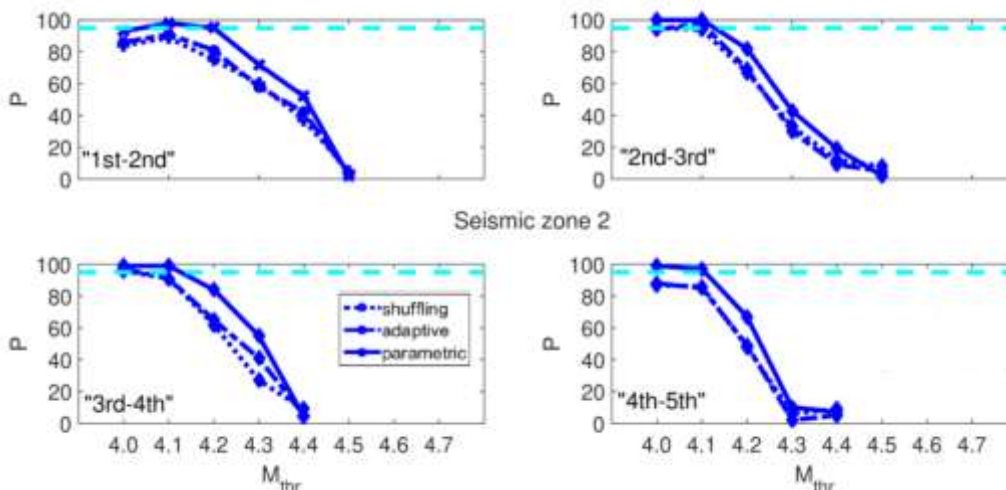


Σχ. Β10: Ο έλεγχος της εξειδίκευσης κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 10.

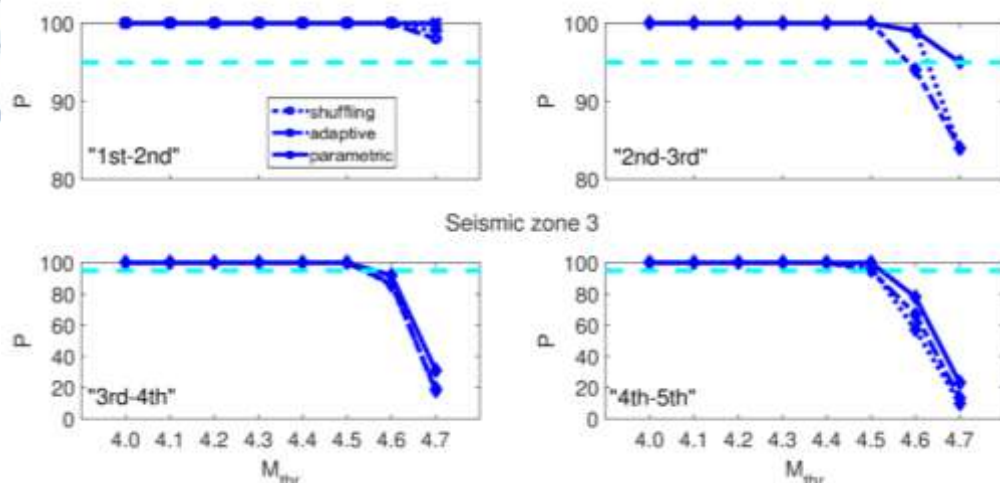
Τα αποτελέσματα της ευαισθησίας του κανονικοποιημένου συντελεστή r , που αφορούν την προσομοιωτική μελέτη της ενότητας 4.4.4 που εφαρμόστηκε σε εξαρτημένες μεταβλητές ($\rho = 0.8$), κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου για κάθε σεισμική ζώνη και για κάθε ζευγάρι σεισμών παρουσιάζονται στο Σχ. Γ (Σχ. Γ1 ως Σχ. Γ10).



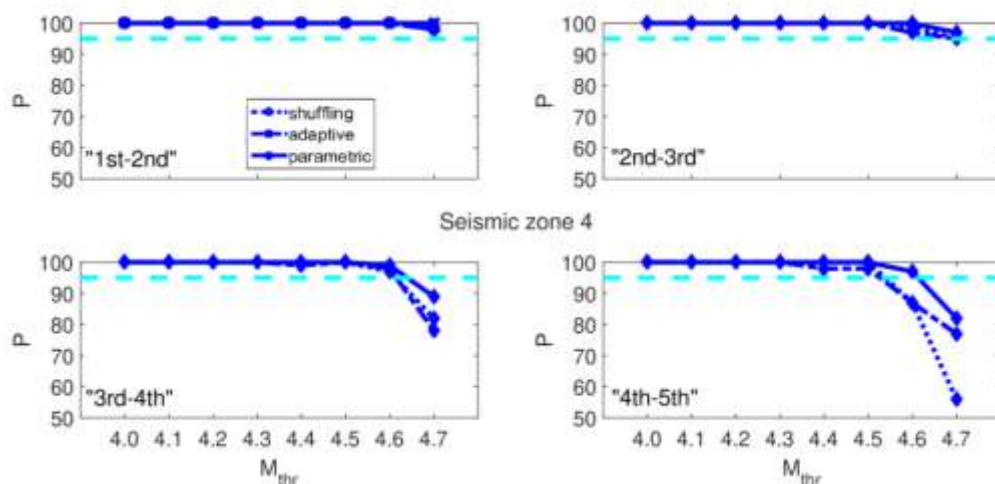
Σχ. Γ1: Ο έλεγχος της ευαισθησίας κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 1.



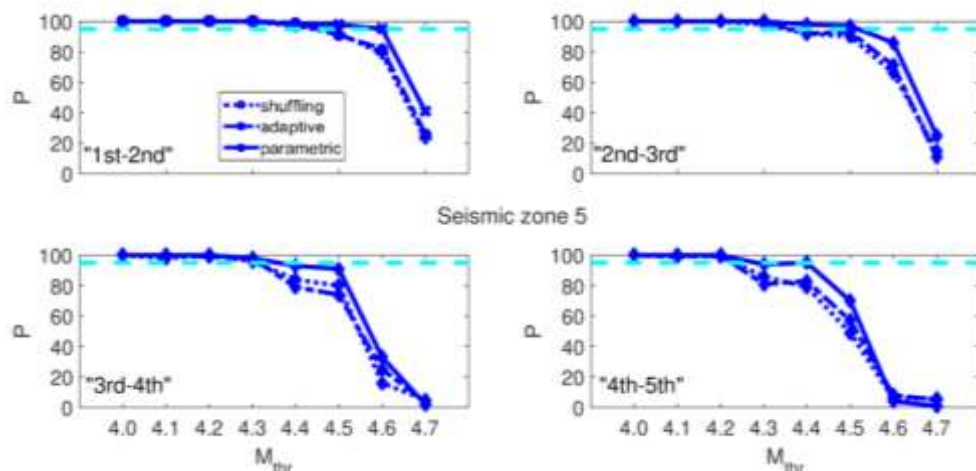
Σχ. Γ2: Ο έλεγχος της ευαισθησίας κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 2. Για κάποια κατώφλια μεγέθους (M_{thr}), ανά ζευγάρι σεισμών, δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα καθώς το μήκος (n) των χρονοσειρών ήταν αρκετά μικρό ($n \leq 2$) και ο υπολογισμός του κανονικοποιημένου συντελεστή r ήταν πρακτικά αδύνατος.



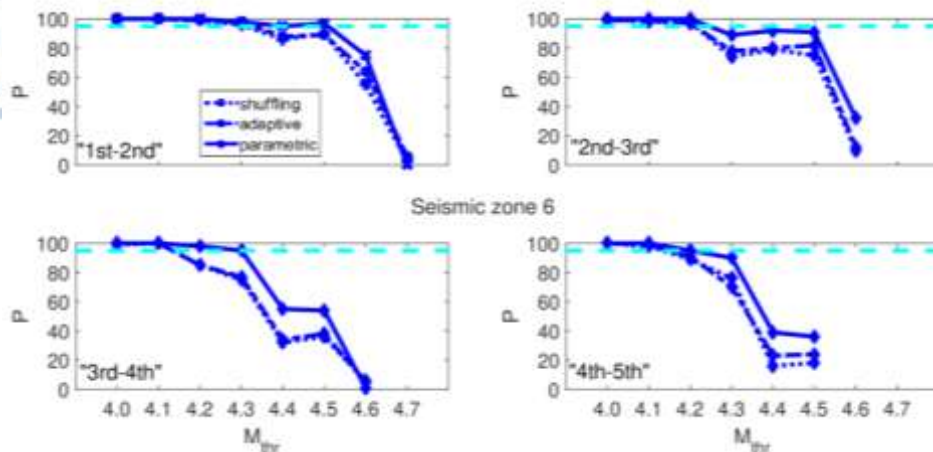
Σχ. Γ3: Ο έλεγχος της εναισθησίας κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 3.



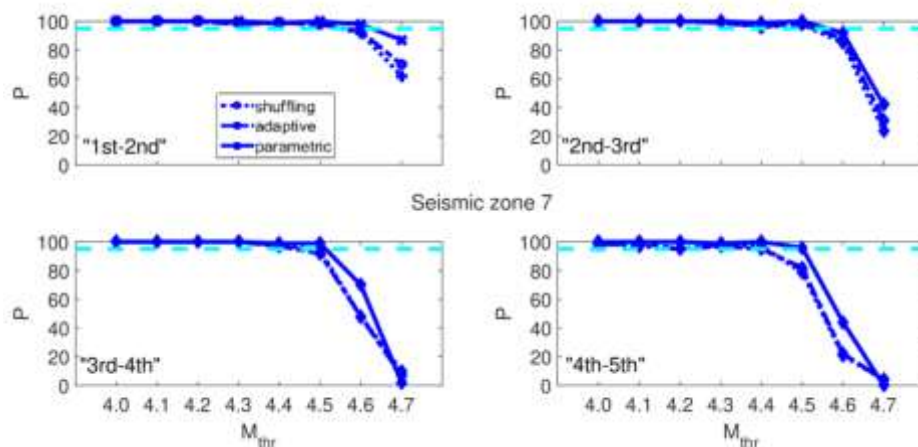
Σχ. Γ4: Ο έλεγχος της εναισθησίας κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 4.



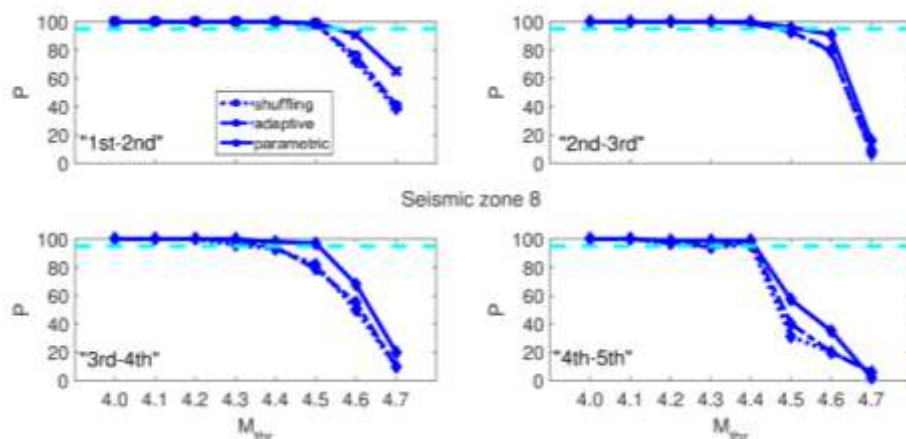
Σχ. Γ5: Ο έλεγχος της εναισθησίας κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 5.



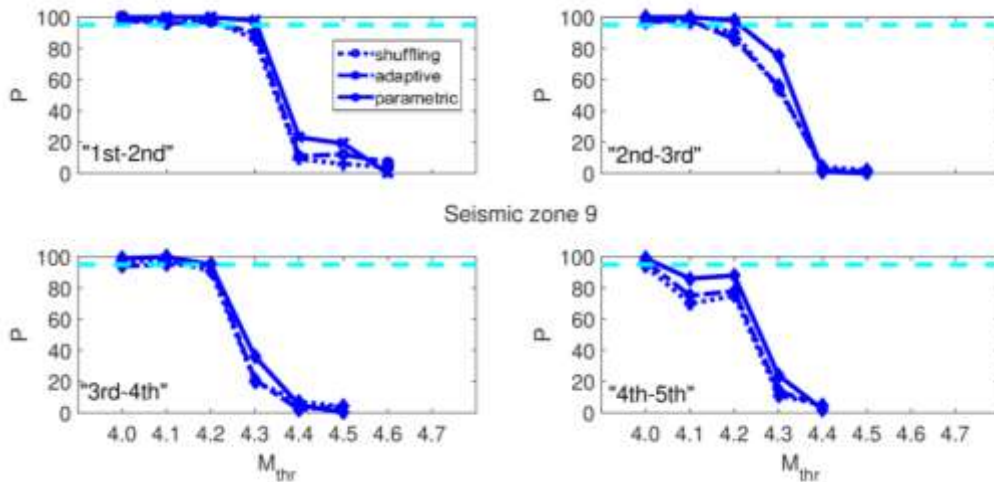
Σχ. Γ6: Ο έλεγχος της ευαισθησίας κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 6. Για κάποια κατώφλια μεγέθους (M_{thr}), ανά ζευγάρι σεισμών, δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα καθώς το μήκος (n) των χρονοσειρών ήταν αρκετά μικρό ($n \leq 2$) και ο υπολογισμός του κανονικοποιημένου συντελεστή r ήταν πρακτικά αδύνατος.



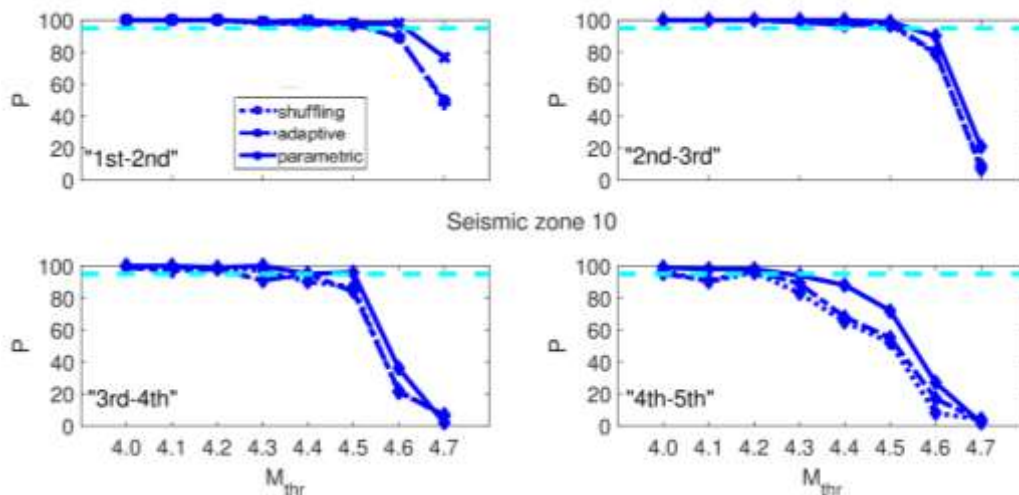
Σχ. Γ7: Ο έλεγχος της ευαισθησίας κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 7.



Σχ. Γ8: Ο έλεγχος της ευαισθησίας κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 8.

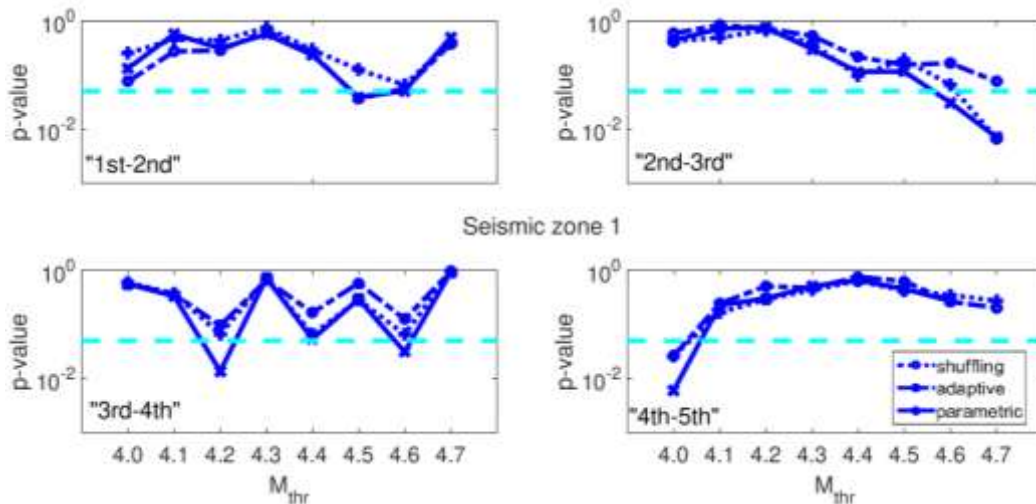


Σχ. Γ9: Ο έλεγχος της ευαισθησίας κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 9. Για κάποια κατώφλια μεγέθους (M_{thr}), ανά ζευγάρι σεισμών, δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα καθώς το μήκος (n) των χρονοσειρών ήταν αρκετά μικρό ($n \leq 2$) και ο υπολογισμός του κανονικοποιημένου συντελεστή r ήταν πρακτικά αδύνατος.

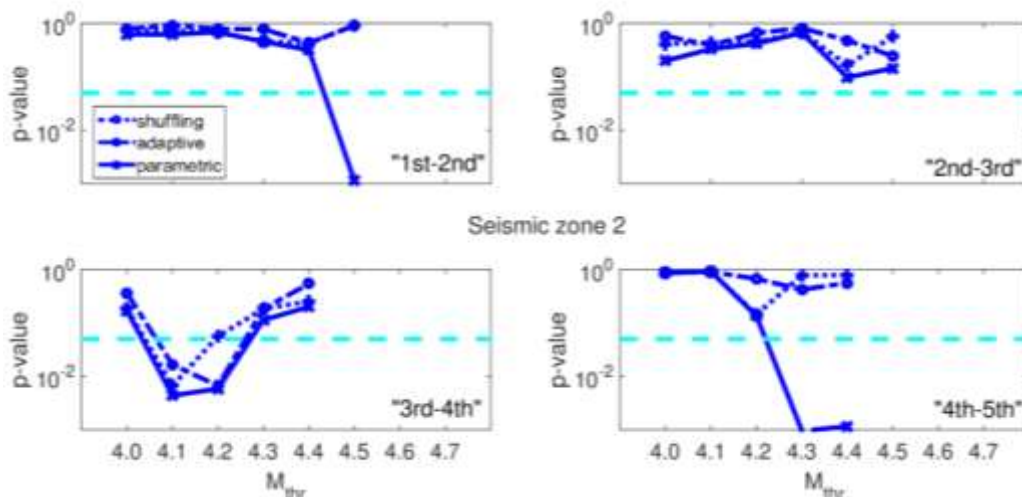


Σχ. Γ10: Ο έλεγχος της ευαισθησίας κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου μέσω του ποσοστού απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 10.

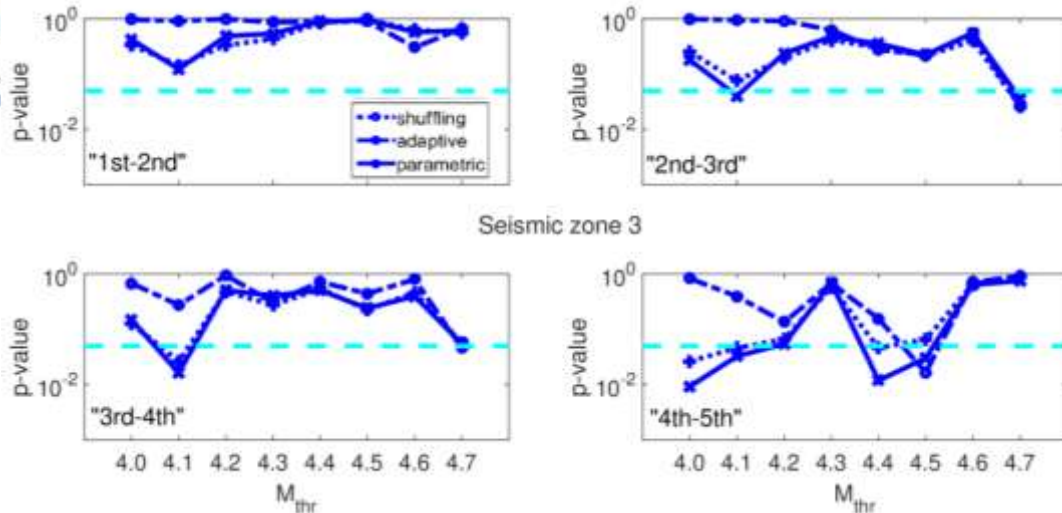
Τα αποτελέσματα της εφαρμογής που αφορούν την ενότητα 4.5, στα πραγματικά δεδομένα, κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου για κάθε σεισμική ζώνη και για κάθε ζευγάρι σεισμών παρουσιάζονται στο Σχ. Δ (Σχ. Δ1 ως Σχ. Δ10).



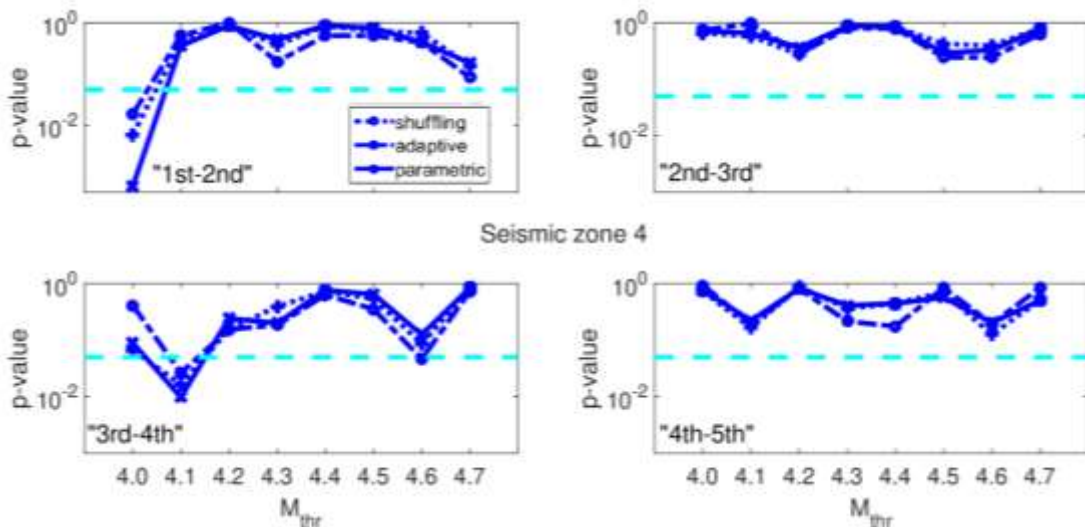
Σχ. Δ1: Ο έλεγχος μέσω της εφαρμογής σε πραγματικά δεδομένα κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου σε σχέση με το ποσοστό απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 1. Ο κάθετος άξονας παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Η οριζόντια κυανή διακοπτόμενη γραμμή είναι στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$.



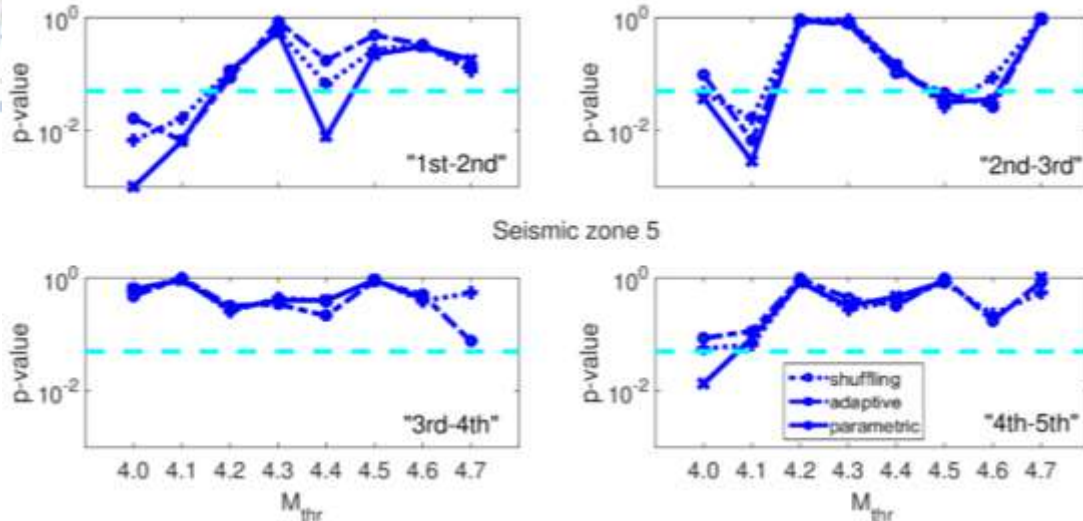
Σχ. Δ2: Ο έλεγχος μέσω της εφαρμογής σε πραγματικά δεδομένα κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου σε σχέση με το ποσοστό απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 2. Ο κάθετος άξονας παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Η οριζόντια κυανή διακοπτόμενη γραμμή είναι στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$. Για κάποια κατώφλια μεγέθους (M_{thr}), ανά ζευγάρι σεισμών, δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα καθώς το μήκος (n) των χρονοσειρών ήταν αρκετά μικρό ($n \leq 2$) και ο υπολογισμός του κανονικοποιημένου συντελεστή r ήταν πρακτικά αδύνατος.



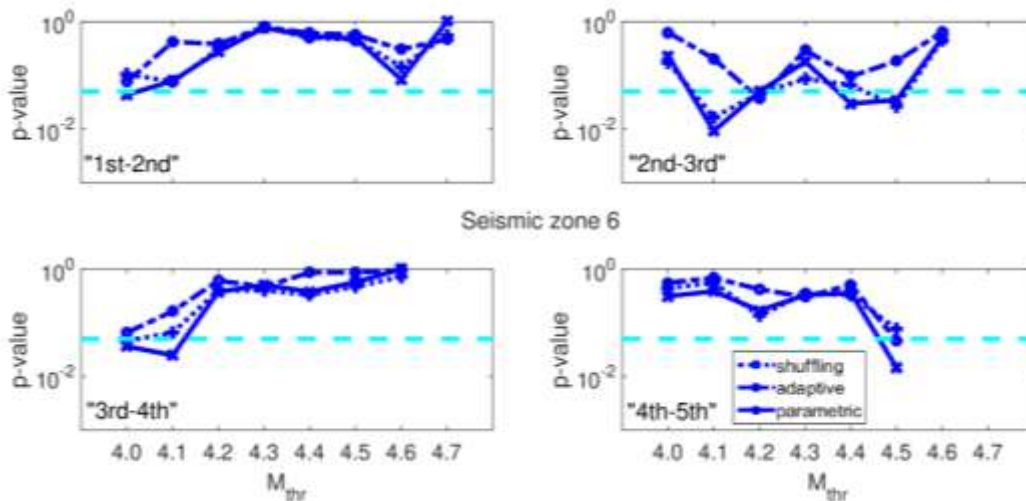
Σχ. Δ3: Ο έλεγχος μέσω της εφαρμογής σε πραγματικά δεδομένα κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου σε σχέση με το ποσοστό απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 3. Ο κάθετος άξονας παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Η οριζόντια κυανή διακοπτόμενη γραμμή είναι στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$.



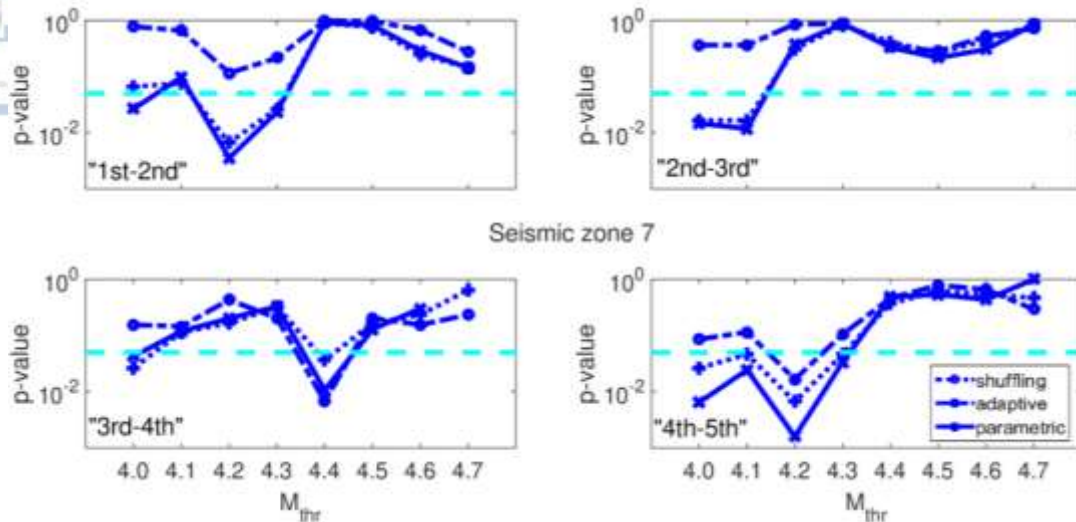
Σχ. Δ4: Ο έλεγχος μέσω της εφαρμογής σε πραγματικά δεδομένα κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου σε σχέση με το ποσοστό απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 4. Ο κάθετος άξονας παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Η οριζόντια κυανή διακοπτόμενη γραμμή είναι στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$.



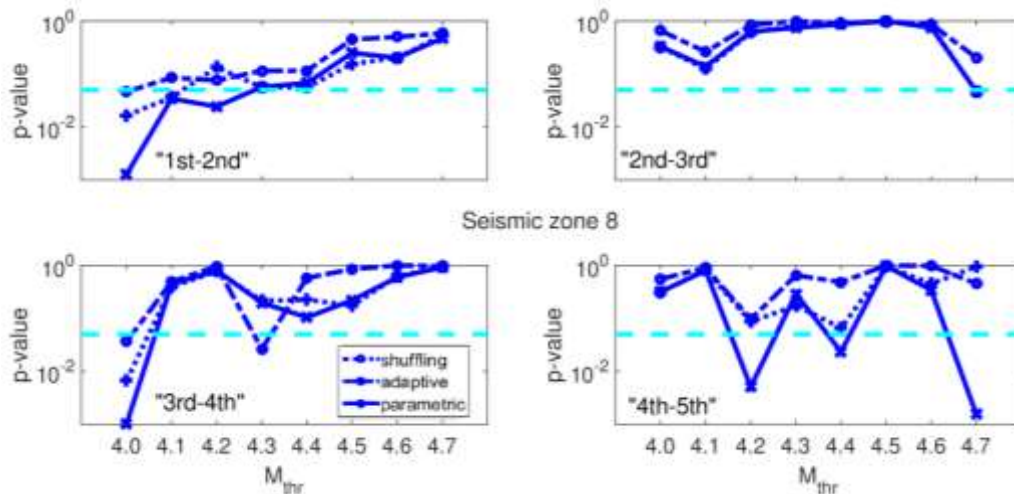
Σχ. Δ5: Ο έλεγχος μέσω της εφαρμογής σε πραγματικά δεδομένα κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου σε σχέση με το ποσοστό απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 5. Ο κάθετος άξονας παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Η οριζόντια κυανή διακοπτόμενη γραμμή είναι στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$.



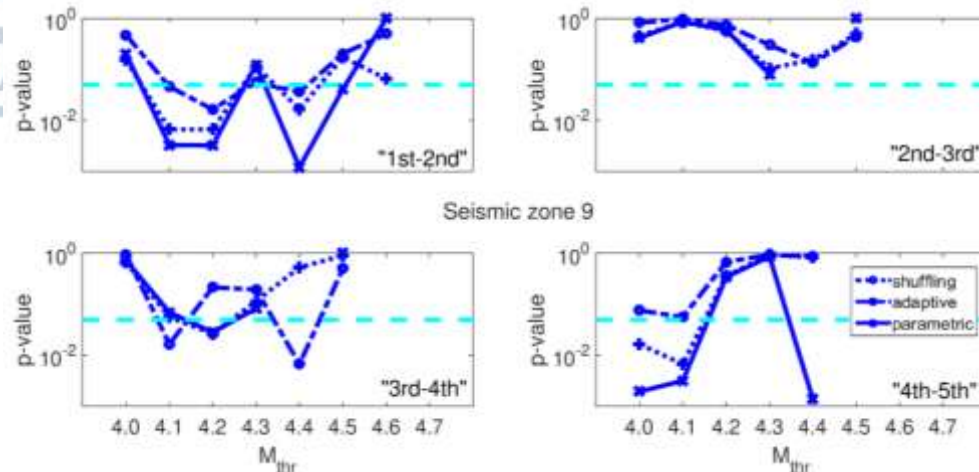
Σχ. Δ6: Ο έλεγχος μέσω της εφαρμογής σε πραγματικά δεδομένα κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου σε σχέση με το ποσοστό απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 6. Ο κάθετος άξονας παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Η οριζόντια κυανή διακοπτόμενη γραμμή είναι στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$. Για κάποια κατώφλια μεγέθους (M_{thr}), ανά ζευγάρι σεισμών, δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα καθώς το μήκος (n) των χρονοσειρών ήταν αρκετά μικρό ($n \leq 2$) και ο υπολογισμός του κανονικοποιημένου συντελεστή r ήταν πρακτικά αδύνατος.



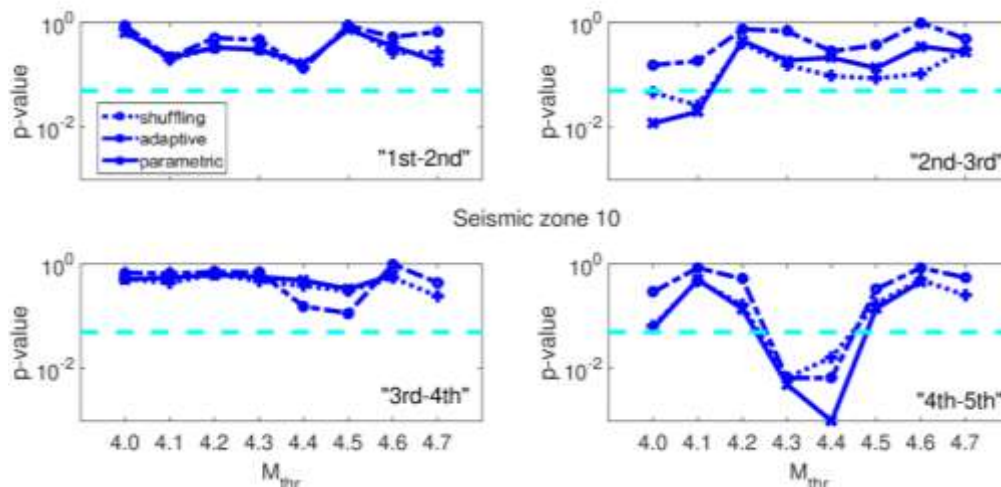
Σχ. Δ7: Ο έλεγχος μέσω της εφαρμογής σε πραγματικά δεδομένα κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου σε σχέση με το ποσοστό απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 7. Ο κάθετος άξονας παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Η οριζόντια κυανή διακοπτόμενη γραμμή είναι στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$.



Σχ. Δ8: Ο έλεγχος μέσω της εφαρμογής σε πραγματικά δεδομένα κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου σε σχέση με το ποσοστό απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 8. Ο κάθετος άξονας παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Η οριζόντια κυανή διακοπτόμενη γραμμή είναι στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$.

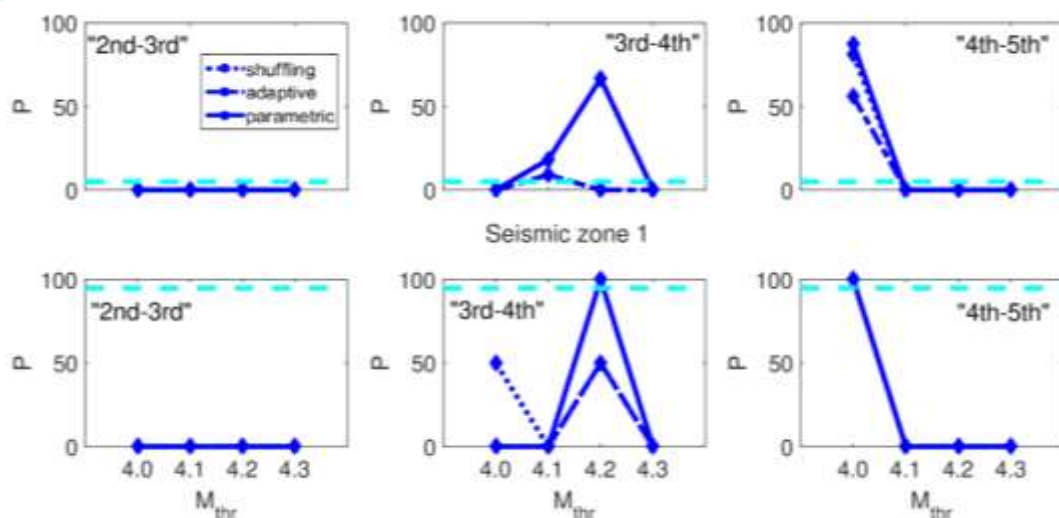


Σχ. Δ9: Ο έλεγχος μέσω της εφαρμογής σε πραγματικά δεδομένα κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου σε σχέση με το ποσοστό απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 9. Ο κάθετος άξονας παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Η οριζόντια κyanή διακοπτόμενη γραμμή είναι στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$. Για κάποια κατώφλια μεγέθους (M_{thr}), ανά ζευγάρι σεισμών, δεν παρουσιάζονται αποτελέσματα καθώς το μήκος (n) των χρονοσειρών ήταν αρκετά μικρό ($n \leq 2$) και ο υπολογισμός του κανονικοποιημένου συντελεστή r ήταν πρακτικά αδύνατος.

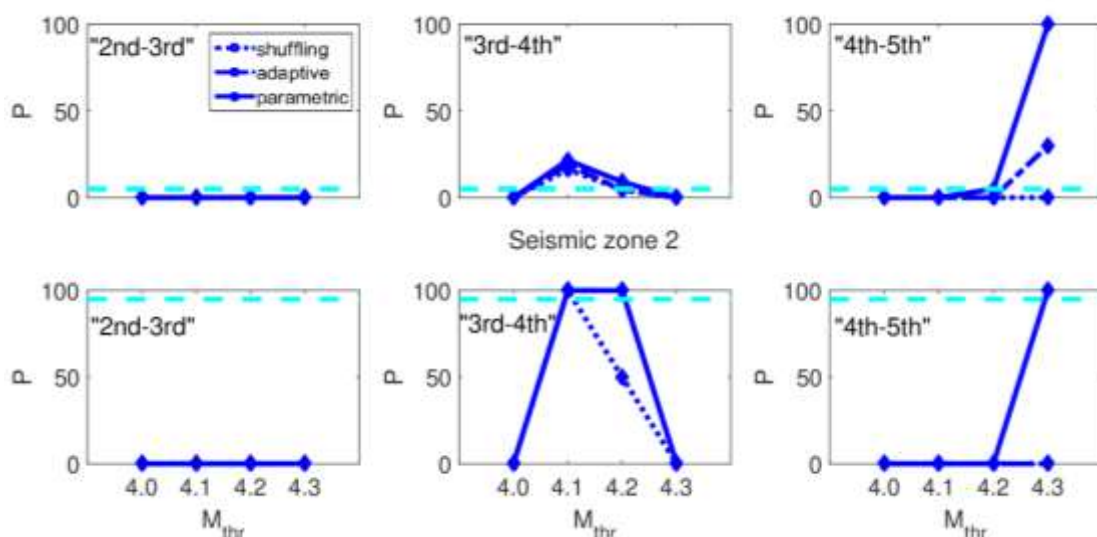


Σχ. Δ10: Ο έλεγχος μέσω της εφαρμογής σε πραγματικά δεδομένα κάθε προσέγγισης του στατιστικού ελέγχου σε σχέση με το ποσοστό απόρριψης της H_0 στις 100 πραγματοποιήσεις με βάση το κατώφλι μεγέθους (M_{thr}) για κάθε ζευγάρι σεισμών που αφορά την σεισμική ζώνη 10. Ο κάθετος άξονας παρουσιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα. Η οριζόντια κyanή διακοπτόμενη γραμμή είναι στο επίπεδο σημαντικότητας $\alpha = 0.05$.

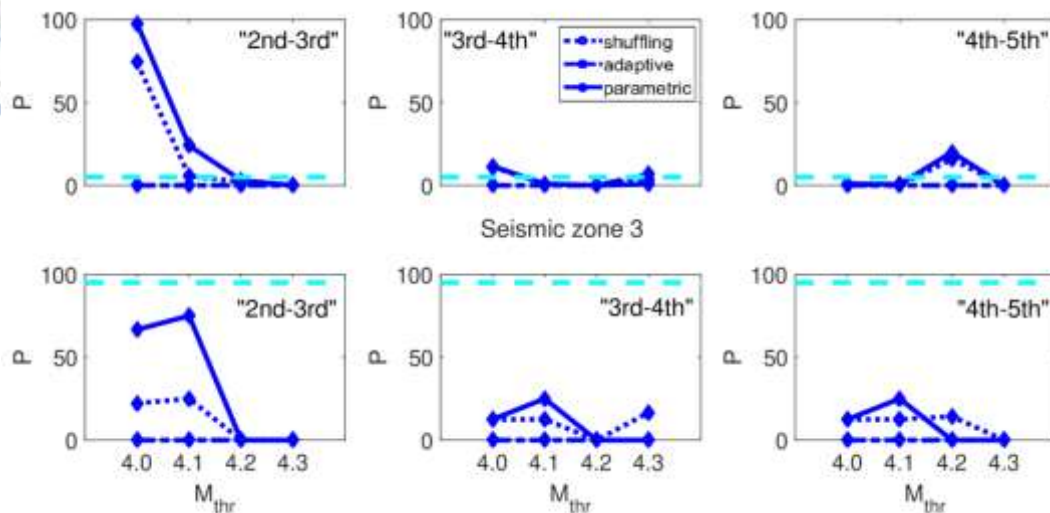
Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης για την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας που αφορούν την ενότητα 4.6 για κάθε προσέγγιση του στατιστικού έλεγχου και για κάθε σεισμική ζώνη στο Σχ. Ε (Σχ. Δ1 ως Σχ. Ε10).



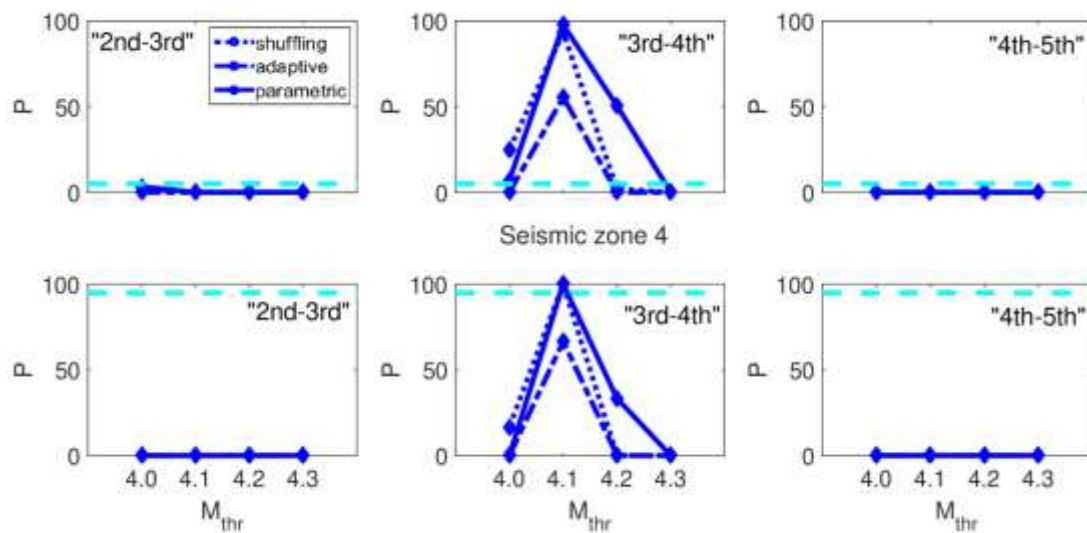
Σχ. Ε1: Το ποσοστό απόρριψης της H_0 , ότι η τιμή του κανονικοποιημένου συντελεστή συσχέτισης r είναι στατιστικά σημαντική, για κάθε ζευγάρι σεισμών και για κάθε προσέγγιση στατιστικού ελέγχου για την σεισμική ζώνη 1. Στην πρώτη γραμμή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον πρώτο (1^o) στατιστικό έλεγχο όπου θέλουμε αποδοχή της H_0 διότι ο επερχόμενος κύριος σεισμός δεν γίνεται πριν από το αντίστοιχο ζευγάρι σεισμών που θεωρείται ενώ στην δεύτερη γραμμή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τον δεύτερο (2^o) στατιστικό έλεγχο όπου θέλουμε απόρριψη της H_0 διότι ο επερχόμενος κύριος σεισμός γίνεται πριν από το αντίστοιχο ζευγάρι σεισμών που εξετάζεται. Το ζευγάρι σεισμών ($1^{os}-2^{os}$) δεν εξετάζεται για την αξιολόγηση διότι ο 1^{os} σεισμός όσον αφορά την μεταβλητή του χρόνου εξαρτάται από τον επερχόμενο κύριο σεισμό, οπότε δεν είναι πρακτικά χρήσιμο ζευγάρι σεισμών για την εκτίμηση της μελλοντικής σεισμικής δραστηριότητας καθώς ο επερχόμενος κύριος σεισμός έχει ήδη πραγματοποιηθεί.



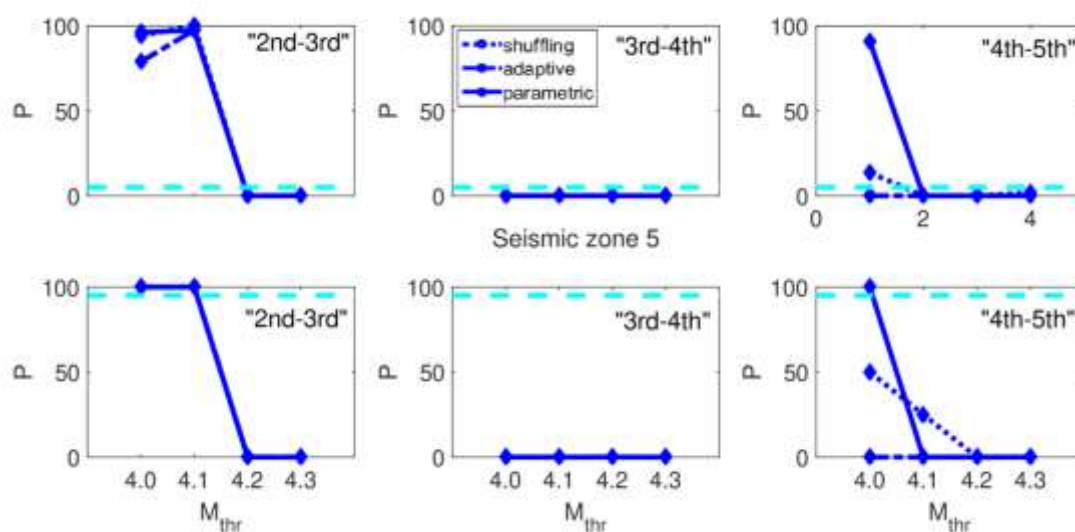
Σχ. Ε2: Όμοια με το Σχ. Ε1 αλλά για την σεισμική ζώνη 2.



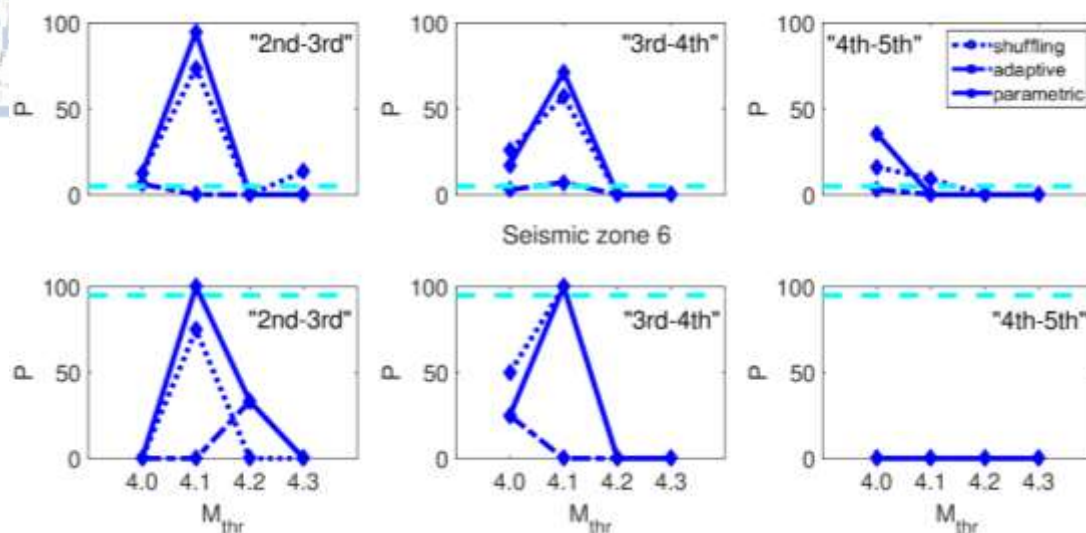
Σχ. E3: Όμοια με το Σχ. E1 αλλά για την σεισμική ζώνη 3.



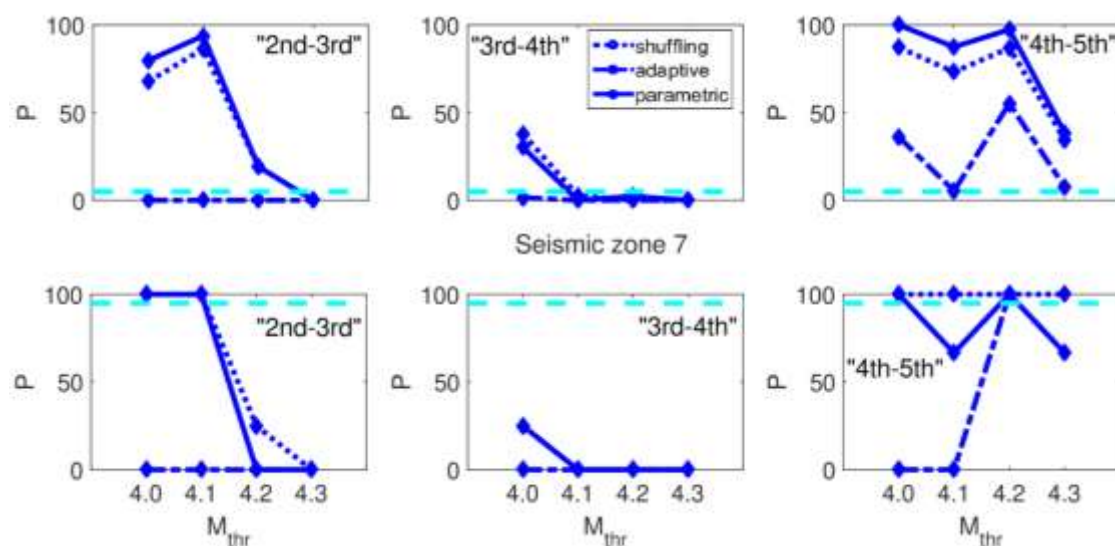
Σχ. E4: Όμοια με το Σχ. E1 αλλά για την σεισμική ζώνη 4.



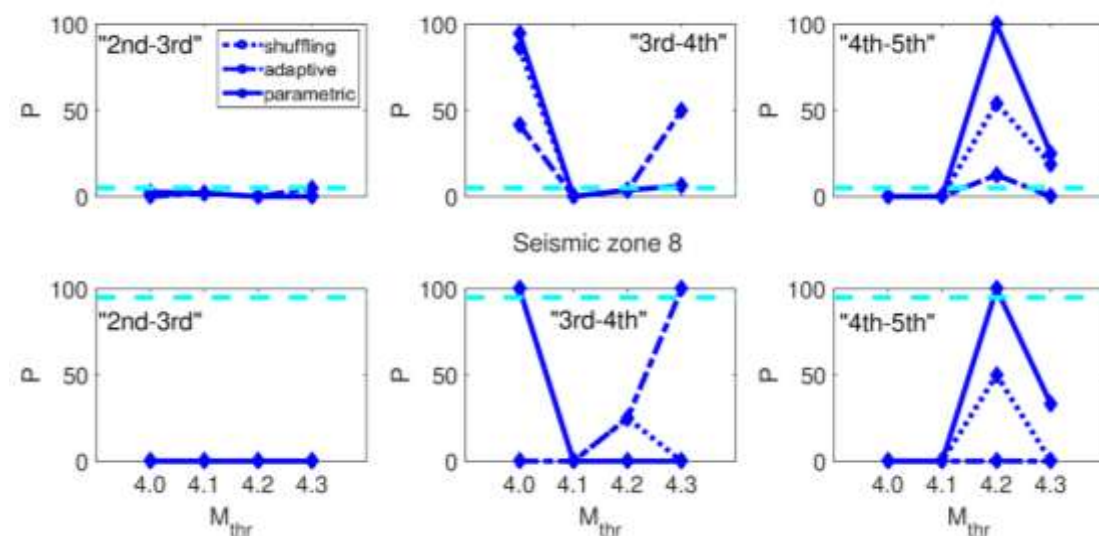
Σχ. E5: Όμοια με το Σχ. E1 αλλά για την σεισμική ζώνη 5.



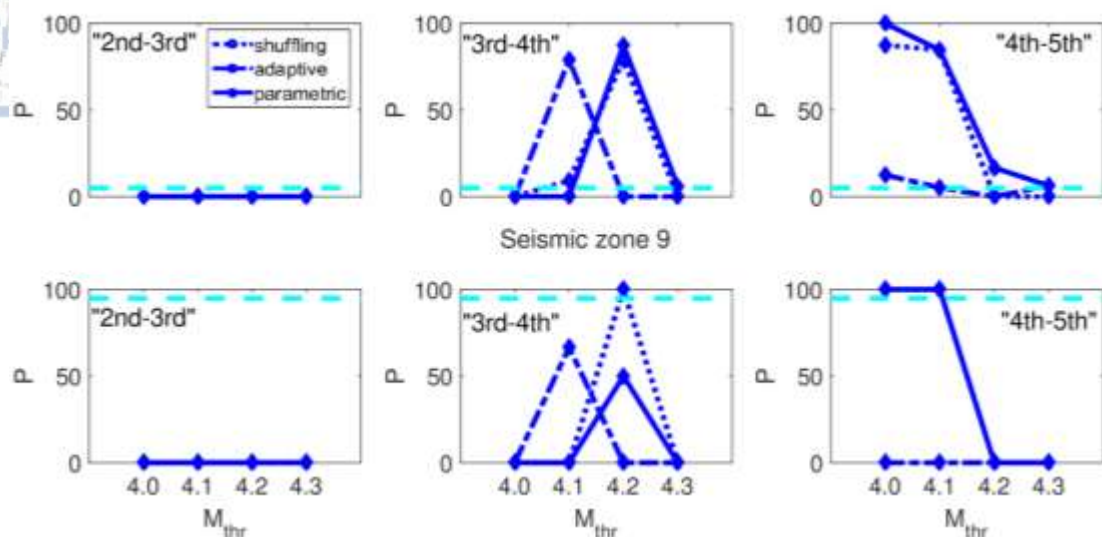
Σχ. Ε6: Όμοια με το Σχ. Ε1 αλλά για την σεισμική ζώνη 6.



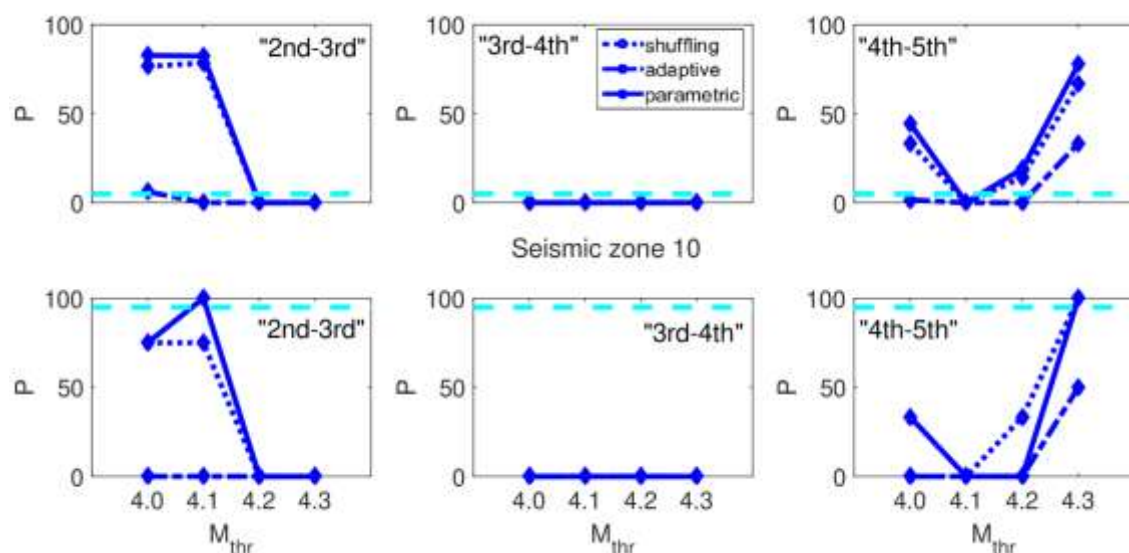
Σχ. Ε7: Όμοια με το Σχ. Ε1 αλλά για την σεισμική ζώνη 7.



Σχ. Ε8: Όμοια με το Σχ. Ε1 αλλά για την σεισμική ζώνη 8.



Σχ. Ε9: Όμοια με το Σχ. Ε1 αλλά για την σεισμική ζώνη 9.



Σχ. Ε10: Όμοια με το Σχ. Ε1 αλλά για την σεισμική ζώνη 10.



Βιβλιογραφία

- Abe S, Suzuki N (2004a) Small-world structure of earthquake network. *Physica A* 337, 357-362.
- Abe S, Suzuki N (2004b) Scale-free network of earthquakes. *Europhysics Letters* 65, 581-586.
- Abe S, Suzuki N (2005) Scale-invariant statistics of period in directed earthquake network. *The European Physical Journal B* 44, 115-117.
- Abe S, Sarlis NV, Skordas ES, Tanaka HK, Varotsos PA (2005) Origin of the usefulness of the natural-time representation of complex time series. *Physical Review Letters* 94, 170 601.
- Abe S, Suzuki N (2006) Complex-network description of seismicity. *Nonlinear Processes in Geophysics* 13, 145-150.
- Abe S, Suzuki N (2007) Dynamical evolution of clustering in complex network of earthquakes. *The European Physical Journal B* 59, 93-97.
- Abe S, Suzuki N (2009) Main shocks and evolution of complex earthquake networks. *Brazilian Journal of Physics* 39(2A), 428-430.
- Abe S, Pasten D, Munoz V, Suzuki N (2011) Universalities of earthquake-network characteristics. *Ch Sc Bull* 56(34), 3697-3701.
- Abe S, Suzuki N (2012) Universal law for waiting internal time in seismicity and its implication to earthquake network. *Europhysics Letters* 97(4), 1-21. doi:10.1209/0295-5075/97/49002.
- Abe S, Suzuki N (2016) Complex-network description of seismicity. *Nonlinear Processes in Geophysics* 13, 145-150.
- Aki K (1981) A probabilistic synthesis of precursory phenomena, in *Earthquake Prediction: An International Review*, Maurice Ewing Series 4, DW. Simpson and PG. Richards (Editors). American Geophysical Union 4, 566-574.
- Albert R, Jeong H, Barabasi AL (2000) Error and attack tolerance of complex networks. *Nature* 406(6794), 378-382.
- Albert R, Barabasi AL (2002) Statistical mechanics of complex networks. *Reviews of Modern Physics* 74, 47-97.
- Alonso A, Geys H, Molenberghs G, Kenward M, Vangeneugden T (2003) Validation of surrogate markers in multiple randomized clinical trials with repeated measurements. *Biometrical Journal* 45(8), 931-945.
- Altınok Y, Kolçak D (1999) An application of the semi-Markov model for earthquake occurrences in North Anatolia, Turkey. *Balkan Geophysical Society* 2, 90-99.

- Aydin NY, Duzgun HS, Wenzel F, Heinimann HR (2017) Integration of stress testing with graph theory to assess the resilience of urban road networks under seismic hazards. *Natural Hazards*, 1-32.
- Baek WH, Lim G, Kim K, Chang KH, Jung JW, Seo SK, Yi M, Lee DI, Ha DH (2011) Robustness of the Topological Properties of a Seismic Network. *Journal of the Korean Physical Society* 58(6), 1712-1714.
- Baiesi M, Paczuski M (2004) Scale-free networks of earthquakes and aftershocks. *Physical Review E* 69(6), 066106.
- Baiesi M, Paczuski M (2005) Complex networks of earthquakes and aftershocks. *Nonlinear Processes in Geophysics* 12, 1-11.
- Bak P, Tang C (1989) Earthquakes as a self-organized critical phenomenon. *Journal of Geophysical Research* 94, 635-637.
- Bak P, Christensen K, Danon L, Scanlon T (2002) Unified Scaling Law for Earthquakes. *Physical Review Letters* 88, 178501(1-4).
- Barabasi A, Albert R (1999) Emergence of scaling in random networks. *Science* 286, 509-512
- Barrat A, Barthelemy M, Vespignani A (2008) *Dynamical processes on complex networks*. Cambridge University Press, United Kingdom, 361.
- Bartlett MS (1947) The general canonical correlation distribution. *Annals of Mathematical Statistics*, 18, 1-17.
- Basfirinci S (2009) An evaluation and an application of using canonical correlation analysis in marketing research. *International Journal of Economic and Administrative Studies*, 1(3), ISSN 1307-9832.
- Bath M (1978) Seismic risk in Fennoscandia. *Tectonophysics* 57, 285-295.
- Belkacem FZB, Zekri N, Terbeche M (2015) Statistical characterization of a small-world network applied to forest fires. *Springer Proceedings in Mathematics and Statistics* 128, 27-37.
- Bell M, Perera S, Piraveenan M, Bliemer M, Latty T, Reid C (2018) Network growth models: A behavioural basis for attachment proportional to fitness. *The Physiological Society* 7, 1-15.
- Benjamini Y, Hochberg Y (1995) Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society* 57, 289-300.
- Bialonski S, Horstmann MT, Lehnertz K (2010) From brain to earth and climate systems: Small-world interaction networks or not?. *Journal of Nonlinear Science* 20(1), 1-9.
- Billio M, Getmansky M, Lo AW, Pelizzon L (2012) Econometric Measures of Connectedness and Systemic Risk in the Finance and Insurance Sectors. *Journal of Financial Economics* 104(3), 535-559.

Borovsky J (2014) Canonical correlation analysis of the combined solar wind and geomagnetic index data sets, Network. Journal of Geophysical Research: Space Physics 119, 5364-5381.

Brillinger D (1982) Some Bounds for Seismic Risk. Bulletin of the Seismological Society of America 72,1403-1410

Bullmore ET, Fornito A, Zalesky A (2016) Fundamentals of Brain Network Analysis. Academic Press, eBook ISBN: 9780124081185, p 494.

Busuioc A, Tomozeiu R, Cacciamani C (2007) Statistical downscaling model based on canonical correlation analysis for winter extreme precipitation events in the Emilia-Romagna region. International Journal of climatology 28(4), 449-464.

Cao DS, Liu S, Zeng WB, Liang YZ (2015) Sparse canonical correlation analysis applied to omics studies for integrative analysis and biomarker discovery. Journal of Chemometrics 29, 371-378.

Carbone V, Sorriso-Valvo L, Harabaglia P, Guerra I (2005) Unified scaling law for waiting times between seismic events. Europhysics Letters 71(6), 1036-1042.

Carrubba S, Minagar A, Chesson JAL, Frilot IC, Marino A (2012) Increased determinism in brain electrical activity occurs in association with multiple sclerosis. Journal of Neurology Research 34, 286-290.

Chelidze T (2017) Complexity of seismic process: A mini-review. International Journal of Physics and Astronomy 1(6), 1-8, 10.15406/paj.2017.01.00035.

Chorozoglou D, Kugiumtzis D (2014) Testing the randomness of causality networks from multivariate time series. International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, NOLTA 2014, Luzern, Switzerland, September 14-18, 229-232.

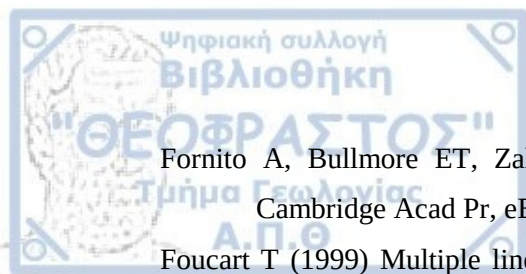
Chorozoglou D, Kugiumtzis D, Papadimitriou E (2015) Small-world property and distinct evolution of complex networks from historical earthquakes in Greece, submitted to the International Conference "SCience in TEchnology - SCinTE - 2015", Athens, Greece, November 5-7, 258-262.

Chorozoglou D, Kugiumtzis D, Papadimitriou E (2017) Application of complex network theory to the recent foreshock sequences of Methoni (2008) and Kefalonia (2014) in Greece. Acta Geophysica 65(3), 543-553.

Chorozoglou D, Kugiumtzis D, Papadimitriou E (2018) Testing the structure of earthquake networks from multivariate time series of successive main shocks in Greece. Physica A 499C, 28-39.

Chorozoglou D, Kugiumtzis D (2018) Testing the randomness of correlation networks from multivariate time series. Journal of Complex Networks 7(2), 190-209, doi.org/10.1093/comnet/cny020.

- Chorozoglou D, Papadimitriou E (2019) Monitoring earthquake network measures between main shocks in Greece. *Journal of Seismology* 23(3), 505-519.
- Cohen R, Erez K, Ben-Avraham D, Havlin S (2000) Resilience of the Internet to random breakdowns. *Physical Review Letters* 85(21), 4626-4628.
- Cornell CA (1968) Engineering seismic risk analysis. *Bulletin of the Seismological Society of America* 58, 1583-1606.
- Corral A (2004) Long-Term Clustering, Scaling, and Universality in the Temporal Occurrence of Earthquakes. *Physical Review Letters* 92, 108501.
- Daskalaki E, Papadopoulos GA, Spiliotis K, Siettos C (2014) Analysing the topology of seismicity in the Hellenic arc using complex networks. *Journal of Seismology* 18, 37-46.
- Daskalaki E, Spiliotis K, Siettos C, Minadakis G, Papadopoulos GA (2016) Foreshocks and short-term hazard assessment of large earthquakes using complex networks: the case of the 2009 L'Aquila earthquake. *Nonlinear Processes in Geophysics* 23, 241-256.
- Degani A, Shafto M, Olson L (2006) Using canonical correlation analysis: Use of composite heliographs for representing multiple patterns. *Diagram Conference*, Stanford, CA. 166.
- Del Genio C, Kim H, Toroczkai Z, Bassler K (2010) Efficient and exact sampling of simple graphs with given arbitrary degree sequence. *Plos One* 5(4), e10012, 10.1371/journal.pone.0010012.
- Donges JF, Zou Y, Marwan N, Kurths J (2009) The backbone of the climate network export. *Europhysics Letters* 87, 48007, 10.1209/0295-5075/87/48007.
- Donges JF, Heitzig J, Donner RV, Kurths J (2012) Analytical framework for recurrence network analysis of time series. *Physical Review E* 85, 046105, doi:10.1103/PhysRevE.85.046105.
- Donner RV, Small M, Donges JF, Marwan N, Zou Y, Xiang R, Kurths J (2011) Recurrence-based time series analysis by means of complex network methods. *International Journal of Bifurcation and Chaos* 21, 1019-1046.
- Dunn J, Doeksen G (1977) Canonical correlation analysis of selected demographic and health personnel variables. *Southern journal of agricultural economics* 9(2), 95-99.
- Emmert-Streib F, Dehmer M (2010) Influence of the Time Scale on the Construction of Financial Networks. *Plos One* 5(9), e12884.
- Erdős P, Rényi A (1959) On random graphs. *Pub Math (Debrecen)* 6, 290-297.
- Estévez J, García-Marín A, Báez-Benitez J, Casas-Castillo MC, Telesca L (2018) Introduction to the special issue on "hydro-meteorological time series analysis and their relation to climate change. *Acta Geophysica* 66(3), 317-318.
- Fiedor P (2014) Networks in financial markets based on the mutual information rate. *Physical Review E* 89(5-1), 052801.

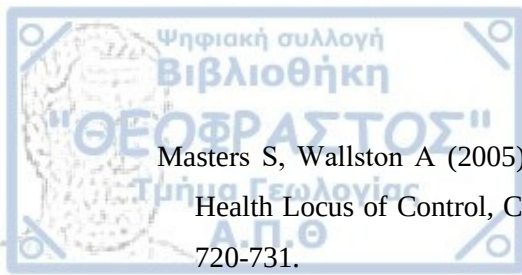


- Fornito A, Bullmore ET, Zalesky A (2016) Fundamentals of Brain Network Analysis. Cambridge Acad Pr, eBook ISBN: 9780124081185, p 476.
- Foucart T (1999) Multiple linear regression on canonical correlation variables. Biometrical Journal, 41(5), 559-572.
- Galton F (1889) Natural Inheritance, Macmillan, London.
- Gerstenberger M, Wiemer S, Jones L, Reasenberg P (2005) Real-time forecasts of tomorrow's earthquakes in California. Nature 435(7040), 328-331.
- Girvan M, Newman ME (2002) Community structure in social and biological networks. Proceedings of the National Academy of Sciences 99, 7821-7826.
- Gohary A, Hanzaee K (2014) Personality Traits as Predictors of Shopping Motivations and Behaviors: A Canonical Correlation Analysis. Arab economics and business journal 9, 166-174.
- Gosset WS (1908) The probable error of a mean. Biometrika 6, 1-25.
- Gutenberg B, Richter CF (1944) Frequency of earthquakes in California. Bulletin of the Seismological Society of America 34, 185-188.
- Hainzl S, Zöller G, Kurths J (1999) Similar power laws for foreshock and aftershock sequences in a spring-block model for earthquakes. Journal of Geophysical Research 104, 7243-7254.
- Härdle W, Simar L (2007) Canonical Correlation Analysis, Applied Multivariate Statistical Analysis, Chp 14, 321-330, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Hardoon D, Szedmak S, Shawe-Taylor J (2004) Canonical Correlation Analysis: An Overview with Application to Learning Methods. Neural Computation 16, 2639-2664.
- Harris RA (1998) Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. Journal of Geophysical Research 103, 24, 347.
- Heiberger RH (2014) Stock network stability in times of crisis. Physica A 393, 376-381.
- Herrera C, Nava FA, Lomnitz C (2006) Time-dependent earthquake hazard evaluation in seismogenic systems using mixed Markov Chains: An application to the Japan area, Earth Planets Space 58, 973-979.
- Hill DP, Reasenberg PA, Michael A, Arabaz WJ, Beroza G, Brumbaugh D, Brune JN, Castro R, Davis R, DePollo D (1993) Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California. Science 260(5114), 1617-1623.
- Hlinka J, Hartman D, Palus M (2012) Small-world topology of functional connectivity in randomly connected dynamical systems, Chaos 22(3), 033107.
- Hong S, Chen X, Jin L, Xiong M (2013) Canonical correlation analysis for RNA-seq co-expression networks. Nucleic Acids Research 41, e95.
- Horvath S (2011) Weighted Network Analysis, Applications in Genomics and Systems Biology. Springer, New York, eBook ISBN: 978-1-4419-8819-5, p 421.

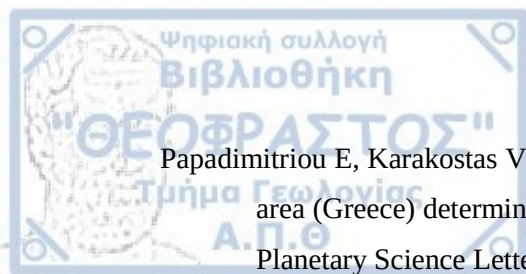


- Hotelling H (1935) The most predictable criterion. *Journal of Educational Psychology* 26, 139-142.
- Hotelling H (1936) Relation between two sets of variates. *Biometrika* 28, 321-377.
- Howard RA (1971) *Dynamic Probabilistic Systems*, 1(2), John Wiley and Sons, New York.
- Iaci R, Sriram T, Yin X (2010) Multivariate association and dimension reduction: A generalization of canonical correlation analysis. *Biometrics* 66(4), 1107-1118.
- Janer C, Biton D, Batac R (2017) Incorporating space, time, and magnitude measures in a network characterization of earthquake events. *Acta Geophysica* 65, 1153-1166.
- Jeong H, Mason SP, Barabasi AL, Oltvai ZN (2001) Lethality and centrality in protein networks. *Nature* 411, 41-42.
- Jimenez A, Tiampo KF, Posadas AM (2008) Small world in a seismic network: the California case. *Nonlinear Processes in Geophysics* 15, 389-395.
- Jones LM, Molnar P (1979) Some characteristics of foreshocks and their possible relationship to earthquake prediction and premonitory slip on fault. *Journal of Geophysical Research* 84, 3596-3608.
- Kagan Y, Knopoff L (1978) Statistical study of the occurrence of shallow earthquakes. *Geophys J Roy Astr S* 55, 67-86.
- Kagan Y, Jackson D (1991) Seismic Gap Hypothesis: Ten Years After. *Journal of Geophysical research* 96(B13), 419-431.
- Kanamori H, Anderson L (1975) Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America* 65(5), 1073-1095.
- Karakostas V (2009) Seismicity patterns before strong earthquakes in Greece. *Acta Geophysica* 57(2), 367-386, DOI: 10.2478/s11600-009-0004-y.
- Karakostas V, Papadimitriou E, Mesimeri M, Gkarlaoui C, Paradisopoulou P (2014) The 2014 Kefalonia Doublet (Mw6.1 and Mw6.0), Central Ionian Islands, Greece: Seismotectonic Implications along the Kefalonia Transform Fault Zone. *Acta Geophysica* 63(1).
- Kasthurirathna D, Piraveenan M. (2015) Emergence of scale-free characteristics in socio-ecological systems with bounded rationality. *Scientific Reports* 5, 10448, 1-16.
- King GCP (2007) Fault interaction, earthquake stress changes, and the evolution of seismicity. *Treatise on Geophysics* 4, 225.
- Kugiumtzis D (2002) Statistically transformed autoregressive process and surrogate data test for nonlinearity. *Physical Review E* 66, 025201.
- Kugiumtzis D, Kimiskidis VK (2015) Direct causal networks for the study of transcranial magnetic stimulation effects on focal epileptiform discharges. *International Journal of Neural Systems* 25(5), 1550006, 10.1142/S0129065715500069.

- Kugiumtzis D, Koutlis Ch, Tsimpiris A, Kimiskidis VK (2017) Dynamics of Epileptiform Discharges Induced by Transcranial Magnetic Stimulation in Genetic Generalized Epilepsy. *International Journal of Neural Systems* 27(7), 1750037, 10.1142/S012906571750037X.
- Lennartz S, Livina VN, Bunde A, Havlin S (2008) Long-term memory in earthquakes and the distribution of interoccurrence times. *Europhysics Letters* 81, 69001.
- León DA, Valdivia JA, Bucheli VA (2018) Modeling of Colombian Seismicity as Small-World Networks. *Seismological Research Letters* 89(5), 1807-1816.
- Le Pichon X, Angelier J (1981) The Aegean Sea. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* 300(1454), 357-372.
- Lippiello E, Arcangelis L, Godano C (2008) Influence of Time and Space Correlations on Earthquake Magnitude. *Physical Review Letters* 100, 038501.
- Lippiello E, Cirillo A, Godano G, Papadimitriou E, Karakostas V (2016) Real time forecast of aftershocks from a single seismic station signal. *Geophysical Research Letters* 43, 6252-6258.
- Livina VN, Havlin S, Bunde A (2005) Memory in the occurrence of earthquakes. *Physical Review Letters* 95, 208501.
- Lomnitz C (1974) *Global Tectonics and Earthquake Risk*. Elsevier Scientific Publishing Co, Amsterdam-London-New York.
- Lomnitz C, Nava F (1983) The Predictive Power of Seismic Gaps. *Bulletin of the Seismological Society of America* 73, 1815-1824.
- Ma F, Yao B (2017) The relations between network-operation and topological-property in a scale-free and small-world network with community structure. *Physica A* 484, 182-193
- Mardia KV, Kent JT, Bibby JM (1979) *Multivariate Analysis*, Academic Press.
- Marwan N, Wessel N, Meyerfeldt U, Schirdewan A, Kurths J (2002) Recurrence Plot Based Measures of Complexity and its Application to Heart Rate Variability Data. *Physical Review E* 66:026702, doi:10.1103/PhysRevE.66.026702.
- Marwan N, Trauth MH, Vuille M, Kurths J (2003) Comparing modern and Pleistocene ENSO-like influences in NW Argentina using nonlinear time series analysis methods. *Climate Dynamics* 21, 317-326, doi:10.1007/s00382-003-0335-3.
- Marwan N, Donges JF, Zou Y, Donner RV, Kurths J (2009) Complex network approach for recurrence analysis of time series. *Physics Letters A* 373, 4246-4254, doi:10.1016/j.physleta.2009.09.042.
- Maslov S, Sneppen K (2002) Specificity and stability in topology of protein networks. *Science* 296, 910-913.



- Masters S, Wallston A (2005) Canonical Correlation Reveals Important Relations between Health Locus of Control, Coping, Affect and Values. *Journal of health psychology* 10(5), 720-731.
- Matcharashvili T, Chelidze T, Peinke J (2008) Increase of order in seismic processes around large reservoir induced by water level periodic variation. *Nonlinear Dynamics* 51, 399-407.
- McGuire J (2008) Seismic Cycles and Earthquake Predictability on East Pacific Rise Transform Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America* 98(3), 1067-1084.
- McKenzie D (1972) Active tectonics of the Mediterranean Region. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 30(2), 109-185.
- Milgram S (1967) The Small-World problem. *Psychology Today* 1(1), 61-67.
- Molloy M, Reed B (1995) A critical point for random graphs with a given degree sequence. *Random Structure and Algorithms* 6(2-3), 161-180.
- Nava FA, Herrera C, Frez J, Glowacka E (2005) Seismic hazard evaluation using Markov chains: Application to the Japan area. *Pure and applied geophysics* 162, 1347-1366.
- Newman M, Strogatz S, Watts D (2001) Random graphs with arbitrary degree distributions and their applications. *Physical Review E* 64(2), 026118.
- Newman MEJ (2003) Mixing patterns in networks. *Physical Review E* 67, 026126.
- Newman M (2010) *Networks, an introduction*. Oxford University Press, eBook ISBN: 9780199206650, p 1042.
- Omori F (1894) On the Aftershocks of Earthquakes. *Sc Imp Univ Tokyo* 7, 111-120
- Opsahl T, Colizza V, Panzarasa P, Ramasco JJ (2008) Prominence and control: The weighted rich-club effect. *Physical Review E* 101, 168702.
- Opsahl T, Colizza V, Panzarasa P, Ramasco JJ, Papaioannou CA, Papazachos BC (2000) Time-independent and time-dependent seismic hazard in Greece based on seismogenic sources. *Bulletin of the Seismological Society of America* 90, 22-33.
- Palus M, Hartman D, Hlinka J, Vejmelka M (2011) Discerning connectivity from dynamics in climate networks. *Nonlinear Processes in Geophysics* 18, 751-763.
- Papadimitriou E (2002) Mode of Strong Earthquake Recurrence in the Central Ionian Islands (Greece): Possible Triggering due to Coulomb Stress Changes Generated by the Occurrence of Previous Strong Shocks. *Bulletin of the Seismological Society of America* 92(8), 3293-3308.
- Papadimitriou E, Wen X, Karakostas V, Jin X (2004) Earthquake Triggering along the Xianshuihe Fault Zone of Western Sichuan, China. *Pure and applied geophysics* 161(8), 1683-1707.



Papadimitriou E, Karakostas V (2005) Occurrence patterns of strong earthquakes in Thessalia area (Greece) determined by the stress evolutionary model B: A case study. *Earth and Planetary Science Letters* 235(3), 395-409.

Papadimitriou E, Karakostas V, Mesimeri M, Ghouliaras C, Kourouklas C (2017) The M_w 6.5 17 November 2015 Lefkada (Greece) Earthquake: Structural Interpretation by Means of the Aftershock Analysis. *Pure and applied geophysics* 174(10), 3869-3888.

Papadopoulos GA, Charalampakis M, Fokaefs A, Minadakis G (2010) Strong foreshock signal preceding the L'Aquila (Italy) earthquake (M_w 6.3) of 6 April 2009. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10, 19-24, doi:10.5194/nhess-10-19.

Papaioannou CA, Papazachos BC (2000) Time-independent and time-dependent seismic hazard in Greece based on seismogenic sources. *Bulletin of the Seismological Society of America* 90, 22-33.

Papana A, Kyrtou C, Kugiumtzis D, Diks C (2017) Financial networks based on Granger causality: A case study. *Physica A* 482, 65-73.

Papazachos BC (1975) Foreshocks and earthquake prediction. *Tectonophysics* 28:213-226.

Papazachos BC, Papaioannou C (1994) Long-term earthquake prediction in the Aegean area based on a time and magnitude predictable model. *Pure and Applied Geophysics* 140(4), 593-612.

Papazachos BC, Kiratzi AA, Karakostas BG (1997) Toward a Homogeneous Moment-Magnitude Determination for Earthquakes in Greece and the Surrounding Area. *Bulletin of the Seismological Society of America* 87(2), 474-483.

Papazachos BC, Papadimitriou EE, Kiratzi AA, Papazachos CB, Louvari EK (1998) Fault plane solutions in the Aegean Sea and the surrounding area and their tectonic implication. *Bollettino di geofisica teorica ed applicata* 39(3), 199-218.

Papazachos BC (1999) Seismological and GPS evidence for the Aegean Anatolia interaction. *Geophysical Research Letters* 26(17), 2653-2656.

Pastén D, Torres F, Toledo B, Muñoz V, Rogan J, Valdivia JA (2016) Time-based network analysis before and after the M_w 8.3 Illapel earthquake 2015 Chile. *Pure and applied geophysics* 173(7), 2267-2275.

Pearson K (1896) Mathematical contributions to the theory of evolution III, Regression, heredity and panmixia. *Philosophical transactions of the Royal Society of London* 187, 253-318.

Pearson K (1898) Mathematical contributions to the theory of evolution V. On the Reconstruction of the stature of prehistoric races. *Philosophical transactions of the Royal Society of London* 192, 169-244.

- Pertsinidou C, Tsaklidis G, Papadimitriou E, Limnios N (2016a) Application of hidden semi-Markov models for the seismic hazard assessment of the North and South Aegean Sea, Greece. *Journal of Applied Statistics* 44(6), 1064-1085.
- Pertsinidou C, Tsaklidis G, Papadimitriou E (2016b) Seismic hazard assessment in the Northern Aegean Sea (Greece) through discrete Semi-Markov modeling. *Bulletin of the Geological Society of Greece XLVII 2013 Proceedings of the 13th International Congress Chania* 44(6), 1417-1428.
- Poincaré H (1890) Sur la probleme des trois corps et les équations de la dynamique. *Acta Mathematica* 13, 1-271.
- Porta A, Faes L (2016) Wiener-Granger causality in network physiology with applications to cardiovascular control and neuroscience. *Proc IEEE* 104, 282-309.
- Riley MA, Balasubramaniam R, Turvey MT (1999) Recurrence quantification analysis of postural fluctuations. *Gait Posture* 9, 65-78.
- Roumelioti Z, Benetatos C, Kiratzi A (2009) The 14 February 2008 earthquake (M6.7) sequence offshore south Peloponnese (Greece): Source models of the three strongest events, *Tectonophysics* 471(1), 272-284.
- Rubinov M, Sporns O (2010) Complex network measures of brain connectivity: uses and interpretations. *Neuroscience* 52, 1059-1069.
- Sahoo BB, Jha R, Singh A, Kumar D (2019) Long short-term memory (LSTM) recurrent neural network for low-flow hydrological time series forecasting. *Acta Geophysica* 67(5), 1471-1481.
- Schinkel S, Dimigen O, Marwan N (2008) Selection of recurrence threshold for signal detection. *The European Physical Journal A* 164, 45-53.
- Scordilis E, Karakaisis G, Karakostas B, Panagiotopoulos D, Comninakis P, Papazachos B (1985) Evidence for Transform Faulting in the Ionian Sea: The Cephalonia Island Earthquake Sequence of 1983. *Pure and Applied Geophysics* 123, 388-397.
- Scholz CH (2010) Large earthquake triggering, clustering, and the synchronization of faults. *Bulletin of the Seismological Society of America* 100, 901-909.
- Schorlemmer D, Wiemer S, Wyss M (2005). Variations in earthquake-size distribution across different stress regimes. *Nature* 437(7058), 539-542.
- Schreiber T, Schmitz A (1996) Improved Surrogate Data for Nonlinearity Tests. *Physical Review Letters* 77(4), 635-638.
- Statheropoulos M, Vassiliadis N, Pappa A (1998) Principal component and canonical correlation analysis for examining air pollution and meteorological data. *Atmospheric Environment* 32(6), 1087-1095.

- Steady S, Gombert J, Cocco M (2005a) Introduction to special section: Stress transfer, earthquake triggering, and time-dependent seismic hazard. *Journal of Geophysical Research* 110(B5), B05S01. 3, 6.
- Steeple W, Steeples D (1996) Far-field aftershocks of the 1906 earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America* 86(4), 921-924.
- Stein R, Barka A, Dieterich J (1997) Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophysical Journal International* 128, 593-604.
- Telesca L, Báez-Benitez J (2018) Investigating dynamical features in the long-term daily maximum temperature time series recorded at Adrián Jara, Paraguay. *Acta Geophysica* 66(3), 393-403.
- Tenenbaum J, Havlin S, Stanley HE (2012) Earthquake networks based on similar activity patterns. *Physical Review E* 86, 046107.
- Theiler J, Prichard D (1996) Constrained-realization Monte-Carlo method for hypothesis testing. *Physica D*, 94(4), 221-235.
- Theodoulidis N, Cultrera G, De Rubeis V, Cara F, Panou A, Pagani M, Teves-Costa P (2008) Correlation between damage distribution and ambient noise H/V spectral ratio, *Bulletin of Earthquake Engineering* 6, 109-140.
- Todros K, Hero A (2012) Measure Transformed Canonical Correlation Analysis with Application to Financial Data, Conference: Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), IEEE 7th.
- Tsapanos TM, Papadopoulou AA (1999) A discrete Markov model for earthquake occurrence in Southern Alaska and Aleutian Islands. *Balkan Geophysical Society* 2(3), 75-83.
- Utsu T (1961) A statistical study on the occurrence of aftershocks. *The geophysical magazine* 30, 521-605
- Utsu T, Ogata Y, Mutsaers RS (1995) The Centenary of the Omori Formula for a Decay Law of Aftershock Activity. *Journal of Physics of the Earth* 43, 1-33.
- Utsu T (2002) Statistical features of seismicity. *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology Part A*. Academic, San Diego, 719-732.
- Vamvakaris DA, Papazachos CB, Papaioannou ChA, Scordilis EM, Karakaisis GF (2016) A detailed seismic zonation model for shallow earthquakes in the broader Aegean area. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 16, 55-84.
- Van den Heuvel M, Stam C, Boersma M, HulshoffPol H (2008) Small-world and scale-free organization of voxel-based resting-state functional connectivity in the human brain. *NeuroImage* 43, 528-539.
- Varotsos PA, Sarlis NV, Skordas ES (2002) Long-range correlations in the electric signals that precede rupture. *Physical Review E* 66, 011902.

- Viger F, Latapy M. (2015) Efficient and simple generation of random simple connected graphs with prescribed degree sequence. *Journal of Complex Networks* 4(1), 15-37.
- Votsi I, Limnios N, Tsaklidis G, Papadimitriou E (2013) Hidden Markov models revealing the stress field underlying the earthquake generation. *Physica A* 392, 2868-2885.
- Votsi I, Limnios N, Tsaklidis G, Papadimitriou E (2014) Hidden Semi-Markov Modeling for the Estimation of Earthquake Occurrence Rates. *Communication in Statistics-Theory and Methods* 43(7), 1484-1502.
- Wang R, Jiang K, Feldman J, Bickel J, Huang H (2014) Interring gene association networks using sparse canonical correlation analysis. *Annals of Applied Statistics* 9(1), 300-323.
- Wang X, Chen G (2003) Complex Networks: Small-World, Scale-Free and Beyond. *Feature*, 6-20.
- Wang X, Koç Y, Derrible S, Ahmad SN, Pino WJA, Kooij RE (2017) Multi-criteria robustness analysis of metro networks. *Physica A* 474, 19-31.
- Watts DJ, Strogatz SH (1998) Collective dynamics of small-world networks. *Nature* 393, 440-442.
- Wessel P, Smith WHF, Scharroo R, Luis JF, Wobbe F. (2013) Generic Mapping Tools: Improved version released. *EOS Trans AGU* 94, 409-410.
- Wiemer S, Wyss M (1997) Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times?. *Journal of Geophysical Research* 102(B7), 15115-15128.
- Wiemer S, Wyss M (2000) Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: Examples from Alaska, the Western United States, and Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America* 90(4), 859-869, 10.1785/0119990114.
- Wu G, Chen F, Kang D, Zhang X, Marinazzo D, Chen H (2011) Multiscale Causal Connectivity Analysis by Canonical Correlation: Theory and Application to Epileptic Brain. *IEEE transactions on biomedical engineering* 58(11), 3088-3096.
- Yu GH, Huang CC (2001) A distribution free plotting position. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 15, 462-476.
- Zhang Y, Zhou G, Jin J, Wang X, Cichocki A (2014) Frequency recognition in ssvep-based bci using multiset canonical correlation analysis. *International Journal of neural Systems* 24(2), 1450013.
- Zhang X, Gan C (2018) Global attractivity and optimal dynamic countermeasure of a virus propagation model in complex networks. *Physica A* 490, 1004-1018.