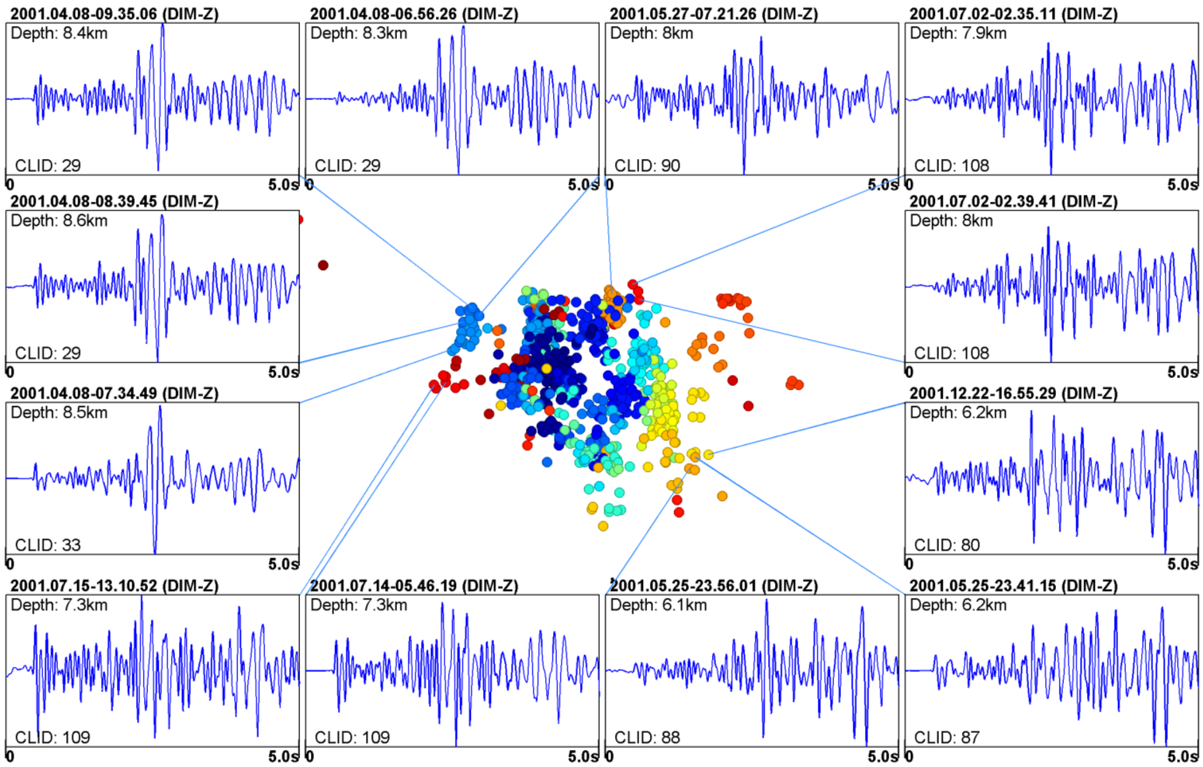
ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ - ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Π. ΚΑΠΕΤΑΝΙΔΗΣ

Μεταπτυχιακή Διατριβή Ειδίκευσης

ΜΕΛΕΤΗ ΣΜΗΝΟΣΕΙΣΜΩΝ ΔΥΤΙΚΟΥ ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΤΕΡΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΟΧΗΣ

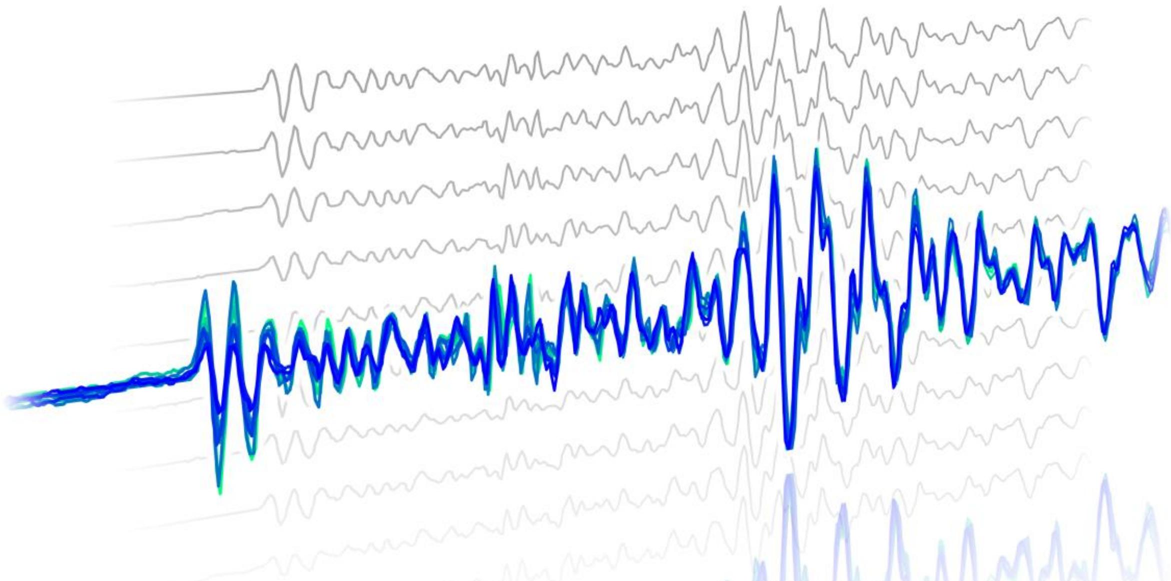
ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ



Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:
Παναγιώτης Παπαδημητρίου, Επίκ. Καθηγητής (Επιβλέπων)
Κωνσταντίνος Μακρόπουλος, Καθηγητής
Νικόλαος Βούλγαρης, Επίκ. Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ 2007

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Π. ΚΑΠΕΤΑΝΙΔΗΣ



ΜΕΛΕΤΗ ΣΜΗΝΟΣΕΙΣΜΩΝ ΔΥΤΙΚΟΥ ΚΟΡΙΝΘΙΑΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΤΕΡΟΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΟΧΗΣ

ΕΠΑΝΑΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:
Παναγιώτης Παπαδημητρίου, Επίκ. Καθηγητής (Επιβλέπων)
Κωνσταντίνος Μακρόπουλος, Καθηγητής
Νικόλαος Βούλγαρης, Επίκ. Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ 2007

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς επιτροπής για την επίβλεψη και διόρθωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής. Ευχαριστώ ιδιαιτέρως τον Επίκουρο Καθηγητή Σεισμολογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών του τομέα Γεωφυσικής-Γεωθερμίας και μέλος της τριμελούς επιτροπής κ. Παναγιώτη Παπαδημητρίου για την ανάθεση αυτού του ιδιαίτερα ενδιαφέροντος θέματος, την παροχή της βάσης δεδομένων, την επίβλεψη και τη διόρθωση της εργασίας μου. Ευχαριστώ επίσης τους συναδέλφους μου Απόστολο Αγάλο, Κωνσταντίνο Λέντα και Χάρις Κουνάδη για τα δεδομένα φάσεων των ετών 2000-2001 τα οποία έχουν προέλθει από εργασίες τους, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη του τομέα Γεωφυσικής-Γεωθερμίας που κατά καιρούς με έχουν βοηθήσει.

Ευχαριστώ τους γονείς μου για την ουσιαστική ψυχολογική και υλική υποστήριξη που συνεχίζουν να μου παρέχουν, τους φίλους μου για τη συμπαράσταση και την υπομονή τους, καθώς και τους μεταπτυχιακούς συμφοιτητές μου για τη βοήθειά τους σε θέματα γεωλογικού και ευρύτερου επιστημονικού ενδιαφέροντος.

στους γονείς μου

Πρόλογος

Η σεισμολογία είναι μια επιστήμη που ασχολείται κατά κύριο λόγο με τη μελέτη των ελαστικών κυμάτων που διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης. Τα κύματα αυτά περιέχουν σημαντικές πληροφορίες τόσο για τον τρόπο δημιουργίας τους όσο και για τον τρόπο διάδοσής. Η μορφή των καταγραφών τους στους διάφορους σταθμούς επηρεάζεται από έναν αριθμό παραμέτρων που πρέπει να προσδιοριστούν στον βαθμό που αυτό είναι δυνατόν. Προκειμένου να γίνει η προσέγγιση των παραμέτρων αυτών γίνονται ορισμένες παραδοχές που περιορίζουν τον αριθμό των αγνώστων ή το εύρος της αβεβαιότητας για ορισμένους από αυτούς. Έτσι, για παράδειγμα, με τη βοήθεια ενός απλού, μονοδιάστατου μοντέλου ταχυτήτων γίνεται μια πρώτη προσέγγιση για τη δομή σε μια περιοχή μελέτης. Επιπλέον, με γνωστές τις περιοχές στις οποίες εμφανίζεται κυρίως η σεισμική δραστηριότητα μπορούν να εγκατασταθούν κατάλληλα τοπικά δίκτυα που περικλείουν την επιφάνεια πάνω από έναν σεισμογόνο χώρο και με αυτόν τον τρόπο παρέχουν ακριβέστερα δεδομένα για τον προσδιορισμό των σεισμικών παραμέτρων.

Μια ακόμα παρατήρηση είναι ότι ορισμένες φορές κάποια σεισμικά γεγονότα συμβαίνουν με τον ίδιο τρόπο, στην ίδια περίπου υποκεντρική θέση αλλά σε διαφορετικό χρόνο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι καταγραφές των ελαστικών κυμάτων που παράγονται και φθάνουν σε ορισμένο σταθμό, ο οποίος βρίσκεται σε σταθερή θέση, να είναι *όμοιες* για τα γεγονότα αυτά τα οποία καλούνται *όμοιοι σεισμοί*. Το φαινόμενο των όμοιων σεισμών είναι το κεντρικό θέμα της παρούσας εργασίας. Θα αναδειχθούν τρόποι με τους οποίους μπορεί να μετρηθεί η ομοιότητα ανάμεσα σε 2 κυματομορφές, θα εξεταστεί από ποιους παράγοντες εξαρτάται η ομοιότητα, πώς γίνεται να ομαδοποιηθούν τα σεισμικά γεγονότα ανάλογα με τον βαθμό της ομοιότητάς τους και σε τι εφαρμογές μπορεί να χρησιμοποιηθεί η πληροφορία που παρέχουν οι όμοιοι σεισμοί.

Στο Κεφάλαιο 1 θα παρουσιαστούν οι μέθοδοι μέτρησης της ομοιότητας ανάμεσα σε χρονοσειρές γενικότερα, και σε σεισμικές καταγραφές ειδικότερα. Θα αναφερθούν τα υπέρ και τα κατά των μεθόδων *ετεροσυσχέτισης* και *συνοχής*, οι οποίες λειτουργούν στο πεδίο του χρόνου και των συχνοτήτων αντίστοιχα. Θα εξεταστεί ποιες σεισμικές παράμετροι και με ποιον τρόπο επηρεάζουν τις κυματομορφές καθώς και το πώς μεταβάλλεται ο βαθμός ομοιότητας από υποκειμενικές επιλογές κατά την ανάλυση των σημάτων, όπως τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται και το μήκος του χρονικού παραθύρου. Θα αναλυθεί επίσης μια μέθοδος μέτρησης μεταβολών στο μέσο διάδοσης με τη χρήση όμοιων σεισμών και θα αναφερθούν εφαρμογές της μεθόδου αυτής στην πρόγνωση ηφαιστειακών εκρήξεων. Τέλος, θα αναπτυχθεί η μέθοδος των *Διπλών Διαφορών* με χρήση της οποίας μπορεί να γίνει επαναπροσδιορισμός των σεισμικών υποκέντρων και κατά αυτόν τον τρόπο να βελτιωθεί η εικόνα της σεισμικότητας μιας περιοχής. Οι πληροφορίες που δίνουν οι όμοιοι σεισμοί παίζουν καθοριστικό ρόλο στη λεπτομέρεια που μπορεί να επιτευχθεί κατά τον επαναπροσδιορισμό όπως θα φανεί σε ορισμένες εφαρμογές που θα παρουσιαστούν στο τέλος του κεφαλαίου.

Στο Κεφάλαιο 2 θα αναλυθεί μια μέθοδος για τον αυτόματο υπολογισμό του μεγέθους σεισμικής ροπής, M_w. Το Κεφάλαιο 3 αποτελεί συνέχεια του 1ου καθώς σε αυτό θα αναπτυχθεί η μεθοδολογία για τον εντοπισμό των όμοιων σεισμών και για την ταξινόμησή τους σε ομάδες ή αλλιώς *συστάδες σμηνοσεισμών* (multiplet clusters), έναν όρο με ευρεία χρήση σε κάθε πτυχή αυτής της εργασίας. Στην αρχή περιγράφεται η τεκτονική της περιοχής μελέτης που είναι ο Δυτικός Κορινθιακός κόλπος και γίνεται αναφορά στο τοπικό δίκτυο CRL (*Corinth Rift Laboratory*) από το οποίο αντλούνται τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια εκτενής μελέτη σε ένα δείγμα σεισμών κατά τις πρώτες μέρες τις εκδήλωσης ενός ορισμένου σεισμικού σμήνους. Με σύγκριση ανάμεσα σε όλους τους συνδυασμούς κυματομορφών ανά δύο θα κατασκευαστούν πίνακες οι οποίοι δίνουν μια εικόνα της ομοιότητας ανάμεσα στις κυματομορφές καθώς και ορισμένων χαρακτηριστικών της καμπύλης ετεροσυσχέτισης. Από τους πίνακες στη συνέχεια κατασκευάζονται δενδρογράμματα τα οποία δείχνουν τον αριθμό και το μέγεθος των συστάδων σμηνοσεισμών που συγκροτούνται για διάφορες τιμές κατωφλίου ομοιότητας με τη μέθοδο ομαδοποίησης απλής σύνδεσης. Τα γεγονότα με όμοιες κυματομορφές θα καλούνται ‘*άμεσοι συγγενείς*’ ενώ υπάρχουν και ζεύγη γεγονότων εντός των συστάδων σμηνοσεισμών των οποίων οι κυματομορφές δεν είναι αρκετά όμοιες (ο βαθμός ομοιότητάς τους δεν ξεπερνάει την τιμή κατωφλίου που έχει οριστεί) και τα οποία θα καλούνται '*έμμεσοι συγγενείς*'. Η ενότητα 3.6 περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται αυτά τα γεγονότα μεταξύ τους, άρα και με κάθε άλλο γεγονός της ίδιας συστάδας σμηνοσεισμών. Τέλος, αναφέρεται η περίπτωση των τμηματικά όμοιων κυματομορφών, οι οποίες έχουν όμοια κύματα P και S αλλά διαφορετική διάρκεια ανάμεσα στις αφίξεις S-P, μια παρατήρηση που θα φανεί χρήσιμη αργότερα.

Στο Κεφάλαιο 4 θα γίνει εφαρμογή των όσων αναφέρονται στα Κεφάλαια 1 και 3 για την ανίχνευση σμηνοσεισμών σε 2 ομάδες επιλεγμένων σεισμών από τα έτη 2000-2001. Ο σκοπός είναι να γίνει επαναπροσδιορισμός της σεισμικότητας με τη χρήση τόσο των δεδομένων του καταλόγου όσο και της ετεροσυσχέτισης ανάμεσα στις κυματομορφές. Θα γίνει σύγκριση της εικόνας των επικέντρων και υποκέντρων πριν και μετά τον επαναπροσδιορισμό και θα διακριθούν ορισμένες συστάδες που ανήκουν σε ορισμένα από τα γνωστά ενεργά ρήγματα της περιοχής. Στο τέλος του κεφαλαίου θα γίνει μια αναφορά στη χρονική κατανομή της σεισμικότητας των ετών αυτών καθώς και στον τρόπο με τον οποίο εμφανίζονται χρονικά οι σεισμοί των διαφόρων συστάδων σμηνοσεισμών.

Με παρόμοιο τρόπο θα αντιμετωπιστεί και η σεισμικότητα των ετών 2005-2006 στο Κεφάλαιο 5. Η βασική διαφορά είναι ότι θα γίνει εφαρμογή μιας επιπλέον μεθόδου διόρθωσης των χρόνων άφιξης που ονομάζεται "μέθοδος των κύριων γεγονότων" (*master events*). Η διόρθωση είναι απαραίτητη διότι τα δεδομένα χρόνων άφιξης για τα έτη αυτά έχουν προκύψει από αλγόριθμο αυτόματου προσδιορισμού άφιξης φάσεων (*phase-picking*) και τα σφάλματα στους χρόνους είναι σε ορισμένες περιπτώσεις σημαντικά. Με αυτή τη μέθοδο ελαχιστοποιούνται τα σφάλματα τουλάχιστον για όσα γεγονότα ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών τα οποία παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στη συνέχεια θα επαναληφθούν για τον διορθωμένο κατάλογο οι διαδικασίες του Κεφαλαίου 4.

Το Παράρτημα Α περιέχει ορισμένα συμπληρωματικά στοιχεία για ορισμένα θέματα στα οποία θα γίνει μικρή αναφορά εντός του κειμένου των κύριων κεφαλαίων. Αυτά τα θέματα περιλαμβάνουν παρατηρήσεις που αξίζει τον κόπο να αναπτυχθούν περεταίρω, όπως το γεγονός ότι οι κυματομορφές του 'κύριου σεισμού' ενός ορισμένου σμήνους, που θα μελετηθεί στα Κεφάλαια 3 και 4, δε μοιάζουν με καμία από τις κυματομορφές των άλλων γεγονότων του σμήνους, το γεγονός ότι παρά την ομοιότητα των κυματομορφών ορισμένων σεισμών, τα υπόκεντρά τους φαίνεται να βρίσκονται μακριά μεταξύ τους, την εμφάνιση όμοιων σεισμών που οι χρόνοι γένεσής διαφέρουν κατά μερικά έτη και την περίπτωση κυματομορφών με ισχυρή αρνητική συσχέτιση. Θα γίνει, επίσης, αναφορά στη μέθοδο του *γενετικού αλγόριθμου* που χρησιμοποιείται στο Κεφάλαιο 3 για τον εντοπισμό της "αλυσίδας συγγένειας" ανάμεσα σε 'έμμεσους συγγενείς' καθώς και για ένα φίλτρο θορύβου τύπου 'αιχμής' το οποίο θα χρησιμοποιηθεί κατά την εφαρμογή της μεθόδου των κύριων γεγονότων (*master events*). Τέλος, το Παράρτημα Β περιέχει επιπλέον σχήματα σε πολλά από τα οποία γίνονται αναφορές μέσα στα κεφάλαια ενώ άλλα αποτελούν πρόσθετο υλικό από τα αποτελέσματα της μελέτης καθώς και μερικές εικόνες από άλλες εργασίες στις οποίες γίνονται αναφορές και που θα χρησιμεύσουν για σύγκριση με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφαλαιο 1

Ομοιότητα Κυματομορφών

1.1 ~ *Όμοιοι Σεισμοί*

Είναι γνωστό ότι τα σεισμικά φαινόμενα που οφείλονται σε τεκτονικά αίτια συνδέονται με τη σχετική ολίσθηση δύο τεμαχών της λιθόσφαιρας επάνω σε επιφάνειες που καλούνται ρήγματα, όταν οι ασκούμενες τάσεις επάνω σε αυτά ξεπερνούν το όριο αντοχής των πετρωμάτων. Τα ρήγματα σε χρονικές περιόδους που παρουσιάζουν σεισμική δραστηριότητα ή ασεισμικό ερπυσμό χαρακτηρίζονται ως ενεργά. Οι σεισμικές δονήσεις αποτελούν ένα μέρος της ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τα βίαια επεισόδια ολίσθησης. Από την εστία ενός σεισμικού γεγονότος εκπέμπονται ελαστικά κύματα τα οποία ακολουθούν περίπλοκες διαδρομές μέσα από στρωματοειδείς και άλλες γεωλογικές δομές. Έχοντας υποστεί πολλαπλές ανακλάσεις, διαθλάσεις, περιθλάσεις, και μετατροπές, φθάνουν τελικά και καταγράφονται στους σεισμολογικούς σταθμούς, αποτυπώνοντας μια κυματομορφή χαρακτηριστική του τρόπου με τον οποίο δημιουργήθηκαν, της διαδρομής που διάνυσαν, της ενέργειας που απελευθερώθηκε, και των ιδιοτήτων του μέσου στο οποίο διαδόθηκαν.

Είναι γνωστό, επίσης, ότι υπάρχουν σχετικά ασεισμικές περιοχές και άλλες που εμφανίζουν έντονη σεισμικότητα. Από τις σεισμικές καταγραφές υπάρχει η δυνατότητα προσδιορισμού της θέσης και του χρόνου γένεσης των σεισμών, μαζί με πολλές άλλες χαρακτηριστικές παραμέτρους. Σε διάφορες χρονικές περιόδους η εικόνα της σεισμικότητας μιας περιοχής μπορεί να ποικίλλει: από αραιή και διάσπαρτη έως πυκνά συσσωρεμένη σε μικρούς όγκους. Οι πυκνές χωρικές κατανομές σεισμικών υποκέντρων, τα οποία στην περίπτωση μικροσεισμών αφορούν σε μικροδιαρρήξεις, συνήθως καλούνται σμηνοσειρές ή **συστάδες** (*clusters*). Η εικόνα ενός «νέφους» σημείων που παρατηρούνται σε χάρτες επικέντρων ή τομές με υπόκεντρα, αντί για σαφέστερες χωρικές κατανομές σημείων επάνω σε κεκλιμένες επιφάνειες, οφείλεται κατά κύριο λόγο στα σφάλματα προσδιορισμού της θέσης των εστιών. Τα σφάλματα θέσης των μικροσεισμικών υποκέντρων που έχουν προσδιοριστεί με συμβατικούς τρόπους είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερα από τις διαστάσεις της ίδιας της σεισμικής πηγής. Παρά το γεγονός ότι επαρκεί για ορισμένους σκοπούς, δεν αποτελεί την πραγματική εικόνα της σεισμικότητας όταν αυτή εξετάζεται σε κλίμακες που πλησιάζουν τα όρια του σφάλματος.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι σεισμοί που ανήκουν σε συστάδες όχι μόνο ως προς τη χωρική τους κατανομή αλλά και ως προς τη χρονική. Η χρονική εξέλιξη της μικροσεισμικότητας μπορεί να παρουσιάζει σταδιακή τάση για ομαδοποίηση (*nucleation*) πριν από ένα ισχυρό γεγονός. Συνηθέστερα, σε μια τυπική μετασεισμική ακολουθία τα γεγονότα συσσωρεύονται χωρικά πάνω στην επιφάνεια διάρρηξης του κύριου γεγονότος σκιαγραφώντας καλύτερα το μήκος του ρήγματος που υπέστη διάρρηξη ενώ η χρονική τους κατανομή παρουσιάζει μια έντονη συσπείρωση η οποία φθίνει εκθετικά με την πάροδο του χρόνου (*Νόμος του Omori*). Μέσα από τους ισχυρά ομαδοποιημένους σεισμούς αναδύεται μια έννοια η οποία ονομάζεται σεισμικό ζεύγος (*earthquake pair* ή ***doublet)*** ή ζεύγος "***όμοιων σεισμών***" όπως θα καλείται σε αυτή την εργασία. Ένα ή περισσότερα τέτοια ζεύγη γεγονότων μπορούν να δημιουργηθούν όταν ένας σεισμός προκαλεί αιτιακά ή, μάλλον, διεγείρει τη γένεση ενός δεύτερου σεισμού στην άμεση γειτονία του και συνήθως σε ένα σχετικά στενό χρονικό διάστημα, ή όταν, λόγω της κατάστασης της ευρύτερης περιοχής, οι ασκούμενες τάσεις έχοντας φτάσει τα όρια αντοχής ορισμένων γειτονικών κλείθρων (*asperities*), ή διαφόρων τμημάτων ενός κλείθρου, τα διαρρηγνύουν.

Στη βιβλιογραφία η έννοια του **Σεισμικού Ζεύγους** (*earthquake pair* ή ***doublet***) χρησιμοποιείται μερικές φορές πιο γενικευμένα, ιδιαίτερα όταν αντιμετωπίζεται σε μεγάλη κλίμακα, προκειμένου να χαρακτηρίσει διαδοχικές διαρρήξεις γειτονικών κλείθρων ή επαναλαμβανόμενες διαρρήξεις ενός ορισμένου κλείθρου. Οι σεισμοί αυτοί καλούνται μερικές φορές «*δίδυμοι σεισμοί»*, καθώς δε μπορεί να αποδοθεί στον δεύτερο η έννοια του μετασεισμού ως προς τον πρώτο αν αυτός χαρακτηριζόταν ως κύριος, αν και βρίσκεται στην ίδια περιοχή και, πιθανότατα, στο ίδιο ρήγμα. Για παράδειγμα θεωρούνται ως «δίδυμοι» (*doublet*) (Gibowicz & Lasocki, 2005) δύο σεισμοί των οποίων τα υπόκεντρα δεν απέχουν παραπάνω από 100km, το μέγεθος δεν διαφέρει περισσότερο από 0.2 μονάδες και το χρονικό διάστημα που τους χωρίζει είναι μικρότερο από μερικά χρόνια (στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν σεισμοί με M≥5.3). Ανάλογοι ορισμοί των «δίδυμων σεισμών» δίνονται σε όσες περιπτώσεις η μελέτη γίνεται αποκλειστικά και μόνο με δεδομένα καταλόγου, χωρίς διαθέσιμες κυματομορφές.

Σε αυτή την εργασία θα μελετηθεί ένας αυστηρότερος ορισμός για τους όμοιους σεισμούς:

*Δύο σεισμικά γεγονότα καλούνται **όμοιοι σεισμοί** όταν οι **πλήρεις** καταγραφές τους είναι **όμοιες***

Θα αναπτυχθεί στις αμέσως επόμενες παραγράφους υπό ποια έννοια θεωρούνται δύο καταγραφές ως όμοιες. Ο ορισμός αυτός είναι ‘τυφλός’ μπροστά στους χρόνους γένεσης, τις υποκεντρικές θέσεις, τους μηχανισμούς γένεσης και τα μεγέθη των υπό σύγκριση σεισμών. Είναι όμως φυσικό επακόλουθο της κινηματικής θεωρίας των ελαστικών κυμάτων και της φυσικής ερμηνείας των σεισμικών καταγραφών (*Aki & Richard 1980; Lay & Wallace, 1995*) πως σε ένα ρεαλιστικό μοντέλο Γης (με όλη της την πολυπλοκότητα) αν καταγραφούν δύο όμοια σεισμικά σήματα στην ίδια συνιστώσα του ίδιου σταθμού η πιθανότητα να διαφέρουν σημαντικά όλες οι εστιακές τους παράμετροι είναι πολύ μικρή. Στην πραγματικότητα η ομοιότητα κρίνεται κάθε φορά από τη «σκοπιά» του συγκεκριμένου σταθμού στον οποίο έφτασαν και καταγράφηκαν τα σεισμικά κύματα. Θεωρητικά υπάρχουν κάποιες ειδικές περιπτώσεις στις οποίες δύο κυματομορφές της *κατακόρυφης* συνιστώσας μπορεί να είναι όμοιες αλλά τα επίκεντρα των σεισμών να βρίσκονται συμμετρικά ως προς τον σταθμό και ανάλογα συμμετρική εικόνα να παρουσιάζουν η δομή και οι σεισμικές ακτίνες των αντίστοιχων φάσεων και έτσι οι κυματομορφές των δύο σεισμών τελικά να είναι όμοιες. Η πιθανότητα ύπαρξης τέτοιων περιπτώσεων είναι αυτή που θεωρείται μικρή και γίνεται ακόμα μικρότερη αν, επιπλέον, ληφθούν υπόψη οι δύο οριζόντιες συνιστώσες για τις οποίες δεν ισχύει η αντίστοιχη συμμετρία. Συνεπώς, τουλάχιστον *κάποιες* από τις εστιακές παραμέτρους δύο σεισμών με όμοιες καταγραφές οφείλουν να είναι έως έναν βαθμό παραπλήσιες.

Ανάλογα με το βαθμό ομοιότητας των σημάτων, η ταύτιση των παραμέτρων τους μπορεί να είναι από μερική έως πλήρης. Σε αντίθεση με τον γενικότερο ορισμό που αναφέρθηκε νωρίτερα με τον οποίο οι «δίδυμοι σεισμοί» (*doublet*) προσδιορίζονται από δεδομένα καταλόγου (στη συγκεκριμένη εργασία των Gibowicz & Lasocki (2005) από δεδομένα 26 ετών με σεισμούς M≥5.3), χωρίς κυματομορφές, με τον ορισμό που δόθηκε σε αυτή την ενότητα η άμεση γειτονία ενός ζεύγους όμοιων σεισμών περιορίζεται σε στενότερες περιοχές του χώρου ενώ η διαφορά μεγέθους επηρεάζει το αποτέλεσμα μόνο λόγω της σχετικής διαφοράς στη διάρκεια της σεισμικής πηγής, η οποία αν αποσυνελιχθεί από την κυματομορφή του μεγαλύτερου σεισμού (ή αντίστοιχα αν συνελιχθεί με την κυματομορφή του μικρότερου σεισμού) έχει τη δυνατότητα να δώσει αρκετά όμοιο σήμα με αυτό ενός σεισμού μικρότερου μεγέθους ο οποίος έχει τις υπόλοιπες σεισμικές παραμέτρους όμοιες.

Ένα πλήθος όμοιων σεισμών, που από τα παραπάνω αναμένεται να έχει μια ιδιαίτερα πυκνή χωρική κατανομή, καλείται **Συστάδα Σμηνοσεισμών** (*Multiplet Cluster*) ή “επαναλαμβανόμενοι σεισμοί” (*repeating earthqukes*). Ένας ακόμη χαρακτηρισμός που θα υιοθετηθεί κατά την ανάλυση της μεθοδολογίας εντοπισμού σμηνοσεισμών στο 3^{ο} Κεφάλαιο είναι αυτός της «*Σεισμικής Οικογένειας*» (*Earthquake Family*) με συχνούς όρους τους *άμεσα* και *έμμεσα* «*συγγενείς*» σεισμούς. Η ιεραρχία μιας σεισμικής οικογένειας καθορίζεται καθαρά σε επίπεδο ομοιότητας των σημάτων των σεισμών που την αποτελούν. Όμως, ενώ οι έννοιες της ομοιότητας μπορούν να μετρηθούν αντικειμενικά με συγκεκριμένες διαδικασίες, η διάκριση σε Συστάδες Σμηνοσεισμών και οι χαρακτηρισμοί της «συγγένειας» μεταξύ των γεγονότων μιας οποιασδήποτε συστάδας εξαρτώνται από κάποιες παραμέτρους (π.χ. μια τιμή κατωφλίου) που επιλέγονται, αν όχι αυθαίρετα, τουλάχιστον υποκειμενικά. Μέσα από κάποια κριτήρια μπορεί να γίνει λιγότερο υποκειμενική η επιλογή αυτή αλλά ουσιαστικά η διάκριση σε επιμέρους συστάδες γίνεται για λόγους ευκολίας της ανάλυσης και συνδέεται *πάντοτε* με το βαθμό ομοιότητας ο οποίος εξετάζεται.

Αναφέρεται στη βιβλιογραφία (*Geller & Mueller, 1980*) πως οι όμοιοι σεισμοί κατανέμονται σε ενδοαποστάσεις (*inter-event distance*) που δεν είναι μεγαλύτερες από το ¼ του δεσπόζοντος μήκους κύματος και ότι προκαλούνται από επανειλημμένη διάρρηξη του ίδιου κλείθρου (*asperity*). Υπάρχουν διάφορες απόψεις για το μηχανισμό της δημιουργίας σεισμικών ζευγών και για τη σχέση τους με τους προσεισμούς και τους μετασεισμούς. Είναι γενικά αποδεκτό πως οι μετασεισμοί δημιουργούνται από αλλαγές στην κατανομή των τάσεων που προκαλεί ο κύριος σεισμός γύρω από την περιοχή της διάρρηξης (*Felzer et al., 2004*), ωστόσο υπάρχουν διάφορες απόψεις για το αν οι προσεισμοί και τα σεισμικά ζεύγη έχουν τον ίδιο φυσικό μηχανισμό με αυτόν των μετασεισμών. Θεωρείται πως σεισμικά ζεύγη (*doublet*) και οι σμηνοσεισμοί (*multiplet*) παρατηρούνται μόνο σε περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη συγκέντρωση μικρών, απλών κλείθρων (*Felzer et al., 2004* με αναφορές σε *Lay & Kanamori, 1980*) ενώ οι προσεισμοί προκαλούνται από το στάδιο πυρηνογένεσης (*nucleation phase*) του επικείμενου κύριου σεισμού (*Felzer et al., 2004* με αναφορές σε *Ohnaka 1993, Dodge et al., 1995, Hurukawa 1998*). Ωστόσο, έχει προταθεί ότι οι προσεισμοί, οι μετασεισμοί και τα σεισμικά ζεύγη ή σμηνοσεισμοί (*doublets/multiplets*) έχουν έναν κοινό φυσικό μηχανισμό δημιουργίας (*Felzer et al., 2004*).

Σεισμικά ζεύγη έχουν παρατηρηθεί σε μεγάλο αριθμό σε ορισμένες περιοχές. Στα νησιά του Σολομώντα (*Solomon Islands*) σε ένα σύμπλεγμα ζωνών υποβύθισης ορισμένων μικροπλακών ανάμεσα στην Ινδο-Αυστραλιανή και την πλάκα του Ειρηνικού, Ανατολικά της Νέας Γουινέας, έχει παρατηρηθεί ο μεγαλύτερος αριθμός σμηνοσεισμών (*multiplet*) παγκοσμίως, με ιδιαίτερο γνώρισμα ορισμένοι κύριοι σεισμοί να εκδηλώνονται κατά ζεύγη (*doublet*) συγκρίσιμου μεγέθους. Αναφέρονται (*Lay & Kanamori, 1980*) κύριοι διπλοί σεισμοί (M_S7.7) στις 14 και 26 Ιουλίου 1971 καθώς και άλλοι δύο με M_S7.9 και M_S7.7 στις 20/7/1975 με διαφορά 3^h20^m. Ο ρυθμός τεκτονικής σύγκλισης στην περιοχή ανέρχεται σε 11cm/yr και η συχνή εμφάνιση σεισμικών ζευγών φανερώνει πως η διέγερση γειτονικών γεγονότων λειτουργεί έντονα σε αυτή την περίπτωση.

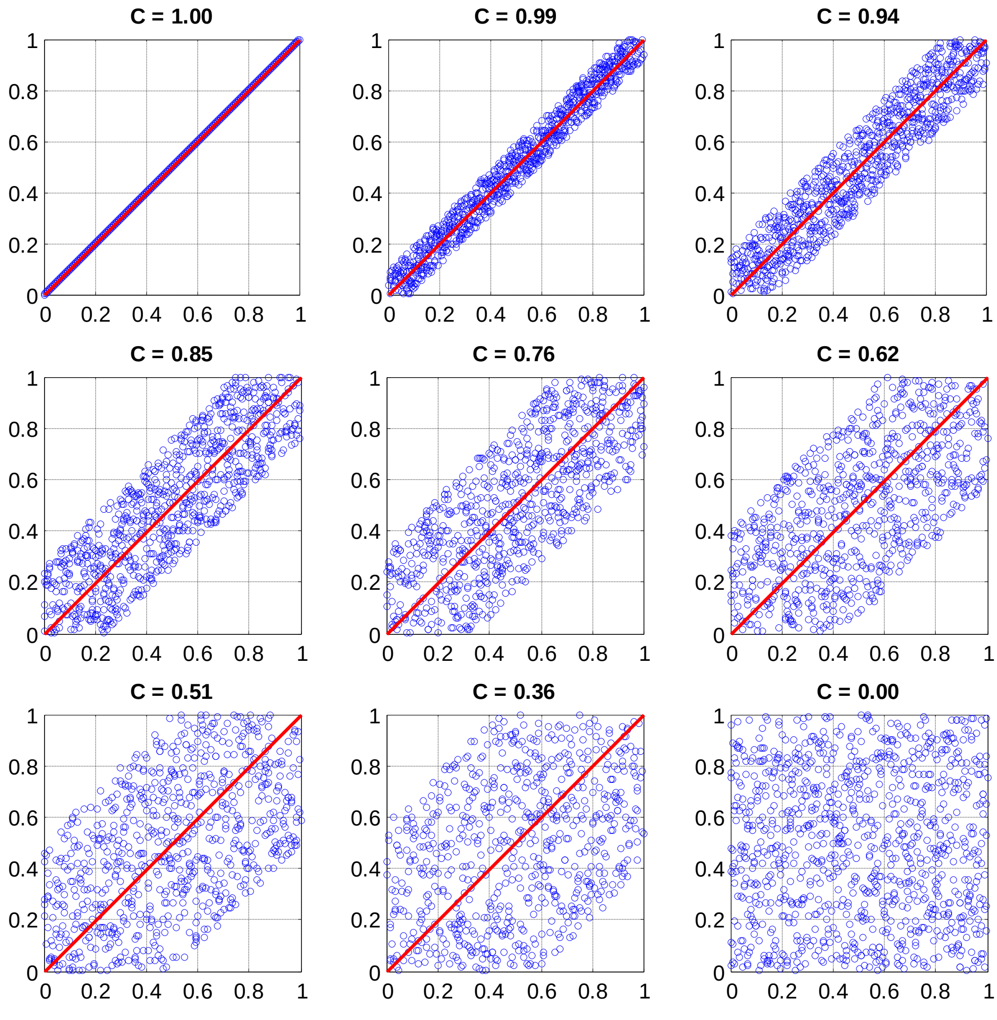
Σε αντίθεση με άλλους σεισμούς σε ζώνες υποβύθισης οι οποίοι εμφανίζουν πολύπλοκα κύματα χώρου που είτε ξεκινούν με μικρότερα σεισμικά γεγονότα ή περιέχουν έναν μεγάλο αριθμό μικρών γεγονότων αμέσως μετά την εκδήλωση του κύριου σεισμού, για τους διπλούς αυτούς σεισμούς του 1971 και 1975 στα νησιά του Σολομώντα παρατηρήθηκε ότι τα κύματα χώρου ήταν ιδιαίτερα ωστικά (*impulsive*) με οξεία πρώτη κίνηση. Αυτό ερμηνεύεται από την παρουσία μεγάλων διακριτών κλείθρων (*asperities*), δηλαδή περιοχών υψηλής τάσης, όμοιου μεγέθους, κατανεμημένων κατά μήκος της επαφής των πλακών, ενώ σε άλλες ζώνες υποβύθισης τα κλείθρα είναι ανόμοια και κατανεμημένα με πιο πολύπλοκο τρόπο. Με την ύπαρξη δύο μεγάλων, συγκρίσιμου μεγέθους, γειτονικών κλείθρων, η διάρρηξη του ενός προκαλεί ανακατανομή των τάσεων και φορτίζοντας περισσότερο από πριν το γειτονικό κλείθρο είναι δυνατόν να διεγείρει τη διάρρηξή του μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Περισσότεροι επαναλαμβανόμενοι σεισμοί στην ίδια περιοχή αναφέρονται (*Wesnousky et al., 1986*) στις 15/6/1966 (doublet: M_S = 7.7, 7.3), 20-21/5/1977 (4 multiplet: M_S = 6.7, 7.5, 7.5, 7.5), 4-5/9/1978 (doublet: M_S = 6.9, 7.1).

1.2 ~ *Συναρτήσεις Γραμμικής Συσχέτισης*

Έστω ένα σύνολο N σημείων του επιπέδου με συντεταγμένες (x,y). Αν υπάρχει κάποια γραμμική εξάρτηση των y από τα x, δηλαδή ισχύει κατά προσέγγιση μια σχέση της μορφής y=f(x)=A+Bx, τότε ο βαθμός στον οποίο η ευθεία y=A+Bx περιγράφει την κατανομή των (x,y) εκφράζεται από τον **απλό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης**:

$$C = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})\cdot(y_i-\bar{y})}{\frac{1}{N}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i-\bar{x})^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(y_i-\bar{y})^2}} \tag{1.1}$$

Αν η σταθερά A=0, τότε η ευθεία y=Bx δείχνει μια σχέση αναλογίας μεταξύ x και y. Αν 1≥B>0 όταν το x αυξάνεται τότε θα αυξάνεται και το y με ανάλογο τρόπο – το ίδιο και αντίστροφα. Αν -1≤B<0 όταν το x αυξάνεται τότε το y θα μειώνεται με ανάλογο τρόπο – το ίδιο και αντίστροφα.

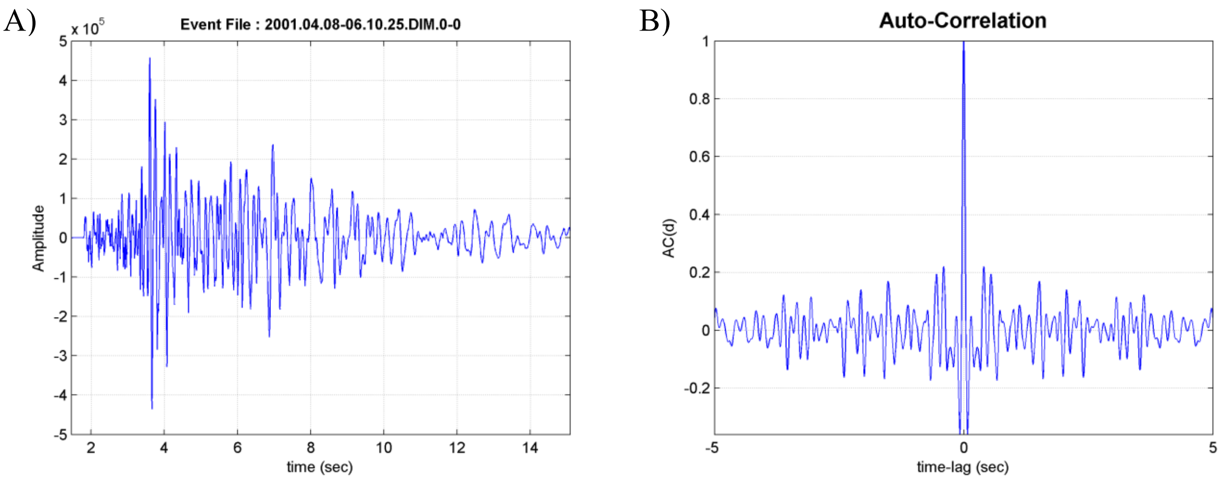


Σχήμα 1.1: γραφική αναπαράσταση 9 περιπτώσεων κατανομής σημείων γύρω από την ευθεία y=x με τους αντίστοιχους απλούς συντελεστές γραμμικής συσχέτισης C για την κάθε περίπτωση (επάνω από κάθε πλαίσιο). Στην τελευταία περίπτωση οι τιμές του y κατανέμονται με τελείως τυχαίο τρόπο και έτσι C=0. Αν η κλίση της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει αρνητική, το ίδιο θα ισχύει για τον συντελεστή (αρνητικής) γραμμικής συσχέτισης.

Έστω τώρα η χρονοσειρά **x** της καταγραφής ενός σεισμού σε μια συνιστώσα κάποιου σταθμού. Η γραμμική συσχέτιση αυτής της χρονοσειράς μήκους **N** με ένα αντίγραφό της μετατοπισμένο κατά μια **καθυστέρηση d** (*lag*) (όπου το d εδώ εκφράζει τιμή δείκτη αλλά συνήθως αντιστοιχεί σε κάποια προσημασμένη χρονική διάρκεια (*time-lag*)) μπορεί να υπολογιστεί με τη γραμμική συνάρτηση **Αυτοσυσχέτισης** (*Linear **Auto-Correlation** Function*):

$$AC(d) = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \bar{x}\right)\cdot\left(x_{i-d} - \bar{x}\right)}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(x_i - \bar{x}\right)^2} \tag{1.2}$$

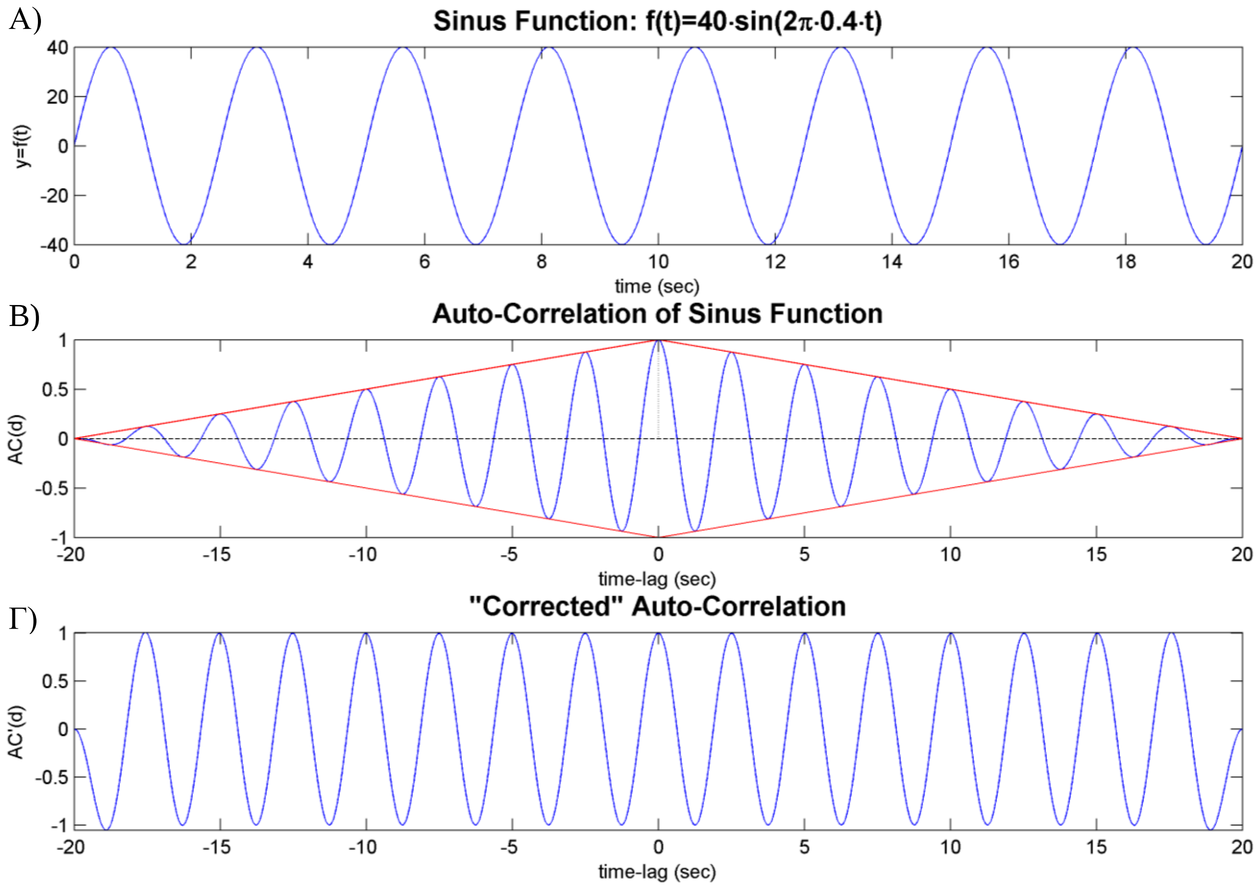
όπου $\bar{x} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i$ η μέση τιμή της χρονοσειράς **x**. Γραφικά η AC(d) μπορεί να απεικονιστεί αν τοποθετηθούν δύο αντίγραφα της χρονοσειράς x μετατοπισμένα το ένα σε σχέση με το άλλο κατά **d** δείγματα στον άξονα των χρόνων, στη συνέχεια δημιουργηθούν ζεύγη τιμών (x_i,x_{i-d}) από τις τιμές x_i της αρχικής χρονοσειράς και x_{i-d} της μετατοπισμένης, δηλαδή τα ζεύγη που προκύπτουν από τα σημεία των δύο μετατοπισμένων κυματομορφών που φαίνεται να έχουν *κοινούς χρόνους* όταν η σχετική χρονική μετατόπιση γίνει κατά μια ποσότητα που αντιστοιχεί σε διάρκεια d δειγμάτων, και εξεταστεί ο απλός συντελεστής γραμμικής συσχέτισης των (x_i,x_{i-d}), τα οποία αν τοποθετηθούν σε άξονες θα βρίσκονται κατανεμημένα κατά μήκος μιας ευθείας που περνάει από την αρχή των αξόνων με μια διασπορά γύρω από αυτήν (Σχήματα 1.1). Η μη κανονικοποιημένη μορφή της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης (χωρίς τον παρονομαστή στην εξίσωση 1.2) ονομάζεται συνάρτηση αυτο-συνδιακύμανσης (*auto-covariance*) ενώ ο ίδιος ο παρονομαστής είναι η διακύμανση $\boldsymbol{\sigma^2}$.



Σχήμα 1.2: A) κυματομορφή ενός μικροσεισμού όπως καταγράφθηκε στην κατακόρυφη συνιστώσα ενός σταθμού (DIM), B) γραφική παράσταση της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης του σεισμού αυτού.

Το κατά πόσο καλά ή όχι περιγράφεται η κατανομή των σημείων (x_i,x_{i-d}) από αυτή την ευθεία, το δίνει ο συντελεστής συσχέτισης της συγκεκριμένης καθυστέρησης d: όσο αυτός πλησιάζει τη μονάδα τόσο καλύτερη είναι η «ταύτιση» των σημείων με την ευθεία, ενώ όσο αυτός τείνει στο μηδέν τόσο πιο διάσπαρτα θα είναι τα σημεία των ζευγών (x_i,x_{i-d}) γύρω από την ευθεία. Η κλίση της ευθείας δίνει τη μέση αναλογία των πλατών μεταξύ της αρχικής και της χρονικά μετατοπισμένης χρονοσειράς. Εξ' ορισμού: AC(d=0) = 1, καθώς για μηδενική χρονική καθυστέρηση οι δύο χρονοσειρές ταυτίζονται απόλυτα ενώ αν η χρονοσειρά x είναι περιοδική τότε η AC(d) θα παρουσιάζει ισχυρά τοπικά μέγιστα κάθε φορά που η χρονική καθυστέρηση ισούται με ένα ακέραιο πολλαπλάσιο της δεσπόζουσας περιόδου.

Στο Σχήμα 1.2 φαίνεται πως η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης έχει δύο κλάδους εκατέρωθεν του d=0 που μοιάζουν, και είναι, συμμετρικοί. Στις περισσότερες εφαρμογές της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης παρουσιάζεται μόνο ο θετικός κλάδος των καθυστερήσεων καθώς ο αρνητικός δεν δίνει περισσότερη πληροφορία. Στην περίπτωσή που εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο, ωστόσο, χρειάζεται αυτή η συμμετρική εικόνα ώστε να συγκριθεί στη συνέχεια με τη γενικότερη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης η οποία παίζει κυρίαρχο ρόλο σε όλες τις εφαρμογές με όμοιους σεισμούς. Στον μη αρνητικό κλάδο η συνάρτηση ξεκινάει από την τιμή 1, φθίνει και μηδενίζεται (για πρώτη φορά) σε μια ορισμένη χρονική καθυστέρηση, έστω την $\boldsymbol{\tau_o}$. Στη χρονική αυτή καθυστέρηση οι δύο κυματομορφές, η αρχική και το μετατοπισμένο κατά $\boldsymbol{\tau_o}$ αντίγραφό της, παρουσιάζονται γραμμικά ανεξάρτητες (όπως στο Σχήμα 1.1, στο κάτω δεξί πλαίσιο με C=0). Η τιμή $\boldsymbol{\tau_o}$ παρέχει χρήσιμη πληροφορία στην περίπτωση που η κυματομορφή είναι μια χαοτική χρονοσειρά καθώς είναι απαραίτητη η γνώση της για την κατασκευή του διανύσματος καθυστέρησης (*delay vector*) που με τη σειρά του χρησιμοποιείται για την ανακατασκευή ενός χώρου καταστάσεων, ισοδύναμου έως έναν βαθμό με τον αρχικό, μέσα από τον οποίο μπορεί να πραγματοποιηθεί μια ποιοτική ανάλυση του μη-γραμμικού δυναμικού συστήματος από το οποίο προέρχεται (Παπαϊωάννου, 2000).



Σχήμα 1.3: Α) μια ημιτονική συνάρτηση ως χαρακτηριστικό παράδειγμα περιοδικής χρονοσειράς, Β) η αυτοσυσχέτιση της παραπάνω χρονοσειράς. Με κόκκινες γραμμές παρουσιάζονται οι περιβάλλουσες της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης, Γ) η «διορθωμένη» συνάρτηση αυτοσυσχέτισης ως προς την προηγούμενη περιβάλλουσα. Ο χρονικός άξονας στα (Β) και (Γ) δείχνει χρονικές καθυστερήσεις και έχει διπλάσιο μήκος από τον χρονικό άξονα του (Α). Παρατηρείται η περιοδική εμφάνιση τιμών 1 και -1 στο (Γ) σε χρονικές καθυστερήσεις $d=k{\cdot}\tau_s$ με k=1,2….,N που αντιστοιχούν σε ακέραια πολλαπλάσια της περιόδου του ημιτόνου ($T=\tau_s$=2.5sec), με τα -1 (αρνητικές συσχετίσεις) να εμφανίζονται με διαφορά φάσης μιας ημιπεριόδου ως προς τα +1 (θετικές συσχετίσεις).

Ένα δεύτερο χαρακτηριστικό που παρατηρείται είναι ότι οι τιμές της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης μιας σεισμικής καταγραφής εμφανίζονται να ταλαντώνονται γύρω από την ευθεία AC=0 καθώς αυξάνονται κατά απόλυτη τιμή οι χρονικές καθυστερήσεις. Ύστερα δηλαδή από τον πρώτο μηδενισμό στη χρονική καθυστέρηση $\boldsymbol{\tau_o}$, η AC αποκτά μια τοπικά ελάχιστη αρνητική τιμή, στη συνέχεια γίνεται αύξουσα, ξαναμηδενίζεται και συνεχίζει να αυξάνεται φθάνοντας τελικά σε ένα δευτερεύον τοπικό μέγιστο σε μια χρονική καθυστέρηση, έστω $\boldsymbol{\tau_s}$ κ.ο.κ. Το δευτερεύον αυτό θετικό μέγιστο εκφράζει το βαθμό περιοδικότητας του σήματος και η χρονική καθυστέρηση $\boldsymbol{\tau_s}$ ονομάζεται **δεσπόζουσα περίοδος**. Ακόμα και σε απλές περιοδικές συναρτήσεις (π.χ. σε ένα ημίτονο) το δευτερεύον μέγιστο είναι πάντοτε μικρότερο από τη μονάδα καθώς ο παρονομαστής της εξίσωσης (1.2) είναι σταθερός ενώ ο αριθμητής πάντα μικρότερος, αφού για χρονικές καθυστερήσεις $d \neq 0$ υπάρχουν d εν γένει μη μηδενικά δείγματα της κάθε χρονοσειράς που πολλαπλασιάζονται με το μηδέν λόγω της προσθήκης μηδενικών (*zero padding*) στα άκρα των χρονοσειρών προκειμένου να έχουν και οι δύο το ίδιο μήκος. Άρα υπάρχει μια περιβάλλουσα (*envelope*) στα πλάτη της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης (Σχήμα 1.3_B κόκκινη γραμμή) η οποία ξεκινάει από την τιμή 1 (ή -1 για τις αρνητικές τιμές της AC) για d=0 και τείνει *γραμμικά* προς το 0 όσο αυξάνεται κατά απόλυτη τιμή η χρονική καθυστέρηση d. Στην περίπτωση μιας απόλυτα περιοδικής συνάρτησης τα δευτερεύοντα μέγιστα καθώς και τα αντίστοιχα τοπικά ελάχιστα «αγγίζουν» αυτήν την περιβάλλουσα.

Αν η χρονοσειρά παρασταθεί ως $y_i=f(t_i)$ με $i=1,2,\ldots,n$ τότε η περιβάλλουσα $\mathbf{C_{e\pm}}$ περιγράφεται από ευθύγραμμα τμήματα που παίρνουν την τιμή ±1 για d=0 και την τιμή μηδέν για $d=\pm(t_n-t_1)$. Οι τιμές αυτές μπορούν να υπολογιστούν για το θετικό τμήμα της περιβάλλουσας τόσο για τις αρνητικές όσο και για τις θετικές χρονικές καθυστερήσεις. Αν στη συνέχεια διαιρεθεί η χρονοσειρά της αυτοσυσχέτισης στοιχείο προς στοιχείο με τη χρονοσειρά της περιβάλλουσας προκύπτει μια «διορθωμένη» συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (Σχήμα $1.3_Γ$) στην οποία έχει ανακτηθεί η πληροφορία της περιοδικής ομοιότητας, δηλαδή προκύπτουν τιμές ±1 κάθε φορά που το μετατοπισμένο κατά d αντίγραφο της αρχικής, περιοδικής χρονοσειράς, ταυτίζεται στο κοινό της τμήμα με την αρχική (υπενθυμίζεται σε αυτό το σημείο πως για μια μετατόπιση κατά d δείγματα, ακριβώς d δείγματα της κάθε χρονοσειράς θα βρίσκονται έξω από το παράθυρο στο οποίο εξετάζεται η γραμμική συσχέτιση και πολλαπλασιάζονται με μηδενικά δείγματα που έχουν προστεθεί πριν την αρχή και μετά το πέρας της κάθε μιας). Στην πράξη με τη διαίρεση αυτή, όταν το σήμα είναι περιοδικό, τα τοπικά ακρότατα μπορεί να ξεπεράσουν κατά μια μικρή ποσότητα την τιμή +1 (ή -1) λόγω αριθμητικών σφαλμάτων και λόγω του γεγονότος ότι διατίθενται διακριτά δείγματα και όχι συνεχείς τιμές.

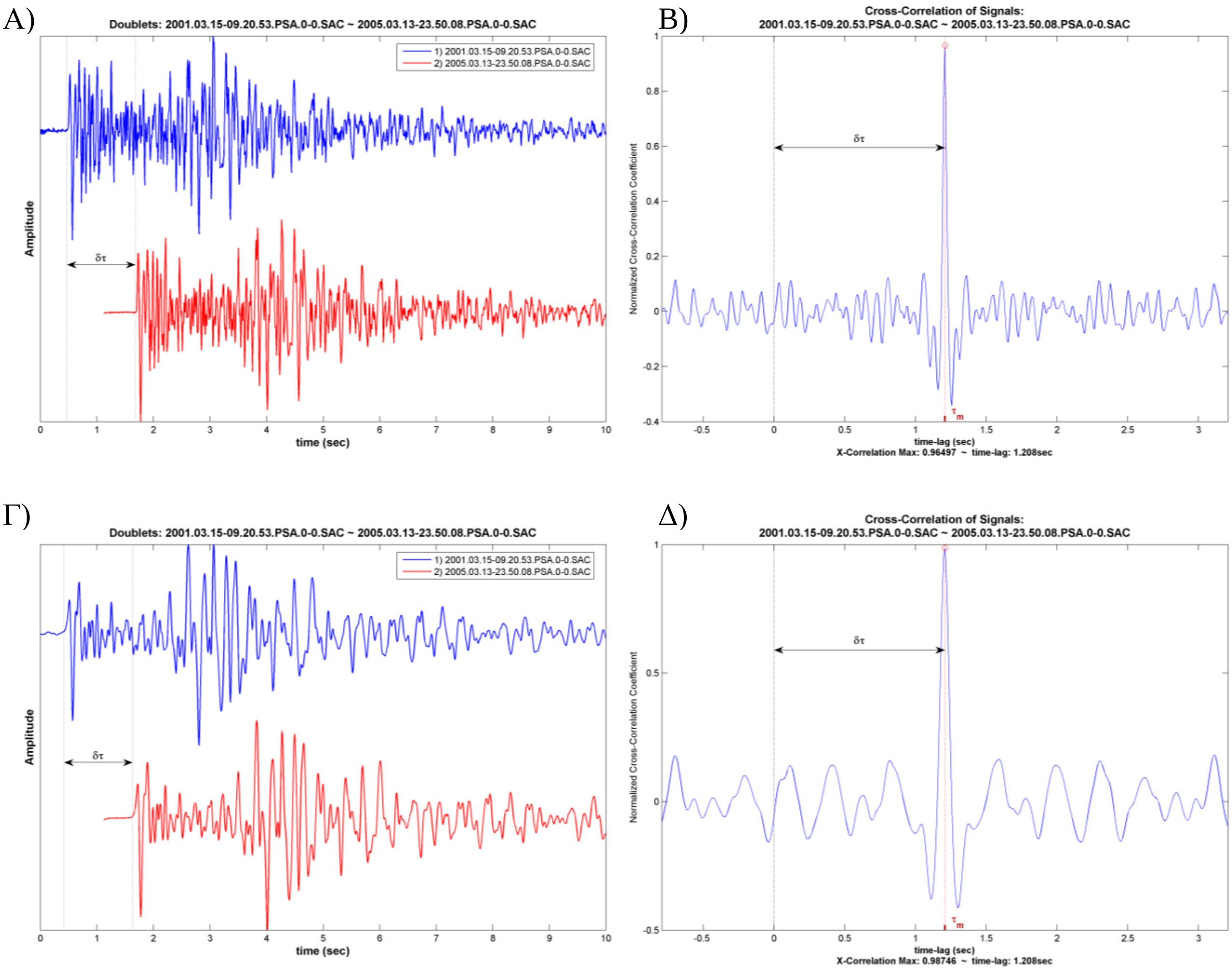
Η συνάρτηση της περιβάλλουσας, $\mathbf{C_{e\pm}}$, για χρονική καθυστέρηση **d** μετρούμενη σε δευτερόλεπτα και $\mathbf{t_1}$, $\mathbf{t_n}$ τους χρόνους του πρώτου και τελευταίου δείγματος της χρονοσειράς σε δευτερόλεπτα, είναι:

$$C_{e\pm}(d) = \pm\left(1 - \frac{|d|}{t_n - t_1}\right) \tag{1.3}$$

Έστω, τώρα, δύο χρονοσειρές x και y με x≠y αλλά οι οποίες «μοιάζουν» μεταξύ τους. Ένα μέτρο ποσοτικοποίησης της ομοιότητάς τους δίνει η Γραμμική **Συνάρτηση Ετεροσυσχέτισης** (*Linear **Cross-Correlation** Function*):

$$\boxed{XC(d) = \frac{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})\cdot(y_{i-d} - \bar{y})}{\frac{1}{N}\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(y_{i-d} - \bar{y})^2}}} \tag{1.4}$$

όπου $\bar{y} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_i$ η μέση τιμή της χρονοσειράς **y**. Αν οι χρονοσειρές δεν έχουν το ίδιο μήκος τότε το N δηλώνει το μήκος της μεγαλύτερης χρονοσειράς ενώ γίνεται προσθήκη μηδενικών (*zero-padding*) στη μικρότερη χρονοσειρά μέχρι να αποκτήσει και αυτή μήκος N.



Σχήμα 1.4: Α) δύο κανονικοποιημένες αφιλτράριστες κυματομορφές όμοιων σεισμών που δεν βρίσκονται στοιχισμένες χρονικά στη χρονική καθυστέρηση της βέλτιστης ταύτισης ($\boldsymbol{\tau_m}$). Για να επιτευχθεί η βέλτιστη ταύτιση πρέπει η κόκκινη καταγραφή να μετατοπιστεί χρονικά προς τα δεξιά κατά χρόνο $\delta\tau=\boldsymbol{\tau_m}$. Β) η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης των κυματομορφών του (Α) με το $\mathbf{XC_{max}}$ να βρίσκεται σε χρόνο $d=\boldsymbol{\tau_m}=\delta\tau$. Παρατηρείται στο (Β) ότι υπάρχει μια σχετική συμμετρία γύρω από την ευθεία $d=\boldsymbol{\tau_m}$. Γ) οι ίδιες κυματομορφές με αυτές του σχήματος (Α) αλλά περασμένες από ζωνοπερατό φίλτρο butterworth μεταξύ 0.5-5Hz. Δ) η ετεροσυσχέτιση για τις φιλτραρισμένες κυματομορφές του σχήματος (Γ).

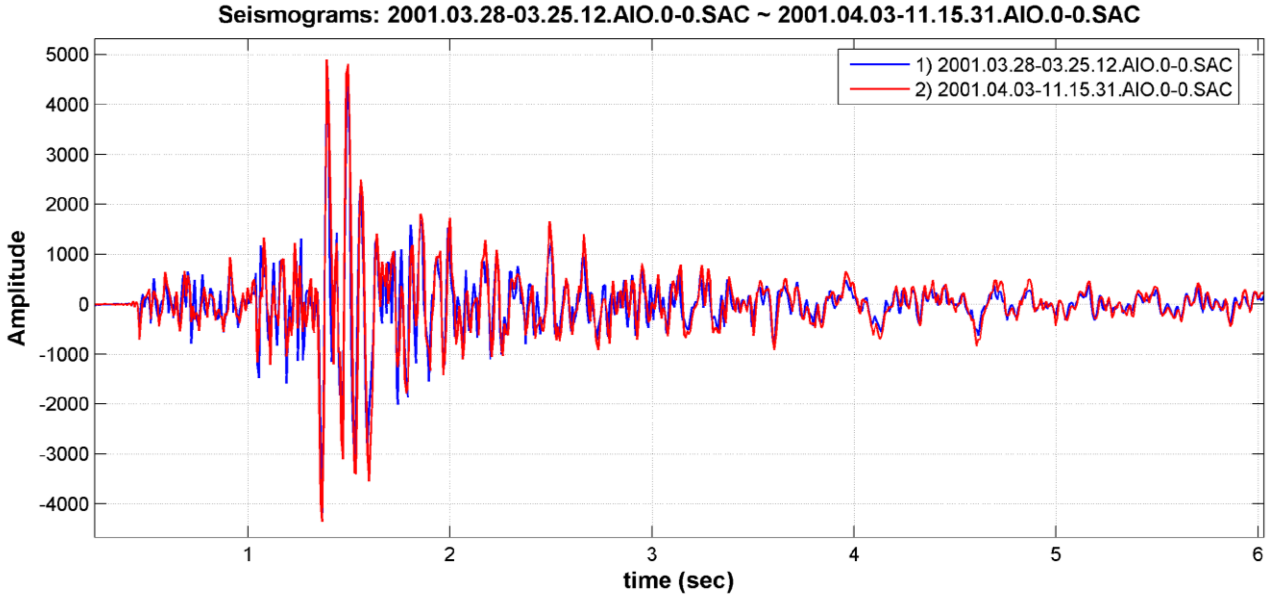
Η συνάρτηση AC αποτελεί υποπερίπτωση της XC. Για μια δεδομένη χρονική καθυστέρηση d η συνάρτηση XC(d) είναι ισοδύναμη με τον απλό συντελεστή γραμμικής συσχέτισης: τα ζεύγη σημείων (x,y) μετατράπηκαν σε χρονοσειρές x(t), y(t) με το t να είναι απλώς ο αύξων αριθμός που μπαίνει ως δείκτης στα x_t, y_{t-d}. Στην περίπτωση που οι x, y είναι σεισμικές καταγραφές, αν αφαιρεθεί η μέση τιμή από τις x, y τότε αυτές θα κυμαίνονται γύρω από την ευθεία του άξονα των χρόνων. Στη συνέχεια αναζητείται μια σχέση αναλογίας της μορφής y=Bx της οποίας ο απλός συντελεστής γραμμικής συσχέτισης είναι η αντίστοιχη τιμή της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης XC για τη δεδομένη χρονική καθυστέρηση d διορθωμένος κατά έναν παράγοντα της μορφής της εξ. 1.3.

Αν σχεδιαστεί η συνάρτηση AC (*αυτοσυσχέτιση*) μιας τυχούσας χρονοσειράς τόσο για θετικά όσο και για αρνητικά **d** θα προκύψει μια συμμετρική καμπύλη ως προς την ευθεία d=0 στην οποία η AC παρουσιάζει ολικό μέγιστο (μονάδα). Κατά αυτή την έννοια το συμμετρικό σκέλος της AC, όπως ήδη αναφέρθηκε, δε δίνει κάποια επιπλέον πληροφορία και μπορεί να αγνοηθεί. Αν η χρονοσειρά y διαφέρει από την x *μόνο* κατά μια χρονική καθυστέρηση $\delta\tau=\boldsymbol{\tau_m}$, ενώ το *σχήμα* της κυματομορφής y είναι ακριβώς ίδιο με εκείνο της x, τότε και η (διορθωμένη κατά τον παράγοντα της εξ. 1.3) XC θα είναι *απόλυτα* συμμετρική ως προς την ευθεία $d=\delta\tau=\boldsymbol{\tau_m}=t_{do}-t_o$, όπου $\mathbf{d_o}$ η τιμή του δείκτη d (που εισάγεται στο y_{i-d}) για την οποία εμφανίζεται **το ολικό μέγιστο της XC** στο οποίο θα γίνεται αναφορά με τον συμβολισμό $\mathbf{XC_{max}}$ (σημειώνεται ότι στη βιβλιογραφία εμφανίζεται πολλές φορές η ετεροσυσχέτιση με το σύμβολο **R** και το μέγιστό της με $\mathbf{R_{max}}$). Στη γενική περίπτωση δύο «περίπου όμοιων» χρονοσειρών (με *μικρές* διαφορές στο σχήμα τους) αναμένεται τα δύο σκέλη εκατέρωθεν της ευθείας $d = t_{do} \equiv \boldsymbol{\tau_m}$ να είναι «περίπου συμμετρικά», τουλάχιστον για ένα περιορισμένο εύρος τιμών γύρω από το $\boldsymbol{\tau_m}$.

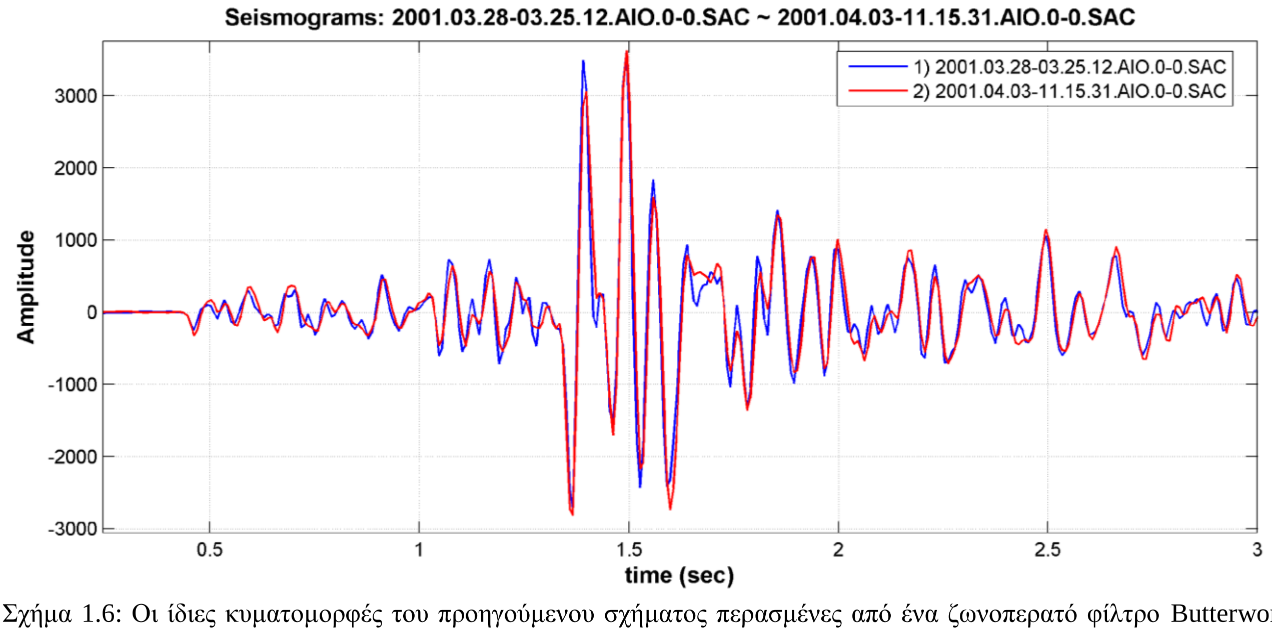
Η **χρονική καθυστέρηση** $d=t_{d1}\equiv\boldsymbol{\tau_m}$ στην οποία εμφανίζεται το **μέγιστο της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης** παίζει καθοριστικό ρόλο στις εφαρμογές που τη χρησιμοποιούν καθώς με τη συγκεκριμένη χρονική μετατόπιση των κυματομορφών επιτυγχάνεται η **βέλτιστη ταύτισή** τους. Από εδώ και στο εξής όταν γίνεται αναφορά σε αυτή τη συγκεκριμένη χρονική καθυστέρηση θα καλείται “χρόνος $\boldsymbol{\tau_m}$” ($\boldsymbol{\tau_{max}}$).

Ο χρόνος $\boldsymbol{\tau_m}$ για δύο χρονοσειρές μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την αρχική τους **στοίχιση** (*alignment*) ή με το χρονικό παράθυρο στο οποίο εξετάζεται η κάθε κυματομορφή. Στην περίπτωση των σεισμικών καταγραφών η αρχική στοίχιση μπορεί να έχει γίνει στη χρονική στιγμή t_p ή t_s της άφιξης των P ή S κυμάτων αντίστοιχα στην καθεμία από τις καταγραφές. Μια από τις εφαρμογές της ετεροσυσχέτισης είναι να υπολογίζονται με ακρίβεια οι χρόνοι t_p ή t_s διαφόρων όμοιων κυματομορφών ως προς τους χρόνους t_p ή t_s μιας άλλης όμοιας κυματομορφής που λαμβάνεται ως κύρια κυματομορφή (*master ή reference*) και θεωρείται ότι έχει ήδη καλά καθορισμένους αυτούς τους χρόνους λόγω ισχυρού σήματος ή χαμηλού ποσοστού θορύβου κτλ. Θα περιγραφθεί στο Κεφάλαιο 3, το γεγονός ότι η ταύτιση δύο περίπου όμοιων κυματομορφών στα P κύματα με καθυστέρηση $\boldsymbol{\tau_m}$ δε σημαίνει απαραίτητα και ταύτιση στα S κατά την ίδια καθυστέρηση ως προς την ίδια αρχική στοίχιση.

Η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης φέρει όμοιες γενικές ιδιότητες με τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης όπως φαίνεται εξ’ άλλου από τη σύγκριση των τύπων τους. Υπάρχει και σε αυτή την περίπτωση μια νοητή περιβάλλουσα η οποία ξεκινάει από την τιμή 1 (ή -1 για τις αρνητικές τιμές) και τείνει γραμμικά προς το μηδέν όσο αυξάνονται κατά απόλυτη τιμή οι χρονικές καθυστερήσεις. Εδώ αναδύεται ένα πρόβλημα: σε αντίθεση με τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης στην οποία εξ’ ορισμού η χρονική καθυστέρηση της βέλτιστης ταύτισης είναι $\boldsymbol{\tau_m}=0$, στην περίπτωση της ετεροσυσχέτισης αναζητείται η τιμή αυτή. Όμως, ενώ στην αυτοσυσχέτιση η τιμή AC(0)=1, γενικά το αντίστοιχο $XC(\tau_m)=\mathbf{XC_{max}} \leq 1$ στον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το $\mathbf{XC_{max}}$ ως μέτρο της ομοιότητας δύο χρονοσειρών θα πρέπει να είναι γνωστή η συμπεριφορά του ανάλογα με τη μορφή των δύο χρονοσειρών. Είναι πιθανόν το $\mathbf{XC_{max}}$ να παίρνει για κάποιο λόγο υψηλές τιμές χωρίς τα δύο σήματα να είναι όμοια με επαρκή στατιστική σημαντικότητα. Μπορεί για παράδειγμα τα δύο σήματα να είναι μικρής διάρκειας, δηλαδή μικρού αριθμού δειγμάτων, κάτι που σε μερικές περιπτώσεις δίνει μεγαλύτερες τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ απ' ότι θα έπρεπε, αν δηλαδή οι χρονοσειρές είχαν μεγαλύτερο μήκος. Αυτά τα προβλήματα θα αντιμετωπιστούν στο Κεφάλαιο 3.



Σχήμα 1.5: Χρονική ταύτιση δύο όμοιων αφιλτράριστων κυματομορφών που επιτυγχάνεται αν γίνει η κατάλληλη χρονική μετατόπιση της μιας ως προς την άλλη κατά το χρονικό διάστημα $\boldsymbol{\tau_m}$ στο οποίο $\mathbf{XC(\tau_m)=XC_{max}}$. Παρατηρείται ότι η ταύτιση συνεχίζεται μέχρι και στην «ουρά» (wave coda) των δύο σημάτων. Η μπλε έχει κανονικοποιηθεί ως προς την κ κόκκινη ώστε να είναι ευκολότερη η οπτική σύγκριση.



Σχήμα 1.6: Οι ίδιες κυματομορφές του προηγούμενου σχήματος περασμένες από ένα ζωνοπερατό φίλτρο Butterworth 0.5-20Hz, μεγεθυσμένες σε μια πιο στενή χρονική περιοχή για καλύτερη ευκρίνεια.

Αρκετά σημαντική όμως μπορεί να είναι και η επίδραση που έχει στην τιμή $\mathbf{XC_{max}}$ η ύπαρξη της περιβάλλουσας. Αυτό συμβαίνει διότι σε αντίθεση με τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης, στην $\mathbf{XC_{max}}$ είναι γενικά $\boldsymbol{\tau_m}\neq 0$, δηλαδή η αντίστοιχη περιβάλλουσα έχει τιμή μικρότερη από τη μονάδα στη χρονική καθυστέρηση της βέλτιστης ταύτισης και έτσι η επίδρασή ελαττώνει συστηματικά την $\mathbf{XC_{max}}$. Αυτό σημαίνει πως προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο ομοιότητας η τιμή $\mathbf{XC_{max}}$ θα πρέπει να διορθωθεί ως προς την επίδραση της περιβάλλουσας. Για να υπολογιστεί αυτή η επίδραση χρειάζεται να υπολογιστεί το $\boldsymbol{\tau_m}$ και το μήκος της μεγαλύτερης από τις δύο υπό σύγκριση χρονοσειρές καθώς αυτό καθορίζει το μήκος που θα έχει η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης (στη μικρότερη χρονοσειρά γίνεται προσθήκη μηδενικών ώστε να φθάσει το μήκος της μεγαλύτερης). Η διόρθωση αυτή γενικά πρέπει να γίνεται αφού πρώτα προσδιοριστεί ποιο είναι το $\mathbf{XC_{max}}$ καθώς αν γίνει σε όλη τη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης και στη συνέχεια προσδιοριστεί το μέγιστο υπάρχει περίπτωση οι δύο χρονοσειρές να «ταυτιστούν» σε ένα μικρό κοινό τμήμα τους κατά τις τελευταίες χρονικές καθυστερήσεις και να δώσουν ένα τεχνητό μέγιστο που μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το πραγματικό $\mathbf{XC_{max}}$ (και βέβαια να βρίσκεται σε διαφορετικό $\boldsymbol{\tau_m}$).

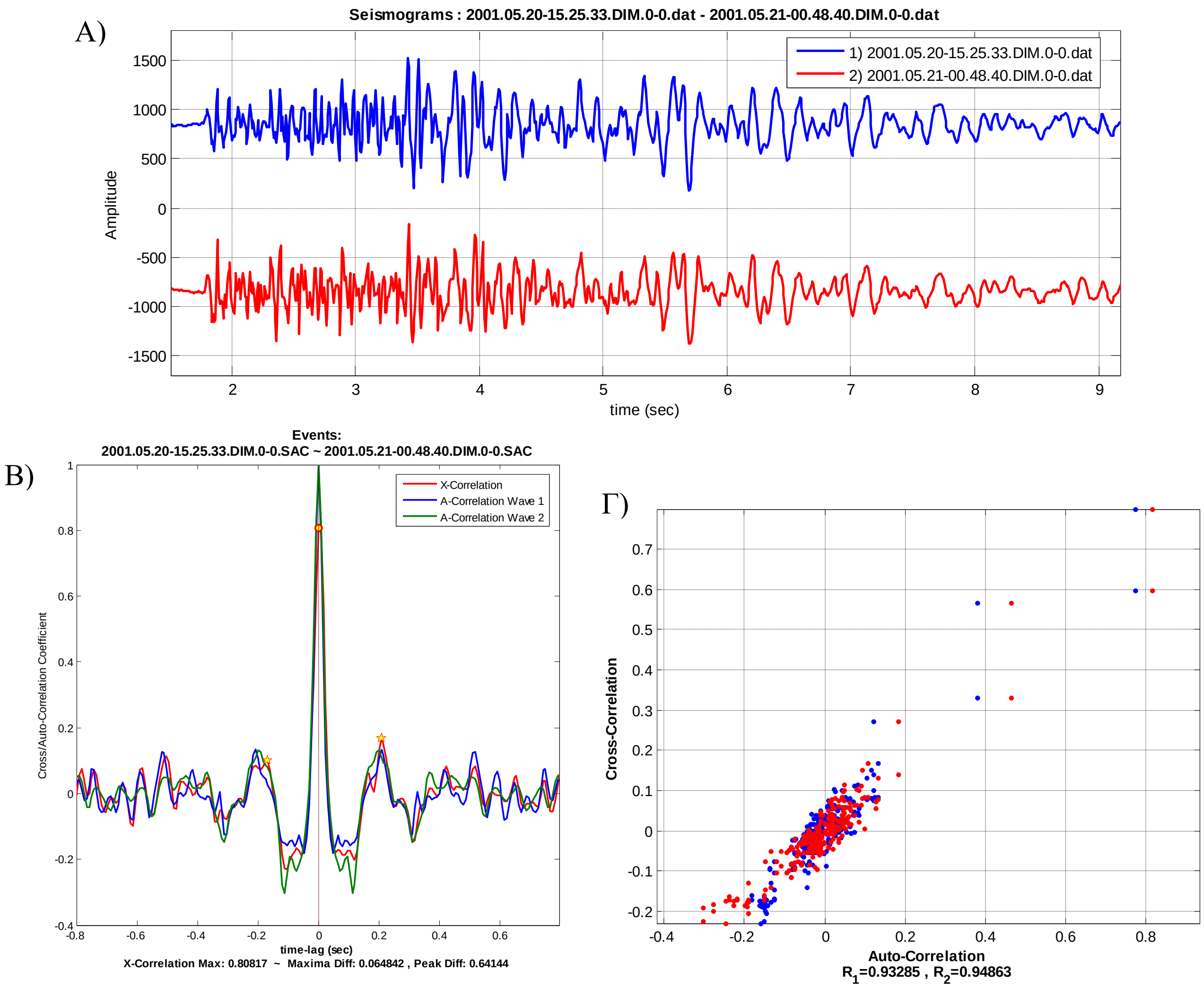
Η επίδραση της περιβάλλουσας γίνεται αισθητή όταν ο χρόνος $\boldsymbol{\tau_m}$ είναι συγκρίσιμος με τη διάρκεια, έστω $\mathbf{T_b}=t_n-t_1$ (παρονομαστής της συνάρτησης 1.3), της μεγαλύτερης χρονοσειράς. Για παράδειγμα αν για κάποιο λόγο ο $\boldsymbol{\tau_m} = 0.5\cdot\mathbf{T_b}$ αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα μια συστηματική μείωση του μεγίστου της ετεροσυσχέτισης κατά έναν παράγοντα 50%. Είναι, πάντως, συνηθέστερο στην περίπτωση των όμοιων σεισμικών κυματομορφών, εφόσον έχουν περικοπεί κατάλληλα ώστε το σεισμικό σήμα να ξεκινάει πάντα κοντά στην αρχή της κάθε χρονοσειράς, γενικά $\boldsymbol{\tau_m}\ll\mathbf{T_b}$.

Αν όμως λόγω του όγκου δεδομένων ή της έλλειψης των χρόνων άφιξης των κυμάτων P για ορισμένους σεισμούς σε κάποιους σταθμούς στους οποίους θα εφαρμοστεί η διαδικασία ετεροσυσχέτισης για την αναγνώριση όμοιων σεισμών, δεν έχει γίνει κατάλληλη περικοπή των χρονοσειρών, οι χρόνοι $\boldsymbol{\tau_m}$ μπορεί να είναι αρκετά μεγάλοι ως προς τη διάρκεια του σήματος ώστε να μειώσουν κατά 0.1-0.2 μονάδες το $\mathbf{XC_{max}}$. Για παράδειγμα μια μείωση στο 90% ενός $\mathbf{XC_{max}}$ που θα ισούταν με 0.8 αν δεν υπήρχε η περιβάλλουσα σημαίνει πως θα έχει μειωθεί στο 0.72 ενώ μια 10% μείωση επάνω σε ένα πραγματικό $\mathbf{XC_{max}}$=0.7 θα έδινε 0.63. Για να παρατηρηθεί μείωση κατά 10% θα πρέπει για παράδειγμα να είναι $\boldsymbol{\tau_m}$=1sec σε ένα σήμα 10sec ή $\boldsymbol{\tau_m}$=2sec σε ένα σήμα 20sec.

Η μείωση αυτή θα μπορούσε να αποφευχθεί αν οι χρονοσειρές είχαν γενικά μεγάλο μήκος, ωστόσο μια υπερβολική αύξηση του μήκους θα μείωνε από μόνη της το $\mathbf{XC_{max}}$ κυρίως λόγω της ύπαρξης θορύβου στο τμήμα στο οποίο δεν υπάρχει σήμα. Εξυπακούεται πως αν βρεθεί το $\boldsymbol{\tau_m}$, στοιχηθούν οι κυματομορφές σε αυτή τη χρονική καθυστέρηση, αποκοπούν τα περιττά τμήματα στις άκρες και επαναληφθεί η διαδικασία ετεροσυσχέτισης, το νέο $\mathbf{XC_{max}}$ που θα υπολογιστεί θα είναι το ίδιο με το διορθωμένο $\mathbf{XC_{max}}'$ που *θα* προέκυπτε *αν* το αρχικό $\mathbf{XC_{max}}$ είχε διαιρεθεί με την τιμή της περιβάλλουσας που αντιστοιχούσε στη χρονική καθυστέρηση $\boldsymbol{\tau_m}$. Το νέο $\mathbf{XC_{max}}$ θα βρίσκεται ήδη στο κέντρο της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης ($\boldsymbol{\tau_m}$=0) και έτσι δεν θα επιδρά επάνω του η περιβάλλουσα, αφού για d=0 είναι $C_{e+}(0)=1$.

Σε αυτό το σημείο μπορεί να γίνει σύγκριση ανάμεσα στις καμπύλες αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης δύο όμοιων σεισμών από την οποία θα βγουν κάποια επίσης ενδιαφέροντα συμπεράσματα. *Η καμπύλη ετεροσυσχέτισης δύο όμοιων σεισμών οφείλει να μοιάζει με τις καμπύλες των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης των δύο σεισμών*. Αυτό σημαίνει πως οι δύο καμπύλες αυτοσυσχέτισης με τη σειρά τους πρέπει να είναι όμοιες, τουλάχιστον σε μια περιοχή γύρω από τη χρονική καθυστέρηση d=0 στην οποία παρουσιάζεται το ολικό μέγιστο AC(d=0)=1. Για να συγκριθούν οι καμπύλες XC και AC πρέπει πρώτα να βρεθεί ο χρόνος $\boldsymbol{\tau_m}$ από την XC, να μετατοπιστούν κατάλληλα οι κυματομορφές, να επαναϋπολογιστεί η XC, οπότε το ολικό της μέγιστο θα βρίσκεται πλέον σε καθυστέρηση d=0 και η παραμόρφωση λόγω της περιβάλλουσας θα είναι η ίδια και στα δύο σκέλη εκατέρωθεν του ολικού μεγίστου, όπως συμβαίνει και στις συναρτήσεις AC, και στη συνέχεια να γίνει η σύγκριση μεταξύ της XC και των δύο AC (Σχήμα 1.7_B). Η σύγκριση αυτή είναι, όπως θα περιγραφεί και στο Κεφάλαιο 3, ένα **μέτρο της συμμετρίας** της συνάρτησης XC σε μια περιοχή γύρω από το ολικό της μέγιστο. Η απαίτηση της συμμετρίας συνήθως δεν ικανοποιείται σε περιπτώσεις που το $\mathbf{XC_{max}}$ έχει βρεθεί υψηλό ενώ οι κυματομορφές δεν ανήκουν σε όμοιους σεισμούς. Η ιδιότητα αυτή θα ληφθεί υπόψη κατά την κατασκευή ενός σύνθετου μέτρου ομοιότητας στο Κεφάλαιο 3.

Λόγω της διακριτής μορφής της, η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης στην πράξη δε μπορεί να είναι απόλυτα συμμετρική, καθώς οι κυματομορφές των σεισμικών καταγραφών δεν είναι συνεχείς αλλά έχουν διακριτοποιηθεί κατά τη διαδικασία της ψηφιακής δειγματοληψίας σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, π.χ. σε χρονικά διαστήματα των 8ms αν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι f_s=125samples/sec. Ακόμα και αν θεωρηθούν δύο ακριβή αντίγραφα ενός *συνεχούς* σήματος το οποίο είχε περάσει από ένα στάδιο διακριτοποίησης π.χ. με συχνότητα δειγματοληψίας f_s, αλλά στο κάθε αντίγραφο (του ίδιου σήματος) η διακριτοποίηση ξεκινάει από διαφορετική χρονική στιγμή, έστω με μια διαφορά **$\delta\tau_o$**: 0<**$\delta\tau_o$**<8ms, και στη συνέχεια εξεταστεί η ετεροσυσχέτιση των δύο διακριτών χρονοσειρών θα παρατηρηθεί μια ασθενής ασυμμετρία και μία μικρή απόκλιση του **XC_{max}** από την τιμή 1, ενώ είναι γνωστό ότι πρόκειται για ψηφιακά σήματα που προήλθαν από το ίδιο ακριβώς αρχικό αναλογικό σήμα και ουσιαστικά πρόκειται για αυτοσυσχέτιση και όχι για ετεροσυσχέτιση.



Σχήμα 1.7: A) κυματομορφές όμοιων σεισμών από τη Z-συνιστώσα του σταθμού DIM του δικτύου CRL (βλέπε Κεφάλαιο 3). B) ένα παράδειγμα σύγκρισης των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης με την αντίστοιχη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης των σημάτων του σχήματος (A) με **XC_{max}=0.8**. Η περίπτωση επιλέχθηκε ακριβώς επειδή η συσχέτιση *δεν* είναι η καλύτερη δυνατή ώστε να φαίνονται οι διαφορές ανάμεσα στις 3 συναρτήσεις καθώς στα ιδανικά παραδείγματα και οι 3 καμπύλες ταυτίζονται. γ) η συσχέτιση της καμπύλης ετεροσυσχέτισης ως προς τις δύο καμπύλες αυτοσυσχέτισης για μια περιοχή χρονικών καθυστερήσεων ±0.3sec γύρω από το ολικό μέγιστο, όπου με μπλε και κόκκινα σημεία απεικονίζονται οι τιμές της XC ως προς τις τιμές της πρώτης και της δεύτερης AC αντίστοιχα. Αναγράφονται οι τιμές των απλών συντελεστών συσχέτισης για τις δύο κατανομές σημείων: R_1=0.933, R_2=0.949. Τα αποτελέσματα αυτά προέκυψαν από *αφιλτράριστα* σήματα. (Βλέπε αντίστοιχο Σχήμα B.21 για ένα τέλειο σεισμικό ζεύγος (*doublet*))

Στην περίπτωση των σεισμικών σημάτων πρέπει να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη θορύβου μεγάλης περιόδου ή DC συνιστώσας που μπορεί να επηρεάσει τις τιμές της ετεροσυσχέτισης. Σε αυτές τις περιπτώσεις το σήμα πρέπει να περαστεί από ένα ανωπερατό φίλτρο Butterworth με συχνότητα αποκοπής γύρω στα 0.5Hz (κυρίως για τα όργανα ευρέος φάσματος ή *broadband*) προκειμένου η διαδικασία υπολογισμού της ετεροσυσχέτισης να μπορέσει να «δει» το πραγματικό μέγιστο. Ο υψίσυχνος θόρυβος, με την προϋπόθεση να είναι πολύ μικρότερου πλάτους από ότι το σήμα, δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το αποτέλεσμα της ετεροσυσχέτισης όσον αφορά στη χρονική καθυστέρηση του μεγίστου. Ωστόσο, θα διαπιστωθεί κατά την εφαρμογή ότι συνιστάται γενικότερα τα σήματα να φιλτράρονται τόσο στις υψηλές όσο και τις χαμηλές συχνότητες με κάποιο ζωνοπερατό φίλτρο (βλέπε ενότητα 1.6 και σχήμα 1.14).

Σε εφαρμογές της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης γίνεται συχνά διόρθωση των τιμών της λόγω της παρουσίας θορύβου ο οποίος ελαττώνει τις τιμές $\mathbf{XC_{max}}$. Ο *Snieder* (2006), με αναφορά στους *Douma & Snieder* (2005), δίνει μια εκτίμηση της διόρθωσης $\mathbf{R_{corr}}$ στην τιμή $\mathbf{R_{max}}=XC_{max}$, η οποία εμφανίζεται μειωμένη παρουσία θορύβου στα δεδομένα, που δίνεται από τη σχέση:

$$R_{corr} = \frac{R}{\sqrt{1-\frac{\langle n_1^2\rangle}{\langle u_1^2\rangle}}\sqrt{1-\frac{\langle n_2^2\rangle}{\langle u_2^2\rangle}}} = \frac{R}{\sqrt{1-\frac{\langle n^2\rangle}{\langle u^2\rangle}}\sqrt{1-\frac{\langle \tilde{n}^2\rangle}{\langle \tilde{u}^2\rangle}}} \tag{1.5}$$

όπου τα $\langle n_1^2\rangle$ και $\langle n_2^2\rangle$ είναι η μέση τιμή του θορύβου υποβάθρου πριν την πρώτη άφιξη των κυμάτων στην πρώτη και τη δεύτερη κυματομορφή αντίστοιχα. Ομοίως με u_1, u_2 συμβολίζονται οι χρονοσειρές των δύο σημάτων. Στο τελευταίο σκέλος της σχέσης (1.5) χρησιμοποιούνται διαφορετικοί συμβολισμοί όπου τα n και u αναφέρονται στην πρώτη (χρονικά) καταγραφή ενώ με το σύμβολο ~ πάνω από τα n και u σημειώνονται οι χρονοσειρές του θορύβου και του σήματος στη «διαταραγμένη» καταγραφή. Ο όρος «διαταραγμένη» καταγραφή αναφέρεται σε ένα σήμα όμοιο ως προς το πρώτο αλλά με ορισμένες διαφορές που οφείλονται σε κάποια συγκεκριμένη διατάραξη των παραμέτρων/συνθηκών, είτε της θέσης της πηγής, είτε του μέσου, όπως θα αναφερθεί στην ενότητα 1.7 για τη χρονική μεταβολή των καθυστερήσεων.

Περισσότερα σχετικά με την εφαρμογή της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης στα σεισμικά κύματα θα αναφερθούν στη συνέχεια, αφού πρώτα παρουσιαστούν ορισμένες ακόμα συναρτήσεις που ποσοτικοποιούν την ομοιότητα δύο σημάτων.

1.3 ~ *Το Ετεροφάσμα (Cross-Spectrum)*

Το ετεροφάσμα ή **Cross-Spectrum** είναι το αποτέλεσμα του διακριτού μετασχηματισμού Fourier πάνω στη *μη-κανονικοποιημένη*, διακριτοποιημένη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης (XC) (χωρίς τον παρονομαστή στην εξ 1.4). Για μια τυχαία χρονοσειρά x που ορίζεται από μια ακολουθία δειγμάτων $x_o, x_1, x_2, \ldots, x_{L-1}$ ο **διακριτός μετασχηματισμός Fourier** είναι μια συνάρτηση της συχνότητας **ω** που δίνεται από το άθροισμα:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{k=0}^{L-1} x_k e^{-jk\omega} \tag{1.6}$$

Στο πεδίο συχνοτήτων το **ετεροφάσμα** μπορεί να υπολογιστεί εύκολα για μία ορισμένη χρονική καθυστέρηση **i** ως εξής: Αν $\mathbf{A1_i(f)}$ και $\mathbf{A2_i(f)}$ είναι οι διακριτοί μετασχηματισμοί Fourier των σημάτων $A1_i(t)$ και $A2_i(t)$ αντίστοιχα, με το **i** εδώ να είναι δείκτης που καθορίζει τη χρονική καθυστέρηση σε ακέραια πολλαπλάσια της περιόδου δειγματοληψίας δt, τότε το ετεροφάσμα $\mathbf{S_i(f)}$ είναι:

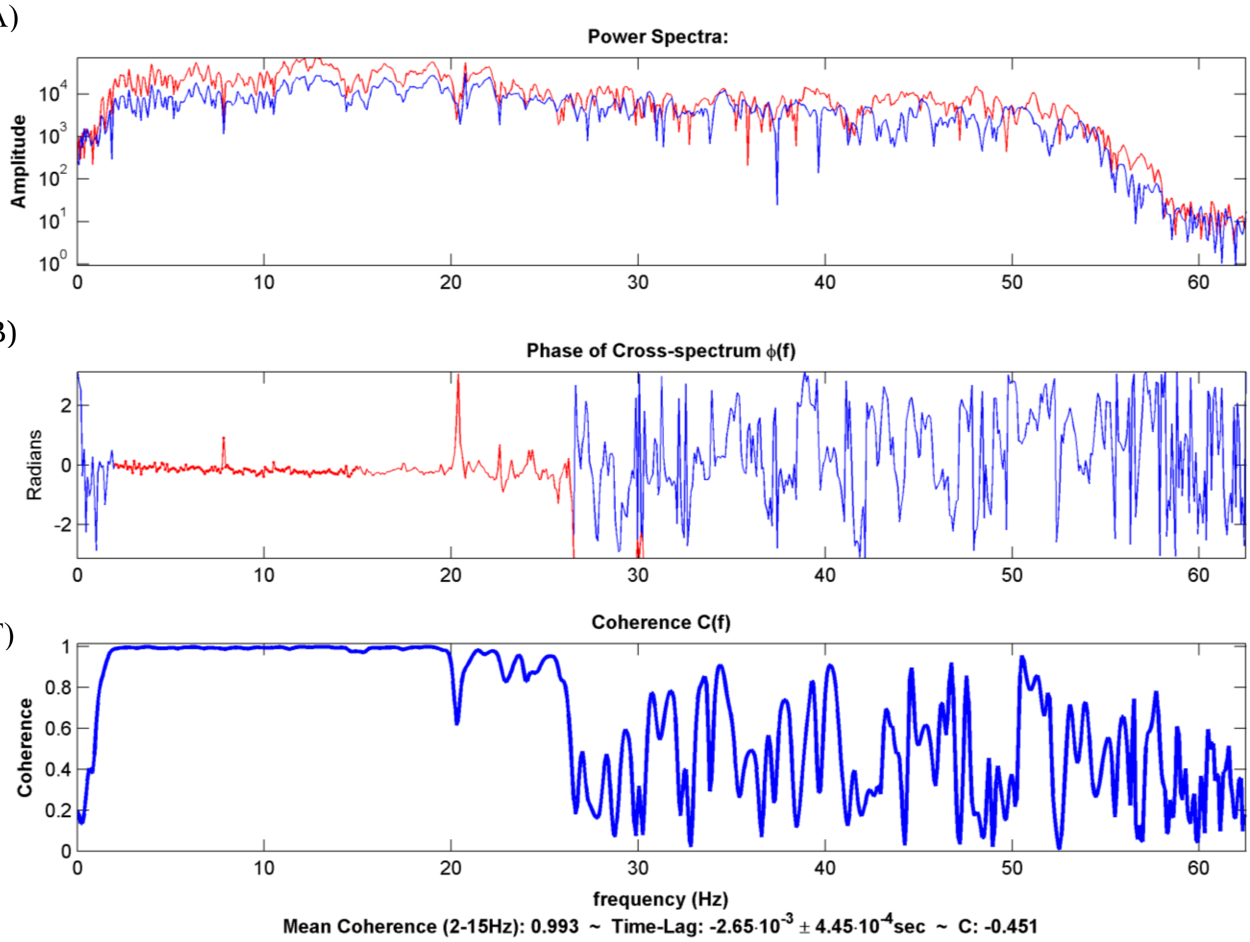
$$S_i(f) = A2^*_i(f)\cdot A1_i(f) \tag{1.7}$$

όπου $A2^*_i(f)$ ο συζυγής μιγαδικός του $A2_i(f)$. Οι τιμές $S_i(f)$ είναι μιγαδικοί αριθμοί. Η φάση $\boldsymbol{\varphi_i}$ του μιγαδικού S_i και η μεταβολή της στις διάφορες συχνότητες μπορούν να δώσουν μια επιπλέον πληροφορία: δύο σήματα τα οποία μοιάζουν μεταξύ τους, όπως τα σεισμογράμματα δύο όμοιων σεισμών, αν στοιχηθούν σε χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ θα παρουσιάζουν S_i με *σχεδόν* μηδενική φάση για ένα σημαντικό εύρος συχνοτήτων. Γίνεται αντιληπτό πως μία ακραία περίπτωση είναι να εξετάσει κανείς το μετασχηματισμό Fourier της συνάρτησης *αυτο*συσχέτισης ενός σήματος σε χρονική καθυστέρηση μηδέν (αφού στην αυτοσυσχέτιση είναι εξ'ορισμού $\boldsymbol{\tau_m}$=0). Σε αυτή την περίπτωση η φάση του $S_o(f)$ θα είναι εξ' ορισμού μηδέν σε όλες τις συχνότητες.

A)

B)

Γ)



Σχήμα 1.8: Τα παραπάνω σχήματα αναφέρονται στις πλήρεις, αφιλτράριστες κυματομορφές των όμοιων σεισμών του Σχήματος 1.5, στοιχισμένες σε χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$, Α) Τα δύο Φάσματα Ισχύος (Power-Spectra), Β) η Φάση φ(f) του ΕτεροΦάσματος (*Cross-Spectral phase*) στην περιοχή [-π,π], με διακεκομμένη γραμμή παρουσιάζεται η αναδιπλωμένη φάση (*wrapped*), με κόκκινη γραμμή η μη αναδιπλωμένη (*unwrapped*), η οποία για συχνότητες f>26.5Hz γίνεται μικρότερη από –π και βρίσκεται εκτός γραφήματος, με κόκκινες κουκίδες σημειώνονται τα συχνοτικά δείγματα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της χρονικής καθυστέρησης ($-2.65\cdot10^{-3}\pm4.45\cdot10^{-4}$sec) από την κλίση β της φ(f)=β·f, επιλεγμένα βάσει των υψηλών τιμών συνοχής (Γ) στις αντίστοιχες συχνότητες, Γ) η Συνοχή (Coherence) των δύο κυματομορφών (βλέπε κείμενο για περισσότερα).

Αν εξεταστεί η φάση $\boldsymbol{\varphi_{\tau'}(f)}$ ενός ετεροφάσματος $\mathbf{S_{\tau'}(f)}$ σε μια χρονική καθυστέρηση $\tau'=\boldsymbol{\tau_m}+\delta\tau$ η οποία, για παράδειγμα, διαφέρει από το $\boldsymbol{\tau_m}$ κατά $\boldsymbol{\delta\tau=0.008}$**sec**$=1/125Hz^{-1}$ που ισοδυναμεί με χρονική μετατόπιση των κυματομορφών κατά 1 δείγμα από την καθυστέρηση που αντιστοιχεί σε $\mathbf{XC_{max}}$ αν η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 125Hz, θα παρατηρηθεί ότι η φάση του ετεροφάσματος $\mathbf{S_{\tau'}(f)}$ στις χαμηλές συχνότητες δεν είναι μηδενική, αλλά παρουσιάζει μια γραμμική μεταβολή σε διαδοχικά μεγαλύτερες συχνότητες και η κλίση της ευθείας ισούται με $\boldsymbol{2\pi\cdot\delta\tau}$. Με άλλα λόγια με τη μέτρηση της **κλίσης β** της ευθείας $\boldsymbol{\varphi_{\tau'}(f)=\beta\cdot f}$ μπορεί να υπολογιστεί η χρονική καθυστέρηση δτ που αντιστοιχεί στη βέλτιστη ταύτιση των κυματομορφών (*Poupinet,G. et al, 1984*):

$$\delta\tau = \frac{\beta}{2\pi} \tag{1.8}$$

Η φάση του ετεροφάσματος αποδεικνύεται ιδιαίτερα ευαίσθητη σε μικρές μεταβολές της χρονικής καθυστέρησης, ακόμα και αν αυτή αποτελεί κλάσμα της περιόδου δειγματοληψίας, dt. Μια πρώτη προσέγγιση της χρονικής καθυστέρησης που οδηγεί στη βέλτιστη ταύτιση δύο όμοιων σημάτων μπορεί να βρεθεί από τον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ του μεγίστου της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης. Αν τα δύο σήματα στοιχηθούν ως προς αυτή τη χρονική καθυστέρηση μπορεί στη συνέχεια να μετρηθεί η κλίση β της φάσης $\varphi_{\tau m}(f)$ του ετεροφάσματος $S_{\tau m}(f)$ με μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων και στη συνέχεια να προσδιοριστεί ακριβέστερα η χρονική καθυστέρηση μέσω της Σχέσης 1.8. Στο Σχήμα 1.8_B η κλίση της φάσης του ετεροφάσματος δείχνει ότι για να επιτευχθεί η βέλτιστη ταύτιση υπολείπονται $-2.65\cdot10^{-3}\pm4.45\cdot10^{-4}$sec, που είναι μια χρονική καθυστέρηση μικρότερη από την περίοδο δειγματοληψίας ($8\cdot10^{-3}$sec). Έτσι, σε πρώτο βαθμό, μια προσέγγιση για την εύρεση του χρόνου $\boldsymbol{\tau_m}$ αποτελεί η εύρεση της χρονικής καθυστέρησης στην οποία παρουσιάζεται το μέγιστο της ετεροσυσχέτισης, $\mathbf{XC_{max}}$, ενώ σε δεύτερο βαθμό η μέτρηση της κλίσης της φάσης του ετεροφάσματος αφού πρώτα γίνει η στοίχιση στον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ που βρέθηκε από την ετεροσυσχέτιση.

Ωστόσο, για να προσεγγιστεί με μεγαλύτερη ακρίβεια από την περίοδο δειγματοληψίας ο χρόνος $\boldsymbol{\tau_m}$ απ' ευθείας από τη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης μπορεί να γίνει μια μη-γραμμική παρεμβολή (συνήθως παραβολική) γύρω από την περιοχή του ολικού μεγίστου της και να βρεθεί στο ολικό μέγιστο $\mathbf{XC_{max}}$ η καθυστέρηση $\boldsymbol{\tau_m}$ πάνω στην παρεμβολή με τόση ακρίβεια όση η «περίοδος δειγματοληψίας» της παρεμβολής. Πρακτικά με αυτόν τον τρόπο γίνεται να μετρηθούν καθυστερήσεις με ακρίβεια μεγαλύτερη κατά περίπου μία τάξη μεγέθους.

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε αναφορά στη συμμετρία της συνάρτησης *αυτο*συσχέτισης, στη *σχεδόν* συμμετρική συνάρτηση *ετερο*συσχέτισης δύο όμοιων σημάτων καθώς και στο γεγονός ότι η σύγκριση μεταξύ της ετεροσυσχέτισης και των δύο αυτοσυσχετίσεων αποτελεί ένα μέτρο του βαθμού συμμετρίας και κατ' επέκταση ένα πρόσθετο μέτρο της ομοιότητας των δύο σημάτων, αφού η ετεροσυσχέτιση δύο όμοιων χρονοσειρών πρέπει να είναι, εν γένει, συμμετρική. Θα εξεταστεί στη συνέχεια το πώς μπορεί να βγει ένα ανάλογο συμπέρασμα για τη συμμετρία της ετεροσυσχέτισης μέσα από τη μορφή του ετεροφάσματος.

Μια απόλυτα συμμετρική συνάρτηση ως προς την ευθεία x=0 έχει μετασχηματισμό Fourier με μια ιδιαίτερη μορφή: οι συντελεστές που προκύπτουν είναι *πραγματικοί* αριθμοί, δεν έχουν δηλαδή φανταστικό μέρος. Σχετικά με αυτό έγινε αναφορά προηγουμένως: η φάση του φάσματος της συνάρτησης *αυτο*συσχέτισης (δηλαδή του ***αυτοφάσματος***) είναι εξ' ορισμού μηδέν σε όλες τις συχνότητες. Το γεγονός ότι οι συντελεστές του μετασχηματισμού Fourier είναι πραγματικοί αριθμοί συνεπάγεται ότι το σήμα (η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης), στο πεδίο του χρόνου (των χρονικών καθυστερήσεων για την ακρίβεια), μπορεί να αναλυθεί σε μια υπέρθεση συνημιτόνων, που αποτελούν *άρτιες* (συμμετρικές ως προς το d=0) συναρτήσεις, καθώς όλοι οι συντελεστές των ημιτόνων, που αντιστοιχούν στο φανταστικό μέρος των συντελεστών Fourier, θα είναι μηδενικοί. Αυτό φαίνεται εύκολα στην περίπτωση μιας συνεχούς συνάρτησης f(t) της οποίας το ανάπτυγμα Fourier είναι:

$$f(t) = \frac{1}{2}\alpha_o + \sum_{n=1}^{\infty}\left[\alpha_n \cos(nt) + b_n \sin(nt)\right]$$

όπου:

$$a_n = \frac{2}{T}\int_{t1}^{t2} f(t)\cos(\omega_n t)dt$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_{t1}^{t2} f(t)\sin(\omega_n t)dt$$

$$\omega_n = n\frac{2\pi}{T}$$

$$a_o = \frac{1}{\mathrm{T}}\int_{t1}^{t2} f(t)dt$$

Αντίστοιχα, αν μια *σχεδόν* συμμετρική συνάρτηση, όπως αυτή της ετεροσυσχέτισης δύο όμοιων σημάτων, κεντραριστεί στο ολικό της μέγιστο (δηλαδή αν μετατοπιστούν τα δύο σήματα έως τον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ και επαναϋπολογιστεί η XC) και στη συνέχεια γίνει ο μετασχηματισμός Fourier (οπότε παράγεται το ετεροφάσμα), η φάση που θα προκύψει θα είναι *σχεδόν* μηδενική, τουλάχιστον σε ένα εύρος συχνοτήτων π.χ. από 1-10Hz. Αυτό σημαίνει πως η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης μπορεί να ανακατασκευαστεί (μέσω του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier) από μια υπέρθεση συνημιτόνων **και** ημιτόνων, με τους μεγαλύτερους συντελεστές να αντιστοιχούν στα συνημίτονα. Αντιθέτως, αν τα σήματα δεν ήταν όμοια και η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης μη-συμμετρική αυτό θα αντικατοπτριζόταν στους συντελεστές Fourier οι οποίοι θα είχαν σημαντικό φανταστικό μέρος, η φάση του ετεροφάσματος θα παρουσιαζόταν μη-μηδενική και μάλιστα τα πλάτη των ημιτόνων θα υπερέβαιναν εκείνα των συνημιτόνων.

Το πρόβλημα της συμμετρικότητας της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης γίνεται, μέσω του μετασχηματισμού Fourier, να αναχθεί σε μέτρηση της **αρτιότητάς** της. Βασική προϋπόθεση για να λειτουργήσει αυτή η τεχνική αποτελεί η ακριβής εύρεση του χρόνου $\boldsymbol{\tau_m}$. Στην περίπτωση των σεισμικών σημάτων πρέπει να ληφθεί υπόψη, πέρα από την ύπαρξη θορύβου στα σήματα, το γεγονός ότι ακόμα και σε σήματα με σημαντικό βαθμό ομοιότητας η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης παρουσιάζεται συμμετρική μόνο σε μια μικρή περιοχή γύρω από το $\mathbf{XC_{max}}$. Αυτό μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητό στην περίπτωση που για παράδειγμα ένα από τα δύο σήματα δεν αντιστοιχεί σε 1 μεμονωμένο σεισμό αλλά σε δύο ή περισσότερους όμοιους σεισμούς που συνέβησαν σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα μεταξύ τους τέτοιο ώστε τα σήματά τους εν μέρει να αλληλεπικαλύπτονται. Σε αυτές τις περιπτώσεις η καμπύλη της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης μπορεί να παρουσιάζει ένα ή περισσότερα σημαντικά δευτερεύοντα μέγιστα λίγο πιο έξω από την περιοχή του ολικού μεγίστου (σε μια χρονική απόσταση ίση με το χρονικό διάστημα μεταξύ των χρόνων άφιξης των αντίστοιχων φάσεων των δύο ή παραπάνω σεισμών στον σταθμό).

Η ιδιότητα της συμμετρίας που παρουσιάζει κατά προσέγγιση η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης δύο όμοιων σημάτων είναι σημαντική αλλά δε μπορεί για την ώρα να αποκλειστεί πλήρως το ενδεχόμενο να υπάρχουν συμμετρικές συναρτήσεις ετεροσυσχέτισης με χαμηλό $\mathbf{XC_{max}}$, που **δεν** προέρχονται δηλαδή από όμοια σήματα καθώς και το αντίστροφο, δηλαδή ασύμμετρες συναρτήσεις XC από καταγραφές όμοιων σεισμών. Κατά την εφαρμογή στο Κεφάλαιο 3 θα επανεξεταστεί το θέμα της «αρτιότητας» της ετεροσυσχέτισης, όπως ορίστηκε σε αυτή την ενότητα μέσα από τη σύγκριση φανταστικού και πραγματικού μέρους των συντελεστών Fourier, και θα απορριφθεί ως ένα μη ασφαλές κριτήριο. Η συμμετρία θα ποσοτικοποιηθεί τελικά μέσα από τη σύγκριση της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης με τις επιμέρους συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης των σημάτων.

1.4 ~ *Συνοχή (Coherence)*

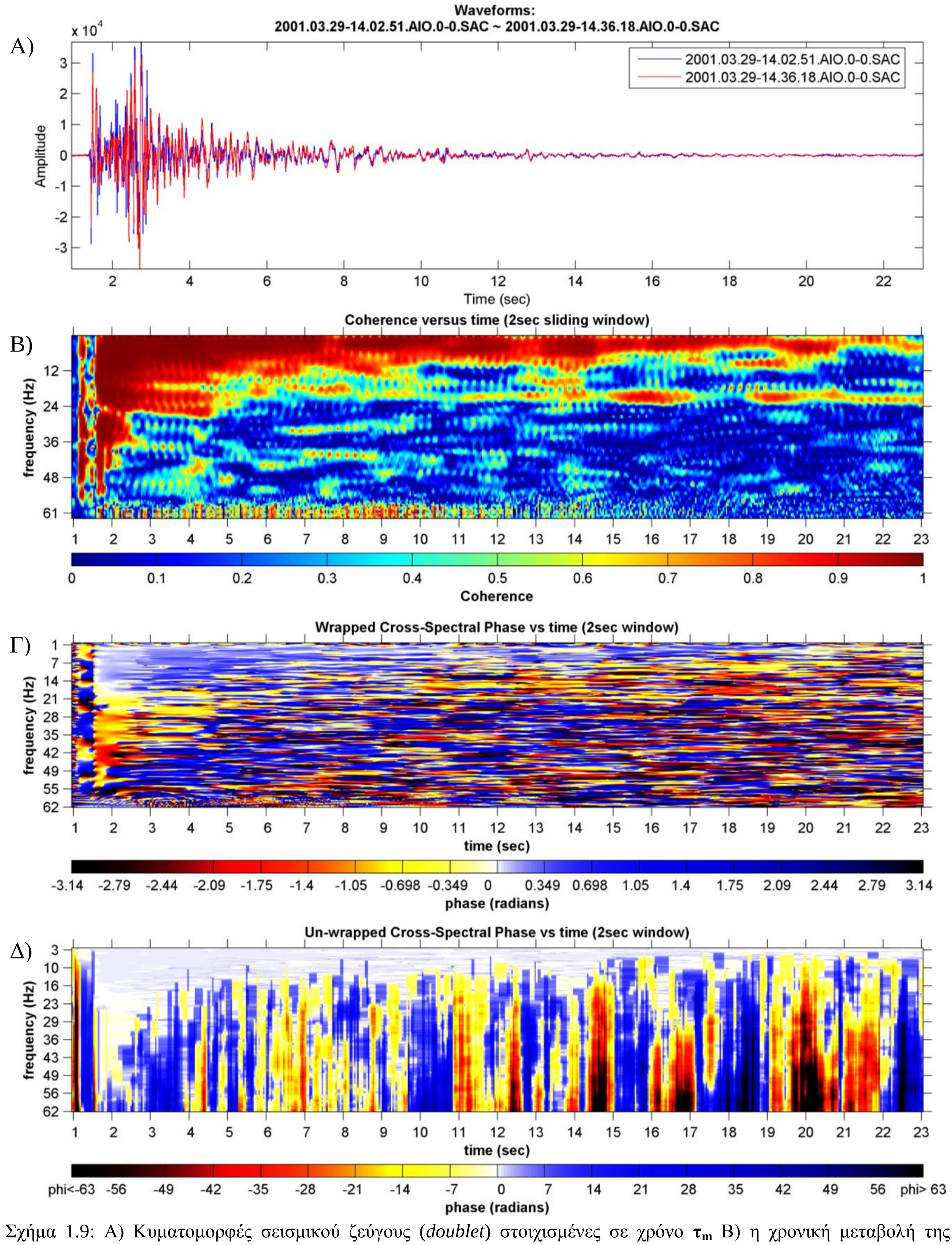
Μια ακόμα εικόνα συσχέτισης δύο σημάτων μπορεί να δώσει η συνάρτηση **Συνοχής** (***Coherence function***) η οποία αποτελεί το αντίστοιχο της ετεροσυσχέτισης στο πεδίο συχνοτήτων καθώς εκφράζει το βαθμό ομοιότητας δύο σημάτων σε μια ορισμένη χρονική καθυστέρηση (η οποία συνήθως είναι η $\boldsymbol{\tau_m}$) ως προς διάφορες συχνότητες. Η Συνοχή υπολογίζεται από τους τύπους:

$$C_i(f) = \frac{S_i^2(f)}{A1_i(f) \cdot A2_i(f)} \qquad \text{ή} \qquad C_{xy}(f) = \frac{\left|P_{xy}(f)\right|^2}{P_{xx}(f) \cdot P_{yy}(f)} \tag{1.9}$$

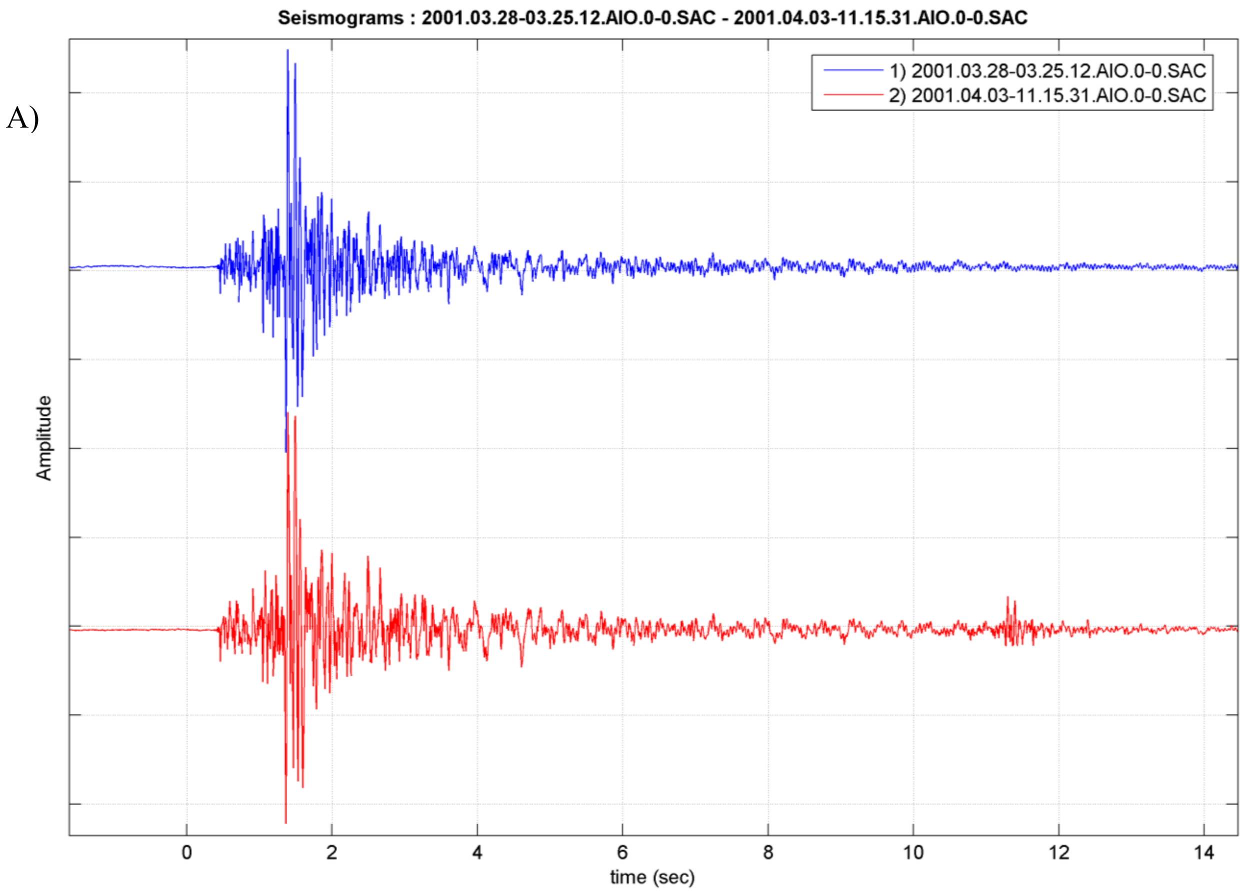
Στον πρώτο τύπο τα $A1_i$, $A2_i$ αντιστοιχούν στα *εξομαλυμένα* φάσματα (*smoothed spectra*) του πρώτου και δεύτερου σήματος αντίστοιχα και το S_i στο ετεροφάσμα (*Poupinet et al., 1984*) ενώ ο δείκτης i είναι ο αριθμός δείγματος και υποδηλώνει τη χρονική καθυστέρηση στην οποία έχει γίνει η στοίχιση. Στον δεύτερο τύπο (ο οποίος χρησιμοποιείται σε αυτή την εργασία) οι δείκτες x,y υποδηλώνουν το πρώτο και το δεύτερο σήμα αντίστοιχα ενώ οι μεταβλητές P εκφράζουν την πυκνότητα του φάσματος ισχύος (*Power Spectral Density*) υπολογισμένη με τη μέθοδο ενός μέσου, τροποποιημένου περιοδογράμματος (*Welch, P.D., 1967*) στην ετεροσυσχέτιση (P_{xy}) και τις αυτοσυσχετίσεις των δύο σημάτων (P_{xx}, P_{yy}).

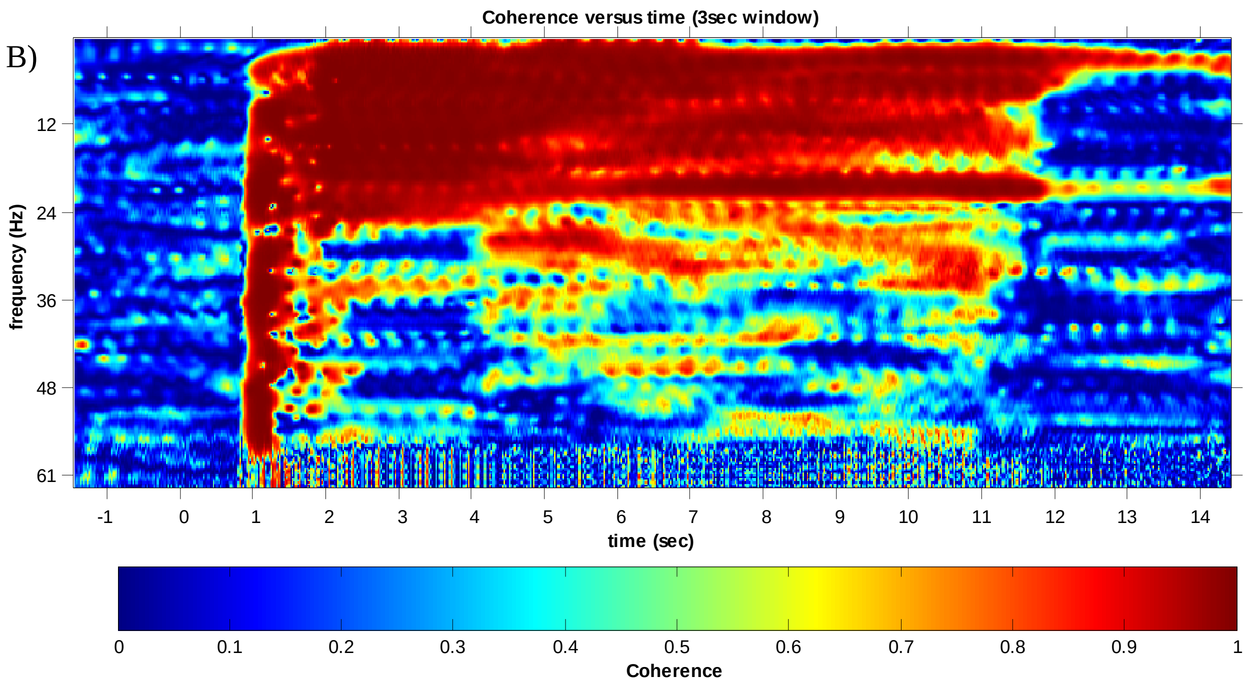
Η συνάρτηση συνοχής είναι κανονικοποιημένη ως προς τα αυτοφάσματα (*auto-spectra*) των επιμέρους σημάτων και εξετάζει τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται το σχήμα των φασμάτων ισχύος των δύο σημάτων σε μια περιοχή γύρω από μια συχνότητα f. Αν τα φάσματα μεταβάλλονται με όμοιο τρόπο τότε η C(f) θα έχει τιμή κοντά στη μονάδα. Στις περιπτώσεις όμοιων κυματομορφών, αν η στοίχιση γίνει σε χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$, παρατηρούνται ευρείες φασματικές περιοχές της συνάρτησης συνοχής με τιμή κοντά στη μονάδα (Σχήμα 1.8Γ). Το συχνοτικό εύρος καλής συνοχής για όμοιους σεισμούς είναι συνήθως μεταξύ 1-10Hz αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να φθάσει τα 30Hz ή παραπάνω (αυτό αναφέρεται κυρίως σε μικροσεισμούς). Μέσα στη φασματική περιοχή της ισχυρής συνοχής είναι δυνατόν να εμφανίζονται ορισμένα σημεία μέτριας ή χαμηλής συνοχής, πιθανόν λόγω θορύβου στις συγκεκριμένες συχνότητες. Συνήθως σε αυτές τις συχνότητες εμφανίζονται και ανωμαλίες στη φάση του ετεροφάσματος ενώ εκεί όπου η συνοχή είναι ισχυρή η φάση του ετεροφάσματος παρουσιάζει γραμμική μεταβολή. Γι' αυτό κατά τη μέτρηση της χρονικής καθυστέρησης από το ρυθμό μεταβολής της φάσης του ετεροφάσματος με μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, κάθε σημείο σταθμίζεται (*weight*) με μια σχέση της μορφής $C_i^2/(1-C_i^2)$ που ενισχύει τα σημεία ισχυρής συνοχής και απορρίπτει όσα εμφανίζουν ανωμαλίες στη συνοχή και κατ' επέκταση στη φάση του ετεροφάσματος (*Poupinet,G. et al., 1984*).

Ένα επιπλέον μέτρο ποσοτικοποίησης της ομοιότητας δύο σημάτων αποτελεί η **μέση συνοχή**, $\mathbf{m_{coh}}$, σε μια ορισμένη φασματική περιοχή, π.χ. 4-12Hz (*Got et al., 1994*), όταν τα σήματα έχουν στοιχηθεί στο $\boldsymbol{\tau_m}$. Σε αντίθεση με τη φάση του ετεροφάσματος, η μέση συνοχή είναι λιγότερο ευαίσθητη σε σχετικά μικρές χρονικές μετατοπίσεις του ενός σήματος ως προς το άλλο γύρω από τον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ (Παράρτημα Β, Σχήματα Β.22, $\mathbf{m_{coh}}$>0.97). Αυτό σημαίνει πως μπορεί να μετρηθεί με ασφάλεια ακόμα και αν ο χρόνος $\boldsymbol{\tau_m}$ δεν έχει προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό το μέτρο ομοιότητας όμως παρουσιάζει κάποια άλλα προβλήματα στα οποία θα γίνει αναφορά στο Κεφάλαιο 3.



Σχήμα 1.9: A) Κυματομορφές σεισμικού ζεύγους (*doublet*) στοιχισμένες σε χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ B) η χρονική μεταβολή της συνοχής τους σε κυλιόμενο παράθυρο εύρους (2 sec), Γ) ομοίως για την αναδιπλωμένη (*wrapped*) φάση του ετεροφάσματος, Δ) ομοίως για τη μη-αναδιπλωμένη (*unwrapped*) φάση του ετεροφάσματος σε συχνότητες>2Hz. Το λευκό χρώμα στο σχήμα (Δ) δείχνει μηδενική φάση σε ένα εύρος χαμηλών συχνοτήτων λόγω της βέλτιστης χρονικής ταύτισης των κυματομορφών (Βλέπε και Παράρτημα Β, Σχήματα Β.24, Β.25).





Σχήμα 1.10: A) Αφιλτράριστες κυματομορφές ενός σεισμικού ζεύγους στοιχισμένες σε χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$, B) χρονική μεταβολή της συνοχής των κυματομορφών του (A) σε κυλιόμενο παράθυρο εύρους 3sec (ή 375 δειγμάτων).

Είναι πολύ ενδιαφέρουσα η εικόνα του Σχήματος 1.9_B που προκύπτει από τη χρονική εξέλιξη της συνοχής σε διαδοχικά, αλληλεπικαλυπτόμενα χρονικά παράθυρα μήκους 3sec, πάνω στις κυματομορφές ενός σεισμικού ζεύγους (*doublet*) οι οποίες έχουν στοιχηθεί σε χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$. Οι κυματομορφές είναι αφιλτράριστες και προέρχονται από καταγραφές της Z-συνιστώσας του σταθμού AIO του δικτύου CRL (περισσότερα για το δίκτυο θα αναφερθούν στην ενότητα 3.1). Από τη σύγκριση της μορφής της συνοχής στις διάφορες συχνότητες προκύπτει ότι αρχικά, πριν μπει το σήμα, η εικόνα δείχνει μια πολύ χαμηλή συνοχή, χαρακτηριστική του ασυσχέτιστου θορύβου, με το μπλε χρώμα να κυριαρχεί σε όλες τις συχνότητες. Μια λίγο διαφορετική εικόνα παρουσιάζεται αν η χρονική μετάθεση κατά τη στοίχιση διαφέρει ελάχιστα από το χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ (Παράρτημα B, Σχήματα B.24, B.25)

Με την άφιξη των P κυμάτων σε χρόνο $t_p \cong 0.5$sec (Σχήμα 1.10) η εικόνα αλλάζει δραματικά, εμφανίζοντας πολύ υψηλές τιμές συνοχής σε ένα ευρύ συχνοτικό εύρος που ξεκινάει από ~1-2Hz και φθάνει μέχρι τα ~50Hz! Όταν καταφθάνουν τα S-κύματα κοντά στο $t_s \cong 1.5$sec η εικόνα μεταβάλλεται: η συνοχή πάνω από τα 25Hz χάνεται ενώ ενισχύεται στις συχνότητες κάτω από τα 15Hz. Περιστασιακά εμφανίζονται χρονικές περιοχές με μέτρια συνοχή σε συχνότητες άνω των 25Hz. Με την εξασθένηση των σεισμικών σημάτων η συνοχή χάνεται, με τελευταίες εναπομένουσες συχνότητες, όπως αναμενόταν, τις χαμηλότερες.

Το γεγονός ότι για $t>t_s$ παύει να υπάρχει συνοχή στις υψηλές συχνότητες πιθανόν οφείλεται όχι στην απότομη εξασθένηση των P-κυμάτων αλλά στο σχετικά μεγαλύτερο πλάτος των χαμηλότερης συχνότητας S-κυμάτων. Λόγω υπέρθεσης με τα S, η «κυματο-ουρά» (*coda-wave*) του συρμού των P-κυμάτων παραμορφώνεται σε τέτοιο βαθμό που αυτά τα χαμηλού πλάτους υψίσυχνα κύματα μετατρέπονται σε ασθενή «θόρυβο» επάνω στα S. Είναι επίσης πιθανόν αν η ανάλυση του ψηφιακού σήματος ήταν ακριβέστερη, π.χ. 128bit, η συνοχή στις υψηλές συχνότητες να συνέχιζε να υφίσταται και για χρόνους $t > t_s$, μέχρι τα P να χαθούν μέσα στον πραγματικό θόρυβο του υποβάθρου. Οι επανεμφανίσεις ισχυρής συνοχής στις υψηλές συχνότητες γίνονται σε περιοχές της κυματομορφής στις οποίες οι χαμηλής συχνότητας ταλαντώσεις, πιθανόν λόγω κάποιας καταστροφικής συμβολής, παρουσιάζουν χαμηλότερα πλάτη, επιτρέποντας στις υψηλής συχνότητας ταλαντώσεις να ξεπροβάλλουν, και μάλιστα χωρίς σημαντική διαφορά φάσης ανάμεσα στα δύο σήματα, αλλιώς δεν θα εμφανιζόταν υψηλή συνοχή. Μια άλλη εξήγηση μπορεί να είναι η άφιξη άλλων φάσεων για παράδειγμα λίγο πριν από $t \cong 4$sec (Σχήμα 1.10).

Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται κατά τη συσχέτιση θορύβου σε συγκεκριμένες συχνότητες, π.χ. στα 50Hz όπου εμφανίζεται έντονο πλάτος σε πολλά όργανα λόγω παρεμβολών ηλεκτρικού ρεύματος που πάλλεται στην ίδια συχνότητα (Παράρτημα B, Σχήμα B.20). Ο θόρυβος αυτός είναι υπαρκτός πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας του σήματος, ωστόσο η συνοχή στα 50Hz χάνεται όταν το σήμα στις χαμηλές συχνότητες κυριαρχεί, πιθανόν και πάλι λόγω του περιορισμού στην ακρίβεια που θέτει η ανάλυση των 24bit. Ένα διαφορετικό είδους θορύβου παρουσιάζεται επίσης σε ορισμένες περιπτώσεις κοντά στα ~20-25Hz ταυτόχρονα με την έλευση του σεισμικού σήματος (Σχήματα $B.18_B$, $B.19_B$ ενώ φαίνεται και στο φασματόγραμμα του Σχήματος $A.1_\Gamma$).

1.5 ~ *Σύγκριση των μεθόδων Ετεροσυσχέτισης και Συνοχής*

Βάσει των όσων αναφέρθηκαν παραπάνω υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι σύγκρισης χρονοσειρών, ο ένας είναι η ετεροσυσχέτιση στο πεδίο χρόνου ενώ ο άλλος είναι το ετεροφάσμα και η συνοχή στο πεδίο συχνοτήτων. Και με τους δύο τρόπους γίνεται εκτίμηση του βαθμού ομοιότητας καθώς και της χρονικής καθυστέρησης κατά την οποία η ομοιότητα μεγιστοποιείται. Το ερώτημα είναι: ποιος από τους δύο τρόπους ενδείκνυται για μια μελέτη ανίχνευσης όμοιων σεισμών και στη συνέχεια για τη διόρθωση των σχετικών θέσεων των υποκέντρων τους;

Η μέθοδος της ετεροσυσχέτισης είναι η πιο άμεσα εφαρμόσιμη επάνω σε μια χρονοσειρά. Δεν απαιτείται μετάβαση στο πεδίο συχνοτήτων άρα δε χρειάζεται να εφαρμοστεί μετασχηματισμός Fourier και η μέτρησή των τιμών της είναι τόσο απλή όσο η μέτρηση του απλού συντελεστή γραμμικής συσχέτισης μιας κατανομής σημείων που ανήκουν κατά προσέγγιση σε μια ευθεία. Η χρονική καθυστέρηση $\boldsymbol{\tau_m}$, επίσης, προκύπτει άμεσα από την τετμημένη του μεγίστου της ετεροσυσχέτισης, $\mathbf{XC_{max}}$. Η ετεροσυσχέτιση μπορεί να συμπληρωθεί από μια σειρά επιπλέον μετρήσεων που εξασφαλίζουν την ομοιότητα δύο σημάτων και βοηθούν στο να απορριφθούν σήματα που πιθανόν να μην είναι πραγματικά όμοια, παρά την ισχυρή θετική συσχέτιση που ίσως να δίνει η τιμή $\mathbf{XC_{max}}$. Η διαδικασία αυτή, που περιλαμβάνει μετρήσεις των δευτερευόντων μέγιστων και της συμμετρίας της ετεροσυσχέτισης γύρω από το ολικό μέγιστο, θα αναλυθεί περισσότερο κατά την εφαρμογή της στο Κεφάλαιο 3.

Η μέθοδος της συνοχής απαιτεί μετασχηματισμό Fourier των δύο σημάτων, τα οποία έχουν προηγουμένως μετατοπιστεί χρονικά κατά $\boldsymbol{\tau_m}$, και ομαλοποίηση (*smoothing* ή *averaging*) του φάσματος. Ως μέτρο της ομοιότητας ορίζεται η μέση συνοχή $\mathbf{m_{coh}}$ στη φασματική ζώνη ενδιαφέροντος, π.χ. μεταξύ 2.5-12Hz (*Schaff et al., 2004*) ενώ η ζητούμενη χρονική καθυστέρηση $\boldsymbol{\tau_m}$ μπορεί να προκύψει από την κλίση β της φάσης του ετεροφάσματος (εξ 1.8).

Θεωρητικά και οι δύο τρόποι πρέπει να παρέχουν το ίδιο αποτέλεσμα, ωστόσο ο δεύτερος είναι περισσότερο επισφαλής λόγω της ασταθούς συμπεριφοράς της φάσης του ετεροφάσματος στην περίπτωση που υπάρχει χαμηλή συνοχή γύρω από ορισμένες συχνότητες. Αυτό μπορεί να οφείλεται κυρίως στην παρουσία θορύβου στις συχνότητες που ενδιαφέρουν είτε στο ένα είτε και στα δύο σήματα. Επίσης, ο αριθμός δειγμάτων μερικές φορές είναι περιοριστικός, ιδιαίτερα εάν δεν εξετάζεται ολόκληρη η κυματομορφή αλλά μόνο ένα μικρό τμήμα της, π.χ. μόνο τα P ή μόνο τα S κύματα, κάτι που είναι πιο συνηθισμένο και απαραίτητο στην πράξη. Αν για παράδειγμα εξετάζονται παράθυρα του ~1sec σε σήματα με συχνότητα δειγματοληψίας f_s=125samples/sec, έστω σε παράθυρα των 128 δειγμάτων, τότε, ιδιαίτερα κοντά στο μέγιστο της ετεροσυσχέτισης, ο αριθμός δειγμάτων που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του $\mathbf{XC_{max}}$, άρα και του $\boldsymbol{\tau_m}$, θα είναι 128-$\boldsymbol{\tau_m}\cdot f_s$. Αν γίνει το ίδιο με τη μέθοδο του ετεροφάσματος, αφενός μεν, χρήσιμα θα είναι μόνο τα μισά συχνοτικά δείγματα που ορίζονται στις θετικές συχνότητες μέχρι τη συχνότητα Nyquist, αφετέρου από αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ένα τμήμα τους το οποίο βρίσκεται μέσα σε μία ζώνη συχνοτήτων π.χ. 2.5-12Hz.

Για το παράδειγμα των 128 δειγμάτων με ρυθμό δειγματοληψίας f_s=125samples/sec, στο θετικό συχνοτικό πεδίο απομένουν 64 δείγματα και στη ζώνη των 2.5-12Hz μόλις 10 δείγματα (σε αντίθεση με τα 128-$\tau_m \cdot f_s$ που είναι διαθέσιμα στην ετεροσυσχέτιση). Για διπλάσιο χρονικό παράθυρο, για 256 χρονικά δείγματα, ο αριθμός αυτός διπλασιάζεται στο πεδίο συχνοτήτων. Από αυτά τα 10 επιλεγμένα συχνοτικά δείγματα, χρήσιμα είναι μόνο όσα βρίσκονται σε συχνότητες $\mathbf{f_i}$ που εμφανίζουν ισχυρή συνοχή $\mathbf{C_i}$ καθώς η κλίση της ευθείας υπολογίζεται με μέθοδο σταθμισμένων τετραγώνων (*weighted least-squares*) με βάρη $\mathbf{C_i^2/(1-C_i^2)}$ (*Poupinet et al., 1984*) ή χρησιμοποιούνται μόνο δείγματα **i** με αντίστοιχη συνοχή $\mathbf{C_i>0.75}$ (*Nishimura et al., 2005*) ή γίνεται συνδυασμός των δύο προηγούμενων περιορισμών (*Got et al., 1994*). Άρα περιορίζεται ακόμη περισσότερο ο αριθμός δειγμάτων από τα οποία υπολογίζεται ο χρόνος $\boldsymbol{\tau_m}$ μέσω της κλίσης της φάσεως του ετεροφάσματος. Η στατιστική σημαντικότητα μιας τέτοιας προσέγγισης είναι σε αυτή την περίπτωση προβληματική.

Στην πράξη, τα σήματα που θα χρησιμοποιηθούν θα έχουν διάρκεια πολύ μεγαλύτερη από 1sec όταν εξετάζονται οι πλήρεις καταγραφές και έτσι ο αριθμός δειγμάτων θα είναι επαρκής. Υπάρχει όμως ένα σημαντικότερο πρόβλημα. Η φάση του ετεροφάσματος, φ(f), *αναδιπλώνεται* στο διάστημα [-π,π] και αυτό έχει ως συνέπεια τον σχηματισμό μιας «πριονωτής» μορφής στο διάγραμμα φ(f) της αναδιπλωμένης φάσης (Παράρτημα Β, Σχήματα Β.22). Υπάρχουν διαδικασίες που μετατρέπουν τη φάση σε μη-αναδιπλωμένη (*phase un-wrapping*) αλλά με τη σειρά τους ορισμένες φορές δε λειτουργούν σωστά και το αποτέλεσμα που δίνουν είναι εσφαλμένο (Παράρτημα Β, Σχήμα Β.23$_\Delta$).

Στο Σχήμα 1.8_B παρουσιάζεται η φάση του ετεροφάσματος τόσο η αναδιπλωμένη (με μπλε γραμμή) όσο και η μη-αναδιπλωμένη (με κόκκινη γραμμή). Με κόκκινα σημεία επάνω στη μη-αναδιπλωμένη φάση σημειώνονται τα επιλεγμένα δείγματα που βρίσκονται στη συχνοτική ζώνη των 2-15Hz και με συνοχή μεγαλύτερη από 90%. Η μέση συνοχή $\mathbf{m_{coh}}$ σε αυτές της συχνότητες στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι ιδιαίτερα υψηλή ($\mathbf{m_{coh}}$=0.995) ενώ στο κάτω μέρος του σχήματος αναγράφεται η τιμή της χρονικής καθυστέρησης, επιπλέον του χρόνου $\boldsymbol{\tau_m}$ από την ετεροσυσχέτιση, που υπολογίστηκε από την κλίση της φάσης του ετεροφάσματος ($-2.65\cdot10^{-3}$sec). Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 125samples/sec άρα η περίοδος δειγματοληψίας είναι 0.008sec. Τα δύο σήματα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή αυτών των διαγραμμάτων είχαν ήδη μετατοπιστεί στη χρονική καθυστέρηση της βέλτιστης ταύτισής τους, $\boldsymbol{\tau_m}$, με τη μέθοδο ετεροσυσχέτισης επάνω στα διακριτά χρονικά δείγματα.

Η κλίση της φάσης του ετεροφάσματος σε αυτή την περίπτωση δίνει μια καλύτερη προσέγγιση του πραγματικού $\boldsymbol{\tau_m}$, διορθώνοντας το αρχικό που υπολογίστηκε με τη μέθοδο ετεροσυσχέτισης, καθώς εκείνο περιορίζεται σε ακρίβεια ίση με την περίοδο δειγματοληψίας (εδώ 8ms). Παρατηρείται επίσης ότι η μη-αναδιπλωμένη φάση βγαίνει εκτός του ορίου τιμών [-π,π] στο οποίο είναι επικεντρωμένο το διάγραμμα γύρω στα 26Hz όπου εμφανίζεται μια απότομη πτώση στη συνοχή (σημειώνεται ότι τα αρχικά σήματα είναι αφιλτράριστα). Αυτό υποδεικνύει ότι η ίδια η διαδικασία «*un-wrap*», που μετατρέπει την αναδιπλωμένη φάση σε μη-αναδιπλωμένη, πρέπει να λειτουργεί μόνο ανάμεσα σε συχνότητες που εμφανίζουν υψηλή συνοχή.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, καθώς αναζητείται μια μικρή διόρθωση σε ένα ήδη υπολογισμένο χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$, η διαδικασία «*un-wrap*» είναι σχεδόν περιττή καθώς δεν εμφανίζεται αναδίπλωση στην περιοχή των 2-15Hz στην οποία γίνεται η γραμμική παλινδρόμηση για τον υπολογισμό της κλίσης της φάσης. Το πρόβλημα γίνεται έντονο όταν *δεν* έχει προηγηθεί χρονική μετατόπιση στον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ με την απλή μέθοδο ετεροσυσχέτισης και η καθυστέρηση που πρέπει να υπολογιστεί είναι μεγαλύτερη από 8msec. Αυτή είναι η περίπτωση που πρέπει να αντιμετωπιστεί στην πράξη καθώς οι χρόνοι $\boldsymbol{\tau_m}$ μπορεί να είναι της τάξεως μερικών 10άδων-100άδων msec ή και μεγαλύτεροι από 1sec. Αν τα δύο σήματα έχουν μια αρχική μετάθεση (***offset***) από τη χρονική καθυστέρηση της βέλτιστης ταύτισης μεγαλύτερη από μερικά χρονικά δείγματα τότε η φάση αναδιπλώνεται μέσα στην περιοχή των 2-15Hz. Εάν η μετατροπή σε μη-αναδιπλωμένη φάση (*un-wrap*) δεν γίνει σωστά, το αποτέλεσμα της μέτρησης της κλίσης της φάσης του ετεροφάσματος θα είναι λανθασμένο (Σχήμα $Β.23_Δ$). Σε εσφαλμένες μετρήσεις μπορεί να οδηγήσει και η ίδια η διαδικασία ομαλοποίησης (*smoothing*) που προηγείται καθώς η ομαλοποίηση μιας σειράς μιγαδικών αριθμών με ταχύτατα μεταβαλλόμενη φάση επηρεάζει το αποτέλεσμα με τάση να το μηδενίσει (*Schaff et al., 2004* με αναφορά σε *Jenkins & Watts, 1968*).

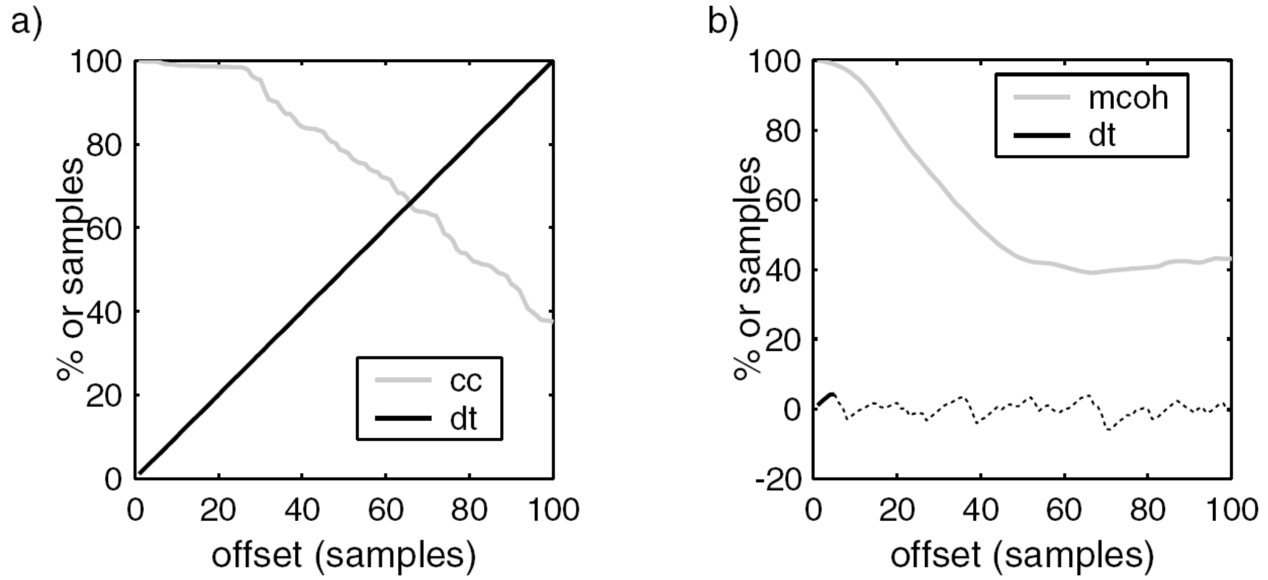
Η ετεροσυσχέτιση στο πεδίο χρόνου, απεναντίας, είναι λιγότερο επιρρεπής σε τέτοια προβλήματα ενώ η δράση της μπορεί να περιοριστεί στις συχνότητες ενδιαφέροντος με τη χρήση κατάλληλων ζωνοπερατών φίλτρων πριν την εφαρμογή της. Στο Σχήμα 1.11 παρουσιάζεται μια σύγκριση των δύο μεθόδων για 2 όμοια σήματα σε ένα παράθυρο 256 δειγμάτων με συχνότητα δειγματοληψίας 100samples/sec, για διαφορετικούς χρόνους αρχικής στοίχισης (*offset*, άξονας-x) από την εργασία των *Schaff et al. (2004)*. Για *offset*=0 ο χρόνος $\boldsymbol{\tau_m}$=0 εν τόσο το $\mathbf{XC_{max}}$ (Cc στο Σχήμα 1.11_A) όσο και το $\mathbf{m_{coh}}$ τείνουν προς τη μονάδα. Επαναλαμβάνοντας τις μετρήσεις για διαφορετική αρχική στοίχιση (μεγαλύτερο offset) ο χρόνος $\boldsymbol{\tau_m}$ που υπολογίζεται πρέπει να ισούται με το *offset* ώστε μια μετατόπιση κατά $\boldsymbol{\tau_m}$ να ξαναφέρει τις κυματομορφές σε βέλτιστη ταύτιση. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση της μεθόδου ετεροσυσχέτισης στο Σχήμα 1.11_A στο οποίο η καμπύλη **dt** (δηλαδή $\boldsymbol{\tau_m}$) ταυτίζεται με την ευθεία y=x, άρα $\boldsymbol{\tau_m}$=offset όπως ακριβώς πρέπει να συμβαίνει. Στην περίπτωση της μεθόδου συνοχής αυτό ισχύει μόνο για **offset ≤ 8 δείγματα ή 80ms** ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται μια διακύμανση γύρω από το dt=0 (με διακεκομμένη γραμμή).

Παράλληλα, η μέση συνοχή $\mathbf{m_{coh}}$, ελαττώνεται πολύ πιο γρήγορα απ' ότι η αντίστοιχη $\mathbf{XC_{max}}$ (Cc) για τα ίδια *offset*, ενώ είναι γνωστό εξ' αρχής ότι τα δύο σήματα είναι όμοια και θα έπρεπε να δίνουν καλή συνοχή και μέγιστη ετεροσυσχέτιση ανεξάρτητα από το *offset*. Όσον αφορά στην ετεροσυσχέτιση αναφέρθηκε ήδη ένας λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό (η περιβάλλουσα $\mathbf{C_{e\pm}}$) καθώς και ο τρόπος με τον οποίο μπορούν να διορθωθούν οι μετρήσεις του $\mathbf{XC_{max}}$ με έναν παράγοντα της μορφής της εξ. (1.3).

Η διακριτοποίηση του σήματος, κατά τη μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό, δημιουργεί, όπως ήδη περιγράφθηκε, ένα πρόβλημα που έχει να κάνει με την ακρίβεια στην προσέγγιση του χρόνου $\boldsymbol{\tau_m}$ με τη μέθοδο ετεροσυσχέτισης, καθώς περιορίζει σε μια ακρίβεια της τάξεως της περιόδου δειγματοληψίας. Το πρόβλημα αυτό είναι απαραίτητο να ξεπεραστεί προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη λεπτομέρεια κατά τις εφαρμογές με όμοιους σεισμούς, η οποία είναι της τάξεως του 1ms. Αυτό μπορεί να γίνει με δύο τρόπους.

Ο ένας είναι με τον υπολογισμό της κλίσης της φάσεως του ετεροφάσματος, που όπως αναφέρθηκε παρουσιάζει κάποια προβλήματα για μεγάλες χρονικές καθυστερήσεις $\boldsymbol{\tau_m}$ και καλό θα ήταν να απορριφθεί. Ο άλλος τρόπος που είναι σχετικά πιο εύκολος και ασφαλής είναι να γίνει ένα είδος επαναδειγματοληψίας στην καμπύλη της ετεροσυσχέτισης γύρω από την περιοχή του $\boldsymbol{\tau_m}$ όπου παρουσιάζεται το ολικό μέγιστο $\mathbf{XC_{max}}$. Αυτό γίνεται με μια μη-γραμμική παλινδρόμηση, κατά προτίμηση παραβολική (*Deichmann & Fernandez, 1992*), και στη συνέχεια με υπολογισμό των τιμών της καμπύλης αυτής μέσα στην ίδια περιοχή αλλά για ένα πιο πυκνό χρονικό κάναβο, δηλαδή για μικρότερη περίοδο δειγματοληψίας, έστω 0.001ms. Με αυτόν τον τρόπο η θέση του ολικού μεγίστου (της κορυφής της παραβολής) διαφοροποιείται ελάχιστα από την αρχική του θέση και ο νέος χρόνος $\boldsymbol{\tau_m}'$ δίνει μια καλύτερη προσέγγιση του πραγματικού. Η τιμή του ίδιου του $\mathbf{XC_{max}}'$ δε μπορεί να διαφέρει ιδιαίτερα από την αρχική, όχι σε βαθμό που να επηρεάζει το αποτέλεσμα από το οποίο κρίνεται το εάν τα δύο σήματα είναι όμοια ή όχι.

Στο Κεφάλαιο 3 θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων ετεροσυσχέτισης και συνοχής που προκύπτουν από έναν μεγάλο αριθμό ζευγών σημάτων. Σκοπός είναι να βρεθεί κατ' αρχήν ένα ασφαλές μέτρο ομοιότητας δύο σημάτων. Η τιμή του $\mathbf{XC_{max}}$ σε συνδυασμό με κάποιες άλλες ιδιότητες που πρέπει να παρουσιάζει η καμπύλη της ετεροσυσχέτισης δύο όμοιων σημάτων θα δώσει ένα σύνθετο μέτρο ομοιότητας το οποίο θα καλείται απλώς «**βαθμός ομοιότητας**» (*Similarity*).



Σχήμα 1.11: Σύγκριση της αποτελεσματικότητας των μεθόδων ετεροσυσχέτισης (a) και συνοχής (b) σε ένα δείγμα 256 samples με συχνότητα δειγματοληψίας 100Hz (από NCSN) με μεταβαλόμενες χρονικές μετατοπίσεις (οι οποίες πρέπει να προσδιοριστούν από την κάθε μέθοδο) από 0 έως 1sec (100 samples). Με συμπαγή μαύρη γραμμή παρουσιάζεται ο χρόνος **dt** ($\boldsymbol{\tau_m}$ στο κείμενο) που υπολόγισε η κάθε μέθοδος για το εκάστοτε *offset* ενώ με γκρίζα γραμμή οι αντίστοιχες τιμές **Cc** ($\mathbf{XC_{max}}$ στο κείμενο) και $\mathbf{m_{coh}}$ (Σχήμα από *Schaff et al., 2004*)

1.6 ~ *Ετεροσυσχέτιση και όμοιοι σεισμοί*

Στις προηγούμενες ενότητες αναλύθηκε η γραμμική συνάρτηση ετεροσυσχέτισης αλλά δεν έγινε λόγος για την πρακτική της χρήση στην περίπτωση των όμοιων σεισμών. Στη συνέχεια θα γίνει περιγραφή των πληροφοριών που μπορεί να δώσει ανάλογα με τη χρήση της καθώς και τον βαθμό στον οποίο εξαρτάται από διάφορους παράγοντες.

Δύο όμοιοι σεισμοί οφείλουν να έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά *σχεδόν* ίδια (το «σχεδόν» είναι ένα θέμα που πρέπει να ποσοτικοποιηθεί περεταίρω):

1) υπόκεντρο
2) σεισμική πηγή
3) μηχανισμό γένεσης
4) διαδρομές σεισμικών ακτίνων

Αυτά προκύπτουν άμεσα από την κινηματική θεωρία των ελαστικών κυμάτων (*Aki & Richards, 1980; Lay,T. & Wallace, T.C., 1995*):

$$u_n(x,t) = s(t) * i(t) * \sum_{i=1}^{5}\left(m_i \cdot G_{in}(x,t)\right) \tag{1.10}$$

όπου $u_n(x,t)$ είναι η μετατόπιση σε μια θέση x και χρόνο t κατά την κατακόρυφη, ακτινική και εφαπτομενική συνιστώσα (για n=1,2,3 αντίστοιχα), s(t) είναι η συνάρτηση της σεισμικής πηγής, i(t) είναι η απόκριση του σεισμομέτρου, ο δείκτης του αθροίσματος i αναφέρεται στα στοιχεία m_i του τανυστή σεισμικής ροπής M (i=1,2,3,4,5, για έναν τανυστή χωρίς ισοτροπική συνιστώσα), $G_{in}(x,t)$ είναι η συνάρτηση *Green* (*Green's Function*) για το στοιχείο **i** και τη **n** συνιστώσα σε θέση και χρόνο (x,t) και το σύμβολο ∗ συμβολίζει την πράξη της συνέλιξης. Η εξίσωση αυτή συνοψίζει τους παράγοντες που παίζουν ρόλο στον σχηματισμό μιας κυματομορφής. Κατά τη σύγκριση κυματομορφών το i(t) απαλείφεται καθώς χρησιμοποιούνται κυματομορφές από έναν ορισμένο σταθμό κάθε φορά. Η σεισμική πηγή, s(t), σε πολλές περιπτώσεις μικροσεισμών θεωρείται απλή ή παρόμοια ανάμεσα στους διάφορους μικροσεισμούς οπότε σε πρώτη προσέγγιση αγνοείται. Απομένουν οι όροι $\mathbf{m_i}$ και $\mathbf{G_{in}}$.

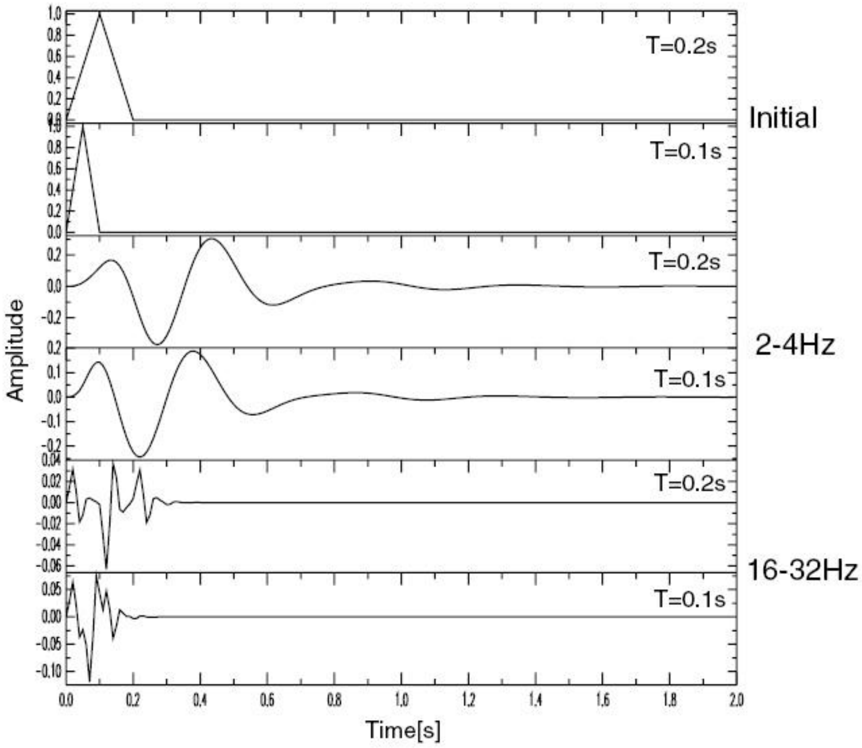
Η συνάρτηση *Green*, $\mathbf{G_{in}}$, περιέχει την επίδραση του μέσου διάδοσης από την εστία μέχρι τον σταθμό κατά τις διαδρομές των σεισμικών ακτίνων που φθάνουν και καταγράφονται ως φάσεις σε διαφορετικούς χρόνους, με διαφορετικά πλάτη και πολικότητες. Συνεπώς η $\mathbf{G_{in}}$ περιέχει όλη την πληροφορία για τη δομή που συναντούν οι σεισμικές ακτίνες κατά τη διαδρομή τους καθώς και την άγνωστη θέση της εστίας. Οποιαδήποτε μεταβολή στο υπόκεντρο (και συνεπώς στην υποκεντρική απόσταση) ή στη δομή (στην κατανομή των ταχυτήτων διάδοσης και την εξασθένηση) επιφέρει μεταβολές στην $\mathbf{G_{in}}$ και αλλαγή στο σχήμα της κυματομορφής.

Οι όροι $\mathbf{m_i}$ εξαρτώνται από τον εκάστοτε μηχανισμό γένεσης. Προκειμένου για όμοιους σεισμούς, οι εστίες τους αναμένεται να βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους (όμοιο υπόκεντρο), αλλιώς αλλάζει η $\mathbf{G_{in}}$. Αυτό κατ' επέκταση σημαίνει πως, πιθανότατα, αυτοί οι σεισμοί ανήκουν στο ίδιο ρήγμα, άρα έχουν όμοια προσανατολισμένο επίπεδο ολίσθησης και η γωνία ολίσθησης δεν πρέπει να διαφέρει ιδιαίτερα. Αν *δεν* ισχύει κάτι τέτοιο τότε ενδέχεται δύο σεισμοί με κατά τα άλλα όμοιες παραμέτρους να μη δώσουν όμοιες κυματομορφές.

Ένας από τους τρόπους να διαπιστωθεί αν δύο σχετικά όμοιοι σεισμοί παρουσιάζουν μια διαφορά στον μηχανισμό γένεσης είναι να συγκριθούν οι λόγοι των κορυφή-προς-κορυφή (*peak-to-peak*) πλατών των P και S κυμάτων τους: αν ο μηχανισμός δεν αλλάζει και με την προϋπόθεση τα υπόκεντρα να είναι στην ίδια περίπου θέση, θα πρέπει ο λόγος αυτός να είναι ο ίδιος και στους δύο σεισμούς σε έναν δεδομένο σταθμό. Έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι υπολογισμού μηχανισμού γένεσης από δεδομένα τόσο της πολικότητας των πρώτων αφίξεων όσο και από τα απόλυτα ή προσημασμένα πλάτη των P και S κυμάτων (*Julian, 1986; Julian & Foulger, 1996*). Οι γραμμικές αυτές μέθοδοι θεωρείται πως μπορούν να προσεγγίσουν με τον βέλτιστο τρόπο τους πραγματικούς μηχανισμούς, μπορούν να χαλαρώσουν τα κριτήρια της πολικότητας, τα δεδομένα των οποίων δεν είναι πάντοτε ακριβή, και μπορούν να συμπεριλάβουν περιπτώσεις στις οποίες υπάρχει σημαντικό ποσοστό CLVD (*Compensated Linear Vector Dipole*) συνιστώσας μέσα στους τανυστές σεισμικής ροπής, κάτι που συναντάται συχνά σε περιοχές με ηφαιστειακή ή γεωθερμική δραστηριότητα, και στις οποίες η προσέγγιση του διπλού ζεύγους δυνάμεων (*Double Couple* ή DC) δεν δίνει σωστά αποτελέσματα.

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται, επίσης, πως η ομοιότητα των κυματομορφών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δομή του υπεδάφους κοντά στον σταθμό (*Nakahara, 2004* με αναφορά σε *Hutchings & Wu, 1990*) καθώς έχει βρεθεί πως για τα κύματα S οι τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ είναι υψηλές όταν η ενδοαπόσταση των γεγονότων είναι μικρότερη από 1-3km, ανάλογα με τη γεωλογία της περιοχής. Σύγκριση της ομοιότητας κυματομορφών μπορεί να γίνει επίσης σε σεισμικές καταγραφές του *ίδιου* σεισμού από σεισμικές διατάξεις, από σταθμούς δηλαδή οι οποίοι βρίσκονται σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους σε σύγκριση με τη μέση υποκεντρική απόσταση του δεδομένου σεισμού και οι οποίοι φέρουν τον ίδιο τύπο οργάνου. Στην Πελοπόννησο, μια τέτοια σεισμική διάταξη είναι η TRISAR στην Τρίπολη (*Pirli et al., 2007*) στην οποία οι 3 από τους 4 σταθμούς έχουν κοινό τύπο οργάνου και απέχουν μεταξύ τους κατά ~250m. Έχει βρεθεί πως οι τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ των κυμάτων P *ενός* σεισμού που καταγράφονται σε σεισμικές διατάξεις (*Nakahara, 2004* με αναφορά σε *Menke et al., 1990*) μειώνονται με *εκθετικό* τρόπο όσο αυξάνεται η συχνότητα ή η ενδοαπόσταση των *σταθμών*. Κατά ανάλογο τρόπο οι καταγραφές μιας συστάδας σμηνοσεισμών (όμοιων σεισμών) σε *έναν* σταθμό μπορούν να θεωρηθούν σαν καταγραφές ενός σεισμού (στη θέση του σταθμού) από μια διάταξη θαμμένων σταθμών ώστε να επιτραπεί η μελέτη της ετερογενούς δομής γύρω από τις εστίες, με την προϋπόθεση οι παράμετροι των σεισμικών πηγών να είναι όμοιες (*Nakahara, 2004* με αναφορά σε *Spudich & Bostwick, 1987*).

Στην εργασία του *H.Nakahara* (2004) εξετάσθηκε ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η τιμή του μεγίστου της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης, $\mathbf{XC_{max}}$, ως προς τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν. Η μελέτη έγινε σε μετασεισμούς που ακολούθησαν τον κύριο σεισμό M_w=6.9 του 1995 στο Kobe της Ιαπωνίας (γνωστού και ως σεισμού του Hyogo-Ken Nanbu, 1995), με κυματομορφές κατακόρυφης συνιστώσας σε δύο σταθμούς που βρίσκονται σε μέση υποκεντρική απόσταση 36-42km. Οι μετασεισμοί χωρίστηκαν σε συστάδες, καθεμία από τις οποίες χαρακτηριζόταν από ένα κύριο γεγονός (*master event*). Επιλέχθηκαν 11 κύρια γεγονότα με μεγέθη $2.9 \leq \mathbf{M} \leq 3.5$ ενώ οι υπόλοιποι μετασεισμοί που χρησιμοποιήθηκαν είχαν μεγέθη $\mathbf{M}>2$ και βρίσκονταν σε μια ακτίνα R<5km από τους κύριους σεισμούς. Υπολογίστηκαν οι τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ για τα διάφορα ζεύγη γεγονότων σε χρονικά παράθυρα εύρους 2sec που περιελάμβαναν τον κυματοσυρμό των P και σε διάφορες συχνοτικές ζώνες (2-4Hz, 4-8Hz, 8-16Hz, 16-32Hz). Σε αυτές τις συχνοτικές ζώνες που εξετάστηκαν οι κυματομορφές παρατηρήθηκε σταδιακή μείωση του $\mathbf{XC_{max}}$ από τις χαμηλές προς τις υψηλές συχνότητες, γεγονός που συμφωνεί με την παρατήρηση που έγινε στην περίπτωση της συνοχής, στην οποία για δύο όμοιους σεισμούς η ισχυρή συνοχή εμφανίζεται κυρίως στις χαμηλές συχνότητες.

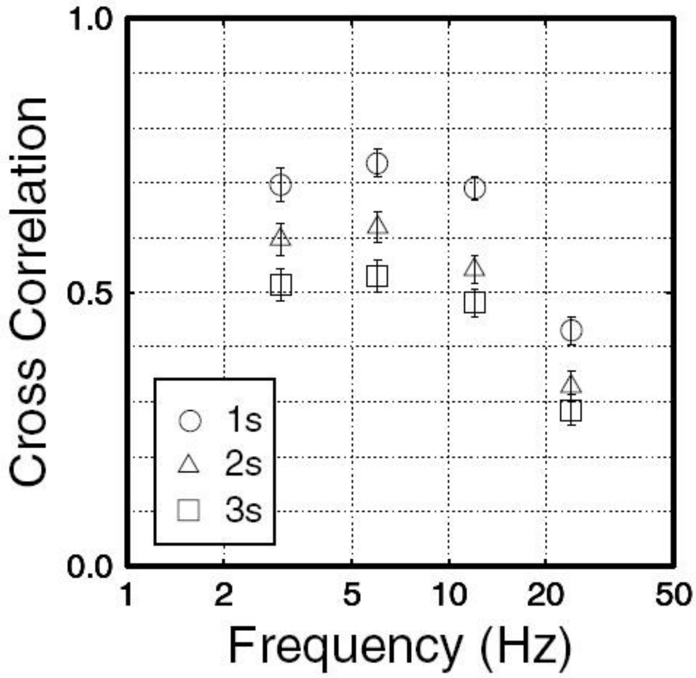


Σχήμα 1.12: Κυματομορφές δύο απλών τριγωνικών πηγών διάρκειας 0.2s και 0.1s. Στα δύο επάνω διαγράμματα παρουσιάζονται οι αρχικές τους (αφιλτράριστες) μορφές, στα δύο μεσαία η μορφή τους στη ζώνη των 2-4Hz και στα δύο κάτω η μορφή τους στη ζώνη των 16-32Hz. (*Σχήμα από Nakahara, 2004*)

Όσον αφορά στη **σεισμική πηγή** s(t), βρέθηκε πως η τιμή του **XC_{max}** επηρεάζεται από αυτήν όταν η σύγκριση των κυματομορφών γίνεται σε σχετικά υψηλές συχνότητες, όπως στη ζώνη των 16-32Hz, ενώ αντίθετα στη ζώνη των 2-4Hz το **XC_{max}** είναι μεγαλύτερο (Σχήμα 1.13). Αυτό φαίνεται στο παράδειγμα του Σχήματος 1.12 στο οποίο συγκρίνονται οι μορφές δύο φιλτραρισμένων πηγών στις δύο αυτές συχνοτικές ζώνες (*Nakahara, 2004*). Πέρα από την αναφορά στη μείωση του **XC_{max}** στις υψηλές συχνότητες σε σύγκριση με τις χαμηλές δεν αναφέρεται η ακριβής τιμή του στο παράδειγμα αυτού του σχήματος, ωστόσο είναι ιδιαίτερα εμφανές από τις μορφές των κυμάτων πως η συσχέτιση αναμένεται να είναι πολύ μικρότερη στη ζώνη των 16-32Hz καθώς το σχήμα των δύο κυματομορφών είναι τελείως διαφορετικό. Η συχνότητα των 8Hz θεωρείται ως χαρακτηριστική συχνότητα πάνω από την οποία η διάρκεια της σεισμικής πηγής αρχίζει να επιδρά στην τιμή του **XC_{max}**. Έτσι αν τα σήματα περαστούν από κατωπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 8Hz ελαχιστοποιείται η επιρροή της διαφοράς στη διάρκεια της πηγής μεταξύ των υπό σύγκριση σεισμών στην τιμή του **XC_{max}**, με την προϋπόθεση ότι οι μορφές των πηγών αυτών μπορούν με καλή προσέγγιση να θεωρηθούν ως απλές, τριγωνικές ή τραπεζοειδείς.

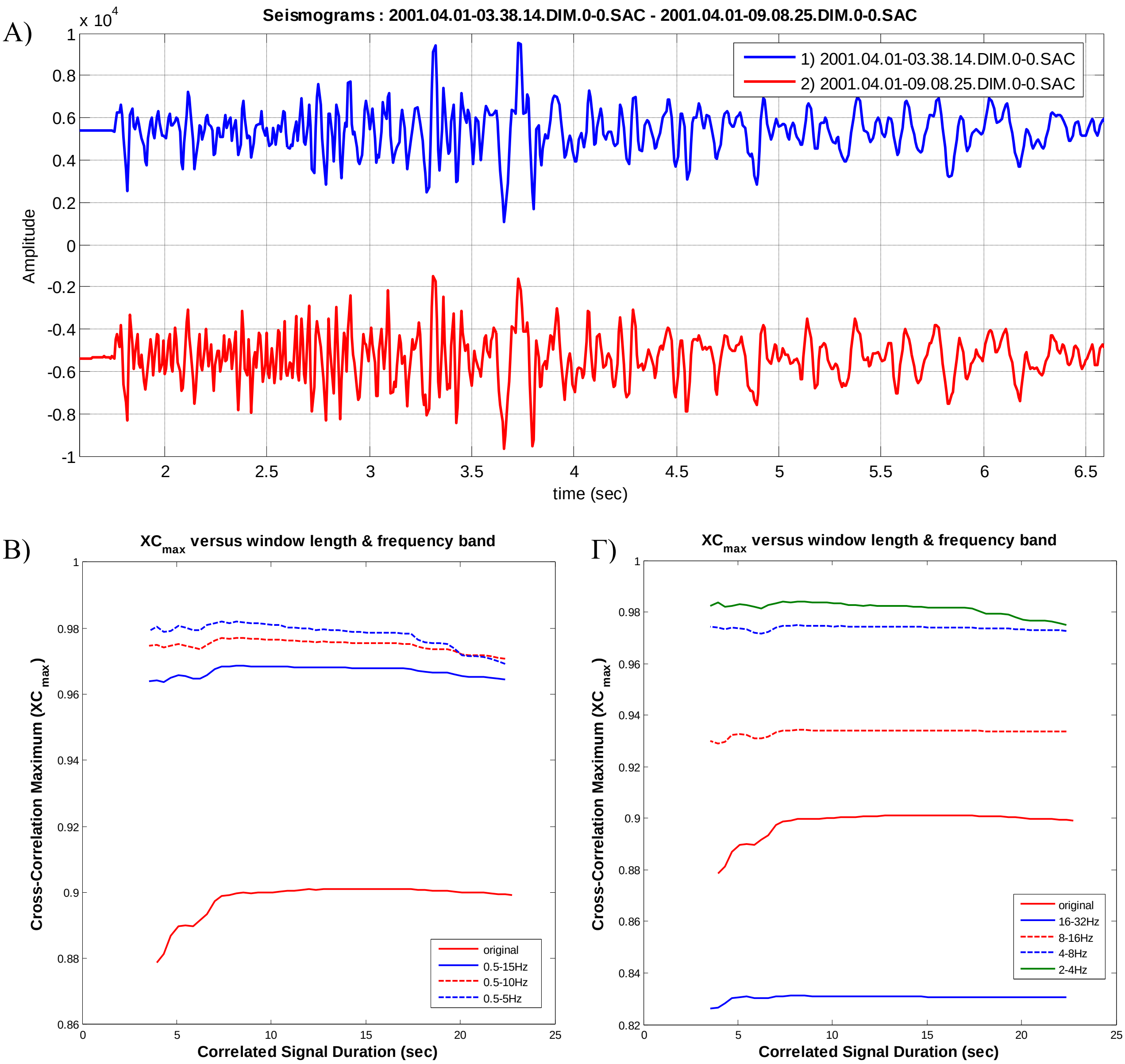
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, δύο σεισμοί που συμβαίνουν στην ίδια συστάδα σμηνοσεισμών (*multiplet*) μπορεί να διαφέρουν ως προς το μηχανισμό γένεσης (*Dodge et al., 1995; Deichmann & Garcia-Fernandez, 1992*) και αυτή η διαφορά μπορεί να ανιχνευθεί άμεσα από τη μεταβολή του λόγου των πλατών των S και P κυμάτων (*Julian & Foulger, 1996*) δεδομένου ότι οι σμηνοσεισμοί αυτοί έχουν όμοιες υποκεντρικές θέσεις. Στην εργασία του *Nakahara* (2004), εντοπίστηκαν ζεύγη όμοιων σεισμών για τους οποίους ήταν γνωστοί οι μηχανισμοί γένεσης και άρα γνωστή η διαφορά τους η οποία ποσοτικοποιήθηκε ως η ελάχιστη γωνία στρέψης (*minimum rotation angle*) κατά την οποία εάν στραφεί ο ένας μηχανισμός μπορεί να μετατραπεί στον δεύτερο. Η γωνία αυτή κυμαίνεται από 0°-120°. Από τη σύγκριση όμως των **XC_{max}** ως προς τις ελάχιστες γωνίες στρέψης δεν παρατηρήθηκε κάποια συσχέτιση. Η ερμηνεία που δόθηκε ήταν ότι επειδή οι συγκρίσεις έγιναν σε χρονικά παράθυρα που περιελάμβαναν μόνο τους κυματοσυρμούς των P-κυμάτων, η επίδραση του μηχανισμού γένεσης ήταν κυρίως στα πλάτη των κυματομορφών και όχι στις μορφές τους και έτσι δεν παρατηρήθηκε κάποια συστηματική μείωση του $\mathbf{XC_{max}}$ ως προς τις γωνίες.

Τέλος, μετρήθηκε (*Nakahara, 2004*) η μεταβολή του $\mathbf{XC_{max}}$ ως προς την απόσταση μεταξύ των υπό σύγκριση γεγονότων στις συχνοτικές ζώνες των 2-4Hz και 4-8Hz (πάντα σε συχνότητες μικρότερες από 8Hz ώστε να αποκλειστεί η επίδραση της σεισμικής πηγής). Παρατηρήθηκε ότι όσο αυξάνεται η ενδοαπόσταση ανάμεσα σε δύο σεισμούς, το $\mathbf{XC_{max}}$ μειώνεται. Θεωρήθηκε επίσης η λεγόμενη «απόσταση συσχέτισης» ως η απόσταση εκείνη πάνω από την οποία είναι $\mathbf{XC_{max}}\leq 0.6$ και οι μετρήσεις έδειξαν ότι αυτή η απόσταση διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Συγκεκριμένα βρέθηκε μικρότερη από 4.5km στην περιοχή Awaji και μεγαλύτερη από 4.5 στην περιοχή του Kobe. Αυτό θεωρήθηκε ως ένδειξη ότι η ετερογένεια στη δομή ταχυτήτων γύρω από τα υπόκεντρα (με την προϋπόθεση ότι οι πηγές μπορούν να θεωρηθούν απλές) είναι ισχυρότερη στην περιοχή Awaji απ' ότι στην περιοχή Kobe.



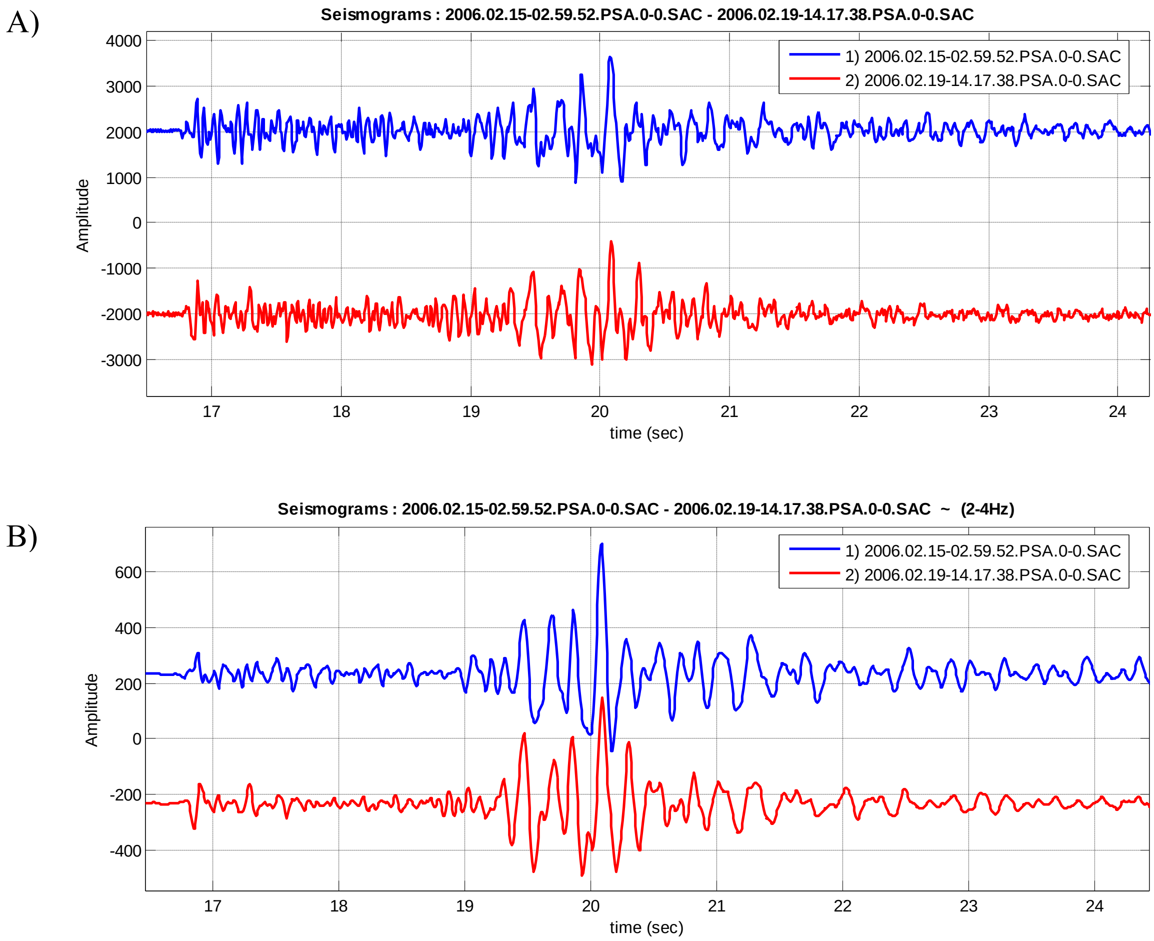
Σχήμα 1.13: Η εξάρτηση του $\mathbf{XC_{max}}$ από τη συχνότητα για διάφορα μήκη χρονικών παραθύρων, από τα δεδομένα του σταθμού FUKT του GROUP-HYOGO, για μετασεισμούς του Σεισμού του Kobe (1995). Ο σταθμός βρίσκεται βόρεια της πόλης του Kobe. (*Σχήμα από Nakahara, 2004*).

Στην ίδια εργασία (*Nakahara, 2004*) έγινε και μία μελέτη της επίδρασης του μήκους του χρονικού παραθύρου στις αντίστοιχες τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ για τις διάφορες συχνοτικές ζώνες. Έγιναν μετρήσεις με εύρος παραθύρου 1, 2 και 3sec (μόνο κύματα P) και παρατηρήθηκε ότι σε όλες τις συστάδες με την ελάττωση του μήκους του παραθύρου από 2 σε 1sec γενικά αυξήθηκε το $\mathbf{XC_{max}}$ κατά 0.1 ενώ με την αύξηση σε 3sec τα $\mathbf{XC_{max}}$ πήραν λίγο μικρότερες τιμές από αυτές που προέκυψαν από παράθυρο μήκους 2sec. Το παράθυρο του **1sec** είναι επίσης *ακατάλληλο* για τη μέτρηση της λεγόμενης «απόστασης συσχέτισης» (*correlation distance*) όπως αναφέρει ο *Nakahara* (2004) καθώς *δεν* δίνει τιμές $\mathbf{XC_{max}}\leq 0.6$ και στερείται της πληροφορίας που δίνει η κυματο-ουρά των P για τη διάδοση των επιμέρους κυμάτων σε διαφορετικές περιοχές του μέσου τα οποία έχουν ελάχιστα διαφορετικές αφίξεις που περιέχονται μέσα στα παράθυρα των 2-3sec.



Σχήμα 1.14: Α) δύο αφιλτράριστες κυματομορφές όμοιων σεισμών, Β) σύγκριση των τιμών $\mathbf{XC_{max}}$ για σταδιακά μικρότερα μήκη χρονοσειρών και για διάφορες συχνοτικές ζώνες, Γ) όμοια με το (Β) αλλά για πιο περιορισμένες ζώνες συχνοτήτων. Από το σχήμα φαίνεται πως η «ιδανικότερη» ζώνη συχνοτήτων για τον χαρακτηρισμό όμοιων σεισμών είναι μεταξύ 2-4Hz για τον συγκεκριμένο σταθμό (PSA) ο οποίος φέρει όργανο των 2Hz. Ανάλογη εικόνα ως προς τις ζώνες συχνοτήτων παρουσιάζεται και σε σταθμούς broadband (π.χ. LAK) με τη διαφορά ότι το αρχικό σήμα πρέπει οπωσδήποτε να περαστεί από ένα ανωπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής ~0.5Hz λόγω της διαρκούς ύπαρξης θορύβου μεγάλης περιόδου.

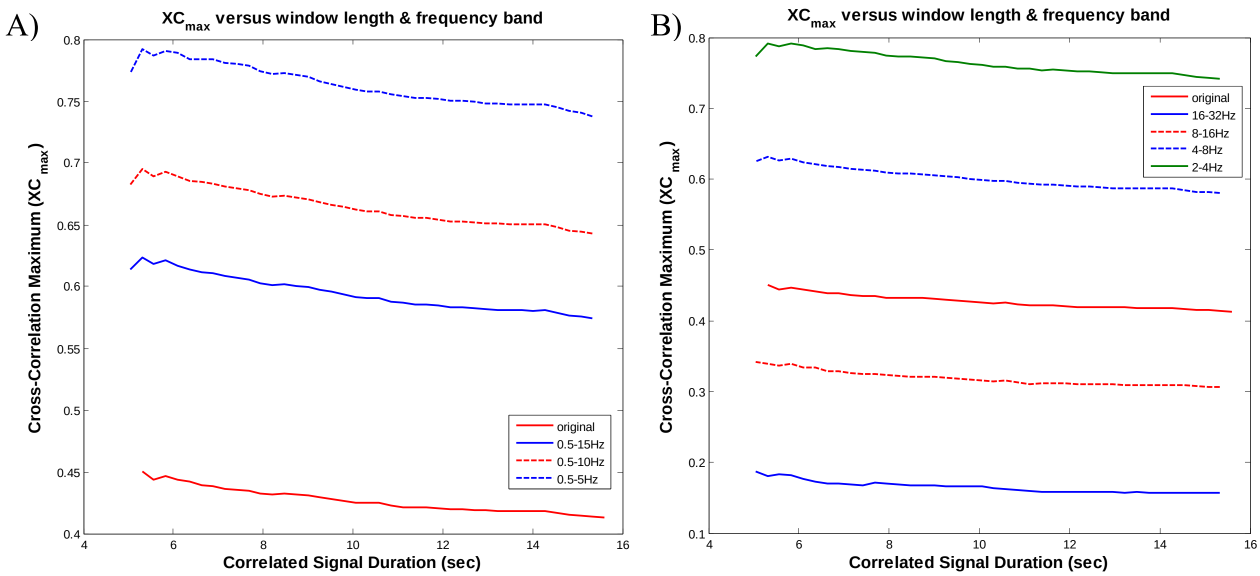
Ανάλογα αποτελέσματα προκύπτουν και κατά τη σύγκριση των *πλήρων* κυματομορφών όμοιων σεισμών (Σχήματα 1.14-16). Η επίδραση του μήκους του παραθύρου γίνεται πιο έντονη στις περιπτώσεις κατά τις οποίες το $\mathbf{XC_{max}}$ είναι σχετικά χαμηλό (Σχήμα 1.16). Αυτό έχει ως συνέπεια όταν γίνεται η σύγκριση ενός σήματος μικρής διάρκειας με μια σειρά σημάτων γενικά μεγαλύτερων διαρκειών να παρατηρείται ένα σχετικά αυξημένο «υπόβαθρο» στις τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ αυτού του γεγονότος σε σύγκριση με το αντίστοιχο υπόβαθρο που έχουν άλλα γεγονότα όταν χρησιμοποιούνται ως γεγονότα αναφοράς. Δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο ένα σφάλμα μεροληψίας (*bias error*) το οποίο χαρακτηρίζει ορισμένες γραμμές του πίνακα συσχέτισης που θα αναλυθεί λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3.



Σχήμα 1.15: A) κυματομορφές δύο σχετικά (αλλά όχι εντελώς) ανόμοιων σεισμών με αρχικό $\mathbf{XC_{max}}$=0.413, B) οι προηγούμενες κυματομορφές φιλτραρισμένες με ζωνοπερατό φίλτρο στα 2-4Hz ($\mathbf{XC_{max}}$=0.742), η ανομοιότητα παραμένει.

Ισχυρή είναι η επίδραση της επιλεγμένης συχνοτικής ζώνης στις τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ καθώς παρατηρείται μια γενική τάση προς αύξηση κατά τη μετάβαση από τις ζώνες υψηλών συχνοτήτων (16-32Hz) προς τις χαμηλότερες (2-4Hz). Οι αρχικές, αφιλτράριστες κυματομορφές δίνουν τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ λίγο μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στη ζώνη των 16-32Hz. Η γενική εικόνα που λαμβάνει κανείς με τις κυματομορφές στη ζώνη 2-4Hz είναι εκ πρώτης όψεως θετική όσον αφορά στον καθορισμό όμοιων σεισμών (Σχήμα 1.14_{Γ}). Ωστόσο, χρειάζεται προσοχή σε εκείνες τις περιπτώσεις των οποίων η τιμή $\mathbf{XC_{max}}$ στα 2-4Hz ξεπερνάει το κατώφλι που έχει τεθεί για τους όμοιους σεισμούς (Κεφ. 3) ενώ στην πραγματικότητα δεν είναι *τόσο* όμοιοι (Σχήμα 1.16_{Γ}).

Η αυτόματη διαδικασία που θα περιγραφθεί στο Κεφάλαιο 3 σκοπό έχει να υποδείξει σε έναν υπολογιστή πώς να διακρίνει και να ανιχνεύει γρήγορα όμοιους σεισμούς μέσα από μια ευρεία βάση δεδομένων. Υπάρχουν περιπτώσεις όμοιων σεισμών που για κάποιο λόγο μπορεί να παρουσιάζουν χαμηλή τιμή $\mathbf{XC_{max}}$ πριν γίνει το φιλτράρισμα, και η ομοιότητά τους να αναδεικνύεται όταν φιλτραριστούν. Με τη χρήση επιπλέον κριτηρίων γίνεται να απορριφθούν ορισμένες περιπτώσεις στις οποίες σεισμοί με $\mathbf{XC_{max}}$ μεγαλύτερο από το κατώφλι δεν είναι στην πραγματικότητα όμοιοι.



Σχήμα 1.16: Α) Μεταβολή του **XC$_{max}$** ως προς το μήκος παραθύρου σε διάφορες συχνοτικές ζώνες για τις κυματομορφές του Σχήματος 1.15$_A$, Β) όμοια με το (Α) αλλά για πιο περιορισμένες ζώνες συχνοτήτων.

1.7 ~ *Η Χρονική Μεταβολή των Καθυστερήσεων*

Δεν έγινε καμία αναφορά έως τώρα στην εξάρτηση της κυματομορφής από το χρόνο γένεσης. Είναι δυνατόν να εντοπιστούν όμοιοι σεισμοί που απέχουν χρονικά κατά ώρες ή ημέρες αλλά δεν αποκλείεται το ενδεχόμενο να βρεθούν όμοιοι σεισμοί με χρονική διαφορά ετών (Σχήμα 1.4 και Παράρτημα Α.3, Σχήματα Α.14, Α.15). Αν οι εδαφικές συνθήκες και οι σεισμικές παράμετροι είναι όμοιες δεν υπάρχει λόγος να μην είναι όμοιες οι κυματομορφές. Για τις εδαφικές συνθήκες αυτό είναι αληθές όταν δύο σεισμοί συμβούν μέσα σε ένα σχετικά μικρό χρονικό διάστημα, όπως διαδοχικά γεγονότα που συμβαίνουν μέσα σε μερικά λεπτά. Αν όμως οι χρόνοι γένεσης των δύο γεγονότων απέχουν χρονικά κατά μερικά έτη, ή πιο σωστά αν εντοπιστούν σε διαφορετικές χρονικές φάσεις ενός σεισμικού κύκλου, οι εδαφικές συνθήκες θα είναι πιθανότατα διαφορετικές, με τις σημαντικότερες επιπτώσεις να εντοπίζονται στην ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων και την εξασθένηση (*attenuation*).

Η μέτρηση της σχετικής μεταβολής στην ταχύτητα μπορεί να γίνει με μια μέθοδο που ονομάζεται «Συμβολομετρία Κυματο-ουράς» (***Coda-Wave Interferometry* ή CWI**) (*Snieder, 2006*). Η μέθοδος αυτή εκμεταλλεύεται την πληροφορία της **φάσης** κατά τη σύγκριση των κυματομορφών ενός σεισμικού ζεύγους και μπορεί να βοηθήσει στο να εξαχθούν συμπεράσματα για μεταβολές στις μηχανικές ιδιότητες του μέσου διάδοσης που συνέβησαν μέσα στο διάστημα που μεσολάβησε μεταξύ των δύο όμοιων σεισμών. Η θεωρία λέει ότι η σεισμική κυματομορφή που καταγράφεται σε έναν σταθμό αποτελεί την υπέρθεση μιας σειράς επιμέρους κυμάτων με το καθένα από αυτά να αντιστοιχεί σε μία από **όλες** τις δυνατές διαδρομές μέσα από τις οποίες μπορούν τα σεισμικά κύματα να φθάσουν από τη σεισμική πηγή στον σταθμό και φυσικά τα κύματα αυτά είναι ακριβώς τόσα όσες οι σεισμικές ακτίνες (με οσοδήποτε πολύπλοκες διαδρομές) που φθάνουν από την πηγή στον σταθμό με διάφορες γωνίες εκκίνησης. Αποτέλεσμα είναι η χαρακτηριστική πολυπλοκότητα των κυματομορφών που σε πρώτη προσέγγιση αναλύεται στις αφίξεις των γνωστών σεισμικών φάσεων αλλά πιο ρεαλιστικά περιγράφεται από την υπέρθεση μιας απειρίας κυμάτων που έχουν υποστεί πολλαπλές ανακλάσεις, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για τοπικούς σεισμούς στους οποίους οι σεισμικές ακτίνες μεταδίδονται κατά κύριο λόγο μέσα στον ανομοιογενή και γεμάτο σκεδαστές (*scatterers*) φλοιό.

Μια περιγραφή της δημιουργίας της κυματο-ουράς δίνεται από τον *Aki* (1995) που αναφέρει ότι το φάσμα ισχύος, $P_{ij}(\omega)$, περιγράφεται από ένα γινόμενο τριών παραγόντων (αντίστοιχα συνέλιξη στο πεδίο του χρόνου):

$$P_{ij}(\omega)=S_j(\omega)R_i(\omega)C(\omega) \quad (1.11)$$

όπου ο δείκτης i αναφέρεται σε συγκεκριμένο σταθμό, ο j αναφέρεται σε συγκεκριμένο σεισμό, S, R είναι συναρτήσεις που εξαρτώνται από την εκάστοτε πηγή ή σταθμό αντίστοιχα ενώ το C(ω) είναι μια κοινή συνάρτηση για όλους τους σεισμούς και όλους τους σταθμούς μιας συγκεκριμένης περιοχής (η ακτίνα της οποίας μπορεί να φθάσει και να ξεπεράσει τα 100km). Η κυματο-ουρά χαρακτηρίζεται ως η εναπομένουσα «αντήχηση» των σεισμικών κυμάτων που έχουν «παγιδευτεί» μέσα σε ένα ετερογενές μέσον γεμάτο με τυχαία κατανεμημένους σκεδαστές, η οποία συνεχίζει να καταγράφεται ακόμα και μετά την πάροδο των θεωρητικά πιο αργών αφίξεων των επιφανειακών κυμάτων. Αντίστοιχο φαινόμενο παρουσιάζεται και στα ηχητικά κύματα μέσα σε κλειστούς χώρους, όταν για παράδειγμα δημιουργηθεί κρότος από έναν πυροβολισμό μέσα σε ένα δωμάτιο στο οποίο έχει τοποθετηθεί ένας δέκτης ακουστικών κυμάτων. Ύστερα από την πάροδο του κύριου μετώπου και των πρώτων ανακλάσεων συνεχίζουν να φθάνουν πολλαπλές ανακλάσεις από τους τοίχους, την οροφή και το δάπεδο, δημιουργώντας μια «ουρά» στην κυματομορφή η οποία σβήνει αργά με χαρακτηριστικό τρόπο για το συγκεκριμένο δωμάτιο. Η σεισμική κυματο-ουρά που αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως ‘**coda**’, αφορά κυρίως στην ουρά των κυμάτων S και δημιουργείται κατά κύριο λόγο από εγκάρσια κύματα καθώς οι συντελεστές σκέδασης των φάσεων P που μετατρέπονται σε S είναι κατά μια τάξη μεγέθους μεγαλύτεροι από εκείνους των φάσεων S που μετατρέπονται σε P (*Aki, 1992*).

Αν δύο όμοιες κυματομορφές στοιχηθούν στον χρόνο της πρώτης άφιξης των κυμάτων και εξεταστούν σε διάφορα χρονικά παράθυρα (με τη σύγκριση βέβαια να γίνεται στο ίδιο ακριβώς χρονικό παράθυρο και στα δύο σήματα ταυτόχρονα) είναι πιθανόν να παρατηρηθεί ότι ο χρόνος $\boldsymbol{\tau_m}$ διαφέρει για κάθε παράθυρο. Στο πρώτο παράθυρο, εφόσον έχει γίνει σωστά η στοίχιση στις πρώτες αφίξεις, και αν το παράθυρο είναι επαρκώς μικρό ώστε να μην περιέχει άλλες αφίξεις, θα είναι με καλή προσέγγιση $\boldsymbol{\tau_m}=0$. Στα επόμενα παράθυρα, όμως, ενδέχεται να είναι $\boldsymbol{\tau_m}\neq 0$. Αυτό είναι αναμενόμενο στην απλή περίπτωση στην οποία τα υπόκεντρα των δύο σχεδόν όμοιων σεισμών απέχουν τόσο ώστε να διακρίνεται μια μικρή διαφορά στους χρόνους $t_{S\text{-}P}$, δηλαδή στη διάρκεια μεταξύ της πρώτης άφιξης των P και των S κυμάτων, στους δύο σεισμούς στον συγκεκριμένο σταθμό, χωρίς αυτή να επηρεάζει ιδιαίτερα την ομοιότητα των πλήρων κυματομορφών. Αυτό σημαίνει πως αν τα δύο σήματα έχουν στοιχηθεί στα P δεν θα εμφανίζονται σωστά στοιχισμένα στα S (βλέπε Σχήμα 3.37). Η ετεροσυσχέτιση σε παράθυρο που περιέχει μόνο τα S θα δώσει $\boldsymbol{\tau_m}=\Delta t_{S\text{-}P}$, ίσο δηλαδή με τη *διαφορά* ανάμεσα στους χρόνους S-P των δύο σεισμών (Παράρτημα Β, Σχήμα Β.3).

Στη μέθοδο **CWI** (Coda-Wave Interferometry, *Snieder, 2006*), όπως και σε όσα αναφέρθηκαν νωρίτερα για την ποσοτικοποίηση της ομοιότητας των σεισμικών ζευγών (*doublet*), βασικό ρόλο παίζει η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης. Μια πιο λεπτομερής μελέτη των χρόνων $\boldsymbol{\tau_m}$ που προκύπτουν από ετεροσυσχετίσεις των κυματομορφών σε διαδοχικά χρονικά παράθυρα μπορεί να δώσει πληροφορία για τη μέση χρονική καθυστέρηση των επιμέρους κυμάτων η υπέρθεση των οποίων δημιουργεί αυτό που ονομάζεται κυματο-ουρά ή **coda-wave**.

Υπάρχουν κυρίως 3 παράγοντες που μπορούν να μεταβληθούν οδηγώντας σε διαταραχή της κυματομορφής (*Snieder, 2006*):

1) η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων
2) η θέση των σκεδαστών
3) η θέση της σεισμικής πηγής

Η πρώτη αλλαγή προκαλεί διαταραχή στη μεταβολή της φάσης κατά τη διάδοση των κυμάτων, η δεύτερη μεταβάλει τη γεωμετρική εξάπλωση των κυμάτων και η τρίτη μεταβάλλει τη γωνία σκέδασης για κάθε συμβάν σκέδασης. Το μέσο μήκος που διανύει ένα κύμα ανάμεσα σε δύο σκεδαστές έστω ότι είναι ℓ. Στο πεδίο συχνοτήτων η διάδοση του κύματος κατά μια απόσταση ℓ περιγράφεται από μεταβολή της φάσης κατά $\exp(ik\ell)$, όπου $k=2\pi/\lambda$ ο κυματαριθμός. Αλλαγή του μέσου μήκους κατά $\boldsymbol{\delta\ell}$ προκαλεί *αλλαγή στη μεταβολή της φάσης* κατά $\exp(ik\delta\ell)=1+ik\delta\ell$ διαταράσσοντας τελικά το κυματικό πεδίο κατά $|\delta u|^{phase}\sim|k\delta\ell u|$. Η ίδια αλλαγή $\boldsymbol{\delta\ell}$ προκαλεί *μεταβολή στη γεωμετρική εξάπλωση* κατά $|\delta u|^{spread}\sim|u\cdot\delta\ell/\ell|$ καθώς είναι ανάλογη του $\mathbf{1/\ell}$. Επίσης προκαλεί *αλλαγή στη γωνία σκέδασης* κατά $\delta\theta\sim\delta\ell/\ell$. Αν η σεισμική ακτινοβολία της πηγής (*radiation pattern*) ή το πλάτος σκέδασης μεταβάλλεται με μορφή $\cos(m\theta)$ ή $\sin(m\theta)$, όπου $\boldsymbol{\theta}$ η γωνία σκέδασης, τότε η αλλαγή στη γωνία σκέδασης κατά $\boldsymbol{\delta\theta}$ προκαλεί μεταβολή στο κυματικό πεδίο της τάξης του $|\delta u|^{angle}\sim|m\delta\theta|u=|mu\cdot\delta\ell/\ell|$. (*Snieder, 2006*)

Προκειμένου η αλλαγή της φάσης του κυματικού πεδίου να είναι η επικρατέστερη εκ των τριών μεταβολών που αναφέρθηκαν πρέπει $|\delta u|^{phase}>>|\delta u|^{spread}$ και $|\delta u|^{phase}>>|\delta u|^{angle}$ ή αλλιώς:

$$\frac{\ell}{\lambda} > \frac{|m|}{2\pi} \tag{1.12}$$

όπου συνήθως είναι $|m|>1$. Η συνθήκη (1.12) ικανοποιείται όταν το μέσο ελεύθερο μήκος σκέδασης ℓ είναι πολύ μεγαλύτερο από ένα μήκος κύματος ($\lambda=2\pi/k$). Αυτό δεν ισχύει όταν τα κύματα είναι εντοπισμένα (*localized*), όταν δηλαδή τα κύματα σκεδάζονται διαρκώς χωρίς όμως να απορροφώνται, κάτι που μπορεί να συμβεί σε ένα ισχυρά ετερογενές γεωγραφικό περιβάλλον (*Snieder, 2006,* με αναφορά σε *Van Tiggelen, 1999*). Όταν αλλάζουν οι αποστάσεις ανάμεσα στους σκεδαστές (*scatterers*) η σημαντικότερη αλλαγή είναι αυτή της φάσης, η οποία μεταβάλλεται γραμμικά ως προς τη συχνότητα καθώς $k=\omega/c$. Αυτή η μεταβολή, στο πεδίο του χρόνου μεταφράζεται ως μεταβολή στον χρόνο άφιξης του κύματος.

Αν συμβολιστεί με P η διαδρομή που διανύει ένα από τα επιμέρους κύματα $S_P(t)$, ενώ με $\boldsymbol{\tau_P}$ η μεταβολή στον χρόνο άφιξης του κύματος, τότε έστω:

$$u(t)=\sum_P S_P(t) \text{ το } \textit{αρχικό} \text{ κυματικό πεδίο} \tag{1.13}$$

$$\tilde{u}(t)=\sum_P S_P(t-\tau_P) \text{ το } \textit{διαταραγμένο} \text{ κυματικό πεδίο} \tag{1.14}$$

Τα $u(t)$ και $\tilde{u}(t)$ των παραπάνω εξισώσεων είναι κυματομορφές ενός σεισμικού ζεύγους που διαφέρουν κατά ένα ποσοστό λόγω της διαταραχής στους χρόνους άφιξης των επιμέρους κυμάτων που συνθέτουν το κυματικό πεδίο. Η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης $\mathbf{R(t_s)}$ για ένα χρονικό παράθυρο $[t-T,t+T]$, δηλαδή με κέντρο **t** και μήκος παραθύρου **2T** για καθυστέρηση $\mathbf{t_s}$, μπορεί να γραφεί (*Snieder, 2006*):

$$R(t_s)=\frac{\int_{t-T}^{t+T}u(t')\tilde{u}(t'+t_s)dt'}{\sqrt{\int_{t-T}^{t+T}u^2(t')dt'\int_{t-T}^{t+T}\tilde{u}^2(t')dt'}}=\frac{N(t_s)}{\sqrt{\int_{t-T}^{t+T}u^2(t')dt'\int_{t-T}^{t+T}\tilde{u}^2(t')dt'}} \tag{1.15}$$

Εισάγοντας τα u(t) και $\tilde{u}$ (t) στον αριθμητή $N(t_s)$ προκύπτει ένα διπλό άθροισμα το οποίο μπορεί να αναλυθεί σε διαγώνιους, P=P΄, και μη-διαγώνιους όρους, P≠P΄:

$$N(t_s)=\sum_P\int_{t-T}^{t+T}S_P(t')S_P(t'+t_s-\tau_P)dt'+\sum_{P\neq P'}\int_{t-T}^{t+T}S_P(t')S_{P'}(t'+t_s-\tau_P)dt' \tag{1.16}$$

Τα πλάτη των δύο επιμέρους αθροισμάτων συνδέονται με τη σχέση (*Snieder, 2004*):

$$\frac{|\sum_{P\neq P'}(...)|}{|\sum_{P=P'}(...)|}\sim\sqrt{\frac{T_{corr}}{2T}}\sim\sqrt{\frac{1}{\Delta f\cdot 2T}}=\frac{1}{\sqrt{N}} \tag{1.17}$$

όπου T_{corr} το εύρος της *αυτο*-συσχέτισης του σήματος στο πεδίο του χρόνου που είναι αντιστρόφως ανάλογο προς το εύρος ζώνης, Δf (*bandwidth*), 2T το μήκος του χρονικού παραθύρου, Δf·2T=N οι βαθμοί ελευθερίας του σήματος. Είναι σημαντικό ο λόγος αυτός των μη-διαγώνιων προς τους διαγώνιους όρους να είναι μικρός ώστε οι μη-διαγώνιοι όροι να μπορούν να αγνοηθούν. Αυτό ισχύει όταν τόσο το μήκος του παραθύρου, 2T, όσο και το εύρος ζώνης, Δf, είναι αρκετά μεγάλα. Όλα αυτά γίνονται προκειμένου να απλοποιηθεί η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης. Ο αριθμητής γράφεται ως το άθροισμα των ετεροσυσχετίσεων μεταξύ των επιμέρους κυμάτων $S_P(t)$ και $S_P(t+t_o)$ με $t_o=t_s-\tau_p$:

$$C_P(t_o)\equiv\int_{t-T}^{t+T}S_P(t')S_P(t'+t_o)dt'$$

$$N(t_s)=\sum_P C_P(t_s-\tau_p) \tag{1.18}$$

$$R(t_s)=\frac{\sum_P C_P(t_s-\tau_p)}{\sum_P C_P(0)}$$

Το 0 στο όρισμα του C_P του παρονομαστή αντιστοιχεί σε $t_o=0$ ή $t_s=\tau_p$ και ισούται με την αυτοσυσχέτιση του συγκεκριμένου κύματος S_P καθώς στη χρονική καθυστέρηση $t_s=\tau_p$ τα δύο κύματα ταυτίζονται δίνοντας τη μέγιστη τιμή C_P.

Επιπλέον ισχύει ότι τα φάσματα ισχύος κυμάτων που έχουν διατρέξει την ίδια σεισμική ακτίνα έχουν το ίδιο σχήμα αλλά με εν γένει διαφορετικά πλάτη και ιδίως φάσεις καθώς υπάρχουν διαφορές στους χρόνους διαδρομής. Όμοιο σχήμα σημαίνει πως έως ένα βαθμό το ετεροφάσμα των δύο σημάτων ύστερα από αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier θα δώσει μια συνάρτηση ετεροσυσχέτισης η οποία θα μοιάζει με τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (όπως αναφέρθηκε εξάλλου και παραπάνω ότι ισχύει στους όμοιους σεισμούς). Η ετεροσυσχέτιση συνεπώς μπορεί να γραφεί:

$$C_P(t_o) = I_P C(t_o) \qquad \text{με} \quad C(0)=1 \tag{1.19}$$

όπου $C_P(t_o)$ η ετεροσυσχέτιση, C η αυτοσυσχέτιση (η οποία για t_o=0 ισούται εξ' ορισμού με τη μονάδα) και I_P ένα μέτρο της έντασης του κύματος που διάνυσε τη διαδρομή P. Τελικά με αυτές τις προσεγγίσεις η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης γίνεται:

$$R(t_s) = \frac{\sum_P I_P C(t_s - \tau_p)}{\sum_P I_P} \tag{1.20}$$

Αν **P(τ)** είναι η κανονικοποιημένη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για την κατανομή της ενέργειας των κυμάτων που φθάνουν από όλες τις δυνατές διαδρομές και καταγράφονται σε διάφορες χρονικές καθυστερήσεις **τ** ως προς τους αδιατάραχτους χρόνους διαδρομής τους, τότε P(τ)·dτ είναι η πιθανότητα (ή το ποσοστό ενέργειας) των κυμάτων που φθάνουν με καθυστερήσεις μεταξύ τ και τ+dτ. Αποδεικνύεται έτσι (*Snieder, 2006*) ότι η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης μπορεί να γραφεί:

$$R(t_s) = \langle C(t_s - \tau) \rangle = \int P(\tau) C(t_s - \tau) \mathrm{d}\tau = (P * C)(t_s) \tag{1.21}$$

Δηλαδή η μέθοδος **CWI** οδηγεί στον σταθμισμένο μέσο όρο (*weighted average*) μιας συνάρτησης της διαταραχής των χρόνων άφιξης. Η παραπάνω εξίσωση εκφράζει την συνάρτηση ετεροσυσχέτισης ως μια πράξη *συνέλιξης* μεταξύ της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας P και της αυτοσυσχέτισης C, με την προϋπόθεση ότι το *σχήμα* των φασμάτων των επιμέρους κυμάτων είναι όμοιο. Με γνωστά τα $R(t_s)$ και $C(t_s)$ προκύπτει άμεσα η συνάρτηση P(τ) με αποσυνέλιξη, όμως δεν είναι ασφαλής αυτός ο τρόπος διεξαγωγής της P(τ) καθώς δεν είναι βέβαιο πως το συχνοτικό φάσμα της P(τ) αλληλεπικαλύπτεται με το φάσμα ισχύος των δεδομένων. Αυτό είναι αληθές μόνο στην περίπτωση στην οποία η κατανομή της διαταραχής των χρόνων διαδρομής μεγιστοποιείται κοντά στη δεσπόζουσα περίοδο των κυμάτων (*Snieder, 2006*).

Το ανάπτυγμα Taylor 2^{ου} βαθμού της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης γύρω από το t=0 (με C(0)=1, dC(t=0)/dt=0) είναι:

$$C(t) = 1 - \frac{1}{2}\left.\frac{d^2C}{dt^2}\right|_{t=0} t^2 = 1 + \frac{1}{2}\ddot{C}(t=0)t^2 = 1 - \frac{1}{2}\overline{\omega^2}t^2 \tag{1.22}$$

$$\text{με} \quad \ddot{C}(0) = -\frac{\int \dot{u}^2(t')dt'}{\int u^2(t')dt'} = -\overline{\omega^2}$$

όπου το $\overline{\omega^2}$ ονομάζεται μέση τετραγωνική γωνιακή συχνότητα και μπορεί να υπολογιστεί από τα δεδομένα των κυματομορφών. Αντικαθιστώντας αυτή την προσέγγιση του C(t) στη σχέση (1.21) του $R(t_s)$ και στη συνέχεια με παραγώγιση ως προς t_s προκύπτει η χρονική καθυστέρηση που δίνει το μέγιστο $R(t_s)$:

$$0 = \frac{\mathrm{dR}(\mathrm{t_s})}{\mathrm{dt_s}} = -\overline{\omega^2}\,\frac{\sum_P I_P(t_s - \tau_P)}{\sum_P I_P} \Rightarrow \tau_m = \frac{\sum_P I_P \tau_P}{\sum_P I_P} = \langle \tau \rangle \tag{1.23}$$

Δηλαδή η ένταση I_P παίζει το ρόλο της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας για τον προσδιορισμό της χρονικής καθυστέρησης του μεγίστου της ετεροσυσχέτισης, $\boldsymbol{\tau_m}$, ως της μέσης τιμής των διαταραχών των χρόνων διαδρομής. Αντικαθιστώντας τον χρόνο $t_s=\boldsymbol{\tau_m}$ στην $R(t_s)$ προκύπτει:

$$R(t_s=\tau_m)=R_{max}=1-\frac{1}{2}\overline{\omega^2}\frac{\sum_P I_P\left(\tau_P-\langle\tau\rangle\right)^2}{\sum_P I_P}=1-\frac{1}{2}\overline{\omega^2}\left\langle\left(\tau-\langle\tau\rangle\right)^2\right\rangle=1-\frac{1}{2}\overline{\omega^2}\sigma_\tau^{\ 2} \qquad (1.24)$$

Βγαίνει δηλαδή το ενδιαφέρον συμπέρασμα ότι η τιμή του μεγίστου της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης, στην υπό εξέταση περίπτωση και με τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν στην αρχή, είναι ελαττωμένη ως προς τη μονάδα κατά ένα ποσόν που εξαρτάται από τη διακύμανση της διαταραχής των χρόνων διαδρομής, σ_τ^2 και από τη μέση τετραγωνική γωνιακή συχνότητα. Τα μεγέθη αυτά μπορούν να υπολογιστούν από τη σύγκριση των κυματομορφών. Για την αντιμετώπιση της επιρροής του θορύβου στους υπολογισμούς, προτείνεται η μέτρηση της ετεροσυσχέτισης σε **μη-αλληλεπικαλυπτόμενα** (*non-overlapping*) χρονικά παράθυρα, ώστε τα δείγματα να είναι κάθε φορά ανεξάρτητα μεταξύ τους (*Snieder, 2006*).

Μια από τις ενδιαφέρουσες εφαρμογές της μεθόδου **CWI** είναι στον υπολογισμό της **σχετικής μεταβολής της ταχύτητας διάδοσης**. Έστω ότι η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων στο μέσο έχει διαταραχθεί κατά **δυ** με ομοιόμορφη σχετική μεταβολή **δυ/υ** σε κάθε σημείο του μέσου. Αν **t** οι αδιατάραχτοι χρόνοι διαδρομής και **t+τ**$\boldsymbol{t+\tau_P}$ οι διαταραγμένοι για ένα κύμα που διατρέχει διαδρομή P, τότε:

$$\begin{aligned}
t &= \int_P \frac{1}{\upsilon}ds \\
t+\tau_P &= \int_P \frac{1}{\upsilon+\delta\upsilon}ds=\int_P\left(\frac{1}{\upsilon}-\frac{\delta\upsilon}{\upsilon^2}\right)ds \\
\tau_P &= -\int_P \frac{1}{\upsilon}\frac{\delta\upsilon}{\upsilon}ds=-\left(\frac{\delta\upsilon}{\upsilon}\right)\int_P\frac{1}{\upsilon}ds=-\frac{\delta\upsilon}{\upsilon}t
\end{aligned} \qquad (1.25)$$

αλλά $\tau_P=\langle\tau\rangle=\boldsymbol{\tau_m}$. Καθώς ο λόγος **δυ/υ** είναι ο ίδιος για όλες τις διαδρομές, η διασπορά των χρόνων διαδρομής $\sigma_\tau^2=0$ και μπορεί να γραφεί:

$$\boxed{\frac{\delta\upsilon}{\upsilon}=-\frac{\tau_m}{t}} \qquad (1.26)$$

Αυτή είναι μια απλή αλλά σημαντική σχέση η οποία δίνει τη δυνατότητα, με την προϋπόθεση της ομοιόμορφης σχετικής μεταβολής της ταχύτητας, να υπολογιστεί η **δυ/υ** από το ρυθμό μεταβολής των $\boldsymbol{\tau_m}$ ως προς τον χρόνο **t** ο οποίος αρχίζει να μετράει από τη χρονική στιγμή της αρχικής στοίχισης των δύο κυματομορφών (ο οποίος συνήθως είναι ο χρόνος άφιξης των κυμάτων S και οι μετρήσεις γίνονται μόνο στην "ουρά" των S). Το $\boldsymbol{\tau_m}$ υπολογίζεται σε διαδοχικά, μη-αλληλεπικαλυπτόμενα, χρονικά παράθυρα. Εάν η ταχύτητα έχει μεταβληθεί, θα ισχύει η παραπάνω σχέση αναλογίας του $\boldsymbol{\tau_m}$ ως προς το **t** με ρυθμό μεταβολής **–δυ/υ**.

Σημειώνεται επίσης (*Snieder, 2006*) ότι καθώς υπάρχουν δύο είδη ελαστικών κυμάτων χώρου, τα επιμήκη P και τα εγκάρσια S, η συναγόμενη μεταβολή της ταχύτητας θα είναι ο σταθμισμένος μέσος των μεταβολών των ταχυτήτων α και β των P και S κυμάτων αντίστοιχα:

$$\frac{\delta \upsilon}{\upsilon} = \frac{\beta^3}{2\alpha^3 + \beta^3}\frac{\delta\alpha}{\alpha} + \frac{2\alpha^3}{2\alpha^3 + \beta^3}\frac{\delta\beta}{\beta} \approx 9\%\frac{\delta\alpha}{\alpha} + 91\%\frac{\delta\beta}{\beta} \tag{1.27}$$

όπου τα ποσοστά 9% και 91% προκύπτουν αν θεωρηθεί ότι $\alpha = \sqrt{3}\beta$ (για μέσο τύπου Poisson). Σε πιο ρεαλιστικές καταστάσεις στις οποίες η σχετική μεταβολή της ταχύτητας δεν είναι ανεξάρτητη από τη θέση στο χώρο, η μέση μεταβολή των χρόνων διαδρομής δίνεται από τη γενικότερη σχέση (*Snieder, 2006*):

$$\langle \tau \rangle = \int K(\vec{r}, t)\delta\upsilon(\vec{r})dV \tag{1.28}$$

όπου K(**r**,t) ο πυρήνας (*kernel*) που εξαρτάται από τον σταθμισμένο μέσο όλων των διαδρομών σκέδασης ως προς την ένταση των κυμάτων και dV ο στοιχειώδης όγκος. Με την έκφραση αυτή δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού των τιμών δυ(**r**) μέσω γραμμικής αντιστροφής των δεδομένων της μέσης μεταβολής των χρόνων διαδρομής από διάφορες πηγές/δέκτες και για διαφορετικά χρονικά παράθυρα. Στην εργασία των *Pacheco & Snieder (2006)* έχουν υπολογιστεί αναλυτικά οι πυρήνες K(**r**,t) για μοντέλα κυμάτων που έχουν υποστεί μονή σκέδαση (*single-scattered*) σε συνδυασμό με παραδείγματα συνθετικών κυματομορφών.

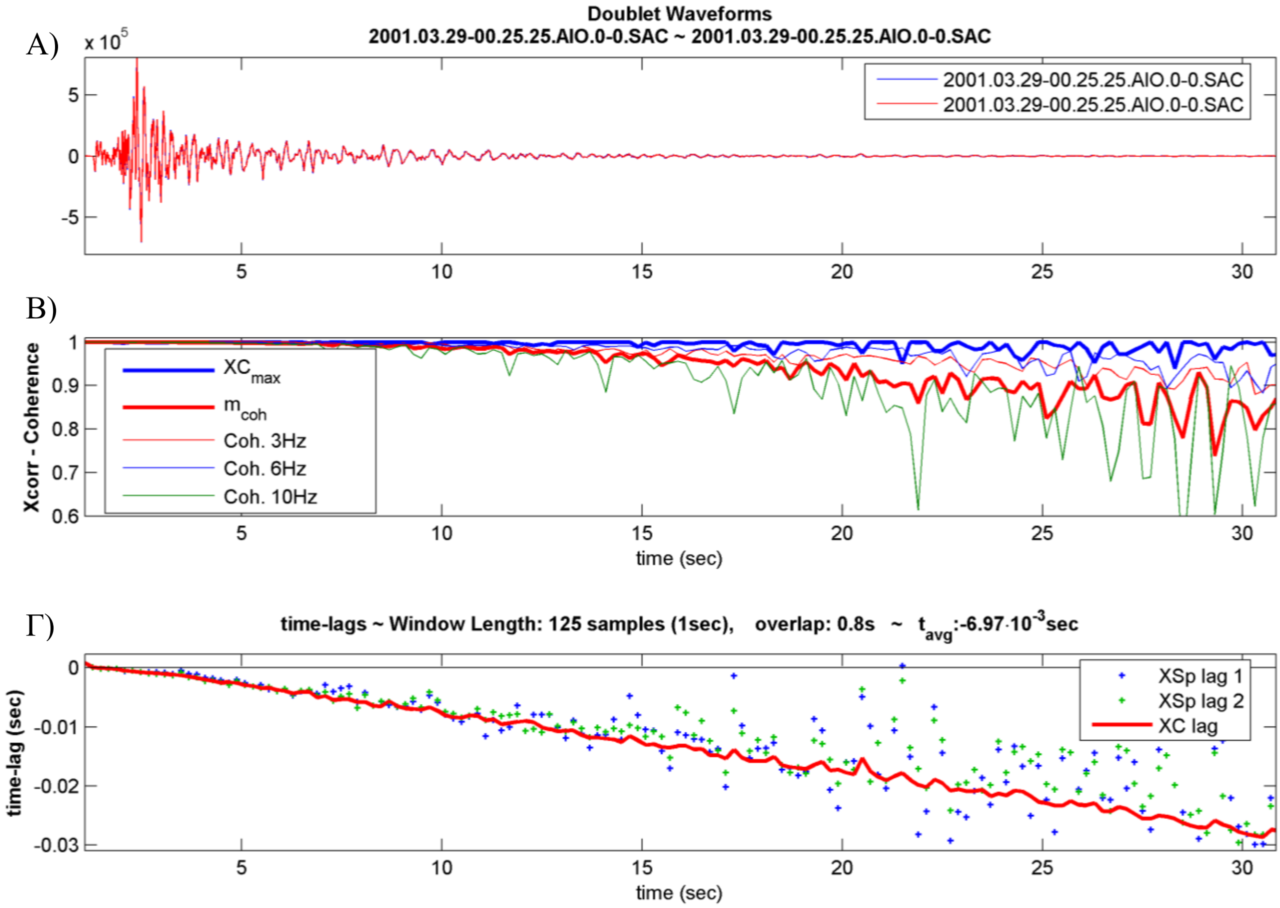
Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης το γεγονός ότι η ίδια θεωρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση που η διαταραχή οφείλεται κατά κύριο λόγο σε **μεταβολή της θέσης της πηγής**, υπό την προϋπόθεση ότι οι μηχανισμοί γένεσης είναι οι ίδιοι. Η διακύμανση των χρόνων διαδρομής εξαρτάται από το είδος της πηγής (έκρηξη, σημειακή δύναμη ή διπλο-ζεύγος δυνάμεων) και από τη διεύθυνση της διαταραχής ως προς το μηχανισμό γένεσης. Στην περίπτωση των μετασεισμών στην οποία όλοι οι σεισμοί βρίσκονται πάνω στο επίπεδο της κύριας διάρρηξης υπολογίζεται πως η διακύμανση σ_τ^2 ισούται με (*Snieder, 2006*):

$$\sigma_\tau^{\,2} = \frac{\left(\frac{6}{\alpha^8} + \frac{7}{\beta^8}\right)}{7\left(\frac{2}{\alpha^6} + \frac{3}{\beta^6}\right)} r^2 \tag{1.29}$$

όπου **r** η ζητούμενη απόσταση ανάμεσα στα δύο υπόκεντρα. Το $\boldsymbol{\sigma_\tau^2}$ μπορεί να υπολογιστεί από το $\mathbf{R_{max}}$ από τον τύπο (1.24) με την απαραίτητη διόρθωση $\mathbf{R_{corr}}$ (εξ. 1.5) λόγω της παρουσίας θορύβου και στη συνέχεια θεωρώντας γνωστές τις ταχύτητες α και β των P και S κυμάτων αντίστοιχα να λυθεί η παραπάνω εξίσωση ως προς **r**.

Ο *Snieder* (2006) προτείνει οι μετρήσεις των **δυ/υ** να γίνονται σε μη-αλληλεπικαλυπτόμενα χρονικά παράθυρα και επιπλέον το κάθε παράθυρο να δίνει μια δική του εκτίμηση της **δυ/υ** και στη συνέχεια από την κατανομή των **δυ/υ** να προκύπτει μια μέση τιμή και κάποιο σφάλμα. Σε άλλες περιπτώσεις μέτρησης αυτής της σχετικής μεταβολής χρησιμοποιείται ένα πλήθος σημείων χρόνων $\boldsymbol{\tau_m}$ συναρτήσει των χρόνων **t** (το t=0 δίνει την αρχική στοίχιση των κυματομορφών σε μια χρονική στιγμή ιδιαίτερης σημασία, όπως η πρώτη άφιξη των P ή των S κυμάτων) και στη συνέχεια η κλίση $d\tau_m/dt$ υπολογίζεται με τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων.

Η δεύτερη μέθοδος είναι μάλλον στατιστικά ασφαλέστερη καθώς 1) δεν δίνει υπερεκτιμημένες τιμές δυ/υ στα πρώτα χρονικά παράθυρα, και 2) αγνοεί το ενδεχόμενο συστηματικό σφάλμα που μπορεί να εισάγει η αρχική στοίχιση. Αν το σφάλμα στη στοίχιση είναι πολύ μικρότερο από το εύρος του παραθύρου δεν επιφέρει σημαντικές μεταβολές στις αντίστοιχες τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ και φάσης τουλάχιστον για τα πρώτα χρονικά παράθυρα τα οποία είναι και τα σημαντικά καθώς παρακάτω, ούτως η άλλως, η συσχέτιση αναμένεται να είναι μικρότερη λόγω της ελάττωσης του πλάτους του σήματος και συνεπώς της μείωσης του λόγου σήματος/θορύβο.



Σχήμα 1.17: Συνθετικό παράδειγμα μεθόδου **CWI**: Α) η κυματομορφή ενός σεισμού (μπλε) υπερκαλυμμένη από το συνθετικά διαταραγμένο αντίγραφό της (κόκκινο). Β) η χρονική μεταβολή των τιμών $\mathbf{XC_{max}}$ (συνεχής, έντονη μπλε), της μέσης συνοχής μεταξύ 2-15Hz (συνεχής, έντονη κόκκινη) και η συνοχή για συχνότητες 3Hz, 6Hz, 10Hz (κόκκινη, μπλε και πράσινη λεπτή γραμμή αντίστοιχα). Γ) με συνεχή κόκκινη γραμμή παρουσιάζονται οι χρονικές καθυστερήσεις $\boldsymbol{\tau_m}$ που αντιστοιχούν στο $\mathbf{XC_{max}}$, με κατάλληλη μη-γραμμική παρεμβολή γύρω από το μέγιστο, με μπλε κουκίδες σημειώνονται οι αντίστοιχοι χρόνοι όπως προκύπτουν από την κλίση της φάσεως του ετεροφάσματος σε συχνότητες μεταξύ 2-10Hz (εξ. 1.8) με την αρχική στοίχιση των κυματομορφών ενώ οι πράσινες κουκίδες είναι οι αντίστοιχες τιμές υπολογισμένες από την κλίση της φάσεως του ετεροφάσματος αλλά ύστερα από στοίχιση των κυματομορφών στην χρονική καθυστέρηση $\boldsymbol{\tau_m}$ που δίνει η συνεχής κόκκινη γραμμή. Οι αρνητικές χρονικές καθυστερήσεις αντιστοιχούν σε καθυστέρηση της συνθετικής ως προς την αρχική κυματομορφή (έχει δηλαδή ήδη εφαρμοστεί το πρόσημο μείον της εξίσωσης (1.26) οπότε **η κλίση δίνει απ' ευθείας το δυ/υ**). Το κυλιόμενο παράθυρο έχει μήκος 1sec και βήμα 0.2sec (αλληλεπικάλυψη 0.8sec)

Σε μερικές εργασίες χρησιμοποιείται η κλίση της φάσης του ετεροφάσματος για τον προσδιορισμό των χρονικών καθυστερήσεων $\boldsymbol{\tau_m}$ που υπολογίζονται από την εξίσωση (1.8). Στη συνέχεια θα υπολογιστεί η τιμή **δυ/υ** σε ένα συνθετικό παράδειγμα τόσο με τη μέθοδο ετεροσυσχέτισης και με τη χρήση μη-γραμμικής παρεμβολής γύρω από το ολικό μέγιστο για τον ακριβέστερο προσδιορισμό του χρόνου $\boldsymbol{\tau_m}$, όσο και με τους χρόνους που προκύπτουν από την κλίση της φάσης του ετεροφάσματος.

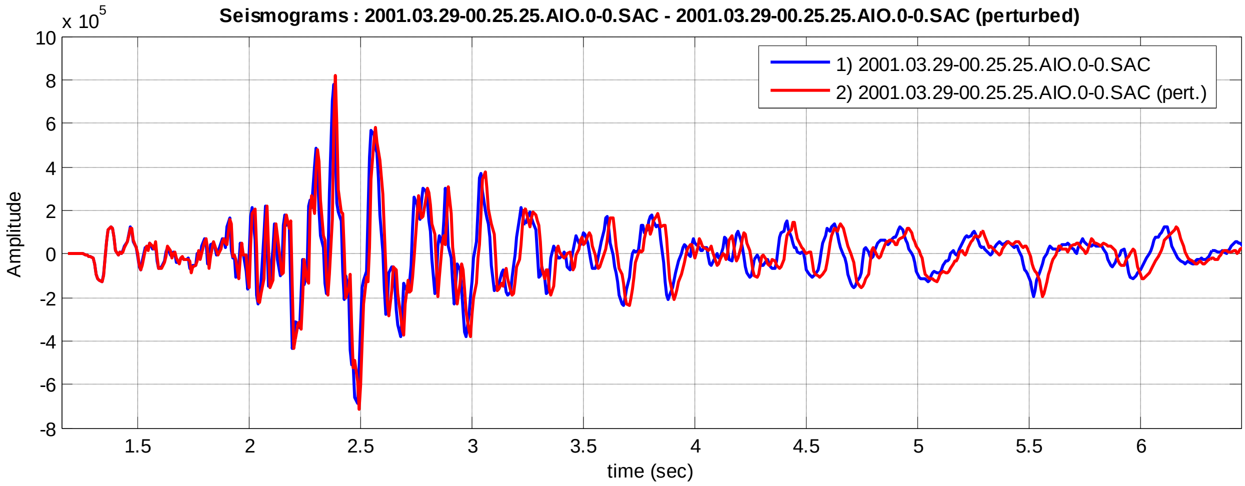
Επιλέγεται αρχικά μια τυχαία κυματομορφή ενός σεισμού με υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο. Στη συνέχεια δημιουργείται ένα αντίγραφο αυτής της χρονοσειράς με διαταραγμένους τους χρόνους των δειγμάτων του με τον εξής τρόπο: αν $\mathbf{t_i}$ είναι ο χρόνος του **i**-δείγματος της αρχικής χρονοσειράς και $\mathbf{t_i'}$ ο χρόνος του αντίστοιχου δείγματος του συνθετικά διαταραγμένου αντίγραφου, οι χρόνοι $\mathbf{t_i'}$ υπολογίζονται από τη σχέση:

$$t_i' = (t_i - t_1)\cdot(1+K) + t_1 = K\cdot(t_i - t_1) + t_i \qquad (1.30)$$

όπου $\mathbf{t_1}$ είναι ο χρόνος του πρώτου δείγματος, ο οποίος είναι κοινός τόσο για την πρότυπη όσο και για τη συνθετική κυματομορφή ($t_1=t_1'$) και το K είναι μια σταθερά που μπορεί να πάρει τιμές θεωρητικά στο διάστημα $(-1,+\infty)$. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι **K=0.001=0.1%**.

Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια εικόνα διαταραγμένης κυματομορφής όμοια με αυτή που απαιτείται για την εφαρμογή της μεθόδου **CWI** που αναλύθηκε παραπάνω (*Snieder, 2006*). Το πρόβλημα είναι ότι τώρα τα δείγματα του αντιγράφου δεν ισαπέχουν χρονικά μεταξύ τους αλλά η διαφορά των χρόνων τους αυξάνεται γραμμικά.

Πρέπει οπωσδήποτε το αντίγραφο αυτό να έχει την ίδια συχνότητα δειγματοληψίας με εκείνη της αρχικής κυματομορφής. Για να γίνει αυτό υπολογίζεται μια πυκνή παρεμβολή (γραμμική ή μια κατάλληλη μη-γραμμική, π.χ. τύπου *spline*) ανάμεσα στα δείγματα του αντιγράφου και ξεκινώντας από το πρώτο δείγμα, το οποίο ταυτίζεται χρονικά με το αντίστοιχο δείγμα της αρχικής χρονοσειράς, υπολογίζονται οι χρόνοι των υπόλοιπων έτσι ώστε να διαφέρουν π.χ. κατά δτ=0.008sec αν η συχνότητα δειγματοληψίας της αρχικής κυματομορφής είναι f_s=125samples/sec, έως το τελευταίο δείγμα της συνθετικής χρονοσειράς. Η τιμή πλάτους του κάθε δείγματος θα είναι το πλάτος του πλησιέστερου χρονικά δείγματος της παρεμβολής που κατασκευάστηκε από την παραμορφωμένη συνθετική χρονοσειρά ή καλύτερα θα υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή ανάμεσα στην τιμή του προηγούμενου και του επόμενου δείγματος. Έτσι οι δύο κυματομορφές είναι πλέον συγκρίσιμες και στο Σχήμα 1.17 φαίνεται το αποτέλεσμα της μεθόδου.



Σχήμα 1.18: αδιατάραχτη (μπλε) και συνθετικά διαταραγμένη σεισμική καταγραφή κατά έναν παράγοντα K=1%. Παρουσιάζεται η σύγχρονη άφιξη των πρώτων κυμάτων και στη συνέχεια η γραμμικά αυξανόμενη καθυστέρηση των υπόλοιπων φάσεων και της κυματο-ουράς.

Το $\mathbf{XC_{max}}$ φαίνεται να μην επηρεάζεται σχεδόν καθόλου από τη διαρκή μετατόπιση της μιας κυματομορφής ως προς την άλλη στα διαδοχικά παράθυρα, σε αντίθεση με τη συνοχή η οποία ύστερα από ~22sec πέφτει κάτω από την τιμή 0.9. Η συνοχή στη συχνότητα των 6Hz φαίνεται να διατηρεί γενικά υψηλότερες τιμές απ' ότι οι υπόλοιπες. Οι διαφορικοί χρόνοι $\boldsymbol{\tau_m}$ που υπολογίζονται από τη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης (Σχήμα 1.17Γ, συνεχής κόκκινη γραμμή) εμφανίζουν μια σχεδόν σταθερή κλίση με σχετικά μικρή διακύμανση σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από την κλίση της φάσεως του ετεροφάσματος (μπλε και πράσινα σημεία στο Σχ. 1.17Γ). Οι δεύτερες παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις ιδιαίτερα εκεί όπου παρατηρούνται διαταραχές στις καμπύλες της συνοχής.

Σε ένα παράθυρο μήκους 15sec από την άφιξη των P υπολογίζεται η κλίση της ευθείας των διαφορικών χρόνων $\boldsymbol{\tau_m}$ της μεθόδου ετεροσυσχέτισης: $\boldsymbol{-\tau_m}/t$ = -0.0961% ± 0.0009% (σχετικό σφάλμα 1.0%) με απλό συντελεστή συσχέτισης R=-0.997. Αναφέρονται επίσης οι αντίστοιχες κλίσεις από τα μπλε και πράσινα σημεία: $-\delta\tau_1/t$ = -0.0917% ± 0.0042% (σχετικό σφάλμα 4.5% και R=-0.933), $-\delta\tau_2/t$ = -0.0861% ± 0.003% (σχετικό σφάλμα 3.5% και R=-0.959). Τα σχετικά σφάλματα γίνονται της τάξεως του 7% για την κλίση της ευθείας που περνάει από τα μπλε ή πράσινα σημεία όταν θεωρηθούν μη-αλληλεπικαλυπτόμενα παράθυρα (δηλαδή βήμα ίσο με το μήκος του παραθύρου, εδώ 1sec) ενώ οι κλίσεις που υπολογίζονται είναι αρκετά πλησιέστερες στην πραγματική και για τις 3 περιπτώσεις, ενισχύοντας την άποψη που θέλει οι μετρήσεις να γίνονται σε ανεξάρτητα δείγματα (*Snieder, 2006*). Θεωρητικά η κλίση αυτή έπρεπε να είναι -0.1% , δηλαδή να είναι ο παράγοντας **–K** με τον οποίο παραμορφώθηκαν οι χρόνοι στη συνθετική κυματομορφή.

Στην περίπτωση που φαίνεται στο Σχήμα 1.18 (για σχετική μεταβολή ταχύτητας διάδοσης κατά -1%, δηλαδή 10 φορές μεγαλύτερη από την προηγούμενη) στην οποία διακρίνεται εύκολα το είδος της παραμόρφωσης που προκαλείται από μια τέτοια διαταραχή στις ιδιότητες του μέσου, η διαφορά στα αποτελέσματα που προκύπτουν με τους τρόπους που περιγράφηκαν προηγουμένως ($\boldsymbol{\tau_m}$ από ετεροσυσχέτιση ή κλίση της φάσεως του ετεροφάσματος) είναι ακόμα πιο σημαντική. Η κλίση $-\boldsymbol{\tau_m}/t$ συνεχίζει να δίνει πολύ καλές προσεγγίσεις της πραγματικής μεταβολής. Ενδεικτικά αναφέρονται για τις 3 περιπτώσεις για την ίδια χρονική διάρκεια ~17sec: $\boldsymbol{\delta\upsilon_1/\upsilon}$=-0.99% ± 0.01% με σχετικό σφάλμα 1.1% για την μέθοδο ετεροσυσχέτισης, $\boldsymbol{\delta\upsilon_2/\upsilon}$=-0.23% ± 0.24% με σχετικό σφάλμα 102.5% από την κλίση της φάσης του ετεροφάσματος *χωρίς* υποβοήθηση από τον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ που δίνει η ετεροσυσχέτιση, και $\boldsymbol{\delta\upsilon_3/\upsilon}$=-0.97% ±0.02% με σχετικό σφάλμα 2.3% από την κλίση της φάσης του ετεροφάσματος *κατόπιν* μετατόπισης κατά τον διαφορικό χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ που δίνει η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης,. Οι απλοί συντελεστές συσχέτισης για τις 3 μεθόδους είναι R_1=-0.999, R_2=-0.244 R_3=-0.996. Το πρόβλημα με τη δεύτερη μέθοδο ξεκινάει μετά το ~11^{o} δευτερόλεπτο της χρονοσειράς. Αν αντί για τα πρώτα 17sec εξεταστεί η κλίση στα πρώτα 10sec των χρονοσειρών η δεύτερη μέθοδος δίνει δυ/υ = -1.03% ± 0.14%, σχετικό σφάλμα 13.8% και R_3'=-0.924.

Το μεγάλο πρόβλημα με την φάση του ετεροφάσματος οφείλεται στις περιπτώσεις που η διαδικασία απαλοιφής της αναδίπλωσης της φάσης (*unwrapping*) δεν λειτουργεί σωστά. Η φάση όταν είναι αναδιπλωμένη βρίσκεται φραγμένη μεταξύ –π και π, παρουσιάζοντας ασυνεχείς μεταβολές κάθε φορά που η πραγματική (μη αναδιπλωμένη) φάση γίνεται μεγαλύτερη (ή μικρότερη) από κάποιο ακέραιο πολλαπλάσιο του π. Αν για κάποιο λόγο η φάση μετά τη διαδικασία «*un-wrap*» έχει παραμείνει αναδιπλωμένη στη ζώνη μεταξύ 2-10Hz στην οποία εξετάζεται η κλίση της, σε αυτές τις περιπτώσεις η κλίση θα τείνει προς το μηδέν ενώ όταν η απαλοιφή της αναδίπλωσης έχει γίνει σωστά, τα μπλε (και πράσινα) σημεία πρέπει να βρίσκονται κοντά στη συνεχή κόκκινη γραμμή του Σχήματος 1.17$_{\Gamma}$.

Αν η διαδικασία υποβοηθηθεί, όπως κατά τον υπολογισμό των πράσινων σημείων (Σχήμα 1.17$_{\Gamma}$), στοιχίζοντας τις κυματομορφές σε χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ πριν τον υπολογισμό της φάσης του ετεροφάσματος, χωρίς μη-γραμμική παρεμβολή γύρω από το μέγιστο της ετεροσυσχέτισης, ουσιαστικά η φάση θα είναι στις περισσότερες περιπτώσεις εξ' αρχής μη αναδιπλωμένη και η κλίση πολύ μικρή, καθώς από την κλίση εκείνο που υπολογίζεται είναι μια διόρθωση στον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ που βρέθηκε ήδη (με ακρίβεια ίση με την περίοδο δειγματοληψίας, 8ms) από τη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης. Το γεγονός ότι οι διορθώσεις αυτές είναι πράγματι σχεδόν αμελητέες είναι μια ακόμα επιβεβαίωση ότι οι χρόνοι $\boldsymbol{\tau_m}$ που υπολογίζονται από την ετεροσυσχέτιση είναι ήδη αρκετά ακριβείς. Στην πράξη όταν υπολογίζεται η κλίση της φάσης του ετεροφάσματος χρειάζεται να λαμβάνεται υπόψην και η συνοχή των αντίστοιχων συχνοτικών δειγμάτων και να χρησιμοποιούνται για τη γραμμική παλινδρόμιση μόνο όσα σημεία αντιστοιχούν σε συχνότητες με αρκετά υψηλή συνοχή (*Poupinet et al., 1984;Nishimura et al., 2005*).

Η μέτρηση της σχετικής μεταβολής στην ταχύτητα των κυμάτων κατά μήκος των σεισμικών ακτίνων με τον τρόπο που περιγράφθηκε, ακόμα και αν θεωρηθεί πως έχει γίνει σωστά, δεν μπορεί να αποδοθεί άμεσα σε μακροχρόνιες μεταβολές των τάσεων μέσα στο έδαφος οφειλόμενες σε τεκτονικά αίτια. Σχετική μεταβολή της ταχύτητας, και μάλιστα σε ανάλογο ποσοστό με αυτά που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα παραδείγματα, έχει παρατηρηθεί πως συμβαίνει με περιοδικό τρόπο εξ' αιτίας των παλιρροιακών φαινομένων, δηλαδή λόγω των βαρυτικών δυνάμεων που ασκούνται στη Γη από τον Ήλιο και τη Σελήνη που προκαλούν περιοδικές μεταβολές στη στάθμη της θάλασσας και κατά συνέπεια μεταβολές στην υδροστατική πίεση στον θαλάσσιο πυθμένα. Στην εργασία των *Yamamura et al.* (2003) μετρήθηκαν οι περιοδικές μεταβολές της ταχύτητας και της εξασθένησης των P-κυμάτων στην ακτή του Κόλπου Miura της Ιαπωνίας, σε μια απόσταση 12m μέσα σε έναν υπόγειο θάλαμο (*vault*) με τη χρήση ενός πιεζοηλεκτρικού πομποδέκτη (*transducer*) ως πηγή υπερηχητικών συμπιεστικών κυμάτων. Στη συσκευή παραγόταν ένας παλμός μορφής *boxcar* με πλάτος 2000V και διάρκειας $5 \cdot 10^{-5}$sec ενώ η λήψη γινόταν σε έναν επιταχυνσιογράφο με επίπεδη απόκριση στη ζώνη των 5Hz έως 8kHz. Ο χρόνος διαδρομής ήταν περίπου $7.1 \cdot 10^{-3}$sec και άρα η ταχύτητα διάδοσης περίπου 1.7km/s. Το σήμα που λαμβανόταν ήταν ασθενές αλλά μπορούσε να αναπαραχθεί και προκειμένου να αυξηθεί ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο γινόταν άθροιση (*stacking*) 16000 παλμών μέσα σε ένα χρονικό διάστημα 20min. Η δεσπόζουσα περίοδος του λαμβανόμενου σήματος ήταν $0.91 \cdot 10^{-3}$sec (δεσπόζουσα συχνότητα ~1.1kHz).

Υπολογίστηκαν σχετικές μεταβολές της ταχύτητας διάδοσης και της εξασθένησης που ανέρχονται σε 0.3% και 4-5% αντίστοιχα ενώ εμφανίστηκε μια αξιοσημείωτη περιοδικότητα που ερχόταν σε καλή συσχέτιση με τις αντίστοιχες μεταβολές των ημερήσιων και ημι-ημερήσιων ηλιακών και σεληνιακών παλιρροιακών παραμορφώσεων, για τις οποίες έγιναν ανεξάρτητες μετρήσεις. Η συχνότητα μετρήσεων ήταν 1 μέτρηση ανά 30min και η διάρκεια του πειράματος 1 έτος.

Ο υπολογισμός της σχετικής μεταβολής της ταχύτητας dV_P/V_P έγινε με τρόπο ανάλογο με αυτόν που περιγράφθηκε παραπάνω, δηλαδή μέσω των διαφορικών χρόνων διαδρομής των παλμών με διαδικασία ετεροσυσχέτισής τους ως προς έναν παλμό αναφοράς. Εδώ τα πράγματα είναι κάπως απλούστερα καθώς ο παλμός είναι απλός και η θέση της πηγής γνωστή και σταθερή.

Για τον υπολογισμό της σχετικής μεταβολής της εξασθένησης έγινε μέτρηση της κορυφής (*peak*) της πρώτης ημιπεριόδου των P-κυμάτων, η οποία κανονικοποιήθηκε με την αντίστοιχη κορυφή $\mathbf{h_i}$ του παλμού εισόδου, δίνοντας έτσι το σχετικό ύψος κορυφής $\mathbf{h_r}$. Σε μια απόσταση x από την πηγή, ένα επίπεδο κύμα συμπίεσης έχει πλάτος:

$$A_x = A_o \cdot e^{\left(-\frac{\pi f x}{V_P Q_P}\right)} \tag{1.31}$$

με $A_o = k \cdot h_i$ το αρχικό πλάτος, V_P την ταχύτητα και Q_P τον παράγοντα ποιότητας. Το h_r θα είναι $h_r = k \cdot A_x/A_o$. Μια στοιχειώδης μεταβολή dQ_P στην εξασθένηση προκαλεί διαταραχή στην παραπάνω εξίσωση η οποία δίνει:

$$\frac{h_r}{k}\left(1+\frac{dh_r}{h_r}\right) = \exp\left[-\frac{\pi f x}{V_P Q_P\left(1+\frac{dV_P}{V_P}\right)\left(1+\frac{dQ_P}{Q_P}\right)}\right] \tag{1.32}$$

που σε προσέγγιση πρώτου βαθμού δίνει:

$$\frac{dh_r}{h_r} = \frac{\pi f x}{V_P Q_P}\left(\frac{dV_P}{V_P}+\frac{dQ_P}{Q_P}\right) \tag{1.33}$$

Βάζοντας στην εξίσωση αυτή τις τυπικές τιμές του πειράματος (*Yamamura et al*., 2003) $f = 1.1\cdot10^3$ Hz , x=12m, V_P=1.7km/s και Q_P=16 προκύπτει $V_PQ_P/\pi fx \approx 0.7$. Η σχετική μεταβολή της ταχύτητας που βρέθηκε στο πείραμα ήταν της τάξεως του $dV_P/V_P \approx 3\cdot10^{-3}$, και η σχετική μεταβολή dh_r/h_r που οφείλεται μόνο στην dV_P/V_P είναι περίπου $4\cdot10^{-3}$. Η παρατηρούμενη τιμή του dh_r/h_r όμως είναι κατά μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη ($\sim10^{-2}$) που δείχνει ότι ένα μέρος της μεταβολής αυτής οφείλεται σε μεταβολή του Q_P. Με τα προηγούμενα νούμερα και τις προσεγγίσεις δίνεται για την περίπτωση αυτού του πειράματος η απλουστευμένη σχέση:

$$\frac{dQ_P}{Q_P} = 0.7\frac{dh_r}{h_r} \tag{1.34}$$

Όσον αφορά στην ταχύτητα, βάσει του θορύβου υποβάθρου που υπήρχε κατά τη διάρκεια του πειράματος, υπολογίστηκε η ακρίβεια των μετρήσεων του διαφορικού χρόνου διαδρομής ως εξής: έστω y(t) ο παλμός αναφοράς και x(t+**τ**) ο εκάστοτε παλμός ο οποίος συγκρίνεται με τον παλμό αναφοράς. Ο χρόνος **τ** είναι η χρονική καθυστέρηση ως προς τον χρόνο **t** (στον οποίο έχει γίνει η αρχική στοίχιση των κυματομορφών) και ισοδυναμεί με τη γνωστή παράμετρο **d** για τη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης XC(d) (η οποία εδώ συμβολίζεται με **g**). Η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης είναι **g(y,x,τ)=N(y,x,τ)/D(y,x,τ)** όπου τα N και D υπολογίζονται για ένα δεδομένο χρονικό παράθυρο $[t_o,t_o+w]$:

$$\begin{gathered} N(y,x,\tau) = \int_{t_o}^{t_o+w}\left(y(t)-\frac{1}{w}\int_{t_o}^{t_o+w}y(s)ds\right)\left(x(t+\tau)-\frac{1}{w}\int_{t_o}^{t_o+w}x(s+\tau)ds\right)dt \\ D(y,x,\tau) = \sqrt{\left(\int_{t_o}^{t_o+w}\left(y(t)-\frac{1}{w}\int_{t_o}^{t_o+w}y(s)ds\right)^2dt\right)}\sqrt{\int_{t_o}^{t_o+w}\left(x(t+\tau)-\frac{1}{w}\int_{t_o}^{t_o+w}x(s+\tau)ds\right)^2dt} \end{gathered} \tag{1.35}$$

Διαχωρίζοντας το σήμα από τον θόρυβο n(t) και n(t+τ), τα x και y γίνονται:

$$x(t+\tau)=x_o(t+\tau)+n(t+\tau) \tag{1.36}$$

$$y(t)=y_o(t)+n(t) \tag{1.37}$$

από αυτόν το διαχωρισμό προκύπτει:

$$\begin{aligned} g(y_o+n,x_o+n,\tau) &\approx \frac{N(y_o,x_o,\tau)}{D(y_o,x_o,\tau)}+\frac{N(y_o,\mathrm{n},\tau)+N(n,\mathrm{x}_o,\tau)+N(n,\mathrm{n},\tau)}{D(y_o,x_o,\tau)}-\frac{N(y_o,\mathrm{x}_o,\tau)}{D^2(y_o,x_o,\tau)}\Delta D = \\ &= g(y_o,x_o,\tau)+R(y_o,x_o,\mathrm{n},\tau) \end{aligned} \tag{1.38}$$

$$\Delta\mathrm{D} \equiv \mathrm{D}(\mathrm{y}_o+\mathrm{n},\mathrm{x}_o+\mathrm{n},\tau)-D(y_o,x_o,\tau)$$

Το ανάπτυγμα Taylor της g(yo+n,xo+n,τ) γύρω από την τιμή $\tau=\tau_{do}$, όπου το τ_{do} είναι η χρονική καθυστέρηση που μεγιστοποιεί το $g(y_o,x_o,\tau)$ (ανάλογο του συμβόλου $\boldsymbol{\tau_m}$ που έχει οριστεί σε αυτή την εργασία, αλλά για το σήμα *χωρίς* θόρυβο), δηλαδή $\partial g(yo,xo,\tau=\tau_{do})/\partial\tau=0$, δίνει:

$$g(y_o+n,x_o+n,\tau)\approx g(y_o,x_o,\tau_{do})+R(y_o,x_o,\mathrm{n},\tau_{do})+\frac{1}{2}(\tau-\tau_{do})^2\left.\frac{\partial^2 g(y_o,x_o,\tau)}{\partial\tau^2}\right|_{\tau=\tau_{do}} \qquad (1.39)$$
$$+(\tau-\tau_{do})\left.\frac{\partial R(y_o,x_o,n,\tau)}{\partial\tau}\right|_{\tau=\tau_{do}}$$

Συμβολίζοντας $R'=\partial R/\partial\tau$ και $g''=\partial^2 g/\partial\tau^2$ προκύπτει:

$$\tau_d=\tau_{do}-\frac{R'(y_o,x_o,n,\tau_{do})}{g''(y_o,x_o,n,\tau_{do})} \qquad (1.40)$$

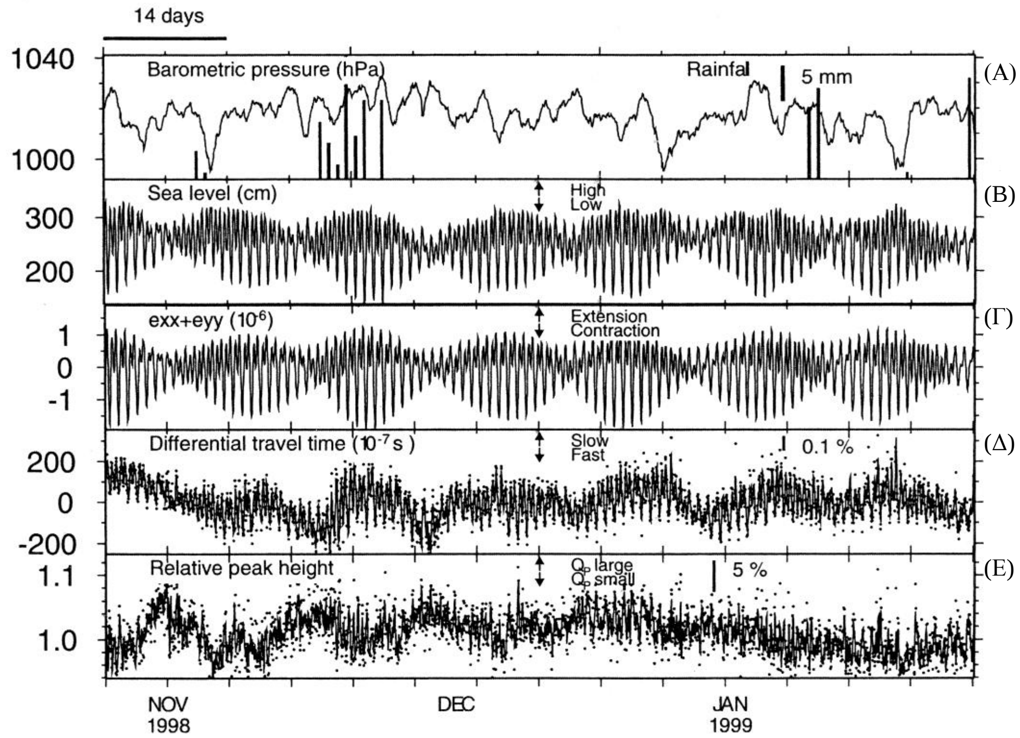
όπου τ_d ο μετρήσιμος (*observed*) διαφορικός χρόνος διαδρομής και τ_{do} ο πραγματικός στην περίπτωση που δεν υπήρχε θόρυβος στα σήματα y(t) και x(t+τ). Από τα δεδομένα του πειράματος προκύπτουν $|R'|\cong 50s^{-1}$ και $|g''|\cong 6\cdot 10^{-7}s^{-2}$ οπότε το σφάλμα ανέρχεται σε $\varepsilon\sim 10^{-6}$s ή 0.01%.

Για τον υπολογισμό της επίδρασης της μεταβολής της εξασθένησης dQ_P στο διαφορικό χρόνο διαδρομής τ_d κατασκευάστηκε συνθετική κυματομορφή από τον παλμό αναφοράς επί έναν παράγοντα Q_f, ο οποίος διαταράσσει το φάσμα A(f), της μορφής:

$$Q_f=\left(\exp\frac{-\pi fL}{2V_P(Q_P-dQ_P)}\right)\Big/\left(\exp\frac{-\pi fL}{2V_P Q_P}\right) \qquad (1.41)$$

Για τα δεδομένα αυτού του πειράματος (L=12m, V_P=1.7km/s,Q_P=16) η επίδραση της μέγιστης σχετικής μεταβολής dQ_P/Q_P = 5% στους διαφορικούς χρόνους διαδρομής είναι της τάξης του 0.06% που θεωρείται αμελητέα σε σύγκριση με την τιμή dV_P/V_P=0.3% που υπολογίστηκε. Για σχετικές μεταβολές της τάξης του 0.3% με περιορισμό στην ακρίβεια 0.01% λόγω θορύβου και μέγιστη επίδραση της εξασθένησης 0.06% στους χρόνους τ_d το σχετικό σφάλμα κυμαίνεται από 3.3% έως 20%. Για τα ίδια ποσοστά θορύβου αλλά με μικρότερες σχετικές μεταβολές της ταχύτητας αυτό το σχετικό σφάλμα μπορεί να αυξηθεί, για παράδειγμα αν dV_P/V_P=0.1% τότε το σχετικό σφάλμα θα κυμαίνεται από 10% έως 60% (θεωρώντας την ίδια μέγιστη σχετική μεταβολή εξασθένησης dQ_P/Q_P=5%). Σχετικό σφάλμα της τάξεως του 20% έχει βρεθεί και σε άλλες εφαρμογές αυτής της μεθόδου για τον προσδιορισμό της σχετικής μεταβολής της ταχύτητας (βλέπε αναφορές εντός *Snieder, 2006*, η ακρίβεια των μετρήσεων είναι της τάξης του 0.1% ενώ τα απόλυτα σφάλματα της τάξης του 0.02%).

Ενδιαφέροντα συμπεράσματα της εργασίας αυτής (*Yamamura et al.*, 2003) αποτελούν οι συσχετίσεις των μεταβολών της ταχύτητας και της εξασθένησης με τις αντίστοιχες μεταβολές της θαλάσσιας στάθμης και των γραμμικών παραμορφώσεων λόγω παλιρροιακών φαινομένων. Τόσο στην ταχύτητα όσο και στην εξασθένηση εμφανίζονται οι αντίστοιχες ημερήσιες και ημι-ημερήσιες μεταβολές που παρατηρούνται στις τιμές των γραμμικών παραμορφώσεων και της θαλάσσιας στάθμης. Επιπλέον, στους διαφορικούς χρόνους διαδρομής (στη σχετική μεταβολή της ταχύτητας) εμφανίζεται μια περιοδικότητα 14 ημερών που αντιστοιχεί στην περιοδικότητα μισού Σεληνιακού κύκλου, των εναλλαγών ανάμεσα στην παλίρροια των τετραγωνισμών (*neap tide*), όταν το σύστημα Σελήνη-Γη-Ήλιος σχηματίζει γωνία ~90°, και την παλίρροια των συζυγιών (*spring tide*), όταν δηλαδή το σύστημα Σελήνη-Γη-Ήλιος βρίσκεται σχεδόν σε μια ευθεία, κατά την πανσέληνο και τη νέα σελήνη, όταν οι βαρυτικές έλξεις της Σελήνης και του Ήλιου στη Γη ενισχύουν η μια την άλλη.

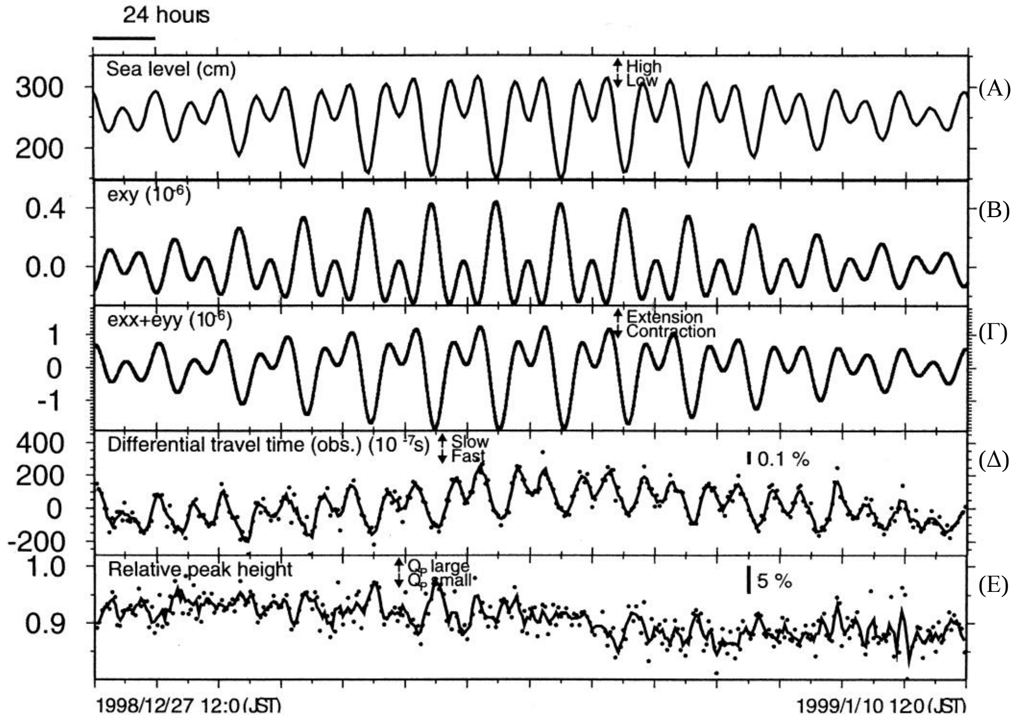


Σχήμα 1.19: Χρονοσειρές μετρήσεων για την περίοδο από 5 Νοεμβρίου 1998 έως 11 Φεβρουαρίου 1999: Α) Μεταβολή θαλάσσιας στάθμης, Β) Μεταβολή εγκάρσιας παραμόρφωσης e_{xy} , Γ) Μεταβολή επιφανειακής παραμόρφωσης exx+eyy, Δ) Διαφορικοί χρόνοι διαδρομής, Ε) Σχετικό ύψος κορυφών. (Σχήμα από *Yamamura et al*. (2003))

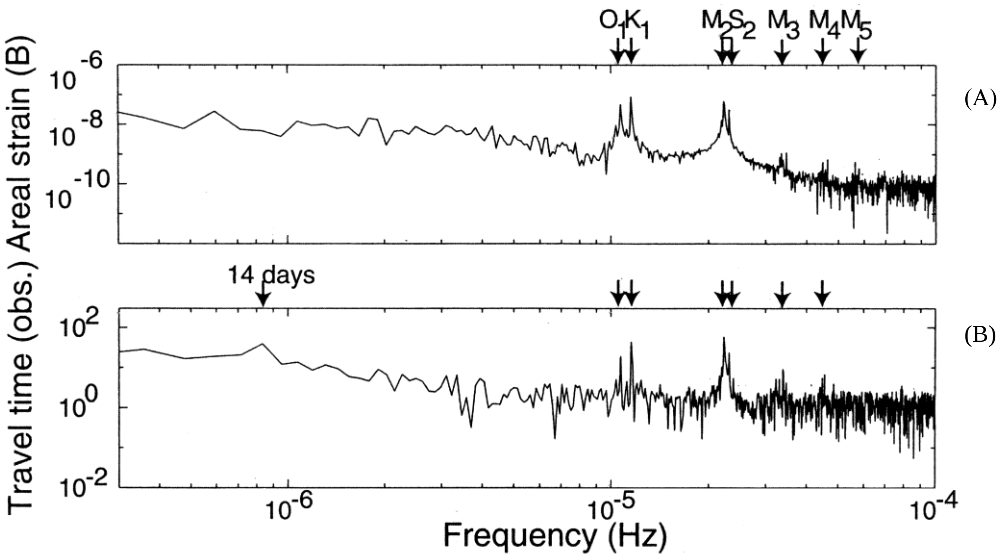
Οι οριζόντιες γραμμικές παραμορφώσεις e_{xx}, e_{yy} γίνονται διασταλτικές (*dilatational*) λόγω της κάμψης του εδάφους όταν υπάρχει παλίρροια, οπότε η θαλάσσια στάθμη είναι ανεβασμένη και ασκείται μεγαλύτερη από τη συνηθισμένη υδροστατική πίεση στον θαλάσσιο πυθμένα. Όταν η επιφανειακή παραμόρφωση $e_{xx}+e_{yy}$ είναι διασταλτική, ανάλογα συμπεριφέρεται και η χωρική παραμόρφωση $e_{xx}+e_{yy} + e_{zz}$. Οι διαφορικοί χρόνοι και η εξασθένηση αυξάνονται όταν οι e_{xx}, e_{yy}, $e_{xx}+e_{yy}$ είναι εφελκυστικές. Αύξηση των διαφορικών χρόνων σημαίνει μείωση της ταχυτητας.

Οι διαφορικοί χρόνοι διαδρομής έρχονται σε καλή συσχέτιση ως προς τη θαλάσσια στάθμη και τις παραμορφώσεις e_{xx}, e_{yy}, e_{xy} (εγκάρσια), $e_{xx}+e_{yy}$ (επιφανειακή) με μέγιστες τιμές ετεροσυσχέτισης 0.77, 0.66, 0.67, 0.51 και 0.67 αντίστοιχα σε χρονικές καθυστερήσεις -76min, +50min, -44min, +313min και -10min αντίστοιχα (η ετεροσυσχέτιση γίνεται μεταξύ των χρονοσειρών των διαφορικών χρόνων διαδρομής ως προς τις χρονοσειρές του καθενός από τα υπόλοιπα μεγέθη που αναφέρθηκαν).

Αυτό φανερώνει πως οι διαφορικοί χρόνοι διαδρομής εμφανίζουν καλή **θετική συσχέτιση** ως προς τις επιφανειακές παραμορφώσεις $e_{xx}+e_{yy}$, αφού έχουν έναν αρκετά καλό συντελεστή ετεροσυσχέτισης και σχεδόν μηδενική διαφορά φάσης (η χρονική καθυστέρηση των 10min είναι μικρότερη από την περίοδο δειγματοληψίας των 30min). Εμφανίζουν, επίσης, πολύ καλή θετική συσχέτιση με τη μεταβολή της θαλάσσιας στάθμης αν και με μια διαφορά φάσης 76min, και καλή συσχέτιση με τα e_{xx} και e_{xy}. Αντίθετα, η συσχέτιση των διαφορικών χρόνων διαδρομής με τις εγκάρσιες παραμορφώσεις e_{xy} δεν είναι καλή, και το χαμηλό $\mathbf{XC_{max}}$ παρουσιάζεται σε αρκετά μεγάλη χρονική καθυστέρηση ~5.2 ωρών. Υπάρχει επίσης μια ασθενής αρνητική συσχέτιση (-0.44) ανάμεσα στους διαφορικούς χρόνους διαδρομής και τον λόγο των πλατών dh_r/h_r (που δίνουν το dQ_P/Q_P) με μηδενική χρονική καθυστέρηση, πράγμα που δείχνει πως η μεταβολή τους είναι σύγχρονη.



Σχήμα 1.20: Μεγέθυνση των χρονοσειρών του προηγούμενου σχήματος για ένα διάστημα 14 ημερών: Α) Μεταβολή θαλάσσιας στάθμης, Β) Μεταβολή εγκάρσιας παραμόρφωσης e_{xy} , Γ) Μεταβολή επιφανειακής παραμόρφωσης exx+eyy, Δ) Διαφορικοί χρόνοι διαδρομής, Ε) Σχετικό ύψος κορυφών. (Σχήμα από *Yamamura et al*. (2003))



Σχήμα 1.21: Το φάσμα της επιφανειακής παραμόρφωσης (Α) και των διαφορικών χρόνων διαδρομής (Β). Σημειώνονται οι χαρακτηριστικές συχνότητες των παλιρροιακών φαινομένων καθώς και η συχνότητα που αντιστοιχεί σε περίοδο 14 ημερών ($f=8.3\cdot10^{-7}$ Hz) η οποία εμφανίζεται μόνο στην περίπτωση των διαφορικών χρόνων διαδρομής. (Σχήμα από *Yamamura et al*. (2003))

Η συσχέτιση των διαφορικών χρόνων διαδρομής με την επιφανειακή παραμόρφωση $e_{xx}+e_{yy}$ εμφανίζεται ισχυρά μη-γραμμική. Αυτό φαίνεται στην ασυμμετρία που παρουσιάζουν οι διαφορικοί χρόνοι ως προς την ευθεία $τ_d=0$ κατά τη διάρκεια της ημέρας σε περιόδους παλίρροιας των συζυγιών σε αντίθεση με τη συμμετρικότητα που έχουν οι αντίστοιχες μεταβολές $e_{xx}+e_{yy}$ ως προς τη στάθμη του μηδενός. Κατά την παλίρροια των τετραγωνισμών και οι δύο μεταβολές είναι συμμετρικές. Ο ρυθμός μεταβολής (κατά απόλυτη τιμή) των μέγιστων διαφορικών χρόνων (των κορυφών του διαγράμματος κατά τη διάρκεια μιας ημέρας) ως προς τις αντίστοιχες μεταβολές των μέγιστων επιφανειακών παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια 14 ημερών είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο ρυθμό μεταβολής των ελαχίστων τιμών των διαφορικών χρόνων ως προς τις αντίστοιχες ελάχιστες τιμές της επιφανειακής παραμόρφωσης.

Στο φάσμα των $e_{xx}+e_{yy}$ δεν υπάρχει κορυφή στη συχνότητα που αντιστοιχεί σε περίοδο 14ημερών ($\sim 8.3\cdot 10^{-7}$ Hz). Στη μεταβολή του $e_{xx}+e_{yy}$, όμως, στο πεδίο του χρόνου υπάρχει μια περιβάλλουσα με περίοδο 14 ημερών. Η μεταβολή αυτή έχει τη μορφή διακροτήματος ως αποτέλεσμα της συμβολής δύο ταλαντώσεων των οποίων οι συχνότητες διαφέρουν κατά $\sim 8.3\cdot 10^{-7}$ Hz). Εξ' αιτίας, όμως, της μη-γραμμικής συσχέτισης των διαφορικών χρόνων με τις επιφανειακές παραμορφώσεις, αυτή η συχνότητα γίνεται *πραγματική* στο φάσμα των διαφορικών χρόνων στο οποίο διακρίνεται μια κορυφή στην περίοδο των 14 ημερών.

Οι διαφορικοί χρόνοι επηρεάζονται έντονα από τη διαδικασία συμπίεσης και κλεισίματος των εδαφικών ρωγμών (αύξηση της τιμής $e_{xx}+e_{yy}$) ενώ είναι αδρανείς ως προς τη διαδικασία διάνοιξης των ρωγμών. Κατά τη διαδικασία συμπίεσης του μέσου η ταχύτητα εξαρτάται μη-γραμμικά από το ρυθμό μεταβολής της παραμόρφωσης με μια σχέση της μορφής $V_P = -s(\dot{e})\dot{e}$, δηλαδή όσο ελαττώνεται ο ρυθμός μεταβολής της παραμόρφωσης τόσο περισσότερο αυξάνεται η ταχύτητα ενώ κατά τη διαδικασία διαστολής η ταχύτητα των κυμάτων συμπίεσης ελαττώνεται με τρόπο που εξαρτάται κυρίως από την τρέχουσα διαστολή και από τη σταδιακή «απώλεια μνήμης» από το τελευταίο μέγιστο της ταχύτητας. Στη δεύτερη περίπτωση ο ρυθμός μεταβολής της παραμόρφωσης δεν παίζει μεγάλο ρόλο.

Συμπεραίνουν από αυτά οι *Yamamura et al*. (2003) πως η διαδικασία κλεισίματος των ρωγμών (αύξησης της V_P) εξαρτάται ισχυρά από το ρυθμό μεταβολής της παραμόρφωσης (ο ρυθμός με τον οποίο κλείνουν οι ρωγμές αυξάνεται όσο ελαττώνεται ο ρυθμός μεταβολής της παραμόρφωσης) ενώ η διαδικασία διάνοιξης όχι. Αυτό υποδεικνύει πως η διαδικασία συμπίεσης δεν είναι τελείως ελαστική καθώς περιέχει όρους πρώτης χρονικής παραγώγου της παραμόρφωσης.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να υπενθυμιστεί ότι η διάταξη του προηγούμενου πειράματος περιλαμβάνει τεχνητή πηγή υπερηχητικών κυμάτων συμπίεσης και η απόσταση μεταξύ πηγής-δέκτη είναι 12m. Γίνεται κατανοητό ότι το σύστημα αυτό είναι ευαίσθητο σε μικρομεταβολές των μηχανικών ιδιοτήτων του μέσου και πιθανόν σε κύματα μικρότερων συχνοτήτων η επίδραση των παλιρροϊκών δυνάμεων και της μεταβολής της υδροστατικής πίεσης του θαλάσσιου πυθμένα στην ταχύτητα διάδοσης να μην είναι το ίδιο ανιχνεύσιμη. Το θέμα αυτό θα συνεχιστεί στην τελευταία ενότητα αυτού του κεφαλαίου (1.9) στην οποία αναφέρονται τα αποτελέσματα μιας νεοσύστατης μεθόδου που χρησιμοποιεί τεχνικές αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης, της λεγόμενης “Συμβολομετρίας Παθητικής Εικόνας” (*Passive Image Interferometry* ή **PII**).

1.8 ~ *Επαναπροσδιορισμός Υποκέντρων*

Όπως ήδη αναφέρθηκε, από την ετεροσυσχέτιση μεταξύ όμοιων σεισμικών κυματομορφών υπολογίζεται το $\mathbf{XC_{max}}$ και το $\boldsymbol{\tau_m}$. Αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον χαρακτηρισμό του βαθμού ομοιότητας αλλά και για την ενδεχόμενη διόρθωση των χρόνων άφιξης των P και S κυμάτων που έχουν προσδιοριστεί είτε αυτόματα είτε χειροναкτικά, προκειμένου να βελτιωθούν οι υποκεντρικές θέσεις. Η βελτίωση των υποκεντρικών θέσεων (και των χρόνων γένεσης παράλληλα) ονομάζεται «επαναπροσδιορισμός υποκέντρων» (και χρόνων γένεσης) ο οποίος στη διεθνή ορολογία αναφέρεται ως ***Relocation***. Ο επαναπροσδιορισμός χρησιμεύει στο να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στις υποκεντρικές θέσεις με τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα. Τα σφάλματα προσδιορισμού θέσης και χρόνου γένεσης των σεισμών είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερα από τις διαστάσεις της ίδιας της πηγής (ειδικά όταν πρόκειται για μικροσεισμούς). Οι παράγοντες που παίζουν ρόλο στην ακρίβεια προσδιορισμού αυτών των παραμέτρων είναι κυρίως η γεωμετρία του δικτύου, τα διαθέσιμα δεδομένα χρόνων άφιξης των P ή S-κυμάτων, τα σφάλματα ανάγνωσης αυτών των φάσεων (άρα η ακρίβεια των χρόνων άφιξης) και το μοντέλο ταχυτήτων (από μονοδιάστατο έως τρισδιάστατο) που προκύπτει από τη μελέτη της δομής του φλοιού στην περιοχή μελέτης, προκειμένου για τοπικούς επιφανειακούς σεισμούς όπως αυτοί που θα αποτελέσουν αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Περιστασιακά, τεχνικοί λόγοι μπορεί να συντρέξουν στη δημιουργία συστηματικού σφάλματος στον εντοπισμό των υποκέντρων, όπως προβλήματα στη διόρθωση χρόνου κάποιου σταθμού ενδεχομένως για κάποια χρονική περίοδο. Με την προϋπόθεση ο πρώτος προσδιορισμός να έχει όσο το δυνατόν μικρότερα σφάλματα, για την επιτρεπόμενη από τα δεδομένα ακρίβεια, μπορεί να ακολουθήσει η διαδικασία επαναπροσδιορισμού.

Ο επαναπροσδιορισμός υποκέντρων μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες μεθόδους. Η πιο γνωστή ίσως από αυτές είναι η μέθοδος των **Διπλών Διαφορών** (*Double-Difference*). Πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία η οποία χρησιμοποιεί ως δεδομένα τους παρατηρούμενους χρόνους διαδρομής $\mathbf{t_k}$ των κυμάτων P (ή S) καθώς και τους αντίστοιχους υπολογιζόμενους ή θεωρητικούς χρόνους διαδρομής που προκύπτουν από το μοντέλο ταχυτήτων και την εκάστοτε λύση $(x,y,z,t)_i$ για το υπόκεντρο και τον χρόνο γένεσης ενός σεισμού **i** και τους συγκρίνει με τους αντίστοιχους χρόνους ενός άλλου σεισμού **j**. Υπολογίζονται ανά ζεύγη (i,j) οι διπλές διαφορές $\mathbf{dr_k^{ij}}$ (*Waldhauser & Ellsworth, 2000*):

$$dr_k^{ij} = \left(t_k^i - t_k^j\right)^{obs} - \left(t_k^i - t_k^j\right)^{calc} \tag{1.42}$$

όπου ο δείκτης **k** αναφέρεται σε μια δεδομένη παρατήρηση (*observation*) μιας ορισμένης φάσης (P ή S) σε έναν ορισμένο σταθμό. Η πρώτη παρένθεση περιέχει τους παρατηρούμενους χρόνους διαδρομής (*observed*) ενώ η δεύτερη τους θεωρητικούς ή υπολογιζόμενους χρόνους διαδρομής (*calculated*) βάσει ενός μοντέλου ταχυτήτων. Αυτή η διπλή διαφορά αναφέρεται ως υπόλοιπο (*residual*) ανάμεσα στα δύο είδη *διαφοράς χρόνων διαδρομής* και ο σκοπός της επαναληπτικής μεθόδου είναι να ελαχιστοποιηθούν τα τετράγωνα αυτών των διαφορών για όλα τα ζεύγη σεισμών τα οποία έχουν κάποια χωρική συσχέτιση μεταξύ τους, και για όλες τις διαθέσιμες παρατηρήσεις ανά σταθμό για τα ζεύγη αυτά.

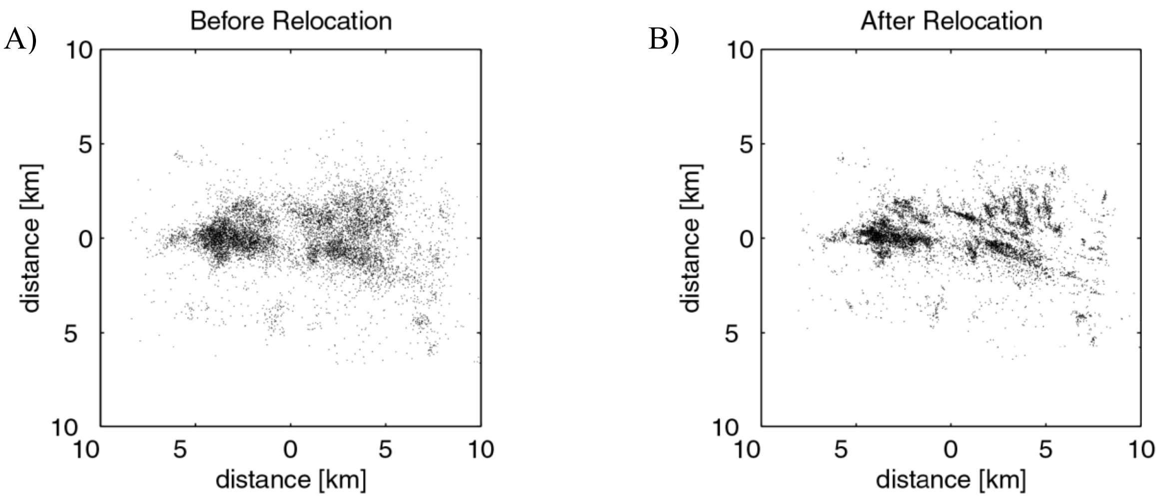
Στη μορφή αυτή, η μέθοδος διπλών διαφορών χρησιμοποιεί δεδομένα ενός καταλόγου φάσεων και το θεμιτό αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι να ελαττωθούν τα σφάλματα που υπεισέρχονται στον αρχικό σεισμικό κατάλογο εξ’ αιτίας της **μη-μοντελοποιημένης δομής** ταχυτήτων. Αυτά τα σφάλματα είναι πάντοτε υπαρκτά όταν χρησιμοποιούνται μονοδιάστατα μοντέλα ταχυτήτων καθώς μια πλευρική βαθμίδα ταχύτητας στη δομή της περιοχής μπορεί να δημιουργήσει συστηματικά σφάλματα στον εντοπισμό υποκέντρων. Η μέθοδος αυτή δύναται να ελαττώσει τα σφάλματα κατά περισσότερό από μια τάξη μεγέθους.

Τα δεδομένα του καταλόγου φάσεων μπορούν να συνδυαστούν με την πληροφορία που παρέχει η **ετεροσυσχέτιση** των κυματομορφών, καθώς με τη γνώση του χρόνου τ_m γίνεται να ελαττωθούν τα **σφάλματα ανάγνωσης των χρόνων άφιξης** ανάμεσα σε σεισμικά ζεύγη (*doublet*) και κατ' επέκταση σε ένα σύνολο ζευγών που συνδέονται μεταξύ τους με μια σχέση ομοιότητας (*multiplet*). Ο χρόνος τ_m μπορεί να υπολογιστεί με αρχική στοίχιση στον χρόνο άφιξης των κυμάτων P ή S (ο οποίος έχει προηγουμένως καθοριστεί αυτόματα ή χειρωνακτικά για κάθε σεισμό σε κάθε σταθμό) και για ένα αρκετά στενό χρονικό παράθυρο που θα περιέχει μόνο τα P ή μόνο τα S κύματα. Ο χρόνος τ_m σε αυτή την περίπτωση θα δώσει τη σχετική χρονική καθυστέρηση της μιας ως προς την άλλη κυματομορφή που πρέπει να εφαρμοστεί ώστε τα εκάστοτε κοινά τμήματα των P ή S αντίστοιχα να ταυτιστούν (βλέπε Κεφάλαιο 4, Σχήματα 4.8, 4.9).

Η διαφορά σε αντίθεση με τον ορισμό που δόθηκε στην αρχή του κεφαλαίου για τους όμοιους σεισμούς είναι ότι σε αυτή την περίπτωση δεν χρησιμοποιείται ολόκληρη η σεισμική καταγραφή αλλά μόνο ένα μέρος της που απομονώνει είτε τα P είτε τα S κύματα. Εάν οι σεισμοί είναι όμοιοι, υπό την αυστηρή έννοια, τότε είτε εξεταστεί ένα παράθυρο με τον κυματοσυρμό των P είτε ολόκληρη η σεισμική καταγραφή, για μια ορισμένη αρχική στοίχιση, ο χρόνος τ_m πρέπει να μη διαφέρει σημαντικά. Ακόμα, όμως, και στην αυστηρή περίπτωση όμοιων σεισμών, μια διαφορετική αρχική στοίχιση δίνει στις περισσότερες περιπτώσεις διαφορετικό χρόνο τ_m. Ακόμα και αν στην πραγματικότητα η χρονική διάρκεια $t_{S\text{-}P}$ μεταξύ της άφιξης των P και S κυμάτων είναι η ίδια για ένα ζεύγος όμοιων σεισμών, αυτό δεν σημαίνει πως δύο ανεξάρτητες παρατηρήσεις των χρόνων άφιξης για τους δύο σεισμούς θα δώσουν το ίδιο ακριβώς $t_{S\text{-}P}$ καθώς υπεισέρχεται το σφάλμα ανάγνωσης 4 ξεχωριστών φάσεων (P και S για τους 2 σεισμούς). Άρα το τ_m αναμένεται να είναι μη-μηδενικό και διαφορετικό για τις δύο περιπτώσεις αρχικής στοίχισης (μια στα P και μια στα S) ακόμα και στην περίπτωση δύο απόλυτα όμοιων σεισμών. Η μέτρηση του χρόνου τ_m μέσω της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης είναι μια μέτρηση της τιμής $(t_k^i - t_k^j)^{obs}$ της εξίσωσης (1.42).

Όλα τα παραπάνω έχουν συνδυαστεί σε έναν σύνθετο αλγόριθμο στο πρόγραμμα **HypoDD** (*Waldhauser & Ellsworth 2000; Waldhauser, 2001*). Πρόκειται για ένα ευέλικτο πρόγραμμα που εκμεταλλεύτεται με ποικίλους τρόπους τη χωρική συσχέτιση των σεισμών, βάσει των αρχικών τους υποκέντρων, των χρόνων διαδρομής καθώς και των δεδομένων από την ετεροσυσχέτιση των κυματομορφών, που παρέχει μια πιο άμεση πληροφορία της σχέσης μεταξύ ζευγών όμοιων σεισμών, συμπεριλαμβάνοντας δεδομένα σφαλμάτων RMS, θέσης, βάρη για τους χρόνους P και S σε κάθε σταθμό (ποιότητα σήματος και ανάγνωσης χρόνων) καθώς και βάρη για τους χρόνους τ_m στα δεδομένα ετεροσυσχέτισης. Τα βάρη αυτά ουσιαστικά δίνονται από την τιμή του XC_{max}, δηλαδή από το μέτρο ομοιότητας των σημάτων που ήδη αναφέρθηκε νωρίτερα στο κεφάλαιο αυτό, με τη διαφορά ότι εδώ τα τ_m και XC_{max} προκύπτουν από ένα τμήμα της κυματομορφής που περιέχει μόνο τα P ή μόνο τα S κύματα.

Με τον επαναπροσδιορισμό, όπως φαίνεται στο παράδειγμα του Σχήματος 1.22, επιτυγχάνεται να ξεκαθαρίσει η αρχικά «θολή» εικόνα της σεισμικότητας που παρέχουν τα δεδομένα του καταλόγου. Αρχίζουν να διακρίνονται γραμμικές δομές σκιαγραφώντας τις επιφάνειες των διαφόρων ρηγμάτων, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιοχές με πολύπλοκη τεκτονική. Επιτυγχάνεται επίσης η εξάλειψη τεχνητών σφαλμάτων (*artifacts*) του αρχικού καταλόγου που δημιουργούνται από περιορισμούς του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε, κυρίως σε γεγονότα που έχουν μικρό αριθμό φάσεων ή κακή αζιμουθιακή κάλυψη.



Σχήμα 1.22: ένα παράδειγμα επαναπροσδιορισμού επικέντρων σεισμών με το πρόγραμμα HypoDD σε κατάλογο περίπου 10.000 σεισμών της κρίσης του 1997 στην καλδέρα Long Valley της California. Χρησιμοποιήθηκαν γεγονότα που απείχαν λιγότερο από περίπου 500m ενώ το μέγεθος του συστήματος των εξισώσεων διπλών διαφορών ήταν της τάξεως του 10^6. Αριστερά: επίκεντρα με τη μέθοδο JHD (*Joint Hypocenter Determination*), Δεξιά: επίκεντρα μετά τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD. (*σχήμα από Waldhauser, 2001*).

Μια άλλη μέθοδος προσδιορισμού σχετικών θέσεων σεισμών με μετρήσεις διαφορικών χρόνων διαδρομής είναι η μέθοδος των Κύριων Γεγονότων ή «**Master Events**», στην οποία το κάθε γεγονός επαναπροσδιορίζεται ως προς ένα μονάχα κύριο γεγονός (δεν πρέπει να γίνεται σύγχυση με την έννοια του ‘Κύριου Σεισμού’). Ως ‘κύριο γεγονός’ επιλέγεται ένας σεισμός με ‘καθαρές’ καταγραφές σε πολλούς σταθμούς και για τον οποίο οι χρόνοι άφιξης των P και S καθορίζονται με συμβατικό, χειρονακτικό (*manual*) τρόπο. Το πρόβλημα αυτής της προσέγγισης είναι ότι λόγω της ύπαρξης θορύβου η συσχέτιση με το κύριο γεγονός μπορεί να περιέχει σφάλμα το οποίο θα διαδοθεί στη συνέχεια σε ολόκληρη τη συστάδα που επαναπροσδιορίστηκε ως προς το γεγονός αυτό. Μπορεί, ωστόσο, να ελεγχθεί το αποτέλεσμα για μια ορισμένη συστάδα επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία με διαφορετικό κύριο γεγονός κάθε φορά ώστε να διαπιστωθεί αν υπάρχουν μεγάλες ή μικρές διαφορές στο αποτέλεσμα. Επίσης, η μέθοδος αυτή θέτει περιορισμούς στη χωρική έκταση της συστάδας που μπορεί να επαναπροσδιοριστεί καθώς πρέπει όλα τα γεγονότα να συσχετίζονται με το κύριο γεγονός. (*Waldhauser & Ellsworth, 2000 με αναφορές σε άλλες εργασίες*).

Με την εισαγωγή των χρόνων $\boldsymbol{\tau_m}$ μέσα στις συμβατικές αναγνώσεις χρόνων άφιξης των P και S κυμάτων επιτυγχάνεται μια πρώτη βελτίωση των αποτελεσμάτων καθώς χρησιμοποιώντας ένα κύριο γεγονός το οποίο είναι εκ των προτέρων γνωστό ότι ανήκει σε μια ευρύτερη συστάδα σμηνοσεισμών, μπορεί να «επαναληφθεί» αυτόματα ο χειρονακτικός καθορισμός χρόνων άφιξης που έχει γίνει για το κύριο γεγονός στους ίδιους ακριβώς σχετικούς χρόνους των κυματομορφών των όμοιων με αυτό γεγονότων (δηλαδή στον ίδιο σχετικό χρόνο του κοινού τμήματος των όμοιων κυματομορφών ως προς μια συγκεκριμένη φάση). Αυτό εξασφαλίζει πως για όμοιους σεισμούς θα είναι διαθέσιμοι χρόνοι άφιξης των φάσεων P και S που έχουν επιλεχθεί με ομοιόμορφο τρόπο. Με την προϋπόθεση ότι ο χειρονακτικός καθορισμός χρόνων άφιξης έχει γίνει σωστά στο κύριο γεγονός εξασφαλίζονται σωστοί χρόνοι άφιξης για όλα τα υπόλοιπα γεγονότα της συστάδας, ακόμα και σε κάποιες περιπτώσεις που λόγω θορύβου πιθανόν να μην μπορούσε διαφορετικά να αναγνωστεί καθαρά ο χρόνος άφιξης των P ή S κυμάτων ενώ η ετεροσυσχέτιση μπορεί να ανιχνεύσει την ομοιότητα ανάμεσα στα δύο σήματα. Η μέθοδος αυτή θα αναλυθεί εκτενέστερα κατά την εφαρμογή της στο 5^o Κεφάλαιο.

Μια άλλη προσέγγιση είναι η χρήση χρονικών καθυστερήσεων $\boldsymbol{\tau_m}$ εξαγόμενων από τη φάση του ετεροφάσματος για *όλους* τους δυνατούς συνδυασμούς ζευγών γεγονότων (*Got et al., 1994*). Έτσι ο επαναπροσδιορισμός δεν εξαρτάται από το κύριο γεγονός (*master*) που θα επιλεχθεί καθώς όλα τα γεγονότα που έχουν ισχυρή συνοχή με κάποια από τα υπόλοιπα χρησιμοποιούνται τόσο ως **κύρια** (*master*) όσο και ως **εξαρτημένα** (*slave*) γεγονότα. Τα αποτελέσματα εισάγονται σε ένα κατάλληλο σύστημα γραμμικών εξισώσεων που επιλύεται με μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιώντας την υπόθεση ότι το άνυσμα βραδύτητας για κάθε σταθμό είναι το ίδιο για όλες τις πηγές (αυτή η προσέγγιση είναι επαρκής όταν τα υπόκεντρα βρίσκονται τόσο κοντά μεταξύ τους ώστε να μην υπάρχουν μεταβολές στις ιδιότητες του μέσου μεταξύ τους, άρα και στην ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων, και οι σεισμικές ακτίνες να είναι περίπου οι ίδιες). Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι οι συστάδες που δεν σχετίζονται μεταξύ τους δεν επαναπροσδιορίζονται η μία ως προς την άλλη, δηλαδή οι σχετικές θέσεις των κεντροειδών τους δεν είναι οι πραγματικές, καθώς χρησιμοποιούνται μόνο δεδομένα ετεροσυσχέτισης. Έτσι, τα γεγονότα που ανήκουν σε διαφορετική συστάδα σμηνοσεισμών (*multiplet*) έχουν χαμηλό $\mathbf{XC_{max}}$ (χαμηλό βάρος) και ο χρόνος $\boldsymbol{\tau_m}$ δεν παρέχει χρήσιμη πληροφορία για τον επαναπροσδιορισμό.

Μια τρίτη μέθοδος (*αναφορά Waldhauser & Ellsworth, 2000, σε εργασία των Dodge et al.,1995*) είναι η χρήση των χρόνων $\boldsymbol{\tau_m}$ για τον επανακαθορισμό των χρόνων άφιξης (των κοινών, δηλαδή, χρόνων άφιξης των P και S από τους οποίους εξάγονται τα δεδομένα του καταλόγου) με μια διαδικασία ‘κύριων γεγονότων’ (όπως στην ομώνυμη μέθοδο που προαναφέρθηκε) και στη συνέχεια με τη βοήθεια μιας μεθόδου “*Joint Hypocenter Determination*” (JHD). Με τη μέθοδο JHD γίνεται ταυτόχρονη αντιστροφή των χρόνων άφιξης για τον προσδιορισμό των σεισμικών παραμέτρων, για τον επαναϋπολογισμό του μοντέλου ταχυτήτων και των διορθώσεων σε κάθε σταθμό (*station corrections*). Η μέθοδος αυτή υποθέτει πως η όποια μη-μοντελοποιημένη δομή μεταξύ των γεγονότων μιας συστάδας, επειδή ακριβώς τα υπόκεντρά τους βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, μέσα σε έναν μικρό όγκο, και οι σεισμικές τους ακτίνες σχεδόν ταυτίζονται, «απορροφάται» πλήρως μέσα στις διορθώσεις για τον κάθε σταθμό. Με τη μέθοδο JHD ένα γεγονός επηρεάζει τις θέσεις άλλων γεγονότων μέσω μιας *κοινής* διόρθωσης ανά σταθμό.

Ο αλγόριθμος του πρόγραμματος **HypoDD** (*Waldhauser & Ellsworth, 2000*) υπερέχει έναντι των παραπάνω μεθόδων που αναφέρθηκαν καθώς συνδυάζει όλα τα διαθέσιμα δεδομένα τόσο του καταλόγου όσο και της ετεροσυσχέτισης των κυματομορφών. Με τα δεδομένα ετεροσυσχέτισης επιτυγχάνεται ο βέλτιστος επαναπροσδιορισμός των συσχετισμένων γεγονότων ως προς το κεντροειδές της συστάδας στην οποία ανήκουν ενώ ταυτόχρονα μέσα από ένα δίκτυο που συνδέει χωρικά με διαφορετικά βάρη ένα μεγάλο πλήθος ζευγών υποκέντρων, οι θέσεις των διαφόρων συστάδων επαναπροσδιορίζονται η μία ως προς την άλλη και κατά αυτόν τον τρόπο το ίδιο συμβαίνει *και* με τα ασυσχέτιστα (ως προς την ετεροσυσχέτιση των κυματομορφών τους) γεγονότα, βάσει των διαφορικών τους χρόνων διαδρομής από δεδομένα του καταλόγου σε σύγκριση με τα υπόλοιπα γεγονότα μέρος των οποίων επηρεάζεται από τα δεδομένα ετεροσυσχέτισης.

Η επαναληπτική διαδικασία μπορεί να γίνει με 2 τρόπους: με τη χρήση της μεθόδου Αποσύνθεσης Ιδιαζουσών Τιμών (*Singular Value Decomposition ή SVD*) καθώς και με μέθοδο Σταθμισμένων Ελαχίστων Τετραγώνων (*Weighted Least-Squares ή LSQR*) (*βλέπε αναφορά των Waldhauser & Elssworth, 2001 σε εργασία των Paige & Saunders, 1982*). Η SVD μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα μικρού αριθμού γεγονότων και παρέχει ακριβέστερες εκτιμήσεις των σφαλμάτων ενώ η LSQR έχει τη δυνατότητα να λύσει αποτελεσματικά συστήματα πολύ μεγάλου μεγέθους και είναι στην πράξη η πιο ευρέως εφαρμόσιμη.

Η διαδικασία επαναπροσδιορισμού με το HypoDD απαιτεί συνήθως έναν αριθμό 2-3 (με μέθοδο SVD) ή 5-20 επαναλήψεων (με μέθοδο LSQR) και μπορεί να χωριστεί σε στάδια στο καθένα από τα οποία καθορίζονται *a priori* βάρη ξεχωριστά για το κάθε είδος παρατήρησης (ως **παρατηρήσεις** ή *observations* ορίζονται οι P και S διαφορικοί χρόνοι διαδρομής από δεδομένα καταλόγου καθώς και οι P και S διαφορικοί χρόνοι διαδρομής από δεδομένα ετεροσυσχέτισης) ή καθορίζονται συνθήκες επαναπροσδιορισμού των βαρών (re-weighting) με κριτήρια την απόσταση μεταξύ των διαφόρων ζευγών υποκέντρων και την τιμή του χρονικού υπολοίπου (*residual*) που εμφανίζουν οι αντίστοιχες παρατηρήσεις. Τα δεδομένα που από κάποιο βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας και έπειτα δεν πληρούν τους περιορισμούς της ενδοαπόστασης και των χρονικών υπολοίπων (εάν έχει τεθεί τέτοιος περιορισμός) είτε αποδυναμώνονται, δηλαδή το βάρος της αντίστοιχης σύνδεσης μειώνεται, είτε αποκόπτονται, δηλαδή η σύνδεσή τους με τα υπόλοιπα παύει να υφίσταται. Γεγονότα που παύουν να συνδέονται με κάποιο από τα υπόλοιπα εξαιρούνται από την επαναληπτική διαδικασία, η οποία συνεχίζει με όσα απέμειναν για όσα βήματα έχουν καθοριστεί, και παραμένουν στη θέση που βρίσκονταν κατά το βήμα που αποκόπηκαν οι συνδέσεις τους. Στην μέθοδο LSQR καθορίζεται επίσης για κάθε στάδιο η τιμή του παράγοντα απόσβεσης (*Damping Factor*).

Κατά την εκτέλεση του προγράμματος σε κάθε βήμα εμφανίζεται το ποσοστό των δεδομένων καταλόγου ή ετεροσυσχέτισης που χρησιμοποιούνται, το σφάλμα RMS και τα μέσα σφάλματα εντοπισμού θέσης, ο δείκτης κατάστασης ή βαθμός συντήρησης (*Condition Number, CND*) που είναι ο λόγος της μεγαλύτερης προς τη μικρότερη ιδιοτιμή, καθώς και η μετατόπιση του κεντροειδούς της συστάδας (ή του συνόλου των δεδομένων εάν αντιμετωπίζονται εξ' ολοκλήρου) ως προς την αρχική του θέση (*Origin Shift, OS*) η οποία πρέπει να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα.

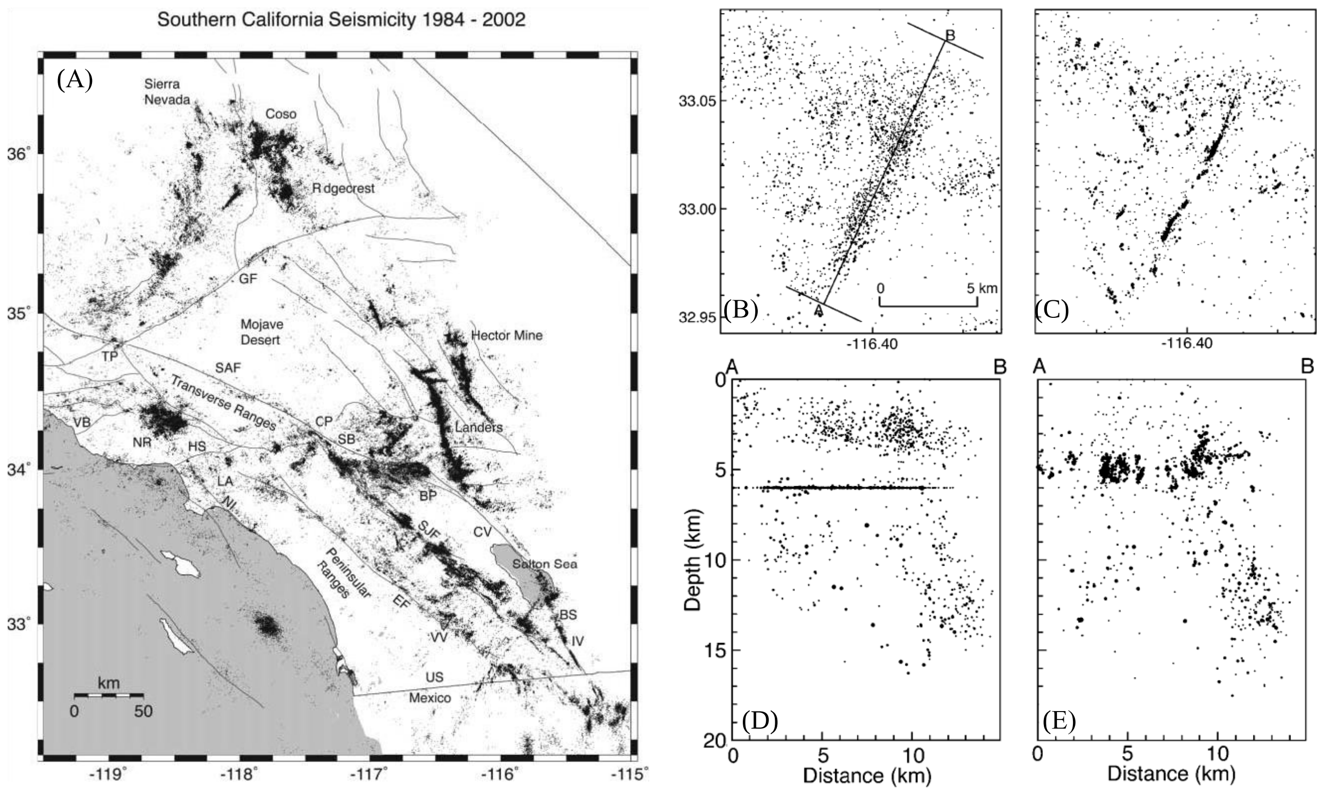
Ο *βαθμός συντήρησης* CND (με τη μέθοδο LSQR) συνήθως πρέπει να έχει μια τιμή μεταξύ 40-80 (*Waldhauser, 2001*). Εάν είναι πολύ μικρότερος υποδηλώνει μεγάλη απόσβεση του συστήματος ενώ αν είναι πολύ μεγαλύτερος σημαίνει πως ο παράγοντας απόσβεσης που χρησιμοποιείται είναι πολύ μικρός και το σύστημα ασταθές. Το OS δηλώνει τον βαθμό της απόλυτης μετατόπισης της συστάδας και πρέπει να παραμένει μικρός. Συνήθως ο αρχικός, συμβατικός προσδιορισμός υποκεντρικών θέσεων, παρά τα όποια σφάλματα, δίνει μια προσέγγιση της αναμενόμενης θέσης των υποκέντρων, ιδιαίτερα όταν το πλήθος των σεισμών είναι αρκετά μεγάλο οπότε δημιουργείται μια στατιστική εικόνα της σεισμικότητας χωρίς όμως πολλές λεπτομέρειες (Σχήμα 1.22_{A}). Μετά τον επαναπροσδιορισμό αναμένεται τα νέα υπόκεντρα να βρίσκονται εντός των ορίων των σφαλμάτων των αρχικών θέσεών τους, εάν βέβαια για μια δεδομένη μελέτη έχουν σημασία οι απόλυτες θέσεις και όχι μόνο οι σχετικές.

Επίσης, σε κάθε βήμα αναφέρεται ο αριθμός των «αερο-σεισμών» (*Air-quakes, AQ*), δηλαδή των γεγονότων εκείνων των οποίων τα υπόκεντρα βρέθηκαν πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, πιθανόν λόγω μεγάλων σφαλμάτων στον αρχικό τους εντοπισμό ή λόγω κακής παραμετροποίησης του προγράμματος. Στην περίπτωση της εμφάνισης κάποιων AQ οι σεισμοί αυτοί αφαιρούνται πλήρως από τον κατάλογο και το βήμα επαναλαμβάνεται χωρίς αυτούς. Περισσότερες λεπτομέρειες για το πρόγραμμα HypoDD θα αναφερθούν κατά την εφαρμογή του στα Κεφάλαια 4 και 5.

1.9 ~ *Εφαρμογές με όμοιους σεισμούς*

Από τα όσα αναφέρθηκαν σε αυτό το κεφάλαιο έως τώρα μπορεί κανείς να πάρει μια ιδέα για τα είδη των εφαρμογών στα οποία προσφέρονται οι μέθοδοι μέτρησης της ομοιότητας των σεισμικών κυματομορφών. Ο εντοπισμός και μόνο των γεγονότων των οποίων οι κυματομορφές έχουν ομοιότητες μεταξύ τους οδηγεί στο συμπέρασμα πως οι σεισμοί έχουν όμοιες παραμέτρους ως προς τη θέση, την πηγή το μηχανισμό γένεσης και –πιθανόν- παραπλήσιους χρόνους γένεσης, αν και αυτό θα πρέπει επιβεβαιωθεί από τους ίδιους τους απόλυτους χρόνους άφιξης, καθώς το σχήμα των κυματομορφών δεν παρέχει τέτοια πληροφορία. Ο βαθμός ομοιότητας, είτε από το μέγιστο της ετεροσυσχέτισης, $\mathbf{XC_{max}}$, είτε από τη μέση τιμή της συνοχής, $\mathbf{m_{coh}}$, σε κάποιο εύρος συχνοτήτων, καθώς και η χρονική καθυστέρηση $\boldsymbol{\tau_m}$ στην οποία εμφανίζεται το $\mathbf{XC_{max}}$ ή η οποία προκύπτει από την κλίση της φάσης του ετεροφάσματος από τη Σχέση 1.8, είναι τιμές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να επαναπροσδιοριστούν τα σεισμικά υπόκεντρα και να δώσουν μια λεπτομερέστερη εικόνα της σεισμικότητας. Είναι, επίσης, δυνατόν να μετρηθούν μικρές σχετικές μεταβολές της τάξεως του 0.1% στην ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων, όπως προβλέπεται από τη θεωρία συμβολομετρίας κυματο-ουράς (*coda-wave interferometry ή **CWI***). Σε αυτή την ενότητα θα γίνει περιληπτική αναφορά σε ορισμένες μελέτες που έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια και έχουν βασιστεί στην ανίχνευση και τη μέτρηση της ομοιότητας σεισμών.

Ίσως η μαζικότερη έως τώρα εργασία επαναπροσδιορισμού γεγονότων έχει γίνει στη Νότια Καλιφόρνια (*Hauksson & Shearer, 2005; Shearer et al., 2005*), στην οποία επαναπροσδιορίστηκαν περισσότεροι από **340000 σεισμοί** που συνέβησαν κατά τη χρονική περίοδο 1984-2002. Ο επαναπροσδιορισμός έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος HypoDD (*Waldhauser & Ellsworth, 2000*), δηλαδή με τη μέθοδο των Διπλών Διαφορών. Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό των σμηνοσεισμών (*multiplets*) ήταν η μέθοδος ετεροσυσχέτισης. Η ετεροσυσχέτιση διεξάχθηκε ανάμεσα σε κάθε γεγονός A και σε 100 γειτονικά γεγονότα γύρω από το κάθε A τα οποία εντοπίστηκαν με τη μέθοδο μωσαϊκού (*tesselation*) Delaunay, χωριστά για τα P και τα S κύματα, όπως απαιτεί στα δεδομένα του το πρόγραμμα HypoDD. Η ευρύτερη περιοχή της Ν. Καλιφόρνια χωρίστηκε σε 5 τμήματα τα οποία περιελάμβαναν λιγότερα από 100.000 γεγονότα το καθένα, ώστε να διευκολυνθούν οι υπολογισμοί. Οι χρόνοι $\boldsymbol{\tau_m}$ υπολογίστηκαν από τις καμπύλες ετεροσυσχέτισης με ακρίβεια 0.001sec, μεγαλύτερη από τις περιόδους δειγματοληψίας, με μη-γραμμική παρεμβολή τύπου "*spline*".



Σχήμα 1.23: A) χάρτης με τα επαναπροσδιορισμένα επίκεντρα των σεισμών της Ν. Καλιφόρνια για την περίοδο 1984-2002 (*από την εργασία των Hauksson & Shearer, 2005*). B) επίκεντρα του *αρχικού* καταλόγου SCSN στην περιοχή κοντά στην κοιλάδα Vallecitos, η γραμμή AB δείχνει την τομή που ακολουθεί στα σχήματα (D) και (E). C) τα επίκεντρα της ίδιας περιοχής *μετά* τον επαναπροσδιορισμό. D) τομή AB στην ίδια περιοχή με τα υπόκεντρα του αρχικού καταλόγου. Η συσσώρευση γεγονότων στα 6km οφείλεται σε τεχνητό σφάλμα (*artifact*), E) τομή AB στην ίδια περιοχή με τα διορθωμένα υπόκεντρα μετά τον επαναπροσδιορισμό. (Σχήματα B,C,D και E *από την εργασία των Shearer et al., 2005*)

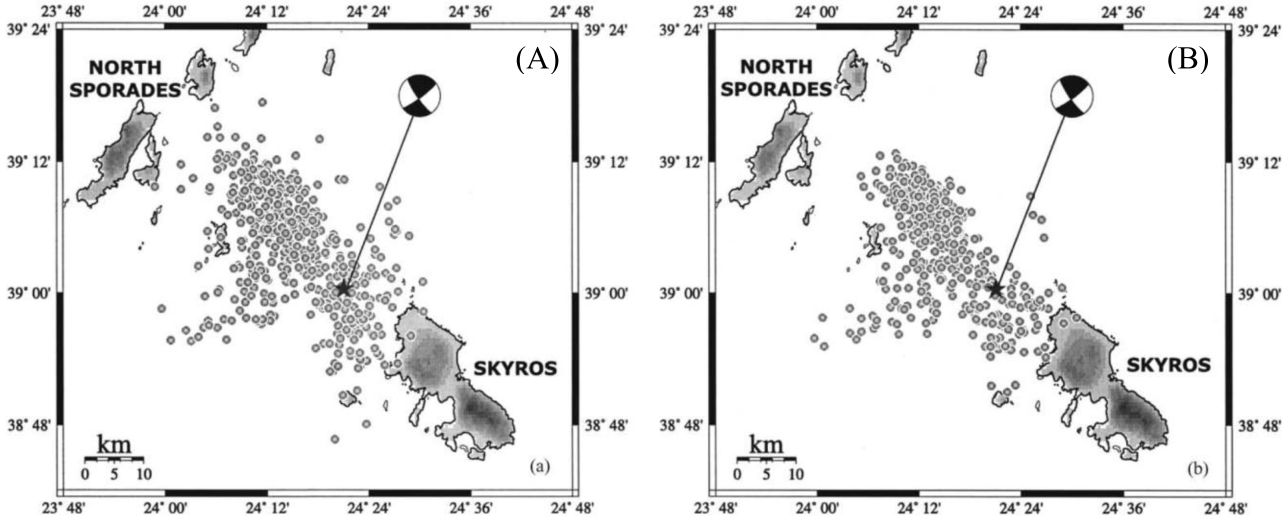
Τα χρονικά παράθυρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 2sec για τα P και 3sec για τα S κύματα, γύρω από τους θεωρητικούς χρόνους άφιξης που προκύπτουν από ένα 1D-μοντέλο ταχυτήτων (ο αρχικός κατάλογος που χρησιμοποιείται έχει κατασκευαστεί με τη χρήση ενός τρισδιάστατου μοντέλου ταχυτήτων). Χρησιμοποιήθηκαν οι θεωρητικοί χρόνοι καθώς σε πολλές περιπτώσεις δεν ήταν διαθέσιμοι οι χειρονακτικά-καθορισμένοι (*manual*) χρόνοι άφιξης, κάτι που θα εφαρμοστεί και στην παρούσα εργασία στο Κεφάλαιο 5 κατά τη διαδικασία της μεθόδου των Κύριων Γεγονότων (*master events*). Η διαφορά ανάμεσα σε θεωρητικούς και πραγματικούς χρόνους άφιξης ήταν συνήθως γύρω στα 0.5sec.

Καταγράφθηκαν τα αποτελέσματα μόνο για όσα ζεύγη γεγονότων είχαν κατά μέσο όρο $\mathbf{XC_{max}}\geq 0.45$, υπολογισμένο από τις ετεροσυσχετίσεις στις κυματομορφές όλων των συνιστωσών σε όλους τους διαθέσιμους σταθμούς. Μαζί με το κάθε $\mathbf{XC_{max}}$ καταγράφθηκε επίσης και η θέση των πρώτων αρνητικών ελαχίστων εκατέρωθεν του ολικού μεγίστου, η τιμή του ολικού ελάχιστου που μπορεί να βοηθήσει στον εντοπισμό περιπτώσεων στις οποίες λόγω κάποιου σφάλματος του οργάνου ή λόγω διαφοράς στους μηχανισμούς γένεσης έχει αντιστραφεί η πολικότητα (Παράρτημα Α.4). Το αποτέλεσμα του επαναπροσδιορισμού φαίνεται στο Σχήμα 1.23_{A}. Η συσσώρευση των συστάδων βελτιώθηκε κατά 2-3 φορές, διακρίνονται δομές, συχνά μάλιστα γραμμικές, που δεν φαίνονται στην αρχική εικόνα ενός διάσπαρτου «νέφους» σημείων και, τέλος, η κατανομή ως προς το βάθος βελτιώθηκε και εξαρτάται λιγότερο από τα όρια των ασυνεχειών στο μοντέλο ταχυτήτων.

Στη συνέχεια ακολούθησε μια ανάλυση συστάδων (*Shearer et al., 2005*) ως ένα στάδιο εκ των υστέρων επεξεργασίας (*post-processing*) των δεδομένων ετεροσυσχέτισης. Θεωρήθηκαν ως σεισμικά ζεύγη (*doublet*) όσα γεγονότα είχαν τουλάχιστον 8 τιμές $\mathbf{XC_{max}}\geq 0.65$ για P ή S κύματα σε σταθμούς με επικεντρική απόσταση $\Delta\leq 80$km (καθώς σε σταθμούς που βρίσκονται μακριά τα κύματα έχουν κυρίως χαμηλές συχνότητες και μπορεί να δώσουν υψηλή ετεροσυσχέτιση ακόμα και αν δεν αποτελούν πραγματικό σεισμικό ζεύγος). Καθώς υπάρχουν έως 3 τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ για τα P ή S του κάθε ζεύγους σε ένα δεδομένο σταθμό, ελήφθη υπόψη για τα P η κατακόρυφη συνιστώσα και για τα S οι δύο οριζόντιες και στη συνέχεια επιλέχθηκε η μέτρηση που έδωσε το υψηλότερο $\mathbf{XC_{max}}$. Για όσα ζεύγη σεισμών ισχύει το κριτήριο της τιμής κατωφλίου σε επαρκή αριθμό σταθμών υπολογίσθηκε η μέση τιμή συσχέτισης από τα P και S κύματα για να προκύψει μια οριστική τιμή που χαρακτηρίζει το «βαθμό ομοιότητας» του συγκεκριμένου ζεύγους.

Τα όμοια γεγονότα ταξινομήθηκαν σε συστάδες με μια μέθοδο που περιγράφεται από τον *Hartigan* (1975) με ορισμένες τροποποιήσεις (*Shearer et al., 2005*). Στη συνέχεια για κάθε συστάδα υπολογίζονται βελτιωμένες θέσεις των γεγονότων εντός συστάδας με μεθόδους που περιγράφονται στην εργασία των *Shearer* (2002) και *Shearer et al.* (2003). Κατά αυτόν τον τρόπο εντοπίστηκαν 207628 γεγονότα (61% του αρχικού καταλόγου) τα οποία ανήκαν σε συστάδες όμοιων σεισμών, και επαναπροσδιορίστηκαν. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα $1.23_{C,E}$ σε σύγκριση με τον αρχικό κατάλογο SCSN (Σχήμα $1.23_{B,D}$).

Στον Ελλαδικό χώρο μια εφαρμογή της μεθόδου των Διπλών Διαφορών έχει γίνει για τον επαναπροσδιορισμό της μετασεισμικής ακολουθίας ενός σεισμού Μ6.5 που συνέβη στις 26 Ιουλίου 2001 στη Σκύρο (*Roumelioti et al., 2003*). Επαναπροσδιορίστηκαν 445 μετασεισμοί με τη χρήση δεδομένων καταλόγου. Το μειονέκτημα είναι ότι δεν υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα από ετεροσυσχέτιση κυματομορφών και οι δυνατότητες του HypoDD με τη χρήση χρονικών αφίξεων P και S μόνο από δεδομένα καταλόγου είναι περιορισμένες. Εν τούτοις η βελτίωση στις επικεντρικές θέσεις θεωρήθηκε σημαντική καθώς τα σφάλματα RMS μειώθηκαν κατά έναν παράγοντα άνω του 2.5 ως προς τα αντίστοιχα αρχικά.

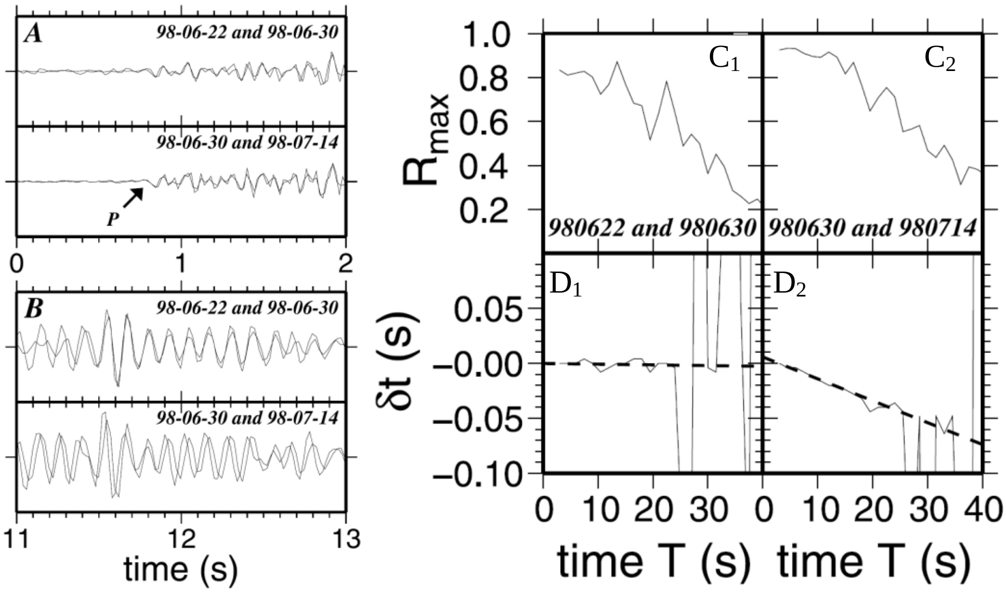


Σχήμα 1.24: A) αρχικά επίκεντρα μετασεισμών στην περιοχή NW της Σκύρου. B) επίκεντρα ύστερα από τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD με δεδομένα καταλόγου (*από την εργασία των Roumelioti et al., 2003*).

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί τόσο στο 3^{ο} όσο και στο 4^{ο} Κεφάλαιο, εκτός των άλλων, ένα σμήνος σεισμών που εκδηλώθηκε από τα τέλη Μαρτίου έως το καλοκαίρι του 2001, 5km Νότια της πόλης του Αιγίου, και το οποίο για ευκολία στην αναφορά θα καλείται «Σμήνος του AIO (2001)». Έχει γίνει προσπάθεια επαναπροσδιορισμού αυτού του σμήνους από δεδομένα του δικτύου της Πάτρας (PATNET) (*Janksy et al., 2003*). Ο επαναπροσδιορισμός έχει γίνει μόνο από δεδομένα καταλόγου για ένα υποσύνολο 139 γεγονότων από τα 171 τα οποία καταγράφηκαν σε τουλάχιστον 5 σταθμούς. Ο κύριος σεισμός M_w=4.2 που συνέβη στις 8 Απριλίου 2001 χρησιμοποιήθηκε ως κύριο γεγονός (*master event*) βάσει του οποίου επαναπροσδιορίστηκαν τα υπόλοιπα με μια μέθοδο που καλείται «διαφορά σταθμών» (*Station-Difference*). Το αποτέλεσμα του επαναπροσδιορισμού βρίσκεται στο Παράρτημα Β (Σχήμα Β.54).

Στην ευρύτερη περιοχή Αιγίου-Ερατινής έχει γίνει προσπάθεια επαναπροσδιορισμού σεισμών με δεδομένα του τοπικού δικτύου CRL στη διδακτορική διατριβή του *Pacchiani* (2006). Η προσέγγισή του είναι πιο κοντά σε αυτή που θα γίνει στην παρούσα εργασία, καθώς περιλαμβάνει εντοπισμό όμοιων κυματομορφών και σχηματισμό συστάδων, η μέθοδος ωστόσο είναι πολύ διαφορετική. Χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος SPARS (*Zhizhin et al., 2006*): γίνεται ανάλυση σε κυματίδια (*wavelets*) από την οποία υπολογίζεται το διακριτό «κλιμακόγραμμα» (*scalogram*, αντίστοιχο του φασματογράμματος στην περίπτωση μετασχηματισμών Fourier) στο πεδίο της κλίμακας κυματιδίων και του χρόνου. Η σύγκριση των κυματομορφών γίνεται με τον υπολογισμό της συντακτικής απόστασης Levenstein (*Levenstein, 1965*) η οποία, σε αντίθεση με το $\mathbf{XC_{max}}$, είναι ένα μέτρο *ανομοιότητας* των κυματομορφών. Στη συνέχεια γίνεται ομαδοποίηση βάσει ενός από 3 αλγορίθμους: της απλής σύνδεσης ή του πλησιέστερου γείτονα (nearest neighbor), σύνδεση μέσου όρου (average linkage) ή του μακρινότερου γείτονα (*furthest neighbor*). Στην περίπτωση των κυματομορφών, απόσταση σημαίνει ανομοιότητα, δηλαδή ο πλησιέστερος γείτονας είναι το πλέον όμοιο γεγονός με το υπό εξέταση γεγονός. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται δενδρογράμματα για τα δεδομένα του κάθε σταθμού. Στη συνέχεια, για δύο δεδομένα γεγονότα, με κριτήριο τη μέγιστη απόσταση Levenstein, τον αριθμό σταθμών που τα έχουν καταγράψει και τον ελάχιστο αριθμό σταθμών στους οποίους η απόσταση Levenstein πρέπει να είναι μικρότερη από μια ορισμένη τιμή κατωφλίου, διαχωρίζονται τα όμοια από τα ανόμοια γεγονότα και κατατάσσονται σε συστάδες σμηνοσεισμών (*multiplet clusters*). Τέλος, υπολογίζονται οι διαφορικοί χρόνοι $\boldsymbol{\tau_m}$ από τη φάση του ετεροφάσματος και η μέση συνοχή, $\mathbf{m_{coh}}$, σε συχνότητες f<30Hz.

Με τη χρήση των χρόνων $\boldsymbol{\tau_m}$ γίνεται επαναπροσδιορισμός σχετικής θέσης για τους σμηνοσεισμούς της κάθε συστάδας με μια μέθοδο κύριων γεγονότων (*Master Events*) και στη συνέχεια επαναπροσδιορισμός των κύριων γεγονότων με HypoDD με δεδομένα καταλόγου. Από τις σχετικές θέσεις που επαναπροσδιορίστηκαν για τα εξαρτημένα (*slave*) γεγονότα της κάθε συστάδας και με τις νέες θέσεις των κύριων γεγονότων που υπολογίστηκαν με το HypoDD (με κάθε κύριο γεγονός γίνεται ανάλογη μετατόπιση των υποκέντρων των εξαρτημένων από αυτό γεγονότων) προκύπτει η τελική εικόνα για το «Σμήνος του AIO (2001)» η οποία παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β, Σχήμα Β.53.



Σχήμα 1.25: Α) όμοιες κυματομορφές από δονήσεις που διεγέρθηκαν με ρίψεις αεροβόλου σε μια σταθερή θέση στην περιοχή του ηφαιστείου Merapi. Β) μεγέθυνση των δύο παραπάνω κυματομορφών για χρόνους 11-13sec. $C_{1,2}$) μεταβολή της Στις κυματομορφές των ημερών 98-06-22 & 98-06-30 οι διαφορικοί χρόνοι είναι σταθεροί (D_1) ενώ μεταξύ των ημερών 98-06-30 & 98-07-14 εμφανίζεται μεταβολή στις χρονικές καθυστερήσεις (D_2). (από την εργασία των (*Wegler et al., 2006*)

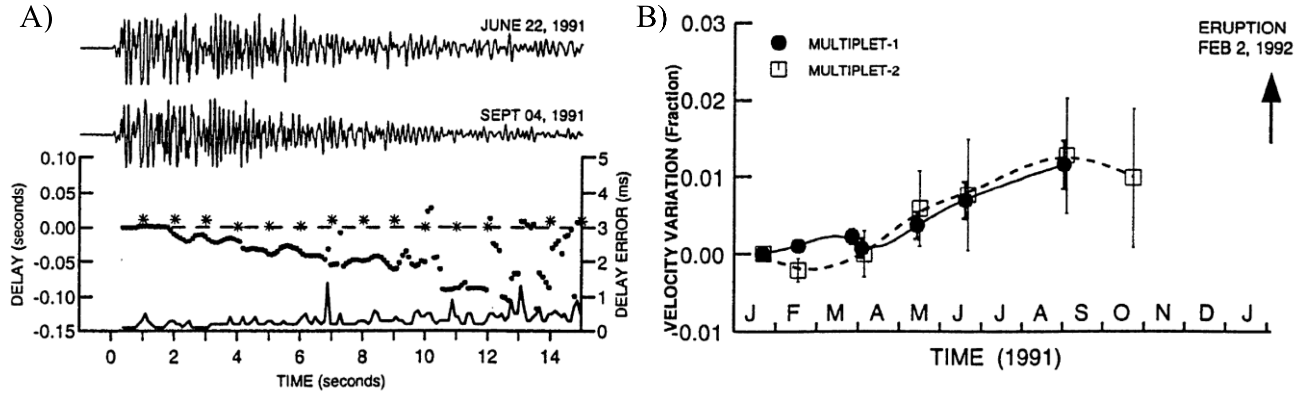
Μια άλλη ενδιαφέρουσα εφαρμογή που περιλαμβάνει μέτρηση της ομοιότητας κυματομορφών είναι αυτή που, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, κάνει χρήση της συμβολομετρίας κυματο-ουράς (*coda wave interferometry ή* **CWI**). Σκοπός είναι η ανίχνευση μικρών σχετικών μεταβολών στη μέση ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων κατά μήκος των –κοινών- σεισμικών ακτινών που φτάνουν από το –κοινό- υπόκεντρο δύο όμοιων σεισμών σε έναν δεδομένο σταθμό. Αυτή η μέθοδος έχει ήδη εφαρμοστεί για τη μέτρηση της μεταβολής ταχυτήτων πριν από ηφαιστειακές εκρήξεις (*Ratdomopurbo & Poupinet, 1995; Nishimura et al., 2000; Snieder & Hagerty, 2004; Nishimura et al., 2005; Wegler et al., 2006*).

Στο Σχήμα 1.25 (*Wegler et al., 2006*) παρουσιάζονται κυματομορφές όμοιων δονήσεων που καταγράφηκαν πριν από τις εκρήξεις του ηφαιστείου Merapi στην Ινδονησία, στις 11 και 19 Ιουλίου 1998. Η πηγή των δονήσεων αυτών είναι πυροβολισμοί με αεροβόλο μέσα σε λεκάνες νερού (*water basins*) οι οποίοι αποτελούσαν μέρος ενός πειράματος σεισμικής διασκόπησης στα πλαίσια μιας εργασίας για τη γεωφυσική μελέτη του εσωτερικού του ηφαιστείου με ενεργές σεισμικές μεθόδους. Σε μια άλλη εργασία (*Ratdomopurbo & Poupinet, 1995*) παρατηρήθηκε αύξηση της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων κατά 1.2%, 8 μήνες πριν από την έκρηξη του 1992 στο ηφαίστειο Merapi. Τα δεδομένα εκείνης της μελέτης, ωστόσο, σταμάτησαν 4 μήνες πριν την έκρηξη καθώς δε σημειώθηκαν άλλοι όμοιοι σεισμοί (Σχήμα 1.26).

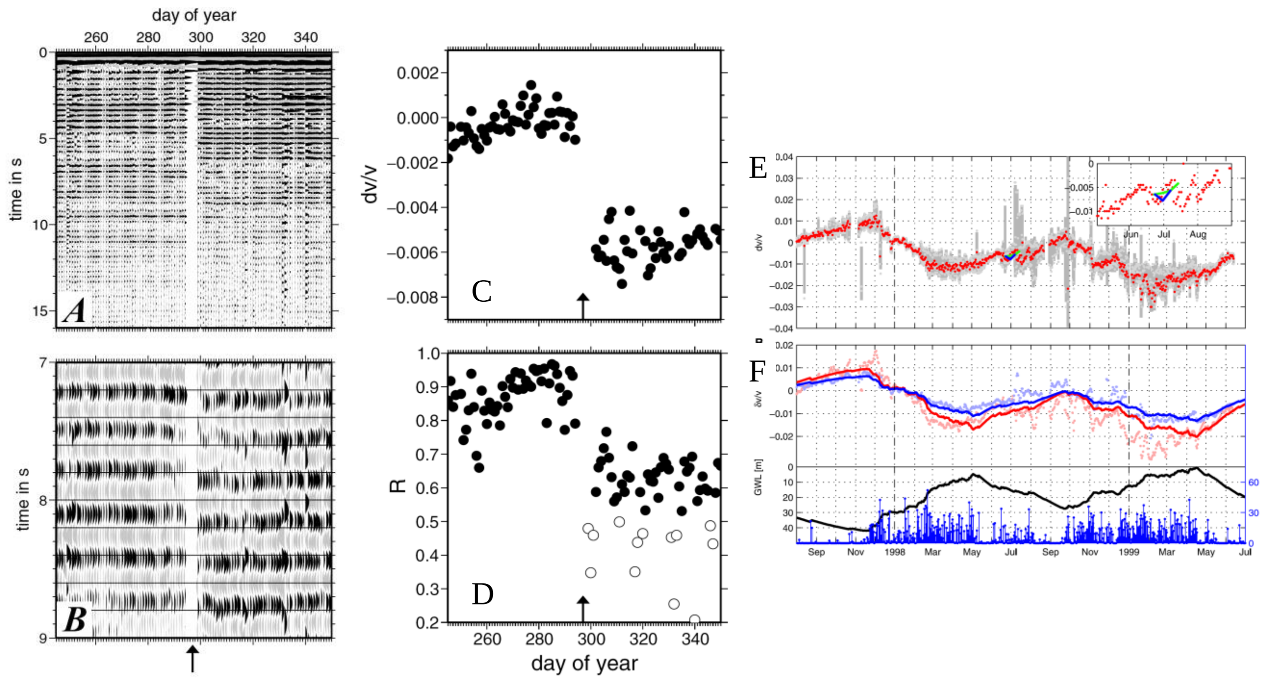
Πριν από τις 2 Ιουλίου 1998 το ηφαίστειο εμφάνιζε μικρή σεισμική δραστηριότητα. Κατά το διάστημα αυτό, στις 22 και 30 Ιουνίου έγιναν 2 βολές με το αεροβόλο στην τοποθεσία BEB και καταγράφηκαν τα όμοια κύματα στους σταθμούς (Σχήμα $1.25_{A,B}$). Οι μετρήσεις μεταβολής ταχύτητας έδωσαν μικρή έως καθόλου αύξηση κατά δυ/υ=(0.03±0.03)% . Την ίδια περίπου περίοδο, 23-30 Ιουνίου, 2 βολές σε μια άλλη τοποθεσία (BAT) έδωσαν μείωση κατά δυ/υ=(0.13±0.03)%. Στις 2 Ιουλίου άρχισε να εκδηλώνεται έντονη σεισμική δραστηριότητα η οποία αυξήθηκε στις 8 Ιουλίου συνοδευόμενη από εδαφική ανύψωση κοντά στην κορυφή του βουνού. Στις 7 Ιουλίου έγιναν βολές και στις 2 τοποθεσίες, οι κυματομορφές των οποίων, σε σύγκριση με τις αντίστοιχες των βολών της $30^{ης}$ Ιουνίου, έδωσαν σχετική αύξηση της ταχύτητας κατά (0.08±0.01)% και (0.08±0.02)% για τις πηγές BEB και BAT αντίστοιχα. Η αύξηση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη με τη σχετική αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό του ηφαιστείου, κατά την οποία κλείνουν οι πόροι των πετρωμάτων και έτσι αυξάνεται η ταχύτητα διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων σε αυτά. Μετά την πρώτη έκρηξη (11/7/1998) έγινε μια ακόμα βολή στη θέση BEB στις 14/7/1998 η οποία σε σύγκριση με τη βολή στις 30/6/1998 έδωσε σχετική αύξηση της ταχύτητας κατά δυ/υ=(0.23±0.01)%, δηλαδή η πίεση συνέχιζε να αυξάνεται. Στις 19/7/1998 συνέβη η δεύτερη μεγάλη έκρηξη η οποία θεωρήθηκε πως πιθανόν να επανέφερε την πίεση και τις ταχύτητες στις αρχικές τους τιμές (*Wegler et al., 2006*).

Μια ενδιαφέρουσα παραλλαγή της μεθόδου **CWI** είναι η λεγόμενη μέθοδος Συμβολομετρία Παθητικής Εικόνας (***Passive Image Interferometry*** ή **PII**) (*Sens-Schönfelder & Wegler, 2006; Wegler & Sens-Schönfelder, 2007*) . Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατόν να μετρηθούν, μέσα από την αυτοσυσχέτιση του σεισμικού θορύβου, σχετικές μεταβολές της ταχύτητας με ακρίβεια 0.1% σε καθημερινή βάση, χωρίς την ανάγκη χρήσης όμοιων σεισμών, για τους οποίους υπάρχει σημαντική πιθανότητα να μην έχουν επαρκώς όμοια υποκεντρική θέση. Επιπλέον, η υψηλή χρονική ανάλυση επιτρέπει τη λεπτομερή επίβλεψη της χρονικής μεταβολής της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων και κατά αυτόν τον τρόπο αποτελεί ένα χρήσιμο σεισμολογικό εργαλείο ανάλυσης.

Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου αποκάλυψε (*Sens-Schönfelder & Wegler, 2006*) μια ισχυρή εξάρτηση της ταχύτητας διάδοσης στα επιφανειακά στρώματα από τις καιρικές συνθήκες, καθώς η βροχόπτωση μπορεί να προκαλέσει σχετική μεταβολή μεγαλύτερη από 1% (Σχήμα $1.27_{E,F}$), συγκρίσιμη με αυτές που έχουν αποδοθεί σε μεταβολές τεκτονικής τάσης ή μεταβολές πίεσης στο εσωτερικό ηφαιστείων (*Ratdomopurbo & Poupinet, 1995*), οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις πιθανόν να παίζουν δευτερεύοντα ρόλο στη μετρούμενη μεταβολή δυ/υ. Στο Σχήμα 1.27_{E} φαίνονται σε μεγέθυνση με μπλε και πράσινη γραμμή οι τιμές μεταβολής ταχύτητας που προσδιορίστηκαν με τη μέθοδο **CWI** (*Wegler et al., 2006*). Σε αντίθεση με αυτό που θα περίμενε κανείς, αμέσως μετά την εκδήλωση της δεύτερης έκρηξης του ηφαιστείου Merapi στις 19/7/1998 παρουσιάστηκε μεν μια μικρή μεταβολή στην τιμή δυ/υ, ωστόσο η ευρύτερη εικόνα δείχνει πως μια αυτή αποτελεί μικρή διακύμανση επάνω σε μια γενικότερη τάση της καμπύλης δυ/υ να αυξηθεί.



Σχήμα 1.26: A) (πάνω) κυματομορφές όμοιων σεισμών με χρονική διαφορά μερικών μηνών στην περιοχή του ηφαιστείου Merapi. (κάτω) διαφορικοί χρόνοι (έντονα σημεία) για διαδοχικά χρονικά παράθυρα των δύο όμοιων κυματομορφών του επάνω σχήματος και τιμές σφάλματος (συνεχής γραμμή). Από την κλίση που παρουσιάζουν οι διαφορικοί χρόνοι μπορεί να μετρηθεί η σχετική μεταβολή της ταχύτητας δυ/υ. B) χρονοδιάγραμμα της σχετικής μεταβολής της ταχύτητας όπως μετρήθηκε με τη μέθοδο CWI. Παρουσιάζεται αύξηση για μερικούς μήνες πριν από την έκρηξη του ηφαιστείου Merapi (2/2/1992) η οποία θεωρείται πως οφείλεται σε αύξηση της πίεσης στο εσωτερικό του ηφαιστείου (από την εργασία των *Ratdomopurbo & Poupinet, 1995*).



Σχήμα 1.27: A) Συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης ημερήσιων καταγραφών σεισμικού θορύβου στον σταθμό KZK για μια περίοδο 3 μηνών. Παρουσιάζονται οι χρονικές καθυστερήσεις των πρώτων 16sec, σκοπός είναι να φανεί ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης από τη μια μέρα στην άλλη. B) μεγέθυνση του προηγούμενου σχήματος για χρονικές καθυστερήσεις μεταξύ 7-8sec. Με το μαύρο βέλος σημειώνεται ο χρόνος γένεσης του σεισμού M_w=6.6 στο Mid-Niigata στις 23/10/2004. Παρατηρείται η μεταβολή στη θέση των τοπικών μεγίστων/ελαχίστων της ετεροσυσχέτισης πριν και μετά τη γένεση του σεισμού. C) ημερήσια σχετική μεταβολή της ταχύτητας dv/v ως προς την καταγραφή μιας ημέρας αναφοράς. Παρουσιάζονται οι τιμές dv/v που έχουν προκύψει μόνο όταν το μέγιστο της ετεροσυσχέτισης ανάμεσα στις αυτοσυσχετίσεις των ημερήσιων καταγραφών είναι R≥0.5. Με το βέλος σημειώνεται ο χρόνος γένεσης του κύριου σεισμού του Mid-Niigata. Παρατηρήθηκε σχετική μεταβολή της ταχύτητας κατά -0.6% η οποία συνδέεται με την πτώση τάσης που προκάλεσε ο σεισμός αυτός. D) τιμή μεγίστου ετεροσυσχέτισης μεταξύ της αυτοσυσχέτισης της καταγραφής της ημέρας αναφοράς και των αυτοσυσχετίσεων της καθεμίας από τις υπόλοιπες ημέρες. E) Μετρήσεις μεταβολής ταχύτητας dv/v στην περιοχή του ηφαιστείου Merapi από διάφορα παράθυρα χρονικών καθυστερήσεων των συναρτήσεων αυτοσυσχέτισης ανάμεσα στις ημερήσιες καταγραφές σεισμικού θορύβου με τη μέθοδο PII. Στη μεγέθυνση φαίνονται με μπλε και πράσινες γραμμές τα αποτελέσματα dv/v από μετρήσεις με χρήση της ενεργής μεθόδου CWI με δεδομένα βολών από αεροβόλο (*Wegler et al., 2006, βλέπε κείμενο*) F) (επάνω) πειραματικές μεταβολές ταχύτητας (σημεία) από τη μέθοδο PII και οι αντίστοιχες θεωρητικές τιμές (συνεχείς καμπύλες) που προβλέπει το μοντέλο για χρονικές καθυστερήσεις 2-4s (κόκκινο) και 6-8s (μπλε) (κάτω) ημερήσια βροχόπτωση (μπλε ιστόγραμμα, δεξιός κατακόρυφος άξονας) και τιμές από μοντέλο στάθμης υπόγειων υδάτων (GWL) (μαύρη γραμμή, αριστερός κατακόρυφος άξονας). (Σχήματα (A,B,C,D) από *Wegler & Sens-Schönfelder, 2007,* Σχήματα (E,F) από *Sens-Schönfelder & Wegler, 2006*)

Όπως φαίνεται η ταχύτητα συνέχισε να αυξάνεται μέχρι περίπου τα τέλη του Σεπτέμβρη και ακολούθησε πτώση σε συνδυασμό με αύξηση των βροχοπτώσεων και της στάθμης των υπόγειων υδάτων, GWL (Σχήμα 1.27$_F$, κάτω, μαύρη γραμμή). Σε μια άλλη περίπτωση όμως, η ταχύτητα διάδοσης μειώθηκε κατά 0.6% αμέσως μετά τον σεισμό M_w=6.6 στις 23/10/2004 στο Mid-Niigata (Σχήμα 1.27$_C$) η οποία μετρήθηκε με τη μέθοδο **PII**. Εδώ είναι πιο βέβαιη η σχέση της μείωσης αυτής με μια πτώση τάσης κατά τη γένεση του μεγάλου σεισμού.

Χρειάζεται, λοιπόν, προσοχή στην ερμηνεία των μεταβολών αυτών καθώς υπάρχουν διάφορα αίτια που μπορεί να τις προκαλούν: μεταβολές πίεσης (*Ratdomopurbo & Poupinet, 1995;Wegler et al., 2006*), μεταβολής στάθμης των υπόγειων υδάτων (GWL στο Σχήμα 1.27$_F$, μαύρη γραμμή) (*Sens-Schönfelder & Wegler, 2006*), μεταβολές της υδροστατικής πίεσης στον θαλάσσιο πυθμένα λόγω παλιρροϊκών φαινομένων (*Yamamura et al. 2003*) κ.α. Η σημαντικότητα της επίδρασης της βροχόπτωσης έχει επισημανθεί και από τους *Poupinet et al.* (1984) καθώς στη συγκεκριμένη εργασία η μεγαλύτερη σχετική μεταβολή ταχύτητας που μετρήθηκε ήταν σε μια κοιλάδα στην οποία γίνεται έντονη άρδευση και η ετήσια άντληση νερού προκαλεί πτώση στη στάθμη των υπόγειων υδάτων μεγαλύτερη από 10m σε μερικές περιοχές ενώ σε άλλες περιοχές παίζουν μεγαλύτερο ρόλο οι μακροπρόθεσμες κλιματικές μεταβολές της βροχόπτωσης.

Ανάλογες εφαρμογές της μεθόδου **CWI** έχουν γίνει και σε άλλες ηφαιστειακές περιοχές, όπως στο βουνό Iwate (*Nishimura et al., 2000;Nishimura et al., 2005*), στον Βεζούβιο (*Pandolfi et al., 2006*), στο ηφαίστειο Arenal (*Snieder & Hagerty, 2004*) κ.α. Μια προσπάθεια μέτρησης των μεταβολών στην ταχύτητα διάδοσης με τη μέθοδο **CWI** έχει γίνει και στην περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας (*Cociani & Bean, 2007*) με τη χρήση σμηνοσεισμών ως επαναλαμβανόμενες πηγές όμοιων κυματομορφών.

Μετασεισμοί, όμοιοι με έναν κύριο σεισμό αλλά με διαφορά μεγέθους, άρα και σεισμικής πηγής, χρησιμοποιούνται ως εμπειρικές συναρτήσεις Green για την εξαγωγή σχετικών σεισμικών πηγών μέσω διαδικασιών αποσυνέλιξης (*Hutchings & Wu, 1990; Lanza et al., 1999; Fischer, 2005; Ichinose et al., 1997*).

Για περισσότερες εφαρμογές με όμοιους σεισμούς βλέπε βιβλιογραφία (*Barani et al., 2007; Deichmann & Garcia-Fernandez, 1992; Becker et al., 2006; Dodge et al., 1995; Dodge & Beroza, 1997; Dodge et al., 1996; Fremont & Malone, 1987; Fremont & Poupinet, 1987; Gibowicz & Lasocki, 2005; Got & Frechet, 1993; Got et al., 1994; Horikawa, 1998; Moriya et al., 2004; Nakamura et al., 2002*).

Κεφαλαιο 2

Σεισμικά Μεγέθη

2.1 ~ *Εισαγωγή στα Μεγέθη*

Μία από τις σημαντικές σεισμικές παραμέτρους που πρέπει να προσδιορίζονται για κάθε σεισμό είναι το μέγεθος. Το μέγεθος αποτελεί ένα μέτρο της ολικής ενέργειας παραμόρφωσης που απελευθερώνεται κατά την εκδήλωση ενός σεισμού, το οποίο είναι δυνατόν να μετρηθεί από την πληροφορία που παρέχουν οι σεισμικές καταγραφές. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι προσδιορισμού του μεγέθους, θα γίνει αναφορά στη συνέχεια σε μερικές από αυτές (*Παπαζάχος, Β., 1997*).

α) Τοπικό Μέγεθος, M_L: Υπολογίζεται με τη μέτρηση της μέσης τιμής **A** (μm) του μέγιστου πλάτους ταλάντωσης στις 2 οριζόντιες συνιστώσες σεισμομέτρων Wood-Anderson ενός σταθμού και με τη σύγκρισή της με το αντίστοιχο πλάτος **A΄** (μm) ενός πρότυπου σεισμού, για τον οποίο ορίζεται το μέγεθος μηδέν, στην ίδια απόσταση. Ως πρότυπος σεισμός θεωρείται εκείνος που δίνει μέγιστο πλάτος ταλάντωσης A΄=1μm σε ένα βραχείας περιόδου σεισμόμετρο στρέψης και σε επικεντρική απόσταση 100km. Η σχέση που δίνει το M_L είναι της μορφής:

$$M_L = \log A - \log A' \tag{2.1}$$

Για τους σεισμούς στον ελληνικό χώρο και τις γύρω περιοχές χρησιμοποιούνται οι σχέσεις:

$$\begin{aligned} M_L &= \log A + 2\log\frac{R}{100} \qquad M_L > 3.7 \\ M_L &= \log A + 1.58\log\frac{R}{100} \qquad M_L \le 3.7 \end{aligned} \tag{2.2}$$

όπου το **A** σε μm, όπως ορίστηκε παραπάνω, ενώ η *υποκεντρική* απόσταση **R** σε km με **R>100km**. Για μικρότερες υποκεντρικές αποστάσεις, **R ≤ 100km**, χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$M_L = \log \alpha + 2.32\cdot\log R - 1.1 \tag{2.3}$$

όπου **α** (μm) το μέγιστο πλάτος της πραγματικής *κατακόρυφης* εδαφικής κίνησης.

β) Μέγεθος Διάρκειας, M_d: Υπολογίζεται με τη μέτρηση της διάρκειας **d** (sec) του σεισμικού σήματος που καταγράφθηκε στους διάφορους σταθμούς και με γνώση της *επικεντρικής* απόστασης **Δ** (km) εφόσον έχει προσδιοριστεί το υπόκεντρο του σεισμού. Η σχέση που δίνει το μέγεθος M_d είναι της μορφής:

$$M_d = a_1 + a_2\cdot\log d + a_3\cdot(\log d)^2 + a_4\cdot\Delta \tag{2.4}$$

όπου οι σταθερές a_1, a_2, a_3 (συνήθως μηδενική) και a_4 προσδιορίζονται ανάλογα με την περιοχή μελέτης. Ως διάρκεια σήματος συνήθως μετράται ο χρόνος ανάμεσα στην πρώτη άφιξη των κυμάτων P και στη χρονική στιγμή, ύστερα από την έλευση των κυμάτων S και πιθανόν των επιφανειακών κυμάτων, στην οποία το πλάτος της ταλάντωσης, καθώς μειώνεται, γίνεται μικρότερο από το διπλάσιο του πλάτους του θορύβου του υποβάθρου. Το μέσο πλάτος του θορύβου υποβάθρου μπορεί να μετρηθεί σε ένα τμήμα της καταγραφής πριν την άφιξη των κυμάτων P.

γ) Επιφανειακό Μέγεθος, M_S: Για επιφανειακούς σεισμούς, βάθους **h<60km** και για μεγάλες επικεντρικές αποστάσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί το επιφανειακό μέγεθος, M_s, το οποίο προσδιορίζεται από τα επιφανειακά κύματα με περίοδο 18-22sec μέσω του τύπου:

$$M_S = \log\alpha - \log\alpha' + c_1 + d_1 \tag{2.5}$$

όπου **α** (μm) το μέγιστο πλάτος της πραγματικής εδαφικής κίνησης των επιφανειακών κυμάτων του συγκεκριμένου σεισμού ενώ **α΄** το αντίστοιχο πλάτος για τον πρότυπο σεισμό, $\mathbf{c_1}$ και $\mathbf{d_1}$ οι σταθερές του σταθμού και της εστίας. Για το επιφανειακό μέγεθος χρησιμοποιείται συνήθως ο «τύπος της Πράγας» για επικεντρικές αποστάσεις μεταξύ 20° και 160°:

$$M_S = \log\frac{\alpha}{\mathrm{T}} + 1.66\log\Delta + 3.3 \tag{2.6}$$

όπου α (μm) το μέγιστο πλάτος της πραγματικής εδαφικής κίνησης των επιφανειακών κυμάτων με περίοδο 20±3sec, **T** (sec) η περίοδος και **Δ** (km) η επικεντρική απόσταση. Αναφέρεται επίσης μια σχέση που συνδέει το επιφανειακό μέγεθος $\mathbf{M_S}$ με το τοπικό μέγεθος $\mathbf{M_L}$ για τον ελληνικό χώρο:

$$M_S = 0.95 \cdot M_L + 0.72 \tag{2.7}$$

δ) Χωρικό Μέγεθος, m_b : Υπολογίζεται για σεισμούς οποιασδήποτε επικεντρικής απόστασης και βάθους από τον τύπο:

$$m_b = \log\frac{\mathrm{u}}{\mathrm{T}} + Q(\Delta, \mathrm{h}) + \mathrm{c}_2 + \mathrm{d}_2 \tag{2.8}$$

όπου u (μm) το μέγιστο πλάτος της πραγματικής εδαφικής κίνησης των επιμηκών (P ή PP) ή εγκαρσίων κυμάτων (S), T (sec) η αντίστοιχη περίοδος, Q(Δ,h) μια συνάρτηση της επικεντρικής απόστασης Δ και του εστιακού βάθους h, c_2 και d_2 οι σταθερές του σταθμού και του εστιακού χώρου. Το m_b συνήθως μετριέται σε επικεντρικές αποστάσεις μεταξύ 21° και 100° από τα πλάτη των επιμηκών κυμάτων χώρου με περίοδο ~1sec και συνδέεται με το επιφανειακό μέγεθος μέσω της σχέσης:

$$m_b = 0.56M_S + 2.9 \tag{2.9}$$

ε) Μέγεθος Σεισμικής Ροπής, M_w: Ως σεισμική ροπή, M_o, ορίζεται η ποσότητα:

$$M_o = \mu \cdot L \cdot w \cdot u \tag{2.10}$$

όπου **μ** το μέτρο δυσκαμψίας του υλικού στον εστιακό χώρο, **L** το μήκος του ρήγματος, **w** το πλάτος του ρήγματος και **u** η μέση ολίσθηση στην επιφάνεια του ρήγματος κατά τη γένεση του σεισμού. Το μέγεθος σεισμικής ροπής, $\mathbf{M_w}$, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\mathrm{M_w} = \frac{2}{3}\left(\log\frac{\mathrm{M_o}}{\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}} - 9.1\right) = \frac{2}{3}\left(\log\frac{\mathrm{M_o}}{\mathrm{dyne}\cdot\mathrm{cm}} - 16.1\right) \tag{2.11}$$

όπου $\mathbf{M_o}$ η σεισμική ροπή εκπεφρασμένη είτε σε N·m (πρώτη μορφή) είτε σε dyne·cm (δεύτερη μορφή). Το μέγεθος σεισμικής ροπής συνδέεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά της διάρρηξης και εκμεταλλεύεται την πληροφορία που δίνει το πλήρες σεισμικό φάσμα. Για αυτόν τον λόγο, σε αντίθεση με τα μεγέθη των προηγούμενων μεθόδων, δεν υπόκειται σε κορεσμό. Τα μεγέθη M_L, M_S και m_b που προαναφέρθηκαν υπολογίζονται από μετρήσεις του πλάτους ορισμένων ταλαντώσεων σε στενές ζώνες συχνοτήτων και κατά συνέπεια εκφράζουν το ποσοστό της ενέργειας που δημιουργεί κύματα σε αυτές τις συχνότητες. Από την άλλη, το μέγεθος M_d εμφανίζει δυσκολία σε σεισμούς μεγάλου μεγέθους καθώς σε τέτοιες περιπτώσεις είναι δύσκολη η μέτρηση της διάρκειας. Όσο αυξάνεται η εκλυόμενη σεισμική ενέργεια τόσο ικανότερη γίνεται στο να διεγείρει ταλαντώσεις μεγάλων περιόδων, με ακραία περίπτωση την ελεύθερη ταλάντωση της Γης. Οι κοινές κλίμακες μεγέθους αδυνατούν σε τέτοιες περιπτώσεις να δώσουν σωστά αποτελέσματα.

Υπό ορισμένες συνθήκες (σταθερή πτώση τάσης, ταχύτητα διάρρηξης και σχήμα ρήγματος) το **τοπικό μέγεθος M_L** συνδέεται με τον λογάριθμο της σεισμικής ροπής, **$\log M_o$**, για ένα εύρος τιμών μεγέθους μεταξύ 2.5 και 6.5 με τη σχέση (*Deichmann, N., 2006*):

$$M_L = \frac{2}{3}\log M_o + B \tag{2.12}$$

όπου B≅6 μια σταθερά που εξαρτάται από τις συνθήκες που προαναφέρθηκαν. Ο τύπος αυτός έχει την ίδια μορφή με τον τύπο που δίνει το M_w (εξ. 2.11) ενώ **M_w=M_L** για μεγέθη **3-5** (*Deichmann, N. (2006)* με αναφορά σε *Hanks & Boore, 1984*). Αυτά ισχύουν στη θεωρία. Στην πράξη, βέβαια, υπάρχουν πολλοί σεισμικοί κατάλογοι με μεγέθη M_L που αποδεικνύουν το αντίθετο και εν μέρει αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι απαραίτητες σταθερές συνθήκες δεν πληρούνται. Σημαντική είναι η παρατήρηση ότι το μέγεθος ροπής **M_w** μπορεί θεωρητικά να δώσει εξίσου καλά αποτελέσματα για μικρούς σεισμούς όσο και για μεγάλους. Σημειώνεται επίσης ότι το **M_L** για μικρά μεγέθη (**M_w<2**) συνήθως υποεκτιμάται ακόμα και κατά μία ολόκληρη μονάδα. Αυτά τα συμπεράσματα θα χρησιμεύσουν αργότερα.

Στην εργασία αυτή θα γίνει υπολογισμός του μεγέθους σεισμικής ροπής, **M_w**, για ένα πλήθος σεισμών. Η διαδικασία που ακολουθείται περιγράφεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

2.2 ~ *Υπολογισμός Μεγέθους Σεισμικής Ροπής, M_w*

Η σεισμική ροπή μπορεί να υπολογιστεί από τη μετατόπιση μακρινού πεδίου, **Ψ_o**, η οποία βρίσκεται από το πλάτος του φάσματος της μετατόπισης στις χαμηλές συχνότητες, με έναν τύπο της μορφής:

$$M_o = \frac{4\pi\rho\upsilon^3 R\Psi_o}{F_\upsilon R_\upsilon S_\upsilon} \tag{2.13}$$

όπου **ρ** η πυκνότητα του υλικού στην περιοχή της εστίας, **υ** η ταχύτητα των επιμηκών (ή εγκαρσίων) κυμάτων στην περιοχή της εστίας, **R** η *υποκεντρική* απόσταση, το **F_υ** εξαρτάται από τη σεισμική ακτινοβολία (*radiation pattern*) των κυμάτων P (ή S), το **R_υ** εξαρτάται από τα φαινόμενα ελεύθερης επιφάνειας και το **S_υ** είναι η τοπογραφική διόρθωση (*site-correction*) για τον εκάστοτε σταθμό (*Bowers & Hudson, 1999*). Στη γενική περίπτωση που ο μηχανισμός γένεσης δεν είναι γνωστός, στη θέση του **F_υ** χρησιμοποιείται μια σταθερά η οποία αντιπροσωπεύει μια μέση τιμή για τον συντελεστή ακτινοβολίας. Οι συνηθέστερες τιμές είναι $F_{P,avg}$=0.52 και $F_{S,avg}$=0.63 για P και S κύματα αντίστοιχα, ωστόσο μια πιο λεπτομερής ανάλυση σχετικά με αυτές τις μέσες τιμές για τις διάφορες περιπτώσεις μηχανισμών γένεσης και επικεντρικών αποστάσεων δείχνει διακυμάνσεις έως και 160% από αυτές τις τιμές εκτός από την περίπτωση των συντελεστών ακτινοβολίας των κυμάτων P από κατακόρυφα ρήγματα οριζόντιας ολίσθησης σε τηλεσεισμικές αποστάσεις που εμφανίζουν μείωση κατά έναν παράγοντα 2.8 σε σχέση με τις συνήθεις μέσες τιμές (*Boore & Boatwright, 1984*).

Στην εργασία αυτή ο υπολογισμός της σεισμικής ροπής $\mathbf{M_o}$ είναι εφικτός χάρη στα ψηφιακά δεδομένα σεισμικών καταγραφών και τη χρήση ενός κατάλληλου αλγορίθμου που θα περιγραφθεί στη συνέχεια. Τα δεδομένα είναι καταγραφές ταχύτητας σε ένα φάσμα συχνοτήτων που καθορίζεται από τα τεχνικά στοιχεία του εκάστοτε σεισμομέτρου. Κάθε όργανο έχει μια ορισμένη απόκριση και το σήμα εξόδου (σεισμόγραμμα) είναι η συνέλιξη της πραγματικής εδαφικής κίνησης S(f) με την απόκριση του σεισμομέτρου, R(f).

Προκειμένου να απεικονιστεί το φάσμα της πραγματικής εδαφικής κίνησης πρέπει πρώτα να εκτελεστεί μια διαδικασία αποσυνέλιξης που θα αφαιρέσει την απόκριση του οργάνου από το σήμα. Η **αποσυνέλιξη** αυτή μπορεί να γίνει στο πεδίο συχνοτήτων διαιρώντας τους αντίστοιχους μετασχηματισμούς Fourier σήματος S(f) και απόκρισης οργάνου R(f). Στην απόκριση του οργάνου συμπεριλαμβάνεται ως πολλαπλασιαστικός παράγοντας η μεγέθυνση καθώς και ο συντελεστής μετατροπής από ηλεκτρική τάση σε ταχύτητα.

Στη συνέχεια γίνεται μετατροπή του φάσματος ταχυτήτων σε φάσμα μετατόπισης με **ολοκλήρωση**. Αυτό μπορεί να γίνει άμεσα στον χώρο συχνοτήτων διαιρώντας το κάθε δείγμα, συχνότητας f, με την τιμή **i2πf**, όπου **i** η φανταστική μονάδα.

Για να υπολογιστεί η **σεισμική ροπή** γίνεται μετατροπή του κάθε συχνοτικού δείγματος μετατόπισης Ψ(f) σε δείγμα με μονάδες σεισμικής ροπής M(f) βάσει του ακόλουθου τύπου:

$$M(f) = \frac{4\pi\rho V_s^3}{F_s R_s}\frac{R}{S_s}\Psi(f) = \frac{C \cdot R}{S_r}\Psi(f) \qquad (2.14)$$

όπου $\rho \cong 2700 kg/m^3$ η πυκνότητα του υλικού στον εστιακό χώρο, $V_s \cong 3500 km/s$ η μέση ταχύτητα των κυμάτων S στον εστιακό χώρο, R η *υποκεντρική* απόσταση, F_s, R_s, S_s όμοια με τα F_υ, R_υ, S_υ, της εξίσωσης 2.13 για την περίπτωση των εγκαρσίων κυμάτων. Οι συντελεστές $4\pi\rho V_s^3/F_sR_s$ αφομοιώνονται σε μια σταθερά C που θεωρείται η ίδια για όλους τους σταθμούς ενώ ο συντελεστής S_s μετονομάζεται σε S_r και εξαρτάται από τον σταθμό.

Ο συντελεστής S_r παρέχει έναν τρόπο διόρθωσης του μεγέθους που υπολογίζεται από κάθε σταθμό για την αποφυγή συστηματικών σφαλμάτων. Ο έλεγχος μπορεί να γίνει με τη σύγκριση του μεγέθους M_w που υπολογίζεται από τον κάθε σταθμό για ορισμένους σεισμούς αναφοράς με τα μεγέθη για τους αντίστοιχους σεισμούς που έχουν βρεθεί από διάφορα ινστιτούτα. Στην ιδανική περίπτωση ο $\mathbf{S_r}$ εκφράζει τον παράγοντα τοπογραφικής διόρθωσης. Στην πράξη θα θεωρηθεί ότι αποτελεί απλώς έναν γενικό παράγοντα διόρθωσης για κάποιον συγκεκριμένο σταθμό. Μέρος της διόρθωσης αυτής είναι η τοπογραφική.

Το $\mathbf{M_o}$ προκύπτει από το πλάτος της σεισμικής ροπής στις χαμηλές συχνότητες όπου, σύμφωνα με τη θεωρία, παρουσιάζεται ένα πλάτωμα (*plateau*) μηδενικής κλίσης ως προς τις συχνότητες. Πρακτικά το πλάτωμα βρίσκεται κάτω από μια ορισμένη συχνότητα που ονομάζεται γωνιακή συχνότητα (*corner frequency*) $\mathbf{f_c}$, η οποία συνδέεται με τη διάρκεια της σεισμικής πηγής. Το πρόβλημα είναι ότι αυτό το πλάτωμα δεν είναι πάντα ευδιάκριτο. Στους πολύ μεγάλους σεισμούς πιθανόν να βρίσκεται πέρα από τα όρια χαμηλών συχνοτήτων τα οποία μπορεί να «δει» το σεισμόμετρο ενώ στους πολύ μικρούς το πλάτωμα χάνεται μέσα στον θόρυβο του υποβάθρου. Η πρώτη περίπτωση μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο με κατάλληλα σεισμικά όργανα ευρέως φάσματος, η δεύτερη περίπτωση, ωστόσο, που ενδιαφέρει κατά τη μελέτη μικροσεισμών, μπορεί να αντιμετωπιστεί έως έναν βαθμό μέσα από μια κατάλληλα διαμορφωμένη αυτόματη διαδικασία εκτίμησης των χαρακτηριστικών του φάσματος.

Το πλάτος του φάσματος σε μονάδες σεισμικής ροπής M(f) (από την εξίσωση 2.14), παρουσιάζει ορισμένα χαρακτηριστικά. Ένα είναι το πλάτωμα στο οποίο βρίσκεται η βαθμωτή τιμή της σεισμικής ροπής, $\mathbf{M_o}$, από την οποία υπολογίζεται το μέγεθος ροπής μέσω της εξίσωσης 2.11. Ένα άλλο είναι η γωνιακή συχνότητα $\mathbf{f_c}$ (*corner frequency*), η συχνότητα πάνω από την οποία το πλάτος του φάσματος φθίνει. Δύο άλλα χαρακτηριστικά είναι ο ρυθμός με τον οποίο φθίνει το πλάτος για συχνότητες $f>f_c$, ο οποίος καλείται **η**, και ο ρυθμός μεταβολής της ίδιας της κλίσης, που καλείται **k**.

Η θεωρία προβλέπει (*Aki & Richards, 1980*; *Lay T., Wallace, T.C., 1995*) ότι για διαρρήξεις σημαντικών διαστάσεων υπάρχουν 2 είδη γωνιακής συχνότητας, f_{c1} και f_{c2} με $f_{c1}<f_{c2}$. Η πρώτη αντιστοιχεί στη διάρκεια της πηγής ενώ η δεύτερη στον χρόνο ανόδου που συνδέεται με την ταχύτητα διάρρηξης. Ένα απλό μοντέλο μονοδιάστατου ρήγματος προβλέπει μεταβολή του φάσματος ανάλογη του f^{-1} για $f_{c1}<f<f_{c2}$ και ανάλογη του f^{-2} για $f>f_{c2}$. Σε πολλές περιπτώσεις είναι δύσκολο να διακριθούν 2 γωνιακές συχνότητες και έτσι μια απλή λύση είναι να προσεγγιστεί το φάσμα με μια δίκλαδη συνάρτηση y(f), η οποία έχει έναν σταθερό κλάδο με $y(f<f_c)=M_o$ στο πλάτωμα και έναν δεύτερο κλάδο $y(f\geq f_c)=M_o\cdot(\pi^2 f^2 \tau_r \tau_c)^{-1}$, όπου $\boldsymbol{\tau_c}$ ο χρόνος διάρρηξης και $\boldsymbol{\tau_r}$ ο χρόνος ανόδου, ή η διάρκεια της ολίσθησης ενός σωματιδίου στον εστιακό χώρο, όταν οι χρονοϊστορίες τόσο της διάρρηξης όσο και της ολίσθησης του κάθε σωματιδίου κατά μήκος της επιφάνειας διάρρηξης είναι κατά προσέγγιση τύπου "*boxcar*" (*Lay T., Wallace, T.C., 1995*). Σε λογαριθμικούς άξονες συχνότητας και ροπής η παραπάνω δίκλαδη συνάρτηση και γραμμική στον κάθε κλάδο της, με κλίσεις 0 και 2 αντίστοιχα.

Η δυσκολία στην εφαρμογή μιας τέτοιας συνάρτησης είναι ότι δεν υπάρχει πάντα ένα σαφές πλάτωμα και μάλιστα υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες εμφανίζονται 2 πλατώματα στο φάσμα λόγω θορύβου στις χαμηλές συχνότητες. Η εφαρμογή ενός ανωπερατού φίλτρου λύνει εν μέρει αυτό το πρόβλημα, αλλά μειώνει το πλάτος στις χαμηλές συχνότητες με αποτέλεσμα το M_o να υποεκτιμάται στους μεγάλους σεισμούς.

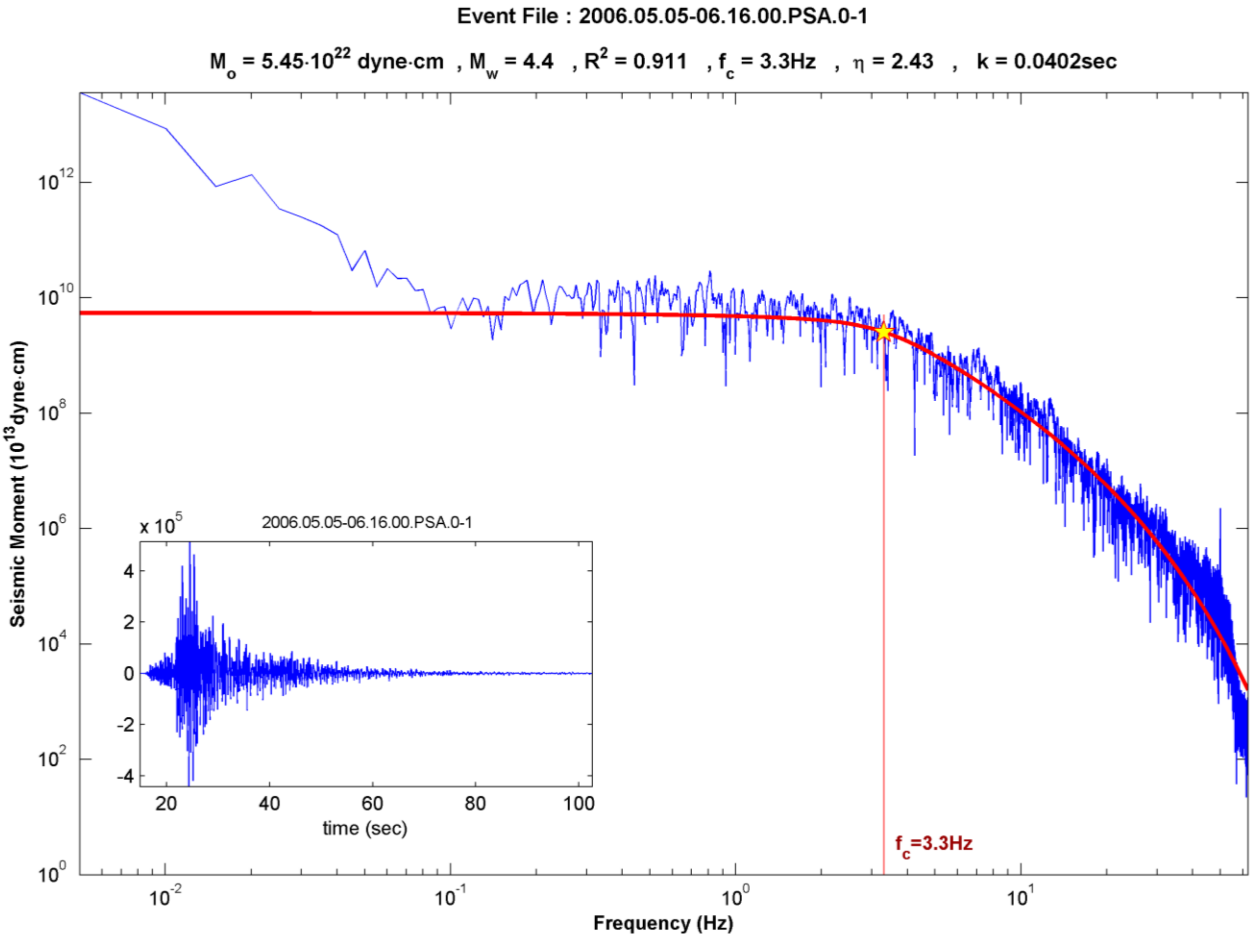
Μια δεύτερη λύση είναι η προσέγγιση του φάσματος με μια μη-γραμμική συνάρτηση όπως η παρακάτω (*Ichinose et al., 1997*):

$$\boxed{M(f) = M_o \frac{e^{-\pi f k}}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_c}\right)^{2\eta}}}} \tag{2.15}$$

Η συνάρτηση αυτή τείνει στο $\mathbf{M_o}$ όταν $\mathbf{f\rightarrow 0}$, με το πλάτωμα να βρίσκεται σε συχνότητες $f<f_c$. Η παράμετρος **η** συνήθως παίρνει την τιμή 2, όπως προβλέπει το μοντέλο $M(f>f_c)\sim f^{-2}$. Το **k** μετράται σε sec και ονομάζεται παράμετρος φασματικής εξασθένησης (*spectral decay parameter*), εξαρτάται κυρίως από τοπικούς παράγοντες (*site effects*) και από την εξασθένηση κατά μήκος της σεισμικής ακτίνας (*path attenuation*) συναρτήσει της απόστασης. Το **k** προκαλεί σταδιακή μείωση του πλάτους με εκθετικό ρυθμό όσο η συχνότητα αυξάνεται και κατά αυτόν τον τρόπο η παραπάνω συνάρτηση μπορεί να προσεγγίσει το φάσμα με μια ομαλή καμπύλη ακόμα και σε συχνότητες αρκετά μεγαλύτερες από το $\mathbf{f_c}$.

Οι τιμές $\mathbf{M_o}$, $\mathbf{f_c}$, **k** και **η** προκύπτουν ως παράμετροι μέσα από μια μη-γραμμική παλινδρόμηση. Χρειάζεται να δοθούν αρχικές τιμές σε αυτές τις παραμέτρους και μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία ελάττωσης του μέσου τετραγωνικού σφάλματος οι τιμές αυτές να διορθωθούν και να συγκλίνουν προς μια λύση. Είναι απαραίτητο να τεθούν ορισμένοι περιορισμοί στις τιμές που μπορούν να λάβουν αυτές οι παράμετροι. Όλες πρέπει να λαμβάνουν θετικές τιμές και το $\mathbf{f_c}$ δε μπορεί να πάρει τιμές μεγαλύτερες από τη συχνότητα Nyquist ούτε μικρότερες από την f_{min} που καθορίζεται από το μήκος του χρονικού παραθύρου. Επιπλέον το **η** θεωρητικά δε μπορεί να πάρει τιμές μικρότερες από 1.5 που αντιστοιχεί σε ρυθμό μεταβολής πλάτους $\mathbf{f^{-1.5}}$, καθώς κάτι τέτοιο θα σήμαινε πως η πηγή ακτινοβολεί άπειρη ενέργεια (*Ichinose et al., 1997*). Το άνω όριο για το **η** πρέπει να είναι κοντά στο 3 (f^{-3}) ενώ το **k** έχει βρεθεί πως παίρνει συνήθως τιμές 10-50msec. Η γωνιακή συχνότητα $\mathbf{f_c}$ εξαρτάται γενικά από το μέγεθος του σεισμού καθώς συνδέεται με τη διάρκεια της σεισμικής πηγής: όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος τόσο μικρότερη αναμένεται να είναι η $\mathbf{f_c}$.

Η εικόνα που προκύπτει σε μια πρώτη εφαρμογή αυτής της μεθόδου δείχνει ότι από σταθμό σε σταθμό για τον ίδιο σεισμό υπάρχουν διακυμάνσεις στις παραμέτρους της συνάρτησης. Το ίδιο φάσμα μπορεί να προσεγγιστεί εξίσου καλά από διαφορετικά ζεύγη τιμών $\mathbf{f_c}$, **k**. Κατά αυτόν τον τρόπο δε μπορεί να εκτιμηθεί αυτόματα η πραγματική τιμή του $\mathbf{f_c}$ και κατ' επέκταση η πτώση τάσης $\mathbf{\Delta\sigma_s}$. Αναφέρεται στην εργασία των *Ichinose et al.* (1997) πως η απροσδιοριστία αυτή είναι μεγαλύτερη σε σεισμούς με $M_w<3$ όπου βρέθηκε το $\mathbf{\Delta\sigma_s}$ να κυμαίνεται μεταξύ 3-113bars, για μεγαλύτερους σεισμούς $3<M_w<4$ οι τιμές κυμαίνονταν μεταξύ 25-75 bars ενώ μικρότερη διακύμανση βρέθηκε για τον κύριο σεισμό $\mathbf{M_w}$ 4.5 με $\mathbf{\Delta\sigma_s}$=53±3bars. Σε εκείνη την περίπτωση το $\mathbf{f_c}$ ήταν σταθερότερο σε μεταβολές του **k** καθώς η εξασθένιση που προκαλούσε ο παράγοντας exp(-πfk) στη γωνιακή συχνότητα $\mathbf{f_c}$ δεν ήταν τόσο έντονη.



Σχήμα 2.1: Πλάτος φάσματος της καταγραφής ενός σεισμού (2006.05.05-06.16.00) στην οριζόντια συνιστώσα N-S του σταθμού PSA, εκπεφρασμένο σε μονάδες σεισμικής ροπής. Η κόκκινη καμπύλη είναι της μορφής της συνάρτησης 2.15. Οι παράμετροι M_o=5.45·10^{22}dyne·cm, f_c=3.3Hz, η=2.43, k=0.0402sec, έχουν υπολογιστεί αυτόματα μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία μη-γραμμικής παλινδρόμησης.

Μία άλλη λύση ενδεχομένως θα ήταν να θεωρηθεί εξ' αρχής **k=0**, δηλαδή να χρησιμοποιηθεί μία απλούστερη συνάρτηση της μορφής:

$$M(f) = \frac{M_o}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_c}\right)^{2\eta}}} \quad \text{ή} \quad \mathrm{M(f)} = \frac{\mathrm{M_o}}{\sqrt{1+\left(\frac{\mathrm{f}}{\mathrm{f_c}}\right)^{4}}} \quad \text{, για } \boldsymbol{\eta} = 2 \qquad (2.16)$$

Μερικές δοκιμές με τις 2 παραπάνω μορφές έδειξαν ότι αν και σε ορισμένες περιπτώσεις λειτουργούν το ίδιο καλά με την αρχική που αφήνει το **k** να κινείται ελεύθερο σε τιμές k>0, αυτό εξαρτάται από το εύρος συχνοτήτων στο οποίο γίνεται η προσαρμογή. Συγκεκριμένα το k≡0 λειτουργεί καλά για προσαρμογή στις συχνότητες 0.01-30Hz ενώ δεν λειτουργεί το ίδιο καλά για προσαρμογή π.χ. σε συχνότητες 0.1-15Hz στις οποίες προκύπτει καλύτερη προσαρμογή όταν είναι k>0. Συγκεκριμένα οι παραπάνω μορφές ορισμένες φορές αδυνατούν να εντοπίσουν το σωστό πλάτωμα και συνήθως εγκλωβίζονται σε δευτερεύοντα ελάχιστα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος τα οποία σε αυτές τις περιπτώσεις μετατρέπονται σε ολικά ελάχιστα λόγω της νέας μορφής της συνάρτησης.

Μπορεί να αναπαρασταθεί με γραφικό τρόπο αυτό που «βλέπει» η διαδικασία ελαχίστων τετραγώνων προκειμένου να βελτιωθεί η λειτουργία της. Η κατά τα άλλα ομαλή μορφή του φάσματος, με το πλάτωμα και στη συνέχεια τη «ράμπα» σταθερής κλίσης f^{-2} είναι μια εικόνα που δημιουργείται όταν απεικονιστεί το φάσμα σε διπλούς λογαριθμικούς άξονες (Σχήμα 2.1). Η συνάρτηση 2.15 με τη μορφή που δίνεται βλέπει τις κανονικές τιμές M(f) και f και όχι τους λογάριθμούς τους (Σχήμα 2.2_{A}). Η διαδικασία μπορεί να «διευκολυνθεί» εάν λογαριθμιστεί η σχέση 2.15 και μετατραπεί σε:

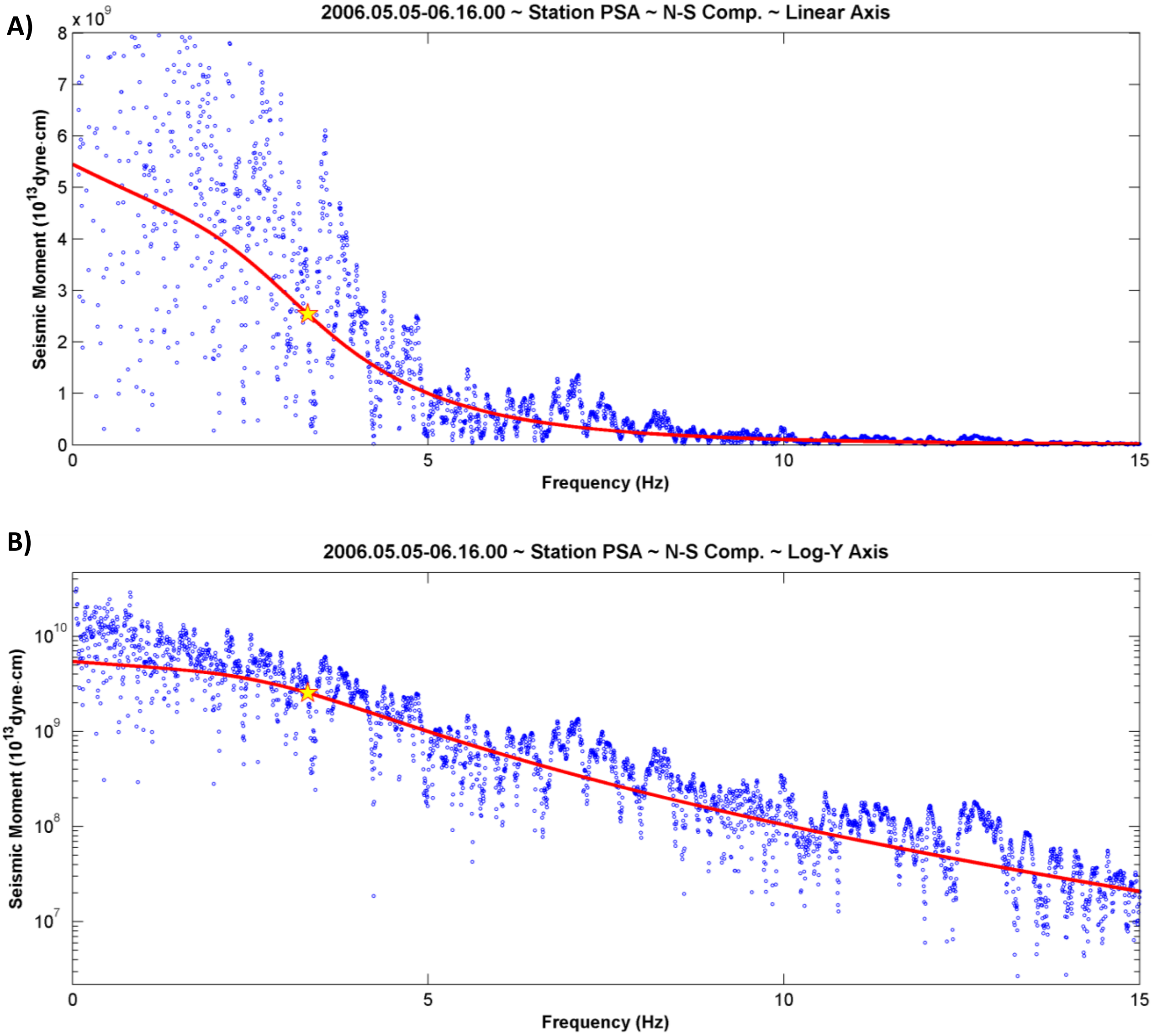
$$\log M(f) = \log M_o - \pi f \mathrm{k} \log e - \frac{1}{2}\log\left[1+\left(\frac{f}{f_c}\right)^{2\eta}\right] \qquad (2.17)$$

Με αυτόν τον τρόπο ομαλοποιείται εν μέρει η συνάρτηση (Σχήμα 2.2_{B}). Μια άλλη λεπτομέρεια είναι ότι τα περισσότερα συχνοτικά δείγματα που χρησιμοποιούνται για την παλινδρόμηση βρίσκονται στις σχετικά υψηλές συχνότητες: αυτό που φαίνεται σαν μια συνεχής γραμμή και αποκαλείται φάσμα πλατών είναι στην πραγματικότητα ένα σύνολο από διακριτά σημεία που έχουν ενωθεί μεταξύ τους με ευθύγραμμα τμήματα (γραμμική παρεμβολή).

Υπάρχουν 2 τρόποι να βελτιωθεί η διαδικασία ως προς τα δείγματα που χρησιμοποιούνται:

1) να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερα βάρη για τα δείγματα χαμηλών συχνοτήτων απ' ότι για τα δείγματα υψηλών συχνοτήτων,

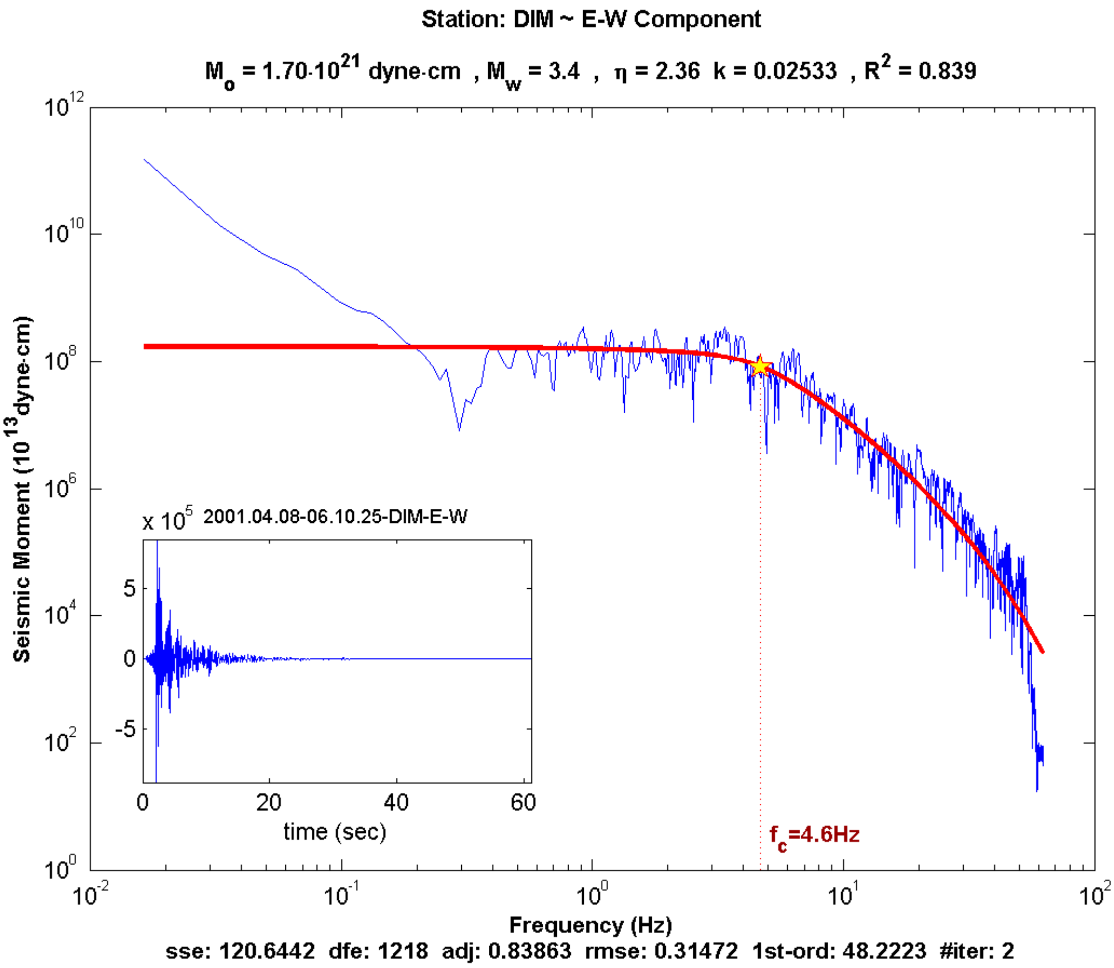
2) να γίνει επαναδειγματοληψία με τη βοήθεια μιας γραμμικής ή μη-γραμμικής παρεμβολής στον χώρο συχνοτήτων με τέτοιο τρόπο ώστε οι λογάριθμοι 2 οποιωνδήποτε διαδοχικών συχνοτήτων στις οποίες έχουν ληφθεί τα νέα δείγματα να είναι ίσοι. Με αυτόν τον τρόπο θα αυξηθεί η πυκνότητα δειγμάτων στις χαμηλές συχνότητες και θα μειωθεί στις υψηλές.



Σχήμα 2.2: Α) μορφή του πλάτους φάσματος και της προσαρμοσμένης καμπύλης του Σχήματος 2.1 σε *κανονικούς* άξονες πλάτους (σε μονάδες ροπής) και συχνότητας, αντιστοιχεί στην εξίσωση 2.15. Β) μορφή του ίδιου φάσματος σε *λογαριθμικό* άξονα πλάτους, αντιστοιχεί στην εξίσωση 2.17. Το άστρο αντιστοιχεί στην τιμή f_c=3.3Hz

Με τους δύο αυτούς τρόπους μπορεί να βελτιωθεί το αποτέλεσμα εάν διαπιστωθεί ότι δεν προκύπτουν σωστές λύσεις για το M_o στις περιπτώσεις μεγάλων σεισμών. Ίσως όμως κάτι τέτοιο να είναι προβληματικό στις περιπτώσεις μικρών σεισμών όπου το πλάτωμα πολλές φορές απουσιάζει και στις πολύ χαμηλές συχνότητες το πλάτος είναι αυξημένο λόγω του θορύβου. Αν τα δείγματα μείνουν ως έχουν γίνεται να χρησιμοποιηθεί με αρκετή ασφάλεια όλο το φάσμα χαμηλών συχνοτήτων χωρίς αυτό να επηρεάσει τα αποτελέσματα ακόμα και εάν υπάρχει θόρυβος στις χαμηλότερες συχνότητες, λόγω ακριβώς του μικρού αριθμού δειγμάτων σε εκείνη την ζώνη.

Το ενδιαφέρον με όλες αυτές τις μη-γραμμικές συναρτήσεις είναι ότι έχουν τη δυνατότητα να βρίσκουν γενικά αποδεκτές λύσεις για τη σεισμική ροπή ακόμα και σε περιπτώσεις που το πλάτωμα M_o δεν είναι τόσο εμφανές. Είναι βέβαια αναγκαίο η τελική τιμή M_w να προκύπτει ως η μέση τιμή ενός πλήθους λύσεων από διαφορετικούς σταθμούς και συνιστώσες. Οι λύσεις αυτές, αν η διαδικασία λειτουργεί σωστά, αναμένεται να είναι παραπλήσιες μεταξύ τους.

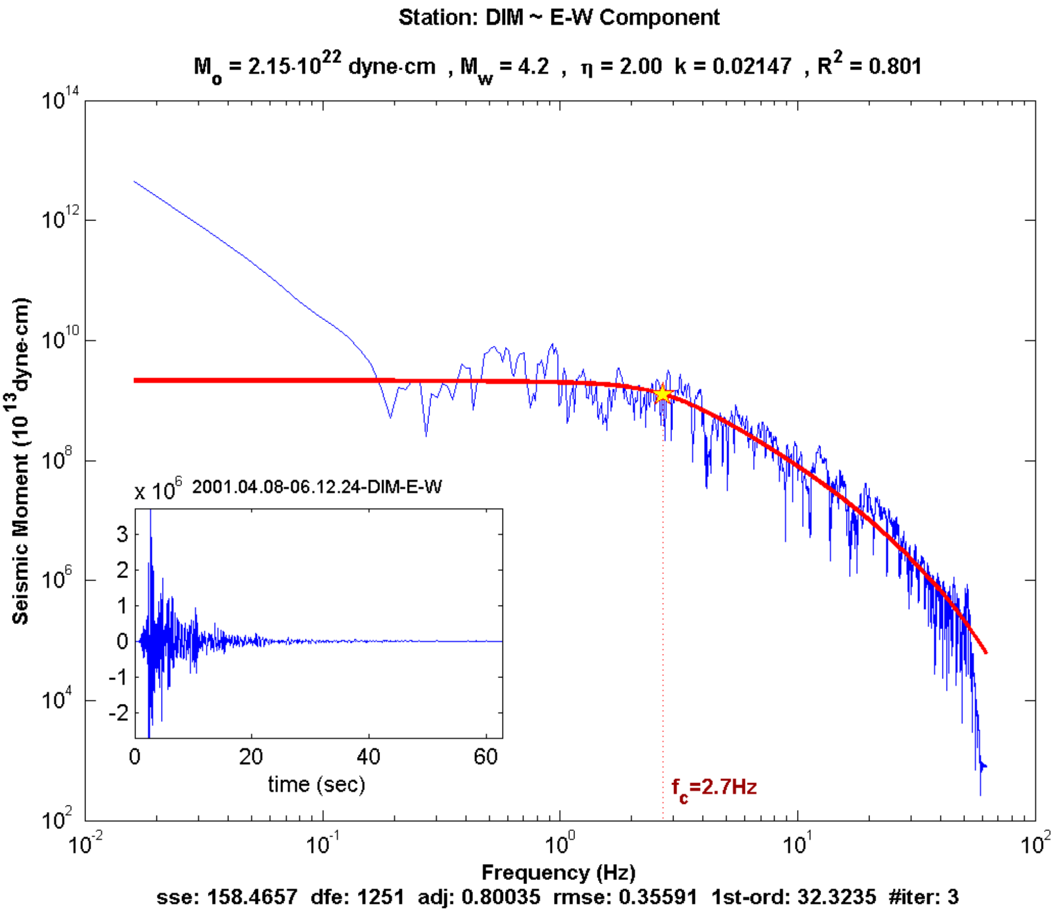


Σχήμα 2.3: Προσαρμογή της παραμετρικής καμπύλης (εξ. 2.17) σε καταγραφή της συνιστώσας E-W του σταθμού DIM ενός σεισμού (2001.08-06.10.25).

Στην παρούσα εργασία έχει προηγηθεί της εφαρμογής της μεθόδου αυτής ένας εκτενής έλεγχος στην κατάσταση λειτουργίας των συνιστωσών σε καθένα από τους σταθμούς σε όλη τη διάρκεια της υπό μελέτης περιόδου. Αυτό είναι απαραίτητο ώστε να εξασφαλιστεί πως δεν θα χρησιμοποιούνται συνιστώσες οι οποίες για κάποιον λόγο έχουν εμφανίσει βλάβη. Σε περίπτωση που και οι 2 οριζόντιες συνιστώσες λειτουργούν κανονικά σε κάποιο σταθμό για μια συγκεκριμένη ημέρα, υπολογίζονται η εφαπτομενική και η ακτινική συνιστώσα, γνωρίζοντας ποιο είναι το αζιμούθιο του σταθμού από τη λύση του υποκέντρου, και στη συνέχεια εκτελείται ο μετασχηματισμός Fourier. Αν μία από τις 2 οριζόντιες συνιστώσες έχει βλάβη τότε χρησιμοποιείται η άλλη, αλλιώς δεν χρησιμοποιείται καθόλου ο συγκεκριμένος σταθμός έως ότου επιβεβαιωθεί ότι η βλάβη έχει αποκατασταθεί.

Ένας δεύτερος έλεγχος γίνεται ύστερα από τον υπολογισμό των παραμέτρων $\mathbf{M_o}$, $\mathbf{f_c}$, **k** και **η** απ' όπου προκύπτει ο συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης $\mathbf{R^2}$. Στην ιδανική περίπτωση ο συντελεστής αυτός πρέπει να ισούται με τη μονάδα, στην πράξη θα θεωρηθούν ικανοποιητικές οι τιμές άνω του 0.7 (το πραγματικό φάσμα ποτέ δεν παρουσιάζει μια εικόνα ομαλής καμπύλης). Τέλος, ύστερα από τον υπολογισμό των τιμών $\mathbf{M_w}$ και $\mathbf{f_c}$ (που ενδιαφέρουν κυρίως σε αυτή τη μελέτη) σε όλους τους σταθμούς και συνιστώσες για έναν δεδομένο σεισμό, γίνεται ένας ακόμη έλεγχος για την απόρριψη κάποιων αποτελεσμάτων που διαφέρουν πολύ από το μέσο όρο και πιθανόν να τον επηρεάζουν. Η απόρριψη γίνεται με κριτήριο τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή που βρέθηκε στις λύσεις των $\mathbf{M_w}$, $\mathbf{f_c}$.

Όσες περιπτώσεις βρεθούν με το προκύπτον $\mathbf{M_w}$ ή $\mathbf{f_c}$ να βρίσκεται εκτός των τιμών $[M_{w,avg}-(\Delta M_w)/2,\ M_{w,avg}+(\Delta M_w)/2]$ ή $[f_{c,avg}-(\Delta f_c)/2,\ f_{c,avg}+(\Delta f_c)/2]$ αντίστοιχα, όπου $M_{w,avg}$ και $f_{c,avg}$ οι μέσες τιμές των M_W και f_c αντίστοιχα ενώ ΔM_W και Δf_c οι διαφορές ανάμεσα σε μέγιστη και ελάχιστη τιμή λύσεων των M_W και f_c αντίστοιχα, απορρίπτονται. Ανεξάρτητα από το κριτήριο που θα χρησιμοποιηθεί (τη διαφορά στο $\mathbf{M_w}$ ή το $\mathbf{f_c}$), η απόρριψη, εάν χρειαστεί, γίνεται σε όλες τις παραμέτρους ($\mathbf{M_o}$, $\mathbf{f_c}$, **k**, **η**) της συγκεκριμένης λύσης και αυτό διότι υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες ένα πολύ διαφορετικό $\mathbf{f_c}$ συμβαδίζει με ένα λανθασμένο $\mathbf{M_o}$. Από όσες λύσεις απομένουν υπολογίζονται οι μέσες τιμές των $\mathbf{M_w}$, $\mathbf{M_o}$, $\mathbf{f_c}$, **k** και **η**.



Σχήμα 2.4: Προσαρμογή της παραμετρικής καμπύλης (εξ. 2.17) σε καταγραφή της συνιστώσας E-W του σταθμού DIM για τον κύριο σεισμό M_w=4.2 (2001.04.08-06.12.25) του «Σμήνους του ΑΙΟ» (Ομάδα Α, Κεφ. 4).

Στην εφαρμογή αυτής της εργασίας για τη μη-γραμμική παλινδρόμηση χρησιμοποιήθηκε η λογαριθμική μορφή της συνάρτησης M(f) (εξ. 2.17). Ως αρχικές τιμές χρησιμοποιήθηκαν: $\log M_o$=13, f_c=5Hz, η=2.2, k=20msec, όπου το αρχικό $M_o=10^{13}$N·m αντιστοιχεί σε $M_w \cong 2.6$ που είναι ένα συνηθισμένο μέγεθος για τον συγκεκριμένο κατάλογό. Χρησιμοποιούνται τα δείγματα του φάσματος της σεισμικής ροπής για συχνότητες μεταξύ 0.01-20Hz. Τίθενται ως επιτρεπτές τιμές: $\mathbf{f_c}\in$[0.05Hz, 15Hz], **η**$\in$[1.5, 3], **k**$\in$[0,100ms], $\mathbf{M_o}\in[0, \infty)$. Διατηρείται η λύση που προκύπτει και στη συνέχεια επαναλαμβάνεται η διαδικασία αφού τεθεί σταθερή η τιμή **η=2** και αναζητούνται τα $\mathbf{M_o}$, $\mathbf{f_c}$, και **k**. Από την επανάληψη αυτή προκύπτει μια δεύτερη λύση.

Τέλος, θεωρείται ως καλύτερη η λύση εκείνη που δίνει τον μεγαλύτερο συντελεστή πολλαπλής συσχέτισης $\mathbf{R^2}$. Η διαδικασία αυτή αφήνει περιθώρια για αρκετούς πειραματισμούς με διαφορετικές αρχικές τιμές, διαφορετικά όρια συχνοτικών δειγμάτων, διαφορετικά διαδοχικά στάδια της προσέγγισης, διαφορετικά όρια στο επιτρεπτό εύρος τιμών της κάθε παραμέτρου καθώς και διαφορετικές σταθερές παραμέτρους ή ακόμη, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, επαναδειγματοληψία στον χώρο συχνοτήτων ή χρήση διαφορετικών βαρών για το κάθε συχνοτικό δείγμα.

2.3 ~ *Βαθμονόμηση Σταθμών*

Ο τίτλος αυτής της ενότητας αναφέρεται στον προσδιορισμό της τιμής $\mathbf{S_r}$ της εξ. 2.14 για τον κάθε σταθμό. Το $\mathbf{S_r}$ είναι ένας διορθωτικός παράγοντας ο οποίος σκοπό έχει να εξαλείψει τα συστηματικά σφάλματα που εμφανίζονται στον υπολογισμό του $\mathbf{M_o}$ (και κατ' επέκταση του $\mathbf{M_w}$) σε κάθε σταθμό. Τα συστηματικά σφάλματα εμφανίζονται ως μια στατιστική διαφορά ανάμεσα στα αποτελέσματα για το $\mathbf{M_w}$ που έδωσε ένας συγκεκριμένος σταθμός σε σύγκριση με το αντίστοιχο μέσο $\mathbf{M_w}$ που υπολογίστηκε με τη μέθοδο και τα κριτήρια που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Επιπλέον, το $\mathbf{S_r}$ πιθανόν περιλαμβάνει έναν κοινό παράγοντα σε όλους τους σταθμούς ο οποίος μπορεί να βγει από το $\mathbf{S_r}$ και να αφομοιωθεί με το $\mathbf{C}$ της εξ. 2.14. Αυτό αποτελεί μια γενική διόρθωση σε όλους τους άλλους παράγοντες που θεωρήθηκαν γνωστοί κατά προσέγγιση στην εξ. 2.14, όπως το $\boldsymbol{\rho}$, το $\mathbf{V_s}$ και το $\mathbf{F_s}$.

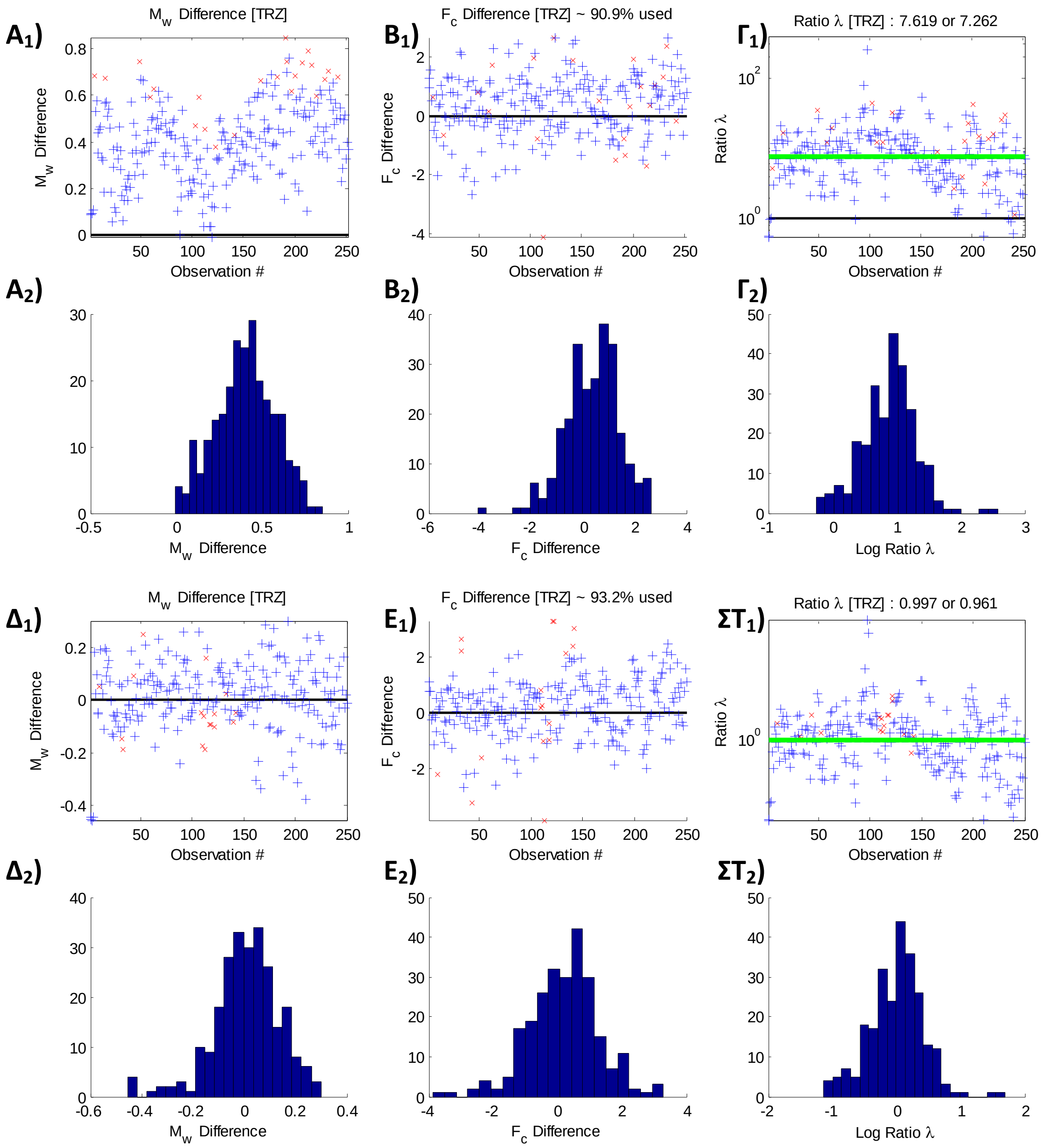
Η διόρθωση αυτή δε μπορεί να γίνει με βάση τα δεδομένα του δικτύου CRL (βλέπε Κεφάλαιο 3) από τα οποία υπολογίζονται τα μεγέθη αυτής της εργασίας, αλλά μπορεί να γίνει με βάση αποτελέσματα μεγεθών για κοινούς σεισμούς του καταλόγου αυτού με τον κατάλογο κάποιου ινστιτούτου όπως για παράδειγμα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (NOA). Ο κατάλογος του NOA περιέχει τοπικά μεγέθη, M_L, που έχουν υπολογιστεί από ένα ευρύτερο δίκτυο σταθμών και με μικρότερη ακρίβεια στον προσδιορισμό της θέσης των υποκέντρων σε σύγκριση με τις λύσεις που δίνουν τα δεδομένα του τοπικού δικτύου CRL στην περιοχή του Δυτικού Κορινθιακού κόλπου. Στην εργασία αυτή θα μελετηθεί η σεισμικότητα των ετών 2000, 2001, 2005 και 2006 στην περιοχή που καλύπτει το δίκτυο CRL. Επιλέχθηκαν οι σεισμοί που έχουν καταγραφεί από το δίκτυο NOA με επίκεντρα εντός μιας περιοχής με γεωγραφικό πλάτος [38.05°N-38.51°N] και γεωγραφικό μήκος [21.55°E-22.50°E] και στη συνέχεια εντοπίστηκαν οι σεισμοί που έχουν καταγραφεί και από τα 2 δίκτυα βάσει του χρόνου γένεσης. Ο αριθμός των κοινών σεισμών ανέρχεται σε 429.

Η διαδικασία προσδιορισμού του $\mathbf{M_o}$ απαιτεί τη γνώση της απόκρισης των σεισμομέτρων προκειμένου να γίνει η απαραίτητη αποσυνέλιξη. Η αποσυνέλιξη είναι μια διαίρεση στον χώρο συχνοτήτων. Ως προς τους λογάριθμους των πλατών της απόκρισης του οργάνου και του φάσματος του αρχικού σεισμογράμματος, η διαίρεση κατά την αποσυνέλιξη αντιστοιχεί σε αφαίρεση μεταξύ των λογαρίθμων των πλατών. Ο παράγοντας $\mathbf{S_r}$ μπορεί να εισαχθεί ως επιπλέον συντελεστής στην απόκριση του οργάνου και έτσι να αφαιρεθεί ο $\mathbf{logS_r}$ από τον λογάριθμο του πλάτους του αρχικού σεισμογράμματος κατά την αποσυνέλιξη. Αρχικά, βέβαια, ο παράγοντας αυτός είναι άγνωστος οπότε θεωρείται $\mathbf{S_r}$=1 ή $\mathbf{logS_r}$=0 ώστε να μην επηρεάζει το αποτέλεσμα.

Όταν εκτελεστεί η διαδικασία υπολογισμού του $\mathbf{M_o}$ και στη συνέχεια του μέσου $\mathbf{M_w}$, σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, μπορεί πλέον να γίνει η σύγκριση των $\mathbf{M_w}$ με τα $\mathbf{M_L}$ για τους κοινούς σεισμούς του καταλόγου CRL με του NOA. Η σύγκριση μπορεί να γίνει επίσης ανά σταθμό, κάτι που θα δώσει τη δυνατότητα να βρεθεί ο παράγοντας $\mathbf{S_r}$ ξεχωριστά για κάθε σταθμό. Σημειώνεται ότι τα διάφορα $\mathbf{S_r}$ που θα υπολογιστούν περιέχουν έναν κοινό παράγοντα για όλους τους σταθμούς ο οποίος στην πραγματικότητα ανήκει στον συντελεστή $\mathbf{C}$ της εξ. 2.14, δηλαδή είναι μια κοινή διόρθωση για το γινόμενο των $\boldsymbol{\rho}$, $\mathbf{V_s^3}$ και $(\mathbf{F_cR_c})^{-1}$ στα οποία έχει τεθεί μια προσεγγιστική σταθερή τιμή.

Στο Σχήμα $2.5_{A1,2}$ φαίνεται η κατανομή της διαφοράς των λύσεων για τα $\mathbf{M_w}$ που προέκυψαν από τον σταθμό TRZ από τις αντίστοιχες τιμές $\mathbf{M_L}$ του δικτύου NOA για 126 από τους 138 σεισμούς που συνέβησαν μέσα στο 2006 και για τους οποίους υπάρχουν καταγραφές στον συγκεκριμένο σταθμό. Σε 252 από τις κυματομορφές αυτού του σταθμού έγινε αποδεκτή η προσαρμογή της καμπύλης που περιγράφεται από την εξίσωση 2.17 λόγω υψηλού συντελεστή συσχέτισης R^2. Παρατηρείται ότι υπάρχει ένα συστηματικό σφάλμα: το μέγεθος $\mathbf{M_w}$ που δίνει ο σταθμός TRZ είναι κατά 0.3-0.5 μεγαλύτερο από το αντίστοιχο μέγεθος $\mathbf{M_L}$. Η διαφορά αυτή μπορεί να απεικονιστεί ως λόγος ανάμεσα στις αντίστοιχες σεισμικές ροπές. Ο λόγος αυτός ο οποίος αναφέρεται στα επόμενα σχήματα ως "*Ratio λ*" είναι το πηλίκο της σεισμικής ροπής $\mathbf{M_o}'$ που *θα* είχε ένας ορισμένος σεισμός αν θεωρηθεί πως $M_L=M_w=(2/3)\cdot(\log(M_o'/N\cdot m)-9.1)$ δηλαδή

$M_o' = 10^{1.5 \cdot M_L + 9.1}$N·m, προς τη σεισμική ροπή $\mathbf{M_o}$ που υπολογίστηκε ως παράμετρος της μη γραμμικής συνάρτησης 2.17 από το φάσμα της καταγραφής του συγκεκριμένου σταθμού (από μια *παρατήρηση*). Αυτό το πηλίκο ονομάζεται «*Λόγος Βαθμονόμησης*», **λ** (*calibration ratio*).

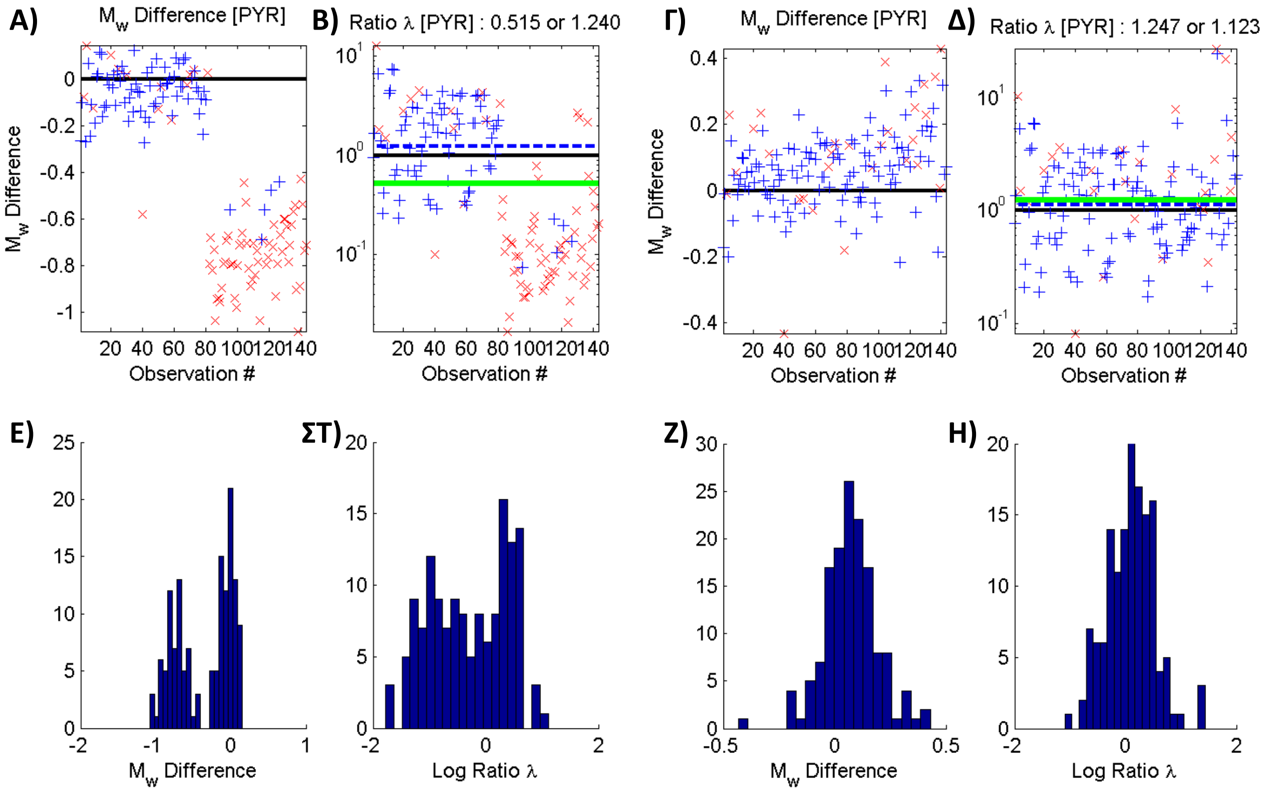


Σχήμα 2.5: Βαθμονόμηση σταθμού TRZ με δεδομένα σεισμών του 2006: $(Α,Δ)_1$ τιμές διαφοράς μεγέθους M_w-M_L ανά παρατήρηση πριν και μετά τη βαθμονόμηση, $(Β,Ε)_1$ τιμές διαφοράς γωνιακής συχνότητας f_{ci}-f_c, όπου f_{ci} η γωνιακή συχνότητα μιας δεδομένης παρατήρησης και f_c η μέση τιμή της γωνιακής συχνότητας από όλες τις αποδεκτές παρατηρήσεις για ένα συγκεκριμένο γεγονός πριν και μετά τη βαθμονόμηση, $(Γ,ΣΤ)_1$ τιμές του λόγου βαθμονόμησης λ πριν και μετά τη βαθμονόμηση. Στο $Γ_1$ η πράσινη γραμμή αναδεικνύει την τιμή $λ_μ$ ενώ στο $ΣΤ_1$ φαίνεται ότι πλέον $λ_μ \cong 1$ άρα εν γένει δεν χρειάζεται κάποια επιπλέον διόρθωση. Τα ιστογράμματα $(Α,Β,Γ,Δ,Ε,ΣΤ)_2$ αντιστοιχούν στις κατανομές σημείων που φαίνονται στα διαγράμματα $(Α,Β,Γ,Δ,Ε,ΣΤ)_\mathbf{1}$. Με μπλε σταυρούς σημειώνονται οι αποδεκτές παρατηρήσεις ενώ με κόκκινο x οι παρατηρήσεις που απορρίφθηκαν.

Αν ο λόγος βαθμονόμησης για κάποιον σεισμό είναι μονάδα τότε η λύση αυτή δεν χρειάζεται διόρθωση. Αν ο λόγος είναι μικρότερος από τη μονάδα αυτό σημαίνει πως το $\mathbf{M_w}$ που υπολογίστηκε για τον συγκεκριμένο σεισμό (για τη συγκεκριμένη παρατήρηση) είναι μεγαλύτερο από το πραγματικό (M_L) ενώ το αντίθετο συμβαίνει όταν ο λόγος είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα.

Η κατανομή του λόγου **λ** μπορεί να απεικονιστεί καλύτερα σε ημιλογαριθμική κλίμακα, όπως φαίνεται στο Σχήμα $2.5_{\Gamma 1}$, καθώς υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις στις οποίες η τιμή του είναι πολύ μεγαλύτερη ή πολύ μικρότερη από τη μονάδα. Υπολογίζεται η μέση τιμή του λογαρίθμου του λόγου **λ** για όλους τους σεισμούς για τους οποίους διατίθεται γνωστό μέγεθος M_L και στη συνέχεια υψώνεται το 10 στη μέση τιμή που βρέθηκε. Το αποτέλεσμα, $\boldsymbol{\lambda_\mu}$, αναγράφεται με την πράσινη γραμμή στο Σχήμα $2.5_{\Gamma 1}$ και είναι $\boldsymbol{\lambda_\mu}=1/\boldsymbol{S_r}$ για τον συγκεκριμένο σταθμό κατά την ορισμένη περίοδο λειτουργίας του. Ύστερα από τη διόρθωση μπορεί να επαναληφθεί η διαδικασία και να επαναπροσδιοριστούν τα $\boldsymbol{M_w}$, τα οποία αναμένεται να κυμαίνονται κοντά στα αντίστοιχα $\boldsymbol{M_L}$.

Υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η «συμπεριφορά» του αποτελέσματος που δίνει κάποιος σταθμός μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια ενός έτους. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2.6 όπου παρατηρείται πως μπορεί να διαχωριστεί η κατάσταση λειτουργίας του σταθμού σε 2 περιόδους με διαφορετικά $\boldsymbol{S_r}$. Η αλλαγή αυτή επιβεβαιώνεται από τα ίδια τα δεδομένα καθώς ο σταθμός PYR παρουσιάζει ένα κενό στις καταγραφές του κατά την περίοδο μεταξύ 11/9/2005 και 2/11/2005. Η μεταβολή στο $\boldsymbol{\lambda_\mu}$ λαμβάνει χώρα ύστερα από την επαναλειτουργία του σταθμού, κάτι που δείχνει πως πιθανόν έγινε αλλαγή στο σεισμόμετρο και στη θέση του παλιού τοποθετήθηκε κάποιο άλλο όργανο με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά.



Σχήμα 2.6: Μεταβλητή βαθμονόμηση στον σταθμό PYR για το έτος 2005. Α) Διαφορά μεταξύ M_w και M_L πριν τη διόρθωση. Η απότομη αλλαγή στη «συμπεριφορά» του σταθμού PYR (πιθανόν λόγω αλλαγής οργάνου) εντοπίζεται πριν και μετά από ένα κενό δεδομένων κυματομορφών μεταξύ 11/9/2005 και 2/11/2005. Β) Τιμή του λόγου βαθμονόμησης λ πριν τη διόρθωση, Γ) διαφορά μεταξύ M_w και M_L μετά τη διόρθωση, Δ) τιμή του λόγου βαθμονόμησης λ μετά τη διόρθωση. Καθώς έχει προηγηθεί ήδη μια διόρθωση λόγω της αλλαγής οργάνου, η πράσινη γραμμή ($\boldsymbol{\lambda_\mu}$) εδώ αποτελεί έναν επιπλέον παράγοντα για τον υπολογισμό του $\boldsymbol{S_r}$, σε συνδυασμό με τους 2 παράγοντες που χρειάστηκαν για την πρώτη διόρθωση. (Ε,ΣΤ,Ζ,Η): κατανομές για τα σημεία των Σχημάτων $2.6_{(A,B,\Gamma,\Delta)}$ αντίστοιχα.

Αν και είναι λίγες αυτές οι περιπτώσεις, και καθώς αποτελέσματα παρατηρήσεων $\mathbf{M_w}$ τα οποία είναι πολύ διαφορετικά από τη μέση τιμή του $\mathbf{M_w}$ που δίνουν όλοι οι σταθμοί για έναν σεισμό απορρίπτονται μέσα από τους ελέγχους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα, αν εξαλειφθούν τέτοια συστηματικά σφάλματα μπορούν να βελτιωθούν τα γενικά αποτελέσματα. Όπως με τον έλεγχο της ημερήσιας κατάστασης λειτουργίας των συνιστωσών στους διάφορους σταθμούς έτσι και με το $\boldsymbol{\lambda_\mu}$ γίνεται να βρεθούν οι κατάλληλες τιμές του ανάλογα με την ημέρα στην οποία συνέβη ο κάθε σεισμός.

Χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές $\boldsymbol{\lambda_\mu}$ όπως σε αυτή την περίπτωση (Σχήμα 2.6) οδηγούν σε 2 διαφορετικές εκτιμήσεις για το $\mathbf{S_r}$ το οποίο, αναπόφευκτα, εφόσον δεν είναι διαθέσιμη η απόκριση του νέου οργάνου με τις αντίστοιχες σταθερές, θα εμπεριέχει έναν παράγοντα που δεν εξαρτάται από τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής του σταθμού ή την τοπική δομή του υπεδάφους. Πριν τη διόρθωση, το 50% των παρατηρήσεων ήταν αποδεκτό (κυρίως για παρατηρήσεις που έγιναν πριν τις 11/9/2005) ενώ μετά τη διόρθωση το 80% των παρατηρήσεων έγινε αποδεκτό.

Στον Πίνακα 2.1 που ακολουθεί φαίνονται οι διάφορες τιμές του παράγοντα $\mathbf{S_r}$ για τον κάθε σταθμό. Όσον αφορά στον παράγοντα τοπογραφικής διόρθωσης η τιμή του $\mathbf{S_r}$ δεν πρέπει να είναι πολύ μικρότερη ή μεγαλύτερη από τη μονάδα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ωστόσο, ο $\mathbf{S_r}$ εμπεριέχει διορθώσεις απαραίτητες για την προσαρμογή των αποτελεσμάτων του κάθε σταθμού με αυτά των υπόλοιπων, κάτι που προκύπτει από μια επανάληψη της προηγούμενης διαδικασίας για τον υπολογισμό ενός $\boldsymbol{\lambda_\mu}$, μόνο που ως «μέγεθος αναφοράς» θα είναι πλέον το μέσο $\mathbf{M_w}$ που έγινε δεκτό από όλες τις παρατηρήσεις των σταθμών (ύστερα από την πρώτη διόρθωση βάσει των $\mathbf{M_L}$ του NOA)

Πίνακας 2.1: Τιμές του παράγοντα διόρθωσης, S_r, ανά σταθμό

σταθμός	S_r	**σταθμός**	S_r
AGE	2.2	**$\mathbf{PAN_1}$**	2.3
AIO	3.4	**$\mathbf{PAN_2}$**	0.45
$\mathbf{ALI_1}$	1	**$\mathbf{PAN_3}$**	0.53
$\mathbf{ALI_2}$	1.6	**PSA**	1.7
DA0	3.3	**$\mathbf{PYR_1}$**	0.8
DAF	1.9	**$\mathbf{PYR_2}$**	0.9
DIM	1.4	**SEL**	6.8
ELE	0.6	**SER**	0.7
KA2	1.3	**STS**	2.2
KAL	1.1	**TEM**	4.7
KOU	2.9	**TRI**	1.2
LAK	0.6	**TRZ**	2.1

Σταθμός ALI: 1) περίοδος 2000-2001, 2) περίοδος 2005-2006
Σταθμός PAN: 1) περίοδος 2000-2001 , 2) από 1/1/2005 έως 9/5/2006, 3) μετά τις 11/10/2006
Σταθμός PYR: 1) από 1/1/2005 έως 11/9/2005, 2) μετά τις 2/11/2005

2.4 ~ *Αποτελέσματα*

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα για τη σχέση μεταξύ $\mathbf{M_L}$ και $\mathbf{M_w}$ μπορεί να θεωρηθεί ότι κατά προσέγγιση ισχύει $\mathbf{M_w \cong M_L}$. Τα διαθέσιμα μεγέθη $\mathbf{M_L}$ για την επιλεγμένη σεισμικότητα από το δίκτυο NOA κυμαίνονται από $\mathbf{M_L}$=2.4 έως $\mathbf{M_L}$=4.3. Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από τα Σχήματα 2.7, 2.8, 2.9, από την αρκετά καλή συσχέτιση μεταξύ $\mathbf{M_w}$ και $\mathbf{M_L}$, είναι ότι το $\mathbf{M_w}$, τουλάχιστον για σεισμούς με $\mathbf{M_w \geq 2.4}$ υπολογίζεται σωστά σε ικανοποιητικό βαθμό.

Το πρόβλημα είναι ότι τα $\mathbf{f_c}$ δεν είναι το ίδιο αξιόπιστα και η συσχέτισή τους με τα $\mathbf{M_w}$ δεν παρουσιάζει την επιθυμητή εικόνα (Παράρτημα Β, Σχήμα Β.38$_{\mathrm{A}}$). Αυτό ήταν αναμενόμενο σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν κατά την εισαγωγή της συνάρτησης **M(f)** (εξ. 2.15): υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί **k** και $\mathbf{f_c}$ που μπορούν να περιγράφουν σε ικανοποιητικό βαθμό το πλάτος του φάσματος (Σχήματα Β.40, Β.41$_{\Delta}$). Παρ' ότι η προσαρμογή της συνάρτησης **M(f)** είναι σε πολλές περιπτώσεις καλή, το $\mathbf{f_c}$ που προκύπτει ως παράμετρος δεν είναι πάντα αυτό που θα επέλεγε κανείς εάν εξέταζε τα φάσματα ένα προς ένα με μη-αυτόματο τρόπο, ακόμα και σε περιπτώσεις αρκετά υψηλού συντελεστή πολλαπλής συσχέτισης $\mathbf{R^2}$.

Στα Σχήματα Β.38, Β.39 του Παραρτήματος Β φαίνονται οι κατανομές των $\mathbf{M_w}$, $\mathbf{f_c}$, **η** και **k** για τη σεισμικότητα της Ομάδας Β (Κεφ. 4). Ωστόσο, με δοκιμές 5000 τυχαίων αρχικών τιμών $\mathbf{log_{10}M_o}$, $\mathbf{f_c}$, **η** και **k** (μέσα στα συνηθισμένα πλαίσια των τιμών που μπορούν να πάρουν αυτές οι παράμετροι) για την προσαρμογή της εξ. 2.17 στο φάσμα του Σχήματος Β.40, προέκυψαν τα αποτελέσματα που φαίνονται στα Σχήματα Β.41-46. Ενώ για το $\mathbf{M_w}$ η μέση λύση είναι σταθερή γύρω από το $\mathbf{M_w}$≅4.2 (Σχήματα Β.41$_{\mathrm{A}}$, Β.43$_{\mathrm{A}}$), τα αποτελέσματα για τις υπόλοιπες παραμέτρους παρουσιάζουν εξάρτηση από τις αρχικές τιμές ενώ μεταξύ τους δεν παρουσιάζουν κάποια συσχέτιση. Επιπλέον, για τους περισσότερους από αυτούς τους συνδυασμούς ο συντελεστής πολλαπλής συσχέτισης R^2 είναι αρκετά υψηλός, επιβεβαιώνοντας την παρατήρηση ότι υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί $\mathbf{f_c}$, **η** και **k** που δίνουν μια καλή προσαρμογή.

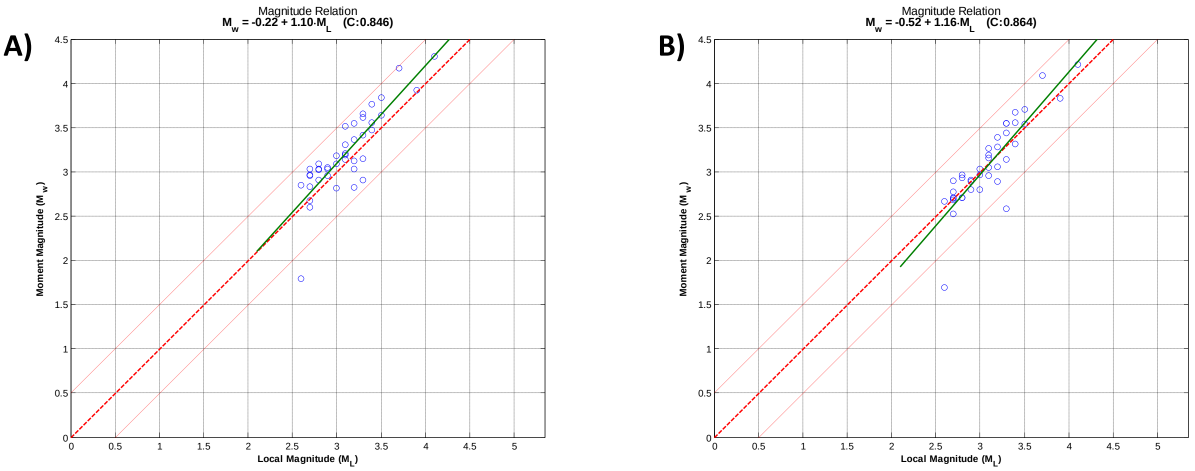
Είναι πάντως πιθανόν να μπορεί να βρεθεί ένας τρόπος καλύτερης εκτίμησης του $\mathbf{f_c}$, ίσως μετά τον προσδιορισμό του μέσου $\mathbf{M_o}$ για έναν ορισμένο σεισμό, με σταθεροποίηση της παραμέτρου $\mathbf{M_o}$, με διαφορετικά όρια ή αρχικές τιμές για το $\mathbf{f_c}$ και τις υπόλοιπες παραμέτρους, ή με κάποιο άλλο τέχνασμα, ακόμη και με μια τελείως διαφορετική διαδικασία που δεν θα χρησιμοποιεί την συνάρτηση 2.15 ή 2.17. Κάτι τέτοιο χρειάζεται εκτενέστερους πειραματισμούς.

Ένα άλλο συμπέρασμα είναι ότι περίπου στο 65% των περιπτώσεων προτιμήθηκε η λύση με σταθερό **η=2** διότι έδωσε μεγαλύτερο συντελεστή $\mathbf{R^2}$ κάτι όμως που μπορεί να οφείλεται απλά στη μείωση του αριθμού των αγνώστων. Σε αρκετές πάντως περιπτώσεις οι λύσεις με σταθερό ή μεταβαλλόμενο **η** δίνουν παραπλήσια αποτελέσματα $\mathbf{M_o}$ και $\mathbf{f_c}$ (για ίδιες αρχικές τιμές των αγνώστων) αφού εξάλλου το **η** δεν επιτρέπεται να λάβει τιμές μικρότερες από 1.5 ή μεγαλύτερες από 3. Αναλυτικότερα: για το 2005 στο 61% των παρατηρήσεων προτιμήθηκε η λύση με η=2, στο 59.6% για το 2006, στο 71% για το 2000-2001 στο σμήνος του AIO (βλέπε Κεφάλαιο 4, Ομάδα Α), και στο 74.5% για σεισμούς με επίκεντρα εντός του Κορινθιακού κόλπου στα έτη 2000-2001 (βλέπε Κεφάλαιο 4, Ομάδα Β).

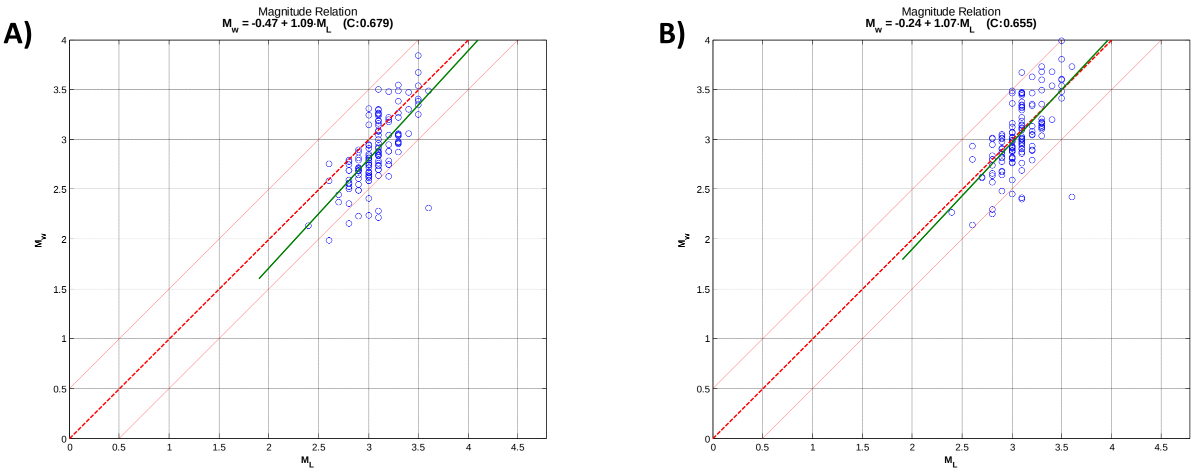
Για τα έτη 2000-2001 υπάρχουν διαθέσιμα μεγέθη διάρκειας, $\mathbf{M_d}$, στα δεδομένα του δικτύου CRL. Τα μεγέθη αυτά έχουν υπολογιστεί βάσει του τύπου (*P. Papadimitriou et al., 2001*):

$$M_d = -1.1 + 2.35 \cdot \log T + 0.0012 \cdot \Delta \tag{2.18}$$

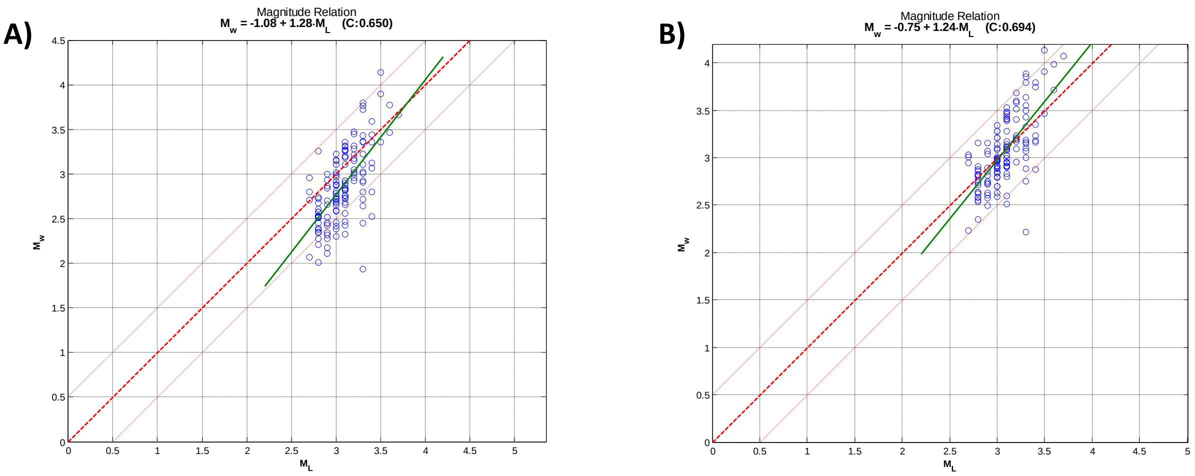
όπου **T** η διάρκεια του σήματος και **Δ** η επικεντρική απόσταση. Από τη στιγμή που υπολογίζονται μεγέθη ροπής $\mathbf{M_w}$ με τη μέθοδο που αναπτύχθηκε, μπορεί να γίνει η σύγκριση ανάμεσα στα $\mathbf{M_w}$ και τα αντίστοιχα μεγέθη ροπής $\mathbf{M_d}$ όπου αυτά είναι διαθέσιμα.



Σχήμα 2.7: Σχέσεις μεταξύ M_w και M_L για σεισμούς των ετών 2000-2001 από την Ομάδα Α (βλέπε Κεφ. 4) πριν (Α) και μετά (Β) τη διόρθωση βάσει του λόγου βαθμονόμησης λ_μ.



Σχήμα 2.8: Σχέσεις μεταξύ M_w και M_L για σεισμούς από το 2005 πριν (Α) και μετά (Β) τη διόρθωση βάσει του λόγου βαθμονόμησης λ_μ.

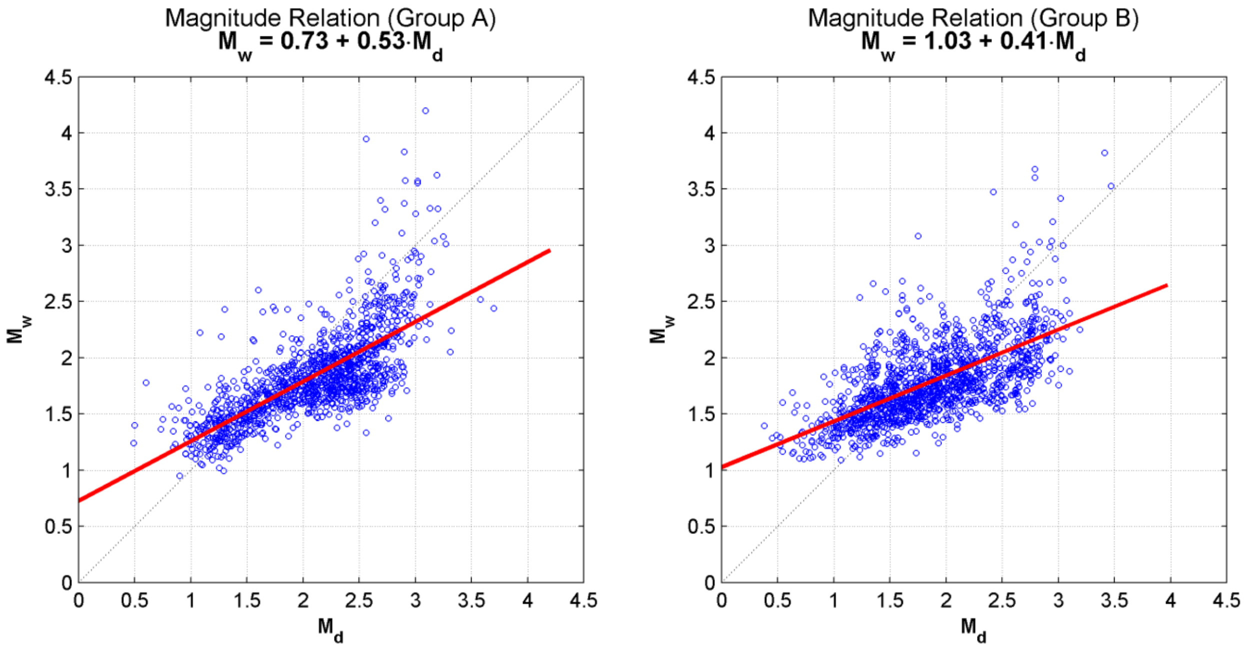


Σχήμα 2.9: Σχέσεις μεταξύ M_w και M_L για σεισμούς από το 2006 πριν (Α) και μετά (Β) τη διόρθωση βάσει του λόγου βαθμονόμησης λ_μ.

Η σύγκριση αυτή φαίνεται στα Σχήματα $2.10_{A,B}$ όπου στο (Α) απεικονίζεται η αντιστοιχία M_w και M_d για 1193 σεισμούς από το «σμήνος του ΑΙΟ» (βλέπε Κεφάλαια 3 και 4, Ομάδα Α) και για 1348 σεισμούς με επίκεντρα εντός του Δ. Κορινθιακού κόλπου (Ομάδα Β, Κεφ. 4). Δίνονται στο κάθε σχήμα οι γραμμικές εξισώσεις που προσεγγίζουν με μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων τη σχέση μεταξύ M_w και M_d. Το ευθύγραμμο τμήμα που περιγράφει τη σχέση τους έχει κλίση 0.4-0.5 και η προέκτασή του τέμνει τον άξονα των M_w σε μια τιμή μεταξύ 0.7-1.0. Ιδιαίτερα στο Σχήμα 2.10_B, όμως, φαίνεται ότι υπάρχουν 2 ή 3 σχεδόν γραμμικές περιοχές στις οποίες μπορεί να χωριστεί η κατανομή των σημείων. Η πρώτη για μικρά μεγέθη μέχρι περίπου 1.8-2.0 ταυτίζεται σχεδόν με ένα τμήμα της ευθείας $M_w=M_d$, στη συνέχεια η κλίση μειώνεται και είναι γενικά $M_w<M_d$ ενώ στο τέλος για μεγαλύτερα μεγέθη υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις στις οποίες $M_w>M_d$ αν και εν γένει το M_w συνεχίζει να βγαίνει μικρότερο από το M_d.

Για τους σκοπούς της εργασίας αυτής υπολογίστηκαν μεγέθη ροπής για συνολικά 16544 σεισμούς εκ των οποίων 3645 από τα έτη 2000-2001, 3796 από το έτος 2005 και 9033 από το έτος 2006. Χρησιμοποιήθηκε ένα μεγάλο πλήθος κυματομορφών από διάφορους σταθμούς του δικτύου CRL (βλέπε Κεφ. 3) καθώς και από ορισμένους σταθμούς του δικτύου του Πανεπιστημίου Αθηνών στην περιοχή του Δ. Κορινθιακού κόλπου. Κατά τη διαδικασία της αυτόματης προσαρμογής της συνάρτησης 2.17 έγιναν αποδεκτές 19172 παρατηρήσεις για την Ομάδα Α, 17467 παρατηρήσεις για την Ομάδα Β (βλέπε Κεφ. 4), 17925 παρατηρήσεις για το έτος 2005 και 64465 παρατηρήσεις για το έτος 2006 (συνολικά 119029 αποδεκτές προσαρμογές). Υπενθυμίζεται ότι αποδεκτές ονομάζονται οι προσαρμογές που έχουν εμφανίσει υψηλό συντελεστή πολλαπλής συσχέτισης R^2.

Τα αποτελέσματα αυτά αποτελούν μια πρώτη προσέγγιση στο πρόβλημα του υπολογισμού μεγέθους ροπής. Επόμενο στάδιο είναι ο επανέλεγχος της αυτόματης διαδικασίας ώστε να μειωθούν οι περιπτώσεις σφαλμάτων στην προσαρμογή της συνάρτησης όσον αφορά στο $\mathbf{M_o}$ και στη συνέχεια η βελτίωση του αλγορίθμου ώστε να υπολογίζονται και οι υπόλοιπες παράμετροι $\mathbf{f_c}$, $\boldsymbol{\eta}$ και $\mathbf{k}$ με μεγαλύτερη βεβαιότητα.



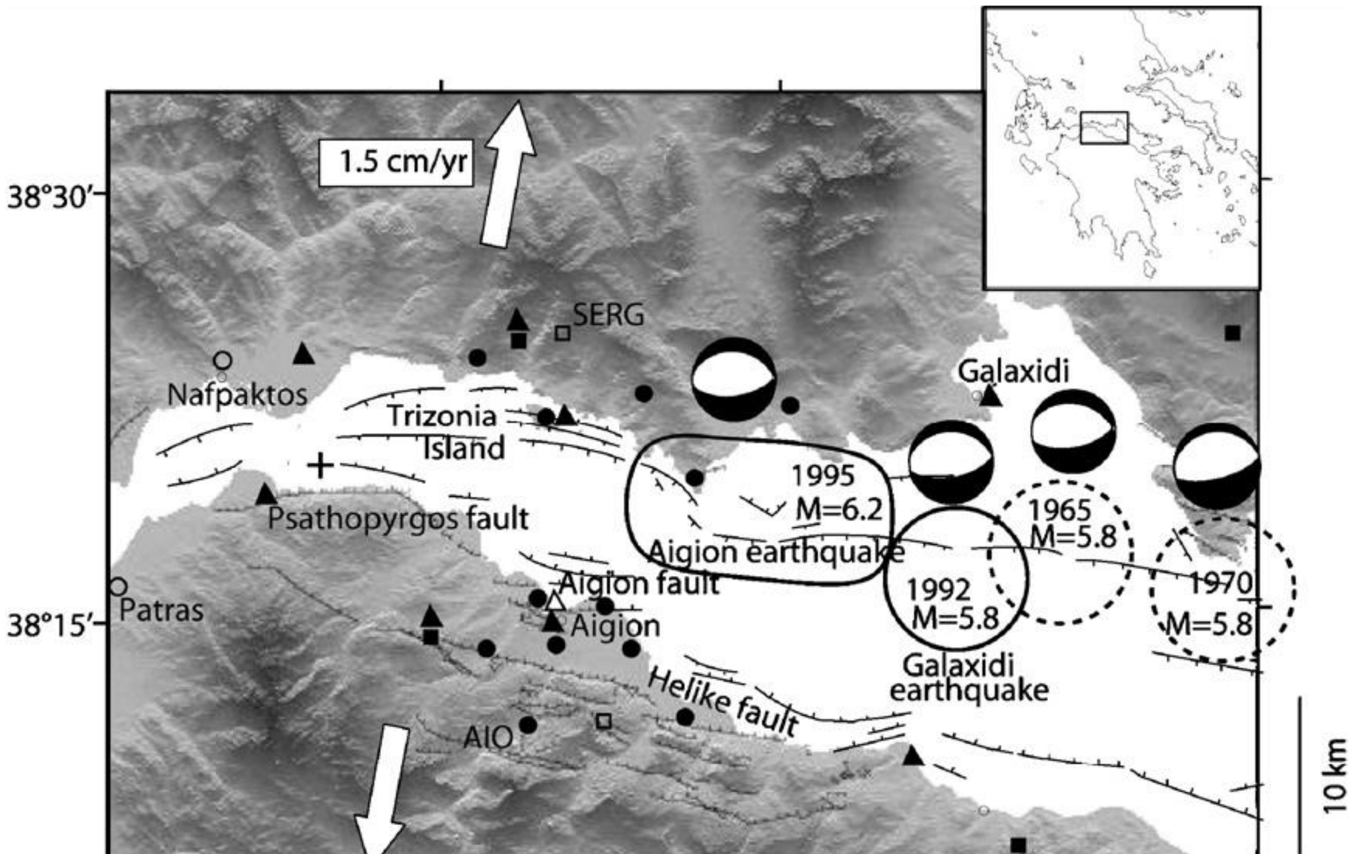
Σχήμα 2.10: Αντιστοιχία μεταξύ Μεγέθους Ροπής, M_w, (κατακόρυφος άξονας) και Μεγέθους Διάρκειας, M_d (οριζόντιος άξονας) Α) για 1193 σεισμούς της Ομάδας Α (βλέπε Κεφ. 4), Β) για 1348 σεισμούς της Ομάδας Β (βλέπε Κεφ. 4)

Κεφάλαιο 3

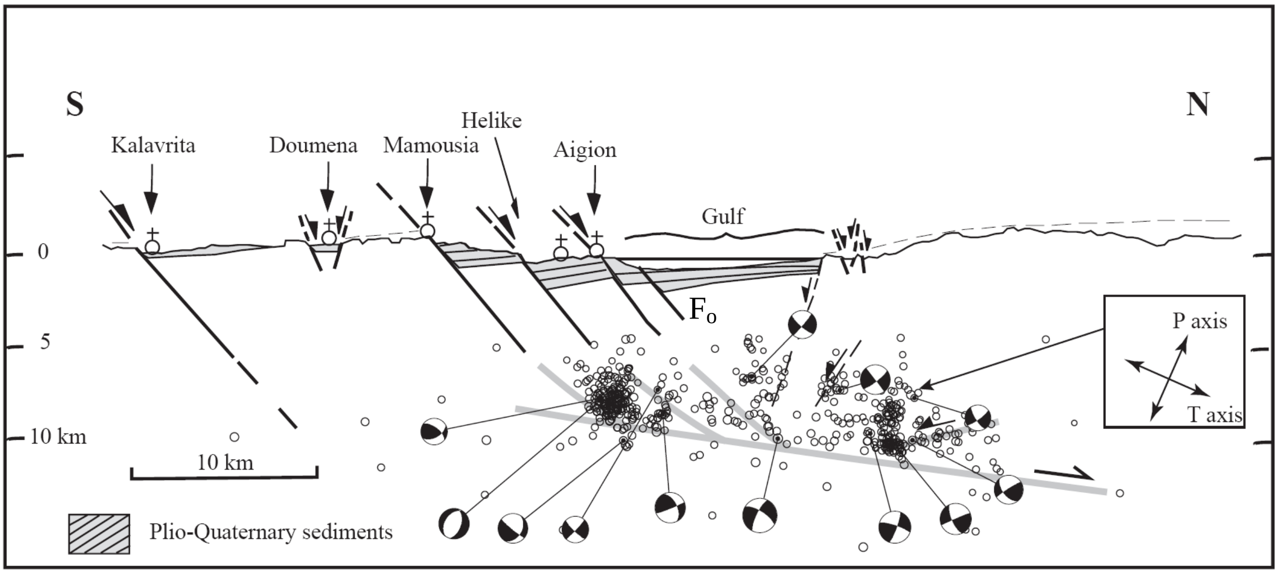
Μεθοδολογία Εντοπισμού Σμηνοσεισμών

3.1 ~ *Τεκτονική της περιοχής του Δ. Κορινθιακού κόλπου*

Στα επόμενα κεφάλαια πρόκειται να γίνει μια εξειδικευμένη μελέτη σμηνοσεισμών στον Δυτικό Κορινθιακό κόλπο, στην ευρύτερη περιοχή Αιγίου-Ερατεινής, πιο συγκεκριμένα, σε ένα τμήμα εμβαδού 30x30km^2 που καλύπτεται από το τοπικό δίκτυο CRL (*Corinth Rift Laboratory*) [3]. Η τεκτονική της περιοχής αποτελείται από ένα σύστημα κανονικών ρηγμάτων. Τα κυριότερα ενεργά ρήγματα βρίσκονται στο Νότιο τμήμα, κλίνουν προς Βορρά και έχουν μια γενική διεύθυνση E-W. Τα ρήγματα αυτά είναι ληστρικά, ξεκινώντας με γενικά μεγάλες κλίσεις στα ρηχά που καταλήγουν σε βάθος 8-12km σε μια κοινή «ρίζα» με κλίση 15±10° η οποία θεωρείται πως αποτελεί μια ζώνη αποκόλλησης (*detachment zone*) (*Bernard et al., 1997*).



Σχήμα 3.1: Η περιοχή του Δ. Κορινθιακού κόλπου με τις σεισμικές διατάξεις που έχουν εγκατασταθεί από διάφορα ινστιτούτα. Με μαύρους κύκλους σημειώνονται οι σταθμοί του δικτύου CRL, με μαύρα τετράγωνα οι σταθμοί του Πανεπιστημίου Αθηνών (ATHNET), με ανοιχτά τετράγωνα οι σταθμοί του Πανεπιστημίου Charles της Πράγας, με ανοιχτούς κύκλους οι σταθμοί του PATNET, με μαύρα τρίγωνα οι σταθμοί του RASMON και με ανοιχτά τρίγωνα οι σταθμοί του CORSSA (από την εργασία των *Bernard et al., 2006*)



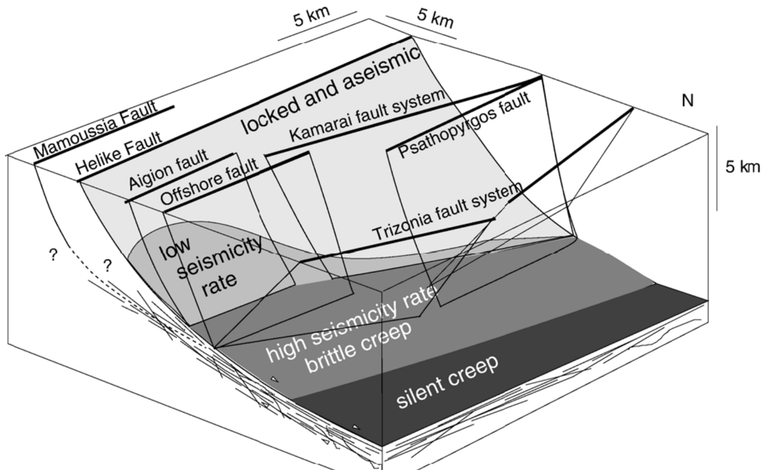
Σχήμα 3.2: τομή σε διεύθυνση S-N στην οποία φαίνεται η σεισμογενής ζώνη μαζί με ορισμένα από τα ρήγματα με επιφανειακές εκδηλώσεις κυρίως στο νότιο τμήμα του Κορινθιακού κόλπου. Σημειώνεται με F_o το παράκτιο ρήγμα που αναφέρεται στο κείμενο (από την εργασία των *Rigo et al., 1996*)

Η βορειότερη επέκταση αυτής της ζώνης εκδηλώνει διαρκή ασεισμικό ερπυσμό εξ' αιτίας του οποίου θεωρείται πως τα ρήγματα του Νότιου μέρους της λεκάνης σε βάθη μεταξύ 5-6km συγκεντρώνουν φόρτο ο οποίος απελευθερώνεται ως σεισμικός ερπυσμός που φθάνει μέχρι τα 4km (*Bernard et al., 2006*). Στο Νότιο κεντρικό τμήμα της λεκάνης ορισμένα από τα γνωστά ρήγματα με επιφανειακές εκδηλώσεις στην ξηρά είναι του Αιγίου (με μήκος επιφανειακής εκδήλωσης < 8km), της Ελίκης (μήκος<18km) της Μαμουσιάς και του Πυργακίου. Στα Δυτικά όρια, εκτός δικτύου, βρίσκεται το ρήγμα του Ψαθόπυργου με επιφανειακή εκδήλωση στην ξηρά μήκους ~12km. Εντοπίζεται Βορειότερα της αντίστοιχης εκδήλωσης του ρήγματος του Αιγίου με το οποίο «συνδέεται» μέσω του ρήγματος των Καμάρων το οποίο παρουσιάζει κλίση ~60° προς τα Βορειο-Ανατολικά (*Bernard et al., 2006*). Το ρήγμα του Ψαθόπυργου έχει δυνατότητα δημιουργίας σεισμών M6-6.6 με χαρακτηριστική ολίσθηση 0.4-1.7m, ενώ, με εξαίρεση ίσως τον σεισμό του 1917 που επηρέασε κυρίως τη Ναύπακτο, τους τελευταίους 3 αιώνες έχει παραμείνει ανενεργό. Το δυτικό τμήμα του ρήγματος της Δυτικής Ελίκης θεωρείται πλέον ανενεργό όπως προκύπτει από σεισμολογικά και γεωλογικά δεδομένα, κλειδωμένο εξ' αιτίας της μεγάλης κλίσης του γειτονικού ρήγματος των Καμάρων στα Βόρεια. Τα παράκτια ρήγματα έχουν επίσης ενδείξεις μεγάλης κλίσης (από δεδομένα σεισμικότητας) και διαφέρουν έντονα από τα μικρής κλίσης ρήγματα στα ανατολικά του κόλπου. Αυτό ερμηνεύεται ως μεταβολή στη δομή ή στη ρεολογία από τη μία περιοχή στην άλλη.

Στη σεισμική ζώνη κάτω από τον κόλπο έχουν εκδηλωθεί ισχυροί σεισμοί όπως του Γαλαξιδίου το 1992 (M5.8) και του Αιγίου το 1995 (M_L6.2) και ορισμένοι παλαιότεροι, το 1965 (M6.3) και το 1970 (M6.2) (*Makropoulos & Burton, 1980; Makropoulos et al., 1989*). Η σεισμικότητα συγκεντρώνεται κυρίως σε βάθη μεταξύ 5-10km. Το ρήγμα της Μαμμουσιάς επεκτείνεται δυτικότερα με το ρήγμα του Πυργακίου και παρουσιάζεται σχετικά ανενεργό. Η διάρρηξη κατά τον σεισμό του Αιγίου το 1995 με M_s=6.2 εκτιμάται πως συνέβη όχι στο ρήγμα του Αιγίου αλλά σε ένα παράκτιο ρήγμα (θα καλείται για ευκολία F_O). Το ρήγμα του Αιγίου εκτιμάται πως έχει μέση περίοδο σεισμικής επανάληψης 320-640 χρόνια με επιφανειακές ολισθήσεις 0.4-0.7m και μεγέθη ροπής 5.8-6.2. Παρόμοια χαρακτηριστικά αποδίδονται και στο ρήγμα F_O που μαζί με το ρήγμα του Αιγίου θεωρούνται υπεύθυνα για τους ιστορικούς σεισμούς ~M6 του 1748 και 1817 οι οποίοι αναφέρεται ότι προξένησαν τσουνάμι ύψους μερικών μέτρων.

Στο Βόρειο μέρος της λεκάνης εμφανίζονται κάποια αντιθετικά ρήγματα με κλίση προς Νότο, με σημαντικότερο από αυτά το ρήγμα των Τριζονιών. Το ενεργό αυτό ρήγμα έχει άλμα ύψους 400m, και φθάνει σε βάθος μέχρι τα 6km περίπου όπου τέμνει το παράκτιο ρήγμα F_O ερμηνεύοντας έτσι και τα παρατηρησιακά δεδομένα σεισμικότητας (*Bernard et al., 2006*). Το ρήγμα αυτό με δυνατότητα δημιουργίας σεισμού μικρότερου από M6, εκτιμάται πως διαρρήχθηκε με το σεισμό του 1909 ο οποίος προξένησε ζημιές σε χωρία σε απόσταση 10-20km Βορειο-Ανατολικά της νήσου των Τριζονιών ενώ πιο πρόσφατα το δυτικό τμήμα του εμφάνισε μια σεισμική κρίση τον Δεκέμβριο του 2002 με διάρκεια μερικών εβδομάδων και 6 σεισμούς με M_L>3.

Μια εντυπωσιακή παρατήρηση κατά αυτή τη δραστηριότητα είναι ότι ο μεγαλύτερος σεισμός της ακολουθίας (M_L3.5) δημιουργήθηκε ~2-3sec ύστερα από την κορύφωση ενός έντονου σήματος αργής συμπίεσης η οποία ξεκίνησε μισή ώρα πριν το σεισμό και διήρκεσε περίπου μία ώρα, όπως καταγράφθηκε από τα *strain-gages* του δικτύου CRL που έχουν εγκατασταθεί στα Τριζόνια. Θεωρώντας ότι το σήμα αυτό προέρχεται από την περιοχή κοντά στο υπόκεντρο του σεισμού αυτού η αντιστοιχία του σε μέγεθος ροπής είναι M_w 4.5-5.5. Αυτό υποδεικνύει ότι ο σεισμός M_L3.5 ήταν απλά ένα δευτερεύον γεγονός μιας μεγαλύτερης κλίμακας, αργής, ασεισμικής παραμόρφωσης (Παράρτημα Β, Σχήμα Β.49).



Σχήμα 3.3: Γεωμετρία ρηγμάτων στην περιοχή του Δ. Κορινθιακού κόλπου (από την εργασία των *Bernard et al., 2006*)

Στην περιοχή υπάρχουν επίσης διάφορες παλαιές, ανενεργές δομές. Ένα από τα παλαιο-ρήγματα του Νότιου τμήματος, με φορά μέγιστης κλίσης NW, θεωρείται πως ενεργοποιήθηκε κατά τη σεισμική κρίση της άνοιξης του 2001 στον Αγ. Ιωάννη (δυτικά του σταθμού AIO του δικτύου CRL και περίπου 5km Νότια της πόλης του Αιγίου). Θα εξεταστεί λεπτομερέστερα αυτή η περίπτωση στη συνέχεια του κεφαλαίου καθώς και στο Κεφάλαιο 4.

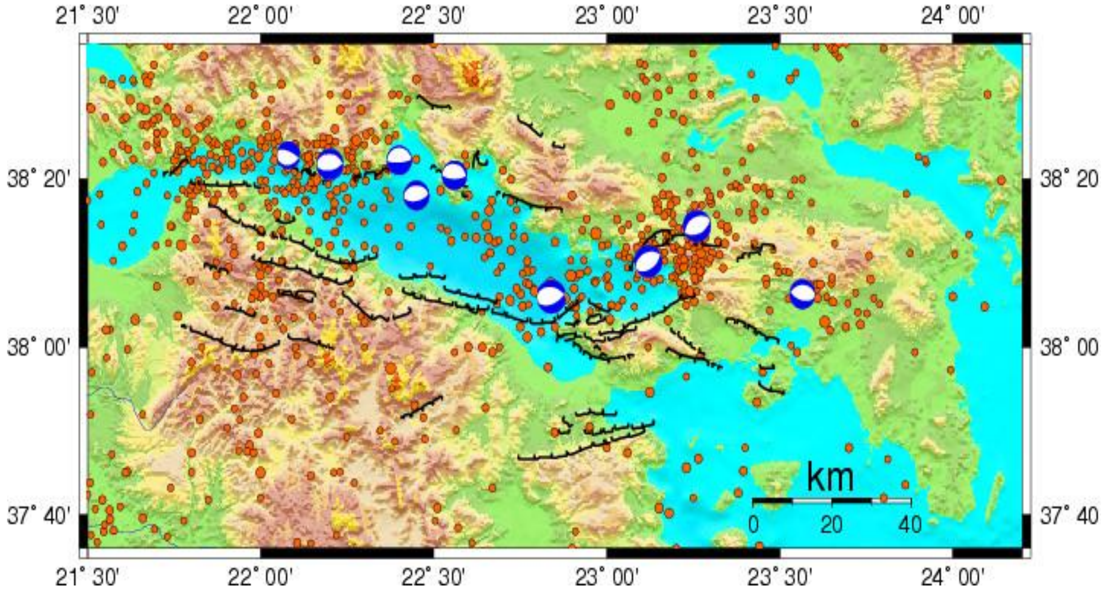
Μετρήσεις με GPS φανερώνουν μια ισχυρή βαθμίδα παραμόρφωσης με διεύθυνση NS και η σεισμική δραστηριότητα στη ζώνη αποκόλλησης (*detachment zone*) αποδίδεται ως σεισμικός ερπυσμός. Η λεκάνη εμφανίζει διάνοιξη με ρυθμό 1-1.5cm/έτος με τις κύριες τάσεις σε διεύθυνση NS. Το Βόρειο τμήμα παρουσιάζει καταβύθιση ενώ το Νότιο ανύψωση. Οι ακτογραμμές προσδίδουν αυτές τις κατακόρυφες μετακινήσεις καθώς οι Βόρειες είναι χαρακτηριστικά πολυπλοκότερες, με πολλές χερσονήσους, πιο απόκρημνες από τις Νότιες οι οποίες εμφανίζονται ομαλότερες και γραμμικότερες (*Armijo et al., 1996*). Επίσης, στον Νότο έχουν σχηματιστεί θαλάσσιες αναβαθμίδες. Η ασυμμετρία της μορφολογίας του κόλπου είναι άλλο ένα στοιχείο που φανερώνει ότι η κυρίαρχη σεισμική δραστηριότητα βρίσκεται στα ρήγματα του Νότιου μέρους που κλίνουν προς Βορρά. Η 300 ετών απουσία σεισμικής δραστηριότητας στο ρήγμα του Ψαθόπυργου το κάνει να υπολείπεται 4.5-6m ολίσθησης, όπως προκύπτει από το ρυθμό διάνοιξης της λεκάνης από μετρήσεις GPS. Καθώς όμως μια τόσο μεγάλη ολίσθηση δεν είναι συμβατή με τα γνωστά συστήματα κανονικών ρηγμάτων (το πολύ 2m) θεωρείται πως ο μεγάλος ρυθμός διάνοιξης οφείλεται σε επιταχυνόμενη κατάσταση κατά το τέλος ενός σεισμικού κύκλου. Με μέση ολίσθηση 5mm/έτος αυτό το ρήγμα υπολείπεται 1.5m ολίσθησης, κάτι που ως προς την παραμόρφωση το καθιστά να βρίσκεται στα όρια της αντοχής του.

Το παρακείμενο ρήγμα των Καμάρων, αν και η επιφανειακή του εκδήλωση είναι σχετικά πρόσφατη, εκτιμάται πως έχει ήδη αναπτυχθεί σε βάθη έως 6-8km και έχει τη δυνατότητα να επηρεάσει ή να συμμετάσχει στη διάρρηξη ενός από τα άλλα γειτονικά ρήγματα. Η ολίσθηση σε αυτό το ρήγμα μπορεί να φθάσει τα 1.3m και το μέγεθος ενός μελλοντικού σεισμού να είναι έως Μ6.4 ενώ σε συνδυασμό με κάποιο από τα γειτονικά το μέγεθος μπορεί να ανέρθει σε Μ6.7, όπως είναι πιθανόν να συνέβη με τον ιστορικό σεισμό του 1748 ή του 1817.

Το δίκτυο CRL εξαπλώνεται σε μία περιοχή 30x30km² στη δυτική πλευρά του κόλπου. Περιλαμβάνει 12 σεισμόμετρα ταχύτητας των 2Hz, 7 από τα οποία βρίσκονται στο Νότιο μέρος του Κορινθιακού και 5 στο Βόρειο. Επικεντρώνεται κυρίως στα ρήγματα του Αιγίου και της Ελίκης. Τα σεισμόμετρα στο Νότιο τμήμα έχουν τοποθετηθεί σε βάθη 60-170m για την αποφυγή των χαλαρών ιζημάτων και του ανθρωπογενούς θορύβου. Ο νοτιότερος σταθμός, AIO (Αγ. Ιωάννης), είναι εγκατεστημένος απ' ευθείας επάνω στο ασβεστολιθικό υπόβαθρο. Η συχνότητα δειγματοληψίας είναι 125Hz. Το δίκτυο συμπληρώνουν 2 σταθμοί του Πανεπιστημίου Αθηνών (LAKA και DAFN σε Λάκα και Δαφνοχώρι αντίστοιχα), ένας σταθμός του Πανεπιστημίου Charles της Πράγας σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο Πατρών (SERG, Σεργούλα), και 2 σταθμοί του Πανεπιστημίου Πατρών (SEL, PNG). Σκοπός του δικτύου είναι να παρατηρήσει και να μοντελοποιήσει τη βραχύχρονη και μακρόχρονη μηχανική του συστήματος των κανονικών ρηγμάτων της λεκάνης.

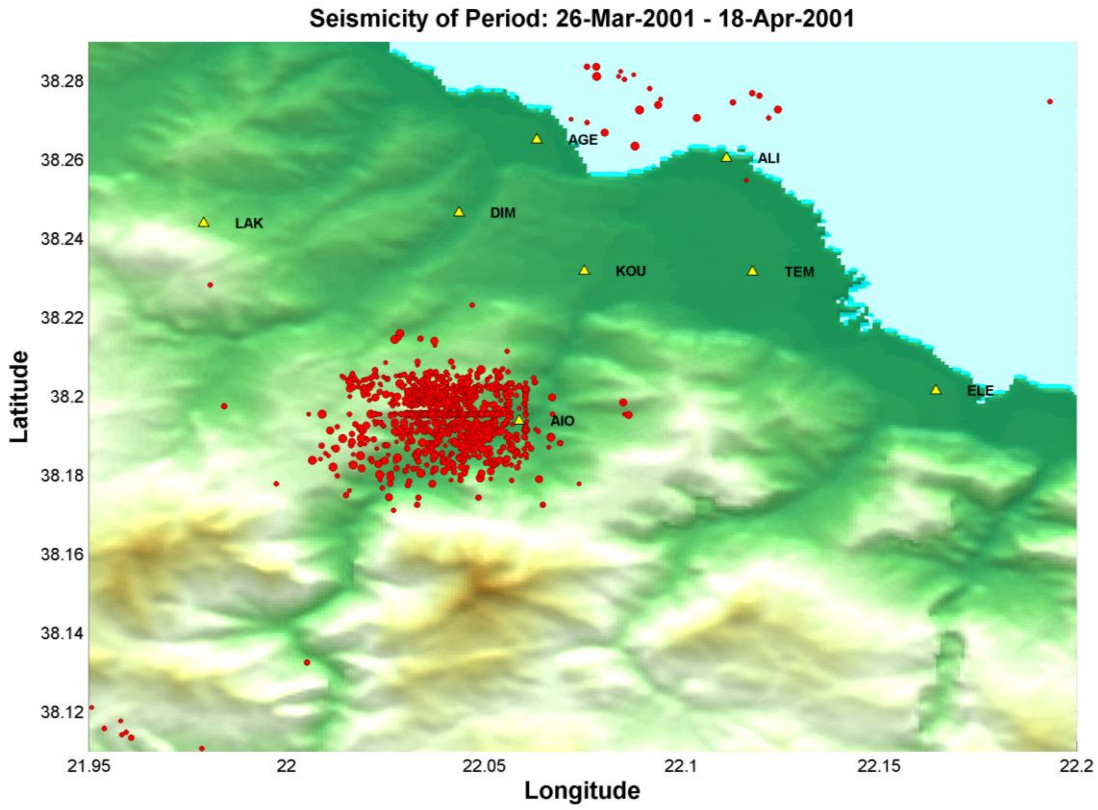
Η περιοχή αυτή επιλέχθηκε:

1) λόγω του γεγονότος ότι η παραμόρφωση εκεί είναι η μέγιστη. Ο τοπικός ρυθμός παραμόρφωσης είναι μεγαλύτερος από 10^{-6} strain (*P.Bernard et al., 2006*)
2) δεν έχει δώσει ισχυρό σεισμό (M>5.5) για πάνω από έναν αιώνα
3) βρίσκεται στο δυτικό άκρο της περιοχής διάρρηξης του σεισμού M_L6.2 του Αιγίου του 1995.
4) η περιοχή αυτή του κόλπου είναι η πιο στενή, επιτρέποντας έτσι την εγκατάσταση οργάνων στη στεριά.



Σχήμα 3.4: η ευρύτερη περιοχή του Κορινθιακού κόλπου με ορισμένους από τους κυριότερους σεισμούς που έχουν καταγραφεί τις τελευταίες δεκαετίες (από την εργασία των *Papadimitriou et al., 1994*)

3.2 ~ *Η μελέτη αυτού του κεφαλαίου*



Σχήμα 3.5: χάρτης με τα επίκεντρα των σεισμών της περιόδου 26/3/2001-18/4/2001 από τον αρχικό κατάλογο. Ξεχωρίζει στο κέντρο ο σταθμός AIO και το σμήνος σεισμών που εκδηλώθηκε κατά την περίοδο αυτή.

Η μεθοδολογία που αναπτύσσεται παρακάτω θα εφαρμοστεί αρχικά σε ένα δείγμα 1161 σεισμών που συνέβησαν κατά την περίοδο 26/3/2001-18/4/2001 (χρονικό διάστημα 24 ημερών) σε μια περιοχή 8km Νότια της πόλης του Αιγίου. Στις 8/4/2001, 06:12:24.44 συνέβη στην περιοχή ένας σεισμός M4.2 τον οποίο ακολούθησε ένα πλήθος μικρότερων. Ο όγκος στον οποίο συνέβησαν τα γεγονότα αυτά βρίσκεται πολύ κοντά σε έναν από τους σταθμούς του τοπικού δικτύου του CRL με την κωδική ονομασία AIO (Αγ.Ιωάννης). Η ύπαρξη ενός σταθμού τόσο κοντά στην κατανομή των επικέντρων θα διευκολύνει τη διαδικασία προσδιορισμού συστάδων όμοιων σεισμών καθώς ακόμα και πολύ μικροί σεισμοί έχουν τη δυνατότητα να καταγραφούν σε αυτόν χωρίς η κυματομορφή τους να περιέχει απαγορευτικά σημαντικό ποσοστό θορύβου.

Θα γίνει προσπάθεια με τη βοήθεια των όσων αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 1:

1) να εντοπιστούν οι όμοιοι σεισμοί ή σμηνοσεισμοί (*multiplets*)
2) να προσδιοριστεί ακριβέστερα η θέση τους και ο χρόνος γένεσής τους

Στο παρόν κεφάλαιο γίνει η ανάλυση που αφορά στον εντοπισμό σμηνοσεισμών και στον τρόπο με τον οποίο μπορεί να γίνει ένα είδος ομαδοποίησης ώστε να διακριθούν σε χωριστές συστάδες. Σκοπός του Κεφαλαίου είναι να αναδειχθεί η μέθοδος η οποία θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια στα Κεφάλαια 4 και 5 χωρίς τη λεπτομερή περιγραφή που θα γίνει σε αυτό το κεφάλαιο. Θα βρεθεί η προτιμώμενη τεχνική για τη μέτρηση της ομοιότητας, θα αναλυθούν ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η ομαδοποίηση και οι επιπτώσεις που έχει η χρήση ενός μόνο σταθμού στη διαδικασία *ανίχνευσης* σμηνοσεισμών.

Σε αρκετές περιπτώσεις παρακάτω θα γίνεται αναφορά σε ένα σύνολο 1085 σεισμών, αυτό διότι λόγω ενός προβλήματος με την αρχειοθέτηση λείπουν δεδομένα κυματομορφών για τις 31/3/2001, ενώ υπάρχουν τα δεδομένα φάσεων για 76 γεγονότα που συνέβησαν την ημέρα εκείνη. Για την πληρέστερη αντιμετώπιση έγινε ανάκτηση των κυματομορφών των γεγονότων της ημέρας αυτής για τον σταθμό AIO βάσει των δεδομένων των φάσεων και οι τελικές συστάδες όμοιων σεισμών έχουν προκύψει από 1134 γεγονότα (εκ των 1161 του καταλόγου που συμπεριλαμβάνουν την ημέρα 31/3/2001) για τα οποία υπήρχαν διαθέσιμες κυματομορφές στον σταθμό AIO. Το σύνολο των 1085 θα χρησιμοποιηθεί κυρίως για τη σύγκριση αποτελεσμάτων που προέκυψαν είτε από κάποιες διαφορετικές μεθόδους είτε από διαφορετικούς σταθμούς και σε αυτές τις περιπτώσεις η έλλειψη 76 γεγονότων δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Για τη μελέτη αποτελεσμάτων που αφορούν αποκλειστικά τον σταθμό AIO θα χρησιμοποιείται το πλήρες σύνολο των 1161 σεισμών του καταλόγου ή των 1134 σεισμών με διαθέσιμες κυματομορφές για τον σταθμό AIO. Όπου χρειάζεται θα αναφέρονται αυτά τα νούμερα για διευκρίνιση. Το μοντέλο ταχυτήτων που χρησιμοποιήθηκε (*Papadimitriou et al., 2002*) βρίσκεται στο Σχήμα Β.58. (Εναλλακτικά μοντέλα στα Σχήματα Β.51, Β.52)

3.3 ~ Κατασκευή Πινάκων Συσχέτισης

Σε πρώτο στάδιο, λόγω της μικρής υποκεντρικής απόστασης του σταθμού AIO από τους σεισμούς του δείγματός και των γενικά καθαρών σημάτων που παρέχει αυτός ο σταθμός για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο, η προσοχή θα εστιαστεί στην ανάλυση της Z συνιστώσας των σημάτων η οποία θα χρησιμοποιηθεί για να διακριθούν οι όμοιοι σεισμοί. Διατίθενται για όλα τα σήματα οι χρόνοι άφιξης των κυμάτων P, η διάρκεια του σήματος από την οποία υπολογίζεται το μέγεθος M_d του σεισμού μέσω της εξ. 2.18, και, φυσικά, οι κυματομορφές με συχνότητα δειγματοληψίας f_s=125samples/sec.

Οι κυματομορφές αποκόπτονται και διατηρείται μόνο το τμήμα μεταξύ της άφιξης του κύματος P και του τέλους του σήματος που καθορίζεται από τη διάρκεια. Αυτό γίνεται για να αποφευχθούν οι περιπτώσεις στις οποίες σε 1 αρχείο κυματομορφής που αντιστοιχεί σε 1 γεγονός εμπεριέχονται τα σήματα 2 ή περισσότερων σεισμών. Προσοχή χρειάζεται σε ορισμένες περιπτώσεις στις οποίες εντός της διάρκειας ενός σεισμού εμπεριέχεται και κάποιος δεύτερος σεισμός. Όλα τα αρχεία πρέπει να ελεγχθούν μη-αυτόματα πριν μπουν στην επόμενη διαδικασία.

Στον κάθε σεισμό του οποίου η κυματομορφή είναι διαθέσιμη δίνεται ένας **αριθμός ταυτοποίησης** ή Event-ID (*identity*), βάσει της σειράς του στον κατάλογο που δημιουργείται και στη συνέχεια ξεκινάει μια σαρωτική διαδικασία στις κυματομορφές: κάθε σήμα $\mathbf{S_i}$ συγκρίνεται με όλα τα υπόλοιπα $\mathbf{S_j}$ που έχουν μεγαλύτερο ή ίσο αριθμό ταυτοποίησης j από το ίδιο (j≥i).

Υπολογίζονται και καταχωρούνται σε πίνακες που θα συμβολίζονται με τις ονομασίες εντός παρενθέσεων ($\mathbf{A_x}$, $\mathbf{A_d}$, $\mathbf{A_c}$ κτλ.) τα παρακάτω στοιχεία:

1) $(\mathbf{A_x})_{ij}$: Η τιμή του ολικού μεγίστου της ετεροσυσχέτισης ($\mathbf{XC_{max}}$)
2) $(\mathbf{A_d})_{ij}$: Η τιμή της χρονικής καθυστέρησης στην οποία αντιστοιχεί αυτό το μέγιστο ($\boldsymbol{\tau_m}$)
3) $(\mathbf{A_c})_{ij}$: Η τιμή της μέσης συνοχής, $\mathbf{m_{coh}}$, των 2 σημάτων στην περιοχή 2-15Hz ύστερα από στοίχιση σε χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$
4) $(\mathbf{A_s})_{ij}$: Η τιμή της συσχέτισης μεταξύ των δύο κλάδων της ετεροσυσχέτισης εκατέρωθεν της ευθείας που αντιστοιχεί στη χρονική καθυστέρηση $\boldsymbol{\tau_m}$ (βλ. αναλυτικότερα στη συνέχεια)

5) $(\mathbf{A_f})_{ij}$: Ο λόγος της μέσης απόλυτης τιμής του πραγματικού προς εκείνης του φανταστικού μέρους των συντελεστών Fourier του ετεροφάσματος ύστερα από στοίχιση των σημάτων σε χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ (βλ. αναλυτικότερα στη συνέχεια)
6) $(\mathbf{A_a})_{ij}$: Ο απλός συντελεστής γραμμικής συσχέτισης ανάμεσα σε μια περιοχή γύρω από το $\boldsymbol{\tau_m}$ και στην αντίστοιχη περιοχή γύρω από τη συνάρτηση αυτοσυσχέτισης του $\mathbf{S_i}$
7) $(\mathbf{A_b})_{ij}$: Ο αντίστοιχος συντελεστής γραμμικής συσχέτισης μεταξύ ετεροσυσχέτισης και αυτοσυσχέτισης του $\mathbf{S_j}$.
8) $(\mathbf{A_m})_{ij}$: Η διαφορά ανάμεσα στις τιμές των 2 δευτερευόντων τοπικών μεγίστων εκατέρωθεν του $\boldsymbol{\tau_m}$.
9) $(\mathbf{A_p})_{ij}$: Η διαφορά ανάμεσα στην τιμή $\mathbf{XC_{max}}$ και στο μεγαλύτερο από τα 2 δευτερεύοντα τοπικά μέγιστα.
10) $(\mathbf{A_{xc}})_{ij}$: Η διορθωμένη τιμή του μεγίστου της ετεροσυσχέτισης $(\mathbf{A_x})_{ij}$ βάσει της σχέσης 1.3

Στο **4^o βήμα** των υπολογισμών ($\mathbf{A_s}$) γίνεται μια προσέγγιση της συμμετρικότητας της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης με τον εξής τρόπο:

a) τα δύο σήματα κανονικοποιούνται
b) υπολογίζεται η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης και η χρονική καθυστέρηση $\boldsymbol{\tau_m}$ που αντιστοιχεί στο μέγιστό της, $\mathbf{XC_{max}}$
c) ύστερα από στοίχιση των κυματομορφών σε χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ γίνεται επαναϋπολογισμός της συνάρτησης XC ώστε να είναι $\boldsymbol{\tau_m}$=0 (εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο διορθωτικός παράγοντας της εξ. 1.3 σε όλο το εύρος τιμών της XC προκειμένου να μειωθεί η παραμόρφωση λόγω της περιβάλλουσας).
d) επιλέγεται ένα περιορισμένο παράθυρο χρονικών καθυστερήσεων γύρω από το μέγιστο στο οποίο θα εξεταστεί η συμμετρία
e) Χωρίζεται το παράθυρο σε δύο κλάδους με κέντρο τον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$, και αντιστρέφεται η σειρά των δειγμάτων του αριστερού κλάδου ως προς τον θεωρούμενο άξονα συμμετρίας t=$\boldsymbol{\tau_m}$ ώστε ο αριστερός να «ταυτιστεί» με τον δεξιό κλάδο.
f) Υπολογίζεται ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των 2 καμπυλών

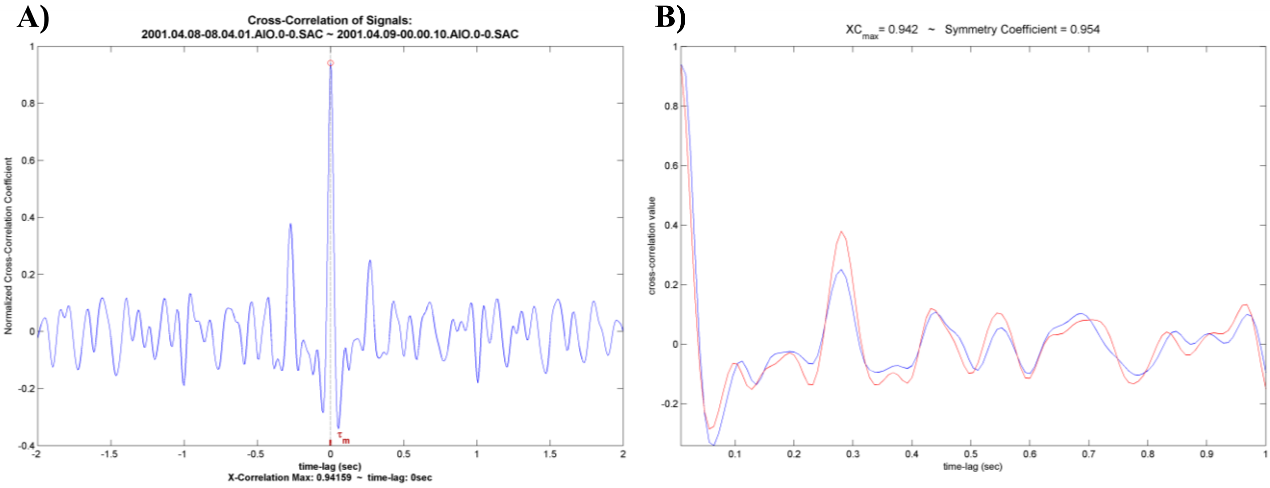
Το **5^o βήμα** ($\mathbf{A_f}$) αναφέρεται στην ποσοτικοποίηση της αρτιότητας της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης. Όπως προηγούμενα, αφού βρεθεί το $\boldsymbol{\tau_m}$ και επαναϋπολογιστεί η ετεροσυσχέτιση επιλέγεται μια ορισμένη χρονική περιοχή γύρω από το μηδέν (αφού πλέον $\boldsymbol{\tau_m}$=0) ενώ πρέπει να διατίθεται ίσος αριθμός δειγμάτων πριν και μετά το $\boldsymbol{\tau_m}$, ή με άλλα λόγια ο συνολικός αριθμός δειγμάτων πρέπει να είναι περιττός με το κεντρικό δείγμα να αντιστοιχεί στο $\mathbf{XC_{max}}$. Εκτελείται ο μετασχηματισμός Fourier και για κάθε συντελεστή υπολογίζεται η απόλυτη τιμή του πραγματικού και του φανταστικού μέρους ξεχωριστά. Στη συνέχεια υπολογίζεται η μέση τιμή του καθενός σε μια περιοχή συχνοτήτων από 1-15Hz και διαιρείται η μέση τιμή του πραγματικού με εκείνη του φανταστικού. Αν η ταύτιση των κυματομορφών είναι επαρκώς καλή τότε η μέση απόλυτη τιμή του φανταστικού μέρους θα είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του πραγματικού και ο λόγος θα έχει γενικά τιμές μεγαλύτερες από 1. Στην ιδανική περίπτωση απόλυτης συμμετρίας ο λόγος αυτός απειρίζεται καθώς το φανταστικό μέρος θα είναι μηδέν, γι' αυτό πρέπει να τίθεται κάποιο όριο για το μέγιστο που μπορεί να πάρει αυτή η τιμή.

Στα **βήματα 6 ή 7** γίνεται η σύγκριση μεταξύ της ετεροσυσχέτισης των 2 σημάτων και της αυτοσυσχέτισης του 1^{ου} σήματος ή του 2^{ου} σήματος αντίστοιχα. Αυτό αναφέρθηκε ήδη στο 1^o Κεφάλαιο (Σχήμα 1.7) όπου έγινε η παρατήρηση ότι η ετεροσυσχέτιση δύο όμοιων χρονοσειρών οφείλει να μοιάζει με την αυτοσυσχέτιση της κάθε επιμέρους χρονοσειράς σε μια περιοχή γύρω από το μέγιστο.

Στο **βήμα 8** υπολογίζεται ένα μέτρο «ασυμμετρίας» της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης με τη διαφορά ανάμεσα στα δύο δευτερεύοντα τοπικά μέγιστα. Στην ιδανική περίπτωση της αυτοσυσχέτισης, η οποία είναι απόλυτα συμμετρική, η διαφορά αυτή είναι εξ’ ορισμού μηδέν. Στην ετεροσυσχέτιση, ακόμα και σε περιπτώσεις εξαιρετικής ομοιότητας ανάμεσα στις δύο κυματομορφές, η διαφορά αυτή προσεγγίζει έως ένα βαθμό το μηδέν χωρίς όμως να ταυτίζεται με αυτό.

Ο υπολογισμός που γίνεται στο **9^{o} βήμα** προέκυψε από την εμπειρική παρατήρηση ότι στις περιπτώσεις όμοιων σεισμών, ακριβώς λόγω της γενικά μη-περιοδικής μορφής που έχει η καταγραφή ενός σεισμού, το ολικό μέγιστο $\mathbf{XC_{max}}$ είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερο από τα δευτερεύοντα τοπικά μέγιστα (είτε ως προς το μεγαλύτερο από τα δύο είτε ως προς τη μέση τιμή τους). Το πόσο μεγαλύτερο θα είναι το $\mathbf{XC_{max}}$ εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις τιμές που εμφανίζουν τα αντίστοιχα δευτερεύοντα τοπικά μέγιστα στις συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης των δύο σημάτων. Συνήθως η όποια μείωση μπορεί να παρουσιάζουν τα δευτερεύοντα μέγιστα της ετεροσυσχέτισης είναι μικρότερη από τη μείωση που εμφανίζει το ολικό μέγιστο $\mathbf{XC_{max}}$ ως προς τη μονάδα, δηλαδή ως προς το ολικό μέγιστο της αυτοσυσχέτισης.

A) B)



Σχήμα 3.6: A) ετεροσυσχέτιση σημάτων από ένα ζεύγος όμοιων σεισμών (2001.04.08-08.04.01.AIO.0-0 και 2001.04.09-00.00.10.AIO.0-0) με μέγιστο . B) Υπολογισμός συντελεστή συμμετρίας από τους δύο κλάδους εκατέρωθεν του μεγίστου της ετεροσυσχέτισης σε ένα εύρος τιμών χρονικής καθυστέρησης ±1sec. Ο μέγιστος συντελεστής ετεροσυσχέτισης είναι $\mathbf{XC_{max}}$=0.941 ενώ ο συντελεστής συμμετρίας 0.954.

Στο τέλος της διαδικασίας έχουν δημιουργηθεί 9 άνω-τριγωνικοί πίνακες διαστάσεων 1085x1085 με όλα τα στοιχεία της διαγωνίου εξ’ ορισμού 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0 και 1 για τους πίνακες $\mathbf{A_x}$, $\mathbf{A_d}$, $\mathbf{A_c}$, $\mathbf{A_s}$, $\mathbf{A_a}$, $\mathbf{A_b}$, $\mathbf{A_m}$ και $\mathbf{A_{xc}}$ αντίστοιχα. Στον πίνακα $\mathbf{A_p}$ τα στοιχεία της διαγωνίου δίνουν τη διαφορά ανάμεσα στο ολικό μέγιστο και το δευτερεύον τοπικό μέγιστο της *αυτο*συσχέτισης του αντίστοιχου σήματος (i=j) και αυτά τα στοιχεία θα βοηθήσουν παρακάτω ώστε να διορθωθούν τα υπόλοιπα του ίδιου πίνακα.

Αντιγράφονται τα στοιχεία του άνω-τριγωνικού τμήματος του κάθε πίνακα στο κάτω-τριγωνικό μέρος μετατρέποντάς τους σε συμμετρικούς με εξαίρεση τον πίνακα $\mathbf{A_d}$ στον οποίο τα στοιχεία που αντιγράφονται στο κάτω τριγωνικό μέρος πολλαπλασιάζονται με το -1 κάνοντάς τον αντι-συμμετρικό, καθώς εάν αλλάξει η σειρά των χρονοσειρών στη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης (στην εξίσωση 1.4 όπου το x αντικατασταθεί από το y και αντίστροφα) τότε η χρονική καθυστέρηση $\boldsymbol{\tau_m}'$ που θα προκύψει θα είναι αντίθετη από την αρχική: $\boldsymbol{\tau_m'=-\tau_m}$. Εξαίρεση αποτελούν και οι πίνακες $\mathbf{A_a}$, $\mathbf{A_b}$ καθώς ύστερα από τον υπολογισμό μόνο του άνω τριγωνικού μέρος του καθενός, αυτό αναστρέφεται και αντιγράφεται στο κάτω τριγωνικό μέρος του *άλλου* πίνακα σχηματίζοντας μη-συμμετρικούς πίνακες οι οποίοι όμως έχουν την ιδιότητα $\mathbf{A_a=A_b^T}$. Μπορεί να παραβλεφθεί όμως αυτή τη διαδικασία και να σχηματιστούν συμμετρικοί ψευδοπίνακες $\mathbf{A_a}'$, $\mathbf{A_b}'$ με όμοιο τρόπο όπως έγινε π.χ. για τον πίνακα $\mathbf{A_x}$. Ο πίνακας που ενδιαφέρει είναι ένας πίνακας με τη μέση τιμή των αντίστοιχων στοιχείων των πινάκων A_a, A_b που ονομάζεται συμβολικά $\mathbf{A_a{\sim}A_b}$ (Σχήμα 3.8$_{\Delta}$). Αυτός ο πίνακας χρησιμοποιείται στη συνέχεια για τον υπολογισμό του πίνακα ομοιότητας $\mathbf{XC_s}$, ώστε να ληφθούν υπόψη στον ίδιο βαθμό οι τιμές και των 2 πινάκων, $\mathbf{A_a}$, $\mathbf{A_b}$.

Οι πίνακες $\mathbf{A_x}$ και $\mathbf{A_c}$ αναμένεται να δώσουν μια παρόμοια εικόνα καθώς θεωρείται ότι τόσο το $\mathbf{XC_{max}}$ όσο και η μέση συνοχή, $\mathbf{m_{coh}}$, αποτελούν μέτρα της ομοιότητας μεταξύ των σημάτων βάσει των όσων αναφέρθηκαν στο 1^{o} Κεφάλαιο, ενώ οι πίνακες $\mathbf{A_s}$, $\mathbf{A_f}$, $\mathbf{A_a}$ και $\mathbf{A_b}$ αναμένεται, ο καθένας από αυτούς με το δικό του τρόπο, να δείξουν το βαθμό συμμετρίας των δύο κλάδων της ετεροσυσχέτισης, που θεωρείται ως μια επιπλέον προϋπόθεση για τον χαρακτηρισμό δύο σημάτων ως όμοιων. Οι τιμές του Πίνακα $\mathbf{A_d}$ θα χρησιμεύσουν στον επαναπροσδιορισμό των υποκέντρων και των χρόνων γένεσης των σεισμών καθώς αποτελούν μια λεπτομερή διόρθωση στον χρόνο άφιξης των P ή S κυμάτων ανάλογα με την αρχική στοίχιση. Στην πράξη ο προϋπολογισμός αυτού του πίνακα δεν είναι απαραίτητος για τη διαδικασία ανίχνευσης όμοιων σεισμών, το μόνο που παρέχει είναι η χρονική καθυστέρηση της βέλτιστης ταύτισης ($\boldsymbol{\tau_m}$) ολόκληρων των σημάτων ξεκινώντας από μια τυχαία αρχική στοίχιση όποια και αν είναι αυτή. Η χρησιμότητα του πίνακα $\mathbf{A_d}$ και γενικότερα των τιμών $\boldsymbol{\tau_m}$ θα φανεί όταν εξεταστούν χωριστά οι κυματομορφές P ή S ανάμεσα σε σήματα που είναι ήδη γνωστό ότι ανήκουν σε όμοιους σεισμούς (όπως έχει προκύψει από την αρχική τους επεξεργασία) και με αρχική στοίχιση σε καθορισμένες χρονικές στιγμές, στους προσδιορισμένους χρόνους άφιξης των κυμάτων P ή S του κάθε σεισμού αντίστοιχα ανά τον κάθε σταθμό και συνιστώσα. Η στοίχιση αυτή θα φανεί στην ενότητα 3.6 στην οποία εξετάζεται η τμηματική ταύτιση των κυματομορφών (Σχήματα 3.36, 3.37).

Εδώ θα πρέπει να προστεθεί μια λεπτομέρεια: η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης μπορεί να πάρει αρνητικές τιμές. Αυτό είναι προφανές αφού δύο σήματα μπορεί να εμφανίζουν αρνητική συσχέτιση μεταξύ τους είτε τοπικά, σε ορισμένες χρονικές καθυστερήσεις, είτε εξ' ολοκλήρου, οπότε το θετικό $\mathbf{XC_{max}}$ δε θα δίνει τη σημαντική πληροφορία, αλλά το αντίστοιχο ολικό ελάχιστο, το οποίο καλείται $XC_{\mathbf{min}}$ με την αντίστοιχη χρονική καθυστέρηση $\boldsymbol{\tau_{min}}$ στην οποία βρίσκεται, δείχνει ότι τα δύο σήματα έχουν κάποια συσχέτιση μεταξύ τους, αν και αρνητική. Εάν το $\mathbf{XC_{min}}$ είναι αρκετά ισχυρό και $|\mathbf{XC_{min}}| > \mathbf{XC_{max}}$ τότε δε πρέπει να αγνοηθεί. Αυτό αποτελεί μια ιδιαίτερη περίπτωση στην οποία τα σήματα είναι όμοια αλλά με αντίθετη πολικότητα η οποία θα εξεταστεί στο Παράρτημα Α.4 καθώς έχουν εντοπιστεί τέτοια σήματα. Για τον λόγο αυτό στην κατασκευή των πινάκων ετεροσυσχέτισης μπορεί να ληφθεί υπόψη και το αρνητικό τμήμα της ετεροσυσχέτισης, αναζητώντας το ολικό απόλυτο μέγιστο και στη συνέχεια διατηρώντας το πραγματικό του πρόσημο +/-. Εάν ενδιαφέρει μόνο το θετικό μέγιστο μπορούν στη συνέχεια να μηδενιστούν οι αρνητικές τιμές του πίνακα $\mathbf{A_x}$ και έτσι να αγνοηθούν εντελώς τα ζεύγη σημάτων στα οποία $|\mathbf{XC_{min}}| > \mathbf{XC_{max}}$ όσο και αν είναι το $\mathbf{XC_{min}}$ ή το $\mathbf{XC_{max}}$. Στις περιπτώσεις που λαμβάνεται το $\mathbf{XC_{min}}$ αντί για το $\mathbf{XC_{max}}$ θα πρέπει να αντιμετωπιστούν με ανάλογο τρόπο *και* οι τιμές των πινάκων $\mathbf{A_a}$, $\mathbf{A_b}$ και $\mathbf{A_p}$ οι οποίες θα αναφέρονται πλέον στα δευτερεύοντα τοπικά ελάχιστα της ετεροσυσχέτισης αυτών των ζευγών σημάτων.

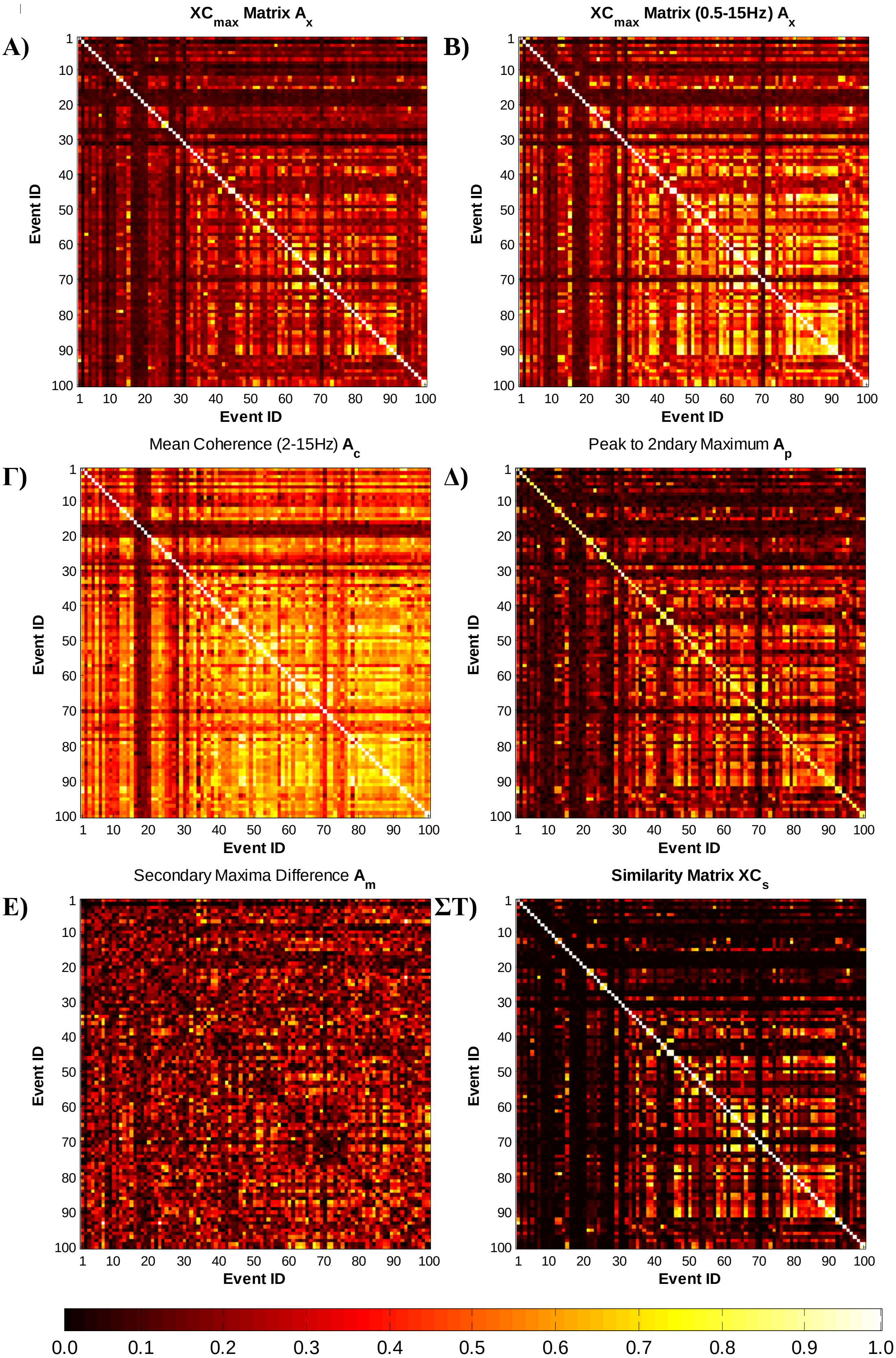
Σε αυτό το τμήμα της εργασίας θα χρησιμοποιούνται μόνο τα θετικά ολικά και δευτερεύοντα μέγιστα της ετεροσυσχέτισης, αλλά για λόγους πληρότητας στα διαγράμματα σύγκρισης πινάκων θα περιλαμβάνονται και όσα ζεύγη σημάτων εμφανίζουν $|\mathbf{XC_{min}}| > \mathbf{XC_{max}}$ και στα οποία έχει διατηρηθεί το αρνητικό ολικό ελάχιστο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται σχηματικά οι πίνακες που προαναφέρθηκαν για τα πρώτα 100 γεγονότα του δείγματος (Σχήματα 3.7, 3.8, 3.9). Η παρουσίαση των πινάκων γίνεται σε μορφή εικόνας όπου το κάθε εικονοστοιχείο (*pixel*) που βρίσκεται σε συντεταγμένες (i,j) αντιπροσωπεύει το αντίστοιχο ζεύγος γεγονότων/στοιχείο (i,j) του πίνακα στον οποίο αναφέρεται ενώ το χρώμα του μεταφράζεται σε αριθμητική τιμή βάσει της χρωματικής κλίμακας η οποία είναι κοινή για όλους τους πίνακες και καλύπτει τις τιμές από 0 μέχρι 1.

Στα σχήματα $3.7_{A,B}$ φαίνονται οι τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς κατά ζεύγη των πρώτων 100 γεγονότων του δείγματος από το «Σμήνος του ΑΙΟ (2001)», από καταγραφές της Z-συνιστώσας του σταθμού AIO. Η διαφορά μεταξύ Σχ. 3.7_A και 3.7_B είναι ότι οι χρονοσειρές που έδωσαν τον πίνακα $\mathbf{A_x}'$ (Σχ. 3.7_B) είχαν περαστεί πρώτα από ένα ζωνοπερατό φίλτρο Butterworth 2^{ης} τάξεως στις συχνότητες μεταξύ 0.5-15Hz, δηλαδή τόσο οι συχνότητες που είναι μικρότερες από 0.5Hz όσο και αυτές που είναι μεγαλύτερες από 15Hz έχουν πρακτικά αποκοπεί. Η γενική εικόνα στους δύο πίνακες παραμένει η ίδια: φαίνονται κάποιες σκοτεινές περιοχές με μαύρο προς σκούρο κόκκινο χρώμα και κάποιες φωτεινές περιοχές με πορτοκαλί προς κίτρινο και προς λευκό χρώμα. Φαίνεται επίσης μια διαγώνια λευκή γραμμή και στους δύο πίνακες. Οι εικόνες αυτές είναι γραφικές αναπαραστάσεις τετραγωνικών πινάκων διαστάσεων 100x100. Η σειρά των εικονοστοιχείων της κάθε εικόνας διαβάζοντάς την από πάνω-δεξιά προς τα αριστερά ανά γραμμή και προς τα κάτω ανά στήλη, είναι η ίδια σειρά με την οποία διατάσσονται τα αντίστοιχα στοιχεία του πίνακα. Ο αριθμός ταυτοποίησης του γεγονότος (Event ID) αναγράφεται αριστερά από κάθε πίνακα, για τις γραμμές του, και κάτω από κάθε πίνακα για τις στήλες του, όπου φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αρίθμηση. Η λευκή διαγώνιος αντιπροσωπεύει ακριβώς τη διαγώνιο του κάθε πίνακα, τα στοιχεία της οποίας (i,j) στην περίπτωση των πινάκων $\mathbf{A_x}$, $\mathbf{A_{x'}}$ είναι εξ' ορισμού ίσα με τη μονάδα, καθώς πρόκειται για το ολικό μέγιστο της αυτοσυσχέτισης του κάθε γεγονότος (για i=j).

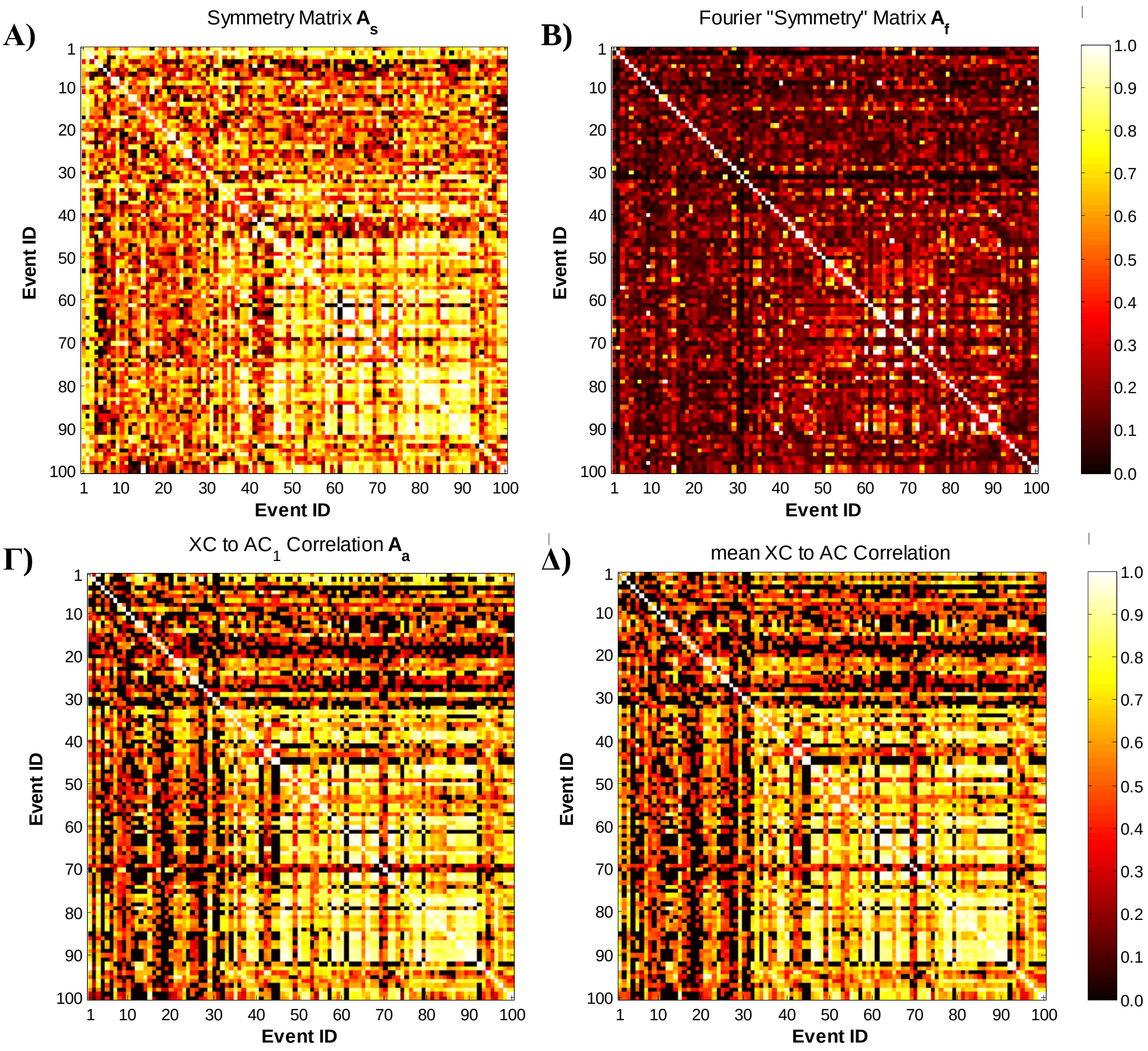
Με ανάγνωση του πίνακα από πάνω προς τα κάτω για μια ορισμένη στήλη **j** ή από αριστερά προς τα δεξιά για μια ορισμένη γραμμή **i**, διακρίνεται η συσχέτιση του κάθε γεγονότος **j** ή **i** αντίστοιχα με όλα τα υπόλοιπα και με διαδοχική σειρά χρόνων γένεσης. Βλέποντας τα στοιχεία της διαγωνίου από πάνω-αριστερά προς τα κάτω-δεξιά γίνεται μετάβαση από παλαιότερα προς μεταγενέστερα γεγονότα και γύρω από το κάθε στοιχείο της διαγωνίου φαίνεται η συσχέτιση των κυματομορφών του αντίστοιχου γεγονότος i=j με τα χρονικώς-γειτονικά του γεγονότα. Είναι σύνηθες φαινόμενο η εμφάνιση των σμηνοσεισμών (*multiplets*) να είναι τόσο χωρική όσο και χρονική, με πιο γνωστές τις μετασεισμικές ακολουθίες οι οποίες ενεργοποιούνται ύστερα από τη γένεση του κύριου σεισμού, μέσα σε στενά χρονικά πλαίσια. Ο πλήρης πίνακας $\mathbf{A_x}$ για το δείγμα 1134 γεγονότων από το σμήνος του ΑΙΟ παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β, Σχήμα Β.1. Σημειώνεται ότι, καθώς πρόκειται για μία αρκετά χωρικά περιορισμένη συστάδα γεγονότων, αναμένεται πολλοί από τους σεισμούς που την απαρτίζουν να εμφανίζουν όμοια σήματα, άρα ο αντίστοιχος πίνακας $\mathbf{A_x}$ να είναι γενικά έντονος (χρωματικά). Τα 100 πρώτα γεγονότα των πινάκων αναφέρονται σε ημερομηνίες μεταξύ 26/3/2001 – 29/3/2001 (όλοι πριν από τον κύριο σεισμό της 8/4/2001).

Ο πίνακας μέσης συνοχής (2-15Hz), $\mathbf{A_c}$ (Σχήμα 3.7$_{\Gamma}$), εμφανίζει γενικά εντονότερα χρώματα από τους πίνακες $\mathbf{A_x}$, $\mathbf{A_{x'}}$ (Σχήματα 3.7$_{A,B}$). Αν γινόταν σύγκριση των δύο αυτών πινάκων ($\mathbf{A_x}$, $\mathbf{A_c}$) σε μια μονοχρωματική κλίμακα διαβαθμιζόμενη από μαύρο προς λευκό (χωρίς κόκκινο/κίτρινο ενδιάμεσα) θα φαινόταν ότι οι δύο εικόνες εκ πρώτης όψεως μοιάζουν μεταξύ τους με τη διαφορά ότι η εικόνα του $\mathbf{A_c}$ παρουσιάζει μικρότερη χρωματική αντίθεση (χαμηλό *contrast*) σε σχέση με την εικόνα του $\mathbf{A_x}$. Δηλαδή, το υπόβαθρο των χαμηλά συσχετιζόμενων ζευγών γεγονότων είναι αυξημένο στην εικόνα του $\mathbf{A_c}$. Παρατηρείται επίσης κάτι κοινό: οι πίνακες εμφανίζουν κάποιες σκούρες ζώνες κοντά στην αρχή τους. Στον πίνακα $\mathbf{A_c}$ αυτό φαίνεται πιο έντονα και εδώ μπορεί να επισημανθεί ότι τόσο η οριζόντια σκούρα ζώνη όσο και η κατακόρυφη αντιστοιχούν ακριβώς στα ίδια ζεύγη γεγονότων καθώς ο πίνακας είναι συμμετρικός. Οι ζώνες αυτές πιθανόν οφείλονται είτε στο γεγονός ότι οι σεισμοί αυτοί βρίσκονται εκτός της συστάδας του ΑΙΟ (τα γεγονότα έχουν επιλεχθεί αποκλειστικά βάσει της χρονικής τους κατανομής) είτε είναι πιθανόν οι καταγραφές αυτές να περιέχουν μόνο θόρυβο και έτσι να μη μπορούν να συσχετιστούν με κανένα άλλο γεγονός.

Ο πίνακας $\mathbf{A_p}$ (Σχήμα 3.7$_{\Delta}$) εμφανίζει εντυπωσιακή ομοιότητα με τους πίνακες $\mathbf{A_x}$. Η διαφορά του ολικού μεγίστου, $\mathbf{XC_{max}}$, από τα δευτερεύοντα μέγιστα γύρω από αυτό μοιάζει να σχετίζεται άμεσα με το ίδιο το $\mathbf{XC_{max}}$, και αυτό ακούγεται λογικό. Ωστόσο, αν παρατηρηθεί η διαγώνιος φαίνεται ότι έχει κίτρινο χρώμα. Η διαγώνιος αναφέρεται στην αυτοσυσχέτιση των γεγονότων και η διαφορά της από τη μονάδα οφείλεται στο ότι ενώ το μέγιστο της αυτοσυσχέτισης είναι μονάδα, τα δευτερεύοντα μέγιστα δεν είναι μηδενικά, άρα η διαφορά τους είναι πάντα μικρότερη από τη μονάδα και θα πρέπει να γίνει μια διόρθωση προτού ο πίνακας $\mathbf{A_p}$ δώσει χρήσιμη πληροφορία.



Σχήμα 3.7: Πίνακες για τα πρώτα 100 γεγονότα του δείγματος από το σμήνος του ΑΙΟ (2001). Α) (Πίνακας $\mathbf{A_x}$): $\mathbf{XC_{max}}$ ολόκληρων, αφιλτράριστων σημάτων, Β) (Πίνακας $\mathbf{A_{x'}}$): $\mathbf{XC_{max}}$ ολόκληρων, *φιλτραρισμένων* κυματομορφών (0.5-15Hz), Γ) (Πίνακας $\mathbf{A_c}$): Μέση Συνοχή μεταξύ 2-15Hz, Δ) (Πίνακας $\mathbf{A_p}$): Διαφορά μεταξύ $\mathbf{XC_{max}}$ και μέσου δευτερεύοντος μεγίστου ετεροσυσχέτισης, Ε) (Πίνακας $\mathbf{A_m}$): Διαφορά μεταξύ των δύο δευτερευόντων μεγίστων της ετεροσυσχέτισης, ΣΤ) Πίνακας «Ομοιότητας» $\mathbf{XC_s}$ με συνδυασμό του $\mathbf{XC_{max}}$ και άλλων συνθηκών (βλέπε κείμενο)



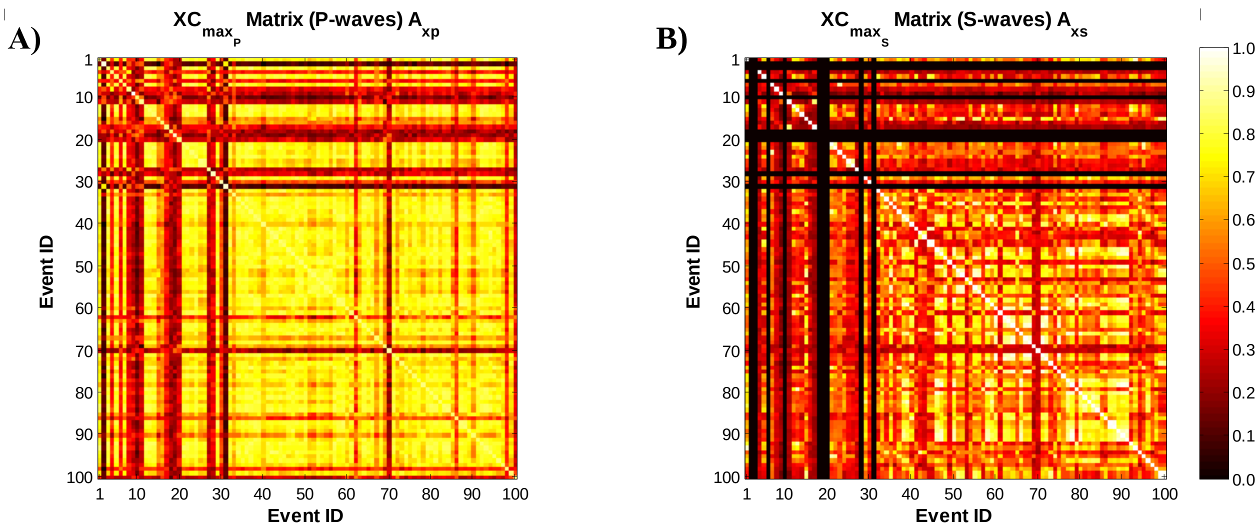
Σχήμα 3.8: A) (Πίνακας $\mathbf{A_s}$): Συμμετρία της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης, B) (Πίνακας $\mathbf{A_f}$): Αρτιότητα της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης (2-15Hz), Γ) (Μη-συμμετρικός Πίνακας $\mathbf{A_a}$): συντελεστής συσχέτισης ανάμεσα στην καμπύλη ετεροσυσχέτισης και στην καμπύλη αυτοσυσχέτισης του 1^{ου} από τα 2 υπό σύγκριση σήματα, ο αντίστοιχος πίνακας $\mathbf{A_b}$ για την αυτοσυσχέτιση του 2^{ου} σήματος είναι ο ανάστροφος του $\mathbf{A_a}$ (A_b=A_a^T), Δ) (Συμμετρικός Μέσος Πίνακας $\mathbf{A_a}$~$\mathbf{A_b}$): η μέση τιμή των πινάκων $\mathbf{A_a}$, $\mathbf{A_b}$.Ο πίνακας αυτός παρουσιάζει ελάχιστες διαφορές από τον $\mathbf{A_a}$.

Η εικόνα του πίνακα $\mathbf{A_m}$ (Σχήμα 3.7$_E$) μοιάζει με θόρυβο, και πράγματι φαίνεται να μην παρέχει πολλές πληροφορίες. Η διαγώνιός του είναι μαύρη καθώς τα δευτερεύοντα μέγιστα στην αυτοσυσχέτιση, λόγω συμμετρίας, είναι ακριβώς ίσα. Ο πίνακας ομοιότητας, $\mathbf{XC_s}$, είναι ένα συνονθύλευμα των πινάκων $\mathbf{A_x}$, $\mathbf{A_p}$, $\mathbf{A_a}$ και $\mathbf{A_b}$. Για την κατασκευή του πίνακα $\mathbf{XC_s}$ θα γίνει λόγος αργότερα, ενώ μερικές περιπτώσεις ζευγών γεγονότων με υψηλό $\mathbf{XC_{max}}$ αλλά σχετικά χαμηλό βαθμό ομοιότητας $\mathbf{S_{ij}}$ (τιμή στον πίνακα $\mathbf{XC_s}$) παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β, Σχήματα Β.10,11. Ο πίνακας $\mathbf{XC_s}$ μοιάζει με τον πίνακα $\mathbf{A_x}$ αλλά το υπόβαθρό του είναι σαφώς μειωμένο. Μείωση στην τιμή ομοιότητας, σε σχέση με την αντίστοιχη τιμή $\mathbf{XC_{max}}$, παρουσιάζουν και τα ζεύγη όμοιων σεισμών, αλλά παραμένουν ευδιάκριτα. Υπάρχουν, πάντως, και περιπτώσεις στις οποίες σημεία έντονου κίτρινου χρώματος στον $\mathbf{A_x}$ μετατράπηκαν σε κόκκινο στον $\mathbf{XC_s}$.

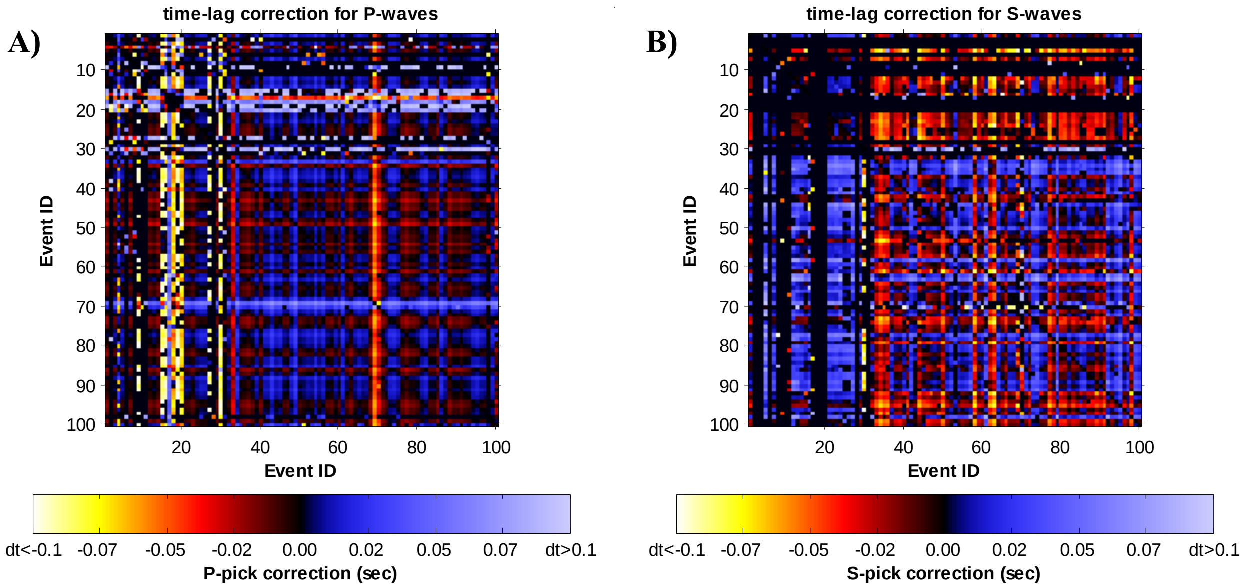
Στους πίνακες του Σχήματος 3.8 φαίνονται εικόνες που σχετίζονται με τη συμμετρία της ετεροσυσχέτισης. Ο πίνακας $\mathbf{A_s}$ έχει προκύψει από τον συντελεστή γραμμικής συσχέτισης των δύο κλάδων της καμπύλης ετεροσυσχέτισης εκατέρωθεν του χρόνου $\boldsymbol{\tau_m}$ με τη διαδικασία που περιγράφηκε για το 4ο βήμα των υπολογισμών παραπάνω. Η εικόνα του είναι έντονη και θορυβώδης. Υψώνοντας το κάθε στοιχείο στο τετράγωνο το υπόβαθρο ελαττώνεται αλλά η «κακή» εικόνα παραμένει. Θόρυβος σε αυτή την περίπτωση σημαίνει ότι δημιουργούνται τεχνητά σφάλματα (*artifacts*) για ορισμένα ζεύγη γεγονότων που τυχαίνει να εμφανίζουν υψηλό βαθμό συμμετρίας γύρω από το –όποιο- ολικό μέγιστο της ετεροσυσχέτισης, όσο μικρό και αν είναι αυτό ή όσο μικρή και αν είναι η διαφορά ανάμεσα στο $\mathbf{XC_{max}}$ και στα δευτερεύοντα μέγιστα. Αυτό αποτελεί πρόβλημα. Όποια και αν είναι η συνεισφορά ενός τέτοιου πίνακα δε μπορεί να σταθεί από μόνος του και θα πρέπει να συνυπολογίζεται με τον πίνακα $\mathbf{A_x}$. Η εικόνα του πίνακα $\mathbf{A_f}$ δεν είναι η πραγματική, καθώς με τον τρόπο που ορίστηκε δεν υπάρχει κάτι που να περιορίζει τις τιμές του ανάμεσα σε 0 και 1. Για απλούστευση οι τιμές των στοιχείων του έχουν διαιρεθεί με το 4 και όσα στοιχεία είχαν τιμή μεγαλύτερη από 1 εξισώθηκαν με το 1. Διακρίνονται κάποια σημεία έντονου χρώματος σε ίδιες περιοχές με αυτές του πίνακα $\mathbf{A_x}$, όμως ο πίνακας είναι ιδιαίτερα θορυβώδης και άρα περιέχει τεχνητά σφάλματα (*artifacts*).

Οι πίνακες $\mathbf{A_a}$, $\mathbf{A_b}$, που προέρχονται από της σύγκριση της *ετερο*συσχέτισης με την *αυτο*συσχέτιση του καθενός από τα δύο σήματα (βλ Σχήμα 1.7, Κεφάλαιο 1) είναι και αυτοί θορυβώδεις (στο Σχήμα 3.8$_\Gamma$ παρουσιάζεται μόνο ο $\mathbf{A_a}$ αλλά εξάλλου $\mathbf{A_a}=\mathbf{A_b}^{\mathbf{T}}$). Η διαφορά τους όμως σε σχέση με τους πίνακες $\mathbf{A_s}$ και $\mathbf{A_f}$ είναι ότι έχουν μεγαλύτερη ομοιότητα με τους πίνακες $\mathbf{A_x}$, $\mathbf{A_p}$, και μεγαλύτερη διαφορά των έντονων σημείων από το υπόβαθρο απ' ότι οι πίνακες $\mathbf{A_s}$, $\mathbf{A_f}$. Ο πίνακας $\mathbf{A_a}\sim\mathbf{A_b}$ παρουσιάζει ελάχιστες διαφορές από τους $\mathbf{A_a}$, $\mathbf{A_b}$. Από τις εικόνες αυτές η περιοχή της πρώτης γραμμής του πίνακα $\mathbf{A_s}$ και $\mathbf{A_a}$ μπορεί να συγκριθεί με την αντίστοιχη γραμμή του πίνακα $\mathbf{A_x}$. Στον $\mathbf{A_x}$ η γραμμή αυτή γενικά έχει σκούρο χρώμα, δηλαδή το γεγονός της πρώτης γραμμής παρουσιάζει χαμηλή συσχέτιση με τα υπόλοιπα, όμως για κάποιο λόγο η ετεροσυσχέτισή του με τα υπόλοιπα εμφανίζει υψηλή συμμετρία γύρω από το $\mathbf{XC_{max}}$. Παρόμοιο φαινόμενο πιθανόν να συμβαίνει και σε άλλες γραμμές/στήλες των πινάκων αυτών, το αποτέλεσμα των οποίων θα φανεί ευκρινέστερα κατά τη σύγκριση των πινάκων (Σχήματα 3.11$_\Gamma$,3.19$_A$).

Στα Σχήματα 3.9$_{A,B}$ φαίνονται οι πίνακες $\mathbf{A_{xP}}$ και $\mathbf{A_{xS}}$ αντίστοιχα για τα ίδια 100 γεγονότα, οι οποίοι παρουσιάζουν τις τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ που προέκυψαν από περιορισμένα χρονικά παράθυρα των κυματομορφών τα οποία καθορίστηκαν βάσει των προσδιορισμένων χρόνων άφιξης των φάσεων P και S αντίστοιχα. Για τα κύματα P παρατηρείται ότι ο πίνακας $\mathbf{A_{xP}}$ περιέχει πολύ έντονα χρώματα, δηλαδή οι τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ είναι πολύ κοντά στη μονάδα, κάτι που αναμενόταν ίσως από την πυκνή χωρική κατανομή του σμήνους του AIO αλλά οφείλεται επίσης στο μικρό χρονικό εύρος του παραθύρου, όπως αναφέρθηκε στο 1ο κεφάλαιο (Σχήμα 1.16), όπου μείωση του χρονικού παραθύρου προκαλεί γενική αύξηση του $\mathbf{XC_{max}}$.



Σχήμα 3.9: Απεικονίσεις πινάκων για τα πρώτα 100 γεγονότα του δείγματος από το σμήνος του AIO (2001): A) (Πίνακας $\mathbf{A_{xP}}$): $\mathbf{XC_{maxP}}$ για τα P-κύματα μόνο, B) (Πίνακας $\mathbf{A_{xS}}$): $\mathbf{XC_{maxS}}$ για τα S-κύματα μόνο.

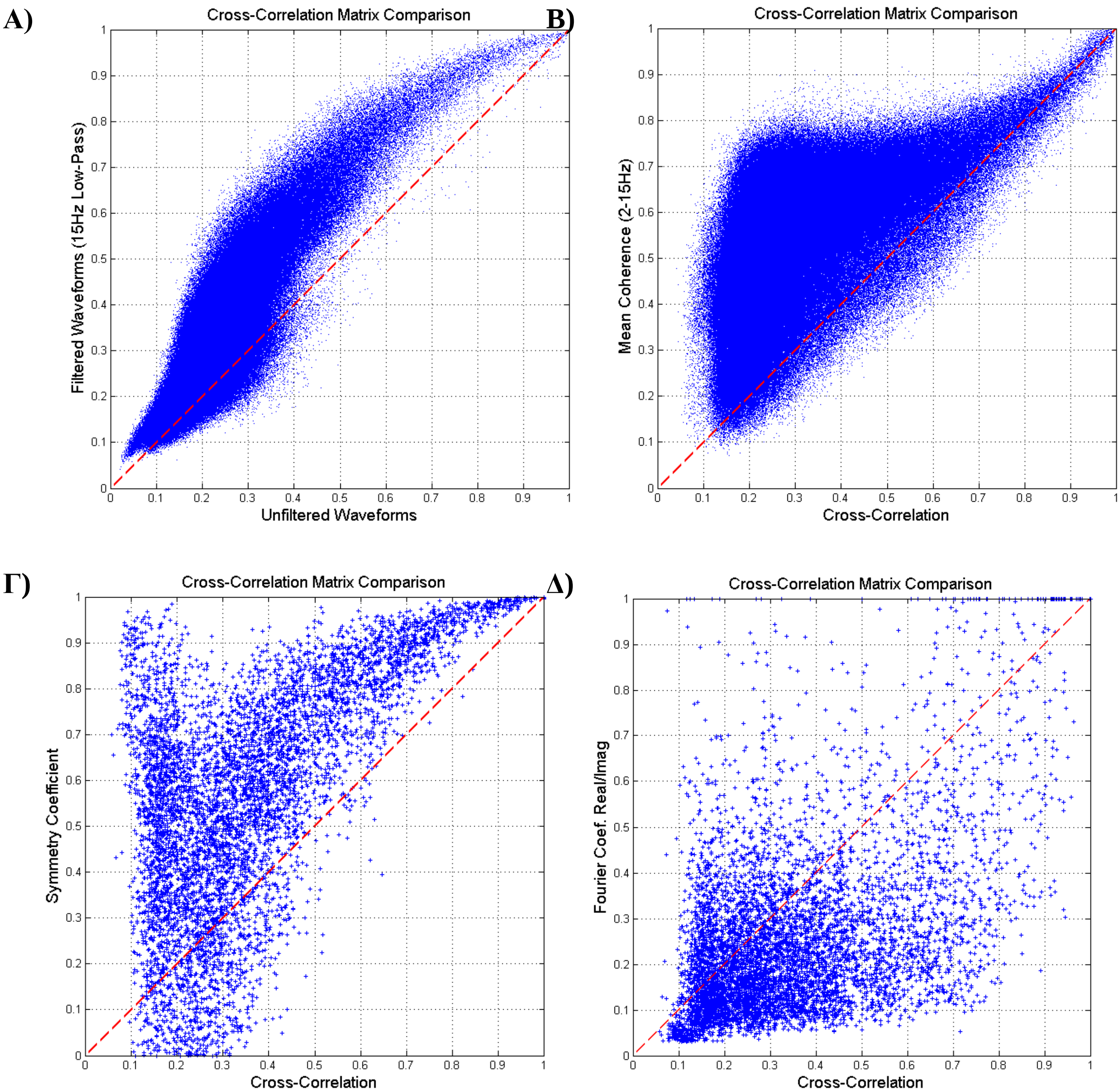


Σχήμα 3.10: Απεικονίσεις πινάκων για τα πρώτα 100 γεγονότα του δείγματος από το σμήνος του AIO (2001): A) (Αντισυμμετρικός Πίνακας $\mathbf{A_{dP}}$) χρονικές διορθώσεις ως προς τις χρονικές αφίξεις των P, B) (Αντισυμμετρικός Πίνακας $\mathbf{A_{dS}}$) χρονικές διορθώσεις ως προς τις χρονικές αφίξεις των S. Από τους πίνακες $\mathbf{A_{dP}}$, $\mathbf{A_{dS}}$, χρήσιμα είναι **μόνο** όσα σημεία αντιστοιχούν σε ζεύγος όμοιων σεισμών και **μόνο** εφόσον υπάρχουν προσδιορισμένοι χρόνοι άφιξης των P ή S αντίστοιχα και για τους δύο σε κάθε ζεύγος.

Καθώς οι επικεντρικές αποστάσεις ως προς τον σταθμό AIO είναι πολύ μικρές (μεταξύ 1-2.5km) ενώ τα βάθη των σεισμών κυμαίνονται από 5-10km το παράθυρο για τα κύματα P είναι αναγκαστικά πολύ μικρό (100ms πριν την άφιξη και 300ms μετά την άφιξη) ώστε να αποφευχθεί η άφιξη των S πριν το πέρας του παραθύρου. Κατά μέσο όρο η διαφορά ανάμεσα στους χρόνους άφιξης των S και P κυμάτων στον σταθμό AIO είναι ~900ms. Για τα S κύματα η εικόνα μοιάζει περισσότερο με αυτή που έδωσε η σύγκριση των πλήρων κυματομορφών στον πίνακα $\mathbf{A_x}$. Αυτό επιβεβαιώνει το γεγονός ότι χρησιμοποιώντας το πλήρες σήμα μεγαλύτερο ρόλο παίζει το χρονικό παράθυρο εκείνο στο οποίο βρίσκεται το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας του κύματος, δηλαδή στον κυματοσυρμό των S και στο S-*coda* (κυματο-ουρά). Προκειμένου, λοιπόν, να διακριθούν λεπτομέρειες σε μια κατά τα άλλα ενιαία χωρική συστάδα όπως αυτή του σμήνους του AIO, τα κύματα S μοιάζουν να προσφέρονται περισσότερο απ' ότι τα P, τόσο για στατιστικούς λόγους (εύρος χρονικού παραθύρου, μεγάλος αριθμός δειγμάτων) όσο και για ενεργειακούς (μέγιστο πλάτος κύματος). Το μεγαλύτερο εύρος του παραθύρου για τα S κύματα (300ms πριν την άφιξη και 2 sec μετά την άφιξη) επιτρέπει επίσης τη χρήση περισσότερης λεπτομέρειας για τον χαρακτηρισμό όμοιων σημάτων καθώς η μορφή της κυματο-ουράς, όπως αναφέρθηκε στο 1$^{\text{ο}}$ Κεφάλαιο, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη σε μικρές μεταβολές των εστιακών παραμέτρων: αν οι σεισμικές ακτίνες διαφέρουν, ολόκληρη η καταγραφή θα διαφέρει. Ασφαλώς αυτό το φαινόμενο μεγιστοποιείται όταν χρησιμοποιείται η πλήρης καταγραφή (Πίνακας $\mathbf{A_x}$) και αυτή η μέθοδος αποτελεί από μόνη της ένα ιδιαίτερα αυστηρό κριτήριο καθορισμού όμοιων σεισμών.

Οι αντι-συμμετρικοί πίνακες $\mathbf{A_{dP}}$, $\mathbf{A_{dS}}$ παρέχουν την πληροφορία για το $\boldsymbol{\tau_m}$ ανάλογα με την αρχική στοίχιση που έχει γίνει στα κύματα, και ανάλογα με το χρονικό παράθυρο που χρησιμοποιείται. Ως εικόνες, ωστόσο, δε δίνουν κάποια πληροφορία από μόνες τους. Θα πρέπει να αγνοηθούν όσα σημεία ανήκουν σε ζεύγη γεγονότων που δεν έχουν όμοια σήματα καθώς και όσα γεγονότα δεν έχουν καθορισμένο χρόνο άφιξης P ή S αντίστοιχα, οπότε η αρχική τους στοίχιση ήταν τυχαία. Πιθανόν αυτό να συμβαίνει σε κάποια γεγονότα των πινάκων που εμφανίζουν μεγάλες τιμές θετικής ή αρνητικής χρονικής καθυστέρησης $\boldsymbol{\tau_m}$ σε όλο το μήκος της αντίστοιχης γραμμής/στήλης.

3.4 ~ *Σύγκριση Πινάκων*

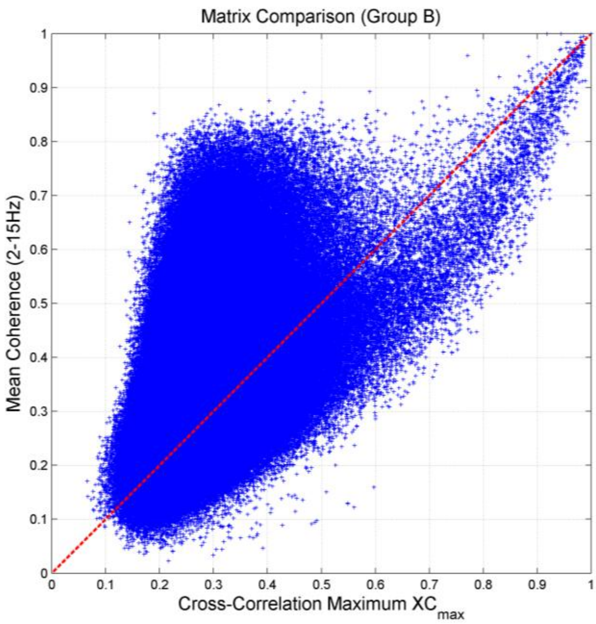


Σχήμα 3.11: **α)** σύγκριση των στοιχείων 2 πινάκων ετεροσυσχέτισης που κατασκευάστηκαν από τη σύγκριση των κυματομορφών της Z-συνιστώσας του σταθμού AIO από το δείγμα 1134 γεγονότων. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι μέγιστες τιμές ετεροσυσχέτισης των αφιλτράριστων κυματομορφών ενώ στον κατακόρυφο άξονα οι τιμές για τα αντίστοιχα ζεύγη φιλτραρισμένων κυματομορφών με κατωπερατό φίλτρο Butterworth με συχνότητα αποκοπής 15Hz. Η διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει την ευθεία y=x, **β)** ομοίως αλλά με τον κατακόρυφο άξονα να δείχνει τη μέση συνοχή από 2-15Hz για τα αντίστοιχα ζεύγη (η συνοχή υπολογίζεται πάντα ύστερα από μετατόπιση των κυματομορφών σε χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$), **γ)** παρόμοια εικόνα με πίνακες που προέρχονται από τα πρώτα 117 γεγονότα του προηγούμενου δείγματος. Στον οριζόντιο άξονα βρίσκονται οι τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ ενώ στον κατακόρυφο οι τιμές του «συντελεστή συμμετρίας» μετρημένου με τη μέθοδο της ενότητας 3.3. Διακρίνεται καθαρά και σε αυτή την εικόνα ο «θόρυβος» που φαίνεται στο Σχήμα 3.8_A σε ζεύγη που έδιναν $\mathbf{XC_{max}}$<0.2 ο αντίστοιχος «συντελεστής συμμετρίας» μερικές φορές ξεπερνάει ακόμα και το 0.9, **δ)** η ίδια εικόνα αυτή τη φορά με τον λόγο της μέσης απόλυτης τιμής του πραγματικού μέρους των συντελεστών Fourier της ετεροσυσχέτισης (ή καλύτερα του ετεροφάσματος) προς την αντίστοιχη μέση απόλυτη τιμή του φανταστικού μέρους για συχνότητες 2-15Hz, όπως φαίνεται δεν υπάρχει καμία αναλογία με τη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης.

Στο Σχήμα 3.11 φαίνεται η σύγκριση ανάμεσα σε δύο είδη πινάκων. Κάθε σημείο των διαγραμμάτων αντιστοιχεί σε ένα ζεύγος γεγονότων (i,j) χωρίς όμως να γίνεται γνωστό (από το σχήμα) ποιο γεγονός είναι το i και ποιο το j. Εκείνο που είναι γνωστό είναι πως η τετμημένη του σημείου αντιστοιχεί στην τιμή του ζεύγους (i,j) στον πίνακα που αναγράφεται στον άξονα-x ενώ η τεταγμένη αντιστοιχεί στην τιμή του ίδιου ζεύγους (i,j) στον πίνακα που αναγράφεται στον άξονα-y. Τα σχήματα αυτά δείχνουν με στατιστικό τρόπο πως τροποποιούνται οι τιμές των στοιχείων 2 πινάκων από τη μορφή που παίρνει το «νέφος» των σημείων στα αντίστοιχα διαγράμματα. Εάν δύο πίνακες ήταν ταυτόσημοι θα έπρεπε το αντίστοιχο διάγραμμα να ήταν η ευθεία y=x που παρουσιάζεται με διακεκομμένη κόκκινη διαγώνια γραμμή.

Στο Σχήμα 3.11_{A} φαίνεται η σύγκριση των πινάκων $\mathbf{A_x}$ και $\mathbf{A_x}'$. Η διαφορά είναι ότι ο δεύτερος (με τις τιμές στο άξονα-y) έχει προκύψει από διαδικασία ετεροσυσχέτισης επάνω σε φιλτραρισμένες κυματομορφές στη ζώνη των 0.5-15Hz. Επιβεβαιώνεται εδώ στατιστικά (από το «νέφος» σημείων) ότι η γενική τάση του πίνακα $\mathbf{A_x}'$ είναι να αυξήσει τις τιμές των αντίστοιχων στοιχείων του πίνακα $\mathbf{A_x}$, ιδιαίτερα για τιμές του $\mathbf{A_x}$ μεγαλύτερες από 0.4. Ένα ποσοστό σημείων του πίνακα $\mathbf{A_x}$ με τιμές μεταξύ 0.1-0.4 παρουσιάζει μείωση, δηλαδή ένα τμήμα του υποβάθρου του πίνακα $\mathbf{A_x}$ έχει ελαττωθεί στον πίνακα $\mathbf{A_x}'$, αλλά τα περισσότερα παρουσιάζουν αύξηση. Το θετικό είναι ότι η γενική τάση της αύξησης είναι ενισχυμένη μετά το 0.4, άρα το φίλτρο ενισχύει τα ζεύγη σεισμών με καλό $\mathbf{XC_{max}}$ περισσότερο απ' ότι τα ζεύγη με χαμηλό $\mathbf{XC_{max}}$.

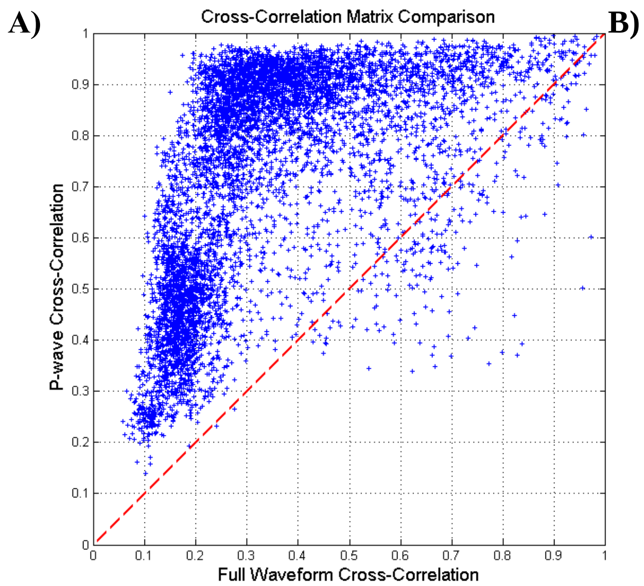
Στο Σχήμα 3.11_{B} φαίνεται σε εικόνα αυτό που περιγράφθηκε νωρίτερα για τη διαφορά μεταξύ $\mathbf{XC_{max}}$ (πίνακας $\mathbf{A_x}$) και μέσης συνοχής $\mathbf{m_{coh}}$ (πίνακας $\mathbf{A_c}$). Η χαμηλή αντίθεση (*contrast*) της εικόνας του $\mathbf{A_c}$ (Σχήμα $3.7_{Γ}$) σε σύγκριση με την εικόνα του $\mathbf{A_x}$ φαίνεται εδώ από τον τρόπο που μεταβάλλονται οι τιμές των αντίστοιχων στοιχείων των δύο πινάκων. Για τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ από 1 έως και 0.3 υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες το αντίστοιχο $\mathbf{m_{coh}}$ έφτασε το 0.9! (Παράρτημα Β, Σχήματα Β.13,14). Είναι προφανές ότι με έναν τέτοιο πίνακα δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί τιμή κατωφλίου για τον χαρακτηρισμό της ομοιότητας, αφού φθάνοντας στο 0.8 ένα μεγάλο πλήθος ζευγών γεγονότων με $0.2 \le \mathbf{XC_{max}} \le 0.7$ ξεπερνούν το κατώφλι. Πρακτικά χρησιμοποιώντας το $\mathbf{m_{coh}}$ σε αυτή την περίπτωση το κατώφλι πρέπει να ορίζεται πάνω από 0.9 και όπως φαίνεται στο διάγραμμα μια τέτοια επιλογή δεν προσφέρει κάτι καλύτερο απ' ότι ένα αντίστοιχο κατώφλι 0.9 στις τιμές $\mathbf{XC_{max}}$. Μια ενδιαφέρουσα λεπτομέρεια είναι ότι, σε αντίθεση με το $\mathbf{XC_{max}}$, το $\mathbf{m_{coh}}$ τείνει να αυξάνεται όσο αυξάνεται το μήκος των χρονοσειρών σε περιπτώσεις όπως αυτή που αναφέρεται στο Παράρτημα Β, Σχήμα Β.13, ζεύγους σημάτων με πολύ μικρή τιμή μεγίστου ετεροσυσχέτισης και σχετικά υψηλή τιμή $\mathbf{m_{coh}}$. Το να μειωθεί το μήκος της χρονοσειράς δεν είναι απαραίτητα καλή λύση καθώς έτσι μειώνεται και ο αριθμός δειγμάτων στις συχνότητες 2-15Hz από τα οποία υπολογίζεται το $\mathbf{m_{coh}}$. Παρόμοια εικόνα (Σχήμα 3.12) έδωσε και ένα άλλο σετ δεδομένων που θα παρουσιαστεί στο Κεφάλαιο 4 με τη ονομασία 'Ομάδα Β', στο οποίο τα επίκεντρα καλύπτουν την περιοχή εντός του Δ. Κορινθιακού κόλπου και δεν είναι χωρικά εντοπισμένα όπως στο «σμήνος του ΑΙΟ».



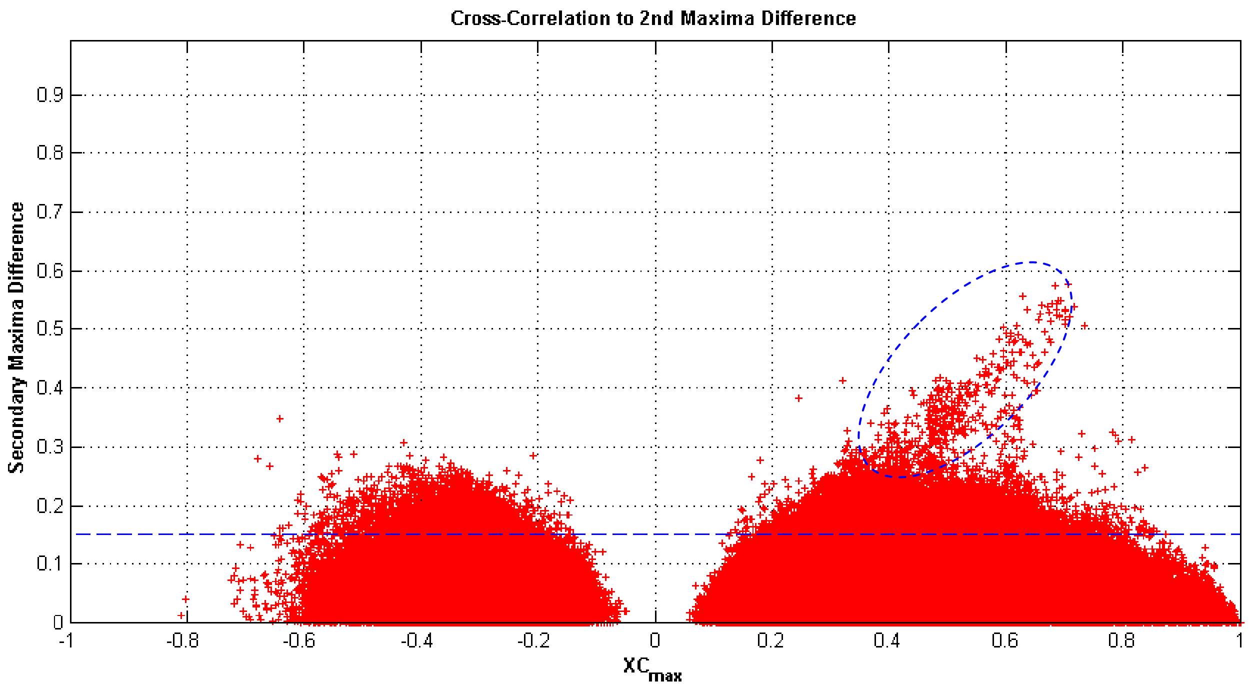
Σχήμα 3.12: Σύγκριση μεταξύ πινάκων ετεροσυσχέτισης, A_x (οριζόντιος άξονας), και μέσης συνοχής, A_c (κατακόρυφος άξονας) για σεισμούς της Ομάδας Β (Κεφ. 4). Η εικόνα είναι παρόμοια με αυτή του Σχήματος 3.11_{B}.

Τα Σχήματα 3.11$_{Γ,Δ}$ αφορούν στη σύγκριση του **XC$_{max}$** με κάποιο μέτρο συμμετρίας της ετεροσυσχέτισης. Στο Σχήμα 3.11$_{Δ}$ συγκρίνεται ο πίνακας **A$_x$** με τον πίνακα **A$_f$**. Δεν υπάρχει καμία σχέση ανάμεσα στους δύο πίνακες, κάτι που επιβεβαιώνει την οπτική παρατήρηση του Σχήματος 3.8$_B$. Στο Σχήμα 3.11$_Γ$ παρά την έντονη διασπορά, παρατηρείται ότι, με εξαίρεση το τμήμα που αντιστοιχεί σε τιμές του άξονα-x: **XC$_{max}$<0.2**, η μορφή του υπόλοιπου διαγράμματος θυμίζει την εικόνα που προέκυψε στην περίπτωση του **A$_x$**΄, δηλαδή του **XC$_{max}$** από τις φιλτραρισμένες κυματομορφές. Η εικόνα εξαρτάται έως ένα βαθμό από το εύρος τιμών γύρω από το **XC$_{max}$** στο οποίο υπολογίστηκε ο βαθμός συμμετρίας (στο παράδειγμα αυτό ήταν ±0.3sec). Η «ουρά» που εμφανίζεται για **XC$_{max}$<0.2**, όπου φαίνεται ένα σύνολο σημείων να αντιστοιχεί σε μεγάλες τιμές του συντελεστή συμμετρίας (στοιχεία του **A$_s$**) οφείλεται στο γεγονός που αναφέρθηκε νωρίτερα (Παράρτημα Β, Σχήμα Β.60), σε περιπτώσεις δηλαδή όπως αυτή της πρώτης γραμμής των πινάκων **A$_x$** και **A$_s$** που στον πρώτο έχουν χαμηλές τιμές ενώ στον δεύτερο υψηλές τιμές. Αυτά τα τεχνητά σφάλματα πάντως δεν επηρεάζουν ιδιαίτερα το αποτέλεσμα στην περίπτωση που συνυπολογίζονται οι πίνακες **A$_x$**, **A$_s$** όταν πολλαπλασιαστούν μεταξύ τους ανά στοιχείο πίνακα, καθώς, σε αντίθεση με τον πίνακα **A$_c$** που εμφάνιζε αυξημένες τιμές σε όλο το εύρος των **XC$_{max}$**, τα τεχνητά σφάλματα του **A$_s$** πολλαπλασιάζονται πάντα με τιμές **XC$_{max}$<0.2** άρα το αποτέλεσμα θα είναι πάντα μικρότερο από 0.2 και η τιμή κατωφλίου ποτέ δεν φτάνει σε τόσο χαμηλά επίπεδα. Οι εσφαλμένα υψηλές τιμές συμμετρίας οφείλονται κατά κύριο λόγο στον μικρό αριθμό δειγμάτων γύρω από τον χρόνο **τ_m** που έχει χρησιμοποιηθεί σε αυτή την περίπτωση (±300ms → 38 δείγματα από κάθε κλάδο της ετεροσυσχέτισης για F_s=125samples/sec). Είναι δυνατόν σε περιπτώσεις πολύ χαμηλού **XC$_{max}$** να εμφανίζεται υψηλός βαθμός συμμετρίας σε μια μικρή περιοχή γύρω από το ολικό μέγιστο της ετεροσυσχέτισης. Αν διευρυνθεί η περιοχή τότε οι απαιτήσεις για υψηλό βαθμό συμμετρίας αυξάνονται. Εναλλακτικά, μπορεί να γίνει σύγκριση ανάμεσα στη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης και τις συναρτήσεις αυτοσυσχέτισης των 2 επιμέρους σημάτων, η οποία είναι και αυτή μια μέτρηση που συνδέεται με τη συμμετρία της ετεροσυσχέτισης.

Στο Σχήμα 3.13$_{A,B}$ φαίνονται τα διαγράμματα σύγκρισης των πινάκων **A$_{xP}$**, **A$_{xS}$** (μέγιστες τιμές ετεροσυσχέτισης στο τμήμα των κυματομορφών που περιέχει μόνο τα P ή μόνο τα S κύματα) με τον πίνακα **A$_x$**. Η έντονη χρωματική εικόνα του πίνακα **A$_{xP}$** παρουσιάζεται ως μια σχεδόν καθολική ανύψωση των τιμών γύρω από το 0.9 ακόμα και για τιμές 0.2 ≤ **XC$_{max}$** ≤ 0.3. Το χρονικό παράθυρο που επιλέχθηκε ξεκινάει από 100ms πριν την άφιξη των P και τελειώνει σε 300ms μετά την άφιξη των P. Για τα S-κύματα χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά όρια: 300ms πριν και 2sec μετά την άφιξη των S-κυμάτων. Ο υπολογισμός του πίνακα A_{xP} επαναλήφθηκε και για μεγαλύτερο εύρος: από 100ms πριν, έως 800ms μετά την άφιξη των P-κυμάτων, καθώς κατά μέσο όρο η διαφορά ανάμεσα στους χρόνους άφιξης των S και των P είναι περίπου 900ms στον σταθμό AIO για το «σμήνος του AIO», αλλά το αποτέλεσμα ήταν παρόμοιο (βλέπε Παράρτημα Β, Σχήμα Β.6). Κατά τη σύγκριση των πινάκων **A$_x$** και **A$_{xS}$** στο Σχήμα 3.13$_B$ φαίνεται πως οι τιμές του **A$_{xS}$** είναι μεν αυξημένες αλλά η κατανομή των σημείων παρακολουθεί, τουλάχιστον ως προς τη μέση κλίση, την ευθεία y=x. Από όσους πίνακες εξετάστηκαν, ο **A$_{xS}$** είναι ο πλέον όμοιος με τον **A$_x$**.



Σχήμα 3.13: A) Σύγκριση των τιμών του πίνακα $\mathbf{A_x}$ από την ετεροσυσχέτιση των πλήρων κυματομορφών (Σχήμα 3.7_A) στον x-άξονα με τις αντίστοιχες τιμές του $\mathbf{A_{xP}}$ από τη ετεροσυσχέτιση μόνο του τμήματος που περιέχει τα κύματα-P (Σχήμα 3.9_A), B) Ομοίως για τη σύγκριση των τιμών του πίνακα $\mathbf{A_x}$ από την ετεροσυσχέτιση των πλήρων κυματομορφών με τις αντίστοιχες τιμές του πίνακα $\mathbf{A_{xS}}$ από την ετεροσυσχέτιση μόνο του τμήματος που περιέχει τα κύματα-S (Σχήμα 3.9_B).



Σχήμα 3.14: Σύγκριση των τιμών του πίνακα $\mathbf{A_x}$ στον x-άξονα με τις αντίστοιχες τιμές του πίνακα $\mathbf{A_m}$ στον y-άξονα της διαφοράς ανάμεσα στα δύο δευτερεύοντα μέγιστα της ετεροσυσχέτισης. Περιλαμβάνονται και οι περιπτώσεις $|\mathbf{XC_{min}}| > \mathbf{XC_{max}}$ στις οποίες τίθεται $\mathbf{XC_{max}} \equiv \mathbf{XC_{min}}$ και καταχωρείται στον πίνακα $\mathbf{A_x}$. Είναι επιθυμητό οι τιμές του πίνακα A_m (κατακόρυφος άξονας) να πλησιάζουν το μηδέν όσο το $\mathbf{XC_{max}}$ αυξάνεται.

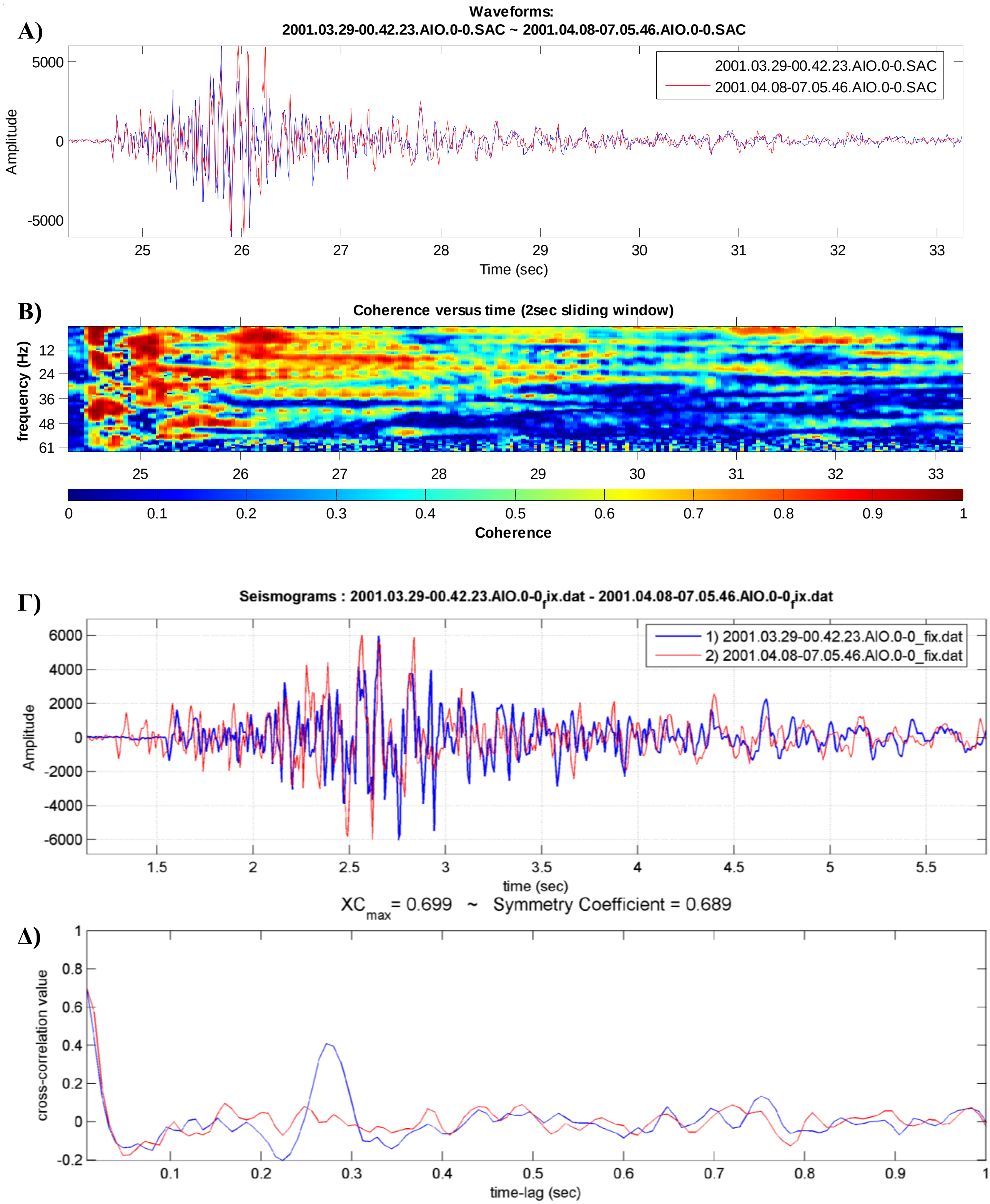
Στο Σχήμα 3.14 έχουν ληφθεί υπόψη και τα **αρνητικά** ολικά ελάχιστα της ετεροσυσχέτισης (XC_{max}≡$\mathbf{XC_{min}}$<0 σε περίπτωση που |$\mathbf{XC_{min}}$| > $\mathbf{XC_{max}}$). Το σχήμα δείχνει τη σύγκριση μεταξύ των πινάκων $\mathbf{A_x}$ και $\mathbf{A_m}$, δηλαδή του πίνακα με τα $\mathbf{XC_{max}}$ και του πίνακα με τις διαφορές ανάμεσα στα δύο δευτερεύοντα μέγιστα (ή ελάχιστα εάν $\mathbf{XC_{max}}$<0) εκατέρωθεν του $\mathbf{XC_{max}}$. Φαίνεται γενικά ότι με τον τρόπο που έχουν επιλεχθεί τα δευτερεύοντα μέγιστα δεν αποτελούν κατ' ανάγκη μέτρο της ασυμμετρίας. Στην απόλυτα συμμετρική συνάρτηση αυτοσυσχέτισης τα δευτερεύοντα μέγιστα όχι μόνο είναι ίσα μεταξύ τους, άρα η αντίστοιχη τιμή του $\mathbf{A_m}$ θα είναι μηδέν, αλλά επιπλέον οι χρονικές καθυστερήσεις στις οποίες εμφανίζονται τα δευτερεύοντα μέγιστα ως προς το μηδέν (ή ως προς το χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ για την ετεροσυσχέτιση) πρέπει να είναι κατά απόλυτη τιμή ίσες. Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται δεν έχει καταγραφεί η διαφορά ανάμεσα σε αυτές τις χρονικές καθυστερήσεις οι οποίες είναι πιθανόν, σε συνδυασμό με τη διαφορά στις τιμές των δευτερευόντων μεγίστων, να προσφέρουν ένα επιπλέον κριτήριο ομοιότητας.

Εξετάστηκαν κάποιες από τις περιπτώσεις στις οποίες εμφανίστηκε υψηλό $\mathbf{XC_{max}}$ και μεγάλη διαφορά ανάμεσα στα 2 δευτερεύοντα μέγιστα. Στην πράξη, το μεγαλύτερο από τα δευτερεύοντα μέγιστα είναι τόσο υψηλό που θα μπορούσε υπό συνθήκες να γίνει ολικό μέγιστο. Πράγματι εξετάζοντας τα σήματα των σεισμών που αναγράφονται στα Σχήματα 3.15 σε διάφορους σταθμούς παρατηρήθηκε η ίδια ασυμμετρία. Μάλιστα στον σταθμό LAK το $\mathbf{XC_{max}}$ ήταν ήδη πολύ χαμηλό (~0.4) ενώ με την εφαρμογή ζωνοπερατού φίλτρου 0.5-15Hz το αρχικό $\mathbf{XC_{max}}$ αντί να αυξηθεί μειώθηκε, και μάλιστα τόσο πολύ που μετατράπηκε το ίδιο σε δευτερεύον ελάχιστο. Κάτι ανάλογο συνέβη και στις κυματομορφές του σταθμού KOU όπου μετά την εφαρμογή του φίλτρου η στοίχιση έγινε στη χρονική καθυστέρηση του δευτερεύοντος μεγίστου. Η συνοχή διαβεβαιώνει πως με στοίχιση στο δευτερεύον, αντί για το πραγματικό ολικό μέγιστο, η εικόνα δεν είναι καλύτερη από αυτή που προκύπτει όταν η στοίχιση γίνει στον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$.

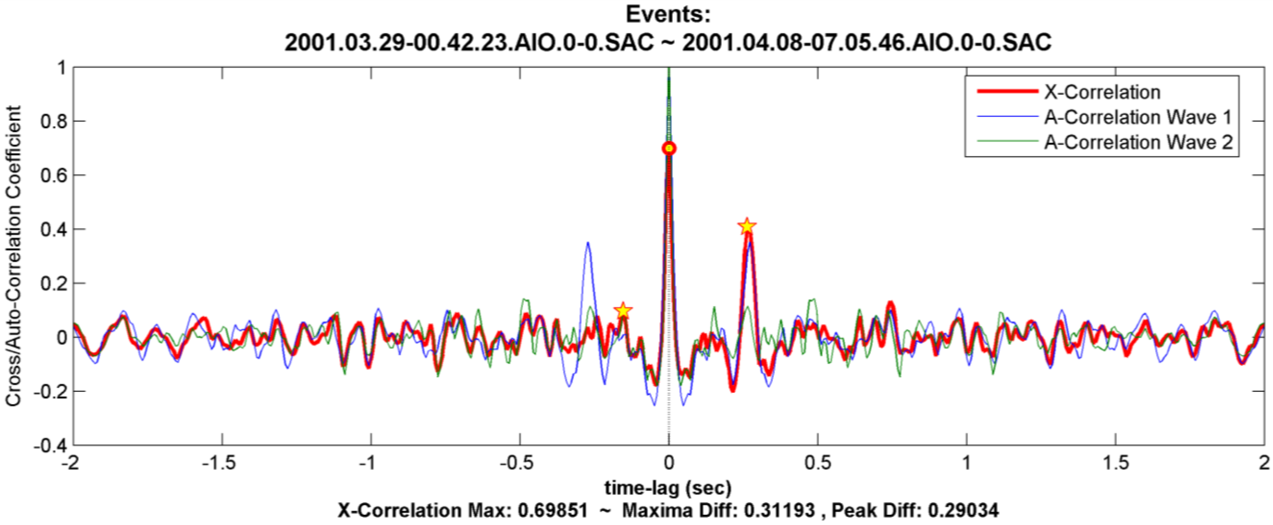
Επιπλέον, παρατηρείται ότι για τα συγκεκριμένα ζεύγη σεισμών, το μεγαλύτερο από τα δευτερεύοντα μέγιστα απέχει χρονικά κατά 33 δείγματα=0.264sec από το ολικό μέγιστο της ετεροσυσχέτισης στον σταθμό AIO. Σε άλλους σταθμούς η χρονική διαφορά μεταβάλλεται (LAK, DIM 23 δείγματα, TRI 16, KOU 26). Αυτό μπορεί να ληφθεί ως ένδειξη ότι μάλλον *δεν* πρόκειται για 2 σεισμούς που έχουν συμβεί στο ίδιο σημείο αλλά με χρονική διαφορά ~0.264sec. Αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί πιθανό εάν η χρονική διαφορά παρέμενε σταθερή ανεξάρτητα από τον σταθμό παρατήρησης αφού κατά τα άλλα οι σεισμικές ακτίνες των δύο επιμέρους γεγονότων (της σύνθετης κυματομορφής) θα ήταν κοινές. Οι σεισμοί της περίπτωσης αυτής, ωστόσο, είναι πιθανόν να αποτελούν ζεύγος όμοιων σεισμών. Ο σεισμός με κωδικό '2001.04.08-07.05.46' (ένας από τους δύο στο Σχήμα 3.15) παρουσιάζει το φαινόμενο της ασυμμετρίας στη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης με υψηλό $\mathbf{XC_{max}}$ σε αρκετούς συνδυασμούς του με άλλους σεισμούς του σμήνους.

Σημειώνεται εδώ πως ενώ με τη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης είναι πολύ εύκολο να διακριθούν τα 2 διαφορετικά μέγιστα και να προσδιοριστεί επακριβώς η χρονική καθυστέρηση στην οποία βρίσκονται, αντιθέτως, με τη μέθοδο υπολογισμού της χρονικής καθυστέρησης από την κλίση της φάσεως του ετεροφάσματος κάτι τέτοιο είναι ιδιαίτερα δύσκολο έως αδύνατο να μετρηθεί λόγω της σχετικά χαμηλής μέσης συνοχής και λόγω της αναδίπλωσης της φάσης. Σε όποιο $\boldsymbol{\tau_m}$ και αν στοιχηθούν οι 2 κυματομορφές (είτε στο ολικό είτε στο δευτερεύον μέγιστο) η φάση του ετεροφάσματος είναι ιδιαίτερα προβληματική, δεν παρουσιάζει γραμμικότητα ως προς τις συχνότητες και η μέση κλίση της δίνει τιμές καθυστέρησης που δεν αντιπροσωπεύουν ούτε το ένα ούτε το άλλο μέγιστο της ετεροσυσχέτισης.

Αυτό που μπορεί να επισημανθεί είναι η εμφάνιση ενός «λοβού» που σημειώνεται με μια μπλε διακεκομμένη έλλειψη στο Σχήμα 3.14, που εμφανίζεται για τιμές $\mathbf{XC_{max}}$<0.75. Αυτός ο λοβός πιθανόν να δημιουργεί πρόβλημα, από την άποψη ότι εκφράζει ισχυρή ασυμμετρία ανάμεσα στους δύο κλάδους της ετεροσυσχέτισης σε περιοχή σχετικά υψηλού $\mathbf{XC_{max}}$. Φαίνονται επίσης κάποια σποραδικά σημεία με υψηλότερη διαφορά μεγίστων (0.2-0.3) απ' ότι τα υπόλοιπα για $\mathbf{XC_{max}}$≈0.8. Θα επανεξεταστεί αυτή η παρατήρηση κατά την κατασκευή του 'πίνακα ομοιότητας', $\mathbf{XC_s}$.

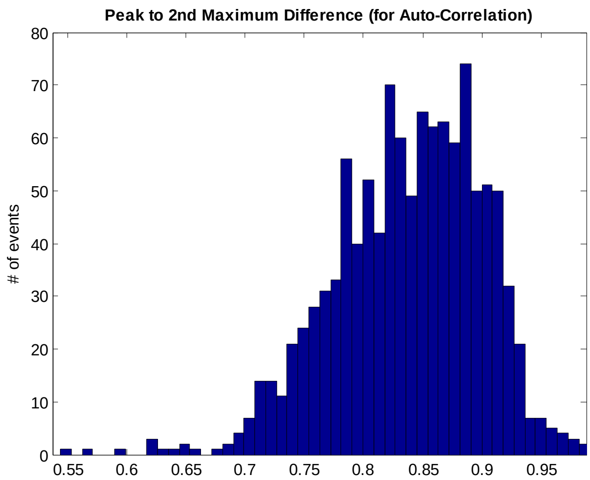


Σχήμα 3.15: A) περίπτωση σημάτων με υψηλό μέγιστο ετεροσυσχέτισης (**XC_{max}**=0.699 *χωρίς* φίλτρο) αλλά με μεγάλη διαφορά ανάμεσα στα 2 δευτερεύοντα ελάχιστα της ετεροσυσχέτισης, B) συνοχή των σημάτων συναρτήσει του χρόνου. Η μέση συνοχή είναι 0.725, Γ) στοίχιση κυματομορφών του Σχήματος 3.15_A στο μεγαλύτερο από τα δευτερεύοντα μέγιστα της ετεροσυσχέτισης, μετατοπισμένο κατά 33 δείγματα (0.264sec) από το ολικό μέγιστο. Παρατηρείται μια σχετική ταύτιση στην περιοχή των κυμάτων S. Δ) Ασυμμετρία ανάμεσα στους 2 κλάδους της ετεροσυσχέτισης (Σχήμα 3.16, κόκκινη γραμμή) των σημάτων του Σχήματος 3.15_A. Ο συντελεστής συμμετρίας που υπολογίστηκε σε παράθυρο 1sec είναι 0.689.



Σχήμα 3.16: ετεροσυσχέτιση (παχιά κόκκινη γραμμή) και αυτοσυσχετίσεις (μπλε και πράσινη γραμμή) των 2 σημάτων του Σχήματος 3.15_{A}. Με κύκλο σημειώνεται το $\mathbf{XC_{max}}$=0.699 ενώ με αστέρια τα 2 δευτερεύοντα μέγιστα τα οποία διαφέρουν κατά 0.312.

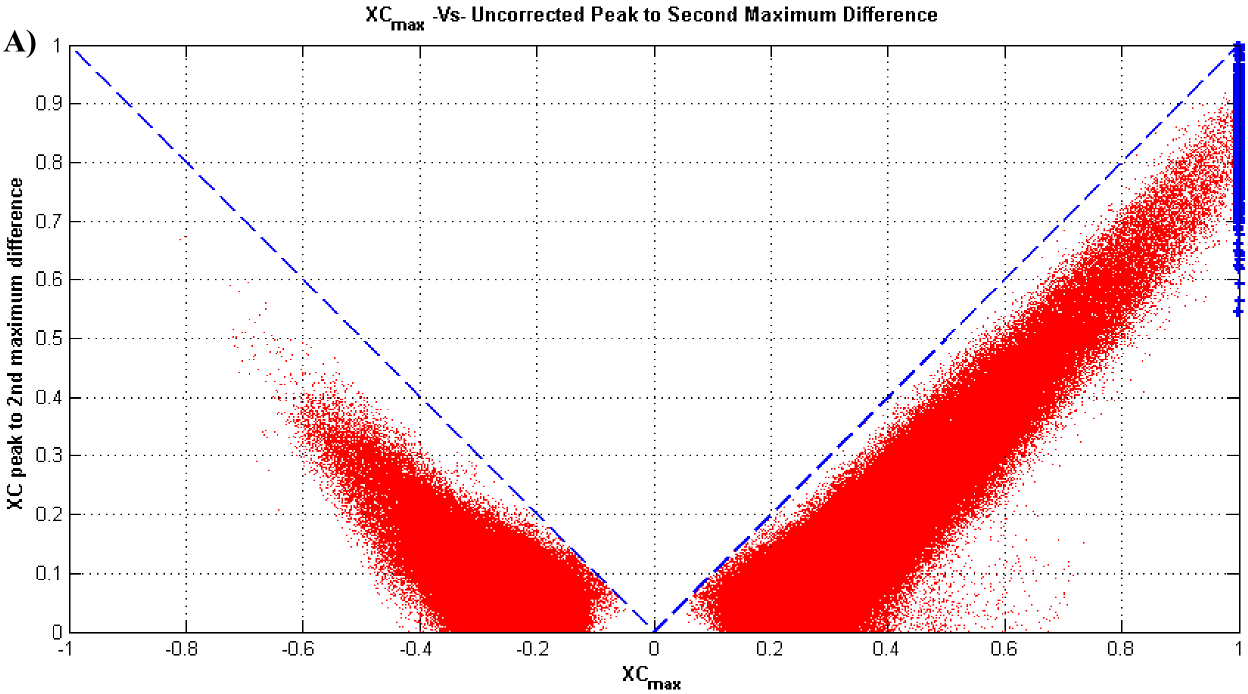
Στα Σχήματα 3.18 παρουσιάζεται η σύγκριση των πινάκων $\mathbf{A_x}$ και $\mathbf{A_p}$, πριν (Σχήμα 3.18_{A}), και μετά τη διόρθωση στον πίνακα $\mathbf{A_p}$ (Σχήμα 3.18_{B}) που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια. Απεικονίζονται, όπως προηγουμένως, και οι αρνητικές τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ ενώ η διαφορά ανάμεσα στο $\mathbf{XC_{max}}$ και στα δευτερεύοντα μέγιστα εκφράζεται κατά απόλυτη τιμή στον πίνακα $\mathbf{A_p}$. Παρατηρείται τόσο για τα θετικά όσο και για τα αρνητικά σκέλη του $\mathbf{XC_{max}}$ μια γενική κλίση όμοια με τις ημιευθείες y=|x|, αλλά με γενικά χαμηλότερες τιμές. Το γεγονός ότι οι τιμές του $\mathbf{A_p}$ είναι γενικά χαμηλότερες οφείλεται στη μεροληψία (*bias*) που προέρχεται από τη μη-μοναδιαία διαφορά του ολικού μεγίστου της **αυτο**συσχέτισης ως προς τα δευτερεύοντα μέγιστά της (Σχήμα 3.17). Τα σημεία της διαγωνίου των δύο πινάκων απεικονίζονται στο διάγραμμα ως μπλε σταυροί, στο δεξί άκρο όπου $\mathbf{XC_{max}}$=1 εξ' ορισμού, ενώ όπως φαίνεται και από την κίτρινη διαγώνιο του σχήματος 3.7_{Δ}, τα αντίστοιχα σημεία του $\mathbf{A_p}$ είναι μικρότερα από τη μονάδα.



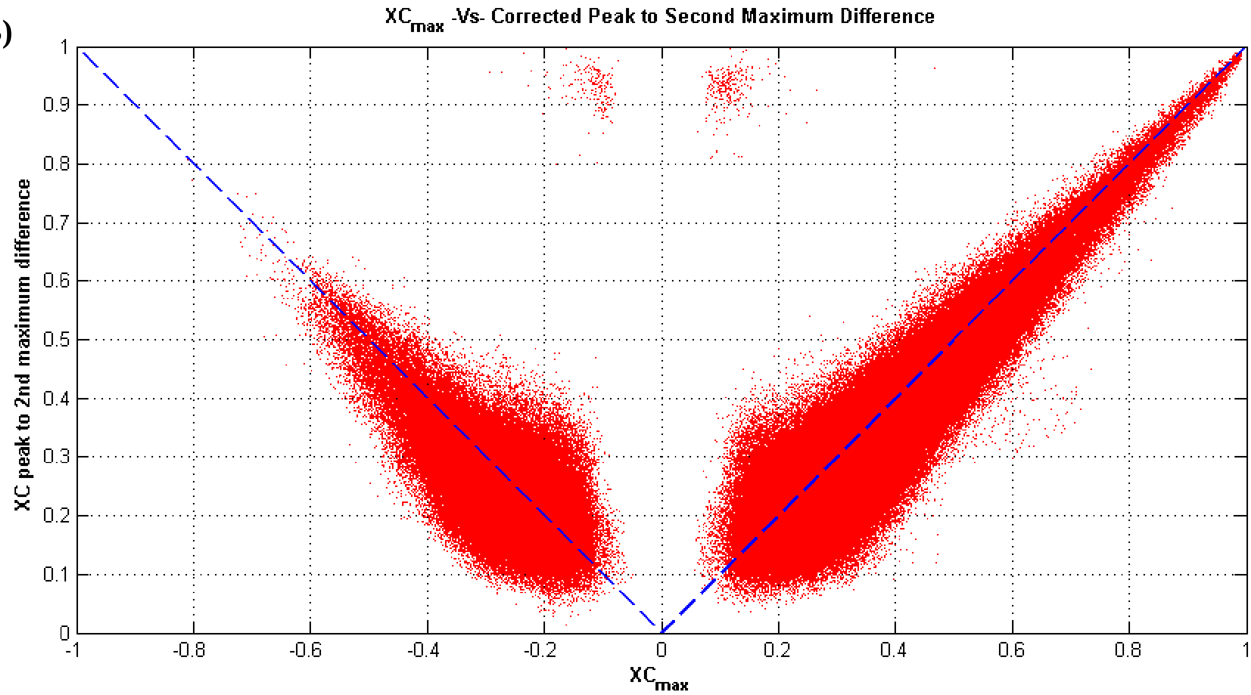
Σχήμα 3.17: Ιστόγραμμα κατανομής διαφορών μεταξύ ολικού μεγίστου **αυτο**συσχέτισης (μονάδα) και δευτερεύοντος μεγίστου για τα 1134 σήματα του δείγματος από το σμήνος του AIO.

Ο πίνακας $\mathbf{A_p}$ πρέπει να διορθωθεί ως προς τη διαγώνιό του. Η διόρθωση γίνεται ως εξής: Κατασκευάζεται ένας νέος πίνακα, έστω $\mathbf{B_p}$, κάθε στοιχείο $\mathbf{B_p}$(i,j) του οποίου υπολογίζεται από τη μέση τιμή των στοιχείων $\mathbf{A_p}$(i,i) και $\mathbf{A_p}$(j,j). Στη συνέχεια οι τιμές του πίνακα $\mathbf{B_p}$ θεωρούνται ως οι μέγιστες που θα μπορούσαν να πάρουν τα αντίστοιχα στοιχεία του πίνακα $\mathbf{A_p}$ και έτσι κάθε στοιχείο του $\mathbf{A_p}$ κανονικοποιείται ως προς το αντίστοιχο του $\mathbf{B_p}$ διαιρώντας ανά στοιχείο: $\mathbf{A_p}'$(i,j)=$\mathbf{A_p}$(i,j)/$\mathbf{B_p}$(i,j). Έτσι για παράδειγμα εάν ένα στοιχείο στον $\mathbf{A_p}$ έχει τιμή 0.5 και στον $\mathbf{B_p}$ έχει τιμή 0.7 τότε το αντίστοιχο στοιχείο στον διορθωμένο πίνακα $\mathbf{A_p}'$ θα έχει τιμή **0.5/0.7≅0.71**.

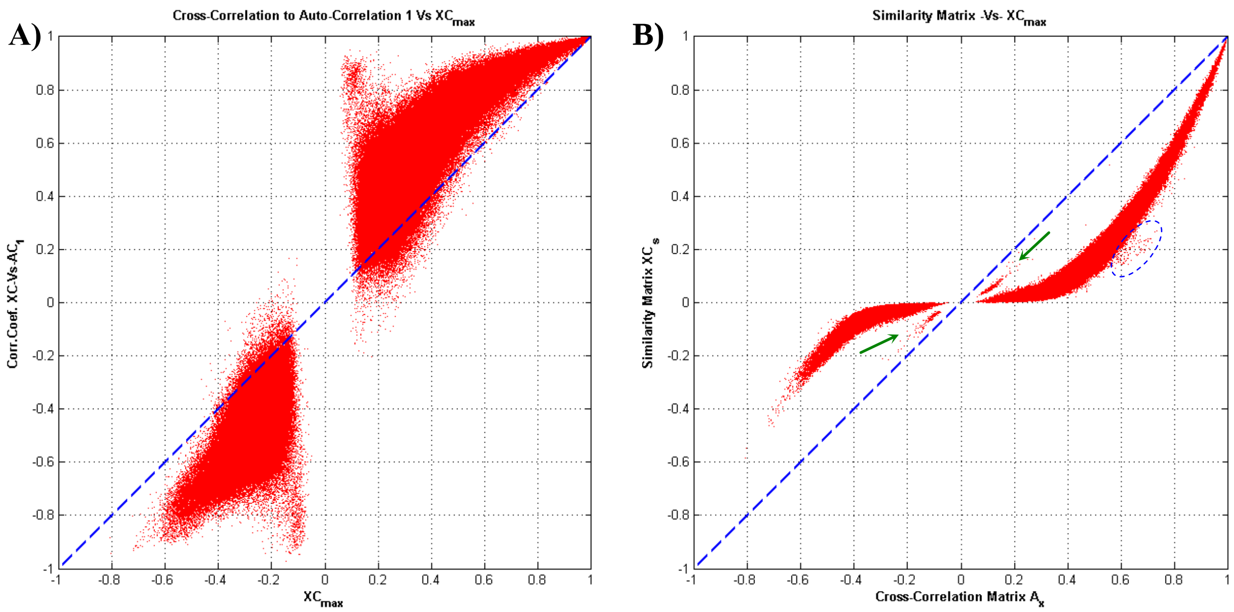
A)



B)



Σχήμα 3.18: A) Σύγκριση των τιμών του πίνακα $\mathbf{A_x}$ στον x-άξονα με τις αντίστοιχες τιμές του μη-διορθωμένου πίνακα $\mathbf{A_p}$ της απόλυτης τιμής της διαφοράς ανάμεσα στο $\mathbf{XC_{max}}$ (ή $\mathbf{XC_{min}}$ εάν $|\mathbf{XC_{min}}|>\mathbf{XC_{max}}$) και στα δύο δευτερεύοντα μέγιστα (ή ελάχιστα αντίστοιχα) της ετεροσυσχέτισης. Επί της ευθείας $\mathbf{XC_{max}}$=1 βρίσκονται κάποια σημεία που συμβολίζονται με σταυρούς. Αυτά ανήκουν στη διαγώνιο των πινάκων και αναφέρονται στην αυτοσυσχέτιση του κάθε σήματος. Η κατανομή αυτών των σημείων φαίνεται στο ιστόγραμμα του Σχήματος 3.17. B) ομοίως για τη σύγκριση του πίνακα $\mathbf{A_x}$ με τον διορθωμένο πίνακα $\mathbf{A_p}$΄



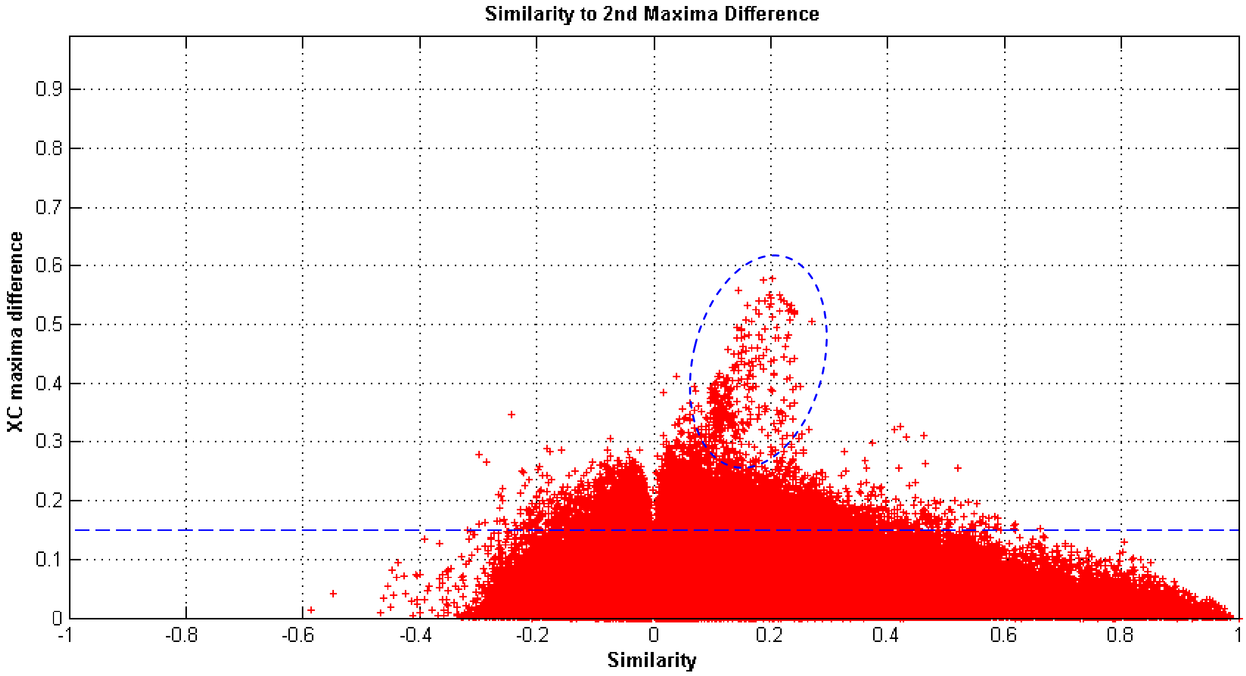
Σχήμα 3.19: Α) Σύγκριση των τιμών του πίνακα $\mathbf{A_x}$ στον x-άξονα με τις αντίστοιχες τιμές του πίνακα $\mathbf{A_a}$ της γραμμικής συσχέτισης ανάμεσα στην καμπύλη ετεροσυσχέτισης και στην καμπύλη αυτοσυσχέτισης του 1^{ου} από τα δύο σήματα. Β) Σύγκριση του αρχικού πίνακα $\mathbf{A_x}$ στον x-άξονα με τον τελικό **πίνακα ομοιότητας** $\mathbf{XC_s}$ στον y-άξονα.

Στο Σχήμα 3.18$_B$, όπου φαίνεται η σύγκριση του διορθωμένου πίνακα $\mathbf{A_p}$΄ με τα αντίστοιχα $\mathbf{XC_{max}}$, η διόρθωση φαίνεται να προκάλεσε τον σχηματισμό ορισμένων τεχνητών σφαλμάτων με υψηλές τιμές $\mathbf{A_p}$΄(i,j) >0.9 σε χαμηλές τιμές $|\mathbf{XC_{max}}|<0.3$. Όπως και στην περίπτωση της σύγκρισης του $\mathbf{A_x}$ με τον πίνακα συμμετρίας $\mathbf{A_s}$ αυτά τα τεχνητά σφάλματα δεν θα επηρεάσουν ιδιαίτερα την τελική λύση λόγω της χαμηλής τιμής του $\mathbf{XC_{max}}$. Το πιο πιθανόν είναι να πρόκειται για ζεύγη κυματομορφών που περιέχουν μόνο θόρυβο (είτε η μία από αυτές είτε και οι δύο) και άρα είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους, αλλά ως προς τον εαυτό τους παρουσιάζουν κάποια περιοδικότητα (τουλάχιστον η μία από αυτές), τέτοια που θέτει το δευτερεύον μέγιστο της αυτοσυσχέτισής τους πολύ κοντά στη μονάδα, και άρα η διαφορά μεταξύ ολικού μεγίστου αυτοσυσχέτισης (μονάδα) και δευτερεύοντος μεγίστου είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα ο παρονομαστής στη διόρθωση του πίνακα A_p να είναι πολύ μικρός, άρα το αποτέλεσμα της διόρθωσης να δώσει κάτι πολύ μεγαλύτερο από την αρχική τιμή.

Τέλος, στο Σχήμα 3.19$_B$ γίνεται η σύγκριση του πίνακα $\mathbf{A_x}$ με τον πίνακα $\mathbf{A_a}$ που απεικονίζει την ομοιότητα της καμπύλης ετεροσυσχέτισης με την καμπύλη αυτοσυσχέτισης του 1^{ου} από τα 2 σήματα (εκείνου με τον αριθμό ταυτοποίησης που ορίζεται από την εκάστοτε γραμμή του πίνακα), όπου εδώ απεικονίζονται οι αρνητικοί κλάδοι τόσο για τις τιμές του $\mathbf{A_x}$ (άξονας-x) όσο και για τις τιμές του $\mathbf{A_a}$ (άξονας-y). Οι τιμές του $\mathbf{A_a}$ θεωρήθηκαν ως μέτρο της συμμετρίας, και πράγματι κάπως έτσι λειτουργεί: παρατηρείται για το θετικό τμήμα του $\mathbf{A_a}$ ως προς τον $\mathbf{A_x}$ ότι η μορφή είναι παρόμοια με εκείνη του διαγράμματος σύγκρισης του $\mathbf{A_s}$ με τον $\mathbf{A_x}$, ακόμα και ως προς τη χαρακτηριστική «ουρά» (τεχνητό σφάλμα) για $0 \le \mathbf{XC_{max}} \le 0.2$. Όμοια εικόνα δίνει και ο αρνητικός κλάδος. Οι τιμές του $\mathbf{A_a}$ είναι εδώ αρνητικές καθώς η ετεροσυσχέτιση είναι επικεντρωμένη στο αρνητικό ολικό ελάχιστο και άρα η συσχέτισή της με την καμπύλη αυτοσυσχέτισης, η οποία έχει πάντα μοναδιαίο *θετικό* μέγιστο σε μηδενική χρονική καθυστέρηση, αναμένεται να είναι αρνητική.

Με τα δεδομένα των προηγούμενων πινάκων και ύστερα από την παρατήρηση ορισμένων ιδιαιτεροτήτων, όπως ο λοβός του Σχήματος 3.14 μέσα στη διακεκομμένη μπλε έλλειψη ο οποίος είναι εν γένει ανεπιθύμητος (ανεξάρτητα από το αν υπάρχουν περιπτώσεις όπως αυτή στην οποία αναφέρονται τα Σχήματα 3.15, 3.16 στις οποίες τα σήματα *μπορεί* να ανήκουν πράγματι σε ζεύγη όμοιων σεισμών), μπορεί να κατασκευαστεί ένας πίνακας που θα συνυπολογίζει όσες παραμέτρους θεωρείται πως συνδέονται με την ομοιότητα 2 σημάτων ώστε σε περίπτωση που το $\mathbf{XC_{max}}$ από μόνο του δεν αρκεί να δώσει ασφαλή αποτελέσματα ως προς την ομοιότητα 2 σημάτων, τα υπόλοιπα να επηρεάζουν με τον τρόπο τους την εικόνα της ομοιότητας των διαφόρων ζευγών γεγονότων.

Ο **Πίνακας Ομοιότητας** (***Similarity Matrix***), $\mathbf{XC_s}$ (σχήμα $3.7_{\Sigma T}$), κατασκευάζεται **πολλαπλασιάζοντας ανά στοιχείο** τους πίνακες $\mathbf{A_x}'$, $\mathbf{A_p}'$ και $\mathbf{A_a \sim A_b}$. Η τιμή **ενός στοιχείου** (i,j) στον πίνακα ομοιότητας θα καλείται $\mathbf{S_{ij}}$ (αντίστοιχα με τις τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ για τον πίνακα $\mathbf{A_x}$). Το αποτέλεσμα μπορεί να συγκριθεί με τον αρχικό πίνακα $\mathbf{A_x}$ που δίνει απλές μετρήσεις του $\mathbf{XC_{max}}$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.19_B. Παρατηρείται ότι, όπως αναμενόταν, όλες οι τιμές του πίνακα $\mathbf{XC_s}$ είναι γενικά μικρότερες από τις αντίστοιχες του πίνακα $\mathbf{A_x}$ διότι όλα τα στοιχεία του αρχικού πίνακα $\mathbf{A_x}'$, που τελικά έδωσαν τα στοιχεία του $\mathbf{XC_s}$, πολλαπλασιάστηκαν 2 φορές με κάποια άλλα στοιχεία (των πινάκων $\mathbf{A_p}'$ και $\mathbf{A_a \sim A_b}$) που ήταν επίσης μικρότερα από τη μονάδα. Αυτό έχει ως άμεση συνέπεια το θεωρούμενο κατώφλι, για το οποίο θα γίνει λόγος στη συνέχεια, να είναι οπωσδήποτε χαμηλότερο στον πίνακα $\mathbf{XC_s}$ απ' ότι θα ήταν στον πίνακα $\mathbf{A_x}$.



Σχήμα 3.20: Σύγκριση των τιμών του **πίνακα ομοιότητας** $\mathbf{XC_s}$ στον x-άξονα με τις αντίστοιχες τιμές του πίνακα $\mathbf{A_m}$ της διαφοράς ανάμεσα στα δύο δευτερεύοντα μέγιστα της ετεροσυσχέτισης. Σημειώνεται μέσα σε μπλε διακεκομμένη έλλειψη ο λοβός που φαίνεται και στο σχήμα 3.14.

Παρατηρείται επίσης στο Σχήμα 3.20 που δείχνει μια νέα εικόνα για τον $\mathbf{XC_s}$, αντίστοιχη του Σχήματος 3.14 για τον $\mathbf{A_x}$, όπου φαίνεται πως ο εν γένει ανεπιθύμητος λοβός που περιέχεται στην μπλε διακεκομμένη έλλειψη των δύο σχημάτων βρίσκεται σε χαμηλότερες τιμές ***Ομοιότητας*** *(Similarity)* (μικρότερες από 0.3) απ' ότι σε τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ (όπου εμφανιζόταν λίγο πιο κάτω από το 0.8). Αυτό οφείλεται στην επιλεκτική μείωση των τιμών ομοιότητας στα στοιχεία εκείνα τα οποία εμφάνιζαν υψηλό $\mathbf{XC_{max}}$ αλλά σχετικά χαμηλό βαθμό συμμετρίας (με τη μορφή που αποδίδεται από τον $\mathbf{A_a \sim A_b}$) ή διορθωμένης διαφοράς $\mathbf{XC_{max}}$ και δευτερεύοντος μεγίστου ($\mathbf{A_p}'$). Οι μικροί δευτερεύοντες λοβοί του Σχήματος 3.19_B που σημειώνονται με πράσινα βέλη στην περιοχή $|\mathbf{XC_{max}}|<0.2$ πιθανόν ανήκουν σε ζεύγη σημάτων με υψηλό βαθμό συμμετρίας στην ετεροσυσχέτιση αλλά με χαμηλό $\mathbf{XC_{max}}$, ή ακόμη και στα τεχνητά σφάλματα του σχήματος 3.18_B με $\mathbf{XC_{max}}<0.2$ και αντίστοιχες τιμές στον πίνακα $\mathbf{A_p}'$ μεγαλύτερες από 0.8. Οι ιδιαίτερα χαμηλές τους τιμές στον πίνακα $\mathbf{XC_s}$ τα καθιστούν αμελητέα.

3.5 ~ *Ομαδοποίηση Γεγονότων*

Από τα στοιχεία του πίνακα $\mathbf{A_x}$ (και αντίστοιχα του $\mathbf{XC_s}$) μπορεί να δημιουργηθεί ένα δενδρόγραμμα στο οποίο ομαδοποιούνται τα διάφορα ζεύγη όμοιων σημάτων σε συστάδες (*clusters*). Ένα τέτοιο δενδρόγραμμα μπορεί πραγματικά να το φανταστεί κάποιος σαν ένα «οικογενειακό δέντρο» σεισμών βασισμένο στην ομοιότητα που έχουν μεταξύ τους τα διάφορα σήματα. Ένας απλός τρόπος σχηματισμού συστάδων είναι ο παρακάτω.

Ορίζεται μια **τιμή κατωφλίου**, η οποία από εδώ και στο εξής θα καλείται με τον συμβολισμό $\mathbf{C_{th}}$ και με αναφορά στον πίνακα ο οποίος χρησιμοποιείται (για παράδειγμα $\mathbf{C_{th}}$ = 0.70 για τον πίνακα $\mathbf{A_x}$ ή αντίστοιχα $\mathbf{C_{th}}$=0.60 για τον πίνακα $\mathbf{XC_s}$, για τον οποίο σε ορισμένες περιπτώσεις το $\mathbf{C_{th}}$ μπορεί να φτάσει το 0.50 ή ακόμα χαμηλότερα), εξετάζονται οι τιμές του πίνακα ανά γραμμή και **ομαδοποιούνται οι σεισμοί** με τη λογική:

«*αν το ζεύγος γεγονότων (**Α,Β**) έχει τιμή $\boldsymbol{XC_{max}\geq C_{th}}$ και το ζεύγος γεγονότων (**Β,Γ**) ομοίως, τότε τα γεγονότα **Α,Β,Γ** ανήκουν στην ίδια ομάδα*», ή με άλλα λόγια «*αν το **Α** είναι όμοιο με το **Β** και το **Β** όμοιο με το **Γ** τότε το **Α** είναι περίπου όμοιο με το **Γ** αλλά πιθανόν σε διαφορετικό βαθμό*».

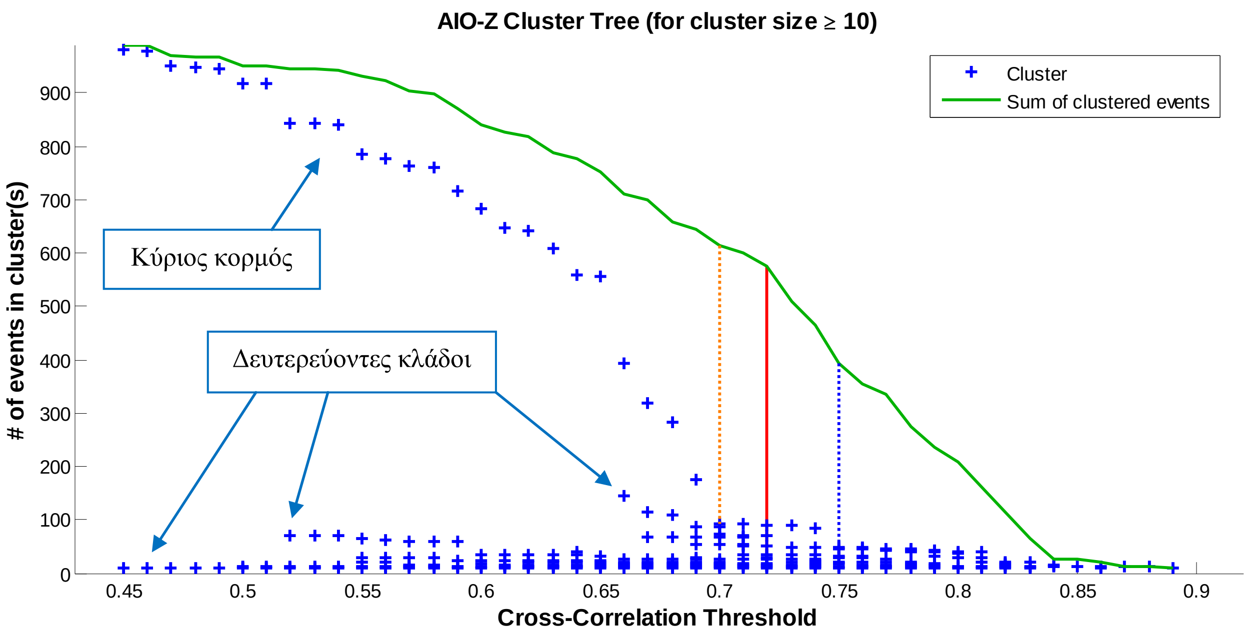
Η λογική αυτή είναι γνωστή ως αλγόριθμος ομαδοποίησης «απλής σύνδεσης» (*single linkage*) ή του «πλησιέστερου γείτονα» (*nearest neighbor*) και είναι ικανή να οδηγήσει σε ευρύτερες ομάδες γεγονότων που μπορεί να περιλαμβάνουν σεισμούς π.χ. με αρκετά διαφορετική διάρκεια πηγής αλλά με όμοια θέση υποκέντρου και παρόμοιο μηχανισμό γένεσης, ή με παρόμοια πηγή και ίδιο μηχανισμό αλλά ελάχιστα διαφορετικό υπόκεντρο κ.ο.κ. Στις ομάδες που δημιουργούνται είναι πολύ πιθανόν για κάποια γεγονότα Α, Β, Γ τα ζεύγη **Α-Β**, **Β-Γ** να ικανοποιούν το κριτήριο $\mathbf{XC_{max}>C_{th}}$ ενώ το ζεύγος **Α~Γ** να μην το ικανοποιεί. Τα Α και Γ συνδέονται μεταξύ τους διαμέσω του Β. Αυτό μπορεί να συμβαίνει για παράδειγμα αν τα Α, Β, Γ, βρίσκονται σε ολοένα μεγαλύτερα βάθη με το Β να βρίσκεται κάπου ενδιάμεσα ενώ και τα 3 έχουν κοινούς ή παραπλήσιους μηχανισμούς γένεσης και όμοια πηγή. Θα ονομάζονται στο εξής οι σχέσεις των **Α-Β** και **Β-Γ** σχέσεις «**άμεσης συγγένειας**» και οι σεισμοί που συνιστούν τα ζεύγη (Α,Β) και (Β,Γ) «**άμεσοι συγγενείς**» ενώ η σχέση **Α~Γ**, για ευκολία στη γραφή, θα ονομάζεται σχέση «**έμμεσης συγγένειας**».

Στις επόμενες παραγράφους θα γίνεται συνήθως χρήση του $\mathbf{XC_{max}}$ του οποίου η έννοια είναι πιο άμεσα αντιληπτή από αυτή του $\mathbf{S_{ij}}$ (*δείκτης ή βαθμός ομοιότητας*), θεωρώντας ότι τα σήματα στα οποία αναφέρεται, εφόσον ικανοποιούν τη συνθήκη $\mathbf{XC_{max}\geq C_{th}}$ είναι όμοια, δηλαδή καλύπτουν τις συνθήκες συμμετρίας και διαφοράς μεγίστων. Το $\mathbf{XC_{max}}$ μπορεί, φυσικά, να αντικατασταθεί αργότερα από το $\mathbf{S_{ij}}$, και στην πράξη αυτό θα γίνει κατά τις εφαρμογές στα Κεφάλαια 4 και 5 όπου το $\mathbf{S_{ij}}$ χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των όμοιων σεισμών αλλά το $\mathbf{XC_{max}}$ χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως μέτρο ομοιότητας (ή ως βάρος) στα ζεύγη σημάτων τα οποία έχουν προηγουμένως διακριθεί ως όμοια βάσει του πίνακα ομοιότητας, $\mathbf{XC_s}$.

Για μια δεδομένη τιμή κατωφλίου δημιουργούνται διάφορες συστάδες βάσει του αλγορίθμου απλής σύνδεσης. Στο Παράρτημα Β, Σχήμα Β.57 φαίνεται ένα δενδρόγραμμα συνδέσεων για τους σεισμούς του δείγματος με $\mathbf{C_{th}}$=0.90 στον Πίνακα $\mathbf{A_x}$. Ωστόσο, παρουσιάζονται μόνο όσοι σεισμοί έχουν βρεθεί να ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών με αυτή την τιμή κατωφλίου καθώς και ο τρόπος με τον οποίο οι συστάδες αυτές διασπώνται όταν η τιμή κατωφλίου αυξάνεται, προς το κάτω μέρος του δενδρογράμματος, μετά την οριζόντια κόκκινη γραμμή που ορίζει το κατώφλι. Πάνω από τη γραμμή αυτή το δενδρόγραμμα δείχνει τον τρόπο με τον οποίο θα ενοποιούνταν σε συστάδες τα γεγονότα που βρέθηκαν να ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών για $\mathbf{C_{th}}$=0.90. Η εικόνα πάνω από την κόκκινη γραμμή **δεν** είναι η πραγματική για το δείγμα των 1134 γεγονότων που εξετάζονται σε αυτό το κεφάλαιο, καθώς υπάρχουν και άλλα γεγονότα που δεν παρουσιάζονται στο Σχήμα Β.57 τα οποία καθώς μειώνεται η τιμή κατωφλίου ενοποιούνται με τις παρούσες συστάδες ή δημιουργούν άλλες.

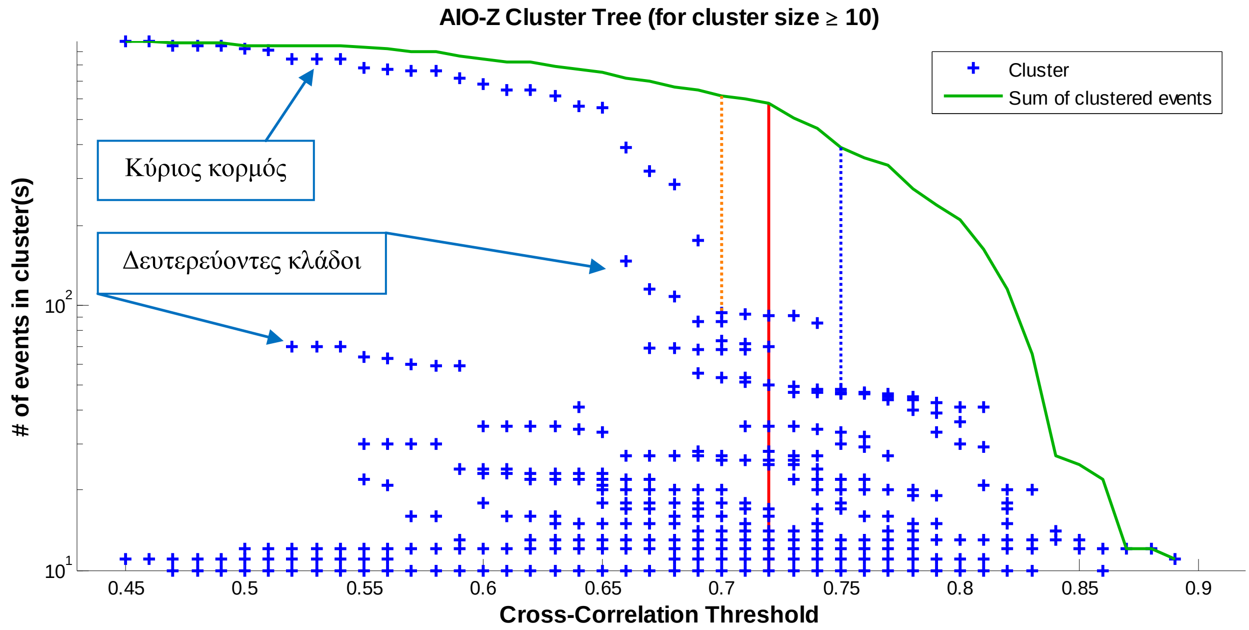
Κάποια από αυτά μπορούν να παίξουν τον ρόλο του «ενδιάμεσου» συγγενή που ενδεχομένως να ενοποιήσει ορισμένες από τις ομάδες του σχήματος Β.57 σε μεγαλύτερες τιμές κατωφλίου απ' ότι φαίνεται σε αυτό το σχήμα. Δεν παρουσιάζεται όλο το πλήθος των 1134 γεγονότων σε αυτό το σχήμα, αφενός μεν γιατί δεν θα ήταν ευδιάκριτοι οι τελευταίοι κλάδοι στο κάτω μέρος, αφετέρου διότι ένα μεγάλο πλήθος γεγονότων δεν εντάσσεται σε συστάδες παρά μόνο για πολύ μικρές τιμές κατωφλίου και αυτό έχει ως συνέπεια να είναι ευδιάκριτοι μόνο οι κλάδοι στο πάνω μέρος για αυτές τις μικρές τιμές κατωφλίου που στην πραγματικότητα δεν παρουσιάζουν ενδιαφέρον.

Καθώς δεν είναι πρακτικό στη χρήση το δενδρόγραμμα του Σχήματος Β.57 σε αυτή την εργασία θα χρησιμοποιείται ως «δενδρόγραμμα» ένα άλλο διάγραμμα. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.21 το οποίο αναδεικνύει το εύρος στο οποίο βρίσκεται η καλύτερη επιλογή που μπορεί να γίνει για την τιμή κατωφλίου, $\mathbf{C_{th}}$, στον πίνακα ετεροσυσχέτισης, $\mathbf{A_x}$. Η επιλογή αυτή μπορεί να γίνει βάσει του αριθμού και του μεγέθους των συστάδων που σχηματίζονται ώστε να χωριστεί ένα φαινομενικά ενιαίο σμήνος σεισμών σε επιμέρους ομάδες με ποιοτικές διαφορές μεταξύ των σεισμών της μιας ομάδας σε σχέση με εκείνους της άλλης. Στο Σχήμα 3.21 στον οριζόντιο άξονα βρίσκεται η τιμή κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$ που επιλέγεται κάθε φορά για τη δημιουργία συστάδων, οι μπλε σταυροί αντιπροσωπεύουν τις συστάδες που δημιουργούνται ανάλογα με την επιλογή κατωφλίου, ο άξονας-y μετράει τον αριθμό γεγονότων που περιέχει η κάθε συστάδα ο οποίος καλείται **μέγεθος συστάδας**.



Σχήμα 3.21: Δενδρόγραμμα όμοιων σεισμών με συστάδες δημιουργημένες από τη σύγκριση **αφιλτράριστων** κυματομορφών της Z-συνιστώσας του σταθμού AIO. Έχουν χρησιμοποιηθεί οι τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ του πίνακα ετεροσυσχέτισης $\mathbf{A_x}$.

Στα Σχήματα 3.21, 3.22 παρουσιάζονται μόνο όσες συστάδες έχουν τουλάχιστον 10 γεγονότα. Στα επόμενα σχήματα δενδρογραμμάτων παρουσιάζονται όλες οι συστάδες μεγέθους από 2 (*doublet*) και άνω. Η πράσινη συνεχής γραμμή δείχνει το άθροισμα των γεγονότων που περιέχονται σε συστάδες μεγέθους 10 ή παραπάνω γεγονότων, δηλαδή των συστάδων που προβάλλονται στο δενδρόγραμμα με τους μπλε σταυρούς στις αντίστοιχες τιμές κατωφλίου. Η κόκκινη κατακόρυφη γραμμή σημειώνει την τιμή κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$ που έδωσε το μεγαλύτερο αριθμό συστάδων. Εδώ η τιμή αυτή είναι 0.72 στην οποία δημιουργούνται 24 συστάδες (μεγέθους από 10 και άνω) η μεγαλύτερη από τις οποίες περιέχει 91 γεγονότα.



Σχήμα 3.22: το ίδιο δενδρόγραμμα με αυτό του προηγούμενου σχήματος αλλά σε λογαριθμικό άξονα y. Με αυτόν τον τρόπο φανερώνεται λεπτομερέστερα ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσονται όλοι οι δευτερεύοντες κλάδοι.

Η διακεκομμένη πορτοκαλί κατακόρυφη γραμμή δίνει ίσως το σημαντικότερο κριτήριο επιλογής κατωφλίου για τη δημιουργία συστάδων καθώς είναι εκείνη η τιμή στην οποία η διαφορά μεταξύ του μεγέθους της μεγαλύτερης συστάδας και του αθροίσματος των συσταδοποιημένων γεγονότων (πράσινη γραμμή) γίνεται μέγιστο. Αριστερά της γραμμής αυτής παρατηρείται μια απότομη αύξηση του μεγέθους της μεγαλύτερης συστάδας. Αυτό συμβαίνει διότι κάτω από το κατώφλι που σημειώνει η πορτοκαλί γραμμή ορισμένες από τις μικρότερες συστάδες ενοποιούνται σε μια μεγαλύτερη παρά τις διαφορές που μπορεί να παρουσιάζουν μεταξύ τους τα σήματα των επιμέρους συστάδων.

Η μπλε διακεκομμένη γραμμή είναι το αντίστοιχο της γραμμής με το πορτοκαλί χρώμα αλλά με τη θεώρηση του λογαρίθμου των μεγεθών των συστάδων και του αθροίσματός τους (το μήκος της μεγιστοποιείται αν παρουσιαστεί το δενδρόγραμμα σε ημιλογαριθμικούς άξονες όπως στο Σχήμα 3.22). Ποιοτικά μπορεί να θεωρηθεί ως ένα άνω όριο για την επιλογή του κατωφλίου καθώς αριστερά της μπλε γραμμής εμφανίζεται ένας από τους **δευτερεύοντες κλάδους** ο οποίος στη συνέχεια, αριστερά της γραμμής με πορτοκαλί χρώμα ενοποιείται με κάποιους άλλους και δημιουργεί τον **κύριο κορμό**, τη μεγαλύτερη από τις συστάδες στην οποία καταλήγουν όλοι οι σμηνοσεισμοί όσο μειώνεται η τιμή κατωφλίου. Ένα μειονέκτημα αυτής της μεθόδου ομαδοποίησης με απλή σύνδεση (*single linkage*) είναι ότι ένα ζεύγος γεγονότων με $\mathbf{XC_{max}>C_{th}}$ *αρκεί* για να ενοποιήσει 2 οσοδήποτε μεγάλες συστάδες οι οποίες για λίγο μεγαλύτερη τιμή $\mathbf{C_{th}}$, βάσει της ίδιας μεθόδου, διαχωρίζονται.

Όσο ελαττώνεται η τιμή κατωφλίου ο κύριος κορμός τείνει προς την πράσινη γραμμή, με άλλα λόγια όλα τα γεγονότα τείνουν να ενοποιηθούν με τον κύριο κορμό και το μέγεθος (ο αριθμός γεγονότων στη συστάδα) του κύριου κορμού τείνει να ταυτιστεί με το άθροισμα του αριθμού γεγονότων που βρίσκονται σε συστάδες μεγέθους 10 και άνω γεγονότων (ή 2 και άνω, ανάλογα με την απεικόνιση).

Για υψηλές τιμές κατωφλίου οι συστάδες που δημιουργούνται αποτελούνται η κάθε μία από σήματα σεισμών που έχουν εξαιρετικά όμοιες κυματομορφές και οι οποίες αποτελούν αναμφίβολα συστάδες σμηνοσεισμών. Από τη στιγμή που ισχύει αυτό, ακόμη και αν δεν είναι γνωστό *πού* συνέβησαν αυτοί οι σεισμοί, το βέβαιο είναι πως τόσο τα υπόκεντρά τους όσο και οι μηχανισμοί γένεσής τους είναι παρόμοιοι, τουλάχιστον τα γεγονότα τα οποία είναι μεταξύ τους άμεσοι συγγενείς (με $\mathbf{XC_{max}>C_{th}}$). Η παραπάνω μεθοδολογία προσφέρεται στο να γίνει ένας σχετικά γρήγορος αυτόματος διαχωρισμός των σεισμών σε ομάδες με κριτήριο τα όμοια σήματα, ωστόσο το τελικό αποτέλεσμα πρέπει να ελεγχθεί με μη-αυτόματο τρόπο, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις στις οποίες μέσα σε κάποια ομάδα έχει επιλεχθεί ένας σεισμός που από τον προσδιορισμό του υποκέντρου του φαίνεται να μην βρίσκεται στην ίδια περιοχή με τους υπόλοιπους (Παράρτημα Α.2, Σχήμα Α.10).

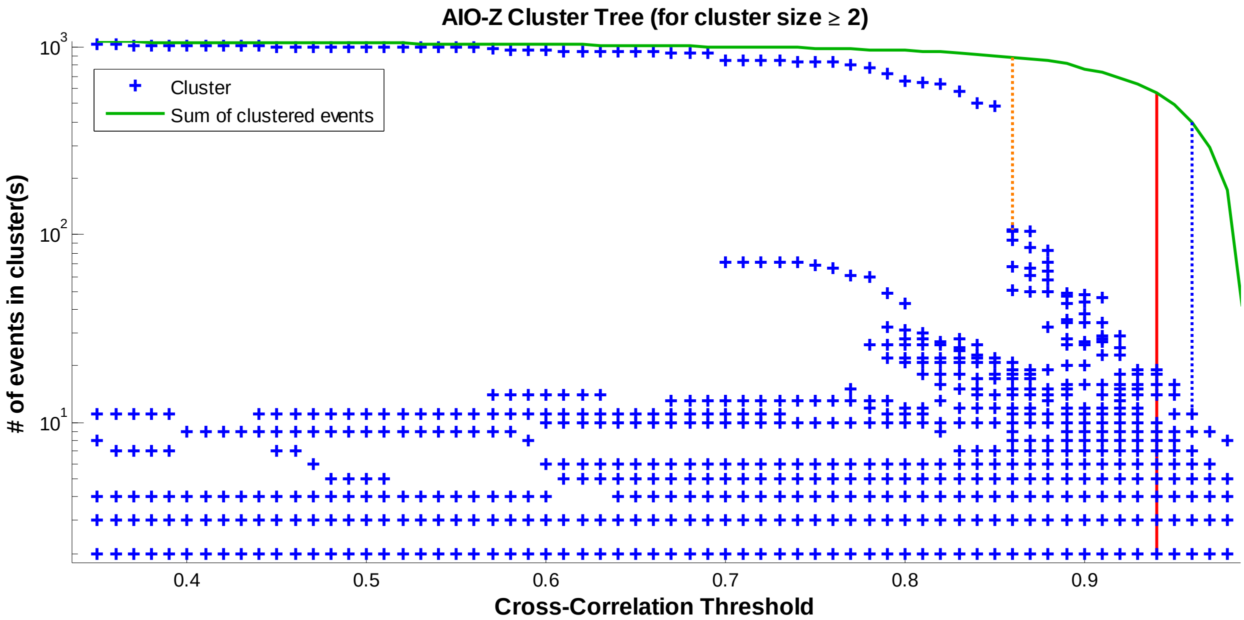
Αντίστοιχο ενδιαφέρον παρουσιάζουν περιπτώσεις στις οποίες κάποιος σεισμός ενώ φαίνεται να εντοπίζεται χωρικά εντός μιας συστάδας Α, εν τούτοις κατέληξε να ανήκει σε μία άλλη συστάδα Β λόγω της εμφάνισης χαμηλού $\mathbf{XC_{max}}$ με τα γεγονότα της Α και με $\mathbf{XC_{max} \geq C_{th}}$ με τουλάχιστον ένα από τα γεγονότα της Β. Καθώς οι 2 διαδικασίες: α) ο προσδιορισμός του υποκέντρου και χρόνου γένεσης και β) ο διαχωρισμός σε ομάδες σεισμών με όμοια σήματα, έχουν γίνει με ανεξάρτητο τρόπο μεταξύ τους είναι πιθανόν το αποτέλεσμα της μίας η της άλλης διαδικασίας να έχει δώσει για κάποιο λόγο αρκετά εσφαλμένες τιμές.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αντίστοιχα δενδρογράμματα σε ημιλογαριθμική κλίμακα που προέκυψαν από τον πίνακα $\mathbf{A_x}$΄, του $\mathbf{XC_{max}}$ από φιλτραρισμένες κυματομορφές μεταξύ 0.5-15Hz) (Σχήμα 3.23), και από τον πίνακα $\mathbf{A_c}$, της μέσης συνοχής $\mathbf{m_{coh}}$ μεταξύ 2-15Hz (Σχήμα 3.24). Στην πρώτη περίπτωση παρατηρούνται ομοιότητες με το προηγούμενο δενδρόγραμμα (Σχήμα 3.22) με τη διαφορά ότι όλοι οι κλάδοι έχουν μετατοπιστεί σε υψηλότερες τιμές κατωφλίου, όπως αναμενόταν από τη σύγκριση των πινάκων $\mathbf{A_x}$, $\mathbf{A_x}$΄ (Σχήμα 3.11$_A$). Στην περίπτωση του δενδρογράμματος του Σχήματος 3.24 που έχει προκύψει από τον πίνακα της μέσης συνοχής, $\mathbf{A_c}$, παρατηρείται κάτι αναμενόμενο από τις παρατηρήσεις κατά τη σύγκριση των πινάκων $\mathbf{A_x}$, $\mathbf{A_c}$ (Σχήμα 3.11$_B$): για τιμές κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$<0.78 όλα τα γεγονότα συγκεντρώνονται στον κύριο κορμό και ταυτίζονται με την πράσινη γραμμή. Αυτό ήταν αναμενόμενο, διότι ένα μεγάλο ποσοστό των ζευγών γεγονότων με $0.2 \leq \mathbf{XC_{max}} \leq 0.5$ εμφανίζει $\mathbf{m_{coh}}$ λίγο μικρότερο από 0.78. Άρα, ούτως ή άλλως, από μόνη της η μέση συνοχή δε μπορεί να αποτελεί κριτήριο ομοιότητας. Ένα αντίστοιχο παράδειγμα αναφέρεται στην εργασία των *Schaff et al.*, (2004) όπου χρησιμοποιείται ως κριτήριο ομοιότητας το άθροισμα των $\mathbf{XC_{max}}$, $\mathbf{m_{coh}}$ με $\mathbf{C_{th}}$=1.7 :

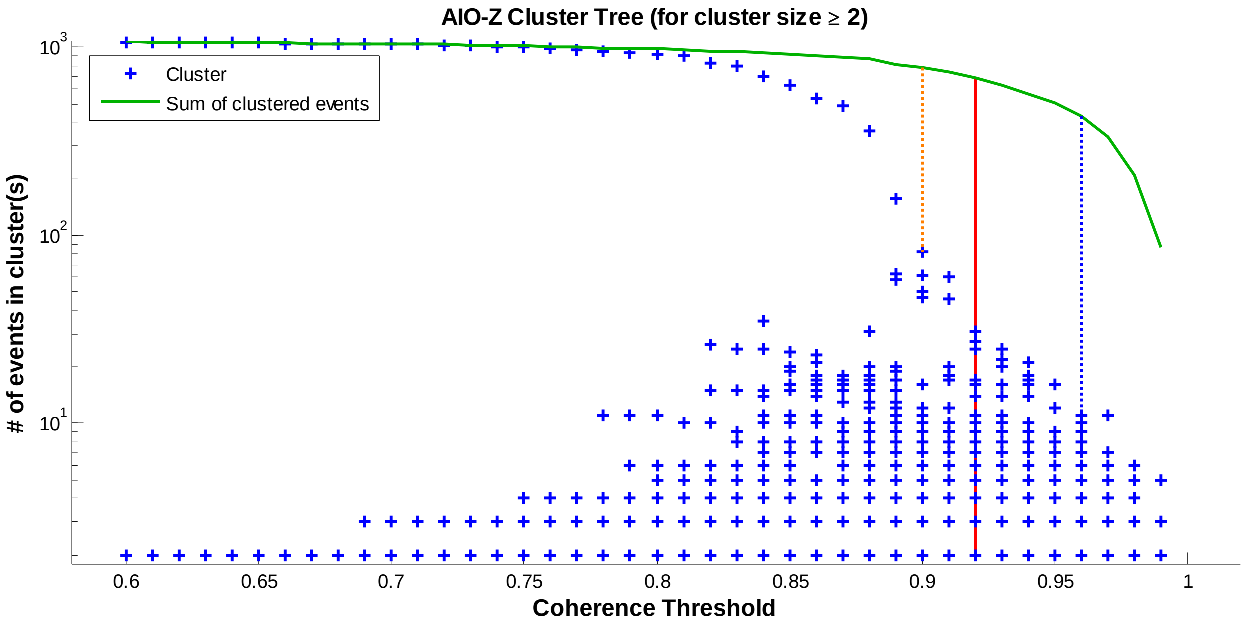
$$(\textit{Schaff et al., 2004}) \qquad \mathbf{XC_{max} + m_{coh} \geq 170\%} \tag{3.1}$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει πως ακόμα και για $\mathbf{m_{coh}}$=100% πρέπει να είναι $\mathbf{XC_{max}} \geq$70% καθώς όπως παρατηρήθηκε σε εκείνη την εργασία υπήρξαν πολλές περιπτώσεις στις οποίες ήταν $\mathbf{m_{coh}} \cong$90% ενώ $\mathbf{XC_{max}} \cong$70% και παράλληλα τα υπόλοιπα (*residuals*) ήταν αρκετά μεγάλα. Επίσης, αναφέρεται ότι για τιμές γύρω στο 90% το $\mathbf{XC_{max}}$ ανταποκρίνεται καλύτερα ως μέτρο ομοιότητας απ' ότι το $\mathbf{m_{coh}}$, καθώς για το πρώτο τα υπόλοιπα των τυπικών αποκλίσεων είναι γύρω στα 10msec, όσο δηλαδή το διάστημα δειγματοληψίας των δεδομένων τους, ενώ για το $\mathbf{m_{coh}}$ τα υπόλοιπα κυμαίνονται από 5-30msec. Σημειώνουν επίσης, οι *Schaff et al.*, (2004), ότι εάν είναι να χρησιμοποιηθεί μόνο ένα μέτρο ομοιότητας, το $\mathbf{XC_{max}}$ παρέχει ένα πιο ασφαλές κριτήριο απ' ότι το $\mathbf{m_{coh}}$. Το δενδρόγραμμα που προκύπτει για το άθροισμα $\mathbf{XC_{max}+m_{coh}}$ (των πινάκων $\mathbf{A_x}$΄$\mathbf{+A_c}$) φαίνεται στο Σχήμα 3.25.

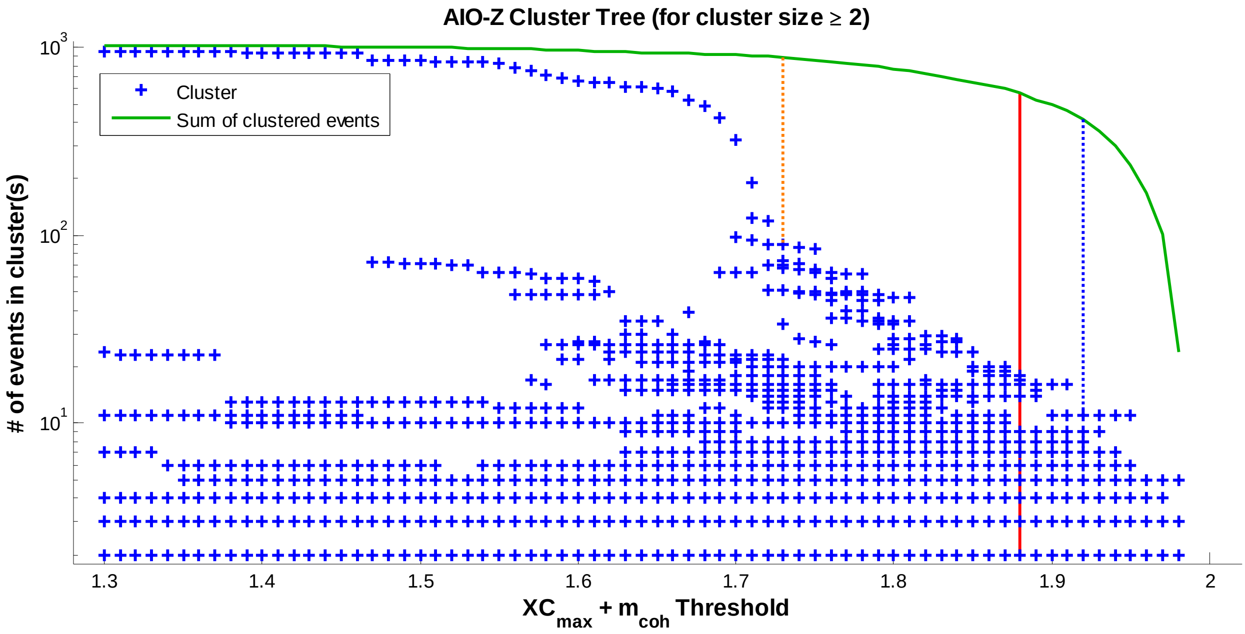
Στην παρούσα εργασία υιοθετείται η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης με όλα τα χαρακτηριστικά που εμφανίζει στην περίπτωση σύγκρισης όμοιων σεισμών, παράγοντας τον *βαθμό* ή *δείκτη ομοιότητας*, $\mathbf{S_{ij}}$ (στοιχείο του πίνακα $\mathbf{XC_s}$), που τελικά χρησιμοποιείται στη μελέτη των συστάδων σμηνοσεισμών. Στο Σχήμα 3.26 παρουσιάζεται το αντίστοιχο δενδρόγραμμα που προέκυψε από τον πίνακα ομοιότητας, $\mathbf{XC_s}$. Η εικόνα που φαίνεται μοιάζει με εκείνη που έδωσε το δενδρόγραμμα του πίνακα $\mathbf{A_x}$΄ με τη διαφορά ότι οι κλάδοι έχουν μετατοπιστεί σε χαμηλότερες τιμές κατωφλίου. Αυτό βοηθάει στο να μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη «ανάλυση» (*resolution*) των συστάδων κατά τη μείωση της τιμής κατωφλίου στην περιοχή των υψηλών τιμών που ενδιαφέρει.



Σχήμα 3.23: Δενδρόγραμμα όμοιων σεισμών σε ημιλογαριθμική κλίμακα με συστάδες δημιουργημένες από τη σύγκριση **φιλτράρισμένων** κυματομορφών της Z-συνιστώσας του σταθμού AIO με ζωνοπερατό φίλτρο Butterworth 0.5-15Hz.



Σχήμα 3.24: δενδρόγραμμα σε ημιλογαριθμική κλίμακα με συστάδες που προέκυψαν από τον πίνακα **μέσης συνοχής** $\mathbf{A_c}$. Όπως φαίνεται και από την εικόνα του ίδιου του πίνακα (Σχ.3.7$_Γ$) οι τιμές της συνοχής βρίσκονται γενικά σε υψηλά επίπεδα, πράγμα που περιορίζει τις τιμές κατωφλίου μέχρι το $\mathbf{C_{th}}$=0.78. Κάτω από αυτή την τιμή όλοι οι σεισμοί καταλήγουν στον κύριο κορμό.



Σχήμα 3.25: Δενδρόγραμμα σε ημιλογαριθμική κλίμακα με συστάδες που προέκυψαν από το άθροισμα $\mathbf{XC_{max}}$ + $\mathbf{m_{coh}}$. Στην εργασία των Schaff et al., για τα δεδομένα της μελέτης τους προτείνεται με το ίδιο άθροισμα ως κριτήριο ομοιότητας τιμή κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$=1.7. Εδώ η προτεινόμενη τιμή (πορτοκαλί διακεκομμένη γραμμή) είναι $\mathbf{C_{th}}$=1.73

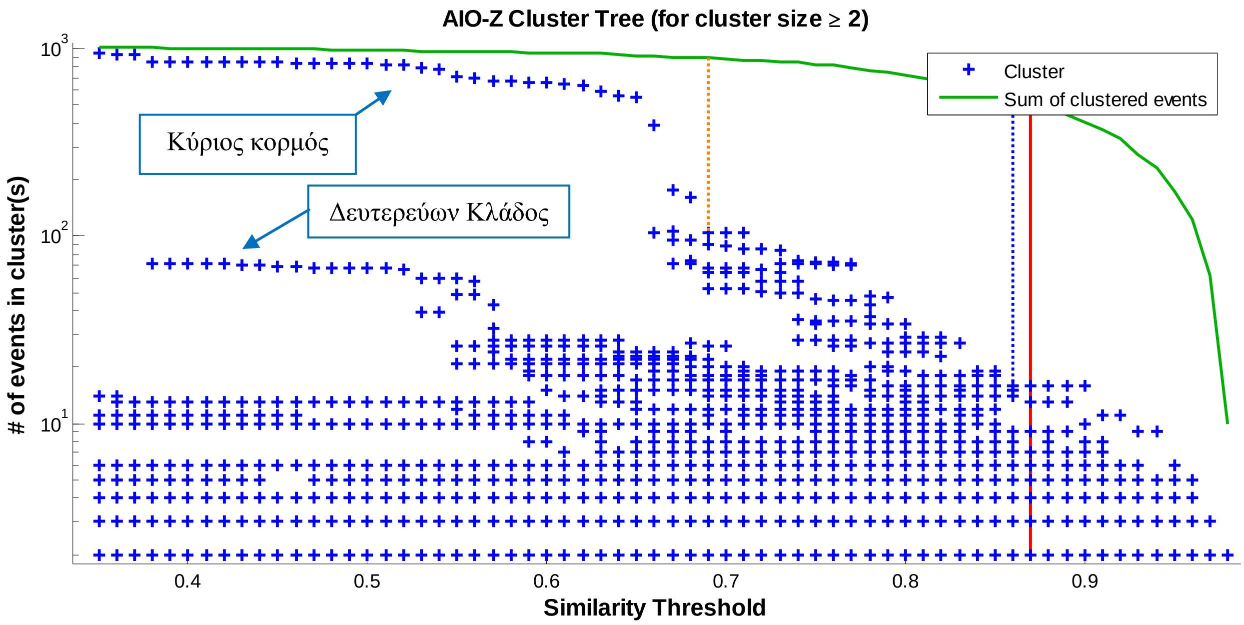
Αυτή η εικόνα σε ορισμένες περιπτώσεις κρύβει κάποιες λεπτομέρειες. Λόγω του τρόπου με τον οποίο ορίζονται οι συστάδες σμηνοσεισμών, ένας κοινός «άμεσος συγγενής» αρκεί ώστε να ενοποιηθούν 2 συστάδες σε κάποια δεδομένη τιμή κατωφλίου. Αρκεί δηλαδή να υπάρχει ένα σήμα G που να μοιάζει, στον βαθμό που ορίζει το κατώφλι, με ένα σήμα K από τους σεισμούς μιας συστάδας A και με ένα άλλο σήμα L από τους σεισμούς μιας συστάδας B προκειμένου να ενοποιηθούν τα δύο σύνολα. Αν τώρα το σήμα G έχει κριθεί *εσφαλμένα* ως όμοιο με το K, με το L ή και με τα δύο, τότε 2 κατά τα άλλα ασυσχέτιστες συστάδες ενοποιούνται εσφαλμένα. Η χρήση των επιπλέον κριτηρίων με την κατασκευή του πίνακα ομοιότητας μειώνει αυτή την πιθανότητα. Τα κριτήρια αυτά σκοπό έχουν κυρίως να μειώσουν τις τιμές που δίνει το $\mathbf{XC_{max}}$ σε περιπτώσεις που πιθανόν έχουν πάρει υψηλές τιμές αλλά για λόγους που δεν έχουν να κάνουν με την ομοιότητα των σεισμών.

Θεωρείται σε αυτή την εργασία πως *δεν* τίθεται θέμα *μη*-αναγνώρισης ενός ζεύγους όμοιων σεισμών εξ' αιτίας χαμηλής τιμής του $\mathbf{XC_{max}}$. Ίσως αυτό να είναι το μοναδικό μειονέκτημα της μεθοδολογίας αυτής. Η χρήση περισσότερων σταθμών αυξάνει την πολυπλοκότητα της διαδικασίας καθώς τα δεδομένα των διάφορων σταθμών δεν παρουσιάζουν ομοιογένεια, υπεισέρχεται ο κίνδυνος της συσχέτισης θορύβου ενώ τίθεται το ερώτημα αν σε μια τέτοια περίπτωση πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η μέγιστη τιμή της ετεροσυσχέτισης (ή μέσης συνοχής), κάποια μέση τιμή ή ένας ελάχιστος αριθμός παρατηρήσεων που απαιτείται ώστε να θεωρηθεί ένα ζεύγος ως ζεύγος όμοιων σεισμών.

Η μεθοδολογία αυτής της εργασίας χρησιμοποιεί, επίσης, τετραγωνικούς πίνακες συσχέτισης με τους οποίους γίνεται σύγκριση ανάμεσα σε όλους τους συνδυασμούς των επιλεγμένων γεγονότων ανά δύο. Το θετικό αυτής της αντιμετώπισης είναι ότι με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση του βαθμού ομοιότητας ενός ως προς τα υπόλοιπα γεγονότα (Σχήμα 3.27) και εντοπίζονται περιπτώσεις στις οποίες κάποιοι σεισμοί έχουν αρκετά εσφαλμένες υποκεντρικές θέσεις (Σχήμα Α.10). Σε μια αντιμετώπιση ευρείας κλίμακας ωστόσο, όπως αυτή που αναφέρθηκε στο 1^{ο} Κεφάλαιο στην ενότητα 1.9 για τον επαναπροσδιορισμό της σεισμικότητας της Ν. Καλιφόρνια (*Hauksson & Shearer, 2005*), δε μπορεί να γίνει κάτι τέτοιο λόγω τεχνικών περιορισμών. Σε μια τέτοια περίπτωση θα πρέπει να υιοθετηθεί μια στρατηγική ανάλογη με αυτή των *Hauksson & Shearer (2005)*. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας γίνεται διαχωρισμός ανάμεσα στον τρόπο ανίχνευσης των όμοιων σεισμών και στον τρόπο διεξαγωγής δεδομένων για τον επαναπροσδιορισμό. Ναι μεν η ανίχνευση γίνεται με τη χρήση ενός σταθμού και μίας συνιστώσας, όλες οι άλλες διαδικασίες, ωστόσο, γίνονται με τη χρήση όλων των σταθμών και όλων των συνιστωσών ανάμεσα στα ζεύγη όμοιων σεισμών που έχουν εντοπιστεί μέσω της πρώτης διαδικασίας.

Μια άλλη παρατήρηση είναι ότι αντί της μεθόδου απλής σύνδεσης (*single linkage* ή *nearest neighbor*) για την ομαδοποίηση των γεγονότων, όπως έχει γίνει και σε άλλες ανάλογες μελέτες (*Kraft et al., 2006; Becker et al., 2006*), θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια από τις άλλες γνωστές μεθόδους ομαδοποίησης. Ως παράδειγμα αναφέρεται η μέθοδος "πλήρους σύνδεσης" (*complete linkage ή furthest neighbor*) με την οποία για να εισαχθεί κάποιο γεγονός μέσα σε μια δεδομένη συστάδα πρέπει να έχει τιμή $\mathbf{XC_{max}}$ (ή βαθμό ομοιότητας) μεγαλύτερη από την τιμή κατωφλίου ως προς όλα τα γεγονότα της συστάδας. Αν και με μια τέτοια μέθοδο εξασφαλίζεται η ομοιότητα ανάμεσα στα γεγονότα των συστάδων, το αποτέλεσμα είναι να δημιουργηθεί ένα μεγάλο πλήθος από μικρές συστάδες αποκομμένες από άλλες με εξίσου όμοια γεγονότα. Θα υπάρχουν γεγονότα A, B εντός 2 διαφορετικών συστάδων C, D αντίστοιχα τα οποία θα έχουν μεταξύ τους $\mathbf{XC_{max}} \geq \mathbf{C_{th}}$, αλλά θα υπάρχουν και γεγονότα E, F εντός των συστάδων C, D αντίστοιχα για τα οποία θα είναι $\mathbf{XC_{max}} \leq \mathbf{C_{th}}$ για τα ζεύγη (A,F) και (B,E) και κατά αυτόν τον τρόπο τα A, B δεν θα ανήκουν στην ίδια συστάδα. Το πρόβλημα αυτό επισημαίνεται και από τους *Becker et al.,(2006)* οι οποίοι προτίμησαν τη μέθοδο απλής σύνδεσης.

Η μέθοδος απλής σύνδεσης, σε σύγκριση με άλλες πολυπλοκότερες, δημιουργεί μεγαλύτερες συστάδες γεγονότων καθώς τα κριτήριά της δεν είναι τόσο αυστηρά όσο π.χ. τα κριτήρια της μεθόδου πλήρους σύνδεσης. Είναι επίσης ευκολότερη η παρακολούθηση του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί καθώς για 2 οποιαδήποτε γεγονότα A, B με σχέση έμμεσης συγγένειας (άρα με $\mathbf{XC_{max}} < \mathbf{C_{th}}$) εντός μιας δεδομένης συστάδας υπάρχει τουλάχιστον μια "αλυσίδα" γεγονότων τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με σχέση άμεσης συγγένειας ($\mathbf{XC_{max}} > \mathbf{C_{th}}$) και συνδέουν το A με το B. Αυτή η "αλυσίδα" είναι ο λόγος για τον οποίο το κάθε γεγονός βρίσκεται μέσα σε μια συστάδα σμηνοσεισμών. Το πρόβλημα είναι ότι αυτή η πληροφορία δεν είναι *άμεσα* προσβάσιμη από τον πίνακα συσχέτισης ή ομοιότητας και για να βρεθεί αυτή η "αλυσίδα" θα πρέπει να αναζητηθεί με ένα διαφορετικό τρόπο. Αυτός ο τρόπος θα εξεταστεί στην ενότητα που ακολουθεί.

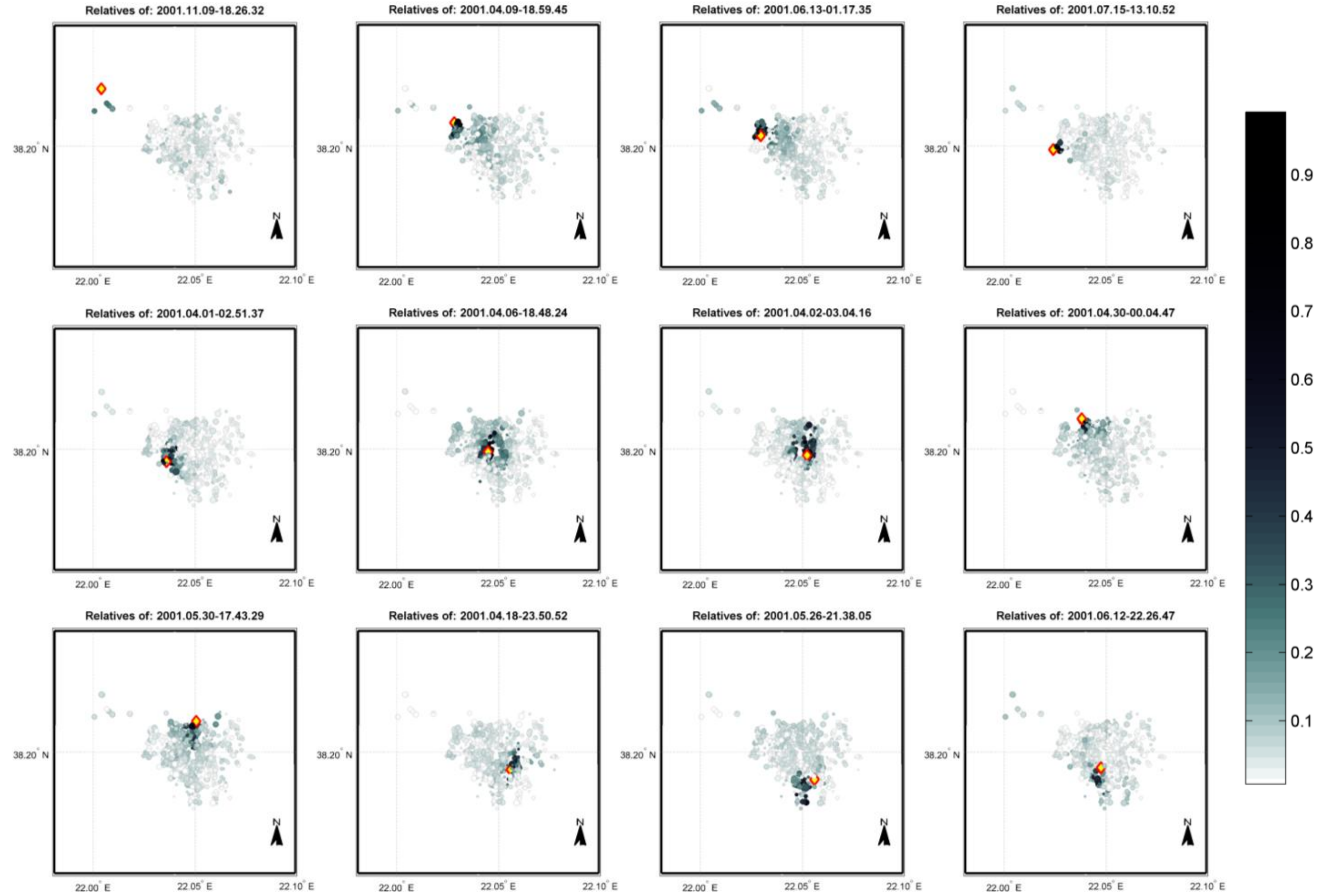


Σχήμα 3.26: Δενδρόγραμμα σε ημιλογαριθμική κλίμακα με συστάδες που προέκυψαν από τον **Πίνακα Ομοιότητας $\mathbf{XC_s}$**.

3.6 ~ *Έμμεσοι Συγγενείς*

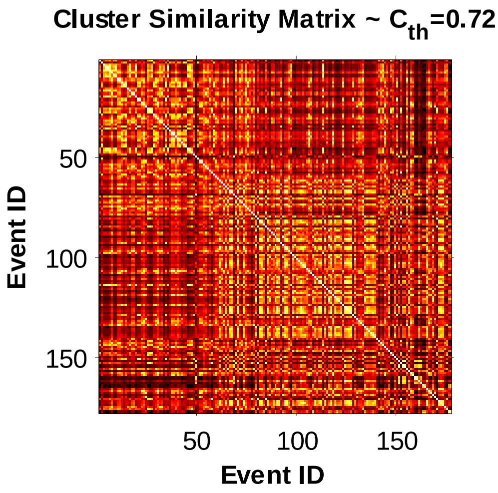
Στο σημείο αυτό θα γίνει χρήση ορισμένων αποτελεσμάτων από το Κεφάλαιο 4 για το «Σμήνος του ΑΙΟ (2001)», το οποίο θα καλείται «Ομάδα Α» και στην οποία η διάκριση σμηνοσεισμών γίνεται με δεδομένα από την κατακόρυφη συνιστώσα ενός άλλου σταθμού με κωδική ονομασία DIM. Στα επόμενα σχήματα θα χρησιμοποιούνται τα επίκεντρα/υπόκεντρα που προέκυψαν ύστερα από επαναπροσδιορισμό με τη βοήθεια του προγράμματος HypoDD (*Waldhauser & Ellsworth 2000; Waldhauser, 2001*) για τον οποίο θα γίνει αναλυτική περιγραφή στο Κεφάλαιο 4.

Ο πίνακας ομοιότητας παρέχει άμεση πρόσβαση στους «άμεσους συγγενείς» ενός οποιουδήποτε γεγονότος. Το μόνο που χρειάζεται είναι να εξεταστεί η γραμμή που αντιστοιχεί στον αριθμό ταυτοποίησης ενός ορισμένου γεγονότος **A** και να εντοπιστούν τα στοιχεία της γραμμής αυτής που έχουν τιμή μεγαλύτερη από την ορισμένη τιμή κατωφλίου, $\mathbf{C_{th}}$. Οι αριθμοί ταυτοποίησης των στηλών αυτών αντιπροσωπεύουν τους άμεσους συγγενείς του **A**. Το Σχήμα 3.27 δείχνει τα επίκεντρα του σμήνους του ΑΙΟ, ύστερα από τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD (Κεφ. 4), με το χρώμα, όπως δείχνει η χρωματική κλίμακα, να μεταφράζεται σε τιμή του δείκτη ομοιότητας, $\mathbf{S_{ij}}$, ανάμεσα σε ένα **γεγονός αναφοράς** που σημειώνεται στον κάθε χάρτη με έναν κόκκινο ρόμβο, και στα υπόλοιπα γεγονότα.



Σχήμα 3.27: επαναπροσδιορισμένα επίκεντρα της Ομάδας Α με έμφαση στους «συγγενείς» ορισμένων τυχαία επιλεγμένων γεγονότων αναφοράς. Τα επιλεγμένα γεγονότα αναφοράς συμβολίζονται με κόκκινο ρόμβο με κίτρινο γέμισμα, ενώ τα υπόλοιπα επίκεντρα χρωματίζονται βάσει της κλίμακας που φαίνεται στα δεξιά και υποδηλώνει τον βαθμό ομοιότητας (αντίστοιχη τιμή στον πίνακα ομοιότητας). Όσο πιο σκούρο είναι κάποιο γεγονός τόσο περισσότερο όμοια είναι η κυματομορφή του με εκείνη του γεγονότος αναφοράς, με τη σύγκριση να γίνεται πάντα σε καταγραφές της κατακόρυφης συνιστώσας του σταθμού DIM.

Σύμφωνα με τα όσα έχουν αναφερθεί έως τώρα περιμένει κανείς να δει ότι τα περισσότερο όμοια σήματα πρέπει να ανήκουν σε σεισμούς με γειτονικά υπόκεντρα ως προς το γεγονός αναφοράς, και, πράγματι, κάτι τέτοιο φαίνεται στο Σχήμα 3.27. Η μέθοδος απλής σύνδεσης που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη ενότητα οδήγησε στον σχηματισμό συστάδων σμηνοσεισμών οι οποίες ορίζονται για συγκεκριμένες τιμές κατωφλίου, $\mathbf{C_{th}}$. Τα γεγονότα στις συστάδες αυτές ουσιαστικά σχηματίζουν μεταξύ τους ένα αόρατο δίκτυο συνδέσμων με διαφορετική ισχύ στον καθένα. Την ισχύ του συνδέσμου ανάμεσα σε 2 γεγονότα την καθορίζουν οι αντίστοιχες τιμές $\mathbf{S_{ij}}$ ανάμεσα σε αυτά. Αν από τον πίνακα ομοιότητας $\mathbf{XC_s}$ της Ομάδας Α διατηρηθούν μόνο τα γεγονότα που ανήκουν σε μια από τις συστάδες με $\mathbf{C_{th}}$=0.72 θα προκύψει αυτό που φαίνεται ως παράδειγμα στο Σχήμα 3.28. Ο πίνακας δείχνει πως οι τιμές ισχύος των διαφόρων συνδέσμων ποικίλουν, καθώς εμφανίζονται περιοχές έντονου χρώματος (υψηλός βαθμός ομοιότητας) αλλά και περιοχές σκούρου χρώματος (χαμηλός βαθμός ομοιότητας). Το ερώτημα είναι το εξής: πώς γίνεται μέσα σε μια συστάδα σμηνοσεισμών να υπάρχουν γεγονότα των οποίων ο βαθμός ομοιότητας είναι πολύ χαμηλότερος από την τιμή κατωφλίου;

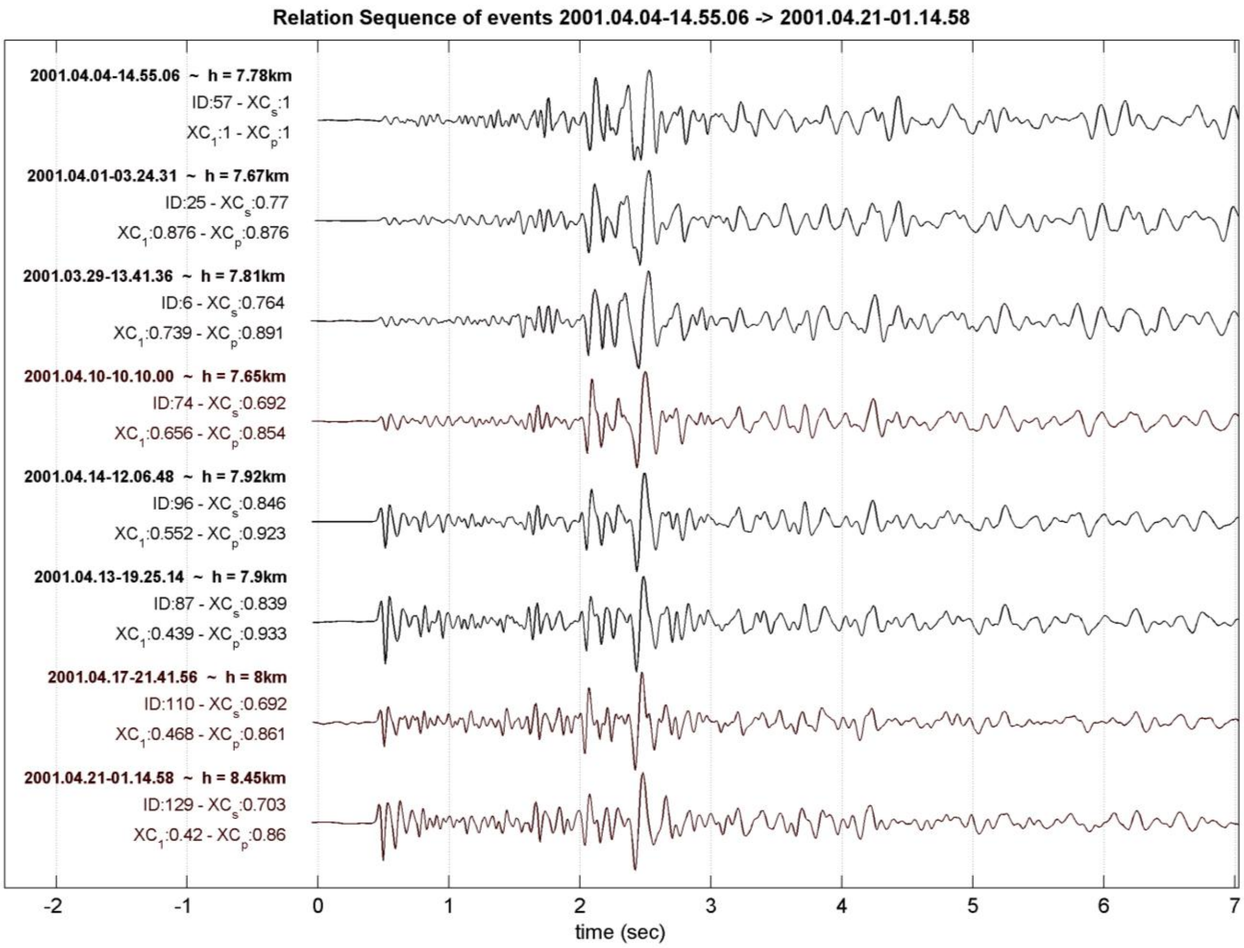


Σχήμα 3.28: Πίνακας ομοιότητας XCs για μια επιλεγμένη συστάδα σμηνοσεισμών με C_{th}=0.72. Περιέχει 177 γεγονότα της Ομάδας Α (Κεφ. 4) τα οποία έχουν επαναπροσδιοριστεί με το HypoDD και των οποίων τα επίκεντρα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.30_A και Α.9 (συστάδα Β)

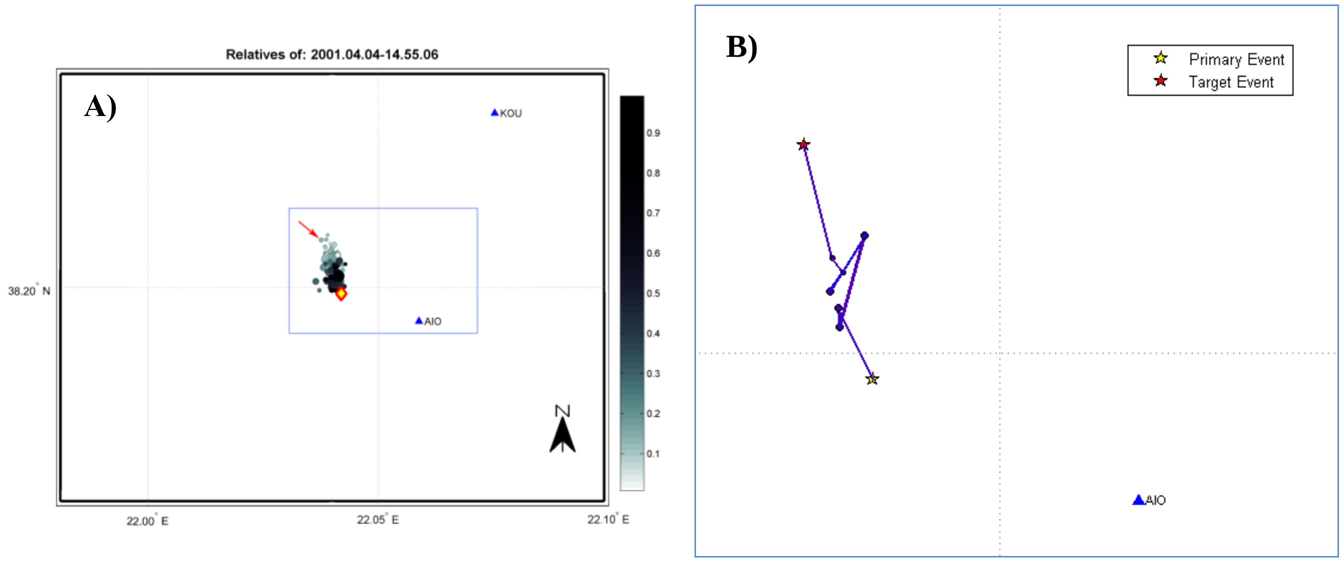
Στο σημείο αυτό θα γίνει μια υπενθύμιση σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο έχουν δημιουργηθεί κατά σύμβαση αυτές οι συστάδες: αρκεί να υπάρχει μια σειρά ενδιάμεσων γεγονότων τα οποία συνδέουν ένα **γεγονός αναφοράς** Α με ένα **γεγονός προορισμού** Β και τα οποία αποτελούν διαδοχικά άμεσους συγγενείς, δηλαδή ο βαθμός ομοιότητας ανάμεσα στα διαδοχικά γεγονότα είναι μεγαλύτερος από την τιμή κατωφλίου.

Μια προσέγγιση του προβλήματος φαίνεται στο Σχήμα 3.29. Η "αλυσίδα" των συγγενών έχει 2 «αδύναμους κρίκους», τα γεγονότα με IDs 74 και 110 τα οποία, το καθένα σε σχέση με το αμέσως προηγούμενό του (η κυματομορφή του σε σχέση με την αμέσως παραπάνω) έχει βαθμό ομοιότητας S_{ij}=0.692 (XC_s στο σχήμα). Για τα δεδομένα του πίνακα ομοιότητας αυτή είναι μια πολύ υψηλή τιμή: στην πραγματικότητα αυτή η αλυσίδα δεν έχει αδύναμους κρίκους.

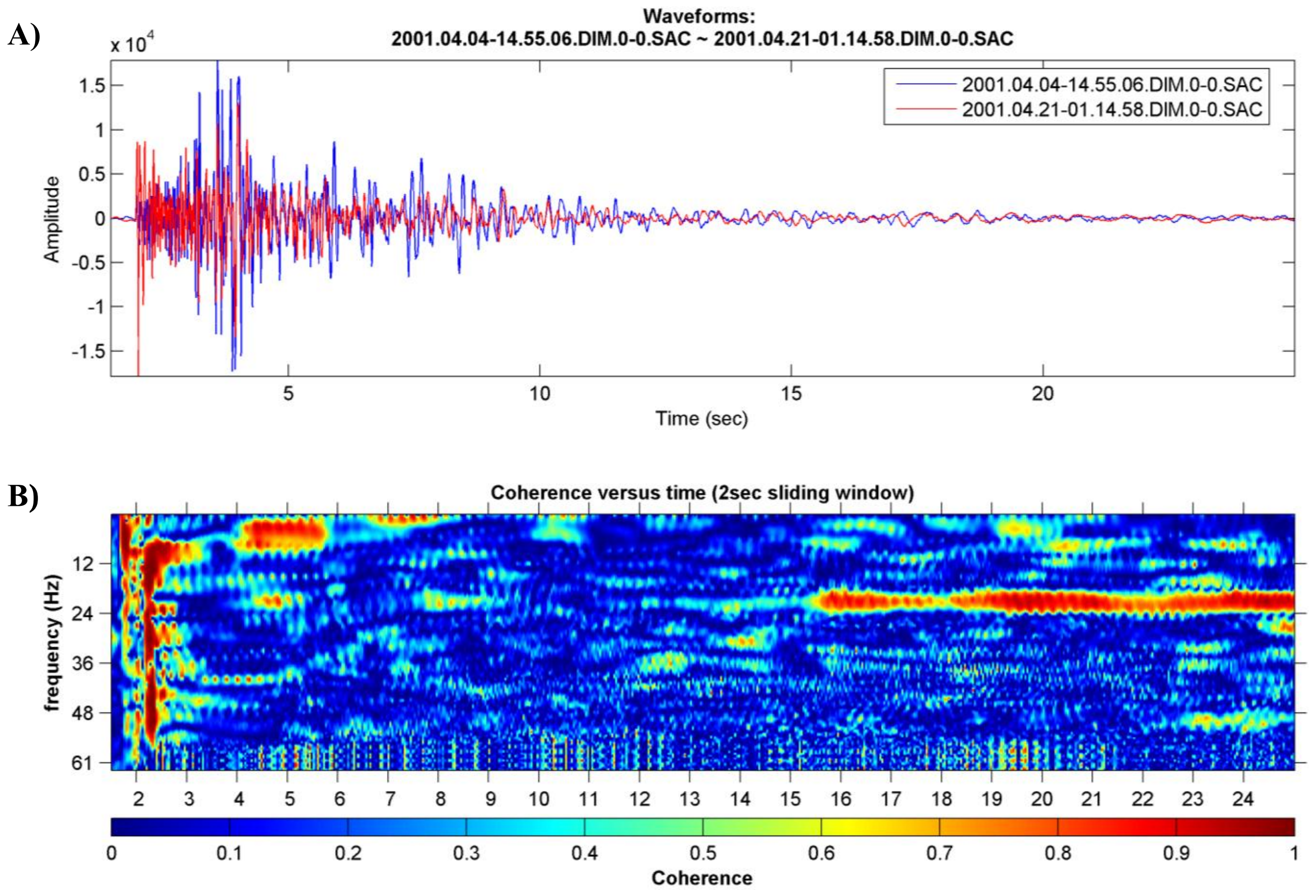
Ωστόσο, η σειρά συγγένειας που παρουσιάζεται σε αυτό το σχήμα δεν είναι η πραγματική που οδήγησε τα γεγονότα με ID 57 και 129 (πρώτη και τελευταία κυματομορφή) να βρίσκονται στην ίδια συστάδα σμηνοσεισμών, καθώς, αν και υψηλή, η τιμή 0.692<0.72=$\mathbf{C_{th}}$. Ο εντοπισμός της πιο «σύντομης διαδρομής», από τη σκοπιά της ομοιότητας των κυματομορφών, που συνδέει το γεγονός αναφοράς Α με το γεγονός προορισμού Β έχει γίνει εδώ με την εφαρμογή ενός **γενετικού αλγορίθμου**, με παραλλαγή του γνωστού προβλήματος του «περιοδεύοντος πωλητή» (*traveling salesman*). Περισσότερα για τη μέθοδο αυτή στο Παράρτημα Α.5. Με τη διαδικασία αυτή γίνεται προσπάθεια εντοπισμού της αλληλουχίας γεγονότων που συνδέει το Α με το Β με τέτοιο τρόπο ώστε η ελάχιστη τιμή του βαθμού ομοιότητας ανάμεσα σε 2 διαδοχικά γεγονότα της αλυσίδας διαρκώς να αυξάνεται μέχρι να ξεπεράσει την τιμή $\mathbf{C_{th}}$, οπότε θα έχει βρεθεί μια αποδεκτή σειρά. Κάθε φορά που επαναλαμβάνεται η αναζήτηση της σειράς συγγένειας με τη μέθοδο του γενετικού αλγόριθμου προκύπτει ένας διαφορετικός συνδυασμός γεγονότων, καθώς η διαδικασία εμπεριέχει έναν βαθμό 'τυχαιότητας' (*randomness*). Συνήθως υπάρχουν πολλές λύσεις για ένα τέτοιο πρόβλημα, δηλαδή η «διαδρομή» που συνδέει το Α με το Β με τέτοιο τρόπο ώστε όλοι οι σύνδεσμοι να έχουν S_{ij}>$\mathbf{C_{th}}$ δεν είναι μοναδική. Αν, βέβαια, είναι πράγματι μοναδική τότε τα πράγματα δυσκολεύουν περισσότερο.



Σχήμα 3.29: Σειρά συγγένειας ανάμεσα σε 2 επιλεγμένα γεγονότα, 2001.04.04-14.55.06 (πρώτη κυματομορφή, επάνω) και 2001.04.21-01.14.58 (τελευταία κυματομορφή, κάτω). Ενδιάμεσα παρεμβάλλονται οι διαδοχικοί άμεσοι συγγενείς που «οδηγούν» από το πρώτο στο τελευταίο γεγονός. Οι τιμές στα αριστερά κάθε κυματομορφής συμβολίζουν: **h**: το εστιακό βάθος, **ID**: ο αριθμός ταυτοποίησης του γεγονότος μέσα στη συστάδα, **XC_s**: η τιμή **S_{ij}** «ομοιότητας» της συγκεκριμένης κυματομορφής με την αμέσως προηγούμενη, **XC_1**: η τιμή **XC_{max}** ανάμεσα στη συγκεκριμένη κυματομορφή και στην πρώτη, **XC_p**: η τιμή **XC_{max}** ανάμεσα στη συγκεκριμένη κυματομορφή και στην αμέσως προηγούμενη. (για περισσότερα βλέπε κείμενο)



Σχήμα 3.30: (Α): επίκεντρα της επιλεγμένης συστάδας από το σμήνος του AIO, η χρωματική κλίμακα δίνει τιμές «ομοιότητας» του κάθε γεγονότος ως προς το γεγονός αναφοράς του οποίου το επίκεντρο εμφανίζεται με κόκκινο ρόμβο και κίτρινο γέμισμα. Με κόκκινο βέλος σημειώνεται το γεγονός «προορισμού» (ο έμμεσος συγγενής του γεγονότος αναφοράς). (Β): Μεγέθυνση στην περιοχή της αριστερής εικόνας που περικλείεται σε μπλε ορθογώνιο, παρουσίαση της διαδρομής που συνδέει το γεγονός αναφοράς (κίτρινο άστρο) με το γεγονός προορισμού (κόκκινο άστρο) μέσω μιας τεθλασμένης ευθείας που συνδέει διαδοχικούς άμεσους συγγενείς. (για περισσότερα βλέπε κείμενο)



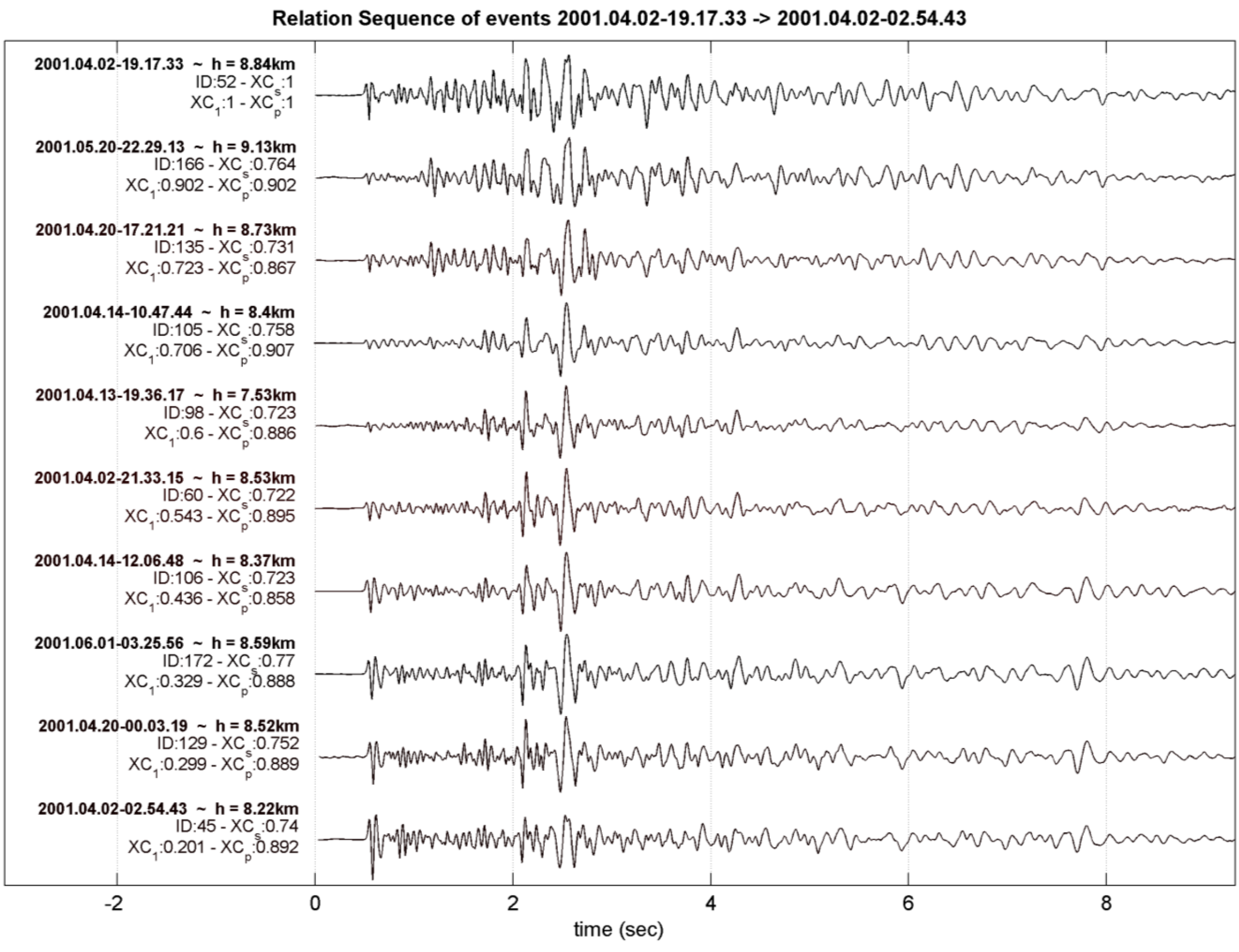
Σχήμα 3.31: A) Σύγκριση κυματομορφών γεγονότος αναφοράς (2001.04.04-14.55.06) και γεγονότος προορισμού (2001.04.21-01.14.58) στην κατακόρυφη συνιστώσα του σταθμού DIM. Οι κυματομορφές αυτές αντιστοιχούν στην πρώτη και την τελευταία του Σχήματος 3.29. B) Συνοχή των προηγούμενων κυματομορφών ως προς τον χρόνο.

Στην περίπτωση των Σχημάτων 3.32, 3.33 έχει επιλεχθεί ίσως ο δυσκολότερος από τους δυνατούς συνδυασμούς της συγκεκριμένης συστάδας καθώς πρόκειται για το ζεύγος (A, B) με τον ελάχιστο βαθμό ομοιότητας S_{AB}=0.0194. Στη σειρά συγγένειας που φαίνεται στο Σχήμα 3.32 ο πιο αδύναμος σύνδεσμος έχει βαθμό ομοιότητας S_{ij}=0.722 που είναι μόλις πιο πάνω από την τιμή κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$=0.72. Πρόκειται για μια πραγματική σειρά συγγένειας που εκπροσωπεί τη συγκεκριμένη συστάδα σμηνοσεισμών, αλλά ο εντοπισμός της έγινε με μια πιο απλή αλλά εν γένει χρονοβόρα διαδικασία η οποία θα περιγραφθεί στη συνέχεια.

Παρ' ότι ο γενετικός αλγόριθμος μπορεί να βοηθήσει στη λύση προβλημάτων στα οποία το σύστημα έχει μεγάλο μέγεθος, καθώς ο αριθμός των δυνατών συνδυασμών είναι της τάξεως του N! (N παραγοντικό, όπου N ο αριθμός των σεισμών σε μια συστάδα), και είναι ασύμφορο για πολλούς λόγους να εξεταστούν όλοι αυτοί οι συνδυασμοί, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να παρακαμφθεί το πρόβλημα, ιδιαίτερα για μικρά N. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα της εύρεσης της σειράς συγγένειας μεταξύ A και B, ακόμη και για μια συστάδα μεγέθους 192 γεγονότων (ή 177 από τα επαναπροσδιορισμένα, Σχήμα 3.28) μπορεί να γίνει μια κλασσική αναζήτηση των διαδρομών και να βρεθεί η λύση αρκεί η αλυσίδα γεγονότων που αναζητείται να μην έχει μεγάλο μήκος.

Η διαδικασία απλής αναζήτησης έχει ως εξής: με αφετηρία το γεγονός A, εντοπίζονται όλα τα άλλα γεγονότα του πίνακα ομοιότητας (Σχήμα 3.28) που έχουν βαθμό ομοιότητας S_{ij} με το A: S_{ij}>$\mathbf{C_{th}}$, τα οποία έστω ότι καλούνται $C_κ$ με κ=1,2,…,N_c όπου N_c ο αριθμός των γεγονότων που βρέθηκαν. Καταχωρούνται οι N_c αλληλουχίες γεγονότων A-$C_κ$ (*άμεσοι συγγενείς*) και στη συνέχεια για καθένα από τα $C_κ$ εντοπίζονται εκείνα τα γεγονότα $D_{κλ}$ τα οποία έχουν τιμή S_{ij}>$\mathbf{C_{th}}$ δημιουργώντας αλληλουχίες γεγονότων της μορφής A-$C_κ$-$D_{κλ}$. Κάθε φορά ελέγχονται τα $D_{κλ}$ ώστε να είναι γεγονότα με διαφορετικό αριθμό ταυτοποίησης από όλα όσα βρίσκονται πριν από αυτά (π.χ. τα A και $C_κ$) στην κάθε αλυσίδα για να μην δημιουργηθεί κλειστή διαδρομή. Αν η διαδικασία συνεχιστεί και βρεθούν όλες αυτές οι αλυσίδες, κάποια από αυτές θα καταλήξει τελικά στο γεγονός B (εφόσον ισχύουν τα όσα αναφέρθηκαν περί έμμεσης συγγένειας A~B και άρα υπάρχει τουλάχιστον μια τέτοια αλυσίδα). Το πρόβλημα είναι ότι ακόμη και αν δεν καταχωρούνται όλοι οι συνδυασμοί γεγονότων αλλά μόνο αυτοί στους οποίους S_{ij}>$\mathbf{C_{th}}$, πάλι ο αριθμός των αλληλουχιών σε κάθε επανάληψη αυξάνεται με δραματικό ρυθμό, το ίδιο και ο απαιτούμενος χρόνος της επεξεργασίας κάθε επανάληψης.

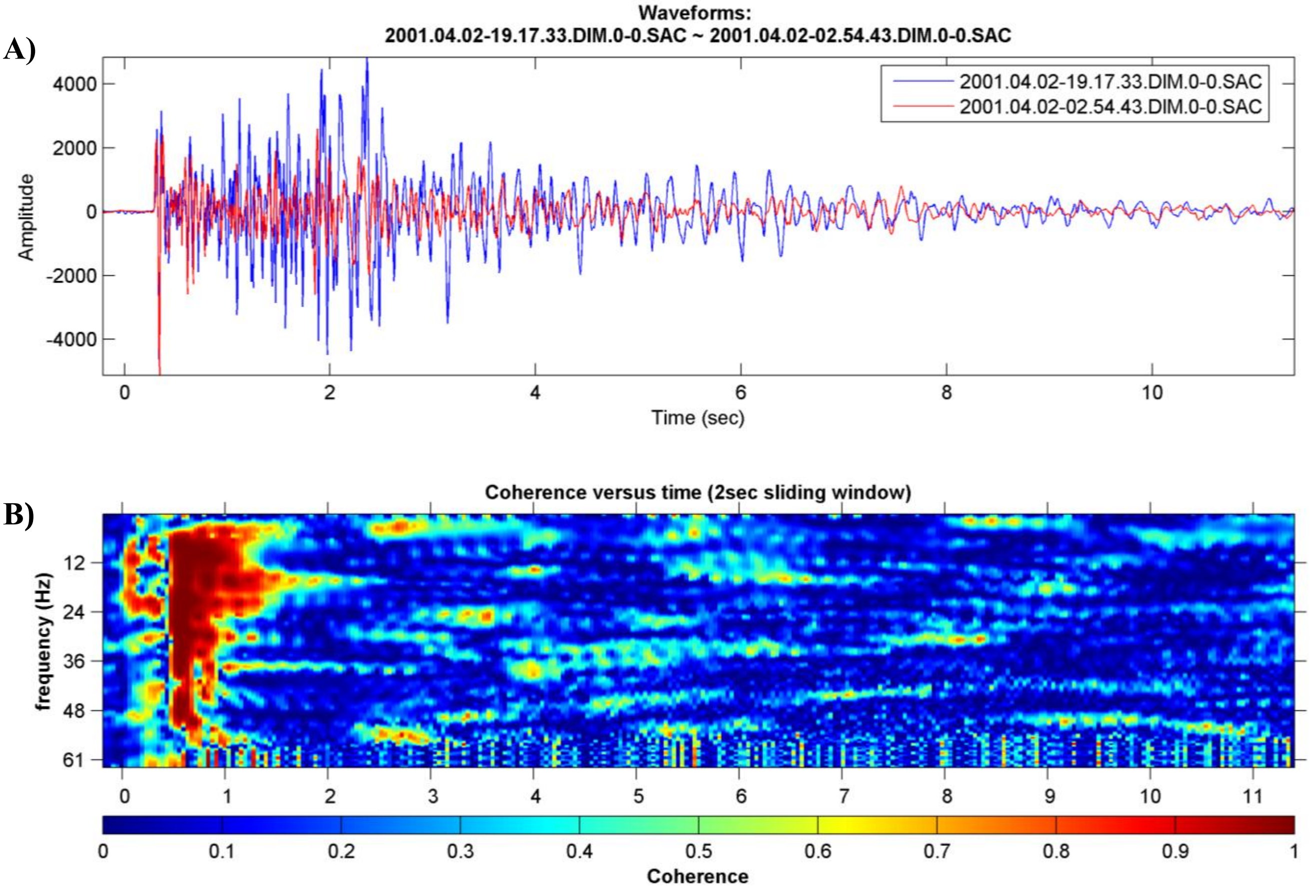
Μέχρι την 5-6η επανάληψη συνήθως ο χρόνος αυτός βρίσκεται μέσα σε κάποια λογικά πλαίσια. Αν δηλαδή η ζητούμενη σειρά συγγένειας αποτελείται από το πολύ 5-6 γεγονότα εκ των οποίων το πρώτο είναι το A και το τελευταίο το B, τα πράγματα είναι εύκολα. Αν όμως το μήκος της αλυσίδας ξεπερνάει το 6 θα χρειαστεί πάρα πολύς χρόνος για να υπολογιστούν οι συνδυασμοί και πάρα πολλή υπολογιστική μνήμη. Μπορεί, όμως, ό,τι γίνεται για το γεγονός A να γίνεται παράλληλα και για το γεγονός B, δηλαδή κάθε φορά που ολοκληρώνεται μια αναζήτηση συνδυασμών που ξεκινούν από το γεγονός A να γίνεται η αντίστοιχη αναζήτηση αλληλουχιών με αρχή το γεγονός B.



Σχήμα 3.32: Σειρά συγγένειας ανάμεσα στα **2 πλέον ανόμοια** γεγονότα της επιλεγμένης συστάδας (2001.04.02-19.17.33 και 2001.04.02-02.54.43) με τιμή ομοιότητας $\mathbf{XC_s=0.0194}$. Ο πιο «αδύναμος κρίκος» της αλυσίδας αυτής είναι η συγγένεια ανάμεσα στα γεγονότα με ID 98 και 60 με τιμή ομοιότητας $\mathbf{XC_s=0.722}$> $\mathbf{C_{th}}$= 0.72. Η τιμή του μεγίστου της ετεροσυσχέτισης ($\mathbf{XC_{max}}$) ανάμεσα στην πρώτη και την τελευταία κυματομορφή είναι $\mathbf{XC_1=0.201}$.

Κατά αυτόν τον τρόπο μπορεί να φανταστεί κανείς 2 δίκτυα να εξαπλώνονται από τα Α και Β μέσα στον χώρο ταυτόχρονα. Κάποια στιγμή τα δίκτυα αυτά ενώνονται, δηλαδή ένα γεγονός από μια αλληλουχία διαδοχικών άμεσων συγγενών με αρχή το Α θα είναι κοινό με ένα γεγονός από μια αλληλουχία διαδοχικών άμεσων συγγενών με αρχή το Β. Με αυτόν τον τρόπο δίπλευρης αναζήτησης είναι δυνατόν να υπολογιστούν αλυσίδες μήκους 9-12 γεγονότων στον διπλάσιο χρόνο 5-6 απλών επαναλήψεων που είναι *πάρα* πολύ μικρότερος από τον χρόνο που απαιτείται για 7 μονόπλευρες αναζητήσεις.

Για τα γεγονότα Α, Β στα οποία έγινε αναφορά προηγουμένως, και ενώ ο γενετικός αλγόριθμος δε μπόρεσε να εντοπίσει αλυσίδες με ελάχιστο βαθμό ομοιότητας μεγαλύτερο από 0.692, η απλή μέθοδος της δίπλευρης αναζήτησης μπόρεσε να βρει **8** διαφορετικούς συνδυασμούς που οδηγούν από το γεγονός Α στο γεγονός Β με ελάχιστο βαθμό ομοιότητας 0.722>$\mathbf{C_{th}}$=0.72 με 10 γεγονότα στην αλυσίδα εκ των οποίων το πρώτο και το τελευταίο είναι τα Α και Β αντίστοιχα. Μια από αυτές τις σειρές συγγένειας φαίνεται στο Σχήμα 3.32.



Σχήμα 3.33: μερική ταύτιση των κυματομορφών του γεγονότος αναφοράς και του γεγονότος προορισμού του Σχήματος 3.32 (τα 2 πλέον ανόμοια της συστάδας) με αρκετά ισχυρή συνοχή στο πρώτο τμήμα της κυματομορφής

Ο βαθμός ομοιότητας ανάμεσα στο γεγονός αναφοράς και στο γεγονός προορισμού είναι $\mathbf{S_{ij}}$ = 0.019, το $\mathbf{XC_{max}}$ στις αφιλτράριστες κυματομορφές τους είναι $\mathbf{XC_{max}}$=0.192 ενώ με ένα ζωνοπερατό φίλτρο από 0.5-15Hz γίνεται $\mathbf{XC_{max}}'\cong$0.199. Θα έλεγε κανείς πως τα δύο γεγονότα δε θα μπορούσαν να έχουν κάποια σχέση μεταξύ τους και άρα δεν θα έπρεπε να βρίσκονται στην ίδια συστάδα σμηνοσεισμών με $\mathbf{C_{th}}$**=0.72** (το οποίο κατώφλι αφορά στις τιμές του πίνακα ομοιότητας που είναι ακόμα χαμηλότερες από τις τιμές μεγίστου ετεροσυσχέτισης). Ο χρόνος $\boldsymbol{\tau_m}$ που δίνει το μέγιστο της ετεροσυσχέτισης δεν είναι ο πραγματικός, δεν φέρνει τις κυματομορφές στη θέση που θα ήταν αναμενόμενο, δηλαδή δεν ταυτίζονται οι αφίξεις των P κυμάτων. Εάν μετατοπιστεί χειροκίνητα η μία κυματομορφή ως προς την άλλη (Σχήμα 3.33_A) και εξεταστεί η συνοχή τους ως προς το χρόνο (Σχήμα

3.33_B) φαίνεται πως δίνει μια αρκετά καλή εικόνα στα P κύματα η οποία μετά χάνεται. Το Σχήμα 3.32 όμως αποδεικνύει ότι μπορεί να βρεθεί μια αλληλουχία γεγονότων που συνδέει τα δύο κατά τα άλλα ανόμοια γεγονότα μεταξύ τους, με τα διαδοχικά γεγονότα αυτής της σειράς να εμφανίζουν υψηλό βαθμό ομοιότητας, μεγαλύτερο από την τιμή κατωφλίου και άρα είναι εξ' ορισμού άμεσοι συγγενείς. Το πρώτο και το τελευταίο γεγονός της σειράς αυτής συνδέονται λοιπόν με μια σχέση *έμμεσης* συγγένειας η οποία δε μπορεί να προκύψει από την εξέταση των 2 κυματομορφών του Σχήματος 3.33_A αλλά προκύπτει από τη μελέτη του συνόλου των διαθέσιμων κυματομορφών για όλα τα γεγονότα που ανήκουν σε μια δεδομένη συστάδα σμηνοσεισμών.

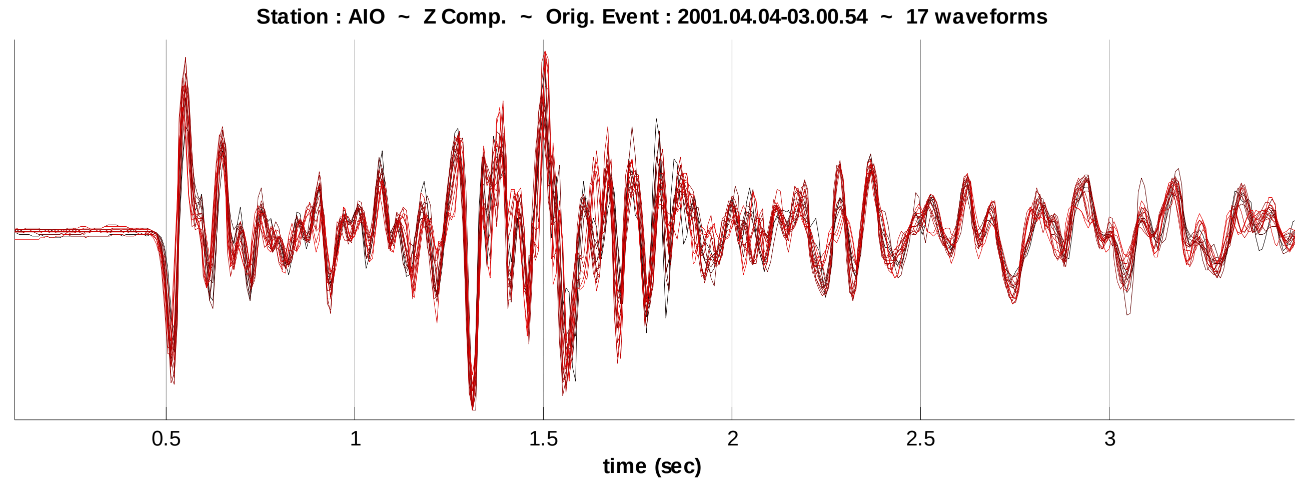
3.7 ~ *Τμηματικά όμοιες κυματομορφές*

Καθώς χρησιμοποιείται ολόκληρο το σήμα γίνεται κατανοητό πως το σπουδαιότερο ρόλο στη μορφή της ετεροσυσχέτισης τον παίζουν τα κύματα S λόγω του μεγαλύτερου πλάτους τους. Αυτό σημαίνει πως αν τα σήματα μιας ομάδας σμηνοσεισμών (*multiplets*) στοιχηθούν στη χρονική καθυστέρηση του μεγίστου της ετεροσυσχέτισής τους θα φανεί ότι πρακτικά η στοίχιση έχει γίνει στα S κύματα και ενώ θα περίμενε κανείς *και* οι χρόνοι άφιξης των P-κυμάτων να συμπίπτουν σε όλα τα σήματα, κάτι τέτοιο δε φαίνεται να συμβαίνει σε όλες τις περιπτώσεις. Εξαίρεση αποτελεί ένα παράδειγμα πλήρους ταύτισης σε ένα σύνολο 17 κυματομορφών που φαίνεται στο Σχήμα 3.34.

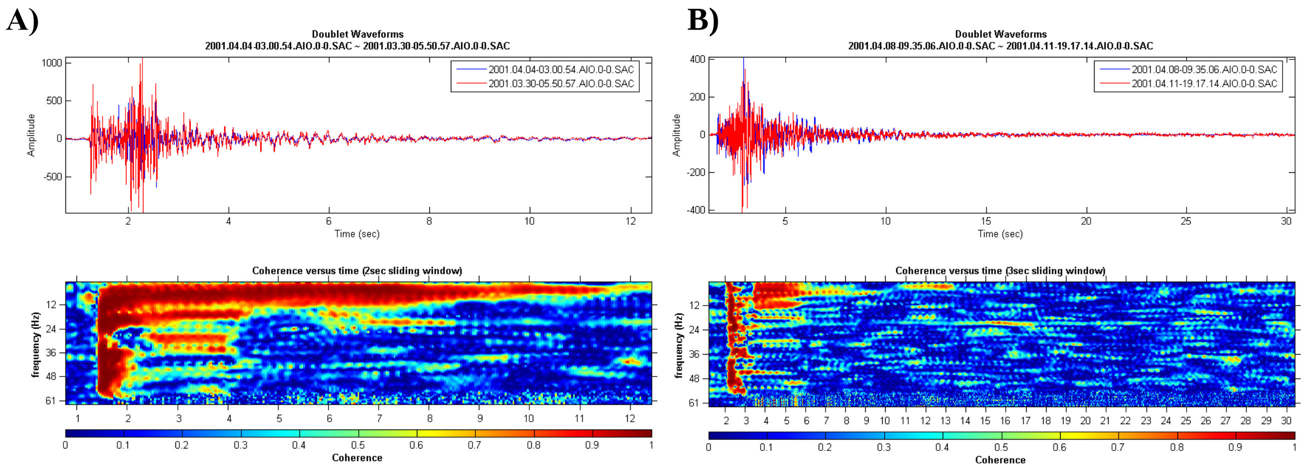
Παραδείγματα όπως αυτό δεν είναι τόσο συνηθισμένα, κυρίως σε περιόδους στις οποίες η σεισμικότητα εμφανίζεται διάσπαρτη στον χώρο και το χρόνο η οποία καλείται με τον όρο «σεισμικότητα υποβάθρου» (*background seismicity*). Μπορεί να διαπιστωθεί, ωστόσο, ότι τα σήματα μιας συστάδας σμηνοσεισμών έχουν όμοια μορφή τόσο στα S όσο και στα P-κύματα **χωρίς** όμως, απαραίτητα, οι χρονικές διάρκειες $\mathbf{t_{S\text{-}P}}$ μεταξύ των P και S αφίξεων να είναι ακριβώς ίδιες – φαίνεται δηλαδή πως υπάρχει ένα περιθώριο ανοχής στη διακύμανση αυτής της χρονικής διάρκειας. Αυτό παραπέμπει στον περιορισμό για τον οποίο έγινε αναφορά στο Κεφάλαιο 1 περί της ομοιότητας των σημάτων όταν τα δύο υπόκεντρα βρίσκονται σε ενδο-απόσταση μικρότερη από το ¼ του δεσπόζοντος μήκους κύματος (*Geller & Mueller, 1980*). Το διάγραμμα της χρονικής εξέλιξης της συνοχής τους όμως, σε λίγες μόνο ιδανικές περιπτώσεις (Σχήματα B.17, B.18, B.19, B.20 και 3.35_A) φανερώνει φασματική ταύτιση σε συχνότητες άνω των 15Hz, σε αυτές που όλες οι εστιακές παράμετροι των 2 σεισμών ταυτίζονται, τουλάχιστον από τη σκοπιά του σταθμού του οποίου οι καταγραφές χρησιμοποιούνται κατά την εκάστοτε σύγκριση.

Αυτό που συμβαίνει στη γενική περίπτωση, στην οποία οι χρόνοι $\mathbf{t_{S\text{-}P}}$ διαφέρουν, φαίνεται στα Σχήματα 3.36 και 3.37 σε ένα σύνολο 21 κυματομορφών των οποίων τα γεγονότα ανήκουν σε διαφορετική συστάδα σμηνοσεισμών από αυτή των γεγονότων του Σχήματος 3.34. Παρατηρείται πως ανάλογα με την αρχική στοίχιση και το επιλεγμένο χρονικό παράθυρο του κάθε σήματος, οι χρόνοι $\boldsymbol{\tau_m}$ είναι τέτοιοι που μετατοπίζουν χρονικά τις κυματομορφές έτσι ώστε αυτές να ταυτιστούν στο κοινό τμήμα του υπό εξέταση χρονικού παραθύρου τους. Η ετεροσυσχέτιση υπολογίζεται μεν στο περιορισμένο παράθυρο αλλά η χρονική μετατόπιση γίνεται σε όλη την κυματομορφή. Τόσο στις κυματομορφές του Σχήματος 3.34 όσο και των Σχημάτων 3.36, 3.37, η ετεροσυσχέτιση έχει γίνει ως προς μία κυματομορφή ενός σεισμού που παίζει τον ρόλο ενός τυχαία επιλεγμένου **γεγονότος αναφοράς** (*reference*), χωρίς να έχει τεθεί κάποιο ιδιαίτερο κριτήριο επιλογής σε αυτό το παράδειγμα πέρα από την ομοιότητα αυτού του σήματος με τα υπόλοιπα.

Στα Σχήματα 3.36 και 3.37 ο **χρόνος μηδέν** (**t=0** στον άξονα-x) δείχνει τη θέση στην οποία είχε γίνει ο προσδιορισμός χρόνου άφιξης των S-κυμάτων (Σχήμα 3.36) και των P-κυμάτων (Σχήμα 3.37) αντίστοιχα στην κυματομορφή αναφοράς (2001.04.08-09.35.06.AIO.0-0.SAC). Οι προσδιορισμένοι χρόνοι άφιξης των P ή S-κυμάτων αντίστοιχα στα υπόλοιπα σήματα δε φαίνονται σε αυτά τα σχήματα καθώς έχουν υποστεί μετατοπίσεις κατά τους χρόνους $\boldsymbol{\tau_m}$ που υπολογίστηκαν από την ετεροσυσχέτιση του καθενός με την κυματομορφή αναφοράς. Είναι, όμως, εμφανές ότι, με την προϋπόθεση ο προσδιορισμός του χρόνου άφιξης των S ή P να έχει γίνει ***σωστά*** στο γεγονός αναφοράς, είναι δυνατόν να καθοριστούν οι αντίστοιχες αφίξεις σε όλα τα υπόλοιπα σήματα.



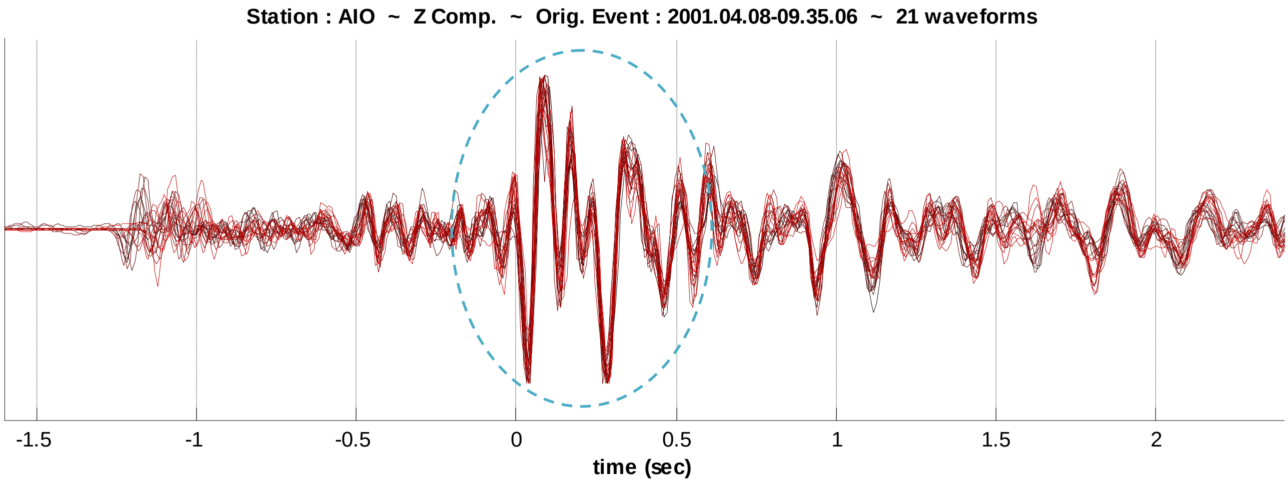
Σχήμα 3.34: Ταύτιση 17 φιλτραρισμένων κυματομορφών (μεταξύ 0.5-15Hz) της Z-συνιστώσας του σταθμού AIO από μια συστάδα σμηνοσεισμών του δείγματος του σμήνους του AIO. Η ταύτιση είναι ικανοποιητική τόσο στα P όσο και στα S κύματα. Η στοίχιση έχει γίνει στον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ της ετεροσυσχέτισης **ολόκληρης** της κάθε κυματομορφής με ένα θεωρούμενο γεγονός αναφοράς (2001.04.04-03.00.54.AIO.0-0.SAC). (Βλέπε και Σχήμα Β.61)



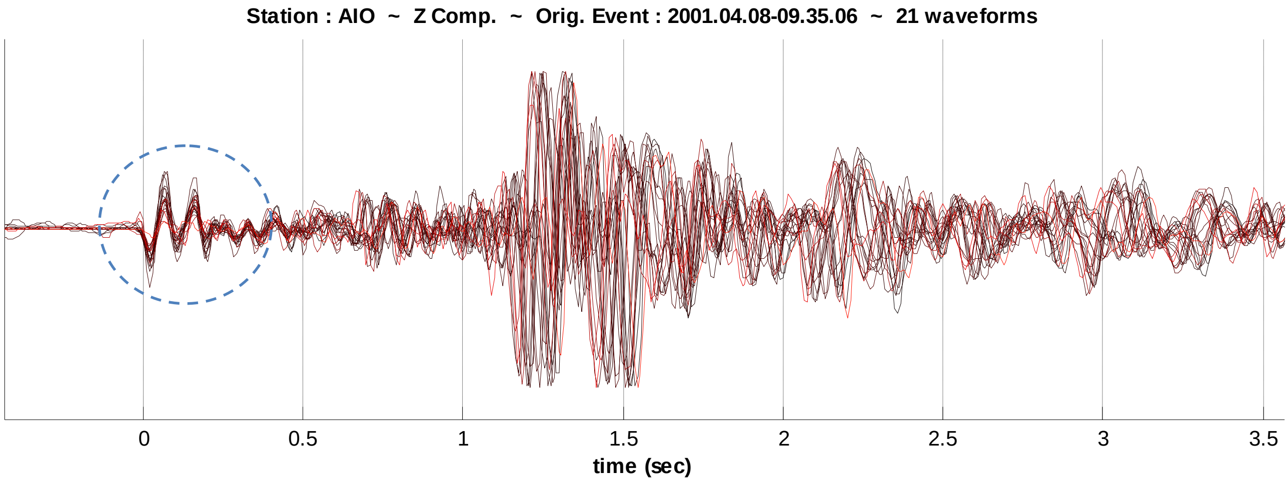
Σχήμα 3.35:

Σχήμα 3.35: Α) Χρονική εξέλιξη της συνοχής για 2 από τους σμηνοσεισμούς του Σχήματος 3.34, το πρώτο από τα οποία (μπλε γραμμή στο άνω πλαίσιο) είναι το γεγονός αναφοράς. Β) Οι 2 λιγότερο όμοιες κυματομορφές των Σχημάτων 3.36-3.37, η πρώτη από τις οποίες (μπλε) ανήκει στο γεγονός αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε. Η ετεροσυσχέτιση έχει γίνει σε ολόκληρες τις κυματομορφές και έτσι έχουν ταυτιστεί κυρίως στο τμήμα τους που περιέχει τα κύματα-S. Το $\mathbf{XC_{max}}$ στα αφιλτράριστα σήματα δίνει $\mathbf{XC_{max}}$=0.50 ενώ μετά από πέρασμα με ζωνοπερατό φίλτρο 0.5-15Hz το μέγιστο της ετεροσυσχέτισης γίνεται $\mathbf{XC_{max}}'\cong 0.70$. Β) διάγραμμα χρονικής εξέλιξης της συνοχής για κυλιόμενο παράθυρο εύρους 3sec στις παραπάνω κυματομορφές.

Αυτός είναι και ο λόγος που, στην πράξη, ως γεγονός αναφοράς επιλέγεται ένα με *καθαρές* καταγραφές (με υψηλό λόγο σήματος προς θόρυβο) σε *πολλούς* σταθμούς, και συνεπώς με ευδιάκριτες τις αφίξεις των P ή S κυμάτων που πρέπει να προσδιοριστούν σε όλους τους διαθέσιμους σταθμούς για το συγκεκριμένο γεγονός, προκειμένου να αξιοποιηθεί με τον βέλτιστο τρόπο η πληροφορία της ομοιότητας για τον καθορισμό των αντίστοιχων χρόνων άφιξης σε όλους τους σμηνοσεισμούς της συγκεκριμένης συστάδας. Η μέθοδος αυτή, με την ονομασία «μέθοδος των Κύριων Γεγονότων» (*Master Events*) θα αναπτυχθεί αναλυτικά κατά την εφαρμογή της στο 5^{o} Κεφάλαιο (ενότητα 5.1.2).



Σχήμα 3.36: Ταύτιση 21 φιλτραρισμένων κυματομορφών (μεταξύ 0.5-15Hz) της Z-συνιστώσας του σταθμού AIO μιας ομάδας σμηνοσεισμών (*multiplet*) ως προς το γεγονός αναφοράς 2001.04.08-09.35.06.AIO.0-0.SAC. Η στοίχιση έχει γίνει στον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ της ετεροσυσχέτισης σε ένα παράθυρο που περιέχει **μόνο τα S-κύματα** του κάθε σήματος. Οι χρόνοι $t_{S\text{-}P}$ παρουσιάζουν μικρές διαφορές και έτσι δεν υπάρχει ταύτιση στα P.



Σχήμα 3.37: Ταύτιση των **ίδιων** 21 κυματομορφών με εκείνες του προηγούμενου σχήματος αλλά με τη στοίχιση να έχει γίνει στους χρόνους $\boldsymbol{\tau_m}$ της ετεροσυσχέτισης ενός παραθύρου που περιέχει **μόνο τα P-κύματα**.

Κεφαλαιο 4

Μελέτη σεισμικότητας των ετών 2000-2001 στον Δυτικό Κορινθιακό κόλπο

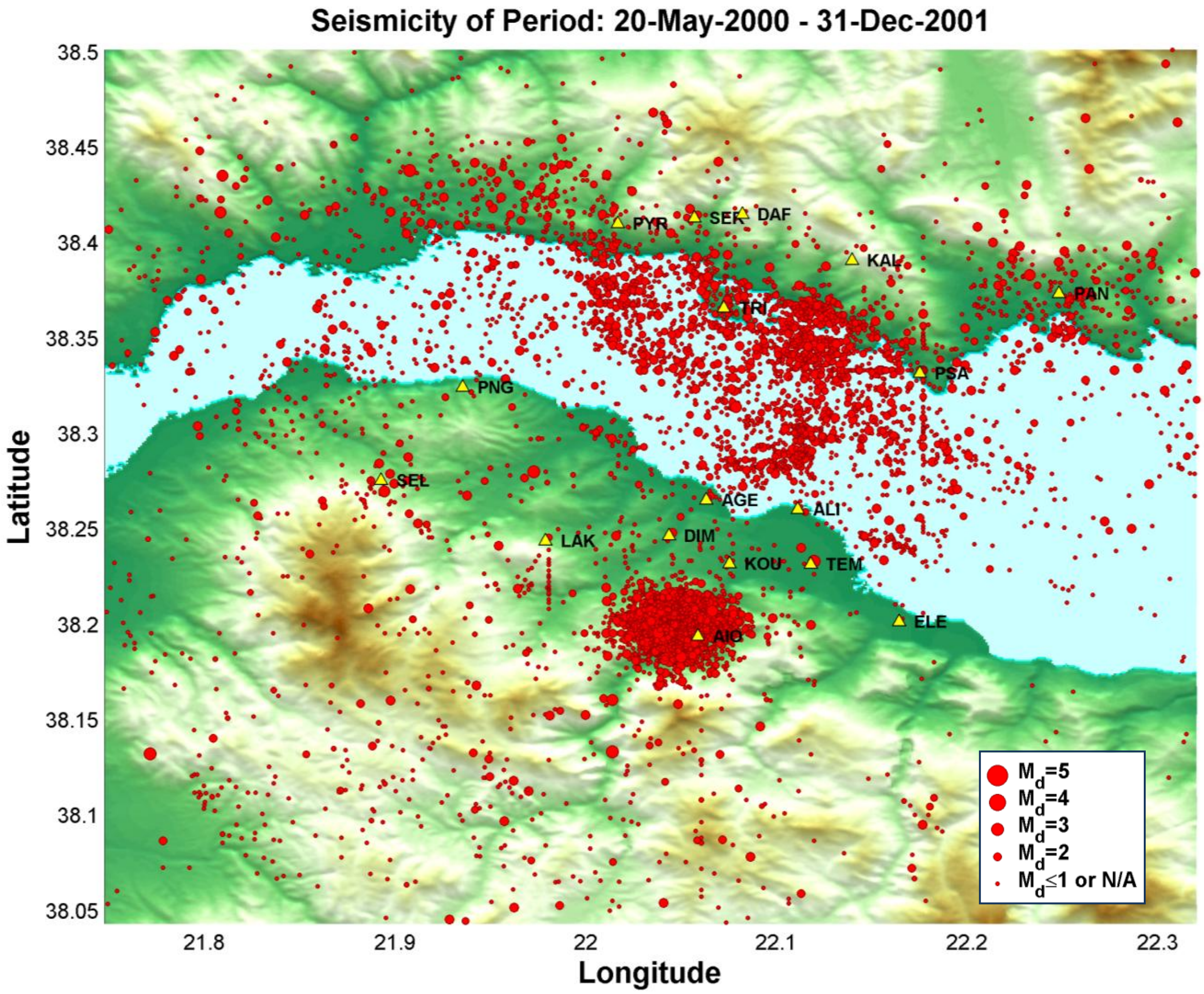
4.1 ~ *Εισαγωγή*

Η πρώτη εφαρμογή θα γίνει στη σεισμικότητα των ετών 2000-2001. Ο σεισμικός κατάλογος για τα έτη 2000, 2001 περιλαμβάνει ένα σύνολο 3355 και 6431 σεισμών αντίστοιχα. Τα διαθέσιμα δεδομένα του καταλόγου για αυτή την περίοδο έχουν ελεγχθεί από αναλυτή (*Κουνάδη, Χ., 2002; Αγάλος, Α. & Λέντας, Κ., 2003*) και έτσι η πρώτη εικόνα για τη σεισμικότητα της περιοχής είναι αρκετά καλά καθορισμένη μέσα σε κάποια πλαίσια σφαλμάτων.

Η διαδικασία ακολουθεί τα εξής στάδια:

1) Επιλογή σεισμικότητας
2) Εντοπισμός συστάδων σμηνοσεισμών (*multiplet clusters*)
3) Επαναπροσδιορισμός με το πρόγραμμα HypoDD

Σημειώνεται ότι οποιαδήποτε αναφορά σε αριθμούς ταυτοποίησης γεγονότων (Event-ID) ή συστάδων (Cluster-ID) δεν αναφέρεται σε κάποιο απόλυτο αριθμό ταυτοποίησης, αλλά σχετίζεται πάντα με ένα ορισμένο «πακέτο» σεισμών ή κάποια ορισμένη τιμή κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$ αντίστοιχα. Σε κάθε τέτοια ομάδα η αρίθμηση ξεκινάει πάντα από το 1. Απόλυτη αναφορά σε συγκεκριμένους σεισμούς θα γίνεται με τον χρόνο γένεσής τους.



Σχήμα 4.1: Χάρτης σεισμικότητας 2000-2001 στην περιοχή του Δυτικού Κορινθιακού κόλπου (Προβολή UTM)

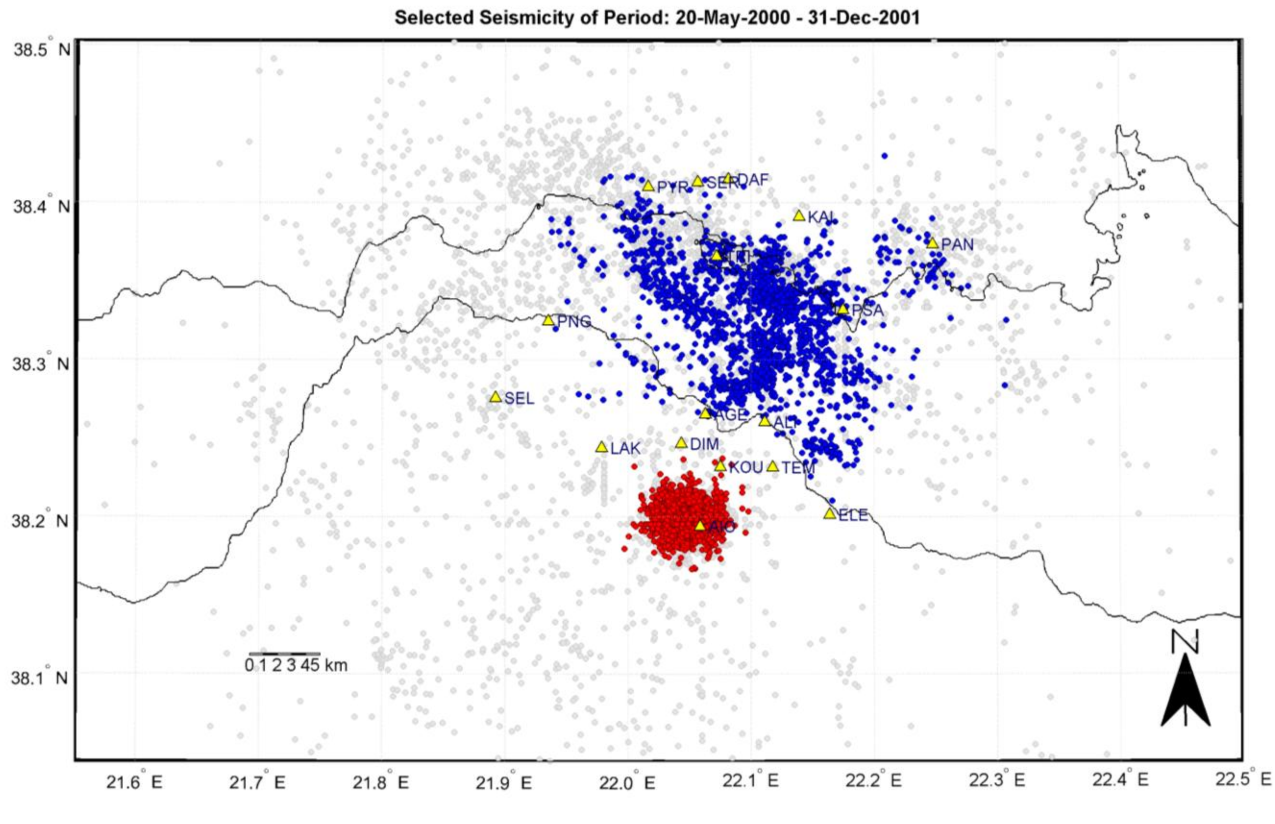
Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζονται τα επίκεντρα σεισμών που καταγράφθηκαν στην περίοδο 2000-2001 στην ευρύτερη περιοχή του Δυτικού Κορινθιακού. Το μέγεθος της κάθε κουκίδας αντιστοιχεί σε Μέγεθος Διάρκειας (**M_d**), όπως δείχνει το υπόμνημα, το οποίο υπολογίστηκε βάσει της διάρκειας T (sec) και της επικεντρικής απόστασης Δ (km) από τον κάθε σταθμό από τον τύπο (*P. Papadimitriou et al., 2001*):

$$M_d = -1.1 + 2.35 \cdot \log T + 0.0012 \cdot \Delta$$

Τα μεγέθη αυτά υπολογίζονται αυτόματα με το πρόγραμμα HYPO71 (*Lee & Lahr, 1972*) από τα δεδομένα των αρχείων φάσεων. Επίσης, για ένα πλήθος 3715 σεισμών από τα έτη 2000-2001 έχει υπολογιστεί το μέγεθος ροπής, ακολουθώντας τη μέθοδο που περιγράφθηκε στο Κεφάλαιο 2.

4.2 ~ *Επιλογή Σεισμικότητας*

Στον χάρτη σεισμικότητας των ετών 2000-2001 (Σχήμα 4.1) φαίνεται ότι υπάρχουν 2 κύριες περιοχές που εμφάνισαν έντονη δραστηριότητα σε αυτή την περίοδο. Η σεισμικότητα μπορεί να χωριστεί σε 2 ομάδες και να εξεταστεί η κάθε μία ξεχωριστά. Η μία ομάδα, που θα ονομάζεται στο εξής **Ομάδα Α**, είναι το σμήνος του AIO (επίκεντρα με κόκκινο χρώμα στο Σχήμα 4.2), ένα μέρος του οποίου αναλύθηκε λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 3. Η άλλη ομάδα, που θα ονομάζεται **Ομάδα Β**, συμβολίζεται με το μπλε χρώμα στο Σχήμα 4.2 και έχει επίκεντρα κυρίως στο εσωτερικό του κόλπου.



Σχήμα 4.2: Επιλεγμένη σεισμικότητα της περιόδου 2000-2001 χωρισμένη σε 2 ομάδες: α) το σμήνος του AIO (κόκκινο, **Ομάδα Α**), β) σεισμικότητα εντός του κόλπου (μπλε, **Ομάδα Β**).

Η Ομάδα Α περιλαμβάνει 1954 σεισμούς ενώ η Ομάδα Β 1827 σεισμούς από ένα σύνολο 9786 γεγονότων με διαθέσιμα δεδομένα κυματομορφών και χρόνων άφιξης για τα έτη 2000-2001. Η Ομάδα Α περιλαμβάνει σεισμούς του 2001 με εξαίρεση 6 σεισμούς από τα τέλη του 2000. Η κύρια δραστηριότητά της έλαβε χώρα ύστερα από έναν σεισμό M_w=4.2 που εκδηλώθηκε στις 8 Απριλίου 2001, 06:12:24.42UTC. Η Ομάδα Β περιέχει 636 γεγονότα μέσα στο 2000 και 1191 μέσα στο 2001 ενώ περιλαμβάνει μια πληθώρα από συστάδες που, όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια, έδρασαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Οι 2 ομάδες έχουν αρχικά επιλεχθεί με καθαρά χωρικά κριτήρια καθώς το σμήνος του AIO μπορεί εύκολα να διαχωριστεί από την υπόλοιπη σεισμικότητα, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.1 και 4.2, ενώ η επιλογή της σεισμικότητας σε κάθε ομάδα έγινε με τα παρακάτω κριτήρια:

<u>Ομάδα Α:</u>

Gap < 320°
Αριθμός Φάσεων ≥ 8
Σφάλμα RMS < 0.2sec
Σφάλμα Θέσης < 1.5km

<u>Ομάδα Β:</u>

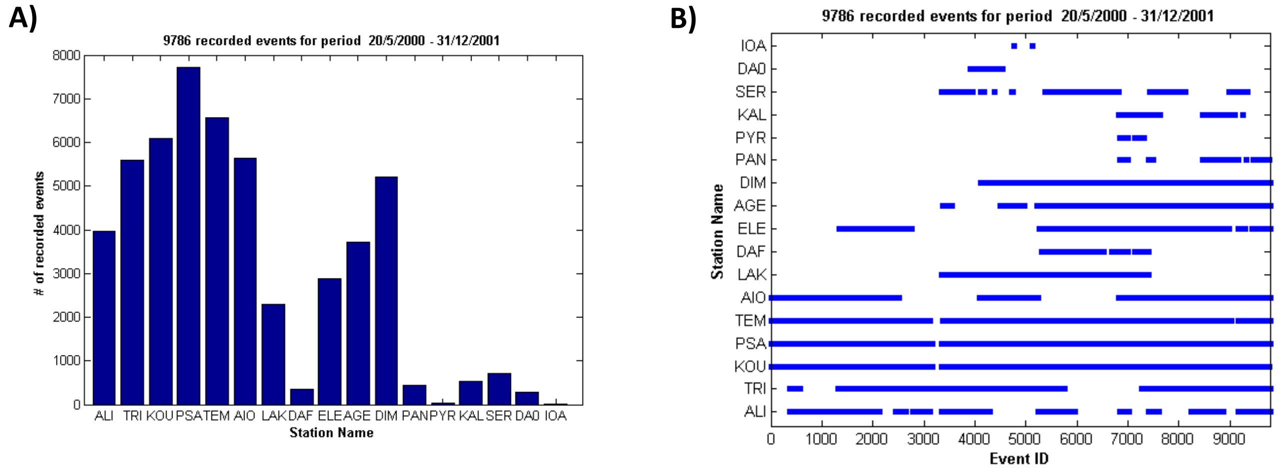
Gap < 270°
Αριθμός Φάσεων ≥ 5
Σφάλμα RMS < 0.3sec
Σφάλμα Θέσης < 5km

Ως “Gap” ορίζεται ο μέγιστος αζιμουθιακός διαχωρισμός ανάμεσα σε 2 σταθμούς, το σφάλμα θέσης υπολογίζεται από τα επιμέρους σφάλματα dx, dy, dz των 3 συνιστωσών θέσης με πυθαγόρειο θεώρημα (σημείωση: το σφάλμα στη συνιστώσα βάθους dz συνήθως είναι μεγαλύτερο από τα άλλα δύο). Η επιλεγμένη σεισμικότητα της Ομάδας Β ξεκινάει από τις 20 Μαΐου 2000 καθώς οι παραπάνω συνθήκες δεν πληρούνταν μέχρι εκείνη την ημερομηνία λόγω του γεγονότος ότι το δίκτυο CRL μόλις πριν μερικούς μήνες από τότε είχε αρχίσει να παράγει δεδομένα. Ένα τμήμα της σεισμικότητας του κόλπου, δυτικά και ανατολικά από τα επίκεντρα της Ομάδας Β, δεν έχει επιλεχθεί λόγω του ισχυρού περιορισμού στο Gap (<270°). Όσοι σεισμοί έχουν επίκεντρα που βρίσκονται έξω από την περιοχή που περικλείει το δίκτυο έχουν μείνει εκτός της επιλογής. Επίσης σεισμοί που βρίσκονται εντός δικτύου μπορεί να έχουν αποκλειστεί λόγω ανεπάρκειας δεδομένων και πιθανόν μικρής αζιμουθιακής κάλυψης. Αυτό εν μέρει οφείλεται στην ανομοιογένεια των δεδομένων από τους σταθμούς όπως φαίνεται στα Σχήματα $4.3_{A,B}$.

4.3 ~ *Εντοπισμός Συστάδων Σμηνοσεισμών*

Ο εντοπισμός των συστάδων σμηνοσεισμών (*multiplet clusters*) θα γίνει με τη μέθοδο που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3. Πρώτα πρέπει να επιλεχθεί ο σταθμός που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του πίνακα συσχέτισης και του πίνακα ομοιότητας στη συνέχεια. Θα πρέπει ο σταθμός να βρίσκεται σχετικά κοντά στα επίκεντρα των σεισμών της κάθε ομάδας και θα πρέπει επίσης να παρέχει μια επαρκή χρονική κάλυψη της περιόδου που εξετάζεται με δεδομένα κυματομορφών καλής ποιότητας, δηλαδή χωρίς έντονο θόρυβο, καθώς και με αρκετά δεδομένα φάσεων, κυρίως με χρόνους άφιξης P.

Η εικόνα για τα δεδομένα των φάσεων ανά σταθμό στην περίοδο 2000-2001 φαίνεται στα Σχήματα 4.3:



Σχήμα 4.3: Διαθεσιμότητα σταθμών για την περίοδο 2000-2001: A) Αριθμός γεγονότων με τουλάχιστον 1 διαθέσιμη φάση P ή S ανά σταθμό. B) Χρονική κάλυψη γεγονότων από κάθε σταθμό. Ο άξονας-x αριθμεί τα διαδοχικά γεγονότα (Event ID) ενώ οι μπλε ράβδοι υποδηλώνουν ότι ο εκάστοτε σταθμός έχει δεδομένα φάσεων για τα συγκεκριμένα γεγονότα.

Ο σταθμός που παρέχει την πληρέστερη κάλυψη σε όλη την περίοδο είναι ο σταθμός PSA (Ψαρομύτα) με τον σταθμό TEM (Τέμενη) να έρχεται δεύτερος. Ο σταθμός KOU παρέχει επίσης κάλυψη σε όλη την περίοδο αλλά η κατακόρυφη συνιστώσα του δεν λειτουργεί, ενώ από τις 2 οριζόντιες μόνο η E-W είναι σε καλή κατάσταση. Για την Ομάδα B ο σταθμός PSA είναι η καλύτερη επιλογή, τόσο για τη χρονική κάλυψη των δεδομένων που παρέχει όσο και για την ποιότητα του σήματος. Η θέση του επίσης είναι καλή για το μεγαλύτερο πλήθος των γεγονότων.

Για την Ομάδα A στο προηγούμενο κεφάλαιο είχε επιλεχθεί ο σταθμός AIO (Αγ. Ιωάννης) λόγω της καλής ποιότητας του σήματός του και της κοντινής του απόστασης από τα επίκεντρα του ομώνυμου σμήνους. Το πρόβλημα είναι ότι παρουσιάζει κενό κάλυψης για δύο περίοδους από 1/1/2001 έως 27/3/2001 και από 18/4/2001 έως 9/6/2001. Ο σταθμός DIM έχει ένα κενό από την αρχή του 2001 μέχρι τις 23/3/2001 αλλά στη συνέχεια παρέχει συνεχή κάλυψη μέχρι το τέλος του έτους. Λόγω της κοντινής του απόστασης επιλέχθηκε ο σταθμός DIM. Εναλλακτικά θα μπορούσε να είχε επιλεχθεί ο σταθμός TEM ο οποίος βρίσκεται λίγο πιο μακριά από τα επίκεντρα του σμήνους απ’ ότι ο DIM αλλά παρέχει κάλυψη από την αρχή του έτους. Το πρόβλημα δεν είναι σοβαρό καθώς από την αρχή του 2001 έως τις 23/3/2001, οπότε ξεκινούν τα δεδομένα φάσεων και κυματομορφών στον σταθμό DIM, έχουν συμβεί μόλις 53 σεισμοί από τους επιλεγμένους της Ομάδας A ενώ σε επίπεδο κυματομορφών, που είναι το πιο σημαντικό, η διαφορά μεταξύ DIM και TEM ανέρχεται σε 21 μόλις σήματα περισσότερα στον σταθμό TEM.

Καθώς είναι γνωστοί οι χρόνοι άφιξης των P-κυμάτων και η διάρκεια του σήματος από τα δεδομένα των αρχείων φάσεων, όταν αυτά είναι διαθέσιμα για τους υπό μελέτη σταθμούς, μπορούν να αποκοπούν τα σήματα μεταξύ του χρόνου t_P (της άφιξης των P κυμάτων) και του χρόνου t_P+D, όπου D η διάρκεια του σήματος στον συγκεκριμένο σταθμό, ώστε οι χρονοσειρές που θα χρησιμοποιηθούν να περιέχουν αποκλειστικά το χρήσιμο τμήμα της καταγραφής που περιέχει το σήμα. Στην περίπτωση της περιόδου 2000-2001 συνήθως είναι γνωστή η διάρκεια του σήματος για τα περισσότερα γεγονότα σε πολλούς από τους σταθμούς. Στην πραγματικότητα η αποκοπή δεν γίνεται ακριβώς από τη χρονική στιγμή t_P αλλά λίγο νωρίτερα (κατά 0.5sec σε αυτή την εργασία) προκειμένου να συμπεριληφθεί και ένα μικρό τμήμα του θορύβου πριν την πρώτη άφιξη των κυμάτων, τόσο σε περίπτωση που το t_P δεν είναι καλά προσδιορισμένο όσο και για έναν άλλο λόγο που έχει να κάνει με πιθανή παραμόρφωση στα άκρα του σήματος κατά το ζωνοπερατό φιλτράρισμα.

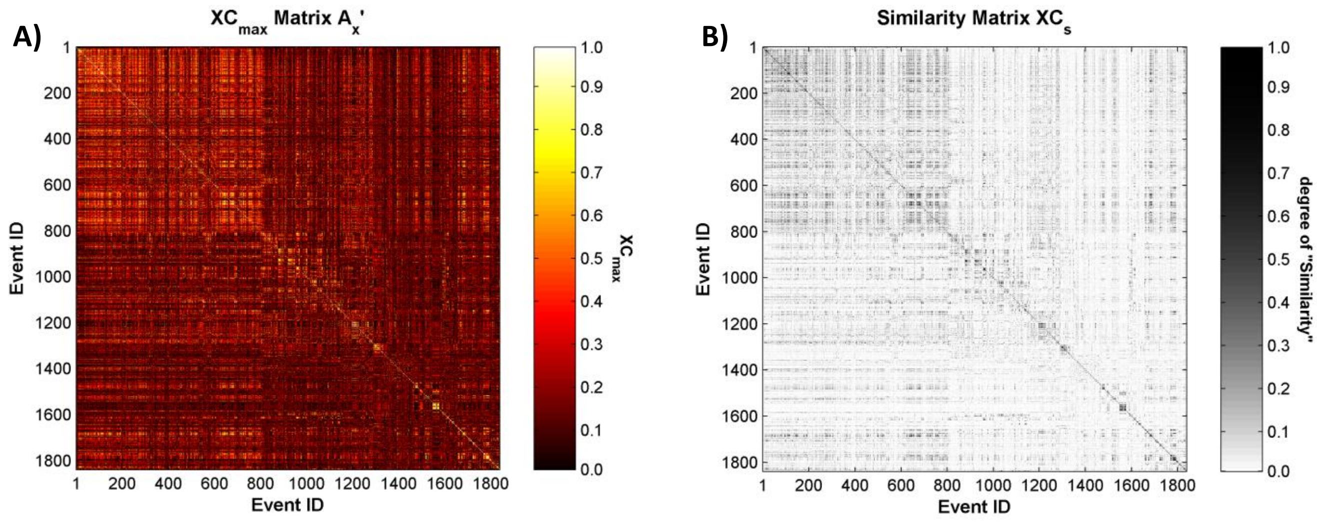
Για τους σεισμούς στους οποίους δεν είναι διαθέσιμοι οι χρόνοι t_P και D θα πρέπει η αποκοπή να γίνει χειροκίνητα ή με κάποιον άλλο αυτόματο τρόπο. Με την αποκοπή, πέρα από την απόρριψη του θορύβου που υπάρχει πριν και μετά το σήμα, επιτυγχάνεται να αποκλειστεί, στη μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων, η παρουσία ενός δεύτερου σήματος μέσα στη χρονοσειρά. Στη μελέτη αυτή η εμφάνιση πολλών σημάτων (από πολλαπλούς μικροσεισμούς) μέσα σε μερικά δευτερόλεπτα είναι αρκετά συχνή, ειδικά όταν αναμένεται ένας συγκεκριμένος σεισμός να ανήκει σε κάποια συστάδα σμηνοσεισμών που συνήθως παρουσιάζει ισχυρή χρονική συσταδοποίηση.

Είναι σημαντικός επίσης ο έλεγχος της κατάστασης λειτουργίας των οργάνων καθώς και των περιπτώσεων στις οποίες αλλάζουν οι παράμετροι δειγματοληψίας ή αλλάζει τελείως το όργανο σε κάποιον σταθμό. Εάν αλλάξει το όργανο, πιθανότατα αλλάζει η απόκριση του οργάνου και τότε δε γίνεται να συγκριθούν σήματα πριν και μετά την αλλαγή αυτή, εκτός εάν είναι γνωστές οι ακριβείς αποκρίσεις και αποσυνελιχθούν από τα αντίστοιχα σήματα προτού εκτελεστεί η διαδικασία ετεροσυσχέτισης. Μια άλλη περίπτωση είναι να αλλάξει ο ρυθμός δειγματοληψίας. Στη γενική περίπτωση θα συναντηθεί αυτό το πρόβλημα με ορισμένους σταθμούς, αλλά υπάρχει τρόπος να ξεπεραστεί όταν οι 2 ρυθμοί δειγματοληψίας έχουν κοινό ακέραιο διαιρέτη. Η απλούστερη περίπτωση είναι ο ένας ρυθμός να είναι διπλάσιος από τον δεύτερο. Τότε μπορούν να διατηρηθούν τα μισά από τα δείγματα της χρονοσειράς που αντιστοιχεί στο σήμα με τον διπλάσιο ρυθμό δειγματοληψίας, ένα παρά ένα, οπότε η νέα χρονοσειρά θα έχει το μισό ρυθμό δειγματοληψίας από τον αρχικό της.

Στη συνέχεια θα εξεταστούν χωριστά οι δύο ομάδες σεισμών που διακρίθηκαν προηγουμένως και θα γίνει προσπάθεια εντοπισμού των συστάδων όμοιων γεγονότων.

4.3.1 ~ *Ομάδα Α*

Η Ομάδα Α, η οποία αντιστοιχεί στο «**Σμήνος του ΑΙΟ (2001)**» περιλαμβάνει 1954 σεισμούς, για 1839 από τους οποίους διατίθενται κυματομορφές της συνιστώσας Z στον σταθμό DIM. Θα κατασκευαστούν πίνακες 1839x1839 από τις φιλτραρισμένες χρονοσειρές στη ζώνη συχνοτήτων 0.5-15Hz: με το ολικό μέγιστο της ετεροσυσχέτισης, $\mathbf{XC_{max}}$ (Πίνακας $\mathbf{A_x}$΄), με το "*peak-to-2nd-maximum*" (Πίνακας $\mathbf{A_p}$) της διαφοράς μεταξύ $\mathbf{XC_{max}}$ και δευτερεύοντος μεγίστου της ετεροσυσχέτισης, και τέλος με τον συντελεστή μεταξύ της καμπύλης ετεροσυσχέτισης και των αυτοσυσχετίσεων των 2 σημάτων για το εκάστοτε υπό σύγκριση ζεύγος (Πίνακες $\mathbf{A_a}$, $\mathbf{A_b}$ και η μέση τιμή τους $\mathbf{A_a}$~$\mathbf{A_b}$). Τα στοιχεία του πίνακα $\mathbf{A_p}$ διορθώνονται κανονικοποιώντας τα ως προς τα στοιχεία της διαγωνίου του (βλέπε Κεφάλαιο 3) παράγοντας έτσι τον πίνακα $\mathbf{A_p}$΄. Από τους πίνακες αυτούς κατασκευάζεται ο **Πίνακας Ομοιότητας** $\mathbf{XC_s}$, όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3, με πολλαπλασιασμό *ανά στοιχείο* των πινάκων $\mathbf{A_x}$΄, $\mathbf{A_p}$΄ και $\mathbf{A_a}$~$\mathbf{A_b}$. Παρακάτω παρουσιάζονται για σύγκριση οι πίνακες $\mathbf{A_x}$΄ και $\mathbf{XC_s}$ για την **Ομάδα Α**:

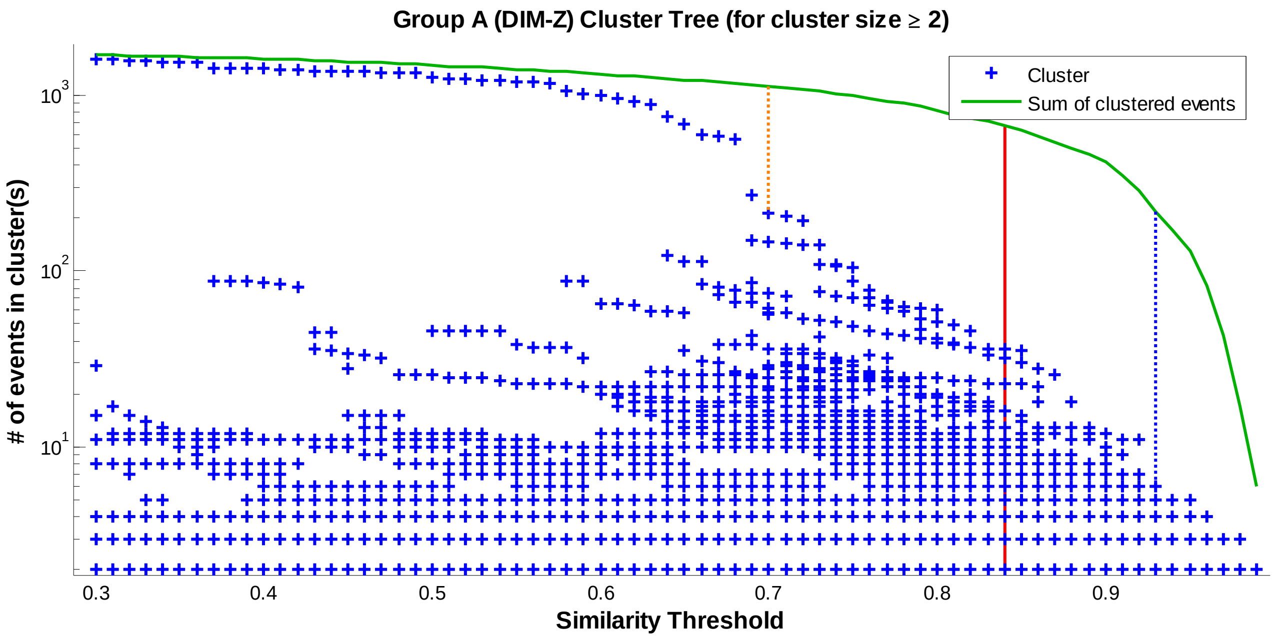


Σχήμα 4.4: Α) Πίνακας Ετεροσυσχέτισης, $\mathbf{A_x}$΄, για την Ομάδα Α, Β) Πίνακας Ομοιότητας, $\mathbf{XC_s}$, για την Ομάδα Α.

Μια πρώτη ματιά στους πίνακες δείχνει ότι κυρίως τα πρώτα ~800 γεγονότα παρουσιάζουν ισχυρή συσχέτιση ενώ στη συνέχεια εμφανίζονται σποραδικά ορισμένες ακόμα συγκεντρώσεις όμοιων, χρονικά κοντινών γεγονότων, κάποια από τα οποία μπορούν να συσχετιστούν και με ορισμένα από τα πρώτα 800 γεγονότα, ανήκουν δηλαδή στις ίδιες συστάδες. Από τον Πίνακα Ομοιότητας κατασκευάζεται το αντίστοιχο δενδρόγραμμα (Σχήμα 4.5) προκειμένου να αποφασιστεί ποια είναι η κατάλληλη τιμή κατωφλίου, $\mathbf{C_{th}}$.

Η «προτεινόμενη» τιμή κατωφλίου για την Ομάδα Α, όπως φαίνεται στο δενδρόγραμμα είναι $\mathbf{C_{th}}$=0.70 με την οποία σχηματίζονται 90 συστάδες από 2 και άνω γεγονότα η κάθε μία, με τη μεγαλύτερη από αυτές να περιέχει 212 γεγονότα ενώ στο σύνολό τους περιέχουν 1124 γεγονότα (61% των γεγονότων με κυματομορφές που ελέγχθηκαν και 57% των γεγονότων της Ομάδας Α).

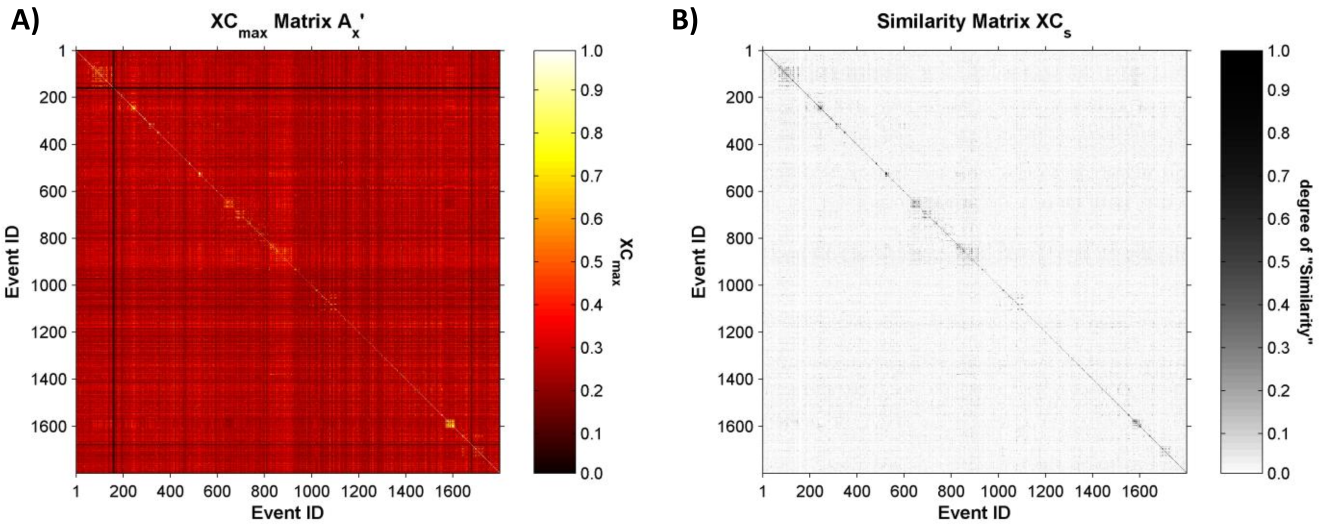
Υπενθυμίζεται πως η προτεινόμενη τιμή κατωφλίου η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 4.5 από την κατακόρυφη διακεκομμένη πορτοκαλί γραμμή στο $\mathbf{C_{th}}$=0.70, είναι αυτή στην οποία η διαφορά μεταξύ του μεγέθους της μεγαλύτερης συστάδας (με τα περισσότερα γεγονότα) από το άθροισμα των γεγονότων που ανήκουν σε συστάδες μεγέθους από 2 και άνω (που απεικονίζεται με την πράσινη περιβάλλουσα γραμμή) μεγιστοποιείται. Η μεγιστοποίηση γίνεται ορατή στο αντίστοιχο δενδρόγραμμα με κανονικούς άξονες (όπως στο Κεφάλαιο 3, Σχήμα 3.21) ενώ στο Σχήμα 4.5 στο οποίο ο άξονας-y είναι λογαριθμικός, παρατηρείται ότι για τιμές κατωφλίου μικρότερες από $\mathbf{C_{th}}$=0.70 ένα μεγάλο πλήθος γεγονότων που ανήκαν σε ξεχωριστές συστάδες αρχίζουν να εντάσσονται σε έναν κύριο κορμό. Όσο το κατώφλι μειώνεται τόσο ξεχωρίζουν ολοένα και περισσότεροι δευτερεύοντες κλάδοι οι οποίοι στη συνέχεια εντάσσονται στον κύριο κορμό. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον φαίνεται να έχει ένας δευτερεύων κλάδος μεγέθους 88 γεγονότων ο οποίος διατηρείται μέχρι και την τιμή $\mathbf{C_{th}}$=0.37 (βλέπε Σχήμα Β.27$_{\Gamma}$ στο βορειο-ανατολικό τμήμα). Ο κύριος κλάδος, με τον οποίο στη συνέχεια ενοποιείται, έχει μέγεθος 1432 για την ίδια τιμή κατωφλίου. Η κατανομή των συστάδων αυτών στον χώρο θα εξεταστεί παρακάτω, αφού πρώτα γίνει ο επαναπροσδιορισμός των υποκέντρων και των χρόνων γένεσης.



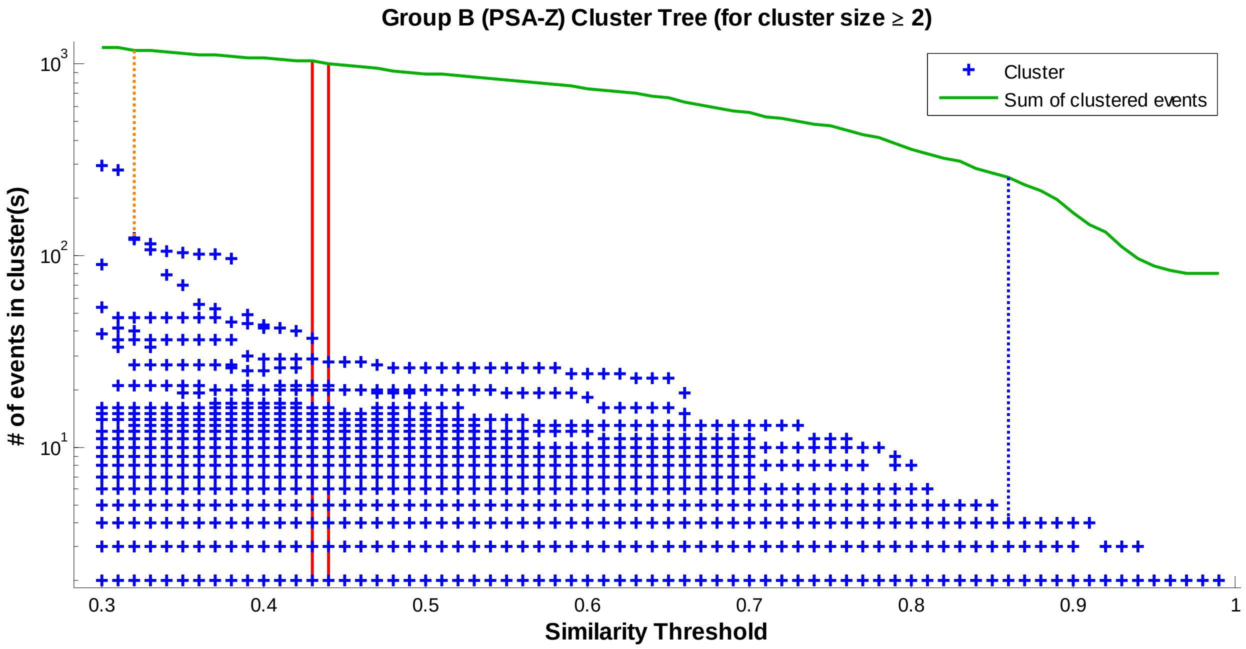
Σχήμα 4.5: Δενδρόγραμμα για την Ομάδα Α κατασκευασμένο από τον πίνακα ομοιότητας, $\mathbf{XC_s}$.

4.3.2 ~ *Ομάδα Β*

Η Ομάδα Β (επίκεντρα με μπλε χρώμα στο Σχήμα 4.2) που περιέχει κυρίως σεισμούς με επίκεντρα εντός του κόλπου, περιλαμβάνει 1827 σεισμούς για 1799 από τους οποίους διατίθενται κυματομορφές της συνιστώσας Z στον σταθμό PSA. Η διαδικασία είναι όμοια με αυτή που εφαρμόστηκε για την Ομάδα Α και παρακάτω παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα.



Σχήμα 4.6: Α) Πίνακας Ετεροσυσχέτισης, $\mathbf{A_x}'$, για την Ομάδα Β, Β) Πίνακας Ομοιότητας, $\mathbf{XC_s}$, για την Ομάδα Β.



Σχήμα 4.7: Δενδρόγραμμα για την Ομάδα Β κατασκευασμένο από τον πίνακα ομοιότητας, $\mathbf{XC_s}$.

Το δενδρόγραμμα αυτό παρουσιάζει πολύ διαφορετική μορφή απ' ότι το προηγούμενο. Δεν ξεχωρίζει κάποιος κύριος κορμός έως την τιμή $\mathbf{C_{th}}$=0.32 (πορτοκαλί διακεκομμένη γραμμή), οι μεγαλύτερες συστάδες που σχηματίζονται περιέχουν 20-30 γεγονότα ενώ η προτεινόμενη τιμή κατωφλίου έχει πέσει στο $\mathbf{C_{th}}$=0.44, σχηματίζοντας 253 συστάδες, με 2 ή παραπάνω γεγονότα ανά συστάδα, η μεγαλύτερη με 28, που στο σύνολό τους περιέχουν 997 γεγονότα (~55% των γεγονότων της Ομάδας Β). Δεν θα προτιμηθεί το $\mathbf{C_{th}}$=0.32 διότι στην περίπτωση αυτή ενοποιούνται συστάδες που (από την κατανομή των επικέντρων τους) φαίνονται ασυσχέτιστες. Η σημαντική διαφορά ανάμεσα σε αυτή την ομάδα και την προηγούμενη είναι η έκταση στην οποία εξαπλώνονται τα επίκεντρα και η πληθώρα συστάδων που μπορούν να διακριθούν από τη χωρική συσσώρευση των γεγονότων σε διάφορες θέσεις στο Σχήμα 4.2 (μπλε επίκεντρα).

4.4 ~ *Επαναπροσδιορισμός με HypoDD*

Η διαδικασία επαναπροσδιορισμού με HypoDD, που περιγράφθηκε στο Κεφάλαιο 1 απαιτεί την ύπαρξη δεδομένων χρόνων άφιξης στους σταθμούς, από τους οποίους στη συνέχεια υπολογίζονται οι χρόνοι διαδρομής. Επαναλαμβάνεται σε αυτό το σημείο ότι βασική προϋπόθεση για τον επιτυχή επαναπροσδιορισμό αποτελεί ένας αρχικά «καλός» κατάλογος. Ο επαναπροσδιορισμός μπορεί να αποδώσει τα μέγιστα όταν ο αρχικός προσδιορισμός έχει γίνει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, κοινώς, όταν όλα τα δεδομένα έχουν ελεγχθεί μη-αυτόματα και όταν είναι διαθέσιμοι οι χρόνοι άφιξης σε όλους τους σταθμούς για όλα τα γεγονότα. Αυτές τις απαιτήσεις καλύπτουν σε μεγάλο βαθμό τα διαθέσιμα δεδομένα φάσεων για τα έτη 2000-2001.

Για τη βασική λειτουργία του το HypoDD χρειάζεται ένα αρχείο εισόδου που περιέχει τους διαφορικούς χρόνους διαδρομής για τα διάφορα ζεύγη σεισμών σε κάθε κοινό σταθμό. Για να δημιουργηθεί αυτό το αρχείο κατασκευάζεται προηγουμένως ένα άλλο με γενική ονομασία HYPO.PH2, το οποίο περιέχει πληροφορία για τη θέση και τον χρόνο γένεσης κάθε σεισμού, το σφάλμα RMS και τα τυπικά σφάλματα οριζόντιας και κατακόρυφης θέσης, καθώς και τους χρόνους διαδρομής των φάσεων P ή/και S για κάθε σεισμό σε κάθε σταθμό μαζί με τα αντίστοιχα βάρη, δηλαδή με την «ποιότητα» της μέτρησης του αντίστοιχου χρόνου άφιξης. Το αρχείο αυτό μετατρέπεται με τη χρήση του προγράμματος PH2DT σε ένα αρχείο με γενική ονομασία DT.CT (όπου το CT αναφέρεται στα *δεδομένα καταλόγου*) και το οποίο είναι το βασικό αρχείο εισόδου του HypoDD. Το πρόγραμμα PH2DT αναλαμβάνει να δημιουργήσει τους συνδέσμους ανάμεσα στα διάφορα γεγονότα ανάλογα με την ενδοαπόστασή τους, τις καταγραφές των φάσεών τους σε κοινούς σταθμούς κτλ. Η διαδικασία αυτή είναι παραμετροποιήσιμη και οι παράμετροι αυτές επηρεάζουν ισχυρά το αποτέλεσμα της εξόδου του HypoDD στη συνέχεια.

Το ίδιο το HypoDD παραμετροποιείται με τρόπο που χωρίζει τη διαδικασία σε διάφορα στάδια. Συνήθως το πρώτο στάδιο αφορά σε έναν γενικό επαναπροσδιορισμό που τοποθετεί χονδρικά την κάθε συστάδα στην σωστή απόλυτη θέση ενώ τα επόμενα επιμέρους στάδια αποσκοπούν στον σχετικό επαναπροσδιορισμό των γεγονότων της κάθε συστάδας ως προς το κεντροειδές της, στη θέση στην οποία βρέθηκε μετά το πέρας του πρώτου γενικού σταδίου.

Στον σχετικό επαναπροσδιορισμό των γεγονότων κάθε συστάδας χρησιμεύουν εξαιρετικά τα δεδομένα ενός δεύτερου αρχείου εισόδου με γενική ονομασία DT.CC (όπου το CC αναφέρεται στα *δεδομένα ετεροσυσχέτισης*). Τα δεδομένα αυτά δεν είναι άλλα από τις τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ και $\boldsymbol{\tau_m}$ για τις οποίες έγινε εκτενής αναφορά στα Κεφάλαια 1 και 3. Για την κατασκευή του αρχείου DT.CC ακολουθείται μια διαδικασία σύγκρισης κυματομορφών όμοιων σεισμών σε **όλους** τους σταθμούς, σε αντίθεση με τη διαδικασία **εντοπισμού** όμοιων σεισμών για την οποία έγινε χρήση ενός μόνο σταθμού και μίας συνιστώσας. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει μια πρόσθετη πολυπλοκότητα καθώς είναι απαραίτητη η γνώση της κατάστασης λειτουργίας όλων των σταθμών κατά τη χρονική περίοδο μελέτης, δηλαδή το κατά πόσο ή όχι λειτουργούν σωστά οι συνιστώσες τους. Στη γενική περίπτωση χρησιμοποιείται η κατακόρυφη συνιστώσα όταν αυτή είναι διαθέσιμη ειδάλλως μία από τις δύο οριζόντιες η οποία είναι διαθέσιμη από κοινού και για τα 2 γεγονότα ενός ζεύγους όμοιων σεισμών. Η αρχική στοίχιση των όμοιων κυματομορφών γίνεται στον χρόνο άφιξης των P ή S κυμάτων ανάλογα με την υπό μελέτη φάση, ορίζοντας αυτή τη χρονική στιγμή ως μηδέν από κοινού και για τις 2 κυματομορφές. Στη συνέχεια προσδιορίζεται το μέγιστο της ετεροσυσχέτισης, $\mathbf{XC_{max}}$, ανάμεσα στις 2 χρονοσειρές καθώς και η χρονική καθυστέρηση $\boldsymbol{\tau_m}$ στην οποία παρουσιάζεται αυτό το μέγιστο. Για να επιτευχθεί λεπτομέρεια μεγαλύτερη από το διάστημα δειγματοληψίας στον υπολογισμό του $\boldsymbol{\tau_m}$, εκτελείται μια μη-γραμμική παρεμβολή, π.χ. μια παραβολή, γύρω από το μέγιστο της ετεροσυσχέτισης (όπως ήδη αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 1). Προαιρετικά, μπορεί να υπολογιστεί και η διορθωμένη τιμή $XC_{max,corr}$ σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στο 1^{ο} Κεφάλαιο και με τη βοήθεια της εξίσωσης 1.3. Σημειώνεται σε αυτό το σημείο ότι η διαδικασία ετεροσυσχέτισης αυτή τη φορά γίνεται σε *τμήμα* των χρονοσειρών, περιορισμένου μήκους, που περιλαμβάνει μόνο τα P ή μόνο τα S κύματα ανάλογα με την περίπτωση, ώστε, ειδικά για τα P, η ταύτιση να γίνει ως προς τα κύματα P και όχι ως προς τα S όπως γίνεται συνήθως εάν η ετεροσυσχέτιση «δει» την πλήρη καταγραφή. Αυτό είναι απαραίτητο καθώς, όπως παρουσιάστηκε στα Σχήματα 3.36, 3.37 του Κεφαλαίου 3, είναι δυνατόν ένα πλήθος όμοιων σεισμών να έχει καταγραφές σε κάποιον σταθμό με *διαφορετικές διαφορές* χρόνων άφιξης, t_{S-P}, και, ωστόσο, να παρουσιάζουν ομοιότητα τόσο στα P όσο και στα S κύματα ξεχωριστά.

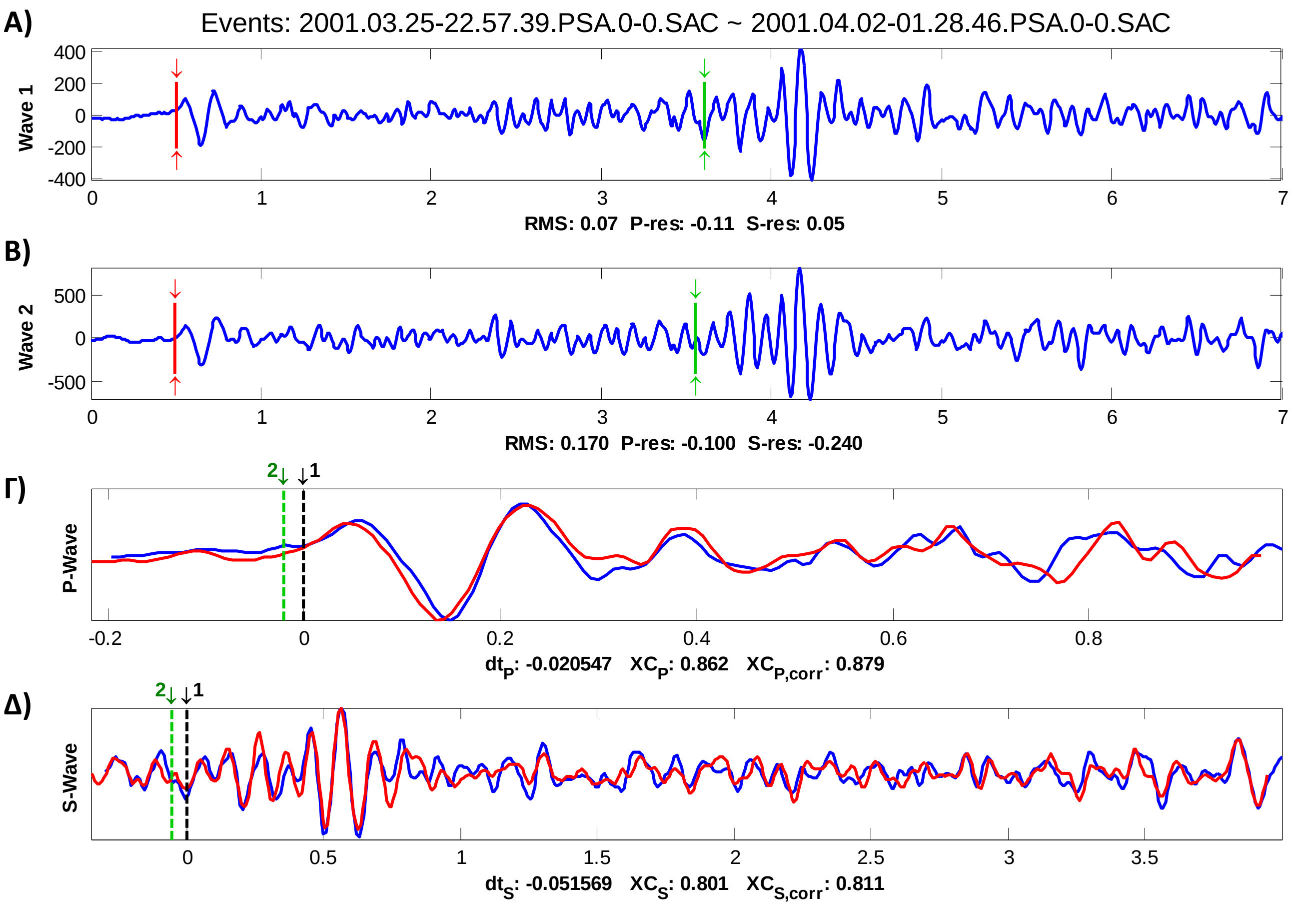
Η σύγκριση γίνεται μόνο σε ζεύγη όμοιων σεισμών τα οποία μπορούν να διακριθούν εύκολα από τα στοιχεία του πίνακα ομοιότητας (*άμεσοι συγγενείς*). Για κάθε *γεγονός αναφοράς* (ID1), με τον αντίστοιχο αριθμό ταυτοποίησης να ορίζει μια γραμμή του πίνακα ομοιότητας, εντοπίζονται εκείνα τα 'εξαρτημένα' (*slave*) γεγονότα (ID2), με τους αριθμούς ταυτοποίησής τους να ορίζουν τις στήλες του πίνακα ομοιότητας, για τα οποία το αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα βρίσκεται πάνω από μια ορισμένη τιμή κατωφλίου. Η διαδικασία αυτή θα μπορούσε να εκτελεστεί για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς ζευγών γεγονότων αλλά κάτι τέτοιο αφενός μεν δεν έχει νόημα, αφετέρου θα ήταν πάρα πολύ χρονοβόρο. Μια εναλλακτική λύση είναι η διαδικασία να τρέχει σε όλα τα γεγονότα εκείνα για τα υπόκεντρα των οποίων η ενδοαπόσταση είναι μικρότερη από κάποια τιμή. Σε αυτή την περίπτωση όμως θα πρέπει να είναι εξακριβωμένη η καλή ποιότητα των αρχικών υποκέντρων, και πάλι, σε μια περίπτωση όπως αυτή της Ομάδας Α, η διαδικασία θα ήταν πολύ χρονοβόρα. Σε μελλοντική εφαρμογή μπορούν να ληφθούν υπόψη και οι έμμεσοι συγγενείς, από τις συστάδες που δίνουν τα αντίστοιχα δενδρογράμματα, ή ακόμη οι όμοιοι σεισμοί που έχουν εντοπιστεί από ένα πλήθος σταθμών (αντί για έναν μόνο), αυξάνοντας έτσι τον όγκο των δεδομένων ετεροσυσχέτισης και πιθανόν βελτιώνοντας ακόμη περισσότερο την εικόνα της σεισμικότητας.

Αφού βρεθούν οι τιμές $\boldsymbol{\tau_m}$ για κάθε σταθμό και φάση, γίνεται μια προσωρινή «διόρθωση» των χρόνων άφιξης στο αρχείο φάσεων του αντίστοιχου 'εξαρτημένου' (*slave*) γεγονότος ID2, εφόσον αυτές οι διορθώσεις είναι μεγαλύτερες από ±1msec, επανεκτελείται το HYPO71 (*Lee & Lahr, 1972*) για το νέο αρχείο φάσεων και υπολογίζεται η **μεταβολή του χρόνου γένεσης** του γεγονότος αυτού. Αυτό αποτελεί μια επιπλέον παράμετρο την οποία απαιτεί το HypoDD για τα δεδομένα ετεροσυσχέτισης και αναφέρεται ως **OTC** (*Origin Time Correction*).

Μία πολύ σημαντική λεπτομέρεια σε αυτή τη διαδικασία είναι ότι τόσο στο αρχείο HYPO.PH2 (που στη συνέχεια μετατρέπεται σε DT.CT) όσο και στο αρχείο DT.CC πρέπει να **διατηρούνται αυστηρά** οι αριθμοί ταυτοποίησης των γεγονότων (*Event IDs*), καθώς και να είναι διαθέσιμος ένας πίνακας με την αντιστοιχία αυτών των αριθμών με το όνομα του αρχείου φάσεων που υπάρχει χωριστά για κάθε σεισμό, ώστε να είναι γνωστό για το κάθε επαναπροσδιορισμένο γεγονός σε ποιο αρχείο του αρχικού καταλόγου αναφέρεται, και κατ' επέκταση σε ποια σήματα. Αυτό είναι, επίσης, απαραίτητο προκειμένου να δημιουργηθούν ενοποιημένοι κατάλογοι και να επανεκτελεστεί η εφαρμογή HypoDD με ένα μεγαλύτερο πλήθος δεδομένων.

Το ερώτημα αν ο επαναπροσδιορισμός έχει επιφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα μπορεί να απαντηθεί εν μέρει από την κατανομή των συστάδων όμοιων σεισμών: η διασπορά των υποκέντρων τους θα πρέπει να είναι μικρότερη από την αρχική. Θα πρέπει επίσης να έχει δημιουργηθεί ένας καλύτερος χωρικός διαχωρισμός ανάμεσα στις διαφορετικές συστάδες, από εκεί που αρχικά υπήρχε αλληλοεπικάλυψη μεταξύ των όγκων τους οποίους καταλαμβάνουν. Τέλος, μπορεί να εξεταστεί ο βαθμός συγγένειας διαφόρων γεγονότων με τα υπόλοιπα γειτονικά γεγονότα στον χώρο, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, Σχήμα 3.27, καθώς και το κατά πόσο έχει βελτιωθεί η *χωρική* συσταδοποίηση σε γεγονότα τα οποία παρουσιάζουν έντονη *χρονική* συσταδοποίηση (όπως π.χ. αυτών που ανήκουν σε μια μετασεισμική ακολουθία) και πιθανότατα συσχετίζονται.

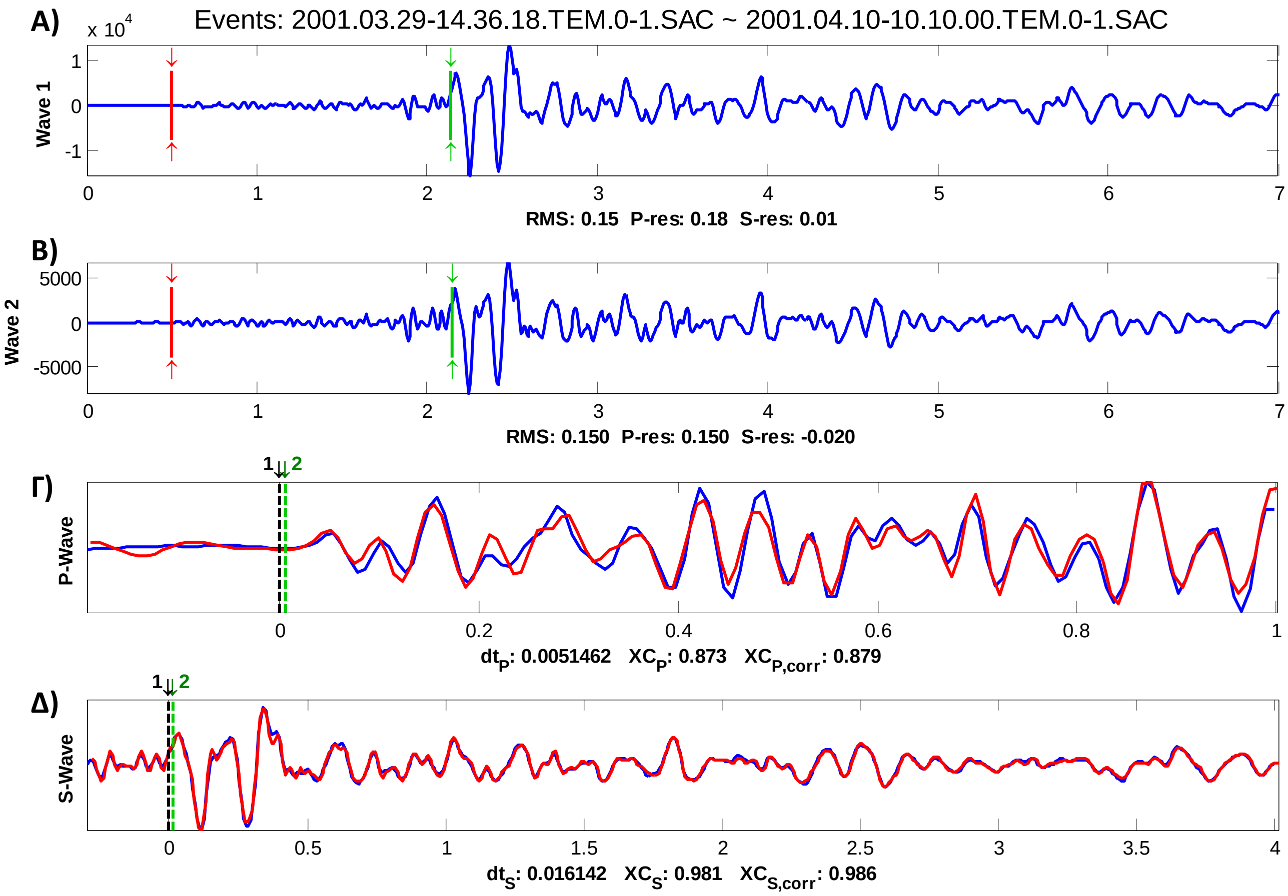
Στα Σχήματα 4.8, 4.9 παρουσιάζονται εικόνες από τη διαδικασία κατασκευής του αρχείου DT.CC, των δεδομένων ετεροσυσχέτισης που εισάγονται στο HypoDD. Σημειώνονται τα ονόματα των κυματομορφών καθώς και τα σφάλματα RMS των αντίστοιχων γεγονότων και τα χρονικά υπόλοιπα (P, S *residuals*) ανάμεσα στους παρατηρούμενους και θεωρητικά υπολογιζόμενους χρόνους διαδρομής των P ή S κυμάτων των 2 σεισμών στον υπό μελέτη σταθμό. Με $\mathbf{dt_p}$ και $\mathbf{dt_s}$ συμβολίζονται οι χρόνοι $\boldsymbol{\tau_m}$ των **P** και **S** κυμάτων αντίστοιχα, ως προς την αρχική ταύτιση που έχει γίνει στους παρατηρούμενους χρόνους άφιξης. Παρουσιάζονται επίσης οι τιμές του μεγίστου της ετεροσυσχέτισης, XC_P και XC_S για τα P και S κύματα αντίστοιχα μαζί με τις διορθωμένες τιμές τους $XC_{P,corr}$ και $XC_{S,corr}$, βάσει του διορθωτικού παράγοντα της σχέσης 1.3.



Σχήμα 4.8: Από τη διαδικασία κατασκευής του αρχείου DT.CC: A) κυματομορφή #1: 2001.03.25-22.57.39.PSA.0-0.SAC, B) κυματομορφή #2: 2001.04.02-01.28.46.PSA.0-0.SAC. Στα (A) και (B) με κόκκινη κατακόρυφη γραμμή σημειώνεται ο χρόνος άφιξης των κυμάτων P ενώ με πράσινο των κυμάτων S. Οι κυματομορφές έχουν περάσει από ζωνοπερατό φίλτρο μεταξύ 0.5-15Hz. Γ) ταύτιση του τμήματος των κυμάτων P των 2 προηγούμενων κυματομορφών, Δ) ταύτιση των κυμάτων S και της κυματοουράς (*coda wave*) . Στα σχήματα (Γ) και (Δ) με μαύρη κατακόρυφη διακεκομμένη σημειώνεται ο χρόνος άφιξης των P και S κυμάτων αντίστοιχα για την κυματομορφή #1 (που έχει οριστεί σε χρόνο t=0) ενώ με πράσινη γραμμή οι αντίστοιχοι χρόνοι άφιξης για την κυματομορφή #2 σε χρόνο $\mathbf{t=dt_p}$ ή $\mathbf{t=dt_s}$ για τα P ή S κύματα αντίστοιχα. Με μπλε χρώμα παρουσιάζεται το τμήμα της κυματομορφής #1 ενώ με κόκκινο χρώμα το τμήμα της κυματομορφής #2.

Φαίνεται ότι για τα συγκεκριμένα σήματα οι παρατηρούμενοι χρόνοι άφιξης διαφέρουν μεταξύ τους (ως προς το όμοιο τμήμα των 2 κυματομορφών) κατά -20.547ms και -51.569ms αντίστοιχα. Οι διαφορές αυτές μετρώνται ως DT=T1-T2 ή T2+DT=T1, όπου T1, T2 οι παρατηρούμενοι χρόνοι άφιξης των P ή S κυμάτων για τα γεγονότα ID1 και ID2 αντίστοιχα, DT είναι η διόρθωση που πρέπει να γίνει στο T2 ώστε ο χρόνος άφιξης T2΄ να βρεθεί στην ίδια χρονική καθυστέρηση με τον χρόνο T1, ο οποίος θεωρείται σωστά προσδιορισμένος. Σύμφωνα με αυτό, για τα παραπάνω σχήματα ισχύει **DT=-dt$_P$** ή **DT=-dt$_s$** για τα P ή S κύματα αντίστοιχα όταν θεωρηθεί ως γεγονός αναφοράς ID1 το πρώτο από τα 2 που παρουσιάζονται στο σχήμα (στο οποίο ανήκει η κυματομορφή #1), ενώ DT=dt$_p$ ή DT=dt$_s$ αν θεωρηθεί ως ID1 το γεγονός στο οποίο ανήκει η κυματομορφή #2.

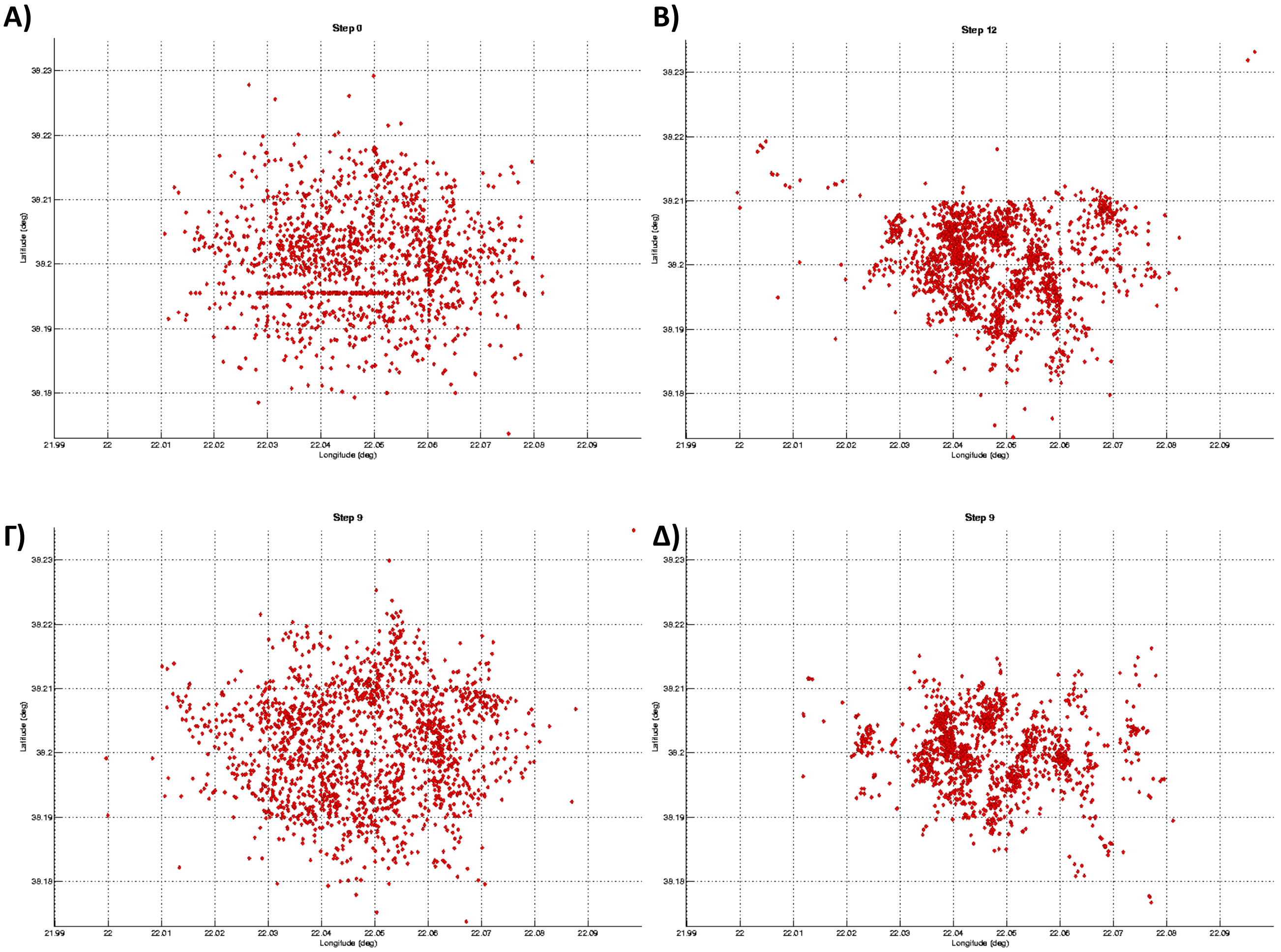
Για παράδειγμα στο Σχήμα 4.8Γ στο οποίο θεωρείται ως γεγονός αναφοράς (ID1) αυτό στο οποίο ανήκει η κυματομορφή #1, πρέπει να γίνει διόρθωση **+0.020547sec** στον χρόνο άφιξης των P κυμάτων στον σταθμό PSA στο γεγονός #2 ώστε τα 2 σήματα να έχουν έναν κοινά καθορισμένο χρόνο άφιξης ως προς το όμοιο τμήμα των κυματομορφών τους. Αν αντιθέτως θεωρηθεί ως ID1 το δεύτερο γεγονός, θα πρέπει να γίνει διόρθωση **-0.020547sec** στον χρόνο άφιξης των κυμάτων S του πρώτου γεγονότος στον σταθμό PSA. Η διόρθωση χρόνου γένεσης (OTC) αφορά σε κάθε περίπτωση το γεγονός ID2.



Σχήμα 4.9: Όμοιο με το προηγούμενο σχήμα για καταγραφές της συνιστώσας N-S του σταθμού TEM: A) κυματομορφή #1: 2001.03.29-14.36.18.TEM.0-1.SAC, B) κυματομορφή #2: 2001.04.10-10.10.00.TEM.0-1.SAC.

4.4.1 ~ *Ομάδα Α*

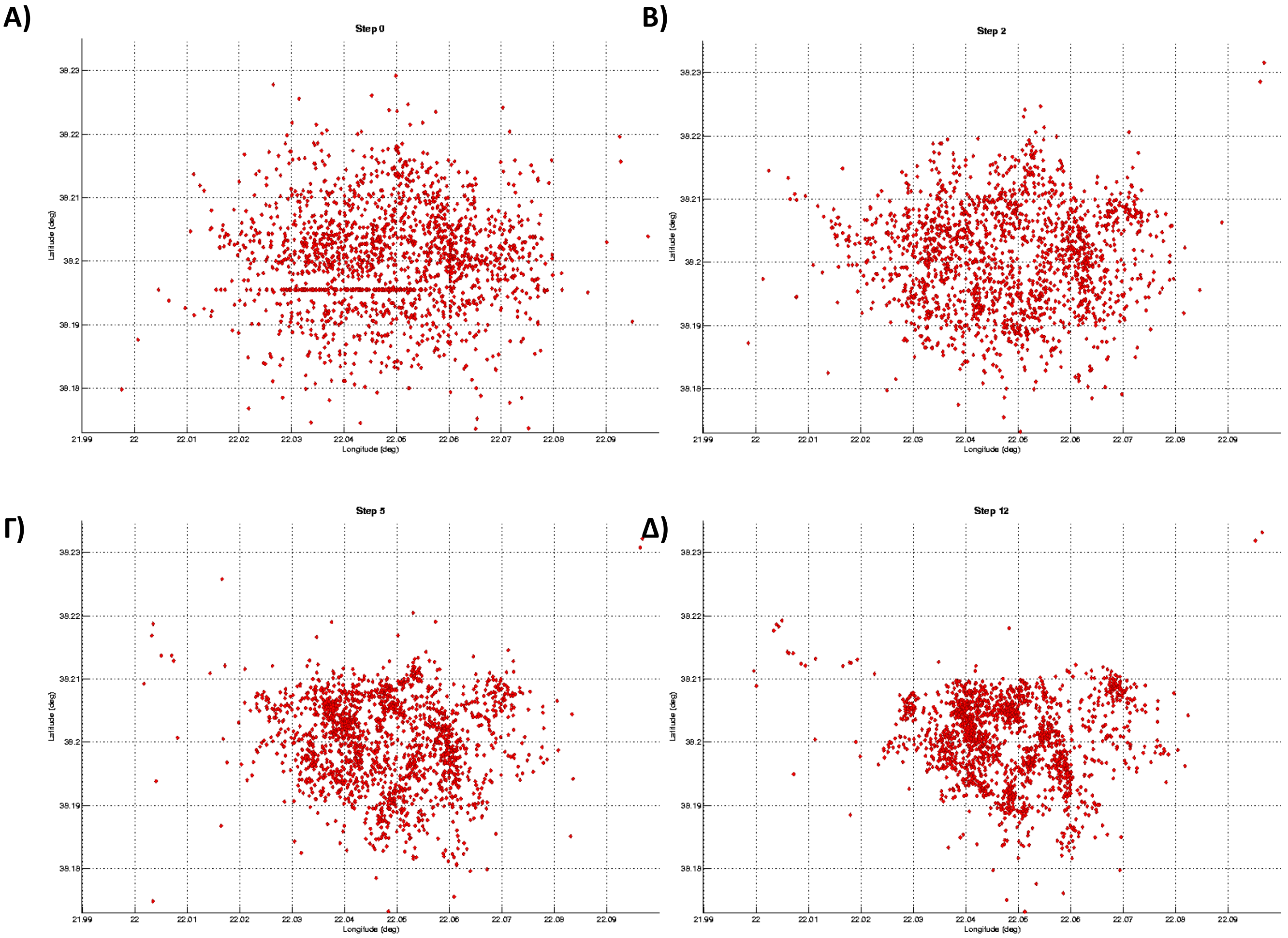
Το επόμενο στάδιο αφορά στην παραμετροποίηση των 2 προγραμμάτων που χρησιμοποιούνται, του PH2DT, το οποίο κατασκευάζει το αρχείο διαφορικών χρόνων διαδρομής από δεδομένα καταλόγου, DT.CT, και, ασφαλώς, του HypoDD, μέσω των αντίστοιχων αρχείων ρυθμίσεων ph2dt.inp και hypodd.inp.



Σχήμα 4.10: Σμήνος του AIO (2001): Α) αρχικός κατάλογος, Β) επαναπροσδιορισμός με HypoDD με δεδομένα καταλόγου και ετεροσυσχέτισης, Γ) επαναπροσδιορισμός με HypoDD μόνο με δεδομένα καταλόγου, Δ) επαναπροσδιορισμός με HypoDD μόνο με δεδομένα ετεροσυσχέτισης

Παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.10 για το σμήνος του AIO (Ομάδα Α) 3 διαφορετικά είδη επαναπροσδιορισμού που καθορίζονται από παραμέτρους του αρχείου hypodd.inp. Στο Σχήμα 4.10_{A} φαίνονται τα αρχικά επίκεντρα της Ομάδας Α. Λίγο νοτιότερα από το «κέντρο» του σμήνους παρατηρείται μια συσπείρωση επικέντρων (162 γεγονότων από την Ομάδα Α) κατά μήκος ενός σταθερού γεωγραφικού πλάτους (38.1955°N) και παράλληλα μια «αραίωση» στα επίκεντρα λίγο βορειότερα και λίγο νοτιότερα από αυτή την ευθεία (κατακόρυφο επίπεδο στον χώρο). Αυτό αποτελεί τεχνητό σφάλμα (*artifact*) του αρχικού προσδιορισμού υποκέντρων με το HYPO71 (*Lee & Lahr, 1972*) λόγω έλλειψης δεδομένων ή κακής αζιμουθιακής κάλυψης για τα συγκεκριμένα γεγονότα και πρόκειται να εξαλειφθεί κατά τον επαναπροσδιορισμό.

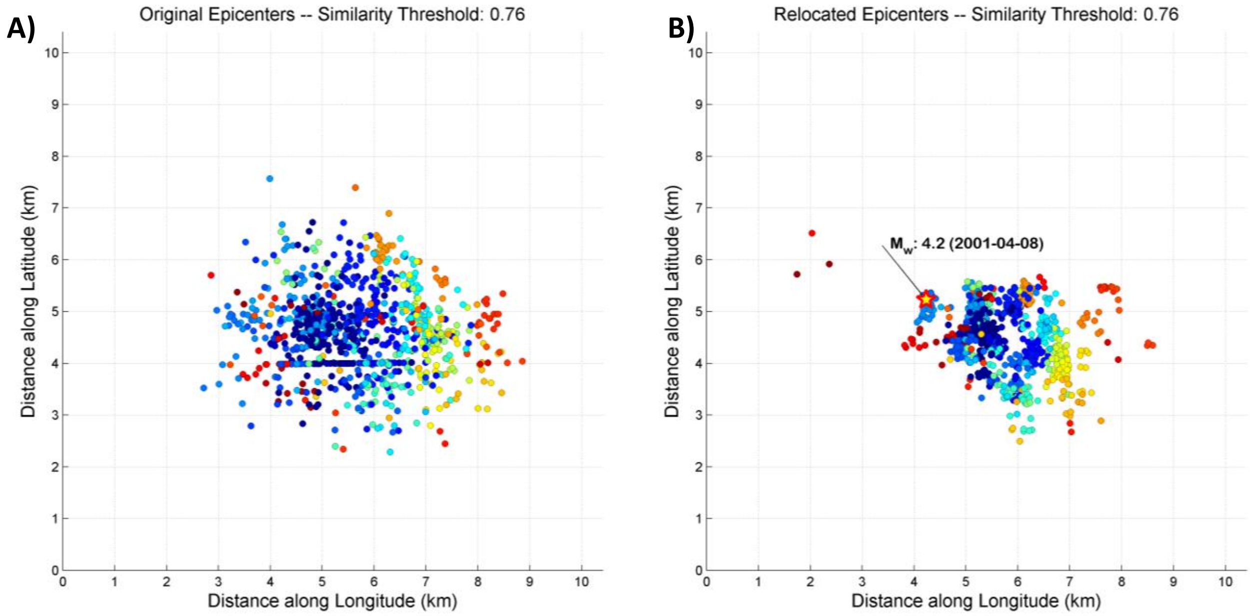
Στο Σχήμα 4.10_{Γ} φαίνεται το αποτέλεσμα του επαναπροσδιορισμού με τη χρήση των διαφορικών χρόνων διαδρομής **μόνο** από δεδομένα καταλόγου (DT.CT). Η αρχικά ασαφής κατανομή του Σχήματος 4.10_{A} αρχίζει να παρουσιάζει κάποια πυκνώματα ενώ υπάρχει συγχρόνως μια συσσώρευση ορισμένων ρηχών γεγονότων από βάθη μικρότερα των 5km προς μεγαλύτερα βάθη, μέσα στον κύριο όγκο που καταλαμβάνει το σμήνος. Στο Σχήμα 4.10$_{\Delta}$ ο επαναπροσδιορισμός έχει γίνει με τη χρήση διαφορικών χρόνων διαδρομής **μόνο** από δεδομένα ετεροσυσχέτισης (DT.CC). Παρατηρούνται έντονες συσσωρεύσεις γεγονότων σε συστάδες που πλέον είναι ορατές από την ίδια τη χωρική κατανομή των επικέντρων. Η συσσώρευση αυτή καλύπτει την προσδοκία για μείωση της διασποράς που εμφανίζει η κάθε συστάδα όμοιων σεισμών καθώς και για τον χωρικό διαχωρισμό των όγκων που καταλαμβάνει η καθεμία. Το πρόβλημα όμως, το οποίο επισημαίνεται και από τον *F. Waldhauser* (2001) είναι ότι λόγω της έλλειψης συνδέσμων ανάμεσα σε όλα τα υπό επεξεργασία γεγονότα ο επαναπροσδιορισμός με τη χρήση μόνο δεδομένων ετεροσυσχέτισης δίνει σωστές μόνο τις σχετικές θέσεις των συσχετιζόμενων γεγονότων (όσων δηλαδή παρουσιάζουν ομοιότητες μεταξύ τους) ενώ οι απόλυτες θέσεις τους είναι εσφαλμένες.



Σχήμα 4.11: Στάδια επαναπροσδιορισμού του σμήνους του ΑΙΟ (2001) με HypoDD με δεδομένα καταλόγου και ετεροσυσχέτισης: Α) αρχικός κατάλογος, Β) 2^{o} βήμα διαδικασίας, Γ) 6^{o} βήμα διαδικασίας, Δ) 12^{o} βήμα διαδικασίας (τελευταίο) στο οποίο έχουν απομείνει 1345 επαναπροσδιορισμένοι σεισμοί.

Για να αντιμετωπιστεί τόσο το πρόβλημα της ασθενούς συσσώρευσης των ισχυρά συσχετισμένων γεγονότων στις διάφορες συστάδες (Σχήμα 4.10$_{\Gamma}$) όσο και το πρόβλημα των εσφαλμένων απόλυτων θέσεων των συστάδων (Σχήμα 4.10$_{\Delta}$) πρέπει να γίνει *συνδυασμός* των δεδομένων καταλόγου και ετεροσυσχέτισης. Το αποτέλεσμα αυτού του συνδυασμού παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.10$_{B}$. Ορισμένα από τα στάδια της επεξεργασίας με HypoDD για αυτόν τον τρόπο επαναπροσδιορισμού φαίνονται στα Σχήματα 4.11$_{A\text{-}\Delta}$. Αρχικά δίνεται μεγαλύτερο *a priori* βάρος (*weight*) στα δεδομένα καταλόγου. Γι' αυτόν τον λόγο η εικόνα του Σχήματος 4.11$_{B}$ μοιάζει αρκετά με εκείνη του Σχήματος 4.10$_{\Gamma}$. Στη συνέχεια, όταν ο πρώτος 'χονδρικός' επαναπροσδιορισμός είναι ικανοποιητικός, δίνεται μεγαλύτερο *a priori* βάρος στα δεδομένα ετεροσυσχέτισης. Τέλος (Σχήμα

4.11$_{\Delta}$) δίνονται στο HypoDD ορισμένες συνθήκες υπό τις οποίες γίνεται επαναϋπολογισμός των βαρών (*re-weighing*) κυρίως για τα δεδομένα καταλόγου, ώστε να «σπάνε» οι συνδέσεις για όσα ζεύγη γεγονότων έχουν υπόκεντρα με μεγάλη ενδοαπόσταση ή για όσα παρουσιάζουν σφάλμα RMS μεγαλύτερο από κάποια τιμή. Έτσι τα δεδομένα καταλόγου λειτουργούν με τη σειρά τους τοπικά σε συνδυασμό πάντα με τα δεδομένα ετεροσυσχέτισης που παίζουν τον κυρίαρχο ρόλο στα τελευταία στάδια του επαναπροσδιορισμού. Μια σημαντική λεπτομέρεια είναι ότι στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας κατά το οποίο τα δεδομένα καταλόγου έχουν μεγαλύτερο βάρος, πρέπει να δίνεται στα δεδομένα ετεροσυσχέτισης ένα μικρό μεν αλλά **μη-μηδενικό βάρος**, ώστε να διατηρείται η σύνδεση, έστω και ασθενής, ανάμεσα στα γεγονότα των συστάδων σμηνοσεισμών. Τα σφάλματα θέσης των επαναπροσδιορισμένων υποκέντρων θεωρητικά ανέρχονται σε μερικές δεκάδες μέτρα ενώ για ορισμένα γεγονότα η ακρίβεια μπορεί να είναι της τάξης ακόμα και μερικών μέτρων (*Waldhauser & Ellsworth, 2000*). Στην πράξη το σφάλμα μπορεί να μειωθεί κατά περισσότερο από μια τάξη μεγέθους.

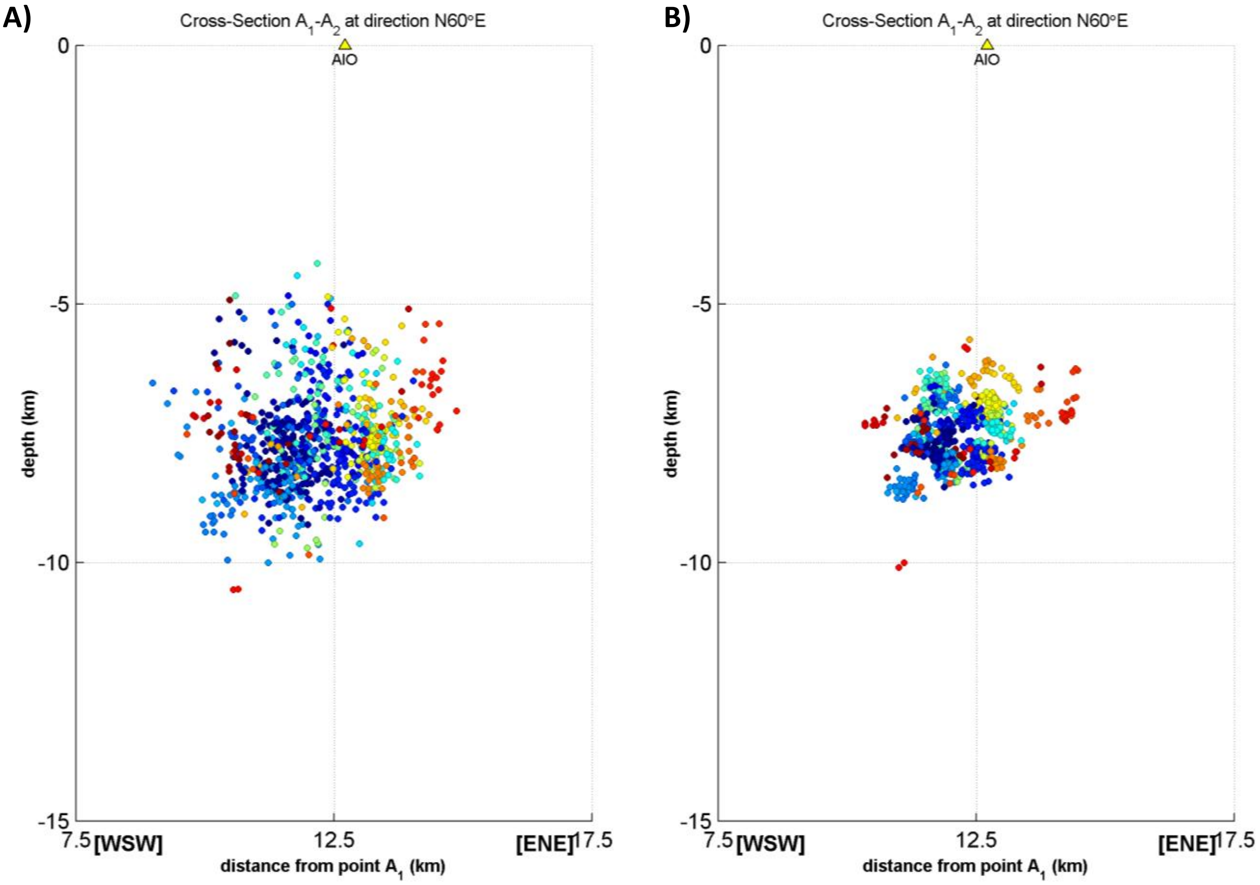


Σχήμα 4.12: Επίκεντρα σεισμών από το σμήνος του ΑΙΟ, πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD. Με διαφορετικό χρώμα αντιπροσωπεύονται διαφορετικές συστάδες σμηνοσεισμών. Στο δεξί σχήμα σημειώνεται το τροποποιημένο επίκεντρο του κύριου σεισμού του ΑΙΟ (Βλέπε Παράρτημα Α.1, Σχήμα Α.9, $K_{3,mod}$). Με τιμή κατωφλίου 0.76 δημιουργούνται 119 συστάδες σμηνοσεισμών που περιλαμβάνουν 889 σεισμούς από τους 1345 που έχουν επαναπροσδιοριστεί συνολικά για το σμήνος του ΑΙΟ, δηλαδή στις παραπάνω εικόνες υπάρχουν 119 διαφορετικές αποχρώσεις. Το χρώμα βοηθάει μόνο στη διάκριση των γειτονικών συστάδων. Συστάδες απομακρυσμένες μεταξύ τους (στη δεξιά εικόνα) μπορεί να έχουν φαινομενικά όμοιο χρώμα αλλά αυτό οφείλεται στην επιλογή γειτονικών αποχρώσεων (από τις 119 στο σύνολο) που δε μπορεί να διακρίνει εύκολα το μάτι ενώ στην πραγματικότητα έχουν διαφορετικό Cluster-ID. Το ίδιο ισχύει και στα επόμενα σχήματα στα οποία παρουσιάζονται οι συστάδες με διαφορετικά χρώματα.

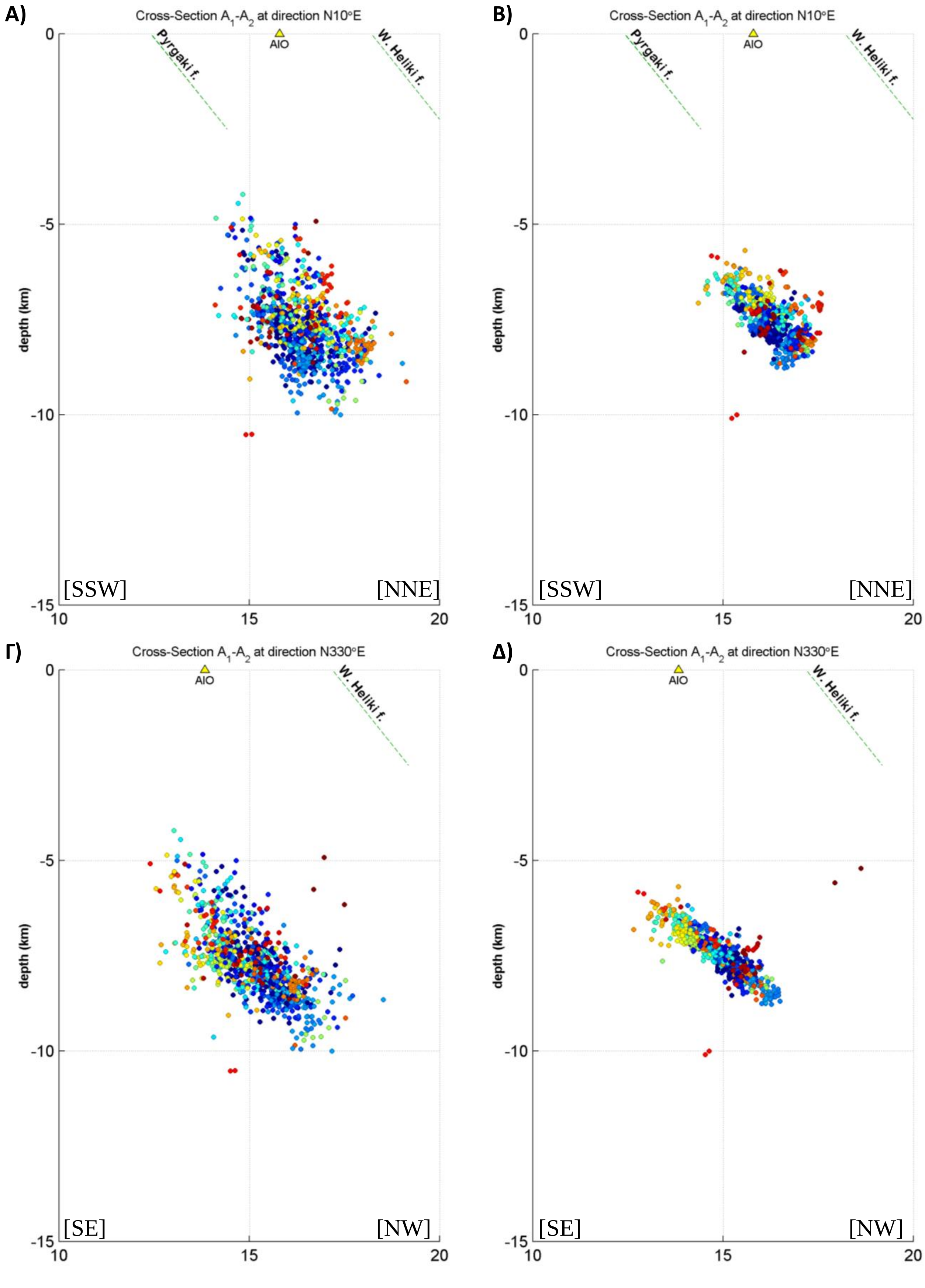
Στα Σχήματα 4.12-14 παρουσιάζονται οι εικόνες των επικέντρων των διαφόρων συστάδων σμηνοσεισμών πριν (αριστερά σχήματα) και μετά (δεξιά) τον επαναπροσδιορισμό με το HypoDD. Αποτέλεσμα του επαναπροσδιορισμού είναι μια εμφανής μείωση της διασποράς καθώς και η διάκριση των συστάδων σμηνοσεισμών, που σημειώνονται με διαφορετικά χρώματα, σε στενές περιοχές που χαρτογραφούν τα διάφορα κλείθρα επάνω στην επιφάνεια διάρρηξης. Για τα συγκεκριμένα σχήματα έχει επιλεχθεί $\mathbf{C_{th}}$=0.76 που είναι λίγο αυστηρότερη τιμή κατωφλίου από την προτεινόμενη (0.70) και με την οποία δημιουργούνται 120 συστάδες. Γενικότερα, σε όσα σχήματα παρουσιάζονται με διαφορετικό χρώμα τα επίκεντρα ή υπόκεντρα σεισμών που ανήκουν σε διαφορετικές συστάδες πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι οι αποχρώσεις είναι πολύ περισσότερες από όσες μπορούν να διακριθούν οπτικά και επομένως αν 2 συστάδες φαίνεται να έχουν ίδιο περίπου χρώμα αλλά να απέχουν πολύ η μία από την άλλη τότε το πιο πιθανόν είναι να έχουν διαφορετικό Cluster-ID, αλλά η διαφορά στη δοθείσα απόχρωση να είναι μικρή τόσο ώστε να μη μπορεί να διακριθεί οπτικά. Γι' αυτό ο σωστός τρόπος ανάγνωσης αυτών των σχημάτων, ως προς τη χωρική κατανομή των συστάδων, είναι σε πολύ τοπικό επίπεδο. Οι αριθμοί ταυτοποίησης συστάδων (Cluster-ID) είναι τέτοιοι ώστε να ακολουθούν το χρόνο γένεσης του πρώτου γεγονότος της κάθε συστάδας (όπως στο σχήμα 4.30$_A$). Κατά τον ίδιο τρόπο διαβαθμίζεται και η χρωματική κλίμακα.

Στη συνέχεια (Σχήματα 4.13, 4.14) φαίνεται η κατανομή των υποκέντρων σε ορθοκανονικούς χιλιομετρικούς άξονες με τον άξονα y να δείχνει το βάθος ενώ τον άξονα x να βρίσκεται κατά μήκος της διεύθυνσης που αναγράφεται στην κάθε τομή. Τα υπόκεντρα του σμήνους του AIO φαινομενικά κατανέμονται επάνω σε ένα επίπεδο το οποίο έχει διεύθυνση μεταξύ N240°E και N245°E, και κλίση περίπου 40° με φορά προς τα Βορειο-Δυτικά. Το επίπεδο αυτό δεν συμπίπτει απαραίτητα με ένα επίπεδο ρήγματος κοινό για όλους τους σεισμούς του σμήνους, για τον λόγο ότι τα γνωστά ενεργά ρήγματα της περιοχής έχουν κλίση με φορά ~N10°E και αυτό περιπλέκει την ανάλυση.

Σε εργασία των (*Zahradnik, J. et al (2004)*) βρέθηκε με μοντελοποίηση κυματομορφών ότι ο κύριος σεισμός του σμήνους (8/4/2001, 06:12:24UTC, M_w=4.2) είχε μηχανισμό γένεσης που εμφανίζει διεύθυνση ρήγματος N220°E και ίδια κλίση (40°) με αυτή που φαίνεται να έχει το επίπεδο στο οποίο κατανέμονται τα επαναπροσδιορισμένα υπόκεντρα των σεισμών του σμήνους. Η ερμηνεία που έχει δοθεί (*Lyon-Caen et al., 2004*) στην περίπτωση που αυτή η παρατήρηση ισχύει είναι ότι πρόκειται για την επανενεργοποίηση ενός παλαιού σχηματισμού. Το κύριο πρόβλημα για το συγκεκριμένο σμήνος είναι πως βρίσκεται οριακά εκτός δικτύου καθώς δεν έχει κάλυψη στα Νότια και έτσι το μεγαλύτερο πλήθος των σεισμών αυτών έχει "*Gap*" μεταξύ 210° και 240°. Είναι πιθανόν δηλαδή η όλη κατανομή να παρουσιάζει ένα συστηματικό σφάλμα και έτσι τα όποια συμπεράσματα σχετικά με την κλίση και τη διεύθυνση να είναι λανθασμένα.

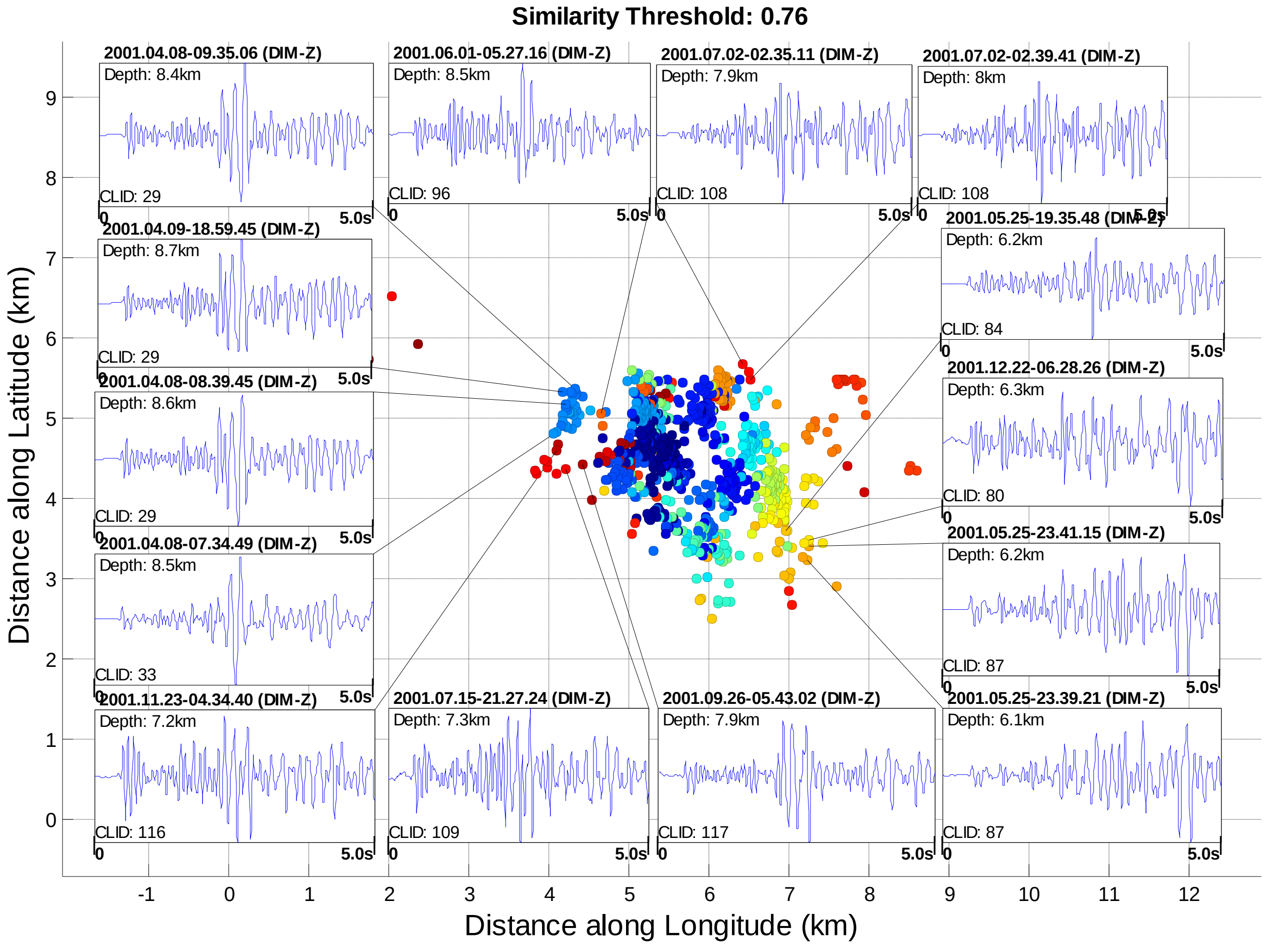


Σχήμα 4.13: Τομές σε διεύθυνση N60°E, πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD. Με διαφορετικό χρώμα αντιπροσωπεύονται διαφορετικές συστάδες σμηνοσεισμών. Στις τομές αυτές παρουσιάζονται 889 σεισμοί που βρέθηκαν να ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών με τιμή κατωφλίου 0.76. Η διεύθυνση της τομής είναι παράλληλη με το επίπεδο πάνω στο οποίο φαίνεται να κατανέμονται οι σεισμοί του σμήνους μετά τον επαναπροσδιορισμό, η εικόνα δείχνει την εξάπλωση των σεισμών επάνω στο επίπεδο αυτό και τον διαχωρισμό της επιφάνειας αυτής σε ομάδες από σμηνοσεισμούς.



Σχήμα 4.14: Τομές N10°E (επάνω, Α,Β) και N330°E (κάτω, Γ,Δ), πριν (αριστερά, Α,Γ) και μετά (δεξιά, Β,Δ) τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD. Με διαφορετικό χρώμα αντιπροσωπεύονται διαφορετικές συστάδες σμηνοσεισμών. Στις τομές αυτές παρουσιάζονται 889 σεισμοί που βρέθηκαν να ανήκουν σε συστάδες με τιμή κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$=0.76.

Η τομή του Σχήματος 4.13 έχει γίνει σε διεύθυνση *παράλληλη* προς το επίπεδο της κατανομής των υποκέντρων, φαίνεται δηλαδή ο τρόπος με το οποίο κατανέμονται οι συστάδες επάνω στην επιφάνεια αυτή. Μια παρατήρηση που μπορεί να γίνει για τα προηγούμενα σχήματα, κυρίως για το Σχήμα 4.13 είναι ότι εμφανίζεται ένα πλήθος συστάδων με κοινό βάθος. Αυτό μπορεί να οφείλεται απλά στο γεγονός ότι μεταβάλλεται η επικεντρική απόσταση από τον σταθμό DIM και άρα μεταβάλλεται ο χρόνος $\mathbf{t_{S\text{-}P}}$. Αυτό το πρόβλημα όμως θα μπορούσε να είχε ξεπεραστεί σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3 για τους έμμεσους συγγενείς. Είναι πιθανόν η διαφορά μεταξύ των συστάδων αυτών να οφείλεται σε μεταβολή του μηχανισμού γένεσης (*Dodge et al., 1995;Deichmann & Garcia-Fernandez, 1992*). Κάτι τέτοιο θα μπορούσε να δικαιολογήσει έντονες ανομοιότητες ανάμεσα σε σήματα σεισμών τα υπόκεντρα των οποίων βρίσκονται πάρα πολύ κοντά. Τέτοιοι σεισμοί μπορούν εύκολα να εντοπιστούν στα όρια ανάμεσα σε γειτονικές συστάδες. Τέλος, μια άλλη περίπτωση είναι (με την προϋπόθεση ότι οι μηχανισμοί γένεσης των σεισμών 2 γειτονικών συστάδων είναι παρόμοιοι) η ύπαρξη κάποιου «κενού» ανάμεσα στις 2 συστάδες, δηλαδή ανεπάρκεια «ενδιάμεσων συγγενών» ανάμεσα στα όρια των 2 συστάδων που θα μπορούσαν να τις είχαν ενοποιήσει.



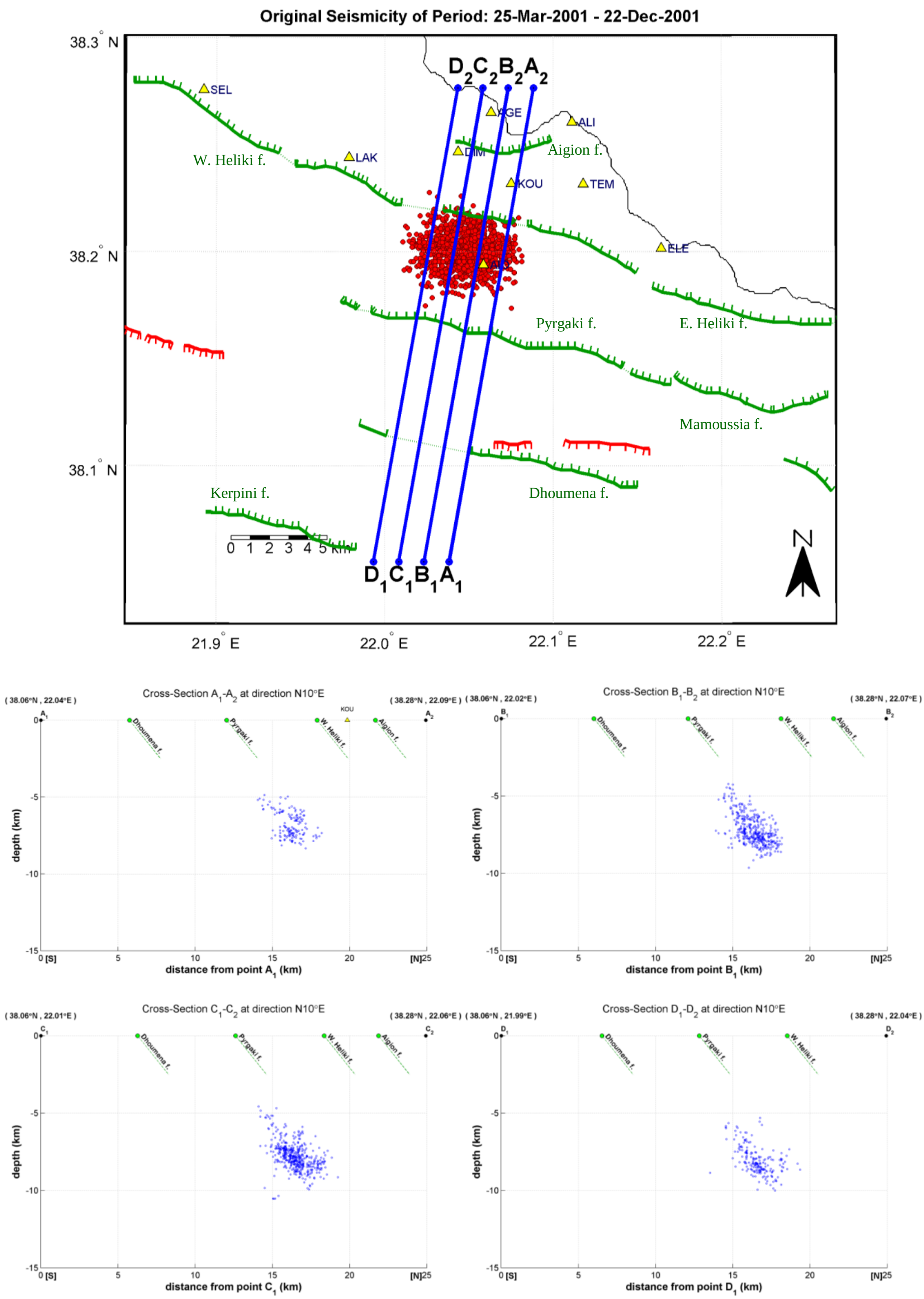
Σχήμα 4.15: επίκεντρα των συστάδων σμηνοσεισμών για το σμήνος του ΑΙΟ με τιμή κατωφλίου 0.76. Κυματομορφές με κοινό CLID (Cluster-ID) αναφέρονται σε σεισμούς που ανήκουν στην ίδια συστάδα για τη συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου.

Μια προσωπική εκτίμηση για το πρόβλημα αυτό είναι ότι οι διαφοροποιήσεις αυτές οφείλονται σε έντονες τοπικές μεταβολές των μηχανισμών γένεσης ανάμεσα σε γειτονικές συστάδες. Ένδειξη για αυτόν τον ισχυρισμό αποτελεί η ύπαρξη γεγονότων με κοινό υπόκεντρο (εντός των ορίων του σφάλματος θέσης), με ίδιους χρόνους $t_{S\text{-}P}$, για παράδειγμα στον σταθμό DIM ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό των όμοιων σεισμών, αλλά με διαφορετικό λόγο πλατών μεταξύ των κυμάτων P και S. Μια ακραία περίπτωση έχει παρατηρηθεί σε σεισμούς με επίκεντρα εντός του κόλπου, τα σήματα των οποίων παρουσίαζαν ισχυρό αρνητικό ελάχιστο στην ετεροσυσχέτισή τους, δηλαδή είχαν αντίθετη πολικότητα ενώ κατά τα άλλα παρουσίαζαν εξαιρετική ομοιότητα (Βλέπε Παράρτημα Α.4). Συνεπώς, είναι πιθανόν το σμήνος του AIO να είναι περισσότερο πολύπλοκο απ’ ότι φαίνεται. Εωσότου υπάρξουν περισσότερα δεδομένα σχετικά με τους μηχανισμούς γένεσης μένει ανοιχτό το ενδεχόμενο της ύπαρξης μικρών αντιθετικών ρηγμάτων υπεύθυνων για ένα μέρος αυτής της ετερογένειας.

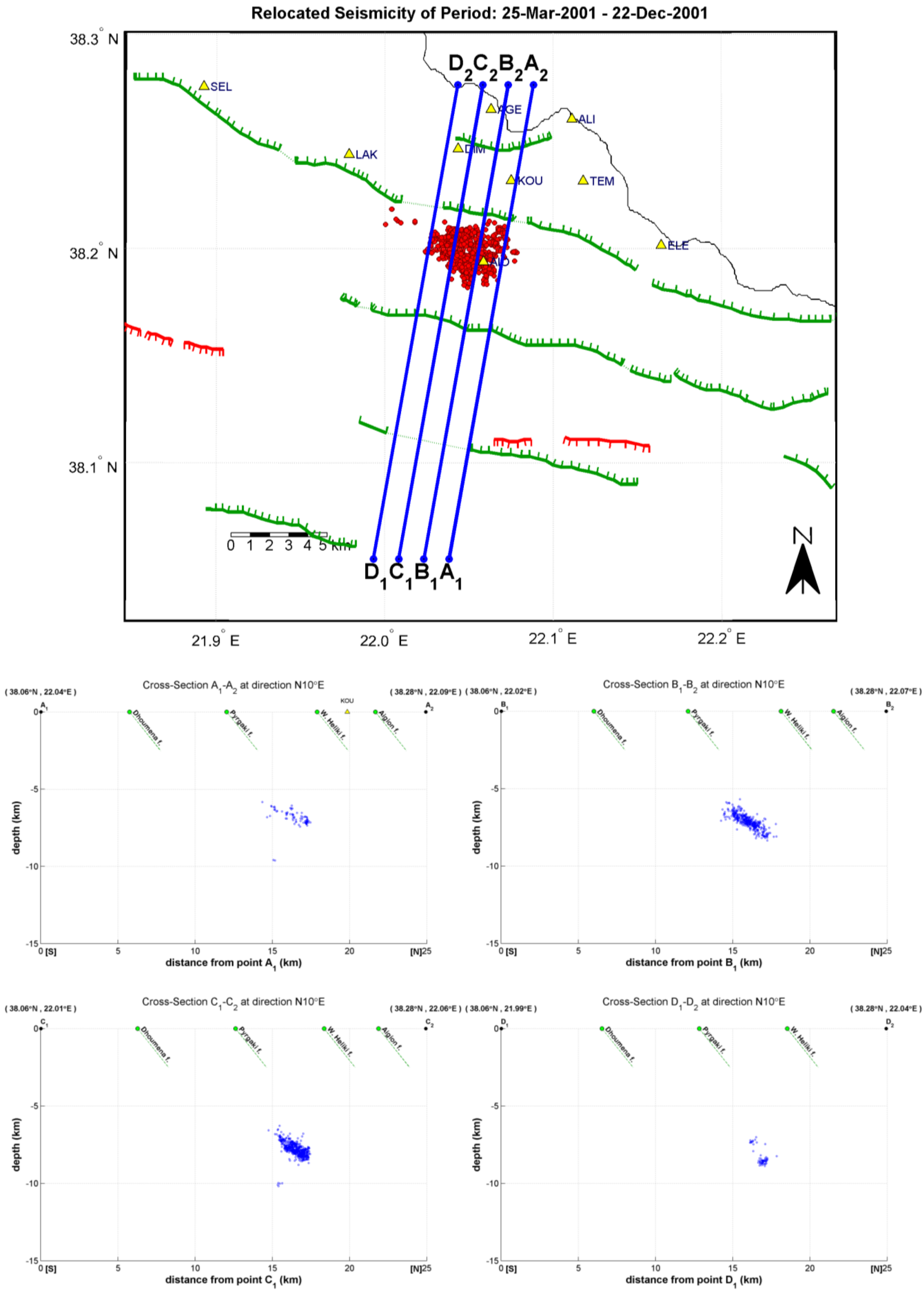
Στο Σχήμα 4.15 φαίνονται οι κυματομορφές της κατακόρυφης συνιστώσας του σταθμού DIM, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του πίνακα ομοιότητας της Ομάδας Α, για μερικά από τα γεγονότα του σμήνους. Επιπλέον, εδώ παρουσιάζεται ακριβώς ο αριθμός ταυτοποίησης της συστάδας (Cluster-ID ή CLID) στην οποία ανήκουν τα επιλεγμένα γεγονότα, που αναγράφεται στο κάτω αριστερό μέρος του κάθε πλαισίου με κυματομορφή. Αναγράφεται επίσης το όνομα του αρχείου για το κάθε γεγονός και το εστιακό βάθος ύστερα από τον επαναπροσδιορισμό. Σε αυτό το σχήμα (και στα άλλα παρόμοια που θα ακολουθήσουν) η προσοχή μπορεί να εστιαστεί σε εκείνα τα γεγονότα με γειτονικά επίκεντρα και παρόμοια απόχρωση αλλά με διαφορετικό CLID, δηλαδή γεγονότα τα οποία αν και βρίσκονται πολύ κοντά στον χώρο (πιθανόν και σε ίδιο βάθος) έχουν βρεθεί να ανήκουν σε άλλη συστάδα. Μπορεί να γίνει η σύγκριση των κυματομορφών γειτονικών γεγονότων με διαφορετικό CLID και γεγονότων με κοινό CLID. Ως παράδειγμα επισημαίνονται οι συστάδες με CLID 29 και 33 σε βάθη 8.4-8.7km στο αριστερό μέρος του σχήματος και οι συστάδες με CLID 80, 84 και 87 σε βάθη 6.1-6.2km στο δεξί μέρος του σχήματος. Υπενθυμίζεται και πάλι ότι η διαφοροποίηση έχει επέλθει στη συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου ($\mathbf{C_{th}}$=0.76) ενώ σε χαμηλότερες τιμές κατωφλίου οι παραπάνω γειτονικές συστάδες ενοποιούνται (και εμπλουτίζονται με γεγονότα τα οποία με $\mathbf{C_{th}}$=0.76 δεν έχουν βρεθεί να ανήκουν σε καμία από τις 120 συστάδες). Ο κύριος σεισμός του AIO, του οποίου το υπόκεντρο ύστερα από επανέλεγχο των χρόνων άφιξης, δείχνει να βρίσκεται στην περιοχή των συστάδων με CLID 29, 33, εν τούτοις έχει κυματομορφή που δεν παρουσιάζει ομοιότητες με καμία άλλη. (Αναλυτικότερα στο Παράρτημα Α.1)

Η χωρική κατανομή των υποκέντρων της Ομάδας Α, πριν και μετά τον επαναπροσδιορισμό μπορεί να γίνει περισσότερο αντιληπτή στα σχήματα που ακολουθούν στις επόμενες σελίδες. Εκεί παρουσιάζονται τομές σε 2 διευθύνσεις που σχηματίζουν γωνία 40° μεταξύ τους. Η πρώτη είναι η διεύθυνση N10°E η οποία είναι πρακτικά κάθετη στη μέση διεύθυνση των ενεργών ρηγμάτων της περιοχής (με μέση φορά μέγιστης κλίσης προς NNE), ενώ η άλλη διεύθυνση (N330°E) είναι κάθετη στη διεύθυνση του επιπέδου πάνω στο οποίο κατανέμονται τα επαναπροσδιορισμένα υπόκεντρα του σμήνους (N240°E με κλίση 40° προς NW). Τα σημεία στα άκρα των τομών συμβολίζονται με γράμματα A,B,C,… από Ανατολικά προς Δυτικά και φέρουν δείκτη 1 ή 2 εάν βρίσκονται στο Νότιο ή το Βόρειο άκρο αντίστοιχα. Στους χάρτες επίσης περιλαμβάνονται οι θέσεις των επιφανειακών εκδηλώσεων γνωστών ρηγμάτων με φορά κλίσης προς Βορρά ή προς Νότο, με πράσινο ή κόκκινο χρώμα αντίστοιχα. Στις τομές η φαινόμενη κλίση των ρηγμάτων *δεν* είναι η πραγματική, σκοπό έχει μόνο να υποδηλώσει την ύπαρξη ενός γνωστού ρήγματος με φορά προς Βορρά (πράσινες διακεκομμένες γραμμές) ή προς Νότο (κόκκινες διακεκομμένες γραμμές). Οι τομές περιλαμβάνουν υπόκεντρα τα οποία απέχουν έως **600m** από το κατακόρυφο επίπεδο της τομής.

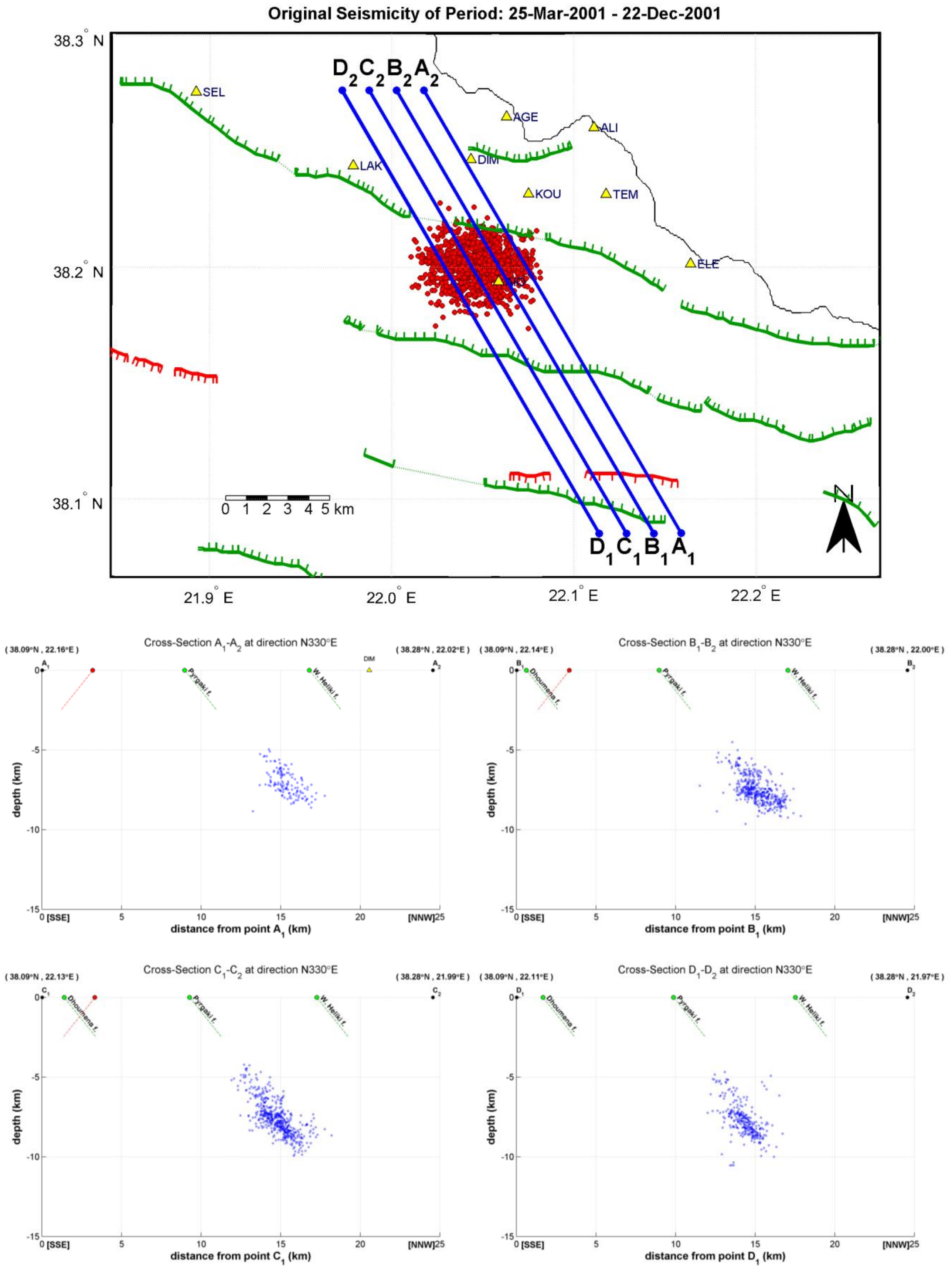
Παρατηρείται έντονη μείωση της διασποράς των υποκέντρων από όποια πλευρά και αν απεικονιστούν, αλλά πιο καλά κατανεμημένα σε μήκος μιας ευθείας βρίσκονται τα υπόκεντρα των τομών σε διεύθυνση N330°E (κάθετων στο επίπεδο κατανομής των υποκέντρων). Επίσης φαίνεται από τις τομές των αρχικών υποκέντρων (Σχήματα 4.16, 4.18) ότι υπάρχει έντονη συσπείρωση των εστιών σε βάθος λίγο μεγαλύτερο από 7km. Αυτό αποτελεί τεχνητό σφάλμα της επίδρασης του μοντέλου ταχυτήτων που έχει χρησιμοποιηθεί καθώς περιλαμβάνει μια ασυνέχεια στα 7.2km μεταβαίνοντας από 5.4km/sec σε 5.8km/sec. Πρόκειται για τεχνητό σφάλμα καθώς η συσπείρωση αυτή εξαρτάται έντονα από το βάθος της ασυνέχειας, κάτι που μπορεί να διαπιστωθεί εάν γίνει αλλαγή στο βάθος της ασυνέχειας στο μοντέλο και επαναϋπολογιστούν οι θέσεις των υποκέντρων με το HYPO71 (*Lee & Lahr, 1972*), οπότε θα φανεί πως το συγκεκριμένο πύκνωμα υποκέντρων «μετακινείται» μαζί με την ασυνέχεια του μοντέλου. Το σφάλμα αυτό εξαλείφεται με την επεξεργασία του HypoDD, αφού εξάλλου ένας από τους σκοπούς του είναι η διόρθωση σε σφάλματα που οφείλονται σε προβληματικό ή ανεπαρκές μοντέλο ταχυτήτων. Η επίδραση του μοντέλου πιθανόν είναι έντονη για το συγκεκριμένο σμήνος διότι βρίσκεται οριακά εκτός δικτύου.



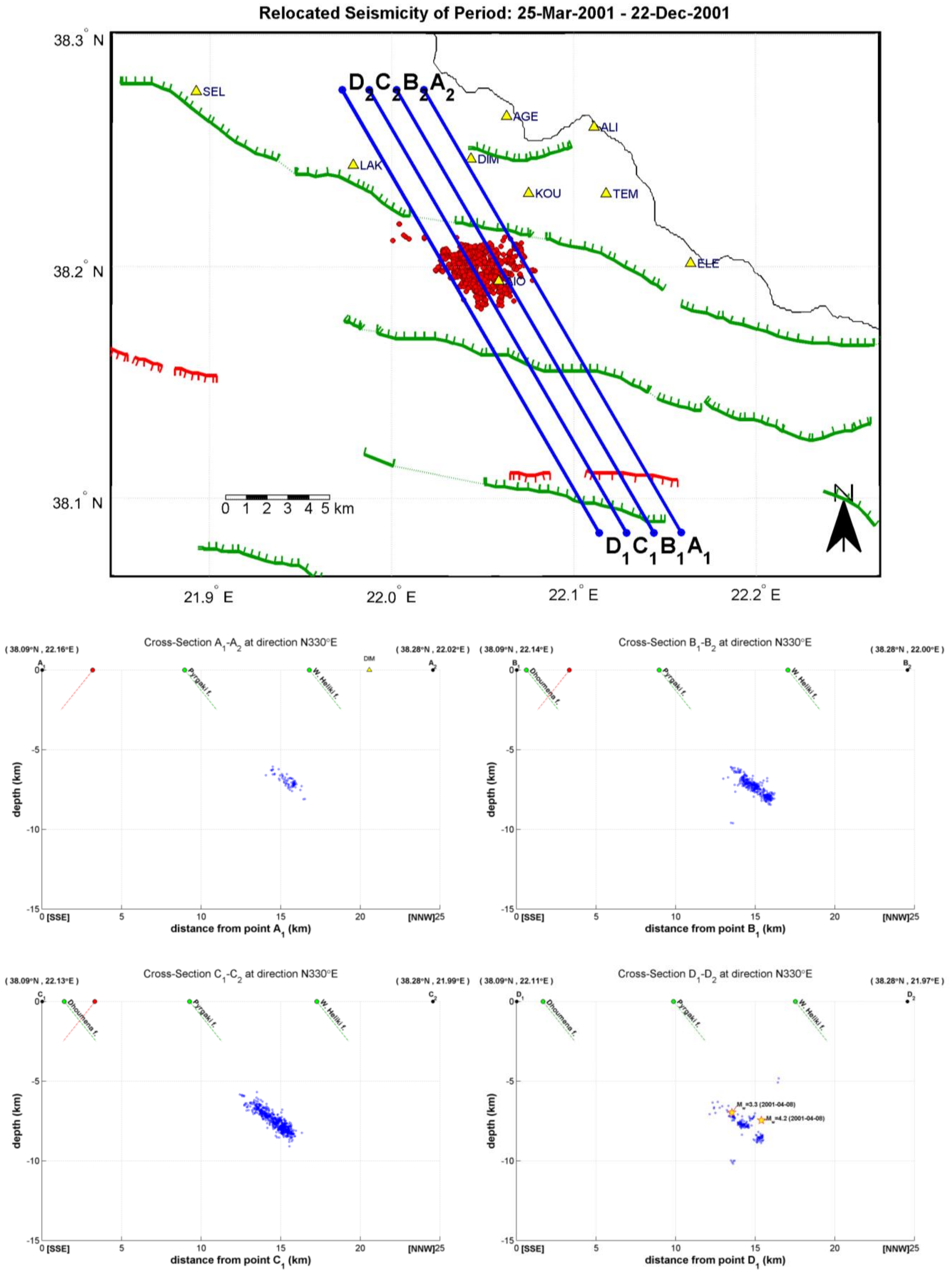
Σχήμα 4.16: τομές σε διεύθυνση **N10°E** με εύρος ±600m για το σμήνος του AIO **πριν** τον επαναπροσδιορισμό (1345 γεγονότα)



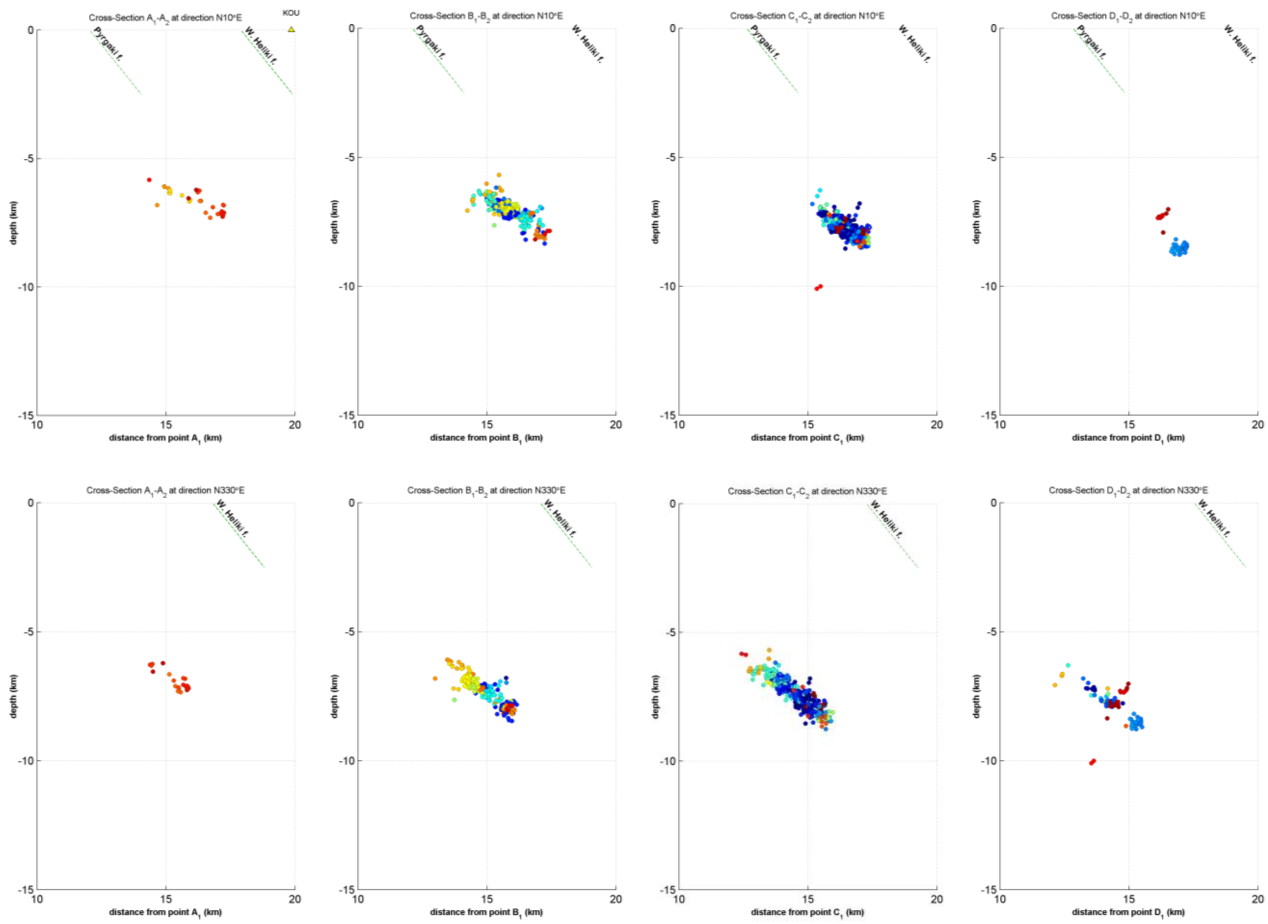
Σχήμα 4.17: τομές σε διεύθυνση **N10°E** με εύρος ±600m για το σμήνος του AIO **μετά** τον επαναπροσδιορισμό (1345 γεγονότα)



Σχήμα 4.18: τομές σε διεύθυνση **N330°E** με εύρος ±600m για το σμήνος του AIO **πριν** τον επαναπροσδιορισμό (1345 γεγονότα)



Σχήμα 4.19: τομές σε διεύθυνση **N330°E** με εύρος ±600m για το σμήνος του AIO **μετά** τον επαναπροσδιορισμό (1345 γεγονότα)



Σχήμα 4.20: Τομές **N10°E** (επάνω, ίδιες με τις τομές του Σχήματος 4.17) και **N330°E** (κάτω, ίδιες με τις τομές του Σχήματος 4.19) για το σμήνος του AIO **μετά** τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD. Με διαφορετικό χρώμα διακρίνονται διαφορετικές συστάδες σμηνοσεισμών όπως προέκυψαν με τιμή κατωφλίου 0.76. Τα χρώματα είναι κοινά για όλα τα σχήματα. Παρατηρείται μεταβολή στη φαινόμενη κλίση στις τομές N10°E ενώ σε όλες τις τομές N330°E η φαινόμενη κλίση παραμένει 40° (μέγιστη κλίση) με φορά προς NNW. Φαίνεται, επίσης, μια γενική μεταβολή του χρώματος συναρτήσει του βάθους ενώ πιθανή είναι η ύπαρξη μικρών αντιθετικών ρηγμάτων κοντά στο μέσο του σμήνους.

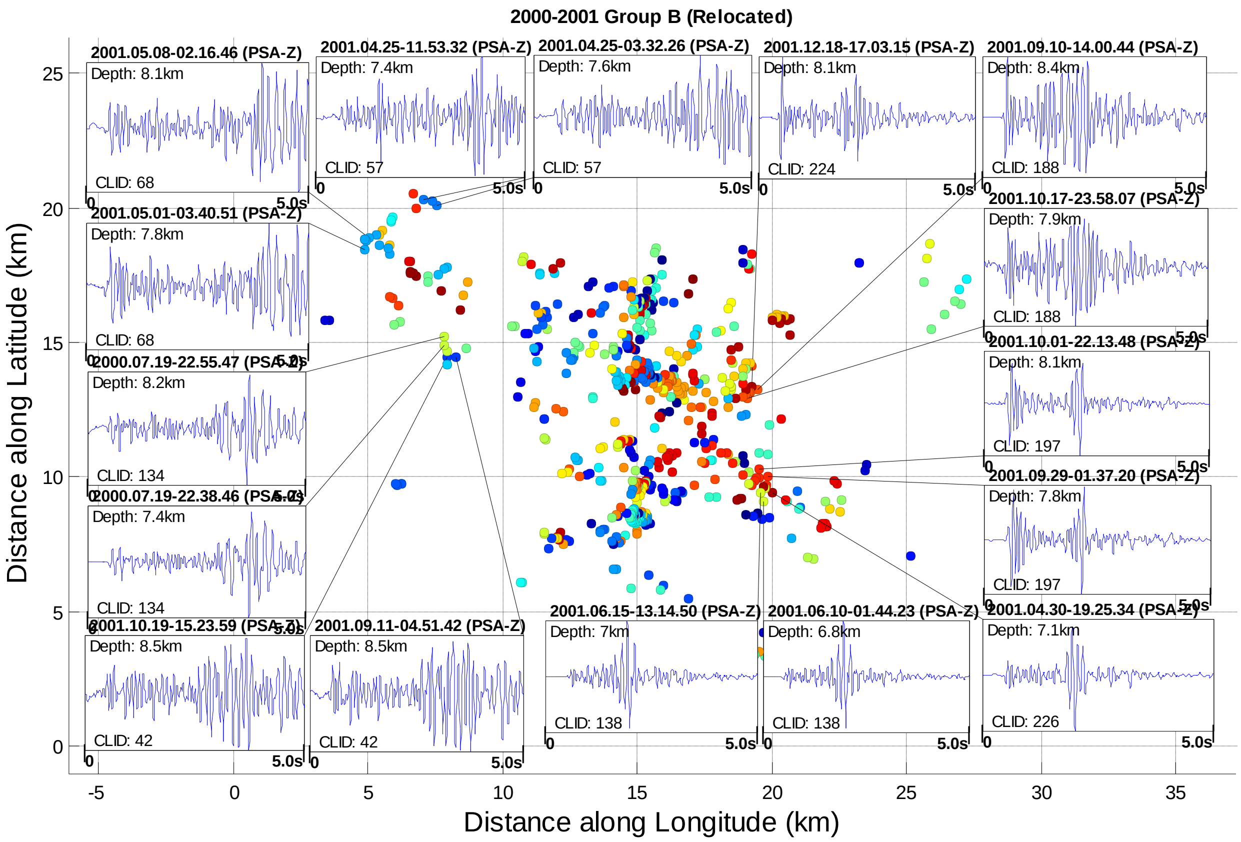
Στο Σχήμα 4.20 φαίνονται συγκεντρωτικά οι 4 τομές των επαναπροσδιορισμένων υποκέντρων για τις 2 διαφορετικές διευθύνσεις με το χρώμα να δείχνει συστάδες σμηνοσεισμών. Τα χρώματα είναι τα ίδια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν ήδη στα Σχήματα 4.12-15, αναφέρονται δηλαδή στις ίδιες συστάδες (με $\mathbf{C_{th}}$=0.76). Στις τομές με διεύθυνση N10°E η φαινόμενη κλίση της ευθείας γύρω από την οποία κατανέμονται τα σημεία αυξάνεται από Ανατολικά (τομή A_1-A_2) προς Δυτικά (D_1-D_2). Αυτό οφείλεται, πέρα από το γεγονός ότι τα υπόκεντρα κατανέμονται πάνω σε ένα επίπεδο με διεύθυνση N240°E και όχι N280°E, στο γεγονός ότι, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13, τα υπόκεντρα επάνω στην επιφάνεια αυτού του επιπέδου δείχνουν να κατανέμονται βαθύτερα από τα Ανατολικά (ENE) προς τα Δυτικά (WSW) της επιφάνειας αυτής. Ωστόσο, η γωνία κλίσης 40° για την οποία γίνεται λόγος δεν έχει φορά WSW αλλά NW. Αντίθετα, στις τομές με διεύθυνση N330°E, η φαινόμενη κλίση της ευθείας στην οποία κατανέμονται τα υπόκεντρα παραμένει σταθερή (40°). Τα βάθη των σεισμών της Ομάδας A κυμαίνονται από 5 έως 9km, το «πάχος» του σμήνους κατά τη διεύθυνση των τομών N330°E δεν ξεπερνάει τα 500m ενώ στη διεύθυνση N60°E (Σχήμα 4.13$_B$) κυμαίνεται μεταξύ 2.5-4.5km

4.4.2 ~ *Ομάδα Β και υπόλοιπη σεισμικότητα 2000-2001*

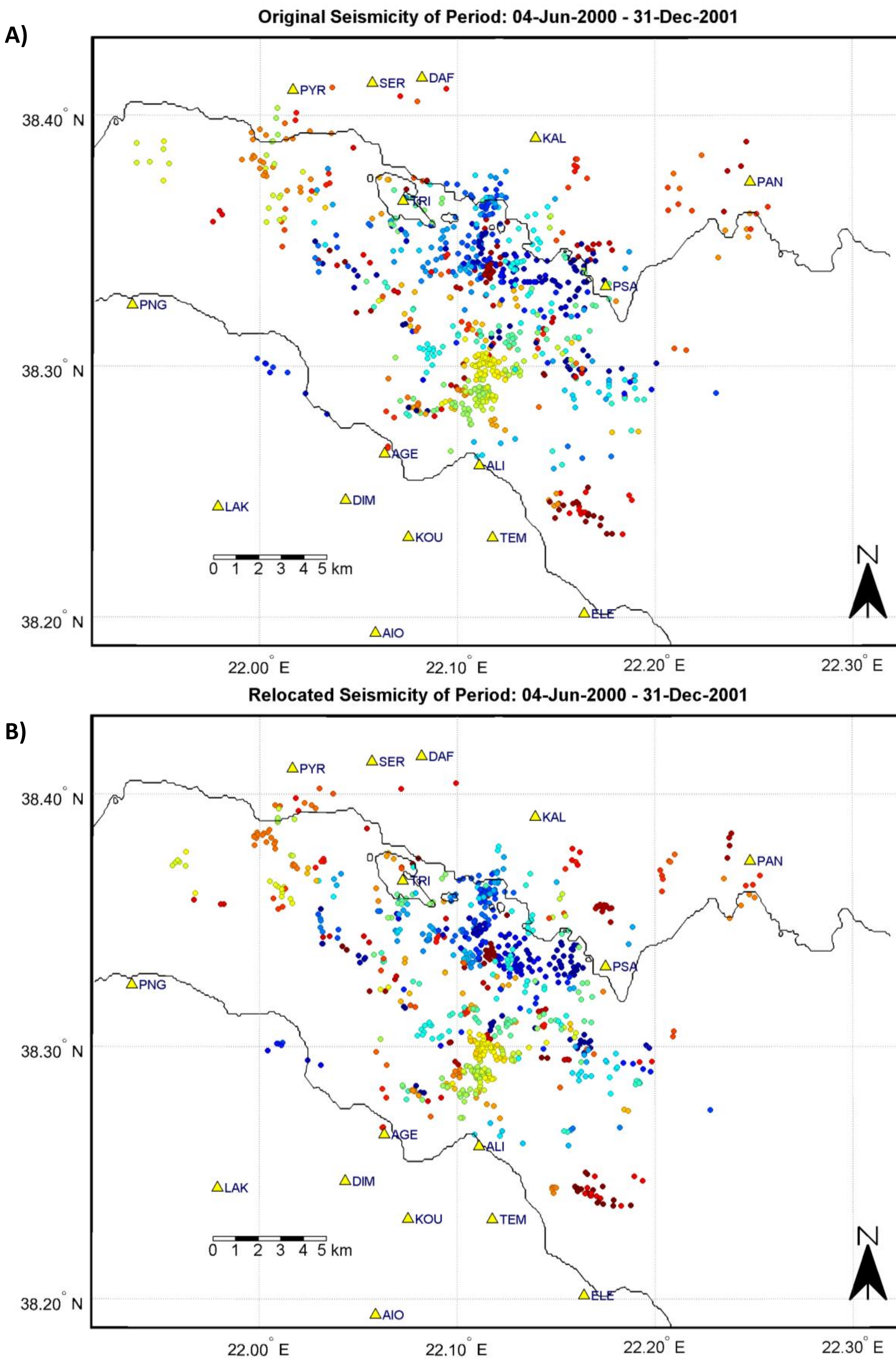
Όσον αφορά στον επαναπροσδιορισμό της σεισμικότητας της Ομάδας Β δεν θα αναφερθούν λεπτομέρειες της διαδικασίας καθώς ισχύουν τα ίδια με τα όσα περιγράφθηκαν για την Ομάδα Α. Χρησιμοποιείται δηλαδή η βέλτιστη μέθοδος με HypoDD η οποία συνδυάζει δεδομένα καταλόγου και ετεροσυσχέτισης με διάφορα στάδια ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα τόσο στις απόλυτες όσο και στις σχετικές θέσεις μεταξύ των υποκέντρων των διαφόρων συστάδων.

Στο Σχήμα 4.22 φαίνονται οι χάρτες των επικέντρων των συστάδων σμηνοσεισμών της Ομάδας Β για τιμή κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$=0.40, πριν και μετά τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD. Η σεισμικότητα της Ομάδας Β δεν παρουσιάζει τη συνοχή που είχε το σμήνος του ΑΙΟ καθώς εξαπλώνεται σε μεγαλύτερη περιοχή και υπάρχουν περισσότερα ρήγματα τα οποία δημιουργούν πρόσθετη ετερογένεια. Η παρατήρηση που έγινε σχετικά με τα ανόμοια γειτονικά γεγονότα για την Ομάδα Α ισχύει και για την Ομάδα Β (και εξάλλου για κάθε άλλη από τις ομάδες που θα αναφερθούν στη συνέχεια), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.21 στο οποίο επισημαίνονται τα CLID 134, 142 (κάτω αριστερά), CLID 188, 224 (πάνω δεξιά), CLID 138, 226, 197 (κάτω δεξιά). Σημειώνεται πως τα 2 όμοια γεγονότα με CLID 188 έχουν μεγέθη M_{w1}=2.1 και M_{w2}=1.4 (ή M_{d1}=2.0 και M_{d2}=1.0 αντίστοιχα) ενώ το γεγονός με CLID 224 έχει M_w=1.8 (το M_d του δεν έχει προσδιοριστεί).

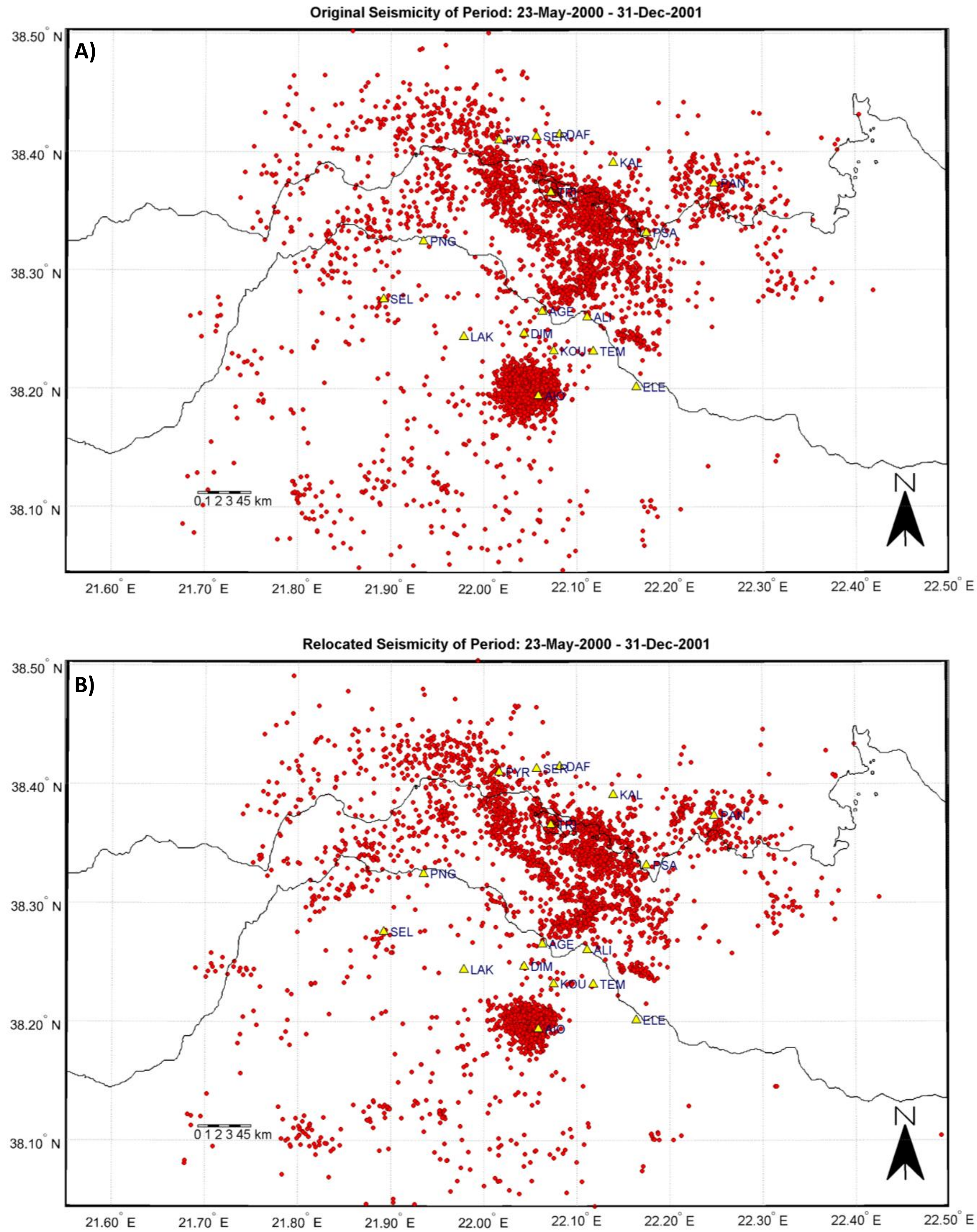
Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται τα δεδομένα ετεροσυσχέτισης τόσο της Ομάδας Β όσο και της Ομάδας Α σε συνδυασμό με τα δεδομένα καταλόγου όλης της σεισμικότητας των ετών 2000-2001 και επιχειρείται επαναπροσδιορισμός με HypoDD. Χρειάζεται προσοχή κατά τη συγχώνευση των δεδομένων ώστε να τηρούνται πλήρως οι αριθμοί ταυτοποίησης των γεγονότων (Event ID). Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει ένας μαζικός επαναπροσδιορισμός όλης της σεισμικότητας, ο οποίος όμως δεν έχει την ίδια ισχύ και λεπτομέρεια με τον τοπικό επαναπροσδιορισμό που γίνεται ανά Ομάδα.



Σχήμα 4.21: επίκεντρα των συστάδων σμηνοσεισμών για Ομάδα Β με τιμή κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$=0.40. Κυματομορφές με κοινό CLID (Cluster-ID) αναφέρονται σε σεισμούς που ανήκουν στην ίδια συστάδα για τη συγκεκριμένη τιμή κατωφλίου.



Σχήμα 4.22: Συστάδες σμηνοσεισμών της Ομάδας B για τιμή κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$=0.40, πριν (αριστερά) και μετά (δεξιά) τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD με δεδομένα καταλόγου και ετεροσυσχέτισης. Με χρώμα διακρίνονται οι διαφορετικές συστάδες σμηνοσεισμών (233 συστάδες με συνολικά 921 γεγονότα).

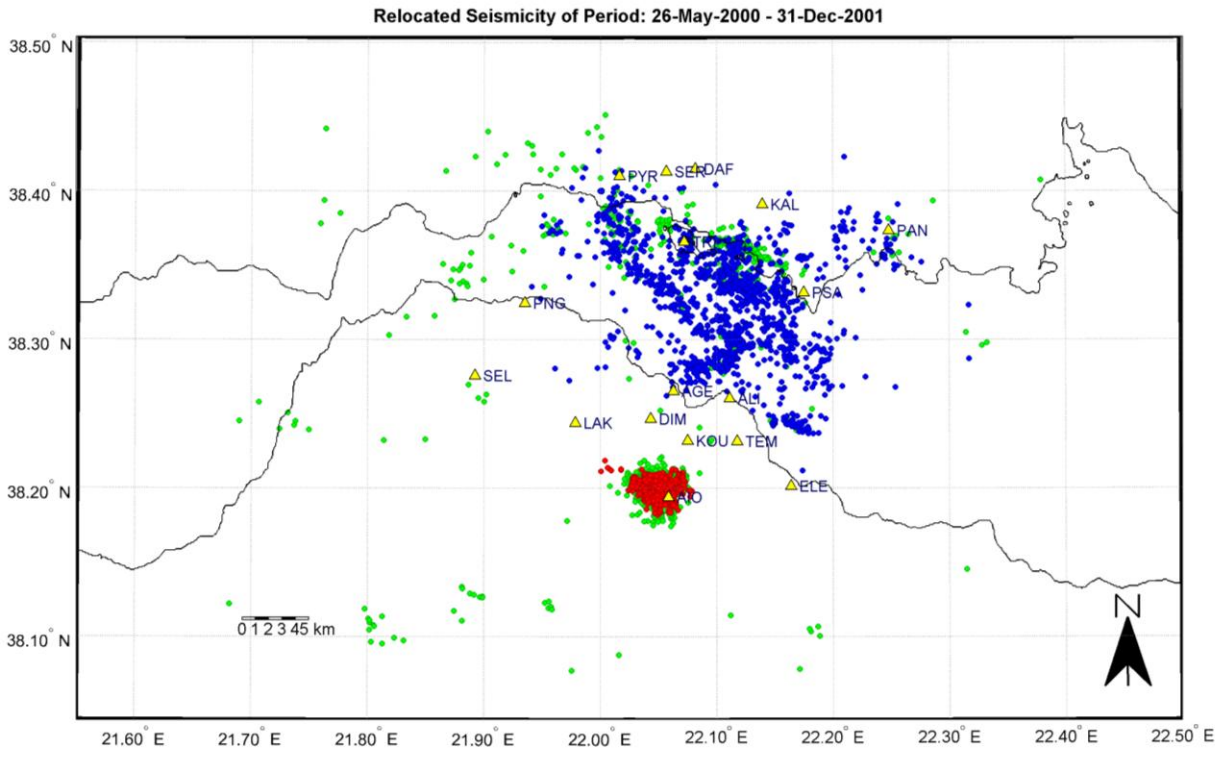


Σχήμα 4.23: χάρτες πλήρους σεισμικότητας 2000-2001 πριν (επάνω) και μετά (κάτω) τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD με δεδομένα καταλόγου και ετεροσυσχέτισης συνδυασμένα από την Ομάδα Α και την Ομάδα Β ταυτόχρονα. Από τα 9786 αρχεία φάσεων του αρχικού καταλόγου, για τα 8277 γεγονότα υπάρχει λύση με το HYPO71 (*Lee & Lahr, 1972*) και από αυτά έχουν επαναπροσδιοριστεί τα 5597 με HypoDD κατά αυτή τη διαδικασία μαζικού επαναπροσδιορισμού.

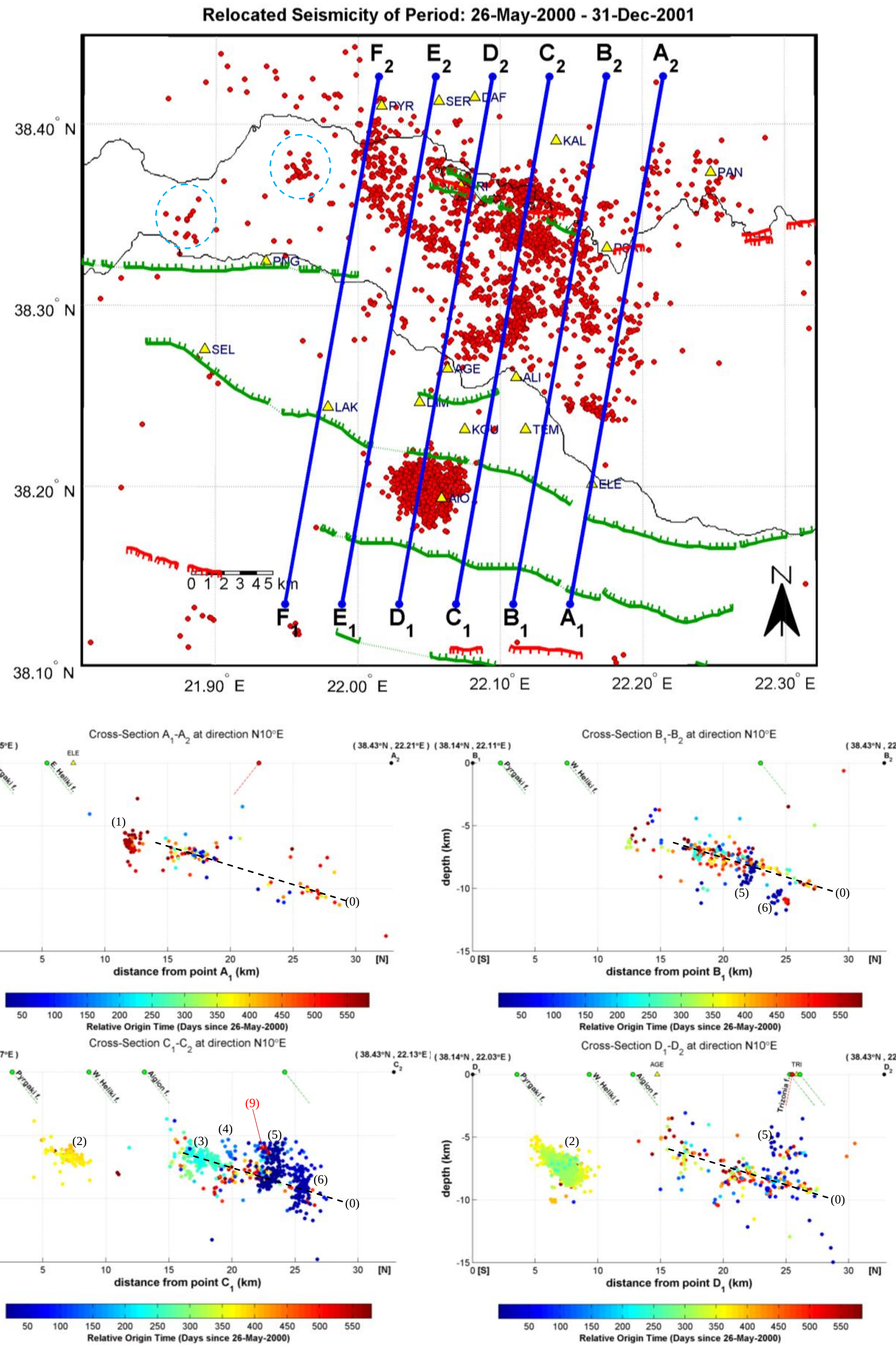
Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί η πληροφορία που λαμβάνεται τόσο από τις Ομάδες Α, Β όσο και από το μαζικό επαναπροσδιορισμό της σεισμικότητας των ετών 2000-2001, στην οποία δίνεται η ονομασία Mix_Group1, δημιουργείται ένα άλλο «πακέτο» από το Mix_Group1, που καλείται Mix_Group1_CL, το οποίο περιέχει μόνο όσα γεγονότα έχουν κοντινούς χωρικούς και χρονικούς «γείτονες», για παράδειγμα μόνο τα γεγονότα εκείνα για τα οποία υπάρχει τουλάχιστον άλλο ένα γεγονός σε ενδοαπόσταση μικρότερη από 2km και το οποίο συνέβη μέσα σε ένα διάστημα ±1ημέρα. Με αυτόν τον τρόπο αφαιρείται η «σεισμικότητα υποβάθρου» η οποία πιθανόν να εμφανίζεται σαν θόρυβος στην εικόνα που σκοπό έχει να κάνει ευδιάκριτες ορισμένες δομές που έδωσαν σμήνη σεισμών μέσα σε αυτή την περίοδο. Στη συνέχεια, αφαιρούνται από το Mix_Group1_CL όσα γεγονότα έχουν επαναπροσδιοριστεί ανεξάρτητα από τις Ομάδες Α και Β (και άρα σε αυτά υπάρχει καλύτερη λεπτομέρεια με τους επιμέρους επαναπροσδιορισμούς) και ενοποιούνται όσα γεγονότα απέμειναν (1107 γεγονότα) με τα επαναπροσδιορισμένα από τις Ομάδες Α και Β (1345 και 1449 γεγονότα αντίστοιχα).

Το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 4.24. Χρειάζεται προσοχή σε έναν τέτοιο μικτό κατάλογο καθώς είναι πιθανόν ένα μέρος των γεγονότων που απέμειναν από το Mix_Group1_CL να ανήκουν σε συστάδες μέρος των οποίων έχει επαναπροσδιοριστεί από κάποια από τις άλλες δύο ομάδες. Αυτό είναι πολύ έντονο στο σμήνος του AIO (υπενθυμίζεται πως στην επιλογή των γεγονότων για την Ομάδα Α είχαν τεθεί κάποια επιπλέον κριτήρια για το *Gap*, αριθμό φάσεων κτλ. πέρα από τον χωρικό διαχωρισμό των επικέντρων του σμήνος από τα υπόλοιπα της σεισμικότητας των ετών 2000-2001). Συνεπώς αυτός ο κατάλογος δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μελετηθεί το σμήνος του AIO.

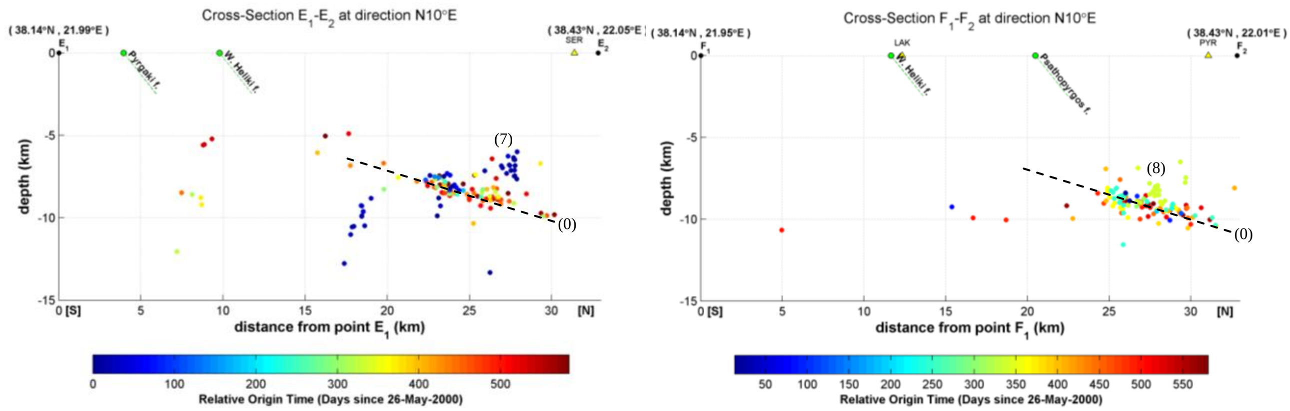
Για τη σεισμικότητα εντός κόλπου το πρόβλημα αυτό δεν είναι τόσο έντονο και ο μικτός κατάλογος εμπλουτίζει την εικόνα με σεισμούς που δεν είχαν συμπεριληφθεί στην Ομάδα Β ή που δεν επαναπροσδιορίστηκαν με τα δεδομένα αυτής της Ομάδας λόγω ασθενούς σύνδεσης με τα υπόλοιπα. Είναι, επίσης, χρήσιμο διότι στην αρχή του καταλόγου υπάρχει η εμφάνιση 2 σημαντικών συστάδων ανατολικά από τη νήσο Τριζόνια που, πιθανόν λόγω μικρού αριθμού φάσεων, δεν συμπεριλήφθηκαν στην Ομάδα Β.



Σχήμα 4.24: Χάρτης επικέντρων μικτού καταλόγου επαναπροσδιορισμένης σεισμικότητας των ετών 2000-2001 από την Ομάδα Α (κόκκινο) και Β (μπλε) καθώς και από το πακέτο Mix_Group1_CL (πράσινο). (Για λεπτομέρειες βλέπε κείμενο)



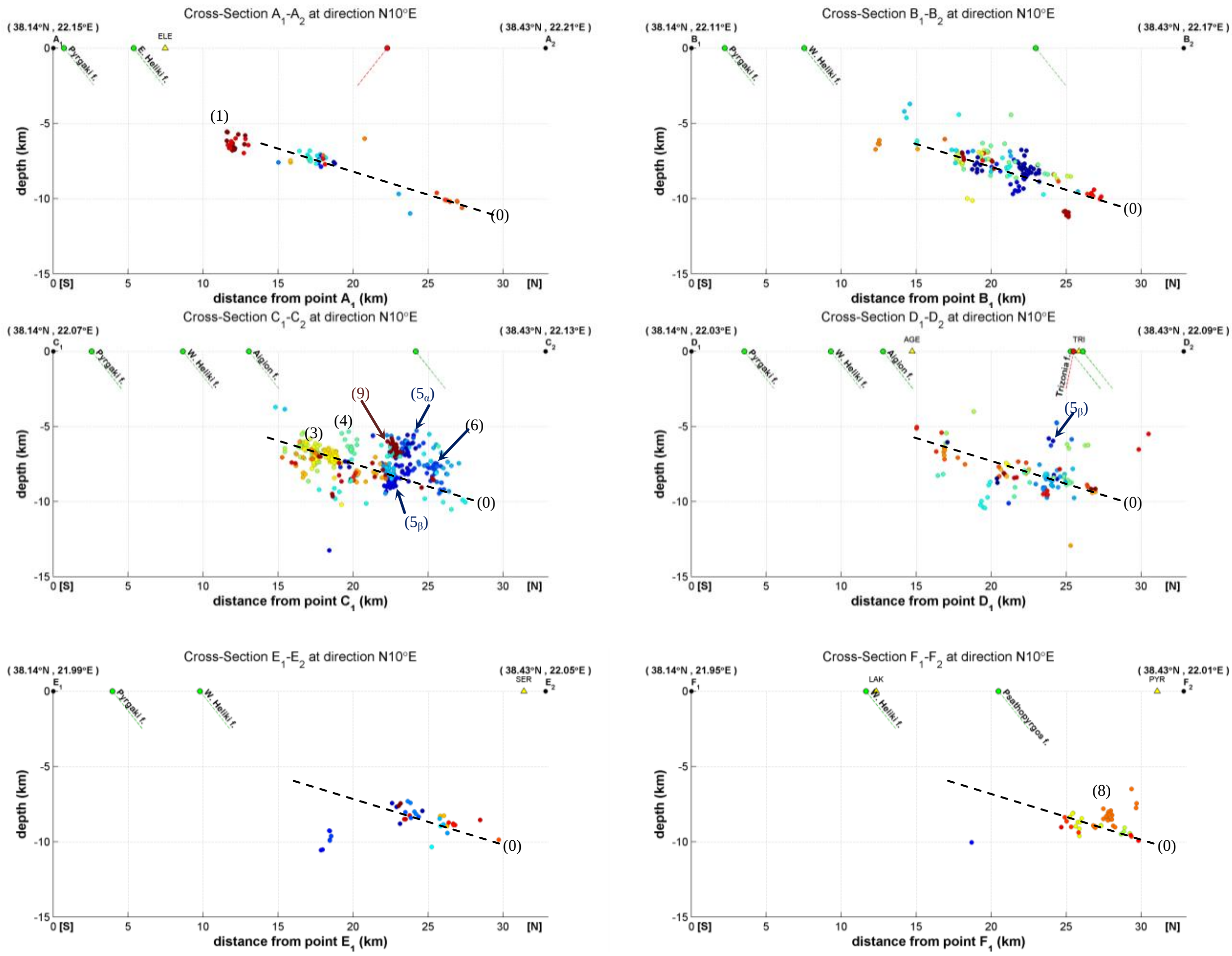
Σχήμα 4.25: Τομές επαναπροσδιορισμένης σεισμικότητας 2000-2001 σε διεύθυνση N10°E με εύρος ±2km. Με χρώμα απεικονίζεται ο σχετικός χρόνος γένεσης σε ημέρες από τις 26/5/2000. (Για λεπτομέρειες βλέπε κείμενο)



Σχήμα 4.26: (συνέχεια από το προηγούμενο, Τομές E_1-E_2 και F_1-F_2).

Στις τομές των προηγούμενων σχημάτων, οι οποίες έχουν γίνει σε διεύθυνση N10°E, φαίνονται με χρώμα οι σχετικοί χρόνοι γένεσης ως προς τις 26/5/2000, ημερομηνία από την οποία ξεκινούν τα επαναπροσδιορισμένα γεγονότα. Το χρώμα βοηθάει εδώ στο να διακριθούν ορισμένες χωρικά γειτονικές συστάδες που ενεργοποιήθηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους, όπως για παράδειγμα στην τομή C_1-C_2 του Σχήματος 4.25 φαίνεται από αριστερά προς τα δεξιά πρώτα το σμήνος του ΑΙΟ με κίτρινο χρώμα (2), μια συστάδα με κυανό χρώμα (3) που μάλλον ανήκει στο ρήγμα της Δυτικής Ελίκης, στη συνέχεια μια μικρή συστάδα με γαλάζιο χρώμα (4) και έπειτα 2 συστάδες (5,6) με μπλε σκούρο χρώμα. Η (5) έχει πιο σκούρο χρώμα, βρίσκεται νοτιότερα από την (6) και είναι χρονικά η πρώτη συστάδα που εμφανίζεται στα δεδομένα. Η (6) δραστηριοποιήθηκε αμέσως μετά την (5). Τα ίδια νούμερα εμφανίζονται και στις άλλες τομές προκειμένου να φανεί η συνέχεια αυτών των συστάδων. Η συστάδα (7) δραστηριοποιήθηκε την ίδια περίοδο με την (5) και τα επίκεντρά τους βρίσκονται μεν στην ίδια νοητή ευθεία αλλά η (7) είναι απομακρυσμένη χωρικά από την (5). Με διακεκομμένη μαύρη γραμμή (0) σημειώνεται η ζώνη αποκόλλησης στην οποία συγκλίνουν τα κανονικά ρήγματα και στην οποία υπάρχει μια συνεχής δραστηριότητα με χρονικά και χωρικά διάσπαρτα γεγονότα. Η κλίση της ευθείας (0) στη διεύθυνση των τομών (N10°E) είναι περίπου 15° και σταθερή σε όλες τις τομές.

Οι πιο ρηχοί σεισμοί της συστάδας (5) μοιάζουν να ανήκουν στο ρήγμα των Τριζονιών το οποίο κλίνει προς τα νότια και σημειώνεται στην τομή D_1-D_2 με ιδιαίτερα απότομη κλίση. Με μια προσεκτική παρατήρηση στην τομή C_1-C_2 του Σχήματος 4.25 λίγο πιο νότια από τη συστάδα με αριθμό (5) μπορεί να δει κανείς ορισμένα υπόκεντρα με κόκκινο χρώμα (9). Αυτοί οι σεισμοί εκδηλώθηκαν προς το τέλος της περιόδου και μάλλον δεν ανήκουν στο ίδιο ρήγμα με τους σεισμούς της συστάδας (5). Η διαφοροποίηση αυτή ενισχύεται από τις αντίστοιχες εικόνες του Σχήματος 4.27 που παρουσιάζει με διαφορετικά χρώματα τις διάφορες συστάδες σμηνοσεισμών με $\mathbf{C_{th}}$=0.40 (αντί για τις χρονικές του προηγούμενου σχήματος). Σημειώνεται πως στο Σχήμα 4.27 περιλαμβάνονται σεισμοί που έχουν επαναπροσδιοριστεί *μόνο* με δεδομένα της Ομάδας Β, αφού μόνο για αυτά τα δεδομένα έχει δημιουργηθεί πίνακας ομοιότητας είναι γνωστό ποια από αυτά ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών. Κατά τα άλλα οι τομές έχουν γίνει στις ίδιες θέσεις και με το ίδιο εύρος (±2km από το επίπεδο της κάθε τομής). Η συστάδα (9) διακρίνεται από τη συστάδα (5_α), το μέρος της χρονικής συστάδας (5) που βρίσκεται στο ίδιο βάθος με την (9), και ως προς την ομοιότητα των σημάτων. Η χρονική συστάδα (5) διαχωρίζεται σε επιμέρους συστάδες σμηνοσεισμών όπως οι (5_α) και (5_β) (στην πραγματικότητα σε περισσότερες από όσες μπορούν να διακριθούν οπτικά από την εικόνα της τομής) ενώ μοιάζει να υπάρχει κάποιος χωρικός διαχωρισμός ανάμεσα στην (5_α) και τις βαθύτερες συστάδες σμηνοσεισμών, κάτι το οποίο όμως πιθανόν να αποτελεί τεχνητό σφάλμα.

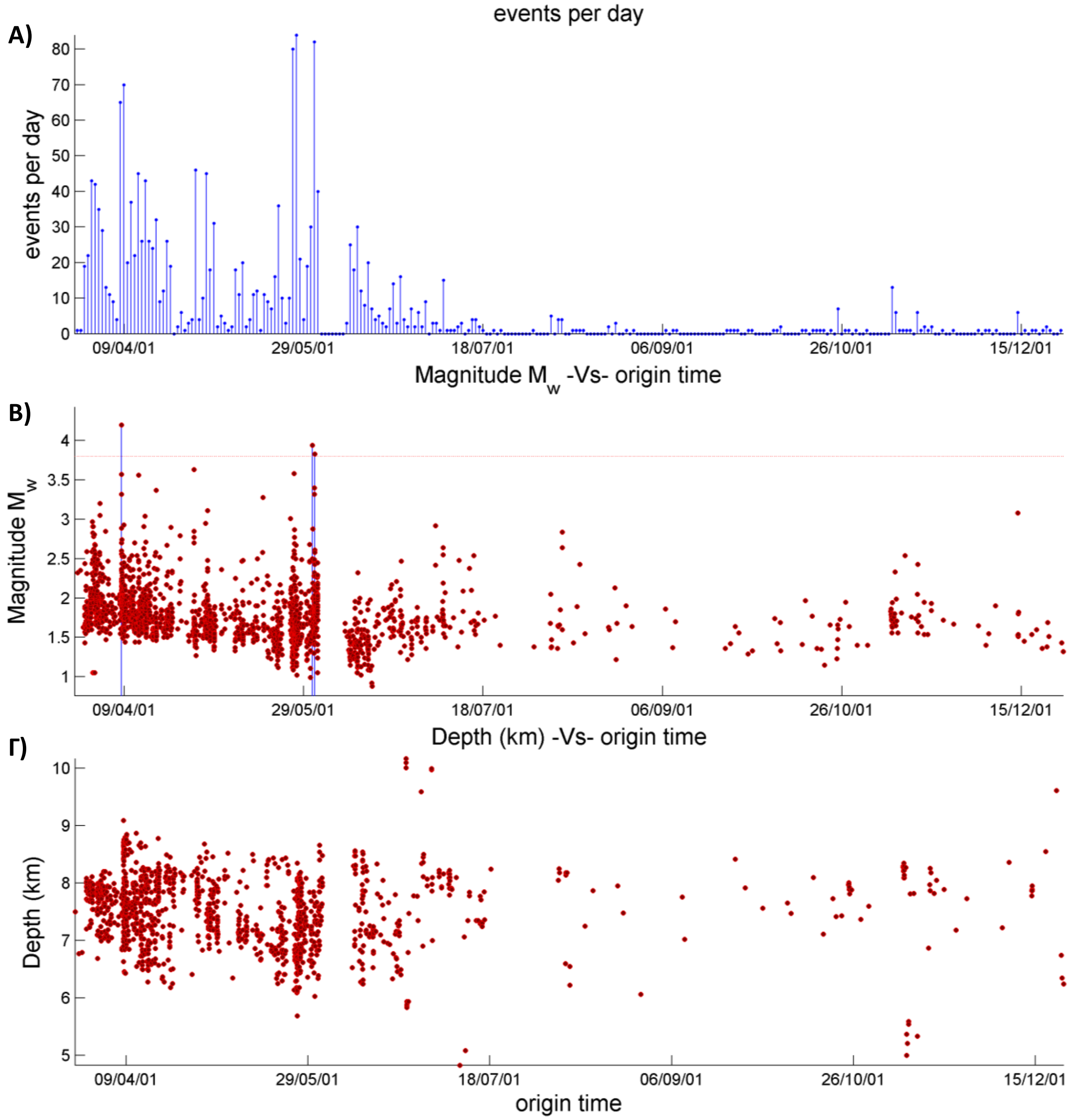


Σχήμα 4.27: τομές N10°E, στις ίδιες θέσεις με τις τομές του προηγούμενου σχήματος. Με διαφορετικό χρώμα (κοινό για όλες τις τομές) απεικονίζονται διαφορετικές συστάδες σμηνοσεισμών. Τα χρώματα είναι κοινά με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν στο Σχήμα 4.22 (**C_{th}**=0.40).

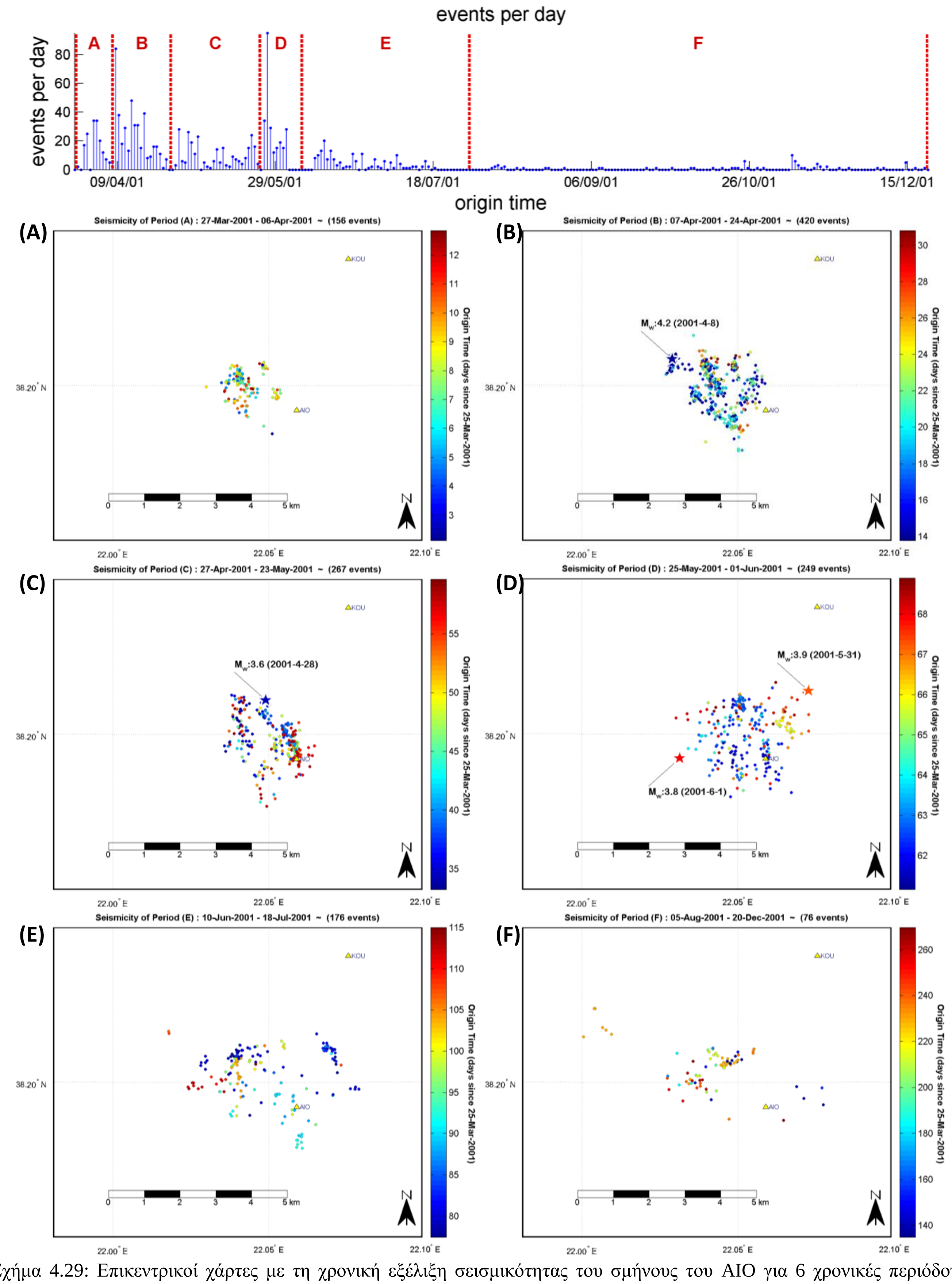
Τέλος σημειώνονται στον χάρτη του Σχήματος 4.25 με διακεκομμένες ελλείψεις στα δυτικά του κόλπου 2 μικρότερες συστάδες οι οποίες δεν έχουν συμπεριληφθεί στις τομές αλλά πιθανόν ανήκουν στο ρήγμα του Ψαθόπυργου. Στις ίδιες περιοχές, όπως φαίνεται στον χάρτη του Σχήματος 4.23$_B$, υπάρχει κάποια σεισμική δραστηριότητα αλλά λόγω έλλειψης δεδομένων ετεροσυσχέτισης σε αυτές τις περιοχές ο επαναπροσδιορισμός δεν βελτίωσε πολύ την εικόνα. Πιθανόν με μια ειδική αντιμετώπιση για αυτές τις περιοχές εκτός δικτύου να μπορέσουν να ληφθούν καλύτερα αποτελέσματα.

4.5.1 ~ *Χρονική Κατανομή: Ομάδα Α*

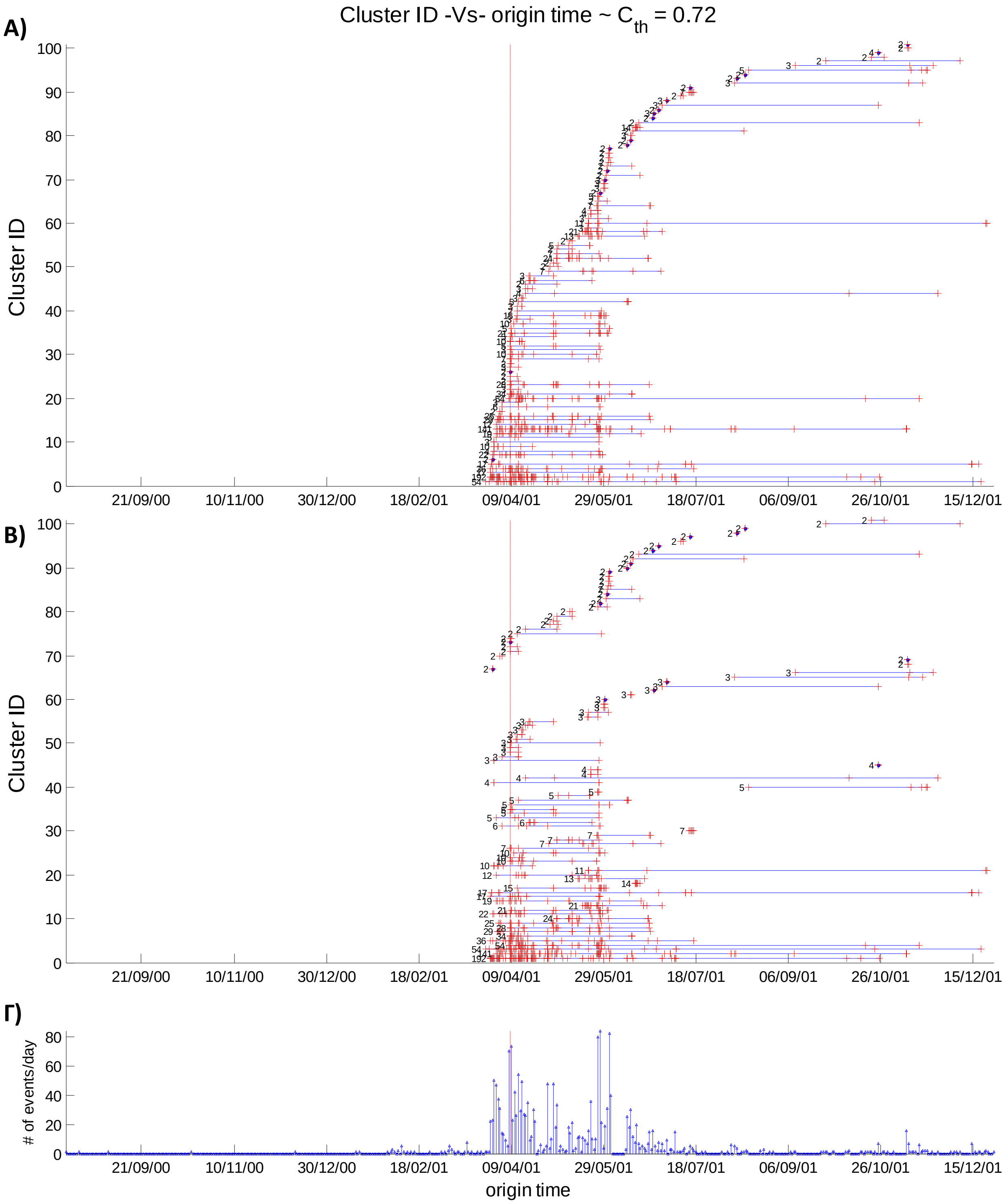
Παρακάτω παρουσιάζεται η χρονική κατανομή της σεισμικότητας της Ομάδας Α. Στο Σχήμα 4.28_{A} μπορεί να διακριθεί, κατά την εμφάνιση των διαφόρων τοπικών μεγίστων, η ύπαρξη πολλών μικρών σεισμικών εξάρσεων, που προηγούνται ή έπονται ορισμένων από τους μεγάλους σεισμούς του σμήνους. Οι μεγαλύτεροι αριθμοί σεισμών ανά ημέρα στο σμήνος του ΑΙΟ, στον πλήρη κατάλογο, καταγράφθηκαν στις 8 Απριλίου (143), 26 Μαΐου (146) καθώς και την $1^{η}$ Ιουνίου 2001 (134). Στην Ομάδα Α κατά την ίδια περίοδο σημειώνονται πάνω από 80 σεισμοί/μέρα όπως φαίνεται παρακάτω. Παρ' ότι ο κύριος σεισμός M_w=4.2 εκδηλώθηκε στις 8 Απριλίου 2001, μια μεγάλη ακολουθία ξεκίνησε με 2 σεισμούς της τάξεως του M_w=3.8-3.9 σε δύο διαφορετικές περιοχές όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.29_{D}.



Σχήμα 4.28: Χρονικές κατανομές για την Ομάδα Α: Α) Αριθμός σεισμών ανά ημέρα, Β) Μεγέθη M_w, Γ) Βάθη (μετά τον επαναπροσδιορισμό)



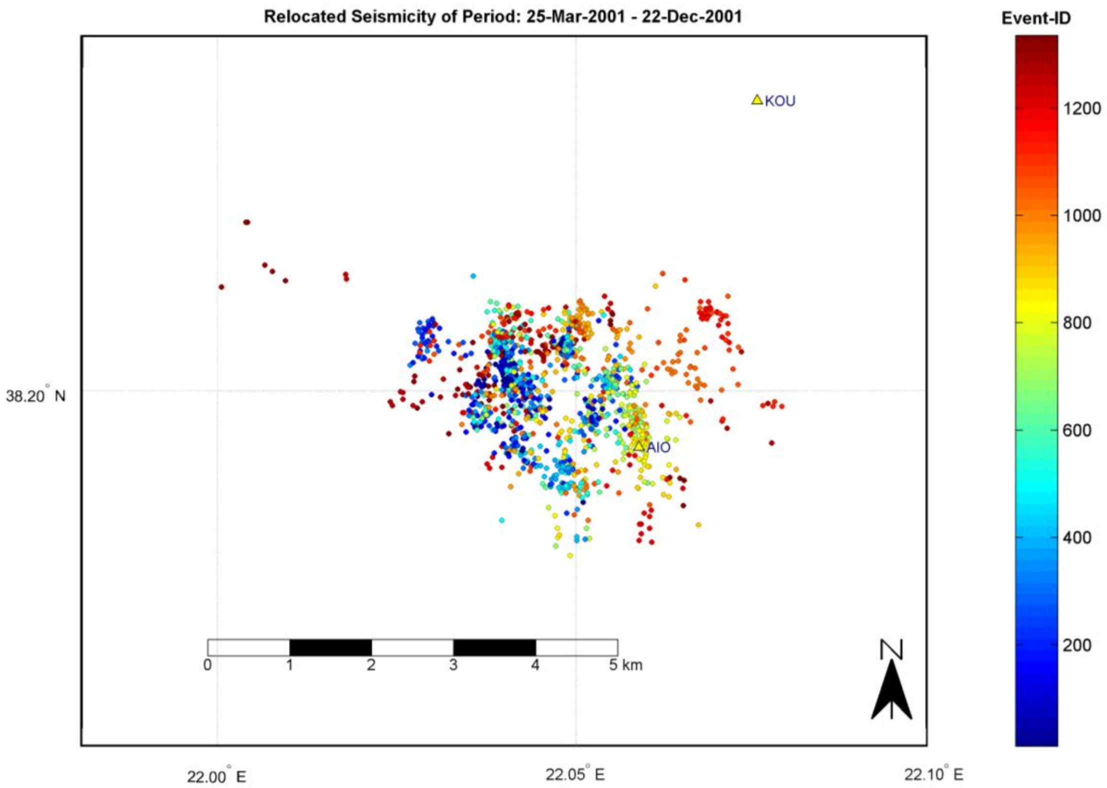
Σχήμα 4.29: Επικεντρικοί χάρτες με τη χρονική εξέλιξη σεισμικότητας του σμήνους του AIO για 6 χρονικές περιόδους. Σημειώνονται ορισμένοι από τους μεγάλους σεισμούς του σμήνους για τους οποίους έχει υπολογιστεί το μέγεθος ροπής M_w. Για τον επανακαθορισμό της θέσης του κύριου σεισμού του AIO (8/4/01,06:12:24UTC,M_w4.2) βλέπε Παράρτημα Α.1



Σχήμα 4.30: Χρονική κατανομή των συστάδων σμηνοσεισμών για το σμήνος του AIO (Ομάδα Α) με $\mathbf{C_{th}}$=0.72. Α) Ο αριθμός Cluster-ID αυξάνεται συναρτήσει του χρόνου γένεσης του πρώτου γεγονότος της κάθε συστάδας, Β) Ο αριθμός Cluster-ID αυξάνεται συναρτήσει του μεγέθους της κάθε συστάδας, Γ) Αριθμός γεγονότων ανά ημέρα για την Ομάδα Α (όλα τα γεγονότα).

Την ημέρα που εκδηλώθηκε ο κύριος σεισμός υπάρχει εμφάνιση σεισμικής δραστηριότητας σε όλη την επιφάνεια που καλύπτει το σμήνος. Συγχρόνως, γίνεται η έναρξη ενός μεγάλου αριθμού συστάδων σμηνοσεισμών, όπως φαίνεται και στα Σχήματα $4.30_{A,B}$. Στο ίδιο σχήμα παρατηρείται επίσης ένα διάστημα προσεισμικής δραστηριότητας κατά το οποίο άρχισαν να εμφανίζονται συστάδες σμηνοσεισμών, μερικές από τις οποίες μάλιστα εκτείνονται χρονικά έως και το τέλος της περιόδου. Σχεδόν όλες, δε, επαναδραστηριοποιήθηκαν αμέσως μετά τη γένεση του κύριου σεισμού.

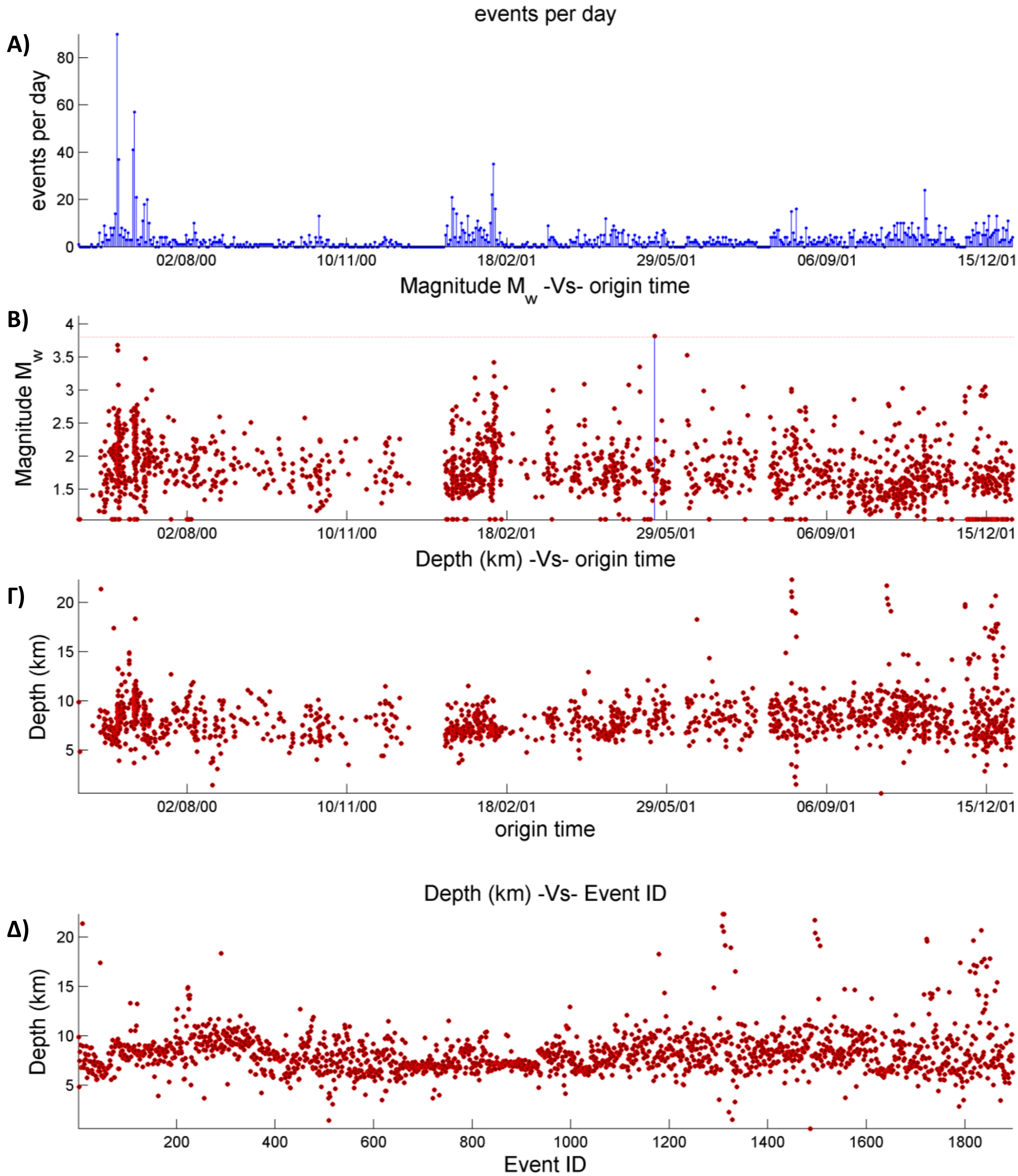
Τέλος, η δεύτερη μεγάλη σεισμική έξαρση που ξεκίνησε στις 29 Μαΐου δημιούργησε έναν αριθμό νέων συστάδων σμηνοσεισμών για τις οποίες όμως δεν είναι διαθέσιμα πολλά στοιχεία καθώς ακολουθεί ένα κενό δεδομένων από τις 2 Ιουνίου έως τις 8 Ιουνίου 2001, διάστημα κατά το οποίο βρισκόταν σε εξέλιξη η μετασεισμική αυτή ακολουθία. Παρατηρείται, επίσης, κατά το διάστημα από 29 Μαΐου έως την $1^{η}$ Ιουνίου να επανεμφανίζονται γεγονότα σε συστάδες οι οποίες είχαν δραστηριοποιηθεί λίγες ημέρες πριν και μετά τον κύριο σεισμό του σμήνους του AIO. Από τις αρχές Ιουλίου και έπειτα η σεισμικότητα εξασθενεί με λιγοστά μόνο γεγονότα να ανήκουν σε κάποιες από τις γνωστές συστάδες σμηνοσεισμών.



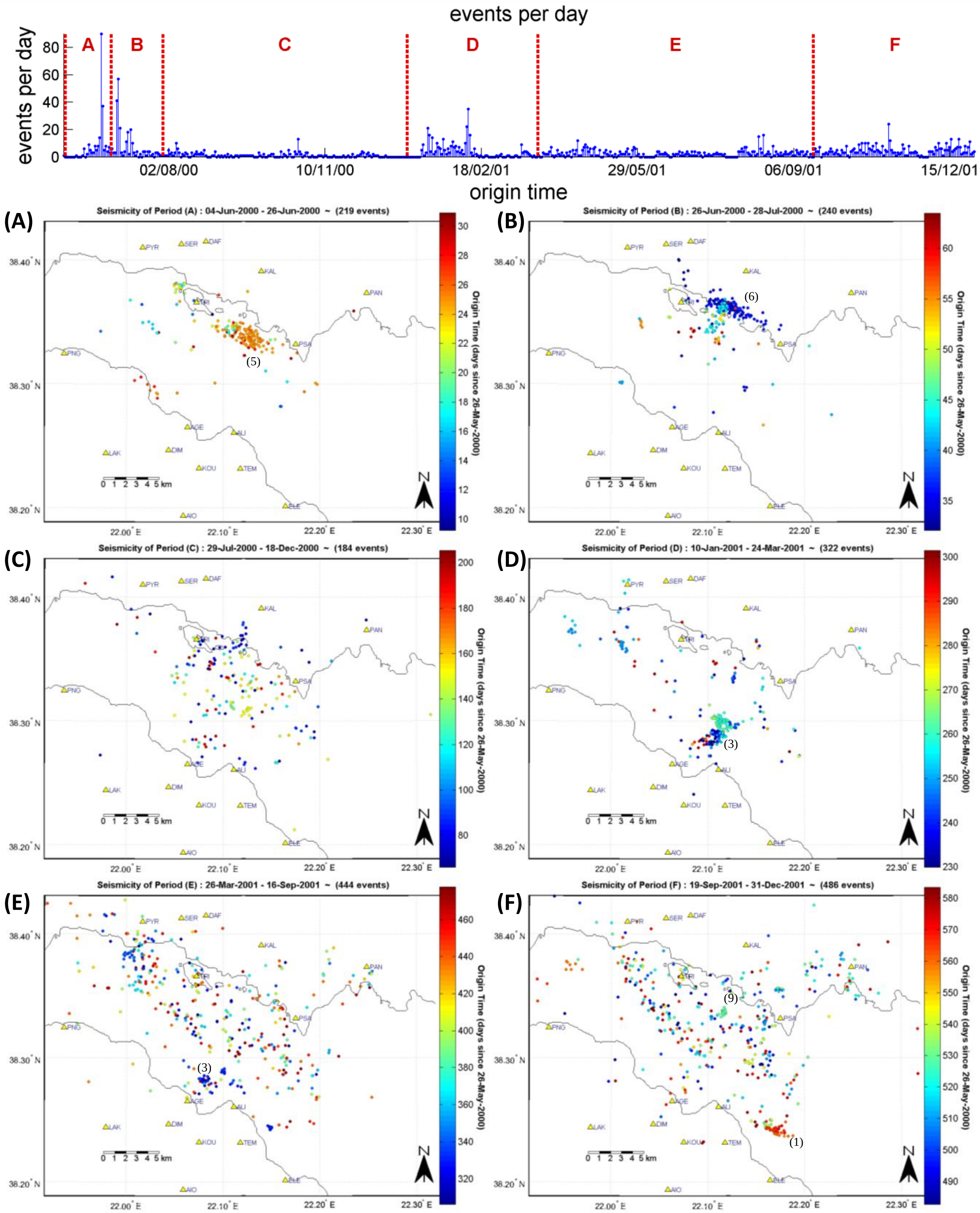
Σχήμα 4.31: Επίκεντρα της επαναπροσδιορισμένης Ομάδας Α με το χρώμα να δείχνει τον αριθμό ταυτοποίησης των γεγονότων που εξαρτάται από τη χρονική σειρά με την οποία συνέβησαν.

4.5.2 ~ *Χρονική Κατανομή: Ομάδα Β*

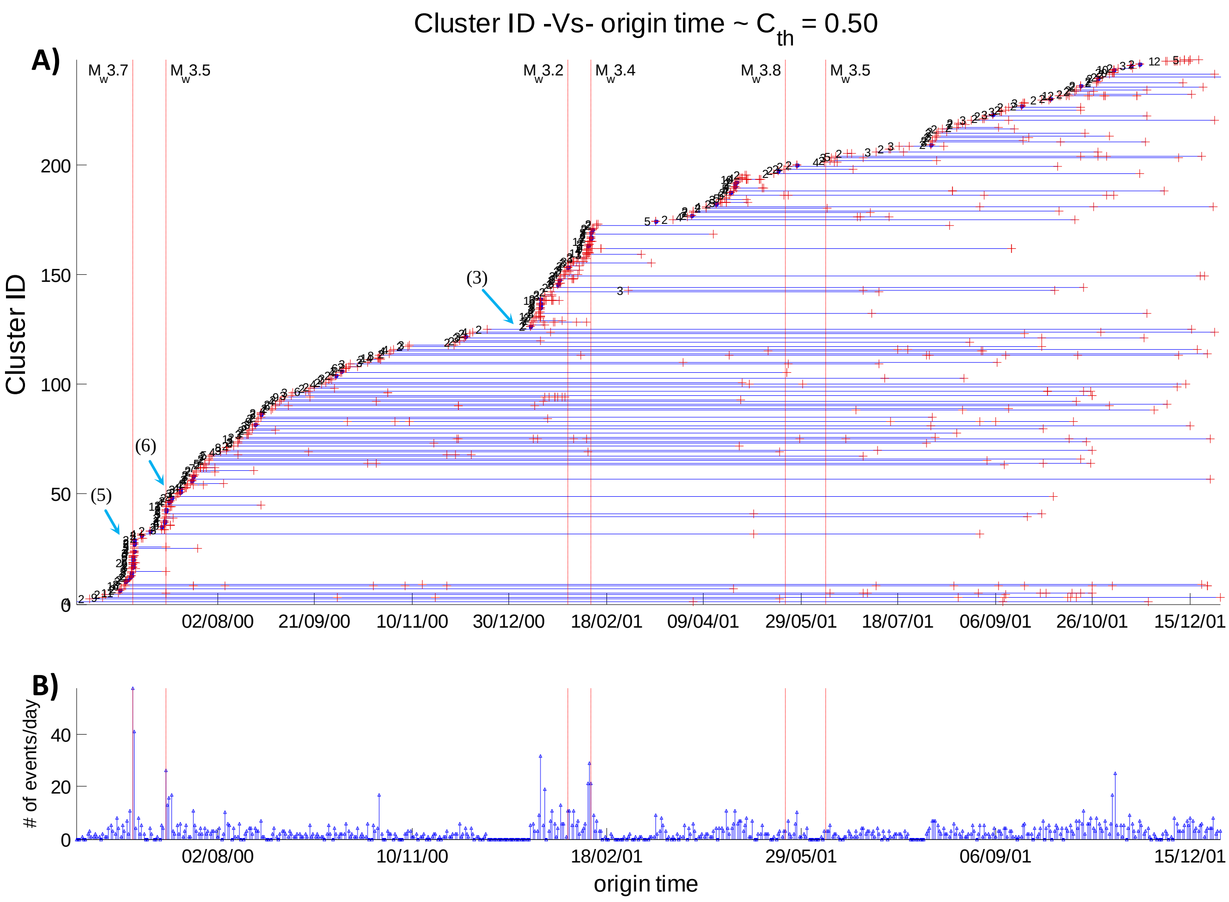
Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται οι αντίστοιχες εικόνες χρονικών κατανομών με αυτές που παρουσιάστηκαν παραπάνω για την Ομάδα Α. Στα δεδομένα περιλαμβάνονται οι σεισμοί της Ομάδας Β συν τους σεισμούς του πακέτου Mix_Group1_CL μείον τη σεισμικότητα στην περιοχή του σμήνους του AIO που περιλαμβάνεται στο Mix_Group1_CL.



Σχήμα 4.32: Χρονικές κατανομές για την Ομάδα Α. Υπάρχει ένα κενό δεδομένων από 2/6/2001 έως 8/6/2001κατά το οποίο έχει χαθεί μέρος του σεισμικού σμήνους που ξεκίνησε στις 29/5/2001 με έναν σεισμό M_w=3.9.



Σχήμα 4.33: Επικεντρικοί χάρτες επαναπροσδιορισμένης σεισμικότητας της Ομάδας Β + Mix_Group1_CL για διάφορες χρονικές περιόδους



Σχήμα 4.34: Χρονική κατανομή συστάδων σμηνοσεισμών για την Ομάδα Β (χωρίς το Mix_Group1_CL) με $\mathbf{C_{th}}$=0.50

Η Ομάδα Β ξεκινάει με 2 μεγάλες χρονικές συστάδες γεγονότων, η πρώτη φαίνεται στο Σχήμα 4.33_A ενώ η δεύτερη στο Σχήμα 4.33_B. Πρόκειται για τις χρονικές συστάδες (5) και (6) που παρουσιάστηκαν στην τομή C_1-C_2 του Σχήματος 4.25 και οι οποίες πυροδοτούνται από σεισμούς μεγέθους M_w=3.7 και 3.5 αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.34_A. Ακολουθεί μια περίοδος (C) με διάσπαρτη σεισμικότητα κατά την οποία, ωστόσο, εντοπίζονται διάφορες μικρές συστάδες σμηνοσεισμών ή σεισμικά ζεύγη (*doublet*). Υπάρχει ένα κενό στα δεδομένα μεταξύ 19 Δεκεμβρίου 2000 και 9 Ιανουαρίου 2001. Είναι πιθανόν προς το τέλος αυτού του κενού διαστήματος να υπήρξε δραστηριότητα στο Νότιο τμήμα του κόλπου, NW του Αιγίου (Σχήμα 4.33_D) καθώς υπάρχει μαζική εμφάνιση συστάδων σμηνοσεισμών αμέσως μετά την επαναφορά των δεδομένων (Σχήμα 4.34_A, σημειώνεται με (3)). Η δραστηριότητα στην περιοχή αυτή συνεχίζεται και κατά την περίοδο (E) (Σχήμα 4.33_E) με κάποιες ακόμα συστάδες στα Βορειοδυτικά όπου σημειώθηκαν 2 σεισμοί M_w=3.8 και M_w=3.5 στις 21/5/2001 και 10/6/2001 αντίστοιχα, και μια μικρή δραστηριότητα στα ΝοτιοΑνατολικά η οποία εντείνεται κατά την τελευταία περίοδο (F) (Σχήμα 4.33_F). Κατά την περίοδο αυτή, επίσης, εμφανίζεται και μία μικρή συστάδα (Σχήμα 4.33_F, σημειώνεται με (9)) λίγο νοτιότερα από τη συστάδα (5).

Κεφαλαιο 5

Μελέτη σεισμικότητας των ετών 2005-2006 στον Δυτικό Κορινθιακό κόλπο

5.1 ~ *Εισαγωγή*

Η μελέτη της σεισμικότητας των ετών 2005-2006 ξεκίνησε με αφορμή το πρόγραμμα 3HAZ-Corinth, ενός ερευνητικού προγράμματος που χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και αφορούσε στη μελέτη της περιοχής του Δυτικού Κορινθιακού κόλπου για την αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών όπως σεισμοί, κατολισθήσεις και τσουνάμι, στο οποίο συμμετείχαν επιστήμονες από πολλούς διαφορετικούς επιστημονικούς κλάδους. Κατά την ολοκλήρωση αυτού του προγράμματος παρουσιάστηκαν τα πρώτα αποτελέσματα των συστάδων σμηνοσεισμών για τα έτη 2005-2006. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια εκτενέστερη παρουσίαση ακολουθώντας την ίδια λογική με αυτή του προηγούμενου κεφαλαίου αλλά αντιμετωπίζοντας τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει ο συγκεκριμένος κατάλογος σε σχέση με τον προηγούμενο.

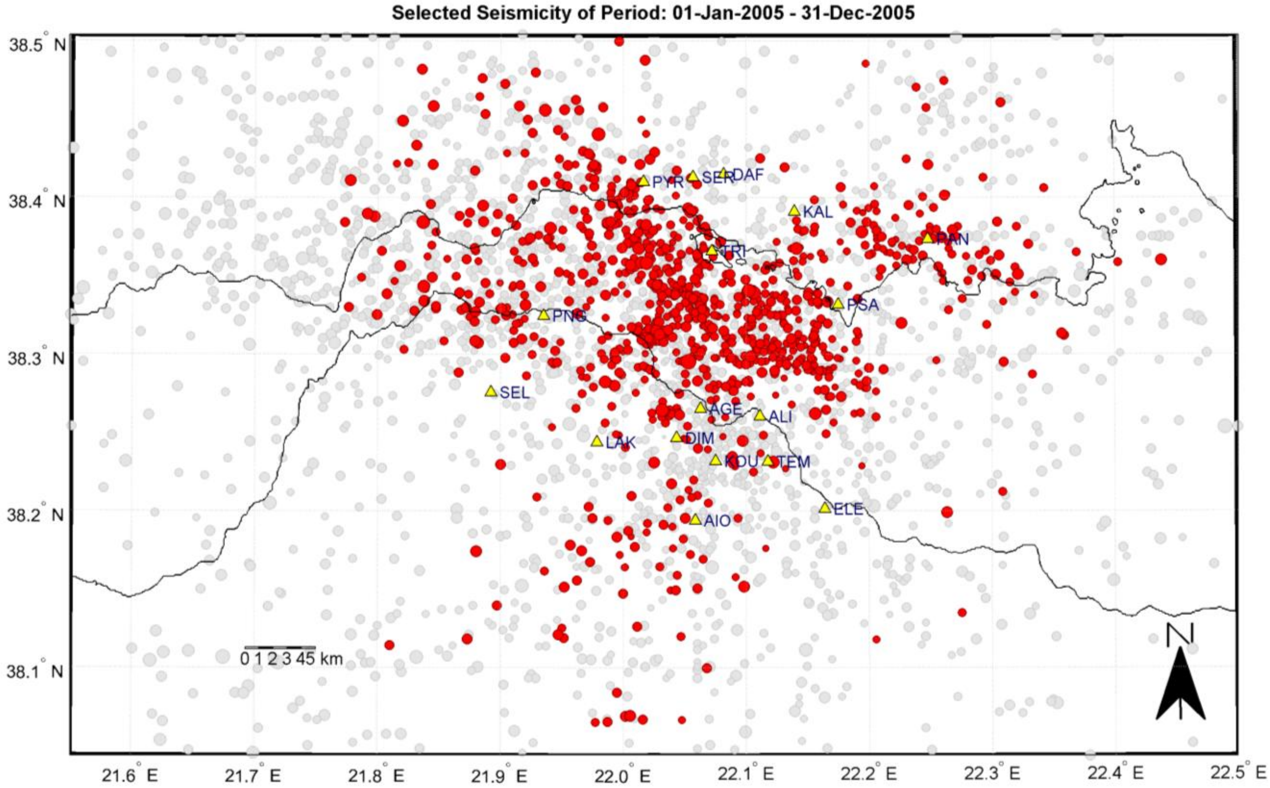
Τα διαθέσιμα δεδομένα για τη σεισμικότητα των ετών 2005-2006 διαφέρουν από αυτά των ετών 2000-2001 υπό την έννοια ότι οι χρόνοι άφιξης των φάσεων P και S έχουν προκύψει από μια αυτόματη διαδικασία και παρ' ότι οι πρώτες λύσεις που προκύπτουν είναι σχετικά ακριβείς, δεν είναι *επαρκώς* ακριβείς για την επιθυμητή λεπτομέρεια. Το κυριότερο πρόβλημα οφείλεται σε κάποιες περιπτώσεις σε εσφαλμένους χρόνους άφιξης, ορισμένοι από τους οποίους έχουν προσδιοριστεί εκτός κυματομορφής ενώ άλλοι πολύ αργότερα από την πραγματική άφιξη των κυμάτων. Ο όγκος των δεδομένων είναι απαγορευτικός προκειμένου να γίνει μη-αυτόματος προσδιορισμός χρόνων άφιξης σε όλο τον κατάλογο ώστε να ακολουθήσει μια ανάλυση όμοια με αυτή του προηγούμενου κεφαλαίου. Για τον λόγο αυτό τα βήματα στα οποία θα κινηθεί η μελέτη αυτού του κεφαλαίου είναι τα παρακάτω:

1) Επιλογή σεισμικότητας
2) Εντοπισμός συστάδων σμηνοσεισμών (*multiplet clusters*)
3) Ημι-αυτόματη διόρθωση χρόνων άφιξης με τη μέθοδο των Κύριων Γεγονότων (*Master Events*)
4) Επαναπροσδιορισμός υποκέντρων και χρόνων γένεσης με το πρόγραμμα HypoDD

Η διαδικασία του βήματος 3 δεν χρειάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο καθώς στην πλειοψηφία τους οι χρόνοι άφιξης για τους σεισμούς των ετών 2000-2001 ήταν καλά προσδιορισμένοι καθώς έχουν ελεγχθεί από αναλυτή (*Κουνάδη, Χ., 2002; Αγάλος, Α. & Λέντας, Κ., 2003*). Σημειώνεται πως το 4^{ο} βήμα θα γίνει με επιφύλαξη, καθώς, πέρα από τα γεγονότα που θα επαναπροσδιοριστούν με τη μέθοδο του βήματος 3, τα υπόλοιπα θα έχουν πολύ μεγαλύτερα σφάλματα λόγω των αυτόματα προσδιορισμένων χρόνων άφιξης.

Ο σταθμός που επιλέχθηκε για τον εντοπισμό των συστάδων σμηνοσεισμών (*multiplet clusters*) για τα έτη 2005-2006 είναι αυτός της Ψαρομύτας (PSA), που είχε επιλεχθεί και στο προηγούμενο κεφάλαιο για την Ομάδα Β. Για τη σεισμικότητα αυτών των ετών δεν διατίθενται δεδομένα διάρκειας σημάτων από τα οποία υπολογίζονταν τα μεγέθη διάρκειας $\mathbf{M_d}$ στο προηγούμενο κεφάλαιο. Τα μόνα διαθέσιμα μεγέθη είναι τα μεγέθη ροπής $\mathbf{M_w}$ που προσδιορίστηκαν με τη διαδικασία που περιγράφθηκε στο Κεφάλαιο 2. Στο Παράρτημα Β, Σχήμα Β.30, παρουσιάζονται τα διαγράμματα της διαθεσιμότητας δεδομένων ανά σταθμό.

5.2 ~ *Σεισμικότητα 2005*



Σχήμα 5.1: Επιλεγμένη σεισμικότητα του έτους 2005 (με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η **Ομάδα C**) πάνω από τη μη επιλεγμένη σεισμικότητα (με ανοιχτό γκρι χρώμα).

5.2.1 ~ *Επιλογή Ομάδας C*

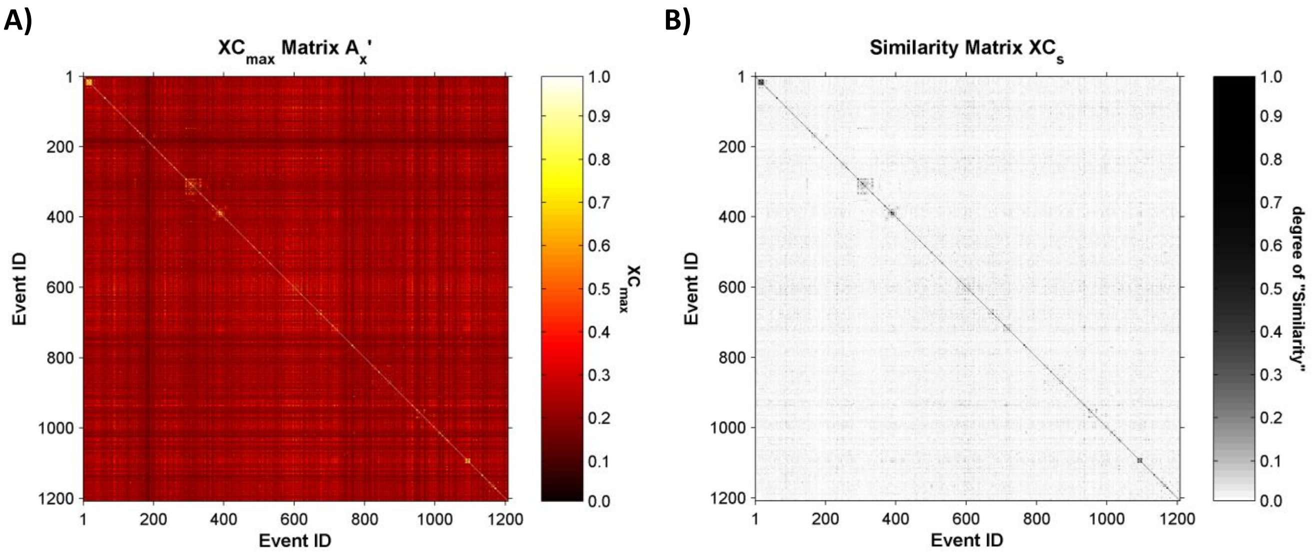
Για το έτος 2005 υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα 5660 αρχείων φάσεων από τα οποία τα 4662 δίνουν λύσεις με το HYPO71 (*Lee & Lahr, 1972*). Η Ομάδα C της επιλεγμένης σεισμικότητας για το έτος 2005 περιλαμβάνει 1232 σεισμούς (26.4% του καταλόγου) για 1207 από τους οποίους διατίθενται κυματομορφές της συνιστώσας Z στον σταθμό PSA. Η επιλογή έγινε με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

<u>Ομάδα C:</u>
 Αριθμός Φάσεων ≥ 9
 Σφάλμα Θέσης < 3km

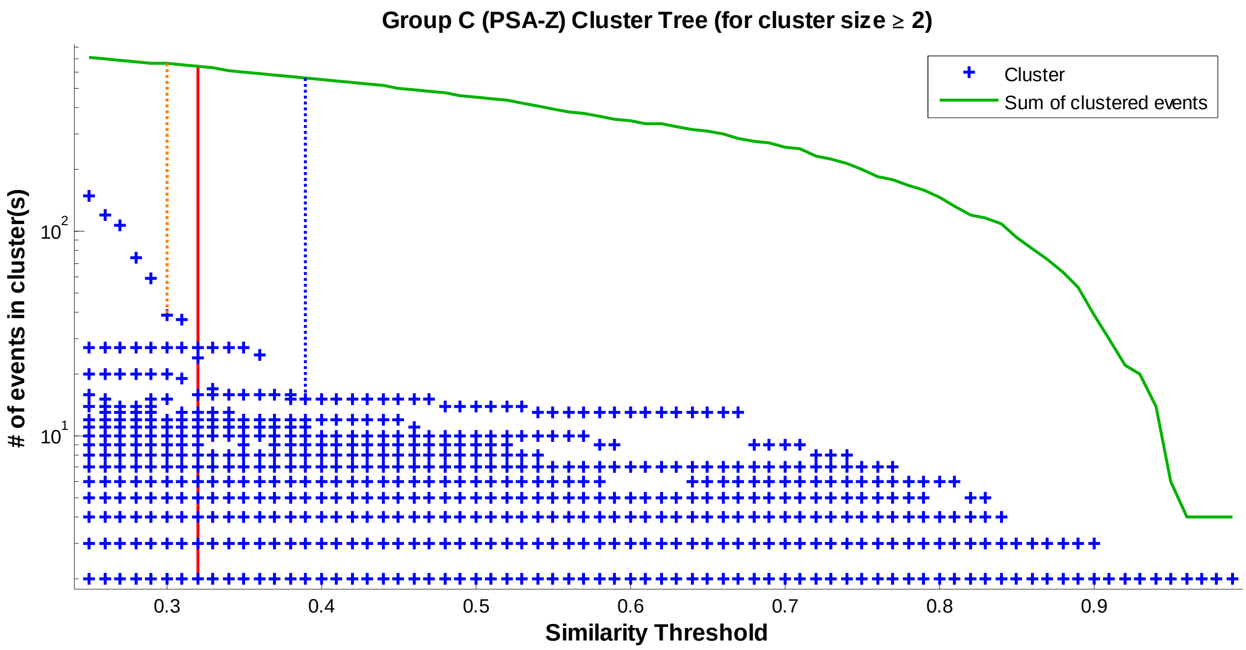
Σημειώνεται ότι το σφάλμα θέσης (σφάλμα εντοπισμού υποκέντρου) υπολογίζεται ως η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων των επιμέρους σφαλμάτων σε καθεμία από τις 3 συνιστώσες θέσης. Μεγαλύτερο ρόλο παίζει το σφάλμα στην κατακόρυφη συνιστώσα θέσης (βάθος) καθώς αυτή η συνιστώσα είναι συνήθως η λιγότερο καλά προσδιορισμένη.

Η εικόνα της επιλεγμένης σεισμικότητας (Σχήμα 5.1, κόκκινα σημεία) είναι διάσπαρτη και δεν αναμένεται να σχηματιστούν μεγάλες συστάδες αλλά ένα πλήθος από πολύ μικρές. Η μεγάλη διασπορά οφείλεται εν μέρει σε προβλήματα στα δεδομένα των αυτόματα προσδιορισμένων χρόνων άφιξης από τους οποίους υπολογίστηκαν τα υπόκεντρα. Ο σκοπός είναι με τη βοήθεια των σμηνοσεισμών (*multiplets*) να γίνει διόρθωση των χρόνων άφιξης σε ένα υποσύνολο των γεγονότων της Ομάδας C που σχηματίζουν συστάδες με τουλάχιστον 2 γεγονότα και στη συνέχεια να επαναπροσδιορίστεί ένα μεγαλύτερο υποσύνολο σεισμών από όλο το 2005 χρησιμοποιώντας την επιπλέον πληροφορία που παρέχουν τα δεδομένα ετεροσυσχέτισης και οι διορθωμένοι χρόνοι άφιξης.

Στον πίνακα ομοιότητας (Σχήμα 5.2Β) φαίνεται ότι για την επιλεγμένη σεισμικότητα οι σμηνοσεισμοί δεν έχουν μεγάλες συγκεντρώσεις, κατανέμονται γύρω από την διαγώνιο σε διάσπαρτα χρονικά διαστήματα κατά κύριο λόγο για λίγα χρονικώς γειτονικά γεγονότα. Η ίδια εικόνα φαίνεται και στο δενδρόγραμμα όπου οι περισσότερες συστάδες έχουν λιγότερους από 10 σεισμούς ενώ ο κύριος κορμός που εμφανίζεται από τιμή κατωφλίου 0.31 δεν μπορεί να θεωρηθεί ως συστάδα όμοιων σεισμών: η συσσώρευση γεγονότων σε αυτόν τον κλάδο οφείλεται στον θόρυβο υποβάθρου του πίνακα ομοιότητας.



Σχήμα 5.2: A) Πίνακας Μεγίστου Ετεροσυσχέτισης XC_{max} για τη επιλεγμένη σεισμικότητα του έτους 2005 (**Ομάδα C**, 1232 σεισμοί), B) Πίνακας Ομοιότητας για την **Ομάδα C**.



Σχήμα 5.3: δενδρόγραμμα για την **Ομάδα C** (2005). Το προτεινόμενο κατώφλι είναι C_{th}=0.32

5.3 ~ *Η Μέθοδος των Κύριων Γεγονότων (Master Events)*

Οι χρόνοι άφιξης που διατίθενται στα αρχεία φάσεων του 2005 έχουν προσδιοριστεί αυτόματα, σε αντίθεση με τους αντίστοιχους χρόνους της σεισμικότητας των ετών 2000-2001 που μελετήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι λύσεις των υποκέντρων/χρόνων γένεσης δίνουν μια αρχική προσεγγιστική εικόνα αλλά όχι την απαιτούμενη λεπτομέρεια. Τα σφάλματα είναι σχετικά μεγάλα και επιπλέον από τη μελέτη των χρόνων άφιξης σε ένα δείγμα σεισμών του 2005 προέκυψε ότι υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες εμφανίζονται μεγάλα σφάλματα που ξεπερνούν ορισμένες φορές το 1sec τόσο στις αφίξεις των P όσο και των S ενώ τα βάρη που έχουν τεθεί από τον αυτόματο αλγόριθμο προσδιορισμού χρόνων άφιξης είναι πάντοτε τα μέγιστα. Προτού γίνει ο όποιος επαναπροσδιορισμός υποκέντρων πρέπει να γίνει μια προσπάθεια διόρθωσης των αρχικών δεδομένων: **ο επαναπροσδιορισμός έχει νόημα μόνο εφόσον έχουν προηγηθεί οι βέλτιστες δυνατές λύσεις με τον συμβατικό τρόπο προσδιορισμού υποκεντρικών θέσεων και χρόνων γένεσης για τους σεισμούς του καταλόγου**.

Η διόρθωση των χρόνων άφιξης είναι μια χρονοβόρα διαδικασία ειδικά όταν ο αριθμός των σεισμών ανέρχεται σε χιλιάδες. Θα αναπτυχθεί μια μέθοδος η οποία μπορεί να εκμεταλλευτεί την πληροφορία που παρέχουν οι όμοιοι σεισμοί προκειμένου να γίνει ημιαυτόματη διόρθωση στους χρόνους άφιξης σε ένα σύνολο σεισμών χωρίς να χρειαστεί να εξεταστούν χειρονακτικά όλοι ένας προς έναν. Επιλέγεται από την Ομάδα C **ένας** σεισμός από την **κάθε** συστάδα σμηνοσεισμών που συγκροτείται σε μια ορισμένη τιμή κατωφλίου, π.χ. $\mathbf{C_{th}}$=0.32 για την οποία σχηματίζονται 180 συστάδες με συνολικά 645 γεγονότα. Οι επιλεγμένοι σεισμοί θα χαρακτηριστούν ως **κύριοι σεισμοί** (*master events*) για τη αντίστοιχη συστάδα τους. Θα πρέπει η επιλογή να γίνει με βάση την ποιότητα του σήματος και τον αριθμό των σταθμών στους οποίους έχουν καταγραφεί οι κύριοι σεισμοί. Μια γρήγορη επιλογή μπορεί να γίνει από τον διαθέσιμο αριθμό φάσεων, δηλαδή να επιλεχθεί από κάθε συστάδα σμηνοσεισμών το γεγονός (ή τα γεγονότα) που έχουν τον μέγιστο αριθμό φάσεων. Εάν υπάρχουν περισσότεροι από ένας σεισμοί με τον ίδιο (μέγιστο) αριθμό φάσεων τότε ως δεύτερο κριτήριο χρησιμοποιείται η τιμή του σφάλματος RMS, επιλέγοντας το γεγονός με το μικρότερο σφάλμα.

Στη συνέχεια πρέπει να γίνει διόρθωση με χειρονακτικό τρόπο στους χρόνους άφιξης των κύριων γεγονότων (*manual phase-picking*). Επιπλέον, πρέπει να προστεθούν στα κύρια γεγονότα, χρόνοι άφιξης φάσεων σε όσους σταθμούς υπάρχουν κυματομορφές με καθαρό σήμα αλλά δεν έχουν προσδιοριστεί οι αντίστοιχοι χρόνοι με τον αυτόματο τρόπο. Έτσι, δημιουργούνται δεδομένα φάσεων που έχουν ελεγχθεί για τα κύρια γεγονότα, τα οποία είναι γνωστό πως ανήκουν σε κάποια από τις συστάδες σμηνοσεισμών. Με την πληροφορία της ομοιότητας των σεισμών μπορούν να διορθωθούν (αυτόματα) οι χρόνοι άφιξης ή ακόμα και να προστεθούν επιπλέον χρόνοι άφιξης σε όλα τα υπόλοιπα γεγονότα που είναι όμοια με τα επιλεγμένα κύρια γεγονότα. Η μέθοδος αυτή καλείται **μέθοδος των κύριων γεγονότων** (*master events*).

Η στρατηγική της μεθόδου είναι απλή: Στο κάθε κύριο γεγονός αντιστοιχεί ένας αριθμός ταυτοποίησης (Event-ID) που δηλώνει τη γραμμή του πίνακα ετεροσυσχέτισης (ή ομοιότητας) η οποία αναφέρεται στο γεγονός αυτό. Από τον πίνακα μπορούν να βρεθούν τα γεγονότα που είναι όμοια με το συγκεκριμένο κύριο γεγονός. Η ομοιότητα έχει προσδιοριστεί από τις κυματομορφές ενός μόνο σταθμού (PSA) και μίας μόνο συνιστώσας (Z), αλλά 2 όμοιοι σεισμοί πρέπει να έχουν όμοιες (ή σχεδόν όμοιες) κυματομορφές σε οποιονδήποτε σταθμό ή συνιστώσα. Με την παραδοχή αυτή γίνεται σύγκριση των κύριων γεγονότων με όλα τα όμοιά τους, τα οποία καλούνται **εξαρτημένα** (*slave events*), σε κάθε *από κοινού* διαθέσιμο σταθμό. Η σύγκριση αυτή τη φορά *δεν* γίνεται σε ολόκληρες τις κυματομορφές αλλά μόνο σε ένα επιλεγμένο τμήμα τους και συγκεκριμένα σε μία χρονική περιοχή που περιέχει τα κύματα P ή S ανάλογα με τον χρόνο άφιξης που πρόκειται να διορθωθεί/προστεθεί. Η διαδικασία αυτή μοιάζει με τη διαδικασία κατασκευής του αρχείου DT.CC, η οποία αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, με τη διαφορά ότι ως ID1 δεν είναι κάποιο τυχαίο γεγονός, αλλά αποκλειστικά και μόνο τα κύρια (*master*) γεγονότα που έχουν ελεγχθεί μη-αυτόματα, ενώ ως ID2 είναι πάντα κάποιο εξαρτημένο (*slave*) γεγονός, και επίσης η διόρθωση χρόνου σε αυτή την περίπτωση αφομοιώνεται εντός του αρχείου φάσεων του κάθε εξαρτημένου γεγονότος. Υπάρχουν και κάποιες άλλες τεχνικές διαφορές, σε σχέση με τη μέθοδο κατασκευής του αρχείου DT.CC, οι οποίες θα περιγραφούν στις παραγράφους που ακολουθούν.

Οι χρόνοι άφιξης των P και S στα κύρια γεγονότα (*master events*) έχουν ελεγχθεί και είναι αξιόπιστοι. Λόγω των μεγάλων σφαλμάτων στους χρόνους άφιξης που έχουν παρατηρηθεί σε ορισμένους από τους σεισμούς με τους μη-ελεγμένους, αυτόματα προσδιορισμένους χρόνους άφιξης, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν αυτοί οι χρόνοι άφιξης για την επιλογή μιας στενής χρονικής περιοχής στην οποία θα γίνει η σύγκριση. Αναγκαστικά το μήκος της χρονοσειράς ενός εξαρτημένου γεγονότος θα είναι αρκετά ευρύ ώστε να περιλαμβάνει περιπτώσεις στις οποίες τα σφάλματα των αυτόματα προσδιορισμένων χρόνων άφιξης (η χρονική διαφορά ανάμεσα στον αυτόματα προσδιορισμένο χρόνο και στον πραγματικό) είναι μεγάλα. Η διαδικασία σύγκρισης έχει ομοιότητες αλλά και διαφορές από τη μέθοδο ετεροσυσχέτισης. Για ένα ορισμένο κύριο γεγονός **M** σε έναν ορισμένο σταθμό, π.χ. PSA, επιλέγεται ένα μικρό τμήμα της κυματομορφής μιας ορισμένης συνιστώσας, έστω της Z, σε μια στενή περιοχή γύρω από τον χρόνο άφιξης π.χ. των κυμάτων P. Η περιοχή πρέπει να είναι αρκετά *στενή* ώστε να μην περιλαμβάνει αφίξεις άλλων φάσεων. Ονομάζεται αυτή η χρονοσειρά **M(t)**, και είναι γνωστό εξ’ αρχής ότι ο χρόνος άφιξης της υπό εξέταση φάσης βρίσκεται σε μια ορισμένη χρονική στιγμή $\mathbf{t=t_P}$. Για ευκολία μπορεί να αφαιρεθεί ο χρόνος $\mathbf{t_P}$ από τους χρόνους **t** ώστε ο χρόνος άφιξης της φάσης στο τμήμα της κυματομορφής του κύριου γεγονότος να γίνει t=0.

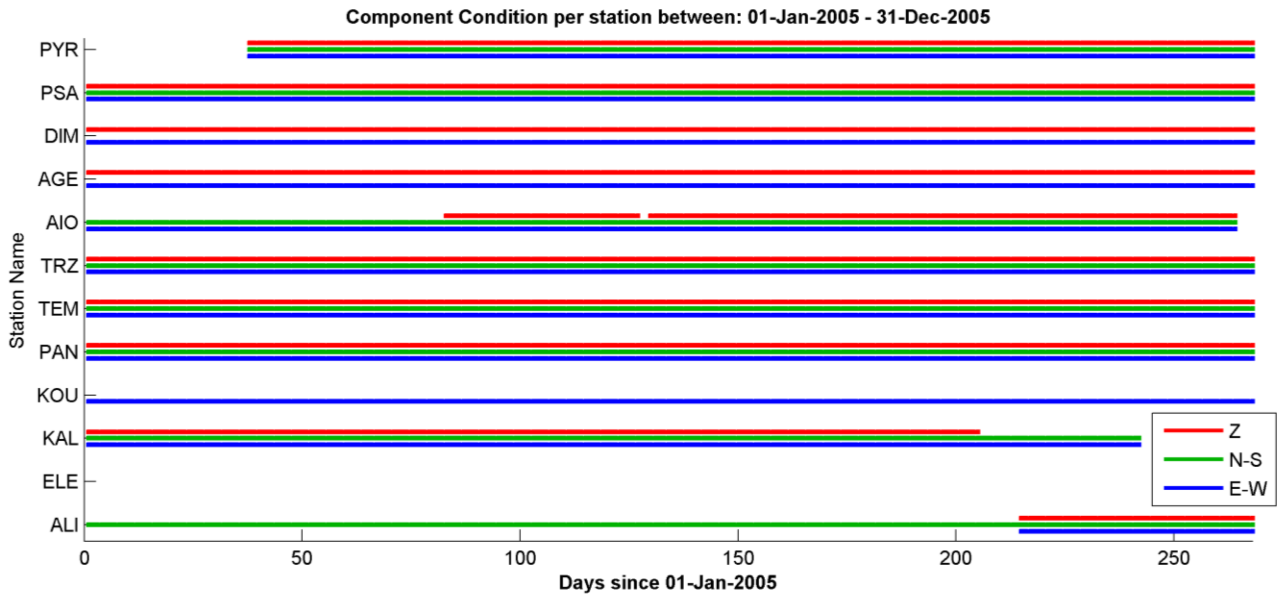
Εντοπίζεται ένα εξαρτημένο (*slave*) γεγονός $\mathbf{S_L}$ που είναι όμοιο με το κύριο γεγονός **M** όπως προκύπτει από τον πίνακα ομοιότητας για μια ορισμένη τιμή κατωφλίου. Εφ’ όσον ο σταθμός PSA έχει διαθέσιμο σήμα στη συνιστώσα Z *και* για τον σεισμό $\mathbf{S_L}$, μπορεί να γίνει διόρθωση (ή προσθήκη) του χρόνου άφιξης των κυμάτων P στον συγκεκριμένο σταθμό με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων. Για να γίνει αυτό αρκεί να εντοπιστεί το τμήμα της κυματομορφής του S_L, στον συγκεκριμένο σταθμό και τη συγκεκριμένη συνιστώσα, που είναι όμοιο με την (μικρού μήκους) χρονοσειρά M(t) του κύριου γεγονότος (*master event*). Για να γίνει αυτό **δεν** χρησιμοποιείται η εξίσωση 1.4 της ετεροσυσχέτισης αλλά η εξίσωση 1.1 του απλού συντελεστή συσχέτισης ανάμεσα στις χρονοσειρές M(t) και $\mathbf{S_{Li}(t)}$, όπου ο δείκτης **i** αναφέρεται σε ένα κυλιόμενο παράθυρο πάνω στην κυματομορφή του S_L με μήκος ίσο με αυτό της M(t) και βήμα 1 δείγμα, σε μια περιοχή στην οποία αναμένεται να βρίσκεται το όμοιο τμήμα των δύο κυματομορφών, το οποίο αναζητείται στην $S_L(t)$.

Εάν υπάρχει διαθέσιμος χρόνος άφιξης των P στον σταθμό PSA για το γεγονός S_L, εξετάζεται μια ευρεία περιοχή γύρω από αυτόν τον αρχικό χρόνο άφιξης. Το ερώτημα εάν μέσα στην περιοχή αυτή περιλαμβάνονται κύματα S ή θόρυβος πριν από την άφιξη των P δεν είναι κάτι που απασχολεί (τόσο), σημασία έχει μέσα στην περιοχή αυτή να υπάρχει ένα τμήμα όμοιο με το ζητούμενο M(t). Για κάθε παράθυρο i υπολογίζεται ο αντίστοιχος συντελεστής συσχέτισης ο οποίος αναμένεται να πάρει υψηλή θετική τιμή για ορισμένα παράθυρα γύρω από το όμοιο τμήμα των S_L και M(t). Αν ο συντελεστής ξεπεράσει π.χ. το 0.7, η κύλιση του παραθύρου μπορεί να συνεχιστεί για μερικά ακόμη βήματα (ώστε να προλάβει να μεγιστοποιηθεί ο συντελεστής συσχέτισης) και στη συνέχεια να διακοπεί. Με αυτόν τον τρόπο η διαδικασία συντομεύεται και αποφεύγεται η εύρεση ενός δεύτερου όμοιου σήματος που μπορεί πιθανόν να ακολουθεί, συνήθως κάποιου άλλου όμοιου σεισμού με χρόνο άφιξης πολύ κοντά σε εκείνον του υπό μελέτη σεισμού S_L στον συγκεκριμένο σταθμό, κάτι σχετικά σπάνιο αλλά όχι τόσο σπάνιο, ειδικά στις περιπτώσεις σμηνοσεισμών που χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό χρονικής συσταδοποίησης.

Όταν εντοπιστεί το όμοιο τμήμα της κυματομορφής S_L με την M(t) μπορεί να βρεθεί η τιμή του χρόνου $\mathbf{t_P}$ της S_L που αντιστοιχεί στον χρόνο t=0 της M(t), δηλαδή στο σημείο της χρονοσειράς M(t) που αντιστοιχεί στην άφιξη των κυμάτων P. Αφού τα σήματα είναι όμοια, όμοιες θα είναι και οι αντίστοιχες φάσεις που περιέχουν, και καθώς υπάρχει χρονική ταύτιση (λόγω της μετάθεσης κατά μια χρονική καθυστέρηση αντίστοιχη του χρόνου $\boldsymbol{\tau_m}$ που αναφέρθηκε κατά τη διαδικασία ετεροσυσχέτισης) ο χρόνος άφιξης στην M(t), για t=0, δείχνει πού βρίσκεται ο αντίστοιχος χρόνος άφιξης στην κυματομορφή S_L. Μετά τις απαραίτητες διορθώσεις χρόνου καταχωρείται ο χρόνος άφιξης της συγκεκριμένης φάσης στον συγκεκριμένο σταθμό. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλα τα γεγονότα που είναι όμοια με τα επιλεγμένα και ελεγμένα κύρια γεγονότα.

Αυτό ήταν το κύριο τμήμα της μεθόδου των κύριων γεγονότων. Υπάρχει, ωστόσο, μια απαραίτητη προεργασία. Τα κύρια γεγονότα έχουν ελεγχθεί μη-αυτόματα, έχουν καθοριστεί οι χρόνοι άφιξης των διαφόρων φάσεων σε κάθε σταθμό στον οποίο υπήρχε καθαρό σήμα και κάθε φάση έχει ένα βάρος καθοριστικό της ποιότητας του σήματος. Η σύγκριση πρέπει να γίνει ανάμεσα σε κυματομορφές που είναι γνωστό ότι περιέχουν σήμα και όχι θόρυβο, σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει κίνδυνος να εμφανιστεί τυχαία υψηλή συσχέτιση του σήματος M(t) με θόρυβο και ο χρόνος άφιξης που θα προσδιοριστεί να είναι εσφαλμένος. Για την αποφυγή αυτής της περίπτωσης γίνεται μια προεργασία και μια εκ των υστέρων επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Η προεργασία είναι ο έλεγχος της ημερήσιας κατάστασης των σταθμών. Ο έλεγχος αφορά στην κατάσταση λειτουργίας της καθεμίας από τις 3 συνιστώσες του κάθε σταθμού, καθώς υπάρχουν περίοδοι στις οποίες κάποιες από τις συνιστώσες δεν λειτουργούν ή μπορεί να εμφανίζουν έντονο θόρυβο. Συνήθως, η βλάβη κάποιας συνιστώσας ορισμένου σταθμού είναι ή μόνιμη, για όλο το υπό εξέταση διάστημα, ή διαρκεί για ορισμένες ημέρες ή μήνες μέχρι να αποκατασταθεί. Έτσι μπορεί να οριστεί για κάθε ημέρα η κατάσταση λειτουργίας προκειμένου να αποφευχθεί η χρήση προβληματικών συνιστωσών κατά την σύγκριση των κυματομορφών. Έτσι, η σύγκριση μεταξύ κύριου και εξαρτημένου γεγονότος δεν γίνεται απλά σε κοινούς σταθμούς, αλλά και σε κοινές *υπό λειτουργία* συνιστώσες. Η διαδικασία σύγκρισης και εύρεσης των χρόνων άφιξης γίνεται σε *όλες* τις συνιστώσες που λειτουργούν. Αν τα σήματα είναι όμοια και η συσχέτιση δεν έχει γίνει στον θόρυβο θα πρέπει οι χρόνοι άφιξης που θα εντοπιστούν να είναι πολύ κοντινοί μεταξύ τους, με μια διαφορά ελαχίστων χρονικών δειγμάτων, στις περισσότερες περιπτώσεις μηδενική.



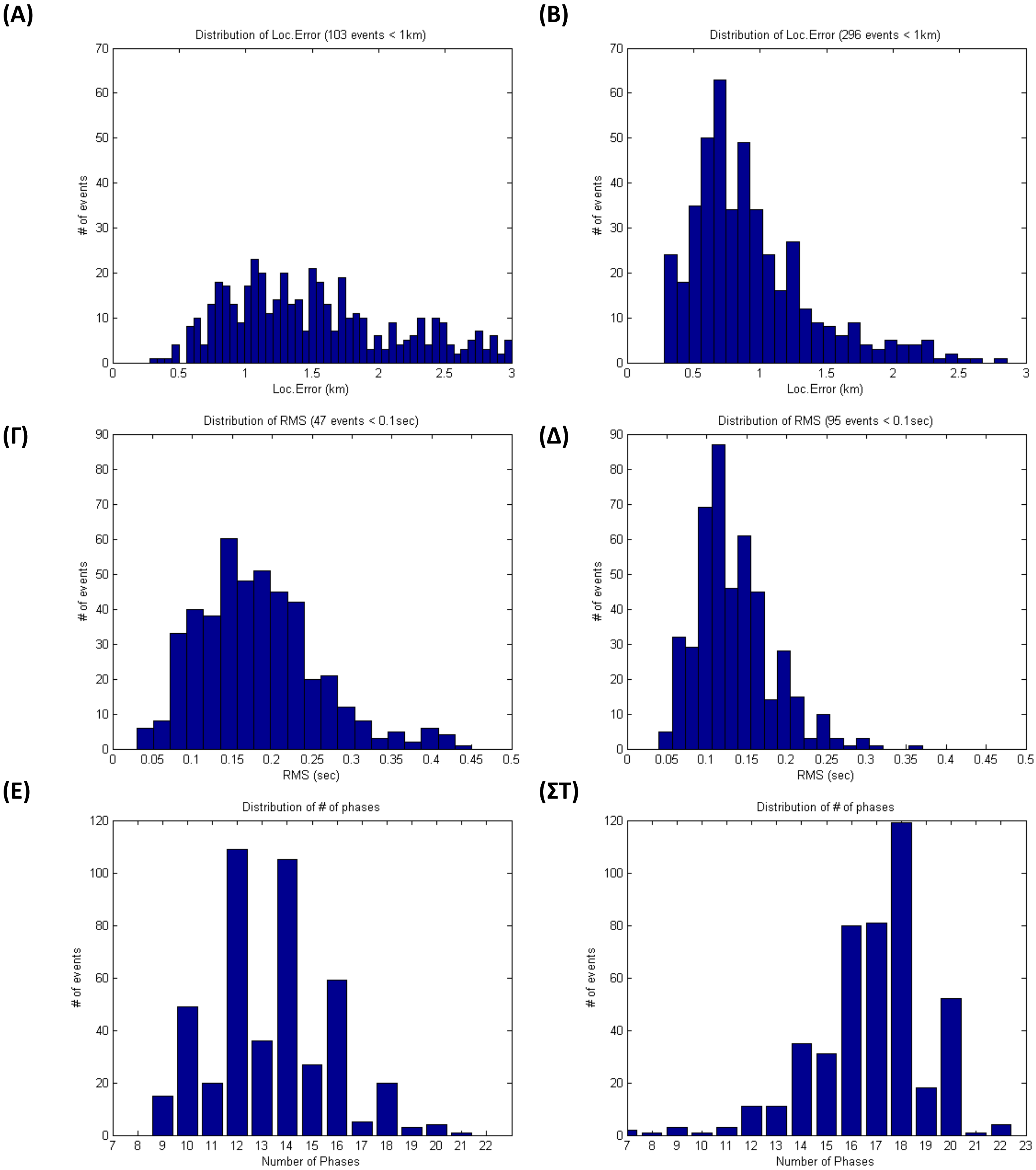
Σχήμα 5.4: κατάσταση λειτουργίας των 3 συνιστωσών ανά σταθμό κατά τη διάρκεια του 2005. Η κόκκινη, πράσινη ή μπλε γραμμή υποδηλώνει καλή λειτουργία της Z, N-S ή E-W συνιστώσας για τη συγκεκριμένη ημέρα (οριζόντιος άξονας) στον συγκεκριμένο σταθμό (κατακόρυφος άξονας).

Προκειμένου να ελαττωθεί ο θόρυβος στις υψηλές συχνότητες εφαρμόζεται κατωπερατό φίλτρο butterworth 3^{ης} τάξεως (συνήθως με συχνότητα αποκοπής 30Hz) ενώ απαραίτητο είναι και ένα ανωπερατό φίλτρο για την αποκοπή θορύβου μεγάλης περιόδου, ιδίως σε σταθμούς με όργανα ευρέως φάσματος. Η συχνότητα αποκοπής του ανωπερατού φίλτρου αποφασίζεται κατά τον έλεγχο της κατάστασης των σταθμών στον οποίο γίνεται παρατήρηση του φάσματος από το οποίο προκύπτει επίσης το εάν είναι απαραίτητη ή όχι η εφαρμογή ορισμένων φίλτρων απόρριψης στενής ζώνης (*notch filter*) σε περίπτωση εμφάνισης ισχυρών παρασιτικών συχνοτήτων κάτω από τη συχνότητα αποκοπής του κατωπερατού φίλτρου (30Hz). Σημειώνονται, επίσης, οι περιπτώσεις σταθμών που εμφανίζουν παράσιτα τύπου αιχμής (*spikes)*, ίσως η πιο δύσκολη περίπτωση θορύβου που πρέπει να αντιμετωπιστεί πριν την εφαρμογή διαδικασιών ετεροσυσχέτισης (βλέπε Παράρτημα Α.6). Τέλος, σημειώνονται κάποιες περιπτώσεις στις οποίες δεν έχει γίνει σωστή διόρθωση χρόνου σε ορισμένους σταθμούς, εφόσον είναι δυνατόν να παρατηρηθούν τέτοιες περιπτώσεις. Στα συγκεκριμένα δεδομένα αυτό συνήθως φαίνεται από μια διαφορά ανάμεσα στον αναμενόμενο χρόνο άφιξης ως προς την αρχή της (αποκομμένης) κυματομορφής (διότι λόγω του τρόπου με τον οποίο έχει γίνει η αποκοπή αυτός ο χρόνος κυμαίνεται γύρω από μια συγκεκριμένη τιμή, π.χ. t=20sec) και στον χρόνο που παρατηρείται να φθάνει το σήμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, εάν πρέπει να μην απορριφθεί εντελώς η πληροφορία ενός τέτοιου σταθμού, ειδικά εάν βρίσκεται σε σημαντικό αζιμούθιο, μπορεί με μια ειδική σήμανση (*flag*), όπως το βάρος ‘9’ στα κύματα P στο αρχείο φάσεων για το πρόγραμμα HYPO71 (*Lee & Lahr, 1972*) που χρησιμοποιείται, να γίνει χρήση μόνο της πληροφορίας της *διαφοράς* $\mathbf{t_{S\text{-}P}}$ των χρόνων άφιξης μεταξύ των κυμάτων S και των κυμάτων P, που είναι ανεξάρτητη από τη διόρθωση χρόνου του σταθμού.

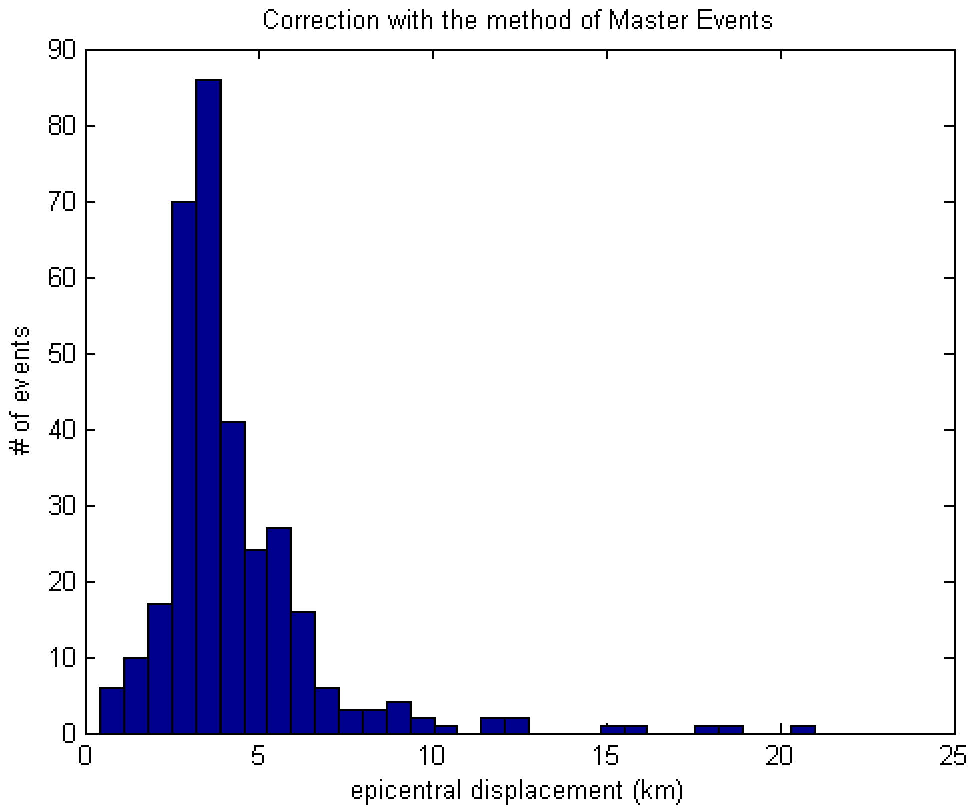
Η προεργασία περιλαμβάνει επίσης μια πρώτη επεξεργασία των αρχείων φάσεων. Επειδή στην περίπτωση αυτή όλα τα προκαθορισμένα (αυτόματα) βάρη των διαθέσιμων φάσεων είναι τα μέγιστα (0 για τα P και 1 για τα S κύματα (HYPO71 format, *Lee & Lahr, 1972*)) ανεξάρτητα από την ποιότητα των σημάτων, από τη στιγμή που έχει κατασκευαστεί ο πίνακας με την ημερήσια κατάσταση των σταθμών (Σχήμα 5.4) μπορούν να επαναπροσδιοριστούν τα βάρη βάσει του πίνακα αυτού. Έτσι, αν έχει πρόβλημα η Z συνιστώσα ενός σταθμού για μια ορισμένη περίοδο, τα βάρη στις αφίξεις των κυμάτων P στον συγκεκριμένο σταθμό για τα γεγονότα αυτής της περιόδου θα πρέπει να είναι μειωμένα. Αυτό επιβαρύνεται εάν επιπλέον υπάρχει πρόβλημα και σε κάποια από τις 2 οριζόντιες συνιστώσες. Ανάλογα αντιμετωπίζονται και τα βάρη των χρόνων άφιξης των κυμάτων S με κύριο παράγοντα τη διαθεσιμότητα των 2 οριζόντιων συνιστωσών. Εάν καμία συνιστώσα δεν λειτουργεί για έναν συγκεκριμένο σταθμό σε μια ορισμένη περίοδο και παρ’ όλα αυτά υπάρχουν αρχεία φάσεων γεγονότων με χρόνους γένεσης εντός της περιόδου αυτής που περιέχουν χρόνους άφιξης στον σταθμό αυτόν, θα πρέπει τα βάρη αυτών των αφίξεων να μηδενιστούν (τιμή 4 στο HYPO71 format (*Lee & Lahr, 1972*)) καθώς θα πρόκειται για σφάλμα του αυτόματου αλγορίθμου.

Επιπλέον, σε κάθε αρχείο φάσεων προστίθενται οι σταθμοί που λείπουν, για τους οποίους στο αντίστοιχο γεγονός υπάρχουν διαθέσιμα αρχεία κυματομορφών. Σε αυτούς τους σταθμούς τίθεται ένας τυχαίος χρόνος άφιξης για τα κύματα P, που μπορεί να είναι η μέση τιμή των χρόνων άφιξης στους άλλους σταθμούς (ή κάποια άλλη κοντινή τιμή χρόνου που μπορεί να δίνεται για παράδειγμα από το όνομα του αρχείου φάσεων, το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι της μορφής yyyy.mm.dd-hr.mn.sc) και τίθεται βάρος 4 (στο HYPO71 format οι φάσεις με βάρος 4 δεν λαμβάνονται καθόλου υπόψη στον υπολογισμό υποκέντρου και χρόνου γένεσης).

Η προσθήκη των επιπλέον σταθμών στα αρχεία φάσεων κατά την προεργασία εξυπηρετεί δύο σκοπούς: α) παρέχει πληροφορία για τους σταθμούς με διαθέσιμες κυματομορφές χωρίς να χρειάζεται κάθε φορά να αναζητούνται στους καταλόγους των κυματομορφών, β) το πρόγραμμα HYPO71 εξάγει ένα αρχείο με επέκταση .RMS που περιέχει πληροφορία για τα σφάλματα σε κάθε σταθμό που περιέχεται στο αρχείο φάσεων, ανεξάρτητα από το βάρος των φάσεων. Στο αρχείο .RMS περιλαμβάνονται τα υπόλοιπα (*residuals*) για τις αφίξεις των P και S κυμάτων σε κάθε σταθμό, οι διαφορές δηλαδή ανάμεσα στον παρατηρούμενο χρόνο διαδρομής, βάσει του χρόνου άφιξης στο αρχείο φάσεων (ανεξάρτητα από το βάρος της φάσης), του υποκέντρου και του χρόνου γένεσης (στοιχεία που προέκυψαν από τη λύση που έδωσε το HYPO71) και στον θεωρητικό χρόνο διαδρομής, με τον θεωρητικό χρόνο άφιξης να υπολογίζεται από τη λύση του ευθέος προβλήματος βάσει του καθορισμένου μοντέλου ταχυτήτων και των συντεταγμένων του σταθμού. Εφ’ όσον δηλαδή υπάρχει μια λύση για το υπόκεντρο και τον χρόνο γένεσης που είναι κατά προσέγγιση σωστή, τα υπόλοιπα των χρόνων άφιξης των P κυμάτων αν αφαιρεθούν από τους τυχαίους χρόνους άφιξης που έχουν τεθεί στο αρχείο φάσεων για τους σταθμούς που έλειπαν από αυτό (με βάρος 4), δίνουν τον θεωρητικά



Σχήμα 5.5: Ιστογράμματα τυπικού σφάλματος υποκεντρικής θέσεως (A,B), μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMS error) (Γ,Δ) και αριθμού φάσεων (Ε,ΣΤ), πριν (Α,Γ,Ε) και μετά (Β,Δ,ΣΤ) τη διόρθωση των χρόνων άφιξης με τη μέθοδο των Κύριων Γεγονότων για τους σεισμούς της Ομάδας C. Φαίνεται μια γενική μείωση των σφαλμάτων και αύξηση του αριθμού φάσεων μετά τη διόρθωση. Περιπτώσεις μείωσης αριθμού φάσεων (εμφάνιση τιμών 7 και 8 στο σχήμα (ΣΤ)) οφείλεται στην απόρριψη δεδομένων από τους αυτόματα προσδιορισμένους (αρχικούς) χρόνους άφιξης σε σταθμούς στους οποίους οι συνιστώσες ήταν εκτός λειτουργίας, π.χ. ELE (βλέπε Σχήμα 5.4 για την κατάσταση λειτουργίας).



Σχήμα 5.6: μετατόπιση 325 σεισμικών επικέντρων (σε km) από τον κατάλογο του 2005 μετά από χειρονακτική διόρθωση/προσθήκη χρόνων άφιξης (*χωρίς* χρήση της μεθόδου των κύριων γεγονότων). Για ένα μεγάλο πλήθος γεγονότων το αρχικό επίκεντρο (από τους αυτόματα προσδιορισμένους χρόνους άφιξης) βρισκόταν κατά περίπου 4km πιο μακριά από το πραγματικό προς τυχαία κατεύθυνση ενώ το θεωρητικό σφάλμα θέσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5_A, αν και για μεγαλύτερο δείγμα γεγονότων, φθάνει το πολύ μέχρι 3km με το μεγαλύτερο πλήθος γεγονότων να έχει σφάλμα από 1km έως 1.5km. Αυτό δημιουργεί τη διασπορά στα επίκεντρα των σμηνοσεισμών του Σχήματος 5.9_A.

αναμενόμενο χρόνο άφιξης, ο οποίος θα πρέπει να προσεγγίζει τον πραγματικό. Με αυτόν τον τρόπο όταν ξεκινήσει η βασική διαδικασία της μεθόδου των κύριων γεγονότων, δηλαδή η αναζήτηση του όμοιου τμήματος των κυμάτων P ανάμεσα στο κύριο και το εξαρτημένο γεγονός, θα είναι γνωστό πού περίπου πρέπει να γίνει η αναζήτηση και δεν θα χρειάζεται να εξεταστεί όλη η κυματομορφή από την αρχή. Σημειώνεται ότι τα υπόλοιπα μπορούν να αφαιρεθούν *και* στις περιπτώσεις που υπάρχουν διαθέσιμοι χρόνοι άφιξης φάσεων με κανονικά βάρη, οπότε σε κάθε περίπτωση ο αρχικός χρόνος άφιξης που χρησιμοποιείται για τα εξαρτημένα γεγονότα θα είναι ο *θεωρητικά* αναμενόμενος (*calculated travel-time*).

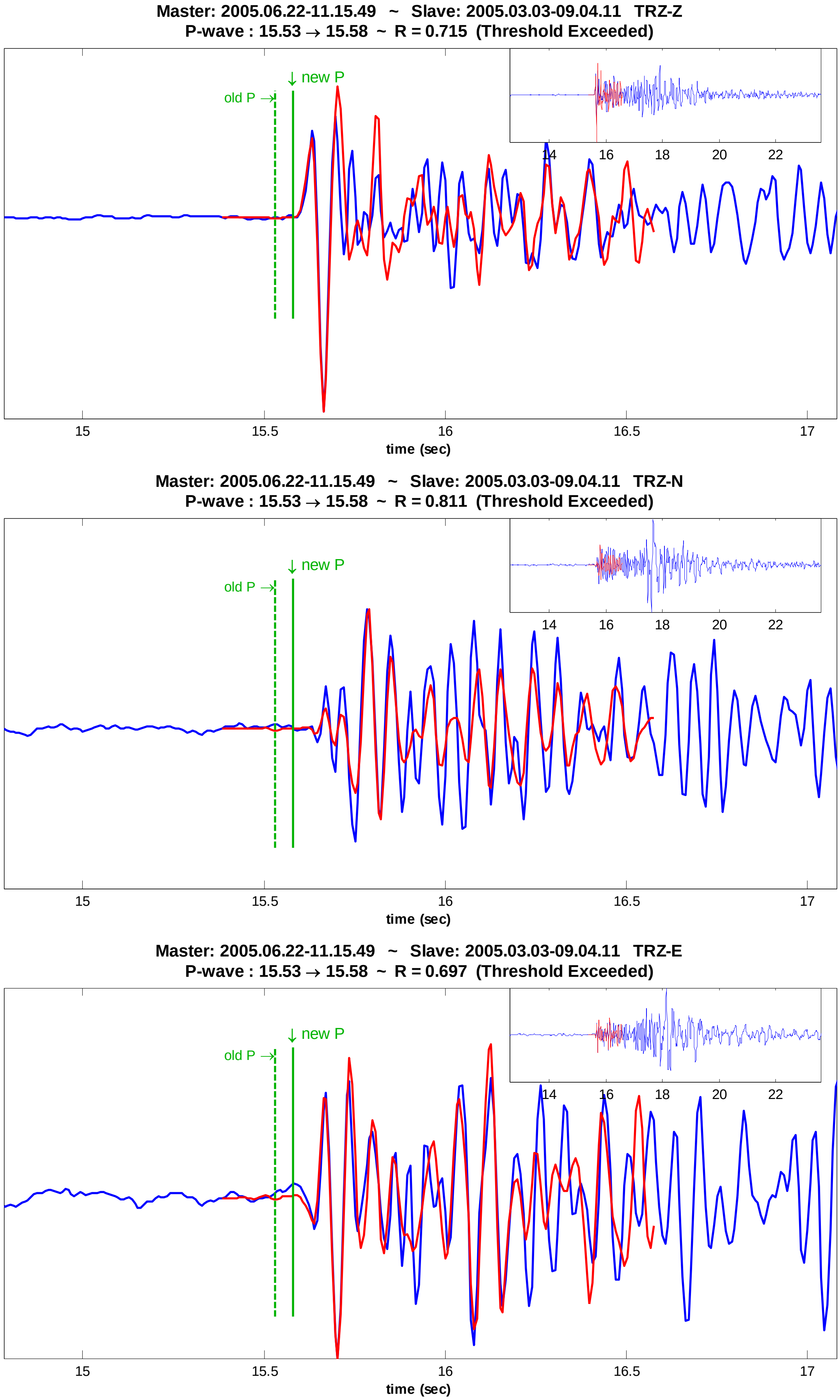
Η εκ των υστέρων επεξεργασία αναφέρεται στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων πριν από την καταχώρηση των χρόνων άφιξης στο αρχείο φάσεων και στον καθορισμό του βάρους της κάθε φάσης. Ένα κριτήριο καλής ποιότητας είναι η ταύτιση (ή μικρή διαφορά) των χρόνων άφιξης που προέκυψαν από τη σύγκριση όλων των διαθέσιμων κοινών *εν λειτουργία* συνιστωσών στον κάθε σταθμό. Ένα άλλο σημαντικό κριτήριο είναι η *διαθεσιμότητα* κοινής εν λειτουργία *κατάκόρυφης* συνιστώσας για τα P-κύματα και κοινών εν λειτουργία *οριζόντιων* συνιστωσών για τα S-κύματα. Για παράδειγμα, σε περίπτωση που η Z-συνιστώσα έχει υψηλό επίπεδο θορύβου ή δεν λειτουργεί καθόλου για το κύριο ή το εξαρτημένο γεγονός, θα πρέπει το βάρος που θα μπει στα P-κύματα να είναι χαμηλό. Αν την ημέρα που συνέβη κάποιο κύριο (*master*) γεγονός η Z-συνιστώσα ενός σταθμού λειτουργούσε, και άρα η άφιξη του κύματος P ήταν ευδιάκριτη, οπότε έχει μεγάλο βάρος, αλλά σε ένα όμοιό του, εξαρτημένο (slave) γεγονός, η Z-συνιστώσα του ίδιου σταθμού εμφάνιζε βλάβη την ημέρα εκείνη σύμφωνα με τον πίνακα της κατάστασης των σταθμών που έχει κατασκευαστεί (Σχήμα 5.4), δε μπορούν να συγκριθούν οι κυματομορφές της Z-συνιστώσας, καθώς δεν είναι διαθέσιμη εν λειτουργία *από κοινού* και για τα 2 γεγονότα στον συγκεκριμένο σταθμό, ενώ εάν υπάρχουν άλλες διαθέσιμες συνιστώσες (οριζόντιες) και εντοπιστεί μέσω αυτών ο χρόνος άφιξης των P, το βάρος που θα τεθεί πρέπει να είναι χαμηλό, λόγω έλλειψης της Z-συνιστώσας που είναι ουσιαστικής σημασίας για τα P κύματα. Αντίστοιχα, εάν υπάρχει πρόβλημα στις 2 οριζόντιες συνιστώσες, οι οποίες κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό της άφιξης των κυμάτων S, το βάρος που θα τεθεί στα S πρέπει να είναι χαμηλότερο.

Τέλος, σημαντικό ρόλο παίζει η τιμή του συντελεστή συσχέτισης ανάμεσα στη (μικρού μήκους) χρονοσειρά M(t) του κύριου γεγονότος και στο όμοιο με αυτή τμήμα στη (μεγάλου μήκους) χρονοσειρά $S_L(t)$ του εξαρτημένου γεγονότος. Αν ο συντελεστής έχει πολύ χαμηλή τιμή (π.χ. $C<0.5$) θα πρέπει να απορριφθεί η μέτρηση, ενώ για ενδιάμεσες τιμές (π.χ. $0.5<C<0.75$) θα πρέπει το βάρος της συγκεκριμένης φάσης να υποβαθμιστεί και η διατήρηση ή όχι της μέτρησης να εξαρτηθεί κυρίως από τα υπόλοιπα κριτήρια (π.χ. την ύπαρξη Z-συνιστώσας για τα P κύματα). Άλλο κριτήριο για το βάρος της μέτρησης σε περίπτωση ενός μέσου συντελεστή συσχέτισης είναι η διαφορά ανάμεσα στον χρόνο άφιξης που υπολογίστηκε από τη μέθοδο των κύριων γεγονότων και στον παλαιό χρόνο άφιξης, εάν υπήρχε τέτοια καταγραφή, ή από τον κατά προσέγγιση χρόνο άφιξης που προκύπτει όταν τεθεί ένας τυχαίος χρόνος στη συγκεκριμένη φάση με μηδενικό βάρος (δηλαδή βάρος 4 για το HYPO71) και αφαιρεθεί από αυτόν το αντίστοιχο υπόλοιπο (*residual*) που δίνει το HYPO71 για τον συγκεκριμένο σταθμό και τη φάση P ή S. Εάν η χρονική διαφορά αυτή είναι σχετικά μεγάλη τότε εξασθενεί το βάρος της συγκεκριμένης μέτρησης η οποία μπορεί ή πρέπει να απορριφθεί.

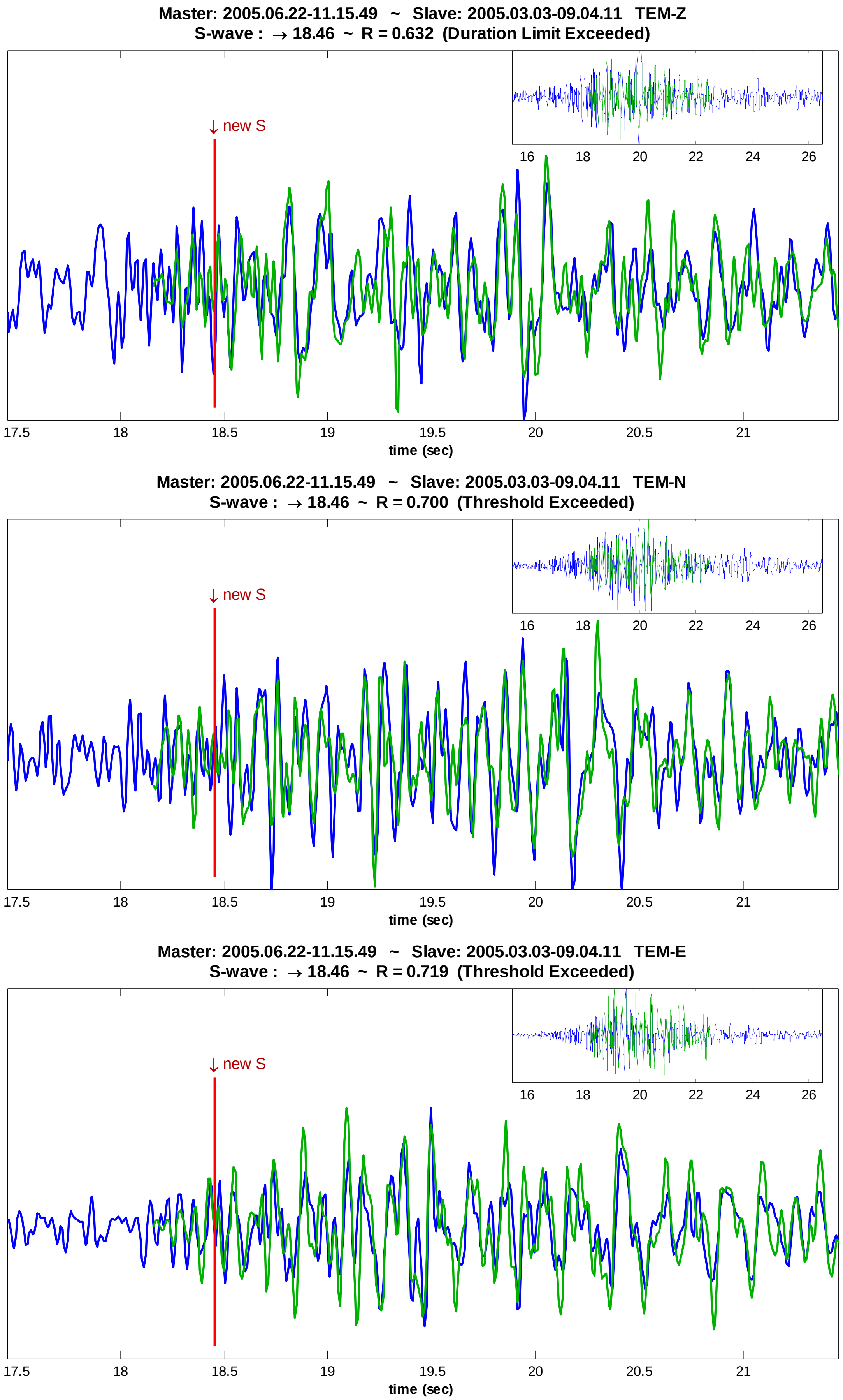
Όταν διορθωθούν οι χρόνοι άφιξης σε όλους τους σταθμούς μέσα στο αρχείο φάσεων ενός εξαρτημένου γεγονότος, επανεκτελείται το HYPO71 για αυτό το γεγονός και γίνεται έλεγχος στο αρχείο .RMS για πιθανά μεγάλα σφάλματα. Στην περίπτωση που το σφάλμα RMS είναι ιδιαίτερα μεγάλο (μεγαλύτερο π.χ. από 0.5sec) πιθανόν να υπάρχει σφάλμα στον προσδιορισμό του χρόνου άφιξης σε κάποιον σταθμό. Σε μια τέτοια περίπτωση θα πρέπει να εντοπιστεί ο σταθμός και να μηδενιστεί το βάρος των χρονικών αφίξεων P ή S σε αυτόν τον σταθμό.

Όταν γίνει η πρώτη διόρθωση στα αρχεία φάσεων, τα διορθωμένα, πλέον, εξαρτημένα γεγονότα (*slave events*) μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τη σειρά τους ως *κύρια* γεγονότα (*master events*) και μέσω αυτών να γίνει διόρθωση σε έμμεσους συγγενείς των αρχικών κύριων γεγονότων. Εάν η διαδικασία λειτουργεί σωστά για τα πρώτα κύρια γεγονότα, δεν υπάρχει λόγος να μην λειτουργήσει σωστά σε δεύτερο βαθμό. Αυτό είναι κάτι που θα πρέπει στο τέλος να ελεγχθεί, κυρίως από τις υποκεντρικές θέσεις και τα σφάλματα των εκάστοτε εξαρτημένων γεγονότων, και φυσικά να γίνεται γνωστό ποια γεγονότα διορθώθηκαν στο κάθε στάδιο. Είναι απαραίτητο η διαδικασία αυτή να επαναληφθεί σε τόσα στάδια όσα απαιτούνται εωσότου να μην υπάρχουν άλλα (όμοια) εξαρτημένα γεγονότα.

Όπως περιγράφθηκε στο Κεφάλαιο 3 ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η συσταδοποίηση είναι ανάλογος και περιλαμβάνει την έννοια των έμμεσων συγγενών. Η μέθοδος των κύριων γεγονότων για συγγενείς μεγαλύτερου βαθμού επεκτείνει την χωρική έκταση των συστάδων κατά έναν ακόμα τρόπο: επειδή η αναζήτηση του όμοιου τμήματος των κυματομορφών γίνεται χωριστά για τα P και τα S κύματα, όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.36, 3.37 του Κεφαλαίου 3 δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός στη διαφορά των χρόνων άφιξης S-P. Όσο διευρύνεται η έννοια της ομοιότητας σε επίπεδο έμμεσων συγγενών, η διαφορά S-P μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά σε σύγκριση με την αντίστοιχη διαφορά των αρχικών κύριων γεγονότων. Έτσι, παρ’ ότι στην ουσία η μέθοδος των κύριων γεγονότων (*master events*) είναι μια *αυτόματη συστηματική επανάληψη* των χειρονακτικά προσδιορισμένων χρόνων άφιξης (*manual picking*) των κύριων γεγονότων στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές οι οποίες εντοπίζονται βάσει της ομοιότητας ανάμεσα στα σήματα των κύριων/εξαρτημένων γεγονότων, τα υπόκεντρα που προκύπτουν από τις λύσεις αυτές *δεν* συμπίπτουν απόλυτα με τα υπόκεντρα των κύριων γεγονότων: βρίσκονται μεν στην ίδια στενή περιοχή αλλά, κυρίως λόγω της διαφοράς στους χρόνους S-P μεταξύ του κύριου και εξαρτημένου γεγονότος σε κάθε σταθμό και ίσως σε κάποιες περιπτώσεις λόγω της έλλειψης δεδομένων από κάποιον σταθμό, τα υπόκεντρα των εξαρτημένων γεγονότων καλύπτουν έναν χώρο που σκιαγραφεί με στατιστικό τρόπο τον όγκο στον οποίο σημειώθηκαν οι διαρρήξεις, δηλαδή ένα κλείθρο (*asperity*), εφόσον υπάρχει ένα επαρκές πλήθος όμοιων σεισμών.



Σχήμα 5.7: Από την εφαρμογή της μεθόδου των κύριων γεγονότων: αλλαγή χρόνου άφιξης P κυμάτων στον σταθμό TRZ



Σχήμα 5.8: Από την εφαρμογή της μεθόδου των κύριων γεγονότων: προσθήκη χρόνου άφιξης S κυμάτων στον σταθμό TEM

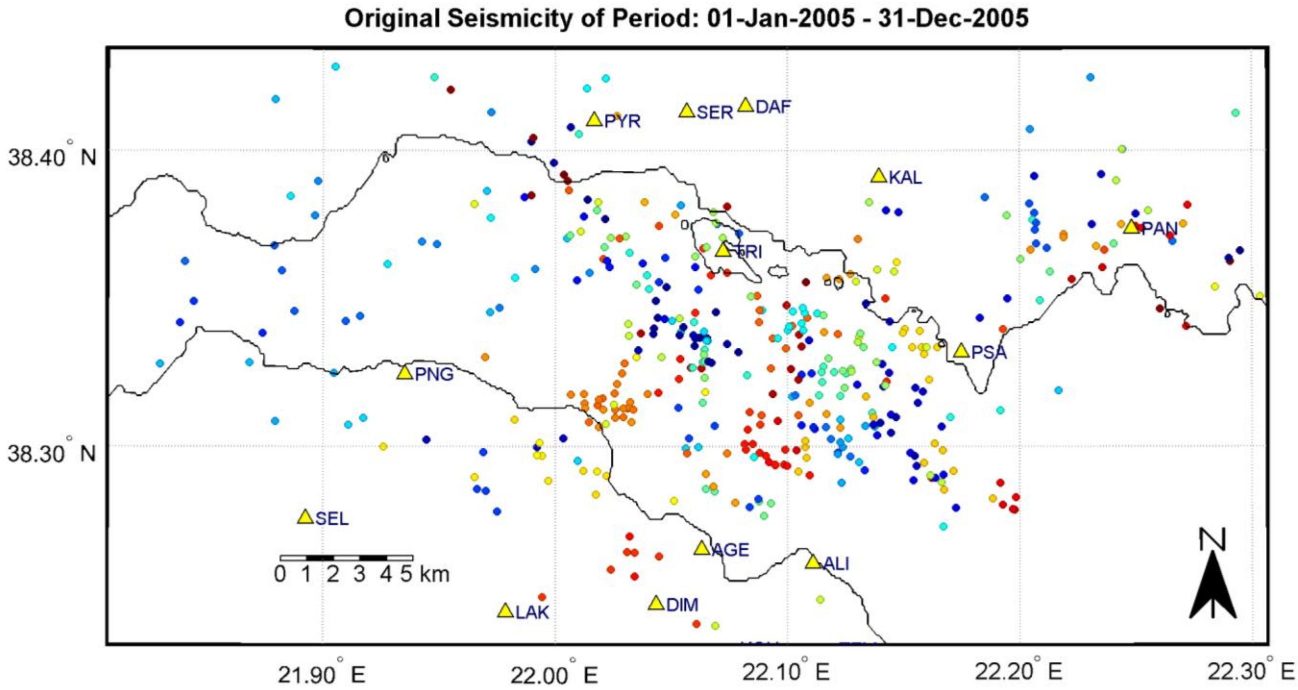
Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία θα έχει δημιουργηθεί πλέον ένας διορθωμένος κατάλογος ο οποίος περιλαμβάνει τα αρχικά κύρια γεγονότα καθώς και όλα τα εξαρτημένα γεγονότα που έχουν άμεση ή έμμεση συγγένεια με τα αρχικά κύρια γεγονότα. Όλα αυτά ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών, μερικές από τις οποίες, λόγω της αρχικής επιλογής που έχει γίνει στη σεισμικότητα προκειμένου να κατασκευαστεί ο πίνακας συσχέτισης/ομοιότητας, περιέχουν μόνο 2 γεγονότα (*doublet*). Προκειμένου να εμπλουτιστεί ο διορθωμένος κατάλογος μπορεί να κατασκευαστεί ένας μη-τετραγωνικός πίνακας συσχέτισης (ή ομοιότητας) ο οποίος θα έχει για γραμμές τα διορθωμένα κύρια/εξαρτημένα γεγονότα και για στήλες **όλα** τα υπόλοιπα γεγονότα του καταλόγου. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να γίνει διόρθωση σε πρώτο βαθμό (μόνο) όσων γεγονότων βρεθούν να είναι όμοια με κάποια από τα ήδη διορθωμένα τα οποία θα χρησιμοποιηθούν σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας ως κύρια γεγονότα.

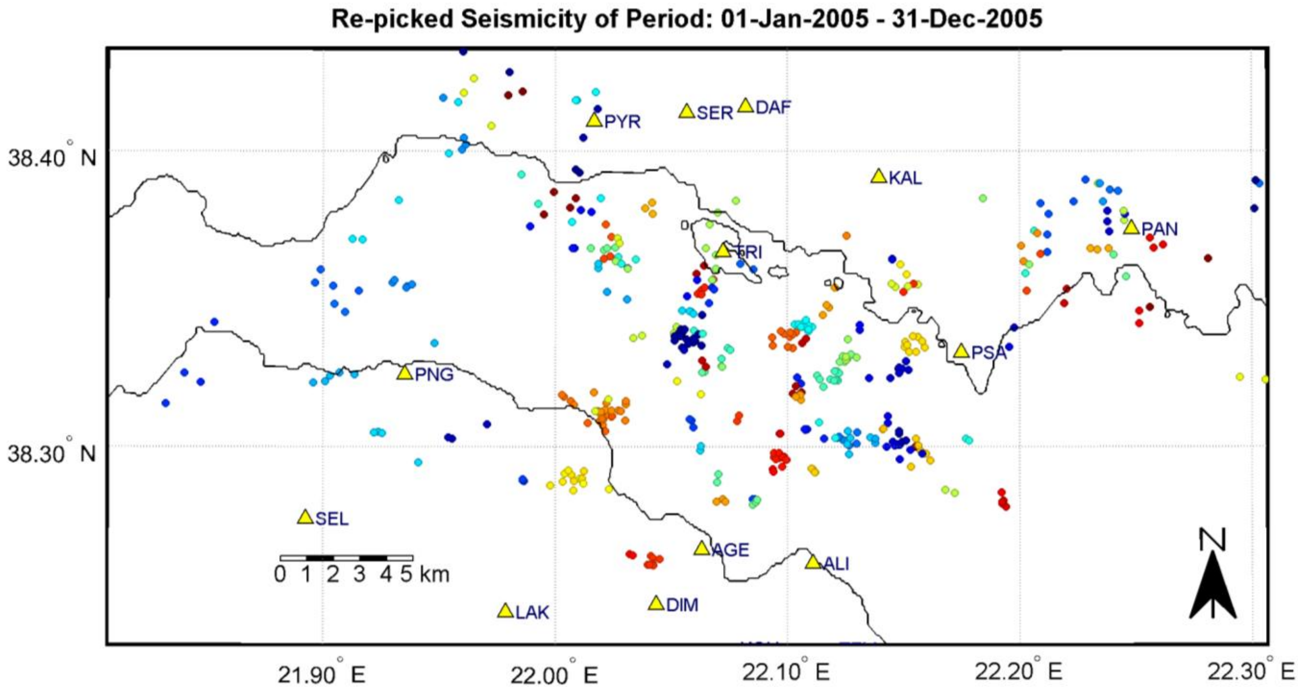
Μπορεί στη συνέχεια να κατασκευαστεί ένας ακόμα μη-τετραγωνικός πίνακας συσχέτισης και έτσι να επεκταθεί η διόρθωση σε έμμεσους συγγενείς κ.ο.κ. Μπορούν επίσης να συμπεριληφθούν ως κύρια γεγονότα (*master events*) σε αυτόν τον πίνακα, σεισμοί από τον κατάλογο των ετών 2000-2001 που έχουν προσδιοριστεί με καλή ακρίβεια και που ανήκουν, κατά προτίμηση, σε κάποιες συστάδες σμηνοσεισμών από αυτές που εντοπίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, αν και αυτό δεν είναι απαραίτητη προϋπόθεση. Ο μόνος λόγος για τον οποίο δεν κατασκευάζεται εξ' αρχής ένας τετραγωνικός πίνακας ο οποίος να περιέχει όλα τα γεγονότα του καταλόγου είναι τεχνικός και έχει να κάνει με περιορισμούς στη μνήμη ενώ έχει βέβαια αντίκτυπο και στον χρόνο επεξεργασίας.

Μια πιο ολοκληρωμένη διόρθωση μπορεί να γίνει με την κατασκευή ενός αντίστοιχου μη-τετραγωνικού πίνακα από σύγκριση κυματομορφών σε έναν άλλον σταθμό. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εντοπιστούν γεγονότα με κοντινά υπόκεντρα αλλά διαφορετικούς μηχανισμούς γένεσης. Από τη σκοπιά ενός σταθμού 2 γεγονότα αυτής της κατηγορίας μπορεί να εμφανίζουν ισχυρότερη ομοιότητα απ' ότι σε έναν άλλο σταθμό, ανάλογα με το αζιμούθιο και τη γωνία εκκίνησης που του αντιστοιχεί.

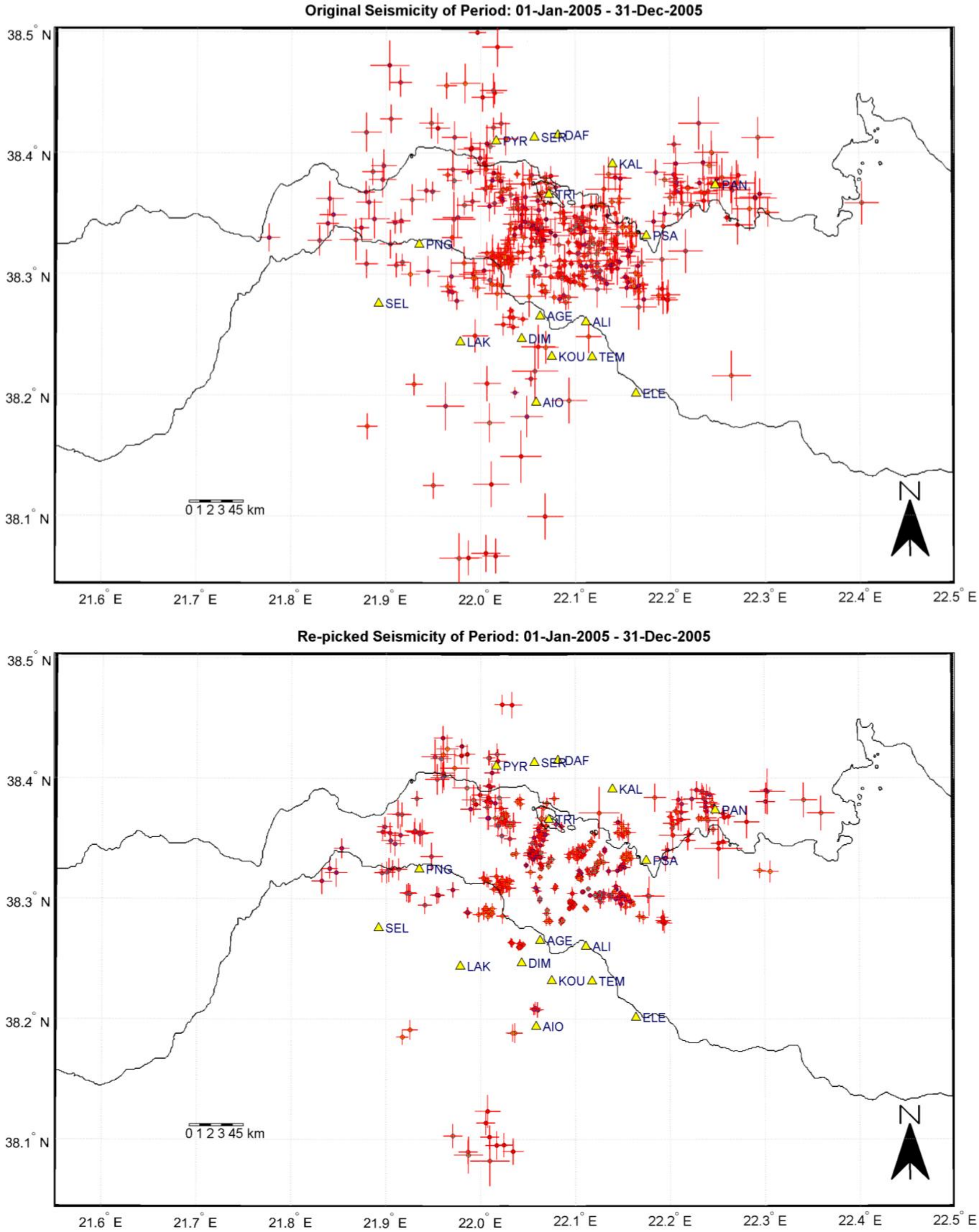
Μπορεί να γίνει αξιολόγηση της μεθόδου των κύριων γεγονότων από τα αποτελέσματά της (Σχήματα $5.5_{B,Δ,ΣΤ}$, 5.9_{B}, 5.10_{B},) αλλά και από την επίδοση που έχει στον κάθε κατάλογο, δηλαδή από το πηλίκο του αριθμού των εξαρτημένων γεγονότων που διορθώθηκαν αυτόματα προς τον αριθμό των κύριων γεγονότων τα οποία χρειάστηκε να ελεγχθούν με χειρονακτικό τρόπο. Για τα δεδομένα του 2005 από ένα σύνολο 180 κύριων γεγονότων (1 ανά συστάδα σμηνοσεισμών) διορθώθηκαν 328 εξαρτημένα γεγονότα (επίδοση ~182%). Για τα δεδομένα του 2006 οι αντίστοιχοι αριθμοί ανέρχονται σε 361 κύρια γεγονότα και 1261 διορθωμένα εξαρτημένα γεγονότα (επίδοση ~350%). Η υψηλότερη επίδοση της μεθόδου για τα δεδομένα του 2006 οφείλεται κατά κύριο λόγο στη μεγαλύτερη χωρική πυκνότητα των σεισμών που συνέβησαν στο έτος αυτό, όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, σε αντίθεση με τη σχετικά διάσπαρτη εικόνα της σεισμικότητας του 2005.

Με την κατασκευή του μη-τετραγωνικού πίνακα που προαναφέρθηκε, τα δυνάμει διορθώσιμα γεγονότα ανέρχονται σε 221 από τα 4330 (5.1%) του καταλόγου του 2005 (εκτός της Ομάδας C) και σε 321 γεγονότα από τα 4428 (7.2%) του καταλόγου του 2006 (εκτός των 3 ομάδων D,E,F που θα αναφερθούν παρακάτω), με χρήση 2130 κύριων γεγονότων (508 από το 2005 και 1622 από το 2006) και τιμή κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$=0.5 στον αντίστοιχο πίνακα ομοιότητας. Αν η τιμή κατωφλίου πέσει σε $\mathbf{C_{th}}$=0.35 (που είναι αποδεκτό για τον πίνακα ομοιότητας) τότε τα νούμερα ανέρχονται σε 330 (7.6%) και 539 (12.2%) για τους καταλόγους των ετών 2005 και 2006 αντίστοιχα. Στην εργασία αυτή έχει γίνει μόνο η πρώτη διόρθωση με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων που αφορά στις επιλεγμένες ομάδες σεισμών (Ομάδα C για το 2005 και ομάδες D,E,F για το 2006 που θα αναφερθούν σε επόμενη ενότητα) καθώς αυτά θα χρησιμεύσουν στον επαναπροσδιορισμό με HypoDD των επιλεγμένων ομάδων που ακολουθεί ευθύς αμέσως.





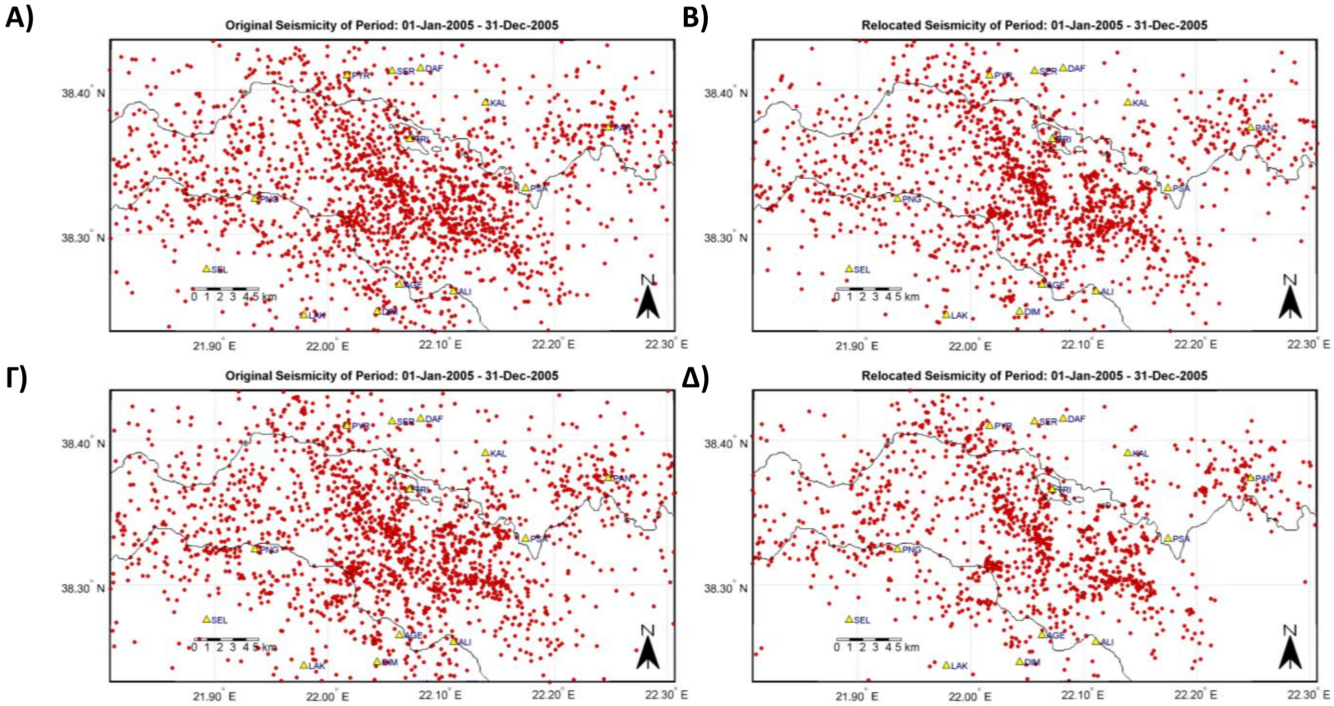
Σχήμα 5.9: Αρχικά επίκεντρα (A) σεισμών της Ομάδας C και διορθωμένα (B) με χειρονακτικό καθορισμό χρόνων άφιξης (*manual picking*) και με τη βοήθεια της μεθόδου των *κύριων γεγονότων*. Με τα διαφορετικά χρώματα διακρίνονται τα γεγονότα που ανήκουν σε διαφορετικές συστάδες σμηνοσεισμών (*Multiplet Clusters*).



Σχήμα 5.10: Σφάλματα οριζόντιας θέσης για τα αρχικά (Α) και τα *διορθωμένα* (Β) επίκεντρα σεισμών των Σχημάτων 5.9_A και 5.9_B αντίστοιχα στην ευρύτερη περιοχή. Σε αυτό το σχήμα φαίνονται και κάποιοι σμηνοσεισμοί στα Νότια (εκτός δικτύου), οι θέσεις των οποίων βελτιώθηκαν σημαντικά.

5.4 ~ *Επαναπροσδιορισμός με HypoDD (Ομάδα C)*

Η διαδικασία επαναπροσδιορισμού με το πρόγραμμα HypoDD είναι όμοια με αυτή που περιγράφθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για τη σεισμικότητα των ετών 2000-2001. Μπορεί να γίνει επαναπροσδιορισμός των επιλεγμένων γεγονότων της Ομάδας C ξεχωριστά ή σε συνδυασμό με την υπόλοιπη σεισμικότητα του 2005 στην περιοχή μελέτης και μπορεί επίσης να εξεταστεί το κατά πόσο ή όχι ωφέλησε η διόρθωση των χρόνων άφιξης με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων, έστω και αν διορθώθηκε μόνο ένα υποσύνολο των γεγονότων της Ομάδας C.



Σχήμα 5.11: επαναπροσδιορισμός **πλήρους** σεισμικότητας 2005: Α) *Αρχικός* κατάλογος (2367 γεγονότα), Β) επαναπροσδιορισμός με HypoDD με δεδομένα *αρχικού* καταλόγου και ετεροσυσχέτισης (1892 γεγονότα), Γ) *Διορθωμένος* κατάλογος με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων (*master events*) (2387 γεγονότα), Δ) επαναπροσδιορισμός με HypoDD με δεδομένα *διορθωμένου* καταλόγου και ετεροσυσχέτισης (1539 γεγονότα). Στην είσοδο του HypoDD έχει δοθεί περίπου ο ίδιος αριθμός δεδομένων και στις 2 περιπτώσεις (4680 και 4669 γεγονότα αντίστοιχα) αλλά οι αριθμοί αυτοί μεταβάλλονται στα διάφορα στάδια επεξεργασίας των δεδομένων από το HypoDD και ένα πλήθος δεδομένων με ασθενή σύνδεση με τα υπόλοιπα αφαιρείται από τον κατάλογο. (για λεπτομέρειες βλέπε κείμενο)

Όπως αναφέρεται στη λεζάντα του Σχήματος 5.11, οι αριθμοί σεισμών στο κάθε επιμέρους σχήμα διαφέρουν. Αυτό είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών συνδέσεων που έχουν τα γεγονότα μεταξύ τους πριν και μετά τη διόρθωση με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων. Το πρόγραμμα PH2DT που αναλαμβάνει να δημιουργήσει αυτές τις συνδέσεις ανάλογα με τους διαφορικούς χρόνους διαδρομής από τα δεδομένα των δύο καταλόγων (πριν και μετά τη διόρθωση) ακόμα και με τις ίδιες παραμέτρους θα δώσει διαφορετικό βάρος σε ορισμένες συνδέσεις όταν τα δεδομένα διαφέρουν. Αν και έχουν καθοριστεί με αυτόματο τρόπο οι χρόνοι άφιξης στον αρχικό κατάλογο, παρ' όλα αυτά τα αρχικά δεδομένα έχουν μια ομοιομορφία καθώς έχει χρησιμοποιηθεί ο ίδιος αυτόματος αλγόριθμος για τα γεγονότα της περιόδου αυτής και τα όποια σφάλματα είναι κατά μέσο όρο κοινά για όλα τα γεγονότα. Με τη διόρθωση των χρόνων διαταράσσεται τοπικά αυτή η ομοιομορφία, στις περιοχές όπου βρίσκονταν τα κύρια γεγονότα και πιθανόν σε κάποιες από τις αρχικές συνδέσεις να μειωθεί αρκετά το βάρος ώστε ένα πλήθος μη-διορθωμένων γεγονότων να βγει εκτός διαδικασίας επαναπροσδιορισμού, είτε από την αρχή είτε σε κάποιο ενδιάμεσο στάδιο.

Σημαντικό ρόλο παίζει ο αριθμός των λεγόμενων «αερο-σεισμών» (*air-quakes ή AQ*), δηλαδή γεγονότων που σε κάποιο στάδιο της διαδικασίας επαναπροσδιορισμού βρέθηκαν να έχουν αρνητικό βάθος, δηλαδή να βρίσκονται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Όταν τα δεδομένα περιέχουν εν γένει σημαντικά σφάλματα, όπως όλα τα μη-διορθωμένα γεγονότα του καταλόγου αυτού, ο αριθμός των AQ αυξάνεται. Κατά τη διαδικασία επαναπροσδιορισμού με HypoDD με τα δεδομένα του αρχικού καταλόγου προέκυψαν 221 AQ ενώ με τα δεδομένα του διορθωμένου καταλόγου (και με διαφορετική παραμετροποίηση τόσο στο HypoDD όσο και στο PH2DT) οι αερο-σεισμοί ανήλθαν σε 293 (περισσότεροι από πριν). Χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραμέτρους για τα δεδομένα του διορθωμένου καταλόγου με αυτές που προτιμήθηκαν στην περίπτωση του αρχικού καταλόγου, ο αριθμός των AQ ανέρχεται σε 250, που είναι και πάλι μεγαλύτερος.

Όταν σε κάποιο βήμα εμφανίζονται AQ τότε το βήμα επαναλαμβάνεται αφού πρώτα αφαιρεθούν τα προβληματικά δεδομένα. Έτσι τα 9 βήματα της διαδικασίας αυτής έγιναν 21, αφού σε 12 από αυτά βρέθηκε τουλάχιστον ένας AQ. Στον επαναπροσδιορισμό της Ομάδας C με διορθωμένο κατάλογο βρέθηκαν 14 AQ ενώ με τον αρχικό κατάλογο 15. Υπενθυμίζεται, ωστόσο, πως τα δεδομένα της Ομάδας C έχουν επιλεχθεί με κριτήριο μικρού σφάλματος και μεγάλου αριθμού φάσεων, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα γεγονότα του πλήρους καταλόγου.

Σημειώνεται πως η παραμετροποίηση γίνεται με κριτήριο τον βαθμό συντήρησης (*Condition Number* ή CND) ο οποίος πρέπει να είναι μεταξύ 40-80 (*Waldhauser, 2000*), με τη μετατόπιση του κεντροειδούς της κατανομής των υποκέντρων ως προς την αρχική του θέση (*Origin Shift ή OS*) που πρέπει να είναι μικρή, του αριθμού αερο-σεισμών, ο οποίος πρέπει γενικά να είναι μικρός ή στην καλύτερη περίπτωση μηδενικός σε όλα τα βήματα, και βέβαια με επίβλεψη της οπτικής εικόνας που παρουσιάζουν τα επίκεντρα/υπόκεντρα στο κάθε βήμα της διαδικασίας επαναπροσδιορισμού. Οι παράμετροι αυτές εκτιμώνται για την κάθε περίπτωση δεδομένων ξεχωριστά και περιέχουν οπωσδήποτε έναν υποκειμενικό παράγοντα. Από ένα πλήθος πειραμάτων με διαφορετικές παραμέτρους επιλέγονται τελικά αυτές που δίνουν το βέλτιστο, βάσει των προηγούμενων κριτηρίων, αποτέλεσμα. Στην περίπτωση του επαναπροσδιορισμού της πλήρους σεισμικότητας του 2005 με τον (μερικώς) διορθωμένο κατάλογο, το βάρος της επιλογής δόθηκε στην εικόνα των επικέντρων αγνοώντας τον αριθμό των AQ που είναι μεγαλύτερος σε σύγκριση με τον αριθμό των AQ που προέκυψαν με τα δεδομένα του αρχικού καταλόγου.

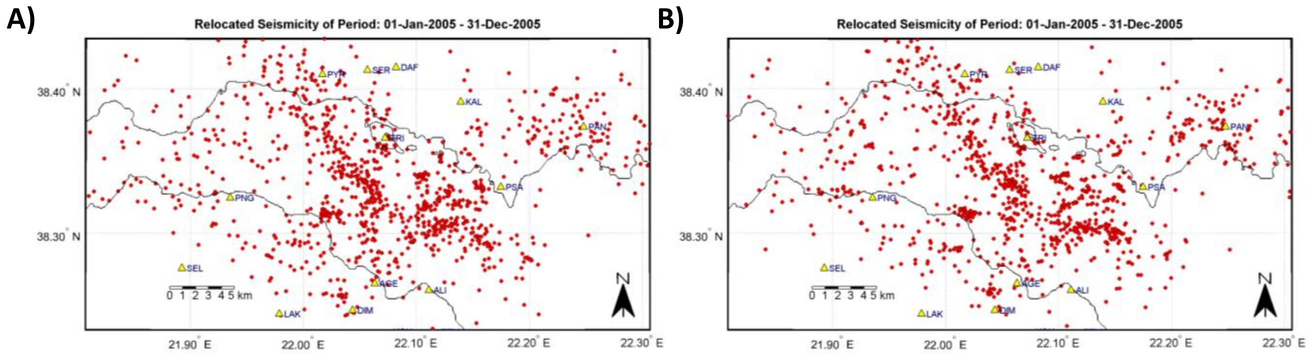
Ανάλογα με την ποιότητα των αρχικών δεδομένων υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί στις δυνατότητες του αλγορίθμου των διπλών διαφορών και στη συγκεκριμένη περίπτωση αυτή είναι η βέλτιστη εικόνα που μπορεί να εξαχθεί με τα υπάρχοντα δεδομένα για το 2005. Παρά το γεγονός ότι η σεισμικότητα του έτους αυτού παρουσιάζει μεγάλη χωρική διασπορά, είναι βέβαιο ότι εάν διορθωθεί ένα μεγαλύτερο ποσοστό του καταλόγου και επαναληφθεί ο επαναπροσδιορισμός με HypoDD η νέα εικόνα θα έχει ακόμη περισσότερες λεπτομέρειες. Εντύπωση προκαλεί ο αριθμός γεγονότων που τέθηκαν εκτός διαδικασίας επαναπροσδιορισμού πριν καν γίνει το πρώτο βήμα. Σχεδόν το 50% του αρχικού (ή διορθωμένου) καταλόγου απορρίφθηκε, πιθανόν λόγω κακής σύνδεσης ανάμεσα στα γεγονότα. Επίσης η «καθαρότητα» της εικόνας των επικέντρων μετά τον επαναπροσδιορισμό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην περεταίρω μείωση του αριθμού των γεγονότων που διατηρήθηκαν έως το τελευταίο βήμα σε σχέση με το πλήθος τους πριν από το πρώτο βήμα. Η μείωση αυτή ήταν περίπου κατά 20% και 36% για τα δεδομένα του αρχικού και του διορθωμένου καταλόγου αντίστοιχα ενώ τελικά επαναπροσδιορίστηκε περίπου το 40% και 32% των αρχικών δεδομένων από τον κάθε κατάλογο.

Χάριν σύγκρισης αναφέρεται ότι κατά τον επαναπροσδιορισμό της σεισμικότητας των ετών 2000-2001 με δεδομένα του πλήρους καταλόγου (8117 σεισμοί) και ετεροσυσχέτισης συνδυασμένα από τις Ομάδες A και B, ο αριθμός AQ ανήλθε σε 69, πριν από το πρώτο βήμα της διαδικασίας υπήρχαν 5954 γεγονότα (μείωση κατά ~27%) ενώ μετά το πέρας του τελευταίου βήματος απέμειναν 5597 γεγονότα (μείωση κατά 6%). Οι αριθμοί αυτοί, αν και δεν είναι άμεσα συγκρίσιμοι λόγω της διαφορετικής παραμετροποίησης, δείχνουν τη διαφορά της ποιότητας ανάμεσα στους 2 αυτούς καταλόγους. Τονίζεται ότι τα αρχικά δεδομένα καταλόγου από το 2000-2001 (8117 γεγονότα) ήταν κατά 73% περισσότερα από τα δεδομένα του 2005 (4669-4680 γεγονότα) και πως στον πρώτο κατάλογο

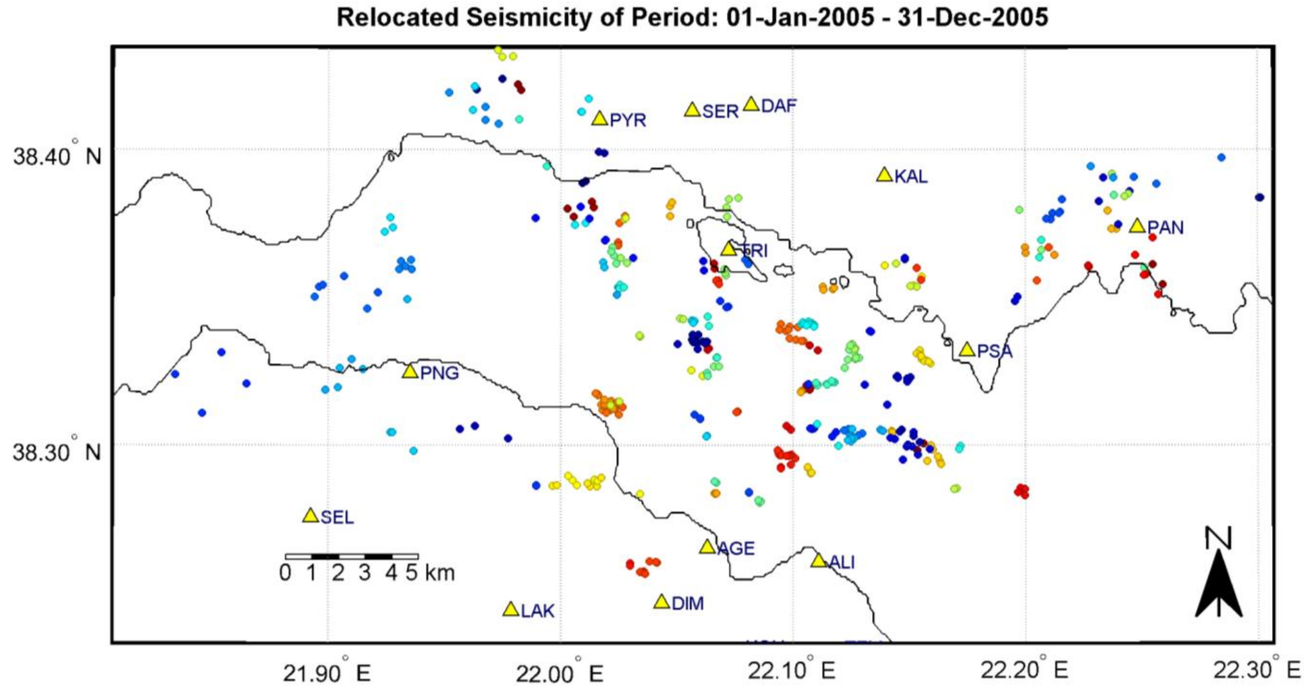
(2000-2001) σχηματίστηκαν 1347693 ζεύγη διαφορικών χρόνων (αθροιστικά από P και S) ενώ στον δεύτερο κατάλογο (2005) σχηματίστηκαν 154447 (στα μη-διορθωμένα δεδομένα) και 541529 (στα διορθωμένα δεδομένα) ζεύγη αντίστοιχα. Ο αυξημένος αριθμός δεδομένων δυσκολεύει τη διαδικασία επαναπροσδιορισμού. Έτσι αν τα δεδομένα των ετών 2000-2001 είχαν ίδια ποιότητα με αυτά του 2005 θα περίμενε κανείς τα αντίστοιχα νούμερα να ήταν πιο επιβαρυντικά στον επαναπροσδιορισμό της σεισμικότητας των ετών 2000-2001. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα πιθανόν αντικατοπτρίζει κατά τον επαναπροσδιορισμό της σεισμικότητας του 2005 ο αριθμός των AQ ο οποίος αυξήθηκε στην περίπτωση των διορθωμένων γεγονότων τόσο με τις επιλεγμένες παραμέτρους (290) όσο και με τις ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν στον μη-διορθωμένο κατάλογο (221 AQ) με τις οποίες ο αριθμός συνδέσεων που δημιουργήθηκαν ήταν 174572, περισσότερες από αυτές του αρχικού καταλόγου (154447) παρά την κοινή παραμετροποίηση.

Όπως στην περίπτωση του επαναπροσδιορισμού της σεισμικότητας των ετών 2000-2001 που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έτσι και εδώ είναι προτιμότερο ο επαναπροσδιορισμός να γίνει σε επιλεγμένα τμήματα της σεισμικότητας ξεχωριστά, δηλαδή σε ομάδες με λιγότερα αλλά καλύτερα προσδιορισμένα γεγονότα. Για το 2005 το καλύτερο που μπορεί να γίνει είναι να εξεταστεί η Ομάδα C χωριστά από την υπόλοιπη σεισμικότητα. Στο Σχήμα 5.12_A φαίνεται η εικόνα του επαναπροσδιορισμού της Ομάδας C με τα δεδομένα του αρχικού καταλόγου (που καλείται για συντομία $\mathbf{Cat_A}$) και ετεροσυσχέτισης ενώ στο Σχήμα 5.12_B είναι η εικόνα που δίνει ο διορθωμένος κατάλογος (που καλείται για συντομία $\mathbf{Cat_B}$). Εδώ τα νούμερα είναι πιο κοντά μεταξύ τους απ' ότι ήταν στις αντίστοιχες περιπτώσεις της πλήρους σεισμικότητας. Από τα 1232 γεγονότα της Ομάδας C ο επαναπροσδιορισμός ξεκίνησε με 1198 και 1202 γεγονότα για τους $\mathbf{Cat_A}$ και $\mathbf{Cat_B}$ αντίστοιχα ενώ στο πέρας της διαδικασίας απέμειναν 1142 και 1170 γεγονότα αντίστοιχα. Εδώ αν και οι διαφορές είναι μικρές, τα αποτελέσματα από πλευράς αριθμών είναι ευνοϊκότερα για τον $\mathbf{Cat_B}$. Το ίδιο συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί και από την οπτική εικόνα τόσο των Σχημάτων 5.12_A και 5.12_B όσο και των Σχημάτων 5.13 και 5.14. Υπενθυμίζεται ότι η διαφορά ανάμεσα στους $\mathbf{Cat_A}$ και $\mathbf{Cat_B}$ είναι ότι ο $\mathbf{Cat_B}$ περιλαμβάνει 508 διορθωμένα γεγονότα με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων, ένα μόλις 41% των συνολικών γεγονότων της Ομάδας C.

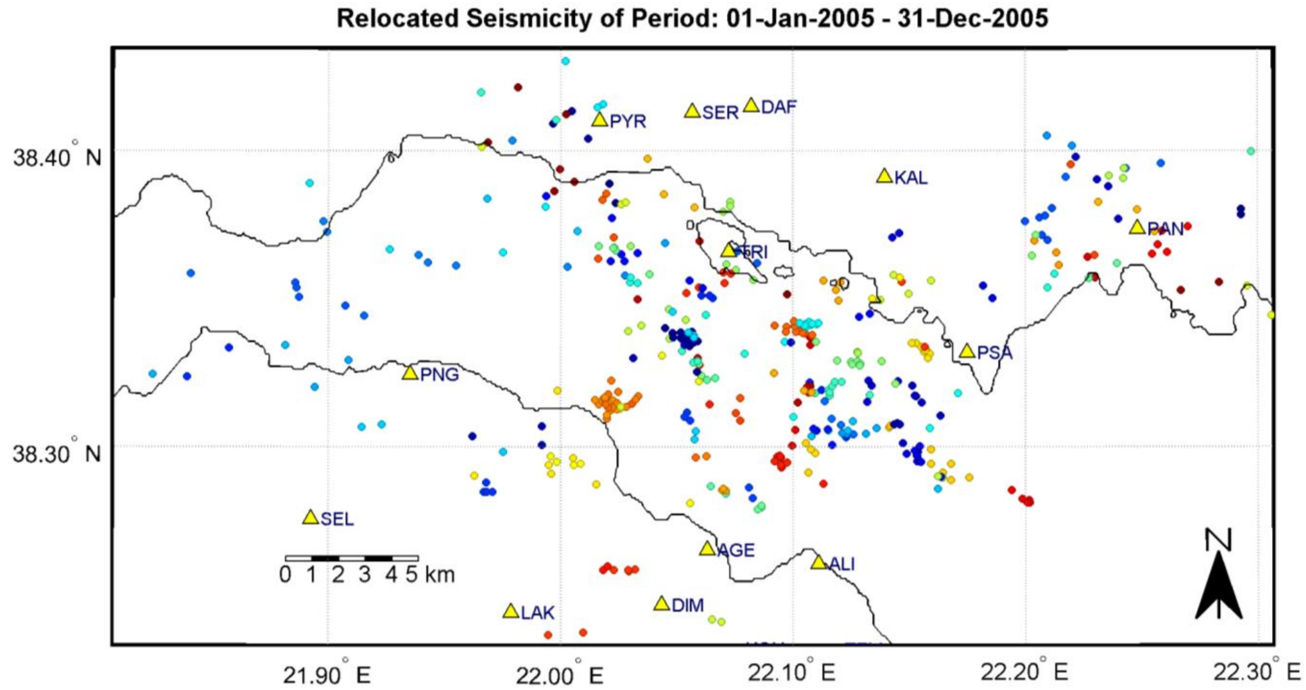
Για σύγκριση με τα Σχήματα 5.13 και 5.14 σημειώνεται πως η αντίστοιχη εικόνα για τις συστάδες σμηνοσεισμών πριν τον επαναπροσδιορισμό είναι στο Σχήμα 5.9_A για τον $\mathbf{Cat_A}$ και στο Σχήμα 5.9_B για τον $\mathbf{Cat_B}$ αντίστοιχα. Η τελική σύγκριση θα πρέπει να γίνει ανάμεσα στα Σχήματα 5.9_A και 5.14.



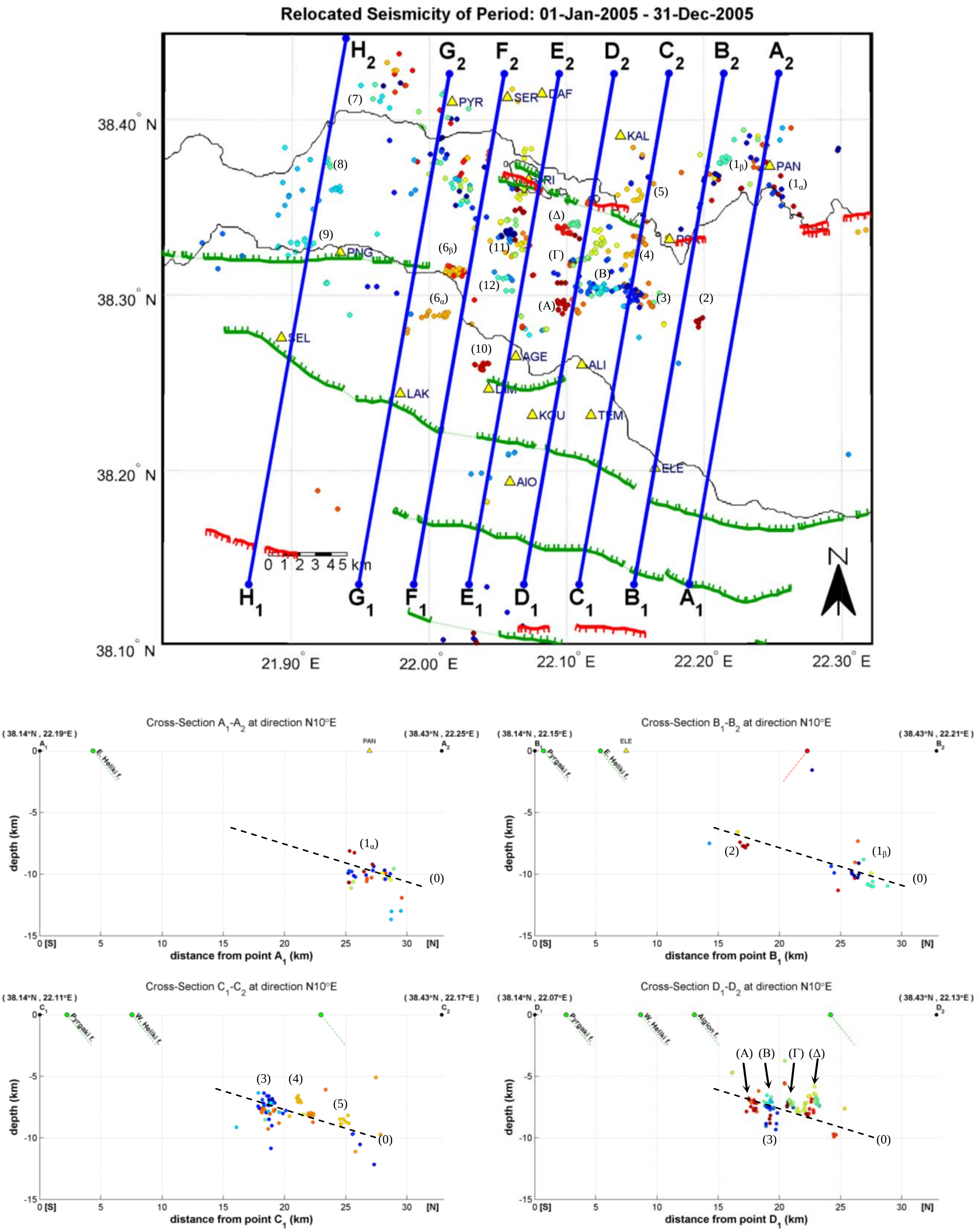
Σχήμα 5.12: Επαναπροσδιορισμός ομάδας C με HypoDD με δεδομένα καταλόγου και ετεροσυσχέτισης: A) με τη χρήση του αρχικού, μη-διορθωμένου, καταλόγου, B) με τη χρήση του διορθωμένου καταλόγου μέσω της μεθόδου των κύριων γεγονότων.



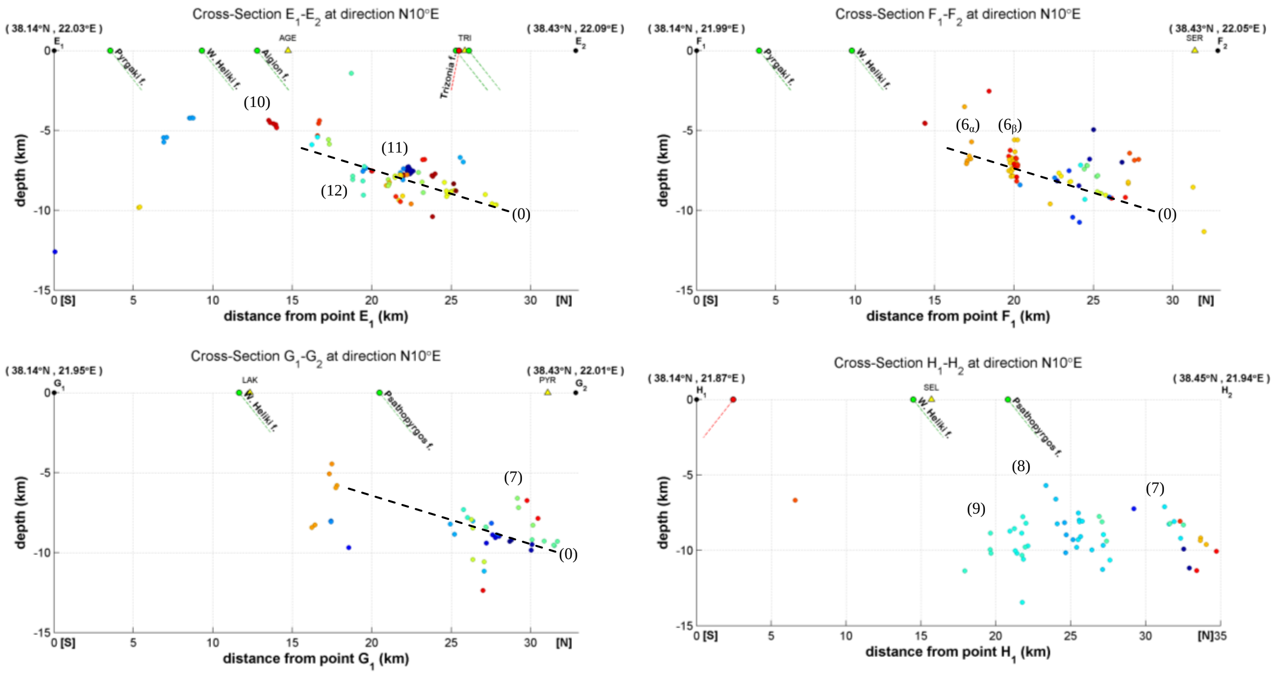
Σχήμα 5.13: Επαναπροσδιορισμένα γεγονότα με HypoDD, με χρήση δεδομένων του ***διορθωμένου*** καταλόγου και ετεροσυσχέτισης, τα οποία ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών με $\mathbf{C_{th}}$=0.50. Στα αρχικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν οι διορθωμένοι χρόνοι άφιξης που προέκυψαν από χειροδεικτικό προσδιορισμό και από τη μέθοδο των κύριων γεγονότων (Σχήμα 5.9_B). Η εικόνα παρουσιάζεται ως συνέχεια των σχημάτων 5.9_A και 5.9_B. Τα χρώματα αντιπροσωπεύουν τις διάφορες συστάδες σμηνοσεισμών είναι κοινά για τα σχήματα αυτά.



Σχήμα 5.14: Επαναπροσδιορισμένα γεγονότα με HypoDD με δεδομένα του αρχικού, ***μη-διορθωμένου*** καταλόγου και ετεροσυσχέτισης, τα οποία ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών με $\mathbf{C_{th}}$=0.50. Τα δεδομένα ετεροσυσχέτισης βοηθούν στο να γίνει ο καλύτερος δυνατός επαναπροσδιορισμός για τις συστάδες αυτές με έναν πλήρως αυτόματο τρόπο χωρίς την χειρονακτική διόρθωση των χρόνων άφιξης ή τη χρήση της μεθόδου των κύριων γεγονότων. Ωστόσο, όπως φαίνεται από τη σύγκριση με το προηγούμενο σχήμα, η διασπορά των επικέντρων των γεγονότων που ανήκουν σε κοινές συστάδες είναι μικρότερη στο προηγούμενο σχήμα αναδεικνύοντας τη σημαντικότητα της καλής ποιότητας των αρχικών δεδομένων που εισάγονται στο HypoDD στην εικόνα που θα δώσει στην έξοδό του.



Σχήμα 5.15: Τομές επαναπροσδιορισμένων συστάδων σμηνοσεισμών του έτους 2005 σε διεύθυνση N10°E. Όλες οι τομές έχουν ίδιο μήκος με εξαίρεση την τελευταία (H_1-H_2) (βλέπε Σχήμα 5.16) που εκτείνεται προς τα Βόρεια περισσότερο από τις άλλες. Διαφορετικό χρώμα χαρακτηρίζει διαφορετική συστάδα σμηνοσεισμών ενώ είναι κοινά με αυτά του Σχήματος 5.13. Με (0) σημειώνεται ένα διακεκομμένο ευθύγραμμο τμήμα με κλίση ~10° η θέση του οποίου διαφέρει σε κάθε σχήμα.



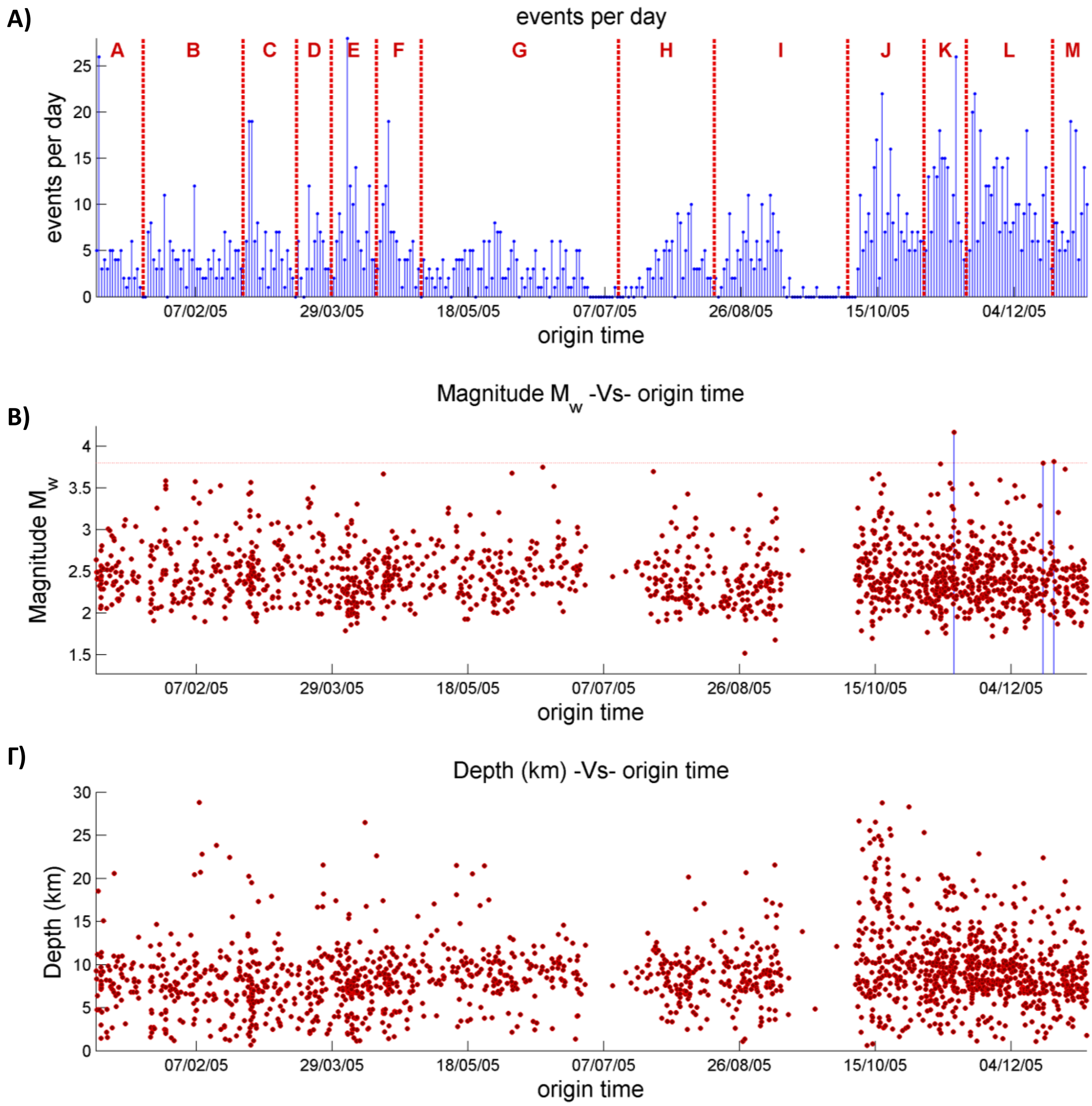
Σχήμα 5.16: (συνέχεια από το προηγούμενο) τομές συστάδων σμηνοσεισμών για το έτος 2005 σε διεύθυνση N10°E. Όλες οι τομές έχουν ίδιο μήκος με εξαίρεση την τελευταία (H_1-H_2) που εκτείνεται προς τα βόρεια περισσότερο από τις άλλες.

Στα Σχήματα 5.15 και 5.16 απεικονίζονται τομές σε διεύθυνση N10°E, όπως αυτές που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι τομές που αντιστοιχούν στα γράμματα A,B,C,…,H βρίσκονται ολοένα δυτικότερα ενώ με οι δείκτες 1 και 2 είναι τα σημεία που βρίσκονται στο Νότιο και το Βόρειο τμήμα αντίστοιχα. Για λόγους ευκρίνειας παρουσιάζονται μόνο τα υπόκεντρα των γεγονότων που ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών (με διαφορετικά χρώματα). Περισσότερο πλήρεις τομές για τα επαναπροσδιορισμένα υπόκεντρα της περιόδου 2005 φαίνονται στα Σχήματα B.32, B.33 στο Παράρτημα Β, όπου το χρώμα αντιστοιχεί σε χρόνο γένεσης. Με αριθμούς εντός παρενθέσεων στα Σχήματα 5.15 και 5.16 συμβολίζονται διάφορες χωρικές συστάδες, καθεμία από τις οποίες περιλαμβάνει ένα πλήθος από συστάδες σμηνοσεισμών όπως αυτές που έχουν διακριθεί με τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν σε αυτή την εργασία.

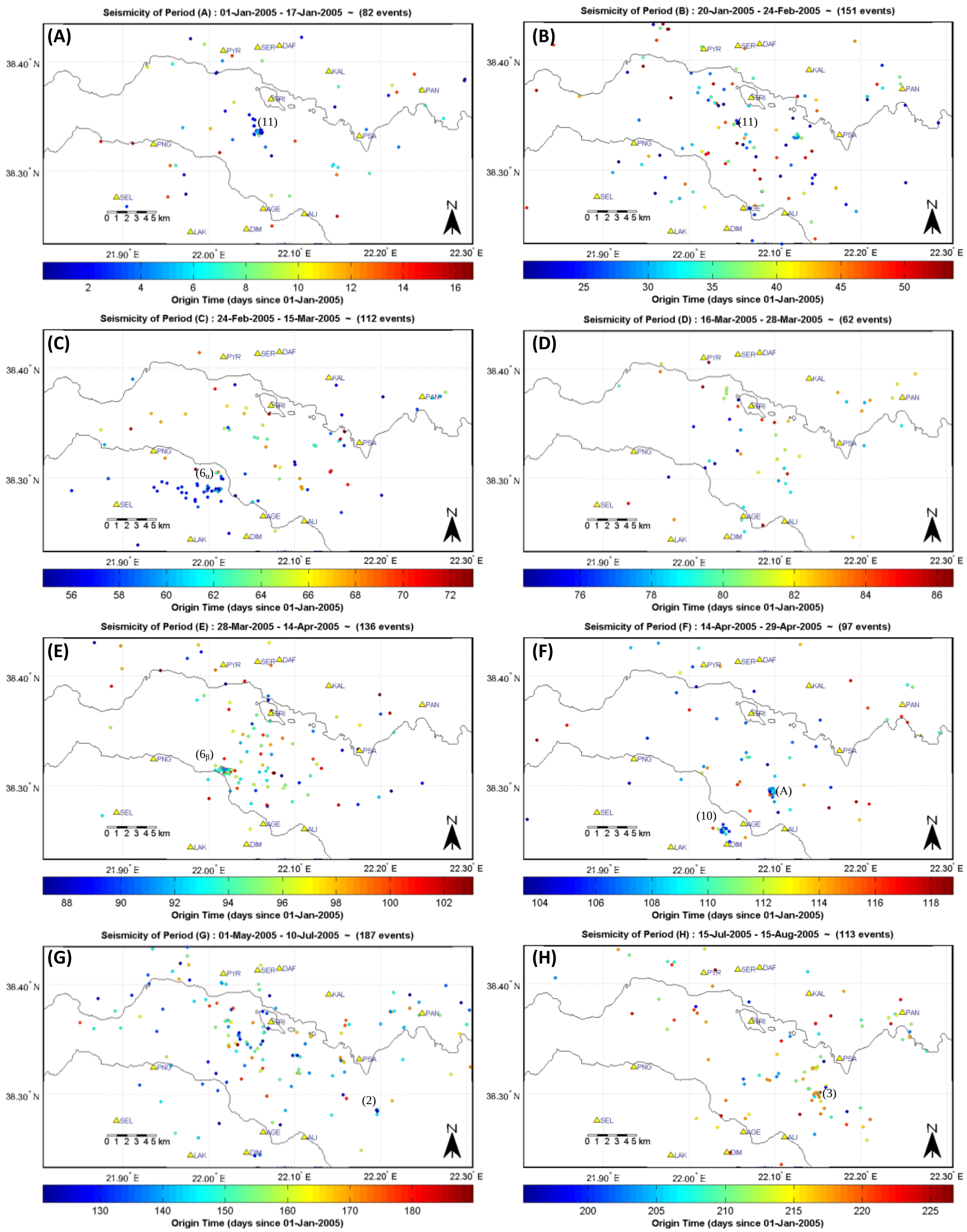
Παρ’ ότι τα γεγονότα είναι λίγα σε αριθμό και οι συστάδες σμηνοσεισμών είναι μικρές σε μέγεθος, μπορούν να διακριθούν ορισμένα πυκνώματα που συνιστούν μικροδιαρρήξεις σε διαφορετικά τμήματα της ζώνης αποκόλλησης (παράλληλα με την ευθεία που συμβολίζεται με (0)) στην οποία συγκλίνουν τα επιμέρους κανονικά ρήγματα της περιοχής ή σε δραστηριότητα σε λίγο μεγαλύτερα ή λίγο μικρότερα βάθη από αυτή τη ζώνη. Με (1_α) και (1_β) συμβολίζονται οι συστάδες σε βάθος 10km που εντοπίζονται γύρω από τον εστιακό χώρο όπου είχε εκδηλωθεί ο σεισμός του Αιγίου το 1995, με M_w=6.2 (Βλέπε Παράρτημα Β, Σχήμα Β.48). Θα γίνει αναφορά σε αυτές τις συστάδες στη συνέχεια κατά την εξέταση της χρονικής τους κατανομής.

5.5 ~ *Χρονική Κατανομή σεισμικότητας 2005*

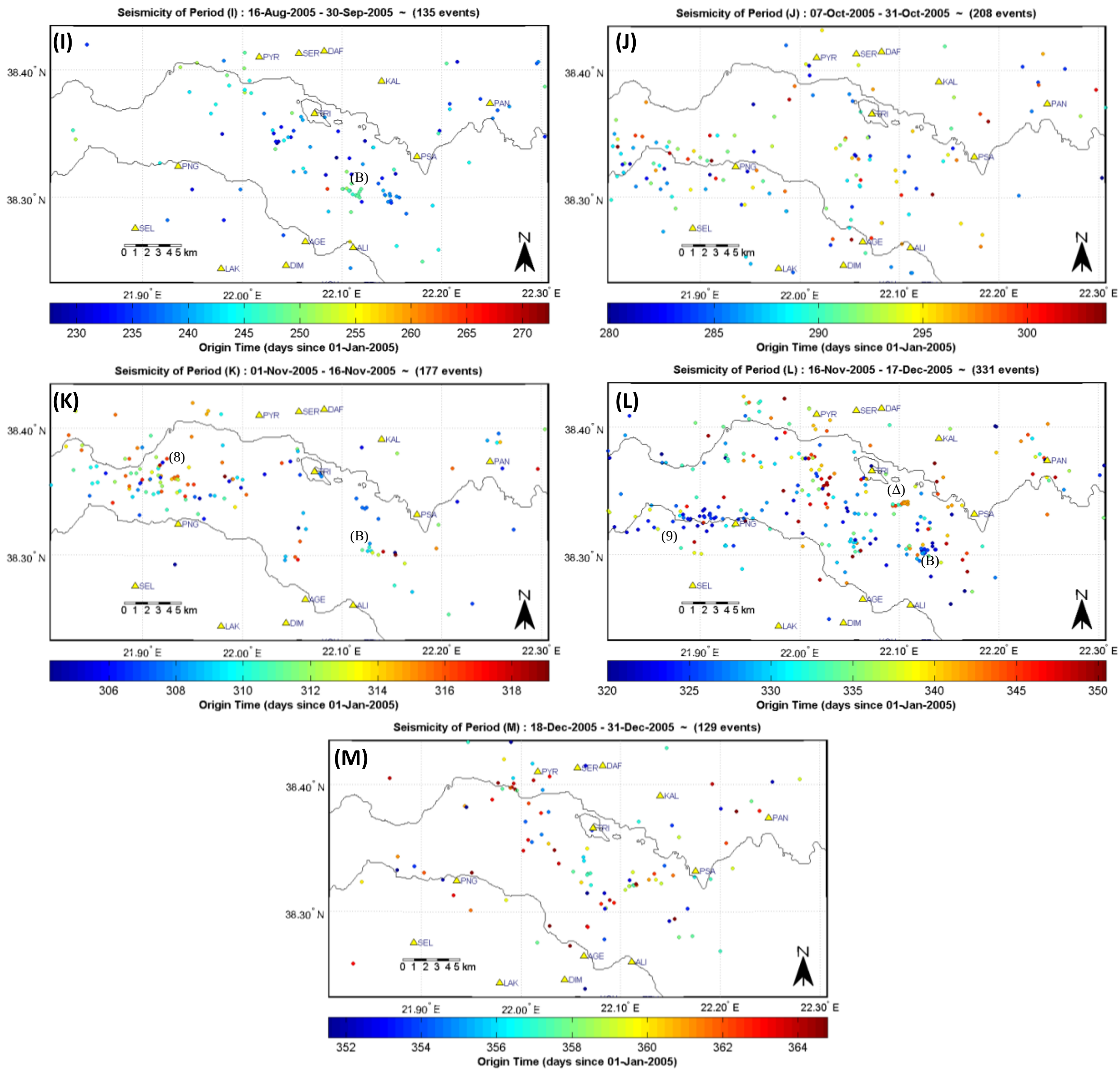
Στα Σχήματα 5.17 φαίνεται ο αριθμός σεισμών ανά ημέρα, το μέγεθος M_w και το βάθος για τα επαναπροσδιορισμένα γεγονότα του 2005 (χάρτης επικέντρων στο Σχήμα 5.12_B). Το Σχήμα 5.17_A έχει χωριστεί σε 13 χρονικές περιόδους (A-M) και τα επίκεντρα των σεισμών της κάθε περιόδου φαίνονται στα Σχήματα $5.18_{A\text{-}H}$ και $5.19_{I\text{-}M}$.



Σχήμα 5.17: Χρονική Κατανομή επαναπροσδιορισμένης σεισμικότητας 2005. A) Αριθμός σεισμών ανά ημέρα (από τον επαναπροσδιορισμένο κατάλογο με 1920 γεγονότα) και διαχωρισμός σε 13 χρονικές περιόδους A-M, B) Χρονική κατανομή μεγεθών M_w για τους σεισμούς του καταλόγου, Γ) Χρονική κατανομή βάθους σεισμών μετά τον επαναπροσδιορισμό.

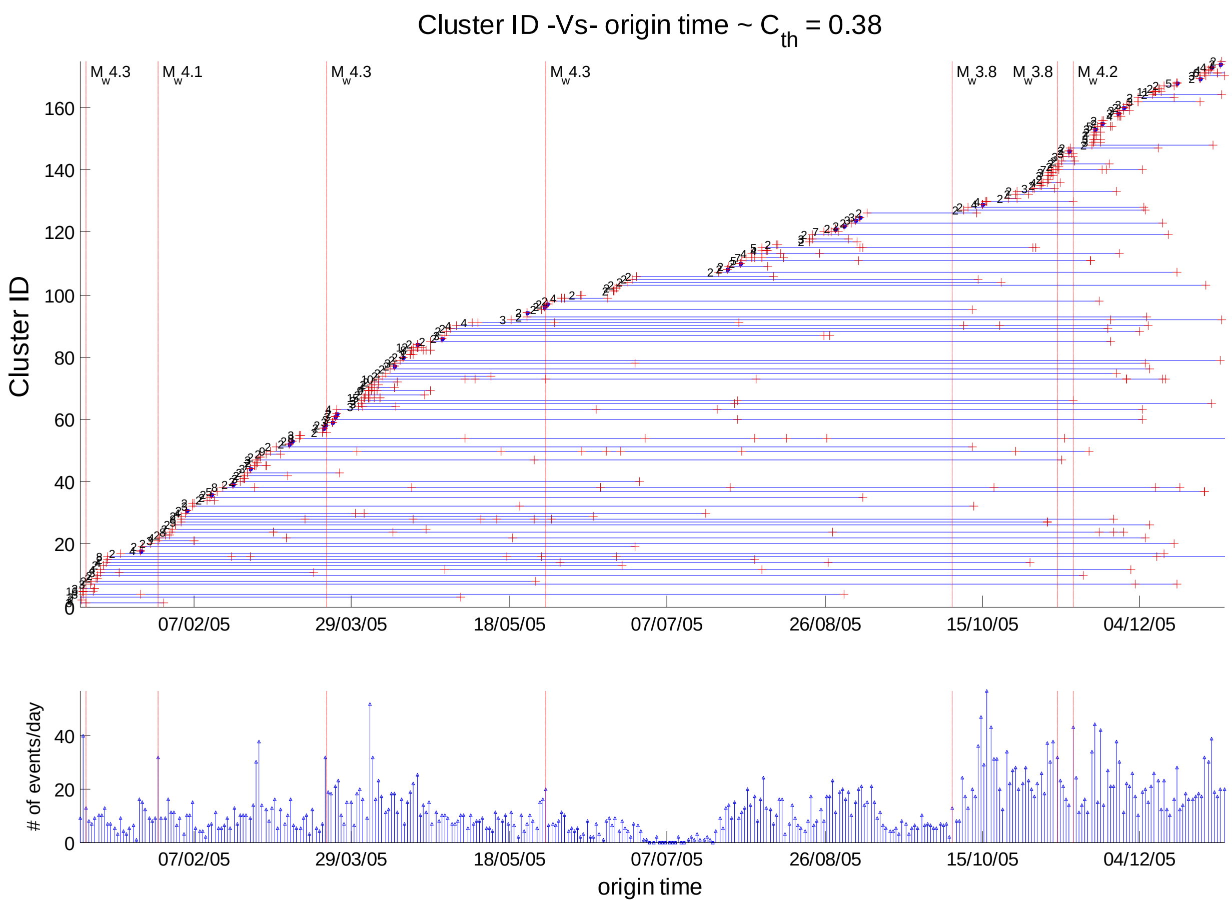


Σχήμα 5.18: Επαναπροσδιορισμένα επίκεντρα σεισμών του έτους 2005 για τις διάφορες χρονικές περιόδους που φαίνονται στο Σχήμα 5.17_A.



Σχήμα 5.19: (συνέχεια από το προηγούμενο σχήμα): Χρονική Εξέλιξη επαναπροσδιορισμένης σεισμικότητας 2005. Παρουσιάζονται τα επίκεντρα για τις περιόδους του Σχήματος 5.17_{A} στις οποίες έχει χωριστεί η σεισμικότητα του έτους.

Παρατηρείται ότι για ορισμένες περιόδους υπάρχουν μικρές εξάρσεις που συγκροτούν χωρικές και χρονικές συστάδες. Στους χάρτες των Σχημάτων 5.18 και 5.19 χρησιμοποιούνται αριθμοί και γράμματα εντός παρενθέσεων που αναφέρονται στις χωρικές συστάδες που παρουσιάστηκαν και στα Σχήματα 5.15 και 5.16. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν κάποιες περιπτώσεις όπως αυτές των συστάδων (6_{α})-(6_{β}) καθώς και (8)-(9) που η μία ακολουθεί χρονικά την άλλη, ενώ η συστάδα (11) φαίνεται να ξεκινάει από κάποιο σημείο (Σχήμα 5.18_{A}) και στη συνέχεια να εξαπλώνεται τόσο προς τα Βορειο-Δυτικά όσο και προς τα Νοτιο-Ανατολικά (Σχήμα 5.18_{B}).



Σχήμα 5.20: Χρονική κατανομή συστάδων σμηνοσεισμών για την **Ομάδα C** με **C$_{th}$**=0.38

Στο Σχήμα 5.20 παρουσιάζεται η χρονική κατανομή των διαφόρων συστάδων σμηνοσεισμών της Ομάδας C που δημιουργήθηκαν με τιμή κατωφλίου **C$_{th}$**=0.38. Στο κάτω μέρος του σχήματος παρουσιάζεται το χρονικό διάγραμμα του αριθμού σεισμών ανά ημέρα από τα δεδομένα του πλήρους καταλόγου (σε αντίθεση με το Σχήμα 5.17$_A$ στο οποίο φαίνονται μόνο οι επαναπροσδιορισμένοι σεισμοί). Σημειώνονται επίσης ορισμένοι σεισμοί με $M_w \geq 3.8$ που δεν περιλαμβάνονται στο Σχήμα 5.17$_B$. Από το Σχήμα 5.20 προκύπτει ότι σε πολλές από τις συστάδες σμηνοσεισμών, τα γεγονότα που τις αποτελούν παρουσιάζουν μεγάλη χρονική διασπορά, κάτι που ήταν αναμενόμενο από τα όσα έχουν αναφερθεί έως τώρα για την Ομάδα C.

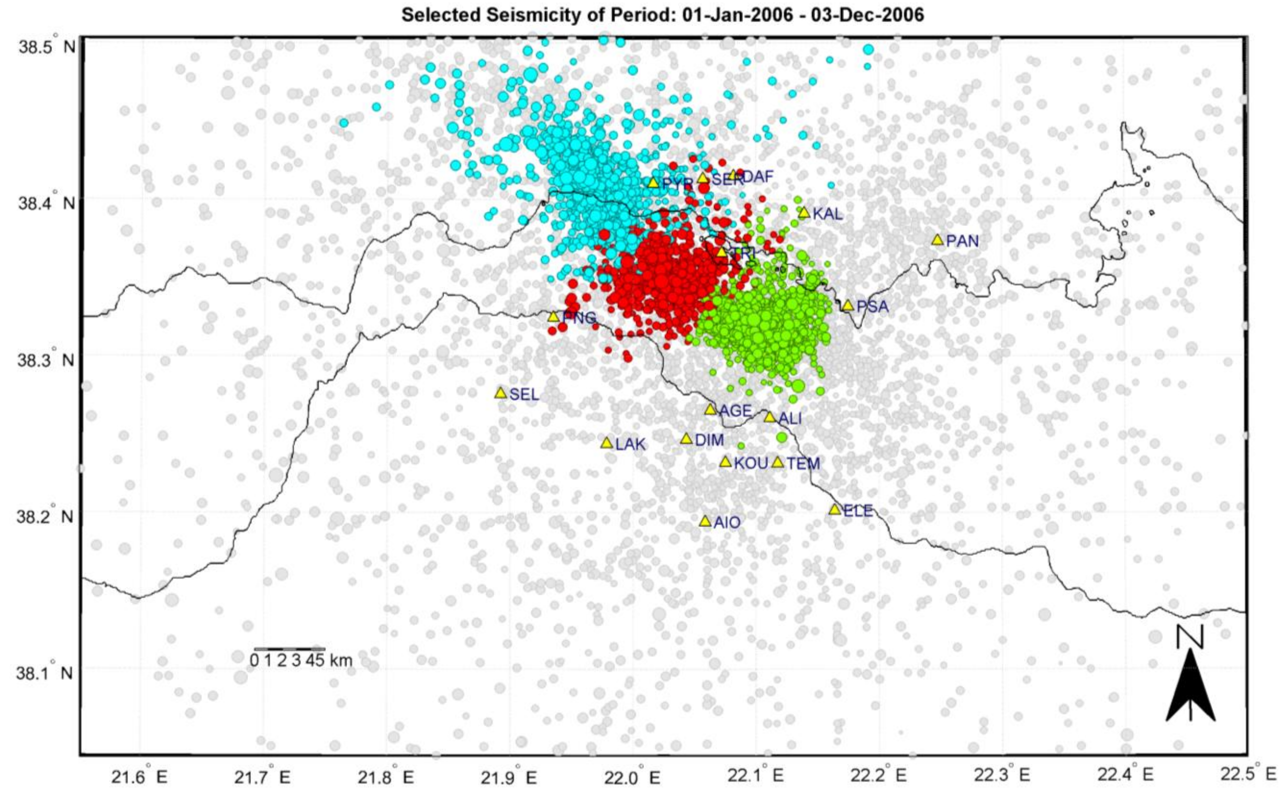
Η εικόνα της σεισμικότητας του έτους 2005 είναι ριζικά διαφορετική από αυτή που παρουσιάζεται στη συνέχεια για το έτος 2006 κατά το οποίο έχουν εκδηλωθεί πολλά και μεγάλα σμήνη σεισμών.

5.6 ~ *Η Σεισμικότητα του έτους 2006*

Για το έτος 2006, από την 1η Ιανουαρίου μέχρι τις 3 Δεκεμβρίου, διατίθενται 10574 αρχεία φάσεων από τα οποία τα 9102 έδωσαν λύση με το HYPO71 (*Lee & Lahr, 1972*). Η αρχική εικόνα της σεισμικότητας φαίνεται στο Σχήμα 5.21 στο οποίο παρουσιάζεται ο χάρτης με τα επίκεντρα. Διακρίνονται 3 περιοχές με διαφορετικά χρώματα οι οποίες θα εξεταστούν σε αυτό το κεφάλαιο. Ο διαχωρισμός έγινε με χωρική ομαδοποίηση, με τη μέθοδο σύνδεσης τύπου ‘ward’ (βλέπε [2]).

Οι ομάδες αυτές ονομάζονται D, E, και F, από τα Δυτικά προς τα Ανατολικά (κυανό, κόκκινο και πράσινο χρώμα αντίστοιχα στο Σχήμα 5.21) και περιέχουν 1108, 888 και 1652 γεγονότα αντίστοιχα. Λόγω της μεγάλης πυκνότητας που παρουσιάζει η σεισμικότητα στην υπό μελέτη περιοχή κατά την περίοδο αυτή αναμένεται να εντοπιστεί ένα μεγάλο πλήθος από συστάδες σμηνοσεισμών σε κάθε Ομάδα.

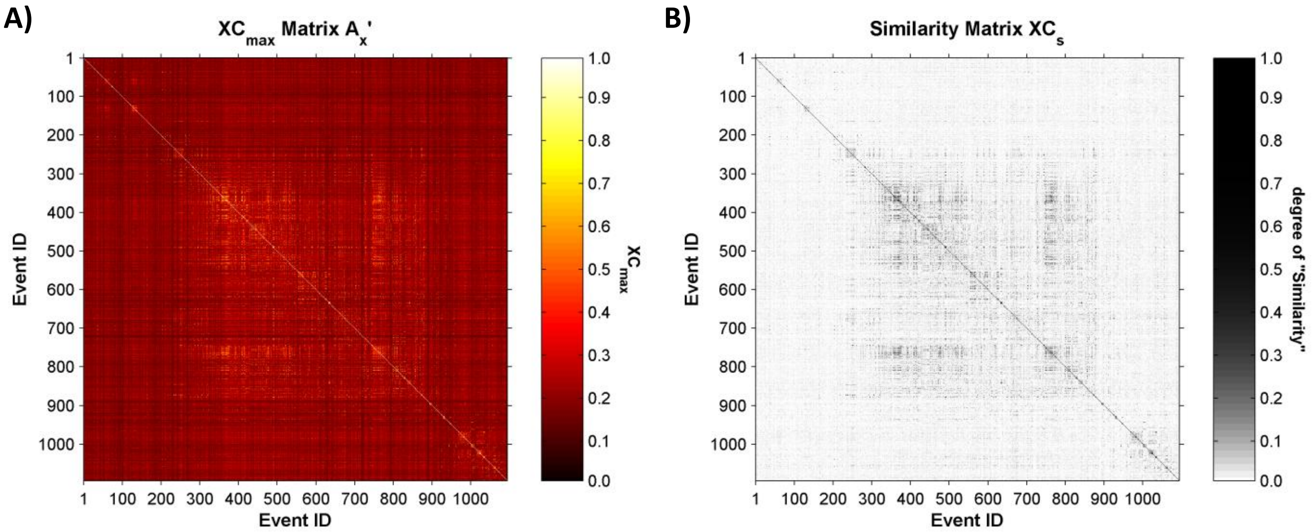
Η ανίχνευση των σμηνοσεισμών θα γίνει στην κάθε ομάδα χωριστά. Έτσι θα προκύψουν 3 πίνακες ομοιότητας με τα αντίστοιχα δενδρογράμματα και μια εν γένει διαφορετική τιμή κατωφλίου στην κάθε περίπτωση. Για τους λόγους που έχουν ήδη αναφερθεί, ως κατάλληλος σταθμός για τον εντοπισμό σμηνοσεισμών κρίνεται και πάλι ο σταθμός της Ψαρομύτας (PSA). Στο Παράρτημα Β, Σχήμα Β.35 φαίνεται ότι για τον συγκεκριμένο σταθμό διατίθεται ο μέγιστος αριθμός καταγραφών, ενώ και οι 3 συνιστώσες του βρίσκονται σε καλή κατάσταση κατά τη διάρκεια όλου του έτους (Σχήμα 5.28).



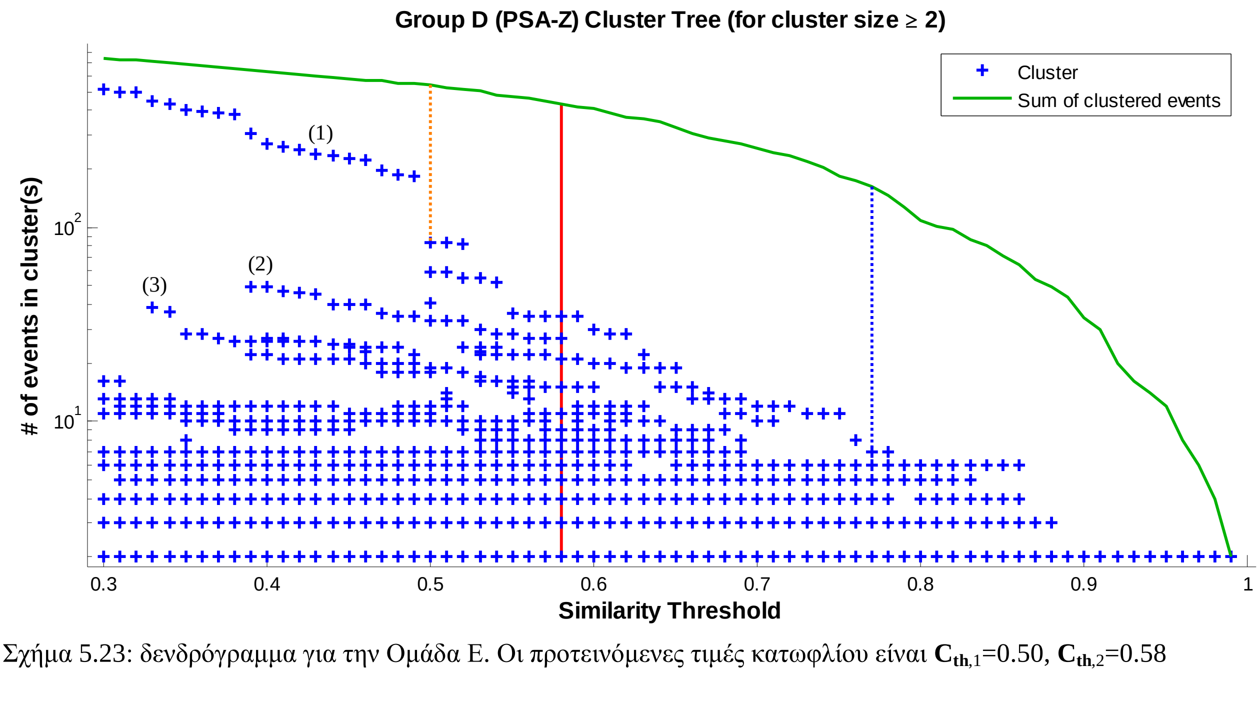
Σχήμα 5.21: Σεισμικότητα του έτους 2006. Οι επιλεγμένες **Ομάδες D, E, F** απεικονίζονται με κυανό, κόκκινο και πράσινο χρώμα αντίστοιχα.

5.6.1 ~ *Ομάδα D*

Πρόκειται για την Ομάδα σεισμών με επίκεντρα στο Βορειο-Δυτικό τμήμα. Όπως φαίνεται από το δενδρόγραμμα (Σχήμα 5.23) εμφανίζονται 3 δευτερεύοντες κλάδοι οι οποίοι ενσωματώνονται με τον μεγαλύτερο από αυτούς (κύριο κορμό, (1) στο Σχήμα 5.23) στις χαμηλές τιμές κατωφλίου. Προτεινόμενη τιμή είναι η $\mathbf{C_{th}}$=0.5, λίγο πριν τον σχηματισμό του κύριου κορμού (1).



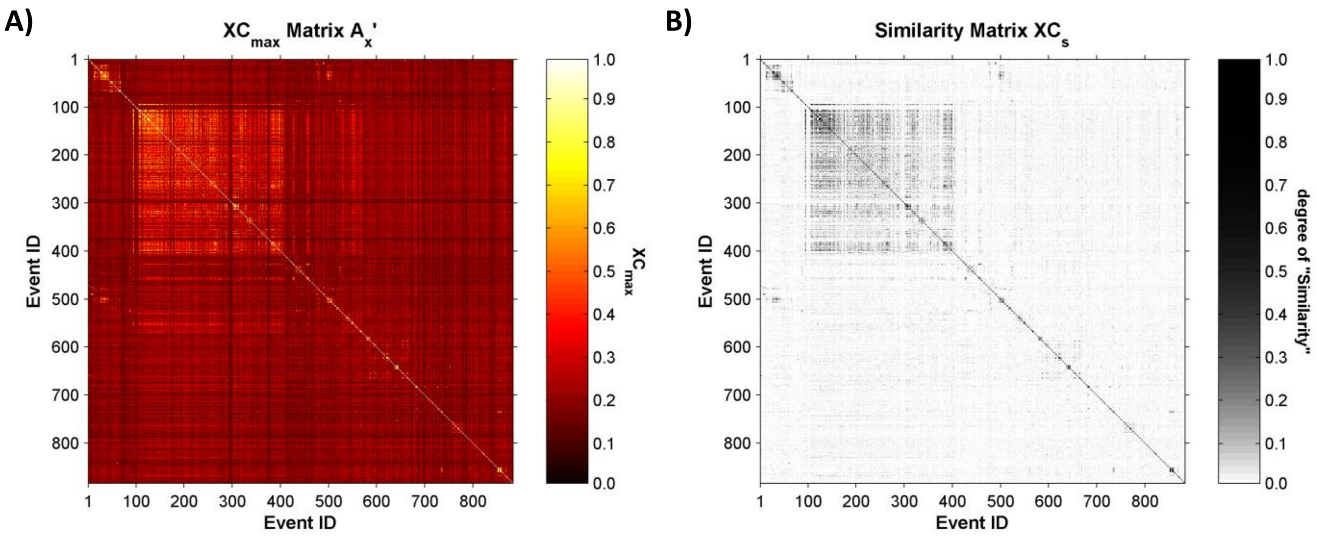
Σχήμα 5.22: A) Πίνακας Μεγίστου Ετεροσυσχέτισης $\mathbf{XC_{max}}$ για την **Ομάδα D** (1108 σεισμοί), B) Πίνακας Ομοιότητας για την **Ομάδα D**.



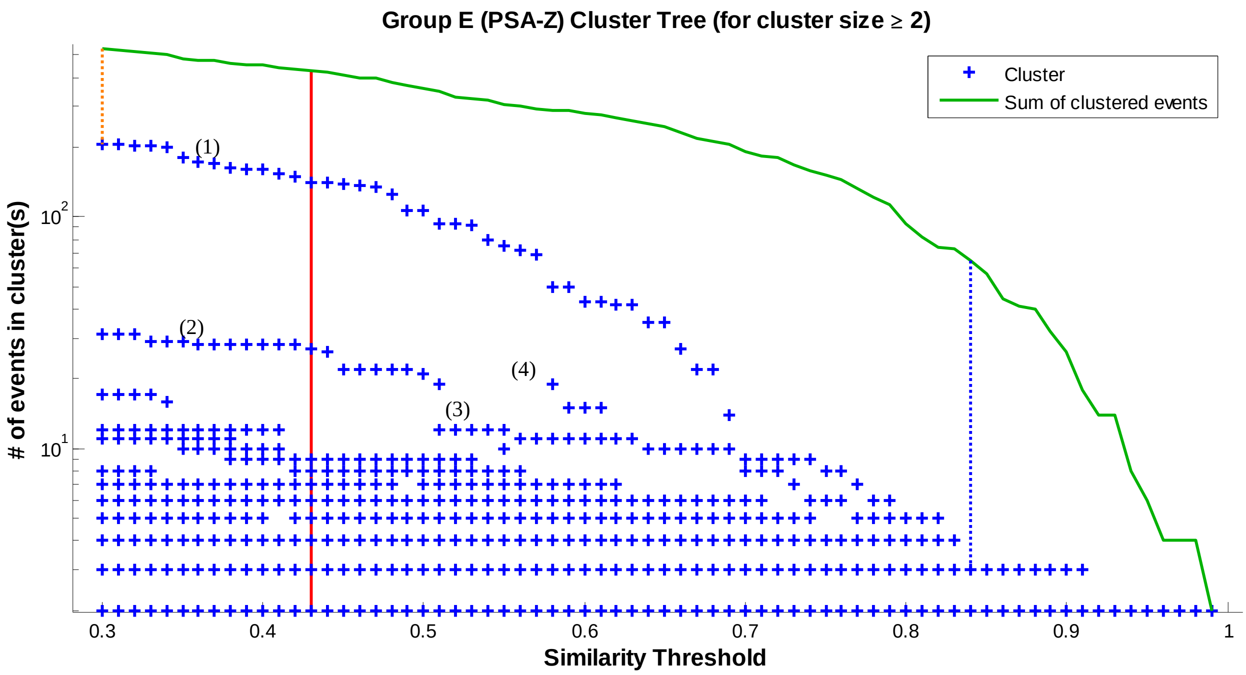
Σχήμα 5.23: δενδρόγραμμα για την Ομάδα Ε. Οι προτεινόμενες τιμές κατωφλίου είναι $\mathbf{C_{th,1}}$=0.50, $\mathbf{C_{th,2}}$=0.58

5.6.2 ~ *Ομάδα Ε*

Οι σεισμοί αυτής της ομάδας έχουν επίκεντρα που βρίσκονται ανάμεσα σε αυτά των σεισμών των Ομάδων D και F. Παρατηρείται η ύπαρξη ενός πολύ συνεκτικού σμήνους, κάτι που φαίνεται τόσο από τους Πίνακες Συσχέτισης και Ομοιότητας (Σχήματα $5.24_{A,B}$) όσο και από το δενδρόγραμμα (Σχήμα 5.25) στο οποίο ο κύριος κορμός (1) εμφανίζεται από νωρίς ενώ ένας μικρότερης τάξης κλάδος (2) ξεκινάει από τιμές $\mathbf{C_{th}}\leq0.50$. Η προτεινόμενη τιμή είναι $\mathbf{C_{th}}=0.43$, ωστόσο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και οι τιμές $\mathbf{C_{th,1}}=0.51$ και $\mathbf{C_{th,2}}=0.58$ λόγω της διάσπασης σε ορισμένους υποκλάδους (3,4).



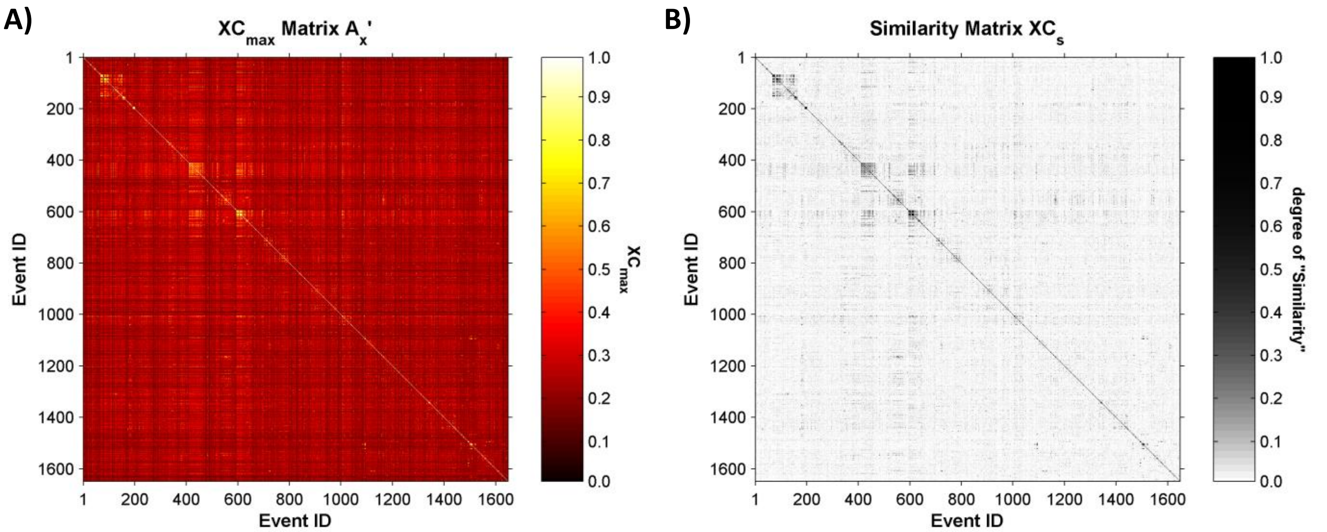
Σχήμα 5.24: Α) Πίνακας Μεγίστου Ετεροσυσχέτισης $\mathbf{XC_{max}}$ για την **Ομάδα Ε** (888 σεισμοί), Β) Πίνακας Ομοιότητας για την **Ομάδα Ε**.



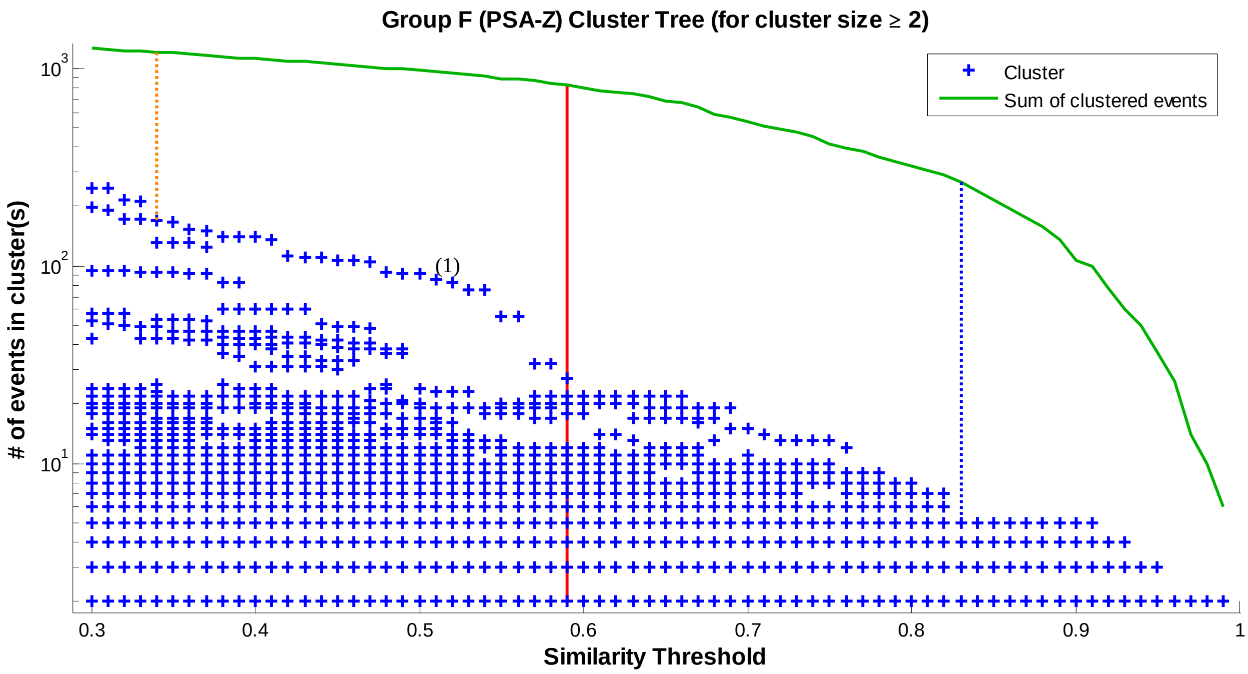
Σχήμα 5.25: δενδρόγραμμα για την Ομάδα Ε. Το προτεινόμενο κατώφλι είναι $\mathbf{C_{th}}=0.43$

5.6.3 ~ *Ομάδα F*

Η ομάδα αυτή εμφανίζει ασθενέστερη συσταδοποίηση, κάτι που δείχνει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα από τις άλλες 2. Ο κύριος κορμός (1) στο δενδρόγραμμα (Σχήμα 5.27) ξεκινάει από $\mathbf{C_{th,1}}$=0.59, που είναι μια προτεινόμενη τιμή κατωφλίου ενώ στη συνέχεια εμφανίζεται ένα πλήθος από μικρότερους κλάδους και μια δεύτερη τιμή $\mathbf{C_{th,2}}$=0.34 που θα πρέπει μάλλον να προτιμηθεί σε αυτή την περίπτωση. Ωστόσο, ενδιαφέρον φαίνεται να παρουσιάζουν και κάποιες ενδιάμεσες τιμές όπως η $\mathbf{C_{th,3}}$=0.38.



Σχήμα 5.26: A) Πίνακας Μεγίστου Ετεροσυσχέτισης $\mathbf{XC_{max}}$ για την **Ομάδα F** (1652 σεισμοί), B) Πίνακας Ομοιότητας για την **Ομάδα F**.

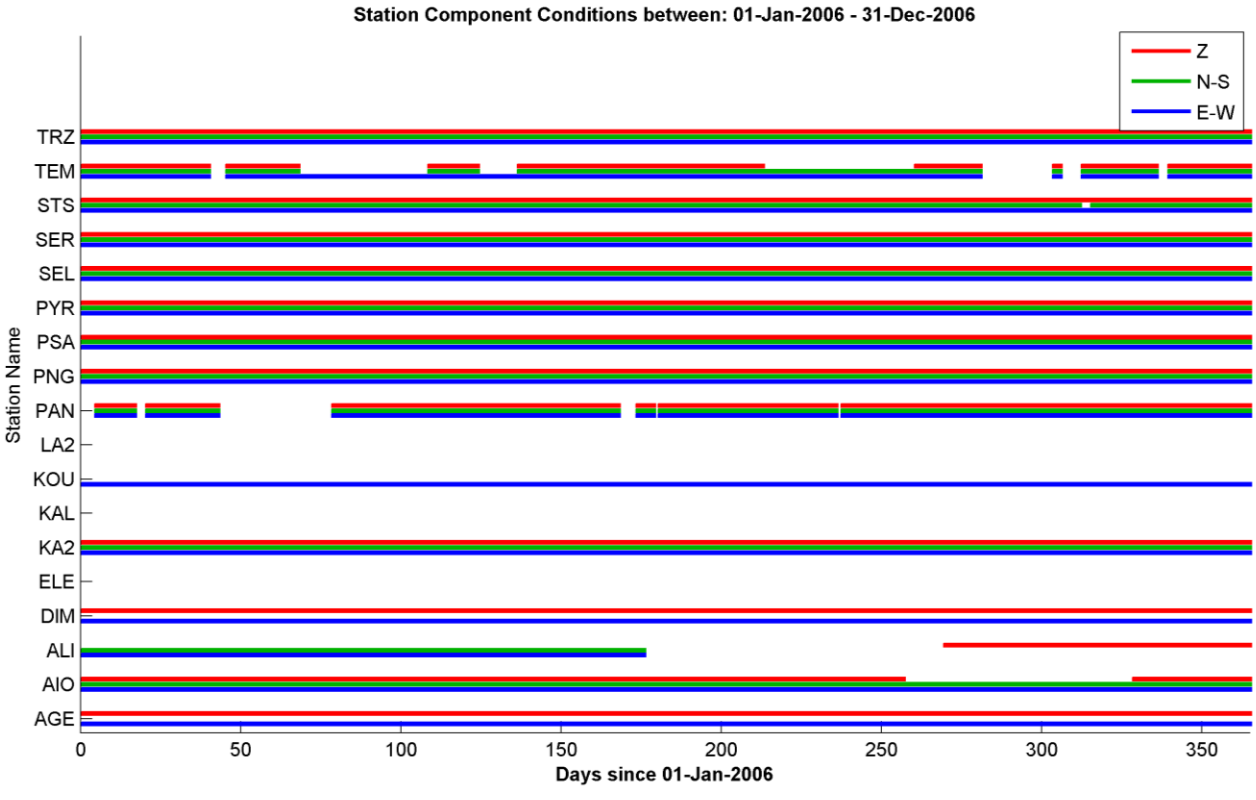


Σχήμα 5.27: δενδρόγραμμα για την Ομάδα F. Οι προτεινόμενες τιμές κατωφλίου είναι $\mathbf{C_{th,1}}$=0.59, $\mathbf{C_{th,2}}$=0.34

5.6.4 ~ *Διόρθωση Χρόνων Άφιξης με τη Μέθοδο των Κύριων Γεγονότων*

Προτού γίνει ο επαναπροσδιορισμός της σεισμικότητας των 3 Ομάδων που προαναφέρθηκαν για το έτος 2006, πρέπει να γίνει μια πρώτη ημι-αυτόματη διόρθωση στους χρόνους άφιξης ενός πλήθους γεγονότων ώστε τα αποτελέσματα του επαναπροσδιορισμού να είναι λίγο καλύτερα απο αυτά που θα έδινε ο αρχικός κατάλογος. Ο λόγος που πρέπει να εφαρμοστεί αυτή η διόρθωση είναι ο ίδιος με αυτόν που ίσχυε για τη σεισμικότητα του 2005: οι διαθέσιμοι χρόνοι άφιξης για τα γεγονότα του 2006 είναι και αυτοί αυτόματα προσδιορισμένοι και περιέχουν σε αρκετές περιπτώσεις σημαντικά σφάλματα τα οποία δημιουργούν μια πρόσθετη διασπορά στα επίκεντρα των σμηνοσεισμών.

Η κατάσταση λειτουργίας των συνιστωσών σε κάθε σταθμό κατά τη διάρκεια αυτού του έτους φαίνεται στο Σχήμα 5.28. Σημειώνεται ότι, όπως και για τον πίνακα του Σχήματος 5.28 (όπως και του Σχήματος 5.4), τα κενά που εμφανίζουν ορισμένες ή όλες οι συνιστώσες κάποιου σταθμού σε μια χρονική περίοδο δείχνουν ότι για τις συγκεκριμένες ημέρες αυτές οι συνιστώσες είχαν προβληματική λειτουργία ή δεν λειτουργούσαν καθόλου (θορυβώδες σήμα ή καθόλου σήμα) σε περιόδους που *υπάρχουν* διαθέσιμα δεδομένα κυματομορφών στον συγκεκριμένο σταθμό. Ο πίνακας *δεν* δείχνει σε ποιες περιόδους *υπάρχουν* διαθέσιμα αρχεία κυματομορφών στον κάθε σταθμό παρά μόνο την αποδεκτή ποιότητα σήματος στις διάφορες συνιστώσες του *όταν* υπάρχουν διαθέσιμα αρχεία κυματομορφών.



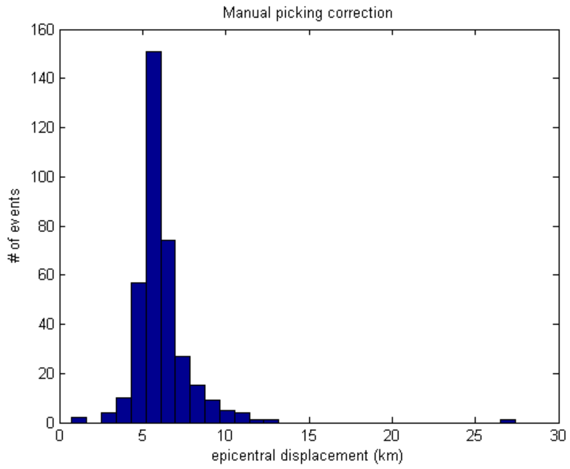
Σχήμα 5.28: κατάσταση λειτουργίας των 3 συνιστωσών ανά σταθμό κατά τη διάρκεια του 2006. Η κόκκινη, πράσινη ή μπλε γραμμή υποδηλώνει καλή λειτουργία της Z, N-S ή E-W συνιστώσας για τη συγκεκριμένη ημέρα στον συγκεκριμένο σταθμό.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου των Κύριων Γεγονότων (*Master Events*) χρησιμοποιήθηκαν 97, 80 και 184 κύρια γεγονότα από τις Ομάδες D, E και F αντίστοιχα (συνολικά 361), ένα από την κάθε συστάδα σμηνοσεισμών, με κριτήρια μέγιστου αριθμού φάσεων και ελαχίστου σφάλματος, τα οποία ελέγχθηκαν ένα προς ένα με μη-αυτόματο τρόπο και βάσει των οποίων στη συνέχεια έγινε αυτόματη διόρθωση των χρόνων άφιξης σε 432, 241 και 588 γεγονότα από την κάθε ομάδα αντίστοιχα. Δηλαδή, έγινε αυτόματη διόρθωση σε 1261 εξαρτημένα (*slave*) γεγονότα, χειρονακτική (*manual*) διόρθωση σε 361 κύρια (*master*) γεγονότα, ενώ συνολικά διορθώθηκαν 1622 γεγονότα από τον κατάλογο του 2006 (διόρθωση στο 17.8% των σεισμών του καταλόγου). Από αυτά: τα 529 ανήκουν στην Ομάδα D (διόρθωση στο 48% της ομάδας), τα 321 στην Ομάδα E (διόρθωση στο 36% της ομάδας), και τα 772 στην Ομάδα F (διόρθωση στο 47% της ομάδας).

Υπενθυμίζεται ότι με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων υπάρχει η δυνατότητα διόρθωσης σε άλλο ένα 7-12% των υπόλοιπων γεγονότων του καταλόγου του 2006, αν χρησιμοποιηθούν ως κύρια γεγονότα όλα τα διορθωμένα γεγονότα από το 2005 και το 2006 μαζί. Το ποσοστό αυτό μπορεί να αυξηθεί αν χρησιμοποιηθεί ένα μεγαλύτερο πλήθος από κύρια γεγονότα και επαναληφθεί η διαδικασία έως ότου εξαντληθούν τα εξαρτημένα γεγονότα ανώτερου βαθμού (έμμεσοι συγγενείς).

Στο Σχήμα 5.29 παρουσιάζεται η κατανομή της οριζόντιας μετατόπισης που υπέστησαν τα επίκεντρα κατά τη διόρθωσή τους με τη μέθοδο των Κύριων Γεγονότων. Το μεγαλύτερο ποσοστό από αυτά μετακινήθηκαν οριζοντίως κατά 6km.

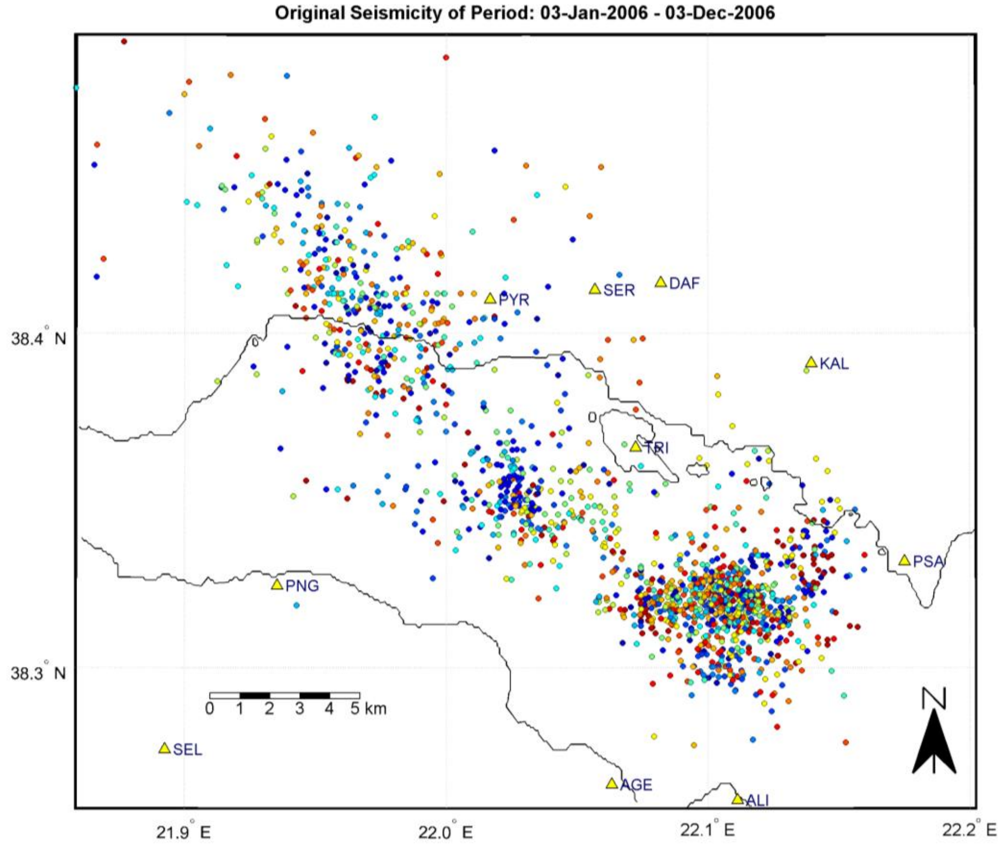
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η αλλαγή στην εικόνα των επικέντρων των διαφόρων συστάδων σμηνοσεισμών των 3 ομάδων της σεισμικότητας του 2006, πριν και μετά τη διόρθωση με τη μέθοδο των Κύριων Γεγονότων. Λόγω του μεγάλου πλήθους των συστάδων (117, 80 και 240 στις ομάδες D, E και F αντίστοιχα) οι αριθμοί ταυτοποίησης (Cluster-ID) έχουν μοιραστεί με τυχαίο τρόπο ώστε να διακρίνεται έως ένα βαθμό η κάθε συστάδα από τις γειτονικές της.



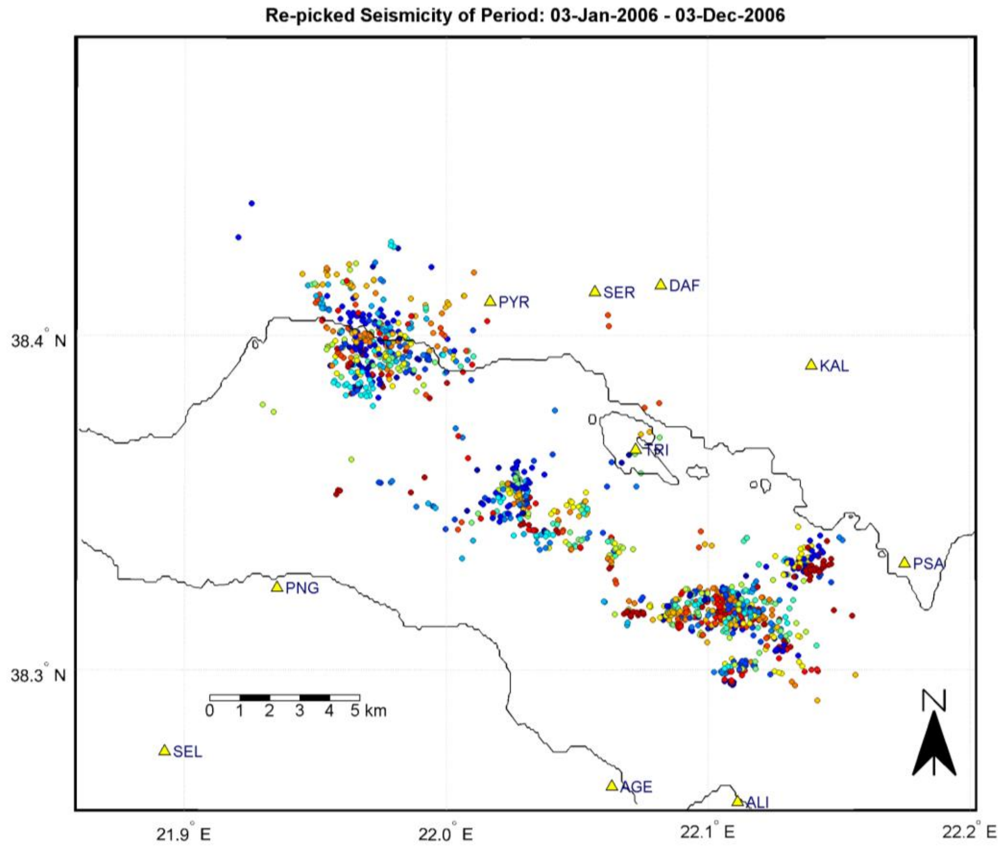
Σχήμα 5.29: μετατόπιση 361 σεισμικών επικέντρων (σε km) από τον κατάλογο του 2006 μετά από χειρονακτική διόρθωση των χρόνων άφιξης. Τα γεγονότα αυτά χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια ως κύρια γεγονότα (*Master Events*). Παρατηρείται ότι ένα μεγάλο μέρος των διορθώσεων προκάλεσαν μετατόπιση επικέντρου κατά περισσότερο από 6km

Η προσοχή θα πρέπει να δοθεί στο Σχήμα 5.30_B, μετά τη διόρθωση, όπου φαίνεται εύκολα ότι επίκεντρα όμοιου χρώματος έχουν έρθει κοντά το ένα με το άλλο ενώ στη συνέχεια μπορούν να αναζητηθούν τα ίδια επίκεντρα στην αρχική εικόνα (Σχήμα 5.30_A) κάπου κοντά στην ίδια περιοχή αλλά με μεγαλύτερη διασπορά. Σημαντική βελτίωση φαίνεται και στην εικόνα των τυπικών σφαλμάτων οριζόντιας θέσης (Σχήματα $5.31_{A,B}$) καθώς, ιδιαίτερα στην περιοχή εντός δικτύου (Ομάδες E και F), τα σφάλματα μειώνονται σε σημαντικό βαθμό. Ορισμένα γεγονότα με μεγάλο σφάλμα, όπως ένα που διακρίνεται εύκολα στο Βορειο-Δυτικό άκρο, πρέπει να επανελεγχθούν μη-αυτόματα.

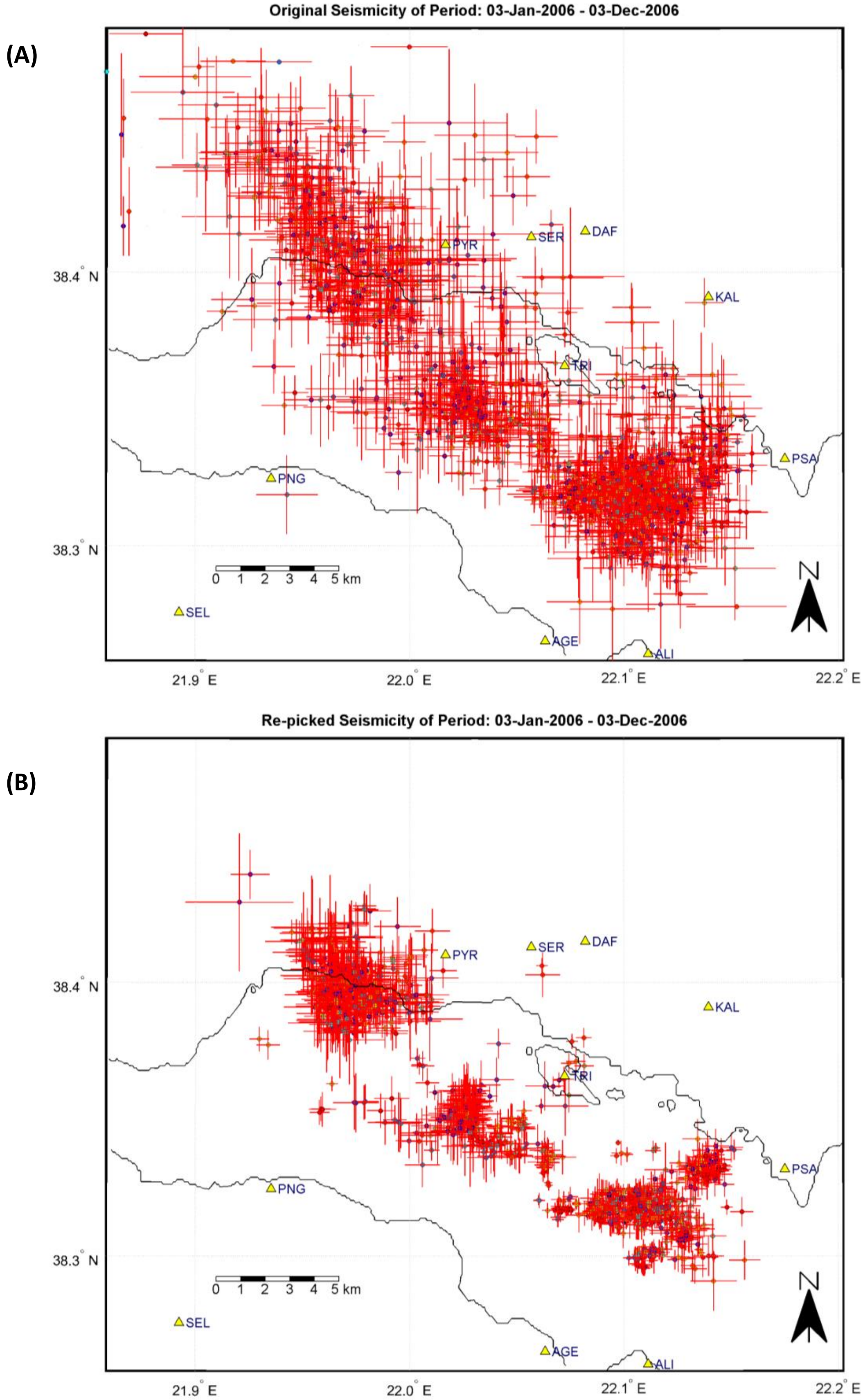
(A)



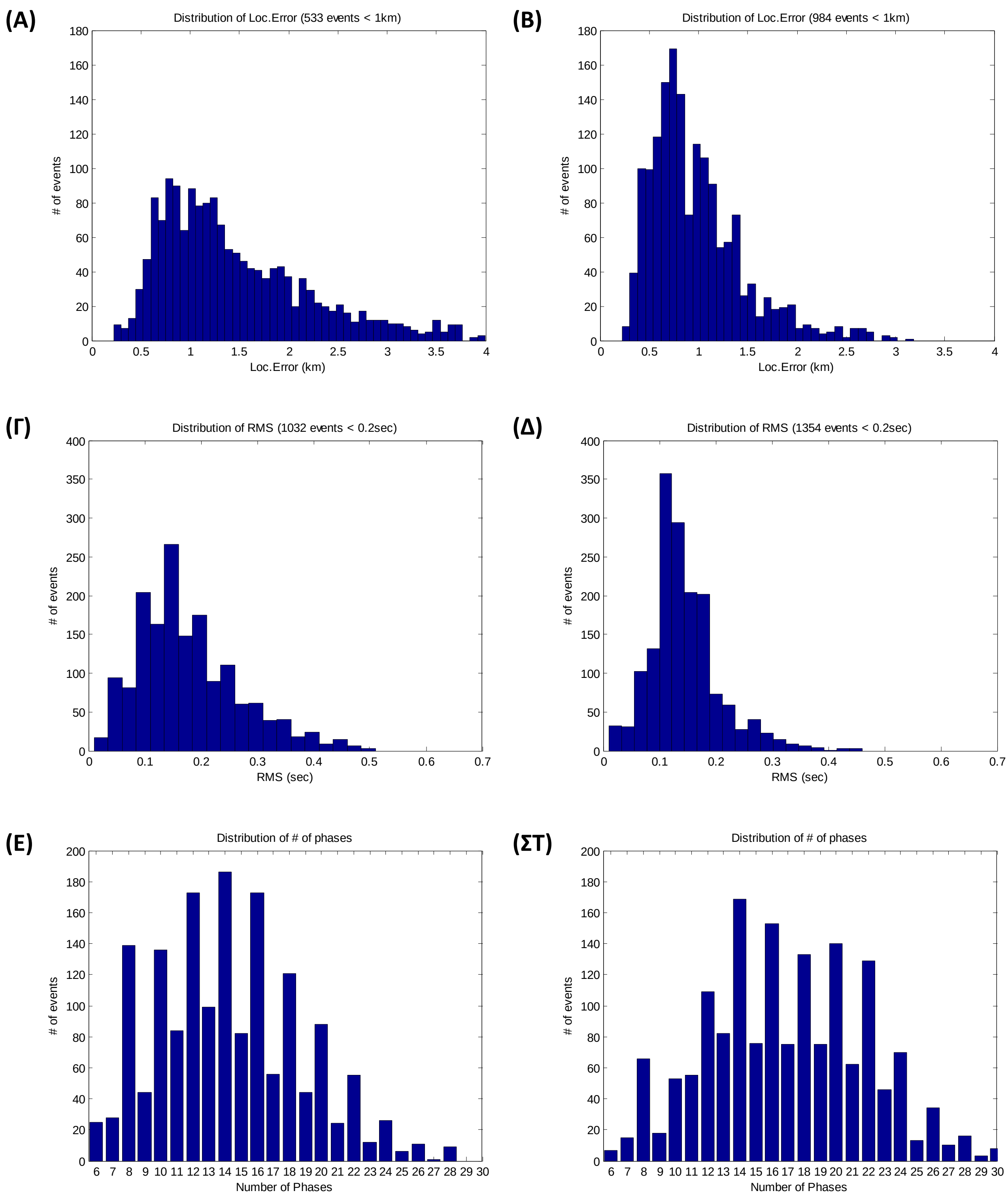
(B)



Σχήμα 5.30: Επίκεντρα 1622 σεισμών από τις Ομάδες D, E, F που ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών πριν (A) και μετά (B) τη διόρθωση των χρόνων άφιξης με τη μέθοδο των Κύριων Γεγονότων. Με τα διαφορετικά χρώματα διακρίνονται τα γεγονότα που ανήκουν σε διαφορετικές συστάδες σμηνοσεισμών.



Σχήμα 5.31: Σφάλματα οριζόντιας θέσης για τα αρχικά επίκεντρα (A) και τα *διορθωμένα* επίκεντρα (B) σε αντιστοιχία με τα Σχήματα 5.30_A και 5.30_B.

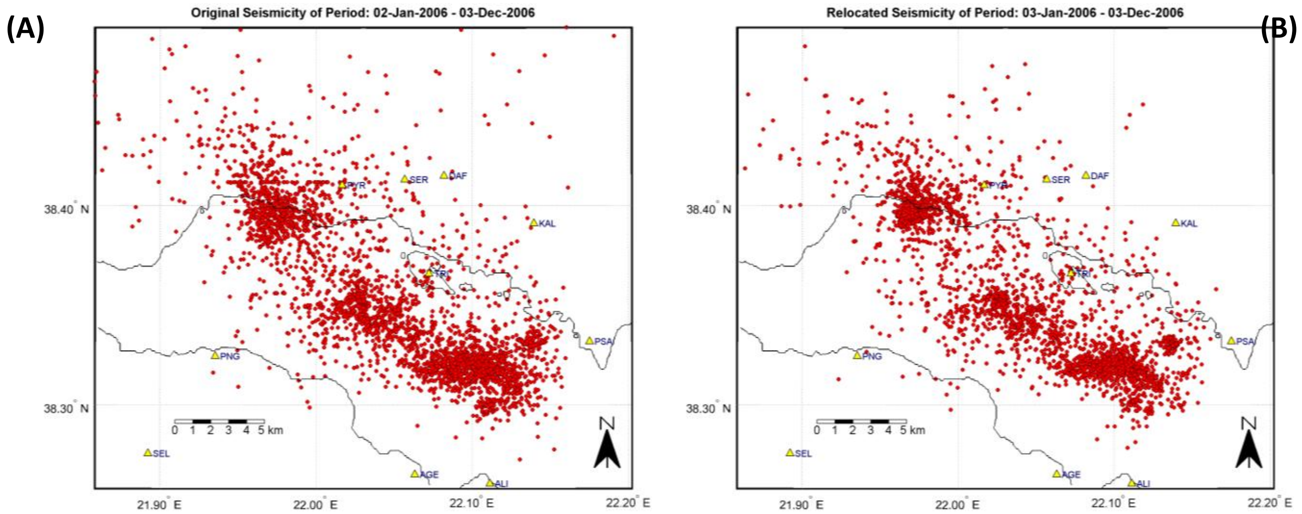


Σχήμα 5.32: Ιστογράμματα τυπικού σφάλματος υποκεντρικής θέσεως (Α,Β), μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMS error) (Γ,Δ) και αριθμού φάσεων (Ε,ΣΤ), πριν (Α,Γ,Ε) και μετά (Β,Δ,ΣΤ) τη διόρθωση των χρόνων άφιξης με τη μέθοδο των Κύριων Γεγονότων για τους σεισμούς των Ομάδων D, E και F συνολικά.

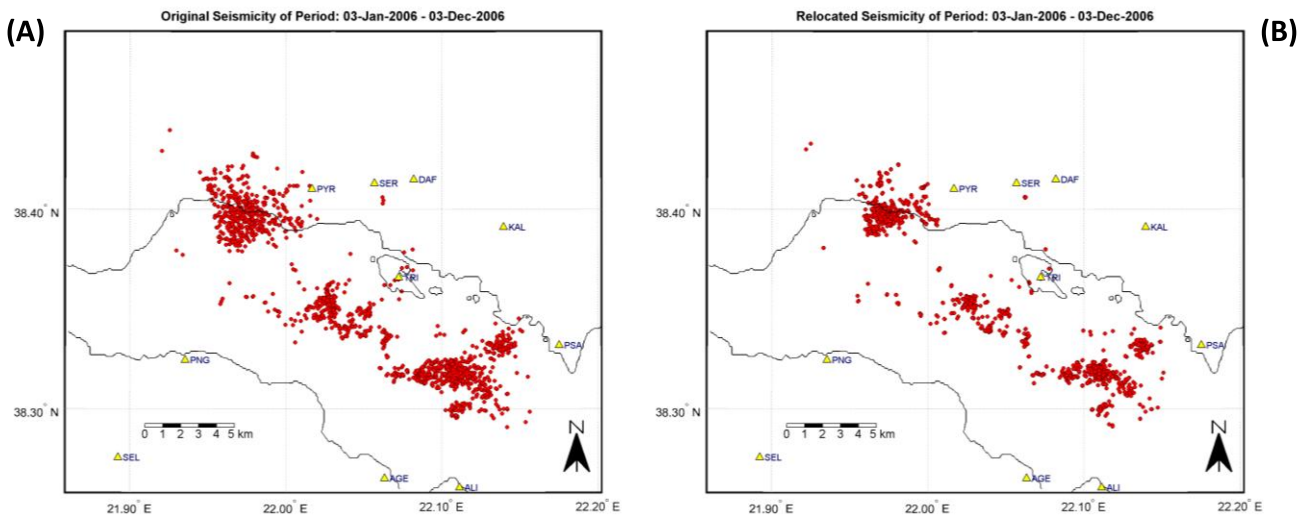
5.6.5 ~ *Επαναπροσδιορισμός με HypoDD και χωρική κατανομή*

Ο επαναπροσδιορισμός της σεισμικότητας του 2006 είναι προτιμότερο εκτελεστεί ανά ομάδα. Το HypoDD δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα με λιγότερα αλλά ποιοτικότερα δεδομένα. Μπορεί να εξεταστεί, επίσης, η περίπτωση της χρήσης *μόνο* των διορθωμένων δεδομένων (με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων), καθώς ο αριθμός τους είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των διορθωμένων σεισμών του 2005, και οι χωρικές συστάδες είναι πυκνότερες και πολυπληθέστερες σε γεγονότα. Αυτό φαίνεται στα Σχήματα $5.34_{A,B}$.

Η εικόνα πριν και μετά τον επαναπροσδιορισμό (αλλά πάντα μετά τη διόρθωση) φαίνεται στα Σχήματα $5.33_{A,B}$. Αν από τα επαναπροσδιορισμένα γεγονότα του Σχήματος 5.33_{B} διατηρηθούν μόνο αυτά που έχουν υποστεί διόρθωση θα προκύψει μια εικόνα πολύ παρόμοια με αυτή του Σχήματος 5.34_{B}. Αυτό οφείλεται μεν στην κοινή παραμετροποίηση των δύο επαναπροσδιορισμών αλλά και στη σταθερότητα της διαδικασίας με τα δεδομένα των 3 ομάδων.

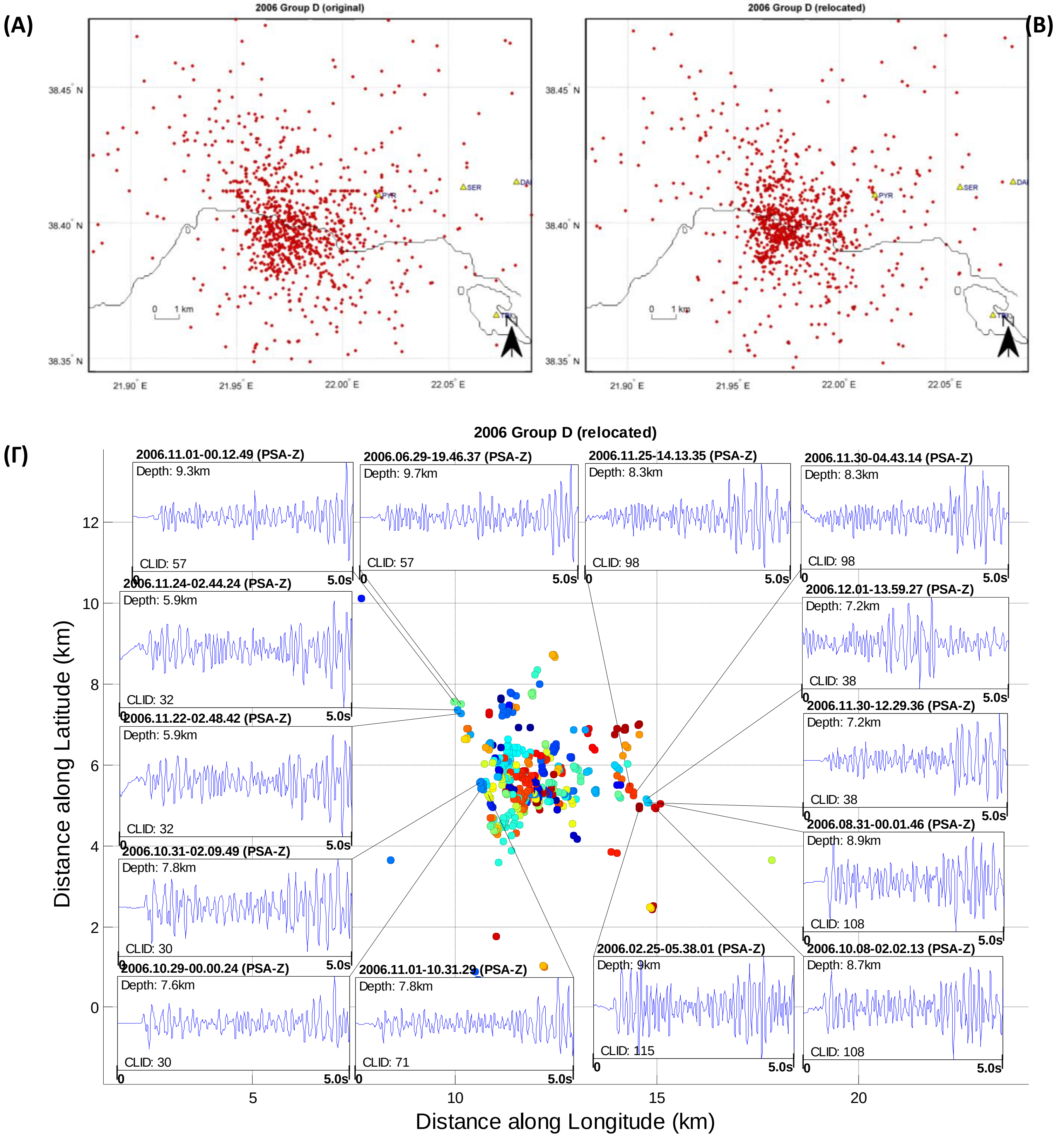


Σχήμα 5.33: Επίκεντρα σεισμών των **Ομάδων D, E και F** πριν (A) και μετά (B) τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD με δεδομένα διορθωμένου καταλόγου (με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων) και ετεροσυσχέτισης συνδυασμένα και από τις 3 ομάδες ταυτόχρονα.



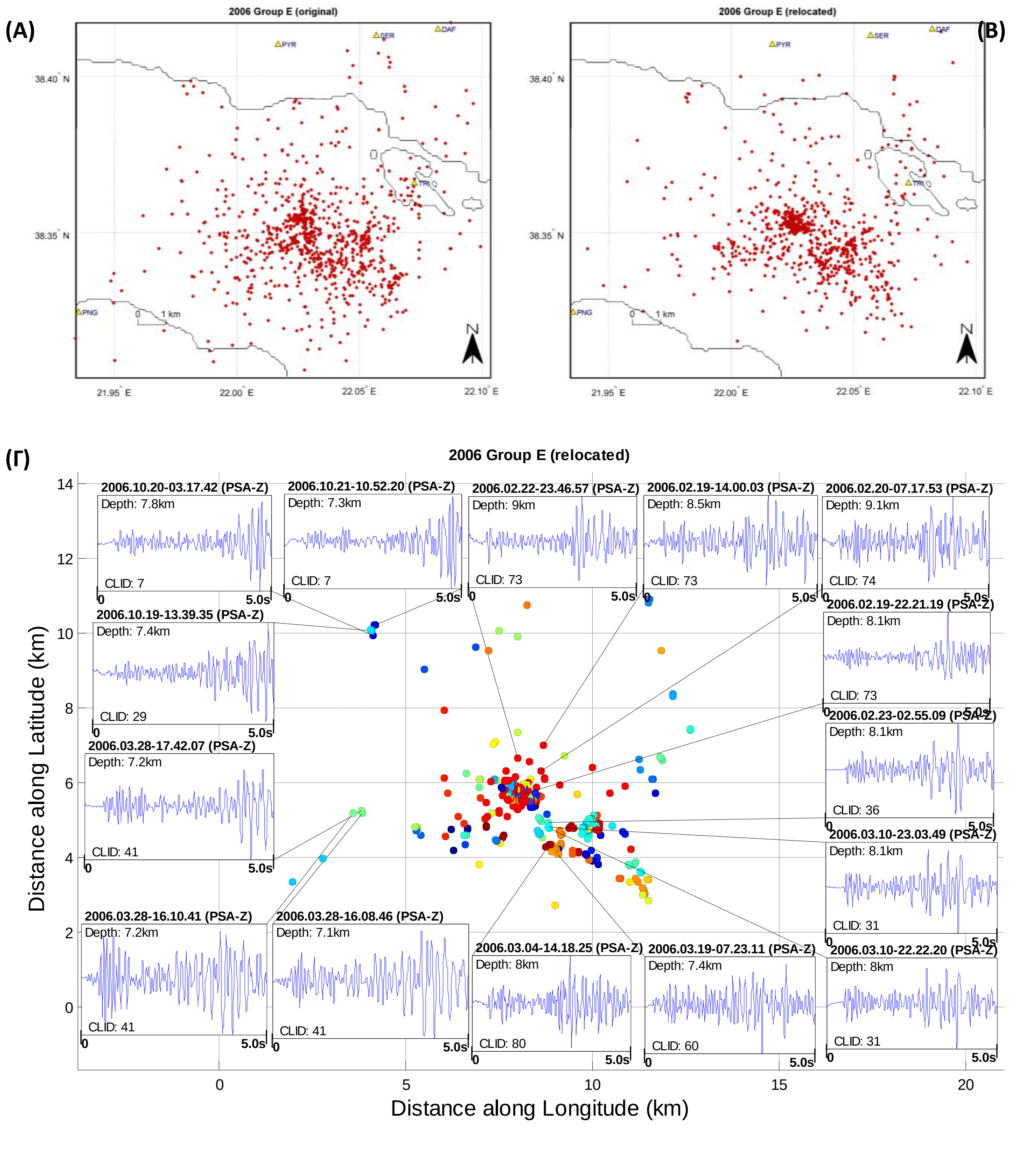
Σχήμα 5.34: Επίκεντρα σεισμών από τις Ομάδες D, E και F, **μόνο** εκείνων για τους οποίους οι χρόνοι άφιξης έχουν **διορθωθεί** με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων, πριν (A) και μετά (B) τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD με δεδομένα καταλόγου και ετεροσυσχέτισης συνδυασμένα και από τις 3 ομάδες ταυτόχρονα και παραμετροποίηση ίδια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την εικόνα του Σχήματος 5.33_{B}.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το αποτέλεσμα του επαναπροσδιορισμού για κάθε Ομάδα ξεχωριστά καθώς και οι κυματομορφές ορισμένων από τα γεγονότα που απαρτίζουν τις διάφορες συστάδες σμηνοσεισμών, από καταγραφές στην κατακόρυφη συνιστώσα του σταθμού PSA με την οποία έγινε ο εντοπισμός των συστάδων. Σε κάθε πλαίσιο κυματομορφής αναγράφεται ο αριθμός ταυτοποίησης της συστάδας (CLID). Κοινός αριθμός σε 2 διαφορετικά πλαίσια σημαίνει πως αυτά αποτελούν όμοιους σεισμούς.



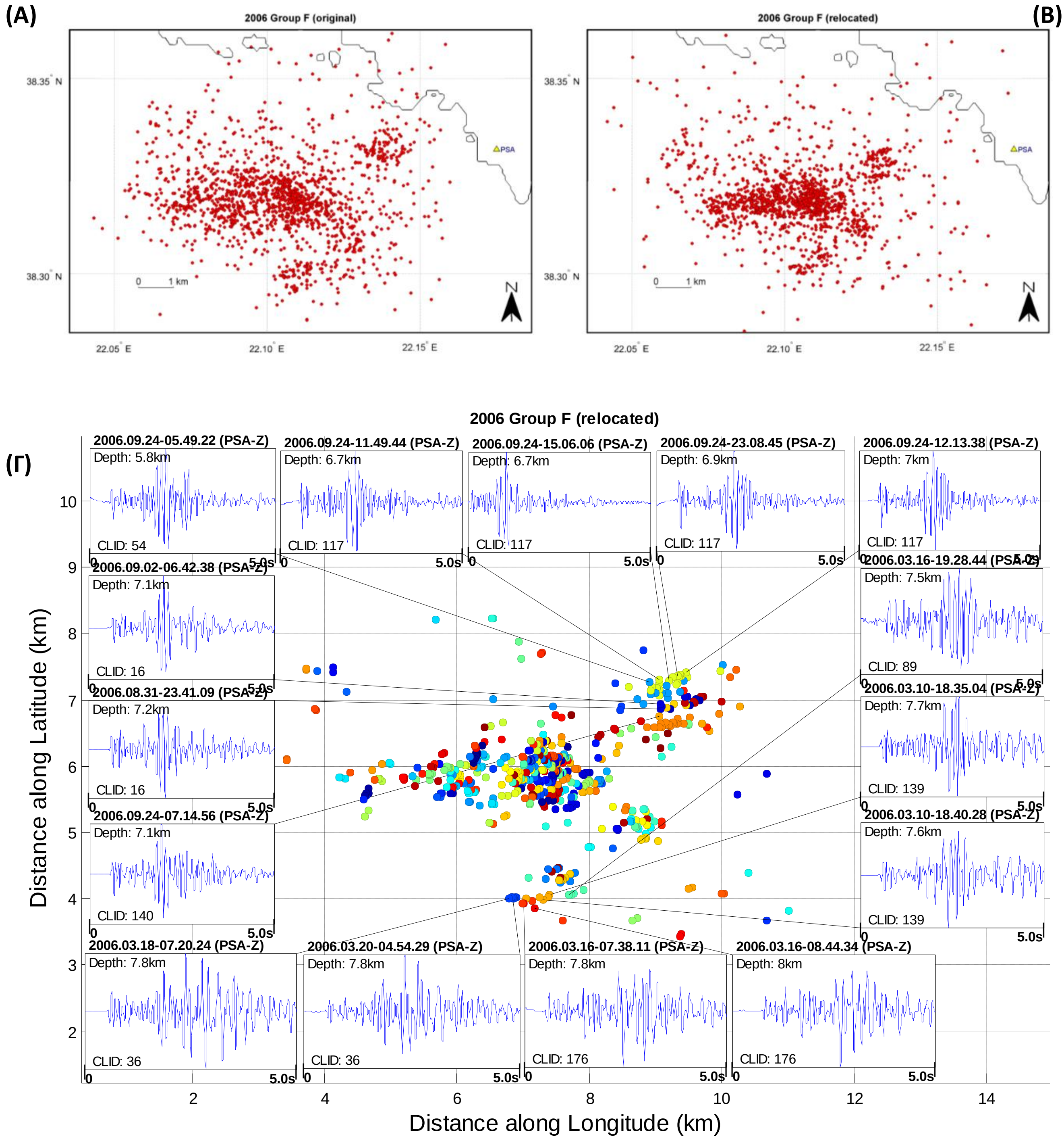
Σχήμα 5.35: Επίκεντρα σεισμών **Ομάδας D** πριν (A) και μετά (B) τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD με δεδομένα διορθωμένου καταλόγου (με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων) και ετεροσυσχέτισης. Γ) κυματομορφές της κατακόρυφης συνιστώσας του σταθμού PSA για ορισμένα από τα γεγονότα που ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών της **Ομάδας D** και για τα πρώτα 5sec της κάθε καταγραφής.

Η προσοχή μπορεί να εστιαστεί σε γειτονικά επίκεντρα με διαφορετικό χρώμα (ή διαφορετικό CLID όταν τα χρώματα είναι παρόμοια). Για παράδειγμα αναφέρονται στο Σχήμα 5.35Γ οι συστάδες με CLID: 57, 32 στο άνω αριστερό μέρος, CLID: 30, 71 στο κάτω αριστερό μέρος, και CLID: 98, 38, 108 και 115 στο δεξί μέρος, και στο Σχήμα 5.36Γ οι συστάδες με CLID: 7, 29 στο άνω αριστερό μέρος, CLID: 80, 60 και 31, 36 στο κάτω δεξί μέρος.

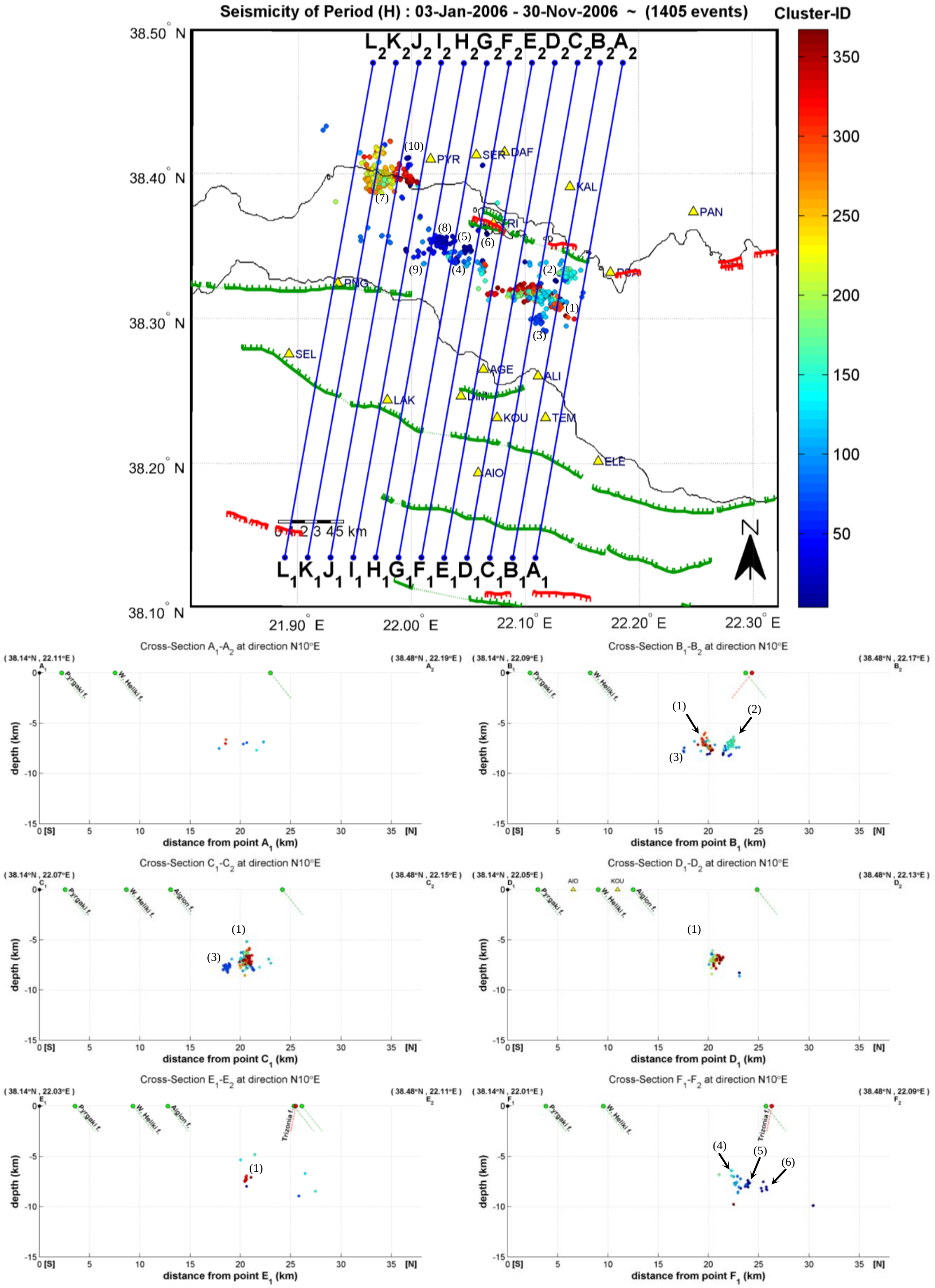


Σχήμα 5.36: Επίκεντρα σεισμών **Ομάδας Ε** πριν (Α) και μετά (Β) τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD με δεδομένα διορθωμένου καταλόγου (με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων) και ετεροσυσχέτισης. Γ) κυματομορφές της κατακόρυφης συνιστώσας του σταθμού PSA για ορισμένα από τα γεγονότα που ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών της **Ομάδας Ε**

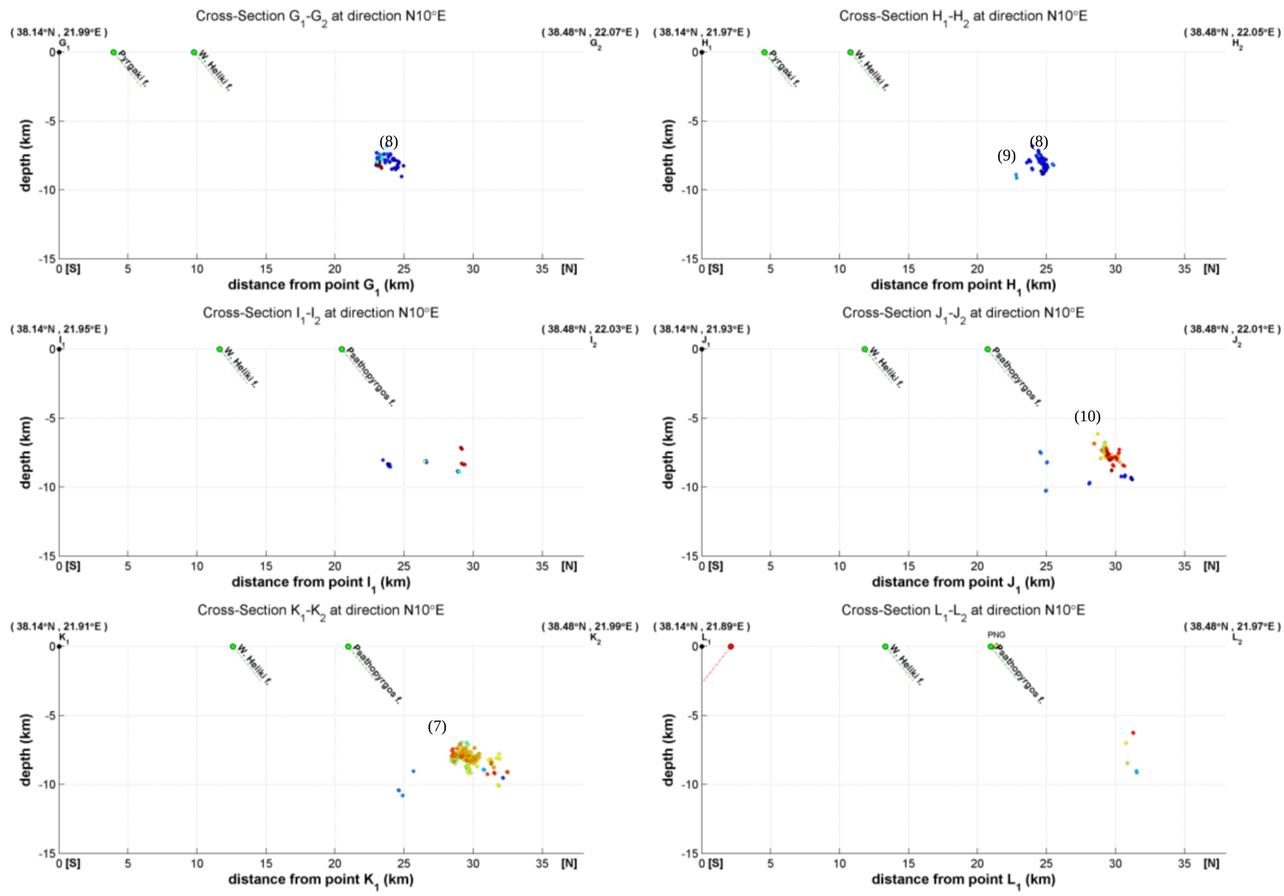
Σεισμοί με γειτονικά επίκεντρα αλλά με ανόμοιες κυματομορφές διακρίνονται και στην τελευταία ομάδα. Στο Σχήμα 5.37Γ εξετάζονται 2 περιοχές. Κυματομορφές από την πρώτη φαίνονται στο πάνω και αριστερό τμήμα του Σχήματος 5.37Γ (CLID: 140, 16, 54, 117) ενώ από τη δεύτερη στο κάτω και δεξί μέρος του σχήματος (CLID: 36, 176, 139, 89).



Σχήμα 5.37: Επίκεντρα σεισμών **Ομάδας F** πριν (Α) και μετά (Β) τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD με δεδομένα διορθωμένου καταλόγου (με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων) και ετεροσυσχέτισης. Γ) κυματομορφές της κατακόρυφης συνιστώσας του σταθμού PSA για ορισμένα από τα γεγονότα που ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών της **Ομάδας F**



Σχήμα 5.38: τομές σε διεύθυνση N10°E για τα **διορθωμένα** γεγονότα του 2006 μετά τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD. Με χρώματα διακρίνονται οι διαφορετικές συστάδες σμηνοσεισμών, αριθμημένες όπως στο Σχήμα 5.46 (βλέπε χρωματική κλίμακα Cluster-ID δεξιά από τον χάρτη στο επάνω μέρος της σελίδας).



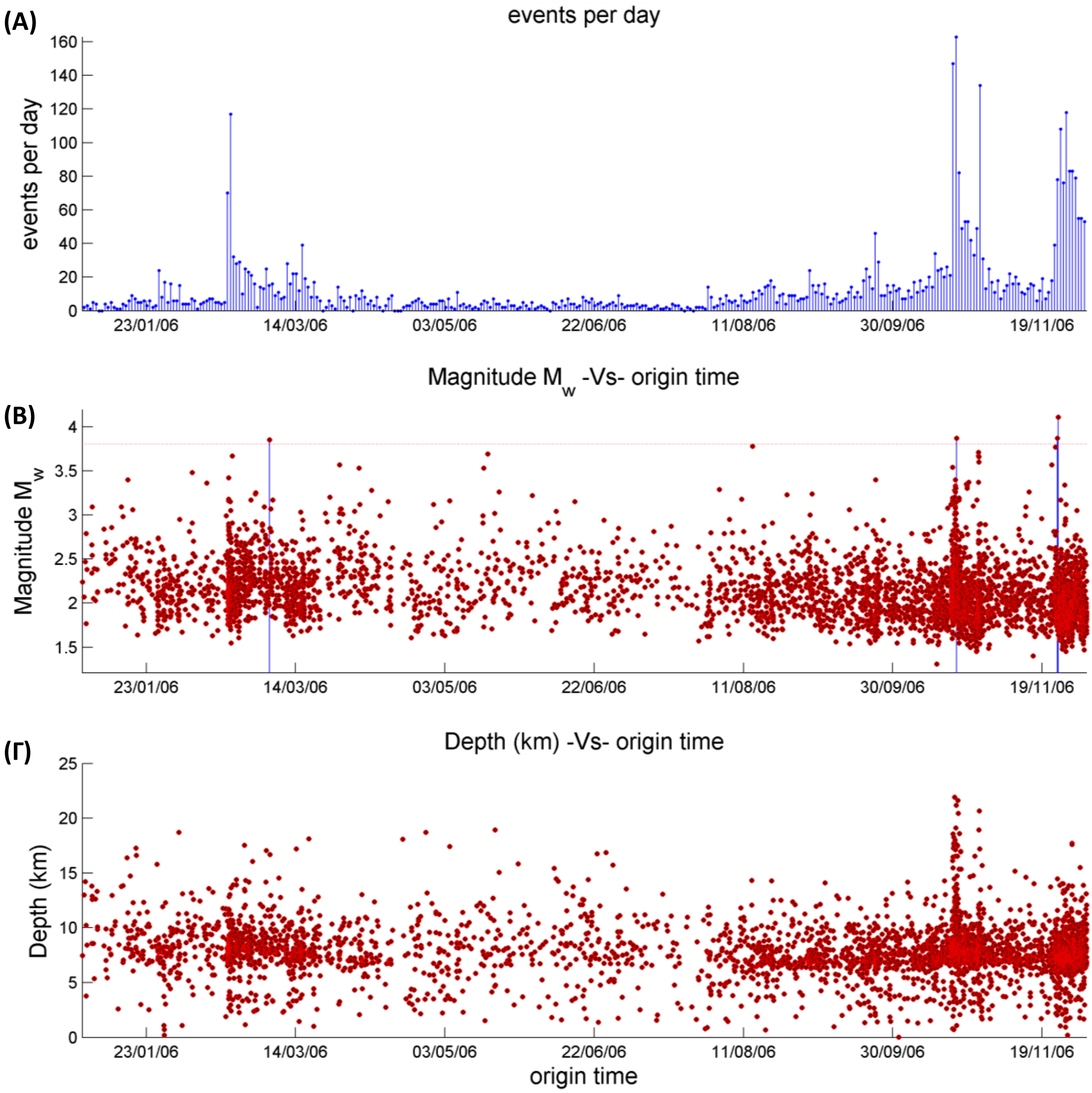
Σχήμα 5.39: (συνέχεια από το προηγούμενο).. τομές G_1-G_2, H_1-H_2, I_1-I_2, J_1-J_2, K_1-K_2, L_1-L_2 σε διεύθυνση N10°E.

Οι τομές των Σχημάτων 5.38 και 5.39 έχουν γίνει πάνω στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται και στο Σχήμα 5.34$_B$. Επιλέχθηκαν αυτοί οι σεισμοί ως οι ακριβέστερα προσδιορισμένοι και ως οι πιο χωρικά συσπειρωμένοι καθώς ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών, προκειμένου να ελαττωθεί ο «θόρυβος» υποβάθρου από σεισμούς τα υπόκεντρα των οποίων είναι περισσότερο διασκορπισμένα στον χώρο. Το χρώμα των υποκέντρων δείχνει αριθμό ταυτοποίησης συστάδας όπως φαίνεται στη χρωματική κλίμακα δεξιά από τον χάρτη του Σχήματος 5.38. Οι συστάδες έχουν αριθμηθεί βάσει του χρόνου γένεσης του πρώτου γεγονότος της κάθε μίας και αυτό δείχνει κατά κάποιο τρόπο τον χρόνο έναρξης της συστάδας. Η πραγματική τους χρονική κατανομή είναι ακριβώς αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 5.46 που παρουσιάζεται παρακάτω.

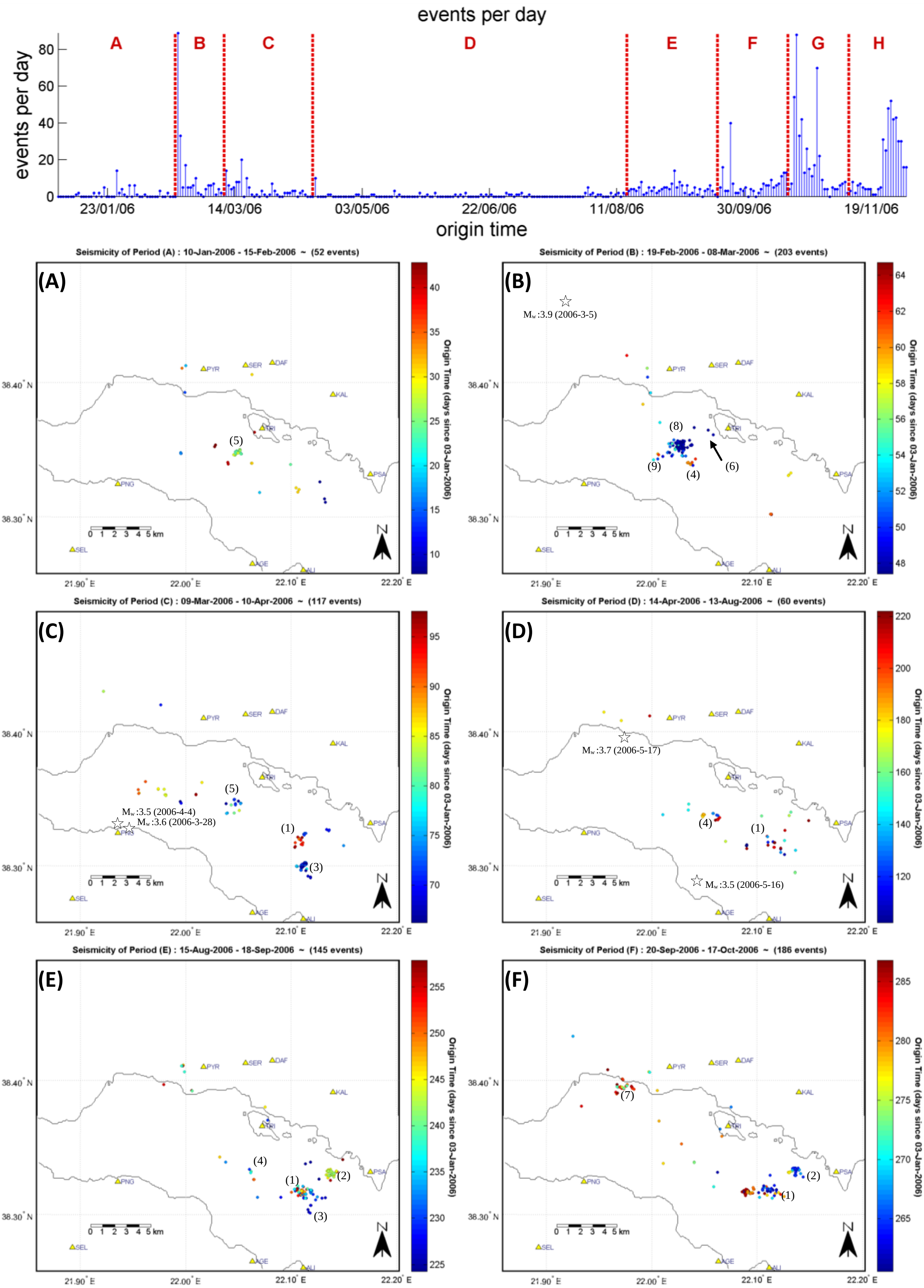
Διακρίνονται κάποιες συγκεντρώσεις υποκέντρων με γραμμικό χαρακτήρα που δίνουν μια ιδέα για τη φορά κλίσης των ρηγμάτων στα οποία ανήκουν. Έτσι είναι πιθανόν οι αριθμημένες χωρικές συστάδες 4, 9, 10 και 7 να βρίσκονται σε ρήγματα με κλίση προς Βορρά ενώ η συστάδα 2 να βρίσκεται σε κάποιο αντιθετικό ρήγμα. Λόγω του χρωματισμού των συστάδων φαίνεται ότι για παράδειγμα οι συστάδες 5 και 6 δημιουργήθηκαν κατά την ίδια χρονική περίοδο ενώ ακολούθησε η συστάδα 4 με τους διαδοχικούς σεισμούς να τείνουν ολοένα σε μικρότερα βάθη. Όμοια χρονική εξέλιξη παρουσιάζει και η συστάδα 2, η οποία έπεται της συστάδας 3, με τους σεισμούς να εκδηλώνονται από μεγαλύτερα προς μικρότερα βάθη. Η συστάδα 1 μοιάζει να είναι πιο σύνθετη και παρουσιάζει δραστηριότητα σε διαφορετικές περιόδους. Όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια κατά την παρουσίαση της χρονικής κατανομής, οι συστάδες 7 και 10 δραστηριοποιήθηκαν (μαζί με ένα μέρος της συστάδας 1) προς το τέλος της περιόδου που καλύπτουν τα δεδομένα (3 Δεκεμβρίου 2006) και η δράση τους εξακολούθησε για αρκετό διάστημα αργότερα σύμφωνα με νεότερα στοιχεία.

5.6.6 ~ *Χρονική Κατανομή της σεισμικότητας του 2006*

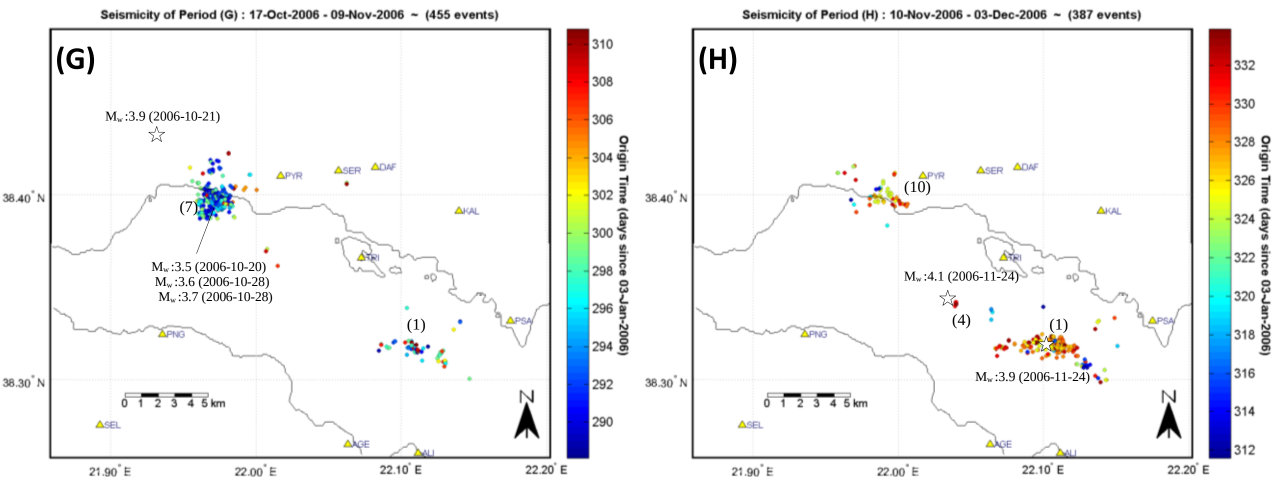
Παρακάτω παρουσιάζεται η χρονική κατανομή των σεισμών που περιλαμβάνονται στις 3 ομάδες. Για την πλήρη σεισμικότητα του 2006 βλέπε Παράρτημα Β, Σχήμα Β.36. Στη συνέχεια ακολουθούν επικεντρικοί χάρτες για 8 χρονικές περιόδους για τους σεισμούς που έχουν διορθωθεί με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων και στη συνέχεια έχουν επαναπροσδιοριστεί με το HypoDD.



Σχήμα 5.40: A) Αριθμός σεισμών ανά ημέρα, B) Μεγέθη σεισμών συναρτήσει χρόνου γένεσης, Γ) Βάθη σεισμών (μετά τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD) συναρτήσει χρόνου γένεσης. Οι παραπάνω χρονικές κατανομές έχουν γίνει για τα συνδυασμένα δεδομένα των Ομάδων D, E και F χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η υπόλοιπη σεισμικότητα του 2006. Για τον πλήρη κατάλογο βλέπε Παράρτημα Β, Σχήμα Β.36.



Σχήμα 5.41: Επικεντρικοί χάρτες επαναπροσδιορισμένης σεισμικότητας για τα διορθωμένα γεγονότα του έτους 2006. Οι χρωματικές κλίμακες αναφέρονται στον σχετικό χρόνο γένεσης σε ημέρες από τις 3 Ιανουαρίου 2006.

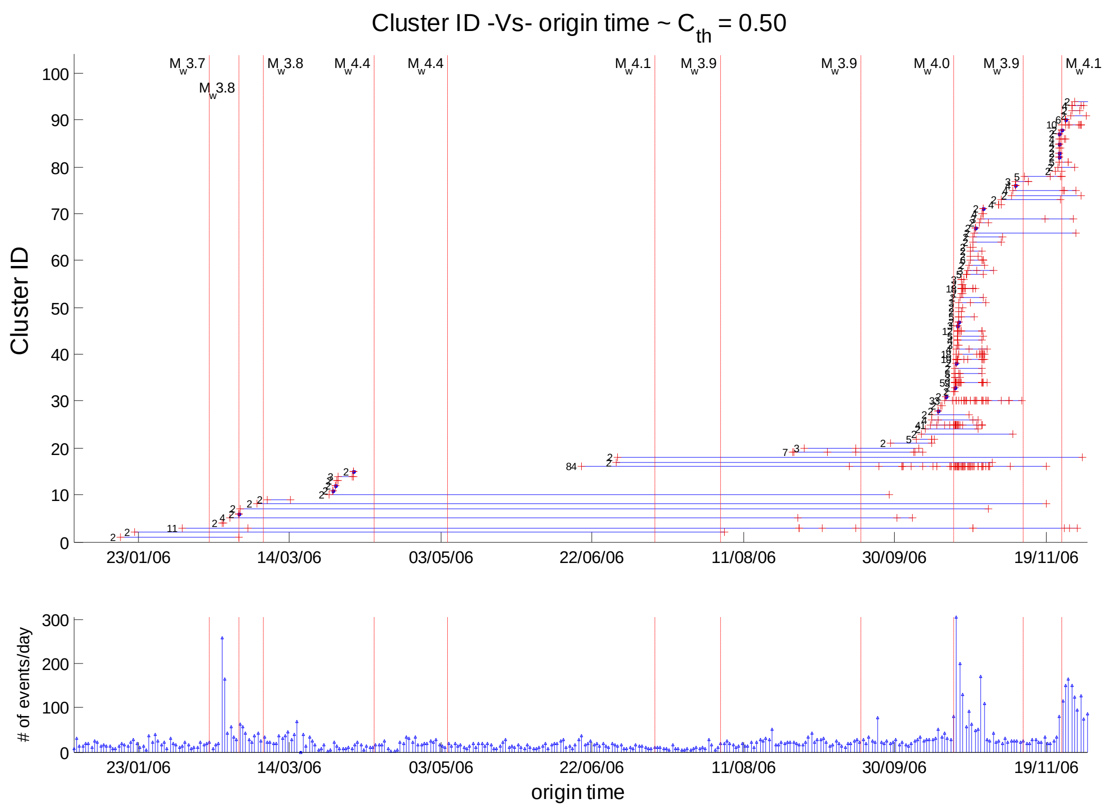


Σχήμα 5.42: (συνέχεια από το προηγούμενο) επικεντρικοί χάρτες για τις χρονικές περιόδους G και H που σημειώνονται στο άνω μέρος του προηγούμενου σχήματος.

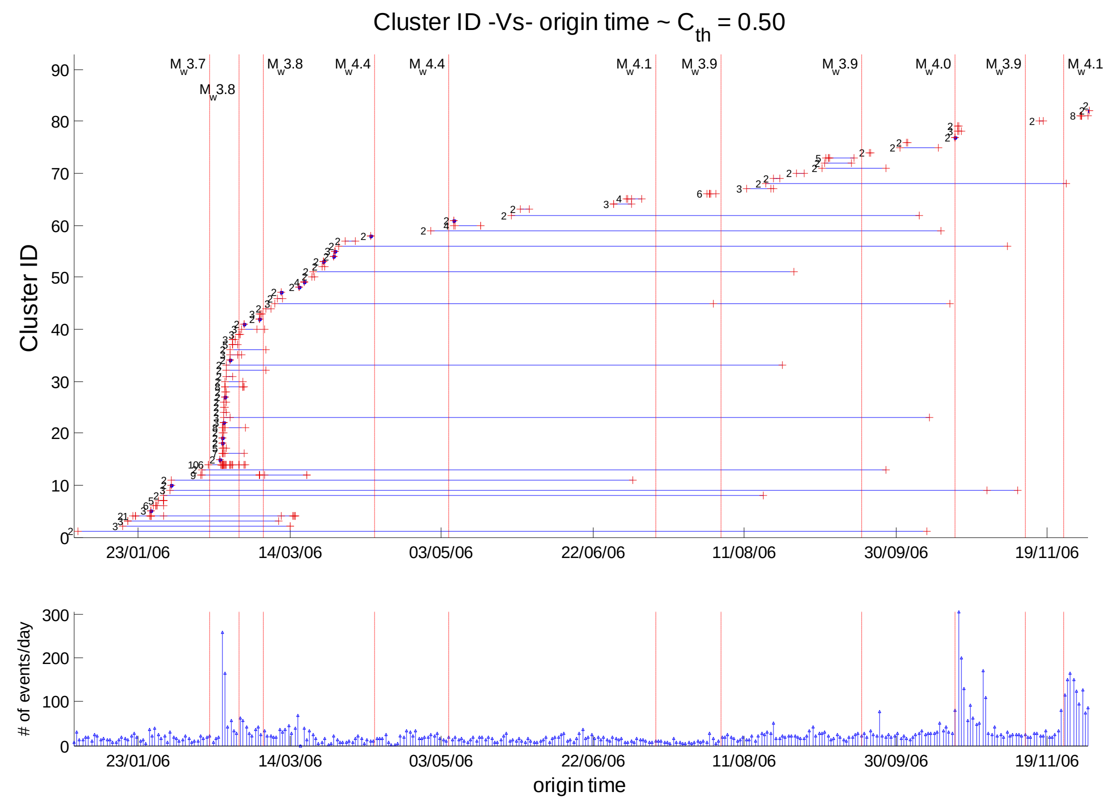
Στους παραπάνω χάρτες σημειώνονται οι αριθμοί των *χωρικών* συστάδων που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα (Σχήματα 5.38, 5.39) ώστε να διευκολύνεται η αντιστοιχία. Κατά τη διάρκεια του έτους φαίνεται το πώς δραστηριοποιούνται τα διάφορα τμήματα της υπό μελέτη περιοχής. Ενδιαφέρον παρουσιάζει κυρίως η συστάδα 1 η οποία εμφανίζει δραστηριότητα σε διάφορες χρονικές περιόδους. Η συστάδα αυτή ανήκει στην Ομάδα F, η οποία αναφέρθηκε νωρίτερα πως δεν εμφανίζει μεγάλες συστάδες σμηνοσεισμών, σε αντίθεση με την Ομάδα E. Στην ίδια ομάδα (F) ανήκουν και οι χωρικές συστάδες 2 και 3.

Στους χάρτες σημειώνονται επίσης ορισμένοι από τους σεισμούς με $M_w \geq 3.5$ και οι αντίστοιχες ημερομηνίες στις οποίες καταγράφθηκαν. Οι θέσεις τους, με εξαίρεση τους 2 σεισμούς $M_w=4.1$ και $M_w=3.9$ που συνέβησαν στις 24 Νοεμβρίου 2006 και τους 3 σεισμούς της περιόδου G (Σχήμα 5.42_G) που αναγράφονται μαζί, έχουν προκύψει από επαναπροσδιορισμό της πλήρους σεισμικότητας του 2006 (εκτός ομάδων) και συνεπώς πιθανόν να περιέχουν σημαντικά σφάλματα. Οι θέσεις των δύο μεγάλων σεισμών της περιόδου H (Σχήμα 5.42_H) έχουν επαναπροσδιοριστεί με συνδυασμό των 3 ομάδων χωρίς την υπόλοιπη σεισμικότητα του 2006 και τα υπόκεντρά τους είναι πιο αξιόπιστα. Το ίδιο ισχύει και για τους 3 σεισμούς της περιόδου G που βρίσκονται εντός της συστάδας 7 (δεν σημειώνονται με αστέρια για να μην επικαλύψουν τα υπόλοιπα επίκεντρα) οι οποίοι συμπεριλαμβάνονται στους σεισμούς που έχουν διορθωθεί με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων. Πιθανόν και ο σεισμός $M_w=3.9$ της ίδιας περιόδου, που εμφανίζεται πιο βορειοδυτικά, στην πραγματικότητα να εντοπίζεται μέσα στον όγκο που καταλαμβάνει η συστάδα 7, κάτι που μπορεί να επιβεβαιωθεί από επανεξέταση των χρόνων άφιξης.

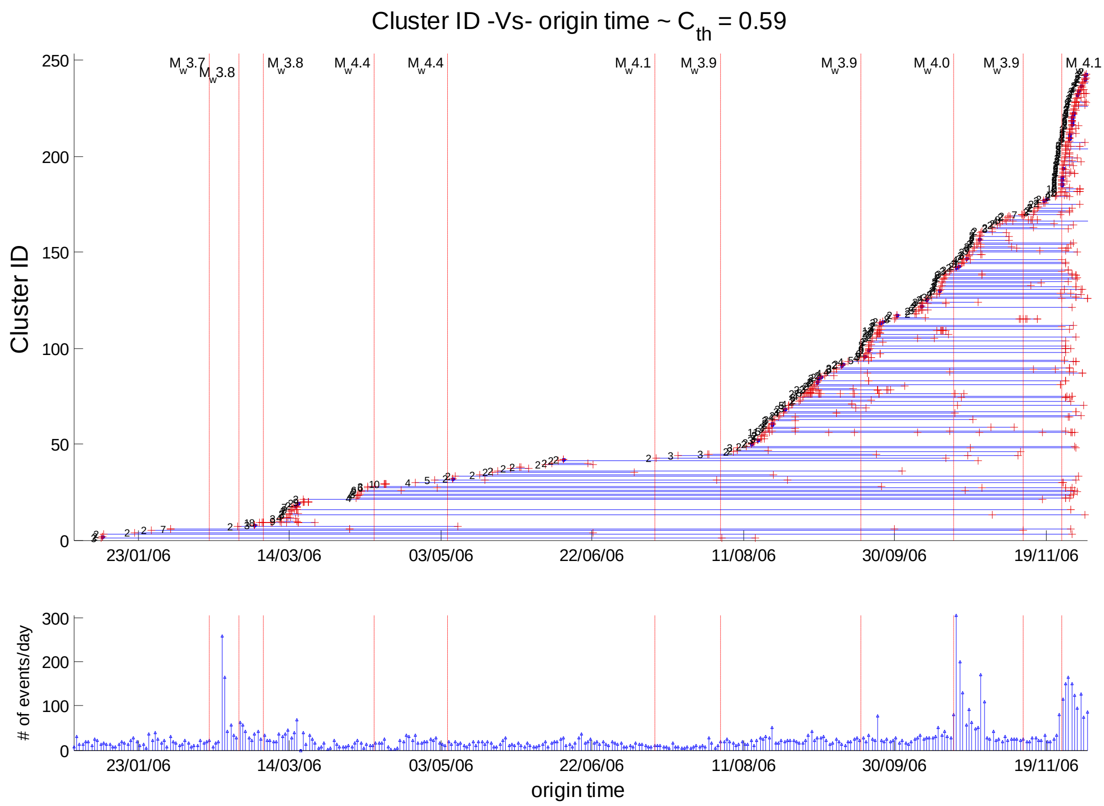
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χρονικές κατανομές των συστάδων σμηνοσεισμών ξεχωριστά για την κάθε ομάδα (σε κοινό χρονικό άξονα). Σημειώνονται οι χρόνοι γένεσης ορισμένων από τους μεγάλους σεισμούς του καταλόγου, όπως προέκυψαν από τα μεγέθη ροπής που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 2. Αρκετοί από αυτούς βρίσκονται εκτός δικτύου, όπως ο $M_w=4.4$ στις 5/5/2006 (στα ανατολικά) και ο $M_w=4.0$ στις 19/10/2006 (στα νότια). Τον $M_w=4.0$, του οποίου το επίκεντρο εντοπίζεται σε συντεταγμένες 37.87°N, 22.04°E, ακολούθησε ένα πλήθος σμηνοσεισμών στη χωρική συστάδα 7 (Σχήμα 5.42_G) με 2 σεισμούς $M_w=3.5$ και $M_w=3.9$ (πιθανόν εντός της συστάδας) στις 20 και 21 Οκτωβρίου αντίστοιχα, και αργότερα (28/10/2006) με άλλους 2 σεισμούς $M_w=3.6$ και $M_w=3.7$. Η τελευταία δραστηριότητα στη συστάδα (10) ξεκίνησε στις 23/11/2006 με έναν σεισμό $M_w=3.8$ ενώ λίγο αργότερα εκδηλώθηκε ένας σεισμός $M_w=3.9$ εντός της συστάδας (1) (Σχήμα 5.42_H) με τον οποίο έγινε η έναρξη μιας σειράς από νέες συστάδες σμηνοσεισμών στην περιοχή και στη συνέχεια ένας σεισμός $M_w=4.1$ (24/11/2006) ο οποίος δημιούργησε μια πολύ μικρή συστάδα σμηνοσεισμών στην περιοχή 4.



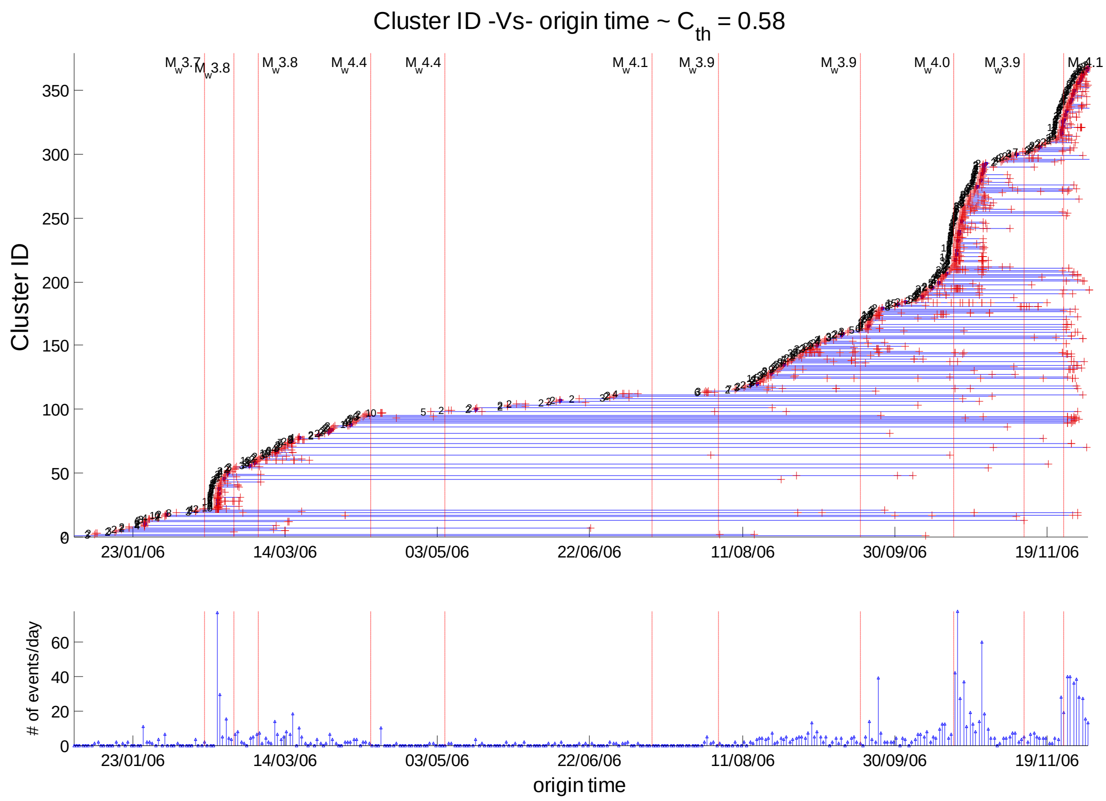
Σχήμα 5.43: Χρονική κατανομή συστάδων σμηνοσεισμών για την **Ομάδα D** με $\mathbf{C_{th}}$=0.50



Σχήμα 5.44: Χρονική κατανομή συστάδων σμηνοσεισμών για την **Ομάδα E** με $\mathbf{C_{th}}$=0.50



Σχήμα 5.45: Χρονική κατανομή συστάδων σμηνοσεισμών για την **Ομάδα F** με $\mathbf{C_{th}}$=0.59



Σχήμα 5.46: Χρονική κατανομή συστάδων σμηνοσεισμών για **όλες τις ομάδες** συνολικά (μόνο για όσους σεισμούς έχουν διορθωθεί με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων) με $\mathbf{C_{th}}$=0.58-0.60. Οι αριθμοί ταυτοποίησης των συστάδων (Cluster-ID) βρίσκονται σε αντιστοιχία με τα χρώματα των υποκέντρων στα Σχήματα 5.38 και 5.39.

Επίλογος

Στην εργασία αυτή εξετάστηκε το φαινόμενο των σεισμών με όμοιες κυματομορφές. Αναλύθηκαν διάφοροι τρόποι μέτρησης της ομοιότητας τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο των συχνοτήτων. Επιλέχθηκε η συνάρτηση ετεροσυσχέτισης για τον καθορισμό της ομοιότητας των κυματομορφών ενώ η συνοχή στο πεδίο συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο κριτήριο κατά την εξέταση μεμονωμένων περιπτώσεων, όπως σημάτων με ισχυρή αρνητική συσχέτιση ή με ασύμμετρη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης. Δύο από τα μειονεκτήματα της χρήσης της συνάρτησης συνοχής και του ετεροφάσματος είναι ότι, αφενός μεν, υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η μέση συνοχή είναι υψηλή ενώ τα σήματα δεν ανήκουν σε όμοιους σεισμούς και, αφετέρου, η φάση του ετεροφάσματος παρουσιάζει προβλήματα λόγω της αναδίπλωσης των τιμών της στο διάστημα [-π,π] ακόμα και σε περιπτώσεις ισχυρής συνοχής και με κυματομορφές που βρίσκονται ήδη χρονικά μετατοπισμένες στην καθυστέρηση που αντιστοιχεί στο ολικό μέγιστο της ετεροσυσχέτισης (Παράρτημα Β, Σχήμα Β.23). Εκτός αυτού, ο αριθμός συχνοτικών δειγμάτων για τον υπολογισμό της συνοχής και της φάσης του ετεροφάσματος σε συχνότητες μεταξύ 2-10Hz όταν το χρονικό παράθυρο είναι πολύ μικρό, όπως στις εφαρμογές τεχνικών CWI (*Coda Wave Interferometry*), είναι μικρότερος από τον αντίστοιχο αριθμό χρονικών δειγμάτων που είναι διαθέσιμος για τη μέθοδο ετεροσυσχέτισης και γι' αυτόν τον λόγο τα αποτελέσματα της δεύτερης κρίνονται στατιστικά σημαντικότερα.

Το ολικό μέγιστο της ετεροσυσχέτισης από μόνο του μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα ικανό και αναγκαίο κριτήριο για τον καθορισμό δύο σεισμικών σημάτων ως όμοιων. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν κάποια άλλα χαρακτηριστικά της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης, όπως η συμμετρία γύρω από το ολικό μέγιστο, η διαφορά του από τα δευτερεύοντα μέγιστα σε σχέση με τη διαφορά της μονάδας από τα δευτερεύοντα μέγιστα των αυτοσυσχετίσεων των επιμέρους σημάτων και η απόρριψη των περιπτώσεων στις οποίες το αρνητικό ολικό ελάχιστο είναι κατά απόλυτη τιμή μεγαλύτερο από το θετικό ολικό μέγιστο, προκειμένου να τεθούν επιπλέον όροι για την ποσοτικοποίηση της ομοιότητας μεταξύ σημάτων. Με αυτά τα κριτήρια απορρίφθηκαν περιπτώσεις στις οποίες εμφανιζόταν ισχυρό μέγιστο ετεροσυσχέτισης χωρίς να υπάρχει συμμετρία (Παράρτημα Β, Σχήματα Β.10, Β.11), περιπτώσεις ισχυρού αρνητικού ελάχιστου (Παράρτημα Α.4) καθώς και περιπτώσεις στις οποίες το μέγιστο είχε βρεθεί υψηλό για λόγους που δεν έχουν να κάνουν με ομοιότητα σημάτων αλλά με συσχέτιση θορύβου σε μικρά χρονικά παράθυρα. Σημαντικό πρώτο βήμα για μια μελέτη όμοιων σεισμών αποτελεί η σωστή κατασκευή ενός πίνακα ομοιότητας ο οποίος πρέπει να δείχνει το βαθμό ομοιότητας ανάμεσα σε 2 οποιαδήποτε γεγονότα χωρίς τεχνητά σφάλματα.

Τον χαρακτηρισμό της ομοιότητας των σημάτων ακολούθησε η ομαδοποίηση γεγονότων σε συστάδες σμηνοσεισμών με μέθοδο *απλής σύνδεσης*. Σύμφωνα με αυτόν τον αλγόριθμο «αν το Α είναι όμοιο με το Β και το Β είναι όμοιο με το Γ, τότε το Α είναι *περίπου* όμοιο με το Γ αλλά πιθανόν σε διαφορετικό βαθμό». Από αυτή την ομαδοποίηση αναδύεται η έννοια των 'άμεσων' και 'έμμεσων' συγγενών, ανάλογα με το αν η ομοιότητα ανάμεσα σε δύο σήματα ελέγχεται απ' ευθείας από τον πίνακα ομοιότητας ή μέσω μιας ακολουθίας γεγονότων με τα διαδοχικά γεγονότα να είναι ανά δύο όμοια μεταξύ τους. Ένα σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι η έννοια των συστάδων όμοιων σεισμών είναι σχετική και εξαρτάται από την τιμή κατωφλίου που έχει οριστεί. Μια οσοδήποτε πυκνή κατανομή σεισμών μπορεί κατά αυτόν τον τρόπο να διαχωριστεί σε επιμέρους μικρότερες συστάδες, με την επιλογή μιας υψηλής τιμής κατωφλίου, και στη συνέχεια να μελετηθεί ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται μεταξύ τους καθώς η τιμή κατωφλίου μειώνεται, όπως φαίνεται από την ένταξη των μικρότερων συστάδων στον κύριο κορμό του δενδρογράμματος στα Κεφάλαια 3, 4 και 5.

Ο χωρισμός σε συστάδες γίνεται κυρίως για τον έλεγχο πριν και μετά τον επαναπροσδιορισμό, καθώς αναμένεται τα γεγονότα της κάθε συστάδας να έχουν έρθει πιο κοντά μεταξύ τους και να έχουν διαχωριστεί από τα γεγονότα των άλλων συστάδων, αλλά και για τη λεπτομερή διάκριση ανάμεσα σε γειτονικές συστάδες με ελάχιστα διαφορετικά χαρακτηριστικά που εκτός από μικρές διαφορές στις υποκεντρικές θέσεις συμπεριλαμβάνουν διαφορές στους μηχανισμούς γένεσης. Η τιμή κατωφλίου μπορεί να επιλεχθεί με λιγότερο υποκειμενικό τρόπο από τη μορφή του δενδρογράμματος, όπως, για παράδειγμα, από την τιμή εκείνη στην οποία η διαφορά του συνολικού αριθμού γεγονότων που εντάσσονται σε συστάδες σμηνοσεισμών από το μέγεθος της μεγαλύτερης συστάδας μεγιστοποιείται. Ωστόσο, αυτή η τιμή διαφέρει εν γένει για σήματα σεισμών από περιοχή σε περιοχή ή για την ίδια περιοχή σε διαφορετικές χρονικές περιόδους για τον ίδιο σταθμό όσο και από σταθμό σε σταθμό για την ίδια σεισμικότητα.

Ακολούθησε, στη συνέχεια, ο επαναπροσδιορισμός της σεισμικότητας των ετών 2000-2001 και 2005-2006 της περιοχής του Δυτικού Κορινθιακού κόλπου με τη χρήση δεδομένων του τοπικού δικτύου CRL (*Corinth Rift Laboratory*), ορισμένων σταθμών του Πανεπιστημίου Αθηνών (σταθμοί LAK και DAF) καθώς και του Πανεπιστημίου Charles της Πράγας (σταθμός SER). Ο επαναπροσδιορισμός έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος HypoDD (*Waldhauser, 2001*) με χρήση δεδομένων καταλόγου και ετεροσυσχέτισης. Η διαθεσιμότητα κυματομορφών επιτρέπει να ανιχνευθούν οι σεισμοί που έχουν όμοιες κυματομορφές, άρα και όμοια χαρακτηριστικά, μέσα από τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν στα Κεφάλαια 1 και 3. Από τη στιγμή που διακριθούν οι όμοιοι σεισμοί, έστω με τον έλεγχο κυματομορφών από έναν μόνο σταθμό ο οποίος όμως παρέχει τα πληρέστερα και ποιοτικότερα δεδομένα για την περιοχή ενδιαφέροντος κατά την ορισμένη χρονική περίοδο, μπορούν στη συνέχεια να μετρηθούν τόσο ο βαθμός ομοιότητας όσο και οι διαφορικοί χρόνοι άφιξης χωριστά για τα P και S κύματα στον *κάθε* σταθμό και σε *όλες* τις διαθέσιμες, με καλή κατάσταση λειτουργίας, συνιστώσες, ανάμεσα σε όσα *ζεύγη όμοιων σεισμών* έχουν ανιχνευθεί με την προκαταρτική μελέτη. Η χρήση δεδομένων ετεροσυσχέτισης παίζει καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση της συσταδοποίησης ανάμεσα στα γεγονότα που έχουν διαθέσιμες συνδέσεις τέτοιου είδους. Η εικόνα του σωστού επαναπροσδιορισμού σεισμικών παραμέτρων επιβεβαιώνεται από τη συσσώρευση γεγονότων που ανήκουν στην ίδια συστάδα σμηνοσεισμών σε στενές περιοχές και από τη χωρική διάκριση ανάμεσα σε διαφορετικές συστάδες σμηνοσεισμών.

Καθώς η διαδικασία εντοπισμού όμοιων σεισμών είναι «τυφλή» στις υποκεντρικές αποστάσεις, τους χρόνους γένεσης και όλα τα άλλα χαρακτηριστικά που προσδιορίζονται με ανεξάρτητες μεθόδους, αυτό έχει ως αποτέλεσμα μερικές φορές μια συστάδα σμηνοσεισμών να είναι αρχικά διάσπαρτη στον χώρο, κάτι που δεν συνάδει με τον ορισμό των όμοιων σεισμών. Αν η μέθοδος εντοπισμού όμοιων σεισμών λειτουργεί σωστά τότε το πιθανότερο είναι αυτή η διασπορά να οφείλεται σε μεγάλα σφάλματα στον προσδιορισμό των θέσεων, τα οποία ίσως να μην αντικατοπτρίζονται από τα τυπικά σφάλματα που μας δίνει ο αλγόριθμος προσδιορισμούς θέσης. Για τη σεισμικότητα των ετών 2005-2006 θεωρήθηκε αναγκαία η διόρθωση των χρόνων άφιξης τουλάχιστον σε όσους σεισμούς βρέθηκαν να ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών, και αυτό διότι οι χρόνοι άφιξης για τα έτη αυτά έχουν προσδιοριστεί με έναν αυτόματο αλγόριθμο και δεν έχουν ελεγχθεί από αναλυτή.

Από την κάθε συστάδα σμηνοσεισμών επιλέχθηκε 1 σεισμός με τις περισσότερες διαθέσιμες φάσεις, τα μικρότερα σφάλματα θέσης και RMS, και, συνήθως, με τις καθαρότερες καταγραφές (μεγαλύτερο λόγο σήματος προς θόρυβο). Οι σεισμοί αυτοί ελέγχθηκαν με *χειρονακτικό* τρόπο, έγιναν διορθώσεις στους χρόνους άφιξης και προσθήκες χρονικών αφίξεων των φάσεων P και S σε όλους τους διαθέσιμους σταθμούς. Με βάση αυτά τα γεγονότα, τα οποία θεωρήθηκαν ως «κύρια γεγονότα» (*Master Events*), *κατασκευάστηκε* η αυτόματη διαδικασία της ομώνυμης μεθόδου με την οποία ανιχνεύονται τα όμοια τμήματα των κυμάτων P ή S ανάμεσα στα κύρια γεγονότα και σε όλα τα όμοιά τους (εξαρτημένα γεγονότα ή *Slave Events*) σε όλους τους σταθμούς και τις συνιστώσες και καθορίζονται οι αντίστοιχοι χρόνοι άφιξης στους ίδιους σχετικούς χρόνους με αυτούς που έχουν προσδιοριστεί με χειρονακτικό τρόπο στις κυματομορφές των κύριων γεγονότων. Έτσι γίνεται μια *αυτόματη συστηματική επανάληψη* των χειρονακτικά καθορισμένων χρόνων άφιξης των κύριων γεγονότων στους διάφορους σταθμούς σε όλα τα εξαρτημένα γεγονότα. Με τη διαδικασία αυτή όχι μόνο εξοικονομείται χρόνος αλλά και προσδιορίζονται ακριβέστερα, με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, οι χρόνοι άφιξης στα όμοια τμήματα των κυματομορφών. Αυτό δεν συνεπάγεται ότι όλοι οι σεισμοί θα έχουν ακριβώς το ίδιο υπόκεντρο, όχι μόνο λόγω της πιθανής διαφοράς στον αριθμό των διαθέσιμων δεδομένων (σταθμών) ανάμεσα στα εξαρτημένα και τα κύρια γεγονότα, αλλά κυρίως λόγω της παρατήρησης ότι 2 κυματομορφές μπορούν να είναι *τμηματικά όμοιες*, με όμοια κύματα P και S αλλά με *διαφορετικές διαφορές* χρόνων άφιξης S-P.

Η μεταβολή των επικεντρικών (και υποκεντρικών) θέσεων φανέρωσε πως τα σφάλματα των αρχικών θέσεων ήταν πράγματι μεγαλύτερα από τα τυπικά σφάλματα που έδινε ο αλγόριθμος του προσδιορισμού θέσης (HYPO71), διότι δεν ελάμβανε υπόψη του τα σφάλματα στους αυτόματα καθορισμένους χρόνους άφιξης που πιθανόν να δίνει η έξοδος του αντίστοιχου αυτόματου αλγόριθμου. Τα πραγματικά σφάλματα παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.6 και 5.29 στα οποία φαίνεται ότι σε μερικές περιπτώσεις κάποια επίκεντρα έπρεπε να μετατοπιστούν κατά περισσότερο από 5km προκειμένου να βρεθούν στη σωστή περιοχή μαζί με τα υπόλοιπα γεγονότα της συστάδας σμηνοσεισμών στην οποία ανήκουν.

Η μέθοδος των «κύριων γεγονότων» (*Master Events*) χρησιμοποιήθηκε σε επιλεγμένες ομάδες σεισμών (Ομάδες C, D, E και F στο Κεφ. 5). Για την Ομάδα C του έτους 2005 χρησιμοποιήθηκαν 180 κύρια γεγονότα (1 ανά συστάδα σμηνοσεισμών) με τα οποία διορθώθηκαν 328 εξαρτημένα γεγονότα (επίδοση ~182%). Από τις Ομάδες D, E και F του έτους 2006 χρησιμοποιήθηκαν 361 κύρια γεγονότα και διορθώθηκαν 1261 εξαρτημένα γεγονότα (επίδοση ~350%). Η μέθοδος αυτή μπορεί να επεκταθεί σε όλον τον κατάλογο με τη βοήθεια ενός μη-τετραγωνικού (άρα και μη-συμμετρικού) πίνακα ομοιότητας ώστε να διορθωθούν εξαρτημένα γεγονότα και εκτός των ομάδων αυτών. Ανάλογα με την τιμή κατωφλίου που θα τεθεί σε μια τέτοια διαδικασία δύναται να διορθωθούν επιπλέον 221 από τα 4330 (5.1%) του 2005 και 321 γεγονότα από τα 4428 (7.2%) του 2006 (όλα αυτά εκτός των ομάδων C, D, E και F), με χρήση 2130 κύριων γεγονότων (508 από το 2005 και 1622 από το 2006) και τιμή κατωφλίου C_{th}=0.5 στον αντίστοιχο πίνακα ομοιότητας. Αν η τιμή κατωφλίου μειωθεί σε C_{th}=0.35 τότε τα νούμερα ανέρχονται σε 330 (7.6%) και 539 (12.2%) για τους καταλόγους των ετών 2005 και 2006 αντίστοιχα. Η μέθοδος αυτή μπορεί να επεκταθεί στη διόρθωση και άλλων τμημάτων του καταλόγου αν αυξηθεί ο αριθμός των κύριων γεγονότων ή ακόμα και να εφαρμοστεί για τη διόρθωση και προσθήκη φάσεων σε δεδομένα άλλων ετών, με τα οποία μπορούν να εντοπιστούν όμοιοι σεισμοί.

Με τον επαναπροσδιορισμό με το πρόγραμμα HypoDD (*Waldhauser, 2001*) δημιουργήθηκε μια ευκρινέστερη εικόνα της σεισμικότητας η οποία ενισχύθηκε σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση δεδομένων ετεροσυσχέτισης, που ήταν ένα από τα βασικά μελήματα της εργασίας αυτής. Έγιναν πολλές προσπάθειες επαναπροσδιορισμού με διαφορετικούς καταλόγους (πλήρεις ή κατά ομάδες) και με διαφορετικά δεδομένα εισόδου (καταλόγου, ετεροσυσχέτισης ή και των δύο μαζί). Για τα έτη 2000-2001 επαναπροσδιορίστηκαν συνολικά ~5700 γεγονότα, εκ των οποίων 1357 από την Ομάδα A και 1449 από την Ομάδα B ενώ τα υπόλοιπα με συνδέσεις από δεδομένα καταλόγου. Για τα έτη 2005-2006 σημαντικά κρίθηκαν μόνο όσα γεγονότα βρίσκονται εντός των ομάδων καθώς από αυτά, για ένα ποσοστό τους, διατίθενται διορθωμένοι χρόνοι άφιξης με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων (*master events*) καθώς και δεδομένα ετεροσυσχέτισης. Επαναπροσδιορίστηκαν 1170 γεγονότα από την Ομάδα C για το 2005 και 3508 γεγονότα από τις Ομάδες D, E και F για το 2006.

Στις τομές που παρουσιάζονται στα Κεφάλαια 4 και 5 διακρίνονται πλέον με μεγάλη ευκρίνεια οι χωρικές κατανομές των συστάδων και δίνονται επιπλέον στοιχεία για την κατηγοριοποίησή τους σε επιφάνειες γνωστών ενεργών ρηγμάτων. Οι βελτιωμένες θέσεις, με σφάλματα που ανέρχονται σε μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες μέτρα, μπορούν να χρησιμεύσουν σε μελέτες που απαιτούν ακρίβεια τέτοιας τάξης μεγέθους, όπως η μέτρηση κλασματικών διαστάσεων των χωρικών κατανομών σε τοπική κλίμακα, λαμβανομένου υπόψη του γεγονότος ότι το δίκτυο CRL καλύπτει μια περιοχή 30×30km^2 και ότι τέτοιου είδους μελέτες απαιτούν ένα εύρος κλιμάκων τουλάχιστον 2 τάξεων μεγέθους.

Παράλληλα με τη μελέτη των όμοιων σεισμών, αναπτύχθηκε μια αυτόματη διαδικασία προσδιορισμού μεγέθους σεισμικής ροπής από τη φασματική ανάλυση των κυματομορφών με τη χρήση μιας ιδιαίτερης συνάρτησης προσαρμογής (εξ. 2.17). Για τους σκοπούς της εργασίας μετρήθηκαν τα μεγέθη $\mathbf{M_w}$ για ~16500 σεισμούς από τα έτη 2000, 2001, 2005 και 2006. Η σταθερότητα που παρουσιάζουν οι λύσεις για τα $\mathbf{M_w}$ επιτρέπει τον ασφαλή τους προσδιορισμό εφόσον οι υποκεντρικές αποστάσεις είναι σωστές. Ωστόσο, η μέθοδος μπορεί να επεκταθεί στον υπολογισμό και άλλων παραμέτρων, όπως η γωνιακή συχνότητα $\mathbf{f_c}$, η κλίση του φάσματος πλατών στις υψηλές συχνότητες $\boldsymbol{\eta}$, και ο παράγοντας απόσβεσης $\mathbf{k}$, για τον εμπλουτισμό του σεισμικού καταλόγου με αυτές τις παραμέτρους. Αυτό θα αποτελέσει μέρος μιας επόμενης εργασίας.

Μετά από την ανασκόπηση των αποτελεσμάτων αξίζει να γίνει μια αναφορά σε μερικές τεχνικές λεπτομέρειες. Με εξαίρεση τη χρήση των προγραμμάτων HYPO71 (*Lee & Lahr, 1972*) και HypoDD (*Waldhauser, 2001*) για τον αρχικό προσδιορισμό υποκεντρικών θέσεων και χρόνων γένεσης και για τον επαναπροσδιορισμό τους αντίστοιχα, όλοι οι υπολογισμοί και οι αυτόματες διαδικασίας που ήταν απαραίτητες για τη διεκπεραίωση αυτής της εργασίας καθώς και για την κατασκευή των γραφημάτων για τη βέλτιστη απεικόνιση των αποτελεσμάτων, γράφτηκαν από την αρχή σε κώδικα MATLAB R14. Γράφτηκαν περίπου 1500 υποπρογράμματα τα οποία είναι μέρος μερικών δεκάδων κύριων προγραμμάτων και πολλών άλλων βοηθητικών ή προσαρμοσμένων σε ειδικές περιπτώσεις. Αυτά περιλαμβάνουν από απλές διαδικασίες όπως η ανάγνωση και εγγραφή αρχείων με δεδομένα χρόνων άφιξης, σεισμικού καταλόγου και άλλων αρχείων τύπου ASCII, μετατροπές ανάμεσα σε διάφορα *format*, υπολογισμό ετεροσυσχέτισης και συνοχής, φάσματα, κατασκευή αρχείου εισόδου DT.CT για τα δεδομένα καταλόγου στο HypoDD, εφαρμογές μέτριας δυσκολίας όπως απεικόνιση επικέντρων σε χάρτες, τομές, χρονοδιαγράμματα, πρακτικές εφαρμογές όπως ένα γραφικό περιβάλλον για το HYPO71 (Σχήμα Β.47) για χειρονακτικό καθορισμό ή διόρθωση χρόνων άφιξης με ταυτόχρονη απεικόνιση της νέας θέσης και των νέων σφαλμάτων, με ενσωμάτωση συχνοτικών φίλτρων και φίλτρων θορύβου, προγράμματα για την αποκοπή των κυματομορφών κατά το στάδιο της προ-επεξεργασίας, προκειμένου στη συνέχεια να γίνει η ετεροσυσχέτιση ανάμεσά τους, προγράμματα απεικόνισης κυματομορφών ανά δύο με ενσωματωμένη λειτουργία αυτόματης χρονικής μετατόπισης στον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ (της καθυστέρησης που αντιστοιχεί στο ολικό μέγιστο της ετεροσυσχέτισης) τόσο στις πλήρεις κυματομορφές όσο και σε τμήματά τους, με δυνατότητα επαναδειγματοληψίας (*resampling*) για μεγαλύτερη ακρίβεια στον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$, σύγκρισης σε κυλιόμενα χρονικά παράθυρα (μέθοδος CWI) για μετρήσεις μεταβολής ταχύτητας, δυνατότητα αποσυνέλιξης ανάμεσα σε 2 κυματομορφές, επιλογή σχετικής πηγής, περεταίρω αποσυνέλιξη ή συνέλιξη και εκ νέου σύγκριση των αποτελεσμάτων, απεικόνιση πολλαπλών κυματομορφών από συστάδες σμηνοσεισμών με στοίχιση στους χρόνους $\boldsymbol{\tau_m}$, εντοπισμός αλυσίδας συγγένειας έμμεσων συγγενών τόσο με κλασσική διαδικασία αναζήτησης όσο και με τη χρήση ενός γενετικού αλγόριθμου (Παράρτημα Α.5), αυτόματη διαδικασία υπολογισμού μεγέθους σεισμικής ροπής, και πολυπλοκότερες αυτοματοποιημένες εφαρμογές όπως η μέθοδος των κύριων γεγονότων (*Master Events*), η κατασκευή του αρχείου εισόδου DT.CC για τα δεδομένα ετεροσυσχέτισης στο HypoDD και ορισμένες ακόμα εφαρμογές που ξεφεύγουν από τα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Με το πέρας αυτής της μελέτης έχει τελειώσει ένα σημαντικό μέρος προεργασίας για τη μαζικότερη ανίχνευση σμηνοσεισμών και τον επαναπροσδιορισμό της σεισμικότητας μιας ευρύτερης χρονικής περιόδου ώστε να καλυφθεί το κενό ανάμεσα στα έτη 2002-2004 και να αντιμετωπιστεί όλη η σεισμικότητα, πιθανόν με έναν ανάλογο τρόπο με αυτόν που αντιμετωπίστηκε η σεισμικότητα της Νότιας Καλιφόρνια (*Hauksson & Shearer, 2005; Shearer et al., 2005*). Επίσης, ένα σημαντικό κομμάτι που δεν άγγιξε η μελέτη αυτής της εργασίας είναι οι μηχανισμοί γένεσης μικροσεισμών. Ο υπολογισμός του τανυστή σεισμικής ροπής και των παραμέτρων $\mathbf{f_c}$, $\boldsymbol{\eta}$ και $\mathbf{k}$ της συνάρτησης φασματικής προσαρμογής (εξ. 2.17) αν όχι για όλους τουλάχιστον για τους περισσότερους σεισμούς με διαθέσιμα δεδομένα κυματομορφών είναι κάτι που πρέπει και μπορεί να γίνει. Με τέτοια στοιχεία θα μπορέσει να γίνει στη συνέχεια μια πλήρης συσχέτιση ανάμεσα στον βαθμό ομοιότητας που μας δίνει το μέγιστο της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης και η μέση συνοχή με τις παραμέτρους που καθορίζουν το σχήμα των κυματομορφών.

Β Ι Β Λ Ι Ο Γ Ρ Α Φ Ι Α

Aki, K. & Richards, P. G. (1980): Quantitative Seismology. Freeman, San Francisco, 2nd edition, 1980.

Aki, K. (1992): Scattering Conversions P to S versus S to P, *Bull. Seismol. Soc. Am*. **82**, 1969-1972.

Aki, K. (1995): Interrelation between Fault Zone Structures and Earthquake Processes, PAGEOPH, Vol. 145, Nos. 3/4 (1995)

Armijo, R., Meyer, B., King, G., Rigo, A. & Papanastassiou, D. (1996): Quaternary evolution of the Corinth rift and its implications for the late Cenozoic evolution of the Aegean, *Geophys. J. Int.* **126**, 11–53.

Barani, S., Ferretti, G., Massa, M. & Spallarossa, D. (2007): The waveform similarity approach to identify dependent events in instrumental seismic catalogues, *Geophys. J. Int*. (2007) **168**, 100–108

Becker, D., Meier, T., Rische, M., Bohnhoff, M. & Harjes, H-P., (2006): Spatio-temporal microseismicity clustering in the Cretan region. Tectonophysics, Vol. 423, Issues 1-4, 1 September 2006, Pages 3-16

Bernard, P., Briole, P., Meyer, B., Lyon-Caen, H., Gomez, J.-M., Tiberi, C., Berge, C., Cattin, R., Hatzfeld, D., Lachet, C., Lebrun, B., Deschamps, A., Courboulex, F., Larroque, C., Rigo, A., Massonnet, D., Papadimitriou, P., Kassaras, J., Diagourtas, D., Makropoulos, K., Veis, G., Papazisi, E., Mitsakaki, C., Karakostas, V., Papadimitriou, E., Papanastassiou, D., Chouliaras, M. & Stavrakakis, G. (1997): The Ms=6.2, June 15, 1995 Aigion earthquake (Greece): evidence for low angle normal faulting in the Corinth rift, *Journal of Seismology* 1: 131–150, 1997. 131

Bernard, P., Lyon-Caen, H., Briole, P., Deschamps, A., Boudin, F., Makropoulos, K., Papadimitriou, P., Lemeille, F., Patau, G., Billiris, H., Paradissis, D., Papazissi, K., Castarède, H., Charade, O., Nercessian, A., Avallone, A., Pacchiani, F., Zahradnik, J., Sacks, S. & Linde, A. (2006): Seismicity, deformation and seismic hazard in the western rift of Corinth: New insights from the Corinth Rift Laboratory (CRL), *Tectonophysics* **426** (2006) 7–30

Boore, D.M., Boatwright, J., (1984): Average body-wave radiation coefficients. *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. **74**, No. 5, pp. 1615-1621, 1984

Bowers, D., Hudson, J.A. (1997), Defining the Scalar Moment of a Seismic Source with a General Moment Tensor. *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. **87**, No. 3, pp. 652-667, June 1997

Cociani, L., Bean, C., (2007): Monitoring seismic velocity changes in the Gulf of Corinth using earthquake multiplets. *Geophysical Research Abstracts,* Vol. **9**, 03066, 2007.

Deichmann, N., & Garcia-Fernandez, M. (1992): Rupture geometry from high-precision relative hypocenter locations of microearthquake clusters, *Geophys. J. Int.* **110**, 501–517.

Deichmann, N., (2006): Local Magnitude, a Moment Revisited. *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. **96**, No. 4A, pp. 1267–1277, August 2006, doi: 10.1785/0120050115

Dodge, D.A., Beroza, G.C. & Ellsworth, W. L. (1995): Foreshock sequence of the 1992 Landers, California, earthquake and its implications for earthquake nucleation, *J. Geophys. Res.*, **100(B6)**, 9865–9880. (1995)

Dodge, D.A., Beroza, G.C. & Ellsworth, W. L. (1996): Detailed observations of California foreshock sequences: Implications for the earthquake initiation process, *Journal of Geophysical Research*, Volume **101**, Issue B10, p. 22371-22392

Dodge, D.A. & Beroza, G.C. (1997): Source array analysis of coda waves near the 1989 Loma Prieta, California, mainshock: Implications for the mechanism of coseismic velocity changes, *J. Geophys. Res.*, **102(B11)**, 24,437–24,458.

Felzer, K.R., Abercrombie, R.E. & Ekström, G., (2004): A Common Origin for Aftershocks, Foreshocks, and Multiplets. *Bull. Seis. Soc. Am.*, Vol. **94**, No. 1, pp. 88–98 (2004)

Fischer, T., (2005): Modelling of multiple events using empirical Green's functions: method, application to swarm earthquakes and implications for their rupture propagation. *Geophys. J. Int.* (2005) **163,** 991–1005

Fremont, M-J & Malone, S. D. (1987): High precision relative locations of earthquakes at Mount St. Helens, Washington, *Journal of Geophysical Research*, Volume **92**, Issue B10, p. 10223-10236 (1987)

Fremont, M. J. & Poupinet, G. (1987): Temporal variation of body-wave attenuation using earthquake doublets, *Geophys. J. R. astr. Soc.* (1987) **90**,503-520

Geller, R. J., & C. S. Mueller (1980): Four similar earthquakes in Central California, *Geophys. Res. Lett.*, **7**, 821-824.

Gibowicz, S. J. & Lasocki, S. (2005): Earthquake doublets and multiplets in the Fiji-Tonga-Kermadec region, *Acta Geophysica Polonica*, Vol **53**; part 3, pages 239-274 (2005)

Got, J-L. & Fréchet, J. (1993): Origins of amplitude variations in seismic doublets: source or attenuation process?, *Geophys. J. Int.* (1993) **114**,325-340

Got, J.-L., Fréchet, J. & Klein, F.W. (1994): Deep fault plane geometry inferred from multiplet relative location beneath the south flank of Kilauea, *J. Geophys. Res*. **99**, 15375-15386.

Grêt, A.A.:Time-Lapse Monitoring with Coda Wave Interferometry, Ph.D. Thesis, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 2004

Hanks, T. C. & D. M. Boore (1984): Moment-magnitude relations in theory and practice, *J. Geophys. Res.* **89,** no. B7, 6229–6235.

Hartigan, J. A. (1975): Clustering Algorithms. John Wiley, New York.

Hauksson, E. & Shearer, P. (2005): Southern California Hypocenter Relocation with Waveform Cross-Correlation, Part 1: Results Using the Double-Difference Method, *Bulletin of the Seismological Society of America*; June 2005; v. **95**; no. 3; p. 896-903; DOI: 10.1785/0120040167

Horikawa, H. (2001): Earthquake Doublet in Kagoshima, Japan: Rupture of Asperities in a Stress Shadow, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **91**, 1, pp. 112–127, February 2001

Hurukawa, N. (1998): The 1995 Off-Etorofu earthquake: joint relocation of foreshocks, the mainshock, and aftershocks and implications for the earthquake nucleation process, *Bull. Seism. Soc. Am.* **88,** 1112–1126.

Hutchings, L. & Wu, F., (1990): Empirical Green's functions from small earthquakes: a waveform study of locally recorded aftershocks of the 1971 San Fernando earthquake, *J. Geophys. Res.*, **95**, 1187-1214

Ichinose, G.A., Smith, K.D. & Anderson, J.G. (1997): Source Parameters of the 15 November 1995 Border Town, Nevada, Earthquake Sequence, *Bulletin Seismological Society of America*, Vol **87**. No. 3, pp. 652-667, June 1997

Janský J., Zahradník J., Sokos E., Serpetsidaki A. & Tselentis G.A. (2004): Relocation of the 2001 Earthquake Sequence in Aegion, Greece, *Studia Geophysica et Geodaetica*, Volume **48**, Number 2, April 2004, pp. 331-344(14)

Julian, B.R. (1986): Analysing seismic-source mechanisms by linear-programming methods, *Geophys. J. R. Astron. Soc.* **84**, 431-443. (1986)

Julian, B.R. & Foulger, G.R. (1996): Earthquake mechanisms from linear-programming inversion of seismic-wave amplitude ratios, *Bulletin of the Seismological Society of America* (August 1996), **86(4)**:972-980

Julian, B.R. & G.R. Foulger (2004): Microearthquake focal mechanisms – A tool for monitoring geothermal systems, *Geotherm. Res. Council Bull.*, **33**, 166-171, 2004.

Kagan, Y. Y. & Jackson, D. D.: Worldwide Doublets of Large Shallow Earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **89**, 5, pp. 1147-1155, October 1999

Kraft, T., Wassermann, J. & Igel, H., (2006): High-precision relocation and focal mechanism of the 2002 rain-triggered earthquake swarms at Mt Hochstaufen, SE Germany. *Geophys. J. Int.* (2006) **167**, 1513–1528

Lanza, V., Spallarossa, D., Cattaneo, M., Bindi D. & Augliera P. (1999): Source parameters of small events using constrained deconvolution with empirical Greens functions, *Geophysical Journal International*, Volume **137**, Issue 3: 651-662. doi: 10.1046/j.1365-246x.1999.00809.x

Lay, T. & Kanamori, H. (1980): Earthquake Doublets in the Solomon Islands, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **21**(1980) 283-304.

Lay, T. & Wallace, T.C. (1995): Modern Global Seismology, Volume 58 (International Geophysics), Academic Press (May 1, 1995), ISBN-10: 012732870X, ISBN-13: 978-0127328706

Lee, W. H. K. and J. C. Lahr (1972): HYP071: A computer program for determining hypocenter, magnitude, and first motion pattern of local earthquakes, Open File Report, U. S. Geological Survey, 100 pp.

Levenstein, V. I. (1965): Binary codes with use of deletions, insertions and substitutions of symbols, Dokl. Akad. Nauk. SSSR, 132 pp.

Lyon-Caen, H., Papadimitriou, P., Deschamps, A., Bernard, P., Makropoulos, K., Pacchiani, F. & Patau, G. (2004): First results of the CRLN seismic network in the western Corinth Rift: evidence for old-fault reactivation, *C. R. Geoscience* **336** (2004) 343–351, Tectonics

Makropoulos, K.C., & Burton, P.W., (1981): A catalogue of seismicity in Greece and adjacent areas, *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, **65**: 741-762

Makropoulos, K., Drakopoulos & J., Latousakis, J., (1989): A revised and extended earthquake catalogue for Greece since 1900. *Geophys. J. Int.* **98**, 391–394.

Menke, W., Lerner-Lam, A.L., Dubendorff, B. & Pacheco, J., (1990): Polarization and coherence of 5 to 30 Hz seismic wave fields at a hard-rock site and their relevance to velocity heterogeneities in the crust, *Bull. Seism. Soc. Am*., **80**, 430-449

Moriya, H., Niitsuma, H. & Baria, R (2004): Multiplet-Clustering Analysis Reveals Structural Details within the Seismic Cloud at the Soultz Geothermal Field, France, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. **93**, No. 4, pp. 1606–1620, August 2003

Nakahara, H. (2004): Correlation distance of waveforms for closely located events – I. Implication of the heterogeneous structure around the source region of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu, Japan, earthquake (M_w=6.9), *Geophys.J.Int.* (2004) **157**, 1255-1268

Nakamura, A., Hasegawa, A., Hirata, N., Iwasaki, T. & Hamaguchi, H. (2002): Temporal Variations of Seismic Wave Velocity Associated with 1998 M6.1 Shizukuishi Earthquake, *Pure appl. Geophys.* **159** (2002), pages 1183-1204

Nishimura, T., Uchida, N., Sato, H., Ohtake, M., Tanaka, S. & Hamaguchi, H. (2000): Temporal changes of the crustal structure associated with the M6.1 earthquake on September 3, 1998, and the volcanic activity of Mount Iwate, Japan, *Geophysical Res. Lett.*, Vol **27**, No 2, pg 269-272 (2000)

Nishimura T.,. Tanaka,S., Yamawaki, T., Yamamoto, H., Sano, T., Sato,M., Nakahara,H., Uchida,N., Hori,S. & Sato,H. (2005): Temporal changes in seismic velocity of the crust around Iwate volcano, Japan, as inferred from analyses of repeated active seismic experiment data from 1998 to 2003, *Earth Planets Space*, **57**, 491–505, 2005

Novotný, O., Lyon-Caen, H., Janský, J. & Plicka, V. (2005): Vertically inhomogeneous models of the upper crust in the Aigion region, Greece, infered from arrival times of the 2001 earthquake sequence, *Studia Geophysica et Geodaetica*, (*submitted*)

Ohnaka, M. (1993): Critical size of the nucleation zone of earthquake rupture inferred from immediate foreshock activity, *J. Phys. Earth* **41,** 45–56.

Pacheco, C. & Snieder, R. (2006): Time-lapse traveltime change of singly scattered acoustic waves, *Geophys. J. Int.* (2006) **165**, 485–500 doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.02856.x

Pacchiani, F. (2006): étude sismologique des failles normales actives du rift de Corinthe, thèse de Doctorat de Université Paris XI

Paige, C. C., and M. A. Saunders (1982): LSQR: Sparse linear equations and least squares problems, *ACM Transactions on Mathematical Software* **8/2,** 195–209.

Pandolfi, Bean, C.J. & Saccorotti, G. (2006): Coda wave interferometric detection of seismic velocity changes associated with the 1999 M = 3.6 event at Mt. Vesuvius, *Geoph. Res. Lett.*, Vol. **33**, L06306, doi:10.1029/2005GL025355, 2006

Papadimitriou, P., Makropoulos, K. & Drakopoulos, J., (1993): Seismic doublet analysis and application in the rupture process: Preliminary results of the Rio-Antirio region (Greece), *proceedings of the 2nd congress of the Hellenic Geophysical Union*, 502-508.

Papadimitriou, P., Kassaras, I., Lyon-Caen, H., Makropoulos, K. & Drakopoulos, J., (1994): Seismic wave propagation and crustal structure in western Corinth gulf (C. Greece), proceedings of the XXIV General Assembly of the ESC, vol 1, 610-619.

Papadimitriou, P., Kassaras, Rigo, A., Lyon-Caen, H., Hatzfeld, D., Makropoulos, K., & Drakopoulos, J., (1994): Source parameters of large and small earthquakes in Corinth gulf (C. Greece), proceedings of the XXIV General Assembly of the ESC, vol 2, 848-858.

Papadimitriou, P., Kaviris, G., Pavlou, K. & Makropoulos, K., (2001): Seismic activity recorded by the CORNET network and source properties of the Gulf of Corinth (Greece). Book of Abstracts, p. 9431, EGS XXVI General Assembly, Nice, France.

Papadimitriou, P., Kaviris, G., Pavlou K. & Makropoulos, K., (2002): Seismic activity in central greece recorded by the cornet network for the period 1996-2002. *Book of Abstracts*, p. 75-76, XXVIII ESC General Assembly, Genoa, Italy

Phillips, W.S (2000): Precise Microearthquake Locations and Fluid Flow in the Geothermal Reservoir at Soultz-sous-Forêts, France, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90**, 1, pp. 212–228, February 2000

Pirli, M., Voulgaris, N., Chira, A. & Makropoulos, K., (2007): The March 2004 Kalamata seismic sequence: a case of efficient seismicity monitoring in the area of Peloponnese, southern Greece, by the Tripoli Seismic Array. *J Seismol* (2007) **11**:59–72

Poupinet, G., Ellsworth, V. L. & Frechet, J. (1984): Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: An application to the Calaveras fault, California, *Journal of Geophysical Research*, Volume **89**, Issue B7, p. 5719-5732

Ratdomopurbo, A., Poupinet, G. (1995): Monitoring a temporal change of seismic velocity in a volcano: application to the 1992 eruption of Mt. Merapi (Indonesia), *Geoph. Res. Lett*., Vol **22**, No 7, pg 775-778 (1995)

Rigo, A., Lyon-Caen, H., Armijo, R., Deschamps, A., Hatzfeld, D., Makropoulos, K., Papadimitriou, P. & Kassaras, I. (1996): A microseismic study in the western part of the Gulf of Corinth (Greece): Implications for large-scale normal faulting mechanisms, *Geophys. J. Int*. **126**, 663–688.

Roumelioti Z., Kiratzi A. & Melis N. (2003): Relocation of the 26 July 2001 Skyros Island (Greece) earthquake sequence using the double-difference technique, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Volume **138**, Number 3, 29 August 2003 , pp. 231-239(9)

Schaff, D. P., Bokelmann, G. H. R, Beroza, G. C., Waldhauser, F. & Ellsworth, W. L. (2002): High-resolution image of Calaveras Fault seismicity, *J. Geophys. Res*., **107(B9)**, 2186, doi:10.1029/2001JB000633.

Schaff, D.P., Bokelmann, G.H.R, Ellsworth, W.L., Zanzerkia, E., Waldhauser, F. & Beroza, G.C. (2004): Optimizing Correlation Techniques for Improved Earthquake Location, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. **94**, No. 2, pp. 705-721, April 2004.

Sens-Schönfelder, C. & Wegler, U. (2006): Passive image interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi Volcano, Indonesia, *Geoph. Res. Lett.*, Vol. **33**, L21302, doi:10.1029/2006GL027797, 2006

Shearer, P., Hauksson, E. & Lin, G. (2005): Southern California Hypocenter Relocation with Waveform Cross-Correlation, Part 2: Results Using Source-Specific Station Terms and Cluster Analysis, *Bulletin of the Seismological Society of America*, June 1, 2005; **95(3):** 904 – 915

Snieder, R., A. Grêt, H. Douma, and J. Scales (2002): Coda wave interferometry for estimating nonlinear behaviour in seismic velocity, *Science,* **295**, 2253– 2255.

Snieder, R. (2004): Extracting the Greens function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase, *Phys. Rev. E* **69**, 046610.

Snieder, R. & Hagerty, M. (2004): Monitoring change in volcanic interiors using coda wave interferometry: Application to Arenal Volcano, Costa Rica, *Geoph. Res. Lett.*, Vol. **31**, L09608, doi:10.1029/2004GL019670, 2004

Snieder R. & Vrijlandt, M. (2005): Constraining the source separation with coda wave interferometry: Theory and application to earthquake doublets in the Hayward fault, California, *Journal of Geoph. Res.*, VOL. **110**, B04301, doi:10.1029/2004JB003317, 2005

Snieder,R. (2006): The theory of coda wave interferometry, *Pure and Applied Geophysics*, Volume **163**, Issue 2-3, pp. 455-473 (2006)

Spudich, P. & Bostwick, T., (1987): Studies of the seismic coda using an earthquake cluster as a deeply buried seismograph array, *J. Geophys. Res*., **92**, 10526-10546

Stich, D., Alguacil, G. & Morales, J. (2001): The relative locations of multiplets in the vicinity of the Western Almeria (southern Spain) earthquake series of 1993-1994, *Geophys. J. Int.* (2001) **146**, 801–812

Van Tiggelen, B.A. (1999): Localization of waves, In (J.P. Fouque, ed.), Diffuse Waves in Complex Media, pages 1–60 (Kluwer, Dordrecht, 1999).

Waldhauser, F. & W.L. Ellsworth (2000): A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 1353-1368, 2000

Waldhauser, F. (2001): HypoDD: A computer program to compute double-difference earthquake locations, U.S. Geol. Surv. open-file report , 01-113, Menlo Park, California, 2001.

Waldhauser, F. & W.L. Ellsworth (2002): Fault structure and mechanics of the Hayward Fault, California, from double-difference earthquake locations, *Journal of Geophysical Research*, **107(B3)**, 2054, doi:10.1029/2000JB000084, 2002.

Wegler, U., & Sens-Schönfelder, C. (2007): Fault zone monitoring with passive image interferometry *Geophys. J. Int.* (2007) **168**, 1029–1033

Welch, P.D. (1967): The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms, *IEEE Trans. Audio Electroacoust.* Vol. **AU-15** (June 1967). Pgs. 70-73.

Wesnousky, S.G, Astiz, L. & Kanamori, H. (1986): Earthquake multiplets in the southeastern Solomon Islands, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **44** (1986) 304—318

Yamamura, K., Sano, O., Utada, H., Takei, Y., Nakao, S. & Fukao, Y. (2003): Long-term observation of in situ seismic velocity and attenuation. *Journal of Geophysical Research*, Vol. **108**, No. B6, 2317, doi:10.1029/2002JB002005 (2003)

Zahradník, J., Janský, J., Sokos, E., Serpetsidaki, A., Lyon-Caen, H. & Papadimitriou, P. (2004): Modeling the ML4.7 mainshock of the February-July 2001 earthquake sequence in Aegion, Greece. *Journal of Seismology* **8**: 247–257, 2004.

Zhizhin, M. N., Rouland, D., Bonnin, J., Gvishiani, A. D. & Burtsev, A. (2006): Rapid Estimation of Earthquake Source Parameters from Pattern Analysis of Waveforms Recorded at a Single Three-Component Broadband Station, Port Vila, Vanuatu. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. **96**, No. 6, pp. 2329–2347, December 2006, doi: 10.1785/0120050172

Αγάλος, Α. & Λέντας, Κ., (2003): Σεισμοτεκτονική μελέτη Δυτικού Κορινθιακού κόλπου και ιδιαίτερα της ευρύτερης περιοχής Αιγίου. Διπλωματική Εργασία Γεωλογικού Τμήματος του Πανεπιστημίου Αθηνών

Κουνάδη, Χ., (2002): Μελέτη μικροσεισμικής δραστηριότητας Δυτικού-Κεντρικού Κορινθιακού κόλπου”, Διπλωματική Εργασία Γεωλογικού Τμήματος του Πανεπιστημίου Αθηνών

Παπαϊωάννου, Π. (2000): Χαοτικές Χρονοσειρές, Θεωρία και πράξη. εκδ. Leader Books, ISBN 960-7901-05-3

Παπαζάχος, Β. (1997): Εισαγωγή στη Σεισμολογία. Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη, 1997

Ιστοσελίδες:

[1] Traveling Salesman Problem (MATLAB):
http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/loadFile.do?objectId=13680&objectType=File

[2] Μέθοδος του Ward
http://www.statistics.com/resources/glossary/w/wardslnkg.php

[3] Corinth Rift Laboratory
http://www.corinth-rift-lab.org/

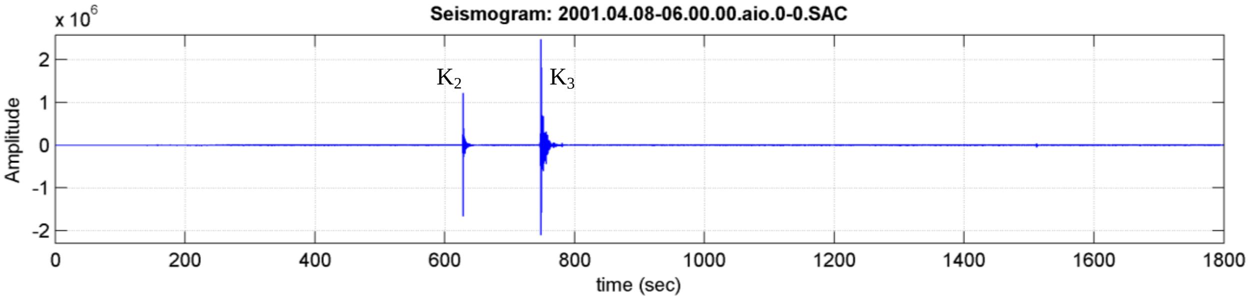
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Συμπλήρωμα

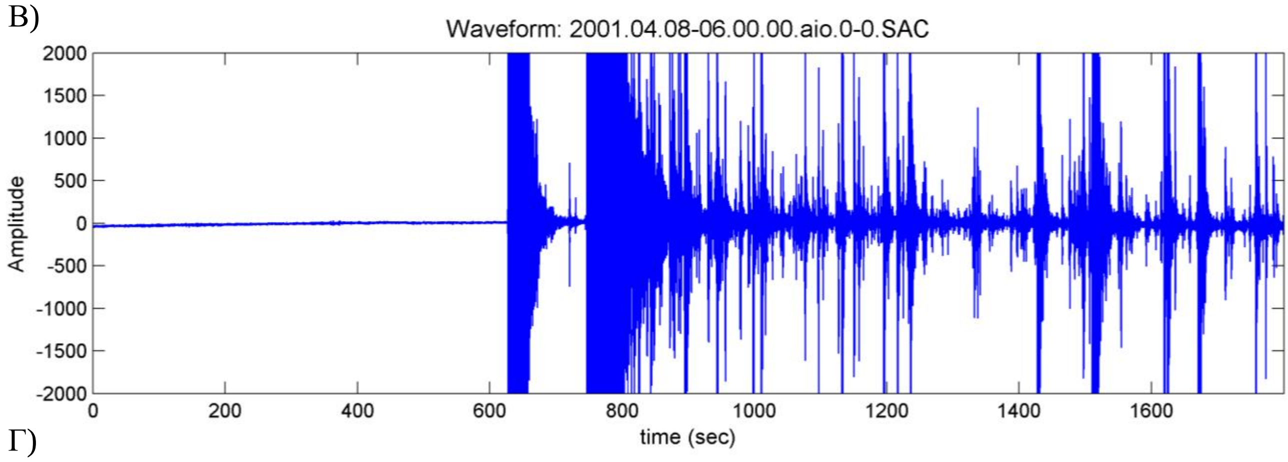
Α.1 ~ *Ο κύριος σεισμός του «Σμήνους του AIO (2001)»*

Από την αναζήτηση όμοιων σεισμών προέκυψε ότι εκ πρώτης όψεως ο κύριος σεισμός M_w=4.2 της 8ης Απριλίου 2001 στις 06:12:24UTC στην περιοχή δυτικά του σταθμού AIO δεν ανήκε σε καμία από τις συστάδες σμηνοσεισμών που αναδείχθηκαν ούτε από το δείγμα των 1134 σεισμών (Κεφ. 3) με κυματομορφές της κατακόρυφης συνιστώσας του σταθμού AIO, ούτε από την Ομάδα Α (Κεφ. 4) με κυματομορφές της κατακόρυφης συνιστώσας του σταθμού DIM. 2 λεπτά πριν από τον κύριο σεισμό, στις 06:10UTC συνέβη ένας άλλος, μικρότερου μεγέθους σεισμός (M_w≅3.3), ο οποίος εντάσσεται εύκολα σε συστάδα σμηνοσεισμών όπως φαίνεται εξάλλου από την ύπαρξη αρκετών άμεσων συγγενών με $\mathbf{C_{th}}$=0.7 στα Σχήματα Α.2$_A$ και Α.3$_A$.

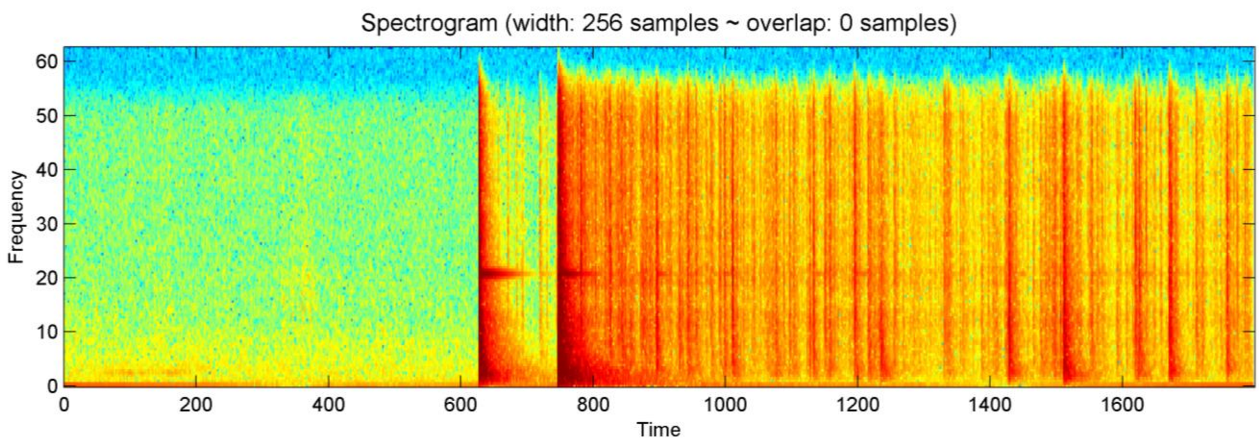
Α)



Β)



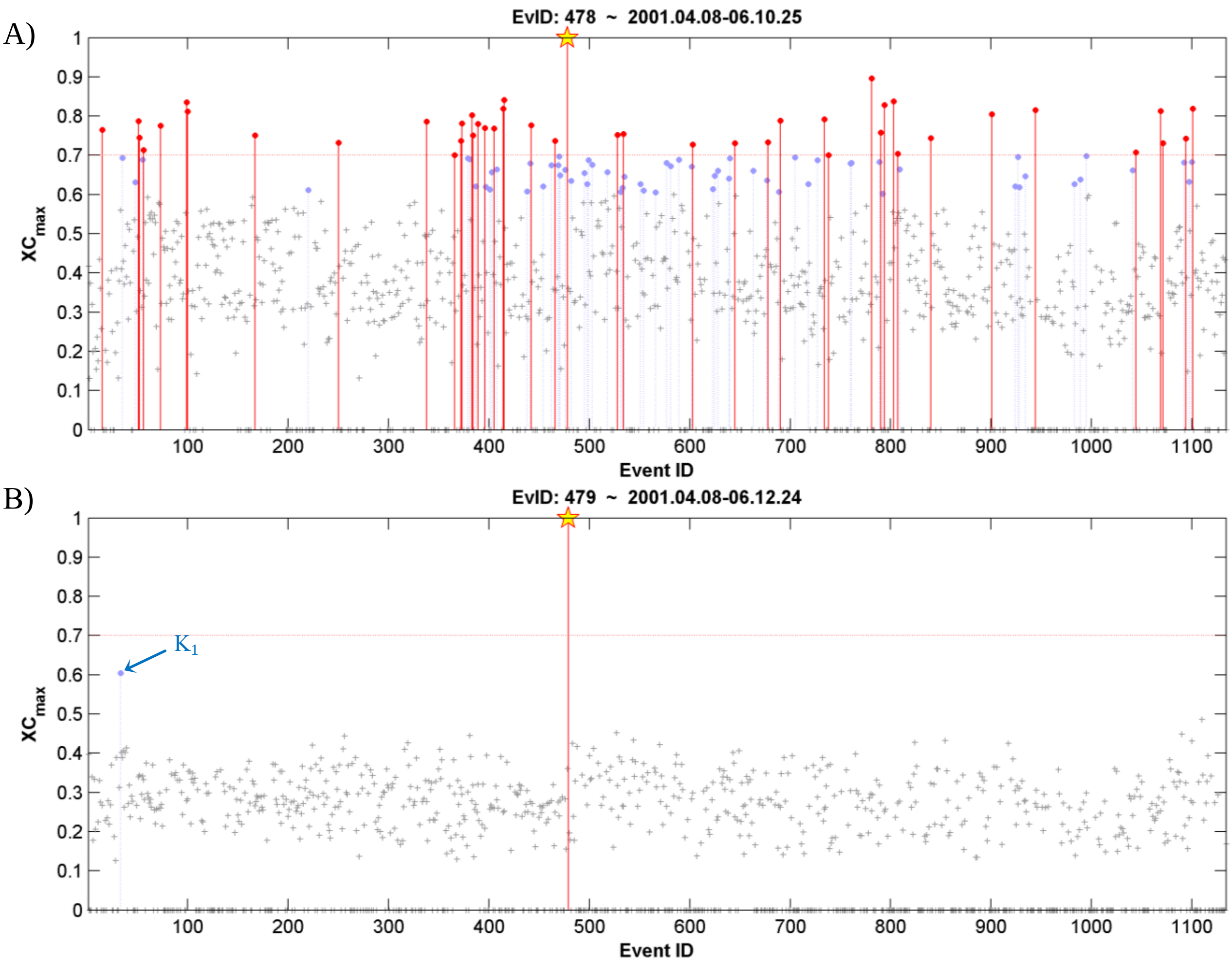
Γ)



Σχήμα Α.1: Α) κυματομορφή της κατακόρυφης συνιστώσας του σταθμού AIO διάρκειας 30min με αρχή στις 8/4/2001, 06:00. Διακρίνονται μόνο 2 σεισμοί, συγκεκριμένα ο σεισμός των 06:10:25 (K_2) και ο κύριος σεισμός των 06:12:24 (K_3). Β) μεγέθυνση της παραπάνω κυματομορφής η οποία φανερώνει ένα διάστημα ησυχίας (συνεχίζεται για ~40min πριν από τον σεισμό των 06:10:25) τουλάχιστον 1 μικρό σεισμό μεταξύ των 2 μεγάλων και αμέσως μετά την άφιξη των κυμάτων του κύριου σεισμού μια μετασεισμική ακολουθία. Γ) φασματόγραμμα της παραπάνω κυματομορφής.

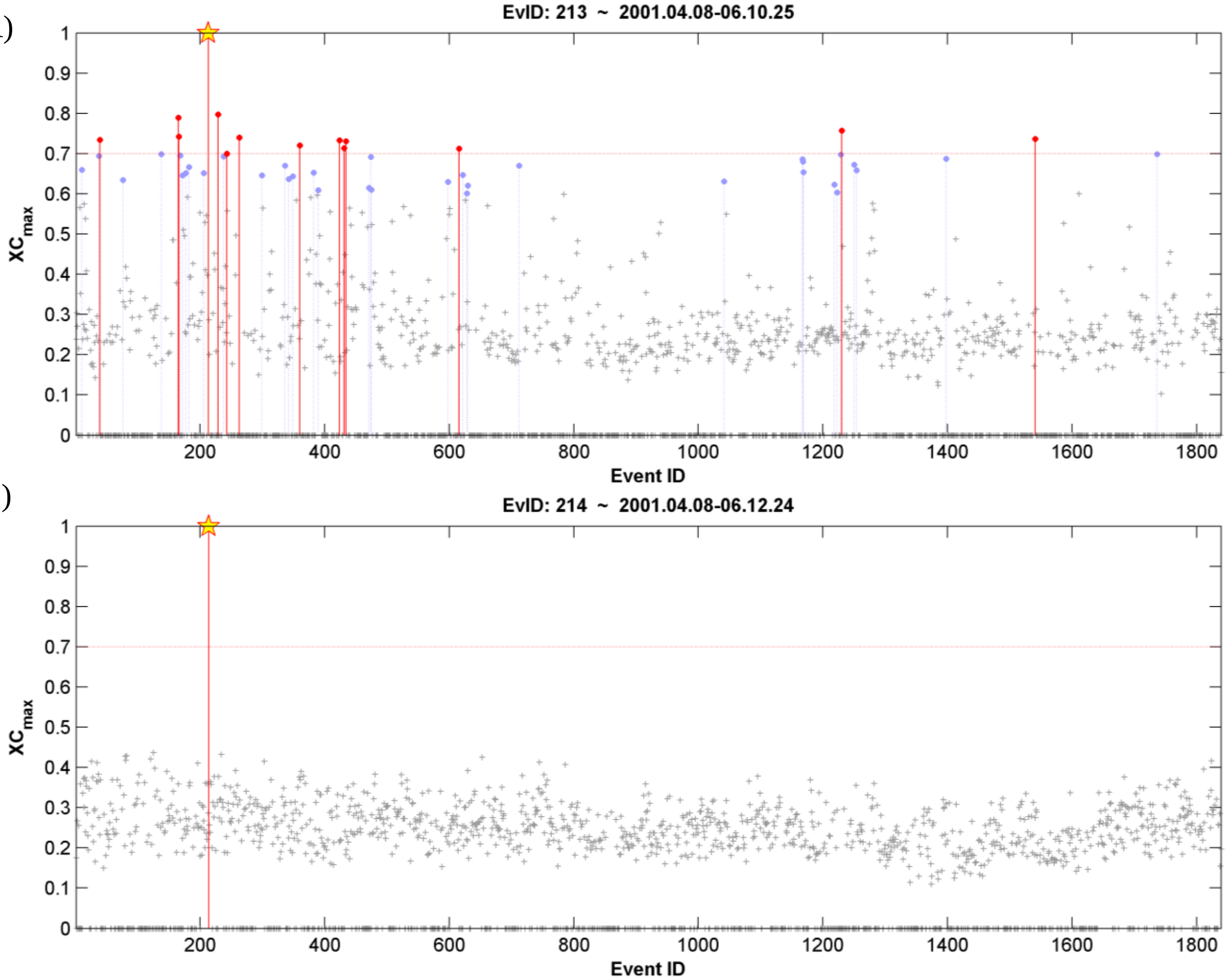
A)

B)



Σχήμα Α.2: Διάγραμμα μεγίστου ετεροσυσχέτισης Α) μεταξύ του γεγονότος αναφοράς 2001.04.08-06.10.25 (K_2) και των υπόλοιπων γεγονότων του δείγματος των 1134 σεισμών του «Σμήνους του ΑΙΟ (2001)» (Κεφ. 3) Β) μεταξύ του γεγονότος αναφοράς 2001.04.08-06.12.24 και των υπόλοιπων. Με το μπλε βέλος σημειώνεται ο σεισμός 2001.03.29-00.25.25 (K_1). Το άστρο αντιστοιχεί στην αυτοσυσχέτιση του εκάστοτε γεγονότος αναφοράς.

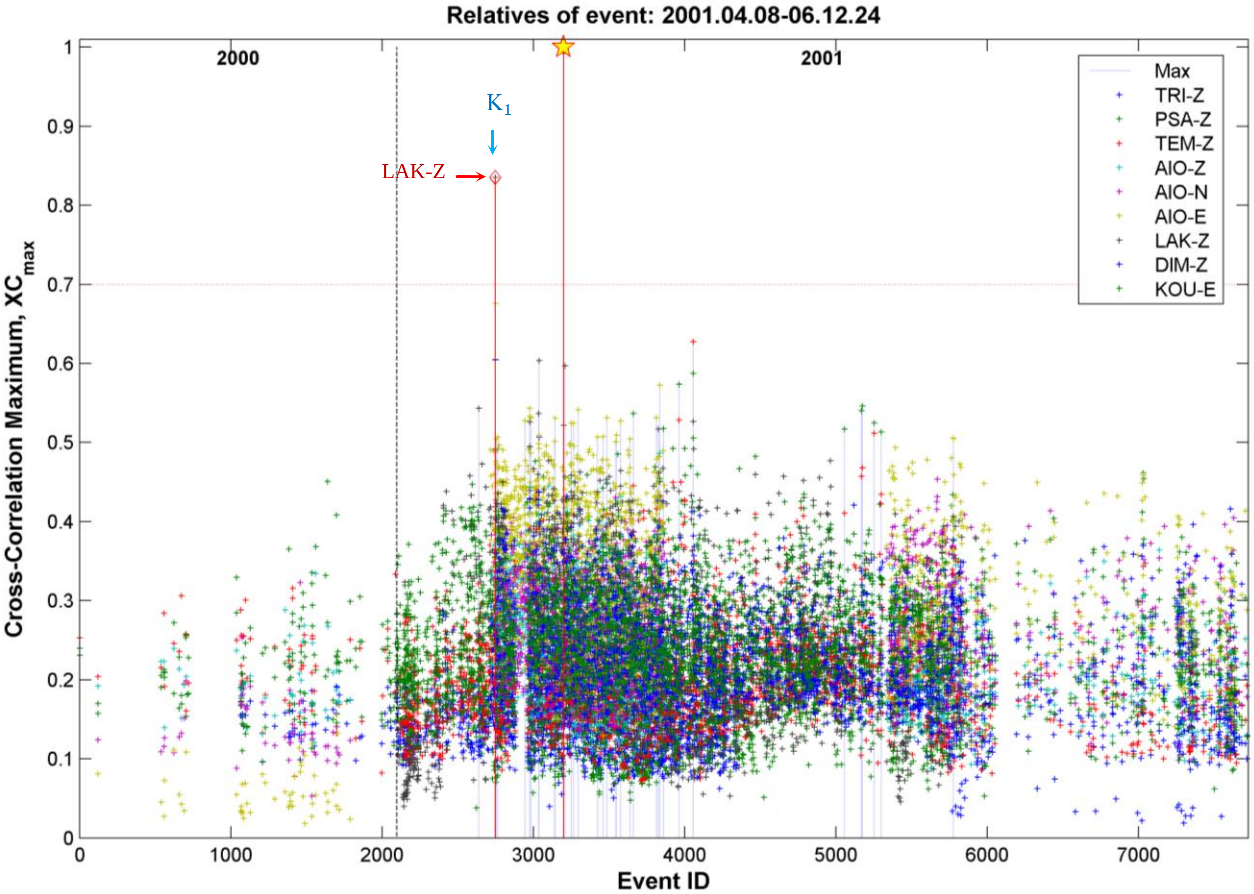
Αντιθέτως, όπως φαίνεται στα Σχήματα Α.2$_B$ και Α.3$_B$, ο κύριος σεισμός του «Σμήνους του ΑΙΟ» δεν έχει κανέναν άμεσο συγγενή με $\mathbf{C_{th}}$=0.7, τουλάχιστον όπως προκύπτει από τους πίνακες. Μόνο ένας σεισμός ξεχωρίζει (Σχήμα Α.2$_B$, μπλε βέλος) ο οποίος είναι μεγέθους M_w=3.7 και συνέβη στις 29 Μαρτίου 2001, ώρα 00:25:25UTC. Η καταγραφή του στην κατακόρυφη συνιστώσα του σταθμού ΑΙΟ μοιάζει έως ένα βαθμό με την αντίστοιχη του κύριου σεισμού. Προκειμένου να επαληθευθεί η εικόνα για ένα ευρύτερο σύνολο δεδομένων έγινε έλεγχος ανάμεσα στις κυματομορφές του κύριου σεισμού στη Z-συνιστώσα 7 σταθμών καθώς και στις 3 συνιστώσες του σταθμού ΑΙΟ. Στο Σχήμα Α.4 φαίνεται το αποτέλεσμα της σύγκρισης. Και πάλι ο μόνος σεισμός που μοιάζει με τον κύριο είναι ο 2001.03.29-00.25.25, ο οποίος μάλιστα έδωσε στη Z-συνιστώσα του σταθμού LAK τιμή $\mathbf{XC_{max}}$>0.8. Για ευκολία στην περιγραφή θα καλείται $\mathbf{K_1}$ ο σεισμός της 29^{ης} Μαρτίου, $\mathbf{K_2}$ ο σεισμός της 8/4/2001 06:10:00UTC και $\mathbf{K_3}$ ο κύριος σεισμός των 06:12:25UTC.

A)
B)


Σχήμα Α.3: Διάγραμμα μεγίστου ετεροσυσχέτισης Α) μεταξύ του γεγονότος αναφοράς 2001.04.08-06.10.25 και των υπόλοιπων 1838 γεγονότων της Ομάδας Α (Κεφ. 4), Β) μεταξύ του γεγονότος αναφοράς 2001.04.08-06.12.24 και των υπόλοιπων της Ομάδας Α. Το άστρο αντιστοιχεί στην αυτοσυσχέτιση του εκάστοτε γεγονότος αναφοράς. (στον Ομάδα Α δεν έχει συμπεριληφθεί ο σεισμός 2001.03.29-00.25.25.

Στα Σχήματα Α.5 φαίνονται οι κυματομορφές του κύριου σεισμού σε σύγκριση με τις κυματομορφές ορισμένων από τους πιο «όμοιους» με αυτόν σεισμούς, όπως προκύπτει από τις τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ στο Σχήμα Α.4 στο οποίο ορισμένα σημεία έχουν τιμές $\mathbf{XC_{max}}$>0.6 ή $\mathbf{XC_{max}}$>0.55. Η ομοιότητα βρίσκεται κυρίως στο τμήμα των S-κυμάτων ενώ στα P-κύματα δεν μπορεί να γίνει σύγκριση.

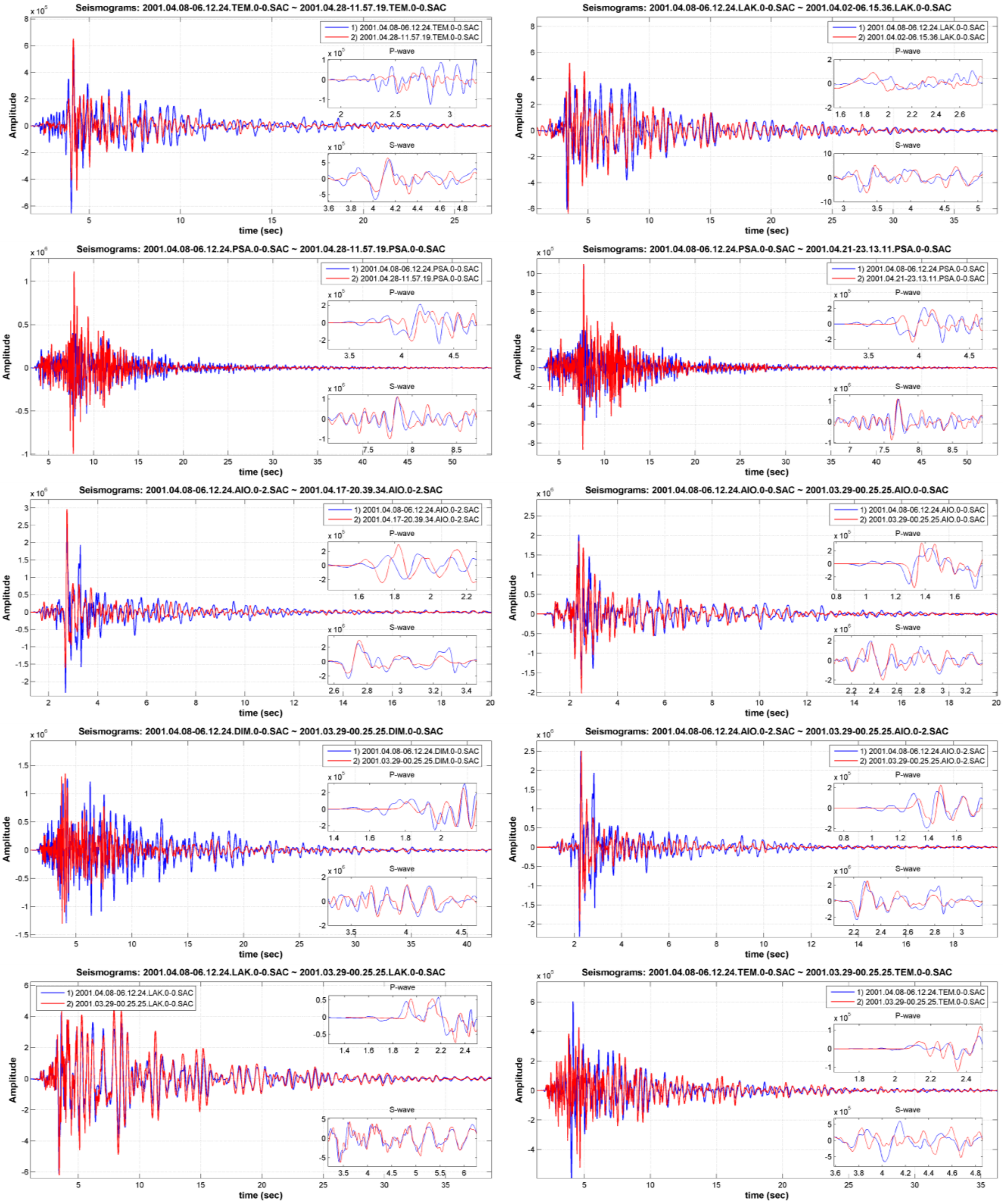
Το πρόβλημα της μη ομοιότητας εντοπίζεται αρχικά στη διαφορά μεγέθους του $\mathbf{K_3}$ με τους μικροσεισμούς του υπόλοιπου σμήνους και κυρίως στην πολυπλοκότερη κυματομορφή του. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι το υπόκεντρο του $\mathbf{K_3}$ εντοπίζεται (αρχικά) σε βάθος ~9km και είναι χωρικά απομονωμένο από το υπόλοιπο σμήνος (Σχήμα Α.9, $K_{3,orig}$). Αυτό είναι αρκετά παράδοξο, αν δει κανείς το Σχήμα Α.1 στο οποίο φαίνεται ο κύριος σεισμός να διεγείρει άμεσα μια χρονικά πυκνή μετασεισμική ακολουθία. Ωστόσο, η χωρική απομόνωση φαίνεται να συμβαδίζει με την απουσία όμοιων σεισμών.



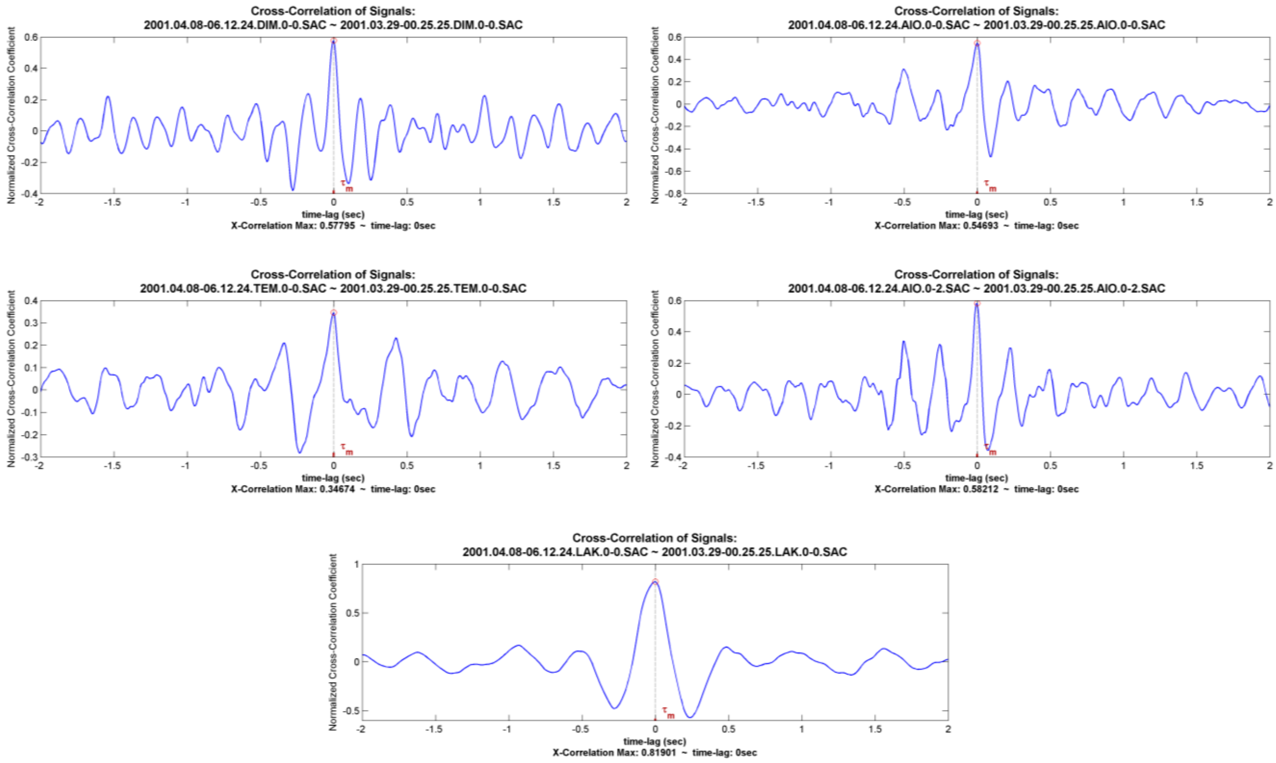
Σχήμα Α.4: τιμές μεγίστου ετεροσυσχέτισης μεταξύ της κυματομορφής του κύριου σεισμού, K_3, και όλων των υπόλοιπων από το σμήνος του AIO, σε διάφορους σταθμούς και συνιστώσες.

Εδώ μπορεί να γίνει μια πρώτη χρήση της έννοιας του «έμμεσου» συγγενή με σκοπό να βρεθεί μια λύση σε αυτό το πρόβλημα. Ο σεισμός $\mathbf{K_1}$ εντοπίζεται σε βάθος ~8km, ρηχότερα από τον $\mathbf{K_3}$. Παρατηρώντας την πολυπλοκότητα της κυματομορφής του $\mathbf{K_3}$ από την καταγραφή της Z-συνιστώσας του AIO διαπιστώνεται ότι υπάρχουν 2 διακριτές αφίξεις P κυμάτων και 2 αφίξεις S κυμάτων (*Lyon-Caen et al., 2004*) (Παράρτημα Β, Σχήμα Β.56). Οι αφίξεις $\mathbf{P_1}$, $\mathbf{P_2}$ του σχήματος Β.56 απέχουν χρονικά ~0.35sec με την $\mathbf{P_2}$ να έχει 6-7 φορές μεγαλύτερο πλάτος από την $\mathbf{P_1}$.

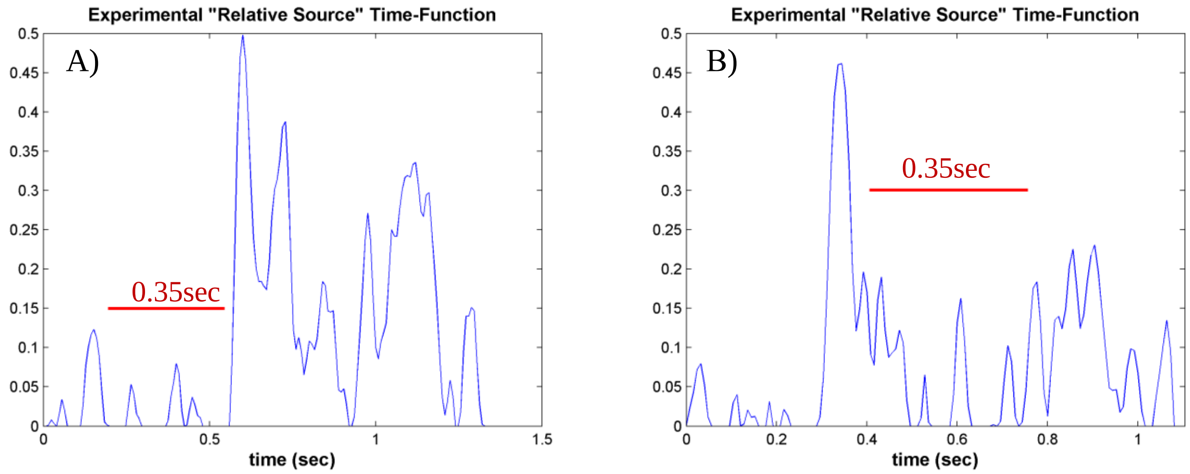
Σε αυτή τη διπλή πηγή αποδίδεται ο κακός εντοπισμός του υποκέντρου του $\mathbf{K_3}$ καθώς θεωρείται ως χρόνος άφιξης των P ο χρόνος άφιξης του $\mathbf{P_1}$ ενώ ως χρόνος άφιξης των S ο χρόνος άφιξης του $\mathbf{S_2}$ (το $\mathbf{S_1}$ είναι δυσδιάκριτο σε απομακρυσμένους σταθμούς). Αν επιλεγούν οι αφίξεις των $\mathbf{P_2}$ και $\mathbf{S_2}$ το υπόκεντρο έρχεται σε βάθος 5.5km και το RMS σφάλμα πέφτει στα 0.06sec (*Lyon-Caen et al., 2004*). Καθώς δεν διατίθενται οι νέοι χρόνοι άφιξης που φέρνουν το υπόκεντρο σε βάθος 5.5km, ούτε οι νέες συντεταγμένες του επικέντρου του, μια προσπάθεια διόρθωσης των χρόνων άφιξης βάσει της παρατήρησης του Σχήματος Β.56 (*Lyon-Caen et al., 2004*) ανέβασε το υπόκεντρο στα 7.5km και το επίκεντρο μετακινήθηκε από (38.1812°N, 22.0262°E) σε (38.2067°N, 22.0290°E), βορειότερα. Διαφέρει από το υπόκεντρο της εργασίας των *Lyon-Caen et al.* (2004) αλλά τουλάχιστον με αυτόν τον τρόπο βρίσκεται εντός του σμήνους. Η νέα υποκεντρική θέση έχει χρησιμοποιηθεί σε σχήματα όπως το 4.29_{Γ}.



Σχήμα Α.5: Φιλτραρισμένες κυματομορφές (0.5-15Hz) του κύριου σεισμού του σμήνους του AIO (2001.04.08-06.12.24) και ορισμένων από τους πιο «όμοιους» σεισμούς που εντοπίστηκαν βάσει του Σχήματος Α.4 με κριτήριο το $\mathbf{XC}_{\mathbf{max}}$ σε διάφορους σταθμούς. Ακόμα και σε αυτές τις περιπτώσεις δε μπορούν να θεωρηθούν όμοιοι αυτοί οι σεισμοί, τουλάχιστον *όχι άμεσα* συγγενείς.



Σχήμα Α.6: Ετεροσυσχέτιση ανάμεσα σε ορισμένα από τα ζεύγη κυματομορφών του σχήματος Α.5



Σχήμα Α.7: Α) **Υποθετική** πολύπλοκη πηγή του κύριου σεισμού (K_3) όπως προέκυψε από την αποσυνέλιξη της κυματομορφής του K_2 από του K_3 στην κατακόρυφη συνιστώσα του σταθμού AIO. Β) το ίδιο αλλά με αποσυνέλιξη της κυματομορφής του K_1 από του K_3. Τονίζεται ότι τα σχήματα αυτά *δεν* δείχνουν την *πραγματική* πηγή του K_3 αλλά ποια *θα έπρεπε* να ήταν η «σχετική πηγή» ως προς αυτές των σεισμών K_2 και K_1 και με την προϋπόθεση το υπόκεντρο του K_3 να βρίσκεται κοντά στο υπόκεντρο του K_2 ή του K_1 αντίστοιχα (και οι μηχανισμοί γένεσης να είναι κοινοί), ώστε να θεωρηθεί πως ο K_3 ανήκει στην ίδια συστάδα σμηνοσεισμών με τον K_2 ή K_1.

Αν πράγματι πρόκειται για σεισμό με πολύπλοκη πηγή, με τουλάχιστον 2 χρονικά διακριτές εκδηλώσεις ολίσθησης που διαφέρουν μεταξύ τους κατά ~0.35sec, αυτό σημαίνει πως για να ενταχθεί ο κύριος σεισμός **K_3** σε μια συστάδα σμηνοσεισμών θα πρέπει να γίνει ένα από τα παρακάτω:

1) να βρεθεί ένας κατάλληλος έμμεσος συγγενής **R**, οπότε με αποσυνέλιξη του σήματος του **R** από αυτό του **K_3** θα προκύψει η σχετική συνάρτηση πηγής (*relative source function*) και στη συνέχεια με συνέλιξη αυτής της πηγής με το **R** θα δημιουργηθεί ένα σήμα **R΄** το οποίο θα έχει υψηλό μέγιστο ετεροσυσχέτισης με το σήμα του **K_3**,

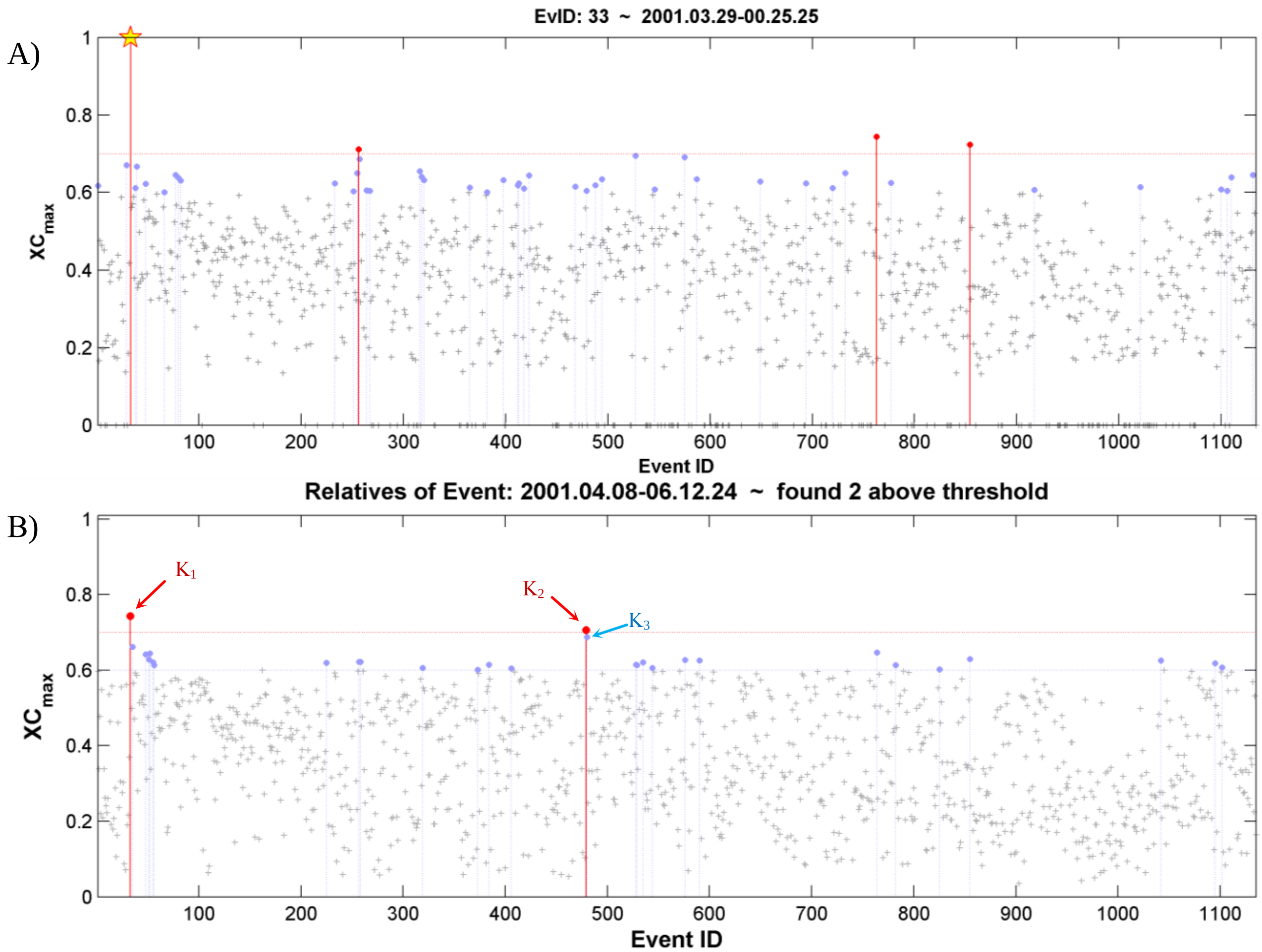
2) θεωρώντας μια γνωστή συνθετική πηγή με ορισμένα χαρακτηριστικά να αποσυνελιχθεί από το σήμα του **K_3** και δημιουργηθεί ένα σήμα **K_3΄** το οποίο να συγκριθεί με τα σήματα όλων των υπόλοιπων σεισμών του «Σμήνους του AIO» και να βρεθεί έτσι ένας όμοιός του, ή αντιστρόφως, να συνελιχθεί το κάθε υπό σύγκριση μικροσεισμικό σήμα με αυτή την πηγή οπότε να δημιουργηθεί έτσι ένα δυνάμει όμοιο σήμα με αυτό του **K_3**, εφόσον η μόνη σημαντική διαφορά τους είναι η πηγή.

Εξετάστηκαν και οι δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη, προκειμένου να αποκτήσουν αρκετή ομοιότητα τα υπό σύγκριση γεγονότα με το **K_3** έπρεπε η συνάρτηση της πηγής να γίνει ιδιαίτερα πολύπλοκη και κατ' επέκταση μεγάλη σε διάρκεια συγκριτικά με το μέγεθος του σεισμού (M_w=4.2). Με τη χρήση μιας τέτοιας πηγής για συνέλιξη το **XC_{max}** έφτανε κοντά στο 0.7 για ένα μεγάλο πλήθος γεγονότων ενώ τα υπόλοιπα εμφάνιζαν τιμές **XC_{max}** με μεγάλη διασπορά ώστε για **C_{th}** λίγο μικρότερο από 0.6 ένας πολύ μεγάλος αριθμός γεγονότων θα θεωρούνταν άμεσοι συγγενείς. Το ίδιο όμως συμβαίνει και σε μια άλλη περίπτωση. Στο Σχήμα Α.8_A φαίνεται το αντίστοιχο των Σχημάτων Α.2, Α.3 αλλά με γεγονός αναφοράς τον **K_1**. Σε σύγκριση με τα Σχήματα Α.2, Α.3 στα οποία υπάρχει μια μικρή διασπορά **XC_{max}** γύρω από μια μέση τιμή (περίπου 0.25) στην οποία συσσωρεύονται τα σημεία όσων γεγονότων δεν έχουν καμία ομοιότητα με το γεγονός αναφοράς, στο Σχήμα Α.8_A φαίνεται ότι η διασπορά είναι πολύ μεγάλη.

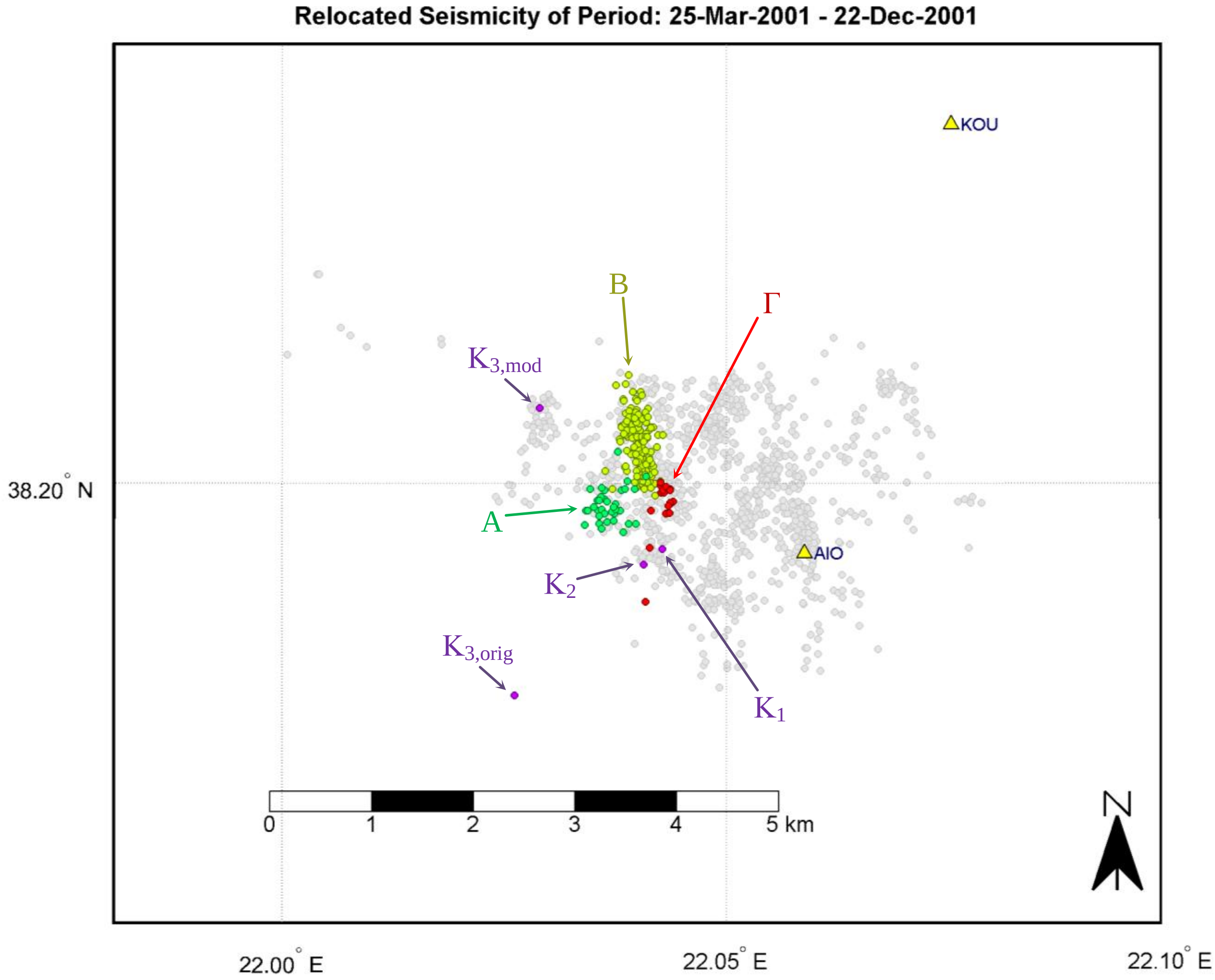
Στη δεύτερη περίπτωση με τη χρήση κυματομορφών της κατακόρυφης συνιστώσας των σταθμών AIO και DIM και με τη χρήση τόσο μιας «διπλής» πηγής με τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν για τον σταθμό AIO και ανάλογα για τον σταθμό DIM, όσο και με πιο πολύπλοκες αλλά μικρής διάρκειας πηγές, ακολουθώντας διάφορες κορυφές του κυματοσυρμού-P, στην καλύτερη περίπτωση η μόνη βελτίωση ήταν μια μικρή αύξηση όλων των **XC_{max}**, κανένας σεισμός δεν έφτασε σε επίπεδο ομοιότητας τον **K_2** (της 29ης Μαρτίου), πράγμα που σημαίνει πως ούτε αυτή η προσέγγιση απέδωσε.

Μένει να εξεταστεί σε ποια συστάδα σμηνοσεισμών θα μπορούσε ενδεχομένως να ανήκει ο **K_3**, με πρώτη αυτή στην οποία ανήκει ο **K_1** ή κάποιος άμεσος συγγενής του και στη συνέχεια στις συστάδες που ανήκουν μερικά από τα γεγονότα των οποίων το **XC_{max}** βρέθηκε κοντά στην τιμή κατωφλίου ύστερα από συνέλιξη με μια πολύπλοκη υποθετική πηγή.

Στον χάρτη του Σχήματος Α.9 φαίνονται οι σεισμοί **K_1**, **K_2** και **K_3** καθώς και ορισμένες από τις υποψήφιες συστάδες σμηνοσεισμών στις οποίες πιθανόν να ανήκει ο **K_3**. Οι θέσεις **K_1** και **$K_{3,orig}$** είναι από τον αρχικό κατάλογο, η θέση του **K_2** είναι μετά τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD ενώ η θέση του **$K_{3,mod}$** είναι μετά τη διόρθωση των χρόνων άφιξης ώστε η άφιξη των **P** να βρίσκεται στο **P2** του Σχήματος Β.56, το ίδιο κατά ανάλογο τρόπο και στους άλλους σταθμούς. Στη **συστάδα Α** (35 γεγονότα) ανήκει ο πλέον όμοιος σεισμός με τον **K_2** (2001.04.11-21.20.08) ενώ ο ίδιος ο **K_2** εντάσσεται στη συστάδα για τιμή κατωφλίου λίγο μικρότερη από 0.72. Στη **συστάδα Β** (177 γεγονότα, η μεγαλύτερη για τιμή **C_{th}**=0.72 στον πίνακα **XC_s**) ανήκουν ορισμένα από τα γεγονότα για τα οποία **XC_{max}**>0.6 κατά τη σύγκρισή τους με το **K_3** ύστερα από συνέλιξη με διαφόρων ειδών πολύπλοκες πηγές, καθώς και ορισμένα από τα όμοια γεγονότα με το **K_1**. Τέλος, στη **συστάδα Γ** (18 γεγονότα) ανήκει ένα από τα όμοια γεγονότα με το **K_1**.



Σχήμα Α.8: Διάγραμμα μεγίστου ετεροσυσχέτισης Α) μεταξύ του γεγονότος αναφοράς 2001.03.29-00.25.25 και των υπόλοιπων γεγονότων του δείγματος των 1131 γεγονότων από το «σμήνος του ΑΙΟ» (το άστρο αντιστοιχεί στην αυτοσυσχέτιση), Β) μεταξύ του κύριου σεισμού και των υπόλοιπων του δείγματος των 1131 κατόπιν φιλτραρίσματος (0.5-15Hz) και συνέλιξης με την πηγή του Σχήματος Α.7$_A$. Το σήμα του Κ3 εδώ έχει συγκριθεί με τη συνελιγμένη έκδοσή του με την υποθετική πηγή η οποία, ως αποτέλεσμα, μοιάζει λιγότερο με το αρχικό σήμα απ' ότι με τα σήματα των Κ$_1$ και Κ$_2$.



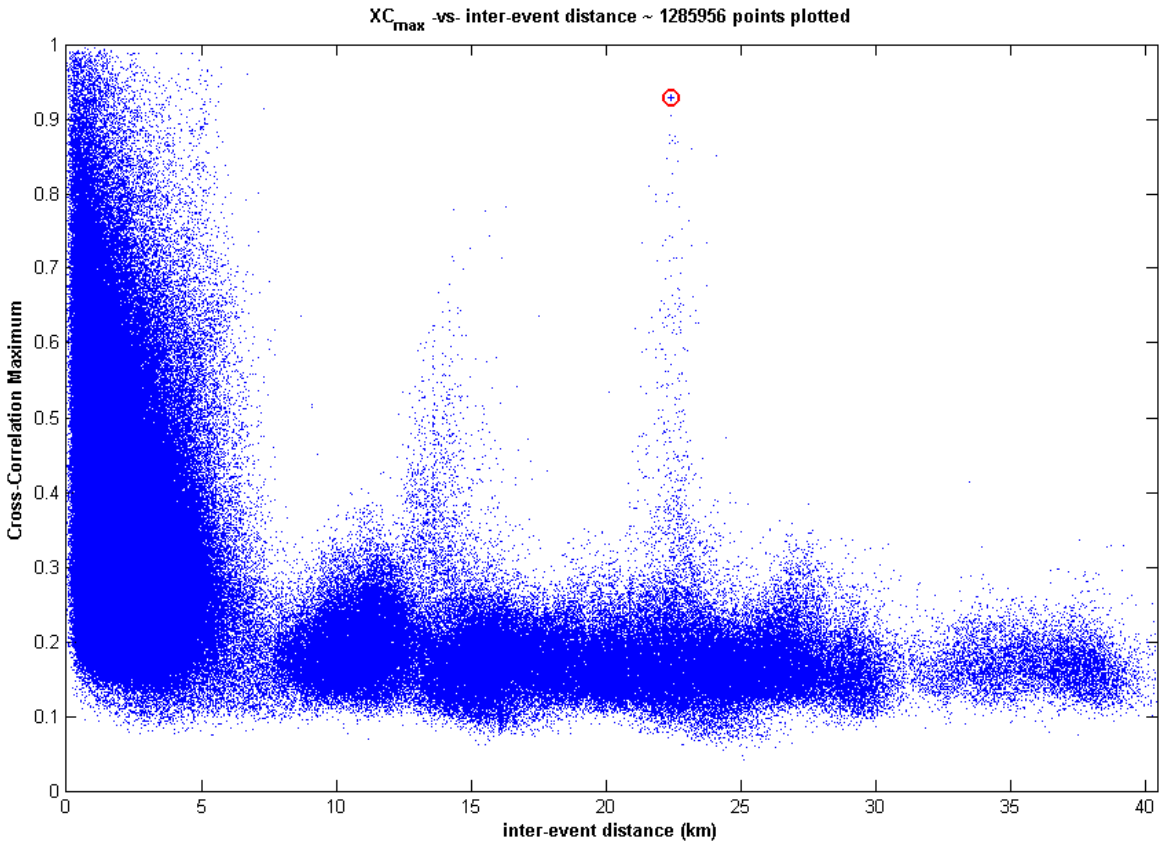
Σχήμα Α.9: Χάρτης επικέντρων της Ομάδας Α μετά τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD (Κεφ. 4). Σημειώνονται οι συστάδες Α, Β και Γ καθώς και τα επίκεντρα των σεισμών K_1, K_2 και K_3. $K_{3,orig}$: αρχικό υπόκεντρο του 3 σε βάθος 9km, $K_{3,mod}$: διορθωμένο επίκεντρο του K_3. (για περισσότερα βλέπε κείμενο).

Παρ' ότι το διορθωμένο επίκεντρο, $\mathbf{K_{3,mod}}$ φαίνεται να ανήκει στην πιο βορειοδυτική από τις συστάδες σμηνοσεισμών της Ομάδας Α, εν τούτοις η συστάδα αυτή βρίσκεται βαθύτερα κατά ~1km από τη νέα θέση του $\mathbf{K_3}$ (βάθος ~7.5km). Το αρχικό επίκεντρο, $\mathbf{K_{3,orig}}$ είναι αρκετά μακριά από τα υπόλοιπα της Ομάδας Α. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις περί μερικής ομοιότητας του $\mathbf{K_3}$ με ορισμένα άλλα γεγονότα, υπό την προϋπόθεση ότι η διαφορά βρίσκεται κυρίως στην πηγή και ότι πράγματι υπάρχουν σεισμοί που είναι όμοιοι με τον $\mathbf{K_3}$ ως προς την υποκεντρική θέση και το μηχανισμό γένεσης οι οποίοι θα μπορούσαν να εντοπιστούν αν ήταν γνωστή η ακριβής χρονοσυνάρτηση της πηγής του, η πραγματική θέση του $\mathbf{K_3}$ αναμένεται να βρίσκεται μεταξύ των συστάδων Β και Γ, πιθανότερα εντός της Β που είναι άλλωστε και η μεγαλύτερη από τις συστάδες που έχουν δημιουργηθεί. Το μέσο βάθος στο οποίο βρίσκονται οι 2 συστάδες είναι ~7.5-8km με τη Β να φτάνει βαθύτερα έως ~8.5km προς τα βόρεια.

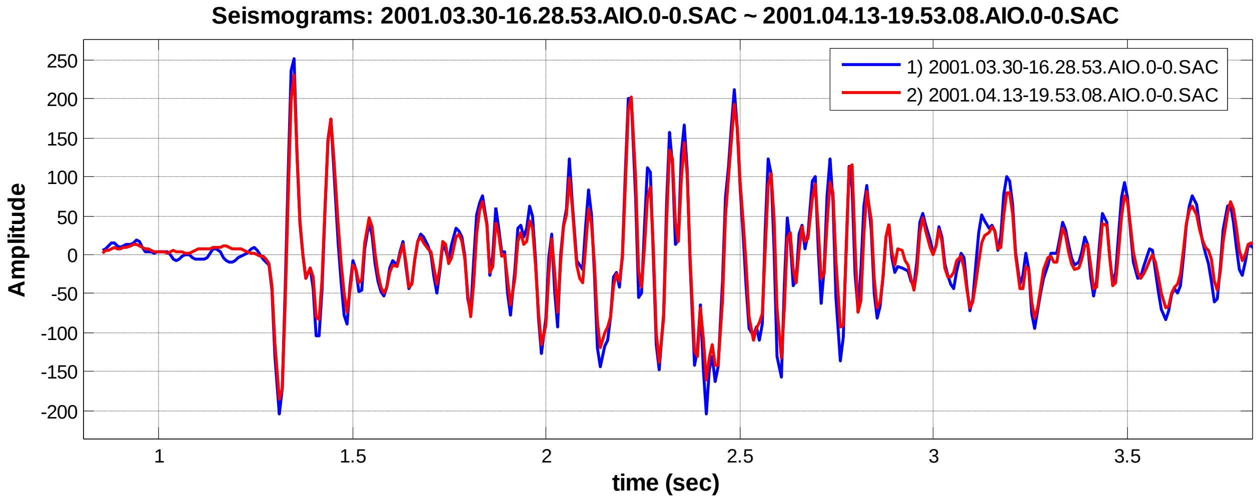
Α.2 ~ Όμοιοι σεισμοί και υποκεντρικές ενδοαποστάσεις

Στο πρώτο κεφάλαιο έγινε λόγος για την απόσταση ανάμεσα σε όμοιους σεισμούς. Αυτή η απόσταση θεωρητικά δεν πρέπει να ξεπερνάει το ¼ του μήκους κύματος που αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα περίοδο. Ωστόσο, μετά την κατασκευή του πρώτου πίνακα συσχέτισης, $\mathbf{A_x}$, (Κεφ. 3) παρατηρήθηκαν περιπτώσεις στις οποίες εμφανίζονταν ζεύγη όμοιων σεισμών των οποίων η μεταξύ τους απόσταση ήταν πολύ μεγάλη. Στο Σχήμα Α.10 κάθε σημείο παριστάνει ένα ζεύγος σεισμών με την τετμημένη να αντιστοιχεί στην απόσταση ανάμεσα στα υπόκεντρα των 2 γεγονότων του κάθε ζεύγους και την τεταγμένη στην τιμή $\mathbf{XC_{max}}$, από τα δεδομένα του δείγματος από το «σμήνος του AIO (2001)» για την περίοδο 26/3/2001-18/4/2001.

Φαίνεται ότι για ένα μεγάλο πλήθος συνδυασμών γεγονότων ανά δύο, οι ενδοαποστάσεις τους είναι μικρότερες από 6km και αντίστοιχα οι τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ μεγιστοποιούνται όσο μικραίνει η ενδοαπόσταση (υπενθυμίζεται ότι αυτές οι αποστάσεις αναφέρονται στα δεδομένα του αρχικού καταλόγου). Παρατηρούνται, ωστόσο, μεταξύ 13-14km καθώς και 22-23km ορισμένα «νέφη» σημείων με σχετικά υψηλές τιμές $\mathbf{XC_{max}}$. Μάλιστα, στο κυκλωμένο με κόκκινο χρώμα σημείο, η τιμή $\mathbf{XC_{max}}$ έχει ξεπεράσει το 0.9. Προφανώς σε μια τέτοια περίπτωση υπάρχουν 2 ενδεχόμενα: 1) υπάρχει πρόβλημα στη μεθοδολογία εντοπισμού όμοιων σεισμών και άρα η τιμή $\mathbf{XC_{max}}$ δεν είναι σωστή, 2) η υποκεντρική θέση ενός ή και των δύο από τα γεγονότα που απαρτίζουν τα ζεύγη με μεγάλο $\mathbf{XC_{max}}$ και μεγάλη ενδοαπόσταση, περιέχει μεγάλα σφάλματα. Θα δειχθεί πως ισχύει το δεύτερο.



Σχήμα Α.10: τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ ως προς την υποκεντρική ενδοαπόσταση μεταξύ όλων των συνδυασμών κατά ζεύγη των 1134 γεγονότων του δείγματος της περιόδου 26/3/2001-18/4/2001 από τα δεδομένα του αρχικού καταλόγου. Οι «εξάρσεις» της ετεροσυσχέτισης που φαίνονται σε αποστάσεις ~13-14km και ~22-23km είναι βέβαιο πως οφείλονται σε κακό προσδιορισμό 2 ή παραπάνω γεγονότων που απέχουν εσφαλμένα από το κύριο 'σεισμικό νέφος' κατά 13-14km και 22-23km αντίστοιχα. Η ετεροσυσχέτιση είναι υπολογισμένη από αφιλτράριστες καταγραφές της Z-συνιστώσας του σταθμού AIO. Το κυκλωμένο σημείο αντιστοιχεί στο ζεύγος των γεγονότων 2001.03.30-16.28.53 και 2001.04.13-19.53.08. Το νέφος σημείων που βρίσκεται κάτω από το κυκλωμένο σημείο με $\mathbf{XC_{max}}$>0.4 αντιστοιχεί σε άμεσους ή έμμεσους συγγενείς του 2001.03.30-16.28.53 (ο οποίος απέχει πράγματι 22-23km από το κύριο σμήνος)



Σχήμα Α.11: Οι φιλτραρισμένες (0.5-20Hz) κυματομορφές του σεισμικού ζεύγους που ήταν κυκλωμένο στο προηγούμενο σχήμα (σε ενδοαπόσταση ~23km όπως προέκυπτε από τον αρχικό κατάλογο). Είναι εμφανές πως η υψηλή τιμή $\mathbf{XC_{max}}$ αντιπροσωπεύει τον υψηλό βαθμό ομοιότητας και προδίδει τον εσφαλμένο προσδιορισμό του υποκέντρου ενός από τους 2 ή και των 2 σεισμών. Εδώ ο σεισμός 2001.03.30-16.28.53 είναι αυτός που έχει βρεθεί χωρικά εκτός συστάδας λόγω προβλήματος στον προσδιορισμό της θέσης του.

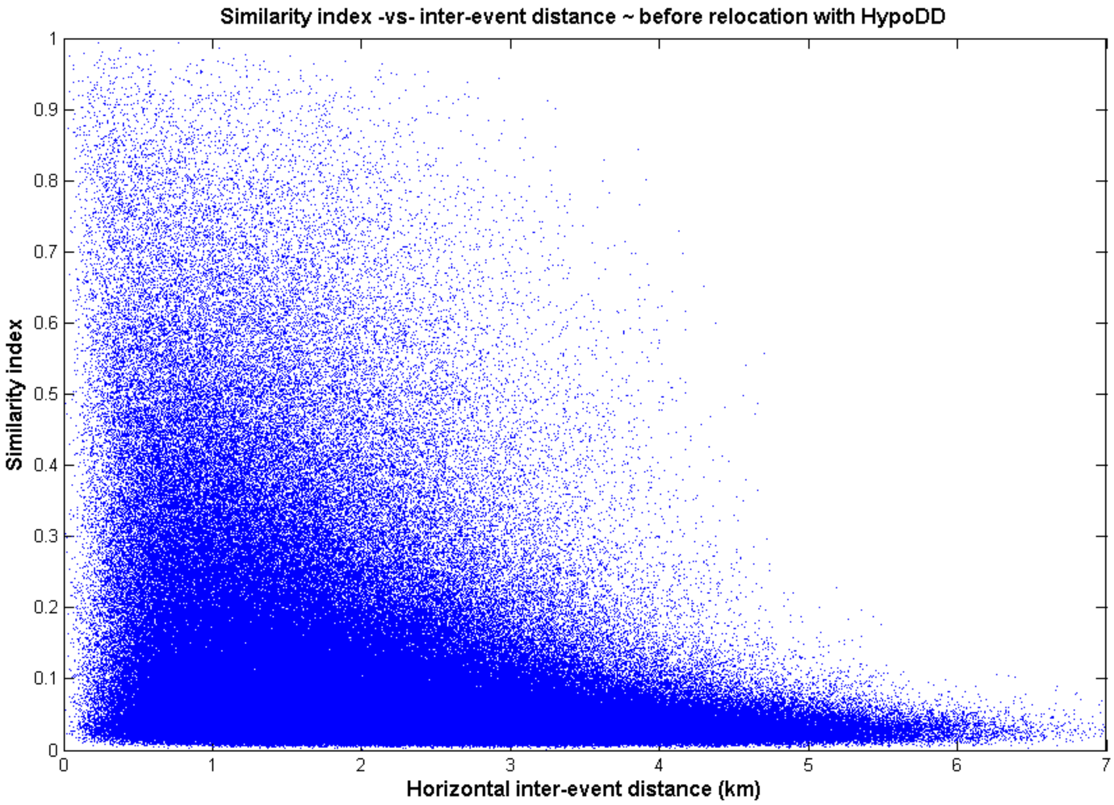
Η ομοιότητα των κυματομορφών του κυκλωμένου ζεύγους του Σχήματος Α.10 φαίνεται στο Σχήμα Α.11. Το $\mathbf{XC_{max}}$, πράγματι, έχει δικαιολογημένα υψηλή τιμή. Μετά από επανέλεγχο των χρόνων άφιξης παρατηρήθηκαν σφάλματα τα οποία οδήγησαν το γεγονός “2001.03.30-16.28.53” να βρεθεί κατά 22-23km μακριά από την πραγματική του θέση, η οποία είναι κάπου στο εσωτερικό του σμήνους του AIO και άρα η πραγματική του ενδοαπόσταση από τους άμεσους και έμμεσους συγγενείς του είναι το πολύ 5-6km.

Το Σχήμα Α.10 δείχνει και κάτι άλλο. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις σεισμών των οποίων οι υποκεντρικές θέσεις σχεδόν ταυτίζονται (πολύ μικρή ενδοαπόσταση) αλλά το $\mathbf{XC_{max}}$ τους είναι πάρα πολύ μικρό. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για τους οποίους μπορεί να συμβεί κάτι τέτοιο. Ο πιο συνήθης είναι, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, τα σφάλματα στον υπολογισμό των υποκέντρων. Ωστόσο, αν θεωρηθεί πως 2 υπόκεντρα είναι πράγματι πολύ κοντά μεταξύ τους, υπάρχουν άλλοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάζουν τις κυματομορφές τους, όπως ο μηχανισμός γένεσης, η χρονο-ιστορία της πηγής (*source time history*), το μέγεθος και το επίπεδο του θορύβου.

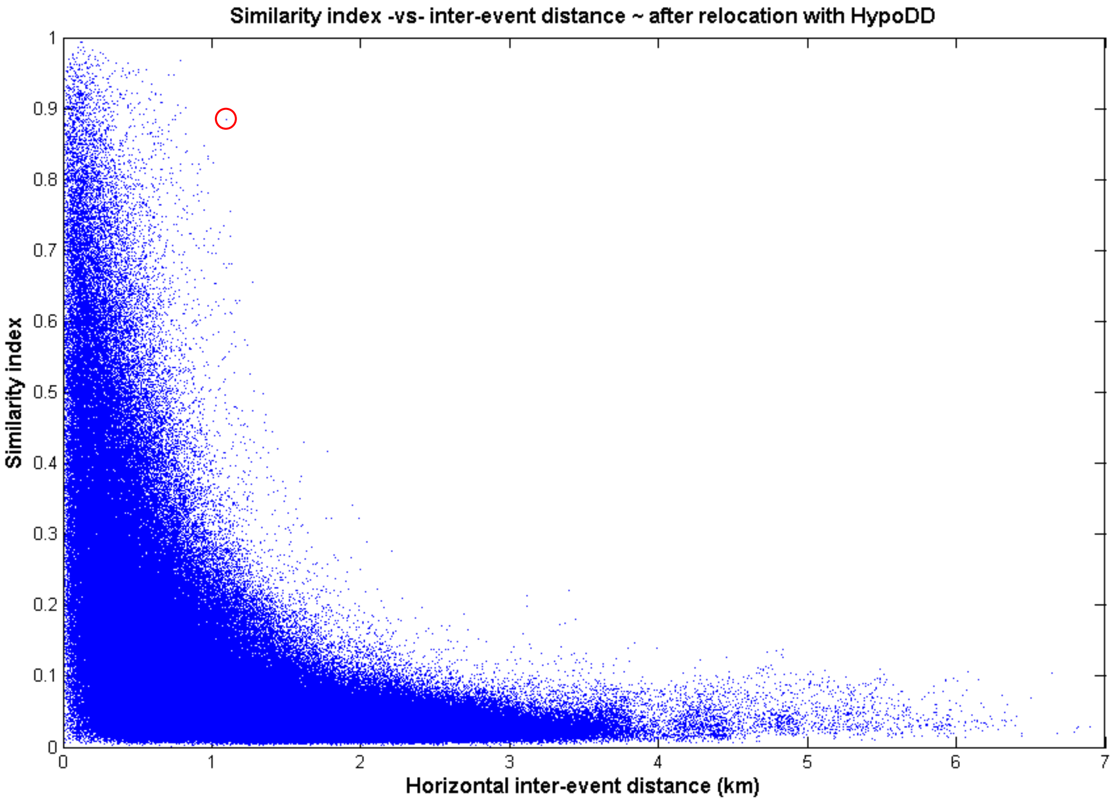
Μια ματιά σε ένα δείγμα από τα λιγότερο συσχετισμένα ζεύγη γεγονότων (πολύ χαμηλή τιμή του δείκτη ομοιότητας, $S_{ij}<0.1$) τα οποία ωστόσο βρέθηκαν σε πολύ μικρή οριζόντια ενδοαπόσταση (μικρότερη από 0.1km) ύστερα από τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD στην Ομάδα Α (Κεφ. 4), έδειξε πως σε αυτές τις περιπτώσεις σε κανέναν σταθμό δεν υπήρχε καλή συσχέτιση, υπήρχε διαφορά στα πλάτη, το ένα από τα δύο σήματα συνήθως είχε περισσότερο θόρυβο, το αντίστοιχο γεγονός δεν ανήκε σε καμία συστάδα σμηνοσεισμών ενώ το άλλο γεγονός ανήκε σε κάποια από τις συστάδες με $C_{th}=0.72$ (από τον πίνακα ομοιότητας $\mathbf{XC_s}$ της Ομάδας Α).

Αυτό σημαίνει πως πιθανόν ο επαναπροσδιορισμός με HypoDD οδήγησε το ένα από τα 2 γεγονότα (αυτό που δεν ανήκε σε κάποια συστάδα) κοντά σε μία συστάδα σμηνοσεισμών, η οποία δημιουργήθηκε βάσει των δεδομένων ετεροσυσχέτισης, λόγω της σύνδεσής του με τα υπόλοιπα γεγονότα της συστάδας αυτής μέσω των δεδομένων καταλόγου. Σε γενικές γραμμές πάντως, η εικόνα της κατανομής των τιμών $\mathbf{S_{ij}}$ συναρτήσει της ενδοαπόστασης πριν (Σχήμα Α.12$_A$) και μετά (Σχήμα Α.12$_B$) τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD βελτιώνεται καθώς το «νέφος» σημείων παίρνει τη μορφή μιας εκθετικής μείωσης όσο η ενδοαπόσταση αυξάνεται.

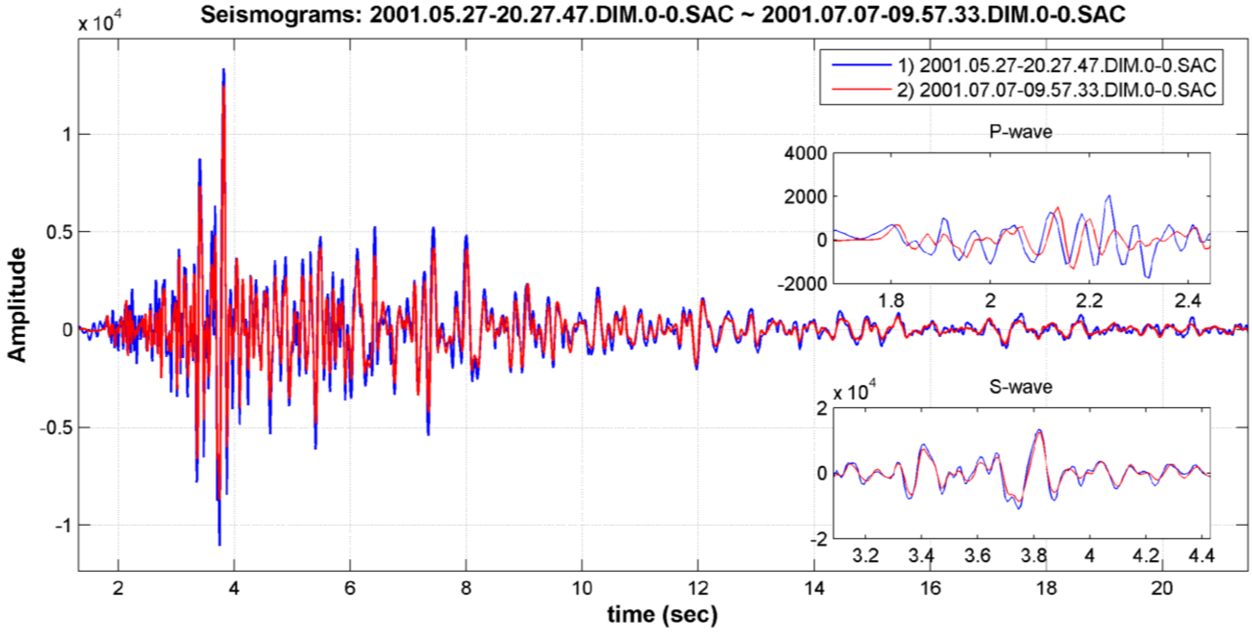
A)



B)



Σχήμα Α.12: Τιμές του δείκτη ομοιότητας $\mathbf{S_{ij}}$ συναρτήσει των οριζόντιων ενδοαποστάσεων μεταξύ των γεγονότων της Ομάδας Α: πριν (Α) και μετά (Β) τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD. Με κόκκινο κύκλο σημειώνεται ένα ζεύγος γεγονότων με $\mathbf{S_{ij}}$=0.885 και ενδοαπόσταση λίγο μεγαλύτερη από 1km, οι κυματομορφές του οποίου φαίνονται στο Σχήμα Α.13



Σχήμα Α.13: φιλτραρισμένες κυματομορφές (0.5-15Hz) του κυκλωμένου ζεύγους του Σχήματος Α.12$_B$ στην κατακόρυφη συνιστώσα του σταθμού DIM. Η ομοιότητα είναι σαφής (**XC_{max}=0.95**) κυρίως στα κύματα S και στην κυματο-ουρά (*S-wave coda*) ενώ υψηλή είναι και η μέση συνοχή **m_{coh}=0.923**. Στο σχήμα τα πλάτη της μπλε κυματομορφής έχουν μεγεθυνθεί κατά 11 φορές ώστε να μπορεί να γίνει η οπτική σύγκριση. Σε αυτό και σε μικρές διαφορές στην πηγή και στο μηχανισμό πιθανόν οφείλονται οι διαφορές στα P-κύματα.

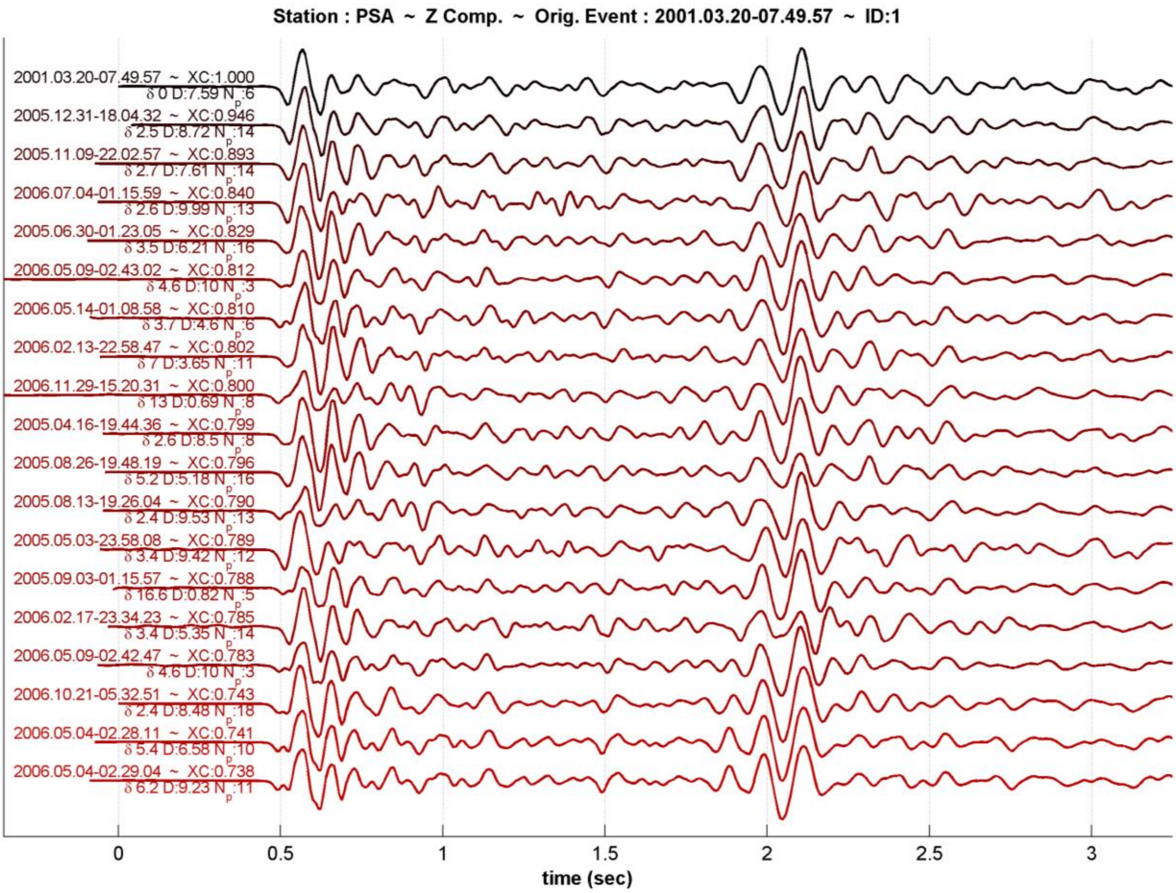
Α.3 ~ *Όμοιοι σεισμοί με μεγάλη διαφορά χρόνου γένεσης*

Στα πλαίσια μιας παρουσίασης για το πρόγραμμα HAZ3, έγινε μια προσπάθεια εντοπισμού όμοιων σεισμών με χρονική διαφορά 4-6 ετών. Η αναζήτηση έγινε με τη γνωστή μέθοδο του πίνακα συσχέτισης αλλά με μια σημαντική τροποποίηση. Ο πίνακας είναι μη-τετραγωνικός και, συνεπώς, μη-συμμετρικός. Οι γραμμές του αντιστοιχούν στους αριθμούς ταυτοποίησης (*Event-ID*) των σεισμών από τα έτη 2000-2001 ενώ οι στήλες σε σεισμούς των ετών 2005-2006. Για τη σύγκριση χρησιμοποιήθηκαν κυματομορφές της κατακόρυφης συνιστώσας του σταθμού PSA. Επιλέχθηκαν 1578 σεισμοί από την περίοδο 2000-2001 και 6059 σεισμοί από την περίοδο 2005-2006, όλοι με επίκεντρα εντός του Δ. Κορινθιακού κόλπου.

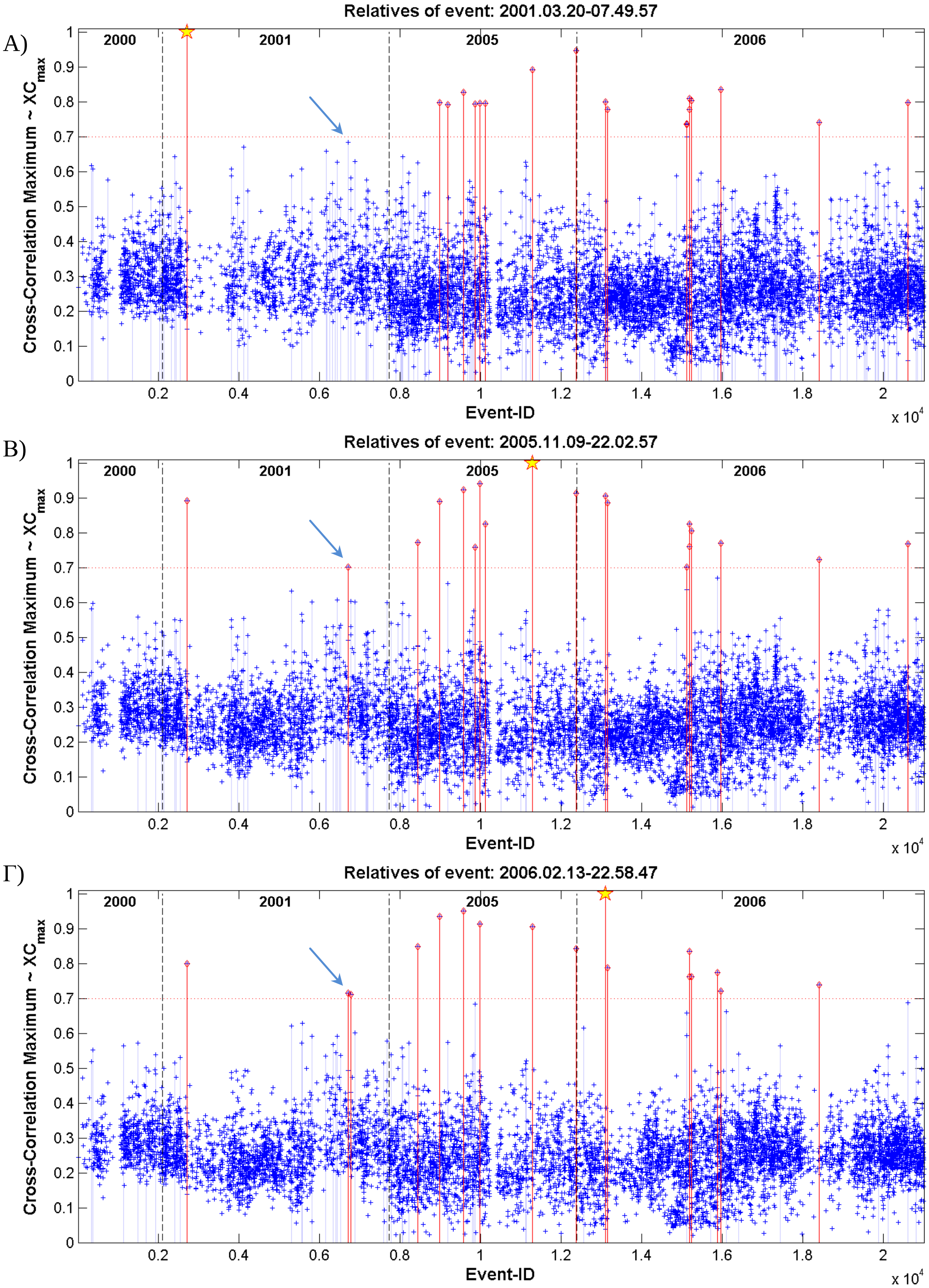
Από τη σύγκριση προέκυψε ότι 42 γεγονότα από τα έτη 2000-2001 έχουν ομοιότητα με 77 γεγονότα από τα έτη 2005-2006 βάσει της τιμής κατωφλίου **C_{th}**=0.7 (λαμβάνοντας μόνο το **XC_{max}**) ενώ με τιμή κατωφλίου **C_{th}**=0.9 εντοπίστηκαν μόνο 13 ζεύγη γεγονότων (*doublet*) με χρονική διαφορά 4-6 ετών. Σημειώνεται ότι πρόκειται για σύγκριση άμεσης συγγένειας, πράγμα που σημαίνει ότι τα 42 ή 77 γεγονότα των ετών 2000-2001 ή 2005-2006 αντίστοιχα, πιθανόν ανήκουν σε ευρύτερες συστάδες σμηνοσεισμών που εκδηλώθηκαν κατά τη διάρκεια των αντίστοιχων ετών.

Σύμφωνα με τον τρόπο αντιμετώπισης των συστάδων σμηνοσεισμών που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3 (κατασκευή δενδρογραμμάτων), ένα ζεύγος όμοιων σεισμών αρκεί ώστε να ενοποιηθούν δύο συστάδες σε μια δεδομένη τιμή κατωφλίου καθώς έτσι υπάρχει μια τουλάχιστον «διαδρομή» διαδοχικών άμεσων συγγενών που συνδέει 2 οποιαδήποτε γεγονότα της ενοποιημένης συστάδας. Ο μεγαλύτερος αριθμός άμεσων συγγενών με **C_{th}**=0.7 εντοπίστηκε για το γεγονός 2001.03.20-07.49.57 για το οποίο βρέθηκαν 18 άμεσοι συγγενείς από τα έτη 2005-2006. Στο Σχήμα Α.14 φαίνονται οι κυματομορφές αυτών των 19 γεγονότων.

Μετά τον εντοπισμό των όμοιων σεισμών μέσω του πίνακα συσχέτισης επιλέχθηκε και παρουσιάζεται η πλήρης σχέση ομοιότητας ανάμεσα σε 3 από τις 19 κυματομορφές που παρουσιάζονται στο Σχήμα Α.14 σε σύγκριση με τις κυματομορφές 21009 γεγονότων από τις Ομάδες Α, Β και από ολόκληρα τα έτη 2005-2006, στην κατακόρυφη συνιστώσα του σταθμού PSA (Σχήμα Α.15). Παρατηρείται ότι πέρα από τα 18 γεγονότα/άμεσους-συγγενείς του γεγονότος αναφοράς 2001.03.20-07.49.57, υπάρχουν και άλλα γεγονότα των οποίων οι κυματομορφές μοιάζουν με αυτές ορισμένων από τους άμεσους συγγενείς του 2001.03.20-07.49.57, καθιστώντας τα έμμεσους συγγενείς του. Αν εντοπιστούν και συνδυαστούν όλοι οι έμμεσοι συγγενείς θα δημιουργηθεί μια συστάδα σμηνοσεισμών χρονικά διασκορπισμένη ανά τα έτη. Παρατηρείται πως ειδικά ορισμένα γεγονότα που βρίσκονταν οριακά στην τιμή κατωφλίου κατά τη σύγκρισή τους με το γεγονός 2001.03.20-07.49.57, βρέθηκαν με $\mathbf{XC_{max}} \geq \mathbf{C_{th}}$ κατά τη σύγκρισή τους με έναν από τους άμεσους συγγενείς του (Σχήμα Α.15$_{Β,Γ}$, σημείωση με μπλε βέλος).



Σχήμα Α.14: 19 όμοιες, φιλτραρισμένες κυματομορφές (0.5-15Hz) από τις οποίες η πρώτη ανήκει σε έναν σεισμό του 2001 (2001.03.20-07.49.57) ενώ οι υπόλοιπες σε σεισμούς από τα έτη 2005-2006. Οι κυματομορφές έχουν στοιχηθεί στον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ ως προς την πρώτη ενώ το χρώμα από μαύρο προς κόκκινο χαρακτηρίζει τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ (XC στο σχήμα) από 1 έως 0.738 που είναι η τιμή της τελευταίας.

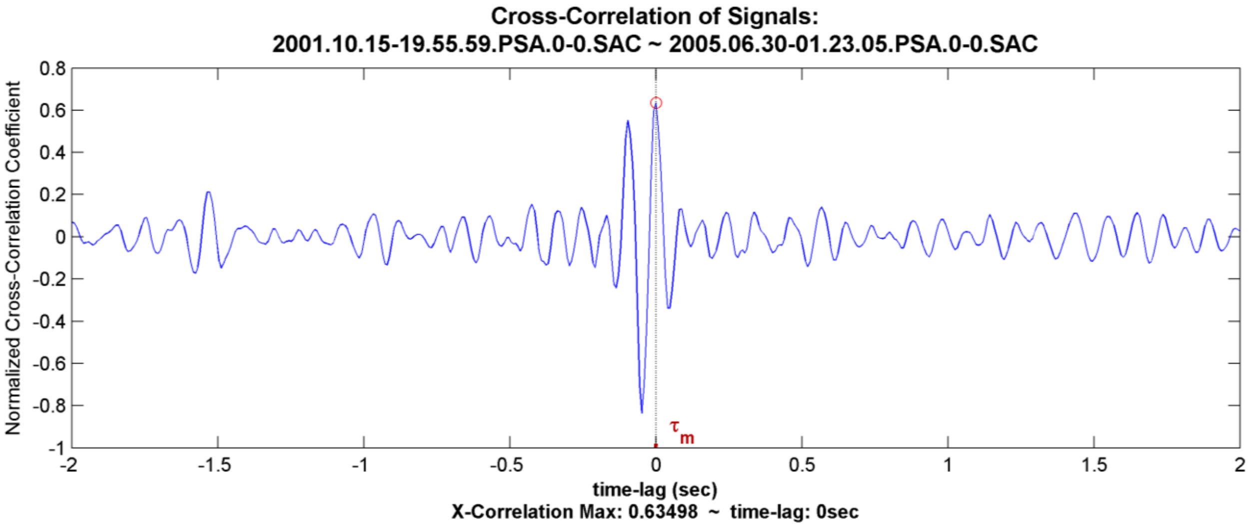


Σχήμα Α.15: τιμές μεγίστου ετεροσυσχέτισης, **XC_{max}**, ανάμεσα στην κυματομορφή ενός γεγονότος αναφοράς (που σημειώνεται στον τίτλο του κάθε γραφήματος και με άστρο εντός γραφήματος) και στις κυματομορφές άλλων 21009 γεγονότων από τα έτη 2000, 2001, 2005 και 2006 (στη συνιστώσα Ζ του σταθμού PSA). Οι κατακόρυφες μαύρες διακεκομμένες γραμμές διαχωρίζουν τα διάφορα έτη. (Βλέπε κείμενο για περισσότερα)

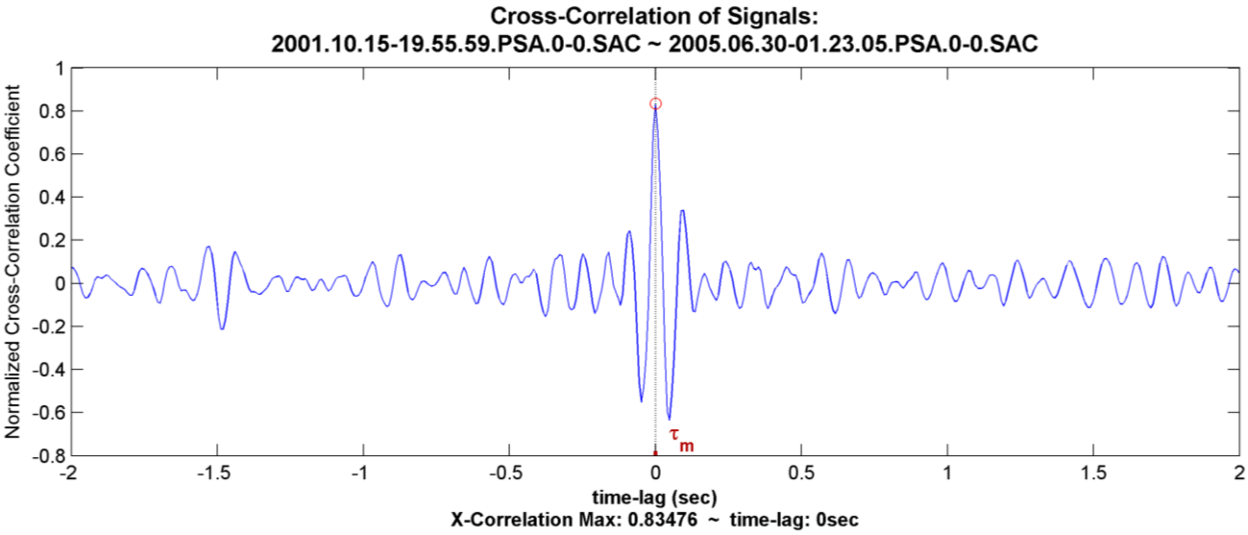
Α.4 ~ Σεισμογράμματα με ισχυρή αρνητική συσχέτιση

Μια ειδική περίπτωση σημάτων είναι αυτή στην οποία το ολικό αρνητικό ελάχιστο της ετεροσυσχέτισης, $\mathbf{XC_{min}}$, είναι κατά απόλυτη τιμή μεγαλύτερο από το ολικό μέγιστο $\mathbf{XC_{max}}$, και μάλιστα είναι $|\mathbf{XC_{min}}| \geq \mathbf{C_{th}}$, όπου $\mathbf{C_{th}}$ μια σχετικά υψηλή τιμή κατωφλίου. Αυτό σημαίνει πως στην αντίστοιχη χρονική καθυστέρηση $\boldsymbol{\tau_m}$ (βάσει του ολικού ελαχίστου) οι κυματομορφές παρουσιάζουν ισχυρή αρνητική συσχέτιση, με άλλα λόγια οι 2 κυματομορφές έχουν αντίθετες πολικότητες. Μια τέτοια περίπτωση παρουσιάζεται στα Σχήματα Α.17.

A)

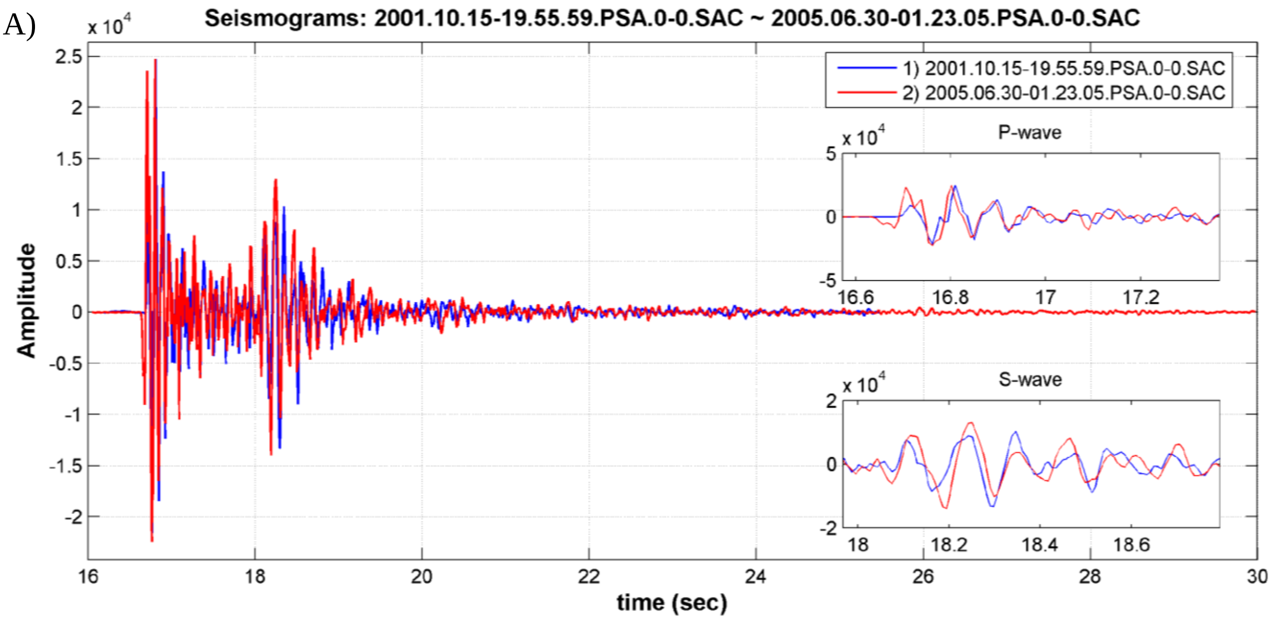


B)

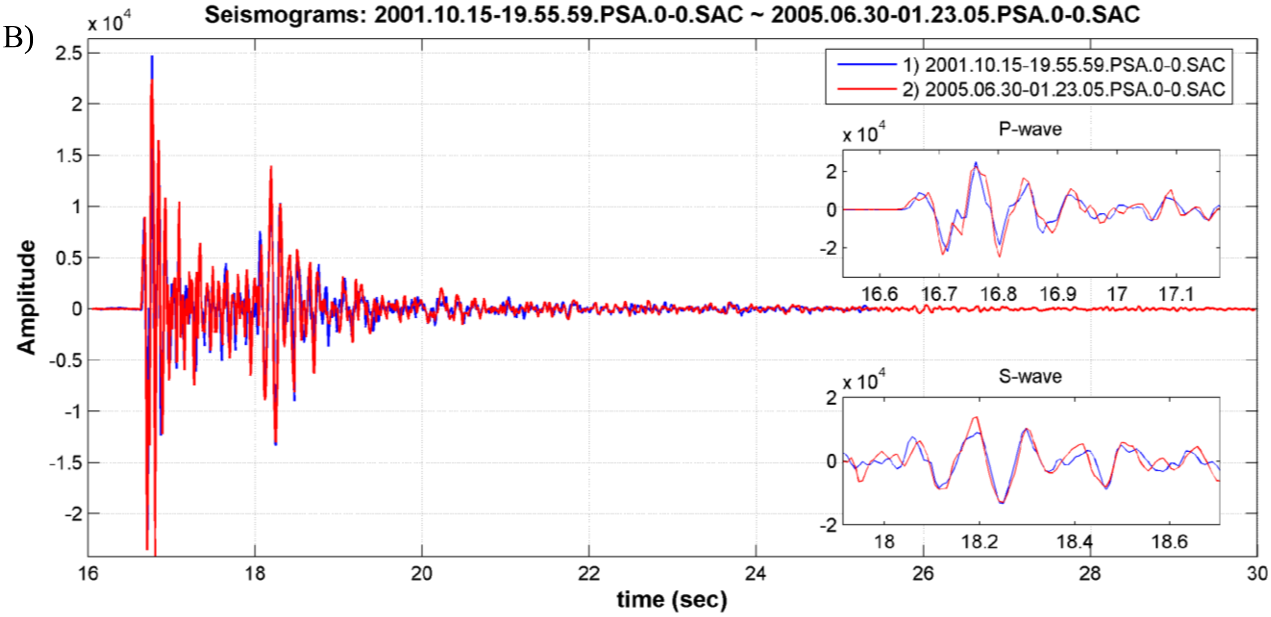


Σχήμα Α.16: ετεροσυσχέτιση των κυματομορφών των Σχημάτων Α.17, πριν (Α) και μετά (Β) την αντιστροφή της δεύτερης κυματομορφής (κόκκινη στο Σχήμα Α.17$_A$). Η συμμετρία γύρω από το μέγιστο του (Α) ($C_{S,A}$=0.755) δεν είναι τόσο καλή όσο αυτή του (Β) ($\mathbf{C_S}$=0.931) ενώ το ίδιο ισχύει και για τα $\mathbf{XC_{max}}$ ($\mathbf{XC_{max,A}}$=0.635, $\mathbf{XC_{max,B}}$=0.835).

A)



B)

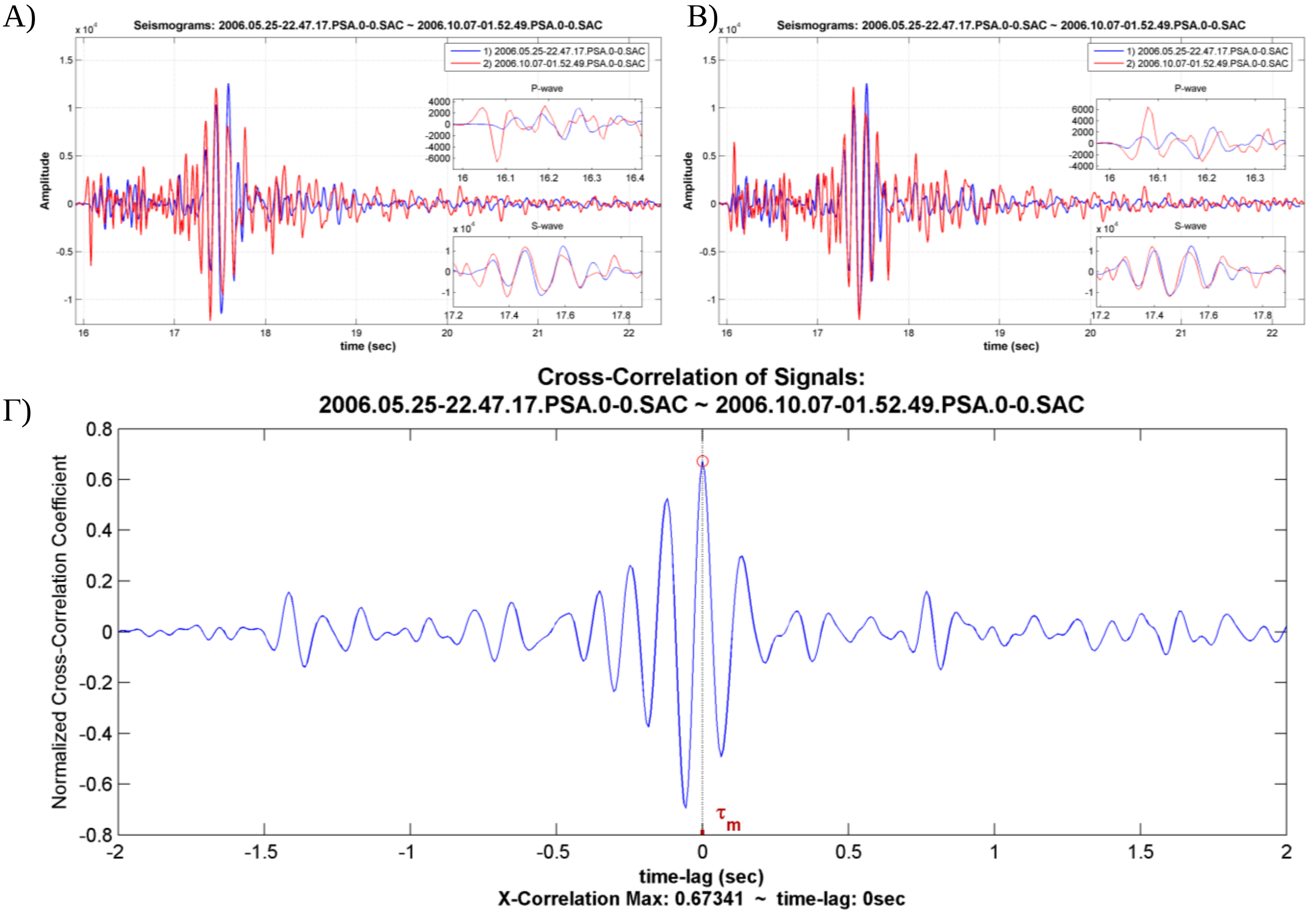


Σχήμα Α.17: Α) σύγκριση των αφιλτράριστων κυματομορφών των γεγονότων 2001.10.15-19.55.59 και 2005.06.30-01.23.05 στην κατακόρυφη συνιστώσα του σταθμού PSA. Η πρώτη άφιξη, όπως φαίνεται από τη μεγέθυνση στα P-κύματα, έχει αντίθετη πολικότητα στις 2 κυματομορφές. Κατά τα άλλα εμφανίζουν μια σχετικά καλή θετική συσχέτιση ($\mathbf{XC_{max}}$=0.635). Β) οι ίδιες κυματομορφές με αυτές του προηγούμενου σχήματος αλλά με τη δεύτερη (κόκκινη) αντιστραμμένη. Η συσχέτιση τώρα είναι ακόμα καλύτερη από πριν ($\mathbf{XC_{max}}$=0.835).

Όπως φαίνεται και από τα Σχήματα Α.16, η ίδια η μορφή της ετεροσυσχέτισης μοιάζει αντιστραμμένη στο Σχήμα Α.16$_A$. Το ολικό μέγιστο που έχει εντοπιστεί, ελάχιστα διαφέρει από το δευτερεύον μέγιστο που βρίσκεται σε αρνητική χρονική καθυστέρηση και αντίστοιχα η διαφορά ανάμεσα στα 2 δευτερεύοντα τοπικά μέγιστα, εκατέρωθεν του ολικού, είναι πολύ μεγάλη, δίνοντας κατά αυτόν τον τρόπο σχετικά χαμηλό συντελεστή συμμετρίας $C_{S,A}$=0.755. Αντίθετα, αν αντιστραφεί η πολικότητα της κόκκινης κυματομορφής του Σχήματος Α.17$_A$, όπως φαίνεται στο Σχήμα Α.17$_B$, η ταύτιση γίνεται καλύτερη, το ολικό μέγιστο της ετεροσυσχέτισης (που προηγουμένως ήταν ολικό ελάχιστο) είναι μεγαλύτερο από το προηγούμενο ($\mathbf{XC_{max,B}}$=0.835) και η συμμετρία γύρω από το μέγιστο βελτιώθηκε ($\mathbf{C_{S,}}$$_B$=0.931). Προκειμένου να ταυτιστούν οι κυματομορφές στο Σχήμα Α.17$_B$ σε σχέση με το Σχήμα Α.17$_A$ έπρεπε να μετακινηθεί η κόκκινη προς τη θετική φορά του χρόνου κατά 6 δείγματα (0.048sec). Η συνοχή βελτιώνεται επίσης αλλά όχι τόσο έντονα (δεν επηρεάζεται από τόσο μικρές χρονικές μετατοπίσεις).

Οι περισσότερες περιπτώσεις, πάντως, δεν είναι σαν αυτή του προηγούμενου παραδείγματος. Συνήθως, $|\mathbf{XC_{min}}|\geq\mathbf{XC_{max}}$ σημαίνει πως τα 2 σήματα δεν είναι όμοια. Αυτή η παρατήρηση θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την κατασκευή ενός διαφορετικού πίνακα ομοιότητας στον οποίο θα παίζει ρόλο η σχέση ανάμεσα στο ολικό (θετικό) μέγιστο και (αρνητικό) ελάχιστο. Στην εργασία αυτή η συγκεκριμένη πληροφορία έχει χρησιμοποιηθεί σε μικρό βαθμό, καθώς στις περιπτώσεις που $|\mathbf{XC_{min}}|\geq\mathbf{XC_{max}}$ τίθεται αυτόματα η τιμή του αντίστοιχου στοιχείου του πίνακα $\mathbf{A_x}$ ίση με το $\mathbf{XC_{min}}$ και στη συνέχεια κατά την κατασκευή του πίνακα ομοιότητας $\mathbf{XC_s}$ τα στοιχεία αυτά μηδενίζονταν εντελώς. Δεν είναι προφανές το πόσο μεγαλύτερο θα πρέπει να είναι το $\mathbf{XC_{max}}$ από το $|\mathbf{XC_{min}}|$ ώστε να χαρακτηριστεί ένα ζεύγος σημάτων ως όμοιο. Για να βγουν συμπεράσματα πάνω σε αυτή τη λεπτομέρεια χρειάζεται περαιτέρω ανάλυση μέσα από την κατασκευή 2 πινάκων στους οποίους θα καταγράφονται τόσο οι τιμές $\mathbf{XC_{min}}$ όσο και οι τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ κάθε φορά που εκτελείται η ετεροσυσχέτιση (βλέπε επίσης *Hauksson & Shearer, 2005*).

Η γενικότερη περίπτωση $|\mathbf{XC_{min}}|\geq\mathbf{XC_{max}}$ είναι σαν αυτή του Σχήματος Α.18. Παρά τη μερική ταύτιση στα S-κύματα, τα P είναι τελείως ανόμοια με ή χωρίς την αντιστροφή της μιας από τις δύο κυματομορφές. Η εικόνα της ετεροσυσχέτισης επίσης δεν είναι η συνηθισμένη που έχει ένα ζεύγος όμοιων σεισμών. Η ανομοιότητα μπορεί να επαληθευθεί και από τις κυματομορφές άλλων σταθμών για τα ίδια γεγονότα.



Σχήμα Α.18: Α) φιλτραρισμένες κυματομορφές (0.5-15Hz) με σχετικά μεγάλο ολικό ελάχιστο της ετεροσυσχέτισης ($\mathbf{XC_{min}}$=-0.695) στοιχισμένες στον χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$ του θετικού μεγίστου της ετεροσυσχέτισης, Β) οι ίδιες κυματομορφές με αυτές του σχήματος (Α) αλλά με την κόκκινη να έχει αντιστραφεί και η στοίχιση να έχει γίνει στον νέο χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$, Γ) ετεροσυσχέτιση των 2 σημάτων του Σχήματος (Α). Είναι $\mathbf{XC_{max}}$=0.673 και $\mathbf{XC_{min}}$=-0.695. Οι τιμές αυτές είναι παραπλήσιες μεταξύ τους και η μορφή της ετεροσυσχέτισης είναι ασύμμετρη. Δεν πρόκειται για όμοιους σεισμούς.

Α.5 ~ *Γενετικοί Αλγόριθμοι*

Ο Γενετικός Αλγόριθμος είναι μια μέθοδος επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης βασισμένη σε μια τεχνητή προσομοίωση της βιολογικής διαδικασίας της Φυσικής Επιλογής, η οποία είναι το κύριο αίτιο του φαινομένου της βιολογικής εξέλιξης. Ο Γενετικός Αλγόριθμος λειτουργεί ως εξής:

1) Αρχικά δημιουργείται ένας πληθυσμός (*population*) συνόλων **τυχαίων** λύσεων ενός προβλήματος.

2) Στη συνέχεια επιλέγονται σύνολα ως «γονείς» (*parents*) είτε τυχαία είτε βάσει κάποιων Κανόνων Επιλογής και ο αλγόριθμος τα χρησιμοποιεί για να παράγει την επόμενη γενιά συνόλων λύσεων. Ο συνδυασμός 2 γονέων για την παραγωγή ενός παιδιού (*child*) ονομάζεται **διασταύρωση** (*cross-over*)

3) Κατά την διαδικασία της «αναπαραγωγής» μπορεί να συμβούν τυχαίες «**μεταλλάξεις**» (*mutations*) όπως συμβαίνει και στους βιολογικούς πληθυσμούς.

4) Μετά τη διαδοχή αρκετών γενεών (*generations*) ο πληθυσμός «**εξελίσσεται**» σε μια βέλτιστη λύση υπό την τάση για ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση μιας ορισμένης συνάρτησης **ικανότητας** (*fitness function*)

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι μπορούν να λύσουν ένα πλήθος προβλημάτων βελτιστοποίησης που άλλες μέθοδοι αδυνατούν να επιλύσουν, συμπεριλαμβανομένων προβλημάτων στα οποία η αντικειμενική συνάρτηση είναι ασυνεχής, μη-διαφορίσιμη, στοχαστική ή ισχυρά μη-γραμμική. Σε αντίθεση με συνήθεις αλγορίθμους βελτιστοποίησης οι Γενετικοί Αλγόριθμοι χρησιμοποιούν πληθυσμούς λύσεων αντί για σημειακές ακολουθίες. Είναι ο πληθυσμός αυτός ο οποίος εξελίσσεται προς τη βέλτιστη λύση, και τα διαδοχικά βήματα περιλαμβάνουν τυχαίες επιλογές σε αντίθεση με τους αιτιοκρατικούς υπολογισμούς των απλών αλγορίθμων.

Μια από τις χρήσεις ενός Γενετικού Αλγόριθμου είναι η εύρεση του ολικού ελάχιστου μιας ισχυρά μη-γραμμικής συνάρτησης, πιθανόν με πολλές μεταβλητές. Μια απλή κλασσική εφαρμογή είναι το **Πρόβλημα του Περιοδεύοντος Πωλητή** (*Traveling Salesman Problem*). Το πρόβλημα έχει ως εξής: δίνεται ένας χάρτης πόλεων από τον οποίο, με γνωστές τις θέσεις τους, μπορούν να υπολογιστούν οι αποστάσεις μεταξύ κάθε συνδυασμού πόλεων ανά δύο. Ένας περιοδεύων (ή πλανόδιος) πωλητής θέλει να επισκεφτεί όλες τις πόλεις από μια φορά την καθεμία και να καταλήξει στην αφετηρία του έχοντας διανύσει την ελάχιστη δυνατή απόσταση. Αυτό σημαίνει πως αναζητείται η βέλτιστη διαδρομή ως προς τη συνολική απόσταση.

Η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυτού για έναν αριθμό Ν πόλεων είναι της τάξεως του Ν!, που σημαίνει ότι για Ν=50 πόλεις υπάρχουν $\sim 3.0414 \cdot 10^{64}$ διαδρομές με τις οποίες μπορούν να συνδεθούν διαδοχικά μεταξύ τους. Για τον υπολογισμό της συνολικής απόστασης χρειάζεται η πρόσθεση 50 αριθμών για κάθε συνδυασμό. Με την υπόθεση ότι ένας υπολογιστής μπορεί να κάνει $\sim 10^{12}$ προσθέσεις/sec για τον υπολογισμό των συνολικών αποστάσεων θα χρειάζονταν $\sim 10^{44}$ έτη για να ολοκληρωθούν οι πράξεις (η τυπική ηλικία του Σύμπαντος υπολογίζεται σε $\sim 13.7 \cdot 10^{12}$ χρόνια). Γίνεται προφανές ότι ένα τέτοιο πρόβλημα χρειάζεται μια διαφορετική αντιμετώπιση.

Η λύση για το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή μπορεί να δοθεί μέσα σε μερικά δευτερόλεπτα με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου. Δημιουργείται αρχικά ένας πληθυσμός Μ τυχαίων λύσεων, που δεν είναι τίποτα άλλο από διατεταγμένες Ν-άδες των Ν πόλεων. Ορίζεται η λεγόμενη «**συνάρτηση ικανότητας**» (*fitness function*), η οποία παίρνει το όνομά της από τη λεγόμενη «επιβίωση του ικανότερου» (*survival of the fittest*) στη θεωρία του Δαρβίνου για την καταγωγή των ειδών, η οποία στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι απλά η συνολική απόσταση για τον κάθε συνδυασμό πόλεων των Μ «ατόμων» (*individuals*) του πληθυσμού συν την απόσταση της τελευταίας πόλης από την πρώτη, καθώς το πρόβλημα απαιτεί η διαδρομή να είναι κλειστή. Σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση ικανότητας, δηλαδή να βρεθεί η διαδρομή κατά την οποία ο πωλητής θα διανύσει την ελάχιστη συνολική απόσταση.

Σε κάθε μετάβαση προς την επόμενη γενιά πραγματοποιούνται οι διαδικασίες διασταύρωσης και μετάλλαξης. Το κάθε άτομο μπορεί να εκτελέσει 2 είδη μετάλλαξης:

1) αντιστροφή ενός τυχαίου τμήματος της διάταξης των N πόλεων του κάθε ατόμου κατά τη διασταύρωσή του με κάποιο άλλο άτομο.
2) τυχαία μετάθεση 2 στοιχείων της διάταξης των N πόλεων του κάθε ατόμου.

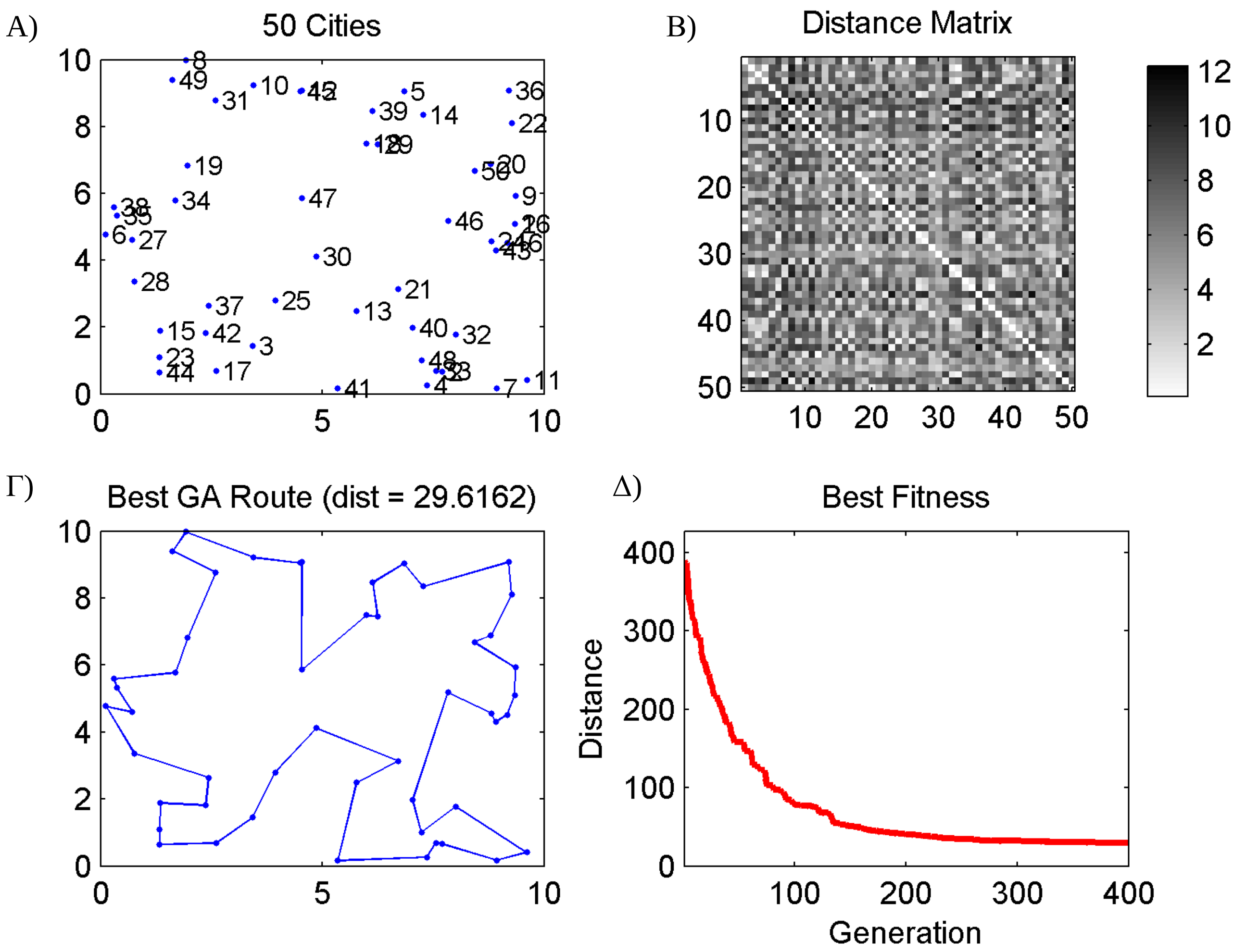
Σε κάθε γενιά υπολογίζονται οι τιμές της συνάρτησης ικανότητας και καταγράφεται η διάταξη του ατόμου το οποίο έχει επιτύχει την ελάχιστη τιμή της συνάρτησης ικανότητας η οποία στην προκειμένη περίπτωση είναι η ολική διαδρομή που θα διανύσει για να μεταβεί σε όλες τις πόλεις ακριβώς μία φορά και να επιστρέψει στην αφετηρία του. Με την πάροδο των γενεών οι επιτυχέστερες (*fittest*) λύσεις θα γίνουν πολυπληθέστερες και τελικά ο πληθυσμός θα συγκλίνει προς μια (ή περισσότερες παραπλήσιες) βέλτιστες λύσεις για το πρόβλημα (Σχήμα Α,19)

Σε τι θα μπορούσε να χρησιμεύσει η παραπάνω μεθοδολογία για την περίπτωση των όμοιων σεισμών; Ήδη σε αυτή την εργασία γίνονται αναφορές σε συγγενείς σεισμούς και σε σεισμικές οικογένειες (συστάδες σμηνοσεισμών). Ορίστηκε η συγγένεια μεταξύ 2 σεισμών ως προς την ομοιότητα των πλήρων σεισμικών τους καταγραφών σε μια συνιστώσα ενός σταθμού. Επίσης κατά τη διαδικασία συσταδοποίησης (*clustering*) χρησιμοποιήθηκε μια τιμή κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$ για τον πίνακα ομοιότητας $\mathbf{XC_s}$ η οποία διαχωρίζει τους άμεσα συγγενείς σεισμούς από τους υπόλοιπους και ορίστηκε ως σχέση έμμεσης συγγένειας η σχέση ομοιότητας μεταξύ 2 σεισμών Α~Γ η οποία δεν προσδιορίζεται άμεσα, από την αντίστοιχη τιμή τους στον πίνακα ομοιότητας, αλλά από την ύπαρξη ενδιάμεσων σεισμών B_i με τους οποίους συνδέονται με μια σχέση άμεσης συγγένειας. Η συσταδοποίηση γίνεται αυτόματα με την επεξεργασία του πίνακα ομοιότητας και 2 έμμεσα συγγενείς σεισμοί μπορεί να συνδέονται μεταξύ τους με περισσότερες από μία «διαδρομές» μέσα στον «χώρο ομοιότητας». Πώς γίνεται, λοιπόν, να βρεθούν εκ των υστέρων αυτοί οι θεωρούμενοι ως ενδιάμεσοι συγγενείς; Ή πώς μπορεί να διαπιστωθεί αν για 2 σχετικά απομακρυσμένους και ανόμοιους σεισμούς Α, Β υπάρχει ή όχι μια αλληλουχία ενδιάμεσων σεισμών μέσω των οποίων μπορεί η κυματομορφή του πρώτου σεισμού να «μετατραπεί» (εξελιχθεί) σταδιακά και επαρκώς ομαλά στην κυματομορφή του τελευταίου;

Η «μετάβαση» από τον Α στον Β δε μπορεί να γίνει άμεσα, δηλαδή σε 1 βήμα, καθώς εκ πρώτης όψεως οι Α και Β είναι ανόμοιοι, τόσο που να μην μπορούν να καταταγούν ως άμεσοι συγγενείς. Το βιολογικό ανάλογο αυτής της περίπτωσης είναι ότι δε μπορεί κάτι πολύπλοκο να προκύψει από κάτι πολύ απλούστερο με τυχαίο τρόπο μέσα σε μια μόνο γενιά (και να είναι συγχρόνως βιώσιμο και ικανότερο στην επιβίωση από τον γονέα του). Μπορεί όμως μέσα από μια διαδοχή γενεών με επαρκώς μικρές μεταβολές και υπό την 'πίεση' που ασκεί η Φυσική Επιλογή, κάτι απλό να εξελιχθεί σταδιακά σε κάτι πολυπλοκότερο και σε βάθος γεωλογικού χρόνου (ύστερα από ένα πολύ μεγάλο πλήθος γενεών) να φτάσει στο σημείο να είναι τελείως διαφορετικό, και συνήθως πολυπλοκότερο, από αυτό που ξεκίνησε, δηλαδή από τον μακρινό του πρόγονο.

Σχετικά με τους σεισμούς, η ίδια η θεωρία των ελαστικών κυμάτων και της ερμηνείας των σεισμικών καταγραφών προβλέπει ότι υπάρχει μια συνεχής γκάμμα κυματομορφών με σταδιακά διαφοροποιημένες μορφές οι οποίες προκύπτουν από τη συνεχή μεταβολή των εστιακών παραμέτρων (ή της θέσης του σταθμού για τον ίδιο σεισμό). Πρακτικά όμως αυτό το συνεχές εύρος δεν υπάρχει γιατί απλούστατα οι σεισμοί στην πραγματικότητα δεν συμβαίνουν οπουδήποτε και με οποιοδήποτε δυνατό τρόπο (μηχανισμό γένεσης, σεισμική πηγή κτλ.), παρότι μπορούν να κατασκευαστούν ανάλογα θεωρητικά μοντέλα. Ακόμα και σε ισχυρά εντοπισμένα σεισμικά νέφη πρέπει να υπάρχει επαρκής αριθμός καταγραφών ώστε να μπορεί να γίνει μια ομαλή μετάβαση ανάμεσα σε κυματομορφές ξεκινώντας από έναν σεισμό Α και καταλήγοντας σε έναν φαινομενικά ανόμοιο σεισμό Β. Με λίγη τύχη μπορούν να εντοπιστούν μερικά δείγματα αυτής της θεωρητικά συνεχούς μετάβασης.

Το αντίστοιχο της διαδρομής του πλανόδιου πωλητή στην περίπτωση των όμοιων σεισμών είναι μια “διαδρομή” μέσα στον πολυδιάστατο χώρο των σεισμικών παραμέτρων καθώς και των παραμέτρων του μοντέλου Γης. Το βιολογικό ανάλογο αυτού του χώρου είναι η δεξαμενή γονιδίων (*gene pool*), όλων δηλαδή εκείνων των γονιδίων που μπορούν να καταλάβουν μια ορισμένη θέση σε κάποιο χρωμόσωμα και έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία όλων των διαφορετικών φαινοτύπων. Ο “φαινότυπος” ενός σεισμικού “γονότυπου” είναι η κυματομορφή. Αν μια διαδρομή στον χώρο αυτόν συμπίπτει με μια διαδρομή στον πραγματικό 3-διάστατο χώρο αυτό είναι φυσικό επακόλουθο που μπορεί να ερμηνευτεί εύκολα εάν διατηρηθούν κάποιες από τις παραμέτρους σχεδόν σταθερές, όπως για παράδειγμα τα στοιχεία του τανυστή σεισμικής ροπής.



Σχήμα Α.19: Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή. Α) μια τυχαία χωρική κατανομή 50 πόλεων μέσα σε μια περιοχή διαστάσεων 10×10,Β) Πίνακας αποστάσεων, το λευκό είναι μηδενική απόσταση (τιμές διαγωνίου), Γ) τελική λύση ύστερα από 400 γενεές, ολικό μήκος διαδρομής dist≅29.6, Δ) διάγραμμα ολικής απόστασης συναρτήσει του αριθμού γενεών. Στην πρώτη γενιά η σειρά με την οποία επισκέπτεται ο πωλητής τις πόλεις είναι εντελώς τυχαία και το ολικό μήκος διαδρομής μέγιστο (περίπου 400). (από εφαρμογή στο πρόγραμμα MatLab τροποποιημένη από τον Joseph Kirk [1])

Στην ενότητα 3.6 επιλύθηκε το πρόβλημα της εύρεσης αυτής της «διαδρομής» για ένα ζεύγος έμμεσων συγγενών με μια κλασσική μέθοδο αναζήτησης (Σχήμα 3.32). Το πρόβλημα αυτό μπορεί να επιλυθεί και με τη χρήση ενός γενετικού αλγορίθμου. Στην πράξη αυτό που θα χρησιμοποιηθεί είναι μια τροποποιημένη έκδοση του αντίστοιχου αλγορίθμου που περιγράφηκε για το «πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή». Οι διαφορές υφίστανται στο ότι η διαδρομή δεν είναι κλειστή αλλά είναι απαραίτητο να ξεκινάει από τον σεισμό Α και να καταλήγει στον Β, στο ότι οι «αποστάσεις» των σημείων (σεισμών) δεν είναι χωρικές (ευκλείδειες) αλλά καθορίζονται από το βαθμό ομοιότητας που δίνει ο πίνακας ομοιότητας, και τέλος τα κριτήρια της διασταύρωσης/μετάλλαξης καθώς και της συνάρτησης ικανότητας είναι διαφορετικά από εκείνα της περίπτωσης του προβλήματος του πλανόδιου πωλητή.

Αρχικά πρέπει να κατασκευαστεί ένας πίνακας ομοιότητας για τα επιλεγμένα γεγονότα μιας περιοχής, 2 από τα οποία θα είναι τα ακραία σημεία Α, Β της ζητούμενης διαδρομής. Ο πίνακας ομοιότητας θα πρέπει στη συνέχεια να μετατραπεί σε πίνακα *ανομοιότητας*, ο οποίος θα δείχνει πόσο *διαφέρει* το κάθε γεγονός από όλα τα υπόλοιπα. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να κατασκευαστεί ένας τέτοιος πίνακας. Σκοπός είναι αυτός ο πίνακας να είναι ένα επαρκώς καλό ανάλογο του πίνακα αποστάσεων που χρησιμοποιείται στο πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή, ο οποίος περιέχει τις αποστάσεις της κάθε πόλης από όλες τις υπόλοιπες. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο εναλλακτικές λύσεις για τα στοιχεία D_{ij} του πίνακα ανομοιότητας βάσει των στοιχείων S_{ij} του πίνακα ομοιότητας:

$$D_{ij} = 100 \cdot (1 - S_{ij})$$

$$D_{ij} = 100 \cdot e^{-10 \cdot Sij}$$

Στις περιπτώσεις αυτές, 2 όμοια γεγονότα (i,j), με ακραία περίπτωση τα στοιχεία της διαγωνίου του πίνακα XC_s, δηλαδή i=j, θα έχουν τιμές $S_{ij} \cong 1$ και $D_{ij} \cong 0$ ενώ 2 τελείως ανόμοια γεγονότα (κ,λ) θα έχουν τιμές $S_{κλ} \cong 0$ και $D_{κλ} \cong 100$. Στην πράξη αρκεί να υπάρχει μια γνησίως φθίνουσα σχέση ανάμεσα στα D_{ij} και S_{ij}.

Ο σκοπός δεν είναι η εύρεση της "διαδρομής" ελαχίστου μήκους αλλά μιας "διαδρομής" η οποία συνδέει ένα γεγονός αναφοράς Α με ένα γεγονός προορισμού Γ (με σχέση έμμεσης συγγένειας) μέσω μιας ακολουθίας ενδιάμεσων γεγονότων B_i (τα οποία αναζητούνται) τέτοιων ώστε οι διαδοχικές «αποστάσεις» μεταξύ τους να γίνονται όσο το δυνατόν μικρότερες, δηλαδή ο πιο «*αδύναμος κρίκος*» της "αλυσίδας" που συνδέει τα δύο πλέον ανόμοια *διαδοχικά* γεγονότα B_i, B_j να έχει τιμή *ομοιότητας* S_{ij} όσο γίνεται *μεγαλύτερη*. Η συνθήκη ολοκλήρωσης της διαδικασίας είναι φυσικά $S_{ij} \geq C_{th}$ ανάμεσα σε όλα τα διαδοχικά γεγονότα.

Για να επιτευχθεί αυτό χρειάζεται κατά την πάροδο των γενεών να «επιβραβεύονται» οι λύσεις που έχουν ισχυρότερο «αδύναμο κρίκο» από τις υπόλοιπες και να εξαλείφονται οι άλλες. Η διαδικασία μπορεί να υποβοηθηθεί από μια τεχνητή παρέμβαση στις μεταλλάξεις που μπορεί να επιτραπεί να συμβαίνει με τυχαίο τρόπο σε ορισμένα από τα «άτομα» του πληθυσμού (αλληλουχίες πιθανών λύσεων). Αυτή η ειδική μετάλλαξη είναι η άμεση εξάλειψη του πιο «αδύναμου κρίκου» της αλληλουχίας (δηλαδή η αφαίρεση ενός γεγονότος της αλληλουχίας με τον χαμηλότερο βαθμό ομοιότητας με το επόμενο ή το προηγούμενο γεγονός σε σύγκριση με όλους τους άλλους συνδέσμους) και η αντικατάστασή του με έναν ισχυρότερο σύνδεσμο, κάτι που μπορεί να προκύψει με αναζήτηση από τον πίνακα ομοιότητας.

Όταν ο πιο "αδύναμος κρίκος" (i,j) έχει τιμή $S_{ij} > C_{th}$ η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί. Η μέθοδος του γενετικού αλγόριθμου δίνει προσεγγιστικές λύσεις στο πρόβλημα της εύρεσης της "αλυσίδας συγγένειας» ανάμεσα σε έμμεσους συγγενείς που έχουν ενταχθεί σε μια συστάδα βάσει ορισμένης τιμής κατωφλίου, C_{th}. Ωστόσο, το αποτέλεσμα είναι συνήθως $S_{ij} \leq C_{th}$ με $S_{ij} \cong C_{th}$, δηλαδή καθώς είναι γνωστό το C_{th} τέτοιες λύσεις δεν δίνουν τις πραγματικές αλυσίδες συγγένειας που έχουν εντάξει τα Α και Γ σε κοινή συστάδα. Μεταφρασμένη σε όρους του προβλήματος του περιοδεύοντος πωλητή αυτή η απαίτηση είναι: να βρεθεί η διαδρομή ώστε να μεταβεί ο πωλητής από την πόλη Α στη Γ μέσω διαδοχικών πόλεων B_i με τον περιορισμό η απόσταση μεταξύ 2 διαδοχικών πόλεων να *μην* είναι μεγαλύτερη από C_{th} (εδώ σε μονάδες μήκους). Όταν η ζητούμενη αλυσίδα γεγονότων είναι μεγάλη ο γενετικός αλγόριθμος δίνει ταχύτερες λύσεις από μια κλασσική μέθοδο αναζήτησης.

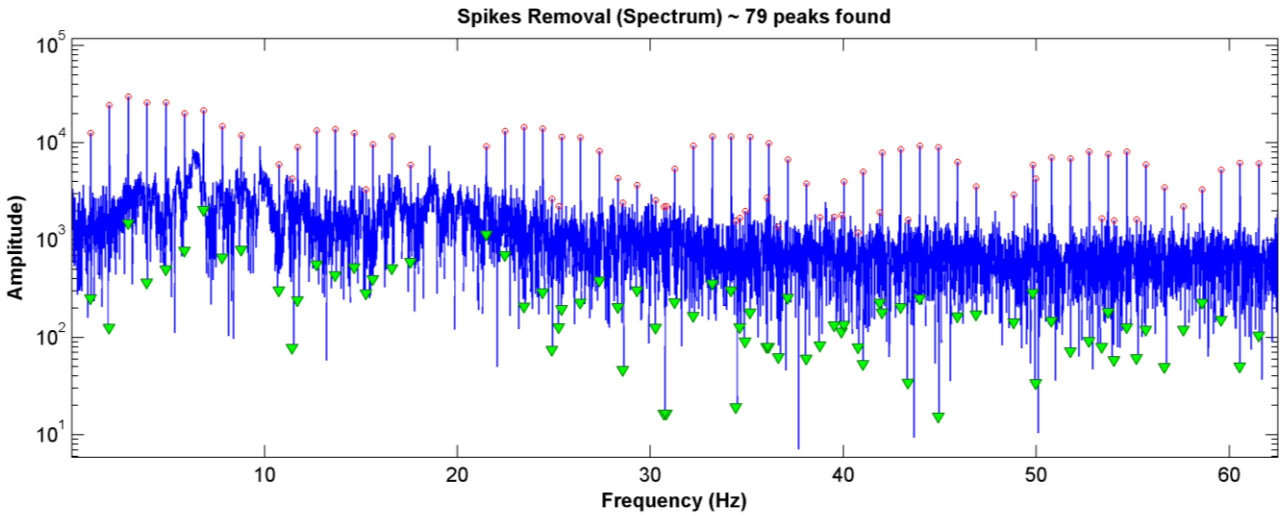
Αποτελέσματα της διαδικασίας αυτής παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.29, Β.4, Β.5 ενώ το 3.32 δείχνει μια επιθυμητή λύση που έχει βρεθεί με κλασσική μέθοδο αναζήτησης.

Α.6 ~ *Περιοδικός θόρυβος τύπου αιχμής (spikes)*

Κατά τον έλεγχο της κατάστασης λειτουργίας των σταθμών, δηλαδή τον έλεγχο της ποιότητας του σήματος στις 3 συνιστώσες, πέρα από τις περιπτώσεις στις οποίες εμφανίζονταν παρασιτικές συχνότητες με έντονο πλάτος όπως στα 50Hz, 25Hz, 40Hz κτλ., παρατηρήθηκαν περιπτώσεις στις οποίες υπήρχε ένας ιδιαίτερος τύπος παράσιτου, ο λεγόμενος τύπος «αιχμής» ή *spikes*. Ο θόρυβος αυτός στο πεδίο του χρόνου έχει τη μορφή αιχμών που παρεμβάλλονται στο σήμα με ορισμένη περιοδικότητα. Η εικόνα μιας τέτοιας χρονοσειράς στο πεδίο συχνοτήτων παρουσιάζει ένα χαρακτηριστικό μοτίβο όταν απεικονιστεί το φάσμα σε ημιλογαριθμικούς άξονες.

Το Σχήμα Α.20 δείχνει το φάσμα πλατών της κυματομορφής που φαίνεται στο Σχήμα Α.21$_A$. Παρατηρείται ότι εμφανίζεται ένα πλήθος κορυφών που διακρίνονται από το υπόλοιπο φάσμα και μάλιστα οι περισσότερες συχνοτικά διαδοχικές κορυφές «απέχουν» μεταξύ τους κατά την ίδια περίπου συχνότητα $\delta f \cong 0.9766$Hz. Αυτή η συχνότητα αντιστοιχεί σε χρόνο $\delta T=1/\delta f=1.024$sec που είναι η μέση περίοδος των κορυφών της κυματομορφής του Σχήματος Α.21$_A$ (στο πεδίο χρόνου). Επίσης, η μικρότερη συχνότητα στην οποία εμφανίζεται κορυφή (αριστερή κορυφή στο Σχήμα Α.20) είναι $f_1=0.9766$Hz. Οι περισσότερες κορυφές που διακρίνονται με κόκκινους κύκλους στο Σχήμα Α.20 βρίσκονται σε συχνότητες οι οποίες είναι *ακέραια πολλαπλάσια* (*αρμονικές*) της συχνότητας f_1 που αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα περιόδο του θορύβου τύπου «αιχμής» $\delta T=1.024$sec.

Ο εντοπισμός των κορυφών στο πεδίο συχνοτήτων γίνεται με έναν αρκετά απλό τρόπο. Εξετάζονται οι λογάριθμοι $B(f_i)=\log A(f_i)$ των τιμών πλάτους $A(f_i)$ σε κάθε συχνότητα $\mathbf{f_i}$ καθώς και των αντίστοιχων τιμών $B(f)$ σε μια περιοχή $\pm\mathbf{W}$ συχνοτικών δειγμάτων γύρω από την κάθε κεντρική συχνότητα $\mathbf{f_i}$. Υπολογίζεται η μέση τιμή των λογαρίθμων **M** και εξετάζεται το εάν το $A(f_i)$ στη συχνότητα $\mathbf{f_i}$ είναι $\mathbf{A(f_i)>M+T_w}$, όπου $\mathbf{T_w}$ μια τιμή «ανοχής» (*tolerance*). Εάν ισχύει αυτή η συνθήκη τότε έχει εντοπιστεί μια «κορυφή» στο φάσμα, σύμφωνα με τις παραμέτρους **W** και $\mathbf{T_w}$ που έχουν τεθεί.



Σχήμα Α.20: Διαδικασία αφαίρεσης περιοδικού θορύβου μορφής «αιχμής». Φαίνεται το φάσμα της κυματομορφής του Σχήματος Α.21$_A$ στο οποίο με κόκκινους κύκλους επισημαίνονται οι σχεδόν συχνοτικά ισαπέχουσες κορυφές (μορφή θορύβου τύπου «αιχμής» στο πεδίο συχνοτήτων), με πράσινα τρίγωνα σημειώνονται οι νέες θέσεις των κορυφών αυτών, μειωμένες αρκετά ώστε να μειωθεί ο θόρυβος που προκαλούν. Στην περίπτωση αυτή εντοπίστηκαν 79 κορυφές των οποίων το πλάτος μειώθηκε.

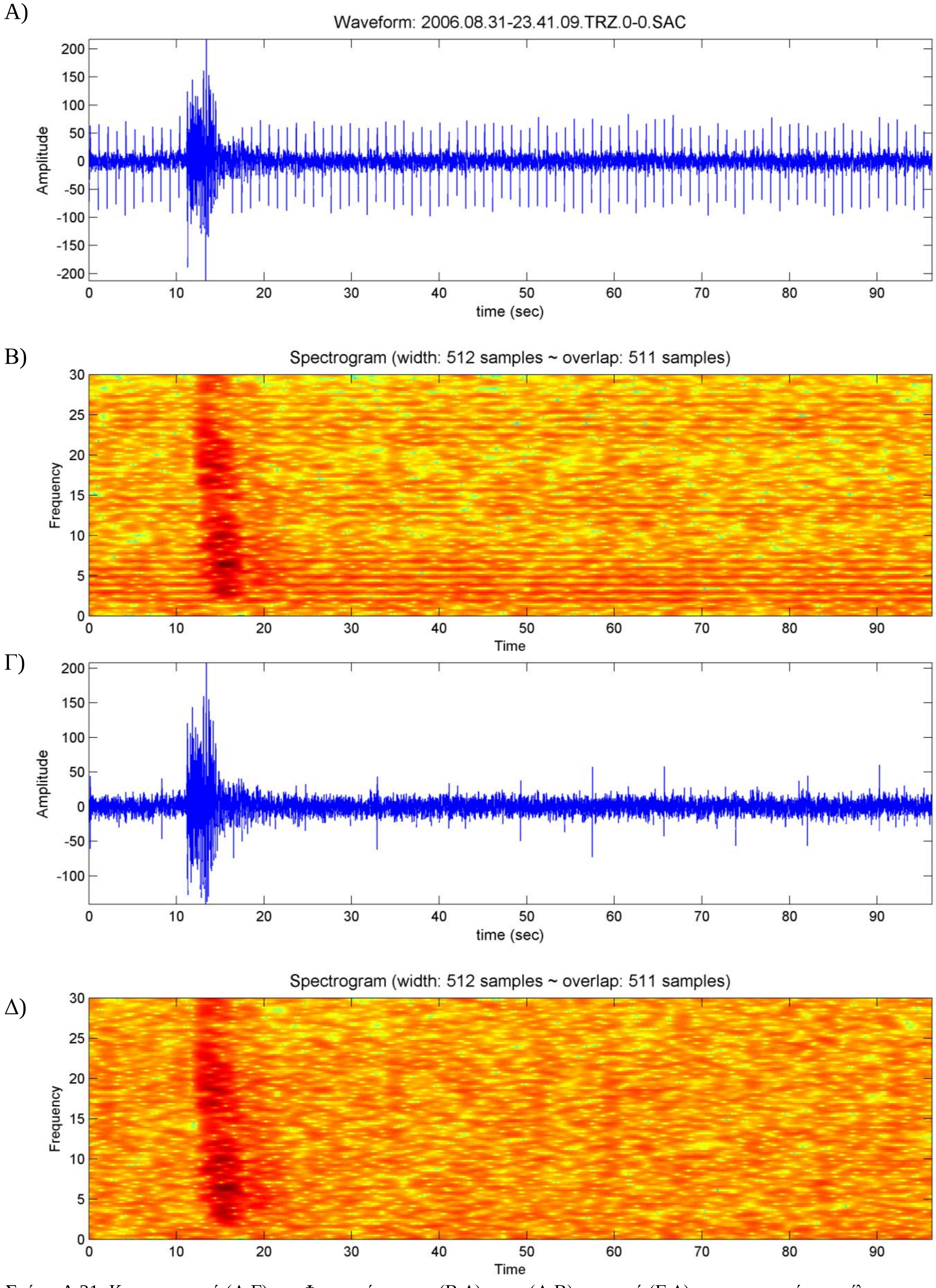
Μετά τον εντοπισμό όλων των κορυφών, δημιουργείται ένα αντίγραφο C=B στο οποίο θα γίνουν οι διορθώσεις στα πλάτη των κορυφών. Η διόρθωση μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, παρουσιάζεται ένας από αυτούς: για κάθε κορυφή που έχει βρεθεί στο B υπολογίζεται η μέση τιμή των τιμών B για ένα εύρος ±W χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η τιμή $B(f_i)$ της κεντρικής συχνότητας και στη συνέχεια αφαιρείται από αυτή την τιμή το $\mathbf{T_w}$. Το αποτέλεσμα αυτής της πράξης καταχωρείται στο $C(f_i)$ (το B χρησιμοποιείται μόνο για ανάγνωση των τιμών και το C μόνο για αποθήκευση των αποτελεσμάτων ώστε να αποφευχθεί η επιρροή των προηγούμενων διορθώσεων σε διαδοχικές συχνότητες κορυφών σε περίπτωση που το W είναι τόσο μεγάλο ώστε να περιέχει στο εύρος του πολλές από τις ήδη διορθωμένες κορυφές). Στο τέλος χρησιμοποιούνται τα πλάτη 10^C και οι αρχικές φάσεις για να ξαναγίνει μετάβαση στο πεδίο του χρόνου με έναν αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier.

Η μέθοδος αυτή χρειάζεται πειραματισμούς ώστε να βρεθούν οι κατάλληλες τιμές W και T_w για την κάθε περίπτωση εμφάνισης περιοδικού θορύβου τύπου αιχμής. Στο παράδειγμα του σχήματος Α.20 έχει χρησιμοποιηθεί W=10 και T_w=0.5. Η μέθοδος αυτή μπορεί ενδεχομένως να βελτιωθεί εάν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι ζητούμενες κορυφές βρίσκονται σε ακέραια πολλαπλάσια της θεμελιώδους συχνότητας f_1. Κάτι τέτοιο όμως προϋποθέτει ότι γίνεται να μετρηθεί με έναν αυτόματο τρόπο, με καλή ακρίβεια, η συχνότητα αυτή, ενώ η παραπάνω μέθοδος προσφέρεται για γενικότερη αντιμετώπιση ενός τέτοιου προβλήματος.

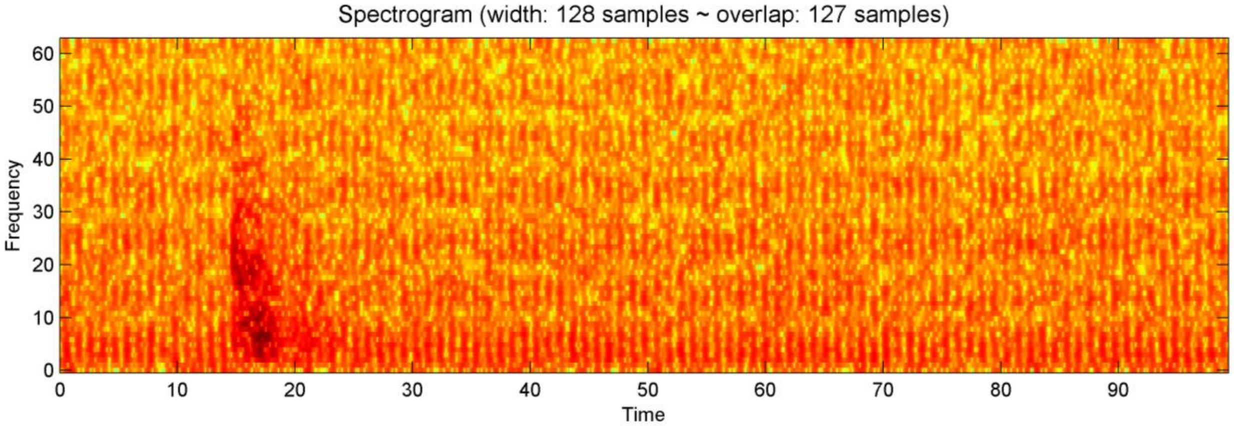
Υπάρχουν, βέβαια, και ορισμένες περιπτώσεις μη περιοδικών παράσιτων τύπου αιχμής που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν με τον ίδιο τρόπο. Όπως μπορεί να φανεί στα Σχήματα Α.25 πρόκειται για κρουστικούς παλμούς, μεμονωμένα «ξεσπάσματα» σε όλο το εύρος συχνοτήτων, σε περιορισμένο χρονικό διάστημα, σε αντίθεση με τις περιοδικές αιχμές (*spikes*) που η επίδρασή τους βρίσκεται σε περιορισμένες συχνότητες αλλά σε όλη τη διάρκεια της καταγραφής. Το πλάτος τους είναι τόσο ισχυρό που αν συμπέσει χρονικά ένας τέτοιος παλμός με ένα σεισμικό σήμα επισκιάζει όλη τη συχνοτική πληροφορία κατά τη χρονική διάρκειά στην οποία εκδηλώνεται. Αν τα σήματα ενός σταθμού περιέχουν τέτοιου είδους θόρυβο θα πρέπει είτε να αποφευχθεί η χρήση τους για τη μελέτη όμοιων σεισμών είτε με κάποιον άλλο τρόπο να αφαιρεθούν οι περιοχές στις οποίες εμφανίζονται κρουστικοί παλμοί (πχ αντικαθιστώντας τις με τυχαίο θόρυβο) ώστε κατά τη διαδικασία ετεροσυσχέτισης να μην συσχετιστούν μεταξύ τους 2 όμοιοι κρουστικοί παλμοί και θεωρηθεί κατά αυτόν τον τρόπο ότι τα σήματα ανήκουν δήθεν σε όμοιους σεισμούς.

Η μέθοδος αφαίρεσης περιοδικού θορύβου τύπου «αιχμής» εκμεταλλεύεται ακριβώς την περιοδικότητα των αιχμών η οποία δημιουργεί αυτό το ιδιαίτερο μοτίβο στο πεδίο συχνοτήτων. Γι’ αυτό, το φίλτρο πρέπει να εφαρμόζεται σε χρονοσειρά μεγάλης διάρκειας η οποία περιέχει πολλές επαναλήψεις αιχμών. Όπως φαίνεται στο Σχήμα Α.22, το φασματόγραμμα μικρού εύρους (που γίνεται σε χρονικά παράθυρα 64 δειγμάτων) δεν «βλέπει» το ίδιο μοτίβο στο πεδίο συχνοτήτων με αυτό που «βλέπει» το φασματόγραμμα μεγάλου εύρους του Σχήματος Α.21$_B$, το οποίο δίνει μια εικόνα παρόμοια με αυτή του πλήρους φάσματος (Σχήμα Α.20) όσον αφορά στις κορυφές. Τα μικρά χρονικά παράθυρα εντοπίζουν μεμονωμένες αιχμές και η εικόνα που δίνουν (Σχήμα Α.22) μοιάζει με αυτή που παρουσιάζεται στα Σχήματα Α.25 στα οποία, πράγματι, ο τύπος θορύβου είναι μη-περιοδικός.

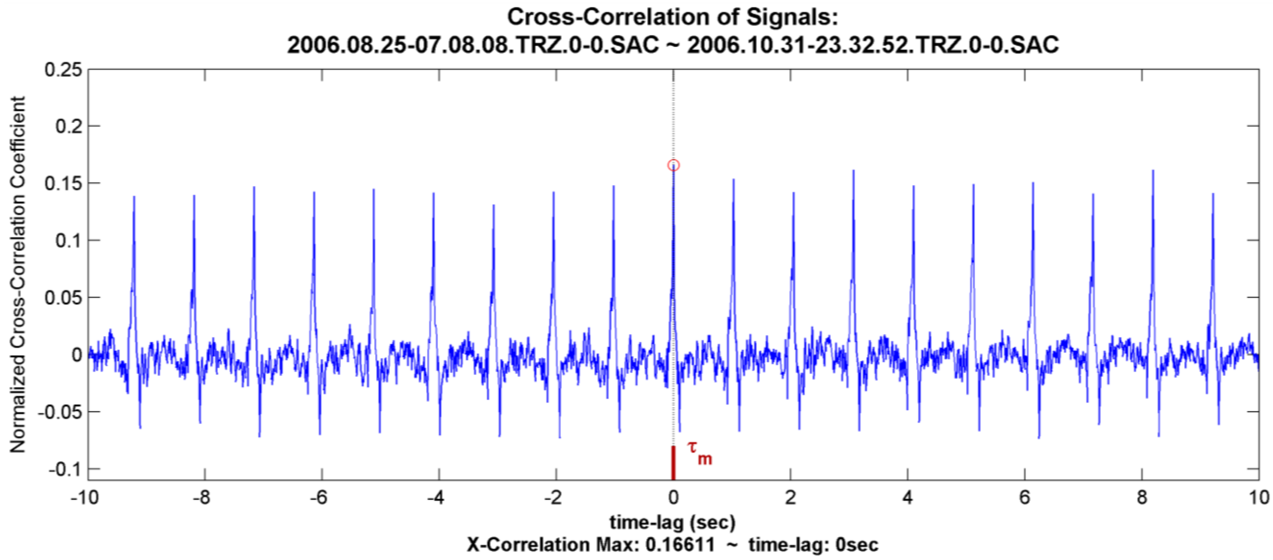
Πριν τον υπολογισμό των διαφορικών χρόνων άφιξης των κυμάτων P και S, τόσο στην περίπτωση της κατασκευής του αρχείου εισόδου DT.CC για το πρόγραμμα HypoDD στα Κεφάλαια 4 και 5, όσο και πριν από την εφαρμογή της μεθόδου των κύριων γεγονότων (*Master Events*) στο Κεφάλαιο 5, κατά τον έλεγχο της κατάστασης λειτουργίας των σταθμών εντοπίστηκαν οι περιπτώσεις εμφάνισης αυτού του είδους θορύβου και σημειώθηκαν οι σταθμοί που είχαν αυτό το πρόβλημα. Σε αυτούς τους σταθμούς, προτού γίνει οποιαδήποτε σύγκριση κυματομορφών, εφαρμόστηκε το φίλτρο θορύβου τύπου αιχμής, όπως περιγράφθηκε παραπάνω, ώστε να μειωθεί σημαντικά το πλάτος των αιχμών στο πεδίο χρόνου και να γίνει στη συνέχεια η ετεροσυσχέτιση. Με αυτό το φίλτρο όχι μόνο αποκλείονται οι περιπτώσεις συσχέτισης θορύβου (Σχήματα Α.23, Α.24) αλλά επιπλέον ενισχύεται το $\mathbf{XC_{max}}$ στην περίπτωση όμοιων σεισμών.



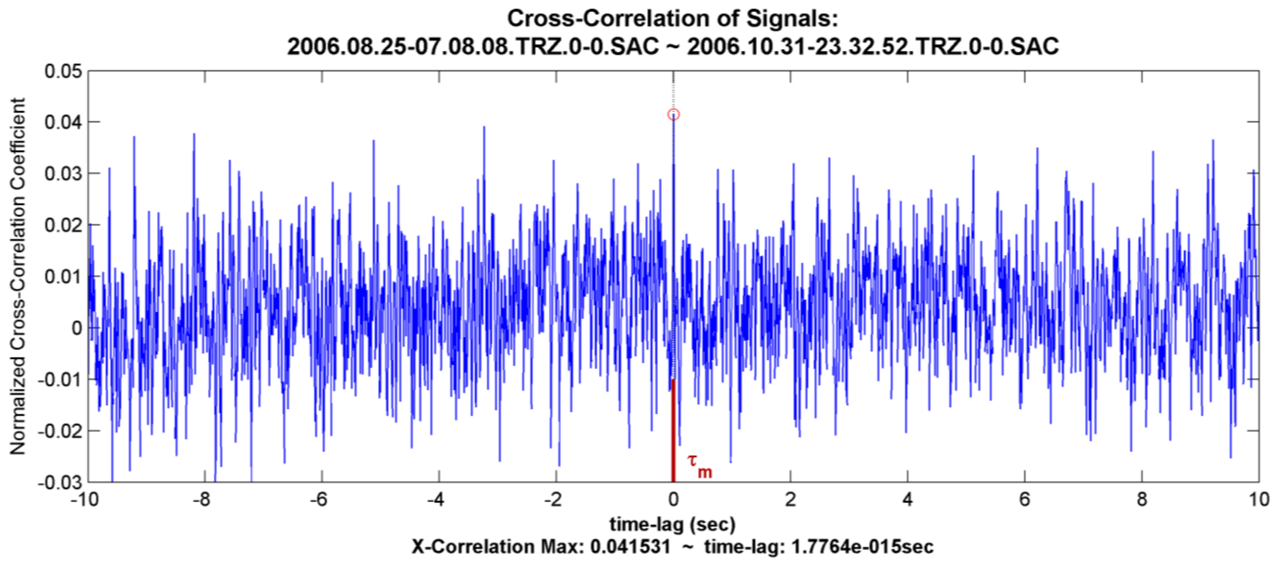
Σχήμα Α.21: Κυματομορφή (Α,Γ) και Φασματόγραμμα (Β,Δ), πριν (Α,Β) και μετά (Γ,Δ) την εφαρμογή του φίλτρου για την αφαίρεση θορύβου τύπου «αιχμής». Παρουσιάζονται μόνο οι συχνότητες f≤30Hz για λόγους ευκρίνειας των οριζόντιων γραμμών στο σχήμα (Β).



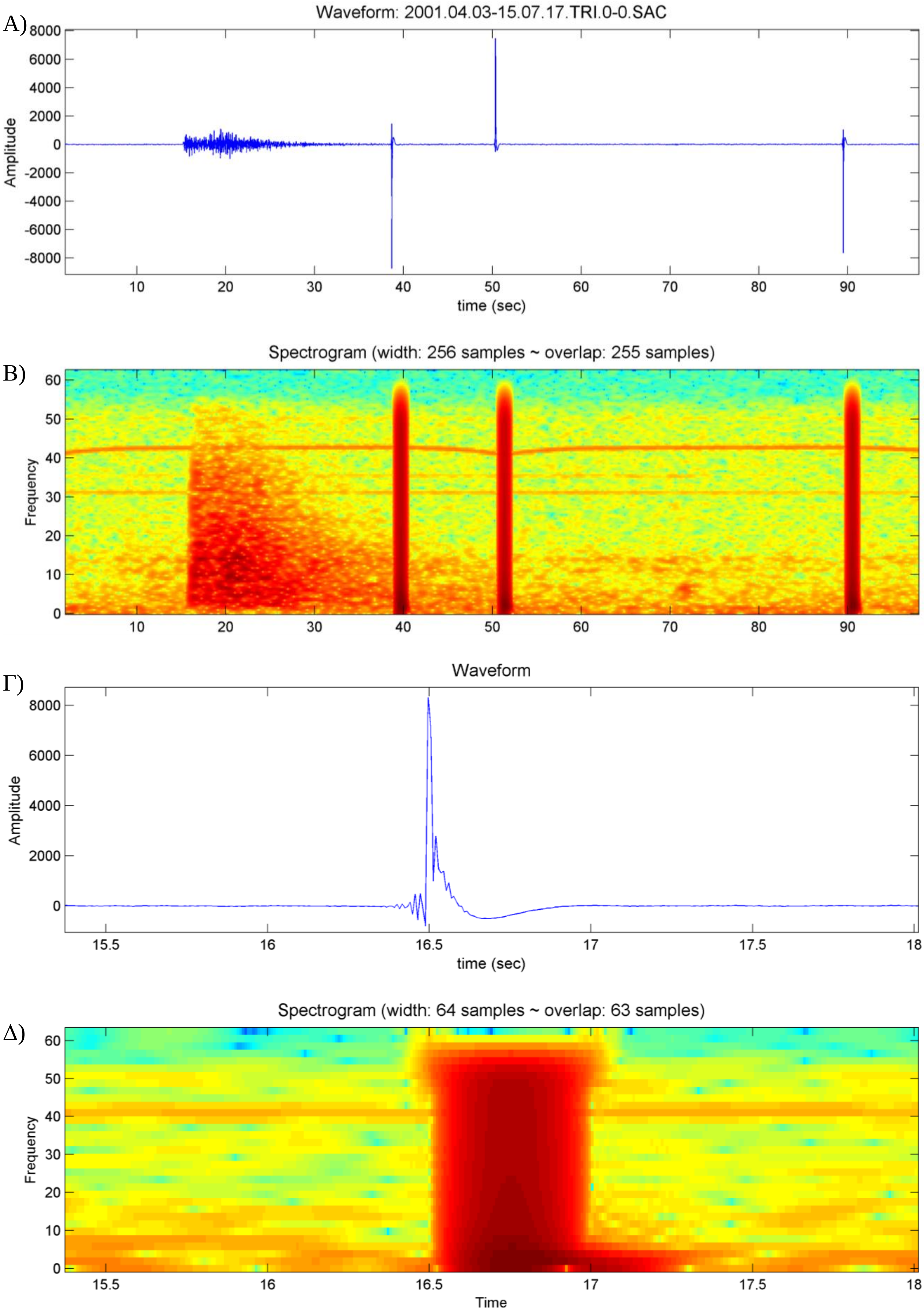
Σχήμα Α.22: Φασματόγραμμα όμοιο με αυτό του Σχήματος Α.21$_B$ (πριν την αφαίρεση του θορύβου τύπου «αιχμής») αλλά για μικρότερο εύρος κυλιόμενου χρονικού παραθύρου (128 δείγματα = 1.024sec σε σχέση με το φασματόγραμμα του Σχήματος Α.21$_B$ που έχει γίνει με εύρος παραθύρου 512 δείγματα = 4.096sec). Παρατηρούνται παράλληλες ραβδώσεις με τον κατακόρυφο άξονα σε αντίθεση με τις παράλληλες ραβδώσεις με τον οριζόντιο άξονα στο Σχήμα Α.21$_B$.



Σχήμα Α.23: ετεροσυσχέτιση χρονοσειρών που περιέχουν μόνο θόρυβο τύπου «αιχμής», πριν το φιλτράρισμα $\mathbf{XC_{max}}$=0.166, συντελεστής συμμετρίας: 0.614



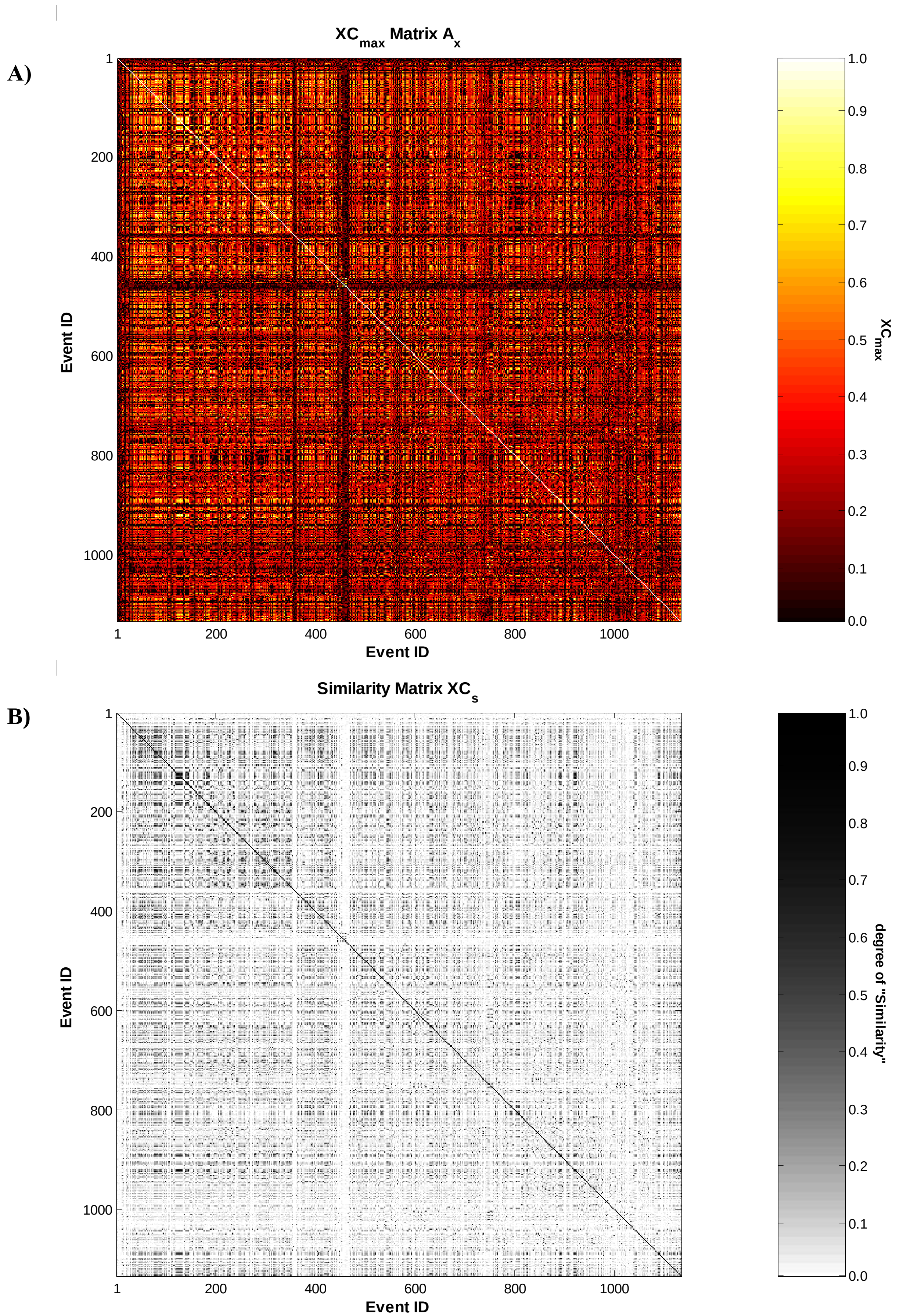
Σχήμα Α.24: ετεροσυσχέτιση των ίδιων χρονοσειρών με αυτές στις οποίες αναφέρεται το Σχήμα Α.23 αλλά μετά το φίλτρο για την αφαίρεση του θορύβου τύπου «αιχμής». Νέο $\mathbf{XC_{max}}$=0.042, συντελεστής συμμετρίας: 0.087



Σχήμα Α.25: (Α,Β) κυματομορφή και φασματόγραμμα με εμφάνιση θορύβου μεμονωμένων κρουστικών παλμών. (Γ,Δ) κυματομορφή και φασματόγραμμα ενός κρουστικού παλμού σε μεγέθυνση.

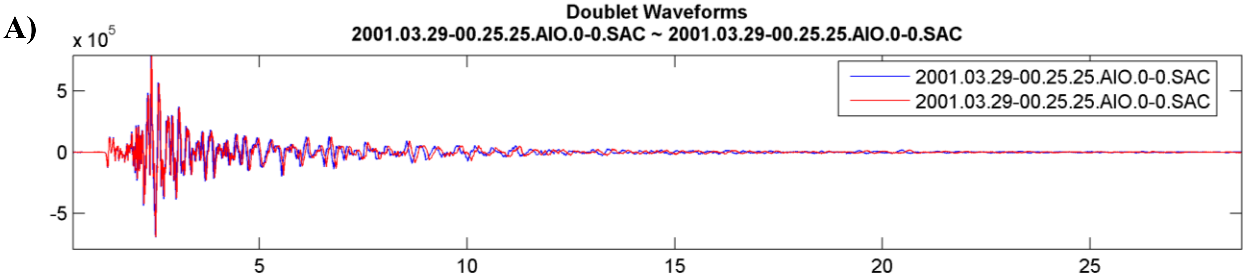
Παράρτημα B

Σχήματα

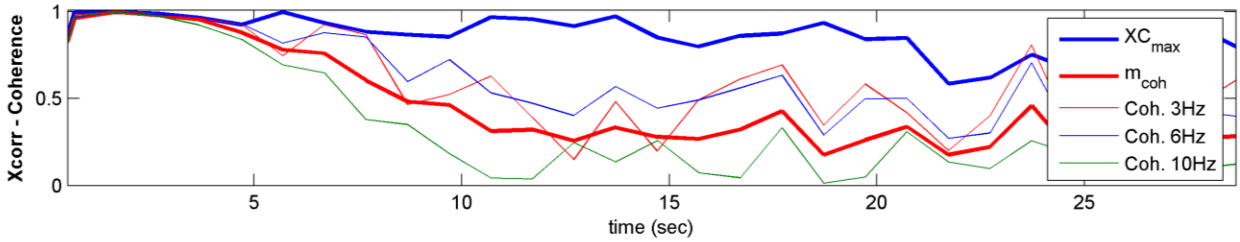


Σχήμα B.1: Πίνακες από το δείγμα του «Σμήνους του ΑΙΟ (2001)» (Κεφ.3): A) Πίνακας $\mathbf{A_x}$ μεγίστου ετεροσυσχέτισης $\mathbf{XC_{max}}$, B) Πίνακας $\mathbf{XC_s}$ Βαθμού Ομοιότητας $\mathbf{S_{ij}}$

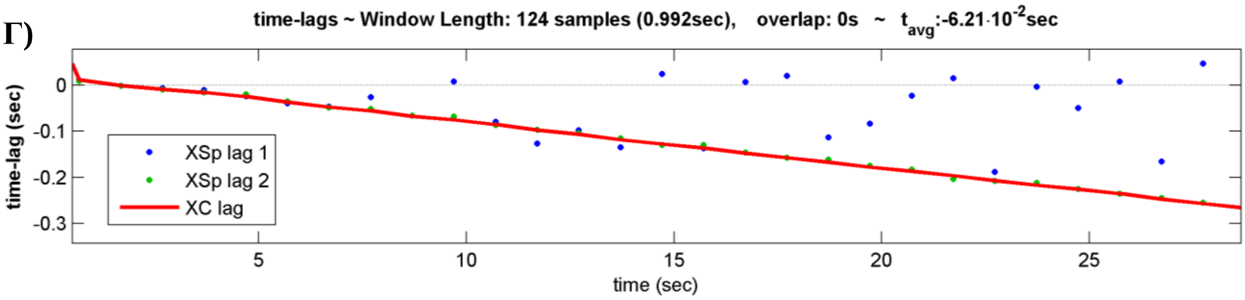
A)



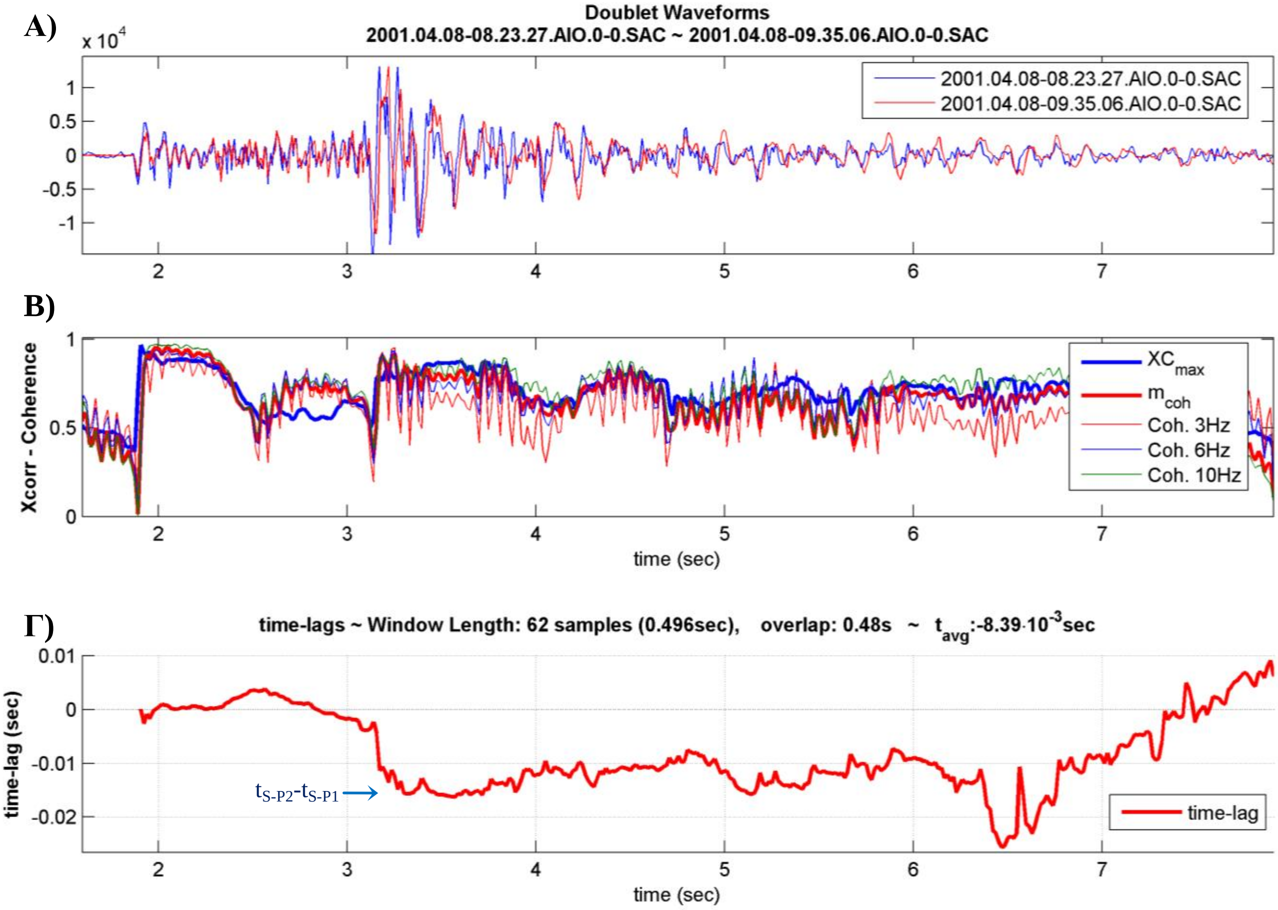
B)



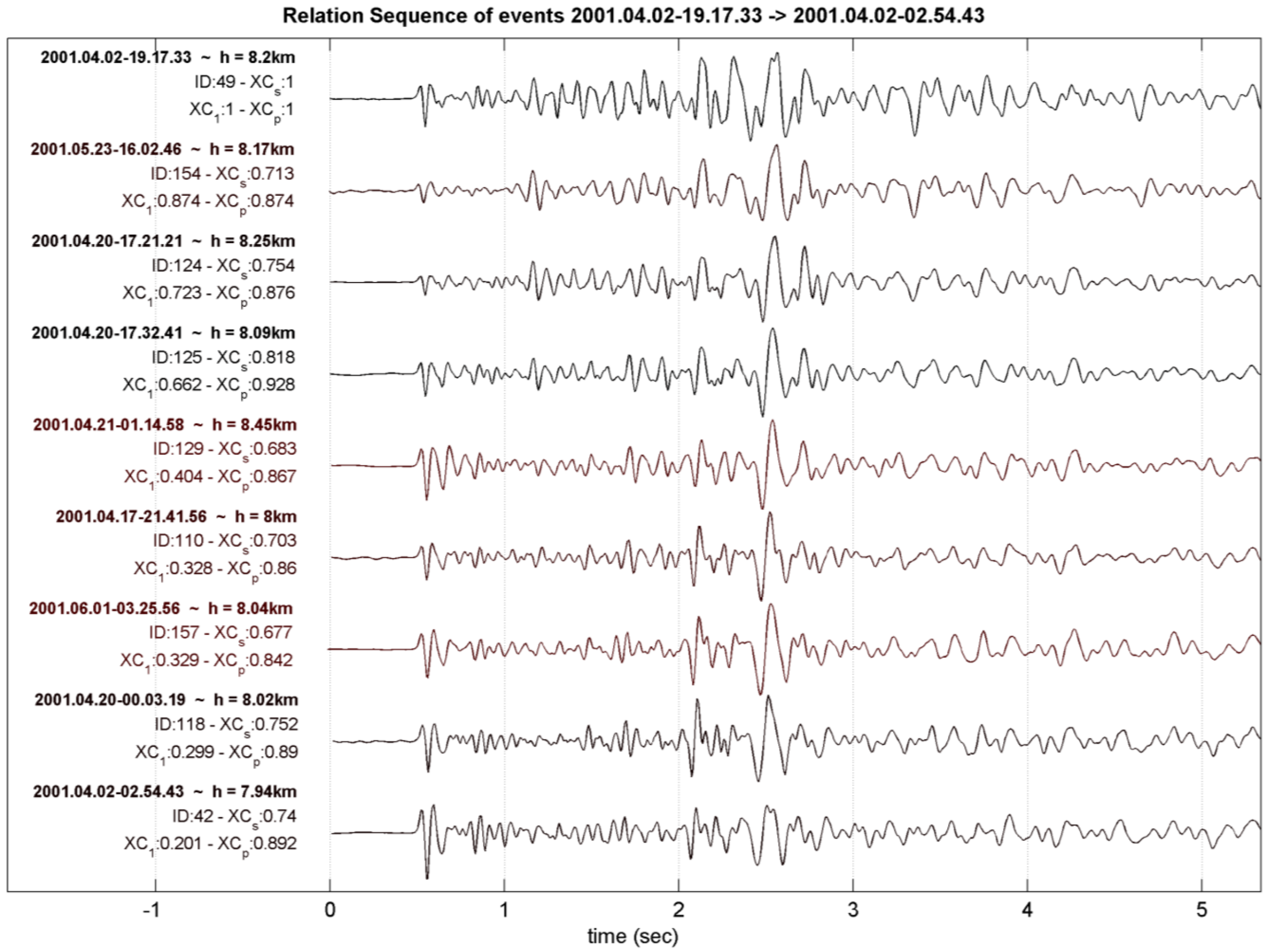
Γ)



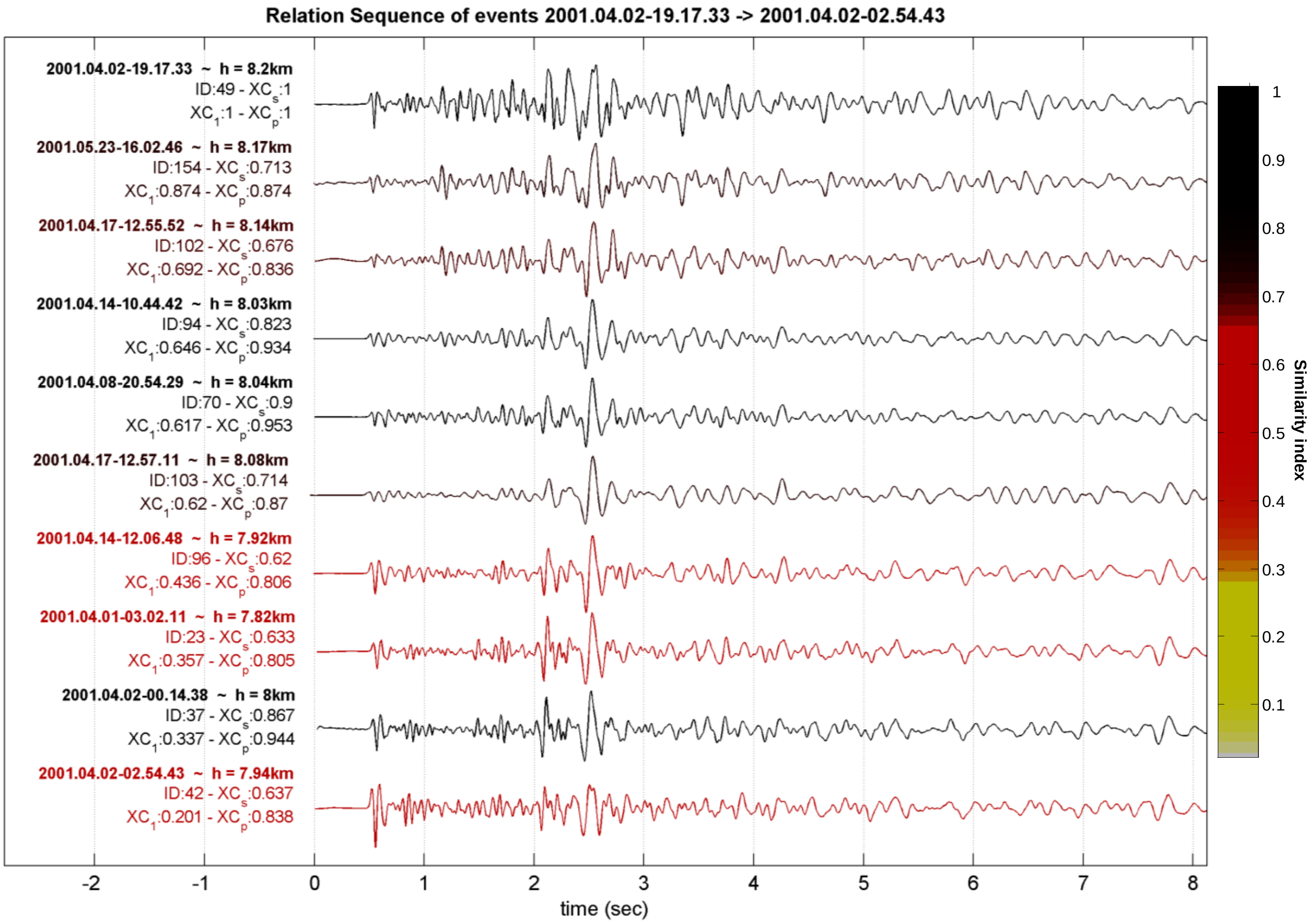
Σχήμα Β.2: Α) αρχική (μπλε) και συνθετικά διαταραγμένη (κόκκινη) κυματομορφή κατά έναν παράγοντα **K=1%**. Β) μέγιστο ετεροσυσχέτισης, μέση συνοχή και συνοχή σε συχνότητες 3, 6 και 10Hz για χρονικά παράθυρα 124 δειγμάτων χωρίς αλληλοεπικάλυψη. Γ) διαφορικοί χρόνοι μέσω διαδικασίας ετεροσυσχέτισης (κόκκινη γραμμή), μέσω της κλίσης του ετεροφάσματος (μπλε κουκίδες) και το ίδιο αλλά κατόπιν χρονικής μετάθεσης κατά τον διαφορικό χρόνο που σημειώνεται από την κόκκινη γραμμή (**τ_m** με διαδικασία ετεροσυσχέτισης).



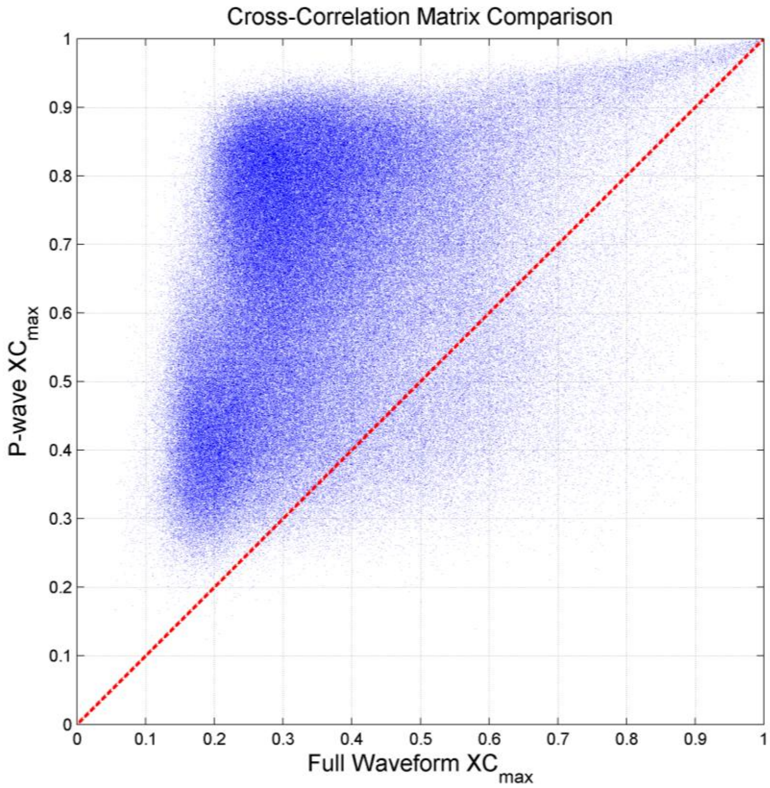
Σχήμα Β.3: A) 2 από τις κυματομορφές του Σχήματος 3.37, στοιχισμένες στον χρόνο τm ενός παραθύρου που περιέχει μόνο τα πρώτα P-κύματα. Οι κυματομορφές, αν και όμοιες, έχουν διαφορετικές διαφορές χρόνων άφιξης $\mathbf{t_{S\text{-}P}}$, και ενώ τα P ταυτίζονται, τα S υπολείπονται μιας χρονικής καθυστέρησης $|t_{S\text{-}P1} - t_{S\text{-}P2}|$. B) τιμές μεγίστου ετεροσυσχέτισης ($\mathbf{XC_{max}}$) μέσης συνοχής (2-15Hz) $\mathbf{m_{coh}}$ και συνοχής στις συχνότητες 3, 6 και 10Hz για κυλιόμενο παράθυρο μήκους 62 δειγμάτων (0.496sec) με βήμα ανά 2 δείγματα (αλληλοεπικάλυψη 0.48sec). Γ) τιμές $\boldsymbol{\tau_m}$ από την ετεροσυσχέτιση για τα διάφορα χρονικά παράθυρα που αναφέρθηκαν για το σχήμα (Β). Οι τιμές $\boldsymbol{\tau_m}$ ξεκινούν από μηδέν, λόγω της στοίχισης των κυματομορφών στο σχήμα (Α) και με την άφιξη των S-κυμάτων μειώνονται και παραμένουν σχεδόν σταθερές για ένα χρονικό διάστημα στην τιμή που υποδεικνύεται από το μπλε βέλος: μέση τιμή $t_{S\text{-}P2} - t_{S\text{-}P1}$=-0.01538sec. Αν εκτελεστεί η ετεροσυσχέτιση στις πλήρεις κυματομορφές με αρχική στοίχιση αυτή που φαίνεται στο σχήμα (Α) προκύπτει χρόνος $\boldsymbol{\tau_m}$=-0.016sec που διαφέρει κατά λιγότερο από 1 δείγμα (0.008sec) από τη μέση καθυστέρηση που σημειώνεται στο σχήμα (Γ).



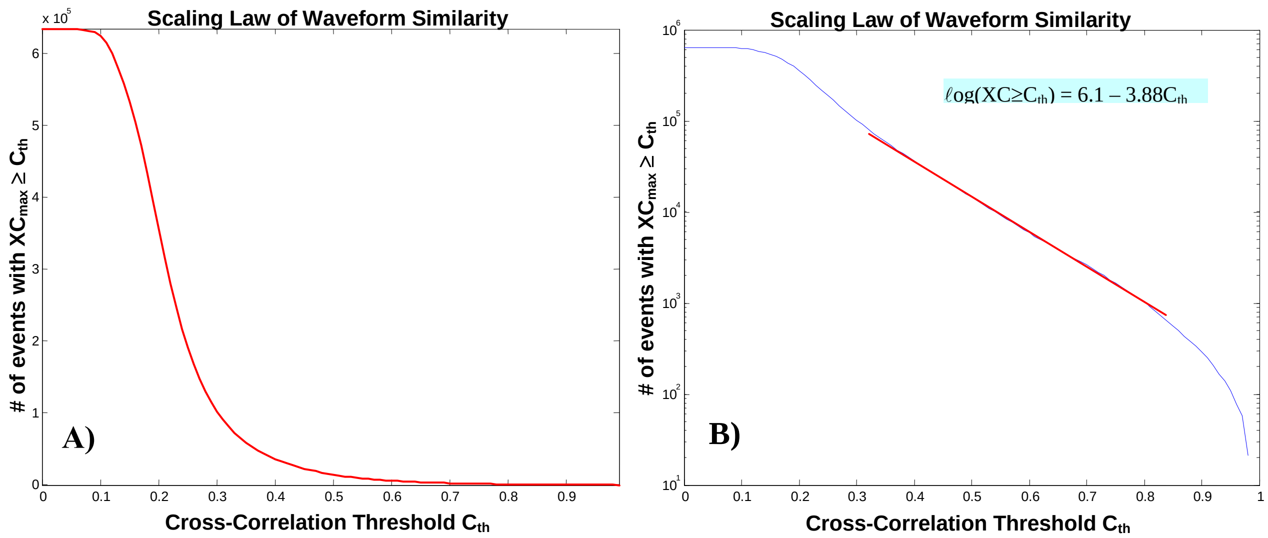
Σχήμα Β.4: Σειρά συγγένειας ανάμεσα στα **2 πλέον ανόμοια** γεγονότα μιας επιλεγμένης συστάδας (2001.04.02-19.17.33 και 2001.04.02-02.54.43) με τιμή ομοιότητας **XC_s=0.0194**. Ο πιο «αδύναμος κρίκος» της αλυσίδας αυτής είναι η συγγένεια ανάμεσα στα γεγονότα με IDs 110 και 157 με τιμή ομοιότητας XC_s=0.677.



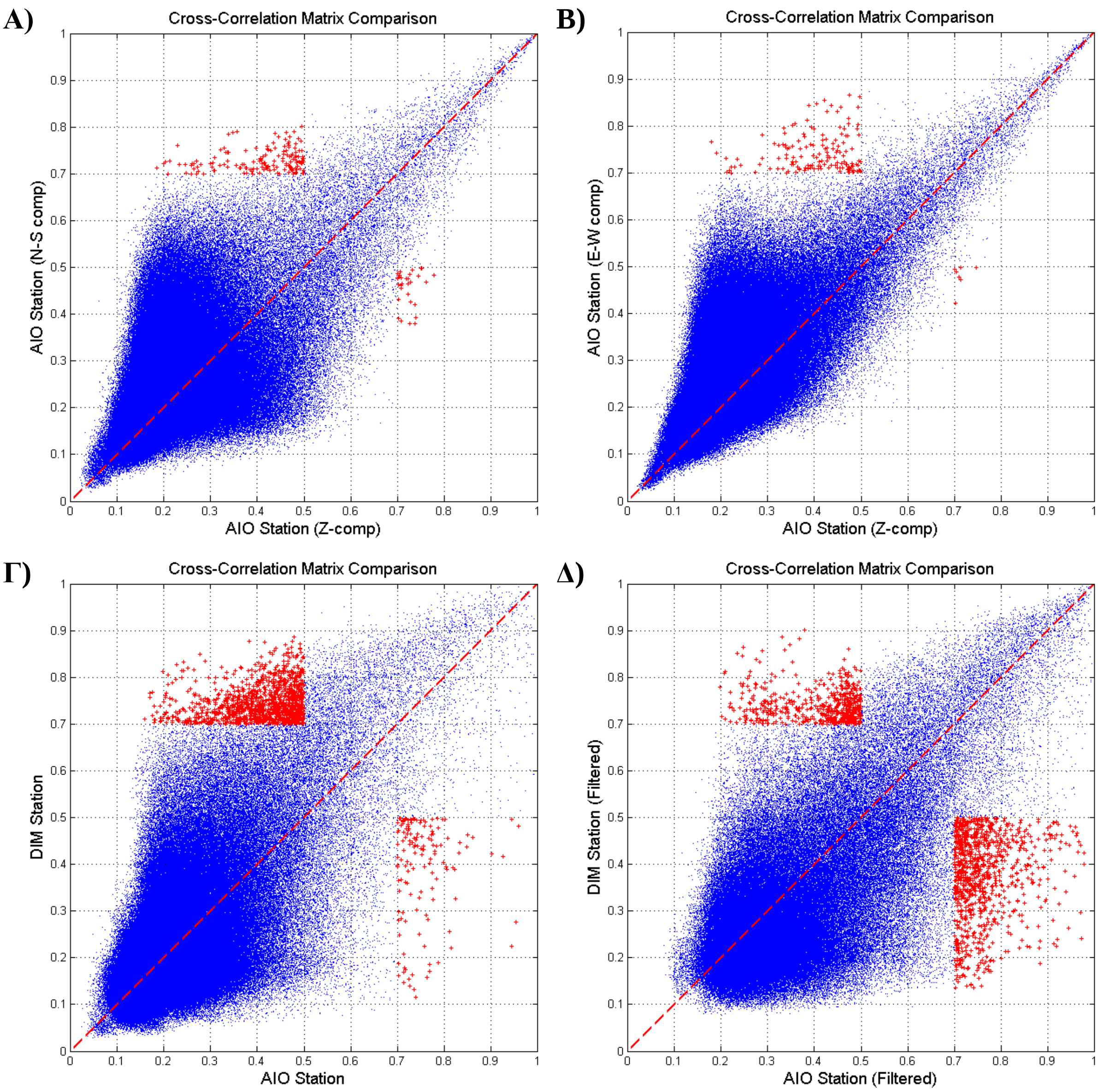
Σχήμα Β.5: Εναλλακτική σειρά συγγένειας ανάμεσα στα 2 πλέον ανόμοια γεγονότα μιας επιλεγμένης συστάδας με τιμή ομοιότητας XC_s=0.0194. Ο πιο «αδύναμος κρίκος» της αλυσίδας αυτής είναι η συγγένεια ανάμεσα στα γεγονότα με IDs 103 και 96 με τιμή ομοιότητας XC_s=0.62 ενώ υπάρχουν άλλες 2 αδύναμες συνδέσεις με $XC_s \cong 0.63$. Το κόκκινο χρώμα στις κυματομορφές υποδηλώνει κυματομορφές που είναι λιγότερο όμοιες με τις αμέσως προηγούμενές τους.



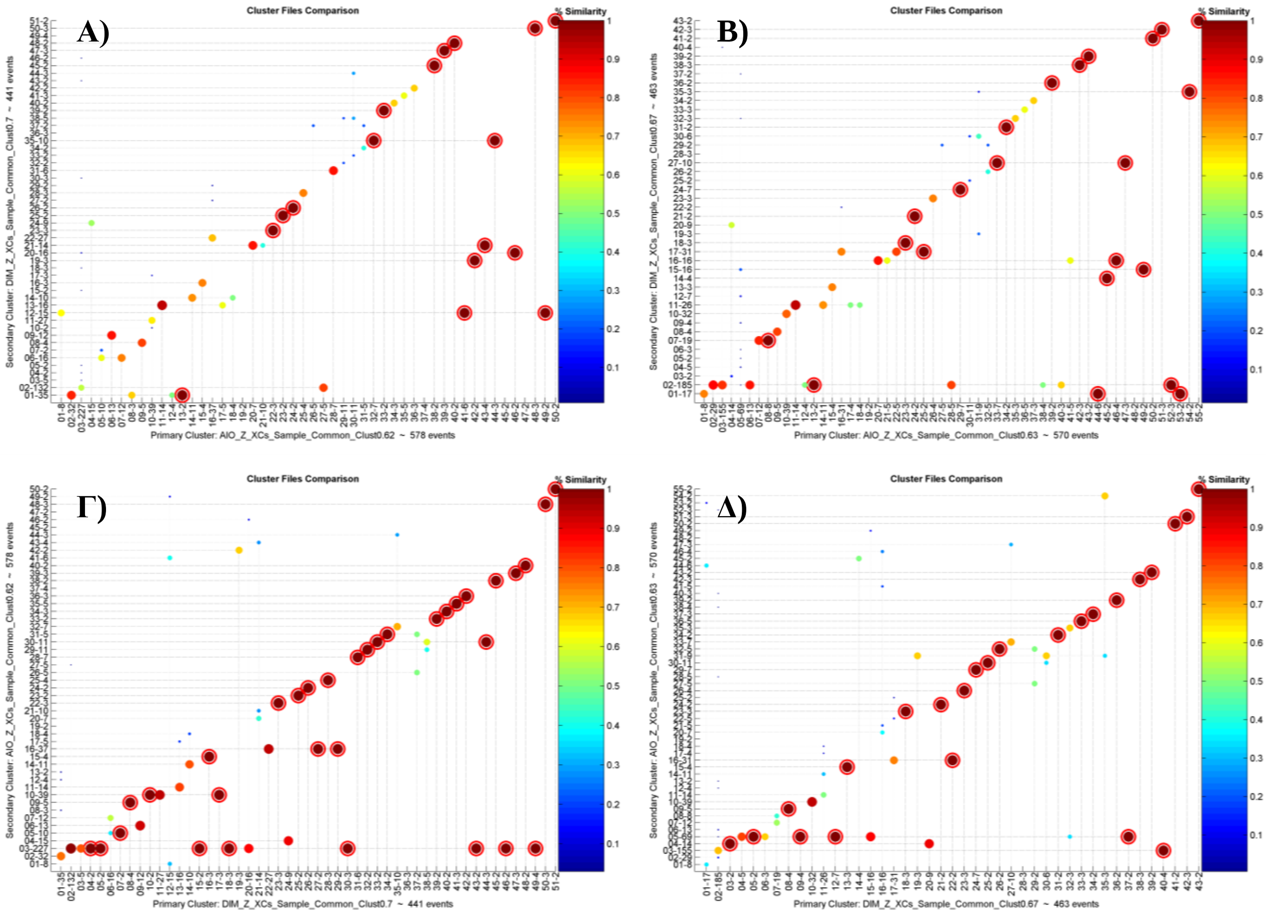
Σχήμα Β.6: σύγκριση μεταξύ των στοιχείων δύο πινάκων ετεροσυσχέτισης για το δείγμα από το σμήνος του AIO (Κεφ. 3): στον οριζόντιο άξονα βρίσκονται οι τιμές **XC_{max}** από σύγκριση πλήρων κυματομορφών, στον κατακόρυφο άξονα βρίσκονται οι τιμές **XC_{max}** από σύγκριση του τμήματος των κυματομορφών που περιέχει τα P-κύματα από 0.1ms πριν την άφιξη έως 0.8ms μετά την άφιξη. Μπορεί να συγκριθεί με το Σχήμα 3.13_A στο οποίο έχει γίνει η ίδια σύγκριση ανάμεσα στα πρώτα 100 γεγονότα του δείγματος και σε μικρότερο χρονικό παράθυρο για τα P-κύματα (από 0.1ms πριν την άφιξη έως 0.3ms μετά την άφιξη). Σε αυτό το σχήμα παρουσιάζονται όλοι οι συνδυασμοί ανά δύο ανάμεσα στα 1134 γεγονότα του δείγματος.



Σχήμα Β.7: Κλιμάκωση του πλήθους των συνδυασμών κυματομορφών με **$XC_{max} \geq C_{th}$** όπου **C_{th}** μια τιμή κατωφλίου. Ο λογάριθμος του πλήθους ως προς το C_{th} εμφανίζει μια σχεδόν γραμμική περιοχή. Τα συγκεκριμένα διαγράμματα προέκυψαν από τον άνω τριγωνικό του πίνακα A_x από αφιλτράριστες κυματομορφές της Z-συνιστώσας του σταθμού AIO για το δείγμα 1134 γεγονότων στη χρονική περίοδο 26/3/2001-18/4/2001.



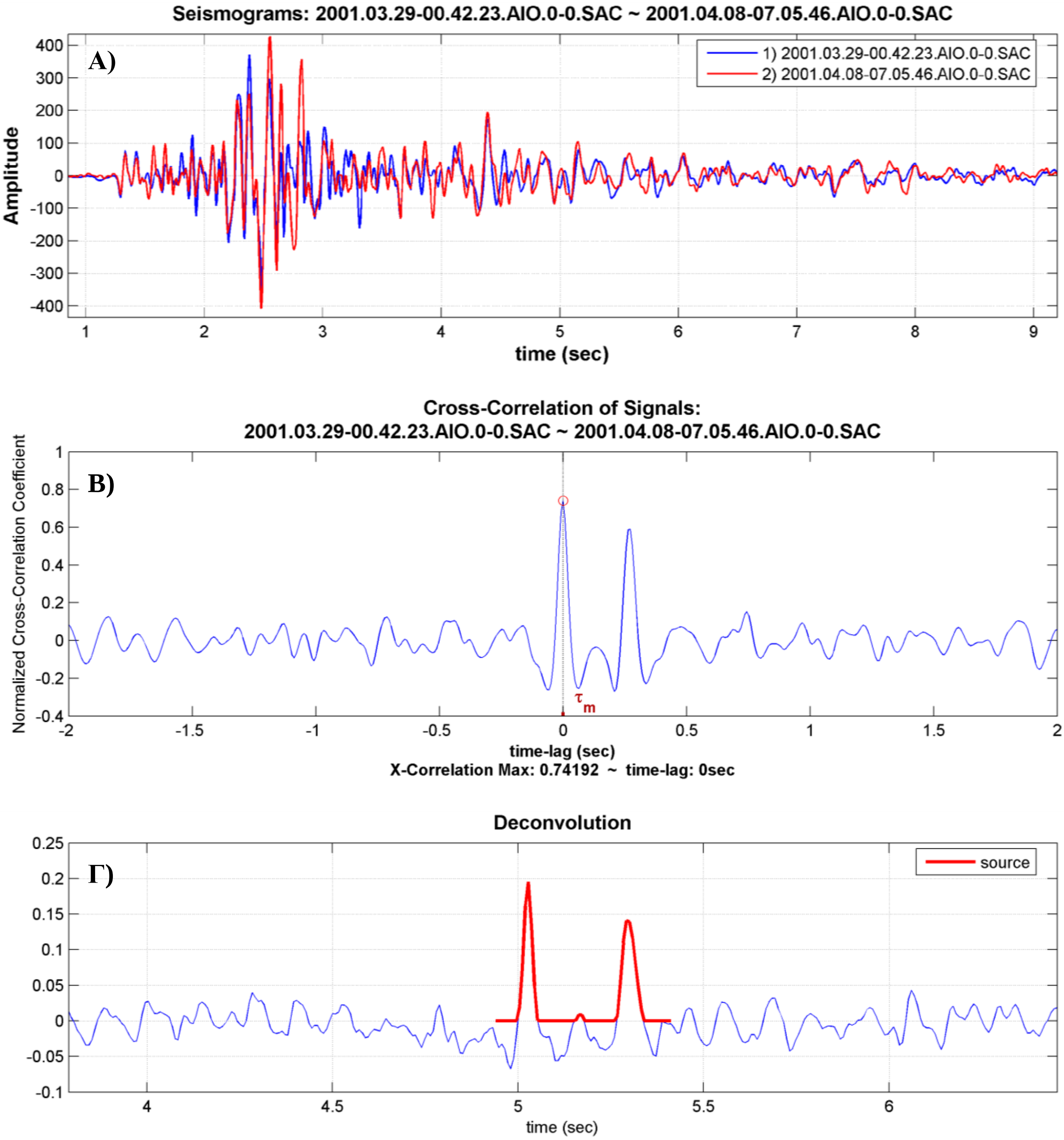
Σχήμα Β.8: Α**)** Σύγκριση των στοιχείων 2 πινάκων ετεροσυσχέτισης που κατασκευάστηκαν από τη σύγκριση των κυματομορφών του σταθμού AIO από το δείγμα 1134 γεγονότων. Στον οριζόντιο άξονα είναι οι τιμές $\mathbf{XC_{max}}$ των αφιλτράριστων κυματομορφών της Z-συνιστώσας ενώ στον κατακόρυφο οι τιμές για τα αντίστοιχα ζεύγη της οριζόντιας N-S συνιστώσας. Με κόκκινους σταυρούς σημειώνονται τα ζεύγη που έδωσαν τιμές $\mathbf{XC_{max}}>0.7$ στον ένα πίνακα και $\mathbf{XC_{max}}<0.5$ στον άλλο και χαρακτηρίζουν μια ασυμφωνία μεταξύ των 2 πινάκων. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του διαγράμματος είναι 0.573. Β**)** το ίδιο με το (Α) αλλά με τον πίνακα $\mathbf{A_x}$ από τις κυματομορφές της οριζόντιας E-W συνιστώσα στον κατακόρυφο άξονα. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης είναι 0.719. Γ**)** Σύγκριση των στοιχείων 2 πινάκων ετεροσυσχέτισης που κατασκευάστηκαν από τη σύγκριση των κυματομορφών της Z-συνιστώσας του σταθμού AIO (οριζ. άξονας) και του σταθμού DIM (κατακόρυφος άξονας) από το δείγμα 1085 γεγονότων (χωρίς την ημέρα 31/3/2001 για την οποία δεν έχουν ανακτηθεί κυματομορφές στον DIM). Καθώς υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες για ένα γεγονός υπάρχουν δεδομένα κυματομορφών μόνο σε έναν από τους δύο σταθμούς έχει γίνει προσεκτική επιλογή των στοιχείων που ανήκουν από κοινού στα ίδια ζεύγη γεγονότων στους 2 πίνακες ετεροσυσχέτισης για να μπορεί να γίνει η σύγκριση. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του διαγράμματος είναι 0.652. Δ**)** Το ίδιο με το (Γ) αλλά με φιλτραρισμένες κυματομορφές και στους 2 σταθμούς. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης είναι 0.676.



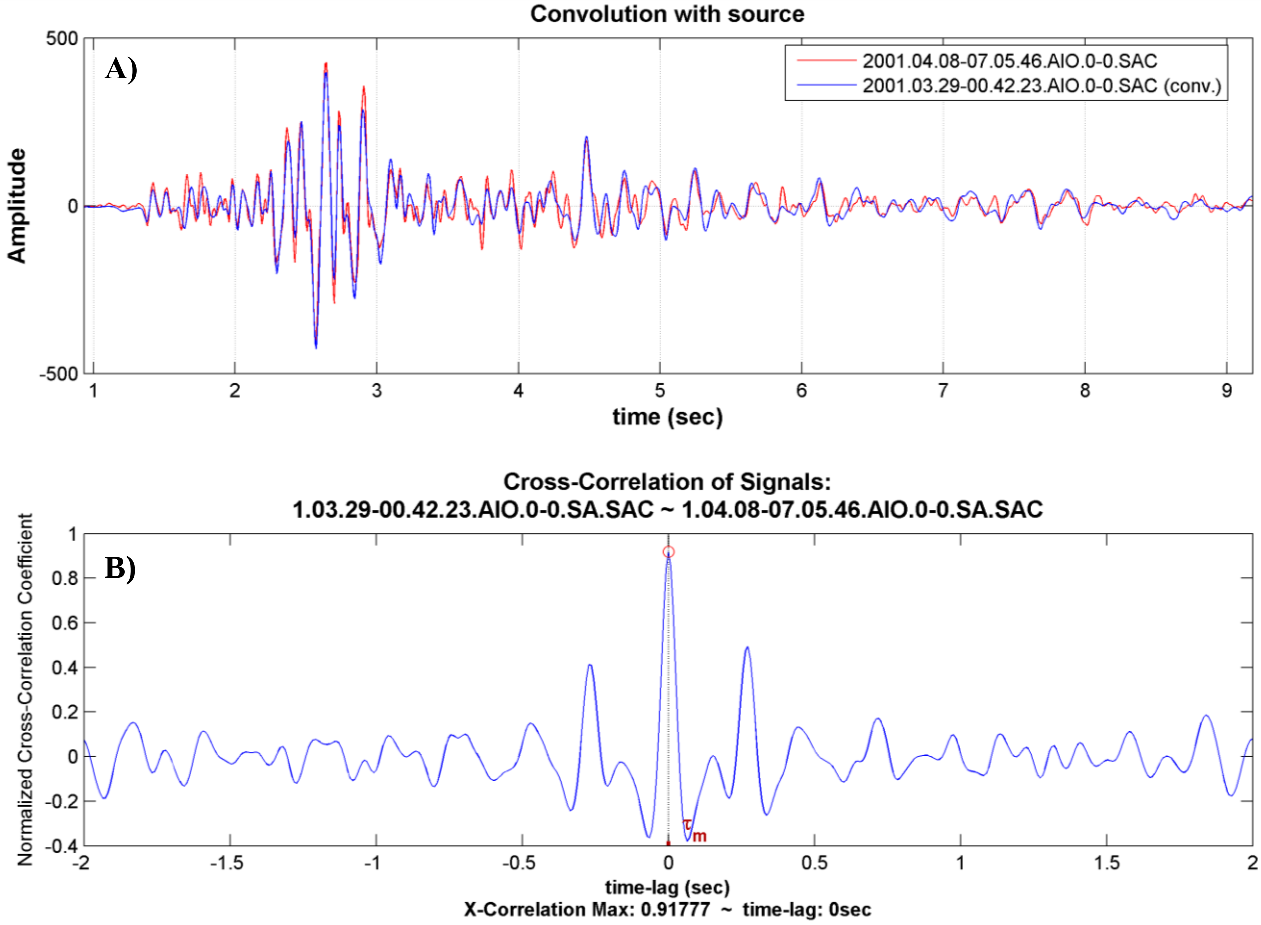
Σχήμα Β.9: Σύγκριση ανάμεσα στις συστάδες που δημιουργούνται από διαφορετικούς πίνακες ομοιότητας (**XC$_s$**) με διαφορετικές τιμές κατωφλίου. Έχουν χρησιμοποιηθεί τα κοινά στοιχεία από τους πίνακες ομοιότητας του «δείγματος» από το «Σμήνος του AIO» (Κεφ. 3), του οποίου ο πίνακας (έστω **XC$_{AIO}$**) έχει κατασκευαστεί από κυματομορφές της κατακόρυφης συνιστώσας του σταθμού AIO, και της Ομάδας Α (Κεφ. 4), με πίνακα (έστω έστω **XC$_{DIM}$**)από τις κυματομορφές της κατακόρυφης συνιστώσας του σταθμού DIM. Οι 2 πίνακες αναφέρονται στα ίδια γεγονότα και έχουν διαστάσεις 650×650. Στους άξονες αναγράφονται τα ονόματα των συστάδων με κωδικό της μορφής «ID-##», όπου ID ο αριθμός ταυτοποίησης της συστάδας και ## ο αριθμός γεγονότων που περιέχει η κάθε συστάδα. Το μέγεθος της κουκίδας συμβαδίζει με τη χρωματική κλίμακα η οποία μας δείχνει το ποσοστό των γεγονότων που περιέχει η εκάστοτε πρωτεύουσα συστάδα στην οποία αναφέρεται η τετμημένη του σημείου (*Primary Cluster*) το οποίο περιέχεται στην εκάστοτε δευτερεύουσα συστάδα στην οποία αναφέρεται η τεταγμένη του σημείου (*Secondary Cluster*). Σε κυκλωμένες κουκίδες αντιστοιχούν όσες πρωτεύουσες συστάδες εμπεριέχονται πλήρως (100%) σε μια και μόνο από τις δευτερεύουσες συστάδες. Μια δευτερεύουσα συστάδα (κατά μήκος μιας οριζόντιας γραμμής) μπορεί να εμπεριέχει μερικώς ή πλήρως περισσότερες από μία πρωτεύουσες συστάδες. Τα κάτω διαγράμματα αποτελούν αντιστροφή των επάνω προκειμένου να δει κανείς τη διαφορά ανάμεσα στα 2 είδη σύγκρισης.

Α) Σύγκριση ανάμεσα στις συστάδες που δημιουργήθηκαν από τον πίνακα **XC$_{DIM}$** με **C$_{th}$**=0.70 (κατακ. Άξονας) και από τον πίνακα **XC$_{AIO}$** με **C$_{th}$**=0.62 (οριζ. Άξονας) **Β)** Σύγκριση ανάμεσα στις συστάδες που δημιουργήθηκαν από τον πίνακα **XC$_{DIM}$** με **C$_{th}$**=0.67 (κατακ. Άξονας) και από τον πίνακα **XC$_{AIO}$** με **C$_{th}$**=0.63 (οριζ. Άξονας) **Γ)** Αντίστροφη σύγκριση από αυτή του σχήματος (Α), **Δ)** Αντίστροφη σύγκριση από αυτή του σχήματος (Γ).

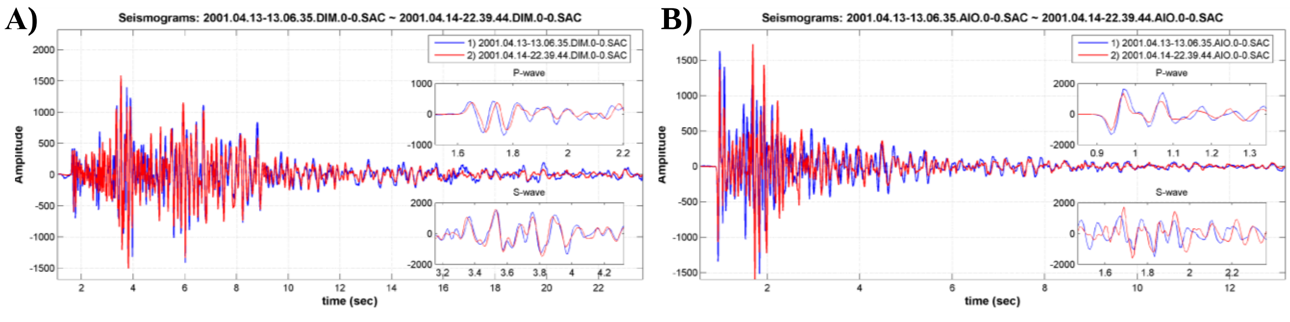
Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από τα παραπάνω σχήματα είναι ότι ο κάθε σταθμός «βλέπει» με διαφορετικό τρόπο τις κυματομορφές και μπορεί να διακρίνει διαφορετικά τη μία από την άλλη. Κατά συνέπεια ένας σταθμός μπορεί να «δει» διαφορές ανάμεσα σε 2 σήματα τις οποίες δε μπορεί να «δει» ένας άλλος. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι συστάδες σμηνοσεισμών που διακρίνονται μπορεί να εντοπίζονται από κοινού και από τους 2 σταθμούς ενώ σε άλλες περιπτώσεις είτε να διασπώνται σε μικρότερες είτε να συγχωνεύονται σε μια μεγαλύτερη. Από τον πίνακα **XC$_{DIM}$** για **C$_{th}$**=0.6 η μεγαλύτερη συστάδα έχει μέγεθος 285 γεγονότα και συνολικά βρίσκονται 504 γεγονότα σε συστάδες μεγέθους μεγαλύτερου ή ίσου με 2, ενώ για την ίδια τιμή κατωφλίου με δεδομένα του πίνακα **XC$_{AIO}$** η μεγαλύτερη συστάδα έχει μέγεθος 318 και ο αριθμός γεγονότων που ανήκουν σε συστάδες σμηνοσεισμών είναι 588. Ο αριθμός αυτός μειώνεται σε 530 για τον πίνακα **XC$_{AIO}$** με **C$_{th}$**=0.70 ενώ για την ίδια τιμή κατωφλίου στον **XC$_{DIM}$** ο αριθμός γεγονότων σε συστάδες μειώνεται σε 441. Στην ιδανική περίπτωση, αν οι δημιουργούμενες συστάδες ήταν μία προς μία ίδιες θα έπρεπε σε όλα τα παραπάνω σχήματα τα σημεία να κατανέμονταν κατά μήκος της διαγωνίου και όλα να αντιστοιχούσαν σε ομοιότητα 100% (κυκλωμένες κουκίδες).



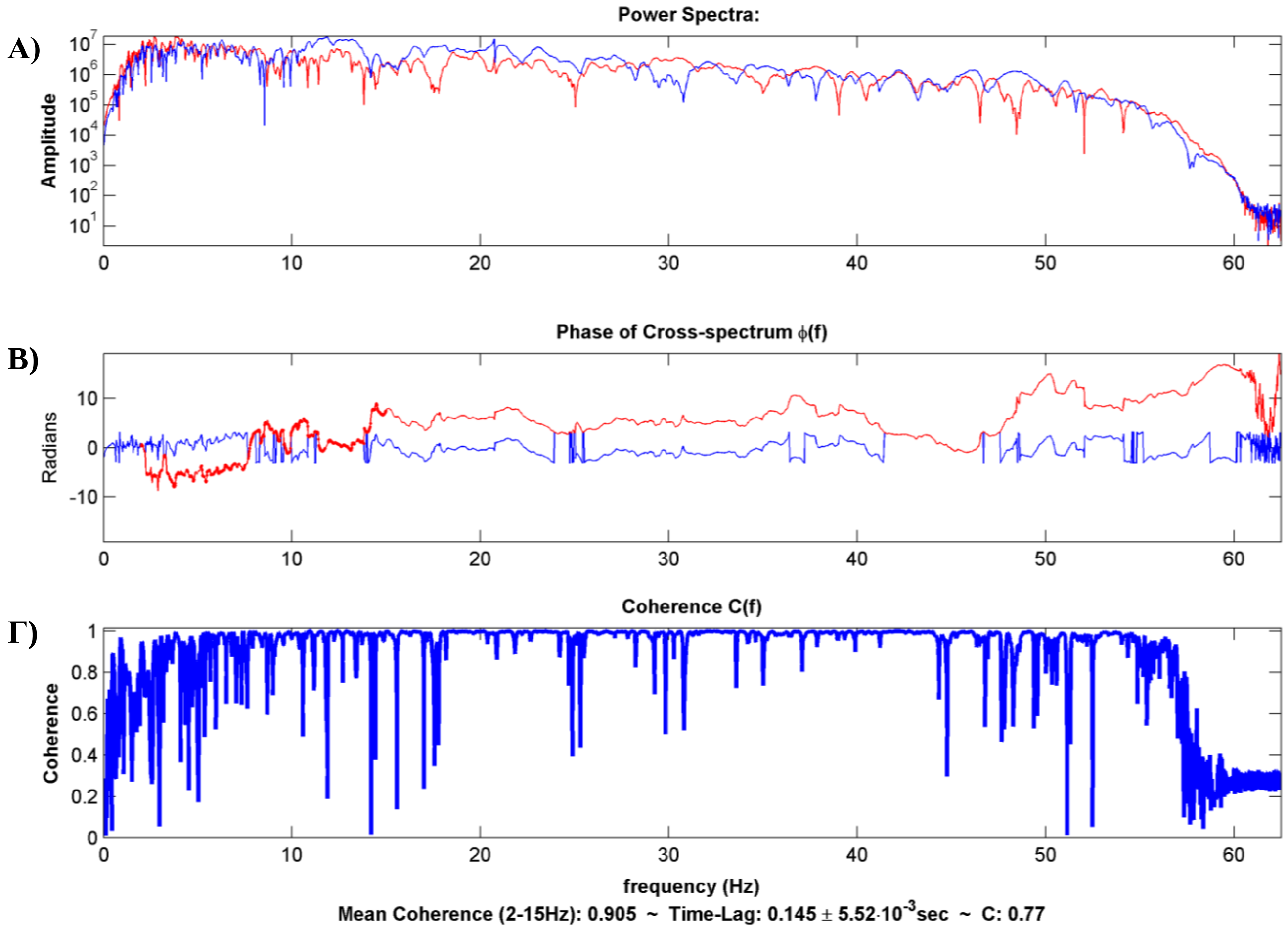
Σχήμα Β.10: Α) Φιλτραρισμένες κυματομορφές (0.5-15Hz) με υψηλό $\mathbf{XC_{max}=0.742}$ αλλά με χαμηλό δείκτη ομοιότητας $\mathbf{S_{ij}=0.27}$, Β) ετεροσυσχέτιση των κυματομορφών του σχήματος (Α). Είναι χαρακτηριστική η ασυμμετρία ($\mathbf{C_s}$=0.658) γύρω από το μέγιστο $\mathbf{XC_{max}}$=0.742. Το δευτερεύον μέγιστο στα δεξιά του ολικού είναι αρκετά σημαντικό ($\mathbf{XC_{max,2}}$=0.590). Γ) Αποσυνέλιξη της κυματομορφής 1 από την 2 του σχήματος (Α). Το αποτέλεσμα είναι μια «διπλή σχετική πηγή» (κόκκινο): ο σεισμός στον οποίο ανήκει η κυματομορφή (2) (κόκκινη στο σχήμα (Α)) θα μπορούσε να είναι ένας διπλός σεισμός με τις 2 πηγές του να διαφέρουν χρονικά κατά ~0.272sec, ωστόσο αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις αντίστοιχες παρατηρήσεις των καταγραφών σε άλλους σταθμούς στους οποίους η διαφορά δεν είναι σταθερή (βλέπε και Κεφ. 3, Σχήμα 3.15).



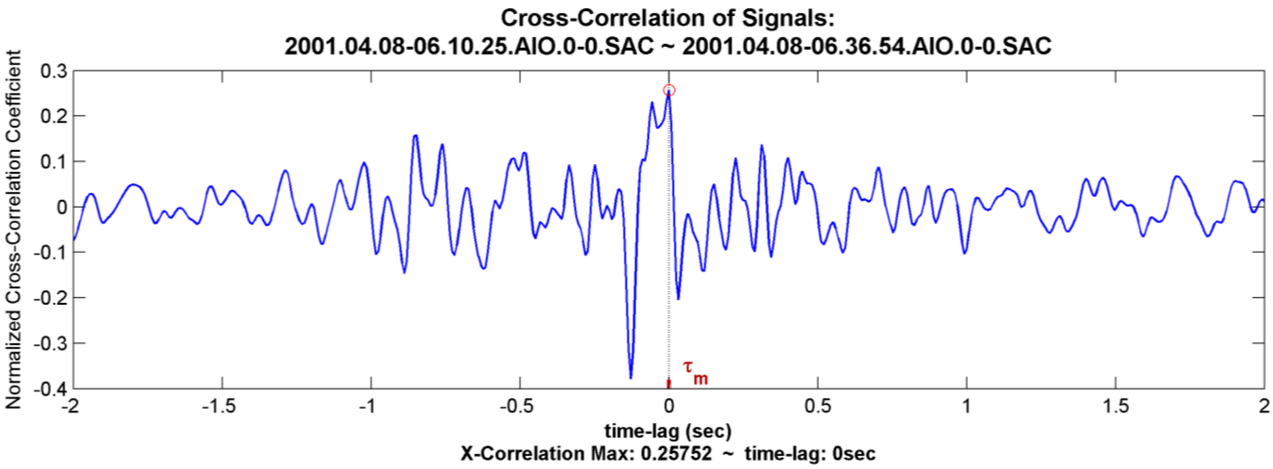
Σχήμα Β.11: Α) συνέλιξη της πηγής (Σχήμα Β.10$_Γ$, κόκκινο) με την κυματομορφή (1) του Σχήματος Β.10$_Α$ (μπλε). Το αποτέλεσμα της συνέλιξης (μπλε κυματομορφή σε αυτό το σχήμα) μοιάζει τώρα περισσότερο με την κόκκινη (διπλός σεισμός). Β) Ετεροσυσχέτιση ανάμεσα στις 2 κυματομορφές του Σχήματος Α. Η συμμετρία έχει βελτιωθεί (**C$_s$**=0.982) καθώς και το μέγιστο **XC$_{max}$**=0.918.



Σχήμα Β.12: Α) Φιλτραρισμένες κυματομορφές (0.5-15Hz) όμοιων σεισμών στην κατακόρυφη συνιστώσα του σταθμού DIM με δείκτη ομοιότητας **S$_{ij}$**=0.711. Β) φιλτραρισμένες κυματομορφές των ίδιων σεισμών στην κατακόρυφη συνιστώσα του σταθμού AIO. Η τιμή του δείκτη ομοιότητας σε αυτή την περίπτωση είναι πολύ χαμηλή (S$_{ij}$=0.247).

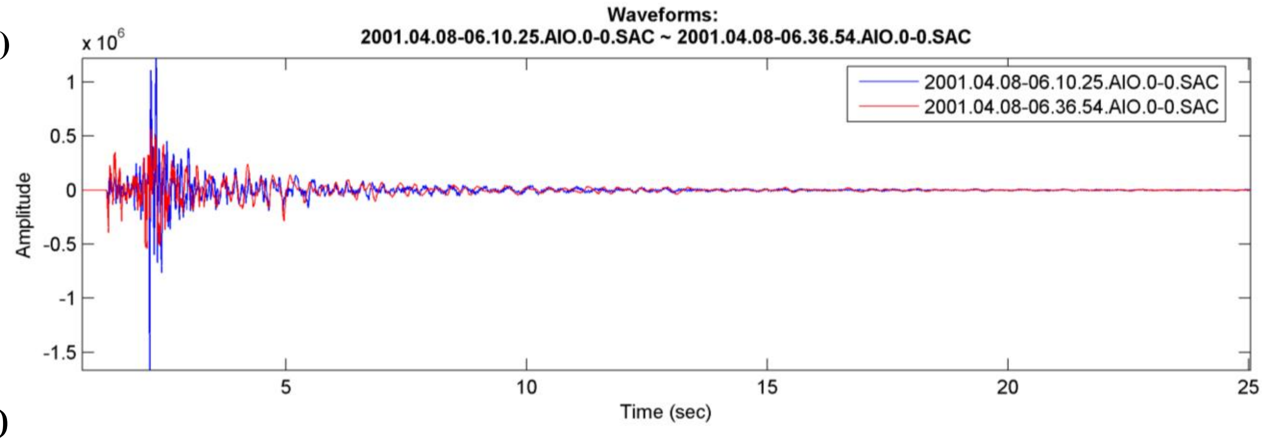


Σχήμα Β.13: περίπτωση ζεύγους 2001.04.08-06.10.25.AIO.0-0 και 2001.04.08-06.36.54.AIO.0-0. Τα σήματα αυτά εμφανίζουν υψηλή μέση συνοχή (2-15Hz) m_{coh}=0.905 σε ένα χρονικό παράθυρο ~48sec ενώ το μέγιστο της ετεροσυσχέτισής τους είναι πολύ χαμηλό (XC_{max}=0.257). Α) Φάσματα ισχύος των 2 σημάτων, Β) φάση του ετεροφάσματος αναδιπλωμένη (μπλε διακεκομμένη) και μη-αναδιπλωμένη (κόκκινη), Γ) Συνοχή (*Coherence*) στις διάφορες συχνότητες. Όσο μειώνεται το χρονικό παράθυρο (αφαιρώντας σήμα από το τέλος του (κυματο-ουρά)) η τιμή της συνοχής ελαττώνεται. Στα 29sec→m_{coh}=0.753, στα 17sec→m_{coh}=0.614.

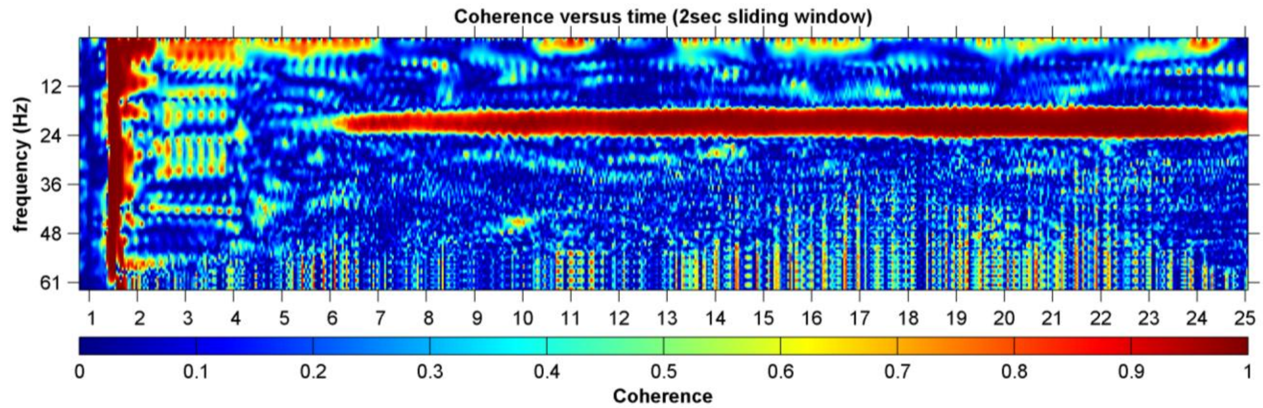


Σχήμα Β.14: διάγραμμα ετεροσυσχέτισης για το ζεύγος 2001.04.08-06.10.25.AIO.0-0 και 2001.04.08-06.36.54.AIO.0-0. Χαμηλό μέγιστο ετεροσυσχέτισης (**XC_{max}**=0.258) παρά την υψηλή μέση συνοχή (2-15Hz), **m_{coh}**=0.905

A)

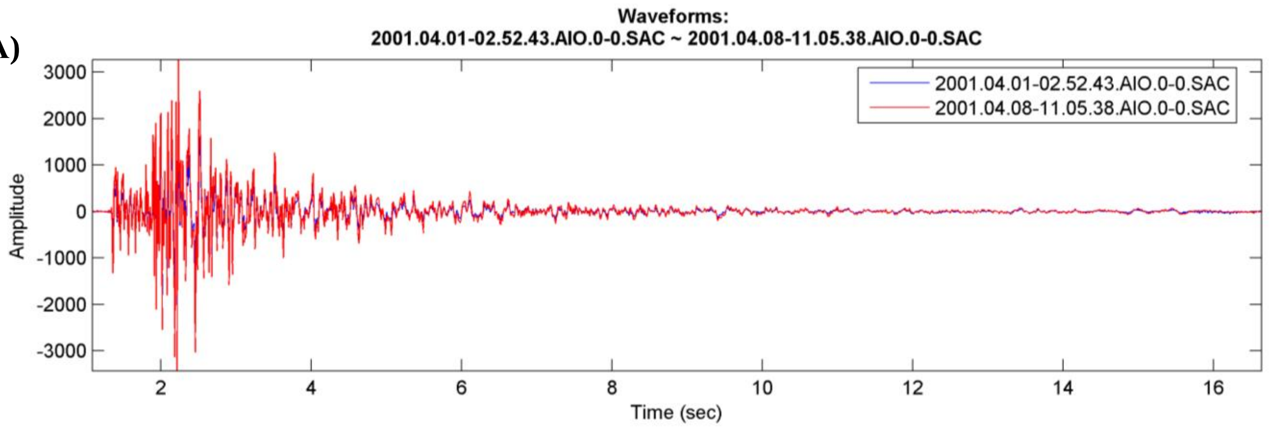


B)

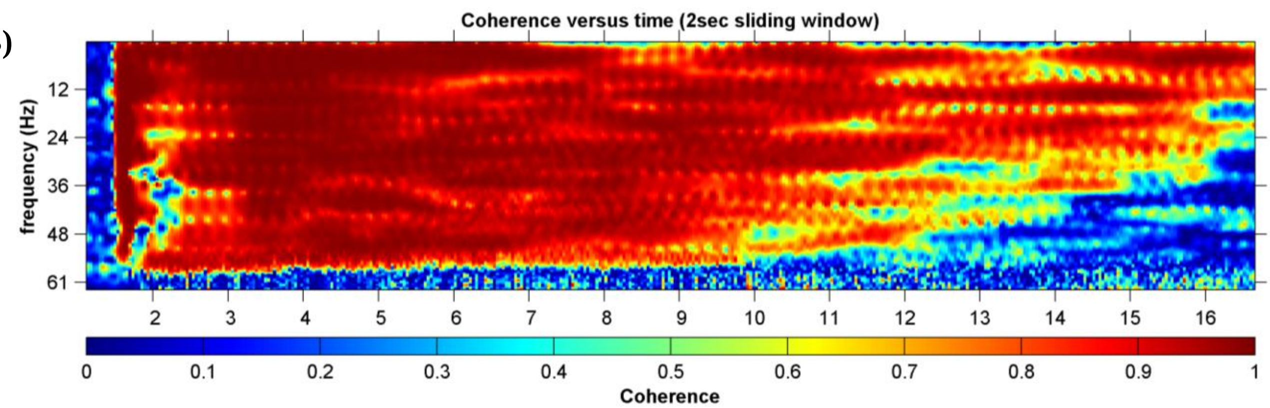


Σχήμα Β.15:Χρονική μεταβολή της συνοχής για το ζεύγος 2001.04.08-06.10.25.AIO.0-0 και 2001.04.08-06.36.54.AIO.0-0

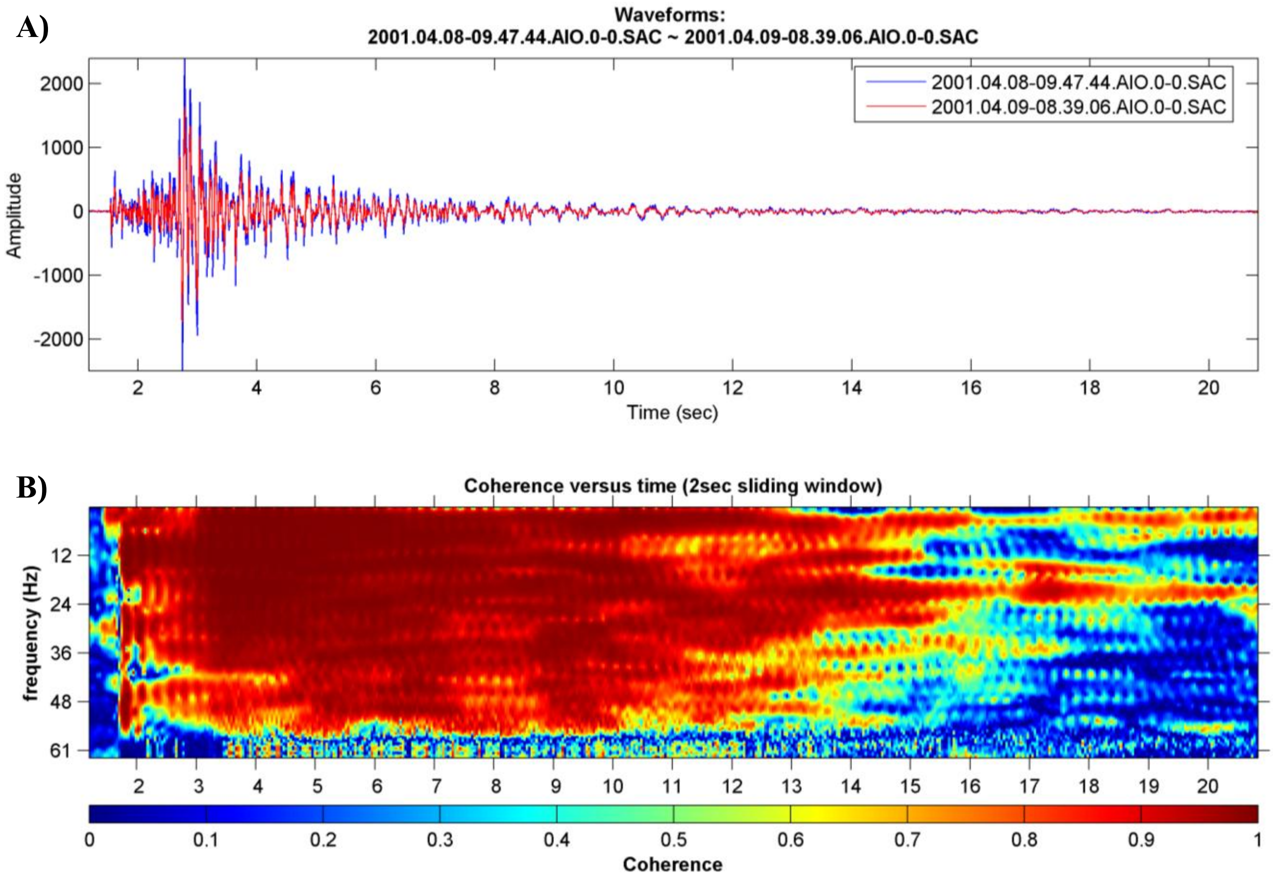
A)



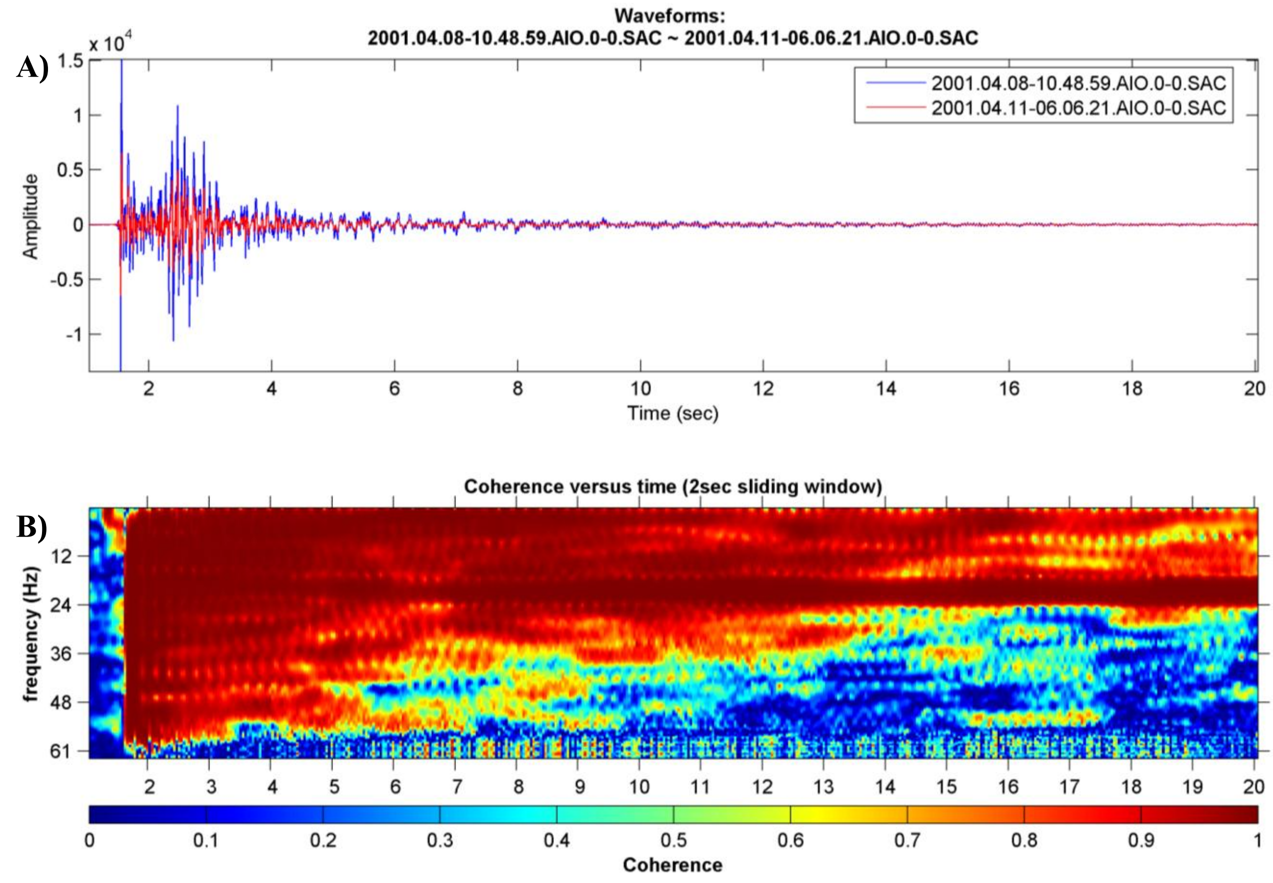
B)



Σχήμα Β.16: Παράδειγμα τέλειου σεισμικού ζεύγους με την αντίστοιχη χρονική μεταβολή της συνοχής

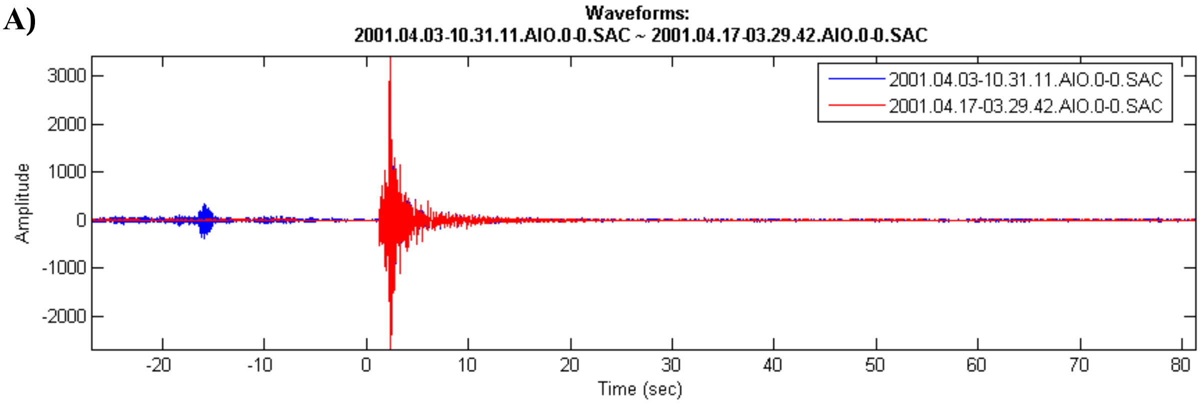


Σχήμα Β.17: Παράδειγμα τέλειου σεισμικού ζεύγους με την αντίστοιχη χρονική μεταβολή της συνοχής

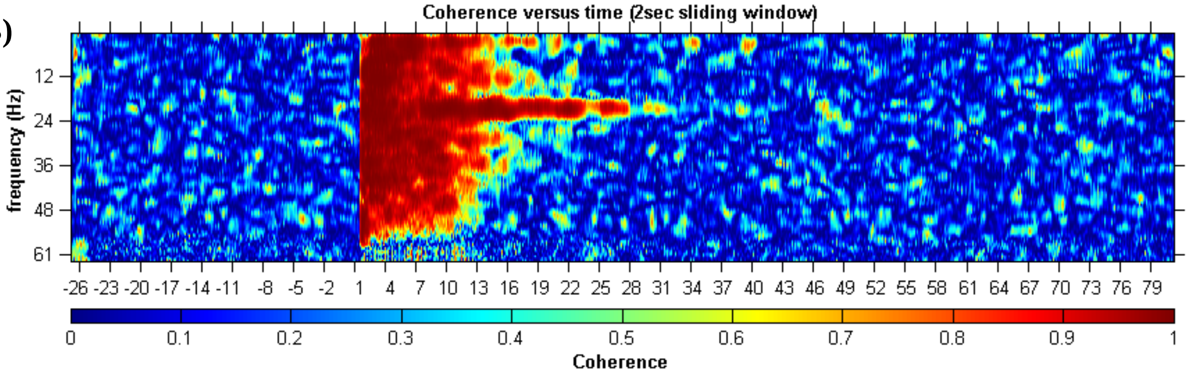


Σχήμα Β.18: Παράδειγμα τέλειου σεισμικού ζεύγους με την αντίστοιχη χρονική μεταβολή της συνοχής

A)

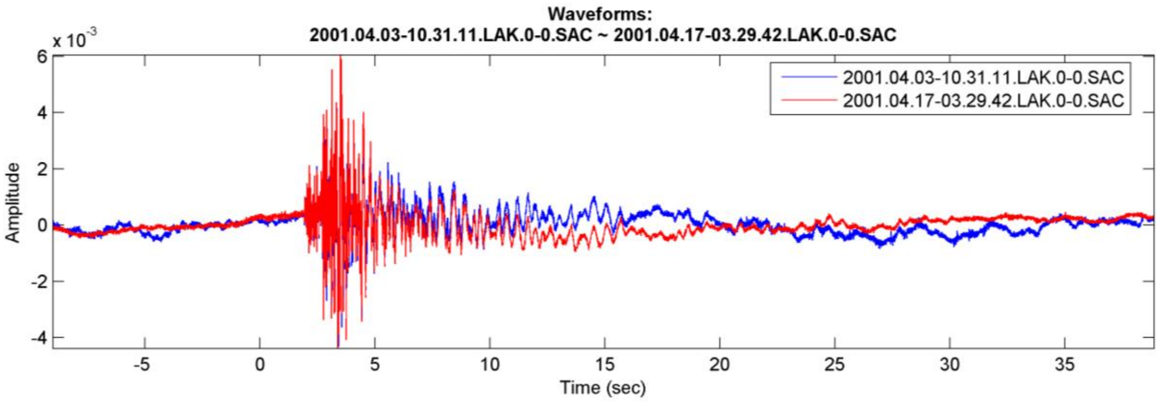


B)

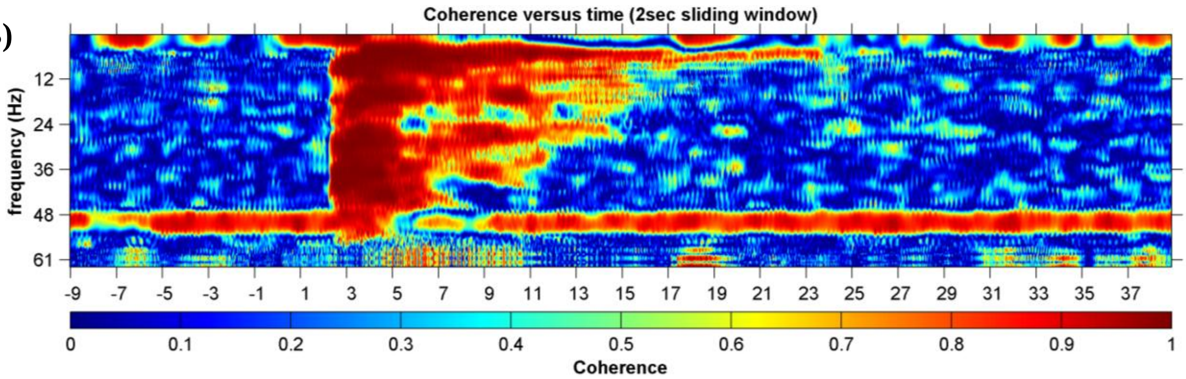


Σχήμα Β.19: ευρύτερη καταγραφή ενός τέλειου σεισμικού ζεύγους. Στην εικόνα της συνοχής φαίνεται ότι τα σεισμικά κύματα διεγείρουν παρασιτικές ταλαντώσεις γύρω από τη συχνότητα των ~20Hz και στις 2 κυματομορφές

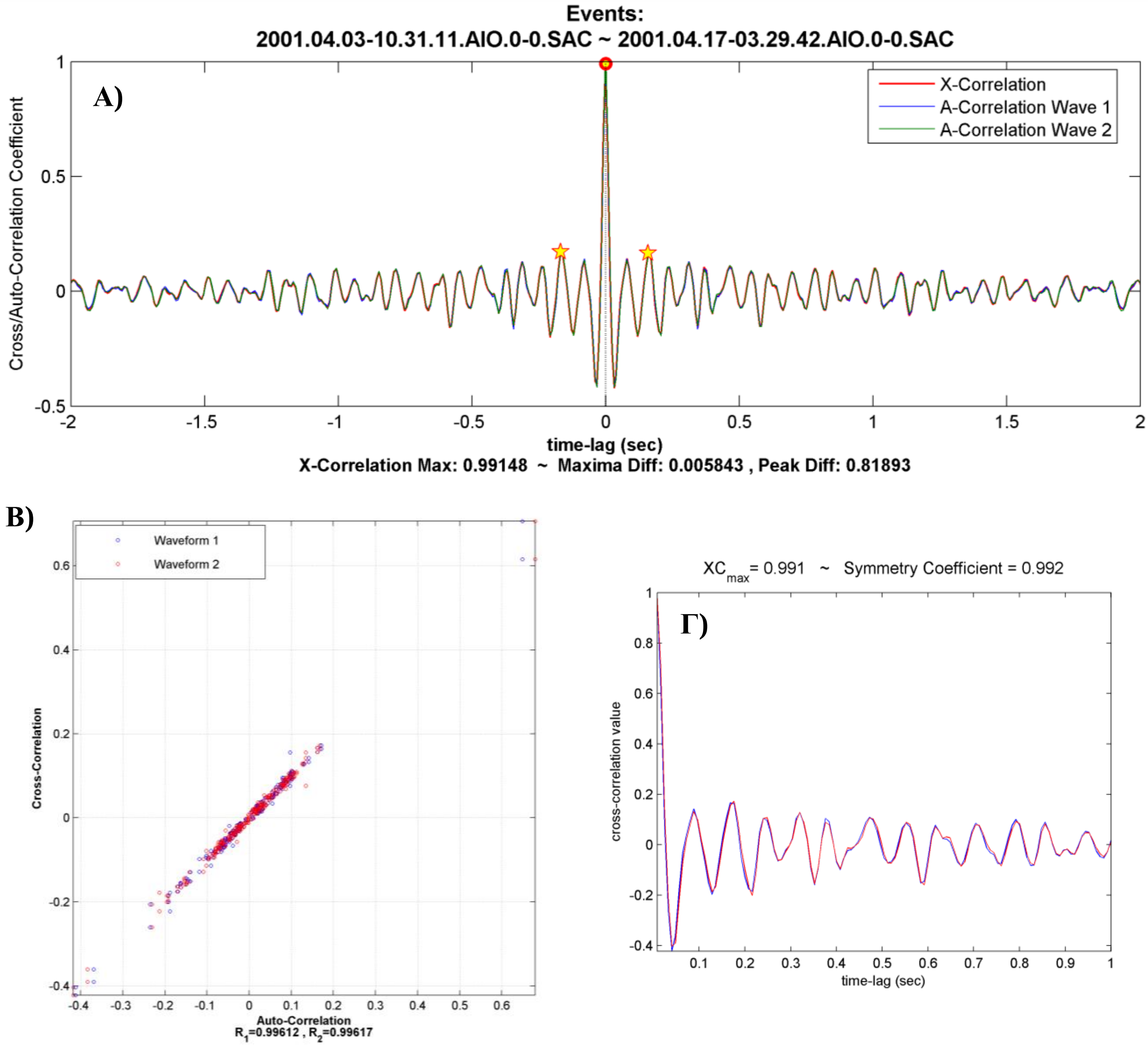
A)



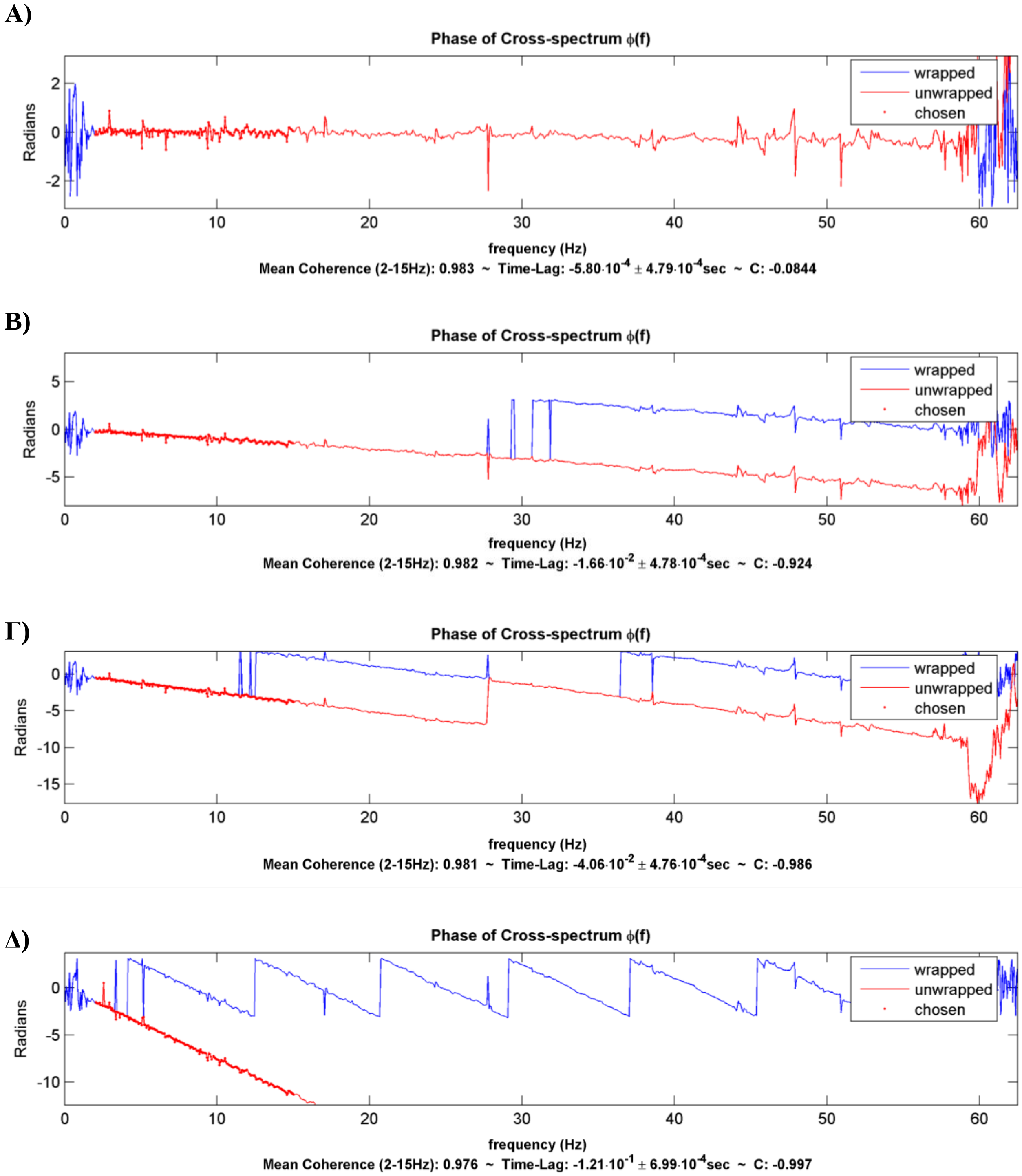
B)



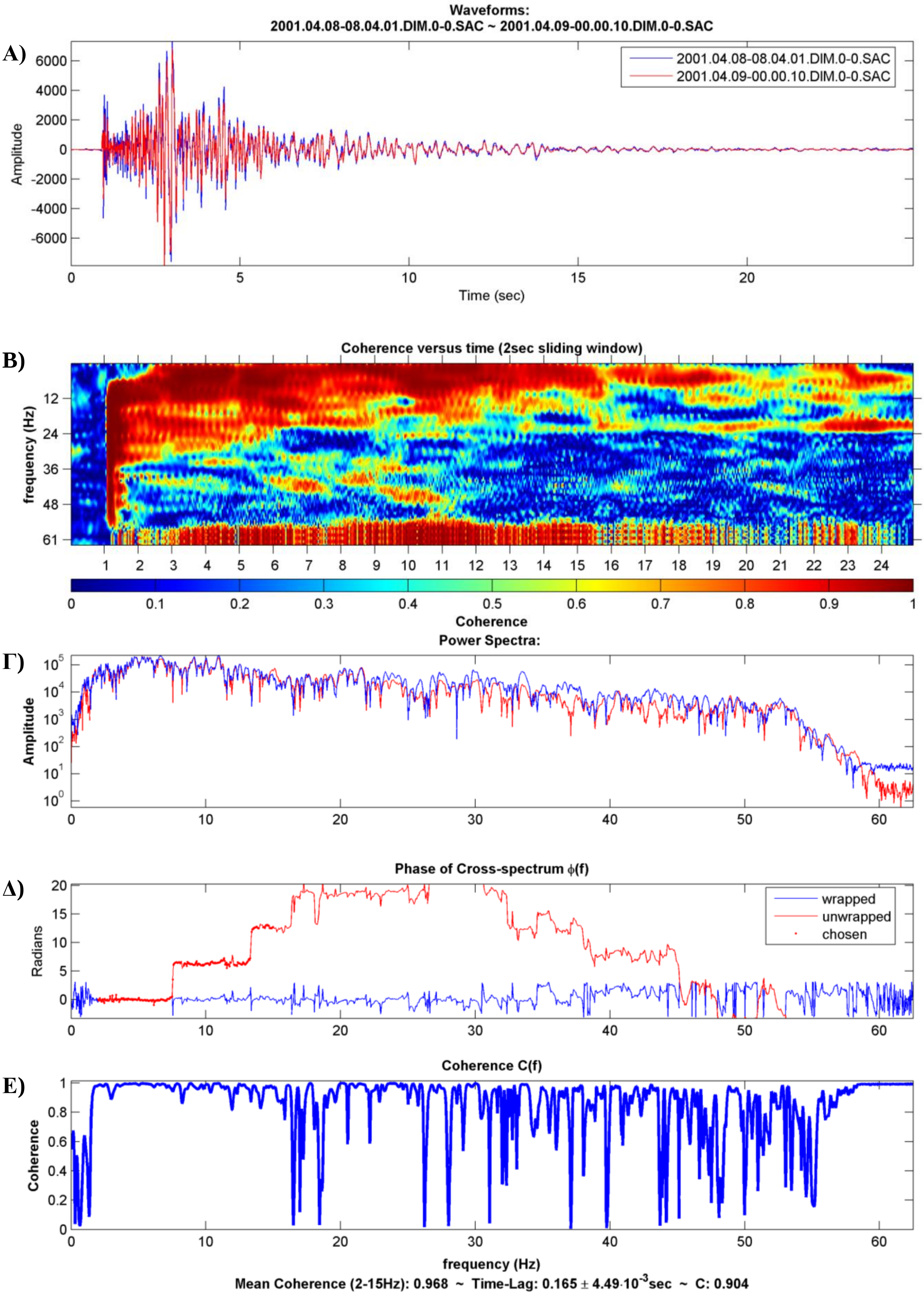
Σχήμα Β.20: το ίδιο ζεύγος σεισμών με αυτό του προηγούμενου σχήματος αλλά στον σταθμό LAK (*broadband*). Εδώ φαίνεται στη συνοχή η παρασιτική συχνότητα ρεύματος στα 50Hz πριν και μετά το σεισμικό σήμα.



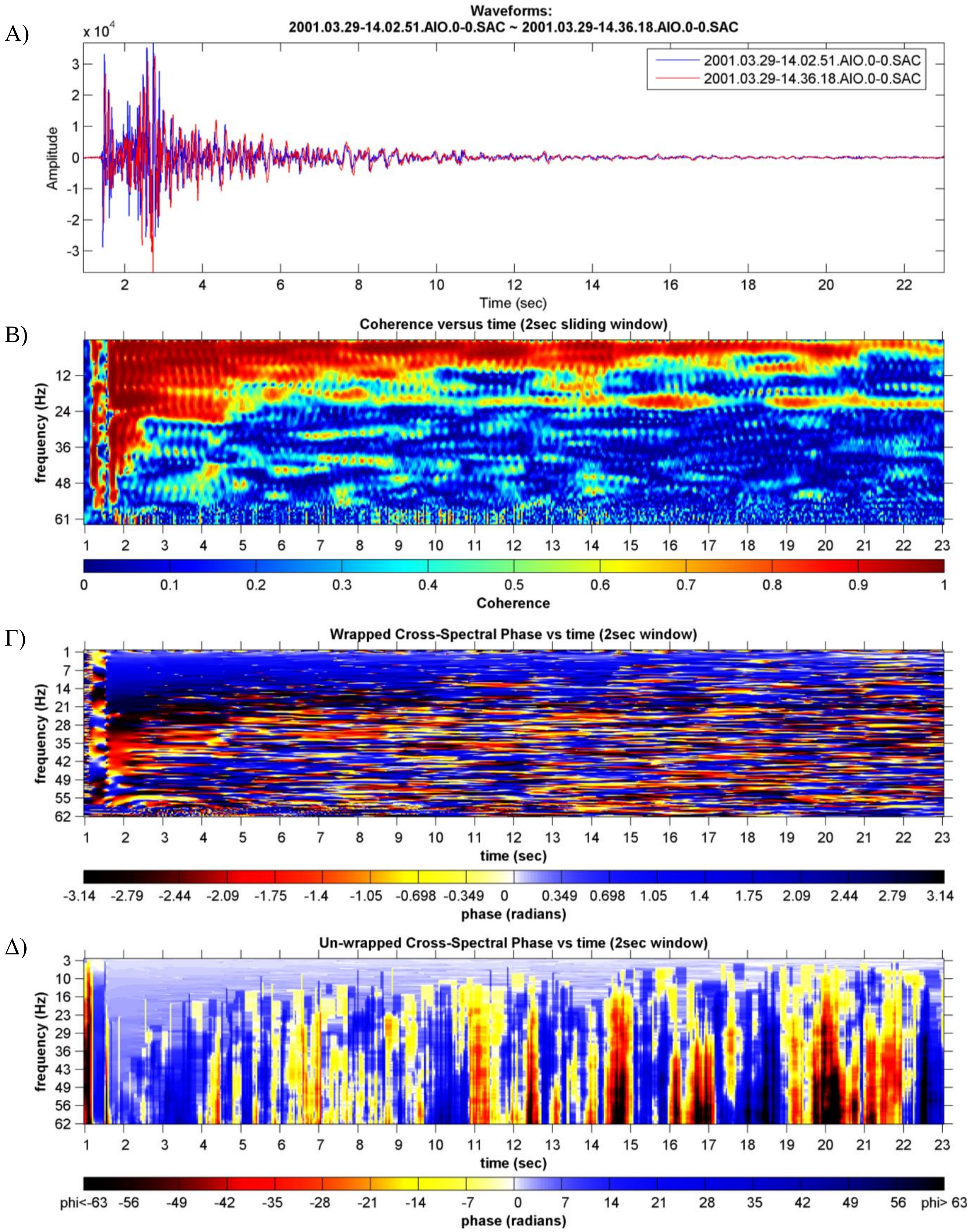
Σχήμα Β.21: A) Ετεροσυσχέτιση και αυτοσυσχετίσεις για το τέλειο σεισμικό ζεύγος (*doublet*) του Σχήματος Β.19$_A$ (με *αφιλτράριστες* κυματομορφές). Η ταύτιση των καμπυλών είναι εξαιρετική. Β) συσχέτιση ανάμεσα στην ετεροσυσχέτιση και την καθεμία από τις αυτοσυσχετίσεις του σχήματος Β.21$_A$. Όπως ήταν αναμενόμενο από το σχήμα (Α) τα σημεία βρίσκονται με πολύ καλή προσέγγιση πάνω σε μια ευθεία (συντελεστής συσχέτισης $R_{1,2}$>0.996 και για τα δύο ζεύγη καμπύλων). Γ) η συμμετρία της ετεροσυσχέτισης η οποία είναι επίσης πολύ υψηλή (συντελεστής συμμετρίας $\mathbf{C_s}$=0.992)



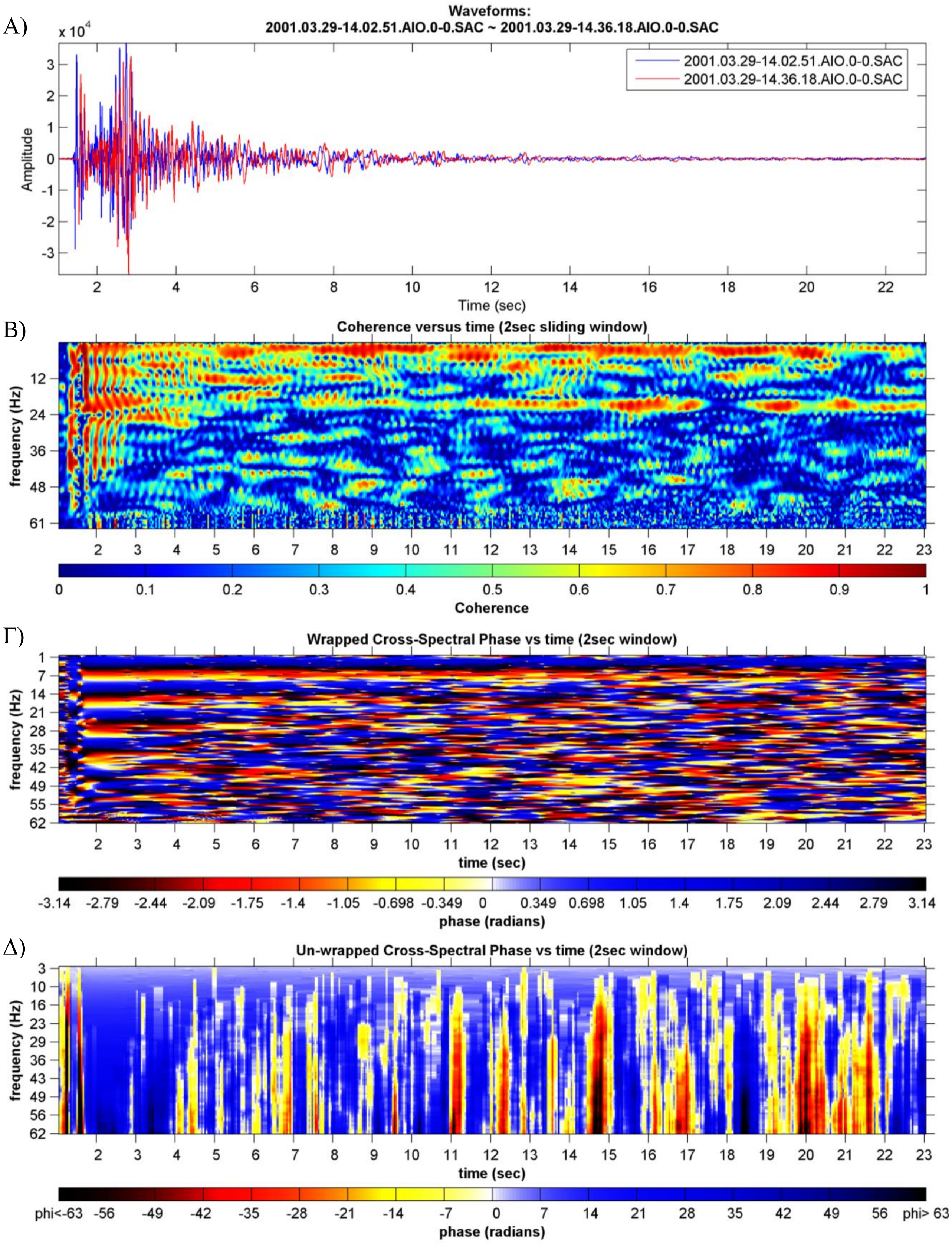
Σχήμα Β.22: Αναδιπλωμένη (wrapped) και μη-αναδιπλωμένη (unwrapped) φάση του ετεροφάσματος για το σεισμικό ζεύγος (*doublet*) του Σχήματος Β.16$_{A}$ σε διάφορες χρονικές μετατοπίσεις των κυματομορφών. Α) κατά 0 δείγματα, Β) κατά 2 δείγματα, Γ) κατά 5 δείγματα, Δ) κατά 15 δείγματα. Η μέση συνοχή ($\mathbf{m_{coh}}$) διατηρείται σε υψηλά επίπεδα ($\mathbf{m_{coh}}$>0.97) παρά τη χρονική μετατόπιση.



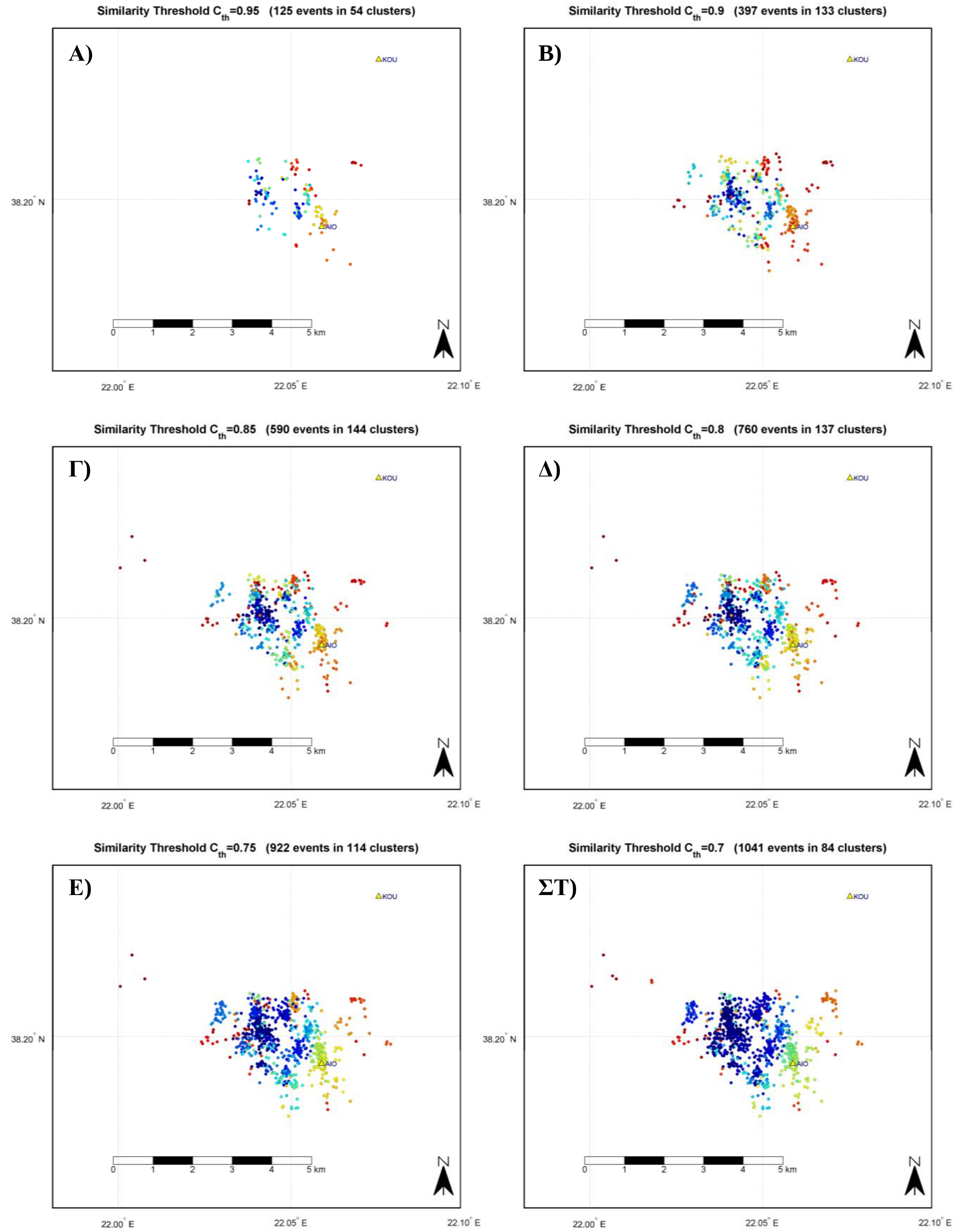
Σχήμα Β.23: Α) Κυματομορφές (*doublet*) στοιχισμένες σε χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$, Β) συνοχή συναρτήσει χρόνου, Γ) φάσματα ισχύος, Δ) φάση ετεροφάσματος, Ε) συνοχή. Παρά την υψηλή συνοχή, η «unwrapped» φάση παρουσιάζει προβλήματα (σε αντίθεση με το σχήμα Β.22_A).



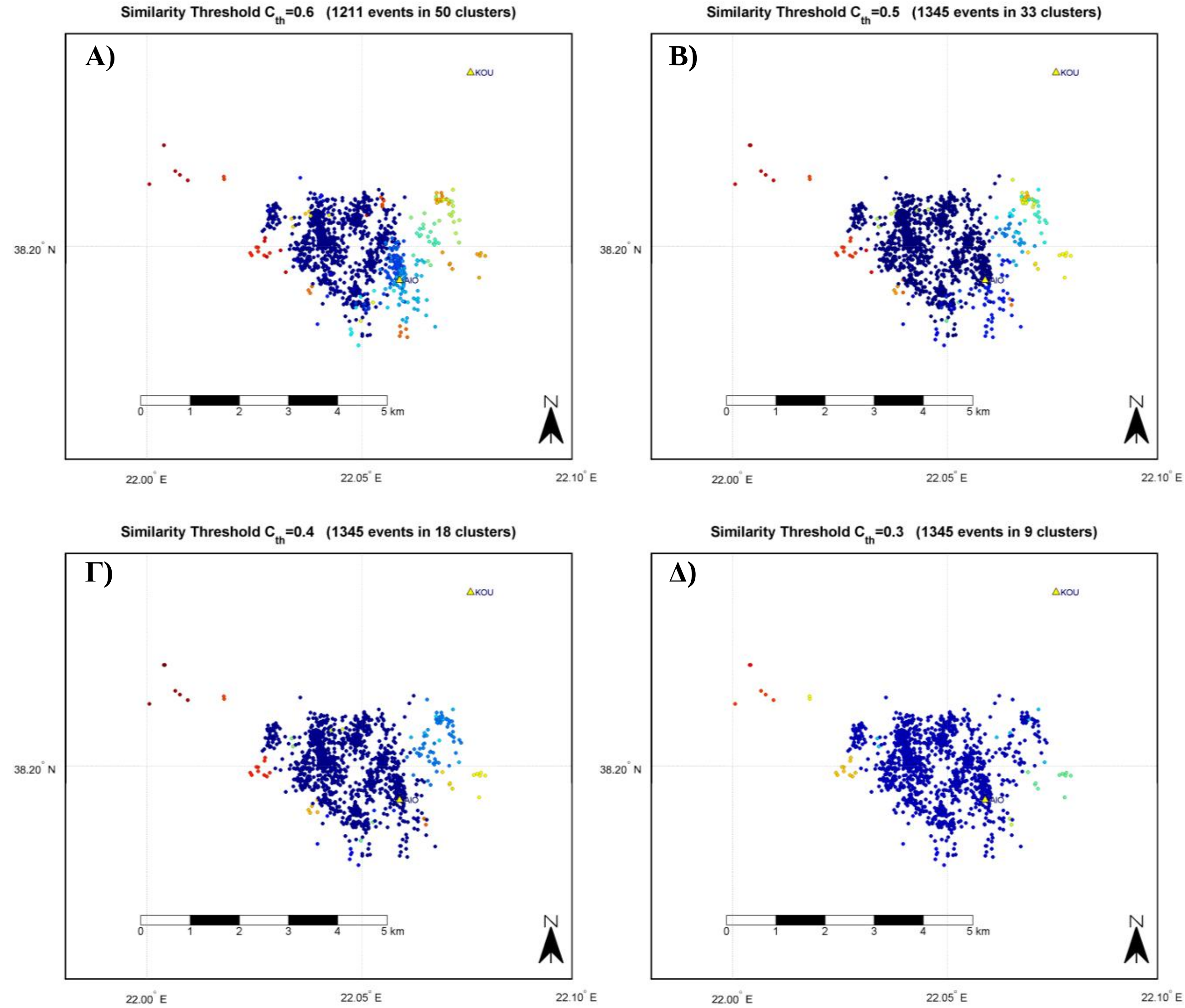
Σχήμα Β.24: Α) Κυματομορφές σεισμικού ζεύγους (*doublet*) στοιχισμένες σε χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$**+0.024sec** (χρονική μετάθεση κατά 3 δείγματα), Β) η χρονική μεταβολή της συνοχής, Γ) ομοίως για την αναδιπλωμένη φάση του ετεροφάσματος, Δ) ομοίως για τη μη-αναδιπλωμένη φάση του ετεροφάσματος σε συχνότητες>2Hz. Παρατηρείται μια διαβάθμιση στη φάση του σχήματος (Δ) από τις χαμηλές προς τις υψηλές συχνότητες, η κλίση **β** της οποίας μας δίνει την κατάλληλη χρονική καθυστέρηση για τη βέλτιστη ταύτιση των κυματομορφών μέσω του τύπου (εξ. 1.8) (Σύγκριση με Σχήματα 1.9, Β.25).



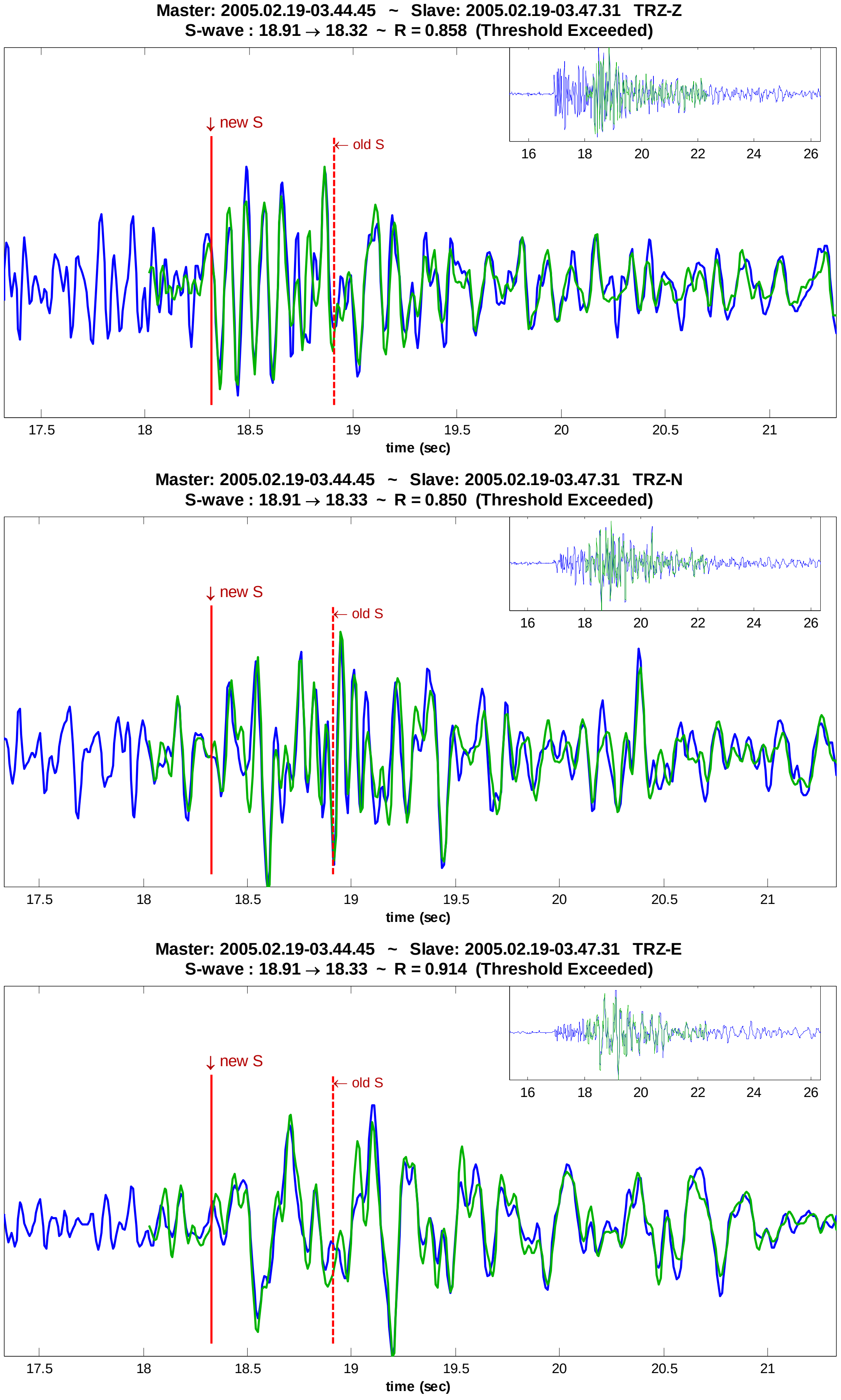
Σχήμα Β.25: Α) Κυματομορφές σεισμικού ζεύγους (*doublet*) στοιχισμένες σε χρόνο $\boldsymbol{\tau_m}$**+0.104sec** (χρονική μετάθεση κατά 13 δείγματα), Β) η χρονική μεταβολή της συνοχής, Γ) ομοίως για την αναδιπλωμένη φάση του ετεροφάσματος, Δ) ομοίως για τη μη-αναδιπλωμένη φάση του ετεροφάσματος σε συχνότητες>2Hz. Η διαβάθμιση στη φάση του σχήματος (Δ) είναι πιο έντονη από αυτή του σχήματος Β.24$_Δ$ ενώ στο σχήμα (Γ) διακρίνεται η «πριονωτή» μορφή της αναδιπλωμένης φάσης. Η συνοχή (Β) είναι φανερά μειωμένη σε σχέση με το Σχήμα Β.24$_B$ (Σύγκριση με Σχήματα 1.9, Β.24).



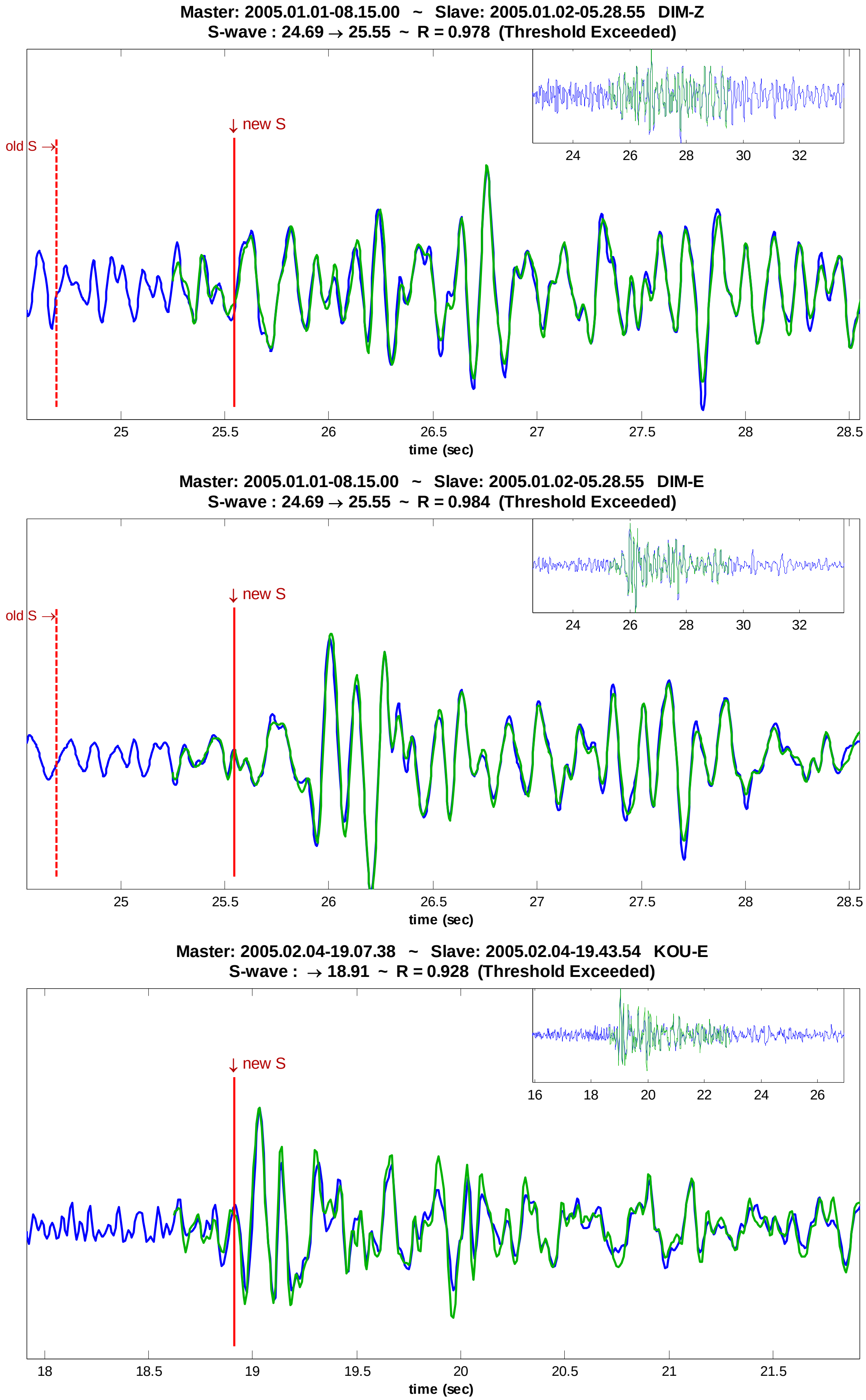
Σχήμα Β.26: Επίκεντρα της Ομάδας Α (Κεφ. 4) μετά τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD. Με διαφορετικό χρώμα απεικονίζονται οι διαφορετικές συστάδες σμηνοσεισμών που δημιουργούνται στις διάφορες τιμές κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$. Α) C_{th}=0.95, Β) C_{th}=0.90, Γ) C_{th}=0.85, Δ) C_{th}=0.80, Ε) C_{th}=0.75, ΣΤ) C_{th}=0.70.



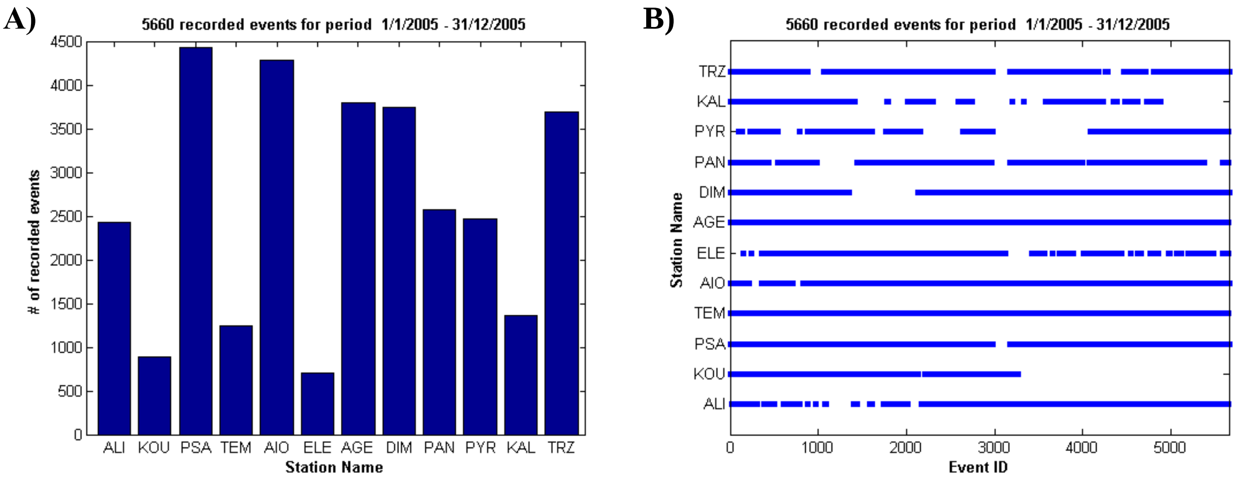
Σχήμα Β.27: (Συνέχεια από το προηγούμενο) Επίκεντρα της Ομάδας Α (Κεφ. 4) μετά τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD. Α) C_{th}=0.60, Β) C_{th}=0.50, Γ) C_{th}=0.40, Δ) C_{th}=0.30.



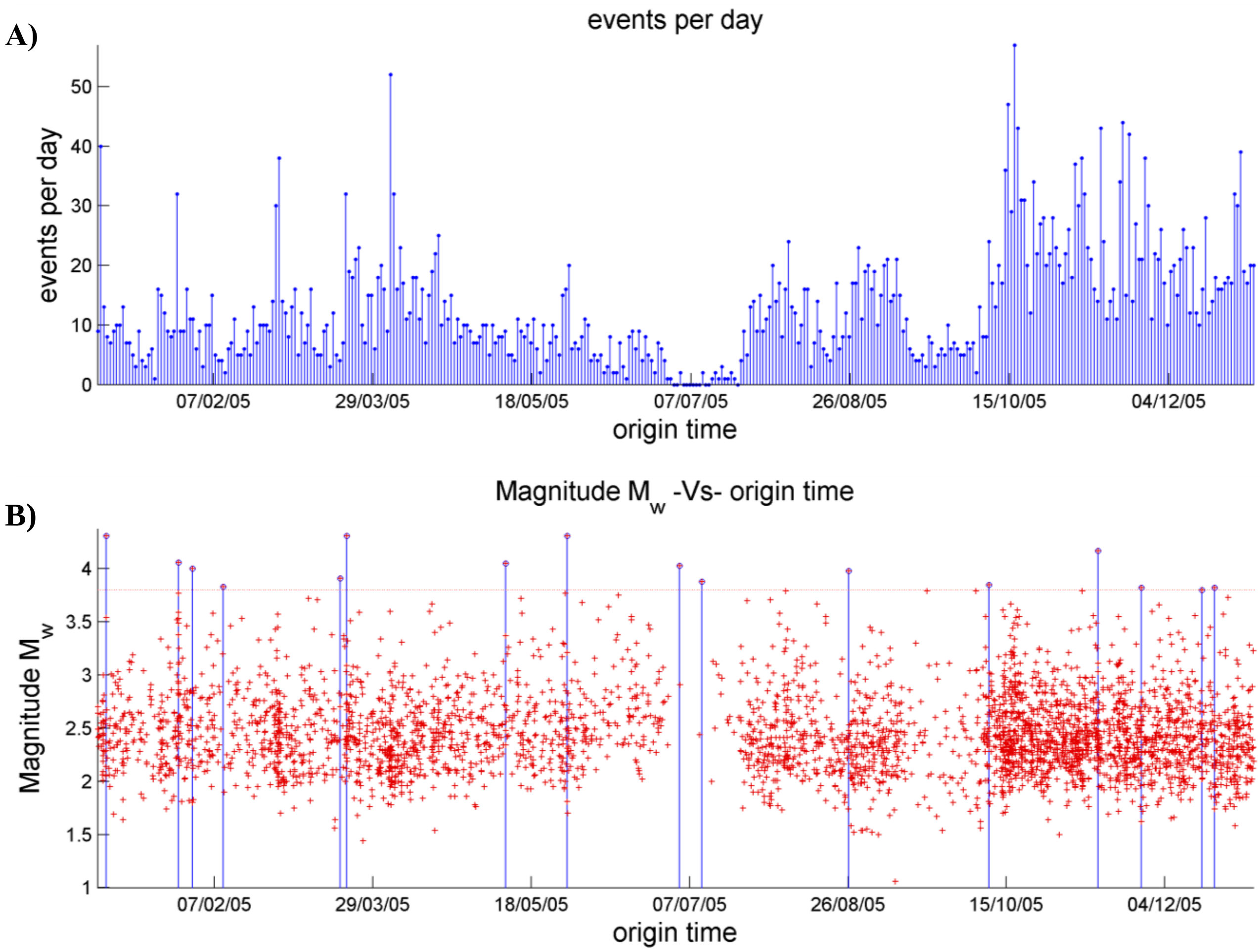
Σχήμα Β.28: Παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου των κύριων γεγονότων (Κεφ. 5)



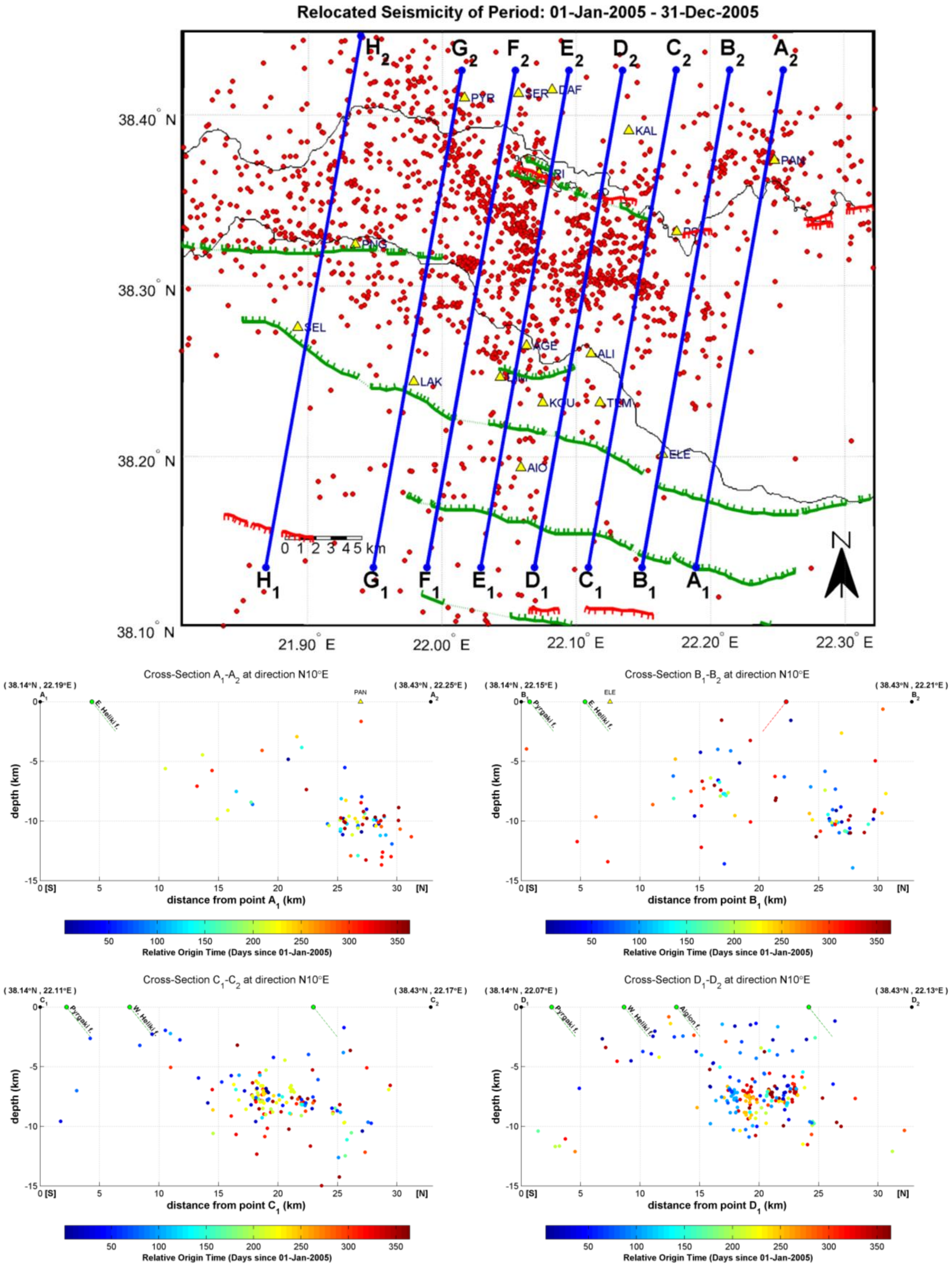
Σχήμα B.29: Παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου των κύριων γεγονότων (Κεφ. 5)



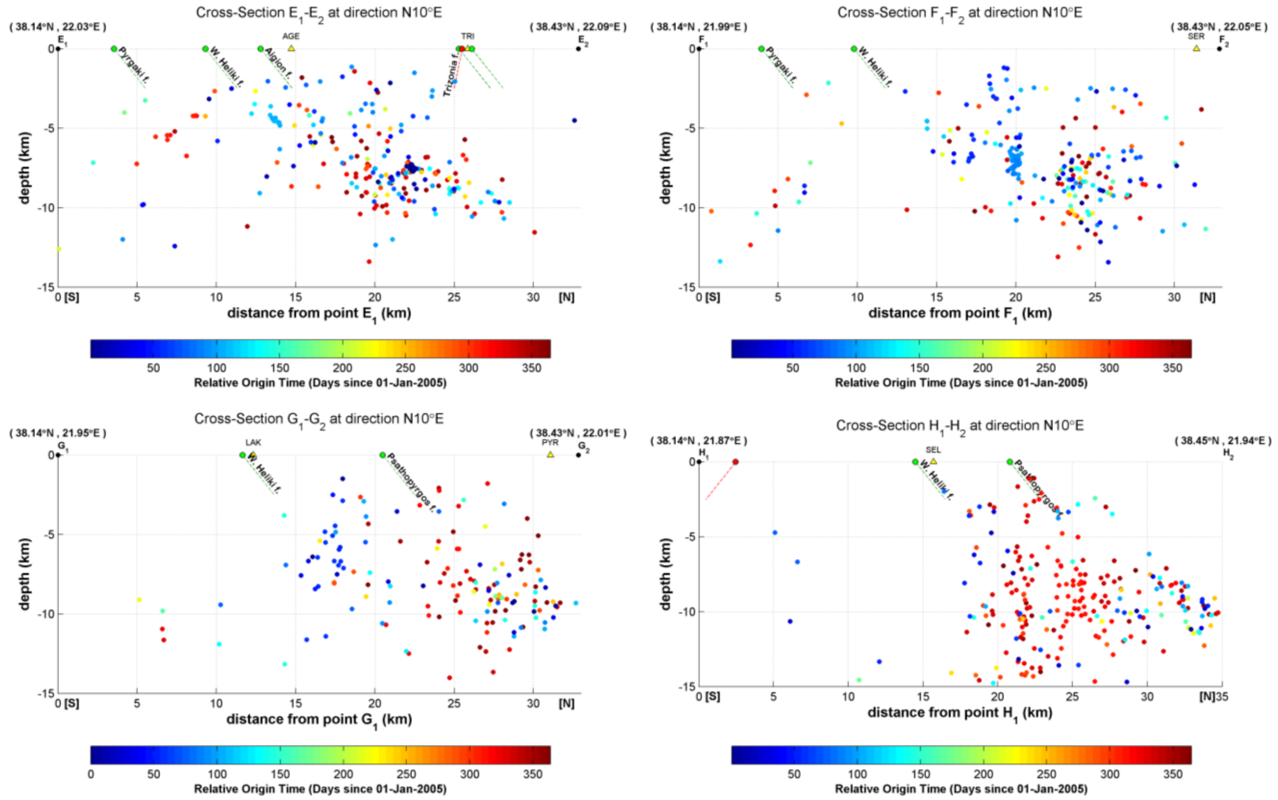
Σχήμα Β.30: διαθεσιμότητα σταθμών για το έτος 2005



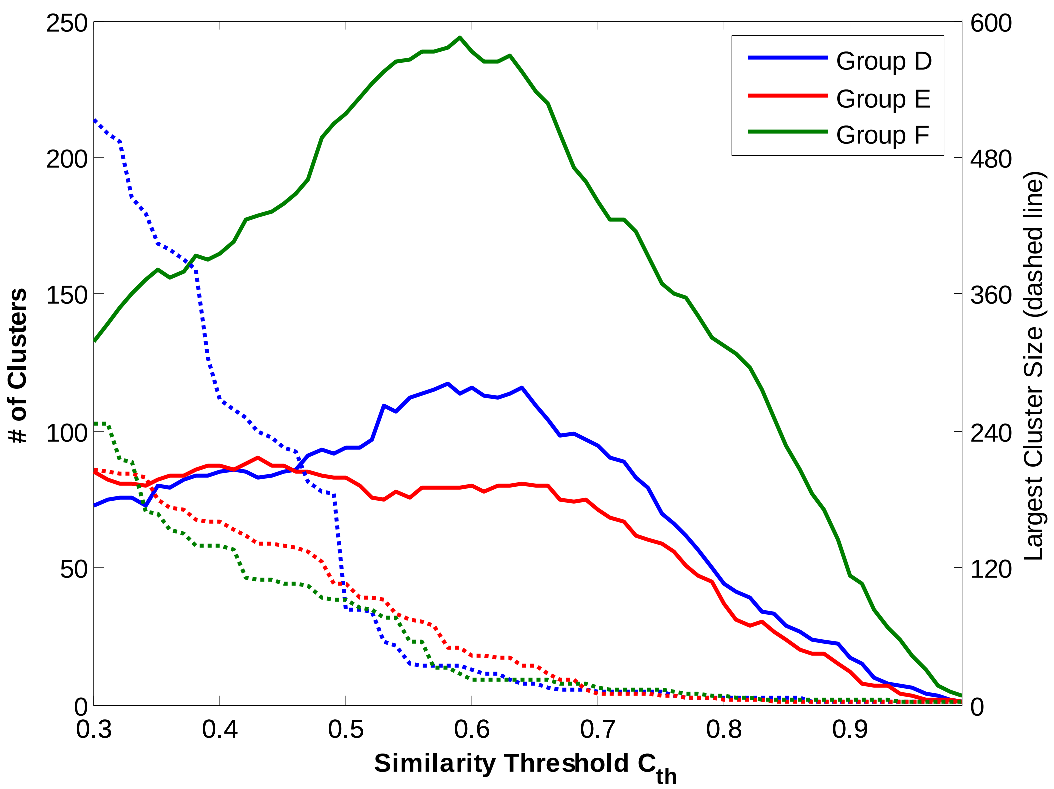
Σχήμα Β.31: Α) αριθμός σεισμών ανά ημέρα για το έτος 2005. Β) μεγέθη ροπής, $\mathbf{M_w}$, για τη σεισμικότητα του 2005.



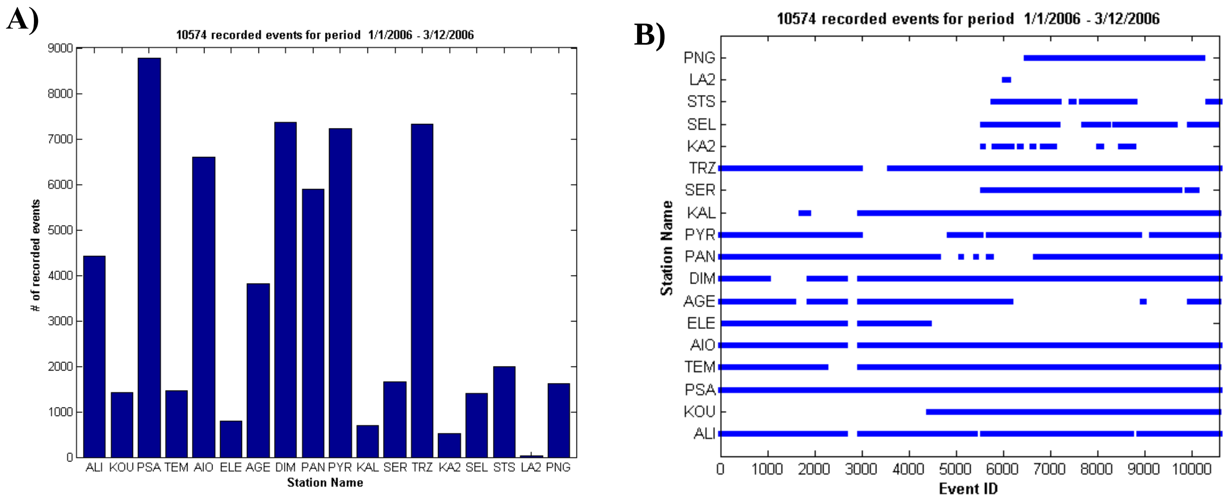
Σχήμα Β.32: Τομές σε διεύθυνση N10°E για τη σεισμικότητα του έτους 2005 μετά τον επαναπροσδιορισμό με HypoDD. Το χρώμα αντιστοιχεί σε χρόνο γένεσης.



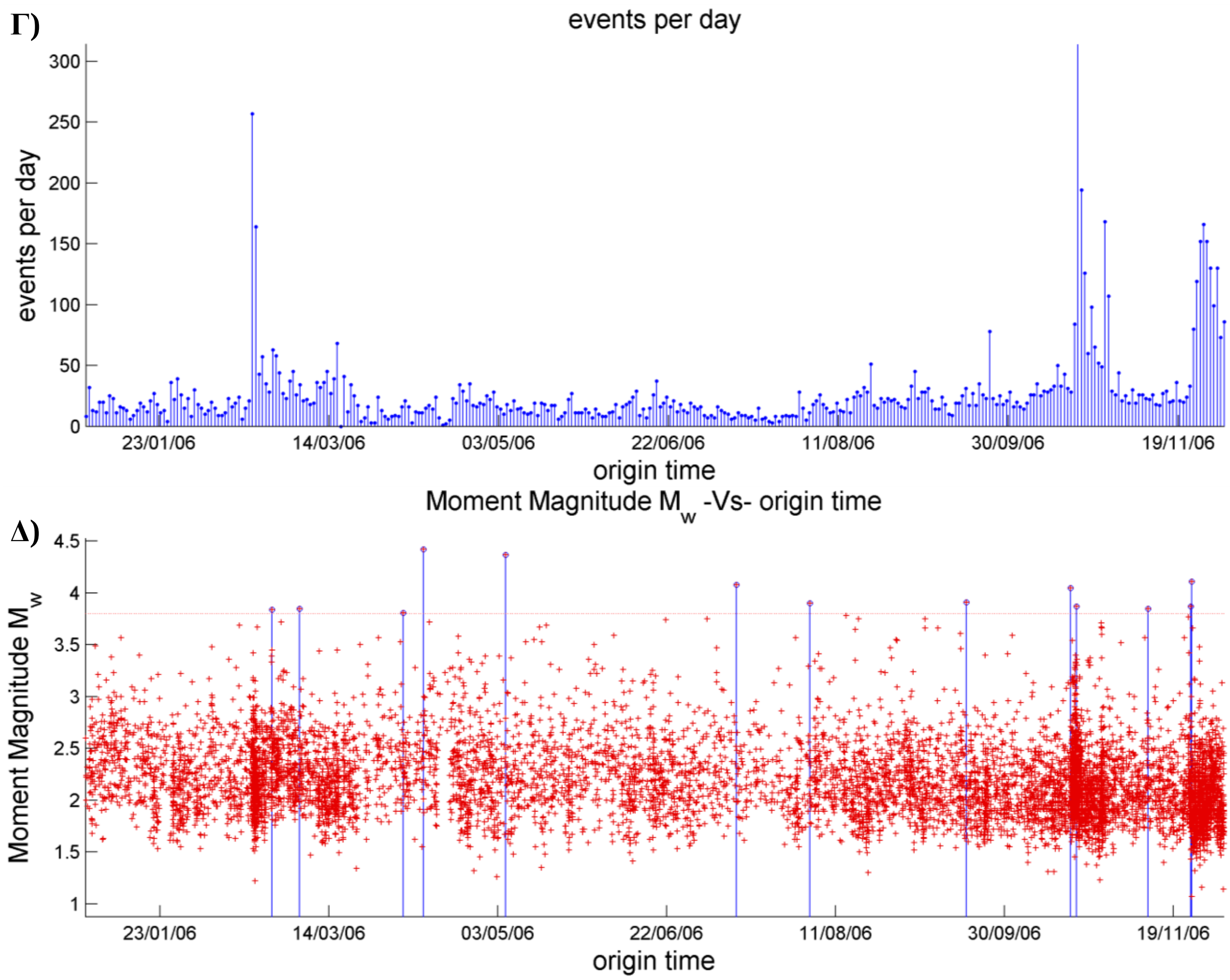
Σχήμα Β.33: (συνέχεια από το προηγούμενο) Τομές E_1-E_2, F_1-F_2, G_1-G_2 και H_1-H_2.



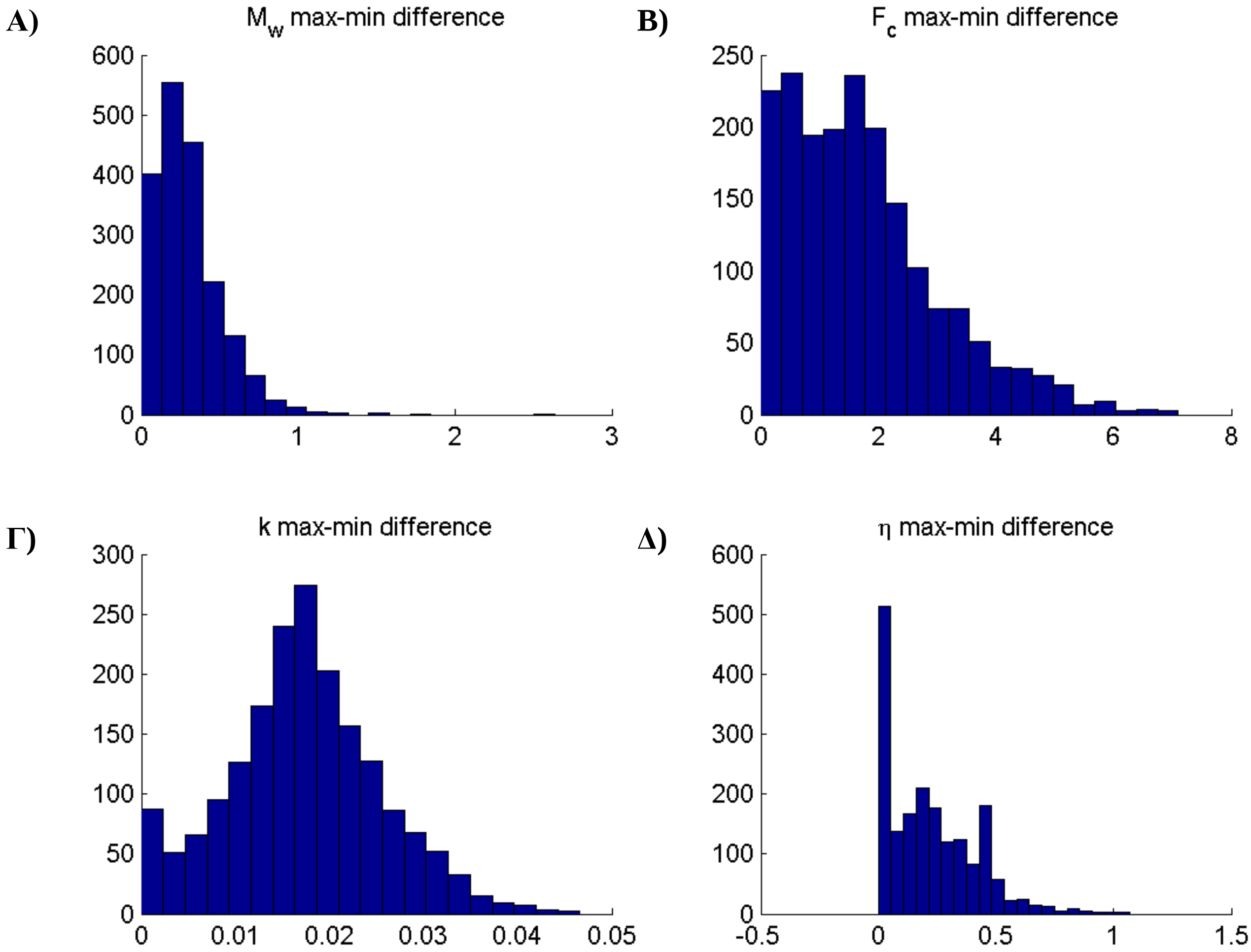
Σχήμα Β.34: αριθμός συστάδων σμηνοσεισμών (συμπαγείς γραμμές, αριστερός κατακόρυφος άξονας) και μέγεθος μεγαλύτερης συστάδας (διακεκομμένες γραμμές, δεξιός κατακόρυφος άξονας) που δημιουργούνται σε κάθε τιμή κατωφλίου για τις 3 ομάδες της σεισμικότητας του 2006.



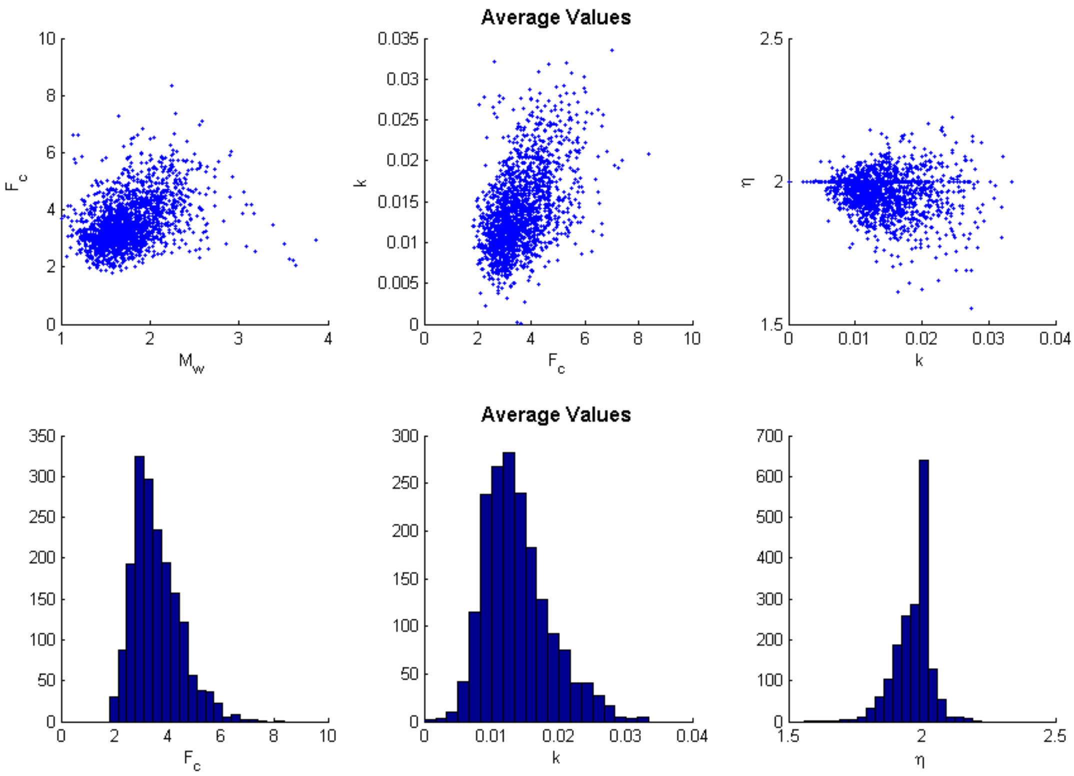
Σχήμα Β.35: διαθεσιμότητα σταθμών για το έτος 2006



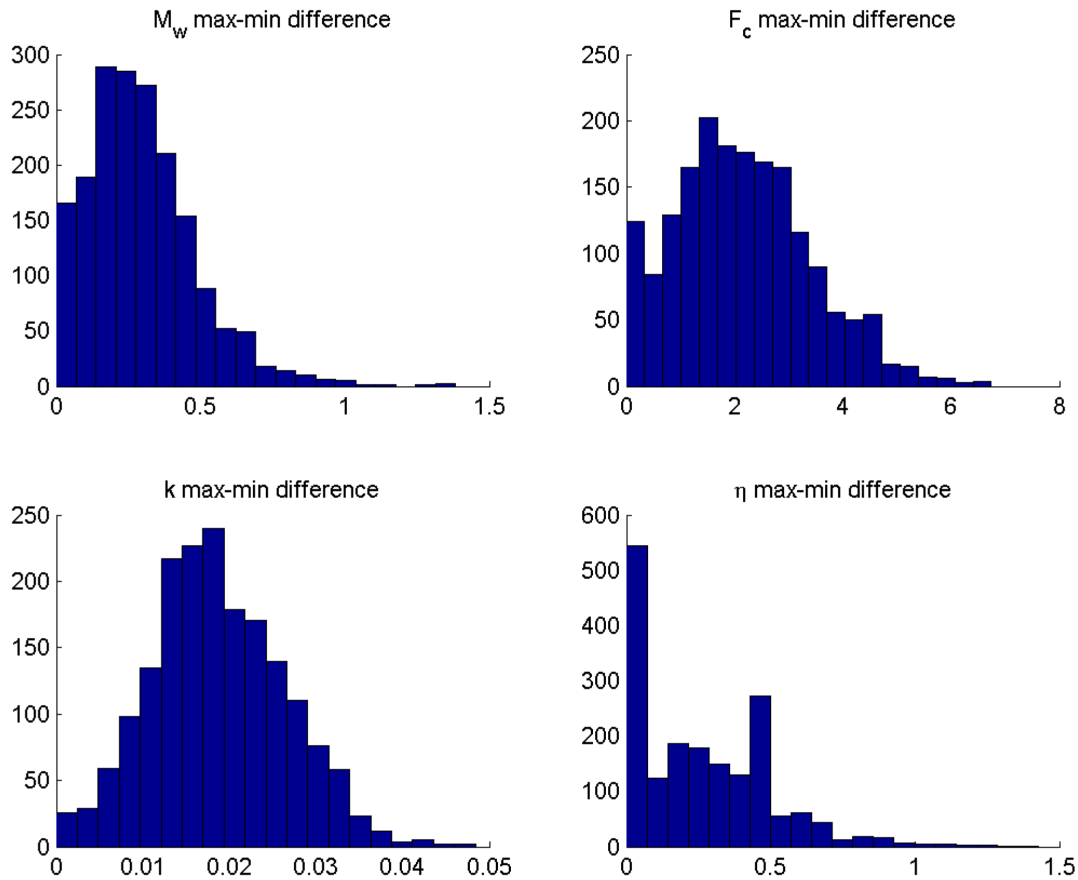
Σχήμα Β.36 Πλήρης σεισμικότητα 2006: Α) Αριθμός σεισμών ανά ημέρα, Β) Μεγέθη $\mathbf{M_w}$ συναρτήσει χρόνου γένεσης.



Σχήμα Β.37: κατανομές διαφοράς ανάμεσα στη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή των παραμέτρων **M_w**, **f_c**, **k**, **η** από τις διάφορες παρατηρήσεις για κάθε σεισμό (Ομάδα Α)

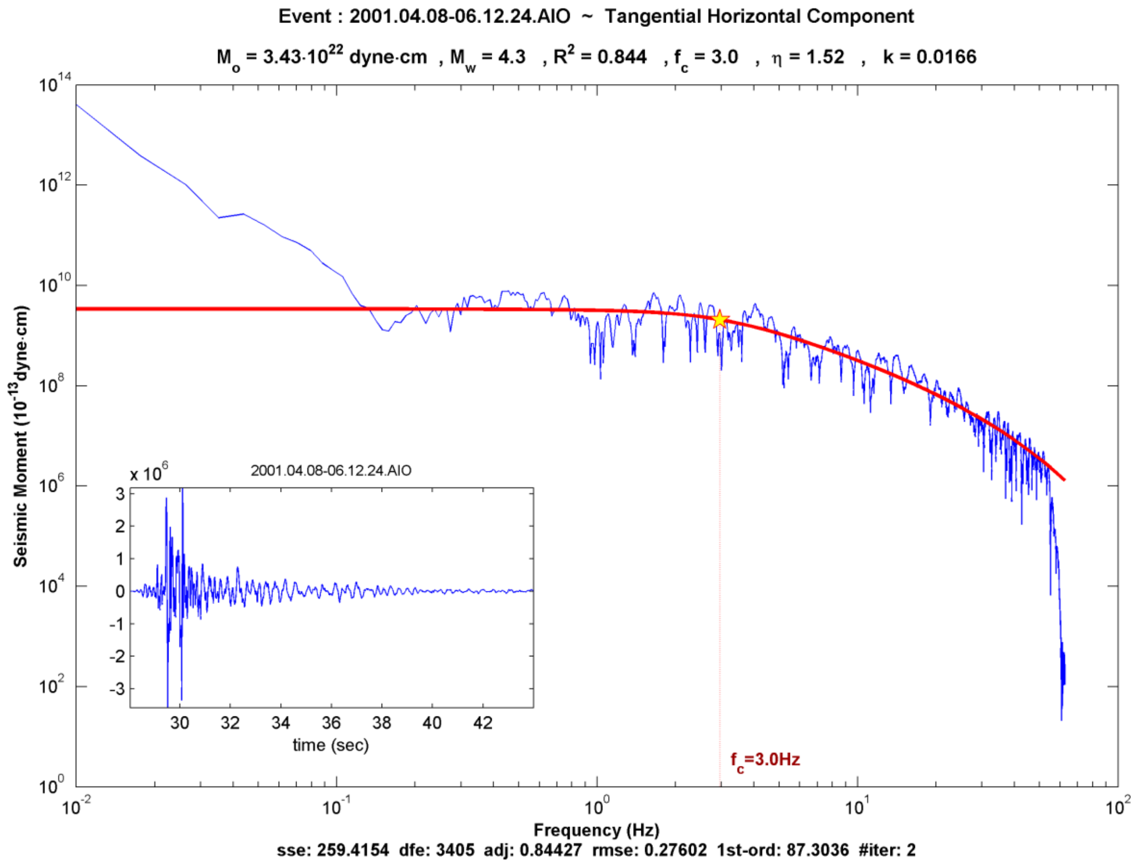


Σχήμα Β.38: κατανομές μέσων τιμών M_w, F_c, k, η για τους σεισμούς της Ομάδας Β

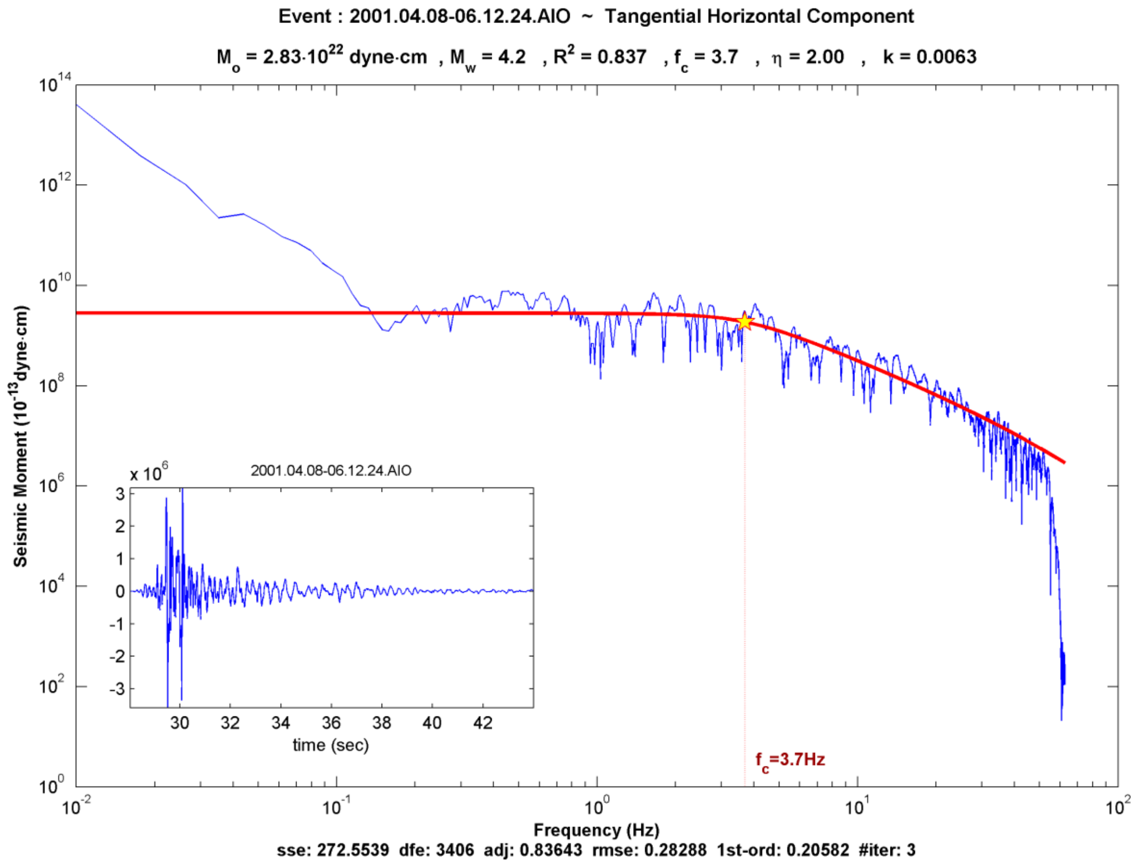


Σχήμα Β.39: κατανομές διαφοράς ανάμεσα στη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή των παραμέτρων Mw, Fc, k, η από τις διάφορες παρατηρήσεις για κάθε σεισμό (Ομάδα Β)

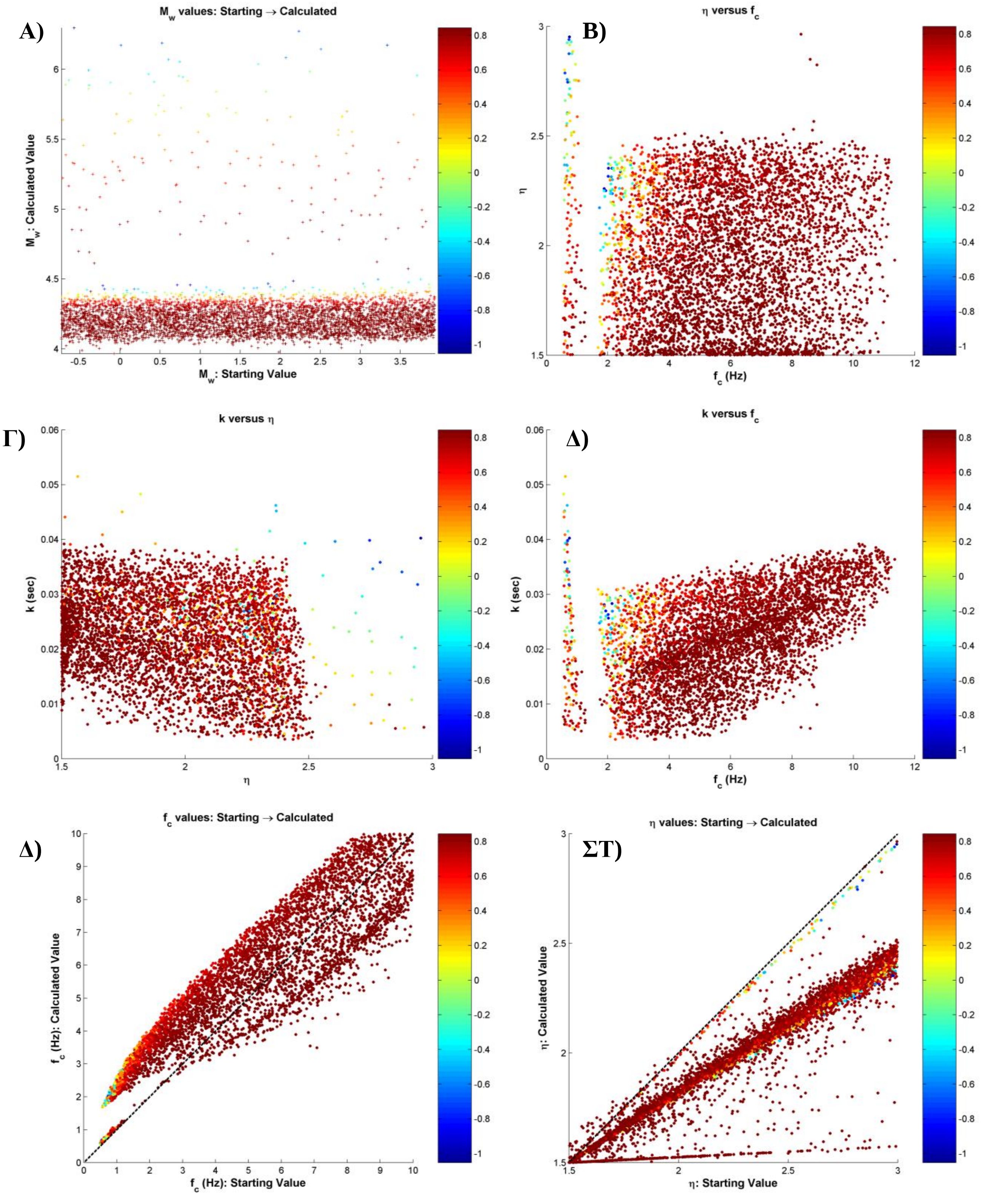
A)



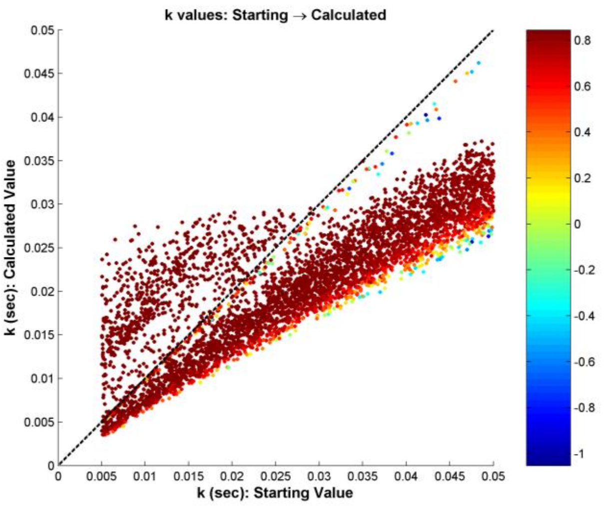
B)



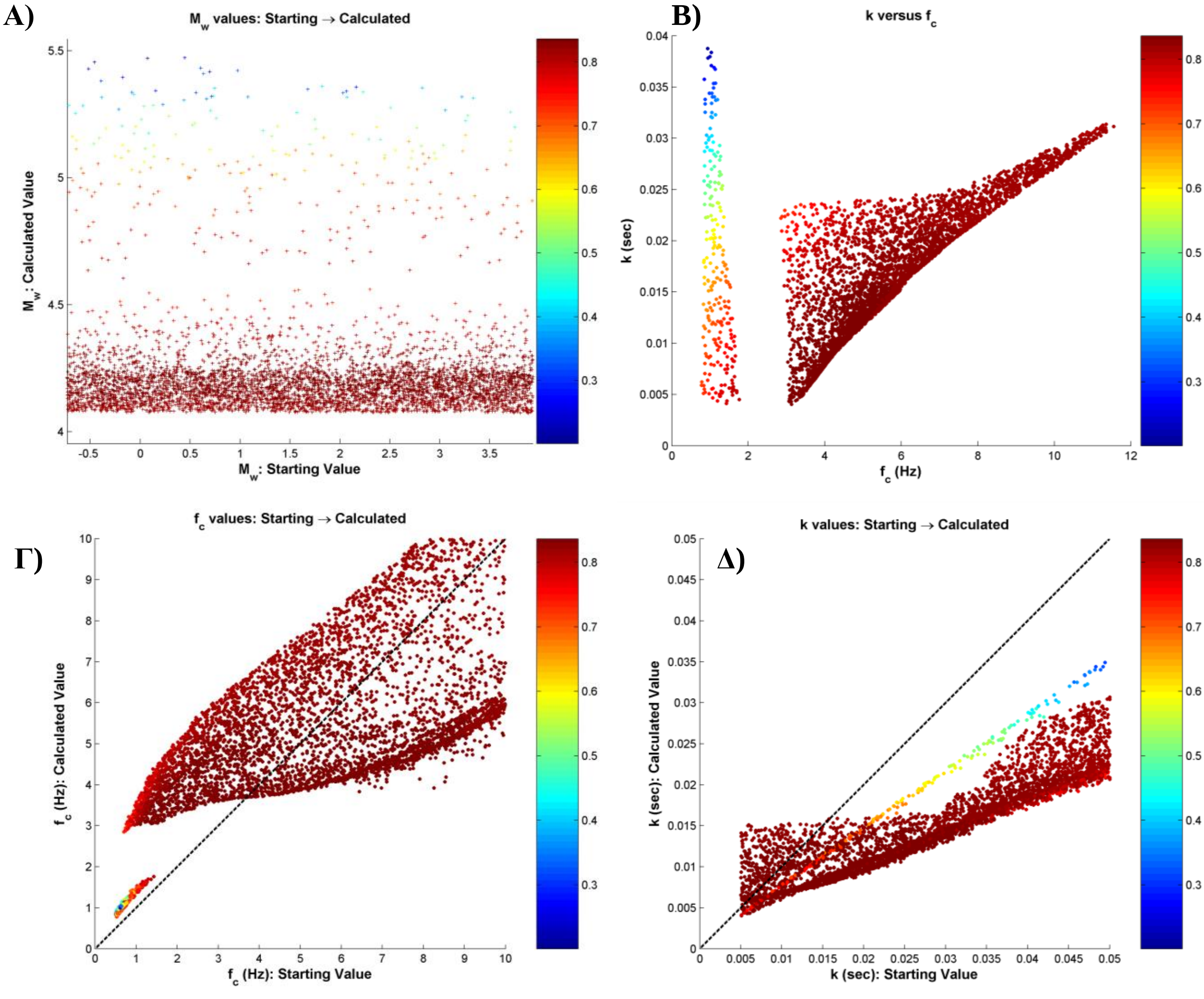
Σχήμα Β.40: Φασματικά πλάτη της εφαπτομενικής συνιστώσας για την καταγραφή του κύριου σεισμού του «Σμήνους του AIO (2001)» στον σταθμό AIO. A) βέλτιστη λύση (από 5000 λύσεις) με ελεύθερο η από 1.5-3.0. B) βέλτιστη λύση (από 5000 λύσεις) για σταθερό η=2.0 (*βλέπε επόμενα σχήματα για περισσότερα*).



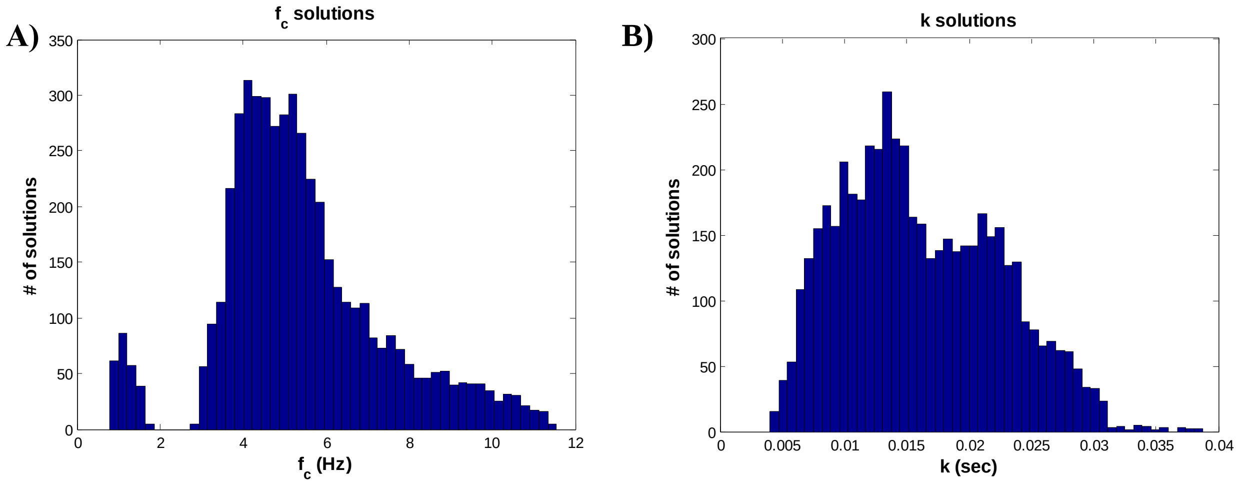
Σχήμα Β.41: αποτελέσματα 5000 λύσεων της συνάρτησης προσαρμογής (εξ 2.17) στο φάσμα του Σχήματος Β.40 με διαφορετικές αρχικές τιμές και με **ελεύθερη** την παράμετρο **η** από 1.5-3.0. Το χρώμα αντιστοιχεί σε τιμή του συντελεστή πολλαπλής συσχέτισης (*coefficient of multiple determination*) R^2. Α) αρχικές και τελικές τιμές για το $\mathbf{M_w}$ (οι αρχικές είχαν δοθεί ως $\log_{10}M_o$, στο σχήμα παρουσιάζεται το ισοδύναμο M_w). Η μέση τιμή είναι 4.24 και η τυπική απόκλιση 0.22. Χαρακτηριστική είναι η σταθερότητα της λύσης γύρω από τη μέση τιμή ανεξάρτητα από την αρχική τιμή που δίνεται. Β) σύγκριση λύσεων για τις τιμές **η** (κατακόρυφος άξονας) και $\mathbf{f_c}$ όπου δεν παρουσιάζεται καμία ιδιαίτερη συσχέτιση ή σταθερότητα. Γ) λύσεις για τις τιμές **k** και **η**. Δ) λύσεις για τις τιμές **k** και $\mathbf{f_c}$, Ε) αρχικές και τελικές τιμές f_c. ΣΤ) αρχικές και τελικές τιμές **η**. (*βλέπε επόμενο σχήμα για σχόλια*)



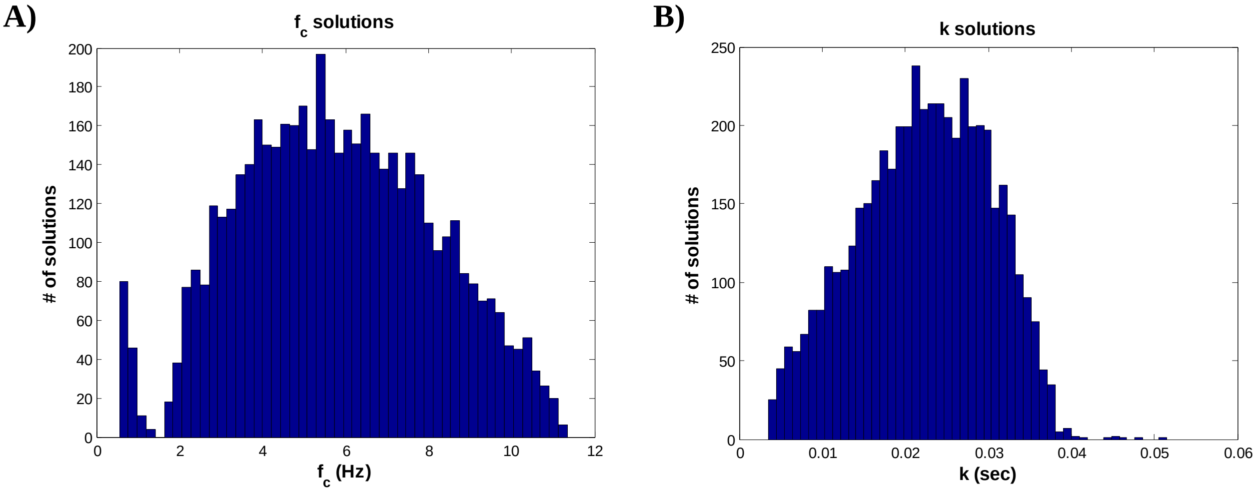
Σχήμα Β.42: (συνέχεια από το προηγούμενο) αρχικές και τελικές τιμές **k** με μεταβλητό **η**. Στο σχήμα αυτό καθώς και στα σχήματα Β.41$_{Ε,ΣΤ}$ φαίνεται ένα είδος θετικής συσχέτισης ως προς τις αρχικές τιμές που επιλέχθηκαν. Αυτό δείχνει εξάρτηση από τις αρχικές τιμές και άρα οι λύσεις για τα **η**, **f$_c$** και **k** δεν είναι αξιόπιστες, κάτι που επιβεβαιώνουν και τα Σχήματα Β.41$_{Β,Γ,Δ}$ που δείχνουν ότι προκύπτουν καλές λύσεις (υψηλό R^2) για πολλούς διαφορετικούς συνδυασμούς **η**, **k** και **f$_c$**.



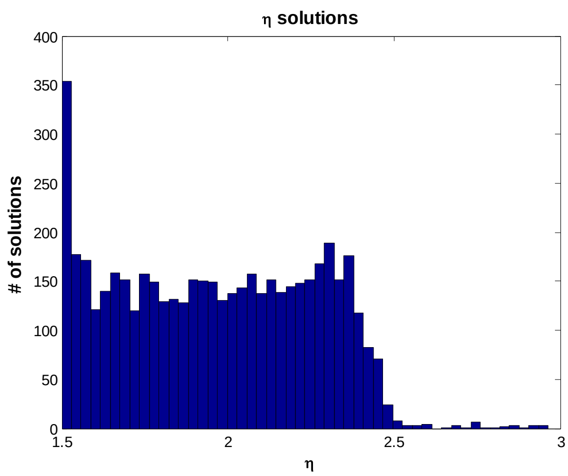
Σχήμα Β.43: όμοια με τα προηγούμενα σχήματα αλλά για λύσεις με **σταθερή** την παράμετρο **η=2.0**. Α) αρχικές και τελικές τιμές για το **M$_w$** (οι αρχικές είχαν δοθεί ως $\log_{10}M_o$, στο σχήμα παρουσιάζεται το ισοδύναμο M_w). Η μέση τιμή είναι 4.23 και η τυπική απόκλιση 0.20. Όπως και στην περίπτωση μεταβλητού **η** έτσι και εδώ η λύση του M_w παρουσιάζει μια χαρακτηριστική σταθερότητα ανεξάρτητα από την αρχική τιμή που έχει δοθεί στο $\log_{10}M_o$. Β) λύσεις για τις τιμές **k** και **f$_c$** με σταθερό **η=2.0**. Η εξάρτηση της λύσης του **k** από το **f$_c$** είναι πιο έντονη σε αυτή την περίπτωση απ' ότι στο Σχήμα Β.41$_Δ$ με μεταβλητό **η**. Γ) αρχικές και τελικές τιμές **f$_c$**. Δ) αρχικές και τελικές τιμές k. Στα σχήματα Γ, Δ παρουσιάζεται μια ιδιόμορφη θετική συσχέτιση, όχι όμως κάποια σταθερότητα στη λύση ανεξάρτητη από τις αρχικές τιμές.



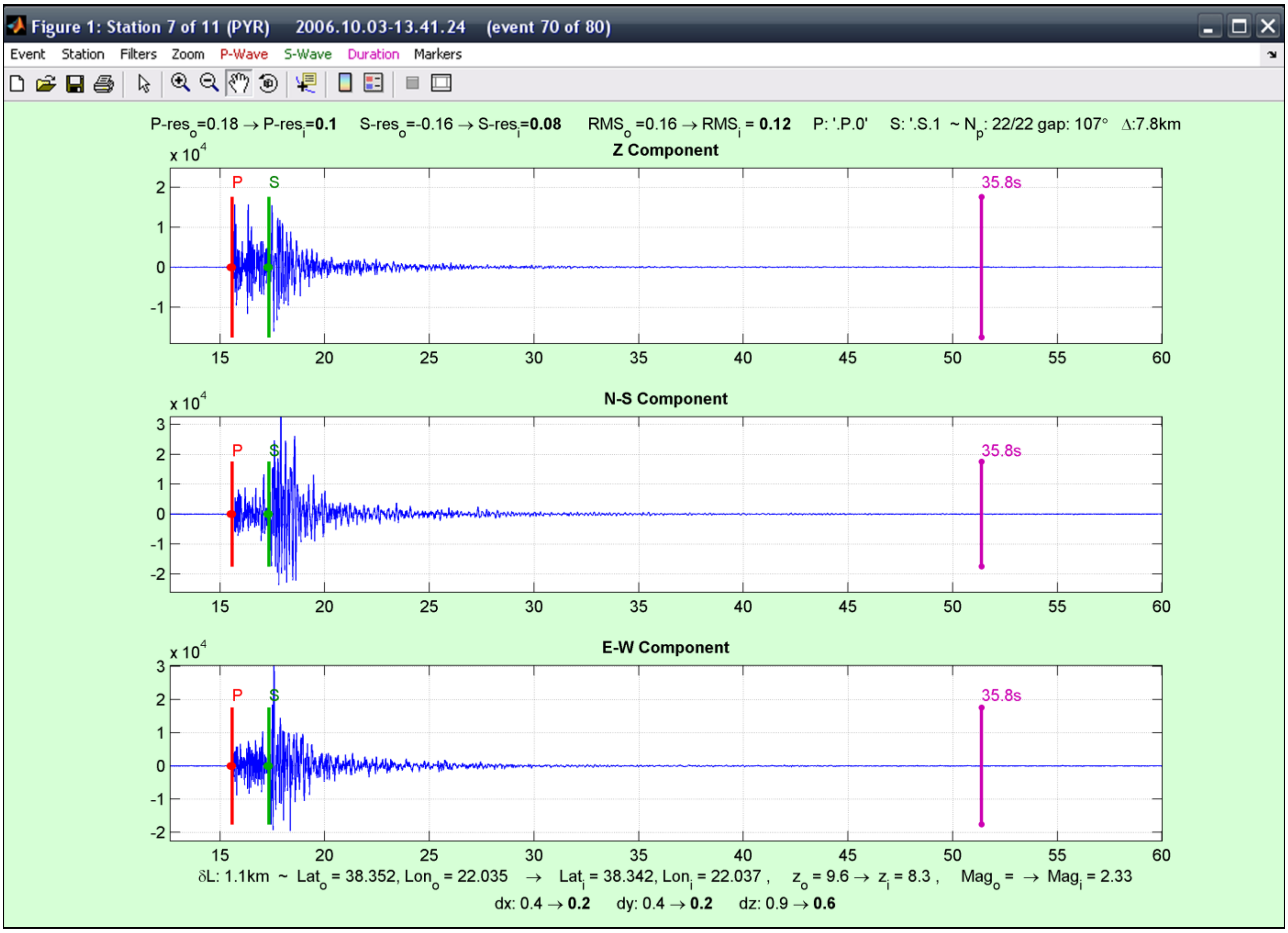
Σχήμα Β.44: 5000 λύσεις (βλέπε προηγούμενα σχήματα) f_c και k με σταθερό η=2



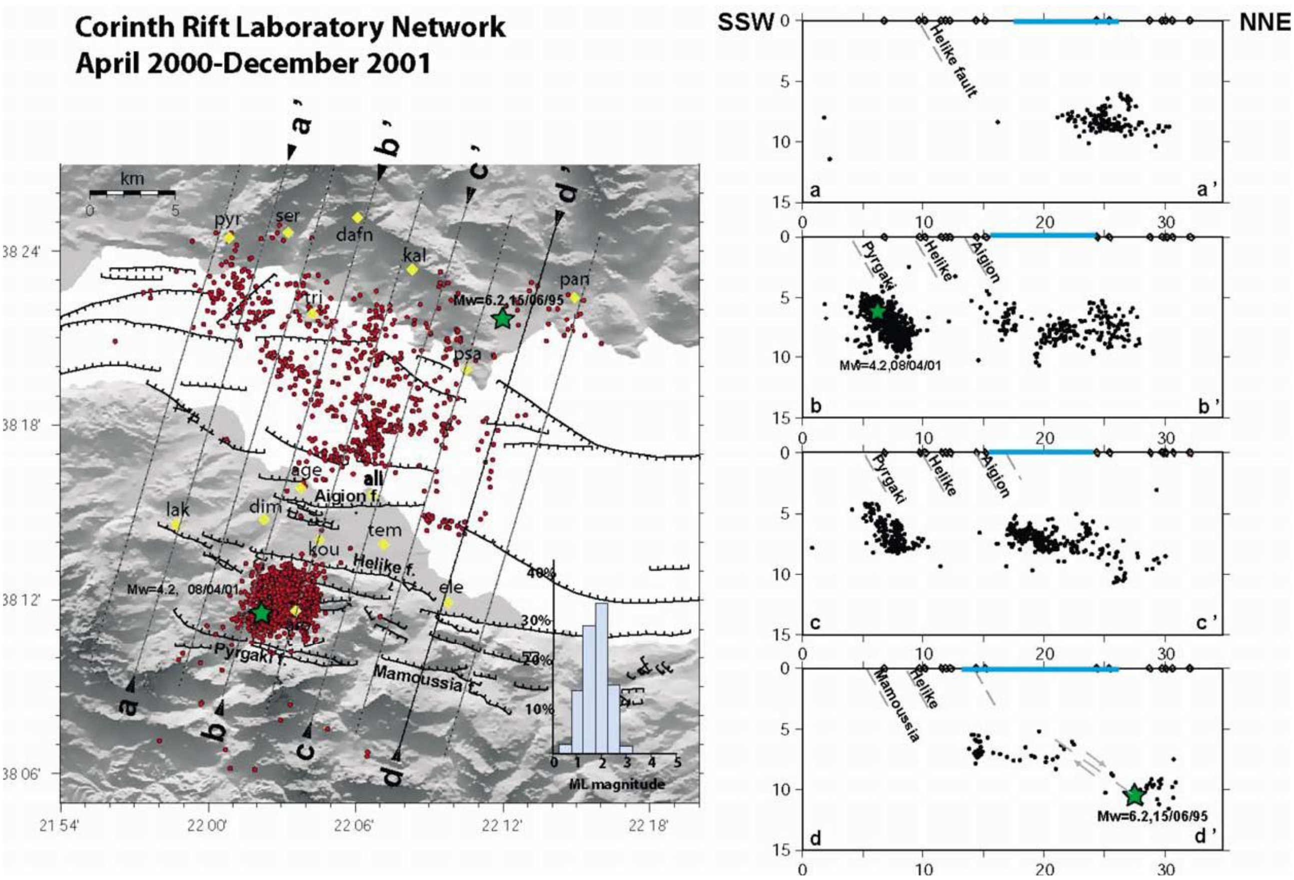
Σχήμα Β.45: 5000 λύσεις (βλέπε προηγούμενα σχήματα) f_c και k με μεταβλητό **η**



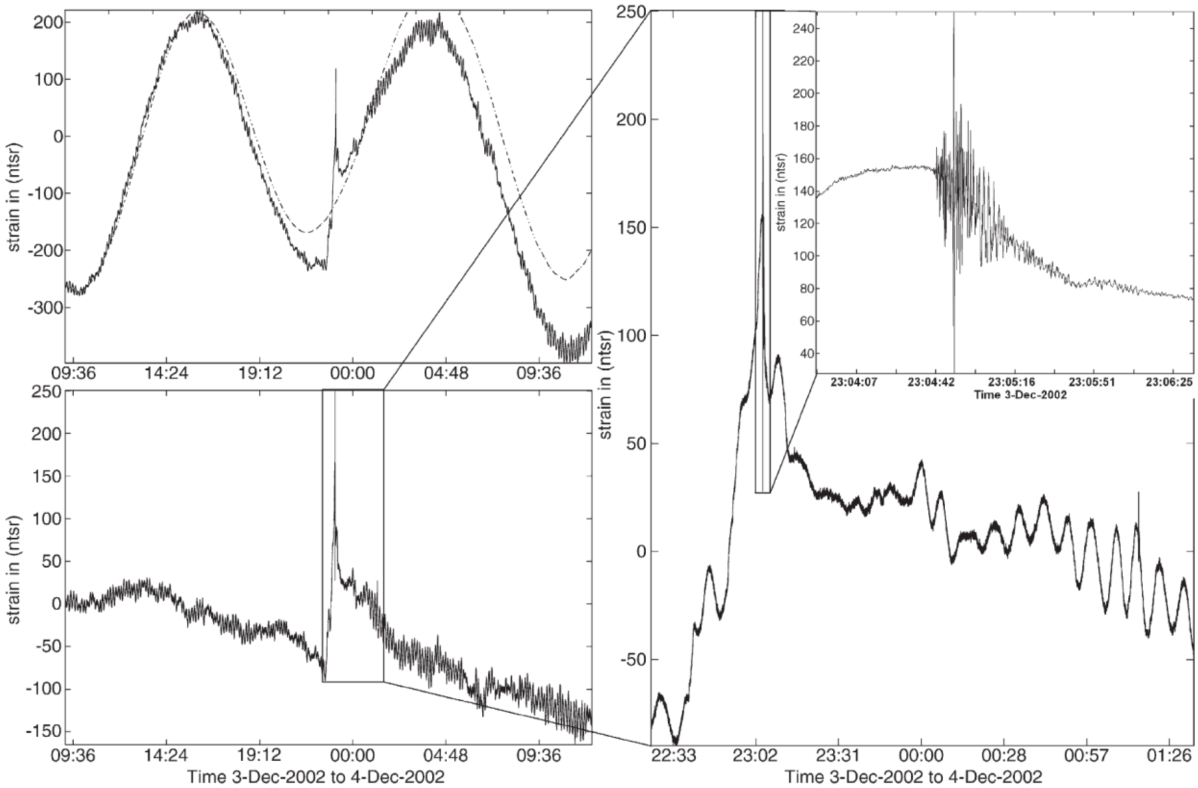
Σχήμα Β.46: 5000 λύσεις (βλέπε προηγούμενα σχήματα) για τις μεταβλητές τιμές **η**



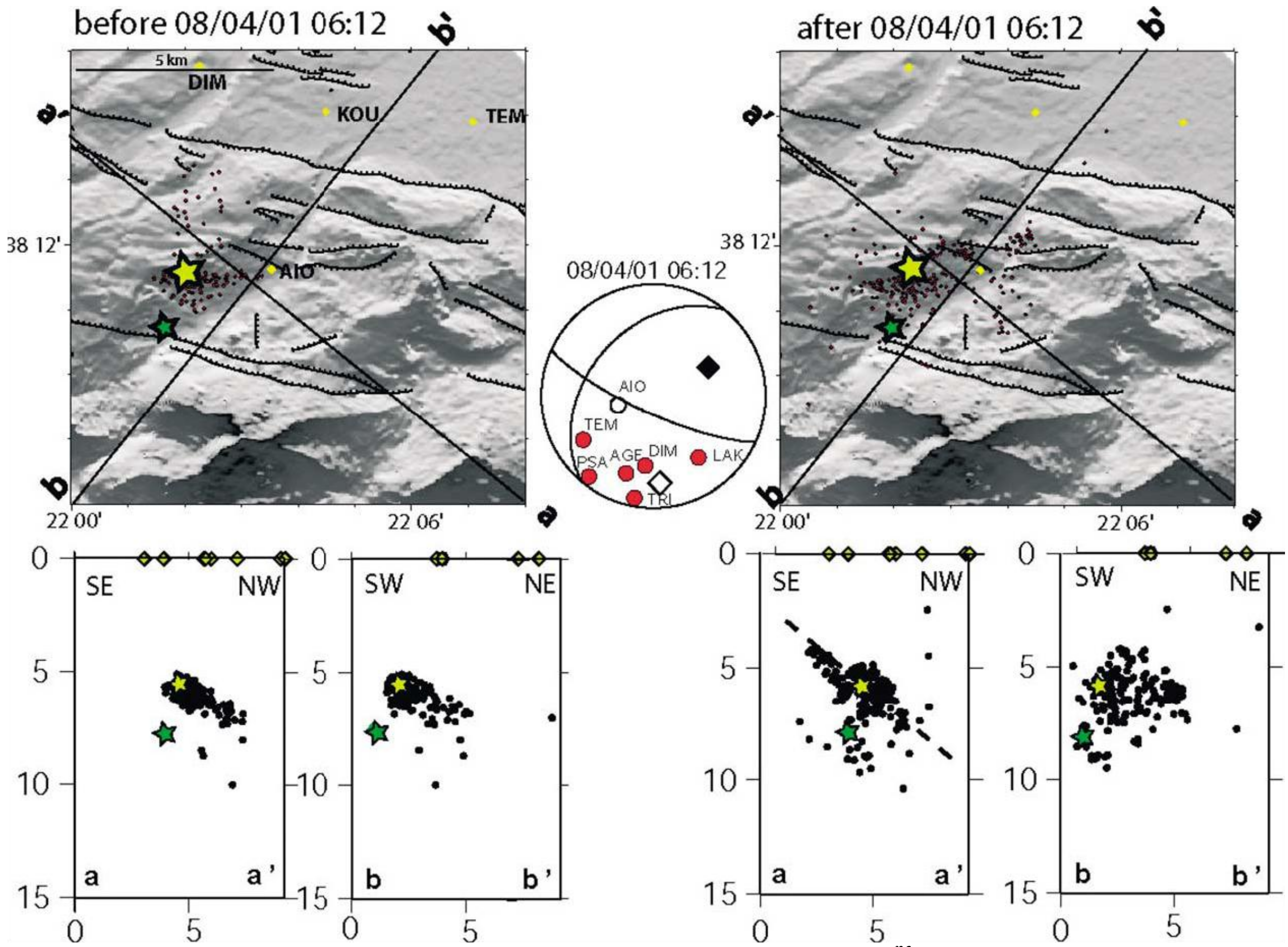
Σχήμα Β.47: εικόνα από το πρόγραμμα LOCATION.m, γραμμένο σε MATLAB Script. Πρόκειται για γραφικό περιβάλλον προσδιορισμού και επαναπροσδιορισμού χρόνων άφιξης για την κατασκευή αρχείων φάσεων που εισάγονται αυτόματα στο πρόγραμμα HYPO71 (*Lee & Lahr, 1972*) κάθε φορά που γίνεται μια προσθήκη/διόρθωση. Το αποτέλεσμα του HYPO71 ανατροφοδοτεί το LOCATION.m και στην οθόνη παρουσιάζονται αμέσως η νέα θέση του επικέντρου, τα νέα σφάλματα RMS και θέσης dx,dy,dz και άλλα στοιχεία. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα με δείκτη **o** στα P-res, S-res, RMS κτλ συμβολίζονται οι *αρχικές* τιμές (από τα αρχικά δεδομένα) ενώ με δείκτη i οι αντίστοιχες τιμές *μετά* τη διόρθωση με τη βοήθεια του προγράμματος αυτού.



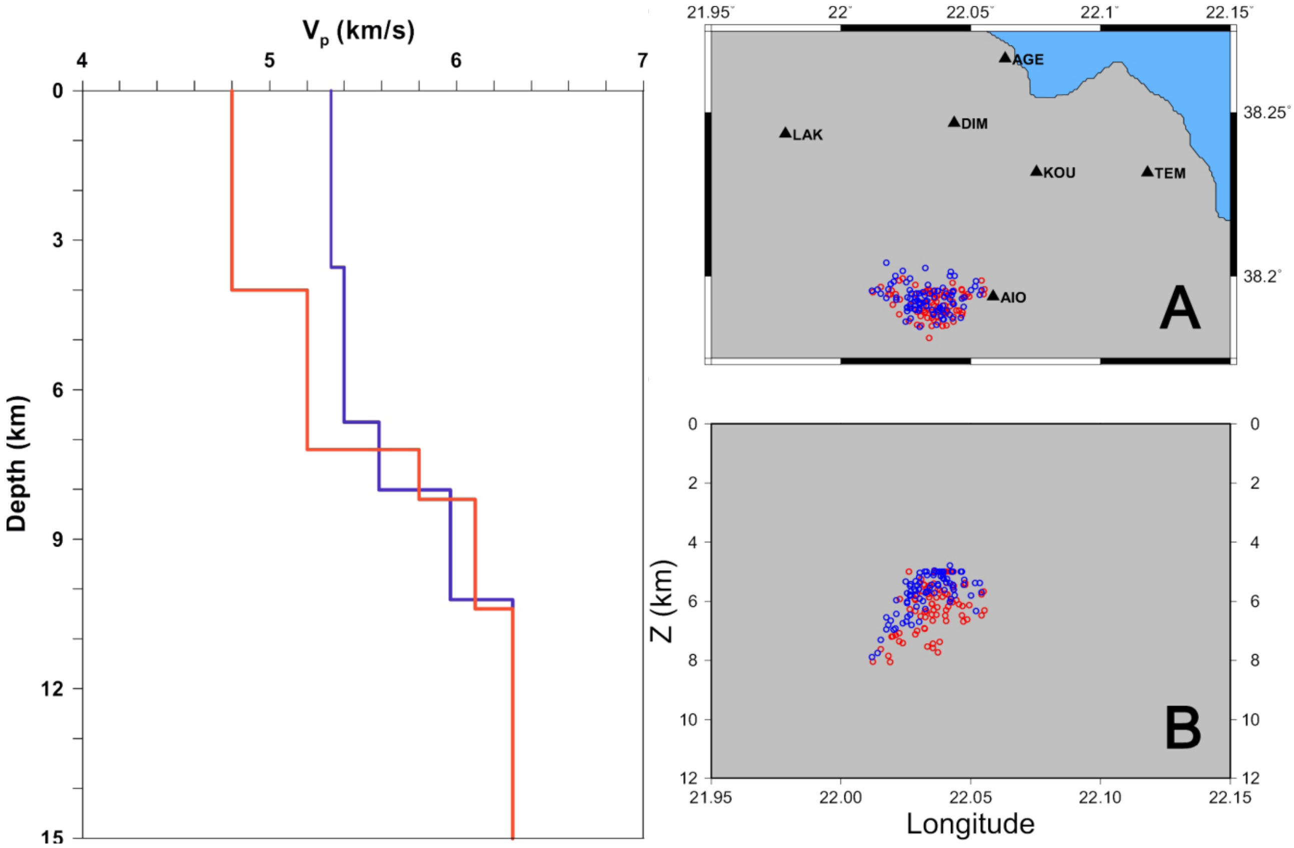
Σχήμα Β.48: τομές σε διεύθυνση N10°E για τη σεισμικότητα των ετών 2000-2001
(από την εργασία των Lyon-Caen H. et al., 2004)



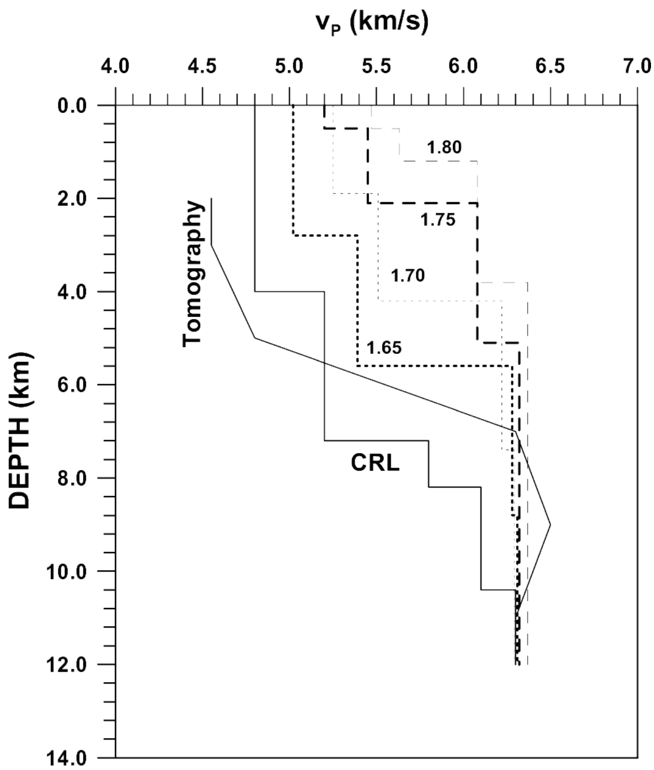
Σχήμα Β.49:Καταγραφή πίεσης στον σταθμό ‘Τριζόνια’ κατά την περίοδο 3/12/2002. Πάνω στην αργά μεταβαλλόμενη καμπύλη διακρίνεται ένας σεισμός M=3.5 (Bernard et al., 2006)



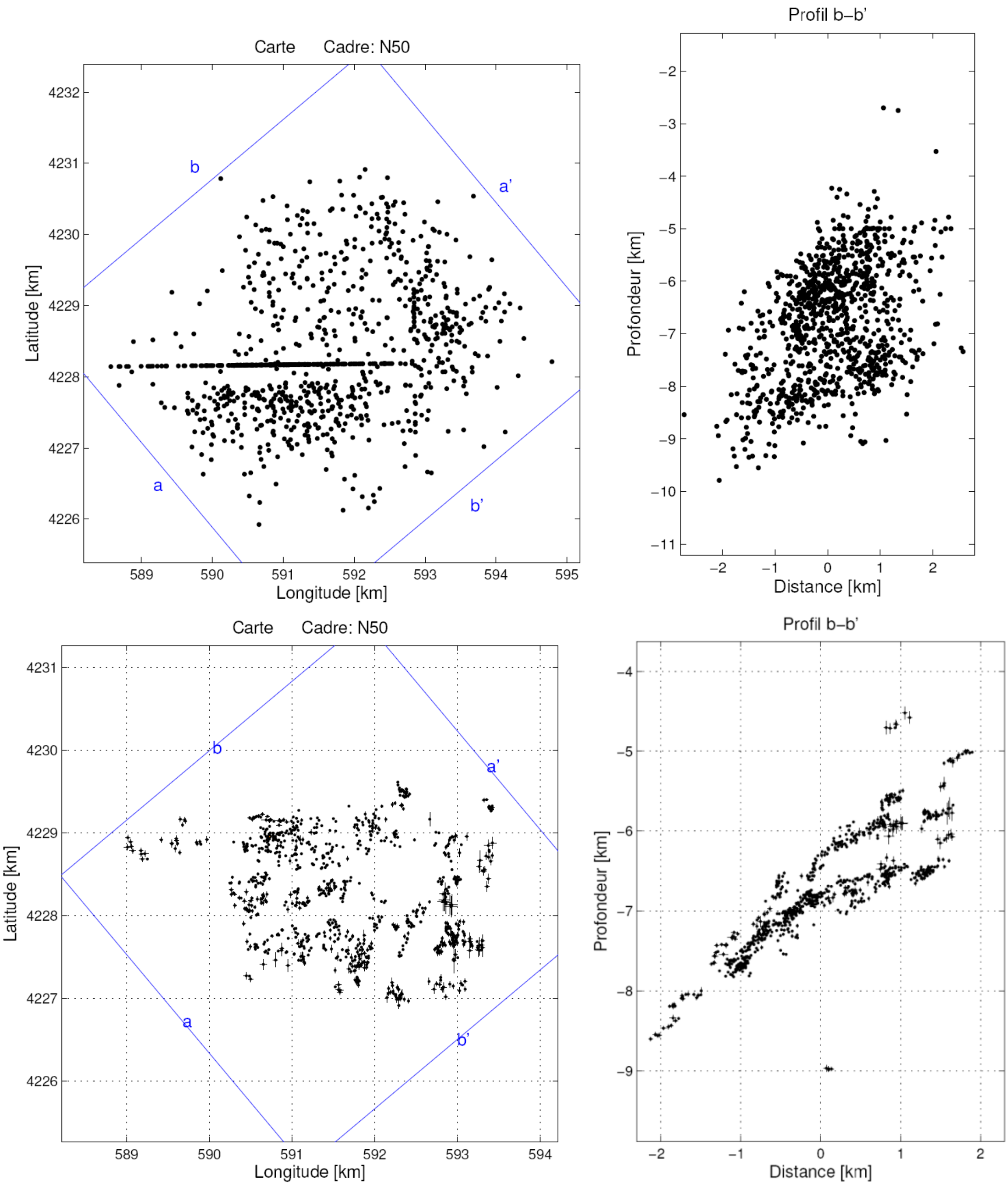
Σχήμα Β.50: Τομές στο σμήνος του AIO (2001) πριν και μετά τον κύριο σεισμό της 8ης Απριλίου 2001 (από την εργασία των Lyon-Caen et al., 2004)



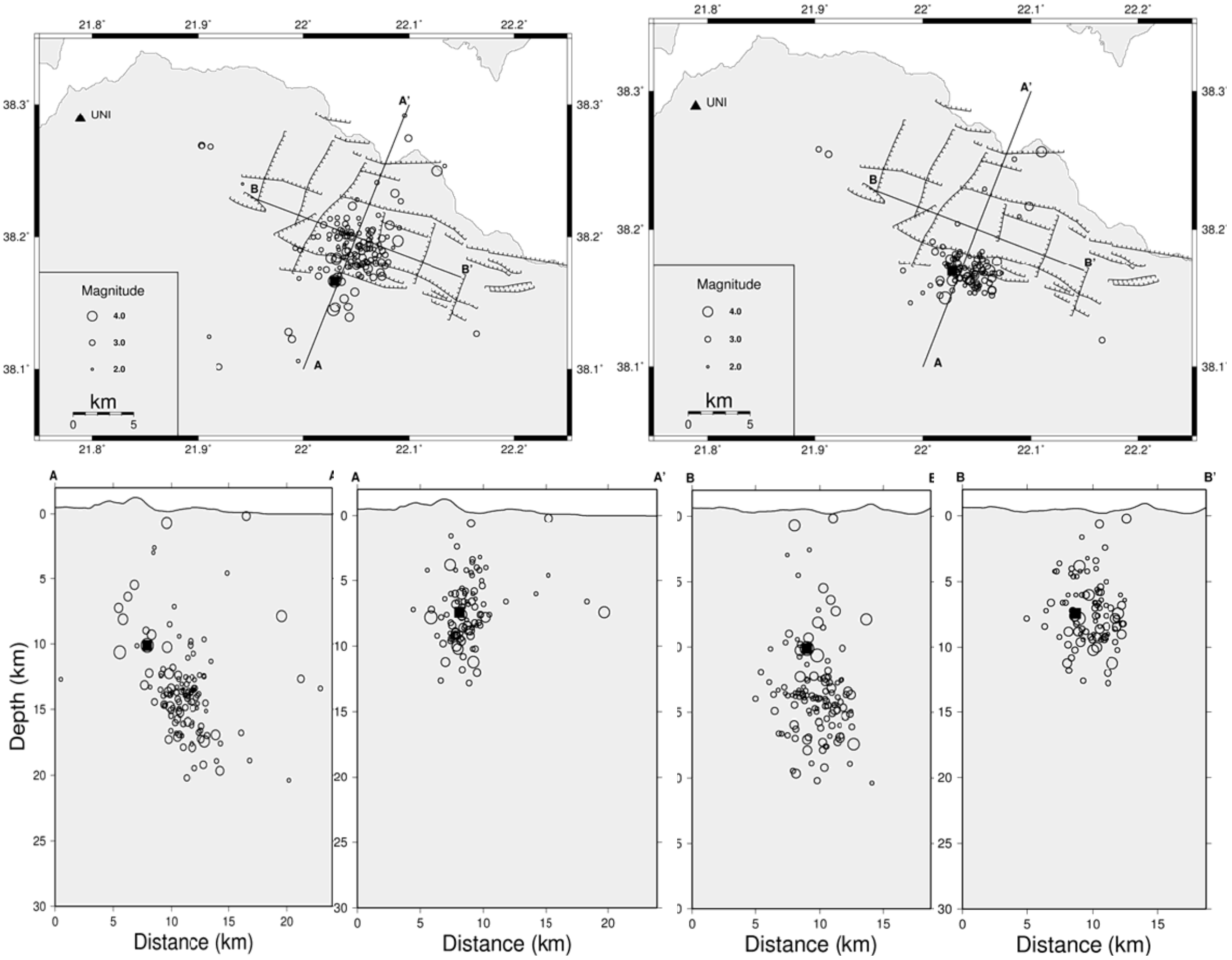
Σχήμα Β.51: (κόκκινο) αρχικό μοντέλο ταχυτήτων με V_p/V_s=1.80, (μπλε) τροποποιημένο μοντέλο ταχυτήτων για την περιοχή του Αιγίου με V_p/V_s=1.83 (από την εργασία των Novotný et al., 2005)



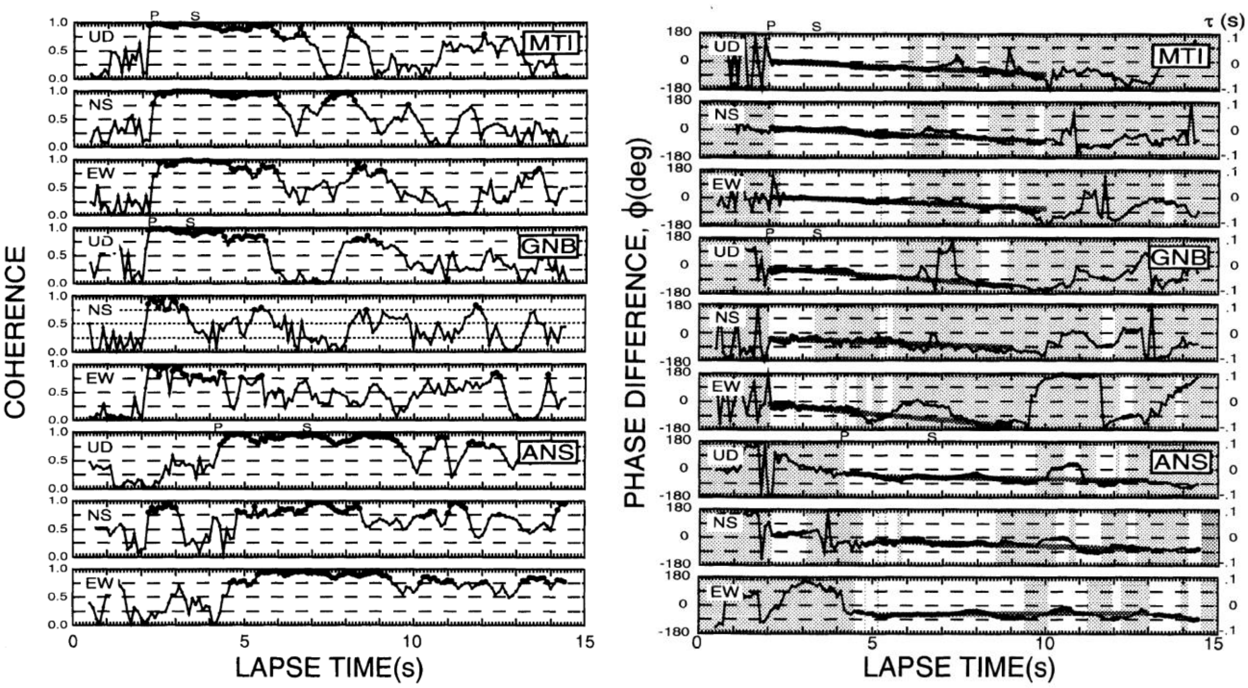
Σχήμα Β.52: (διακεκομμένες γραμμές) εναλλακτικά μονοδιάστατα μοντέλα ταχυτήτων 4 στρωμάτων για την περιοχή του Αιγίου για διάφορες τιμές του λόγου V_p/V_s. Σε όλες τις περιπτώσεις οι ταχύτητες που βρέθηκαν είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του μοντέλου CRL (από την εργασία των *O. Novotný et al., 2005*)



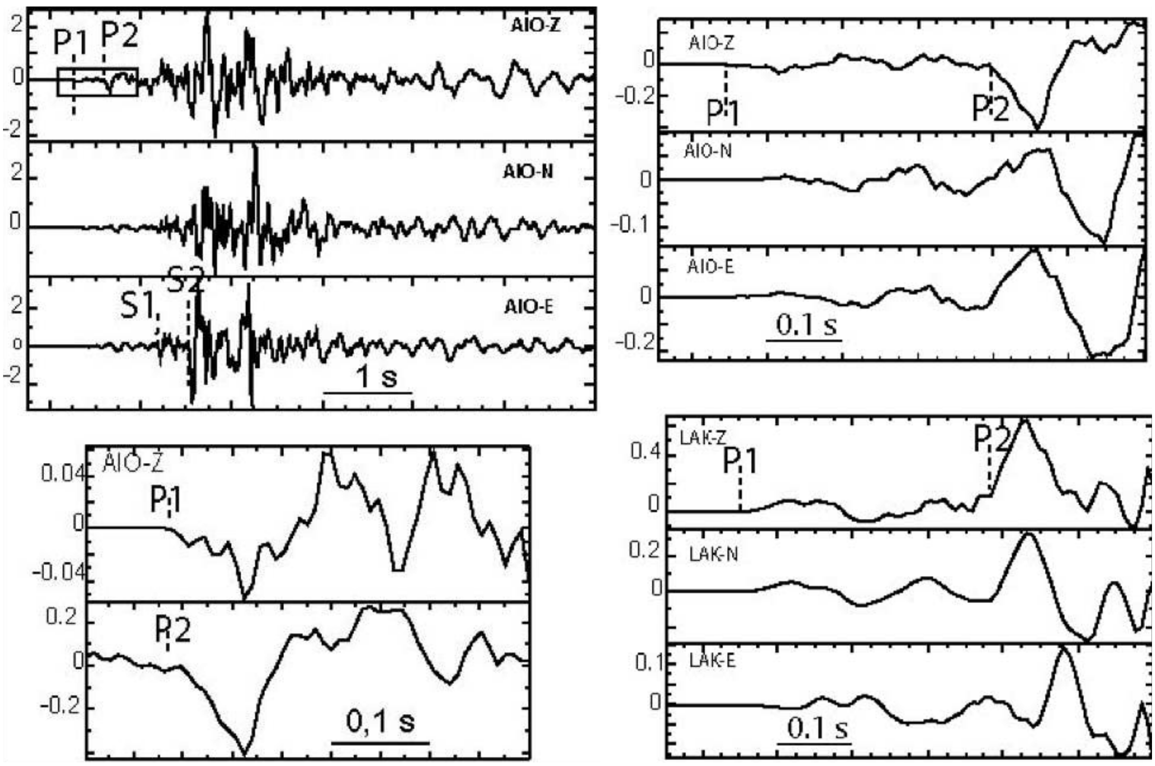
Σχήμα Β.53: Α) αρχικά επίκεντρα του σμήνους του AIO (Κεφ. 3, 4), Β) τομή b-b΄ στα επίκεντρα του σχήματος (Α), C) επαναπροσδιορισμένα επίκεντρα με HypoDD, D) τομή b-b΄ και επαναπροσδιορισμένα υπόκεντρα με HypoDD. (*από τη διδακτορική διατριβή του Pacchiani, 2006*)



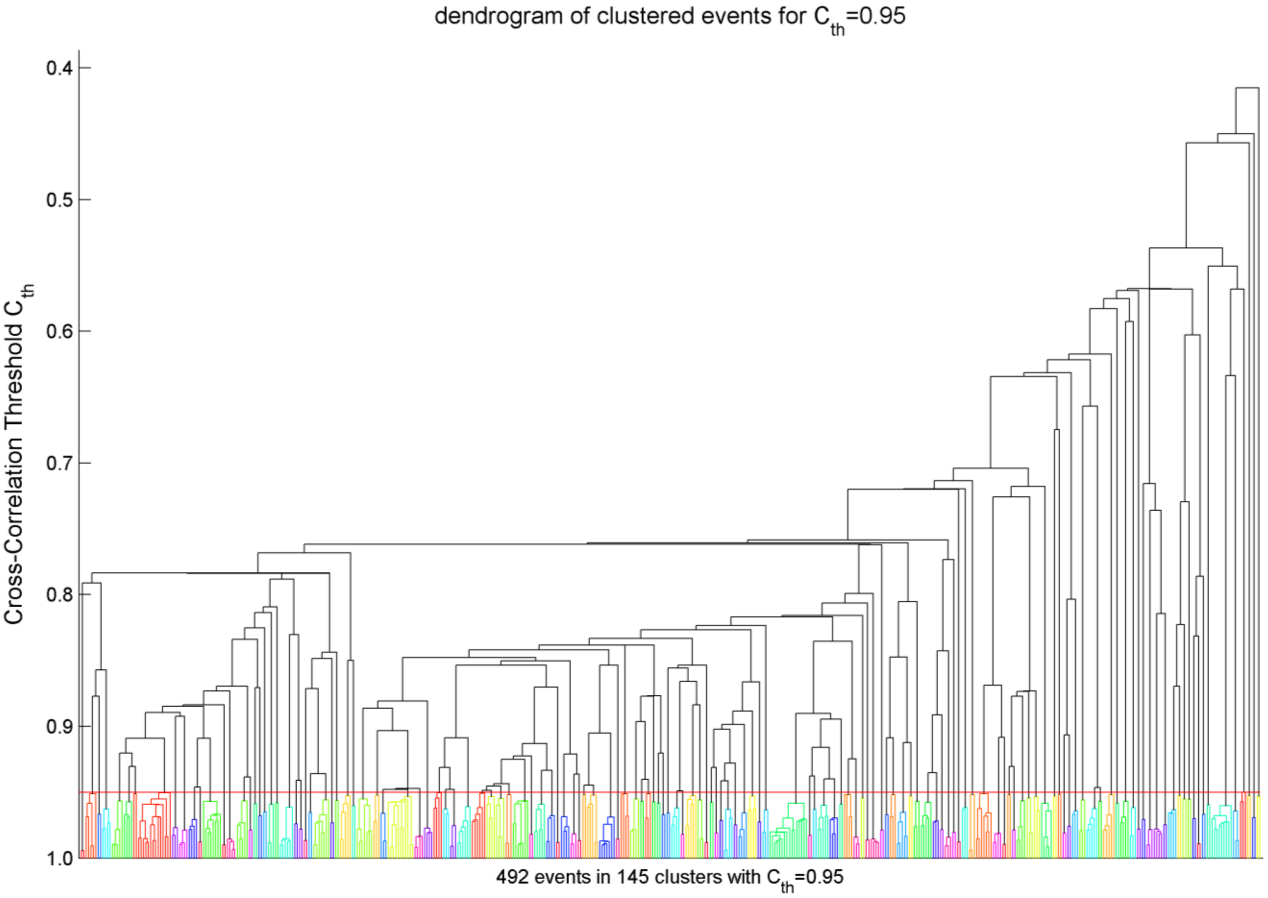
Σχήμα Β.54: επαναπροσδιορισμός του «σμήνους του ΑΙΟ (2001)» από δεδομένα του δικτύου PATNET
(από την εργασία των *Janksy et al., 2003)*



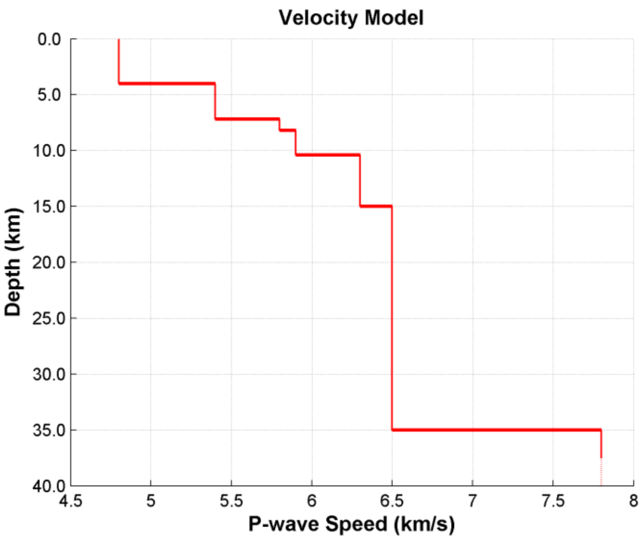
Σχήμα Β.55: Α) χρονική μεταβολή της συνοχής $\mathbf{C}_{4.7}$ όμοιων κυματομορφών στα 4.7Hz στις 3 συνιστώσες 3 σταθμών ευρέος φάσματος. Με έντονες κουκίδες σημειώνονται τα δείγματα συνοχής $\mathbf{C}_{4.7}$ των 4.7Hz με $\mathbf{C}_{4.7} > 0.75$. Σημειώνονται επίσης οι χρόνοι άφιξης των κυμάτων P και S. B) Διαφορά φάσης ετεροφάσματος στα 4.7Hz μεταξύ όμοιων κυματομορφών για διαδοχικά χρονικά παράθυρα. Οι σκιασμένες περιοχές είναι για χρονικά παράθυρα στα οποία η συνοχή είναι C4.7<0.75(*από την εργασία των Nishimura et al., 2000*)



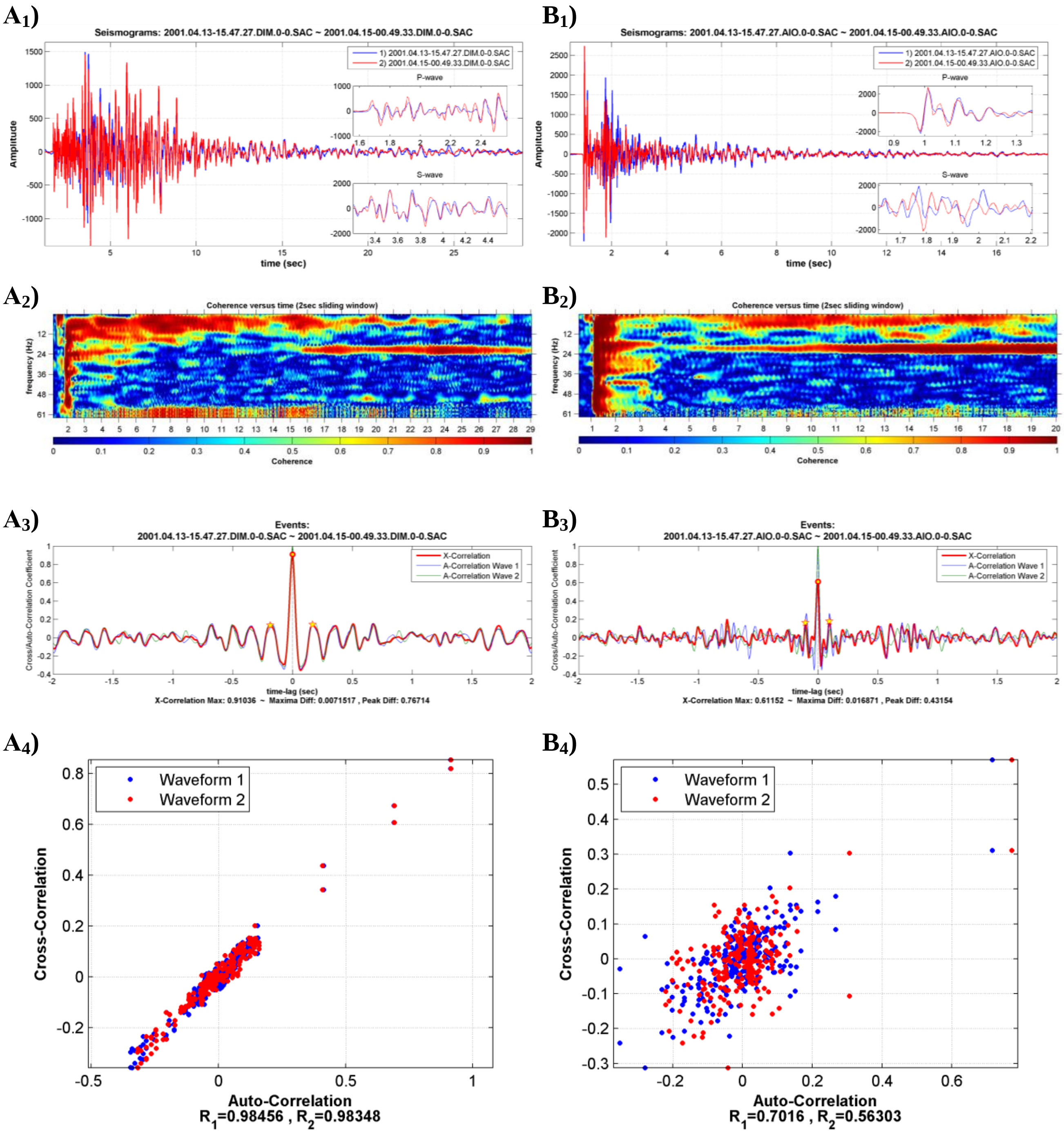
Σχήμα Β.56: διόρθωση στους χρόνους άφιξης του κύριου σεισμού του σμήνους του ΑΙΟ (2001) (από την εργασία των Lyon-Caen et al., 2004) (για περισσότερα βλέπε Παράρτημα Α)



Σχήμα Β.57: Πραγματικό δενδρόγραμμα σύνδεσης γεγονότων για το δείγμα 1135 γεγονότων από το «Σμήνος του ΑΙΟ (2001)» (Κεφάλαιο 3) για τον πίνακα $\mathbf{A_x}'$ (μέγιστο ετεροσυσχέτισης για φιλτραρισμένες κυματομορφές μεταξύ 0.5-15Hz) με τιμή κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$=0.95. Παρουσιάζονται οι συνδέσεις μόνο για τα 492 γεγονότα που βρέθηκαν να ανήκουν σε 145 συστάδες σμηνοσεισμών με αυτή την τιμή κατωφλίου καθώς και ο τρόπος που θα ενοποιούνταν οι συστάδες αυτές καθώς μειώνεται η τιμή κατωφλίου (προς τα επάνω) εάν *δεν* υπήρχαν άλλα γεγονότα στον πίνακα, άρα δεν είναι η πραγματική εικόνα για τον πίνακα αυτόν. Οι χρωματιστοί κλάδοι στο κάτω μέρος δείχνουν την *πραγματική* εξέλιξη του δενδρογράμματος για τον Πίνακα $\mathbf{A_x}'$ καθώς αυξάνεται η τιμή κατωφλίου. (Περισσότερα στο Κεφάλαιο 3)

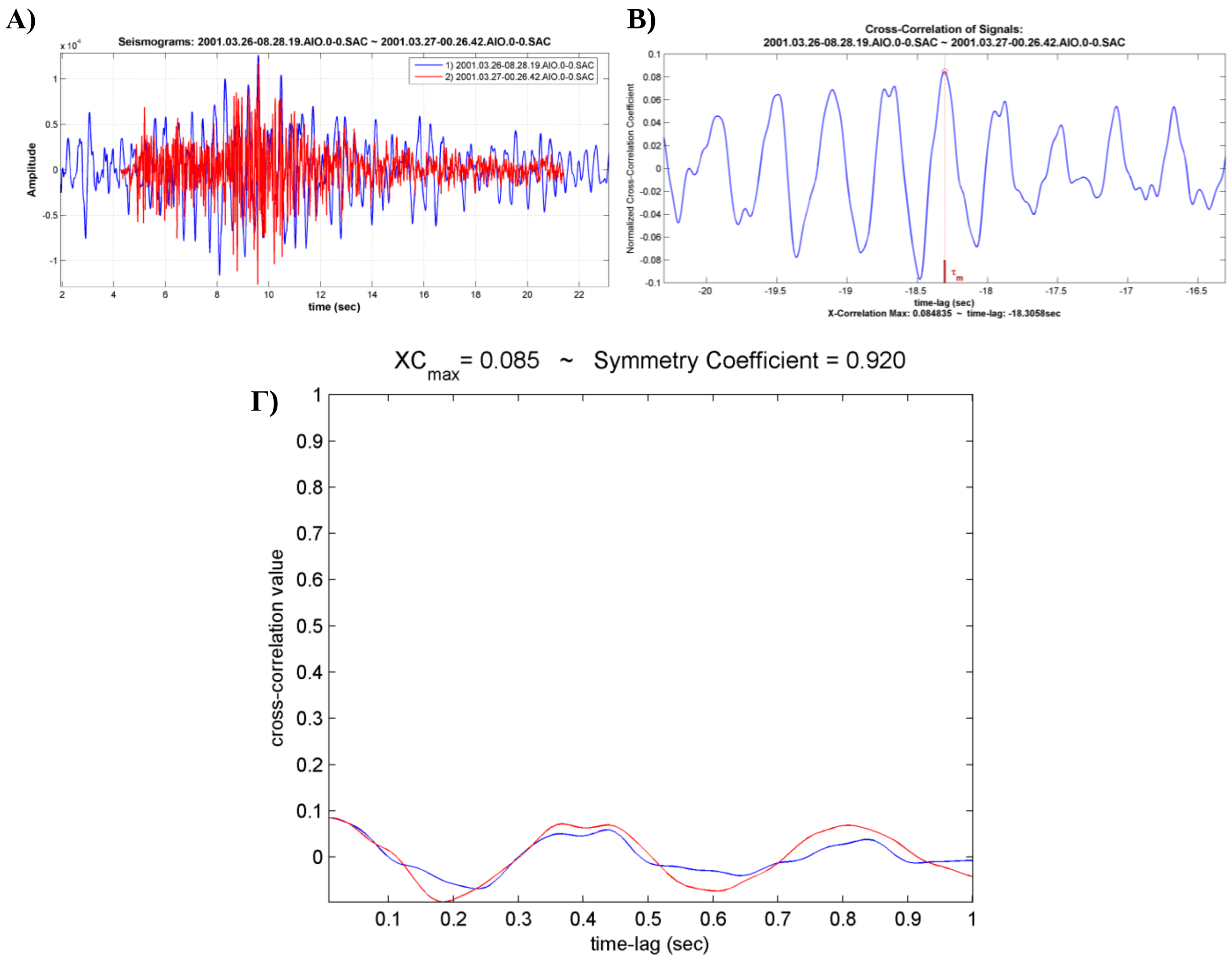


Σχήμα Β.58: Μοντέλο ταχυτήτων διάδοσης των κυμάτων P που χρησιμοποιήθηκε στις εφαρμογές των Κεφαλαίων 3, 4 και 5 με V_p/V_s=1.80 (από *Papadimitrioy et al., 2002*)

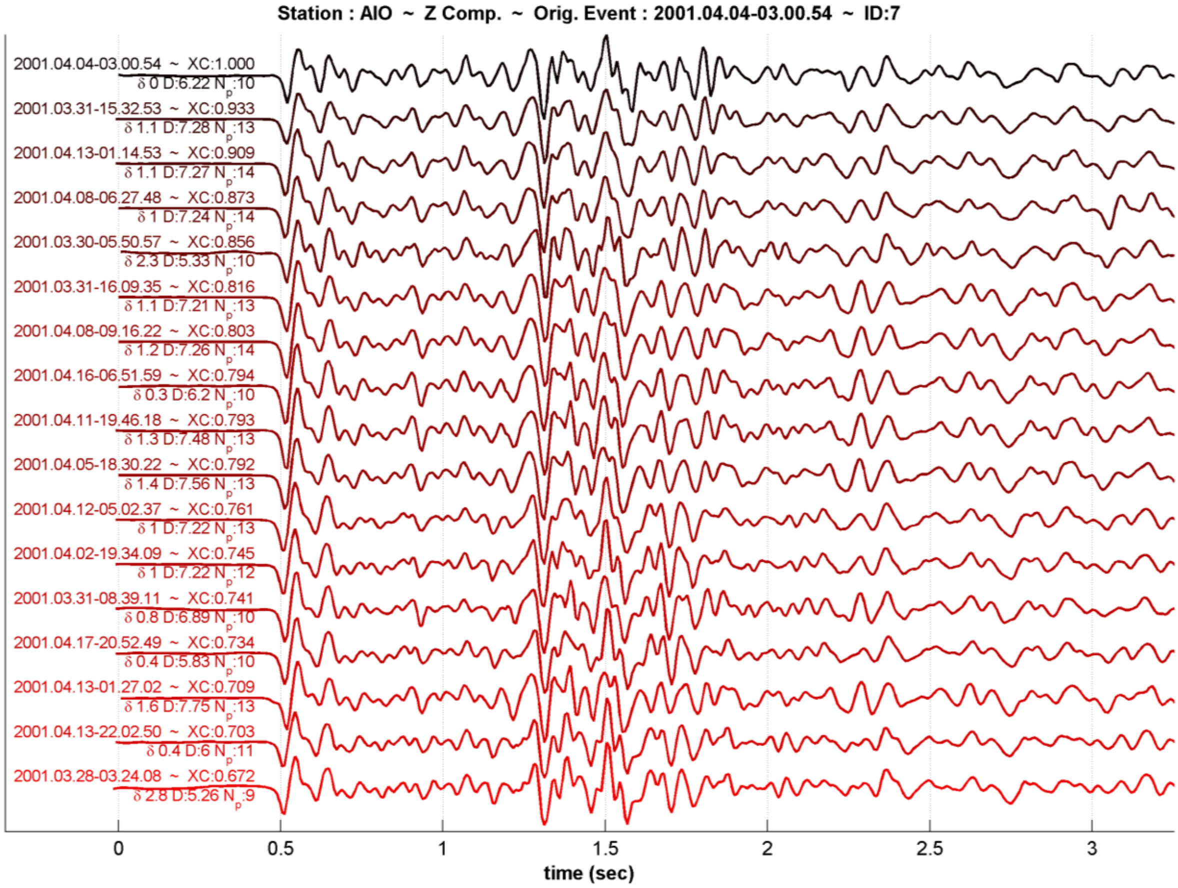


Σχήμα Β.59: ένα ζεύγος σεισμών με διαφορά στην ομοιότητα των σημάτων του στους σταθμούς DIM (A) και AIO (B). Στον σταθμό DIM παρουσιάζει $\mathbf{XC_{max}}$=0.910 ενώ στον σταθμό AIO $\mathbf{XC_{max}}$=0.612 (στις φιλτραρισμένες κυματομορφές με ζωνοπερατό φίλτρο 0.5-15Hz). . Οι αντίστοιχες τιμές ομοιότητας είναι $\mathbf{S_{ij}}$=0.816 και $\mathbf{S_{ij}}$=0.249 καθώς λαμβάνεται υπόψη ο χαμηλός βαθμός συμμετρίας ανάμεσα στις συναρτήσεις XC και AC στις κυματομορφές του σταθμού AIO (B_4).

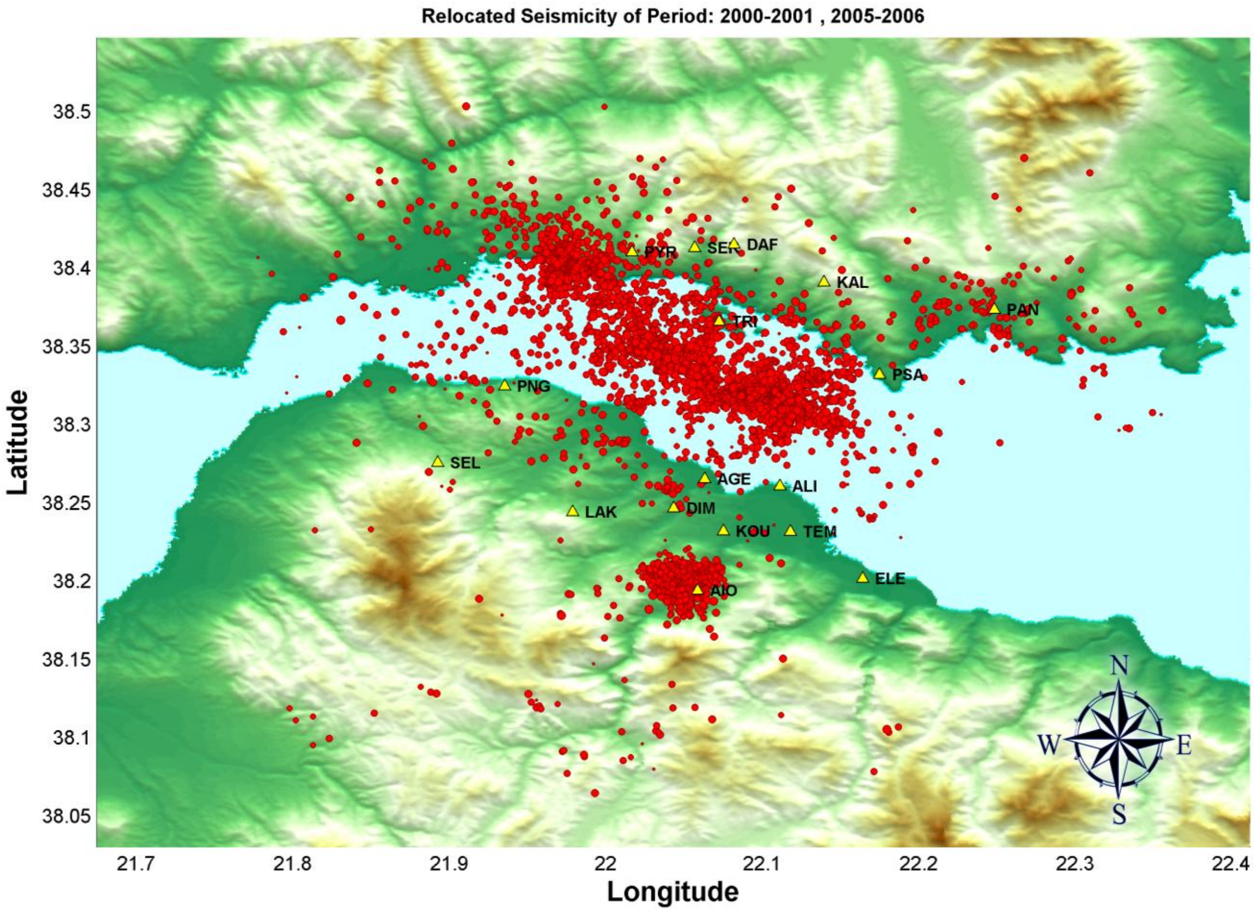
(A_1,B_1) κυματομορφές στους σταθμούς DIM και AIO αντίστοιχα,
(A_2,B_2) συνοχή συναρτήσει χρόνου στους σταθμούς DIM και AIO αντίστοιχα,
(A_3,B_3) ετεροσυσχέτιση και αυτοσυσχετίσεις στους σταθμούς DIM και AIO αντίστοιχα,
(A_4,B_4) συσχέτιση ανάμεσα στην καμπύλη ετεροσυσχέτιση και τις καμπύλες των αυτοσυσχετίσεων για τα σήματα των σταθμών DIM και AIO αντίστοιχα.



Σχήμα Β.60: Παράδειγμα ζεύγους σημάτων με χαμηλό μέγιστο ετεροσυσχέτισης ($\mathbf{XC}_{\mathbf{max}}$=0.085) και υψηλό βαθμό συμμετρίας ετεροσυσχέτισης (C=0.920) σε αφιλτράριστες κυματομορφές του σταθμού AIO. A) κυματομορφές μετατοπισμένες χρονικά στον χρόνο $\boldsymbol{\tau}_{\mathbf{m}}$ (οι κυματομορφές δεν είναι όμοιες), B) ετεροσυσχέτιση γύρω από το ολικό της μέγιστο, Γ) συμμετρία των δύο κλάδων ετεροσυσχέτισης εκατέρωθεν του (χαμηλού) ολικού μεγίστου της ετεροσυσχέτισης. Αυτό το ζεύγος σημάτων αντιστοιχεί σε σημείο της «ουράς» στο άνω αριστερό μέρος του Σχήματος 3.11



Σχήμα Β.61: Κυματομορφές 17 σμηνοσεισμών χωρίς μεγάλες διαφορές στους χρόνους S-P (της τάξεως του 0.015sec). Πρόκειται για τις ίδιες κυματομορφές με αυτές του Σχήματος 3.34.



Σχήμα Β.62: Χάρτης επιλεγμένων, επαναπροσδιορισμένων σεισμών για την περίοδο 2000-2001, 2005-2006.

Ευρετήριο Όρων

Άμεσοι Συγγενείς (*Close Relatives*): A-B, γεγονότα των οποίων το μέγιστο της ετεροσυσχέτισης ή του βαθμού ομοιότητας των κυματομορφών τους όπως έχουν καταγραφεί σε κάποια συνιστώσα ενός σταθμού βρίσκεται πάνω από την ορισμένη τιμή κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$ που χαρακτηρίζει όμοια σήματα. (Σελ. 112)

Αριθμός Ταυτοποίησης Γεγονότος (*Event ID number*): είναι ένας αριθμός με τον οποίο ταυτοποιείται το κάθε γεγονός (Event-ID ή EVID) μέσα σε έναν κατάλογο ή λίστα δεδομένων προκειμένου να γίνονται συγκεκριμένες αναφορές σε αυτό. Η αρίθμηση είναι συνήθως γνησίως αύξουσα ως προς τη χρονική διαδοχή των γεγονότων. Ανάλογα ορίζεται και ο αριθμός ταυτοποίησης συστάδας (Cluster-ID ή CLID) (Σελ. 93)

Αρνητική Συσχέτιση: Η περίπτωση στην οποία 2 χρονοσειρές των οποίων τα δείγματα αναφέρονται σε κοινούς (σχετικούς) χρόνους έχουν στατιστικά γραμμικά εξαρτημένες τιμές με *αρνητικό* συντελεστή συσχέτισης, δηλαδή η μεταβολή της μιας συνεπάγεται ανάλογη μεταβολή της άλλης με αντίθετη φορά. (Σελ. 246-248)

Αυτοσυσχέτιση (*Auto-Correlation*): Ειδική περίπτωση της Ετεροσυσχέτισης όταν οι 2 υπό σύγκριση χρονοσειρές είναι ακριβώς οι ίδιες. (Σελ. 13)

Βέλτιστη Ταύτιση: Όταν δύο κυματομορφές βρίσκονται σε κατάλληλη χρονική στοίχιση ώστε ένα τμήμα τους ή ολόκληρες να εμφανίζουν ισχυρή θετική συσχέτιση. (Σελ. 17)

Γεγονός Αναφοράς (*Reference Event*): Στην περίπτωση των όμοιων σεισμών πρόκειται για ένα γεγονός το οποίο συγκρίνεται με όλα τα υπόλοιπα ή με μια ομάδα σεισμών του καταλόγου. Στη συνέχεια όλες οι σχέσεις ομοιότητας ή χρονικών καθυστερήσεων εκφράζονται ως προς το γεγονός αναφοράς. (Σελ. 125)

Δενδρόγραμμα Συσχέτισης (*Correlation Tree*): Αποτελεί το «οικογενειακό δένδρο» της ομοιότητας σεισμικών σημάτων και απεικονίζει τον αριθμό και το μέγεθος των συστάδων που δημιουργούνται για διάφορες τιμές κατωφλίου της (μέγιστης) ετεροσυσχέτισης. (Σελ. 112-117)

Δευτερεύοντες Κλάδοι: Αναφέρεται στο δενδρόγραμμα συσχέτισης και αποτελεί συνένωση μικρότερων συστάδων σε ευρύτερες ομάδες που συνυπάρχουν με τον κύριο κορμό πριν καταλήξουν σε αυτόν καθώς η τιμή κατωφλίου μειώνεται. (Σελ. 114)

Εξαρτημένο Γεγονός (*Slave Event*): Γεγονός με όμοιες κυματομορφές με αυτές ενός κύριου γεγονότος (*Master Event*) βάσει των οποίων μπορεί να γίνει αυτόματη διόρθωση ή προσθήκη χρόνων άφιξης των P και S κυμάτων και κατά αυτόν τον τρόπο να γίνει επαναπροσδιορισμός με τη μέθοδο των κύριων γεγονότων. (Σελ. 57, 174-186)

Έμμεσοι Συγγενείς (*Distant Relatives*): A~B, γεγονότα των οποίων το μέγιστο της ετεροσυσχέτισης των κυματομορφών τους όπως έχουν καταγραφεί σε κάποια συνιστώσα ενός σταθμού βρίσκεται *κάτω* από την ορισμένη τιμή κατωφλίου $\mathbf{C_{th}}$ που χαρακτηρίζει όμοια σήματα, αλλά υπάρχει ένα γεγονός Γ με Α-Γ και Γ-Β ή μια σειρά **ν** γεγονότων $Γ_1$, $Γ_2$, …, $Γ_{ν-1}$, $Γ_ν$ τα οποία ικανοποιούν τις σχέσεις Α-$Γ_1$, $Γ_1$-$Γ_2$, …, $Γ_{ν-1}$-$Γ_ν$, $Γ_ν$-Β, όπου το σύμβολο – χαρακτηρίζει σχέσεις *άμεσης συγγένειας* βάσει τις εκάστοτε τιμής κατωφλίου. (Σελ. 112, 118-124)

Ετεροσυσχέτιση (*Cross-Correlation*): Είναι οι συντελεστές γραμμικής συσχέτισης 2 διαφορετικών χρονοσειρών για διάφορες τιμές χρονικής καθυστέρησης (Σελ. 16)

Ετεροφάσμα (*Cross-Spectrum*): Ο μετασχηματισμός Fourier της Ετεροσυσχέτισης. (Σελ. 22)

Θετική Συσχέτιση: Η περίπτωση στην οποία 2 χρονοσειρές των οποίων τα δείγματα αναφέρονται σε κοινούς (σχετικούς) χρόνους έχουν στατιστικά γραμμικά εξαρτημένες τιμές με *θετικό* συντελεστή συσχέτισης, δηλαδή η μεταβολή της μιας συνεπάγεται ανάλογη μεταβολή της άλλης κατά την *ίδια* φορά. (Σελ. 51)

Ιστορικό Όμοιων Σεισμών *(Multiplet History)*: Η χρονική εξέλιξη της κατανομής των γεγονότων που έχουν βρεθεί ότι ανήκουν σε συστάδες όμοιων σεισμών. (Σελ. 162, 166, 195, 214, 215)

Κύριο Γεγονός (*Master Event*): Γεγονός αναφοράς το οποίο πληροί ορισμένα κριτήρια μεγάλου αριθμού φάσεων και μικρού σφάλματος το οποίο χρησιμεύει για τον σχετικό επαναπροσδιορισμό ορισμένων εξαρτημένων γεγονότων (*slave events*) ως προς αυτό. (Σελ. 56-57, 174-186)

Κύριος Κορμός: Αναφέρεται στο δενδρόγραμμα συσχέτισης και αποτελεί την κύρια συστάδα στην οποία τείνουν να ενοποιηθούν όλα τα γεγονότα καθώς μειώνεται η τιμή κατωφλίου. (Σελ. 114)

Μέγεθος Συστάδας: ο αριθμός γεγονότων που περιλαμβάνει μια συστάδα (Σελ. 113)

Μέγιστο της Ετερο-συσχέτισης (*Cross-Correlation Maximum*, $\mathbf{XC_{max}}$): Εμφανίζεται στην χρονική καθυστέρηση εκείνη κατά την οποία τα 2 σήματα που συγκρίνονται μεταξύ τους έχουν τη βέλτιστη δυνατή ταύτιση. Η τιμή του κανονικοποιημένου μεγίστου είναι ένα μέτρο της ομοιότητας των κυματομορφών. (Σελ. 17)

Μέθοδος των Κύριων Γεγονότων (*Master Events*): Μέθοδος επαναπροσδιορισμού υποκέντρων και χρόνων γένεσης για μια ομάδα εξαρτημένων γεγονότων (*slave events*) βάσει τις ομοιότητας των κυματομορφών τους με ορισμένα κύρια γεγονότα (*master events*) με συστηματική επανάληψη των σχετικών χρόνων άφιξης των κυμάτων P και S σε αυτά. (Σελ. 56-57, 174-186)

Όμοιοι Σεισμοί (*Doublet, Multiplet, Repeating Earthquakes*): σεισμοί των οποίων οι καταγραφές στους σταθμούς παρουσιάζουν χαρακτηριστική ομοιότητα που αποδίδεται σε μερική ή πλήρη ταύτιση όλων των σεισμικών παραμέτρων τους. (Σελ. 9-11)

Πίνακας (Ετερο-)Συσχέτισης, A_x (*Cross-Correlation Matrix*): δισδιάστατος πίνακας αριθμών που παρουσιάζεται σε μορφή εικόνας. Οι τιμές του κάθε στοιχείου A_{ij} (ή το χρώμα του κάθε εικονοστοιχείου) του πίνακα αναφέρονται στο μέγιστο της ετεροσυσχέτισης των κυματομορφών 2 γεγονότων των οποίων οι ταυτοτικοί αριθμοί i,j (*Event IDs*) δίνονται από τον αριθμό της αντίστοιχης γραμμής i και στήλης j του στοιχείου του πίνακα. Εξ' ορισμού ο πίνακας είναι συμμετρικός και τα στοιχεία της διαγωνίου του μοναδιαία καθώς αντιστοιχούν στην αυτοσυσχέτιση του κάθε γεγονότος. (Σελ. 93-101)

Σεισμικό Ζεύγος (*Earthquake Doublet*): ένα ζεύγος όμοιων σεισμών. (Σελ. 9)

Στοίχιση (*Alignment*): Η χρονική μετατόπιση 2 κυματομορφών ώστε 2 επιλεγμένες χρονικές στιγμές τους (π.χ. ο χρόνος t_p της άφιξης των P-κυμάτων) να ταυτίζονται. Από μια αρχική στοίχιση ή *offset* (η οποία μπορεί να είναι οποιαδήποτε) μπορεί στη συνέχεια να υπολογιστεί ένας χρόνος τ_m για την ταύτιση των 2 κυματομορφών. (Σελ. 17)

Συνοχή (*Coherence*): είναι το τετράγωνο του περιοδογράμματος της ετεροσυσχέτισης 2 χρονοσειρών κανονικοποιημένο ως προς τα περιοδογράμματα των αυτό-συσχετίσεών τους. (Σελ. 25)

Συντελεστής Συμμετρίας, C_s: ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης ανάμεσα στους 2 κλάδους εκατέρωθεν του ολικού μεγίστου της ετεροσυσχέτισης. Ισοδύναμο αποτελεί ο μέσος συντελεστής συσχέτισης ανάμεσα στην καμπύλη ετεροσυσχέτισης (με $\boldsymbol{\tau_m}$=0) και στις καμπύλες αυτοσυσχέτισης των 2 υπό σύγκριση χρονοσειρών. (Σελ. 93-101)

Συστάδα (*Cluster*): Ομάδα σεισμών οι οποίοι έχουν κάτι κοινό. Συστάδες μπορούν να δημιουργηθούν από χωρική συσχέτιση, χρονική συσχέτιση ή από ομοιότητα κυματομορφών. (Σελ. 9)

Συστάδα Σμηνοσεισμών (*Multiplet Cluster*): μια συστάδα όμοιων σεισμών. (Σελ. 10)

Τιμή Κατωφλίου, C_{th} (*Correlation/Similarity Threshold*): Είναι μια ορισμένη τιμή του μεγίστου ετεροσυσχέτισης ή του βαθμού ομοιότητας (ανάλογα με τον πίνακα στον οποίο αναφέρεται) πάνω από την οποία δύο κυματομορφές θεωρούνται ως όμοιες καθώς και τα αντίστοιχα γεγονότα ως *άμεσοι συγγενείς* (Σελ. 112)

Φάση του Ετερο-φάσματος (*Cross-Spectral Phase*): Η φάση των μιγαδικών συντελεστών του ετεροφάσματος που αντιστοιχεί στις διάφορες συχνότητες. Από το ρυθμό μεταβολής της ως προς τη συχνότητα μπορεί να εκτιμηθεί η χρονική καθυστέρηση για τη βέλτιστη ταύτιση 2 όμοιων σημάτων. (Σελ. 22-23)

Χρονική καθυστέρηση (*time-lag*): Είναι η χρονική μετατόπιση 2 κυματομορφών που αρχικά έχουν στοιχηθεί ως προς κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή των 2 σημάτων (η οποία μπορεί να είναι είτε τυχαία, είτε η άφιξη των P-κυμάτων είτε η άφιξη των S-κυμάτων). Η συσχέτιση ανάμεσα στις 2 κυματομορφές για όλες τις θετικές ή αρνητικές χρονικές καθυστερήσεις μας δίνει τη συνάρτηση ετεροσυσχέτισης. (Σελ. 13-21)

Χρόνος τ_m (τ_{max}): είναι η χρονική καθυστέρηση κατά την οποία εμφανίζεται το μέγιστο της συνάρτησης ετεροσυσχέτισης. Θεωρείται ως η χρονική καθυστέρηση της 'βέλτιστης ταύτισης' ανάμεσα σε δύο κυματομορφές. (Σελ. 17)