

Ο ΣΕΙΣΜΟΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΥ ΒΑΘΟΥΣ Μ 6.7 ΤΩΝ ΚΥΘΗΡΩΝ ΣΤΙΣ 8 ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΥ 2006: ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΓΕΝΕΣΗΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΛΕΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Μπενετάτος Χ.¹, Κιρατζή Α¹.

¹ Τομέας Γεωφυσικής, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. 541 24 Θεσσαλονίκη, chmpenet@geo.auth.gr, kiratzi@geo.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις 8 Ιανουαρίου 2006 στην περιοχή νοτιοανατολικά των Κυθήρων σημειώθηκε ισχυρός Μ 6.7 σεισμός ενδιάμεσου βάθους ($h=67$ km) που έγινε αισθητός σε όλες τις περιοχές της Ελλάδας, ολόκληρη τη νοτιοανατολική Μεσόγειο από τη νότια Ιταλία ως την Αίγυπτο και την Ιορδανία. Χρησιμοποιήσαμε ψηφιακές κυματομορφές από κοντινές και τηλεσεισμικές ($\Delta > 30^\circ$) αποστάσεις για να καθορίσουμε το μηχανισμό γένεσης και την κατανομή της ολίσθησης στην επιφάνεια του ρήγματος. Τα αποτελέσματα των αντιστροφών έδειξαν α) ο σεισμός οφείλεται σε ανάστροφο ρήγμα παράταξης BBA-NNΔ, και κλίσης $\sim 50^\circ$ (παράταξη= 55° , κλίση= 53° , γωνία ολίσθησης= 110° ; $M_0 = 1.06E26$ dyn-cm), β) καταγράφηκε σημαντική απόκλιση από διπλό ζεύγος δυνάμεων (CLVD 46%) που συχνά εμφανίζεται σε σεισμούς ενδιάμεσου βάθους, γ) η διάρρηξη δεν πραγματοποιήθηκε σε μια σαφώς καθορισμένη επιφάνεια καθώς η ταύτιση συνθετικών και πραγματικών κυματομορφών βελτιώνεται με σχεδόν ταυτόχρονη διάρρηξη δυο πηγών διαφορετικά προσανατολισμένων, που έχουν κοινό έναν κύριο άξονα τάσης και δ) υπολογίστηκε μεγάλη διάρκεια (STF) 14-16 sec για την ολοκλήρωση της συνολικής ολίσθησης. Από την αντιστροφή τηλεσεισμικών καταγραφών για τον υπολογισμό ενός μοντέλου ολίσθησης επιβεβαιώθηκε η πολυπλοκότητα της διάρρηξης, καθώς η ολίσθηση παρουσιάζει τέσσερις συγκεντρώσεις (slip patches). Τα χαρακτηριστικά του σεισμού των Κυθήρων είναι σε συμφωνία με την τρέχουσα επιστημονική γνώση η οποία θεωρεί ότι οι σεισμοί βάθους οφείλονται σε πολλαπλές πηγές διαφορετικού προσανατολισμού, με μεγάλο ποσοστό CLVD, με τον κύριο άξονα τάσης να καθορίζεται από την καταδυόμενη λιθόσφαιρα.

THE 8 JANUARY 2006, M 6.7 INTERMEDIATE DEPTH KYTHERA EARTHQUAKE: FOCAL MECHANISM OF THE MAINSHOCK AND SLIP DISTRIBUTION MODEL USING TELESEISMIC WAVEFORMS

Benetatos C.¹, Kiratzi A.¹

¹ Department of Geophysics, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 541 24, Thessaloniki, chmpenet@geo.auth.gr, kiratzi@geo.auth.gr

ABSTRACT

The 8 January 2006 intermediate depth ($h = 67$ km) earthquake ($M_w 6.7$) occurred close to the small island of Kythera at the western part of the Hellenic trench. The earthquake was strongly felt in all regions of Greece and in a very large area of the Eastern Mediterranean Sea, from southern Italy to Egypt and Jordan. We used teleseismic and regional broad band records to invert for the focal mechanism and the slip distribution on the fault. The mechanism (NP1 strike= 55° , dip= 50° , rake= 110° ; $M_0 = 1.06E26$ dyn-cm) is in accordance with the regional stress field, at this depth range, where compression is NW-SE following the trend of the Hellenic trench.

The source time function is in the range of 14 to 16 sec. The moment was simultaneously released in mainly two operating faults at depths ~67 km – in mainly two to four slip patches on the fault, with the main moment release towards the south western part. The rupture velocity is 2.7 km/sec. The multiple character of the source and the strong CLVD (46%) of the solution intensifies previous observations related to the complexity of intermediate focus earthquakes.

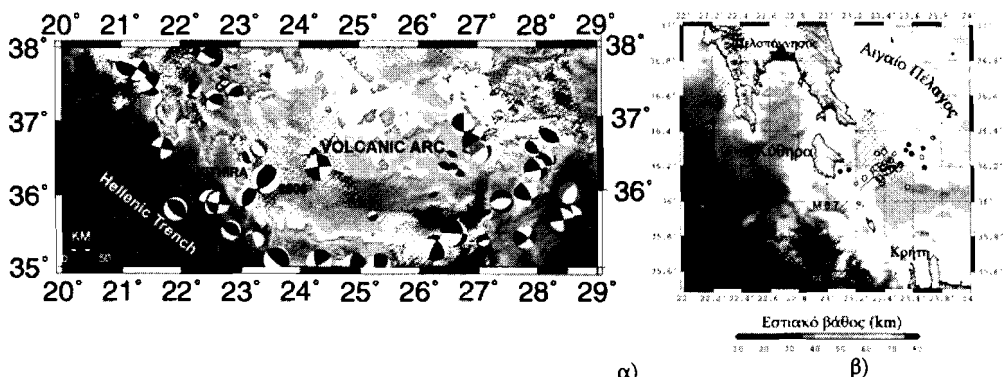
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις 8 Ιανουαρίου 2006 ένας ισχυρός (M 6.7) σεισμός έγινε στην περιοχή νοτιοανατολικά των Κυθήρων (Σχ. 1). Ο σεισμός ήταν ενδιάμεσου βάθους (Konstantinou et al., 2006) και ως εκ τούτου έγινε ιδιαίτερα αισθητός σε μια πολύ μεγάλη περιοχή καλύπτοντας σχεδόν ολόκληρη την νοτιοανατολική Μεσόγειο (Αίγυπτο, Ισραήλ, Συρία, Ιορδανία, Λίβανο, Τουρκία, Κύπρο) καθώς και περιοχές της νότιας Ιταλίας.

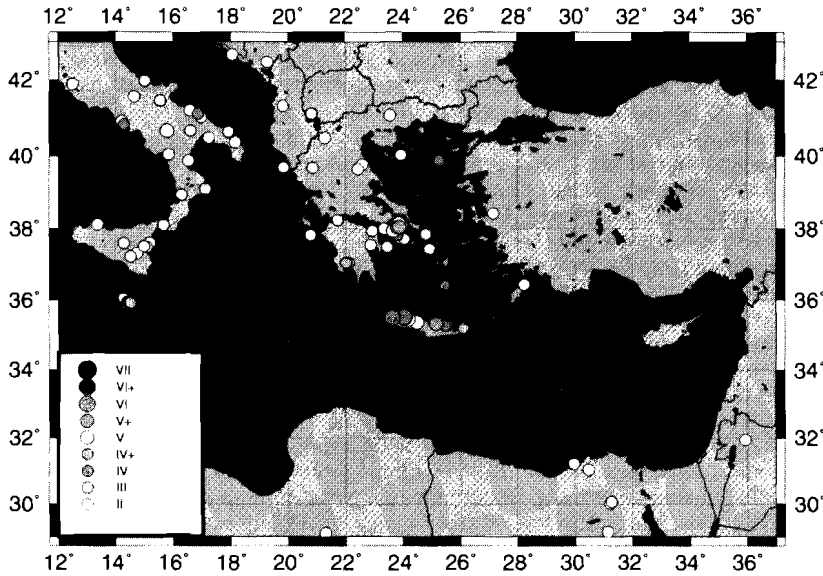
Η περιοχή γένεσης εντοπίζεται στο δυτικό τμήμα του Ελληνικού Τόξου όπου λαβαίνει χώρα η κατάδυση του εμπρόσθιου τμήματος της πλάκας της ανατολικής Μεσογείου κάτω από την πλάκα του Αιγαίου (Parazachos and Compninkakis 1971). Οι σεισμοί που συμβαίνουν σε αυτήν την περιοχή παρουσιάζουν μηχανισμούς γένεσης αναστροφών ρηγμάτων με τον άξονα συμπίεσης να ακολουθεί τη μεταβολή της παράταξης του τόξου και να είναι πάντα παράλληλος σε αυτήν, και τον άξονα εφελκυσμού (ελάχιστης συμπίεσης) να είναι παράλληλος προς την καταδυόμενη λιθόσφαιρα (Kíratzi and Parazachos, 1995; Benetatos et al., 2004).

Ο σεισμός των Κυθήρων έδωσε πληθώρα δεδομένων και είναι ίσως και ο πρώτος ενδιάμεσου βάθους σεισμός που γράφηκε από επιταχυνσιογράφους (Konstantinou et al., 2006). Η πλειοψηφία των ζημιών εντοπίζεται στα Κύθηρα (στο χωριό Μιτάτα) και στο νομό Χανίων. Από τον προκαταρκτικό χάρτη μακροσεισμικών εντάσεων (Σχ. 2, Έκθεση Ι.Τ.Σ.Α.Κ. 2006) φαίνεται ότι οι εντάσεις στη νότια Ιταλία, Σικελία και Μάλτα έχουν τις ίδιες τιμές με εντάσεις στο Αιγαίο Πέλαγος, σε σημαντικά μικρότερες επικεντρικές αποστάσεις. Από τον ίδιο αυτό χάρτη φαίνεται ότι ο σεισμός έγινε αισθητός στην ενδοχώρα της βόρειας Αφρικής και στο Αμάν της Ιορδανίας.

Η χωρική κατανομή των εντάσεων αποτελεί τυπική εικόνα για τους σεισμούς ενδιάμεσου βάθους του νοτίου Αιγαίου Πελάγους (Tassos 1984). Στη δυτική περιοχή του Ελληνικού Τόξου έχουν συμβεί στο παρελθόν ισχυροί σεισμοί ενδιάμεσου βάθους με τους πιο πρόσφατους στις 22 Μαΐου 1984 και 21 Νοεμβρίου 1984 οι οποίοι είχαν και παρόμοιο μηχανισμό γένεσης (Benetatos et al. 2004).



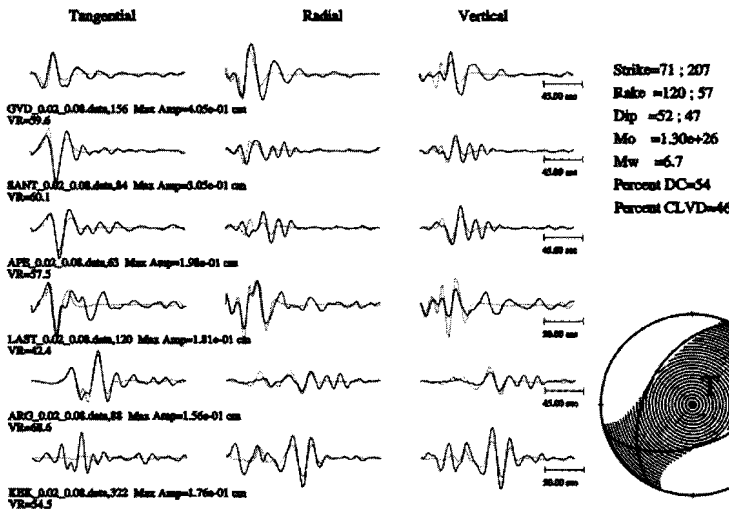
Σχήμα 1. α) Η περιοχή του τόξου με μηχανισμούς γένεσης σεισμών με βάθος >40 km. β) Επίκεντρο του κύριου σεισμού και μετασεισμών της ακολουθίας των Κυθήρων (Ιανουάριος 8, 2006). Οι συντεταγμένες των επικέντρων προέρχονται από τον κατάλογο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Παρόλο που υπάρχει διασπορά στους λίγους σε αριθμό μετασεισμούς, εντούτοις διαφάνεται μια παράταξη BBA-NND.



Σχήμα 2. Γεωγραφική κατανομή των μακροσεισμικών εντάσεων του σεισμού των Κυθήρων. (Σχήμα από Έκθεση Ι.Τ.Σ.Α.Κ. 2006)

2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΓΕΝΕΣΗΣ ΤΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ

Από την αντιστροφή των ψηφιακών κυματομορφών ευρέως φάσματος του Εθνικού Δικτύου Σεισμογράφων της Ελλάδας, με τη μέθοδο της αντιστροφής του ταυστή σεισμικής ροπής (Dreger, 2003) όπως αυτή προσαρμόστηκε στο σεισμολογικό δίκτυο της Θεσσαλονίκης (Roumelioti et al., 2008), υπολογίσθηκε ο μηχανισμός γένεσης του Σχήματος 3, που δείχνει ανάστροφο ρήγμα παράταξης BBA-NNd και κλίσης ~ 50ο.

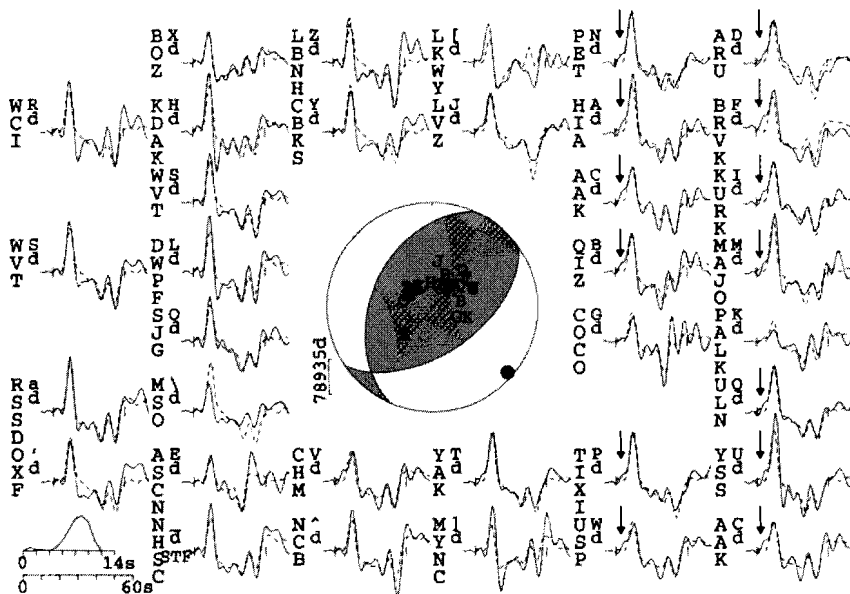


Σχήμα 3. Μηχανισμός γένεσης του σεισμού των Κυθήρων (8 Ιανουαρίου 2006, M 6.7, βάθος 65 km) με χρήση δεδομένων ευρέως φάσματος. (Γρήγορη λύση από Ζ. Ρουμेलιώτη, Εργ. Γεωφυσικής Α.Π.Θ.) Είναι αξιοσημείωτη η απόκλιση από διπλό ζεύγος δυνάμεων για την περιγραφή της ολίσθησης (CLVD 46%).

Ο μηχανισμός γένεσης είναι αναμενόμενος για την περιοχή και για σεισμούς ενδιάμεσου βάθους, με P- άξονα παράλληλο στην παράταξη του Ελληνικού Τόξου, και είναι σε συμφωνία με τους μηχανισμούς γένεσης από προηγούμενους ισχυρούς σεισμούς (Kiratzi and Papazachos 1995, Benetatos et al., 2004). Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό του μηχανισμού είναι η παρουσία υψηλού ποσοστού (46%) γραμμικού διανυσματικού διπόλου αντιστάθμισης (CLVD) που είναι όμως μια συνήθης παρατήρηση για σεισμούς ενδιάμεσου βάθους (Richardson and Jordan, 2002).

Η παρουσία υψηλού ποσοστού CLVD μας οδήγησε στην ανάγκη λεπτομερούς μελέτης του μηχανισμού γένεσης με τη χρήση κυμάτων μακράς περιόδου που έχουν καταγραφεί σε τηλεσεισμικές αποστάσεις. Συλλέχθηκαν δεδομένα από σταθμούς σε αποστάσεις 300-900 από το επίκεντρο, του Διεθνούς Σεισμογραφικού Δικτύου (Global Digital Seismographic Network-GDSN). Αφού απομακρύνθηκε η επίδραση του οργάνου καταγραφής, οι αναγραφές μετατράπηκαν σε μετάθεση, και εφαρμόστηκε ζωνοπερατό φίλτρο με εύρος 0.01-0.12 Hz. Για την αντιστροφή των κυματομορφών χρησιμοποιήσαμε τον κώδικα MT5 των McCaffrey and Abers (1988) που έχει βασιστεί στον αλγόριθμο αντιστροφής του Nábělek (1984) και περιγράφεται από τους McCaffrey et al. (1991), για τον υπολογισμό του μηχανισμού γένεσης, χρησιμοποιώντας κυματομορφές από αποστάσεις 30ο-90ο για τα επιμήκη κύματα και 35ο – 84ο για τα εγκάρσια κύματα, για να αποφύγουμε τις επιδράσεις της δομής του άνω μανδύα. Στην αντιστροφή, χρησιμοποιώντας γραμμική προσέγγιση, προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε τις διαφορές στο σχήμα και το πλάτος, μεταξύ των μακράς περιόδου P- και SH- κυματομορφών και των αντίστοιχων συνθετικών κυματομορφών. Τα συνθετικά σειсмоγράμματα υπολογίζονται για σημειακή πηγή που βρίσκεται σε στρώματα απλής δομής, συνδυάζοντας τις αφίξεις των απευθείας κυμάτων (είτε P ή S) με τις ανακλάσεις κοντά στην πηγή (pP και sP, ή sS) και με τις πολλαπλές αφίξεις κοντά στην πηγή (near source multiples). Αρχικά εξετάστηκε η περίπτωση μιας σημειακής πηγής χρησιμοποιώντας μόνο P- κύματα (Σχ. 4).

55/53/110/67/1.056E19

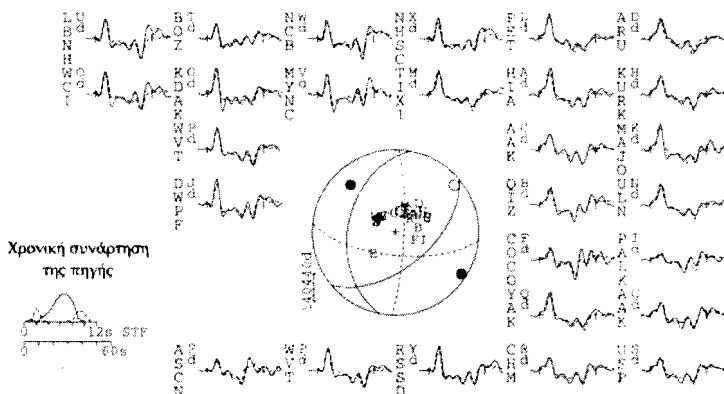


Σχήμα 4. Μηχανισμός γένεσης, με αντιστροφή των κυμάτων χώρου, για το σεισμό των Κυθήρων (8 Ιανουαρίου 2006, M 6.7). Πραγματικές (συνεχής γραμμή) και συνθετικές (σπικτική γραμμή) καταγραφές. Αριστερά από κάθε ζεύγος καταγραφών παρουσιάζεται το όνομα του σταθμού και ο κωδικός. Κάτω αριστερά εμφανίζεται η χρονική συνάρτηση της πηγής. Στο πάνω μέρος του σχήματος παρουσιάζεται η παράταξη(°)/γωνία κλίσης(°)/γωνία ολισθησης(°)/βάθος (km)/σεισμική ροπή (Nt.m). Τα μαύρα βέλη δηλώνουν θέσεις όπου η ταύπιση πραγματικών συνθετικών καταγραφών δεν είναι ικανοποιητική.

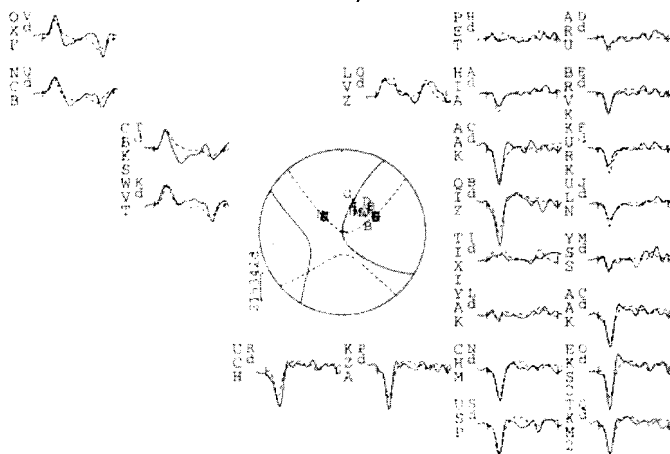
Οι φάσεις βάθους ρP και sP είναι εξαιρετικά σημαντικές για τον καλλίτερο προσδιορισμό του βάθους έκλυσης της σεισμικής ροπής, και από η ταύτιση μεταξύ πραγματικών και συνθετικών καταγραφών είναι ικανοποιητική (Σχ. 4). Από τη μορφή της χρονικής συνάρτησης της πηγής παρατηρείται ότι στην αρχή της διάρρηξης εκλύθηκε ένα μικρό ποσοστό της ροπής (προδιάρρηξη) ενώ η κύρια έκλυση ξεκίνησε ~4 sec αργότερα. Αν και η ταύτιση είναι αρκετά καλή, στους ανατολικούς σταθμούς παρατηρείται αδυναμία των συνθετικών να προβλέψουν το πλάτος των πραγματικών (μαύρα βέλη στο Σχ. 4). Για τη διερεύνηση και τη βελτίωση της ταύτισης, καθώς επίσης και για τη διερεύνηση της αιτίας του υψηλού ποσοστού CLVD, πραγματοποιήθηκαν και άλλες δοκιμές στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν δύο ή περισσότερες σημειακές πηγές. Επίσης εφαρμόστηκε διαφορετικό ζωνοπερατό φίλτρο επιτρέποντας τη διέλευση υψηλότερων συχνοτήτων (-0.2 Hz). Το τελικώς προτεινόμενο μοντέλο (minimum misfit) για το μηχανισμό γένεσης του σεισμού των Κυθήρων παρουσιάζεται στο σχήμα 5.

1:50/55/115/67/1.097E19
2:96/67/189/64/3.775E18

P- κύματα



SH- κύματα



Σχήμα 5. Μηχανισμός γένεσης για το σεισμό των Κυθήρων (8 Ιανουαρίου 2006, M 6.7) έπιπτα από την αντιστροφή με χρήση δύο σημειακών πηγών και συχνοτικό εύρος 0.01-0.2 Hz. Πραγματικές (συνεχής γραμμή) και συνθετικές (στικτή γραμμή) καταγραφές (Συμβολισμοί όπως στο Σχ. 4)

Οι παράμετροι των πηγών είναι: Πηγή 1: $h=67$ km, $M_0=1.1E26$ dyn.cm, $M_w=6.7$, Ορικό επίπεδο 1: $\varphi=50^\circ$, $\lambda=55^\circ$, $\xi=115^\circ$, Ορικό επίπεδο 2: $\varphi=191^\circ$, $\lambda=42^\circ$, $\xi=59^\circ$, $\rho\alpha\zeta=123^\circ$, $\rho\kappa\lambda=7^\circ$, $\tau\alpha\zeta=15^\circ$, $\tau\kappa\lambda=69^\circ$, Διάρκεια $TR = 8$ sec; Πηγή 2: $h=64$ km, $M_0=3.8E25$ dyn.cm, Ορικό επίπεδο 1: $\varphi=96^\circ$, $\lambda=67^\circ$, $\xi=-171^\circ$, Ορικό επίπεδο 2: $\varphi=2^\circ$, $\lambda=82^\circ$, $\xi=-23^\circ$, $\rho\alpha\zeta=317^\circ$, $\rho\kappa\lambda=22^\circ$, $\tau\alpha\zeta=51^\circ$, $\tau\kappa\lambda=10^\circ$, $TR = 6$ sec. Η κύρια έκλυση της σεισμικής ροπής έγινε σε ανάστροφο ρήγμα, ενώ η διάρρηξη και δεύτερο ρήγματος αποτελεί τμήμα της διαδικασίας διάρρηξης. Να σημειώσουμε ότι η ταύτιση μεταξύ πραγματικών και συνθετικών καταγραφών με περισσότερες των δύο πηγές βελτιώνονται ακόμα περισσότερο, αλλά εδώ υιοθετήθηκε το απλούστερο δυνατό μοντέλο το οποίο είναι ικανό να παράγει ικανοποιητικές συνθετικές καταγραφές. Η χρονική συνάρτηση της πηγής δείχνει ότι η κύρια έκλυση της σεισμικής ροπής έγινε στο διάστημα 5-8 sec έπειτα από την έναρξη της διάρρηξης ενώ η δεύτερη πηγή είχε συνεισφορά τόσο στην αρχή όσο και στο τέλος της διαδικασίας. Πραγματοποιώντας ευθύ υπολογισμό των συνθετικών καταγραφών διαπιστώσαμε ότι η δεύτερη πηγή παίζει καθοριστικό ρόλο στην ερμηνεία φάσεων, τις οποίες αδυνατεί να προσομοιώσει μόνη της η πρώτη πηγή.

3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

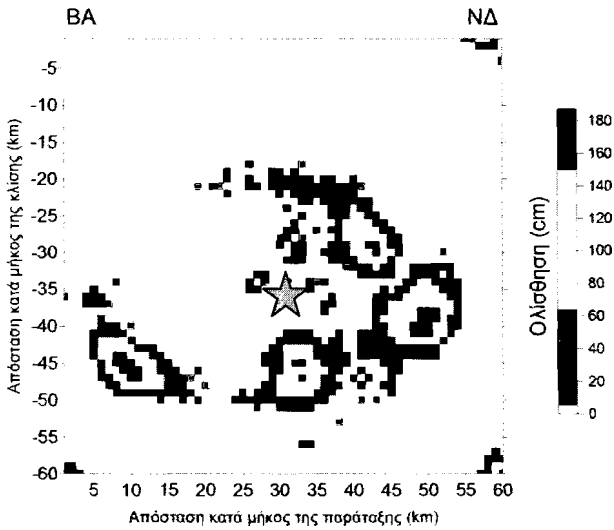
3.1 Δεδομένα

Για την εύρεση της κατανομής της ολίσθησης στο σεισμογόνο ρήγμα του σεισμού των Κυθήρων συλλέχθηκαν δεδομένα από το Παγκόσμιο Δίκτυο Σειсмоγράφων (Global Seismographic Network – GSN). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 36 σταθμούς οι οποίοι παρέχουν ικανοποιητική αζιμουθιακή κάλυψη γύρω από το επίκεντρο του σεισμού. Ο κοντινότερος σταθμός βρίσκεται σε απόσταση ~600 km ενώ ο πιο απομακρυσμένος σε απόσταση ~6500 km. Από τα δεδομένα απομακρύνθηκε η επίδραση του οργάνου καταγραφής, πραγματοποιήθηκε ολοκλήρωση ώστε να μετατραπούν σε καταγραφές μετάθεσης και εφαρμόστηκε ζωνοπερατό φίλτρο με εύρος 0.01-0.2 Hz. Οι συναρτήσεις Green οι οποίες είναι απαραίτητες για τη διαδικασία αντιστροφής κατασκευάστηκαν με χρήση του κώδικα FKRPROG (Saiκία 1994) και το μοντέλο ταχυτήτων IASP91 (Kennett and Engdahl 1991).

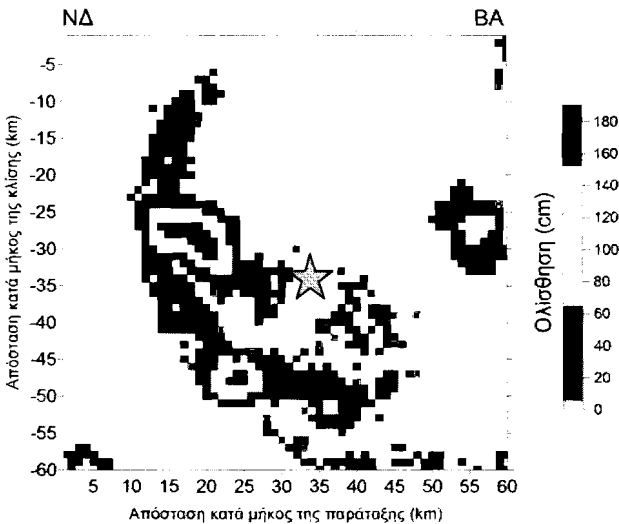
Για τον προσανατολισμό και τη θέση του ρήγματος στο χώρο χρησιμοποιήθηκαν δύο δυνατές λύσεις, σύμφωνα με τους μηχανισμούς γένεσης που υπολογίσαμε και παρουσιάσαμε προηγουμένως. Αρχικά, έγιναν αντιστροφές με τη χρήση ενός επιπέδου (μία πηγή) και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν δοκιμαστικές αντιστροφές με δύο επίπεδα, τα οποία αντιστοιχούν σε δύο πηγές. Η αναγνώριση του επιπέδου ολίσθησης είναι δύσκολη, τόσο με βάση την κατανομή των λίγων μετασεισμών, όσο και με βάση τις ήδη υπάρχουσες εργασίες για το σεισμό των Κυθήρων όσον αφορά ποιο ήταν το επίπεδο του ρήγματος (Konstantinou et al., 2006; Zahradnik et al., 2006; Vergoz et al., 2006; Plicka, 2007).

3.2 Μοντέλο ολίσθησης με τη χρήση μίας πηγής

Για το μοντέλο ολίσθησης με μόνη την Πηγή 1 εξετάσαμε και τα δύο ορικά επίπεδα του μηχανισμού γένεσης, καθώς δεν γνωρίζουμε το επίπεδο του ρήγματος. Υπάρχουν κάποιες ενδείξεις για το επίπεδο με κλίση προς τα ΝΑ, με βάση κατά κύριο λόγο την κατανομή των μετασεισμών. Εξετάστηκαν πρώτα το επίπεδο που κλίνει προς τα ΒΔ με παραμέτρους $191^\circ/42^\circ/59^\circ$ (παράταξη, γωνία κλίσης, γωνία ολίσθησης) και έπειτα το δεύτερο ορικό επίπεδο το οποίο κλίνει προς τα ΝΑ, με παραμέτρους $50^\circ/55^\circ/115^\circ$, ενώ κατά την αντιστροφή όλες οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν σταθερές. Οι διαστάσεις που δόθηκαν στο ρήγμα ήταν 60×60 km ώστε η ολίσθηση να μετακινηθεί στην προτιμητέα θέση χωρίς να συναντήσει εμπόδια στα όρια του μοντέλου. Η επιφάνεια του ρήγματος διακριτοποιήθηκε σε τμήματα διαστάσεων 1×1 km, και το επίκεντρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτό του Εργαστηρίου Γεωφυσικής με συντεταγμένες $\varphi=36.156^\circ$ $\lambda=23.356^\circ$ ενώ το βόθρο του υποκέντρου τοποθετήθηκε στα 67 km. Κατά την εφαρμογή των αντιστροφών χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τιμές για την ταχύτητα διάρρηξης (από 1.8 έως 3.6 km/sec, με βήμα 0.2 km/sec). Η βέλτιστη τιμή της ταχύτητας διάρρηξης που παρουσιάζει την καλύτερη μείωση της συνάρτησης διασποράς είναι 2.8 km/sec. Η κατανομή της ολίσθησης στο σεισμογόνο ρήγμα για το επίπεδο με κλίση προς τα ΒΔ ($191^\circ/42^\circ/59^\circ$) εμφανίζει τέσσερις κύριες συγκεντρώσεις, (Σχ. 6) με μέγιστη τιμή ~1.9 m.



Σχήμα 6. Κατανομή της ολίσθησης στην επιφάνεια του ρήγματος κατά το σεισμό των Κυθήρων (8 Ιανουαρίου 2006, M 6.7) με χρήση ενός επιπέδου ρήγματος που κλίνει προς τα ΒΔ ($191^{\circ}/42^{\circ}/59^{\circ}$). Ο αστερίσκος δηλώνει το υπόκεντρο.



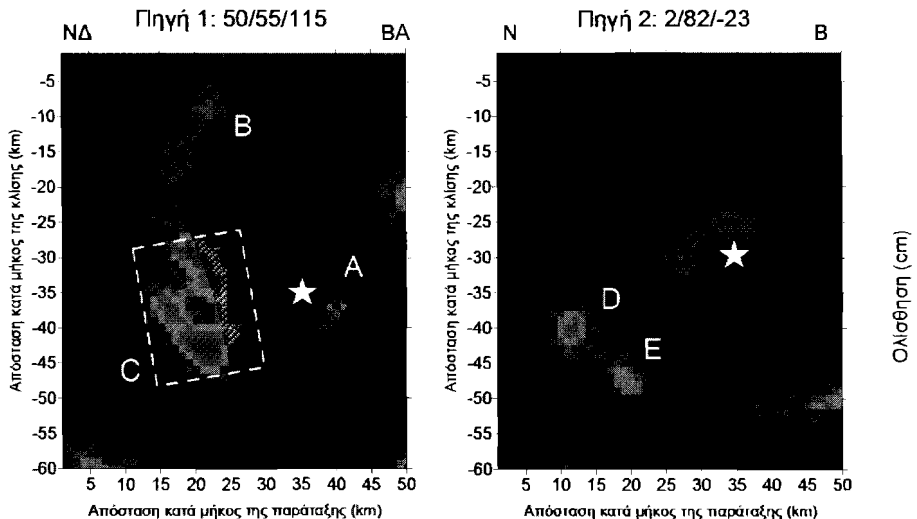
Σχήμα 7. Κατανομή της ολίσθησης στην επιφάνεια του ρήγματος κατά το σεισμό των Κυθήρων (8 Ιανουαρίου 2006, M 6.7) με χρήση ενός επιπέδου ρήγματος που κλίνει προς τα ΒΔ ($50^{\circ}/55^{\circ}/115^{\circ}$). Ο αστερίσκος δηλώνει το υπόκεντρο.

Η κατανομή της ολίσθησης στο επίπεδο με κλίση προς τα ΝΑ ($50^{\circ}/55^{\circ}/115^{\circ}$), επίσης δείχνει πολλαπλές συγκεντρώσεις οι οποίες βρίσκονται προς τα ΝΔ του επικέντρου υποδηλώνοντας κατευθυντικότητα προς αυτή την διεύθυνση. Ο Plicka (2007) χρησιμοποίησε τη μέθοδο των εμπειρικών συναρτήσεων Green για τον υπολογισμό της ολίσθησης και της κατευθυντικότητας του σεισμού των Κυθήρων και παρατήρησε ότι σταθμοί προς τα δυτικά και νότια παρουσιάζουν μικρότερες διάρκειες και μεγαλύτερα πλάτη από αυτούς προς τα ΒΑ, επιβεβαιώνοντας την ένδειξη της προς τα ΝΔ κατευθυντικότητας.

3.3 Μοντέλο ολίσθησης με τη χρήση δύο πηγών

Από τα δύο ορικά επίπεδα κάθε μηχανισμού (Σχ. 5) επιλέχθηκε το επίπεδο με παραμέτρους $50^\circ/55^\circ/115^\circ$ από την πηγή 1 και το επίπεδο με παραμέτρους $2^\circ/82^\circ/-23^\circ$ από την πηγή 2. Ορίστηκαν δύο ρήγματα διαστάσεων 50×60 km τα οποία διακριτοποιήθηκαν σε τμήματα διαστάσεων 1×1 km. Τοποθετήθηκαν σε εστιακά βάθη 67 km και 64 km αντίστοιχα, και για την ενεργοποίησή τους εξετάστηκαν διαφορετικές χρονικές καθυστερήσεις. Κατά την αντιστροφή των τηλεσεισμικών κυμάτων για τον υπολογισμό του μηχανισμού γένεσης υπολογίστηκε χρονική καθυστέρηση 1 sec μεταξύ των ενεργοποιήσεων των πηγών και αρχικά χρησιμοποιήθηκε αυτή η τιμή, στη συνέχεια όμως είδαμε ότι ταυτόχρονη ενεργοποίηση των πηγών δίνει καλύτερα αποτελέσματα, πράγμα που υιοθετήσαμε. Για τις ταχύτητες διάρρηξης εξετάστηκε εύρος από 1.8-3.6 km/sec και τελικά υιοθετήθηκε τιμή 2.7 km/sec και για τα δύο ρήγματα.

Είναι προφανές (Σχ. 8 αριστερά) ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της ολίσθησης κατανέμεται στο ρήγμα της πηγής 1 ($50^\circ/55^\circ/115^\circ$) και συγκεντρώνεται σε τρεις λοβούς (A, B, και C στο σχήμα 8), που βρίσκονται χωρικά πολύ κοντά μεταξύ τους, και περίπου 15 km ΝΔ του υπόκεντρου. Οι συνολικές διαστάσεις των λοβών είναι 15km κατά μήκος της παράταξης και 20 km κατά μήκος της κλίσης, βρίσκονται δε στο βαθύτερο τμήμα του ρήγματος. Η μέγιστη τιμή της ολίσθησης είναι ~ 1.7 m, ενώ η μέση τιμή της, σε όλη την επιφάνεια του ρήγματος, είναι 0.3m. Η διάρρηξη της πηγής 2 ($2^\circ/82^\circ/-23^\circ$), που έχει μηχανισμό γένεσης με παρατάξεις ρηγμάτων που είναι χαρακτηριστικές για την ανατολική πλευρά του Ελληνικού τόξου, και ισχυρότερη συνιστώσα οριζόντιας μετατόπισης (σε σχέση με πηγή 1), προβλέπει ολίσθηση σε δυο λοβούς μικρών διαστάσεων (D, E, στο σχήμα 8), περίπου 25 km νότια του υπόκεντρου, και πάλι στα βαθύτερα τμήματα του ρήγματος. Οι μέγιστες τιμές της ολίσθησης είναι μικρότερες σε σχέση με την πηγή 1, και αποκτούν τιμές λίγο μεγαλύτερες από 1 m. Η κύρια συκέντρωση της ολίσθησης ΝΔ της εστίας βρίσκεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των Vergoz et al. (2006) και Plicka (2007).



Σχήμα 8. Μοντέλο ολίσθησης στην επιφάνεια του ρήγματος κατά το σεισμό των Κυθήρων (8 Ιανουαρίου 2006, M 6.7) με ταυτόχρονη διάρρηξη δυο ρηγμάτων σε βάθη 67 και 64 km και κλίση προς ΝΑ και Α, ($50^\circ/55^\circ/115^\circ$ και $2^\circ/82^\circ/-23^\circ$ - αριστερά και δεξιά του σχήματος, αντίστοιχα). Ο αστερίσκος αντιπροσωπεύει τη θέση της εστίας για την πηγή 1 και τη θέση έναρξης της διάρρηξης της πηγής 2.

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση είναι προφανές ότι ο σεισμός των Κυθήρων εμφανίζει πολυπλοκότητα, απόκλιση από το διπλό ζεύγος δυνάμεων, με υψηλά ποσοστά CLVD, δυσκολία στο να ορισθεί μονοσήμαντα το επίπεδο του ρήγματος, δυσκολία επίσης στο να βρεθεί βέλτιστο μοντέλο ολίσθησης με τα

Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστος - Τμήμα Γεωλογίας. Α.Π.Θ.

τηλεσεισμικά δεδομένα μόνο, καθώς οι κυματομορφές δεν παρουσιάζουν εξαιρετική ευαισθησία στις λεπτομέρειες της διάρρηξης, αλλά με βάση τα μέχρι στιγμής δεδομένα που επεξεργασθήκαμε, το μοντέλο ολίσθησης που προτείνουμε (Σχ.8) αποτυπώνει τα γενικά χαρακτηριστικά της διάρρηξης.

Είναι, όμως, γεγονός ότι στο σεισμό των Κυθήρων απαιτείται η συμμετοχή πολλαπλών ρηγμάτων διαφορετικών προσανατολισμών, όπως προβλέπεται και από την ερμηνεία των CLVD's. Με τη χρήση τηλεσεισμικών καταγραφών είναι εφικτή εκτίμηση της κατανομής της ολίσθησης, αλλά για λεπτομερή απεικόνισή της πάνω στην επιφάνεια του ρήγματος είναι απαραίτητη η χρήση και δεδομένων από κοντινούς σταθμούς.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα αυτή ενισχύθηκε οικονομικά από το Πρόγραμμα INTERREG IIIA (Greece-FYROM) και από τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Έκθεση Ι.Τ.Σ.Α.Κ. 2006. The Kythira (Greece) earthquake of January 8, 2006: Preliminary Report on strong motion data, Geotechnical and Structural damage, σελ. 21.
- Benetatos, Ch., Kiratzi, A., Papazachos C. and G. Karakaisis, 2004. Focal mechanisms of shallow and intermediate depth earthquakes along the Hellenic Arc. *Journal of Geodynamics*, Vol. 37 (2), 253-296.
- Dreger D. S. 2003. "TDMT_INV: Time Domain Seismic Moment Tensor INVersion", *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology*, W. H. K. Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings and C. Kisslinger (eds.), Vol. B, pp. 1627.
- Kennett, B. & Engdahl E., 1991. Travel times for global earthquake location and phase identification. *Geophys. J. Int.*, 105, 429-465.
- Kiratzi, A.A. & Papazachos C.B., 1995. Active seismic deformation in the southern Aegean Benioff zone. *J. Geodynam.*, 19, 65-78.
- Konstantinou, K., Kalogeras, I., Melis, N., Kourouzidis, M., & Stavrakakis, 2006. The 8 January 2006 Earthquake (Mw 6.7) Offshore Kythira Island, Southern Greece: Seismological, Strong-motion, and Macroscopic Observations of an Intermediate-depth Event. *Seismological Research Letters Volume 77*, 544-553.
- McCaffrey, R. & Abers, G., 1988. SYN3: A Program for Inversion of Teleseismic Body Waveform on Microcomputers. Air Force Geophysics Laboratory, Technical Report, AFGL-TR-88-0099.
- McCaffrey, R., Abers, G. & Zwick, P. 1991. Inversion of Teleseismic Body Waves. *International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior*, pp. 166.
- Nábělek, J.L., 1984. Determination of earthquake source parameters from inversion of body waves. Ph.D Thesis, MIT, MA.
- Papazachos, B.C. & Comninakis P.E., 1971. Geophysical and tectonic features of the Aegean arc. *J. Geophys. Res.*, 76, 8517-8533.
- Plicka, V., 2007. Imaging of seismic rupture process of the Kythira Mw6.7 earthquake: Inversion from the relative source time functions. *Geophysical Journal Int.* (Υπό δημοσίευση).
- Richardson, E. and Jordan, T., 2002. Low-frequency properties of intermediate-focus earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 2434-2448.
- Roumelioti, Z., Benetatos, Ch., Kiratzi, A. and D. Dreger, 2008. Near-real time moment tensors for earthquakes in Greece based on seismological data of the Hellenic Unified Seismological Network, 3rd National Conference of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Athens, 5-7 November, 2008, paper ID:1789.
- Saikia C.K., 1994. Modified frequency-wavenumber algorithm for regional seismograms using Filon's quadrature; modelling of Lg waves in eastern North America. *Geophys. J. Int.*, 118, 142-158.
- Tassos S. T., 1984. Static and dynamic properties of the upper mantle in the southern Aegean area, Ph.D Thesis, Univ. of Thessaloniki.
- Vergoz, J., Vallée, M., Guilbert, J. & Bollinger, L., 2006. Fast imaging of seismic rupture process of the recent earthquakes of the July 2005 - April 2006 period with Mw > 6.8, EGU General Assembly 2006, Vienna, Austria, 2-7 April, 2006.
- Zahradnik J., Jansky, J, Plicka, V. & Sokos, E., 2006. Cythera M6.7 earthquake (January 8, 2006) in southern Aegean: uneasy retrieval of the upward rupture propagation. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 3-8 September, 2006.