

Τελική έκθεση

Ιδιότητες των σεισμικών πηγών στην Ελλάδα με έμφαση στη λεπτομερή μελέτη των σεισμών ενδιαμέσου βάθους του νοτίου Αιγαίου

Φορέας Εκτέλεσης του Έργου

Αρι οτ στέλει ο Πανε π στήμ ο Θεσσαλονίκης, Τομέας Γεωφυσικής
Συντονιστής και Επισημονική υπεύθυνος: Αναστασία Κυρατζή, Καθηγήτρια

Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τομέας Γεωθερμίας και Γεωφυσικής
Επισημονικός Υπεύθυνος: Κωνσταντίνος Μακρόπουλος, Καθηγητής



Θεσσαλονίκη
Σεπτέμβριος 2002

Στόχοι του προγράμματος

1. Ο λεπτομερής καθορισμός των ιδιοτήτων των σεισμικών πηγών των σεισμών της Ελλάδας, τόσο των επιφανειακών όσο και των σεισμών ενδιαμέσου βάθους του νοτίου Αιγαίου
2. Ο καθορισμός του μηχανισμού γένεσης όλων των σεισμών με μέγεθος $M > 5$, τόσο των επιφανειακών αλλά ιδιαίτερα των σεισμών ενδιαμέσου βάθους για τους οποίους δεν έχει πραγματοποιηθεί σχετική μελέτη στη χώρα μας
3. Ο καθορισμός του μηχανισμού γένεσης των σεισμών μέσου μεγέθους της χώρας μας, με σύγχρονες μεθοδολογίες, προκειμένου να αποκτήσουμε πληροφόρηση για περιοχές που δεν έχουμε καθόλου δεδομένα από μεγάλους σεισμούς ή από μικροσεισμούς
4. Η λεπτομερής αποτύπωση της χρονικής και χωρικής μεταβολής του πεδίου των τάσεων
5. Η αναγνώριση του επιπέδου του ρήγματος από ένα πλήθος μηχανισμών γένεσης, ο υπολογισμός των διανυσμάτων ολίσθησης και η σύγκριση αυτών με γεωδαιτικές μετρήσεις GPS
6. Η αποτύπωση σε χάρτη των ενεργών ρηγμάτων, των μηχανισμών γένεσης των σεισμών, της σεισμικότητας.
7. Ο συνδυασμός των ανωτέρων σεισμοτεκτονικών πληροφοριών για την εκτίμηση του σεισμικού δυναμικού των ρηγμάτων της χώρας μας

Επιστημονικά Αποτελέσματα Του Προγράμματος

ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΠΗΓΩΝ

Κυρατζή Αναστασία, Λούβαρη Ελένη, Γκολαπιδής Αντώνης, Ρουμελιώτη Ζαφειρά
κα Παναγιώτου Μαρία

Εργαστήριο Γεωφυσικής, ΑΠΘ

Φασματική ανάλυση των εγκαρσίων κυμάτων για σεισμούς της κεντρικής Ελλάδας – Καθορισμός σχέσεων

Γενικά

Μα από τις μεθοδολογίες που συχνά ακολουθούνται για τον υπολογισμό των παραμέτρων της εστίας (διαστάσεις εστίας, σεισμική ροπή, γωνιακή συχνότητα, μεταξύ των άλλων) είναι αυτή της φασματικής ανάλυσης των επιμήκων ή εγκάρσιων κυμάτων (Keilis – Borok, 1959; Hanks and Wyss, 1972; Thatcher and Hanks, 1973; Archuleta et al., 1982).

Η ισχυρή σεισμική κίνηση, $u(t)$ προκύπτει ουσιαστικά από την συνέλιξη των συναρτήσεων:

$$u(t) = s(t) * m(t) * r(t) \quad (3.1)$$

όπου η συνάρτηση $s(t)$ περιγράφει την επίδραση της εστίας στην παρατηρούμενη σεισμική κίνηση, η συνάρτηση $m(t)$ την επίδραση του δρόμου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και τέλος, η συνάρτηση $r(t)$ εμπεριέχει το αποτέλεσμα των τοπικών συνθηκών στη θέση παρατήρησης. Στο πεδίο των συχνοτήτων, η πράξη της συνέλιξης μετατρέπεται σε πολλαπλασιασμό και έτσι η σχέση 3.1 μετασχηματίζεται στην ακόλουθη:

$$U(\omega) = S(\omega) \cdot M(\omega) \cdot R(\omega) \quad (3.2)$$

Από τη σχέση 3.2 προκύπτει ότι ένας από τους βασικότερους παράγοντες που καθορίζουν τη σεισμική κίνηση είναι η εστία και οι διεργασίες που πραγματοποιούνται σε αυτήν κατά την γένεση του σεισμού. Η συνάρτηση αυτή, $S(\omega)$, είναι πολύπλοκη συνάρτηση και αποτελεί σύνθεση πολλών παραμέτρων, όπως είναι η σεισμική ροπή, τα χαρακτηριστικά της διάρρηξης (σημείο έναρξης, ταχύτητα διάδοσης, κατευθυντικότητα) και το φασματικό περιεχόμενο της εκλυόμενης ενέργειας.

Μεθοδολογία

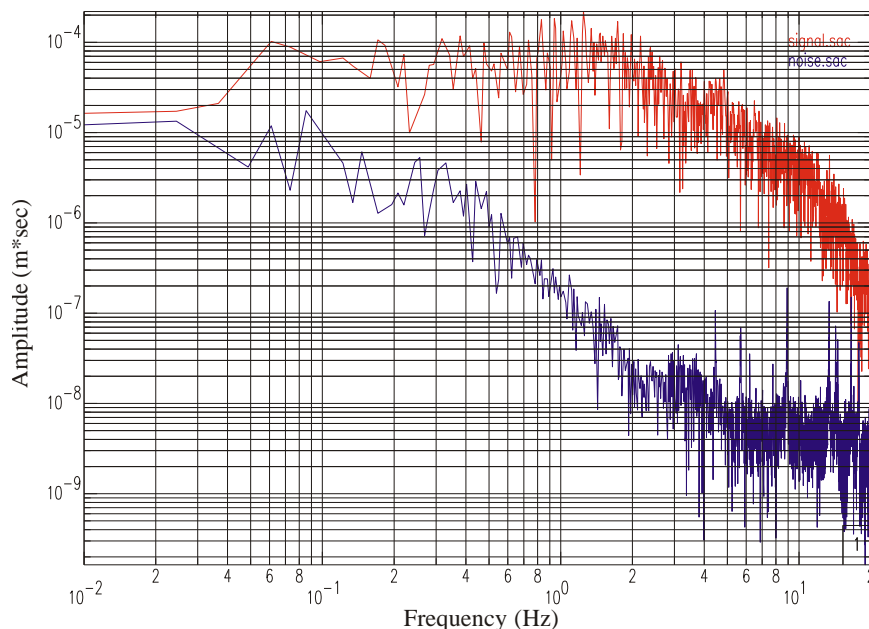
Κατά την φασματική ανάλυση τόσο των επιμήκων όσο και των εγκάρσιων κυμάτων, από το δυναμικό φάσμα της μετατόπισης υπολογίζεται η τιμή της ασύμπτωτης χαμηλών συχνοτήτων, Ω_0 , και η τιμή της γωνιακής συχνότητας, f_c . Έχει παρατηρηθεί ότι η τιμή του οριζοντίου τμήματος, Ω_0 , που ορίζουν οι χαμηλές συχνότητες του φάσματος μετατόπισης ενός σεισμού είναι ανάλογη της σεισμικής ροπής, ενώ η τιμή της γωνιακής συχνότητας, f_c , που προκύπτει από την τομή της ασύμπτωτης των χαμηλών συχνοτήτων με την ασύμπτωτη των υψηλών συχνοτήτων, είναι αντιστρόφως ανάλογη των διαστάσεων της σεισμικής πηγής.

Επεξεργασία των Ψηφιακών καταγραφών

Για την φασματική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές ταχύτητας. Οι πρωτογενείς καταγραφές ήταν, αρχικά, σε μονάδες Volt/(m/sec), ενώ μετά τη διόρθωση για την απόκριση του οργάνου (αφαίρεση του οργάνου) μετατράπηκαν σε μονάδες m/sec. Τα δεδομένα φιλτραρίστηκαν με βάση το λόγο σήματος προς θόρυβο. Κατά την διαδικασία αυτή, επλέχθηκε το χρονικό παράθυρο του σήματος και στην συνέχεια επλέχθηκε ίσο χρονικό παράθυρο του θορύβου (από το τμήμα της καταγραφής που βρίσκεται προ την είσοδο του σήματος) και

υπολογίστηκαν τα φάσματα τους, τα οποία χαρτογραφήθηκαν μαζί. Οι καταγραφές, στις οποίες ο λόγος αυτός δεν ήταν ικανοποιητικός, δεν χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς. Στην πλειοψηφία των καταγραφών το φίλτρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν band pass Butterworth με γωνιακές συχνότητες 0.1 και 20 Hz.

Στο σχήμα 1 απεικονίζονται τα φάσματα σήματος και θορύβου για τον σεισμό (97-03-21) στο σταθμό VAV.



Σχήμα 1.: Φάσματος (κόκκινο) και φασματικό θόρυβο (μπλε) για τον καθρέφτη. Τα φάσματα προέκυψαν από την καταγραφή του σεισμού 97-03-21 στο σταθμό VAV.

Μετά από την επιλογή των χρονικών παραθύρων των S κυμάτων από τις δύο οριζόντιες συνιστώσες κάθε σεισμού, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα F_c σε γλώσσα Fortran για τον υπολογισμό της γωνιακής συχνότητας, f_c , κατά το οποίο πραγματοποιείται έλεγχος αν το βήμα δειγματοληψίας είναι 0.02 samples/sec και διόρθωση για τη μέση στάθμη της σεισμικής κίνησης (base line correction). Στην συνέχεια πραγματοποιείται συνέλιξη των ακραίων σημείων κάθε καταγραφής (σε ποσοστό 10% του συνόλου των σημείων) με μια συνημιτονοειδή συνάρτηση (tapering 10%) και ακολουθεί μετασχηματισμός Fourier για την εξαγωγή του φάσματος μετατόπισης. Η τιμή της γωνιακής συχνότητας, f_c , υπολογίστηκε με το πρόγραμμα της Fortran σύμφωνα με τον τύπο (Andrews, 1986)

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\int_0^t V^2(f) df}{\int_0^t D^2(f) df}} \quad (3.3)$$

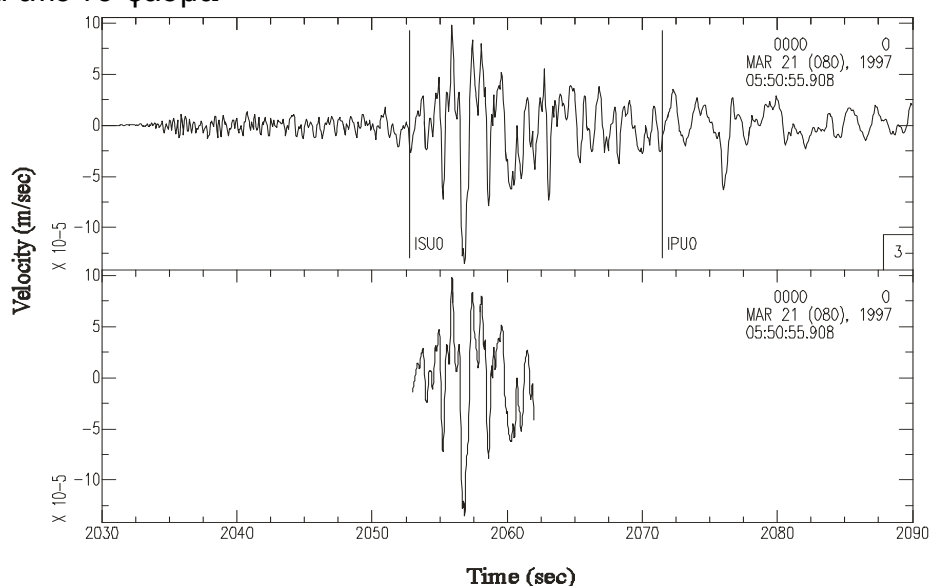
όπου $V^2(f)$ είναι το τετράγωνο του φάσματος της ταχύτητας, $D^2(f)$ το τετράγωνο του φάσματος μετατόπισης, για χρονικό παράθυρο t των S κυμάτων.

Η τιμή της γωνιακής ταχύτητας, f_c , του παραθύρου των S κυμάτων που είχε επιλεχθεί αρχικά χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του χρόνου διάρρηξης, T_d , σύμφωνα με την παρακάτω σχέση (Hermann, 1985):

$$T_d = \frac{1}{f_c} + 0.05 * R \quad (3.4)$$

όπου R η επκεντρική απόσταση (σε Km) και f_c η γωνιακή συχνότητα. Η σχέση αυτή προκύπτει από σχέσεις ισχυρής σεισμικής κίνησης (Boore and Atkinson, 1987; Toro and McGuire, 1987; Atkinson and Boore, 1990), οι οποίες βασίζονται στο μοντέλο των φασματικών πλατών Fourier.

Στην συνέχεια επλέγεται χρονικό παράθυρο των εγκαρσίων κυμάτων ίσο με τον χρόνο διάρρηξης, T_d και ακολουθείται ξανά η ίδια διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω για τον υπολογισμό του φάσματος μετατόπισης και της γωνιακής συχνότητας, f_c . Από το φάσμα μετατόπισης καθορίστηκε οπτικά η μέση τιμή των χαμηλών συχνοτήτων (ασύμπωτη χαμηλών συχνοτήτων Ω_0), ενώ η τιμή της γωνιακής συχνότητας, f_c , με το πρόγραμμα Fc, αλλά επαληθεύτηκε και οπτικά από το φάσμα.



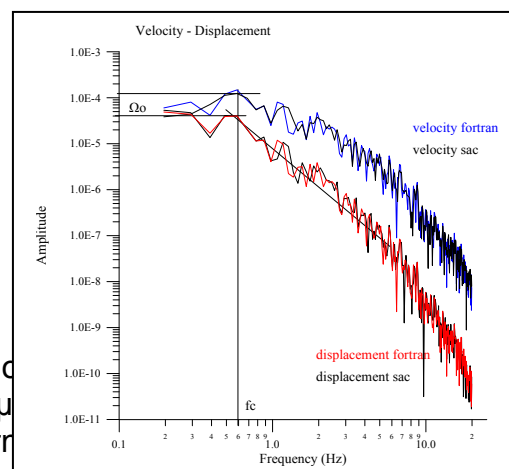
Σχήμα 2: Καταγραφή σεισμού 97-03-21 στο σταθμό AGG. Στο πάνω μέρος του σχήματος απεικονίζεται η καταγραφή της φασματικής απόκρισης και έχει σημειωθεί το πρώτο των S κυμάτων που επλήθηκε αρχικά. Ενώ στο κάτω μέρος δίνεται το φάσμα που επλήθηκε με τη χρησιμοποίηση τύπου $T_d = 1/f_c + 0.05R$.

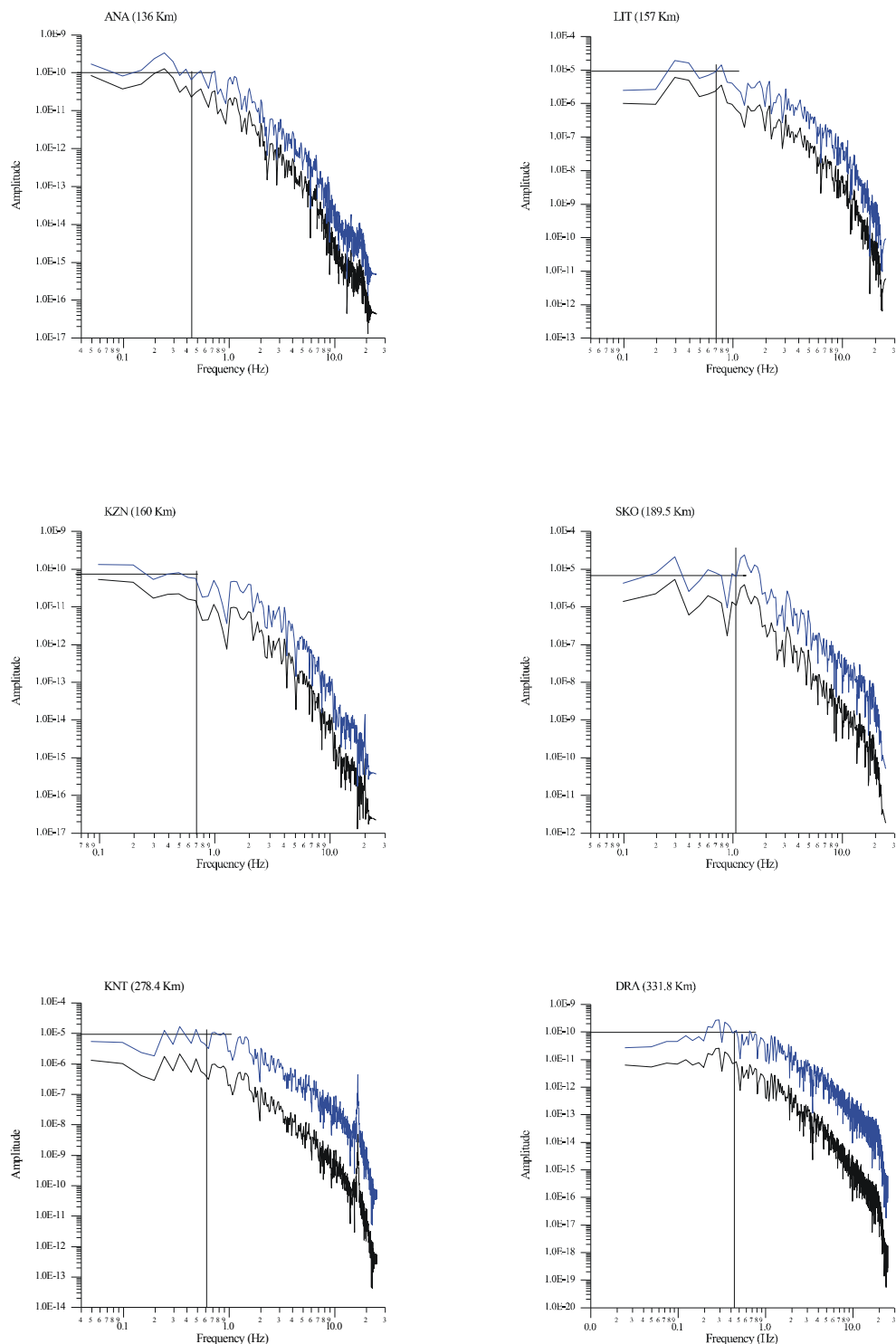
Στο σχήμα 3 απεικονίζονται τα φάσματα ταχύτητας και μετατόπισης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα SAC και το πρόγραμμα Fc. Επίσης σημειώνεται ο πλάτος της γωνιακής συχνότητας f_c , και η τιμή της αμplitudes των χαμηλών συχνοτήτων Ω_0 .

Σχήμα 3: Φάσματα ταχύτητας και μετατόπισης όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα SAC και το πρόγραμμα Fc. Επίσης σημειώνεται ο πλάτος της γωνιακής συχνότητας f_c , και η τιμή της αμplitudes των χαμηλών συχνοτήτων Ω_0 .

Διόρθωση για την Απόσβεση

Είναι γνωστό ότι τα πλάτη των σεισμικών παραγόντων που εξαρτώνται από το δρόμο διασπορά και η απόσβεση. Η διόρθωση (σχήμα 4) είναι αρκετά





Σχήμα 4: Αρχικά (μαύρο χρώμα) και διορθωμένα (μπλε χρώμα) φασμαμετρήσεις για τον σεισμό 97-03-09

πολύπλοκη, γιατί η απόσβεση μεταβάλλεται στο χώρο σε συνάρτηση με την συχνότητα. Το αποτέλεσμα της επίδρασης της απόσβεσης στο σεισμικό φάσμα παριστάνεται με μια εκθετική συνάρτηση μετασχηματισμού:

$$Amp = Amp / e \left(- \frac{\pi f R}{Q(f) c} \right) \quad (3.5)$$

όπου Amp το φασματικό πλάτος, f η συχνότητα, R η επκεντρική απόσταση, $Q(f)$ η σχέση του παράγοντα παύσης σε συνάρτηση με την συχνότητα και c η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων.

Η σχέση η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον παράγοντα παύσης, είναι μια γενική σχέση η οποία ισχύει για τον Ελληνικό χώρο

$$Q = 100f^{0.8} \quad (3.6)$$

Παράμετρα της εσίας

Από τα διορθωμένα φάσματα της μετατόπισης των δύο οριζόντιων συνιστωσών κάθε καταγραφής υπολογίστηκε η σεισμική ροπή M_0 , από την εμπειρική σχέση που τη συνδέει με την τιμή Ω_0 (Keilis – Borok, 1959)

$$M_0 = \frac{4\pi R \rho v^3 \Omega_0}{k R_{\theta\phi}} \quad (3.7)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του μέσου διάδοσης (2.72 gr/cm^3), R η υποκεντρική απόσταση μεταξύ της πηγής και του σταθμού παρατήρησης, v η ταχύτητα των επιμήκων ή εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων (3.4 km/sec για τα εγκάρσια κύματα), k σταθερά για τη διόρθωση του αποτελέσματος της ελεύθερης επιφάνειας και $R_{\theta\phi}$ συντελεστής που σχετίζεται με τον τρόπο ακτινοβολίας των σεισμικών κυμάτων (το γινόμενο $k R_{\theta\phi}$ λαμβάνει συνήθως τη μέση τιμή 0.85). Οι μέγιστες σεισμικές ροπές προσδιορίστηκαν για τον κάθε σεισμό σύμφωνα με την σχέση (Archuleta et al, 1982)

$$M_0 = \text{anti log} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log M_{0i} \right\} \quad (3.8)$$

όπου N ο αριθμός των σταθμών που χρησιμοποιήθηκαν και M_{0i} είναι η σεισμική ροπή που προσδιορίζεται από την σχέση (3.7), για την i καταγραφή.

Οι διαστάσεις των σεισμικών πηγών προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας τις μέσες τιμές της γωνιακής συχνότητας, f_c . Σχέσεις που συνδέουν τη γωνιακή συχνότητα f_c με την ακτίνα r κυκλικού ρήγματος έχουν προταθεί από τους Brune (1970, 1971) και Madariaga (1976, 1977) και είναι αντίστοιχα :

$$\begin{aligned} r &= \frac{0.37\beta}{f_c} && \text{Brune (1970,1971)} \\ r &= \frac{0.21\beta}{f_c} && \text{Madariaga (1976)(3.9)} \\ r &= \frac{0.40\beta}{f_c} && \text{Madariaga (1977)} \end{aligned}$$

όπου β η ταχύτητα των εγκάρσιων κυμάτων.

Για τις ανάγκες του παρόντος προγράμματος χρησιμοποιήθηκε η σχέση του Brune (1970, 1971) γιατί είναι η πιο διαδεδομένη και θεωρείται η πιο αξιόπιστη. Για τον υπολογισμό των τιμών της πτώσης τάσης, Δ_σ , χρησιμοποιήθηκε η σχέση του Keilis – Borok (1959):

$$\Delta_\sigma = \frac{7}{16} \frac{M_0}{r_a^3} \quad (3.10)$$

όπου στη θέση του r_a (ακτίνα κυκλικού ρήγματος) χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές που υπολογίστηκαν με τη διαδοχικά που αναφέρθηκε παραπάνω. Για τον

υπολογισμό της μετατόπισης, u , κατά μήκος της ρηξιγενούς επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε η σχέση του (Brune, 1968):

$$u = \frac{M_0}{\pi r^2 \mu} \quad (3.11)$$

όπου μ είναι το μέτρο δυσκαμψίας ($3 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$).

Αποτελέσματα της Φασματικής Ανάλυσης των Εγκάρσιων Κυμάτων

Οι παράμετροι της εστίας, όπως προέκυψαν από τη φασματική ανάλυση των εγκάρσιων κυμάτων των σεισμών που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, δίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1 : Παράμετροι της σεισμικής εστίας, όπως προέκυψαν από τη φασματική ανάλυση των εγκάρσιων κυμάτων των 32 σεισμών που μελετήθηκαν

Σεισμός	M_{LGR}	Αριθμός	Fc	$\Omega (10^{-05})$	$M_0 (10^{22})$	r	$\Delta\sigma$	u
(Ημερομηνία χρόνου)		Σεισμών	Hz	(m/sec)	dyn*cm	(Km)	(bar)	(cm)
97-04-6 22:18	5.1	10	0.52	12.50	61.00	2.419	18.85	11.064
97-03-21 06:17	5.0	12	0.70	3.87	19.10	1.797	14.40	6.278
97-02-16 11:03	4.9	4	0.83	5.89	21.20	1.516	26.64	9.797
97-03-05 15:06	4.9	6	0.46	3.77	20.53	2.735	4.39	2.914
97-03-30 12:57	4.8	6	1.02	2.31	13.60	1.233	31.72	9.491
97-04-28 03:17	4.8	8	0.52	3.44	15.40	2.419	4.76	2.793
97-02-04 02:41	4.7	3	1.19	4.31	14.70	1.057	54.44	13.964
97-04-29 23:52	4.5	7	0.70	1.70	7.93	1.797	5.98	2.607
97-03-09 11:36	4.4	6	0.57	0.89	2.79	2.207	1.14	0.608
97-04-07 04:31	4.3	6	0.98	0.52	2.29	1.284	4.736	1.475
97-04-28 10:28	4.3	7	0.51	1.13	5.17	2.467	1.507	0.902
97-04-30 18:36	4.3	6	0.78	1.48	3.54	1.613	3.692	1.445
97-02-12 22:55	4.2	3	0.81	1.14	4.20	1.553	4.905	1.848
97-02-13 11:11	4.2	3	0.81	0.45	1.41	1.553	1.647	0.621
97-02-13 12:51	4.2	2	0.84	0.40	1.02	1.498	1.329	0.483
97-02-01 23:48	4.1	4	1.71	0.70	1.87	0.736	20.548	3.668
97-02-13 10:27	4.1	2	0.55	0.71	1.81	2.287	0.662	0.367
97-02-13 17:11	4.1	2	0.83	0.45	1.17	1.516	1.470	0.541
97-02-19 08:49	4.1	2	0.82	0.55	1.39	1.534	1.684	0.627

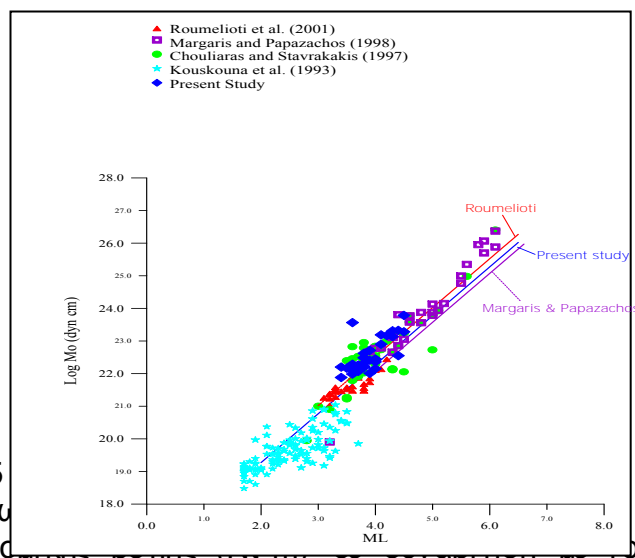
97-03-05 17:54	4.1	3	0.58	0.71	3.07	2.169	1.316	0.693
97-03-08 22:07	4.1	5	0.63	1.01	3.06	1.997	1.681	0.815
97-03-10 14:11	4.1	5	0.53	0.81	2.60	2.374	0.851	0.490
97-03-15 23:49	4.1	4	0.82	0.47	1.57	1.534	1.902	0.708
97-04-28 03:22	4.1	5	0.51	9.55	36.60	2.467	10.669	6.386
97-05-02 06:20	4.1	5	0.83	0.63	2.75	1.516	3.455	1.271
97-05-03 12:14	4.1	4	0.66	0.52	2.09	1.906	1.320	0.611
97-06-11 20:06	4.1	9	1.29	0.71	1.81	0.975	8.539	2.020
97-02-14 20:13	4.0	3	1.12	0.31	0.97	1.123	2.985	0.814
97-03-09 16:44	4.0	4	0.75	0.69	1.94	1.677	1.799	0.732
97-03-19 18:09	4.0	3	1.06	0.54	1.41	1.187	3.690	1.063
97-04-05 08:10	4.0	2	0.65	0.40	1.47	2.029	0.770	0.379
97-07-03 02:17	3.9	5	1.07	0.22	0.76	1.176	2.046	0.584

Σχέσεις μεταξύ των παραμέτρων της επίσης

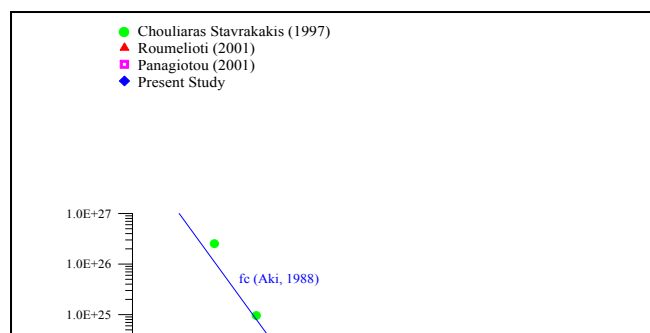
Στο σχήμα 5α φαίνεται η μεταβολή του λογαρίθμου της σεισμικής ροπής, M_0 (dyne*cm) σε συνάρτηση με το τοπικό μέγεθος, M_L . Με την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων στο σύνολο των αποτελεσμάτων, υπολογίζεται η σχέση:

$$\log M_0 = 1.5M_L + (16.27 \pm 0.59) \quad (3.12)$$

Σχήμα 5α Μεταβολή του λογαρίθμου της σεισμικής ροπής M_0 σε συνάρτηση με το τοπικό μέγεθος M_L

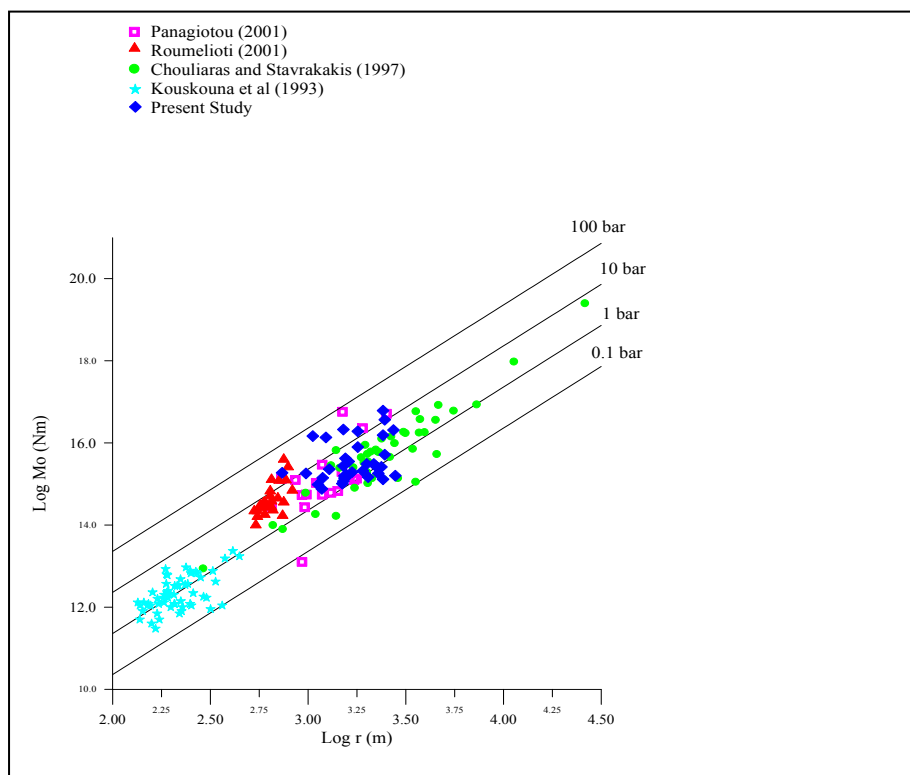


Στο σχήμα 5α φαίνεται η μεταβολή του λογαρίθμου της σεισμικής ροπής, M_0 , σε συνάρτηση με τη γωνία θ της σεισμικής ροπής, M_0 , σε συνάρτηση με το τοπικό μέγεθος, M_L . Με την εφαρμογή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων στο σύνολο των αποτελεσμάτων, υπολογίζεται η σχέση:

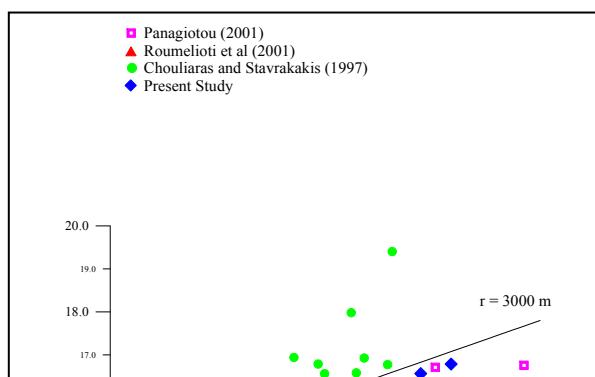


Σχήμα 5 β: Μεταβολής της σεισμικής ροπής σε συνάρτηση με τη γωνιακή συχνότητα

Σχήμα 6: Διάγραμμα μεταβολής του λογάριθμου της σεισμικής ροπής ($Nt \cdot m$) σε συνάρτηση με το λογάριθμο της ακτίνας, r , των σεισμικών πηγών (m).



Στο σχήμα 7 φαίνεται το διάγραμμα μεταβολής του λογάριθμου της σεισμικής ροπής, M ($Nt \cdot m$), σε συνάρτηση με το λογάριθμο της πίεσης τάσης, Δ_t (bars), καθώς επίσης και α ευθείες σταθερής τιμής ακτίνας της θεωρούμενης κυκλικής σεισμικής πηγής.



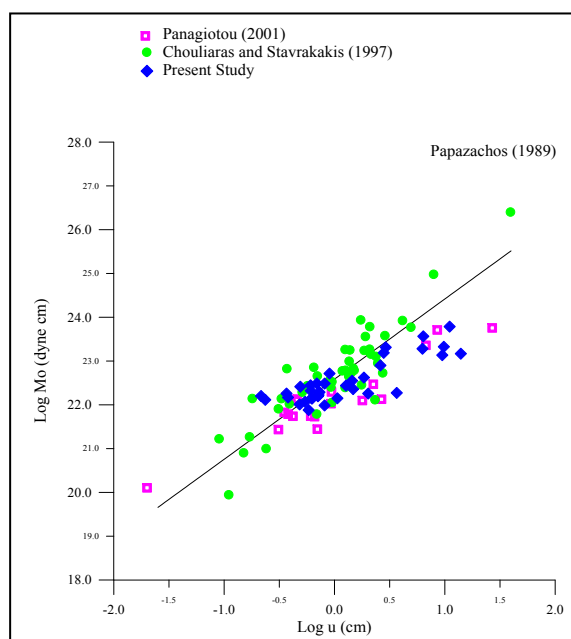
Σχήμα 7:

Μεταβολή της
σεισμικής ροπής
σε συνάρτηση με
την πτώσης τάσης

Στο σχήμα 8 παρουάζεται η μέση μετατόπιση, u (cm), πάνω στην επιφάνεια του ρήγματος, σε συνάρτηση με τον λογάριθμο της σεισμικής ροπής, M_0 (dyne*cm). Επίσης παρουάζονται και τα αποτελέσματα της εργασίας Παναγιώτου (2001). Στο σχήμα επίσης έχει χαρτογραφηθεί και η σχέση που έχει προταθεί από τον Papazachos (1989).

$$\log M_0 = 1.83 \log u + 22.586 \quad (3.13)$$

Σχήμα 8: Διάγραμμα μεταβολής του λογάριθμου της μέσης μετατόπισης, u (cm), πάνω στην επιφάνεια του ρήγματος σε συνάρτηση με τον λογάριθμο της σεισμικής ροπής, M_0 (dyne*cm).



Μηχανισμοί γένεσης των επιφανειακών σεισμών του Αιγαίου και της ευρύτερης περιοχής

Ο σεισμός της Τουρκίας και στη συνέχεια ο σεισμός της Αθήνας το 1999 αποτέλεσαν ένα ιδιαίτερο κίνητρο για την μελέτη τους τόσο από εμάς όσο και από άλλους ερευνητές. Για το σκοπό αυτό και στο πλαίσιο του παρόντος προγράμματος μελετήθηκαν τόσο οι σεισμοί της Τουρκίας όσο και ο σεισμός της

Αθήνας, με τη χρήση της μεθόδου της αντιστροφής των μακράς περιόδου κυμάτων χώρου.

Μηχανισμοί γένεσης και παράμετρα της εστίας των σεισμών της Ν κομήδειας 1999

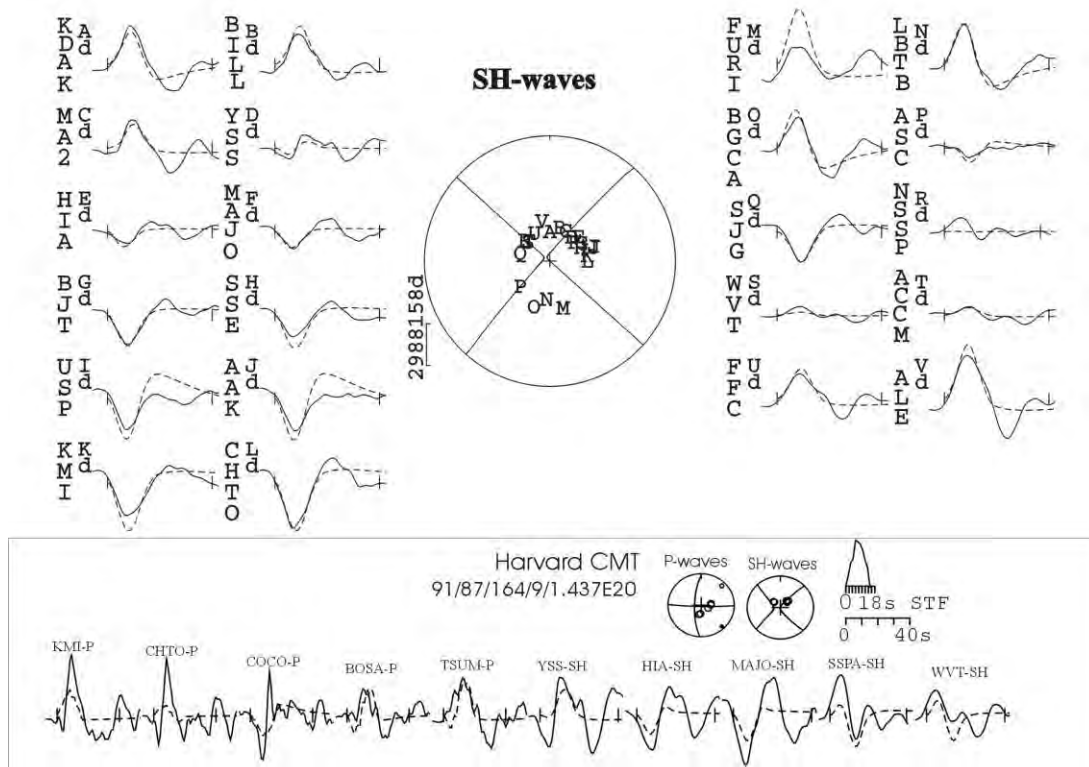
Με τη μέθοδο της αντιστροφής των κυμάτων χώρου και το πρόγραμμα ΜΠ5 μελετήθηκαν οι μηχανισμοί γένεσης της ακολουθίας της Ν κομήδειας και με τη μέθοδο της φασματικής ανάλυσης μελετήθηκαν οι παράμετρα της εστίας. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στους πίνακες 3.2.1 – 3.2.3 καθώς και στα αντίστοιχα σχήματα 9-13.

Πίνακας 3.2.1 Σταχία του μηχανισμού γένεσης 5 σεισμών της ακολουθίας της Ν κομήδειας 1999.

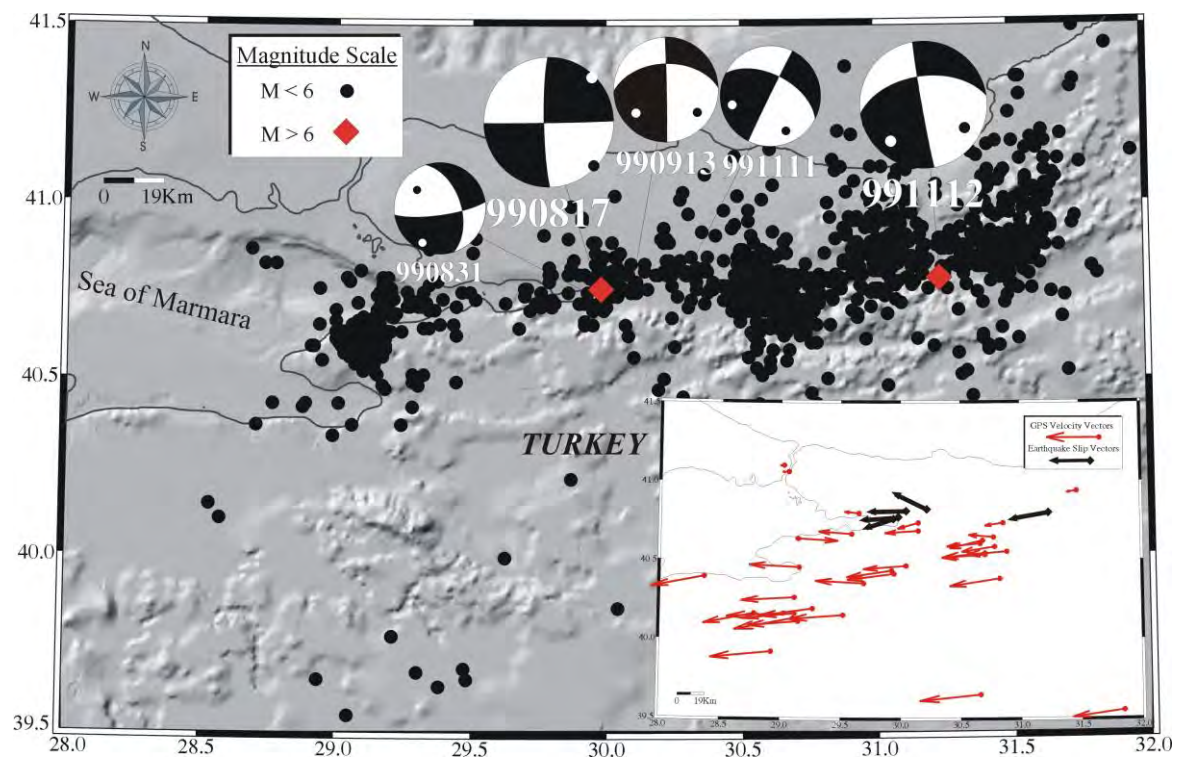
Date Y/M/D	Time H:M	Lat. (°)	Lon. (°)	M _w	M ₀ ×10 ¹⁷ Nm	Depth (Km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	P axis Az / Pl	T axis Az / Pl
1 990817	00:01	40.76	29.97	7.4	1311	10 (+2)	267 (+2)	85 (+1)	-175 (+3)	177	85	-5	132/7	222/0
2 990831	08:10	40.75	29.92	5.1	0.474	15 (+2)	82 (+15)	78 (+5/- 1)	-141 (+15)	343	52	-15	310/35	207/17
3 990913	11:55	40.80	30.03	5.7	4.901	16 (+1/- 2)	268 (+5)	49 (+2/- 5)	180 (+5/- 15)	359	89	41	126/27	232/28
4 991111	14:41	40.81	30.20	5.6	2.64	13 (+3)	297 (+5)	55 (+1)	-179 (+10)	206	89	-35	156/25	257/23
5 991112	16:57	40.79	31.21	7.1	470.8	12(+3) (+5)	262 (+5)	53 (+2)	-177 (+3)	170	88	-37	119/27	222/24

P-waves

Figure 1 displays 24 seismic waveforms (P-waves) recorded at various stations, arranged around a central map of the Pacific Northwest. The stations and their corresponding waveforms are: KAd, BId, FURId, BOSAd, SQRd, TSUMr, SURd, TSUMt, BGCSd, SHELt, GCAAd, SUGv, AASCd, SUGx, NDWd, SSPa, WWPd, SPANd, FCCM, SFJz, ALId, KBSd, and EAd. The central map shows the epicenter location (marked with a dot) and the locations of the stations (marked with dots). A scale bar indicates distances of 0 to 20 seconds and 0 to 60 seconds. The title "P-waves" is centered above the map.



14



Σχήμα 10. Ο μηχανισμός γένεσης των σεισμών της Τουρκίας 1999 που προσδώσαμε. Στο ένθετο παρουσιάζονται οι διευθύνσεις των διανυσμάτων ολίσθησης των σεισμών καθώς και αυτών που έχουν προκύψει από γεωδαιτικά στοιχεία

Πίνακας 3.2.2 Σταχά των σταθμών και πμές του φάσματος μακρινού - πεδίου που χρησιμοποήθηκαν για τον υπολογισμό των παραμέτρων της εστίας των σεισμών της Νικομήδειας.

a) Earthquake of August 17, 1999						b) Earthquake of November 12, 1999					
Station	Distance	Azimuth	Ω_o		f_c	Station	Distance	Az	Ω_o		f_c
Code	(Km)	(o)	$R_{\theta\phi}$	(m-sec)	(Hz)	Code	(Km)	(o)	$R_{\theta\phi}$	(m-sec)	(Hz)
BILL	4354	16	0.176	5.72E-04	0.051	BILL	4307	17	0.320	4.04E-04	0.046
NRIL	2673	27	0.309	1.44E-03	0.055	MA2	4878	28	0.409	4.90E-04	0.045
MA2	4943	28	0.206	1.01E-03	0.039	PET	5790	30	0.377	4.01E-04	0.056
YSS	5977	41	0.203	9.33E-04	0.054	YAK	4077	33	0.493	6.14E-04	0.041
HIA	4783	49	0.252	1.23E-03	0.062	YSS	5890	42	0.452	5.01E-04	0.055
MDJ	5632	49	0.219	9.81E-04	0.033	HIA	4692	49	0.560	7.38E-04	0.072
MAJO	6840	51	0.180	5.64E-04	0.067	MDJ	5536	50	0.512	5.01E-04	0.047
BJT	5342	59	0.214	1.39E-03	0.048	TLY	3797	51	0.627	8.15E-04	0.055
MAKZ	3035	63	0.283	1.90E-03	0.059	ULN	4189	55	0.613	5.58E-04	0.071
SSE	6401	65	0.169	4.79E-04	0.046	KURK	2642	57	0.698	6.45E-04	0.075
WMQ	3485	66	0.253	1.91E-03	0.05	BJT	5237	60	0.554	7.91E-04	0.056
XAN	5394	68	0.182	9.35E-04	0.059	MAKZ	2937	63	0.672	8.03E-04	0.090
TATO	6979	69	0.141	5.56E-04	0.072	SSE	6287	66	0.504	3.08E-04	0.078
USP	2741	70	0.239	1.93E-03	0.043	WMQ	3382	66	0.647	1.00E-03	0.089
TKM2	2819	71	0.234	1.91E-03	0.049	XAN	5282	69	0.550	6.24E-04	0.081
KBK	2790	71	0.230	1.88E-03	0.054	AAK	2660	72	0.650	7.81E-04	0.095
AAK	2764	71	0.229	1.88E-03	0.046	ENH	5617	73	0.526	6.21E-04	0.067
EKS2	2720	71	0.228	1.92E-03	0.053	LSA	4439	83	0.531	7.48E-04	0.072
ULHL	2883	72	0.224	1.91E-03	0.06	KMBO*	4286	171	0.015	2.44E-04	0.091
KZA	2830	72	0.220	1.87E-03	0.062	SUR*	7825	189	0.032	3.06E-04	0.051
KMI	5696	80	0.113	6.32E-04	0.057	TSUM*	6435	195	0.053	4.04E-04	0.057
LSA	4554	82	0.113	9.20E-04	0.061	ASCN	6629	232	0.235	4.10E-04	0.056
FURI	3217	163	0.161	4.51E-04	0.099	SJG	7976	288	0.332	1.99E-04	0.070
BGCA*	3666	199	0.084	7.51E-04	0.062	SSPA	6419	312	0.293	2.21E-04	0.072
ASCN*	6524	231	0.067	9.62E-04	0.036	CCM	7304	318	0.214	2.02E-04	0.062
SJG*	7885	287	0.077	3.70E-04	0.048	SFJ	3294	330	0.272	3.06E-04	0.065
DWPF*	7852	304	0.075	4.60E-04	0.048	KBS*	2174	354	0.073	2.08E-04	0.081
SSPA*	6368	312	0.097	4.86E-04	0.048						
WVT*	7319	314	0.070	4.75E-04	0.044						
CCM*	7261	317	0.063	4.48E-04	0.046						
SFJ	3276	330	0.119	5.94E-04	0.066						

Πίνακας 3.2.3 Παράμετρα της εστίας για τον κύριο σεισμό της Νικομήδειας και το σεισμό του Bolu.

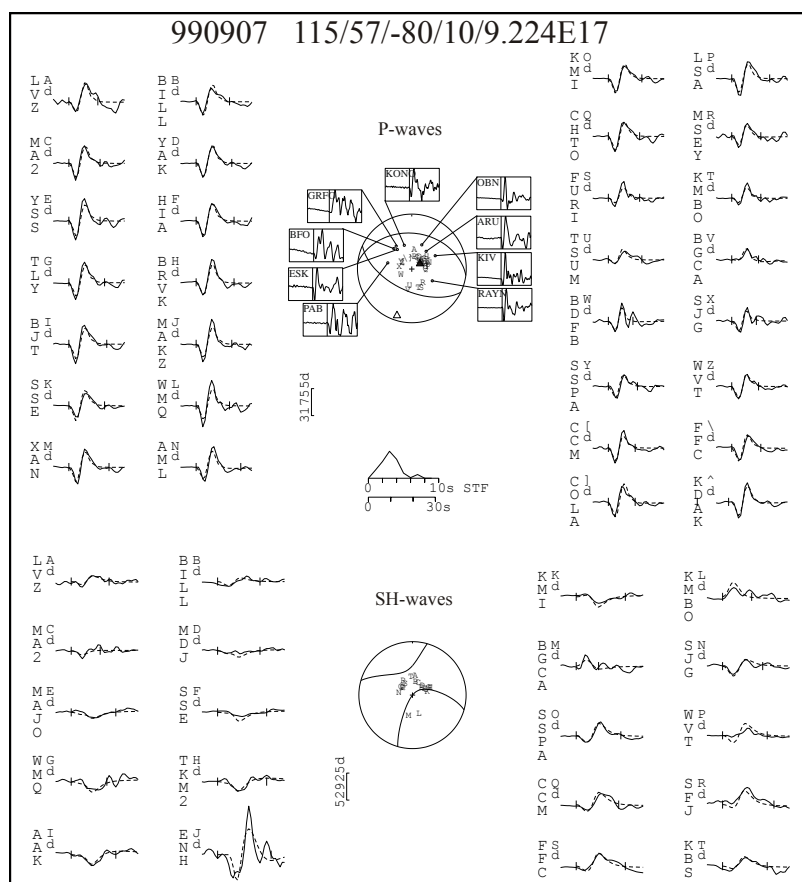
Earthquake	Moment	Stress Drop	Length	Width (Fix)	Displacement
	($\times 10^{17}$ Nm)	(bar)	(Km)	(Km)	(cm)
17 August 1999	2090 (± 578)	90 (± 38)	76 (± 35)	15	640 (± 268)
12 November 1999	491 (± 167)	29 (± 11)	56 (± 27)	15	205 (± 82)

Μικρό γένος και παράμετρο της εστίας των σεισμών της Αθήνας 1999

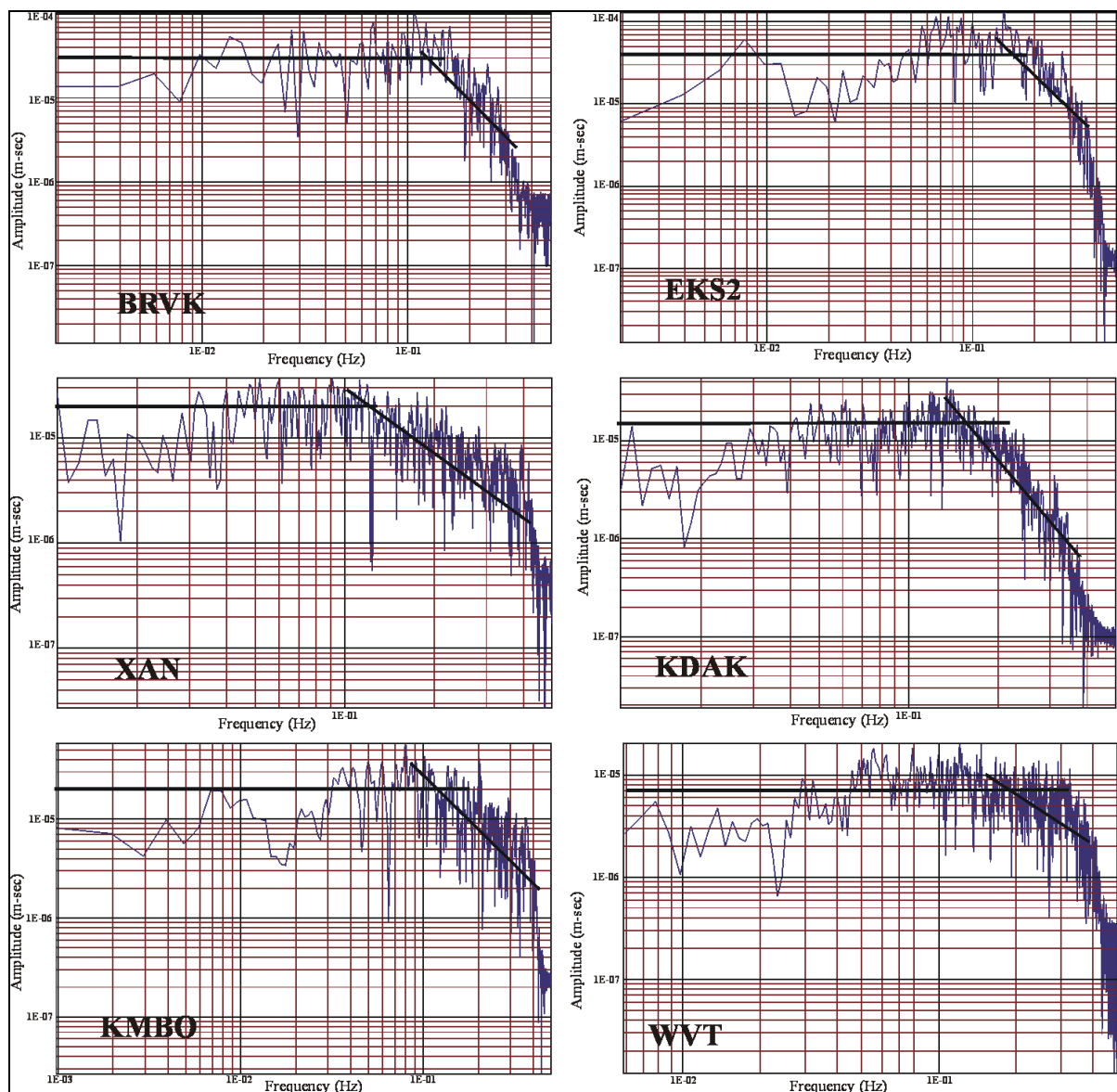
Ο σεισμός της Αθήνας 1999 μελετήθηκε με τη χρήση των κυματομορφών των P και SH κυμάτων από μακρινούς σταθμούς. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στα σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 11. Επί κεντρα μεγάλων σεισμών στην ευρύτερη περιοχή της Αττικής



Σχήμα 12 . Πραγματικά (συνεχής γραμμή) και συνθετικά σειсмоγράμματα του σεισμού της Αθήνας.



Σχήμα 13. Φάσματα μακρνού πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό των παραμέτρων της εστίας του σεισμού της Αθήνας

Παράμετρα της εστίας του σεισμού της Αθήνας από φασματική ανάλυση

	$\Delta\sigma$	$E_{\Delta\sigma}$	L	E_L	u	E_u
Circular Model (Brune)	1.24	1.64	37	1.17	5	1.61
Circular Model (Madariaga)	11.52	1.64	18	1.17	22	1.61
Circular Model (Sato & Hirose)	4.44	1.64	24	1.17	12	1.61
Rectangular Model	8.45	1.37	18	1.37	30	1.61

ΣΕΙΣΜΟΤΕΚΤΟΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΗΣ Δ. ΑΤΤΙΚΗΣ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΓΕΝΕΣΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΑΠΟ ΤΗ ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ ΒΟΥΤΑΤΣΗΣ, ΓΑΒΡΙΗΛ ΠΟΥΤΑΛ, ΜΑΡΙΟΥΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ
Τάξας Γεωφυσικής και Γεωθέρμιας ΓΑ

1. Μηχανισμοί γένεσης για τη μετασεισμική ακολουθία του σεισμού της Αθήνας

Για τη μετασεισμική ακολουθία του σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 προσδιορίστηκαν οι λύσεις 1050 μηχανισμών γένεσης. Ο υπολογισμός πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των αποκλίσεων των πρώτων άφξεων των επιμήκων σεισμικών κυμάτων. Από το σύνολο των μετασεισμών επιλέγησαν εκείνα, για τους οποίους οι πρώτες αποκλίσεις κατεγράφησαν από περισσότερους από πέντε σταθμούς (Πυρλή, 2001).

1.1 Αποτελέσματα και στατιστική ανάλυση

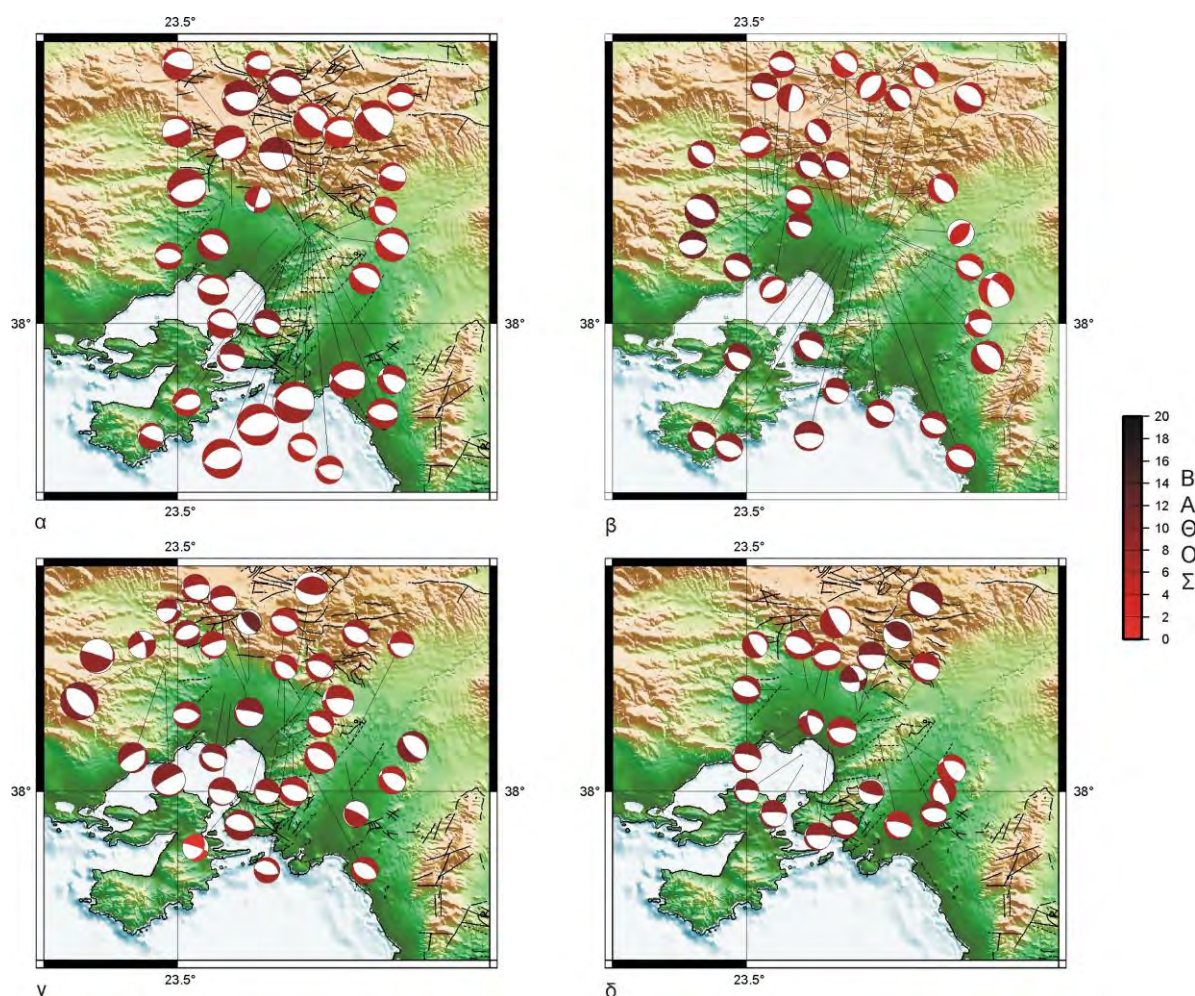
Από την πλειονότητα των λύσεων προκύπτουν κανονικές διάρρηξεις, οι οποίες είναι σύμφωνες τόσο με τις διευθύνσεις των τεκτονικών σταχείων της περιοχής όσο και με τη χωρική διασπορά των μετασεισμών, αλλά και κάποιες διάρρηξεις αναστροφής χαρακτήρα. Οι τελευταίες εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στα περιαστικά της μετασεισμικής περιοχής.

Ως επίπεδο ρήγματος λαμβάνεται το επίπεδο, το οποίο φέρεται να κλίνει προς Νότο, δεδομένου ότι στα χείρα αυτό είναι σύμφωνο με την κατανομή σε βάθος των μετασεισμικών υποκέντρων και με το μηχανισμό γένεσης του κύριου σεισμού (Papadimitriou et al, 2000). Η διάτση αυτή δεν καλύπτει το σύνολο της περιοχής, ισχύει όμως όσον αφορά το δυτικό και κεντρικό τμήμα της μετασεισμικής περιοχής. Στο ανατολικό τμήμα της μετασεισμικής περιοχής διαπιστώνεται διαφοροποίηση των λύσεων και υποδηλώνεται η ενεργοποίηση και δευτερευόντων ρηγμάτων εκτός αυτού, που έδωσε τον κύριο σεισμό.

Στους χάρτες των σχημάτων 1.1α και 1.1β απεικονίζονται οι μηχανισμοί γένεσης μετασεισμών μεγέθους μεγαλύτερου του 1.60 για το μήνα Σεπτέμβριο, ενώ στους χάρτες των σχημάτων 1.1γ και 1.1δ οι μετασεισμικοί μεγέθους μεγαλύτερου του 1.50 για τους μήνες Οκτώβριο-Νοέμβριο και Δεκέμβριο. Το σχήμα 1.2 απεικονίζει τους ισχυρότερους μετασεισμούς ($M \geq 2.0$), για το σύνολο της μετασεισμικής ακολουθίας.

Διαπιστώνεται ότι κατά το πρώτο μισό του Σεπτεμβρίου (σχήμα 1.1α), οι περισσότεροι μηχανισμοί γένεσης υπολογίστηκαν για μετασεισμούς, τα επίκεντρα των οποίων εντοπίζονται στο ανατολικό τμήμα της μετασεισμικής περιοχής. Δυτικά υπάρχει μία μικρότερη συγκέντρωση γεγονότων, ενώ ο ενδιαμέσος χώρος στερείται μετασεισμών μεγέθους $M \geq 1.6$, για τους οποίους να έχει προσδιοριστεί μηχανισμός γένεσης. Γενικά πρόκειται για γεγονότα μικρού εστιακού βάθους, τα οποία υποδηλώνουν διάρρηξη κανονικού χαρακτήρα. Οι περισσότερες λύσεις μηχανισμών γένεσης περιγράφουν επίπεδο διάρρηξης με αξιόμοθο της τάξης των $100-110^\circ$, ωστόσο

παρατηρούνται και λύσεις με μεγαλύτερο αζιμούθιο ιδίτερα στο ανατολικό τμήμα της περoχής.



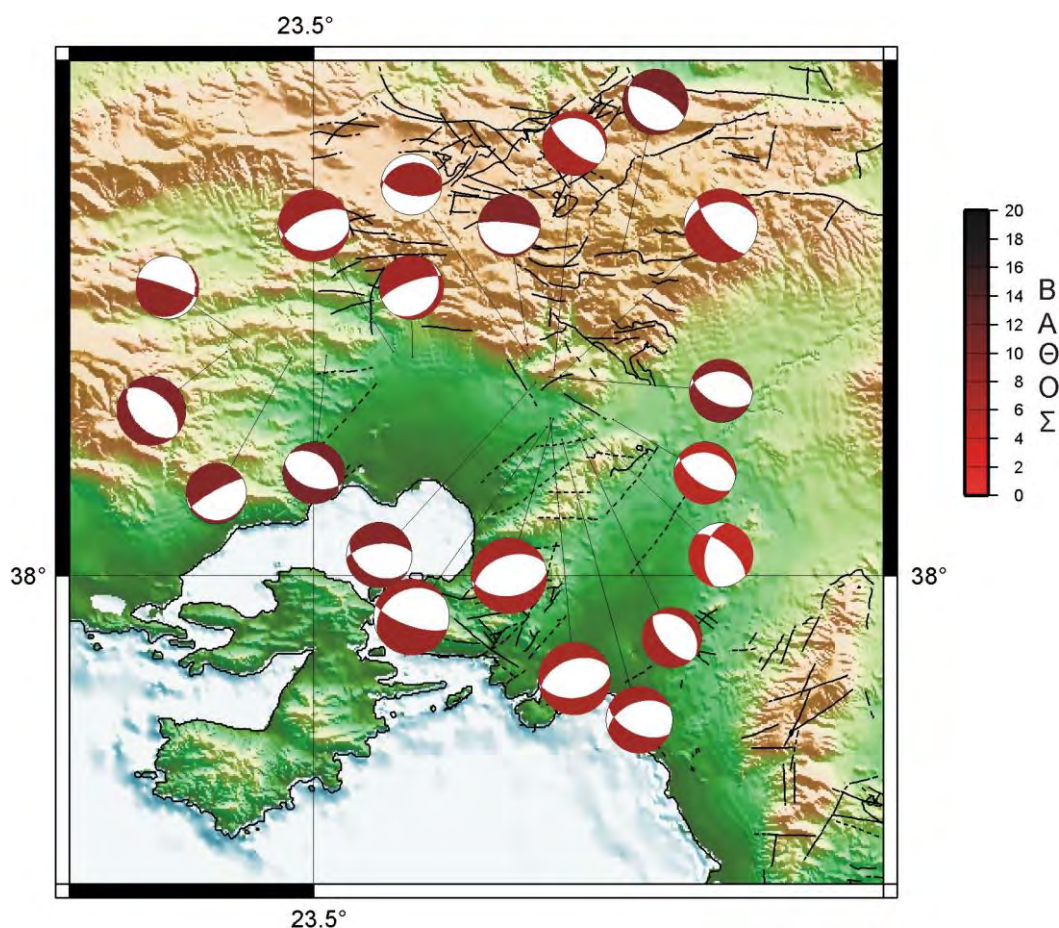
Σχήμα 1.1: α Μηχανισμά γένεσης για μετασεισμούς μεγέθους $M > 1.6$, κατά το χρονικό διάστημα 10/09/99 – 13/09/99. Η κλίμακα εκφράζει εσπικό βάθος σε km. β Μηχανισμά γένεσης μετασεισμών μεγέθους $M > 1.6$ για το χρονικό διάστημα 14/09/99 – 30/09/99. γ. Μηχανισμά γένεσης μετασεισμών μεγέθους $M > 1.5$, για τους μήνες Οκτώβριο και Νοέμβριο 1999. δ. Μηχανισμά γένεσης μετασεισμών μεγέθους $M > 1.5$, για το Δεκέμβριο 1999. Η χρωματική κλίμακα εκφράζει εσπικό βάθος σε km.

Η γενική εικόνα παραμένει παρόμοια και κατά το δεύτερο μισό του Σεπτεμβρίου (σχήμα 1.1 β), με τη διαφορά ότι το εσπικό βάθος των μετασεισμών είναι ελαφρώς αυξημένο στο νότιο τμήμα της μετασεισμικής περoχής. Μια ακόμα σημαντική διαφορά αποτελεί το γεγονός ότι διαπιστώνεται μεγαλύτερη διαφοροποίηση στις λύσεις των μηχανισμών γένεσης, στο ανατολικό κυρίως τμήμα της περoχής. Πάντως, η συντριπτική πλειοψηφία των μηχανισμών αντιπροσωπεύει και σε αυτή την περίπωση διαρρήξεις κανονικού χαρακτήρα.

Κατά το χρονικό διάστημα Οκτώβριος-Νοέμβριος 1999, ο αριθμός των μετασεισμών, για τους οποίους έχει υπολογισθεί ο μηχανισμός γένεσης, έχει μειωθεί σημαντικά με συνέπεια την επιλογή των μετασεισμών με μέγεθος μεγαλύτερο του 1.5 για την κατασκευή του αντίσταχου χάρτη (σχήμα 1.1 γ). Το

γεγονός αυτό εν μέρει οφείλεται στο γεγονός ότι μειώθηκε σημαντικά ο αριθμός των μετασεισμών, οι πολικότητες των πρώτων αφέσεων των οποίων αναγνωρίστηκαν σε περισσότερους από έξι σταθμούς. Από τη σχεδίαση των εν λόγω γεγονότων διαπιστώνεται ότι και πάλι πρόκειται για μετασεισμούς με ελαφρώς αυξημένο εσιακό βάθος. Η διαφοροποίηση των λύσεων των μηχανισμών γένεσης δεν είναι τόσο μεγάλη όσο ήταν για το δεύτερο μισό του προηγούμενου μήνα, ενώ η μεγαλύτερη συγκέντρωση μετασεισμών εξακολουθεί να παρατηρείται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής.

Κατά το Δεκέμβριο, η σημαντικότερη μεταβολή στην παρατηρούμενη εικόνα είναι το γεγονός ότι οι μηχανισμοί γένεσης των μετασεισμών με μεγαλύτερο εσιακό βάθος, εντοπίζονται στο βόρειο τμήμα της ανατολικής περιοχής και αντιπροσωπεύουν λύσεις, οι οποίες αποκλίνουν από την τυπική λύση της διάρρηξης κανονικού χαρακτήρα με αξιόμοθο επιπέδου διάρρηξης κοντά στις 110° . Γενικά, οι περισσότερες λύσεις περιγράφουν διάρρηξεις μικρής κλίσης και αξιόμοθου της τάξης των 150° . Στο δυτικό τμήμα της μετασεισμικής περιοχής, υπάρχουν πολύ λίγα μηχανισμοί γένεσης, οι οποίοι γενικά διατηρούν τα χαρακτηρισικά της αρχικής λύσης.



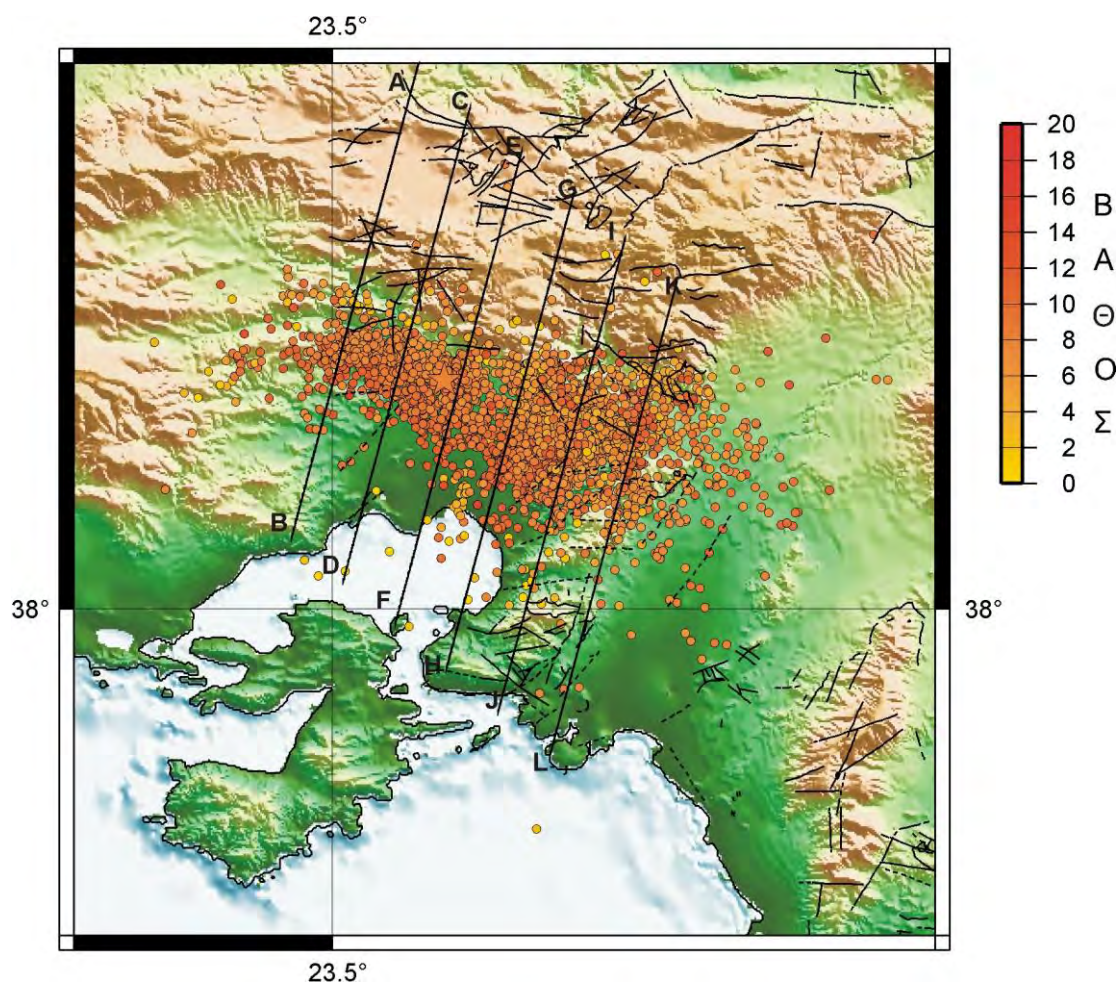
Σχήμα 1.2: Μηχανισμοί γένεσης των μεγαλύτερων μετασεισμών ($M \geq 2.0$), για το χρονικό διάστημα Σεπτέμβριος – Δεκέμβριος 1999. Η χρωματική κλίμακα εκφράζει εσιακό βάθος σε km.

Γενικά διαπιστώνεται ότι στο ανατολικό τμήμα της μετασεισμικής περιοχής, παρατηρείται μεγαλύτερη διαφοροποίηση στις λύσεις των μηχανισμών

γένεσης, γεγονός το οποίο υποδηλώνει την ενεργοποίηση και άλλων ρηγματίων εκτός από εκείνα που ενεργοποιήθηκαν κατά την εκδήλωση του κύρου σεισμού. Η διαπίστωση αυτή έρχεται σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις στην κατανομή των υποκέντρων με το βάθος.

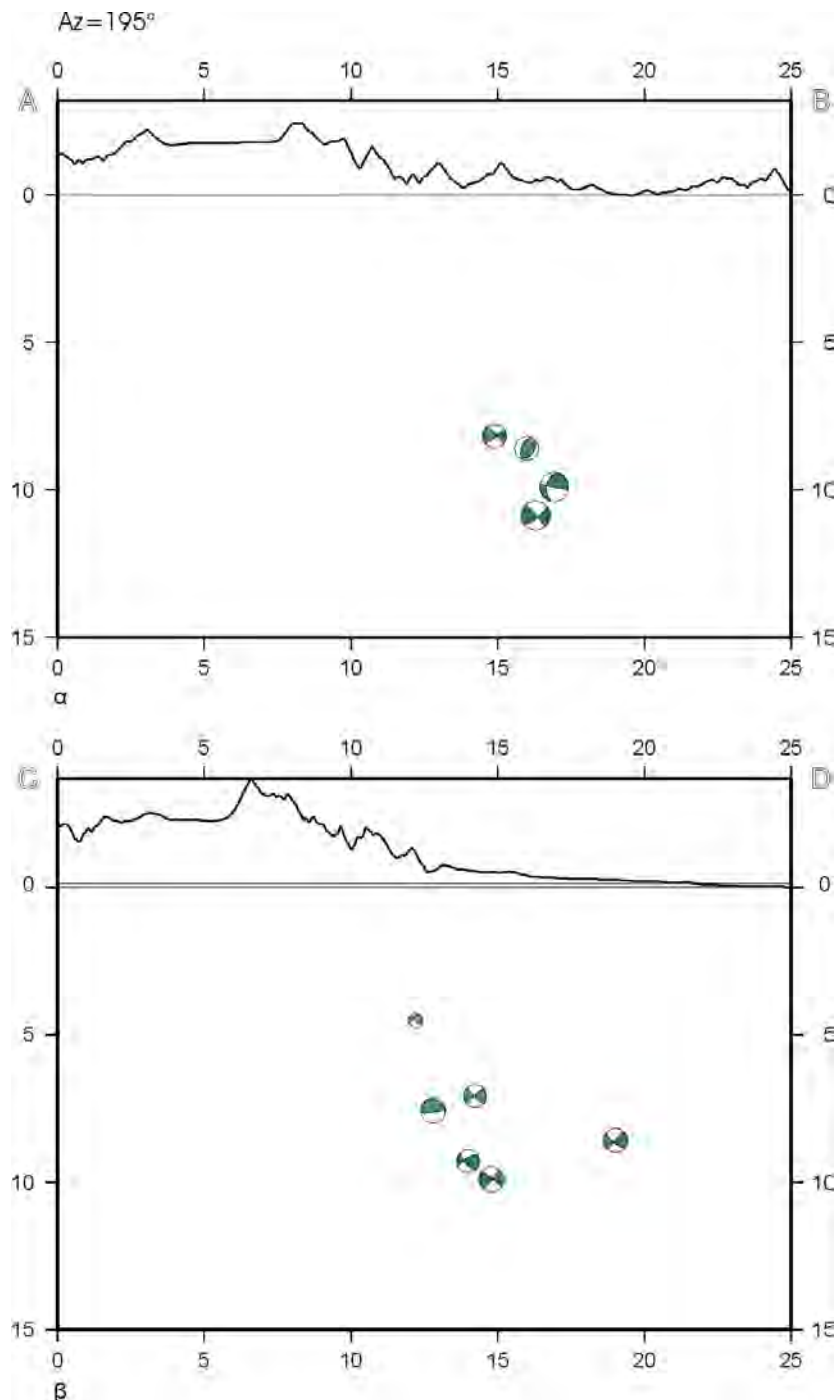
Όσον αφορά τους ισχυρότερους μετασεισμούς διαπιστώνεται ότι απεισσότερα προέρχονται από διάρρηξεις, οι οποίες ενεργοποιήθηκαν στο ανατολικό τμήμα της μετασεισμικής περιοχής (σχήμα 1.2).

Στο σχήμα 1.4 ακολουθούν τομές για τους μηχανισμούς γένεσης μετασεισμών μεγέθους μεγαλύτερου του 1.6. Επίσης, προβάλλεται μία δεύτερη ομάδα μηχανισμών γένεσης, μικρού εστιακού βάθους, ανεξαρτήτως μεγέθους, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τα ρήγματα κοντά στην επιφάνεια. Οι θέσεις των τομών σημειώνονται στο σχήμα 1.3.

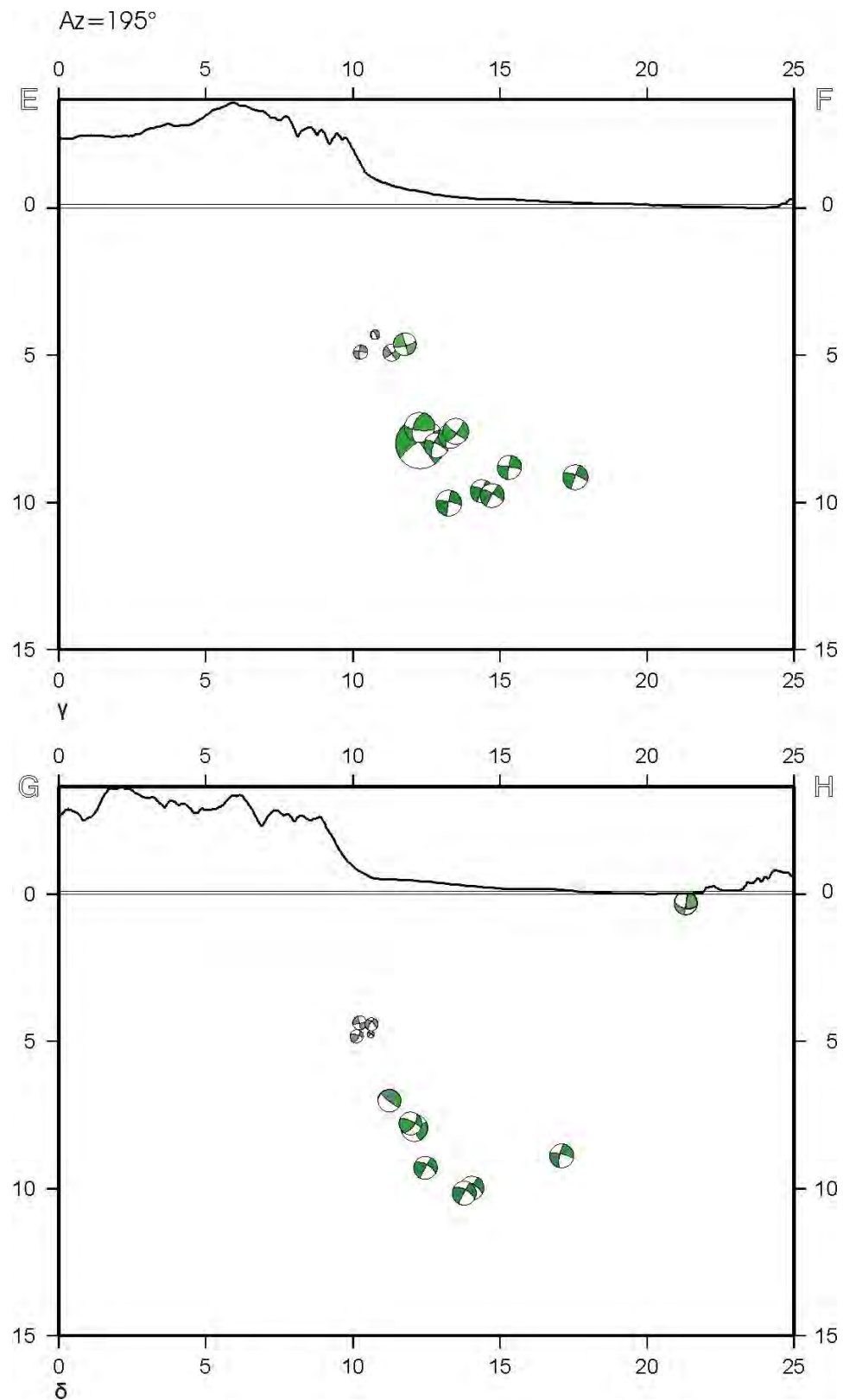


Σχήμα 1.3: Σχηματικός χάρτης της Αιγικής, όπου απεικονίζονται τα επίκεντρα των μετασεισμών, που καταγράφηκαν από το τοπικό δίκτυο του Πανεπιστημίου Αθηνών (κύκλα), το επίκεντρο του κύρου σεισμού (άστρο) (Papadimitriou et al, 2000) και τα ρήγματα της περιοχής (ΙΓΜΕ, χάρτες 1:50000). Με AB, CD, EF, GH, IJ και KL συμβολίζονται οι έξι κάθετες στο επίπεδο του ρήγματος τομές, με азιμούθ 0 195°, μήκος 25 km και πλάτος 2km. Η χρωματική κλίμακα αναφέρεται σε εστιακό βάθος σε km.

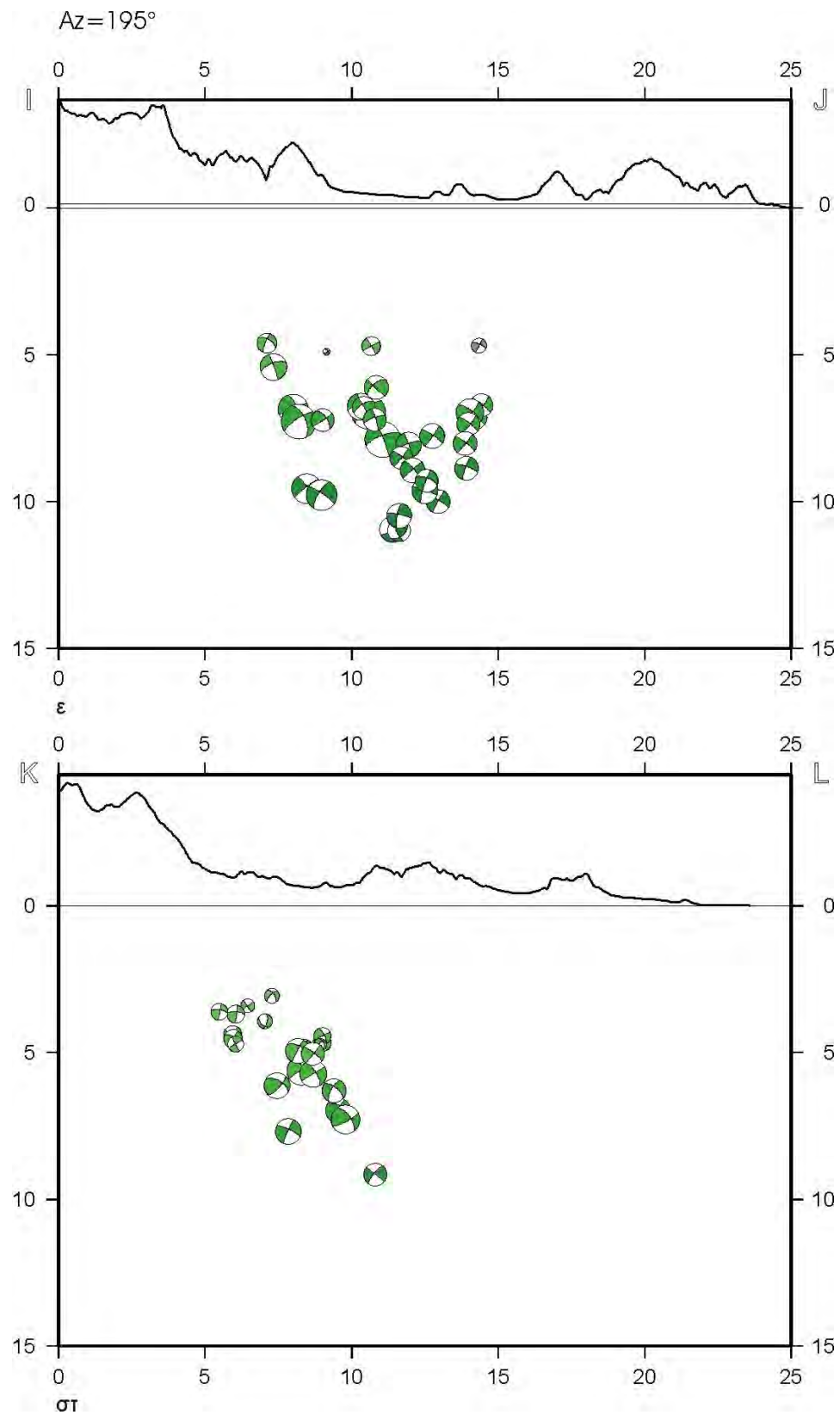
Η τομή AB είναι η δυτικότερη από τις έξι τομές (σχήμα 1.4α). Ο αριθμός των λύσεων των μηχανισμών γένεσης είναι πολύ μικρός για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων, ωστόσο οι δύο από τις λύσεις περιγράφουν επί πεδο διάρρηξης, το αξιόμοθό του οποίου δεν θα φέρει σημαντικά από εκείνο του κύριου σεισμού, κάθετα στο οποίο χαραχθήκαν οι τομές.



Σχήμα 1.4: Τρές κατασκευασθέντες επιφάνειες διάφραξης του κύριου σεισμού που περιβάλλουν ο λίκας μηχανισμών γένεσης για μετασεισμικές μεγέθους $M \geq 1.6$ και για μετασεισμικές μικρού σεισμικού βήθους. Το μήκος των τομών είναι με 25 km και το βάθος με 2 km. Πρώτα γιατί τρές των σεισμών στο σχήμα του σχήματος 4.2.3. Το μήκος των τομών είναι αυτό του μεγέθους του μετασεισμού όπως αυτό υπολογίστηκε από το πρόγραμμα HFO.



Σχήμα 1.4: Συνέχεια



Σχήμα 1.4: Συνέχεια