

Z.

**ΜΕΛΕΤΗ της ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ
(ΠΑΠΑΖΑΧΟΣ, ΚΑΡΑΚΩΣΤΑΣ, ΚΑΡΑΚΑΪΣΗΣ, και
ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ)**

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ ΤΗΣ 7/9/99 ($M_w=5.9$)

Κ. Β. Παπαζάχος⁽¹⁾, Β. Γ. Καρακώστας⁽¹⁾, Γ. Φ. Καρακαϊσής⁽¹⁾, Χ. Α. Παπαϊωάννου⁽²⁾

⁽¹⁾ Τομέας Γεωφυσικής, Αριστ. Παν/μιο Θεσ/νίκης, ΤΘ 352-1, GR-54006, Θεσσαλονίκη,
e_mail:(costas, vkarak, georgek)@lemnos.geo.auth.gr

⁽²⁾ Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ), ΤΘ 53, Φοίνικας,
GR-55102, Θεσσαλονίκη, e_mail: chpapai@itsak.gr

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στις 7 Σεπτεμβρίου 1999 στις 11:56 (GMT) ένας ισχυρός σεισμός με μέγεθος $M_w=5.9$, έγινε κοντά στην πόλη των Αθηνών. Ο σεισμός είχε ως αποτέλεσμα την κατάρρευση περισσότερων από 40 κτιρίων, με 143 νεκρούς και εκατοντάδες τραυματίες. Αμέσως μετά το σεισμό ο Τομέας Γεωφυσικής του ΑΠΘ σε συνεργασία με το ΙΤΣΑΚ εγκατέστησαν τοπικό δίκτυο σειсмоγράφων και επιταχυνσιογράφων, με σκοπό την παρακολούθηση της μετασεισμικής δραστηριότητας του σεισμού. Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται τα προκαταρκτικά αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων της μετασεισμικής ακολουθίας, καθώς και τα σχετικά συμπεράσματα τα οποία αφορούν τον κύριο σεισμό.

2. ΚΥΡΙΟΣ ΣΕΙΣΜΟΣ

Για την εκτίμηση των υποκεντρικών παραμέτρων του κύριου σεισμού χρησιμοποιήθηκαν όλα τα διαθέσιμα δεδομένα αφίξεων σεισμικών κυμάτων τα οποία καταγράφηκαν από τα διάφορα δίκτυα τα οποία κατέγραψαν το σεισμό. Για να αποφευχθεί η επίδραση των ισχυρών μεταβολών της δομής του φλοιού στα σεισμικά κύματα, κυρίως στις φάσεις P_n και S_n η οποία είναι ιδιαίτερα ισχυρή στην περιοχή του Αιγαίου (βλέπε π.χ. Panagiotopoulos and Papazachos, 1985), περιοριστήκαμε στην χρήση μικρών επικεντρικών αποστάσεων με σκοπό να συμπεριληφθούν μόνο P_g και S_g φάσεις. Δυστυχώς μόνο ένα μικρός αριθμός καταγραφικών με απόλυτο χρόνο παρείχε ακριβή P και S δεδομένα. Για το σκοπό αυτό, ένας σημαντικός αριθμός από διαφορικούς χρόνους $S-P$ όπως είχαν καταγραφεί από ψηφιακούς επιταχυνσιογράφους χρησιμοποιήθηκαν επίσης για την ανάλυση. Το τελικό σύνολο δεδομένων αποτελούνταν από 4P, 3S και 11 $S-P$ αφίξεις. Το μοντέλο ταχυτήτων το οποίο χρησιμοποιήθηκε βασίστηκε σε προηγούμενα 3-διάστατα μοντέλα ταχυτήτων ευρείας κλίμακας (π.χ.

Papazachos and Nolet, 1997) με κατάλληλες τροποποιήσεις για την εισαγωγή κατάλληλων στρωμάτων χαμηλών ταχυτήτων για τα ανώτερα στρώματα του φλοιού, σε συμφωνία με παρόμοια μοντέλα τα οποία έχουν προταθεί για την περιοχή (βλέπε π.χ. Tselentis and Zahradnik, 2000). Το τελικό μοντέλο ταχυτήτων παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Μοντέλο ταχυτήτων το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των εστιακών παραμέτρων του κύριου σεισμού.

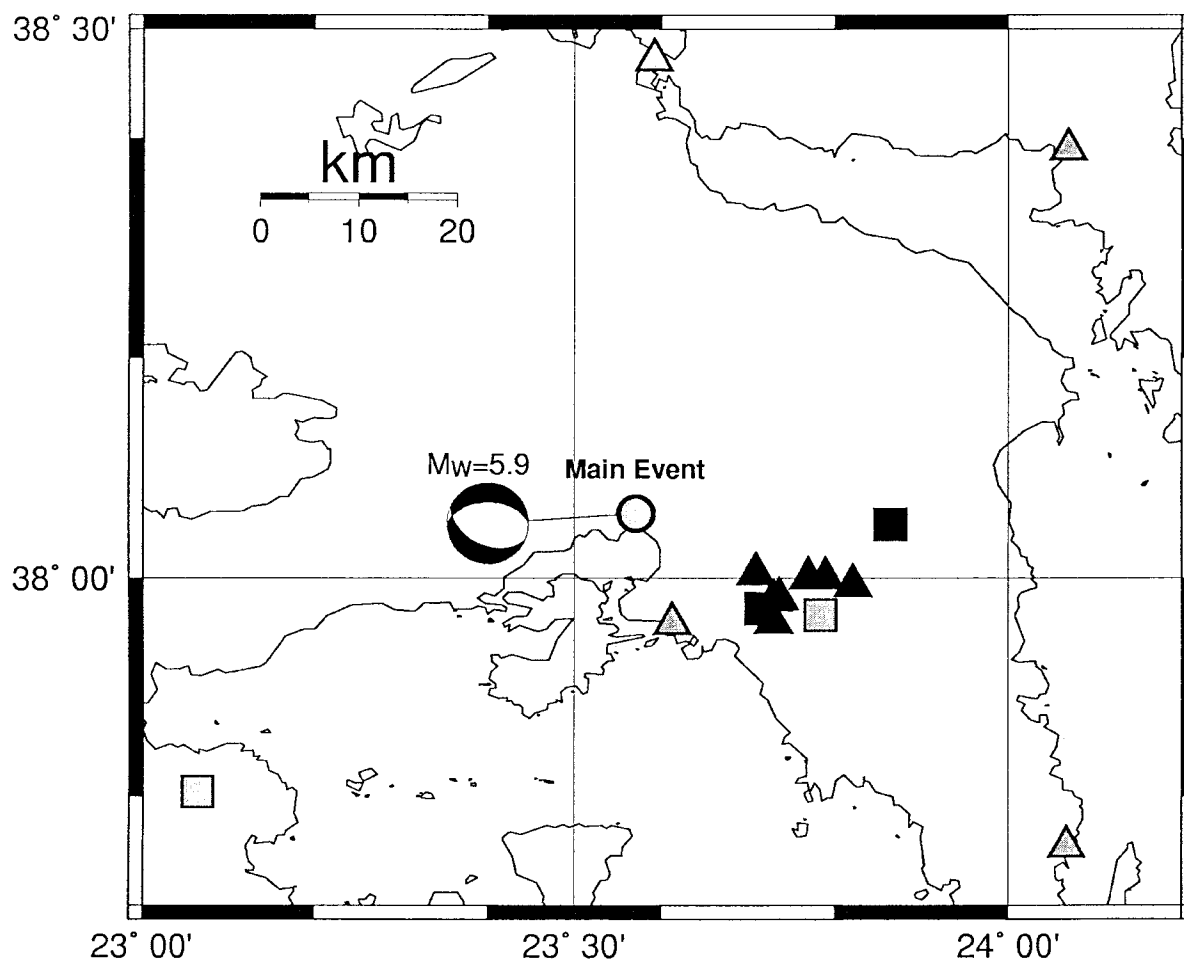
Βάθος(km)	V_P (km/s)	V_S (km/s)
0	3.0	1.69
0.9	5.5	3.09
6	6.0	3.37
15	6.5	3.65
31	7.9	4.44

Πρέπει να επισημανθεί ότι το παραπάνω μοντέλο δεν είναι απαραίτητα το πιο αντιπροσωπευτικό για την περιοχή του σεισμικού ρήγματος, όπως θα φανεί και από τη μετέπειτα ανάλυση, αλλά το πιο κατάλληλο για την ευρύτερη περιοχή μελέτης, η οποία περιλαμβάνει την ευρύτερη περιοχή της Αττικής. Επιπλέον, δεν έχουν χρησιμοποιηθεί διορθώσεις για τους σταθμούς καταγραφής, αφού είναι άγνωστες αυτές οι διορθώσεις για P_g και S_g κύματα, τόσο για τους σειсмоγράφους όσο και για τους επιταχυνσιογράφους της περιοχής.

Η τελικά προτεινόμενη εστία της σεισμικής διάρρηξης υπολογίστηκε με τη χρήση του λογισμικού HYPOINVERSE Y2K (Lahr, 1999). Το κύριο σεισμικό γεγονός έγινε στις 7 Σεπτεμβρίου 1999 στις 11:56:51.4 GMT σε συνταγμένες $\varphi_N=38.059^\circ$, $\lambda_E=23.571^\circ$ και σε ένα βάθος ~ 14.5 km. Ο τελικός προσδιορισμός του παραμέτρων της εστίας πρέπει να θεωρηθεί αρκετά σταθερός και αξιόπιστος αφού το τελικό RMS των χρονικών υπολοίπων είναι 0.3sec, ενώ το εκτιμημένο οριζόντιο και κατακόρυφο τυπικό σφάλμα υπολογίστηκαν στα 1.7 και 2.3km, αντίστοιχα. Το μέγιστο αζιμούθιο χωρίς σταθμό καταγραφής (GAP) είναι σχετικά μικρό (75°).

Το σχήμα 1 δείχνει το τελικό επίκεντρο καθώς και τις θέσεις των σταθμών καταγραφής. Τα τετράγωνα δείχνουν τους σταθμούς καταγραφής για τους οποίους υπήρχαν απόλυτες αφίξεις των P και S κυμάτων σε μικρές αποστάσεις (σταθμοί Γεωδυναμικού Ινστιτούτου και Παν/μίου Αθηνών), ενώ τα τρίγωνα τους σταθμούς για τους οποίους διαφορικές αφίξεις (S-P) ήταν διαθέσιμες (επιταχυνσιογράφοι Γεωδυναμικού Ινστιτούτου Αθηνών, ΔΕΗ/ΔΕΠ-ΤΕΑΦ και ΙΤΣΑΚ). Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται και ο μηχανισμός γένεσης όπως υπολογίστηκε από το Παν/μιο του Harvard ($\varphi=114^\circ$, $\delta=45^\circ$, $\lambda=-73^\circ$), ο οποίος δείχνει ένα ΔΒΔ-ΑΝΑ ρήγμα, με σχεδόν κανονική ολίσθηση. Ο μηχανισμός φανερώνει ένα κανονικό εφελκυστικό πεδίο διεύθυνσης περίπου Β-Ν, σε συμφωνία με το

γενικότερο εφελκυστικό πεδίο της οπισθοτόξης περιοχής του Αιγαίου (π.χ. Papazachos and Kiratzi, 1996).



Σχήμα 1. Επίκεντρο του κύριου σεισμού ($M_w=5.9$) της Αθήνας της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999, όπως καθορίστηκε από καταγραφές μικρών επικεντρικών αποστάσεων ($<100\text{km}$). Τα τετράγωνα αντιστοιχούν σε απόλυτες αφίξεις P και S, ενώ τα τρίγωνα σε διαφορικούς χρόνους S-P.

3. ΦΟΡΗΤΟ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

Δύο ημέρες μετά τον κύριο σεισμό της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999, ο Τομέας Γεωφυσικής του Α.Π.Θ. εγκατέστησε τους πρώτους φορητούς σειсмоγράφους στην ευρύτερη επικεντρική περιοχή. Τα δεδομένα που προέκυψαν από τις πρώτες λίγες ώρες της λειτουργίας τους, οδήγησαν στην προσεκτική επιλογή θέσεων εγκατάστασης των υπολοίπων φορητών σεισμογράφων σε τέτοιες θέσεις, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη αζιμουθιακή κατανομή τους γύρω από το μετασεισμικό χώρο, με στόχο τον

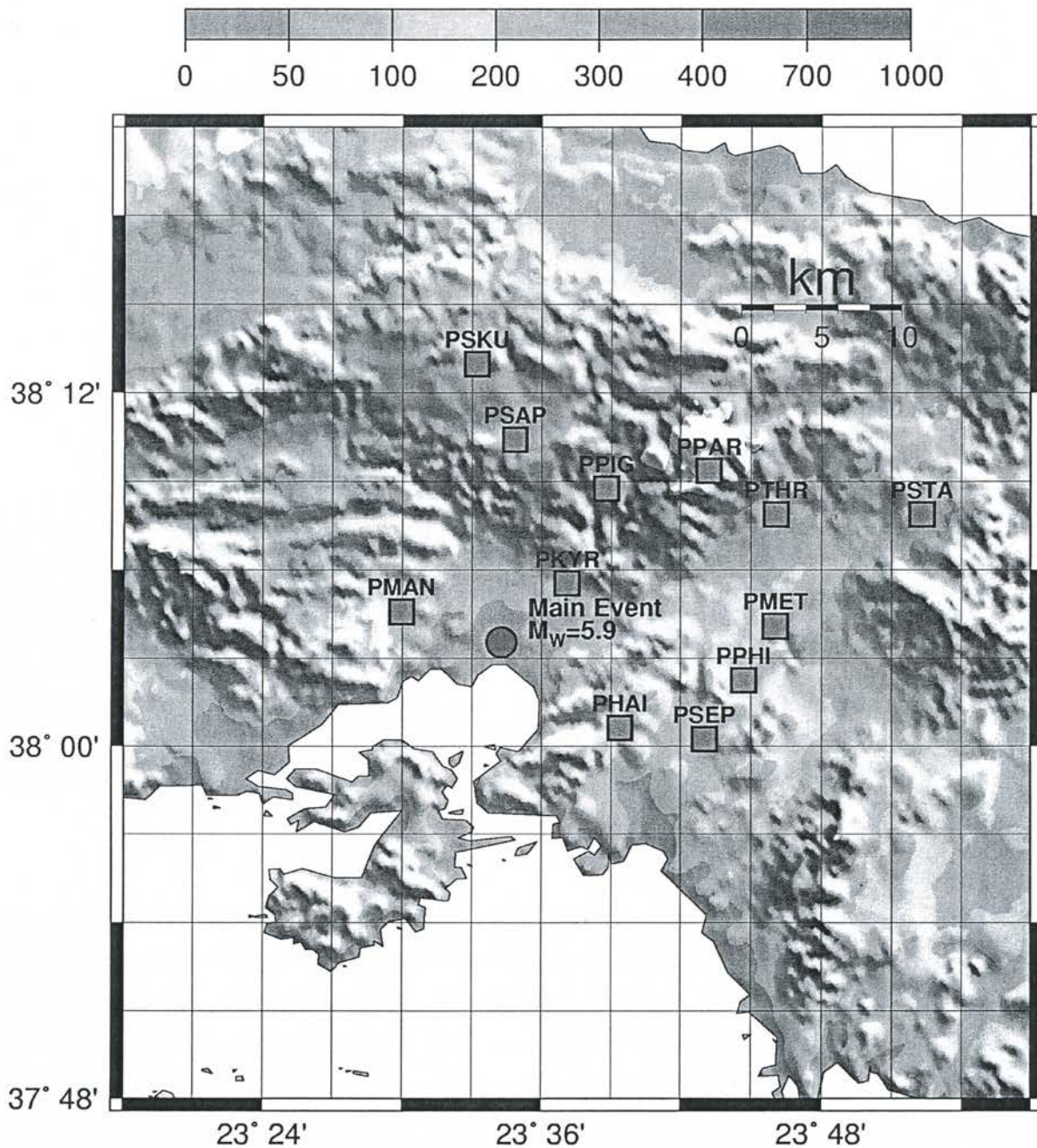
κατά το δυνατόν ακριβέστερο υπολογισμό των εστιακών παραμέτρων των μετασεισμών (επίκεντρο, εστιακό βάθος, μέγεθος, χρόνος γένεσης), καθώς και τον υπολογισμό των μηχανισμών γένεσής τους. Καταβλήθηκε προσπάθεια ώστε οι θέσεις που επιλέχθηκαν να βρίσκονται μακριά από αστικές περιοχές, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η καταγραφή θορύβου από τους σειсмоγράφους. Παρόλα αυτά, μερικοί σταθμοί στην ανατολική πλευρά του δικτύου (π.χ. PSEP, PPHI, PMET) αναπόφευκτα τοποθετήθηκαν σε περιοχές με ιδιαίτερα υψηλή στάθμη θορύβου. Όμως, παρά το γεγονός αυτό, οι καταγραφές των σταθμών αυτών βοήθησαν αρκετά στον ακριβέστερο υπολογισμό των εστιακών παραμέτρων των μετασεισμών.

Πίνακας 2. Πληροφορίες για τους δώδεκα σεισμολογικούς σταθμούς των οποίων δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη των μετασεισμών του κύριου σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999. Για κάθε σταθμό δίνονται η τοποθεσία και η κωδική ονομασία του σταθμού, οι συντεταγμένες της θέσης του (βόρειο γεωγραφικό πλάτος, ανατολικό γεωγραφικό μήκος), το υψόμετρο (σε m) καθώς και η ημερομηνία έναρξης λειτουργίας του.

Τοποθεσία Σταθμού	Κωδική ονομασία	Φ_B^0	λ_A^0	Υψόμετρο (m)	Ημερομηνία εγκατάστασης
Θρακομακεδόνες	PTHR	38.1311	23.7678	375	9.9.1999
Πάρνηθα	PPAR	38.1561	23.7200	1019	9.9.1999
Σεπόλια	PSEP	38.0041	23.7171	100	9.9.1999
Σταμάτα	PSTA	38.1314	23.8719	439	9.9.1999
Πηγή	PPIG	38.1460	23.6465	744	10.9.1999
Σκούρτα	PSKU	38.2161	23.5531	529	10.9.1999
Λόφος Κυρίου	PKYR	38.0922	23.6183	188	11.9.1999
Σάπιο Πηγάδι	PSAP	38.1736	23.5807	710	11.9.1999
Μεταμόρφωση	PMET	38.0681	23.7674	226	14.9.1999
Μάνδρα	PMAN	38.0763	23.4992	149	15.9.1999
Νέα Φιλαδέλφεια	PPHI	38.0374	23.7446	155	15.9.1999
Χαϊδάρι	PHAI	38.0106	23.6563	161	15.9.1999

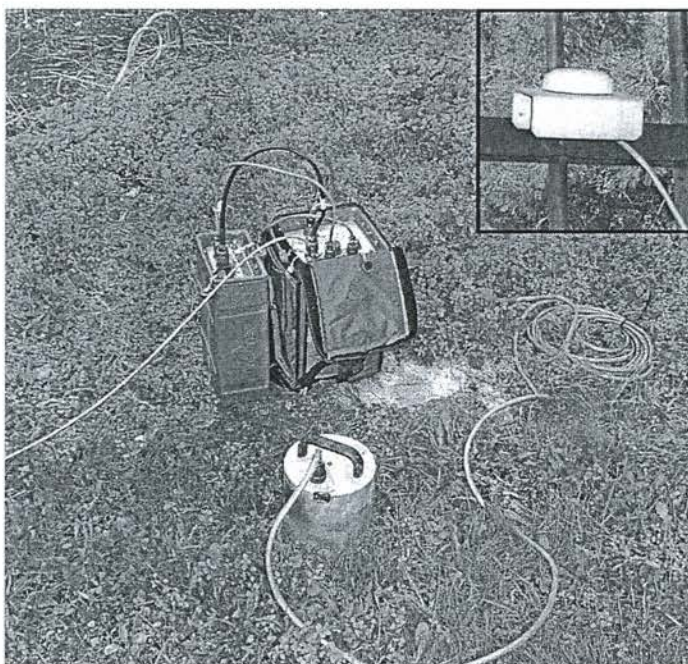
Στον Πίνακα 2 δίνονται πληροφορίες για τις θέσεις στις οποίες εγκαταστάθηκαν οι φορητοί σειсмоγράφοι (θέση, ονομασία σταθμού, γεωγραφικές συντεταγμένες, υψόμετρο) καθώς και οι ημερομηνίες έναρξης λειτουργίας καθενός από αυτούς. Στο Σχήμα 2 φαίνονται οι θέσεις των δώδεκα σεισμολογικών σταθμών των οποίων δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της μετασεισμικής ακολουθίας του κύριου σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 (κόκκινος κύκλος). Φαίνεται ότι οι σταθμοί παρουσιάζουν αρκετά καλή χωρική κατανομή σε σχέση με την επικεντρική περιοχή του κύριου

σεισμού. Το γεγονός αυτό μπορεί εύκολα να εξηγήσει τα μικρά σφάλματα στον υπολογισμό των εστιακών παραμέτρων των μετασεισμών, όπως φαίνεται στη συνέχεια, και ιδιαίτερα των εστιακών τους βαθών, αν και δεν υπήρξε συνεχόμενη λειτουργία του συνόλου των σταθμών σε όλο το χρονικό διάστημα της παρακολούθησης της σεισμικής ακολουθίας. Στο Σχήμα 3 φαίνεται μια τυπική (υπαίθρια) εγκατάσταση ενός φορητού σειсмоγράφου (καταγραφικό τύπου REFTEK 72A με σεισμόμετρο Guralp CMG-40T-30sec) στην περιοχή που μελετήθηκε.



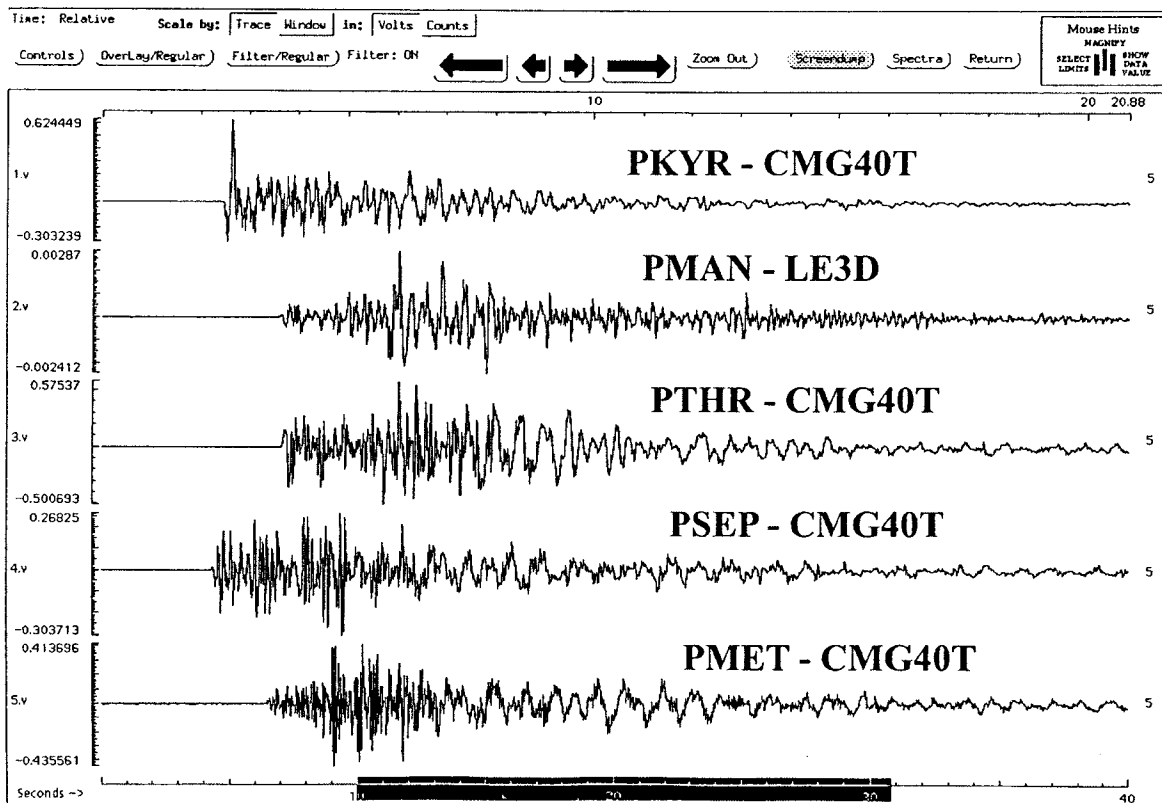
Σχήμα 2. Οι θέσεις των δώδεκα σεισμολογικών σταθμών που εγκατέστησε ο Τομέας Γεωφυσικής του Α.Π.Θ. στην ευρύτερη επικεντρική περιοχή του σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999. Ο κόκκινος κύκλος αντιστοιχεί στο επίκεντρο του κύριου σεισμού.

Πρέπει να επισημανθεί ότι για τη μελέτη της μετασεισμικής ακολουθίας χρησιμοποιήθηκαν επίσης και τα δεδομένα τα οποία προέκυψαν από τα στοιχεία των ψηφιακών επιταχυνσιογράφων του ΙΤΣΑΚ. Στις περισσότερες περιπτώσεις επειδή τα συγκεκριμένα καταγραφικά (επιταχυνσιογράφοι) δεν διέθεταν σύστημα απόλυτου χρόνου (GPS) χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι διαφορικοί χρόνοι S-P. Όμως, ιδιαίτερα σημαντικές ήταν και οι πληροφορίες οι οποίες προέκυψαν από τις αντίστοιχες πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων, για τον προσδιορισμό των αντίστοιχων μηχανισμών γένεσης.



Σχήμα 3. Τυπική υπαίθρια εγκατάσταση ενός φορητού συστήματος σειсмоγράφου-σεισμομέτρου στην περιοχή που μελετήθηκε. Στην ένθετη φωτογραφία φαίνεται η εγκατάσταση υπαίθριας αντένας συστήματος GPS.

Στο Σχήμα 4 φαίνονται ενδεικτικά οι κυματομορφές ενός μετασεισμού της σεισμικής ακολουθίας του κύριου σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999, όπως αυτές καταγράφηκαν από πέντε σειсмоγράφους (κατακόρυφες συνιστώσες) του δικτύου που εγκαταστάθηκε στην υπό μελέτη περιοχή από τον Τομέα Γεωφυσικής του Α.Π.Θ. Τα δεδομένα μετατράπηκαν σε πρώτη φάση από το δυαδικό τύπο του καταγραφικού (binary Reftek format) σε κατάλληλο για επεξεργασία τύπο κυματομορφών (SEG-Y format). Η επεξεργασία των κυματομορφών έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού PQL, το οποίο αναγνωρίζει το συγκεκριμένο τύπο αρχείων και παρέχει τη δυνατότητα ακριβούς προσδιορισμού και χαρακτηρισμού των πρώτων αφίξεων των επιμήκων και εγκάρσιων κυμάτων.



Σχήμα 4. Κυματομορφές μετασεισμού της σεισμικής ακολουθίας του κύριου σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999, όπως καταγράφηκαν από πέντε σειсмоγράφους τοποθετημένους στην ευρύτερη επικεντρική περιοχή.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Μετά τον υπολογισμό των χρόνων άφιξης και των πρώτων αποκλίσεων των αφίξεων των σεισμικών κυμάτων και για την αρχική ανάλυση των δεδομένων, υπολογίστηκαν οι εστιακές παράμετροι των σεισμών για το σύνολο των δεδομένων. Συνολικά, ο υπολογισμός των εστιακών παραμέτρων ήταν εφικτός για 1251 σεισμούς. Οι σεισμοί αυτοί αφορούν το χρονικό διάστημα από 11 έως και 24 Σεπτεμβρίου 1999, καθώς και όλους τους σημαντικούς σεισμούς για τους οποίους υπήρχαν καταγραφές ισχυρής σεισμικής κίνησης μέχρι τις 18 Οκτωβρίου 1999. Ο υπολογισμός των παραμέτρων έγινε αρχικά με βάση το πρόγραμμα HYPOINVERSE Y2K (Lahr, 1999), το οποίο χρησιμοποιήθηκε και για τον κύριο σεισμό. Ως μοντέλο για τον υπολογισμό των εστιακών παραμέτρων χρησιμοποιήθηκε αρχικά το μοντέλο του Πίνακα 1.

Οι εστίες των σεισμών που προσδιορίστηκαν αρχικά παρουσίαζαν σημαντική διασπορά, η οποία ήταν φανερό ότι μπορούσε να βελτιωθεί με τη χρήση καλύτερου μοντέλου ταχυτήτων, καθώς και κατάλληλων διορθώσεων σταθμών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της αντιστροφής των χρόνων άφιξης για τον ταυτόχρονο προσδιορισμό τόσο του μοντέλου ταχυτήτων όσο και των παραμέτρων των σεισμών. Συνοπτικά, η μεθοδολογία στηρίζεται στην ευσταθή αντιστροφή του ακόλουθου γραμμικού συστήματος:

$$\mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{v} = \mathbf{r}$$

όπου οι πίνακες \mathbf{A} και \mathbf{B} αντιστοιχούν στις μερικές παραγώγους των χρόνων διαδρομής ως προς τις υποκεντρικές παραμέτρους των σεισμών και τις διορθώσεις του μοντέλου ταχύτητας, αντίστοιχα. Τα διανύσματα \mathbf{x} , \mathbf{v} και \mathbf{r} περιέχουν τις διορθώσεις στις υποκεντρικές παραμέτρους των σεισμών, τις διορθώσεις του μοντέλου ταχύτητας και τα χρονικά υπόλοιπα (residuals) των σεισμικών φάσεων που έχουν καταγραφεί, αντίστοιχα.

Η αντιστροφή έγινε με δύο ανεξάρτητα προγράμματα αντιστροφής για καλύτερο έλεγχο των αποτελεσμάτων. Τα προγράμματα αυτά ήταν το πρόγραμμα VELEST (Kissling et al., 1995) καθώς και κατάλληλος κώδικας μη γραμμικής αντιστροφής (TOMOMEM) των Papazachos and Nolet (1997). Και τα δύο προγράμματα έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα. Πρέπει να σημειωθεί ότι για την αποφυγή εισαγωγής συστηματικών σφαλμάτων στα αποτελέσματα χρησιμοποιήθηκαν μόνο σεισμοί με σημαντικό πλήθος αφίξεων σε σχεδόν όλους τους σταθμούς καταγραφής, αφού είναι γνωστό ότι σφάλματα του μοντέλου δεν τους επηρεάζουν σημαντικά. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν 208 σεισμοί, από την αντιστροφή των οποίων προέκυψε το τελικό τοπικό μοντέλο ταχυτήτων για την περιοχή της μετασεισμικής ακολουθίας, το οποίο παρουσιάζεται στον Πίνακα 3. Επίσης, με την παραπάνω διαδικασία υπολογίστηκαν και κατάλληλες διορθώσεις (station corrections) για τους σταθμούς του τοπικού δικτύου σεισμογράφων και επιταχυνσιογράφων.

Πίνακας 3. Τελικό τοπικό μοντέλο ταχυτήτων για την περιοχή του σεισμικού ρήγματος, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον τελικό υπολογισμό των εστιακών παραμέτρων των σεισμών της μετασεισμικής ακολουθίας.

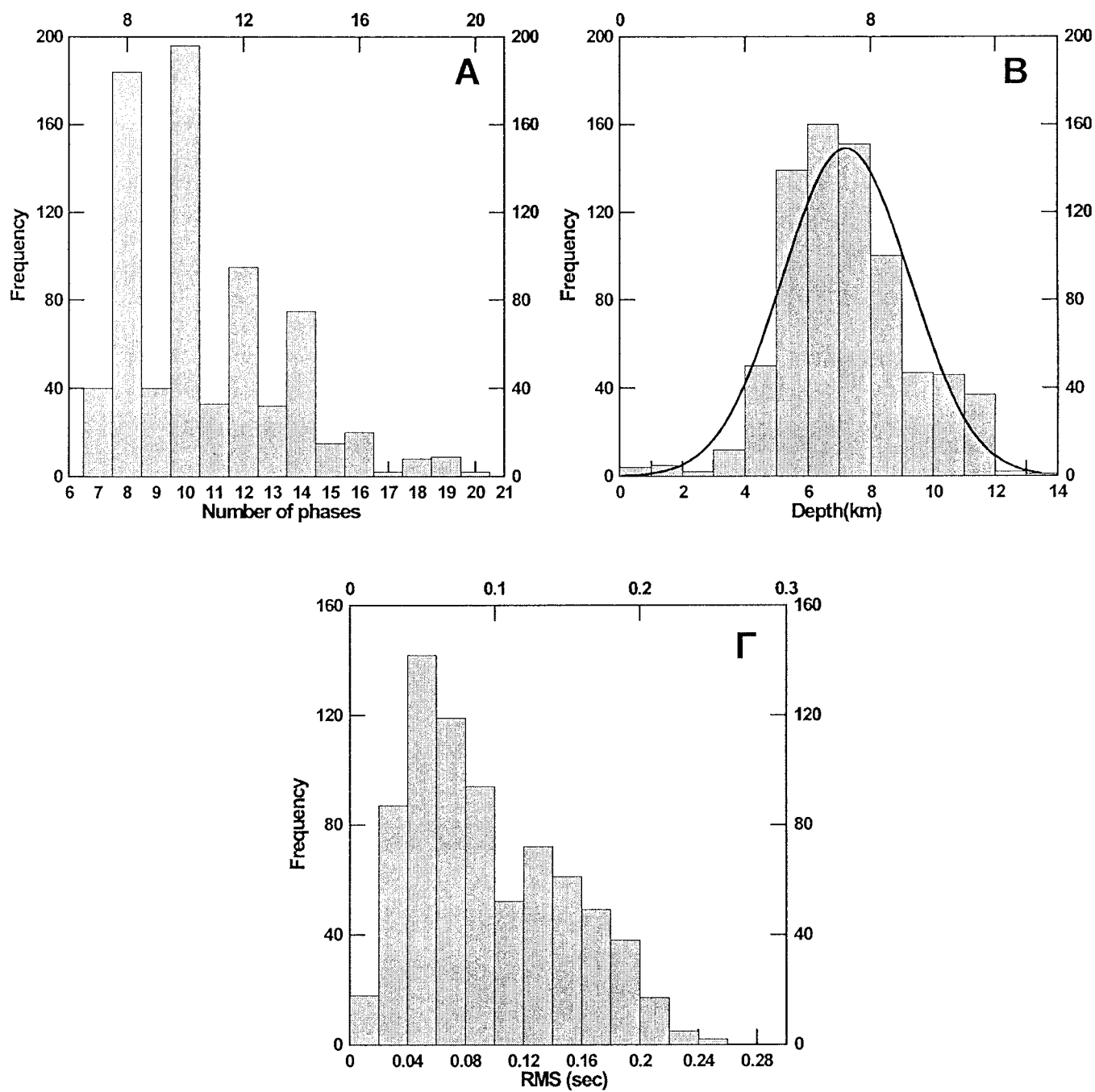
Βάθος(km)	V_P(km/s)	V_S(km/s)
0	5.08	2.85
1	5.24	2.94
2	5.53	3.11
5.5	6.23	3.50
8	6.48	3.64
10.5	6.51	3.66

Το παραπάνω μοντέλο χρησιμοποιήθηκε για τον τελικό υπολογισμό του συνόλου των μετασεισμών οι οποίοι καταγράφηκαν από το μετασεισμικό δίκτυο. Όμως, για τη μελέτη των χαρακτηριστικών της μετασεισμικής ακολουθίας δεν παρουσιάζεται το σύνολο των μετασεισμών. Η επιλογή αυτή βασίζεται στην απαίτηση για ύπαρξη υψηλής ακρίβειας στα τελικά αποτελέσματα. Έτσι, επιλέχθηκε να εισαχθούν κάποια κριτήρια σχετικά με την «αξιοπιστία» των προσδιοριζόμενων παραμέτρων. Κατά συνέπεια, έγιναν αποδεκτές οι εστιακές παράμετροι για τις οποίες υπήρχαν τουλάχιστον 7 σεισμικές αφίξεις, είχαν μέσο τετραγωνικό σφάλμα χρονικών υπολοίπων (RMS) μικρότερο από 0.25 sec, καθώς και ακρίβεια προσδιορισμού της σεισμικής εστίας μικρότερη από 2 km για τις οριζόντιες συντεταγμένες και το βάθος, αντίστοιχα.

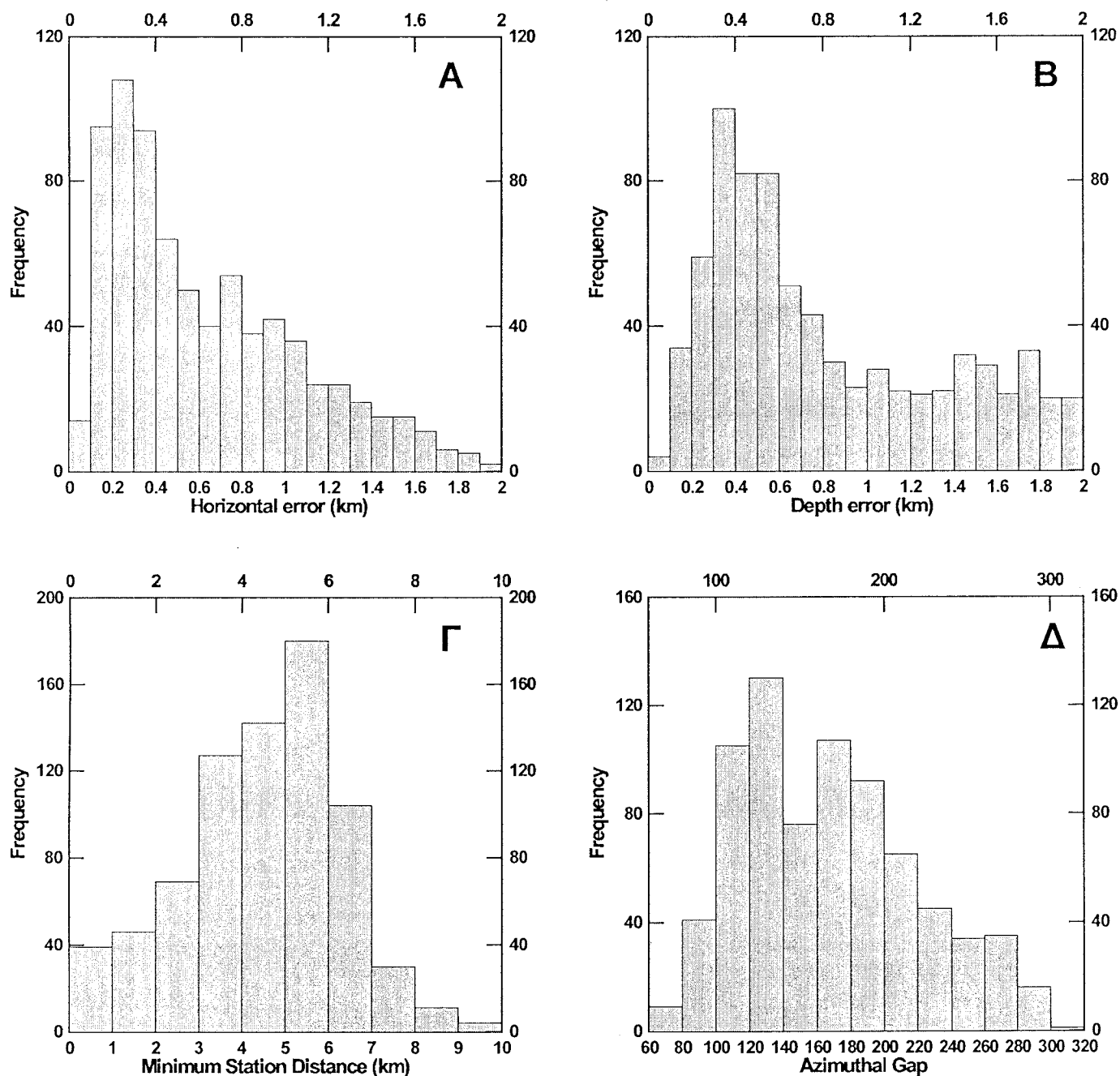
Τα παραπάνω κριτήρια οδήγησαν στην επιλογή ενός τελικού δείγματος από 756 σεισμούς, οι οποίοι παρουσιάζονται στο Παράρτημα και χρησιμοποιούνται στη συνέχεια. Πρέπει να τονιστεί, ότι τα επίκεντρα που ανήκαν στο δείγμα αυτό είχαν απόσταση μικρότερη από 10km από τον κοντινότερο σταθμό καταγραφής (εκτός ενός σεισμού) και γενικά καλή αζιμουθιακή κάλυψη από σταθμούς, εκτός από το δυτικότερο άκρο της μετασεισμικής ακολουθίας, όπου εμφανίζονταν τιμές έως και 300° για το μέγιστο αζιμουθιακό «κενό» κάλυψης των επικέντρων. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζονται το εύρος, η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των παραπάνω ποσοτικών παραμέτρων, οι οποίες και καθορίζουν την ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων. Τα αντίστοιχα ιστογράμματα παρουσιάζονται στα σχήματα 5 και 6. Χαρακτηριστική είναι η σχεδόν κανονική (Gaussian) κατανομή των βαθών των μετασεισμών, η οποία δείχνει προκαταβολικά ότι η κύρια σεισμική δραστηριότητα εμφανίστηκε σε βάθη 4-12km, γεγονός που επιβεβαιώνει την έλλειψη σημαντικών μετασεισμών κοντά στην επιφάνεια. Η παρατήρηση αυτή σχολιάζεται εκτενέστερα κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων της μελέτης των μετασεισμών και της σχέσης τους με τον κύριο σεισμό.

Πίνακας 4. Εύρος, μέση τιμή και τυπική απόκλιση των τυπικών ποσοτικών παραμέτρων ακρίβειας υπολογισμού των εστιακών παραμέτρων των 756 μετασεισμών της σεισμικής ακολουθίας που τελικά χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη του σεισμογόνου ρήγματος.

Παράμετροι ακρίβειας σεισμικών εστιών	Εύρος	Μέση τιμή
Αριθμός φάσεων (P, S, S-P)	7-24	11±3
RMS (sec)	0.01-0.25	0.1±0.05
Τυπικό οριζόντιο σφάλμα (km)	0.1-2	0.7±0.4
Τυπικό σφάλμα βάθους (km)	0.1-2	0.9±0.5
Απόσταση κοντινότερου σταθμού αναγραφής	0-14.4	4.5±1.9
Μέγιστο αζιμουθιακό «κενό» (gap)	69°-301°	168°±52°



Σχήμα 5. Ιστογράμματα για τις κύριες παραμέτρους των 756 σεισμών που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της σεισμικής ακολουθίας του κύριου σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999: Α) Αριθμός σεισμικών φάσεων, Β) Κατανομή βαθών σεισμών, Γ) Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS).



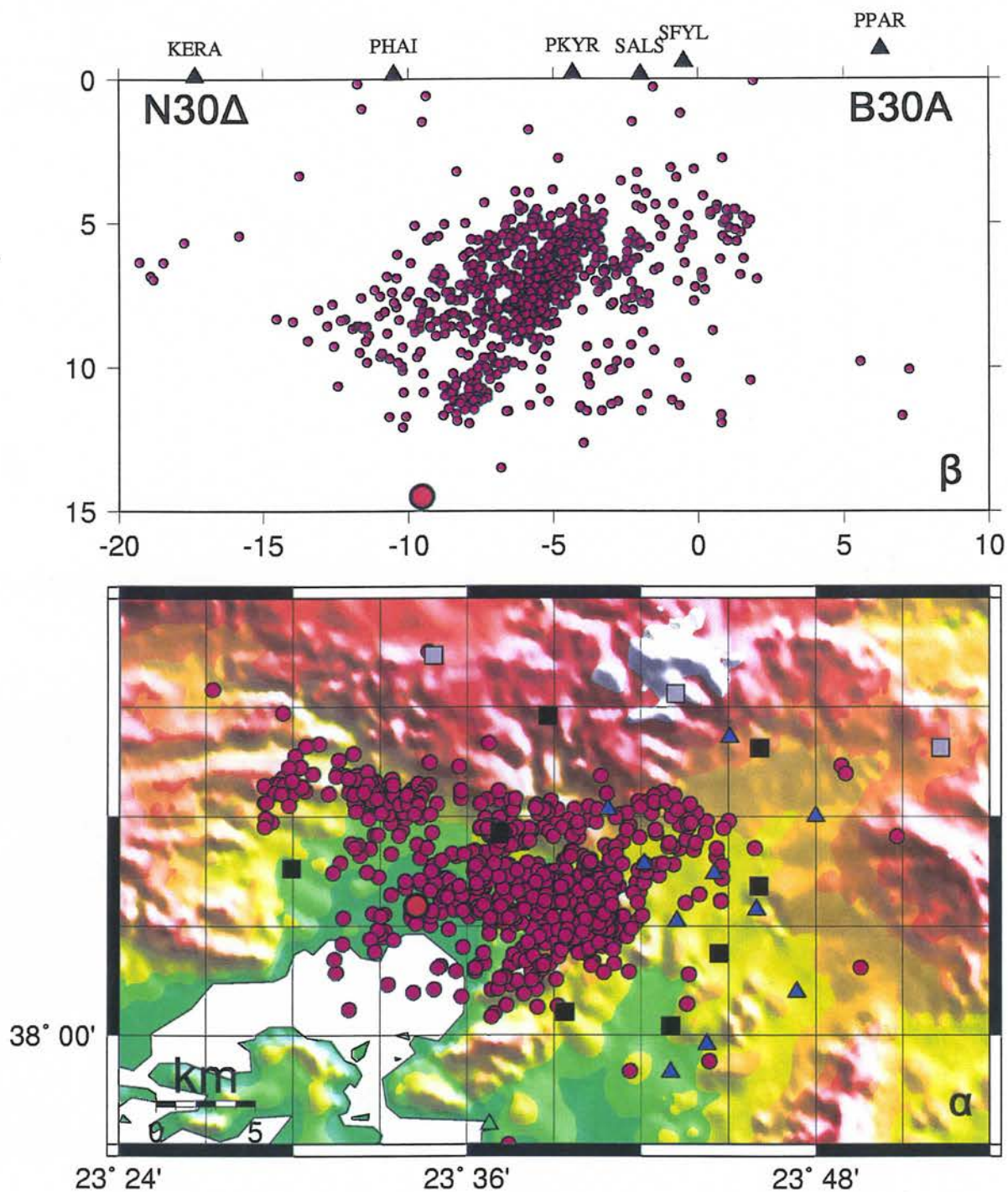
Σχήμα 6. Ιστογράμματα για τις κύριες ποσοτικές παραμέτρους ελέγχου της ακρίβειας των εστιακών παραμέτρων των 756 σεισμών της σεισμικής ακολουθίας: Α) Τυπικό οριζόντιο σφάλμα (ERH), Β) Τυπικό σφάλμα βάθους (ERZ), Γ) Απόσταση κοντινότερου σταθμού αναγραφής (DMIN), Δ) Μέγιστο αζιμουθιακό «κενό» μεταξύ των σταθμών καταγραφής (GAP).

5. ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΕΣΤΙΩΝ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΩΝ

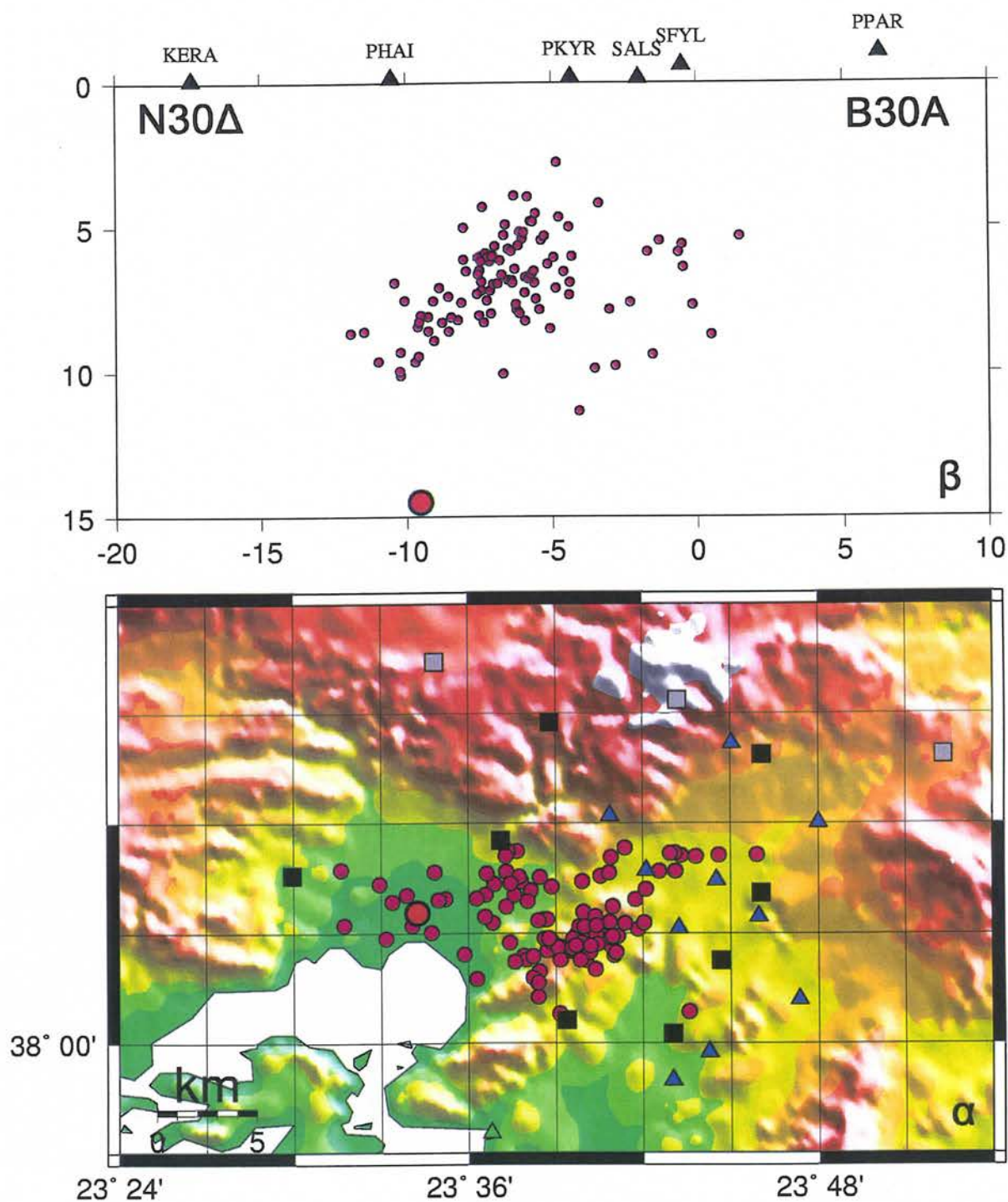
Στο σχήμα 7α χαρτογραφήθηκαν τα επίκεντρα των 756 μετασεισμών, των οποίων οι εστιακές παράμετροι περιέχονται στο Παράρτημα, σε τοπογραφικό χάρτη της ευρύτερης περιοχής της νότιας πλευράς της Πάρνηθας. Φαίνεται, ότι τα επίκεντρα βρίσκονται κυρίως στο κεντρικό και ανατολικό μέρος του Θριασίου Πεδίου και συγκεκριμένα μεταξύ των βορειοδυτικών υπωρειών του Αιγάλεω, της νότιας πλευράς της Πάρνηθας και ανατολικά της Μάνδρας. Το επίκεντρο του κύριου σεισμού (κίτρινο τετράγωνο) βρίσκεται κοντά στις ακτές του κόλπου της Ελευσίνας, στο νοτιοδυτικό μέρος του μετασεισμικού χώρου. Με βάση την παρατήρηση ότι η μεγαλύτερη συγκέντρωση επικέντρων παρατηρείται στην περιοχή μεταξύ του Αιγάλεω και της Πάρνηθας, μπορεί να υποθεθεί ότι στην περιοχή αυτή υπάρχει ένα ισχυρό εμπόδιο (barrier) στην επιφάνεια της ζώνης διάρρηξης, το οποίο συγκέντρωσε ισχυρή μετασεισμική δραστηριότητα.

Η χωρική κατανομή των εστιών των μετασεισμών του προηγούμενου σχήματος φαίνεται στο σχήμα 7β, όπου οι εστίες των μετασεισμών καθώς και η εστία του κύριου σεισμού προβλήθηκαν σε κατακόρυφο επίπεδο με διεύθυνση $B30^{\circ}A$, θεωρώντας ως σημείο αναφοράς του καρτεσιανού τοπικού συστήματος προβολής το σημείο με συντεταγμένες $38.1^{\circ}N$, $23.7^{\circ}E$. Η διεύθυνση προβολής έχει επιλεγεί κάθετη στην διεύθυνση του ρήγματος, όπως θα προκύψει και από τη μετέπειτα ανάλυση, αλλά και τον σχετικό μηχανισμό γένεσης. Στην πάνω πλευρά του σχήματος προβάλλονται και οι θέσεις ορισμένων σεισμολογικών σταθμών. Φαίνεται, ότι το μεγαλύτερο μέρος των εστιών αυτών ορίζουν, με αρκετά μεγάλη διασπορά, μία ζώνη διάρρηξης με κλίση προς τα νοτιοδυτικά ($\sim 45^{\circ}$), δηλαδή, προς τον κόλπο της Ελευσίνας. Ο κύριος σεισμός φαίνεται ότι έγινε στο βαθύτερο τμήμα αυτής της ζώνης διάρρηξης, αν και το βάθος το οποίο προσδιορίστηκε φαίνεται ότι είναι ελαφρά υπερεκτιμημένο.

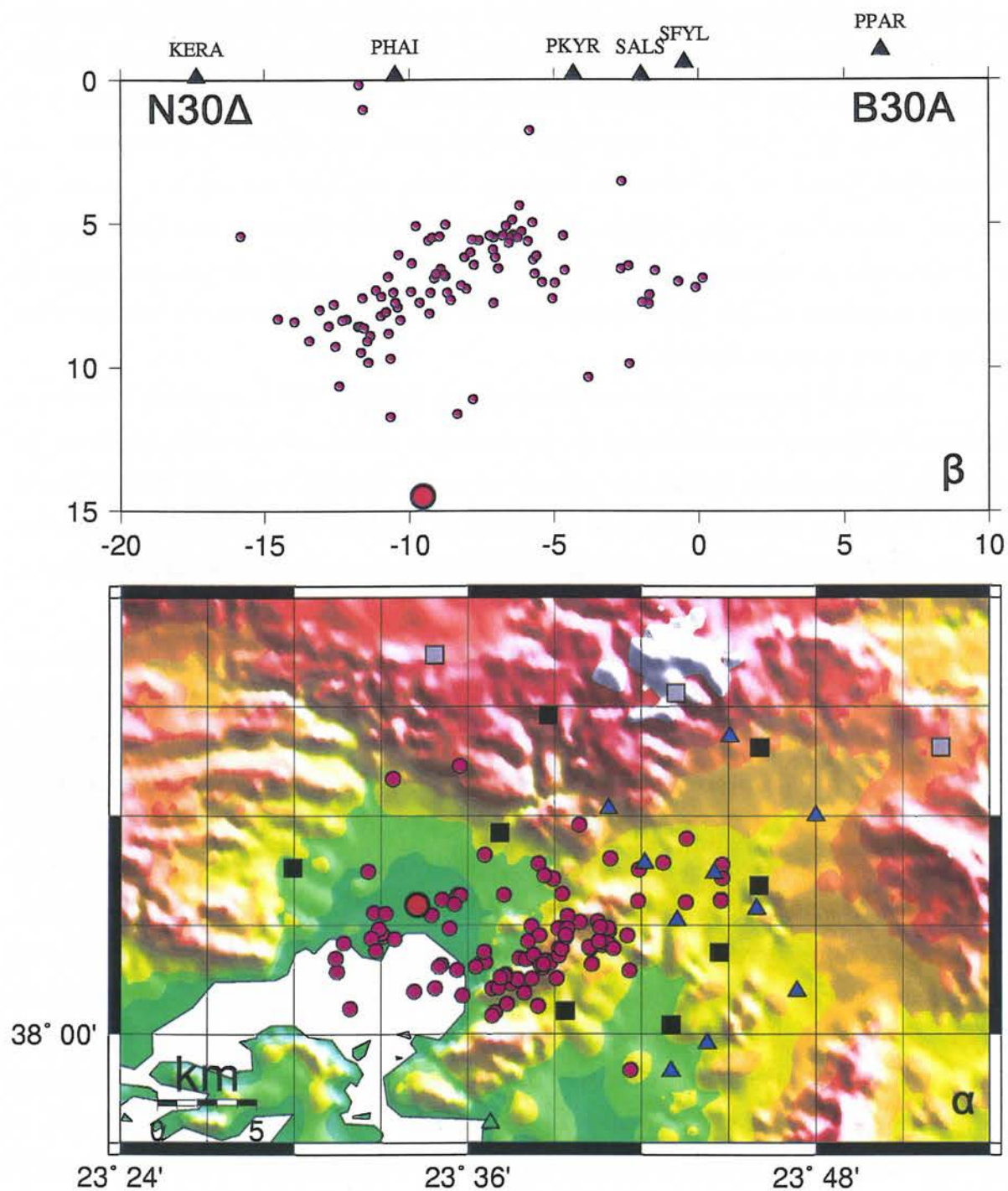
Με σκοπό να ερευνηθεί η χωροχρονική εξέλιξη της μετασεισμικής ακολουθίας, μελετήθηκαν τα δεδομένα διαφόρων χρονικών διαστημάτων. Γενικά, παρουσιάζεται μία σταδιακή μετανάστευση της σεισμικής δραστηριότητας προς το Νότο, απομακρυνόμενη από το κύριο ρήγμα, η οποία επανέρχεται στο κύριο ρήγμα μετά το μεσημέρι της 16/9/1999. Για να παρουσιαστεί αυτό το φαινόμενο χαρτογραφήθηκαν στο σχήμα 8α, στον ίδιο τοπογραφικό χάρτη, τα επίκεντρα των μετασεισμών που έγιναν στο χρονικό διάστημα 12/9-14/9/1999, ενώ η κατανομή των εστιών των μετασεισμών αυτών, που προέκυψε με τον τρόπο που αναφέρθηκε προηγούμενα για το σχήμα 7β, φαίνεται στο σχήμα 8β. Παρατηρείται ότι οι μετασεισμοί στο χρονικό αυτό διάστημα έγιναν κυρίως στο κεντρικό και νοτιοανατολικό μέρος της μετασεισμικής περιοχής, ενώ έγιναν και μερικοί μετασεισμοί νότια από τις νοτιοανατολικές υπώρειες της Πάρνηθας. Παράλληλα, οι εστίες των περισσότερων μετασεισμών ορίζουν μία ζώνη με κλίση προς τα νοτιοδυτικά, παρόμοια με αυτήν του σχήματος 7β, μετατοπισμένη όμως ελαφρά προς τα Νότιο-Νοτιοδυτικά.



Σχήμα 7. (α) Επίκεντρα των μετασεισμών (μωβ κύκλοι) και του κύριου σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 (κόκκινος κύκλος). Με μαύρα και γκρι τετράγωνα παρουσιάζονται οι σταθμοί του τοπικού δικτύου που λειτούργησαν κατά τη συνολική διάρκεια και τμηματικά, αντίστοιχα, ενώ με μπλε τρίγωνα παρουσιάζονται οι ψηφιακοί επιταχυνσιογράφοι του ΙΤΣΑΚ. (β) Κατανομή των εστιών του προηγούμενου σχήματος σε κατακόρυφο επίπεδο με διεύθυνση B30°A θεωρώντας σημείο αναφοράς με συντεταγμένες 38.1°N, 23.7°E. Στην πάνω πλευρά του σχήματος προβάλλονται και οι θέσεις ορισμένων σεισμολογικών σταθμών που βρίσκονται κοντά στην τομή.



Σχήμα 8. (α) Επίκεντρα των μετασεισμών που έγιναν στο χρονικό διάστημα 12/9-14/9/1999 (μώβ κύκλοι). Ο κύριος σεισμός της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 παριστάνεται με κόκκινος κύκλο. (β) Κατανομή των εστιών των μετασεισμών του προηγούμενου σχήματος. Η προβολή έγινε σε κατακόρυφο επίπεδο με διεύθυνση B30⁰A.



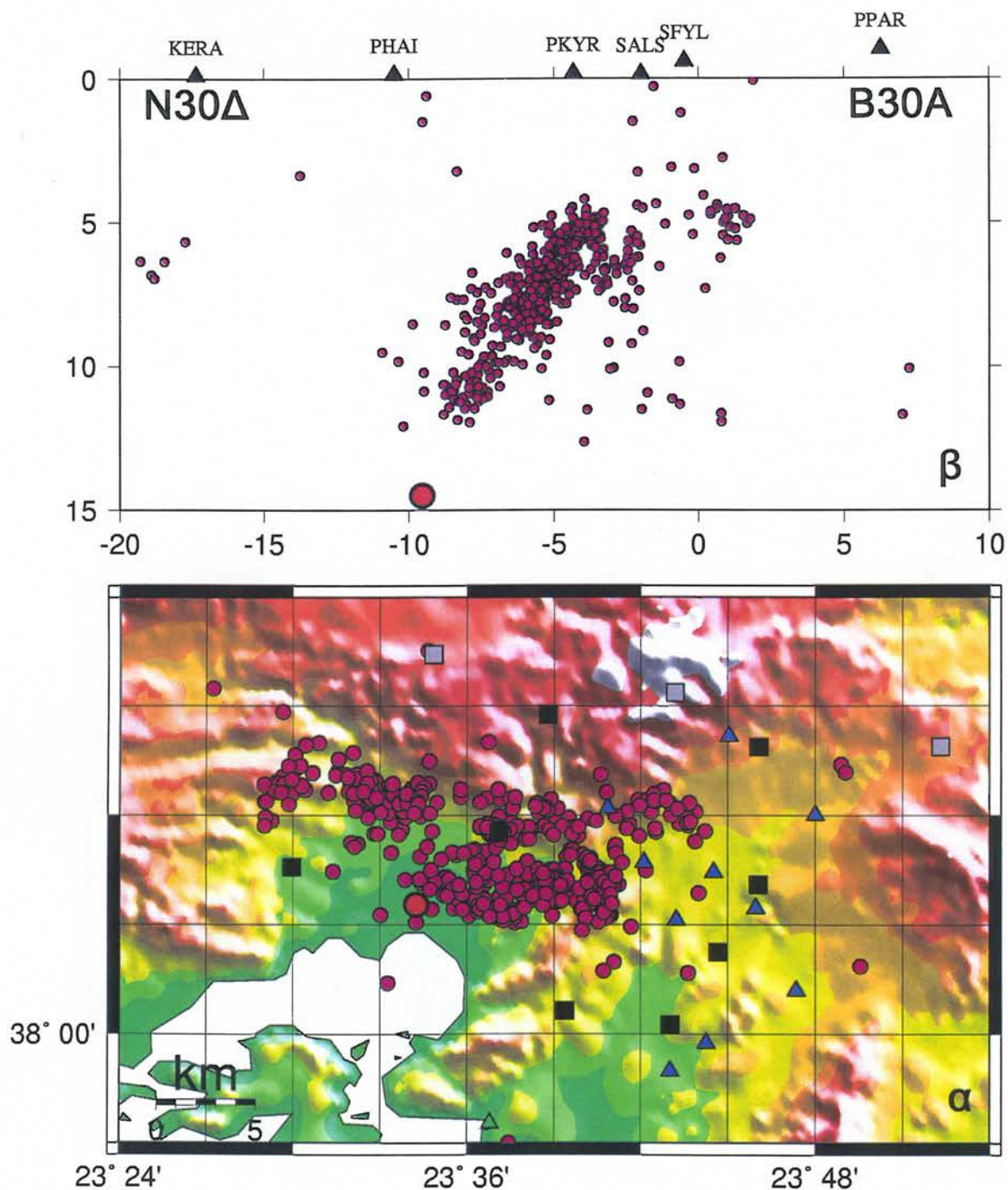
Σχήμα 9. (α) Επίκεντρα των μετασεισμών που έγιναν στο χρονικό διάστημα 15/9-16/9/1999, ως τις 15:00 (μωβ κύκλοι). Ο κύριος σεισμός της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 παριστάνεται με κόκκινο κύκλο. (β) Κατανομή των εστιών των μετασεισμών του προηγούμενου σχήματος. Η προβολή έγινε σε κατακόρυφο επίπεδο με διεύθυνση B30⁰A.

Χαρακτηριστική είναι στο παραπάνω σχήμα η έντονη συγκέντρωση της σεισμικότητας στις δυτικές υπώρειες του όρους του Αιγάλεω. Η BA-NΔ κατανομή αυτής της σεισμικότητας, παρόμοια με την διεύθυνση της οροσειράς, φανερώνει την ύπαρξη ενός εμποδίου (barrrier) το οποίο «σταμάτησε» την διάδοση της διάρρηξης προς τα ανατολικά. Παρόμοια συμπεράσματα φαίνονται και από το σχήμα 9α όπου παρουσιάζονται τα επίκεντρα των μετασεισμών που έγιναν στο χρονικό διάστημα 15/9-16/9/1999 (έως τις 15:00). Η μεγαλύτερη συγκέντρωση μετασεισμών παρατηρείται στο νοτιοανατολικό τμήμα της μετασεισμικής περιοχής, καθώς και στην περιοχή του κόλπου της Ελευσίνας, ενώ οι εστίες τους (σχήμα 9β) ορίζουν μία ζώνη διάρρηξης που κλίνει προς τα νοτιοδυτικά, αλλά με σημαντικά μικρότερη γωνία κλίσης από αυτήν που φαίνεται στο σχήμα 8β. Ιδιαίτερα έντονη είναι και στο σχήμα αυτό η παρουσία της BA-NΔ γράμμωσης των επικέντρων στο δυτικό τμήμα του όρους του Αιγάλεω.

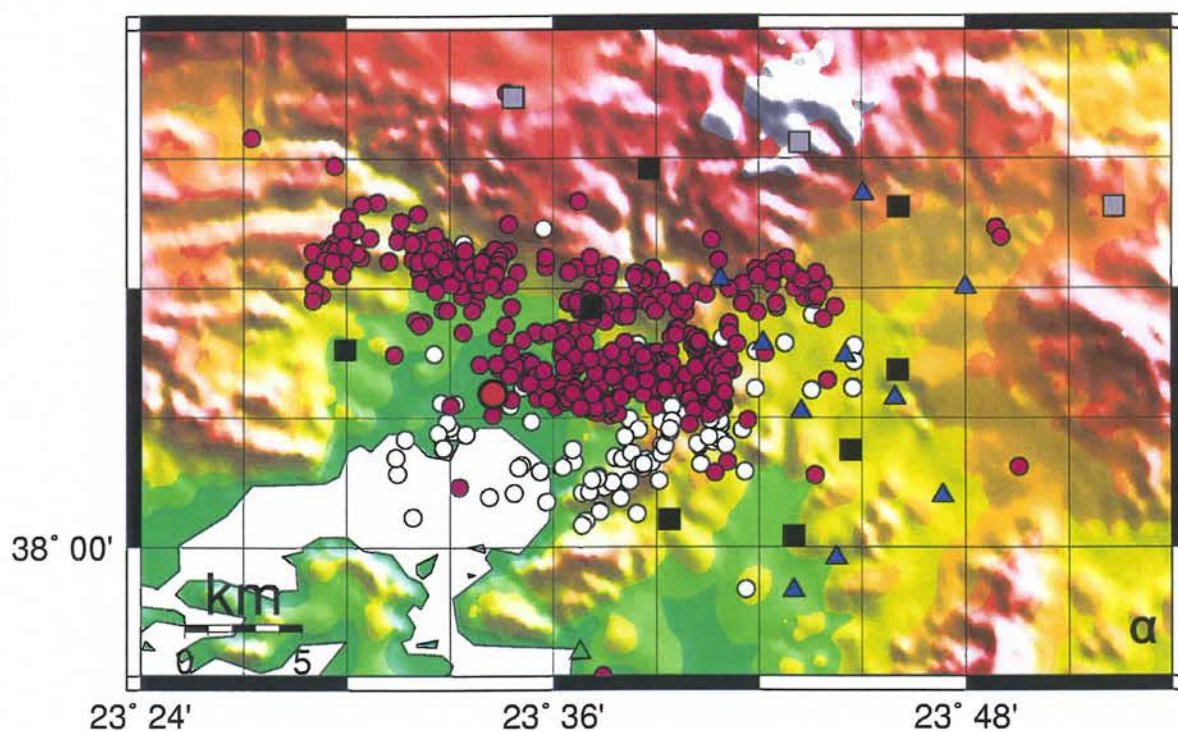
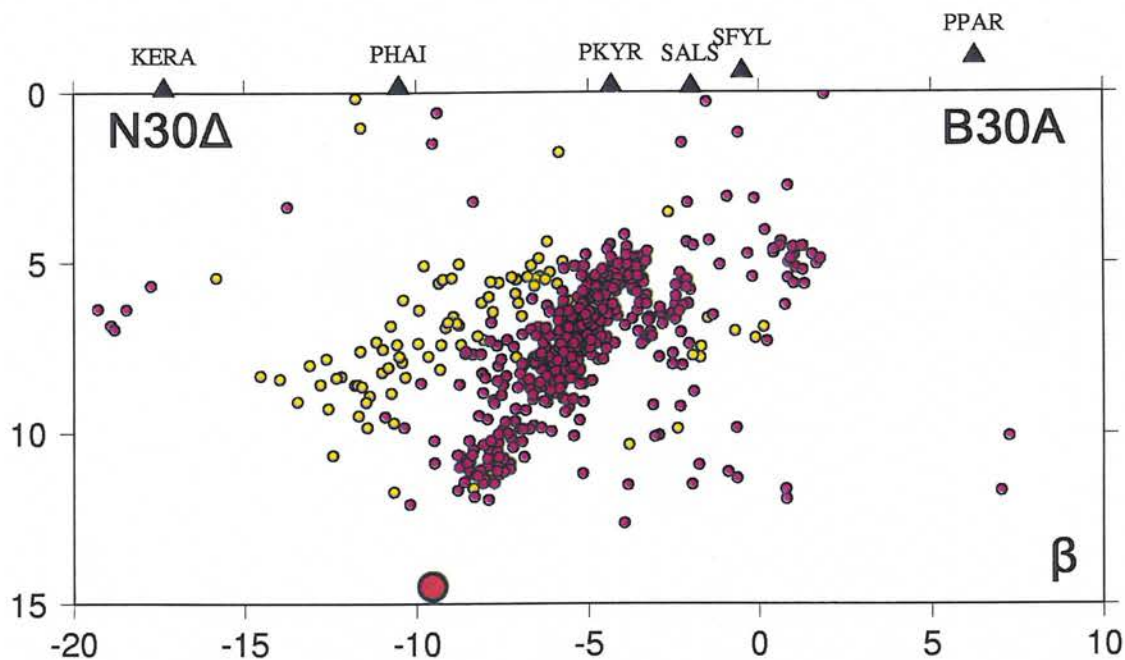
Τα επίκεντρα των μετασεισμών που έγιναν από τις 15:00 της 16^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 έως το τέλος του διαστήματος παρακολούθησης της μετασεισμικής δράσης στην περιοχή, φαίνονται στο σχήμα 10α. Η μετασεισμική περιοχή που ορίζεται από αυτούς έχει διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ (αζιμούθιο περίπου 120°), ενώ οι εστίες τους (σχ. 10β) καθορίζουν, με πολύ μικρότερη διασπορά από αυτήν που φαίνεται στο σχήμα 7β, τη ζώνη διάρρηξης με κλίση περίπου 47° προς τα νοτιοδυτικά, διαγράφοντας ουσιαστικά το κύριο σεισμογόνο ρήγμα.

Τα επίκεντρα που χαρτογραφήθηκαν στα δύο προηγούμενα σχήματα (9 και 10) δείχνουν μία σημαντική διαφοροποίηση της συμπεριφοράς της ακολουθίας κατά τη διάρκεια της 16^{ης} Σεπτεμβρίου 1999. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τα επίκεντρα των σχημάτων 9 και 10 φαίνονται στο σχήμα 11α, όπου με λευκούς και μωβ κύκλους συμβολίζονται τα επίκεντρα των μετασεισμών που έγιναν στα διαστήματα 15/9-16/9 [15:00] και μετά από τις [15:00] της 16/9, αντίστοιχα. Παρατηρείται, ότι οι περισσότεροι μετασεισμοί του πρώτου χρονικού διαστήματος έγιναν νοτιότερα από αυτούς του δεύτερου χρονικού διαστήματος και ότι οι εστίες τους ορίζουν δύο, εύκολα διακριτές, διαφορετικές ζώνες διάρρηξης (σχήμα 11β). Μάλιστα, αναλυτική χωροχρονική μελέτη της ακολουθίας δείχνει ότι κατά τη διάρκεια της 16^{ης} Σεπτεμβρίου, η δραστηριότητα μετατοπίζεται σταδιακά από το νότο (άσπροι κύκλοι-επίκεντρα στον κόλπο της Ελευσίνας) προς το βορρά, όπου περίπου το μεσημέρι [-15:00] «συναντούν» το κύριο ρήγμα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μετατόπιση αυτή δεν μπορεί να οφείλεται σε κάποιο άλλο τεχνητό αίτιο (π.χ. αλλαγή δικτύου καταγραφής σε συνδυασμό με σφάλματα μετρήσεων ή μοντέλου) αφού το δίκτυο είχε την τελική του μορφή από το μεσημέρι της 15^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 (24 ώρες πριν την παρατηρούμενη μεταβολή).

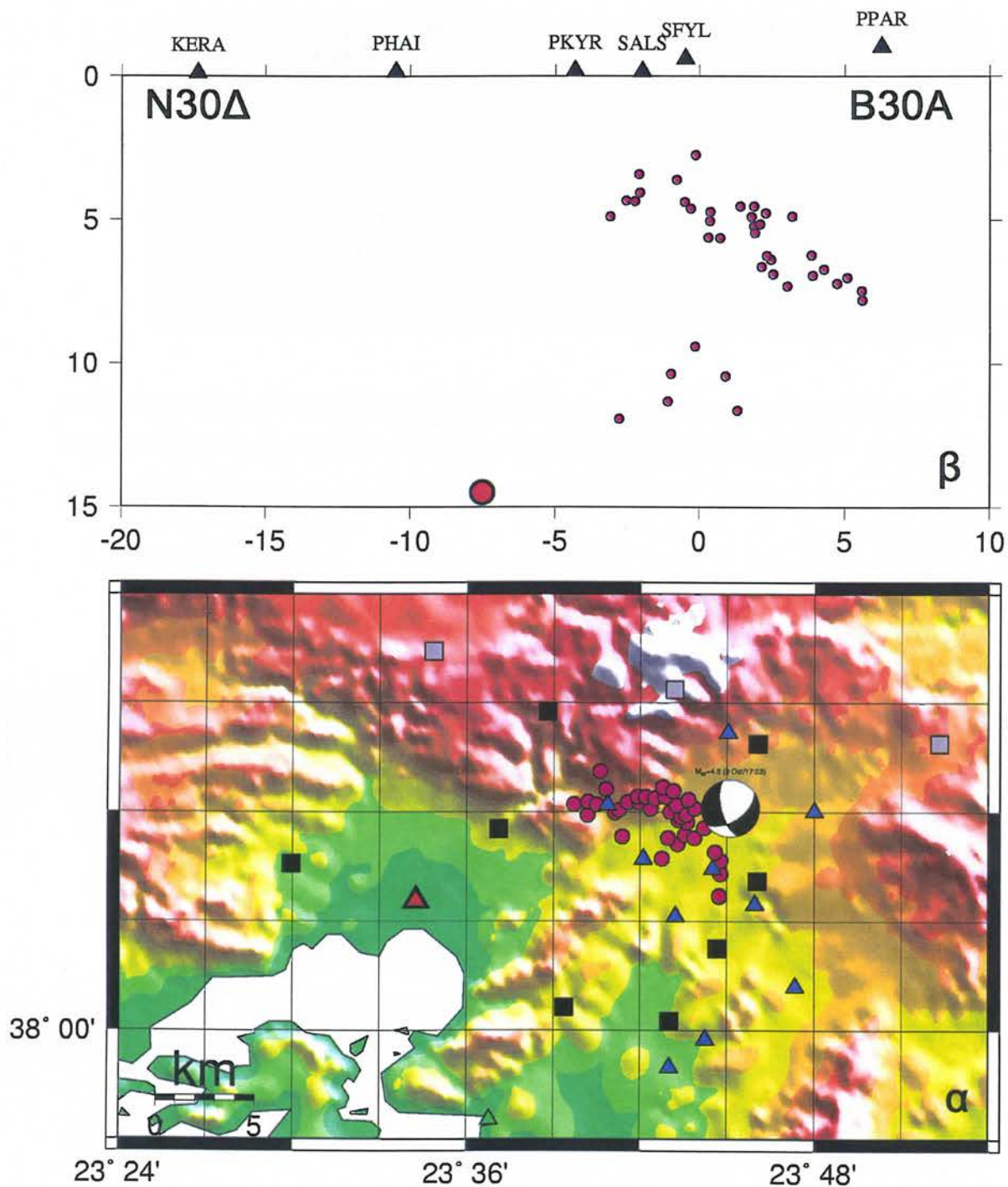
Τα παραπάνω αποτελέσματα αναδεικνύουν το κύριο επίπεδο του σεισμικού ρήγματος της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999, αλλά και σημαντική δραστηριότητα σε άλλα δευτερεύοντα ρήγματα. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το ρήγμα το οποίο εμφανίζεται στην περιοχή του Μενιδίου-Θρακομακεδόνων. Το ρήγμα αυτό φαίνεται καθαρά στο σχήμα 12α, όπου παρουσιάζεται μία ξεχωριστή συγκέντρωση μετασεισμών στην περιοχή δυτικά του Μενιδίου και των Άνω Λιοσίων, προς τη περιοχή Θρακομακε-



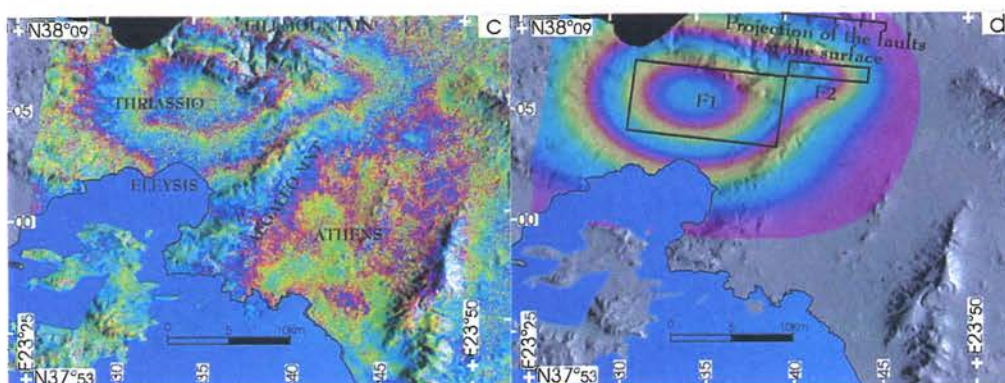
Σχήμα 10. (α) Επίκεντρα των μετασεισμών που έγιναν μετά από τις 15:00 της 16/9 (μωβ κύκλοι). Ο κύριος σεισμός της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 παριστάνεται με κόκκινο κύκλο. (β) Κατανομή των εστιών των μετασεισμών του προηγούμενου σχήματος. Η προβολή έγινε σε κατακόρυφο επίπεδο με διεύθυνση B30⁰A. Παρατηρείται η εξαιρετική «σκιαγράφηση» του ίχνους του σεισμικού ρήγματος.



Σχήμα 11. (α) Επίκεντρα των μετασεισμών που έγιναν στο χρονικό διάστημα 15/9-16/9/1999, ως τις 15:00 (λευκοί κύκλοι) και από τις 15:00 της 16/9 ως το τέλος του πειράματος (μωβ κύκλοι). Ο κύριος σεισμός της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 παριστάνεται με κόκκινο κύκλο. (β) Κατανομή των εστιών των μετασεισμών του προηγούμενου σχήματος. Η προβολή έγινε σε κατακόρυφο επίπεδο με διεύθυνση B30⁰A. Εύκολα διακρίνονται οι δύο διαφορετικές ζώνες διάρρηξης.



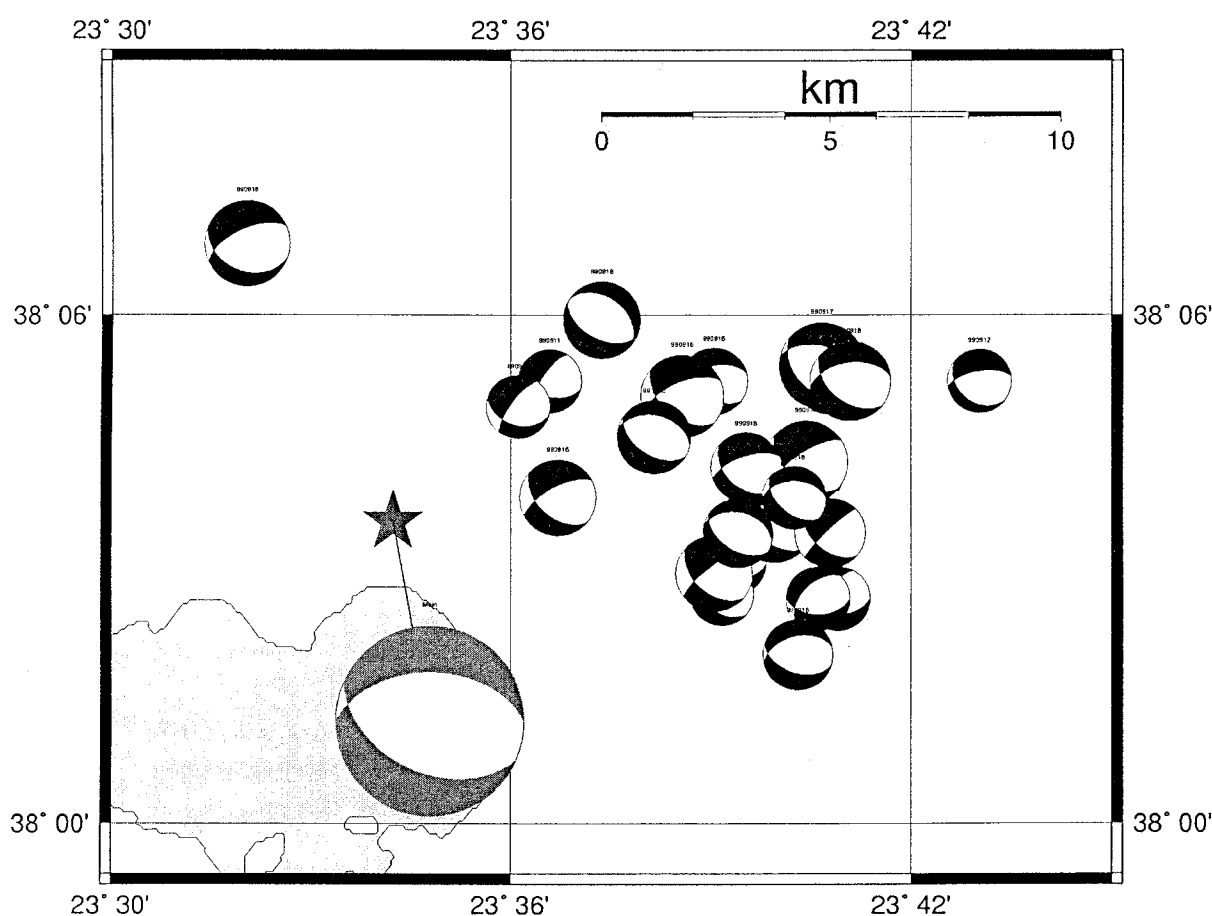
Σχήμα 12. (α) Επίκεντρα των μετασεισμών που έγιναν στην περιοχή Μενιδίου-Λιοσίων-Θρακομακεδόνων. (β) Κατανομή των εστιών των μετασεισμών του προηγούμενου σχήματος. Η προβολή έγινε σε κατακόρυφο επίπεδο με διεύθυνση B120⁰A, παράλληλα με το κύριο σεισμικό ρήγμα. Εύκολα διακρίνεται η ζώνη διάρρηξης, η οποία βρίσκεται σε εξαιρετική συμφωνία με το μηχανισμό του ισχυρότερου μηχανισμού στην περιοχή, όπως φαίνεται στο (α).



Σχήμα 13. Παρατηρημένη (αριστερά) και μοντελοποιημένη (δεξιά) παραμόρφωση από δορυφορικά δεδομένα του σεισμού της Αθήνας (Kontoes et al., 2000). Το προτεινόμενο δευτερεύον ρήγμα F2 συμφωνεί με τη θέση της ακολουθίας του σχήματος 12, αν και έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά.

σεισμό με σημαντικές καταγεγραμμένες επιταχύνσεις (~5% g) και συνεπώς είναι δυνατόν η καταγεγραμμένη παραμόρφωση να οφείλεται σε ένα η περισσότερα τέτοια σεισμικά γεγονότα.

Εκτός από την κατανομή των εστιών των σεισμών, μελετήθηκαν και οι αντίστοιχοι μηχανισμοί γένεσης. Για τον προσδιορισμό των μηχανισμών γένεσης των μετασεισμών της ακολουθίας, χρησιμοποιήθηκαν οι πρώτες αποκλίσεις των επιμήκων σεισμικών κυμάτων στους σταθμούς του σεισμολογικού δικτύου που εγκαταστάθηκε στην περιοχή από τον Τομέα Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Το γεγονός ότι οι καταγραφές αυτές έγιναν από υψηλής διακριτικής ικανότητας ψηφιακούς σειсмоγράφους, είχε ως αποτέλεσμα την ασφαλή ανάγνωση των πρώτων αποκλίσεων και τη συλλογή αξιόπιστων δεδομένων. Όμως, ο σχετικά μικρός αριθμός των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και ο αυξημένος εδαφικός θόρυβος στην περιοχή μελέτης, ήταν οι βασικοί παράγοντες που εμπόδισαν τον προσδιορισμό των μηχανισμών γένεσης σε ένα μεγάλο αριθμό μετασεισμών.



Σχήμα 14. Μηχανισμοί γένεσης οι οποίοι έχουν προσδιοριστεί για διάφορους σεισμούς της ακολουθίας του σεισμού της Αθήνας οι οποίοι βρίσκονται στο κύριο ρήγμα του σεισμού. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και ο CMT μηχανισμός του Harvard. Γενικά παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία των μηχανισμών των μετασεισμών με τον μηχανισμό του κύριου σεισμού.

Στο σχήμα 14, έχουν χαρτογραφηθεί οι μηχανισμοί γένεσης των μετασεισμών της ακολουθίας οι οποίοι προσδιορίστηκαν με τη χρήση τουλάχιστον πέντε πρώτων αποκλίσεων. Στο ίδιο σχήμα έχει χαρτογραφηθεί επίσης ο μηχανισμός γένεσης του κύριου σεισμού, όπως αυτός προσδιορίστηκε από το Πανεπιστήμιο του Harvard. Ο μικρός αριθμός των μηχανισμών γένεσης των μετασεισμών και το ότι σε αρκετούς από αυτούς τα επίπεδα δεν προσδιορίζονται μονοσήμαντα (εξαιτίας του μικρού αριθμού των παρατηρήσεων), δεν επιτρέπει τη λεπτομερή μελέτη του τρόπου της διάρρηξης. Όμως, από το σύνολο των δεδομένων προκύπτει ότι ο μηχανισμός γένεσης των μετασεισμών βρίσκεται σε καλή συμφωνία με αυτόν του κύριου σεισμού. Όλα τα δεδομένα δείχνουν κανονική διάρρηξη ενώ οι διευθύνσεις των επιπέδων με κλίση προς τα νότια κυμαίνονται από 100° - 130° , δηλαδή, κοντά στη διεύθυνση των 115° , του αντίστοιχου επιπέδου της λύσης που έχει προταθεί από το Harvard για τον κύριο σεισμό.

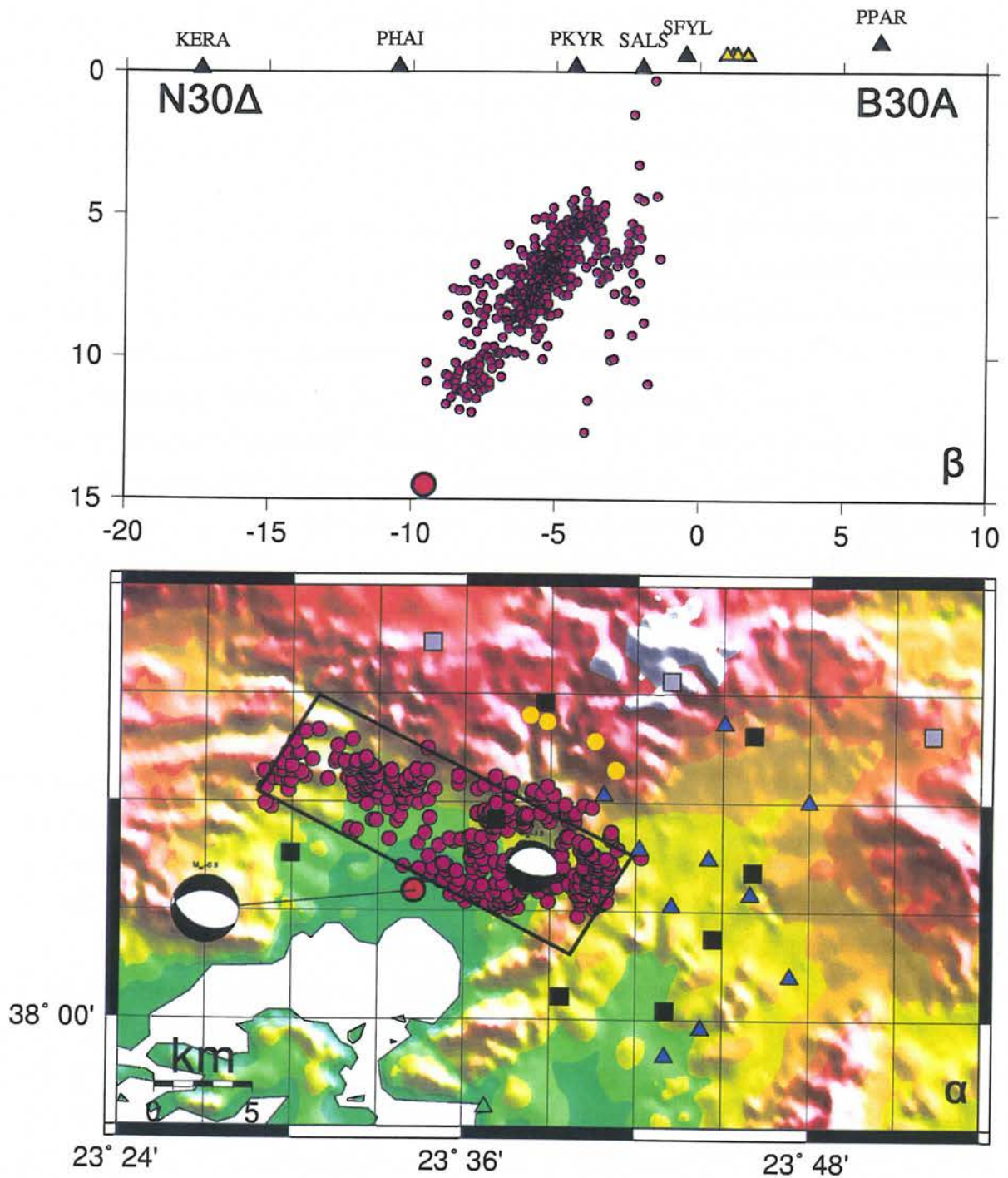
6. Η ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΚΥΡΙΟ ΡΗΓΜΑ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ, 7/9/1999 ($M_w=5.9$)

Στο σχήμα 15α έχουν χαρτογραφηθεί τα ακριβέστερα προσδιορισμένα επίκεντρα των μετασεισμών της σεισμικής ακολουθίας, που αντιστοιχούν στο κύριο σεισμικό ρήγμα του σεισμού. Στο ίδιο σχήμα με κόκκινο κύκλο, έχει χαρτογραφηθεί το επίκεντρο του κύριου σεισμού (έναρξη της διάρρηξης), ενώ με τρίγωνα και τετράγωνα συμβολίζονται οι θέσεις των διαφόρων σεισμολογικών οργάνων που είχαν εγκατασταθεί στην περιοχή και οι καταγραφές των οποίων μας είναι διαθέσιμες. Τα επίκεντρα των σεισμών αυτών σχηματίζουν μια ζώνη ΔΒΔ-ΑΝΑ διεύθυνσης, η οποία και οριοθετεί το προτεινόμενο ρήγμα του κύριου σεισμού, το οποίο σημειώνεται με τη συνεχή γραμμή. Το συνολικό μήκος της ζώνης είναι $L=18$ km και βρίσκεται σε σχετικά καλή συμφωνία με το μήκος διάρρηξης των 15 km το οποίο προβλέπεται για ένα σεισμό μεγέθους $M=5.9$, σύμφωνα με το σχετικό τύπο που έχει προταθεί από τους Papazachos and Papazachou (1997). Το επίκεντρο του κύριου σεισμού βρίσκεται στο νότιο και κεντρικό σημείο της σεισμικής ζώνης, δείχνοντας ότι η διάρρηξη προχώρησε από το κεντρικό και κατώτερο τμήμα του σεισμικού ρήματος προς τα δύο άκρα της σεισμικής ζώνης, σε συμφωνία με πολλούς άλλους σεισμούς στον Ελληνικό χώρο (π.χ. ακολουθία Κοζάνης, Papazachos et al., 1998). Η συγκέντρωση των επικέντρων είναι αρκετά μεγαλύτερη στο χώρο ανατολικά του επικέντρου του κύριου σεισμού από ότι δυτικά αυτού. Η παρατήρηση αυτή, εφόσον είναι ακριβής, λόγω της μερικά ασύμμετρης ανάπτυξης του τοπικού δικτύου με έμφαση στην περιοχή των Αθηνών, επιτρέπει τον προσδιορισμό τμημάτων υψηλής και χαμηλής ολίσθησης κατά τη διάρκεια της κύριας διάρρηξης.

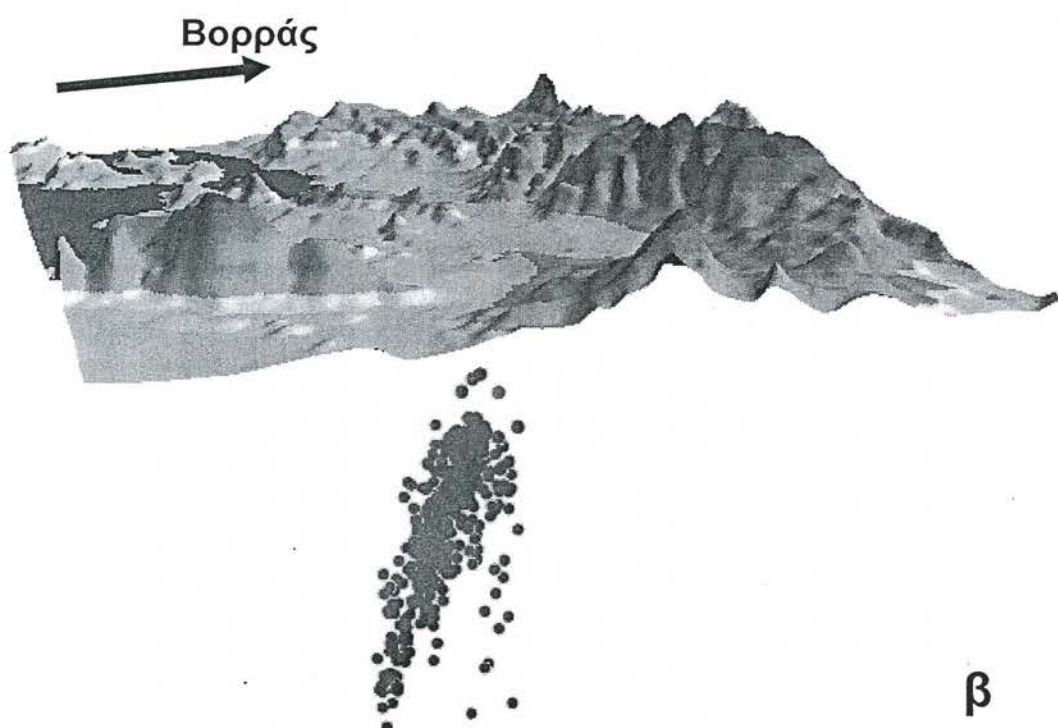
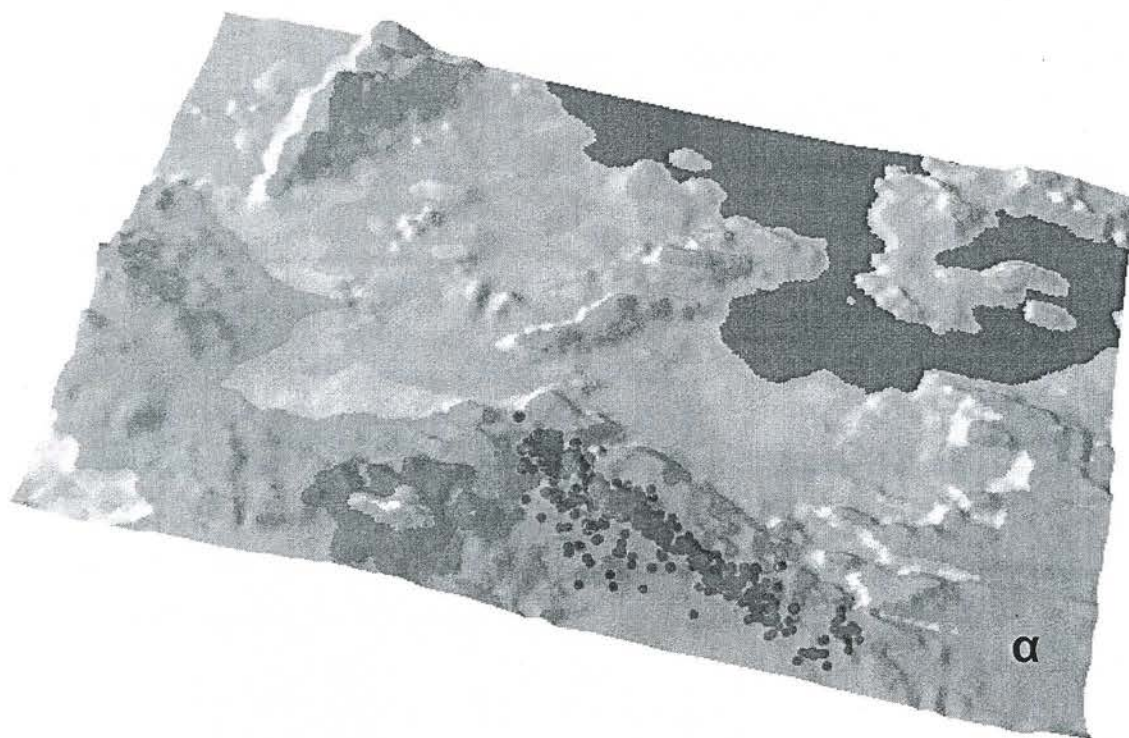
Η μετασεισμική ζώνη καλύπτει κατά κύριο λόγο το Θριάσιο πεδίο και οριοθετείται αρκετά καλά από τη μορφολογία της περιοχής. Συγκεκριμένα, η βόρεια, η ανατολική και η δυτική πλευρά της ζώνης περιορίζονται από τους αντίστοιχους ορεινούς όγκους που υπάρχουν στην περιοχή. Μόνο η συγκέντρωση μετασεισμών στο βορειοανατολικό άκρο της ζώνης (περιοχή Μενιδίου-Λιοσίων) βρίσκεται στο σύνολό της έξω από τη λεκάνη που συγκεντρώνονται όλοι οι υπόλοιποι σεισμοί και έχει διαφορετικές ιδιότητες από την κύρια ζώνη, γι' αυτό και παρουσιάζεται και σχολιάζεται στα σχήματα 12 και 13, χωριστά.

Η διεύθυνση της βόρειας πλευράς της κύριας σεισμικής ζώνης ($\sim 120^\circ$) βρίσκεται σε συμφωνία με τη διεύθυνση των επιφανειακών διαρρήξεων που παρατηρήθηκαν στην περιοχή μετά τη γένεση του κύριου σεισμού από την επιτόπια έρευνα και οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα 15α με κίτρινους κύκλους. Επίσης, βρίσκεται σε συμφωνία με τη διεύθυνση του επιπέδου του ρήγματος με κλίση προς τα νότια, του μηχανισμού γένεσης του κύριου σεισμού όπως αυτός προσδιορίστηκε από τη CMT λύση του Παν/μίου του Harvard. Με βάση τα παραπάνω εξετάστηκε η κατανομή των εστιακών βαθών των μετασεισμών σε μια τομή με διεύθυνση κάθετη σε αυτή της κύριας σεισμικής ζώνης (Σχήμα 15β). Τα εστιακά βάθη των μετασεισμών που αντιστοιχούν στην κύρια σεισμική διάρρηξη κυμαίνονται κατά σχεδόν αποκλειστικά μεταξύ 4-12 km, όπως σχολιάστηκε και στο σχήμα 5B. Το μεγαλύτερο μέρος των εστιών βρίσκεται πάνω σε μια ζώνη η οποία βυθίζεται προς τα νότια με κλίση περίπου $\sim 45-50^\circ$. Η εστία του κύριου σεισμού βρίσκεται στην προς τα κάτω προέκταση της ζώνης αυτής, αν και είναι πιθανό να υπάρχει μια μικρή υπερεκτίμηση του εστιακού βάθους του κύριου σεισμού. Σε κάθε περίπτωση η εστία η οποία παρουσιάζεται στην τομή δείχνει την έναρξη της σεισμικής διάρρηξης και όχι το σημείο έκλυσης της κύριας σεισμικής ενέργειας, το οποίο τόσο από το σχήμα, όσο και από ανεξάρτητα στοιχεία (Tselentis and Zahradnik, 2000, Θεοδουλίδης και συνεργάτες, 2000) φαίνεται ότι βρίσκεται περίπου στα 8km. Γενικά, από την τομή αυτή προκύπτει ότι η διάρρηξη άρχισε στο κάτω μέρος της σεισμικής ζώνης, σε βάθος 12-14 km και διαδόθηκε προς την επιφάνεια μέχρι το βάθος των 4 km περίπου όπου και σταμάτησε.

Ιδιαίτερος προβληματισμός έχει αναπτυχθεί σχετικά με τη συσχέτιση του σεισμού με κάποιο ενεργό τεκτονικό ρήγμα το οποίο να είναι ορατό στην επιφάνεια. Οι Papadopoulos et al. (2000) πρότειναν την ταύτιση του ρήγματος με το ονομαζόμενο πιθανό ρήγμα της Φυλής, το οποίο είναι παράλληλο με το ρήγμα του Θριασίου πεδίου και έχει σχολιαστεί ήδη από τον Γαλανόπουλο. Στο σχήμα 15β φαίνεται ότι οι παρατηρούμενες επιφανειακές διαρρήξεις από υπαίθριες παρατηρήσεις (κίτρινα τρίγωνα) βρίσκονται στην προέκταση του ίχνους του σεισμογόνου ρήγματος προς την επιφάνεια. Παρόμοια συμπεράσματα μπορεί να εξαχθούν και από τα σχήματα 16α και 16β, όπου φαίνεται η τρισδιάστατη απεικόνιση των μετασεισμών. Στο σχήμα 16α τα επίκεντρα έχουν προσανατολιστεί παράλληλα με το επίπεδο του ρήγματος έτσι ώστε στην ημιδιαφανή μορφολογική επιφάνεια να σκιαγραφούν την επιφανειακή προβολή του ίχνους του ρήγματος. Από το σχήμα φαίνεται καθαρά ότι η προβολή τους είναι παράλληλη με το Θριάσιο ρήγμα και μετατοπισμένη προς



Σχήμα 15. (α) Επίκεντρα των μετασεισμών που οριοθετούν το κύριο σεισμικό ρήγμα (μωβ κύκλοι). Ο κύριος σεισμός της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999 παριστάνεται με κόκκινο κύκλο. Παρουσιάζονται επίσης ο μηχανισμός ενός τυπικού μετασεισμού, καθώς και ίχνη επιφανειακών διαρρήξεων (κίτρινοι κύκλοι) που εντοπίστηκαν στην περιοχή της Φυλής (β) Κατανομή των εστιών των μετασεισμών του προηγούμενου σχήματος σε κατακόρυφο επίπεδο με διεύθυνση $B30^{\circ}A$. Διακρίνεται το κύριο επίπεδο του ρήματος, καθώς και τα επιφανειακά ίχνη διαρρήξεων (κίτρινα τρίγωνα) που βρίσκονται στην προέκταση του ρήματος στην επιφάνεια.



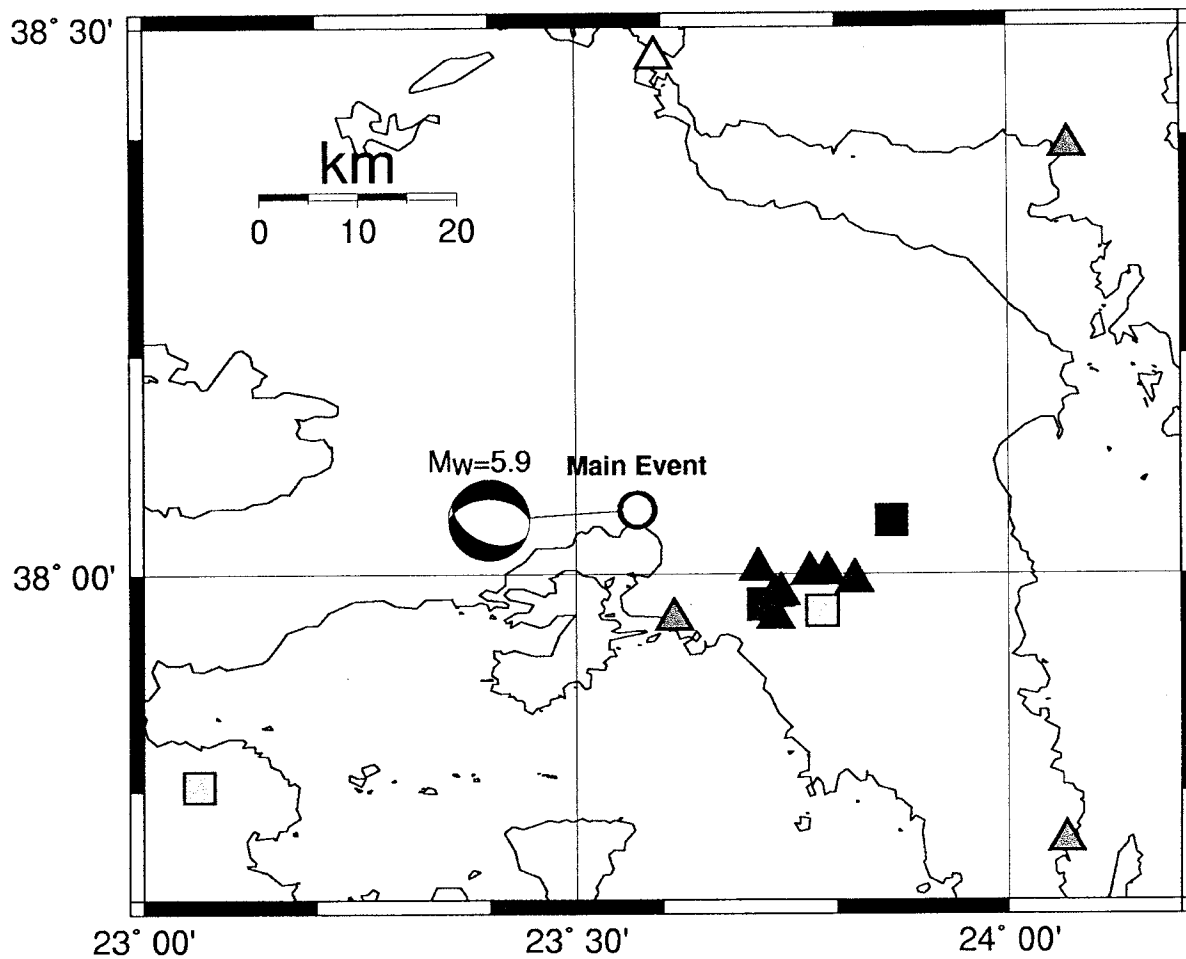
Σχήμα 16. Τρισδιάστατη απεικόνιση των εστιών των μετασεισμών που καθορίζουν το σεισμικό ρήγμα. (α) Προβολή των μετασεισμών σε ημιδιαφανές μορφολογικό υπόβαθρο: η προβολή γίνεται παράλληλα με το επίπεδο του ρήγματος ώστε να σκιαγραφείται η επιφανειακή του προβολή. (β) Απεικόνιση των μετασεισμών παράλληλα προς το επίπεδο του ρήγματος από την ΑΝΑ πλευρά του. Παρατηρείται ταύτιση της επιφανειακής του προβολής με το φαράγγι στην περιοχή της Φυλής.

τα βόρεια, στην περιοχή της Φυλής. Παράλληλα, στο σχήμα 16β φαίνεται ότι η επιφανειακή προβολή του ρήγματος συμπίπτει με το φαράγγι το οποίο βρίσκεται στην περιοχή της Φυλής.

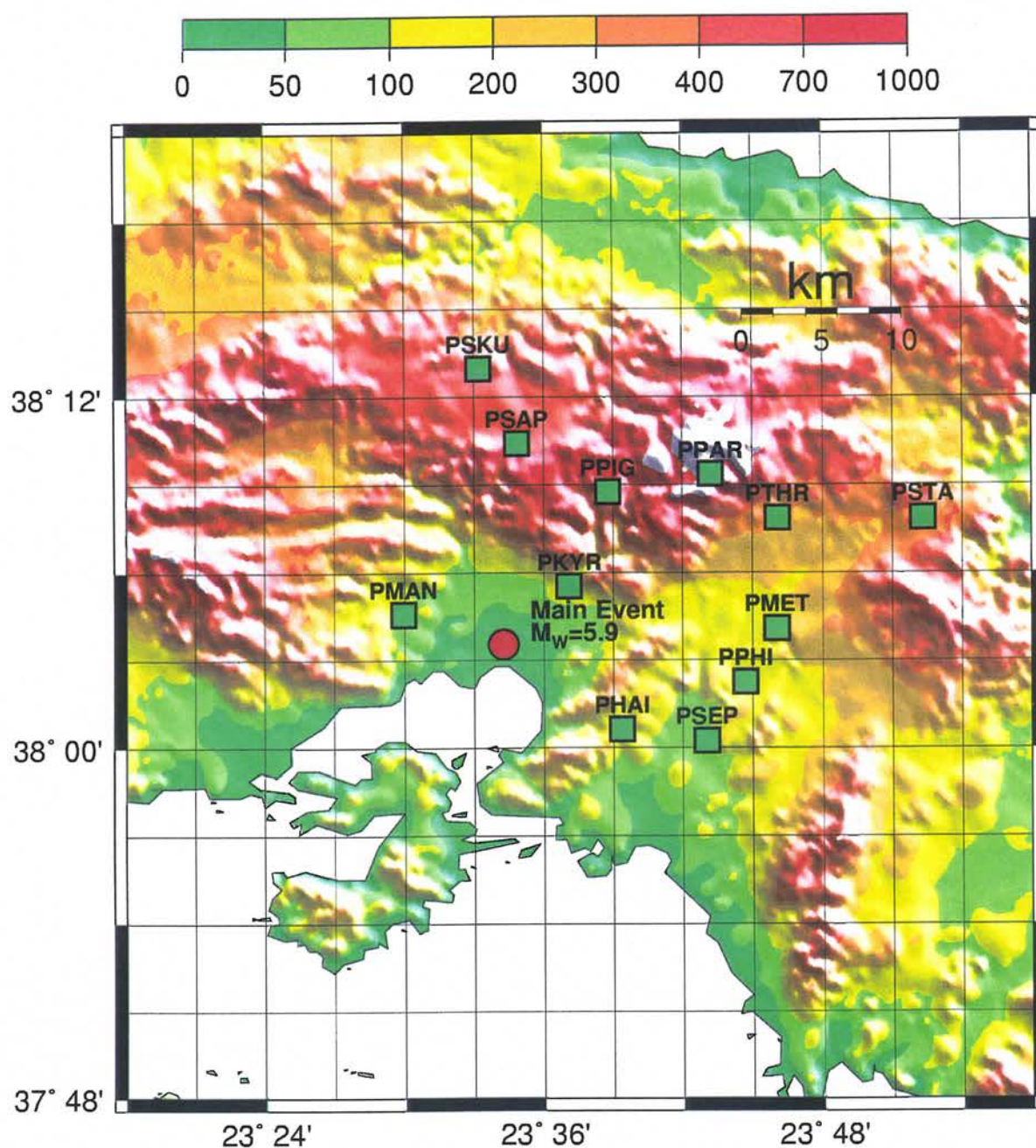
Παρά τις παραπάνω διαπιστώσεις, τόσο η κατανομή των μετασεισμών η οποία δείχνει την σχεδόν πλήρη απουσία επιφανειακών σεισμών, όσο τα γεωδαιτικά στοιχεία (Kontoes et al., 2000), αλλά και η έλλειψη κάποιου καθαρού επιφανειακού ρήγματος παρά μόνο διάσπαρτων επιφανειακών διαρρήξεων δείχνουν ότι αυτή η ταύτιση του ρήγματος του σεισμού με το συγκεκριμένο γεωλογικό ρήγμα είναι πιθανά υπερβολική: ο σεισμός πρέπει να θεωρηθεί ότι έγινε κυρίως σε βάθος μεγαλύτερο από 4km, όπως και σε αρκετούς άλλους παρόμοιους σεισμούς (Πάτρα, 1993, Κοζάνη, 1995), χωρίς σημαντικές μετατοπίσεις στην επιφάνεια. Η κύρια διάρρηξη είχε ως αποτέλεσμα την ανακατανομή των τάσεων στην περιοχή και τη διέγερση άλλων μικρότερων γειτονικών ρηγμάτων με τη γένεση μικρού μεγέθους μετασεισμών. Στο σχήμα 15α παρουσιάζεται και ο μηχανισμός ενός τυπικού μετασεισμού με μέγεθος $M_w=4.0$ (28/9-05:59), ο οποίος έγινε στο μέσο βάθος του σεισμικού ρήγματος (~8km) και ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στις μετέπειτα προσομοιώσεις (Θεοδουλίδης και συνεργάτες, 2000).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Θεοδουλίδης, Ν., Μάργαρης, Β., Παπααϊωάννου, Χ. και Δημητρίου, Π., Προκαταρκτική έκθεση της ισχυρής σεισμικής κίνησης σε θέσεις της πλειόσειστης περιοχής της ΒΔ Αττικής κατά το σεισμό της 7/9/1999, Τεχνική Έκθεση, 2000.
- Kissling, E., Kradolfer, U., and Maurer H., VELEST user's guide, ETH Zurich, Institute of Geophysics, 22pp.
- Kontoes, C. , Briole, P., Sachpazi, M. , Veis, G., Elias, P., Kotsis, I. , Sykioti, O., Remy, D., Displacement field mapping and fault modelling of the Mw=5.9, September 7, 1999 Athens earthquake based on ERS-2 satellite radar interferometry, Geoph. Res. Let., 2000 (in press).
- Lahr, J. C., HYPOELLIPSE: A Computer Program for Determining Local Earthquake Hypocentral Parameters, Magnitude and First-Motion Pattern (Y2K Compliant Version), U.S.Geological Survey Open-File Report 99-23, 1999.
- Panagiotopoulos, D.G. and Papazachos, B.C., Travel times of Pn-waves in the Aegean and surrounding area. Geophys. J. R. astr. Soc., 80, 165-176, 1985.
- Papadopoulos, G. A., Drakatos, G., Papanastassiou, D., Kalogeras, I., and Stavrakakis, G., Geophys. Res. Let., 318-329, 2000.
- Papazachos, B. C., and Papazachou, C. C., The earthquakes of Greece, Ziti Publ., Thessaloniki, 304pp., 1997.
- Papazachos, B. C., Karakostas, B. G., Kiratzi, A. A., Papadimitriou, E. E., and Papazachos, C. B., A model for the 1995 Kozani-Grevena seismic sequence, J. Geodynamics, 26, 217-231, 1998.
- Papazachos, C. B., and Kiratzi, A. A., A detailed study of the active crustal deformation in the Aegean and surrounding area, Tectonophysics, 253, 129-153, 1996.
- Papazachos, C. B., and Nolet. G., P and S deep velocity structure of the Hellenic area obtained by robust non-linear inversion of travel times, J. Geophys. Res., 102, 8349-8367, 1997.
- Tselentis, G-A., and Zahradnik, J., Aftershock monitoring of the Athens earthquake of 7 September 1999, Geophys. Res. Let., 330-337, 2000.



Σχήμα 1. Επίκεντρο του κύριου σεισμού ($M_w=5.9$) της Αθήνας της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999, όπως καθορίστηκε από καταγραφές μικρών επικεντρικών αποστάσεων ($<100\text{km}$). Τα τετράγωνα αντιστοιχούν σε απόλυτες αφίξεις P και S, ενώ τα τρίγωνα σε διαφορικούς χρόνους S-P.



Σχήμα 2. Οι θέσεις των δώδεκα σεισμολογικών σταθμών που εγκατέστησε ο Τομέας Γεωφυσικής του Α.Π.Θ. στην ευρύτερη επικεντρική περιοχή του σεισμού της 7^{ης} Σεπτεμβρίου 1999. Ο κόκκινος κύκλος αντιστοιχεί στο επίκεντρο του κύριου σεισμού.

Πρέπει να επισημανθεί ότι για τη μελέτη της μετασεισμικής ακολουθίας χρησιμοποιήθηκαν