

**ΕΝΟΡΓΑΝΕΣ ΚΑΙ ΥΠΑΙΘΡΙΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
ΓΙΑ ΤΟΝ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΟΓΟΝΟΥ ΔΟΜΗΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ
ΤΗΣ 7ΗΣ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΥ 1999 ΣΤΗΝ ΑΘΗΝΑ***
Γ. Α. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ¹, Α. ΓΚΑΝΑΣ¹, Σ. ΠΑΥΛΙΔΗΣ²

ΣΥΝΟΨΗ

Αν και έχουν πραγματοποιηθεί πολυποικίλες παρατηρήσεις για τη μελέτη του σεισμού της 7-9-1999 στην Αθήνα, δεν υπάρχει προς το παρόν ομογνομία μεταξύ των επιστημόνων για το ποιά ήταν η σεισμογόνος δομή. Για την επίλυση αυτού του ζητήματος παρατίθενται σεισμογραφικές μετρήσεις και μακροσεισμικές και γεωλογικές παρατηρήσεις υπαίθρου. Οι μηχανισμοί γένεσης και οι επικεντρικοί προσδιορισμοί του κύριου σεισμού και των μετασεισμών δεν αφήνουν αμφιβολία ότι η διάρρηξη ήταν κανονική με ΔΒΔ-ΑΝΑ διεύθυνση και κλίση προς τα ΝΔ. Οι παρατηρήσεις υπαίθρου δείχνουν ότι τα μόνα γνωστά ρήγματα που έχουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που ανταποκρίνονται στα σεισμογραφικά δεδομένα είναι του Θριασίου Πεδίου και της Φυλής. Υποστηρίζουμε ότι το ρήγμα της Φυλής πιθανότατα απετέλεσε τη σεισμογόνο δομή γιατί είναι ενεργό, οι μέγιστες βλάβες και οι κύριες εδαφικές παραμορφώσεις παρατηρήθηκαν στο επικρεμάμενο τέμαχος (hanging-wall domain) και πλησίον του επιφανειακού του ίχνους, και επιπλέον παρατηρήθηκε πιθανή συνσεισμική μετακίνηση 3-6 cm. Αντίθετα, το ρήγμα του Θριασίου Πεδίου δεν έχει κανένα από αυτά τα γνωρίσματα. Επίσης, από τις υπάρχουσες παρατηρήσεις δεν προκύπτει ότι ίσως ενεργοποιήθηκε ένα «τυφλό ρήγμα».

ABSTRACT

The earthquake of 7 Sept. 1999 ($M_s = 5.9$) that struck the metropolitan area of Athens, occurred only at a distance of 18 NW from the historical center of the city and has been the most destructive shock in modern history of Greece. Therefore, it is of great importance to identify the seismogenic structure. Focal mechanisms of the main shock as well as the lateral and vertical distributions of the aftershocks, determined by several institutes, are consistent in that the main shock was associated with a normal faulting striking WNE-ESE and dipping SW. The only geological faults known in the area to have the geometrical characteristics that are compatible with the seismographic results are the fault of Thriassion Pedion and the Fili fault. We support that the Fili fault, striking $110^\circ - 150^\circ$ N at an observable length of 8-10 Km, has been very probably the seismogenic structure of the Athens earthquake because (i) it proved to be an active fault as revealed by the striations we observed on several segments of the fault mirror, (ii) the meizoseismal region as well as the most important ground failures, like local small-scale landslides and rock-falls, all are located on the hanging-wall domain and very close to the surface trace of the fault as it is theoretically expected (e.g. Oglesby et al., 2000), (iii) we observed a possibly co-seismic displacement by 3-6 cm of the SW (hanging-wall) segment towards SW. On the contrary, the fault of Thriassion Pedion is recognizable in satellite images but in the field it is evident only as a series of alluvium cones which is an evidence of a possibly inactive structure. Moreover, the meizoseismal area and the ground failures observed in association with the Athens earthquake are located in its foot-wall, that is in the domain where strong motion should not be expected to occur. In addition, if that fault was the seismogenic one then the earthquake focus would fit the fault geometry only if it was shifted at least 15 km southwestwards. The last possibility that the Athens earthquake was associated with a blind fault is not supported by any kind of instrumental or field evidence.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: σεισμός, Αθήνα 1999, σεισμογόνος δομή
KEY WORDS: earthquake, Athens 1999, seismogenic structure

* INSTRUMENTAL AND FIELD OBSERVATIONS FOR THE DETERMINATION OF THE SEISMOGENIC STRUCTURE OF THE 7 SEPTEMBER 1999 ATHENS EARTHQUAKE

1. Γεωδυναμικό Ινστιτούτο, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, Τ.Θ. 200 48, 118 10 Αθήνα
2. Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. 54 006 Θεσσαλονίκη

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σεισμός της 7ης Σεπτεμβρίου του 1999, μεγέθους $M_s = 5.9$ σύμφωνα με το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Ε.Α.Α. και το Εργαστήριο Γεωφυσικής του Α.Π.Θ. και $M_w = 5.9$ σύμφωνα με διεθνή σεισμογραφικά κέντρα, έγινε στις 11: 56: 50.5 GMT (14: 56: 50.5 τοπική ώρα). Η επαναπροσδιορισθείσα εστία από τους Papadopoulos et al. (1999, 2000, 2001) έχει συντεταγμένες $38,08^{\circ}N / 23,58^{\circ}E$ και βάθος 17 km , δηλαδή η επικεντρική απόσταση του Εθνικού Αστεροσκοπείου στο ιστορικό κέντρο της Αθήνας είναι $\Delta \sim 18$ km (Σχήμα 1). Οι Papadimitriou et al. (2000) προσδιόρισαν παραπλήσιο επίκεντρο αλλά μικρότερο εστιακό βάθος (~ 8 km). Αυτός ο σεισμός υπήρξε ο πιο σημαντικός στη νεότερη ιστορία της χώρας μας για τρεις λόγους : (1) είναι ο πρώτος που βεβαιωμένα έγινε με τόσο μεγάλο μέγεθος και σε τόσο μικρή απόσταση από το ιστορικό κέντρο της Αθήνας , αποκαλύπτοντας μία νέα σεισμική πηγή μέσα στα όρια του μητροπολιτικού κέντρου της χώρας , (2) είναι ο πρώτος στη μακροαίωνα ιστορία που γνωρίζουμε ότι προκάλεσε θύματα μέσα στα όρια του μητροπολιτικού κέντρου, και (3) είναι από τους πιο βλαβερούς σεισμούς της νεότερης ιστορίας της χώρας , δεδομένου ότι προκάλεσε 143 θύματα και εκατοντάδες τραυματίες, μεγάλες ή μέτρες βλάβες σε περίπου 65.000 κτίρια σε 55 δήμους και άμεση οικονομική βλάβη που υπερβαίνει το 1,2 τρις δραχμές .

Για τους λόγους αυτούς είναι εξαιρετικά σημαντικό να υπολογιστεί το σεισμικό δυναμικό της σεισμογόνου δομής και ο μελλοντικός σεισμικός κίνδυνος που συνεπάγεται. Επειδή , όμως , προς το παρόν δεν υπάρχει ομογνωμία για το ποιά υπήρξε η σεισμογόνος δομή, στην παρούσα εργασία εξετάζουμε ειδικότερα το θέμα αυτό βασιζόμενοι σε ενόργανα σεισμογραφικά δεδομένα, σε μακροσεισμικές και γεωλογικές υπαίθριες παρατηρήσεις και στη συνδυασμένη ερμηνεία τους.

2. ΕΝΟΡΓΑΝΕΣ ΣΕΙΣΜΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

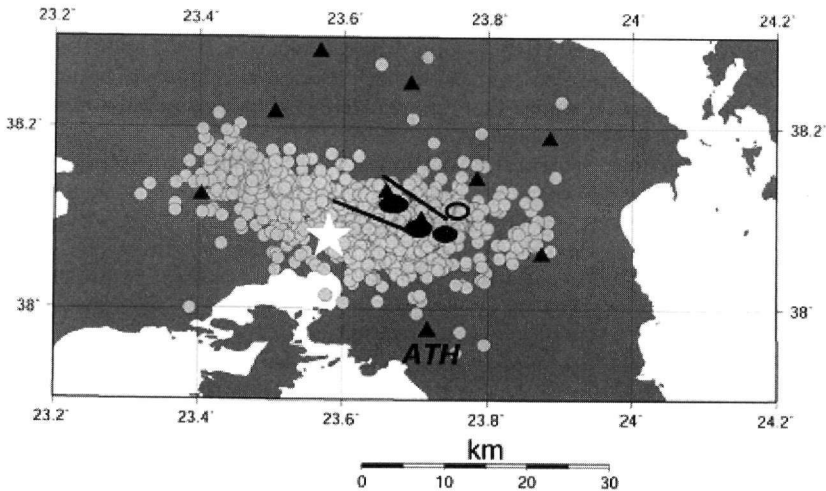
2.1 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΓΕΝΕΣΗΣ ΤΟΥ ΚΥΡΙΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΙΣΧΥΡΩΝ ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΩΝ ΤΟΥ

Οι μηχανισμοί γένεσης που καθορίστηκαν από διεθνή σεισμογραφικά κέντρα από μακρινές καταγραφές του κύριου σεισμού αμέσως μετά τη γένεσή του, βρίσκονται σε γενική συμφωνία μεταξύ τους και υποδεικνύουν τις εξής λύσεις για τα δύο κύρια επίπεδα (nodal planes, NP): NP1 (διεύθυνση/ κλίση/ ολίσθηση): $292^{\circ} / 36^{\circ} / -99^{\circ}$ (USGS), $271^{\circ} / 47^{\circ} / -106^{\circ}$ (Harvard), $294^{\circ} / 47^{\circ} / -83^{\circ}$ (MEDNET), NP2 (διεύθυνση/ κλίση/ ολίσθηση): $123^{\circ} / 55^{\circ} / -84^{\circ}$ (USGS), $114^{\circ} / 45^{\circ} / -73^{\circ}$ (Harvard), $104^{\circ} / 43^{\circ} / -97^{\circ}$ (MEDNET). Οι Papadopoulos et al. (1999,2000) καθόρισαν τον μηχανισμό γένεσης του κύριου σεισμού και 38 μετασεισμών του με τη μέθοδο των πρώτων αποκλίσεων των κυμάτων P από καταγραφές ελλαδικών σταθμών . Ο μηχανισμός γένεσης του κύριου σεισμού (NP1: $293^{\circ} / 51^{\circ} / -90^{\circ}$, NP2: $113^{\circ} / 39^{\circ} / -90^{\circ}$) είναι παρόμοιος με αυτόν που προσδιορίστηκε από μακρινές καταγραφές και συμφωνεί με τον μηχανισμό που προσδιόρισαν και άλλοι ερευνητές (π.χ. Louvari and Kiratzi, 2000, Papadimitriou et al., 2000). Συνεπώς , ο κύριος σεισμός προκλήθηκε από κανονική διάρρηξη με διεύθυνση ΔΒΔ – ΑΝΑ και κλίση ή ΝΔ ή ΒΑ και με κατερχόμενο το νοτιοδυτικό ή το βορειοανατολικό τέμαχος , αντίστοιχα. Παρόμοιοι είναι και οι μηχανισμοί γένεσης των μετασεισμών.

2.2 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΕΠΙΚΕΝΤΡΩΝ ΤΩΝ ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΩΝ

Το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο αμέσως μετά τον κύριο σεισμό τοποθέτησε οκτώ αναλογικούς φορητούς σεισμογράφους τύπου Sprengnether MEG-800 εξοπλισμένους με κατακόρυφα σεισμόμετρα βραχείας περιόδου (1 Hz) τύπου Teledyne S – 13. Το σύνολο αυτών των οργάνων μαζί με τους δύο μόνιμους σεισμογραφικούς σταθμούς των Αθηνών και της Πεντέλης συγκρότησαν δίκτυο δέκα σταθμών (Σχήμα 1) από τις καταγραφές των οποίων έγινε δυνατός ο προσδιορισμός περίπου 800 μετασεισμών μέχρι τα τέλη του Οκτωβρίου του 1999, με ελάχιστο αριθμό έξι φάσεων κυμάτων χώρας. Το μοντέλο ταχυτήτων που εφαρμόστηκε αποτελεί ελαφρά τροποποίηση εκείνου που δημοσίευσαν οι Papadimitriou et al. (1999) και έχει ως εξής: (V_p / h) : (4,80/ 0,0) , (5,40/ 4,0) , (5,80/ 7,2) , (6,30/ 10,4) , (6,5/ 15,0) και (7,00/ 30, 0) , όπου V_p είναι η ταχύτητα των κυμάτων P σε km/sec και h είναι το βάθος σε km.

Η γεωγραφική και κατακόρυφη διανομή των εστιών των μετασεισμών αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά κριτήρια για τον καθορισμό της σεισμογόνου διάρρηξης . Όμως, η ανελαστική αναδιανομή των τάσεων που προκαλεί ο κύριος σεισμός έχει ως αποτέλεσμα τη γένεση μετασεισμών σε χώρο ευρύτερο απ' αυτόν που καθορίζει η κύρια διάρρηξη, και γι' αυτό η γεωγραφική εξάπλωση των επικέντρων του συνόλου των μετασεισμών ίσως δεν παρέχει απολύτως αντιπροσωπευτική εικόνα της διάρρηξης αυτής. Γι' αυτό , διεθνώς γίνεται παραδεκτό ότι η αντιπροσωπευτικότερη εικόνα προκύπτει αν ληφθούν υπόψη οι μετασεισμοί μόνο των πρώτων ημερών της μετασεισμικής ακολουθίας. Το Σχήμα 1 δείχνει τη γεωγραφική διανομή των επικέντρων των 98 μετασεισμών που προσδιορίστηκαν κατά την αρχική μετασεισμική περίοδο , δηλαδή μέχρι και την 10η



Σχήμα 1. Επίκεντρο του κύριου σεισμού (αστέρι) και επίκεντρα των μετασεισμών του πρώτου τριμήρου (κύκλοι) (δεδομένα από Papadopoulos et al., 2000). Η νότια και η βόρεια γραμμή παριστούν απλοποιημένα τα ρήγματα του Θριάσιου Πεδίου και της Φυλής, αντίστοιχα. Πρόσθετη επεξήγηση: μαύρες ελλείψεις = περιοχές μέγιστων βλαβών (Φυλή, Α. Λιόσια, Μενίδι από ΒΔ προς ΝΑ), λευκή έλλειψη = περιοχή σημαντικών βλαβών (Θρακομακεδόνες), τρίγωνα = σταθμοί αναλογικού δικτύου του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου.

Σεπτεμβρίου του 1999. Είναι προφανής η διάταξη των επιπέδων σε ζώνη με περίπου ελλειπτικό σχήμα με μέγιστο άξονα ΔΒΔ – ΑΝΑ διεύθυνσης μήκους περίπου 25 km. Επιλεκτική διάταξη των επιπέδων σε άλλες διευθύνσεις δεν παρατηρείται, γεγονός που σημαίνει ότι η κύρια διάρρηξη ήταν ΔΒΔ – ΑΝΑ διεύθυνσης και ότι ούτε δευτερογενείς διαρρήξεις σε άλλες διευθύνσεις υπήρξαν κατά τις πρώτες μέρες της μετασεισμικής ακολουθίας. Επίσης, είναι προφανής η συγκέντρωση των επιπέδων σε δύο περιοχές, την δυτική και την ανατολική, γεγονός που έχει ήδη επισημανθεί από τους Papadopoulos et al. (1999, 2000) από την προκαταρκτική αξιολόγηση της διανομής του συνόλου των μετασεισμών που προσδιορίστηκαν από τις καταγραφές του φορητού δικτύου. Την ίδια παρατήρηση έκαναν και οι Tselentis and Zahradnik (2000) με δεδομένα από ανεξάρτητο φορητό δίκτυο που κατέγραψε μετασεισμούς. Αυτή η συγκέντρωση υποδεικνύει ότι η διάρρηξη του κύριου σεισμού πρέπει να έγινε σε δύο κύρια ασθενή φράγματα (barriers, σύμφωνα με τον ορισμό των Das και Aki, 1977) διαχωριζόμενα από σχετικά μικρού όγκου ισχυρό φράγμα που έμεινε άθραυστο κατά την κύρια διάρρηξη. Παρατήρηση είναι και η άποψη των Voulgaris et al. (2000). Σε κατακόρυφη τομή διεύθυνσης Α-Δ (Σχήμα 2) έχουν προβληθεί οι οπίσθιοι των μετασεισμών που προσδιορίστηκαν κατά το πρώτο δεκαήμερο, δηλαδή μέχρι και την 17η Σεπτεμβρίου του 1999, προκειμένου να διαπιστωθεί τυχόν επέκταση της μετασεισμικής δράσης σε σχέση με τις πρώτες μέρες. Η ύπαρξη των δύο συγκεντρώσεων σεισμικών εστιών στο δυτικό και στο ανατολικό τμήμα της διάρρηξης είναι εμφανής με σαφώς μεγαλύτερο αριθμό εστιών στο ανατολικό τμήμα. Το συνολικό μήκος του μετασεισμικού χώρου παραμένει ίσο με περίπου 25 km που σημαίνει ότι στην εξέλιξη της ακολουθίας δεν υπήρξε αξιόλογη γεωγραφική επέκταση της μετασεισμικής δράσης. Τα εστιακά βάθη σχεδόν του συνόλου των μετασεισμών δεν υπερβαίνει το βάθος των 17 km που υπολογίστηκε για τον κύριο σεισμό (Σχήμα 3) και αυτό σημαίνει ότι η κύρια διάρρηξη έγινε από κάτω προς τα πάνω, όπως ακριβώς αναμένεται σε περιπτώσεις κανονικών διαρρήξεων.

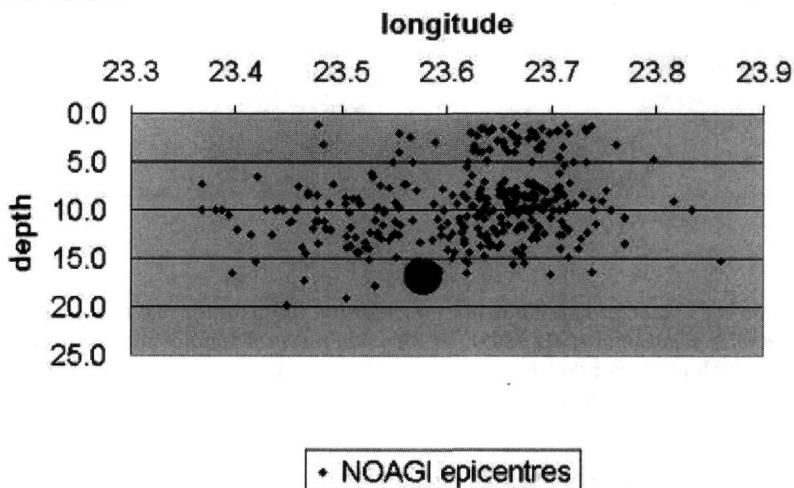
3. ΜΑΚΡΟΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

3.1 ΝΕΟΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Οι υπαίθριες γεωλογικές παρατηρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην ευρύτερη σεισμόπληκτη περιοχή τις πρώτες μετά τον κύριο σεισμό ημέρες, σε συνδυασμό με εξέταση δορυφορικών εικόνων (Ganas et al. 2001) και γεωλογικών χαρτών (ΙΓΜΕ, 1980), έδειξαν ότι δύο είναι τα κύρια ρήγματα που χαρακτηρίζουν με την επιφανειακή τους εμφάνιση την περιοχή. Το πρώτο είναι το ρήγμα του Θριάσιου Πεδίου (ή Ασπροπίργου) με διεύθυνση περίπου ΔΒΔ – ΑΝΑ, και το δεύτερο είναι το ρήγμα της Φυλής που διατάσσεται περίπου παράλληλα με το πρώτο και βόρεια απ' αυτό. Και τα δύο ρήγματα κλίνουν προς τα ΝΑ. Από μορφοτεκτονική άποψη το ρήγμα του Θριάσιου Πεδίου εμφανίζεται με τη μορφή σειράς κώνων αλλοβιακών αποθέσεων χωρίς να εμφα-

νίζει τυπική επιφάνεια ρήγματος (καθρέφτη), δίδοντας έτσι την εντύπωση ότι πρόκειται μάλλον για τεκτονική δομή αβέβαιης δραστηριότητας. Αντίθετα, το ρήγμα της Φυλής, διεύθυνσης B110? – 130? και κλίσης 70? - 85? ΝΔ εμφανίζει σε πολλές θέσεις μορφοτεκτονικές επιφάνειες τυπικές ενεργών ρηγμάτων, με συχνή την παρουσία χαρακτηριστικών γραμμώσεων ολίσθησης, με τα παραπάνω γεωμετρικά χαρακτηριστικά, που μαρτυρούν μετακινήσεις σε νεοτεκτονικό ή και σε ιστορικό χρόνο.

Ακόμη, είναι αξιοσημείωτο ότι το νεοτεκτονικό ρήγμα της Φυλής οριοθετεί το βορειοανατολικό μέρος της ζώνης των μετασεισμών.



Σχήμα 2. Κατακόρυφη τομή του μετασεισμικού χώρου διεύθυνσης Α- Α. Προβάλλονται οι εστίες του κύριου σεισμού (μεγάλος κύκλος) και των μετασεισμών του πρώτου δεκαημέρου, όπως προσδιορίστηκαν από τους Papadopoulos et al. (2000, 2001).

3.2 ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΒΛΑΒΩΝ

Από τις παρατηρήσεις πεδίου προκύπτει ότι η γεωγραφική διανομή των μέγιστων μακροσεισμικών εντάσεων ήταν σημαντικά ασύμμετρα (Σχήμα 1). Οι μέγιστες βλάβες παρατηρήθηκαν στον άξονα Φυλή - Α. Λιόσια - Αχαρνές (Μενίδι), όπου η μακροσεισμική ένταση έφθασε τον βαθμό VIII, και τοπικά τον IX, στην κλίμακα MM. Ο άξονας αυτός έχει διεύθυνση ΔΒΔ - ΑΝΑ που είναι και η διεύθυνση της σειсмоγόνου διάρρηξης, όπως προκύπτει από τους μηχανισμούς γένεσης και από τη γεωγραφική διανομή των επικέντρων των μετασεισμών. Στην προς τα ΑΝΑ προέκταση του άξονα αυτού, στις περιοχές Αδάμες και Μεταμόρφωση, η ένταση δεν υπερέβη τον VII βαθμό, παρά τις μεμονωμένες καταρρεύσεις που παρατηρήθηκαν τοπικά. Η ίδια μέγιστη ένταση παρατηρήθηκε και στους Θρακομακεδόνες, περιοχή που εντοπίζεται βορειώς του ανατολικού άκρου του παραπάνω άξονα. Σε όλες τις υπόλοιπες περιοχές, ανεξαρτήτως της επικεντρικής απόστασης και της αξιμουθιακής τους τοποθέτησης σε σχέση με τη σεισμική εστία, η μακροσεισμική ένταση δεν υπερέβη τον VII βαθμό. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι τοπικοί εδαφικοί παράγοντες ίσως, σε ορισμένες περιπτώσεις, ενίσχυσαν τοπικά τον εδαφικό κραδασμό στις περιοχές των μέγιστων εντάσεων. Όμως, παρόμοιες εδαφικές συνθήκες (π.χ. χαλαρές πρόσφατες αποθέσεις) εντοπίζονται σε περιοχές μικρότερης ή ίσης επικεντρικής απόστασης, εντοπιζόμενες πολύ κοντά στην εστία, όπως ο Ασπρόπυργος, ή στα ΝΔ αυτής, όπως η Ελευσίνα και η Μαγούλα, όπου η ένταση δεν υπερέβη τον βαθμό VI.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η γεωγραφική διάταξη των περιοχών όπου παρατηρήθηκε η μέγιστη ένταση πρέπει να ερμηνευθεί κυρίως από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διάρρηξης. Από την άποψη αυτή είναι σημαντικό ότι η πλειοσειστική ζώνη Φυλής - Α. Λιοσίων - Αχαρνών όχι μόνο βαίνει παράλληλα με το ρήγμα της Φυλής αλλά και εντοπίζεται στο κατερχόμενο τμήμα αυτού και πολύ κοντά στο επιφανειακό ίχνος του ρήγματος. Η σημαντικότητα αυτής της παρατήρησης συζητείται παρακάτω.

3.3 ΣΥΝΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΕΛΔΦΙΚΕΣ ΑΣΤΟΧΙΕΣ

Οι υπαίθριες γεωλογικές παρατηρήσεις που πραγματοποιήσαμε αμέσως μετά τον κύριο σεισμό περιέλαβαν και την αναζήτηση επιφανειακής εκδήλωσης του σειсмоγόνου ρήγματος, δηλαδή συνσεισμικών μετακινήσεων και εδαφικών αποτυχιών. Οι μόνες πιθανές μετακινήσεις που συνδεόταν με τον κύριο σεισμό της 7ης

Σεπτεμβρίου του 1999 παρατηρήθηκαν σε ορισμένες θέσεις του ρήγματος της Φυλής. Η σημαντικότερη είναι εκείνη που εντοπίστηκε στα ΒΔ της Μονής του Αγίου Κυπριανού και της Φυλής και σε απόσταση περίπου 1 km από αυτήν. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε μετακίνηση της τάξης των 3-6 cm και σε μήκος μικρότερο των 100 m, προς ΝΔ του νοτιοδυτικού τεμάχους, δηλαδή του κατερχόμενου τεμάχους του ρήγματος, όπως ακριβώς αναμένεται τόσο από την νεοτεκτονική του συγκεκριμένου ρήγματος όσο και από την αποδοχή του ενός από τα δύο κύρια επίπεδα που υποδεικνύει παρόμοια μετακίνηση στην εστία. Η μετακίνηση αυτή είναι οριακή, δηλαδή δεν εμφανίστηκε σε μεγάλο μήκος και δεν είχε σημαντικό άλμα, όπως άλλωστε αναμένεται από το μέτρο μέγεθους του σεισμού. Εντυπωσιακό είναι ότι παρόμοιες παλαιότερες μικρομετακινήσεις εμφανίζονται τόσο στην συγκεκριμένη θέση για περισσότερο από 1 km, όσο και σε αντίστοιχα μήκη στη θέση Κάστρο Φυλής και βόρεια των Ανω Λιοσίων, οριοθετώντας ουσιαστικά το ενεργό ρήγμα της Φυλής για περίπου 5-8 km. Οι μετατοπίσεις αυτές είναι τυπικές συνσεισμικές της τάξης 6-12 cm και σε συνδυασμό με το ορατό μήκος του ρήγματος προσδιορίζουν αντίστοιχα μεγέθη παλαιοσεισμών της τάξης $M_s = 6.0$ σύμφωνα με τις σχέσεις μεγέθους / μετακίνησης των Wells and Coppersmith (1994) και Pavlides et al. (2001).

Οι εδαφικές αστοχίες που παρατηρήθηκαν είναι δύο κατηγοριών: μικρής κλίμακας κατολισθήσεις και τοπικές καταπτώσεις λίθων. Οι θέσεις έχουν προσδιοριστεί με τη συνδυασμένη χρήση τοπογραφικών χαρτών και φορητών δεκτών GPS Magellan ακριβείας 60-70 μέτρων. Αν και η εμφάνιση τέτοιων αστοχιών εξαρτάται σημαντικά από τοπικούς παράγοντες, όπως οι μορφολογικές κλίσεις και ο βαθμός διάβρωσης των επιφανειακών πετρωμάτων, η πιο σημαντική παράμετρος που καθορίζει την κύρια ζώνη τέτοιων εμφανίσεων είναι ο ισχυρός εδαφικός κρυσταλλισμός. Η πλειονότητα αυτών των αστοχιών εντοπίζεται στην ζώνη των μέγιστων βλαβών ή πλησίον αυτής. Επίσης, πολύ κοντά στα τμήματα του ρήγματος της Φυλής όπου μετρήθηκε η πιθανώς συνσεισμική μετακίνηση, παρατηρήθηκαν τοπικές αναστηθήσεις λίθων που προσφέρουν έμμεση μαρτυρία ότι η κατακόρυφη συνιστώσα της εδαφικής επιτάχυνσης πρέπει να προσέγγισε το 1g στις συγκεκριμένες θέσεις. Παρόμοια φαινόμενα έχουν περιγραφεί στο παρελθόν σε άλλες σεισμογόνες περιοχές της Γης.

4. ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

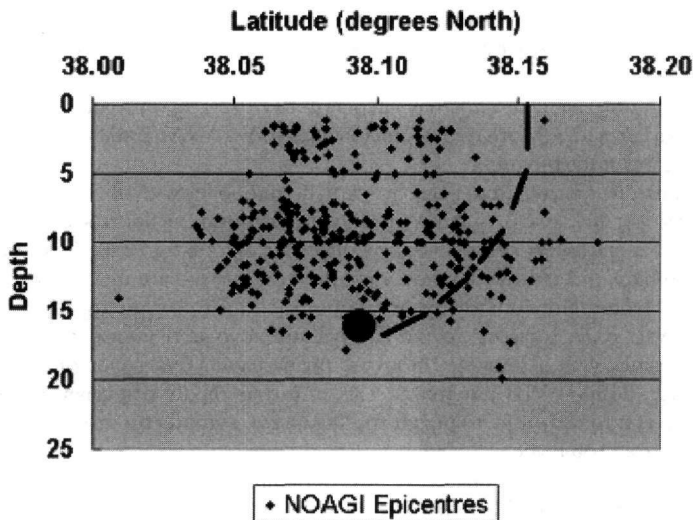
Τα κύρια αποτελέσματα που προκύπτουν συνοψίζονται στα εξής:

- 4.1. Οι μηχανισμοί γένεσης του κύριου σεισμού υποδεικνύουν ότι η διάρρηξη ήταν κανονική, με ΔΒΔ – ΑΝΑ διεύθυνση και με κλίση ή προς τα ΝΔ ή προς τα ΒΑ. Παρόμοιοι είναι και οι μηχανισμοί γένεσης της πλειονότητας των μετασεισμών.
- 4.2. Τα επίκεντρα των μετασεισμών των πρώτων ημερών μετά τη γένεση του κύριου σεισμού διατάσσονται σε περίπου ελλειπτική ζώνη με μέγιστο άξονα διεύθυνσης ΔΒΔ – ΑΝΑ. Επιλεκτική διάταξη επικέντρων σε άλλες διευθύνσεις δεν παρατηρήθηκε.
- 4.3. Δύο είναι τα ρήγματα με επιφανειακή εμφάνιση που θα μπορούσαν να συνδέονται με τον κύριο σεισμό. Το κανονικό ρήγμα της Φυλής, ΔΒΔ – ΑΝΑ διεύθυνσης, οριοθετεί τη βορειοανατολική πλευρά της ζώνης των μετασεισμών και εμφανίζει εντυπωσιακές επιφάνειες ολίσθησης (καθρέφτη) με εμφανείς γραμμώσεις, που προκλήθηκαν από τεκτονική μετακίνηση σε νεοτεκτονικό και ίσως σε ιστορικό χρόνο. Το ρήγμα του Θριάσιου Πεδίου διατάσσεται σχεδόν παράλληλα με το ρήγμα της Φυλής, είναι εμφανές σε δορυφορικές εικόνες, αλλά μορφοτεκτονικά εμφανίζεται μόνο με τη μορφή σειράς αλλουβιακών ριπιδίων χωρίς εμφανή επιφάνεια ολίσθησης, δίδοντας την εντύπωση ανενεργού ρήγματος.
- 4.4. Οι μέγιστες βλάβες, βαθμού VIII και τοπικά IX, παρατηρήθηκαν στη ζώνη Φυλής – Α. Λιοσίων – Αχαρνών που βαίνει παράλληλα με το ρήγμα της Φυλής και εντοπίζεται στο κατερχόμενο τμήμα του και κοντά στο επιφανειακό του ίχνος.
- 4.5. Σε ορισμένες θέσεις του ρήγματος της Φυλής παρατηρήθηκε πιθανώς συνσεισμική, οριακή μετακίνηση του κατερχόμενου τεμάχους κατά 3-6 cm. Στις ίδιες θέσεις παρατηρήσαμε επίσης αναστηθήσεις λίθων, γεγονός που υποδηλώνει ότι η κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής επιτάχυνσης προσέγγισε το 1g, όπως έχει παρατηρηθεί και σε περιπτώσεις σεισμών σε άλλες περιοχές του πλανήτη (π.χ. βλ. Bouchon et al., 2000 για σύντομη ανασκόπηση και νέες παρατηρήσεις). Ακόμη, τοπικές μικροκατολισθήσεις και καταπτώσεις παρατηρήθηκαν κυρίως στην πλειόσειστη ζώνη.

Τα παραπάνω αποτελέσματα ερμηνεύονται πολύ ικανοποιητικά αν δεχθούμε ότι το ρήγμα της Φυλής απετέλεσε τη σεισμογόνο δομή του σεισμού της 7ης Σεπτεμβρίου 1999, άποψη που για πρώτη φορά διατυπώθηκε από τους Pavlides et al. (1999). Πράγματι, η γεωμετρία του και η κινηματική του συμφωνούν απόλυτα τόσο με το ένα από τα δύο κύρια επίπεδα που υποδεικνύουν οι μηχανισμοί γένεσης του κύριου σεισμού, δηλαδή εκείνο που προβλέπει μετακίνηση προς τα ΝΔ του νοτιοδυτικού τεμάχους της διάρρηξης, όσο και με τη γεωμετρία της μετασεισμικής επιφάνειας. Επιπλέον, από τη νεοτεκτονική ανάλυση προέκυψε ότι το ρήγμα της Φυλής πιθανότατα ενεργοποιήθηκε σε πρόσφατο γεωλογικό ή και ιστορικό χρόνο, δηλαδή ότι είναι ενεργό και είχε το

δυναμικό για τη γένεση σεισμού, όπως αυτός της 7ης Σεπτεμβρίου 1999. Η μη εμφάνιση τυπικής, επιφανειακής συνσεισμικής μετακίνησης αιτιολογείται απολύτως από το μέτριο μέγεθος του σεισμού και δεν μειώνει την επιχειρηματολογία υπέρ της ενεργοποίησης του ρήγματος της Φυλής. Εξάλλου, η οριακή μετακίνηση που παρατηρήθηκε, έχει τα γεωμετρικά και κινηματικά χαρακτηριστικά που προβλέπονται αν δεχθούμε ότι το ρήγμα της Φυλής ενεργοποιήθηκε με το σεισμό. Επιπλέον το ίδιο ρήγμα είναι το μόνο στην περιοχή που παρουσιάζει τυπικά χαρακτηριστικά ενεργού ρήγματος. Συνδέεται επίσης με τις περισσότερες εδαφικές παραμορφώσεις (πτώσεις βράχων, εδαφικές διαρρηξεις, αναπηδήσεις λίθων, κτλ.) σε ποσοστό και σε ένταση. Σύμφωνα με τους Tselentis and Zahradnik (2000), η τομή του επιπέδου του ρήγματος, που καθορίζεται από τους μετασεισμικούς που οι ίδιοι κατέγραψαν με ανεξάρτητο φορητό δίκτυο, με την επιφάνεια της Γης συμπίπτει με το επιφανειακό ίχνος του ρήγματος της Φυλής. Αυτό προκύπτει και από την τομή διεύθυνσης B – N (Σχήμα 3) στην οποία έχουν προβληθεί οι εστίες των μετασεισμών που προσδιορίστηκαν από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο. Ακόμη, αποτελέσματα συμβολομετρικής ανάλυσης (Kontoes et al. 2000) συνηγορούν υπέρ του ότι το ρήγμα της Φυλής συνδέεται με το σεισμό της Αθήνας του 1999.

Η αποδοχή ότι το ρήγμα της Φυλής ήταν η σειсмоγόνο δομή σημαίνει ότι στο νοτιοδυτικό τέμαχος, που είναι το επικρεμάμενο (κατερχόμενο), και ιδιαίτερα πλησίον του επιφανειακού ίχνους του, αναμενόταν να παρατηρηθεί η ισχυρότερη εδαφική κίνηση. Πράγματι, παρατηρήσεις σε άλλες σεισογόνες περιοχές της Γης οδήγησαν στο αποτέλεσμα ότι στο επικρεμάμενο τέμαχος (hanging wall) ρηγμάτων ολίσθησης κατά την κλίση (dip-slip), και ιδιαίτερα κοντά στο επιφανειακό ίχνος του ρήγματος, η εδαφική κίνηση είναι σημαντικά ενισχυμένη απ' ότι στο σταθερό τέμαχος (foot wall) (π.χ. Abrahamson and Somerville 1996, Allen et al. 1998). Παρατηρήσεις από προηγούμενους σεισμούς που συνδέθηκαν με κανονικά ρήγματα στον Ελλαδικό χώρο, όπως οι σεισμοί της Μυθονιάς λεκάνης (1978), της Μαγνησίας (1980), των Αλκωνιδών (1981), της Καλαμάτας (1986), της Κοζάνης – Γρεβενών (1995) και του Αιγίου (1995), δείχνουν ότι κατά κανόνα οι μέγιστες βλάβες εντοπίζονται στο κατερχόμενο τέμαχος του κανονικού ρήγματος, γεγονός που έμμεσα παραπέμπει στο παραπάνω αποτέλεσμα. Το ίδιο ενισχύεται και θεωρητικά από τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης της σεισμικής κίνησης που δημοσίευσαν πρόσφατα οι Oglesby et al. (2000).



Σχήμα 3. Όπως το Σχήμα 2 σε διεύθυνση B – N, δηλαδή περίπου κάθετα στο ρήγμα της Φυλής του οποίου η συνέχεια της επιφανειακής εμφάνισης σε βάθος είναι υποθετική και συμβολίζεται με τη διακεκομμένη γραμμή.

Δεχόμενοι αυτό το μοντέλο της ασύμμετρης διανομής της ισχυρής σεισμικής κίνησης, μπορούμε να ερμηνεύσουμε χωρίς δυσκολία τον εντοπισμό της πλειόσειστης ζώνης, αλλά και της πλειονότητας των εδαφικών αστοχιών, στο κατερχόμενο τμήμα του ρήγματος της Φυλής, κοντά στο επιφανειακό ίχνος και παράλληλα με αυτό. Για τους αντίθετους λόγους δεν μπορεί να υποστηριχθεί ότι ο κύριος σεισμός συνδέεται με ενεργοποίηση του ρήγματος του Θριασίου Πεδίου. Πράγματι, η πλειόσειστη περιοχή βρίσκεται στο ανερχόμενο τέμαχος αυτού του ρήγματος (Σχήμα 1), δηλαδή εκεί όπου θα αναμενόταν η σεισμική κίνηση να είναι μειωμένη. Εξάλλου, δεν έχουν βρεθεί ενδείξεις ότι το ρήγμα αυτό είναι ενεργό, ούτε συνσεισμική μετακίνηση και εδαφικές

αποτοχίες εμφανίστηκαν στην περιοχή του εξαιτίας του σεισμού της 7 - 9- 1999. Ακόμη, αν το ρήγμα αυτό ήταν εκείνο που ενεργοποιήθηκε , τότε η εστία του σεισμού, βρισκόμενη σε βάθος 10-17 km θα έπρεπε να βρίσκεται κατά πολύ νοτιότερα ώστε να συμφώνει με την προς τα ΝΑ κλίση του ρήγματος, λαμβανομένου επιπλέον υπόψη ότι η γωνία κλίσης μειώνεται με το βάθος.

Απομένει η εξέταση της περίπτωσης ο σεισμός να συνδέεται με κάποιο «τυφλό ρήγμα» , δηλαδή χωρίς επιφανειακή μορφοτεκτονική εκδήλωση. Σ' αυτή την περίπτωση , και ειδικότερα αν το ρήγμα βρίσκεται σε βάθος μεγαλύτερο του 1 km, σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των Oglesby et al. (2000) δεν είναι δυνατόν να υπάρξει σημαντική επίδραση στην επιφάνεια , και συνεπώς δεν αιτιολογούνται εύκολα όλες εκείνες οι παρατηρήσεις που μαρτυρούν πολύ ισχυρό εδαφικό κραδασμό στην πλειόσειστη περιοχή. Επιπλέον, δεν υπάρχουν άλλης κατηγορίας παρατηρήσεις που να συνηγορούν υπέρ της αποδοχής ενός «τυφλού ρήγματος» , σε εφελκυστικό περιβάλλον (κανονικά ρήγματα) και σε τόσο μικρή απόσταση μεταξύ δύο νεοτεκτονικών ρηγμάτων, που να συνδέεται γενετικά με τον σεισμό της 7 – 9 – 1999. Ο όρος “τυφλό ρήγμα” είναι καταλληλότερος για περιοχές συμπιεστικού νεοτεκτονικού πεδίου (Yeats 1986), κυρίως σε πυρήνες ενεργών αντικλίνων που δεν επιτρέπουν την επιφανειακή εκδήλωση των ρηγμάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ABRAHAMSON, N. AND SOMERVILLE, P. , 1996. Effects of the hanging wall and footwall on ground motions recorded during the Northridge earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, S93-S99.
- ALLEN, C.R., BRUNE, J.N., CLUFF, L.S. AND BARROWS, A.G., 1998. Evidence for unusually strong near-field ground motion on the hanging wall of the San Fernando fault during the 1971 earthquake. *Seism. Res. Lett.*, 69, 524-531.
- BOUCHON, M., GAFFET, S., CORNOU, C., DIETRICH, M., GLOT., J.P., COURBOULEX, F., CASERTA, CULTRERA, G., MARRA, F. AND R. GUIGUET, 2000. Observations of vertical ground accelerations exceeding gravity during the 1997 Umbria-Marche (central Italy) earthquakes., *J. of Seismology*, 4, 517-523.
- DAS, S. AND AKI, K. , 1977. Fault planes with barriers: a versatile earthquake model. *J. Geophys. Res.*, 82, 5658 – 5670.
- GANAS, A., PAPAPOPOULOS, G. AND S.B. PAVLIDES, 2001. The 7 September 1999 Athens 5.9 Ms earthquake: remote sensing and digital elevation model inputs towards identifying the seismic fault. *Int. J. Remote Sensing*, 22,1,191-196.
- ΙΓΜΕ, 1980. Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο «Αθήναι-Ελευσίς» (1:50.000), Αθήνα.
- KONTOES, C., ELIAS, P., SYKIOTI, O., BRIOLE, P., REMY, D., SACHPAZI, M., VEIS, G., KOTSIKIS, I. 2000 Displacement field and fault model for the September 7, 1999 Athens earthquake inferred from radar satellite ERS2 interferometry *Geophys. Res. Lett.* 27, 3989
- LOUVARI, E. & KIRATZI, A. , 2000. Source parameters of the September 7, 1999 Athens (Greece) earthquake based on teleseismic data. *J. Balkan Geoph. Soc.* (in press).
- OGLESBY, D.D., ARCHULETA, R.J. AND S.B. NIELSEN, 2000. The three-dimensional dynamics of dipping faults. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 90, 616-628.
- PAPADIMITRIOU, P., KAVIRIS, G. AND K. MAKROPOULOS, 1999. Evidence of shear-wave splitting in the eastern Corinthian Gulf (Greece), *Phys. Earth Planet. Inter.*, 114, 3-13.
- PAPADIMITRIOU, P., KAVIRIS, G., VOULGARIS, N., KASSARAS, I., DELIBASIS, N. AND MAKROPOULOS, K. , 2000. The September 7, 1999 Athens earthquake sequence recorded by the cornet network: Preliminary results of source parameters determination of the mainshock. *Ann. Geol. Pays Hellen. Memoire* J. Drakopoulos, 1e serie, T. XXXVIII, Fasc. B, 29-39.
- PAPAPOPOULOS, G.A., I. BASKOULTAS , G. CHOULIARAS , G. DRAKATOS , I. KALOGERAS , V.KARASTATHIS , M. KOUROUZIDIS, I. LATOUSSAKIS, D. MAKARIS, N. MELIS, G. PANOPOULOU, D.PAPANASTASSIOU, I. PAPPIS, S. TASSOS, A. PLESSA AND G. STAVRAKAKIS. Seismological aspects of the Athens earthquake of 7th September, 1999: Preliminary results, 1st Conf. “Advances on Natural Hazards Mitigation-Experiences from Europe and Japan”, Programme – Abstracts- Reports, Athens 3-4 November, 1999, 73-79.
- PAPAPOPOULOS G.A., DRAKATOS G., PAPANASTASSIOU D., KALOGERAS, I. AND STAVRAKAKIS, G. ,2000. Preliminary results about the catastrophic earthquake of 7 September 1999 in Athens, Greece. *Seismol. Res. Letters*, 71, 318- 329.
- PAPAPOPOULOS G.A., DRAKATOS G., PAPANASTASSIOU D., KALOGERAS, I. AND STAVRAKAKIS, G., 2001. Preliminary results about the catastrophic earthquake of 7 September 1999 in Athens, Greece – Erratum.

- Seismol. Res. Letters*, 72, 73.
- PAVLIDES, S., G.A. PAPADOPOULOS, AND A. GANAS, 1999. The 7th September 1999 unexpected earthquake of Athens: Preliminary results on the seismotectonic environment, *1st Conf. Advances in Natural Hazards Mitigation: Experiences from Europe and Japan, Programme-Abstracts-Reports, Athens, 3-4 November, 1999*, 80-85.
- PAVLIDES, S., CAPUTO, R., AND CHATZIPETROS, A. , 2000. Empirical Relationships among Earthquake Magnitude, Surface Ruptures and Maximum Displacement in the Broader Aegean Region. *Proc. 3rd igcem (Intern Geolog. Congress on the Eastern Meditter.) Nikosia -Cyprus Sept. 1998 (under publication)*.
- TSELENTIS G.A. AND ZAHRADNIK, J. , 2000. Aftershock monitoring of the Athens earthquake of 7 September 1999, *Seism. Res. Lett.*, 71, 330-337.
- VOULGARIS, N., KASSARAS, I., PAPADIMITROU, P. DELIBASIS N., 2000. Preliminary results of the Athens September 7, 1999, Aftershock sequence. *Ann. Geol. Pays Hellen. Memoire J. Drakopoulos, 1e serie, T. XXXVIII, Fasc, B. 51-62.*
- WELLS, D.L. & COPPERSMITH, K.J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002.
- YEATS, S. R.. 1986. Active Faults Related to Folding. In "Active Tectonics" Studies in Geophysics, *Nat. Acad. Press, Washington D.C.*,63-79.