

ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΒΑΡΥΤΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΚΟΛΟΥΘΙΑΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ (13-9-1986)

Κ. Δημητρόπουλος* και Ε. Λάγιος**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια κατανόησης των τεκτονικών διεργασιών που έλαβαν χώρα κατά και μετά τον μεγάλο ($M=6.2$) πρόσφατο σεισμο στην περιοχή Καλαμάτας (13-9-1986), με βάση γεωφυσικά και σεισμολογικά δεδομένα. Η ανάλυση της μετασεισμικής σειράς έχει δείξει την ύπαρξη δύο σημείων μετασεισμών, τα οποία διαφοροποιούνται χωρικά και χρονικά, χαρακτηρίζονται δε από διαφορετικούς μηχανισμούς γέννησής: στο βόρειο σημείο επικρατούν εφελκυστικές τάσεις, ενώ στο νότιο συμπιεστικές. Οι λεπτομερείς βαρυτικές μετρήσεις ακριβείας κατά μήκος τριών πληγείσα περιοχή δείχνουν την ύπαρξη υψηλών βαθμίδων βαρύτητας κοντά στην περιοχή της Καλαμάτας. Οι βαθμίδες αυτές μπορούν να εξηγηθούν με την ύπαρξη κανονικού ρήγματος με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και μετάπτωση προς νότο. Η διεύθυνση αυτή επιβεβαιώνεται και από πρόσφατη δημοσιευθείσα ανάλυση της μετασεισμικής ακολουθίας, που υποδεικνύει για το νότιο σημείο συνεπίπεδα ελλειψοειδή διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ και κλίσης 50° 15'. Το κανονικό αυτό ρήγμα πιθανόν να ενεργοποιήθηκε σε κίνησή οριζόντιας ολισθήσεως μετά τον κύριο σεισμό προκαλώντας έτσι μηχανισμούς συμπέσης. Η άποψη αυτή διαφέρει από την κρατούσα αντίληψη ότι όλη η μετασεισμική δραστηριότητα οφείλεται στο μεγάλο κανονικό ρήγμα της Βέργας με γενική διεύθυνση Β-Ν.

ABSTRACT

After the destructive Kalamata earthquake (Sept. 13, 1986; $M=6.2$) gravity measurements along profiles were carried out to the north and east of the city. The profiles show high gravity gradients to the north and north-east of Kalamata. The high gravity gradient near the Nedon River confirms the existence of a fault striking along the river confirming the western boundary of both the Perivolakia Graben and the extent of the area of the severe earthquake damages. High gradients along two small N-S and one NE-SW profiles suggest the existence of fault(s) within the graben and under the Pleistocene - Holocene sediment cover of probable E-W to NW-SE direction, exhibiting a throw to the S-SE. The distribution of the aftershock epicenters around Kalamata city has shown two distinct clusters

K. DIMITROPOULOS & E. LAGIOS. Correlation between gravity observations and the aftershock sequence of the Kalamata earthquake (13-9-1986).

* ΔΕΠ - ΕΚΥ, Ικτινσίας 149, Αθήνα 151 24.

** Γραφείο Γεωφυσικής-Γεωθερμικής Πανεπιστημίου Αθηνών,
Πανεπιστημιούπολη, Τάξιας, Αθήνα 157 04.

separated by a narrow zone of no seismic activity. The two clusters substantially differ in a number of characteristics: (i) The southern cluster, in contrast to the northern one, shows a uniform behaviour in their analysis with the principal parameters method; (ii) the southern cluster has been activated later than the northern one in the aftershock sequence; (iii) the mean hypocenter depth is deeper for the northern compared to the southern cluster; (iv) the southern cluster shows a much larger dispersion than the northern one; (v) the focal mechanisms for the northern cluster suggest a N105°E extension, whereas a compression of similar direction is also observed in the southern cluster; (vi) the hypocenters' projection on the vertical plane through the Kalamata Fault trace fall within the expected fault zone in the northern cluster, and most of them in the footwall in the southern cluster.

The study of the direction of the contact between the Tripolis flysch and limestones and the Pleistocene sediments, the NW-SE trend of the Pleistocene-Holocene sediments contact and the change of the flow direction of the Venitsa and Kserilas Rivers at these contacts, along with some mapped faults of a general NW-SE direction and the change of the Kalamata Fault trend, suggest that the existence of a zone of NW-SE trending basement faults is probable to the NE of Kalamata. The same direction is also suggested by the co-planar ellipsoids of the southern cluster aftershocks. It is believed that a major part of the aftershock activity in the southern cluster is related to movements along these NW-SE trending faults, and even the largest aftershock may have occurred at the junction of the Kalamata Fault with these faults.

1. Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι η πόλη της Καλαμάτας επλήγη από ισχυρό επιφανειακό σεισμό μεγέθους $M_s = 6,2$ στις 13-9-1986, το επίκεντρο του οποίου τοποθετείται σε απόσταση περίπου 10 χιλιομέτρα βόρεια από τα λιμάνι (Papazachos et al., 1986). Δύο μέρες αργότερα συνέβη ο μεγαλύτερος μετασεισμός μεγέθους $M_s = 5,4$ με επίκεντρο πολύ κοντά στο λιμάνι. Η πόλη υπέστη σοβαρές ζημιές από τους σεισμούς. Σημαντικές ζημιές υπέστησαν επίσης τα χωριά που βρίσκονται μέσα στην σχετικά μικρή τριγωνική λεκάνη, που ορίζεται από τις ζώνες ρηγμάτων των ποταμών Σερύλα προς τα νότια, Νέδοντα προς τα δυτικά, την ζώνη κάτω Καρβέλι-Βενίτσα προς τα βόρεια, και την ζώνη ρηγμάτων Δυζήθουσας

ΒΒΔ-NNA προς τα ανατολικά στην περιοχή του χωριού Αράχωβα (Mariolakos et al. 1989), που φαίνονται στο σχήμα 1.

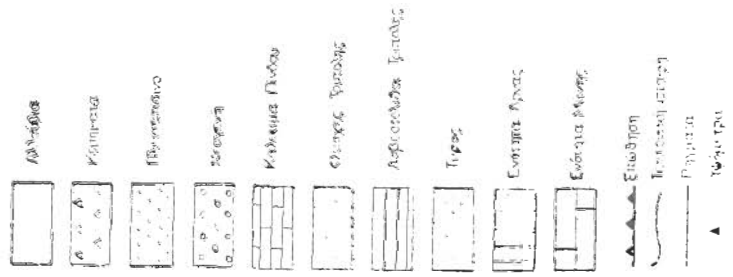
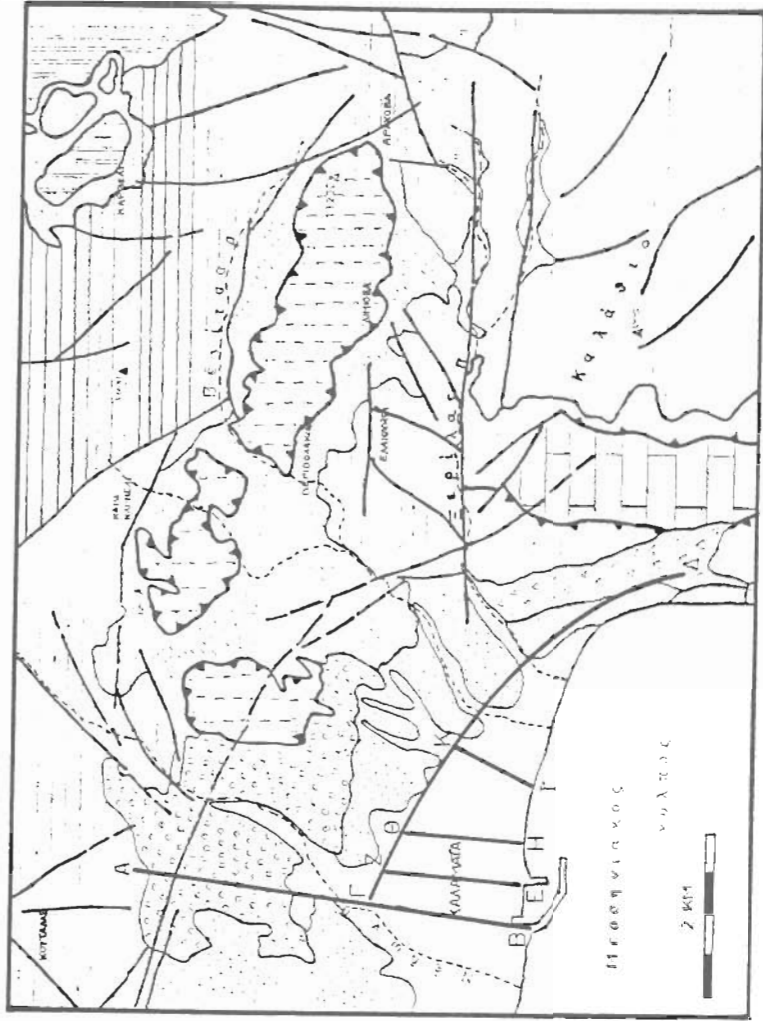
Η ευρύτερη περιοχή της Νό Πυλοποννήσου έχει αναγνωρισθεί σαν περιοχή μεγίστου σεισμικού δυναμικού και πολύ υψηλής πιθανότητας για την εκδήλωση μεγάλων σεισμών (Purcaru & Berckheimer 1979, 1982; Wyss and Baer 1981; Papadimitriou & Papazachos 1985; Papazachos et al. 1986). Στην περιοχή Μεσσηνίας ισχυροί σεισμοί έχουν συμβεί και στο παρελθόν, όλοι δε είναι μικρού βάθους ($h < 10$ km), ενώ απουσιάζουν οι σεισμοί ενδιάμεσου βάθους.

2. Γεωλογία Περιοχής

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που συναντώνται στην ευρύτερη περιοχή της Καλαμάτας φαίνονται στο σχήμα 1. Γους σχηματισμούς αυτούς μπορούμε να τους χωρίσουμε σε Αλπικούς και Μεταλπικούς.

2.1 Αλπικοί Σχηματισμοί

Αποτελούνται από πετρώματα των ενότητων Μάνης, Αρνας, Τρίπολης και Πινδου. Η ενότητα Μάνης συναντάται στην περιοχή των χωριών Άνω και Κάτω Βέργας και θεωρείται ως η αυτόχθονη ενότητα της περιοχής. Αποτελείται από πλακάδες κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους ηλικίας Άνω Σενονίου - Άνω Ηοκαίνου και από την κλασσική σειρά του φλύσχ ηλικίας Άνω Ηοκαίνου - Ολιγοκαίνου. Στην περιοχή Καλαμάτας εμφανίζονται μόνο τα στρώματα μεταβάσης από τους ασβεστόλιθους στον φλύσχη.



Σχήμα 1. Γεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής Καλαμάτας και θέσεις βαρυτικών προφίλ.

Figure 1. Simplified geological map of Kalamata broader area and gravity anomaly profiles.

Η ενότητα Άρνας, που συναντάται στην περιοχή των χωριών Καρβέλι και Λαοός, επικείται τεκτονικά της ενότητας Μάνης και υπόκειται της ενότητας Τριπολής. Περιλαμβάνει πολυπτυχωμένους σχιστόλιθους, μετακρκαλοπαγή, μεταβασάλτες, χαλασίτες, μάρμαρα και σερπεντινίτες.

Η ενότητα Τριπολής, που καλύπτει την μεγαλύτερη έκταση των αλπικών σχηματισμών, επικείται των ενότητων Μάνης και Άρνας και υπόκειται τεκτονικά της ενότητας της Πίνδου. Περιλαμβάνει πετρώματα ηλικίας Περμιού έως και Ολιγόκαινου, που διακρίνονται σε τρεις επιμέρους ενότητες : (α) τα στρώματα γύρω ηλικίας Περμιού - Κατώ Τριαδικού, αποτελούμενα από ηφαιστειακού-εξηματογενή και ανθρακικά πετρώματα (β) τα νηρητικής φύσης μέσο- έως παχύ-στρώματώδη ανθρακικά πετρώματα ηλικίας Μέσου Τριαδικού - Άνω Ηοκαίνου, με κύριο χαρακτηριστικό τον πολύ έντονο ρηγματογόνο τεκτονισμό τους, και (γ) την κλασσική σειρά του φλύσχη ηλικίας Άνω Ηοκαίνου - Ολιγόκαινου, που αποτελείται κυρία από εναλλαγές πηλιτών και ψαμμιτών.

Η ενότητα της Πίνδου παρουσιάζεται στο τεκτονικό βόθισμα Δημιοφας - Περιβολακών, και αποτελεί την ανώτερη τεκτονική ενότητα της ευρύτερης περιοχής, που είναι επωθημένη στην ενότητα Τριπολής. Περιλαμβάνει τον πρώτο φλύσχη και κερατόλιθους ηλικίας Ιουρασικού - Κάτω Κρητιδικού, και εντονότατα τεκτονισμένους και πολυπτυχωμένους λεπτοπλακώδεις ασβεστολίθους ηλικίας Τουρωνίου - Σενωνίου.

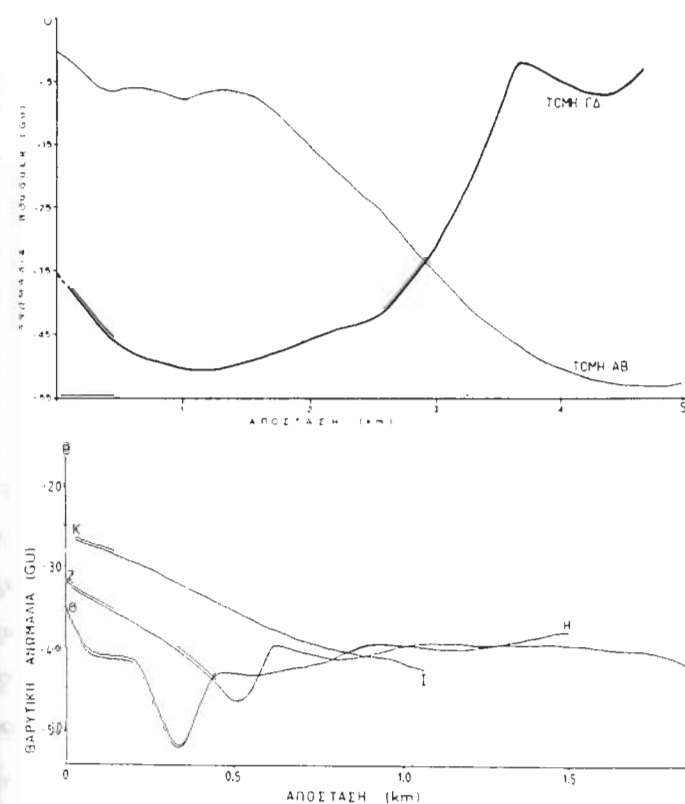
2.2 Μεταλπικοί Σχηματισμοί

Αποτελούνται από αποθέσεις Νεογενούς και Τεταρτογενούς ηλικίας. Οι Πλειοκαινικοί σχηματισμοί έχουν αποθεθεί ασύμφωνα πάνω σ'ένα διαμορφωμένο παλαιοσάγγλυφο αλπικών σχηματισμών. Προέρχονται κύρια από θαλάσσιες ή και δελταικές αποθέσεις και αποτελούνται από εναλλαγές κροκαλοπαγών, ψαμμιτών και μαργών. Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις αποτελούνται από τον ερυθροπορφυριτικό κλαστικό σχηματισμό, Πλειστοκαινικής ηλικίας, που έχει αποθεθεί ασύμφωνα πάνω στους Νεογενείς σχηματισμούς, από αλλουβιακά ριπύδια και κώνους πλευρικών κορημάτων.

3. Βαρυτικές Μετρήσεις

Στην ευρύτερη περιοχή βόρεια και ανατολικά της Καλαμάτας έγιναν μετρήσεις βαρυτητας κατά μήκος πέντε τομών συνολικού μήκους 17 περίπου χιλιομέτρων, η θέση των οποίων φαίνεται στο σχήμα 1. Οι πλέον σημαντικές απ' αυτές τις τομές είναι : (α) Η τομή ΑΒ με διεύθυνση Β-Ν που εκτείνεται από το λιμάνι μέχρι την εμφάνιση των ασβεστόλιθων της ενότητας Τρίπολης, βόρεια από την Καλαμάτα. (β) Η τομή ΓΔ που εκτείνεται από το βόρειο τμήμα της πόλης μέχρι την παραλία του χωριού Βέργα, με γενική διεύθυνση ΒΔ=ΝΑ. Οι δύο μικρότερες τομές ΕΖ και ΗΘ έχουν γενική διεύθυνση Β-Ν, ενώ η ανατολικότερη μικρή τομή ΙΚ έχει διεύθυνση ΒΑ=ΝΔ. Όλες οι τομές των βαρυτομετρικών ανωμαλιών φαίνονται στο σχήμα 2.

Οι μετρήσεις κατά μήκος των τομών πραγματοποιήθηκαν ανά 100 = 250 μέτρα. Τα υψόμετρα των σταθμών μέτρησης υπολογίσθηκαν με την



Σχήμα 2. Μεταβολή βαρυτομετρικής ανωμαλίας κατά μήκος προφίλ.

Figure 2. Variation of gravity anomaly along different profiles.

Π Ι Ν Α Κ Α Σ Ι

Πυκνότητες Γεωλογικών Σχηματισμών

Λιθολογία Σχηματισμού	Πυκνότης (gr/cm ³)
Ασβεστόλιθοι Πίνδου	2,70 ± 0,01
Ασβεστόλιθοι Τρίπολης	2,69 ± 0,01
Πηλίτες φλύσχη Τρίπολης	2,62 ± 0,02
Ψαμμίτες φλύσχη Τρίπολης	2,48 ± 0,03
Μάρμαρες (με ραδιολαρίτες) Πίνδου	2,62 ± 0,03

εκτέλεση χωροστάθμησης ακριβείας, χαρακτηρίζονται δε από ακρίβεια $\pm 0,02$ m. Οι οριζοντίες συντεταγμένες των σταθμών έχουν ακρίβεια ± 10 m. Λεπτομερείς τοπογραφικές διορθώσεις πραγματοποιήθηκαν μέχρι την ζώνη L κατά Hammer (14.5 km). Το τοπογραφικό αποτέλεσμα υπολογίσθηκε χωριστά για Ήγηρά και Θάλασσα. Οι βαρυτικές ανωμαλίες που υπολογίσθηκαν με βάση τον τύπο IGF-1967 (International Gravity Formula 1967) έχουν ανεξάρτητο επίπεδο αναφοράς (arbitrary datum) και προσδιορίσθηκαν με ακρίβεια καλύτερη του 1 gu (0.1 mGal).

Για την ερμηνεία των βαρυτικών ανωμαλιών πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις πυκνότητας σε μεγάλο αριθμό δειγμάτων από διαφορετικούς γεωλογικούς σχηματισμούς και τοποθεσίες. Οι μέσες τιμές που υπολογίσθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 1. Η τιμή της πυκνότητας bouguer, που χρησιμοποιήθηκε για την αναγωγή των βαρυτικών μετρήσεων, ήταν $2,30$ gr/cc. Δοκιμάστηκε επίσης η τιμή $2,67$ gr/cc, αλλά οι διαφορές που προέκυψαν στα πλάτη των βαρυτικών ανωμαλιών ήταν πολύ μικρές.

Παρ'όλας τις αβεβαιότητες που υπάρχουν σε ότι αφορά τον χαρακτήρα των σχηματισμών (λιθολογία, πυκνότητα, πάχη) κάτω από το λεπτό στρώμα των αλλούβιων αποθέσεων, έγινε προσπάθεια ποιοτικής κυρίως ερμηνείας των βαρυτομετρικών τομών. Όπως φαίνεται από την βαρυτική τομή AB (Σχ. 2), υπάρχει μία μεταβολή της τάξης των 45 gu μεταξύ του βόρειου και του νότιου τμήματος της τομής. Η μεταβολή αυτή είναι σχετικά απότομη (περίπου 20 gu/km) κυρίως στο κέντρο της τομής. Βαρυτικές τομές αυτής της μορφής είναι ενδεικτικές της υπαίτης ρήγματος ή συστήματος ρηγμάτων μετάπτωσης στο υπέδαφος. Στην περίπτωση υπαίτης ενός κύριου ρήγματος μετάπτωσης, η θέση του πρέπει να βρίσκεται στο μέσον περίπου του τμήματος βύθισης της καμπύλης της βαρυτομετρικής ανωμαλίας.

Με βάση τις βαρυτικές και γεωλογικές παρατηρήσεις στην περιοχή, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο βαρυτικής προσομοίωσης 2.5 διαστάσεων. Οι ευρύτεροι σχηματισμοί που υπεισέρχονται σ'ένα τέτοιο μοντέλο είναι : (α) Αλλούβια και Πλειστοκαινικές αποθέσεις μέσης πυκνότητας $2,0-2,3$ gr/cc και (β) Πλειοκαινικές αποθέσεις μέσης πυκνότητας $2,2-2,5$ gr/cc. Κάτω από τους σχηματισμούς αυτούς υπάρχει ή ασβεστόλιθος ή παρεμβάλλεται ενδιάμεσα ο φλύσχης πρώτα και στη συνέχεια υπόκειται ο ασβεστόλιθος. Το ασβεστολιθικό υπόβαθρο, μέσης πυκνότητας $2,70$ gr/cc διέπει όλη την τομή, ενώ ο φλύσχης, μέσης πυκνότητας $2,55-2,60$ gr/cc, υποκειται πιθανότατα στο νότιο τμήμα της τομής. Το βόρειο άκρο της τομής AB δείχνει μία άνοδο της βαρυτικής ανωμαλίας, που οφείλεται στην εμφάνιση των ασβεστολιθών της ενότητας Τρίπολης στην επιφάνεια. Στη κατασκευή του διυδιδιάστατου μοντέλου καθοριστικό ρόλο (constraint) διαδραμάτισε η επιφανειακή εμφάνιση του ασβεστόλιθου στο βόρειο άκρο της τομής AB, από όπου συγκεκριμένα αρχίζει το προφίλ αυτό. Επειδή ούτε τα πάχη ούτε οι μέσες πυκνότητες των σχηματισμών είναι επαρκώς γνωστά, δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστεί ένα γεωλογικό μοντέλο που να προσεγγίζει την στρωματογραφία της περιοχής κατά μήκος της τομής AB. Αντ' αυτού επιχειρήθηκε ένα μοντέλο, που αποδίδει την παρατηρούμενη μεταβολή της βαρυτικής ανωμαλίας σε αντίστοιχη μεταβολή του πάχους των κλαστικών υζημάτων (στα οποία συμπεριλαμβάνουμε και τον φλύσχη, αν υπάρχει) κάτω από την επιφάνεια. Τα υζηματα θεωρείται ότι έχουν μια μέση πυκνότητα $2,40$ gr/cc. Η μετάπτωση από μικρού πάχους υζηματα στο βόρειο τμήμα της τομής σε μεγαλύτερα πάχη στο νότιο τμήμα δεχόμαστε ότι γίνεται μέσω του κανονικού ρήγματος.

Με τις παραπάνω παραδοχές προκύπτουν από το γεωφυσικό μοντέλο παχη

υψημάτων της τάξης των 50m στο βόρειο τμήμα της τομής και 400 m στο νότιο τμήμα, αφ' ετέρου δε κλίση ρήματος της τάξης των 30°. Η κλίση αυτή είναι πολύ μικρή για κανονικό ρήγμα. Είναι λοιπόν πιθανό η μετάπτωση των στρωμάτων να μη γίνεται με ένα τέτοιο ρήμα κάθετο περίπου στην τομή ΑΒ, αλλά να πραγματοποιείται είτε (α) με παράλληλα κανονικά ρήματα, ή (β) με ένα κύριο κανονικό ρήμα υπό γωνίαν ως προς τη διεύθυνση της τομής ΑΒ. Η δεύτερη άποψη υποστηρίζεται γεωλογικά από την ρηματογόνο ζώνη του Νέδοντα, που ουσιαστικά ακολουθεί την διεύθυνση του ποταμού (ΒΒΑ-ΝΝΑ). Το ρήγμα αυτό σύμφωνα με τους Μανιοτακός et al. (1989) αποτελεί το δυτικό όριο της Λεκανής Δημόσβαθ - Περιβολακίων, και επομένως η πτώση των τιμών της βαρυτικής ανωμαλίας από Β προς Ν στην τομή ΑΒ είναι σύμφωνη με την μεταβολή του πάχους των υψημάτων (αυξάνουν από ΒΔ προς ΝΑ), που αναμένεται να προκαλεί το ρήγμα αυτό.

Γεωφυσικό μοντέλο κατά μήκος της τομής ΓΔ δεν επιχειρήθηκε, διότι η διεύθυνσή του είναι τέτοια που τα πάχη των υψημάτων εκατέρωθεν αυτής διαφέρουν σημαντικά. Η τομή αρχίζει από τον ποταμό Νέδοντα και με διεύθυνση αρχικά ΒΔ-ΝΑ και μετά ΒΒΔ-ΝΝΑ καταλήγει στην τοποθεσία Παραλία Βέργας στους πρόποδες του όρους Καλάθιο, με τους τελευταίους σταθμούς της τομής να κείνται πάνω σε ασβεστόλιθο.

Το δυτικό τμήμα της τομής ΓΔ είναι περίπου κάθετο στη διεύθυνση του ρήματος του Νέδοντα και η καμπύλη της βαρυτικής ανωμαλίας στην περιοχή κοντά στο ρήμα παρουσιάζει μείωση προς τα ανατολικά (Σχ. 2). Η πτώση των τιμών είναι της τάξης των 25 $\mu\text{g}/\text{km}$ και είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη πτώση των τιμών στην ίδια περιοχή κατά μήκος της τομής ΑΒ. Το γεγονός αυτό ενισχύει την άποψη ότι η μείωση των τιμών

των βαρυτικών ανωμαλιών στην τομή ΗΒ οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο ρήμα του Νέδοντα. Η συνολική πτώση από το δυτικό άκρο της τομής μέχρι τις χαμηλότερες τιμές είναι της τάξης των 16 μg , που είναι το ένα τρίτο περίπου του πλάτους κατά μήκος της τομής ΑΒ (περίπου 45 μg). Το γεγονός αυτό πιστεύουμε ότι οφείλεται σε δύο λόγους:

- (i) Το πάχος των υψημάτων (ιδιαίτερα των αλλουβίων που έχουν πολύ χαμηλή πυκνότητα) είναι αρκετά μεγαλύτερο στο νότιο τμήμα της τομής ΑΒ από το αντίστοιχο πάχος κατά μήκος της τομής ΓΔ.
- (ii) Το δυτικό άκρο της τομής ΓΔ βρίσκεται σε περιοχή καλυμμένη με αλλουβία σχετικά μακριά από την εμφάνιση των ασβεστόλιθων και έτσι η τιμή της βαρυτικής ανωμαλίας είναι ήδη χαμηλή (-20 μg), ενώ στο αντίστοιχο βόρειο άκρο της τομής ΑΒ (βόρεια από το σημείο σημείο Γ') το πάχος των υψημάτων είναι μικρότερο και η εμφάνιση των ασβεστόλιθων είναι πολύ κοντά με αποτέλεσμα η τιμή της βαρυτικής ανωμαλίας να είναι συγκριτικά αυξημένη. Η απότομη άνοδος των τιμών βαρύτητας στο ΝΑ άκρο της τομής ΓΔ οφείλεται στους ασβεστόλιθους του τεκτονικού κέρατος του Καλαθίου Όρους.

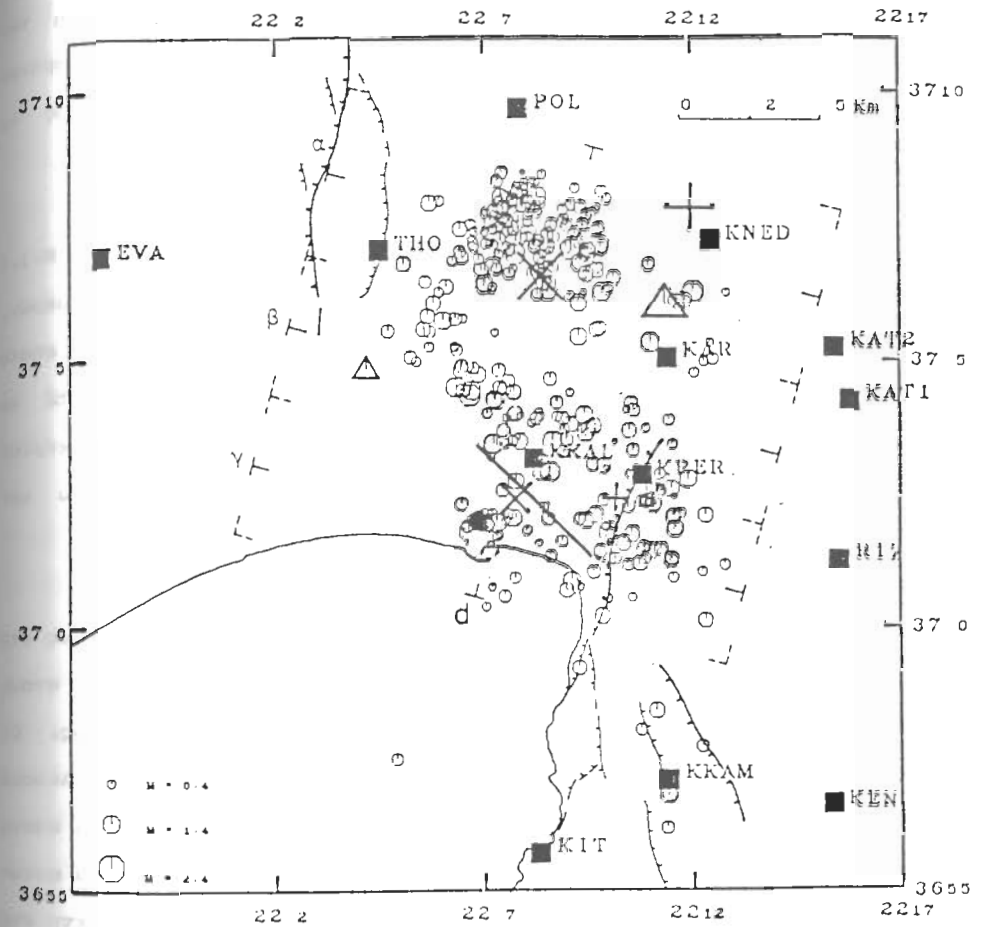
Το κυριώτερο χαρακτηριστικό των μικρών τομών ΕΖ και ΗΘ (Σχ. 2) είναι μια ανωμαλία σχήματος V, που οφείλεται πιθανόν σε παλαιά κοίτη ποταμού. Πρέπει να σημειωθεί ακόμα ότι το βόρειο τμήμα των τομών παρουσιάζει άνοδο των τιμών των βαρυτικών ανωμαλιών, ιδιαίτερα δε στην τομή ΕΖ η μεταβολή αυτή είναι της τάξης των 25 $\mu\text{g}/\text{km}$, (έδια περίπου με τη βαρυτική βαθμίδα στο δυτικό τμήμα της τομής ΓΔ. Η διεύθυνση των δύο τομών είναι περίπου Β-Ν και η απότομη μεταβολή της βαρύτητας υποστηρίζει την ύπαρξη και άλλου τεκτονικού αιτίου εκτός από το ρήμα του Νέδοντα (αφού έχουμε απομακρυνθεί απ' αυτό) που να

προκαλεί μετάπτωση των ιζημάτων. Η τομή ΙΚ (Σχ. 2) παρουσιάζει μια ομαλή πτώση των βαρυτικών ανωμαλιών προς τα νότια συνολικού πλάτους 16 g.u.

4. Σεισμολογικές Παρατηρήσεις - Κατανομή Μετασεισμών

Λίγες μέρες μετά τον κύριο σεισμό ένα δίκτυο 16 φορητών σεισμογράφων εγκαταστάθηκε γύρω από την πληγείσα περιοχή για την μελέτη της μετασεισμικής δραστηριότητας, η λεπτομερής δε περιγραφή του τρόπου καταγραφής, των κριτηρίων επιλογής και της επεξεργασίας των μετασεισμών δίνεται από τους Lyon-Caen et al. (1988). Οι μετασεισμοί καλύπτουν μια περιοχή 10 km x 15 km και τα επικεντρά τους (Σχ. 3) μπορούν να χωριστούν σε δύο σμήνη (ομάδες), τα οποία χωρίζονται από μια στενή ζώνη 2 km χωρίς σεισμική δραστηριότητα (Parazachos et al. 1986, Lyon-Caen et al. 1988). Το βόρειο σμήνος φαίνεται περισσότερο συγκεντρωμένο στον χάρτη (Σχ. 3) από το νότιο σμήνος και παρουσιάζει αρκετές διαφορές από αυτό στα χαρακτηριστικά του.

Σύμφωνα με τους Makropoulos et al. (1988) η κυριότερη διαφορά συνίσταται στο ότι, σε αντίθεση με το βόρειο, το νότιο σμήνος παρουσιάζει ομοιόμορφη συμπεριφορά όσον αφορά την ανάλυσή του με τη μέθοδο κύριων παραμέτρων (principal parameters method) των Ebbing and Michelini (1986). Η ανάλυση με τη μέθοδο αυτή δίνει συνεπώς ελλειψοειδή με μέση διεύθυνση $B45^{\circ} \Delta \pm 2^{\circ}$ και μέση κλίση $52^{\circ} \pm 6^{\circ}$. Οι αντίστοιχες λύσεις στο βόρειο σμήνος δίνουν δύο ομάδες διευθύνσεων ($B32^{\circ} A \pm 4^{\circ}$ και $B5^{\circ} A \pm 13^{\circ}$) και τέσσερες ομάδες κλίσεων ($81^{\circ} \pm 7^{\circ}$ για την πρώτη μέση διεύθυνση και $47^{\circ} \pm 3^{\circ}$, $53^{\circ} \pm 5^{\circ}$ και $85^{\circ} \pm 5^{\circ}$ για τη



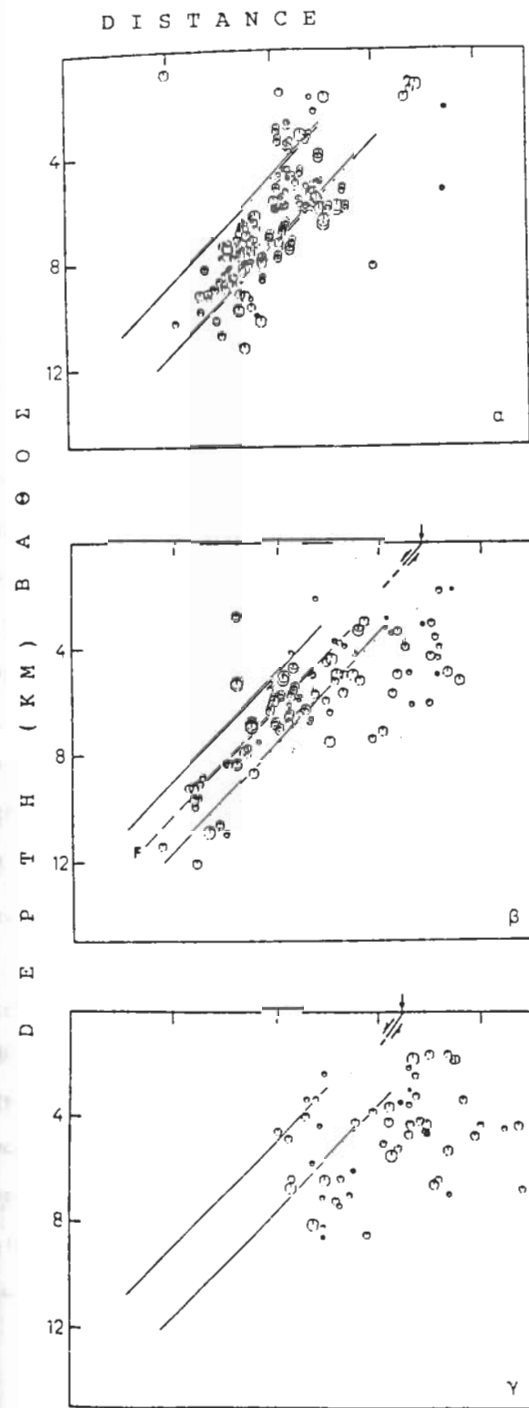
Σχήμα 3. Κατανομή των επικέντρων των μετασεισμών στην ευρύτερη περιοχή Κалаμάτας (Lyon-Caen et al., 1988). Με α, β, γ αναπαρίστανται οι περιοχές επικέντρων που έχουν προβληθεί σε κατακόρυφο επίπεδο.

Figure 3. Earthquake epicenter distribution of the Kalamata aftershocks in the broader area (Lyon-Caen et al., 1988). The regions α, β, γ are those the hypocenters of which have been projected on a vertical plane.

δεύτερη μέση διεύθυνση). Σημαντική είναι επίσης η παρατήρηση των ίδιων ερευνητών, ότι η χωρική διαφοροποίηση των δύο σημείων συνοδεύεται και από χρονική διαφοροποίηση με το νότιο σημείο να δραστηριοποιείται στη μετασεισμική σειρά αργότερα από το βόρειο.

Οι Parazachos et al. (1986) αναλύοντας 39 μετασεισμούς μεγέθους M 1.7 καταγραφέντες από 5 φορητούς σειсмоγράφους σε διάστημα τριών ημερών, διαπιστώνουν επίσης την ύπαρξη δύο σημείων μετασεισμών (τα οποία διαφέρουν στο μέσο βάθος των υποκέντρων: 7 ± 2 km το βόρειο και 5 ± 2 km το νότιο) και τους αποδίδουν σε κίνηση κατά μήκος του κύριου κανονικού ρήγματος της Βέργας με διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ έως Β-Ν, όπου και παρατηρούνται οι κυριότερες διαρρήξεις.

Οι Lyon-Caen et al (1988) αποδίδουν και αυτοί τους μετασεισμούς στο ρήγμα της Βέργας, παρόλο που διαπιστώνουν σημαντικές διαφορές στους μηχανισμούς γέννησης ανάμεσα στο βόρειο και το νότιο σημείο. Οι μηχανισμοί γέννησης στο βόρειο σημείο συνιστούν οριζόντιο εφελκυσμό με άξονα T διεύθυνσης $8105^\circ A \pm 15^\circ$ και σχεδόν κατακόρυφο άξονα συμπίεσης (άξονας P). Η προβολή των υποκέντρων τους (ιδιαίτερα αυτών με $h > 4$ km) σε κατακόρυφο επίπεδο με διεύθυνση $8105^\circ A$ (κάθετη στο ρήγμα της Βέργας) σχηματίζει μια ζώνη που βυθίζεται προς τα ΒΔ (Σχ. 4α). Οι αντίστοιχες προβολές των βόρειου και νότιου τμήματος του νότιου σημείου (Σχ. 4β, 4γ) παρουσιάζουν μια μεγάλη διασπορά χωρίς σαφή κλίση βύθισης αντίστοιχης αυτής του ρήγματος της Βέργας. Οι μηχανισμοί γέννησης στο νότιο τμήμα συνιστούν συμπίεση με διεύθυνση $8110^\circ A \pm 20^\circ$ (άξονας P), και στο βόρειο τμήμα παρατηρούνται και οι δύο μηχανισμοί που αναφέρθηκαν. Οι Lyon-Caen et al (1988) συμπεραίνουν ότι οι εφελκυστικοί μηχανισμοί λαμβάνουν χώρα στη ζώνη



Σχήμα 4. Κατανομή των υποκέντρων των περιοχών α, β, γ (Σχ. 3) σε κατακόρυφο επίπεδο, ύστερα από προβολή τους.

Figure 4. Hypocenter projection on a vertical plane (perpendicular to the average Verga Fault trend) of the earthquakes fallen in areas α, β, γ (Fig. 3).

του ρήγματος της Θέργας, οι δε συμπίεστικοί στο "ανερχόμενο" τμήμα του ίδιου ρήγματος.

5. Συζήτηση - Συμπεράσματα

Οι βαρυτικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην πληγείσα από τον σεισμό της 13/9/1986 περιοχή της Καλαμάτας επιβεβαιώνουν (μέσω της υψηλής βαρυτικής βαθμύδας στις τομές ΗΒ και ΓΔ) την σημαντικότητα του ρήγματος του Νέδοντα, ο οποίος αποτελεί και το δυτικό όριο των πλέον σημαντικών ζωνών από τον σεισμό. Η προς τα βόρεια αυξηση της βαρυτικής ανωμαλίας στις μικρότερες τομές (ιδιαίτερα στην τομή ΕΖ όπου η βαθμύδα είναι αρκετά υψηλή) υποδεικνύει την ύπαρξη ενός κύριου ρήγματος ή μικρότερων παραλλήλων ρηγμάτων μέσα στη λεκάνη και κάτω από τα Ολοκαινικά (αλλουβία) και Πλειστοκαινικά ισθμάτα. Η άποψη αυτή είναι σύμφωνη με τα συμπεράσματα των Makropoulos et al. (1989) για ομοεπίπεδα ελλειψοειδή με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ στην περιοχή του νότιου σμήνους μετασεισμών. Το μέσο βάθος στο σμήνος αυτό είναι 5 ± 2 km σύμφωνα με τους Parazachos et al. (1986), άποψη που επιβεβαιώνεται και από τα σχήματα 4β, 4γ.

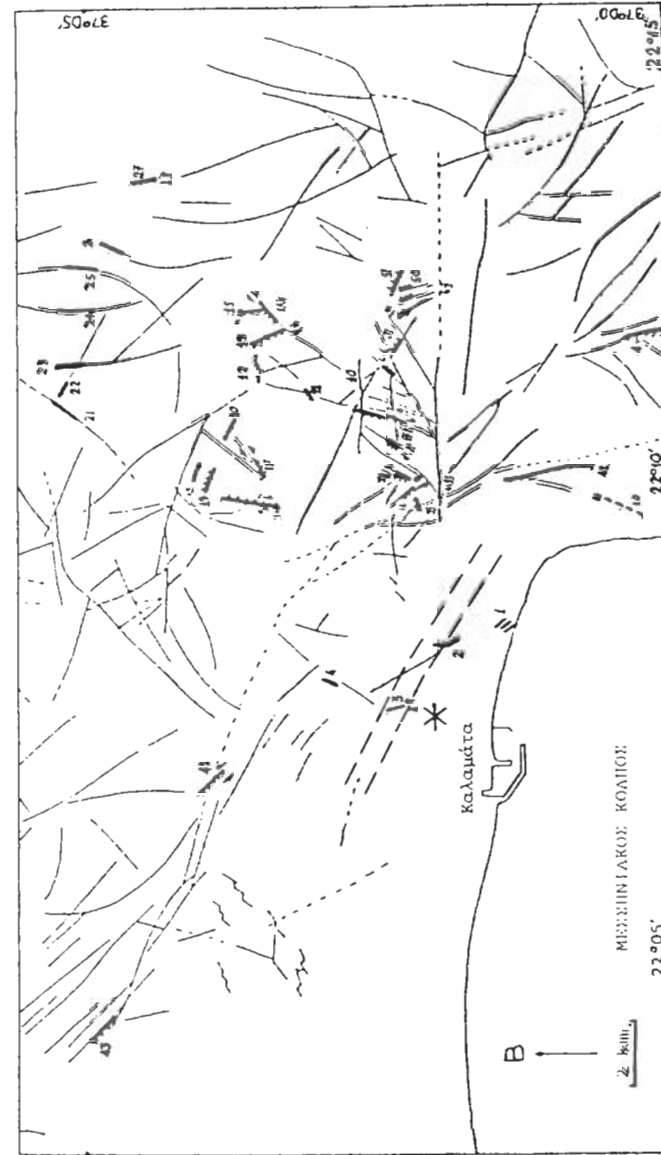
Εάν υποθέσουμε ότι οι μετασεισμοί του νότιου σμήνους οφείλονται σ' ένα κύριο κανονικό ρήγμα διεύθυνσης $845^\circ \Delta$ και μέσης κλίσης 58° (οι Makropoulos et al. (1989) δίνουν $52^\circ \pm 6^\circ$, ενώ οι Lyon-Caen et al. (1988) $55^\circ - 60^\circ$), τότε το μήκος του ρήγματος αυτού θα έπρεπε να βρίσκεται 3 περίπου km ΒΑ από τη μεγαλύτερη συγκέντρωση μετασεισμών στο νότιο σμήνος και να έχει παρόμοια διεύθυνση (ΒΔ-ΝΑ). Σε συγκρίσιμες με την παραπάνω αποστάσεις και διευθύνσεις στον γεωλογικό

χάρτη φαίνονται μερικά εν εσχέσει ρήγματα, τα οποία προς νότο τέμνουν το ρήμα του ποταμού Σερύλα και ορίζουν την εμφάνιση των ασβεστολίθων της ενότητας Τρίπολης βόρεια από το ρήμα αυτό (Σχ. 1). Στο ύψος των ρηγμάτων αυτών αλλάζει φορά και ο ρους των ποταμών Σερύλα και Βενύτσα. Τα ρήματα αυτά συνεχίζονται σαν ένα κύριο ρήμα με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ μέσα από τη δυτικότερη εμφάνιση των ασβεστολίθων του καλύμματος της Πύλδου, τις Πλειστοκαινικές αποθέσεις και στο δυτικό άκρο του γεωλογικού χάρτη (Σχ. 1) ορίζει την επαφή πλειστοκαινικών αποθέσεων και των ασβεστολίθων της ενότητας Τρίπολης. Πρέπει να σημειώσουμε ακόμα ότι η εμφάνιση των αλλουβίων αποθέσεων ΒΑ της Καλαμάτας και η επαφή τους με τους πλειστοκαινικούς σχηματισμούς έχει γενική διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ παράλληλη με την παραπάνω ρηματογόνο ζώνη και ότι κοντά στην επαφή αυτή ο ρους των ποταμών Σερύλα και Βενύτσα αλλάζει πάλι φορά από ΒΑ-Να σε σχεδόν Β-Ν. Στην προέκταση της ζώνης αυτής (παράλληλη σχεδόν με την τομή ΓΔ) ο ποταμός Νέδων παρουσιάζει μία παράλληλη μετατόπιση προς νότο και σχηματίζεται και μια μικρή υπολεκάνη αλλουβίων (βόρεια από το σημείο Γ - Σχ. 1). Είναι έτσι πιθανό η γενική διεύθυνση της επαφής αλλουβίων - Πλειστοκαινικών αποθέσεων να οριοθετεί την ύπαρξη ενός κύριου κανονικού ρήματος (ή περισσότερων παραλλήλων) με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Ένα τέτοιο ρήμα θα εξηγούσε και την υψηλή βαρυτική βαθμύδα στο βόρειο άκρο των τομών ΕΖ, κυρίως Ηβ και Ικ, και ίσως την αλλαγή διεύθυνσης στο ρήμα της Θέργας από $810^\circ \Delta$ σε $830^\circ \Delta$ (Lyon-Caen et al., 1988).

Το ερώτημα που γεννάται είναι αν το ρήμα (ή το σύστημα ρηγμάτων) αυτό ενεργοποιήθηκε την περίοδο της σεισμικής δραστηριότητας του 1986 στην περιοχή. Αν υποθέσουμε ότι υπάρχει ένα κύριο ρήμα, τότε από το

μήκος του προκύπτει ότι ενδεχόμενη δραστηριοποίησή του θα έπρεπε να δώσει ένα σεισμό μεγέθους $M = 5,5$, περίπου. Συγκρισιμος σε μέγεθος και θέση επικέντρου είναι ο μεγαλύτερος μετασεισμός ($M = 5,4$). Ενισχυτική μαρτυρία για πιθανή ενεργοποίηση ενός τέτοιου ρήγματος δίνει ο χάρτης 1 των Φουντούλη και Γρύβας (1989), ο οποίος παρουσιάζει διαρρήξεις στην ίδια διεύθυνση (Σχ. 5), οι οποίες μαάλιστα χαρακτηρίζονται από αμελητέα κατακόρυφη κίνηση και οριζόντια αριστερόστροφη κίνηση στις θέσεις 2 και 3. Στην ίδια επίσης εργασία παρουσιάζεται χάρτης ρηγμάτων από ανάλυση δορυφορικής εικόνας στην οποία επίσης παρουσιάζεται ρήγμα σε θέση ανάλογη με το προτεινόμενο.

Πιστεύεται ότι είναι δυνατόν η εστία του μεγαλύτερου μετασεισμού να βρίσκεται στην συμβολή του ρήγματος της Θέργας και του ρήγματος που προτείνεται στην παρούσα εργασία διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ (Σχ. 5). Η πιθανή κίνηση κατά μήκος του ρήγματος αυτού δεν είναι σαφής. Η διεύθυνση του και οι διαρρήξεις κατά μήκος αυτής ευνοούν την άποψη για κίνηση ολίσθησης. Ρήγματα συζυγούς με αυτήν διεύθυνσης (ΒΑ-ΝΔ) παρατηρούνται στην περιοχή νότια από το Ελαιχώρι μεταξύ δύο ρηγμάτων διεύθυνσης Α-Δ (Σχ. 1) μαρτυρούντα την ύπαρξη διατμητικών τάσεων παρόμοιας διεύθυνσης. Εάν τέτοιες τάσεις είναι ενεργές στην περιοχή σήμερα, θα μπορούσαν να προκαλέσουν συμπιεστικά φαινόμενα κατά μήκος του προτεινόμενου ρήγματος (ή παραλλήλων ρηγμάτων) και να εξηγήσουν τους συμπιεστικούς μηχανισμούς γέννησης των μετασεισμών στο νοτιότερο μέρος του νοτίου σμήνους μετασεισμών. Η άποψη αυτή μπορεί να θεωρηθεί εναλλακτική ή και συμπληρωματική της ερμηνείας περί αναπαλαστικών κινήσεων στο ανερχόμενο τμήμα του ρήγματος της Θέργας (Lyon-Caen *et al.*, 1988).



Σχήμα 5. Διαρρήξεις στην ευρύτερη περιοχή Καλαμάτας μετά τον κύριο σεισμό (Φουντούλης και Γρύβας, 1989) και θέση του προτεινόμενου ρήγματος και του μεγαλύτερου μετασεισμού (αστερίσκος).

Figure 5. Surface ruptures in the broader area of Kalamata after the main earthquake (Fudulis and Grivas, 1989) and the position of the proposed fault and the large after-shock (asterisk).

- Ebbling, C. and Michelini, A., 1986. "A principal parameter analysis of aftershock sequence: applied to the 1977 Friuli, Italy, sequence," *Ann. Geophys.*, 4B(4), 473-480.
- Lyon-Caen, H., Armijo, R., Drakopoulos, J., Delibasis, N., Gaulon, R., Kou-skouna, V., Latoussakis, J., Makropoulos, K., Papadimitriou, D. and Pedotti, G., 1988. "The Kalamata (South Peloponnese) earthquake: detailed study of a normal fault and tectonic implications." *J. Geophys. Res.*, 93(B12), 14967-15000.
- Makropoulos, K., Tselentis, A., Voulgaris, N. and Drakopoulos, J., 1989. "Spatial and Temporal Evolution of the September 1986, Kalamata, Greece, Aftershock Sequence." *Bull. Geol. Soc. Greece*, vol. XXIII/3, 373-384.
- Μαριολακος, Ι., Φουντουλις, Ι., Λογος, Ε., Λοζιος, Σ., 1989. "Surface faulting caused by the Kalamata (Greece) earthquakes (13-9-1986)". *Tectonophysics*, 163, 197-203.
- Papadimitriou, E. and Papazachos, B.C., 1985. "Evidence for precursory seismicity patterns in the Ionian Islands (Greece)." *Erth. Predict. Res.*, 3, 95-103.
- Papazachos, B.C., Papadimitriou, E.E., Kiratzi, A.A., Papaioannou, Ch. and Karakaisis, F.F., 1986. "Probabilities of occurrence of large earthquakes in the Aegean and surrounding area during the period 1986-2006." *Pure Applied Geophys.*, 125, 597-612.
- Purcaru, G. and Berckhemer, H., 1979. "Patterns of occurrence of large earthquakes in the region of the Mediterranean." *Intern. Symp. Earth. Predict.*, UNESCO, 1979, Paris, Paper III-7, Publ.Sc/79/Conf, 802, 15pp.
- Wyss, M. and Baer, M., 1981. "Seismic quiescence in the Western Hellenic Arc may foreshadow large earthquakes". *Nature*, 289, 785-787.
- Φουντούλης, Δ., Γρίβας, Κ., 1989. "Μικροτεκτονική Μελέτη Σεισμικών Ρωγμών Καλαμάτας (Σεισμική περίοδος Σεπτεμβρίου 1986." *Bull. Geol. Soc. Greece*, vol. XXIII/3, 259-274.