

Αρ. Πραγ. 1933
10-287

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΕΥΘΥΝΤΗΣ: ΚΑΘΗΓ. Ι. Κ. ΔΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
ΤΩΝ ΠΡΟΣΦΑΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ. ΧΑΡΤΗΣ ΙΣΟΣΕΙΣΤΩΝ

ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ

ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΝΙΟΣ 1987

51

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

- 1. ΓΕΝΙΚΑ**
- 2. ΧΑΡΤΗΣ ΙΣΟΣΕΙΣΤΩΝ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ 13.9.86**
- 3. ΠΡΟΚΑΤΑΡΚΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΦΑΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ**
 - 3.1 ΚΥΡΙΟΣ ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟΣ ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΟΣ**
 - 3.2 ΛΟΙΠΗ ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στα πλαίσια της εκπόνησης της Μικροζωνικής μελέτης της πόλης της Καλαμάτας ανατέθηκε από τον ΟΑΣΠ στον Τομέα Γεωφυσικής του Παν/μίου Αθηνών (χωρίς πρόσθετη οικονομική ενίσχυση) η μελέτη της πρόσφατης σεισμικής δράσης στην περιοχή Καλαμάτας (Συγκέντρωση και αξιολόγηση Μικροσεισμικών και Μακροσεισμικών στοιχείων).

Το δίκτυο των φορητών σεισμογράφων που εγκαταστάθηκε ευθύς αμέσως μετά τον κύριο σεισμό της 13-9-86, καθώς και οι επιταχυνσιογράφοι, παρέμειναν στις αρχικές τους θέσεις μέχρι τις 27-9-86 και κάλυψαν την κύρια μετασεισμική δράση. Στη συνέχεια έγιναν αλλαγές στις τοποθεσίες με τη μετακίνηση ορισμένων σταθμών μέσα και γύρω από την πόλη της Καλαμάτας με κύριο σκοπό τη μελέτη της συσχέτισης εδάφους-απόκρισης (βλ. σχετικό τεύχος). Έτσι στο τεύχος αυτό γίνεται η αξιολόγηση των στοιχείων, μετασεισμών, της κύριας μετασεισμικής περιόδου από 13-9-86 έως και 27-9-86.

Η αξιολόγηση δύο των στοιχείων γίνεται σε συνεργασία των

- 1) Τομέα Γεωφυσικής του Παν/μίου Αθηνών και
- 2) Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Αστεροσκοπείου Αθηνών με συντονιστή της εργασίας τον Δ/ντή των δύο κέντρων Καθηγ. Ι.Δρακόπουλο.

Από τον Τομέα Γεωφυσικής μετέχουν οι : Επικ.Καθηγ.Κ. Μακρόπουλος που είναι και επιστημονικός υπεύθυνος, ο επικ. καθηγ. Ν.Δελήμπασης, η Βοηθός Βίκυ Κουσκουνά και ο συνεργάτης του Τομέα Δρ. Σεισμ. Γ. Σταυρακάκης.

Από το Γεωδυν.Ινστιτούτο του Αστεροσκοπείου Αθηνών μετέχουν ο ερευνητής Δ'Ι.Λατουσάκης και οι βοηθοί Ι. Μπασκούτας και Δ.Παπαναστασίου.

Πολύτιμη όμως ήταν η συμμετοχή στη συλλογή αξιόπιστου μικροσεισμικού υλικού στην Καλαμάτα του Τεχνικού προσωπικού των δύο Κέντρων και κυρίως των ηλεκτρονικών Χ. Αναγνώστου, Θ.Βουράκη, Φ. Μαρινάκη και Σ. Αγγελή.

ΠΡΟΣΦΑΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ .ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕ-
ΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .ΧΑΡΤΗΣ ΙΣΟΣΕΙΣΤΩΝ

1. ΓΕΝΙΚΑ

Ο Τομέας Γεωφυσικής του Παν/μίου Αθηνών σε συνεργασία και με το Αστεροσκοπείο Αθηνών ευθύς μετά τον καταστρεπτικό σεισμό της 13.9.86 που έπληξε τη πόλη της Καλαμάτας και τις γύρω περιοχές εγκατέστησαν την επομένη, 14.9.86, δίκτυο επτά φορητών σεισμογράφων τύπου MEQ -800 . Σκοπός της εγκατάστασης του δικτύου ήταν η ακριβέστερη καταγραφή της σεισμικής δραστηριότητας και η παρακολούθηση της εξέλιξής της. Παράλληλα εγκαταστάθηκαν πέντε επιταχυνσιογράφοι τύπου SMA -1 που μαζί με τον υπάρχοντα δίδη από ετών στη πόλη της Καλαμάτας, δημιούργησαν δίκτυο καταγραφής των εδαφικών επιταχύνσεων σε διάφορες εδαφικές συνθήκες της πόλης της Καλαμάτας. Εξ άλλου , την επομένη του σεισμού, το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Αστεροσκοπείου Αθηνών στα πλαίσια των αρμοδιοτήτων του έστειλε σε όλες τις κοινότητες και δήμους της ευρύτερης περιοχής Νότιας Ελλάδας τα σχετικά ερωτηματολόγια για την αποτύπωση των μακροσεισμικών εντάσεων με τελικό σκοπό τη σύνταξη χαρτών ισοσείστων των μεγαλύτερων δονήσεων. Την επομένη εβδομάδα (20.9. 86) Γαλλική ομάδα του Ινστιτούτου Γεωφυσικής του Παρισιού σε συνεργασία με τον Τομέα Γεωφυσικής του Παν/μίου Αθηνών έφερε και εγκατέστησε για δέκα μέρες άλλους εννέα φορητούς σταθμούς σε τοποθεσίες τέτοιες ώστε να καλύπτουν αζιμουθιακά κενά του πρώτου δικτύου με στόχο τον ακριβέστερο προσδιορισμό των σεισμικών παραμέτρων όπως επικέντρων και βαθών. Η ακρίβεια των παραμέτρων αυτών είναι καθοριστική στη αποτύπωση της θέσης του ρήγματος καθώς και στη διαδικασία διάρρρηξής του. Οι θέσεις όλων των σεισμογράφων παρουσιάζονται στο Χάρτη που ακολουθεί (σχ. 1). Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι συντεταγμένες των σταθμών.

Το δίκτυο, των σεισμογράφων και επιταχυνσιογράφων του Παν/μίου και Αστεροσκοπείου παρέμειναν, με μικρές απαραίτητες μετακινήσεις, σε λειτουργία μέχρι 28-2-87 καταγράφοντας συνεχώς κάθε μετασεισμό της περιοχής με αποτέλεσμα τη συγκέντρωση αρκετών εκατοντάδων ταινιών με σεισμικά γεγονότα ο αριθμός των οποίων υπερβαίνει τις τρεις χιλιάδες.

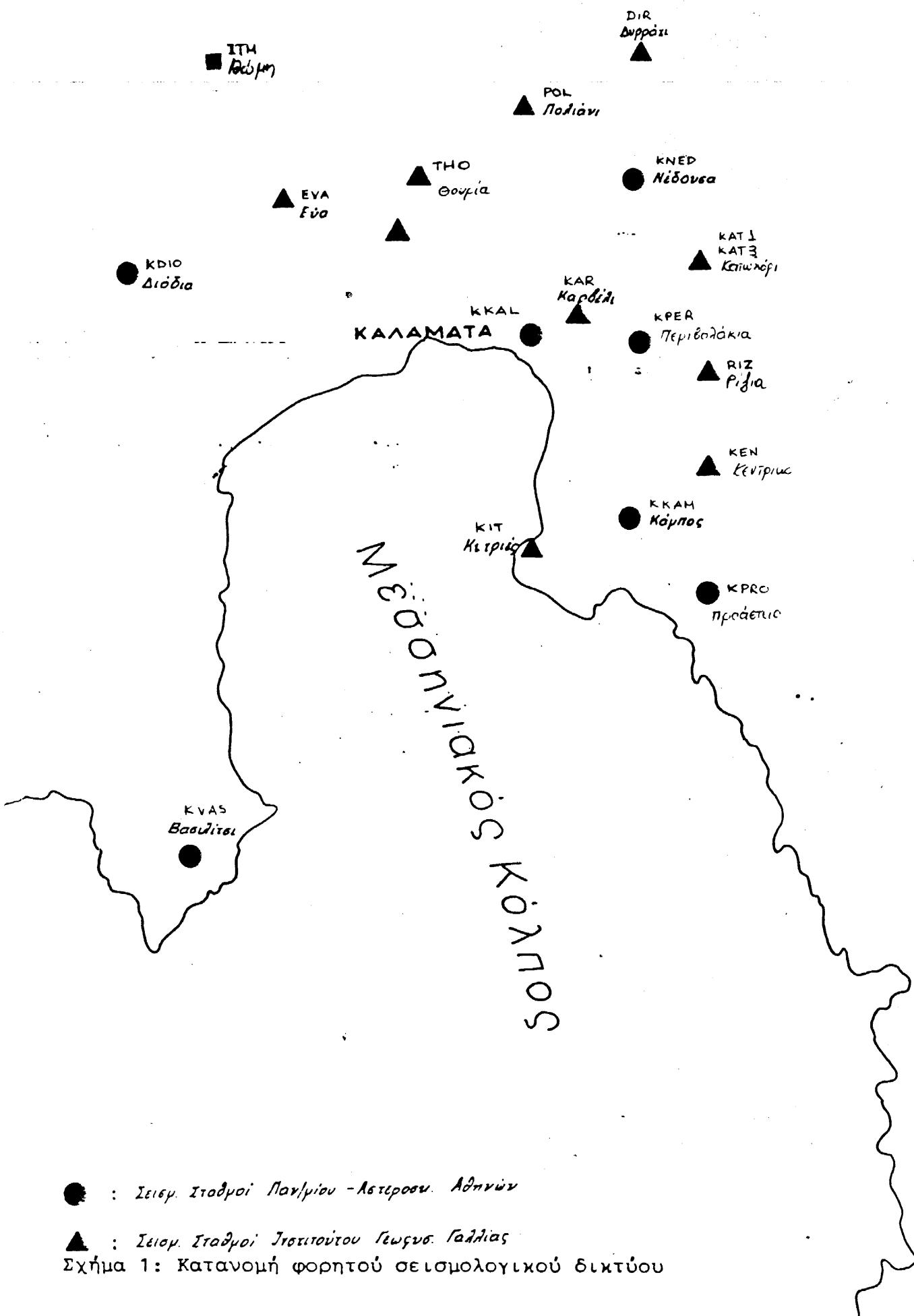


TABLE I

Stations coordinates

	LAT	LONG
EVA	37 6.93	21 57.82
KAR	37 5.05	22 11.45
KAT1	37 4.24	22 15.84
KAT2	37 5.23	22 15.47
KDIO	37 4.68	21 51.39
KEN	36 56.59	22 15.37
KIT	36 55.73	22 9.05
KKAL	37 3.16	22 8.24
KKAM	36 57.11	22 11.48
KNED	37 7.19	22 12.47
KPER	37 2.84	22 10.85
KPRO	36 52.71	22 14.93
KVAS	36 46.88	21 55.83
PET	36 54.26	21 51.31
POL	37 9.66	22 7.87
RIZ	37 1.24	22 15.57
THO	37 7.05	22 4.53

Velocity structure

Velocity (km/s)	Depth (km)
5.0	0.0
5.4	2.0
6.0	5.0

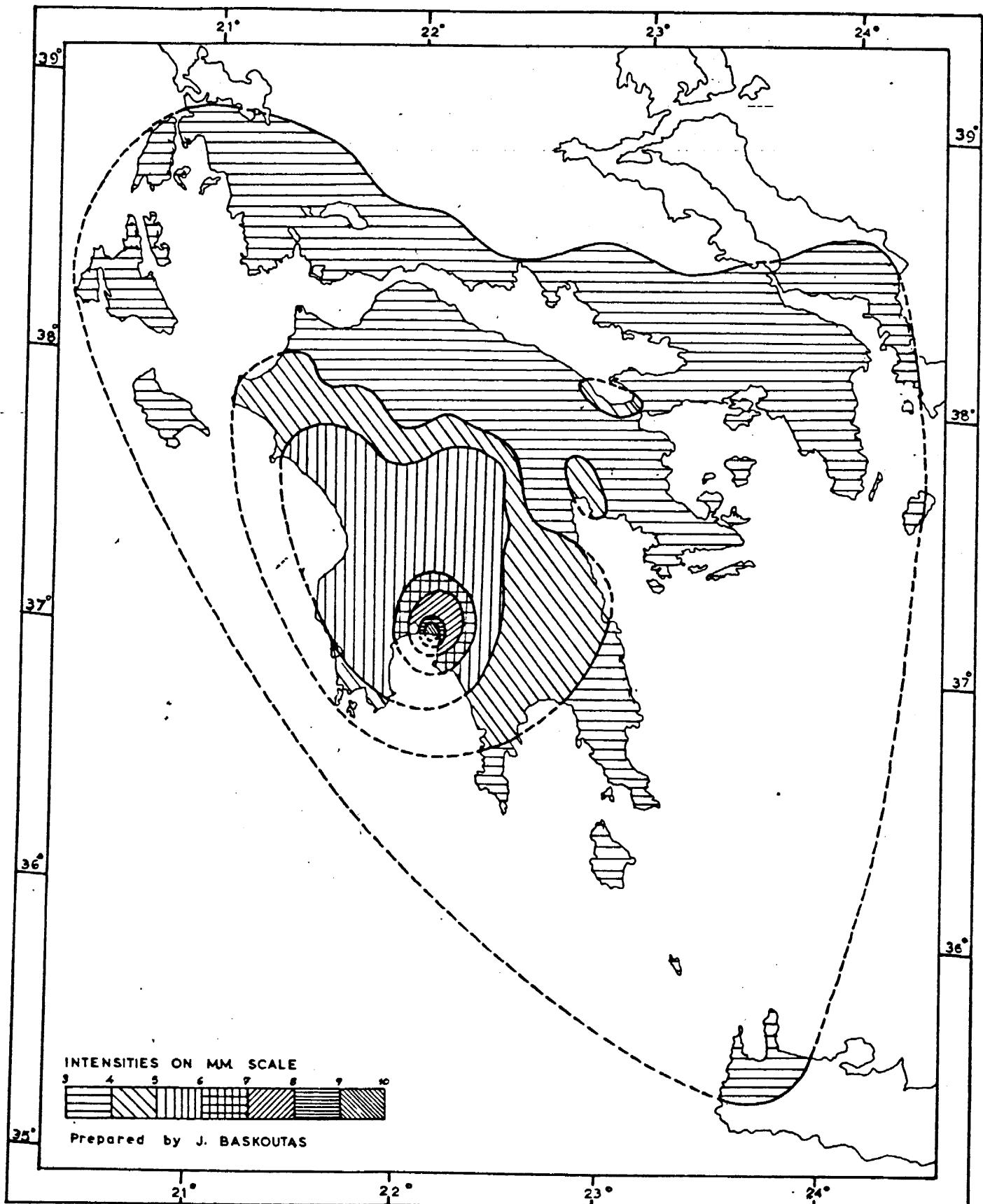
'Ετσι, στα επόμενα θα γίνει ο σχολιασμός των πρώτων αποτελεσμάτων της ανάλυσης των μικροσεισμικών στοιχείων (σεισμικών καταγραφών) καθώς και του χάρτη των ισοσείστων του κύριου σεισμού της 13.9.86.

2. ΧΑΡΤΕΣ ΙΣΟΣΕΙΣΤΩΝ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ 13.9.86

'Οπως προαναφέρθηκε ευθύς μετά τον κύριο σεισμό της 13.9.86 διανεμήθηκαν από το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Αστεροσκοπείου Αθηνών ειδικά ερωτηματολόγια σ' όλους τους νομούς Πελοποννήσου, Στ. Ελλάδας, Ιονίων Νήσων και Κρήτης. Οι απαντήσεις στα σχετικά με τον βαθμό αισθητότητας, βλαβών, εδαφικών διαρρήξεων ή.λ.π. ερωτήματικά, συγκεντρώθηκαν, ταξινομήθηκαν και τελικά βαθμολογήθηκαν από έμπειρα μέλη του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Αστεροσκοπείου Αθηνών. 'Ετσι για κάθε χωριό ή πόλη προέκυψε μια μακροσεισμική ένταση που αντιπροσωπεύει το μέτρο των αποτελεσμάτων του συγκεκριμένου σεισμού. Η κλίμακα εντάσεων που χρησιμοποιήθηκε είναι η δωδεκαβάθμια Modified Mercalli (M.M.). Τέλος, όλες αυτές οι εντάσεις τοποθετήθηκαν πάνω σε γεωγραφικό χάρτη στις αντίστοιχες θέσεις των τόπων παρατήρησης και χαράκτηκαν οι τιόσειστες καμπύλες, δηλαδή οι καμπύλες που συνδέουν τους τόπους όπου παρουσιάστηκε η ίδια μακροσεισμική ένταση. Το αποτέλεσμα όλης αυτής της διαδικασίας παρουσιάζεται στο "χάρτη ισοσείστων" που ακολουθεί (σχ.2) και αφορά τον κύριο σεισμό της 13.9.86 με συντεταγμένες 37.01° Β, 22.17° Α και μέγεθος $M_s = 6.2$ (ATH).

Με βάση τον χάρτη αυτό των ισοσείστων μπορούμε να παρατηρήσουμε τα παρακάτω :

- (1) Η πλειόσειστος περιοχή (περιοχή Καλαμάτας) χαρακτηρίζεται από μια μέση ένταση 9 - 10 βαθμών. Από τις επιτόπου παρατηρήσεις, στην τόλη της Καλαμάτας η ένταση ποικίλλει από 6 - 10 βαθμούς της κλίμακας M.M. Για τη συγκεκριμένη πόλη έχει ήδη ανατεθεί από τον ΟΑΣΠ ειδική μελέτη και δε θα επεκταθούμε περισσότερο στη παρούσα ερευνητική προσπάθεια.



ISOSEISMAL MAP FOR THE EARTHQUAKE OF SEPTEMBER 13, 1986

Σχήμα 2. Χάρτης ισοσείστων του σεισμού της 13ης Σεπτεμβρίου 1986.

- (2) Ο βαθμός ελάττωσης των εντάσεων σε συνάρτηση με την απόσταση από το επίκεντρο είναι μεγάλος. Ήδη σε απόσταση λίγων χιλιομέτρων από την εστία έχουμε πτώση της έντασης τάξεως των 3 - 4 βαθμών της M.M. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι ο σεισμός είχε πολύ μικρό εστιακό βάθος (6-8 χλμ) με αποτέλεσμα τα σεισμικά κύματα να περνούν κυρίως από τα επιφανειακά, ανομοιογενή και έντονα τεκτονισμένα γεωλογικά στρώματα και έτσι να παρατηρείται μεγάλη απόσβεση - απορρόφηση.
- (3) Η μέγιστη μακροσεισμική ακτίνα αισθητότητας, R_3 , είναι της τάξεως των 250 χιλμ. σε μια διεύθυνση Β - ΒΔ, Ν - ΝΑ, διεύθυνση που συμπίπτει με αυτή του Ελληνικού τόξου. Αυτή η άξι - μουθιακή συμπεριφορά είναι κοινό γνώρισμα των σεισμών κατά μήκος της Δυτικής Ελλάδας (βλέπε Δρακόπουλος 1978, Στα - μελού 1985, Δρακόπουλος και συνεργάτες 1986).

Συμπερασματικά θα μπορούσε να παρατηρηθεί ότι η μακροσεισμική κατανομή του συγκεκριμένου σεισμού είναι τυπική τόσο των σεισμών με πολύ μικρό εστιακό βάθος όσο και των σεισμών της Δυτικής Ελλάδας κατά μήκος του Ελληνικού τόξου.

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΦΑΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ

3.1. ΚΥΡΙΟΣ ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΟΣ ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΟΣ

Στις 13 Σεπτεμβρίου και τοπική ώρα 19:34 η περιοχή Καλαμάτας δονήθηκε από ισχυρό σεισμό μεγέθους $M_L = 5.7$ (Αθήνα), $M_B = 6.0$ (NEIS), $M_S = 5.8$ (NEIS), $M_S = 6.2$ (Αθήνα). Οι συντεταγμένες του επικέντρου ήταν 37.014° Β, 22.176° Α (NEIS) το δε βάθος ήταν 11km (NEIS), 6 km (Αθήνα). Το αποτέλεσμα ήταν είκοσι νεκροί και περίπου τριακόσιοι τραυματίες. Οι πρώτες εκτιμήσεις αναφέρουν 2500 αστέγους ενώ περίπου 1500 οικοδομές καταστράφηκαν.

Δύο μέρες αργότερα και συγκεκριμένα στις 15.9.87 και τοπική ώρα 13 : 41 : 28 σημειώθηκε ο μεγαλύτερος μετασεισμός

της ακολουθίας με συντεταγμένες 36.93° Β και 22.17° Α (NEIS) με μέγεθος $M_L = 4.8$ (Αθήνα), $M_b = 4.9$ (NEIS), $M_s = 4.8$ (NEIS), $M_s = 5.4$ (Αθήνα). Το βάθος υπολογίστηκε (NEIS) σε 10 km. Ο σεισμός αυτός προκάλεσε άλλους 37 τραυματισμούς και πρόσθετες βλάβες στα ήδη καταπονημένα κτίρια της πόλης της Καλαμάτας.

Και οι δύο σεισμοί αναγράφηκαν από τους εκεί εγκατεστημένους επιταχυνσιογράφους η ανάλυση των επιταχυνσιογραφημάτων όμως αποτελεί αντικείμενο άλλης παράλληλης μελέτης που εκπονείται για τον ΟΑΣΠ. Εξ άλλου αντικείμενο άλλης μελέτης αποτελεί επίσης η εκτίμηση των βλαβών που προξενήθηκαν από τους δύο αυτούς σεισμούς. Έτσι δε θα επεκταθούμε προς αυτές τις κατευθύνσεις στο προκαταρκτικό στάδιο αυτής της μελέτης.

Αμέσως μετά τον κύριο σεισμό ο Τομέας Γεωφυσικής σε συνεργασία με τα μέλη του Institute de Physique du Globe, Paris, Γαλλίας που μετείχαν στην αποστολή, επεξεργάστηκαν τα στοιχεία-αναγραφές μακράς περιόδου σεισμογραφημάτων από οκτώ σταθμούς του παγκόσμιου σεισμολογικού δικτύου (WWSSN). Οι σταθμοί αυτοί που ανταποκρίθηκαν στο σχετικό αίτημα και έστειλαν φωτοαντίγραφα των αναγραφών ήσαν :

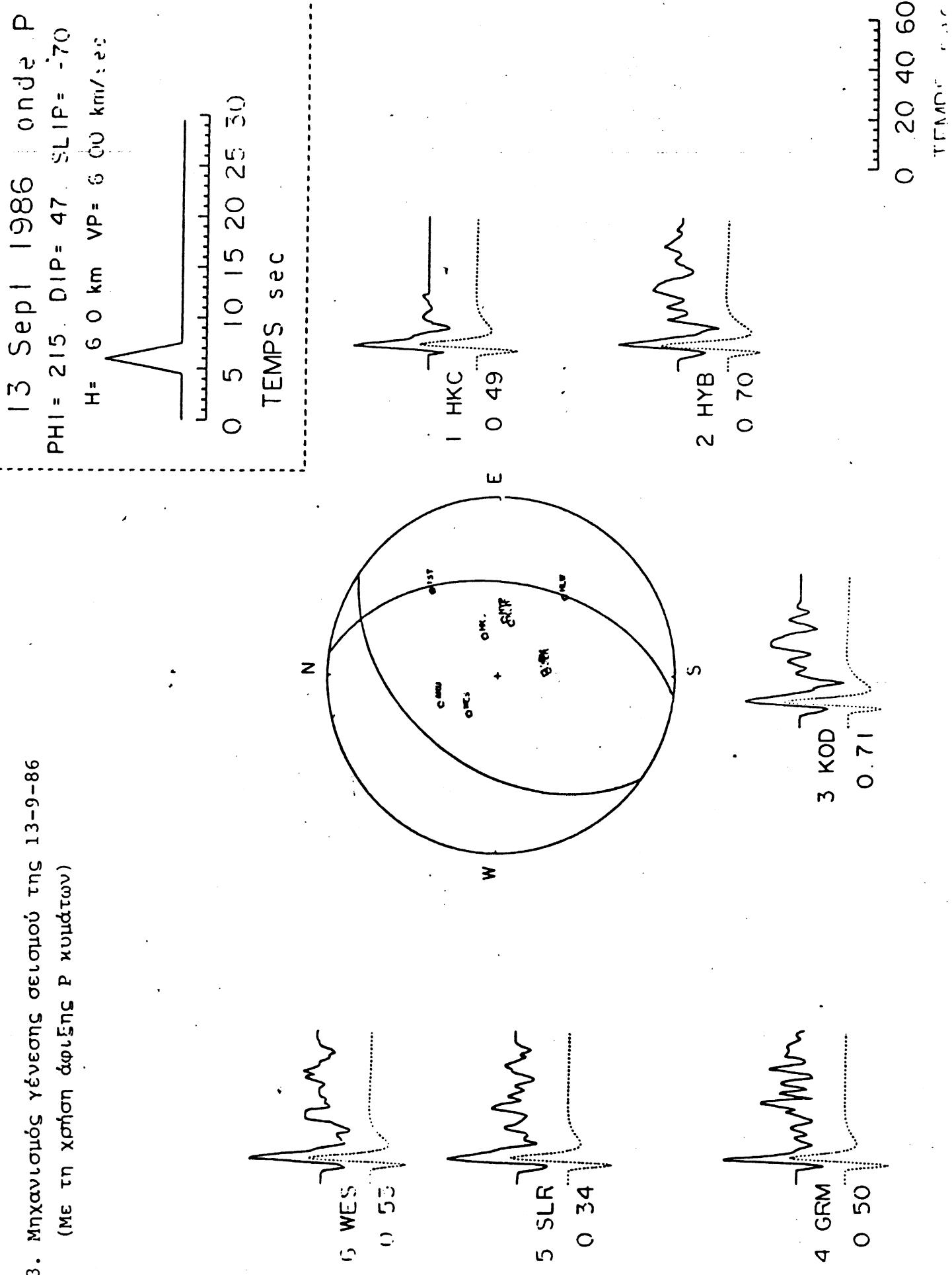
ΣΤΑΘΜΟΣ	ΠΕΡΙΟΧΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ	ΥΨΟΜΕΤΡΟ
1 AKUREYRI	ICELAND	AKU	65 41 12 N, 18 06 24 W	24
2 GRAHAMSTOWN	S.AFRICA	GRM	33 18 48 S, 26 34 24 E	610
3 HONG KONG	HONG KONG CO- LONY	HKC	22 18 12 N, 114 10 19 E	27
4 HYDERABAD	INDIA	HYB	17 25 02 N, 78 33 11 E	510
5 KODAIKANAL	INDIA	KOD	10 14 N, 77 28 E	2343
6 WESTON	MASSACHUSETTS	WES	42 23 05 N, 71 19 19 W	60
7 WIJDHOEK	S.W.AFRICA	WIN	22 34 S, 17 06 E	1728
8 SAULT ST. MARIE	ONTARIO	SLR	46 38 14 N, 84 21 02 W	335

Μετά τη κατάλληλη ψηφιοποίηση των αναγραφών των P, S_Z και SH κυμάτων και τη παραγωγή συνθετικών αναγραφών κάτω από συγκεκριμένες παραδοχές, η σύγκριση τους έδωσε στοιχεία για το μηχανισμό γένεσης του κύριου σεισμού της 13ης Σεπτεμβρίου. Έτσι, βρέθηκε οτι (a) το βάθος του σεισμού ήταν 6 ± 3 χλμ.,

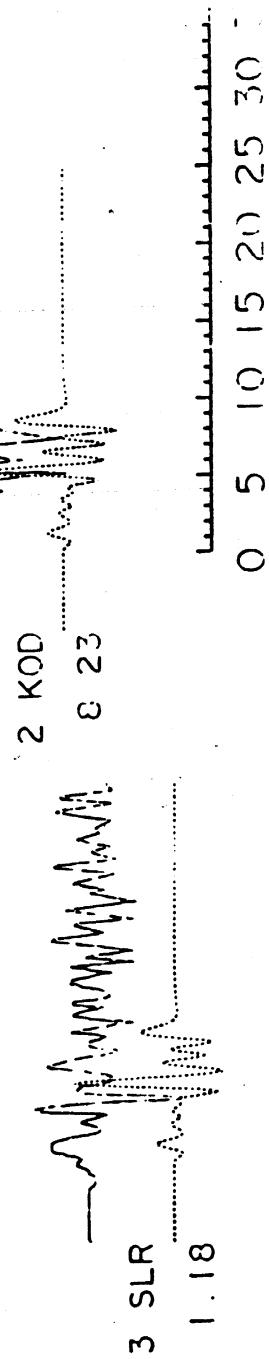
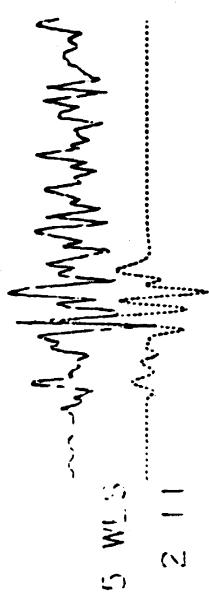
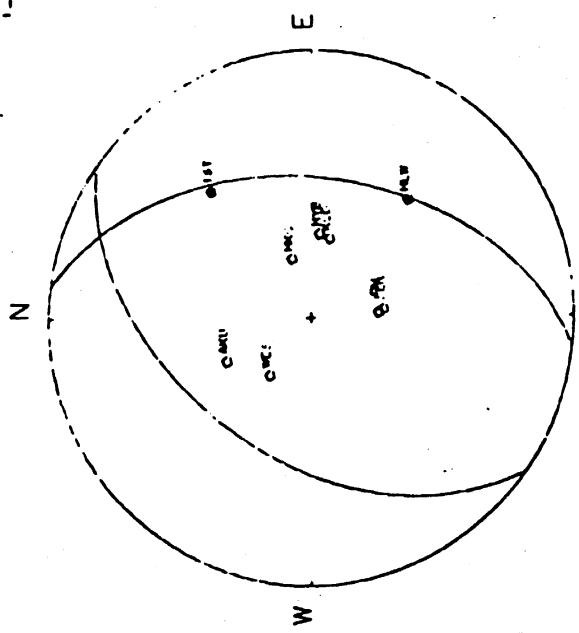
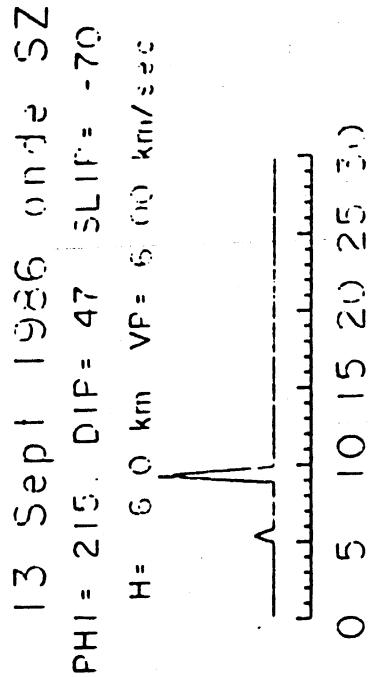
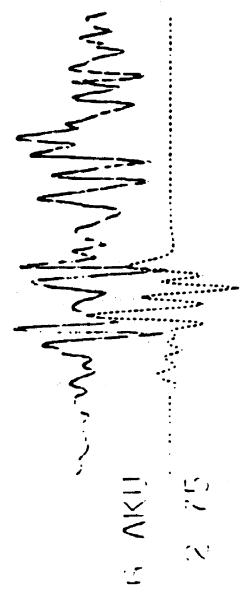
(β) πρόκειται για κανονικό ρήγμα κατά μήκος επιπέδου με διεύθυνση περίπου $N\ 35^{\circ}$ και βυθίζεται προς τα δυτικά με αλίση περίπου 47° . Το αξιμούθιο του επιπέδου αυτού συμφωνεί και με τις επιφανειακές εκδηλώσεις που παρατηρήθηκαν στο ύπαιθρο. Τέλος η σεισμική ροπή που υπολογίστηκε είναι της τάξεως του $8 \cdot 10^{24}$ dyn-cm που δίνει μια μετατόπιση της τάξεως των 10 έως 15 cm που και πάλι συμφωνεί με τις μετατοπίσεις που παρατηρήθηκαν επί τόπου. Στα σχήματα 3, 4 και 5 φαίνονται τα αποτελέσματα αυτά μαζί με τις κυματομορφές τόσο των πρωτοτύπων όσο και των συνθετικών σεισμογραφημάτων.

Οι παραπάνω λύσεις είναι σε συμφωνία και με τις αντίστοιχες παραμέτρους που δημοσιεύτηκαν πρόσφατα από το Αμερικανικό σεισμολογικό κέντρο NEIS.

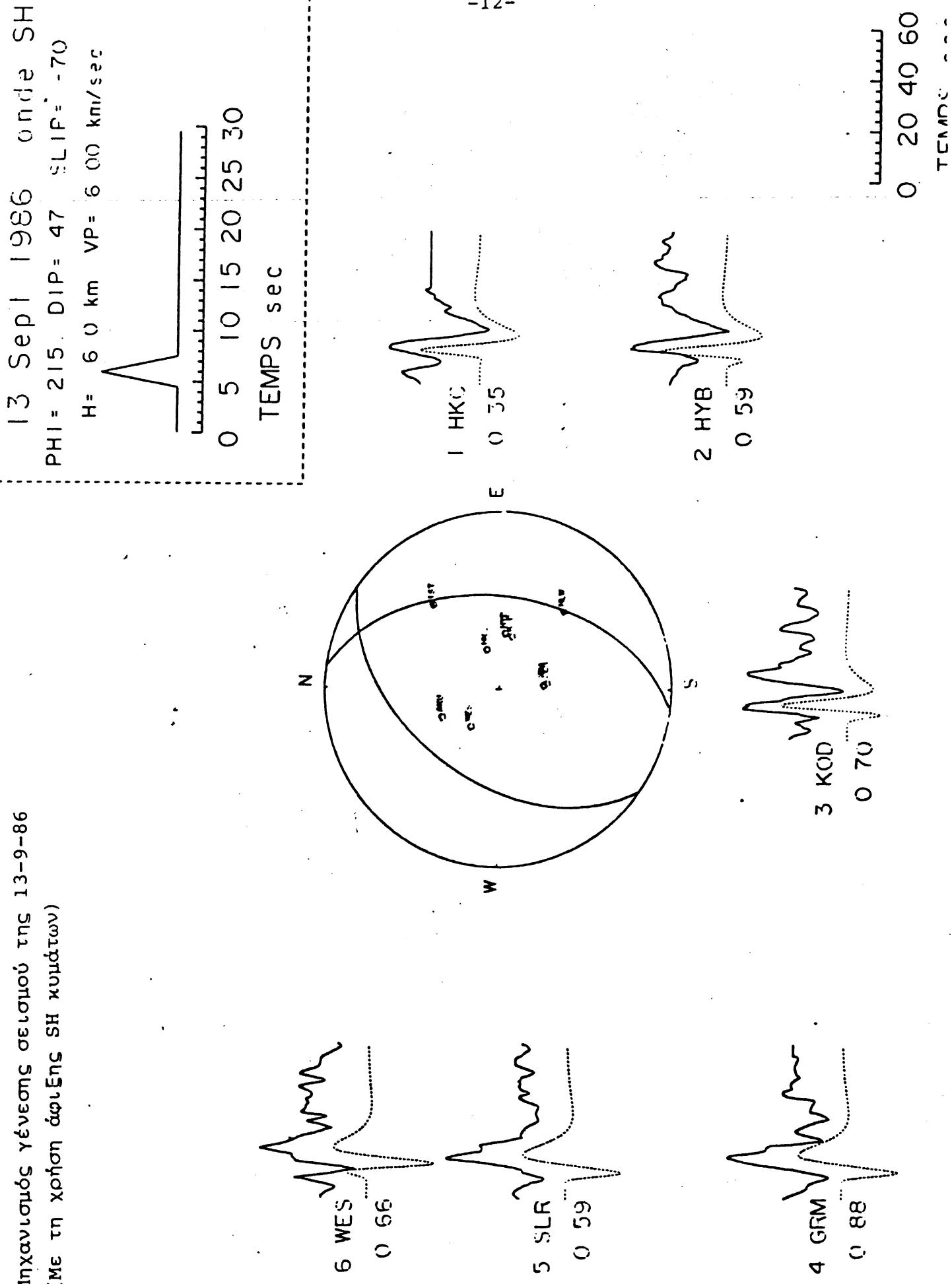
Σχ.3. Μηχανισμός γένεσης σεισμού της 13-9-86
(Με τη χρήση διφύλγιας P κυμάτων)



Σχ.4. Μηχανισμός γένεσης σεισμού της 13-9-86
(Με τη χρήση διφύλλων SZ κυμάτων)



Σχ.5. Μηχανισμός γένεσης σεισμού της 13-9-86
(Με τη χρήση διαιρέσεων SH μυάδων)



3.2. ΛΟΙΠΗ ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

'Οπως αναφέρθηκε και στο γενικό μέρος , η άμεση εγκατάσταση τοπικού δικτύου φορητών σεισμογράφων έκανε δυνατή την λεπτομερή παρακολούθηση και "ώρα με τη ώρα " εκτίμηση της κατάστασης από άποψη σεισμικής δραστηριότητας . Η ανά ώρα καταγραφή του πλήθους των σεισμικών δονήσεων και η αποτύπωσή της υπό μορφή ισογράμμα - τος έδωσε την δυνατότητα τόσο στο κλιμάκιο των σεισμολόγων του Τομέα Γεωφυσικής του Παν. Αθηνών και του Σεισμολογικού Ινστιτούτου του Αστεροσκοπείου Αθηνών όσο και στον ΟΑΣΠ να ενημερώνουν την Πολιτεία και τοπικές αρχές για την εξέλιξη και τις πραγματικές διαστάσεις του φαινομένου. 'Ετσι , αποφεύχθηκε ο "πανικός, και οι διάφορες διαδόσεις για επικείμενο μεγαλύτερο σεισμό δεν βρήκαν πρόσφορο έδαφος μια και τα Σεισμολογικά κλιμάκια αλλά και ο ΟΑΣΠ και ο Τομέας Γεωφυσικής του Παν/μίου Αθηνών ήσαν συνεχώς σε θέση με τα στοιχεία - καταγραφές που διέθεταν να πληροφορούν σωστά τους κατοίκους της Καλαμάτας.

3.2.1. Γενικές Παρατηρήσεις

- 1) Η εξέλιξη της μετασεισμικής σειράς ήταν κανονική δηλαδή η ελάττωση του πλήθους των μετασεισμών με τη πάροδο του χρόνου ακολούθησε τον εκθετικό νόμο όπως και στις περισσότερες των περιπτώσεων των Ελληνικών μετασεισμικών σειρών. Η δράση, συνεχώς ελαττούμενη, διαρκεί μέχρι σήμερα με περιοδικές μικρές εξάρσεις μικρής σημασίας. Ήδη έχει πλησιάσει το σεισμικό υπόβαθρο (seismic background) της περιοχής ,δηλαδή τη συνήθη δράση που υπήρχε και πριν από τον σεισμό της 13ης Σεπτεμβρίου.
- 2) Έχουν ήδη διθεί προς τον ΟΑΣΠ λεπτομερή ιστογράμματα της συχνότητας των σεισμών ανά δίωρο για τους δύο πρώτους μήνες από 15 - 9 έως 15 - 11/1986 μετά τη σεισμική έξαρση της Καλαμάτας. Ο σχετικά μεγάλος αριθμός σεισμών που παρατηρείται μετά από κάποιο αξιόλογο σεισμό (της τάξεως των 3,5 - 4,0 Richter) είναι φυσιολογικός αφού κάθε αξιόλογος μετασεισμός έχει τους δικούς του μετασεισμούς που θεωρούνται μετασεισμοί 2ας τάξεως του πρώτου κυρίου σεισμού των 6,2 Richter.
- 3) Σε ότι αφορά τα σεισμικά μεγέθη συμπεριλαμβανομένου και του κυρίου μετασεισμού με μέγεθος $M_s = 5,4$ (ATH) αυτά ήσαν σε συμφωνία με αντίστοιχες μετασεισμικές σειρές άλλων Ελληνικών σεισ-

μάν . Έτσι ο κύριος μετασεισμός διέφερε από τον κύριο σεισμό 0.6 -0.8 της τάξεως μεγέθους και έγινε μέσα στις πρώτες τρεις μέρες μετά το κύριο σεισμό όπου οι πιθανότητες είναι πάντα πολύ μεγαλύτερες (75%) . Οι παρατηρήσεις χρόνου γένεσης και μεγέθους του μετασεισμού αυτού και η συμφωνία του με αντίστοιχες μελέτες έδωσε ευθύς εξ αρχής τη δυνατότητα χαρακτηρισμού του σαν του μεγαλύτερου μετασεισμού.

- 4) Ο προκαταρκτικός υπολογισμός των επικέντρων των μετασεισμών τόσο επιτόπου (μέτρηση διαφοράς χρόνου άφιξης των P και S κυμάτων από συγκεκριμένο σταθμό) όσο και στο εργαστήριο με τη βοήθεια του H / Y έδειξε ότι δεν υπήρξε ουσιώδης και συστηματική μετανάστευση επικέντρων. Δηλαδή δεν παρατηρήθηκε συστηματική μετακίνηση εστιών προς μια γειτονική κατεύθυνση γεγονός που και πάλι έδωσε τη δυνατότητα για την εκτίμηση ότι δε φαίνεται πιθανή η "ενεργοποίηση" άλλης γειτονικής περιοχής (triggering effect).
- 5) Διευκρινίζεται εδώ ότι δεν πρέπει να συγχέεται η μετανάστευση επικέντρων προς γειτονικούς σεισμογόνους χώρους στην οποία αναφερθήκαμε προηγουμένως με τη συνηθισμένη μετανάστευση στο ίδιο σεισμογόνο χώρο του κύριου σεισμού. Έτσι και εδώ παρατηρήθηκε ότι η σεισμική έξαρση άρχισε από το Βόρειο τμήμα της σεισμογόνου περιοχής και αμέσως μετά μετατοπίστηκε στο Νότιο τμήμα της . Η περιοχή αυτή όπως καθορίστηκε από τα 500 περίπου καλά προσδιορισμένα επίκεντρα, έχει διαστάσεις περίπου 20 χιλ. μήκος και 10 χιλ. πλάτος σε μια διεύθυνση Β- Ν . (βλέπε εικόνα κατανομής των μετασεισμών).

3.2.2. Ανάλυση - Σχόλια

Με τη βοήθεια του πυκνού δικτύου φορητών σεισμογράφων που εγκαταστάθηκαν στην ευρύτερη περιοχή της Μεσσηνίας η ρική κατανομή των οποίων φαίνεται στο σχήμα 1 , έγινε δυνατή η καταγραφή όλων των μετασεισμών της ακολουθίας που ανέρχονται σε χιλιαδες. Το σημαντικότερο όμως είναι ότι για 1136 από αυτούς που έγιναν από τη στιγμή του κύριου σεισμού μέχρι και την 27η Σεπτεμβρίου ήταν δυνατός ο υπολογισμός των παραμέτρων τους όπως συντεταγμένες επικέντρων βάθος και μέγεθος: Η δυνατότητα

αυτή δόθηκε από την λειτουργία 19 φορητών σταθμών στη περιοχή (βλ. σχ.1) και από τη χρήση του μόνιμου σεισμολογικού δικτύου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

(a) Καθορισμός εστιακών παραμέτρων (χρόνος γένεσης, γεωγραφικές συντεταγμένες, εστιακό βάθος)

Στην ανάλυση για τον προσδιορισμό των υποκέντρων, λήφθηκαν υπόψη οι χρόνοι καθυστέρησης, που οφείλονταν στις ιδιαιτερες γεωλογικές συνθήκες κάτω από κάθε σταθμό, σε συνδυασμό με το μοντέλλο ταχυτήτων. Δηλ. ελήφθηκαν υπόψη το υψόμετρο και το είδος του γεωλογικού σχηματισμού, κάτω από το συγκεκριμένο (σεισμολογικό) σταθμό και εφαρμόστηκε σε κάθε σταθμό διόρθωση στο χρόνο διαδρομής των P κυμάτων της μορφής υψόμετρο σε km.
4 sec. Πρακτικά δηλ. για να ληφθεί υπόψη η "χρονική" καθυστέρηση κάτω από ένα σταθμό παρατήρησης, μετατράπηκε σε στρώμα ισοδύναμου πάχους. Αυτή η μετατροπή άλλαξε βέβαια ελαφρώς τη δομή του φλοιού κάτω από το σταθμό. Έτσι οι σταθμοί παρατήρησης εμφανίζονται με ένα ελαφρά διαφορετικό φλοιό. Οι ταχύτητες των P κυμάτων είναι οι ίδιες, αλλά τα πάχη του πρώτου και δεύτερου στρώματος διαφέρουν ελαφρά από σταθμό σε σταθμό. Πάντως οι χρόνοι καθυστέρησης που προσδιορίστηκαν για δόλους τους σταθμούς ήταν από 0,08 - 0,4 sec.

Ο προσδιορισμός δόλων των εστιακών παραμέτρων έγινε με τη χρησιμοποίηση του προγράμματος HYPO '71 (Lee and Lahr, 1975).

Το πρόγραμμα αυτό υπολογίζει, για κάθε σεισμό, μεταξύ των άλλων, το χρόνο που χρειάζεται το σεισμικό κύμα, ανάλογα με το μοντέλλο της δομής του φλοιού που χρησιμοποιείται, για να διατρέξει τη διαδρομή από την εστία του σεισμού μέχρι κάθε σταθμό. Αυτός είναι ο θεωρητικός χρόνος διαδρομής του σεισμικού κύματος για το συγκεκριμένο σταθμό στο συγκεκριμένο σεισμό. Ο πειραματικός χρόνος διαδρομής του σεισμικού κύματος ενδός σεισμού σε ένα σταθμό, είναι η διαφορά του χρόνου γένεσης του σεισμού από το χρόνο άφιξης του σεισμικού αυτού κύματος στο σταθμό. Η διαφορά του θεωρητικού χρόνου από τον πειραματικό χρόνο διαδρομής, είναι το χρονικό υπόλοιπο (residual) του σεισμικού κύματος στο σταθμό για το συγκεκριμένο σεισμό. Όσο μικρότερα, κατά απόλυτη τιμή, είναι τα χρονικά υπόλοιπα σ' ένα σταθμό, τόσο το θεωρητικό μοντέλλο πλησιάζει περισσότερο την πραγματική δομή του φλοιού κάτω από το σταθμό αυτό. Αν τα χρονι-

κά υπόλοιπα σ'ένα σταθμό είναι αρνητικά, τα σεισμικά κύματα διαδίδονται γρηγορώτερα από ότι προβλέπεται με βάση το θεωρητικό μοντέλλο, ενώ το αντίθετο συμβαίνει αν τα χρονικά υπόλοιπα είναι θετικά.

Υπολογίζαμε τα μέσα χρονικά υπόλοιπα κάθε σταθμού, από μιά οιμάδα επιλεγμένων σεισμών γιά τα επιμήκη κύματα. Οι μέσες τιμές των χρονικών υπόλοιπων σε κανένα σταθμό δεν ήταν συστηματικά μεγάλη πράγμα που δείχνει ότι το μοντέλλο δομής φλοιού που χρησιμοποιήθηκε ήταν ικανοποιητικό.

Η ροή του προγράμματος HYPO '71 αρχίζει με τη θεώρηση ενός αρχικού υποκέντρου το οποίο βρίσκεται κοντά στο σταθμό με το μικρότερο χρόνο άφιξης των P κυμάτων. Κατ'ακολουθία υπολογίζονται οι χρόνοι διαδρομής γιά δλους τους σταθμούς, με βάση το προκαθόρισμένο μοντέλλο ταχύτητας του φλοιού και συγκρίνονται με τους χρόνους διαδρομής που παρατηρήθηκαν. Στη συνέχεια εφαρμόζεται μία διόρθωση στο αρχικό υπόκεντρο που εκφράζεται με την τροποποίηση των αρχικών συντεταγμένων x, y, το βάθος z και το χρόνο γένεσης t.

Μία σπουδαία παράμετρος που δίνεται κατά τον υπολογισμό των υποκέντρων είναι η "κρίσιμη τιμή F", που πρέπει να έχει επιλεγεί σωστά γιά να μη σταματήσει πρόσωρα η διαδικασία γιά τον προσδιορισμό των υποκεντρικών παραμέτρων (Lee και Lahr , 1975). Τελικά, η τιμή 0,5 λήφθηκε γιά το TEST (03) και 1,0 γιά το TEST (6), όπως ο Lee και Lahr συνιστούν.

Οι χρόνοι άφιξης των εγκαρσίων κυμάτων S, που λαμβάνονται γιά τον προσδιορισμό των υποκεντρικών παραμέτρων, πρέπει να χρησιμοποιούνται με πολύ προσοχή. Πάντως, όσο πιο λίγοι σταθμοί έχουν χρησιμοποιηθεί, τόσο πιο καθοριστικής σημασίας είναι η λήψη περισσοτέρων χρόνων άφιξης εγκαρσίων κυμάτων γιά τον καλύτερο προσδιορισμό των υποκεντρικών παραμέτρων.

Στις περισσότερες περιπτώσεις της συγκεκριμένης μελέτης στην Καλαμάτα χρησιμοποιήθηκαν φάσεις επιμήκων κυμάτων και από τους σεισμογράφους του εθνικού σεισμολογικού δικτύου και έτσι ο αριθμός των σεισμογράφων ήταν μεγαλύτερος του 5. Επικουρικά πάντως, σε πολλές περιπτώσεις ευκρινούσε αναγραφής των εγκαρσίων κυμάτων, χρησιμοποιήθηκαν και φάσεις εγκαρσίων S στους υπολογισμούς.

Αυτό ήταν αναγκαίο κύρια σε περιπτώσεις πολύ μικρών σεισμών που είχαν αναγραφεί από 2 ή 3 μόνο σεισμολογικούς σταθμούς.

Τους χρόνους άφιξης των επιμήκων και εγκαρσίων κυμάτων δίλων των σεισμών σε κάθε σεισμολογικό σταθμό τους μετρήσαμε με ακρίβεια που εξαρτάται από τον τύπο του κύματος και το είδος του σεισμογράφου. Για τους φορητούς σεισμολογικούς σταθμούς που εγκαταστάθηκαν σχετικά κοντά στην περιοχή και ήταν τύπου ΜΕΩ-800 η ακρίβεια ανάγνωσης στον χρόνο των επιμήκων κυμάτων (P) ήταν ($0,05 \sim 0,1$) sec ενώ η ακρίβεια ανάγνωσης των εγκαρσίων κυμάτων (S) ήταν ($0,1 \sim 0,2$) sec.

(β) Μοντέλο δομής φλοιού

Από την παραπάνω διαδικασία είναι φανερό ότι το μοντέλο της δομής του φλοιού που θα υιοθετηθεί για την περιοχή παίζει αποφασιστικό ρόλο στην ακρίβεια της τελικής λύσης.

Έτσι, για τον καθορισμό του πιό αντιπροσωπευτικού μοντέλου δομής του φλοιού στην περιοχή μελέτης (ταχύτητες κυμάτων σε συνάρτηση με το βάθος), έγιναν διαδοχικές προσπάθειες με όλα τα διαθέσιμα μοντέλα δομής φλοιού που έχουν εφαρμοστεί στον Ελληνικό χώρο όπως: Herein et al., (1968), Παναγιωτόπουλος (1984), Makris (1978), Papazachos et al., (1966 a,b), Rothé (1972), Drakopoulos et al., (1986). Στο σχήμα 6 φαίνονται τα επτά αυτά μοντέλα.

Στην πρώτη φάση έγινε επιλογή 40 από τους σεισμούς που είχαν καταγραφεί ευκρινώς από ολόκληρο το δίκτυο. Τα στοιχεία των σεισμών αυτών αποτέλεσαν την είσοδο στον H/Y και με εφαρμογή του προγράμματος HYPO 71 έγινε επεξεργασία τους διαδοχικά με κάθε ένα από τα παραπάνω μοντέλα.

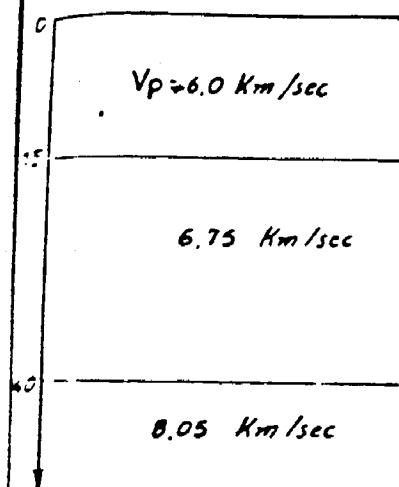
Το αποτέλεσμα έδειξε ότι το μοντέλο Herein et al., (1968) έδωσε σχεδόν για όλους τους σεισμούς τα καλύτερα RMS.

Στη συνέχεια επιχειρήθηκε πιό λεπτομερειακή αντιμετώπιση του μοντέλου στο πρώτο στρώμα που αφορά πολύ επιφανειακούς σεισμούς. Έτσι κρατώντας τα άλλα στρώματα σταθερά σε πάχος και ταχύτητα, έγινε επανυπολογισμός των 40 αυτών σεισμών με διαδοχικές αλλαγές της ταχύτητας του πρώτου στρώματος από 4.0 km/sec έως 6.0 km/sec με βήμα 0.2 km/sec. Βρέθηκε ότι την καλύτερη λύση έδωσε η εφαρμογή του μοντέλου με πρώτο στρώμα στο 1 χλμ. και αντί-

(1)

-18-

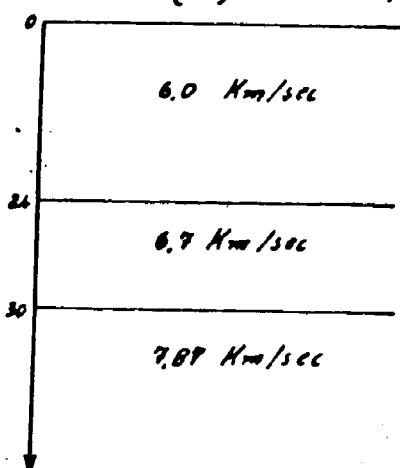
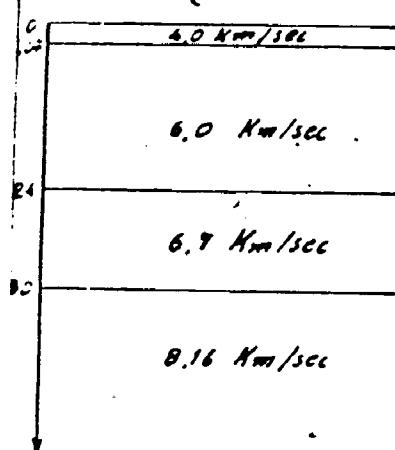
(2)



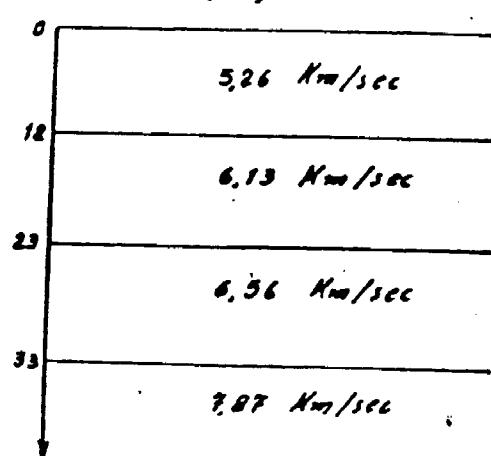
(3)

(4)

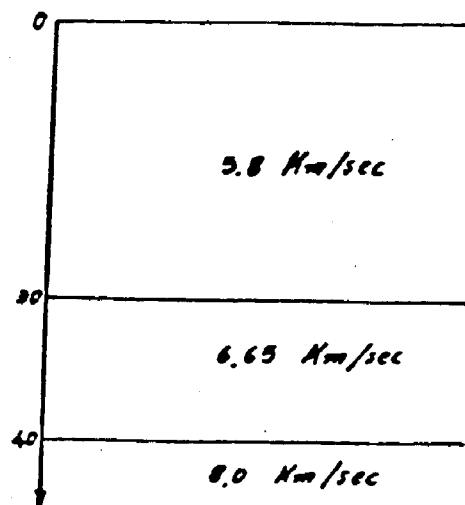
(5)



(6)



(7)



Σχ. 6. Διάφορα μοντέλα δομής που έχουν χρησιμοποιηθεί στον Ελλ. χώρο.
Η σειρά των επτά μοντέλων είναι αυτή που δίνεται στο κείμενο.

στοιχη ταχύτητα 5.0 km/sec. Το σχήμα 7 παρουσιάζει τον τελικό μοντέλο ταχύτητας-πάχος στρωμάτων του φλοιού που υιοθετήθηκε για την επεξεργασία των σεισμών της περιοχής που καταγράφηκαν από το δίκτυο.

Το ίδιο μοντέλο φλοιού χρησιμοποιήθηκε και για τον υπολογισμό των σεισμικών παραμέτρων με τη χρήση των αναγραφών των σταθμών του Εθνικού σεισμολογικού δικτύου.

(γ) Υπολογισμός σεισμικού μεγέθους

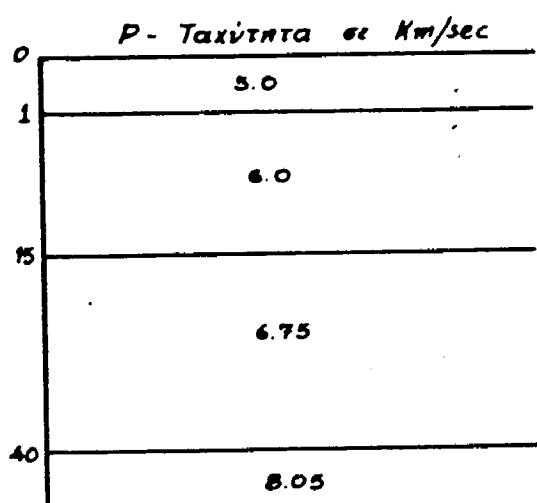
Γιά τον υπολογισμό των μεγεθών των σεισμών της περιοχής και γιά όσους από αυτούς κατέγραψε ο σταθμός της Αθήνας, χρησιμοποιήθηκαν οι αναγραφές του σεισμογράφου τύπου Wood - Anderson. Το είδος αυτό του σεισμογράφου δίνει τη δυνατότητα απ'ευθείας υπολογισμού του τοπικού μεγέθους M_L , από το μέγιστο πλάτος αναγραφής και την απόσταση με τη βοήθεια ειδικού νομογράμματος.

Η απόσταση όμως του σταθμού των Αθηνών από την περιοχή μελέτης και η σχετικά χαμηλή μεγέθυνση του σεισμογράφου Wood-Anderson (-2800) δεν επιτρέπει καταγραφή σεισμών με μέγεθος μικρότερο του 3R περίπου. Έτσι γιά σεισμούς είτε μικρότερου του ορίου διακριτικότητας των σεισμογράφων Wood-Anderson είτε γιά σεισμούς που γιά διάφορους λόγους δεν καταγράφηκαν από την Αθήνα, το ισοδύναμο με M_L μέγεθος υπολογίστηκε με την εφαρμογή σχέσεως του τύπου:

$$M_L = a \log D + b \Delta + C$$

όπου a , b και C σταθερές που υπολογίζονται από δεδομένα γιά τα οποία υπάρχουν μεγέθη M_L από τον σεισμογράφο Wood-Anderson (Αθήνας), D είναι η διάρκεια του σεισμού από τη στιγμή της πρώτης εισόδου του P κύματος μέχρις ότου το πλάτος της κίνησης από κορυφή σε κορυφή δεν υπερβαίνει τα 2 mm, (Lee et al., 1972) και Δ είναι η επικεντρική απόσταση σε χιλιόμετρα.

Με τη χρήση των αναγραφών 30 σεισμών γιά τους οποίους υπολογίστηκαν M_L από τους σεισμογράφους Wood-Anderson της Αθήνας και ήταν γραμμένοι από το σταθμό της Καλαμάτας (KKAL) και με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων υπολογίστηκαν τα a , b και C . Ο τελικός τύπος υπολογισμού του ισοδύναμου μεγέθους M_{LD} που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή είναι:



Σχ. 7. Το τελικό μοντέλο δομής που χρησιμοποιήθηκε στην επεξεργασία των δεδομένων

$$M_{LD} = 1.22 \log D + 0.0088\Delta - 0.83 \quad (1.1)$$

Οι τιμές των a , b και c δίδονται σαν παράμετροι ειδόδου στο HYPO 71 μαζί με τις συντεταγμένες κάθε σταθμού και τον κατάλογο των χρόνων άφιξης των επιμήκων P και όπου είναι δυνατόν, των εγκαρσίων S κυμάτων.

(δ) Κατανομή μετασεισμών

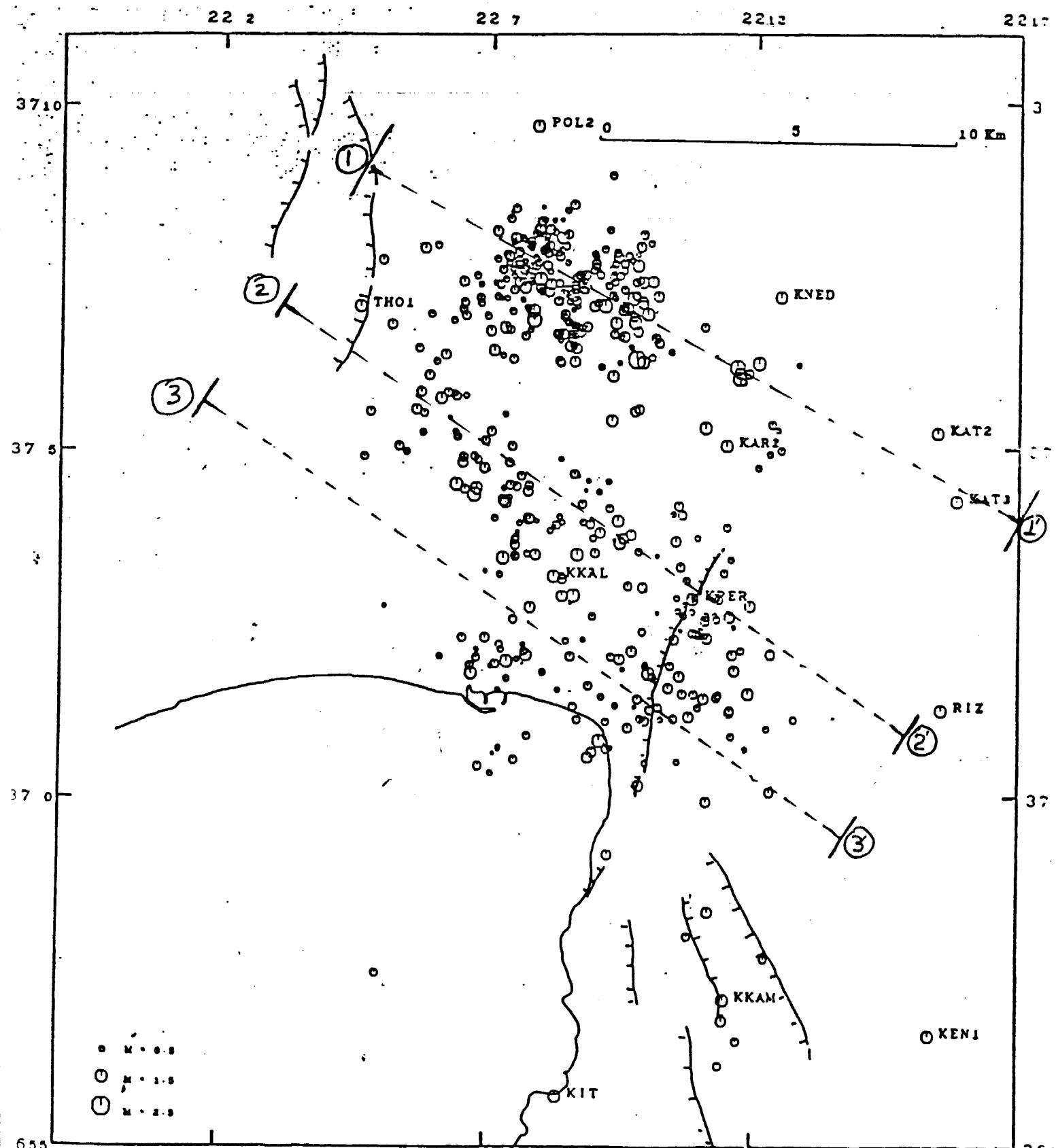
Ο χάρτης 8 δείχνει τους σεισμούς με τις καλύτερες λύσεις που καταγράφηκαν στη διάρκεια της πρώτης φάσης της λειτουργίας του φορητού δικτύου (13.9 - 27.9.87). Πρόκειται για 525 μετασεισμούς για τους οποίους οι λύσεις έδωσαν : RMS 0.15 sec, ERZ 1,2 km ERX 0.6 km ERY 0.6 km.

Στο παράρτημα φαίνονται οι παράμετροι όλων των μετασεισμών για τους οποίους το HYPO έδωσε λύση. Πρόκειται για 1265 μετασεισμούς με μεγέθη από 1.7 έως 3.6 M_s . Φυσικά έχουν καταγραφεί αρκετές εκατοντάδες ακόμα αλλά είτε λόγω μεγέθους είτε λόγω περιορισμένου αριθμού καταγραφών (4) δεν ήταν δυνατόν να υπολογιστεί ακριβές επίκεντρο.

Από το χάρτη αυτό φαίνεται καθαρά ότι η περιοχή που ενεργοποιήθηκε έχει διαστάσεις 10 X 20 km με διεύθυνση Β - Ν. Το νοτιότερο τμήμα της ζώνης αυτής συμπίπτει σχεδόν με τα όρια της πόλης της Καλαμάτας.

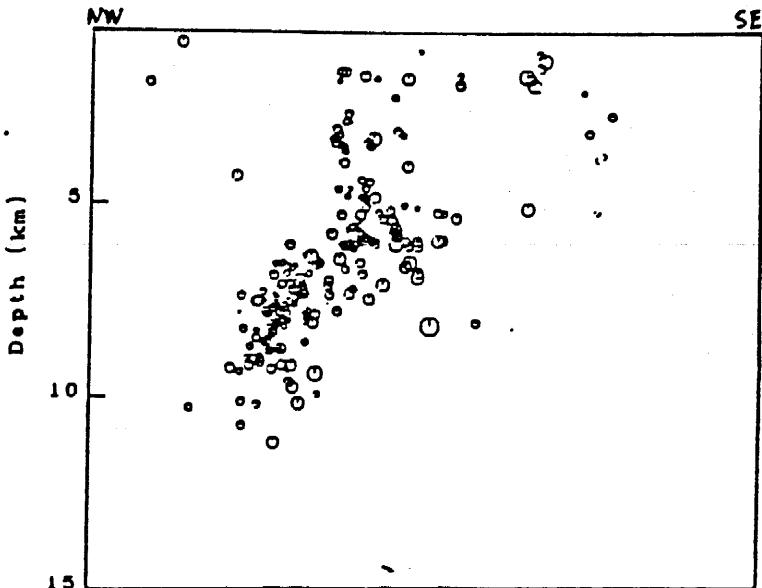
Από τις προβολές των επικέντρων του χάρτη σε κάθετα επίπεδα με ίχνη 1 - 1', 2 - 2' και 3 - 3' (βλέπε χάρτη) και διεύθυνση ΒΔ - ΝΑ που παρουσιάζονται στα σχήματα 9, 10 και 11 παρατηρούμε ότι :

- α) Το σύνολο σχεδόν των μετασεισμών έχει βάθη μακρότερα των 10 - 12 χιλιομέτρων με το μεγαλύτερο μέρος τους να έχει βάθος από 5 έως 10 χιλιόμετρα.
- β) Υπάρχει σαφής αύξηση βάθους προς τα δυτικά πράγμα που επιβεβαιώνει και τη λύση του μηχανισμού γένεσης του κύριου σεισμού.

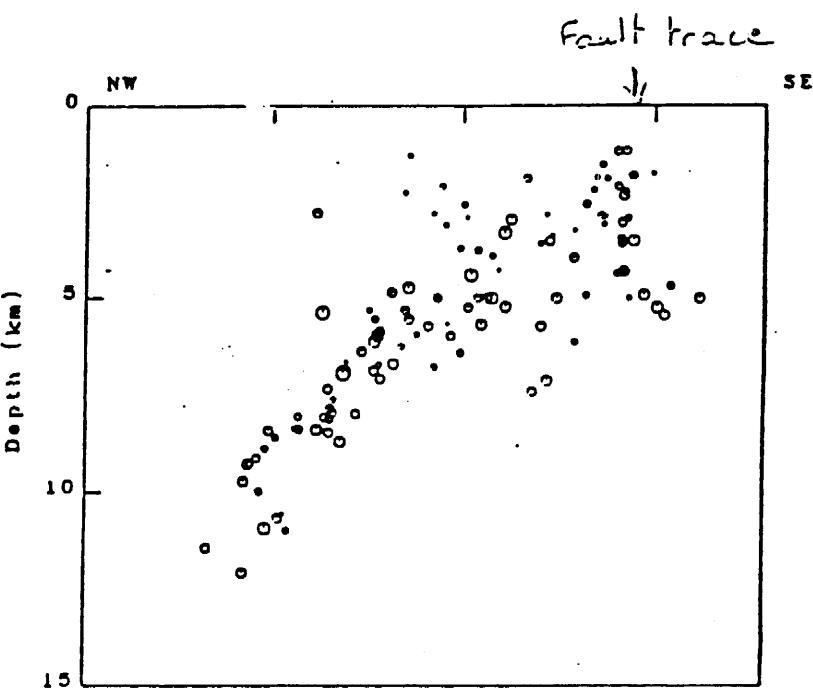


$RMS < 0.15s$ $ERZ < 1.2 \text{ km}$ $ERX < 0.6 \text{ km}$ $ERY < 0.6 \text{ km}$

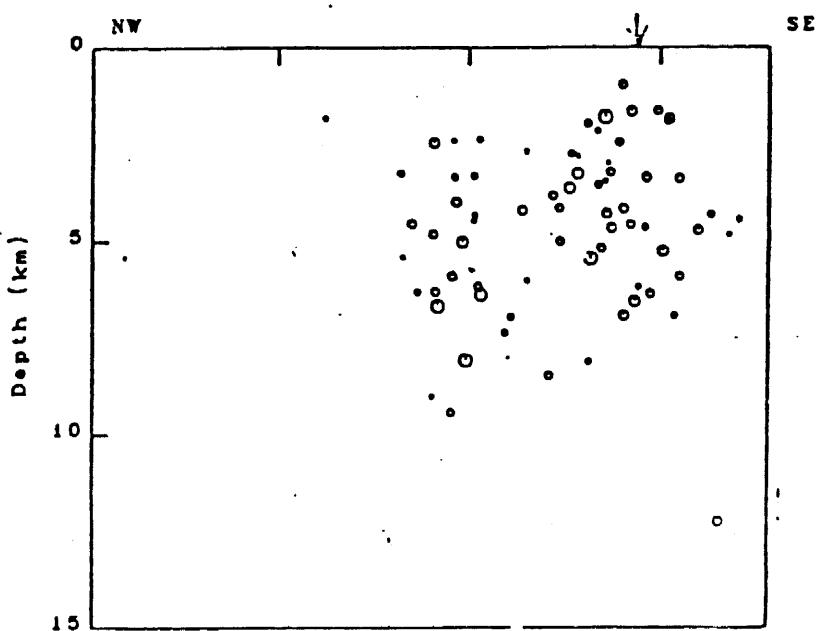
Σχ. 8. Χάρτης επικέντρων των σεισμών με τις καλύτερες λύσεις (~500). Οι τομές 1-1', 2-2' και 3-3' χρησιμοποιήθηκαν για τις προβολές των σχημάτων, και αντίστοιχα.



Σχ. 9. Προβολή υποκέντρων στο επίπεδο ΒΔΝΑ της τομής 1-1' (Βλ. σχ. 8).



Σχ. 10. Προβολή υποκέντρων στο επίπεδο ΒΔΝΑ της τομής 2-2' (Βλ. σχ. 9).

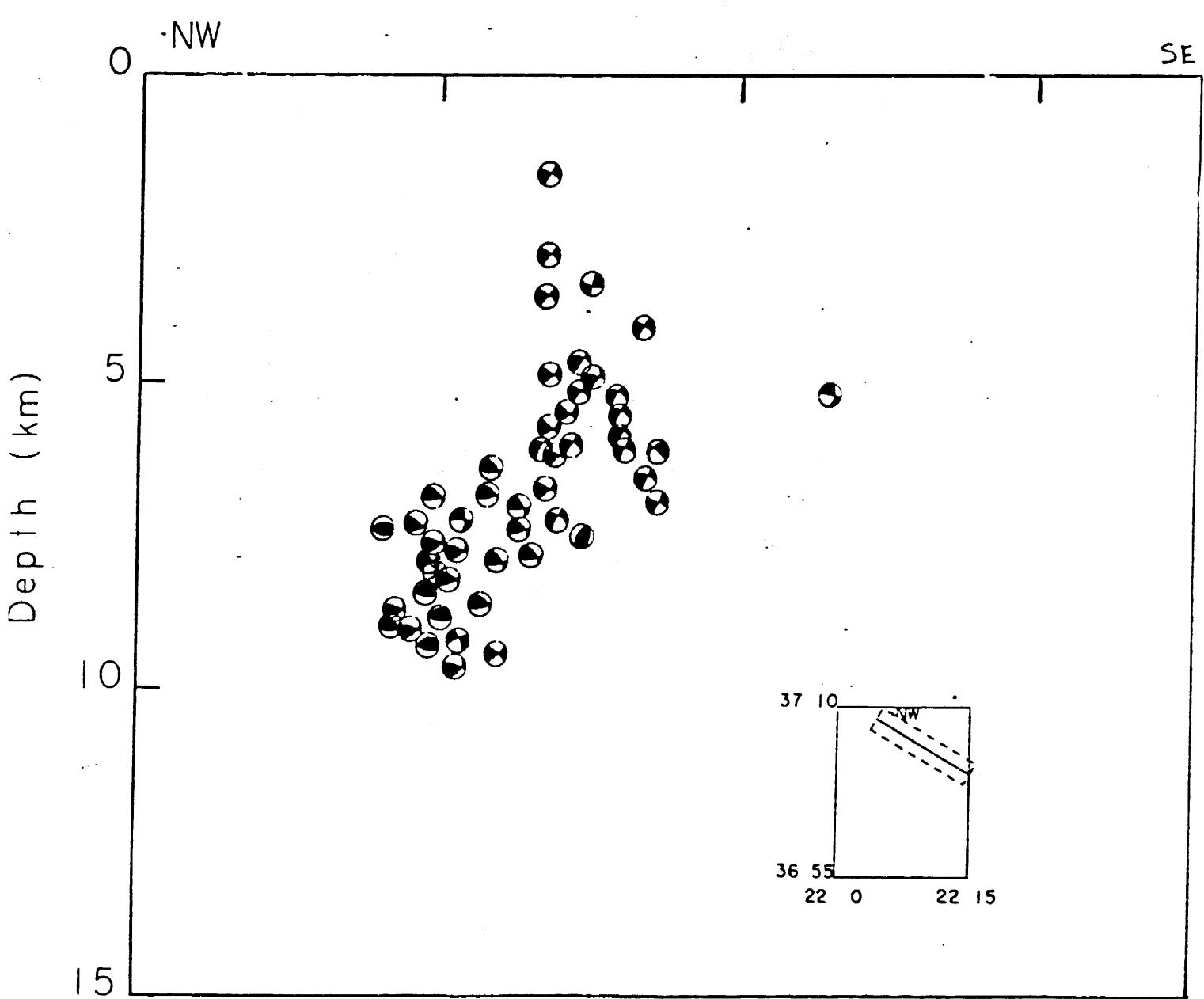


Σχ. 11. Προβολή υποκέντρων στο επίπεδο ΒΔΝΑ της τομής 3-3' (Βλ. σχ. 8).

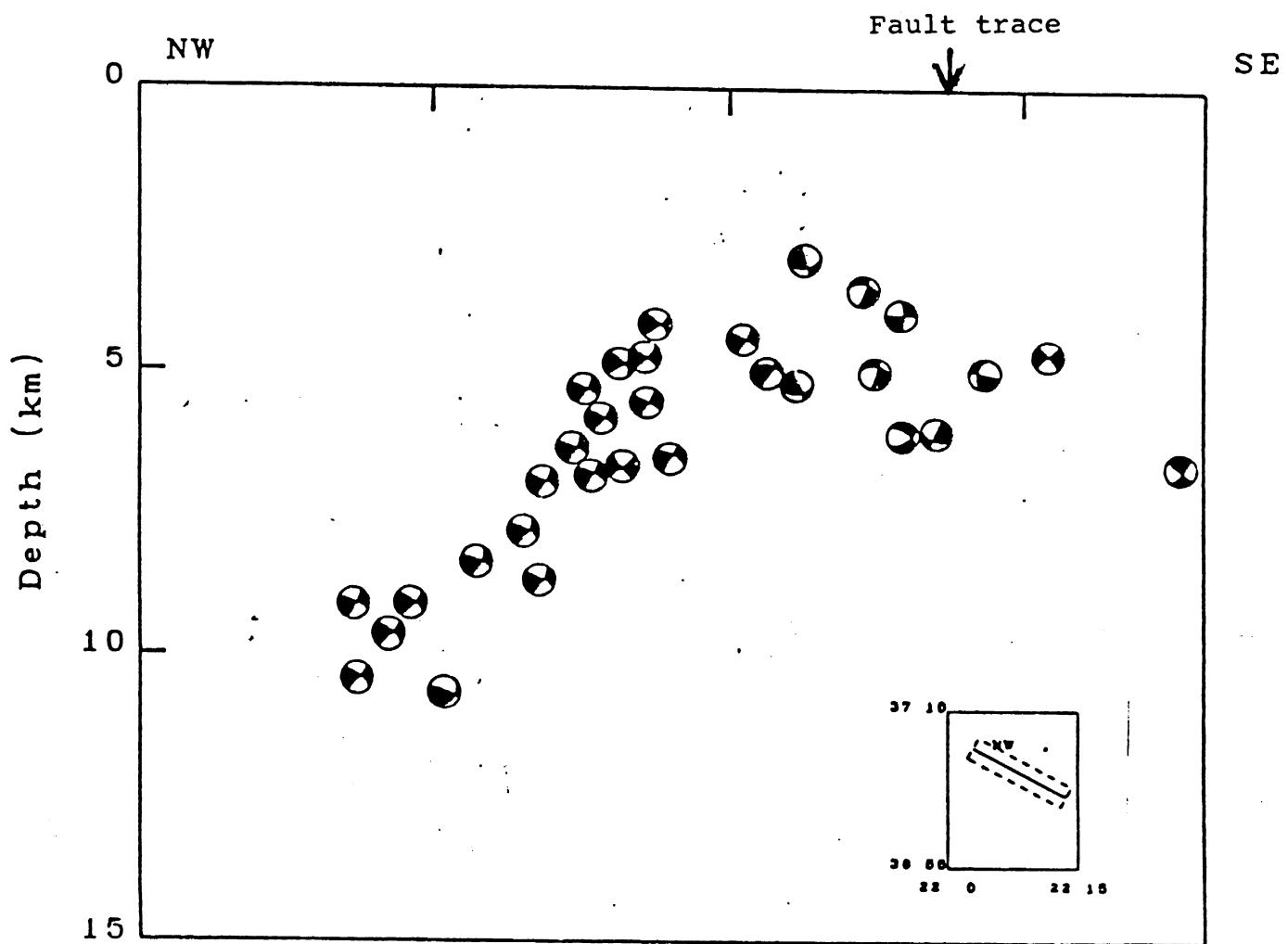
Εξ άλλου από τις αντίστοιχες προβολές 12 , 13 και 14 όπου αποτυπώνονται οι μηχανισμοί γένεσης των μετασεισμών για τους οποίους ήταν δυνατόν ο υπολογισμός τους , σε συνάρτηση με τη κατανομή βάθους τους , επιβεβαιώνεται ότι πρόκειται για κανονικό ρήγμα που ενεργοποιήθηκε με τον κύριο σεισμό.

Συμπερασματικά , η ανάλυση και επεξεργασία του κύριου σεισμού της 13.9. 87 και της μετασεισμικής ακολουθίας του έδειξε οτι:

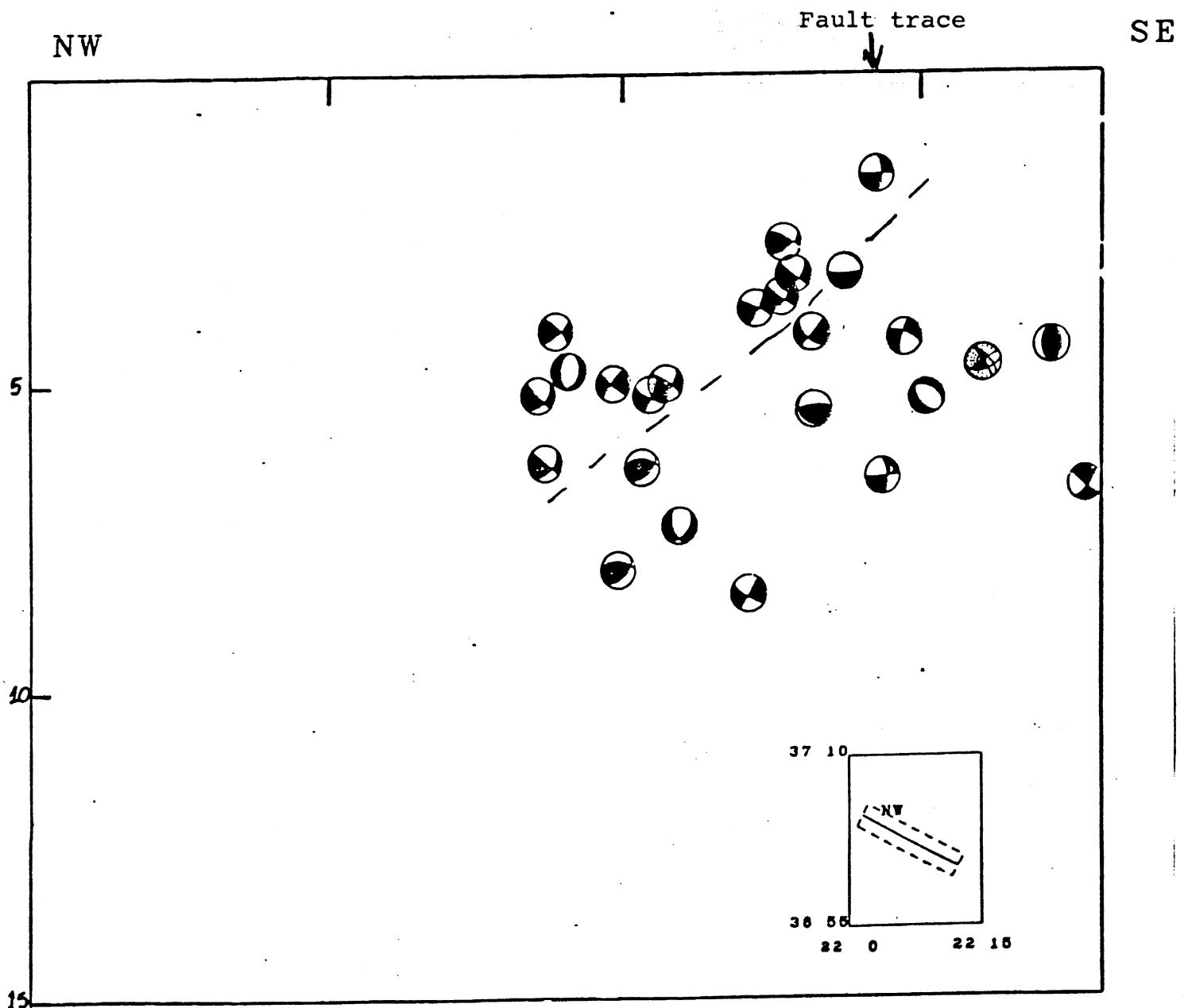
- 1.- Ο κύριος σεισμός ήταν το αποτέλεσμα διάρρηξης κανονικού ρήγματος σε επίπεδο με διεύθυνση N 35° και αλίση προς τα δυτικά περίπου 47° .
- 2.- Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την ενεργοποίηση μιας περιοχής διαστάσεων 10×20 χιλμ. κατά τη διεύθυνση Β - Ν με το νοτιότερο τμήμα της σχεδόν τη πόλη της Καλαμάτας.
- 3.- Τα βάθη , τόσο του κύριου σεισμού όσο και των μετασεισμών ήταν της τάξεως των 0 - 10 χιλιομέτρων με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση μεταξύ 4 - 8 χιλιόμετρα. Αυτό εξάλλου σε συνδυασμό και με τη μικρή επικεντρική απόστασή τους δικαιολογεί και τις εκτεταμένες καταστροφές στη πόλη της Καλαμάτας.



Σχ. 12. Προβολή υπόκεντρων μετασεισμών γιά τους οποίους υπολογίστηκε ο μηχανισμός γένεσης κατά μήκος της τομής 1-1' (Βλ. σχ. 8). Το ένθετο δείχνει τη σχετική θέση της τομής ως προς την ευρύτερη περιοχή μελέτης.



Σχ. 13 . Προβολή υποκέντρων μετασεισμών γιά τους οποίους υπολογίστηκε ο μηχανισμός γένεσης κατά μήκος της τομής 2-2' (Βλ. σχ. 8). Το ένθετο δείχνει τη σχετική θέση της τομής ως προς την ευρύτερη περιοχή μελέτης.



Σχ.14 . Προβολή υποκέντρων μετασεισμών για τους οποίους υπολογίστηκε ο μηχανισμός γένεσης κατά μήκος της τομής 3-3' (Βλ. σχ. 8) Το ένθετο δείχνει τη σχετική θέση της τομής ως προς την ευρύτερη περιοχή μελέτης.