



**Τελική Έκθεση του Ερευνητικού Προγράμματος  
Προς τον ΟΑΣΠ**

**Ο ΣΕΙΣΜΟΣ της ΛΕΥΚΑΔΑΣ**

- (1) Συλλογή-Ανάλυση Σεισμολογικών καί Γεωτεχνικών Δεδομένων**
- (2) Ανάλυση Αστοχιών στους Λιμένες Λευκάδας, Λυγιάς, Νυδρίου, καί Βασιλικής**
- (3) Ερμηνεία των Κατολισθήσεων στο Οδικό Δίκτυο**
- (4) Προτάσεις Αντιμετώπισης**

Επιστημονικός Υπεύθυνος

**Καθηγητής Γ. Γκαζέτας**

Σε συνεργασία με τους

**Καθηγητές Γ. Κούκη και Α. Τσελέντη**

του Πανεπιστημίου Πατρών

Φεβρουάριος 2004



**Τελική Έκθεση του Ερευνητικού Προγράμματος  
Προς τον ΟΑΣΠ**

**Ο ΣΕΙΣΜΟΣ της ΛΕΥΚΑΔΑΣ**

- (1) Συλλογή-Ανάλυση Σεισμολογικών και Γεωτεχνικών Δεδομένων**
- (2) Ανάλυση Αστοχιών στους Λιμένες Λευκάδας, Λυγιάς, Νυδρίου, και Βασιλικής**
- (3) Ερμηνεία των Κατολισθήσεων στο Οδικό Δίκτυο**
- (4) Προτάσεις Αντιμετώπισης**

Επιστημονικώς Υπεύθυνος  
**Καθηγητής Γ. Γκαζέτας**

Σε συνεργασία με τους  
**Καθηγητές Γ. Κούκη και Α. Τσελέντη**  
του Πανεπιστημίου Πατρών

Φεβρουάριος 2004

# **Ο ΣΕΙΣΜΟΣ της ΛΕΥΚΑΔΑΣ (14-8-03)**

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

- 1.1. Στόχοι και Αντικείμενο του Ερευνητικού Προγράμματος
- 1.2. Επισκόπηση των Βλάβων, Στόχοι του Προγράμματος

## **2. ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ**

- 2.1. Σεισμολογία των Ιονίων Νήσων
- 2.2. Σεισμική Ιστορία της Λευκάδας
- 2.3. Ο Σεισμός της 14-8-03 και οι Καταγραφές Λευκάδας, και Πρέβεζας.

## **3. ΑΝΑΛΥΣΗ του ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ της ΛΕΥΚΑΔΑΣ**

- 3.1. Καταγραφή και Ελαστικά Φάσματα
- 3.2. Ανελαστικά Φάσματα
- 3.3. Φάσματα Συμμετρικής και Ασύμμετρης Ολίσθησης

## **4. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ και ΕΔΑΦΙΚΑ ΠΡΟΦΙΛ**

- 4.1. Θέσεις Γεωτρήσεων και Διασκοπήσεων – Τύπος Δοκιμών
- 4.2. Γενικευμένο Εδαφικό Προφίλ

## **5. ΕΔΑΦΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ του ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΡΑΔΑΣΜΟΥ**

- 5.1. Εισαγωγή
- 5.2. "Αντιστροφή" Καταγραφής, Διέγερση Υποβάθρου
- 5.3. Κυματική Ανάλυση της Εδαφικής Απόκρισης σε Διάφορες Θέσεις

## **6. ΜΕΡΙΚΕΣ ΣΚΕΨΕΙΣ από την ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΤΙΡΙΩΝ**

## **7. ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗ. ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ : ΛΕΥΚΑΔΑ, ΚΑΣΤΡΟ, ΒΑΣΙΛΙΚΗ, ΛΙΜΑΝΙΑ**

## **8. Οι ΒΛΑΒΕΣ στα ΛΙΜΑΝΙΑ και τις ΜΑΡΙΝΕΣ της ΛΕΥΚΑΔΑΣ**

- 8.1. Εισαγωγή

## 8.2 Περιγραφή – Τεκμηρίωση Λιμενικών Ζημιών

### 8.2.1 Το Λιμάνι της Λευκάδας

### 8.2.2 Η Μαρίνα Αναψυχής της Λευκάδας

### 8.2.3 Το Λιμάνι της Λυγιάς

### 8.2.4 Το Λιμάνι της Βασιλικής

### 8.2.5 Το Λιμάνι του Νυδρίου

### 8.2.6 Τα Λιμάνια Νυκιάνας και Βλυχού

## 8.3 Πιθανά Βαθύτερα Αιτία της Μεγάλης Εκτασης των Λιμενικών Ζημιών

### 8.3.1 Η «Καταστρεπτικότητα» του Επιταχυνσιογραφήματος Λευκάδας : Συγκριτική Μελέτη

### 8.3.2. Σεισμική Ανάλυση Κρηπιδοτοίχου με Καθιερωμένες Μεθόδους της Βιβλιογραφίας και με τον ΕΑΚ

### 8.3.3 Μια Αριθμητική Σεισμική Ανάλυση του Κρηπιδοτοίχου

### 8.3.4 Συμπεράσματα και Ανακύπτοντα Ερωτήματα

## 9. ΟΙ ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ

### 9.1 Εισαγωγή : Γεωλογικές Συνθήκες και Αστάθεια Πρανών

### 9.2 Μορφολογικό Ανάγλυφο, Αίτια των Κατολισθήσεων

#### 9.2.1 Οδικός Αξονας "Τσουκαλάδες–Πευκούλια–Αγ. Νικήτας"

#### 9.2.2 Οδικός Αξονας "Αγ. Πέτρος–Κομηλιό"

#### 9.2.3 Δευτερεύοντες Οδικοί Αξονες

## 10. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ των ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΒΛΑΒΩΝ

### – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ

### – ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

# 1.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Στόχοι και Αντικείμενο του Ερευνητικού Προγράμματος

Ο αμεσότερος παράλληλος προς την έρευνα στόχος του παρόντος ερευνητικού προγράμματος ήταν κατεπείγοντος χαρακτήρα : η ανάλυση των αστοχιών των λιμένων και η συνεργασία με τον λιμενολόγο Μελετητή, "ΤΡΙΤΩΝ Α.Ε.", για την εκπόνηση μελετών αποκαταστάσεως των λιμένων Λευκάδας Νυδρίου, και Βασιλικής. Η συνεργασία αυτή, υπό την μορφή παροχής πληροφοριών προς τον Μελετητή και ελέγχου των παραδοχών των μελετών αποκαταστάσεως, έχει ήδη ολοκληρωθεί.

Το αντικείμενο του ερευνητικού προγράμματος, τα αποτελέσματα του οποίου παρουσιάζονται στο παρόν τεύχος είναι το ακόλουθο :

1. Συλλογή και αξιολόγηση των σεισμολογικών δεδομένων, με έμφαση στην γεωμετρία και στον προσανατολισμό του σεισμογόνου ρήγματος, και στην κατεύθυνση διαδόσεως της διάρρηξης.
2. Συλλογή και αξιολόγηση υπαρχόντων γεωτεχνικών στοιχείων από γεωτρήσεις δημοσίων και ιδιωτικών έργων. Εκτέλεση ενός αριθμού πρόσθετων γεωτρήσεων και μερικών γεωφυσικών διασκοπήσεων, για να επιτευχθεί μία ολοκληρωμένη εικόνα των εδαφικών συνθηκών στην περιοχή των αστοχιών.
3. Επεξεργασία / Ανάλυση των κυριοτέρων επιταχυνσιογραφημάτων του σεισμού : της καταγραφής στο Νοσοκομείο Λευκάδας ( $PGA = 0.42 \text{ g}$ ), στην Πρέβεζα ( $PGA = 0.19 \text{ g}$ ), και στην υποθαλάσσια-επικαθήμενη σήραγγα Ακτίου-Πρεβέζης ( $PGA \approx 0.10 \text{ g}$ ). Η επεξεργασία θα περιλαμβάνει καί τον υπολογισμό ελαστικών και πάσης-φύσεως ανελαστικών φασμάτων αποκρίσεως.

4. Με βάση τα αποτελέσματα των ανωτέρω επιμέρους εργασιών "2" και "3", ανάλυση της κυματικής απόκρισης του εδάφους θεμελιώσεως για να επιβεβαιωθεί (ή τροποποιηθεί) η εμμέσως διαφαινόμενη συντονιστική ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού από το έδαφος. Επανάληψη των αναλύσεων για διάφορες θέσεις της πόλης ώστε η σεισμική διέγερση στις αναλύσεις των επιμέρους αστοχιών να είναι τελείως ρεαλιστική.
5. Πλήρης Καταγραφή / Αναγνώριση των βλαβών στον λιμένα και παραλία Λευκάδας, στην μαρίνα Λευκάδας, στο λιμανάκι Αυγιάς, και στον λιμένα Βασιλικής. Μέσω τοπογραφικών μετρήσεων : γεωμετρική αποτύπωση των κρηπιδοτοίχων. Χρήση αεροφωτογραφιών. Ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς των κρηπιδοτοίχων. Εξαγωγή Συμπερασμάτων ως προς :
  - (i) τον μηχανισμό της αστοχίας ή παραμόρφωσης
  - (ii) τις επιθυμητές εδαφικές ή γεωμετρικές παραμέτρους με τις οποίες θα ελαχιστοποιούνταν ή και θα αποφεύγονταν η βλάβη.
6. Ανάλυση των περιπτώσεων ρευστοποίησεως και κατανόηση του ρόλου τους στην αστοχία των επηρεαζομένων κατασκευών.
7. Γεωλογική/γεωτεχνική χαρτογράφηση των μεγάλων κατολισθήσεων της βορειοδυτικής ακτογραμμής. Ερμηνεία του μηχανισμού αστοχίας, με γεωλογικές και εδαφομηχανικές θεωρήσεις.

Στην εκπόνηση του προγράμματος συμμετείχαν : η ερευνητική ομάδα Εδαφοδυναμικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ :

*Αγγελος Τσίκας, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός*

*Νίκος Γερόλυμος, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός*

*Πρόδρομος Ψαρρόπουλος, Διδάκτωρ Πολιτικός Μηχανικός,*

*Γιάννης Αναστασόπουλος, Υπ. Διδάκτωρ, Πολιτικός Μηχανικός M.Sc.*

*Μάριος Αποστόλου, Υπ. Διδάκτωρ, Πολιτικός Μηχανικός, M.Sc.*

*Ράλλης Κουρκουλής, Υπ. Διδάκτωρ, Πολιτικός Μηχανικός, M.Sc.*

*Ευαγγελία Γαρίνη, Υπ. Διδάκτωρ, Πολιτικός Μηχανικός*

*Παναγιώτης Γεωργαράκος, Υπ. Διδάκτωρ, Πολιτικός Μηχανικός*

- Ο Καθηγητής κ. **Γ. Κούκης**, του Τμήματος Εφαρμοσμένης Γεωλογίας και Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών, με κύρια ευθύνη του αντικειμένου 9 (ερμηνεία των κατολισθήσεων).
- Ο Καθηγητής κ. **Α. Τσελέντης**, Διευθυντής του Εργαστηρίου Σεισμολογίας του Πανεπιστημίου Πατρών, με κύρια ευθύνη την εκτέλεση γεωφυσικών τομογραφιών σε επιλεγμένες θέσεις της χώρας της Λευκάδας.
- Ο Επίκουρος Καθηγητής κ. **Γ. Τσιαμπάος** της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του ΕΜΠ, σε συνεργασία με το Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Εργων (ΚΕΔΕ), με ευθύνη για την εκτέλεση και ερμηνεία μιάς σειράς δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και μετρήσεων SPT, CPT και Crosshole.
- Ο Αναπληρωτής Καθηγητής κ. **Γ. Μυλωνάκης**, της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του City University of New York και νεοκλεγείς επίκουρος καθηγητής του Πανεπιστημίου Πατρών.

Η ερευνητική εργασία του κ. Γ. Κούκη επισυνάπτεται ως ξεχωριστό τεύχος, η εργασία του κ. Α. Τσελέντη και του Εργαστηρίου Γεωτεχνικής του ΚΕΔΕ συγκεφαλαιώνεται σε παράρτημα του παρόντος, ενώ οι εργασίες των κ.κ. Γ. Τσιαμπάου και Γ. Μυλωνάκη έχουν ενσωματωθεί στο κείμενο της παρούσης Εκθέσεως.

## **1.2 Επισκόπηση των Βλαβών, Στόχοι του Προγράμματος**

Σ' έναν από τους ισχυρότερους σεισμούς ( $M_s \approx 6.4$ ) της τελευταίας 20ετίας στην Ελλάδα, την 14<sup>η</sup> Αυγούστου 2003, τα κτίρια και δομήματα της πόλης και των χωριών της Λευκάδας αντέδρασαν αξιοθαύμαστα Σε συνδυασμό με το (σύνηθες) μικρό βάθος της σεισμικής διάρρηξης ( $\approx 15$  km) και την μικρή απόσταση ( $\approx 14$  km) του γενεσιουργού ρήγματος απ' την πόλη, ο σεισμός προκάλεσε εντονότατη δόνηση, η μοναδική καταγραφή της οποίας (στο υπόγειο του νοσοκομείου, σε όργανο του ΙΤΣΑΚ) έδωσε το δραματικότερο ίσως μέχρι σήμερα (δηλαδή, μετά απ' το 1972) επιταχυνσιογράφημα του ελλαδικού χώρου.

Σε αντίθεση με την επιτυχία των κτιριακών κατασκευών, μερικά από τα "μυστικά" της οποίας αναζητούνται στην παρούσα Εκθεση, πάμπολλες (σε μορφή, ένταση, και έκταση) ήταν **οι εδαφικού-τύπου ή εδαφικής-προέλευσης ζημιές και αστοχίες** σε όλο το νησί. Για τον τεχνικό κόσμο της χώρας έχει μεγάλο ενδιαφέρον :

- (i) Η συστηματική καταγραφή και τεκμηρίωση των ζημιών αυτών,
- (ii) Η επιστημονική διαλεύκανση των βαθύτερων αιτίων τους.
- (iii) Η διατύπωση αναπάντητων προς το παρόν ερωτημάτων, και
- (iv) Ο σχολιασμός της επάρκειας ή μή των μεθόδων του ισχύοντος ελληνικού αντισεισμικού κανονισμού.

Αυτοί ακριβώς είναι οι στόχοι του παρόντος ερευνητικού προγράμματος.

Οι ζημιές και αστοχίες στις οποίες αναφέρεται η παρούσα Εκθεση περιλαμβάνουν τις :

- Μόνιμες παραμορφώσεις και αστοχίες σε όλα σχεδόν τα **λιμάνια** ή **επιχώματα** με θαλάσσιο μέτωπο, παρά το μικρό τους βάθος ( $\approx 2-4$  μέτρα). Σημαντικές ήταν οι ζημιές στο λιμάνι και στην μαρίνα της Λευκάδας, στα μικρά λιμάνια της Λυγιάς και της Νικιάνας, και στο λιμάνι της Βασιλικής.



Στις μορφές αστοχίας περιλαμβάνονται : η δυναμική συνίζηση του επιχώματος, η οριζόντια μετακίνηση, στροφή, ή και ανατροπή του κρηπιδοτοίχου, η ρευστοποίηση, η οριζόντια εξάπλωση σε μεγάλη έκταση πίσω από τον κρηπιδότοιχο, και οι [συνεπαγόμενες από τα ανωτέρω] πάσης φύσεως διαφορικές μετακινήσεις, οριζόντιες και κατακόρυφες.

- **Διαφορικές βυθίσεις** μονωρόφων, διωρόφων και τριωρόφων κτιρίων, πιθανότατα οφειλόμενες σε δυναμική ανακυκλική συνίζηση (μέ ή χωρίς ρευστοποίηση), χωρίς να αποκλείονται και άλλα αίτια.
- **Μεγάλης κλίμακας κατολισθήσεις** στα απόκρημνα πρανή της βορειοδυτικής ακτής, κυρίως στην περιοχή του Αγίου Νικήτα. Οι κατολισθήσεις αυτές απέκοψαν τον παραλιακό δρόμο σε συνολικό μήκος περίπου 2 km, παρά δε την σχετικώς αβαθή μορφή τους περιέκλειαν βραχώδη τμήματα της τάξεως των 100 τόνων και άνω.
- **Δομητικές βλάβες** μερικών *υψηλών κτιρίων*. Παρά την ενγένει καλή δόμηση και θεμελίωση, βάσιμα πιθανολογείται ότι στους υψηλούς ορόφους, στην πόλη της Λευκάδας, αναπτύχθηκαν ισχυρότατες επιταχύνσεις, λόγω διπλού οιονεί-συντονισμού σεισμικής διέγερσης-εδάφους-κτιρίου.

Επιπλέον, μελετάται αρκετά διεξοδικά η φύση του (καταγραφέντος) εδαφικού κραδασμού, και αναλύεται η πιθανή επίδραση του υπεδάφους στην ένταση και την συχνοτική σύνθεση του κραδασμού.

Βάση όλων των αναλυτικών υπολογισμών είναι η σύνθεση κατάλληλων / αντιπροσωπευτικών εδαφικών προφίλ στις θέσεις ενδιαφέροντος. Προς τον σκοπό αυτόν πραγματοποιήθηκε μία ολοκληρωμένη σειρά γεωτρήσεων και επιτόπου δοκιμών, τα αποτελέσματα της οποίας συγκεφαλαιώνονται στην παρούσα Εκθεση.

## 2.

### ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

#### 2.1 Σεισμολογία των Ιονίων Νήσων

Η ευρύτερη περιοχή των νήσων του Κεντρικού Ιονίου Πελάγους χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλή σεισμικότητα, αποτελώντας την πλέον σειсмоγόνο περιοχή της Ελλάδας (βλ. Σχ. 2.1), και κατ'έκταση της Ευρώπης. Ιστορικές αναφορές κατά τους τέσσερις τελευταίους αιώνες κάνουν λόγο για πενήντα περίπου σεισμούς με επιφανειακό μέγεθος μεγαλύτερο του 6. Παράλληλα, μακροσκοπικές πληροφορίες από τα νησιά αυτά συνδέουν μεγάλους ιστορικούς σεισμούς με αλλαγές στην ακτογραμμή των νησιών, παραμορφώσεις του εδάφους, κατολισθήσεις και καταπτώσεις βράχων, υδρογεωλογικές μεταβολές, και φαινόμενα ρευστοποιήσεως. Αξιοσημείωτο είναι το ότι κατά τον εικοστό αιώνα οι 4 νήσοι (Κεφαλλονιά, Λευκάδα, Ιθάκη, Ζάκυνθος) υπέστησαν συνολικώς οκτώ σεισμούς με μέγεθος μεγαλύτερο του 6.5, αριθμόν (πλήθος δηλαδή) πολύ μεγαλύτερο από οποιαδήποτε άλλη περιοχή αντίστοιχης επιφανείας στην Ελλάδα (ίσως και στον κόσμο) (βλ. Πίνακα 2.1).

Η εμφάνιση των σεισμών στην ευρύτερη περιοχή οφείλεται σε διαφορετικούς μηχανισμούς διάρρηξης, όπως δείχνουν οι μηχανισμοί γενέσεως των σεισμών του εικοστού αιώνα, αλλά και υπονοείται από την ενεργό τεκτονική στο χώρο αυτό (Papazachos & Papazachou 1997). Στον ευρύτερο χώρο παρατηρούνται γενικά συμπίεστικές τάσεις, τόσο κατά μήκος του κυρτού μέρους του ελληνικού τόξου που φτάνει μέχρι τη Ζάκυνθο, όσο και παράλληλα προς τις ακτές της πρώην Γιουγκοσλαβίας, Αλβανίας και κεντρικής Δυτικής Ελλάδας, μέχρι την Λευκάδα.

Η σεισμικότητα των Ιονίων νήσων καθορίζεται από ένα κύριο ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης, συνολικού μήκους περί τα 130 km., το οποίο ξεκινά από τα ανοικτά της Ζακύνθου, περνά δυτικά της Κεφαλονιάς και εκτείνεται έως τα βορειοδυτικά παράλια της Λευκάδας. Πρόκειται για ένα μεγάλο ρήγμα

**"Μετασχηματισμού"**, προϊόν της ασυμβατότητας των τεκτονικών μετακινήσεων της καταβυθιζόμενης αφρικανικής πλάκας προς τα βορειοανατολικά και της ηπειρωτικής ώθησης της πλάκας της Απουλίας προς τα βορειοδυτικά. Το Σχ. 2.2 (Louvari & Kyratzi, 1999) δείχνει το ίχνος του σχεδόν κατακορύφου αυτού ρήγματος (κλίση  $\approx 80^\circ$ ) με τους μηχανισμούς γενέσεως μερικών σχετικώς πρόσφατων σεισμικών συμβάντων. Το ρήγμα αυτό ενώνει τις περιοχές ενεργού καταβύθισης και ηπειρωτικής σύγκρουσης (Pavlides et al 2003). Ο ρυθμός ολισθήσεως του είναι περίπου 2.7 mm/yr (Pavlides et al 2004).

### **Πίνακας 2.1**

*Σεισμοί στο Κεντρικό Ιόνιο πέλαγος μέσα τον Εικοστό αιώνα  
με μέγεθος μεγαλύτερο του 6.5*

<b>Μήνας – Έτος</b>	<b>Τοποθεσία</b>	<b>Μέγεθος</b>
Ιανουάριος 1912	Κεφαλονιά & Ζάκυνθος	6.8
Ιανουάριος 1915	Ιθάκη	6.6
Αύγουστος 1915	Ιθάκη	6.7
Απρίλιος 1948	Λευκάδα	6.5
Αύγουστος 1953	Κεφαλονιά & Ζάκυνθος	7.2
Νοέμβριος 1959	Ζάκυνθος	6.8
Μάιος 1976	Ζάκυνθος	6.5
Ιανουάριος 1983	Κεφαλονιά	7

## **2.2 Σεισμική Ιστορία της Λευκάδας**

Η Λευκάδα έχει δεχθεί πολλά ισχυρά και καταστρεπτικά σεισμικά πλήγματα στο παρελθόν. Αν και κατά καιρούς δονείται και από γειτονικούς σεισμούς της

Κεφαλονιάς και της Ζακύνθου, δεν είναι λίγες οι φορές όπου το επίκεντρο ισχυρών σεισμών βρίσκεται κοντά στα δυτικά παράλια του νησιού.

Στον Πίνακα 2.2 παρατίθενται καταστρεπτικοί σεισμοί που έπληξαν την Λευκάδα από τον δέκατο έβδομο αιώνα μέχρι σήμερα. Σημειώνεται ότι κατά τις περιόδους της Ενετοκρατίας και Αγγλοκρατίας, από τον 16<sup>ο</sup> μέχρι τα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα, οι ζημιές από σεισμούς στην νήσο καταγράφονταν με τρόπο αρκετά συστηματικό (τηρουμένων των αναλογιών με την ηπειρωτική Ελλάδα). Κατά μέσον όρο εκδηλώνονται 4 με 5 σεισμοί μεγέθους άνω του 6 ¼ ανά αιώνα, το οποίο αντιστοιχεί σε έναν ισχυρό σεισμό κάθε 20 με 25 έτη. Η εικόνα αυτή επαληθεύεται τα τελευταία εκατό χρόνια, στα οποία εκδηλώθηκαν τέσσερεις ισχυροί σεισμοί (1914, 1948, 1973 και 2003).

Πιο αναλυτικά, το χρονικό διάστημα μεταξύ 1612 και 1869 η Λευκάδα είχε δεχθεί συνολικώς 12 καταστρεπτικά σεισμικά χτυπήματα, όπως συγκεκριμένα λαιώνονται στον Πίνακα 2.2.

Το 1869 ισχυρός σεισμός μεγέθους 6.6 έπληξε την νήσο μετατρέποντας την πόλη σε σωρό ερειπίων. Για τα επόμενα σαρανταπέντε χρόνια (1869 έως 1914) η Λευκάδα δέχεται συχνά σεισμικά πλήγματα, χωρίς όμως αυτά να είναι ιδιαίτερος καταστρεπτικά. Όμως το 1914 σημειώθηκε ισχυρός σεισμός,  $M_s$  6.3, ο οποίος προξένησε σημαντικές βλάβες κυρίως στο δυτικό τμήμα της νήσου. Εκτός από βλάβες σε πολλά σπίτια και εκκλησίες, εκδηλώθηκαν κατολισθήσεις και καταπτώσεις βράχων. Το επόμενο χρόνο, 1915, σημαντικές βλάβες σημειώθηκαν σε πολλούς οικισμούς της Λευκάδας λόγω ισχυρού σεισμού στη γειτονική Ιθάκη μεγέθους 6.7.

Για τα επόμενα 45 περίπου έτη ακολούθησε μία περίοδος ύφεσης της σεισμικής δραστηριότητας, αλλά τον Απρίλιο του 1948 ισχυρός σεισμός έπληξε το νοτιοδυτικό τμήμα της νήσου. Το μέγεθός του ήταν 6.5 προξένησε δε κατολισθήσεις, καταπτώσεις βράχων και σημαντικότερες βλάβες σε σπίτια χωριών στην νοτιοδυτική Λευκάδα. Απεναντίας, στην πόλη της Λευκάδας και στα ανατολικά χωριά οι ζημιές ήταν περιορισμένες. Τον Ιούνιο όμως του ίδιου έτους νέος σεισμός  $M_s$  6.4 κατέστρεψε το βορειοδυτικό τμήμα και κυρίως την πόλη της

Λευκάδας, όπου εκτός από καταρρεύσεις κτιρίων παρατηρήθηκαν σοβαρές βλάβες στην προκυμαία της πόλης. Σημειώνεται ότι στην παραλία του χωριού Αγ. Νικήτας συνέβη ρευστοποίηση (κρατήρας βάθους 1 m και διαμέτρου 3 m) όπως και στον σεισμό του 1914.

Την επόμενη πεντηκονταετία η Λευκάδα δονείτο διαρκώς από σεισμούς στις γειτονικές περιοχές με κορυφαίον τον μεγάλο σεισμό του 1953,  $M_s$  7.2, ο οποίος κατέστρεψε σχεδόν ολοκληρωτικά την Κεφαλονιά και την Ζάκυνθο, χωρίς όμως να προκαλέσει και τόσο μεγάλες καταστροφές στην μακρύτερα ευρισκόμενη Λευκάδα.

Ο επόμενος σημαντικός σεισμός στην Λευκάδα σημειώθηκε το 1973. Μάλιστα δε, με τον σεισμό αυτόν υπήρξε και η πρώτη καταγραφή επιταχυνσιογραφήματος στον Ελληνικό χώρο. Ο σεισμός είχε  $M_s$  5.8 με επίκεντρο 15 km βορειοδυτικά της πόλης. Η κορυφαία εδαφική επιτάχυνση ήταν 0.54 g (η μεγαλύτερη που έχει καταγραφεί έως σήμερα στην Ελλάδα). Επίσης ισχυρή ήταν και η μέγιστη ταχύτητα (60 cm/s), αλλά παρόλα αυτά, οι ζημιές ήταν περιορισμένες. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός της ανομοιόμορφης κατανομής των ζημιών : αυξημένες παρουσιάστηκαν οι βλάβες μόνον στο βόρειο τμήμα της πόλης.

Κατόπιν επικράτησε σχετική σεισμική ηρεμία για μεγάλο χρονικό διάστημα, μέχρι τον σεισμό της 14 Αυγούστου 2003, αν εξαιρέσουμε έναν σεισμό  $M_s$  5.8 το 1994, ο οποίος προκάλεσε μεμονωμένες καταπτώσεις βράχων και περιορισμένες βλάβες σε παλιά κτίρια.

Η υψηλή σεισμικότητα της νήσου αποτυπώνεται και στον ελληνικό αντισεισμικό κανονισμό (Ε.Α.Κ., 2000), ο οποίος κατατάσσει την περιοχή στην ζώνη ύψιστης σεισμικής επικινδυνότητας (ζώνη IV), η οποία αντιστοιχεί σε βασική σεισμική επιτάχυνση σχεδιασμού 0.36 g, όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Σημειώνεται ότι και ο νέος χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας ο οποίος υιοθετήθηκε προσφάτως (2003) προτείνει την ίδια υψηλή βασική επιτάχυνση.

Ως συμπέρασμα, ένα ιδιαιτέρως επίφοβο χαρακτηριστικό των σεισμών της Λευκάδας το οποίο προκύπτει από τον Πίνακα 2.2 και την όλη πρόσφατη σεισμική

ιστορία της νήσου είναι το εξής : Σεισμοί μεγέθους  $M_s \approx 6.5$  λαμβάνουν χώραν στο ρήγμα μετασχηματισμού (δυτικά της Λευκάδας) συνήθως κατά ζεύγη, σε χρονική απόσταση μεταξύ τους η οποία κυμαίνεται από λίγους μήνες έως λίγα έτη. Τα ενεργοποιούμενα διαδοχικώς κάθε φορά τμήματα του ρήγματος έχουν μήκος περίπου 20 km έκαστον, βρίσκονται δε εναλλάξ τη μία φορά δίπλα στο βόρειο και την άλλη δίπλα στο νότιο τμήμα της νήσου. Όταν μια διάρρηξη (μετά από περίοδο δεκαετιών σεισμικής "ηρεμίας") συμβεί στο βόρειο τμήμα του ρήγματος (όπως στο συγκεκριμένο υπό-μελέτην επεισόδιο), ακολουθεί η επόμενη διάρρηξη στο νότιο, και αντιστρόφως.

**Πίνακας 2.2: Οι καταστρεπτικοί σεισμοί της Λευκάδας : 1600 – 2003**

(Πηγές: Ροντογιάννης 1995, Σπυρόπουλος 1997, Παπαζάχος & Παπαζάχου 1989)

Θέση Έτος	Μέγεθος	Μέγιστη [Μερκάλια] Ένταση	Ζημιές, Απώλειες
Λευκάδα 2003 (14 Αυγούστου)	6.4	–	Ρευστοποιήσεις, βλάβες στα λιμάνια, μεγάλης εκτάσεως κατολισθήσεις
Λευκάδα 1973	5.8	VII–VIII	Σημαντικές βλάβες σε δευτερεύοντα στοιχεία κτιρίων
Λευκάδα 1948 (Απρίλιος)	6.5	IX <sup>–</sup>	11 νεκροί, 244 καταρρεύσεις, σοβαρές βλάβες (κυρίως στο νότιο τμήμα της νήσου). Τσουνάμι.
Λευκάδα 1948 (Ιούνιος)	6.4	IX <sup>–</sup>	7 νεκροί, 1200 καταρρεύσεις (κυρίως στο βόρειο τμήμα της νήσου καθώς και στην Πρέβεζα). Ρωγμές, μετακινήσεις, βυθίσεις στην προκυμαία σε μήκος 150 m. Κατολισθήσεις, Ρευστοποιήσεις.
Λευκάδα 1914	6.3	IX	16 νεκροί, καταστροφή 18 χωριών, βύθιση λιμενοβραχίονα Νυδρίου, κατολισθήσεις, καθίζηση στο Καλαμίτσι
Λευκάδα 1869	6.4	IX	15 νεκροί, πολλές καταρρεύσεις στην πόλη και στους Τσουκαλάδες
Λευκάδα 1825	6.5	IX	58 νεκροί, καταστροφή της πόλης και πολλών χωριών
Λευκάδα 1820	6.4	VIII	Μεγάλες ζημιές στην πόλη, καθίζηση στην κεντρική πλατεία.
Λευκάδα 1815	6.3	VIII	20 νεκροί, καταστροφές σε όλο το νησί
Λευκάδα 1783	6.7	IX	10 νεκροί, 862 καταρρεύσεις, καταστροφή του χωριού Αθάνι, μεγάλες ζημιές σε 10 χωριά
Λευκάδα 1769	6.7	IX <sup>–</sup>	7 νεκροί, 497 καταρρεύσεις σε σύνολο 826 σπιτιών στην πόλη
Λευκάδα 1723	6.7	VIII	Σημαντικές ζημιές σε όλο το νησί, ιδιαίτερα στην πόλη
Λευκάδα 1722	6.4	VIII	Πολλές καταρρεύσεις στα : Αθάνι, Δαμιλιάνι, Άγιο Πέτρο, Αγία Μαρίνα
Λευκάδα 1704	6.3	IX	34 νεκροί, άμπολλες καταρρεύσεις στην πόλη και στο Φρυνί
Λευκάδα 1630	6.6	IX <sup>–</sup>	Καταρρεύσεις στην πόλη και στην Κατούνα, κατολισθήσεις, ρωγμές στο έδαφος
Λευκάδα 1625	6.6	VIII <sup>1</sup>	Πολλές καταρρεύσεις πέτρινων σπιτιών στην πόλη
Λευκάδα 1613	6.4	VIII	Καταστροφές σπιτιών, μεγάρων και μιναρέδων στη πόλη. Καταρρεύσεις σε όλο το νησί
Λευκάδα 1612	6.5	VIII	Ζημιές σε τέσσερις οικισμούς

## **2.3 Ο Σεισμός της 14-8-03 και οι Καταγραφές στην Λευκάδα και στην Πρέβεζα**

Ο οριζόντιας διάτμησης ("strike slip") σεισμός του Αυγούστου είχε μέγεθος 6.4. Η διάρρηξη ξεκίνησε από το βόρειο άκρο (κάτα Louvari et al 1999) του ρήγματος Μετασχηματισμού, βορειοδυτικά της πόλης της Λευκάδας (Σχ. 2.3). Η κατεύθυνση διαδόσεως της διάρρηξης ήταν επομένως προς νότον. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την πολύ μικρή απόσταση του ρήγματος από τα δυτικά παράλια της νήσου εξηγούν ενδεχομένως και την μεγάλη έκταση των κατολισθήσεων / καταπτώσεων στις εκεί απότομες κλιτύες (Πευκούλια, Αγ. Νικήτας, κλπ.)

Μόνον ένας επιταχυνσιογράφος κατέγραψε τον εδαφικό κραδασμό στην νήσο : ο επιταχυνσιογράφος του ΙΤΣΑΚ που ήταν τοποθετημένος στο ημι-υπόγειο του Νοσοκομείου Λευκάδας (βλ. Χάρτη Σχήματος 2.4). Οι τρεις хроνοϊστορίες της καταγραφής και τα αντίστοιχα φάσματα τους δίδονται στο Σχ. 2.5.

Πρόκειται αναμφισβήτητα για ένα από τα πλέον θεαματικά επιταχυνσιογραφήματα του Ελλαδικού χώρου, ιδίως ως προς τον μεγάλον αριθμό ισχυρών κύκλων (της τάξεως του 10) και την σημαντική επιτάχυνση του 0.42 g. Λεπτομερέστερη ανάλυσή του δίδεται στο επόμενο κεφάλαιο.

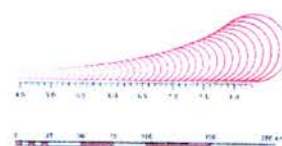
Ατυχώς δεν υπήρξε καταγραφή στον επιταχυνσιογράφο του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου ο οποίος ήταν εγκατεστημένος στο (γειτονικό του νοσοκομείου) κτίριο του ΟΤΕ. Υπενθυμίζεται ότι στην θέση αυτή είχε καταγραφεί το 1973 το πρώτο επιταχυνσιογράφημα στην Ελλάδα, το οποίο αναλύεται στο επόμενο κεφάλαιο.

Αντιθέτως, στην Πρέβεζα, 20 km βορειοανατολικά του ενεργοποιηθέντος ρήγματος υπήρξαν δύο καταγραφές.

- στο κτίριο ΟΤΕ (του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου)
- στο Δημαρχείο (του ΙΤΣΑΚ)



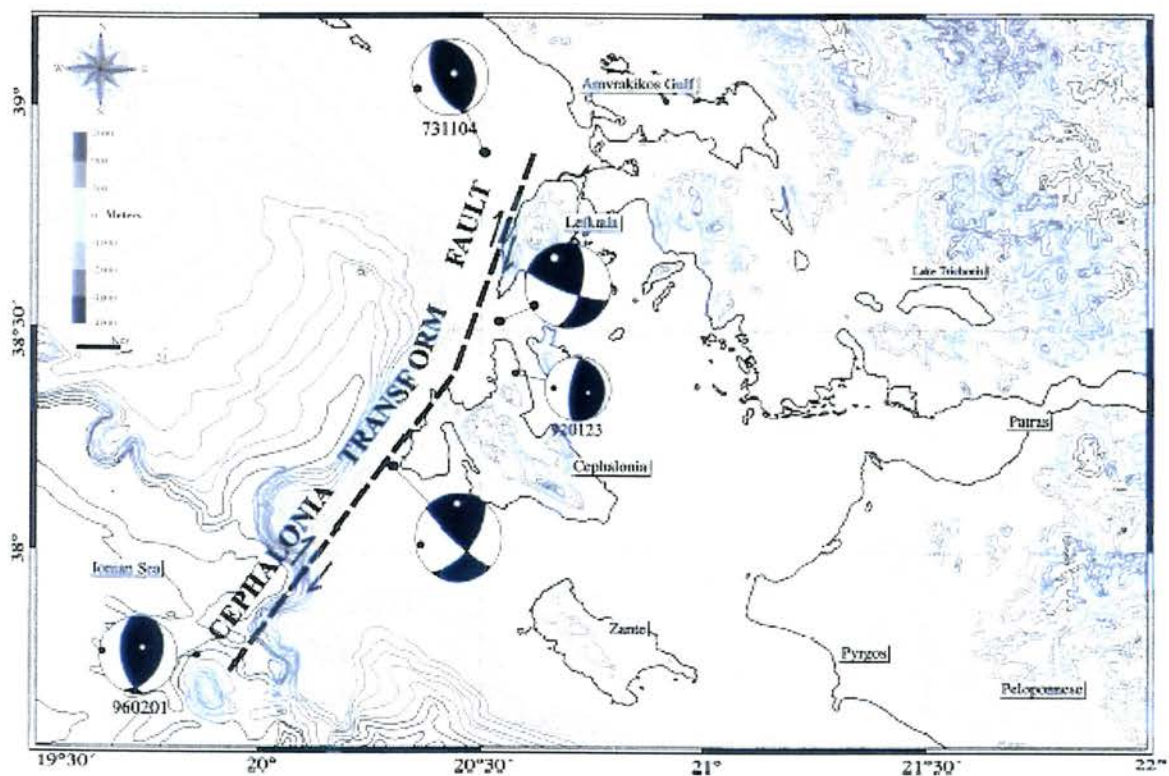
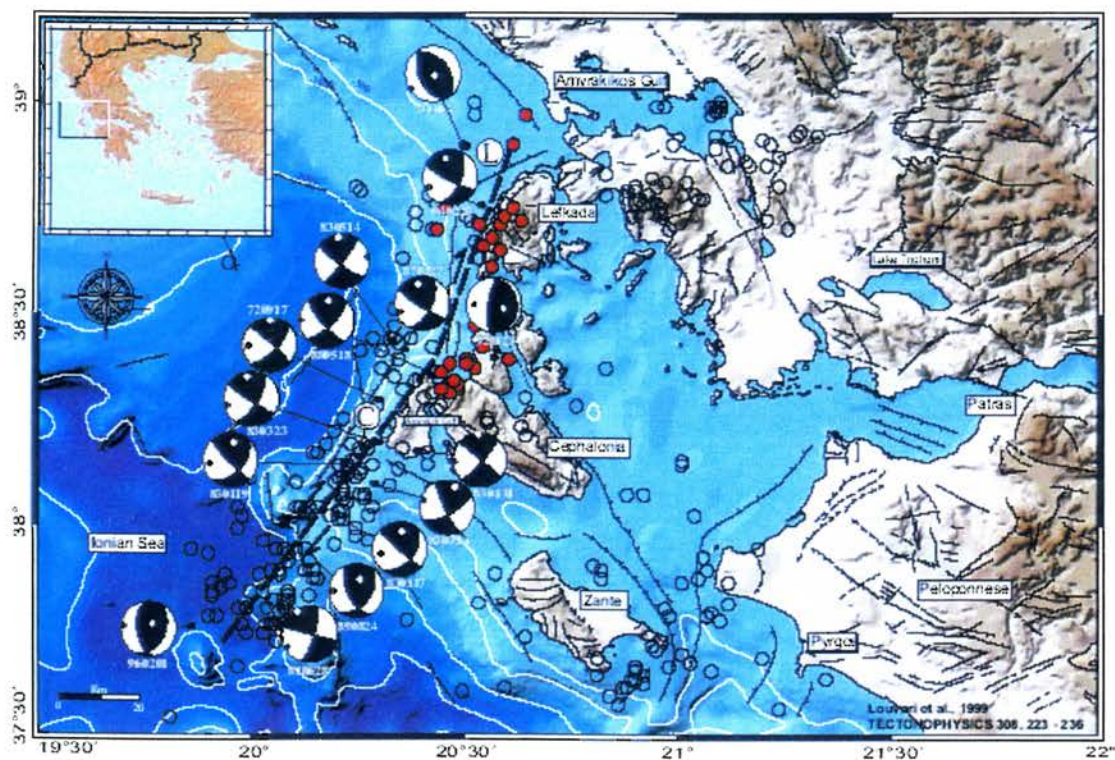
Οι δύο αυτές καταγραφές είχαν κορυφαίες τιμές της επιτάχυνσης 0.11 g και 0.16 g, αντιστοίχως, δίδονται δε στα Σχήματα 2.6 και 2.7, μαζί με τα αντίστοιχα φάσματα αποκρίσεως. Πρόκειται ασφαλώς για σημαντικά εξασθενημένους κραδασμούς σε σύγκριση με αυτόν της Λευκάδας, γεγονός που αντανακλάται και στις ασήμαντες βλάβες στην πόλη της Πρέβεζας.



**Σχήμα 2.1**

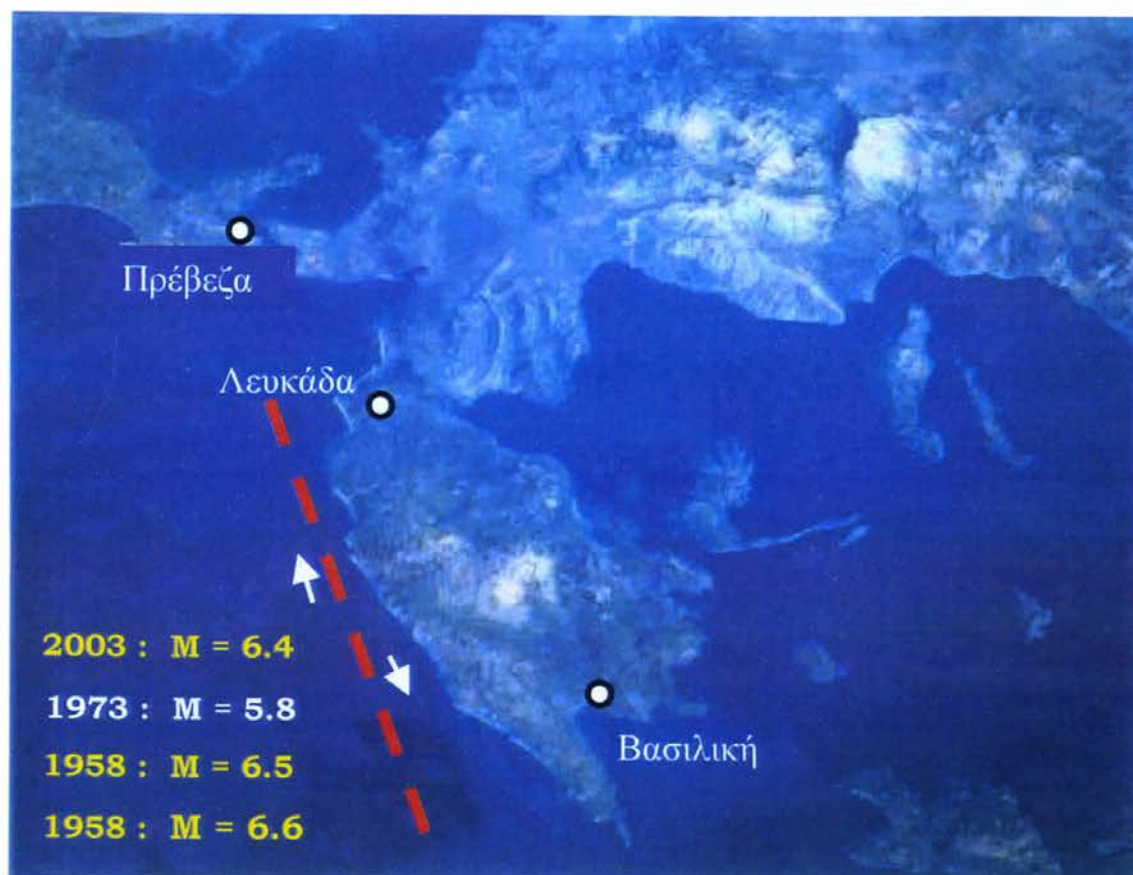
Σεισμικότητα της Ελλάδας (Papazachos et al. 1997)





Σχήμα 2.2

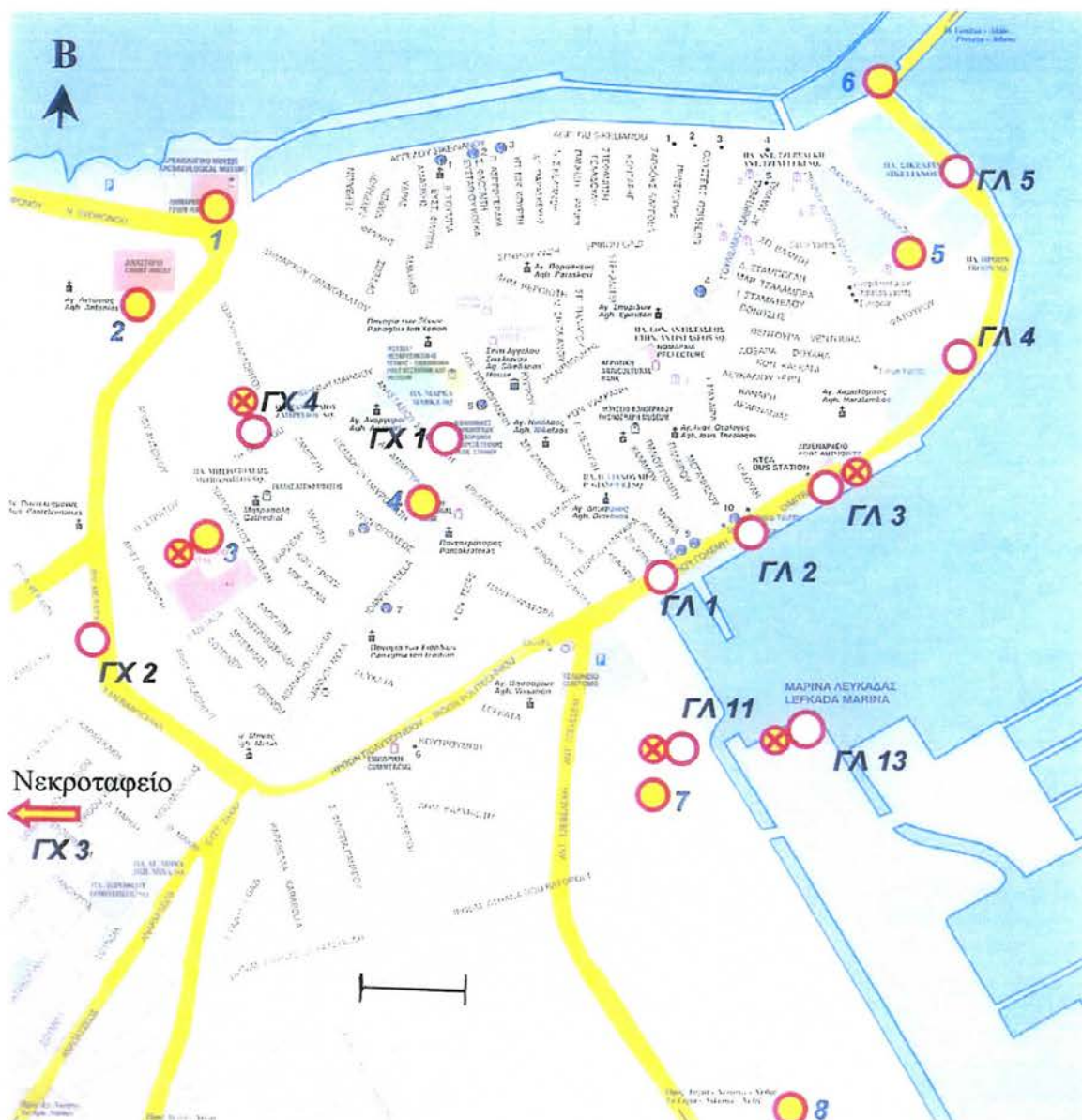
Το μεγάλο ρήγμα του Ιονίου και οι μηχανισμοί γενέσεως μερικών σημαντικών σεισμών προ του 1999 (Louvari, Kiratzi, Papazachos 1999).



**Σχήμα 2.3**

Η Λευκάδα και η διάρρηξη του σεισμού της 14/8/2004.





#### Παλιές Γεωτρήσεις

- 1: Δημαρχείο – Πνευματικό Κέντρο
- 2: Δικαστικό Μέγαρο
- 3: Νοσοκομείο
- 4: Εθνική Τράπεζα

- 5: Διάυλος
- 6: Ξενοδοχείο "Ionian Star"
- 7: Διοικητήριο
- 8: ΚΤΕΟ

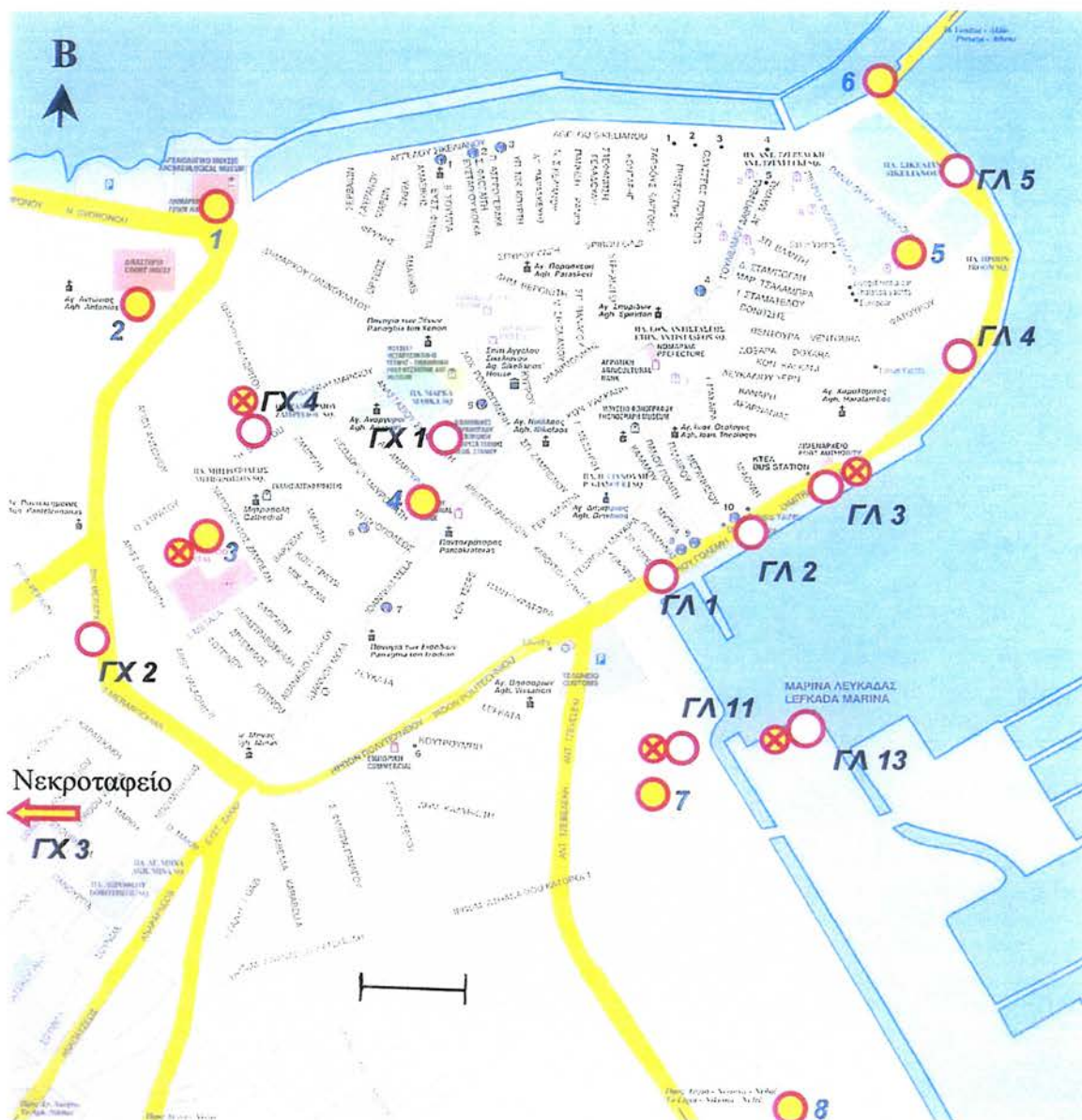
#### Νέες Γεωτρήσεις

- ΓΧ1: Βιβλιοθήκη
- ΓΧ2: 8<sup>η</sup> Μεραρχίας και Ζαμπέλη
- ΓΧ3: Νεκροταφείο
- ΓΧ4: ΟΤΕ

- ΓΛ1 – ΓΛ5: Λιμάνι
- ΓΛ11: Είσοδος Μαρίνας

#### Θέσεις Γεωφυσικών Τομογραφιών Downhole και Crosshole

Σχήμα 2.4 Χάρτης της Λευκάδας και θέσεις γεωτρήσεων



#### Παλιές Γεωτρήσεις

- 1: Δημαρχείο – Πνευματικό Κέντρο
- 2: Δικαστικό Μέγαρο
- 3: Νοσοκομείο
- 4: Εθνική Τράπεζα

- 5: Διάυλος
- 6: Ξενοδοχείο "Ionian Star"
- 7: Διοικητήριο
- 8: ΚΤΕΟ

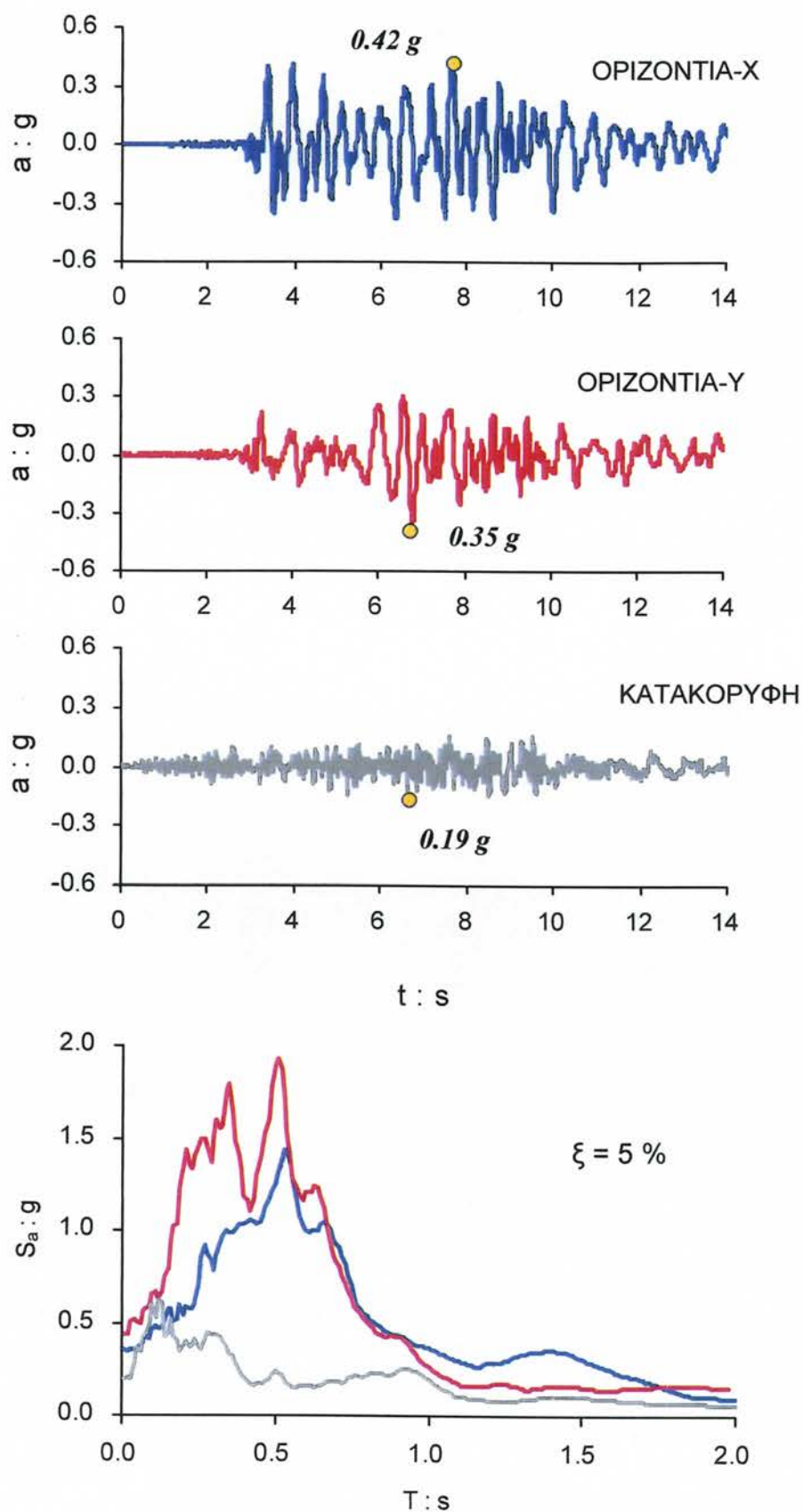
#### Νέες Γεωτρήσεις

- ΓΧ1: Βιβλιοθήκη
- ΓΧ2: 8<sup>η</sup> Μεραρχίας και Ζαμπέλη
- ΓΧ3: Νεκροταφείο
- ΓΧ4: ΟΤΕ

- ΓΛ1 – ΓΛ5: Λιμάνι
- ΓΛ11: Είσοδος Μαρίνας

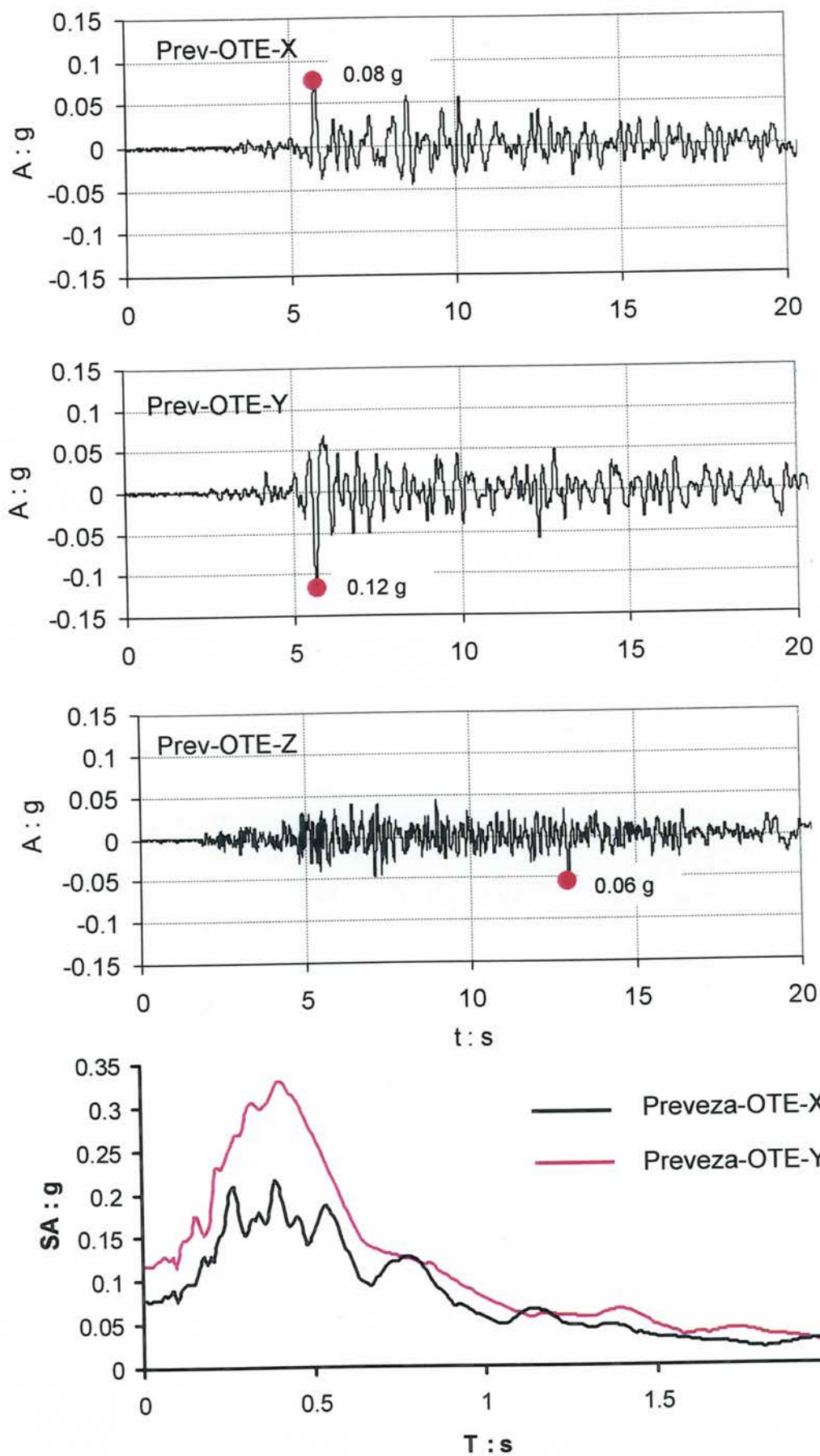
#### Θέσεις Γεωφυσικών Τομογραφιών Downhole και Crosshole

Σχήμα 2.4 Χάρτης της Λευκάδας και θέσεις γεωτρήσεων



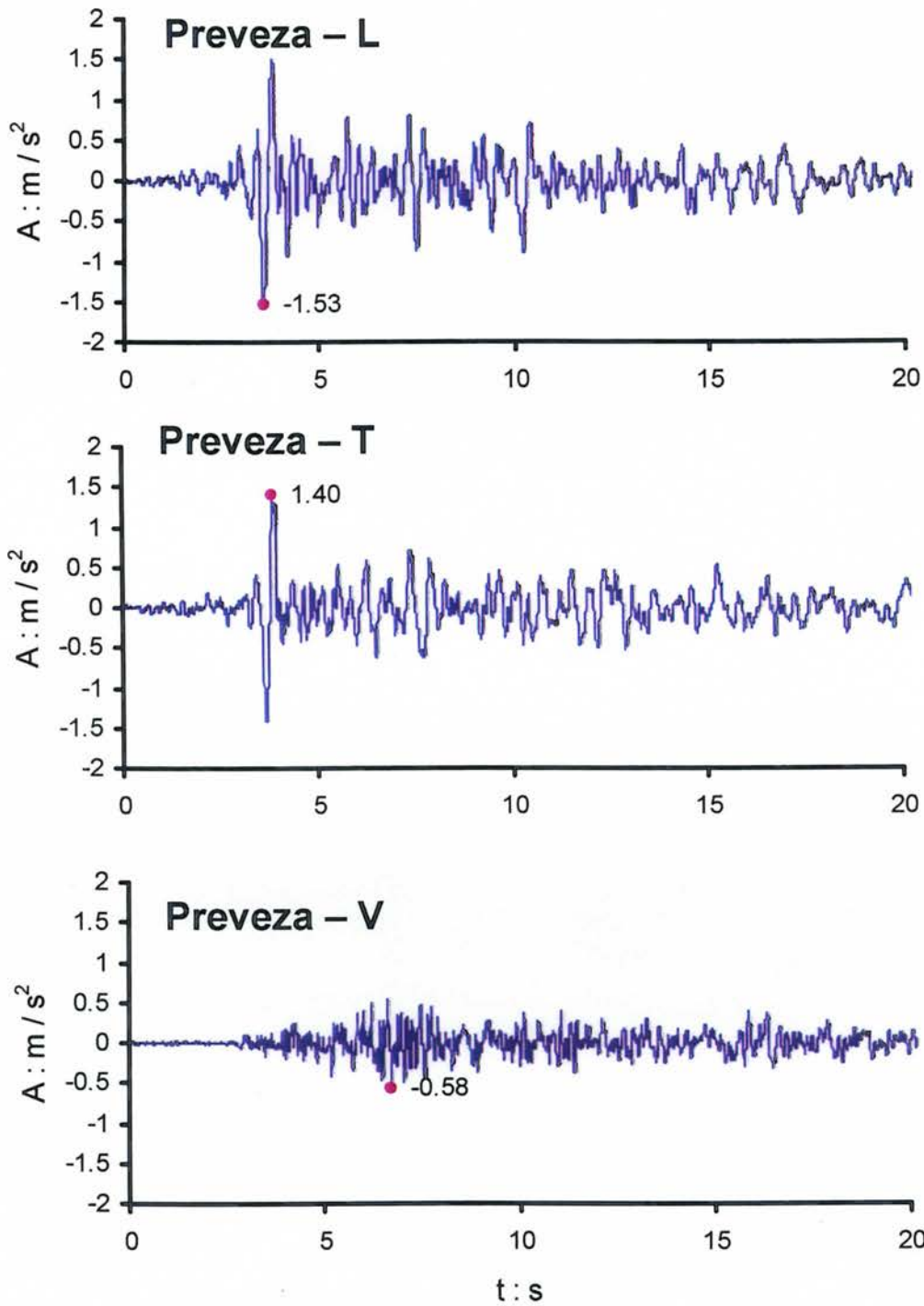
**Σχήμα 2.5** Οι χρονοϊστορίες των τριών συνιστωσών της καταγραφής του ΟΤΕ στην πόλη της Λευκάδας κατά τον σεισμό της 14-8-03 και τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης για  $\xi = 5\%$





**Σχήμα 2.6:** Οι τρεις συνιστώσες της καταγραφής στον ΟΤΕ Πρέβεζας και τα ελαστικά φάσματα αποκρίσεως που τους αντιστοιχούν





Σχήμα 2.7: Οι τρεις συνιστώσες της καταγραφής στην Δημαρχία Πρέβεζας

### 3.

#### ΑΝΑΛΥΣΗ του ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΟΣ της ΛΕΥΚΑΔΑΣ

##### 3.1 Καταγραφή και Ελαστικά Φάσματα

Οι τρεις συνιστώσες του επιταχυνσιογραφήματος με τα αντίστοιχα φάσματα αποκρίσεως απεικονίζονται στο Σχ. 3.1. Είναι προφανή τα ακόλουθα :

- η εδαφική δόνηση είναι ισχυροτάτη, με υψηλές τιμές οριζόντιας επιτάχυνσης (0.42 g και 0.35 g) στις δύο διευθύνσεις
- ο αριθμός των σημαντικών κύκλων (περί τις 8 κορυφές με πλάτος μεγαλύτερο του 0.30 g !) είναι πρωτοφανής στις καταγραφές του ελλαδικού χώρου
- η δεσπόζουσα περίοδος του κραδασμού κυμαίνεται περί τα 0.55 sec, ενώ το εύρος σημαντικών περιόδων κυμαίνεται από 0.30 – 0.70 sec. Οι τιμές αυτές είναι από τις δυσμενέστερες που έχουν καταγραφεί στον ελληνικό χώρο (βλ. Γκαζέτας 2002)
- οι φασματικές επιταχύνσεις έχουν μέγιστες τιμές (στο ανωτέρω εύρος περιόδων) που ξεπερνούν τα 1.5 g, αντιστοιχούν δε σέ μέγιστη ενεργό επιτάχυνση A (κατά ΕΑΚ),

$$A = \int S_a(T = 0.2 - 0.6 \text{ sec}) dT / 2.5 \approx 0.56 \text{ g} ,$$

η ισχυρότερη ενεργός επιτάχυνση όλων των καταγραφών του Ελλαδικού χώρου.

Εξι άλλοι "δείκτες βλαπτικότητας" ενός επιταχυνσιογραφήματος :

- Η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV)

- Η μέγιστη εδαφική μετατόπιση (PGD)
- Η ένταση κατά Housner ( $I_H$ ), όπου

$$I_H = \int_{0.2}^{2.5} S V \, dT$$

- Η ένταση κατά Arias ( $I_A$ ), όπου

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_d} \ddot{u}_g^2 \, dt$$

- Η ενεργός διάρκεια ( $D_b$ )
- Η παράμετρος καταστρεπτικότητας ( $D_p$ ), όπου

$$D_p = \frac{I_A}{2 v_o}$$

και  $v_o$  = χαρακτηριστική συχνότητα,

έχουν υπολογισθεί για την καταγραφή της Λευκάδας και συγκρίνονται στον Πίνακα 3.1 με τις τιμές των αντίστοιχων δεικτών άλλων καταγραφών στην Ελλάδα.

**Πίνακας 3.1:** Δείκτες Εντάσεως / Βλαπτικότητας μερικών σημαντικών επιταχυνσιογραφημάτων του Ελληνικού Χώρου: μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA), μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV), μέγιστη εδαφική μετατόπιση (PGD), ένταση κατά Housner ( $I_H$ ), σημαίνουσα διάρκεια ( $D_B$ ), "παράμετρος καταστρεπτικότητας" κατά Trifunac ( $D_p$ ).

Σταθμός	Σεισμός / Ημέρομηνία	Μέγεθος ( $M_s$ )	Απόσταση					PGA (g)	PGV (cm/s)	PGD (cm)	$I_H$ (cm)	$D_B$ (s)	$D_p$ (cm/s <sup>2</sup> )
			Επικεντρική Απόσταση (km)	Από Εδαφικές Συνθήκες	Προσανατολισμός Αξόνων	Από Ρήγμα (km)	Εδαφικός Τύπος						
Λευκάδα κτήριο ΟΤΕ	Λευκάδας 11/04/1973	5.7	15	11	L N-S T E-W		Μέτριο Μαλακό Έδαφος	0.53	57	12	168	8	5.3
								0.26	26	5	77	8	1.7
Καλαμάτα κτήριο ΟΤΕ	Καλαμάτας 09/13/1986	6.2	10	5	L N80E T N10W		Μέτριος Σκληρό Έδαφος	0.24	32	7	100	6	1.4
								0.27	24	5	89	8	2.0
Αίγιον κτήριο ΟΤΕ	Αίγιου 06/15/1995	6.2	18	4	L N-S T E-W		Μέτριος Σκληρό Έδαφος	0.54	51	10	111	5	2.3
								0.49	40	7	116	6	1.2
Μοναστηράκι	Πάρνηθας 07/09/1999	5.9	17	13	L N20 T N290		Μέτριος Σκληρό Έδαφος	0.23	15	4	0.22	3	0.4
								0.50	15	2	0.75	6	0.6
Σετόλια σταθμός ΜΕΤΡΟ	Πάρνηθας 07/09/1999	5.9	14	9	L N320 T N50		Μέτριο Σκληρό Έδαφος	0.32	22	3	0.58	5	0.8
								0.31	19	2	0.66	6	0.9
Λευκάδα Νοσοκομείο	Λευκάδας 14/08/2003	6.4	14	14	L N65E T N335W		Μέτριο Μαλακό Έδαφος	0.34	28	-	129	15	5.1
								0.43	35	-	126	10	1.2

Οι ακόλουθες πρόσθετες παρατηρήσεις έχουν ενδιαφέρον από την συγκριτική μελέτη του Πίνακα :

- Η μέγιστη ένταση κατά Housner, 129 cm, είναι εξαιρετικά υψηλή –ενδεικτικό μεγάλης φασματικής ταχύτητας , έχει δε ξεπεραστεί μόνον στην καταγραφή της Λευκάδας 1973.
- Η μέγιστη ένταση κατά Arias, 4.1 m/s, είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ένταση όλων των καταγραφών στον Ελλαδικό χώρο — ενδεικτικό κυρίως της μεγάλης διάρκειας του ισχυρού κραδασμού.
- Τα ανωτέρω επαληθεύονται και από τη σχετικά μεγάλη τιμή της ενεργού διάρκειας, 15 sec. Αξιοσημείωτο είναι ότι η ενεργός διάρκεια είναι ελαφρώς μεγαλύτερη στη διεύθυνση της μικρότερης επιτάχυνσης (N65E).
- Η “παράμετρος καταστρεπτικότητας”,  $D_p$ , δηλαδή η ένταση κατά Housner διηρημένη με το τετράγωνο της μέσης συχνότητας (Mylonakis et al 2003), είναι σχεδόν ίση με την μέγιστη που έχει ποτέ καταγραφεί στην Ελλάδα ( $5.3 \text{ cm/s}^2$ ). Έκπληξη μάλιστα αποτελεί η σχετικώς μικρή αντίστοιχη τιμή του επιταχυνσιογραφήματος Αιγίου 1995, παρότι το τελευταίο είναι αρκετά "καταστρεπτικό" λόγω της παρουσίας ισχυρού παλμού εγγύς πεδίου (Γκαζέτας et al 1995)

Αναμφισβήτητα πρόκειται για έναν επικίνδυνο σεισμικό κραδασμό. Οι χρονοϊστορίες και τα φάσματα του κραδασμού συγκρίνονται στα Σχήματα 3.2 και 3.3 με τα αντίστοιχα γραφήματα των δύο άλλων πιο ισχυρών κραδασμών του Ελλαδικού χώρου : Αιγίου 1995 και Λευκάδας 1973, καθώς και των καταγραφών Μοναστηρακίου και Σεπολίων, του πρόσφατου σεισμού της Πάρνηθας 1999. Οι κραδασμοί 1995 και 1973 παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα μεταξύ τους, αλλά είναι τελείως διαφορετικοί από τον κραδασμό 2003 : είναι δύο "παλμικοί" κραδασμοί με ουσιαστικώς έναν μόνον σημαντικό μακροπερίοδο παλμό μεγάλης επιτάχυνσης ( $\approx 0.53 \text{ g}$ ), αντιστοίχως μεγάλης ταχύτητας ( $\approx 0.54 \text{ m/s}$ ), και μεγάλου βήματος ταχύτητας ( $\approx 0.75 \text{ m/s}$  το 1995,  $\approx 1.0 \text{ m/s}$  το 1973).

Από την σύγκριση των (ελαστικών) φασμάτων αποκρίσεως γίνεται φανερό ότι η πρόσφατη καταγραφή (2003) υπερέχει της μεν καταγραφής Αιγίου σε όλες σχεδόν τις περιόδους, της δε καταγραφής Λευκάδας (1973) μόνον στο εύρος  $0.20 < T < 0.65 \text{ sec}$ .

Μεγάλο ενδιαφέρον έχει και ο υπολογισμός του επιταχυνσιογραφήματος σε διάφορες διευθύνσεις. Με περιστροφή των δύο συνιστωσών της καταγραφής και σύνθεση, προκύπτει ότι η "μέγιστη" συνιστώσα του επιταχυνσιογραφήματος είναι σε πρώτη προσέγγιση η κάθετη προς το ρήγμα !. Τούτο δεν αποτελεί έκπληξη για διαρρήξεις οριζόντιας διάτμησης (strike slip), στην κατεύθυνση διαρρήξεως, και εγγύς του ρήματος.

Το Σχήμα 3.4 συγκρίνει τα φάσματα αποκρίσεως (SA, SV, SD) της κάθετης και της παράλληλης προς το ρήγμα συνιστώσας. Δίδονται επίσης και τα φάσματα συνισταμένης ("περιβάλλουσα" φασματικών τιμών για όλες τις οριζόντιες διευθύνσεις).

Παρατηρούμε ότι :

- Η φασματική επιτάχυνση της κάθετης συνιστώσας ξεπερνά το εντυπωσιακό 2.2 g στα 0.53 sec, απομειώνεται δε σημαντικά μόνον μετά το 1sec. Η υψηλή τιμή στην ανωτέρω περίοδο οφείλεται καί σε σεισμολογικούς παράγοντες (μηχανισμός γένεσης, κατευθυντικότητα), καί σε εδαφική ενίσχυση (λόγω συντονισμού) όπως θα γίνει φανερό από τις αναλύσεις του μεθεπομένου κεφαλαίου.
- Η μέγιστη φασματική ταχύτητα, 1.8m/s στα 0.5 sec, είναι επίσης εντυπωσιακή και αποτελεί έμμεσο δείκτη για τις (σημαντικές) ολισθήσεις στερεών σωμάτων που παρατηρήθηκαν στην πόλη της Λευκάδας. (Ακριβέστερες μη-γραμμικές αναλύσεις παρουσιάζονται παρακάτω.)
- Αξιοσημείωτο είναι ότι γιά περιόδους μεγαλύτερες των 0.3s, οι μέγιστες φασματικές τιμές παρατηρούνται στην κάθετη διεύθυνση προς το ρήγμα (N76W). Σε μικρότερες περιόδους, μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στη διεύθυνση παράλληλα στο ρήγμα (N14E). Δεδομένου του μηχανισμού

διάρρηξης (strike slip) και της μικρής απόστασης από το ρήγμα ( $\approx 12$  km), τούτο πιθανώς να οφείλεται σε *κατευθυντικότητα* της πηγής. Προϋπόθεση για την ύπαρξη κατευθυντικότητας είναι το επίκεντρο της απο-βορρά-προς-νότο διάρρηξης να βρίσκεται αρκετά χιλιόμετρα βόρεια της πόλης, κάτι που δεν έχει ακόμα επαληθευθεί. Σημειώνεται εδώ ότι ο προσδιορισμός του επικέντρου είναι δυσχερής, καθώς τα διαθέσιμα σεισμολογικά όργανα δεν περιβάλλουν το ρήγμα.

Επίσης ενδιαφέρον έχει και το *Πολικό Φασματικό Διάγραμμα* του Σχήματος 3.5, το οποίο δίδει τις φασματικές επιταχύνσεις δύο χαρακτηριστικών περιόδων, ως προς τον προσανατολισμό της κάθε συνιστώσας του κραδασμού (βλ. Mylonakis et al 2003). Στο Σχήμα αυτό απεικονίζονται και οι διευθύνσεις του ρήγματος και της κάθετης προς αυτό. Είναι ενδιαφέρον ότι:

- στην περίοδο των 0.65 sec η φασματική τιμή στη κάθετη προς το ρήγμα διεύθυνση είναι πολύ μεγαλύτερη (3 φορές) από την παράλληλη στο ρήγμα, ενώ
- στην περίοδο των 0.2 sec, η τιμή στη διεύθυνση κάθετα στο ρήγμα είναι κατά 30% μικρότερη της τιμής παράλληλα στο ρήγμα,
- οι προσανατολισμοί των *απολύτων μεγίστων* φασματικών τιμών στις ανωτέρω περιόδους (βλ. κουκίδες στο σχήμα) είναι επίσης αντιστοίχως κοντά στην κάθετη (0.65 sec) και στην παράλληλη (0.2 sec) διεύθυνση ως προς το ρήγμα.

### **3.2 Ανελαστικά Φάσματα**

Χρήσιμη πληροφορία για την απόκριση ανελαστικών απλών κατασκευών παρέχεται από φάσματα ανελαστικής απόκρισης τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 3.6 υπό την μορφή παραμετρικών συναρτήσεων αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας προς ιδιοπερίοδο. Οι σχετικές παράμετροι στο διάγραμμα είναι:

- Σεισμικός συντελεστής διαρροής:  $\varepsilon_y = F_y / W$

- Συντελεστής μετελαστικής δυσκαμψίας:  $\alpha = K_{py} / K$

όπου  $F_y$  και  $W$  αντιστοιχούν στην οριζόντια δύναμη διαρροής και το βάρος της κατασκευής, αντίστοιχα.  $K$  και  $K_{py}$  είναι, αντίστοιχα η ελαστική και μετελαστική δυσκαμψία της κατασκευής.

Τα ανωτέρω φάσματα έχουν υπολογισθεί για τιμές του  $\varepsilon_y$  μεταξύ 0.1 και 0.5. Τό κάτω όριο αντιστοιχεί σε αδρές γραμμές σε κατασκευές σχεδιασμένες έναντι μικρής έντασης σεισμικού κραδασμού, ενώ το άνω όριο για κατασκευές σχεδιασμένες πάνω-κάτω με τις διατάξεις του ΕΑΚ για την περιοχή Λευκάδας. Στο ίδιο σχήμα παρατίθενται για σύγκριση τα αντίστοιχα φάσματα για τις δύο ισχυρότερες καταγραφές του σεισμού της Αθήνας. Παρατηρείται ότι :

- Η απαίτηση πλαστιμότητας είναι μεγαλύτερη στην διεύθυνση κάθετα στο ρήγμα, απ'ότι παράλληλα στο ρήγμα. Αυτό συμφωνεί με τις προηγούμενες παρατηρήσεις για ελαστικά φάσματα.
- Η απαίτηση πλαστιμότητας είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν των καταγραφών του σεισμού της Αθήνας.

Ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον έχει η σύγκριση των φασμάτων της "επιβαλλόμενης" πλαστιμότητας απ' την σεισμική διέγερση, σε ελαστοπλαστικούς ταλαντωτές με "ενεργό" συντελεστή διατμητικής αντίστασης :

$$\varepsilon^* = F_{max} / mg$$

ανάλογου του σεισμικού συντελεστή  $\varepsilon$  στην εν λόγω περιοχή. Μια ρεαλιστική προσέγγιση είναι :

$$\varepsilon^* = 2.5 \varepsilon$$

Και θεωρώντας  $\varepsilon = 0.12 \text{ g}$  (κατά τον παλιό Αντισεισμικό Κανονισμό για την Λευκάδα) προκύπτει :

$$\varepsilon^* = 0.30 \text{ g}$$

Τα φάσματα απαιτούμενης πλαστιμότητας για  $\varepsilon^* = 0.30 \text{ g}$  απεικονίζονται στο Σχήμα 3.7



Τέλος στο Σχήμα 3.8 συγκρίνονται τα μεικτά φάσματα Επιτάχυνσης–Μετατόπισης,  $SA=f(SD)$ , των καταγραφών Λευκάδας 2003–κάθετα στο ρήγμα, Λευκάδας 1973, Αιγίου 1995, και Μοναστηρακίου 1999. Σημειώνεται ότι το σύνθετο διάγραμμα χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το κανονικοποιημένο διάγραμμα δύναμης–μετατόπισης της κατασκευής (διάγραμμα “pushover”). Το σημείο τομής των δύο καμπυλών παρέχει προσεγγιστικά την *σεισμική απαίτηση μετατόπισης και δύναμης* στον ταλαντωτή. Παρατηρούμε και πάλι την υπεροχή των δύο καταγραφών της Λευκάδας : για την ελαστοπλαστική κατασκευή με  $\varepsilon_y = 0.40$  και  $T = 0.50$  sec και οι δύο καταγραφές οδηγούν σε  $SD \approx 0.16$  m. Για την καταγραφή 2003 όμως χρησιμοποιήσαμε την κάθετη ( $\approx$  μέγιστη) συνιστώσα και όχι την τυχούσα καταγραφή.

### **3.3 Φάσματα Συμμετρικής και Ασύμμετρης Ολίσθησης**

Μεγαλύτερου όμως ενδιαφέροντος είναι η σύγκριση των επιπτώσεων των τριών καταγραφών σε “ολισθαίνοντα” συστήματα. Αναλύουμε προς τούτο δύο απλά μεν, αλλά χαρακτηριστικά συστήματα μή–ελαστικής συμπεριφοράς (Σχ. 3.9):

- (α) Στερεό σώμα εδραζόμενο μέσω απλής τριβής Coulomb σε οριζόντια βάση η οποία υποβάλλεται σε οριζόντια σεισμική διέγερση, και
- (β) Στερεό σώμα εδραζόμενο μέσω απλής τριβής Coulomb σε κεκλιμένο επίπεδο (γωνίας  $25^\circ$ ), το οποίο επίσης υποβάλλεται σε οριζόντια σεισμική διέγερση.

Τα δύο αυτά συστήματα, πέρα από την καθαρώς γεωτεχνική τους σημασία, αντιπροσωπεύουν (ποιοτικά, αλλά και ποσοτικά) ελαστοπλαστικά συστήματα *συμμετρικής* (ως προς τις δύο κατευθύνσεις, αριστερά–δεξιά) και *μή–συμμετρικής* (μόνον προς την μία κατεύθυνση δηλαδή) απόκρισης. Οι κτιριακές κατασκευές ανήκουν ενγένει στην πρώτη κατηγορία, συμμετρικής ή “*δι-κατευθυντικής*” απόκρισης. Οι τοίχοι αντιστηρίξεως και τα πρανή ανήκουν στην κατηγορία της μή–συμμετρικής “*μονο-κατευθυντικής*” απόκρισης. (Παραπέμπουμε στα άρθρα :

Newmark 1965, Ambraseys & Sarma 1967, Makdisi & Seed 1978, Richards & Elms 1979, Gazetas & Uddin 1994, Γκαζέτας 1996, Paglietti & Porcu 2001).

Τα Σχ. 3.10 και 3.11 αναφέρονται στην απόκριση των δύο τέτοιων συστημάτων όταν διεγερθούν με τα δύο επιταχυνσιογραφήματα της Λευκάδας : του 2003 και του 1973. Συγκεκριμένα:

Το Σχ. 3.10 απεικονίζει τις χρονοϊστορίες αποκρίσεως του ολισθαίνοντος σώματος σε οριζόντια βάση, με συντελεστή τριβής  $\mu = 0.20 \alpha$ , όπου  $\alpha = \max A / g$  είναι η ανηγμένη ως προς  $g$  κορυφαία επιτάχυνση της διέγερσης. Μία λεπτομερής ερμηνεία των χρονοϊστοριών ξεφεύγει από τους στόχους αυτού του άρθρου.

Εστιάζουμε την προσοχή μας στο τελικό αποτέλεσμα : την ολίσθηση  $\delta$  του στερεού σώματος ("κατασκευής") ως προς την βάση. Διαπιστώνουμε αμέσως την μεγάλη "καταστρεπτικότητα" της καταγραφής του 1973, η οποία δίδει διπλάσια μόνιμη ολίσθηση απ' ό,τι η καταγραφή του 2003.

Αντιστοίχως το Σχ. 3.11 απεικονίζει τις χρονοϊστορίες των  $A$ ,  $\Delta$  για σώμα επί κεκλιμένου επιπέδου ( $\beta = 25^\circ$ ) με επιτάχυνση ολισθήσεως  $\alpha_c = 0.20 \alpha$ . [Ορισμός :  $\alpha_c = \text{ο λόγος της οριζόντιας δύναμης } F_c \text{ η οποία στατικάς επιβαλλόμενη οδηγεί σε συντελεστή ασφαλείας έναντι ολισθήσεως ίσον με 1, διά του βάρους του προς ολίσθησιν σώματος.}]$  Τώρα πιά, προς κατάπληξή μας, "καταστρεπτικότερο" είναι το επιταχυνσιογράφημα του 2003, το οποίο οδηγεί σε μόνιμη προς τα κάτω ολίσθηση (0.50 m) δυνάμει φορές μεγαλύτερη από την ολίσθηση (0.20 m) που προκαλεί το επιταχυνσιογράφημα του 1973 !).

Αυτή η (παράδοξη αλλά όχι τελείως σπάνια) αντιστροφή ρόλων των δύο καταγραφών εξακολουθεί και για όλες σχεδόν τις τιμές του λόγου  $\alpha_c/\alpha$  ή  $\mu/\alpha$ , όπως φανερώνει το Σχ. 3.12.

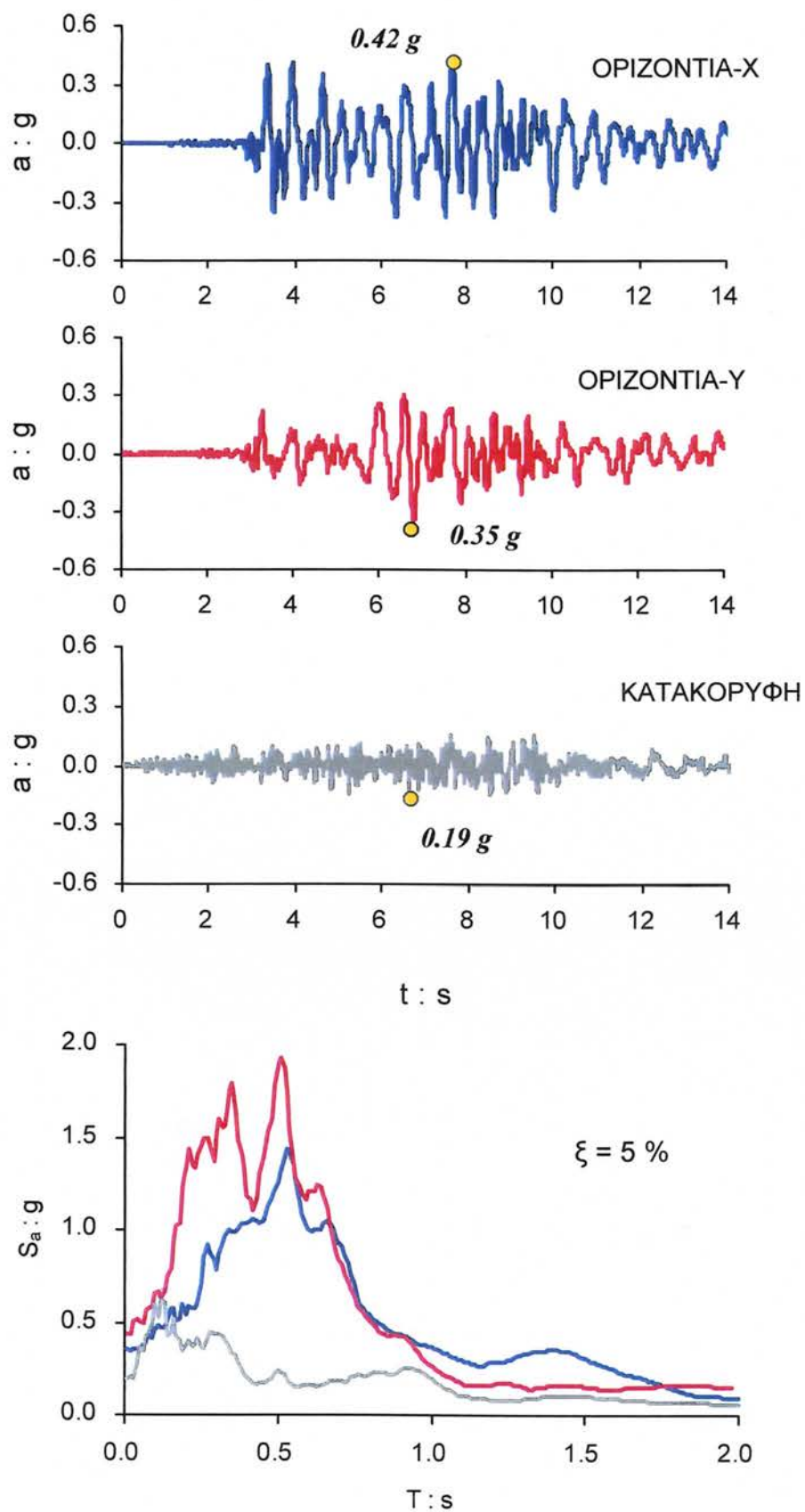
Η ποιοτική ερμηνεία της διαφορετικής συμπεριφοράς κτιρίων και λιμένων στον σεισμό της 14<sup>ης</sup> Αυγούστου 2003 είναι πρόδηλη : (α) η προκληθείσα εδαφική δόνηση δεν οδηγεί σε μεγάλη συσσώρευση πλαστικών παραμορφώσεων σε μία κατασκευή με περίπου συμμετρικών φορέα, όπως είναι ένα σύνηθες κτίριο, σε

αντίθεση με τον ισχυρό παλμό του 1973, (β) η "ιδιοσυγκρασία" όμως της δόνησης αυτής είναι τέτοια ώστε να οδηγεί σε μεγάλη συσσώρευση πλαστικών παραμορφώσεων μή-συμμετρικών συστημάτων, όπως είναι οι λιμενικοί κρηπιδότοιχοι !

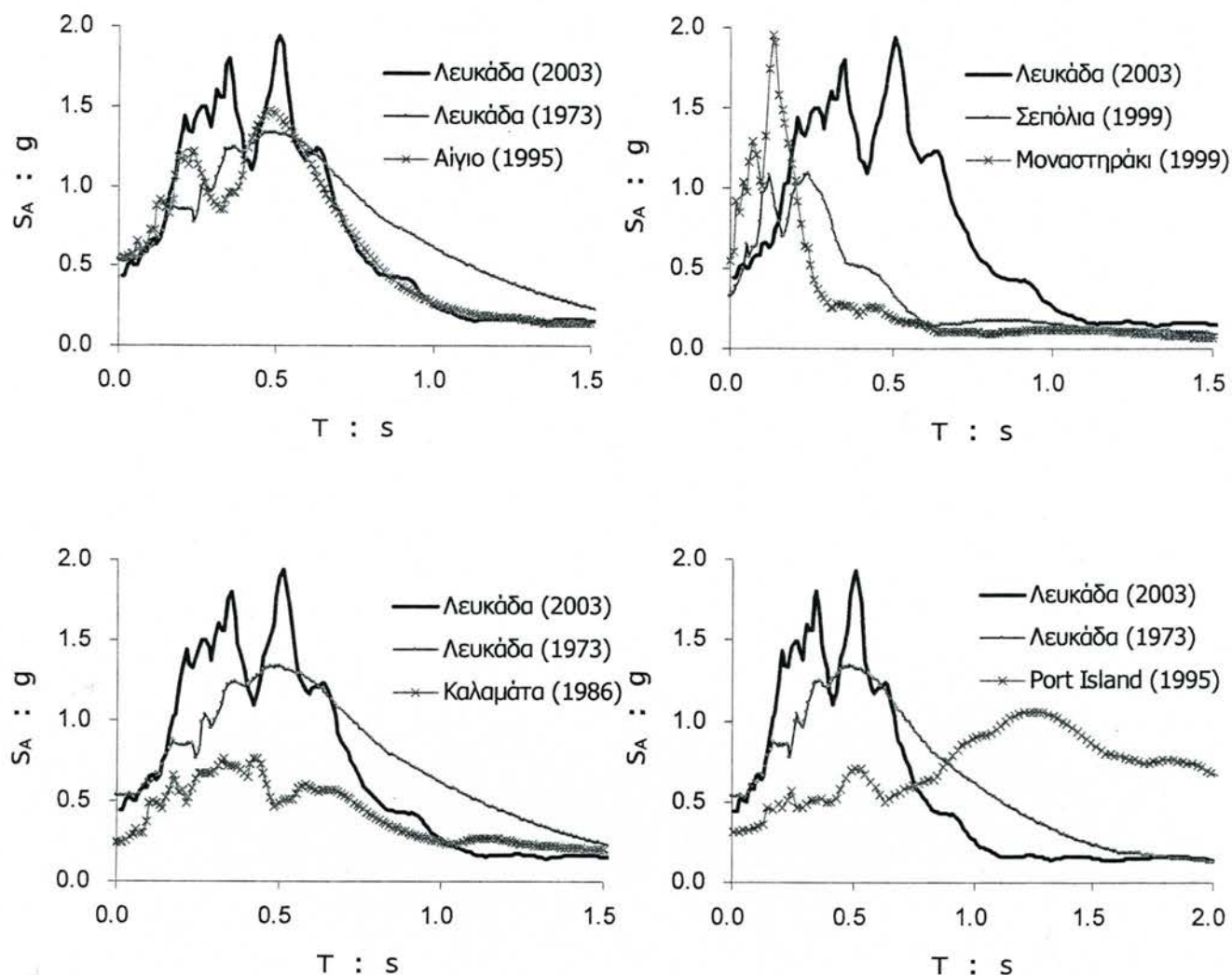
Αξίζει να τονισθεί και η υπεροχή της καταγραφής του 2003 έναντι μερικών απ' τις ισχυρότερες καταγραφές στην Ελλάδα : Αιγίου, Καλαμάτας, Σεπολίων, και Μοναστηρακίου. Ως προς την ασύμμετρη ολίσθηση, η υπεροχή είναι συντριπτική 3 φορές μεγαλύτερη παραμόρφωση από το Αίγιο και την Καλαμάτα, 10 φορές μεγαλύτερη από τα Σεπόλια, Μοναστηράκι. Ως προς την συμμετρική ολίσθηση ωστόσο, τα επιταχυνσιογραφήματα Λευκάδας 2003, Αιγίου 1995, Καλαμάτας 1986 δίνουν παραπλήσιες τιμές  $\Delta_{\max}$ , γεγονός και πάλι σε ποιοτική συμφωνία με την έκταση των δομικών βλαβών στα τρία αυτά σεισμικά επεισόδια.

Δύο ακόμη αρνητικά χαρακτηριστικά του επιταχυνσιογραφήματος του 2003 ενδέχεται να έχουν σημαντική συμβολή στην μεγάλη έκταση των λιμενικών "αστοχιών" :

- (1) Ο μεγάλος αριθμός επαναληπτικών κύκλων μεγάλου πλάτους επιταχύνσεως ( $> 0.25 \text{ g}$ ) είναι άκρως δυσμενής για εκδήλωση φαινομένων "κοπώσεως", όπως είναι η ρευστοποίηση ιλυοαμμωδών εδαφικών στρώσεων, και η συνακόλουθη συνίζηση. Πολλές από τις προαναφερθείσες λιμενικές "αστοχίες", οφείλονται σε μεγάλο βαθμό σε τέτοια ακριβώς φαινόμενα (λιμένας Λευκάδας, μαρίνα Λευκάδας κ.λ.π.) .
- (2) Η ύπαρξη σαφούς δεσπόζουσας περιόδου στον κραδασμό, απόρροια σε μεγάλο βαθμό του μηχανισμού γενέσεως του σεισμού, σε συνδυασμό με την τιμή αυτής της περιόδου,  $T_p \approx 0.55 \text{ sec}$ , και με τον μεγάλο αριθμό σημαντικών κύκλων (της τάξεως του 8), οδηγούν εύκολα σε συντονιστικά φαινόμενα, όταν διεγείρουν επιχώματα και μαλακούς εδαφικούς σχηματισμούς. Είναι πολύ πιθανόν, επομένως, τα επιχώματα και οι κρηπιδότοιχοι να υπέστησαν ακόμη μεγαλύτερες επιταχύνσεις απ' ό,τι φανερώνει η καταγραφή στο νοσοκομείο.



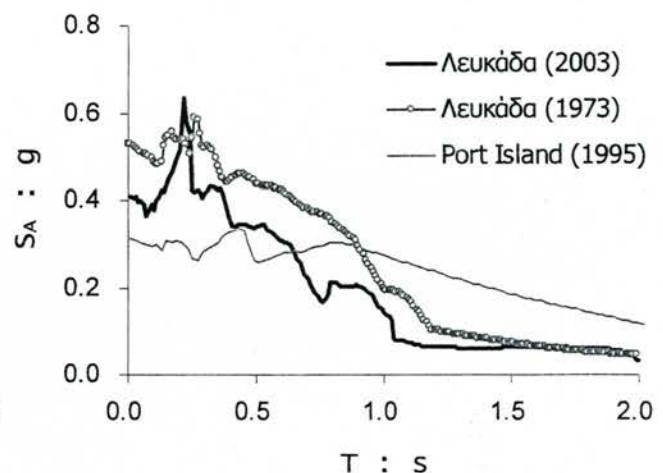
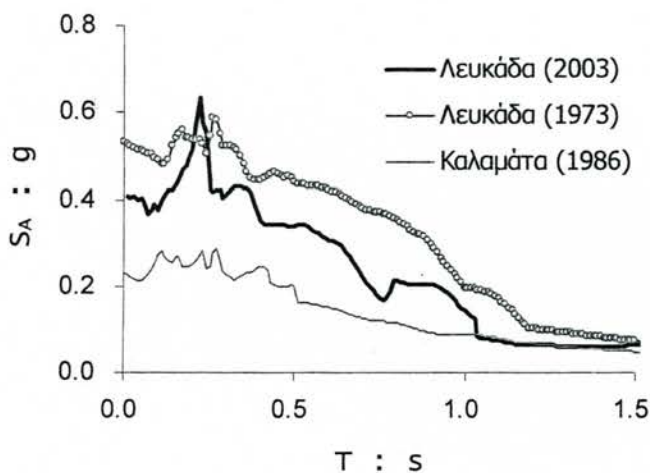
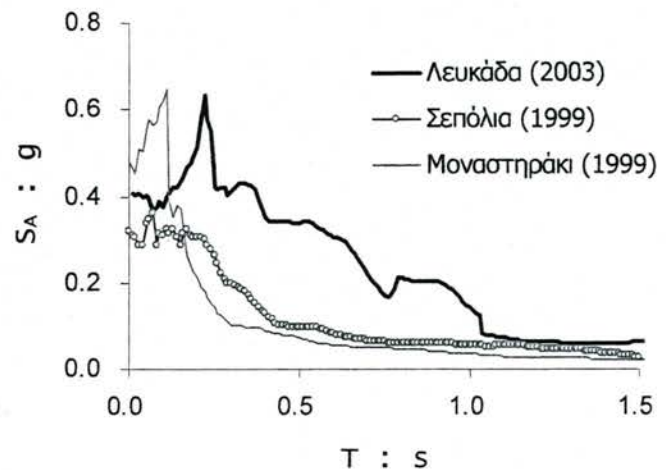
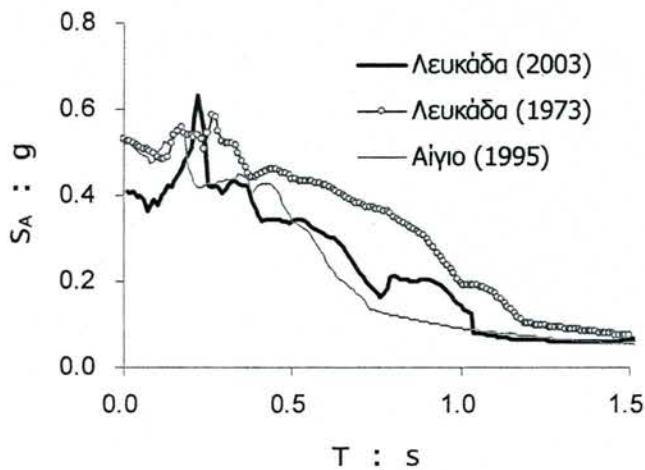
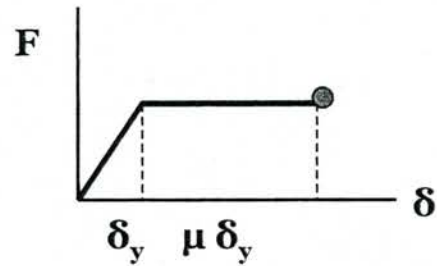
**Σχήμα 3.1** Οι χρονοϊστορίες των τριών συνιστωσών της καταγραφής του ΟΤΕ στην πόλη της Λευκάδας κατά τον σεισμό της 14-8-03 και τα αντίστοιχα φάσματα απόκρισης για  $\xi = 5\%$



**Σχήμα 3.2** Το ελαστικό φάσμα απόκρισης της καταγραφής του Νοσοκομείου στην πόλη της Λευκάδας κατά τον σεισμό της 14-8-03 για  $\xi = 5\%$  εν συγκρίσει με τα αντίστοιχα φάσματα των καταγραφών :

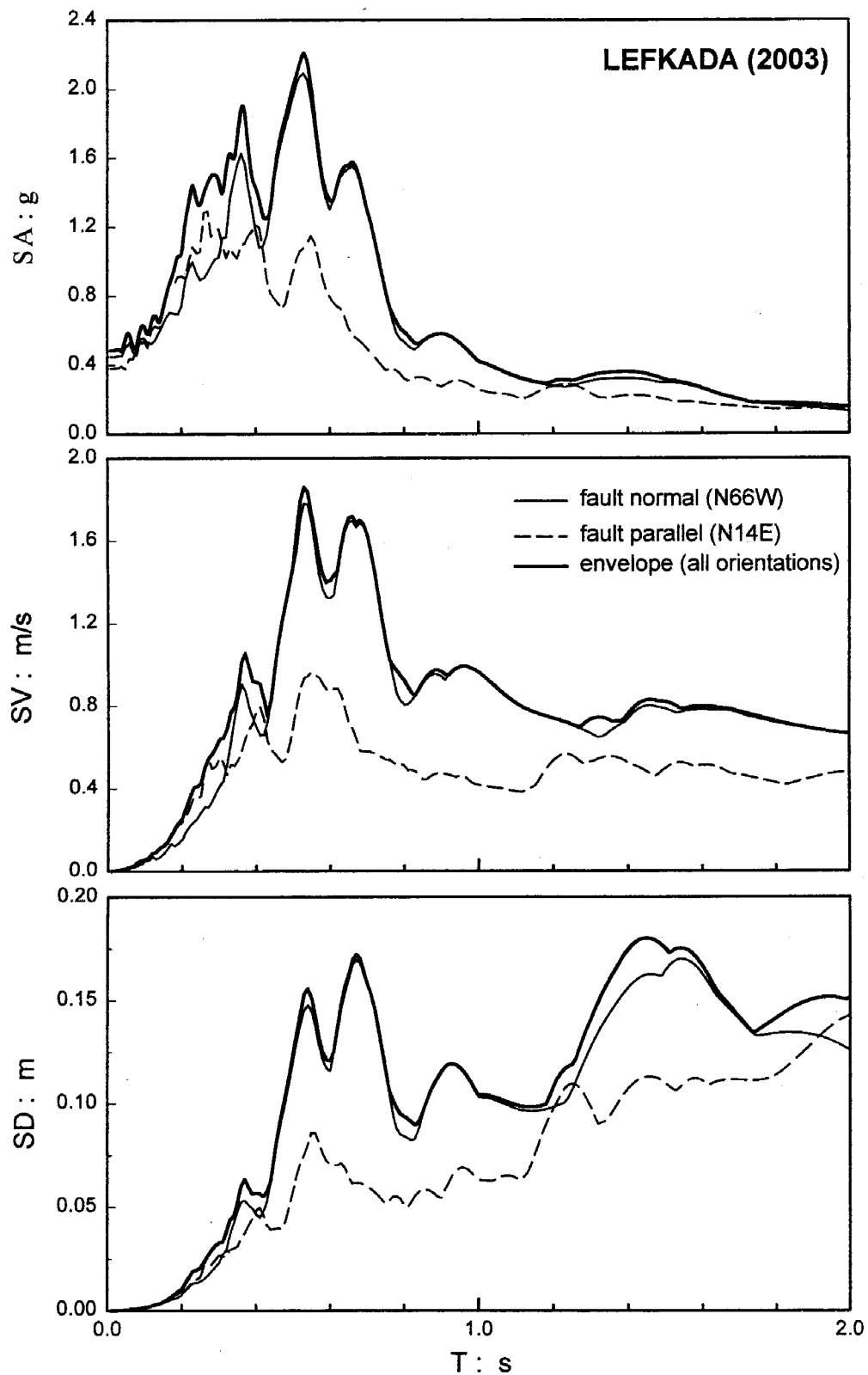
- α) στην τεχνητή νήσο Port Island (Kobe, 1995)
- β) στο κτήριο του ΟΤΕ Λευκάδας (Λευκάδα, 1973)
- γ) στο κτήριο της Νομαρχίας της Καλαμάτας (Καλαμάτα, 1986)
- δ) στο Αίγιο (Αίγιο, 1995)
- ε) στους σταθμούς των Σεπολίων και του Μοναστηρακίου (Αθήνα, 1999)

Πλασιμότητα :  $\mu = 4$

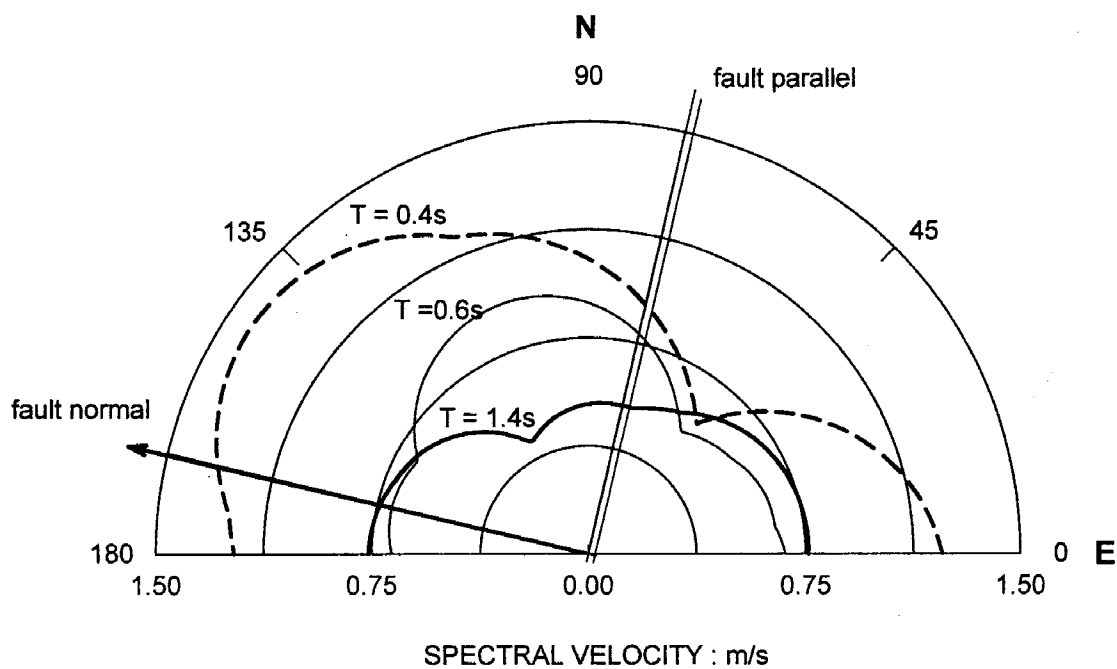
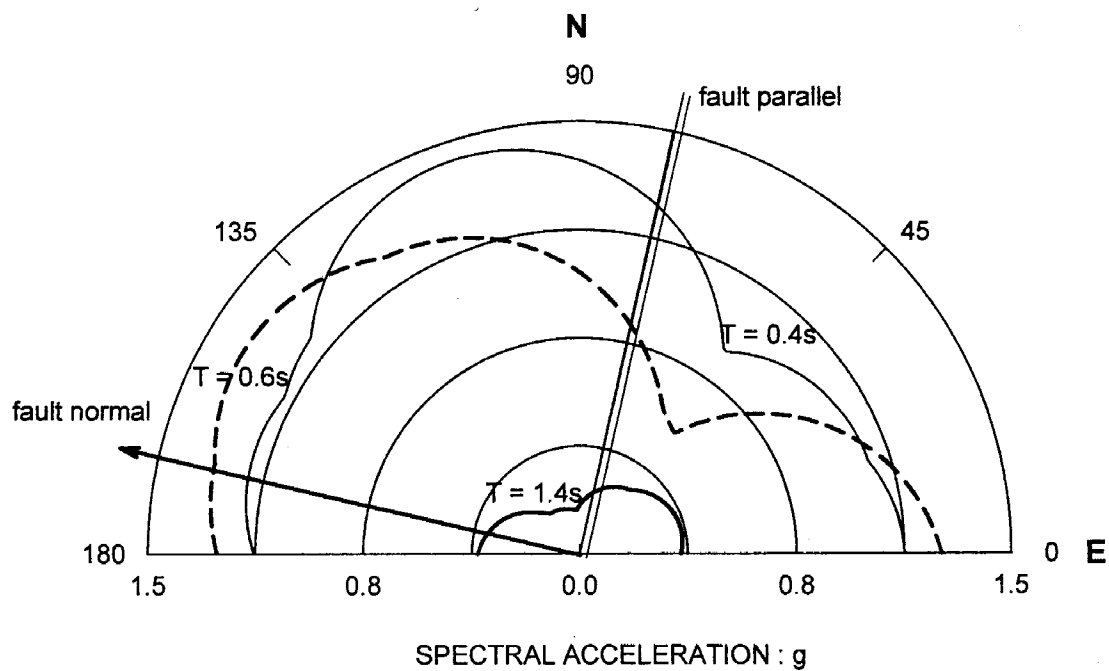


**Σχήμα 3.3** Το ανελαστικό ( $\mu = 4$ ) φάσμα απόκρισης της καταγραφής του Νοσοκομείου στην πόλη της Λευκάδας κατά τον σεισμό της 14-8-03 για  $\xi = 5\%$  εν συγκρίσει με τα αντίστοιχα φάσματα των καταγραφών :

- α) στην τεχνητή νήσο Port Island (Kobe, 1995)
- β) στο κτήριο του ΟΤΕ Λευκάδας (Λευκάδα, 1973)
- γ) στο κτήριο της Νομαρχίας της Καλαμάτας (Καλαμάτα, 1986)
- δ) στο Αίγιο (Αίγιο, 1995)
- ε) στους σταθμούς των Σεπολίων και του Μοναστηρακίου (Αθήνα, 1999)

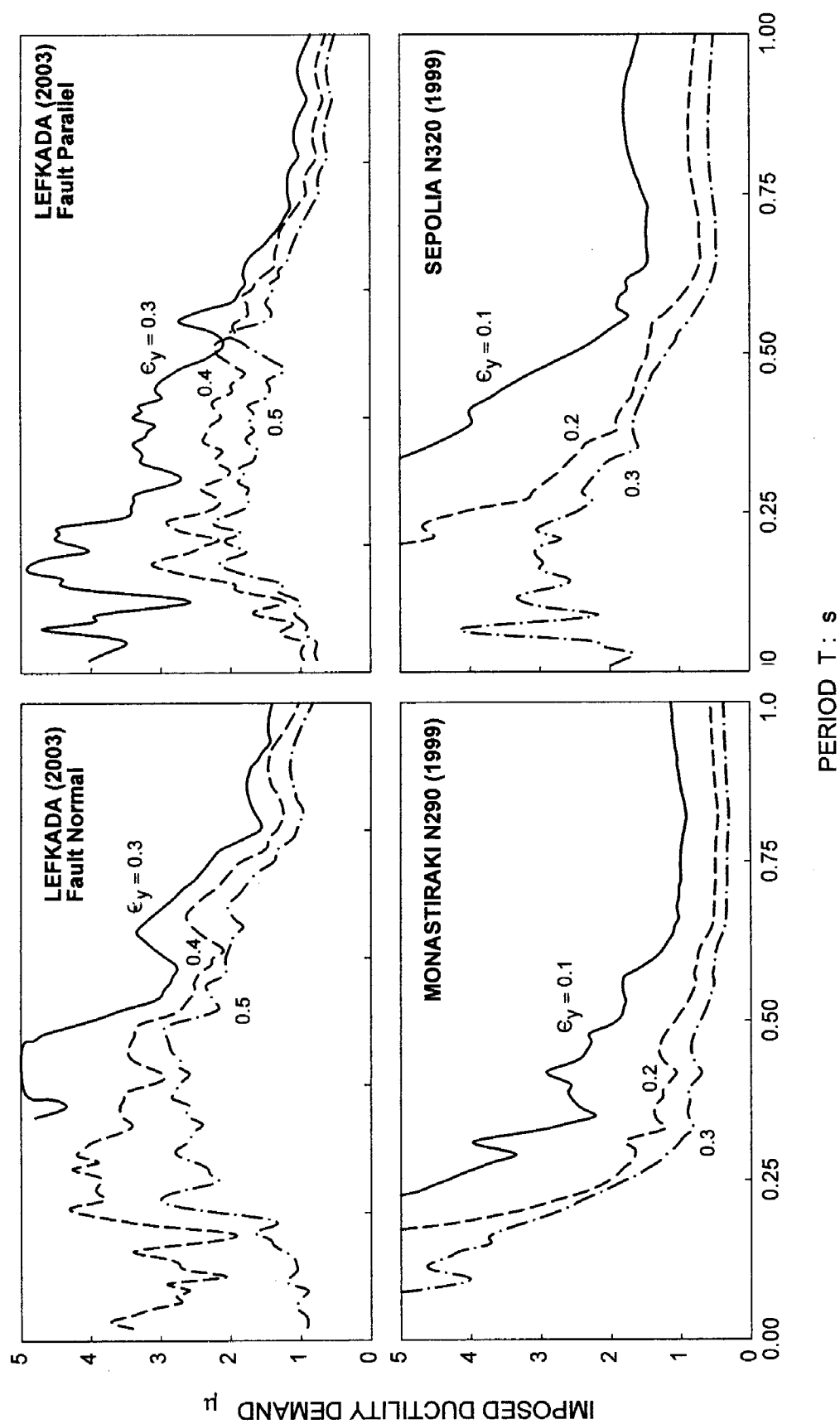


**Σχήμα 3.4** Τα φάσματα απόκρισης της κάθετης και της παράλληλης προς το ρήγμα συνιστώσας για απόσβεση 5 %. Η γωνία περιστροφής μετράται αριστερόστροφα ως προς την Ανατολή.

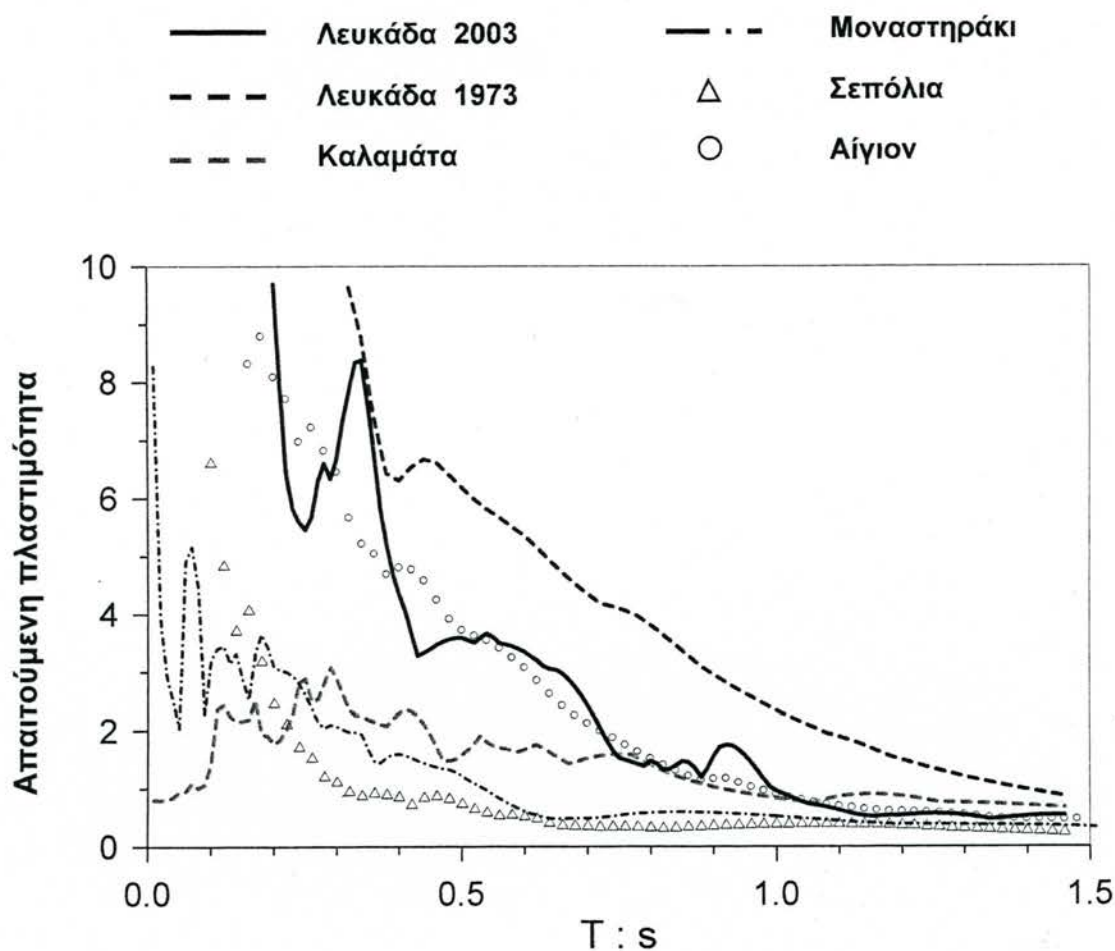


**Σχήμα 3.5** Πολικά φασματικά διαγράμματα της επιτάχυνσης και της ταχύτητας για την καταγραφή του Νοσοκομείου ( $\xi = 5\%$ )





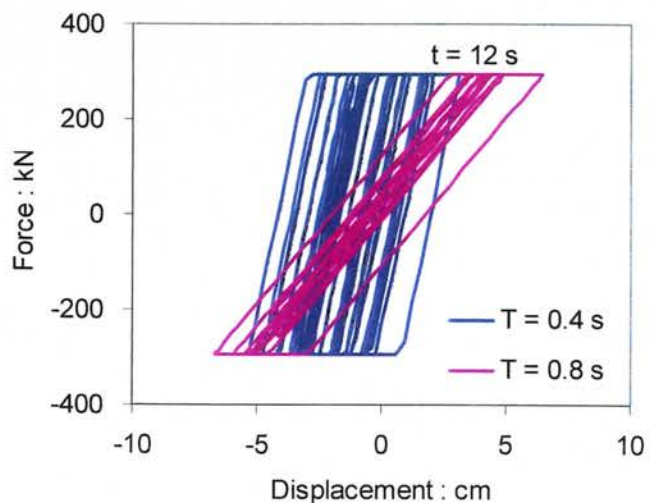
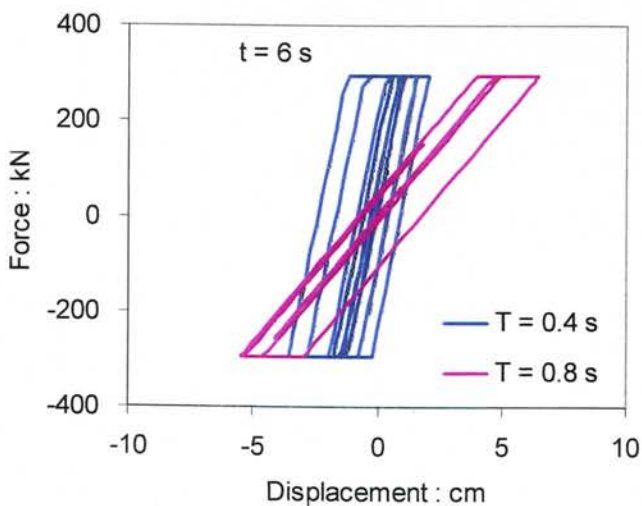
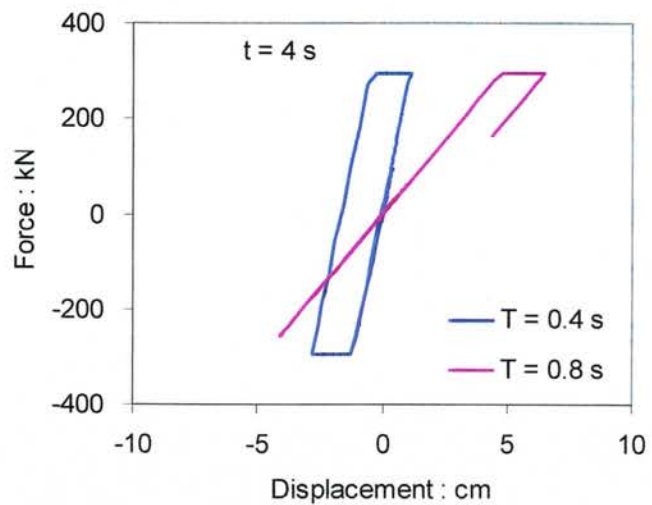
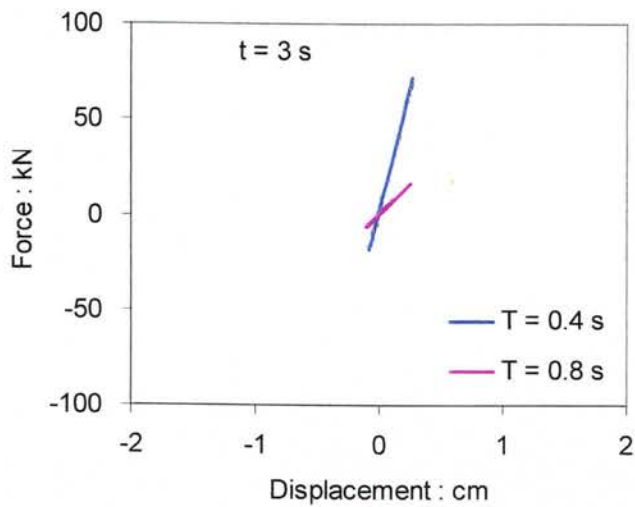
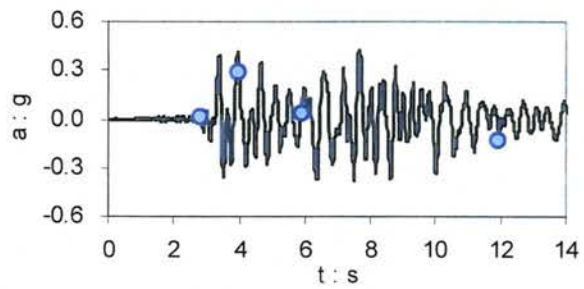
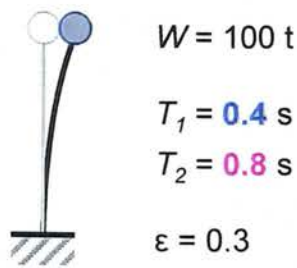
**Σχήμα 3.6** Τα φάσματα αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας από την καταγραφή του Νοσοκομείου της Λευκάδας (στην κάθετη και παράλληλη στο ρήγμα συνιστώσα) και των καταγραφών Μοναστηρακίου και Σεπολίων (Αθήνα, 1999) για διάφορες τιμές του σεισμικού συντελεστή διαρροής.



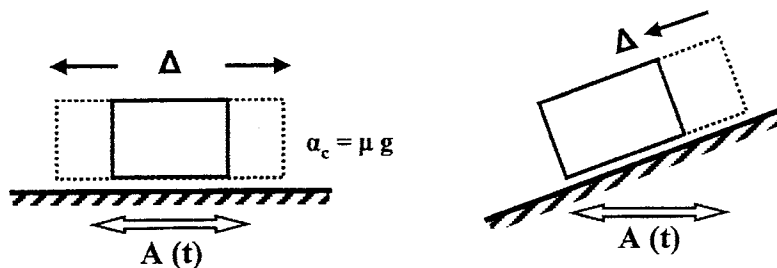
**Σχήμα 3.7** Το φάσμα της **απαιτούμενης πλαστιμότητας** ελαστοπλαστικού μονοβάθμιου ταλαντωτή της καταγραφής του Νοσοκομείου στην πόλη της Λευκάδας κατά τον σεισμό της 14-8-03 εν συγκρίσει με τα αντίστοιχα φάσματα των καταγραφών :

- α) στο κτήριο του ΟΤΕ Λευκάδας (Λευκάδα, 1973)
- β) στο κτήριο της Νομαρχίας της Καλαμάτας (Καλαμάτα, 1986)
- γ) στο Αίγιο (Αίγιο, 1995)
- δ) στους σταθμούς των Σεπολίων και του Μοναστηρακίου (Αθήνα, 1999)

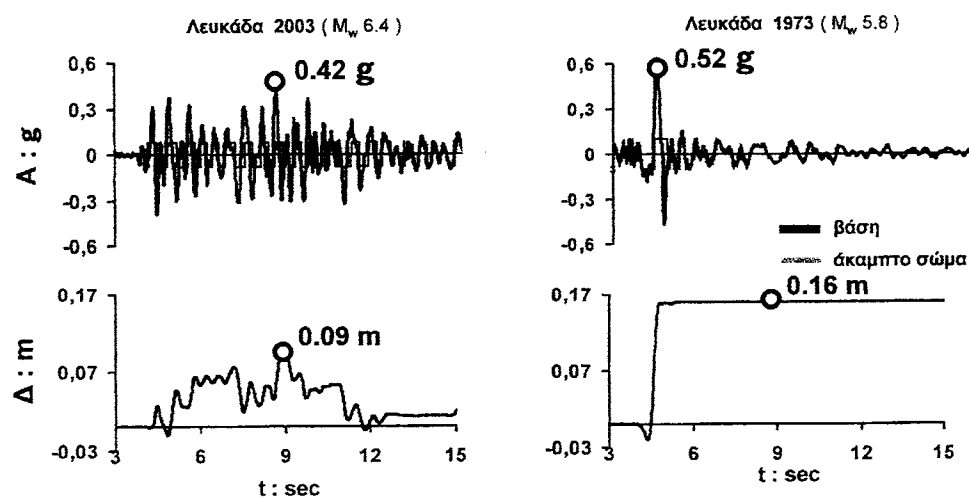
Excitation : *Lefkada 2003*



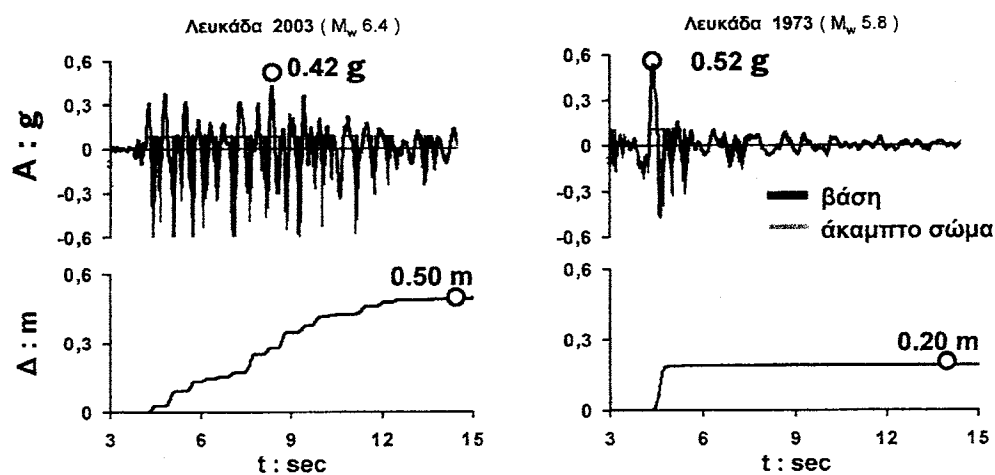
**Σχήμα 3.8** Τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης ελαστοπλαστικού μονοβάθμιου ταλαντωτή με μάζα  $m = 100 \text{ t}$  και ιδιοπερίοδο  $0.4 \text{ s}$  και  $0.8 \text{ s}$  (μπλέ και κόκκινη γραμμή αντιστοίχως), για σεισμικό συντελεστή  $\varepsilon = 0.3$ . Ως σεισμική διέγερση στην βάση χρησιμοποιείται η καταγραφή του Νοσοκομείου Λευκάδας (2003).



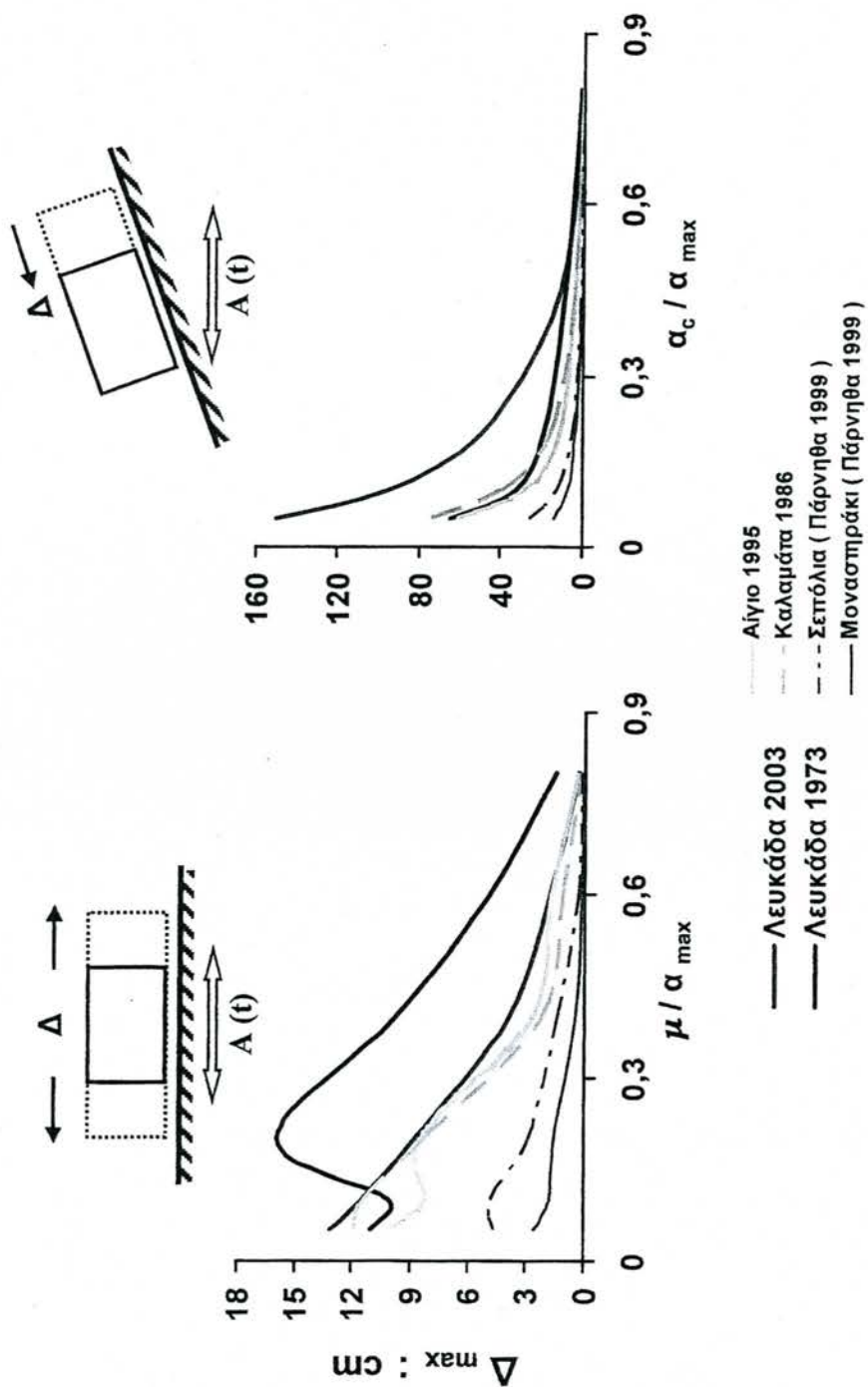
Σχήμα 3.9 Δύο απλά ανελαστικά συστήματα, συμμετρικής και ασύμμετρης ολίσθησης



Σχήμα 3.10 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των καταγραφών Λευκάδας 2003 και 1973 σε συμμετρική ολίσθηση



Σχήμα 3.11 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των καταγραφών Λευκάδας 2003 και 1973 σε ασύμμετρη ολίσθηση



Σχήμα 3.12 Σύγκριση Φασμάτων Συμμετρικής και Ασύμμετρης ολίσθησης

- Η περιοχή του (νοτίου τμήματος ) του λιμένα Λευκάδας
- Η Μαρίνα και η πλησίον αυτής περιοχή.

Τα κυριότερα αποτελέσματα των γεωτεχνικών και γεωφυσικών μετρήσεων δίδονται σε Παράρτημα. Στο κεφάλαιο αυτό και στο επόμενο παρουσιάζονται μερικά μόνον αποτελέσματα, με έμφαση να αναδειχθεί ο ρόλος του εδάφους στην διαμόρφωση του σεισμικού κραδασμού στην επιφάνεια.

## **4.2 Γενικευμένο Εδαφικό Προφίλ**

Βάσει των υπάρχοντων στοιχείων, και δεδομένων των αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στον ακριβή προσδιορισμό των ιδιοτήτων του εδάφους, είναι δυνατόν να εξαχθούν τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα ως προς το είδος των εδαφικών σχηματισμών που αναπτύσσονται στη Νήσο.

- Το βραχώδες μαργαϊκό υπόβαθρο εκτιμάται ότι εμφανίζεται στα -9 m στα βόρεια της πόλης, “βυθίζεται” στα -13 m περίπου στο κέντρο, στα -16 m στα νότια του λιμένος ενώ φαίνεται να αναδύεται και πάλι καθώς κινούμαστε νοτιότερα προς την περιοχή του λιμένα της Λυγιάς. Η ταχύτητα του διατμητικού κύματος στη μάργα υπολογίζεται, βάσει των εκτελεσθεισών γεωφυσικών τομογραφιών, στα 550 m/s. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω περιγραφή συμφωνεί με τις υπάρχουσες γεωλογικές μελέτες του υποβάθρου της νήσου οι οποίες περιγράφουν την διαμόρφωση μιας γεωλογικής τάφρου στο μαργαϊκό υπόβαθρο.
- Οι υπερκείμενοι του βράχου εδαφικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν σε γενικές γραμμές μια περίπου ομοιόμορφη εικόνα (με διαφοροποιήσεις βεβαίως από θέση σε θέση.) Στα πρώτα 1-2 m συναντάται συνήθως ένα στρώμα τεχνητών αποθέσεων, μετά δε μια στρώση αμμοιλύος στην περιοχή του κέντρου ή αμμώδους αργίλου καθώς κινούμαστε προς τα δυτικότερα. Σε όλες τις περιπτώσεις πάντως, τόσο οι περιγραφές των τομών όσο και η δοκιμή CPT αναδεικνύουν την ύπαρξη φακών αργίλου ή άμμου μικρού πάχους. Τυπικός

αριθμός κρούσεων SPT στην εν λόγω στρώση είναι της τάξης του 10, ενώ παρατηρούνται διαφοροποιήσεις από θέση σε θέση. Σε μεγαλύτερα βάθη, ανάλογα με την υπό μελέτην θέση, συναντάται είτε απευθείας το βραχώδες υπόβαθρο όταν αυτό αναδύεται σε ρηχότερα στρώματα, είτε παρεμβάλλεται ένα στρώμα αργιλοϊλύος (όπου ο αριθμός  $N_{SPT}$  είναι ελαφρώς υψηλότερος του 10) ή χαλίκων με  $N_{SPT} \approx 25$  ανάλογα με τη θέση της γεώτρησης.

*Στο παράρτημα παρατίθενται οι γεωτρήσεις και τα αποτελέσματα των δοκιμών σε κάθε θέση.*

Βάσει των αποτελεσμάτων, εξάγονται τα ακόλουθα τυπικά προφίλ για τις διάφορες περιοχές της πόλης, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω στα Σχήματα 4.1 – 4.12 . Τα προφίλ αυτά χρησιμοποιούνται για τις δυναμικές αναλύσεις που έπονται.





#### Παλιές Γεωτρήσεις

- 1: Δημαρχείο – Πνευματικό Κέντρο
- 2: Δικαστικό Μέγαρο
- 3: Νοσοκομείο
- 4: Εθνική Τράπεζα

- 5: Διάυλος
- 6: Ξενοδοχείο “Ionian Star”
- 7: Διοικητήριο
- 8: ΚΤΕΟ

#### Νέες Γεωτρήσεις

- ΓΧ1: Βιβλιοθήκη
- ΓΧ2: 8<sup>η</sup>ς Μερραρχίας και Ζαμπέλη
- ΓΧ3: Νεκροταφείο
- ΓΧ4: ΟΤΕ

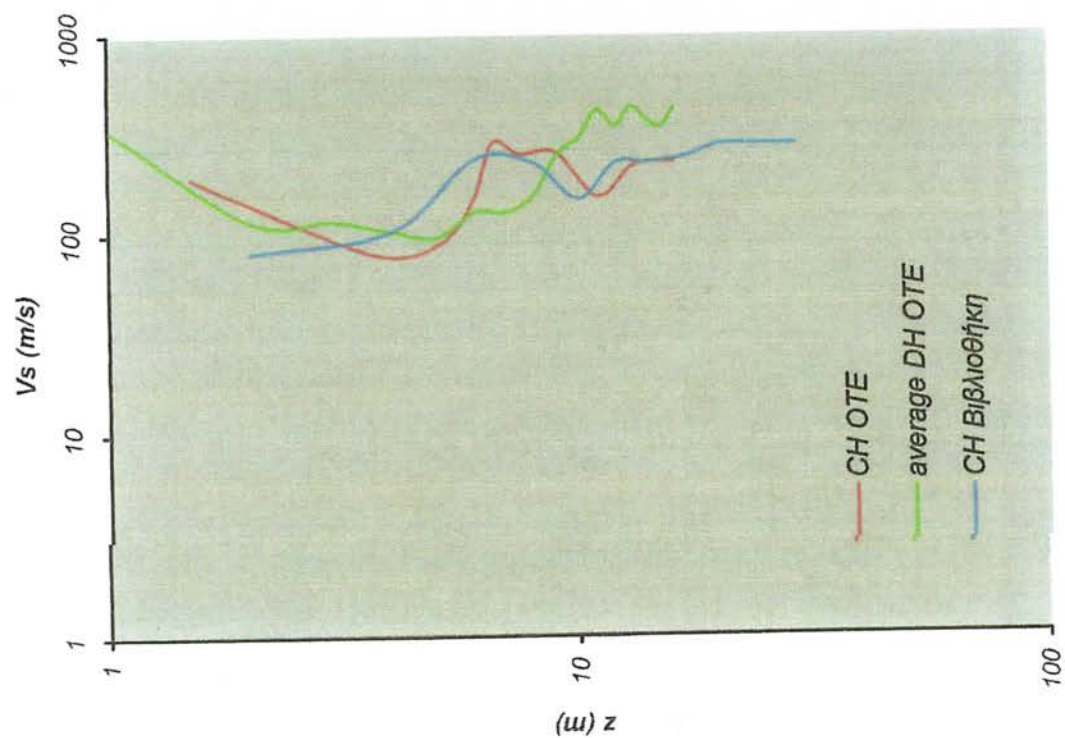
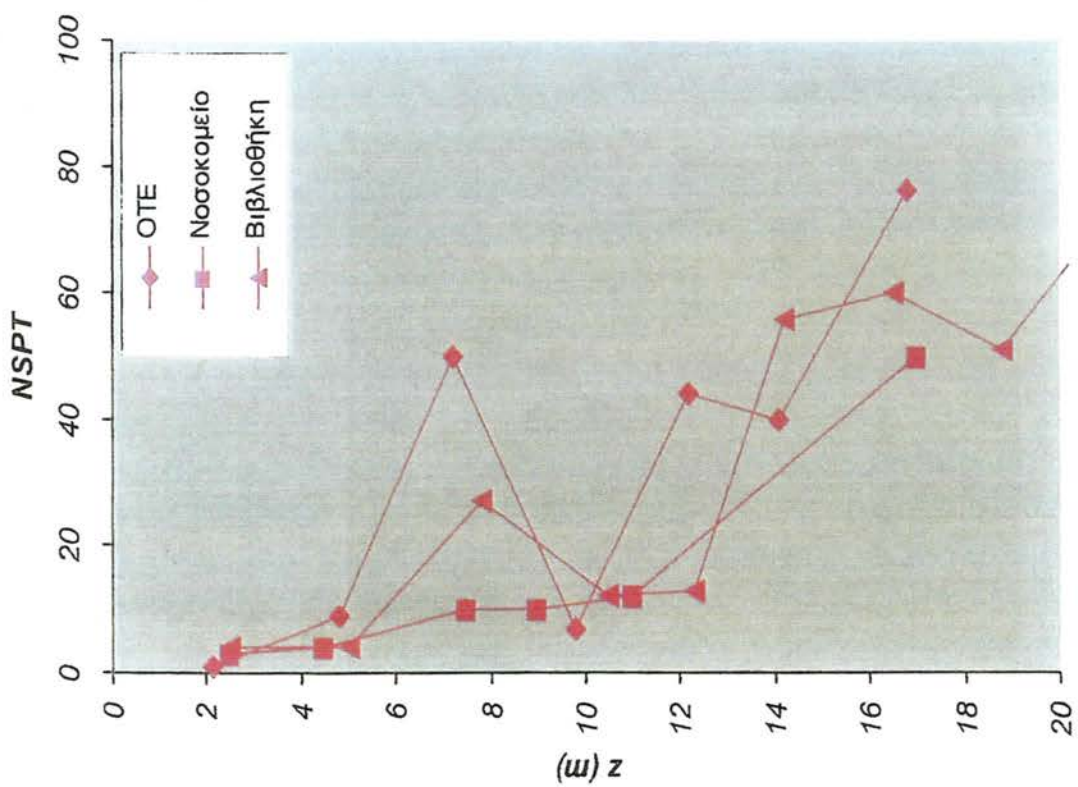
- ΓΛ1 – ΓΛ5: Λιμάνι
- ΓΛ11: Είσοδος Μαρίνας

#### Θέσεις Γεωφυσικών Τομογραφιών Downhole και Crosshole

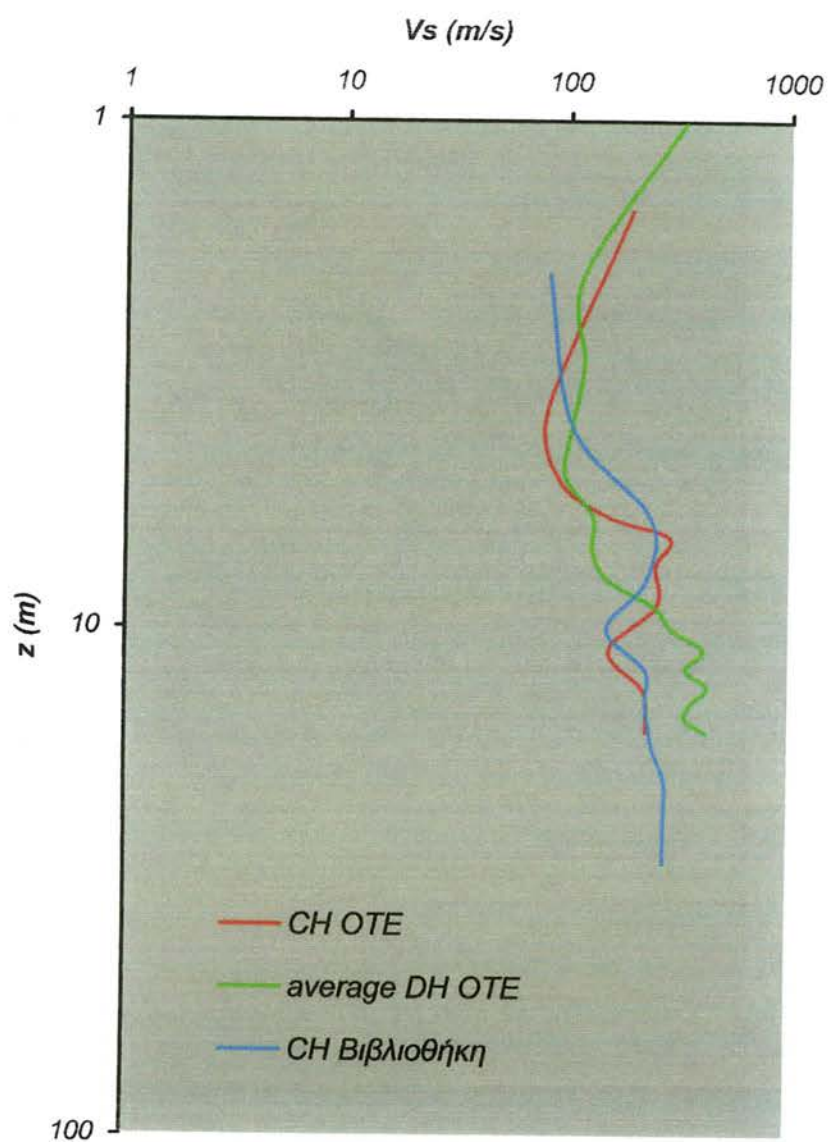


**Σχήμα 4.α** Χάρτης της Λευκάδας και θέσεις γεωτρήσεων

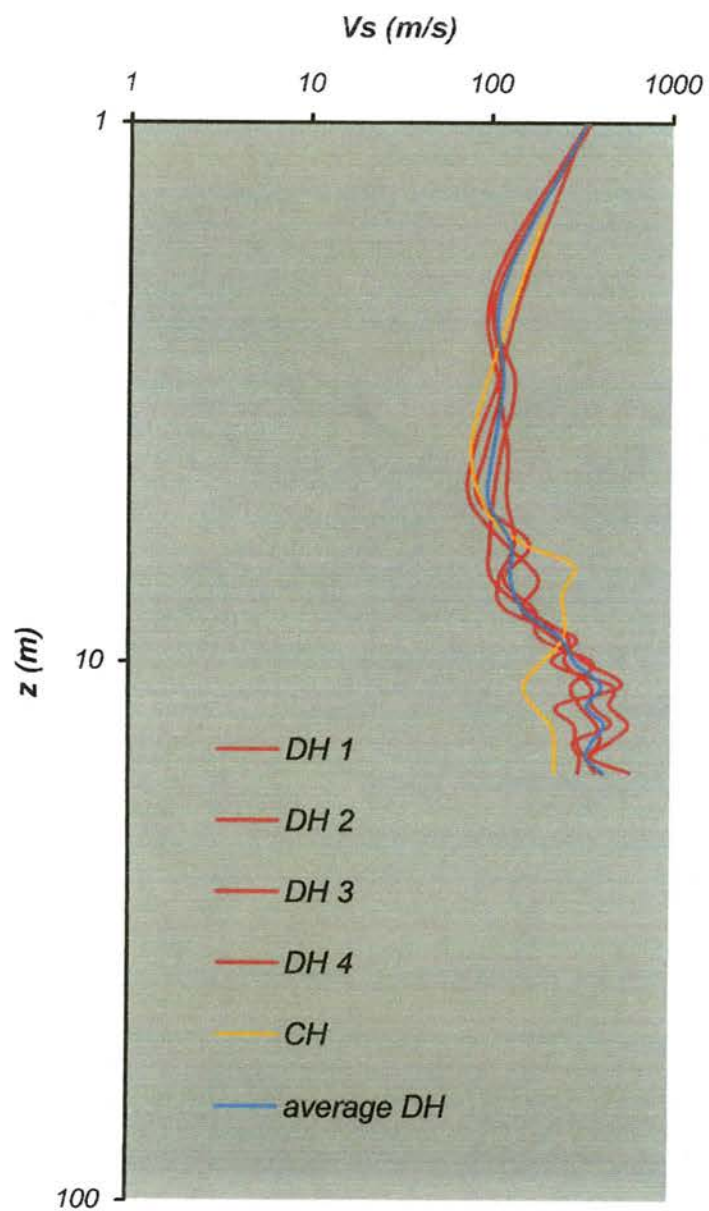




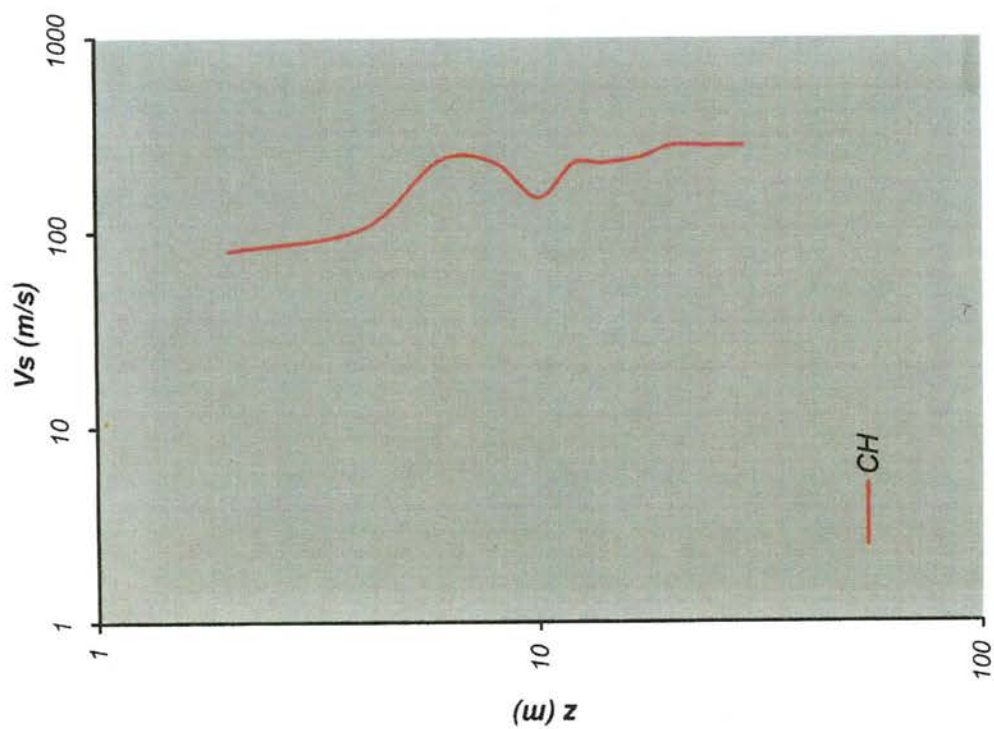
Σχήμα 4.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στην περιοχή του ΟΤΕ από δοκιμή SPT και γεωφυσική τομογραφία



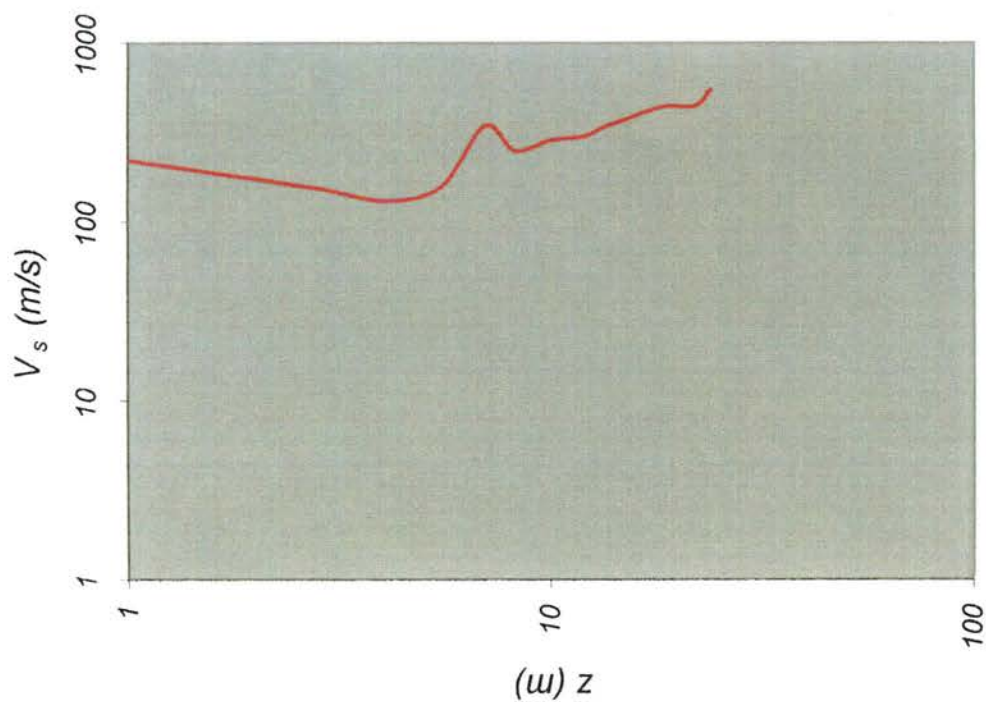
**Σχήμα 4.2** Προφίλ ταχυτήτων διατμητικού κύματος από δοκιμές CROSSHOLE και DOWNHOLE για την περιοχή ΟΤΕ-Βιβλιοθήκης



**Σχήμα 4.3** Προφίλ ταχυτήτων διατμητικού κύματος από δοκιμές CROSSHOLE και DOWNHOLE στον ΟΤΕ

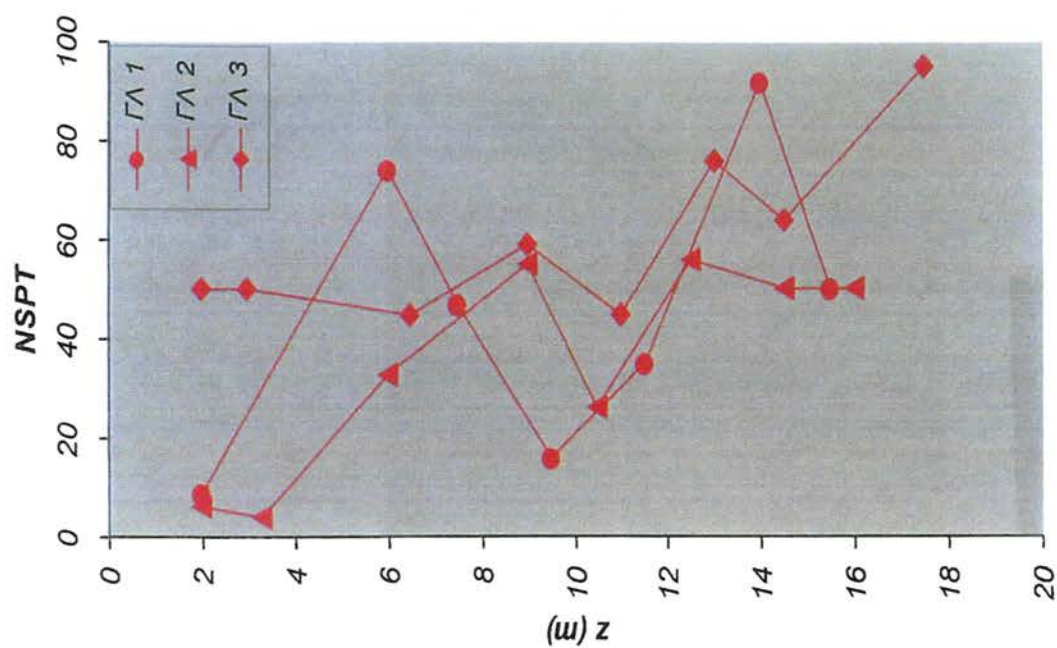
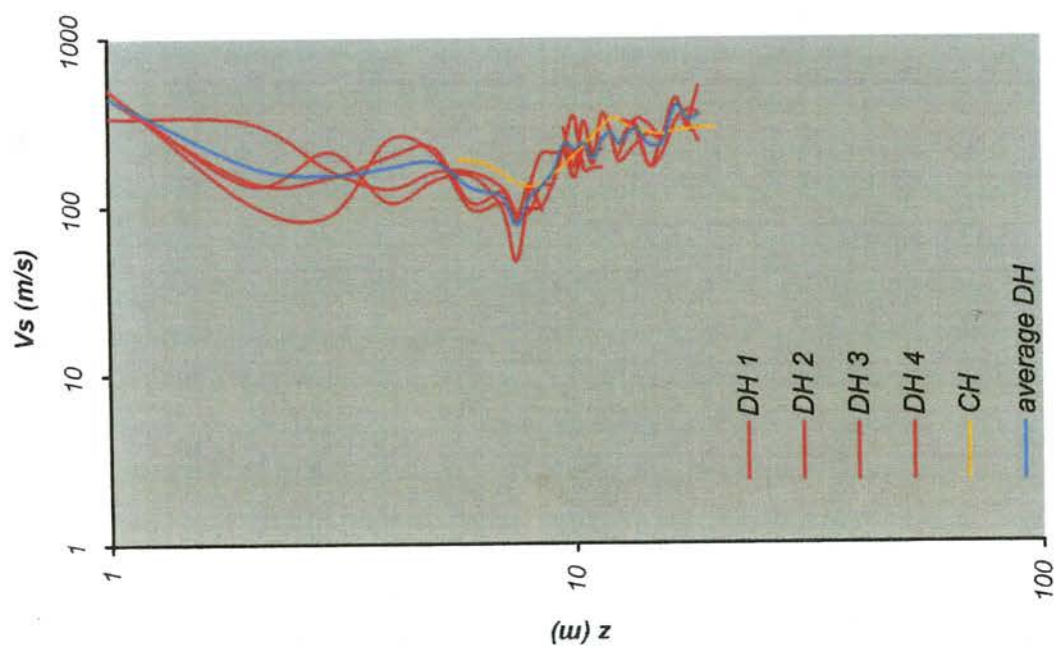


**Σχήμα 4.4** Προφίλ ταχυτήτων διατμητικού κύματος από δοκιμή CROSSHOLE στην Βιβλιοθήκη

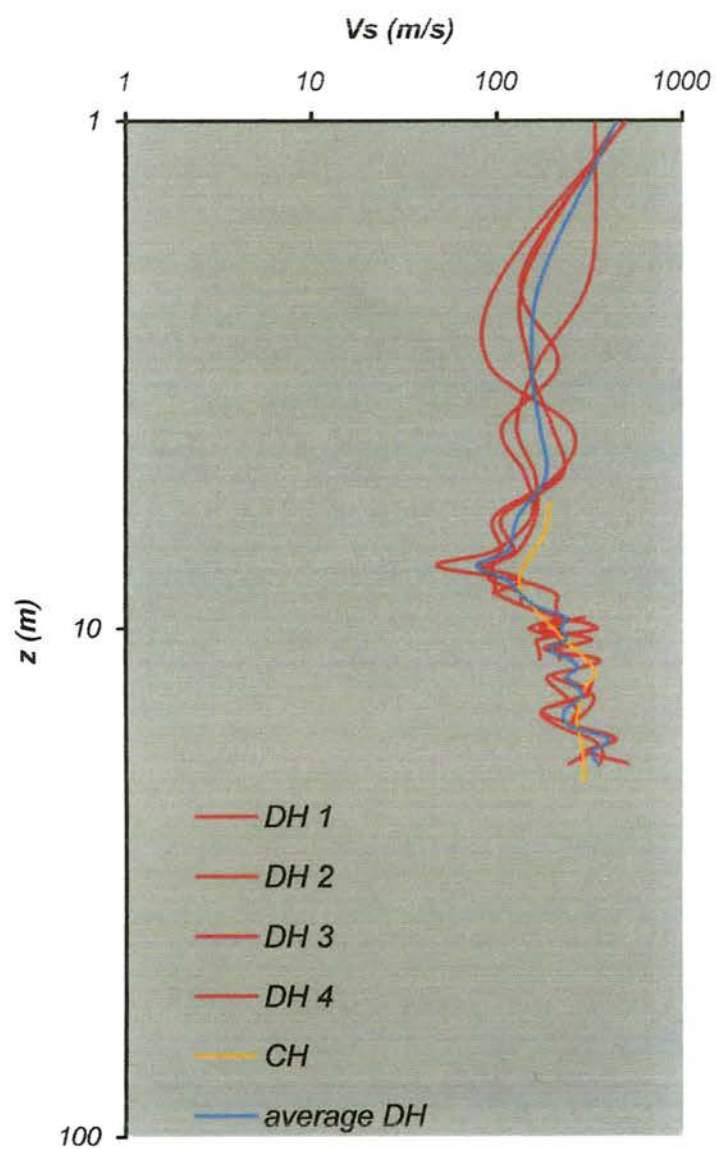


**Σχήμα 4.5** Προφίλ ταχυτήτων διατμητικού κύματος από δοκιμή CROSSHOLE στο Νοσοκομείο

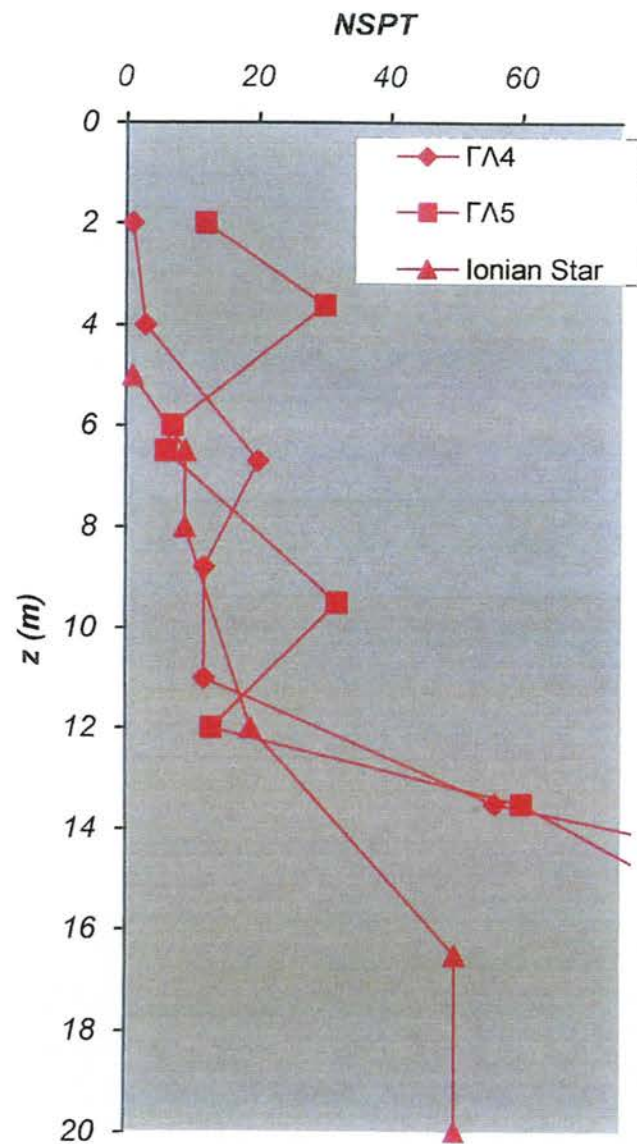




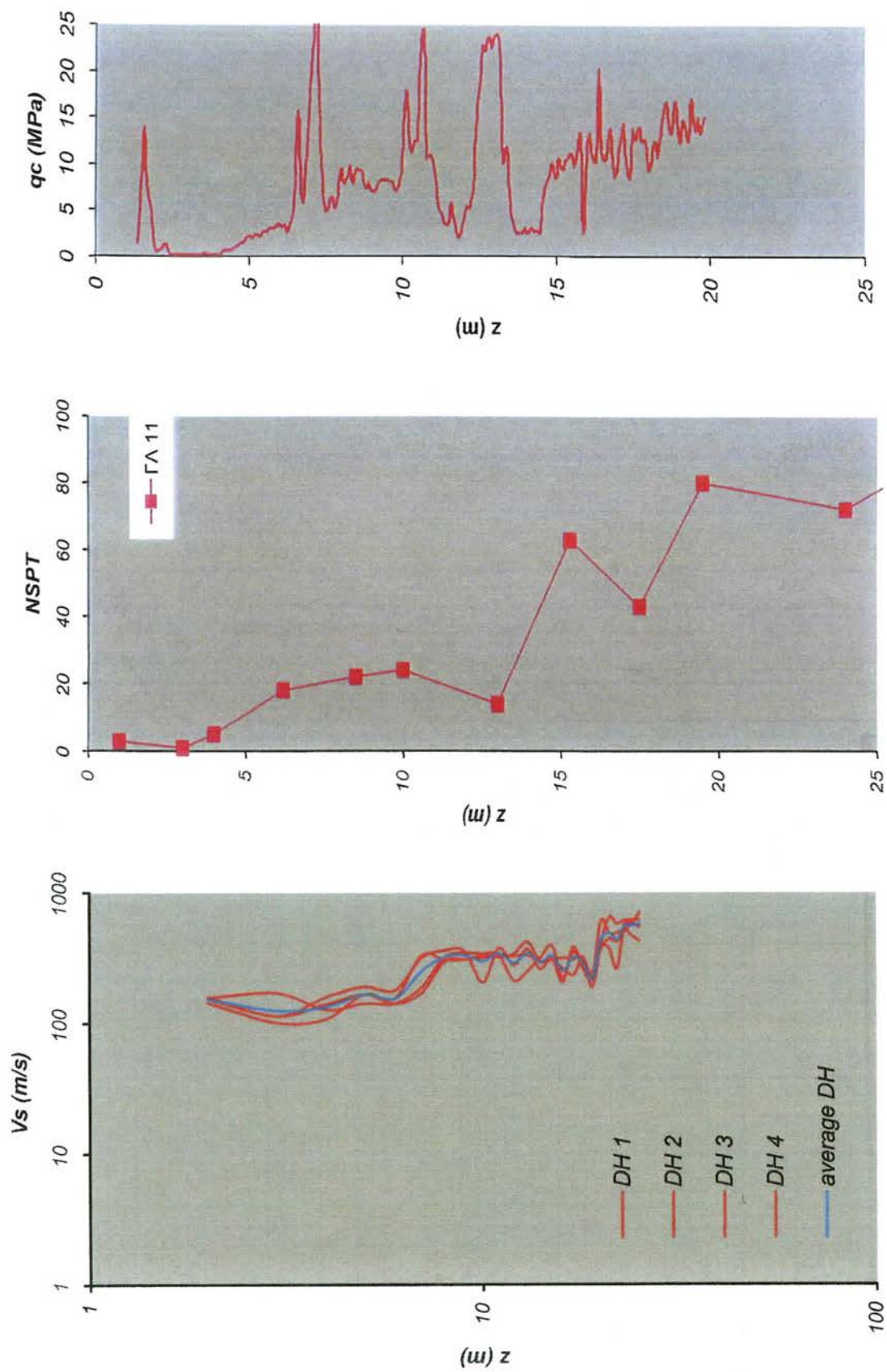
**Σχήμα 4.6** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στο νότιο τμήμα του Λιμανιού από δοκιμή SPT και γεωφυσική τομογραφία



**Σχήμα 4.7** Προφίλ ταχυτήτων διατμητικού κύματος από δοκιμές CROSSHOLE και DOWNHOLE στο νότιο τμήμα του λιμανιού της Λευκάδας

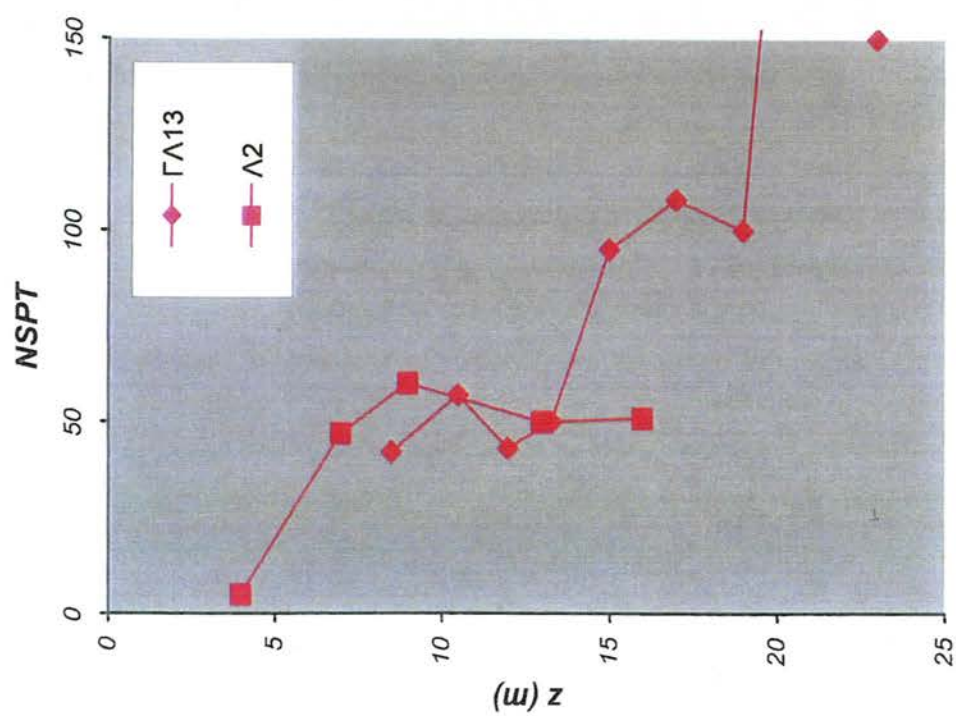
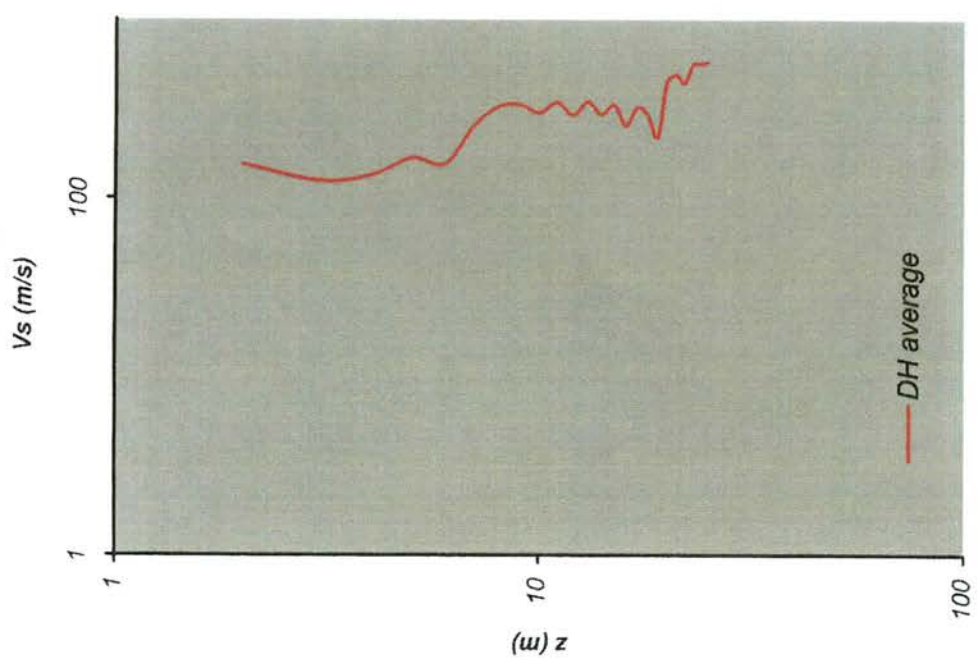


**Σχήμα 4.8** Προφίλ κτύπων πρότυπης δοκιμής διείσδυσης (SPT) στο κεντρικό τμήμα του λιμανιού της Λευκάδας



Σχήμα 4.9 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στην είσοδο της Μαρίνας από δοκιμές SPT, CPT και γεωφυσική τομογραφία





**Σχήμα 4.10** Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στην περιοχή της Μαρίνας από δοκιμή SPT και γεωφυσική τομογραφία

## 5.

### **ΕΔΑΦΙΚΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ του ΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΚΡΑΔΑΣΜΟΥ**

#### **5.1 Εισαγωγή**

Τα μεγάλης σημασίας ερωτήματα στα οποία απαντά το παρόν κεφάλαιο είναι :

Επηρεάστηκε το επιταχυνσιογράφημα του Νοσοκομείου από τα χαρακτηριστικά (δυστημής, γεωμετρία) του υπεδάφους ; Και κατά πόσον ;

Ποια θα ήταν τα επιταχυνσιογραφήματα σε διάφορες άλλες θέσεις ενδιαφέροντος (π.χ. στα λιμάνια), με διαφορετικό υπέδαφος, εάν τυχόν υπήρχαν εκεί καταγραφικοί σταθμοί την ημέρα του σεισμού;

Γενικώς, πόσο σημαντικός ήταν ο ρόλος του εδάφους στην τροποποίηση της έντασης και των φασματικών χαρακτηριστικών της διέγερσης ;

Πράγματι, είναι πλέον γνωστό σε όλους ότι οι συχνά παρατηρούμενες διαφοροποιήσεις στην έκταση και ένταση των σεισμικών βλαβών αποδίδονται σε διαφορές στις "τοπικές" εδαφικές συνθήκες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι σεισμοί : του Kanto 1923, του Καρακάς 1067, του Μεξικού 1985, της Καλαμάτας 1986, της Αρμενίας 1988, της Loma Prieta 1989, του Κόμπε 1994. Το πρόβλημα της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών έχει μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό τις τρεις τελευταίες δεκαετίες, τόσο με επιτόπου παρατηρήσεις όσο και με θεωρητική ανάλυση. Είναι γενικώς αποδεκτό ότι ένα συγκεκριμένο επιταχυνσιογράφημα αντανακλά σε κάποιον βαθμό τα χαρακτηριστικά των εδαφικών στρώσεων στην περιοχή της καταγραφής, και ότι η ένταση της δόνησης διαφοροποιείται με το βάθος από την επιφάνεια. Στην ουσία το εδαφικό στρώμα παίζει κατά κάποιον τρόπο τον ρόλο προσπίπτοντος "φίλτρου", ενισχύοντας εκείνες τις αρμονικές συνιστώσες του προσπίπτοντος κυματισμού των οποίων η συχνότητα πλησιάζει τις δικές τους ιδιοσυχνότητες (ή ταυτίζεται με αυτές : συντονισμός).

Για να διερευνηθεί ο ρόλος που ενδεχομένως διαδραμάτισαν οι εδαφικές συνθήκες στην αλλοίωση της έντασης και των φασματικών χαρακτηριστικών της εδαφικής δόνησης στην Λευκάδα διεξήχθησαν δύο τύποι αναλύσεων :

(α) μονοδιάστατες ισοδυνάμως-γραμμικές αναλύσεις της κυματικής διάδοσης διαμέσου των εδαφικών στρώσεων σε κάθε θέση με χρήση του κώδικα SHAKE (Schnabel et al 1973). Η μείωση του μέτρου διατμήσεως  $G$ , και η αύξηση της υστερητικής απόσβεσης  $\xi$ , αυξανόμενης της διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$ , δεν προήλθαν από πειραματικές μετρήσεις, αλλά από εμπειρικές καμπύλες της βιβλιογραφίας (Vucetic & Dobry 1991).

(β) επίσης μονοδιάστατα μή-γραμμικές, μή-ελαστικές αναλύσεις της κυματικής διάδοσης, με χρήση του κώδικα NL-DYAS (Gerolymos & Gazetas 2003). Ο κώδικας αυτός βασίζεται σε ένα ευέλικτο ανελαστικό καταστατικό προσομοίωμα, το BWGG, το οποίο αφενός μεν είναι συμβιβαστό με τις καμπύλες  $G = G(\gamma)$ ,  $\xi = \xi(\gamma)$  της ισοδυνάμως-γραμμικής ανάλυσης, αφετέρου δε μπορεί να αναπαράγει ποικίλες μορφές καμπυλών ανακυκλικής διάτμησης,  $\tau = \tau(\gamma)$ .

## 5.2 "Αντιστροφή" Καταγραφής, Διέγερση Υποβάθρου

Από την γεωτεχνική έρευνα προέκυψε ότι η *μάργα* που εμφανίζεται σε βάθος κυμαινόμενο από 15 m – 20 m από την επιφάνεια είναι ο κοινός "παρανομαστής" όλων των εδαφικών προφίλ. Επομένως, το (αγνώστου πάχους) στρώμα της μάργας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως το "*σεισμικό υπόβαθρο*" της πόλης της Λευκάδας.

Τούτο υπόνοεί ότι ο προσπίπτων σεισμικός κραδασμός στην κορυφή του υποβάθρου είναι κοινός σε όλες τις θέσεις του ενδιαφέροντος.

Ο υπολογιστικός προσδιορισμός του κραδασμού στο υπόβαθρο γίνεται με την παγκοσμίως καθιερωμένη διαδικασία αντιστροφής : κυματική ανάλυση με ισοδυνάμως-γραμμικό προσομοίωμα και την καταγραφή στην επιφάνεια ως "*συνοριακή συνθήκη*". Προς τούτο γίνεται η εύλογη προσεγγιστική παραδοχή ότι το επιταχυνσιογράφημα του Νοσοκομείου αντιπροσωπεύει τον κραδασμό στην επιφάνεια του ελευθέρου πεδίου. Η παραδοχή αυτή έχει ελεγχθεί : το λάθος είναι μόλις της τάξεως του 5% – 10% σε όλο το φάσμα συχνοτήτων, αμελητέο μπρός στην αναπόφευκτη

αβεβαιότητα των εδαφικών προφίλ. Η τελευταία εντέλει αντιμετωπίζεται μόνον μέσω παραμετρικής διερεύνησης.

Το Σχήμα 5.1 δίνει γραφικά τα αποτελέσματα της "αντιστροφής" αυτής. Η διέγερση, υπό την μορφή επιταχυνσιογραφήματος σε ελεύθερη επιφανειακή εκδήλωση της μάργας χαρακτηρίζεται από σαφώς μειωμένα πλάτη επιταχύνσεων. Η κορυφαία τιμή είναι 0.30 g και η μέγιστη φασματική 1.10 g — συγκρινόμενα με τα 0.42 g και 1.90 g, αντιστοίχως, στην εδαφική επιφάνεια. Ο ενισχυτικός ρόλος του εδάφους σε μεγάλο εύρος περιόδων ( $T > 0.20$  sec) είναι εμφανής από το φάσμα της εδαφικής ενίσχυσης  $A = A(T)$ . Από το φάσμα αυτό επίσης προκύπτει ότι η ενεργός ιδιοπερίοδος του εδαφικού σχηματισμού είναι ίση περίπου με 0.35 sec, στην οποία αντιστοιχεί ενίσχυση  $A \approx 2.8$ .

### **5.3 Κυματική Ανάλυση της Εδαφικής Απόκρισης σε Διάφορες Θέσεις**

Η ανωτέρω χρονοϊστορία επιταχύνσεως σε επιφανειακή εκδήλωση μάργας, χρησιμοποιείται τώρα καταλλήλως ως διέγερση στις θέσεις ΟΤΕ, Λιμένος, και Μαρίνας (3 θέσεις). Η κυματική απόκριση των αντιστοίχων εδαφικών προφίλ δίδει τα αποτελέσματα που σκιαγραφούνται :

- στα Σχήματα 5.2 – 5.6 από την ισοδυνάμως–γραμμική ανάλυση
- στα Σχήματα 5.7–5.16 απ' την μή–γραμμική ανελαστική ανάλυση

Η τελευταία σειρά αποτελεσμάτων περιλαμβάνει και τις κατανομές με το βάθος των κορυφαίων τιμών επιτάχυνσης  $A$ , διατμητικής τάσης  $\tau$ , και διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma$ . Δίδονται επίσης και δύο χαρακτηριστικοί βρόχοι υστερήσεως.

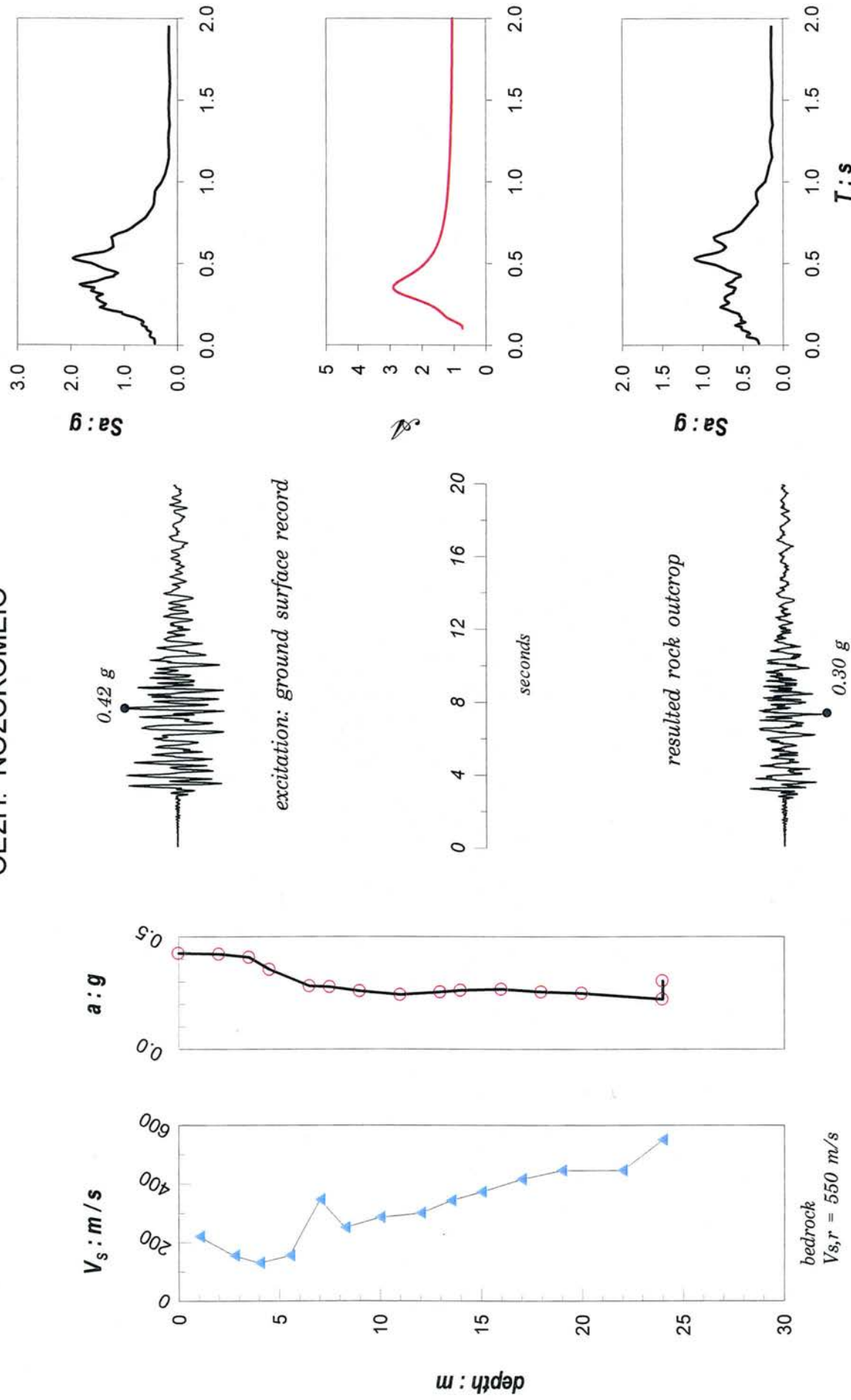
Συμπεραίνεται αμέσως ότι σε όλες τις εξετασθείσες θέσεις ο ρόλος του εδάφους είναι σαφής. Πιο σημαντικός και μάλιστα ενισχυτικός είναι στα σχετικώς "δύσκαμπτα" εδαφικά προφίλ. Αντιθέτως, στα πιο μαλακά προφίλ, όπως του λιμένος, επικρατεί η απομείωση των υψίσυχων συνιστωσών της διέγερσης έτσι ώστε η κορυφαία εδαφική επιτάχυνση μειώνεται στα 0.20 g – 0.25 g.

Συγκεφαλαίωση των αποτελεσμάτων απεικονίζεται στα Σχήματα 5.17 (α,β,γ). Συγκεκριμένα, το Σχ. 5.17(α) συγκρίνει όλα τα φάσματα αποκρίσεως που αντιστοιχούν στις αναλύσεις των Σχημάτων 5.7–5.16. Το Σχήμα 5.17 (β) συγκρίνει τα αντίστοιχα

σχήματα, όπου η διέγερση υποβάθρου προέκυψε μέσω εναλλακτικού εδαφικού προφίλ. Το Σχ. 5.17(γ) περικλείει τα φάσματα των δύο προηγούμενων σχημάτων.

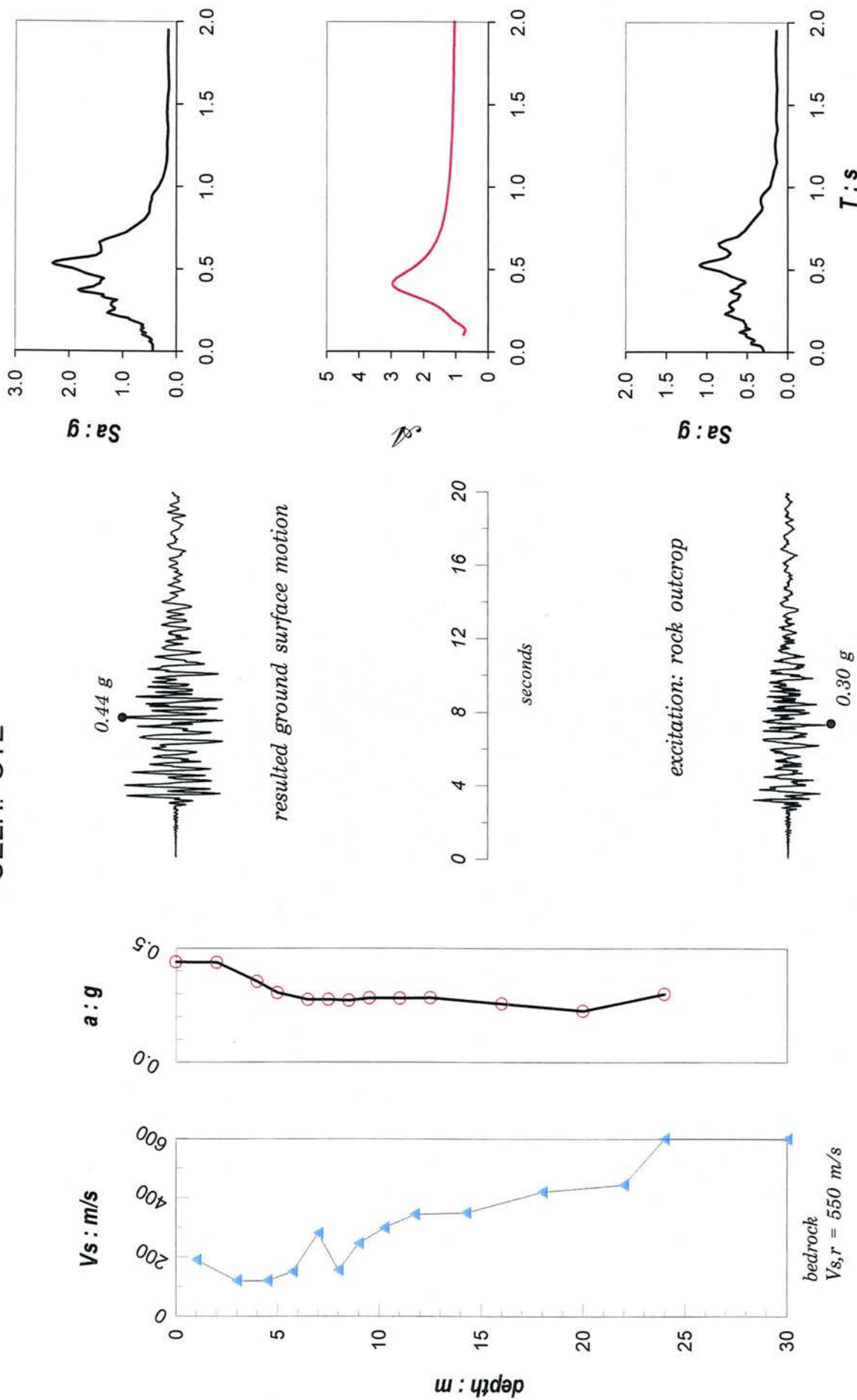
Η τεράστια διασπορά των "προβλεπομένων" φασμάτων δείχνει πόσο σημαντικό ρόλο έπαιξε η εδαφική απόκριση στην διαμόρφωση του σεισμικού κραδασμού. Τούτο δε παρά το γεγονός ότι εκ πρώτης όψεως το υπέδαφος της Λευκάδας φαίνεται ως ομοιόμορφο !

## ΘΕΣΗ: ΝΟΣΟΚΟΜΕΙΟ



**Σχήμα 5.1** Αποτελέσματα της αντίστροφης (ισοδύναμης γραμμικής) ανάλυσης για την αποσυνέλιξη του σεισμικού κραδασμού και τον υπολογισμό του στο σεισμικό υπόβαθρο. Ως “διέγερση” στην εδαφική επιφάνεια χρησιμοποιείται το επιταχυνσιογράφημα του Νοσοκομείου.

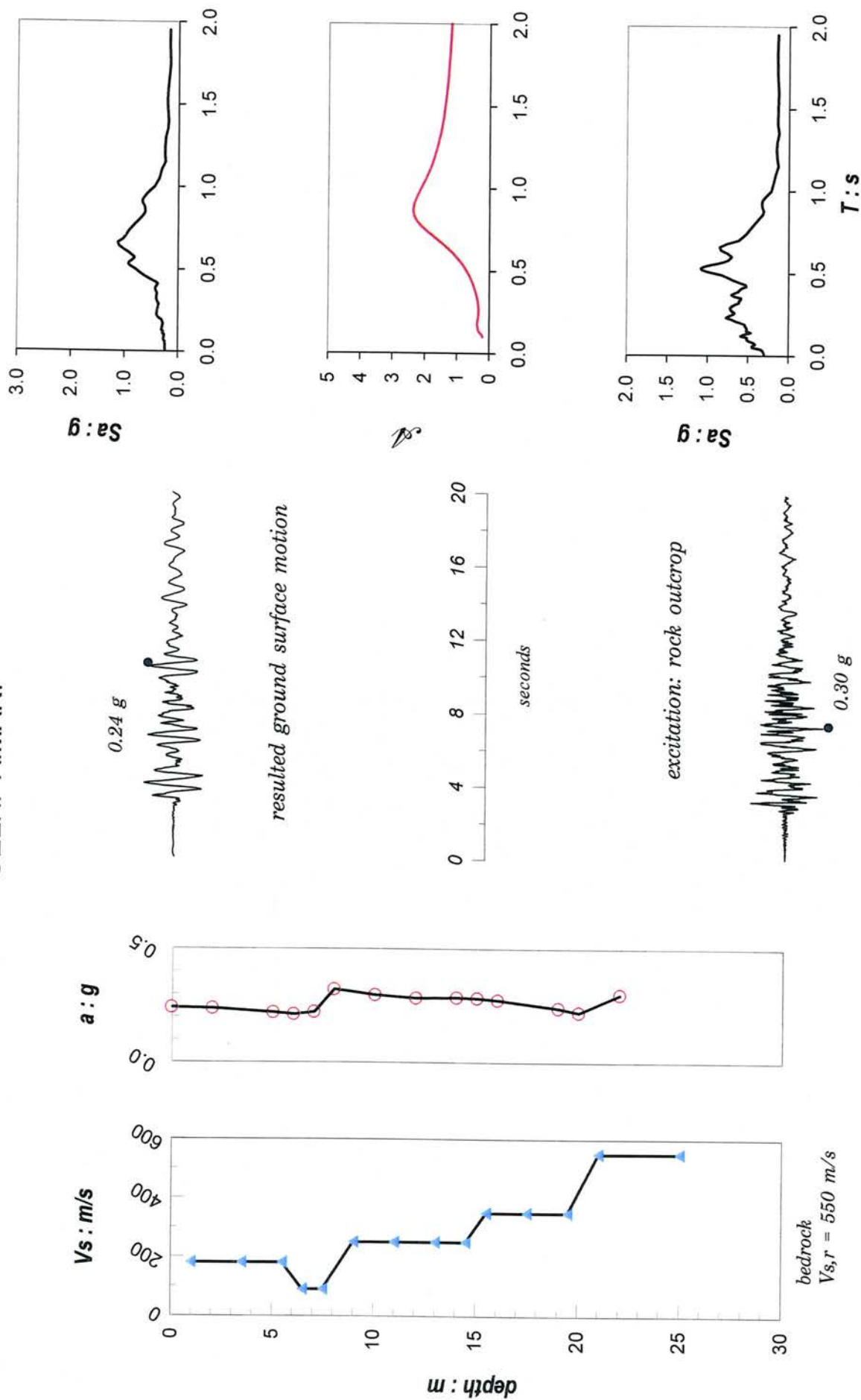
# ΘΕΣΗ: ΟΤΕ



**Σχήμα 5.2** Αποτελέσματα της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης για την περιοχή του ΟΤΕ. Ως διέγερση στο σεισμικό υπόβαθρο χρησιμοποιείται το τροποποιημένο από την αποσυνέλιξη επιταχυνσιογράφημα του Νοσοκομείου

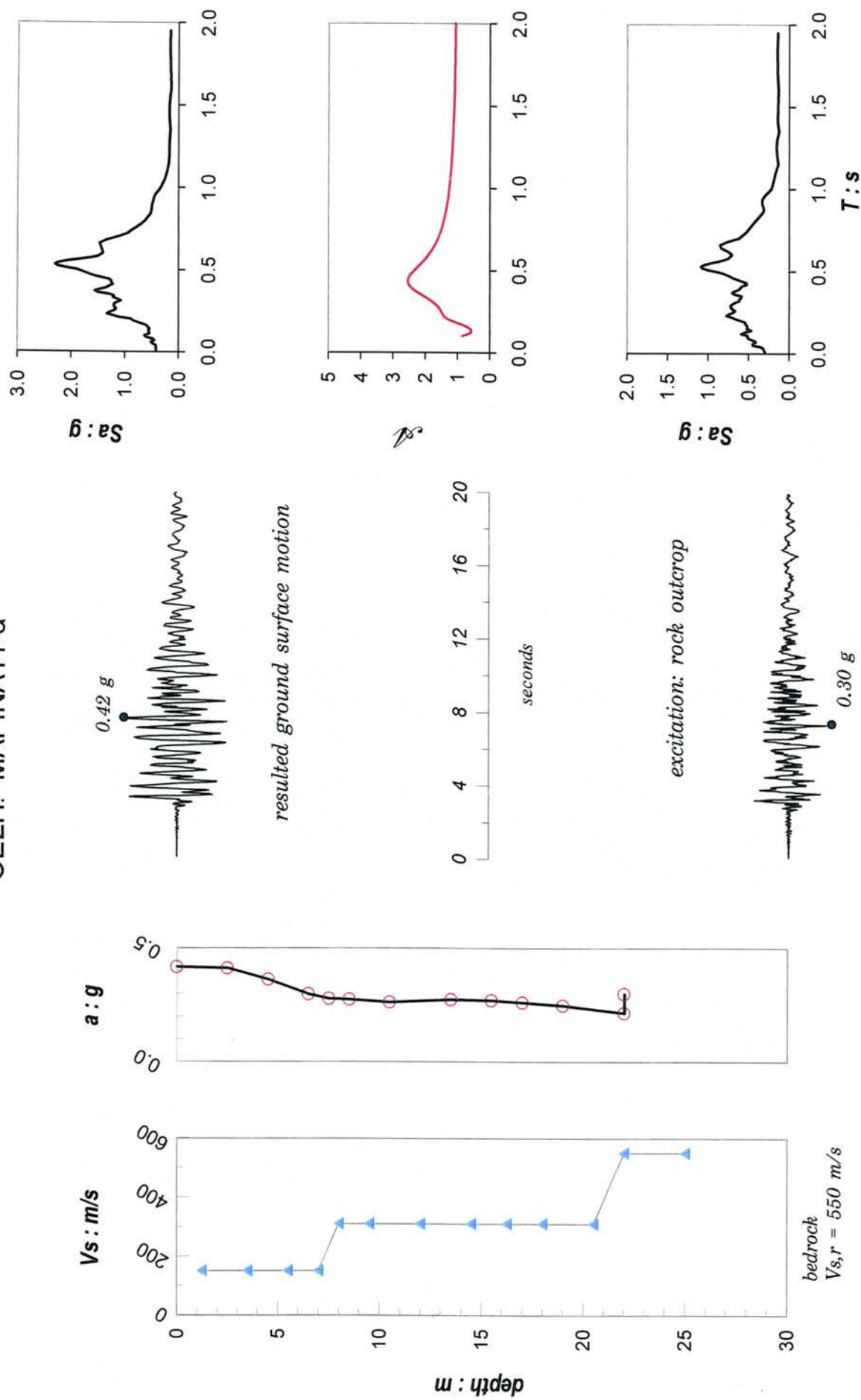


# ΘΕΣΗ: ΛΙΜΑΝΙ



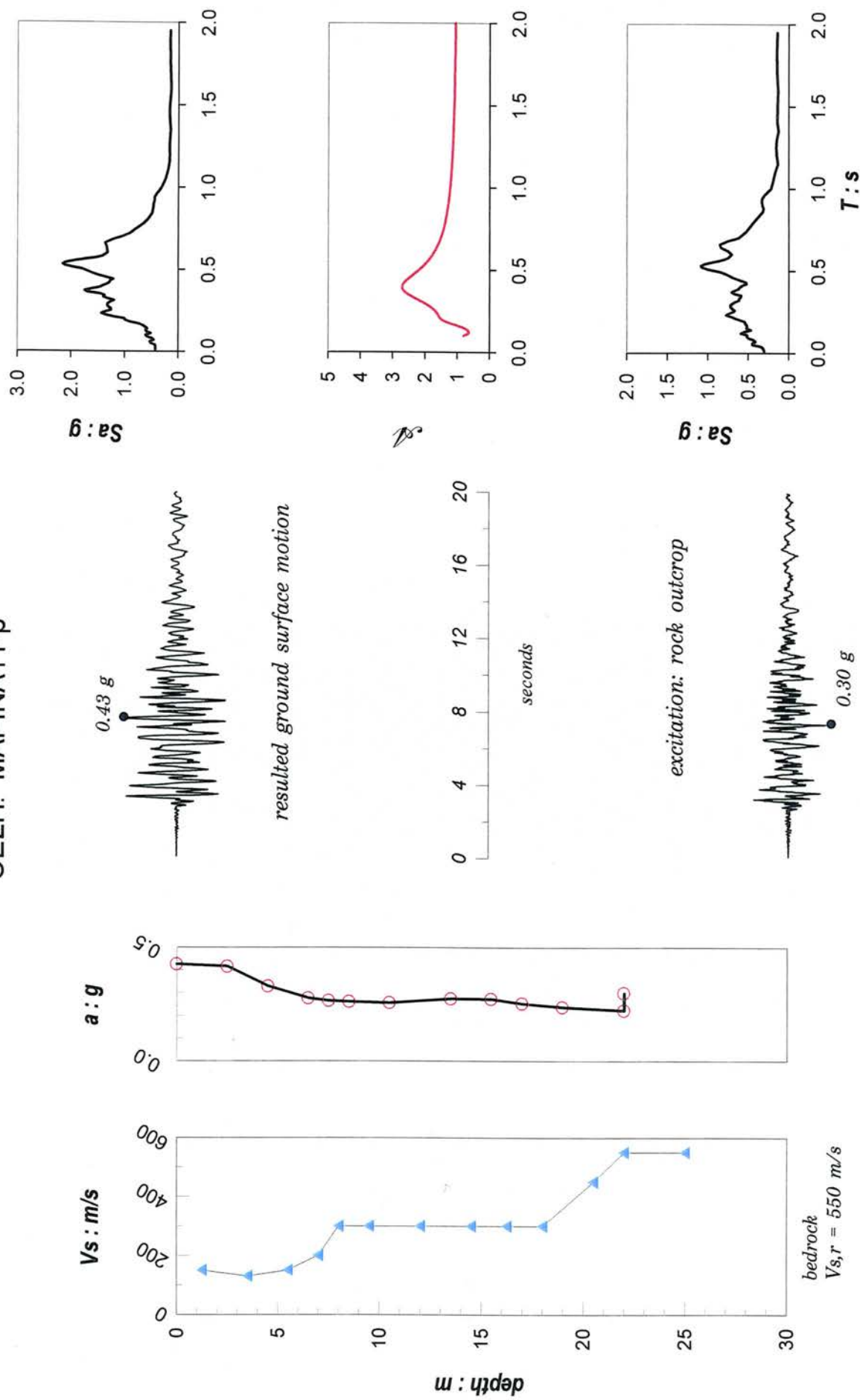
**Σχήμα 5.3** Αποτελέσματα της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης για την περιοχή του Λιμανιού. Ως διέγερση στο σεισμικό υπόβαθρο χρησιμοποιείται το τροποποιημένο από την αποσυνέλιξη επιταχυνσιογράφημα του Νοσοκομείου.

# ΘΕΣΗ: MAPINA11-α



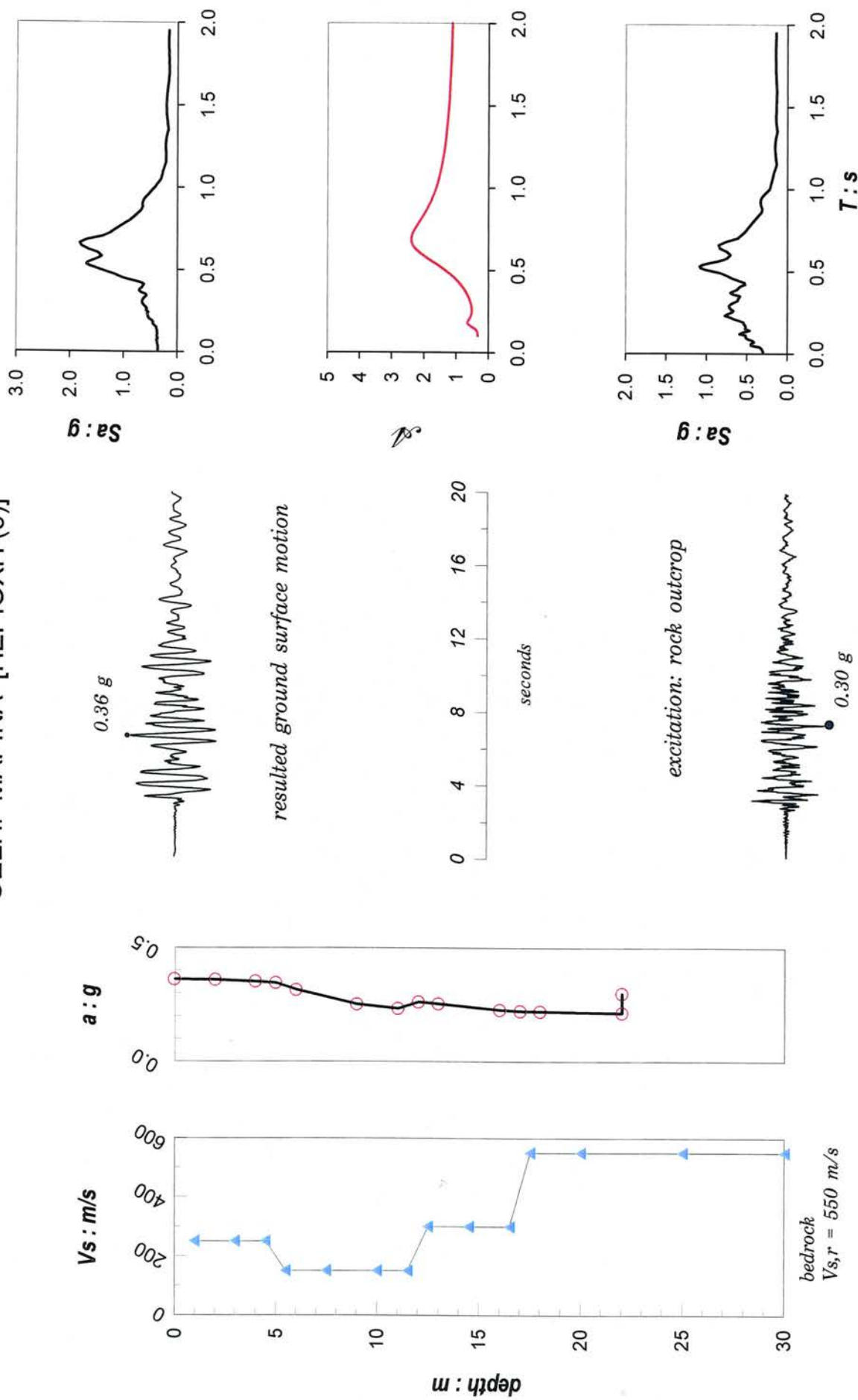
**Σχήμα 5.4α** Αποτελέσματα της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης για την περιοχή της Μαρίνας στην θέση 11-α. Ως διέγερση στο σεισμικό υπόβαθρο χρησιμοποιείται το τροποποιημένο από την αποσυνέλιξη επιταχυνσιογράφημα του Νοσοκομείου.

# ΘΕΣΗ: ΜΑΡΙΝΑ11-β



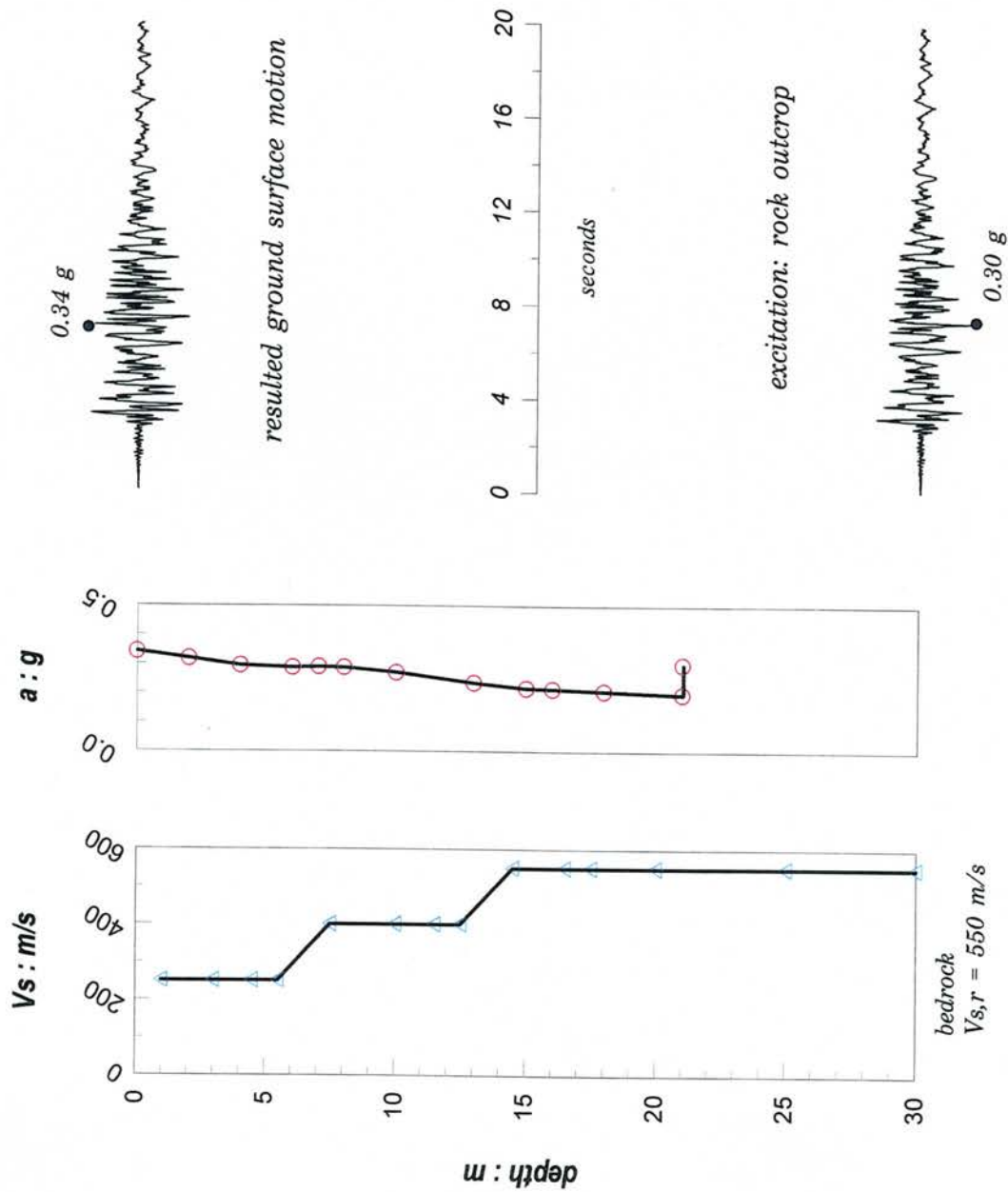
**Σχήμα 5.4β** Αποτελέσματα της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης για την περιοχή της Μαρίνας (θέση 11-β). Ως διέγερση στο σεισμικό υπόβαθρο χρησιμοποιείται το τροποποιημένο από την αποσυνέλιξη επιταχυνσιογράφημα του Νοσοκομείου.

# ΘΕΣΗ: ΜΑΡΙΝΑ [ΠΕΡΙΟΧΗ (δ)]



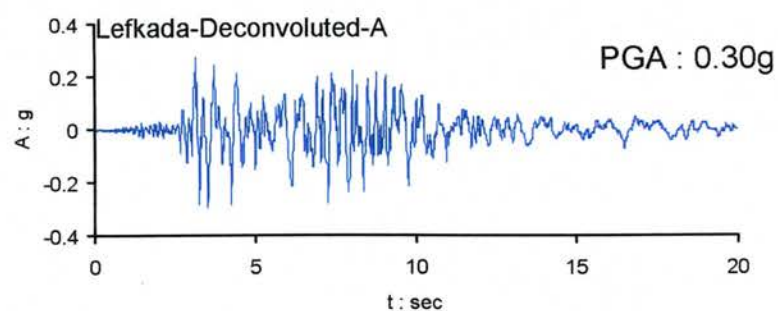
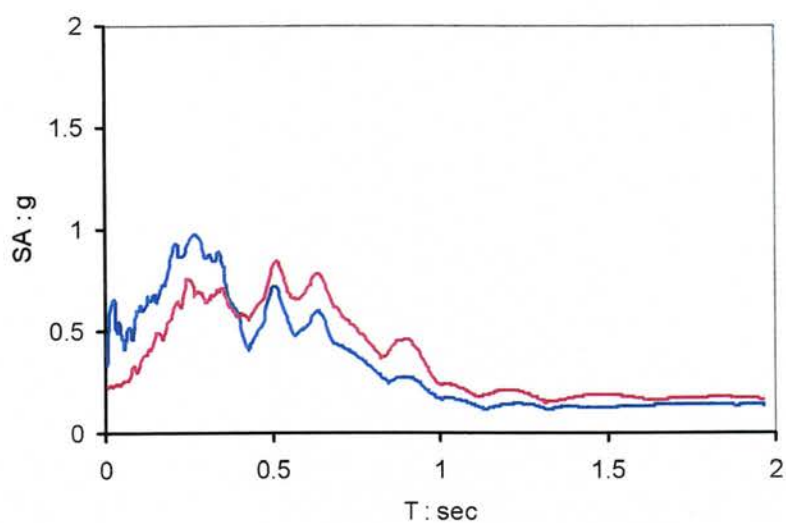
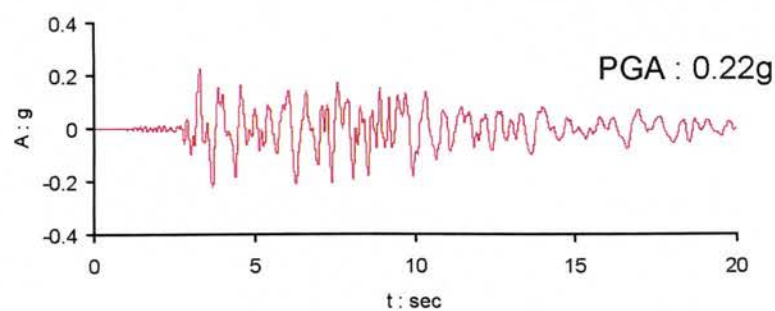
**Σχήμα 5.5** Αποτελέσματα της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης για την περιοχή της Μαρίνας (Περιοχή Γ). Ως διέγερση στο σεισμικό υπόβαθρο χρησιμοποιείται το τροποποιημένο από την αποσυνέλιξη επιταχυνσιογράφημα του Νοσοκομείου.

# ΘΕΣΗ: ΜΑΡΙΝΑ13 [Περιοχή (α) Πισίνας]

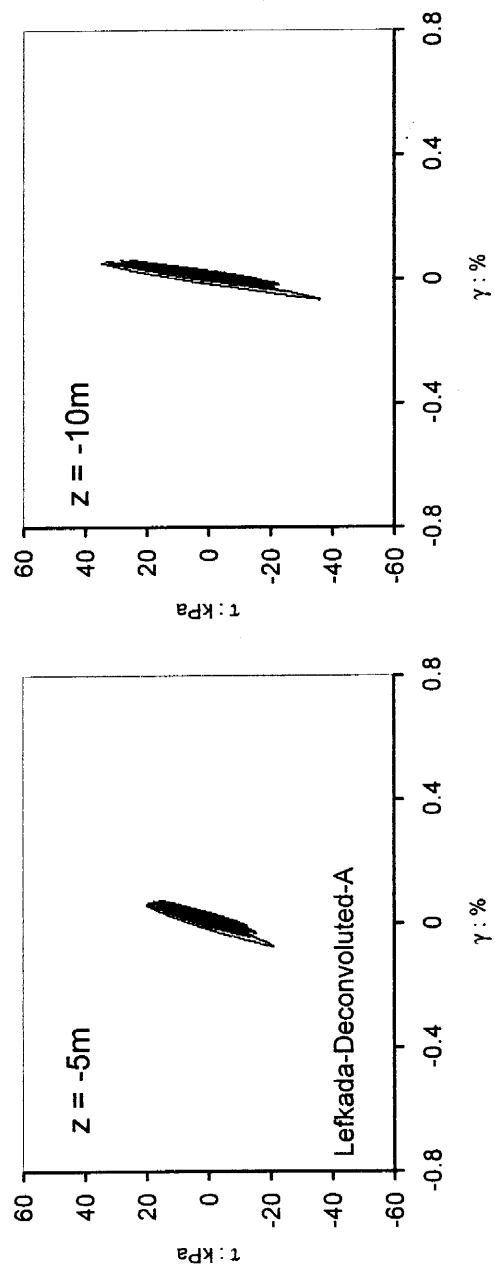
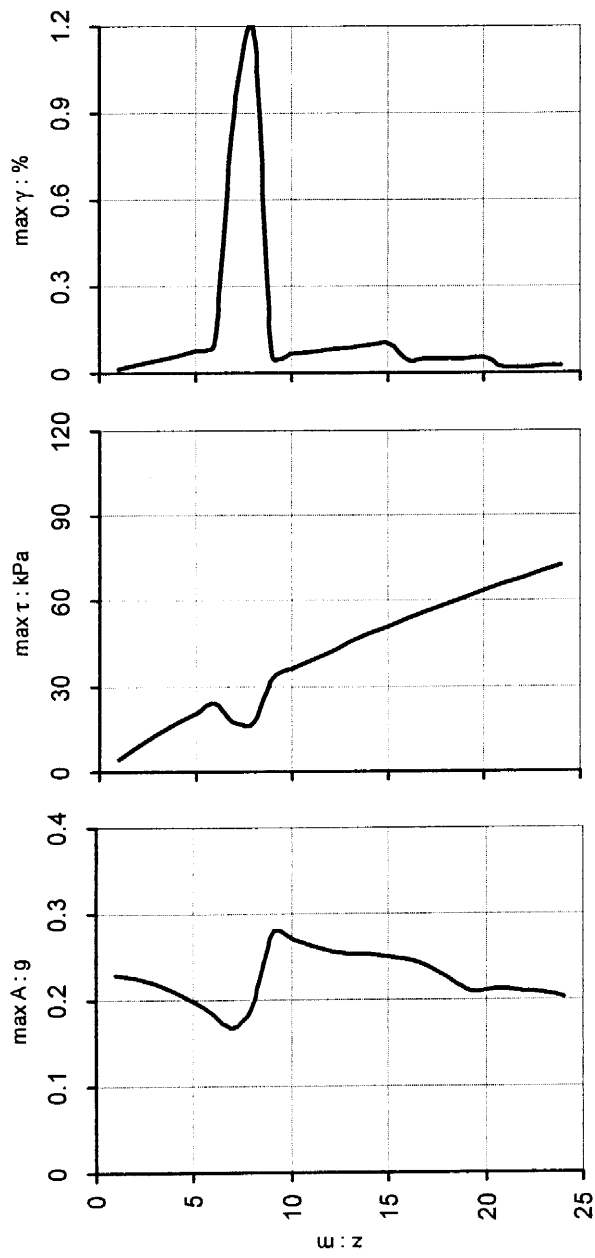


**Σχήμα 5.6** Αποτελέσματα της ισοδύναμης γραμμικής ανάλυσης για την περιοχή της Μαρίνας (θέση 13). Ως διέγερση στο σεισμικό υπόβαθρο χρησιμοποιείται το τροποποιημένο από την αποσυνέλξη επιταχυνσιογράφημα του Νοσοκομείου.



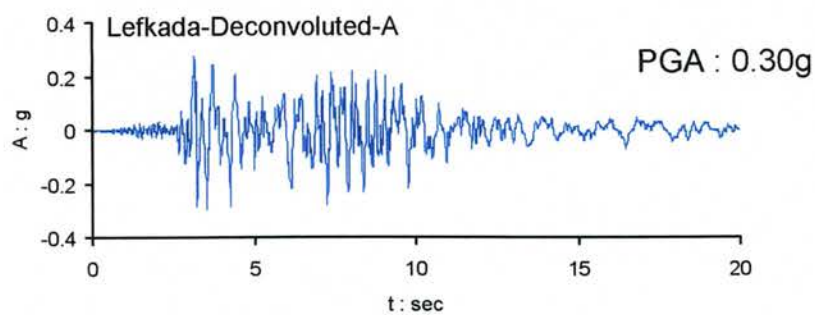
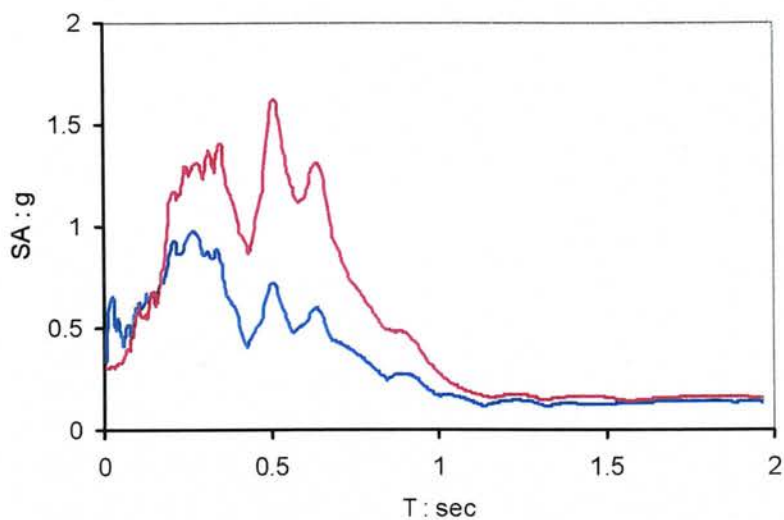
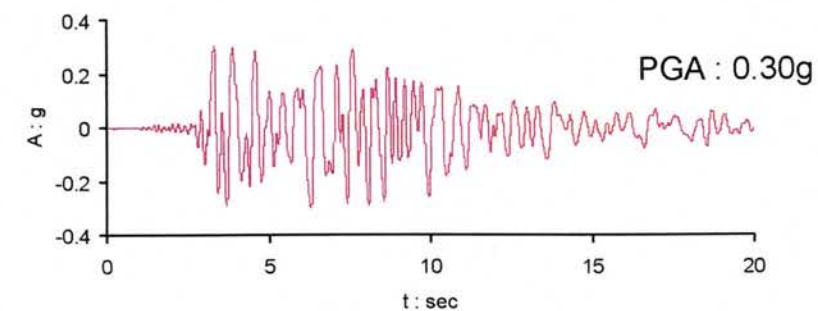


**Σχήμα 5.7:** Λιμάνι. Επιταχυνσιογραφήματα διέγερσης και απόκρισης στην επιφάνεια, σύγκριση φασμάτων απόκρισης

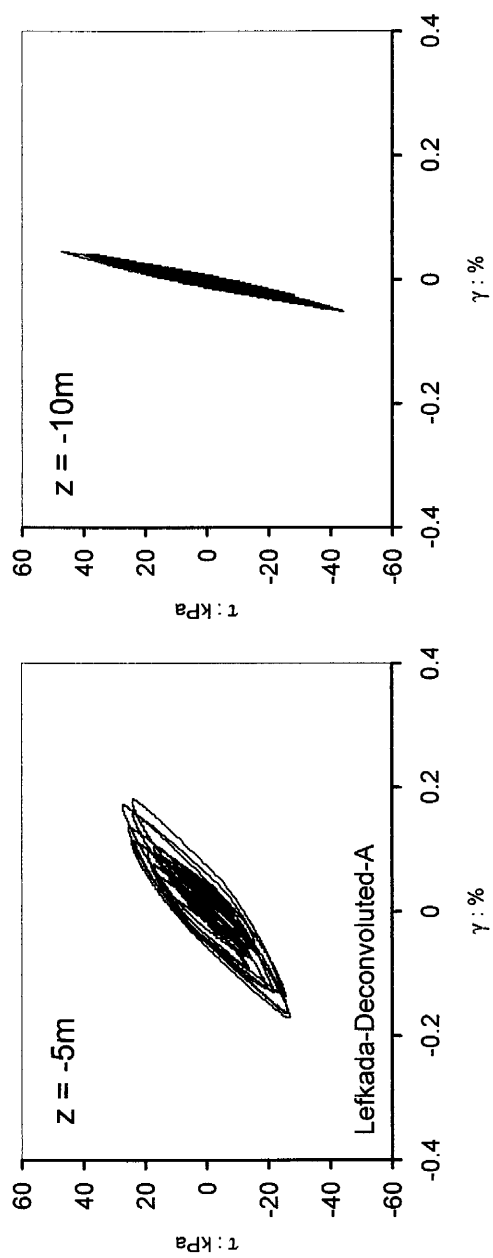
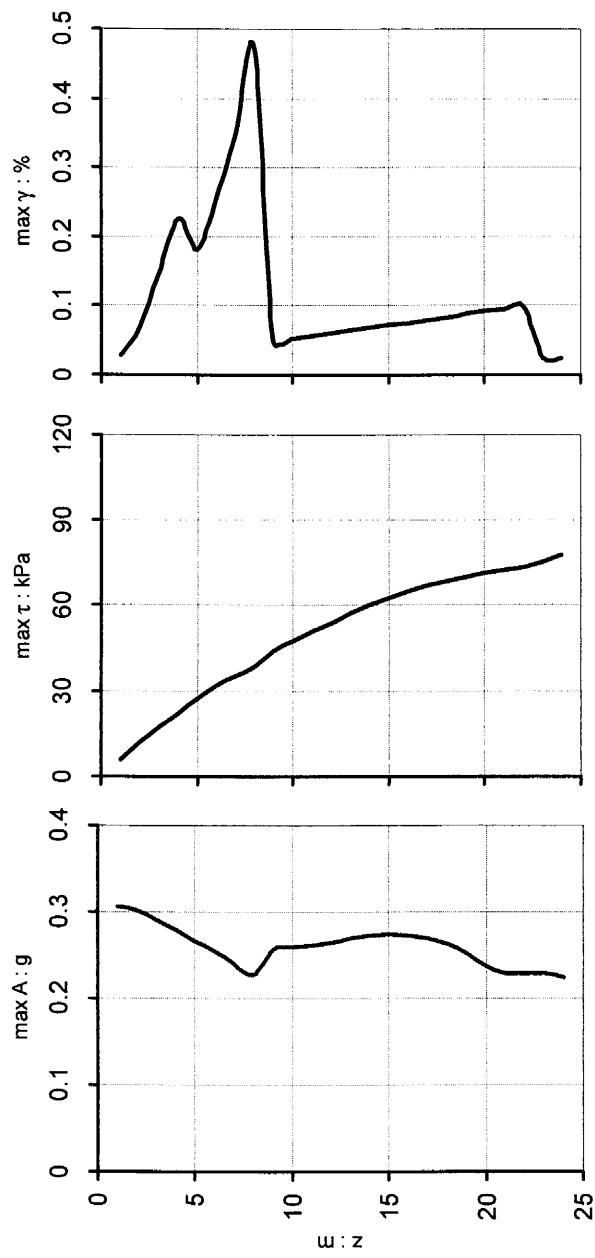


**Σχήμα 5.8:** Λιμάνι. Κατανομές μεγίστων επιταχύνσεων, διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων, Βρόχοι διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης σε δύο βάθη

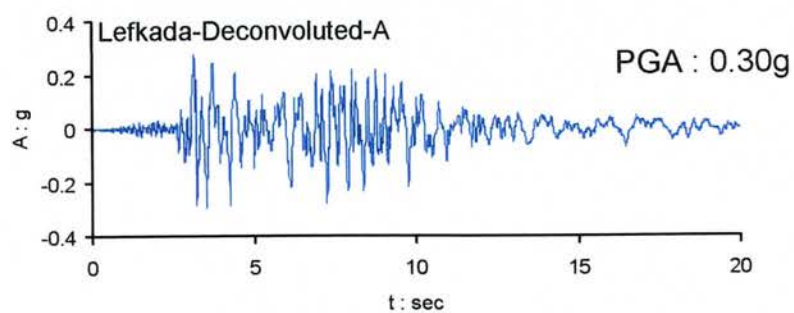
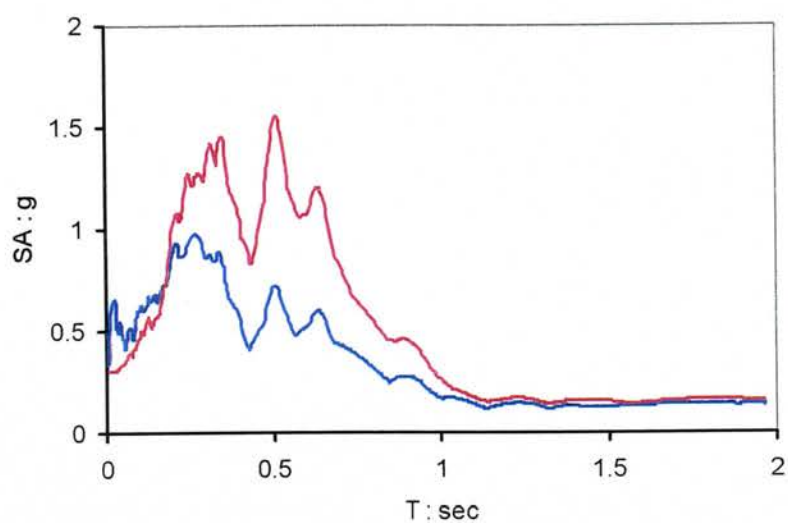
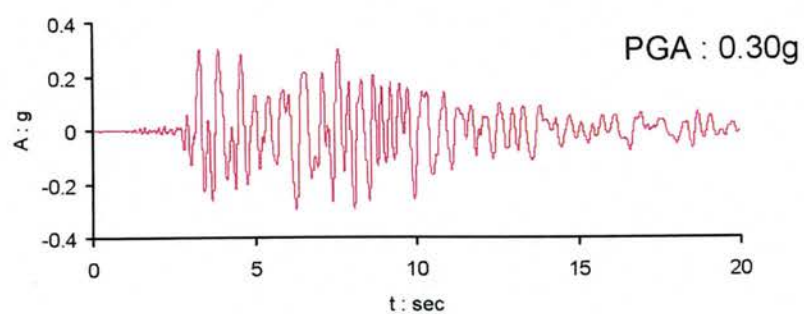




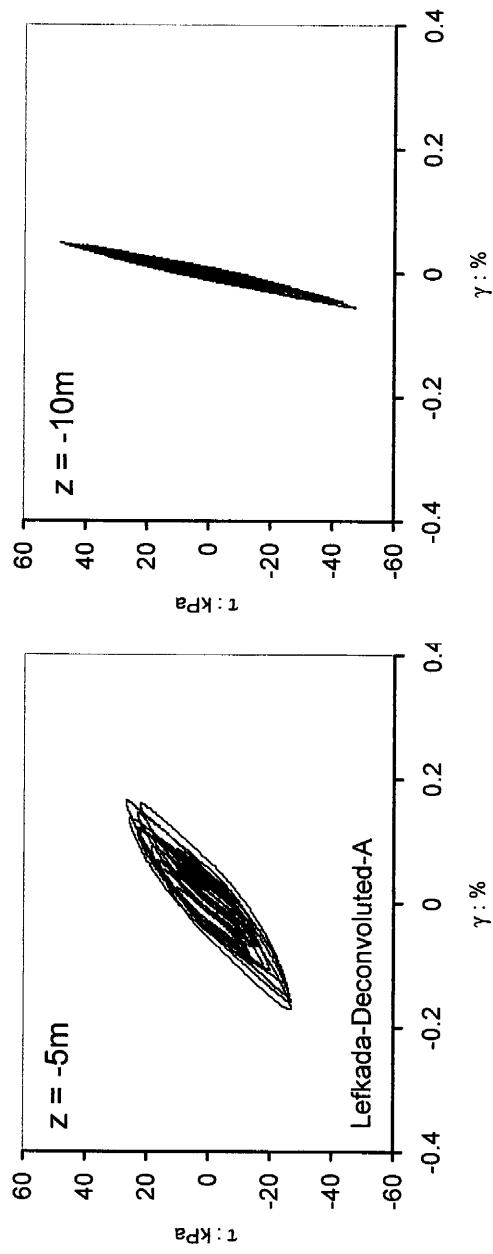
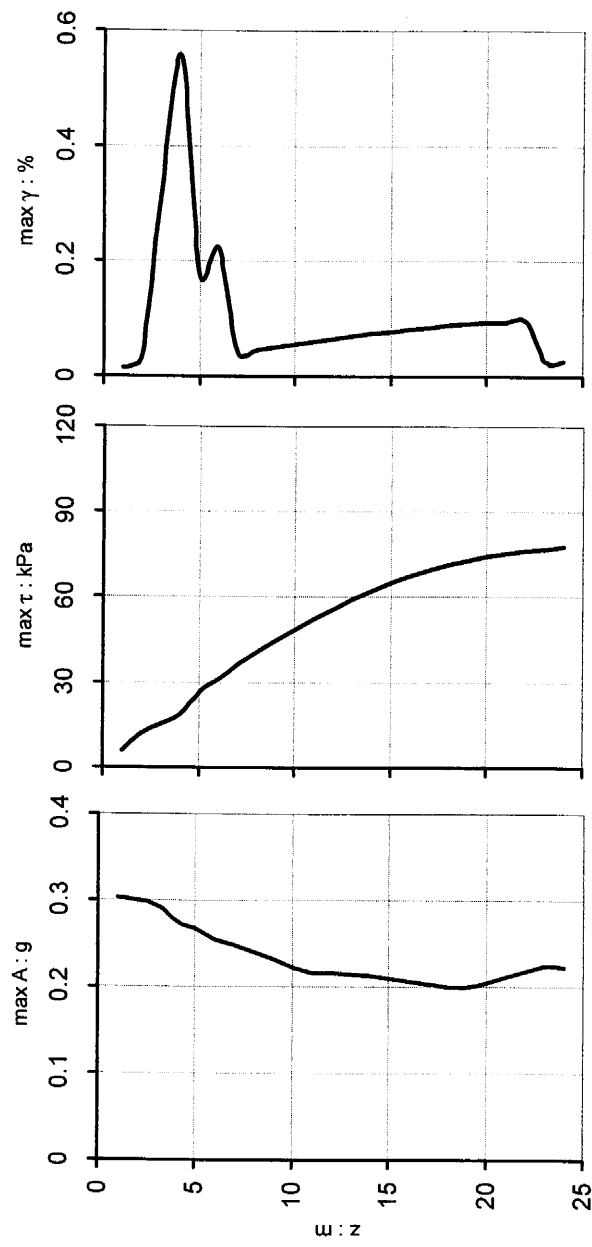
**Σχήμα 5.9:** *Μαρίνα, Παραλία – Διοικητήριο, Προφίλ (α).* Επιταχυνσιογραφήματα διέγερσης και απόκρισης στην επιφάνεια, σύγκριση φασμάτων απόκρισης



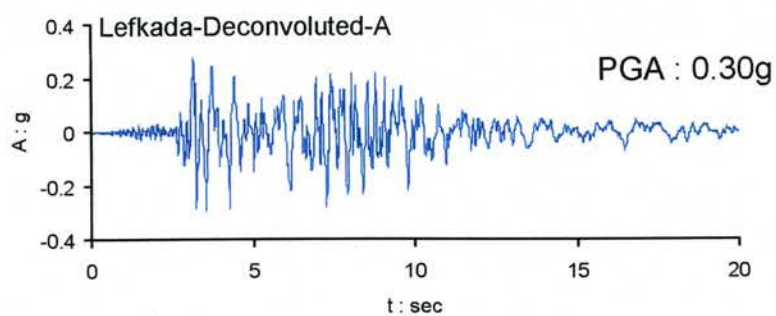
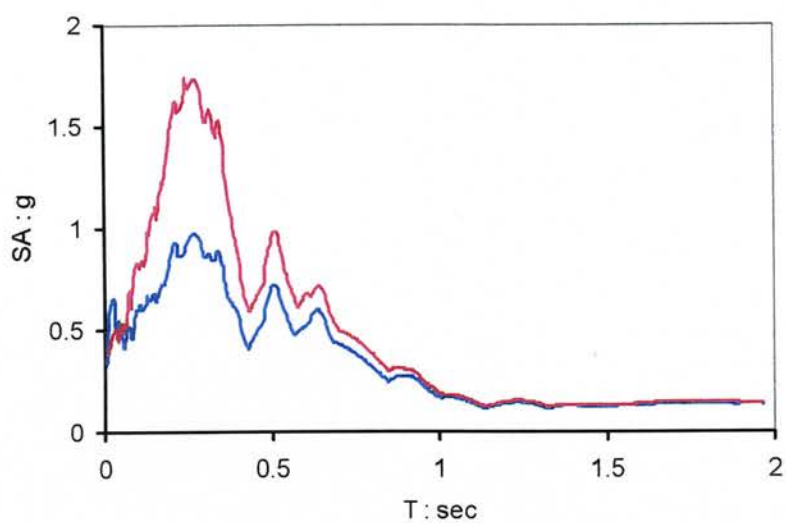
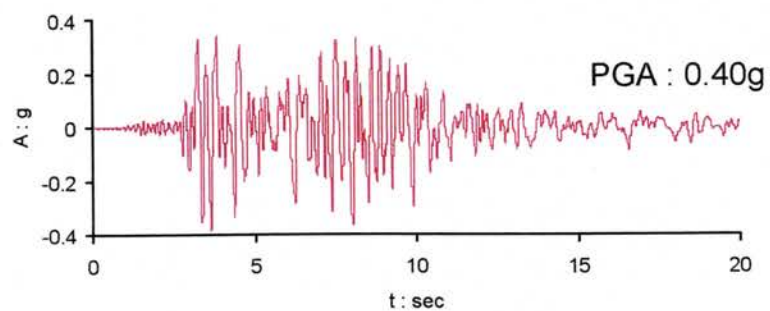
**Σχήμα 5.10:** Μαρίνα, Παραλία – Διοικητήριο, Προφίλ (α). Κατανομές μεγίστων επιταχύνσεων, διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων, Βρόχοι διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης σε δύο βάθη



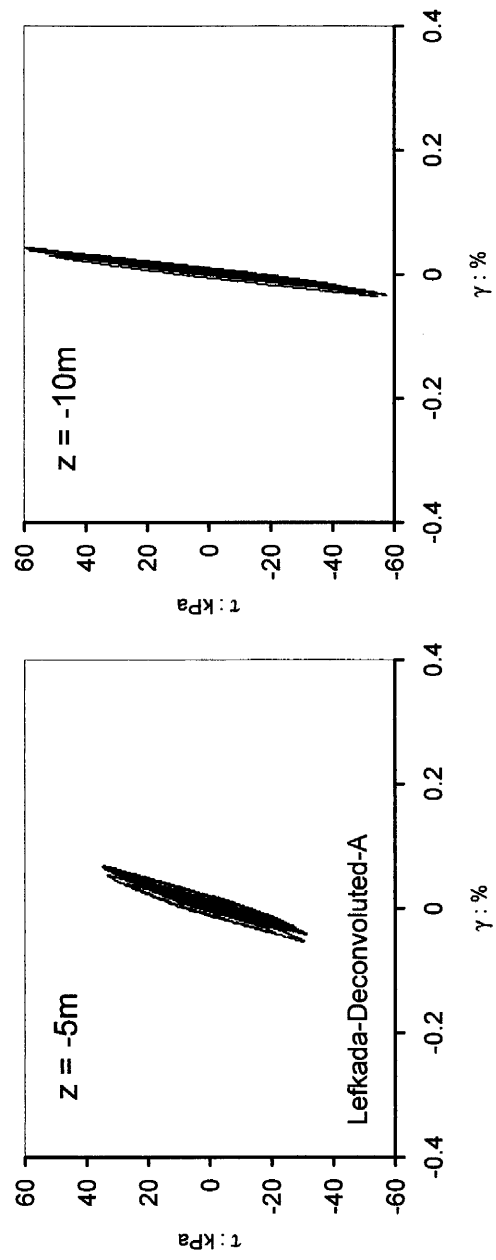
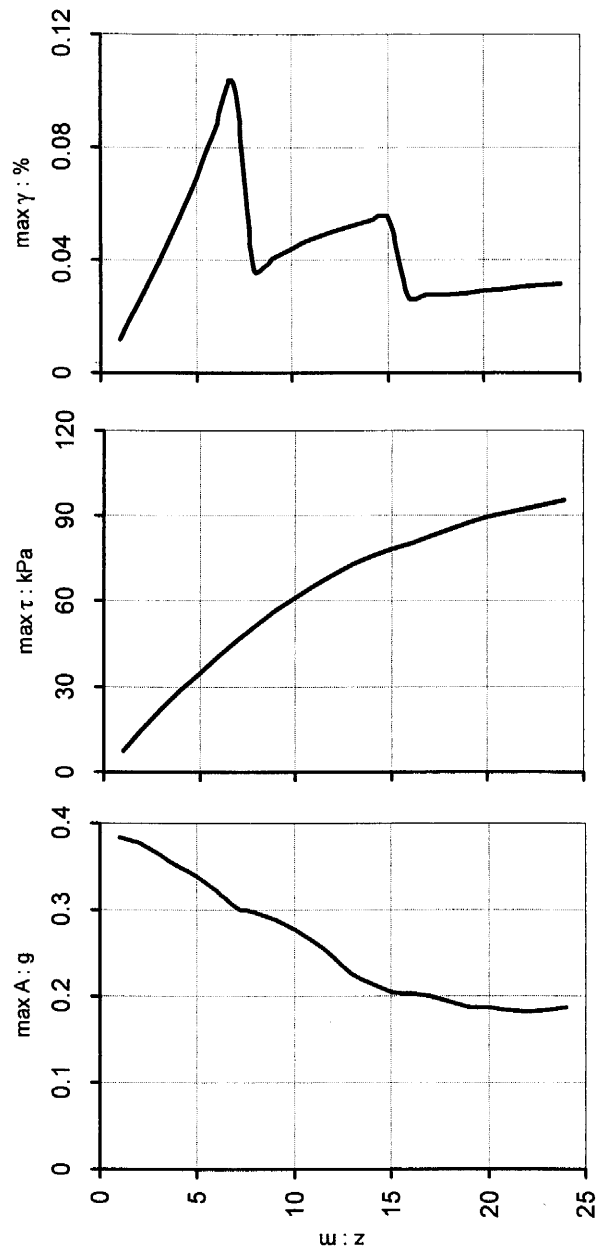
**Σχήμα 5.11:** Μαρίνα, Παραλία – Διοικητήριο, Προφίλ (β). Επιταχυνσιογραφήματα διέγερσης και απόκρισης στην επιφάνεια, σύγκριση φασμάτων απόκρισης



**Σχήμα 5.12:** Μαρίνα, Παραλία – Διοικητήριο, Προφίλ ( $\beta$ ). Κατανομές μεγίστων επιταχύνσεων, διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων, Βρόχοι διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης σε δύο βάθη

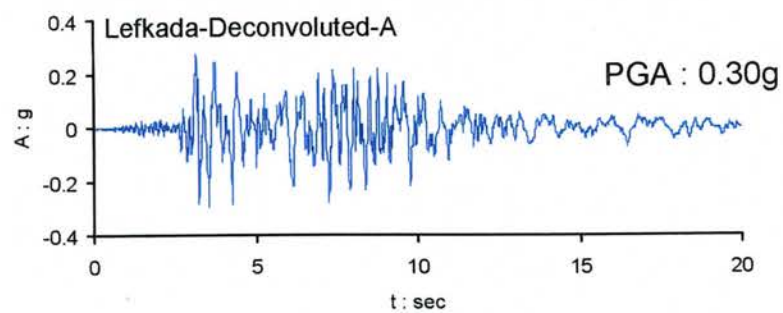
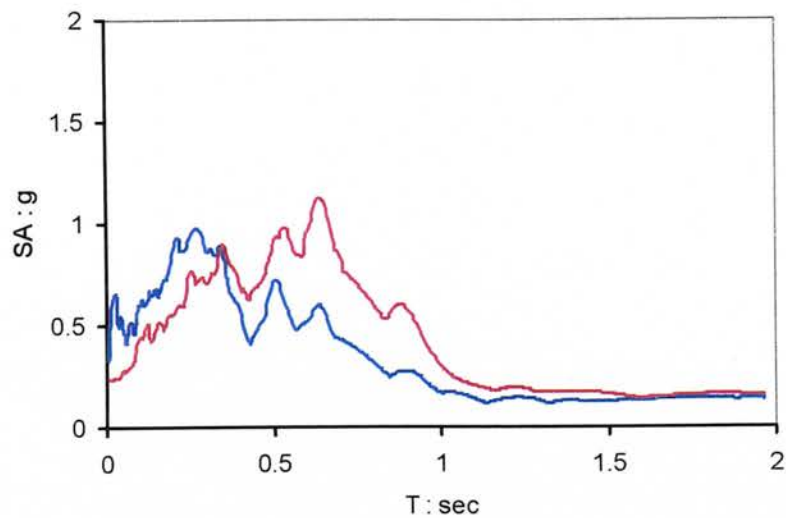
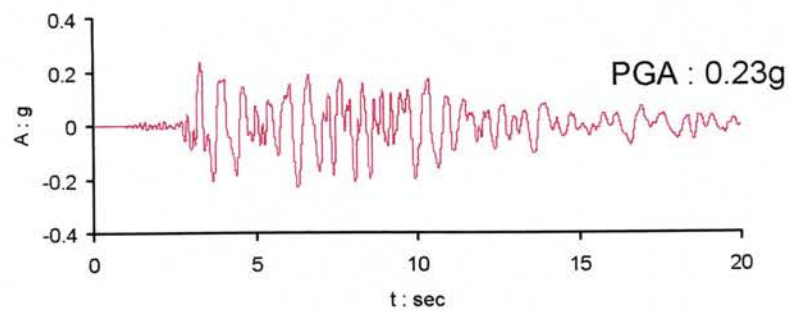


**Σχήμα 5.13:** Μαρίνα, Περιοχή πισίνας. Επιταχυνσιογραφήματα διέγερσης και απόκρισης στην επιφάνεια, σύγκριση φασμάτων απόκρισης

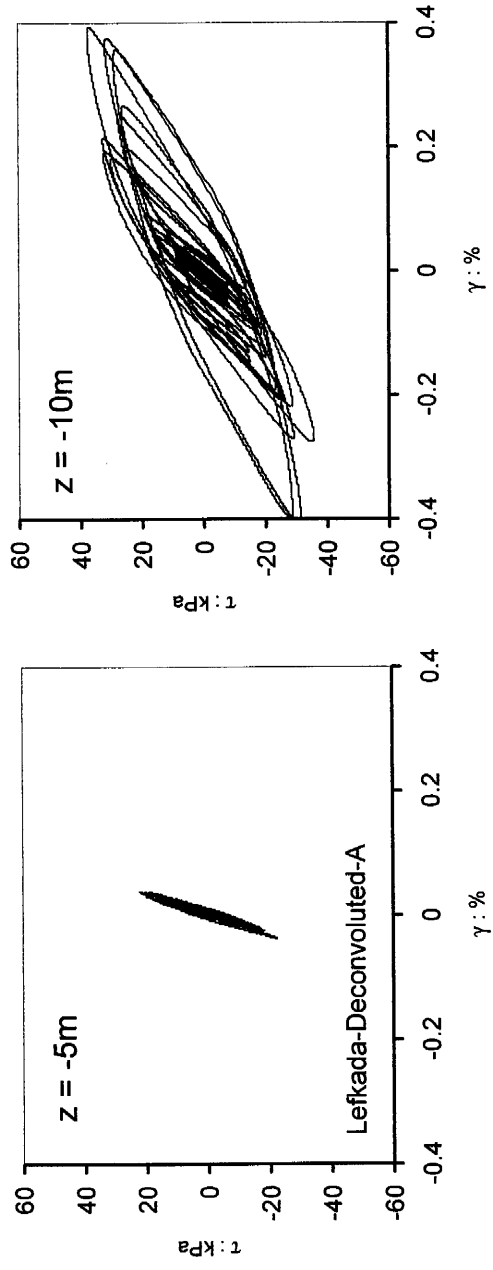
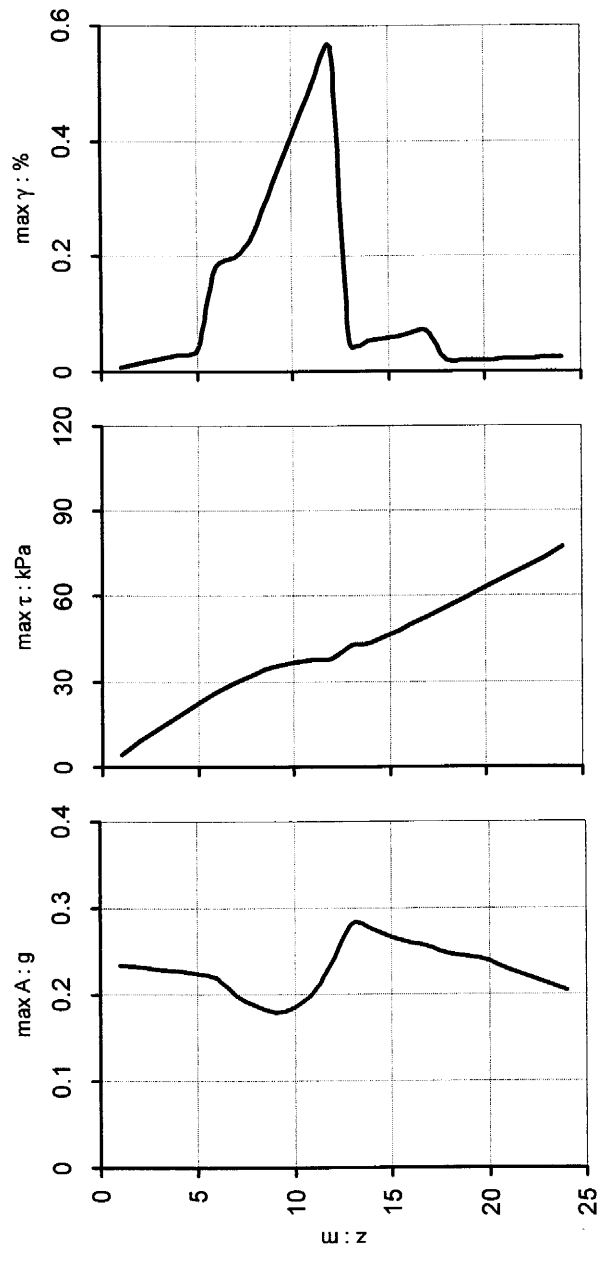


**Σχήμα 5.14: Μαρίνα, Περιοχή πισίνας. Κατανομές μεγίστων επιταχύνσεων, διατηρητικών τάσεων και παραμορφώσεων, Βρόχοι διατηρητικής τάσης-παραμόρφωσης σε δύο βάθη**

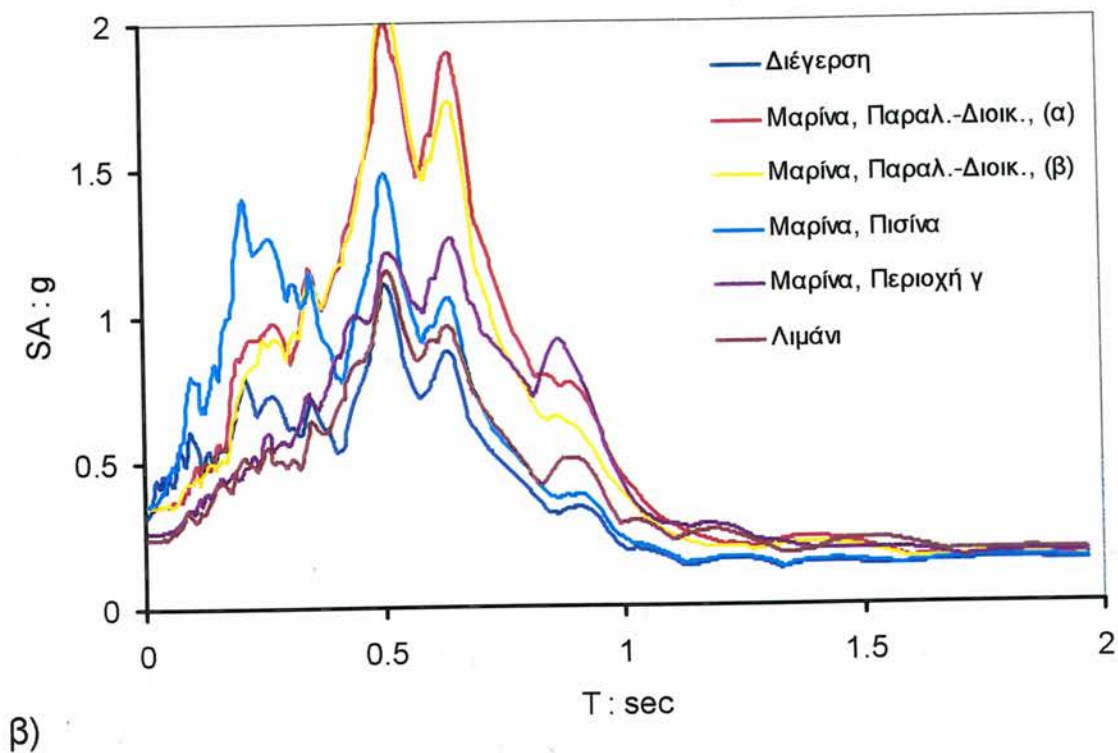
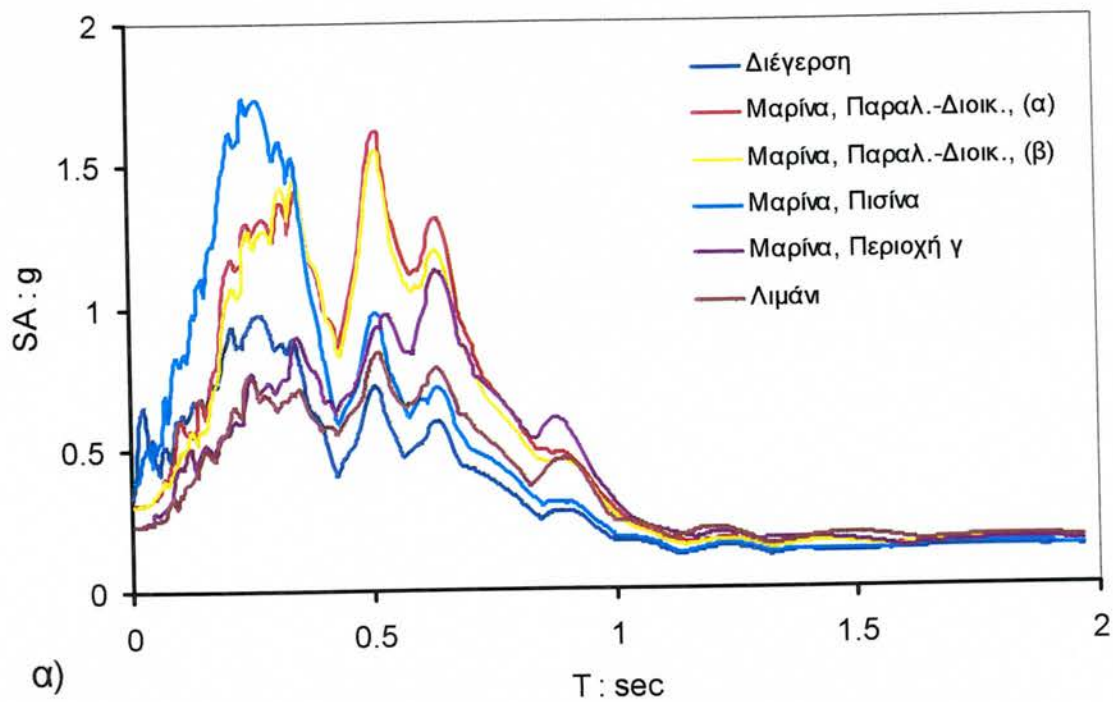




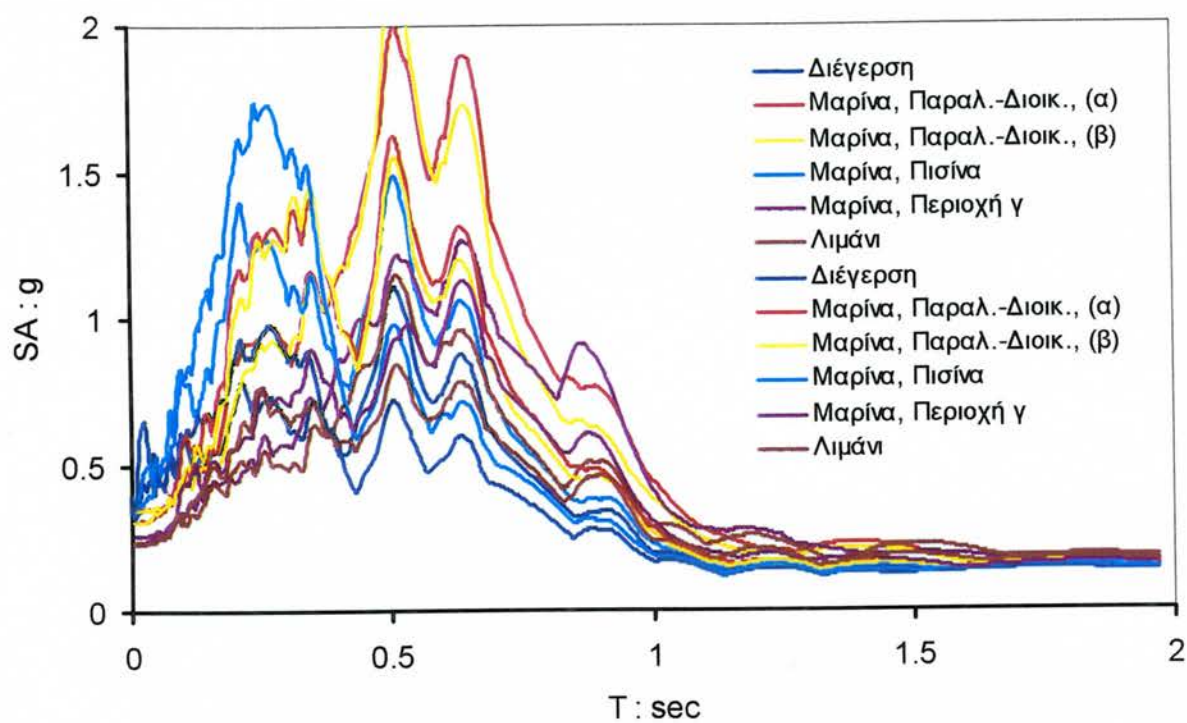
**Σχήμα 5.15:** *Μαρίνα, Περιοχή δ.* Επιταχυνσιογραφήματα διέγερσης και απόκρισης στην επιφάνεια, σύγκριση φασμάτων απόκρισης



**Σχήμα 5.16:** Μαρίνα, Περιοχή δ.Κατανομές μεγίστων επιταχύνσεων, διατμητικών τάσεων και παραμορφώσεων, Βρόχοι διατμητικής τάσης-παραμόρφωσης σε δύο βάθη



**Σχήμα 5.17:** Συγκεντρωτικά Φάσματα απόκρισης για την διέγερση α) Λευκάδα-deconvoluted-A, και β) Λευκάδα-deconvoluted-B



**Σχήμα 5.17γ:** Συγκεντρωτικά Φάσματα απόκρισης