

# Ο σεισμός της Λευκάδας (M=6.2, 14 Αυγ. 2003): Ισχυρή Εδαφική Κίνηση και Αποτίμηση του ρόλου του εδάφους

The Lefkas Earthquake (M=6.2, Aug.14, 2003): Strong Ground Motion and valuation of the subsoil's impact

ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ, Α.Ι. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Κύριος Ερευνητής, ΙΤΣΑΚ  
ΜΑΡΓΑΡΗΣ, Β. Ν. Δρ. Σεισμολόγος, Κύριος Ερευνητής, ΙΤΣΑΚ  
ΚΛΗΜΗΣ, Ν. Σ. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Κύριος Ερευνητής, ΙΤΣΑΚ  
ΜΑΚΡΑ, Κ. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Δόκιμος Ερευνητής ΙΤΣΑΚ  
ΠΙΤΙΛΑΚΗΣ Κ. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Α.Π.Θ.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα σεισμολογικά δεδομένα του σεισμού της 14<sup>ης</sup> Αυγούστου 2003 στην Λευκάδα καθώς και οι παράμετροι του ισχυρού σεισμικού κραδασμού από καταγραφές του μόνιμου εθνικού δικτύου επιταχυνσιογράφων του ΙΤΣΑΚ. Επίσης, παρουσιάζονται αποτελέσματα θεωρητικών αναλύσεων εδαφικής απόκρισης με στόχο τον καθορισμό του ρόλου του εδάφους και της συσχέτισής του με την έκταση και το είδος των παρατηρηθεισών βλαβών. Τα αποτελέσματα φανερώνουν ότι η παρουσία μικρού πάχους χαλαρών αμμωδών/ ιλυωδών ή μαλακών συνεκτικών σχηματισμών, συνεισέφεραν σημαντικά στην ενίσχυση / απομείωση και στο συχνοτικό περιεχόμενο του σεισμικού κραδασμού.

**ABSTRACT :** This paper presents the seismological data and the strong ground motion parameters of the Lefkas earthquake on August 14, 2003 stemming from recorded accelerograms of the ITSAK's permanent network. Additionally, results of theoretical site response analyses aiming to the definition of the subsoil's role and its relation with the spatial variation and the type of observed damage are presented and discussed. The results manifest that the presence of thin loose sandy-silty and soft cohesive soil layers, contributed considerably in the amplification and frequency content of seismic vibration.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σεισμός της 14<sup>ης</sup> Αυγούστου 2003 που είχε επίκεντρο στη Δυτική περιοχή της Λευκάδας και έγινε ιδιαίτερα αισθητός στην ευρύτερη περιοχή, αποτέλεσε ένα σεισμικό φαινόμενο ιδιαίτερης σημασίας για τη χώρα μας, κυρίως λόγω των σημαντικών επιπτώσεων του στο μη-δομημένο και φυσικό περιβάλλον. Οι καταγεγραμμένες κορυφαίες τιμές επιτάχυνσης στην πόλη της Λευκάδας ξεπέρασαν το 0.40g, ενώ η απογραφή των ζημιών παρουσίασε διαφοροποιήσεις τόσο στην ένταση όσο και στο είδος στο κέντρο της πόλης, συγκριτικά με άλλες περιοχές. Αντικείμενο της εργασίας είναι η παρουσίαση των καταγραφών του μόνιμου δικτύου των επιταχυνσιογράφων του ΙΤΣΑΚ, των παραμέτρων του σεισμού και η διερεύνηση της συνεισφοράς του υπεδάφους στην ένταση και το συχνοτικό περιεχόμενο του σεισμικού κραδασμού στην επιφάνεια και

της συσχέτισης με την έκταση και το είδος των παρατηρηθεισών βλαβών.

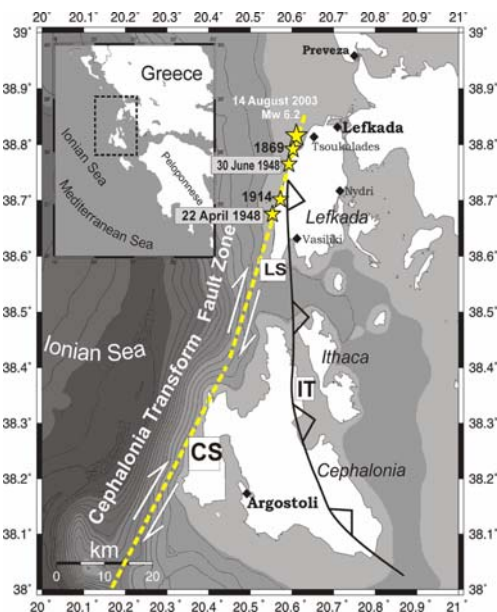
## 2. ΙΣΧΥΡΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ

### 2.1 Σεισμολογικά – Σεισμοτεκτονικά Δεδομένα

Στις 14 Αυγούστου 2003 και τοπική ώρα 08:15 (05:15GMT) συνέβη ισχυρός σεισμός μεγέθους 6.2 στις δυτικές ακτές της Λευκάδας (38.761°N, 20.599°E) (Karakostas et al., 2004). Η δόνηση έγινε ιδιαίτερα αισθητή σ' όλο το νησί καθώς και στις γειτονικές περιοχές της Δυτικής Ελλάδας. Η σεισμικότητα της περιοχής, που αποτελεί την πλέον σεισμικά ενεργή περιοχή του Ελληνικού χώρου, συνδέεται με μία δεξιόστροφη διάρρηξη παράταξης (dextral strike-slip) η οποία εκτείνεται από το ΝΔ άκρο της Κεφαλονιάς μέχρι το ΒΔ άκρο της Λευκάδας. Το σεισμικό ρήγμα μπορεί να χω-

ρισθεί σε δύο τμήματα αυτό της Κεφαλονιάς (CS) και το αντίστοιχο της Λευκάδας (LS) το οποίο εκτείνεται βορειότερα (σχήμα 1).

Η μελέτη της σεισμικής ακολουθίας του υπόψη σεισμού με βάση τηλεσεισμικές κυματομορφές (Benetatos et al., 2005) έδειξε ότι ο κύριος σεισμός προήλθε από την διέγερση πολλαπλών σεισμικών πηγών κατά μήκος του προαναφερομένου ρήγματος μετασχηματισμού κοντά στις βορειοδυτικές ακτές της Λευκάδας. Οι ίδιοι ερευνητές καθόρισαν ότι ο κύριος σεισμός της Λευκάδας προέκυψε από την διέγερση τριών διαφορετικών σεισμικών πηγών κατά μήκος ενός ρήγματος με διεύθυνση ~N12°E, ενώ η διάρρηξη ξεκίνησε βόρεια της Λευκάδας και συνεχίστηκε νοτιότερα προς την Κεφαλονιά. Το πρώτο σεισμικό συμβάν συνέβη στο βορειότερο σημείο του ρήγματος πολύ κοντά στην πόλη της Λευκάδας και σε εστιακό βάθος περίπου 15 km, ενώ 2.5 sec αργότερα, λίγο νοτιότερα, συνέβη το δεύτερο σε μέσο βάθος 11 km. Το τρίτο σεισμικό γεγονός συνέβη 14 sec μετά το δεύτερο σε βάθος 15 km, στα βόρεια του νησιού της Κεφαλονιάς. Με βάση τη συνολική σεισμική ροπή του κύριου σεισμού ( $M_0=22.3 \cdot 10^{24}$  dyne.cm) προσδιορίστηκε το μέγεθος  $M_w=6.2$ , ενώ η προκύπτουσα σεισμική διάρκεια είναι 16 sec.



Σχήμα 1. Το δεξιόστροφο ρήγμα μετασχηματισμού της Κεφαλονιάς (CS) και το αντίστοιχο της Λευκάδας (LS). Τα επίκεντρα των σεισμών 14<sup>ης</sup> Αυγ. 2003 και 22<sup>ας</sup> Απρ. 1948 απεικονίζονται με άστρα (Benetatos et al., 2005).

Figure 1. The dextral transform fault of the Cephalonia (CS) and the corresponding (LS) of the Lefkada segment. The 14 Aug. 2005, and 14 Apr. 1948 epicenters are shown by stars (Benetatos et al., 2005).

Οι μηχανισμοί γένεσης των δύο πλέον ισχυρών δονήσεων (δεύτερη και τρίτη) είναι 2<sup>ο</sup> Αζιμούθιο:12<sup>ο</sup> Κλίση:81<sup>ο</sup> Γωνία Ολίσθ:174<sup>ο</sup> και 3<sup>ο</sup> Αζιμούθιο:20<sup>ο</sup> Κλίση:63<sup>ο</sup> Γωνία Ολίσθ:-179<sup>ο</sup>.

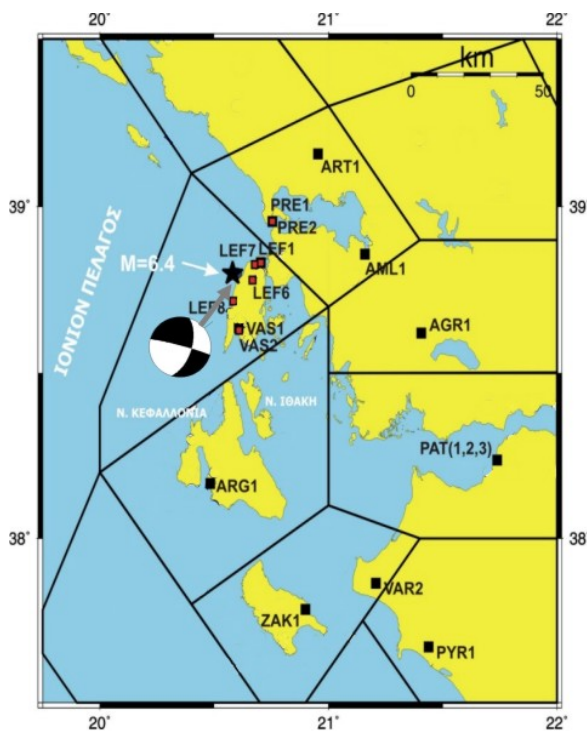
Στο ίδιο συμπέρασμα περί ενός πολλαπλού σεισμικού γεγονότος, κατέληξαν με παρόμοια μεθοδολογία οι Zahradnik et al.(2005), θεωρώντας μία ακολουθία από τέσσερα σεισμικά συμβάντα και σεισμική διάρρηξη με κατεύθυνση από Βορρά προς Νότο.

Οι μετασεισμοί που ακολούθησαν τον κύριο σεισμό ταξινομούνται γεωγραφικά σε δύο διακριτές ομάδες, η μία στα βόρεια του σεισμικού ρήγματος ενώ η δεύτερη, η μεταγενέστερη χρονικά, στα νότια της διάρρηξης (Benetatos et. al., 2005).

## 2.2 Δεδομένα Ισχυρής Σεισμικής Δόνησης

Η ισχυρή σεισμική δόνηση του κύριου σεισμού καταγράφηκε από όργανα τα οποία βρίσκονται στις πόλεις της Λευκάδας (LEF1), Πρέβεζας (PRE1), Αμφιλοχίας (AML1), Αγρινίου (AGR1), Αργοστολίου (ARG1), Ζακύνθου (ZAK1) και Βαρθολομιού (VAR2). Στο σχήμα 2 παρουσιάζονται οι σταθμοί του μόνιμου δικτύου καταγραφής ισχυρής δόνησης του ΙΤΣΑΚ, το επίκεντρο και ο μηχανισμός γένεσης του κύριου σεισμού της Λευκάδας 2003 καθώς και οι σεισμικές ζώνες της ευρύτερης περιοχής.

Στο σχήμα 3 δίνονται οι διορθωμένες, κορυφαίες συνιστώσες επιταχύνσεων των καταγραφών ισχυρής κίνησης του κύριου σεισμού στους διάφορους σταθμούς. Στο σχήμα 4 δίνονται οι καταγεγραμμένες τιμές των κορυφαίων εδαφικών επιταχύνσεων, PGA, για διάφορες εδαφικές συνθήκες (S=0 βραχωδών, 1 ενδιάμεσων και 2 χαλαρών) όπως καταγράφηκαν από τα διάφορα όργανα ισχυρής δόνησης στην ευρύτερη περιοχή του σεισμού της Λευκάδας 2003. Οι τιμές αυτές προέρχονται από δύο δίκτυα καταγραφής ισχυρής δόνησης του ΙΤΣΑΚ και του ΓΙ-ΕΕΑ. Οι τιμές αυτές συγκρίνονται στο σχήμα 4 με τις αντίστοιχες τιμές, που προκύπτουν με βάση τις εμπειρικές σχέσεις πρόβλεψης (Skarlatoudis et. al., 2003) για ενδιάμεσες εδαφικές συνθήκες S=1 ( $\pm 1$  τυπική απόκλιση). Παρότι οι παρατηρημένες τιμές κυμαίνονται σε ένα ευρύ διάστημα κορυφαίων τιμών επιταχύνσεων, αποστάσεων και εδαφικών συνθηκών, εν' τούτοις εκτός από 2 εξαιρέσεις που αφορούν ακραίες εδαφικές συνθήκες (βράχου και πολύ χαλαρών), όλες οι άλλες καταγεγραμμένες τιμές κορυφαίων επιταχύνσεων περικλείονται μέσα σε  $\pm 1$  τυπική απόκλιση από την μέση σχέση πρόβλεψης για ενδιάμεσες τοπικές εδαφικές συνθήκες. Η διασπορά των δεδομένων δεν αποκλείει περι-



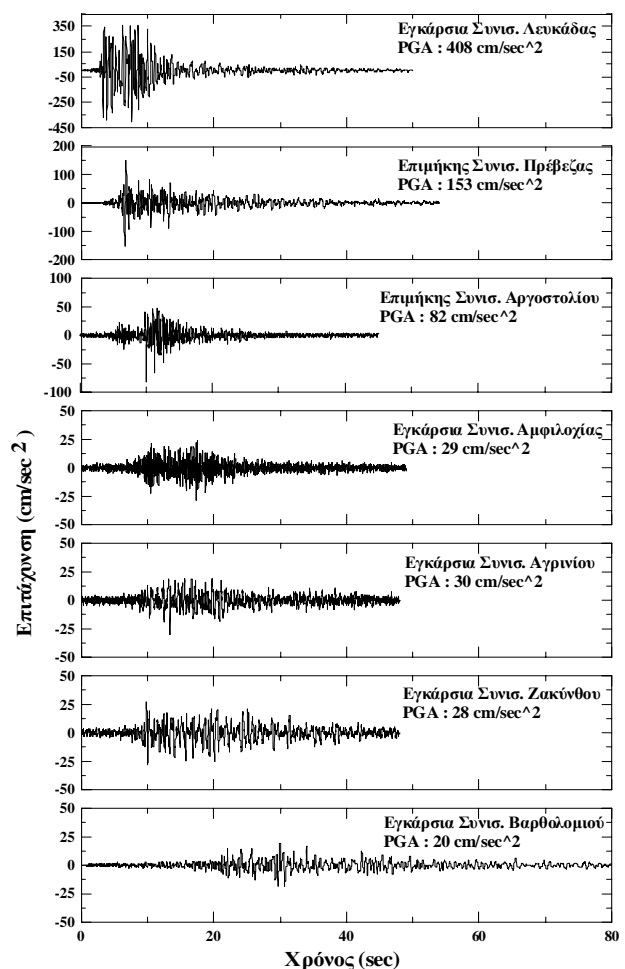
Σχήμα 2. Σταθμοί καταγραφής ισχυρής δόνησης σεισμού Λευκάδας 2003, επίκεντρο (άστρο), μηχανισμός γένεσης σεισμού και σεισμικές ζώνες ευρύτερης περιοχής (Δημητρίου και συν., 2004).  
Figure 2. Recording stations of Lefkada 2003 earthquake strong motion, epicenter (black star), source mechanism, and seismic zones of the surrounding area (Dimitriou et al., 2004).

πτώσεις κατευθυντικότητας, ακτινοβολίας σεισμικών κυμάτων, τοπικές συνθήκες κλπ.

Με βάση τις διορθωμένες καταγραφές ισχυρής κίνησης του κύριου σεισμού της Λευκάδας 2003, υπολογίσθηκαν τα φάσματα απόκρισης για ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης ( $\xi=5\%$ ). Στο σχήμα 5 παρουσιάζονται τα φάσματα ψευδο-επιτάχυνσης των οριζοντίων συνιστωσών των δύο σημαντικότερων καταγραφών του κύριου σεισμού στις θέσεις της Λευκάδας και της Πρεβέζης.

Η σύγκριση των φασματικών επιτάχυνσης του κύριου σεισμού στην πόλη της Λευκάδας με αντίστοιχες φασματικές τιμές άλλων ισχυρών σεισμών που έχουν πλήξει τον Ελληνικό χώρο (Αλκυονίδες 1981 [ $M=6.7$ ], Αργοστόλι 1983 [ $M=6.9$ ], Καλαμάτα 1986 [ $M=6.0$ ], Γρεβενά 1995 [ $M=6.6$ ]) αναδεικνύει το επίπεδο της έντασης και το πλούσιο φασματικό περιεχόμενο των καταγραφών, (Dimitriou et al., 2003).

Η εκτίμηση της χρονικής διάρκειας της ισχυρής σεισμικής κίνησης από καταγραφές επιταχύνσεων αποτελεί αντικείμενο έρευνας τα τελευταία χρόνια (Koliopoulos et. al. 1998, Hancock and Bommer, 2005), αναγνωρίζοντας την μεγάλη επιρροή της στην βλαπτικότητα του εδαφικού κραδασμού. Στον πίνακα 1 δίνονται η σημαντική



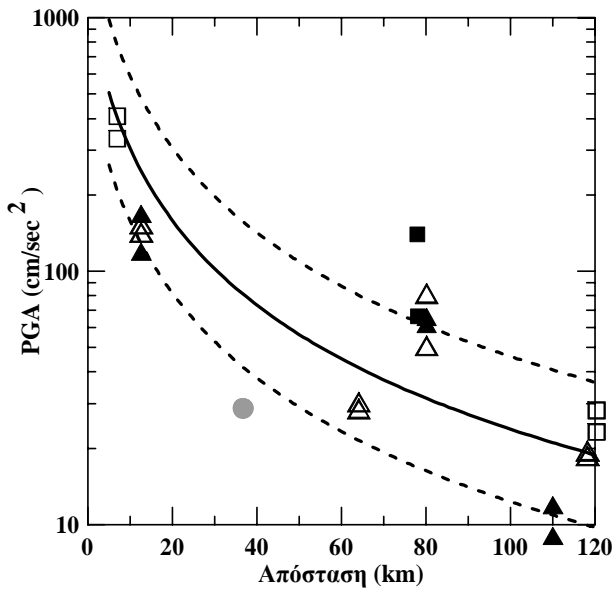
Σχήμα 3. Μέγιστες οριζόντιες συνιστώσες των καταγραφών του σεισμού της Λευκάδας 2003.  
Figure 3. Peak horizontal components of the Lefkada's 2003 earthquake

και περιβαλλόμενη διάρκεια της ισχυρής κίνησης (Koliopoulos et.al., 1998) μερικών από τους ισχυρότερους Ελληνικούς σεισμούς οι οποίοι προκάλεσαν πολύ σημαντικές βλάβες. Αναμφισβήτητα, λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος, την απόσταση από τη θέση καταγραφής αλλά και το πλάτος της δόνησης, η σεισμική δράση που προκάλεσε ο σεισμός της Λευκάδας είχε την μεγαλύτερη διάρκεια σε σύγκριση με τους υπόλοιπους.

### 3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ - ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΛΗΣ ΛΕΥΚΑΔΑΣ

Η Λευκάδα ανήκει γεωλογικά στις ζώνες των Παξών ή Προαπούλια (δυτικά) και στην Ιόνια ζώνη (ανατολικά). Χαρακτηριστικό της πεδινής περιοχής της πόλης της Λευκάδας, με υψόμετρο ένα μέτρο, περίπου, είναι η λιμνοθάλασσα που σχηματίζεται βόρεια της πόλης, μεταξύ του βορειοανατολικού άκρου της νήσου και στενής λωρίδας ξηράς ('ζωστήρας'), προς δυτικά και βόρεια και των ακτών της Ακαρνανίας προς Ανατολικά. Η πόλη

της Λευκάδας, η οποία βρίσκεται στην Ιόνια ζώνη, δομείται από σύγχρονες αλλουβιακές προσχώ-



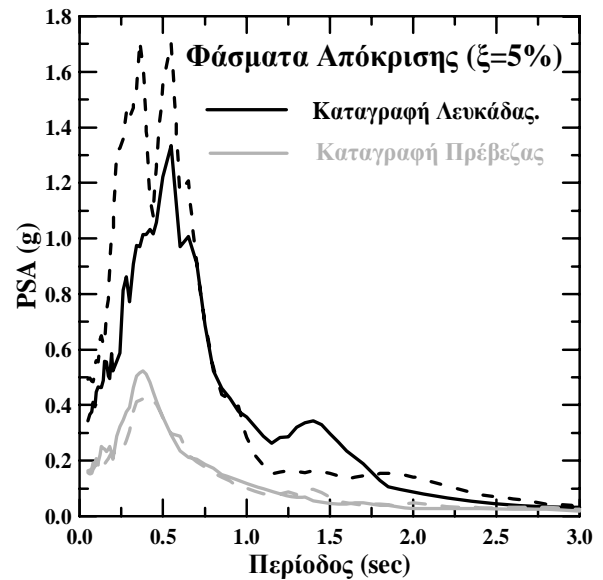
Σχήμα 4. Σύγκριση εμπειρικών σχέσεων (Skarlatoudis et. al., 2003) της PGA ( $\pm 1$  τυπική απόκλιση) για ενδιάμεσες εδαφικές συνθήκες (S=1) με τις καταγεγραμμένες τιμές για διάφορες εδαφ. συνθήκες καταγραφής του σεισμού της Λευκάδας. (Γκρι κύκλος: βράχος S=0 ΙΤΣΑΚ, ανοικτό τρίγωνο: Ενδιάμεσα S=1 ΙΤΣΑΚ, τετράγωνο: χαλαρά S=2 ΙΤΣΑΚ, Μαύρο τρίγωνο: Ενδιάμεσα S=1 ΓΙ-ΕΕΑ, Μαύρο τετράγωνο: χαλαρά S=2 ΓΙ-ΕΕΑ).

Figure 4. Comparison of the PGA empirical relations (Skarlatoudis et. al., 2003)  $\pm 1$  standard deviation for S=1 intermediate soil conditions at various site conditions of the Lefkada Eq. 2003. (Gray circle: rock site condition S=0 ITSAK, Open triangle: intermediate soil conditions S=1 ITSAK, rectangle: loose S=2 ITSAK, Black triangle: intermediate S=1 GI-NOA, Black rectangle: loose S=2 GI-NOA).

Πίνακας 1. Απόσταση, Μέγεθος, Σημαντική και Περιβαλλόμενη (>10 % g) Διάρκεια Ισχυρών σεισμών του Ελληνικού χώρου.

Table 1. Distance, Magnitude, Significant and Bracketed Durations (<10%g) of strong earthquakes in Greece.

	Έτος	R (km)	M	Σημαντ. Διάρκεια (sec)	Περιβ. Δ. >10%g (sec)
Θεσ/νικη	1978	30	6.5	7.9	1.1
Αλκυονίδες	1981	31	6.6	15.4	5.9
Αργοστόλι	1983	33	6.9	10.6	3.3
Καλαμάτα	1986	9	6.0	5.6	2.3
Κοζάνη	1995	27	6.5	8.7	2.9
Αίγιο	1995	18	6.4	2.0	3.0
Αθήνα	1999	11	5.9	5.9	3.7
Λευκάδα	2003	8	6.3	10.6	10.7



Σχήμα 5. Φάσματα απόκρισης επιτάχυνσης, PSA ( $\xi=5\%$ ), των δύο οριζοντίων συνιστωσών των καταγραφών στις θέσεις Λευκάδα και Πρέβεζα του κύριου σεισμού της Λευκάδας 2003.

Figure 5. 5%-PSA response spectra of the horizontal components of the accelerograms recorded at Lefkada and Preveza from the main shock of the Lefkada earthquake 2003.

σεις, ήτοι παράκτιους αμμώδεις σχηματισμούς, και λιμνοθαλάσσιες ιλυώδεις αποθέσεις, πλευρικές αποθέσεις που επικάθονται του μαργαίτου υποβάθρου, ενώ καθ'όλο το μήκος του 'ζωστήρα' η ακτή συνίσταται από συμπαγές παράκτιο ψηφιδωπαγές, ενώ το εσωτερικό αποτελείται από αμμοίλυδεις σχηματισμούς (Μπορνόβας, 1964; Dercourt, 1980; Μουντράκης, 1985). Στο βόρειο τμήμα της πόλης, στην περιοχή του ιστορικού κέντρου καθώς και της προκουμιάς συναντώνται τεχνητές επιχώσεις στις οποίες και οφείλονται οι καθιζήσεις που έχουν αναφερθεί και κατά καιρούς.

Σύμφωνα με τα διαθέσιμα γεωτεχνικά στοιχεία τα οποία προέρχονται από γεωτρήσεις στο Νοσοκομείο Λευκάδας (Ερ.Πρόγραμμα ΟΑΣΠ, 1996), στην πόλη και στο Λιμάνι στα πλαίσια έρευνας για την αξιολόγηση των ζημιών του σεισμού της 14ης Αυγούστου 2003 καθώς και από προγενέστερες γεωερευνητικές εργασίες, το υπέδαφος στην πόλη της Λευκάδας δομείται από:

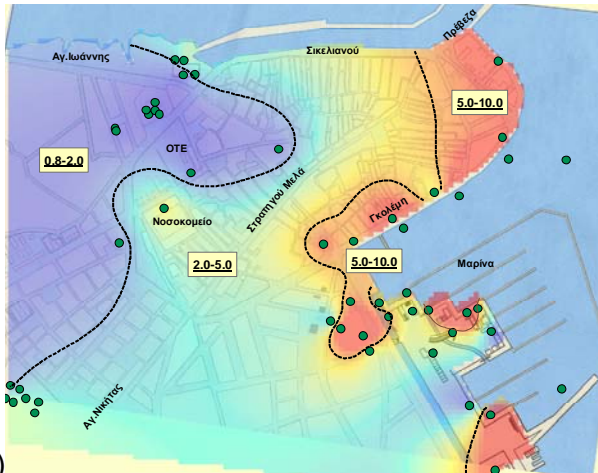
(α) Επιφανειακά μέχρι βάθους 8 έως 12m (και μέχρι βάθους 15-16m, στην περιοχή του Διαύλου και της Μαρίας), περίπου, από τεχνητές επιχώσεις (πάχους 0.5 έως 5m), αργίλους μέσης έως υψηλής πλασιμότητας έως αμμώδεις αργίλους (CH-CL) με κυμαινόμενο ποσοστό άμμου και υψηλό ποσοστό οργανικών κατά θέσεις, αργιλώδεις άμμους (σχήμα 6α) έως και καθαρές άμμους, με κυμαινόμενο ποσοστό χαλικιών, (SC, SM, GM, GC) χαλαρές έως μέσης πυκνότητας στις περιο-

χές του διαύλου και της Μαρίνας, και ακολουθεί στρώση ιλύος με κυμαινόμενο ποσοστό άμμου (ML, ML(CL)) σε χαλαρή κατάσταση. Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία η επιφανειακή αυτή στρώση φαίνεται να καλύπτει όλο το ιστορικό κέντρο της πόλης της Λευκάδας (από την περιοχή του Πνευματικού Κέντρου, μέχρι την Μαρίνα).

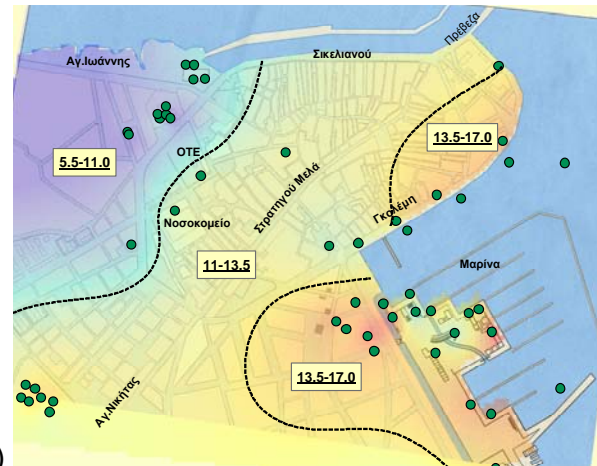
(β) Η υποκείμενη εδαφική στρώση η οποία εκτείνεται τουλάχιστον μέχρι βάθους 50m, αποτελείται

από αργιλική μάργα (CL) μέσης πλασιμότητας και σκληρή με τιμές αστράγγιστης διατμητικής αντοχής της τάξης των 600 – 700 kPa και εμφανίζεται σε βάθη από 5.5m στην Β-ΒΔ περιοχή έως 17m, περίπου, στην περιοχή του Διαύλου και της Μαρίνας (Σχήμα 6β).

Η στάθμη του υπόγειου υδάτινου ορίζοντα στην υπόψη περιοχή βρίσκεται πολύ ψηλά, σε βάθος μόλις 0.5 έως 2.0m.



(α)

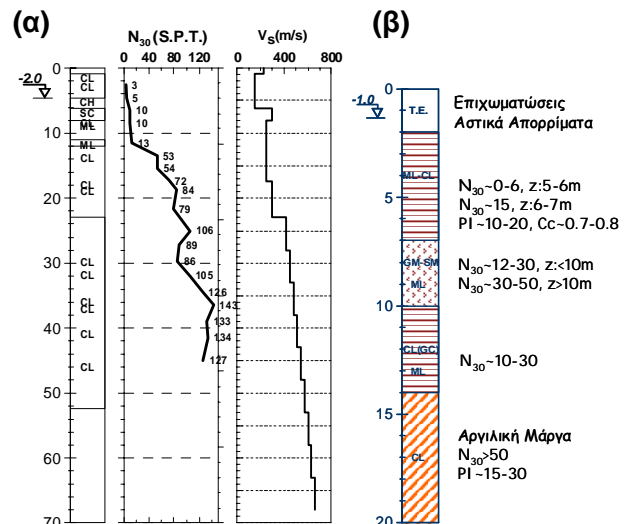


(β)

Σχήμα 6. Θεματικοί χάρτες της πόλης της Λευκάδας με καμπύλες μεταβολής α) του πάχους των χαλαρών αμμοίλυωδών στρώσεων (SM-SC) και β) της 'οροφής' εμφάνισης της πολύ σφιχτής έως σκληρής αργιλικής μάργας.

Figure 6. Thematic maps of the region of Lefkas city with contours of α) thickness of loose sandy-silty layers (SM-SC) and β) top surface of very stiff to hard clayey marl.

Στη θέση του σταθμού επιταχυνσιογράφου στο Νοσοκομείο της πόλης (σχήμα 7α), οι επιφανειακές εδαφικές στρώσεις μέχρι βάθους 12m, περίπου, αποτελούνται από μαλακές αργίλους μέσης έως υψηλής πλαστικότητας, που επικάθονται στην πολύ σφιχρή έως σκληρή αργιλική μάργα η οποία εκτείνεται τουλάχιστον μέχρι βάθους 50m. Σημειώνεται ότι στα πρώτα 12m βάθους, ο αριθμός των κτύπων  $N_{30}$ -S.P.T. κυμαίνεται από 3 έως 13. Η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων,  $V_s$ , από 150 m/s στις επιφανειακές στρώσεις (1 – 6m) έως 380m/s σε βάθος 30m, περίπου, (Ερευν.Πρόγραμμα ΟΑΣΠ, 1996). Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω στοιχεία, το υπέδαφος στην πόλη της Λευκάδας κατατάσσεται στην κατηγορία Γ, σύμφωνα με ΕΑΚ 2000, εκτός των περιπτώσεων όπου εμφανίζονται χαλαρές λεπτόκοκκες, αμμοίλυωδεις στρώσεις με μεγάλη επικινδυνότητα σε ρευστοποίηση /συνίζηση, ενώ σύμφωνα με τον EC8, στην κατηγορία C ( $V_{s,30}=230$  έως 250m/s) ή στην κατηγορία E στην περίπτωση που ο υποκείμενος εδαφικός σχηματισμός (αργιλική μάργα) χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλές τιμές της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων ( $V_{s,30}>800$ m/sec).



Σχήμα 7. Εδαφική τομή (α) στη θέση του επιταχυνσιογράφου του μόνιμου δικτύου του ΙΤΣΑΚ στο Νοσοκομείο Λευκάδας και (β) στην παραλιακή περιοχή

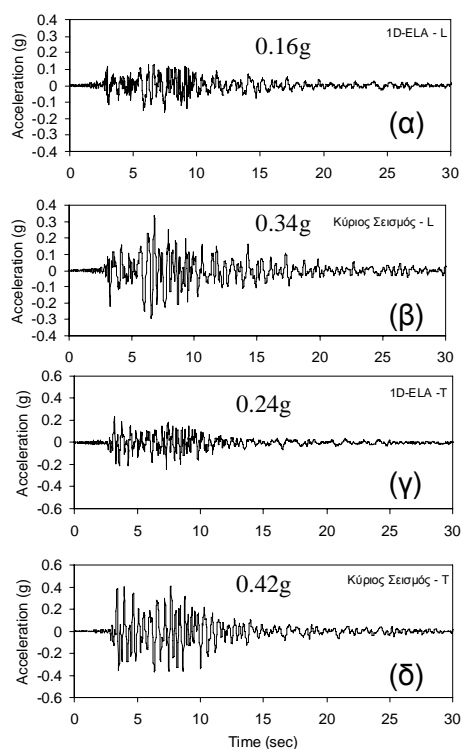
Figure 7. Cross section at Lefkada's accelerograph station of ITSAK – Hospital (α) and at the coastal area (β).

#### 4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία που αφορούν στη

στρωματογραφία του υπεδάφους στη θέση του Νοσοκομείου της πόλης της Λευκάδας, στις δυναμικές ιδιότητες των εδαφικών υλικών και στην καταγραφή του κύριου σεισμού της 14<sup>ης</sup> Αυγούστου 2003 στη θέση αυτή, επιχειρήθηκε αντίστροφη ανάλυση (αποσυνέλιξη) της δυναμικής συμπεριφοράς των εδαφικών σχηματισμών, που στόχο είχε την «αφαίρεση» της επιρροής των τοπικών εδαφικών συνθηκών στη θέση καταγραφής (Schnebel et al., 1972) των δύο οριζοντίων συνιστωσών του κύριου σεισμού, με ανάδειξη της χρονοϊστορίας επιτάχυνσης και των αντίστοιχων φασμάτων σε συνθήκες επιφανειακής εκδήλωσης βραχώδους υποβάθρου.

Στο σχήμα 8 δίνονται οι χρονοϊστορίες επιτάχυνσης των δύο οριζοντίων συνιστωσών σε συνθήκες επιφανειακής εκδήλωσης του βραχώδους υποβάθρου (πάνω) όπως επίσης και της καταγραφής στον επιταχυνσιογράφο του μόνιμου δικτύου του ΙΤΣΑΚ στο Νοσοκομείο της Λευκάδας (κάτω). Παρατηρείται ότι οι κορυφαίες εδαφικές επιταχύνσεις σε συνθήκες «βράχου» παρουσιάζουν τιμές σημαντικά μειωμένες (έως και 50% περίπου) σε σχέση με τις καταγραφείσες, γεγονός που υποδηλώνει ότι

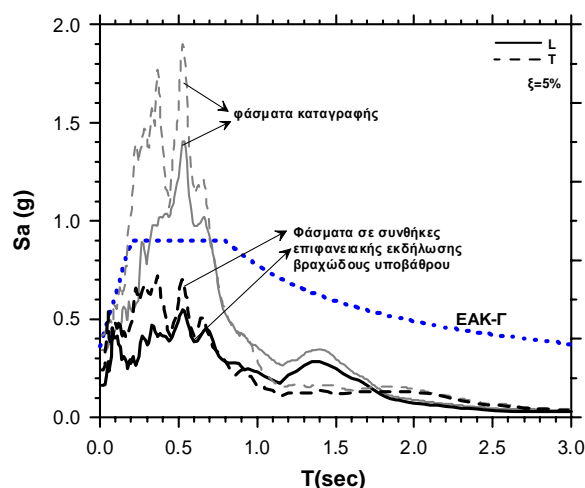


Σχήμα 8. Χρονοϊστορίες επιτάχυνσης των δύο οριζοντίων συνιστωσών σε συνθήκες επιφανειακής εκδήλωσης του βραχώδους υποβάθρου (α,γ) και της καταγραφής στον επιταχυνσιογράφο του μόνιμου δικτύου του ΙΤΣΑΚ στο Νοσοκομείο της Λευκάδας (β,δ).

Figure 8. Computed acceleration time histories of two horizontal components at outcropping bedrock conditions (α,γ) and recorded (β,δ) at the station of Lefkas city (Hospital).

οι τοπικές εδαφικές συνθήκες στη θέση καταγραφής συνέβαλαν σημαντικά στη διαμόρφωση του πλάτους του σεισμικού κραδασμού.

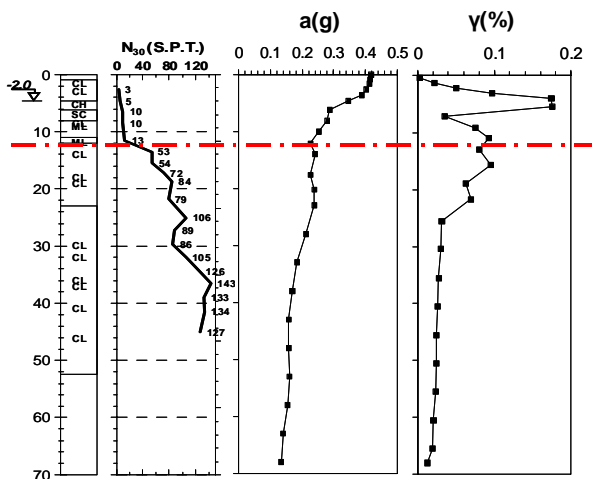
Από τη σύγκριση των φασμάτων απόκρισης των δύο οριζοντίων συνιστωσών της σεισμικής κίνησης μεταξύ του «οιωνεί» βράχου και των εδαφικών αποθέσεων στη θέση καταγραφής (Σχήμα 9), προκύπτει ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή ενίσχυσαν σημαντικά τη σεισμική κίνηση σε περιόδους από 0.3 έως 0.8 sec. Από τα επιμέρους χαρακτηριστικά της αντίστροφης ανάλυσης που αφορούν την κατανομή με το βάθος των κορυφαίων εδαφικών επιταχύνσεων και των αναπτυσσόμενων διατμητικών παραμορφώσεων (Σχήμα 10), αναδεικνύεται ο ρόλος των επιφανειακών (έως βάθους 12m) χαλαρών μή-συνεκτικών και μικρού πάχους (1 έως 3m) μαλακών συνεκτικών εδαφικών στρώσεων με εξόχως μή-γραμμική συμπεριφορά (ανάπτυξη διατμητικών παραμορφώσεων έως 0.2% περίπου) τα οποία συνεισφέρουν στην ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού στην επιφάνεια.



Σχήμα 9. Φάσματα απόκρισης σε συνθήκες επιφανειακής εκδήλωσης του βραχώδους υποβάθρου (έντονη γραμμή) και της καταγραφής (γκρι γραμμή) στον σταθμό δικτύου του ΙΤΣΑΚ στο Νοσοκομείο της Λευκάδας.

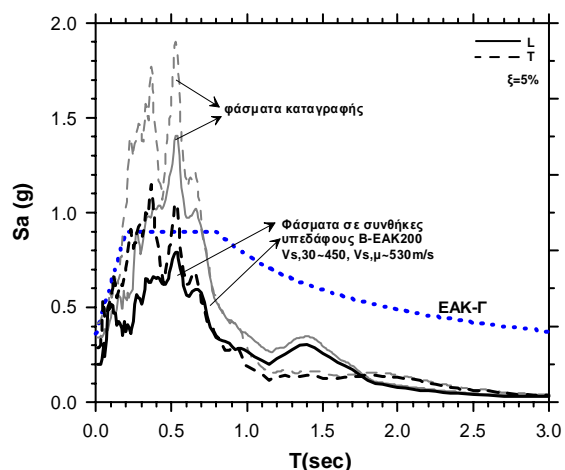
Figure 9. Comparison of recorded at the station of Lefkas city (Hospital) and computed at outcropping bedrock conditions acceleration response spectra.

Στην περίπτωση όπου το υπέδαφος στην περιοχή του Νοσοκομείου συνίστατο από πολύ σφιχτές έως σκληρές αργίλους ή πυκνές μη συνεκτικές στρώσεις (κατηγορία Β, σύμφωνα με τον ΕΑΚ) με μέση ταχύτητα διατμητικών κυμάτων 530m/s και  $V_{s,30}=450$  m/s, οι κορυφαίες τιμές επιτάχυνσης στην επιφάνεια, με σεισμικές διεγέρσεις τις χρονοϊστορίες που υπολογίστηκαν από την διαδικασία της αντίστροφης ανάλυσης, προκύπτουν



Σχήμα 10 Αποτελέσματα θεωρητικών αναλύσεων: Κατανομή με το βάθος των μέγιστων εδαφικών επιταχύνσεων και διατμητικών παραμορφώσεων.

Figure 10 Results of Theoretical analyses: Variation of peak acceleration and shear strain amplitude with depth.



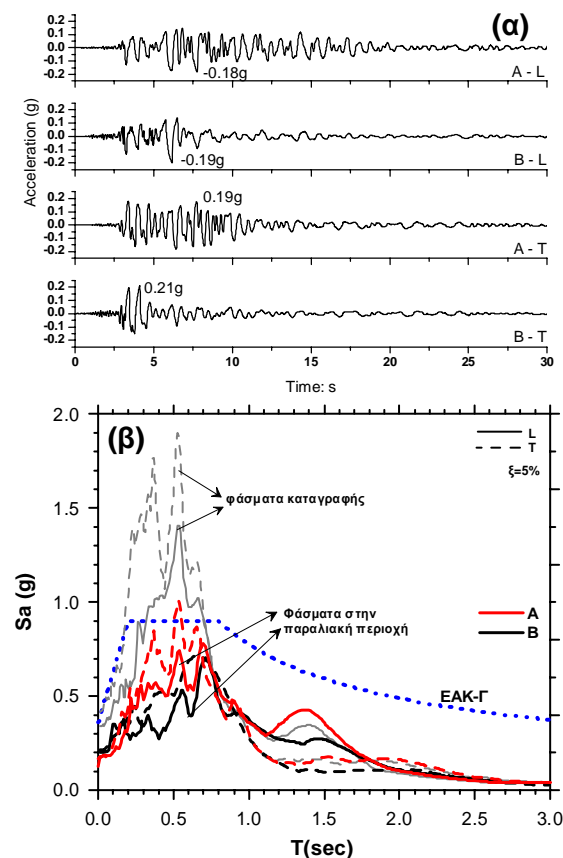
Σχήμα 11. Φάσματα απόκρισης σε συνθήκες υπεδάφους κατηγορίας Β και της καταγραφής στον σταθμό δικτύου του ΙΤΣΑΚ στο Νοσοκομείο Λευκάδας.

Figure 11. Comparison of recorded and computed at B-soil conditions according EAK acceleration response spectra at the station of Lefkas city (Hospital).

από 0.20g έως 0.28g και οι αντίστοιχες φασματικές τιμές (σχήμα 11) καλύπτονται ικανοποιητικά από το φάσμα του EAK.

Στην παραλιακή περιοχή της Λευκάδας (οδός Γκολέμη, Μαρίνα, περιοχή διαύλου) μετά τον κύριο σεισμό σημειώθηκαν χαρακτηριστικά φαινόμενα ρευστοποίησης, όπως πλήρωση υπογείων με λάσπη, 'αναβλύσεις' λεπτόκοκκου υλικού και δυναμικές καθιζήσεις της τάξης των 10cm. Οι αμμοιλυώδεις εδαφικές στρώσεις που συναντώνται στην περιοχή αυτή είναι γενικά μικρού πάχους και επιδεικτι-

κές ρευστοποίησης σύμφωνα με τα φυσικά τους χαρακτηριστικά. Για το λόγο αυτό σε μία τυπική εδαφική τομή της περιοχής (7.β) πραγματοποιήθηκαν μη-γραμμικές αναλύσεις σε καθεστώς ενεργών τάσεων με σεισμικές διεγέρσεις τις χρονοϊστορίες που υπολογίστηκαν από την διαδικασία της αντίστροφης ανάλυσης. Για τις μη-συνεκτικές στρώσεις χρησιμοποιήθηκε το ελαστοπλαστικό προσομοίωμα (A) πολλαπλών επιφανειών διαρροής (Parra, 1996; Yang & Elgamal, 2001) καθώς και το υποπλαστικό προσομοίωμα (B) απλοποιημένης μορφής (Li et al., 1992). Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων (σχήμα 12) διαπιστώνεται η εμφάνιση ρευστοποίησης μικρής έκτασης, σε στρώσεις πάχους 1 έως 2m, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των κορυφαίων τιμών επιτάχυνσης (0.18 έως 0.21g) και την ενίσχυση του κραδασμού σε μεγαλύτερες περιόδους (0.7 – 1.2sec).



Σχήμα 12. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων (α) και (β) φάσματα απόκρισης στην επιφάνεια της παραλιακής περιοχής.

Figure 12. Acceleration time histories and response spectra at the ground surface of coastal area.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα μέχρι τώρα δεδομένα και αποτελέσματα φαίνεται ότι η επιρροή του υπεδάφους στη διαμόρφωση του σεισμικού κραδασμού στην

επιφάνεια υπήρξε σημαντική για δύο κύριους λόγους:

(α) Η διέλευση των σεισμικών κυμάτων από το μαργαϊκό υπόβαθρο διαμέσου των χαλαρών/μαλακών εδαφικών στρώσεων μικρού σχετικά πάχους (8 έως 16m), ενισχύθηκε σημαντικά στο εύρος των περιόδων από 0.3 έως 0.7sec, που εμπίπτει με το εύρος των σημαντικών ιδιοπεριόδων των εδαφικών αποθέσεων.

(β) Η ύπαρξη χαλαρών καθώς και μαλακών στρώσεων κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους, με εξόχως μή-γραμμική συμπεριφορά στην περίπτωση μεγάλου πλάτους ταλάντωσης, συνεισέφεραν στην ενίσχυση του σεισμικού κραδασμού στην περιοχή των μεγάλων περιόδων καθώς και σε φαινόμενα που οδηγούν στην εμφάνιση έντονων πλευρικών μετατοπίσεων, δυναμικών καθιζήσεων – συνιζήσεων έως και τοπική εμφάνιση ρευστοποίησης

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς επιθυμούν να εκφράσουν τις θερμές ευχαριστίες τους προς όλο το τεχνικό προσωπικό του Εργαστηρίου του ΙΤΣΑΚ για την συμβολή του καθ'όλη τη διάρκεια των εγκαταστάσεων και παρακολούθησης του μετασεισμικού δικτύου στη Λευκάδα, την Υ.Α.Σ. και το ΚΕΔΕ - Τμήμα Εδαφών για τη διάθεση γεωτεχνικών πληροφοριών.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Benetatos, C., Kiratzi, A., Poulmilioti, Z., Stavrakakis, G. Drakatos, G. and Latousakis, J. (2005), "The 14 August 2003 Lefkada Island (Greece) earthquake: Focal mechanisms of the mainshock and the aftershock sequence". *Journal of Seism.*, 9, 171-190.
- Dercourt et al. (1980), "Grèce. Introduction à la géologie générale". 26 Cong. Géol. Int. Excursions 160-162c, Livret Guide, G12, 159p, Paris.
- Δημητρίου, Π., Θεοδουλίδης, Ν., Μάργαρης, Β., Παπαϊωάννου, Χ., Αναστασιάδης, Α., Κλήμης, Ν., Μάκρας, Κ., Δημοσθένους, Μ., Καρακώστας, Χ., Λεκίδης, Β., Μακάριος, Τ., Σαλονικιός, Θ., και Σούς Ι. (2004), "Ο σεισμός της Λευκάδας (M=6.2), 14 Αυγούστου 2003, Ισχυρή εδαφική δόνηση- Συνέπειες στο δομημένο και φυσικό περιβάλλον". Έκδοση ΤΕΕ, 78 σελ.
- EC-8, No 8, "Structures in seismic regions", Commission of the European Communities, 1989.
- Ερευνητικό Πρόγραμμα ΟΑΣΠ, (1996), "Μελέτη της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών της γεωμορφολογίας και της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής στις ενόργανες καταγραφές εθνικού δικτύου επιταχυνσιογράφων, θέση Λευκάδα", Επιστ. Υπ. Καθ. Κυριαζής Πιπιλάκης.
- Hancock, J. and Bommer, J.J. (2005), "The effective number of cycles of earthquake ground motion". *J. Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 34, 637-664.
- Karakostas V.G., Papadimitriou, E.E. & Papazachos K.B. (2004), "Properties of the 2003 Lefkada, Ionian Islands, Greece, earthquake seismic sequence and seismicity triggering". *Bull.Seism.Soc.Am.*,94, 1976-1981.
- Koliopoulos, P.K., Margaris, B.N. and Klimis, N.S. (1998), "Duration and energy characteristics of Greek strong motion records". *J. Earthq. Eng.*, 2, 391-417.
- Li X.S, Wang Z.L.and C.K. Shen (1992), "SUMDES: A Nonlinear Procedure for Response Analysis of Horizontally-layered Sites Subjected to Multi-directional Earthquake Loading". Department of Civil Engineering, University of California, Davis, 1992.
- Μουντράκης Δ.Μ. (1985), «Γεωλογία της Ελλάδος». 207 σελ., Θεσσαλονίκη.
- Μπορνόβας Ι.Μ. (1964), "Η Γεωλογία της νήσου Λευκάδος". ΙΓΜΕ Τομ.Χ, Νο1, 142σελ., Αθήνα.
- Para E., (1996), "Numerical Modeling of Liquefaction and Lateral Ground Deformation Including Cyclic Mobility and Dilation Response in Soil Systems". PhD Thesis, Dept. of Civil Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY.
- Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H.B., (1972), 'SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites'. Report No.EERC-72/12, Univ. of California, Berkeley, 1972.
- Skarlatoudis, A.A., Papazachos, C.B., Margaris, B.N., Theodulidis, N., Papaloannou, Ch., Kalogeras, I., Scordilis, E.M., and Karakostas, V. (2003), "Empirical peak ground-motion predictive relations for shallow earthquakes in Greece". *BSS A*, 93, 2591-2603.
- Yang Z. and Elgamal A. (2001), "Cyclic 1D Nonlinear Finite Element program for execution of one-dimensional site amplification and liquefaction simulations". University of California, San Diego.
- Zahradnik J., Serpetsidaki, A., Sokos, E., and Tselentis,G-A.(2005), "Iterative deconvolution of regional waveforms and double-event interpretation of the 2003 Lefkada, Greece". *BSSA.*, 95, 159-172.