

## ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΛΗΘΗΚΑΝ ΑΠΟ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΗΣ ΛΕΥΚΑΔΑΣ (14/08/03 MS=6.4)

Παπαθανασίου Γ.<sup>1</sup>, Παυλίδης Σπ.<sup>1</sup>, Χρηστάρας Β.<sup>1</sup>, και Πιτιλάκης Κ.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Τομέας Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. 546 21 Θεσσαλονίκη, [grapatha@geo.auth.gr](mailto:grapatha@geo.auth.gr), [pavlidēs@geo.auth.gr](mailto:pavlidēs@geo.auth.gr), [christar@geo.auth.gr](mailto:christar@geo.auth.gr)

<sup>2</sup> Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., [k.pitilakis@geo.civil.auth.gr](mailto:k.pitilakis@geo.civil.auth.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις 14 Αυγούστου 2003 (05:14:53.9 GMT<sup>+</sup>; 08:14:54 τοπική ώρα) σεισμική δόνηση μεγέθους Ms=6.4, Mw=6.2 και εστιακού βάθους h=10km, σημειώθηκε στο Ιόνιο Πέλαγος δυτικά του νησιού της Λευκάδας στο ύψος του Αγ. Νικήτα. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες του επικέντρου, σύμφωνα με το Εργαστήριο Σεισμολογίας του Α.Π.Θ, είναι φ=38,86N° και λ=20,73E°. Η ένταση του σεισμού στην πόλη της Λευκάδας ήταν VIII (EMS). Στην ίδια περιοχή η επιτάχυνση που μετρήθηκε ήταν α=0,42g. Παρατηρήθηκαν καταπτώσεις βράχων, κατολισθήσεις, καθιζήσεις και ρωγμές στα λιμάνια του νησιού καθώς και αστοχίες τεχνικών έργων. Σημαντικό μέρος των ζημιών που προκλήθηκαν στα λιμάνια ίσως να οφείλεται και στη ρευστοποίηση του υπεδάφους. Εξετάζοντας την ιστορική σεισμικότητα του νησιού συμπεραίνουμε ότι στο παρελθόν έχουν προκληθεί παρόμοια φαινόμενα στις αντίστοιχες περιοχές από σεισμούς ανάλογου μεγέθους. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις αποτελούν οι σεισμικές δονήσεις του 1914 (Ms=6.3) και 1948 (Ms=6.5) όπου είχαν παρατηρηθεί καταπτώσεις βράχων, κατολισθήσεις και αστοχίες λιμενικών έργων. Στις περιοχές όπου παρατηρήθηκαν πιθανά φαινόμενα ρευστοποίησης, συλλέχθηκε εδαφικό υλικό το οποίο αναδύθηκε στην επιφάνεια από εδαφικές διαρρήξεις. Το υλικό αυτό εξετάστηκε ως προς την κοκκομετρία του και τα όρια Atterberg έτσι ώστε να βγουν συμπεράσματα ως προς την επιδεκτικότητα του σε ρευστοποίηση σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν διαμορφωθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για αμμώδη εδάφη (Wang 1979). Σύμφωνα λοιπόν με τα αποτελέσματα των δοκιμών τα δείγματα προέρχονται από εδαφικά στρώματα τα οποία δείχνουν μεγάλη επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση.

### 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

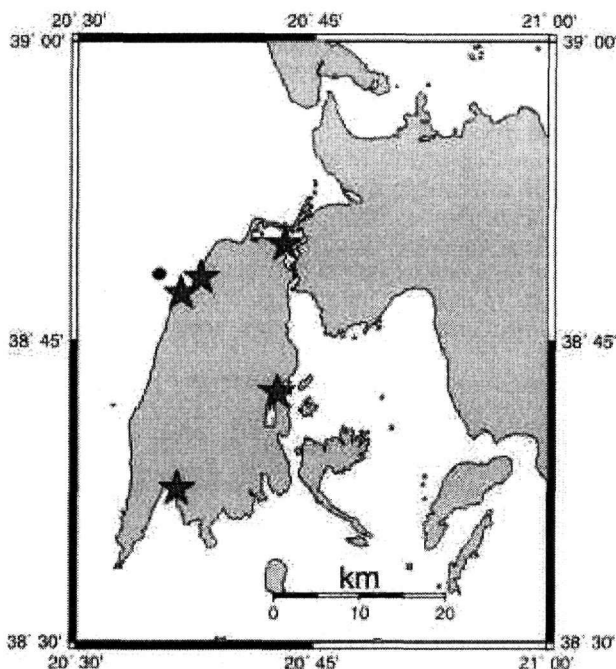
Το πρωί της 14 Αυγούστου 2003 σημειώθηκε ισχυρή σεισμική δόνηση στο θαλάσσιο χώρο δυτικά της Λευκάδος μεγέθους Ms=6.4 και εστιακού βάθους 10 Km. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες του επικέντρου, σύμφωνα με το Εργαστήριο Σεισμολογίας του Α.Π.Θ, είναι φ=38,86N° και λ=20,73E° (Σχ. 1). Την κύρια δόνηση ακολούθησαν 17 μετασεισμοί με μέγεθος M<sub>L</sub> =4.0 – 5.4 μέχρι τις 31 Αυγούστου και 324 σεισμικά γεγονότα μικρότερου μεγέθους. Ο μεγαλύτερος μετασεισμός (Ms=5.7) σημειώθηκε το απόγευμα της ίδιας ημέρας λίγες ώρες μετά τον κύριο σεισμό.

Το σεισμογόνο ρήγμα είναι τύπου οριζόντιας μετατόπισης, δεξιόστροφο με διεύθυνση BBA-NNΔ και κλίση προς τα ANA. Για σεισμική δόνηση Ms=6.2-6.4 το μήκος του ρήγματος πρέπει να είναι 32 έως 35Km, σύμφωνα με τις έρευνες για σεισμούς στη Μεσόγειο. Λαμβάνοντας υπόψη και τους τύπους των Pavlides & Caputo (2004) για το μήκος των ρηγμάτων σε σχέση με το μέγεθος του σεισμικής δόνησης καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το επιφανειακό μήκος εμφάνισης ενός ρήγματος πρέπει να είναι μεταξύ 9-20 Km για να μπορέσει να προκαλέσει σεισμό μεγέθους Ms=6.2-6.4. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι μόνο το 1/2 του ρήγματος της Λευκάδος ενεργοποιήθηκε κατά το σεισμό της 14 Αυγούστου, και πιο συγκεκριμένα μόνο το βόρειο τμήμα αυτού (Pavlides et al. 2003).

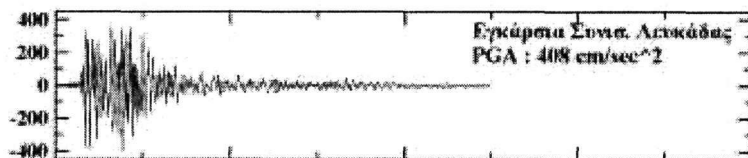
Η ισχυρή εδαφική κίνηση του σεισμού καταγράφηκε από το μόνιμο δίκτυο επιταχυνσιογράφων του ΙΤΣΑΚ. Στην πόλη της Λευκάδος η καταγραφή προέρχεται από τον επιταχυνσιογράφο ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο νοσοκομείο της πόλης. Η μέγιστη τιμή της οριζόντιας επιτάχυνσης που προκλήθηκε από το σεισμό καταγράφηκε στην πόλη της Λευκάδος και είχε τιμή 0,42g. Στο σχήμα 2 δίνεται η διορθωμένη συνιστώσα αυτής της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης. Χαρακτηριστικό της

καταγραφής του σχήματος 2 είναι η μεγάλη διάρκεια της ισχυρής κίνησης η οποία έγινε αισθητή κατά τη στιγμή της σεισμικής δόνησης.

Η σεισμική δόνηση, όπως περιγράφεται στη συνέχεια, προκάλεσε εκτεταμένες καταπτώσεις βράχων, κατολισθήσεις, φαινόμενα ρευστοποίησης καθώς και αστοχίες τεχνικών έργων τόσο στο οδικό δίκτυο όσο και στα λιμάνια του νησιού. Στο σχήμα 1 εμφανίζονται με μαύρο άστρο οι περιοχές εκείνες όπου παρατηρήθηκαν πιθανά φαινόμενα ρευστοποίησης.



Σχήμα 1. Χάρτης όπου απεικονίζεται το επίκεντρο της σεισμική δόνησης (μαύρος κύκλος) καθώς και οι περιοχές όπου παρατηρήθηκαν πιθανά φαινόμενα ρευστοποίησης (μαύρο αστέρι)



Σχήμα 2. Μέγιστη οριζόντια συνιστώσα της καταγραφής της ισχυρής κίνησης του κυρίου σεισμού (ΙΤΣΑΚ 2003).

Στην εργασία αυτή εξετάζονται εδαφικά δείγματα ως προς την επιδεκτικότητα τους προς ρευστοποίηση. Τα δείγματα αυτά συλλέχθηκαν από περιοχές κοντά σε αστοχίες λιμενικών έργων (Νυδρί, Λευκάδα, Βασιλική) και από την περιοχή Αλυκές, ανατολικά της πόλης της Λευκάδας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών και με βάση τα κριτήρια που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία, τα δείγματα που συλλέχθηκαν προέρχονται από εδαφικά στρώματα τα οποία δείχνουν μεγάλη επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση. Τα αποτελέσματα αυτά θέτουν την ρευστοποίηση ως ένα από τους βασικούς παράγοντες οι οποίοι συντέλεσαν στην αστοχία μερικών λιμενικών έργων στο νησί της Λευκάδας. Είναι απαραίτητο όμως η έρευνα να συνεχιστεί, με γεωτρήσεις και επί τόπου δοκιμές, ώστε να αποσαφηνιστεί ακριβώς ο ρόλος των ρευστοποιημένων εδαφικών στρωμάτων στην πρόκληση αυτών των αστοχιών στα λιμενικά έργα.

## 2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΣΕΙΣΜΙΚΟΤΗΤΑ

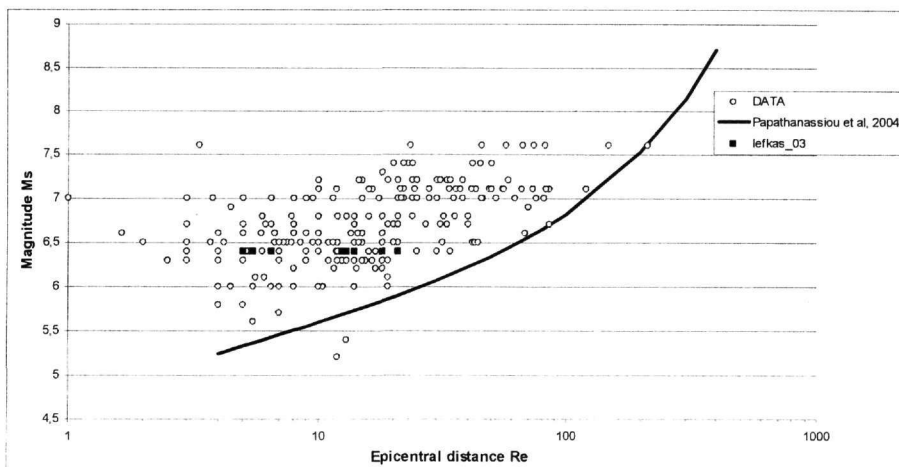
Φαινόμενα ρευστοποίησης συνήθως εμφανίζονται σε περιοχές όπου είχαν παρατηρηθεί και στο παρελθόν όταν παραμένουν αμετάβλητες οι εδαφικές και υδρογεωλογικές συνθήκες (Youd 1984). Συνεπώς η μελέτη της ιστορικής σεισμικότητας μιας περιοχής μπορεί να αποτελέσει το πρώτο εργαλείο για την αναγνώριση περιοχών με επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση.

Η Λευκάδα έχει υποστεί αρκετές ζημιές από ισχυρούς σεισμούς στο παρελθόν. Μελετώντας την ιστορική της σεισμικότητα διαπιστώνουμε τουλάχιστον 5 περιπτώσεις σεισμικών γεγονότων, τα οποία προκάλεσαν παρόμοια δευτερογενή φαινόμενα στο νησί (Πιν. 1). Χαρακτηριστικές είναι οι περιπτώσεις των σεισμών του 1914 και 1948. Κατά τον πρώτο σεισμό (27/09/1914,  $M_s=6.3$ ) προκλήθηκαν σημαντικές ζημιές στο νησί. Συγκεκριμένα προκλήθηκε καθίζηση της προκουμαίας στο Νυδρί, ζημιές σε κτίρια και δρόμους στην περιοχή του λιμανιού της πόλης της Λευκάδας καθώς και κρατήρες άμμου στην παραλία Πευκούλια (Γαλανόπουλος 1955). Όσον αφορά το δεύτερο σεισμό (30/06/1948,  $M_s=6.4$ ), οι ιστορικές αναφορές κάνουν λόγο για εδαφικές διαρρήξεις στην προβλήτα της πόλης της Λευκάδας με 150m μήκος και 12cm πλάτος. Επίσης παρατηρήθηκε καθίζηση της προβλήτας κατά 12cm (Ροντογιάννης 1995). Στην παραλία Πευκούλια, όπως και στο σεισμό του 1914, παρατηρήθηκαν κρατήρες άμμου. Στον πίνακα που ακολουθεί βλέπουμε κατά στήλη την ημερομηνία του σεισμού, την επικεντρική περιοχή, το μέγεθος, την περιοχή όπου παρατηρήθηκαν πιθανά φαινόμενα ρευστοποίησης και τέλος μια σύντομη περιγραφή των καταστροφών.

Πίνακας 1. Σύνδεση δεδομένων ιστορικής σεισμικότητας με πιθανά φαινόμενα ρευστοποίησης στο νησί της Λευκάδας.

Ημερομηνία	Επικεντρική περιοχή	$M_s$	Περιοχή πιθανής ρευστοποίησης	Περιγραφή
21 Δεκεμβρίου 1820	Λευκάδα	6,4	Πόλη Λευκάδας	Καθίζηση της κεντρικής πλατείας
24 Μαΐου 1911	Λευκάδα	5,3	Πόλη Λευκάδας	Εδαφικές διαρρήξεις στην προβλήτα 150m μήκος και 5cm πλάτος
27 Νοεμβρίου 1914	Λευκάδα	6,3	Πόλη Λευκάδας	Ζημιές σε κτίρια στο λιμάνι της πόλης
27 Νοεμβρίου 1914	Λευκάδα	6,3	Νυδρί	Καθίζηση προβλήτας
27 Νοεμβρίου 1914	Λευκάδα	6,3	Πευκούλια	Κρατήρες άμμου
22 Απριλίου 1948	Λευκάδα	6,5	Βασιλική	Εδαφικές διαρρήξεις στην προβλήτα, 40m μήκος και 5cm πλάτος
30 Ιουνίου 1948	Λευκάδα	6,4	Πόλη Λευκάδας	Εδαφικές διαρρήξεις στην προβλήτα, 150m μήκος και 12cm πλάτος. Καθίζηση 12cm
30 Ιουνίου 1948	Λευκάδα	6.4	Πευκούλια	Κρατήρες άμμου

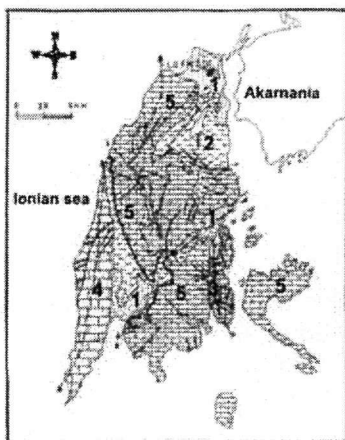
Επίσης η εμφάνιση ρευστοποίησης σε μια περιοχή εξαρτάται και από την επικεντρική της απόσταση (Ambraseys 1988). Στο διάγραμμα  $M_s$ - $R_e$  (επικεντρική απόσταση) που ακολουθεί (Σχ. 3) απεικονίζονται δεδομένα (άσπροι κύκλοι) τα οποία αφορούν περιοχές εμφάνισης ρευστοποίησης από τον ελληνικό χώρο και τις γύρω χώρες (Parathanassiou et al. 2004). Οι περιοχές των οποίων η επικεντρική απόσταση βρίσκεται αριστερά από την καμπύλη ορίζονται ως περιοχές με πιθανότητα ρευστοποίησης (Ambraseys 1988). Στο ίδιο διάγραμμα με διαφορετικό συμβολισμό (μαύρα τετράγωνα) απεικονίζονται τα δεδομένα που προέκυψαν από το σεισμό της 14/08/2003 στη Λευκάδα. Όπως παρατηρούμε οι επικεντρικές αποστάσεις των περιοχών όπου παρατηρήθηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης φανερώνουν, σύμφωνα με το διάγραμμα, περιοχές με πιθανότητα ρευστοποίησης.



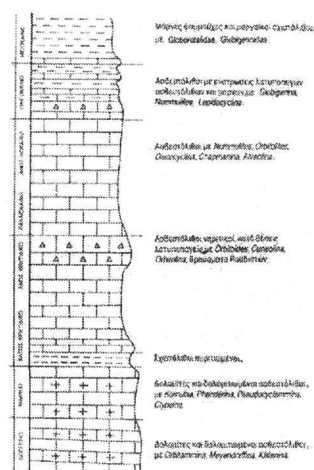
Σχήμα 3. Διάγραμμα Ms-Re με δεδομένα από τον ελληνικό χώρο (άσπροι κύκλοι) και από το σεισμό της Λευκάδας (μαύρα τετράγωνα). Με μαύρο χρώμα απεικονίζεται η καμπύλη-όριο πιθανότητας ρευστοποίησης (Papathanassiou et al 2004)

### 3 ΓΕΩΛΟΓΙΑ

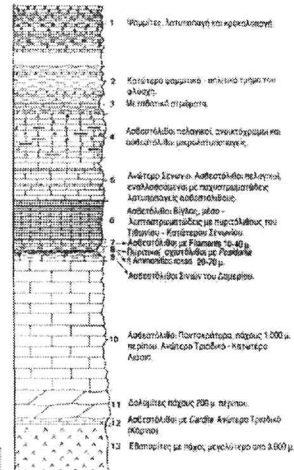
Η Λευκάδα ανήκει γεωλογικά στη ζώνη των Παξών και στην Ιόνια ζώνη (Σχ. 4α). Διακρίνουμε 1) Πλειστοκαινικές και κυρίως Ολοκαινικές παράκτιες αποθέσεις, 2) Μειοκαινικές μάργες και ψαμμίτες, 3) κατά τόπου εμφανίσεις του φλύσχη της Ιονίου, 4) ασβεστόλιθους της Απουλίας ζώνης στο ΝΔ τμήμα του νησιού, 5) και την ασβεστολιθική σειρά της Ιόνιας ζώνης. Η ζώνη των Παξών στρωματογραφικά αποτελείται από επιφανειακούς μειοκαινικούς σχηματισμούς οι οποίοι είναι μαργαικοί, συχνά ψαμμούχοι εναλλασσόμενοι με λατυποπαγείς ασβεστόλιθους (Σχ. 4β). Η Ιόνια ζώνη είναι επωθημένη προς τα δυτικά πάνω στη ζώνη των Παξών. Οι επιφανειακοί της μειοκαινικοί σχηματισμοί είναι αποθέσεις μολασικών ιζημάτων μεγάλου πάχους (κυρίως μάργες και λιγότερο ψαμμίτες, με ενστρώσεις μαργαικών ασβεστόλιθων και λατυποκροκαλοπαγών) που επικάθονται στο φλύσχη (Σχ. 4γ).



Σχήμα 4α. Γεωλογικός χάρτης Λευκάδας. (Ροντογιάννη-Τσιαμπάου, 1997)



Σχήμα 4β. Στρωματογραφική στήλη της ζώνης Παξών (Κατσικάτσος, 1992)



Σχήμα 4γ. Στρωματογραφική στήλη της Ιόνιας ζώνης (Dercourt et al. 1980)

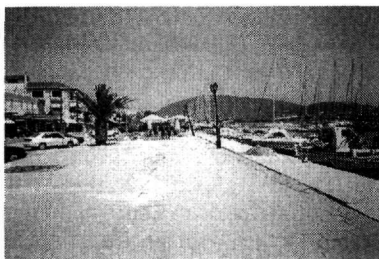
Όσον αφορά την γεωλογία των περιοχών όπου παρατηρήθηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης, αυτές δομούνται κυρίως από Πλειστοκαινικές και Ολοκαινικές παράκτιες αποθέσεις. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ, η περιοχή της πόλης της Λευκάδας δομείται από σύγχρονες αλλουβιακές προσχώσεις, παράκτιους αμώδεις σχηματισμούς και λιμνοθαλάσσιες ιλυώδεις αποθέσεις, πλευρικές αποθέσεις που επικάθονται του μαργακού υποβάθρου. Παρόμοιες γεωλογικές συνθήκες επικρατούν και στη Βασιλική καθώς και στο Νυδρί (ΙΤΣΑΚ 2003).

## 4 ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΚΑΙ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

### 4.1 Αστοχίες τεχνικών έργων

Ο σεισμός της 14 Αυγούστου προκάλεσε εκτεταμένες ζημιές σε όλο το νησί της Λευκάδας. Σημαντικός αριθμός καταπτώσεων και κατολισθήσεων εντοπίζεται τόσο κατά μήκος του δυτικού άξονα του νησιού αλλά και στο ανατολικό τμήμα με μικρότερες επιπτώσεις. Επίσης σημαντικές αστοχίες παρατηρήθηκαν και στα λιμάνια του νησιού. Οι βλάβες στα λιμενικά έργα κατανέμονται χωρικά στο ανατολικό, βόρειο και νότιο τμήμα του νησιού.

Στην πόλη της Λευκάδας παρατηρήθηκαν οριζόντιες μετακινήσεις και στροφές κρηπιδότοιχων καθώς και βυθίσεις υλικού επίχωσης πίσω από τους κρηπιδότοιχους. Επίσης σημαντικές βλάβες υπέστη τόσο η πλωτή γέφυρα που συνδέει την Λευκάδα με την Δυτ. Στερεά Ελλάδα όσο και ο διάυλος που οδηγεί στην πόλη της Λευκάδας όπου παρατηρήθηκαν δυναμικές διαφορικές καθιζήσεις (Σχ. 5α,β,γ)



Σχήμα 5α. Λευκάδα-Οδ. Γκολέμη: Καθίζηση υλικού επίχωσης

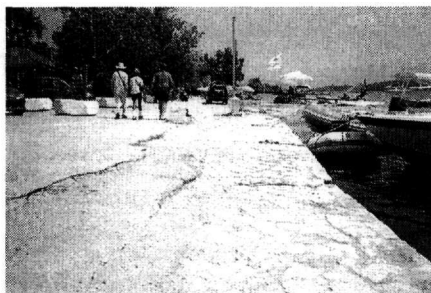


Σχήμα 5β. Λευκάδα – είσοδος: Αστοχία κρηπιδώματος στην πλωτή γέφυρα



Σχήμα 5γ. Λευκάδα-Διάυλος: Καθίζηση επιχώματος.

Στο λιμάνι του οικισμού Νυδρί παρατηρήθηκαν ρωγμές πίσω από τον κρηπιδότοιχο και παράλληλα προς αυτόν καθώς και διαφορικές καθιζήσεις (Σχ. 6α). Τέλος στο λιμάνι της Βασιλικής, στην προβλήτα παρατηρήθηκαν έντονες μετακινήσεις, βυθίσεις και στροφές του κρηπιδώματος (Σχ. 6β)



Σχήμα 6α. Νυδρί: Ρωγμές πίσω από τον κρηπιδότοιχο



Σχήμα 6β. Βασιλική: Βύθιση και στροφή του κρηπιδώματος

Οι παραπάνω αστοχίες στα λιμενικά έργα είναι πιθανό να οφείλονται και στη ρευστοποίηση του εδάφους. Ο βαθμός επιρροής των ρευστοποιημένων εδαφικών στρωμάτων στις βλάβες θα μπορέ-

σει να αποσαφηνιστεί με την διάνοιξη γεωτρήσεων και επί τόπου δοκιμών στις συγκεκριμένες περιοχές.

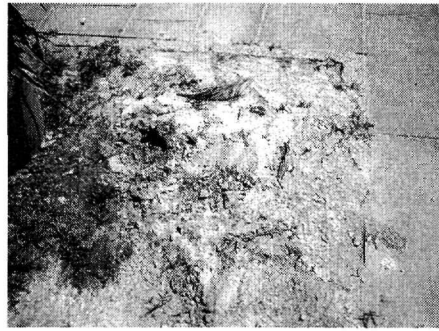
#### 4.2 Φαινόμενα ρευστοποίησης

Χαρακτηριστικά δευτερογενή φαινόμενα του σεισμού που παρατηρήθηκαν, τα οποία συνδέονται με ρευστοποίηση, ήταν η ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού από εδαφικές διαρρήξεις στην πόλη της Λευκάδας, στο Νυδρί και στην περιοχή της Βασιλικής. Επίσης κρατήρες άμμου παρατηρήθηκαν στις παραλίες Πευκούλια και Μύλοι. Από τις παραπάνω περιοχές έγινε δειγματοληψία ώστε να αποσαφηνιστεί αν το υλικό το οποίο αναδύθηκε προέρχεται από εδαφικούς σχηματισμούς με επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση. Εκτελέστηκαν εργαστηριακές δοκιμές ώστε να διευκρινιστεί η κοκκομετρική σύσταση των υλικών και οι φυσικές τους ιδιότητες.

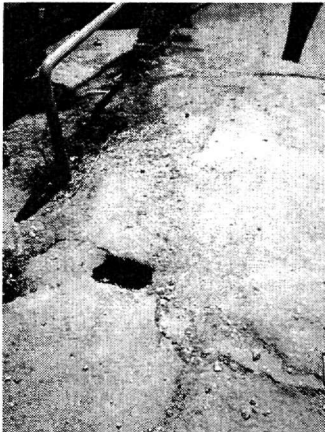
Στην πόλη της Λευκάδας, στην οδό Γκολέμη, παρατηρήθηκαν εδαφικές διαρρήξεις πλάτους μέχρι 7cm από τις οποίες αναδύθηκε λεπτόκοκκο υλικό ενώ δημιουργήθηκαν και κώνοι άμμου. Επίσης σε αρκετά υπόγεια πολυκατοικιών εμφανίστηκε αναδυόμενο εδαφικό υλικό ενώ φαινόμενα ρευστοποίησης παρατηρήθηκαν και βόρεια της πόλης της Λευκάδας, στην περιοχή αμμόγλωσσα (ΙΤΣΑΚ 2003). Στην περιοχή του parking εμφανίστηκε πίδακας, σύμφωνα με αυτόπτη μάρτυρα, από τον οποίο αναδύθηκε υλικό με νερό μέχρι το ύψος του μισού μέτρου. Επίσης στην μαρίνα δημιουργήθηκαν ρωγμές από τις οποίες αναδύθηκε λεπτόκοκκο υλικό(Σχ. 7α,β,γ,δ)



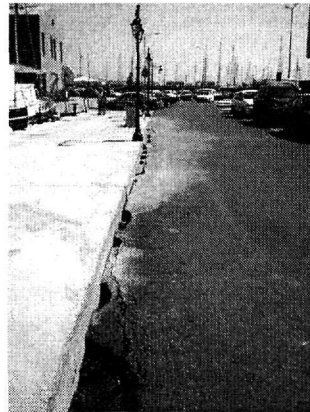
Σχήμα 7α. Λευκάδα-οδ. Γκολέμη: Ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού (Λευκάδα II)



Σχήμα 7β. Λευκάδα –Οδ. Γκολέμη: Δημιουργία κώνου άμμου. (Λευκάδα I)



Σχήμα 7γ. Λευκάδα-parking: Δημιουργία πίδακα



Σχήμα 7δ. Λευκάδα-μαρίνα: Ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού

Στην περιοχή του οικισμού Νυδρί παρατηρήθηκαν παρόμοια φαινόμενα με αυτά στην πόλη της Λευκάδας. Συγκεκριμένα στην παλιά εκβολή του ποταμού Δημοσάρι υπήρξε ανάδυση υλικού από εδαφικές διαρρήξεις. Παράλληλα εμφανίσθηκαν τέσσερις κρατήρες άμμου, σύμφωνα με αυτόπτη

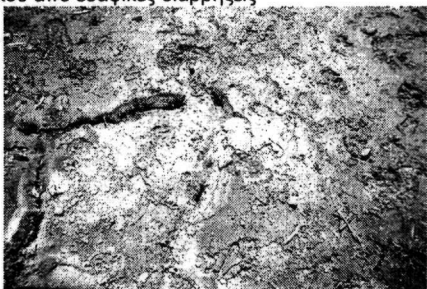
μάρτυρα, από τους οποίους εκτινασσόταν εδαφικό υλικό με νερό. Παρόμοια φαινόμενα μικρότερης όμως κλίμακας παρατηρήθηκαν και στη νέα εκβολή του ποταμού Δημοσάρι (Σχ. 8α,β,γ,δ)



Σχήμα 8α. Νυδρι-Παλιά εκβολή Δημοσάρι: Ανάδυση υλικού από εδαφικές διαρρήξεις



Σχήμα 8β. Νυδρι-Παλιά εκβολή Δημοσάρι: Κρατήρες άμμου

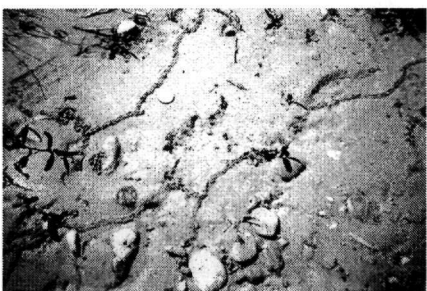


Σχήμα 8γ. Νυδρι-Παλιά εκβολή Δημοσάρι: Ανάδυση υλικού από εδαφικές διαρρήξεις

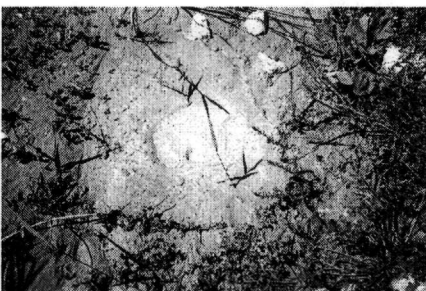


Σχήμα 8δ. Νυδρι-Νέα εκβολή Δημοσάρι: Κρατήρες άμμου

Η περιοχή της Βασιλικής όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2 δομείται από ολοκαινικές αποθέσεις ενώ δυτικά του οικισμού, σε απόσταση 200m περίπου, εκβάλλει χείμαρρος. Στην εκβολή του παρατηρήθηκαν μικρές σε πλάτος εδαφικές διαρρήξεις με ελάχιστη ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού ενώ δημιουργήθηκαν χαρακτηριστικοί κρατήρες άμμου με διάμετρο 25cm (Σχ. 9α,β)



Σχήμα 9α. Βασιλική: Εδαφικές διαρρήξεις με ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού



Σχήμα 9β. Βασιλική: Κρατήρες άμμου διαμέτρου 25cm

Στο δυτικό τμήμα του νησιού δεν παρατηρήθηκαν αντίστοιχα φαινόμενα λόγω της γεωμορφολογίας του. Στις περιοχές όμως Πευκούλια και Μύλοι παρατηρήθηκαν φαινόμενα τα οποία πιθανό να οφείλονται σε ρευστοποίηση. Συγκεκριμένα στην παραλία Πευκούλια δημιουργήθηκαν τέσσερις κρατήρες. Ο μεγαλύτερος είχε διάμετρο 3m και βάθος 2m, ενώ ο μικρότερος είχε διάμετρο 1.5m και βάθος 0.7m (Σχ. 10α,β). Παρόμοια φαινόμενα περιγράφονται από τον Γαλανόπουλο (1955), στην ίδια περιοχή, ως αποτέλεσμα των σεισμικών δονήσεων του 1914 και 1948. Νότια της περιοχής Πευκούλια βρίσκεται η παραλία Μύλοι στην οποία εμφανίστηκαν παρόμοια φαινόμενα μικρότερης όμως κλίμακας. Οι δύο αυτές περιοχές βρίσκονται εκατέρωθεν του οικισμού Αγ. Νικήτας και απέχουν λίγα μόλις χιλιόμετρα από το επίκεντρο του σεισμού.



Σχήμα 10α. Πευκούλια: Κρατήρας διαμέτρου 3m και βάθους 2m



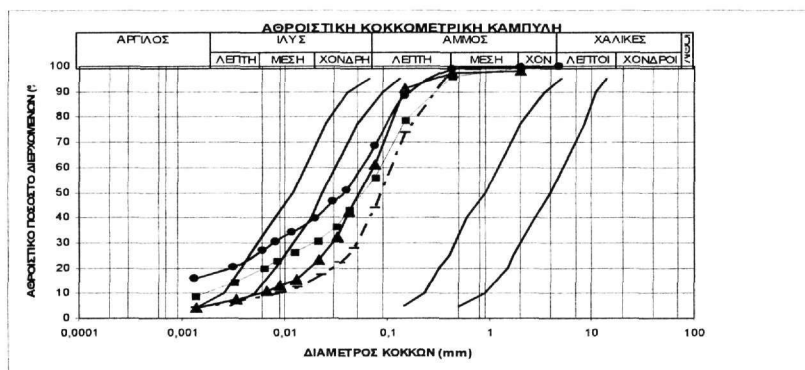
Σχήμα 10β. Πευκούλια: Κρατήρας διαμέτρου 1.5m και βάθους 0.7m

## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Ένας άμεσος τρόπος για να εξακριβωθεί εάν το αναδυόμενο λεπτόκοκκο υλικό προέρχεται από ρευστοποιημένο εδαφικό στρώμα είναι η μελέτη στο εργαστήριο της κοκκομετρικής του σύστασης και των φυσικών του ιδιοτήτων (φυσική υγρασία, όρια Atterberg). Όσον αφορά την κοκκομετρία του εδαφικού υλικού έχουν καθοριστεί όρια μέσα στα οποία υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ρευστοποίησης (Tsuchida 1971). Υπάρχουν δύο διαγράμματα ανάλογα με τη βαθμό ομοιομορφίας του εδάφους. Επίσης ο συνδυασμός του ορίου υδαρότητας, της φυσικής υγρασίας και του ποσοστού των λεπτόκοκκων του εδάφους μπορεί να αποσαφηνίσει την επιδεκτικότητα ή όχι ενός υλικού προς ρευστοποίηση (Wang 1979, Seed & Idriss 1982, Andrews & Martin 2002).

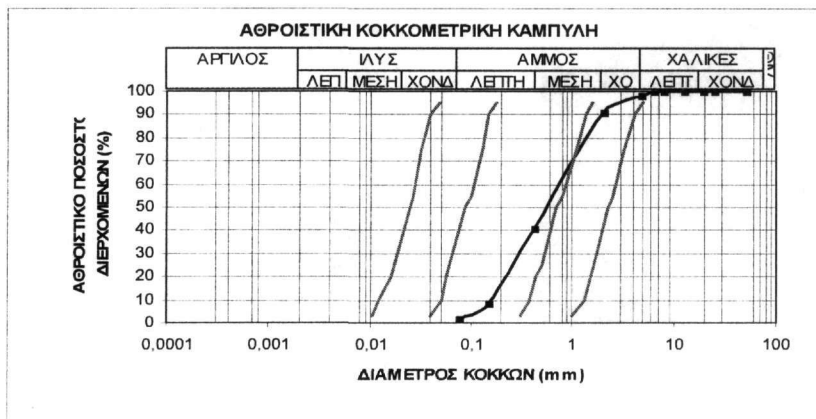
Από το υλικό το οποίο αναδύθηκε έγινε δειγματοληψία και εκτελέστηκαν εργαστηριακές δοκιμές σύμφωνα με τα παραπάνω. Όπως βλέπουμε στο σχήμα 11α η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού από τις τοποθεσίες «Λευκάδα Ι» (Σχ. 7β), «Λευκάδα ΙΙ» (Σχ. 7α) και «Βασιλική» (Σχ. 9β) «εφαρμόζει» πλήρως στην περιοχή μεγάλης πιθανότητας ρευστοποίησης. Αντιθέτως το υλικό που προέρχεται από την τοποθεσία «Αλυκές», νότια της πόλης της Λευκάδας, δείχνει μια πιθανότητα ρευστοποίησης η οποία όμως είναι μικρότερη από τα υπόλοιπα δείγματα. Η κοκκομετρική καμπύλη του δείγματος «Νυδρί» (Σχ. 8γ) λόγω του μεγάλου βαθμού ομοιομορφίας, απεικονίζεται στο αντίστοιχο διάγραμμα (Σχ. 11β). Όπως παρατηρούμε το συγκεκριμένο υλικό παρουσιάζει μεγάλη πιθανότητα ρευστοποίησης.

Στα παραπάνω δείγματα εκτελέστηκαν και εργαστηριακές δοκιμές με στόχο την εκτίμηση των φυσικών τους ιδιοτήτων. Οι τιμές αυτών των ιδιοτήτων (Πιν. 2) συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές που ορίζονται από τη διεθνή βιβλιογραφία (Σχ. 12α, 12β) για εδάφη επιδεκτικά προς ρευστοποίηση.



Σχήμα 11α. Κοκκομετρική σύσταση αναδυόμενων εδαφικών υλικών. Με συμπαγείς γραμμές εμφανίζονται τα όρια των περιοχών ρευστοποίησης. Με διακεκομμένη γραμμή η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού «Λευκάδα ΙΙ», με παρεμβολές τριγώνων η καμπύλη του υλικού «Λευκάδα Ι», με παρεμβολές τετραγώνων του υλικού «Βασιλική» και με παρεμβολές κύκλων του υλικού «Αλυκές»



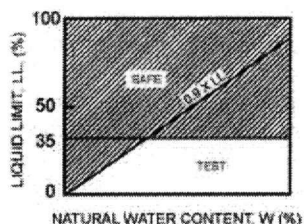


Σχήμα 11β. Κοκκομετρική σύσταση δείγματος «Νυδρί» (μαύρη γραμμή). Με γκρι εμφανίζονται οι καμπύλες των ορίων πιθανότητας ρευστοποίησης.

Πίνακας 2. Τιμές φυσικών ιδιοτήτων των υλικών που αναδύθηκαν.

Δείγμα	% (0,005mm)	% (0,002mm)	LL
Λευκάδα I	10	5	25
Λευκάδα II	9	4.5	24.5
Βασιλική	17	102	25.2
Αλυκές	23	18.7	34.5
Νυδρί	Καθαρή άμμος μη διαβαθμισμένη (SP)		

- 1 Percent Finer than 0.005mm  $\leq 15\%$
- 2 Liquid Limit (LL)  $\leq 35\%$
- 3 Water Content (W)  $\geq 0.9 \times LL$



	Liquid Limit <sup>1</sup> < 32	Liquid Limit $\geq 32$
Clay Content <sup>2</sup> < 10%	Susceptible	Further Studies Required <i>(Considering plastic non-clay sized grains - such as Illite)</i>
Clay Content <sup>2</sup> $\geq 10\%$	Further Studies Required <i>(Considering non-plastic clay sized grains - such as mine and quarry tailings)</i>	Not Susceptible

- Notes:
1. Liquid limit determined by Casagrande-type percussion apparatus.
  2. Clay defined as grains finer than 0.002 mm.

Σχήμα 12α. Τιμές κινεζικών κριτηρίων για εδάφη επιδεικτικά προς ρευστοποίηση (Wang 1979, Seed & Idriss 1982)

Σχήμα 12β. Τιμές κριτηρίων για εδάφη επιδεικτικά προς ρευστοποίηση (Andrews & Martin 2002)

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του πίνακα 2 με τις αντίστοιχες τιμές των κριτηρίων στα σχήματα 12α και 12β καθώς και τις κοκκομετρικές καμπύλες των υλικών (Σχ. 11α), συμπεραίνουμε ότι το υλικό το οποίο αναδύθηκε είτε μέσα από εδαφικές διαρρήξεις είτε δημιουργώντας κώνους άμμου στις τοποθεσίες «Λευκάδα I», «Λευκάδα II» και «Βασιλική» προέρχεται από εδαφικά στρώματα τα οποία είναι επιδεικτικά προς ρευστοποίηση. Επίσης το υλικό «Νυδρί» προέρχεται από εδαφικό στρώμα το οποίο σύμφωνα και με το σχήμα 11β έχει μεγάλη πιθανότητα ρευστοποίησης. Αντιθέτως οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού «Αλυκές» δεν πληρούν τα κριτήρια που ορίζονται στα σχήματα 12α,β και επομένως δεν θεωρείται ότι προέρχεται από εδαφικό στρώμα με επιδεικτικότητα προς ρευστοποίηση. Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν ότι πράγματι προκλήθηκε ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών σε συγκεκριμένες τοποθεσίες κατά το σεισμό της 14/08/2003. Όμως ο

βαθμός επίδρασης αυτών των ρευστοποιημένων σχηματισμών στις αστοχίες των λιμενικών έργων θα αποσαφηνιστεί μόνο με γεωτρήσεις και επί τόπου δοκιμές.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε τον Δρ. Αθανασίου Γκανά, Ερευνητή του Αστεροσκοπείου Αθηνών, για την βοήθεια του κατά την διάρκεια των παρατηρήσεων πεδίου

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Γαλανόπουλος Α. Γ., 1955. *Σεισμική Γεωγραφία της Ελλάδος*, Γεωλ. χρονικά Ελληνικών χωρών, 6, σελ. 83-121
- ΙΤΣΑΚ, 2003. *Ο σεισμός της Λευκάδος (M=6.4), 14 Αυγούστου 2003, Προκαταρκτική έκθεση των συνεπειών του σεισμού στο δομημένο και μη περιβάλλον*, σελ. 61
- Ροντογιάννης Π., 1995. *Σεισμολόγιο της Λευκάδος*, Επετηρίς, Ετ. Λευκ. Μελ., Τομ. Η, σελ.151-205, Αθήνα
- Ambraseys N., 1988. *Engineering seismology*, Earthquake engineering and structural dynamics, 17, pp. 1-105
- Papadopoulos A. G., Karastathis V., Ganas A., Pavlides Sp., Fokaefs A., Orfanogiannaki K., 2003. *The Lefkada, Ionian Sea (Greece), shock (Mw 6.2) of 14 August 2003: Evidence for the characteristic earthquake from seismicity and ground failures*. Earth Planets Space, 55, pp. 713-718.
- Papathanassiou G., Pavlides S., Christaras B. & Pitilakis K., 2004. *Liquefaction phenomena in the Aegean broader area and empirical relations of magnitude versus distance*, Proc., 5<sup>th</sup> Int. Symp. On Eastern Med. Geology, 2, 942-946, Thessaloniki 14-20 April, Greece
- Pavlides S. & Caputo R., 2004. *Earthquakes versus Active Fault's length- displacement: qualitative and quantitative relationships from the Aegean (Greece and Surrounding region)*. Tectonophysics, 308.
- Pavlides S.B., Papadopoulos G.A., Ganas A., Papathanassiou G., Karastathis V., Keramydas D. & Fokaefs A., 2004. *The 14 August 2003 Lefkada (Ionian sea) earthquake*. Proc., 5<sup>th</sup> Int. Symp. On Eastern Med. Geology, 2, 631-635, Thessaloniki 14-20 April, Greece
- Rondoyanni-Tsiambaou, Th., 1997. *Les seismes et l'environnement géologique de l'île de Lefkade, Grèce :Passe et Futur*. Engineering Geology and the Environment, Marinos, et al. (eds) pp. 1469-1474, Balkema
- Youd T.L., 1984. *Recurrence of liquefaction at the same site*. Proc., 8<sup>th</sup> World Con. On Earthquake Engineering, Vol.3, pp.231-238
- Tsuchida H., 1971. *Estimation of liquefaction potential of sandy soils*, Proc. 3<sup>rd</sup> Joint Meeting, US-Japan, UNJR

## ABSTRACT

### LIQUEFACTION PHENOMENA TRIGGERED BY THE EARTHQUAKE OF AUGUST 14, 2003, IN THE ISLAND OF LEFKADA, GREECE

Papathanassiou G.<sup>1</sup>, Pavlides S.<sup>1</sup>, Christaras B.<sup>1</sup>, and Pitilakis K.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Geology, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 546 21, Thessaloniki, gpapatha@geo.auth.gr, pavlides@geo.auth.gr, christar@geo.auth.gr

<sup>2</sup> Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 546 21, Thessaloniki, K.pitilakis@geo.civil.auth.gr

In the early morning of August 14, 2003 (05:14:53.9 GMT; 08:14:54 local time), a strong ( $M_s=6.4$ ,  $M_w=6.2$ ,  $a=0.42g$ ) damaging earthquake occurred offshore the NW coast of Lefkada Island (Ionian, Greece). According to the Seismological laboratory of Aristotle University Of Thessaloniki, its focus was located at 38.86 N, 20.73 E (fig. 1) at depth  $h = 10$ km. Extensive ground failures (rock falls, liquefaction, cracks) were observed. The maximum intensity has been evaluated  $I_0 = VIII$  (EMS) at Lefkas municipality. Historical evidence of liquefaction show that the island suffered from similar co-seismic effects from past earthquakes, especially from 1914 and 1948 shocks. From the liquefaction sites, representing samples of the ejected soil were examined with a view to evaluate the liquefaction susceptibility of them. The results of the laboratory tests show that according to the Chinese Criteria (Wang 1979) these soils are considered to be of high potentially liquefiable type.