

# Σεισμική Απόκριση και Τρωτότητα Κρηπιδότοιχων. Το Παράδειγμα της Λευκάδας.

## Seismic Response and Vulnerability Assessment of Quaywalls. The Case of Lefkas.

ΚΑΚΔΕΡΗ, Κ. Γ. Πολιτικός Μηχανικός, MSc, Υποψ. Δρ Α.Π.Θ.  
ΡΑΠΤΑΚΗΣ, Δ. Γ. Λέκτορας Τμ. Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.  
ΑΡΓΥΡΟΥΔΗΣ, Σ. Α. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψ. Δρ Α.Π.Θ.  
ΑΛΕΞΟΥΔΗ, Μ. Ν. Πολιτικός Μηχανικός, Δρ Τμ. Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.  
ΠΙΤΙΛΑΚΗΣ, Κ. Δ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής Τμ. Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η παρούσα μελέτη αποτελεί μια πρώτη συμβολή στην εκτίμηση καμπυλών τρωτότητας κρηπιδότοιχων–τοιχών αντιστήριξης για την ελληνική κατασκευαστική πραγματικότητα. Ως παράδειγμα χρησιμοποιούνται οι κρηπιδότοιχοι στην πόλη της Λευκάδας που υπέστησαν σημαντικές παραμορφώσεις κατά τον σεισμό της 14/08/2003. Αρχικά περιγράφονται οι αστοχίες (μετακινήσεις) και γίνεται μια πρώτη προσπάθεια ερμηνείας των παρατηρούμενων βλαβών. Στην συνέχεια η συστηματική κατάταξη και τυπολογία των βλαβών χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και αξιολόγηση υπάρχουσών καμπυλών τρωτότητας με στόχο την διερεύνηση της δυνατότητας διαμόρφωσης αντίστοιχων καμπυλών μικρών κρηπιδότοιχων με βάση τα ελληνικά δεδομένα.

**ABSTRACT:** The present study is a first contribution in the estimation of vulnerability functions for quaywalls-retaining structures for the construction practice of Greece. The quaywalls of the city of Lefkas that sustained significant deformations during the 14/08/2003 earthquake are used as an example. Initially, the failures (displacements) are described and a first attempt for the explanation of the observed damages is performed. Afterwards, the systematic classification and typology of these damages is used for the valuation and examination of the reliability of existing fragility curves, aiming at the examination of the possibility to develop corresponding curves for small quaywalls based on Greek data.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι λιμενικές εγκαταστάσεις αποτελούν τμήμα του δικτύου μεταφορών μιας χώρας. Ως βασική τους λειτουργία θεωρείται η μεταφορά ανθρώπων και εμπορευμάτων δια θαλάσσης, παράλληλα όμως περιλαμβάνουν και ένα πλήθος εγκαταστάσεων και υποδομών, δικτύων κοινής ωφελείας και μεταφορικών δικτύων (Werner, 1998).

Η κριτική αξιολόγηση της παρατηρούμενης σεισμικής συμπεριφοράς λιμενικών εγκαταστάσεων είναι δυνατό να συντελέσει δραστικά στην αποτελεσματικότερη μείωση του σεισμικού τους κινδύνου. Για την αξιόπιστη εκτίμηση του αναμενόμενου επιπέδου βλαβών των κρηπιδότοιχων – τοίχων αντιστήριξης σε σεισμό επιβάλλεται ο έλεγχος της αξιοπιστίας των χρησιμοποιούμενων σχέσεων τρωτότητας

καθώς και η προσαρμογή τους στα δεδομένα της Ελληνικής κατασκευαστικής πρακτικής.

Ιδιαίτερα σημαντική συμβολή προς την κατεύθυνση αυτή αποτελεί η αξιολόγηση της συμπεριφοράς των λιμενικών εγκαταστάσεων κατά την διάρκεια του σεισμού της Λευκάδας (14/08/2003). Η εμφάνιση μιας πληθώρας σεισμικών βλαβών στις λιμενικές εγκαταστάσεις του νησιού σε συνδυασμό με την ύπαρξη σεισμικών και γεωτεχνικών πληροφοριών για την περιοχή, επιτρέπει αφενός την ερμηνεία της σεισμικής τους απόκρισης και αφετέρου τον έλεγχο της αξιοπιστίας και καταλληλότητας των σχέσεων τρωτότητας που προτάθηκαν στην διεθνή βιβλιογραφία (ειδικά στην Ιαπωνία) για τα λιμενικά έργα του Ελλαδικού χώρου.

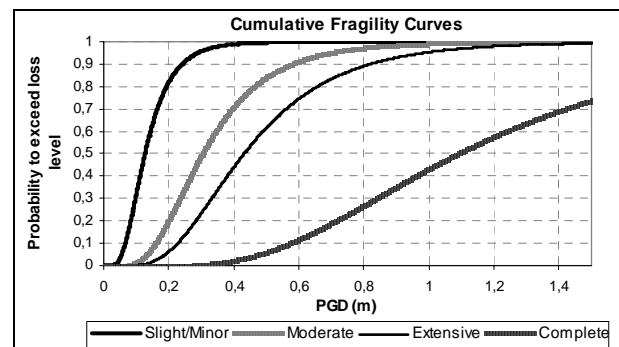
## 2. ΜΕΘΟΛΟΓΙΑ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΤΡΩΤΟΤΗΤΑΣ

Η συλλογή και απογραφή των κύριων τυπολογικών χαρακτηριστικών των επί μέρους συνιστωσών, αποτελεί την βάση για την επιλογή της κατάλληλης σχέσης τρωτότητας. Οι διαφορετικοί τύποι κρηπιδότοιχων διακρίνονται ανάλογα με την γεωμετρία τους, το είδος της διατομής τους, το υλικό κατασκευής τους, τον τύπο θεμελίωσής τους, την ύπαρξη και το είδος των αγκυρώσεων κτλ (PIANC, 2001). Το σύνολο της πληροφορίας καταγράφεται σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, παράλληλα με την θέση ή/και χωρική κατανομή τους.

Η ποσοτική εκτίμηση του πιθανού βαθμού βλάβης γίνεται με βάση τις καμπύλες ή σχέσεις τρωτότητας, οι οποίες συνδέουν την ένταση του σεισμικού κραδασμού με την πιθανότητα βλάβης. Η ένταση και τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης αποδίδονται είτε μέσω της κορυφαίας τιμής της εδαφικής επιτάχυνσης, ταχύτητας, μετακίνησης, ή των αντίστοιχων φασματικών τιμών τους σε συγκεκριμένες περιόδους, είτε τέλος μέσω του μεγέθους της μόνιμης εδαφικής μετακίνησης (λόγω μόνιμων παραμορφώσεων του εδάφους, ρευστοποίησης ή κατολισθήσεων). Επιπλέον, η χωρική κατανομή και τα χαρακτηριστικά της εδαφικής ταλάντωσης θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τους τις τοπικές εδαφικές συνθήκες, τις γεωτεχνικές-δυναμικές ιδιότητες των εδαφικών στρώσεων, καθώς και την επιρροή των πιθανών ασυνεχειών και των τοπογραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής (Pitilakis, 2004).

Αποφασιστικής σημασίας είναι ο καθορισμός της κρίσιμης παραμέτρου της εδαφικής κίνησης. Η απώλεια ή μείωση της διατμητικής αντοχής των χαλαρών, κορεσμένων, αμμωδών σχηματισμών που συχνά επικρατούν στις παραλιακές περιοχές αποτελεί την επικρατέστερη αιτία πρόκλησης σεισμικών βλαβών στις λιμενικές εγκαταστάσεις (Werner, 1998). Η εμπειρία έχει δείξει ότι η επιβολή ακόμα και μέτριων επιπέδων σεισμικής διέγερσης είναι σε θέση να προκαλέσει φαινόμενα μερικής ρευστοποίησης, με αποτέλεσμα την θραύση ή/και καθίζηση του εδάφους, την αύξηση των πλευρικών ωθήσεων στις κατασκευές αντιστήριξης και την απώλεια της παθητικής αντίστασης τόσο στον τοίχο όσο και στις αγκυρώσεις (PIANC, 2001).

Ο καθορισμός της πιθανότητας βλάβης γίνεται με βάση τις διεθνώς προτεινόμενες συναρτήσεις τρωτότητας (HAZUS, 2004 και Ichii, 2003). Το HAZUS, 2004 προτείνει για τον καθορισμό των αναμενόμενων απωλειών των κρηπιδότοιχων τις καμπύλες του σχήματος 1. Πρόκειται για κανονικο-λογαριθμικές συναρτήσεις οι οποίες συνδέουν την παραμένουσα εδαφική μετακίνηση (PGD) με την πιθανότητα υπέρβασης ορισμένων επιπέδων βλάβης. Τέσσερα επίπεδα βλάβης ορίζονται για μικρές, μέτριες, εκτεταμένες και καθολικές βλάβες.

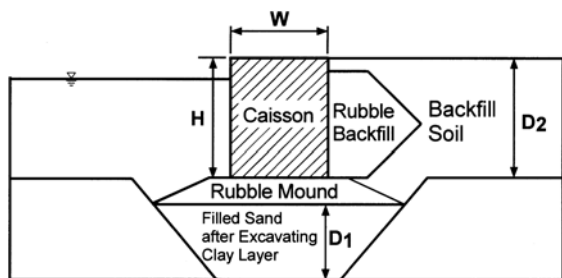


Σχήμα 1. HAZUS, 2004-Καμπύλες τρωτότητας για παράκτιες κατασκευές.

Figure 1. HAZUS, 2004-Fragility curves for waterfront structures.

Για την αποτίμηση του βαθμού των άμεσων απωλειών των τοίχων βαρύτητας, ο Ichii (2003) προτείνει συνολικά 20 διαφορετικές καμπύλες τρωτότητας (κανονικο-λογαριθμικές συναρτήσεις) που συνδέουν την κορυφαία τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) με την πιθανότητα υπέρβασης ορισμένων επιπέδων βλάβης. Ορίζονται τέσσερα επίπεδα βλάβης με βάση την τιμή της ανηγμένης ως προς το ύψος του τοίχου μετακίνησης / ολίσθησής του προς την θάλασσα. Για την επιλογή της κατάλληλης σχέσης τρωτότητας λαμβάνονται υπόψη οι παρακάτω παράμετροι (σχήμα 2):

- Ο λόγος των δύο διαστάσεων του τοίχου (πλάτος προς ύψος  $W/H$ ).
- Το ανηγμένο ως προς το ύψος του τοίχου βάθος του αμμώδους στρώματος όπισθεν του τοίχου ( $D_1/H$ ). Οι αποθέσεις που μεσολαβούν μέχρι το σιφρό έδαφος μπορεί να είναι είτε φυσικές είτε τεχνητές.
- Η τιμή του ισοδύναμου αριθμού κτύπων  $N_{SPT}$  ( $N_{65}$ ) των αμμωδών στρωμάτων κάτω και πίσω από τον τοίχο (η διορθωμένη τιμή για ενεργό κατακόρυφη τάση ίση με 65 kPa αναφορικά με την τιμή μιας ισοδύναμης σχετικής πυκνότητας).



Σχήμα 2. Ichii 2003 – Ορισμός παραμέτρων καμπυλών τρωτότητας για κρηπιδοτόιχους.  
Figure 2. Ichii 2003 – Definition of fragility curves' parameters for quaywalls.

Στον πίνακα 1 δίνονται οι παράμετροι καθορισμού της συνάρτησης βλάβης των κρηπιδοτόιχων βαρύτητας σύμφωνα με τον Ichii (2003), ενώ στο σχήμα 3 απεικονίζεται μια ενδεικτική καμπύλη τρωτότητας ( $W/H=0,9$ ,  $D_1/H=0,5$ ,  $N_{65}=10$ ).

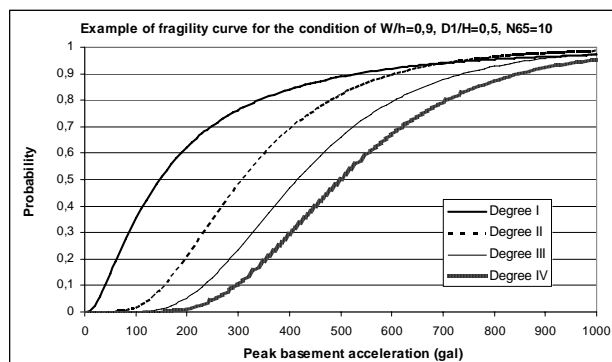
Πίνακας 1. Ichii 2003– Παράμετροι καθορισμού σχέσης τρωτότητας κρηπιδοτόιχων βαρύτητας.  
Table 1. Ichii 2003 – Fragility curve parameters for gravity type quay-walls.

Equivalent SPT N values	Aspect ratio (W/H)	Normalized thickness of sand deposit (D1/H)
5	0,9	0
8	0,9	0
10	0,9	0
15	0,9	0
20	0,9	0
25	0,9	0
5	0,9	1
8	0,9	1
10	0,9	1
15	0,9	1
20	0,9	1
25	0,9	1
15	0,65	0
15	0,9	0
15	1,05	0
15	0,65	1
15	0,9	1
15	1,05	1
10	0,9	0,5
20	0,9	0,5

Παράμετροι καθορισμού του επιπέδου βλάβης των κρηπιδοτόιχων αποτελούν:

- Ο βαθμός της δομικής βλάβης (HAZUS, 2004).
- Η κανονικοποιημένη μετακίνηση / ολίσθηση προς την θάλασσα (Ichii, 2003, PIANC, 2001).
- Η παραμένουσα κλίση προς την θάλασσα (PIANC, 2001).
- Η μόνιμη / παραμένουσα μετακίνηση στην κορυφή του τοίχου (Uwabe, 1983).

- Η οριζόντια μετακίνηση του τοίχου (OCDI, 2002).
- Ο βαθμός βλάβης της ποδιάς (διαφορική καθίζηση, παραμένουσα κλίση) (PIANC, 2001).
- Η κατάσταση λειτουργικότητας (HAZUS, 2004, OCDI, 2002).



Σχήμα 3. Ichii 2003 – Παράδειγμα καμπυλών τρωτότητας ( $W/H=0,9$ ,  $D_1/H=0,5$ ,  $N_{65}=10$ ).  
Figure 3. Ichii 2003 – Example fragility curves ( $W/H=0.9$ ,  $D_1/H=0.5$ ,  $N_{65}=10$ ).

Τέλος, η αξιολόγηση και έλεγχος της αξιοπιστίας των σχέσεων τρωτότητας με βάση πραγματικές σεισμικές βλάβες γίνεται με στόχο την επιλογή της πλέον κατάλληλης σχέσης αναφορικά με την περιοχή, τα τυπολογικά χαρακτηριστικά και την επικρατούσα κατασκευαστική πρακτική.

### 3. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΛΕΥΚΑΔΑ

#### 3.1 Συμπεριφορά λιμενικών εγκαταστάσεων κατά την διάρκεια του σεισμού της 14/08/2003

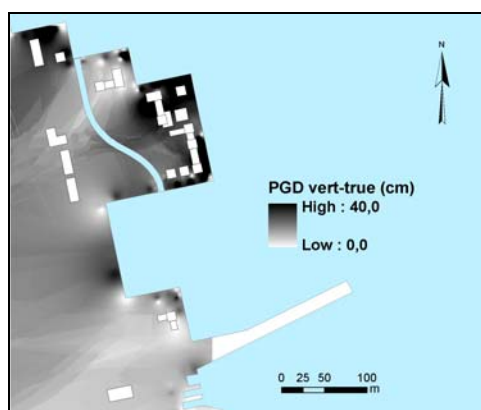
Ο σεισμός της Λευκάδας (14/08/2003) αποτελεί ένα καλό παράδειγμα των σεισμικών βλαβών σε παράκτιες κατασκευές, καθώς υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μικρών λιμενικών εγκαταστάσεων τυπικών για τα ελληνικά νησιά (ΙΤΣΑΚ, 2003). Η μεγάλη ποικιλία του επιπέδου των άμεσων απωλειών γίνεται φανερή από τη συνολική θεώρηση της συμπεριφοράς των εγκαταστάσεων αυτών (από μικρές/μέτριες βλάβες έως εκτεταμένες/καθολικές). Η συμπεριφορά των λιμενικών έργων της πόλης της Λευκάδας (τύπος και έκταση των βλαβών και μια πρώτη εκτίμηση της σπουδαιότητάς τους με βάση το επίπεδο της λειτουργικότητας, το μέγεθος των μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων και παραμενουσών παραμορφώσεων των τοίχων) συνοψίζεται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2. Συμπεριφορά των λιμενικών εγκαταστάσεων στην πόλη της Λευκάδας κατά την διάρκεια του σεισμού του Αυγούστου, 2003.

Table 2. Performance of port structure in Lefkas during the August, 2003 earthquake.

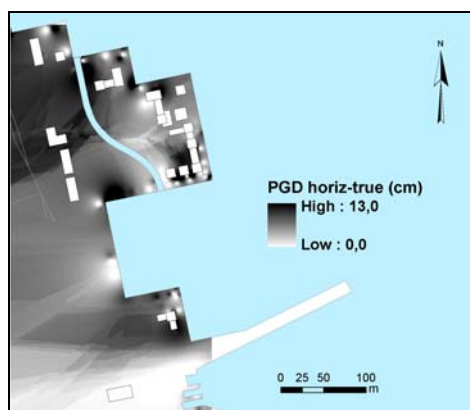
Κρηπιδότοιχοι από πρίσματα σκυροδέματος							
Παρατηρηθείσες Βλάβες	Ολίσθηση προς τα έξω	Κλίση	Καθίζηση	Ανατροπή και εκτεταμένη κλίση	Κατάρρευση	Ρηγμάτωση της ποδιάς του πεζοδρομίου	Ρηγμάτωση με σχετική καθίζηση του πεζοδρομίου ως προς τον τοίχο
Λιμάνι Λευκάδας	✓	✓	-	-	-	✓	✓
Λευκάδα-Μαρίνα	✓	✓	-	-	-	✓	✓
Υλικά επιχώματος							
Παρατηρηθείσες Βλάβες	Θραύση του εδάφους και ρηγμάτωση της επιφάνειας του δρόμου	Ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού από ρωγμές του εδάφους	Καθίζηση του επιχώματος	Διαφορική καθίζηση του εδάφους	Πλευρική εδαφική μετακίνηση (lateral spreading)		
Λιμάνι Λευκάδας	✓	✓	✓	✓	-		
Λευκάδα-Μαρίνα	✓	✓	✓	✓	✓		
Εκτιμώμενο επίπεδο βλάβης (με βάση το HAZUS, 2004)		Σύντομη περιγραφή των βλαβών που παρατηρήθηκαν					
Λιμάνι Λευκάδας	Μικρές έως μέτριες βλάβες	Έντονες οριζόντιες μετακινήσεις (περίπου έως 15cm) και στροφές κρηπιδότοιχων για εκατοντάδες μέτρα. Καταστροφή των παρακείμενων πεζοδρομίων. Σημαντικές ρηγματώσεις δρόμων και βυθίσεις σε πολλές θέσεις. Παρατηρηθείσες καθιζήσεις από 1-40 cm. Μεγάλες μετακινήσεις του διαύλου Λευκάδας-Αιγίου, ρηγματώσεις του δρόμου σε μήκος > των 150m.					
Λευκάδα-Μαρίνα	Μικρές έως μέτριες βλάβες	Μόνιμες σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις ολόκληρου του συστήματος των κρηπιδότοιχων μέχρι και 12 cm. Παρατηρηθείσες καθιζήσεις από 1-40 cm.					

Στο λιμάνι της Λευκάδας καθώς και στην περιοχή της Μαρίνας σημειώθηκαν μικρού έως μέτριου επιπέδου βλάβες. Η εκδήλωση φαινομένων μερικής ή ολικής ρευστοποίησης αποδίδεται ως η κύρια αιτία εμφάνισης των βλαβών αυτών. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται σε αρκετές περιπτώσεις όπως στην περιοχή της Μαρίνας (λιμένα σκαφών αναψυχής) και στην οδό Γκολέμη (εμφάνιση κρατήρων άμμου και ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού στην επιφάνεια).



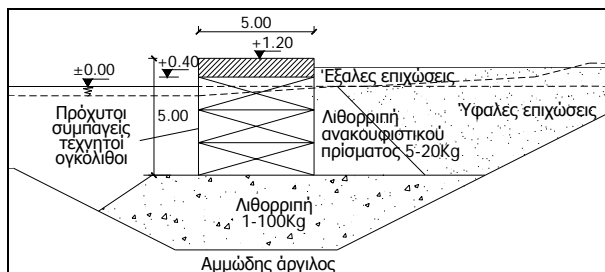
Σχήμα 4. Παρατηρηθείσες σχετικές κατακόρυφες μετακινήσεις στην περιοχή της Μαρίνας για τον σεισμό της Λευκάδας, 2003.  
Figure 4. Observed values of relative vertical displacements in the Marina area for the Lefkas 2003 earthquake.

Επιπλέον, από επιτόπου έρευνα μετά τον σεισμό, καταγράφηκαν σχετικές καθιζήσεις κατά μήκος της παραλιακής ζώνης που κυμαίνονται από 1-40 cm, καθώς και οριζόντιες μετακινήσεις των τοίχων έως 15 cm στο λιμάνι και έως 12 cm στην περιοχή της Μαρίνας. Οι τελευταίες αναφέρονται σε σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των κρηπιδότοιχων. Στα σχήματα 4 και 5 δίνεται το εύρος και η χωρική κατανομή των σχετικών κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων όπως αυτές μετρήθηκαν στην περιοχή της Μαρίνας.



Σχήμα 5. Παρατηρηθείσες σχετικές οριζόντιες μετακινήσεις στην περιοχή της Μαρίνας για τον σεισμό της Λευκάδας, 2003.  
Figure 5. Observed values of relative horizontal displacements in the Marina area for the Lefkas 2003 earthquake.

Τέλος, αναφορικά με τα τυπολογικά χαρακτηριστικά των κρηπιδότοιχων στην περιοχή, πρόκειται για τοίχους βαρύτητας κατασκευασμένους από σκυρόδεμα. Ο λιμένας αναψυχής (Μαρίνα) διαθέτει πρόσφατα κατασκευασμένες εγκαταστάσεις (2002). Η τυπική διατομή τους δίνεται στο σχήμα 6.



Σχήμα 6. Τυπική διατομή κρηπιδότοιχων Μαρίνας-Λευκάδας.

Figure 6. Typical cross-section of Marina-Lefkas' quaywalls.

### 3.2 Ανάλυση εδαφικής απόκρισης

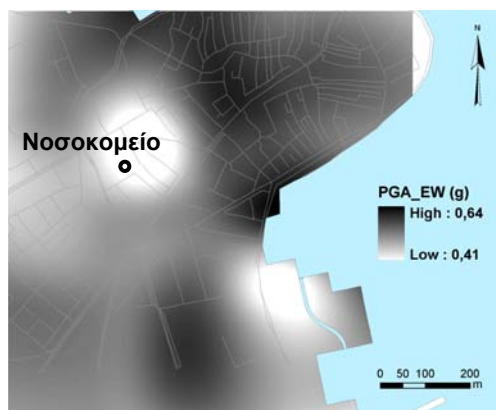
Αναλύσεις σεισμικής εδαφικής απόκρισης πραγματοποιήθηκαν για την πόλη της Λευκάδας για το σενάριο του σεισμού της 14/08/2003, με στόχο την εκτίμηση της χωρικής κατανομής των παραμέτρων της εδαφικής κίνησης. Η περιοχή που εξετάστηκε περιλαμβάνει το ιστορικό κέντρο καθώς και την παραλιακή ζώνη και την Μαρίνα.

Οι βασικοί γεωτεχνικοί - γεωλογικοί σχηματισμοί στην πόλη της Λευκάδας αποτελούνται από πρόσφατες εδαφικές αποθέσεις (σε βάθη που κυμαίνονται από 10,6 έως 16,0m) που υπέρκεινται ενός στρώματος σιφρής έως σκληρής μάργας. Η τελευταία εκτείνεται έως το σεισμικό βραχώδες υπόβαθρο. Οι ανώτεροι σχηματισμοί αποτελούνται από ένα επιφανειακό στρώμα μαλακών έως μέτριων συνεκτικών εδαφών ( $V_s=180-250\text{m/sec}^2$ ) με κατά θέσεις στρώματα χαλαρών κορεσμένων αμμοιλύων, ιδιαίτερα επιδεκτικών σε ρευστοποίηση που εντοπίζονται κυρίως στην παραλιακή ζώνη της εξεταζόμενης περιοχής, υποκείμενων ενός στρώματος τεχνητών επιχωματώσεων πάχους 1,0-5,7m. Το κατώτερο στρώμα των αποθέσεων αποτελείται από μέτριας αντοχής αργίλους και ιλύες στην κεντρική περιοχή της πόλης, ενώ στην παραλιακή ζώνη επικρατούν μέτρια έως πυκνά αμμοιλυώδη εδάφη.

Ο χαρακτηρισμός και η γεωτεχνική ταξινόμηση των εδαφικών σχηματισμών βασίστηκε σε γεωτεχνικές τομές που

προέκυψαν από την ανάλυση των διαθέσιμων γεωτρήσεων (17), δοκιμών SPT και δοκιμών Cross-Hole, καθώς και τις λίγες δοκιμές στην στήλη συντονισμού που είχαν πραγματοποιηθεί από το ΑΠΘ στα πλαίσια παλαιότερης ερευνητικής προσπάθειας (ΟΑΣΠ, 1996). Επιπλέον, στην θέση καταγραφής του ΙΤΣΑΚ του κυρίως σεισμού (Νοσοκομείο) το εδαφικό προφίλ είναι γνωστό μέχρι το βάθος των 60m, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό για την πραγματοποίηση των αναλύσεων αποσυνέλιξης (deconvolution).

Πραγματοποιήθηκε πλήθος μονοδιάστατων ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων ολικών τάσεων (χρησιμοποιήθηκαν 32 προφίλ τοποθετημένα σε κάναβο 150m x 150m). Ο επίπνοος και ιδιαίτερως μακροσκελής έλεγχος της αξιοπιστίας τους βασίστηκε σε καταγραφές μετασεισμών σε επαρκή αριθμό σημείων στην εξεταζόμενη περιοχή. Οι υπολογιζόμενες τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) για την ισοδύναμη γραμμική ανάλυση κυμαίνονται από 0,64-0,41 g (σχήμα 7). Σημειώνεται το γεγονός ότι στο Νοσοκομείο καταγράφηκε μέγιστη επιτάχυνση ίση προς 0,42g.

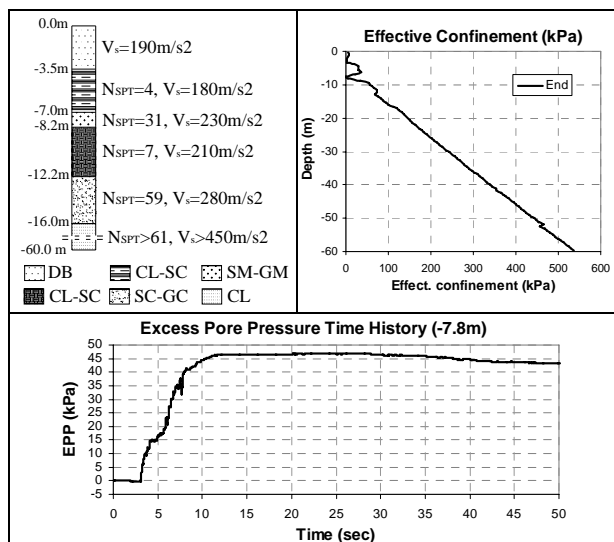


Σχήμα 7. Χωρική κατανομή των υπολογισθέντων τιμών της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) για τον σεισμό της Λευκάδας, 2003 (EW συνιστώσα, ισοδύναμη γραμμική ανάλυση).

Figure 7. Spatial distribution of computed PGA values for the Lefkas 2003 earthquake (EW component, EQL analysis).

Προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση του φαινομένου της ρευστοποίησης, έγιναν με τις ίδιες σεισμικές διεγέρσεις ελαστοπλαστικές αναλύσεις εδαφικής απόκρισης με χρήση του προγράμματος 1D-Cyclic (Elgamel, Yang, Parra and Ragheb, 2001). Οι αναλύσεις με βάση τις ενεργές τάσεις δίνουν μέγιστες τιμές μειωμένες σε σχέση με την ισοδύναμη

γραμμική ανάλυση (60% μείωση για τις τιμές της PGA και 30% για τις τιμές της PGV). Οι αποκλίσεις αυτές είναι δυνατό να αποδοθούν στην απόσβεση ενέργειας των ρευστοποιούμενων εδαφών καθώς και στις διαφορετικές παραδοχές της προσομοίωσης. Στο σχήμα 8 δίνεται μια ενδεικτική εδαφική τομή στην περιοχή της Μαρίνας. Στην παραλιακή κυρίως ζώνη και στον λιμένα σκαφών αναψυχής ολική ή μερική ρευστοποίηση παρατηρείται στα επιφανειακά εδαφικά επιδεκτικά στρώματα.

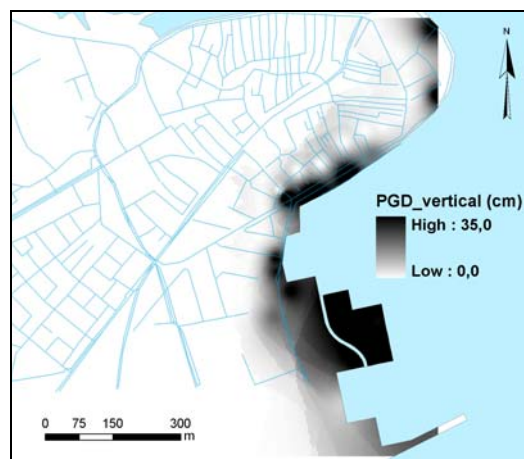


Σχήμα 8. Εδαφική τομή - περιοχή Μαρίνας. Πλήρης ιστορία της ενεργού τάσης με το βάθος. Αύξηση της πίεσης των πόρων σε βάθος -7,8m (EW συνιστώσα, ελαστοπλαστική ανάλυση).

Figure 8. Soil profile - Marina area. Time history of effective confinement with depth. Excess pore pressure in -7.8m depth (EW comp., elastopl. analysis).

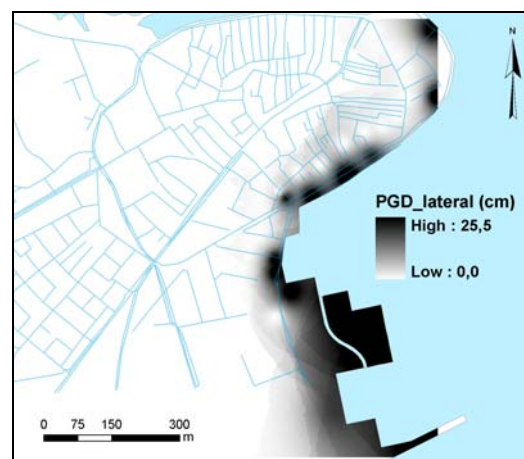
Επιπλέον, υπολογίστηκαν οι αναμενόμενες τιμές της μόνιμης εδαφικής παραμόρφωσης λόγω ρευστοποίησης με βάση τα αποτελέσματα των ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων (λήφθηκε υπόψη η μείωση των εδαφικών παραμορφώσεων με το βάθος για την ρεαλιστικότερη εκτίμηση του δυναμικού ρευστοποίησης). Η αποτίμηση της επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών καθώς και η εκτίμηση των μόνιμων μετακινήσεων βασίστηκαν στην χρήση απλοποιημένων εμπειρικών μεθόδων (Seed et al., 2003, Youd et al., 2001, Ishihara and Yoshimine, 1992, Bardet et al., 2002). Στα σχήματα 9 και 10 απεικονίζεται η χωρική κατανομή των υπολογιζόμενων τιμών των

καθιζήσεων (0-35 cm) και των οριζόντιων μετακινήσεων (0-25,5 cm) αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές συμβαδίζουν σε μεγάλο βαθμό με τις αντίστοιχες παρατηρηθείσες κατά τον σεισμό του 2003, όπως επίσης και με την χωρική κατανομή τους.



Σχήμα 9. Χωρική κατανομή των υπολογισμένων τιμών της μόνιμης εδαφικής μετακίνησης (καθιζήσεις) για τον σεισμό της Λευκάδας, 2003 (EW συνιστώσα, ισοδύναμη γραμμική ανάλυση).

Figure 9. Spatial distribution of computed PGD values (settlements) for the Lefkas 2003 earthquake (EW component, EQL analysis).



Σχήμα 10. Χωρική κατανομή των υπολογιζόμενων τιμών της μόνιμης οριζόντιας εδαφικής μετακίνησης (πλευρική εξάπλωση) για τον σεισμό της Λευκάδας, 2003 (EW συνιστώσα, ισοδύναμη γραμμική ανάλυση).

Figure 10. Spatial distribution of computed horizontal PGD values (lateral spreading) for the Lefkas 2003 earthquake (EW component, EQL analysis).

### 3.3 Αναλυτική εκτίμηση σεισμικής συμπεριφοράς κρηπιδοτοιχων

Για την περίπτωση των κρηπιδοτοιχων του λιμένα σκαφών αναψυχής πραγματοποιήθηκε μια πρώτη προσπάθεια αναλυτικής εκτίμησης της παρατηρηθείσας σεισμικής συμπεριφοράς τους. Η εκτίμηση της τιμής της κρίσιμης επιτάχυνσης  $K_c$  βασίστηκε σε αντίστροφες αναλύσεις. Έγιναν παραμετρικές αναλύσεις αναφορικά με τις ιδιότητες και την γεωμετρία του εδάφους έδρασης και του επιχώματος, αλλά και του συντελεστή κατακόρυφης επιτάχυνσης  $K_v$ . Επιπλέον, εφαρμόστηκε η τροποποιημένη θεωρία του ολισθαίνοντος στερεού σώματος, όπως αυτή προτάθηκε από τον Ichii (2003) προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επίδραση του συντονισμού και η μείωση της τριβής στην δυναμική φάση. Με βάση την θεώρηση αυτή, υπολόγιστηκαν οι μέσες τιμές της στατικής και δυναμικής κρίσιμης επιτάχυνσης  $K_{c,stat}=0,11g$  και  $K_{c,dyn}=0,10g$  αντίστοιχα. Το εύρος των αναμενόμενων τιμών των μόνιμων μετακινήσεων, όπως αυτές προέκυψαν με χρήση των αποτελεσμάτων των μονοδιάστατων αναλύσεων στο βάθος έδρασης των κρηπιδοτοιχων δίδεται στον πίνακα 3.

Πίνακας 3. Παραμένουσες μετακινήσεις των κρηπιδοτοιχων στην περιοχή της Μαρίνας - μέθοδος του ολισθαίνοντος στερεού σώματος. Table 3. Residual displacements of the Marina quaywalls – sliding block concept.

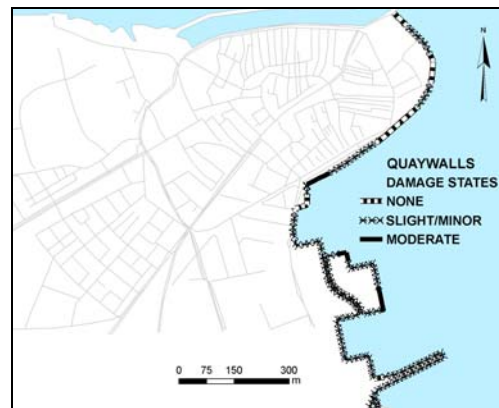
	Μετακίνηση (cm)	
	EW συνιστώσα	NS συνιστώσα
Ισοδύναμη γραμ. ανάλυση	37,0 – 62,5	12,5 – 21,0
Ελαστοπλαστική ανάλυση	9,5 – 16,0	2,5 – 6,5

Οι τιμές των μετακινήσεων που προκύπτουν με βάση τα αποτελέσματα των ελαστοπλαστικών αναλύσεων συμβαδίζουν σε μεγάλο βαθμό με τις παρατηρηθείσες σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των κρηπιδοτοιχων ενώ έρχονται σε συμφωνία και με τις αρκετά μειωμένες τιμές σε όρους κορυφαίων τιμών των αντίστοιχων αναλύσεων σε ενεργές τάσεις, σε σχέση με τις ισοδύναμες γραμμικές αναλύσεις. Αντίθετα, οι τελευταίες οδηγούν σαφώς σε μεγαλύτερες τιμές των μετακινήσεων. Τα επίπεδα βλάβης που προκύπτουν με βάση το HAZUS, 2004 ακολουθούν την ίδια λογική (μέτριες με εκτεταμένες βλάβες για ισοδύναμη γραμμική

ανάλυση και μικρές βλάβες για ελαστοπλαστική ανάλυση).

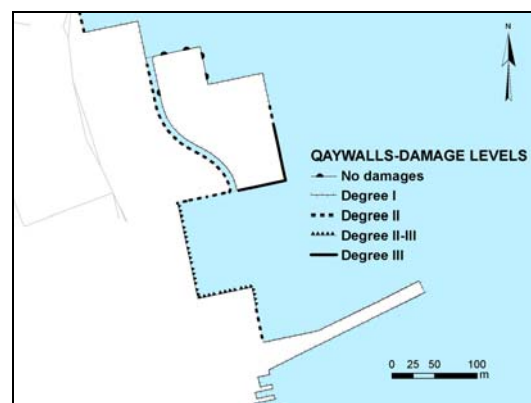
### 3.4 Αποτίμηση τρωτότητας των κρηπιδοτοιχων της Λευκάδας

Η αποτίμηση της τρωτότητας των κρηπιδοτοιχων έγινε με βάση τα συντηρητικότερα αποτελέσματα των ισοδύναμων γραμμικών αναλύσεων, τόσο σε όρους κορυφαίων τιμών εδαφικής επιτάχυνσης όσο και μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων. Στο σχήμα 11 δίνονται τα πιθανότερα επίπεδα βλάβης όπως προκύπτουν για τους κρηπιδοτοιχους του λιμανιού και της Μαρίνας με εφαρμογή των σχέσεων του HAZUS, 2004. Οι εκτιμώμενες βλάβες (μικρές έως μέτριες) φαίνεται να βρίσκονται σε καλή συμφωνία με την παρατηρηθείσα σεισμική συμπεριφορά.



Σχήμα 11. Πιθανότερο επίπεδο βλάβης για τους κρηπιδοτοιχους της Λευκάδας (HAZUS, 2004).

Figure 11. Prevailing damage state for Lefkas quaywalls (HAZUS, 2004).



Σχήμα 12. Εκτιμώμενα επίπεδα βλάβης για τους κρηπιδοτοιχους της Μαρίνας (Ichii, 2003).

Figure 12. Estimated damage levels for Marina quaywalls (Ichii, 2003).

Οι σχέσεις τρωτότητας που προτείνει ο Ichii (2003) εφαρμόστηκαν στην περιοχή της Μαρίνας, ενώ τα εκτιμώμενα επίπεδα βλάβης απεικονίζονται στο σχήμα 12. Συγκριτικά με τις παρατηρηθείσες βλάβες οι σχέσεις αυτές φαίνεται να υπερεκτιμούν τις αναμενόμενες απώλειες των κρηπιδοτόιχων.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η ρευστοποίηση (έστω και “μερική”) φαίνεται να είναι η κύρια αιτία πρόκλησης των βλαβών κατά την διάρκεια του σεισμού της 14/08/2003 στους κρηπιδοτόιχους της Λευκάδας.
- Η θεώρηση της μείωσης της τριβής κατά την δυναμική φάση οδηγεί σε μικρότερες και πιο ρεαλιστικές τιμές της κρίσιμης επιτάχυνσης  $K_c$ .
- Οι αναλυτικές εκτιμήσεις της εδαφικής απόκρισης είναι συμβατές με τις καταγραφές.
- Η αποτίμηση της τρωτότητας και η κατανομή των επιπέδων βλάβης με βάση την σχέση του HAZUS, 2004 συμβαδίζει σε μεγάλο βαθμό με τις παρατηρηθείσες βλάβες.
- Οι αναμενόμενες βλάβες με βάση τις καμπύλες τρωτότητας του Ichii (2003) εμφανίζονται ελαφρώς υπερεκτιμημένες.
- Η εφαρμογή των σχέσεων τρωτότητας του Ichii (2003) απαιτεί την γνώση γεωτεχνικών και κατασκευαστικών δεδομένων. Η εφαρμογή τους είναι δυνατή σε περιπτώσεις έλλειψης μελετών εκτίμησης των αναμενόμενων μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων.

Τέλος, τονίζεται το γεγονός ότι η συλλογή περαιτέρω στοιχείων σεισμικών βλαβών πρέπει να συνεχιστεί με σκοπό την βελτίωση της υπάρχουσας γνώσης και τον καθορισμό καμπυλών τρωτότητας με βάση τα ιδιαίτερα τυπολογικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του Ελληνικού και ευρύτερου Ευρωπαϊκού χώρου.

#### 5. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αναγνωρίζεται η υποστήριξη του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) στην πρώτη από τους συγγραφείς.

#### 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bardet J.P., Mace N., Tobita T. & Hu J. (2002), “Regional modeling of Liquefaction-induced ground deformation”. *Earthquake Spectra* (EERI), Vol. 18, Issue 1, pp. 19-46.
- Elgamal, A., Yang, Z., Parra, E., and Ragheb, A. (2001). *CYCLIC 1D*, UCSD.
- Ichii, K. (2003), “Application of Performance-

Based Seismic Design Concept for Caisson-Type Quay Walls”. Dis., Kyoto Univ., Japan.

- Ishihara K. & Yoshimine M. (1992), “Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes”. *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 1, pp. 173-188.
- National Institute of Building Sciences (2004), “Earthquake loss estimation methodology. HAZUS”. Technical manuals, FEMA, Washington, D.C.
- OCDI (2002), “Technical standards and commentaries for port and harbour facilities in Japan”. The overseas coastal area development inst. of Japan, Tokyo, p.600.
- PIANC (2001), “Seismic Design Guidelines for Port Structures”. Intern.Navigation Assoc., A.A. Balkema, Lisse, Belgium, p.474.
- Pitilakis, K. (2004), “Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation, Chapter 5: Site Effects”. Editor A. Ansal, Kluwer Academic Publ.
- Seed R. B. et al. (2003), “Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Frame work”. 26<sup>th</sup> Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Keynote Presentation, H.M.S. Queen Mary, Long Beach, California.
- Uwabe, T. (1983), “Estimation of earthquake damage deformation and cost of quaywalls based on earthquake damage records”. Technical Note of Port and Harbour Research Institute, No. 473, p.197.
- Werner S.D. (1998), “Seismic Guidelines for Ports”. TCLEE, Monograph No. 12, p.327.
- Youd T.L. et al. (2001), “Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils”. *Journal of Geot. and Geoenv. Eng.*, Vol. 127, No.10, pp. 817-833.
- ΙΤΣΑΚ (2003), “Ο σεισμός της Λευκάδος (M=6.4), 14 Αυγούστου 2003. Προκαταρκτική έκθεση των συνεπειών του σεισμού στο δομημένο και μη περιβάλλον”. Τεχνική έκθεση ερευνητικού προγράμματος ΟΑΣΠ (1996). “Μελέτη της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών, της γεωμορφολογίας και της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους – θεμελίωσης - ανωδομής στις ενόργανες καταγραφές του εθνικού δικτύου επιταχυνσιογράφων”, Επιστ. υπεύθ. Κ. Πιπιάκης, Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων ΑΠΘ & ΙΤΣΑΚ (1992-1996).