

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

**ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΕΞΑΠΛΩΣΗ ΣΤΗΝ ΠΑΡΑΛΙΑΚΗ ΖΩΝΗ ΤΟΥ
ΛΗΞΟΥΡΙΟΥ ΚΑΙ ΑΡΓΟΣΤΟΛΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΤΗΣ
ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ ΣΤΙΣ 26-1- & 03-2-2014**

**ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΓΙΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ**

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Χ. ΚΕΧΑΓΙΑΣ

Πολιτικός Μηχανικός
Διπλωματούχος Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ – ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΕΙΣ

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γ. Αθανασόπουλο, Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, χωρίς την καθοδήγηση, την βοήθεια και τις χρήσιμες συμβουλές του οποίου δεν θα ήταν δυνατή η διεξαγωγή της παρούσας έρευνας. Ευχαριστώ επίσης τον Assoc. Professor του University of Michigan, Ann Arbor, Η.Π.Α, Δημήτρη Ζέκκο για την υπόδειξη του θέματος της παρούσας Διατριβής και τις συμβουλές του σχετικά με την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Ευχαριστίες επίσης εκφράζονται στον Αναστάσιο Μπατίλα, Πολιτικό Μηχανικό και Υποψήφιο Διδάκτορα, του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πατρών, για τη πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση της παρούσας Διατριβής αλλά και για την εμπειρία που μου μετέδωσε τόσο σε θέματα σχετικά με τη Διατριβή, όσο και σε γενικότερα θέματα της Γεωτεχνικής Μηχανικής.

Επίσης, ευχαριστίες εκφράζονται σε όλα τα μέλη της ομάδας του Εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών που συμμετείχαν στις επι-τόπου μετρήσεις στην Κεφαλονιά και έκαναν δυνατή τη δημιουργία της βάσης δεδομένων που αναλύθηκε στην Διατριβή. Συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναστάσιο Μπατίλα Υποψήφιο Διδάκτορα, την Ξένια Καρατζιά Υποψήφιο Διδάκτορα και την Φωτεινή Λυρατζάκη Υποψήφιο Διδάκτορα για την αποτύπωση των ρωγμών στον Λιμένα Ληξουρίου και Αργοστολίου. Οι μετρημένες τιμές των ανοιγμάτων των ρωγμών αποτέλεσαν βασικό στοιχείο στην ανάλυση και εμπεριέχονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.

Τέλος, θα ήθελα να αναγνωρίσω την αμέριστη υποστήριξη που μου προσέφερε η οικογένειά μου κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας Διατριβής και γενικά της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πλευρική εξάπλωση είναι ένα εντυπωσιακό-καταστροφικό φαινόμενο, επακόλουθο της ρευστοποίησης, που οδηγεί στην εδαφική αστοχία. Στην περίπτωση κεκλιμένων εδαφών ή εδαφών που καταλήγουν σε ελεύθερο μέτωπο, προκαλείται έντονη ρηγμάτωση της επιφάνειας του εδάφους και Πλευρική Εξάπλωση, Lateral Spreading, (δηλαδή οριζόντια μετακίνηση) του εδαφικού υλικού (παραμορφώσεις πολύπλοκης μορφής), στην περιοχή της όχθης υδάτινων ρευμάτων ή άλλων θαλασσίων μετώπων και η εξάπλωση αυτών σε μεγάλη απόσταση προς τα ανάντι.

Αντικείμενο της παρούσας Διατριβής αποτελεί η μελέτη της εκτεταμένης πλευρικής εξάπλωσης που πραγματοποιήθηκε υπό συνθήκες ελευθέρου μετώπου προς την κατεύθυνση της ακτογραμμής στο Δυτικό Κρηπίδωμα του Λιμένα Ληξουρίου και στην παραλιακή ζώνη του Αργοστολίου κατά τους σεισμούς της Κεφαλονιάς στις 26-1-2014 ($M_w=6.1$) και στις 03-2-2014 ($M_w=6.0$).

Η Διατριβή περιλαμβάνει παρουσίαση των διαθέσιμων γεωτεχνικών δεδομένων για το λιμένα Ληξουρίου και εκτιμήσεις του μεγέθους της πλευρικής εξάπλωσης με βάση τα σύγχρονα εμπειρικά μοντέλα του Youd et al. (2002) και την τροποποίηση αυτού, Youd et al. (2013). Γίνεται επίσης, σύγκριση της μετρηθείσας οριζόντιας μετακίνησης με τις προβλέψεις των οριζόντιων μετακινήσεων των δύο μοντέλων. Για τον έλεγχο της ρευστοποιησιμότητας του εδάφους -με χρήση του αριθμού κτύπων N_{SPT} - με σκοπό τον υπολογισμό του αθροιστικού ρευστοποιήσιμου πάχους T_{15} , χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία των Idriss and Boulanger (2006).

Τέλος, παρουσιάζονται τα διαγράμματα μετρημένης οριζόντιας αθροιστικής μετακίνησης - απόστασης από το ελεύθερο μέτωπο για την παραλιακή ζώνη του Αργοστολίου. Λόγω έλλειψης γεωτεχνικών δεδομένων για το Αργοστόλι δεν έγινε δυνατή η σύγκριση των μετρημένων τιμών με τις εκτιμηθείσες από εμπειρικά μοντέλα. Ωστόσο, οι τιμές αυτές μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμη προσθήκη στην υφιστάμενη βάση δεδομένων για βελτίωση των εμπειρικών μοντέλων και καλύτερη εφαρμογή τους στον ελλαδικό χώρο.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	v
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ	xi
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 Πλευρική Εξάπλωση (Lateral Spreading)	1
1.2 Αντικείμενο και Διάρθρωση Διατριβής.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	5
2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	5
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Ιστορική Αναδρομή	6
2.3 Δείκτης Επικινδυνότητας Ρευστοποίησης (LSI)	8
2.4 Μέθοδος Γραμμικής Παλινδρόμησης Πολλαπλών Μεταβλητών (MLR)	10
2.5 Εφαρμογή της μεθόδου MLR για την ανάπτυξη εμπειρικών ή ημιεμπειρικών μοντέλων	11
2.6 Το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης λόγω ρευστοποίησης.	12
2.7 Μέθοδοι εκτίμησης της μετακίνησης λόγω πλευρικής εξάπλωσης.....	13
2.8 Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών.....	13
2.9 Απλοποιημένα Αναλυτικά Μοντέλα.....	14
2.10 Εμπειρικά μοντέλα	16
2.11 Σύγκριση των διαφορετικών προσεγγίσεων.....	33
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	34
3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ	34
3.1 Εισαγωγή.....	34
3.2 Γεωλογική-Στρωματογραφική επισκόπηση.....	37
3.3 Τεκτονική Επισκόπηση της Νήσου Κεφαλονιάς	38
3.4 Μορφοτεκτονικά χαρακτηριστικά του Ιονίου πελάγους	39
3.5 Το ρήγμα Cephalonia Transform Fault (CTF)	39
3.6 Σεισμικότητα	43
3.7 Οι πρόσφατοι ισχυροί σεισμοί.....	47
α) Σεισμός 26-1-2014 ($M_w = 6,1$).....	47
β) Σεισμός 03-02-2014 ($M_w = 6,0$).....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	58

4. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	58
4.1 Εισαγωγή.....	58
4.2 Λιμένας Ληξουρίου.....	60
4.3 Λιμένας Αργοστολίου	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	71
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ - ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ.....	71
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	71
5.2 Σύγκριση Παρατηρηθείσας και Προβλεπόμενης Συμπεριφοράς στο Λιμένα Ληξουρίου.....	71
5.3 Εκτίμηση της Σεισμικής Μετακίνησης Κρητιδότοιχου.....	87
5.4 Υπολογισμός Ρευστοποιήσιμου Πάχους (T15).....	91
5.4 Παρατηρηθείσα Συμπεριφορά στο Λιμένα Αργοστολίου.....	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	111
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	111
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	114
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	114
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	119
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β	134

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1	Σχηματικό διάγραμμα περιγραφής πλευρικής εξάπλωσης εξαιτίας εδαφικής ρευστοποίησης κατά την διάρκεια ενός σεισμού.....	12
Σχήμα 2-2	Σχηματική αναπαράσταση των δύο γενικών τύπων πλευρικής εξάπλωσης. 1) πλευρική εξάπλωση προς ελεύθερο μέτωπο και 2) πλευρική εξάπλωση σε έδαφος με ήπια κλίση. 3) Συνδυασμός και των δύο.....	19
Σχήμα 2-3	Διάγραμμα ισοδύναμης καθαρής άμμου ($T_{15,CS}$) - Αθροιστικού ρευστοποιήσιμου πάχους (T_{15}).....	27
Σχήμα 2-4	Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων E-POLLS, των μεταβλητών που απαιτούνται για την εφαρμογή του καθενός και των περιορισμό στις τιμές των παραμέτρων.....	32
Σχήμα 3-1	Χάρτης της Κεφαλονιάς με τις θέσεις των σημαντικότερων πόλεων και οικισμών.....	34
Σχήμα 3-2	Χάρτης ανάγλυφου της Κεφαλονιάς.....	35
Σχήμα 3-3	Σπήλαιο Μελισσάνη.....	36
Σχήμα 3-4	Η παραλία Μύρτος.....	36
Σχήμα 3-5	Χάρτης, με διαφορετικές ισοπικές ζώνες του Ελλαδικού χώρου.....	37
Σχήμα 3-6	Διακριτές ιζηματογενείς φάσεις. Τμήμα της Κεφαλονιάς με λευκό χρώμα Προ-Απούλια πλάκα και τμήμα της με λαδί χρώμα Ιόνια ζώνη.....	38
Σχήμα 3-7	Το μεγάλης έκτασης δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης Cephalonia Transform Fault (CTF).	40
Σχήμα 3-8	Το σύγχρονο τεκτονικό καθεστώς Στην περιοχή του ρήγματος (CTF).....	40
Σχήμα 3-9	Το Ρήγμα Μετασχηματισμού της Κεφαλονιάς και οι μηχανισμοί γένεσης παλαιότερων σεισμών.....	41
Σχήμα 3-10	Τα τρία "ρηξιτεμάχη" στα οποία διαχωρίζεται η Κεφαλονιά μετά το πέρας των σεισμών. Με μπλε βελάκια μετακίνηση της Παλικής προς τα Βόρεια (μέγιστη μετακίνηση 12cm), με κόκκινα βελάκια καθίζηση (μέγιστη καθίζηση -7cm) (Ευθύμης Λέκκας, Το Βήμα: 27/07/2014).....	42
Σχήμα 3-11	Οι ζημιές που προκάλεσε ο καταστροφικός σεισμός του 1953.....	45
Σχήμα 3-12	Με κόκκινο χρώμα το επίκεντρο του κύριου σεισμού ($M_W=6,1$) και με κίτρινο το επίκεντρο του ισχυρού μετασεισμού ($M_W=5,5$).....	48
Σχήμα 3-13	Οι κρηπιδοτόιχοι του Λιμανιού του Ληξουρίου κατεστραμμένοι από την σφοδρότητα του σεισμού.....	48
Σχήμα 3-14	Χρονικές ιστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης κατά την διάρκεια του 1ου σεισμού ($M_W = 6,1$), όπως καταγράφηκαν από τον σταθμό ARG2 του EPO-ITSAK στο Αργοστόλι.....	49
Σχήμα 3-15	Χρονικές ιστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης (από αριστερά προς τα δεξιά) κατά την διάρκεια του 1ου σεισμού ($M_w = 6,1$), όπως καταγράφηκαν από τον σταθμό LXRΒ του ΝΟΑ-ΙΓ στο Δημαρχείο του Ληξουρίου. Τα αντίστοιχα φάσματα ψευδοεπιτάχυνσης με λόγο απόσβεσης $D=0,05$	50

Σχήμα 3-16	Χρονικές ιστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης κατά την διάρκεια του 1ου σεισμού ($M_w = 6,1$), όπως καταγράφηκαν από τον σταθμό VSK1 του ΕΡΟ-ΙΤΣΑΚ στις Βασιλικάδες (Βόρειο τμήμα Κεφαλονιάς).	51
Σχήμα 3-17	Με κόκκινο χρώμα το επίκεντρο του κύριου σεισμού ($M_w=6,1$) και του 2ου ($M_w=6,0$), με κίτρινο χρώμα το επίκεντρο του ισχυρού μετασεισμού ($M_w=5,5$)	52
Σχήμα 3-18	Οι καταστροφικές συνέπειες του 2ου σεισμού στο Λιμάνι του Ληξουρίου. Ανατροπή των σκαφών που εδράζονταν στον βόρειο υπήνεμο μώλο.....	53
Σχήμα 3-19	Χρονικές ιστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης, καταγραμμένες στον σταθμό (CHV1) και τα αντίστοιχα φάσματα ψευδοταχύτητας και επιτάχυνσης για τον σεισμό της 3/2/2014 και λόγος απόσβεσης $D=0,05$	54
Σχήμα 3-20	Χρονικές ιστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης καταγραμμένες στον σταθμό (LXR1) και τα αντίστοιχα φάσματα ψευδοταχύτητας και επιτάχυνσης για τον σεισμό της 3/2/2014 και λόγος απόσβεσης $D=0,05$	55
Σχήμα 3-21	Ιστορικά επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης καταγραμμένες στον σταθμό (ARG2) και τα αντίστοιχα φάσματα ψευδοταχύτητας και επιτάχυνσης για τον σεισμό της 3/2/2014 και λόγος απόσβεσης $D=0,05$	56
Σχήμα 3-22	Ιστορικά επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης καταγραμμένες στον σταθμό (VSK1) και τα αντίστοιχα φάσματα ψευδοταχύτητας και επιτάχυνσης για τον σεισμό της 3/2/2014 και λόγος απόσβεσης $D=0,05$	57
Σχήμα 4-1	Χάρτης της Κεφαλονιάς στον οποίο φαίνονται οι θέσεις των τεσσάρων κύριων λιμένων του νησιού (με πορτοκαλί χρώμα αυτό του Ληξουρίου που υπέστη τις σημαντικότερες βλάβες)	58
Σχήμα 4-2	Λιμάνι Ληξουρίου. Σημειώνεται η περιοχή ρευστοποίησης κατά μήκος του δυτικού κρηπιδώματος που οδήγησε στην εκδήλωση του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης.....	59
Σχήμα 4-3	Λιμάνι Αργοστολίου. Σημειώνονται οι περιοχές ρευστοποίησης.	59
Σχήμα 4-4	Γεωγραφική θέση Ληξουρίου (Google Earth).....	60
Σχήμα 4-5	Τοπογραφικό διάγραμμα του λιμένα Ληξουρίου με τις θέσεις των Γεωτρήσεων Γ-1 έως Γ-10 & των ερευνητικών φρεάτων Φ1 έως Φ13.....	64
Σχήμα 4-6	Λιμενολεκάνη Ληξουρίου. Διακρίνονται τα τμήματα που την απαρτίζουν, καθώς και οι θέσεις των γεωτρήσεων	65
Σχήμα 4-7	Γεωτεχνική τομή κατά μήκος του Δυτικού Κρηπιδώματος	66
Σχήμα 4-8	Οι οριζόντιες μετακινήσεις εμφανίστηκαν σε ζώνη πλάτους 70 μέτρων στην χερσαία ζώνη και έφτασαν μέγιστη τιμή 1,52m.....	67
Σχήμα 4-9	Δορυφορική φωτογραφία της περιοχής του Αργοστολίου. Διακρίνεται η γέφυρα του De Bosset.	68
Σχήμα 4-10	Το λιμάνι του Αργοστολίου μετά τον καταστροφικό σεισμό του 1953	69
Σχήμα 4-11	Βλάβες στον κρηπιδότοιχο μετά το σεισμικό γεγονός του 1953.....	69
Σχήμα 4-12	Περιοχή εμφάνισης ρωγμών και μέγιστες πλευρικές μετακινήσεις στον κεντρικό προβλήτα του Αργοστολίου.	70

Σχήμα 5-1	Δορυφορική φωτογραφία (Google Earth) του λιμένα Ληξουρίου με τις θέσεις των τομών κατά μήκος των οποίων πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις μετακινήσεων	72
Σχήμα 5-2	Δορυφορική φωτογραφία (Google Earth) του λιμένα Ληξουρίου με τις χρησιμοποιηθείσες γεωτρήσεις.....	74
Σχήμα 5-3	Βλάβες κατά μήκος του Δυτικού κρηπιδώματος του Λιμένα Ληξουρίου, λόγω πλευρικής εξάπλωσης.....	76
Σχήμα 5-4	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm).....	77
Σχήμα 5-5	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm).....	78
Σχήμα 5-6	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm).....	79
Σχήμα 5-7	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm).....	80
Σχήμα 5-8	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm).....	81
Σχήμα 5-9	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm).....	82
Σχήμα 5-10	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm).....	83
Σχήμα 5-11	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm).....	84
Σχήμα 5-12	Σύγκριση μετρημένων αθροιστικών οριζόντιων τιμών μετακίνησης (cm) σε κάθε τομή με τις υπολογισθείσες μετακινήσεις (μέθοδοι Youd et al.2002 και 2013).....	85
Σχήμα 5-13	Σύγκριση μετρημένων οριζόντιων τιμών μετακίνησης (cm) (χωρίς να ληφθεί υπόψη η πρώτη ρωγμή) σε κάθε τομή με υπολογισθείσες μετακινήσεις (μέθοδοι Youd et al.2002 και 2013).	86
Σχήμα 5-14	Ψευδοστατική ανάλυση κρηπιδότοιχου, υπολογισμός α_c από την οριζόντια ισορροπία των δυνάμεων.....	87
Σχήμα 5-15	Διάγραμμα οριακής επιτάχυνσης μέγιστης οριζόντιας μετακίνησης ανάλογα με το μέγεθος του σεισμού κατά Makdisi-Seed, 1978.....	90
Σχήμα 5-16	Υπολογισμός ρευστοποιήσιμου πάχους T_{15} στην γεώτρηση Γ-4. Ρευστοποιείται η στρώση αργιλοιλυώδους άμμου έως αμμοϊλύς πάχους 1m και τμήμα της στρώσης αργίλου πάχους επίσης 1m. Συνολικό ρευστοποιήσιμο πάχος $T_{15} = 2m$	92
Σχήμα 5-17	Υπολογισμός ρευστοποιήσιμου πάχους T_{15} στην γεώτρηση Γ-5. Αθροιστικό ρευστοποιήσιμο πάχος T_{15} περιοχή κόκκινης γραμμής με $FS < 1$. $T_{15} = 4,60m$	93

Σχήμα 5-18	Υπολογισμός ρευστοποιήσιμου πάχους T15 στην γεώτρηση Γ-6. Αθροιστικό ρευστοποιήσιμο πάχος T15 περιοχή κόκκινης γραμμής με FS<1. T ₁₅ =2,40m.	94
Σχήμα 5-19	Υπολογισμός ρευστοποιήσιμου πάχους T15 στην γεώτρηση Γ-9. Αθροιστικό ρευστοποιήσιμο πάχος T15 περιοχή κόκκινης γραμμής με FS<1. T ₁₅ =1,40m.	95
Σχήμα 5-20	Υπολογισμός ρευστοποιήσιμου πάχους T15 στην γεώτρηση Γ-10. Αθροιστικό ρευστοποιήσιμο πάχος T15 περιοχή κόκκινης γραμμής με FS<1. T ₁₅ =4,00 m.	96
Σχήμα 5-21	Θέσεις μετρήσεων της οριζόντιας μετακίνησης στη παραλιακή ζώνη του Αργοστολίου.....	97
Σχήμα 5-22(α)	Τομές 28 και 29 (GPS Συντεταγμένες Lat. 38,17227 Long. 20,49425).....	98
Σχήμα 5-22(β)	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 28.....	98
Σχήμα 5-22(γ)	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 29.....	99
Σχήμα 5-23(α)	Τομές 33, 34 και 35 (GPS Συντεταγμένες Lat. 38,17483 Long. 20,49156)...	100
Σχήμα 5-23(β)	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 33.....	100
Σχήμα 5-23(γ)	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 34.....	101
Σχήμα 5-23(δ)	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 35.....	101
Σχήμα 5-24(α)	Λιμένας Αργοστολίου (GPS Συντεταγμένες Lat. 38,17713 Long. 20,48982)	102
Σχήμα 5-24(β)	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 41.....	102
Σχήμα 5-25(α)	Λιμένας Αργοστολίου (GPS Συντεταγμένες Lat. 38,17837 Long. 20,48959)	103
Σχήμα 5-25(β)	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 42.....	103
Σχήμα 5-25(γ)	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 44.....	104
Σχήμα 5-26(α)	Λιμένας Αργοστολίου (GPS Συντεταγμένες Lat. 38,18034 Long. 20,48992)	105
Σχήμα 5-26(β)	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 45.....	105
Σχήμα 5-26(γ)	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 47.....	106
Σχήμα 5-26(δ)	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 48.....	106
Σχήμα 5-26(ε)	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 50.....	107
Σχήμα 5-26(ζ)	Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 51.....	107

Σχήμα 5-26(η) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 52.....	108
Σχήμα 5-26(θ) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 53.....	108
Σχήμα 5-26(ι) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 55.....	109
Σχήμα 5-26(κ) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 57.....	109
Σχήμα 5-27(α) Θέση στάθμευσης - προβλήτας (GPS Συντεταγμένες: Lat. 38,18217 Long. 20,48858).....	110
Σχήμα 5-27(β) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 61.....	110

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1	Περιοχές τιμών παραμέτρων.....	24
Πίνακας 2-2	Ανάλυση αποτελεσμάτων διακύμανσης 1ου μοντέλου	24
Πίνακας 2-3	Ανάλυση αποτελεσμάτων διακύμανσης 2ου μοντέλου	25
Πίνακας 2-4	Ανάλυση αποτελεσμάτων διακύμανσης μοντέλου Youd (2013).....	26
Πίνακας 2-5	Ανάλυση αποτελεσμάτων διακύμανσης μοντέλου Youd (2013).....	26
Πίνακας 2-6	Προσδιορισμός μεταβλητών για το EPOLLS	31
Πίνακας 3-1	Καταγραφές 1ου σεισμού (Μεγέθους $M_w = 6.1$)	49
Πίνακας 3-2	Καταγραφές 2ου σεισμού (Μεγέθους $M_w = 6.0$)	53
Πίνακας 5-1	Πάχος και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά ρευστοποιήσιμου εδάφους.....	74
Πίνακας 5-2	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των 8 τομών που αναλύθηκαν.....	75
Πίνακας 5-3	Υπολογιζόμενες μετακινήσεις $DH(cm)$ για την Τομή 18	77
Πίνακας 5-4	Υπολογιζόμενες μετακινήσεις $DH(cm)$ για την Τομή 17	78
Πίνακας 5-5	Υπολογιζόμενες μετακινήσεις $DH(cm)$ για την Τομή 16	79
Πίνακας 5-6	Υπολογιζόμενες μετακινήσεις $DH(cm)$ για την Τομή 15	80
Πίνακας 5-7	Υπολογιζόμενες μετακινήσεις $DH(cm)$ για την Τομή 13	81
Πίνακας 5-8	Υπολογιζόμενες μετακινήσεις $DH(cm)$ για την Τομή 12	82
Πίνακας 5-9	Υπολογιζόμενες μετακινήσεις $DH(cm)$ για την Τομή 10	83
Πίνακας 5-10	Υπολογιζόμενες μετακινήσεις $DH(cm)$ για την Τομή 9	84

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

a_{max}	: μέγιστη επιτάχυνση στην επιφάνεια του εδάφους
a_{mean}	: μέση επιφανειακή επιτάχυνση του εδάφους
CSR	: λόγος κυκλικής τάσης
CRR	: λόγος κυκλικής αντίστασης
C_u	: συντελεστής ομοιομορφίας
C_c	: συντελεστής καμπυλότητας
c_u	: αστράγγιστη διατμητική αντοχή
d	: βάθος από την επιφάνεια του εδάφους
D_r	: σχετική πυκνότητα
D_{50}	: μέσο μέγεθος κόκκων
D_H	: πλευρική μετατόπιση
$D_{50_{15}}$: μέση διάμετρος κόκκων στο πάχος T15
e	: λόγος κενών
e_c	: κρίσιμος λόγος κενών
F_{15}	: μέσο ποσοστό λεπτών στο πάχος T15
FC	: ποσοστό λεπτών συστατικών
FC_{cr}	: κρίσιμη τιμή του ποσοστού των λεπτών συστατικών
FS	: συντελεστής ασφάλειας
G_s	: ειδική πυκνότητα
G_o	: αρχικό μέτρο διάτμησης
GC	: ποσοστό χαλίκων
g	: επιτάχυνση βαρύτητας (9.81 m/s)
h	: πάχος εδαφικής στρώσης
H	: ύψος ελεύθερου μετώπου
I_c	: δείκτης εδαφικής συμπεριφοράς
L	: μήκος ρήγματος
L_{slide}	: μέγιστη οριζόντια απόσταση της πλευρικής εξάπλωσης κατά τη δεσπόζουσα διεύθυνση της μετατόπισης
LL	: όριο υδαρότητας
LSI	: Δείκτης Επικινδυνότητας Ρευστοποίησης
M	: μέγεθος σεισμού
MLR	: Μέθοδος Γραμμικής Παλινδρόμησης Πολλαπλών Μεταβλητών
M_w	: μέγεθος σεισμικής ροπής
N_{SPT}	: αριθμός κτύπων της δοκιμής τυποποιημένης διείσδυσης
$(N_1)_{60}$: διορθωμένος αριθμός κτύπων
$(N_1)_{60cs}$: διορθωμένος αριθμός κτύπων λόγω λεπτών συστατικών

OCR	: λόγος προστερεοποίησης
PI	: δείκτης πλαστικότητας
PL	: όριο πλαστικότητας
q_u	: αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη
R	: απόσταση από ρήγμα
R_e	: επικεντρική απόσταση
R_{eq}	: ισοδύναμη επικεντρική απόσταση
S	: κλίση εδάφους
SPT	: τυποποιημένη δοκιμή διείσδυσης
T_d	: διάρκεια μεταξύ αρχικού και τελικού περιστατικού με επιφανειακή επιτάχυνση $\geq 0.05g$
T	: πάχος ρευστοποιήσιμων στρωμάτων ή περίοδος της σεισμικής κίνησης ή ιδιοπερίοδος
T_{15}	: αθροιστικό πάχος ρευστοποιήσιμων στρώσεων
t_d	: χρονική διάρκεια της ισχυρής εδαφικής κίνησης
USCS	: ενιαίο σύστημα ταξινόμησης εδαφών
V_{so}	: ταχύτητα διάδοσης εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων μικρού πλάτους σε βάθος 30m
z	: βάθος θεωρούμενου σημείου
Z_{FSmin}	: μέσο πάχος των πιθανώς ρευστοποιήσιμων στρώσεων με το μικρότερο συντελεστή ασφάλειας
Z_{liq}	: μέσο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι την αρχή των πιθανώς ρευστοποιήσιμων στρώσεων
γ_t	: υγρό ειδικό βάρος εδάφους
γ_d	: ξηρό ειδικό βάρος εδάφους

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πλευρική Εξάπλωση (Lateral Spreading)

Η πλευρική εξάπλωση λόγω ρευστοποίησης, ορίζεται ως η περιορισμένη πλευρική εδαφική μετακίνηση που προκαλείται από την αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων και τη ρευστοποίηση ενός αβαθούς εδαφικού στρώματος κατά την διάρκεια ενός σεισμού.

Στο γενικό πλαίσιο της μελέτης των εδαφικών παραμορφώσεων και αστοχίας πρανών, ο Varnes (1978) περιγράφει την πλευρική εξάπλωση ως εξής:

"Οι μετακινήσεις μπορεί να εμπριέχουν ρήγματα και εξάπλωση συνεκτικού υλικού . . . που οφείλονται στην ρευστοποίηση ή πλαστική ροή υποκείμενου υλικού. Τα υπερκείμενα συνεκτικά στρώματα μπορεί να υποστούν καθίζηση, να περιστραφούν ή να διασπαστούν, ή μπορεί και αυτά να ρευστοποιηθούν και να ολισθήσουν. Ο μηχανισμός της αστοχίας περιλαμβάνει στοιχεία όχι μόνο στροφής αλλά και ροής . . ."

Περιορίζοντας την εξέταση του φαινομένου μόνο στις εδαφικές παραμορφώσεις, που οφείλονται στην εδαφική ρευστοποίηση κατά την διάρκεια του σεισμού, η πλευρική εξάπλωση έχει οριστεί ως "η πλευρική μετακίνηση μεγάλων, επιφανειακών τεμαχών εδάφους, λόγω της ρευστοποίησης που προκαλείται σε ένα υποκείμενο στρώμα" (Liquefaction...1985).

Όπως έχει περιγραφεί από τους Bartlett and Youd (1992a; 1992b) η πλευρική εξάπλωση εμφανίζεται σε περιοχές υπερκείμενες χαλαρών άμμων και με φρεάτιο ορίζοντα κοντά στην εδαφική επιφάνεια. Τέτοιου τύπου εδάφη είναι επιρρεπή στην αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων, στην χαλάρωση και ρευστοποίηση τους κατά την διάρκεια ισχυρών σεισμών. Αν συμβεί ρευστοποίηση, το υπερκείμενο έδαφος ολισθαίνει προς τα κατόντι ή μετακινείται προς το ελεύθερο κατακόρυφο μέτωπο με ταυτόχρονο σχηματισμό ρωγμών. Οι γεωλογικές συνθήκες που ευνοούν το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης (ήπια κλίση εδάφους, επιφανειακός φρεάτιος ορίζοντας, ρευστοποιήσιμα εδάφη χωρίς συνοχή) συχνά εμφανίζονται κατά μήκος κοιτών ποταμών και θαλάσσιων μετώπων (κρηπιδότοιχοι) με πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις, όπως και σε χαλαρές, κορεσμένες αμμώδεις επιχώσεις. (Youd and Hoose 1976).

1.2 Αντικείμενο και Διάρθρωση Διατριβής

Στην παρούσα Διατριβή εξετάζεται η Πλευρική Εξάπλωση που οφείλεται στην ρευστοποίηση κατά την διάρκεια σεισμικών διεργάσεων. Το φαινόμενο της ρευστοποίησης, οφείλεται στην αύξηση της πίεσης του νερού των εδαφικών πόρων κάτω από τη δράση του εδαφικού σεισμικού κραδασμού. Η αύξηση αυτή της πίεσης του νερού των πόρων έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των τιμών των ενεργών ορθών τάσεων και την επακόλουθη μείωση της διαμητρικής αντοχής και της φέρουσας ικανότητας των εδαφικών υλικών, η οποία οδηγεί στην ανάπτυξη μεγάλων καθιζήσεων (Liu & Dobry, 1997; Rollins & Seed, 1990).

Στην περίπτωση κεκλιμένων εδαφών ή εδαφών που καταλήγουν σε ελεύθερο μέτωπο, προκαλείται έντονη ρηγμάτωση της επιφάνειας του εδάφους και πλευρική εξάπλωση, lateral spreading, (δηλαδή οριζόντια μετακίνηση) του εδαφικού υλικού (παραμορφώσεις πολύπλοκης μορφής), στην περιοχή της όχθης υδάτινων ρευμάτων ή άλλων θαλασσιών μετώπων και η εξάπλωση αυτών σε μεγάλη απόσταση προς τα ανάντι. Η εμφάνιση του φαινομένου γίνεται συνήθως σε παραλιακές ζώνες ή σε περιοχές υδάτινων ρευμάτων και ποταμών. Οι ρωγμές συνήθως έχουν διεύθυνση παράλληλα με την ακτογραμμή ή τον άξονα του ποταμού. Το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες σε τεχνικά έργα (κρηπιδοίτοιχοι, βάθρα γεφυρών) καθώς αναπτύσσονται μεγάλες παραμορφώσεις και σημαντικές εξαναγκασμένες μετακινήσεις. Για την μελέτη του φαινομένου έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες: α) εμπειρικές, β) ημιεμπειρικές και γ) αναλυτικές (Towhata et al., 1992) με στόχο τον υπολογισμό των αναμενόμενων εδαφικών μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης.

Αντικείμενο της παρούσας Διατριβής αποτελεί η παρουσίαση στοιχείων που αφορούν στην εκδήλωση πλευρικής εξάπλωσης στις παραλιακές ζώνες Ληξουρίου και Αργοστολίου κατά τους δύο ισχυρούς σεισμούς που έπληξαν την Κεφαλονιά στις 26/01/2014 ($M_w=6.1$) και στις 03/02/2014 ($M_w=6,0$), με επίκεντρα ευρισκόμενα κατά μήκος των Δυτικών ακτών στην περιοχή του Ληξουρίου (χερσόνησος Παλικής). Τα στοιχεία περιλαμβάνουν παρατηρήσεις πεδίου, γεωτεχνικά δεδομένα για τις εδαφικές συνθήκες του λιμένα του Ληξουρίου ο οποίος υπέστη εκτεταμένες ζημιές, αλλά και του λιμένα του Αργοστολίου καθώς και εκτίμηση της έντασης της επιφανειακής κίνησης με βάση τις διαθέσιμες καταγραφές των σεισμών. Τέλος, η παρατηρηθείσα συμπεριφορά των κρηπιδοίτοιχων των δύο παραπάνω λιμένων καθώς και οι πραγματικές οριζόντιες μετακινήσεις λόγω πλευρικής εξάπλωσης συγκρίνονται με εκτιμήσεις βασισμένες στην εφαρμογή των σύγχρονων εμπειρικών μοντέλων πλευρικής εξάπλωσης που αξιοποιούν αποτελέσματα της επι-τόπου δοκιμής (SPT).

Η δομή της Διατριβής περιλαμβάνει έξι κεφάλαια και δύο παραρτήματα, το περιεχόμενο των οποίων περιγράφεται συνοπτικά στην συνέχεια.

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 παρουσιάζεται ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που αφορά στο φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης των εδαφών. Γίνεται επίσης σύντομη αναφορά σε διάφορα εμπειρικά, ημιεμπειρικά και αναλυτικά προσομοιώματα πρόβλεψης οριζόντιων εδαφικών μετακινήσεων. Συστηματική αναφορά και ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις μεθοδολογίες εκτίμησης των εδαφικών μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης των Youd et al. (2002) και Gillins&Bartlett (2014), που αποτελούν και τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις της παρούσας Διατριβής.

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 παρουσιάζονται πληροφορίες που αφορούν στη γεωλογία και στην τεκτονική της Κεφαλονιάς. Επιπλέον, δίνονται στοιχεία που αφορούν την σεισμικότητα της περιοχής και γίνεται μια ιστορική αναδρομή σε παλαιότερους σεισμούς. Τέλος, γίνεται αναφορά στους δύο πρόσφατους ισχυρούς σεισμούς της Κεφαλονιάς 26/01/2014 ($M_w=6.1$) και στις 03/02/2014 ($M_w=6,0$). Τα στοιχεία περιλαμβάνουν γεωλογικές και σεισμοτεκτονικές πληροφορίες και καταγραφές της σεισμικής κίνησης.

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 περιγράφεται η εκτεταμένη γεωτεχνική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της παραλιακής ζώνης του Ληξουρίου όπου παρατηρήθηκε εκδήλωση ρευστοποίησης/πλευρικής εξάπλωσης. Η διερεύνηση του υπεδάφους στην περιοχή ρευστοποίησης -που πραγματοποιήθηκε από την εταιρεία ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΕΠΕ.- βασίσθηκε στη διεξαγωγή δειγματοληπτικών γεωτρήσεων με μετρήσεις του αριθμού κτύπων της τυποποιημένης δοκιμής διείσδυσης (SPT). Διεξήχθησαν επίσης εργαστηριακές δοκιμές κατάταξης και δοκιμές αντοχής στα συνεκτικά εδαφικά δείγματα. Τέλος, στοιχεία επι-τόπου μετρήσεων της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων σεισμικών κυμάτων μικρού πλάτους V_{so} , ως συνάρτηση του βάθους ελήφθησαν από το GEER/ERI/ATC Reconnaissance Version 1 June 6, 2014 Data from Pelekis 2014 και για τους δύο λιμένες (Ληξουρίου, Αργοστολίου).

Στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 συγκρίνεται η παρατηρηθείσα συμπεριφορά (οι πραγματικές τιμές οριζοντίων μετακινήσεων που μετρήθηκαν κατά την αναγνώριση πεδίου που πραγματοποιήθηκε από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Πατρών) με την αναμενόμενη συμπεριφορά και τις εκτιμώμενες τιμές με βάση τα σύγχρονα εμπειρικά μοντέλα που αφορούν τις οριζόντιες μετακινήσεις λόγω πλευρικής εξάπλωσης για περίπτωση ελεύθερου μετώπου. Επιπλέον, γίνεται λεπτομερής περιγραφή των διαφόρων μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν και παρουσιάζονται τα σχετικά αποτελέσματα.

Τέλος στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 διατυπώνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη της πλευρικής εξάπλωσης και της συμπεριφοράς των κρητιδότοιχων στην παραλιακή ζώνη της Κεφαλονιάς και συγκεκριμένα στους λιμένες Ληξουρίου και Αργοστολίου.

Στα δύο Παραρτήματα, τα οποία παρατίθενται στο τέλος της Διατριβής, παρουσιάζονται λεπτομερή στοιχεία για την πραγματοποιηθείσα γεωτεχνική έρευνα.

Συγκεκριμένα, στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α δίνονται τα μητρώα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων στο λιμένα Ληξουρίου και τα αποτελέσματα της Δοκιμής Τυποποιημένης Διείσδυσης SPT, ως συνάρτηση του βάθους. Το παράρτημα συμπληρώνεται από φωτογραφικό υλικό των παραπάνω δοκιμών, την γεωτεχνική έρευνα και τα δείγματα.

Το ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β περιλαμβάνει πίνακες με τις μετρηθείσες τιμές των μετακινήσεων στο Ληξούρι και στο Αργοστόλι καθώς και την ακριβή θέση τους. Επιπλέον εμπεριέχει εποπτικό υλικό που αφορά τις βλάβες των λιμενικών κατασκευών (κυρίως κρηπιδοτόιχων) που προκλήθηκαν από τους σεισμούς και την εκδήλωση αρκετών φαινομένων εδαφικής αστοχίας όπως εδαφικής ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης και καθίζησης των παραλιακών ζωνών.

2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

2.1 Εισαγωγή

Το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης (lateral spreading) εξετάζεται με ιδιαίτερο ενδιαφέρον από τους ερευνητές τα τελευταία χρόνια. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμών και σε κορεσμένα εδάφη που παρουσιάζουν ελεύθερο κατακόρυφο μέτωπο σε επαφή με υδάτινες λεκάνες ή εδάφη με ήπια ή και έντονη κλίση. Χαρακτηριστικό γνώρισμα είναι οι έντονες ρηγματώσεις του εδάφους, πολύπλοκης μορφής (Rauch, 1997), στην περιοχή της όχθης υδάτινων ρευμάτων και ποταμών ή άλλων θαλασσίων μετώπων και η εξάπλωση αυτών σε μεγάλη απόσταση από την υδάτινη επιφάνεια. Οι ρωγμές συνήθως έχουν διεύθυνση παράλληλη με την ακτογραμμή ή τον άξονα του ποταμού. Το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης μπορεί να προκαλέσει σοβαρές βλάβες σε τεχνικά έργα (κρηπιδοίχοι, βάθρα γεφυρών) καθώς αναπτύσσονται μεγάλες παραμορφώσεις και σημαντικές εξαναγκασμένες μετακινήσεις. Για την μελέτη του φαινομένου έχουν αναπτυχθεί διάφορες μεθοδολογίες: α) εμπειρικές, β) ημιεμπειρικές και γ) αναλυτικές (Towhata et al. 1992) με στόχο τον υπολογισμό των αναμενόμενων εδαφικών μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης.

Άλλοι τρόποι μελέτης του προβλήματος και εκτίμησης των εδαφικών μετακινήσεων είναι: α) η μέθοδος ολισθαίνοντος πρίσματος (Μέθοδος Newmark), όπου οι αδρανειακές δυνάμεις λόγω της επιβαλλόμενης σεισμικής κίνησης οδηγούν σε στιγμιαίο συντελεστή ασφάλειας έναντι ευστάθειας μικρότερο της μονάδας, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μετακινήσεων και β) η ανάπτυξη μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών και εκτέλεση μη γραμμικών δυναμικών και στατικών αναλύσεων.

Στα επόμενα παρουσιάζονται εμπειρικά και ημιεμπειρικά μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί από διάφορους ερευνητές και βασίζονται σε παρατηρήσεις πεδίου και ιστορικά περιστατικά. Οι εδαφικές μετακινήσεις συσχετίζονται με παραμέτρους που αφορούν:

1) την σεισμικότητα της περιοχής (π.χ. μέγεθος σεισμού, M)

- 2) την γεωμετρία, συνήθως περιγράφεται με την εδαφική κλίση ή το ύψος του ελεύθερου μετώπου
- 3) τις εδαφικές παραμέτρους.

2.2 Ιστορική Αναδρομή

Η πλευρική εξάπλωση είναι ένα εντυπωσιακό-καταστροφικό φαινόμενο, επακόλουθο της ρευστοποίησης, που οδηγεί στην εδαφική αστοχία. Κατά την διάρκεια της πλευρικής εξάπλωσης, τέμαχος από συμπαγές συνήθως, επιφανειακό έδαφος μετακινείται προς τα κατάντι ή προς ελεύθερο μέτωπο λόγω μιας ζώνης διάτμησης που δημιουργείται εντός του ρευστοποιήσιμου στρώματος. Η τυπική προκύπτουσα παραμόρφωση του εδάφους περιλαμβάνει εκτεταμένες ρωγμές ή ένα βύθισμα στην κεφαλή της αστοχίας, διατμητικές παραμορφώσεις κατά μήκος του παραλιακού μετώπου, και συμπίεση ή ανατροπή του εδάφους στον πόδα του ελεύθερου μετώπου. Το μέγεθος της πλευρικής εξάπλωσης τυπικά κυμαίνεται από ορισμένα εκατοστά έως αρκετά μέτρα και μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές βλάβες σε κατασκευές αλλά και να απειλήσει ανθρώπινες ζωές. Για παράδειγμα, η πλευρική εξάπλωση που δημιουργήθηκε από τον σεισμό του 1906 στο Σαν Φρανσίσκο προκάλεσε βλάβες ή κατέστρεψε έναν μεγάλο αριθμό κτιρίων, γεφυρών, δρόμων και αγωγών (Youd and Hoose 1978). Η πλευρική εξάπλωση που δημιουργήθηκε από τον σεισμό της Αλάσκα το 1964 κατέστρεψε πολλές γέφυρες, κτίρια και οδήγησε στην απώλεια πολλών ζωών. Περίπου 80 εκατομμύρια δολάρια ήταν η ζημιά λόγω του σεισμού το 1964 στην Αλάσκα σε 266 γέφυρες και πολυάριθμα τμήματα αναχωμάτων κατά μήκος του σιδηρόδρομου της Αλάσκας και του αυτοκινητόδρομου. (McCulloch and Bonilla 1970; Kachadoorian 1968). Τον ίδιο χρόνο, η ρευστοποίηση προκάλεσε εκτεταμένες βλάβες στην Νιγκάτα, Ιαπωνία (Hamada et al. 1986). Η πλευρική εξάπλωση, χαλαρών επιχωμάτων οδήγησε στην μετακίνηση των πρηνών του ποταμού Shinano έως και 10 μέτρα προς την εσωτερική πλευρά του καναλιού προκαλώντας καταστροφικές βλάβες σε εγκαταστάσεις κατά μήκος της όχθης του ποταμού στη Νιγκάτα.

Πολλές αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης (Rauch 1997). Ωστόσο για την χρήση αυτών των μεθόδων απαιτείται εκτίμηση των εδαφικών παραμέτρων σε περιοχές με ελάχιστες πληροφορίες για το υπέδαφος. Οι αναλυτικές και αριθμητικές μέθοδοι χρειάζονται παραμέτρους που ορίζονται δύσκολα ή είναι δύσκολο να εκτιμηθούν και δεν έχουν επαρκώς εξακριβωθεί με τα δεδομένα πεδίου. Για αυτό λοιπόν η πρόβλεψη εδαφικών μετακινήσεων εξαιτίας της πλευρικής εξάπλωσης, στην πράξη βασίζεται σε εμπειρικές μεθόδους προερχόμενες από τη μελέτη ιστορικών περιστατικών.

Ο Youd και Perkins (1987) διατύπωσαν μια απλή εμπειρική συσχέτιση μεταξύ παραμέτρων του σεισμού και του "Liquefaction Severity Index" (LSI), ο οποίος ορίζεται ως η συνολική μέγιστη δυνατή μετακίνηση λόγω της πλευρικής εξάπλωσης σε έναν τυπικό γεωλογικό σχηματισμό. Επειδή οι περισσότερες μετακινήσεις λόγω πλευρικής εξάπλωσης θα είναι μικρότερες από την μέγιστη, το LSI μοντέλο προσδιορίζει ένα άνω όριο πρόβλεψης των μετακινήσεων στο πεδίο. Επιπλέον το LSI μοντέλο προσαρμόστηκε σε μια βάση δεδομένων από περιοχές της Βορειοδυτικής Αμερικής, ενώ ο Bartlett και Youd (1992) έδειξαν ότι το LSI μοντέλο μπορεί να υποεκτιμήσει πλευρικές παραμορφώσεις στην Ιαπωνία. Ένα άλλο εμπειρικό μοντέλο, που δημιουργήθηκε από τους Hamada et al. (1987), περιορίζεται από τη μικρή διακύμανση των εδαφικών συνθηκών της βάσης δεδομένων τους, η οποία είναι μόνο από περιοχές στο Noshiro, Ιαπωνία.

Ο Bartlett and Youd (1992, 1995) ανέπτυξαν μια περισσότερο ολοκληρωμένη μέθοδο για πρόβλεψη της πλευρικής εξάπλωσης. Έκαναν χρήση της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (MLR) για να προσαρμόσουν τις εξισώσεις σε μια βάση δεδομένων από 467 διανύσματα μετακινήσεων πλευρικής εξάπλωσης που εμφανίστηκαν σε οχτώ σεισμούς. Το MLR μοντέλο τους αποτελείται από δύο εξισώσεις, για πλευρική εξάπλωση με ή και χωρίς κατακόρυφο μέτωπο, και προβλέπει μετακινήσεις σε συγκεκριμένα σημεία σε ένα δοσμένο πεδίο. Στην βάση δεδομένων του Bartlett και Youd, 72% των περιπτώσεων προέρχεται από την Νιγκάτα και Νοσίρο στην Ιαπωνία, όπου η πλευρική εξάπλωση προκάλεσε πολύ μεγάλες μετακινήσεις σε εκτενείς περιοχές. Γι αυτό, το μοντέλο του Youd και Bartlett τείνει να υπερεκτιμά μετακινήσεις σε μικρότερες, πιο συνηθισμένες περιπτώσεις πλευρικής εξάπλωσης.

Στην παρούσα Διατριβή γίνεται εκτενέστερη αναφορά στο εμπειρικό μοντέλο των Youd et al. (2002) και (2013) για την εκτίμηση της οριζόντιας εδαφικής μετακίνησης που οφείλεται σε πλευρική εξάπλωση ως επακόλουθο της ρευστοποίησης. Ειδικότερα γίνεται μια ιστορική αναδρομή στα προηγούμενα εμπειρικά μοντέλα και στο πως οι ερευνητές κατέληξαν στο μοντέλο πρόβλεψης πλευρικής εξάπλωσης των Youd et al. (2002) που αποτελεί το πιο ολοκληρωμένο εμπειρικό μοντέλο. Επιπλέον αναφέρονται τροποποιήσεις που υπέστη το αρχικό μοντέλο που δημοσιεύθηκε το 1995, ώστε να δίνει καλύτερες εκτιμήσεις με το τελικό του 2002 και 2013.

Ο Barlett and Youd (1992) συνέδεσαν τους παράγοντες του εξεταζόμενου πεδίου από το μοντέλο πάχους-κλίσης του Hamada et al.(1986) και τα μοντέλα μεγέθους-απόστασης του Youd and Perkins (1987) καθώς και του Ambraseys (1988) για να αναπτύξουν ένα πιο ολοκληρωμένο μοντέλο πρόβλεψης πλευρικής εξάπλωσης που εξαρτάται από χαρακτηριστικά του πεδίου αλλά και το μέγεθος σεισμού. Οι παραπάνω

ερευνητές, έκαναν δεκτό ότι το μέγεθος της οριζόντιας μετακίνησης D_H είναι συνάρτηση του σεισμού, της τοπογραφίας της περιοχής γεωλογικών και εδαφικών παραγόντων.

$D_H = f(\text{σεισμός, τοπογραφία, γεωλογία, εδαφικοί παράγοντες})$

Η πολλαπλή γραμμική εξίσωση παλινδρόμησης (MLR) χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση αυτών των παραγόντων.

2.3 Δείκτης Επικινδυνότητας Ρευστοποίησης (LSI)

Η εκτίμηση της εδαφικής αστοχίας σε συγκεκριμένη θέση είναι μείζονος σημασίας από τον προσδιορισμό της πιθανής αστοχίας ενός μόνο συγκεκριμένου εδαφικού υποστρώματος. Οι Iwasaki et al. (1982) πρότειναν τον μηχανικό δείκτη πιθανής ρευστοποίησης IL (Liquefaction Index), για τον υπολογισμό της επικινδυνότητας εδαφικής αστοχίας. Αυτός ο δείκτης ορίζεται ως εξής:

$$IL = \int_0^H W(z) * F_1 * dz \quad (1)$$

όπου:

$W(z) = 10 - 0,5 * z$, z το βάθος του εδάφους (m)

F_1 : συντελεστής ασφάλειας ορισμένος ως

$$\begin{aligned} (\text{Για } F_s < 1,0) & \quad F_1 = 1 - F_s \\ (\text{Για } F_s > 1,0) & \quad F_1 = 0 \end{aligned}$$

όπου F_s είναι ο συντελεστής ασφάλειας έναντι ρευστοποίησης και μπορεί να προσδιοριστεί από τον λόγο CRR/CSR , όπου CSR είναι ο λόγος κυκλικής φόρτισης και CRR ο λόγος κυκλικής αντίστασης για κάθε εδαφικό υπόστρωμα, όπως ορίστηκε από τον Cetin et al. (2004) :

$$CRR = \exp \left(\frac{N_{1,60}(1+0,004FC) - 29,53 \ln(M_w) - 3,70 \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) + 0,05FC + 16,85 + 2,70\Phi^{-1}(P_L)}{13,32} \right) \quad (2)$$

όπου $N_{1,60}$ είναι η διορθωμένη τιμή SPT-N , FC το ποσοστό λεπτών στο έδαφος (%), M_w το μέγεθος του σεισμού, σ'_v η ενεργός τάση, P_a η ατμοσφαιρική πίεση σε ίδιες μονάδες με της σ'_v , $\Phi^{-1}(P_L)$ είναι η τυπική αντίστροφη αθροιστική συνάρτηση κατανομής για μια δοσμένη πιθανότητα ρευστοποίησης (μέση τιμή= 0 & τυπική απόκλιση =1), και

P_L η πιθανότητα ρευστοποίησης για κάθε υπόστρωμα ορισμένη από τους Cetin et al. (2004) :

$$P_L = \Phi\left(\frac{N_{1,60}(1+0,004FC) - 13,32 \ln(CSR) - 29,53 \ln(M_w) - 3,70 \ln\left(\frac{\sigma'_v}{P_a}\right) + 0,05FC + 16,85}{2,70}\right) \quad (3)$$

Φ είναι η τυπική αθροιστική συνάρτηση κατανομής για μια δοσμένη πιθανότητα ρευστοποίησης (δηλαδή μέση τιμή = 0 και τυπική απόκλιση = 1), $N_{1,60}$ είναι η διορθωμένη τιμή SPT-N, FC το ποσοστό λεπτών στο έδαφος (%), CSR είναι ο λόγος κυκλικής φόρτισης, M_w το μέγεθος του σεισμού, σ'_v η ενεργός τάση, P_a η ατμοσφαιρική πίεση σε ίδιες μονάδες με της σ'_v .

Βασισμένοι σε μια βάση δεδομένων από 64 ρευστοποιήσιμα και 23 μη ρευστοποιήσιμα πεδία από έξι διαφορετικούς σεισμούς, οι Iwasaki et al. (1992) πρότειναν το ακόλουθο κριτήριο για διαφορετικά επίπεδα εδαφικής αστοχίας:

- $IL = 0$, για πολύ μικρή πιθανότητα ρευστοποίησης
- $0 < IL \leq 5$, για χαμηλή πιθανότητα ρευστοποίησης
- $5 < IL \leq 15$, για μεγάλη πιθανότητα ρευστοποίησης
- $IL > 15$, για εξαιρετικά μεγάλη πιθανότητα ρευστοποίησης

Μετά από μια μικρή τροποποίηση του όρου IL , προέκυψε ο δείκτης LSI (Liquefaction Severity Index) που πρώτος υιοθέτησε και χρησιμοποίησε ο Yilmaz (2004). Αυτή η μεταβλητή LSI είναι μια συνάρτηση της: 1) πιθανότητας ρευστοποίησης του εδάφους, 2) του πάχους του πιθανώς ρευστοποιήσιμου υποστρώματος και 3) του βάθους από την επιφάνεια του πιθανώς ρευστοποιήσιμου στρώματος που ορίζεται ως εξής:

$$LSI = \int_0^H P_L T_H W_F \quad (4)$$

όπου: H είναι το συνολικό πάχος στο προφίλ του εδάφους με αφετηρία το βάθος του φρεάτιου ορίζοντα, T_H είναι το πάχος του πιθανώς ρευστοποιήσιμου υποστρώματος, W_F ένας συντελεστής βάρους ίσος με $1-0,05z$, όπου z είναι το βάθος του πιθανώς ρευστοποιήσιμου υποστρώματος (m) και P_L η πιθανότητα ρευστοποίησης σε κάθε υπόστρωμα.

2.4 Μέθοδος Γραμμικής Παλινδρόμησης Πολλαπλών Μεταβλητών (MLR)

Για την εφαρμογή της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, υποτίθεται ότι η πραγματική αλλά όχι γνωστή σχέση μεταξύ της οριζόντιας μετακίνησης D_H και των ανεξάρτητων μεταβλητών μπορεί να προσεγγιστεί με μια αθροιστική γραμμική εξίσωση, η οποία παρέχει τις βέλτιστες εκτιμήσεις των παραμέτρων του μοντέλου, ελαχιστοποιώντας έτσι το σφάλμα του μοντέλου. (Draper and Smith 1981):

$$D_H = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_pX_p + e \quad (5)$$

Σε αυτή την εξίσωση X_1, \dots, X_p είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της οριζόντιας εδαφικής μετακίνησης D_H . Οι συντελεστές παλινδρόμησης b_0, b_1, \dots, b_p , είναι οι βέλτιστες εκτιμήσεις των παραμέτρων του πραγματικού μοντέλου (B_0, \dots, B_p). Ο όρος του σφάλματος, e , είναι η διαφορά μεταξύ της μετρημένης τιμής D_H και της προβλεπόμενης τιμής από το μοντέλο D^*_H :

$$e = D_H - D^*_H \quad (6)$$

Οι συντελεστές παλινδρόμησης που χρησιμοποιούνται στην εξίσωση (1), υπολογίζονται ελαχιστοποιώντας το άθροισμα των τετραγώνων του όρου σφάλματος.

$$S_e = \sum(e)^2 \quad (7)$$

Συνήθως, η ικανότητα πρόβλεψης των πολλαπλών μεταβλητών γραμμικής παλινδρόμησης μοντέλων, **multiple linear regression (MLR)** καθορίζεται από τον συντελεστή προσδιορισμού, r^2 :

$$r^2 = [\sum(Y^2) - S_e - (\sum Y)^2/n] / [\sum(Y^2) - (\sum Y)^2/n] \quad (8)$$

Όπου Y είναι η εξαρτημένη μεταβλητή (δηλαδή το D_H για το παρόν πρόβλημα) και n το μέγεθος του δείγματος. Αυτός ο συντελεστής είναι μια μέτρηση του ποσού της μεταβλητότητας της εξαρτημένης μεταβλητής που καθορίζεται από τις ανεξάρτητες μεταβλητές και κυμαίνεται από 0 έως 1. Για παράδειγμα, τιμή $r^2 = 0,50$ σημαίνει ότι το 50% της μεταβλητότητας του Y (D_H) καθορίζεται από τις ανεξάρτητες μεταβλητές που εμπεριέχονται στο MLR μοντέλο.

Για την προκαταρκτική ανάπτυξη του μοντέλου, έγινε χρήση της διαδικασίας τροποποιημένης βηματικής παλινδρόμησης. Συνοπτικά η διαδικασία αυτή έχει ως εξής: αρχίζει αναζητώντας το σετ των ανεξάρτητων μεταβλητών (δηλαδή των X) για το X με

την μεγαλύτερη συσχέτιση με το D_H και αυτό το X εισάγεται στο μοντέλο. Στο επόμενο βήμα, τα υπόλοιπα X επανεξετάζονται για να βρεθεί το X που προκαλεί την μεγαλύτερη βελτίωση στο r^2 και αυτό το X εισάγεται με την σειρά του στο μοντέλο. Η βηματική διαδικασία εισόδου των X στο μοντέλο συνεχίζεται έως ότου κανένα επιπλέον X δεν μπορεί να εισαχθεί το οποίο θα βελτιώσει σημαντικά το r^2 . Επιπλέον, στο τέλος κάθε βήματος, όλα τα X που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο ελέγχονται για να επαληθεύσουμε ότι το κάθε X συνεχίζει να συνεισφέρει στην βελτίωση του r^2 . (Σε μερικές περιπτώσεις, ένα X εισαγόμενο κατά την διάρκεια αρχικού βήματος, πιθανότατα να γίνει ασήμαντο κατά την διάρκεια επόμενου βήματος γιατί συσχετίζεται και με τα άλλα X τα οποία εισήχθησαν μετά από αυτό στο μοντέλο. Αν κάποιο X βρεθεί ασήμαντο ακολούθως αφαιρείται από το μοντέλο με σκοπό να ξεκινήσει το επόμενο βήμα.)

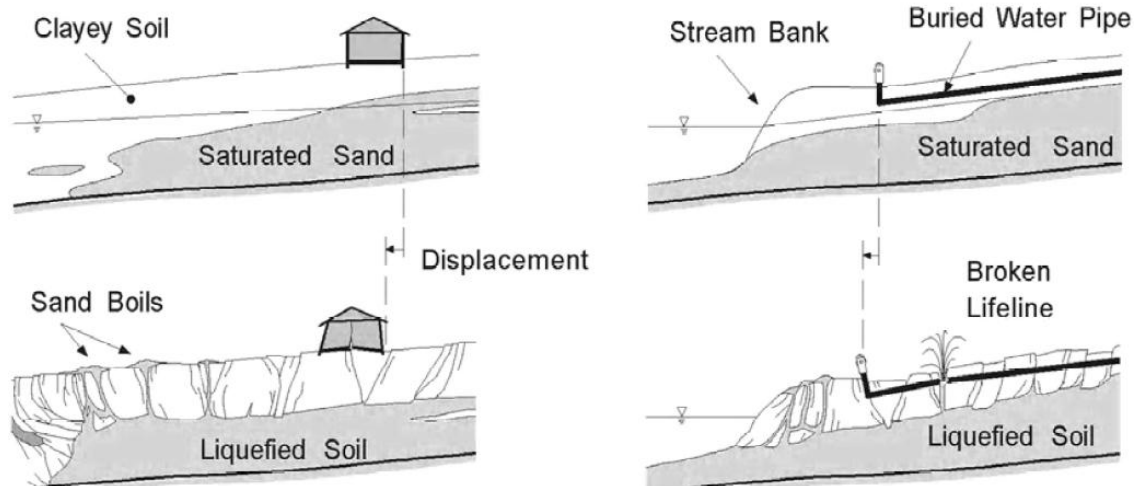
2.5 Εφαρμογή της μεθόδου MLR για την ανάπτυξη εμπειρικών ή ημιεμπειρικών μοντέλων

Λόγω των ανωτέρω υπολογιστικών και άλλων πολυπλοκοτήτων, πολλοί ερευνητές ανέπτυξαν εμπειρικές ή ημιεμπειρικές εξισώσεις εκτίμησης της εδαφικής μετακίνησης λόγω της πλευρικής εξάπλωσης (Hamada et al. 1986, Youd and Perkins 1987, Rauch and Martin 2000, Bardet et al. 2002, Baska 2002, Youd et al. 2002, Zhang et al. 2004, Faris et al. 2006, Olson and Johnson 2008). Η πλειοψηφία αυτών των ερευνητών έχουν εξαγει τις εξισώσεις τους από τεχνικές στατιστικής παλινδρόμησης ιστορικών συμβάντων πλευρικής εξάπλωσης οφειλόμενη σε εδαφική ρευστοποίηση.

Οι Bartlett and Youd (1992, 1995) εισήγαγαν τέτοιες εμπειρικές εξισώσεις για πρόβλεψη του μεγέθους της εδαφικής μετακίνησης από πλευρική εξάπλωση οφειλόμενη σε ρευστοποίηση. Αυτές οι εξισώσεις έχουν γίνει ευρέως γνωστές στην γεωτεχνική σεισμική μηχανική. Οι εξισώσεις αναπτύχθηκαν μέσω των πολλαπλών μεταβλητών γραμμικής παλινδρόμησης μιας μεγάλης βάσης δεδομένων που συγκεντρώθηκε από τους ίδιους τους ερευνητές. Αργότερα οι Youd et al. (2002) διόρθωσαν ορισμένα σφάλματα στην βάση δεδομένων, προσθέτοντας δεδομένα από τρεις ακόμα σεισμούς, και παρουσίασαν μια αναθεωρημένη έκδοση του μοντέλου. Οι διαδικασία της παλινδρόμησης έδειξε ότι η εδαφική μετακίνηση από την πλευρική εξάπλωση στατιστικά συσχετίζεται με την κλίση του εδάφους ή την εγγύτητα και το βάθος του ελεύθερου κατακόρυφου μετώπου, το μέγεθος του σεισμού και την απόσταση από την σεισμική πηγή. Επιπλέον, συσχετίζεται με το πάχος, το ποσοστό λεπτών, και το μέσο πάχος των κορεσμένων εδαφικών ιζημάτων που έχουν τιμές $SPT N_{1,60} < 15$ (Bartlett and Youd, 1992). Παρακάτω γίνεται εκτενέστερη αναφορά στα εμπειρικά μοντέλα.

2.6 Το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης λόγω ρευστοποίησης.

Το μηχανικό φαινόμενο της εδαφικής ρευστοποίησης από μόνο του μπορεί να μην είναι επικίνδυνο, ωστόσο όταν συνδυάζεται με διαφορετικές μορφές εδαφικών παραμορφώσεων/μετακινήσεων τότε οι συνέπειες είναι καταστροφικές στο γύρω περιβάλλον. Κατά την διάρκεια του σεισμού, όταν ένα εδαφικό υπόστρωμα ρευστοποιείται, τα άθικτα εδαφικά τεμάχια θα κινηθούν προς την κατωφέρεια σε επιφάνειες ήπιας κλίσης και/ ή προς κάποιο κατακόρυφο μέτωπο. Για αυτό, λόγω της ρευστοποίησης του εδάφους κατά την διάρκεια παλαιών σεισμικών γεγονότων, μεγάλες επιφάνειες και μάζες εδάφους παρατηρήθηκαν να έχουν μετακινηθεί και μετατοπιστεί πλαγίως σε νέες θέσεις, με αποτέλεσμα σημαντικές καταστροφικές συνέπειες τόσο για υποδομές όσο και υπερκείμενες κατασκευές. Τα πλάτη (ανοίγματα ρωγμών) εξαιτίας της πλευρικής εξάπλωσης κυμαίνονται από μερικά εκατοστά έως και αρκετά μέτρα. Στο Σχ. 2-1 παρουσιάζονται διάφορες περιπτώσεις πλευρικής εξάπλωσης λόγω εδαφικής ρευστοποίησης κατά την διάρκεια ενός σεισμού, και οι σχετιζόμενες κρίσιμες συνέπειες.



Σχήμα 2-1 Σχηματικό διάγραμμα περιγραφής πλευρικής εξάπλωσης εξαιτίας εδαφικής ρευστοποίησης κατά την διάρκεια ενός σεισμού.

Όταν υπάρχει ένα εν δυνάμει ρευστοποιήσιμο εδαφικό υπόστρωμα, το υπερκείμενο έδαφος μπορεί να ολισθήσει κατά την διάρκεια του σεισμού, ακόμα και αν η επιφάνεια του εδάφους είναι ήπιας κλίσης ή και εντελώς επίπεδη. Επειδή ο κορεσμός του εδάφους είναι απαραίτητος για να επιτευχθεί ρευστοποίηση, η κατάσταση των υπόγειων υδάτων είναι ένας από τους μείζονες παράγοντες που καθορίζουν αν το έδαφος, όταν υπόκειται σε μετακίνηση, είναι επιρρεπές ή όχι σε ρευστοποίηση. Εδάφη κάτω από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα θεωρούνται κορεσμένα και για αυτό επιρρεπή σε ρευστοποίηση.

2.7 Μέθοδοι εκτίμησης της μετακίνησης λόγω πλευρικής εξάπλωσης

Αρκετές διαφορετικές προσεγγίσεις για την πρόβλεψη του μεγέθους των πλευρικών εδαφικών παραμορφώσεων έχουν εισαχθεί μέχρι σήμερα, και από τεχνική άποψη, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως:

- 1) Αριθμητικές αναλύσεις με χρήση πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών (e.g., Finn et al. (1994), Arulanandan et al. (2000), και Liao et al. (2002), Bouckovalas et al. (2010))
- 2) υπολογιστικές μέθοδοι (e.g., Wang and Rahmann (1999))
- 3) Απλοποιημένες αναλυτικές μέθοδοι (e.g. Newmark (1965), Towhata et al. (1992), Kokusho and Fujita (2002), και Elgamal et al. (2003))
- 4) Εμπειρικές μέθοδοι που αναπτύχθηκαν, βασιζόμενες σε εκτιμήσεις από δεδομένα εργαστηριακών δοκιμών ή στατιστική ανάλυση ιστορικών πλευρικής εξάπλωσης (e.g., Hamada et al. (1986), Shamoto et al. (1998), και Youd et al. (2002) & (2013)).

Αυτές οι διαφορετικές προσεγγίσεις εξετάζονται στην παρούσα Διατριβή με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στις εμπειρικές μεθόδους καθώς παρουσιάζουν πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων προσδιορισμού του μεγέθους πλευρικής εξάπλωσης.

2.8 Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών.

Οι Liao et al. (2002) αναφέρονται στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και πεπερασμένων διαφορών (FD) (e.g., ABAQUS, FLAC, ADINA, και DIANA) η χρήση των οποίων στην προσομοίωση του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης οδηγεί στην γνώση πολλών πτυχών, όπως την σεισμική διέγερση, την εδαφική χαλάρωση, την αιφνίδια απώλεια διατμητικής αντοχής, ανακατανομή της πίεσης του νερού των πόρων και πιθανή προοδευτική αστοχία. Για την εφαρμογή των μεθόδων απαιτούνται πολύ σύνθετες αριθμητικές και υπολογιστικές δυνατότητες καθώς και εκτεταμένες πηγές δεδομένων για το έδαφος με σκοπό την επίτευξη τρισδιάστατης προσομοίωσης με πραγματικό πεδίο χρόνου. Αυτά τα συστήματα που βρίσκουν εφαρμογή στην γεωτεχνική είναι απλοποιημένα σε μια έκταση τους εξαιτίας της πολυπλοκότητας στην ακρίβεια μοντελοποίησης και μέτρησης της ανισότροπης κατάστασης του πεδίου, των ολικών και ενεργών τάσεων λόγω της σεισμικής απόκρισης της πίεσης του νερού των πόρων, της μη γραμμικής έντασης και παραμόρφωσης του εδάφους, και τις εγγενείς μεταβλητότητες και ανομοιογένεια των παραμέτρων των εδαφικών υλικών. Αρκετά γνωστά πακέτα FEM και FD έχουν κατασκευαστεί για ανάλυση της εδαφικής παραμόρφωσης και δυναμική ανάλυση του εδάφους σε περίπτωση σεισμού.

Ο Finn et al. (1994) έκαναν χρήση του TARA-3 και TARA-3FL κωδίκων για τον υπολογισμό της πλευρικής εδαφικής εξάπλωσης. Άλλες προσπάθειες μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό της πλευρικής εξάπλωσης λόγω σεισμών προτάθηκαν από τον Hamada et al.(1987) και τον Towhata (1992).

Ο Gu et al. (1993; 1994) έκαναν χρήση ενός μοντέλου πρόβλεψης της παραμόρφωσης εξαιτίας της ρευστοποίησης. Όταν αυτή η μέθοδος εφαρμόστηκε στο Wildlife Site στην Καλιφόρνια (Gu et al. 1994), εκτιμήθηκε σωστά η συνολική διάταξη των μετακινήσεων, αλλά υπερεκτιμήθηκε το μέγεθός τους κατά 30%.

Το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) προσομοιώνει ένα δυναμικό μοντέλο που επιτρέπει την αριθμητική ανάλυση μιας σύνθετης γεωκατασκευής, που εμπεριέχει έδαφος και φράγματα σκυροδέματος, αναχώματα, πρανή, αβαθής και βαθιές εκσκαφές, τοίχους αντιστήριξης και άλλα. Ένα άλλο διεθνώς γνωστό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων για μοντελοποίηση γεωτεχνικών προβλημάτων είναι το PLAXIS. Άλλο ολοκληρωμένο μοντέλο τριών διαστάσεων που περιέχει ενεργές τάσεις, πλαστικότητα, καθώς και τύπους επιφανειών σαν παραμέτρους αντιπροσώπευσης του εδάφους αναπτύχθηκε από τον Jean Prevost στο Princeton University ΗΠΑ.

Ο Yang et al. (2003) εργάστηκε πάνω στα υπολογιστικά μοντέλα του Elgamal (2002) για να εισάγει μια πλατφόρμα αριθμητικής προσομοίωσης του εδάφους με σκοπό τον υπολογισμό της απόκρισης του σε σεισμό (CYCLIC 1D), το οποίο εμπεριέχει και πρόβλεψη πλευρικής εξάπλωσης.

2.9 Απλοποιημένα Αναλυτικά Μοντέλα

Μοντέλο ολισθαίνοντος πρίσματος

Το 1965, ο Newmark πρότεινε αυτό το μοντέλο βασιζόμενος σε ένα ολισθαίνον πρίσμα πάνω σε ένα κεκλιμένο επίπεδο με τριβή. Το μοντέλο επιτρέπει τον υπολογισμό εδαφικών παραμορφώσεων του εδάφους λόγω του σεισμού με ολοκλήρωση των επιταχύνσεων, που ξεπερνούν την οριακή επιτάχυνση ολίσθησης (a_{yield}), υπολογίζοντας έτσι τις ταχύτητες του πρίσματος. Η οριακή επιτάχυνση σχετίζεται με την κλίση και τον συντελεστή ασφάλειας έναντι ολίσθησης. Το πρίσμα ξεκινά να ολισθαίνει όταν η κινητήρια δύναμη (σεισμική επιτάχυνση) φτάσει ή ξεπεράσει την δύναμη αντίστασης (επιτάχυνση διαρροής/ οριακή επιτάχυνση). Οι συνολικές μετακινήσεις προσδιορίζονται με ολοκλήρωση των ταχυτήτων του ολισθαίνοντος πρίσματος.

Ο Yegian et al. (1991) έκανε χρήση της μεθόδου Newmark για να εισάγει ένα μοντέλο πρόβλεψης της σταθερής μετακίνησης του εδάφους ως:

$$D = N_{eq} T^2 a_p f\left(\frac{a_y}{a_p}\right) \quad (9)$$

όπου: D είναι η πλευρική εδαφική παραμόρφωση, N_{eq} ο ισοδύναμος αριθμός ομαλών κύκλων φόρτισης, T η περίοδος (sec), a_y οριακή επιτάχυνση (g), a_p η μέγιστη επιτάχυνση (g), και f μια αδιάστατη συνάρτηση εξαρτώμενη από την κίνηση της βάσης.

Οι Baziar et al. (1992) έκαναν επίσης χρήση της μεθόδου Newmark, υποθέτοντας μια ισοδύναμη ημιτονοειδή καταγραφή φάσματος επιτάχυνσης, ώστε να σχεδιάσουν το μοντέλο τους πρόβλεψης σταθερής μετακίνησης ως εξής:

$$D = N_{eq} \left(\frac{V_{max}^2}{a_{max}}\right) f\left(\frac{a_y}{a_p}\right) \quad (10)$$

όπου: D είναι η πλευρική εδαφική παραμόρφωση, N_{eq} ο ισοδύναμος αριθμός ομαλών κύκλων φόρτισης, V_{max} η μέγιστη ταχύτητα, a_y οριακή επιτάχυνση (g), a_p η μέγιστη επιτάχυνση (g), και f μια αδιάστατη συνάρτηση εξαρτώμενη από την κίνηση της βάσης.

Ο Jibson, R. W. (1994) πρότεινε μία σχέση για πρόβλεψη της πλευρικής εξάπλωσης ως:

$$\text{Log}D = 1,46\text{Log}I_a - 6,642a_y + 1,546 \quad (11)$$

όπου D είναι η πλευρική μετακίνηση σε cm, $I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^\infty a(t)^2 dt$ (Arias Intensity σε μονάδες μήκους ανά χρόνο, $a(t)$ το φάσμα επιτάχυνσης σε μονάδες g, και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Μοντέλο ελάχιστης ενέργειας

Αυτό το μοντέλο αναπτύχθηκε από τους Towhata et al. (1991;1992) βασιζόμενο στα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών. Η τελική θέση του εδαφικού στρώματος προσδιορίζεται από την αρχή της ελάχιστης ενέργειας, κάνοντας χρήση των εξισώσεων μετακίνησης Lagrange, και υποθέτοντας ημιτονοειδή διακύμανση της πλευρικής μετακίνησης με το βάθος και αγνοώντας τις επιπτώσεις της αδράνειας κατά την διάρκεια της δυναμικής φόρτισης.

Ο Tokida et al. (1993) έκαναν χρήση της παραπάνω αρχής και ανέπτυξαν εξισώσεις για μέγιστη πλευρική μετακίνηση στο κέντρο του ολισθαίνοντος πρίσματος ως:

(Από $10\text{m} \leq L \leq 100\text{m}$)

$$D = 1,73 * 10^{-5} L^{1,94} H^{0,298} T^{-0,275} \theta^{0,963} \quad (12)$$

(Από $100\text{m} \leq L \leq 1000\text{m}$)

$$D = 1,29 * 10^{-5} L^{1,99} H^{0,28} T^{-0,243} \theta^{0,995} \quad (13)$$

όπου: D είναι η οριζόντια μετακίνηση (m), L είναι το μήκος της επιφάνειας ολίσθησης (m), H είναι το μέσο πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος σε (m), T είναι η περίοδος του σεισμού σε (sec) και θ η κλίση του εδάφους (%).

2.10 Εμπειρικά μοντέλα

Στα εμπειρικά μοντέλα εκτίμησης των εδαφικών μετακινήσεων λόγω πλευρικής εξάπλωσης, οι μετακινήσεις συσχετίζονται με διάφορες επιλεγμένες παραμέτρους μέσω εξισώσεων παλινδρόμησης, οι συναρτήσεις των οποίων δεν υποστηρίζονται από θεωρητικό υπόβαθρο ή θεμελιώδεις αρχές της φυσικής (έμμεσα υποστηρίζονται από τις παραμέτρους που περιέχονται στις εξισώσεις).

Οι Hamada et al.(1986), Youd and Perkins (1987), Rauch and Martins(1997), Shamoto et al.(1998), Bardet(1999), Youd et al.(2002, 2013) εισήγαγαν εμπειρικά μοντέλα και μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης με σκοπό την εκτίμηση της πλευρικής εξάπλωσης. Οι μέθοδοι του Hamada et al.(1986), Youd and Perkins(1987), Rauch and Martin (1997), Bardet(1999), Youd et al.(2002 και 2013) και Kanibir(2003), αποτελούν εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης και έχουν αναπτυχθεί με την ανάλυση παλινδρόμησης διαθέσιμων πραγματικών ιστορικών πλευρικής εξάπλωσης. Η προβλεπτική προσέγγιση

του Shamoto et al.(1998) χρησιμοποιεί εργαστηριακές εκτιμήσεις μείωσης της διατμητικής αντοχής του εδάφους λόγω ρευστοποίησης και σε συνδυασμό με έναν εμπειρικό συντελεστή συνδέει τις εργαστηριακές τιμές με την παρατηρούμενη συμπεριφορά του πεδίου.

Hamada et al. (1986)

Οι Hamada et al. (1986) δημοσίευσαν διαγράμματα διανυσμάτων οριζόντιας μετακίνησης για πολλές περιοχές που επλήγησαν από την πλευρική εξάπλωση στις πόλεις Νιγκάτα και Νισίρο στην Ιαπωνία το 1964 και 1983 από τους Nihonkai-Chubu σεισμούς, αντίστοιχα. Βασισμένοι στη παρατηρούμενη διάταξη παραμόρφωσης του εδάφους, οι Hamada et al. (1986) διαίρεσαν τις πλευρικές εξαπλώσεις σε διακριτά τεμάχια που φαίνονταν να είχαν μετακινηθεί ως μονάδα. Το μέγεθος της οριζόντιας μετακίνησης, το πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος και μέσος όρος της εδαφικής κλίσης κάθε τεμάχους (οι μέσες τιμές) χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργηθεί η παρακάτω εμπειρική εξίσωση:

$$D_H = 0,75 * T^{0,50} * \theta^{0,33} \quad (14)$$

Όπου D_H = οριζόντια μετακίνηση σε μέτρα; T = το πάχος του ρευστοποιήσιμου στρώματος σε μέτρα; και θ = είτε η κλίση της τοπογραφίας ή η κλίση της βάσης του ρευστοποιήσιμου στρώματος (όποια είναι μεγαλύτερη) σε ποσοστό επί τοις εκατό.

Εύκολα διαπιστώνεται ότι αυτό το μοντέλο είναι πολύ απλό και εύκολο στην χρήση, αλλά βασίζεται σε έναν περιορισμένο αριθμό ιστορικών πλευρικής εξάπλωσης και συνίσταται από δύο μόνο παραμέτρους σχετιζόμενες με την γεωμετρία του πεδίου, χωρίς σεισμικές και γεωτεχνικές παραμέτρους. Για αυτό τον λόγο αυτό το εμπειρικό μοντέλο δεν είναι γενικό και η χρήση του είναι περιορισμένη σε περιπτώσεις με όμοιες συνθήκες.

Ambraseys (1988)

Ο Ambraseys (1988) κάνοντας χρήση προσεισμικών και μετασεισμικών αεροφωτογραφιών, κατάρτισε τιμές του μεγέθους σεισμού, M_w , και την απόσταση από την σεισμική πηγή έως τα πιο απομακρυσμένα παρατηρούμενα φαινόμενα ρευστοποίησης R_f , σε χιλιόμετρα, για διάφορους σεισμούς ανά τον κόσμο και σύνδεσε αυτές τις πληροφορίες με την ακόλουθη εξίσωση:

$$M_w = 0,18 + 9,2 * 10^{-8} * R_f + 0,90 * \log (R_f) \quad (15)$$

Η εξίσωση του Ambrasey's (1988) δεν αναπτύχθηκε για την πρόβλεψη οριζοντίων εδαφικών μετακινήσεων, αλλά δείχνει ότι υπάρχει μια μέγιστη απόσταση, R_i , πέρα από την οποία δεν υπάρχει πιθανότητα ρευστοποίησης ή πλευρικής εξάπλωσης.

Youd and Perkins (1987)

Ο Youd και Perkins (1987) βασίστηκαν σε ιστορικές καταγραφές σεισμών στις Δυτικές ΗΠΑ και στην Αλάσκα. Πρώτοι εισήγαγαν τον δείκτη "σοβαρότητας ρευστοποίησης" (LSI) ως ένα πρόσφορο δείκτη εκτίμησης της μέγιστης αναμενόμενης οριζόντιας μετακίνησης σε μια συγκεκριμένη ρευστοποιήσιμη θέση. Η ακρίβεια του δείκτη (LSI) ήταν περιορισμένη σε περιπτώσεις πλευρικής εξάπλωσης που δημιουργήθηκαν σε ήπιες κλίσεις εδάφους ή σε κανάλια ποταμών με πλάτος μεγαλύτερο των 10 μέτρων. Επιπλέον η βάση δεδομένων για τον δείκτη (LSI) ήταν περιορισμένη για θέσεις μέσης έως και υψηλής επικινδυνότητας ρευστοποίησης, που βρίσκονταν κάτω από πρόσφατες επιχώσεις, με τιμές του δείκτη δηλαδή N από την δοκιμή SPT κυμαινόμενες από 2 έως 10 κρούσεις ανά 0,3m.

Για αυτό τον γεωλογικό τύπο εδάφους ο Youd and Perkins (1987) δέχονται ότι η οριζόντια εδαφική μετακίνηση είναι κυρίως συνάρτηση του πλάτους και της διάρκειας της ισχυρής σεισμικής μετακίνησης. Ωστόσο, επειδή καταγραφές ισχυρών σεισμών δεν υπήρχαν στο ιστορικό συμβάντων σε διάφορους τύπους εδαφών, αποφάσισαν να εκφράσουν το LSI σε όρους μεγέθους σεισμού M , και τον λογάριθμο της απόστασης από την σεισμική πηγή, R .

$$\log(\text{LSI}) = -3,49 - 1,86 * \log(R) + 0,98 * M_w \quad (16)$$

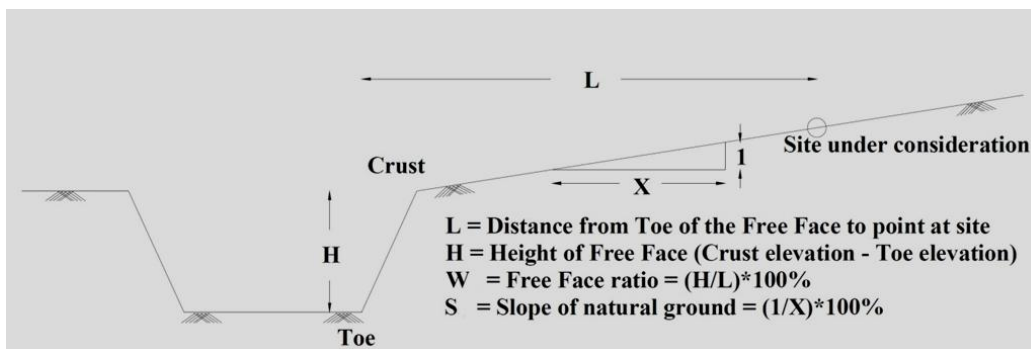
όπου LSI = η μέγιστη αναμενόμενη μόνιμη οριζόντια μετακίνηση σε ίντσες (1 ίντσα = 25mm); R =η κοντινότερη οριζόντια απόσταση από την προβολή στην επιφάνεια της σεισμικής πηγής ή ρήγμα έως το σημείο που μας ενδιαφέρει σε χιλιόμετρα; και M_w = το μέγεθος του σεισμού (Kanamori 1978). Σε περιπτώσεις όμως που η μέγιστη οριζόντια μετακίνηση είχε ξεπεράσει τα 2,5m εξαιρούνταν από τον έλεγχο με την εξίσωση LSI. Αυτές οι μετακινήσεις θεωρήθηκαν τόσο επιζήμιες και ακανόνιστες, οπότε θεωρήθηκε πως επέκταση του LSI για τιμές μετακινήσεων άνω των 2,5m δεν ήταν ουσιαστική για πρακτικές εφαρμογές. Η χρήση αυτού του διπαραμετρικού μοντέλου περιορίζεται σε εδάφη με σεισμικές, γεωτεχνικές και τοπογραφικές συνθήκες όμοιες με αυτές που εμφανίζονται στις δυτικές περιοχές της Βόρειας Αμερικής.

Οι Bartlett and Youd (1990) εισήγαγαν εμπειρικές εξισώσεις πρόβλεψης οριζόντιας μετακίνησης λόγω πλευρικής εξάπλωσης που αποτελεί επακόλουθο της

εδαφικής ρευστοποίησης. Το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης είναι ένα πολύπλοκο, δυναμικό, φυσικό φαινόμενο, που για την ανάλυσή του απαιτείται:

- 1) αξιολόγηση των συνθηκών τοπογραφίας
- 2) αξιολόγηση της μεταβλητότητας της στρωματογραφίας του υπεδάφους καθώς και των ιδιοτήτων του
- 3) υπολογισμό της ευαισθησίας του εδάφους σε ρευστοποίηση
- 4) εκτίμηση της δυνατής εδαφικής μετακίνησης για μια εξαιρετικά μη γραμμική δυναμική διαδικασία

Ένα εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης του μεγέθους της οριζόντιας εδαφικής μετακίνησης που οφείλεται στην πλευρική εξάπλωση, η οποία προκαλείται από την ρευστοποίηση του εδάφους είναι αυτό του Youd and Bartlett (1992, 1995) καθώς και η αναθεώρηση αυτού το 2002 και 2013. Η δημιουργία του μοντέλου βασίστηκε σε πολλαπλές αναλύσεις γραμμικής παλινδρόμησης ιστορικών πλευρικής εξάπλωσης σε περιοχές της Ιαπωνίας και των ΗΠΑ. Δύο γενικοί τύποι πλευρικής εξάπλωσης διακρίνονται: 1) πλευρική εξάπλωση προς ένα ελεύθερο μέτωπο και 2) πλευρική εξάπλωση σε έδαφος με ήπια κλίση όπου δεν παρουσιάζει ελεύθερο μέτωπο. Οι εδαφικές μετακινήσεις συνδέονται άμεσα με τις συνθήκες του ελεύθερου μετώπου και συγκεκριμένα συσχετίζονται άμεσα με το ύψος του ελεύθερου μετώπου και την απόσταση από αυτό. Παρομοίως, εδαφικές μετακινήσεις συνδέονται με τις συνθήκες εδαφικής κλίσης και συσχετίζονται άμεσα με την κλίση της επιφάνειας του εδάφους. Άλλοι παράγοντες όπως το μέγεθος του σεισμού, η απόσταση από την σεισμική πηγή, το πάχος των ρευστοποιήσιμων στρωμάτων και το ποσοστό λεπτών, το μέσο μέγεθος κόκκων αυτών των στρωμάτων συσχετίζονται με την εδαφική μετακίνηση. Το τελικό μοντέλο Youd et al.(2002) έχει προσαρμοστεί για ένα ευρύτερο φάσμα σεισμικών και εδαφικών συνθηκών σε σχέση με παλιότερα εμπειρικά μοντέλα, είναι περισσότερο γενικό και δίνει καλύτερα αποτελέσματα όταν εφαρμόζεται κατάλληλα.



Σχήμα 2-2 Σχηματική αναπαράσταση των δύο γενικών τύπων πλευρικής εξάπλωσης 1) πλευρική εξάπλωση προς ελεύθερο μέτωπο και 2) πλευρική εξάπλωση σε έδαφος με ήπια κλίση. 3) Συνδυασμός και των δύο.

Bardet et al. (1999)

Οι Bardet et. al (1999) βαθμονόμησαν δύο μοντέλα πολλαπλών μεταβλητών γραμμικής παλινδρόμησης με έξι και με τέσσερις παραμέτρους, αντίστοιχα, με σκοπό την πρόβλεψη της πλευρικής εξάπλωσης. Τα μοντέλα καλύπτουν τόσο συνθήκες ελεύθερου μετώπου όσο και ήπιας κλίσης. Το μοντέλο τεσσάρων παραμέτρων είναι πιο προσεγγιστικό σε σχέση με αυτό των έξι και συστήνεται όταν υπάρχει περιορισμός στα δεδομένα από γεωτρήσεις στην περιοχή. Τα μοντέλα είναι τα εξής:

6-παραμέτρων συνδυασμού ελεύθερου μετώπου και κλίσης:

$$\text{Log}(D_H + 0,01) = -15,034 + 1,096M - 0,873\text{Log}R - 0,014R + 0,634\text{Log}W + 0,275\text{Log}S_{gs} + 0,494\text{Log}T_{15} + 4,053\text{Log}(100 - F_{15}) - 0,814\text{Log}(D50_{15}) \quad (17)$$

6-παραμέτρων ελεύθερου μετώπου:

$$\text{Log}(D_H + 0,01) = -17,372 + 1,248M - 0,923\text{Log}R - 0,014R + 0,685\text{Log}W + 0,3\text{Log}T_{15} + 4,826\text{Log}(100 - F_{15}) - 1,091D50_{15} \quad (18)$$

6-παραμέτρων ήπιας κλίσης:

$$\text{Log}(D_H + 0,01) = -14,152 + 0,988M - 1,049\text{Log}R - 0,011R + 0,318\text{Log}S_{gs} + 0,619\text{Log}T_{15} + 4,287\text{Log}(100 - F_{15}) - 0,705D50_{15} \quad (19)$$

4-παραμέτρων συνδυασμού ελεύθερου μετώπου και κλίσης:

$$\text{Log}(D_H + 0,01) = -7,28 + 1,017M - 0,278\text{Log}R - 0,026R + 0,497\text{Log}W + 0,454\text{Log}S_{gs} + 0,558\text{Log}T_{15} \quad (20)$$

4-παραμέτρων ελεύθερου μετώπου:

$$\text{Log}(D_H + 0,01) = -6,968 + 0,972M - 0,271\text{Log}R - 0,027R + 0,497\text{Log}W + 0,584\text{Log}T_{15} \quad (21)$$

4-παραμέτρων ήπιας κλίσης:

$$\text{Log} [(D) _H + 0,01) = -7,586 + 1,109M - 0,233\text{Log}R - 0,025R + 0,477\text{Log}S_{gs} + 0,597\text{Log}T_{15} \quad (22)$$

όπου: D_H είναι η προβλεπόμενη οριζόντια μετακίνηση σε (m), M το μέγεθος του σεισμού, R η οριζόντια κοντινότερη απόσταση στην σεισμική πηγή ή στο κοντινότερο ρήγμα (km), W ο λόγος ελεύθερου μετώπου = H/L (%), H το ύψος του ελεύθερου μετώπου, L η απόσταση από το ελεύθερο μέτωπο έως το σημείο εμφάνισης της μετακίνησης (ρωγμής), S η κλίση της τοπογραφίας (%), T_{15} το πάχος των κορεσμένων στρωμάτων με $N_{1,60} < 15$ (m), F_{15} το μέσο ποσοστό λεπτών, για σωματίδια λεπτότερα των 0,075mm εντός του T_{15} στρώματος (%) και $D50_{15}$ η μέση διάμετρος κόκκων (mm) στο T_{15} στρώμα.

Τα μοντέλα αυτά ακολούθησαν για την εξαγωγή τους την ίδια διαδικασία με το πρώτο μοντέλο του Bartlett and Youd (1992) και στην συνέχεια αναθεωρήθηκαν δύο φορές και παρουσιάστηκαν ξανά ως μοντέλο του Youd et al. (2002), για το οποίο γίνεται αναφορά παρακάτω. Χρησιμοποιούν την ίδια μαθηματική προσέγγιση γραμμικής παλινδρόμησης πολλαπλών μεταβλητών αλλά με χρήση της βάσης δεδομένων του Bartlett (1998), έχοντας έτσι κάποιες μικρές διαφορές στις τιμές των μετακινήσεων σε σχέση με αυτές των Youd et al. (1992). Αυτό το μοντέλο έχει παρόμοιες τιμές παραμέτρων με αυτές των Youd et al. (1992) εκτός από το ότι η παράμετρος R^* αφαιρέθηκε και αντικαταστάθηκε με την R . Επιπλέον εισήχθη μια εξίσωση για συνδυασμό κλίσης- ελεύθερου μετώπου και προτάθηκε μια εξίσωση τεσσάρων παραμέτρων σαν πρώτη εκτίμηση των πλευρικών μετακινήσεων χωρίς την ανάγκη γνώσης γεωλογικών χαρακτηριστικών του υπεδάφους.

Kanibir (2003)

Ο Kanibir (2003) πρότεινε μια ομάδα μοντέλων για πρόβλεψη πλευρικής εξάπλωσης οφειλόμενη στην ρευστοποίηση. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούν τις ίδιες παραμέτρους όπως στην προσέγγιση του Youd et al. (2002), αλλά καλύπτουν και την περίπτωση συνθηκών ελεύθερου μετώπου και ήπιας κλίσης ταυτόχρονα.

Για περίπτωση συνδυασμού ελεύθερου μετώπου και συνθηκών ήπιας κλίσης:

$$\text{Log } D_H = -18,84 + 23,37M - 1,31\text{Log}R^* - 0,009R + 0,06S + 0,09\text{Log}W + 0,46\text{Log}T_{15} - 0,02F_{15} - 0,90\text{Log}(D50_{15} + 0,1\text{mm}) \quad (23)$$

Για περίπτωση ελεύθερου μετώπου:

$$\text{Log } D_H = -20,71 + 25,32M - 1,39\text{Log}R^* - 0,009R + 1,15\text{Log}W + 0,19T_{15}^{0,5} - 0,02F_{15} - 0,84\text{Log}(D50_{15} + 0,1\text{mm}) \quad (24)$$

Για περίπτωση ήπιας κλίσης επιφάνειας:

$$\text{Log } D_H = -7,52 + 8,44\text{Log}M + 0,001R^* - 0,23R + 0,11S + 0,6\text{Log}T_{15} - 0,22F_{15} - 0,89\text{Log}(D50_{15}) \quad (25)$$

Όπου:

D_H είναι η προβλεπόμενη οριζόντια μετακίνηση σε (m), M το μέγεθος του σεισμού, R η οριζόντια κοντινότερη απόσταση στην σεισμική πηγή ή στο κοντινότερο ρήγμα (km), W ο λόγος ελεύθερου μετώπου = $H/L(\%)$, H το ύψος του ελεύθερου μετώπου, L η απόσταση από το ελεύθερο μέτωπο έως το σημείο εμφάνισης της μετακίνησης (ρωγμής), S η κλίση της επιφανείας του εδάφους (%), T_{15} το πάχος των κορεσμένων στρωμάτων με $N_{1,60} < 15(\text{m})$, F_{15} το μέσο ποσοστό λεπτών, για σωματίδια λεπτότερα των $0,075\text{mm}$ εντός του T_{15} στρώματος (%) και $D50_{15}$ η μέση διάμετρος κόκκων (mm) στο T_{15} στρώμα.

Η ανάπτυξη αυτού του εμπειρικού σετ μοντέλων από τον Kanibir (2003) βασίστηκε στην ανάλυση από την πλευρική εξάπλωση στον σεισμό του 1999 στο Kocaeli (Izmit) στην Τουρκία και συγκεκριμένα στην περιοχή της λίμνης Sapanca. Το R^2 αυτών των μοντέλων είναι 74,51%, 76,18% και 72,39% αντίστοιχα.

Youd et al. (2002, 2013)

Το αρχικό μοντέλο των Bartlett and Youd (1992) υπέστη τροποποίηση το 1995. Αργότερα το μοντέλο αναθεωρήθηκε εκ νέου και ξαναπαρουσιάστηκε ως μοντέλο του Youd et al. (2002). Το τελευταίο αναπτύχθηκε με την μέθοδο γραμμικής παλινδρόμησης πολλαπλών μεταβλητών από μια μεγάλη βάση δεδομένων προερχόμενη από τους σεισμούς της Ιαπωνίας και ΗΠΑ. Το μοντέλο περιλαμβάνει δύο σχέσεις που καλύπτουν τις περιπτώσεις ελεύθερου μετώπου και ήπιας κλίσης.

1ο Μοντέλο (2002)

$$\text{Log}D_H = b_0 + b_{off}a + b_1M + b_2\text{Log}R^* + b_3R + b_4\text{Log}W + b_5\text{Log}S + b_6\text{Log}T_{15} + b_7\text{Log}(100 - F_{15}) + b_8\text{Log}(D50_{15} + 0,1 \text{ mm}) \quad (26)$$

όπου,

- DH εκτιμώμενη οριζόντια εδαφική μετακίνηση εξαιτίας της πλευρικής εξάπλωσης σε μέτρα
- M μέγεθος του σεισμού (M_w)
- R η πλησιέστερη απόσταση από την σεισμική πηγή έως το πεδίο σε km

- R^* μεταβλητή που υπολογίζεται από μία μη-γραμμική συνάρτηση μεγέθους σεισμού - απόστασης: $R^* = R + 10^{0,89M-5,64}$
- W ο λόγος ύψους του ελεύθερου μετώπου προς την οριζόντια απόσταση μεταξύ της βάσης του ελεύθερου μετώπου έως το σημείο που μας ενδιαφέρει (%)
- S η κλίση του εδάφους (%)
- T_{15} αθροιστικό πάχος σε μέτρα των κορεσμένων, μη συνεκτικών ιζημάτων στο προφίλ του εδάφους με διορθωμένο αριθμό κρούσεων SPT, $N_{1,60} \leq 15$
- F_{15} το μέσο ποσοστό λεπτών (ποσοστό ιζημάτων που περνούν από το Νο200 κόσκινο) των υλικών που συνιστούν το T_{15} (%)
- $D50_{15}$ μέση διάμετρος κόκκου των υλικών που συνιστούν το T_{15}
- α μια μεταβλητή που εξαρτάται από τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής που μας ενδιαφέρει. Για συνθήκες κεκλιμένου εδάφους, το α παίρνει τιμή μηδέν, και το W ορίζεται σε τιμή 1, ενώ το S παίρνει την εκτιμηθείσα τιμή κλίσης εδάφους (%). Για συνθήκες ελεύθερου μετώπου, το α και το S παίρνουν τιμή 1, και εισάγονται συγκεκριμένες τιμές ανάλογα με το σημείο που μας ενδιαφέρει $W(\%)$.

Οι Youd et al.2002 υπολόγισαν τους ακόλουθους συντελεστές συσχέτισης, μέσω της διαδικασίας γραμμικής παλινδρόμησης, για την παραπάνω εξίσωση:

$$b_0 = -16,213, b_{off} = -0,500, b_1 = 1,532, b_2 = -1,406, b_3 = -0,012, \\ b_4 = 0,592, b_5 = 0,338, b_6 = 0,540, b_7 = 3,413 \text{ και } b_8 = -0,795$$

Οπότε:

Για συνθήκες ελεύθερου μετώπου:

$$\text{Log } D_H = -16,713 + 1,532M - 1,406\text{Log}R^* - 0,012R + 0,592\text{Log}W + 0,540\text{Log}T_{15} + \\ 3,413\text{Log}(100 - F_{15}) - 0,795\text{Log}(D50_{15} + 0,1\text{mm}) \quad (27)$$

Για συνθήκες ήπιας κλίσης εδάφους:

$$\text{Log } D_H = -16,213 + 1,532M - 1,406\text{Log}R^* - 0,012R + 0,338\text{Log}S + 0,540\text{Log}T_{15} + \\ 3,413\text{Log}(100 - F_{15}) - 0,795\text{Log}(D50_{15} + 0,1\text{mm}) \quad (28)$$

Το ανωτέρω εμπειρικό μοντέλο λαμβάνει υπόψη του παραμέτρους που σχετίζονται με την σεισμική καταγραφή, την τοπογραφία και τα εδαφικά χαρακτηριστικά του πεδίου. Η χρήση ωστόσο του μοντέλου έχει πολλούς περιορισμούς, όπως: είναι εφαρμοστέο για περιπτώσεις ευρείας πλευρικής εξάπλωσης και όχι για πλευρική εξάπλωση σε συγκεκριμένο σημείο, η εξίσωση με συνθήκες ελεύθερου μετώπου

χρησιμοποιείται όταν $5 \leq W \leq 20\%$, ενώ η εξίσωση για συνθήκες ήπιας κλίσης όταν $W \leq 1\%$. Αυτό το σύστημα περιορισμού του W είναι ασυνεχές και δεν δίνει εξηγήσεις για τις περιπτώσεις που οι τιμές του W βρίσκονται εκτός αυτού του εύρους τιμών. Επιπλέον αυτό το μοντέλο είναι έγκυρο για περιοχές τιμών των παραμέτρων: $6 \leq M_w \leq 8$, $0,1 \leq S \leq 6\%$ και $1 \leq T_{15} \leq 15m$ και ένα συνολικό βάθος μέχρι την κορυφή του ρευστοποιήσιμου υποστρώματος να κυμαίνεται από 1 έως 10m. Το μοντέλο δεν είναι έγκυρο όταν οι αποστάσεις από την σεισμική πηγή είναι κοντινότερη από τις εξής περιπτώσεις:

Πίνακας 2-1 Περιοχές τιμών παραμέτρων

M_w	6	6,5	7	7,5	8
R (km)	0,5	1	5	10	20-30

Τέλος, το μοντέλο δεν είναι εφαρμόσιμο για χαλικώδη και πολύ ιλυώδη εδάφη ενώ δεν περιέχει λύσεις για περιπτώσεις ήπιας κλίσης εδάφους μαζί με κατακόρυφο μέτωπο.

Τροποποιήσεις στο μοντέλο του Youd et al. (2002)

2ο Μοντέλο Απλοποιημένη Μέθοδος

Λόγω έλλειψης τιμών F_{15} και $D_{50_{15}}$ από γεωτρήσεις με SPT, οι Bardet et al. (2002) πρότειναν ένα τροποποιημένο εμπειρικό μοντέλο MLR που δεν εμπεριέχει αυτές τις μεταβλητές. Μετά την αφαίρεση αυτών των μεταβλητών το απλοποιημένο εμπειρικό μοντέλο που προκύπτει έχει την γενική μορφή που φαίνεται παρακάτω:

$$\text{Log}D_H = b_0 + b_{\text{off}}a + b_1M + b_2\text{Log}R^* + b_3R + b_4\text{Log}W + b_5\text{Log}S + b_6\text{Log}T_{15} \quad (29)$$

Όπου οι συντελεστές συσχέτισης είναι οι εξής:

$$b_0 = -9,087, \quad b_{\text{off}} = -0,353, \quad b_1 = 1,428, \quad b_2 = -0,902, \quad b_3 = -0,020, \\ b_4 = 0,401, \quad b_5 = 0,293, \quad b_6 = 0,560$$

Πίνακας 2-2 Ανάλυση αποτελεσμάτων διακύμανσης 1ου μοντέλου

Πηγή διακύμανσης	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμός ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο
Παλινδρόμηση	93,53	9	10,3923
Σφάλμα	18,39	474	0,0388
Συνολικά	111,92	483	
Σημείωση:	$R^2 = 83,3 \%$		

Πίνακας 2-3 Ανάλυση αποτελεσμάτων διακύμανσης 2ου μοντέλου

Πηγή διακύμανσης	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμός ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο
Παλινδρόμηση	74,56	7	10,6520
Σφάλμα	37,35	476	0,0785
Συνολικά	111,92	483	
Σημείωση:	$R^2 = 66,1 \%$		

Gillins and Bartlett (2013) - γνωστό ως μοντέλο Youd et al. (2013)

Η συνολική έλλειψη προσαρμογής του απλοποιημένου μοντέλου του Youd et al. (2002) με λόγο συσχέτισης μόλις 66,1% , εξαιτίας της απαλοιφής των όρων μέσου ποσοστού λεπτών (F_{15}) και της μέσης διαμέτρου κόκκου ($D_{50_{15}}$) , οδήγησε στην δημιουργία ενός νέου μοντέλου. Πρόκειται για ένα πρόσφατο μοντέλο που εισήγαγαν οι Gillins and Bartlett, και η διαφορά σε σχέση με αυτό του Youd et al. (2002) έγκειται στο γεγονός ότι δεν γίνεται χρήση του μέσου ποσοστού λεπτών (F_{15}) και της μέσης διαμέτρου κόκκου ($D_{50_{15}}$) αλλά χρησιμοποιεί έναν νέο δείκτη εδάφους ορισμένο ως SI (Soil Index). Αυτός ο δείκτης επιτρέπει μια γενική περιγραφή του εδάφους της γεώτρησης. Πριν γίνει αυτή η αντικατάσταση στο μοντέλο του 2002, ελέγχθηκε η βάση δεδομένων για την συνοχή των αποτελεσμάτων μεταξύ του δείκτη περιγραφής του εδάφους SI και των μετρημένων τιμών ποσοστού λεπτών (F_{15}) και μέσης διάμετρου κόκκου ($D_{50_{15}}$), ώστε να εξασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρξουν μεγάλα σφάλματα κατά την εισαγωγή του νέου δείκτη. Οι τιμές του SI είναι από 1 έως 6 και κάθε ακέραια τιμή περιγράφει και έναν τύπο εδάφους όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Με την εισαγωγή των μεταβλητών περιγραφής του εδάφους, το τροποποιημένο μοντέλο περιγράφεται ως εξής:

$$\text{Log}D_H = b_0 + b_{off}a + b_1M + b_2\text{Log}R^* + b_3R + b_4\text{Log}W + b_5\text{Log}S + b_6\text{Log}T_{15} + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \quad (30)$$

όπου x_i = το πάχος στρωμάτων στο εδαφικό προφίλ τα οποία περιλαμβάνουν τα T_{15} με τιμή $SI = i$, διαιρεμένα με το συνολικό πάχος ρευστοποιήσιμου εδάφους T_{15} . (T_{15} τα πάχη στο προφίλ της γεώτρησης με $SPT N_{1,60} < 15$)

Πίνακας 2-4 Ανάλυση αποτελεσμάτων διακύμανσης μοντέλου Youd (2013)

Typical soil descriptions in database	SI	n	\overline{D}_{50} (mm)	σ_{D50} (mm)	\overline{FC} (%)	σ_{FC} (%)	General USCS symbol
Silty gravel with sand, silty gravel, fine gravel	1	5	6.45	4.28	19.9	5.6	GM
Very coarse sand, sand and gravel, gravelly sand	2	8	2.11	0.77	6.8	6.3	GM-SP
Coarse sand, sand with some gravel	2	33	0.63	0.18	7.3	4.5	SP
Sand, medium to fine sand, sand with some silt	3	80	0.34	0.02	4.8	2.4	SP-SM
Fine sand, sand with silt	4	50	0.17	0.04	14.6	11.0	SM
Very fine sand, silty sand, dirty sand, silty/clayey sand	4	41	0.10	0.03	37.0	11.3	SM-ML
Sandy silt, silt with sand	5	34	0.07	0.08	61.2	9.4	ML
Nonliquefiable material (not part of T_{15})	6	—	—	—	—	—	CL

Οι συντελεστές συσχέτισης για το παραπάνω μοντέλο είναι:

$b_0 = -8,208$, $b_{off} = -0,344$, $b_1 = 1,318$, $b_2 = -1,073$, $b_3 = -0,016$, $b_4 = 0,445$, $b_5 = 0,337$, $b_6 = 0,592$, $\alpha_1 = -0,683$, $\alpha_2 = 1,200$, $\alpha_3 = 0,252$, $\alpha_4 = -0,040$ και $\alpha_5 = -0,535$.

Πίνακας 2-5 Ανάλυση αποτελεσμάτων διακύμανσης μοντέλου Youd (2013)

Πηγή διακύμανσης	Άθροισμα τετραγώνων	Βαθμός ελευθερίας	Μέσο τετράγωνο
Παλινδρόμηση	88,46	12	7,3717
Σφάλμα	23,46	471	0,0498
Συνολικά	111,92	483	
Σημείωση:	$R^2 = 78,5\%$		

Ο λόγος συσχέτισης του νέου μοντέλου είναι $R^2 = 79\%$ μόνο 4,3% λιγότερο από το μοντέλο του 2002. Οι τιμές των συντελεστών "α" δηλώνουν πως το είδος του εδάφους επηρεάζει την πλευρική μετακίνηση. Για παράδειγμα ο μεγαλύτερος από αυτούς τους συντελεστές, α_3 , δείχνει ότι λεπτή προς μέση διάμετρο άμμος, με μικρό ποσοστό λεπτών (SP-SM), σχετίζεται με μεγαλύτερες μετακινήσεις σε σχέση με άλλους τύπους εδαφών. Πολύ λεπτά ή χαλικώδη υλικά, όπως ιλυώδης άμμος (ML), έχουν αρνητική επιρροή που σημαίνει ότι παράγουν μικρότερες μετακινήσεις κατά μέσο όρο συγκρινόμενα με την μέση εκτιμώμενη τιμή μετακίνησης από το μοντέλο.

Για να γίνει πιο φανερό, πώς ο τύπος εδάφους και το πάχος του επηρεάζει το μέγεθος της πλευρικής μετακίνησης, ο όρος T_{15} μπορεί να αντικατασταθεί από έναν ισοδύναμο όρο καθαρής άμμου $T_{15,CS}$. Ο όρος $T_{15,CS}$ ορίζεται σαν τιμή T_{15} για λεπτή-μέση καθαρή άμμο μόνο, που υφίσταται στην περίπτωση όπου $x_3 = 1$ και όλα τα άλλα $x = 0$.

Το $T_{15,CS}$ υπολογίζεται ως εξής, με χρήση των τελευταίων έξι όρων του μοντέλου:

$$b_6 \text{Log} T_{15} + (\alpha)(x) = b_6 \text{Log} T_{15} + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 \quad (31)$$

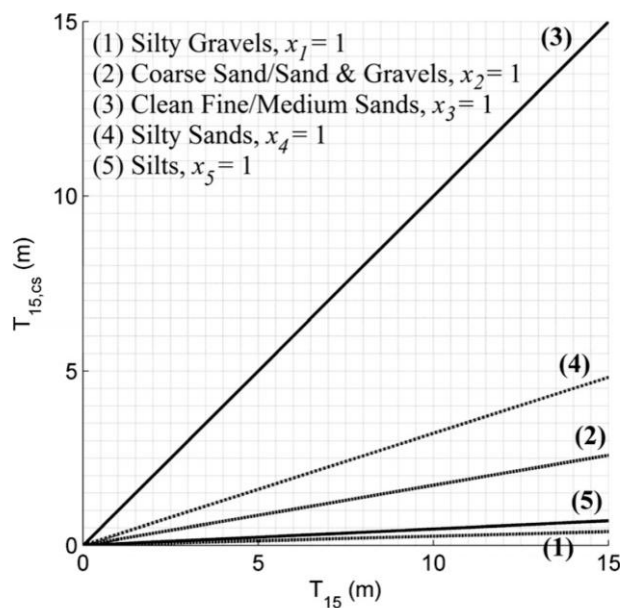
όπου (α) είναι ένα διάνυσμα από το α₁ έως το α₅ και (x) ένα διάνυσμα από το x₁ έως το x₅. Εισάγοντας στο δεξιό μέλος της εξίσωσης όπου T₁₅ το T_{15CS} και x₁ = x₂ = x₃ = x₄ = x₅ = 0 και x₃ = 1 προκύπτει:

$$b_6 \text{Log} T_{15} + (a)(x) = b_6 \text{Log} T_{15,cs} + a_3 \quad (32)$$

Λύνοντας ως προς T_{15,cs} προκύπτει:

$$T_{15,cs} = T_{15} * 10^{\left[\frac{(a)(x)-a_3}{b_6}\right]} \quad (33)$$

Η χρήση μιας μεταβλητής δείχνει πως ο τύπος του εδάφους και το πάχος του ταυτόχρονα, επηρεάζουν την πλευρική εξάπλωση. Για παράδειγμα, στο παρακάτω διάγραμμα T_{15,cs}-T₁₅ για διάφορους τύπους εδαφών, κρατώντας όλες τις άλλες ανεξάρτητες μεταβλητές του μοντέλου σταθερές (δηλαδή M, R, W, S), παρατηρούμε ότι 1m κορεσμένης καθαρής λεπτής έως μέσης άμμου με N_{1,60}<15 θα παρουσιάσει την ίδια πιθανή μετακίνηση με περισσότερα από 15 μέτρα πάχους από κορεσμένο έδαφος που είναι ή χάλικες ή ιλύς με N_{1,60}<15.



Σχήμα 2-3 Διάγραμμα ισοδύναμης καθαρής άμμου (T_{15,cs}) - Αθροιστικού ρευστοποιήσιμου πάχους (T₁₅).

Shamoto et al. (1998)

Η προσέγγιση του Shamoto et al. (1998) χρησιμοποιεί εκτιμήσεις της πλευρικής μετακίνησης του εδάφους βασισμένες σε εργαστηριακές δοκιμές. Αυτές τις εργαστηριακές τιμές τις συσχετίζει μέσω ενός συντελεστή προσαρμογής με την συμπεριφορά σε συνθήκες πεδίου. Οι προβλεπόμενες πλευρικές μετακινήσεις, βασισμένες σε εργαστηριακές δοκιμές ελάχιστης διατμητικής αντοχής, πολλαπλασιάζονται με έναν συντελεστή 0,16 με σκοπό την πρόβλεψη πλευρικής μετακίνησης εδαφών χωρίς κλίση. Τα εδαφικά δοκίμια συλλέχθηκαν από δώδεκα σεισμογενείς περιοχές στην Ιαπωνία και η γενική ταξινόμηση αυτών των εδαφών ήταν καθαρή άμμος, χωρίς ποσοστό λεπτών ($FC=0$). Η μαθηματική έκφραση του μοντέλου είναι η εξής:

$$D_h = C_h x (D_h)_{max} = C_h x \int_0^H (\gamma_r)_{max} dz \quad (34)$$

$$(\gamma_r)_{max} = \frac{e_0 - e_{min}^*}{1 + e_0} \frac{R_0^*}{M_{CS0}} \gamma_{max}^m \quad (35)$$

όπου: D_h είναι η πλευρική μετακίνηση, C_h ο παράγων συσχέτισης μεταξύ παρατηρούμενης και προβλεπόμενης μετακίνησης (0,16 για οριζόντιο έδαφος, και 1,0 για εδάφη με κλίση ή ελεύθερο μέτωπο), H είναι το μέγιστο υπό εξέταση κατακόρυφο βάθος (m), z είναι το κατακόρυφο βάθος κάτω από την επιφάνεια του εδάφους (m), $\gamma_{r_{max}}$ η μέγιστη παραμένουσα διατμητική αντοχή, e_0 ο αρχικός δείκτης κενών, $e_{min}^* = e_{max} - 1,3(e_{max} - e_{min})$, e_{max} μέγιστος δείκτης κενών, e_{min} ελάχιστος δείκτης κενών, $R_0^* (= 2,0)$ είναι μια σταθερά ανεξάρτητη από τον τύπο της άμμου, $M_{CS0} = 0,142 * M_{CS}$, M_{CS} είναι ο κρίσιμος παρεκκλίνων ισοτροπικός λόγος, $m (=0,76)$ είναι μια σταθερά ανεξάρτητη από τον τύπο της άμμου, και γ_{max} μέγιστη διατμητική παραμόρφωση.

Οι φανεροί περιορισμοί αυτού του εργαστηριακού εμπειρικού μοντέλου είναι ότι προέρχεται από αποτελέσματα πειραματικής εργασίας και είναι αρκετά επηρεασμένο από τα εδάφη της Ιαπωνίας που είναι καθαρή άμμος καθώς και σχετίζεται με τα σεισμικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής.

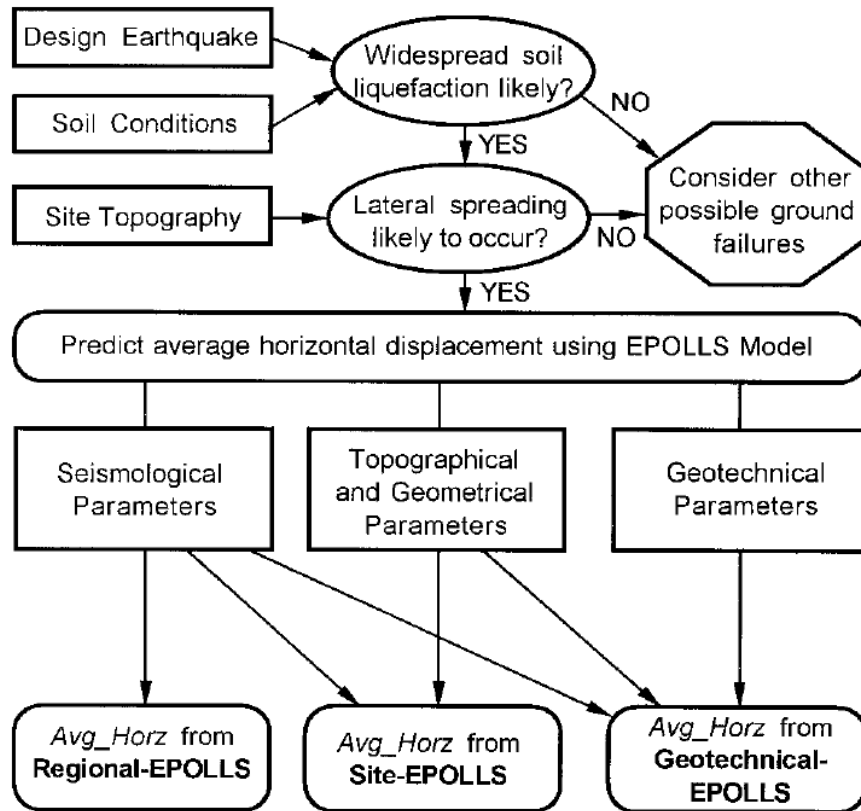
Μοντέλο EPOLLS Rauch and Martin (2000)

Πρόκειται για ένα εμπειρικό μοντέλο, ονομαζόμενο EPOLLS, που δημιουργήθηκε για την πρόβλεψη επιφανειακών εδαφικών μετακινήσεων εξαιτίας πλευρικής εξάπλωσης οφειλόμενη στην ρευστοποίηση. Η πλευρική εξάπλωση ορίζεται ως η πιο μεγάλη οριζόντια παραμόρφωση εδάφους ήπιας κλίσης, ως αποτέλεσμα της ρευστοποίησης. Το EPOLLS (Empirical Prediction Of Liquefaction-induced Lateral Spreading), δηλαδή Εμπειρική Πρόβλεψη Πλευρικής Εξάπλωσης λόγω Ρευστοποίησης, είναι ένα μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της μέσης οριζόντιας επιφανειακής μετακίνησης που μπορεί να δημιουργηθεί σε μια πιθανή θέση πλευρικής εξάπλωσης. Το μοντέλο διακρίνεται σε 3 επιμέρους μοντέλα οριζόμενα ως Regional-EPOLLS (περιφερειακό - EPOLLS) , Site-EPOLLS (θέσης), και Geotechnical-EPOLLS (γεωτεχνικό). Τα τρία αυτά μοντέλα επιτρέπουν προοδευτικά καλύτερη πρόβλεψη με την προσθήκη περισσότερων παραμέτρων πεδίου. Το μοντέλο αποτελείται από απλές αλγεβρικές εξισώσεις με τέσσερις έως εννέα παραμέτρους που αντιπροσωπεύουν το σεισμό, την τοπογραφία και την κατάσταση του υπεδάφους. Το μοντέλο EPOLLS δημιουργήθηκε με πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση ανάλυση δεδομένων από 71 περιπτώσεις πλευρικής εξάπλωσης.

Το παρακάτω διάγραμμα ροής απεικονίζει την εφαρμογή του μοντέλου EPOLLS ανάλογα με την διαθεσιμότητα διαφόρων παραμέτρων. Το μοντέλο είναι κατάλληλο για την πρόβλεψη μετακινήσεων σε περιοχές όπου αναμένεται ρευστοποίηση και πλευρική εξάπλωση. Το μοντέλο EPOLLS δεν προορίζεται να προβλέψει αν μπορεί να γίνει πλευρική εξάπλωση , αλλά να προσδιορίσει τις δυνατές παραμορφώσεις όπου αναμένεται πλευρική εξάπλωση. Ο σχεδιασμός του μοντέλου είναι τέτοιος ώστε να επιτρέπει την χρήση περισσότερων ή λιγότερων πληροφοριών από το πεδίο, διαχωριζόμενο σε τρία συμπληρωματικά μοντέλα.

Η μέθοδος EPOLLS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την σταδιακή αξιολόγηση του πεδίου ξεκινώντας με εκτιμήσεις εξαρτώμενες μόνο από τις σεισμικές παραμέτρους, σε πιο ακριβείς προβλέψεις μετακινήσεων με πιο λεπτομερείς πληροφορίες και των εδαφικών χαρακτηριστικών του πεδίου που μας ενδιαφέρει.

Στα επόμενα δίνονται οι εξισώσεις των μοντελων R, S και G-EPOLLS και γίνεται αναλυτικότερη περιγραφή τους:



Το **R-EPOLLS** προσαρμόσθηκε σε 68 μελέτες ιστορικών πλευρικής εξάπλωσης. Η προσαρμοσθείσα εξίσωση παλινδρόμησης είναι:

$$\sqrt{\text{Avg_Horz}} = 0,613M_W - 0,0139R_f - 2,42A_{\max} - 0,0114T_d - 2,21 \quad (36)$$

Το **S-EPOLLS**: συμπεριλαμβάνει επιπλέον του R τοπογραφικές και γεωμετρικές παραμέτρους. Οι σεισμολογικές παράμετροι παραμένουν ίδιες, αλλάζουν βέβαια οι συντελεστές συσχέτισης των διαφόρων παραμέτρων. Οπότε η εξίσωση S-EPOLLS είναι η παρακάτω (προσαρμοσμένη σε 57 ιστορικά):

$$\sqrt{\text{Avg_Horz}} = 0,613M_W - 0,0139R_f - 2,42A_{\max} - 0,0114T_d + 0,000523L_{\text{slide}} + 0,0423S_{\text{top}} + 0,0313H_{\text{face}} - 2,44 \quad (37)$$

Το **G-EPOLLS** που είναι το πιο ολοκληρωμένο σε βάση παραμέτρων μοντέλο που μπορεί να δώσει και τις πιο ακριβείς προβλέψεις μετακινήσεων. Το μοντέλο αυτό επιπλέον του S περιλαμβάνει και χαρακτηριστικά του υπεδάφους της εξεταζόμενης περιοχής, συγκεκριμένα δύο γεωτεχνικές παραμέτρους το Z_{FSmin} και το Z_{liq} μέσο βάθος όπου εμφανίζεται ο ελάχιστος συντελεστής ασφάλειας FS έναντι πιθανής ρευστοποίησης σε μέτρα και μέσο βάθος της κορυφής του ρευστοποιήσιμου στρώματος αντίστοιχα.

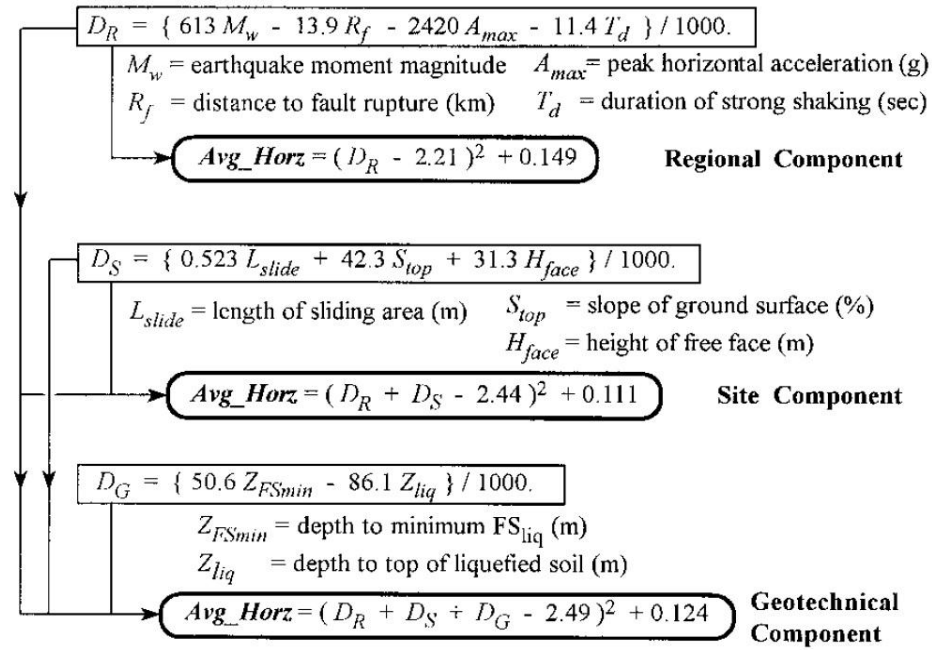
$$\sqrt{\text{Avg_Horz}} = 0,613M_w - 0,0139R_f - 2,42A_{\max} - 0,0114T_d + 0,000523L_{\text{slide}} + 0,0423S_{\text{top}} + 0,0313H_{\text{face}} + 0,0506Z_{\text{FSmin}} - 0,0861Z_{\text{liq}} - 2,49 \quad (38)$$

Το μοντέλο EPOLLS για πρόβλεψη μέσης οριζόντιας μετακίνησης οργανώνεται σε 3 επιμέρους μέρη R-, S-, και Geotechnical-EPOLLS. Με την εισαγωγή τριών όρων D_R , D_S και D_G απλοποιείται η παρουσίαση του μοντέλου. Συνολικά απαιτούνται εννέα παράμετροι για τον πλήρη προσδιορισμό, όπως φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2-6 Προσδιορισμός μεταβλητών για το EPOLLS

Μεταβλητές	Μονάδες	Περιγραφή
M_w	-	Μέγεθος σεισμού
R_f	km	Επικεντρική απόσταση από το πεδίο έως το ρήγμα
A_{\max}	g	Μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση που εμφανίστηκε στο πεδίο εξαιτίας του σεισμού
T_d	s	Διάρκεια ισχυρού σεισμού ορισμένη ως ο χρόνος μεταξύ πρώτης και τελευταίας εδαφικής επιτάχυνσης $\geq 0,05$ g
L_{slide}	m	Μέγιστο οριζόντιο μήκος από το κατακόρυφο μέτωπο μέχρι και το τελευταίο σημείο που εμφανίζονται ρωγμές λόγω πλευρικής εξάπλωσης
S_{top}	%	κλίση εδάφους
H_{face}	m	ύψος κατακόρυφου μετώπου
Z_{FSmin}	m	μέσο βάθος εμφάνισης ελάχιστου συντελεστή ασφάλειας σε ένα εν δυνάμει ρευστοποιήσιμο έδαφος
Z_{liq}	m	Μέσο βάθος έως την κορυφή του ρευστοποιήσιμου εδάφους.

Σημειώνεται ότι ο υπολογισμός του Z_{liq} και του Z_{FSmin} γίνεται με το προφίλ SPT της γεώτρησης, αλλά μπορούν να προσδιοριστούν και από άλλες κατάλληλες επί τόπου δοκιμές. Τέλος, επειδή τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά προέρχονται από την Δυτική Ακτή και Βόρεια Αμερική καθώς και Ανατολικά νησιά της Ασίας η αξιοπιστία του μοντέλου εκτός αυτών των περιοχών, όπου τα χαρακτηριστικά σεισμικής απόσβεσης μπορούν να διαφέρουν σημαντικά, είναι άγνωστη.



Limits on input parameters

M_w	6.5	9.2	—
R_f	0.0	119	km
A_{max}	0.16	0.52	g
T_d	4	88	sec
L_{slide}	20	1,360	m
S_{top}	-0.7	5.2	%
H_{face}	0.0	9.0	m
Z_{FSmin}	2.4	12.4	m
Z_{liq}	0.9	7.3	m

(b) Limits on combined factors used in model components

D_R	2.57	3.88	$m^{0.5}$
$D_R + D_S$	2.81	4.35	$m^{0.5}$
$D_R + D_S + D_G$	2.82	4.53	$m^{0.5}$

(c) Range of predicted *Avg_Horz* corresponding to limits in (b)

<i>Avg_Horz</i> from R-EPOLLS	0.28	2.94	m
<i>Avg_Horz</i> from S-EPOLLS	0.25	3.67	m
<i>Avg_Horz</i> from G-EPOLLS	0.23	4.29	m

Σχήμα 2-4 Συνοπτική παρουσίαση των μοντέλων E-POLLS, των μεταβλητών που απαιτούνται για την εφαρμογή του καθενός και των περιορισμό στις τιμές των παραμέτρων.

2.11 Σύγκριση των διαφορετικών προσεγγίσεων

Οι διαφορετικές αναλυτικές και αριθμητικές διαδικασίες που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι μηχανικές μέθοδοι που προσπαθούν να μοντελοποιήσουν, με διαφορετικό βαθμό απλούστευσης η καθεμία, την φυσική συμπεριφορά της πλευρικής εξάπλωσης εξαιτίας ρευστοποίησης. Εν τούτοις, τα εμπειρικά μοντέλα, δεν προσπαθούν να εξηγήσουν τις μηχανικές συμπεριφορές του συστήματος: σκοπός τους είναι να παρουσιάσουν την παρατηρούμενη σχέση μεταξύ μετακινήσεων και διαφορετικών σεισμικών, τοπογραφικών και γεωτεχνικών παραμέτρων που σχετίζονται με το εκάστοτε πεδίο.

Λόγω της δυσκολίας στον προσδιορισμό των εισαγόμενων παραμέτρων, και των μη ικανοποιητικών τιμών στα διαθέσιμα μηχανικά μοντέλα, τα εμπειρικά μοντέλα αποτελούν μια καλύτερη προσέγγιση από άποψη απλότητας στην εφαρμογή και αξιοπιστία αποτελεσμάτων. Εάν ένα εμπειρικό μοντέλο διατυπωθεί σωστά, έχει το πλεονέκτημα ότι βασίζεται άμεσα στην παρατηρούμενη συμπεριφορά πεδίου. Επιπλέον, τα εμπειρικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία και επικύρωση πιο πολύπλοκων μηχανικών μοντέλων ή ανέξοδα να βοηθήσουν στην εξακρίβωση του τύπου εδάφους στο εξεταζόμενο πεδίο. Για την κατασκευή τους ωστόσο πρέπει να επιλέγονται σχετικές με το φαινόμενο παράμετροι και να βαθμονομούνται με ακρίβεια από ένα ικανοποιητικά μεγάλο δείγμα πραγματικών καταγραφών. Για το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης αυτή είναι μια δυσχερής αλλά κρίσιμη και απαραίτητη διαδικασία. (Glaser 1994).

3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

3.1 Εισαγωγή

Η Κεφαλονιά (Κεφαλληνία) είναι το μεγαλύτερο και περισσότερο ορεινό νησί των Επτανήσων και το τρίτο σε πληθυσμό, μετά την Κέρκυρα και τη Ζάκυνθο. Βρίσκεται απέναντι από την είσοδο του Πατραϊκού Κόλπου, βόρεια της Ζακύνθου, νότια της Λευκάδας και δυτικά της Ιθάκης.

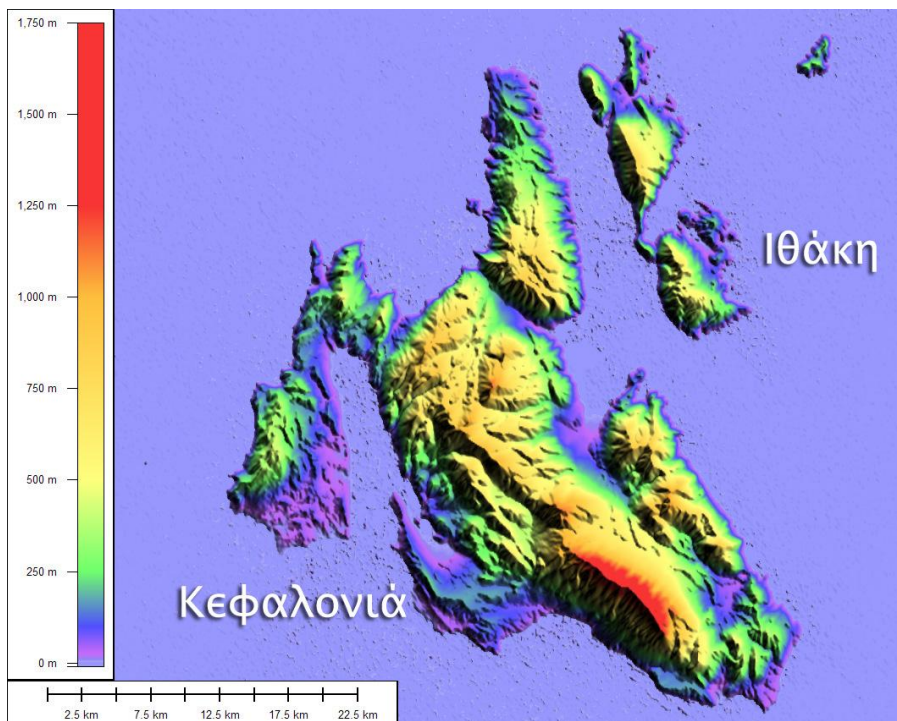


Σχήμα 3-1 Χάρτης της Κεφαλονιάς με τις θέσεις των σημαντικότερων πόλεων και οικισμών.

Οι διάφορες τεκτονικές μετακινήσεις, οι οποίες έχουν τη ρίζα τους στις δύο τεράστιες λιθοσφαιρικές πλάκες, την Ευρωπαϊκή και την Αφρικανική, των οποίων οι άκρες

συναντώνται και τρίβονται η μία επάνω στην άλλη, βαθιά κάτω από το νησί, δημιουργούν στην επιφάνεια όλη αυτή τη «φυσική ομορφιά».

Η Κεφαλονιά έχει έκταση περίπου 781 τ.χλμ. και 35.801 κατοίκους. Τα βουνά, με πρώτο τον Αίνο, που συνιστά κατάφυτο εθνικό δρυμό, τα ακρωτήρια, οι αναρίθμητες σπηλιές, οι παραλίες δημιουργήθηκαν και συνεχίζουν να δημιουργούνται μέσα από τη δραστηριότητα διαφόρων ειδών ρηγμάτων που δεν ησύχασαν ποτέ εδώ και πολλές χιλιετίες. Μεγάλο μέρος της έκτασης του νησιού καταλαμβάνει η οροσειρά Αίνος που έχει χαρακτηριστεί ως Εθνικός δρυμός, με σημαντικότερες κορυφές τις Μέγας Σωρός (1.628μ.), Αγία Δυνατή (1.131μ.), Ευμορφία (1.043μ.) και Κόκκινη Ράχη (1.078μ.) Οι σημαντικότερες πεδιάδες είναι αυτές της Κραναίας, της χερσονήσου Παλικής, του Αρακλείου και της Σάμης.



Σχήμα 3-2 Χάρτης ανάγλυφου της Κεφαλονιάς

Οι ακτές της Κεφαλονιάς σχηματίζουν πολλούς κόλπους και ακρωτήρια. Σπουδαιότεροι κόλποι είναι αυτοί της Σάμης, του Μύρτου, του Λουρδά, του Αθέρα, του Φισκάρδου, του Λιβαδιού και του Αργοστολίου, γνωστού και ως Κουτάβου. Κυριότερα ακρωτήρια είναι (αρχίζοντας από το νότο και προχωρώντας με ανατολική κατεύθυνση) η Μούντα, η Κάπρος, το Σαρακήνικο, ο Μύτικας, το Κεντρί, το βορεινό Δαφνούδι, στα βορειοδυτικά ο Αθέρας, στα δυτικά τα Ορθολίθια, η Σκίζα και ο Γερόγομπος και νοτιότερα το Ακρωτήριο και η Αγία Πελαγία, ο Λιάκας, ο Καστανάς κ.ά. Οι ακτές είναι γενικά βραχύδεις και απότομες προς το Ιόνιο, ενώ έχουν ηπιότερους σχηματισμούς προς την ανατολική πλευρά. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα σπήλαια του νησιού, όπως τα

βαραθρώδη Μελισσάνη, Αγκαλάκι, Αγίων Θεόδωρων, Ζερβάτη, η Σπηλιά Δρογκαράτη, το σπήλαιο Σάκκου κ.ά.



Σχήμα 3-3 Σπήλαιο Μελισσάνη

Η παραλία Μύρτος στην βορειοδυτική πλευρά του νησιού έχει ψηφιστεί 11 φορές ως η καλύτερη ελληνική θάλασσα σύμφωνα με την ετήσια ψηφοφορία του Υ.ΠΕ.ΧΩ.ΔΕ. Στη δυτική πλευρά του νησιού και συγκεκριμένα στην Παλική βρίσκονται οι παραλίες των Πετανών και της Πλατιάς Άμμου.

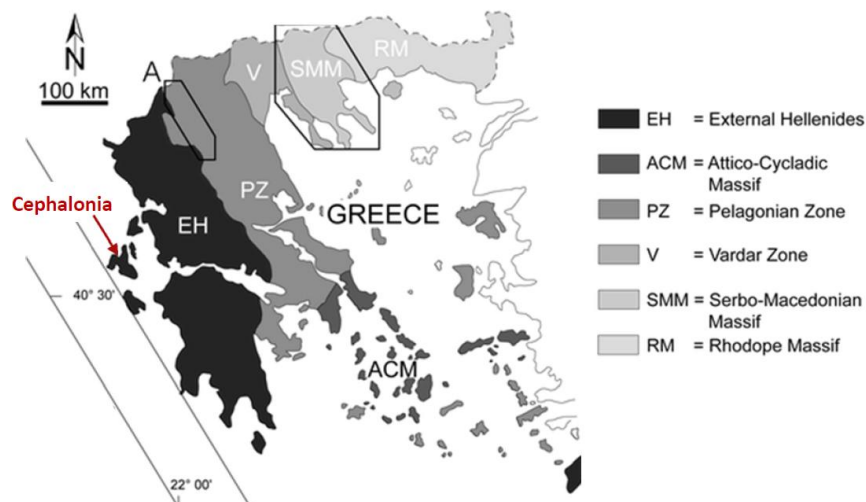


Σχήμα 3-4 Η παραλία Μύρτος

3.2 Γεωλογική-Στρωματογραφική επισκόπηση

Γεωλογική εξέλιξη του Ελλαδικού χώρου

Η γεωλογική εξέλιξη του ελλαδικού ορογενούς περιγράφηκε ικανοποιητικά για πρώτη φορά από τον Aubouin (1959, 1965) ο οποίος βασίστηκε στη θεωρία των γεωσυγκλίσεων. Στο μοντέλο αυτό ο Aubouin (1959) χωρίζει το τμήμα του Αλπικού ορογενούς που βρίσκεται στον ελλαδικό χώρο σε διακριτές ιζηματογενείς φάσεις Μεσοζωικής ηλικίας (248-144 εκ. χρόνια πριν), γνωστές και ως ισοπικές ζώνες. Επιπλέον κριτήρια για τον διαχωρισμό τους αποτελούν τα ιδιαίτερα παραμορφωτικά επεισόδια που κάθε μια από αυτές τις ζώνες έχει υποστεί. Νέες θεωρήσεις πάνω σε αυτό το μοντέλο (Underhill, 1985) προτείνουν ότι το ελληνικό Αλπικό ορογενές δημιουργήθηκε ως αποτέλεσμα του ανοίγματος και επακόλουθου κλεισίματος ωκεάνιων τμημάτων της Νεοτηθύος κατά το Μεσοζωικό- Κατώτερο Καινοζωικό (248-33,7 εκ. χρόνια πριν). Η διαδικασία αυτή οδήγησε στον έντονο ορογενετικό τεκτονισμό των παθητικών περιθωρίων που οριοθετούσαν ωκεάνια τμήματα, όπως είναι ο ωκεανός της Πίνδου και ο ωκεανός του Βαρδάρη. Ο τεκτονισμός αυτός σε συνδυασμό με την ύπαρξη οφιολιθικών ραφών οδήγησε στο διαχωρισμό του ελλαδικού Αλπικού ορογενούς σε Εξωτερικές και Εσωτερικές Ελληνίδες ισοπικές ζώνες. Πιο συγκεκριμένα, οι σχηματισμοί των Εξωτερικών ζωνών έχουν υποστεί έναν μόνο ορογενετικό τεκτονισμό κατά το Τριτογενές (65-1,8 εκ. χρόνια πριν) και κατέχουν το δυτικό τμήμα του ελλαδικού χώρου, ενώ οι σχηματισμοί των Εσωτερικών, εκτός από τον τεκτονισμό του Τριτογενούς έχουν υποστεί επιπλέον και έναν πρώιμο ορογενετικό τεκτονισμό, που έλαβε χώρα κατά το Ανώτερο Ιουρασικό-Κατώτερο Κρητιδικό (180-65 εκ. χρόνια πριν) και κατέχουν το ανατολικό (εσωτερικό) τμήμα του ελλαδικού χώρου.



Σχήμα 3-5 Χάρτης, με διαφορετικές ισοπικές ζώνες του Ελλαδικού χώρου

Στην Δυτική Ελλάδα, και πιο συγκεκριμένα στο Ιόνιο πέλαγος όπου βρίσκεται η νήσος Κεφαλονιά, αναγνωρίζονται τρεις ισοπικές ζώνες. Οι ζώνες αυτές από τα δυτικά προς τα ανατολικά είναι οι εξής: η Προ-Απούλια ζώνη, η Ιόνια ζώνη και η ζώνη Γαβρόβου-Τριπόλεως. Θεωρείται ότι οι ζώνες Ιόνια και Γαβρόβου-Τριπόλεως αποτελούν τα εξώτερα τεκτονικά καλύμματα του ελλαδικού Αλπικού ορογενούς, τα οποία βρίσκονται επωθημένα πάνω στην αυτόχθονη ζώνη της Προ-Απούλιας (Aubouin, 1959, 1965; Aubouin and Dercourt, 1962; Temple, 1968; Jenkins, 1972; Smith and Moores, 1974).

Νεότερες θεωρήσεις (Underhill, 1985, 1988), υποστηρίζουν ότι η έννοια του προαναφερθέντος διαχωρισμού σε τρεις ισοπικές ζώνες ισχύει μόνο για τις Μεσοζωικής και Παλαιοκαινικής ηλικίας ιζηματογενείς ακολουθίες των ζωνών αυτών, όταν οι Εξωτερικές Ελληνίδες αποτελούσαν τμήμα του προαναφερθέντος παθητικού ηπειρωτικού περιθωρίου στην θάλασσα της Νεοτηθύος. Αντίθετα οι Νεογενείς (33,7-1,8 εκ. χρόνια πριν) ιζηματογενείς ακολουθίες των ζωνών αυτών αποτελούσαν τμήμα μιας λεκάνης προχώρας η οποία καταβυθίστηκε και κινήθηκε κάτω από το Αλπικό ορογενές.



Σχήμα 3-6 Διακριτές ιζηματογενείς φάσεις. Τμήμα της Κεφαλονιάς με λευκό χρώμα Προ-Απούλια πλάκα και τμήμα της με λαδί χρώμα Ιόνια ζώνη

3.3 Τεκτονική Επισκόπηση της Νήσου Κεφαλονιάς

Η νήσος Κεφαλονιά αποτελεί ως επί το πλείστον, τμήμα της Προ-Απούλιας πλάκας με ένα μικρό μόνο τμήμα της να ανήκει στην Ιόνια ζώνη. Το τμήμα αυτό, που αποτελεί το νοτιοανατολικό άκρο της Κεφαλονιάς ενώνεται με την Προ-Απούλια με μια επώθηση

μεγάλης έκτασης (την Ιόνια επώθηση). Η επαφή των δύο ισοπικών ζωνών εντοπίζεται στο σημείο όπου ανθρακικά πετρώματα Μεσοζωικής ηλικίας, τα οποία αποτελούν την οροφή της επώθησης, βρίσκονται επάνω σε διαβρωμένες μειοκαινικές μάργες. Λίγο νοτιότερα εντοπίζεται μια μεγάλης έκτασης ζώνη έντονα διαβρωμένων τριαδικών εβαποριτών, οι οποίοι πιθανότατα αποτελούν μια ζώνη αποκόλλησης. Η ζώνη αυτή αποκολλησεως διαχωρίζει τα προαναφερθέντα ανθρακικά πετρώματα από τις Μειοκαινικές μάργες.

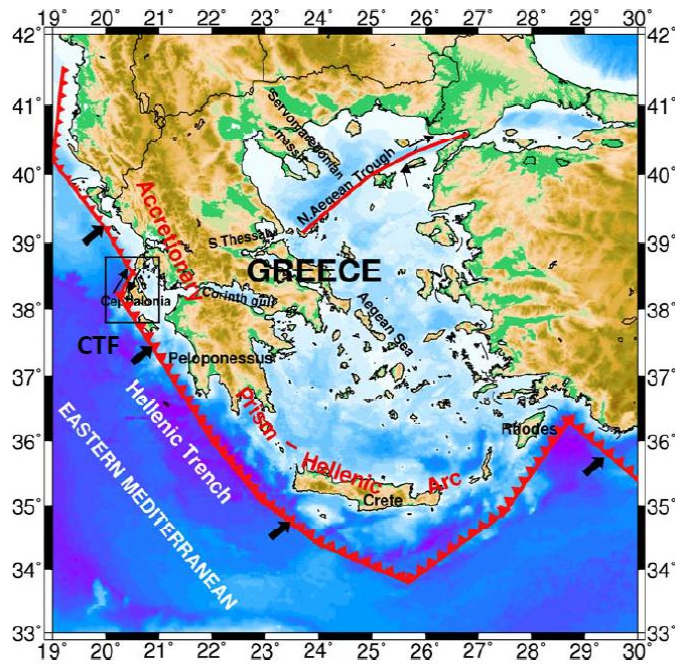
3.4 Μορφοτεκτονικά χαρακτηριστικά του Ιονίου πελάγους

Προτού αναφερθούν τα κύρια μορφοτεκτονικά χαρακτηριστικά της περιοχής του Ιονίου πελάγους στο οποίο ανήκει και η νήσος Κεφαλονιά, είναι σημαντικό να παρουσιαστεί το σύγχρονο γεωτεκτονικό καθεστώς του Ελληνικού Τόξου (Μουντράκης 1985). Το Ελληνικό Τόξο, που αναφέρεται επίσης και ως Αιγαιακό τόξο, οφείλει την δημιουργία του στην σύγκλιση των λιθοσφαιρικών πλακών Ευρώπης και Αφρικής. Πιο συγκεκριμένα, ο ωκεάνειος φλοιός από τον οποίο αποτελείται η Αφρικανική πλάκα καταβυθίζεται κάτω από την Ευρασιατική πλάκα. Η βύθιση πιστεύεται ότι είναι αμφιθεατρική και στο γεγονός αυτό οφείλεται το τοξοειδές σχήμα του Ελληνικού Τόξου. Η διεύθυνση βύθισης της Αφρικανικής πλάκας είναι Β-ΒΑ, ενώ η ταχύτητα βύθισης 2,5 – 3,5 εκ./έτος. Τα τμήματα του Ελληνικού Τόξου είναι τα εξής: α) Εξωτερικό ιζηματογενές τόξο, το οποίο περιλαμβάνει τη Δυτική Ελλάδα, την Κρήτη και τα Δωδεκάνησα. β) Ελληνική περιφερειακή τάφρος, η οποία περιβάλλει εξωτερικά (κυρτό μέρος) το ιζηματογενές τόξο, από το Ιόνιο πέλαγος μέχρι τα νότια της Κρήτης και της Ρόδου και αποτελεί σύστημα βαθιών (2000-3000 μέτρων) υποθαλάσσιων βυθισμάτων. γ) Ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου, το οποίο βρίσκεται στο εσωτερικό μέρος του τόξου και αποτελείται από ηφαιστειογενή νησιά τα οποία οφείλουν τη γένεσή τους στη βύθιση και τήξη της πλάκας της Αφρικής σε βάθος περίπου 150χλμ. πίσω από το μέτωπο σύγκλισης των πλακών. δ) Λεκάνη πίσω από το τόξο, που δημιουργείται από τις εφελκυστικές τάσεις πίσω από το τόξο και στον ελληνικό χώρο ταυτίζεται κυρίως με το Κρητικό πέλαγος. ε) Μεσογειακή ράχη, η οποία αποτελεί μια υποθαλάσσια έξαρση του φλοιού και διασχίζει την Ανατολική Μεσόγειο νότια από την Ελληνική περιφερειακή τάφρο, παράλληλα στο Ελληνικό τόξο.

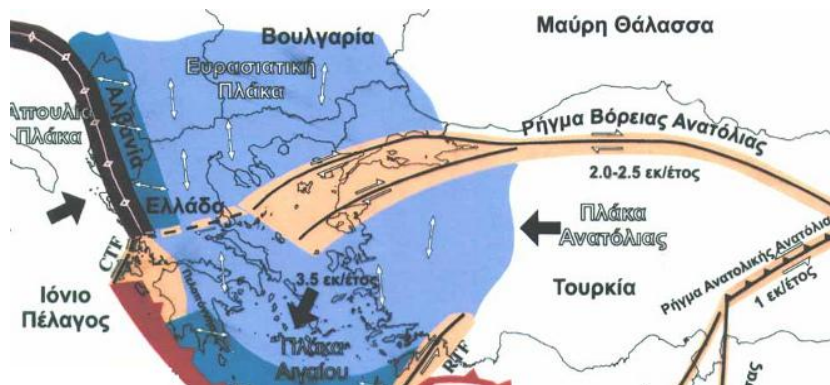
3.5 Το ρήγμα Cephalonia Transform Fault (CTF)

Η δυτική Ελλάδα βρίσκεται σε μια σεισμοτεκτονικά σύνθετη περιοχή η οποία υπόκειται σε διαρκή και έντονη παραμόρφωση. Η περιοχή αυτή παίζει σημαντικό ρόλο στις κινηματικές διαδικασίες της ανατολικής Μεσογείου. Η περιοχή με την υψηλότερη σεισμική δραστηριότητα στην Ευρώπη είναι αυτή στο δυτικό τμήμα του Ελληνικού Τόξου, η οποία περιλαμβάνει τα εξής νησιά του Ιονίου πελάγους: Λευκάδα, Ιθάκη,

Κεφαλονιά και Ζάκυνθος. Στην περιοχή αυτή του Ελληνικού Τόξου, η ζώνη καταβύθισης του ωκεάνειου φλοιού κάτω από τον ηπειρωτικό οριοθετείται στα δυτικά από το Ρήγμα Μετασχηματισμού Κεφαλληνίας, **ένα μεγάλης έκτασης δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης Cephalonia Transform Fault (CTF)**. Το ρήγμα αυτό βρίσκεται στα δυτικά της νήσου Κεφαλονιάς σε μια περιοχή μεγάλου θαλάσσιου βάθους – μεγαλύτερο των 3χλμ. - που έχει ΒΑ διεύθυνση. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 3-7, 3-8 (Finetti, 1982) που παρουσιάζει το σύγχρονο τεκτονικό καθεστώς στο θαλάσσιο χώρο μεταξύ Ελλάδας και Ιταλίας, ωκεάνειος φλοιός υπωθείται κάτω από το Ελληνικό Τόξο στα ανατολικά και το Τόξο της Καλαβρίας στα δυτικά.

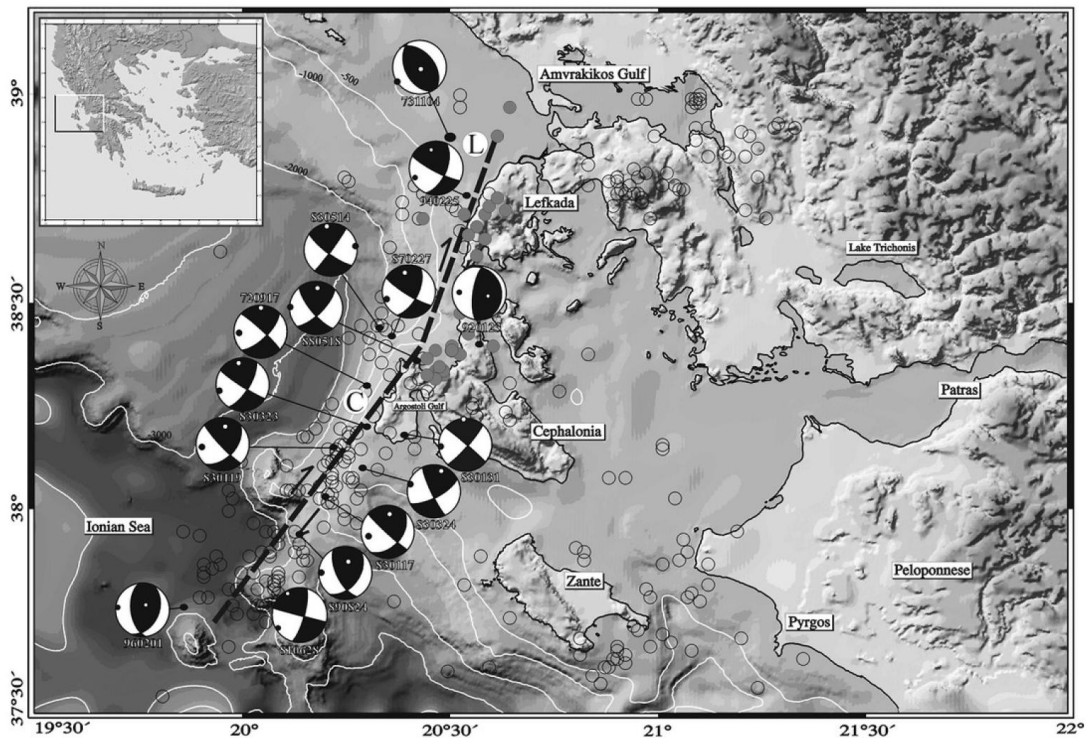


Σχήμα 3-7 Το μεγάλης έκτασης δεξιόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης Cephalonia Transform Fault (CTF).



Σχήμα 3-8 Το σύγχρονο τεκτονικό καθεστώς Στην περιοχή του ρήγματος (CTF) συναντώνται η Προ-Απούλια πλάκα, ο ηπειρωτικός φλοιός και ωκεάνειος φλοιός.

Η πρόσφατη σεισμική ακολουθία του 2014 έλαβε χώρα στο προαναφερθέν ενεργό ρήγμα της Κεφαλονιάς, γνωστό και ως Ρήγμα Μετασχηματισμού της Κεφαλλονιάς. Πρόκειται για μία δεξιόστροφη ζώνη οριζόντιας μετατόπισης με γενική διεύθυνση ΒΑ - ΝΔ έως ΒΒΑ - ΝΝΔ, η οποία λειτουργεί ως ρήγμα μεταφοράς της παραμόρφωσης στη ζώνη υποβύθισης του Ελληνικού Τόξου, η οποία στην περιοχή παρουσιάζει μία διακριτή μετατόπιση Σχ 3-9. Το ρήγμα αυτό είναι ένα από τα πλέον ενεργά του Ελληνικού χώρου, όπως αποδεικνύεται από την υψηλή ιστορική και ενόργανη σεισμικότητα. Λόγω της μεγάλης ενεργότητας του ρήγματος αυτού, η Κεφαλονιά, η Ιθάκη, η Ζάκυνθος, η Λευκάδα καθώς και μία παραλιακή ζώνη της Αιτωλοακαρνανίας κατατάσσονται στην υψηλότερη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό, (ΕΑΚ 2003).

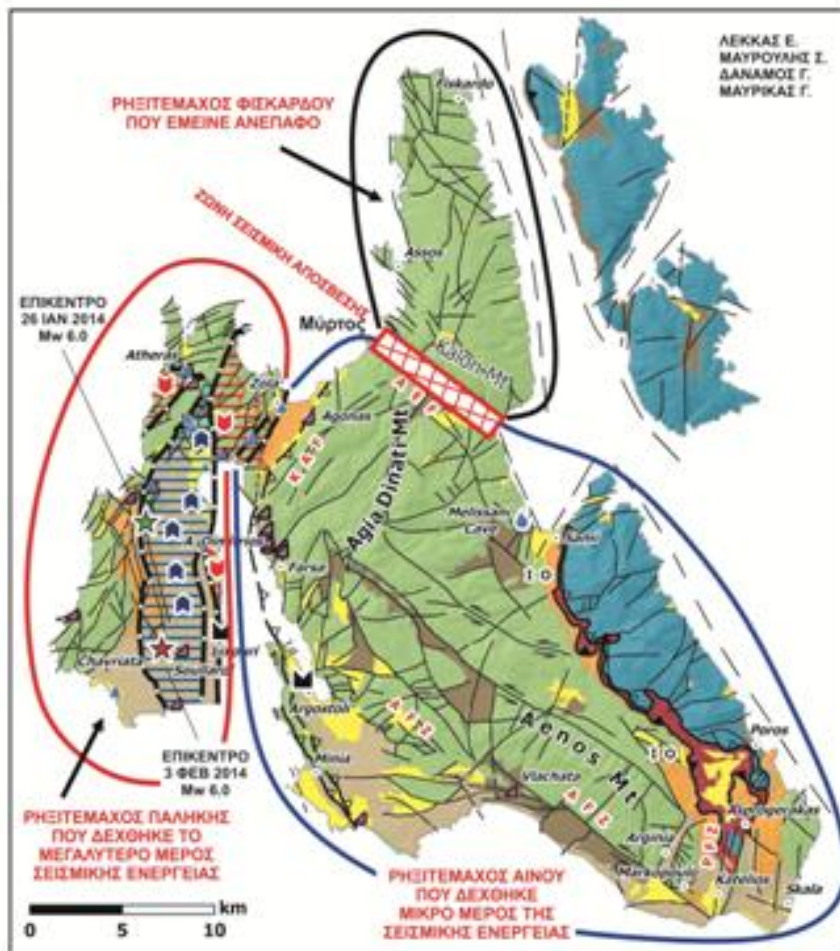


Σχήμα 3-9 Το Ρήγμα Μετασχηματισμού της Κεφαλονιάς και οι μηχανισμοί γένεσης παλαιότερων σεισμών

Η νήσος Κεφαλονιά διαχωρίζεται από τον ωκεάνειο φλοιό με αυτό το ενεργό οριζόντιο δεξιόστροφο ρήγμα του οποίου ο ρυθμός κίνησης κυμαίνεται από 7χιλ./έτος έως 30χιλ./έτος. Στην περιοχή του ρήγματος αυτού συναντώνται η Προ-Απούλια πλάκα, ο ηπειρωτικός φλοιός ο οποίος ανήκει στην Ιόνια ζώνη και ωκεάνειος φλοιός. Παλαιομαγνητικές έρευνες στα νησιά του Ιονίου δείχνουν μια δεξιόστροφη κίνηση των 26° περίπου τα τελευταία 5 εκ. χρόνια, η οποία πιθανόν οφείλεται στο γεγονός ότι ο ηπειρωτικός φλοιός επωθείται πάνω στον ωκεάνειο φλοιό λόγω του ότι αυτός είναι

πυκνότερος και συνεπώς βαρύτερος, κάτι που εξηγεί και τον δεξιόστροφο χαρακτήρα του προαναφερθέντος οριζόντιου ρήγματος (Underhill 1989).

Ο χάρτης του Σχ. 3-10 υποδεικνύει ότι η Κεφαλονιά αποτελείται από τρία βασικά τμήματα, τα οποία ονομάζονται «ρηξιτεμάχη»: το ρηξιτέμαχος της Παλικής στα δυτικά, του Φισκάρδου στα βόρεια και του Αίνου στο κέντρο. Οι δύο πρόσφατοι σεισμοί προκάλεσαν τη δόνηση στο δυτικό τμήμα, που δέχθηκε το μεγαλύτερο μέρος της σεισμικής ενέργειας, και στο κεντρικό τμήμα του νησιού, όπου η σεισμική ενέργεια ήταν μικρότερη. Το βόρειο όμως τμήμα του Φισκάρδου δεν κινήθηκε. Έτσι το σημείο όπου συναντάται το βόρειο και «ανένδοτο» τμήμα με το κεντρικό δέχθηκε μεγάλη πίεση. Πρόκειται για μια λωρίδα ορεινής γης με κατεύθυνση από νοτιοανατολικά προς βορειοδυτικά, η οποία καταλήγει ακριβώς επάνω από τον Μύρτο και είναι γνωστή ως Χάρακας.



Σχήμα 3-10 Τα τρία "ρηξιτεμάχη" στα οποία διαχωρίζεται η Κεφαλονιά μετά το πέρας των σεισμών. Με μπλε βελάκια μετακίνηση της Παλικής προς τα Βόρεια (μέγιστη μετακίνηση 12cm), με κόκκινα βελάκια καθίζηση (μέγιστη καθίζηση -7cm)

3.6 Σεισμικότητα

Οι διεργασίες της ενεργού καταβύθισης (ή κατείσδυσης) και της ηπειρωτικής σύγκρουσης στον χώρο του Ιονίου πελάγους είναι υπεύθυνες για τους σεισμούς οι οποίοι δημιουργούνται κατά μήκος των δυτικών ακτών Ελλάδας και Αλβανίας καθώς και στην κυρτή πλευρά του Ελληνικού Τόξου. Στην περιοχή δυτικά της νήσου Κεφαλονιάς εντοπίζεται, όπως προαναφέρθηκε, το Ρήγμα Μετασχηματισμού Κεφαλληνίας η δράση του οποίου έχει ως αποτέλεσμα την έντονη σεισμική δραστηριότητα στην περιοχή αυτή. Η πλειονότητα των σεισμών εντοπίζεται σε μια στενή ζώνη δυτικά των ακτών της Κεφαλονιάς καθώς και σε μια ευρύτερη περιοχή στο θαλάσσιο τμήμα νοτιοδυτικά της Ζακύνθου. Οι σεισμοί στον θαλάσσιο χώρο της Ζακύνθου προκαλούνται από ρήγματα ανάστροφα, όπως δείχνουν οι επιλύσεις εστιακών μηχανισμών της περιοχής, ενώ όσο μετακινούμαστε προς Βορρά τα ρήγματα παρουσιάζουν μερικώς ή και αμιγώς πλάγια συνιστώσα κίνησης. Η περιοχή του Ιονίου πελάγους έχει πληγεί συστηματικά από ισχυρούς σεισμούς με καταστροφικά για τα νησιά του κεντρικού Ιονίου αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, σεισμοί μεγάλου μεγέθους ($M \geq 7$) έχουν καταστρέψει αστικές περιοχές σε Κεφαλονιά, Ζάκυνθο και Λευκάδα, με βάση ιστορικές αναφορές, ενώ ο καταστροφικός σεισμός του 1953 ($M=7,2$) είχε ως αποτέλεσμα την ολοκληρωτική καταστροφή κτιρίων στο μεγαλύτερο μέρος της Κεφαλονιάς και την απώλεια ζών εκατοντάδων ανθρώπων. Το μεγαλύτερο καταγεγραμμένο μέγεθος σεισμού είναι $M=7,4$ ενώ τις τελευταίες δεκαετίες σεισμοί μεγέθους $M > 6$ έχουν πλήξει επανειλημμένα την περιοχή με σημαντικότερους, αυτούς του έτους 1983 ($M=6,7$) στην Κεφαλονιά, του έτους 2003 ($M=6,3$) στα δυτικά της Λευκάδας, των ετών 2005 ($M=5,6$), 2006 ($M=5,7$) και φυσικά των δύο πρόσφατων στις 26/01/2014 και 03/02/2014 ($M=6,1$) και ($M=5,8$) αντίστοιχα, στα δυτικά της Ζακύνθου. Από τότε και μέχρι σήμερα συμβαίνουν συχνά πολλοί σεισμοί με μεγέθη μικρότερα του $M=5$ ενώ κάθε χρόνο αναμένεται τουλάχιστον ένας σεισμός μεγέθους $M \approx 5$ (Kokinou et al. 2006).

Παρακάτω γίνεται μια αναδρομή στους σεισμούς που έχουν σημειωθεί ιστορικά, στην περιοχή με τη μεγαλύτερη σεισμική δραστηριότητα στην Ευρώπη.

- 1469** Απρίλης: Σεισμός μεγέθους 7,2 R με επίκεντρο το Αργοστόλι. Μαρτυρούνται σοβαρές υλικές ζημιές στην Κεφαλονιά, μεταξύ των οποίων και καταστροφή του Κάστρου του Αγ. Γεωργίου αλλά και ανθρώπινα θύματα.
- 1636** Σεπτέμβρης: Φονικός σεισμός μεγέθους 7,1 R χτυπά το Ληξούρι. Ιστορικές πηγές αναφέρουν πως βυθίστηκε αρχαία πόλη στα ΝΑ της Κεφαλονιάς. Οι μετασεισμοί διήρκεσαν έως το 1637. Καταγράφονται περίπου 525 νεκροί και 1.500 τραυματίες.

- 1743** 20 Φλεβάρη: Σεισμός 7 R χτυπάει το Ιόνιο. Μεγάλες καταστροφές στην Κεφαλονιά και σε όλη τη Δυτική Ελλάδα.
- 1759** 14 Ιούνη: Σεισμοί (ο μεγαλύτερος 6,3 R) χτυπούν την Κεφαλονιά, οι οποίοι διήρκεσαν τρεις ημέρες. Οι μεγαλύτερες καταστροφές εντοπίζονται στην Παλική, όπου κατέρρευσαν τα περισσότερα σπίτια, ενώ μαρτυρούνται και ανθρώπινα θύματα.
- 1766** 24 Ιούλη: Σεισμός 7 R με επίκεντρο την Κεφαλονιά. Προκάλεσε το θάνατο περίπου 20 ατόμων, και μεγάλες καταστροφές, ιδίως στην Παλική και την Έρισσο, αλλά και το Αργοστόλι μέχρι τη Ζάκυνθο.
- 1767** 22 Ιούλη: Σεισμός 7,2 R χτυπά το Ληξούρι. Από τους καταστροφικότερους που χτύπησαν ποτέ την Κεφαλονιά. Αναφέρονται 50 νεκροί στο Ληξούρι και 253 στις γύρω περιοχές, μόλυνση των υδάτων, καταστροφή όλων σχεδόν των εκκλησιών, και μετασεισμική ακολουθία 40 ημερών.
- 1834** 5 Ιούλη: Σεισμός 6 R με σοβαρές υλικές ζημιές στην Κεφαλονιά.
- 1862** 14 Μάρτη: Σεισμός 6,6 R χτυπά το Αργοστόλι προκαλώντας σοβαρές υλικές ζημιές.
- 1867** 4 Φλεβάρη: Σεισμός 7,4 R χτυπά την Παλική. 3000 σπίτια καταστράφηκαν, 35 νεκροί στο Ληξούρι, 63 στα Δαμουλιανάτα-Ρίφι, 41 στην Αγία Θέκλη και 19 στα Κουβαλάτα. Σχεδόν ολοκληρωτική η καταστροφή στην Παλική, αλλά και σημαντικές ζημιές σε Πύλαρο, Θηνιά, Έρισσο και Λειβαθώ. Ζημιές και στο Αργοστόλι.
- 1902** 5 Νοέμβρη: Σεισμός 5,5 R με επίκεντρο το Ληξούρι. Υλικές ζημιές.
- 1905** 3 Ιούνη: Σεισμός 5,5 R στο Ληξούρι. Υλικές ζημιές.
- 1912** 24 Γενάρη: Καταστροφικός σεισμός 6,8 R στον Ασπρογέρακα (ΝΑ Κεφαλονιά). Μεγάλες καταστροφές στην περιοχή Ελειού – Πρόννων. Ακολούθησαν σεισμοί με επίκεντρο το Αργοστόλι στις 25, 26/1 και 10/2 (5,9, 5,4 και 5,1 R αντίστοιχα).
- 1915** 27 Γενάρη: Ισχυρός και καταστροφικός σεισμός στην Εξωγή της Ιθάκης (6,6 R). Στις 16/5 ισχυρός σεισμός 5,6 R στο Αργοστόλι, με ελάχιστες ζημιές. Στις 7/8 ισχυρός σεισμός και πάλι στην Ιθάκη με σοβαρές υλικές ζημιές (6,7 R). Την ίδια μέρα, σεισμός και στο Αργοστόλι (5,1 R). Στις 10/8, τρεις ακόμη ισχυροί σεισμοί στην Ιθάκη (5,7, 6,1 και 5,0 R). Η Ιθάκη θα χτυπηθεί άλλες τρεις φορές μέσα σε δύο μέρες (11, 12/8) από σεισμούς 6,4, 5,8 και 5,0 R.
- 1916** 9 Οκτώβρη: Σεισμός 5 R στο Αργοστόλι με μικρές ζημιές.
- 1918** 28 Μάρτη: Σεισμός 5 R στο Αργοστόλι με μικρές ζημιές.
- 1923** 20 Μάη: Σεισμός 5,3 R χτυπά το Αργοστόλι. Υλικές ζημιές.
- 1932** 9 Μάρτη: Ισχυρός σεισμός 5,6 R προκαλεί υλικές ζημιές στο Ληξούρι.
- 1933** 22 Μάρτη: Ισχυρός σεισμός 5,2 R στο Αργοστόλι. Μικρές ζημιές.
- 1939** 20 Σεπτέμβρη: Σεισμός 6,3 R, νοτιοδυτικά της Κεφαλονιάς.
- 1940** 2 Γενάρη: Σεισμός 5,2 R στο Λιβάδι της Κεφαλονιάς.

- 1943** Χρονιά με πολλούς σεισμούς στην Κεφαλονιά (επίκεντρο στη θάλασσα): Στις 17/1, 5,6 R βόρεια του νησιού. Στις 14/2, σεισμοί 5,8 και 5,0 R, νοτιοδυτικά του νησιού. Στις 22/5, 5,6 R νοτιοανατολικά του νησιού, όπου και στις 14/6 (5,1 R).
- 1948** 22 Απρίλη: Καταστροφικός σεισμός στη Βασιλική της Λευκάδας (6,5) γίνεται αισθητός στην Κεφαλονιά. Και δεύτερος σεισμός την ίδια χρονιά, στους Τσουκαλάδες της Λευκάδας (6,4 R), εξίσου καταστροφικός.
- 1949** 4 Φλεβάρη: Σεισμός 5 R νοτιοανατολικά της Κεφαλονιάς.
- 1951** 20 Δεκέμβρη: Σεισμός 5,3 στην Αγία Θέκλη της Κεφαλονιάς, με μικρές ζημιές.
- 1952** Δύο ισχυροί σεισμοί στο Αργοστόλι, (5,4 R στις 9/3 και 5,1 R στις 5/10)
- 1953** Η χρονιά της μεγάλης καταστροφής. Την Κυριακή, 9 Αυγούστου γίνεται ο πρώτος μεγάλος σεισμός με επίκεντρο τον Σταυρό Ιθάκης (6,4 R). Ο δεύτερος, (6,8 R) στις 11 Αυγούστου με 10 μετασεισμούς την ίδια μέρα (οι δύο μεγαλύτεροι 5,3 και 5,1 R). Στις 12 Αυγούστου το πρωί, ημέρα Τετάρτη, ένας ισχυρός σεισμός 5,2 R είναι απλώς το μήνυμα για την καταστροφή που θα ακολουθήσει (ώρα 09:23:52 Greenwich).



Σχήμα 3-11 Οι ζημιές που προκάλεσε ο καταστροφικός σεισμός του 1953

Ο σεισμός των 7,2 R είναι ο καταστροφικότερος στην Ιστορία της Κεφαλονιάς (η έντασή του έχει προσδιοριστεί ως X+), και ένας από τους καταστροφικότερους στη σεισμική ιστορία της Ελλάδας. Είναι χαρακτηριστικό ότι την ίδια μέρα καταγράφηκαν ισχυροί σεισμοί και σε άλλες περιοχές της Δυτικής Ελλάδας (Πύργος, Αμαλιάδα, Πάτρα –μεγέθους 6,3 R-, Καλάβρυτα, Αργίριο).

Η Κεφαλονιά, η Ιθάκη και η Ζάκυνθος (που είχαν ήδη υποστεί σοβαρές ζημιές από τους σεισμούς της 9 και 11/8) ισοπεδώθηκαν σχεδόν ολοκληρωτικά: 27.658 από τις 33.300 οικοδομές κατέρρευσαν – μόνο 467 σώθηκαν (κυρίως στη Βόρεια Κεφαλονιά – περιοχή Ερίσου), ενώ όλες οι υπόλοιπες υπέστησαν σοβαρές ή ελαφρύτερες βλάβες. Ο συνολικός αριθμός των νεκρών ανήλθε σε 455, των αγνοουμένων σε 21 και των τραυματιών σε 2.412.

Ακολούθησε μεγάλος αριθμός πολύ συχνών μετασεισμών που διήρκεσαν μέχρι τα τέλη Σεπτεμβρίου, πολλοί από τους οποίους είχαν μέγεθος μεγαλύτερο των 5,0 R. Στις 16/10 σεισμός 5,2 χτυπά το Ληξούρι, ενώ στις 20/11 σεισμός 5,1 R σημειώνεται με επίκεντρο την Ιθάκη.

- 1954** 8 Μάρτη: Σεισμός 5,3 με επίκεντρο το Αργοστόλι.
- 1962** 17 Απρίλη: Σεισμός 5,3 με επίκεντρο τη Σάμη. Είχε προηγηθεί, στις 10/4 ισχυρή σεισμική δόνηση 6,3 στις Βολίμες της Ζακύνθου.
- 1969** 7 Ιούνη: Σεισμός 5 R με επίκεντρο τα Βαλσαμάτα (περιοχή Αγίου Γερασίμου).
- 1970** 1 Σεπτέμβρη: Νέος ισχυρός σεισμός 5,0 R με επίκεντρο τα Βαλσαμάτα. Η περιοχή έχει δώσει ένα πλήθος δονήσεων μεταξύ 4,0 και 5,0 R τις τελευταίες δεκαετίες, χωρίς αξιοσημείωτες υλικές ζημιές.
- 1972** 17 Σεπτέμβρη: Σεισμός 6,3 R με επίκεντρο την Παλική (Χαβριάτα, Κουβαλάτα, Δαμουλιανάτα). Υλικές ζημιές. Στις 30/10 ισχυρός σεισμός στο Νιοχώρι Ερίσου (5,4 R).
- 1974** 14 Δεκέμβρη: Σεισμός 5,4 R στη Σάμη. Μικρές ζημιές.
- 1976** 11 Μάη: Ισχυρός σεισμός 6,5 R στη Ζάκυνθο, γίνεται αισθητός στην Κεφαλονιά.
- 1983** 17 Γενάρη: Μεγάλος σεισμός 7 R στην Κεφαλονιά (ο μεγαλύτερος μετά το 1953). Ελάχιστες υλικές ζημιές σημειώνονται στο νησί. Μεγάλη μετασεισμική ακολουθία στην περιοχή. Στις 19/1, νέος σεισμός 5,8 R στην περιοχή της Παλικής (Αγία Θέκλη), όπου και τρίτος ισχυρός σεισμός (6,2 R) στις 23/3. Από 17/1 μέχρι 14/5 σημειώνονται στην περιοχή άλλοι 10 σεισμοί μεγέθους πάνω από 5,0 R.
- 1987** 27 Φλεβάρη: Σεισμός 5,7 R στην Κεφαλονιά, χωρίς υλικές ζημιές.
- 1988** Στις 18 και 22 Μάη και 6 Ιούνη, 3 ισχυροί σεισμοί 5,3, 5,4 και 5,0 R αντίστοιχα στην Κεφαλονιά. Στις 16/10, σεισμός 6,0 R στη θαλάσσια περιοχή δυτικά της Κυλλήνης γίνεται αισθητός στην Κεφαλονιά. Όλοι χωρίς υλικές ζημιές.
- 1989** 24 Αυγούστου: Σεισμός στο θαλάσσιο χώρο μεταξύ Κεφαλονιάς και Ζακύνθου μεγέθους 5,2 R.
- 1992** 23 Γενάρη: Δύο ισχυροί σεισμοί στην Κεφαλονιά (5,6 και 5,1 R) χωρίς υλικές ζημιές.
- 1997** 18 Νοέμβρη: Ισχυρός σεισμός 6,6 R στο θαλάσσιο χώρο νοτιοδυτικά της Ζακύνθου γίνεται αισθητός σε Ζάκυνθο και Κεφαλονιά.

- 2003** 14 Αυγούστου: Ο σεισμός της Λευκάδας (6,3 R) που προκάλεσε σοβαρές υλικές ζημιές στο νησί γίνεται αισθητός ιδίως στο βόρειο τμήμα της Κεφαλονιάς – μικρές υλικές ζημιές σε παλιά σπίτια.
- 2006** 11 και 12 Απρίλη: Τέσσερις ισχυροί σεισμοί με μεγέθη από 5,2 έως 5,9 πλήττουν τη Ζάκυνθο, με αρκετές υλικές ζημιές - γίνονται αισθητοί και στην Κεφαλονιά, με μικρές υλικές ζημιές.
- 2007** 25 Μάρτη: Ισχυρός σεισμός μεγέθους 5,9 (κατ' άλλες μετρήσεις 5,7) με επίκεντρο τη θαλάσσια περιοχή βορειοδυτικά της Κεφαλονιάς προκαλεί αρκετές υλικές ζημιές στο βορειοδυτικό κυρίως τμήμα του νησιού.
- 2008** 8 Ιούνη: Ο ισχυρότατος κα φονικός (2 νεκροί) σεισμός μεγέθους 6,9 στην Ανδραβίδα Ηλείας με πολλές υλικές ζημιές στην περιοχή, γίνεται αισθητός στην Κεφαλονιά.
- 2008** 30 Ιούλη: Σεισμός με επίκεντρο νοτιοδυτικά της Κεφαλονιάς και μέγεθος 5,5, χωρίς να προκληθούν υλικές ζημιές.

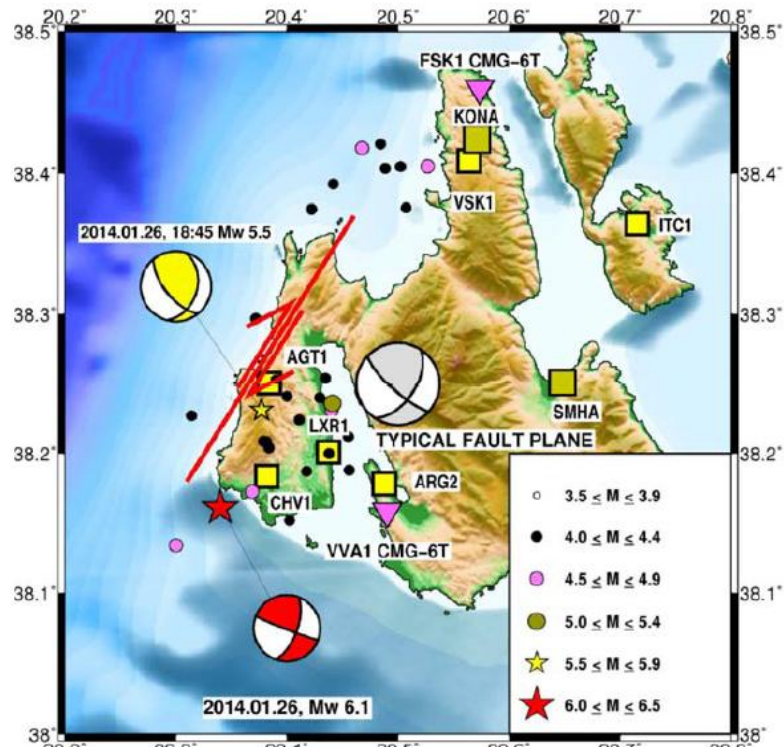
3.7 Οι πρόσφατοι ισχυροί σεισμοί

α) Σεισμός 26-1-2014 ($M_w = 6,1$)

Στις 26 Ιανουαρίου 2014 και τοπική ώρα 15:55 (13:55 GMT) συνέβη ένας ισχυρός σεισμός μεγέθους $M_w=6.1$ με επίκεντρο τις νοτιοδυτικές ακτές της Κεφαλονιάς, και συγκεκριμένα περί τα 9km νοτιοδυτικά του Ληξουρίου. Οκτώ ημέρες αργότερα 3/2/2014 έλαβε χώρα και νέος σεισμός $M=6.0$, 7 km, βορειοδυτικά του Ληξουρίου με πολύ υψηλές επιταχύνσεις, ιδιαίτερα στο Ληξούρι ο οποίος προκάλεσε βλάβες σε κατασκευές και Λιμενικές εγκαταστάσεις, τόσο στο Ληξούρι όσο και στο Αργοστόλι.

Σύμφωνα με την ιστοσελίδα του Σεισμολογικού Σταθμού του ΑΠΘ (http://geophysics.geo.auth.gr/the_seisnet/ATLAS/web/majorquakes_gr.htm) πρόκειται για επιφανειακούς σεισμούς, με γεωγραφικές συντεταγμένες του πρώτου επικέντρου 38.1610B, 20.3400A. Ακολούθησαν πολλοί μετασεισμοί με $M>4.0$. Στις 20:45 της 26/01/2014 ακολούθησε ένας μετασεισμός μεγέθους $M_w=5.5$. Από τους μηχανισμούς γένεσης των δύο σεισμών φαίνεται ότι οι δύο σεισμοί σχετίζονται γενετικά με το ρήγμα διεύθυνσης της Κεφαλονιάς (Scordilis et al.1985). Πρόκειται για δεξιόστροφο ρήγμα το οποίο περιλαμβάνει και ανάστροφη συνιστώσα (Παπαζάχος και Παπαζάχου, 1997, 2003). Τους κύριους σεισμούς ακολούθησε πλήθος μετασεισμών μεγάλης έντασης με πολύ μεγάλη συχνότητα από τα ίδια επίκεντρα, που έγιναν ιδιαίτερα αισθητοί από τους κατοίκους του Αργοστολίου και του Ληξουρίου. Οι επιταχύνσεις ήταν ιδιαίτερα υψηλές. Στον κύριο σεισμό καταγράφηκε επιτάχυνση 0.40 g στην οριζόντια διεύθυνση στο

Αργοστόλι, ενώ στο Ληξούρι πολύ μεγαλύτερη 0.57 g. Στις Βασιλικάδες λόγω απόσβεσης (βόρεια του Νησιού) καταγράφηκε επιτάχυνση μόνο 0.10 g.



Σχήμα 3-12 Με κόκκινο χρώμα το επίκεντρο του κύριου σεισμού (MW=6,1) και με κίτρινο το επίκεντρο του ισχυρού μετασεισμού (MW=5,5)

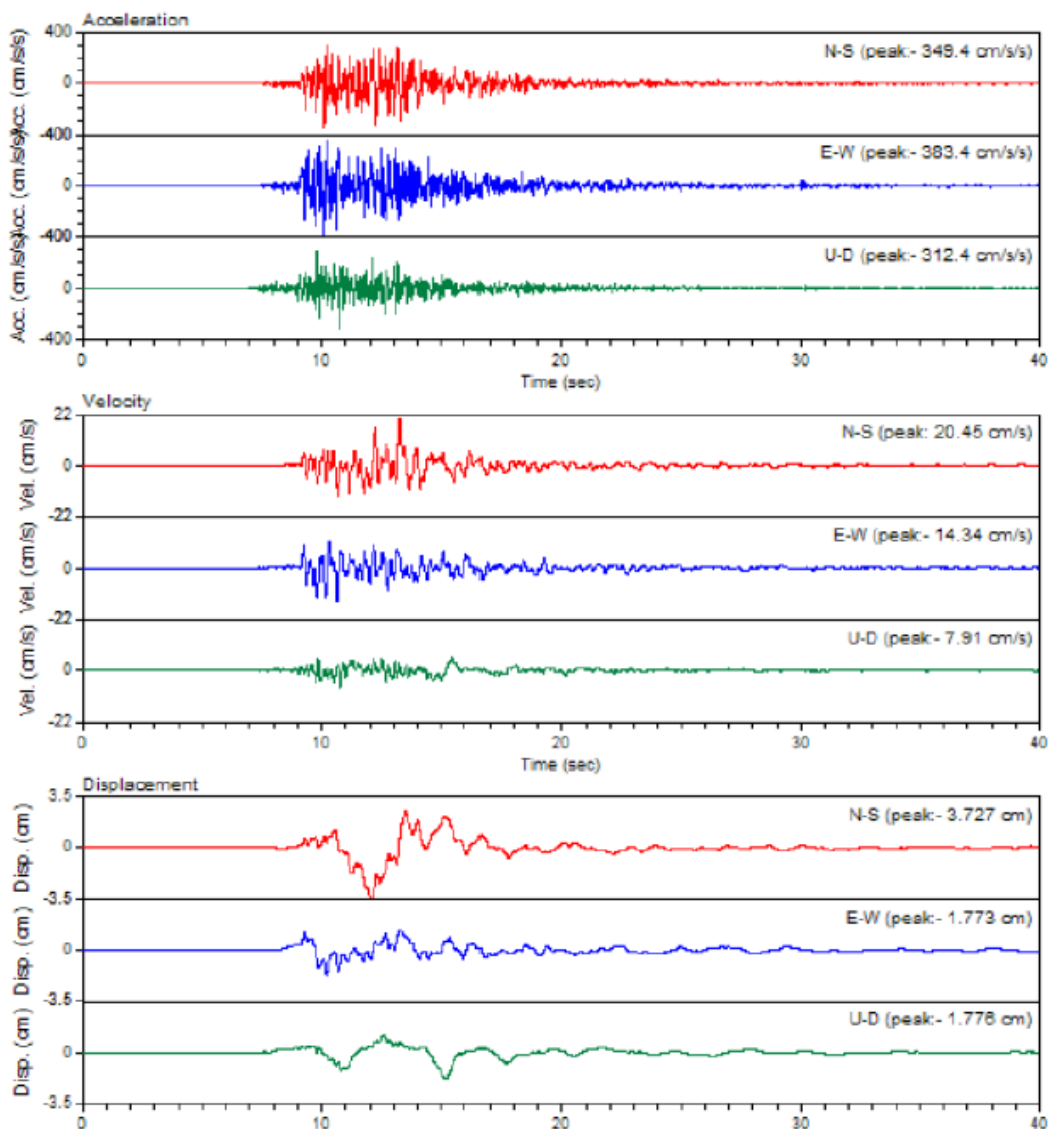


Σχήμα 3-13 Οι κρηπιδότοιχοι του Λιμανιού του Ληξουρίου κατεστραμμένοι από την σφοδρότητα του σεισμού

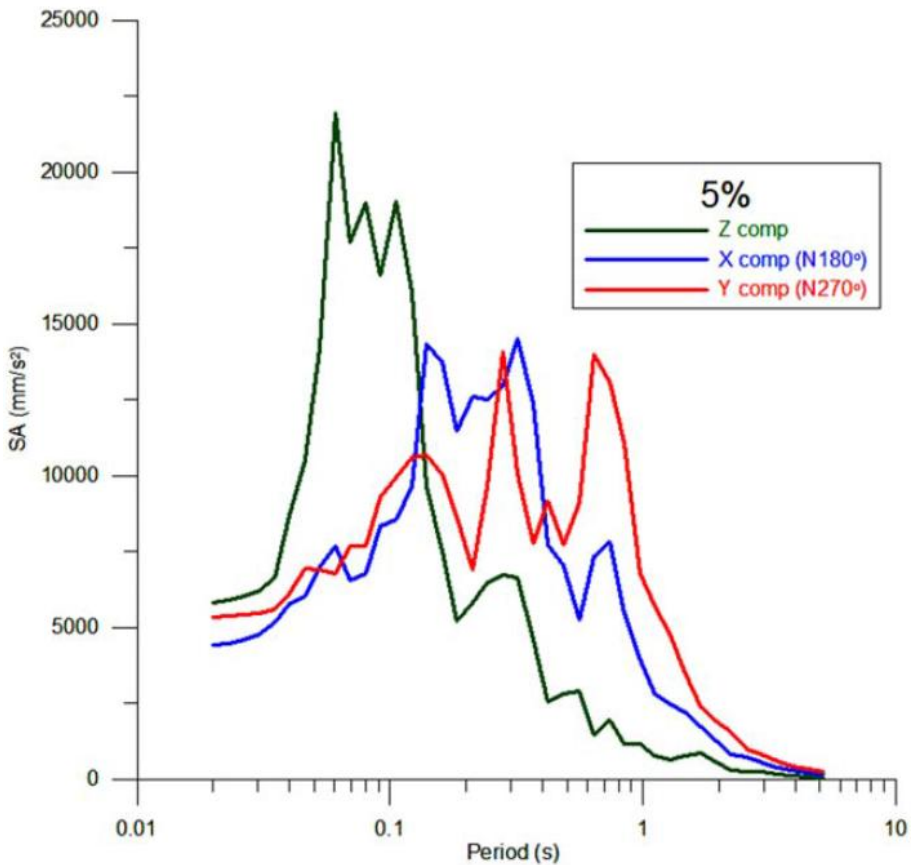
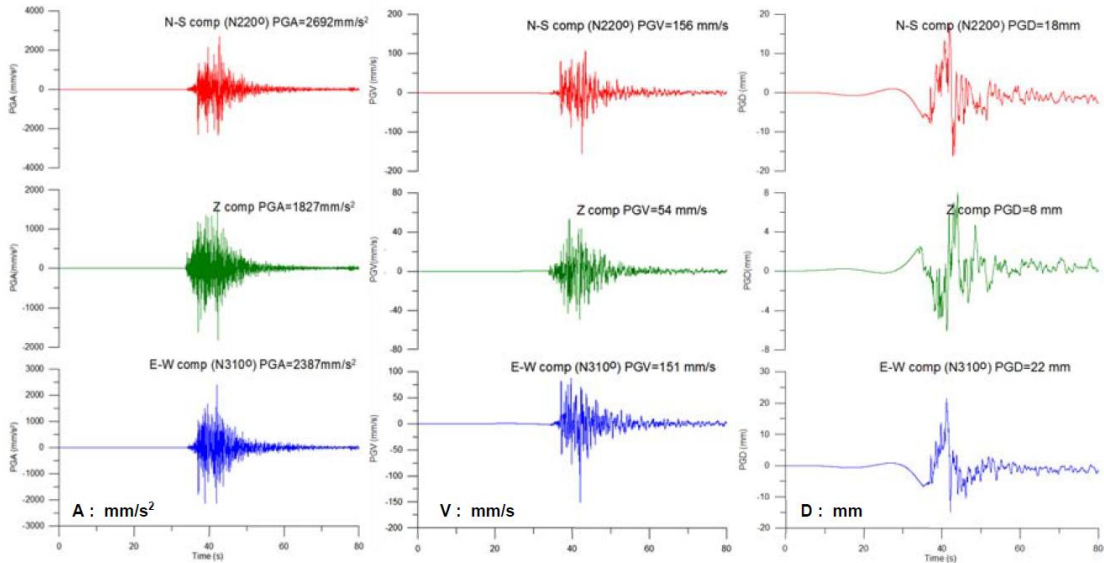
Πίνακας 3-1 Καταγραφές 1ου σεισμού (Μεγέθους $M_w = 6.1$)

ΘΕΣΗ	Επικεντρική Απόσταση	Μέγιστη εδαφική Επιτάχ. (cm/sec ²)	Μέγιστη εδαφική ταχύτητα (cm/s)	Μέγιστη εδαφική μετακίνηση (cm)
Αργοστόλι (ARG2)	13	424	20,5	3,7
Ληξούρι (LXRB)	9	562	61,1	12,3
Βασιλικάδες (VSK1)	34	95	8,38	2,05

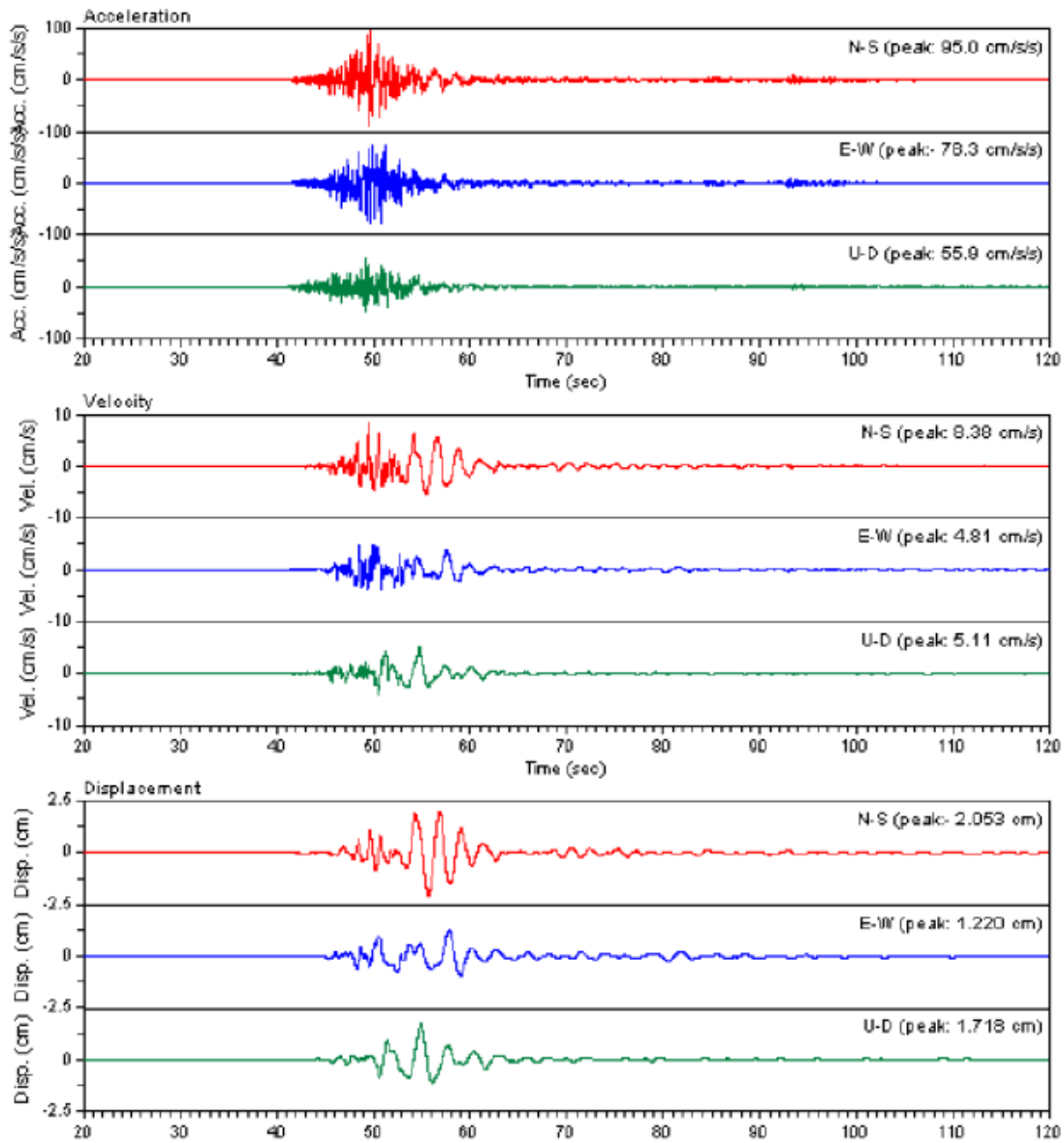
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα επιτάχυνσης - χρόνου κατά την διάρκεια του 1^{ου} σεισμού ($M_w=6,1$), από τους τρεις σταθμούς (ARG2, LXRB, VSK1).



Σχήμα 3-14 Χρονικές ιστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης κατά την διάρκεια του 1ου σεισμού ($M_w = 6,1$), όπως καταγράφηκαν από τον σταθμό ARG2 του ΕΡΟ-ITSΑΚ στο Αργοστόλι.



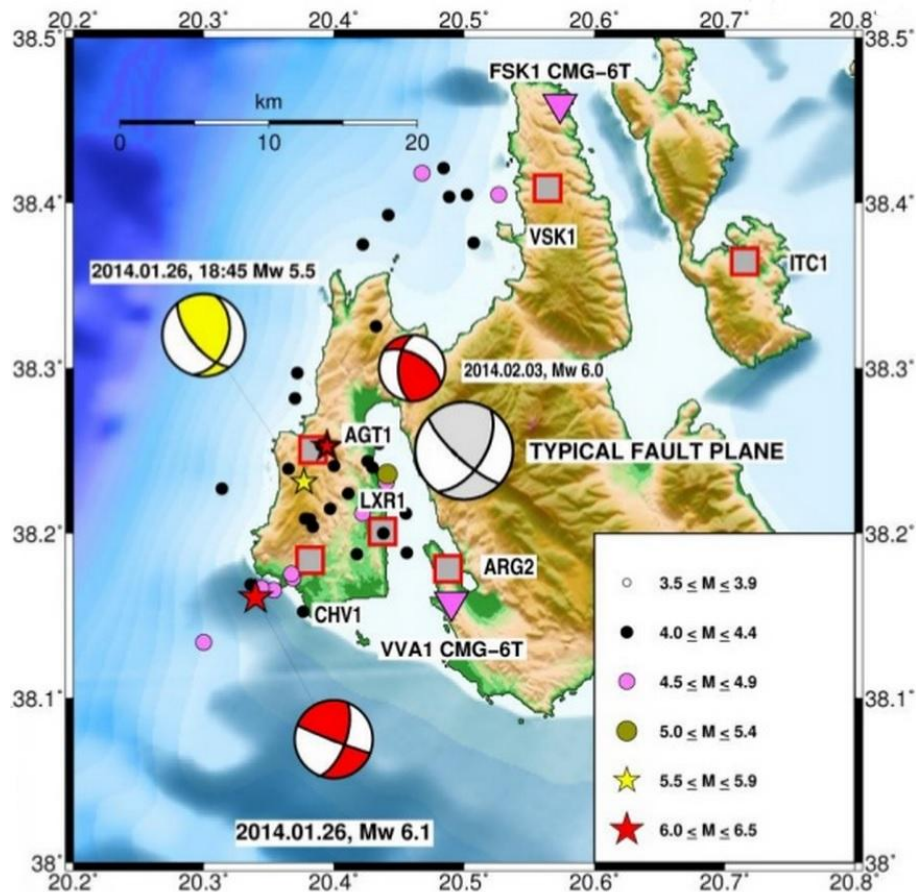
Σχήμα 3-15 Χρονικές ιστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης (από αριστερά προς τα δεξιά) κατά την διάρκεια του 1ου σεισμού ($M_w = 6,1$), όπως καταγράφηκαν από τον σταθμό LXRΒ του ΝΟΑ-ΙΓ στο Δημαρχείο του Ληξουρίου. Τα αντίστοιχα φάσματα ψευδοεπιτάχυνσης με λόγο απόσβεσης $D=0,05$.



Σχήμα 3-16 Χρονικές ιστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης κατά την διάρκεια του 1ου σεισμού ($M_w = 6,1$), όπως καταγράφηκαν από τον σταθμό VSK1 του ΕΡΟ-ΙΤΣΑΚ στις Βασιλικάδες (Βόρειο τμήμα Κεφαλονιάς).

β) Σεισμός 03-02-2014 ($M_W = 6,0$)

Στις 3 Φεβρουαρίου 2014 και τοπική ώρα 05:08 (03:08 GMT), οχτώ μέρες μετά τον ισχυρό σεισμό μεγέθους M_W 6,1, ένας δεύτερος ισχυρός σεισμός μεγέθους M_W 6,0 εκδηλώθηκε στην χερσόνησο της Παλικής, με επίκεντρο στις Δυτικές ακτές του νησιού, περίπου 7 km βορειοδυτικά του Ληξουρίου. Σύμφωνα με Ελληνικό Σεισμολογικό Δίκτυο (Hellenic United Seismological Network (HUSN)) , επρόκειτο για έναν επιφανειακό σεισμό με επίκεντρο 38,25N, 20,39E και βάθος 10km. Από την θέση του επικέντρου και τους εστιακούς μηχανισμούς γένεσης των σεισμών συμπεραίνεται ότι και ο δεύτερος σεισμός σχετίζεται με το ρήγμα διεύθυνσης της Κεφαλονιάς (CTF) (Skordilis et al. 1985).



Σχήμα 3-17 Με κόκκινο χρώμα το επίκεντρο του κύριου σεισμού ($M_W=6,1$) και του 2ου ($M_W=6,0$), με κίτρινο χρώμα το επίκεντρο του ισχυρού μετασεισμο ($M_W=5,5$)

Με κόκκινους αστερίσκους φαίνονται τα επίκεντρα των δύο ισχυρών σεισμών, ενώ με κίτρινο το επίκεντρο του ισχυρού μετασεισμού. Σημειώνεται επίσης η σεισμική ακολουθία στο νησί της Κεφαλονιάς για έναν μήνα μετά τον πρώτο σεισμό (HUSN). Επιπλέον, με γκριζα σφαίρα διακρίνεται ο τυπικός εστιακός μηχανισμός γένεσης των σεισμών για την περιοχή της Κεφαλονιάς (Parazachos and Parazachou,

2003). Τέλος, τα γκρίζα ορθογώνια και τα ροζ τρίγωνα υποδηλώνουν την θέση των επιταχυνσιογράφων και σειсмоγράφων.

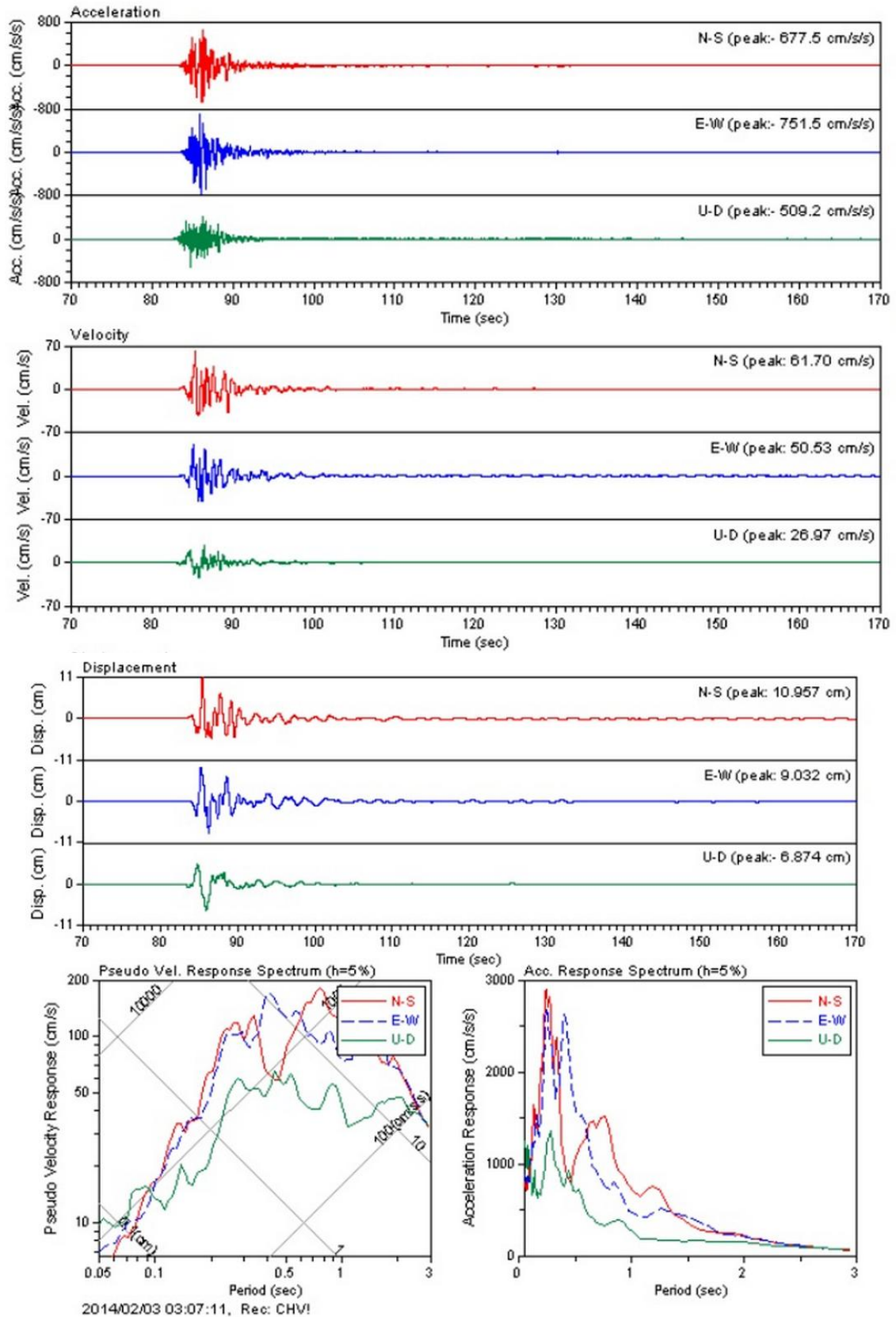
Πίνακας 3-2 Καταγραφές 2ου σεισμού (Μεγέθους $M_W = 6.0$)

Σταθμός	Επικεντρική απόσταση (km)	Μέγιστη Εδαφική Επιτάχυνση (cm/s^2)	Μέγιστη εδαφική ταχύτητα (cm/s)	Μέγιστη Εδαφική Μετακίνηση (cm)
Χαβριάτα (CHV1)	7	752	62	11
Ληξούρι (LXR1)	7	667	122	30,5
Αργοστόλι (ARG2)	12	264	30	5,7
Βασιλικάδες (VSK1)	23	57	5	1,4

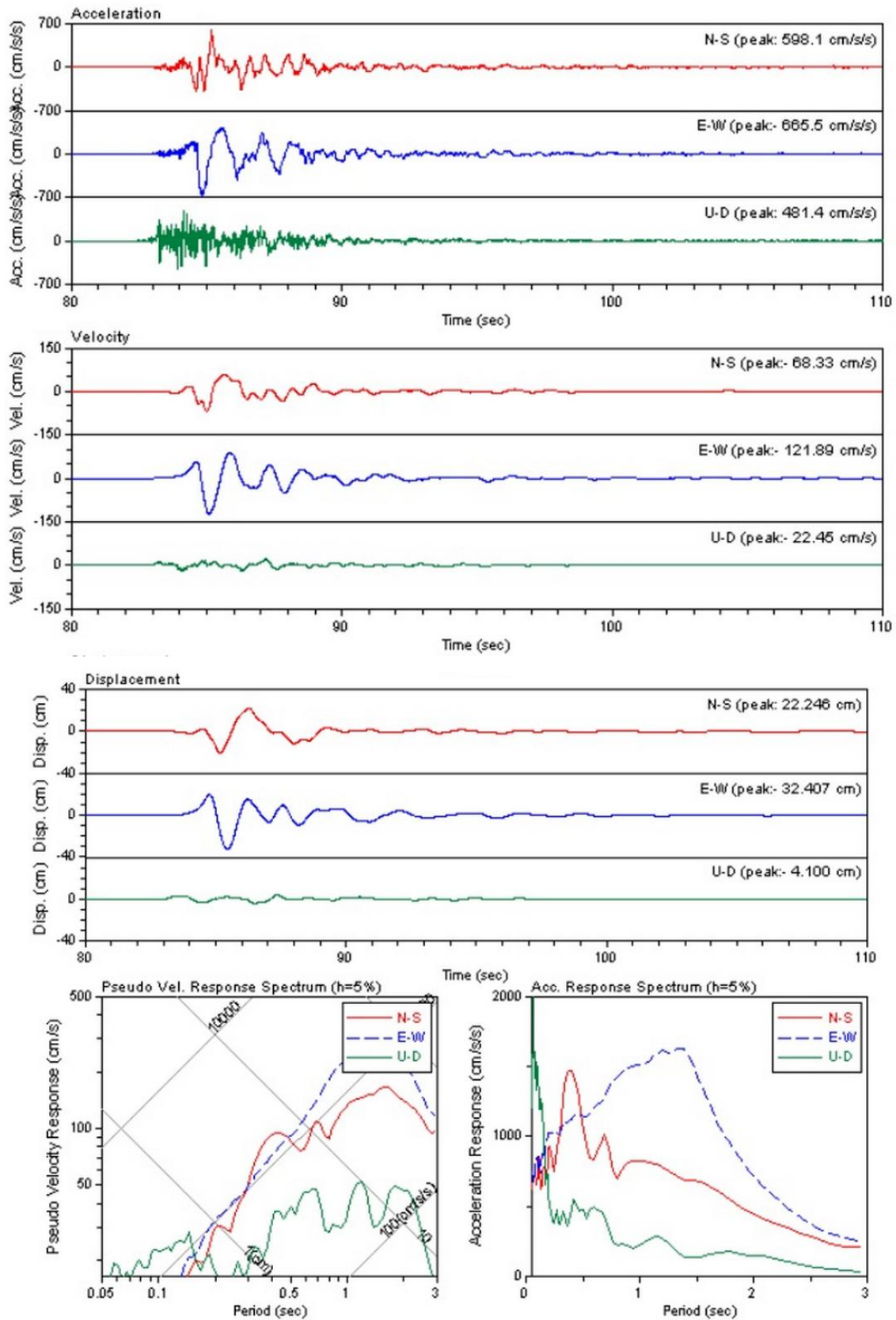
Παρατηρούμε ότι στον δεύτερο σεισμό M_W 6,0 στις 3/2/2014 καταγράφηκαν μεγαλύτερες τιμές επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης στο Ληξούρι σε σχέση με τον πρώτο σεισμό μεγέθους M_W 6,1. Αυτό οφείλεται κυρίως στην μικρότερη απόσταση του Ληξουρίου από το επίκεντρο του 2ου σεισμού: 7km έναντι 9km του πρώτου. Σε συμφωνία με τα παραπάνω βρίσκονται και οι βλάβες στο Ληξούρι που, όπως παρατηρήθηκε, ήταν πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με αυτές που προκάλεσε ο πρώτος σεισμός.



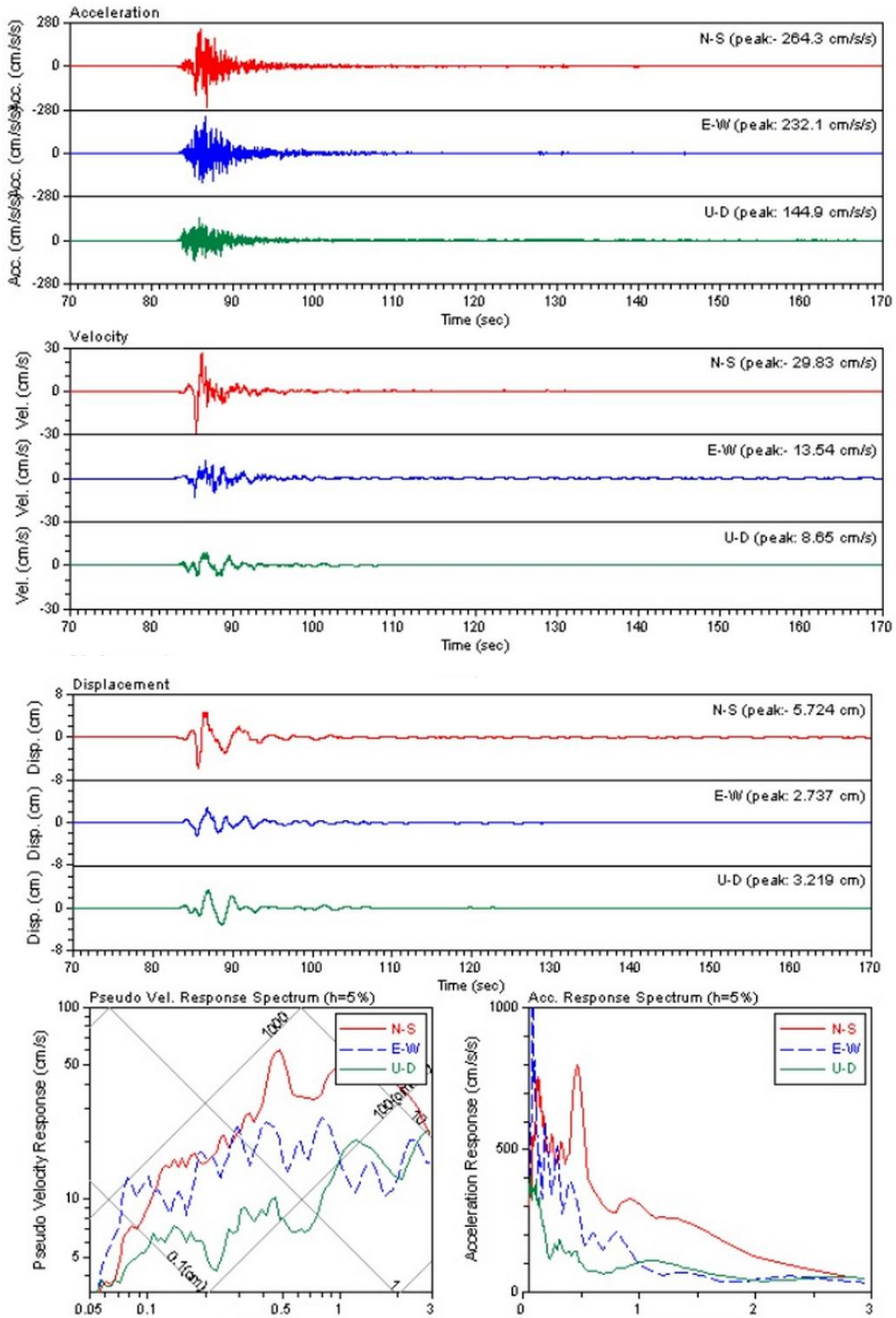
Σχήμα 3-18 Οι καταστροφικές συνέπειες του 2ου σεισμού στο Λιμάνι του Ληξουρίου. Ανατροπή των σκαφών που εδράζονταν στον βόρειο υπήνεμο μώλο.



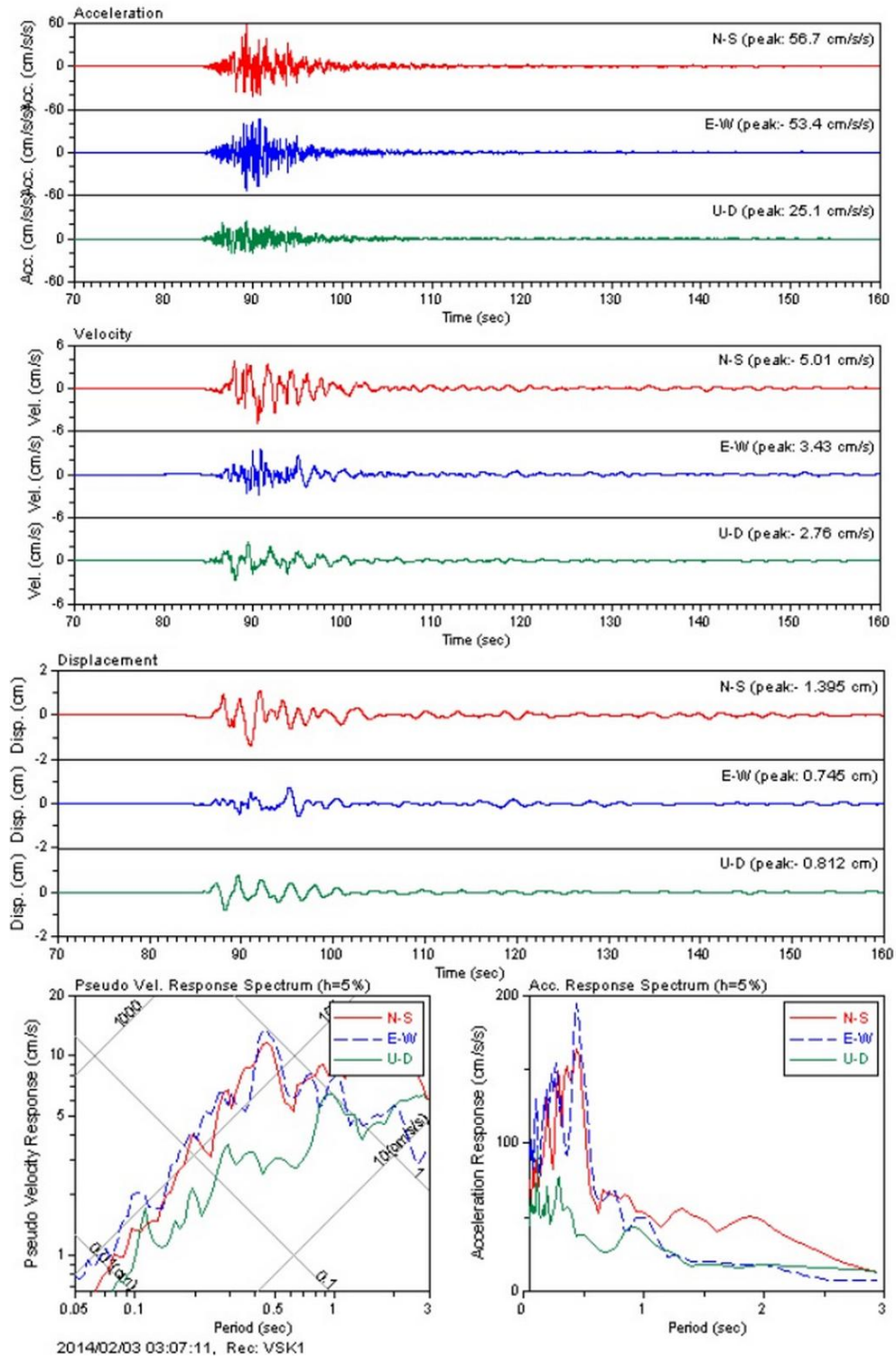
Σχήμα 3-19 Χρονικές ιστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης, καταγραμμένες στον σταθμό (CHV1) και τα αντίστοιχα φάσματα ψευδοταχύτητας και επιτάχυνσης για τον σεισμό της 3/2/2014 και λόγος απόσβεσης $D=0,05$.



Σχήμα 3-20 Χρονικές ιστορίες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης καταγραμμένες στον σταθμό (LXR1) και τα αντίστοιχα φάσματα ψευδοταχύτητας και επιτάχυνσης για τον σεισμό της 3/2/2014 και λόγος απόσβεσης $D=0,05$.



Σχήμα 3-21 Ιστορικά επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης καταγραμμένες στον σταθμό (ARG2) και τα αντίστοιχα φάσματα ψευδοταχύτητας και επιτάχυνσης για τον σεισμό της 3/2/2014 και λόγος απόσβεσης $D=0,05$.



Σχήμα 3-22 Ιστορικά επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετακίνησης καταγραμμένες στον σταθμό (VSK1) και τα αντίστοιχα φάσματα ψευδοταχύτητας και επιτάχυνσης για τον σεισμό της 3/2/2014 και λόγος απόσβεσης $D=0,05$.

4. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

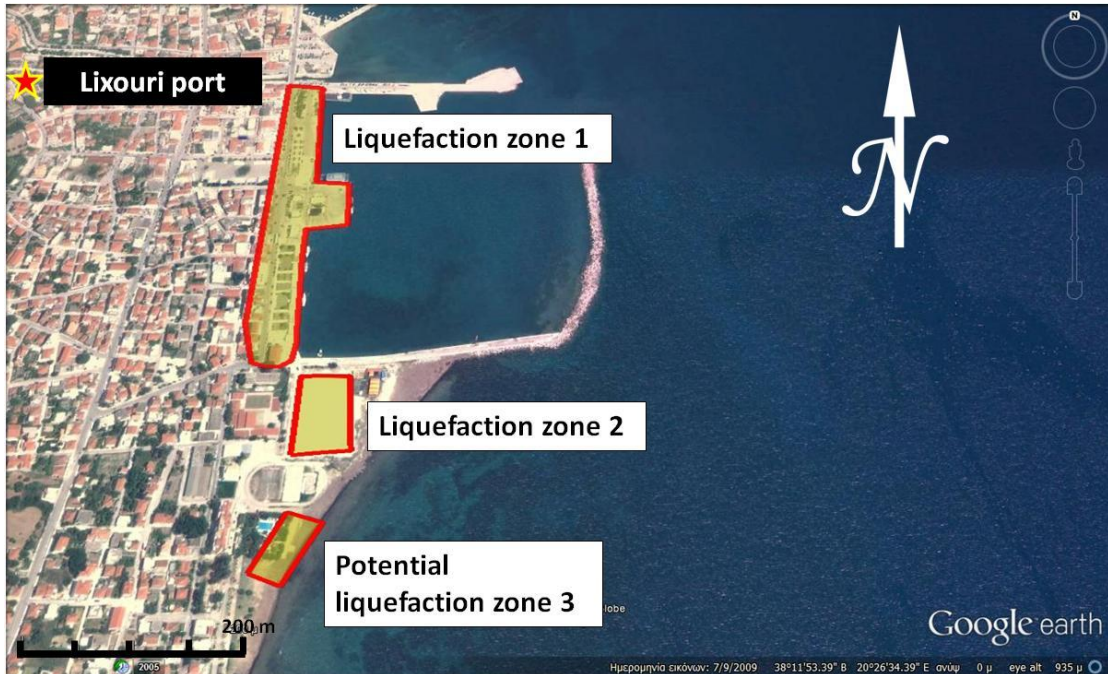
4.1 Εισαγωγή

Οι δύο σεισμικές ακολουθίες που έπληξαν την Κεφαλονιά το 2014 προκάλεσαν εκτεταμένη ρευστοποίηση στα λιμάνια Ληξουρίου και Αργοστολίου (τα δύο από τα τέσσερα κύρια λιμάνια του νησιού) και σημαντικές ζημιές στους αντίστοιχους κρηπιδοτόιχους τους. Το Σχ. 4-1 δείχνει την θέση των τεσσάρων λιμανιών του νησιού: Αργοστόλι, Ληξούρι, Σάμη και Πόρος. Το επακόλουθο της ρευστοποίησης ήταν το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης, που εκδηλώθηκε με το άνοιγμα μεγάλων ρωγμών, κατά κύριο λόγο παράλληλων με την ακτογραμμή και με κίνηση προς το θαλάσσιο μέτωπο. Επιπλέον παρατηρήθηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης και μετακίνησης των τεχνητών ογκολίθων της αποβάθρας στο λιμάνι της Σάμης. Δεν παρατηρήθηκαν βλάβες στο λιμάνι του Πόρου, το οποίο είναι και πιο απομακρυσμένο από το επίκεντρο του σεισμού.



Σχήμα 4-1 Χάρτης της Κεφαλονιάς στον οποίο φαίνονται οι θέσεις των τεσσάρων κύριων λιμένων του νησιού (με πορτοκαλί χρώμα αυτό του Ληξουρίου που υπέστη τις σημαντικότερες βλάβες)

Στα Σχ. 4-2 και 4-3 παρουσιάζονται δορυφορικές φωτογραφίες (Google Earth) των λιμένων Ληξουρίου και Αργοστολίου καθώς και οι ζώνες όπου παρουσιάστηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης (GEER/EERI/ATC Cephalonia, Greece 2014, Version 1).



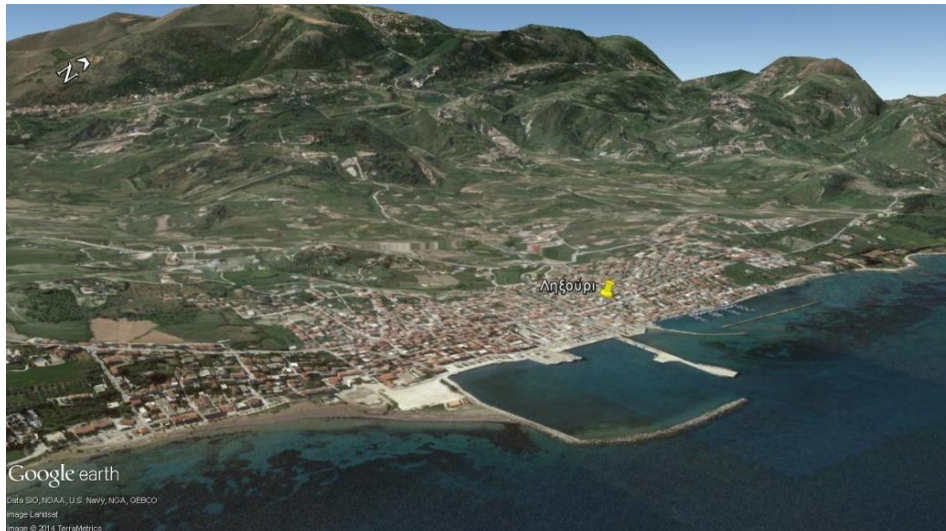
Σχήμα 4-2 Λιμάνι Ληξουρίου. Σημειώνεται η περιοχή ρευστοποίησης κατά μήκος του δυτικού κρηπιδώματος που οδήγησε στην εκδήλωση του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης.



Σχήμα 4-3 Λιμάνι Αργοστολίου. Σημειώνονται οι περιοχές ρευστοποίησης.

4.2 Λιμένας Ληξουρίου

Το θαλάσσιο μέτωπο του λιμένα Ληξουρίου έχει μήκος περίπου 400m (Σχήμα 4-4). Σύμφωνα με πληροφορίες ανακατασκευάστηκε μετά τον καταστροφικό σεισμό του 1953 ($M=7,2$). Ο χώρος του λιμένα βρίσκεται στο παραλιακό τμήμα ανατολικά του Ληξουρίου, σε απόσταση 5,0 km περίπου βορειοδυτικά του Αργοστολίου, 5,0 km περίπου νοτιοδυτικά από τα Δαυγάτα και στο ανατολικό τμήμα της χερσονήσου της Παλικής



Σχήμα 4-4 Γεωγραφική θέση Ληξουρίου (Google Earth)

Μετά τους δύο ισχυρούς σεισμούς που έπληξαν την Κεφαλονιά πραγματοποιήθηκε γεωτεχνική έρευνα στο λιμάνι του Ληξουρίου, που υπέστη τις μεγαλύτερες βλάβες. Εκτιμάται ότι πιθανόν η εκδήλωση ρευστοποίησης έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη μεγάλη έκταση των βλαβών μετά το 2ο κύριο σεισμό (3-2-2014) και όχι τον 1ο κύριο σεισμό (26/1/2014), παρότι το μέγεθος του 2ου σεισμού ήταν παρόμοιο με αυτό του 1ου.

Η γεωτεχνική έρευνα που περιέλαβε δειγματοληπτικές γεωτρήσεις (Γ1 έως Γ11), ερευνητικά φρέατα (Φ1 έως Φ13), επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές, καθώς και η παρουσίαση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων) ανατέθηκε από τη Διεύθυνση Λιμενικών Έργων και Αεροδρομίων (Δ4) του Υ.ΥΠΟ.ΜΕ.ΔΙ στην εταιρεία γεωτεχνικών μελετών ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ Ε.Π.Ε. Σχ. 4-5. Σκοπός της γεωτεχνικής έρευνας ήταν ο προσδιορισμός των γεωτεχνικών συνθηκών, τόσο στην περιοχή έδρασης των κρηπιδοτοίχων όσο και στην περιοχή των χερσαίων χώρων του Ληξουρίου, όπου εμφανίστηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης. Η έρευνα αυτή αποτέλεσε βασική πηγή δεδομένων, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ανάλυση του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης με χρήση των εμπειρικών μοντέλων που περιγράφηκαν στο ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

Θέση και περιγραφή του λιμένα Ληξουρίου

Ο χώρος του λιμένα βρίσκεται στο παραλιακό τμήμα ανατολικά του Ληξουρίου, σε απόσταση 5,0 km περίπου βορειοδυτικά του Αργοστολίου, 5,0 km περίπου νοτιοδυτικά από τα Δαυγάτα και στο ανατολικό τμήμα της χερσονήσου της Παλικής (βλ. Σχ. 4-4).

Οι χερσαίοι χώροι του λιμένα έχουν προκύψει, σύμφωνα με μαρτυρίες, από εκτεταμένες επιχωματώσεις που πραγματοποιήθηκαν το 1953, μετά τους ισχυρούς σεισμούς του Αυγούστου 1953 που έπληξαν το νησί, με τα προϊόντα κατεδάφισης των χαλασμάτων του Ληξουρίου. Βορείως του λιμένα και σε επαφή με τον υπήνεμο μώλο εκβάλλει χείμαρρος (σημείο Α). Ο λιμένας του Ληξουρίου ανακατασκευάστηκε μετά τους σεισμούς του 1953, με τις τελευταίες επεμβάσεις να πραγματοποιούνται τη δεκαετία του 2000. Ο λιμένας έχει ανατολικό προσανατολισμό και περιλαμβάνει γενικά τα εξής (βλ. Σχ. 4-6 και 4-7):

- Λιμενολεκάνη συνολικού εμβαδού 110 στρεμμάτων περίπου.
- Βόρειο υπήνεμο μώλο (τμήμα Α-Β-Γ-Δ-Ε-Ζ-Η-Θ-Ι), συνολικού μήκους 250 m περίπου
- Δυτικό κρηπίδωμα (τμήμα Ι-Κ-Λ-Μ-Ο-Π), συνολικού μήκους 380 m περίπου
- Κεντρικό προβλήτα στο κεντρικό τμήμα του δυτικού κρηπιδώματος (τμήμα Μ-Ν-Ξ-Ο), μήκους 66 m περίπου και πλάτους 48 m περίπου.
- Νότιο προσήνεμο μώλο (τμήμα Π-Ρ-Σ), συνολικού μήκους 285 m περίπου.
- Ανατολικό κυματοθραύστη από λιθορριπές, συνολικού μήκους 320 m περίπου

Τα κρηπίδωματα έχουν κατασκευαστεί με κατακόρυφα μέτωπα από τεχνητούς ογκολίθους, οι οποίοι εδράζονται επάνω σε εξυγιαντική στρώση. Τα βάθη της λιμενολεκάνης μπροστά στο βόρειο υπήνεμο μώλο κυμαίνονται μεταξύ 3,00-6,00 m περίπου, στο δυτικό κρηπίδωμα μεταξύ 3,00-7,00 m περίπου και στον κεντρικό προβλήτα μεταξύ 4,00-5,00 m περίπου.

Γενικές Γεωλογικές πληροφορίες περιοχής.

Στην ευρύτερη παράκτια περιοχή της θέσης του έργου εμφανίζονται πλειοκαινικές αποθέσεις αποτελούμενες από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και ασβεστολίθους, ενώ στα ανώτερα μέλη επικρατούν οι κυανές μάργες. Ο θαλάσσιος χώρος καλύπτεται επιφανειακά από ολοκαινικές αλλουβιακές αποθέσεις αποτελούμενες από άμμους, αργίλους και χάλικες, το πάχος των οποίων αυξάνει προς βορρά στην περιοχή που εκβάλλει χείμαρρος βορείως του υπήνεμου μώλου. Οι χερσαίοι χώροι του λιμένα καλύπτονται σε μεγάλη έκταση από ανθρωπογενείς επιχωματώσεις, κυρίως μετά τους σεισμούς του 1953, σύμφωνα με μαρτυρίες.

Εδαφοτεχνικά χαρακτηριστικά λιμένα

Εξυγιαντική στρώση: Κάτω από τους τεχνητούς ογκολίθους σε όλες τις γεωτρήσεις εκτός από τη Γ7 και μέχρι βάθους 4,60-12,00 m απαντάται στους μεν νεώτερους κρηπιδοτοίχους αργιλοϊλυώδες ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ (GC-GM-SM), μέσης πυκνότητας ως πυκνό, ασβεστολιθικής σύστασης, στους δε παλαιότερους κρηπιδοτοίχους μικροί ψαμμιτικοί ΛΙΘΟΙ και ΧΑΛΙΚΕΣ, μέσης πυκνότητας ως πυκνοί, οι οποίοι έχουν βυθιστεί εν μέρει στον παλαιό μαλακό πυθμένα, λευκόφαιου, τεφρού ως τεφρόφαιου χρώματος.

Στρώμα 1: Κάτω από την εξυγιαντική στρώση στις γεωτρήσεις Γ4 και Γ5 και μέχρι βάθους 7,80– 8,20 m απαντάται αργιλοϊλυώδης ΑΜΜΟΣ ως ΑΜΜΟΪΛΥΣ (ML), τεφρού χρώματος, με όστρακα και στρογγυλεμένα χαλίκια κατά θέσεις (GC-GM).

Στρώμα 2α: Κάτω από το Στρώμα 1 στις γεωτρήσεις Γ4 και Γ5, μέχρι το μέγιστο βάθος που διερευνήθηκε (15,45m), κάτω από τους τεχνητούς ογκολίθους και μέχρι βάθους 8,00 m στη γεώτρηση Γ7 απαντώνται αλλουβιακές αποθέσεις αποτελούμενες από ΑΡΓΙΛΟ χαμηλής ως μέσης πλαστικότητας (CL), μέσης συνεκτικότητας ως σιφρή, αμμώδη κατά θέσεις, τεφρού, τεφροπράσινου, μελανού, μελανοπράσινου ως μελανότεφρου χρώματος, με λεπτά όστρακα και ενστρώσεις πυκνού αργιλοϊλυώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ (GC-GM-SC-SM) κατά θέσεις.

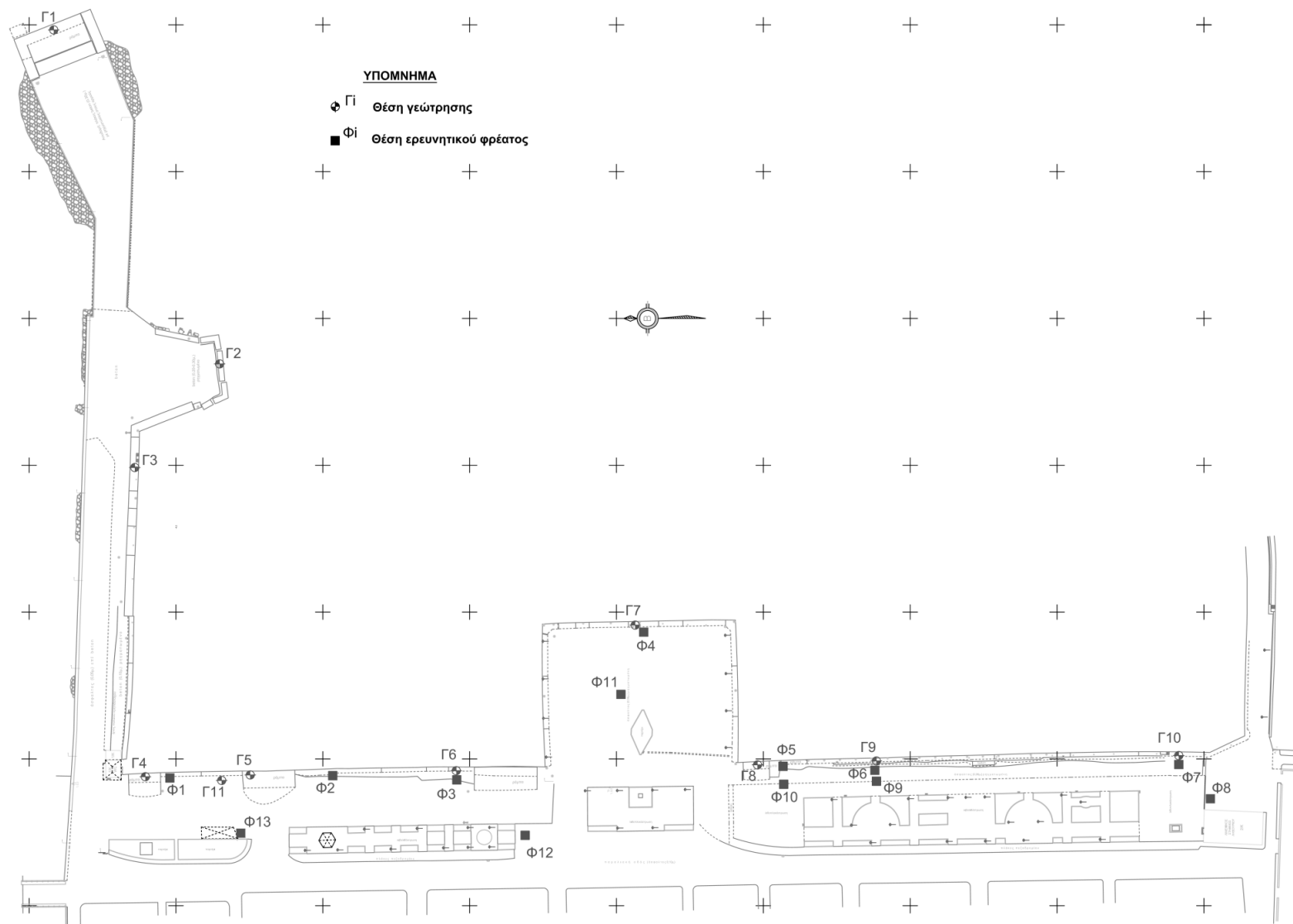
Στρώμα 2β: Κάτω από την εξυγιαντική στρώση στις γεωτρήσεις Γ9 και Γ10 και μέχρι βάθους 6,00–6,30 m απαντώνται αλλουβιακές αποθέσεις αποτελούμενες από ΑΜΜΟΪΛΥ (SM), πυκνή, τεφρού ως τεφροπράσινου χρώματος, με χαλίκια και όστρακα κατά θέσεις.

Στρώμα 3: Τέλος, μέχρι το μέγιστο βάθος που διερευνήθηκε στις γεωτρήσεις Γ4, Γ5, Γ6, Γ7, Γ8, Γ9 και Γ10 απαντάται ΑΡΓΙΛΟΣ χαμηλής ως μέσης πλαστικότητας (CL), σιφρή ως πολύ σιφρή, αμμώδης κατά θέσεις, τεφρού, τεφροπράσινου έως τεφροκύανου χρώματος, με λεπτά όστρακα και ενστρώσεις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ (GC-SC) κατά θέσεις (Αποσαθρωμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΪΚΟ υπόβαθρο).

Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α επισυνάπτονται αναλυτικά οι εδαφικές τομές των γεωτρήσεων Γ4, Γ5, Γ6, Γ7, Γ8, Γ9 και Γ10 (που αφορούν το Δυτικό κρηπίδωμα) προερχόμενες από την γεωτεχνική έρευνα.

Χερσαίοι χώροι λιμενικής ζώνης, ερευνητικά φρέατα Φ8, Φ9, Φ10, Φ11, Φ12 & Φ13.

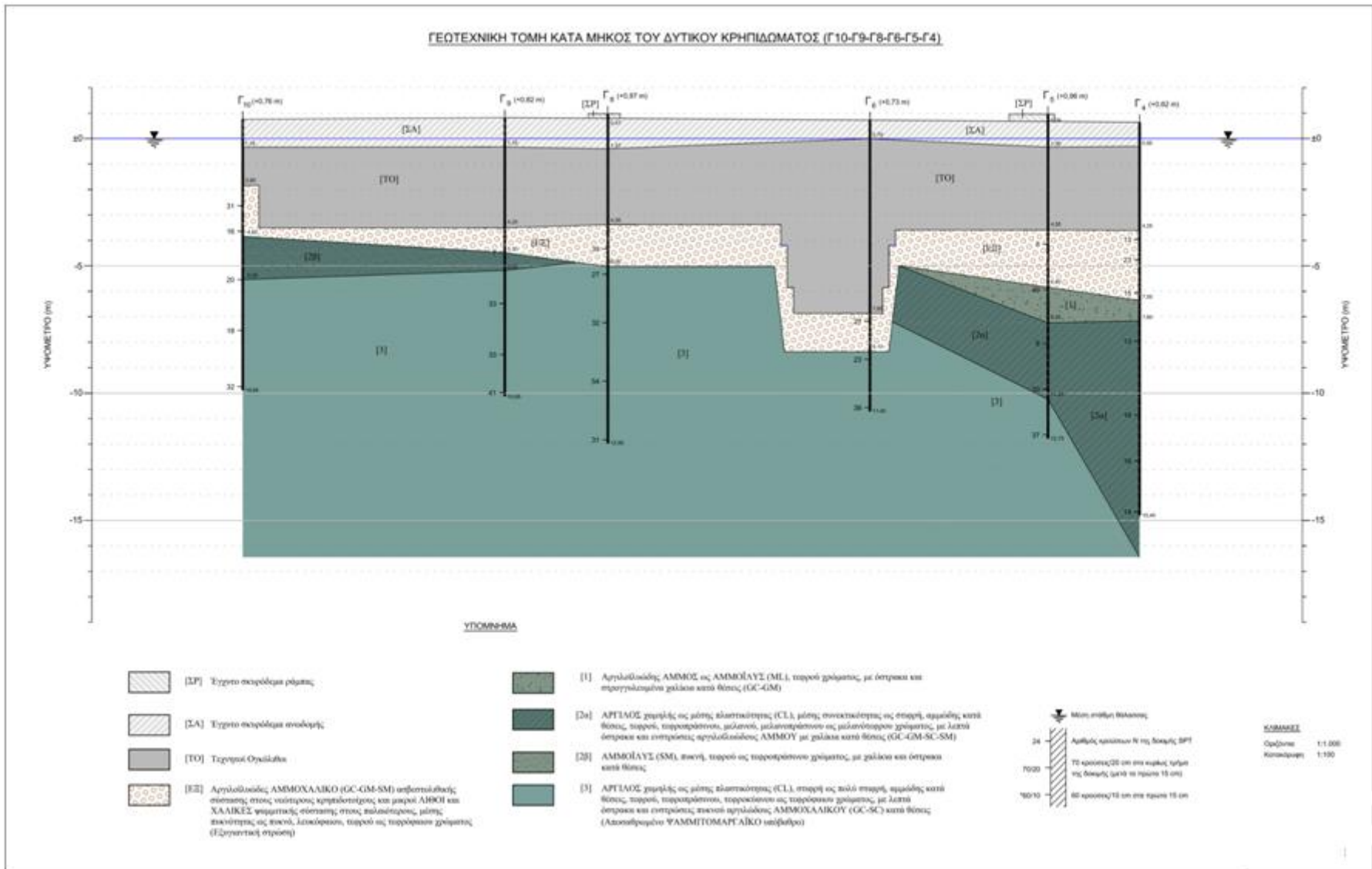
Επιφανειακά στα ερευνητικά φρέατα Φ9 και Φ10 απαντάται πλάκα σκυροδέματος πάχους 0,10 m. Επιφανειακά στα ερευνητικά φρέατα Φ8, Φ11, Φ12 και Φ13 απαντάται ασφαλτικός τάπητας πάχους 0,08-0,10 m. Κάτω από την πλάκα σκυροδέματος στα ερευνητικά φρέατα Φ9 και Φ10 και κάτω από τον ασφαλτικό τάπητα στα ερευνητικά φρέατα Φ8, Φ11 και Φ12 και μέχρι βάθους 0,20- 0,40 m, απαντώνται αμμοχαλικώδη υλικά οδοστρωσίας. Κάτω από τα υλικά οδοστρωσίας στο ερευνητικό φρέαρ Φ10 και μέχρι βάθους 0,70 m απαντάται αμμώδης ΑΡΓΙΛΟΣ, τεφρού ως τεφροπράσινου χρώματος. Κάτω από τα υλικά οδοστρωσίας στο ερευνητικό φρέαρ Φ11 και μέχρι βάθους 0,60 m απαντάται ιλυώδης ΑΜΜΟΣ (SM), καστανού ως καστανόφαιου χρώματος, με χαλίκια και λίθους κατά θέσεις. Βαθύτερα, σε όλα τα φρέατα και μέχρι το μέγιστο βάθος που διερευνήθηκε 2,30 m, απαντώνται υλικά καταδεφίσεων των χαλασμάτων των σεισμών του 1953, ποικίλης σύστασης, τα οποία περιλαμβάνουν πέτρες και λίθους μεγέθους 30-70 cm, γωνιασμένους δομικούς λίθους, κονιάματα, ξύλα, ποικίλα εδαφικά υλικά, μεταλλικά αντικείμενα, κλπ.



Σχήμα 4-5 Τοπογραφικό διάγραμμα του λιμένα Ληξουρίου με τις θέσεις των Γεωτρήσεων Γ-1 έως Γ-10 & των ερευνητικών φρεάτων Φ1 έως Φ13



Σχήμα 4-6 Λιμενολεκάνη Ληξουρίου. Διακρίνονται τα τμήματα που την απαρτίζουν, καθώς και οι θέσεις των γεωτρήσεων



Σχήμα 4-7 Γεωτεχνική τομή κατά μήκος του Δυτικού Κρηπίδωματος

Η ρευστοποίηση προκάλεσε στην περιοχή αυτή την ανάπτυξη μεγάλων οριζόντιων μετακινήσεων (πλευρική εξάπλωση) λόγω των αυξημένων ωθήσεων που ασκήθηκαν από το ρευστοποιημένο έδαφος. Αξιοσημείωτο είναι ότι παρά τη χονδροκόκκη φύση των επιχώσεων χερσαίων χώρων κάτω από τη στάθμη της θάλασσας (υλικά καταδαφίσεων), αυτά αφ'ενός περιέχουν σημαντικό ποσοστό λεπτοκόκκων, αφετέρου δε καλύπτονται πάνω από τη στάθμη της θάλασσας από σχετικά χαμηλής διαπερατότητας υλικά, τα οποία δεν διευκολύνουν την κίνηση του υπό πίεση νερού προς τα πάνω, έτσι ώστε να εκτονώνονται γρήγορα οι αναπτυσσόμενες υπερπιέσεις πόρων κατά τη διάρκεια της ισχυρής σεισμικής δόνησης.

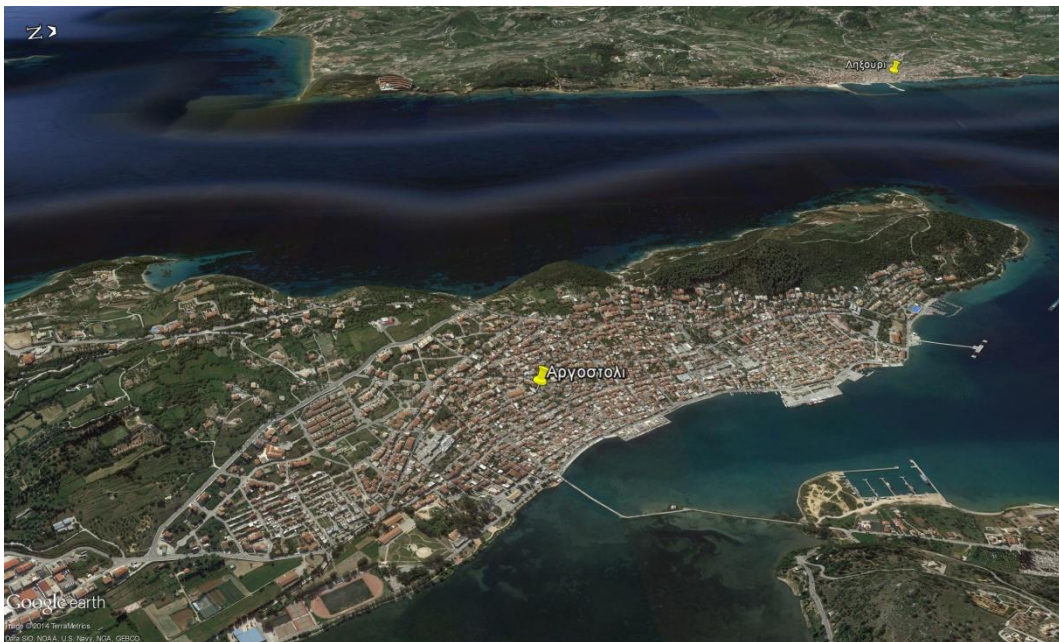


Σχήμα 4-8 Οι οριζόντιες μετακινήσεις εμφανίστηκαν σε ζώνη πλάτους 70 μέτρων στην χερσαία ζώνη και έφτασαν μέγιστη τιμή 1,52m

4.3 Λιμένας Αργοστολίου

Εισαγωγή

Το Αργοστόλι είναι η μεγαλύτερη πόλη της Κεφαλονιάς και πρωτεύουσα του Νομού Κεφαλληνίας. Κατά την απογραφή του 2011 είχε 9.748 κατοίκους. Είναι επίσης πρωτεύουσα της επαρχίας Κραναίας που περιλαμβάνει το νότιο και νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού. Ο κόλπος του Αργοστολίου που το περιβάλλει είναι ένα από τα ασφαλέστερα λιμάνια του κόσμου. Από το 1757 το Αργοστόλι άρχισε να μεγαλώνει σταδιακά. Όταν τα Επτάνησα πέρασαν στους Άγγλους, περίπου το 1810, η Κεφαλονιά όπως και τα άλλα Επτάνησα είχε το δικό της Άγγλο Κυβερνήτη. Ένας από αυτούς τους κυβερνήτες ήταν ο De Bosset (1810-1814), ο οποίος έκανε πολλά έργα στο Αργοστόλι και υπήρξε ο δημιουργός της γέφυρας του Αργοστολίου. Η γέφυρα αυτή, μήκους περίπου ενός χιλιομέτρου, συνέδεε το Αργοστόλι με την απέναντι πλευρά του κόλπου του Αργοστολίου, Σχ. 4-9.



Σχήμα 4-9 Δορυφορική φωτογραφία (Google Earth) της περιοχής του Αργοστολίου. Διακρίνεται η γέφυρα του De Bosset.

Ιστορικά, αναφέρεται ότι το σύνολο της ακτογραμμής του Αργοστολίου καταστράφηκε, εξαιτίας των ισχυρών σεισμικών γεγονότων του 1953 (μεγέθους 7,3) που έπληξαν την Κεφαλονιά.



Σχήμα 4-10 Το λιμάνι του Αργοστολίου μετά τον καταστροφικό σεισμό του 1953



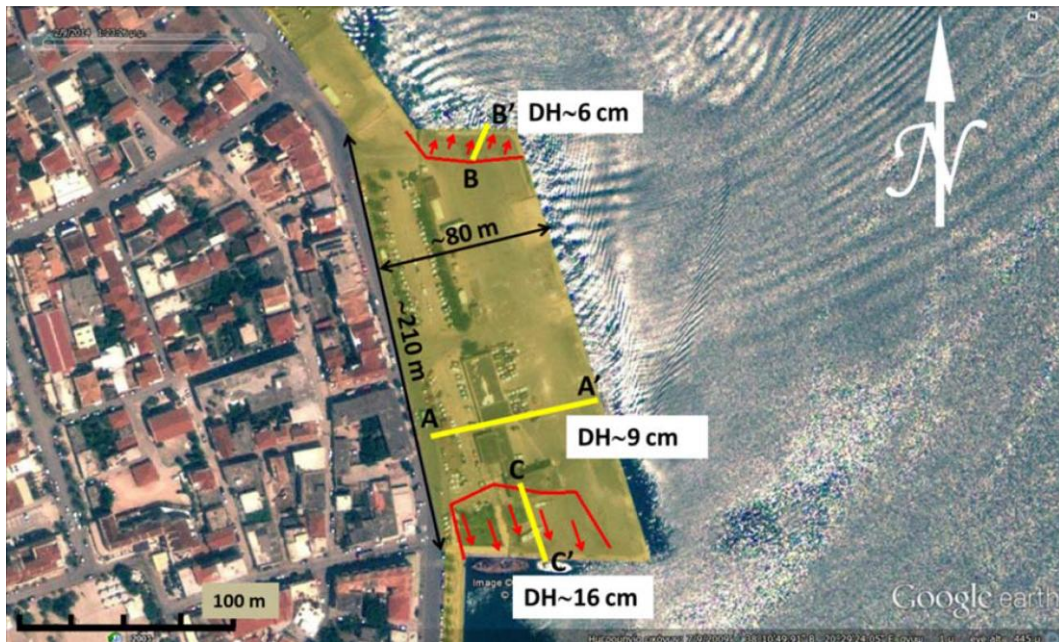
Σχήμα 4-11 Βλάβες στον κρηπιδότοιχο μετά το σεισμικό γεγονός του 1953

Το λιμάνι ανακατασκευάστηκε με υλικά πλήρωσης, τα οποία ως επί τον πλείστον ήταν συντρίμια ή προϊόντα κατεδάφισης κτιρίων φέρουσας τοιχοποιίας. Επιπλέον, κατά την ανακατασκευή και πάνω από τα υλικά πλήρωσης τοποθετήθηκε πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος πάχους περίπου 0,60m και με βάθος θεμελίωσης όχι περισσότερο από 1,50m.

Ως αποτέλεσμα των πρόσφατων ισχυρών σεισμών του 2014, το λιμάνι του Αργοστολίου καθώς και η παρακείμενη ακτογραμμή υπέστησαν ρευστοποίηση και πλευρική εξάπλωση. Το θαλάσσιο μέτωπο της πόλης έχει μήκος περίπου 1,1km. Φαινόμενα ρευστοποίησης παρατηρήθηκαν κατά μήκος του μετώπου και σε ορισμένα σημεία του ιδιαίτερα έντονα. Σε γενικές γραμμές, οι βλάβες στο λιμάνι του Αργοστολίου ήταν μικρότερες σε σχέση με αυτές του λιμένα Ληξουρίου, που ήταν πιο κοντά στο επίκεντρο του σεισμού.

Λόγω της ρευστοποίησης και της ύπαρξης ελεύθερου μετώπου, άνοιξαν μεγάλες ρωγμές στην περιοχή του λιμένα, καθώς και στην ασφαλτοστρωμένη ακτογραμμή της πόλης. Οι ρωγμές ήταν γενικά παράλληλες στο θαλάσσιο μέτωπο και τα πλάτη τους ελαττώνονταν με την απομάκρυνση από το μέτωπο, με τις τελευταίες να εμφανίζονται περίπου 80 μέτρα προς την ενδοχώρα.

Στο Σχ. 4-12 παρουσιάζονται οι μετρηθείσες τιμές των πλευρικών μετακινήσεων σε τρεις τομές (A-A', B-B' και C-C') κάθετες στην λιμενική ζώνη, που έχει μήκος 210m και πλάτος 80m. Οι μετρηθείσες τιμές κυμαίνονται από 6cm (B-B') έως 16cm (C-C').



Σχήμα 4-12 Περιοχή εμφάνισης ρωγμών και μέγιστες πλευρικές μετακινήσεις στον κεντρικό προβλήτα του Αργοστολίου.

Στην περιοχή του Αργοστολίου δεν έχει πραγματοποιηθεί γεωτεχνική έρευνα και λόγω έλλειψης γεωτεχνικών δεδομένων στην περιοχή ήταν αδύνατη η χρήση των εμπειρικών μοντέλων πρόβλεψης πλευρικής εξάπλωσης.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ - ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕ ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΕΙΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης που αφορούν την εκδήλωση του φαινομένου της πλευρικής εξάπλωσης στην παραλιακή ζώνη του Ληξουρίου κατά τον σεισμό της 03-02-2014 και ειδικότερα στο δυτικό κρηπίδωμα του λιμένα. Στην αρχή παρουσιάζονται τα γεωτεχνικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στα εμπειρικά μοντέλα του Youd et al (2002) και Youd et al. (2013) από Daniel T. Gillins, και Steven F. Bartlett. Στη συνέχεια συγκρίνονται οι μετρηθείσες τιμές της πλευρικής εξάπλωσης με την εκτίμηση που δίνουν τα εμπειρικά μοντέλα.

Επιπλέον παρουσιάζονται οι μετρηθείσες τιμές πλευρικής εξάπλωσης στο θαλάσσιο μέτωπο του Αργοστολίου

5.2 Σύγκριση Παρατηρηθείσας και Προβλεπόμενης Συμπεριφοράς στο Λιμένα Ληξουρίου.

Στην παρούσα Διατριβή, για τη σύγκριση μεταξύ παρατηρηθείσας και υπολογισθείσας συμπεριφοράς, χρησιμοποιείται η μέθοδος Youd et al. (2002) Εξ. (26) και Youd et al. (2013) Εξ.(30), με τις εξής παραδοχές:

- 1) περίπτωση πρανούς με ελεύθερο μέτωπο χωρίς ύπαρξη ήπιας κλίσης
- 2) απόσταση από ρήγμα $R=7\text{km}$ (η ισοδύναμη απόσταση $R_{eq}=7,62\text{km}$)
- 3) μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $a_{max}=0.57g$ όπως μετρήθηκε από τον επιταχυνσιογράφο LXRΒ
- 4) μέγεθος σεισμού $M_w=6.0$
- 5) αθροιστικό πάχος ρευστοποιήσιμων στρώσεων (στρώσεις για τις οποίες ισχύει $(N1)_{60}<15$) T15 με χρήση της μεθόδου Idriss και Boulanger (2006) τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται παρακάτω

- 6) ποσοστό λεπτών (που αντιστοιχεί στο πάχος T_{15}), F_{15} ως ο γεωμετρικός μέσος των ποσοστών λεπτών των ρευστοποιήσιμων στρωμάτων από τις κοκκομετρικές καμπύλες της γεωτεχνικής έρευνας
- 7) μέση διάμετρος κόκκων στο πάχος T_{15} , ($D_{50_{15}}$) ομοίως όπως προκύπτει από τις κοκκομετρικές καμπύλες των εν δυνάμει ρευστοποιήσιμων στρωμάτων.
- 8) Ταξινόμηση εδάφους και επιλογή κατάλληλων τιμών S_l , με βάση τις εδαφικές τομές των γεωτρήσεων (βλ. Παράρτημα Α) της γεωτεχνικής έρευνας.



Σχήμα 5-1 Δορυφορική φωτογραφία (Google Earth) του λιμένα Ληξουρίου με τις θέσεις των τομών κατά μήκος των οποίων πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις μετακινήσεων

Στο Σχ. 5-1 απεικονίζονται με κίτρινες γραμμές οι θέσεις των μετρημένων τιμών των οριζόντιων μετακινήσεων από την ομάδα GEER (2014) και συγκεκριμένα την γεωτεχνική ομάδα του εργαστηρίου Πατρών. Στον Πίνακα του ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΟΣ δίνονται λεπτομερή στοιχεία για τις συντεταγμένες των σημείων καθώς και των μετρημένων τιμών μετακίνησης που αναπτύχθηκαν προς τη διεύθυνση του θαλάσσιου μετώπου. Φαίνονται επίσης οι ακριβείς θέσεις των γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στον λιμένα του Ληξουρίου μετά τους ισχυρούς σεισμούς (ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ 2014). Από αυτές τις γεωτρήσεις συλλέχθηκαν χρήσιμα στοιχεία για τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά της χερσαίας περιοχής κοντά στο θαλάσσιο μέτωπο Πιν 5-1. Τέλος, οι κόκκινες γραμμές αποτελούν τις τομές και ενώνουν τα σημεία εμφάνισης των ρωγμών μέχρι την μεγαλύτερη απόσταση εμφάνισης από τον κρηπιδότοιχο.

Στα επόμενα παρουσιάζονται διαγράμματα απόστασης από το ελεύθερο μέτωπο (κρηπιδότοιχος) - αθροιστική μετακίνηση (άθροισμα ρωγμών), τα οποία αποτελούν αντικείμενο ανάλυσης και σύγκρισης με τα μοντέλα πρόβλεψης πλευρικής εξάπλωσης. Ωστόσο, λόγω έλλειψης γεωτεχνικών δεδομένων για την ευρύτερη παραθαλάσσια περιοχή του Ληξουρίου, η ανάλυση πλευρικής εξάπλωσης περιορίστηκε στο δυτικό κρηπίδωμα του λιμένα Ληξουρίου και συγκεκριμένα σε οκτώ συνολικά τομές, όπως φαίνεται και στο Σχ. 5-2, με αριθμούς (από βόρεια προς νότια) 18, 17, 16, 15, 13, 12, 10 και 9. Γεωτεχνικά δεδομένα για την εκτίμηση της πλευρικής εξάπλωσης αντλήθηκαν από τις γεωτρήσεις που απεικονίζονται επίσης στον χάρτη. Χρησιμοποιήθηκε η πλησιέστερη γεώτρηση για την εκάστοτε τομή, δηλαδή για την τομή 18 χρησιμοποιήθηκε η γεώτρηση Γ4, για την τομή 17 η Γ5, για την 16 και 15 η Γ6, για την 12 και 13 η Γ9, για την 10 και 9 η Γ10.

Σημειώνεται ότι αν και για τον Βόρειο υπήνεμο μώλο τον Κεντρικό προβλήτα και το Νότιο προσήνεμο μώλο είναι διαθέσιμες μετρηθείσες τιμές οριζόντιων μετακινήσεων (καθώς και αποτελέσματα γεωτρήσεων) δεν μπορεί να αναλυθεί το φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης λόγω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των παραπάνω τμημάτων του λιμένα. Οι ρωγμές στα παραπάνω τμήματα είχαν ποικίλο προσανατολισμό και αυτό οφείλεται 1) στην ύπαρξη θαλασσίου μετώπου σε δύο διαστάσεις και 2) στο πολύ μικρό πλάτος τους σε σχέση με το μήκος τους.



Σχήμα 5-2 Δορυφορική φωτογραφία (Google Earth) του λιμένα Ληξουρίου με τις χρησιμοποιηθείσες γεωτρήσεις.

Πίνακας 5-1 Πάχος και γεωτεχνικά χαρακτηριστικά ρευστοποιήσιμου εδάφους

ΤΟΜΕΣ	ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ	T15 αθρ. πάχος ρευστ. στρωμάτ $N_{1,60 < 15}$ $FS < 1$ (m)	F_{15} %	$D_{50_{15}}$ σε mm	SI (τιμές α _i)	Κατάταξη εδάφους
18	Γ4	2,00	20	1,50	1	GM
17	Γ5	4,60	27	0,22	1	GM
16	Γ6	2,40	18	0,30	1	GM
15	Γ6	2,40	18	0,30	1	GM
13	Γ9	1,40	15	0,17	4 & 5	ML
12	Γ9	4,00	15	0,17	4 & 5	ML
10	Γ10	4,00	15	0,17	2 & 3	GM-SM
9	Γ10	4,00	15	0,17	2 & 3	GM-SM

GM: ιλυώδες αμμοχάλικο

ML: αργιλοϊλυώδης άμμος

SM: λεπτή - ιλυώδης άμμος

Τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά ($D_{50_{15}}$, F_{15} και SI), προέρχονται από τις αντίστοιχες γεωτρήσεις.

Πίνακας 5-2 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά των 8 τομών που αναλύθηκαν

Σημεία	Απόσταση από μέτωπο L (m)	Ύψος κατακόρυφου μετώπου H (m)	Λόγος ύψους προς απόσταση $W = (H/L) * 100\%$
Τομή 18			
A18	45	4,25	9,46
B18	35	4,25	12,32
C18	32	4,25	13,49
D18	23	4,25	18,64
E18	17	4,25	24,85
F18	6	4,25	67,46
G18	2	4,25	212,50
Τομή 17			
A17	69,2	4,60	6,58
B17	41,45	4,60	10,98
C17	29,8	4,60	15,27
D17	27,1	4,60	16,79
E17	18,1	4,60	25,14
F17	11,1	4,60	41,00
G17	5,2	4,60	87,50
H17	0,8	4,60	568,75
Τομή 16			
A16	91,2	7,60	8,33
B16	57,4	7,60	13,24
C16	42,85	7,60	17,74
D16	33,1	7,60	22,96
E16	26,54	7,60	28,64
F16	21	7,60	36,19
G16	16,3	7,60	46,63
H16	4,8	7,60	158,33
Τομή 15			
A15	89,7	7,60	8,47
B15	69,3	7,60	10,96
C15	39,17	7,60	19,40
D15	24,38	7,60	31,17
E15	19,72	7,60	38,54
F15	17,62	7,60	43,13
G15	10,47	7,60	72,59
Τομή 13			
A13	81,8	4,33	5,29
B13	72,2	4,33	6,00
C13	41,25	4,33	10,50
D13	23,8	4,33	18,19
E13	17,75	4,33	24,39
F13	13,64	4,33	31,74
G13	9	4,33	48,11
Τομή 12			
A12	88,2	4,33	4,91
B12	73,6	4,33	5,88
C12	44,5	4,33	9,73
D12	34,5	4,33	12,55
E12	28,3	4,33	15,30

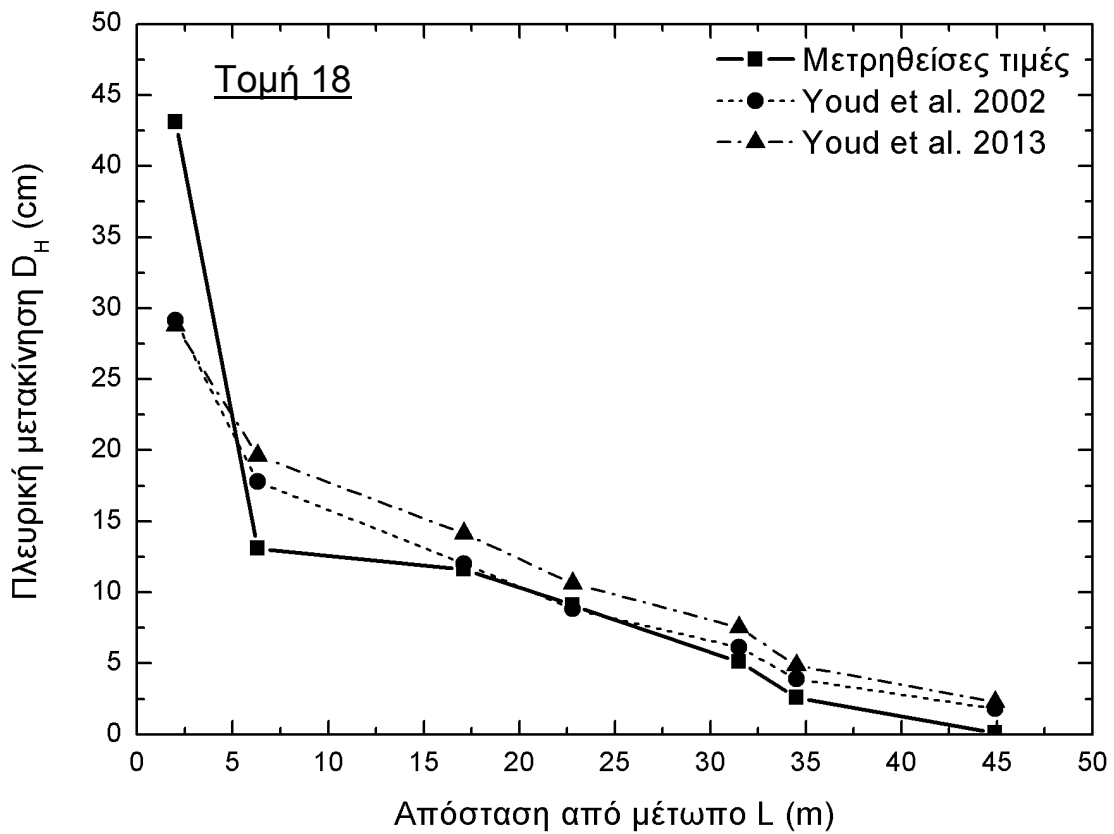
F12	25,7	4,33	16,85
G12	22,9	4,33	18,91
H12	15,4	4,33	28,12
I12	9,64	4,33	44,92
J12	5,13	4,33	84,41
Τομή 10			
A10	70	2,60	3,71
B10	66	2,60	3,94
C10	29,5	2,60	8,81
D10	26,6	2,60	9,77
E10	22,2	2,60	11,71
F10	20,75	2,60	12,53
G10	16,32	2,60	15,93
H10	14,85	2,60	17,51
I10	8,8	2,60	29,55
J10	4,5	2,60	57,78
Τομή 9			
A9	32,7	2,60	7,95
B9	8	2,60	32,50
C9	5,9	2,60	44,07



Σχήμα 5-3 Βλάβες κατά μήκος του Δυτικού κρητιδώματος του Λιμένα Ληξουρίου, λόγω πλευρικής εξάπλωσης.

Πίνακας 5-3 Υπολογιζόμενες μετακινήσεις DH(cm) για την Τομή 18

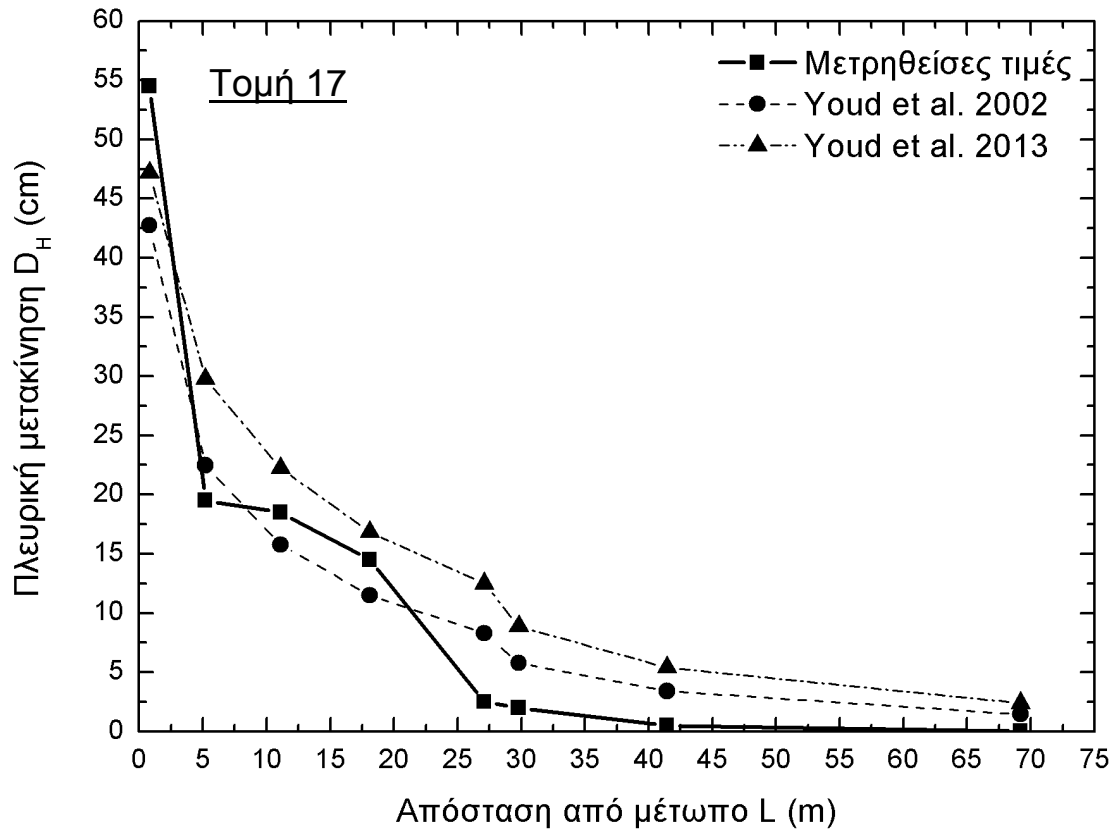
ΤΟΜΗ 18 Γ4	ΑΠΟΣΤΑΣΗ L ΑΠΟ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΜΕΤΩΠΟ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ σε cm	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΡΩΓΜΗ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΗΜΕΙΟ σε cm	τιμές οριζόντιας μετακίνησης κατά YOUNG σε cm	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ YOUNG	τιμές από YOUNG 2013	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ YOUNG 2013
G18	2	43,1	30	11,37	29,16	9,13	28,76
F18	6	13,1	1,5	5,77	17,78	5,48	19,63
E18	17	11,6	2,5	3,19	12,02	3,51	14,15
D18	23	9,1	4	2,69	8,83	3,09	10,63
C18	32	5,1	2,5	2,22	6,13	2,68	7,54
B18	35	2,6	2,5	2,11	3,91	2,57	4,86
A18	45	0,1	0,1	1,80	1,80	2,29	2,29



Σχήμα 5-4 Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm)

Πίνακας 5-4 Υπολογιζόμενες μετακινήσεις D_H (cm) για την Τομή 17

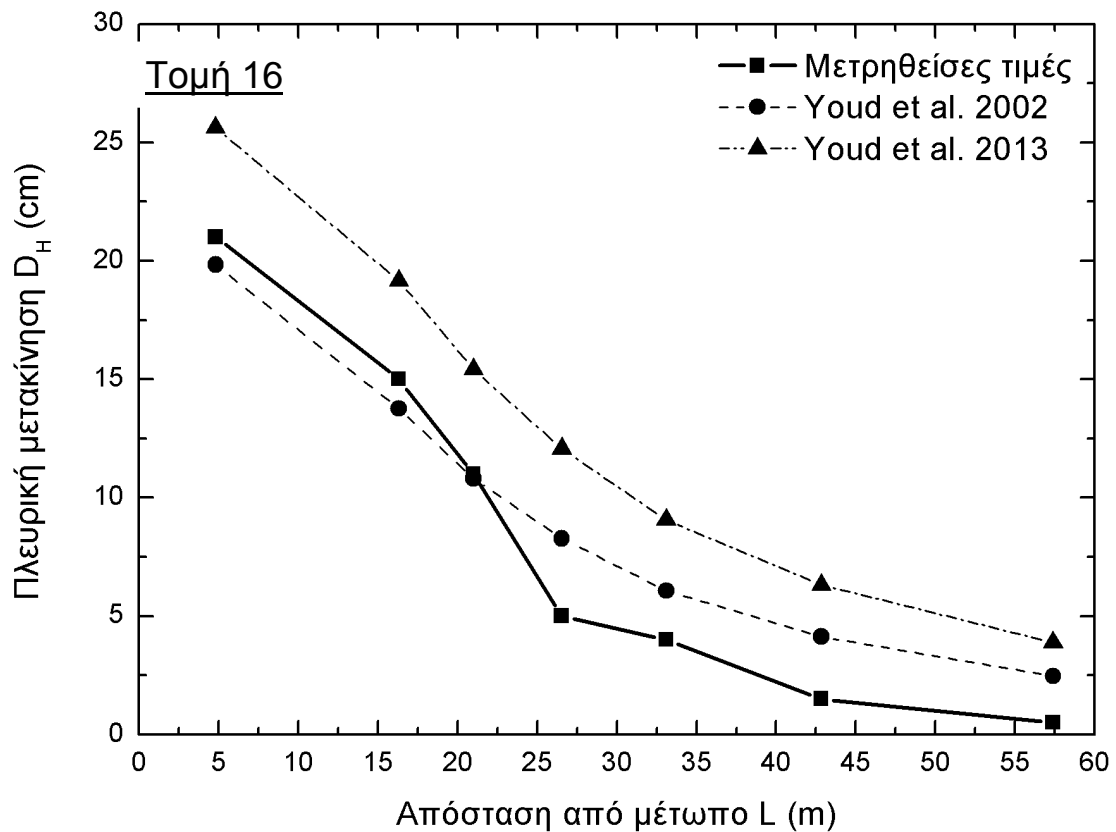
ΤΟΜΗ 17 τιμές από γεώτρηση Γ5	ΑΠΟΣΤΑΣΗ L ΑΠΟ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΜΕΤΩΠΟ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΡΩΓΜΗ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΗΜΕΙΟ	τιμές οριζόντιας μετακίνησης κατά ΥΟΥΔ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ ΥΟΥΔ	τιμές από ΥΟΥΔ 2013	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ ΥΟΥΔ 2013
H17	0,8	54,5	35	20,27	42,75	17,39	47,18
G17	5,2	19,5	1	6,69	22,47	7,56	29,79
F17	11,1	18,5	4	4,27	15,78	5,39	22,23
E17	18,1	14,5	12	3,20	11,51	4,34	16,83
D17	27,1	2,5	0,5	2,52	8,31	3,63	12,49
C17	29,8	2	1,5	2,38	5,79	3,48	8,87
B17	41,45	0,5	0,5	1,96	3,41	3,00	5,39
A17	69,2	0	0	1,45	1,45	2,39	2,39



Σχήμα 5-5 Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης D_H (cm)

Πίνακας 5-5 Υπολογιζόμενες μετακινήσεις DH(cm) για την Τομή 16

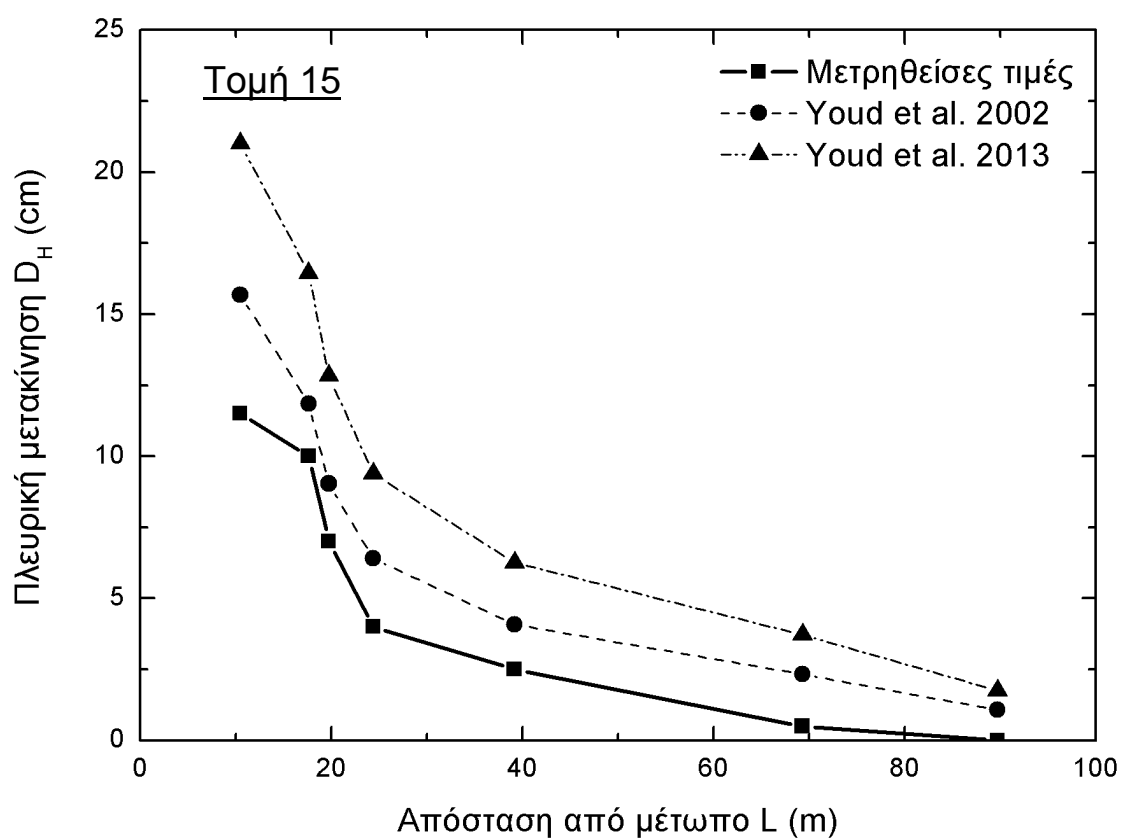
ΤΟΜΗ 16 τιμές από γεώτρηση Γ6	ΑΠΟΣΤΑΣΗ L ΑΠΟ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΜΕΤΩΠΟ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΡΩΓΜΗ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΗΜΕΙΟ	τιμές οριζόντιας μετακίνησης κατά ΥΟΥΔ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ ΥΟΥΔ	τιμές από ΥΟΥΔ 2013	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ ΥΟΥΔ 2013
H16	4,8	21	0	6,08	18,78	6,46	23,88
G16	16,3	15	4	2,95	12,70	3,75	17,42
F16	21	11	6	2,54	9,75	3,35	13,68
E16	26,54	5	1	2,21	7,21	3,02	10,33
D16	33,1	4	2,5	1,94	5,00	2,73	7,31
C16	42,85	1,5	1	1,66	3,06	2,44	4,58
B16	57,4	0,5	0,5	1,40	1,40	2,14	2,14



Σχήμα 5-6 Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm)

Πίνακας 5-6 Υπολογιζόμενες μετακινήσεις D_H (cm) για την Τομή 15

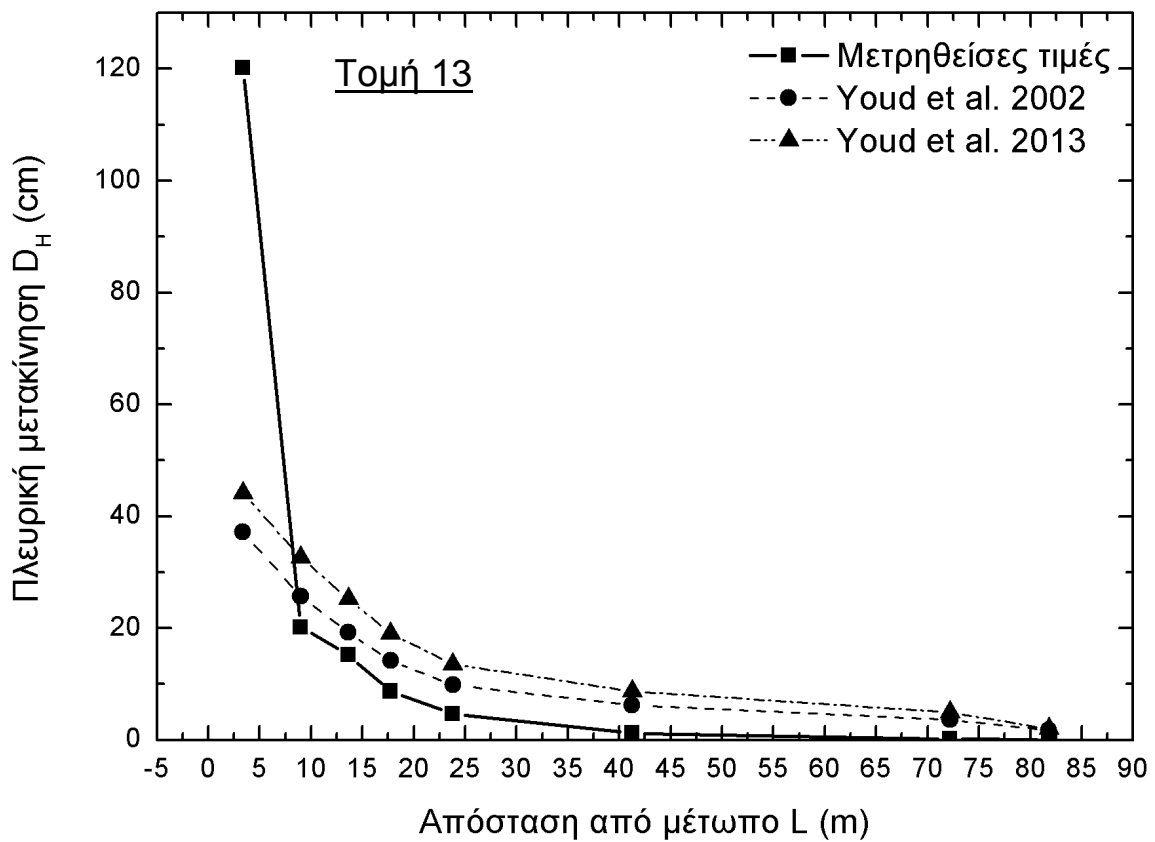
ΤΟΜΗ 15 Γ6	ΑΠΟΣΤΑΣΗ L ΑΠΟ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΜΕΤΩΠΟ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΡΩΓΜΗ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΗΜΕΙΟ	τιμές οριζόντιας μετακίνησης κατά ΥΟΥΔ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ ΥΟΥΔ	τιμες από ΥΟΥΔ 2013	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ ΥΟΥΔ 2013
G15	10,47	11,5	1,5	3,83	15,69	4,56	21,02
F15	17,62	10	3	2,82	11,86	3,62	16,45
E15	19,72	7	3	2,63	9,04	3,44	12,83
D15	24,38	4	1,5	2,32	6,40	3,13	9,39
C15	39,17	2,5	2	1,75	4,08	2,54	6,26
B15	69,3	0,5	0,5	1,25	2,33	1,97	3,72
A15	89,7	0	0	1,07	1,07	1,75	1,75



Σχήμα 5-7 Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης D_H (cm)

Πίνακας 5-7 Υπολογιζόμενες μετακινήσεις DH(cm) για την Τομή 13

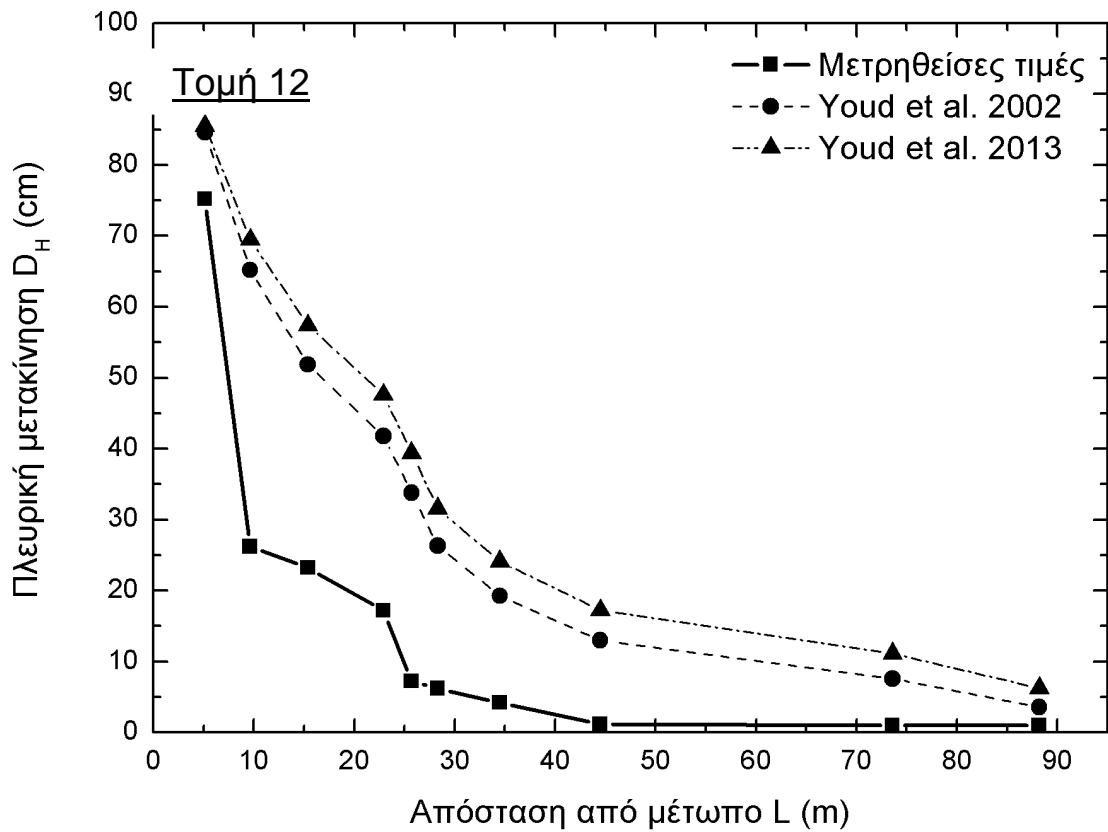
ΤΟΜΗ 13 Γ9	ΑΠΟΣΤΑΣΗ L ΑΠΟ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΜΕΤΩΠΟ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΡΩΓΜΗ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΗΜΕΙΟ	τιμές οριζόντιας μετακίνησης κατά ΥΟΥΔ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ ΥΟΥΔ	τιμες από ΥΟΥΔ 2013	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ ΥΟΥΔ 2013
H13	3,37	120,2	100	11,53	37,20	11,51	44,18
G13	9	20,2	5	6,45	25,67	7,44	32,67
F13	13,64	15,2	6,5	5,04	19,22	6,18	25,23
E13	17,75	8,7	4	4,31	14,18	5,50	19,05
D13	23,8	4,7	3,5	3,62	9,87	4,82	13,56
C13	41,25	1,2	1	2,62	6,24	3,78	8,73
B13	72,2	0,2	0,1	1,88	3,62	2,94	4,96
A13	81,8	0,1	0,1	1,75	1,75	2,78	2,01



Σχήμα 5-8 Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm)

Πίνακας 5-8 Υπολογιζόμενες μετακινήσεις DH(cm) για την Τομή 12

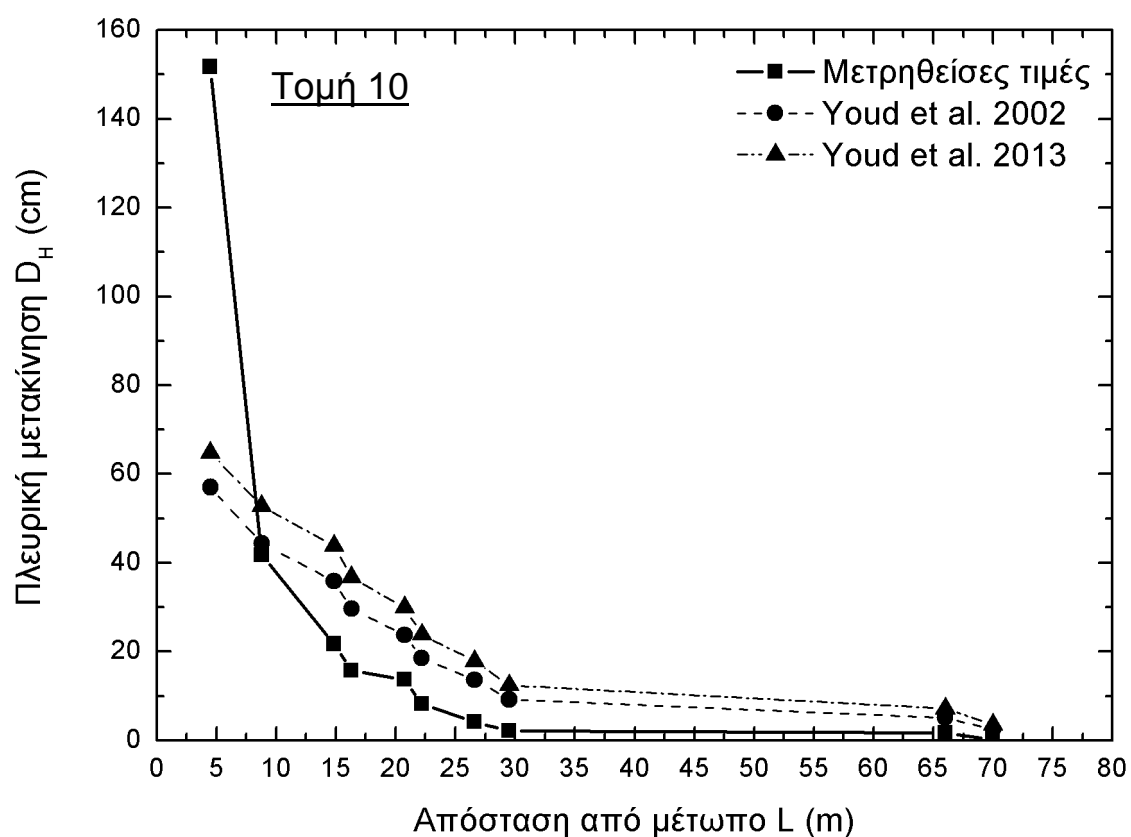
ΤΟΜΗ 12	ΑΠΟΣΤΑΣΗ L ΑΠΟ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΜΕΤΩΠΟ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΡΩΓΜΗ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΗΜΕΙΟ	τιμές οριζόντιας μετακίνησης κατά YOUNG σε cm	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ YOUNG	τιμες από YOUNG 2013	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ YOUNG 2013
J12	5,13	75,2	49	19,37	84,57	15,99	85,48
I12	9,64	26,2	3	13,34	65,20	12,08	69,49
H12	15,4	23,2	6	10,11	51,87	9,81	57,41
G12	22,9	17,2	10	7,99	41,76	8,22	47,61
F12	25,7	7,2	1	7,46	33,77	7,81	39,39
E12	28,3	6,2	2	7,05	26,31	7,48	31,58
D12	34,5	4,2	3	6,27	19,26	6,85	24,10
C12	44,5	1,2	0,2	5,39	12,99	6,12	17,25
B12	73,6	1	0	4,00	7,60	4,89	11,14
A12	88,2	1	1	3,60	3,60	4,51	6,25



Σχήμα 5-9 Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm)

Πίνακας 5-9 Υπολογιζόμενες μετακινήσεις DH(cm) για την Τομή 10

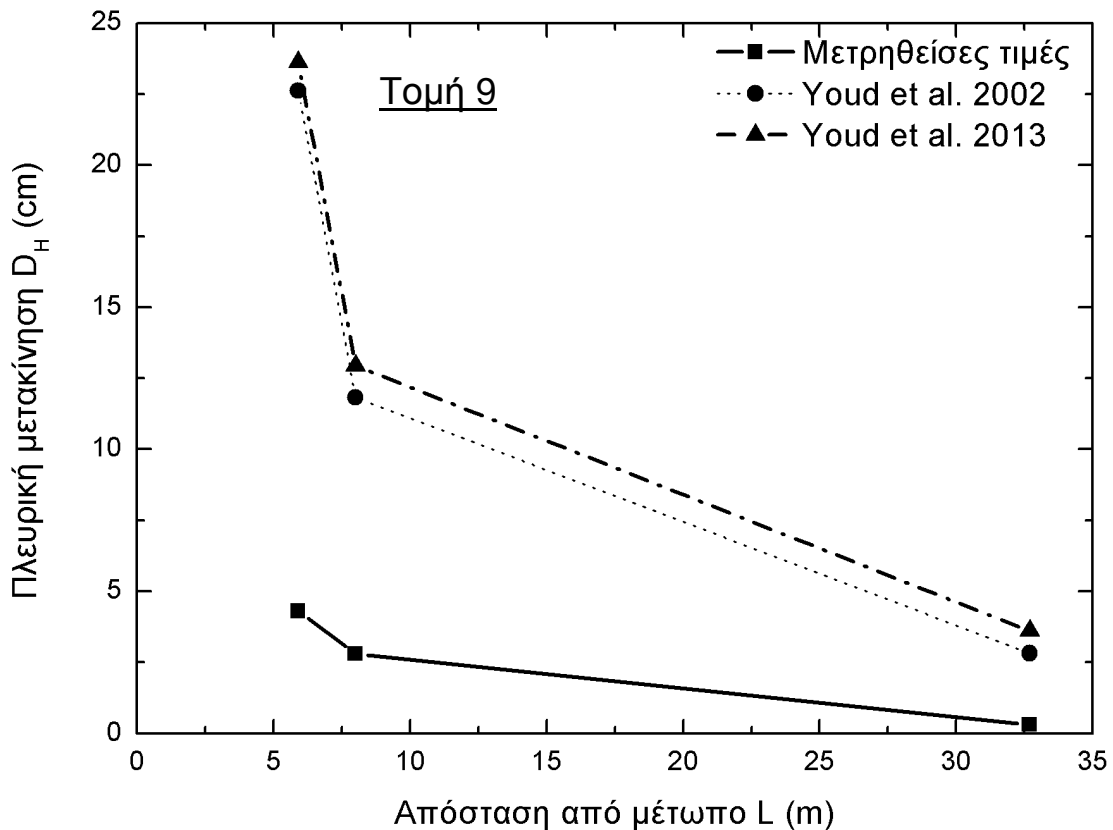
ΤΟΜΗ 10 Γ10	ΑΠΟΣΤΑΣΗ L ΑΠΟ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΜΕΤΩΠΟ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΡΩΓΜΗ ΣΕ ΚΆΘΕ ΣΗΜΕΙΟ	τιμές οριζόντιας μετακίνησης κατά ΥΟΥΔ σε cm	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ ΥΟΥΔ	τιμές από ΥΟΥΔ 2013	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ ΥΟΥΔ 2013
J10	4,5	151,7	110	12,66	57,04	12,05	64,80
I10	8,8	41,7	20	8,51	44,38	8,94	52,75
H10	14,85	21,7	6	6,25	35,86	7,09	43,80
G10	16,32	15,7	2	5,91	29,62	6,79	36,72
F10	20,75	13,7	5,5	5,12	23,71	6,11	29,92
E10	22,2	8,2	4	4,92	18,58	5,93	23,82
D10	26,6	4,2	2	4,42	13,66	5,47	17,89
C10	29,5	2,2	0,5	4,16	9,24	5,22	12,42
B10	66	1,7	1,5	2,58	5,08	3,65	7,20
A10	70	0,2	0,2	2,49	2,49	3,55	3,55



Σχήμα 5-10 Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm)

Πίνακας 5-10 Υπολογιζόμενες μετακινήσεις D_H (cm) για την Τομή 9

ΑΠΟΣΤΑΣΗ L ΑΠΟ ΕΛΕΥΘΕΡΟ ΜΕΤΩΠΟ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ	ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΡΩΓΜΗ ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΗΜΕΙΟ	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ	τιμές οριζόντιας μετακίνησης κατά YOUND σε cm	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ YOUND	τιμες από YOUND 2013	ΑΘΡΟΙΣΤΙΚΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΚΑΤΑ YOUND 2013
5,9	4,3	1,5	4,3	10,79	22,62	10,69	23,63
8	2,8	2,5	2,8	9,01	11,83	9,33	12,94
32,7	0,3	0,3	0,3	3,91	2,82	4,99	3,61

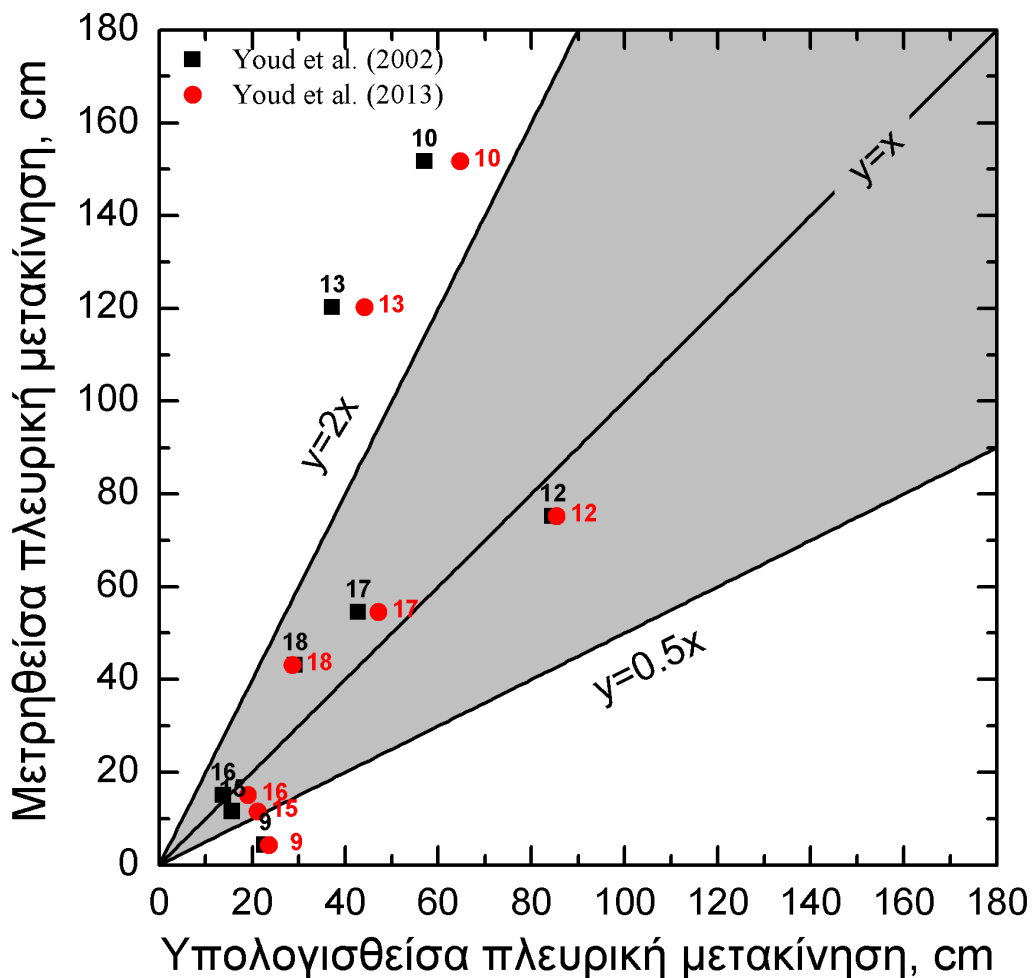


Σχήμα 5-11 Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης D_H (cm)

Στο διάγραμμα του Σχ. 5-12 συγκρίνονται οι μετρηθείσες τιμές των συνολικών αθροιστικών μετακινήσεων με τις αντίστοιχες υπολογισμένες με τα μοντέλα πρόβλεψης Yound et al.(2002) και Yound et al.(2013). Παρατηρείται ότι βρίσκονται σε καλή συμφωνία μεταξύ τους, καθώς και ότι οι περισσότερες τιμές βρίσκονται εντός της γκρίζας περιοχής.

Οι ανωτέρω χρησιμοποιηθείσες συνολικές αθροιστικές τιμές μετακινήσεων συμπεριλαμβάνουν και την πρώτη ρωγμή δηλαδή τη ρωγμή που αναπτύχθηκε πολύ κοντά στο ελεύθερο μέτωπο. Στο σημείο αυτό οι μετακινήσεις, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, δεν οφείλονται μόνο στο φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης. Αντίθετα, σημαντικό μέρος της μετατόπισης οφείλεται τόσο στην ολίσθηση της βάσης

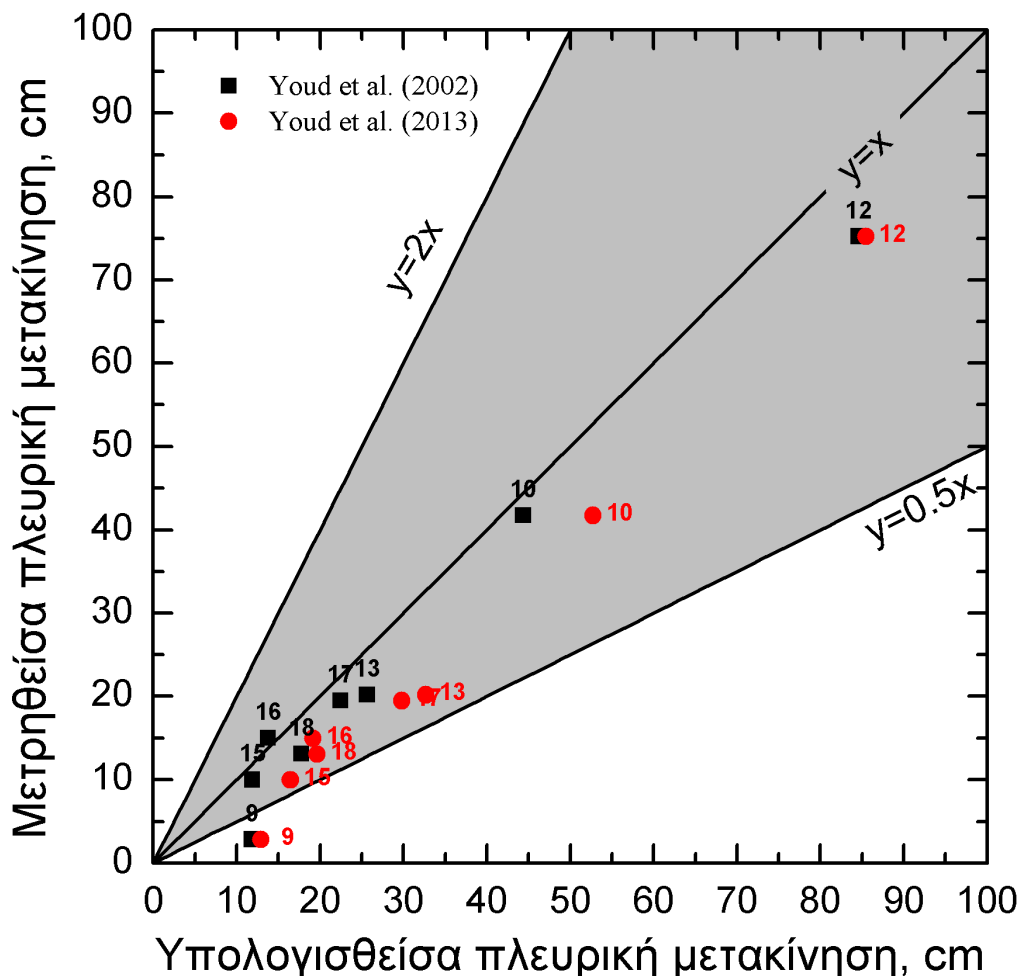
του κρηπιδότοιχου, όσο και στην στροφή του τοίχου που συμβάλλει στην μετατόπιση της κορυφής του, στην ανάπτυξη υπερπίεσης του νερού των πόρων στο έδαφος θεμελίωσης καθώς και σε άλλους μηχανισμούς παραμόρφωσης. Για τον λόγο αυτό στις Τομές 10 και 13 κυρίως, αλλά και στις 17, 18, τα μοντέλα υποεκτιμούν την οριζόντια μετατόπιση. Ειδικά η πρώτη ρωγμή στην Τομή 10 (σημείο J10 άνοιγμα 110cm βλ. Σελ 148 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β εικόνα) καθώς και η πρώτη ρωγμή στην Τομή 13 (σημείο H13 άνοιγμα 100cm βλ. Σελ 144 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β εικόνα) παρουσιάζουν μια μεγάλη τιμή οριζόντιας μετακίνησης που δεν μπορεί να εκτιμηθεί ορθά από τα μοντέλα πρόβλεψης και οφείλεται στους παραπάνω μηχανισμούς παραμόρφωσης, όπως αναφέρεται και στην βιβλιογραφία



Σχήμα 5-12 Σύγκριση μετρημένων αθροιστικών οριζόντιων τιμών μετακίνησης (cm) σε κάθε τομή με τις υπολογισθείσες μετακινήσεις (μέθοδοι Youd et al. 2002 και 2013).

Επειδή η ολίσθηση της βάσης του κρηπιδότοιχου δεν είναι ο μόνος μηχανισμός παραμόρφωσης και η πρώτη εκτιμώμενη ρωγμή από τα μοντέλα πρόβλεψης αναγκαστικά προκύπτει λανθασμένη (καθώς δεν λαμβάνουν υπόψη τους άλλους μηχανισμούς παραμόρφωσης) αποφασίσθηκε η αφαίρεση της πρώτης τιμής οριζόντιας

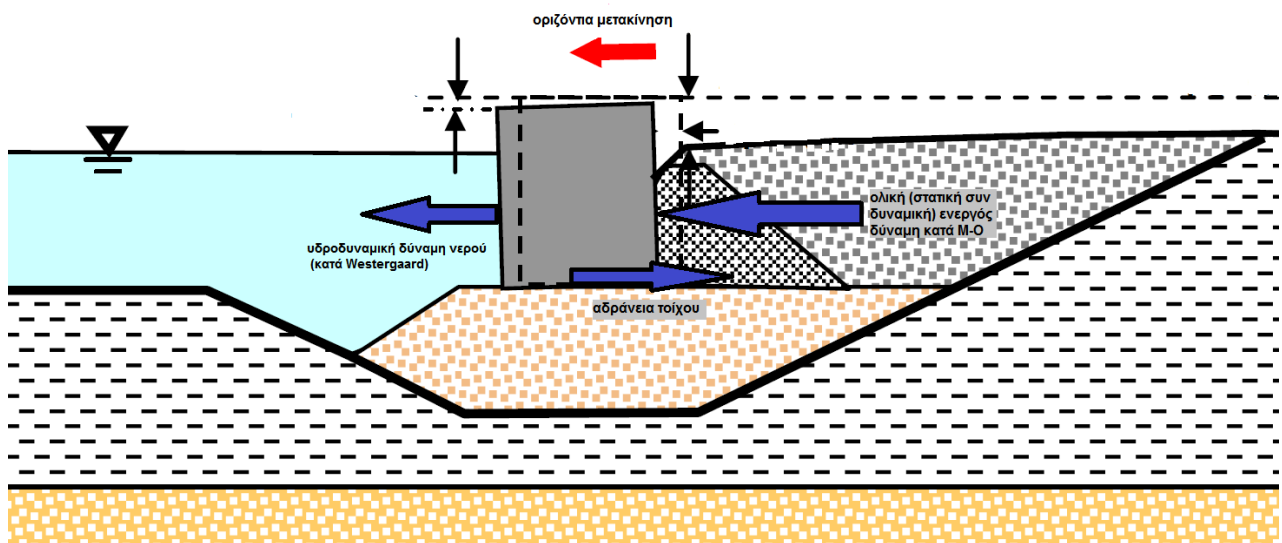
μετατόπισης από το συνολικό άθροισμα. Στο διάγραμμα του Σχ. 5-13 παρουσιάζονται οριζόντιες μετακινήσεις σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 5 μέτρων από το ελεύθερο μέτωπο, όπου ο μηχανισμός παραμόρφωσης είναι πλέον αποκλειστικά η πλευρική εξάπλωση. Παρατηρείται ότι οι προβλεπόμενες αθροιστικές οριζόντιες τιμές βρίσκονται πλέον σε πάρα πολύ καλή συμφωνία με τις μετρηθείσες. Παρατηρείται επίσης ότι τα μοντέλα υπερεκτιμούν σε μικρό βαθμό την οριζόντια αθροιστική μετακίνηση στο σύνολο των περιπτώσεων. Επιπλέον, οι μαύρες κουκίδες που αντιπροσωπεύουν το μοντέλο Youd et al.(2002) δείχνουν την μεγαλύτερη ακρίβεια αυτού του μοντέλου σε σχέση με αυτό του Youd et al.(2013), όπως εξάλλου αναφέρεται και στην βιβλιογραφία. Τέλος, η συνολική πραγματική αθροιστική μετακίνηση στην Τομή 9 είναι αρκετά μικρότερη από την εκτιμώμενη των μοντέλων. Αυτό ενδέχεται να οφείλεται και στην γεωμετρία της περιοχής καθώς τα σημεία αυτά βρίσκονται κοντά στον νότιο προσήνεμο μώλο (3D effect).



Σχήμα 5-13 Σύγκριση μετρημένων οριζόντιων τιμών μετακίνησης (cm) (χωρίς να ληφθεί υπόψη η πρώτη ρωγμή) σε κάθε τομή με υπολογισθείσες μετακινήσεις (μέθοδοι Youd et al.2002 and 2013).

5.3 Εκτίμηση της Σεισμικής Μετακίνησης Κρηπιδότοιχου

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα, εκτιμάται ότι η γειτονική στον κρηπιδότοιχο ρωγμή, η οποία δεν συμπεριλήφθηκε στην αθροιστική μετακίνηση, οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη μετακίνηση (μεταφορική και περιστροφική) του κρηπιδότοιχου. Για το λόγο αυτό στην υποενοότητα αυτή, επιχειρείται ο προσεγγιστικός υπολογισμός της μεταφορικής μετακίνησης του δυτικού κρηπιδώματος του λιμένα Ληξουρίου, με γεωμετρικά χαρακτηριστικά $B=H=4\text{m}$ και $\gamma=22\text{kN/m}^3$.



Σχήμα 5-14 Ψευδοστατική ανάλυση κρηπιδότοιχου, υπολογισμός α_c από την οριζόντια ισορροπία των δυνάμεων.

Οι σύγχρονοι σεισμικοί κανονισμοί απαιτούν: (α) ψευδοστατικό υπολογισμό της ενεργού δύναμης που ασκείται στον τοίχο για τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης σχεδιασμού $A_d = \alpha_d g$. (β) καθορισμό της κρίσιμης επιτάχυνσης $A_c = \alpha_c g$ που θα δημιουργούσε αστοχία ($FS=1$) σε ολίσθηση, ανατροπή, ή φέρουσα ικανότητα. (γ) εκτίμηση της μόνιμης παραμόρφωσης σε κάθε μία από τις ανωτέρω μορφές αστοχίας αν $A_d > A_c$. Συχνά η ολίσθηση είναι η κρίσιμη συνθήκη για ένα τοίχο με μεγάλο λόγο πλάτους προς ύψους (π.χ. εδώ $B/H=1$).

Οι σεισμικές ενεργές εδαφικές πιέσεις προσδιορίζονται συμβατικά με την μέθοδο Mononobe-Okabe για ενεργό οριζόντια επιτάχυνση $A_d = \alpha_d g$ (Σχ. 5-14). Πολλαπλές παραμετρικές δυναμικές αναλύσεις έχουν καταδείξει ότι η κατακόρυφη επιτάχυνση δεν έχει σημαντική επίδραση στην απόκριση του κρηπιδότοιχου γεγονός που είναι ιδιαίτερα

αληθές για την περίπτωση της αρκετά υψίσυχνης κατακόρυφης επιτάχυνσης της Κεφαλονιάς (Seed & Whitman 1970).

Η κρίσιμη επιτάχυνση για ολίσθηση A_c λαμβάνεται από την οριζόντια ισορροπία του τοίχου υπό την επίδραση:

- 1) της δύναμης ενεργητικής κατάστασης αστοχίας κατά M-O
- 2) της αδράνειας του τοίχου
- 3) της υδροδυναμικής εφελκυστικής δύναμης του νερού μπροστά από τον τοίχο (κατά Westergaard)

Η ολική (στατική συν δυναμική) ενεργός δύναμη κατά M-O είναι

$$P_{AE} = \frac{1}{2} \gamma_e H^2 K_{AE} \quad (39)$$

όπου

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi - \psi)}{\cos(\psi) \cos(\psi + \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \psi)}{\cos(\psi + \delta)}} \right]^2} \quad (40)$$

φ = η γωνία διατμητικής αντοχής του αντιστηριζόμενου εδάφους, δ = η γωνία διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας τοίχου-εδάφους. Η γωνία ψ είναι συνάρτηση του σεισμικού συντελεστή α' :

$$\psi = \tan^{-1}(\alpha') \quad (41)$$

Η τιμή του α' αντιπροσωπεύει τον βασικό σεισμικό συντελεστή και την επίδραση της παρουσίας του νερού (Ebeling & Morison 1992). Για αντιστηριζόμενο έδαφος του οποίου μόνο ένα τμήμα ευρίσκεται κάτω από τον Υ.Ο., οι δυνάμεις επί έναν συντελεστή βαρύτητας ανάλογο με τον όγκο του εδάφους που αστοχεί επάνω και κάτω από τον Υ.Ο., δίδουν την ακόλουθη έκφραση του φαινόμενου σεισμικού συντελεστή.

$$\alpha' = \alpha \frac{\gamma_{sat} H_w^2 + \gamma H_{sur}^2 + 2\gamma H_w H_{sur}}{\gamma_b H_w^2 + \gamma H_{sur}^2 + 2\gamma H_w H_{sur}} \quad (42)$$

και το ισοδύναμο ειδικό βάρος του εδάφους

$$\gamma_e = \gamma_b \left(\frac{H_w}{H} \right)^2 + \gamma \left[1 - \left(\frac{H_w}{H} \right)^2 \right]^2 \quad (43)$$

γ_b : υπό άνωση φαινόμενο βάρος εδάφους

$$H = H_w + H_{sur} \quad (44)$$

είναι το ολικό ύψος του τοίχου

H_w είναι το ύψος κάτω από τον Υ.Ο., H_{sur} είναι το ύψος πάνω από τον Υ.Ο., όπου το έδαφος έχει ειδικό βάρος γ .

Οι παραδοχές για την ανωτέρω ανάλυση είναι ότι (α) οι πιέσεις του ύδατος πόρων δεν αλλάζουν λόγω της σεισμικής δόνησης και (β) η διαπερατότητα του αντιστηριζόμενου εδάφους είναι αρκετά μικρή ώστε το νερό των πόρων να κινείται μαζί με το έδαφος.

Για μια χαρακτηριστική τομή στο Δυτικό κρηπίδωμα του Λιμένα Ληξουρίου με γεωμετρικά χαρακτηριστικά κρηπιδότοιχου: ($B=H=4m$), και $\gamma=22kN/m^3$

- $H_w = 3m$
 - $H_{sur} = 1m$
- } $H_{ολ} = 4m$

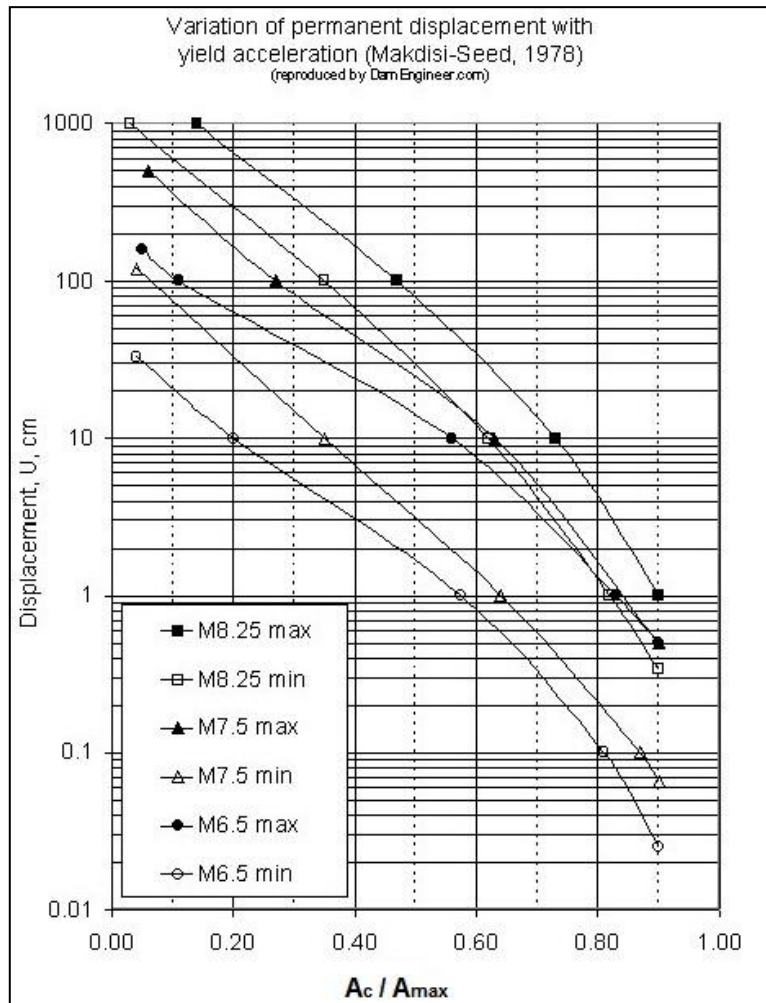
και με χαρακτηριστικά εδάφους

- $\varphi = 30^\circ$
- $\delta = 0,8\varphi = 24^\circ$
- $\gamma_t = 19kN/m^3$, $\gamma_k = 20kN/m^3$ και $\gamma_w = 10kN/m^3$

προκύπτει μετά από μια σειρά δοκιμών ότι η κρίσιμη επιτάχυνση για ολίσθηση είναι:
 $\alpha_c = 0,112$

$$A_c \cong 0,112g$$

Από το παρακάτω διάγραμμα των Makdisi & Seed (1978) Σχ. 5-15, για $M=6,1$ και $A_c / A = 0,112/0,58 \cong 0,19$ προκύπτει ως άνω όριο $\Delta \cong 20cm$ (η επιλογή του άνω ορίου γίνεται λόγω των πολλών κύκλων φόρτισης στον σεισμό της Κεφαλονιάς). Παρατηρούμε ότι η οριζόντια μετακίνηση 20cm που προέκυψε από την ψευδοστατική ανάλυση και την θεωρία των Makdisi & Seed (1978) είναι μικρότερη από την μετακίνηση (έως και ένα μέτρο !) που εμφανίστηκε στην κορυφή του κρηπιδότοιχου.



Σχήμα 5-15 Διάγραμμα οριακής επιτάχυνσης μέγιστης οριζόντιας μετακίνησης ανάλογα με το μέγεθος του σεισμού κατά Makdisi-Seed, 1978

Αυτό οφείλεται στο ότι, η συμβατική ανάλυση εμπεριέχει αρκετούς περιορισμούς. Στην πραγματικότητα:

- Οι οριζόντιες μετατοπίσεις του τοίχου δεν οφείλονται μόνον στην ολίσθηση στην βάση αλλά και στην παραμόρφωση του υποκειμένου εδάφους.
- Η στροφή του τοίχου συμβάλλει στην μετατόπιση της κορυφής
- Η ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων στο έδαφος θεμελιώσεως αυξάνει τις μετατοπίσεις, όπως στις περιπτώσεις των κρηπιδοτοίχων του Port και Rokko Island κατά τον σεισμό του Kobe το 1995.

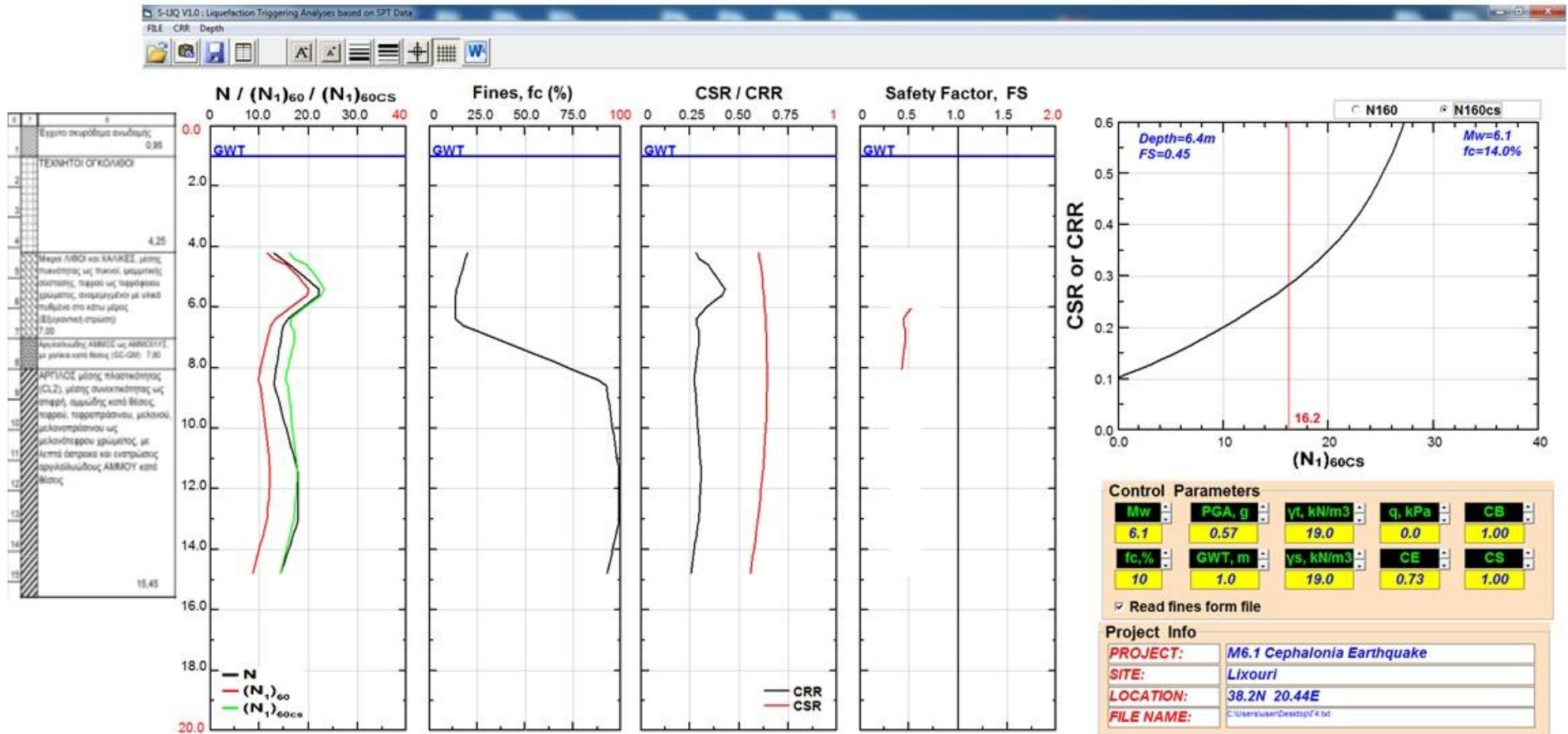
Άρα η ολίσθηση στην βάση δεν είναι ο μόνος μηχανισμός παραμόρφωσης του κρηπιδοτοίχου, όπως άλλωστε έχει καταδειχθεί πολλαπλώς και στις αναλύσεις του σεισμού του Kobe το 1995.

5.4 Υπολογισμός Ρευστοποιήσιμου Πάχους (T₁₅)

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του αθροιστικού ρευστοποιήσιμου πάχους είναι αυτή του Idriss and Boulanger (2006). Τα αποτελέσματα προέκυψαν με την χρήση κατάλληλου λογισμικού στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής του Πανεπιστημίου Πατρών (Μπατίλας και Πελέκης 2010) και παρουσιάζονται παρακάτω. Το προκύπτον αθροιστικό ρευστοποιήσιμο πάχος T₁₅ είναι ουσιαστικά το μήκος της κόκκινης γραμμής που βρίσκεται στην περιοχή του διαγράμματος με FS<1, αυτό το πάχος εδάφους θεωρείται ότι ρευστοποιείται.

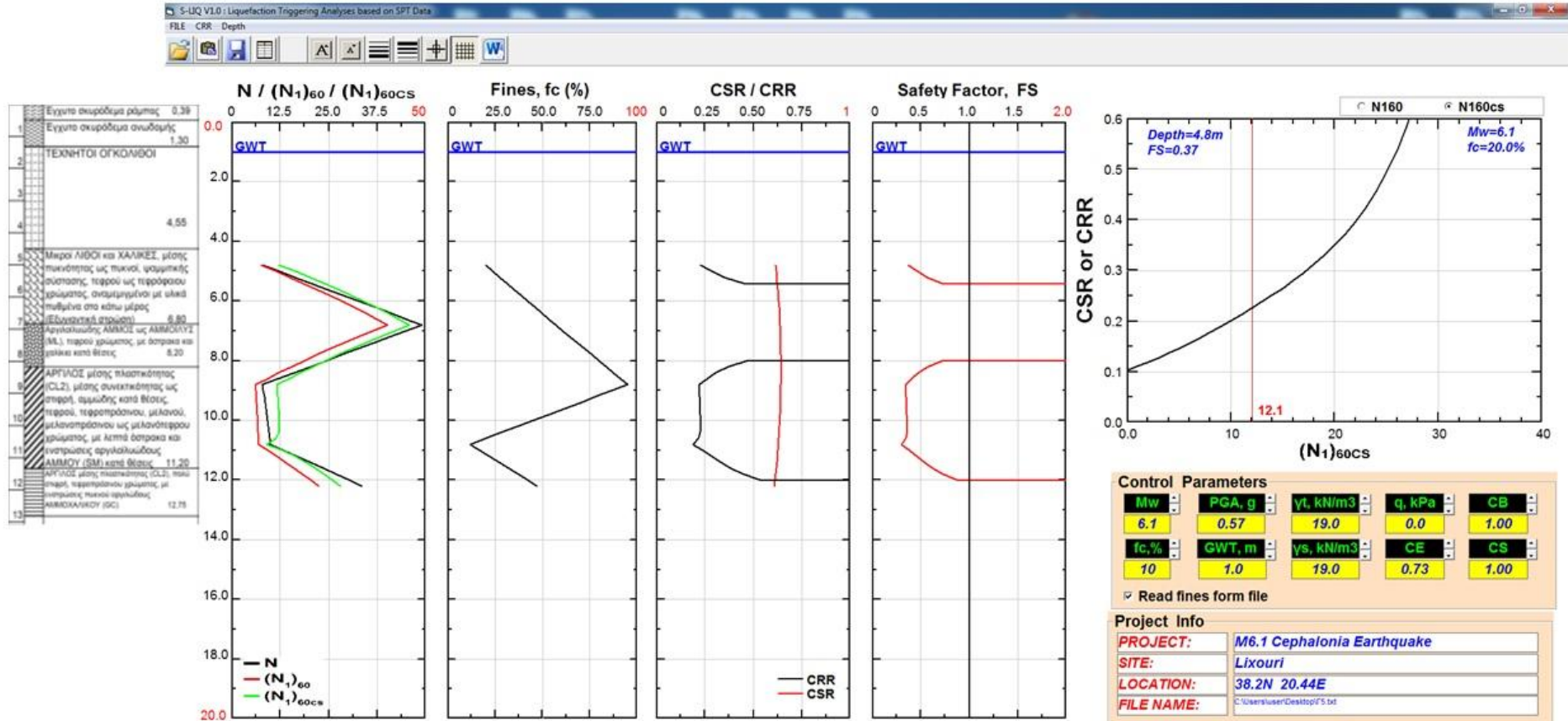
Στο τελικό αποτέλεσμα υπολογισμού του T₁₅ και συγκεκριμένα στις γεωτρήσεις Γ-4 και Γ-10, πραγματοποιήθηκαν δύο τροποποιήσεις. Στην γεώτρηση Γ-4 αν και προκύπτει από την μέθοδο ότι ρευστοποιούνται και τα 11 μέτρα, θεωρήθηκε ότι ρευστοποιείται μόνο το στρώμα αργιλοϊλυώδης άμμος ως αμμοϊλύς, με χαλίκια κατά θέσεις (GC-GM) πάχους ενός μέτρου και ένα μικρό τμήμα πάχους ενός μέτρου επίσης της στρώσης αργίλου μέσης πλαστικότητας (CL2), μέσης συνεκτικότητας ως στιφρή, αμμόδης κατά θέσεις, με λεπτά όστρακα και ενστρώσεις αργιλοϊλυώδους άμμου κατά θέσεις. Δεν ρευστοποιείται η στρώση της αργίλου όπως φαίνεται και στο προφίλ της γεώτρησης, καθώς το διορθωμένο N_{SPT} >15 σε αυτή την στρώση. Οπότε το συνολικό ρευστοποιήσιμο πάχος T₁₅ από την γεώτρηση Γ-4 εκτιμάται ότι είναι 2 μέτρα. Επιπλέον, στην γεώτρηση Γ-10, δεν ρευστοποιείται ολόκληρη η στρώση αργίλου, ομοίως γιατί το διορθωμένο N_{SPT} >15, αλλά τμήμα της με το T₁₅ να λαμβάνεται ως 4,00m.

G-4



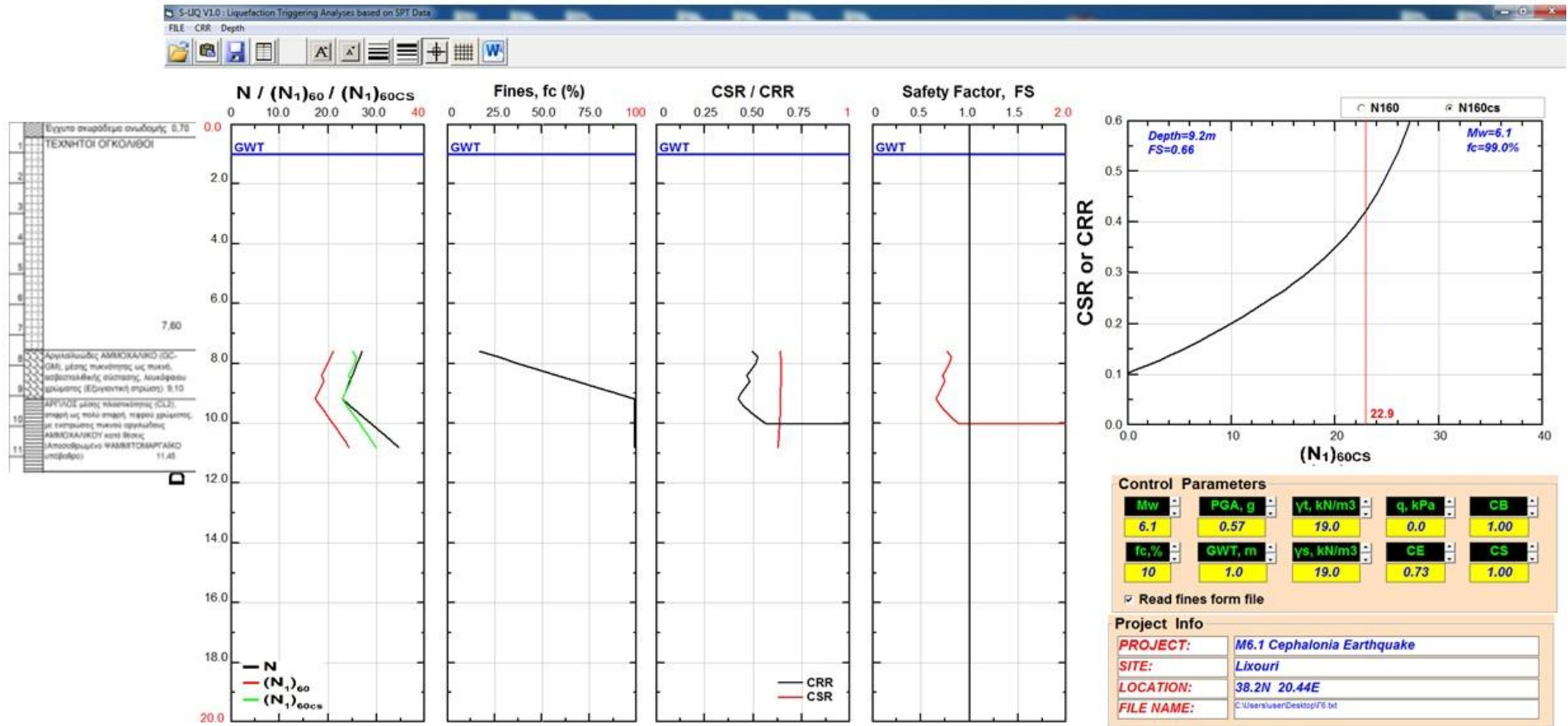
Σχήμα 5-16 Υπολογισμός ρευστοποιήσιμου πάχους T15 στην γεώτρηση Γ-4. Ρευστοποιείται η στρώση αργιλοιλυώδους άμμου έως αμμοιύλης πάχους 1m και τμήμα της στρώσης αργίλου πάχους επίσης 1m. Συνολικό ρευστοποιήσιμο πάχος T₁₅ = 2m

G-5



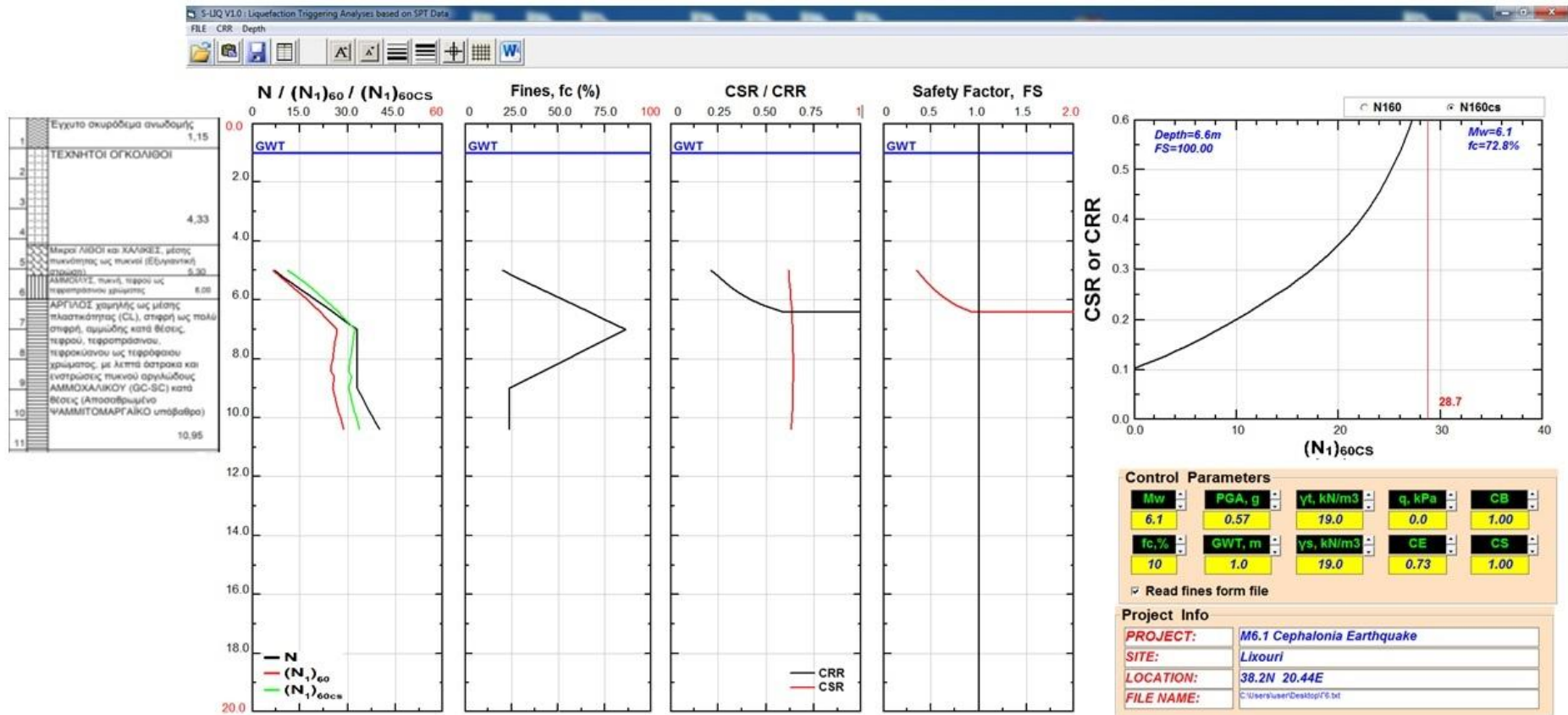
Σχήμα 5-17 Υπολογισμός ρευστοποιήσιμου πάχους T15 στην γεώτρηση Γ-5. Αθροιστικό ρευστοποιήσιμο πάχος T15 περιοχή κόκκινης γραμμής με FS<1. T₁₅=4,60m.

G-6



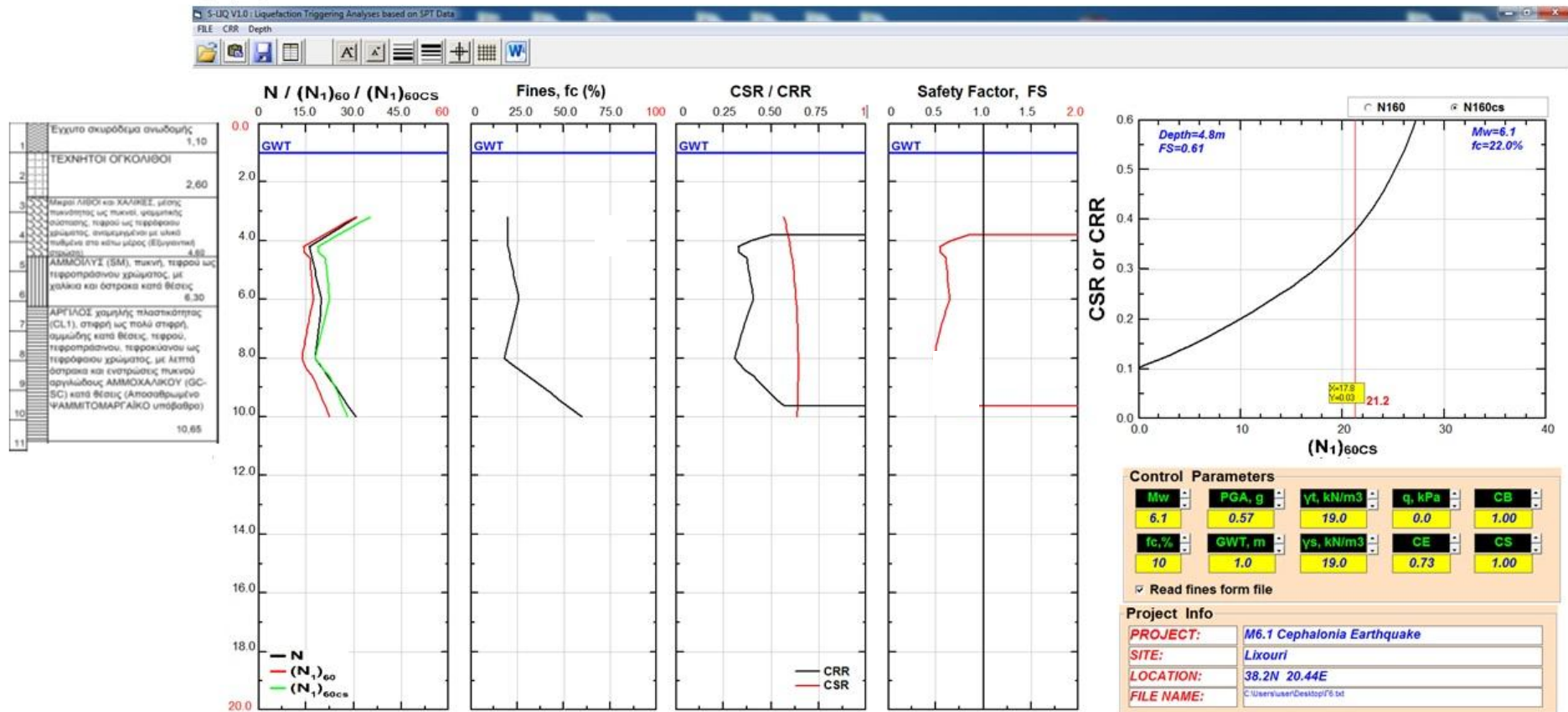
Σχήμα 5-18 Υπολογισμός ρευστοποιήσιμου πάχους T15 στην γεώτρηση Γ-6. Αθροιστικό ρευστοποιήσιμο πάχος T15 περιοχή κόκκινης γραμμής με FS<1. T₁₅=2,40m.

G-9



Σχήμα 5-19 Υπολογισμός ρευστοποιήσιμου πάχους T15 στην γεώτρηση Γ-9. Αθροιστικό ρευστοποιήσιμο πάχος T15 περιοχή κόκκινης γραμμής με FS<1. T₁₅=1,40m.

G-10



Σχήμα 5-20 Υπολογισμός ρευστοποιήσιμου πάχους T15 στην γεώτρηση Γ-10. Αθροιστικό ρευστοποιήσιμο πάχος T15 περιοχή κόκκινης γραμμής με $FS < 1$. $T_{15} = 4,00$ m.

5.4 Παρατηρηθείσα Συμπεριφορά στο Λιμένα Αργοστολίου

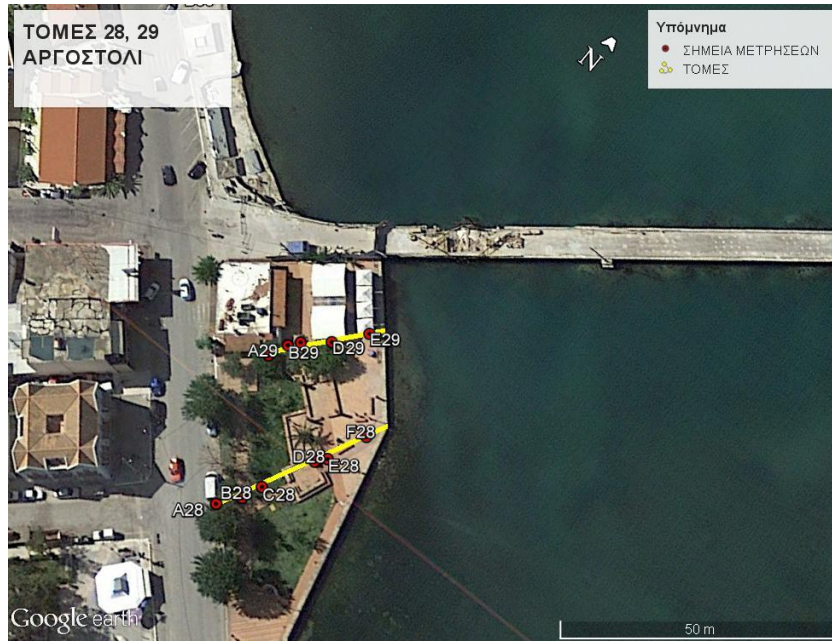
Στο Αργοστόλι, λόγω έλλειψης γεωτεχνικών δεδομένων, δεν έγινε δυνατή η εκτίμηση της πλευρικής εξάπλωσης στην περιοχή με χρήση εμπειρικών μοντέλων. Ωστόσο, στην παρούσα Διατριβή παρουσιάζονται τα διαγράμματα των τομών Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης D_H (cm) των μετρημένων τιμών, στοιχεία που μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμη προσθήκη στην υφιστάμενη βάση δεδομένων για βελτίωση των εμπειρικών μοντέλων και καλύτερη εφαρμογή τους στον ελλαδικό χώρο, Σχ. 5-21.



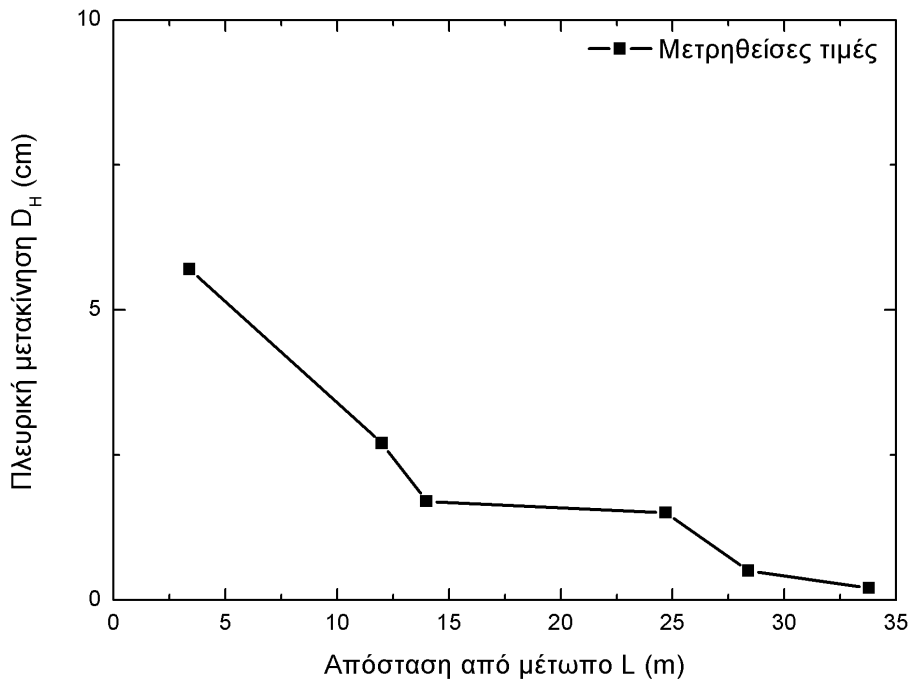
Σχήμα 5-21 Θέσεις μετρήσεων της οριζόντιας μετακίνησης στη παραλιακή ζώνη του Αργοστολίου

Συνολικά μετρήθηκαν 115 σημεία, τα οποία παρουσιάζονται αναλυτικά και σε Πίνακα στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β. Το εύρος ανοίγματος των ρωγμών κυμάνθηκε από 0,10cm έως 8,50cm , δηλαδή οι οριζόντιες μετακινήσεις είναι πολύ μικρότερες σε σχέση με αυτές του Ληξουρίου που έφτασαν αρκετές δεκάδες εκατοστά. Αυτό οφείλεται όπως αναφέρθηκε στην απόσταση από το επίκεντρο του σεισμού και σε άλλους σεισμικούς και γεωλογικούς παράγοντες.

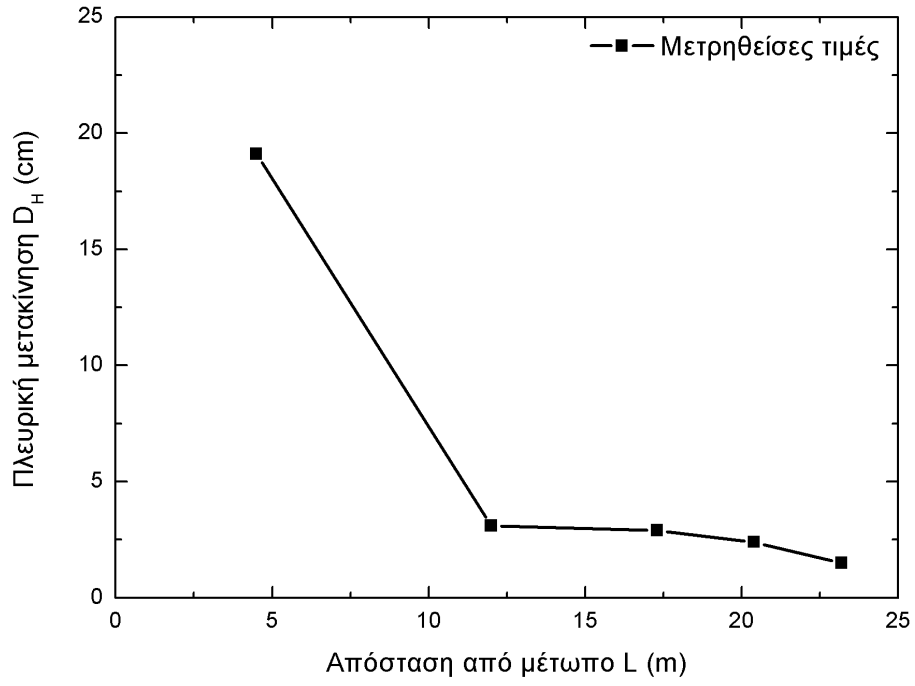
Από το σύνολο των σημείων κατασκευάστηκαν και παρουσιάζονται παρακάτω 20 τομές των μετρημένων μετακινήσεων.



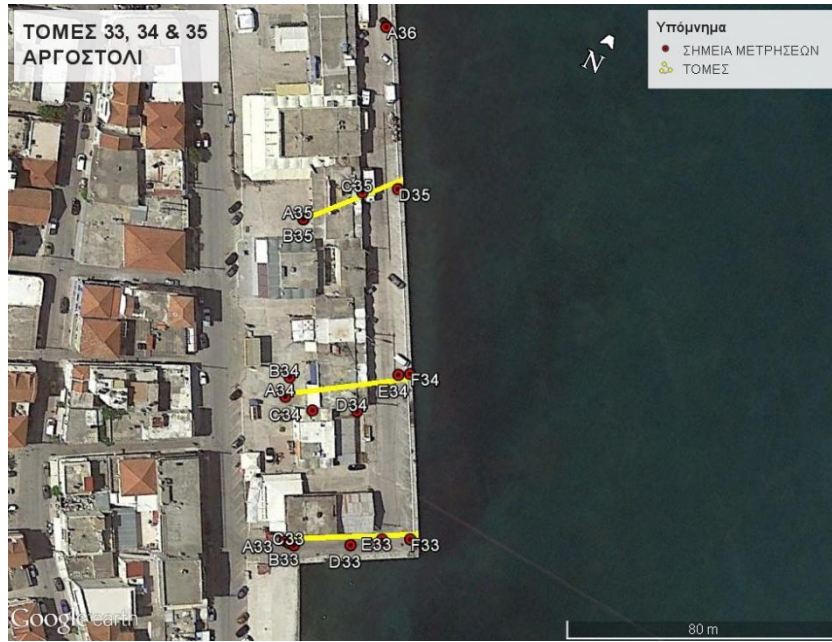
Σχήμα 5-22(α) Τομές 28 και 29 (GPS Συντεταγμένες Lat. 38,17227 Long. 20,49425)



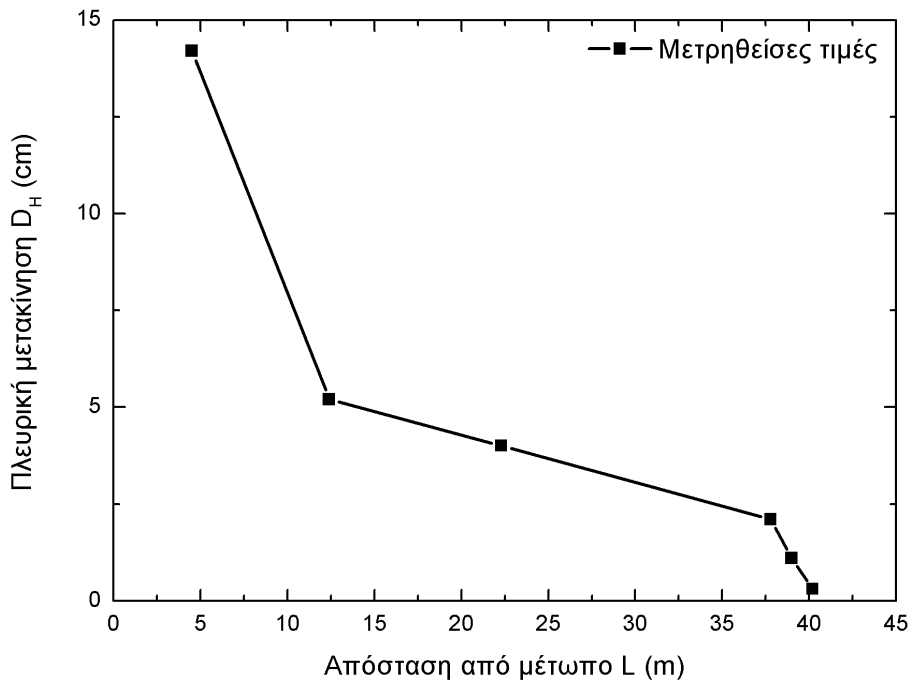
Σχήμα 5-22(β) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης D_H (cm) για τα σημεία 28



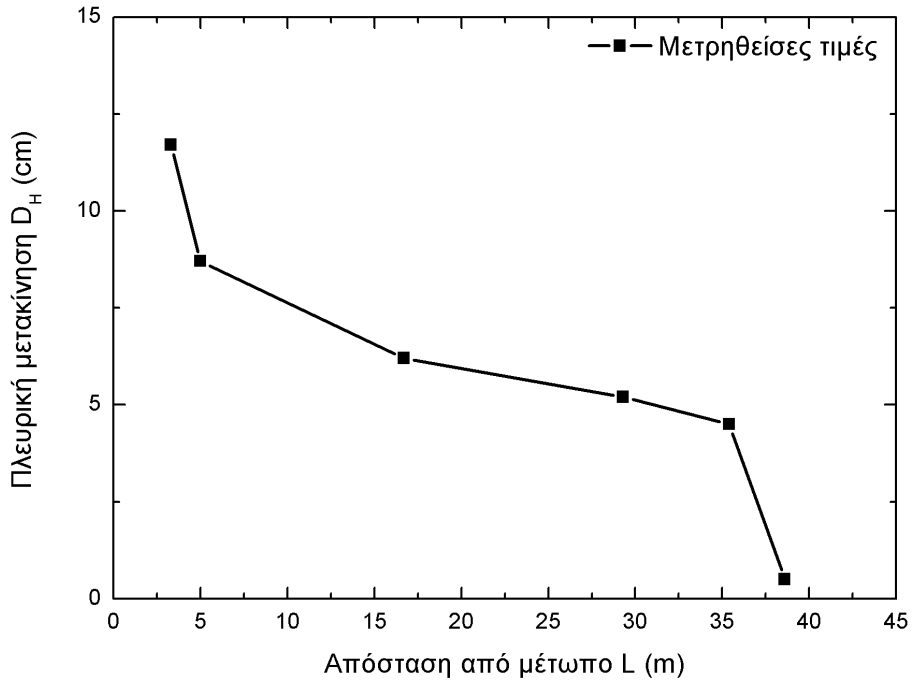
Σχήμα 5-22(γ) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης D_H (cm) για τα σημεία 29



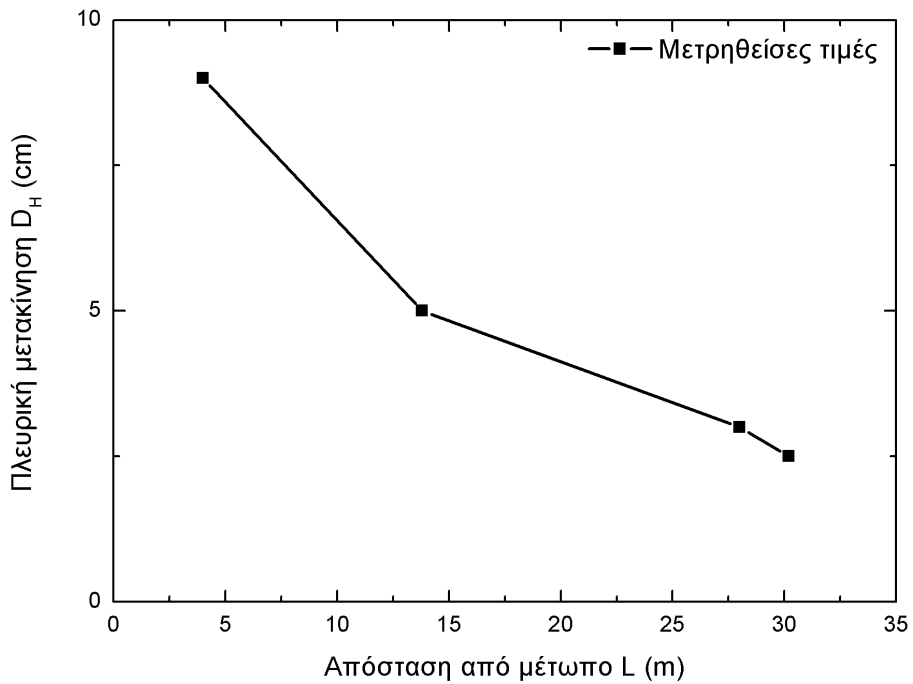
Σχήμα 5-23(α) Τομές 33, 34 και 35 (GPS Συντεταγμένες Lat. 38,17483 Long. 20,49156)



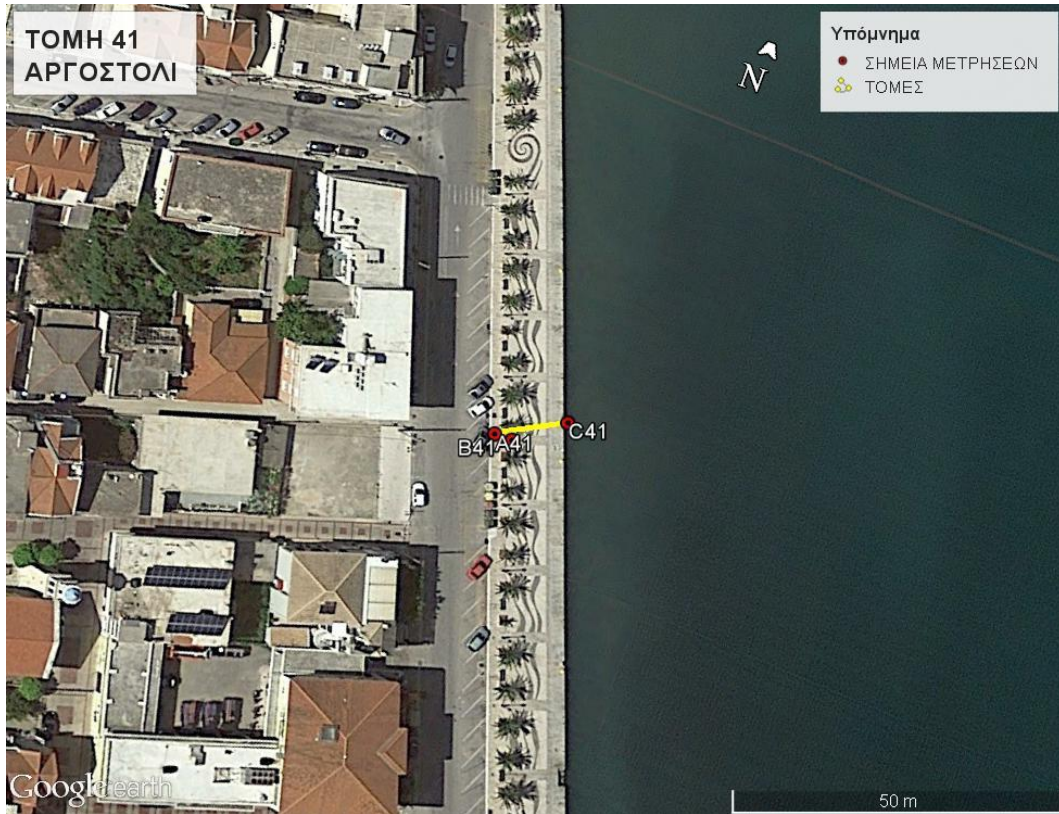
Σχήμα 5-23(β) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης D_H (cm) για τα σημεία 33



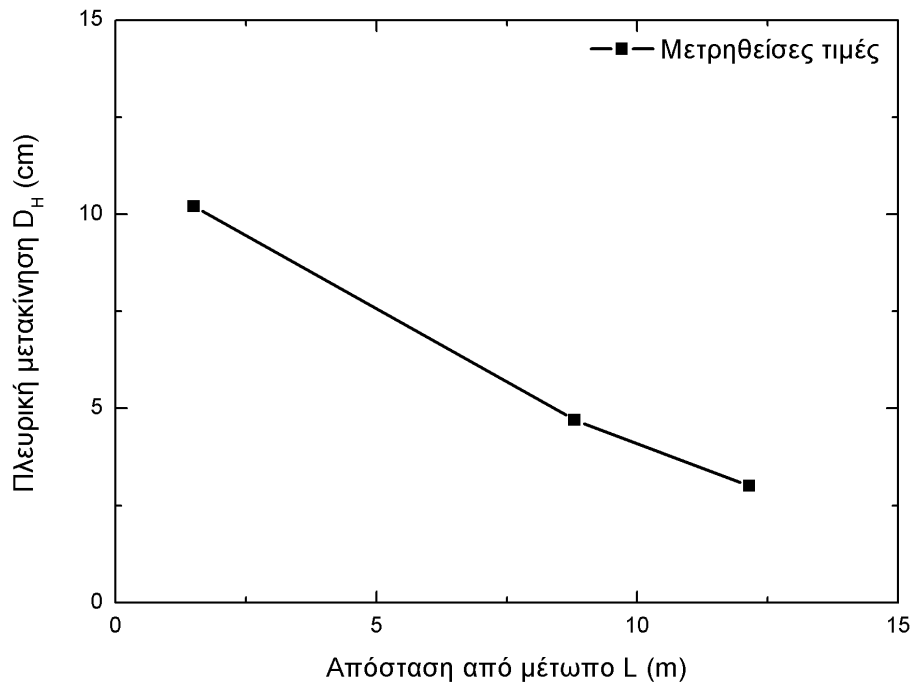
Σχήμα 5-23(γ) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 34



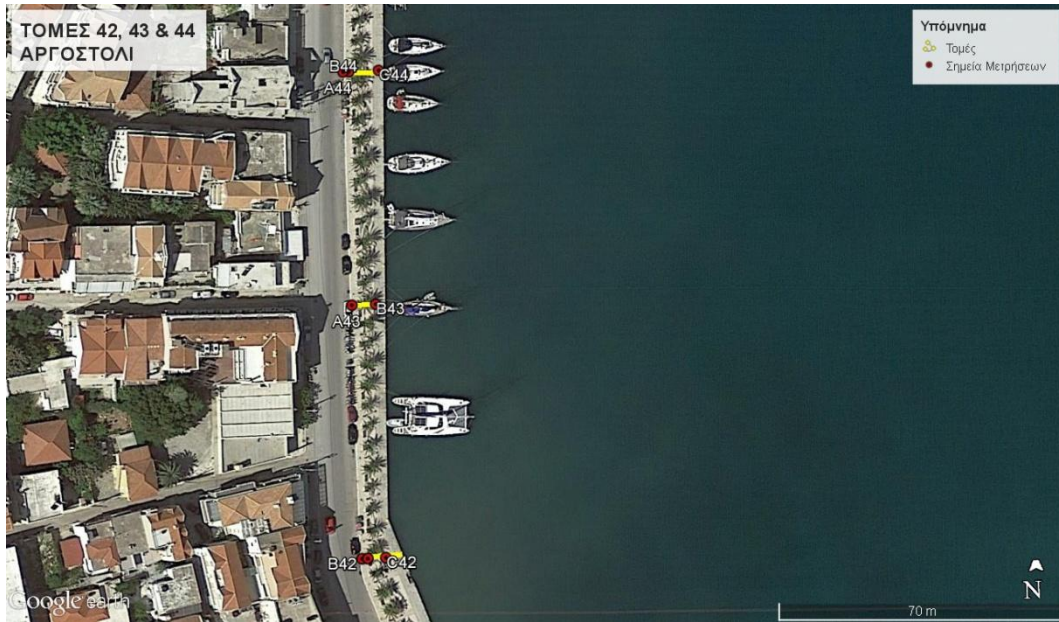
Σχήμα 5-23(δ) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 35



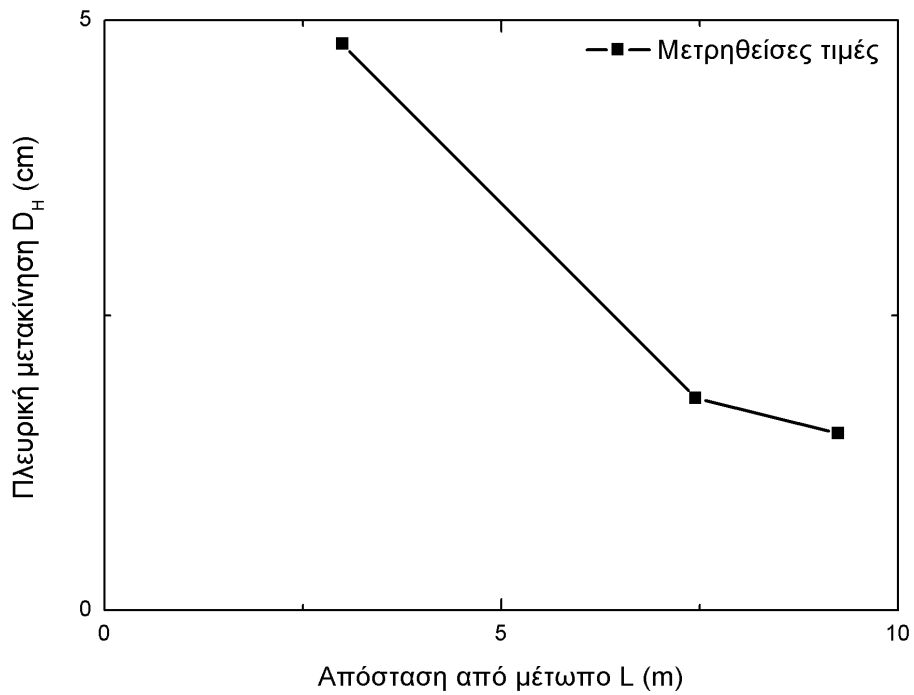
Σχήμα 5-24(α) Λιμένας Αργοστολίου (GPS Συντεταγμένες Lat. 38,17713 Long. 20,48982)



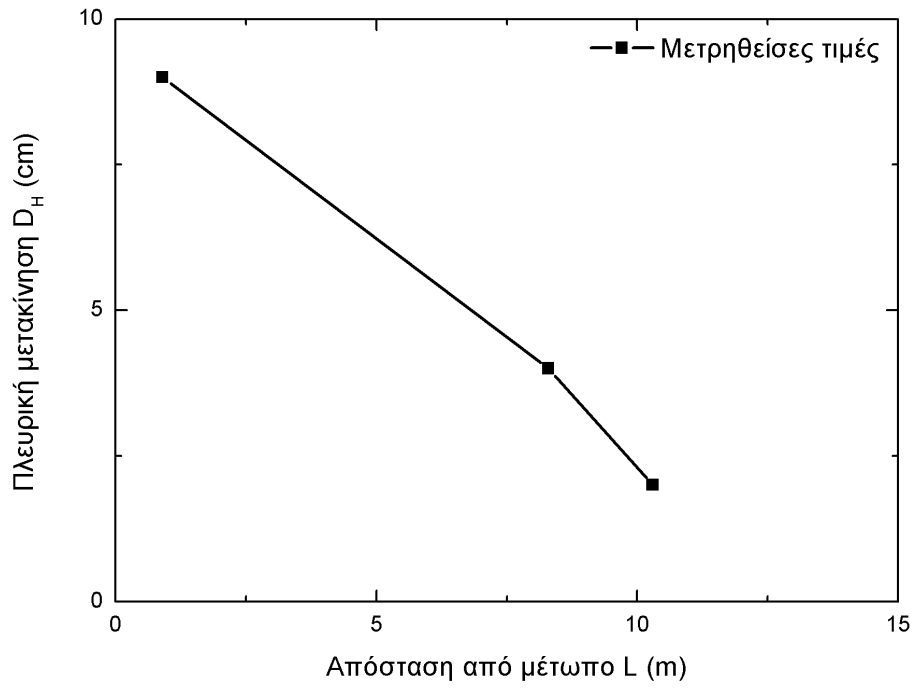
Σχήμα 5-24(β) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 41



Σχήμα 5-25(α) Λιμένας Αργοστολίου (GPS Συντεταγμένες Lat. 38,17837 Long. 20,48959)



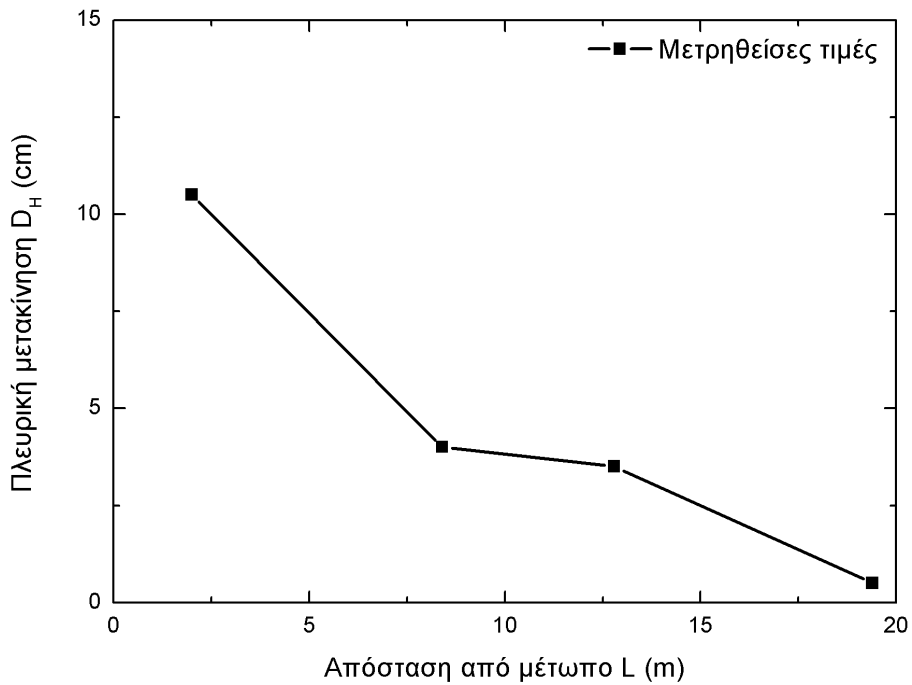
Σχήμα 5-25(β) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης D_H (cm) για τα σημεία 42



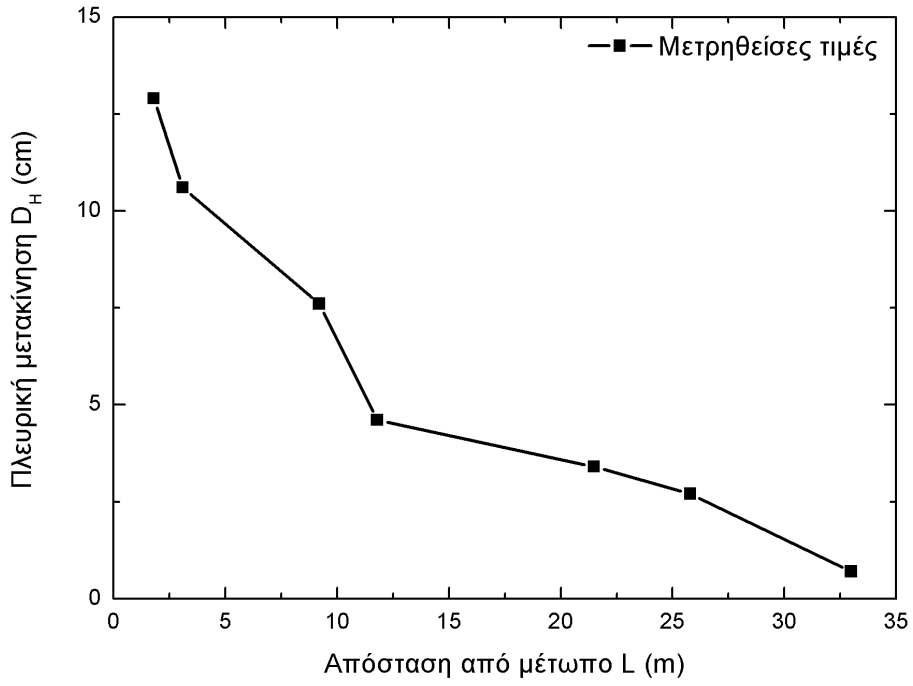
Σχήμα 5-25(γ) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 44



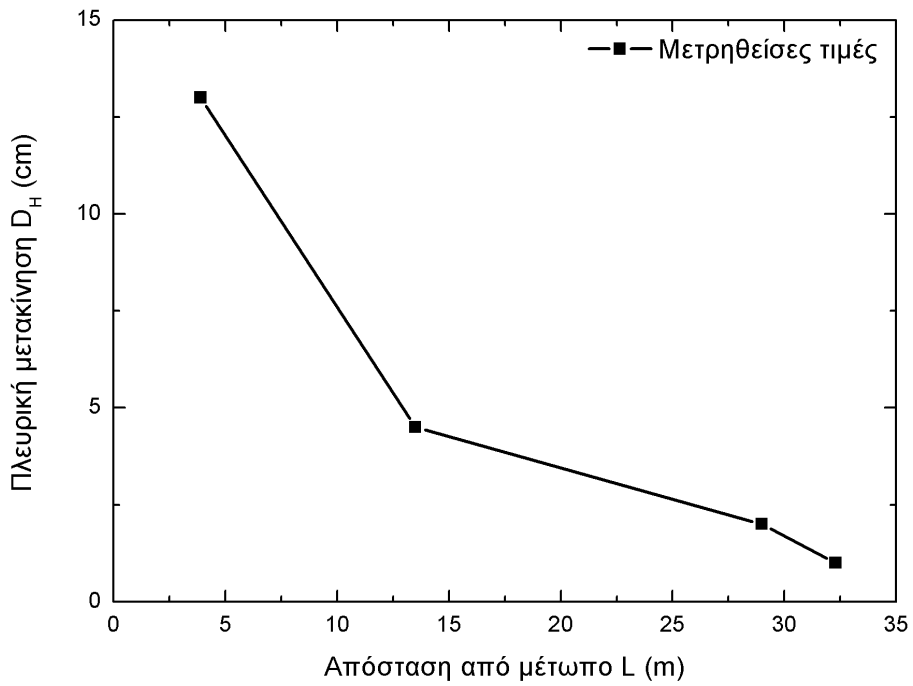
Σχήμα 5-26(α) Λιμένας Αργοστολίου (GPS Συντεταγμένες Lat. 38,18034 Long. 20,48992)



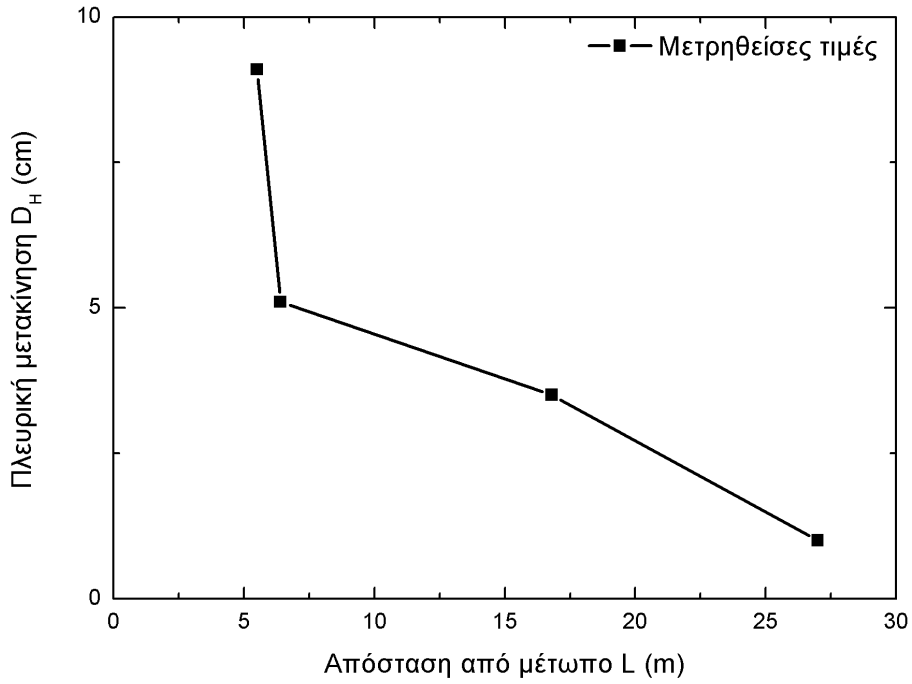
Σχήμα 5-26(β) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 45



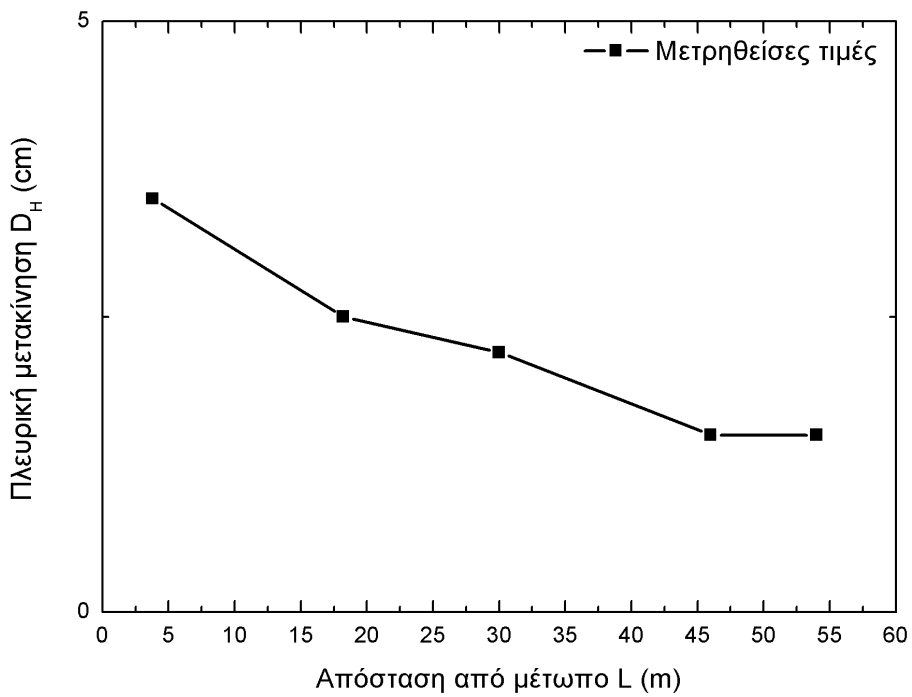
Σχήμα 5-26(γ) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 47



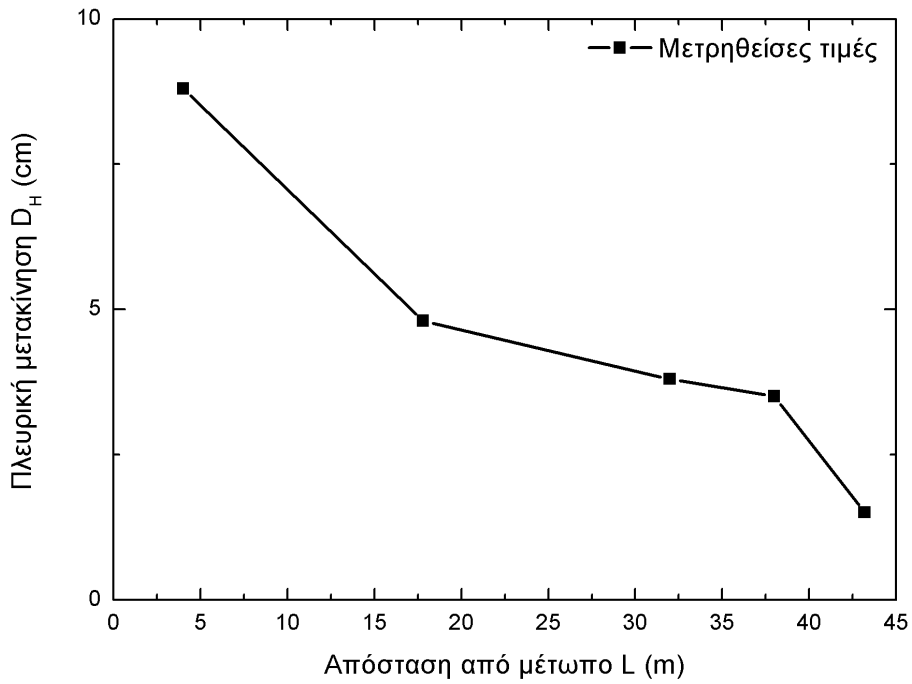
Σχήμα 5-26(δ) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης DH (cm) για τα σημεία 48



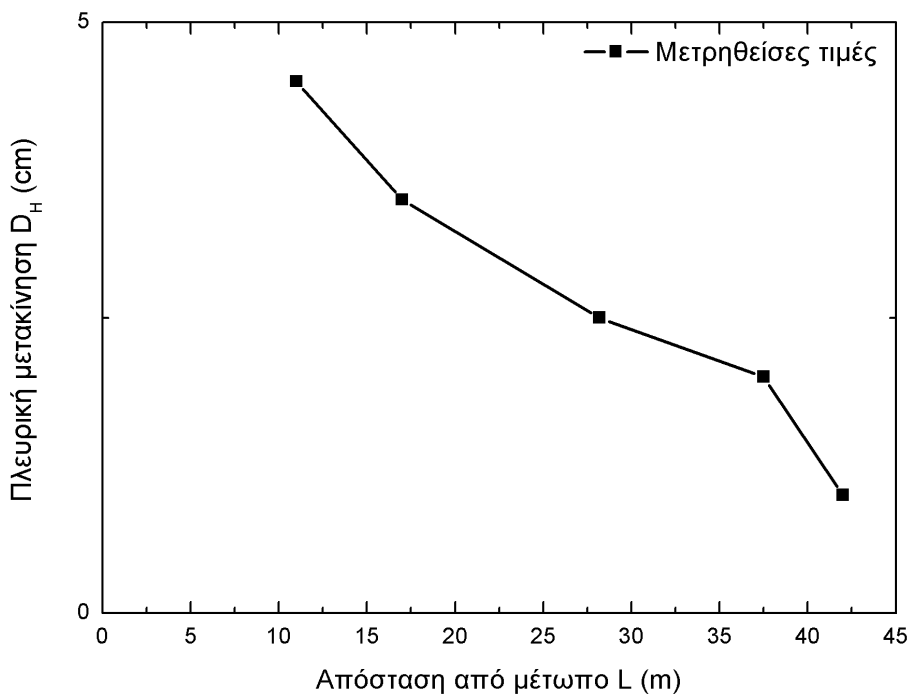
Σχήμα 5-26(ε) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης D_H (cm) για τα σημεία 50



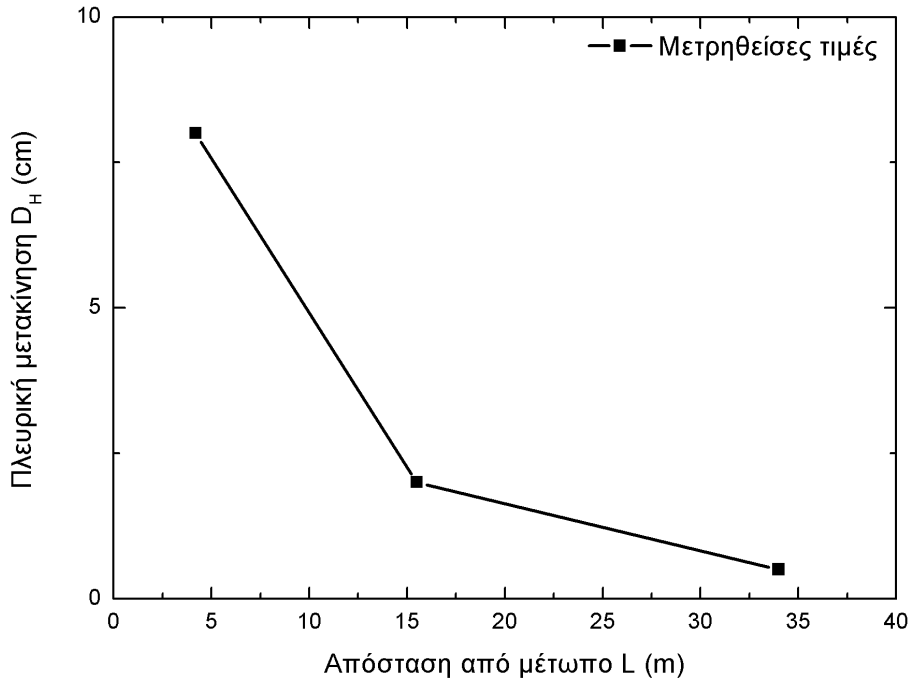
Σχήμα 5-26(ζ) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης D_H (cm) για τα σημεία 51



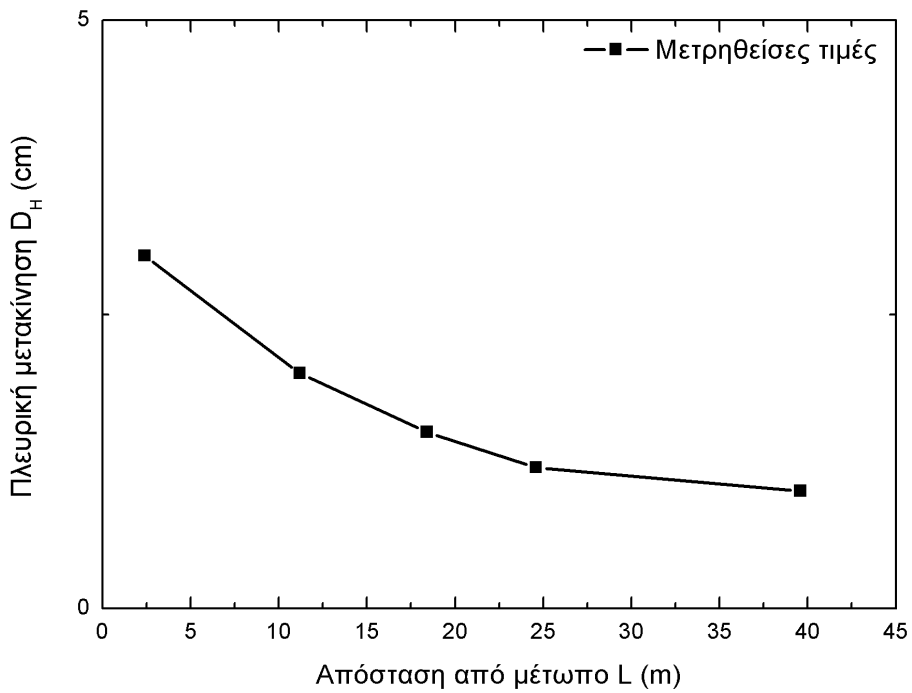
Σχήμα 5-26(η) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης D_H (cm) για τα σημεία 52



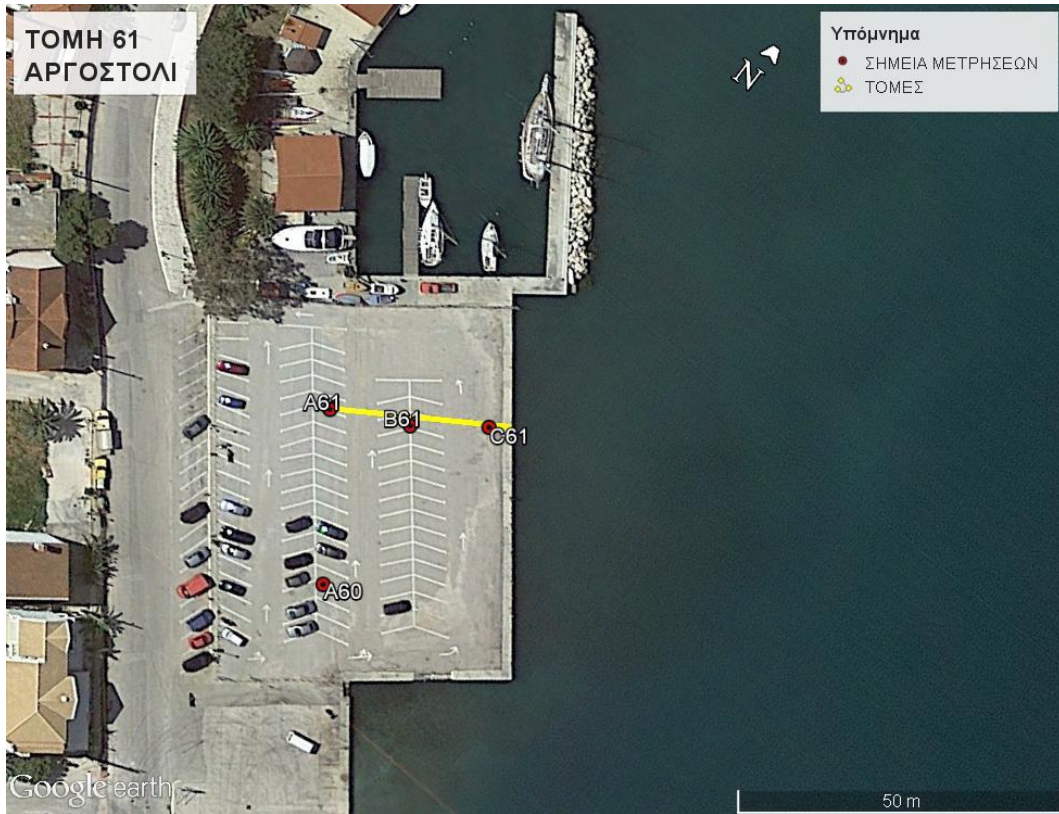
Σχήμα 5-26(θ) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης D_H (cm) για τα σημεία 53



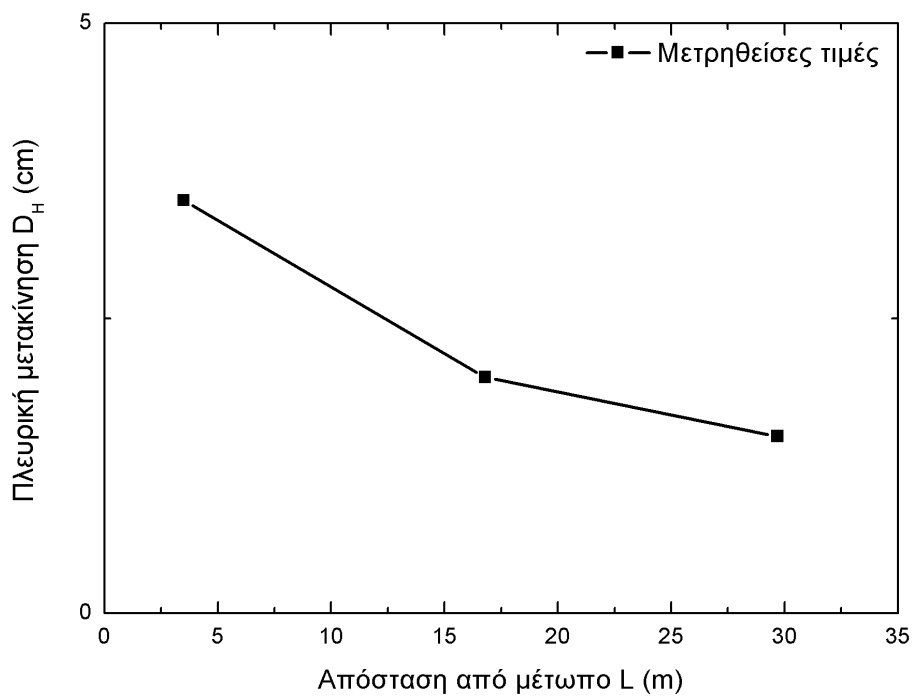
Σχήμα 5-26(ι) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης D_H (cm) για τα σημεία 55



Σχήμα 5-26(κ) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης D_H (cm) για τα σημεία 57



Σχήμα 5-27(α) Θέση στάθμευσης - προβλήτας (GPS Συντεταγμένες: Lat. 38,18217 Long. 20,48858)



Σχήμα 5-27(β) Καμπύλη Απόστασης L (m) από ελεύθερο μέτωπο - αθροιστικής μετακίνησης D_H (cm) για τα σημεία 61

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας Διατριβής αποτέλεσε η μελέτη της εκτεταμένης πλευρικής εξάπλωσης που πραγματοποιήθηκε υπό συνθήκες ελευθέρου μετώπου προς την κατεύθυνση της ακτογραμμής στο Δυτικό Κρηπίδωμα του Λιμένα Ληξουρίου και στην παραλιακή ζώνη του Αργοστολίου κατά τους σεισμούς της Κεφαλονιάς στις 26-1-2014 ($M_w=6.1$) και στις 03-2-2014 ($M_w=6.0$). Παρουσιάστηκαν τα γεωτεχνικά δεδομένα για το λιμένα Ληξουρίου και εκτιμήθηκε το μέγεθος της πλευρικής εξάπλωσης με βάση τα σύγχρονα εμπειρικά μοντέλα του Youd (2002) και την τροποποίηση αυτού, Youd (2013). Έγινε σύγκριση της μετρηθείσας οριζόντιας μετακίνησης με προβλέψεις οριζόντιων μετακινήσεων που εκτιμούν τα δύο μοντέλα. Για έλεγχο της ρευστοποιησιμότητας του εδάφους με χρήση του αριθμού κτύπων N_{SPT} με σκοπό τον υπολογισμό του αθροιστικού ρευστοποιήσιμου πάχους T_{15} χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία του Idriss and Boulanger (2006). Επιπλέον, παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα μετρημένης οριζόντιας αθροιστικής μετακίνησης - απόστασης από το ελεύθερο μέτωπο για την θαλάσσια περιοχή του Αργοστολίου. Λόγω έλλειψης γεωτεχνικών δεδομένων για το Αργοστόλι δεν έγινε δυνατή η σύγκριση των τιμών με τις εκτιμηθείσες από εμπειρικά μοντέλα. Ωστόσο, οι τιμές αυτές μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμη προσθήκη στην υφιστάμενη βάση δεδομένων για βελτίωση των εμπειρικών μοντέλων και καλύτερη εφαρμογή τους στον ελλαδικό χώρο.

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα είναι δυνατόν να συναχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Οι προβλεπόμενες οριζόντιες μετακινήσεις των μοντέλων, είναι συντηρητικές σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις. Η υπερεκτίμηση των οριζοντίων μετακινήσεων έγκειται στο γεγονός ότι τα εμπειρικά μοντέλα του Youd χρησιμοποιούν ως βάση δεδομένων σεισμούς από την Δυτική Αμερική και την Ιαπωνία όπου τα μεγέθη του σεισμού είναι μεγαλύτερα και τα ρευστοποιήσιμα πάχη του εδάφους (T_{15}) επίσης μεγαλύτερα. Όπως αναφέρθηκε και στην βιβλιογραφική ανασκόπηση, στην βάση δεδομένων του Bartlett and Youd (2002), 72% των περιπτώσεων προέρχεται από την Νιγκάτα και Νοσίρο στην Ιαπωνία, όπου η πλευρική εξάπλωση προκάλεσε πολύ μεγάλες μετακινήσεις σε εκτεταμένες περιοχές. Γι αυτό, το μοντέλο του Youd και Bartlett

(2002) τείνει να υπερεκτιμά μετακινήσεις σε μικρότερες, πιο συνηθισμένες περιπτώσεις πλευρικής εξάπλωσης.

2. Επειδή η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την ανάπτυξη των μοντέλων με την μέθοδο γραμμικής παλινδρόμησης πολλαπλών μεταβλητών, περιλαμβάνει περιπτώσεις με συνθήκες ελεύθερου μετώπου με λόγο $W < 20\%$, οι τιμές οριζόντιας μετακίνησης στις περιοχές με $W > 20\%$ (δηλαδή πολύ κοντά στο ελεύθερο μέτωπο), δεν είναι αντιπροσωπευτικές. Κοντά στο ελεύθερο μέτωπο οι μετακινήσεις δεν οφείλονται μόνο στο φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης αλλά και σε φαινόμενα αστοχίας λόγω ροής υλικού ή ολίσθησης τεχνητών ογκολίθων (κρηπιδοτόιχος), καθώς και στην παραμόρφωση του υποκείμενου εδάφους. Επιπλέον, η στροφή του τοίχου συμβάλλει στην μετατόπιση της κορυφής ενώ η ανάπτυξη υπερπίεσης του νερού των πόρων στο έδαφος θεμελίωσης αυξάνει τις μετατοπίσεις, με αποτέλεσμα οι τιμές των οριζοντίων μετακινήσεων να προκύπτουν πολύ μεγαλύτερες από αυτές που προβλέπουν τα μοντέλα. Παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση των Σχ. 5-7 και Σχ. 5-9, όπου διαπιστώνονται μεγάλες μετρημένες τιμές οριζοντίων μετακινήσεων 1,20m και 1,50m αντίστοιχα, κοντά στο ελεύθερο μέτωπο, ενώ η εκτιμώμενες τιμές είναι μόλις 45cm και 60cm αντίστοιχα.

3. Οι δύο ισχυροί σεισμοί της Κεφαλονιάς(2014) που συνέβησαν σε χρονική περίοδο 8 ημερών είχαν ίδιο περίπου μέγεθος σεισμού. Οι μετρηθείσες οριζόντιες μετακινήσεις καταγράφηκαν στο σύνολό τους μετά τον δεύτερο σεισμό. Στην ανάλυση με χρήση των εμπειρικών μοντέλων έγινε χρήση των δυσμενέστερων σεισμικών δεδομένων που καταγράφηκαν στην περιοχή του Ληξουρίου και Αργοστολίου. Από μαρτυρίες κατοίκων της περιοχής, οι έντονες ρωγμές παρατηρήθηκαν μετά την εκδήλωση του δεύτερου σεισμού. Αυτό βέβαια δεν αποκλείει ότι και ο πρώτος σεισμός συνέβαλε στο φαινόμενο της πλευρικής εξάπλωσης. Στην βιβλιογραφία των εμπειρικών μοντέλων δεν αναφέρεται η περίπτωση δύο ή περισσότερων διαδοχικών σεισμικών γεγονότων καθώς και ποιά μεγέθη πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση αυτή.

4. Οι τιμές οριζοντίων μετακινήσεων και των δύο μοντέλων βρίσκονται σε καλή συμφωνία. Από την βιβλιογραφία το μοντέλο του Youd (2002) παρουσιάζει καλύτερο λόγο συσχέτισης, δηλαδή είναι πιο ακριβές, από αυτό του Gillins&Bartlett (2014). Η ακρίβεια οφείλεται στην εισαγωγή δύο επιπλέον γεωτεχνικών δεδομένων: της μέσης διαμέτρου κόκκου του ρευστοποιήσιμου πάχους ($D_{50_{15}}$) και του ποσοστού λεπτών του ρευστοποιήσιμου πάχους (F_{15}). Για την γνώση αυτών των μεταβλητών είναι απαραίτητες εργαστηριακές δοκιμές και κοκκομετρικές αναλύσεις πέρα των γεωτρήσεων. Οι τιμές αυτές σε ένα ανομοιογενές υλικό όπως το έδαφος είναι δύσκολο να προσδιοριστούν με ακρίβεια και παρουσιάζουν αβεβαιότητα. Αντιθέτως το πιο

πρόσφατο μοντέλο δεν κάνει χρήση αυτών των μεταβλητών αλλά με απλή ταξινόμηση του εδάφους και χρήση του κατάλληλου συντελεστή SI (Πίνακας 2-4) δίνει εξίσου ικανοποιητικές προβλέψεις. Οπότε το μοντέλο του Gillins&Bartlett (2014) αποτελεί ένα εμπειρικό μοντέλο που κάνει χρήση των γεωτεχνικών δεδομένων της περιοχής με απλοποιημένο τρόπο και μπορεί να δώσει πιο άμεσα αποτελέσματα, χωρίς εργαστηριακές δοκιμές, όντας εξίσου αξιόπιστο.

5. Το Λιμάνι του Ληξουρίου, και συγκεκριμένα το Δυτικό κρηπίδωμα, υπέστη σοβαρές σεισμικές βλάβες: σημαντική μετατόπιση και στροφή του τοίχου, καθίζηση και ρηγμάτωση του αντιστηριζόμενου εδάφους και πλευρική εξάπλωση σε απόσταση 70m. Οι οριζόντιες μετατοπίσεις του τοίχου δεν οφείλονται μόνο στην ολίσθηση της βάσης, (όπως προέκυψε από την ψευδοστατική ανάλυση 20cm), αλλά και στην παραμόρφωση του υποκείμενου εδάφους. Η στροφή του τοίχου συμβάλλει στην μετατόπιση της κορυφής και η ανάπτυξη υπερπίεσης πόρων στο έδαφος θεμελίωσης αυξάνει τις μετατοπίσεις, όπως στις περιπτώσεις των κρηπιδότοιχων του Port και Rokko Island κατά τον σεισμό του Kobe 1995.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Al Atik L. and Sitar N. Development of Improved Procedures for Seismic Design of Buried and Partially Buried Structures. Department of Civil and Environmental Engineering University of California, Berkeley. Final report on research supported by the San Francisco Bay Area Rapid Transit (BART) and the Santa Clara Valley Transportation Authority (VTA).
2. Ambraseys, N. N. 1988. "Engineering seismology." *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 17, 1–105.
3. Bardet Jean-Pierre, M.EERI, Tobita Tetsuo, Nicholas Mace, and Jianping Hua. Regional Modeling of Liquefaction- Induced Ground Deformation Civil Engineering Department, University of Southern California, Los Angeles, CA 90080-2531 *Earthquake Spectra*, Volume 18, No. 1, pages 19–46, February 2002; © 2002, Earthquake Engineering Research Institute.
4. Bartlett S. F., and Youd, T. L. 1992. "Empirical analysis of horizontal ground displacement generated by liquefaction-induced lateral spread." Tech. Rep. No. NCEER-92-0021, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, N.Y., 114.
5. Bartlett, S. F., and Gillins, D. T. (2013). "Mapping the probability and uncertainty of liquefaction induced ground failure for Weber County, Utah." USGS External Research Award No. G12AP20074, Earthquake Hazards Program, Denver
6. Bartlett, S. F., and Youd, T. L. 1995. "Empirical prediction of liquefaction-induced lateral spread." *J. Geotech. Eng.*, 121-4, 316– 329.
7. Baska, D. A. (2002). "An analytical/empirical model for prediction of lateral spreading displacements." Ph.D. dissertation, Univ. of Washington, Seattle.
8. Batilas A., Pelekis P., Vlachakis V., Athanasopoulos G.. *International Journal of Geoengineering Soil Liquefaction/Nonliquefaction in the Achaia-Ilia (Greece) 2008 Earthquake: Field Evidence, Site Characterization and Ground Motion Assessment. Case Histories* ©, Vol. 2, Issue 4, p. <http://casehistories.geoengineer.org> 270
9. Bazair (1991). "Liquefaction ground deformation predicted from laboratory tests", 2nd International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri.
10. Bouckovalas G., Papadimitriou A., Valsamis A.. Parametric investigation of lateral spreading of gently sloping liquefied ground, Geotechnical Department, School of Civil

Engineering, National Technical University of Athens, 9 Iroon Polytechniou Street, 15780 Zographou, Greece Department of Civil Engineering, University of Thessaly, Greece. 2010 Elsevier Ltd..

11. Boulanger, R.W. and Idriss, I.M. (2004). "Evaluating the Potential for Liquefaction or Cyclic Failure of Silts and Clays", Rept. No. UCD/CGM-04/01, Center for Geotechnical Modeling, Dept. of Civil and Envir. Engineering, U.C. Davis.
12. Boulanger, R.W. and Idriss, I.M. (2006). "Liquefaction Susceptibility Criteria for Silts and Clays", J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 11, pp.1413 - 1426.
13. Bray, J.D. and Sancio, R.B. (2006). "Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils", J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 132, No. 9, pp. 1165 - 1177.
14. Cetin K. O., Youd T. L., Seed R. B., Bray J. D., Stewart J. P., Durgunoglu H. T., W. Lettis, and Yilmaz M. T.. Liquefaction-Induced Lateral Spreading at Izmit Bay During the Kocaeli (Izmit)-Turkey Earthquake, JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING © ASCE / DECEMBER 2004.
15. Cetin, K. O., Isik, N., and Unutmaz, B. (2004). "Seismically-induced landslide at Degirmendere Nose, Izmit Bay after 1999 Kocaeli (Izmit)—Turkey Earthquake." Soil Dyn. Earthquake Eng., 24(3), 189–197.
16. Chu D. B., Stewart J. P.; Youd T. L.; and Chu B. L.. "Liquefaction-Induced Lateral Spreading in Near-Fault Regions during the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake" J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Vol. 132, No. 12, December 1, 2006. ©ASCE, ISSN 1090-0241/2006/12-1549–1565.
17. Franke K. W. and Kramer S. L. "Procedure for the Empirical Evaluation of Lateral Spread Displacement Hazard Curves", ASCE, January 2014
18. GEER/EERI/ATC Earthquake Reconnaissance January 26th/February 2nd 2014 Cephalonia, Greece Events, Version 1: June 6, 2014
19. Gillins D. T. , Ph.D., M.ASCE; and Steven F. Bartlett, Ph.D., M.ASCE. Multilinear Regression Equations for Predicting Lateral Spread Displacement from Soil Type and Cone Penetration Test Data. © 2013 American Society of Civil Engineers. © ASCE 04013047-1 J. Geotech. Geoenviron. Eng.
20. Glaser, S. D. (1994), "Estimation of Surface Displacements Due to Earthquake Excitation of Saturated Sands", Earthquake Spectra, Vol. 10, Issue 3, pp. 489-517.
21. Hamada H., Isoyama, R., and Wakamatsu, K. ~1995. "The Hyogo-Ken Nambu ~Kobe earthquake, liquefaction, ground displacement and soil condition in Hanshin area." Mngroph., Association for Development of Earthquake Prediction in Japan, School of Science and Engineering, Waseda Univ. and Japan Engineering Consultants, Limited.

22. Hamada, Towhata, I, Yasuda, S., Isoyama, R. (1987). "Study on Permanent Ground Displacement Induced by Seismic Liquefaction", Computers and Geotechnics, Vol. 4, Elsevier Applied Science Publication, pp. 197-220.
23. Idriss, I. M. and Boulanger R. W., (2008), Soil liquefaction during earthquakes. EERI Monograph 12. Earthquake Engineering Research Institute. California 2008: 262
24. Iwasaki, T., Arakawa, T., and Tokida, K. (1982), "Standard Penetration Test and Liquefaction Potential Evaluation", Proceedings, International Conference of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Southampton, Vol. 2, pp. 925-941.
25. Kanibir, A. (2003), "Investigation of the Lateral spreading at Sapanca and Suggestion of Empirical Relationships for Predicting Lateral Spreading", M.Sc. Thesis, Department of Geological Engineering, Hacettepe University, Ankara, Turkey. (in Turkish)
26. Kramer (1996). "Geotechnical Earthquake Engineering" Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey, pp. 514-515.
27. Makdisi-Seed Simplified Procedure for Estimating Embankment Earthquake-Induced Deformations (1978) "Technical Bases for Regulatory Guide for Soil Liquefaction," March 2000, prepared by the US Army Corps of Engineers for the Nuclear Regulatory Commission, Figure 40, [from Harder, et al. 1990, as modified by Cameron (WES), 1996].
28. Olsen, M. J., Bartlett, S. F., and Solomon, B. J. (2007). "Lateral spread hazard mapping of the Northern Salt Lake Valley, Utah for a M7.0 scenario earthquake."
29. Rauch, A. F. (1997), "An Empirical Method for Predicting Surface Displacements due to Liquefaction-Induced Lateral Spreading in Earthquakes", A Dissertation Submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering, Blacksburg, Virginia, May 5 1997.
30. Rauch, A. F. ,1 P. E., Member, ASCE, and James R. M. EPOLLS MODEL FOR PREDICTING AVERAGE DISPLACEMENTS ON LATERAL SPREADS By II,2 Associate Member, ASCE
31. Rauch, A. F. and James R. M. "EPOLLS Model for Predicting Average Displacements on Lateral Spreads" J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, April 2000.
32. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE, Vol. 97, No. SM9, Proceeding Paper 8371, September, pp. 1249-1273.
33. Senthamilkumar S. PhD Scholar Evaluation of Liquefaction-Induced Lateral Spread, National Institute of Technology, Tiruchirappalli. INDIAN GEOTECHNICAL SOCIETY CHENNAI CHAPTER.
34. Shamoto, Y., Zhang, J., and Tokimatsu, K. (1998). "New charts for predicting large residual post-liquefaction ground deformations." Soil dynamics and earthquake engineering, Vol. 17, Elsevier, New York, 427-438.

35. Stuart-Palmer Tonkin & Taylor Ltd Assessment of the Potential for Earthquake Induced Lateral Spreading., PO Box 2083, Wellington. 2006 NZSEE Conference.
36. Wa' el Mohammad Kh. Al Bawwab "Probabilistic Assessment Of Liquefaction - Induced Lateral Ground Deformations", Middle East Technical University, November 2005.
37. Youd, T. L. Hansen, C. M., and Bartlett, S. F. (2002), "Revised Multilinear Regression Equations for Prediction of Lateral Spread Displacement". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, December 2002, pp. 1007-1017.
38. Youd, T. L., and Perkins, D. M. (1987). "Mapping of liquefaction severity index." J. Geotech. Engineering, ASCE, 113(11), 1374–1392.
39. Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango. I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwake, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., and Stokoe, K.H. (2001). "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 10, pp. 817 - 833.
40. Yuman Shakya, Rajan Suwal Journal of the Institute of Engineering, Vol. 10, No. 1, pp. 199–204 © TUTA/IOE/PCU All rights reserved. Printed in Nepal. Seismic Deformation Analysis of Rockfill Dam Department of Civil Engineering, Central Campus, Pulchowk, IOE, TU, Lalitpur, Nepal
41. Γκαζέτας, Γ., Ντάκουλας Π., Αναστασόπουλος Ι., (2006), Αστοχία Λιμενικών Κρηπιδοτοίχων στον Σεισμό της Λευκάδας 14-8-2003. Failure of Harbor Quaywalls in the Lefkada 14-8-2003 Earthquake. 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006.
42. Καπατσώρης Α. Πτυχιακή εργασία με τίτλο: Τεκτονική Ανάλυση των δύο μεγάλων επωθήσεων στις περιοχές Όρμου Μύρτου και Κόλπου Αγίας Κυριακής στο Βόρειο τμήμα της νήσου Κεφαλονιάς Πάτρα. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ, ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΝΙΚΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΗΣ. Πάτρα 2012.
43. Λεκίδης Β. πρόεδρος της Επιτροπής Αντιμετώπισης Φυσικών Καταστροφών του ΤΕΕ/ΤΚΜ και διευθυντή ερευνών στον ΙΤΣΑΚ-ΟΑΣΠ. ΟΙ ΣΕΙΣΜΟΙ ΤΗΣ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ (M=6.1 ΚΑΙ M=6.0), ΔΙΔΑΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΑ ΜΕΧΡΙ ΣΗΜΕΡΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.. 10/ 481 ΤΕΥΧΟΣ 15 ΜΑΡΤΙΟΥ 2014
44. Μπατίλας Α. (2010) "Εδαφική Ρευστοποίηση και Πλευρική Εξάπλωση Στην Παραλιακή Ζώνη της Κάτω Αχαΐας κατά το σεισμό της Αχαΐας Ηλείας της 8ης Ιουνίου 2008", ΜΔΕ, Πανεπιστήμιο Πατρών
45. Παταργιά Α., Μέμος Κ. Διερεύνηση μετατοπίσεων σπονδυλωτού κρηπιδοτοίχου με δυναμική ανάλυση 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5–7 Νοεμβρίου , 2008.

46. Υπουργείο ΥΠΟ.ΜΕ.ΔΙ Γ.Γ.ΔΕ. - ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΛΙΜΕΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ & ΕΡΓΩΝ ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΩΝ (Δ.Λ.Ε.Ε.Α), "ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΣΤΟ ΛΙΜΕΝΑ ΛΗΞΟΥΡΙΟΥ Ν. ΚΕΦΑΛΛΗΝΙΑΣ ΜΕΤΑ ΤΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΣΤΙΣ 26/1/2014 ΚΑΙ 3/2/2014, ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ, Αθήνα Μάρτιος 2014, ΓΕΩΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΕΠΕ Γεωτεχνικές Μελέτες και Έρευνες.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Μητρώα δειγματοληπτικών γεωτρήσεων
στο λιμένα Ληξουρίου και φωτογραφικό υλικό

Στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α δίνονται τα μητρώα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων στο λιμένα Ληξουρίου. Το παράρτημα συμπληρώνεται από φωτογραφικό υλικό των παραπάνω δοκιμών, την γεωτεχνική έρευνα και τα δείγματα.

ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΣΥΜΒΟΛΩΝ ΚΑΙ ΟΡΩΝ
ΣΤΑ ΜΗΤΡΩΑ ΕΡΕΥΝΑΣ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ

1. ΑΠΑΡΤΙΖΟΝΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

λίγη 0 έως 10%
με 10 έως 20%
ώδης 20 έως 35%
και 35 έως 50%

2. ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΟΚΚΩΝ

χ = χονδρόκοκκο
μ = μεσόκοκκο
λ = λεπτόκοκκο

Υπογράμμιση ενός εκ των συμβόλων
σημαίνει μεγαλύτερη αναλογία

3. ΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΟΚΙΜΕΣ ΥΠΑΙΘΡΟΥ

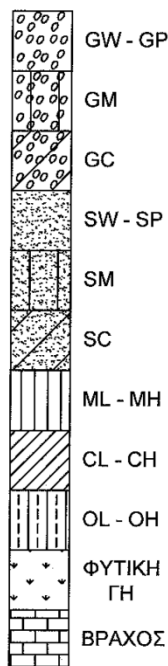
Δείγμα ημιδιαταραγμένο

A Δείγμα αδιατάρακτο

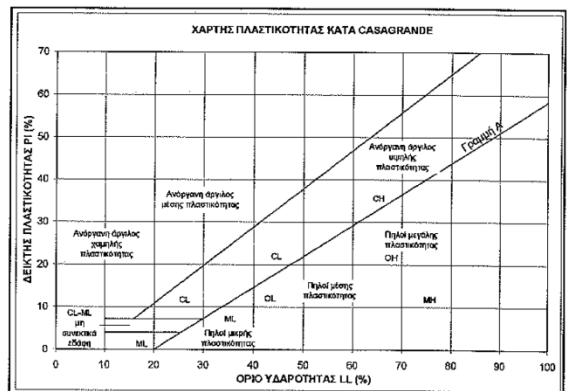
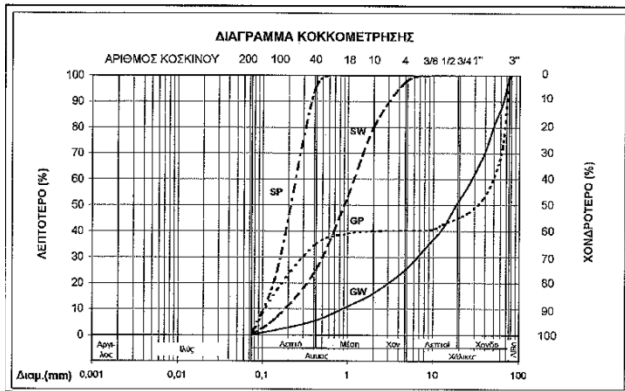
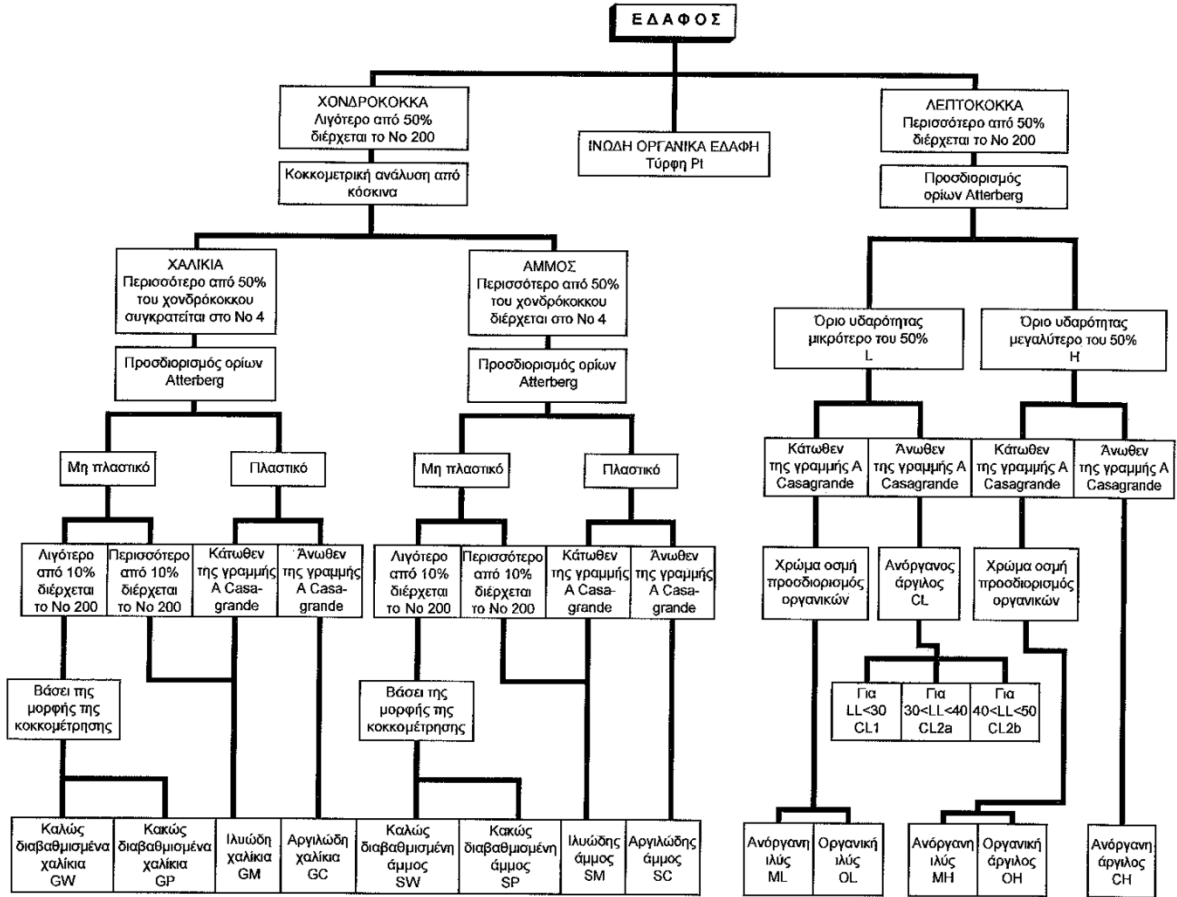
Δοκιμή τυποποιημένης διείσδυσης χωρίς δειγματοληψία ή ανεπιτυχής προσπάθεια αδιατάρακτου δείγματος

Δείγμα πυρήνα βράχου

A Άρνηση σε δοκιμή τυποποιημένης διείσδυσης



**ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΕΔΑΦΩΝ ΚΑΤΑ
AMERICAN UNIFIED SOIL CLASSIFICATION SYSTEM
(A.U.S.C.S.)**



ΜΗΤΡΩΟ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ Γ4

Σελίδα Α7

ΕΡΓΟ: ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΛΙΜΕΝΑ ΛΗΘΕΟΥΡΙΟΥ


ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΟ: JOY-12							ΥΨΟΜΕΤΡΟ: +0,64 m	X = 188,044 m Y = 4.233,861 m		ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ						ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ						ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ							ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ																										
ΠΡΟΣΩΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΕΙΔΟΣ ΚΟΤΙΛΙΟΥ	ΣΩΛΗΝΟΣΗ	ΣΤΑΣΙΜΗ ΥΔΑΤΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΒΑΘΟΣ (m)	ΤΟΜΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΔΟΚΙΜΗ S.P.T. αριθμός κρούσεων ανά 15 cm	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ				ΟΡΙΑ ATTERBERG		ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑ A.U.S.C.S.						ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ						ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ																											
										ΚΟΣΚΙΝΑ				αριθμό αρίθμο	ΟΡΙΑ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ	ΟΡΙΑ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	w	γ	γ _d	G _s	eo	S	qu	ε	c/c	φ/φ'	Cc	C _v 10 ⁻¹	Es	p	σ _i	γ _d	n	qu	E	v																		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41															
21/02/14	TD101	Φ114	W101	Υ	1	1	Εγγυτο σκυρόδεμα ανωδομής 0,95																																				23,1	18,90											
				Υ	2	2	ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ																																				21,2	14,20											
				Υ	3	3																																																	
				Υ	4	4		4,25																																								21,6	7,10						
				SPT	5	5	5		Μικροί ΛΙΘΟΙ και ΧΑΛΙΚΕΣ, μέσης πυκνότητας ως πυκνοί, ψαμίτικης σύστασης, τερφού ως τερφόραυο χρώματος, αναμειγμένοι με υλικά πιθμένα στο κάτω μέρος (Εξυγιαντική στρώση) 7,00			8	4	9																																									
				Υ	6	6	6																																																
				SPT	7	7	7																																																
				Φ	8	8	8			Αργιλολιωδης ΑΜΜΟΣ ως ΑΜΜΟΛΙΛΥΣ, με χαλκία κατά θέσεις (GC-GM) 7,90		Δ3				44	34	25	14	18,2	12,8	5,4	GC-GM	13,4																															
				SPT	9	9	9			ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), μέσης συνεκτικότητας ως σπιδροί, αμμώδης κατά θέσεις, τερφού, τερφοτράσινου, μελανού, μελανότράσινου ως μελανότερφου χρώματος, με λεπτά όστρακα και ενσטרώσεις αργιλολιωδους ΑΜΜΟΥ κατά θέσεις		Δ4	5	5	8	100	98	97	92	24	33,0	16,9	16,1	CL2a	27,8	19,41	15,19	2,65	0,74	99			47/-*	0/-*	0,146	7,5	5,9	100-200																	
				Δ	10	10	10					Δ6																																											
				A	11	11	11					Δ7																																											
				SPT	12	12	12					Δ8	6	8	10	100	100	100	99	23	32,0	16,8	15,2	CL2a	24,3					2,61																									
Φ	13	13	13					Δ9																																															
SPT	14	14	14					Δ10	7	9	9																																												
Φ	15	15	15					Δ11				100	100	99	92	21	31,9	17,1	14,8	CL2a	27,9	19,30	15,10	2,62	0,74	99			38*/3**	0*/29**	0,188	7,0	4,3	100-200																					
SPT	16	16	16				15,45	Δ12	6	7	7																																												


ΜΗΤΡΩ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ Γ5

Σελίδα Α8

ΕΡΓΟ: ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΒΛΑΒΩΝ ΛΙΜΕΝΑ ΛΗΞΟΥΡΙΟΥ

ΠΡΟΣΩΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΟ: JOY-12							ΥΨΟΜΕΤΡΟ: +0,96 m	Χ = 188.045 m Υ = 4.233.825 m		ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ							ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ					ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ							ΑΠΟΤΕΛΣΜΑΤΑ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ																		
	ΕΙΔΟΣ ΚΟΠΤΙΚΟΥ	ΣΕΔΗΘΕΣΗ	ΣΤΑΘΗΜΗ ΥΔΑΤΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΒΑΘΟΣ (m)	ΤΟΜΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ		ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΔΟΚΙΜΗ S.P.T. αριθμός κρούσεων ανά 15 cm	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ				ΟΡΙΑ ATTERBERG			ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ					ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ							ΑΠΟΤΕΛΣΜΑΤΑ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ																		
											ΚΟΣΚΙΝΑ				αριθμό τεράμετρο	ΟΡΙΟ ΥΔΑΡΟΦΗΤΑΣ	ΟΡΙΟ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	ΟΡΙΟ ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	ΥΓΡΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ	ΞΗΡΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ	ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΛΟΓΟΣ ΚΕΝΩΝ	ΒΑΘΜΟΣ ΚΟΡΣΕΙΜΟΥ	ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΠΙΣΤΕΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ	ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ (°) ΠΡΟΡΕΘΙΣΕΩΣ ΔΙΑΤΛΙΨΗΣ (°)	ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ							ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ														
											4	10	40	200													<2µ	LL	PL	PI	w	γ	γd	Gs	eo	S	qu	ε	c/c'	φ/φ'	Cc	Cvx10 ⁴	E _s	p	σ _v	γd	η	qu
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41								
					Y		Εγχυτο σκυρόδεμα ράμτας																																									
					Y	1	Εγχυτο σκυρόδεμα ανωδομής																																									
					Y		ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ																																									
					Y	2																																										
					Y	3																																										
					Y	4																																										
					SPT	5	Μικροί ΛΙΘΟΙ και ΧΑΛΙΚΕΣ, μέσης πυκνότητας ως πυκνοί, ψαμμίτικης σύστασης, τεφρού ως τεφρόφραϊου χρώματος, αναμειγμένοι με υλικά πυθμένα στο κάτω μέρος (Γευνιαντική στρώση)	Δ1	18	6	2																																					
					Φ	6																																										
					SPT	7	Αργιλολυώδης ΑΜΜΟΣ ως ΑΜΜΟΛΥΣ (ML), τεφρού χρώματος, με άστρακα και χαλκία κατά θέσεις	Δ2	22	12	37																																					
					Φ	8						100	99	96	57	10	N.P.	N.P.	N.P.	ML	23,0	20,17	16,40	2,64	0,61	100																						
					SPT	9	ΑΡΓΙΛΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), μέσης συνεκτικότητας ως σπυρή, αιμώδης κατά θέσεις, τεφρού, τεφροπράσινου, μελανού, μελανοπράσινου ως μελανότεφρου χρώματος, με λεπτά άστρακα και ενταρώσεις αργιλολυώδους ΑΜΜΟΥ (SM) κατά θέσεις	Δ4	1	4	4								CL2a	36,2	18,25	13,40	2,58	0,93	100	76,6	9,1						0,293	4,0	3,6	100-200												
					Φ	10																																										
					SPT	11						84	71	42	12		N.P.	N.P.	N.P.	SM	19,8																											
					Φ	12	ΑΡΓΙΛΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), πολύ σπυρή, τεφροπράσινου χρώματος, με ενταρώσεις πυκνού αργιλωδούς ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ (GC)	Δ8				69	66	64	52	18	32,9	14,0	18,9	CL2a/GC	27,5			2,63																								
					SPT	13																																										
						14																																										
						15																																										
						16																																										
						17																																										
						18																																										
						19																																										
						20																																										

 ΓΕΩΣΥΜΒΟΛΟΙ ΕΠΕ <small>γεωτεχνικές μελέτες και έρευνες</small>							ΜΗΤΡΩΟ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ Γ6															Σελίδα Α9																																			
ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΟ: JOY-12				ΥΨΟΜΕΤΡΟ: +0,73 m			X = 188.046 m Y = 4.233.755 m			ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ						ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ						ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ						ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ																													
ΠΡΟΣΔΙΩΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΕΙΔΟΣ ΚΟΠΤΙΚΟΥ	ΣΩΛΗΝΙΔΗ	ΣΤΑΘΗΝ ΥΛΑΤΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΒΑΘΟΣ (m)	ΤΟΜΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ				ΟΡΙΑ ATTERBERG		ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΤΑ A.U.S.C.S.	ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	ΥΓΡΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ	ΞΗΡΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ	ΕΙΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΑΡΧΙΚΟΣ ΛΟΓΟΣ ΠΕΡΙΝΝ	ΒΑΘΜΟΣ ΚΟΡΣΙΜΟΥ	ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΛΕΙΨΙΜΕΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ	ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ (*) ΠΛΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (**)		ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ						ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ																										
									ΚΟΣΚΙΝΑ				αριθμ. κρούσεων ανά 15 cm	αριθμ. πλάσσης									LL	PL	PI	w	γ	γd	Gs	e _o	S	q _u	ε	c/c'	φ/φ'	Cc	Cvx10 ³	E _s	p	σ _r	γd	n	q _u	E	v												
									4	10	40	200																																		%	%	%	%	%	κΝ/μ ²	κΝ/μ ³	%	κΡα	κΡα	κΡα	κΝ/μ ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41																	
W114							Εγγυλιωδες ανωδομής 0,70 ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ 7,60	Y																																	22,0	24,60															
W101								Αργυλιωδες ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ (GC-GM), μέσης πυκνότητας ως πυκνό, ασβεστολιθικής σύστασης, λευκόφαιου χρώματος (Εξυγιαντική στρώση) 9,10	Y								GC-GM	9,9																												22,2	18,80										
W101									ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45	Y																																					22,5	18,70									
W101										ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45	Y																																					21,7	14,20								
W101											ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45	Y																																							19,7	6,30					
W101												ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45	Y																																								23,1	19,00			
W101													ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45	SPT	8	7	14	13																																							
W101														ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45	Φ	9		36	25	17		17,1	11,1	6,0																																	
W101															ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45	SPT	9	13	10																																						
W101																ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45	Φ	10		100	100	99	32	39,4	18,1	21,3		CL2a	24,6	19,99	16,04	2,65	0,65	100	260,3	14,9			0,118	3,8	7,2	100-200															
W101																	ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45	SPT	11	13	21																																				
W101							ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45											12																																							
W101								ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45										13																																							
W101									ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45									14																																							
W101										ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45								15																																							
W101											ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45							16																																							
W101												ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45						17																																							
W101													ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45					18																																							
W101														ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45				19																																							
W101															ΑΡΓΙΛΙΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), σφαιρική ως πολύ σφαιρική, τεφρού χρώματος, με ενατρωσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσπασμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο) 11,45			20																																							

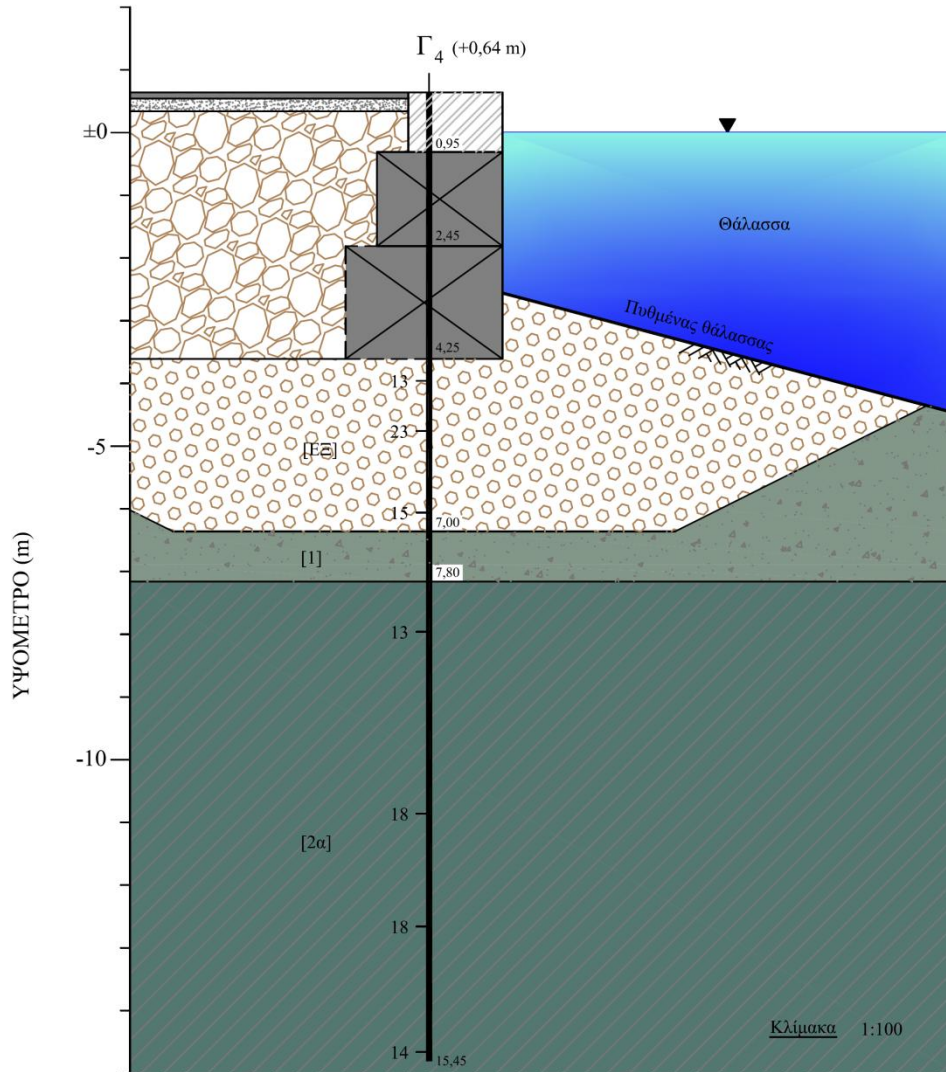
 ΓΕΩΣΥΜΒΟΛΟΙ ΕΠΕ <small>γεωτεχνικές μελέτες και έρευνες</small>							ΜΗΤΡΩΟ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ Γ9														Σελίδα Α12																								
ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΟ: JOY-17			ΥΨΟΜΕΤΡΟ: +0.82 m				X = 188.049 m Y = 4.233.612 m		ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ				ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ				ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ				ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ																								
ΠΡΟΣΔΙΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΕΙΔΟΣ ΚΟΠΤΙΚΟΥ ΣΩΛΗΝΟΣ	ΣΤΑΘΜΗ ΥΔΑΤΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΔΕΓΜΑΤΟΣ	ΒΑΘΟΣ (m)	ΤΟΜΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΓΜΑΤΟΣ	ΔΟΚΙΜΗ S.P.T. αριθμός κρούσεων ανά 15 cm	ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ				ΟΡΙΑ ΑΤΤΕΡΒΕΡΓ		ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑ A.U.S.C.S.	ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	ΥΓΡΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ	ΞΗΡΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ	ΕΙΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΑΡΧΙΚΟΣ ΛΟΓΟΣ ΠΕΡΑΝ	ΒΑΘΜΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ	ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΠΙΣΤΑΣΗΣ ΘΑΨΗΣ	ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ (') ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΗΡΗΣΗΣ (')	ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ				ΜΟΝΟΑΣΟΝΙΚΗ ΘΑΨΗ																	
									ΚΟΣΚΙΝΑ				αριθμόμετρο	ΟΡΟ ΥΔΑΡΟΤΗΤΑΣ										ΟΡΟ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	ΔΕΙΚΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	w	γ	γd	Gs	eo	S	qu	ε	c/c'	φ/φ'	Cc	Cvx10 ⁴	Es	p	σ _v	γd	n	qu	E	v
									4	10	40	200	<2μ	LL										PL	PI	%	%	%	%	%	kN/m ³	kN/m ³	%	kPa	%	kPa	(°)	m ³ /sec	MPa	kPa	kPa	kN/m ²	%	MPa	MPa
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41					
				Y	1	Εύχυτο ακυρόδεμα ανυδαμής 1,15																																							
				Y	2	ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ																																							
				Y	3																																								
				Y	4																																								
				Y	5	Μικροί ΛΙΘΟΙ και ΧΑΛΙΚΕΣ, μέσης πυκνότητας ως πυκνοί (Εξυγιαντική στρώση)																																							
				SPT	6	ΑΜΜΟΛΥΣ, πυκνή, τεφρού ως τεφροπράσιου χρώματος	5,30	Δ1	2	3	4																																		
				Φ	7	ΑΡΓΙΛΟΣ χαμηλής ως μέσης πλαστικότητα (CL), σιφρή ως πολύ σιφρή, αμμώδης κατά θέσεις, τεφρού, τεφροπράσιου, τεφροκίανου ως τεφροβραίου χρώματος, με λεπτά όστρακα και ενστρώσεις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ (GC-SC) κατά θέσεις (Αποσαθρωμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΙΚΟ υπόβαθρο)	6,00	Δ2				100	100	100	97	16	26,8	14,8	12,0	CL1	21,6	20,38	16,76	2,69	0,61	96			110/-	2/-	(UU)														
				SPT	8			Δ3	11	16	17																																		
				Φ	9			Δ4				100	99	98	86	22	32,2	15,6	16,6	CL2a	22,3	20,43	16,70	2,71	0,62	97	199,2	16,6		0,119	5,1	6,7	100-200												
				SPT	10			Δ5	8	14	19																																		
				Φ	11			Δ6				61	51	38	24		25,0	13,8	11,2	GC/SC	19,9																								
				SPT	12			Δ7	19	19	22																																		

							ΜΗΤΡΩΟ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ Γ10														Σελίδα Α13																							
ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΟ: JOY-12							ΥΨΟΜΕΤΡΟ: +0,76 m							Χ = 188.051 m Υ = 4.233.509 m		ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ				ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ				ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ						ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ														
ΠΡΟΣΩΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΕΙΔΟΣ ΚΟΠΤΙΚΟΥ ΣΩΛΗΝΟΣ	ΣΤΑΘΜΗ ΥΔΑΤΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΒΑΘΟΣ (m)	ΤΟΜΗ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΔΟΚΙΜΗ S.P.T.				ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ				ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ				ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ						ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ																		
								αριθμός κρούσεων ανά 15 cm				ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ		ΟΡΙΑ ΑΤΤΕΡΒΕΡΓ		ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ	ΥΓΡΟ ΦΑΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ	ΞΗΡΟ ΦΑΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ	ΕΙΛΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	ΑΡΧΙΚΟΣ ΛΟΓΟΣ ΡΕΝΙΝ	ΒΑΘΜΟΣ ΚΟΡΕΣΜΟΥ	ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΛΕΥΣΤΗ ΘΑΛΗΣ	ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΣΟΝΙΚΗ (*) ΠΛΑΜΕΝΗΣ ΔΙΑΠΗΛΗΣ (*)	ΔΟΚΙΜΗ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ						ΜΟΝΟΑΣΟΝΙΚΗ ΘΑΛΙΦΗ														
4	10	40	200	<2μ	LL	PL	PI	w	γ	γd	Gs	eo	s	qu	ε									c/c'	φ/φ'	Cc	Cvx10 ⁹	Es	p	σ _v	γd	n	qu	E	v									
				δερχόμενο %				%				%				%																												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41				
						Εύχυτο σκυρόδεμα ανωδομής																																						
						ΤΕΧΝΗΤΟΙ ΟΓΚΟΛΙΘΟΙ																																						
						Μικροί ΛΙΘΟΙ και ΧΑΛΙΚΕΣ, μέσης πυκνότητας ως πυκνοί, γραμμικής αίστασης, τεφρού ως τεφροφάρου χρώματος, αναμεμειγμένοι με υλικά πυθμένα στο κάτω μέρος (Εξυγιαντική στρώση)																																						
						ΑΜΜΟΙΛΥΣ (SM), πυκνή, τεφρού ως τεφροπράσινο χρώματος, με χαλίκια και όστρακα κατά θέσεις																																						
						ΑΡΓΙΛΟΣ χαμηλής πλαστικότητας (CL1), σφιφή ως πολύ σφιφή, αμμόλης κατά θέσεις, τεφρού, τεφροπράσινο, τεφροκόκκινο ως τεφροφάρου χρώματος, με λεπτά όστρακα και ενσπράσις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ (GC-SC) κατά θέσεις (Αποσαθρωμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΛΙΚΟ υπόβαθρο)																																						



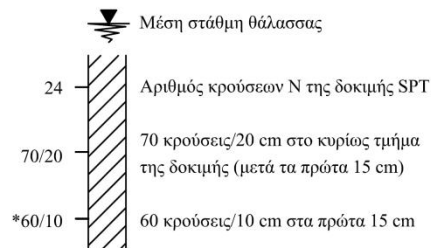


ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΜΗ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΗΣ Γ4

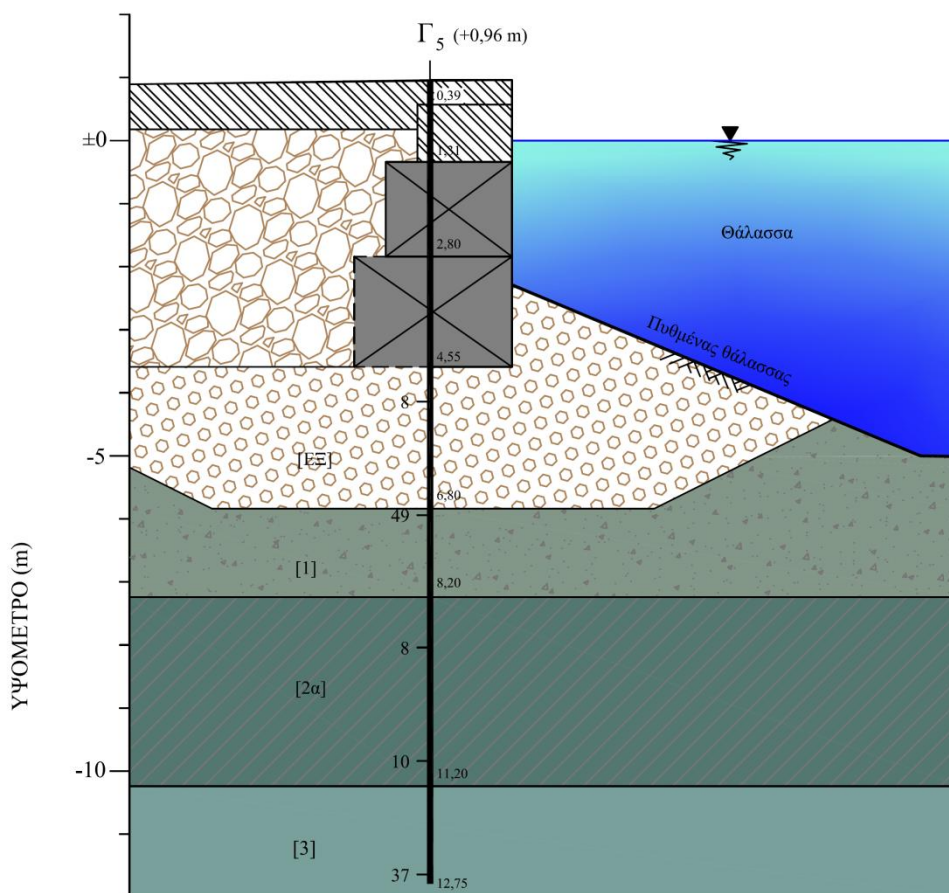


ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- [ΕΞ] Μικροί ΛΙΘΟΙ και ΧΑΛΙΚΕΣ, μέσης πυκνότητας ως πυκνοί, ψαμμιτικής σύστασης, τερφού ως τερφόφαιου χρώματος, αναμεμειγμένοι με υλικά πυθμένα στο κάτω μέρος (Εξυγιαντική στρώση)
- [1] Αργιλοϊλύδης ΑΜΜΟΣ ως ΑΜΜΟΪΛΥΣ, τερφού χρώματος, με όστρακα και στρογγυλεμένα χαλίκια κατά θέσεις (GC-GM)
- [2α] ΑΡΓΙΛΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), μέσης συνεκτικότητας ως σιφρή, αμιώδης κατά θέσεις, τερφού, τερφοπράσινου, μελανού, μελανοπράσινου ως μελανότερφου χρώματος, με λεπτά όστρακα και ενστρώσεις αργιλοϊλύδους ΑΜΜΟΥ κατά θέσεις



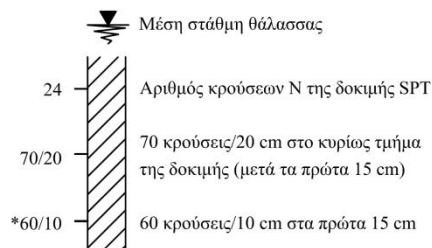
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΜΗ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΗΣ Γ5



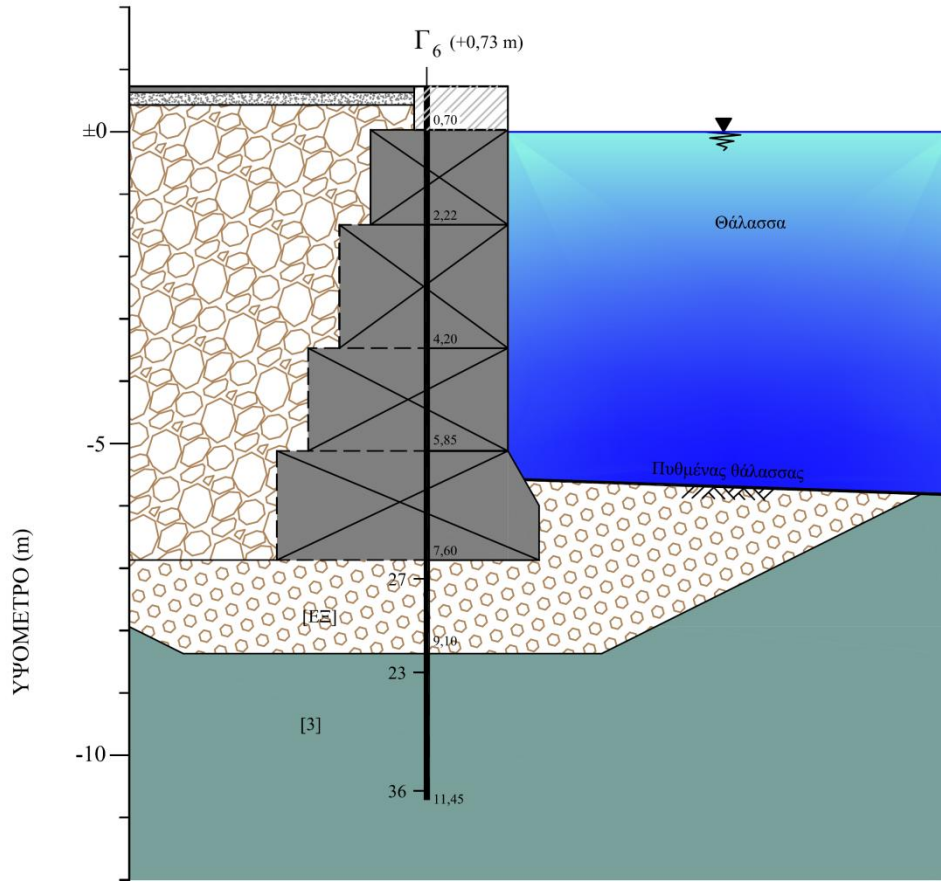
ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- [ΕΞ] Μικροί ΛΙΘΟΙ και ΧΑΛΙΚΕΣ, μέσης πυκνότητας ως πυκνοί, ψαμμιτικής σύστασης, τεφρού ως τεφρόφαιου χρώματος, αναμεμιγμένοι με υλικά πυθμένα στο κάτω μέρος (Εξυγιαντική στρώση)
- [1] Αργιλιώδης ΑΜΜΟΣ ως ΑΜΜΟΪΛΥΣ (ML), τεφρού χρώματος, με όστρακα και στρογγυλεμένα χαλίκια κατά θέσεις
- [2α] ΑΡΓΙΛΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), μέσης συνεκτικότητας ως στιφρή, αμμώδης κατά θέσεις, τεφρού, τεφροπράσινου, μελανού, μελανοπράσινου ως μελανότεφρου χρώματος, με λεπτά όστρακα και ενστρώσεις αργιλιώδους ΑΜΜΟΥ (SM) κατά θέσεις
- [3] ΑΡΓΙΛΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL), στιφρή ως πολύ στιφρή, αμμώδης κατά θέσεις, τεφρού, τεφροπράσινου, τεφροκίανου ως τεφρόφαιου χρώματος, με λεπτά όστρακα και ενστρώσεις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ (GC) κατά θέσεις (Αποσαθρωμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΪΚΟ υπόβαθρο)

Κλίμακα 1:100



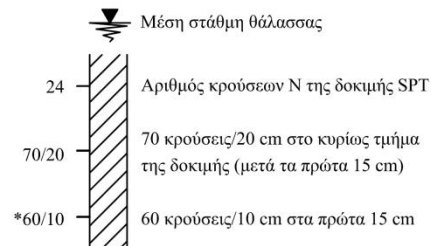
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΜΗ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΗΣ Γ6



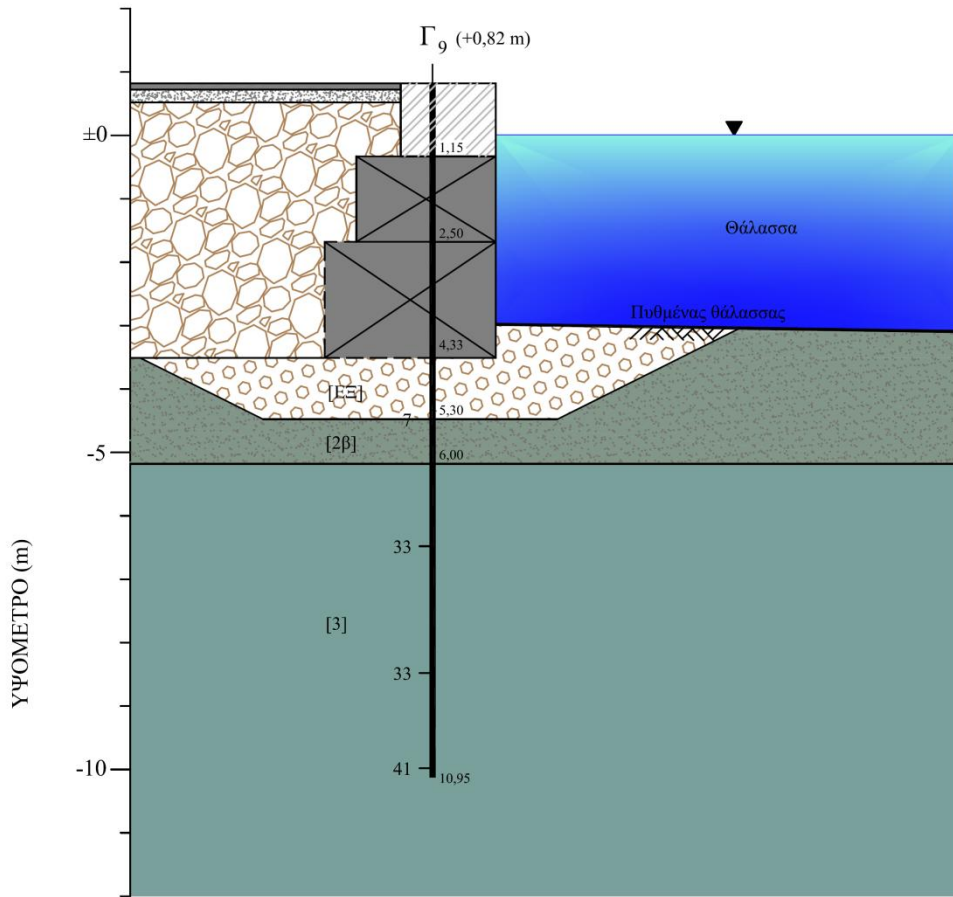
Κλίμακα 1:100

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- [EΞ] Αργιλοϊλύδες ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟ (GC-GM), μέσης πυκνότητας ως πυκνό, ασβεστολιθικής σύστασης, λευκόφαιου χρώματος (Εξυγιαντική στρώση)
- [3] ΑΡΓΙΛΟΣ μέσης πλαστικότητας (CL2), στιφή ως πολύ στιφή, αμμώδης κατά θέσεις, τερφού, τερφοπράσινου, τερφοκύανου ως τερφόφαιου χρώματος, με λεπτά δστρακα και ενστρώσεις πυκνού αργιλόδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ κατά θέσεις (Αποσαθρωμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΪΚΟ υπόβαθρο)



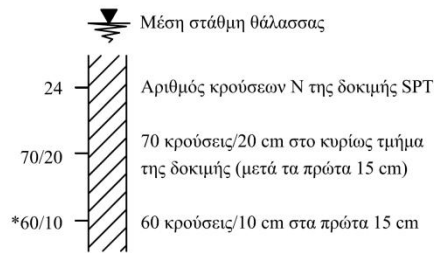
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΜΗ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΗΣ Γ9



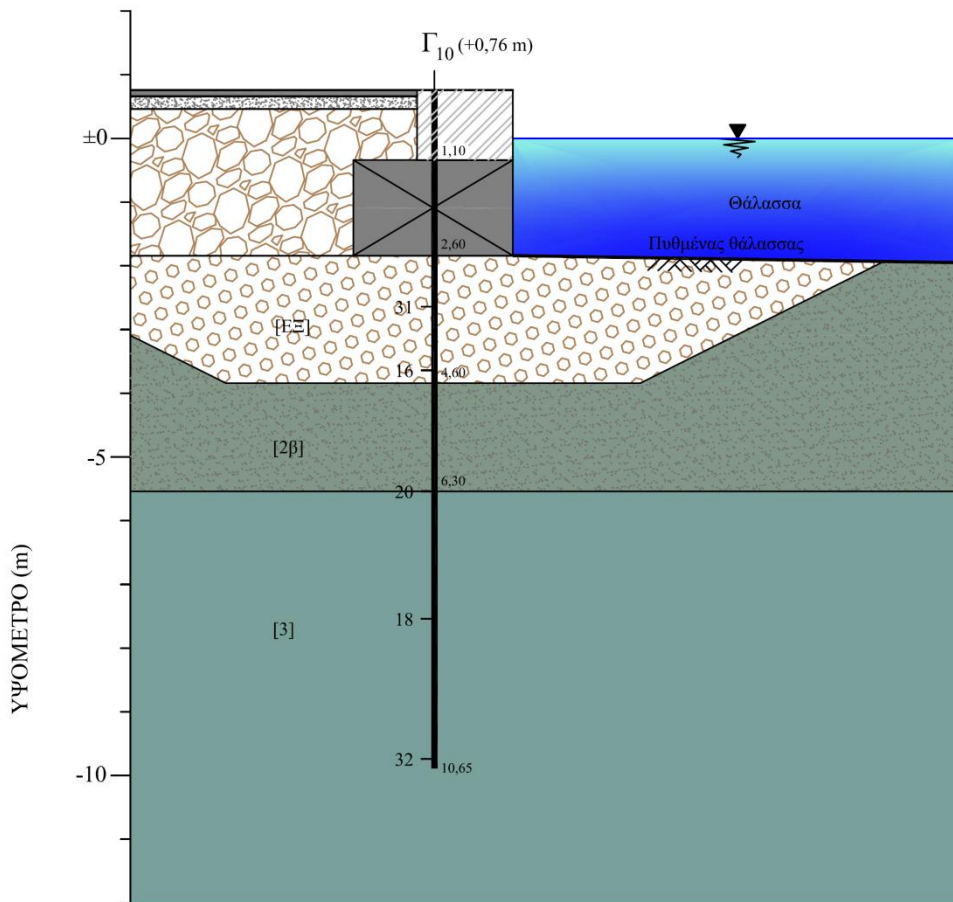
Κλίμακα 1:100

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- [EΞ] Μικροί ΛΙΘΟΙ και ΧΑΛΙΚΕΣ, μέσης πυκνότητας ως πυκνοί, ψαμμιτικής σύστασης, τεφρού ως τεφρόφαιου χρώματος, αναμεμιγμένοι με υλικά πυθμένα στο κάτω μέρος (Εξυγιαντική στρώση)
- [2β] ΑΜΜΟΪΛΥΣ, πυκνή, τεφρού ως τεφροπράσινου χρώματος, με χαλίκια και όστρακα κατά θέσεις
- [3] ΑΡΓΙΛΟΣ χαμηλής ως μέσης πλαστικότητας (CL), στιφρή ως πολύ στιφρή, αμμώδης κατά θέσεις, τεφρού, τεφροπράσινου, τεφροκίανου ως τεφρόφαιου χρώματος, με λεπτά όστρακα και ενστρώσεις πυκνού αργιλόδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ (GC-SC) κατά θέσεις (Αποσθρωμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΪΚΟ υπόβαθρο)



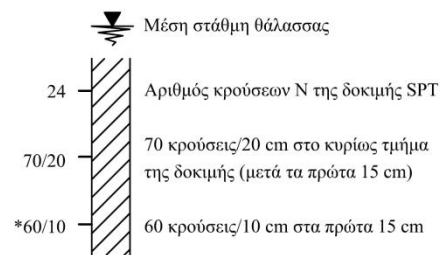
ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΤΟΜΗ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΗΣ Γ10



Κλίμακα 1:100

ΥΠΟΜΝΗΜΑ

- [EΞ] Μικροί ΛΙΘΟΙ και ΧΑΛΙΚΕΣ, μέσης πυκνότητας ως πυκνοί, ψαμμιτικής σύστασης, τειφρού ως τειφροπράσινου χρώματος, αναμεμιγμένοι με υλικά πυθμένα στο κάτω μέρος (Εξυγιαντική στρώση)
- [2β] ΑΜΜΟΪΛΥΣ (SM), πυκνή, τειφρού ως τειφροπράσινου χρώματος, με χαλίκια και όστρακα κατά θέσεις
- [3] ΑΡΓΙΛΙΟΣ χαμηλής πλαστικότητας (CL1), σιφρή ως πολύ σιφρή, αμμώδης κατά θέσεις, τειφρού, τειφροπράσινου, τειφροκίανου ως τειφροπράσινου χρώματος, με λεπτά όστρακα και ενστρώσεις πυκνού αργιλώδους ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΟΥ (GC-SC) κατά θέσεις (Αποσαθρωμένο ΨΑΜΜΙΤΟΜΑΡΓΑΪΚΟ υπόβαθρο)



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Μετρημένες τιμές εδαφικών ρωγμών στους λιμένες
Ληξουρίου και Αργοστολίου και σχετικό
φωτογραφικό υλικό

ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ - ΛΗΞΟΥΡΙ - ΛΙΜΑΝΙ Ημερομηνία 8-02-2014 Τοπική ώρα 10:10						
Σημείο	GPS Συντεταγμένες		Μετακίνηση		Φωτογραφίες	Σχόλια
	Lat.		V (cm)	H (cm)		
A1	38,19575	20,43937		1	4997-98	παραλία - άμμος & φύκια
B1	38,1958	20,43951			5000	παραλία - άμμος & φύκια (πιθανός κρατήρας από ρευστοποίηση)
A2	38,196	20,43967			5002-3	φούνικας - ίχνη ρευστοποίησης (πιθανοί κρατήρες στην άμμο)
B2	38,19611	20,43916		0,5	5005,7	
A3	38,19632	20,43908		0,5	5008-9	
B3	38,19622	20,43964		0,5	5010-16	
C3	38,19623	20,43972		0,4	5017-21	
A4	38,19647	20,43893			5022	
B4	38,19649	20,43906		0,1	5023	
C4	38,19645	20,43936		0,1	5033	
D4	38,19641	20,43956		0,2	5037	
A5	38,19473	20,43893			5038-41&43-53	Καθίζηση κτιρίου
B5	δεν λήφθηκε σημείο GPS		6,5	2,5	5058-60	Καθίζηση κτιρίου
A6	38,19675	20,43959		0,1	5072-73	γήπεδο μπάσκετ
B6	38,1725	20,49441				σε 30m προς την παραλία παρόμοια
A7	38,19725	20,43958			5074-76,79,83	μάντρα σχολείου - κρατήρες άμμου σε αλάνα απέναντι από σχολείο (77-78,80-82,84)
A8	38,19793	20,43969		2,5	5085	
B8	38.197967°	20.439950°		5	5094	
C8	38.197950°	20.440233°		0,5	5097	
D8	38.197983°	20.440617°	13	5,5	5104-5106	
E8	38.198017°	20.441017°		3	5114	
F8	38.198033°	20.441433°		5	5115	μετατόπιση σκαλοπατιών
G8	38.198117°	20.441917°	3	5	5122-23	
H8	38.198233°	20.442800°			5145	τέλος Ανατολικού βραχίωνα
A9	38.198100°	20.439267°		0,3	5149-51	Λιμενικός Σταθμός
B9	38.198067°	20.439550°		2,5	5152	
C9	38.198050°	20.439583°		1,5	5153-54	αρχή αποκόλλησης
A10	38.198433°	20.438817°		0,2	5171-72	
B10	38.198367°	20.438867°		1,5	5173-76	
C10	38.198383°	20.439283°		0,5	5177-78	
D10	38.198367°	20.439317°	4	2	5179-5182	
E10	38.198367°	20.439367°		4	5183-84	
F10	38.198383°	20.439383°		5,5	5186	
G10	38.198383°	20.439433°		2	5191	
H10	38.198383°	20.439450°		6	5192-93	
I10	38.198400°	20.439517°		20	5196-97	
J10	38.198417°	20.439567°		110	5204-05,07	
A11	38.198483°	20.439267°				Όμοια με line 10
A12	38.198783°	20.438583°		1	5227-28	
B12	38.198767°	20.438750°				
C12	38.198767°	20.439083°		0,2	5232-33	
D12	38.198717°	20.439200°		3		
E12	38.198717°	20.439250°		2	5239	
F12	38.198717°	20.439283°		1	5241	
G12	38.198733°	20.439333°		10		
H12	38.198750°	20.439417°		6	5248	
I12	38.198750°	20.439483°		3		
J12	38.198767°	20.439533°	30	49	5255-59	
A13	38.199200°	20.438617°		0,1	5270	
B13	38.199183°	20.438733°		0,1	5274	
C13	38.199167°	20.439083°		1	5276	
D13	38.199217°	20.439283°		3,5	5279	
E13	38.199217°	20.439350°		4	5283-86	
F13	38.199200°	20.439400°		6,5	5289-90	
G13	38.199200°	20.439450°		5	5293-94	
H13	38.199200°	20.439517°		100	5300-02	

ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ - ΛΗΞΟΥΡΙ - ΛΙΜΑΝΙ Ημερομηνία 8-02-2014 Τοπική ώρα 10:10						
Σημείο	GPS Συντεταγμένες		Μετακίνηση		Φωτογραφίες	Σχόλια
	Lat.		V (cm)	H (cm)		
A14	38.199700°	20.439583°			5308	Σημεία στην προβλήτα -(A14 ολική καθίζηση προβλήτας)
B14	38.199550°	20.439867°				
C14	38.199900°	20.440000°				
D14	38.199883°	20.439683°			5334	Ένδειξη ρευστοποίησης
E14	38.200067°	20.439417°			5339	Ένδειξη ρευστοποίησης - τέλος προβλήτας
A15	38.200117°	20.438450°			5347	πλατεία
B15	38.200133°	20.438683°		0,5		
C15	38.200083°	20.439033°		2		Παρατηρήθηκε πίδακας νερού
D15	38.200117°	20.439200°		1,5		
E15	38.200200°	20.439250°		3		
F15	38.200200°	20.439267°		3		
G15	38.200217°	20.439350°		1,5	5376	
A16	38.200450°	20.438417°			5381	ανασηκωμένα πλακάκια
B16	38.200450°	20.438800°		0,5	5386	
C16	38.200450°	20.438967°		1	5385	
D16	38.200417°	20.439083°		2,5	5389	
E16	38.200467°	20.439150°		1	5392	
F16	38.200467°	20.439217°		6	5396	
G16	38.200500°	20.439267°		4	5397	
H16	38.200483°	20.439400°			5402	
A17	38.200783°	20.438617°	0,5		5409-11	καθίζηση εδάφους
B17	38.200767°	20.438933°		0,5	5419	σπασμένα πλακάκια
C17	38.200767°	20.439067°		1,5	5420	
D17	38.200733°	20.439100°		0,5		
E17	38.200717°	20.439200°		12	5424	
F17	38.200717°	20.439283°		4	5426	
G17	38.200700°	20.439350°		1	5429	
H17	38.200767°	20.439400°	18	35	5440	
A18	38.201283°	20.438883°		0,1	5446-47	
B18	38.201300°	20.439000°	3	2,5	5448,50	
C18	38.201300°	20.439033°		2,5		
D18	38.201283°	20.439133°		4		
E18	38.201283°	20.439200°		2,5		
F18	38.201300°	20.439317°		1,5		
G18	38.201300°	20.439367°	13	30	5462-63	
A19	38.201450°	20.439633°			5469	Δυτικός βραχίονας
B19	38.201483°	20.440417°			5479	
C19	38.201500°	20.441283°		9	5488	καινούρια προέκταση
D19	38.201567°	20.442167°			5491	την άκρη του βραχίονα έχουν κάτσει τα μεσαία μπλοκ - τέλος βραχίονα 5491
A20	38.202033°	20.438867°	2,5	3	5501-03	Τράπεζα Πειραιώς - καθίζηση
B20	38.202033°	20.438950°		0,5	5504	
C20	38.202033°	20.439100°		0,5	5506	
D20	38.202033°	20.439117°		1	5507	
E20	38.202033°	20.439233°		0,5	5508	
F20	38.202067°	20.439350°		2,5	5509	
G20	38.202083°	20.439383°		17,5	5511	& 6251 από κάμερα Ξένιας
A21	38.202833°	20.438783°		0,2	6260	
B21	38.202867°	20.438867°		1		

ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ - ΑΡΓΟΣΤΟΛΙ - ΛΙΜΑΝΙ Ημερομηνία 9-02-2014 Τοπική ώρα 10:10						
Σημείο	GPS Συντεταγμένες		Μετακινήσεις (cm)		φωτογραφίες	Σχόλια
	Lat.	Long.	V	H		
A22	38,17075	20,49667		1,5	5516-17	Κοντά στο τεχνολογικό ινστιτούτο
B22	38,17076	20,49668		1	5518	
C22	38,17081	20,49673		1	5519 (& 5520-22 γενικές)	
A23	38,17105	20,49625		2	5523	
A24	38,17118	20,496		1,5	5524-26	Κρατήρες γκριζού χρώματος (& 5527-37, 5540-42 γενικές & κρατήρες ρευστοπ. Χωρίς GPS)
A25	38,17127	20,49579			5538-39	
A26	38,17168	20,49503		0,3	5552-53	Κρατήρες γκριζού χρώματος
B26	38,17175	20,49508		0,2	5554	
A27	38,17209	20,49451			5561-64	Καταβόθρα - υποχώρηση εδάφους (?) Μέχρι το σημείο αυτό, παρατηρείται ίδια εικόνα με τομή 26
A28	38,17227	20,49425		0,2	5571	
B28	38,1723	20,49429		0,3	5572	5566-5571 γενικές
C28	38,17233	20,49431	1,5	1	5573-74	
D28	38,17241	20,49436		0,2	5575	
E28	38,17244	20,49437		1	5576	5577-5579 γενικές
F28	38,1725	20,49441	5,5	3	5579-80	5581-85 γενικές
A29	38,17251	20,49413		1,5	5586-88	
B29	38,17253	20,49415		0,9	5589-90	
C29	38,17256	20,49417		0,5	5591	
D29	38,17259	20,49422		0,7	5592	
E29	38,17264	20,49426	5	16	5593-96	
A30	38,17293	20,49352		1	5598	
B30	38,17294	20,49353		1,5	5600	5601 γενική
A31	38,17361	20,49252		0,2		Μετακίνηση κρηπιδότοιχου, μέχρι αυτό το σημείο ίδια εικόνα με τομή 30
A32	38,17395	20,49222		3,5	5606-5614	
A33	38,17451	20,49178		0,3	5615-16	Προβλήτα
B33	38,17449	20,4918		0,8	5617	Προβλήτα
C33	38,17451	20,49182		1		Προβλήτα
D33	38,17457	20,49199		1,9	5618	Προβλήτα h = Σh 3 ρωγμών
E33	38,17461	20,49207		1,2	5619	Προβλήτα
F33	38,17465	20,49215	9	5	5630-31	Προβλήτα (5624-5627 γενικές στη line 33)
A34	38,17483	20,49156		0,5	5639	Ρευστοποίηση (Βενζινάδικο Shell 5636-39)
B34	38,17488	20,49154		4	5640	Ρευστοποίηση - στο σημείο αυτό υπήρχε αρμός διαστολής
C34	38,17484	20,49166		0,7	5642	5641 - 5643
D34	38,17489	20,4918		1	5644	
E34	38,17502	20,49186		2,5	5647	
F34	38,17503	20,49189		3	5648	5649-5654 γενικές κατά μήκος της προβλήτας // θάλασσα
A35	38,17526	20,49134		2,5	5655-56	
B35	38,17527	20,49135		0,5	5659	
C35	38,17541	20,49148	2,3	1,5	5663-64	
D35	38,17544	20,49159		4	5668	
A36	38,17581	20,4913	5,5	5	5675-76	5669-5674 γενικές κατά μήκος της προβλήτας
A37	38,17603	20,49106	6,5	6	5682-5683	5684-5687 γενικές
A38	38,17592	20,49058		1,8	5688-89	λίγο μετά το τέλος της προβλήτας
B38	38,17597	20,49068		2,5	5690	
A39	38,17614	20,49052	3	2	5692-94	
A40	38,17642	20,49018		3,5	5696	5697-98 γενικές
B40	38,17647	20,49027		4	5700	5699 h=0.2cm noGPS
A41	38,17713	20,48982		3	5704-5705	5701-5703 γενικές κατά μήκος της παραλίας μπιστά στο Tourist hotel
B41	38,17714	20,48985		1,7	5706	
C41	38,17718	20,48993	3	5,5	5708-09	
A42	38,17782	20,48951		1,5	5710-11	
B42	38,17782	20,48954		0,3		
C42	38,17781	20,48958	2,7	3	5713-14	
A43	38,17837	20,48951		5	5723	5718-5722 γενικές
B43	38,17837	20,48959	3	4	5727-28	5724-27 γενικές
A44	38,17888	20,48952		2	5731-32	
B44	38,17888	20,48953		2	5734	
C44	38,17889	20,48961	5,5	5	5735,38	
A45	38,17947	20,48946		0,5	5747	
B45	38,17945	20,48954		3	5745-46	Καθίζηση κτιρίου
C45	38,17946	20,48959		0,5	5750	
D45	38,17945	20,48966	11	6,5	5752,54	Αποκόλληση - μετακίνηση κρηπιδότοιχου
A46	38,17957	20,48954		2	5755-56	Προβλήτα Λιμεναρχείου
B46	38,17957	20,48964		0,5	5759	Βάθος νερού 2,80 μ - track arg 1
A47	38,17982	20,48972		0,7	5780-82	Τομή 47 - Κάθετα στο νότιο κρηπιδότοιχο//θάλασσα
B47	38,17976	20,4898	3	2,5	5784-85	Τομή 47 - Κάθετα στο νότιο κρηπιδότοιχο//θάλασσα
C47	38,17973	20,48984		0,7	5787	Τομή 47 - Κάθετα στο νότιο κρηπιδότοιχο//θάλασσα
D47	38,17965	20,48986		1,2	5788	Τομή 47 - Κάθετα στο νότιο κρηπιδότοιχο//θάλασσα
E47	38,17963	20,48987		3	5789	Τομή 47 - Κάθετα στο νότιο κρηπιδότοιχο//θάλασσα
F47	38,17957	20,48988		3	5790	Τομή 47 - Κάθετα στο νότιο κρηπιδότοιχο//θάλασσα
G47	38,17956	20,48988		2,3	5791	Τομή 47 - Κάθετα στο νότιο κρηπιδότοιχο//θάλασσα
H47	38,17955	20,48987		3	5792	Τομή 47 - Κάθετα στο νότιο κρηπιδότοιχο//θάλασσα
A48	38,17979	20,49007		1	5794,98	Τομή 48 - Κάθετα στο νότιο κρηπιδότοιχο//θάλασσα
B48	38,17977	20,49008		1	5799	Τομή 48 - Κάθετα στο νότιο κρηπιδότοιχο//θάλασσα
C48	38,17963	20,49014		2,5	5800	Τομή 48 - Κάθετα στο νότιο κρηπιδότοιχο//θάλασσα
D48	38,17955	20,49011		8,5	5801	Τομή 48 - Κάθετα στο νότιο κρηπιδότοιχο//θάλασσα
A49	38,17961	20,49046		2,5	5807-08	γωνία Νότιου κρηπιδότοιχου
B49	38,17961	20,49059	7,5	5,5	580-06	γωνία Νότιου κρηπιδότοιχου

A50	38,17996	20,4902		1	5816	Τομή 50 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
B50	38,17998	20,49031	2,5	2,5	5817	Τομή 50 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
C50	38,17997	20,49044		1,6	5820	Τομή 50 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
D50	38,17996	20,49044		4	5821	Τομή 50 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
A51	38,17994	20,48989		1,5	5827	Τομή 50 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
B51	38,17998	20,48996			5828	Ρευστοποίηση - ανασήκωμα πλακών
C51	38,18005	20,49014		0,7	5829	Τομή 51 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
D51	38,18009	20,49027		0,3	5830	Τομή 51 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
E51	38,1801	20,49043	1	1	5831	Τομή 51 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
A52	38,1801	20,48993		1,5	5835,37	Τομή 52 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
B52	38,18014	20,48997		2	5838	Τομή 52 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
C52	38,18017	20,49003		0,3	5839-40	Τομή 52 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
D52	38,18021	20,49018		1	5841	Τομή 52 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
E52	38,18024	20,49034	7	4	5843-45	Τομή 52 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
A53	38,18033	20,48986		1	5846-47	Κοντά στον επιταχυνσιογράφο
B53	38,18034	20,48992		1	5848	Τομή 53 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
C53	38,18039	20,48999		0,5	5849	Τομή 53 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
D53	38,18039	20,49011		1	5850	Τομή 53 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
E53	38,18041	20,49018		1	5851	Τομή 53 - Κάθετα στον Ανατολικό κρηπιδότοιχο
A54	38,18056	20,4902		7	5855	
A55	38,18077	20,48978		0,5	5857-5858	
B55	38,18076	20,48999		1,5	5859	
C55	38,1808	20,49012		6	5861-62	
A56	38,1804	20,48953			5863	Φαινόμενο ρευστοποίησης - Track arg2 & arg3, αριστερό τμήμα προβλήτας
A57	38,18105	20,48955		1	5876	Τομή 57 - Κάθετα στο Βόρειο κρηπιδότοιχο
B57	38,18118	20,48954		0,2		Τομή 57 - Κάθετα στο Βόρειο κρηπιδότοιχο
C57	38,18122	20,48953		0,3		Τομή 57 - Κάθετα στο Βόρειο κρηπιδότοιχο
D57	38,1813	20,48953		0,5		Τομή 57 - Κάθετα στο Βόρειο κρηπιδότοιχο
E57	38,18138	20,48953	1	1	5884	Τομή 57 - Κάθετα στο Βόρειο κρηπιδότοιχο
A58	38,18125	20,4898		1,5	5885	Τομή 58 - Κάθετα στο Βόρειο κρηπιδότοιχο
B58	38,18137	20,4898	7	4	5886	Τομή 58 - Κάθετα στο Βόρειο κρηπιδότοιχο
A59	38,18122	20,48996	10,5	12	5887-5888	
A60	38,18196	20,48877		1	5889-5890	TKLG001-track 3
A61	38,18217	20,48858		1,5	5892-93	
B61	38,18222	20,48872		0,5	5894	
C61	38,18228	20,48883		1,5	5895	
A62	38,18355	20,48805		1,5	589697	
B62	38,18358	20,48815		2,5	5898	

Ληξούρι τομή 18, σημεία **A18**, **B18**, **G18**.



ρωγμή στο σημείο A18



ρωγμή στο σημείο B18



Άνοιγμα ρωγμών παράλληλα με το παραλιακό μέτωπο (τομή 18, σημείο B18)

Τομή 17 (A17-B17-C17-D17-E17-F17-G17-H17)



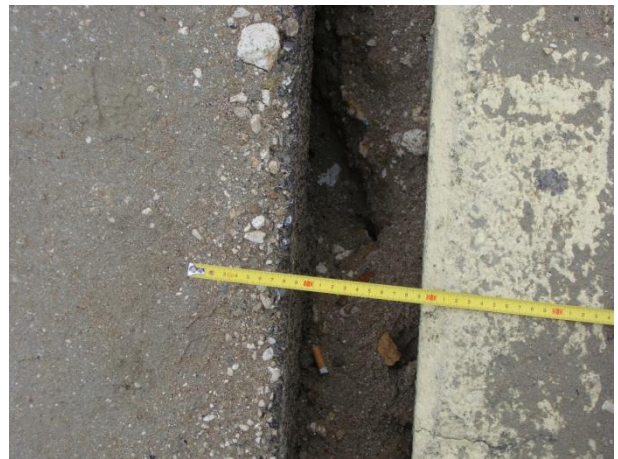
A17 ζημιές στο κτίριο ΚΕΠ



B17 άνοιγμα ρωγμών στην ασφαλτο και στον πεζόδρομο



C17 άνοιγμα ρωγμής 3cm



E17 άνοιγμα ρωγμής 10cm



F17 άνοιγμα ρωγμής 4cm



G17 άνοιγμα ρωγμής 3cm



Η17. Άνοιγμα ρωγμής 35cm κοντά στον κρηπιδότοιχο, στο ελεύθερο μέτωπο λόγω πλευρικής εξάπλωσης. Παρατηρούμε ότι η ράμπα έδρασε σαν ελκυστήρας αποτρέποντας την μεγαλύτερη οριζόντια μετατόπιση.

Τομή 16 (A16-B16-C16-D16-E16-F16-G16-H16)



Σημείο B16 0,5cm



Σημείο C16 1cm



Σημείο D16 ρωγμή 2,5cm



Σημείο E16 ρωγμή 1cm



Σημείο F16 ρωγμή 2,5cm



Σημείο G16 ρωγμή 1cm



Σημείο H16 Σοβαρή ζημιά στον κρηπιδότοιχο. Ανατροπή, ολίσθηση και μετακίνηση του προς το ελεύθερο μέτωπο.

Τομή 15 (A15-B15-C15-D15-E15-F15-G15)



Σημείο A15 Ζημιές και ανοίγματα ρωγμών στην πλατεία του Ληξουρίου



Σημείο G15 καθίζηση 25cm

Τομή 13 (A13-B13-C13-D13-E13-F13-G13-H13)



Σημείο A13 ρωγμή 0,1cm



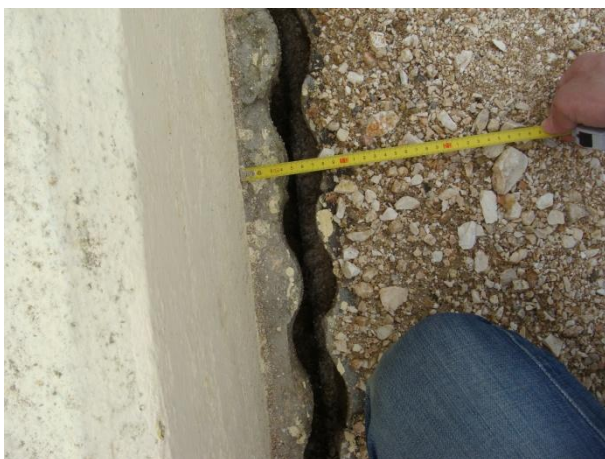
Σημείο B13 ρωγμή 0,1cm



Σημείο C13 ρωγμή 1cm



Σημείο D13 ρωγμή 3,5cm



Σημείο E13 ρωγμή 4cm



Σημείο F13 ρωγμή 6,5cm



Σημείο G13 άνοιγμα ρωγμής 5cm.



Σημείο H13, κοντά στο ελεύθερο μέτωπο η οριζόντια μετακίνηση έφτασε το 1 μέτρο.

Τομή 12 (A12-B12-C12-D12-E12-F12-G12-H12-I12-J12)



Σημείο A12 άνοιγμα ρωγμής 1cm



Σημείο C12 άνοιγμα ρωγμής 0,2cm



Σημείο E12 άνοιγμα ρωγμής 2cm



Σημείο F12 άνοιγμα ρωγμής 1cm



Σημείο H12 άνοιγμα ρωγμής 6cm



Σημείο J12 άνοιγμα ρωγμής 49cm.

Τομή 10 (A10-B10-C10-D10-E10-F10-G10-H10-I10-J10)



Σημείο A10 άνοιγμα ρωγμής 0,2cm



Σημείο B10 άνοιγμα ρωγμής 1,5cm



Σημείο C10 άνοιγμα ρωγμής 0,5cm



Σημείο D10 άνοιγμα ρωγμής 2cm



Σημείο E10 άνοιγμα ρωγμής 4cm



Σημείο F10 άνοιγμα ρωγμής 5,5cm



Σημείο G10 άνοιγμα ρωγμής 2cm

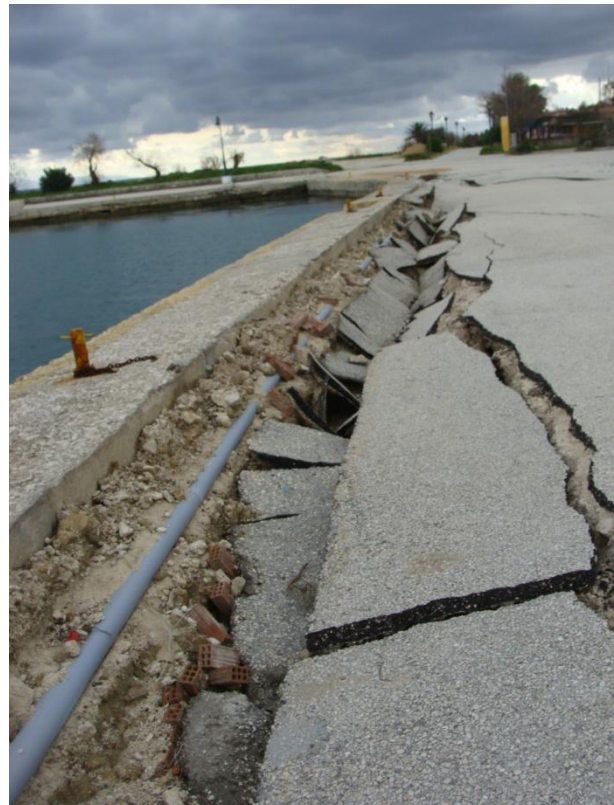


Σημείο H10 άνοιγμα ρωγμής 6cm



Σημείο I10 άνοιγμα ρωγμής 20cm





Σημείο J10 . Εκτεταμένες ζημιές στον κρηπιδότοιχο του λιμένα με την οριζόντια μετακίνηση να φτάνει κοντά στο ελεύθερο μέτωπο τα 110cm.

Τομή 9 (A9-B9-C9)



Σημείο A9 άνοιγμα ρωγμής 0,3 cm



Σημείο B9 άνοιγμα ρωγμής 2,5cm



Σημείο C9 άνοιγμα ρωγμής 1,5 cm

