

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ

Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών

Τμήμα: ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

Πτυχιακή εργασία :

Ρευστοποίηση εδαφών στον ελλαδικό χώρο



Όνομα: Κιτσονίδης Βασίλειος

Κορδολαίμης Ευάγγελος

Επιβλέπων:κα. Βγενοπούλου Ειρήνη

Πάτρα, Ιανουάριος 2016

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ρευστοποίηση εδαφών στον ελλαδικό χώρο

Περίληψη

Ο κίνδυνος της ρευστοποίησης του εδάφους, είναι αναμφισβήτητα ένα από τα κυριότερα προβλήματα που καλούνται να αντιμετωπίσουν οι γεωτεχνικοί μηχανικοί. Το φαινόμενο της ρευστοποίησης προκαλείται από την προοδευτική συσσώρευση υδατικών υπερπίεσεων πόρων και οδηγεί σε απώλεια της διατμητικής αντοχής και δυστημσίας των κορεσμένων αμμωδών εδαφών.

Φαινόμενα ρευστοποίησης έχουν παρατηρηθεί στους περισσότερους σεισμούς μεγάλου μεγέθους ($M > 6.5$). Σε πολλές περιπτώσεις η ρευστοποίηση ενδέχεται να προκαλέσει ανεκτές μόνο παραμορφώσεις και μετατοπίσεις. Αν όμως, το φαινόμενο λάβει σημαντική έκταση, η ρευστοποίηση μπορεί να επιφέρει σημαντικές βλάβες σε κτίρια, επιχώματα, πρανή, αντιστηρίξεις, οδοστρώματα, δεξαμενές και σε πολλές ακόμη κατασκευές και τεχνικά έργα οι οποίες σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να πάρουν καταστροφικές διαστάσεις όπως στο σεισμό του 1964 στη Νιυγκάτα της Ιαπωνίας. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο σε σημαντικές κατασκευές όπως σχολεία, νοσοκομεία, πολυσύχναστα δημόσια κτίρια και δημόσια έργα αυξημένου συντελεστή σπουδαιότητας η περίπτωση της ρευστοποίησης πρέπει να αποκλείεται. Στην Ελλάδα, παρ'όλο που δεν έχουν σημειωθεί ανάλογης κλίμακας καταστροφές έχουν καταγραφεί περιστατικά ρευστοποίησης με μικρές εδαφικές και κατασκευαστικές αστοχίες με χαρακτηριστικό παράδειγμα το σεισμό της Λευκάδας το 2003.

Στην παρούσα εργασία, μελετάται το φαινόμενο της ρευστοποίησης των εδαφικών σχηματισμών στον ελλαδικό χώρο και παρατίθενται αναλυτικά οι ιστορικές καταγραφές του φαινομένου κατά τη διάρκεια σεισμικών δονήσεων στη χώρα μας. Τέλος, γίνεται λεπτομερής περιγραφή των αστοχιών που προκλήθηκαν σε κάθε περίπτωση κι επιπλέον, δίνεται μια σύντομη περιγραφή των μεθόδων βελτίωσης του εδάφους καθώς και των μεθόδων εκτίμησης της ευαισθησίας του εδάφους στο φαινόμενο της ρευστοποίησης ανάλογα με τα ειδικά χαρακτηριστικά του.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1 Σκοπός και διάρθρωση της εργασίας	1
1.2 Γενικά στοιχεία	1
Κεφάλαιο 2: Ρευστοποίηση λόγω σεισμού.....	5
2.1 Γενικά.....	5
2.2 Κατηγορίες ρευστοποίησης.....	8
2.2.1 Ρευστοποίηση στο ελεύθερο πεδίο	8
2.2.2 Ρευστοποίηση σε πρανή και στο έδαφος θεμελίωσης	9
2.3 Εδαφικές παραμορφώσεις-μετατοπίσεις λόγω ρευστοποίησης	10
2.4 Κριτήρια ευαισθησίας εδαφών σε ρευστοποίηση	13
Κεφάλαιο 3: Φαινόμενα ρευστοποίησης στον ελλαδικό χώρο.....	19
3.1 Ο σεισμός της Λευκάδας (14/08/03 Ms=6.4)	19
3.1.1 Γενικά στοιχεία.....	19
3.1.2 Ιστορική σεισμικότητα	21
3.1.3 Γεωλογία.....	22
3.1.4 Αστοχίες και φαινόμενα ρευστοποίησης.....	24
3.1.5 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών.....	30
3.1.6 Συμπεράσματα.....	32
3.2 Ο σεισμός της Αχαΐας-Ηλείας (08/06/2008-Mw=6.5).....	34
3.2.1 Γενικά στοιχεία.....	34
3.2.2 Γεωλογία.....	37
3.2.3 Αστοχίες και φαινόμενα ρευστοποίησης.....	41
3.2.4 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών.....	46
3.2.5 Συμπεράσματα.....	52
3.3 Ο σεισμός της Κεφαλλονιάς (26/01/2014-03/02/2014, Mw=6.5)	53
3.3.1 Γενικά στοιχεία.....	53
3.3.2 Γεωλογικά στοιχεία	56
3.3.3 Αστοχίες και φαινόμενα ρευστοποίησης.....	59
3.3.4 Συμπεράσματα.....	66
Κεφάλαιο 4 : Αντιμετώπιση του φαινομένου της ρευστοποίησης	67
4.1.2 Μέθοδοι βελτίωσης –ενίσχυσης του εδάφους.....	67

4.1.2 Μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους με στραγγιστήρια.....	67
4.1.3 Μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους με χαλικοπασσάλους	68
Βιβλιογραφία.....	71

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Σκοπός και διάρθρωση της εργασίας

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη του φαινομένου της ρευστοποίησης στον ελληνικό χώρο, καθώς και η εκτίμηση της επικινδυνότητας, ως προς το φαινόμενο αυτό με βάση τη σεισμικότητα της περιοχής και των χαρακτηριστικών των εδαφικών σχηματισμών. Επιπλέον, παρατίθενται ιστορικές καταγραφές εμφανίσεως του φαινομένου της ρευστοποίησης σε διάφορες περιοχές στον ελλαδικό χώρο και γίνεται μελέτη των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών συνθηκών της κάθε περίπτωσης καθώς και του τύπου των αστοχιών που προκλήθηκαν.

Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται κάποια εισαγωγικά στοιχεία για το φαινόμενο της ρευστοποίησης και το ρόλο των εδαφικών χαρακτηριστικών που καθορίζουν το ενδεχόμενο πρόκλησης της, ενώ στο δεύτερο κεφάλαιο παρατίθενται θεωρητικά στοιχεία και σημαντικές ιδέες και τεχνικές για το φαινόμενο και τα κριτήρια ευαισθησίας των εδαφικών σχηματισμών σε ρευστοποίηση. Στο τρίτο κεφάλαιο παρατίθενται αναλυτικά ιστορικά περιστατικά ρευστοποίησης κατά τη διάρκεια σεισμικών δονήσεων στη χώρα μας και περιγράφονται οι αστοχίες που προκλήθηκαν καθώς και ο ρόλος των εδαφικών χαρακτηριστικών στην κάθε περίπτωση. Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική αναφορά στις συνέπειες της ρευστοποίησης και στις μεθόδους βελτίωσης του εδάφους με στραγγιστήρια και χαλικοπασσάλους.

1.2 Γενικά στοιχεία

Κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων οι κορεσμένοι χαλαροί αμμώδεις σχηματισμοί υποβαλλόμενοι σε ανακυκλική φόρτιση, οδηγούνται σε συμπίκνωση. Υπό αστράγγιστες όμως συνθήκες σε πλήρως κορεσμένα εδάφη η διάθεση αυτή δεν μπορεί να υλοποιηθεί εμποδιζόμενη από την παρουσία του ασυμπίεστου ύδατος στους πόρους. Αυτή η διαδικασία επιφέρει την αύξηση της πίεσης των πόρων με

αποτέλεσμα τη μείωση έως και μηδενισμό της διατμητικής αντοχής του εδαφικού σχηματισμού και την μετατροπή της κατάστασής του σε ρευστή. Έτσι όταν η δόνηση είναι αρκετά μεγάλης έντασης και διάρκειας, λαμβάνει χώρα μια βαθμιαία συσσώρευση υδατικών υπερπιέσεων και το εδαφικό υλικό προοδευτικά υφίσταται απώλεια αντοχής. Το έδαφος θα επανέλθει στην στερεή του κατάσταση μετά την εκτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων, με την ροή του νερού προς την επιφάνεια. Συγχρόνως, πραγματοποιείται αύξηση της πυκνότητας του εδαφικού σχηματισμού και μείωση του όγκου του και τελικώς ενδέχεται να έχουμε πλήρη απώλεια αντοχής και δυστημσίας, με μεγάλες αιφνίδιες παραμορφώσεις.

Ο όρος ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει όλα τα σχετικά φαινόμενα είναι «*ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών*» (soil liquefaction). Αυτή μπορεί να πάρει ποικίλες μορφές, από καταστροφική «*εδαφική ροή*» έως μικρές παραμένουσες παραμορφώσεις (Whitman 1995, Stamatopoulos et al 1991). Η ακριβής συμπεριφορά σε κάθε περίπτωση εξαρτάται από τη φύση της αστράγγιστης μονοτονικής σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων, από την ύπαρξη και το ρόλο των στατικών διατμητικών τάσεων, και φυσικά από την ένταση και διάρκεια της δόνησης.

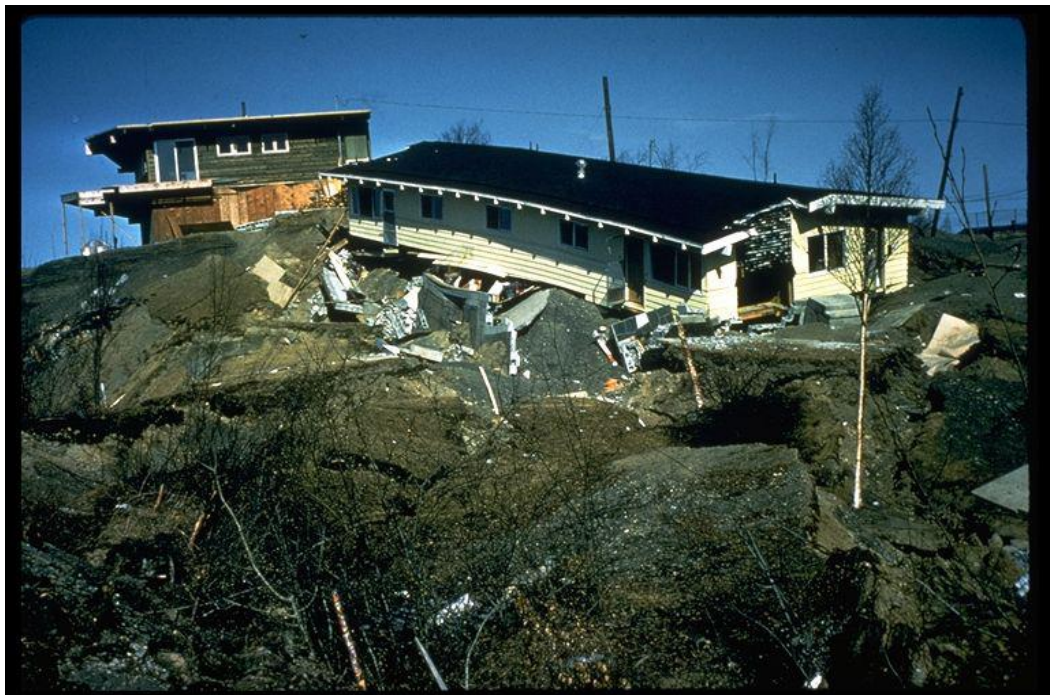
Η ρευστοποίηση ενός υποκείμενου εδαφικού σχηματισμού είναι πιθανό να προκαλέσει την εκδήλωση χαρακτηριστικών φαινομένων στην επιφάνεια του εδάφους όπως κώνοι άμμου ή αλλιώς “*ηφαίστεια άμμου*” καθώς επίσης και την ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού από εδαφικές διαρρήξεις. Επιπλέον, είναι πιθανή η πρόκληση εδαφικών καθιζήσεων. Επίσης, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα αστοχίας κατασκευών, οι οποίες εδράζονται στον ρευστοποιημένο σχηματισμό.

Στους περισσότερους σεισμούς μεγάλου μεγέθους ($M > 6.5$) έχουν παρατηρηθεί φαινόμενα ρευστοποίησης. Παρόλα αυτά η επιστημονική κοινότητα δεν εστίασε στη μελέτη των φαινομένων καθώς δεν προκαλούσαν μεγάλης κλίμακας εδαφικές παραμορφώσεις όπως άλλα δευτερογενή φαινόμενα, για παράδειγμα οι κατολισθήσεις. Ορόσημο για την συστηματική μελέτη του φαινομένου της ρευστοποίησης, ουσιαστικά αποτέλεσαν οι δύο σεισμικές δονήσεις στην Niigata (Ιαπωνία) και στην Αλάσκα (Η.Π.Α) το 1964. Σε αυτές τις δύο περιπτώσεις, η ρευστοποίηση των υποκείμενων εδαφικών σχηματισμών προκάλεσε μεγάλης

κλίμακας αστοχίες σε κατασκευές τόσο στην πόλη της Niigata όσο και στην πόλη Anchorage στην Αλάσκα (εικόνα 1 και 2).



Εικόνα 1.1: Ανατροπή πολυκατοικιών λόγω ρευστοποίησης των υποκείμενων εδαφικών σχηματισμών (Niigata, Ιαπωνία, 1964).



Εικόνα 1.2: Αστοχία κατασκευής λόγω εδαφική ροής στο Anchorage, στην Αλάσκα, Η.Π.Α το 1964

Στην Ελλάδα δεν έχουν σημειωθεί έως τώρα ανάλογης κλίμακας καταστροφές λόγω ρευστοποίησης. Συνήθως παρατηρούνται μικρού μεγέθους εδαφικές αστοχίες, κυρίως ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού και/ή δημιουργία κώνων άμμου, και μικρής κλίμακας κατασκευαστικές αστοχίες όπως καθιζήσεις προβλητών ή γεφυρών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα πρόκλησης αστοχιών λόγω ρευστοποίησης στην Ελλάδα αποτελεί η σεισμική δόνηση (Ms 6.4) στην Λευκάδα στις 14 Αυγούστου 2003. Αυτός ο σεισμός προκάλεσε μικρής κλίμακας καθιζήσεις στην πόλη της Λευκάδας, ενώ κώνοι άμμου δημιουργήθηκαν στην παραλιακή ζώνη του Νυδρί και στη Βασιλική. Οι αστοχίες αυτές όπως επίσης και οι αστοχίες από το σεισμό της Κεφαλονιάς το 2014 και της Αχαΐας το 2008 μελετώνται αναλυτικά στα επόμενα κεφάλαια.

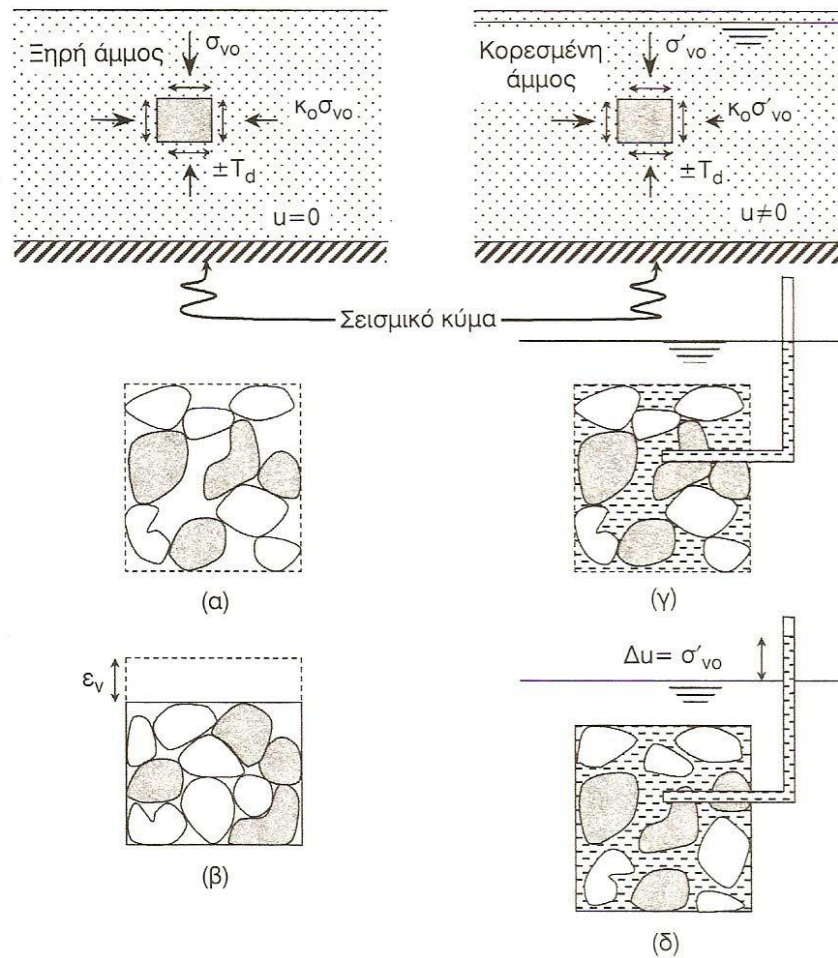
Κεφάλαιο 2: Ρευστοποίηση λόγω σεισμού

2.1 Γενικά

Η ρευστοποίηση είναι ένα φαινόμενο που συνδέεται άμεσα με τη μετάδοση των σεισμικών κυμάτων μέσα στα στρώματα ενός εδαφικού σχηματισμού και μπορεί να επιφέρει σημαντικές βλάβες σε κτίρια, πρανή, αντιστηρίξεις κ.λ.π.

Ας θεωρήσουμε ένα στρώμα ξηρής άμμου και ένα εδαφικό στοιχείο του στρώματος αυτού, που παρουσιάζει μια σχετικά χαλαρή δομή, με μεγάλο ποσοστό κενών (e_0), σαν αποτέλεσμα της πρωτογενούς απόθεσής του, της επίδρασης διαφόρων επιφορτίσεων κ.α.. Με την επίδραση μιας σεισμικής τάσης στο εδαφικό στοιχείο επενεργούν: οι γεωστατικές τάσεις σ_{v0} και $\sigma_{h0} = K_0 \times \sigma_{v0}$ και η διατμητική τάση λόγω σεισμού με εναλλασσόμενη φορά (τ_d). Η πίεση των πόρων είναι προφανώς μηδενική. Το αποτέλεσμα της επίδρασης του σεισμού είναι η μεταβολή της αρχικής δομής του εδαφικού στοιχείου και η μείωση των κενών με αντίστοιχη κατακόρυφη παραμόρφωση.

Το φαινόμενο αυτό καλείται δυναμική συνίζηση και εκδηλώνεται σαν καθίζηση του εδάφους μετά από ισχυρούς σεισμούς. Στην περίπτωση που η άμμος βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα και είναι προφανώς κορεσμένη, με την επίδραση της σεισμικής τάσης, στο εδαφικό στοιχείο του στρώματος επενεργούν: οι ενεργές γεωστατικές τάσεις σ'_{v0} και $\sigma'_{h0} = K_0 \times \sigma'_{v0}$, η υδροστατική πίεση των πόρων (u) και η διατμητική τάση λόγω σεισμού με εναλλασσόμενη φορά ($\pm \tau_d$).

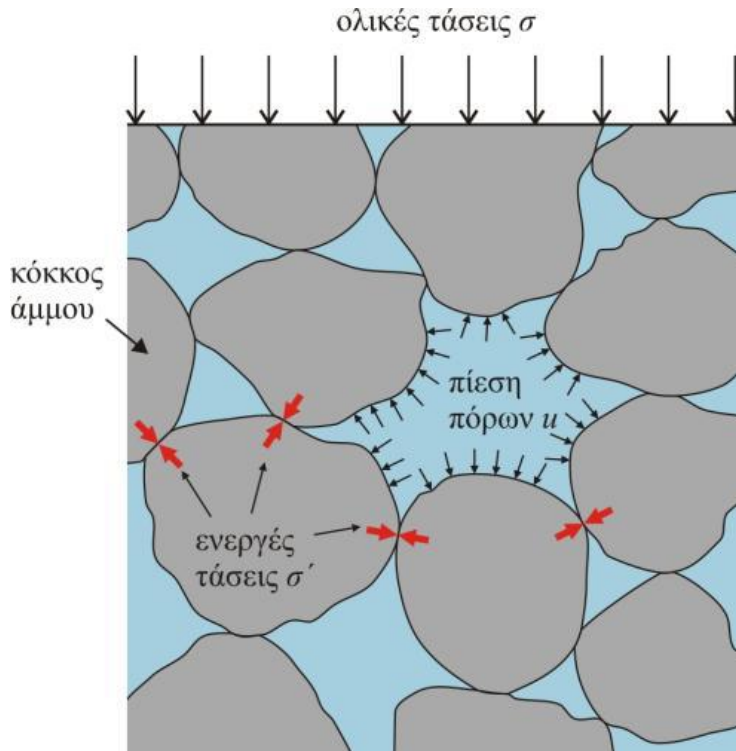


Εικόνα 2.1 Σχηματική απεικόνιση (α και β) δυναμικής συνίζησης και (γ, δ), ρευστοποίησης μιας άμμου (Μπουκοβάλας, 1999).

Το αποτέλεσμα της επίδρασης του σεισμού είναι η μεταβολή της αρχικής δομής του εδαφικού στοιχείου κατά τρόπο παρόμοιο με αυτόν της ξηρής άμμου. Η μεταβολή όμως του όγκου του εδαφικού στοιχείου δεν είναι τώρα δυνατή, καθόσον το νερό που υπάρχει στους πόρους είναι ασυμπίεστο και λόγω της μεγάλης ταχύτητας της σεισμικής φόρτισης δεν είναι δυνατή η αποστράγγιση (δηλαδή πρακτικά έχουμε αστράγγιστες συνθήκες φόρτισης). Με τον τρόπο αυτό έχουμε σταδιακή αύξηση της πίεσης των πόρων με αντίστοιχη προφανή μείωση των αρχικών ενεργών τάσεων. Μετά από κάποιον αριθμό κύκλων σεισμικής φόρτισης, λόγω μεγάλης αύξησης της πίεσης των πόρων οι ενεργές τάσεις μηδενίζονται ($\Delta u = \sigma'_{vo}$) και χάνεται η επαφή μεταξύ των κόκκων της άμμου. Το φαινόμενο αυτό καλείται ρευστοποίηση της άμμου, καθόσον μαζί με τις ενεργές τάσεις μηδενίζεται και η διατμητική αντοχή της άμμου που συμπεριφέρεται πλέον σαν ρευστό.

Το φαινόμενο της ρευστοποίησης δεν παρατηρείται με την ίδια συχνότητα σε όλους τους τύπους των εδαφικών υλικών. Καταρχήν, η δυνατότητα ρευστοποίησης μειώνεται με την αύξηση της ηλικίας του εδαφικού στρώματος. Γενικά, εδάφη ηλικίας παλαιότερης της Ολοκαινικής, δύσκολα ρευστοποιούνται. Τα εδάφη που κινδυνεύουν από ανάπτυξη υπερπίεσεων και ρευστοποίηση (προϋποτίθεται υψηλός υδροφόρος ορίζοντας) είναι κυρίως λεπτόκοκκες άμμοι και αμμοϊλύες γεωλογικά πρόσφατων αποθέσεων. Τα εδάφη μπορούν γενικά να ταξινομηθούν από πλευράς δυνατότητας (επικινδυνότητας) για ρευστοποίηση σαν: κατεξοχήν ρευστοποιήσιμα, πιθανά ρευστοποιήσιμα και μη ρευστοποιήσιμα.

Τα κορεσμένα κοκκώδη εδάφη, όπως αμμώδη εδάφη με πλαστικά ή μη-πλαστικά λεπτόκοκκα ($\% < 75\mu\text{m}$) και αμμοχάλικα χαρακτηρίζονται ως ρευστοποιήσιμα εδάφη και η μελέτη της συμπεριφοράς τους παρουσιάζει έντονο πρακτικό ενδιαφέρον καθώς τα εδάφη αυτά απαντώνται συχνά σε πλήθος γεωτεχνικών κατασκευών και έργων. Βέβαια, στη φύση σπάνια συναντώνται ομοιόμορφα κοκκώδη εδάφη, καθώς πάντοτε περιέχουν κόκκους διαφορετικής διαμέτρου και διαφόρων χαρακτηριστικών, όσον αφορά στην ορυκτολογική σύσταση, το σχήμα και τη διάταξή τους. Μέχρι σήμερα η έρευνα για τη ρευστοποίηση των κοκκωδών εδαφών έχει επικεντρωθεί κυρίως στη συμπεριφορά των καθαρών και ιλυωδών άμμων, ενώ οι μελέτες που αφορούν στη συμπεριφορά αμμοδών εδαφών με πλαστικά λεπτόκοκκα και των αμμοχάλικων είναι σχετικά περιορισμένες λόγω των αντικειμενικών δυσκολιών στις εργαστηριακές δοκιμές (μόρφωση δοκιμίων στις άμμους με πλαστικά λεπτόκοκκα και διείδυση μεμβράνης και μέγεθος δοκιμίου στα αμμοχάλικα), καθώς και του γεγονότος ότι τα εδάφη αυτά εθεωρούντο ότι είναι πιο δύσκολο να ρευστοποιηθούν, παρά τις αντίθετες ενδείξεις από περιπτώσεις ρευστοποίησης στο πεδίο κατά τη διάρκεια σεισμών (Fukui-Ιαπωνία, 1948, Valdez-Αλάσκα, 1964, Idaho-Η.Π.Α., 1983, Αρμενία, 1988, Hokkaido-Ιαπωνία, 1993, Kobe-Ιαπωνία, 1995, Kocaeli & Adapazari-Τουρκία, 1999, Λευκάδα, 2003).



Εικόνα 2.2. Ενεργές τάσεις και φυσική σημασία τους

2.2 Κατηγορίες ρευστοποίησης

Όπως προαναφέρθηκε, το φαινόμενο της ρευστοποίησης μπορεί να πάρει ποικίλες μορφές. Η ακριβής συμπεριφορά σε κάθε περίπτωση εξαρτάται από τη φύση της αστράγγιστης μονοτονικής σχέσης τάσεων-παραμορφώσεων, από την ύπαρξη και το ρόλο των στατικών διατμητικών τάσεων, και φυσικά από την ένταση και διάρκεια της δόνησης. Οι κατηγορίες που διακρίνονται περιγράφονται παρακάτω:

2.2.1 Ρευστοποίηση στο ελεύθερο πεδίο

Ο όρος ελεύθερο πεδίο υπαινίσσεται μια οριζόντια στρωσιγενή εδαφική απόθεση και την απουσία κάθε ανθρώπινου δομήματος που θα επέβαλλε σημαντικές διατμητικές τάσεις στα εδαφικά στοιχεία.

Εργαστηριακές ανακυκλικές δοκιμές δείχνουν ότι οι σχετικώς χαλαρές άμμοι μπορούν να φτάσουν στην κατάσταση « $\sigma=0$ », όπου δηλαδή η ενεργός τάση μηδενίζεται τουλάχιστον στιγμιαία κατά τη διάρκεια ενός κύκλου παραμορφώσεως.

Η κατάσταση αυτή παρ'όλο που δεν επιφέρει οπωσδήποτε μηδενισμό της αντοχής σε διάτμηση στην επόμενη αστράγγιστη φόρτιση είναι η βασική αιτία αστοχίας για πολλά από τα σχετικά φαινόμενα που θα αναφερθούν σε παρακάτω κεφάλαιο.

2.2.2 Ρευστοποίηση σε πρανή και στο έδαφος θεμελίωσης

Σε τέτοιες περιπτώσεις στα εδαφικά στοιχεία δρουν σημαντικές στατικές διατμητικές τάσεις τόσο κατά τη διάρκεια όσο και μετά το πέρας της δόνησης. Η φύση της αστράγγιστης μονοτονικής διατμητικής συμπεριφοράς στερεοποιημένου εδαφικού στοιχείου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και την αστράγγιστη ανακυκλική συμπεριφορά του. Οι δύο πιθανές μορφές συμπεριφοράς είναι οι περιπτώσεις καταστροφικής « εδαφικής ροής» αφ'ενός και ανελαστικής μόνιμης παραμόρφωσης αφ'ετέρου.

Τον πρώτο τύπο συμπεριφοράς παρουσιάζουν τα κοκκώδη εδάφη με συσταλτική συμπεριφορά όταν υπόκεινται σε μέγιστη στατική διατμητική τάση q_s που υπερβαίνει την αστράγγιστη αντοχή της 'οριακής κατάστασης' S_{us} . Ο δεύτερος τύπος συμπεριφοράς παρουσιάζεται είτε σε εδάφη με διασταλτική συμπεριφορά είτε σε εδάφη με συσταλτική μεν συμπεριφορά τα οποία όμως υπόκεινται σε στατική διατμητική τάση q_s μικρότερη από την S_{us} . Η συμπεριφορά ενός εδαφικού στοιχείου είναι είτε συσταλτική είτε διασταλτική εάν ο αρχικός του λόγος κενών e_0 είναι αντίστοιχα μεγαλύτερος ή μικρότερος από τον 'κρίσιμο' λόγο e_{ss} της οριακής κατάστασης.

Αυτή ακριβώς η γραμμή που διαχωρίζει τους δυο τύπους συμπεριφοράς ονομάζεται **γραμμή 'οριακής κατάστασης'** ή 'critical state line' στη βιβλιογραφία (Castro 1975, Poulos et al 1985).

2.3 Εδαφικές παραμορφώσεις-μετατοπίσεις λόγω ρευστοποίησης

Οι υψηλές υδατικές πιέσεις που συνδέονται με την κατάσταση κατά την οποία η ενεργός τάση μηδενίζεται είναι η βασική αιτία αστοχίας για πολλά από τα σχετικά φαινόμενα. Ενδεικτικά αναφέρουμε τα πιο χαρακτηριστικά:

- **Κώνοι αμμοϊλός** οι οποίοι σχηματίζονται όταν το εδαφικό υλικό δηλαδή του διαλύματος νερού και κόκκων άμμου/ιλός διαρρέει από την ρευστοποιηθείσα στρώση υψηλής πίεσεως προς την επιφάνεια του εδάφους, μέσω ρωγμών στις υπερκείμενες στρώσεις



Εικόνα 2.3 Φαινόμενο ρευστοποίησης με κυκλικά επαναλαμβανόμενη ροή υπό τη μορφή ηφαιστειού άμμου. Σεισμός του 1979 στο El Centro.

- **Η επιφανειακή καθίζηση**, η οποία προκαλείται από τη συμπύκνωση των μη συνεκτικών στρωμάτων και η οποία ακολουθεί την αποτόνωση των υδατικών υπερπίεσεων
- **Η οριζόντια ταλάντωση του «επιπλέοντος» εδάφους** όταν δηλαδή η ρευστοποίηση σε κάποιο βάθος αποσυνδέει τις υπερκείμενες συνεκτικές εδαφικές μάζες, επιτρέποντας τον λικνισμό τους ως μεμονωμένα εδαφικά

μπλοκ, μετά το άνοιγμα κατακόρυφων ρωγμών. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε «οριζόντια» εξάπλωση.

- **Επίπλευση – ανάδυση** υπόγειων κατασκευών και δικτύων, ελαφρότερων από το περιβάλλον ρευστοποιημένο έδαφος, όπως δεξαμενές, αγωγοί κ.τ.λ.



Εικόνα 2.4 Πλευρική μετατόπιση της αποβάθρας στο λιμένα Κοβε, το 1995.



Εικόνα 2.5 Καθίζηση από ρευστοποίηση



Εικόνα 2.6 Καθίζηση από ρευστοποίηση

2.4 Κριτήρια ευαισθησίας εδαφών σε ρευστοποίηση

Συνοπτικά, για να εκτιμηθεί το ενδεχόμενο πρόκλησης ρευστοποίησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο συνδυασμός των παρακάτω παραγόντων:

- Πληθώρα στοιχείων από μετασεισμικές παρατηρήσεις
- Πειραματικά αποτελέσματα εργαστηριακών μελετών με κορεσμένα εδαφικά δείγματα
- Μεθόδους θεωρητικής αναλύσεως
- Μετρήσεις σε ομοίωμα του φυσικού προβλήματος με φυγοκεντρικώς επιβαλλόμενη προσομοίωση της βαρύτητας

Προκειμένου να θεωρηθεί ένα έδαφος εν δυνάμει ρευστοποιήσιμο θα πρέπει να πληρεί ορισμένες προϋποθέσεις, η εξέταση των οποίων είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί πριν την τελική εκτίμηση της πιθανότητας ρευστοποίησης του συγκεκριμένου εδαφικού σχηματισμού. Από τα αποτελέσματα αυτής της εξέτασης της επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών θα προκύψει η αναγκαιότητα ή όχι της περαιτέρω μελέτης του δυναμικού ρευστοποίησης αυτών. Ως επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση ενός εδαφικού σχηματισμού ορίζεται η ικανότητα του εδάφους να ρευστοποιείται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Από τη μελέτη ιστορικών περιστατικών εμφάνισης ρευστοποίησης, στα οποία γίνεται συσχετισμός κυρίως των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και φυσικών χαρακτηριστικών των ρευστοποιηθέντων εδαφικών υλικών καθορίζονται τα κριτήρια ευαισθησίας προς ρευστοποίηση ενός εδαφικού σχηματισμού.

Η γεωλογική ηλικία όπως και το περιβάλλον απόθεσης του εδαφικού σχηματισμού αποτελούν βασικά κριτήρια για την εξέταση της ευαισθησίας του εδάφους ως προς τη ρευστοποίηση. Κορεσμένες, χαλαρές και ψαθυρές αποθέσεις παρουσιάζουν το μεγαλύτερο βαθμό επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση (Youd, 1998). Επειδή η πυκνότητα και ο βαθμός συγκόλλησης των εδαφών αυξάνονται με την πάροδο του χρόνου, η αύξηση της αντοχής έναντι ρευστοποίησης των σχηματισμών θα είναι ανάλογη της ηλικίας τους. Κατά συνέπεια νεώτερες σε ηλικία αποθέσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε ρευστοποίηση από ότι παλαιότερες (Kramer, 1996). Εδαφικοί σχηματισμοί ηλικίας *Άνω Ολοκαίνου* είναι περισσότερο επιδεκτικοί προς ρευστοποίηση από σχηματισμούς του *Ολοκαίνου*, ενώ ρευστοποίηση εδαφών *Πλειστοκαινικής* ηλικίας έχει προκληθεί σε συγκεκριμένες

περιστάσεις. Τέλος, δεν έχουν παρατηρηθεί σύγχρονα φαινόμενα ρευστοποίησης σε ιζήματα προ – Πλειστοκαίνου (Obermeier, 1996)

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας ρευστοποίησης ενός σχηματισμού είναι το **περιβάλλον απόθεσης** του. Όταν οι συνθήκες επιτρέπουν την απόθεση ενός ομοιόμορφου ταξινομημένου σχηματισμού σε χαλαρή κατάσταση τότε αυτό δημιουργεί την υψηλή ευαισθησία της απόθεσης. Έτσι λοιπόν ποτάμιες, κολλούβιες και αιολικές αποθέσεις είναι επιδεκτικές προς ρευστοποίηση όταν βρίσκονται σε κορεσμένο στάδιο (Kramer, 1996). Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στις ανθρωπογενείς αποθέσεις, όπως επιχώσεις και φίλτρα φραγμάτων, στις οποίες δεν έχει πραγματοποιηθεί συμπύκνωση μετά την τοποθέτησή τους και οι οποίες σε περίπτωση κορεσμού συγκαταλέγονται στα εδάφη με μεγάλη ευαισθησία σε ρευστοποίηση.

Απαραίτητο στοιχείο βέβαια, για τη ρευστοποίηση ενός εδάφους είναι να βρίσκεται σε κορεσμένη κατάσταση, δηλαδή να βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα οπότε και η στάθμη του υδροφόρου επηρεάζει την ευαισθησία προς ρευστοποίηση του. Καθώς η αντοχή έναντι ρευστοποίησης ενός στρώματος σε μια στρωματογραφική στήλη αυξάνεται όταν αυξάνεται η πίεση των υπερκείμενων (γεωστατική τάση) και η ηλικία του, δηλαδή είναι ανάλογη του βάθους αφού και οι δύο παράγοντες αυξάνονται με αυτό, τότε θα αυξάνεται και με το βάθος της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Συνεπώς, όσο πιο χαμηλή είναι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα τόσο μεγαλύτερη αντίσταση θα προβάλλει το συγκεκριμένο εδαφικό στρώμα σε ενδεχόμενη πιθανότητα ρευστοποίησης (Youd, 1998). Αποτελέσματα γεωτεχνικών ερευνών σε θέσεις εμφάνισης ρευστοποίησης έδειξαν ότι τα περισσότερα περιστατικά παρουσιάστηκαν σε περιοχές όπου η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρισκόταν έως 3 μέτρα βάθος από την επιφάνεια, μερικές εμφανίσεις συνδέονται με βάθος στάθμης υδροφόρο έως τα 10 μέτρα, ενώ ελάχιστες είναι οι περιπτώσεις ρευστοποίησης σε θέσεις όπου η υδροστατική στάθμη βρισκόταν σε βάθη μεγαλύτερα των 15 μέτρων (Youd, 1998).

Σχετικά με την **κοκκομετρική διαβάθμιση** οι εδαφικοί σχηματισμοί παρόμοιας κοκκομετρικής σύστασης συνηθίζουν να επιδεικνύουν διαφορετική

συμπεριφορά ως προς την δυνατότητα ρευστοποίησης τους ανάλογα με την τιμή της σχετικής τους πυκνότητας.

Αναλυτικότερα, όσο πιο χαλαρή είναι η διάταξη των κόκκων ενός εδάφους τόσο η τιμή του δείκτη πόρων είναι μεγαλύτερη και αντίστοιχα η τιμή της σχετικής πυκνότητας του D_r (%) είναι μικρότερη. Η τιμή της D_r υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης:

$$D_r = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$$

όπου e είναι ο πραγματικός δείκτης πόρων της άμμου, e_{\max} είναι ο δείκτης πόρων που αντιστοιχεί στην ελάχιστη συμβατική πυκνότητα (π.χ. με απλή απόθεση του υλικού) και e_{\min} είναι ο δείκτης πόρων που αντιστοιχεί στη μέγιστη συμβατική πυκνότητα (π.χ. μετά από συμπίκνωση). (Κούκης και Σαμπατάκης, 2002).

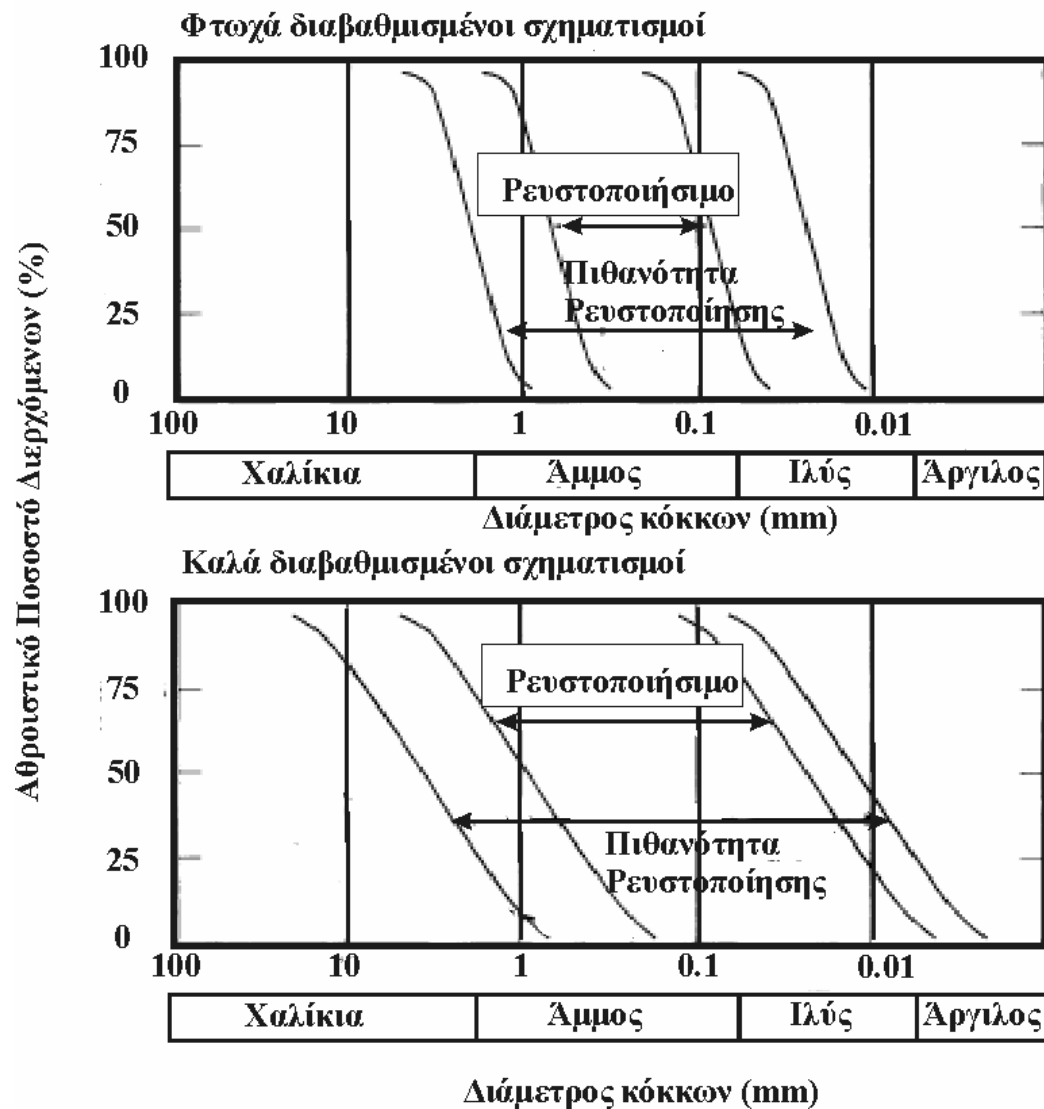
Σύμφωνα με τους Terzaghi και Peck (1967), στα αμμώδη εδάφη η σχετική πυκνότητα συνδέεται με τον αριθμό κρούσεων NSPT της επί τόπου δοκιμής τυποποιημένης διείδυσης SPT, ενώ αντίθετα, για να δημιουργηθούν ικανές συνθήκες πρόκλησης ρευστοποίησης σε μερικούς πυκνά αμμώδη στρώματα απαιτούνται πολύ δυνατές φορτίσεις. Τα αρχικά συμπεράσματα τα οποία είχαν προκύψει από μελέτες του φαινομένου της ρευστοποίησης, χαρακτηρίζουν ως επιδεκτικούς προς ρευστοποίηση τους εδαφικούς σχηματισμούς οι οποίοι αποτελούνται μόνο από καθαρή άμμο. Τα λεπτόκοκκα εδάφη θεωρούνται μη ικανά να αναπτύξουν τις υψηλές πιέσεις πόρων που απαιτούνται για τη δημιουργία του φαινομένου ενώ η παρουσία αργιλικού κλάσματος σε αυτά συντελεί στην ανάπτυξη συνοχής c . Τα χονδρόκοκκα εδάφη είναι πολύ διαπερατά ώστε να διατηρήσουν την απαιτούμενη υπερπίεση του νερού των πόρων μέχρις ότου να προκληθεί ρευστοποίηση. Επιπλέον, η κοκκομετρική διαβάθμιση του εδάφους επηρεάζει επίσης το βαθμό επιδεκτικότητας.

Τα καλά διαβαθμισμένα εδάφη είναι λιγότερο πιθανό να ρευστοποιηθούν σε σχέση με πιο ομοιόμορφα διαβαθμισμένα εδάφη καθώς η πλήρωση των κενών μεταξύ των μεγαλύτερων κόκκων από μικρότερους κάτω από συνθήκες πλήρους αποστράγγισης έχει ως αποτέλεσμα την συμπίκνωση σε μικρότερο όμως ποσοστό και κατά συνέπεια μικρότερη τιμή υπερπίεσης πόρων υπό αστράγγιστες συνθήκες

(Kramer, 1996). Το παραπάνω συμπέρασμα έχει επιβεβαιωθεί και από ιστορικά περιστατικά ρευστοποίησης, όπου ανομοιόμορφα διαβαθμισμένοι εδαφικοί σχηματισμοί προκάλεσαν αστοχίες λόγω ρευστοποίησης.

Αναφορικά με το **σχήμα των κόκκων**, είναι φανερό ότι εδάφη αποτελούμενα από στρογγυλοποιημένους κόκκους αυξάνουν την πυκνότητα τους σε μεγαλύτερο βαθμό από εδάφη με γωνιώδεις κόκκους. Επομένως, τα εδάφη αυτά παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευαισθησία στο φαινόμενο της ρευστοποίησης (Kramer, 1996).

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται προσεγγιστικά η πιθανότητα ρευστοποίησης εδαφικών σχηματισμών ανάλογα με την κοκκομετρική τους σύσταση, τόσο για υλικά με ομοιόμορφη όσο και με ανομοιόμορφη κατάταξη, (Tsuchida 1971).



Σχήμα 2.1 : Πιθανότητα ρευστοποίησης εδαφικών σχηματισμών

Σχετικά με τα αδρόκοκκα, αρχικά η δυνατότητα άμεσης αποστράγγισης τους τα καθιστούσε μη επιδεκτικά προς ρευστοποίηση, μολονότι η συμπεριφορά τους σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση δε διέφερε σε μεγάλο βαθμό από αυτήν των άμμων.

Ύστερα όμως από ιστορικά περιστατικά ρευστοποίησης αδρόκοκκων εδαφικών σχηματισμών τα παραπάνω συμπεράσματα αναθεωρήθηκαν ως εξής. Σύμφωνα με τους Seed et al. (2003), το πλεονέκτημα της άμεσης αποστράγγισης των αδρόκοκκων έως χαλικωδών εδαφών εξουδετερώνεται, με αποτέλεσμα τα συγκεκριμένα εδάφη να θεωρούνται επιδεκτικά προς ρευστοποίηση, όταν ικανοποιούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- οι σχηματισμοί περιστοιχίζονται από λεπτόκοκκα εδάφη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να δημιουργούνται αστράγγιστες συνθήκες,
- υπάρχει παρουσία λεπτόκοκκων τα οποία καταλαμβάνουν τα διάκενα ανάμεσα στα αδρόκοκκα στοιχεία του σχηματισμού με αποτέλεσμα τη μείωση της διαπερατότητας του
- στρώμα του αδρόκοκκου σχηματισμού έχει μεγάλες διαστάσεις και κατά συνέπεια η απόσταση στην οποία θα πρέπει να γίνει άμεση αποστράγγιση κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής δόνησης είναι μεγάλη.

Τέλος, ένα ακόμη κριτήριο αποτελεί η **καταγραφή ιστορικών εμφανίσεων ρευστοποίησης** (Kramer, 1996) για τη διερεύνηση της επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση ενός εδάφους σε μια θέση στην ύπαιθρο. Σύμφωνα με τον Iwasaki (1986), το δυναμικό ρευστοποίησης των σχηματισμών μιας περιοχής στην οποία παρατηρήθηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης κατά το παρελθόν είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο δυναμικό σε περιοχές όπου δεν έχουν ακόμα καταγραφεί ιστορικά περιστατικά ρευστοποίησης.

Η παραπάνω συνθήκη ισχύει μόνο σε περιπτώσεις κατά τις οποίες στη ρευστοποιημένη κατά το παρελθόν περιοχή, οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες, που επικρατούσαν κατά τη στιγμή της ιστορικής εμφάνισης παραμένουν ως είχαν (Youd, 1984a).

Ο συνδυασμός ιστορικών εμφανίσεων ρευστοποίησης με το βαθμό επιδεκτικότητας των περιοχών, με βάση τα γεωλογικά και γεωμορφολογικά

χαρακτηριστικά της τοποθεσίας όπως αυτά αναλύθηκαν παραπάνω, παρέχει τη δυνατότητα οριοθέτησης περιοχών επιδεκτικών προς ρευστοποίηση και τη σύνταξη αντίστοιχων προκαταρκτικών χαρτών.

Συγκεφαλαιώνοντας, όσον αφορά τα ιστορικά κριτήρια θα πρέπει να τονίσουμε ότι η ύπαρξη ιστορικών περιγραφών συντελεί στην αξιολόγηση της περιοχής ως θέση όπου στο μέλλον υπάρχει πιθανότητα εμφάνισης ρευστοποίησης ενώ η έλλειψη παρόμοιων αναφορών δε θα πρέπει να αποκλείει την πιθανότητα πρόκλησης ρευστοποίησης όταν τα υπόλοιπα δεδομένα οδηγούν σε αυτό το συμπέρασμα.

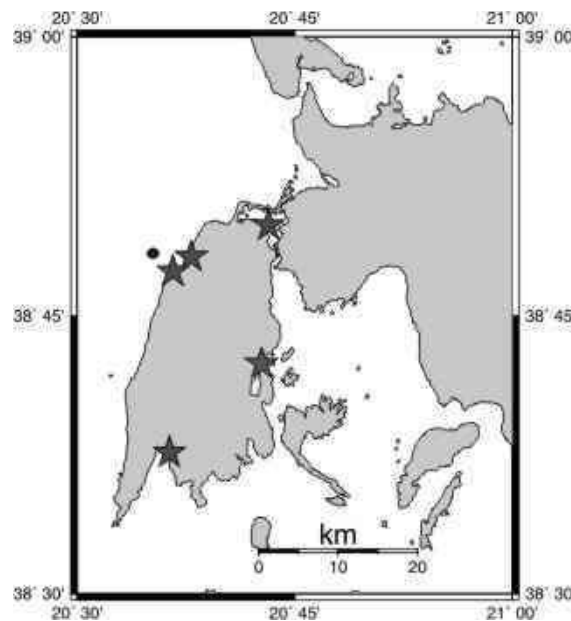
Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύονται τέτοια ιστορικά περιστατικά στην περιοχή της Ελλάδας και εξετάζονται τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που επικρατούσαν σε κάθε εμφάνιση του φαινομένου.

Κεφάλαιο 3: Φαινόμενα ρευστοποίησης στον ελλαδικό χώρο

3.1 Ο σεισμός της Λευκάδας (14/08/03 $M_s=6.4$)

3.1.1 Γενικά στοιχεία

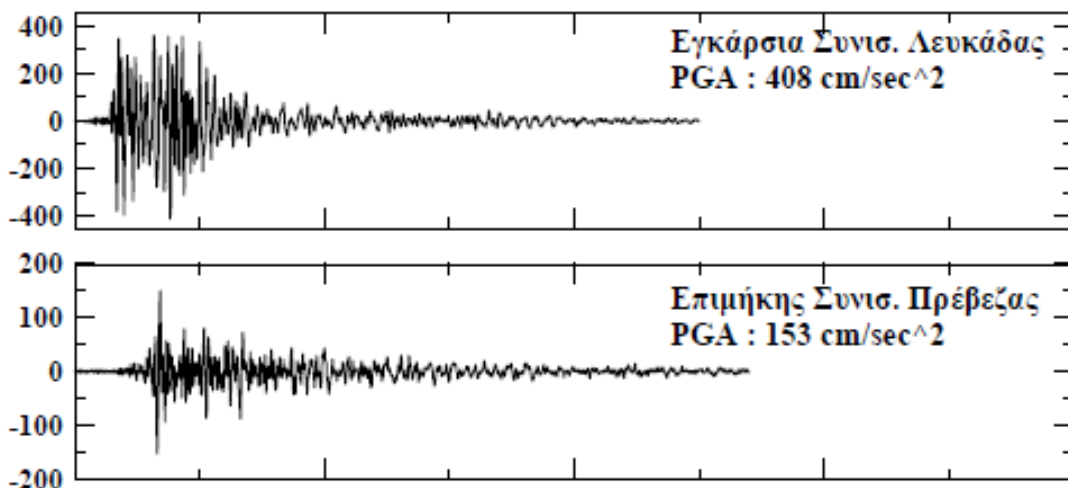
Ο σεισμός της Λευκάδας έγινε στις 14 Αυγούστου 2003 (05:14:53.9 GMT 08:14:54 τοπική ώρα). Η σεισμική δόνηση η οποία ήταν μεγέθους $M_s=6.4$, $M_w=6.2$ και εστιακού βάθους $h=10\text{km}$, σημειώθηκε στο Ιόνιο Πέλαγος δυτικά του νησιού της Λευκάδας στο ύψος του Αγ. Νικήτα. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες του επικέντρου, σύμφωνα με το Εργαστήριο Σεισμολογίας του Α.Π.Θ, είναι $\varphi=38,86\text{No}$ και $\lambda=20,73\text{Eo}$. Την κύρια δόνηση ακολούθησαν 17 μετασεισμοί με μέγεθος $M_L=4.0 - 5.4$ μέχρι τις 31 Αυγούστου και 324 σεισμικά γεγονότα μικρότερου μεγέθους. Ο μεγαλύτερος μετασεισμός ($M_s=5.7$) σημειώθηκε το απόγευμα της ίδιας ημέρας λίγες ώρες μετά τον κύριο σεισμό.



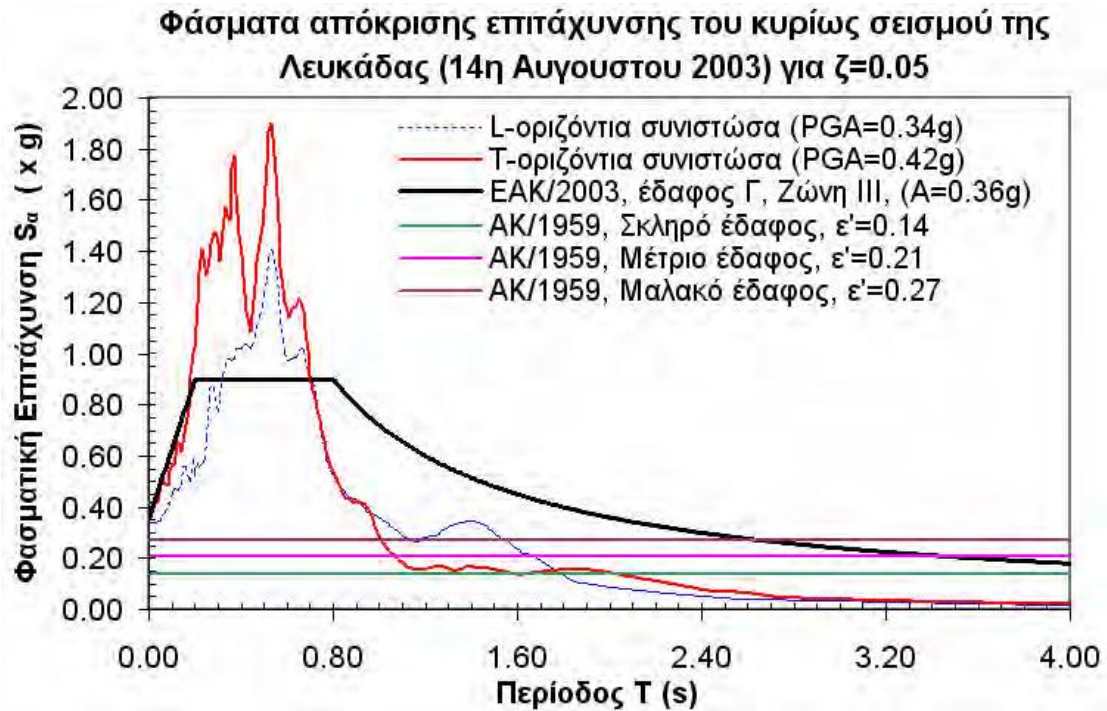
Χάρτης: το επίκεντρο της σεισμικής δόνησης (μαύρος κύκλος) και οι περιοχές όπου παρατηρήθηκαν πιθανά φαινόμενα ρευστοποίησης (μαύρο αστέρι)

Το σειсмоγόνο ρήγμα είναι τύπου οριζόντιας μετατόπισης, δεξιόστροφο με διεύθυνση BBA-NNΔ και κλίση προς τα ANA. Για σεισμική δόνηση $M_s=6.2-6.4$ το μήκος του ρήγματος πρέπει να είναι 32 έως 35Km, σύμφωνα με τις έρευνες για σεισμούς στη Μεσόγειο. Λαμβάνοντας υπόψη και τους τύπους των Pavlides & Caruto (2004) για το μήκος των ρηγμάτων σε σχέση με το μέγεθος του σεισμικής δόνησης καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το επιφανειακό μήκος εμφάνισης ενός ρήγματος πρέπει να είναι μεταξύ 9-20 Km για να μπορέσει να προκαλέσει σεισμό μεγέθους $M_s=6.2-6.4$. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι μόνο το $\frac{1}{2}$ του ρήγματος της Λευκάδος ενεργοποιήθηκε κατά το σεισμό της 14 Αυγούστου, και πιο συγκεκριμένα μόνο το βόρειο τμήμα αυτού (Pavlides et al. 2003). Στην πόλη της Λευκάδος η καταγραφή προέρχεται από τον επιταχυνσιογράφο ο οποίος είναι εγκατεστημένος στο νοσοκομείο της πόλης. Η μέγιστη τιμή της οριζόντιας επιτάχυνσης που προκλήθηκε από το σεισμό καταγράφηκε στην πόλη της Λευκάδος και είχε τιμή 0,42g ενώ η ένταση του σεισμού ήταν VIII (EMS).

Από το σεισμό προκλήθηκαν εκτεταμένες ζημιές όπως καταπτώσεις βράχων, κατολισθήσεις, καθιζήσεις και ρωγμές στα λιμάνια του νησιού καθώς και αστοχίες τεχνικών έργων τόσο στο οδικό δίκτυο όσο και στα λιμάνια του νησιού. Σημαντικό μέρος των ζημιών που προκλήθηκαν στα λιμάνια οφείλεται και στη **ρευστοποίηση** του υπεδάφους.



Σχήμα 3.1: Οριζόντιες σεισμικές συνιστώσες καταγραφών ισχυρής κίνησης στην Λευκάδα και στην Πρέβεζα του κύριου σεισμού της Λευκάδας (14/08/2003).



Σχήμα 3.2

Στις περιοχές όπου παρατηρήθηκαν πιθανά φαινόμενα ρευστοποίησης, συλλέχθηκε εδαφικό υλικό το οποίο αναδύθηκε στην επιφάνεια από εδαφικές διαρρήξεις. Το υλικό αυτό εξετάστηκε ως προς την κοκκομετρία του και τα όρια Atterberg έτσι ώστε να βγουν συμπεράσματα ως προς την επιδεκτικότητα του σε ρευστοποίηση σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουν διαμορφωθεί στη διεθνή βιβλιογραφία για αμμώδη εδάφη (Wang 1979). Σύμφωνα λοιπόν με τα αποτελέσματα των δοκιμών τα δείγματα προέρχονται από εδαφικά στρώματα τα οποία δείχνουν μεγάλη επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση.

Τα αποτελέσματα αυτά θέτουν την ρευστοποίηση ως ένα από τους βασικούς παράγοντες οι οποίοι συντέλεσαν στην αστοχία μερικών λιμενικών έργων στο νησί της Λευκάδας

3.1.2 Ιστορική σεισμικότητα

Συνήθως φαινόμενα ρευστοποίησης εμφανίζονται σε περιοχές όπου είχαν παρατηρηθεί και στο παρελθόν με την προϋπόθεση να παραμένουν αμετάβλητες οι εδαφικές και υδρογεωλογικές συνθήκες (Youd 1984). Συνεπώς η μελέτη της

ιστορικής σεισμικότητας μιας περιοχής μπορεί να αποτελέσει το πρώτο εργαλείο για την αναγνώριση περιοχών με επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση.

Μελετώντας την ιστορική σεισμικότητα του νησιού συμπεραίνουμε ότι η Λευκάδα έχει υποστεί αρκετές ζημιές από ισχυρούς σεισμούς στο παρελθόν κι έχουν σημειωθεί παρόμοια φαινόμενα στις αντίστοιχες περιοχές από σεισμούς ανάλογου μεγέθους.

Πιο συγκεκριμένα διαπιστώνουμε τουλάχιστον 5 περιπτώσεις σεισμικών γεγονότων, τα οποία προκάλεσαν παρόμοια δευτερογενή φαινόμενα στο νησί. Χαρακτηριστικές είναι οι περιπτώσεις των σεισμών του 1914 και 1948. Κατά τον πρώτο σεισμό (**27/09/1914**, $M_s=6.3$) προκλήθηκαν σημαντικές ζημιές στο νησί. Συγκεκριμένα προκλήθηκε καθίζηση της προκυμαίας στο Νυδρί, ζημιές σε κτίρια και δρόμους στην περιοχή του λιμανιού της πόλης της Λευκάδας καθώς και κρατήρες άμμου στην παραλία Πευκούλια (Γαλανόπουλος 1955). Όσον αφορά το δεύτερο σεισμό (**30/06/1948**, $M_s=6.4$), οι ιστορικές αναφορές κάνουν λόγο για εδαφικές διαρρήξεις στην προβλήτα της πόλης της Λευκάδας με 150m μήκος και 12cm πλάτος. Επίσης παρατηρήθηκε καθίζηση της προβλήτας κατά 12cm (Ροντογιάννης 1995). Στην παραλία Πευκούλια, όπως και στο σεισμό του 1914, παρατηρήθηκαν κρατήρες άμμου.

3.1.3 Γεωλογία

Η Λευκάδα ανήκει γεωλογικά στη ζώνη των Παξών και στην Ιόνια ζώνη όπου διακρίνουμε τους εξής τύπους εδαφών :

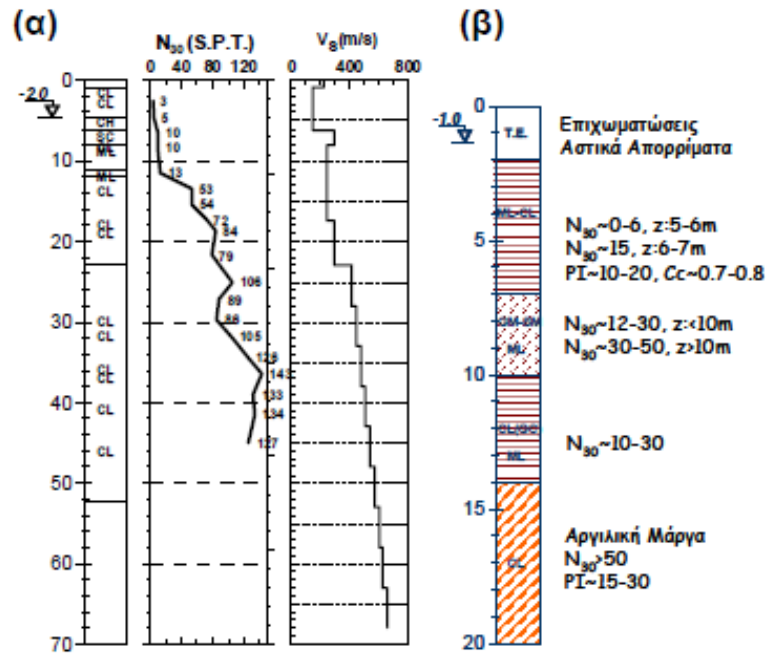
- Πλειστοκαινικές και κυρίως Ολοκαινικές παράκτιες αποθέσεις,
- Μειοκαινικές μάργες και ψαμμίτες
- μεμονωμένες εμφανίσεις του φλύσχη της Ιονίου
- ασβεστόλιθους της Απουλίας ζώνης στο ΝΔ τμήμα του νησιού
- και την ασβεστολιθική σειρά της Ιόνιας ζώνης.

Η ζώνη των Παξών στρωματογραφικά αποτελείται από επιφανειακούς μειοκαινικούς σχηματισμούς οι οποίοι είναι μαργαϊκοί, συχνά ψαμμούχοι εναλλασσόμενοι με λατυποπαγείς ασβεστόλιθους. Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή της

πόλης Λευκάδας δομείται από σύγχρονες αλλουβιακές προσχώσεις, δηλαδή παράκτιους αμμώδεις σχηματισμούς, και λιμνοθαλάσσιες ιλυώδεις αποθέσεις καθώς και από πλευρικές αποθέσεις στο μαργαϊκό υπόβαθρο. Στο βόρειο τμήμα της Λευκάδας υπάρχουν τεχνητές επιχώσεις και έχουν αναφερθεί καθιζήσεις στην περιοχή του ιστορικού κέντρου και της προκυμιάς.

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ/2000), το υπέδαφος στην πόλη της Λευκάδας κατατάσσεται στην **κατηγορία εδάφους Γ**, ενώ σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 (CEN/TC250/SC8/N317, 2002) κατατάσσεται στην κατηγορία εδάφους C ή στην κατηγορία E στην περίπτωση που ο υποκείμενος εδαφικός σχηματισμός (αργιλική μάργα) χαρακτηρίζεται από σχετικά υψηλές τιμές της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων ($V_{s,30} > 800 \text{m/sec}$). Η Ιόνια ζώνη είναι επωθημένη προς τα δυτικά πάνω στη ζώνη των Παξών. Οι επιφανειακοί της μειοκαινικοί σχηματισμοί είναι αποθέσεις μολασικών ιζημάτων μεγάλου πάχους (κυρίως μάργες και λιγότερο ψαμμίτες, με ενστρώσεις μαργαϊκών ασβεστόλιθων και λατυποκροκαλοπαγών) που επικάθονται στο φλύσχη. Όσον αφορά την γεωλογία των περιοχών όπου παρατηρήθηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης, αυτές δομούνται κυρίως από Πλειστοκαινικές και Ολοκαινικές παράκτιες αποθέσεις.

Παρόμοιες γεωλογικές συνθήκες επικρατούν και στη Βασιλική καθώς και στο Νυδρί.



Σχήμα 3.3: Εδαφική τομή (α) στη θέση του επιταχυνσιογράφου του μόνιμου δικτύου του ΙΤΣΑΚ στο Νοσοκομείο Λευκάδας και (β) στην παραλιακή περιοχή

3.1.4 Αστοχίες και φαινόμενα ρευστοποίησης

Όπως προαναφέρθηκε, ο σεισμός της 14 Αυγούστου προκάλεσε εκτεταμένες ζημιές σε όλο το νησί της Λευκάδας. Σημαντικός αριθμός καταπτώσεων και κατολισθήσεων εντοπίζεται τόσο κατά μήκος του δυτικού άξονα του νησιού αλλά και στο ανατολικό τμήμα με μικρότερες επιπτώσεις. Επίσης σημαντικές αστοχίες παρατηρήθηκαν και στα λιμάνια του νησιού.

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

Στο λιμάνι του οικισμού Νυδρί παρατηρήθηκαν ρωγμές πίσω από τον κρηπιδότοιχο και παράλληλα προς αυτόν καθώς και διαφορικές καθιζήσεις. Τέλος

στο λιμάνι της Βασιλικής, στην προβλήτα παρατηρήθηκαν έντονες μετακινήσεις, βυθίσεις και στροφές του κρηπιδώματος

Χαρακτηριστικά δευτερογενή φαινόμενα του σεισμού που παρατηρήθηκαν, τα οποία συνδέονται με ρευστοποίηση, ήταν η ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού από εδαφικές διαρρήξεις στην πόλη της Λευκάδας, στο Νυδρί και στην περιοχή της Βασιλικής. Επίσης κρατήρες άμμου παρατηρήθηκαν στις παραλίες Πευκούλια και Μύλοι.

Ο βαθμός επιρροής των ρευστοποιημένων εδαφικών στρωμάτων στις αστοχίες αυτές των λιμενικών έργων αποσαφηνίζεται σε κάθε περίπτωση με επιπλέον έρευνα , διάνοιξη γεωτρήσεων και επί τόπου δοκιμές στις συγκεκριμένες περιοχές.

Από τις παραπάνω περιοχές έγινε δειγματοληψία ώστε να αποσαφηνιστεί αν το υλικό το οποίο αναδύθηκε προέρχεται από εδαφικούς σχηματισμούς με επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση. Εκτελέστηκαν εργαστηριακές δοκιμές ώστε να διευκρινιστεί η κοκκομετρική σύσταση των υλικών και οι φυσικές τους ιδιότητες. Στην πόλη της Λευκάδας, στην οδό Γκολέμη, παρατηρήθηκαν εδαφικές διαρρήξεις πλάτους μέχρι 7cm από τις οποίες αναδύθηκε λεπτόκοκκο υλικό ενώ δημιουργήθηκαν και κώνοι άμμου. Στην περιοχή του parking εμφανίστηκε πίδακας, σύμφωνα με αυτόπτη μάρτυρα, από τον οποίο αναδύθηκε υλικό με νερό μέχρι το ύψος του μισού μέτρου . Επιπλέον σε αρκετά υπόγεια πολυκατοικιών εμφανίστηκε αναδύόμενο εδαφικό υλικό ενώ φαινόμενα ρευστοποίησης παρατηρήθηκαν και βόρεια της πόλης της Λευκάδας, στην περιοχή αμμόγλωσσα.. Επίσης στην μαρίνα δημιουργήθηκαν ρωγμές από τις οποίες αναδύθηκε λεπτόκοκκο υλικό. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις των αστοχιών που αναφέρθηκαν παρουσιάζονται στις παρακάτω φωτογραφίες.



Εικόνα 3.1: Λευκάδα – Οδ. Γκολέμη: Ρευστοποίηση εδάφους με ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού.



Εικόνα 3.2: Βασιλική: Εδαφικές διαρρήξεις με ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού

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



Εικόνα 3.3: Λευκάδα – Είσοδος (βορείως της πλωτής γέφυρας): Αστοχία κρηπιδώματος.

Στην περιοχή του οικισμού Νυδρί παρατηρήθηκαν παρόμοια φαινόμενα με αυτά στην πόλη της Λευκάδας. Συγκεκριμένα στην παλιά εκβολή του ποταμού Δημοσάρι υπήρξε ανάδυση υλικού από εδαφικές διαρρήξεις. Παράλληλα εμφανίσθηκαν τέσσερις κρατήρες άμμου, σύμφωνα με αυτόπτη μάρτυρα, από τους οποίους εκτινασσόταν εδαφικό υλικό με νερό. Παρόμοια φαινόμενα μικρότερης όμως κλίμακας παρατηρήθηκαν και στη νέα εκβολή του ποταμού Δημοσάρι.



Εικόνα 3.4: Νυδρί – Λιμένας: Ρευστοποίηση εδάφους με ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού

Στο δυτικό τμήμα του νησιού δεν παρατηρήθηκαν αντίστοιχα φαινόμενα λόγω της γεωμορφολογίας του. Στις περιοχές όμως Πευκούλια και Μύλοι παρατηρήθηκαν φαινόμενα τα οποία πιθανό να οφείλονται σε ρευστοποίηση. Συγκεκριμένα στην παραλία Πευκούλια δημιουργήθηκαν τέσσερις κρατήρες. Ο μεγαλύτερος είχε διάμετρο 3m και βάθος 2m, ενώ ο μικρότερος είχε διάμετρο 1.5m και βάθος 0.7m .. Νότια της περιοχής Πευκούλια βρίσκεται η παραλία Μύλοι στην οποία εμφανίστηκαν παρόμοια φαινόμενα μικρότερης όμως κλίμακας. Οι δύο αυτές περιοχές βρίσκονται εκατέρωθεν του οικισμού Αγ. Νικήτας και απέχουν λίγα μόλις χιλιόμετρα από το επίκεντρο του σεισμού.



Εικόνα 3.5: Πευκούλια: Κρατήρας διαμέτρου 3m και βάθους 2m



Εικόνα 3.6.: Νυδρί-Νέα εκβολή Δημοσάρι: Κρατήρες άμμου



Εικόνα 3.7: Λευκάδα - Οδ. Σικελιανού: Οριζόντια μετακίνηση 10 όπισθεν του κρηπιδότοιχου



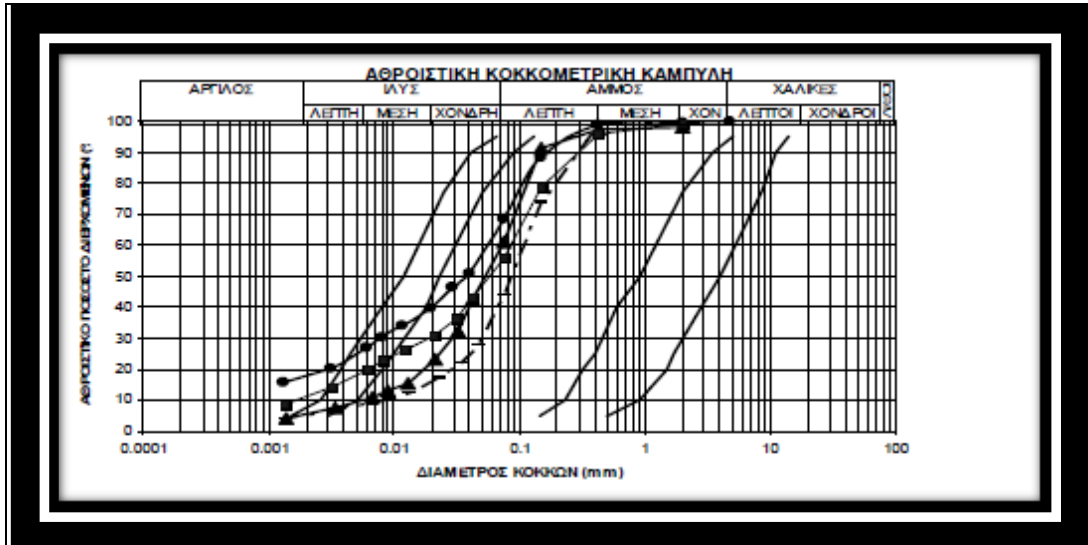
Εικόνα 3.8: Λευκάδα-parking: Δημιουργία πίδακα άμμου

3.1.5 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών

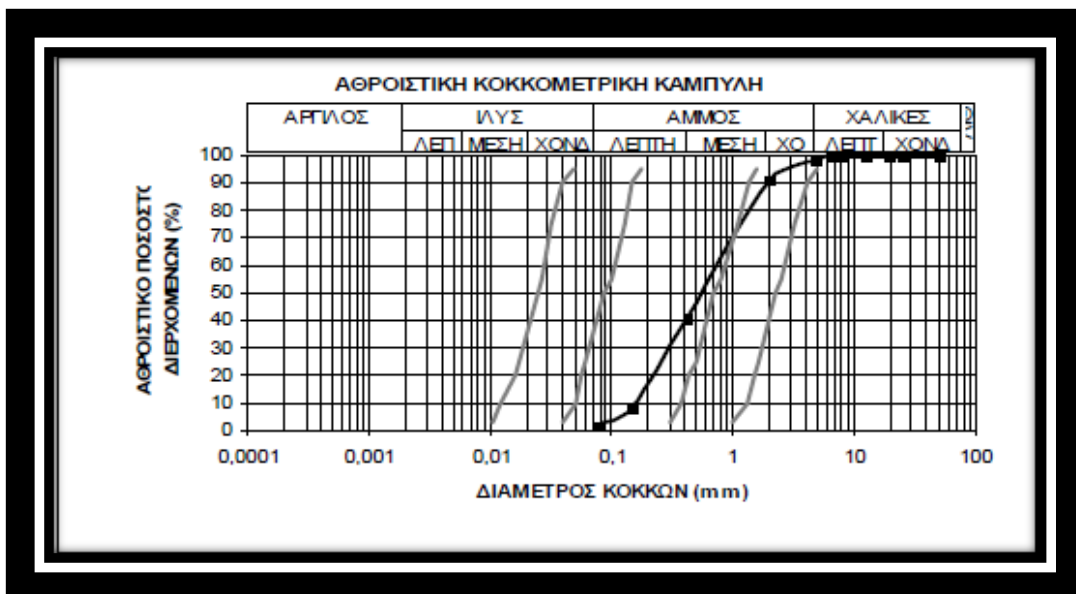
Όπως προαναφέρθηκε σε πολλές περιπτώσεις δημιουργήθηκε ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού η οποία πιθανότατα οφειλόταν σε ρευστοποίηση εδάφους. Προκειμένου να εξακριβωθεί το γεγονός ότι το αναδύμενο λεπτόκοκκο υλικό προέρχεται από ρευστοποιημένο εδαφικό στρώμα κρίνεται κάθε φορά απαραίτητο να γίνει η μελέτη στο εργαστήριο της κοκκομετρικής σύστασης και των φυσικών ιδιοτήτων του εδαφικού σχηματισμού. (φυσική υγρασία, όρια Atterberg).

Αναφορικά με την κοκκομετρία του εδαφικού υλικού έχουν καθοριστεί όρια μέσα στα οποία υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ρευστοποίησης (Tsuchida 1971) σε δύο διαγράμματα ανάλογα με τη βαθμό ομοιομορφίας του εδάφους. Επιπλέον ο συνδυασμός του ορίου υδαρότητας, της φυσικής υγρασίας και του ποσοστού των λεπτόκοκκων του εδάφους μπορεί να διαχωρίσει την υλικά ως επιδεκτικά ή όχι προς ρευστοποίηση (Wang 1979, Seed & Idriss 1982, Andrews & Martin 2002).

Από το υλικό το οποίο αναδύθηκε έγινε δειγματοληψία και εκτελέστηκαν εργαστηριακές δοκιμές σύμφωνα με τα παραπάνω. Σύμφωνα με το σχήμα 3.3 η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού από τις τοποθεσίες «Λευκάδα Ι», «Λευκάδα ΙΙ» και «Βασιλική» τοποθετείται ακριβώς μέσα στα όρια της περιοχής με μεγάλη πιθανότητα ρευστοποίησης. Αντίθετα, το υλικό που προέρχεται από την τοποθεσία «Αλυκές», νότια της πόλης της Λευκάδας, δείχνει μια πιθανότητα ρευστοποίησης η οποία όμως είναι μικρότερη από τα υπόλοιπα δείγματα. Η κοκκομετρική καμπύλη του δείγματος «Νυδρί» λόγω του μεγάλου βαθμού ομοιομορφίας, απεικονίζεται στο αντίστοιχο σχήμα 3.4. Όπως παρατηρούμε το συγκεκριμένο υλικό παρουσιάζει επίσης μεγάλη πιθανότητα ρευστοποίησης.



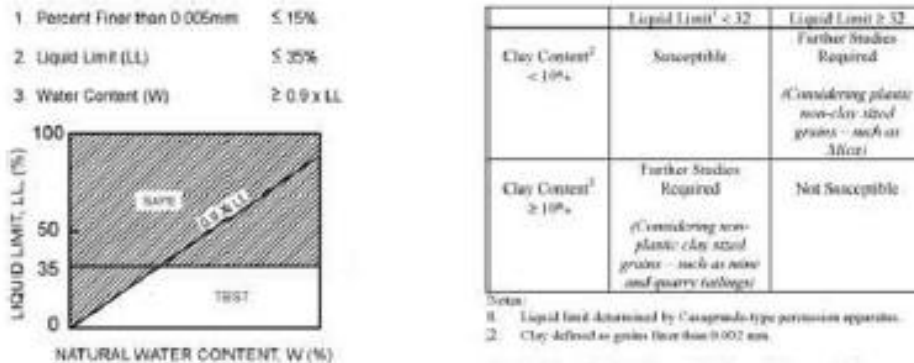
Σχήμα 3.4: Κοκκομετρική σύσταση αναδυόμενων εδαφικών υλικών. Με συμπαγείς γραμμές εμφανίζονται τα όρια των περιοχών ρευστοποίησης. Με διακεκομμένη γραμμή η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού «Λευκάδα ΙΙ», με παρεμβολές τριγώνων η καμπύλη του υλικού «Λευκάδα Ι», με παρεμβολές τετραγώνων του υλικού «Βασιλική» και με παρεμβολές κύκλων του υλικού «Αλυκές»



Σχήμα 3.5: Κοκκομετρική σύσταση δείγματος «Νυδρί» (μαύρη γραμμή). Με γκρι εμφανίζονται οι καμπύλες των ορίων πιθανότητας ρευστοποίησης.

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

Σχήμα 3.6: Τιμές φυσικών ιδιοτήτων των υλικών που αναδύθηκαν.



Σχήμα 3.7: Τιμές κριτηρίων για εδάφη επιδεκτικά προς ρευστοποίηση

3.1.6. Συμπεράσματα

Συγκεφαλαιώνοντας, από την παρουσίαση των στοιχείων που προέκυψαν μπορούμε να προβούμε στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Ο σεισμός της 14ης Αυγούστου 2003 υπήρξε πολύ σημαντικός για τη μελέτη του φαινομένου της ρευστοποίησης καθώς αναδείχθηκε ο ιδιαίτερος και πολύπλευρος ρόλος του εδάφους, στη διαμόρφωση της ισχυρής σεισμικής κίνησης. Αναλυτικότερα, έγινε σαφές ότι υπήρξε **ενίσχυση** της σεισμικής δόνησης στην πόλη της Λευκάδας εξαιτίας των ιδιαίτερων τοπικών εδαφικών συνθηκών που επικρατούν. Το γεγονός αυτό, επιβεβαιώνεται από την εμφάνιση έντονων πλευρικών εδαφικών μετατοπίσεων, καθιζήσεων και ρευστοποίησης του εδάφους καθώς και από τις αστοχίες φυσικών πρανών, τεχνητών πρανών ορυγμάτων και επιχωμάτων οδοποιίας που παρατηρήθηκαν.
- Συγκρίνοντας τις τιμές των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών του σχήματος 3.5 με τις αντίστοιχες τιμές των κριτηρίων στο σχήμα 3.6 καθώς και τις

κοκκομετρικές καμπύλες των υλικών συμπεραίνουμε ότι το αναδύμενο υλικό σε όλες τις περιπτώσεις των περιοχών «Λευκάδα Ι», «Λευκάδα ΙΙ» και «Βασιλική» προέρχεται από εδαφικά στρώματα τα οποία είναι **επιδεκτικά προς ρευστοποίηση**. Επίσης το υλικό «Νυδρί» προέρχεται από εδαφικό στρώμα το οποίο σύμφωνα και με το σχήμα 3.4 έχει μεγάλη πιθανότητα ρευστοποίησης. Αντιθέτως οι τιμές των φυσικών ιδιοτήτων του υλικού «Αλυκές» δεν πληρούν τα κριτήρια που ορίζονται στα σχήματα 3.6 και επομένως δεν θεωρείται ότι το εδαφικό στρώμα από το οποίο προέρχεται είναι επιδεκτικό προς ρευστοποίηση. *Τα αποτελέσματα αυτά αποδεικνύουν ότι πράγματι προκλήθηκε ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών σε συγκεκριμένες τοποθεσίες κατά το σεισμό της 14/08/2003.*

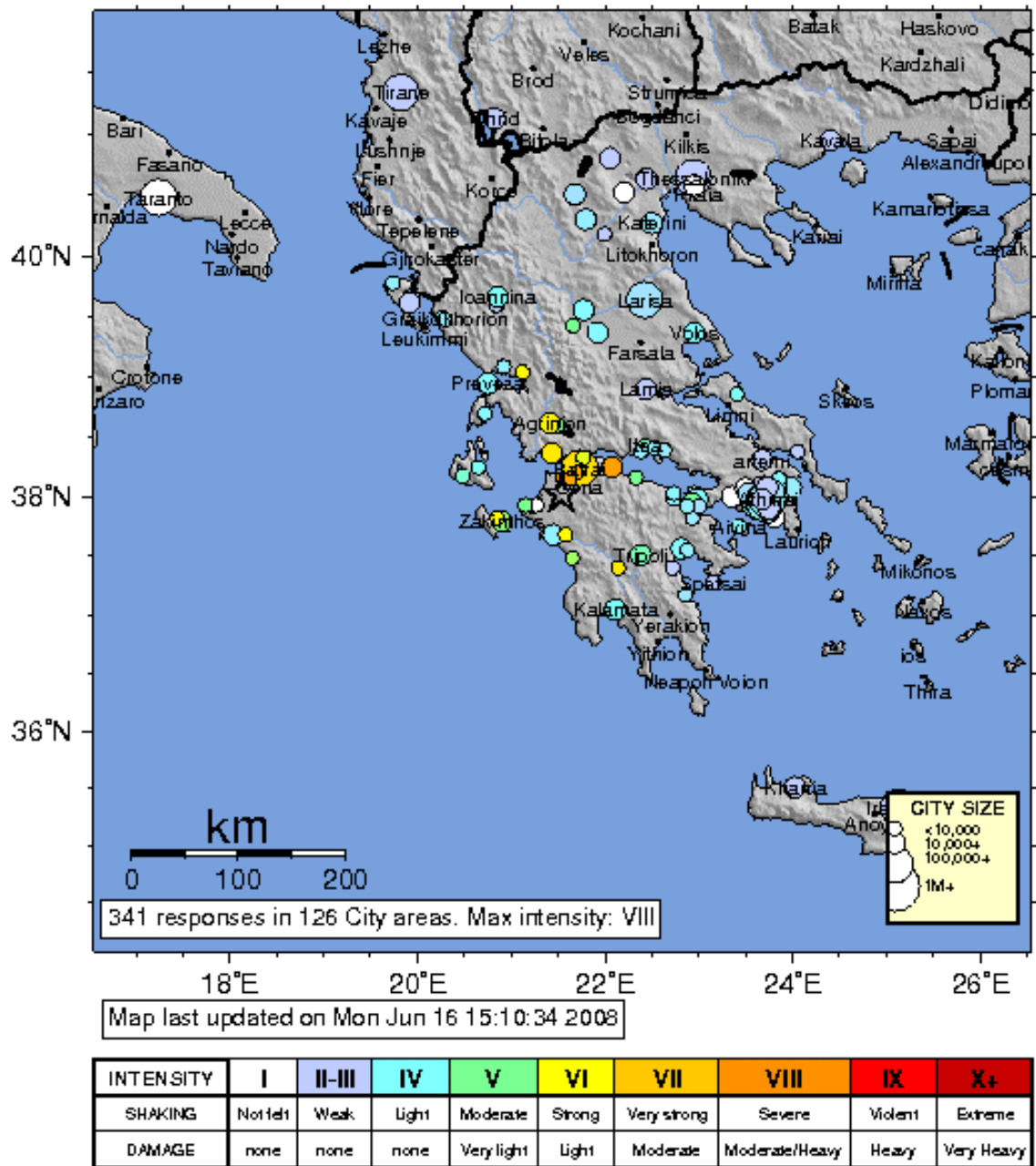
- Παρά τη σφοδρότητα της σεισμικής δόνησης, και τις προβληματικές εδαφικές συνθήκες της πόλης της Λευκάδας, οι βλάβες στα κτίρια ήταν περιορισμένες και αυτό οφειλόταν στους εξής λόγους:
 - ✓ Στο φάσμα απόκρισης επιταχύνσεων όπου οι μέγιστες φασματικές τιμές επιτάχυνσης ήταν σε ιδιοπεριόδους μεταξύ 0.20 έως 0.60sec και άρα τα κτίρια της Λευκάδος δεν καταπονήθηκαν με τις μέγιστες δυνατές φασματικές επιταχύνσεις διότι έχουν θεμελιώδη ιδιοπερίοδο κάτω από 0.20-0.25 sec.
 - ✓ Λόγω της συχνότητας των σεισμικών συμβάντων, οι κάτοικοι και οι τεχνίτες του νησιού έχουν αναπτυγμένη αντισεισμική συνείδηση δίνοντας ιδιαίτερη σημασία στην ποιότητα κατασκευής των κτιρίων. Έτσι εξηγείται η ανάπτυξη των παραδοσιακών αντισεισμικών κτιρίων με το διπλό δομικό σύστημα που είναι μία ντόπια εφεύρεση των κατοίκων της Λευκάδας. Ακόμη και τα σύγχρονα κτίρια από ο/σ έχουν υψηλή ποιότητα μελέτης & κατασκευής και εκτεταμένη χρήση των τοιχωμάτων ο/σ με τη δημιουργία δύσκαμπτων πλαισίων ο/σ που συνεργάζονται άριστα με τις επίσης υψηλής ποιότητας τοιχοπληρώσεις και εκεί αποδίδονται οι όντως περιορισμένες βλάβες στις κατασκευές αυτές.

3.2 Ο σεισμός της Αχαΐας-Ηλείας (08/06/2008- Mw=6.5)

3.2.1 Γενικά στοιχεία

Ο σεισμός της Αχαΐας-Ηλείας έλαβε χώρα στις 8 Ιουνίου 2008 και ώρα 15.25 και είχε μέγεθος Mw=6.5. Το επίκεντρο του σεισμού σύμφωνα με το Σεισμολογικό σταθμό του ΑΠΘ εντοπίστηκε στο σημείο με γεωγραφικές συντεταγμένες 37.9933°B και 21.5887°A και το βάθος της εστίας του σεισμού υπολογίστηκε στα 3 km. Η σεισμική δόνηση εκτός από τις σοβαρές βλάβες που προξένησε σε οικισμούς της περιοχής προκάλεσε και την εκδήλωση αρκετών φαινομένων εδαφικής αστοχίας σε ακτίνα 15km, περίπου, από το κατακόρυφο, δεξιόστροφο σειсмоγόνο ρήγμα διεύθυνσης που προκάλεσε το σεισμό (Margaris et al. 2008, 2010). Τα φαινόμενα αυτά περιλαμβάνουν ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών, πλευρική εξάπλωση, καθίζηση παραλιακών ζωνών ή επιχωμάτων και κατολισθήσεις (κυρίως βραχοπτώσεων).

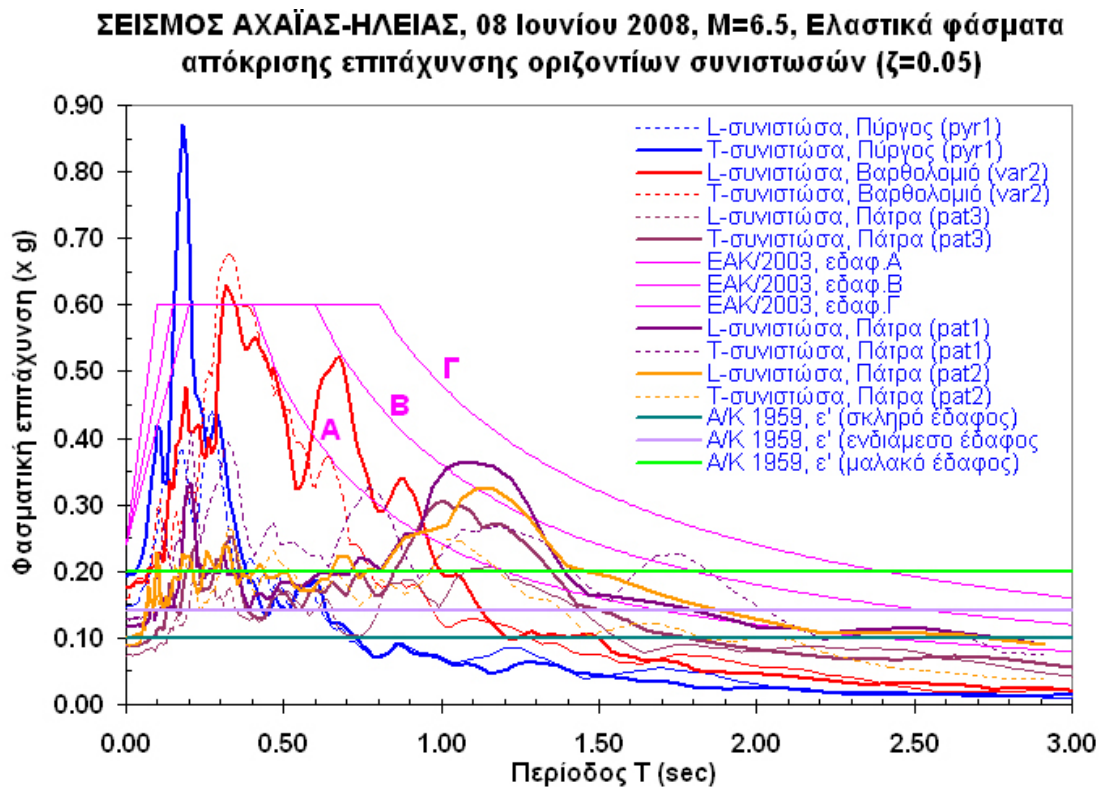
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται στοιχεία που αφορούν στην εκδήλωση εδαφικής ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης στην παραλιακή ζώνη της Κάτω Αχαΐας, καθώς και γεωτεχνικά δεδομένα για τις εδαφικές συνθήκες της περιοχής. Στον παρακάτω χάρτη παριστάνεται η κατανομή των εντάσεων στην περιοχή και επιπλέον με αστέρι απεικονίζεται το επίκεντρο της σεισμικής δόνησης.



Σχήμα 3.8: Γεωγραφική κατανομή των εντάσεων

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα ελαστικά φάσματα απόκρισης ($\zeta=5\%$) των δύο οριζόντιων σεισμικών συνιστωσών του κυρίως σεισμού, όπως αυτός καταγράφηκε από τους σταθμούς του Δικτύου Επιταχυνσιογράφων του ΙΤΣΑΚ στον Πύργο (PYR1), το Βαρθολομιά (VAR2) και την Πάτρα (PAT1, PAT2, PAT3). Επιπλέον παρουσιάζεται το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού του ΕΑΚ/2003, για διάφορες εδαφικές συνθήκες, καθώς και οι τιμές των αντίστοιχων ανηγμένων συντελεστών σεισμικής επιβάρυνσης των προ του 1992 αντισεισμικών κανονισμών (κανονισμοί 1959 και 1985).

Οι εδαφικές συνθήκες στις θέσεις καταγραφής PAT1, PAT2, PAT3 και PYR1 κατατάσσονται στην κατηγορία Β του ΕΑΚ2003 (μέτρια σεισμική επικινδυνότητα) ενώ στη θέση VAR2 με την κατηγορία Γ κατά ΕΑΚ2003 (μεγάλη σεισμική επικινδυνότητα)



Σχήμα 3.9: Σύγκριση ελαστικών φασμάτων απόκρισης του σεισμού της 8/06/2008 με τα φάσματα σχεδιασμού του ΕΑΚ/2003 ($\zeta=5\%$) και τους αντίστοιχους συντελεστές των προ του 1992 κανονισμών.

3.2.2 Γεωλογία

Η ευρύτερη περιοχή της ΒΔ Πελοποννήσου ανήκει στην Αδριατικοϊόνιο ζώνη, γνωστή και ως «Ιόνιος ζώνη» η οποία εκτείνεται κατά μήκος της δυτικής παραλίας της Ηπειρωτικής Ελλάδας με διεύθυνση Β-Ν και περιλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της Ηπείρου, την Ακαρνανία, τμήματα των Ιονίων Νήσων και την Βορειοδυτική Πελοπόννησο. Η Αδριατικοϊόνιος ζώνη καθώς και οι ζώνες Παρνασσού-Γκιώνας, Γαβρόβου-Τρίπολης και Παξών (Εξωτερικές Ελληνίδες ζώνες) τοποθετούνται στην Απουλία μικροπλάκα και αντιπροσωπεύουν περιοχές ιζηματογένεσης ηπειρωτικού περιθωρίου με συνεχή ανθρακική ως επί το πλείστον ιζηματογένεση. Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικά γεωλογικά στοιχεία για τους εδαφικούς σχηματισμούς των περιοχών της σεισμικής δόνησης.

Πάτρα

Γεωλογικά, η πόλη των Πατρών ανήκει στην ζώνη «Ωλονού - Πίνδου». Η ζώνη αυτή διακρίθηκε για πρώτη φορά από τον Philippson το 1898 και οφείλει την ονομασία της στο όρος Ωλονός της Πελοποννήσου και στην οροσειρά της Πίνδου, ενώ συχνότερα χρησιμοποιείται ο απλός όρος «ζώνη Πίνδου» που δόθηκε από τον Aubouin το 1959. Στον ελληνικό χώρο η ζώνη «Ωλονού -Πίνδου» κατεβαίνει από τα Ελληνοαλβανικά σύνορα προς την ηπειρωτική Ελλάδα στην οροσειρά της Πίνδου, στα όρη Άγραφα, Αιτωλικό, Βαρδούσια και μετά στην Πελοπόννησο στους ορεινούς όγκους Παναχαϊκό και Ωλονό. Τμήματα της βρίσκονται στα νησιά Κρήτη και Ρόδο. Οι εδαφικοί σχηματισμοί που συμπεριλαμβάνει η ζώνη της Πίνδου είναι οι εξής: (Doutsos et al, 2001):

- **Ορίζοντας τριαδικών σχηματισμών:** Κλαστικοί σχηματισμοί όπως ψαμμίτες, πηλίτες και ασβεστόλιθοι, που εναλλάσσονται με ιζηματογενή πετρώματα βαθιάς θάλασσας, ασβεστόλιθους και κερατόλιθους με μέγιστο πάχος 200 m.
- **Ασβεστόλιθοι Δρυμού:** Πρόκειται για ένα σύνολο πελαγικών ασβεστόλιθων με στρώσεις κερατολίθων και μερικές φορές πηλιτών, με πάχος που κυμαίνεται από 50 m έως 200 m.

- **Ραδιολαρίτες:** Ραδιολαρίτες, χρώματος ερυθρού ή πράσινου ή ιώδους, με μικρές εμφανίσεις μεταλλεύματος Mn κατά θέσεις. Χαρακτηριστικός της πινδικής σειράς με μέγιστο πάχος τα 350 m
- **Πρώτος φλύσσης:** Περιλαμβάνει στρώματα ψαμμιτών, των οποίων τα κλαστικά υλικά είναι προϊόντα διάβρωσης των Εσωτερικών ζωνών που είχαν χερσεύσει κατά τις ορογενετικές φάσεις του Ανώτερου Ιουρασικού - Κατώτερου Κρητιδικού. Το μέγιστο πάχος του ανέρχεται στα 200m.
- **Ανωκρητιδικοί ασβεστόλιθοι:** Αποτελείται από ασβεστολίθους πελαγικής φάσης, βιομικρικούς, μεσοστρωματώδεις, με διαστρώσεις και κονδύλους πυριτόλιθων, χρώματος τεφρού έως υπόλευκου και στα κατώτερα τους μέλη ερυθρίζοντες. Το πάχος τους κυμαίνεται από 200 m έως 400 m. Εγκλείουν πλούσια μικροπανίδα, κυρίως πολλά είδη Globotrucana, βάση των οποίων διακρίνονται σε επιμέρους στρωματογραφικούς ορίζοντες

Πύργος

Τα ιζήματα της περιοχής του Πύργου αναφέρονται στο γεωλογικό χάρτη ως βαθμίδα του Βουνάργου του Ανωτ. Πλειόκαινου. Επιφανειακά οι σχηματισμοί καλύπτονται κατά θέσεις από παχύ μανδύα των ιδίων αποσαθρωμάτων. Όπου δεν υπάρχει ο μανδύας αυτός, εμφανίζονται αμμώδεις σχηματισμοί σε εναλλαγές με αργίλους. Στην κοίτη του μικροχειμάρρου αποκαλύπτονται ενστρώσεις απολιθοματοφόρων μαργών έως μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Ο γεωλογικός σχηματισμός του Πύργου έχει την ακόλουθη γενική περιγραφή:

- Τεταρτογενές – Ολόκαινο : Αποτελείται από χαλίκια, άμμο και ιλυώδη άμμο με ένα στρώμα αλλουβιακού πηλού στην κορυφή. Τα χαλίκια στην χαρακτηριστική τους ανάπτυξη αποτελούνται από ανοιχτόχρωμους ασβεστόλιθους (69-73%), σκοτεινόχρωμους ασβεστόλιθους (2-4%) και ψαμμίτες με φλύσση (6-7%). Δευτερεύοντα συστατικά είναι κερατόλιθος, χαλαζίτης, λατύπες λιγνίτη και πυριτιωμένοι ασβεστόλιθοι. Στον αλλουβιακό πηλό βρίσκονται άφθονα μεταφερμένα και επανατοποθετημένα νεογενή υλικά και απολιθώματα. Πλειστόκαινο. Βαθμίδα του Τζόγια. Κροκαλοπαγή του Αγ. Ιωάννη: βρίσκονται στην κορυφή των άμμων του Τζόγια (Pt.c2) σε

ασυμφωνία με τα ιζήματα του Πλειόκαινου. Τυπικά τα κροκαλοπαγή αποτελούνται από 85-95% κερατόλιθο και κατά το υπόλοιπο από ανοιχτόχρωμους ασβεστόλιθους, ανθρακικούς ψαμμίτες (νεογενείς), ψαμμίτες του φλύσχη, χαλαζίτες και πυριτιωμένους ασβεστόλιθους.

- Νεογενές – Ανώτερο Πλειστόκαινο: Αποτελείται από λεπτές άμμους, αμμώδεις, ιλυώδεις, αργιλώδεις αποθέσεις και σπανιότερα αργιλικές κροκάλες και λατύπες ενώ ο κύριος τύπος της πλειοκαινικής ιζηματογενούς ακολουθίας είναι καστανοκίτρινες, λεπτό- έως μεσόκοκκες ανθρακικές άμμοι. Συχνά συναντώνται με συσσωματώματα ανθρακικών ψαμμιτών

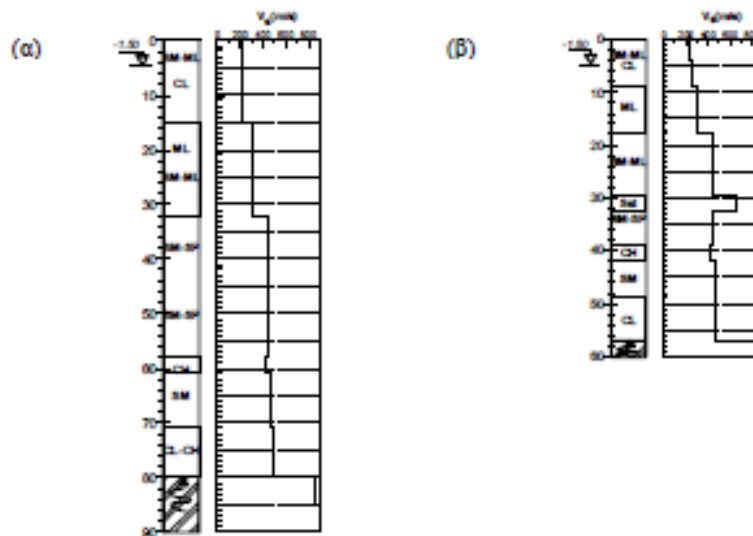
Το έδαφος στην περιοχή του Πύργου κατατάσσεται κατά ΕΑΚ/2003 στην κατηγορία Β και κατά EC8 στην κατηγορία C.

Βαρθολομιό

Η περιοχή του Βαρθολομιού, αποτελείται από τεταρτογενείς σχηματισμούς οι οποίοι επικάθονται σε μεταλλικούς σχηματισμούς (μειοκαινικά ιζήματα, πλειστοκαινικοί σχηματισμοί) μεγάλου πάχους. Οι μεταλλικοί σχηματισμοί επικάθονται ασύμφωνα στους Αλπικούς σχηματισμούς που αποτελούν το υπόβαθρο της περιοχής και ανήκουν στην Ιόνια γεωτεκτονική ζώνη. Οι πλειο-πλειστοκαινικοί σχηματισμοί συνίστανται από ασβεστιτικούς ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, μάργες, εναλλασσόμενες στρώσεις ιλυωδών άμμων και αργίλων πάχους μεγαλύτερου από 1500 μέτρα. Οι τεταρτογενείς, ολοκαινικές αποθέσεις αποτελούνται κυρίως από εναλλασσόμενες στρώσεις άμμων, ιλύων και αργίλων, συχνά σε χαλαρή δομή και πρόσφατες προσχώσεις από άμμους και κροκάλες, λόγω της δράσης των χειμάρρων στην ευρύτερη περιοχή. Κατά μήκος της νοτιοδυτικής και βορειοδυτικής παράκτιας ζώνης (Κυλλήνη, λουτρά Κυλλήνης, ακρ. Γλώσσα) εμφανίζονται θίνες πάχους 3-4 m, όπου και είχαν παρατηρηθεί εδαφικές διαρρήξεις λόγω ρευστοποίησης κατά τον σεισμό του 1988.

Στα πλαίσια προκαταρκτικής μελέτης της σεισμικής απόκρισης των εδαφικών σχηματισμών της περιοχής Βαρθολομιού έχουν υιοθετηθεί, βάση των διαθέσιμων στοιχείων, 2 εδαφικές τομές αντιπροσωπευτικές της ανατολικής και κεντρικής

περιοχής της πόλης του Βαρθολομιού. Η πρώτη εξ'αυτών (θέση 1), αναφέρεται στην ανατολική περιοχή πλησίον της θέσης του επιταχυνσιογράφου του ΙΤΣΑΚ (VAR2), όπου το πάχος των πρόσφατων χαλαρών εδαφικών αποθέσεων είναι μεγαλύτερο σε σύγκριση με την κεντρική περιοχή (περιοχή Αγ. Ιωάννη) όπου περιγράφεται από τη θέση 2.



Σχήμα 3.10: Εδαφικές τομές της περιοχής του Βαρθολομιού α) Θέση1 – Ανατολική Περιοχή, β) Θέση 2 – Κεντρική περιοχή Αγ. Ιωάννη.

3.2.3 Αστοχίες και φαινόμενα ρευστοποίησης

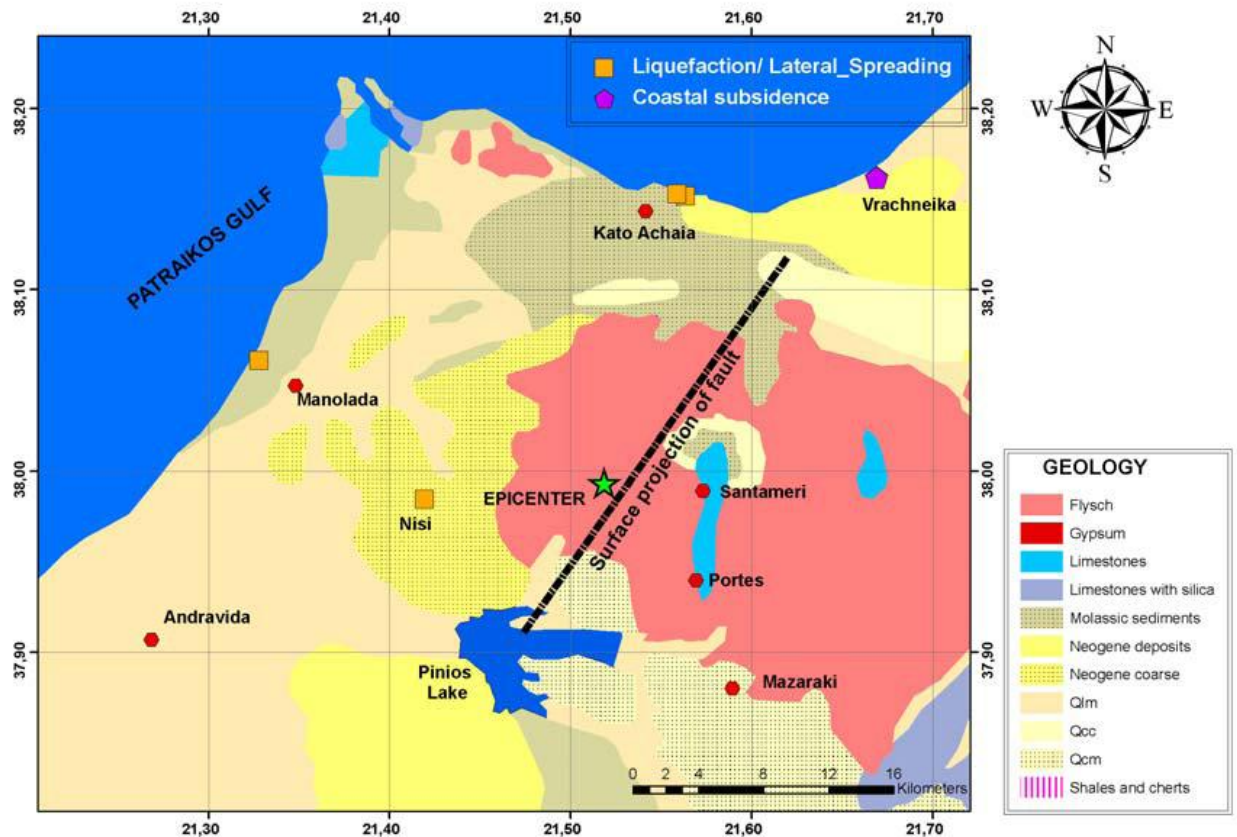
Από τη σεισμική δόνηση προκλήθηκαν πολλά φαινόμενα ρευστοποίησης κυρίως στις εξής περιοχές :

- 1) σε δύο θέσεις στην Κάτω Αχαΐα
- 2) στην παραλία της Μανωλάδας
- 3) στην τεχνητή λίμνη του Πηνειού
- 4) στο χωριό Νησί

Όλες οι παραπάνω περιοχές όπου παρατηρήθηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης, εκτός από την τεχνητή λίμνη του Πηνειού, βρίσκονται βόρεια σε σχέση με την επικεντρική περιοχή. Επιπλέον, όλες οι περιοχές βρίσκονται κοντά σε θάλασσα ή λίμνη με εξαίρεση την περιοχή του Νησιού.

Στο σχήμα 3.10 απεικονίζεται μια συνολική εικόνα των περιοχών όπου εμφανίστηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης

Επιπλέον, αξίζει να αναφερθεί ότι φαινόμενα ρευστοποίησης δεν παρατηρήθηκαν στο σιδηροδρομικό σταθμό της Κάτω Αχαΐας (όπου παρατηρήθηκαν φαινόμενα εδαφικής αστοχίας), στα Βραχναίικα (όπου παρατηρήθηκε σημαντική δυναμική καθίζηση) και στη Μπούκα, παραλία σε μικρή απόσταση από το Βαρθολομιό.



Σχήμα 3.11: Χάρτης της Πελοποννήσου με τις θέσεις όπου παρατηρήθηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης, οριζόντιας εξάπλωσης και δυναμικής καθίζησης.

Τα φαινόμενα ρευστοποίησης στο ανατολικό τμήμα της παραλίας της Κάτω Αχαΐας, καταλαμβάνουν έκταση 150μ x 90μ περίπου 30μ από την ακτογραμμή και έγιναν αντιληπτά από την εμφάνιση κρατήρων άμμου και ρηγματώσεις με ή χωρίς ανάδυση του λεπτόκοκκου ιλυώδους υλικού. Στην περιοχή αυτή, φαινόμενα ρευστοποίησης παρατηρήθηκαν σε δύο παραλιακές θέσεις περίπου 700μ βορείως του σιδηροδρομικού σταθμού (όπου οι εδαφικές αστοχίες που παρατηρήθηκαν εκεί είχαν ως αποτέλεσμα την κύρτωση των σιδηροδρομικών γραμμών).. Στη δεύτερη θέση της παραλίας της Κάτω Αχαΐας, 200μ δυτικότερα της πρώτης, παρατηρήθηκαν μικροί κρατήρες άμμου με περιορισμένη ή/και χωρίς ανάδυση αμμώδους υλικού .Στη θέση αυτή οι εδαφικές ρωγμές και τα φαινόμενα οριζόντιας εξάπλωσης ήταν πολύ περιορισμένα σε σχέση με την πρώτη(ανατολική) θέση.

Στην παραλία της Μανωλάδας, περίπου 19χλμ ΒΑ της Ανδραβίδας, φαινόμενα ρευστοποίησης παρατηρήθηκαν με τη μορφή μικρών κρατήρων άμμου (μερικών εκατοστών) σε απόσταση 50 με 70μ από την ακτογραμμή, ενώ δεν παρατηρήθηκαν ρωγμές και αναδύσεις λεπτόκοκκου υλικού.

Στα αναχώματα της τεχνητής λίμνης του Πηνειού και στην περιοχή του χωριού Νησί, αναφέρθηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης για τα οποία όμως δεν υπάρχουν περαιτέρω διαθέσιμα στοιχεία.

Παραδείγματα χαρακτηριστικών αστοχιών από ρευστοποίηση στις παραπάνω θέσεις παρουσιάζονται αναλυτικά στις παρακάτω εικόνες



Εικόνα 3.9: Κάτω Αχαΐα – ανατολικά: Κρατήρες άμμου με ανάδυση του ρευστοποιημένου εδαφικού υλικού αμμοϊλυώδους σύστασης.



Εικόνα 3.10: Κάτω Αχαΐα – ανατολικά Εδαφικές ρωγμές χωρίς ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού. Οριζόντια μετατόπιση από 4 έως 8cm και κατακόρυφη μετατόπιση από 3 έως 6cm



Εικόνα 3.11: Κάτω Αχαΐα – ανατολικά Εδαφικές ρωγμές με ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού. Οριζόντια μετατόπιση από 4 έως 8cm και κατακόρυφη μετατόπιση από 3 έως 6cm



Εικόνα 3.12: Κάτω Αχαΐα – δυτικά: Κρατήρες άμμου.



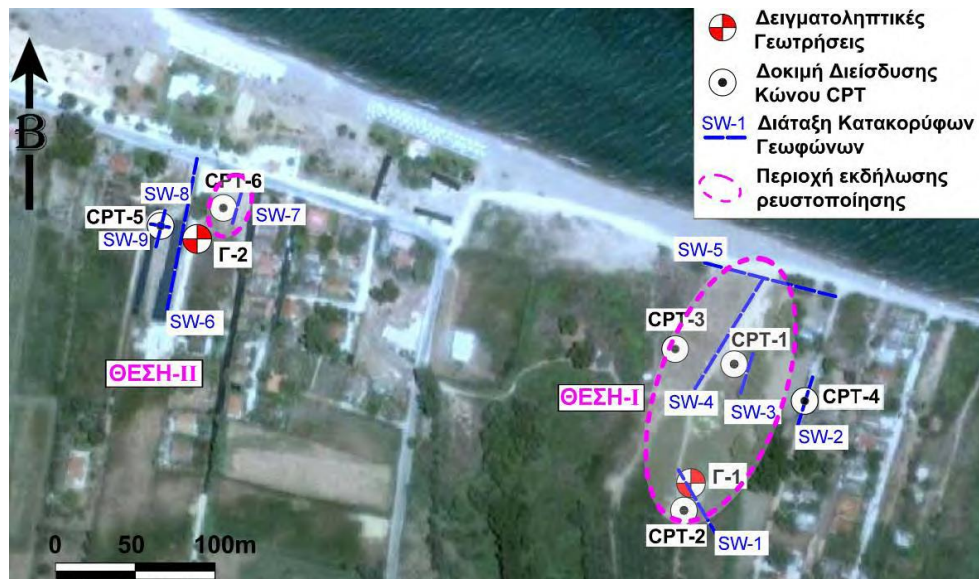
Εικόνα 3.13: Κάτω Αχαΐα – δυτικά: Λεπτομέρεια από το ρευστοποιημένο εδαφικό υλικό.



Εικόνα 3.14: : Παραλία Μανωλάδας: Μικροί κρατήρες άμμου

3.2.4 Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών

Προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών και ο ρόλος του φαινομένου της ρευστοποίησης στις κατά τόπους αστοχίες έγινε τοπογραφική αποτύπωση δύο θέσεων ρευστοποίησης στην παραλιακή ζώνη οι οποίες ονομάστηκαν ΘΕΣΗ I και ΘΕΣΗ II και οι οποίες φαίνονται στο χάρτη.

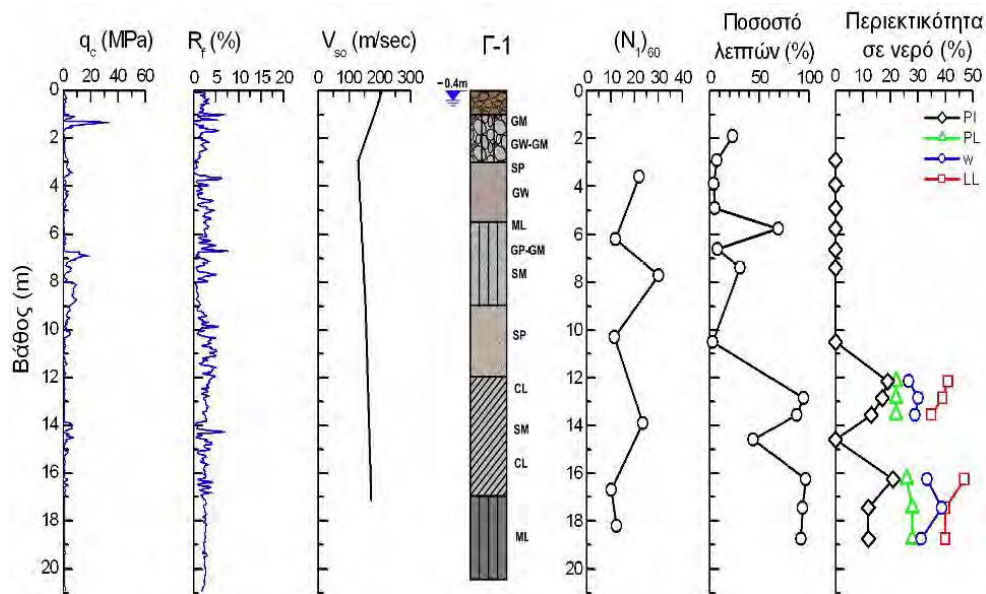


Η ΘΕΣΗ-I (N38O 09.106', E21O 33.807') βρίσκεται στην παραλιακή ζώνη της Κ.Αχαΐας, σε απόσταση 590m Β-ΒΑ από τον Σιδηροδρομικό Σταθμό, και χαρακτηρίζεται από επίπεδη μορφολογία, με ήπια κλίση ($\approx 0.4\%$) προς τη θάλασσα, ενώ η ΘΕΣΗ-II (N38O 09.147', E21O33.571') βρίσκεται σε απόσταση 350m δυτικά της ΘΕΣΗΣ-I και παρουσιάζει παρόμοια μορφολογικά χαρακτηριστικά.

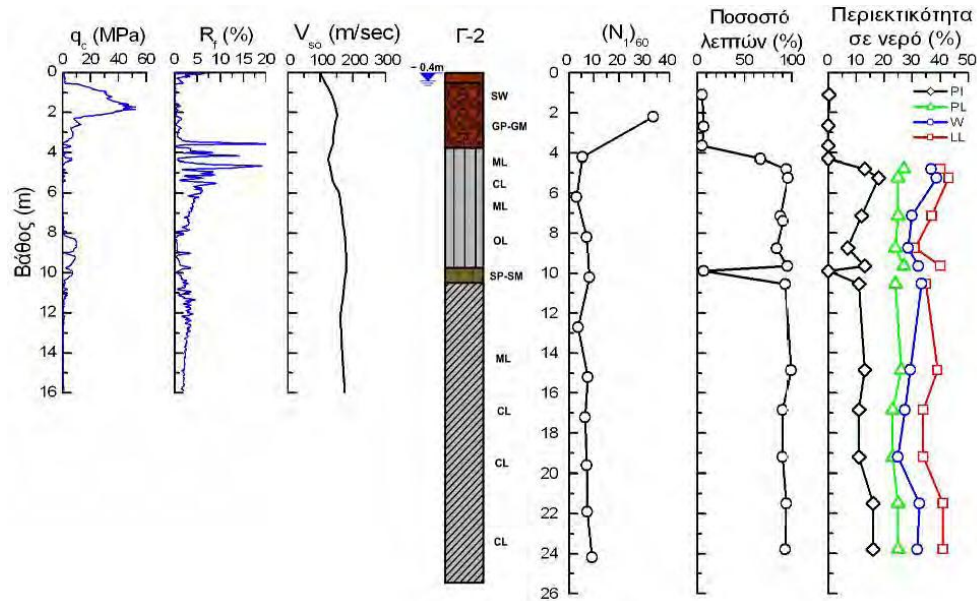
Στη ΘΕΣΗ-I παρατηρήθηκαν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της εκδήλωσης ρευστοποίησης οριζοντίου εδάφους όπως κρατήρες άμμου με απόθεση αμμοίλυωδών υλικών τεφρού χρώματος. Στη ΘΕΣΗ-I παρατηρήθηκαν επίσης τα γνωρίσματα της πλευρικής εξάπλωσης, δηλαδή η ανάπτυξη επιφανειακών εδαφικών ρηγματώσεων με πλάτος ανοίγματος κυμαινόμενο από 1cm έως 12cm φαινόμενο το οποίο συνδέεται με τη ρευστοποίηση.

Αναφορικά με τη ΘΕΣΗ-II υπήρξε ρευστοποίηση εδάφους περιορισμένης έκτασης (όχι όμως και πλευρική εξάπλωση). Στις παραπάνω θέσεις πραγματοποιήθηκε επίσης διεξαγωγή δειγματοληπτικών γεωτρήσεων με μετρήσεις του αριθμού κτύπων της τυποποιημένης δοκιμής διείσδυσης (SPT), δοκιμών διείσδυσης κώνου (CPT). Διεξήχθησαν επίσης εργαστηριακές δοκιμές κατάταξης και δοκιμές αντοχής στα συνεκτικά εδαφικά δείγματα.

Τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής διερεύνησης στις δύο θέσεις παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα



Σχήμα 3.12:Θέση I



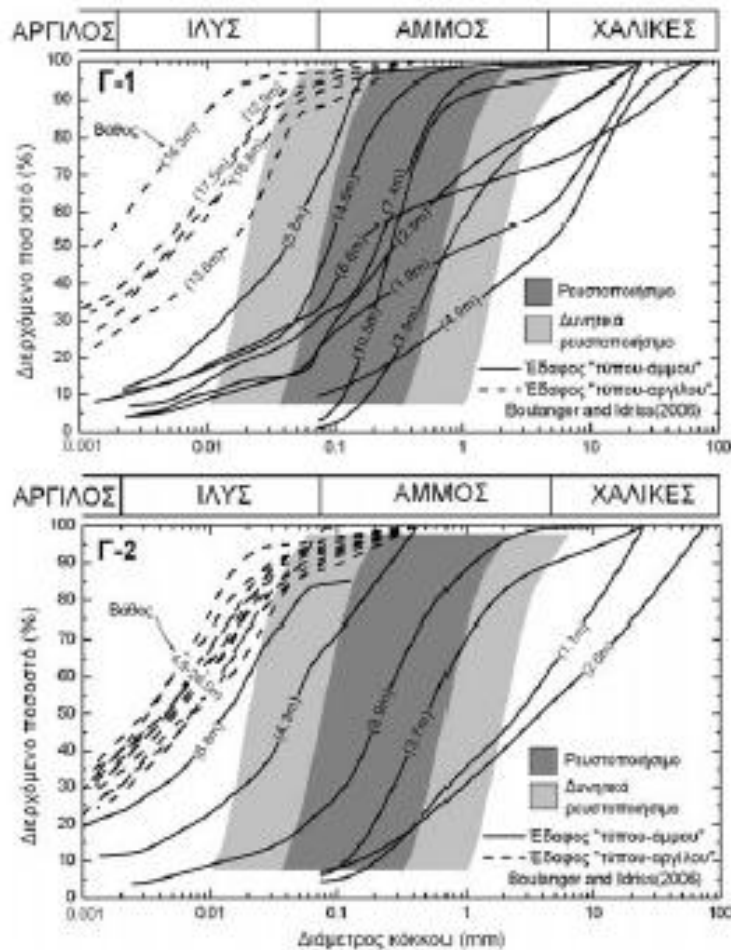
Σχήμα 3.13: Θέση II

Παρατηρείται ότι η εδαφική τομή στις δύο θέσεις (ΘΕΣΗ-I και ΘΕΣΗ-II) παρουσιάζει ορισμένες γενικές ομοιότητες αλλά και χαρακτηριστικές διαφοροποιήσεις. Και στις δύο θέσεις η εδαφική στρωματογραφία περιλαμβάνει επιφανειακή στρώση **χονδρόκοκκων** υλικών (αμμοχαλίκων) με πολύ μικρό ποσοστό λεπτόκοκκων συστατικών, ακολουθούμενη από στρώση συνεκτικού εδάφους, μέσης πλαστικότητας και μικρής αντοχής. Το πάχος της επιφανειακής στρώσης είναι ίσο με 3m, στη ΘΕΣΗ-I και 4m στη ΘΕΣΗ-II. Στη συνέχεια η στρωματογραφία των δύο θέσεων διαφοροποιείται: στη ΘΕΣΗ-II μετά το βάθος των 4m συναντώνται λεπτόκοκκοι συνεκτικοί σχηματισμοί μικρής αντοχής με υψηλότατο ποσοστό λεπτών συστατικών (μέχρι 90%) και δείκτη πλαστικότητας κυμαινόμενο από 7 έως 18.

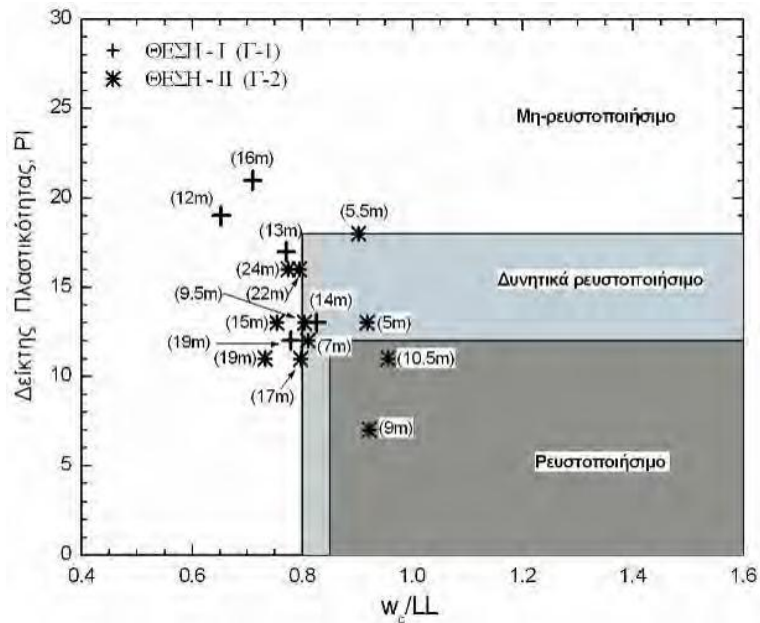
Αντίστοιχα, στη ΘΕΣΗ-I μετά την επιφανειακή στρώση συναντώνται μη-πλαστικές αμμόδεις/ιλυώδεις στρώσεις με χαμηλό ποσοστό λεπτών μέχρι βάθος 12m. Οι στρώσεις αυτές ακολουθούνται από συνεκτικά εδαφικά υλικά μικρής αντοχής με πολύ υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκων συστατικών, παρόμοια με αυτά της ΘΕΣΗΣ-II

Γενικά στις περιπτώσεις των χονδρόκοκκων εδαφών υιοθετείται το κριτήριο του Tsuchida, 1970 το οποίο βασίζεται στην κοκκομετρική καμπύλη του υλικού. Στο Σχήμα 3.13 παρουσιάζονται οι κοκκομετρικές καμπύλες που προέκυψαν για τα εξετασθέντα εδαφικά δείγματα των γεωτρήσεων στις δύο θέσεις και οι καμπύλες των ορίων ρευστοποιήσιμων εδαφών κατά Tsuchida, 1970 (από Ishihara et al.)

Επισημαίνεται ότι οι κοκκομετρικές καμπύλες έχουν διαχωριστεί σε καμπύλες εδαφικών υλικών “τύπου άμμου” και “τύπου αργίλου”, με βάση το κριτήριο των Boulanger and Idriss (2006). Είναι φανερό, ότι τα διαγράμματα του Σχήματος 3.13 υποδεικνύουν και στις δύο θέσεις την ρευστοποιησιμότητα των αδρόκοκκων επιφανειακών σχηματισμών οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως εδάφη “τύπου άμμου”, ενώ οι βαθύτεροι λεπτόκοκκοι συνεκτικοί εδαφικοί σχηματισμοί (οι οποίοι χαρακτηρίζονται ως εδάφη “τύπου αργίλου”) βρίσκονται εκτός της ζώνης ρευστοποιησιμότητας του διαγράμματος. Για τον έλεγχο της ρευστοποιησιμότητας αυτών των εδαφών χρησιμοποιείται το κριτήριο των Bray and Sancio (2006) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.14 μαζί με τα σημεία που αντιστοιχούν στα εδαφικά δείγματα των δύο θέσεων που εξετάζονται.



Σχήμα 3.14: Κοκκομετρικές καμπύλες των εξετασθέντων δειγμάτων και οριακές καμπύλες ρευστοποιήσιμων εδαφών κατά Tsuchida

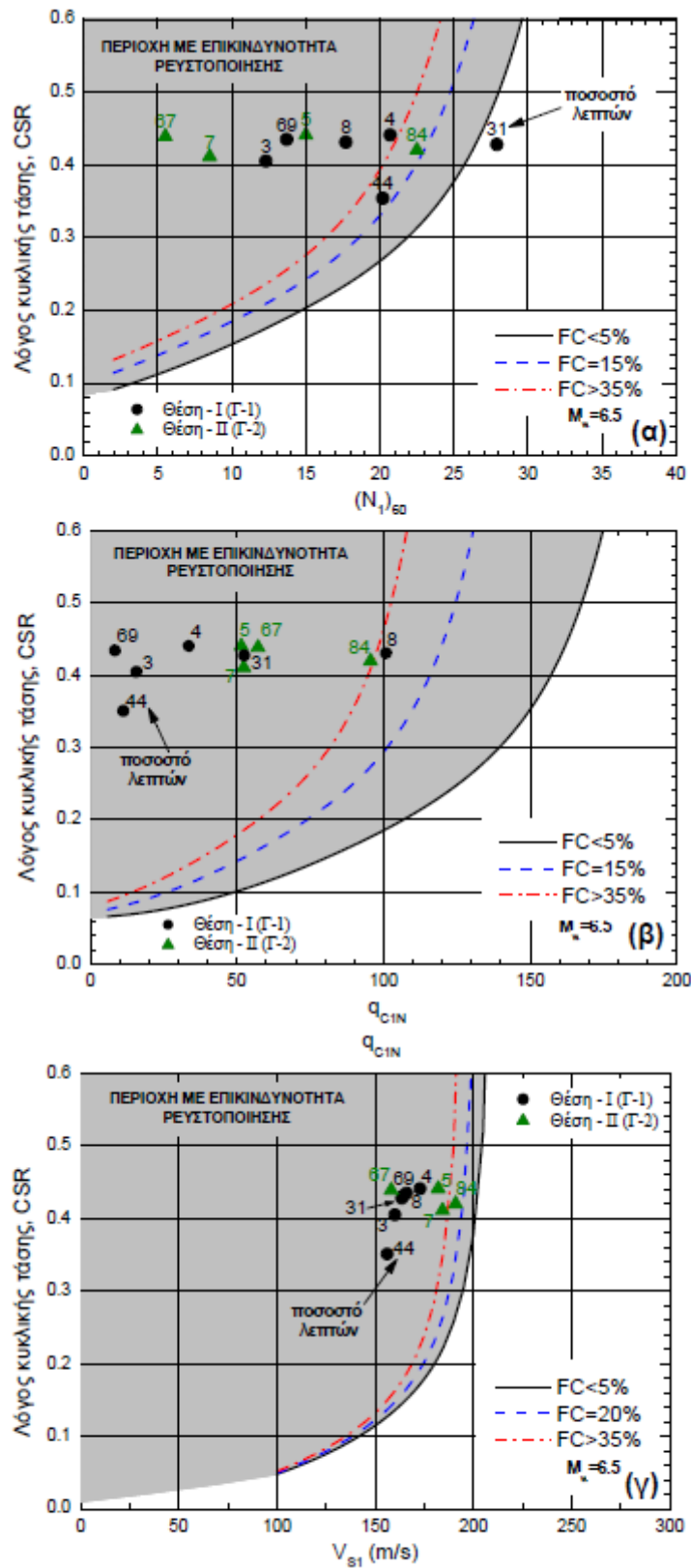


Σχήμα 3.15: Αποτελέσματα δοκιμών κατάταξης των επιφανειακών εδαφών της παραλιακής ζώνης και τα κριτήρια ρευστοποιησιμότητας των Bray and Sancio (2006).

Παρατηρείται ότι ορισμένα από τα συνεκτικά εδαφικά στρώματα που συναντώνται μέχρι το βάθος των 14m ταξινομούνται ως δυνητικά ρευστοποιήσιμα ή ρευστοποιήσιμα.

Ο κίνδυνος ρευστοποίησης στην παραλιακή ζώνη της Κ.Αχαΐας είναι δυνατόν να εκτιμηθεί με βάση ημιεμπερικές συσχετίσεις με τα αποτελέσματα των επιτόπου δοκιμών SPT και CPT καθώς και με την τιμή της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων μικρού πλάτους, V_{so} (Idriss and Boulanger, 2008). Οι προβλέψεις των τριών μεθοδολογιών εκτίμησης του κινδύνου ρευστοποίησης σε σύγκριση με την παρατηρηθείσα συμπεριφοράς του εδάφους παρουσιάζεται στα διαγράμματα του Σχήματος 3.15.

Στα διαγράμματα αυτά έχουν εισαχθεί τα σημεία που αντιστοιχούν στις μετρηθείσες τιμές των παραμέτρων $(N1)_{60}$, qc_{1N} και $VS1$ στις δύο θέσεις (ΘΕΣΗ-I και ΘΕΣΗ-II) και στις αντίστοιχες υπολογισθείσες τιμές του λόγου κυκλικής διατμητικής τάσης, CSR.



Σχήμα 3.16: Διαγράμματα επικινδυνότητας ρευστοποίησης, με βάση α) τον αριθμό κτύπων $(N_1)_{60}$, β) την αντοχή αιχμής κώνου q_{c1N} και γ) την ταχύτητα διάδοσης V_{SI} , με τα δεδομένα της περίπτωσης ρευστοποίησης της Κ. Αχαΐας.

Παρατηρείται ότι, με την εξαίρεση ενός μόνο σημείου υπάρχει *πλήρης συμφωνία* μεταξύ της παρατηρηθείσας εκδήλωσης ρευστοποίησης στις δύο θέσεις και στις προβλέψεις και των τριών διαγραμμάτων.

3.2.5 Συμπεράσματα

Κατά το σεισμό της Αχαΐας-Ηλείας στις 8-6-2008, στην παραλιακή ζώνη της Κ. Αχαΐας εντοπίστηκαν χαρακτηριστικά γνωρίσματα όπως :

- (α) εκτεταμένη εδαφική ρευστοποίηση υπό συνθήκες ελευθέρου πεδίου
- (β) πλευρική εξάπλωση προς την κατεύθυνση της ακτογραμμής.

Μετά τις καταγραφές των παραπάνω περιστατικών ακολούθησε αναλυτική γεωτεχνική έρευνα του υπεδάφους τα αποτελέσματα της οποίας χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή συγκρίσεων παρατηρηθείσας και αναμενόμενης συμπεριφοράς με βάση σύγχρονα κριτήρια και μεθοδολογίες.

Τα δεδομένα που αποκτήθηκαν από την μελέτη και ανάλυση της συγκεκριμένης περίπτωσης ρευστοποίησης επιβεβαιώνουν την αξιοπιστία των συγχρόνων μεθοδολογιών ελέγχου ρευστοποιησιμότητας, κινδύνου ρευστοποίησης και υπολογισμού πλευρικών μετακινήσεων και αποτελούν χρήσιμη προσθήκη στην υφιστάμενη βάση δεδομένων.

Επιπλέον, επιβεβαιώνεται για ακόμη μια φορά ο καθοριστικός ρόλος του εδάφους στην ενίσχυση της σεισμικής δόνησης και στην εμφάνιση αστοχιών σε τεχνικά έργα από το φαινόμενο της ρευστοποίησης.

3.3 Ο σεισμός της Κεφαλονιάς (26/01/2014-03/02/2014, Mw=6.5)

3.3.1 Γενικά στοιχεία

Οι πρόσφατοι σεισμοί της Κεφαλονιάς έλαβαν χώρα στις 26 Ιανουαρίου και στις 3 Φεβρουαρίου 2014 κατά τη διάρκεια των οποίων το νησί σείστηκε από 2 ισχυρές δονήσεις μεγέθους $M_w = 6.1$ και $M_w = 6.0$ αντίστοιχα. Από τις δονήσεις αυτές, προκλήθηκαν σημαντικές αστοχίες κυρίως (αλλά όχι αποκλειστικά) στη χερσόνησο της Παλικής τόσο γεωτεχνικού όσο και δομοστατικού ενδιαφέροντος.

Οι γεωτεχνικές αστοχίες που παρατηρήθηκαν αναφέρονται κυρίως σε βραχοπτώσεις – κατολισθήσεις, αστοχίες πρανών, ρευστοποιήσεις, συνιζήσεις και πλευρικές μετακινήσεις οι οποίες έφεραν ως αποτέλεσμα εκτεταμένες βλάβες στα έργα υποδομής κυρίως στο οδικό δίκτυο και στα λιμάνια του νησιού και οι οποίες αποτυπώθηκαν αθροιστικά τόσο μετά τον πρώτο όσο και μετά τον δεύτερο σεισμό.

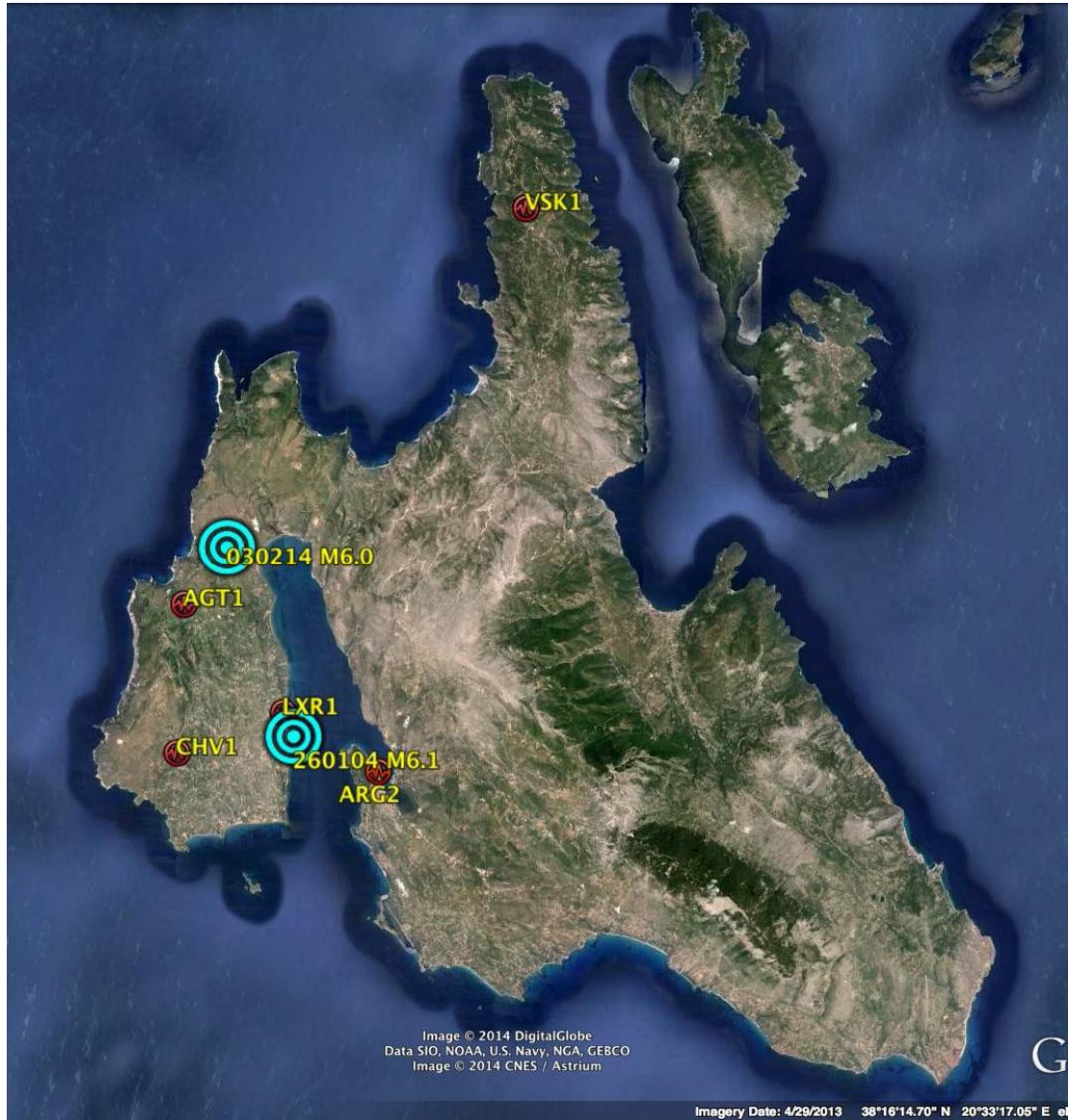
Και οι δύο ισχυροί σεισμοί καταγραφήκαν από δίκτυο επιταχυνσιογράφων που διατηρεί μόνιμα στο νησί ο ΟΑΣΠ-ΙΤΣΑΚ αλλά και από επιταχυνσιογράφους που εγκαταστάθηκαν στο νησί την επομένη της γένεσης του πρώτου σεισμού. Οι καταγραφές του δικτύου αυτού αξιοποιήθηκαν σε συνδυασμό με προκαταρκτικά αποτελέσματα αναλύσεων και μελετών σεισμικής απόκρισης με στόχο να αποσαφηνιστεί, ο ρόλος της επιρροής των εδαφικών συνθηκών της περιοχής στη σεισμική κίνηση, η σφοδρότητα των σεισμικών δονήσεων όπως αποτυπώθηκε στις ενόργανες μετρήσεις αλλά και η αποτίμηση των σεισμικών δράσεων σχεδιασμού τόσο του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού όσο και του Ευρωκώδικα 8.

Οι σεισμοί του Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου του 2014 στην Κεφαλονιά ανέδειξαν τη σημασία της κατανόησης της ενεργού τεκτονικής αλλά και της σεισμικής ιστορίας των ενεργών ρηγμάτων του Ελληνικού χώρου, αφού οι πληροφορίες του παρελθόντος μας επιτρέπουν να κατανοήσουμε καλύτερα την εξέλιξη των σεισμικών ακολουθιών και τις επιπτώσεις τους. Η σεισμική ακολουθία του 2014 έλαβε χώρα στη σεισμική ζώνη του ρήγματος της Κεφαλονιάς-Λευκάδας,

και ειδικότερα στο τμήμα της Κεφαλονιάς, ίσως το πιο σημαντικό ρήγμα του Ελληνικού χώρου.

Το ρήγμα αυτό είναι ένα μεγάλο δεξιόστροφο ρήγμα, όπως προέκυψε για πρώτη φορά από την ανάλυση των δεδομένων του ισχυρού σεισμού του 1983 ($M=7.2$), όπως αυτά παρουσιάστηκαν από τους Σκορδύλη και συν. (1985). Το ρήγμα παρουσιάζει μία πλούσια και πολύπλοκη ιστορία, με πολλούς σεισμούς με $M>7.0$, αρκετοί από τους οποίους συγκεντρώνονται σε μικρά χρονικά διαστήματα, όπως και οι 2 ισχυροί σεισμοί του 2014 που απείχαν μία εβδομάδα.

Στο χάρτη που ακολουθεί παρουσιάζεται η γεωγραφική κατανομή των καταγραφών του δικτύου καθώς και τα επίκεντρα των δύο σεισμικών δονήσεων.



Εικόνα 3.15: Γεωγραφική κατανομή σταθμών καταγραφής ΟΑΣΠ-ΙΤΣΑΚ και επικέντρων

ARG2

- 26 JAN 2014 M6.1
- 3 FEB 2014 M6.0

LXR1 & CHV1

- 3 FEB 2014 M6.0

3.3.2 Γεωλογικά στοιχεία

Τα χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών στις περιοχές των σεισμών προέκυψαν μετά από εκτεταμένη γεωτεχνική διερεύνηση, επιτόπου αυτοψίες και διάνοιξη γεωτρήσεων στις θέσεις αστοχιών . Τα αποτελέσματα για την περιοχή του Αργοστολίου και Ληξουρίου παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια

Αργοστόλι

Οι εδαφικοί σχηματισμοί στην περιοχή του Αργοστολίου αποτελείται από πλειοκαινικά ιζήματα όπως ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, ασβεστόλιθους, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους με μαργαϊκές ενστρώσεις και μάργες.



Εικόνα 3.16: Αργοστόλι, Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, 1:50.000

Παραλία

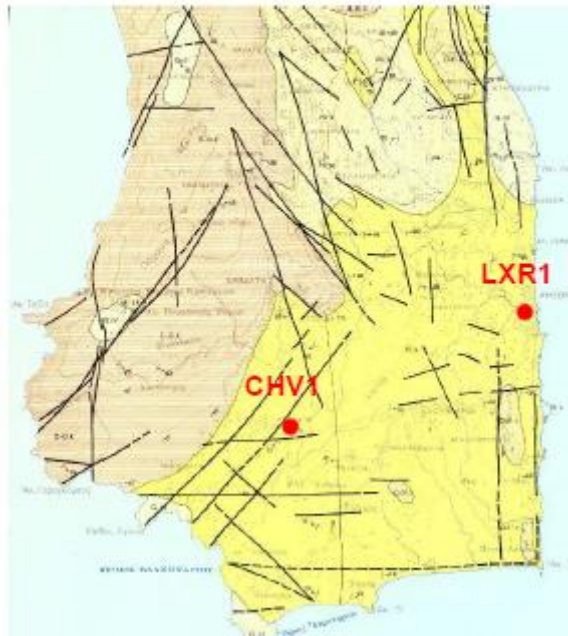
Στην παραλία επικρατούν κυρίως ιλυοαργιλώδεις σχηματισμοί μικρής δυστημής, κατά τόπους μεγάλης πλαστικότητας, με πάχος περίπου 30m, οι οποίοι είναι πλούσιοι σε απολιθώματα και οργανικά (λιγνίτες).

Ληξούρι

Στην περιοχή του Ληξουρίου επικρατεί ο ίδιος γεωλογικός σχηματισμός με το Αργοστόλι όπου συναντώνται πλειοκαινικά ιζήματα, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, ασβεστόλιθοι, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι με μαργαϊκές ενστρώσεις και μάργες. Αναφορικά με το ανώτερο τμήμα αυτό αποτελείται από κυανές μάργες, λεπτόκοκκους ψαμμίτες και αμμούχες μάργες.

03-02-2014 M6.0

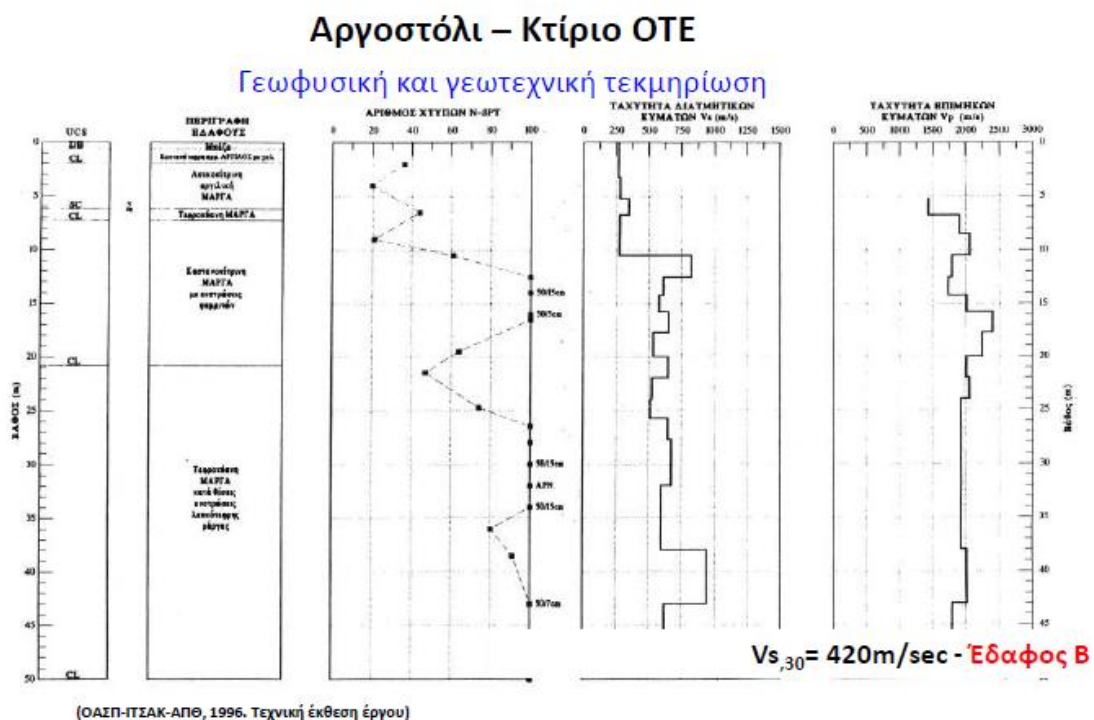
Ληξούρι – Χαβριάτα



Εικόνα 3.17: Ληξούρι, Γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ, 1:50.000

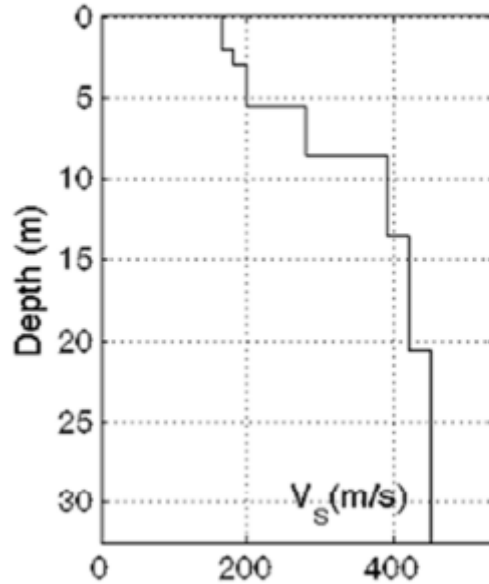
Συμπερασματικά και όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα της γεωτεχνικής έρευνας, παρατηρείται ότι τα ανώτερα εδαφικά στρώματα αποτελούνται από αλλουβιακές αποθέσεις μικρού πάχους, η φύση των οποίων είναι αμμώδης στο νότιο τμήμα του λιμένα και κυρίως αργιλική στο βόρειο.

Επιπλέον, το πάχος τους αυξάνεται σημαντικά όσο κινούμαστε προς το βορρά, όπου εκβάλλει χείμαρρος βορείως του υπήνεμου μώλου, κάτω από τις οποίες βρίσκεται το αποσαθρωμένο ψαμιτομαργαϊκό υπόβαθρο υπό μορφή στιφρής έως πολύ στιφρής αργίλου χαμηλής ως μέσης πλαστικότητα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι γεωλογικές τομές και τα αποτελέσματα από τη διεξαγωγή δειγματοληπτικών γεωτρήσεων με μετρήσεις του αριθμού κτύπων της τυποποιημένης δοκιμής διείσδυσης (SPT), δοκιμών διείσδυσης κώνου (CPT). Το έδαφος στην περιοχή του Αργοστολίου κατατάσσεται στην κατηγορία Β σύμφωνα, ενώ στο Ληξούρι στην κατηγορία C.



Σχήμα 3.17: Αργοστόλι

03-02-2014 M6.0



V_{s,30} = 330m/sec - Έδαφος C (EC8)

Σχήμα 3.18: Ληξούρι

3.3.3 Αστοχίες και φαινόμενα ρευστοποίησης

Όπως προαναφέρθηκε, κατά τη διάρκεια των δύο σεισμικών δονήσεων εμφανίστηκαν εκτεταμένες αστοχίες σε δομικά έργα, λιμένες και σε εδάφη πολλές από τις οποίες οφείλονταν στο φαινόμενο της ρευστοποίησης. Τέτοια παραδείγματα, παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω:

1. Ολίσθηση κρηπιδοτοιχών της τάξης των 10-30 cm (είτε όλης της στήλης είτε μόνο της επιδομής επί των τεχνητών ογκολίθων). Η συχνότητα εμφάνισης αυτού του τύπου αστοχίας είναι μεγάλη.
2. Ολίσθηση και στροφή κρηπιδοτοιχών λόγω πιθανής θραύσης ή πλαστικοποίησης του εδάφους κάτω από το προς τη θάλασσα άκρο της θεμελίωσης είτε λόγω στροφής του ανώτερου τεχνητού ογκολίθου. Μετακινήσεις της στέγης της τάξης

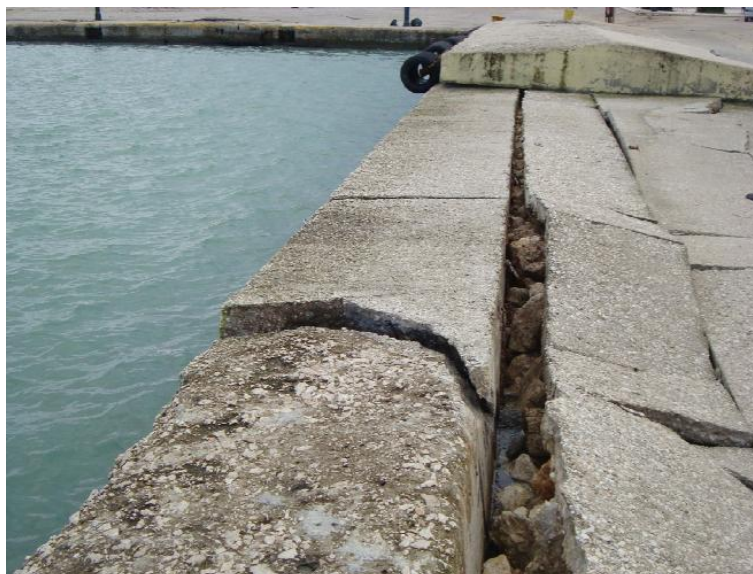
των 10-30 cm γενικά και μέχρι 60-80 cm σε θέσεις αστοχίας . Η συχνότητα εμφάνισης αυτού του τύπου αστοχίας είναι μεγάλη, αλλά μικρότερη από την υπ' αριθμ. 1.

3. Γενική αστοχία του εδάφους όπισθεν των κρηπιδοτοίχων λόγω μεγάλης μετακίνησης ή/και στροφής τους. Υπάρχουν 3 πιθανές τέτοιες περιπτώσεις στη νότια περιοχή του λιμένα .
4. Καθιζήσεις έως και 50 cm όπισθεν των κρηπιδοτοίχων αφενός λόγω δυναμικής συνίζησης του ανακουφιστικού πρίσματος αφετέρου δε ως αποτέλεσμα των οριζοντίων μετακινήσεων των κρηπιδοτοίχων .
5. Εκτεταμένες ανομοιόμορφες καθιζήσεις της επιφάνειας των χερσαίων χώρων και εφελκυστικές ρωγμές ανοίγματος 5-10 cm λόγω πιθανής ρευστοποίησης των επιχώσεων. Υπάρχουν ενδείξεις τέτοιων φαινομένων σε αρκετά σημεία .

Στη συνέχεια παρατίθενται κάποιες φωτογραφίες από χαρακτηριστικά παραδείγματα αστοχιών σε διάφορες θέσεις από ρευστοποίηση.



Εικόνα 3.18: Ρευστοποίηση στο λιμένα



Εικόνα 3.19: Ρευστοποίηση στο λιμένα



Εικόνα 3.20: Ίχνη ρευστοποίησης



Εικόνα 3.21: Άμμος και χαλίκια από ρευστοποίηση



Εικόνα 3.22: Ίχνη ρευστοποίησης



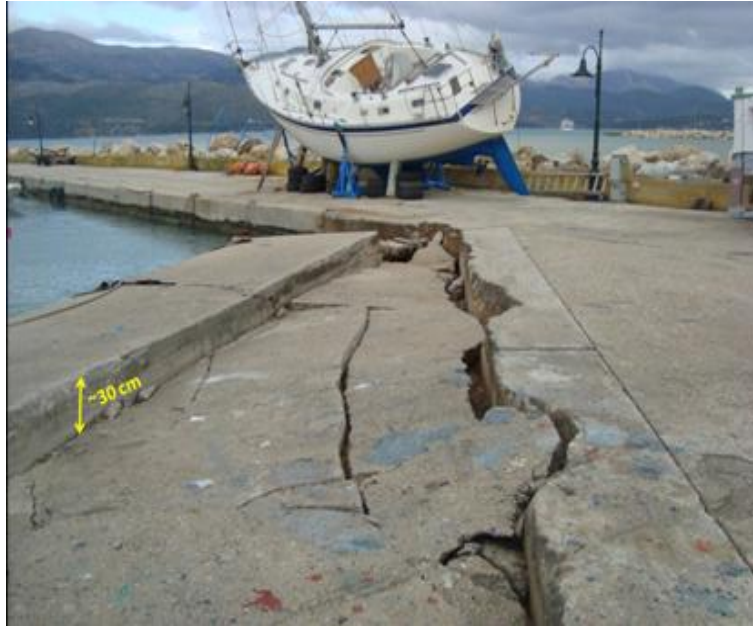
Εικόνα 3.23: Αστοχία κρηπιδότοιχου στο λιμένα



Εικόνα 3.24: Καθίζηση κρηπιδότοιχου στο λιμένα



Εικόνα 3.25: Ληξούρι- λιμένας



Εικόνα 3.26: Εδαφική αστοχία-καθίζηση 30 cm



Εικόνα 3.27: Εδαφική αστοχία-καθίζηση 40 cm

3.3.4 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, για τις δύο σεισμικές δονήσεις στο νησί της Κεφαλλονιάς, διαπιστώνεται ότι το φαινόμενο της ρευστοποίησης, συνέβαλε στην ένταση και την έκταση των παραπάνω φαινομένων, αφενός λόγω της μείωσης της διατμητικής αντοχής του εδάφους, αφετέρου λόγω της αύξησης των ωθήσεων γαιών όπισθεν των κρηπιδοτοιχών. Επιπλέον, αρκετές περιπτώσεις αστοχιών προκλήθηκαν ξεκάθαρα και μόνο από εδαφική αστοχία λόγω ρευστοποίησης και όχι από αστοχίες δομικών στοιχείων.

Βεβαίως αξίζει να σημειωθεί η πολλή καλή συμπεριφορά των κρηπιδοτοιχών σε περιοχές όπου υπήρχε κάποιου είδους δέσμευση των μετακινήσεων, όπως σε γωνίες και στις θέσεις των ραμπών, οι οποίες έδρασαν ως ελκυστήρες.

Συνεπώς η ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών ως φαινόμενο χρίζει για ακόμη μια φορά ειδική μελέτη και πρόβλεψη καθώς οι αστοχίες για τις οποίες είναι υπεύθυνο το φαινόμενο είναι εκτεταμένες και καταστροφικές .

Κεφάλαιο 4 : Αντιμετώπιση του φαινομένου της ρευστοποίησης

4.1.2 Μέθοδοι βελτίωσης –ενίσχυσης του εδάφους

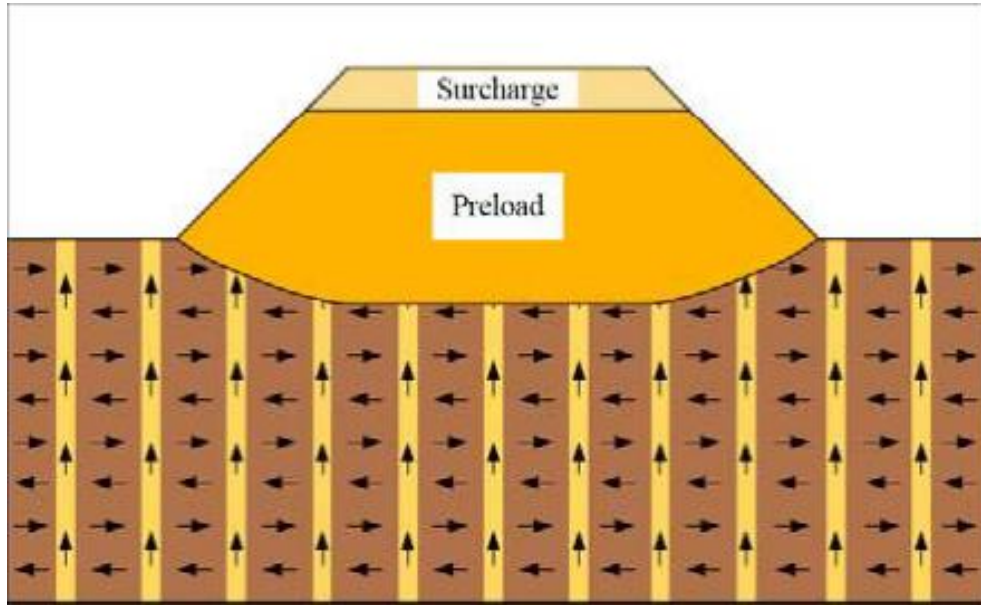
Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας και εφόσον έχει τονιστεί η σημαντικότητα του φαινομένου της ρευστοποίησης, κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν συνοπτικά οι πιο αποτελεσματικές και ευρέως διαδεδομένες μέθοδοι εξυγίανσης του εδάφους έναντι του φαινομένου.

Οι μέθοδοι αυτές έχουν ως σκοπό την αύξηση της φέρουσας ικανότητας του εδάφους μέσω της γρήγορης αποτόνωσης των υδατικών υπερπίεσεων και της αύξησης των ενεργών τάσεων. Επιπλέον στοχεύουν και στη μείωση του εύρους των αναμενόμενων καθιζήσεων. Κάποιες από αυτές τις μεθόδους ενίσχυσης είναι αποτελεσματικές για όλους τους τύπους των εδαφών ενώ κάποιες άλλες όχι .Οι μέθοδοι αυτές αναλύονται στη συνέχεια.

4.1.2 Μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους με στραγγιστήρια

Η μέθοδος βελτίωσης του εδάφους με κατακόρυφα στραγγιστήρια εφαρμόζεται κυρίως σε λεπτόκκοκκα – αργιλικά εδάφη στα οποία η καθίζηση από δευτερεύουσα στερεοποίηση δεν είναι σημαντική. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται η ταυτόχρονη προφόρτιση του εδαφικού σχηματισμού.

Σκοπός της μεθόδου είναι η δημιουργία κατακόρυφων στηλών αυξημένης διαπερατότητας στο έδαφος με σκοπό την επιτάχυνση του φαινομένου της στερεοποίησης.



Εικόνα 4.1 : Μέθοδος ενίσχυσης εδάφους με στραγγιστήρια

Τα κατακόρυφα στραγγιστήρια μπορεί να είναι :

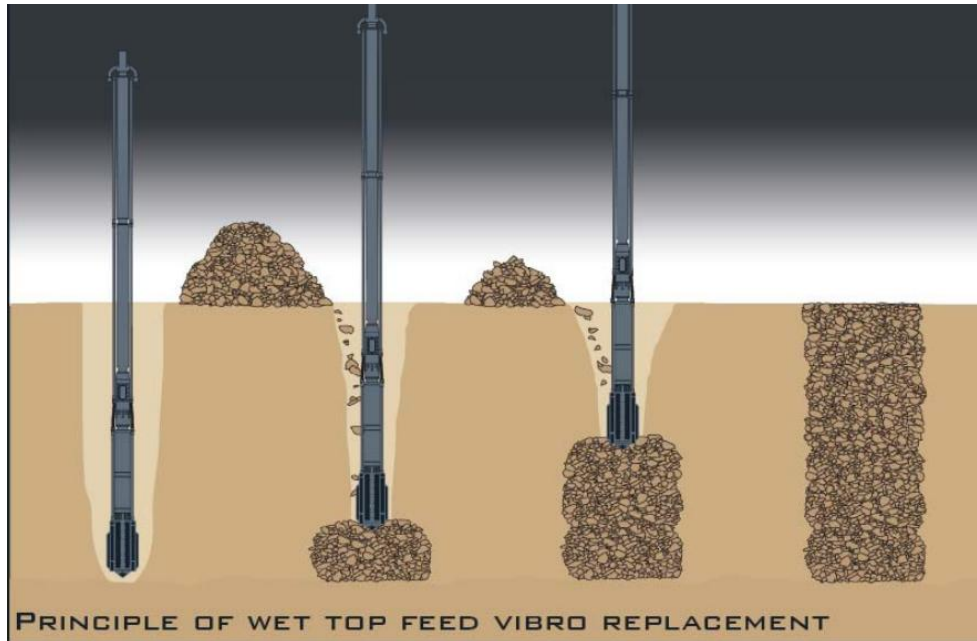
- ✓ Αμμοστραγγιστήρια
- ✓ Προκατασκευασμένα στραγγιστήρια

4.1.3 Μέθοδοι βελτίωσης του εδάφους με χαλικοπασσάλους

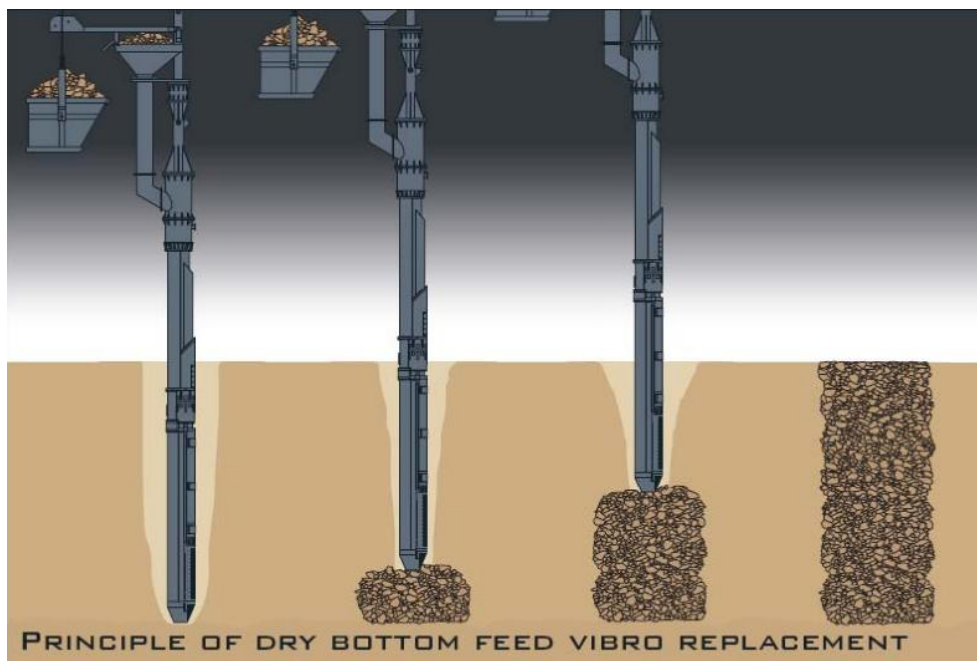
Η μέθοδος της βαθιάς δονητικής συμπίκνωσης με αντικατάσταση είναι γνωστή και ως μέθοδος βελτίωσης του εδάφους με χαλικοπασσάλους. Οι χαλικοπάσσαλοι είναι διατρήματα που γεμίζονται με άμμο ή χάλικες και είναι πολύ αποτελεσματικοί για την αντιμετώπιση της συμπεριφοράς σχεδόν όλων των τύπων των εδαφών (ιλυώδη, λεπτόκοκκα, αμμώδη) ως προς τη ρευστοποίηση.

Με την κατασκευή των χαλικοπασσάλων αυξάνεται η δυστημψία, η διατμητική αντοχή και η φέρουσα ικανότητά του εδάφους και μειώνεται η συμπιεστότητά του. Επιπλέον, επιτυγχάνεται ταχεία αποτόνωση των υδατικών υπερπιέσεων ,η συμπίκνωση του εδάφους, η μείωση της καθίζησης και η ανάληψη φορτίου γεγονός που καθιστούν το έδαφος πολύ ανθεκτικό σε ρευστοποίηση.

Ακόμη, το γεγονός αυτό συνεπάγεται αναπόφευκτα τη αλλαγή του τρόπου διάδοσης της σεισμικής κίνησης και τη μεταβολή της δυναμικής απόκρισης της κατασκευής που θα θεμελιωθεί στο βελτιωμένο αυτό έδαφος.



Εικόνα 4.2 : Μέθοδος ενίσχυσης εδάφους με χαλικοπασσάλους με τροφοδοσία αδρανών στην κεφαλή της δονητικής στήλης



Εικόνα 4.3 : Μέθοδος ενίσχυσης εδάφους με χαλικοπασσάλους με τροφοδοσία αδρανών στη βάση της δονητικής στήλης

Άλλες μέθοδοι είναι :

- ✓ η βελτίωση του εδάφους με βαθιά εδαφική ανάμειξη (κατασκευή εδαφοπασσάλων)
- ✓ η βελτίωση του εδάφους με οπλισμό (ενίσχυση με γεωφάσματα-γεωπλέγματα-μεταλλικές λάμες)
- ✓ η βελτίωση των λεπτόκοκκων εδαφών με προφόρτιση
- ✓ η βελτίωση του εδάφους με μείωση του επιβαλλόμενου φορτίου (μείωση ύψους επιχώματος, αύξηση κλίσης πρανών , χρήση ελαφρών υλικών επιχωμάτωσης, τοποθέτηση σωλήνων εντός του σώματος του επιχώματος)
- ✓ η βελτίωση του εδάφους με βαθιά δυναμική συμπίκνωση(vibrocompaction) ή επιφανειακή συμπίκνωση

Βιβλιογραφία

1. Γκαζέτας Γ., **Εδαφοδυναμική και Σεισμική Μηχανική «Ιστορικά περιστατικά»**, εκδόσεις Συμεών 1996
2. Καββαδάς Μ., **Στοιχεία Εδαφομηχανικής**, έκδοση ΕΜΠ, 2006.
3. ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ Α.Ι., ΜΑΡΓΑΡΗΣ Β. Ν, ΚΛΗΜΗΣ Ν. Σ. , ΜΑΚΡΑ, Κ. , ΠΙΤΙΛΑΚΗΣ Κ. **Ο σεισμός της Λευκάδας (M=6.2, 14 Αυγ. 2003): Ισχυρή Εδαφική Κίνηση και Αποτίμηση του ρόλου του εδάφους.**(5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, Ξάνθη, 31/5-2/6/2006 1)
4. Παπαθανασίου Γ., Παυλίδης Σπ., Χρηστάρας Β., Πιτιλάκης Κ. **«ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΛΗΘΗΚΑΝ ΑΠΟ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΗΣ ΛΕΥΚΑΔΑΣ (14/08/03 MS=6.4)»**
5. Δημητρίου Π. και συνεργάτες **«Ο Σεισμός της Λευκάδας της 14ης Αυγούστου του 2003 (Mw=6.2). Η Απόκριση των Κατασκευών και οι Επιπτώσεις του στο Νησί της Λευκάδας»**(3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5–7 Νοεμβρίου, 2008 Άρθρο 2000)
6. Παπαθανασίου Γιώργος: **Φαινόμενα ρευστοποίησης εδαφών στον Ελληνικό χώρο**
7. Μπατίλας Α.Β, Αθανασόπουλος Γ.Α και συνεργάτες : **Εδαφική Ρευστοποίηση στην Παραλιακή Ζώνη της Κάτω Αχαΐας κατά το Σεισμό της Αχαΐας-Ηλείας της 8ης Ιουνίου 2008 (6ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής & Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, ΤΕΕ, 29/09 – 1/10 2010, Βόλος 1)**
8. Ι.Τ.Σ.Α.Κ 2008 : **«Ο σεισμός Αχαΐας Ηλείας»**
9. Διατριβή ειδίκευσης Α.Καπατσώλου : **«Εκτίμηση της επικινδυνότητας για ρευστοποίηση των εδαφών στην ευρύτερη περιοχή της πόλης των Πατρών»**
10. Διαλέξεις πανεπιστημίου Πατρών για τη βελτίωση ενίσχυση εδαφών:
http://www.geology.upatras.gr/files/shmioseis/12817E/KEFALAIO_4.pdf
11. Παρουσιάσεις – Ημερίδες ΤΕΕ για την Κεφαλλονιά:
http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/EKDHLVSEIS/EKDHLWSEIS_2014/Seismoi_Kefalonia_2014/Tab2

12. Μπουκοβάλας Γ. Διαλέξεις για την Κεφαλλονιά:

<http://users.ntua.gr/gbouck/presentations>

13. Μπάνος Γ. Σεισμοί Κεφαλονιάς – Γεωτεχνική μελέτη αποκατάστασης ζημιών
λιμένα Ληξουρίου