

1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγικό σημείωμα

Η προκαλούμενη, κατά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων, εφαρμογή κυκλικών διατμητικών τάσεων οδηγεί τους κορεσμένους χαλαρούς αμμώδεις σχηματισμούς σε συμπίκνωση. Όμως σε αστράγγιστες συνθήκες, η αδυναμία μεταβολής του όγκου τους έχει ως αποτέλεσμα την μεταφορά της πίεσης στο νερό των πόρων. 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. 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 όγκο του. Ο όρος ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή της παραπάνω διαδικασίας είναι «*ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών*» (soil liquefaction)

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.

Φαινόμενα ρευστοποίησης έχουν παρατηρηθεί στους περισσότερους σεισμούς μεγάλου μεγέθους ($M > 6.5$). 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 1-1 και 1-2).



Εικόνα 1-1. Ανατροπή πολυκατοικιών λόγω ρευστοποίησης των υποκείμενων εδαφικών σχηματισμών (Σεισμική δόνηση μεγέθους Ms 7.5 στην Niigata, Ιαπωνία, το 1964).



Εικόνα 1-2. Αστοχία κατασκευής λόγω εδαφική ροής στο Anchorage, (Σεισμική δόνηση μεγέθους Mw 9.2 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. Κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στην μελέτη αυτών των αστοχιών καθώς αποτέλεσαν άμεσα παραδείγματα ρευστοποίησης τουλάχιστον για τον ελληνικό χώρο.

1.2 Στόχος της διατριβής

Έως τώρα, η μελέτη των φαινομένων ρευστοποίησης και κατά συνέπεια οι μέχρι σήμερα διατυπωμένες εμπειρικές σχέσεις βασιζόταν είτε σε δεδομένα παγκόσμιας κλίμακας είτε σε δεδομένα προερχόμενα αποκλειστικά από μια συγκεκριμένη περιοχή (Ιταλία, Τουρκία, Ιαπωνία).

Στόχος της παρούσας διατριβής ήταν η μελέτη του φαινομένου της ρευστοποίησης στον ελληνικό χώρο, καθώς η γεωγραφική κατανομή των επιδεκτικών προς ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών σε συνδυασμό με την έντονη σεισμικότητα της περιοχής συντελούν στην αυξημένη επικινδυνότητα συγκεκριμένων θέσεων ως προς το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Επιπλέον, στο πλαίσιο αυτό διερευνήθηκε η δυνατότητα διατύπωσης νέων εμπειρικών σχέσεων οι οποίες θα βασιζόνταν αποκλειστικά σε δεδομένα προερχόμενα από την ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου αναζητήθηκαν ιστορικά περιστατικά εμφανίσεων ρευστοποίησης σε σεισμικούς καταλόγους και επιστημονικές εργασίες, όπου περιγράφονται δευτερογενή φαινόμενα σεισμικών δονήσεων. Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από αυτήν την αναζήτηση και αξιολόγηση των περιγραφών είναι i) η δημιουργία ενός καταλόγου εμφάνισης φαινομένων ρευστοποίησης στον ελληνικό χώρο, ο οποίος παρατίθεται στο Παράρτημα Α, και του αντίστοιχου πίνακα 5.2 στον οποίο έχουν καταχωρηθεί δεδομένα σχετικά με τις θέσεις ιστορικών εμφανίσεων ρευστοποίησης και τον τύπο των αστοχιών τις οποίες προκάλεσε, ii) και η σύνταξη ενός πρότυπου χάρτη επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση περιοχών του ελληνικού χώρου.

Έπειτα, τα καταχωρημένα δεδομένα στον πίνακα επεξεργάστηκαν με τη βοήθεια στατιστικών προγραμμάτων και προέκυψαν iii) νέες εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της απόστασης εμφάνισης φαινομένων ρευστοποίησης (είτε από το επίκεντρο είτε από την επιφανειακή εκδήλωση του σεισμογόνου ρήγματος) με το επιφανειακό

μέγεθος της δόνησης τόσο για τον ελληνικό χώρο όσο και για την ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου. Επίσης, για πρώτη φορά προτείνονται iv) εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της επικεντρικής απόστασης εμφάνισης ρευστοποίησης με το επιφανειακό μέγεθος ανάλογα με τον τύπο του σεισμογόνου ρήγματος.

Έπειτα, κρίθηκε σκόπιμο να επεκταθεί η έρευνα στον τομέα της πρόβλεψης επιφανειακών εκδηλώσεων ρευστοποίησης. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε με βάση παγκόσμια δεδομένα επί τόπου δοκιμών SPT σε θέσεις εκδήλωσης ή μη φαινομένων ρευστοποίησης, τα οποία αναζητήθηκαν σε δημοσιευμένες εργασίες και δικτυακούς τόπους και στη συνέχεια καταχωρήθηκαν σε μια βάση δεδομένων. Αυτά τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με την μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης, την διακριτική ανάλυση και την μέθοδο των θηκογραμμάτων. Τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από αυτήν την διερεύνηση είναι: v) η ανάπτυξη μεθόδου υπολογισμού της πιθανότητας εκδήλωσης φαινομένων ρευστοποίησης στο γειτονικό περιβάλλον μιας εδαφικής στήλης με βάση την τιμή του αντίστοιχου δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης και vi) η ανάπτυξη μιας συνάρτησης διάκρισης με βάση την τιμή του δείκτη, το πάχος του μη ρευστοποιήσιμου επιφανειακού στρώματος και την εμφάνιση φαινομένων ρευστοποίησης. Τέλος, vii) ταξινομήθηκαν οι μορφές των αστοχιών λόγω ρευστοποίησης σε σχέση με την τιμή του δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης.

1.3 Δομή της διατριβής

Η παρούσα διατριβή χωρίζεται σε δύο κύρια μέρη: στο πρώτο περιγράφεται το φαινόμενο της ρευστοποίησης και αναπτύσσονται οι μεθοδολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των αστοχιών που προκαλεί (Κεφάλαια 2-4). Στο δεύτερο μέρος αναπτύσσεται η μεθοδολογία, η οποία ακολουθήθηκε και παρουσιάζονται αναλυτικά τα δεδομένα τα οποία επεξεργάστηκαν για την επίτευξη των στόχων αυτής της διατριβής (Κεφ. 5, 6 και Παράρτημα Α). Η σύνοψη των αποτελεσμάτων της διατριβής παρουσιάζεται στο 7^ο κεφάλαιο μαζί με τις προοπτικές της περαιτέρω μελέτης του φαινομένου της ρευστοποίησης.

Αναλυτικά, μετά το εισαγωγικό κεφάλαιο, ακολουθεί το 2^ο κεφάλαιο στο οποίο υπάρχουν πληροφορίες για τον μηχανισμό πρόκλησης της ρευστοποίησης, για τη διαδικασία ρευστοποίησης και για τις προϋποθέσεις τις οποίες πρέπει να πληρεί ένας

εδαφικός σχηματισμός για να χαρακτηριστεί επιδεκτικός προς ρευστοποίηση. Η ανάλυση των κριτηρίων επιδεκτικότητας καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος του 2^{ου} κεφαλαίου καθώς αποτελούν βασικό στοιχείο για την εκτίμηση του δυναμικού ρευστοποίησης μιας θέσης.

Το 3^ο Κεφάλαιο τιτλοφορείται « Μέθοδοι υπολογισμού κινδύνου ρευστοποίησης» και περιγράφει τις μεθόδους οι οποίες χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του κινδύνου ρευστοποίησης ενός εδαφικού στρώματος και γενικότερα μιας θέσης. Αρχικά αναλύονται οι μεθοδολογίες οι οποίες χρησιμοποιούνται στα πρώτα στάδια μιας μελέτης εκτίμησης της επικινδυνότητας προς ρευστοποίησης μιας θέσης. Αυτές οι μεθοδολογίες, βασίζονται σε εμπειρικές σχέσεις μεγέθους σεισμικής δόνησης με την απόσταση της τοποθεσίας είτε από το επίκεντρο της σεισμικής δόνησης, είτε από την επιφανειακή εκδήλωση του σεισμογόνου ρήγματος. Στη συνέχεια, περιγράφονται οι διαδικασίες, τις οποίες οφείλει να ακολουθήσει ο ερευνητής για τον προσδιορισμό του κινδύνου ρευστοποίησης ενός εδαφικού στρώματος.

Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η ταξινόμηση των εδαφικών παραμορφώσεων λόγω ρευστοποίησης ανάλογα με το μηχανισμό πρόκλησης και το μέγεθος των αστοχιών τις οποίες προκαλούν. Οι εδαφικές παραμορφώσεις σύμφωνα με την βιβλιογραφία διακρίνονται στις κατηγορίες: πλευρική μετατόπιση, εδαφική ταλάντωση, καθίζηση κορεσμένων άμμων, κώνοι άμμου και εδαφικές ροές. Για κάθε κατηγορία αστοχίας υπάρχει αναλυτική περιγραφή του μηχανισμού πρόκλησης της, καθώς επίσης και παρουσίαση των επικρατέστερων μεθοδολογιών εκτίμησης του μεγέθους των παραμορφώσεων τις οποίες προκαλούν.

Το 5^ο Κεφάλαιο οριοθετεί την αρχή του δεύτερου μέρους της διατριβής. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η διαδικασία συλλογής δεδομένων και η δημιουργία της βάσης δεδομένων ιστορικών εμφανίσεων ρευστοποίησης στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου. Αυτό το σημαντικό τμήμα της μελέτης αποτυπώνεται με τη βοήθεια ενός πίνακα στον οποίο έχουν καταχωρηθεί όλες οι θέσεις στις οποίες παρατηρήθηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης από ιστορικούς σεισμούς. Για κάθε τοποθεσία υπάρχει με κωδικοποιημένη μορφή ο τύπος της αστοχίας που προκλήθηκε και η απόσταση από το επίκεντρο της σεισμικής δόνησης. Στη συνέχεια, περιγράφεται η χρήση αυτής της βάσης δεδομένων για τον προσδιορισμό θέσεων

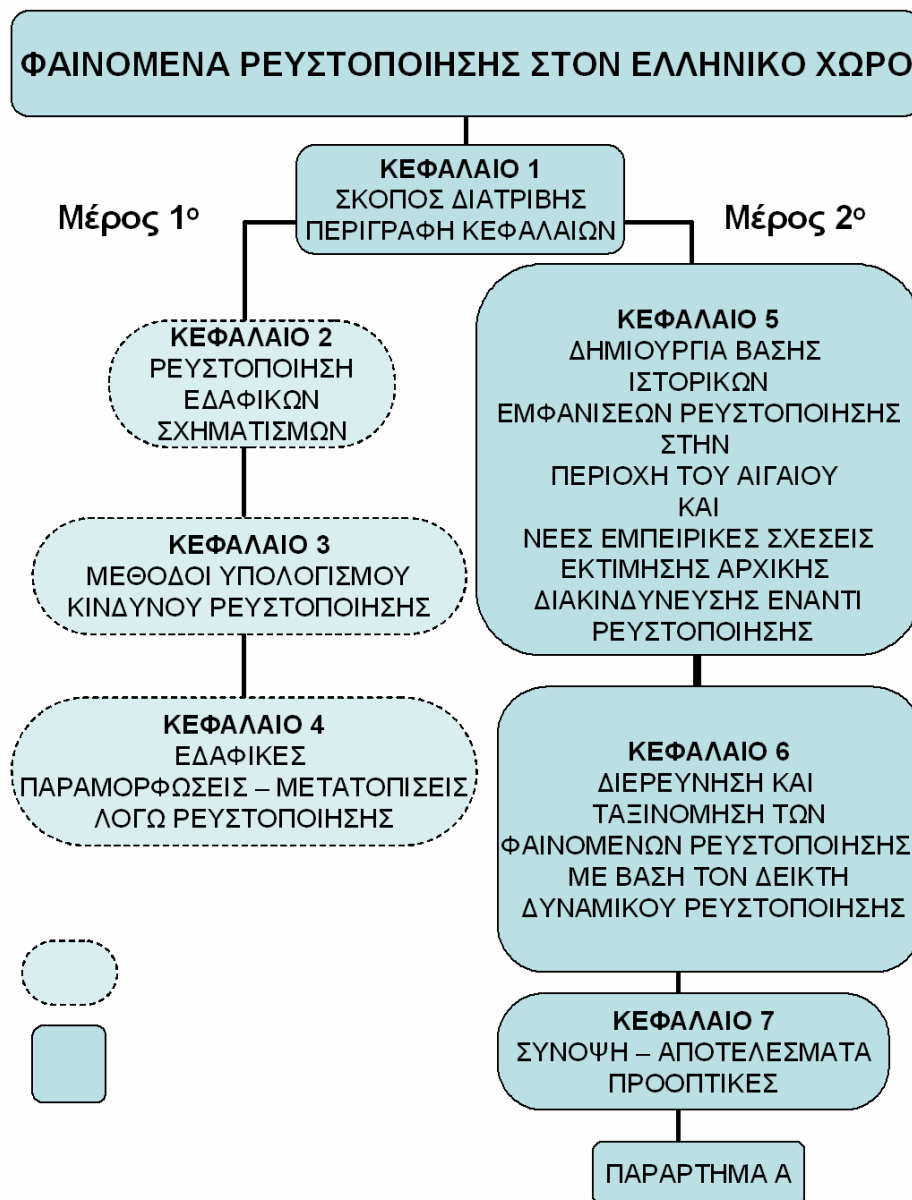
επιδεκτικών προς ρευστοποίηση τόσο σε τοπικό όσο και σε εθνικό επίπεδο. Παρουσιάζεται το πιλοτικό παράδειγμα του σεισμού της Λευκάδας το 2003 όπου οι εμφανίσεις ρευστοποίησης παρατηρήθηκαν στις ίδιες θέσεις ιστορικών εκδηλώσεων οι οποίες είχαν καταχωρηθεί στη βάση δεδομένων και περιγράφεται η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για την σύνταξη ενός πρότυπου χάρτη επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση της Ελλάδας. Τέλος, στο 5^ο κεφάλαιο αναπτύσσονται οι νέες, για τον ελληνικό χώρο, προτεινόμενες εμπειρικές σχέσεις συσχετισμού του επιφανειακού μεγέθους της σεισμικής δόνησης με την απόσταση εκδήλωσης φαινομένων ρευστοποίησης τόσο από το επίκεντρο του σεισμού όσο και από το σειсмоγόνο ρήγμα.

Στο 6^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η νέα ταξινόμηση των φαινομένων ρευστοποίησης με βάση τον δείκτη δυναμικού ρευστοποίησης μιας εδαφικής στήλης. Αρχικά περιγράφεται η διαδικασία συλλογής δεδομένων επί τόπου δοκιμών SPT και στη συνέχεια παρουσιάζεται η στατιστική επεξεργασία αυτών με τη μέθοδο των θηκογραμμμάτων (whisker box-plot). Επιπλέον, αναπτύσσονται οι νέες προτεινόμενες πιθανολογικές μέθοδοι διερεύνησης της συμπεριφοράς μιας εδαφικής στήλης, όπως αυτές προέκυψαν κατά την ανάλυση των δεδομένων με τη βοήθεια της λογιστικής παλινδρόμησης (logistic regression) και της διακριτικής ανάλυσης (discriminant analysis).

Η σύνοψη των αποτελεσμάτων της έρευνας, η οποία αναλύεται στο 5^ο και 6^ο κεφάλαιο, παρουσιάζεται στο 7^ο κεφάλαιο. Επιγραμματικά γίνεται αναφορά στις νέες προτεινόμενες εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού της απόστασης εμφάνισης ρευστοποίησης και στις μεθόδους πρόβλεψης επιφανειακών εκδηλώσεων ρευστοποίησης, ενώ στο τέλος του κεφαλαίου αναφέρονται οι προοπτικές από τη μελέτη του φαινομένου της ρευστοποίησης.

Τέλος, το Παράρτημα Α συνιστά έναν πρότυπο κατάλογο φαινομένων ρευστοποίησης στον οποίο περιγράφονται τα μακροσκοπικά αποτελέσματα ιστορικών σεισμών στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου τα οποία συνδέονται με το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Για κάθε περιστατικό, εκτός από την περιγραφή των αστοχιών είτε εδαφικών είτε κατασκευαστικών, παρατίθεται χάρτης απεικόνισης των θέσεων ρευστοποίησης.

Η δομή της διατριβής, με τον διακριτό ρόλο του πρώτου και δεύτερου μέρους, απεικονίζεται στο οργανόγραμμα της εικόνας 1-3.



Εικόνα 1-3. Οργανόγραμμα διατριβής