

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
Π Ο Λ Υ Τ Ε Χ Ν Ι Κ Η Σ Χ Ο Λ Η

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ:
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ
ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

**Passive stabilization of liquefiable
soils: literature review - constitutive
simulation**

Βελαλής Κωνσταντίνος - Παπαγιαννάκης Παναγιώτης

Οκτώβριος 2012



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 11091/1
Ημερ. Εισ.: 01-02-2013
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2012
ΒΕΛ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
Π Ο Λ Υ Τ Ε Χ Ν Ι Κ Η Σ Χ Ο Λ Η

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ
ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ:
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ
ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Passive stabilization of liquefiable
soils: literature review - constitutive
simulation

Βελαλής Κωνσταντίνος - Παπαγιαννάκης Παναγιώτης
Οκτώβριος 2012

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Κατ' αρχάς θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μας κο. Αχιλλέα Παπαδημητρίου, για την καθοδήγηση του και την βοήθεια του σε κάθε φάση της δημιουργίας της. Επίσης την Γεωργία Αγαπουλάκη για την συνεισφορά της στην υλοποίηση της διπλωματικής. Θέλουμε ακόμη να εκφράσουμε την ευγνωμοσύνη μας στους γονείς για την διαρκή τους υποστήριξη που παρείχαν καθώς και τα αδέρφια μας για το ρόλο που έπαιξαν στην επιτυχή διεκπεραίωση της εργασίας (αφού είτε βοήθησαν είτε μας άφησαν ήσυχους για να μπορέσουμε να την κάνουμε). Τέλος θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τους φίλους και συναδέλφους μας για τα όμορφα φοιτητικά χρόνια που περάσαμε μαζί.

Βελαλής Κωνσταντίνος

Παπαγιαννάκης Παναγιώτης

Βόλος, 16 Οκτωβρίου 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ρευστοποίηση μη συνεκτικών εδαφών θεωρείται εκ των πλέον σημαντικών αιτιών δομικών αστοχιών κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων. Η αποτροπή της σεισμικής ρευστοποίησης μη συνεκτικών εδαφών σε θέσεις νέων κατασκευών δεν παρουσιάζει συνήθως τεχνικά προβλήματα και γίνεται επιλέγοντας από μια σειρά καθιερωμένες μεθοδολογίες που στηρίζονται συνήθως στη συμπύκνωση, στη σταθεροποίηση ή την αποτόνωση των αναπτυσσόμενων υπερπιέσεων πόρων. Όμως σε θέσεις υφισταμένων κατασκευών, η χρήση των περισσοτέρων από τις υπάρχουσες μεθοδολογίες βελτίωσης είναι είτε δυσχερής ή αδύνατη. Μια νέα τεχνική βελτίωσης του εδάφους θεμελίωσης, κυρίως υφισταμένων κατασκευών, είναι η παθητική σταθεροποίηση, κατά την οποία ένας σταθεροποιητής (σε διάλυμα) εισάγεται μέσω διήθησης χαμηλής υδραυλικής κλίσης στο ρευστοποιήσιμο έδαφος θεμελίωσης ολόκληρης της περιοχής μιας υφιστάμενης κατασκευής. Βασικά χαρακτηριστικά ενός τέτοιου σταθεροποιητή, πέραν της αύξησης της αντοχής σε ρευστοποίηση του σταθεροποιημένου εδάφους, είναι να δημιουργεί διάλυμα με χαμηλή αρχική τιμή ιξώδους, ώστε να επιτρέπεται η διήθηση με χαμηλή υδραυλική κλίση, και η τιμή αυτή να αυξάνει ραγδαία όταν ο σταθεροποιητής φθάσει στην επιθυμητή θέση (μετά από χρονικό διάστημα που ονομάζεται χρόνος γέλης). Η νέα αυτή τεχνική βελτίωσης παραμένει σε ερευνητικό επίπεδο διεθνώς, και το να καταστεί πρακτικώς εφαρμόσιμη αποτελεί το βασικό στόχο ενός μεγάλου ερευνητικού προγράμματος που εκπονείται από το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σε συνεργασία με άλλα ΑΕΙ της χώρας (ακρωνύμιο NANO-LIQ, στο πλαίσιο του προγράμματος ΘΑΛΗΣ).

Η παρούσα εργασία εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο αυτής της ερευνητικής προσπάθειας και έχει δύο βασικούς στόχους: α) να γίνει μια κριτική αξιολόγηση της διεθνούς βιβλιογραφίας για τα πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμές σε εδαφικά στοιχεία, στοχεύοντας στην κατοχύρωση της μηχανικής συμπεριφοράς του νέου γεωϋλικού που ονομάζεται σταθεροποιημένο έδαφος, και β) να διερευνηθούν οι δυνατότητες προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς του ως άνω νέου γεωϋλικού με ευφυή χρήση υπαρχόντων ελαστοπλαστικών προσομοιωμάτων κρίσιμης κατάστασης για άμμους.

Πιο συγκεκριμένα, αρχικώς γίνεται μια αναφορά σε πιθανούς σταθεροποιητές, μα η έμφαση δίνεται στο κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (colloidal silica) που αποτελεί τον σταθεροποιητή που έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρον στη σχετική διεθνή βιβλιογραφία. Παρουσιάζονται εκτενώς τα χημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του, και υποδεικνύονται οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν το χρόνο γέλης του, όπως το ποσοστό κατά βάρος στο διάλυμα (CS%), το pH του διαλύματος, και το ιονικό σθένος.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά των πέντε (5) άμμων που έχουν σταθεροποιηθεί στη βιβλιογραφία, και για τις οποίες έχουν γίνει αποσπασματικά διαφορετικών ειδών δοκιμές. Η συναξιολόγηση των αποτελεσμάτων για διαφορετικές

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

άμμους υποδεικνύει ότι το νέο γεωϋλικό (άμμος σταθεροποιημένη με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου) αποκτά αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη (που αυξάνει με το CS%), και εμφανίζει σαφώς πιο δύσμητη και πιο διαστολική συμπεριφορά από τη φυσική άμμο στις ίδιες αρχικές συνθήκες. Επιπλέον εμφανίζει μικρή αύξηση στις τιμές του ελαστικού μέτρου διάτμησης G_{max} , αλλά καμία ουσιώδη επίδραση στις καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης G/G_{max} και αύξησης της υστερητικής απόσβεσης D με την ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση γ . Από ανακυκλικές δοκιμές προκύπτει ότι το νέο γεωϋλικό εμφανίζει ρευστοποίηση σε πολύ μεγαλύτερες τιμές του λόγου ανακυκλικών τάσεων CSR, συγκριτικά με την ίδια άμμο στις ίδιες συνθήκες.

Με βάση όλα τα ανωτέρω, προκύπτει ότι η επίδραση της σταθεροποίησης στη μηχανική συμπεριφορά ενός μη-συνεκτικού εδάφους μπορεί να αποδοθεί ποιοτικά ως αντίστοιχη μιας «ψευδο-αύξησης» της σχετικής πυκνότητας του φυσικού εδάφους. Αυτή η πρώτη αδρή προσέγγιση αποτέλεσε τη βάση της προσπάθειας προσομοίωσης με χρήση ενός υπάρχοντος καταστατικού προσομοιώματος οριακής επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης που έχει αποδεδειγμένα τη δυνατότητα προσομοίωσης (τουλάχιστον) της μονοτονικής συμπεριφοράς άμμων με την ίδια ομάδα σταθερών ανεξαρτήτως αρχικών συνθηκών. Οι προσομοιώσεις υποδεικνύουν ότι πράγματι είναι δυνατή ποιοτικά η προσομοίωση του σταθεροποιημένου εδάφους ως «ψευδο-πυκνότερο» του φυσικού. Ποσοτικά όμως η όλη προσομοίωση απέχει απ' την ακρίβεια, δεδομένου ότι η αναγκαία «ψευδο-αύξηση» της σχετικής πυκνότητας δε μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια, ενώ διαφαίνεται και ανάγκη αλλαγής στις τιμές των σταθερών του προσομοιώματος ειδικώς για ανακυκλική φόρτιση.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	2
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
1.1 Η έννοια της παθητικής σταθεροποίησης μη συνεκτικών εδαφών	6
1.2 Σκοπός και διάρθρωση της εργασίας.....	9
2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΙΘΑΝΩΝ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΩΝ.....	11
2.1 Χημικά χαρακτηριστικά διάφορων σταθεροποιητών.....	11
2.1.1 Ενέματα μικρό-τσιμεντοκονιαμάτων	11
2.1.2 Χημικά ενέματα	11
2.1.3 Διαλύματα αργιλικών πλακιδίων	13
2.2 Χαρακτηριστικά κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου.....	15
2.2.1 Μέτρηση χρόνου γέλης και ιξώδους.....	19
3 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΑΜΜΩΝ.....	22
3.1 Φυσικά χαρακτηριστικά αμμων και ειδη δοκιμων	22
3.2 Μονοτονική συμπεριφορά	25
3.3 Αντοχή σε ανεμποδιστή θλιψη (πριν το σεισμό).....	26
3.4 Δυναμική συμπεριφορά.....	29
3.4.1 Μετρήσεις Vs σε δοκιμές φυγοκεντρίστη	29
3.4.2 Μετρήσεις σε δοκιμές Στήλης Συντονισμού.....	36
3.5 Ανακυκλική συμπεριφορά.....	43
3.5.1 Γήρανση.....	43
3.5.2 Ανακυκλική διατμητική συμπεριφορά.....	45
3.5.3 Τριαξονικές δοκιμές.....	49
3.5.4 Απλή Διάτμηση	56
3.6 Μετασεισμική συμπεριφορά.....	65
4 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΑΜΜΩΝ.....	68
4.1 Το επιλεγεν καταστατικό προσομοίωμα και η ακρίβεια του	68
4.2 Προσομοίωση Ανακυκλικής Φορτίσης	73
4.2.1 Πρώτη προσεγγίση	73
4.2.2 Δευτερη προσεγγίση	76
4.2.3 Τελική προσεγγίση.....	77

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

4.3	Προσομοίωση Μονοτονικής Φορτίσης.....	84
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	86
	Βιβλιογραφία	88
6	Appendix.....	91
6.1	$P_{INI} = 50$ kpa	92
6.1.1	$e = 0.597$ και $z_{max} = 4$	92
6.1.2	$e = 0.597$ και $z_{max} = 20$	96
6.1.3	$e = 0.67$ και $z_{max} = 12$	99
6.1.4	$e = 0.68$ και $z_{max} = 11$	103
6.1.5	$e = 0.7$ και $z_{max} = 4$	107
6.1.6	$e = 0.7$ και $z_{max} = 10$	111
6.1.7	$e = 0.825$ και $z_{max} = 4$	115
6.2	$P_{INI} = 100$ kpa	117
6.2.1	$e = 0.597$ και $z_{max} = 20$	117
6.2.2	$e = 0.67$ και $z_{max} = 12$	121
6.2.3	$e = 0.68$ και $z_{max} = 11$	125
6.2.4	$e = 0.825$ και $z_{max} = 4$	129
6.3	$P_{INI} = 200$ kpa	131
6.3.1	$e = 0.597$ και $z_{max} = 20$	131
6.3.2	$e = 0.67$ και $z_{max} = 12$	135
6.3.3	$e = 0.68$ και $z_{max} = 11$	139
6.3.4	$e = 0.825$ και $z_{max} = 4$	143

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΗΣ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Η ρευστοποίηση μη συνεκτικών εδαφών (αμμοχάλικων, άμμων, μιγμάτων αμμοιλύων, μη-πλαστικών ιλύων) θεωρείται σήμερα μια εκ των πλέον σημαντικών αιτιών δομικών αστοχιών κατά τη διάρκεια σεισμικών διεγέρσεων. Για τον λόγο αυτό την παρούσα χρονική στιγμή δεν έχει γίνει επιστημονικά αποδεκτός ο σχεδιασμός συνήθων κτηρίων σε καθεστώς σεισμικής ρευστοποίησης. Έτσι, οι αντισεισμικοί κανονισμοί που είναι εν ισχύ στη χώρα μας (ΕΑΚ, EC8) ορίζουν ότι θα πρέπει πρώτα να επιτευχθεί αποτροπή της ρευστοποίησης μέσω βελτίωσης του εδάφους και μετά να γίνει η κατασκευή του συνήθους κτηρίου. Η αποτροπή της σεισμικής ρευστοποίησης μη συνεκτικών εδαφών σε θέσεις νέων κατασκευών δεν παρουσιάζει τεχνικά προβλήματα και γίνεται επιλέγοντας από μια σειρά καθιερωμένες μεθοδολογίες που στηρίζονται στη συμπίκνωση (π.χ. δυναμική συμπίκνωση, βαθιά δονητική συμπίκνωση ή αντικατάσταση), τη σταθεροποίηση (π.χ. βαθιά εδαφική ανάμιξη) ή την αποτόνωση των σεισμικών υπερπιέσεων πόρων (π.χ. χαλικο-στραγγιστήρια).

Όμως υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου ο κίνδυνος ρευστοποίησης εντοπίζεται μετά την κατασκευή των κτηρίων. Για παράδειγμα, τα παραλιακά μέτωπα πολλών πόλεων και στη χώρα μας έχουν κατασκευασθεί σε μεγάλο βαθμό κατά τη διάρκεια των δεκαετιών 1960 και 1970 κατά τις οποίες η μελέτη της σεισμικής ρευστοποίησης μόλις ξεκινούσε διεθνώς. Σε τέτοιες θέσεις υφισταμένων κατασκευών, η χρήση των περισσότερων από τις υπάρχουσες μεθοδολογίες βελτίωσης είναι είτε δυσχερής ή αδύνατη. Η δυσχέρεια συνίσταται σε περιορισμούς λόγω παράλληλης χρήσης, αν η κανονική λειτουργία της κατασκευής δε μπορεί να συνδυαστεί με εργασίες βελτίωσης (π.χ. σε νοσοκομεία). Η αδυναμία συνδέεται με πιθανές δομικές ζημιές που μπορούν να προκληθούν στην υπάρχουσα κατασκευή από τη χρήση δονητικών ή δυναμικών μεθόδων βελτίωσης, αλλά και στην έλλειψη χώρου για την εγκατάσταση και χρήση του αναγκαίου εξοπλισμού (π.χ. σε συνεχή αστική δόμηση, ή εντός της κάλυψης του κτηρίου). Έτσι, σε θέσεις υφισταμένων κατασκευών, οι πλέον συνήθεις μεθοδολογίες βελτίωσης έναντι σεισμικής ρευστοποίησης είναι:

(α) η τοποθέτηση μικροπασσάλων (underpinning),

(β) η εισπίεση ενεμάτων (grouting) υψηλού ιξώδους μέσω γειτονικών γεωτρήσεων, και τελευταίως,

(γ) η έμπηξη στραγγιστηρίων διακορευμένων πλαστικών σωλήνων (perforated drains)

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

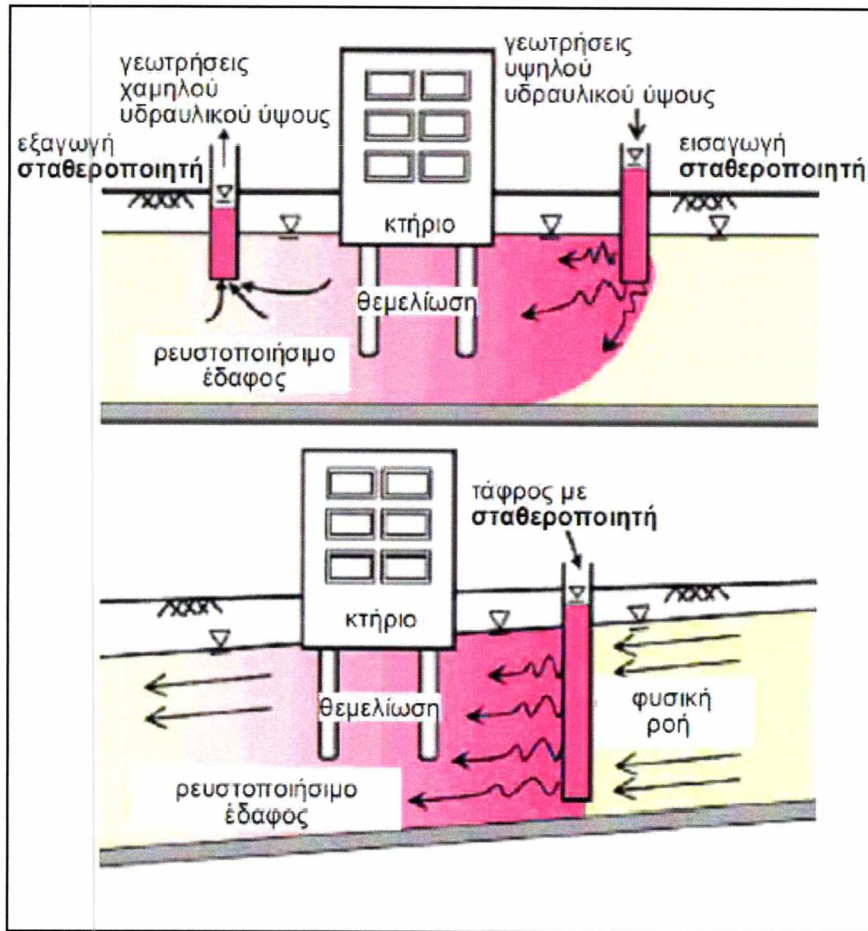
Ωστόσο, ακριβώς λόγω της ύπαρξης του κτηρίου, οι μεθοδολογίες αυτές δεν μπορούν ευχερώς να βελτιώσουν το έδαφος σε ολόκληρη την κάτοψή του, ενώ μπορούν να δημιουργήσουν και προβλήματα (π.χ. η εισπίεση ενεμάτων μπορεί να προκαλέσει ανασήκωμα θεμελίων). Επιπλέον, κατά τη διάρκεια των εργασιών της βελτίωσης προκαλούνται δυσχέρειες στην κανονική λειτουργία της κατασκευής και η βελτίωση μεγάλων περιοχών αποδεικνύεται σχετικά υψηλού κόστους.

Μια νέα τεχνική βελτίωσης του εδάφους θεμελίωσης, κυρίως υφισταμένων, κατασκευών είναι η παθητική σταθεροποίηση (passive stabilization), κατά την οποία ένας σταθεροποιητής (stabilizer) εισάγεται μέσω διήθησης χαμηλής υδραυλικής κλίσης στο ρευστοποιήσιμο έδαφος θεμελίωσης ολόκληρης της περιοχής μιας υφιστάμενης κατασκευής. Ο εμπλουτισμός του υγρού των πόρων του ρευστοποιήσιμου εδάφους με τον σταθεροποιητή (περιβαλλοντικώς ασφαλή νανο-σωματίδια, με διάφορες πιθανές μορφές χημικής σύστασης, π.χ. κολλοειδές οξείδιο πυριτίου, αργιλικά ορυκτά, μικρο-οργανισμοί) αλλάζει τη μηχανική συμπεριφορά του συστήματος εδαφικού σκελετού – υγρού πόρων, καθιστώντας το λιγότερο ευάλωτο σε ανάπτυξη σημαντικών σεισμικών υπερπιέσεων πόρων, που είναι η αιτία της (σχεδόν ολοκληρωτικής) απώλειας της διατμητικής αντοχής του εδάφους και των καταστροφικών συνεπειών που έχει αυτή για την κατασκευή.

Η διήθηση του σταθεροποιητή μπορεί να γίνει μετά από διάνοιξη φρέατος και μέσω της φυσικής ροής του υγρού των πόρων, ή με μεταβολή αυτής με τη χρήση γεωτρήσεων υψηλού και χαμηλού υδραυλικού ύψους εκατέρωθεν της κατασκευής (Σχήμα 1.1). Λόγω της χρήσης διήθησης χαμηλής υδραυλικής κλίσης και όχι εισπίεσης, δεν υπάρχουν επιδράσεις στη θεμελίωση.

Ταυτόχρονα όμως, ο σταθεροποιητής θα πρέπει να έχει χαμηλή τιμή αρχικού ιξώδους, η οποία θα αυξάνει όταν αυτός φθάσει στην επιθυμητή θέση (αυτή είναι και η βασική διαφορά με τα συνήθη ενέματα, τα οποία έχουν αρχικώς υψηλό ιξώδες και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πασσάλων ενέματος, και δε διηθούνται σε ολόκληρη την περιοχή). Συνεπώς, με χρήση της παθητικής σταθεροποίησης η βελτίωση δεν έχει πλέον τοπικό χαρακτήρα, ενώ δεν παρενοχλείται η λειτουργία της υπάρχουσας κατασκευής. Για τους λόγους αυτούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη βελτίωση του εδάφους σε μικρά βάθη και γύρω από αστικές υποδομές, όπως αγωγοί, δίκτυα κάτω από οδοστρώματα. Επιπλέον, το κόστος της διαδικασίας βελτίωσης αναμένεται χαμηλό και πρακτικώς να είναι συγκρίσιμο με την εισπίεση οποιουδήποτε χημικού ενέματος (chemical grouting), αλλά με τη διαφορά ότι δεν υπάρχει ανάγκη χρήσης εξειδικευμένου εξοπλισμού ή προσωπικού.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



Σχήμα 1.1 Σκαριφήματα που υποδεικνύουν τη διαδικασία εκτέλεσης παθητικής σταθεροποίησης α) με χρήση γεωτρήσεων υψηλού και χαμηλού υδραυλικού ύψους, β) με χρήση της φυσικής ροής (βασισμένο σε σχήματα των Ramuk et al 2008)

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, ένα βασικό κριτήριο για την επιλογή ενός νανο-υλικού ως σταθεροποιητή είναι να έχει χαμηλό ιξώδες για να μπορέσει να διηθηθεί επαρκώς. Σε περίπτωση που πρέπει να αλλάξει ιξώδες για να επιτευχθεί η βελτίωση, η αλλαγή θα πρέπει να γίνεται μετά τη διήθηση του σταθεροποιητή στην επιθυμητή θέση. Επιπλέον, ο σταθεροποιητής θα πρέπει να έχει διάρκεια ζωής, να είναι μη-τοξικός και επαρκώς φθηνός. Με βάση τα ανωτέρω κριτήρια, ως πιθανοί σταθεροποιητές προκρίνονται κατ' αρχήν το κολλοειδές οξείδιο πυριτίου (colloidal silica), σταθεροποιητής ο οποίος ερευνήθηκε αναλυτικά στην παρούσα εργασία, αργιλικά πλακίδια νανοειδών διαστάσεων (nano-clay particles), χημικά ενέματα (chemical grouts) και ο αδρανής σίδηρος (zero-valent iron). Σύμφωνα με την Gallagher (2000), μια σειρά από χημικά ενέματα αποκλείονται για διαφορετικούς λόγους (π.χ. το πυριτικό νάτριο (sodium silicate) επειδή αλλάζει ιξώδες γρήγορα, το ακριλαμίδιο (acrylamide) επειδή είναι τοξικό αλλά και ακριβό. Επιπλέον, ο αδρανής σίδηρος αποκλείεται επειδή είναι εξαιρετικά ευαίσθητος σε οξείδωση, και συνεπώς υπάρχει θέμα διάρκειας ζωής της

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

βελτίωσης. Συνεπώς, ακόμη δεν έχει διερευνηθεί πλήρως ποιος σταθεροποιητής μπορεί να θεωρηθεί ως βέλτιστος.

Σε κάθε περίπτωση, η νέα αυτή τεχνική βελτίωσης πρωτοεμφανίστηκε ως ιδέα στη διεθνή βιβλιογραφία στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας και βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο εξέλιξης παγκοσμίως. Παρόλα αυτά διαφαίνεται ότι έχει σημαντικά προτερήματα, και αν καταστεί στο μέλλον πρακτικώς εφαρμόσιμη θα αποτελέσει ισχυρό εργαλείο για την απομείωση του σεισμικού κινδύνου κατοικημένων περιοχών της χώρας μας, αλλά και διεθνώς.

1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το να καταστεί η νέα αυτή τεχνική βελτίωσης εδαφών πρακτικώς εφαρμόσιμη αποτελεί το βασικό στόχο ενός μεγάλου ερευνητικού προγράμματος που εκπονείται από το Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, σε συνεργασία με άλλα ΑΕΙ της χώρας. Η παρούσα εργασία εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο αυτού του προγράμματος, και οι δύο βασικοί στόχοι αυτής είναι:

Α) να γίνει μια κριτική αξιολόγηση της διεθνούς βιβλιογραφίας για τα πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμές σε εδαφικά στοιχεία, στοχεύοντας στην κατοχύρωση της μηχανικής συμπεριφοράς του νέου γεωϋλικού που ονομάζεται σταθεροποιημένο έδαφος (με χρήση κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου)

Β) να διερευνηθούν οι δυνατότητες προσομοίωσης της μηχανικής συμπεριφοράς του ως άνω νέου γεωϋλικού με ευφυή χρήση υπαρχόντων ελαστοπλαστικών προσομοιωμάτων κρίσιμης κατάστασης για άμμους

Έτσι, στο Κεφάλαιο 2 γίνεται περιγραφή των χαρακτηριστικών πιθανών σταθεροποιητών, αλλά η έμφαση δίνεται στην αναλυτική περιγραφή του συνήθως χρησιμοποιούμενου στη βιβλιογραφία σταθεροποιητή, του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου (colloidal silica).

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα φυσικά χαρακτηριστικά άμμων που έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία σε δοκιμή παθητικής σταθεροποίησης, ενώ η έμφαση δίνεται σε αποτελέσματα από δοκιμές σε σταθεροποιημένες άμμους υπό μονοτονική, δυναμική και ανακυκλική φόρτιση με στόχο την κατοχύρωση της συμπεριφοράς του νέου γεωϋλικού και τον εντοπισμό άγνωστων πτυχών αυτής.

Κατόπιν, στο Κεφάλαιο 4 γίνεται περιγραφή ενός σύγχρονου ελαστοπλαστικού προσομοιώματος κρίσιμης κατάστασης για άμμους και της ακρίβειας του, και στη συνέχεια χρησιμοποιείται ευφυώς (με στοχευμένες αλλαγές σε σταθερές και παραμέτρους κατάστασης) με στόχο την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς του σταθεροποιημένου εδάφους, έστω σε ένα πρώτο αδρό ποιοτικό επίπεδο.

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 καταγράφονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας και δίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα στο ίδιο αντικείμενο.

2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΙΘΑΝΩΝ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΩΝ

2.1 ΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΤΩΝ

Εκτός από το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (παρ. 2.2) υπάρχουν και άλλοι σταθεροποιητές που μπορούν, εν δυνάμει, να χρησιμοποιηθούν για την βελτίωση των εδαφών έναντι ρευστοποίησης, και, τα χημικά κυρίως, χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται εδώ περιληπτικά.

2.1.1 ΕΝΕΜΑΤΑ ΜΙΚΡΟ-ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ

Η βασική διαφορά των μικρό-τσιμεντοκονιαμάτων έναντι των συνήθων τσιμεντοκονιαμάτων βρίσκεται στο μέγεθος των σωματιδίων που τα απαρτίζουν. Το μέγεθος αυτό είναι 3-4 μm έναντι 20 μm (Clarke 1987). Το πλεονέκτημα βρίσκεται στο ότι λόγω του μικρού μεγέθους, το ένεμα μπορεί να εισχωρήσει ευκολότερα και αποτελεσματικότερα σε εδάφη με μικρότερο πορώδες. Όμως, τα σωματίδια του τσιμεντοκονιάματος έχουν την τάση να δημιουργούν συσσωματώσεις κατά την ανάμειξη τους με το νερό. Έτσι, είναι απαραίτητη η χρήση προσθετικών για την αποφυγή τους. Ακόμη η μίξη τους πρέπει να γίνεται με αναδευτήρες υψηλής ταχύτητας για την εξασφάλιση δημιουργίας δίνης, που είναι απαραίτητη για την σωστή ανάμειξη των τσιμεντοκονιαμάτων (Houlsby 1982). Η σταθερότητα και η ρευστότητα του τσιμεντοκονιάματος εξαρτώνται από το λόγο νερού-τσιμέντου και από τα διάφορα προσθετικά. Η μείωση του ιξώδους του μίγματος γίνεται με την προσθήκη νερού, που οδηγεί όμως στην μείωση της σταθερότητας, ή την ανάγκη χρήσης ειδικών προσθετικών για την αύξηση της πυκνότητας (Gause and Bruce 1997, DePaoli et al 1992, Naudts 1996). Ωστόσο, διάφορα προσθετικά, όπως ο μπετονίτης, αυξάνουν την σταθερότητα με παράλληλη αύξηση του ιξώδους και της συνεκτικότητας του τσιμεντοκονιάματος που δεν είναι πάντα επιθυμητές παρενέργειες. Γενικότερα, πρέπει να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός έτσι ώστε η αύξηση της σταθερότητας του μίγματος να επιτυγχάνεται με μικρή αλλαγή στο ιξώδες και τη συνεκτικότητα. Το κόστος των ενεμάτων μικρο-τσιμέντου είναι 100-200\$ ανά κυβικό μέτρο ρευστοποιημένου εδάφους, δηλαδή είναι αρκετά φθηνό.

2.1.2 ΧΗΜΙΚΑ ΕΝΕΜΑΤΑ

Μια περιεκτική αναφορά σε χημικά ενέματα παρουσιάζεται από την Gallagher (2000). Εδώ παρουσιάζεται μια συνεκτική περίληψη αυτών, και πιο συγκεκριμένα:

2.1.2.1 Πυριτικό νάτριο (Sodium Silicate)

Το πυριτικό νάτριο δημιουργείται από την καύση πυριτικής άμμου και ανθρακικού νατρίου σε υψηλές θερμοκρασίες και στη συνέχεια της διάλυσης του μίγματος σε νερό

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

(Pier et al 1979) . Με την προσθήκη κατάλληλων καταλυτών, όπως το διπανθρακικό, δημιουργείται γέλη. Για την αύξηση της αντοχής της γέλης χρειάζεται μεγαλύτερη αναλογία σε πυρίτιο ή προσθήκη οργανικών καταλυτών, όπως το φορμαμίδιο, κάποιιο από τους οποίους είναι τοξικοί (Naudts 1996, Whang 1995). Ακόμη ο χρόνος γέλης μπορεί να ελεγχθεί για μερικά λεπτά, αλλά όχι για μεγαλύτερους χρόνους. Τέλος, μετά την εφαρμογή δεν έχει αποδειχθεί η σταθερότητα της γέλης, καθώς λόγω της διαφυγής νερού μειώνεται ο όγκος της (Yonekura and Miwa 1993) και ακόμη, εξαιτίας της ύπαρξης αδρανούς νατρίου παρατηρείται το φαινόμενο της αντίστροφης αδρανοποίησης του μίγματος κάτι που προκαλεί την αλλοίωση της αντοχής της γέλης. Η αντίστροφη αδρανοποίηση παρατηρήθηκε σε διαλύματα με υψηλό χρόνο γέλης (Karol 1990). Ο χρόνος ζωής εκτιμάται στα 10 με 20 έτη (Whang 1995). Το κόστος για την σταθεροποίηση των εδαφών με πυριτικό νάτριο είναι 180 \$ ανά κυβικό μέτρο σταθεροποιημένου εδάφους και περιεκτικότητα 35 % κατά βάρος, δηλαδή είναι αρκετά φθηνό.

2.1.2.2 Ακρυλιμίδιο (Acrylamide)

Το ακρυλιμίδιο είναι μίξη οργανικών μονομερών που μπορεί να πολυμεριστεί με τη χρήση καταλυτών σε κατάλληλες συνθήκες (Karol 1990). Έχει πολλά θετικά όπως η πυκνότητα, το χαμηλό ιξώδες (σχεδόν ίδιο με αυτό του νερού), και εύκολα ελεγχόμενους χρόνους γέλης. Είναι αδρανές κάτι που συνεπάγεται και σταθερότητα στη δομή μετά την εφαρμογή του. Ωστόσο είναι τοξικό και δεν πρέπει να έρθει σε επαφή με πόσιμο νερό. Το κόστος για την βελτίωση των εδαφών με ακρυλιμίδιο είναι 500 \$ ανά κυβικό μέτρο σταθεροποιημένου εδάφους και περιεκτικότητας σε 35 % κατά βάρος (Avanti International 1999), δηλαδή είναι σχετικώς ακριβό.

2.1.2.3 Ακρυλικό (Acrylate)

Η γέλη του ακρυλικού αρχικά είχε χρησιμοποιηθεί ως λιγότερο τοξικό συστατικό από το ακρυλιμίδιο, ενώ έχει χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο διαρροών αποβλήτων. Το ακρυλικό είναι εν πολλοίς όμοιο με το ακρυλιμίδιο, με λίγο μεγαλύτερο ιξώδες, ωστόσο ο χρόνος γέλης του δεν είναι τόσο εύκολα ελεγχόμενος και η αντοχή του είναι λίγο μικρότερη. Ακόμη είναι αρκετά λιγότερο τοξικό και γι' αυτό αντικατέστησε το ακρυλιμίδιο σε πολλές εφαρμογές. Το ιξώδες του παραμένει χαμηλό την περισσότερη περίοδο του χρόνου επαγωγής. Επιπλέον, ο Karol (1990) υποστήριξε ότι τα ακρυλικά ενέματα μπορούν να αναμειχθούν με ακρυλικά άλατα. Όλα τα ενέματα χρειάζονται οξειδοαναγωγικό καταλυτικό σύστημα (τριαιθανολαμίνη και υπερθειικό αμμώνιο) και σιδηροκυανιούχου κάλιο ως επιβραδυντή. Οι επιβραδυντές μπορούν να εξασφαλίσουν χρόνο γέλης έως και 6 ώρες. Επίσης το ακρυλικό είναι χημικά και μηχανικά σταθερό.. Ο χρόνος ζωής εκτιμάται στα 10 με 20 έτη (Whang 1995). Το κόστος για την σταθεροποίηση των εδαφών με ακρυλικό είναι 325 \$ ανά κυβικό μέτρο σταθεροποιημένου εδάφους και περιεκτικότητα 35 % κατά βάρος (Whang 1995), δηλαδή δεν είναι ιδιαίτερα φθηνό.

2.1.2.4 Ενέματα διαλύματος σιδήρου (Iron Precipitation Grouts)

Οι Harka και Whang (1996) και ο Whang (1995) ανέπτυξαν τη θεωρία τους σχετικά με την χρησιμοποίηση για περιβαλλοντολογικές εφαρμογές ενεμάτων με διαλύματα

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

υδροξειδίου του σιδήρου. Αυτά τα ενέματα αναπτύχθηκαν για να αξιοποιούν τα συγκεντρωμένα διαλύματα σιδήρου σε απόβλητα χαμηλού pH. Αυτό επιτυγχάνεται με την αύξηση του pH. Για τη σταθεροποίηση του υλικού των αποβλήτων για μεταφορά, το pH των αποβλήτων αυξάνει περίπου σε 3 και κιτρικό οξύ προστίθεται ώστε να διατηρήσει τον σίδηρο σε διάλυμα. Οι χρόνοι σταθεροποίησης μετρήθηκαν έως 5 ώρες αλλά και περισσότερο. Το ιξώδες του ενέματος είναι περίπου 1cP. Εκτιμάται ότι έχει μεγάλη αντοχή κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Το κόστος για την ρευστοποίηση των εδαφών με ενέματα διαλύματος σιδήρου είναι 250\$ ανά κυβικό μέτρο σταθεροποιημένου εδάφους και περιεκτικότητα 35 % κατά βάρος (Whang 1995), δηλαδή είναι σχετικώς φθηνό..

2.1.2.5 Εποξύ (Epoxy)

Υπάρχει νέος τύπος εποξέος που σχεδιάστηκε για να χρησιμοποιηθεί ως ένεμα (Whang 1995). Το ιξώδες του είναι 5-20 cP και είναι πολύ χαμηλό σε σχέση με άλλα εποξέα. Όταν αναμιχτεί με νερό δημιουργεί γέλη που μοιάζει με πολυουρεθάνη. Το εποξύ είναι μη τοξικό και δεν χρειάζεται ιδιαίτερη ασφάλεια και κατάρτιση για την εφαρμογή του αλλά και μετά το πέρας αυτής. Ο μέγιστος χρόνος που απαιτείται για να δημιουργηθεί η γέλη είναι 8 ώρες και ο χρόνος ζωής ξεπερνά τα 25 έτη. Το κόστος για την ρευστοποίηση των εδαφών με εποξύ είναι 2200\$ ανά κυβικό μέτρο ρευστοποιημένου εδάφους και περιεκτικότητα 35 % κατά βάρος (Whang 1995), δηλαδή είναι εξαιρετικά ακριβό.

2.1.2.6 Πολυσιλοξάνιο (Polysiloxane)

Το πολυσιλοξάνιο έχει ως βάση του το πυρίτιο και είναι μη τοξικό, χημικά και βιολογικά αδρανές. Το ιξώδες του είναι υψηλό, 10-35 cP, και εξαρτάται από το μήκος των πολυμερών αλυσίδων. Με την προσθήκη επιβραδυντών μπορεί να ελεγχθεί ο χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία γέλης. Η αντοχή του εκτιμάται ότι είναι πολύ μεγάλη και ο χρόνος ζωής του ξεπερνά τα 25 έτη. Το κόστος για την σταθεροποίηση των εδαφών με πολυσιλοξάνιο είναι 1400 \$ ανά κυβικό μέτρο ρευστοποιημένου εδάφους και περιεκτικότητα 35 % κατά βάρος (Whang 1995), δηλαδή είναι πολύ ακριβό

2.1.3 ΔΙΑΛΥΜΑΤΑ ΑΡΓΙΛΙΚΩΝ ΠΛΑΚΙΔΙΩΝ

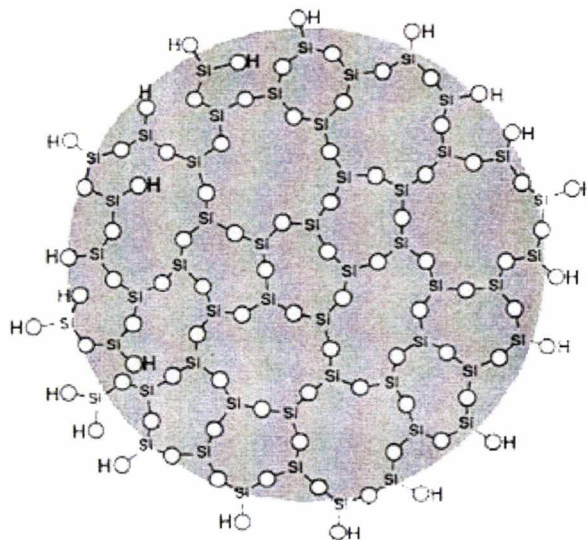
Σύμφωνα με τους (El Mohtar, 2008) ως σταθεροποιητές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και διαλύματα αργιλικών πλακιδίων όπως ο μπετονίτης. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση μπετονίτη (αργιλικών πλακιδίων υψηλής πλαστιμότητας) σε μικρά ποσοστά κατά βάρος (3-5%) σε νερό δημιουργεί ένα θιξοτροπικό (thixotropic) υγρό πόρων. Το θιξοτροπικό αυτό υγρό πόρων αποκτά επαρκώς μικρό ιξώδες που να επιτρέπει τη διήθησή του, μόνο μετά από χημική διαφοροποίησή του με πυροφωσφορικό άλας νατρίου (sodium pyrophosphate). Η εν λόγω χημική διαφοροποίησή του δεν είναι μόνιμη, δεδομένης της υδρόλυσης του πυροφωσφορικού άλατος του νατρίου, και έτσι μακροπρόθεσμα το υγρό των πόρων με μπετονίτη επανακτά τη θιξοτροπική του σύσταση. Μάλιστα, αν το σταθεροποιημένο εδαφικό υλικό ρευστοποιηθεί λόγω μιας ισχυρότατης σεισμικής διέγερσης, η αντοχή του επανέρχεται, συν τω χρόνω, στην τιμή του μόλις σταθεροποιημένου εδάφους (αυτοθεραπευόμενο υλικό), μια ιδιαίτερα

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

χρήσιμη ιδιότητα. Όπως αναφέρεται ανωτέρω, το πρόβλημα διηθησιμότητας που εμφανίζει το διάλυμα μπετονίτη έχει αντιμετωπισθεί με χρήση πυροφωσφορικού άλατος του νατρίου. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθούν άλλα αργιλικά νάνο-σωματίδια μικρότερων διαστάσεων, όπως ο λαπονίτης (Iaponite), δηλαδή μια συνθετική, περιβαλλοντικά αδρανής, άργιλος υψηλής πλαστιμότητας, με πλακίδια που έχουν διάμετρο 25nm και πάχος 1nm, δηλαδή μια τάξη μεγέθους μικρότερα από τα πλακίδια του μπετονίτη. Σχετικές δοκιμές για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας της χρήσης λαπονίτη, ή άλλου αργιλικού υλικού αντίστοιχα μικρότερης διαμέτρου πλακιδίων, δεν έχουν βρεθεί στη βιβλιογραφία. (Haldavnekar,2004)

2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΟΛΛΟΕΙΔΟΥΣ ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

Ο όρος κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (colloidal silica) δεν αντιστοιχεί σε ένα και μόνο προϊόν. Πιο συγκεκριμένα, στη βιβλιογραφία έχουν δοκιμαστεί τρία (3) διαφορετικά είδη κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου, και τα οποία διερευνήθηκαν ως προς το ιξώδες και τους χρόνους γέλης τους, για να εντοπιστεί το βέλτιστο είδος προς χρήση για την παθητική σταθεροποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών. Τα διαλύματα κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου που επιλέχθηκαν



Σχήμα 2.1 Σχηματική απεικόνιση ενός μορίου του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου. (Silco International 2005)

για τις δοκιμές ήταν τα Ludox®-SM, Ludox®-HS-40 και Ludox®-TM. Μερικές από τις σημαντικότερες ιδιότητες αυτών των σταθεροποιητών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

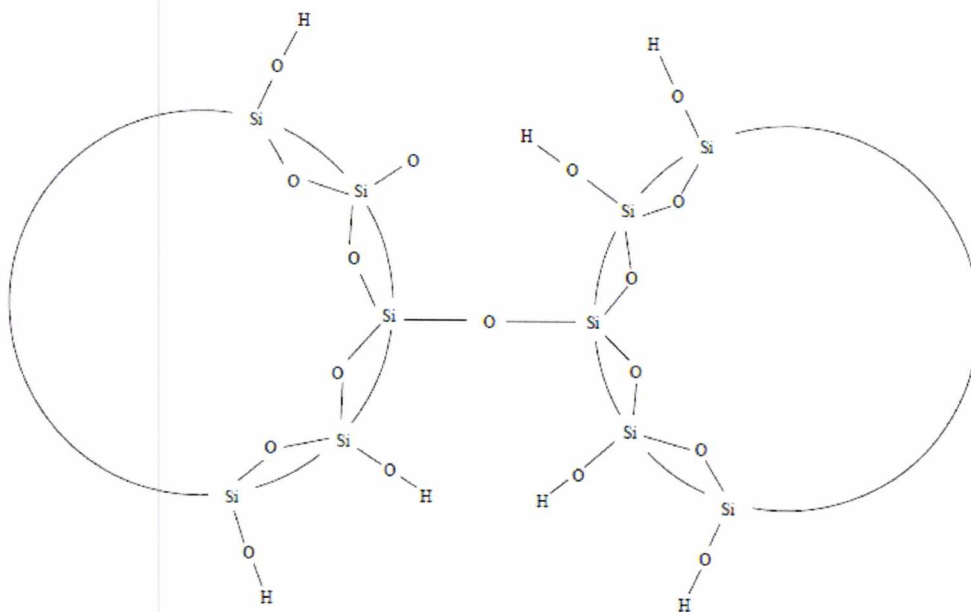
Στην παράγραφο αυτή, καθώς και σε όλη την εργασία, η έμφαση δίνεται στο κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου Ludox SM, που είναι αυτό που έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως στη βιβλιογραφία παθητικής σταθεροποίησης εδαφών. Πιο συγκεκριμένα, το Ludox SM είναι αιώρημα σε νερό, διάλυμα μικροσκοπικών σωματιδίων πυριτίου. Τα σωματίδια είναι συνήθως μεταξύ 2 και 100 nm σε μέγεθος. Σε μίγματα 5% κατά βάρος, το κολλοειδές οξείδιο πυριτίου έχει αρχικώς ιξώδες αντίστοιχο του νερού. Το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου είναι μη τοξικό, βιολογικά και χημικά αδρανές, άοσμο, μη εύφλεκτο, λευκό στο χρώμα και δεν χρειάζεται ιδιαίτερο εξοπλισμό τόσο κατά την εφαρμογή του όσο και μετά το πέρας αυτής. Επιπλέον, το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου έχει εξαιρετικά χαρακτηριστικά αντοχής. Για την καλύτερη διατήρηση του, προτείνεται η αποθήκευση του σε ξηρό περιβάλλον 20°C -25°C (Iler et al 1979, Whang 1995). Τα μόρια του είναι σφαιρικά με αρνητικό φορτίο όπως φαίνονται στο Σχήμα 2.1.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΕΙΔΟΣ CS	Ludox-SM	Ludox HS-40	Ludox TM
SiO ₂ /Na ₂ O κατά βάρος	50	95	225
Σταθεροποιητής	Νάτριο	Νάτριο	Νάτριο
Φορτίο σωματιδίων	Αρνητικό	Αρνητικό	Αρνητικό
Πυρίτιο SiO ₂ (% κατά βάρος)	30	40	50
Ιξώδες (cP)	5.5	16	40
Μέση διάμετρος σωματιδίων (nm)	7	12	22
Ειδική Επιφάνεια (m ² /g)	345	220	140

Πίνακας 2.1. Βασικά χαρακτηριστικά κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου (DuPont 1997)

Το κολλοειδές οξείδιο πυριτίου δημιουργείται όταν μόρια H₄SiO₄ αλληλεπιδρούν για να σχηματίσουν δεσμούς σιλοξάνης (Si-O-Si) με άλλα μόρια (Iler et al 1979). Οι επιφάνειες των σωματιδίων περιέχουν ομάδες σιλανόλης με ελεύθερους δεσμούς, SiOH. Όταν τα σωματίδια αλληλεπιδρούν με άλλα σωματίδια, σχηματίζουν δεσμούς σιλοξάνης μεταξύ τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.



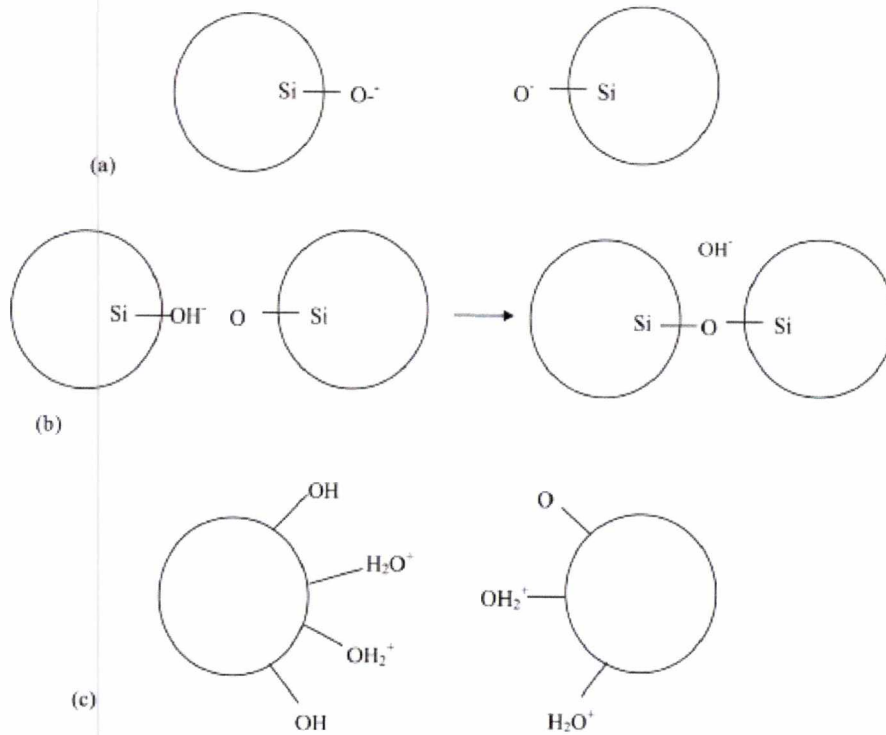
Σχήμα 2.2 Σχηματισμός δεσμών σιλοξάνης καθώς το διάλυμα του οξειδίου του πυριτίου μετατρέπεται σε γέλη. (Moridis et al. 1995)

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

Στη συνέχεια και όταν τα σωματίδια αυξηθούν στο επιθυμητό μέγεθος, το διάλυμα μπορεί να σταθεροποιηθεί με την αύξηση του pH για να αποφευχθεί η περαιτέρω ανάπτυξη των σωματιδίων. Η αύξηση του pH κάνει τα μόρια να ιονιστούν και έτσι απωθούνται. Η δημιουργία γέλης στο υδατικό διάλυμα μπορεί να προκληθεί σε μεταγενέστερο χρόνο, μειώνοντας τις απωστικές δυνάμεις με έναν ελεγχόμενο τρόπο, που επιτρέπει στα κολλοειδή σωματίδια να πήξουν, να αυξηθούν σε μέγεθος, και τελικά να διαμορφώσουν μια πυκνή δομή. Ο χρόνος αυτός καθορίζεται από το ποσοστό της αλληλεπίδρασης των σωματιδίων μεταξύ τους.

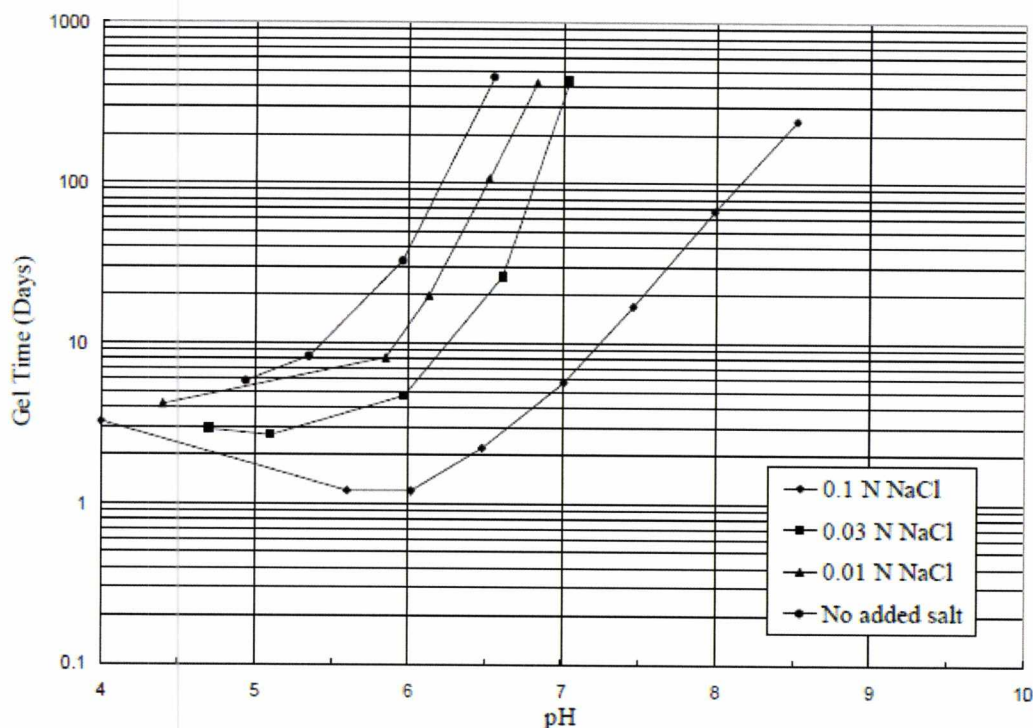
Τα διαλύματα οξειδίου του πυριτίου σταθεροποιούνται χωρίς να μετατραπούν σε γέλη χρησιμοποιώντας αλκαλικά διαλύματα, όπως το υδροξείδιο του νατρίου, NaOH. Το αλκάλιο αντιδρά με τις επιφάνειες των σωματιδίων, δημιουργώντας ένα αρνητικό φορτίο για τα σωματίδια με αποτέλεσμα την μεταξύ τους απώθηση. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο Σχήμα 2.3.a. Τα ιόντα υδροξυλίου που προστίθεται από το αλκαλικό διάλυμα θα λειτουργούσαν ως καταλύτης στην πραγματικότητα στο σχηματισμό γέλης, αλλά σε υψηλές τιμές pH το κολλοειδές πυρίτιο είναι σταθερό λόγω της υψηλής φόρτισης των σωματιδίων. Σε χαμηλότερες τιμές pH, η επιβάρυνση των σωματιδίων μειώνεται ανάλογα με τη συγκέντρωση των ιόντων υδροξυλίου στο διάλυμα. Ως εκ τούτου, τα σωματίδια μπορούν να αλληλεπιδράσουν και να σχηματίσουν δεσμούς σιλοξάνης όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.3.b. Το αποτέλεσμα είναι ότι ο ελάχιστος χρόνος γέλης, εμφανίζεται μεταξύ pH 5 και 7. Καθώς το pH συνεχίζει να μειώνεται κάτω από 5, τα ιόντα υδροξυλίου εξαφανίζονται και τα σωματίδια γίνονται αφόρτιστα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.c. Ως εκ τούτου, ο ρυθμός σχηματισμού δεσμών σιλοξάνης μειώνεται και υπάρχει μια αντίστοιχη αύξηση του χρόνου που απαιτείται για τη μετατροπή του διαλύματος σε γέλη (Gallagher 2000).

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



Σχήμα 2.3 Συμπεριφορά κολλοειδών σωματιδίων πυριτίου σε διαφορετικές τιμές pH: (a) $pH \geq 8$: O-στην επιφάνεια προκαλεί στα σωματίδια να απωθούνται, (b) $5 < pH < 8$: O-στην επιφάνεια ενός σωματιδίου δημιουργεί δεσμό με H σε άλλα σωματίδια, Si-O-Si δημιουργεί δεσμούς μεταξύ των μορίων(c) $pH < 5$: σωματίδια είναι αφόρτιστα ή απωθούνται. (Gallagher 2000)

Ο χρόνος που απαιτείται για την μετατροπή του διαλύματος οξειδίου του πυριτίου σε γέλη είναι πολύ σημαντικός, γιατί αυτός καθορίζει την αποτελεσματική εφαρμογή της παθητικής σταθεροποίησης. Ο χρόνος γέλης ορίζεται ως το χρονικό διάστημα από το τέλος της ανάμειξης μέχρι το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου να αποτελεί ένα είδος γέλης, να έχει αυξηθεί πρακτικά το ιξώδες του και να έχει πυκνή δομή. Ο χρόνος μετατροπής σε γέλη του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου εξαρτάται από το ποσοστό των αλληλεπιδράσεων των σωματιδίων μεταξύ τους, το οποίο εξαρτάται από πολλές μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένου του ποσοστού του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου στο διάλυμα, το μέγεθος των σωματιδίων και το ιονικό σθένος του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου, του pH, και της θερμοκρασίας του διαλύματος. Επιπλέον, ο χρόνος γέλης μειώνεται με: α) την αύξηση του βάρους του πυριτίου, μειώνοντας το μέγεθος των σωματιδίων, β) την αύξηση του ιονικού σθένος, καθώς και γ) με την αύξηση της θερμοκρασίας (Σχήμα 2.4). Ο χρόνος γέλης επηρεάζεται επιπλέον και από την παρουσία ιόντων στο έδαφος που θα σταθεροποιηθεί. Αν υπάρχουν ανταλλάξιμα κατιόντα στο έδαφος αυτό ίσως επηρεάζει το χρόνο γέλης. Τα κατιόντα

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Σχήμα 2.4 Καμπύλες χρόνου γέλης σε σχέση με το pH και το ιονικό σθένος. (Gallagher 2000)

αλλάζουν το ιονικό σθένος και αυτό με τη σειρά του προκαλεί αλλαγή στο χρόνο γέλης. (DuPont 1997, Gallagher 2000). Οι χρόνοι που έχουν καταγραφεί για τη μετατροπή του διαλύματος σε γέλη κυμαίνονται από 30' μέχρι 49 ημέρες (Noll et al. 1992). Η διάρκεια ζωής για το κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου ξεπερνά τα 25 έτη (Whang 1995).

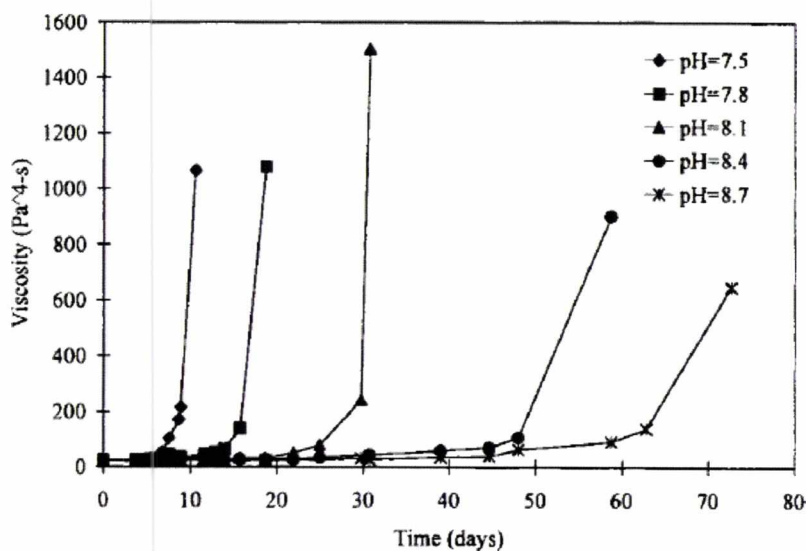
2.2.1 ΜΕΤΡΗΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΓΕΛΗΣ ΚΑΙ ΙΞΩΔΟΥΣ.

Για τη μέτρηση του χρόνου γέλης, έχουν χρησιμοποιηθεί κυλινδρικά γυάλινα δοχεία ώστε να γίνονται οπτικές παρατηρήσεις κατά την αναστροφή τους. Τοποθετήθηκε μία σφαίρα και μετρήθηκε το στάδιο γέλης ανάλογα με το χρόνο που χρειαζόταν για να μετακινηθεί η σφαίρα από την μια άκρη του κυλίνδρου στην άλλη. Αρχικά λιγότερο από 1s χρειάστηκε. Στη συνέχεια κολλούσε στο καπάκι μέχρι να πέσει από τον πυθμένα στην κορυφή του κυλίνδρου. Θεωρούμε ότι το διάλυμα μετατράπηκε σε γέλη, όταν ο χρόνος που χρειάζεται η σφαίρα από τη μία άκρη του δοχείου έως την άλλη είναι μεγαλύτερος από 15s. Η διαδικασία μετατροπής του διαλύματος σε γέλη συνεχίζεται έως ότου έχουμε άκαμπτη και ακλόνητη γέλη. Αναλυτικά τα στάδια της γέλης περιγράφονται στον Πίνακα 2.3. Στη συνέχεια, ο χρόνος που χρειάζεται η σφαίρα για να πέσει μέσα από το ένεμα δίνει μια ποσοτική ένδειξη του ιξώδους. Τέτοιου είδους παρατηρήσεις δείχνουν ότι το ιξώδες του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου παραμένει αρκετά χαμηλό μέχρι ακριβώς πριν από την μετατροπή του σε γέλη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5 (Gallagher 2000)

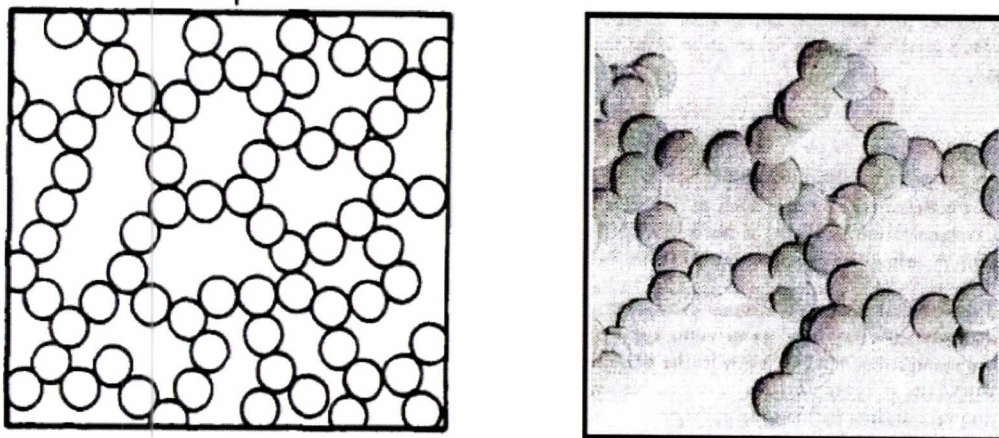
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Στάδιο γέλης	Περιγραφή
1	Καμία ανιχνεύσιμη ένδειξη γέλης. Το διάλυμα φαίνεται να έχει το ίδιο ιξώδες (ρευστότητα) με το αρχικό διάλυμα και οπτικά δε μοιάζει με γέλη.
2	Πολύ ρευστή γέλη. Εμφανίζεται να έχει ελαφρώς μεγαλύτερο ιξώδες από το αρχικό διάλυμα.
3	Ρέουσα γέλη. Ροή γέλης ανιχνεύσιμη από το καπάκι του κυλίνδρου.
4	Μέτρια ροή γέλης. Μικρό τμήμα (5-15%) της γέλης δεν ρέει εύκολα από το καπάκι του κυλίνδρου.
5	Μικρή ροή γέλης. Η γέλη ρέει αργά προς το καπάκι του κυλίνδρου και πάνω από το 15% αυτού, δεν ρέει καθόλου.
6	Μεγάλη μεταμόρφωση μη ρευστής γέλης. Η γέλη δεν ρέει έξω από το καπάκι του κυλίνδρου και μόλις που το φτάνει.
7	Μέτρια παραμόρφωση μη ρευστής γέλης. Η γέλη ρέει μέχρι τη μέση του κυλίνδρου,
8	Μικρή παραμόρφωση μη ρευστής γέλης. Μόνο η επιφάνεια της γέλης αλλάζει ελάχιστα κατά την αναστροφή.
9	Σταθερή γέλη. Δεν υπάρχει μεταμόρφωση κατά την αναστροφή.
10	Άκαμπτος δακτύλιος γέλης. Κραδασμοί μπορούν να παρατηρηθούν κατά το σφράγισμα του κυλίνδρου.
11	Άκαμπτος και ακίνητος δακτύλιος γέλης. Κανένας κραδασμός δεν παρατηρείται και η φυσική πυκνότητα της γέλης έχει αυξηθεί.

Πίνακας 2.2 Στάδια γέλης. (Sydansk 1990)



Σχήμα 2.5 Καμπύλες χρόνου γέλης για διάφορες τιμές pH. (Gallagher et al, 2007)

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Σχήμα 2.6 Δεσμοί γέλης σωματιδίων κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου.(Conlee 2010)

Το κολλοειδές οξύδιο του πυριτίου είναι ένας ιδανικός σταθεροποιητής για παθητική στερεοποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών, καθώς τα διαλύματα του έχουν χαμηλό αρχικό ιξώδες καθώς επίσης μεγάλους και ελεγχόμενους χρόνους κατά τους οποίους τα διαλύματα μετατρέπονται σε γέλη. Γίνεται κατανοητό, ότι για πρακτικούς λόγους είναι πολύ σημαντική η αποφυγή της πρόωρης μετατροπής του διαλύματος σε γέλη. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τρεις τρόπους :

1. Ξέπλυμα με αλατόνερο-άλμη
2. Η όλη διαδικασία να γίνει με χαμηλή ποσότητα σταθεροποιητή (δηλαδή αραιό διάλυμα)
3. Χρήση χλωριούχου νατρίου NaCl ή χλωριούχου φθορίου NaF

Το κόστος του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου ανέρχεται στα 60 \$ για 5 % κατά βάρος ανά κυβικό μέτρο εδάφους, δηλαδή πρόκειται για τον φθηνότερο σταθεροποιητή από όλους όσους παρουσιάστηκαν.

3 ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΑΜΜΩΝ

3.1 ΦΥΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΜΜΩΝ ΚΑΙ ΕΙΔΗ ΔΟΚΙΜΩΝ

Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται μια προσπάθεια συλλογής των δεδομένων διαφόρων δοκιμών που έχουν εκτελεστεί τα τελευταία χρόνια στη βιβλιογραφία και αφορούν τη μηχανική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων άμμων έναντι ρευστοποίησης. Ο στόχος αυτής της συλλογής δεδομένων είναι η κριτική τους συναξιολόγηση, και η προσπάθεια κατοχύρωσης μιας «τυπικής» συμπεριφοράς αυτών.

Οι άμμοι που σταθεροποιήθηκαν από τους διάφορους ερευνητές της βιβλιογραφίας και οι οποίες έχουν συλλεχθεί και παρατίθενται αναλυτικά εδώ είναι οι εξής: **Monterey sand No 30, Nevada sand No 120, Trevino sandy loam, Lazaro Cardenas sand, Toyoura sand**. Παρακάτω παρατίθενται κάποιες βασικές πληροφορίες γι' αυτές, στο Σχήμα 3.1 συγκρίνονται οι κοκκομετρικές τους διαβαθμίσεις, ενώ στον Πίνακα 3.1 γίνεται μια συγκριτική παρουσίαση όλων των βασικών φυσικών χαρακτηριστικών τους (π.χ. συντελεστής ομοιομορφίας $C_u = D_{60}/D_{10}$, όπου το D_i είναι το μέγεθος των κόκκων που ανταποκρίνονται στο $i\%$ ποσοστό διερχόμενων, μέγιστος (e_{max}) και ο ελάχιστος λόγος (e_{min}) των κενών).

MONTEREY NO. 30 (Gallagher, 2000) (Gallagher & Mitchell, 2002) (Persoff et al., 1999)

Η άμμος Monterey No. 30 είναι μια εμπορικά διαθέσιμη άμμος στην Καλιφόρνια. Έχει χρώμα ανοιχτό καστανό, είναι μία κακώς διαβαθμισμένη μέτρια προς λεπτή άμμος με κόκκους μισό-γωνιακούς και μισό-στρογγυλεμένους. Είναι χαρακτηρισμένη ως SP με βάση το USCS.

NEVADA NO.120 (Gallagher & Lin, 2006) (Gallagher & Lin, 2009)

Η Nevada No.120 είναι μια κακώς διαβαθμισμένη πυριτική άμμος, που χαρακτηρίζεται ως SW - SM με βάση το σύστημα USCS.

TREVINO SANDY LOAM (Persoff et al., 1999)

Το έδαφος Trevino sandy loam χαρακτηρίζεται ως αργιλώδης άμμος, κατατάσσεται σαν SM ή SC με βάση το σύστημα USCS και είναι από το Beaumont, του Τέξας. Χαρακτηρίζεται ως κακώς διαβαθμισμένη λεπτή άμμος. Σε τάξεις μεγέθους, είναι 52% άμμο, 42% ιλύ, και 6% αργίλου (<2 μm), μα δυστυχώς αυτά είναι τα μόνα γνωστά χαρακτηριστικά του.

LAZARO CARDENAS (Diaz-Rodriguez, et al., 2008)

Η άμμος Lazaro Cardenas προέρχεται από το βιομηχανικό λιμάνι, Michoacan, Μεξικό. Το 1985, παρατηρήθηκε καθίζηση 10-40 cm λόγω της ρευστοποίησης του εδάφους που καταγράφηκε σε όλη αυτή την ζώνη του λιμένα μετά από ένα σεισμό και μετασεισμό με μεγέθη 8,1 και 7,5, αντίστοιχα (Singh and Souarez 1987). Η άμμος αυτή είναι κακώς διαβαθμισμένη και περιέχει 11,5% λεπτόκοκκων και αποτελείται κυρίως από χαλαζία.

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

Σύμφωνα με το USCS, αυτή η άμμος έχει ταξινομηθεί ως SP-SM (ανεπαρκώς διαβαθμισμένη άμμος με λεπτόκοκκα). Η ειδική πυκνότητα των στερεών κόκκων της άμμου αυτής είναι 2.67. Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας της άμμου Lazaro Cardenas προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας ένα ευέλικτο τοίχο διαπερατότητας (ASTM D5084-00 (ASTM 2000c), και βρέθηκε να είναι 2.2×10^{-3} και 1.3×10^{-3} cm/s για τις σχετικές πυκνότητες των 40% και 60%, αντίστοιχα. Η άμμος Lazaro Cardenas έχει επιτόπου λόγο κενών 1.03, που αντιστοιχεί σε μία σχετική πυκνότητα 35%.

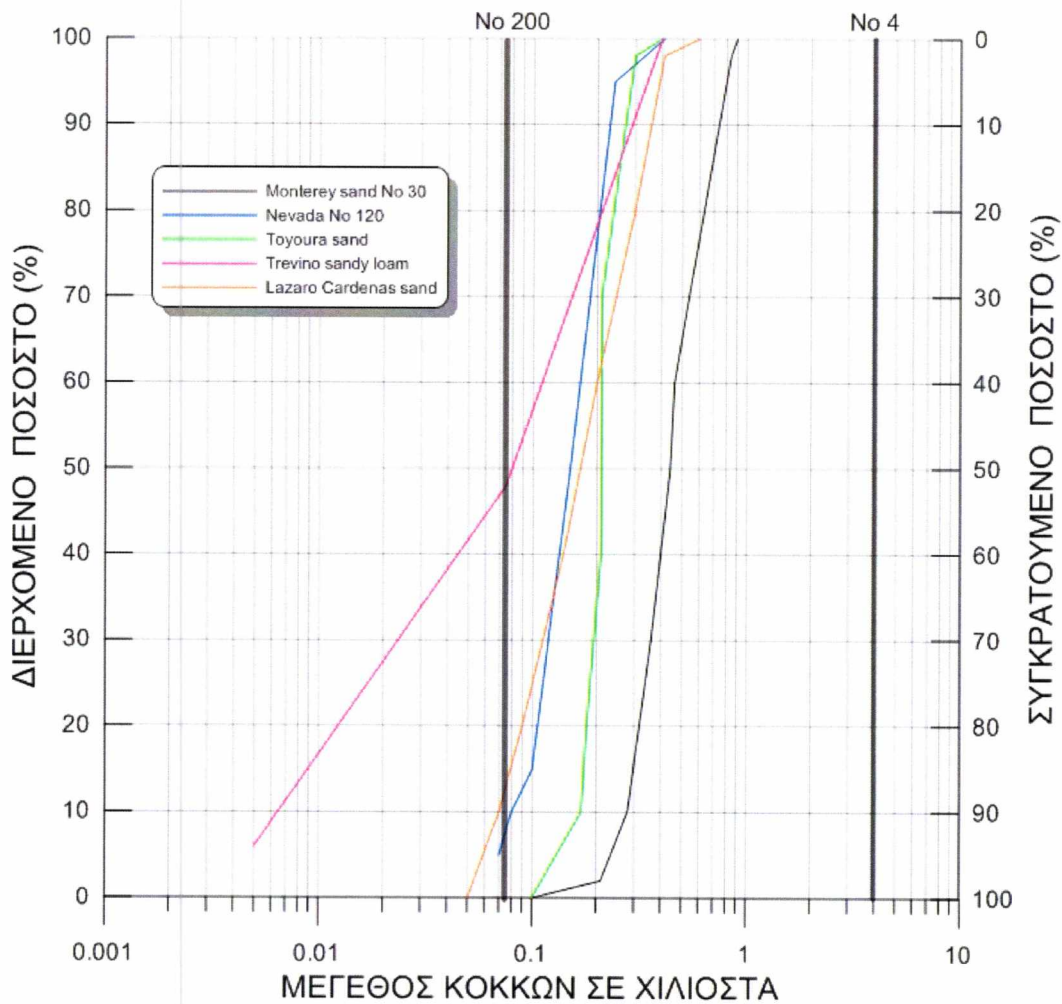
TOYOURA (Kodaka, et al., 2005)

Η άμμος Toyoura είναι κακώς διαβαθμισμένη, δηλαδή χαρακτηρίζεται ως SP πάντα με βάση το USCS.

	Monterey sand No 0/30	Nevada No120 sand	Trevino sandy loam	Lazaro Cardenas sand	Toyourea sand
$C_u = D_{60}/D_{10}$	1.64	2.13	18.46	3	1.24
e_{max}	0.821	0.89	-	1.17	0.977
e_{min}	0.464	0.51	-	0.77	0.597
D_{50} (mm)	0.44	0.15	0.08	0.17	0.21
D_{10} (mm)	0.28	0.08	0.0065	0.07	0.17
Ποσοστό λεπτόκοκκων	0%	7.5%	48%	11.5%	0%

Πίνακας 3.1: Φυσικά χαρακτηριστικά άμμων που έχουν σταθεροποιηθεί στη βιβλιογραφία.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



Σχήμα 3.1: Κοκκομετρικές καμπύλες άμμων που έχουν σταθεροποιηθεί στη βιβλιογραφία.

Σε κάθε μία από αυτές τις πέντε (5) σταθεροποιημένες άμμους εκτελέστηκε μία σειρά δοκιμών, οι οποίες δεν ήταν ίδιες για όλες. Τα είδη των εκτελεσθέντων δοκιμών ανά σταθεροποιημένη άμμο φαίνονται συγκεντρωτικά στον Πίνακα 3.2. Όπως προκύπτει από τον Πίνακα αυτό, δεν υπάρχει σταθεροποιημένη άμμος που να έχει υποστεί όλων των ειδών τις δοκιμές, αλλά επίσης δεν υπάρχει δοκιμή που να έχει χρησιμοποιηθεί για όλες τις σταθεροποιημένες άμμους. Συνεπώς, τα όποια πειραματικά αποτελέσματα της βιβλιογραφίας μπορούν να θεωρηθούν αποσπασματικά. Παρόλα αυτά συγκρινόμενα μεταξύ τους, ανά είδος δοκιμών ή είδος συμπεριφοράς (μονοτονική, ανακυκλική, κλπ) μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για την εξαγωγή κάποιων πρώτων συμπερασμάτων για τη μηχανική συμπεριφορά αυτού του νέου γεωυλικού, της σταθεροποιημένης άμμου.

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

	Ανεμπόδιση Θλίψη	Στρεπτική Διάτμηση	Τριαξονική	Απλή διάτμηση	Μέτρηση Vs - Στήλης Συντονισμού
Monterey No. 30	X		X		
Nevada No. 120	X				X
Trevino sandy loam	X				
Lazaro Cardenas				X	
Toyoura		X			

Πίνακας 3.2: Είδη δοκιμών που εκτελέστηκαν στις διαφορετικές σταθεροποιημένες άμμους

Σημειώνεται ότι η μέτρηση Vs που αφορά στην άμμο Nevada No. 120 έγινε στο πλαίσιο δοκιμής φυγοκέντρισης, αλλά τέτοιου είδους δοκιμές προβλημάτων συνοριακών τιμών (υπάρχουν και άλλες τέτοιες δοκιμές, π.χ Ramuk et al. 2007, καθώς και δοκιμή πεδίου Gallagher et al 2008) εκφεύγουν του στόχου της παρούσας εργασίας και δεν παρουσιάζονται εδώ.

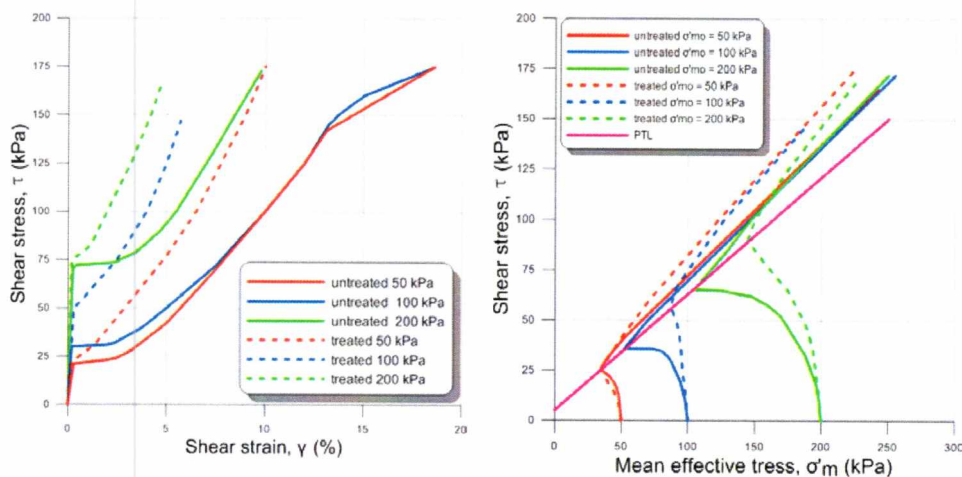
3.2 ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Οι μόνες δοκιμές μέτρησης της μονοτονικής συμπεριφοράς που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία είναι οι δοκιμές στρεπτικής διάτμησης των καθαρών και σταθεροποιημένων δειγμάτων άμμου Toyoura με δείκτη πόρων $e = 0.825$ (σχετική πυκνότητα $D_r = 40\%$) για διαφορετικές τιμές κατακόρυφων τάσεων που φαίνονται στο Σχήμα 3.2. Επισημαίνεται η χρήση colloidal silica (CS) 4% κατά βάρος, της οποίας ο τύπος (π.χ Ludox-SM ή όχι) ή τα χαρακτηριστικά δεν ξεκαθαρίζονται στη δημοσίευση.

Από τη σύγκριση του Σχήματος 3.2 προκύπτει σαφώς ότι η συμπεριφορά του εδάφους μετά από τη σταθεροποίηση είναι πιο διαστολική, καθώς η ενεργός τασική όδευση είναι σαφώς πιο κατακόρυφη πριν συναντήσει την Γραμμή Αλλαγής Φάσης (Phase Transformation Line, PTL). Επιπλέον προκύπτει ότι στη διαστολική φάση (πάνω από την PTL), τα δεδομένα της σταθεροποιημένης άμμου αντιστοιχούν σε μεγαλύτερο αποκλίνοντα λόγο τάσεων τ/σ'_m , δηλαδή σε μεγαλύτερη διατμητική αντοχή. Αυτό συνάγεται και από τη σχέση τάσεων-παραμορφώσεων, η οποία μάλιστα εμφανίζεται σαφώς πιο δύσμητη για τη σταθεροποιημένη άμμο (μικρότερες διατμητικές παραμορφώσεις γ στην ίδια διατμητική τάση τ). Αυτές οι παρατηρήσεις έχουν ισχύ για όλα τα επίπεδα τάσεων, και δεν αλλάζουν την «συστολική» επίδραση της αύξησης της

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

κατακόρυφης τάσης (για σταθερό δείκτη πόρων), η οποία παρατηρείται και για τη σταθεροποιημένη άμμο.



Σχήμα 3.2 Αποτελέσματα δοκιμών μονοτονικής στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για καθαρή άμμο Toyoura και για άμμο Toyoura με ποσοστό (colloidal silica) CS 4% με δείκτη πόρων $e = 0.825$ (σχετική πυκνότητα $D_r = 40\%$) για διαφορετικές κατακόρυφες ενεργές τάσεις (Kodaka et al 2005): α) Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων, β) Διάγραμμα ενεργού τασικής όδευσης.

Σημειώνεται ότι τα υπάρχοντα δεδομένα δεν είναι αρκετά ώστε να μπορέσει να εξαχθεί ένα ασφαλές συμπέρασμα για την συμπεριφορά της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης (CSL), δηλαδή για το αν υπάρχει για τη σταθεροποιημένη άμμο, και αν υπάρχει αν παραμένει στη θέση που έχει για την καθαρή άμμο ή μετατοπίζεται.

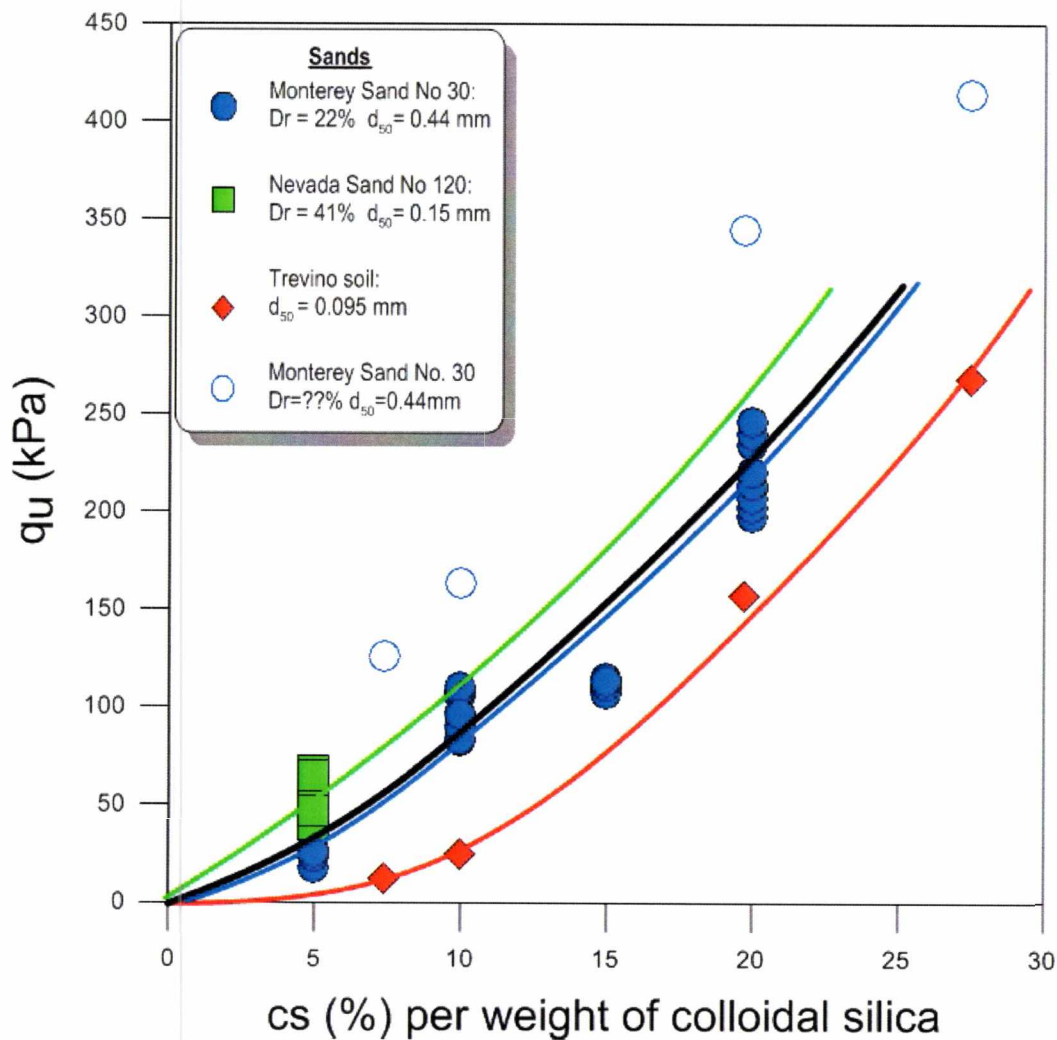
3.3 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ (ΠΡΙΝ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ)

Ως γνωστόν, οι φυσικές άμμοι δεν έχουν αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη. Όμως οι σταθεροποιημένες άμμοι μπορούν να μορφωθούν σε δοκίμια και να υποστούν δοκιμή ανεμπόδιστη θλίψης. Το χαρακτηριστικό τους αυτό δεν αποτελεί κριτήριο σχεδιασμού, αλλά μπορεί να αποτελέσει μια διαδικασία ελέγχου της ποιότητας εφαρμογής της παθητικής σταθεροποίησης (quality control). Με άλλα λόγια, η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u που μετράται σε αδιατάρακτο δοκίμιο μετά την εφαρμογή της σταθεροποίησης, μπορεί να αποτελέσει ένα κριτήριο ότι η σταθεροποίηση έχει πραγματοποιηθεί επιτυχώς και μάλιστα με το σχεδιασθέν (επιθυμητό) ποσοστό κατά βάρος κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου CS(%).

Τέτοια δεδομένα υπάρχουν στη βιβλιογραφία για τρεις (3) διαφορετικές άμμους, και συγκεκριμένα: Monterey No. 30 (Gallagher, 2000) (Gallagher & Mitchell, 2002) (Persoff et al., 1999), Nevada No. 120 (Gallagher & Lin, 2006) (Gallagher & Lin, 2009) και Trevino sandy loam (Persoff et al., 1999). Οι άμμοι αυτοί σταθεροποιήθηκαν με Ludox-SM, εκτός από την Trevino sandy loam για την οποία δε δίνονται σχετικά στοιχεία.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Τα αποτελέσματα για όλες τις σχετικές δοκιμές παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.3, όπου συσχετίζεται η αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u με το ποσοστό κατά βάρος κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου CS(%) από 5% έως και 27.5%. Τα αποτελέσματα για διαφορετικές άμμους παρουσιάζονται με διαφορετικά σύμβολα στο Σχήμα 3.3, ενώ αναλυτικά οι τιμές τους συνοψίζονται στον Πίνακα 3.3



Σχήμα 3.3 Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u πριν το σεισμό, ως συνάρτηση του ποσοστού κατά βάρος CS(%) για διαφορετικές άμμους (μετρήσεις: Gallagher 2000; Gallagher and Mitchell, 2002 ; Persoff et al. 1999; Gallagher and Lin 2005)

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

sand	cs (%)	q _u (kPa)	Dr (%)	sand	cs (%)	q _u (kPa)	Dr (%)	
Monterey sand No 0/30	5	17.93	22	Monterey sand No 0/30	5	25.86	22	
	5	23.44	22		5	55.36	22	
	5	27.58	22		10	83.70	22	
	5	34.47	22		10	89.87	22	
	5	55.16	22		10	95.98	22	
	10	82.74	22		15	107.08	22	
	10	89.63	22		15	110.80	22	
	10	96.53	22		15	113.21	22	
	10	105.72	22		20	206.84	22	
	10	108.02	22		20	214.22	22	
	10	110.32	22		20	220.36	22	
	15	108.02	22		20	240.08	22	
	15	110.32	22		20	246.24	22	
	15	114.91	22		Monterey sand No 0/30	5	67.57	22
	20	197.65	22			7.4	125.42	22
	20	202.25	22			10	162.99	22
	20	211.44	22			19.7	344.74	22
	20	220.63	22			27.5	413.69	22
20	234.42	22	Nevada No120	5		61.00	41	
20	245.91	22		5	67.00	41		
Trevino soil	7.4	12.55		-	5	65.00	41	
	10	25.10		-	5	47.00	41	
	19.7	156.72	-	Nevada No120	5	48.00	41	
	27.5	267.65	-		5	40.00	41	
					5	40.00	41	
			5		40.00	41		
			5		60.00	41		

Πίνακας 3.3: Μετρήσεις αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u πριν το σεισμό ως συνάρτηση του ποσοστού κατά βάρος CS για διαφορετικές άμμους

Γενικώς προκύπτει σημαντική αύξηση της αντοχής q_u με την αύξηση του ποσοστού κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου CS(%), με τη μαύρη καμπύλη να αποτελεί τη μέση καμπύλη (ελαφρώς εκθετικής μορφής) για όλα τα δεδομένα. Πάντως, ακόμη και για CS = 5% κατά βάρος προκύπτουν τιμές q_u =40 έως 67 kPa (μέση τιμή 52 kPa), δηλαδή προκύπτει ένα γεωυλικό με διατμητική αντοχή που προσεγγίζει εκείνης μιας μαλακής αργίλου (δηλ. μπορεί να διαμορφώσει δοκίμιο χωρίς πλευρική στήριξη ή να αντέξει σε μια κατακόρυφη εκσκαφή πολύ μικρού ύψους χωρίς αντιστήριξη). Από την άλλη μεριά, για μεγάλες τιμές CS προκύπτουν τιμές q_u εξόχως μεγάλες, συγκρίσιμες με εκείνες υπερστερεοποιημένων αργίλων, αλλά μικρότερες εκείνων για άμμους που έχουν υποστεί ανάμιξη με τσιμέντο (deep soil mixing).

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

Βέβαια η διασπορά των δεδομένων είναι μεγάλη, αλλά αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι αφορούν 3 εξόχως διαφορετικές άμμους, για κάθε μία απο τις οποίες όμως επιβεβαιώνεται η γενική τάση αύξησης της q_u (βλέπε καμπύλες για κάθε έδαφος). Αν υπάρχει μία κάποια τάση, αυτή θα μπορούσε να είναι η (αναμενόμενη) αύξηση της q_u με τη σχετική πυκνότητα (δεν υπάρχουν σχετικά δεδομένα για το Trevino sandy loam). Από την άλλη μεριά, προκύπτει ότι η q_u για λεπτόκοκκα σταθεροποιημένα εδάφη (όπως η Trevino sandy loam) είναι σαφώς μικρότερη από εκείνη πιο χονδρόκοκκων, αλλά η επίδραση δεν είναι απόλυτως επιβεβαιώσιμη δεδομένου ότι συνυπάρχει με την επίδραση της σχετικής πυκνότητας που προαναφέρθηκε.

3.4 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Με τον όρο δυναμική συμπεριφορά των σταθεροποιημένων άμμων γίνεται αρχικώς αναφορά στο (μέγιστο) μέτρο διάτμησης G_{max} των υλικών αυτών σε μικρές ανακυκλικές διατμητικές παραμορφώσεις (όπως μετράται είτε σε δοκιμές στήλης συντονισμού ή σε δοκιμές μέτρησης της ταχύτητας διάδοσης σεισμικών κυμάτων V_s) και στην αντιστοιχούσα ελάχιστη τιμή υστερητικής απόσβεσης D_{min} . Επιπλέον όμως, γίνεται αναφορά και στις καμπύλες απομείωσης του μέτρου διάτμησης G/G_{max} με το μέγεθος ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης και στη συμβατή αύξηση της υστερητικής απόσβεσης D , οι οποίες αφορούν μικρές και μέτριες ανακυκλικές διατμητικές παραμορφώσεις.

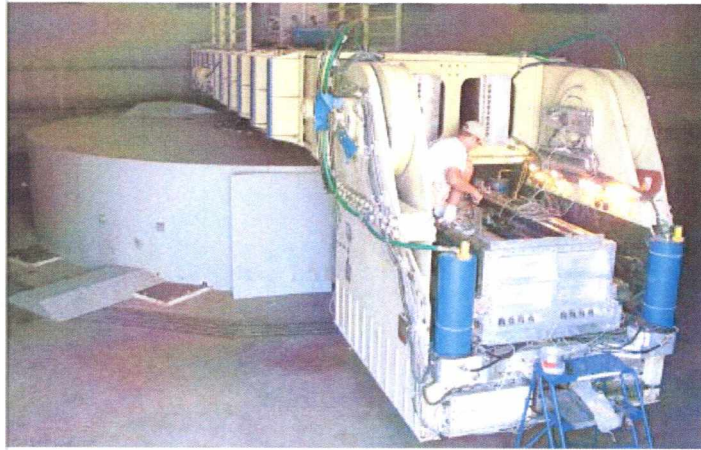
3.4.1 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ V_s ΣΕ ΔΟΚΙΜΕΣ ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΣΤΗ

Τα στοιχεία των δοκιμών που θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν παρακάτω προέρχονται από το διδακτορικό της Conlee (2010), και αφορούν άμμο Nevada No.120 σε σχετική πυκνότητα 41% (δείκτη πόρων $e = 0.73$), η οποία σταθεροποιήθηκε με διαφορετικά ποσοστά κατά βάρος κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου (Ludox-SM). Η ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων V_s μετρήθηκε με δύο διαφορετικούς τρόπους, με μετρήσεις ταχύτητας κυμάτων παλμών (pulse wave test) και τη μέθοδο των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (bender element test).

3.4.1.1 Μετρήσεις ταχύτητας κυμάτων παλμών

Οι εν λόγω μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν εντός προσομοιώματος φυγοκεντρική (εικόνα 3.1) κατά τη διάρκεια της «πτήσης» του, με τις καταγραφές του παλμού μέσα στο φυσικό και στο σταθεροποιημένο έδαφος (ταυτόχρονα) να γίνονται από επιταχυνσιόμετρα διατεταγμένα κατακόρυφα, με πράσινο χρώμα, όπως φαίνονται στο Σχήμα 3.4. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για πέντε (5) επίπεδα μέγιστης επιτάχυνσης βάσης, ως εκτίμηση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς αυτών.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



Εικόνα 3.1 Περιστεφόμενο άκρο φυγοκεντρίστη, όπου φαίνεται ο χώρος όπου τοποθετείται το γεωτεχνικό προσομοίωμα (Conlee, 2010)

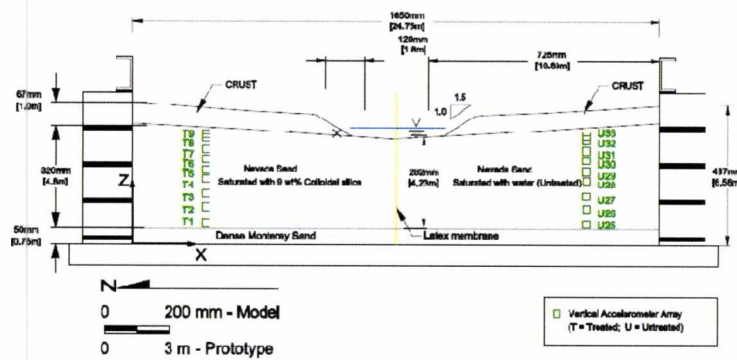


Figure 5.8 Instrumentation Layout for Pulsewave Testing in CTC01

Σχήμα 3.4 Διάταξη επιταχυνσιμέτρων στο γεωτεχνικό προσομοίωμα που εισήχθη στον φυγοκεντρίστη (Conlee, 2010)

3.4.1.2 Μέθοδος των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων

Η δοκιμή των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (bender element test), η οποία αναπτύχθηκε από τους Shirley & Hampton (1978), χρησιμοποιείται ολοένα και περισσότερο τα τελευταία χρόνια για τη μέτρηση της Vs ταυτόχρονα με άλλες δοκιμές στον συμβατικό εργαστηριακό εξοπλισμό, όπως είναι οι συσκευές συμπίεστότητας, τριαξονικής φόρτισης και άμεσης διάτμησης. Η προσθήκη των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων στις συσκευές αυτές μετατρέπει τη μέτρηση της Vs σε μια διαδικασία ρουτίνας, εύκολη και άμεση, ενώ η Conlee (2010) την χρησιμοποίησε για την καταγραφή της ταχύτητας διάδοσης διατμητικών κυμάτων Vs σε εδάφη για διαφορετικά βάθη. Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται η διάταξη των πομπών και των δεκτών (αισθητήρων) για τις σχετικές μετρήσεις.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ

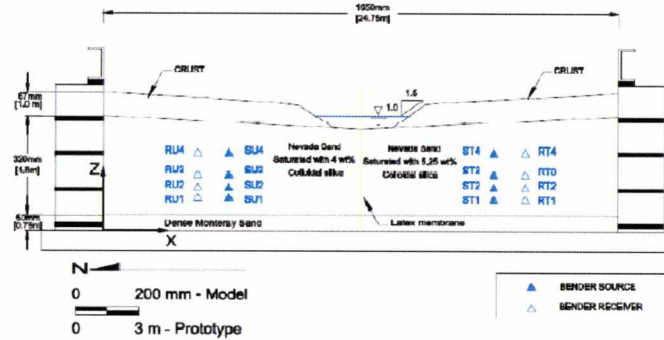


Figure 5.12 Sensor Layout for Bender Element Testing in CTC02

Σχήμα 3.5 Διάταξη αισθητήρων για τις μετρήσεις πιεζομετρικών στοιχείων στο γεωτεχνικό προσομοίωμα που εισήχθη στον φυγοκεντριστή (Conlee, 2010)

Λόγω της συμμετρικής διάταξης στο προσομοίωμα που εισήχθη στο φυγοκεντριστή, γίνεται δυνατή η απευθείας σύγκριση τιμών Vs στην φυσική και στη σταθεροποιημένη άμμο, στο ίδιο βάθος και υπό τις ίδιες συνθήκες επιτάχυνσης βάσης. Τα εν λόγω αποτελέσματα συγκεντρώθηκαν στους Πίνακες 3.4 και 3.5.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΛΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Μετρήσεις ταχύτητας κυμάτων παλμών (Pulse wave test)

0g (U)		0g (9%)		0,1g (U)		0,1g (9%)		0,19g (U)		0,56g (U)		0,56g (9%)		0,19g (9%)	
Βάθος (m)	Vs (m/s)	Βάθος (m)	Vs (m/s)	Βάθος (m)	Vs (m/s)	Βάθος (m)	Vs (m/s)	Βάθος (m)	Vs (m/s)	Βάθος (m)	Vs (m/s)	Βάθος (m)	Vs (m/s)	Βάθος (m)	Vs (m/s)
1.5	238	1.2	214	1.2	234	1.5	178	1.5	146	1.2	207	1.2	193	1.2	193
2.05	230	1.8	230	1.8	227	2.05	168	2.05	140	1.8	195	1.8	186	1.8	186
2.65	227	2.5	220	2.65	206	2.5	224	2.65	172	2.5	183	2.5	185	2.5	185
3	216	3	207	3	190	3	217	3	166	3	166	3	174	3	174
3.45	204	3.5	214	3.45	187	3.5	225	3.45	157	3.5	161	3.5	180	3.5	180
4.1	179	4.7	215	4.1	178	4.7	206	4.1	152	4.7	142	4.7	165	4.7	165
4.65	199	4.95	223	4.65	190	4.95	183	4.65	155	4.95	135	4.95	160	4.95	160
Μέσος όρος	213.3	Μέσος όρος	218.2	Μέσος όρος	194.4	Μέσος όρος	216.6	Μέσος όρος	164.0	Μέσος όρος	145.1	Μέσος όρος	169.9	Μέσος όρος	177.6

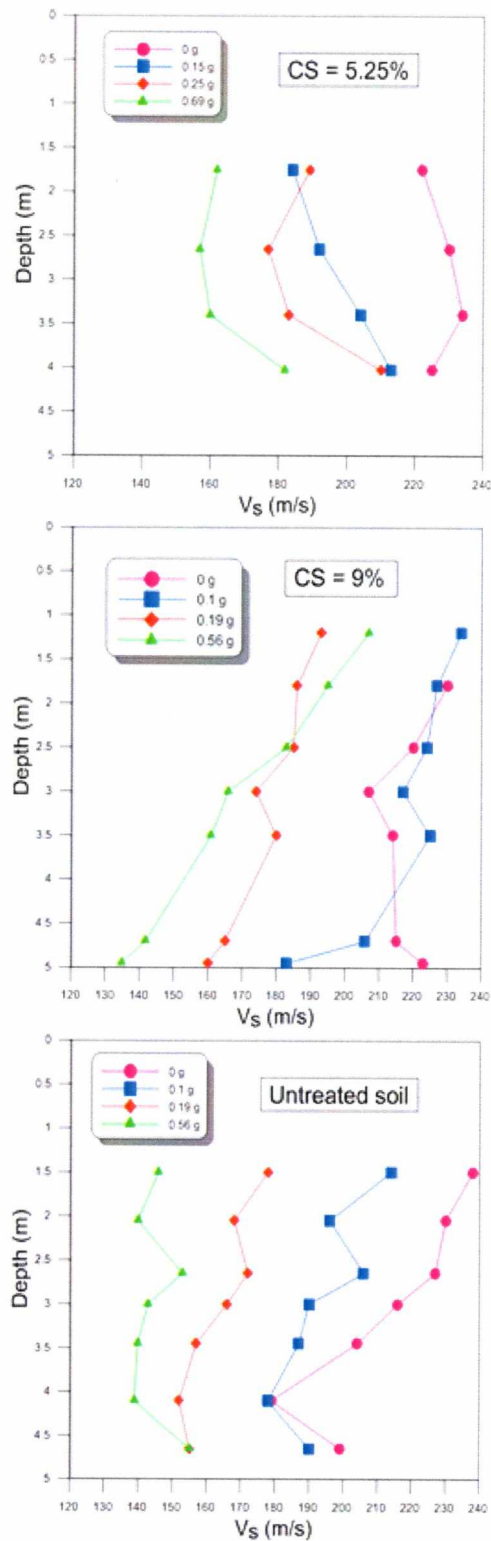
Πίνακας 3.4 Μετρήσεις ταχύτητας Vs με το βάθος για φυσική (U) άμμο Nevada No.120 (Dr=41%, e=0.73), και την ίδια άμμο σταθεροποιημένη με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (CS=9%), όπως πραγματοποιήθηκαν ως ταχύτερες κυμάτων παλμών (Conlee 2010)

ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΙΕΖΟΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ (Bender Element test)

initial (5.25%)		0.15g (5.25%)		0.25g (5.25%)		0.69g (5.25%)	
Βάθος (m)	Vs (m/s)	Βάθος (m)	Vs (m/s)	Βάθος (m)	Vs (m/s)	Βάθος (m)	Vs (m/s)
1.75	222	1.75	184	1.75	189	1.75	162
2.66	230	2.66	192	2.66	177	2.66	157
3.4	234	3.4	204	3.4	183	3.4	160
4.03	225	4.03	213	4.03	210	4.03	182
Μέσος όρος	227.75	Μέσος όρος	198.25	Μέσος όρος	189.75	Μέσος όρος	165.25

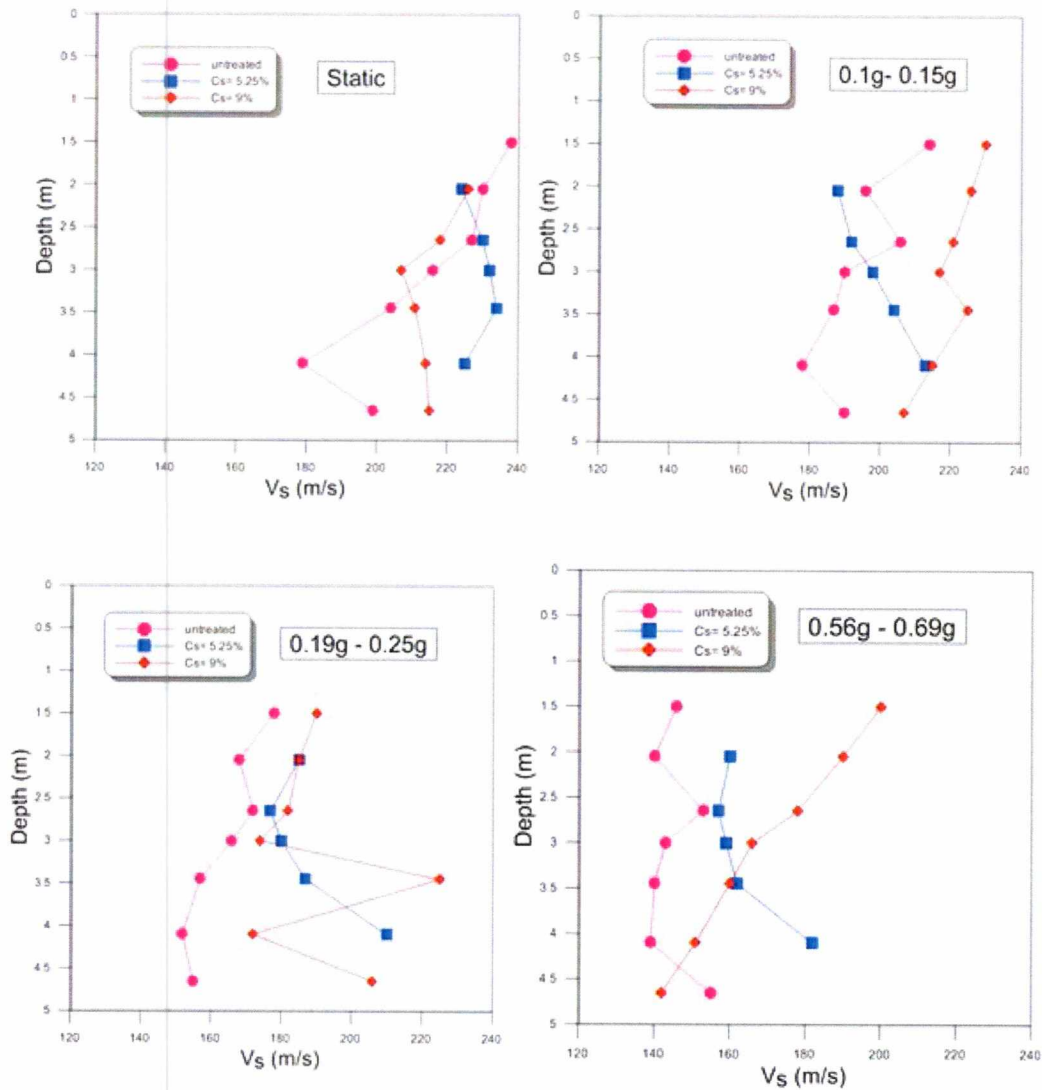
Πίνακας 3.5 Μετρήσεις ταχύτητας Vs με το βάθος για φυσική (U) άμμο Nevada No.120 (Dr=41%, e=0.73), και άμμο σταθεροποιημένη με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (CS=5.25%), όπως πραγματοποιήθηκαν με χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (Conlee 2010)

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



Σχήμα 3.6 Επίδραση επιτάχυνσης βάσης στις τιμές της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων V_s με το βάθος, για φυσική άμμο Nevada No. 120 ($D_r=41\%$, $e=0.73$), και την ίδια άμμο σταθεροποιημένη με ποσοστό κατά βάρος κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου CS(%) = 5.25% και 9%, με βάση μετρήσεις από Conlee (2010)

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



Σχήμα 3.7 Επίδραση ποσοστού κατά βάρος κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου CS(%) στις τιμές της ταχύτητας διατμητικών κυμάτων V_s της άμμου Nevada No. 120 ($D_r=41\%$, $e=0.73$) με το βάθος, για διάφορα επίπεδα επιτάχυνσης βάσης, με βάση μετρήσεις από Conlee (2010).

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η επίδραση της επιτάχυνσης βάσης στις τιμές της ταχύτητας V_s με το βάθος για τα 3 διαφορετικά γεωυλικά: τη φυσική άμμο (untreated sand) Nevada No.120 ($D_r = 41\%$, $e = 0.73$), και την ίδια άμμο σταθεροποιημένη με ποσοστά κατά βάρος κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου $C_s = 5.25\%$ και 9% , με βάση τα αποτελέσματα των Πινάκων 3.3 και 3.4. Εν γένει προκύπτει η αναμενόμενη μείωση όσο αυξάνει η επιτάχυνση βάσης, και η οποία αποδίδεται στη μη-γραμμική συμπεριφορά του γεωυλικού και στην ανάπτυξη υπερπίεσεων πόρων (ειδικά στις μεγάλες επιταχύνσεις της φυσικής άμμου). Μάλιστα, δε διαφαίνεται σημαντική διαφοροποίηση στο πόσο επηρεάζεται το κάθε γεωυλικό από μέτρια έστω αύξηση της επιτάχυνσης βάσης, γεγονός που θα επιβεβαιωθεί αργότερα από μετρήσεις της δοκιμής στήλης συντονισμού.

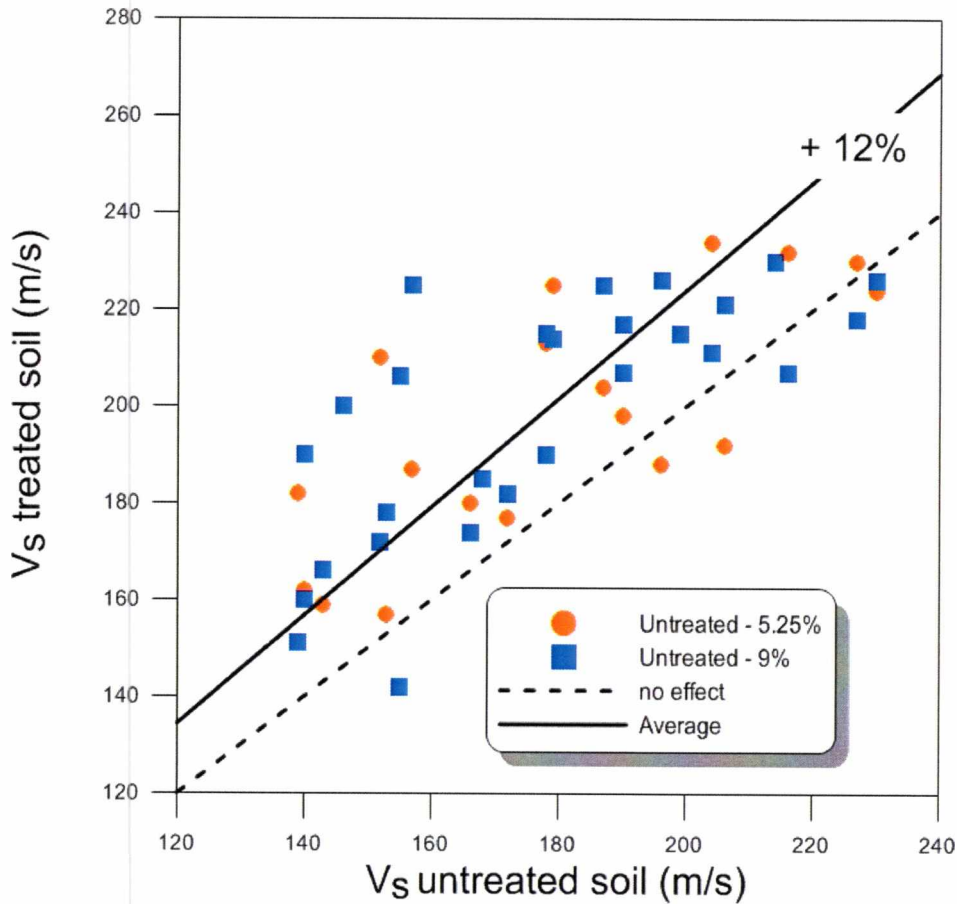
**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η επίδραση του ποσοστού CS(%) στη μεταβολή της ταχύτητας Vs με το βάθος για διάφορα επίπεδα επιτάχυνσης βάσης, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των Πινάκων 3.3 και 3.4. Στόχος του σχήματος αυτού είναι να διαφανεί αν η παθητική σταθεροποίηση μεταβάλλει συστηματικά την τιμή της Vs, ανεξαρτήτως επιτάχυνσης βάσης ή βάθους εντός του εδάφους. Με βάση το Σχήμα αυτό προκύπτει ότι σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, η παθητική σταθεροποίηση αυξάνει τις τιμές της Vs (για το ίδιο ή αντίστοιχο βάθος), αλλά το ποσοστό CS(%) δε δείχνει να είναι καθοριστικός παράγων (δηλαδή δε διαφαίνεται συστηματική διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων με CS=5.25% και 9%, σε αντίθεση με τα αποτελέσματα για φυσική άμμο).

Για να γίνει σαφέστερη αυτή η σύγκριση και να μπορέσει να ποσοτικοποιηθεί η όποια επίδραση, στο Σχήμα 3.8 συγκρίνεται οι μετρήσεις Vs της φυσικής άμμου με αντίστοιχες μετρήσεις για σταθεροποιημένη άμμο στο ίδιο βάθος, θεωρώντας διαφορετικά σύμβολα για κάθε τιμή του CS(%). Η διαγώνιος σε αυτό το σχήμα αντιστοιχεί σε μη-επηρεασμό της τιμής του Vs από την παθητική σταθεροποίηση. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν συστηματικά αύξηση της τιμής Vs λόγω σταθεροποίησης, η οποία είναι της τάξης του 11% (με αρκετή διασπορά). Όμως δε διαφαίνεται διαφορά από το ποσοστό CS, δηλαδή μια τιμή CS της τάξης του 5% επιφέρει την όποια διαφοροποίηση, και συνεπώς περαιτέρω προσαύξηση αυτής δεν αυξάνει περαιτέρω τις τιμές της Vs. Φυσικά, δε μπορούν να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα για μεγαλύτερες τιμές CS, καθώς δεν εξετάστηκαν.

Τέλος, αξίζουν παράθεσης κάποια συμπεράσματα της Conlee (2010) για τις εν λόγω μετρήσεις. Η συμπεριφορά που παρουσίασαν τα δοκίμια ήταν παρόμοια με αυτή που παρατηρήθηκε και από τον Tsukamoto (2006) για εδάφη που βελτιώθηκαν με ενέματα με βάση το πυρίτιο. Ακόμη, παρόμοια με τις καθαρές άμμους, οι σταθεροποιημένες χάνουν σε ακαμψία όσο χάνουν και σε ενεργή τάση γι' αυτό και το μέτρο διάτμησης μειώνεται όσο αυξάνεται η πίεση πόρων (r_u). Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, η αύξηση στην πίεση πόρων σε σταθεροποιημένα εδάφη επέρχεται μετά από αρκετούς κύκλους φόρτισης και είναι σημαντικά περιορισμένη σε σχέση με αυτή που παρουσιάζουν οι φυσικές άμμοι. Τέλος, οι σταθεροποιημένες άμμοι σε αντίθεση με τις φυσικές, διατήρησαν τη "μνήμη" τους από προηγούμενες καταστάσεις δυναμικής φόρτισης.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



Σχήμα 3.8 Σύγκριση τιμών V_s φυσικής (untreated) άμμου Nevada No. 120 ($D_r=41\%$, $e=0.73$) με τιμές V_s της ίδιας άμμου σταθεροποιημένης (treated) με $CS = 5.25\%$, 9% , και στο ίδιο βάθος, με βάση τις μετρήσεις της Conlee (2010).

3.4.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΤΗΛΗΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

Τα πειράματα στήλης συντονισμού πραγματοποιήθηκαν στη διδακτορική διατριβή της Spencer (2010) και εκτελέστηκαν με αρχικώς μικρό μέγεθος ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης, η οποία αυξήθηκε σταδιακά, φτάνοντας μια μέγιστη παραμόρφωση ίση με 0.03% , ανάλογα με τη δυσκαμψία του εκάστοτε δοκιμίου. Συνολικά έγιναν δοκιμές σε δώδεκα (12) δοκίμια, τρία (3) για κάθε ένα από τα παρακάτω γεωυλικά: φυσική άμμος Nevada No. 120 ($D_r=41$, $e=0.73$), και η ίδια άμμος σταθεροποιημένη με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (Ludox SM) σε ποσοστά κατά βάρος $CS = 5\%$, 7% και 9% . Τα τρία δοκίμια ανά γεωυλικό στοχεύουν στη διερεύνηση της επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Τα αποτελέσματα σχολιάζονται πρώτα για μικρές ανακυκλικές παραμορφώσεις, και ύστερα για μεσαίες τιμές αυτής, δεδομένου ότι οι δοκιμές δε συνεχίστηκαν για μεγάλες τιμές ανακυκλικών παραμορφώσεων.

3.4.2.1 Επίδραση στις δυναμικές ιδιότητες (μικρές ανακυκλικές παραμορφώσεις)
Στον Πίνακα 3.6 φαίνονται οι σχετικές πυκνότητες, καθώς και οι τιμές του μέγιστου μέτρου διάτμησης (G_{max}) και του ελάχιστου λόγου απόσβεσης (D_{min}) που μετρήθηκαν τόσο για τα σταθεροποιημένα, όσο και για τα δοκίμια φυσικής άμμου.

Ποσοστό κατά βάρος Κολλοειδούς Οξειδίου του Πυριτίου (%)	Αριθμός δοκιμίου	Σχετική πυκνότητα (%)	G_{max} (MPa)	D_{min} (%)
5	CS5_1	47	63.5	0.31
	CS5_2	50	65.9	0.30
	CS5_3	53	66.1	0.27
7	CS7_1	53	66.3	0.36
	CS7_2	52	66.3	0.36
	CS7_3	61	70.5	0.36
9	CS9_1	50	64.4	0.45
	CS9_2	54	66.9	0.49
	CS9_3	55	68.0	0.47
Φυσική άμμος	UN_1	64	62.1	0.30
	UN_2	55	58.0	0.29
	UN_3	54	57.9	0.28

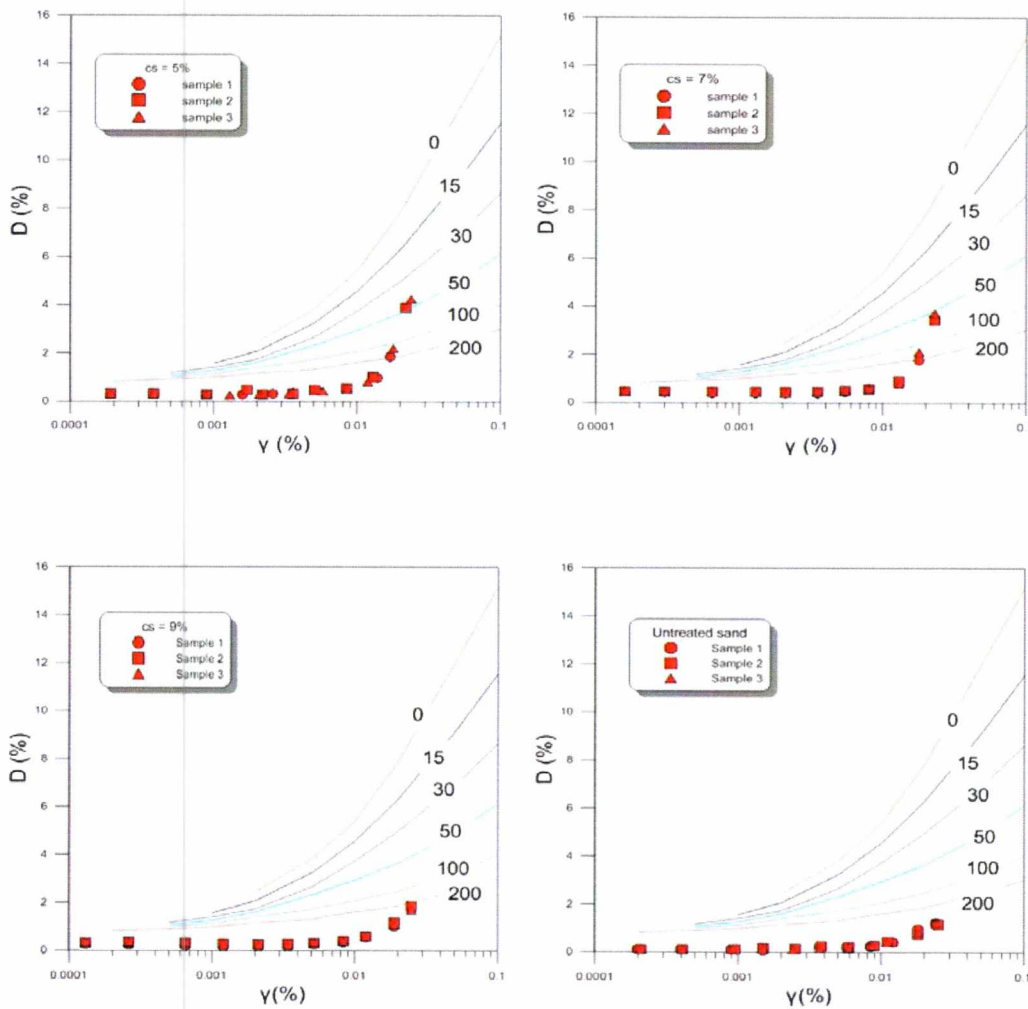
Πίνακας 3.6 Αποτελέσματα απόκρισης σε μικρές ανακυκλικές παραμορφώσεις, από δοκιμές στήλης συντονισμού για άμμο Nevada No. 120 φυσική και σταθεροποιημένη με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου ποσοστού κατά βάρος CS = 5, 7 και 9% (Spencer,2010)

Όπως προκύπτει, η σταθεροποίηση δείχνει να έχει μικρή αυξητική επίδραση στην τιμή της G_{max} , η οποία είναι συμβατή ποιοτικά με την αντίστοιχη της $V_s = (G_{max}/\rho)^{0.5}$ που βρέθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Ποσοτικά, η ανωτέρω επαύξηση της G_{max} (περίπου 11%) είναι μικρότερη εκείνης που θα αναμενόταν με βάση την προσαύξηση κατά 11% της V_s που βρέθηκε στην προηγούμενη ενότητα, αλλά πάντως είναι της ίδιας τάξης μεγέθους (δεδομένων και των διαφορών στις σχετικές πυκνότητες που καθιστούν τις εν λόγω συγκρίσεις δυσχερείς).

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

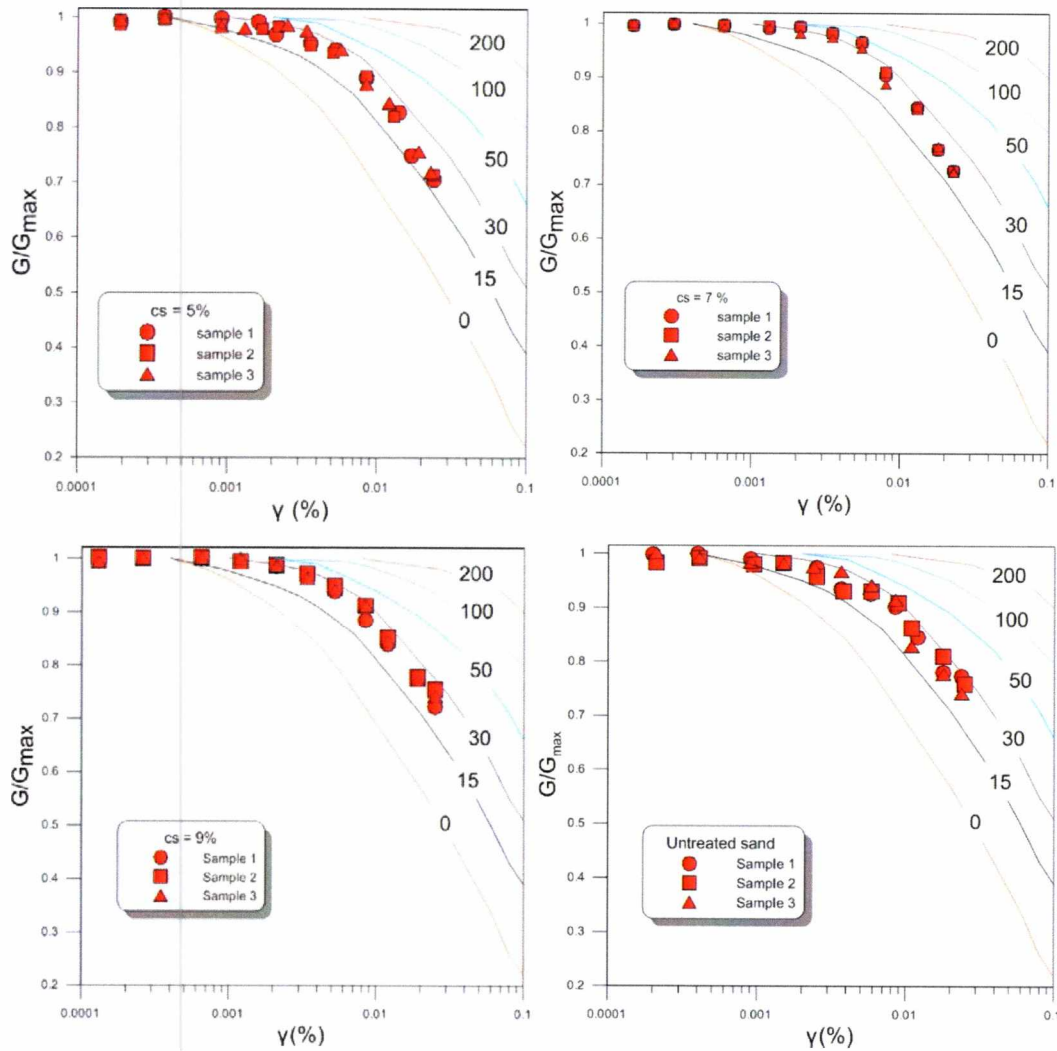
Αντίστοιχα, η σταθεροποίηση δείχνει να έχει αυξητική επίδραση και στην τιμή του ελάχιστου λόγου απόσβεσης D_{min} , η οποία μάλιστα δείχνει να είναι ποσοστιαία μεγαλύτερη (+29%). Παρόλα αυτά, οι τιμές παραμένουν μικρές (κάτω του 0.5%), οπότε η εν λόγω προσαύξηση δεν κρίνεται ως ιδιαίτερα σημαντική για τη συνολική απόκριση του γεωυλικού.

Σε καμία από τις ανωτέρω περιπτώσεις δεν υπάρχει συστηματική διαφοροποίηση της απόκρισης για διαφορετικά (μικρά) ποσοστά CS. Η διαφοροποίηση γίνεται σαφής όταν το CS γίνεται τουλάχιστον 5%, αλλά δεν μεταβάλλεται συστηματικά αν αυτό το ποσοστό γίνει 7% η 9%.



Σχήμα 3.9 Αποτελέσματα δοκιμών στήλης συντονισμού για το λόγο απόσβεσης D (%) ως συνάρτησης της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης γ (%), για την άμμο Nevada No. 120 φυσική και σταθεροποιημένη με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου ποσοστού κατά βάρος $CS = 5, 7$ και 9% (Spencer, 2010), και σύγκριση με τις αντίστοιχες καμπύλες των Vucetic and Dobry (1991)

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



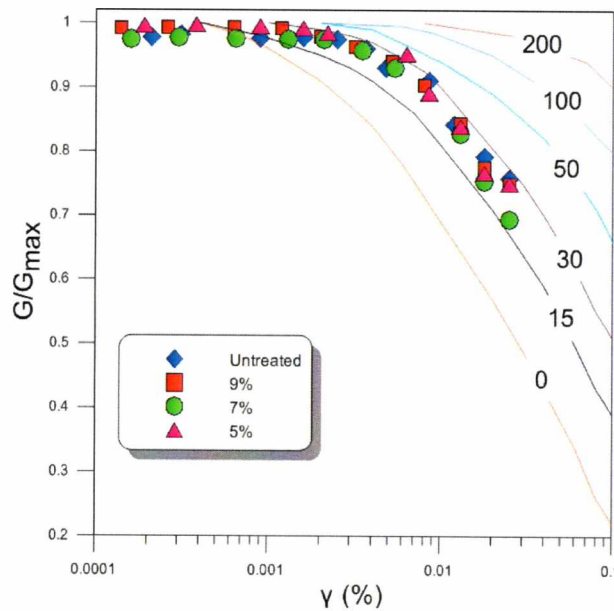
Σχήμα 3.10 Αποτελέσματα δοκιμών στήλης συντονισμού για το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης G/G_{max} ως συνάρτησης της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης γ (%), για την άμμο Nevada No. 120 φυσική και σταθεροποιημένη με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου ποσοστού κατά βάρος CS = 5, 7 και 9% (δεδομένα από Spencer, 2010) και σύγκριση με τις αντίστοιχες καμπύλες των Vucetic and Dobry (1991)

3.4.2.2 Επίδραση στις δυναμικές ιδιότητες (μεσαίες ανακυκλικές παραμορφώσεις) Στα Σχήματα 3.9 και 3.10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών στήλης συντονισμού σε όρους αύξησης της απόσβεσης D (%) και απομείωσης του μέτρου διάτμησης G/G_{max} με το μέγεθος της διατμητικής παραμόρφωσης γ (%) για τα 4 γεωυλικά: φυσική άμμος, και η ίδια άμμος σταθεροποιημένη με CS = 5%, 7%, 9%.

Όπως προαναφέρθηκε, για κάθε γεωυλικό υπάρχουν 3 δοκίμια, χάριν ελέγχου της επαναληψιμότητας, η οποία επιβεβαιώνεται (διασπορά της τάξης του 5%). Τα ίδια σχήματα δείχνουν ότι τα εν λόγω πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν λιγότερο μη-γραμμική συμπεριφορά σχετικά με την αναμενόμενη για μη-συνεκτικό έδαφος (βλ. καμπύλη για PI=0% των Vucetic and Dobry 1991).

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Για τη διερεύνηση της επίδρασης της σταθεροποίησης στις εν λόγω καμπύλες, είναι καλύτερο να γίνουν απευθείας συγκρίσεις των αποτελεσμάτων. Έτσι, στο Σχήμα 3.11 παρουσιάζονται μαζί τα αποτελέσματα δοκιμών στήλης συντονισμού για το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης G/G_{max} ως συνάρτησης της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης $\gamma(\%)$, και για τα 4 γεωυλικά μαζί (με διαφορετικά σύμβολα), ενώ το Σχήμα συμπεριλαμβάνει και τις σχετικές «μέσες» καμπύλες των Vucetic and Dobry (1991).



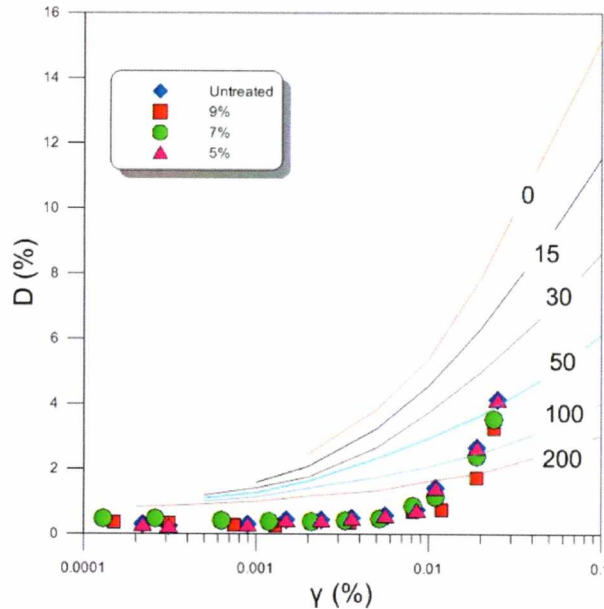
Σχήμα 3.11 Επίδραση σταθεροποίησης με κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου ποσοστού κατά βάρος CS = 5, 7 και 9% σε άμμο Nevada No. 120, στα αποτελέσματα δοκιμών στήλης συντονισμού για το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης G/G_{max} ως συνάρτησης της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης $\gamma(\%)$ (δεδομένα από Spencer, 2010 - καμπύλες Vucetic and Dobry 1991)

Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι η παθητική σταθεροποίηση δεν επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης απομείωσης του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης G/G_{max} ως συνάρτησης της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης $\gamma(\%)$. Αν υπάρχει μια διαφορά αυτή εντοπίζεται για τιμές παραμόρφωσης γ μεγαλύτερες του 0.01%, όπου τα σταθεροποιημένα δείχνουν να έχουν μια πιο απότομη κλίση υποδεικνύοντας πιο μη-γραμμική συμπεριφορά. Παρόλα αυτά η διαφορά είναι μόνο 5%, η οποία είναι ίση με την διασπορά που βρέθηκε μεταξύ δειγμάτων ίδιων υλικών, οπότε δεν κρίνεται στατιστικά σημαντική.

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 3.12 παρουσιάζονται μαζί τα αποτελέσματα δοκιμών στήλης συντονισμού για το λόγο υστερητικής απόσβεσης $D(\%)$ ως συνάρτησης της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης $\gamma(\%)$, και για τα 4 γεωυλικά μαζί (με

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

διαφορετικά σύμβολα), ενώ το Σχήμα συμπεριλαμβάνει και τις σχετικές «μέσες» καμπύλες των Vucetic and Dobry (1991).



Σχήμα 3.12 Επίδραση σταθεροποίησης με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου ποσοστού κατά βάρος CS = 5, 7 και 9% σε άμμο Nevada No. 120, στα αποτελέσματα δοκιμών στήλης συντονισμού για τον λόγο υστερητικής απόσβεσης D(%) ως συνάρτησης της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης γ(%) (δεδομένα από Spencer, 2010 – καμπύλες Vucetic and Dobry 1991)

Και από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι η παθητική σταθεροποίηση δεν επηρεάζει τη μορφή της καμπύλης αύξησης του λόγου υστερητικής απόσβεσης D(%) ως συνάρτησης της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης γ(%). Αν υπάρχει μια διαφορά αυτή εντοπίζεται για τιμές παραμόρφωσης γ μεγαλύτερες του 0.003%, όπου η φυσική άμμος υποδεικνύει ελαφρώς μεγαλύτερη απόσβεση από τα σταθεροποιημένα δοκίμια, αντίθετα με ότι προκύπτει σε πολύ μικρές παραμορφώσεις (βλ. τιμές για D_{min}). Σε κάθε περίπτωση, δεν κρίνονται ως στατιστικά σημαντικές αυτές οι διαφοροποιήσεις.

Οι μετρήσεις από τις δοκιμές στήλης συντονισμού που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.9 έως 3.12 συνοψίζονται στον Πίνακα 3.7.

	G/Gmax	γ		D	γ (%)
untreated	0.978	0.00021	5% CS	0.293333	0.00019
	0.981	0.00031		0.264	0.00039
	0.976	0.0009		0.234667	0.0009
	0.978	0.0016		0.322667	0.0015
	0.974	0.0025		0.322667	0.0022
	0.961	0.0037		0.381333	0.0035
	0.930	0.0048		0.528	0.0053

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

	0.910	0.0085		0.586667	0.0085
	0.843	0.012		0.733333	0.013
	0.792	0.018		1.76	0.019
	0.758	0.025		3.813333	0.024
5% cs	0.996	0.00019	7% cs	0.36	0.00015
	0.997	0.00038		0.324	0.00031
	0.994	0.0009		0.288	0.00075
	0.991	0.0016		0.252	0.0013
	0.985	0.0022		0.36	0.0021
	0.951	0.0063		0.36	0.0035
	0.890	0.0085		0.504	0.0054
	0.839	0.013		0.684	0.0081
	0.767	0.018		0.756	0.012
	0.749	0.025		1.728	0.019
7% cs	0.975	0.00016	9% cs	3.24	0.024
	0.978	0.0003		0.47	0.00013
	0.976	0.00065		0.47	0.00026
	0.975	0.0013		0.423	0.00063
	0.975	0.0021		0.376	0.0012
	0.957	0.0035		0.376	0.0021
	0.931	0.0054		0.423	0.0033
	0.827	0.013		0.47	0.0052
	0.753	0.018		0.846	0.0081
	0.694	0.025		1.128	0.011
9% cs	0.992	0.00014	untreated	2.397	0.019
	0.994	0.00026		3.525	0.024
	0.994	0.00063		0.29	0.00022
	0.992	0.0012		0.261	0.00031
	0.978	0.002		0.29	0.0009
	0.963	0.0032		0.435	0.0015
	0.941	0.0052		0.435	0.0024
	0.903	0.008		0.493	0.0036
	0.843	0.013		0.58	0.0056
	0.775	0.018		0.754	0.0085
0.750	0.025	1.421	0.011		
			2.668	0.019	
			4.147	0.025	

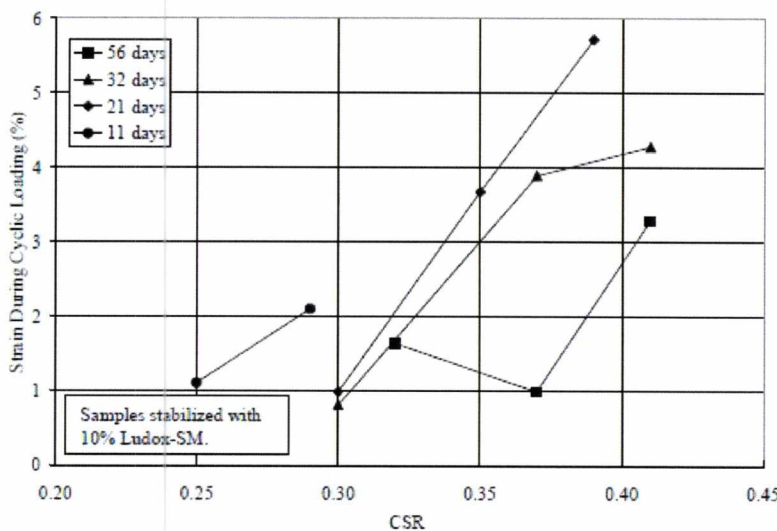
Πίνακας 3.7: Μετρήσεις δοκιμών στήλης συντονισμού για το κανονικοποιημένο μέτρο διάτμησης G/G_{max} και το λόγο υστερητικής απόσβεσης $D(\%)$ ως συνάρτησης της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης $\gamma(\%)$, για την άμμο Nevada Nevada No. 120 φυσική και σταθεροποιημένη με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου ποσοστού κατά βάρος CS = 5, 7 και 9% (δεδομένα από Spencer, 2010)

3.5 ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Η παθητική σταθεροποίηση σχεδιάστηκε ως μέσο αποτροπής της ρευστοποίησης. Συνεπώς, πρωταρχικής σημασίας είναι το θέμα της ανακυκλικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένων εδαφών, και το οποίο αποτελεί το αντικείμενο αυτής της παραγράφου. Στην πρώτη υπο-παράγραφο με τίτλο «γήρανση» τίθεται ένα θέμα που αποτελεί μια ασαφή παράμετρο της όλης διαδικασίας, δηλαδή το πως επηρεάζεται η όλη ανακυκλική συμπεριφορά ανάλογα με το πόσος χρόνος έχει περάσει από τη δημιουργία της γέλης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται και αναλύονται αποτελέσματα από διάφορους ερευνητές στοχεύοντας στην κατοχύρωση μιας «τυπικής» ανακυκλικής συμπεριφοράς, και των παραγόντων που την καθορίζουν.

3.5.1 ΓΗΡΑΝΣΗ

Για να διερευνηθεί η επίδραση της περιόδου πήξης (curing period) στην αντοχή σε ανακυκλική φόρτιση, κατασκευάστηκαν 12 δείγματα με χρόνους γέλης περίπου 1 ημέρα με κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου (Ludox-SM) CS = 10 % κατά βάρος (Gallagher 2000). Για τις ανάγκες αυτής της διερεύνησης χρησιμοποιήθηκε άμμος Monterey (Dr = 22%, e=0.75). Κατασκευάστηκαν τέσσερες (4) ομάδες δειγμάτων, τα οποία αφέθηκαν να πήξουν μετά τη γέλη για 11, 21, 32, και 56 ημέρες (3 δείγματα ανά ομάδα). Τα δείγματα στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε ανακυκλική φόρτιση με σταθερό λόγο ανακυκλικών τάσεων (Cyclic Stress Ratio, CSR), και μετρήθηκε η μέγιστη τιμή ανακυκλικής παραμόρφωσης σε αυτά. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.13, και τα δείγματα με διαφορετική περίοδο πήξης εμφανίζονται με διαφορετικά σύμβολα. Σε γενικές γραμμές, όσο η περίοδος πήξης αυξάνεται, τόσο μειώνεται η ανακυκλική παραμόρφωση που προκύπτει για το ίδιο επίπεδο CSR. Συνεπώς, είναι πιθανό ότι η ανακυκλική αντοχή θα συνεχίσει να βελτιώνεται με το χρόνο, μια ιδιότητα που θα προσδίδει ασφάλεια στα έργα Πολιτικού Μηχανικού στην πράξη. Βέβαια, το όλο θέμα χρήζει περαιτέρω και συστηματικής διερεύνησης.



Σχήμα 3.13 Παραμόρφωση κατά την ανακυκλική τριαξονική φόρτιση (με σταθερό CSR) για δοκίμια άμμου Monterey (Dr=22%, e=0.75) διαφορετικών περιόδων πήξης μετά τη γέλη κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου με CS = 10% κατά βάρος (Gallagher, 2000)

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Δείγμα	CSR	Περίοδος πήξης (μέρες)	Σύνολο κύκλων	Κύκλοι έως DA = 1%	Κύκλοι έως DA = 2%	Κύκλοι έως DA = 5%
SM20-9A	0.44	-	1000	NA	NA	NA
SM20-9B	0.44	-	1000	NA	NA	NA
SM20-9C	0.44	-	1000	NA	NA	NA
SM20-9D	0.44	-	1000	NA	NA	NA
SM20-9E	0.44	-	1000	NA	NA	NA
SM20-9F	0.44	-	1000	NA	NA	NA
SM10-10A	0.3	-	1000	36	NA	NA
	0.4	-	200	-	49	NA
SM10-10B	0.4	-	500	3	10	NA
SM10-10C	0.23	-	300	10	46	261
SM10-10D	0.25	-	400	101	101	NA
SM10-11D	0.27	-	1000	NA	NA	NA
	0.4	-	200	4	14	NA
SM10-11F	0.27	-	400	35	159	276
SM15-12A	0.43	-	1000	NA	NA	NA
SM15-12B	0.43	-	1000	NA	NA	NA
SM15-12C	0.41	-	1000	10	901	NA
SM10-13A	0.3	-	1000	992	NA	NA
SM10-13B	0.37	-	400	NA	NA	NA
SM10-15A	0.29	11	300	1	220	NA
SM10-15B	0.25	11	400	2	NA	NA
SM10-16A	0.3	21	200	1	24	NA
SM10-16B	0.035	21	300	1	3	NA
SM10-16C	0.39	21	200	1	2	106
SM10-17A	0.41	32	100	1	2	NA
SM10-17B	0.37	32	100	1	3	NA
SM10-17C	0.3	32	100	NA	NA	NA
SM10-18A	0.32	56	100	3	NA	NA
SM10-18B	0.41	56	100	1	2	NA
SM10-18C	0.37	56	100	3	NA	NA

Πίνακας 3.8 Δεδομένα δοκιμών (α/α, CSR, περίοδος πήξης, σύνολο κύκλων φόρτισης, αριθμός κύκλων για DA=1%, 2%, 5% με στόχο τη μελέτη της επίδρασης της περιόδου πήξης, και του CSR στον αριθμό κύκλων για ρευστοποίηση (Gallagher, 2000)

Πιο αναλυτικά, και με βάση τα αποτελέσματα που συγκεντρώνονται στον Πίνακα 3.8, αναφέρεται ότι τα δείγματα SM10-15A και SM10-15B ελέγχθηκαν στις 11 ημέρες σε λόγο διατμητικής ανακυκλικής τάσης, CSR, 0,29 και 0,25 για 300 και 400 κύκλους φόρτισης, αντίστοιχα. Το δείγμα SM10-15A έφτασε παραμόρφωση DA=1% σε 1 κύκλο, αλλά απαιτήθηκαν 220 κύκλοι για να φτάσει 2% DA παραμόρφωση και ποτέ δεν

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

έφτασε 5% DA παραμόρφωση. Αντίστοιχα, το δείγμα SM10-15B έφτασε 1% DA παραμόρφωση σε 2 κύκλους, αλλά ποτέ δεν έφτασε σε DA παραμόρφωση 2% ή 5%. Τα δείγματα SM10-16A, SM10 -16B και SM10-16C ελέγχθηκαν μετά από 21 ημέρες πήξης για CSR 0.30, 0.35, και 0.39, αντίστοιχα, και για 200, 300, και 200 κύκλους, αντίστοιχα. Και τα τρία δείγματα έφθασαν 1% DA παραμόρφωση στον πρώτο κύκλο. Όμως, στο δείγμα SM10-16A απαιτήθηκαν 24 κύκλοι για να φτάσει 2% DA παραμόρφωση και ποτέ δεν έφτασε 5% DA παραμόρφωση. Το δείγμα SM10-16B έφτασε 2% DA παραμόρφωση σε 3 κύκλους, αλλά δεν έφτασε 5% DA παραμόρφωση. Για το δείγμα SM10-16C απαιτήθηκαν μόνο 2 κύκλοι για να φτάσει 2% DA παραμόρφωση, αλλά δεν έφτασε 5% DA παραμόρφωση πριν τους 106 κύκλους.

Τα δείγματα SM10-17A, SM10-17B και SM10-17C ελέγχθηκαν μετά από 32 ημέρες πήξης. Έπειτα δοκιμάστηκαν σε CSR 0.41, 0.37 και 0.30 αντίστοιχα για 100 κύκλους το καθένα. Το δείγμα SM10-17A έφθασε 1 και 2% DA παραμόρφωση σε 1 και 2 κύκλους, αντίστοιχα, αλλά δεν έφθασε 5% DA παραμόρφωση σε 100 κύκλους. Το δείγμα SM10-17B έφθασε 1 και 2% DA παραμόρφωση σε 1 και 3 κύκλους, αντίστοιχα, αλλά δεν έφθασε 5% DA παραμόρφωση σε 100 κύκλους. Τέλος, το δείγμα SM10-17C δεν έφτασε 1, 2 ή 5% DA παραμόρφωση ούτε σε 100 κύκλους.

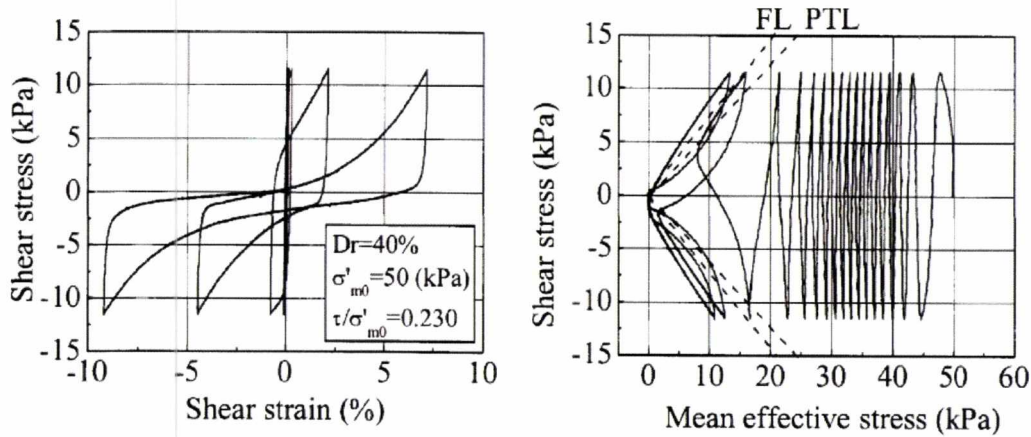
Τα δείγματα SM10-18A, SM10-18B, και SM10-18C ελέγχθηκαν μετά από 56 ημέρες πήξης. Το καθένα δοκιμάστηκε σε CSR 0.32 0.41 και 0.37 αντίστοιχα για 100 κύκλους το καθένα. Το δείγμα SM10-18A έφθασε παραμόρφωση DA = 1% σε 3 κύκλους, αλλά δεν έφθασε σε παραμόρφωση DA = 2% ή 5% ούτε σε 100 κύκλους. Το δείγμα SM10-18B έφθασε 1 και 2 % DA παραμόρφωση σε 1 και 2 κύκλους, αντίστοιχα, αλλά δεν έφθασε 5% DA παραμόρφωση ούτε σε 100 κύκλους. Το δείγμα SM10-18C έφτασε 1% DA παραμόρφωση σε 3 κύκλους, αλλά δεν έφθασε 2 ή 5% DA παραμόρφωση σε ούτε 100 κύκλους.

3.5.2 ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Στο Σχήμα 3.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας δοκιμής ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για καθαρή άμμο Toyoura με CSR=0.23. Αυτή η απόκριση αποτελεί την τυπική μηχανική συμπεριφορά τέτοιων εδαφών, όπου το δοκίμιο παρουσιάζει πολύ μικρές διατμητικές παραμορφώσεις μέχρι τη μείωση της μέσης ενεργού τάσης να οδηγήσει την τασική όδευση πάνω από τη Γραμμή Αλλαγής Φάσης (Phase Transformation Line, PTL), η οποία μετρήθηκε (ανεξάρτητα) από μονοτονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες στην ίδια άμμο και την ίδια σχετική πυκνότητα. Από εκεί και πέρα, η συνέχιση της δοκιμής υπό σταθερό CSR οδηγεί σε εναλλαγές εντόνων συστολικών και διαστολικών φάσεων που συνοδεύεται από μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται απότομα, οδηγώντας στη ρευστοποίηση του δοκιμίου (π.χ. οριζόμενη με την ανάπτυξη ανακυκλικής παραμόρφωσης διπλού εύρους, double amplitude DA = 5%) με την πάροδο 1-2 μόνο

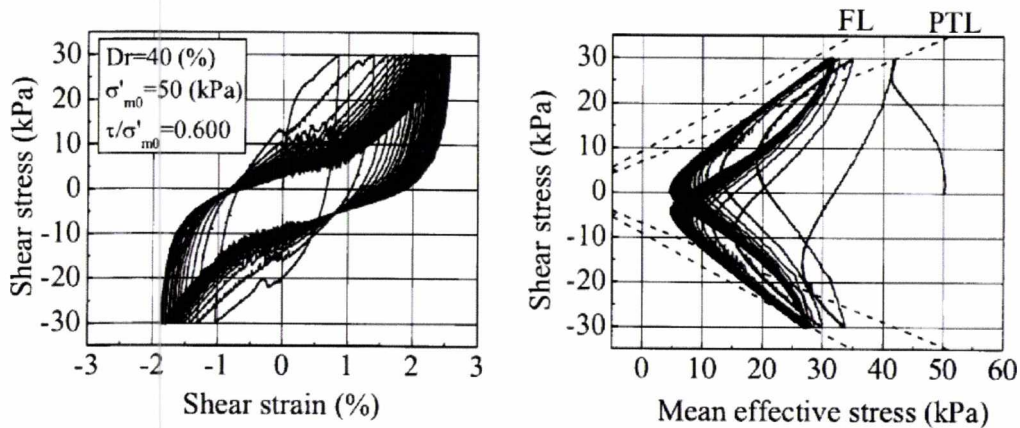
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

επιπλέον κύκλων φόρτισης και αφού η ενεργή τασική όδευση είχε περάσει από την περιοχή με μέση ενεργό τάση $p = 0$ kPa.



Σχήμα 3.14 Σχέση διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων και ενεργή τασική όδευση από δοκιμή ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για καθαρή άμμο Toyoura με $Dr=40\%$, $e=0.825$ (Kodaka et al,2005)

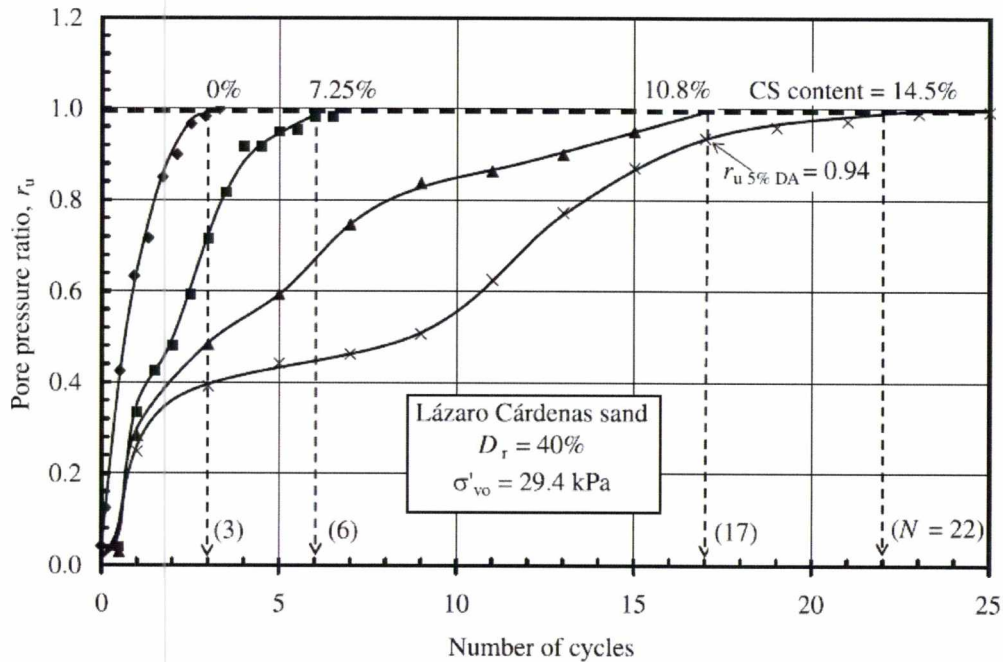
Αντίθετα με την συμπεριφορά της φυσικής άμμου, στην αντίστοιχη δοκιμή ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες με υπερδιπλάσια τιμή $CSR = 0.6$ επί της ίδιας άμμου σταθεροποιημένης με ποσοστό κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (CS) 4% οδηγεί σε διαφοροποιημένη μηχανική συμπεριφορά (δε δίνονται στοιχεία αν χρησιμοποιήθηκε Ludox-SM ή όχι). Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15, λόγω της πολύ μεγαλύτερης τιμής CSR , η ενεργός τασική όδευση φθάνει πάνω από την PTL σε πολύ λιγότερους κύκλους, μα από εκεί και πέρα η μηχανική συμπεριφορά είναι σαφώς πιο σταθερή αφού η αύξηση των παραμορφώσεων είναι σαφώς πιο σταδιακή και το τελικό μέγεθος της παραμόρφωσης DA δεν υπερβαίνει το 5% ακόμη και μετά από μεγάλο αριθμό κύκλων.



Σχήμα 3.15 Σχέση διατμητικών τάσεων-παραμορφώσεων και ενεργή τασική όδευση από δοκιμή ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για άμμο Toyoura με $Dr=40\%$, $e=0.825$ σταθεροποιημένη με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου $CS=4\%$ (Kodaka et al,2005)

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Μελετώντας αντίστοιχες εργαστηριακές προσπάθειες, αλλά σε όρους ρυθμού αύξησης της υπερπίεσης πόρων u , και δη του λόγου υπερπίεσεων πόρων ($r_u = u/\sigma'_{vo}$), ως συνάρτηση του αριθμού κύκλων φόρτισης, παρουσιάζεται το Σχήμα 3.16. Εκεί συγκρίνονται οι ρυθμοί αύξησης του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u σε αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης με ίδιο $CSR = 0.41$ σε δοκίμια της (ιλυώδους) άμμου Lazaro Cardenas που σταθεροποιήθηκαν με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (Ludox-SM) διαφορετικών ποσοστών κατά βάρος CS(%), από CS = 0% έως 14.5%, στο εισπιεζόμενο διάλυμα υγρού πόρων. Τέτοιου είδους διαγράμματα επιτρέπουν τη μελέτη της επίδρασης του ποσοστού κατά βάρος της CS(%) στο ρυθμό ανάπτυξης υπερπίεσεων, αλλά και στον αριθμό κύκλων για αρχική ρευστοποίηση, όπως αυτή ορίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία (για $r_u = 1$).

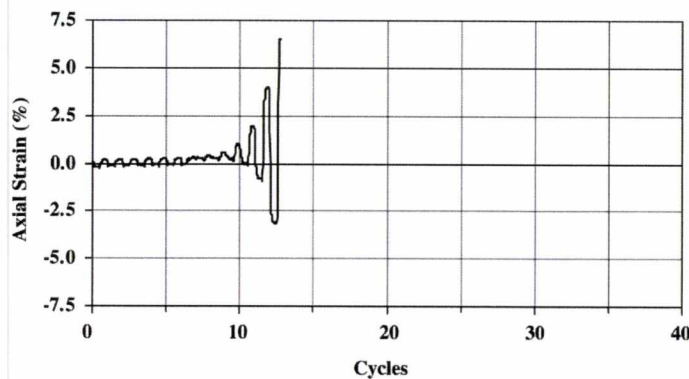


Σχήμα 3.16 Ρυθμοί αύξησης του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u σε αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης με ίδιο $CSR = 0.41$ σε δοκίμια της άμμου Lazaro Cardenas που σταθεροποιήθηκαν με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (Ludox-SM) διαφορετικών ποσοστών κατά βάρος CS(%), από CS = 0% έως 14.5% (Rodríguez et al, 2008)

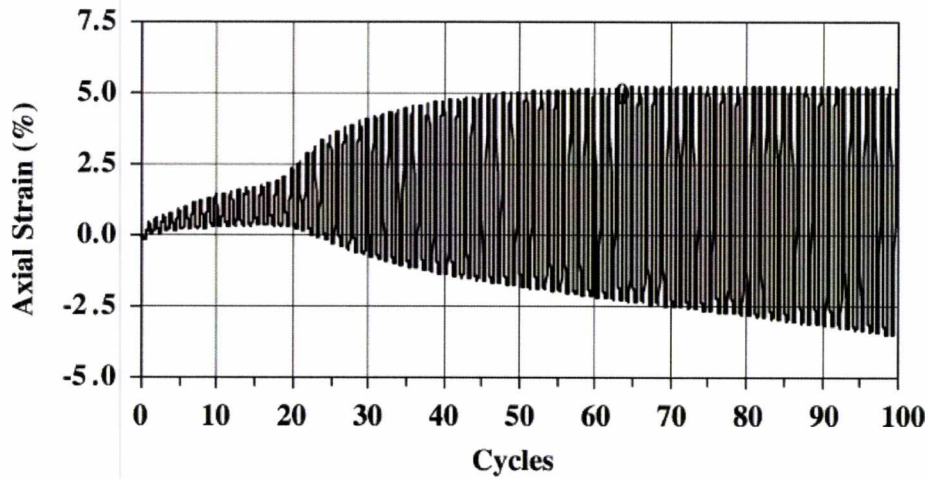
Από το Σχήμα αυτό προκύπτει η αναμενόμενη αύξηση του αναγκαίου αριθμού κύκλων για αρχική ρευστοποίηση με την αύξηση του CS, από 3 στους 22 κύκλους. Παρατηρείται επίσης ότι για CS=7,5% οι κύκλοι για ρευστοποίηση είναι διπλάσιοι εκείνων για τη φυσική άμμο (από 3 σε 6), ενώ για ποσοστά CS=10.8% και 14.5% η προσαύξηση είναι πολύ μεγαλύτερη.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Τα ανωτέρω αποτελέσματα υποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της παθητικής σταθεροποίησης σε όρους αριθμού κύκλων για (αρχική) ρευστοποίηση ($r_u=1$). Όμως, πολλές φορές, η ρευστοποίηση ορίζεται ως συνάρτηση κάποιας τιμής ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης διπλού εύρους $DA = 1\%$, 2% ή 5% . Συνεπώς, το ενδιαφέρον εστιάζεται όχι στο ρυθμό αύξησης του r_u συναρτήσει του αριθμού κύκλων, αλλά της τιμής της διατμητικής παραμόρφωσης. Για το σκοπό αυτό, στα Σχήματα 3.17 και 3.18 δίνονται ενδεικτικά αποτελέσματα από ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές υπό αστράγγιστες συνθήκες που έγιναν για $CSR=0.27$, αρχική ενεργό τάση $p = 100$ kPa και σχετική πυκνότητα $D_r=22\%$ επί της άμμου Monterey σε όρους αναπτυσσόμενης αξονικής παραμόρφωσης συναρτήσει του αριθμού κύκλων. Η διαφορά στα δύο σχήματα έγκειται στο ότι στο πρώτο δίνονται αποτελέσματα για τη φυσική άμμο, ενώ στο δεύτερο αντίστοιχα αποτελέσματα μετά από σταθεροποίηση με κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου (Ludox-SM) $CS = 5\%$. Πιο συγκεκριμένα, στη φυσική άμμο οι αρχικές αξονικές παραμορφώσεις είναι μικρές, ενώ όταν η υπερπίεση των πόρων αυξάνεται σημαντικά οι ανακυκλικές παραμορφώσεις (σε όρους διπλού εύρους) ξεπερνούν το 1% στον 11° κύκλο και το 5% αμέσως μετά στον 12° κύκλο. Αντίθετα, στη σταθεροποιημένη άμμο αναπτύσσονται σταδιακά οι παραμορφώσεις φθάνοντας σε $DA = 5\%$ περί τον 35° κύκλο. Επισημαίνεται ότι η ανάπτυξη των παραμορφώσεων συνεχίζεται σταδιακά και φθάνει το $DA = 8\%$ στο τέλος της δοκιμής (κύκλος 400).



Σχήμα 3.17 Ρυθμός αύξησης της αξονικής παραμόρφωσης σε αστράγγιστη ανακυκλική τριαξονική φόρτιση με $CSR = 0.27$, επί της φυσικής άμμου Monterey με $D_r=22\%$ ($e=0.75$) και αρχική ενεργό τάση $p = 100$ KPa (Gallagher and Mitchell, 2002)

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Σχήμα 3.18 Ρυθμός αύξησης της αξονικής παραμόρφωσης σε αστράγγιστη ανακυκλική τριαξονική φόρτιση με $CSR = 0.27$, επί της άμμου Monterey με $D_r=22\%$ ($e=0.75$) και αρχική ενεργό τάση $p = 100$ kPa σταθεροποιημένη με (Ludox-SM) $CS=5\%$ (Gallagher and Mitchell, 2002)

3.5.3 ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Οι Gallagher and Mitchell (2002) παρουσίασαν αποτελέσματα αστράγγιστων δοκιμών ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης με στόχο την ποσοτικοποίηση της αποτελεσματικότητας της παθητικής σταθεροποίησης της άμμου Monterey No30, για $D_r = 22\%$ ($e=0.75$) και τάση στερεοποίησης 100kPa που σταθεροποιήθηκε με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (Ludox-SM) σε διάφορα ποσοστά κατά βάρος $CS(\%)$, από 5 έως 20%. Ο Πίνακας 3.9 παρουσιάζει συγκεντρωτικά τα χαρακτηριστικά προετοιμασίας των δοκιμών που εν συνεχεία υποβλήθηκαν σε ανακυκλική τριαξονική φόρτιση. Οι τριαξονικές δοκιμές έγιναν σύμφωνα με τον κανονισμό ASTM D5311 για τριαξονικές δοκιμές ελεγχόμενης φόρτισης σε εδάφη. Ειδικές μετατροπές χρειάστηκαν κατά την διαδικασία των δοκιμών για την καταγραφή ειδικών ιδιοτήτων των σταθεροποιημένων άμμων. Εξαιτίας της χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας των σταθεροποιημένων δοκιμών, η πίεση των πόρων δεν ήταν δυνατόν να μετρηθεί. Έτσι η αξονική παραμόρφωση χρησιμοποιήθηκε για να ποσοτικοποιήσει τα αποτελέσματα των σταθεροποιημένων δοκιμών (π.χ. αριθμός κύκλων για ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση διπλού εύρους $DA=1, 2$ ή 5%). Συνολικά πραγματοποιήθηκαν δοκιμές σε 50 δείγματα με συγκεντρώσεις κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου 5-20 %. Από αυτά 31 υποβλήθηκαν σε τριαξονικές δοκιμές, 19 σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης. Τέλος 25 δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης μετά από τις ανακυκλικές δοκιμές.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΛΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Δείγμα	Ποσοστό κατά βάρος Κολλοειδούς Οξειδίου του Πυριτίου CS (%)	Χρόνος Γέλης	Περίοδος πήξης	Λόγος Περιόδου Πήξης / Χρόνου Γέλης	Τύποι Δοκιμών
SM5-8A	5	4	22	ημέρες	UC
SM5-8B	5	4	22	ημέρες	UC
SM5-8C	5	4	22	ημέρες	UC
SM5-9A	5	28	11	ημέρες	Cyclic, UC
SM5-9B	5	28	11	ημέρες	Cyclic, UC
SM5-9C	5	28	11	ημέρες	Cyclic, UC
SM5-10A	5	28	19	ημέρες	Cyclic, UC
SM5-10B	5	28	19	ημέρες	Cyclic, UC
SM5-10C	5	28	31	ημέρες	UC
SM5-11A	5	28	30	ημέρες	UC
SM5-11B	5	28	30	ημέρες	UC
SM5-11C	5	28	31	ημέρες	Cyclic, UC
SM5-12A	5	28	31	ημέρες	Cyclic, UC
SM5-12B	5	28	31	ημέρες	Cyclic, UC
SM5-12C	5	28	30	ημέρες	UC
SM10-7A	10	4	18	ημέρες	UC
SM10-7B	10	4	18	ημέρες	UC
SM10-10A	10	4	6	ημέρες	Cyclic
SM10-10B	10	4	6	ημέρες	Cyclic, UC
SM10-10C	10	4	6	ημέρες	Cyclic, UC
SM10-10D	10	4	40	ώρες	Cyclic, UC
SM10-10E	10	4	40	ώρες	UC
SM10-11D	10	4	4	ημέρες	Cyclic
SM10-11F	10	4	7	ημέρες	Cyclic
SM10-15A	10	1	11	ημέρες	Cyclic
SM10-15B	10	1	11	ημέρες	Cyclic

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΛΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

SM10-16A	10	1	ημέρα	21	ημέρες	21	Cyclic, UC
SM10-16B	10	1	ημέρα	21	ημέρες	21	Cyclic, UC
SM10-16C	10	1	ημέρα	21	ημέρες	21	Cyclic, UC
SM10-17A	10	1	ημέρα	32	ημέρες	32	Cyclic, UC
SM10-17B	10	1	ημέρα	32	ημέρες	32	Cyclic, UC
SM10-17C	10	1	ημέρα	32	ημέρες	32	Cyclic, UC
SM10-18A	10	1	ημέρα	53	ημέρες	53	Cyclic, UC
SM10-18B	10	1	ημέρα	55	ημέρες	55	Cyclic, UC
SM10-18C	10	1	ημέρα	56	ημέρες	56	Cyclic, UC
SM10-19A	10	4	ώρες	7	ημέρες	42	UC
SM10-19B	10	4	ώρες	7	ημέρες	42	UC
SM10-19C	10	4	ώρες	7	ημέρες	42	UC
SM15-12A	15	4	ώρες	7	ημέρες	42	Cyclic, UC
SM15-12B	15	4	ώρες	7	ημέρες	42	Cyclic, UC
SM15-12C	15	4	ώρες	7	ημέρες	42	Cyclic
SM15-20A	15	4	ώρες	10	ημέρες	60	UC
SM15-20B	15	4	ώρες	10	ημέρες	60	UC
SM15-20C	15	4	ώρες	10	ημέρες	60	UC
SM20-6A	20	4	ώρες	18	ημέρες	108	UC
SM20-6B	20	4	ώρες	18	ημέρες	108	UC
SM20-6C	20	4	ώρες	18	ημέρες	108	UC
SM20-9A	20	4	ώρες	7	ημέρες	42	Cyclic, UC
SM20-9D	20	4	ώρες	9	ημέρες	54	Cyclic, UC
SM20-9E	20	4	ώρες	9	ημέρες	54	Cyclic, UC

Πίνακας 3.9 Συγκεντρωτική παρουσίαση επιμέρους χαρακτηριστικών προετοιμασίας (π.χ. χρόνος γέλιξης, πήξης, CS(%) με Ludox-SM) αστράγγιστων ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών των Gallagher and Mitchell (2002). Επισημαίνεται ότι στους τύπους δοκιμών: Cyclic = ανακυκλική δοκιμή, UC = ανεμπόδιστη θλίψη

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

Δεδομένης της ποσοτικοποίησης της ρευστοποίησης σε όρους αριθμού κύκλων για την ανάπτυξη συγκεκριμένων τιμών ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης διπλού εύρους DA(%), τα αποτελέσματα των δοκιμών φαίνονται αναλυτικά στον Πίνακα 3.10. Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται πιο σαφώς στα διαγράμματα των σχημάτων 3.19 και 3.20. Γενικά παρατηρείται ότι όσο αυξάνει η συγκέντρωση του CS(%) στα δοκίμια τόσο μειώνονται οι ανακυκλικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται, στον ίδιο αριθμό κύκλων. Με άλλα λόγια, όσο αυξάνει το ποσοστό CS(%) τόσο αυξάνει ο αναγκαίος αριθμός κύκλων για να επιτευχθεί το ίδιο επίπεδο DA(%). Επισημαίνεται επίσης ότι στη φυσική άμμο (CS=0%), η ρευστοποίηση προκλήθηκε αμέσως αφού έφτασαν τα δοκίμια σε DA=1%, ενώ έφθασαν σε DA = 2 και 5% μετά από πολύ λίγους κύκλους φόρτισης. Αυτή η ραγδαία αύξηση των παραμορφώσεων δεν παρατηρείται στις σταθεροποιημένες άμμους, στις οποίες οι καμπύλες για διαφορετικά επίπεδα DA είναι διακριτές και δίνουν σαφώς μεγαλύτερες τιμές αριθμού κύκλων για ρευστοποίηση όσο αυξάνει το επίπεδο της DA αναφοράς.

Διευκρινίζεται ότι τα δοκίμια με CS=10% ανέπτυξαν παραμόρφωση DA=5% με CSR = 0,40 σε 100 - 500 κύκλους, παραμένοντας ανέπαφα έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν και μετά την δοκιμή (για δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης). Τα δοκίμια με CS=5% ανέπτυξαν DA = 1 έως 2% παραμόρφωση με CSR = 0,15-0,29 σε 100 κύκλους, οπότε και πάλι έμειναν ανέπαφα και χρησιμοποιήθηκαν σε δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης. Πρέπει να επισημανθεί επίσης ότι κάποιες τιμές δεν ελήφθησαν υπόψη για την εκτίμηση των αντίστοιχων καμπυλών αντοχής σε ρευστοποίηση (και αυτές είναι σημειωμένες με ?, και είναι όλες για ένα χαμηλό CSR=0.15). Ο λόγος που δεν ελήφθησαν υπόψη είναι ότι δε συνάδουν με τη γενικότερη τάση αύξησης του αριθμού κύκλων για ρευστοποίηση με τη μείωση του CSR, για το ίδιο επίπεδο DA αναφοράς και το ίδιο ποσοστό CS(%) στο υγρό των πόρων.

Επισημαίνεται τέλος, ότι σε πολλές περιπτώσεις τα δοκίμια με ποσοστό CS=5% έφθασαν σε DA = 1% και 2% σε λιγότερους κύκλους από τα δείγματα φυσικής άμμου, αλλά δεν ισχύει αυτό για DA=5%. Αυτή η μη-αναμενόμενη εικόνα ξεκαθαρίζει πλήρως για ποσοστά CS=10%, όπου ο αριθμός κύκλων είναι σαφώς μεγαλύτερος, απ' ότι για τη φυσική άμμο και την άμμο με CS=5%, ανεξαρτήτως επιπέδου DA αναφοράς.

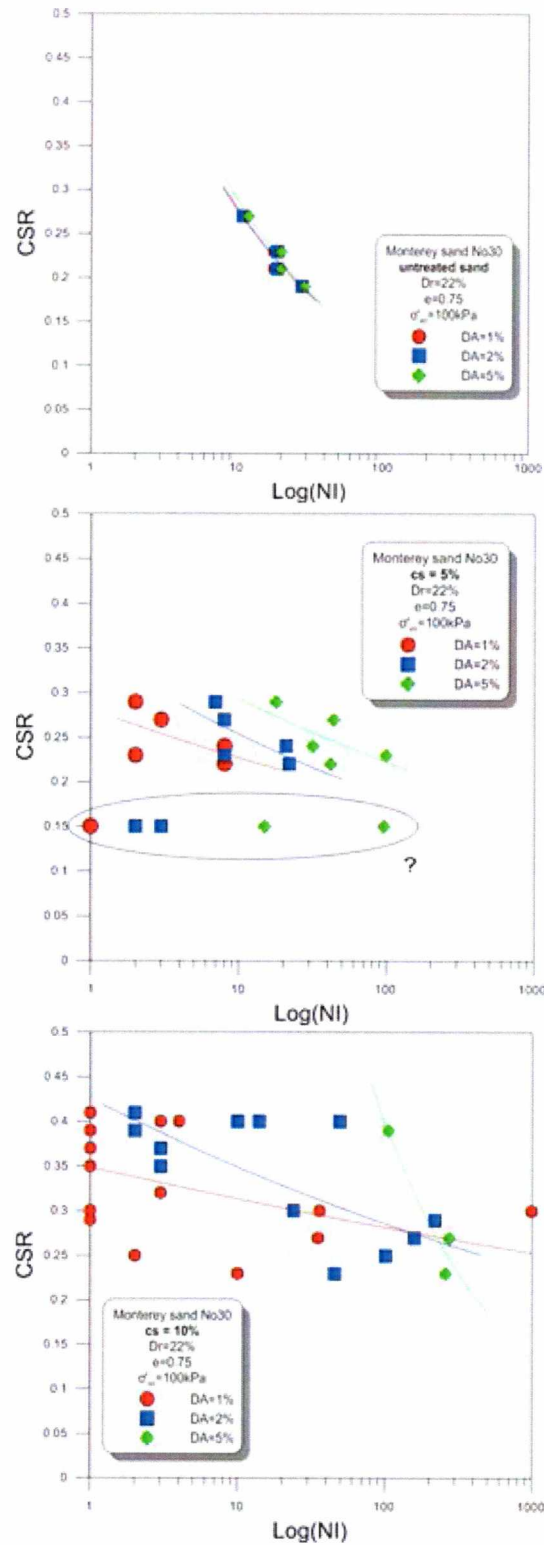
Δείγμα	CSR	Αριθμός Κύκλων	Κύκλοι για DA = 1%	Κύκλοι για DA =2%	Κύκλοι για DA = 5%
SM5-9A	0.22	100	8	22	42
SM5-9B	0.29	100	2	7	18
SM5-9C	0.17	100			
SM5-10A	0.15	100	1	2	15
SM5-10B	0.24	100	8	21	32
SM5-11C	0.23	100	2	8	100
SM5-12A	0.15	100	1	3	96
SM5-12B	0.27	100	3	8	44

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

SM10-10A	0.3	1000	36		
	0.4	200	–	49	
SM10-10B	0.4	500	3	10	
SM10-10C	0.23	300	10	46	261
SM10-10D	0.25	400	101	101	
SM10-11D	0.27	1000			
	0.4	200	4	14	
SM10-11F	0.27	400	35	159	276
SM10-13A	0.3	1000	992		
SM10-13B	0.37	400			
SM10-15A	0.29	300	1	220	
SM10-15B	0.25	400	2		
SM10-16A	0.3	200	1	24	
SM10-16B	0.35	300	1	3	
SM10-16C	0.39	200	1	2	106
SM10-17A	0.41	100	1	2	
SM10-17B	0.37	100	1	3	
SM10-17C	0.3	100			
SM10-18A	0.32	100	3		
SM10-18B	0.41	100	1	2	
SM10-18C	0.37	100	3		
SM15-12A	0.43	1000			
SM15-12B	0.43	1000			
SM15-12C	0.41	1000	10	901	
SM20-9A	0.44	1000			
SM20-9D	0.44	1000			
SM20-9E	0.44	1000			

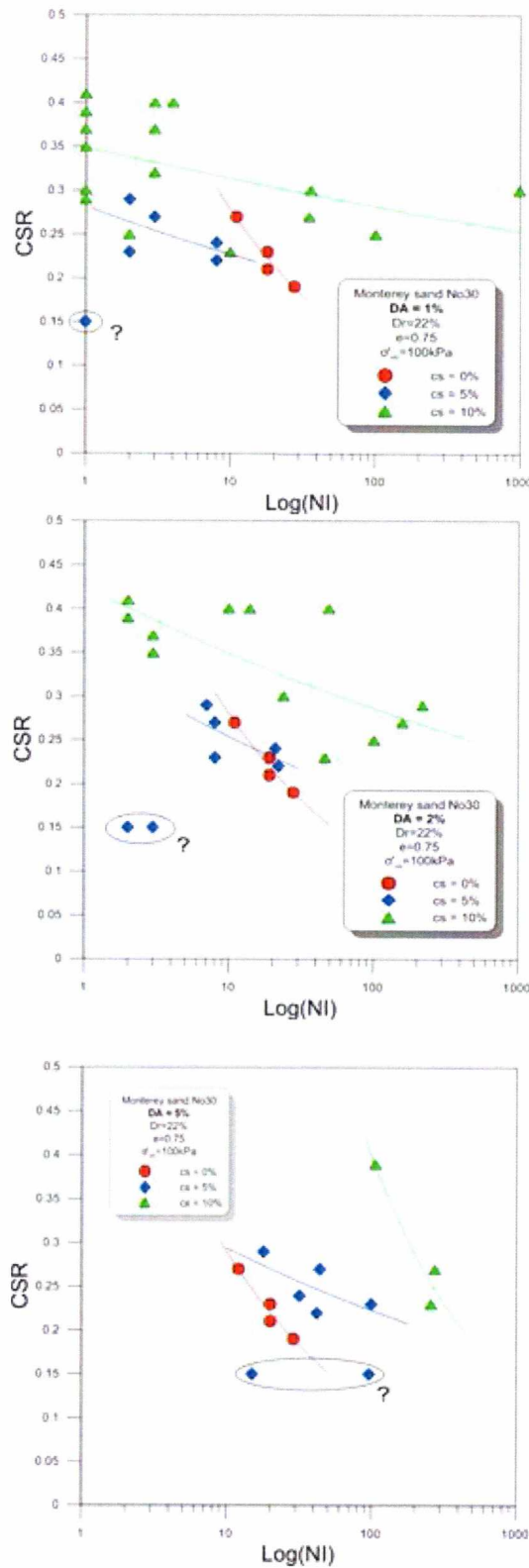
Πίνακας 3.10 Αποτελέσματα αστράγγιστων ανακυκλικών τριαξονικών δοκιμών σε όρους αριθμού κύκλων για την ανάπτυξη διαφορετικού επιπέδου ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης διπλού εύρους DA επί δοκιμίων στερεοποιημένων στα 100 kPa από άμμο Monterey No.30 , Dr =22% (e=0.75)σταθεροποιημένων με ποσοστά CS = 0 έως 20% (Gallagher, 2000)

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ



Σχήμα 3.19 Καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση για διαφορετικά επίπεδα ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης διπλού εύρους DA(%) και ίδιο, κάθε φορά, ποσοστό CS(%) στη σταθεροποίηση της άμμου Monterey No.30 , $D_r=22\%$ ($e=0.75$) στερεοποιημένα στα 100kPa (Gallagher and Mitchell, 2002)

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



Σχήμα 3.20 Καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση για διαφορετικά επίπεδα ανακυκλικής διαμητικής παραμόρφωσης διπλού εύρους DA(%) και ίδιο, κάθε φορά, ποσοστό CS(%) στη σταθεροποίηση της άμμου Monterey No.30 , Dr =22% (e=0.75)στερεοποιημένα στα 100kPa (Gallagher and Mitchell, 2002)

3.5.4 ΑΠΛΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

Οι Diaz Rodriguez et al. (2008) παρουσίασαν αποτελέσματα αστράγγιστων δοκιμών ανακυκλικής απλής διάτμησης με στόχο την ποσοτικοποίηση της αποτελεσματικότητας της παθητικής σταθεροποίησης της άμμου Lazaro Cardenas, για $D_r = 40\%$ και 60% ($e=1,010$ και $0,930$) και τάσεις στερεοποίησης $29,4\text{kPa}$, $58,8\text{ kPa}$ και $88,2\text{ kPa}$ που σταθεροποιήθηκε με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (Ludox-SM) στο υψηλό ποσοστό κατά βάρος $CS = 14,5\%$.

Συνολικά παρασκευάστηκαν 21 κορεσμένα δοκίμια άμμου στην συσκευή απλής διάτμησης, τα οποία σταθεροποιήθηκαν και επέτρεψαν τη διατμητική δοκιμή τους μετά από 7 ημέρες από τη μέρα διαποτισμού τους. Αντίστοιχα, έγιναν 21 δοκιμές σε αντίστοιχα δοκίμια φυσικής άμμου, στα οποία επεβλήθησαν επακριβώς οι ίδιες συνθήκες φόρτισης. Σε όλες τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε η συσκευή απλής διάτμησης τύπου του Νορβηγικού Γεωτεχνικού Ινστιτούτου (NGI) (Bjerrum και Landva 1966). Κατά τη διάρκεια της ανακυκλιζόμενης φόρτισης των δειγμάτων, διασφαλιστηκε η διατήρηση του ύψους δείγματος σταθερή, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση ενός σταθερού όγκου, κύριο χαρακτηριστικό αστράγγιστων συνθηκών (Finn και Vaid 1977). Επισημαίνεται ότι κατά τη διάρκεια της δοκιμής, δεν μετρήθηκαν πιέσεις πόρων άμεσα, αλλά εκτιμήθηκαν εμμέσως από τις αλλαγές στην κατακόρυφη τάση που απαιτούνται για να διατηρηθεί ένα σταθερό ύψος στο δοκίμιο.

Τα κύρια αποτελέσματα 21 δοκιμών ανακυκλικής απλής διάτμησης που διεξάγονται σε δείγματα φυσικής άμμου συνοψίζονται στον Πίνακα 3.11, ενώ τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τις 21 δοκιμές ανακυκλικής απλής διάτμησης επί άμμου σταθεροποιημένης με $CS = 14,5\%$ συνοψίζονται στον Πίνακα 3.12. Επισημαίνεται ότι η ρευστοποίηση ορίζεται όταν επιτυγχάνεται ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση διπλού εύρους $DA = 5\%$. Τα ίδια αποτελέσματα παρουσιάζονται και στα Σχήματα 3.19 και 3.20, όπου συγκρίνονται οι καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση για φυσική και σταθεροποιημένη άμμο Lazaro Cardenas, αντίστοιχως, σε σχετικές πυκνότητες (D_r) 40% και 60% , αντίστοιχα, για τρεις τιμές αρχικής ενεργής κατακόρυφης τάσης (σ'_{v0}) με βάση τα δεδομένα από τους Diaz-Rodriguez et al. (2008). Στο ίδιο σχήμα, χάριν συγκρίσεως, εμπεριέχονται και καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση για την ίδια άμμο από δοκιμές ανακυκλικής απλής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες αλλά εξόχως διαφορετικές τιμές D_r , όπως προέκυψαν από τους (Diaz-Rodriguez & Antonio-Izarraras, 2004) για αρχικές τάσεις $\sigma'_{v0} = 0,3\text{ kg/cm}^2$. Όπως αναμενόταν, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, για μία δεδομένη σχετική πυκνότητα D_r και ενεργό τάση σ'_{v0} , ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που απαιτούνται για την επίτευξη ρευστοποίησης (παραμόρφωση $DA = 5\%$) αυξάνει καθώς ο λόγος ανακυκλικών τάσεων CSR μειώνεται, και αυτό τόσο για φυσική όσο και για σταθεροποιημένη άμμο. Μάλιστα, οι καμπύλες ρευστοποίησης για φυσική και σταθεροποιημένη άμμο έχουν παρόμοιο σχήμα, αλλά η σχετική θέση και κλίση τους καθορίζονται από τη σχετική πυκνότητα, την αρχική ενεργό κατακόρυφη τάση (σ'_{v0}), και το ποσοστό CS . Όσο η αρχική ενεργός κατακόρυφη τάση (σ'_{v0}) αυξάνει, με όλες τις άλλες συνθήκες ίδιες, οι καμπύλες ρευστοποίησης

γίνονται λίγο πιο απότομες και κινούνται προς τα επάνω (δηλαδή, η άμμος εμφανίζει μεγαλύτερη ανακυκλική αντοχή).

Τα αποτελέσματα δείχνουν επίσης ότι η σχετική πυκνότητα και η αρχική ενεργός κατακόρυφη τάση (σ'_{vo}) επηρεάζουν την ανακυκλική αντίσταση ρευστοποίησης των φυσικών και σταθεροποιημένων άμμων. Για παράδειγμα, οι ανακυκλικές διατμητικές τάσεις (t_{cyc}) που απαιτούνται για να προκαλέσουν τη ρευστοποίηση σε 10 κύκλους στη φυσική άμμο με σχετική πυκνότητα $D_r=60\%$ και τιμές $\sigma'_{vo}=29,4, 58,8,$ και 88.2 kPa είναι περίπου 13,5%, 10%, και 12% μεγαλύτερες, αντίστοιχα, από τις τιμές σε καθαρή άμμο και σχετική πυκνότητα $D_r=40\%$, για τις ίδιες πάντα τιμές σ'_{vo} .

Επιπλέον, για χαμηλή αρχική ενεργό κατακόρυφη τάση $\sigma'_{vo}=29,4$ kPa, η σταθεροποιημένη άμμος με χαμηλότερη σχετική πυκνότητα $D_r=40\%$ εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερη αντοχή σε ρευστοποίηση σε σχέση με την άμμο με σχετική πυκνότητα $D_r=60\%$. Αυτά τα αποτελέσματα είναι σύμφωνα με τις παρατηρήσεις που σχετίζονται με την στατική σχέση τάσεων παραμορφώσεων για σταθεροποιημένες χαλαρές άμμους με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (Clough et al 1979, Krizek et al 1982). Πιο λεπτομερώς, η ελαφρώς μεγαλύτερη αντοχή σε ρευστοποίηση σε σταθεροποιημένες χαλαρές άμμους σε σχετικά χαμηλή τιμή σ'_{vo} μπορεί να εξηγηθεί από μια μεγαλύτερη αναλογία CS προς άμμο ανά μονάδα όγκου του εδάφους σε σύγκριση με τα πυκνότερα σταθεροποιημένα δείγματα (για μία δεδομένη συγκέντρωση CS). Αντίστοιχα, όσο η τάση σ'_{vo} αυξάνει το κέρδος στην αντίσταση σε ρευστοποίηση των σταθεροποιημένων άμμων επηρεάζεται λιγότερο από την αναλογία CS προς άμμο, και συνεπώς χρειάζεται μια διαφορετική προσέγγιση η όλη θεώρηση.

Λεπτομερής μελέτη των συγκρίσεων των Σχημάτων 3.21 έως 3.23 υποδεικνύει ότι για δεδομένες τιμές των σ'_{vo} και D_r , ο αριθμός των κύκλων που απαιτούνται για να προκληθεί η ρευστοποίηση αυξάνει σημαντικά λόγω της θεραπείας με CS, εκτός από την περίπτωση με $D_r=60\%$ σε $\sigma'_{vo}=29,4$ kPa, δηλαδή την περίπτωση όπου η φυσική άμμος εμφανίζει την πλέον διαστολική συμπεριφορά, ή με άλλα λόγια την περίπτωση για την οποία η ρευστοποίηση είναι η λιγότερο πιθανή. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η επίδραση των D_r και σ'_{vo} είναι πολύ μικρότερη στις σταθεροποιημένες, απ' ό,τι στις φυσικές άμμους.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Σχετική Πυκνότητα D_r (%)	Αρχική Ενεργός Κάθεται Τάση (σ'_{vo} kPa)	Ανακυκλική Τάση (τ_{cyc}) kPa	Λόγος Ανακυκλικής Τάσης (CSR)	Αριθμός κύκλων για $DA = 5\%$	Υπερτίεση πόρων σε $DA = 5\%$	Λόγος υπερτίεσης πόρων σε $DA = 5\%$
40	29.4	8.01	0.27	53	29.2	0.99
		10.55	0.36	9	29	0.99
		13.42	0.46	2	27.9	0.95
		16.38	0.56	1	26.6	0.9
		11.94	0.2	147	57.8	0.98
	58.8	13.26	0.23	56	57.7	0.98
		17.26	0.29	5	55.4	0.94
		18.99	0.32	2	52.3	0.89
		21.64	0.25	32	82.2	0.93
		23.99	0.27	10	78.6	0.89
60	29.4	30.93	0.35	3	74	0.84
		7.43	0.25	180	29.2	0.99
		11.06	0.38	13	28.5	0.97
		12.81	0.44	7	27.6	0.94
		17.88	0.61	1	23.4	0.8
	58.8	15.5	0.26	30	55.6	0.95
		18.41	0.31	7	53.8	0.92
		19.78	0.34	3	50.9	0.87
		21.78	0.25	61	84.2	0.95
		25.06	0.28	24	82.9	0.94
88.2	29.52	0.33	7	77.7	0.88	

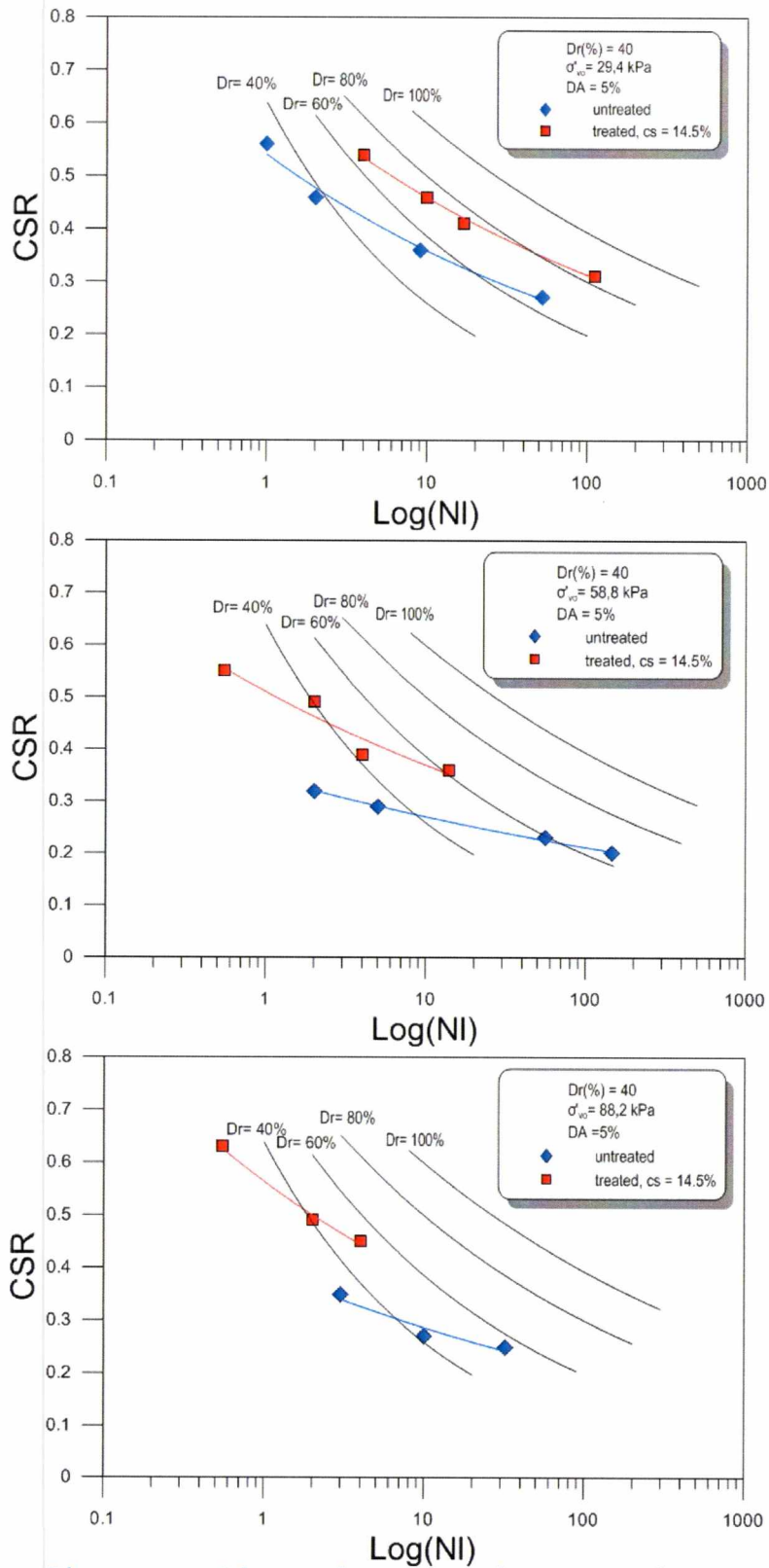
Πίνακας 3.11 Αρχικές συνθήκες και κύρια αποτελέσματα δοκιμών αστράγγιστης ανακυκλικής απλής διάτμησης για δείγματα φυσικής άμμου Lazaro-Cardenas (Diaz-Rodriguez et al., 2008)

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Σχετική Πυκνότητα Dr(%)	Αρχική Ενεργός Κάθετη Τάση (σ'_{vo} kPa)	Ανακυκλική Τάση (τ_{vc}) kPa	Λόγος Ανακυκλικής Τάσης (CSR)	Αριθμός κύκλων για DA = 5%	Υπερπίεση πόρων σε DA = 5%	Λόγος υπερπίεσης πόρων σε DA = 5%
40	29.4	9.11	0.31	112	27.93	0.95
		12.05	0.41	17	27.5	0.94
		13.52	0.46	10	25.5	0.87
		15.88	0.54	4	18.9	0.64
		21.17	0.36	14	53.5	0.91
	58.8	22.93	0.39	4	42	0.71
		28.81	0.49	2	43.8	0.74
		32.34	0.55	<1	—	—
		39.69	0.45	4	71.7	0.81
		43.22	0.49	2	73	0.83
60	29.4	55.57	0.63	<1	—	—
		7.35	0.25	205	29.5	1
		12.35	0.42	13	27.1	0.92
		14.11	0.48	4	23.8	0.81
		27.05	0.46	5	41	0.7
	58.8	29.99	0.51	2	44.2	0.75
		34.69	0.59	1	41.9	0.71
		30.87	0.35	33	70	0.79
		39.69	0.45	7	69	0.78
		46.75	0.53	1	68	0.77
		51.16	0.58	<1	—	—

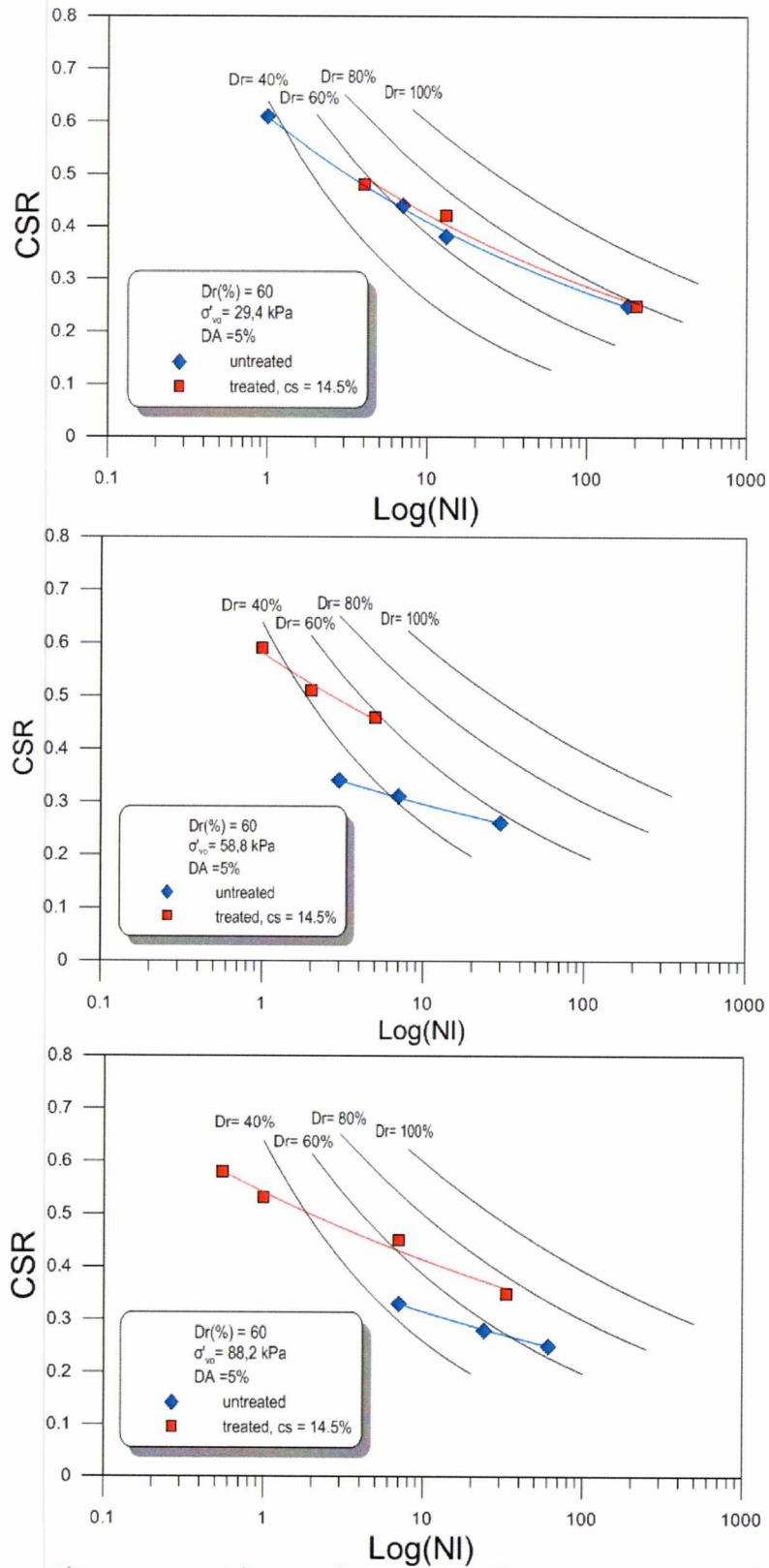
Πίνακας 3.12 Αρχικές συνθήκες και κύρια αποτελέσματα δοκιμών αστράγγιστης ανακυκλικής απλής διάτμησης για δείγματα άμμου Lazaro-Cardenas με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (Diaz-Rodriguez et al., 2008) CS=14,5%

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



Σχήμα 3.21 Σύγκριση καμπυλών αντοχής σε ρευστοποίηση για φυσική και σταθεροποιημένη (με Ludox-SM, CS=14.5%) άμμο Lazaro Cardenas με $D_r=40\%$, και 3 διαφορετικές τιμές αρχικής ενεργού τάσης σ'_{vc} (δεδομένα από Diaz-Rodríguez et al., 2008, καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση για διαφορετικές D_r της ίδιας άμμου από (Diaz-Rodríguez & Antonio-Izarraras, 2004)

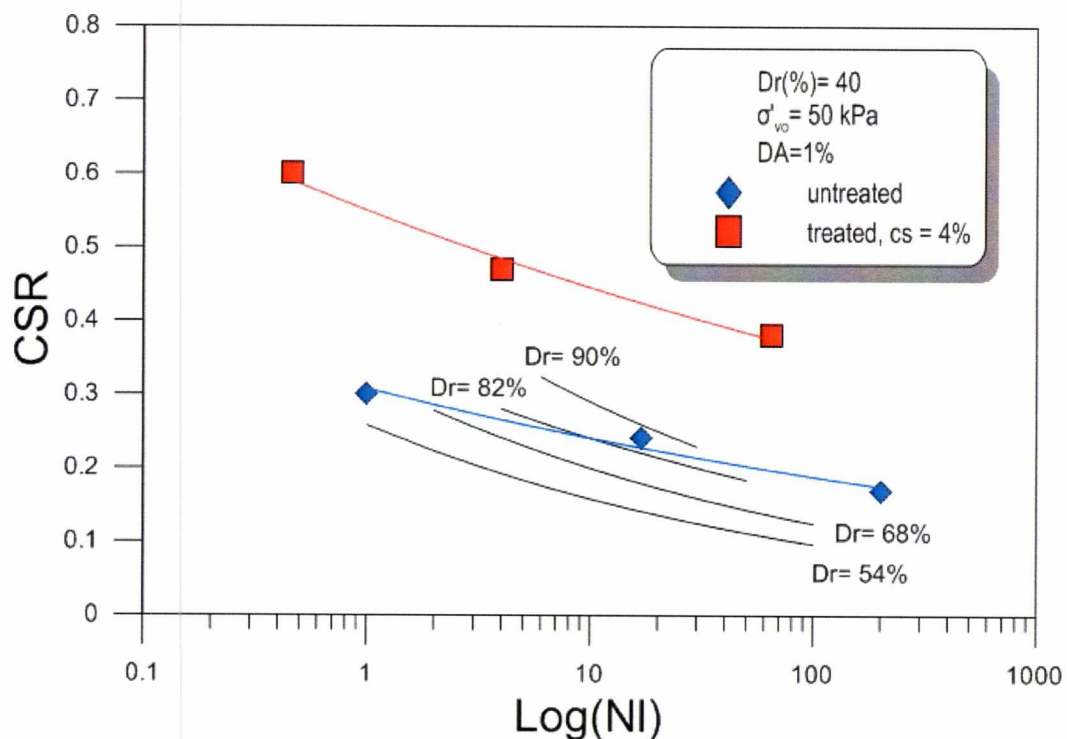
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ



Σχήμα 3.22 Σύγκριση καμπυλών αντοχής σε ρευστοποίηση για φυσική και σταθεροποιημένη (με Ludox-SM, CS=14.5%) άμμο Lazaro Cardenas με $D_r=60\%$, και 3 διαφορετικές τιμές αρχικής ενεργού τάσης σ'_{vo} (δεδομένα από Diaz-Rodriguez et al., 2008, καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση για διαφορετικές D_r της ίδιας άμμου από (Diaz-Rodriguez & Antonio-Izarraras, 2004).

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Αντίστοιχα με τα ανωτέρω αποτελέσματα, στη βιβλιογραφία βρέθηκαν καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση από αστραγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης σε φυσική και σταθεροποιημένη άμμο Toyoura με $D_r=40\%$ ($e = 0.825$), στεροποιημένη σε ενεργό κατακόρυφη τάση $\sigma'_{vo} = 50\text{kPa}$ (Kodaka et al 2005). Η σταθεροποίηση έγινε με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου ποσοστού κατά βάρος $CS = 4\%$, χωρίς να διευκρινίζονται όμως τα χαρακτηριστικά του. Η ρευστοποίηση στις δοκιμές αυτές ορίζεται όταν η ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση διπλού εύρους $DA = 1\%$, και οι σχετικές καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.21. Επισημαίνεται ότι επιλέχθηκε αυτή η τιμή της DA , καθώς τα σταθεροποιημένα δοκίμια δεν ανέπτυξαν μεγαλύτερες τιμές παραμόρφωσης.



Σχήμα 3.23 Σύγκριση καμπυλών αντοχής σε ρευστοποίηση για φυσική και σταθεροποιημένη ($CS=4\%$, αλλά ασαφούς τύπου κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου) άμμο Toyoura με $D_r=40\%$ και $\sigma'_{vo} = 50\text{kPa}$ (δεδομένα από Kodaka et al 2005, καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση για διαφορετικές D_r άμμου από De Alba et al. 1976)

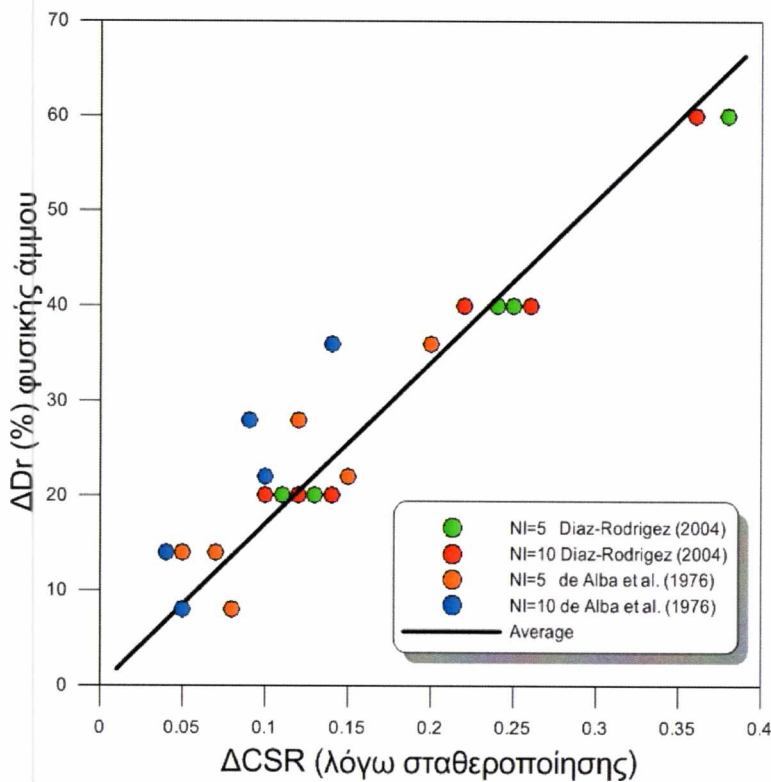
Από τα Σχήματα 3.21 έως 3.23 προκύπτει ότι για όλες τις άμμους και ανεξάρτητα από $D_r(\%)$, σ'_{vo} και $CS(\%)$, η σταθεροποίηση με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου οδηγεί σε αύξηση της αντοχής σε στερεοποίηση, δηλαδή σε αύξηση του CSR για τον ίδιο αριθμό κύκλων φόρτισης (ή σε αύξηση του αριθμού κύκλων φόρτισης για το ίδιο CSR). Αντίστοιχα όμως, από τα ίδια σχήματα (αλλά και τη σχετική βιβλιογραφία) προκύπτει ότι και η αύξηση της σχετικής πυκνότητας μιας φυσικής άμμου οδηγεί σε αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση. Συνεπώς, ως μια πρώτη αδρή προσέγγιση, προκύπτει ότι η ευεργετική επίδραση της σταθεροποίησης στην αντοχή σε ρευστοποίηση μιας φυσικής

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

άμμου ομοιάζει με την αντίστοιχη επίδραση μιας αύξησης της πυκνότητάς της (π.χ. λόγω συμπίκνωσης). Με αυτό το σκεπτικό, αν κάποιος συσχετίσει την αύξηση του CSR (ΔCSR) με την αύξηση της σχετικής πυκνότητας ($\Delta Dr(\%)$) σε φυσικές άμμους (π.χ. βλέπε καμπύλες των DeAlba et al. 1976), και μετά την αύξηση του CSR με την επίδραση της σταθεροποίησης (π.χ. βλέπε αποτελέσματα των Kodaka et al (2005), Diaz-Rodriguez et al. (2008)), μπορεί εν τέλει να συσχετίσει εμμέσως την επίδραση της σταθεροποίησης ως μια ισοδύναμη «ψευδο-αύξηση» της σχετικής πυκνότητας.

Για το σκοπό αυτό, εδώ χρησιμοποιούνται οι καθιερωμένες καμπύλες των DeAlba et al (1976), αλλά και οι καμπύλες των (Diaz-Rodriguez & Antonio-Izarraras, 2004) που αφορούν την άμμο Lazaro Cardenas (μία από τις σταθεροποιημένες άμμους). Η εν λόγω συσχέτιση ΔCSR με $\Delta Dr(\%)$ γίνεται για 2 τιμές του αριθμού κύκλων για ρευστοποίηση, $Ni=5$ και $Ni=10$, ώστε να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι οι καμπύλες ρευστοποίησης δε μετατοπίζονται λόγω συμπίκνωσης εντελώς παράλληλα προς τα άνω. Τα αποτελέσματα αυτής της συσχέτισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.24, απ' όπου προκύπτει μια στενή συσχέτιση η οποία μάλιστα μπορεί να αποδοθεί και με μια γραμμική σχέση για εύρος μεταβολής ΔDr έως 70%, και ΔCSR έως 0.4, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta Dr(\%) = 170.26 (\Delta CSR) \tag{3.1}$$



Σχήμα 3.24 Συσχέτιση αύξησης CSR (ΔCSR) που οδηγεί σε ρευστοποίηση (σε 5 και 10 κύκλους φόρτισης) λόγω αύξησης της σχετικής πυκνότητας $\Delta Dr(\%)$ σε φυσικές άμμους, με βάση δεδομένα από DeAlba et al. (1976) και (Diaz-Rodriguez & Antonio-Izarraras, 2004).

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 3.13 επιχειρείται η ζητούμενη αδρή προσέγγιση της επίδρασης της σταθεροποίησης (στην τιμή του CSR) ως μια ισοδύναμη «ψευδο-αύξηση» της σχετικής πυκνότητας, χρησιμοποιώντας τη σχέση 3.1. Πιο συγκεκριμένα, για τις 3 άμμους για τις οποίες υπάρχουν δεδομένα για ανακυκλική φόρτιση, και με βάση τις αρχικές τους συνθήκες (σ'_{vo} , $D_r(\%)$, e) και για 10 κύκλους φόρτισης ($N_l = 10$) εκτιμάται αρχικώς το ΔCSR λόγω σταθεροποίησης με βάση τα Σχήματα 3.19 έως 3.21. Στη συνέχεια εκτιμάται η αντιστοιχούσα «ψευδο-αύξηση» της πυκνότητας $\Delta D_r(\%)$ με βάση τη σχέση 3.1, και έτσι τελικώς εκτιμάται η τελική, προσαυξημένη, $D_r'(\%)$ και το τελικός δείκτης πόρων e' . Έτσι προκύπτει ότι οι 2 φυσικές άμμοι με σχετική πυκνότητα 40% έως 60%, τελικώς αποκρίθηκαν ως έχουσες σχετική πυκνότητα 53% έως 77% λόγω σταθεροποίησης, δηλαδή οι αμιγώς μέσης πυκνότητας άμμοι αποκρίθηκαν ως μέσης και υψηλής πυκνότητας άμμοι λόγω σταθεροποίησης.

άμμος	σ'_{vo} (kPa)	D_r (%)	e	N_l	ΔCSR	ΔD_r (%)	$D_r'(\%) =$ $D_r(\%) + \Delta D_r(\%)$	$e' = e_{max} -$ $D_r(e_{max} - e_{min})$
Lazaro Cardenas sand	29.4	40	1.010	10	0.11	17	57	0.942
Lazaro Cardenas sand	58.8	40	1.010	10	0.09	13	53	0.958
Lazaro Cardenas sand	88.2	40	1.010	10	0.12	19	59	0.934
Lazaro Cardenas sand	29.4	60	0.930	10	0.0105	3	63	0.918
Lazaro Cardenas sand	58.8	60	0.930	10	0.11	17	77	0.862
Lazaro Cardenas sand	88.2	60	0.930	10	0.09	13	73	0.878
Toyoura sand	50	40	0.825	10	0.2	33	73	0.6996

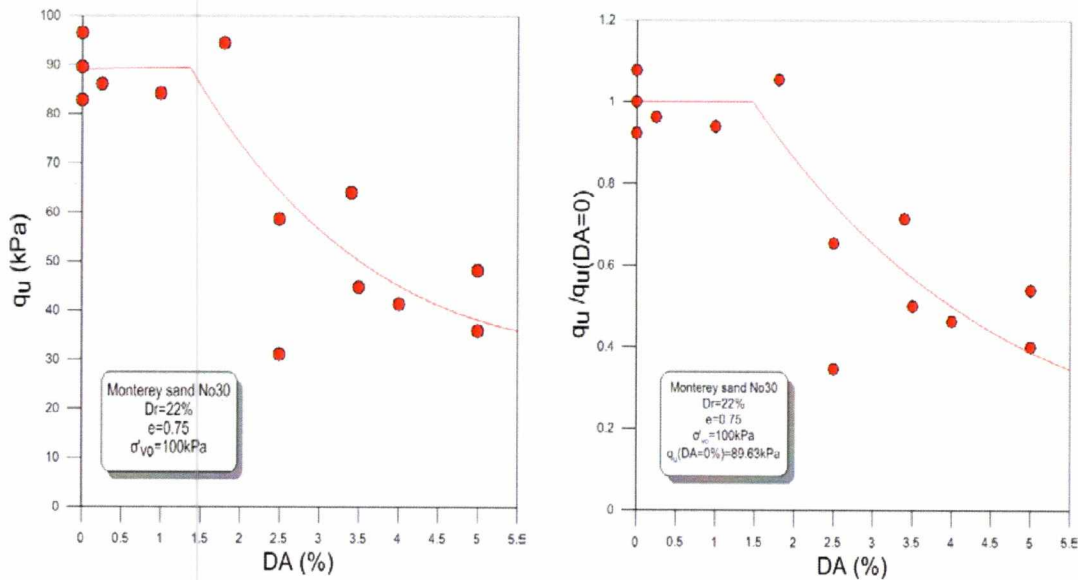
Πίνακας 3.13 Εκτίμηση της επίδρασης της σταθεροποίησης των άμμων Lazaro Cardenas (Diaz-Rodriguez et al 2008) και Toyoura (Kodaka et al 2005) ως μια «ψευδο-αύξηση» της σχετικής πυκνότητάς τους, με χρήση της σχέσης 3.1

3.6 ΜΕΤΑΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Πρακτικώς, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να διακριβωθεί ποια είναι η συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους, μετά τη σεισμική διέγερση. Δεδομένου ότι η παθητική σταθεροποίηση είναι ακόμη σε ερευνητικό στάδιο διεθνώς, μια καλή προσέγγιση της μετα-σεισμικής συμπεριφοράς του σταθεροποιημένου εδάφους γίνεται με μετρήσεις εργαστηρίου μετά το πέρας ανακυκλικών δοκιμών (διάτμησης ή τριαξονικών).

Πιο συγκεκριμένα, η Gallagher (2000) ή Gallagher and Mitchell (2002) παρουσιάζει δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης σε μία σειρά δειγμάτων άμμου Monterey No. 30, $D_r=22\%$ ($e=0,75$) σταθεροποιημένα με κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου (Ludox-SM) σε ποσοστό $CS=10\%$ που είχαν υποβληθεί αρχικά σε ανακυκλική τριαξονική φόρτιση (βλέπε και Πίνακα 3.9). Η μετρηθείσα q_u συσχετίστηκε στη συνέχεια με τη μέγιστη ανακυκλική παραμόρφωση διπλού εύρους $DA(\%)$ που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της προηγούμενης ανακυκλικής φόρτισης (ανεξαρτήτως του αριθμού κύκλων που αυτή εμφανίστηκε) και έτσι προέκυψε το Σχήμα 3.25α. Μάλιστα, χάριν γενίκευσης στο Σχήμα 3.25β, οι μετρηθείσες τιμές q_u κανονικοποιήθηκαν ως προς τη μέση q_u που είχαν τα εν λόγω δοκίμια πριν την ανακυκλική φόρτιση (παρουσιάζεται ως $q_u(DA=0)$). Όπως προκύπτει, η σταθεροποιημένη άμμος δε δείχνει να έχει απομειωμένη αντοχή (σε ανεμπόδιστη θλίψη) αν η προηγούμενη ανακυκλική φόρτιση είχε επιβάλλει μέγιστη DA μικρότερη από 1.5%, μια οριακή τιμή που δε μπορεί να θεωρηθεί μικρή και αντιστοιχεί σε αρκετά ισχυρή σεισμική δόνηση. Από εκεί και πέρα, όσο αυξάνει η μέγιστη DA , τόσο μειώνεται η αντοχή (σε ανεμπόδιστη θλίψη), αλλά για να φθάσει η (μετα-σεισμική) q_u στο 40% της αρχικής (προ-σεισμικής) τιμής της, πρέπει να έχει υποστεί εξαιρετικά ισχυρή δόνηση που να έχει επιβάλλει μέγιστη $DA = 5.5\%$ (πολύ μεγάλη τιμή), κατά μέσο όρο. Αυτή η απομείωση μπορεί να αποδωθεί σε καταστροφή των δεσμών του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου, αν και ακόμη δεν έχει διερευνηθεί το όλο θέμα εκτενώς.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



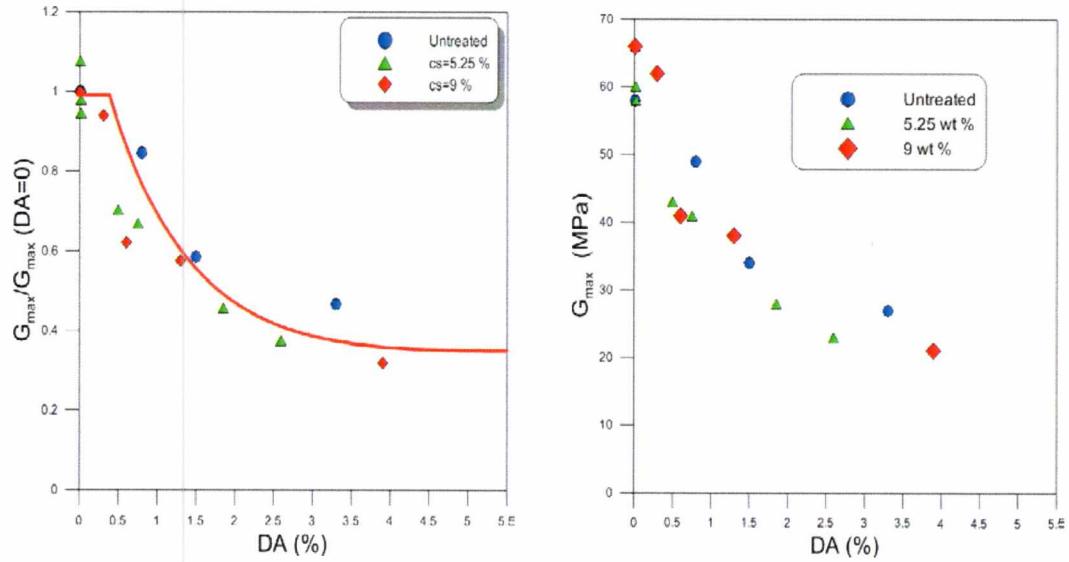
Σχήμα 3.25 Απομείωση της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u για άμμο Monterey No 30 ($D_r=22\%$, $e=0.75$) σταθεροποιημένη με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (Ludox-SM) σε ποσοστό $CS=10\%$ μετά από ανακυκλική τριαξονική φόρτιση που επέβαλλε μέγιστη παραμόρφωση DA (%) (δεδομένα από Gallagher, 2000 ή Gallagher and Mitchell 2002)

Κατ' αντιστοιχία, η Conlee (2010) παρουσιάζει μετρήσεις του μέγιστου (ελαστικού) μέτρου διάτμησης G_{max} σε άμμο Monterey Sand, $D_r=22\%$, ($e=0.75$) και Nevada Sand, $D_r=41\%$, $e=0.73$ σταθεροποιημένα με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (Ludox-SM) σε ποσοστά $CS = 5.25\%$ και 9% που είχαν υποβληθεί αρχικά σε ανακυκλική τριαξονική φόρτιση. Η μετρηθείσα τιμή G_{max} συσχετίστηκε στη συνέχεια με τη μέγιστη ανακυκλική παραμόρφωση διπλού εύρους $DA(\%)$ που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της προηγούμενης ανακυκλικής φόρτισης (ανεξαρτήτως του αριθμού κύκλων που αυτή εμφανίστηκε) και έτσι προέκυψε το Σχήμα 3.26α. Μάλιστα, χάριν γενίκευσης στο Σχήμα 3.26β, οι μετρηθείσες τιμές G_{max} κανονικοποιήθηκαν ως προς τη μέση G_{max} που είχαν τα εν λόγω δοκίμια πριν την ανακυκλική φόρτιση (παρουσιάζεται ως $G_{max}(DA=0)$). Όπως προκύπτει, η σταθεροποιημένη άμμος δε δείχνει να έχει απομειωμένο μέγιστο μέτρο διάτμησης G_{max} αν η προηγούμενη ανακυκλική φόρτιση είχε επιβάλλει μέγιστη DA μικρότερη από 0.5% , μια οριακή τιμή που μπορεί να εμφανιστεί και σε μέτριας έντασης διεγέρσεις. Από εκεί και πέρα, όσο αυξάνει η μέγιστη DA , τόσο μειώνεται το μέγιστο μέτρο διάτμησης, αλλά για να φθάσει το (μετα-σεισμική) G_{max} στο 40% της αρχικής (προ-σεισμικής) τιμής του, πρέπει να έχει υποστεί εξαιρετικά ισχυρή δόνηση που να έχει επιβάλλει μέγιστη $DA = 2.5\%$ (αρκετά μεγάλη τιμή), κατά μέσο όρο.

Με βάση τα Σχήματα 3.23 και 3.24 προκύπτει ότι η μετα-σεισμική απόκριση της σταθεροποιημένης άμμου χαρακτηρίζεται από μειωμένες τιμές G_{max} και q_u , αν και μόνο αν η προηγούμενη σεισμική φόρτιση έχει υποβάλλει μέγιστη τιμή ανακυκλικής παραμόρφωσης διπλού εύρους $DA = 0.5 - 1.5\%$, με το G_{max} να είναι πιο ευαίσθητο και να απομειώνεται με το κάτω όριο αυτού του εύρους και την q_u να απομειώνεται με το άνω

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

όριο. Γενικότερα, η απομείωση φθάνει, κατά μέσο όρο, έως το 35-40% των αρχικών τιμών, με το G_{max} ως πιο ευαίσθητο να το προσεγγίζει μετά από $DA = 2.5\%$ και την q_u να προσεγγίζει αυτή την τιμή μετά από $DA = 5.5\%$.



Σχήμα 3.26 Απομείωση του μέγιστου μέτρου διάτμησης G_{max} για άμμο Monterey No 30 ($D_r=22\%$, $e=0.75$) και Nevada Sand, $D_r= 41\%$, $e=0.73$ σταθεροποιημένη με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (Ludox-SM) σε ποσοστά CS = 5.25% και 9% μετά από ανακυκλική τριαξονική φόρτιση που επέβαλλε μέγιστη παραμόρφωση DA (%) (δεδομένα από Conlee 2010)

4 ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΑΜΜΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται η προσομοίωση των σταθεροποιημένων άμμων. Αυτό δε γίνεται με την κατάστρωση νέων καταστατικών σχέσεων, καθώς δε βρέθηκε στη βιβλιογραφία ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο περιγραφής της εν λόγω μηχανικής συμπεριφοράς ή ένα ολοκληρωμένο σετ δοκιμών επί μίας σταθεροποιημένης άμμου αλλά αποσπασματικές δοκιμές σε πέντε (5) διαφορετικές σταθεροποιημένες άμμους. Έτσι, για τις ανάγκες καταστατικής προσομοίωσης θα χρησιμοποιηθεί το τελικό συμπέρασμα από το Κεφάλαιο 3, δηλαδή ότι η συμπεριφορά της σταθεροποιημένης άμμου ομοιάζει στη συμπεριφορά άμμου που είναι πυκνότερη της φυσικής. Συνεπώς, για το σκοπό της εν λόγω προσπάθειας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εν δυνάμει, ένα υπάρχον καταστατικό προσομοίωμα για μη συνεκτικά εδάφη που να έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς μη συνεκτικών εδαφών υπό διαφορετικές πυκνότητες με την ίδια ομάδα σταθερών.

Για το σκοπό αυτό λοιπόν επελέγη το προσομοίωμα των Dafalias and Manzari (2004), βαθμονομημένο για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της άμμου Toyoura, μιας από τις άμμους που έχουν σταθεροποιηθεί στη βιβλιογραφία. Έτσι, στην επόμενη παράγραφο δίνονται κάποια ενδεικτικά στοιχεία για το εν λόγω προσομοίωμα και την ακρίβεια προβλέψεων της μηχανικής συμπεριφοράς της άμμου Toyoura που αυτό προσφέρει.

4.1 ΤΟ ΕΠΙΛΕΓΕΝ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΚΑΙ Η ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΤΟΥ

Το προσομοίωμα των Dafalias and Manzari (2004) είναι ένα σύγχρονο ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα Οριακής Επιφάνειας (Bounding Surface) που στηρίζεται στις αρχές της Εδαφομηχανικής Κρίσιμης Κατάστασης. Έχει μια μικρή κινηματικώς κρατυνόμενη επιφάνεια διαρροής και διαθέτει ομοιόθετες επιφάνειες Διαστολικότητας, Κρίσιμης Κατάστασης και Οριακής Επιφάνειας, η απόσταση των οποίων μεταξύ τους καθορίζονται με βάση την εκάστοτε τρέχουσα τιμή της παραμέτρου κατάστασης ψ (Been and Jefferies 1985). Χαρακτηρίζεται από μη-συσχετισμένο νόμο ροής, ενώ ο νόμος προβολής του, μαζί με την κινηματική κράτυνση της επιφάνειας διαρροής εξασφαλίζουν τη δυνατότητα πρόβλεψης και της ανακυκλικής συμπεριφοράς. Έχει πρόβλεψη για επιτυχή προσομοίωση των συνθηκών ρευστοποίησης μέσω ενός εξελισσόμενου τανυστή δομής-διαστολικότητας που επηρεάζει το μέγεθος της προβλεπόμενης διαστολικότητας ειδικά σε συνθήκες μικρών ενεργών τάσεων και διαδοχικές αποφορτίσεις-επαναφορτίσεις.

Η συσχέτιση των ομοιόθετων επιφανειών του προσομοιώματος μέσω της παραμέτρου κατάστασης ψ εξασφαλίζει ακριβή προσομοίωση (τουλάχιστον) της μονοτονικής συμπεριφοράς μη συνεκτικών εδαφών. Στη δημοσίευσή τους έχουν βαθμονομήσει τις

**ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ**

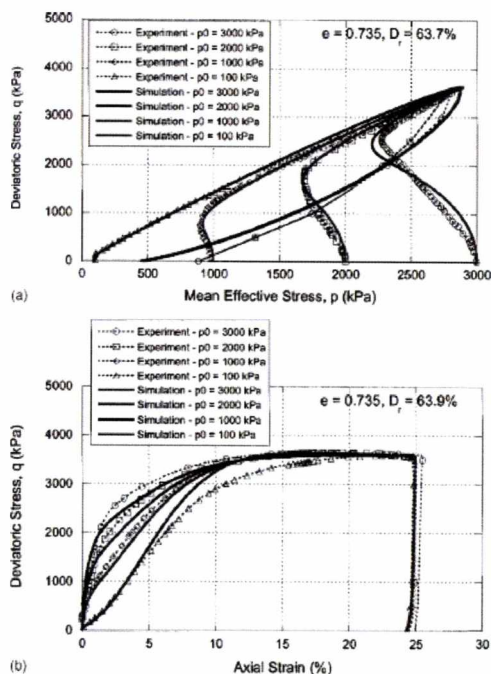
15 σταθερές του προσομοιώματος επί των πειραματικών δεδομένων της άμμου Toyoura, όπως αυτά πρωτοπαρουσιάστηκαν από τους Verdugo and Ishihara (1996). Πρόκειται για ένα εξαιρετικό σετ μονοτονικών τριαξονικών δοκιμών, τόσο σε στραγγιζόμενες όσο και σε αστράγγιστες συνθήκες, με τιμές αρχικών τάσεων που κυμαίνονται από 100 έως 3000kPa, και δείκτη πόρων (λόγο κενών) e που κυμαίνεται μεταξύ 0.735 ($D_r=63.7\%$) και 0.907 ($D_r=18.5\%$). Οι τιμές των σταθερών που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της άμμου Toyoura γι' αυτό το μεγάλο εύρος διακύμανσης των αρχικών συνθηκών παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Μέγεθος	Σταθερά	Τιμή
Ελαστικότητα	G_0	125
	ν	0.05
Κρίσιμη Κατάσταση	M	1.25
	c	0.712
	λ_c	0.019
	e_0	0.934
	ξ	0.7
Επιφάνεια διαρροής	m	0.01
Πλαστικό μέτρο κράτυνσης	h_0	7.05
	c_h	0.968
	n^b	1.1
Διασταλτικότητα	A_0	0.704
	n^d	3.5
Τανυστής Δομής-Διασταλτικότητας	z_{max}	4
	C_z	600

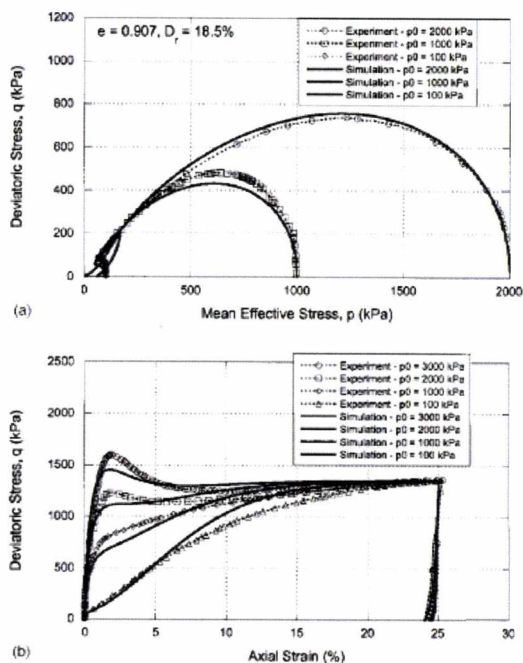
Πίνακας 4.1 Τιμές σταθερών για το προσομοίωμα των Dafalias and Manzari (2004) για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της άμμου Toyoura, ανεξαρτήτως αρχικών συνθηκών.

Στα Σχήματα 4.1 έως 4.3 δείχνονται ενδεικτικά οι συγκρίσεις προσομοιώσεων των Dafalias and Manzari (2004) και πειραματικών αποτελεσμάτων των Verdugo and Ishihara (1996) από μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές για την άμμο Toyoura υπό αστράγγιστες συνθήκες, σε διάφορες τιμές του λόγου κενών ($e=0.735 - 0.907$) και αρχική ενεργό μέση τάση που κυμαίνεται από 100 έως 3000 kPa. Προκύπτει εξαιρετική σύμπτωση προσομοιώσεων - μετρήσεων, τόσο στην ενεργό τασική όδευση όσο και στη σχέση τάσεων παραμορφώσεων, και αυτή η εξαιρετική ακρίβεια του προσομοιώματος επιτυγχάνεται με ένα σετ τιμών για τις 15 σταθερές του προσομοιώματος, παρά το πολύ μεγάλο εύρος διακύμανσης των αρχικών συνθηκών.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

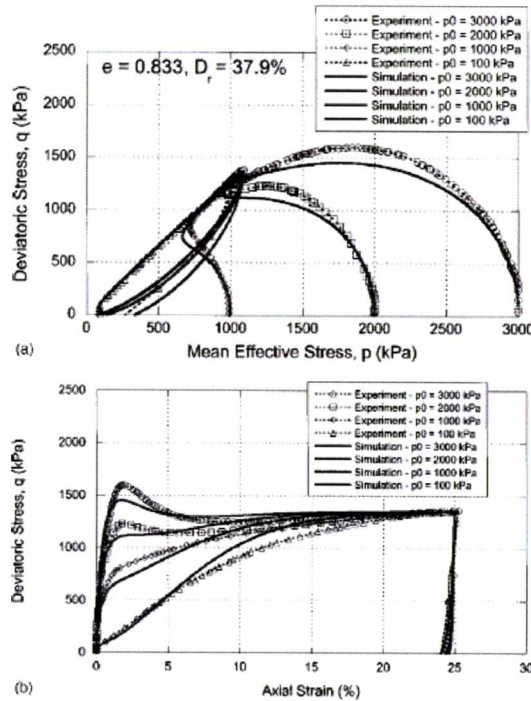


Σχήμα 4.1 Προσομοιώσεις των Dafalias & Manzari (2004) (με τιμές σταθερών από Πίνακα 4.1) και πειράματα σε μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές για την άμμο Τογούρα υπό αστραγγιστες συνθήκες, σε λόγο κενών $e=0.735$, ενώ η αρχική ενεργός μέση τάση κυμαίνεται από 100 ~ 3000 kPa (Verdugo and Ishihara 1996)



Σχήμα 4.2 Προσομοιώσεις των Dafalias & Manzari (2004) (με τιμές σταθερών από Πίνακα 4.1) και πειράματα σε μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές για την άμμο Τογούρα σε αστραγγιστες συνθήκες, σε λόγο κενών $e=0.907$, ενώ η αρχική ενεργός μέση τάση κυμαίνεται από 100 ~ 3000 kPa (Verdugo and Ishihara 1996)

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ

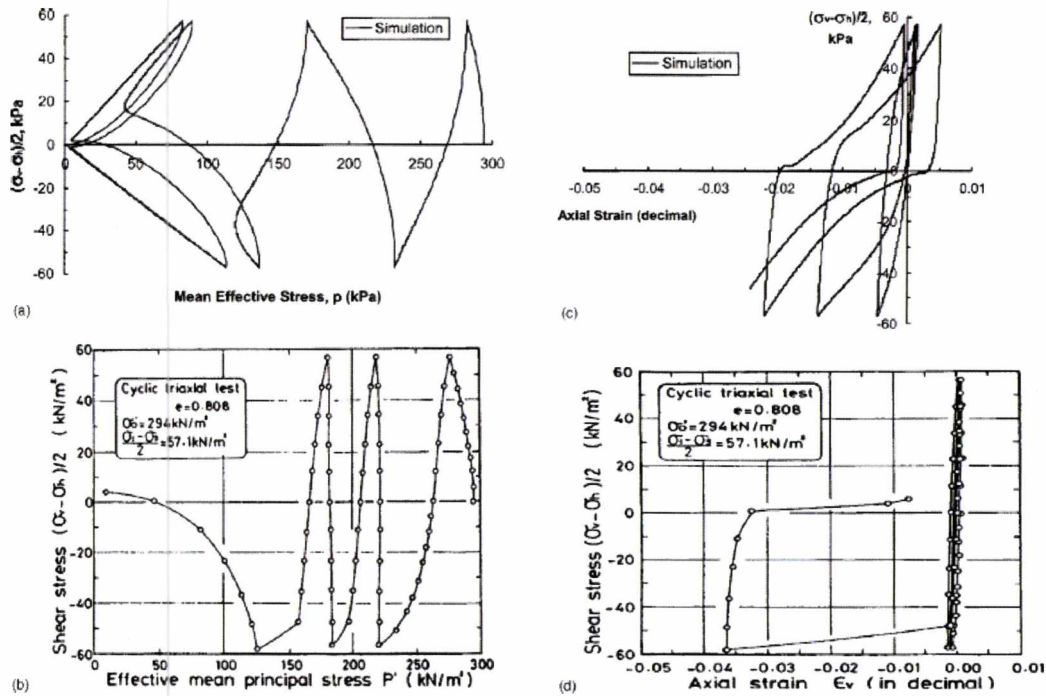


Σχήμα 4.3 Προσομοιώσεις των Dafalias & Manzari (2004) (με τιμές σταθερών από Πίνακα 4.1) και πειράματα σε μονοτονικές τριαξονικές δοκιμές για την άμμο Τογουρα σε αστράγγιστες συνθήκες, ο λόγος κενών $e=0.833$, ενώ η αρχική ενεργός μέση τάση κυμαίνεται από 100 ~ 3000 kPa (Verdugo and Ishihara 1996)

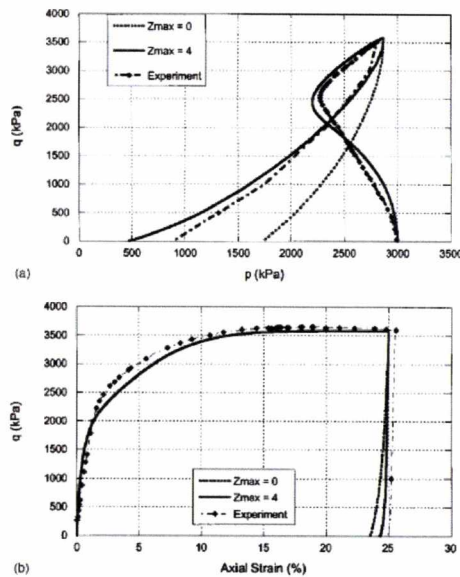
Οι συγκρίσεις στα Σχήματα 4.1 έως 4.3 αφορούν κυρίως μονοτονική φόρτιση, ενώ για θέματα ανακυκλικής φόρτισης εμφανίζονται μέσω των επιτυχημένων προσομοιώσεων των κλάδων αποφόρτισης. Όμως, η ανακυκλική φόρτιση είναι ένα θέμα αρκετά πιο πολύπλοκο από έναν κλάδο αποφόρτισης, ειδικά για μη-συνεκτικά εδάφη και εφόσον αυτά προσεγγίζουν πολύ μικρές τιμές μέσης ενεργού τάσης λόγω ρευστοποίησης. Έτσι, στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται σύγκριση προσομοιώσεων - μετρήσεων για μια ανακυκλική τριαξονική δοκιμή υπό αστράγγιστες συνθήκες στην άμμο Τογουρα, απ' όπου προκύπτει ικανοποιητική ακρίβεια προσομοίωσης και πάλι.

Για τους κλάδους αποφόρτισης, μα κυρίως για το ευρύτερο θέμα της ανακυκλικής φόρτισης, ιδιαίτερη σημασία έχουν οι σταθερές z_{max} και c_z που σχετίζονται με τον τανυστή δομής-διασταλτικότητας z (Πίνακας 4.1). Η σημασία αυτών στον καθορισμό του τανυστή z , και συμπερασματικά στην προσομοίωση κλάδων αποφόρτισης μετά από φάση διαστολικής συμπεριφοράς, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5, όπου συγκρίνονται προσομοιώσεις με $z_{max} = 0$ (άρα και $z=0$) και με $z_{max} = 4$ (δηλ. την τιμή για την άμμο Τογουρα, βλέπε Πίνακα 4.1). Από τη σύγκριση αυτή προκύπτει ότι αν δε λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του τανυστή z , το προσομοίωμα δε μπορεί να προβλέψει την έντονα συστολική συμπεριφορά κατά την αποφόρτιση μετά από φάση διαστολικής συμπεριφοράς, και συνεπώς δε μπορεί να προσομοιώσει με επιτυχία το ρυθμό ανάπτυξης υπερπίεσεων πόρων που οδηγούν σε ρευστοποίηση.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ



Σχήμα 4.4 Προσομοίωση των Dafalias & Manzari (2004) (με τιμές σταθερών από Πίνακα 4.1) και πείραμα από ανακυκλική τριαξονική δοκιμή για την άμμο Toyoura σε αστράγγιστες συνθήκες, σε λόγο κενών $e=0.808$ και αρχική ενεργός μέση τάση 294kPa (Ishihara et al. 1975): (α και γ) προσομοίωση, (β και δ) πείραμα



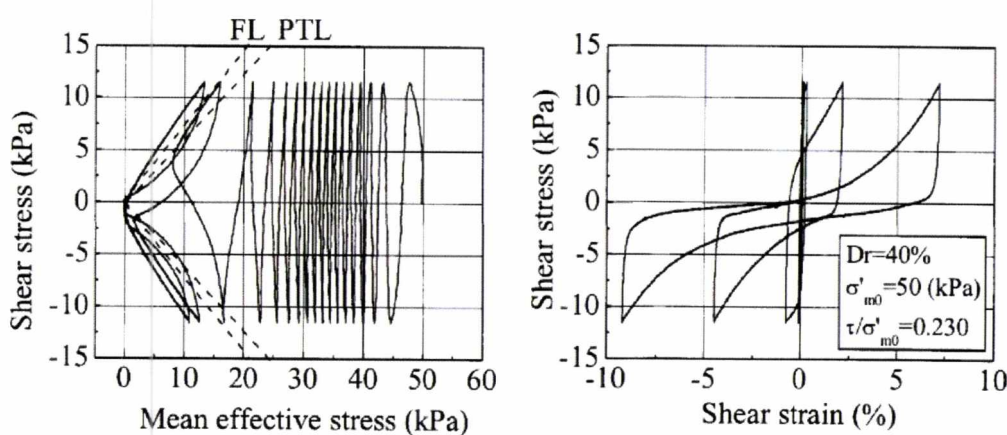
Σχήμα 4.5 Επίδραση τιμής σταθεράς z_{max} που καθορίζει τη μέγιστη επίδραση του τανυστή δομής-διαστολικότητας στην προβλεπόμενη συμπεριφορά αποφόρτισης μετά από φάση διαστολικής φόρτισης υπό αστράγγιστες τριαξονικές συνθήκες, για $p_0 = 3000$ kPa (από Dafalias and Manzari, 2004)

4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Το προσομοίωμα των Dafalias and Manzari (2004) θα χρησιμοποιηθεί εδώ ως έχει με στόχο την προσομοίωση της ανακυκλικής φόρτισης σταθεροποιημένων εδαφών. Η προσομοίωση θα βασιστεί στην αδρή προσέγγιση που προέκυψε από το Κεφάλαιο 3, ότι δηλαδή η σταθεροποίηση με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου αντιστοιχεί σε μια «ψευδό»-αύξηση της πυκνότητας του σταθεροποιημένου εδάφους. Συνεπώς, το εν λόγω προσομοίωμα θα χρησιμοποιηθεί αρχικώς με τις σταθερές του Πίνακα 4.1, αλλά με αλλαγή (αύξηση) στην τιμή του δείκτη πόρων e , με στόχο την προσομοίωση της σταθεροποίησης. Επισημαίνεται ότι εκτελέστηκαν περί τις 80 παραμετρικές αναλύσεις με το εν λόγω προσομοίωμα, που παρουσιάζονται λεπτομερώς μόνο στο Παράρτημα αυτής της εργασίας. Υπογραμμίζεται επίσης ότι η ρευστοποίηση ορίζεται όταν ο λόγος υπερπίεσης των πόρων (u_v) πλησίαζε την τιμή 1, που αντιστοιχεί σε μέση ενεργό τάση (p) που πλησιάζει την τιμή 0. Τέλος, αναφέρεται ότι εκτελέστηκαν μόνο τριαξονικές αναλύσεις με το εν λόγω προσομοίωμα, και όχι απλής (ή στρεπτικής) διάτμησης όπως θα απαιτούσαν επακριβείς προσομοιώσεις, κι αυτό χάριν απλότητας. Συνεπώς, οι όποιες συγκρίσεις με σχετικά πειράματα έχουν *a priori* μόνο ποιοτική και όχι ποσοτική αξία.

4.2.1 ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Ως πρώτη προσέγγιση προσομοίωσης, υιοθετήθηκαν οι τιμές σταθερών του Πίνακα 4.1, που θεωρητικά αντιστοιχούν στην άμμο Toyoura. Για την εν λόγω άμμο, έχουν εκτελεσθεί οι δοκιμές στρεπτικής διάτμησης των Kodaka et al (2005), αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται ενδεικτικά στο Σχήμα 4.6.

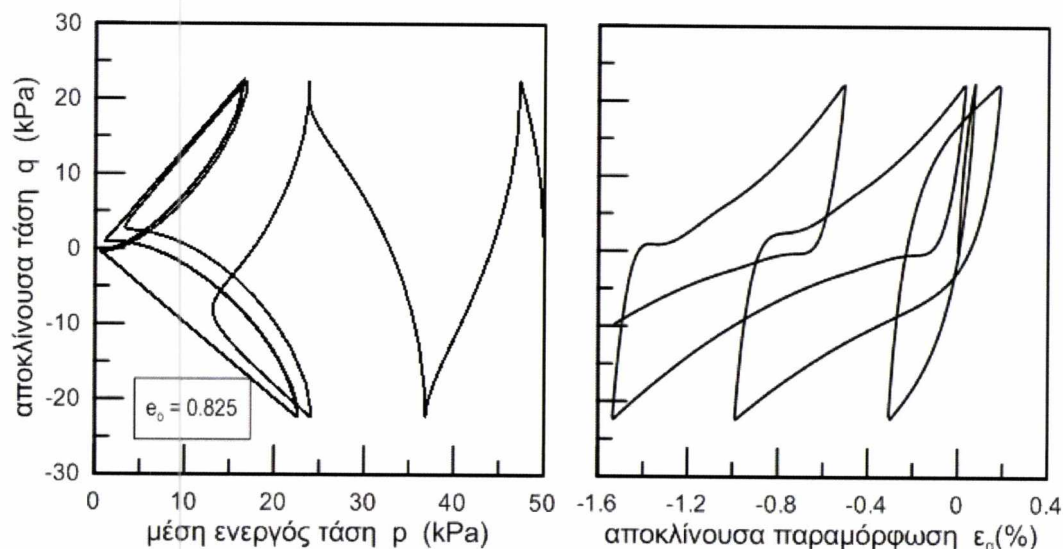


Σχήμα 4.6 Ενεργός τασική όδευση και σχέση τάσεων παραμορφώσεων από πείραμα ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσική άμμο Toyoura με $D_r=40\%$ ($e=0.825$), $\sigma'_{m0}=50$ kPa και $\tau/\sigma'_{m0}=0.230$. (Kodaka et al, 2005)

Χάριν σύγκρισης, στο Σχήμα 4.7 παρουσιάζονται αποτελέσματα από ανάλυση για ανακυκλική τριαξονική φόρτιση με $CSR=0.45$ με τις τιμές σταθερών του Πίνακα 4.1

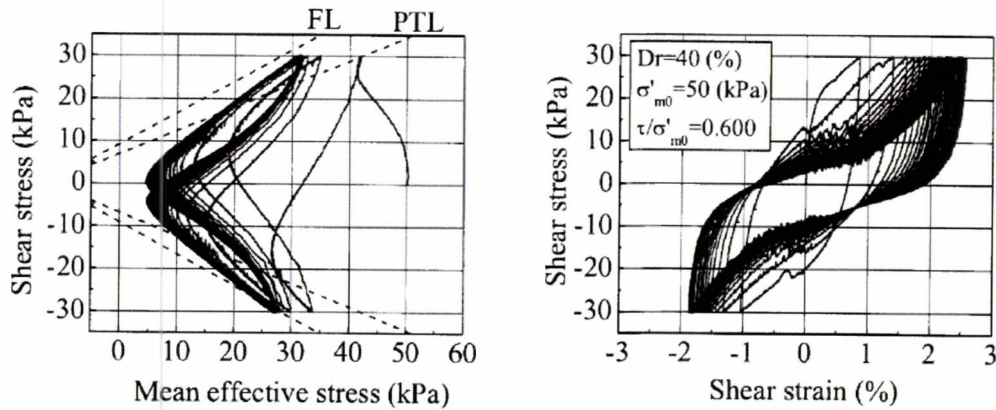
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

(που αφορούν στην άμμο Toyoura), αρχική τάση $p_{ini}= 50$ kPa (όπως στο Σχήμα 4.6) και αρχικό δείκτη πόρων $e=0.825$ (όπως στο Σχήμα 4.6). Συγκρίνοντας το πείραμα (Σχήμα 4.6) και την προσομοίωση (Σχήμα 4.7) προκύπτει ποιοτική ομοιότητα (π.χ. ανάλυση που οδηγεί σε ρευστοποίηση ($r_u=1$), που σχετίζεται με ανάπτυξη μεγάλων παραμορφώσεων).



Σχήμα 4.7 Ενεργός τασική όδευση και σχέση τάσεων παραμορφώσεων από ανάλυση ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης υπό αστράγγιστες συνθήκες με το προσομοίωμα των Dafalias & Manzari (2004), τις τιμές σταθερών του Πίνακα 4.1 (που αφορούν στην άμμο Toyoura), αρχική τάση $p_{ini}= 50$ kPa, αρχικό δείκτη πόρων $e=0.825$ και $CSR = 0.45$.

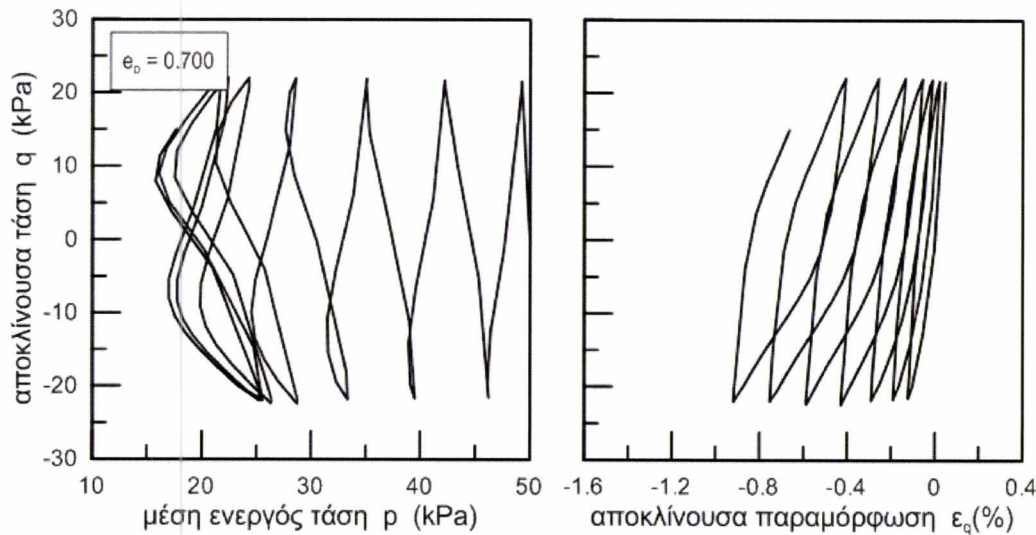
Στη συνέχεια, ο στόχος ήταν να προσομοιωθεί η συμπεριφορά της σταθεροποιημένης (με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου) άμμου στις ίδιες αρχικές συνθήκες και υπό την ίδια ακριβώς φόρτιση. Η συμπεριφορά με βάση την πειραματική διερεύνηση παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ

Σχήμα 4.8 Ενεργός τασική όδευση και σχέση τάσεων παραμορφώσεων από πείραμα ανακυκλικής στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες σε φυσική άμμο Toyoura με $D_r=40\%$ ($e=0.825$), $\sigma'_{m0}=50$ kPa και $\tau/\sigma'_{m0}=0.60$. (Kodaka et al, 2005)

Σύμφωνα με την αδρή προσέγγιση που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3, και ειδικά στον Πίνακα 3.11, για την άμμο Toyoura, η σταθεροποίηση άμμου με αρχική τάση $p_{ini}=50$ kPa, $e=0.825$ μπορεί να επιτευχθεί με μείωση της τιμής του δείκτη πόρων σε $e=0.70$. Έτσι, στη συνέχεια έγιναν αναλύσεις για ανακυκλική τριαξονική φόρτιση με τις τιμές σταθερών του Πίνακα 4.1 (που αφορούν στην άμμο Toyoura), αρχική τάση $p_{ini}=50$ kPa (όπως στο Σχήμα 4.8) και αρχικό δείκτη πόρων $e=0.70$.

Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζονται ενδεικτικά αποτελέσματα από μία από αυτές τις αναλύσεις (εκείνης με $CSR = 0.45$ που είναι αντίστοιχη με την ανάλυση του Σχήματος 4.7) που αποπειράται να προσομοιώσει ποιοτικά τη συμπεριφορά του σταθεροποιημένου εδάφους του Σχήματος 4.8. Όπως προκύπτει, πράγματι η ανάλυση υποδεικνύει πιο σταθερή συμπεριφορά με μικρότερες παραμορφώσεις και μεγαλύτερο αριθμό κύκλων για ρευστοποίηση. Προσεκτικότερη παρατήρηση υποδεικνύει ότι η ανάλυση δε φθάνει μέχρι επαρκώς μικρές τιμές της μέσης ενεργού τάσης, καθώς φθάνει έως $\bar{\sigma}_u = 0.7$ και όχι μεγαλύτερες τιμές που υποδεικνύει το Σχήμα 4.8. Συνεπώς, η προσομοίωση υποδεικνύει στοιχεία ορθότητας (π.χ. πιο δύστηνη και πιο διαστολική συμπεριφορά), μα θα πρέπει να βαθμονομηθεί πιο κατάλληλα ώστε να προσεγγίζει μεγαλύτερες τιμές $\bar{\sigma}_u$ (π.χ. 0.95) σε επαρκώς μεγάλο αριθμό κύκλων.

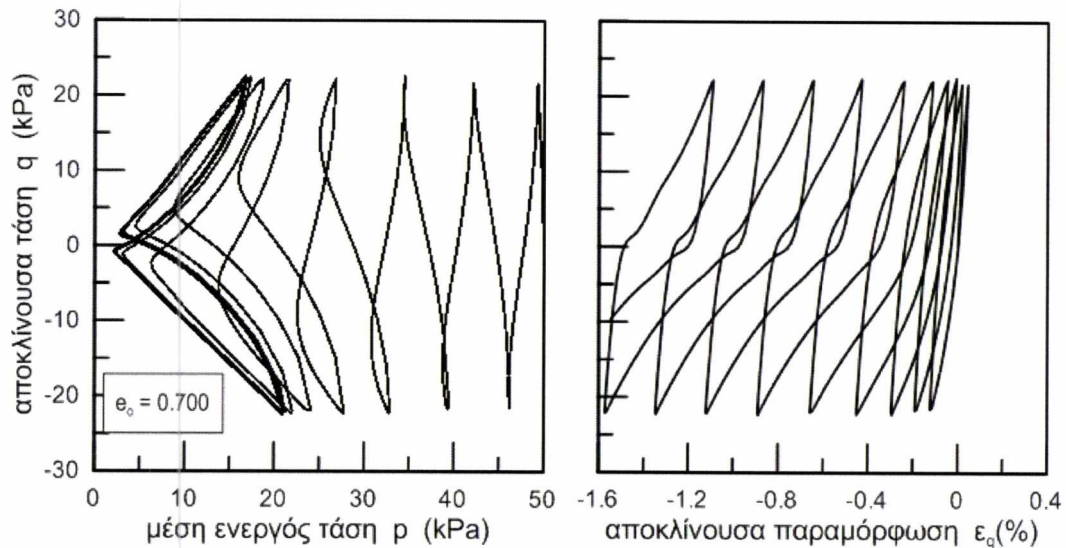
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Σχήμα 4.9 Ενεργός τασική όδευση και σχέση τάσεων παραμορφώσεων από ανάλυση ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης υπό αστράγγιστες συνθήκες με το προσομοίωμα των Dafalias & Manzari (2004), τις τιμές σταθερών του Πίνακα 4.1 (που αφορούν στην άμμο Toyoura), αρχική τάση $p_{ini} = 50$ kPa, $CSR = 0.45$, και αρχικό δείκτη πόρων $e=0.7$ ως προσομείωση σταθεροποίησης της άμμου Toyoura με δείκτη πόρων $e=0.825$.

4.2.2 ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Στη συνέχεια, η έμφαση δόθηκε σε καλύτερη προσομοίωση της συμπεριφοράς σε μικρές ενεργές τάσεις που σχετίζονται με τη ρευστοποίηση, αλλά όχι τη μονοτονική συμπεριφορά. Σύμφωνα με όσα παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 4.1, ο τανυστής δομής-διασταλτικότητας σχετίζεται ακριβώς με αυτή τη συμπεριφορά, και συνεπώς η έμφαση στη νέα βαθμονόμηση δόθηκε στις σταθερές που τον ποσοτικοποιούν. Συνεπώς, σε δεύτερη προσέγγιση, διατηρήθηκαν όλες οι τιμές σταθερών του Πίνακα 4.1, εκτός από την τιμή της z_{max} που αυξήθηκε από 4.0 σε 10.0, γεγονός που επιτρέπει πιο έντονη συστολική συμπεριφορά σε αποφόρτιση μετά από φάση διαστολικής φόρτισης (βλέπε Σχήμα 4.5).

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



Σχήμα 4.10 Ενεργός τασική όδευση και σχέση τάσεων παραμορφώσεων από ανάλυση ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης υπό αστράγγιστες συνθήκες με το προσομοίωμα των Dafalias & Manzari (2004), τις τιμές σταθερών του Πίνακα 4.1 (που αφορούν στην άμμο Τογούρα) αλλά $z_{max}=10$ (αντί για 4.0), αρχική τάση $p_{ini}= 50$ kPa, CSR = 0.45, και αρχικό δείκτη πόρων $e=0.7$ ως προσομείωση σταθεροποίησης της άμμου Τογούρα με δείκτη πόρων $e=0.825$

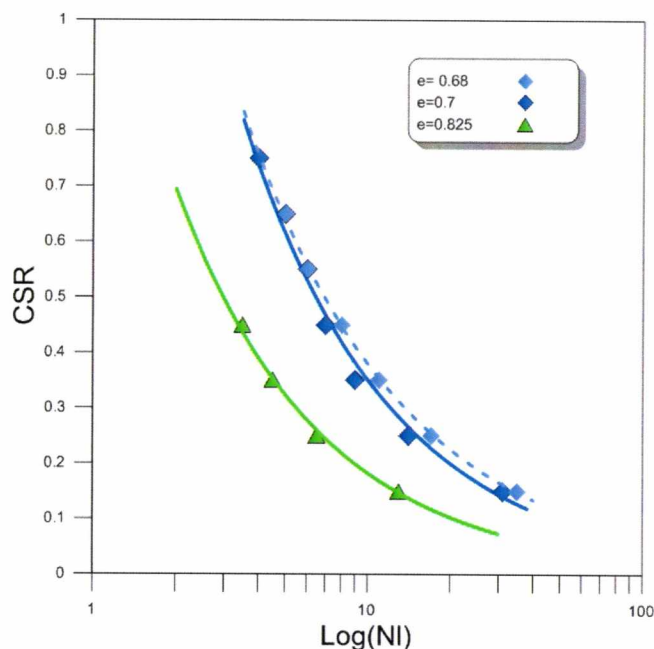
Τα αποτελέσματα γι’ αυτή τη δεύτερη προσέγγιση, και για την ανάλυση αναφοράς (με $p_{ini}= 50$ kPa, CSR = 0.45) παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.10. Η νέα αυτή προσέγγιση οδηγεί σε ακριβέστερη προσέγγιση της πειραματικής συμπεριφοράς (π.χ. η ανάλυση φθάνει σε $r_u=0.95$), και είναι συνεπώς πιο ορθή.

4.2.3 ΤΕΛΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Έχοντας ποιοτικώς υποδείξει ότι είναι δυνατή η προσομοίωση της ανακυκλικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένων εδαφών, έγινε σειρά αναλύσεων για διάφορες τιμές CSR ώστε να δημιουργηθούν καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση για $p_{ini}=50$ kPa. Αυτές συνοψίζονται στο Σχήμα 4.11, όπου εμφανίζονται καμπύλες για $e = 0.825$ (φυσική άμμος, με τις σταθερές του Πίνακα 4.1) και $e=0.70$ (με τις σταθερές του Πίνακα 4.1, αλλά $z_{max}=10$). Γίνεται σαφής η αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση, όπως αυτή ποσοτικοποιείται με αύξηση του CSR για τον ίδιο αριθμό κύκλων. Προσεκτικότερη παρατήρηση όμως υποδεικνύει ότι για $N_i = 5$ έως 10, η καμπύλη αντοχής σε ρευστοποίηση της φυσικής άμμου (αυτή για $e=0.7$) προσαυξάνεται κατά ΔCSR λίγο λιγότερο από 0.2 που είχε υπονοηθεί από τον Πίνακα 3.11 και είχε οδηγήσει στην τιμή $e=0.7$. Συνεπώς, χρειάζεται μια επιπλέον μείωση του δείκτη πόρων για να επιτευχθεί η εν λόγω $\Delta CSR = 0.20$ που ήταν το ζητούμενο με βάση τα ευρεθέντα στο Κεφάλαιο 3.

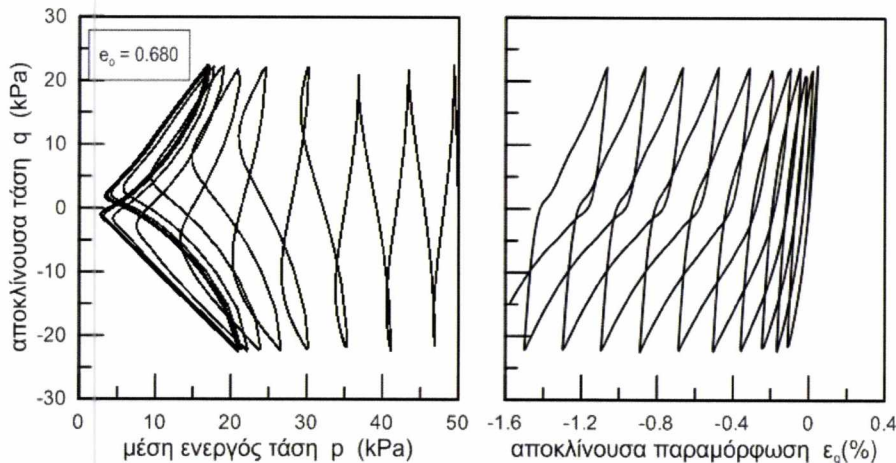
Η νέα αυτή προσέγγιση (για $e < 0.7$) θα πρέπει να προκύπτει με τιμή της σταθεράς $z_{max} > 10$, σύμφωνα με όσα προέκυψαν στη δεύτερη προσέγγιση. Για το σκοπό αυτό θεωρήθηκε εμπειρικά μια σχέση εκτίμησης της σταθεράς z_{max} με βάση τον (αρχικό) δείκτη πόρων e , η οποία φαίνεται παρακάτω:

$$\log(z_{max}) = 3.16 - 3.1e \tag{4.1}$$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Σχήμα 4.11 Καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση για $p_{\text{ini}} = 50$ kPa με βάση αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές όπως προκύπτουν από το προσομοίωμα των Dafalias and Manzari (2004), για την άμμο Toyoura: $e=0.825$ (τιμές σταθερών από Πίνακα 4.1), $e=0.7$ (τιμές σταθερών από Πίνακα 4.1, αλλά $z_{\text{max}}=10$), $e=0.68$ (τιμές σταθερών από Πίνακα 4.1, αλλά $z_{\text{max}}=11$).

Η σχέση 4.1 δίνει $z_{\text{max}} = 4$ για $e = 0.825$ (φυσική άμμος, Πίνακας 4.1), $z_{\text{max}} = 9.8$ για $e=0.7$ και $z_{\text{max}} = 11.3$ για $e=0.68$. Έτσι, με βάση επαναληπτική διαδικασία (με στόχο $\Delta\text{CSR}=0.2$ για $Nl = 5$ έως 10) εκτιμήθηκε μια τιμή $e=0.68$ (αναλύσεις με $z_{\text{max}} = 11$, χάριν απλότητας) ως πιο κατάλληλη, ώστε η αντιστοιχούσα «ψευδο-αυξημένη» πυκνότητα της άμμου να προσομοιώνει την επίδραση της σταθεροποίησης στην άμμο Toyoura. Η καμπύλη αντοχής σε ρευστοποίηση γι' αυτό το δείκτη πόρων συμπεριλαμβάνεται στο Σχήμα 4.11, ενώ τα πλήρη αποτελέσματα για μία από τις αναλύσεις αυτές (εκείνης με $\text{CSR} = 0.45$ που είναι αντίστοιχη με την ανάλυση των Σχημάτων 4.7 και 4.9) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.12.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

Σχήμα 4.12 Ενεργός τασική όδευση και σχέση τάσεων παραμορφώσεων από ανάλυση ανακυκλικής τριαξονικής φόρτισης υπό αστράγγιστες συνθήκες με το προσομοίωμα των Dafalias & Manzari (2004), τις τιμές σταθερών του Πίνακα 4.1 (που αφορούν στην άμμο Toyoura) αλλά $z_{max}=11$ (αντί για 4.0), αρχική τάση $p_{ini}=50$ kPa, $CSR=0.45$, και αρχικό δείκτη πόρων $e=0.68$ ως προσομείωση σταθεροποίησης της άμμου Toyoura με δείκτη πόρων $e=0.825$.

Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει ότι η «ευφής» χρήση υπαρχόντων προσομοιωμάτων, ακόμη και εκείνων που είναι ικανών να προσομοιώσουν τη μονοτονική απόκριση μη συνεκτικών εδαφών με ένα σετ σταθερών ανεξαρτήτως αρχικών συνθηκών δεν είναι εύχρηστη. Αυτό καθώς μια «ψευδό»-αύξηση της σχετικής πυκνότητας (προϋπολογισμένη αδρά με βάση την επίδραση της σχετικής πυκνότητας στην αντοχή σε ρευστοποίηση) δεν επαρκεί για ορθή προσομοίωση, και αυτό γιατί μάλλον χρειάζεται επιπλέον προσαύξηση της εν λόγω σχετικής πυκνότητας, ενώ πιθανώς να χρειάζεται και αλλαγή σε τιμές σταθερών (όπως συνέβη με το προσομοίωμα των Dafalias and Manzari 2004 που χρησιμοποιήθηκε εδώ). Σε κάθε περίπτωση, προκύπτει ότι είναι ποιοτικά ορθή η προσέγγιση ότι η σταθεροποίηση μοιάζει με μια «ψευδό»-αύξηση της πυκνότητας των μη-συνεκτικών εδαφών.

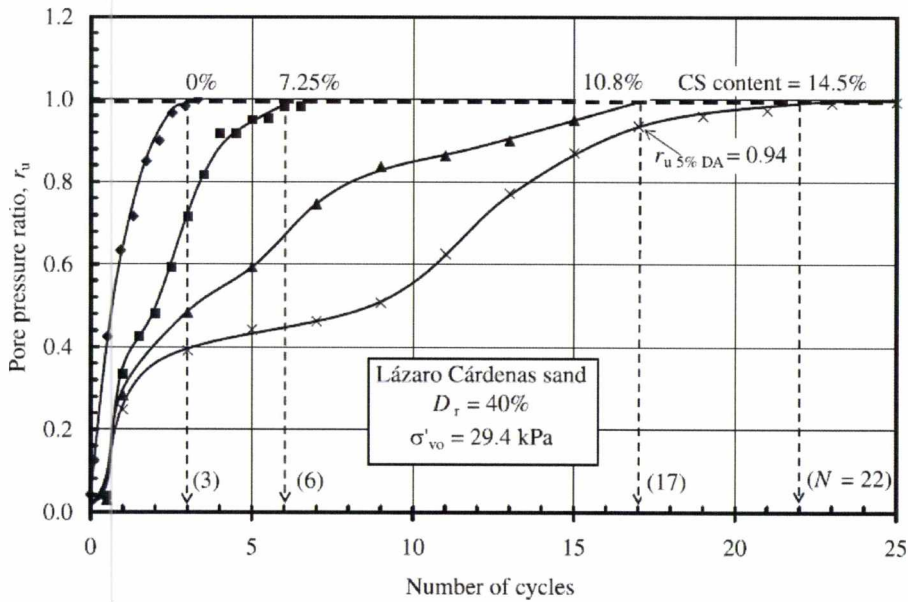
Τούτων δοθέντων, με βάση την αδρή μεθοδολογία προσομοίωσης της σταθεροποίησης που παρουσιάστηκε ανωτέρω, στη συνέχεια γίνεται ποιοτική σύγκριση μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων από τη βιβλιογραφία και αναλυτικών προβλέψεων με βάση το νεο-βαθμονομημένο καταστατικό προσομοίωμα.

Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 4.13 συγκρίνονται οι ρυθμοί αύξησης των υπερπίεσεων πόρων u , και δη του λόγου υπερπίεσεων πόρων ($r_u = u/\sigma'_{vo}$), ως συνάρτηση του αριθμού κύκλων φόρτισης, σε αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης με ίδιο $CSR=0.41$ σε δοκίμια της (ιλυώδους) άμμου Lazaro Cardenas που σταθεροποιήθηκαν με κολλοειδές οξείδιο του πυριτίου (Ludox-SM) διαφορετικών ποσοστών κατά βάρος $CS(\%)$, από $CS=0\%$ έως 14.5% , στο εισπιεζόμενο διάλυμα υγρού πόρων. Από το σχήμα αυτό προέκυψε η ευεργετική επίδραση του ποσοστού $CS(\%)$ στην αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση, στο Κεφάλαιο 3.

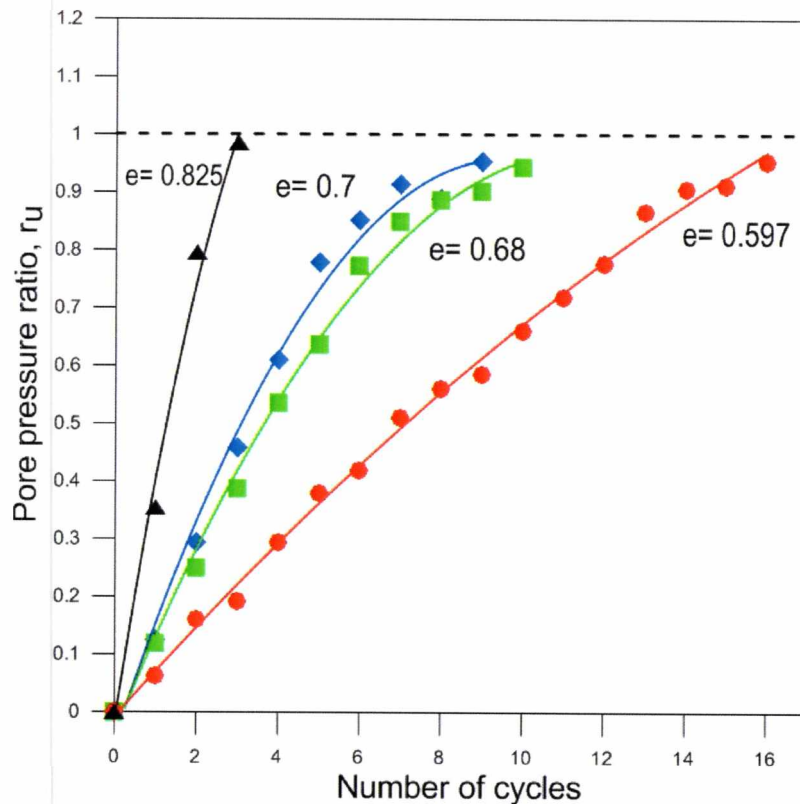
Εδώ, και εντελώς αντίστοιχα, στο Σχήμα 4.14 συγκρίνονται οι ρυθμοί αύξησης των υπερπίεσεων πόρων u , και δη του λόγου υπερπίεσεων πόρων ($r_u = u/p'_o$), ως συνάρτηση του αριθμού κύκλων φόρτισης, από προσομοιώσεις για αστράγγιστες ανακυκλικές

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ

τριαξονικές δοκιμές με ίδιο CSR = 0.41, ίδιο $p'_{o}=50\text{kPa}$, αλλά διαφορετικές τιμές του (αρχικού) δείκτη πόρων e . Για τις προσομοιώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα των Dafalias and Manzari (2004), οι τιμές των σταθερών του Πίνακα 4.1, με αλλαγές μόνο στις τιμές του z_{\max} με βάση τη σχέση 4.1. Προκύπτει και από εδώ ότι η ευεργετική επίδραση του ποσοστού CS(%) στην αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση των πειραμάτων, μπορεί να προσομοιωθεί με «ψευδο-αύξηση» της σχετικής πυκνότητας, που είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνει το ποσοστό CS(%).



Σχήμα 4.13 Ρυθμοί αύξησης του λόγου υπερπίεσεων r_u σε αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης με ίδιο CSR = 0.41 σε δοκίμια της άμμου Lazaro Cardenas που σταθεροποιήθηκαν με κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου (Ludox-SM) διαφορετικών ποσοστών κατά βάρος CS(%), από CS = 0% έως 14.5% (Rodriguez et al, 2008)

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

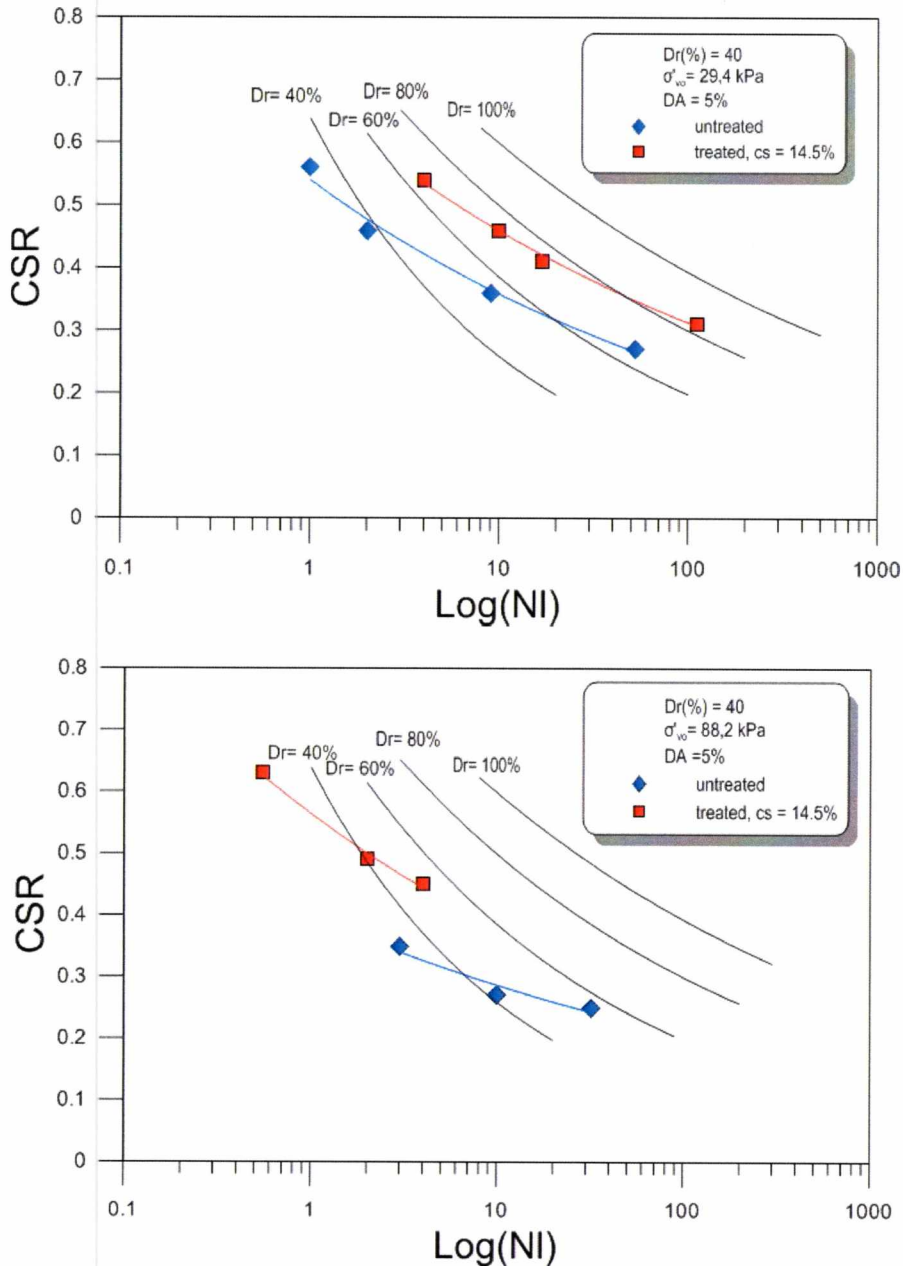
Σχήμα 4.14 Ρυθμοί αύξησης του λόγου υπερπίεσεων πόρων r_u από προσομοιώσεις για αστράγγιστες ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές με ίδιο $CSR = 0.41$, ίδιο $p'_{v0} = 50 \text{ kPa}$, αλλά διαφορετικές τιμές του (αρχικού) δείκτη πόρων e . Για τις προσομοιώσεις αυτές χρησιμοποιήθηκε το προσομοίωμα των Dafalias and Manzari (2004), οι τιμές των σταθερών του Πίνακα 4.1, με αλλαγές μόνο στις τιμές του z_{max} με βάση τη σχέση 4.1.

Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της επίδρασης της σταθεροποίησης στην αντοχή σε ρευστοποίηση, για μικρές και μεγάλες μέσες ενεργές τάσεις. Για το σκοπό αυτό, στο Σχήμα 4.15 παρουσιάζονται οι καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση με βάση αστράγγιστες ανακυκλικές δοκιμές απλής διάτμησης των Diaz-Rodriguez et al (2008) στην άμμο Lazaro-Cardenas για $\sigma'_{v0} = 29,4 \text{ kPa}$ και $88,2 \text{ kPa}$ αντίστοιχα. Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι η αύξηση του επιπέδου των τάσεων οδηγεί σε μεγαλύτερη επαύξηση της αντοχής λόγω σταθεροποίησης, κι αυτό μπορεί να αποδοθεί στο ότι οι μεγαλύτερες τάσεις κάνουν το φυσικό υλικό πιο συστολικό, και συνεπώς πιο επιρρεπές σε ρευστοποίηση, σε αντίθεση με τη σταθεροποιημένο υλικό που δεν επηρεάζεται έντονα από το επίπεδο των τάσεων. Με άλλα λόγια, η σταθεροποίηση είναι πιο ευεργετική όσο πιο συστολικό είναι το αρχικό φυσικό έδαφος.

Ποιοτικώς αντίστοιχα, στο Σχήμα 4.16 παρουσιάζονται καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση με βάση αναλύσεις για αστράγγιστες ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές με το προσομοίωμα των Dafalias and Manzari (2004) με χρήση της τελικής καταστατικής προσέγγισης (βλέπε άνωθεν), και για $p_0 = 50 \text{ kPa}$ και 200 kPa ως χαρακτηριστικές τιμές για μικρές και μεγάλες ενεργές τάσεις. Από το σχήμα αυτό προκύπτει επιβεβαίωση των πειραματικών ευρημάτων, μα ποσοτική η ευεργετική επίδραση της σταθεροποίησης στις μεγάλες ενεργές τάσεις είναι σαφώς μεγαλύτερη και από αυτή που υποδεικνύουν

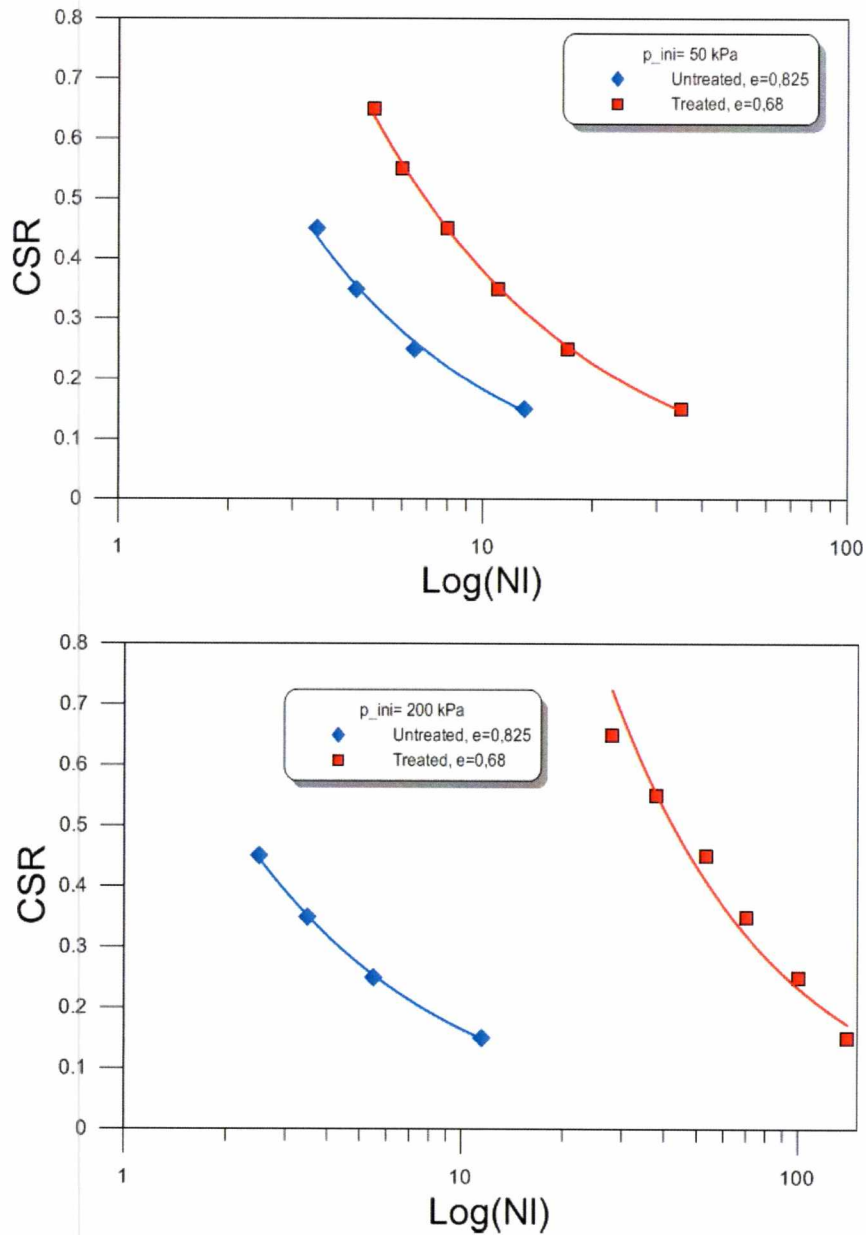
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

οι πειραματικές μετρήσεις. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι η χρησιμοποιούμενη τάση 200kPa είναι πολύ μεγαλύτερη της τιμής των 88.2 kPa που ήταν η «μεγάλη» τάση στα πειράματα. Επίσης, πιθανώς να χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση η νέα βαθμονόμηση του προσομοιώματος, καθώς η σχέση 4.1 για την τιμή της σταθεράς z_{max} προέκυψε εμπειρικά από δοκιμές μόνο για «μικρές» τάσεις. Σε κάθε περίπτωση, η ποσοτική ακρίβεια στις προβλέψεις της ανακυκλικής συμπεριφοράς σταθεροποιημένων εδαφών απέχει από το να έχει επιτευχθεί.



Σχήμα 4.15 Σύγκριση καμπυλών αντοχής σε ρευστοποίηση για φυσική και σταθεροποιημένη (με Ludox-SM, CS=14.5%) άμμο Lazaro Cardenas με $D_r=40\%$ υπό ανακυκλικές αστράγγιστες δοκιμές απλής διάτμησης, και 2 διαφορετικές τιμές αρχικής ενεργού τάσης $\sigma'_{vo} = 29.4$ kPa (μικρή) και 88.2 kPa (μεγάλη) (δεδομένα από Diaz-Rodriguez et al., 2008, καμπύλες αντοχής σε ρευστοποίηση για διαφορετικές D_r της ίδιας άμμου από (Diaz-Rodriguez & Izarraras, 2004).

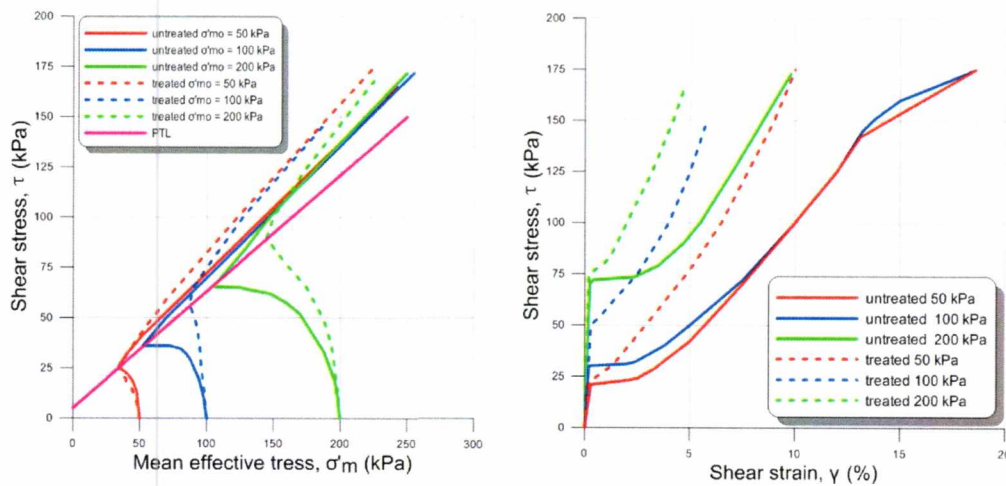
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



Σχήμα 4.16 Σύγκριση καμπυλών αντοχής σε ρευστοποίηση για φυσική ($e = 0.825$) και σταθεροποιημένη ($e = 0.68$) άμμο, για 2 διαφορετικές τιμές αρχικής ενεργού τάσης $p'_0 = 50$ kPa (μικρή) και 200 kPa (μεγάλη), όπως προκύπτουν για αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές από το προσομοίωμα των Dafalias and Manzari (2004), για την άμμο Τογoura: τιμές σταθερών από Πίνακα 4.1, αλλά $z_{max} = 4$ (για $e = 0.825$), 11 (για $e = 0.68$)

4.3 ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Χάριν πληρότητας, έχοντας ολοκληρώσει την «ευφυή» βαθμονόμηση του προσομοιώματος των Dafalias and Manzari (2004) επί της ανακυκλικής συμπεριφοράς των σταθεροποιημένων εδαφών, εδώ γίνεται μια προσπάθεια προσομοίωσης των μόνων μονοτονικών δοκιμών επί σταθεροποιημένων εδαφών που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία, εκείνων των Kodaka et al. (2005) που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.17.



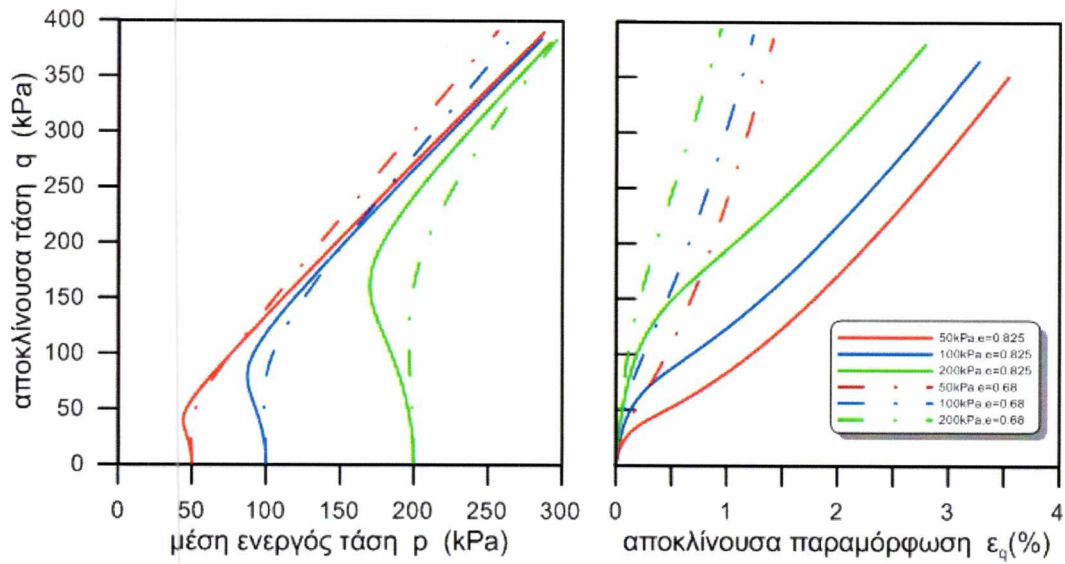
Σχήμα 4.17 Αποτελέσματα δοκιμών μονοτονικής στρεπτικής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες για καθαρή άμμο Toyoura και για άμμο Toyoura με ποσοστό (colloidal silica) CS=4% με δείκτη πόρων $e = 0.825$ (σχετική πυκνότητα $D_r = 40\%$) για διαφορετικές κατακόρυφες ενεργές τάσεις (Kodaka et al 2005): α) Διάγραμμα ενεργού τασικής όδευσης, β) Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

Έτσι, έγιναν προσομοιώσεις δοκιμών αστράγγιστης μονοτονικής τριαξονικής θλίψης, για $e = 0.825$ (με τις σταθερές του Πίνακα 4.1) και για $e = 0.68$ («ισοδύναμος» e για σταθεροποιημένο έδαφος) με χρήση των σταθερών του Πίνακα 4.1 αλλά με $z_{max} = 11$. Αυτή η τελευταία αλλαγή δεν επηρεάζει τη μονοτονική συμπεριφορά που προβλέπεται, αλλά υιοθετήθηκε χάριν συμβατότητας με τις προσομοιώσεις της ανακυκλικής συμπεριφοράς στην προηγούμενη παράγραφο. Όπως και στις πειραματικές δοκιμές, και στις αναλύσεις έγιναν προβλέψεις για 3 τιμές των αρχικών τάσεων, $p_o = 50, 100, 200\text{kPa}$, και τα αποτελέσματα των αναλύσεων παρουσιάζονται με ίδια χρωματική διαφοροποίηση στο Σχήμα 4.18.

Όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, ποσοτική σύγκριση μεταξύ των πειραμάτων (Σχ. 4.17) και των αναλύσεων (Σχ. 4.18) δε μπορεί να γίνει δεδομένου ότι στα πρώτα οι δοκιμές είναι στρεπτικής διάτμησης ενώ στις δεύτερες είναι τριαξονικές. Όμως μπορεί να γίνει ποιοτική σύγκριση, απ' όπου προκύπτει σαφής ομοιότητα. Πιο συγκεκριμένα, προκύπτει σαφώς ότι η σταθεροποίηση καθιστά το μη συνεκτικό έδαφος πιο

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

διαστολικό και πιο δύστηνο ανεξαρτήτως επιπέδου τάσεων, τόσο στα πειράματα όσο και στις αναλύσεις.



Σχήμα 4.18 Αποτελέσματα αναλύσεων για μονοτονική τριαξονική θλίψη υπό αστραγγίστες συνθήκες για φυσική ($e = 0.825$) και σταθεροποιημένη άμμο ($e = 0.68$), για διαφορετικές μέσες ενεργές τάσεις, όπως προκύπτουν από το προσομοίωμα των Dafalias and Manzari (2004) με τιμές σταθερών του Πίνακα 4.1: α) Διάγραμμα ενεργού τασικής όδευσης, β) Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε μια πρώτη προσπάθεια βιβλιογραφικής έρευνας και καταστατικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς ενός νέου γεωϋλικού, δηλαδή του μη-συνεκτικού εδάφους (άμμου ή ιλυώδους άμμου) σταθεροποιημένου με κολλοειδές οξειδίο του πυριτίου (colloidal silica). Το νέο αυτό γεωϋλικό προκύπτει όταν επιχειρείται η παθητική σταθεροποίηση ρευστοποιήσιμων εδαφών. Τα πιο σημαντικά συμπεράσματα από όσα παρουσιάζονται εκτενώς στην εργασία αυτή είναι:

- Με βάση την διεθνή βιβλιογραφία, η χρήση του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου για παθητική σταθεροποίηση είναι πρακτικώς εφαρμόσιμη, αφού χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος και τις κατάλληλες χημικές και μηχανικές ιδιότητες (π.χ. χαμηλό ιξώδες κατά τη διήθηση, το οποίο αυξάνεται ραγδαία σε ελεγχόμενο χρόνο και όταν βρεθεί στην κατάλληλη θέση).
- Τα αποτελέσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας που βρέθηκαν αφορούν δοκιμές σε 5 διαφορετικά μη συνεκτικά εδάφη, οι οποίες όμως είναι αποσπασματικές, δηλαδή δεν υπάρχει ένα ολοκληρωμένο σετ δοκιμών που να καλύπτει όλο το εύρος της απόκρισης (π.χ. μονοτονικές και ανακυκλικές στο ίδιο έδαφος και για μεγάλο εύρος αρχικών συνθηκών). Παρόλα αυτά, συγκριτική αξιολόγηση υποδεικνύει κάποια σαφή συμπεράσματα γενικής εφαρμογής.
- Σε ό,τι αφορά στη μονοτονική φόρτιση, το σταθεροποιημένο έδαφος αποκτά αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη (αυξανόμενη όσο αυξάνει το ποσοστό κατά βάρος του κολλοειδούς οξειδίου του πυριτίου CS(%) στο διηθούμενο διάλυμα). Επιπλέον, το σταθεροποιημένο έδαφος εμφανίζει συστηματικά πιο διαστολική και πιο δύσμητη διατμητική συμπεριφορά, σε σχέση με το φυσικό έδαφος, και αυτό το συμπέρασμα προκύπτει για όλα τα εξετασθέντα επιπέδα τάσεων στερεοποίησης.
- Σε σχέση με την ανακυκλική φόρτιση, προκύπτει ότι αύξηση του ποσοστού CS(%) αυξάνει τον αριθμό κύκλων για ρευστοποίηση, αν και μικρές τιμές του εν λόγω ποσοστού 5-10% πιστεύεται ότι προσφέρουν πρακτικώς ικανοποιητική αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση. Η επίδραση της σταθεροποίησης στην αντοχή σε ρευστοποίηση διαφαίνεται πιο σημαντική για μικρές σχετικές πυκνότητες και μεγάλες τάσεις, απ' ό,τι για μεγάλες σχετικές πυκνότητες και μικρές τάσεις. Συνεπώς, η σταθεροποίηση φαίνεται να είναι πιο ευεργετική όταν χρειάζεται περισσότερο, δηλαδή στα πιο συστολικά εδάφη.
- Σχετικώς με τη δυναμική φόρτιση, προκύπτει μικρή αύξηση της μέγιστου (ελαστικού) μέτρου διάτμησης G_{max} , ενώ δεν προκύπτει καμία ουσιαστικώς επίδραση στις καμπύλες απομείωσης του κανονικοποιημένου μέτρου διάτμησης G/G_{max} και αύξησης της υστερητικής απόσβεσης D με την ανακυκλική παραμόρφωση γ , συγκριτικά με εκείνες του φυσικού εδάφους.
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης, ότι η αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη και η τιμή του μέγιστου (ελαστικού) μέτρου διάτμησης G_{max} παραμένουν अपαράλλακτες μετά από ανακυκλική διατμητική παραμόρφωση διπλού εύρους DA έως 0.5%. Από εκεί και πέρα, οι τιμές τους αρχίζουν να μικραίνουν, με την τιμή του G_{max} να είναι λίγο πιο ευαίσθητη, αλλά σε καμία περίπτωση (ακόμη και για $DA = 5\%$) δε μειώνονται περισσότερο από 60%, κατά μέσο όρο, σε σχέση με την αρχική τους τιμή.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

- Τέλος, δεδομένου ότι δεν υπάρχει αυτή τη στιγμή καταστατικό προσομοίωμα για το νέο γεωυλικό του σταθεροποιημένου μη συνεκτικού εδάφους, έγινε προσπάθεια «ευφυούς» χρήσης υπάρχοντος προσομοιώματος για άμμους. Αυτή βασίστηκε στο βασικό συμπέρασμα από τη διεθνή βιβλιογραφία, ότι το νέο γεωυλικό έχει αντίστοιχη συμπεριφορά με το φυσικό έδαφος, αλλά παρουσιάζει πιο διαστολική και πιο δύσμητη συμπεριφορά συγκριτικά με αυτό. Συνεπώς, επιχειρήθηκε η προσομοίωσή του ως ένα γεωυλικό με «ψευδο-αυξημένη» σχετική πυκνότητα, της οποίας μάλιστα η αναγκαία αύξηση ποσοτικοποιήθηκε με βάση την αναγκαία αύξηση σε όρους CSR της αντοχής σε ρευστοποίηση.
- Οι πραγματοποιηθείσες αναλύσεις με καταστατικό προσομοίωμα για άμμους με «ψευδο-αυξημένη» τιμή σχετικής πυκνότητας για το νέο γεωυλικό υπέδειξε ποιοτική συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα. Ποσοτικά όμως δεν κατέστη δυνατή, ακόμη, η σύγκριση, καθώς διαφαίνεται ότι η προαναφερθείσα ποσοτικοποίηση της αναγκαίας «ψευδο-αύξησης» της σχετικής πυκνότητας δεν επαρκεί. Μάλιστα, σημαντικό ρόλο σε αυτό φαίνεται να παίζει ότι ακόμη και προσομοιώματα που δίνουν ικανοποιητικές προβλέψεις για μονοτονικές φορτίσεις ανεξαρτήτως αρχικών συνθηκών, μάλλον χρειάζονται ανα-βαθμονόμηση για να επιτευχθεί ποσοτικώς ορθή προσομοίωση σε ανακυκλικές συνθήκες φόρτισης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Avanti International. (n.d.). Personal communication with P.M. Gallagher.
- Bjerrum, L., & Landva, A. (1966). Direct simple-shear tests on a Norwegian quick clay. *Geotechnique*(16), pp. 147-157.
- Clarke, W. J. (1987). Microfine cement technology.
- Clough, G. W., Kuck, W., & Kosali, G. (1979). Silicate stabilized sands. *Journal of Geotechnical Engineering Division*(105), pp. 65-82.
- Conlee, C. T. (2010). *Dynamic Properties of Colloidal Silica Soils using Centrifuge Model Tests and a Full-Scale Field Test*.
- Dafalias, Y. F., & Manzari, M. T. (2004). Simple Plasticity Sand Model Accounting for Fabric Change. *JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS*(June), pp. 622-634.
- DePaoli, B., Bosco, B., Granata, R., & Bruce, D. A. (1992). Fundamental observations on cement based grouts (1): traditional materials. (R. H. Borden, R. D. Holtz, & I. Juran, Επμ.) *Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, ASCE GSP*(30), σσ. 474-485.
- Diaz-Rodriguez, J. A., Antonio-Izarraras, V. M., Bandini, P., & Lopez-Molina, J. A. (2008). Cyclic strength of a natural liquefiable sand stabilized with colloidal silica grout. *NRC Research*.
- DuPont. (1997). Ludox Colloidal Silica: Properties, Uses, Storage, and Handling. *product information*.
- Finn, W., & Vaid, Y. (1977). Liquefaction potential from drained constant volume cyclic simple shear tests. *In Proceedings of the 6th World Conference on Earthquake Engineering, 6*, pp. 7-12.
- Gallagher, P. M. (2000). Passive Site Remediation for Mitigation of Liquefaction Risk. *Ph. D. dissertation*.
- Gallagher, P. M., & Mitchell, J. K. (2002). Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained of loose sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*(22 (9-12)), pp. 1017-1026.
- Gallagher, P. M., Pamuk, A., & Abdoun, T. (2007). Stabilization of Liquefiable Soils Using Colloidal Silica Grout. *JOURNAL OF MATERIALS IN CIVIL ENGINEERING*(19(1)), pp. 33-40.
- Gause, C., & Bruce, D. A. (1997). Control of fluid properties of particulate grouts: part 1 – general concepts. (C. Vipulanandan, Ed.) *Grouting: Compaction, Remediation, Testing, ASCE GSP*(66), pp. 212-229.

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

- Hapka, A. M., & Whang, J. M. (1996). In-situ precipitation of an iron based grout. *Environmental Geotechnology, Proceedings of the 3rd International Symposium, 1*, pp. 375-378.
- Houlsby, A. C. (1982). Cement Grouting for Dams. *Proceedings of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering*, pp. 1-34.
- Iler, R. K. (1979). The Chemistry of Silica: Solubility, Polymerization, Colloid and Surface Properties, and Biochemistry. p. 866.
- Ishihara, K., Tatsuoka, F., & Yasuda, S. (1975). Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses. *Soils Found.*(15(1)), pp. 29-44.
- Karol, R. (1990). *Chemical Grouting, 2nd*. NY: Marcel Dekker, Inc.
- Kodaka, T., Oka, F., Ohno, Y., Takyu, T., & Yamasaki, N. (2005). Modeling of cyclic deformation and strength characteristics of silica treated sand. (J. A. Yamamuro, & J. Koseki, Eds.) *In Geomechanics: testing, modeling, and simulation., No. 143*, pp. 205-216.
- Krizek, R. J., Benitayf, M. A., & Atmatzidis, D. K. (1982). Effective stress-strain-strength behavior of silicate-grouted sand. (W. H. Baker, Ed.) *In ProceedingsQ Grouting in Geotechnical Engineering.,* pp. 482-497.
- Li, X. S., & Dafalias, Y. F. (2000). Dilatancy for cohesionless soils. *Geotechnique*(50(4)), pp. 449-460.
- Li, X. S., Dafalias, Y. F., & Wang, Z. L. (1999). State-dependent dilatancy in critical-state constitutive modeling of sand. *Can. Geotech*(36), pp. 599-611.
- Moridis, G. J., Apps, J., Persoff, P., Myer, L., Muller, S., Yen, P., et al. (1996). A field test of a waste containment technology using a new generation of injectable barrier liquids. *Spectrum*.
- Naudts, A. C. (1996). Grouting to improve foundation soil. (R. W. Brown, Ed.) *Practical Foundation Engineering Handbook*.
- Noll, M. R., Bartlett, C., & Dochat, T. (1992). In situ permeability reduction and chemical fixation using colloidal silica. *Proceedings of the 6th National Outdoor Action Conference, National Ground Water Association*, pp. 443-457.
- Pamuk, A., Gallagher, P. M., & Zimmie, T. F. (2007). Remediation of piled foundations against lateral spreading by passive site stabilization technique. *SOIL DYNAMICS AND EARTHQUAKE ENGINEERING*.
- Persoff, P., Apps, J., Moridis, G., & Whang, J. M. (1999). Effect of dilution and contaminants on sand grouted with colloidal silica. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*(94(SM1)), pp. 337-353.

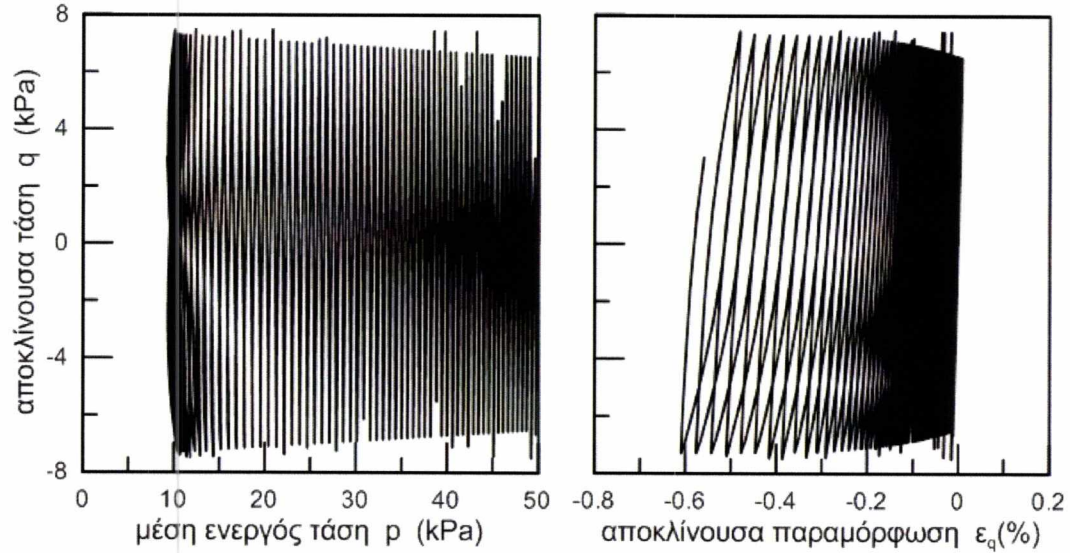
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

- Silco International;. (2005). Colloidal Silica Technical Information.
- Spencer, L. (2010). Evaluation of sand treated with colloidal silica gel. *Ph. D. dissertation*.
- Sydansk, R. D. (1990). A newly developed chromium (III) technology. *SPE Reservoir Engineering*.
- Verdugo, R., & Ishihara, K. (1996). The steady state of sandy soils. *Soils Found.*(36(2)), pp. 81-92.
- Wang, Z. L., Dafalias, Y. F., Li, X. S., & Maksidi, F. (2002). State pressure index for modeling sand behavior. *J. Geotech. Geoenviron Eng.*(128(6)), pp. 11-19.
- Whang, J. M. (1995). Section 9 – Chemical-based barrier materials. (R. R. Rumer, & J. K. Mitchell, Eds.) *Assessment of Barrier Containment Technologies for Environmental Remediation Applications*, pp. 211-247.
- Yonekura, R., & Miwa, M. (1993, May 4-8). Fundamental Properties of Sodium Silicate Based Grout. *Eleventh Southeast Asia Geotechnical Conference*, pp. 439-444.
- El Mohtar, C.S., Clarke, J.P., Bobet, A., Drnevich, V.P., Johnston, C., Santagata M.C. (2008a). "Cyclic response of a sand with thixotropic pore fluid" Proceedings, 4th International Conference on Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Sacramento, May 18-22
- El Mohtar, C.S., Bobet, A., Drnevich, V.P., Johnston, C., Santagata M.C. (2008b), "Effect of plastic fines on the small strain stiffness of sand", Proceedings, 4th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials (IS-Atlanta), September 22-24
- Haldavnekar, V., Bobet, A., Santagata, M., Drnevich, V. (2004). "Soil treatment with a thixo-tropic fluid: an autoadaptive design for liquefaction prevention." Proceedings, 11th International Conference on Soil Dynamics & Earthquake Engineering & 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Vol. II, 553-560.

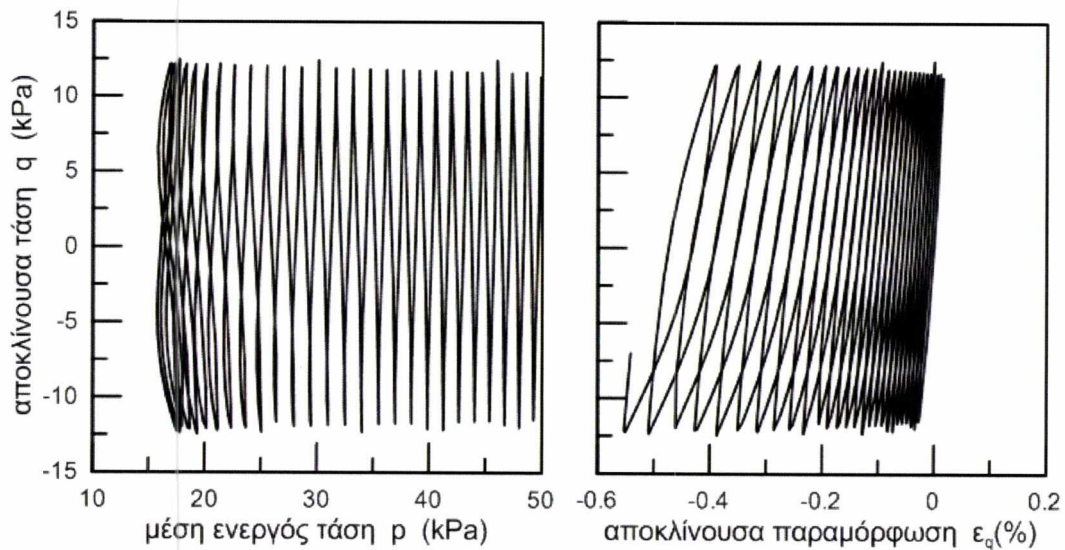
6 APPENDIX

6.1 $P_{INI} = 50 \text{ kPa}$

6.1.1 $E = 0.597 \text{ ΚΑΙ } z_{MAX} = 4$

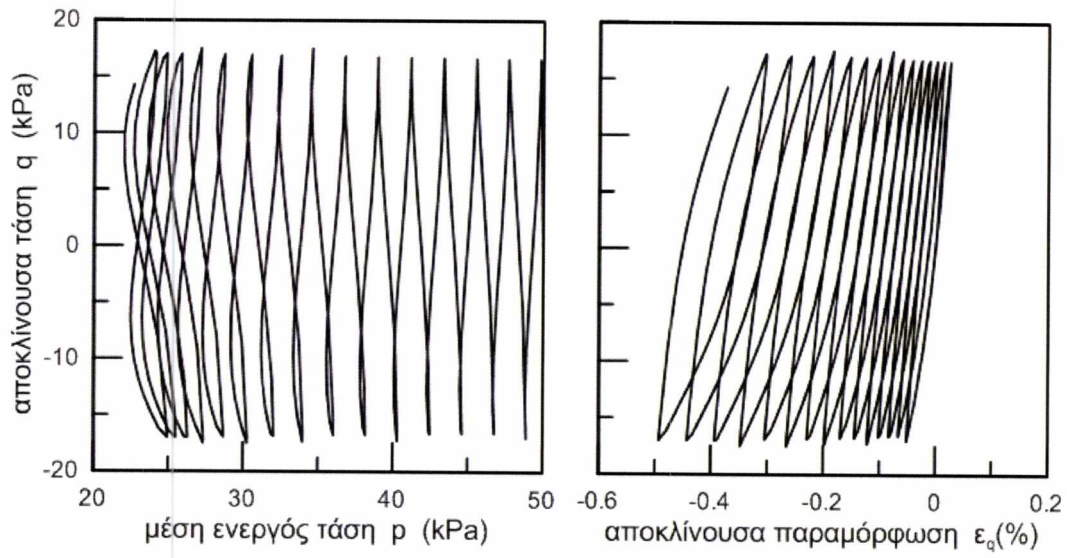


Σχήμα 6.1 $P_{ini} = 50 \text{ kPa}$, $e = 0.597$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.15$

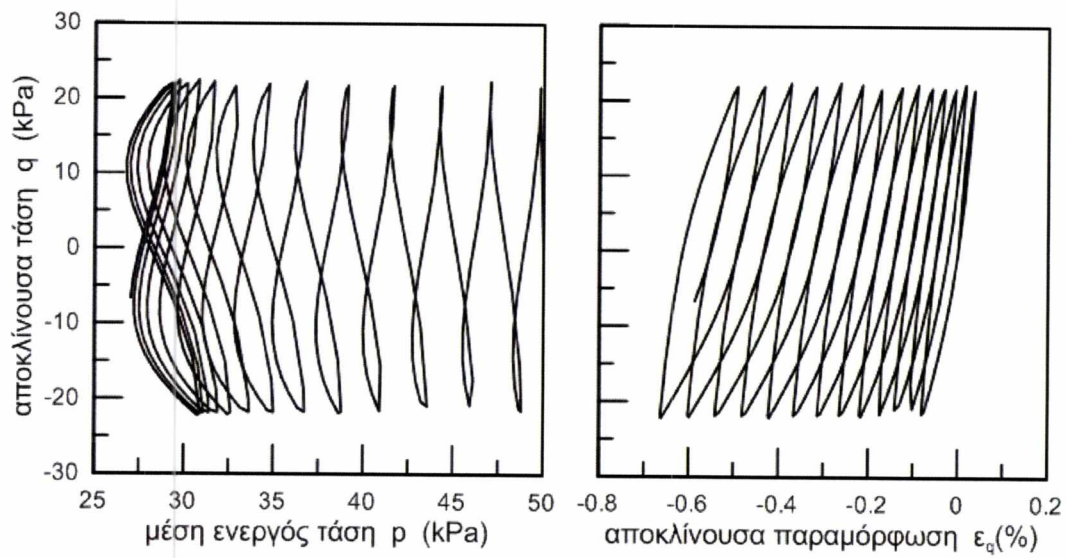


Σχήμα 6.2 $P_{ini} = 50 \text{ kPa}$, $e = 0.597$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.25$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

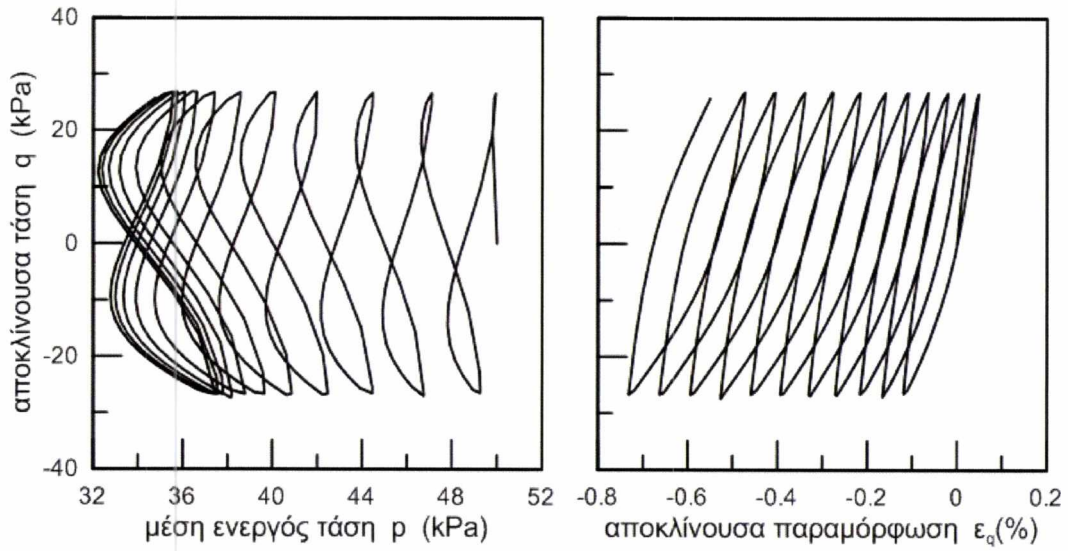


Σχήμα 6.3 $P_{ini}= 50\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 4$, $CSR= 0.35$

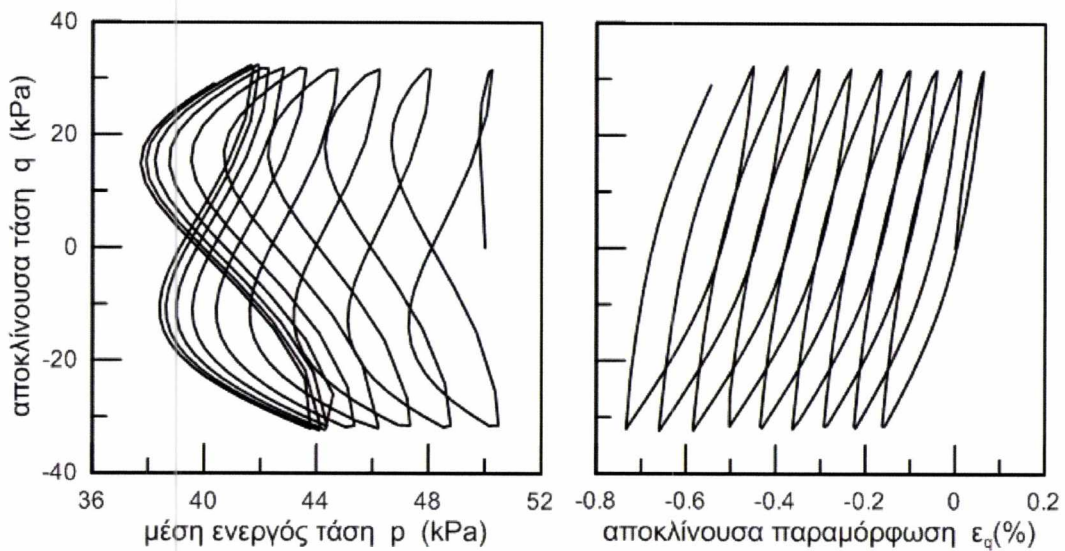


Σχήμα 6.4 $P_{ini}= 50\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 4$, $CSR= 0.45$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

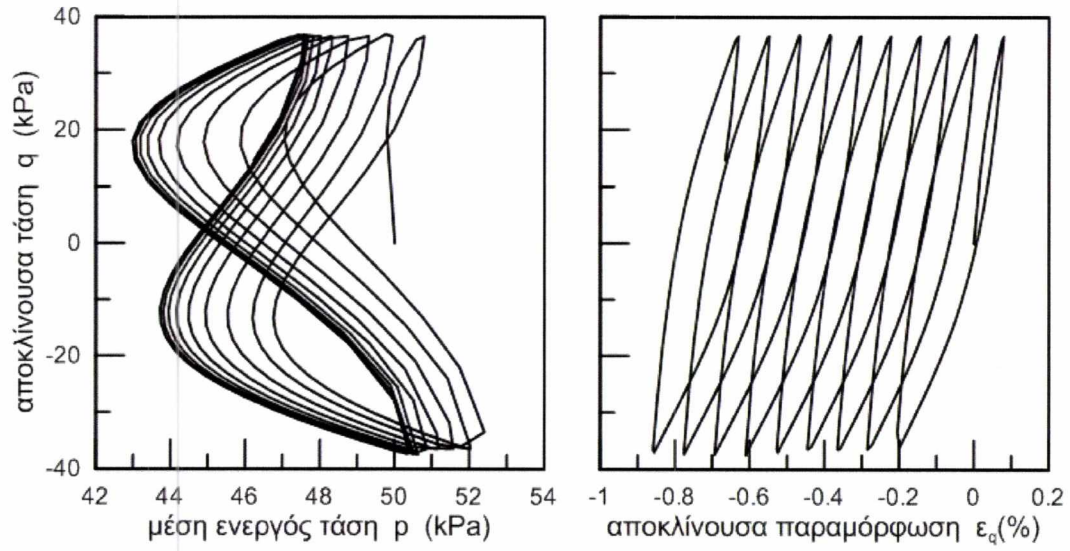


Σχήμα 6.5 $P_{ini}= 50\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 4$, $CSR= 0.55$



Σχήμα 6.6 $P_{ini}= 50\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 4$, $CSR= 0.65$

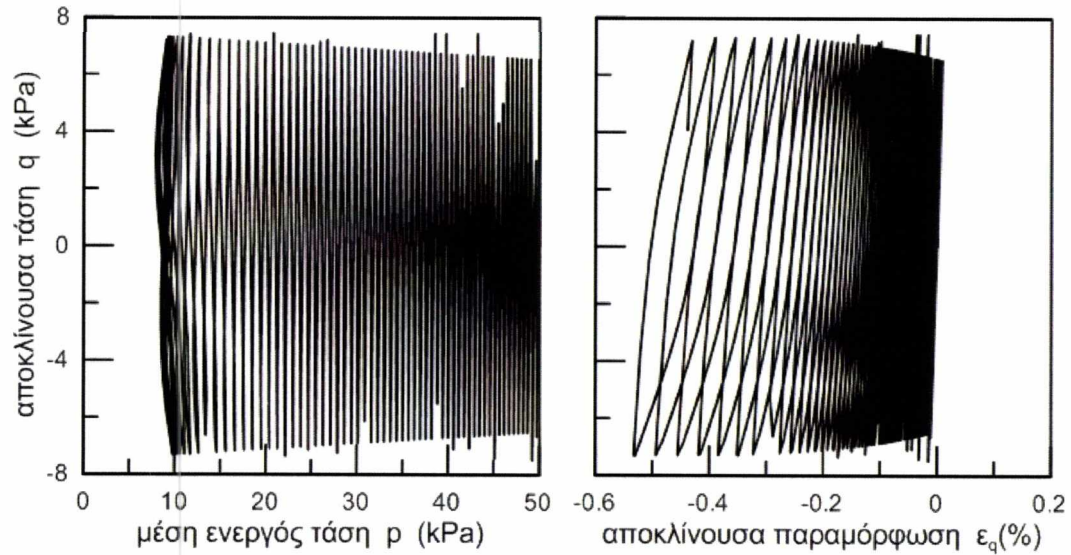
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



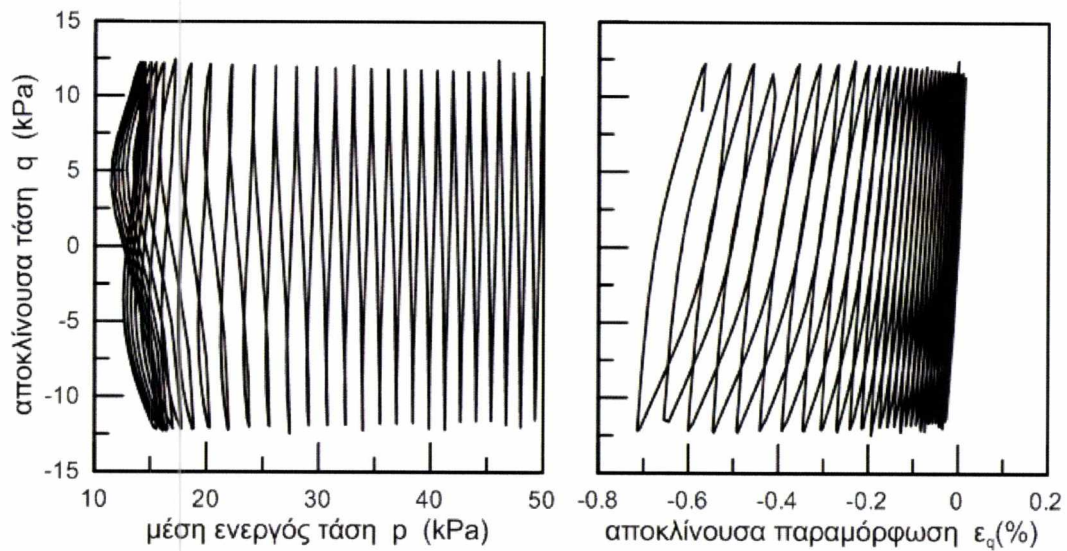
Σχήμα 6.7 $P_{ini}= 50\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 4$, $CSR= 0.75$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

6.1.2 $E = 0.597$ ΚΑΙ $z_{MAX} = 20$

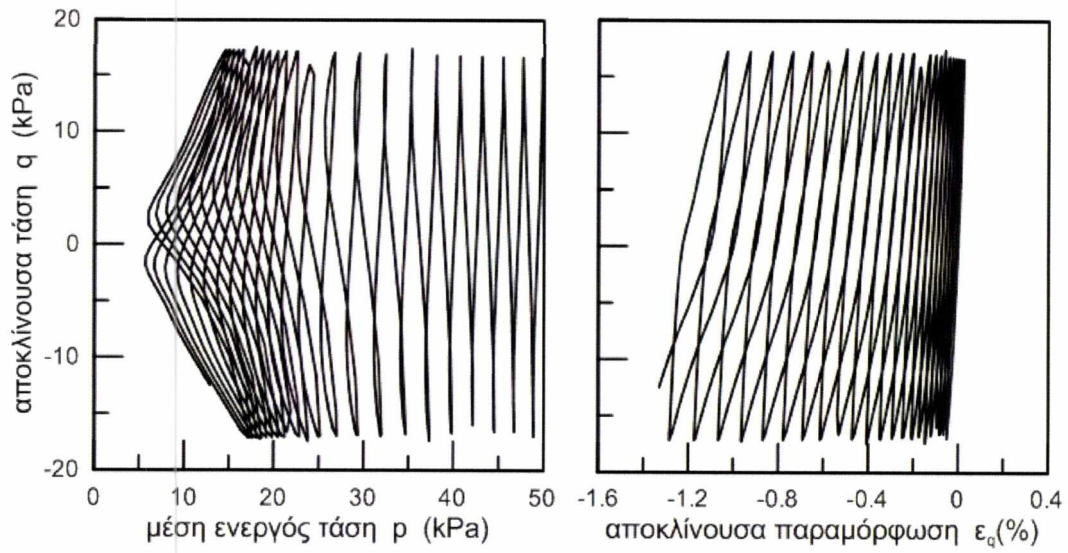


Σχήμα 6.8 $P_{ini} = 50 \text{ kPa}$, $e = 0.597$, $z_{max} = 20$, $CSR = 0.15$

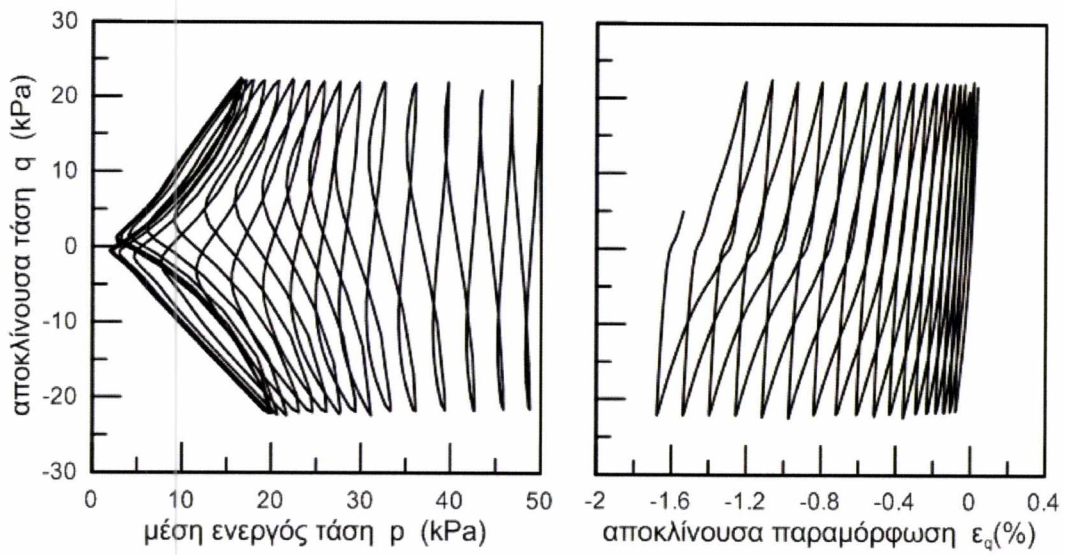


Σχήμα 6.9 $P_{ini} = 50 \text{ kPa}$, $e = 0.597$, $z_{max} = 20$, $CSR = 0.25$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

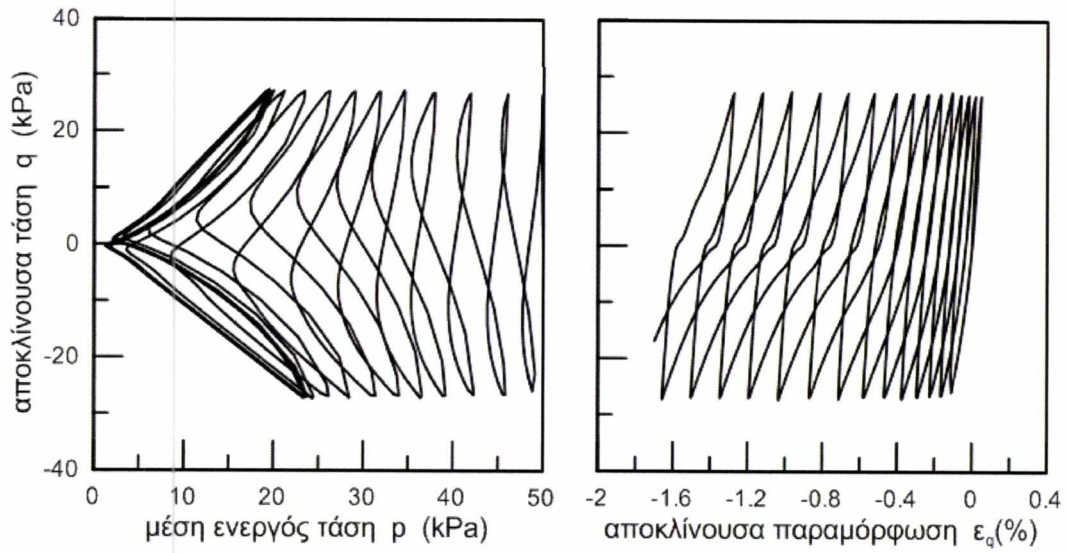


Σχήμα 6.10 $P_{ini}= 50\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 20$, $CSR= 0.35$

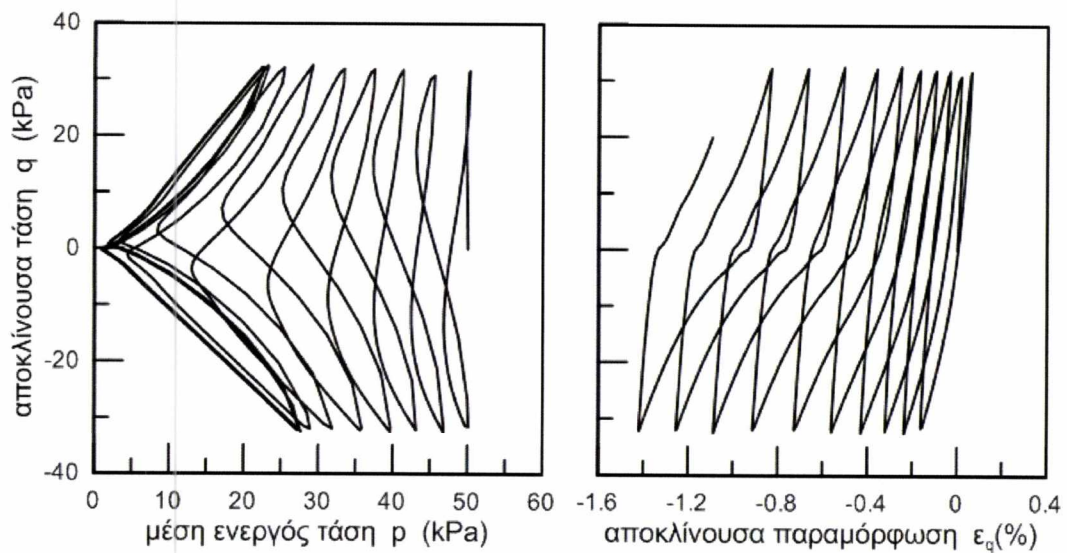


Σχήμα 6.11 $P_{ini}= 50\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 20$, $CSR= 0.45$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



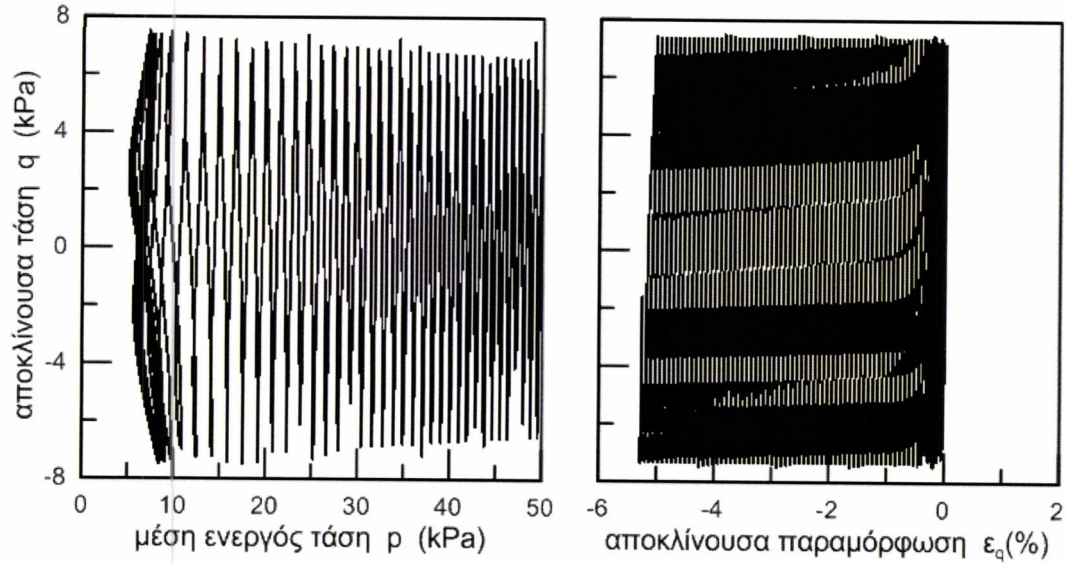
Σχήμα 6.12 $P_{ini}= 50\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 20$, $CSR= 0.55$



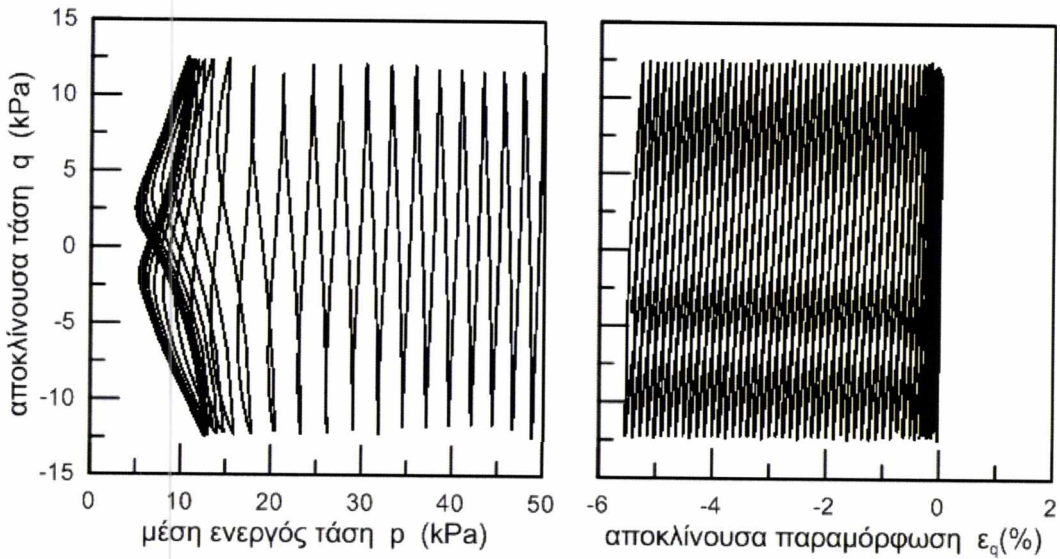
Σχήμα 6.13 $P_{ini}= 50\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 20$, $CSR= 0.65$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

6.1.3 $E = 0.67$ ΚΑΙ $Z_{MAX} = 12$

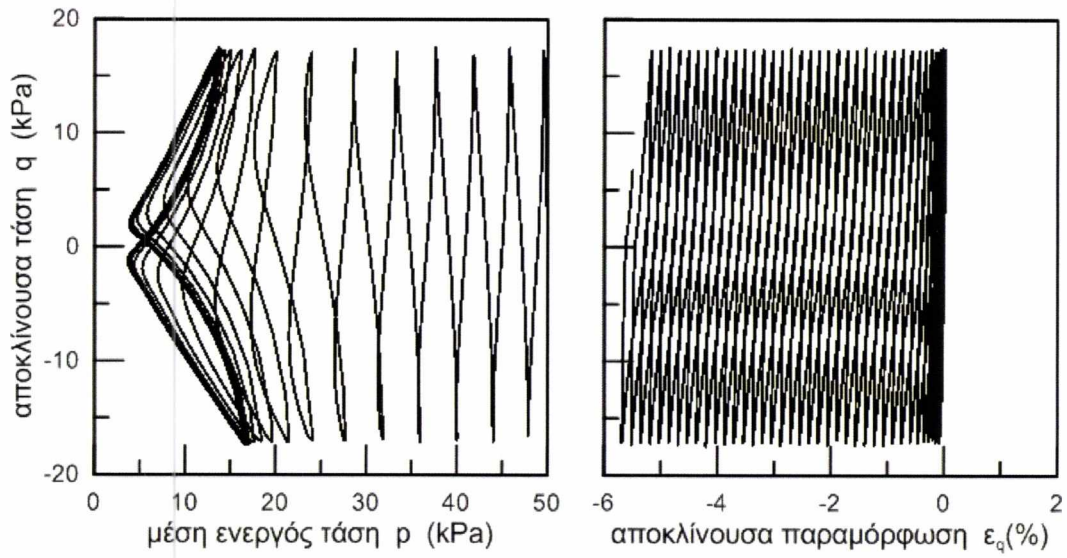


Σχήμα 6.14 $P_{ini} = 50\text{kPa}$, $e = 0.67$, $z_{max} = 12$, $CSR = 0.15$

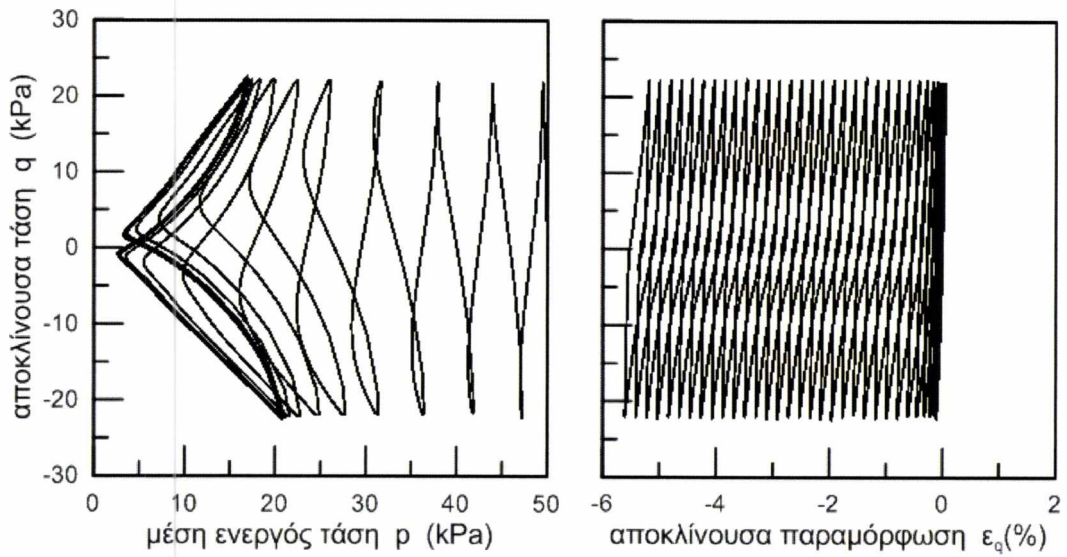


Σχήμα 6.15 $P_{ini} = 50\text{kPa}$, $e = 0.67$, $z_{max} = 12$, $CSR = 0.25$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

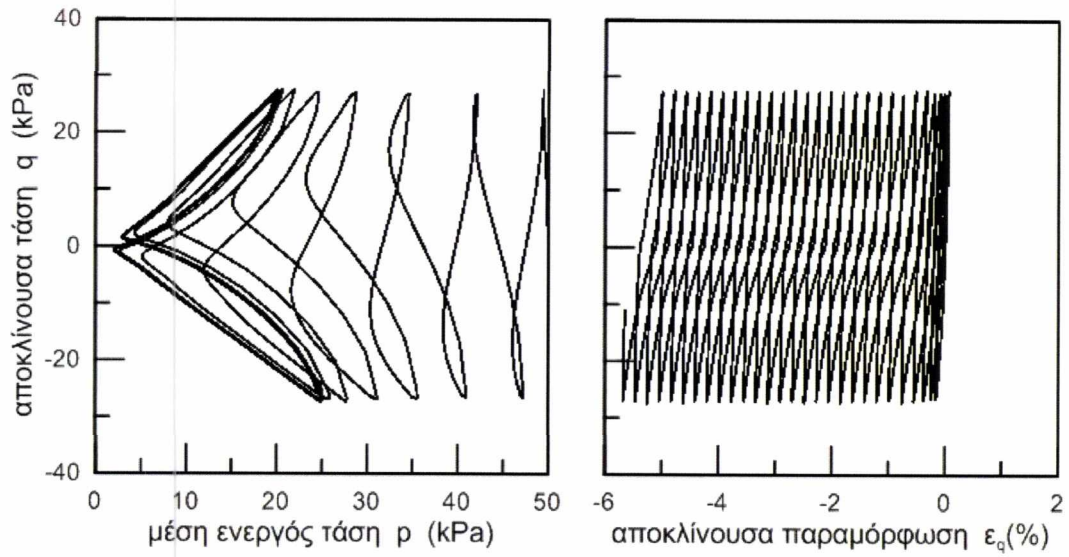


Σχήμα 6.16 $P_{ini}=50\text{kPa}$, $e=0.67$, $z_{max}=12$, $CSR=0.35$

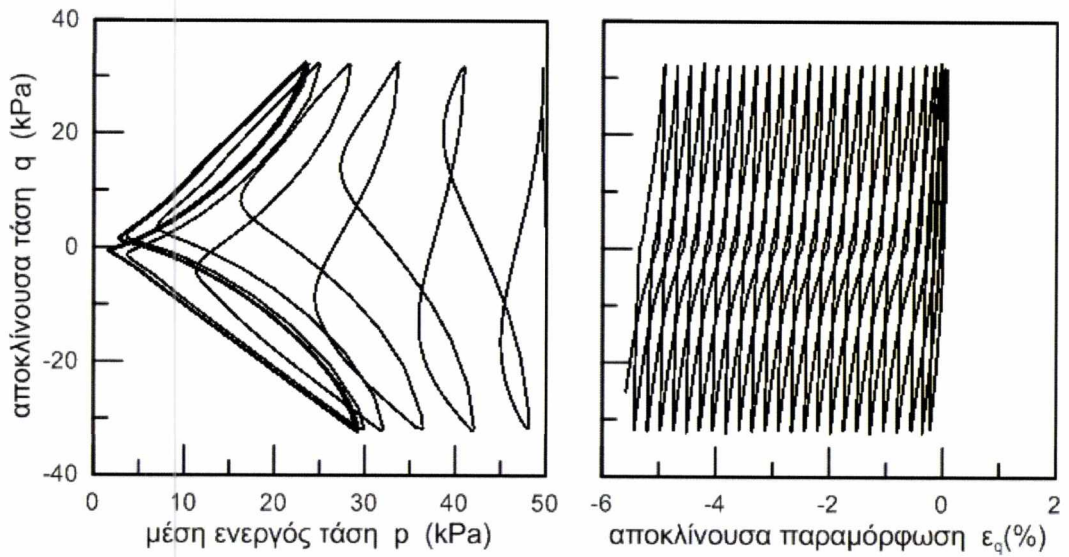


Σχήμα 6.17 $P_{ini}=50\text{kPa}$, $e=0.67$, $z_{max}=12$, $CSR=0.45$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

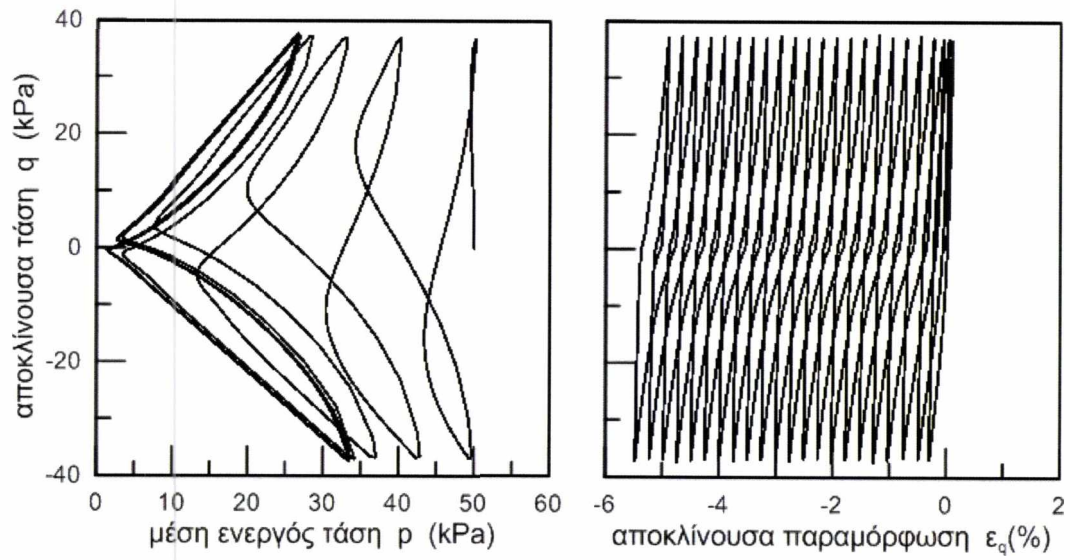


Σχήμα 6.18 $P_{ini}=50\text{kPa}$, $e=0.67$, $z_{max}=12$, $CSR=0.45$



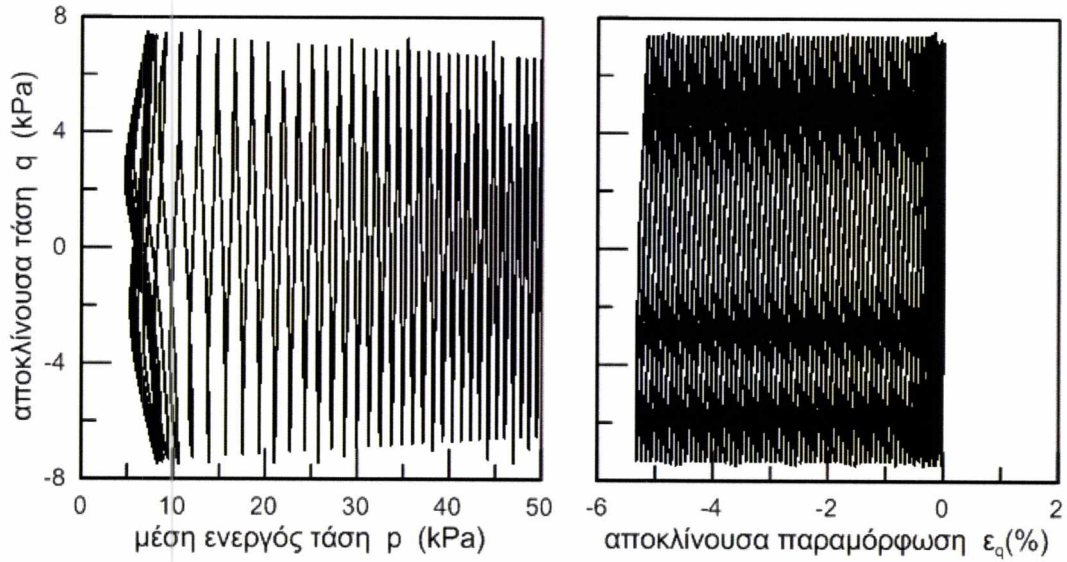
Σχήμα 6.19 $P_{ini}=50\text{kPa}$, $e=0.67$, $z_{max}=12$, $CSR=0.55$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

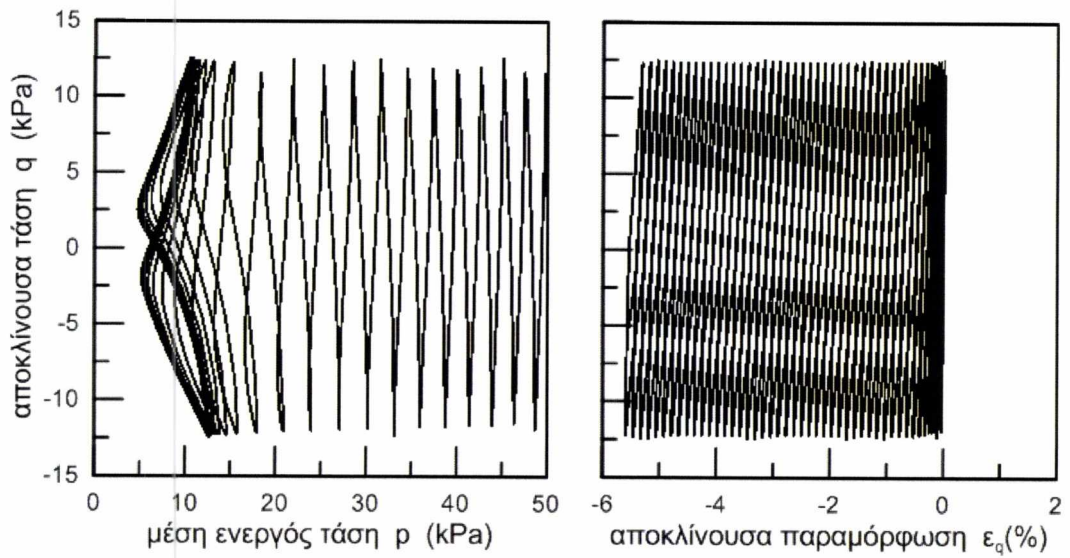


Σχήμα 6.20 $P_{ini}=50\text{kPa}$, $e=0.67$, $z_{max}=12$, $CSR=0.65$

6.1.4 $E = 0.68$ ΚΑΙ $Z_{MAX} = 11$

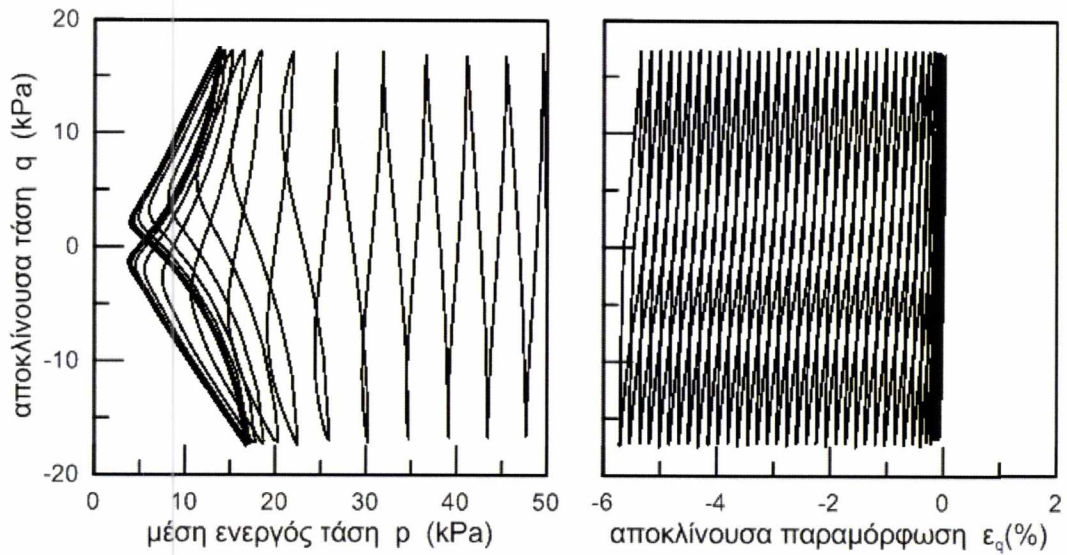


Σχήμα 6.21 $P_{ini} = 50\text{kPa}$, $e = 0.68$, $z_{max} = 11$, $CSR = 0.15$

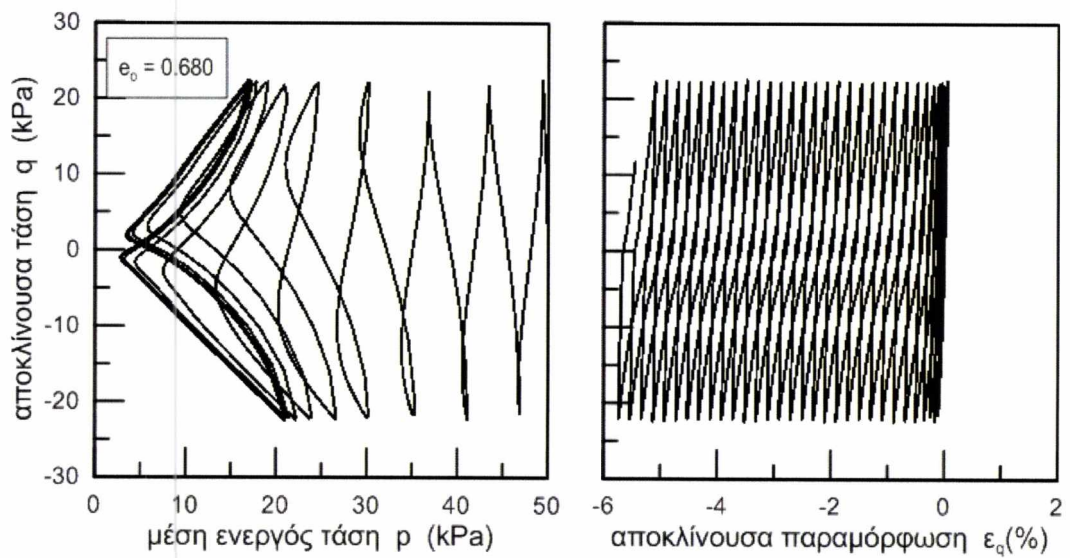


Σχήμα 6.22 $P_{ini} = 50\text{kPa}$, $e = 0.68$, $z_{max} = 11$, $CSR = 0.25$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

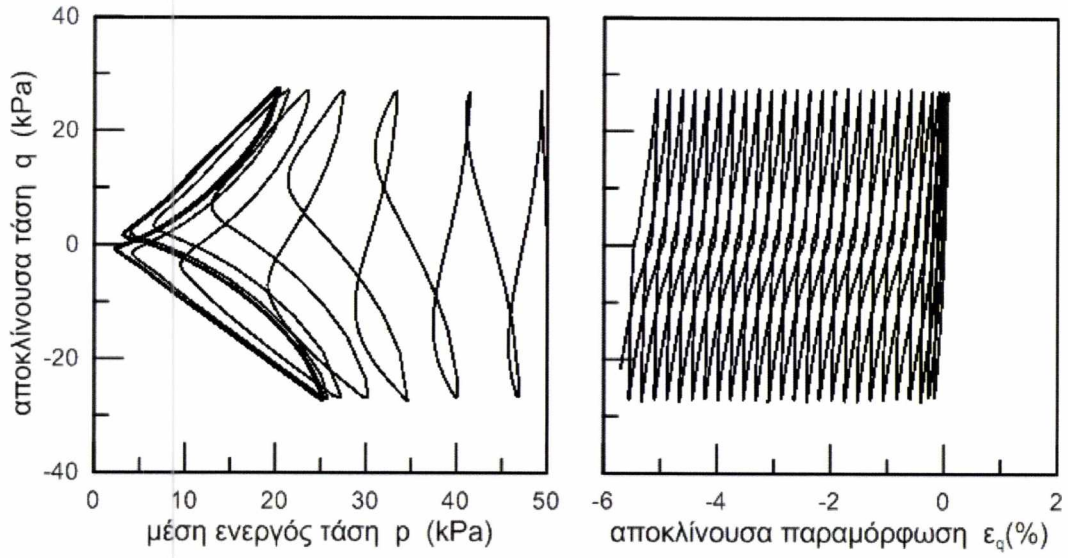


Σχήμα 6.23 $P_{ini}=50\text{kPa}$, $e=0.68$, $z_{max}=11$, $CSR=0.35$

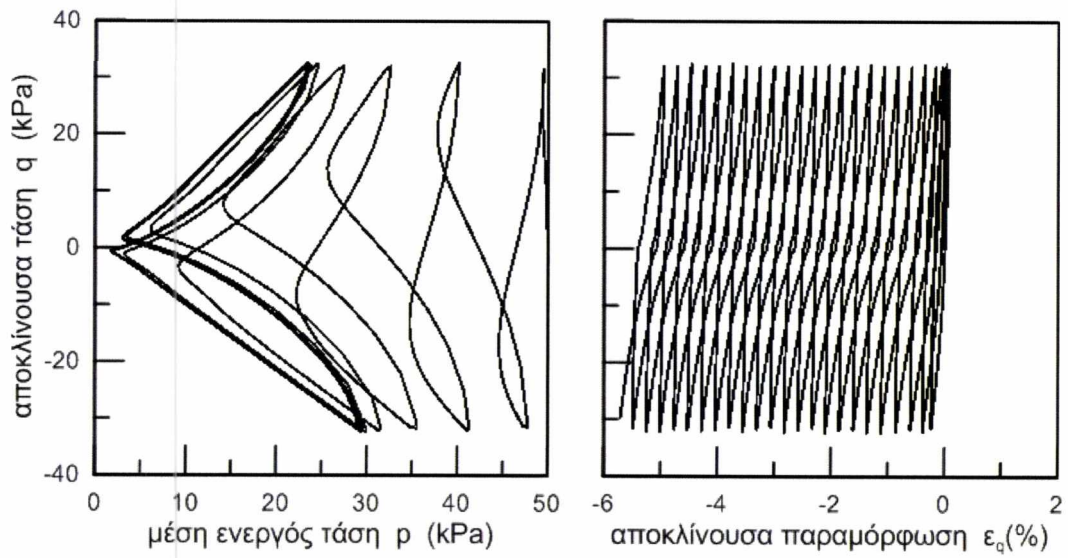


Σχήμα 6.24 $P_{ini}=50\text{kPa}$, $e=0.68$, $z_{max}=11$, $CSR=0.45$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

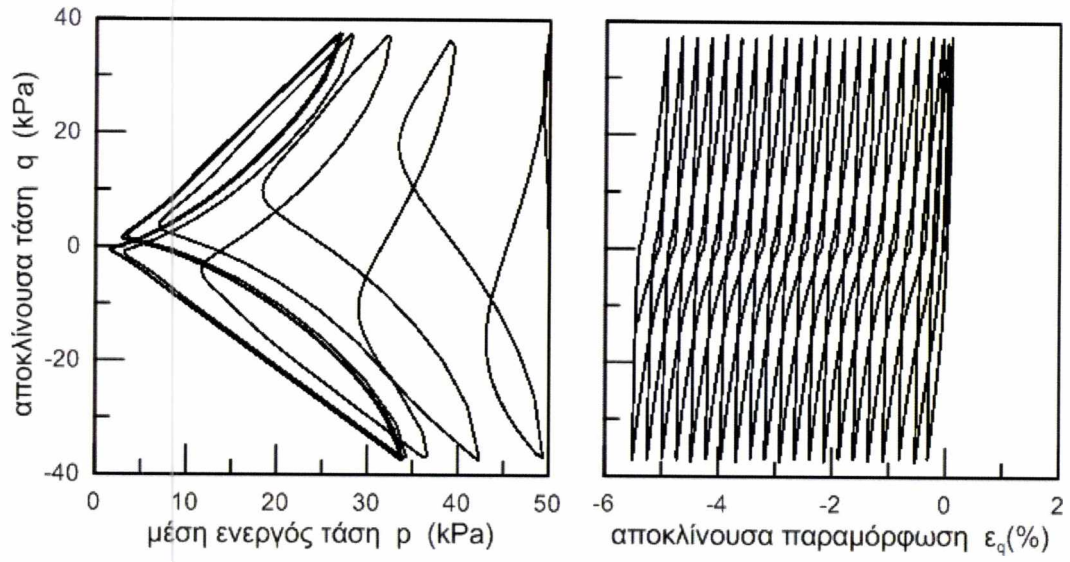


Σχήμα 6.25 $P_{ini} = 50\text{kPa}$, $e = 0.68$, $z_{max} = 11$, $CSR = 0.55$



Σχήμα 6.26 $P_{ini} = 50\text{kPa}$, $e = 0.68$, $z_{max} = 11$, $CSR = 0.65$

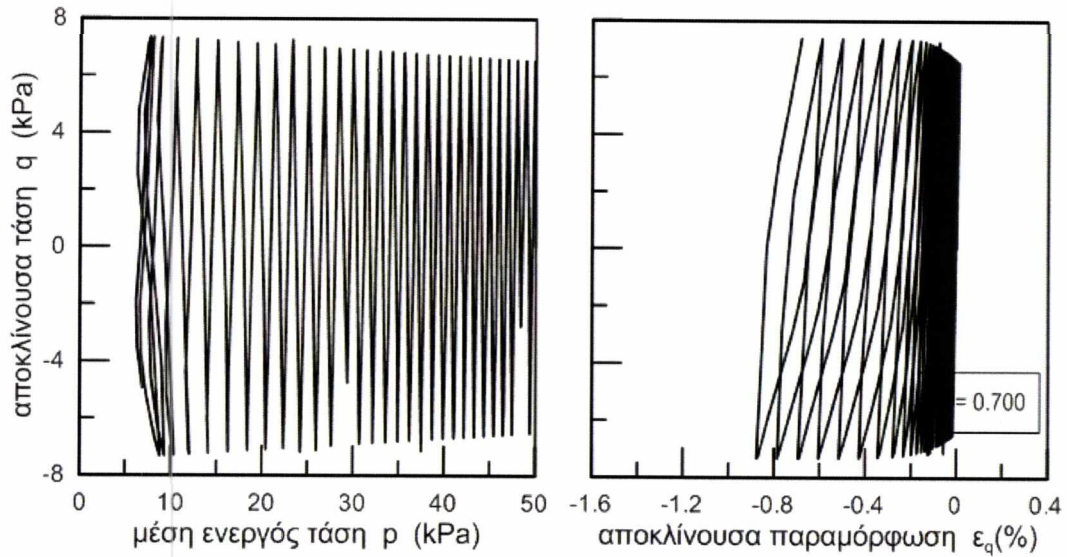
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



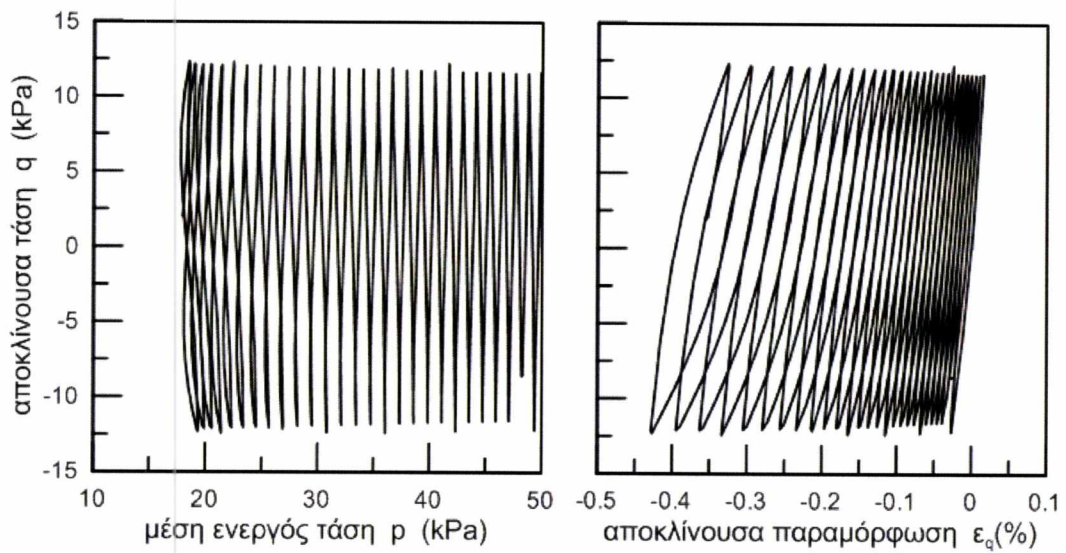
Σχήμα 6.27 $P_{ini}=50\text{kPa}$, $e=0.68$, $z_{max}=11$, $CSR=0.75$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

6.1.5 $e = 0.7$ ΚΑΙ $Z_{MAX} = 4$

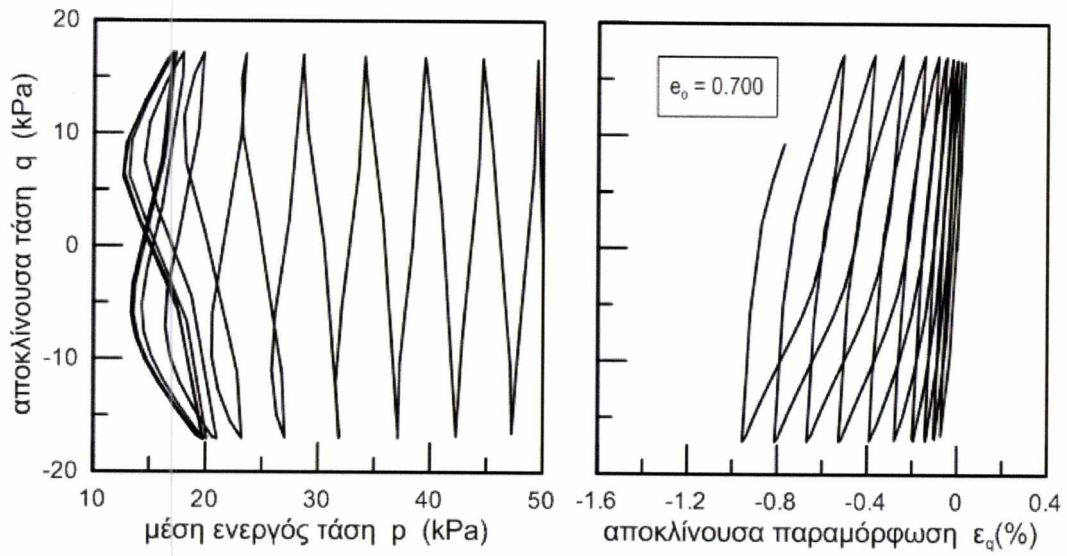


Σχήμα 6.28 $P_{ini} = 50\text{kPa}$, $e = 0.7$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.15$

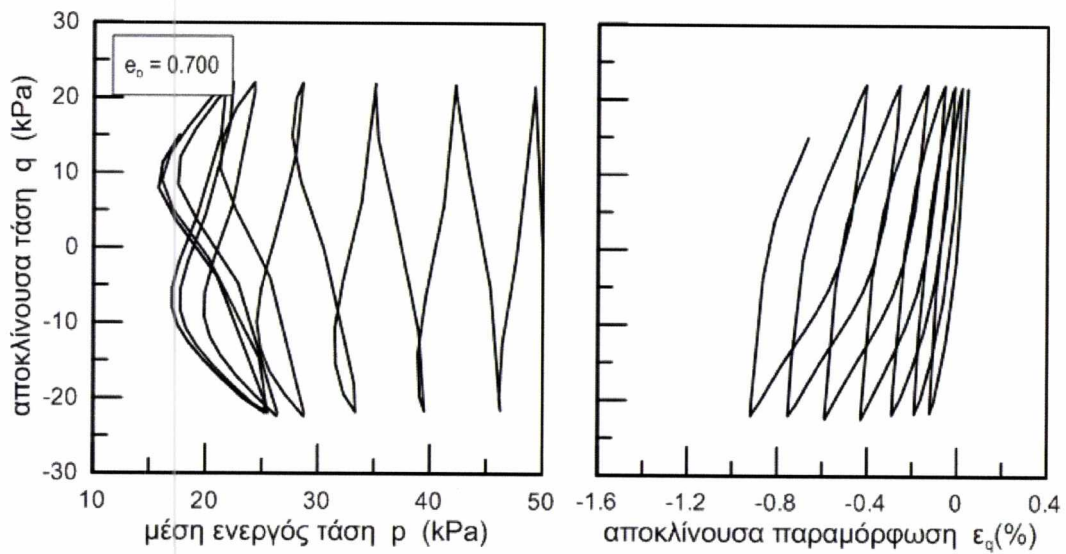


Σχήμα 6.29 $P_{ini} = 50\text{kPa}$, $e = 0.7$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.25$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

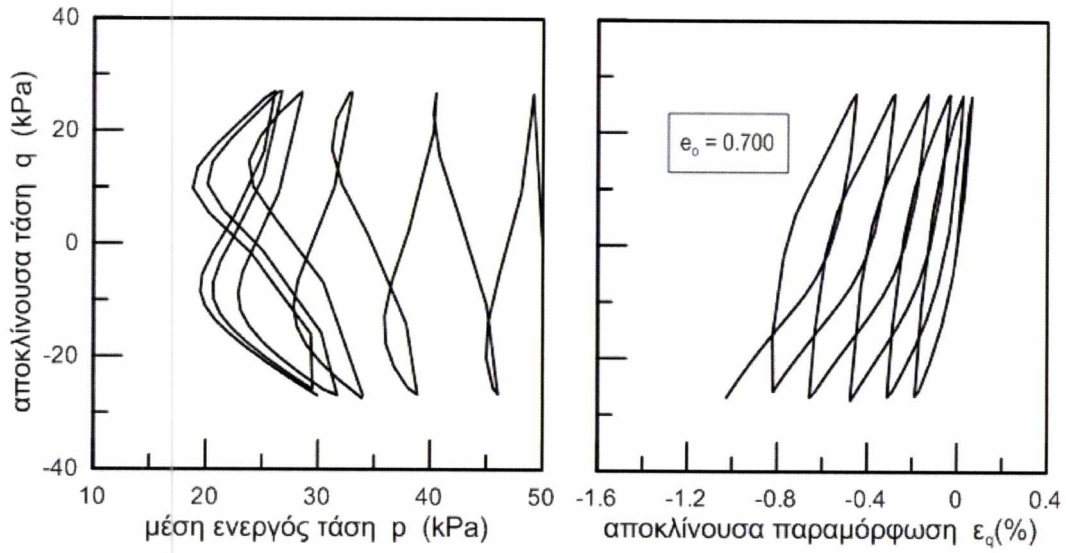


Σχήμα 6.30 $P_{ini}=50\text{kPa}$, $e=0.7$, $z_{max}=4$, $CSR=0.35$

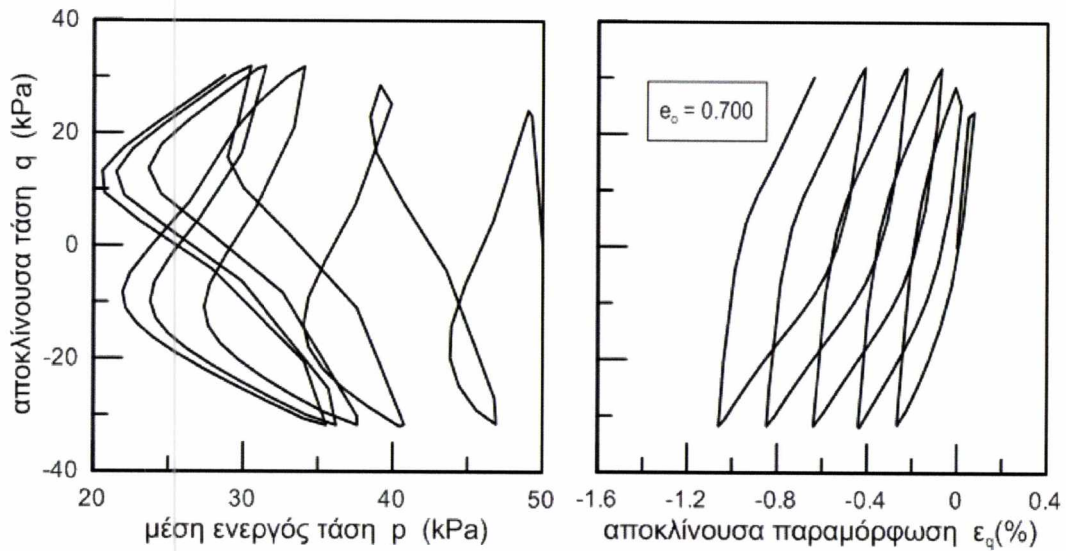


Σχήμα 6.31 $P_{ini}=50\text{kPa}$, $e=0.7$, $z_{max}=4$, $CSR=0.45$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

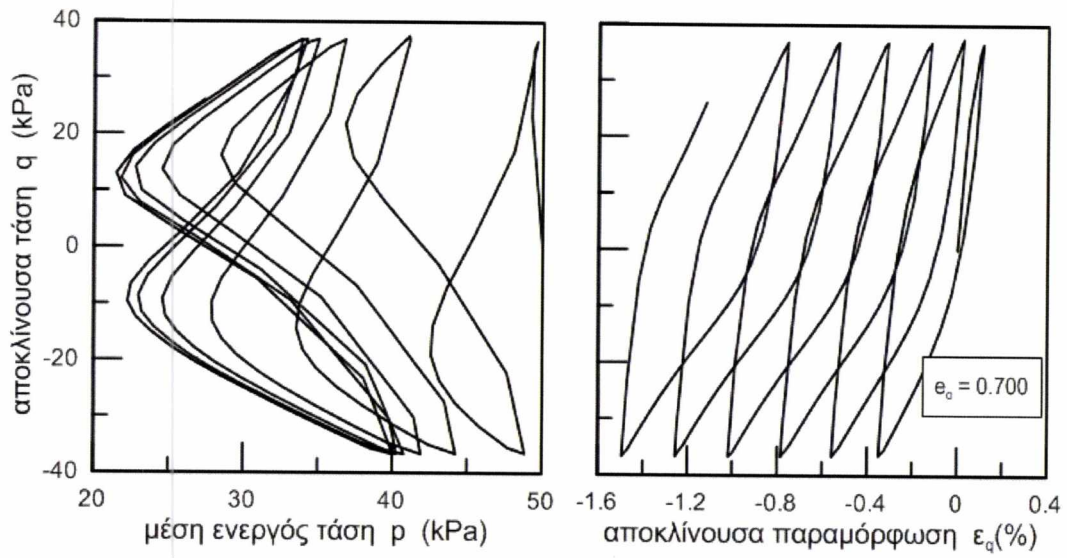


Σχήμα 6.32 $P_{ini} = 50 \text{ kPa}$, $e = 0.7$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.55$



Σχήμα 6.33 $P_{ini} = 50 \text{ kPa}$, $e = 0.7$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.65$

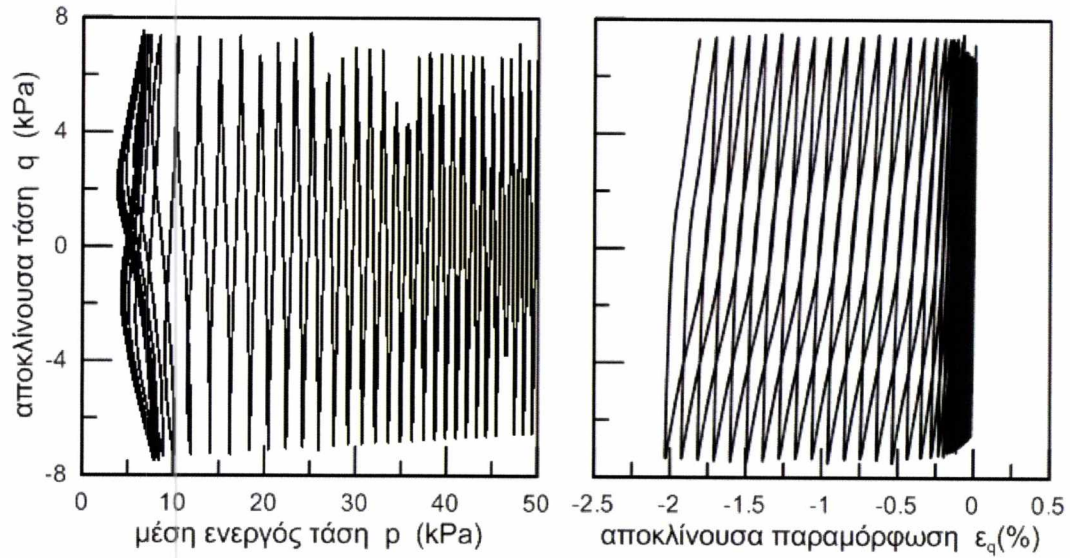
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



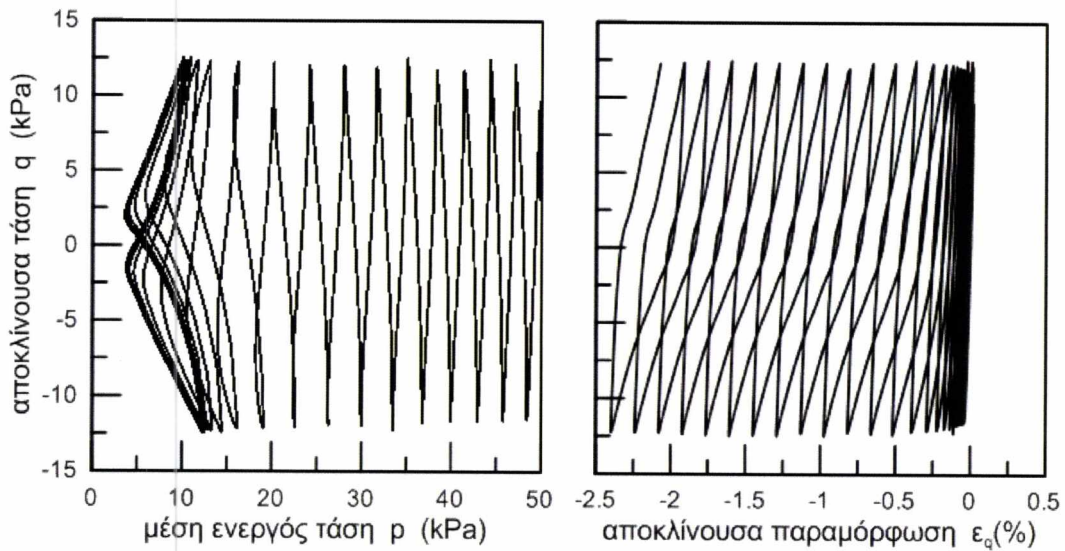
Σχήμα 6.34 $P_{ini} = 50 \text{ kPa}$, $e = 0.7$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.75$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

6.1.6 $e = 0.7$ ΚΑΙ $z_{MAX} = 10$

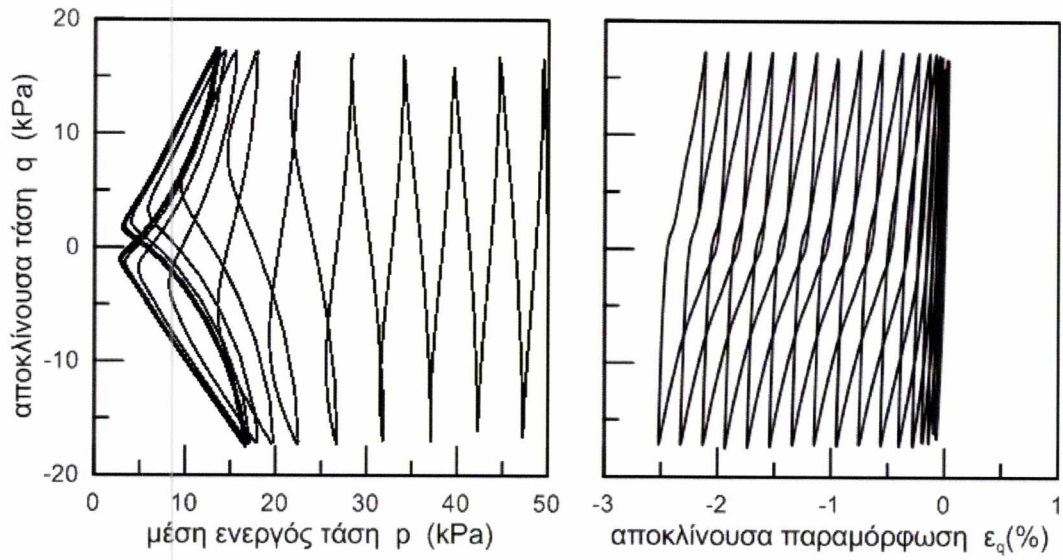


Σχήμα 6.35 $P_{ini} = 50\text{kPa}$, $e = 0.7$, $z_{max} = 10$, $CSR = 0.15$

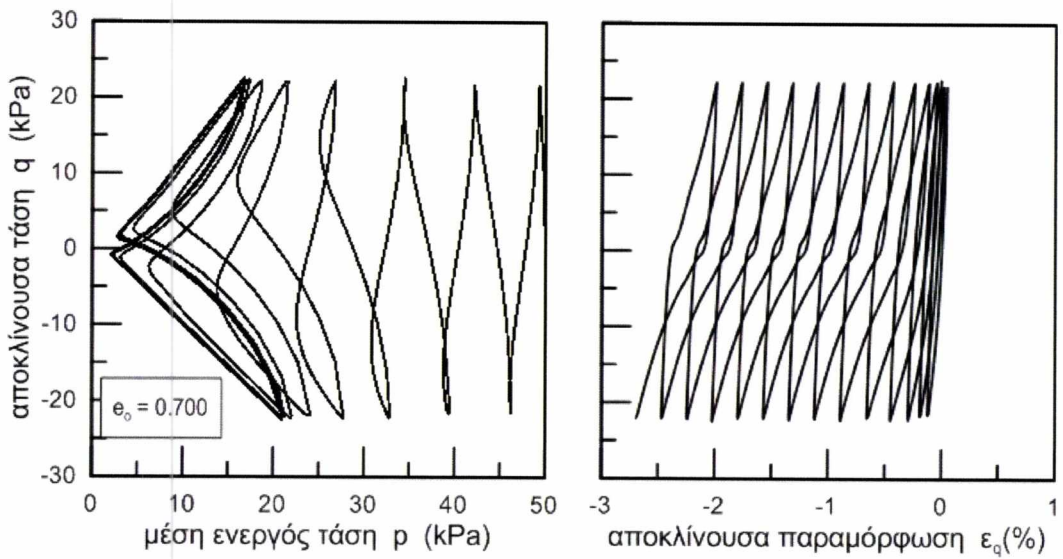


Σχήμα 6.36 $P_{ini} = 50\text{kPa}$, $e = 0.7$, $z_{max} = 10$, $CSR = 0.25$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

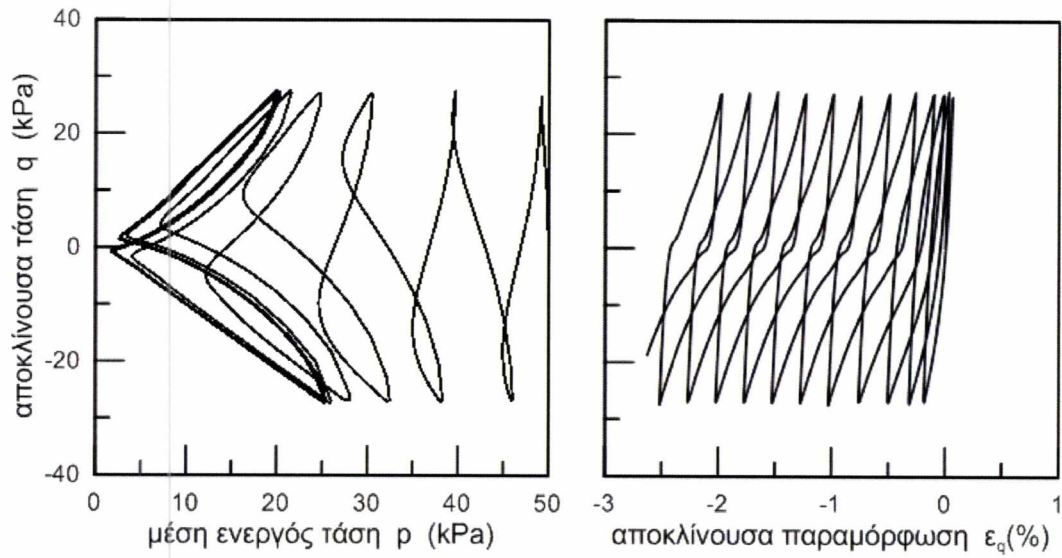


Σχήμα 6.37 $P_{ini}=50\text{kPa}$, $e=0.7$, $z_{max}=10$, $CSR=0.35$

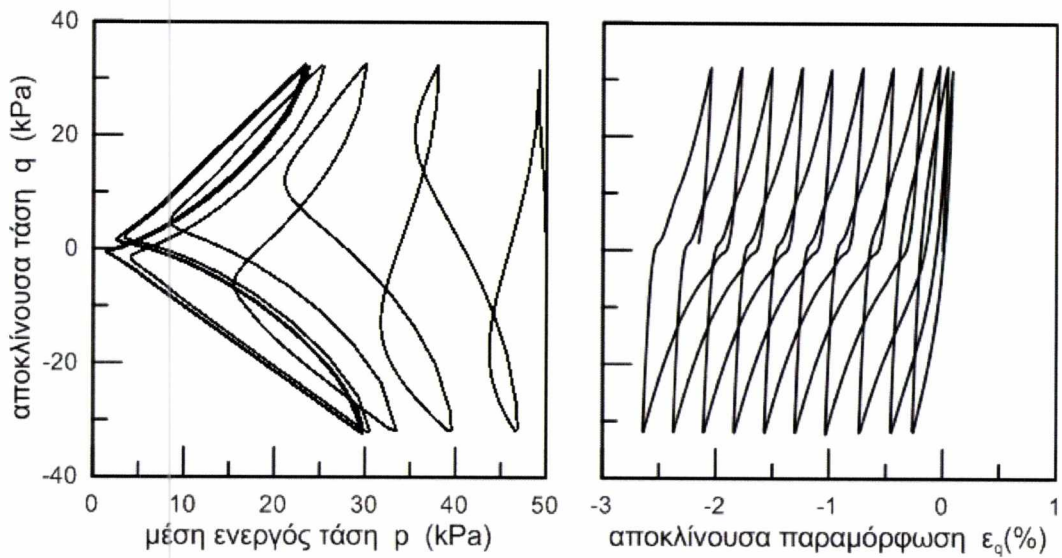


Σχήμα 6.38 $P_{ini}=50\text{kPa}$, $e=0.7$, $z_{max}=10$, $CSR=0.45$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

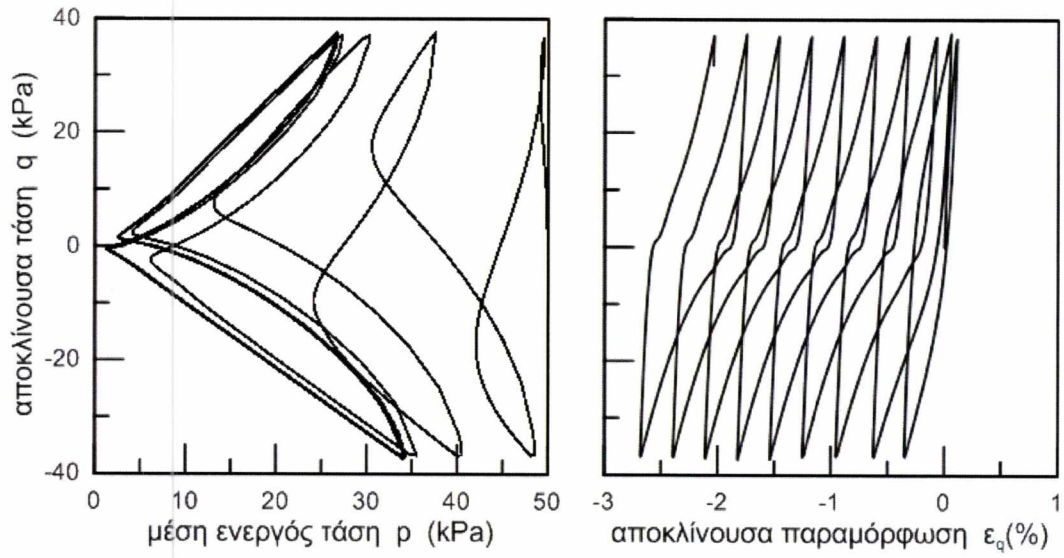


Σχήμα 6.39 $P_{ini}= 50\text{kPa}$, $e= 0.7$, $z_{max}= 10$, $CSR= 0.55$



Σχήμα 6.40 $P_{ini}= 50\text{kPa}$, $e= 0.7$, $z_{max}= 10$, $CSR= 0.65$

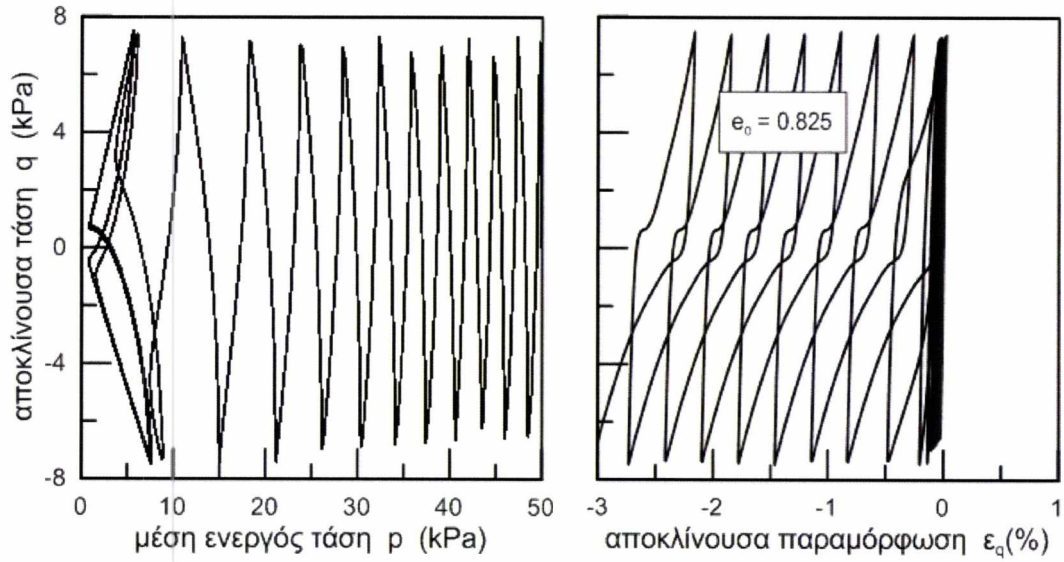
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



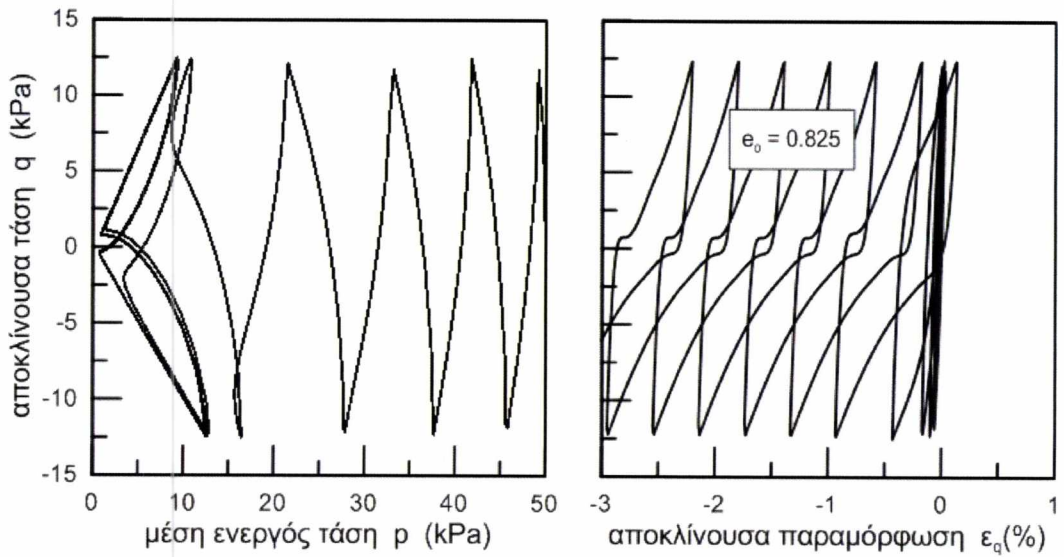
Σχήμα 6.41 $P_{ini}=50\text{kPa}$, $e=0.7$, $z_{max}=10$, $CSR=0.75$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

6.1.7 $E = 0.825$ ΚΑΙ $Z_{MAX} = 4$

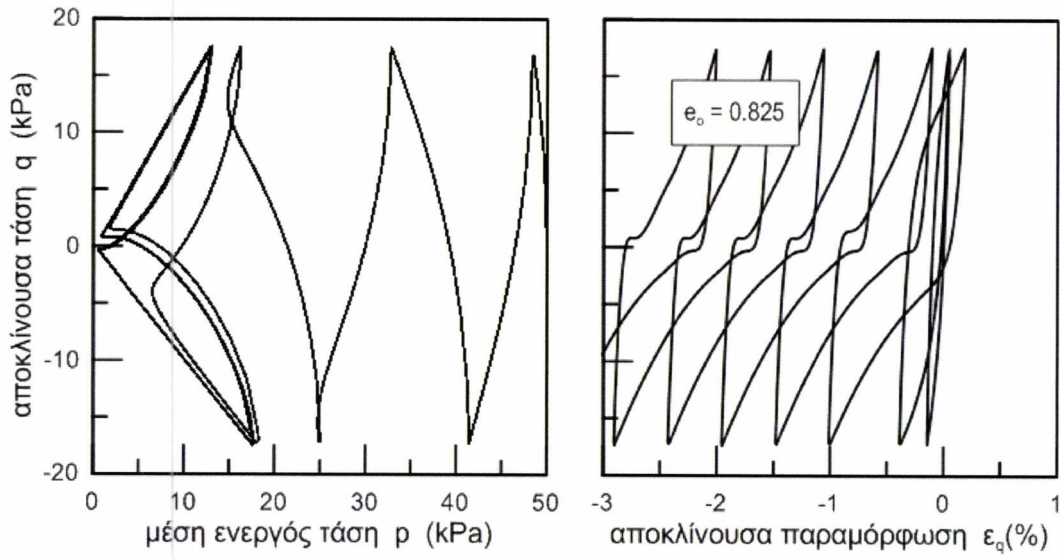


Σχήμα 6.42 $P_{ini} = 50\text{kPa}$, $e = 0.8$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.15$

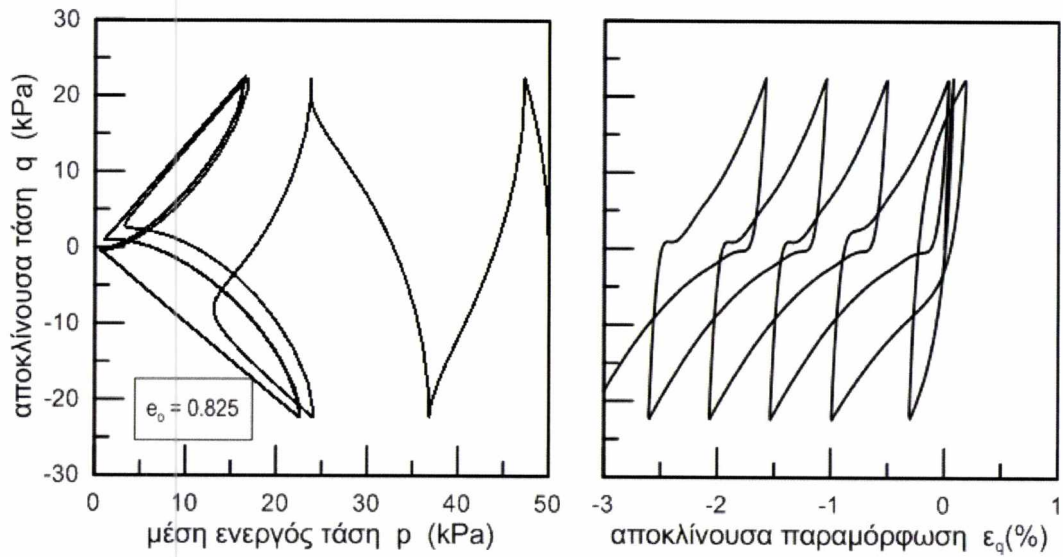


Σχήμα 6.43 $P_{ini} = 50\text{kPa}$, $e = 0.8$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.25$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ



Σχήμα 6.44 $P_{ini}=50\text{kPa}$, $e=0.8$, $z_{max}=4$, $CSR=0.35$

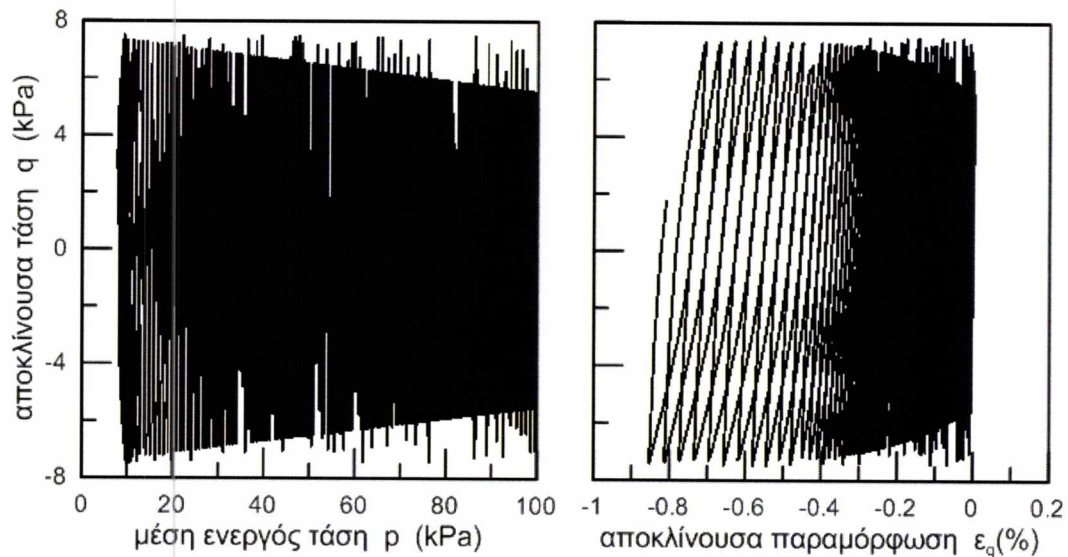


Σχήμα 6.45 $P_{ini}=50\text{kPa}$, $e=0.8$, $z_{max}=4$, $CSR=0.45$

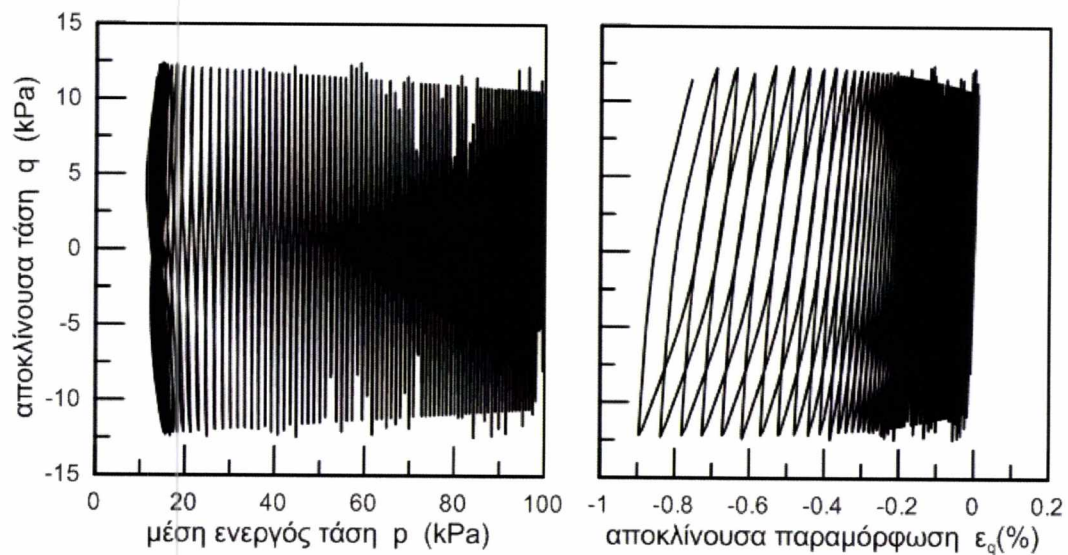
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

6.2 $P_{INI} = 100 \text{ kPa}$

6.2.1 $E = 0.597$ ΚΑΙ $Z_{MAX} = 20$

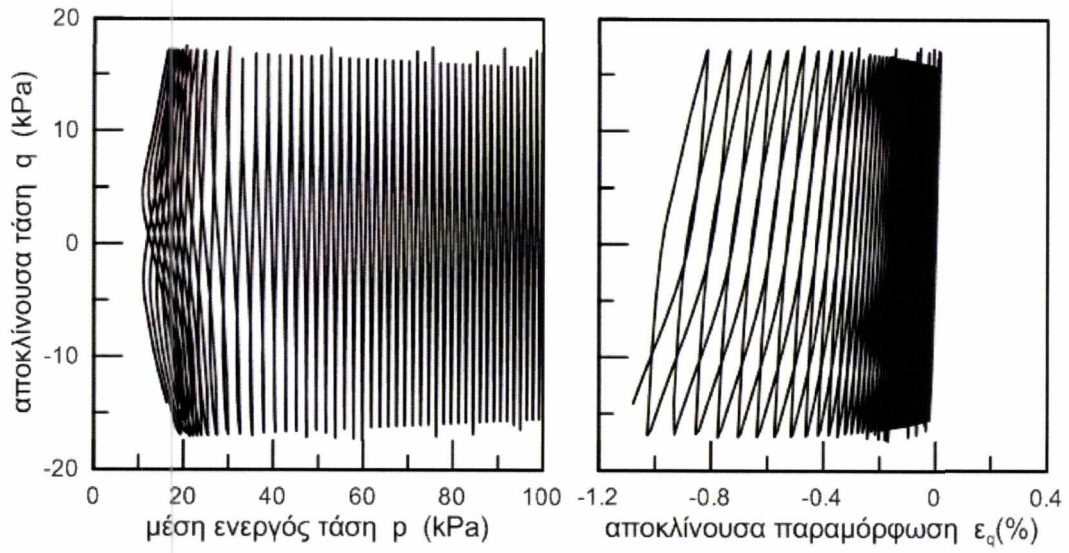


Σχήμα 6.46 $P_{ini} = 100 \text{ kPa}$, $e = 0.597$, $z_{max} = 20$, $CSR = 0.15$

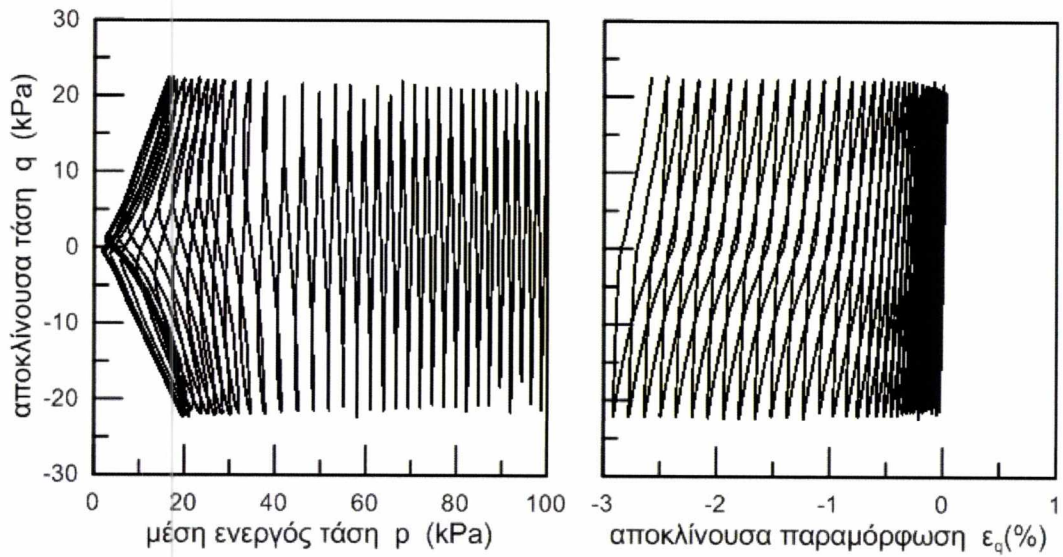


Σχήμα 6.47 $P_{ini} = 100 \text{ kPa}$, $e = 0.597$, $z_{max} = 20$, $CSR = 0.25$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

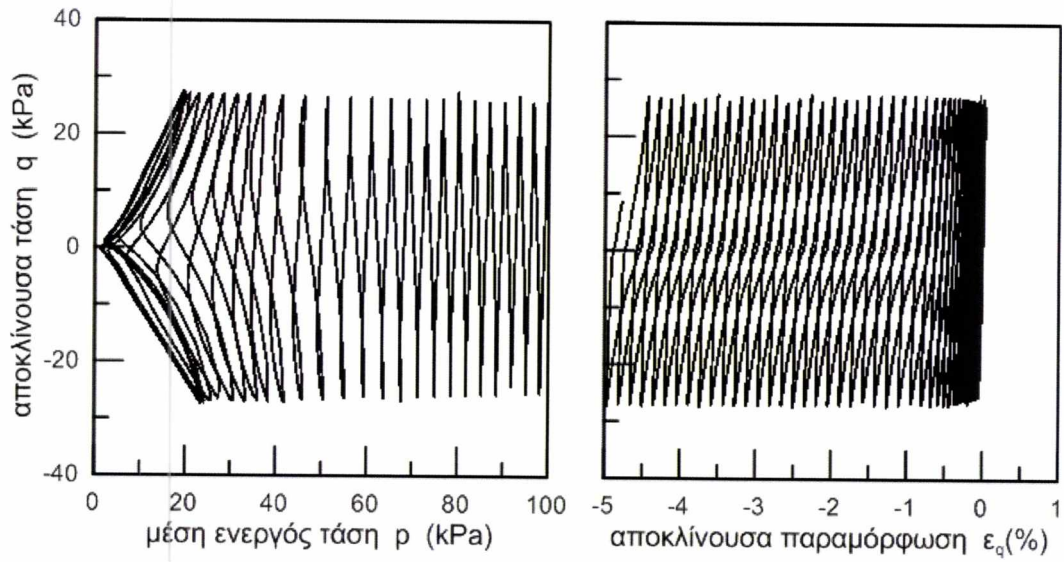


Σχήμα 6.48 $P_{ini}= 100\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 20$, $CSR= 0.35$

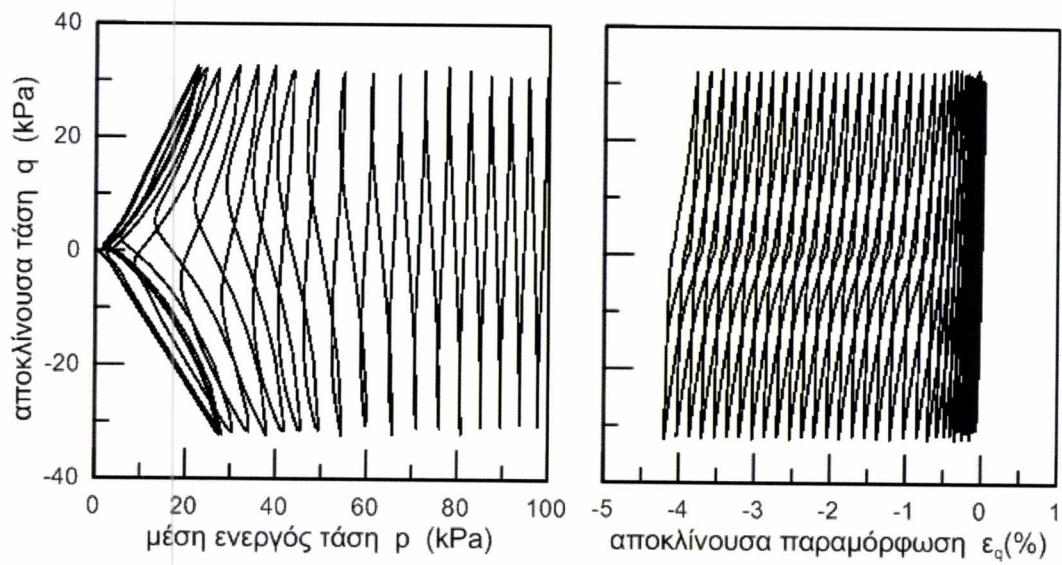


Σχήμα 6.49 $P_{ini}= 100\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 20$, $CSR= 0.45$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

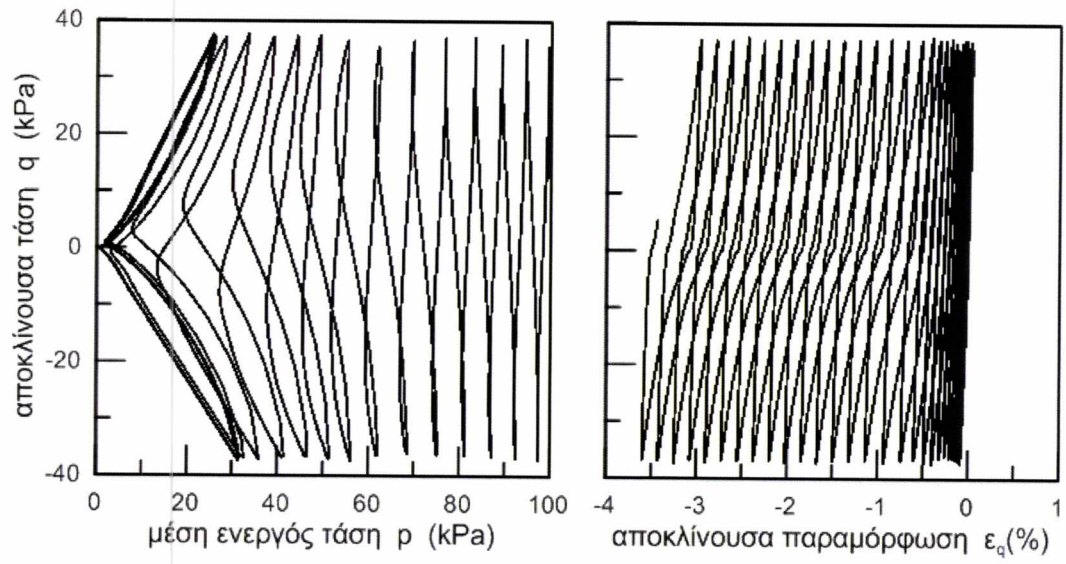


Σχήμα 6.50 $P_{ini}= 100\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 20$, $CSR= 0.55$



Σχήμα 6.51 $P_{ini}= 100\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 20$, $CSR= 0.65$

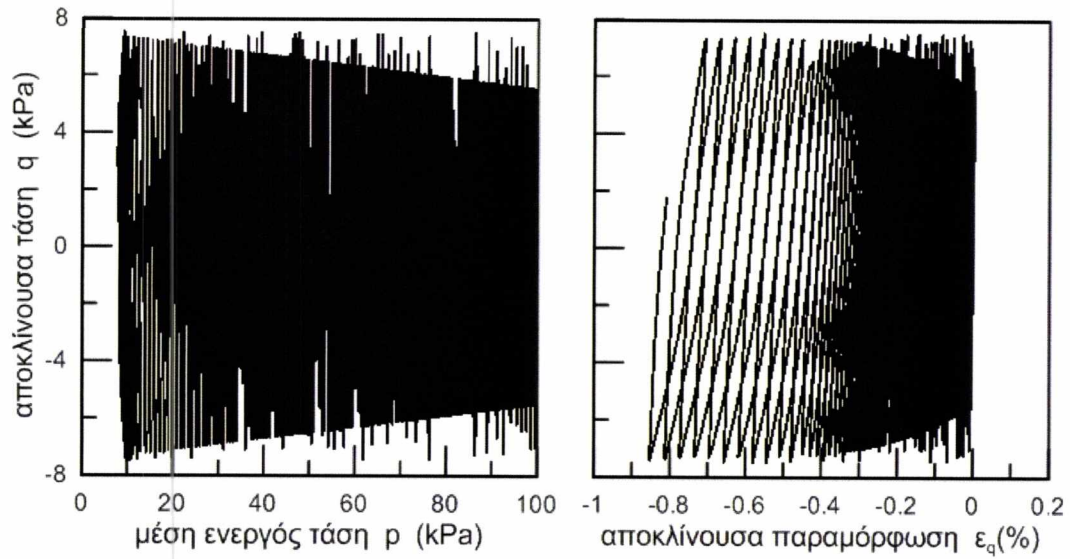
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



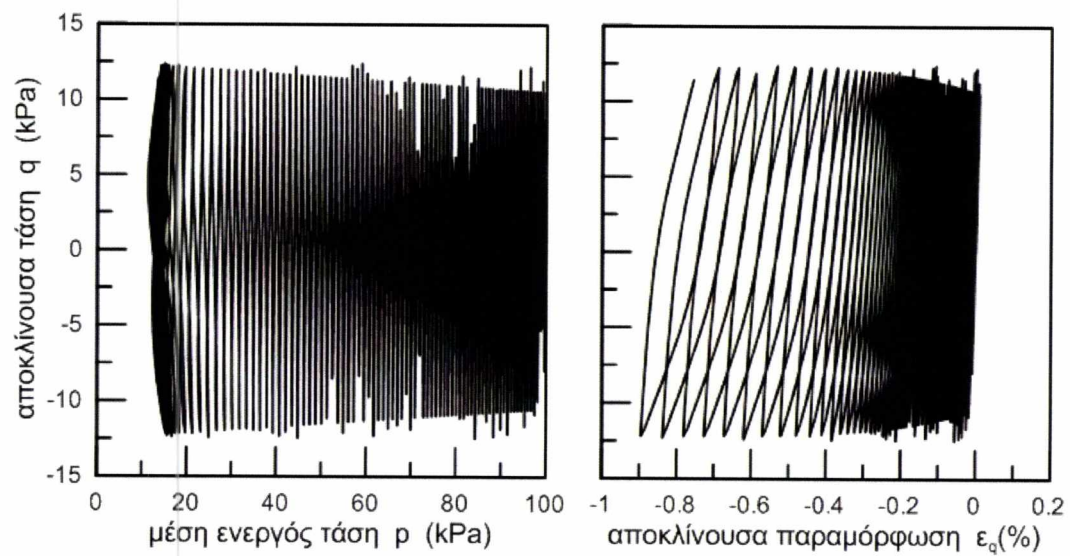
Σχήμα 6.52 $P_{ini}= 100\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 20$, $CSR= 0.75$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

6.2.2 $E = 0.67$ ΚΑΙ $Z_{MAX} = 12$

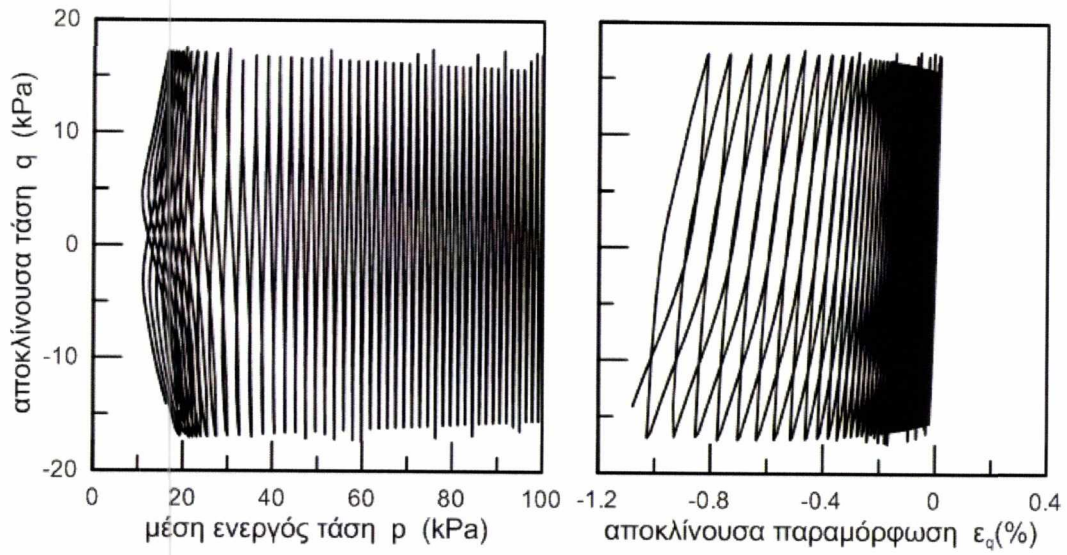


Σχήμα 6.53 $P_{ini}=100\text{kPa}$, $e=0.67$, $z_{max}=12$, $CSR=0.15$

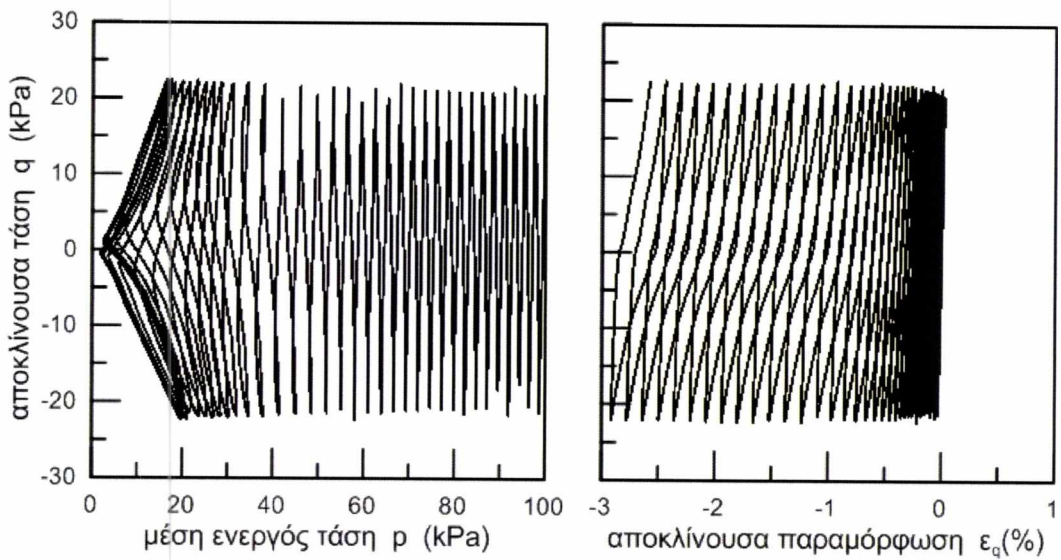


Σχήμα 6.54 $P_{ini}=100\text{kPa}$, $e=0.67$, $z_{max}=12$, $CSR=0.25$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

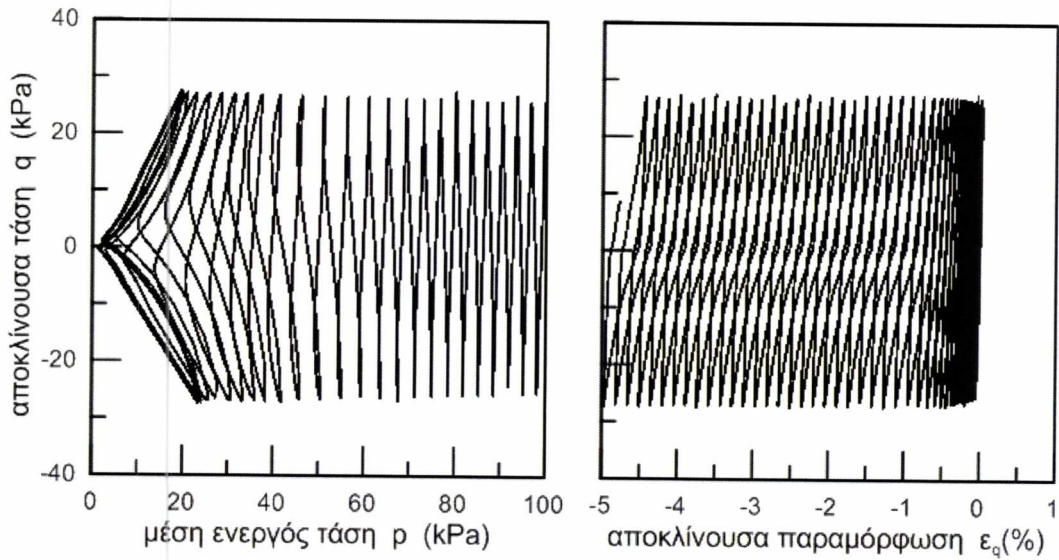


Σχήμα 6.55 $P_{ini}= 100\text{kPa}$, $e= 0.67$, $z_{max}= 12$, $CSR= 0.35$

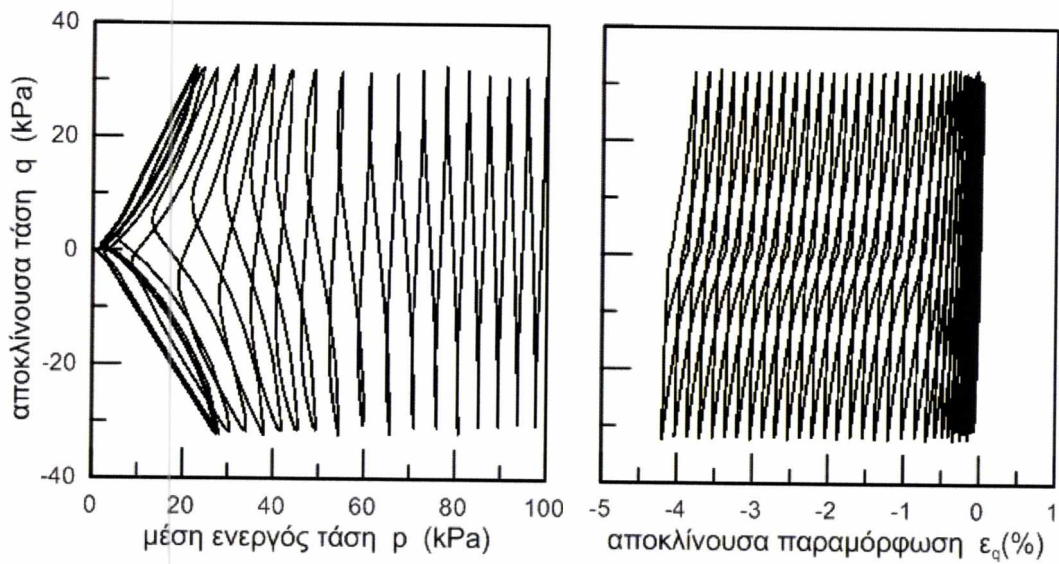


Σχήμα 6.56 $P_{ini}= 100\text{kPa}$, $e= 0.67$, $z_{max}= 12$, $CSR= 0.45$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

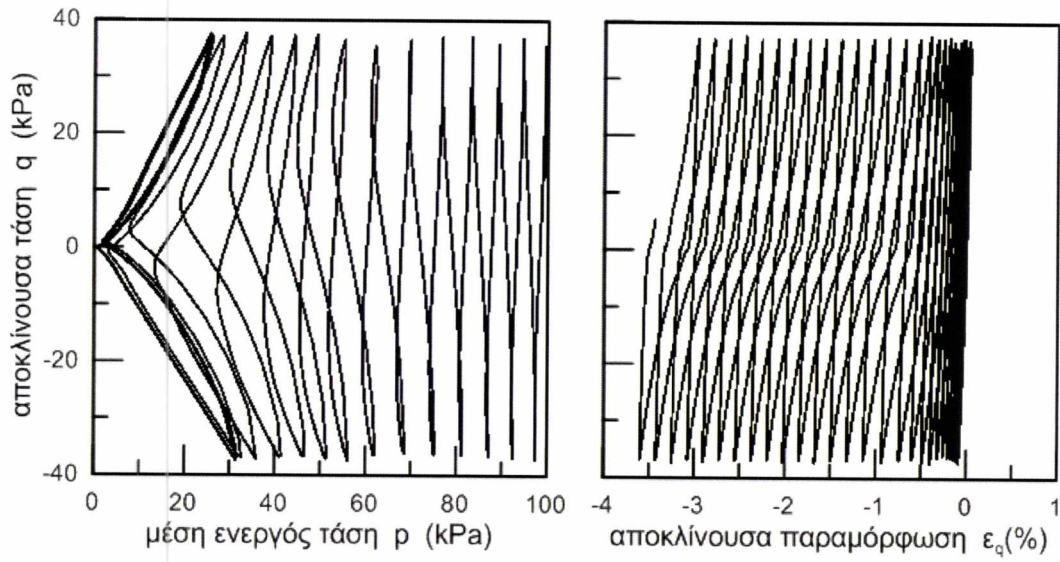


Σχήμα 6.57 $P_{ini}= 100\text{kPa}$, $e= 0.67$, $z_{max}= 12$, $CSR= 0.55$



Σχήμα 6.58 $P_{ini}= 100\text{kPa}$, $e= 0.67$, $z_{max}= 12$, $CSR= 0.65$

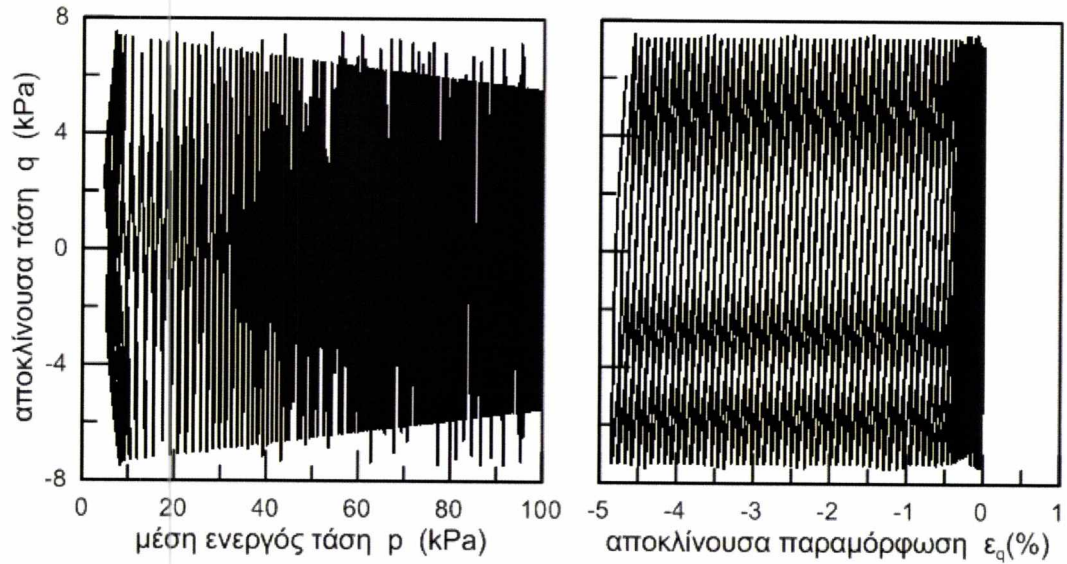
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



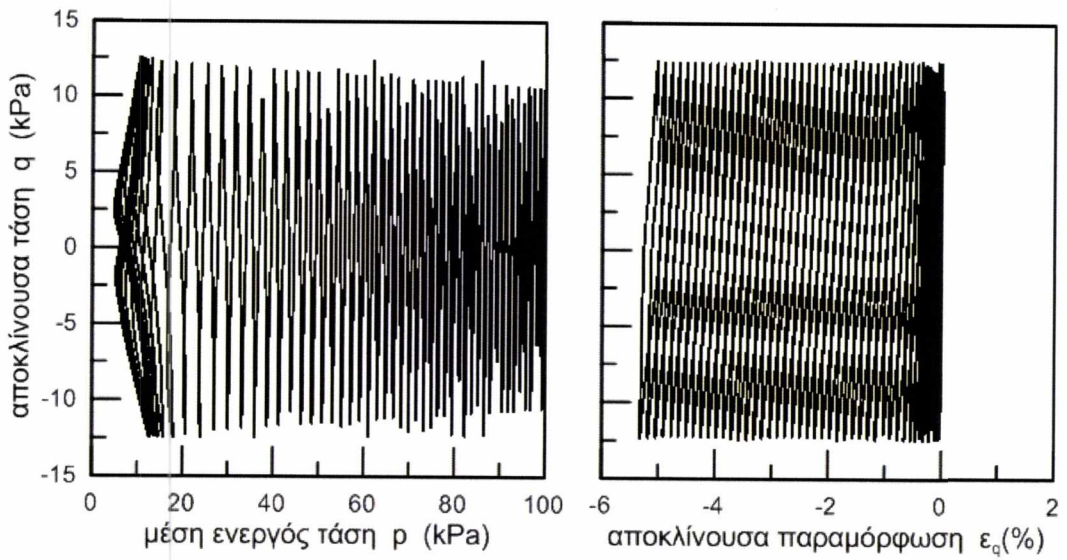
Σχήμα 6.59 $P_{ini} = 100\text{kPa}$, $e = 0.67$, $z_{max} = 12$, $CSR = 0.75$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

6.2.3 $E = 0.68$ ΚΑΙ $Z_{MAX} = 11$

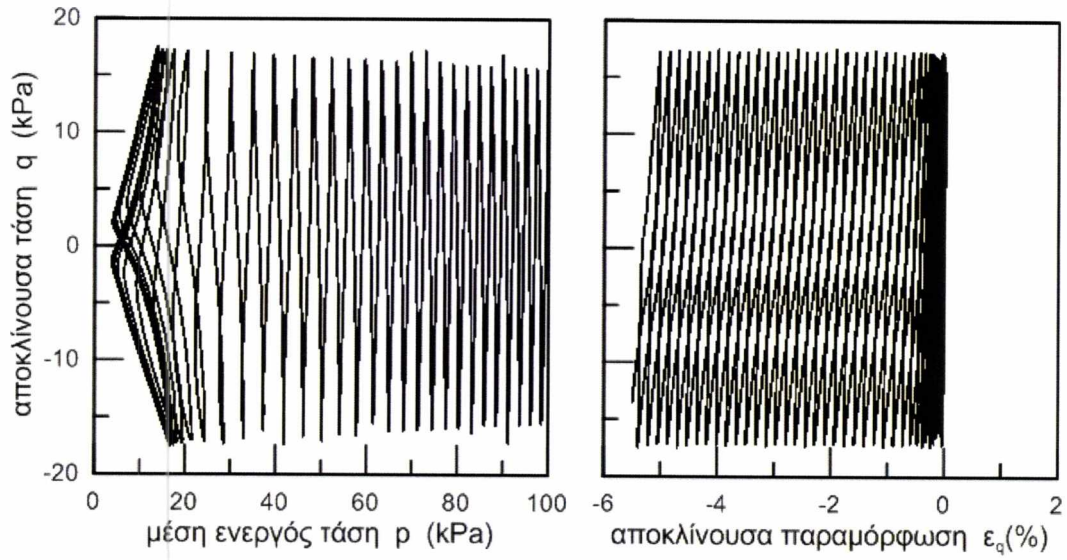


Σχήμα 6.60 $P_{ini} = 100\text{kPa}$, $e = 0.68$, $z_{max} = 11$, $CSR = 0.15$

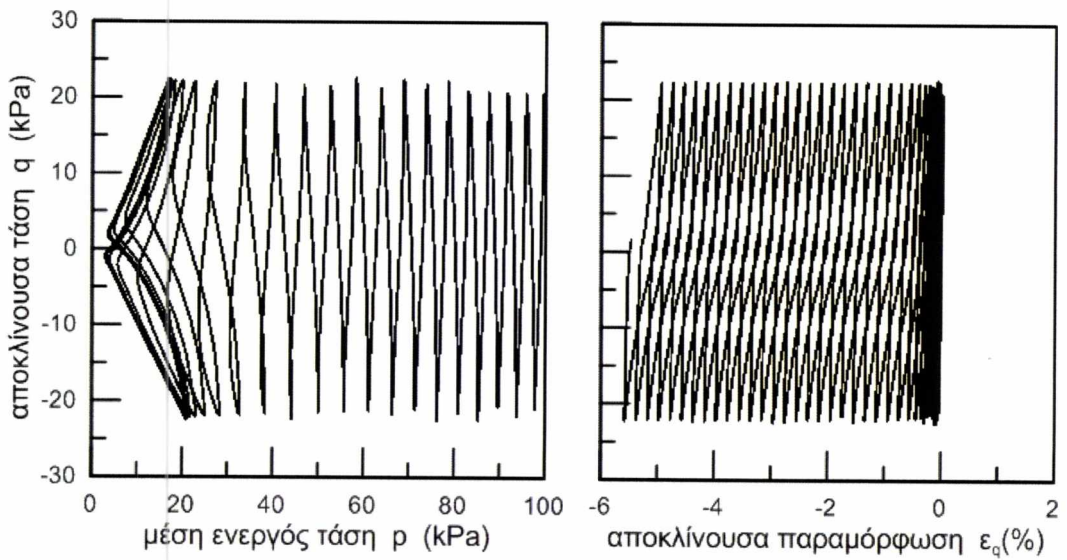


Σχήμα 6.61 $P_{ini} = 100\text{kPa}$, $e = 0.68$, $z_{max} = 11$, $CSR = 0.25$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

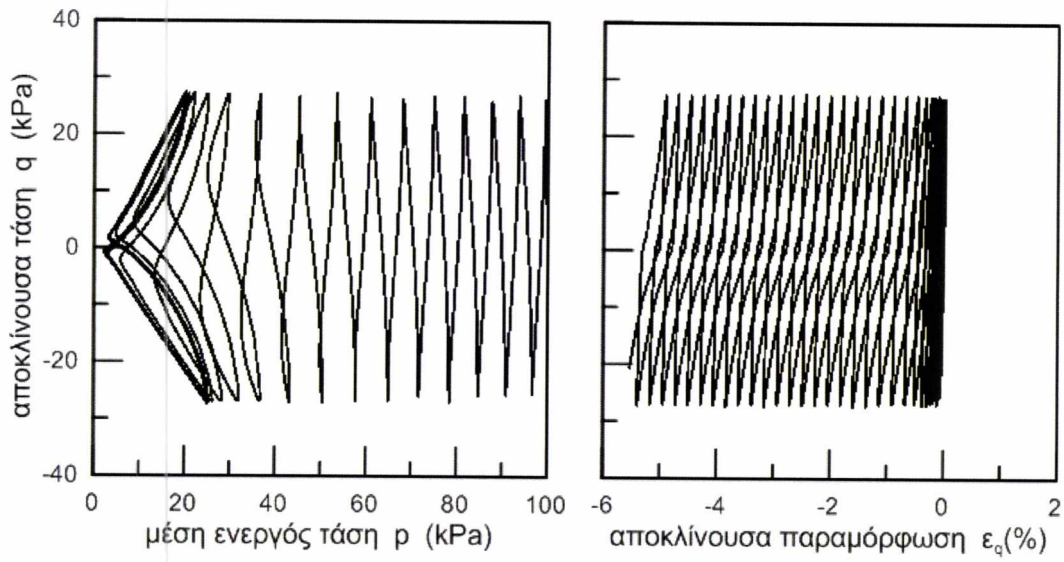


Σχήμα 6.62 $P_{ini}= 100\text{kPa}$, $e= 0.68$, $z_{max}= 11$, $CSR= 0.35$

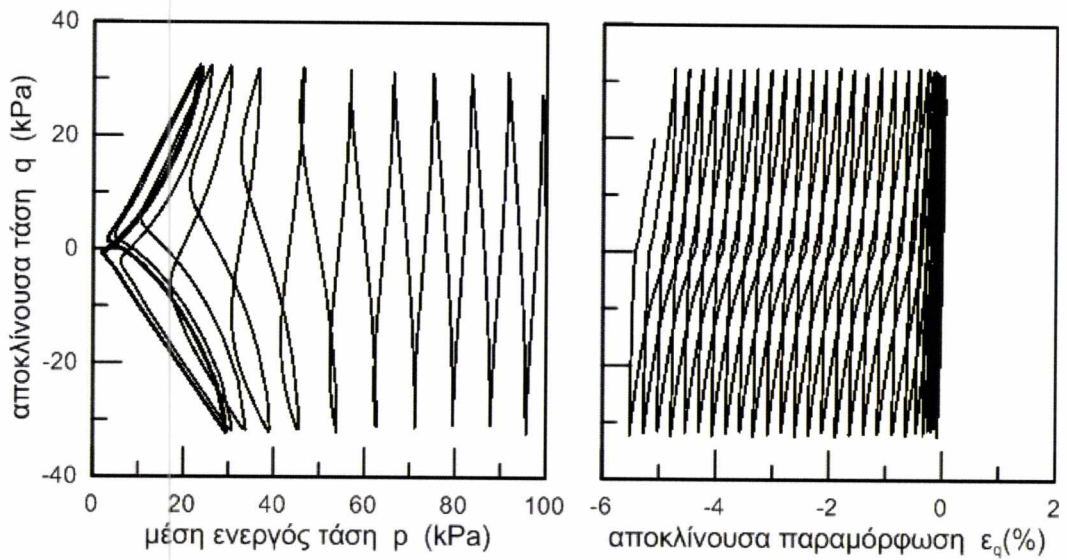


Σχήμα 6.63 $P_{ini}= 100\text{kPa}$, $e= 0.68$, $z_{max}= 11$, $CSR= 0.45$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

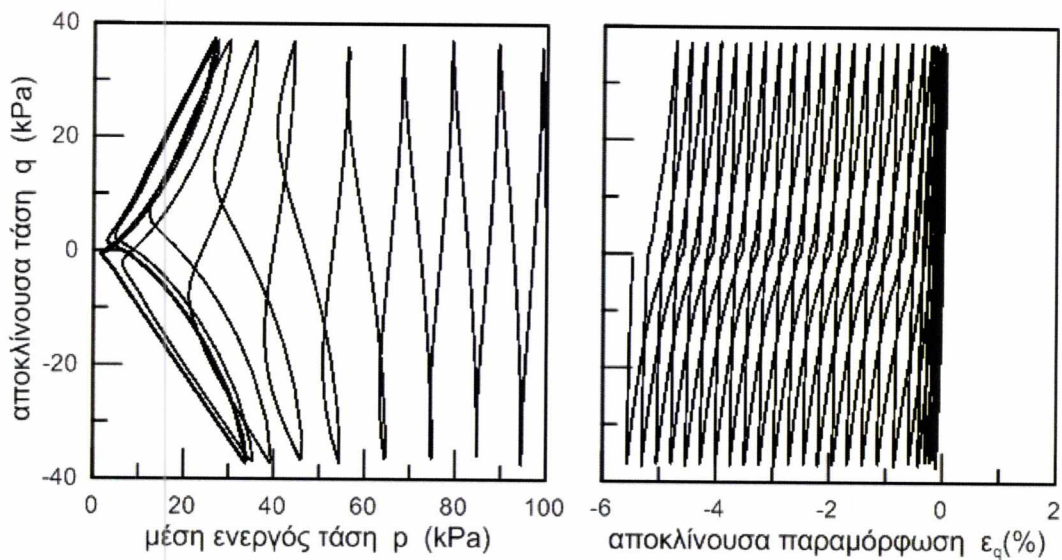


Σχήμα 6.64 $P_{ini}=100\text{kPa}$, $e=0.68$, $z_{max}=11$, $CSR=0.55$



Σχήμα 6.65 $P_{ini}=100\text{kPa}$, $e=0.68$, $z_{max}=11$, $CSR=0.65$

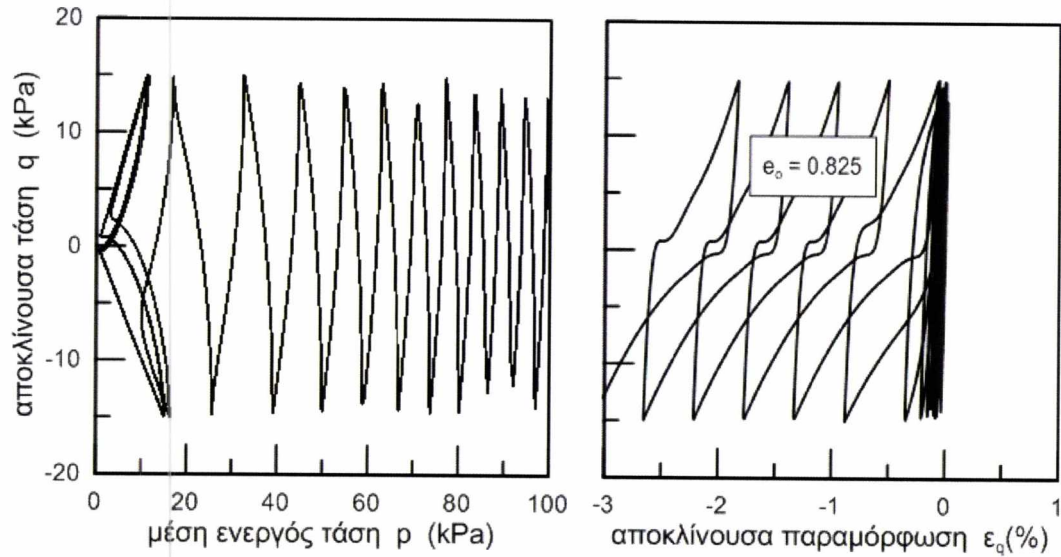
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



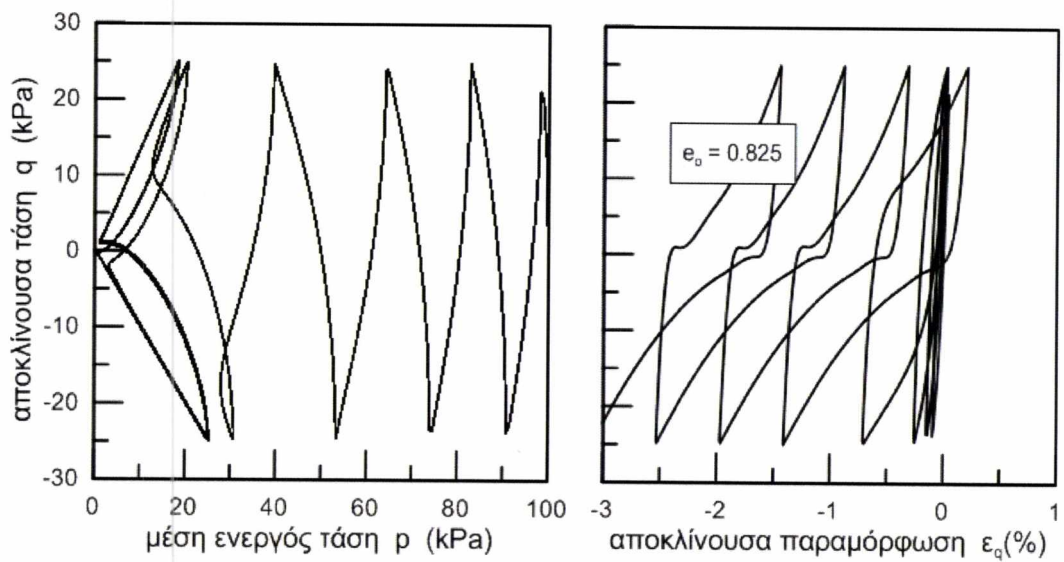
Σχήμα 6.66 $P_{ini}= 100\text{kPa}$, $e= 0.68$, $z_{max}= 11$, $CSR= 0.75$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

6.2.4 $E = 0.825$ ΚΑΙ $Z_{MAX} = 4$

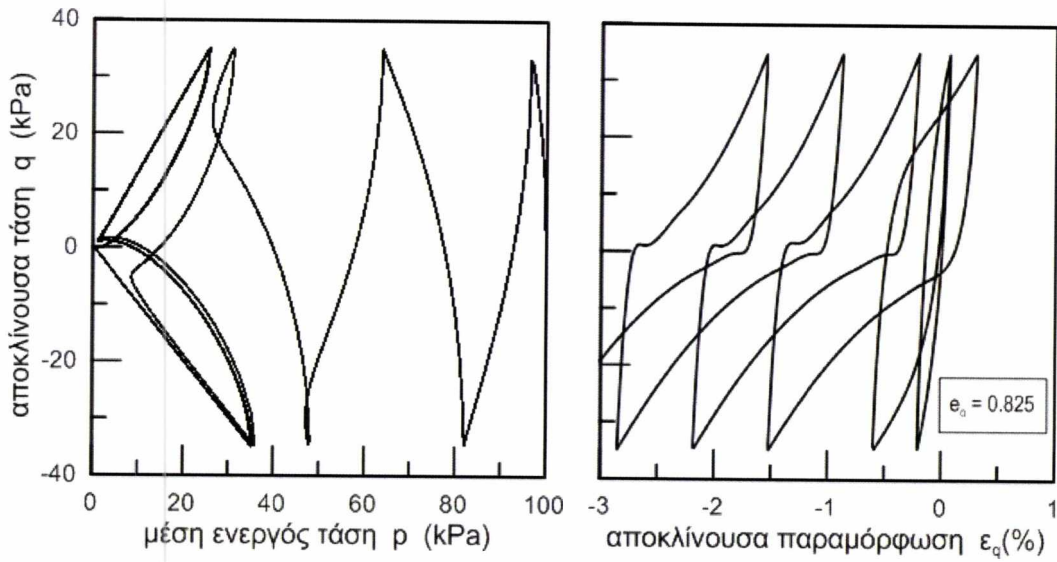


Σχήμα 6.67 $P_{ini} = 100\text{kPa}$, $e = 0.825$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.15$

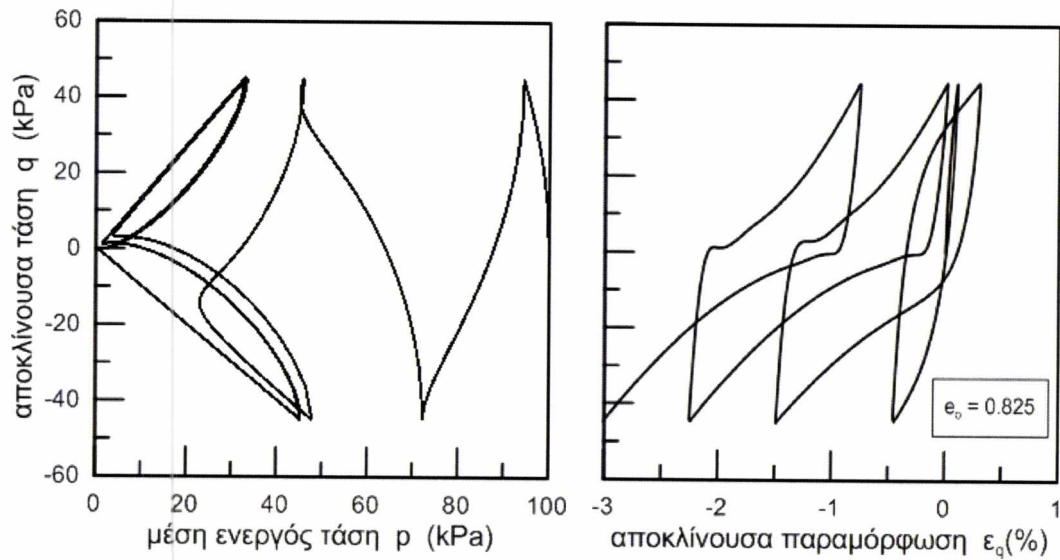


Σχήμα 6.68 $P_{ini} = 100\text{kPa}$, $e = 0.825$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.25$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



Σχήμα 6.69 $P_{ini} = 100\text{kPa}$, $e = 0.825$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.35$

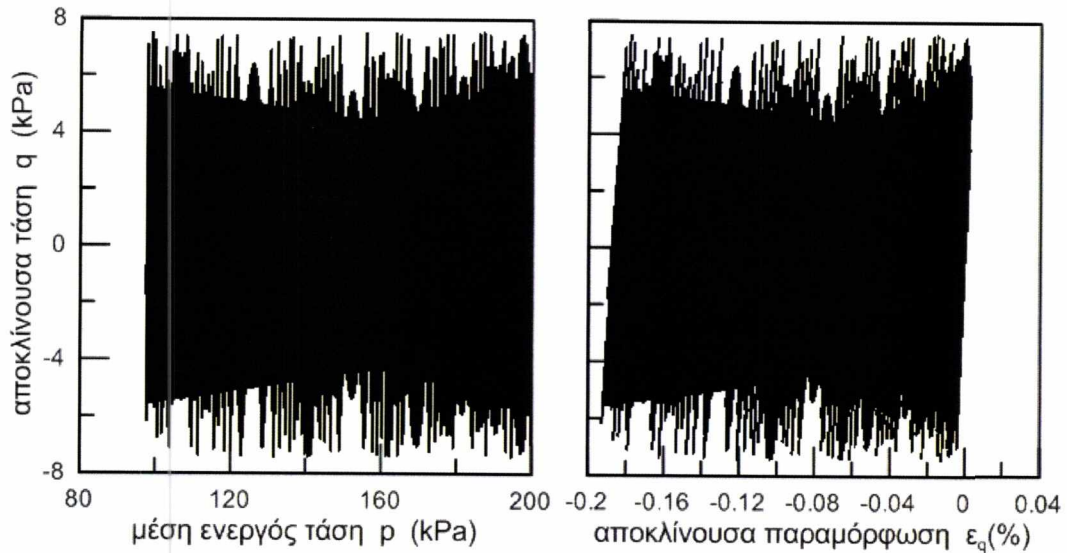


Σχήμα 6.70 $P_{ini} = 100\text{kPa}$, $e = 0.825$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.45$

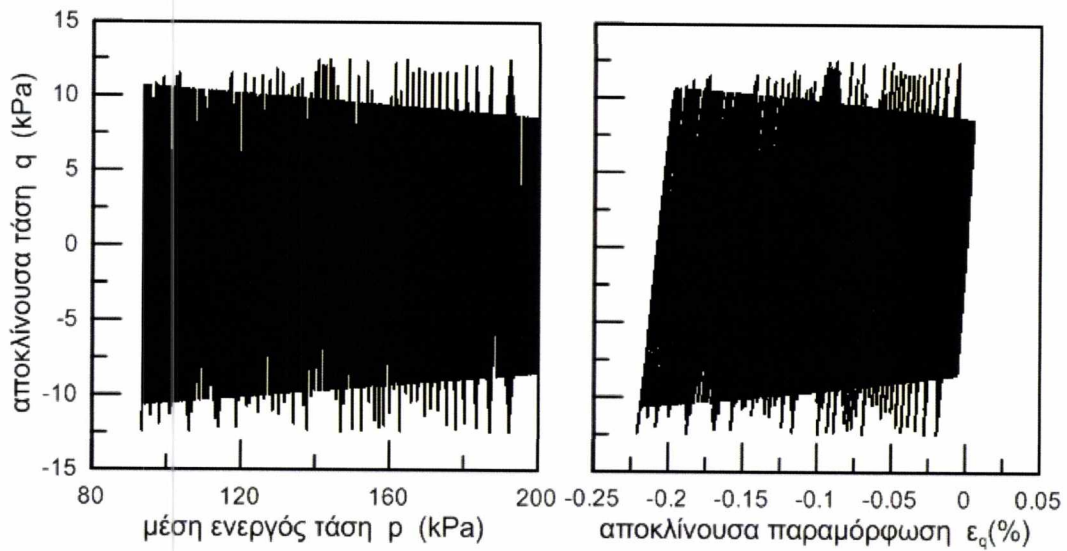
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

6.3 $P_{INI} = 200 \text{ kPa}$

6.3.1 $E = 0.597 \text{ ΚΑΙ } z_{MAX} = 20$

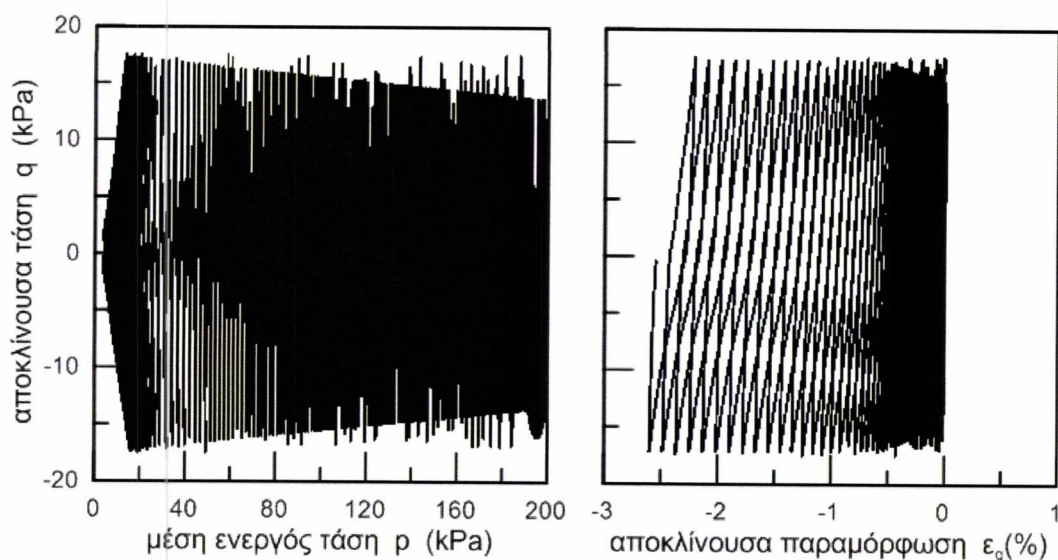


Σχήμα 6.71 $P_{ini} = 200 \text{ kPa}$, $e = 0.597$, $z_{max} = 20$, $CSR = 0.15$

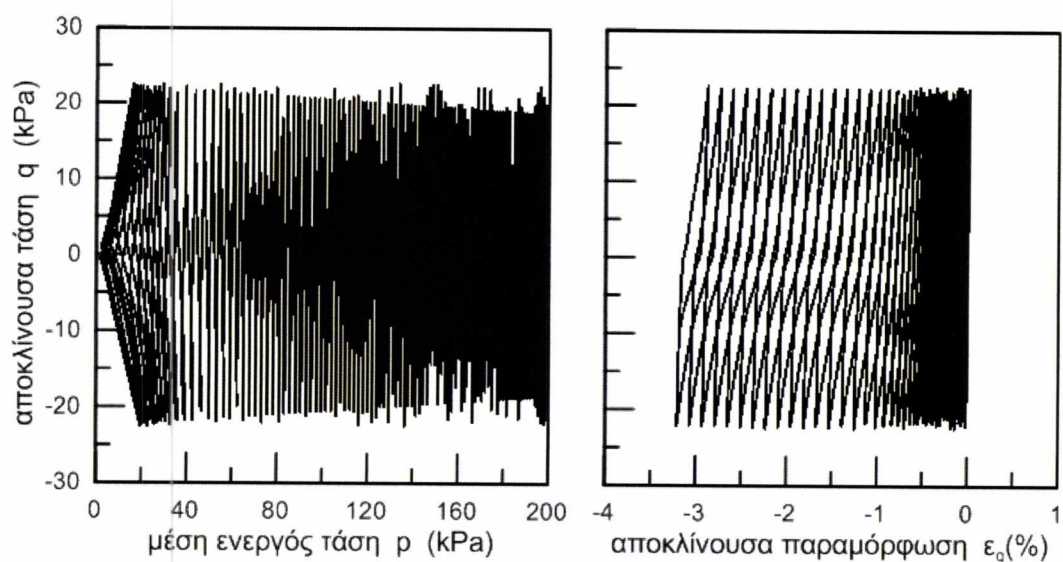


Σχήμα 6.72 $P_{ini} = 200 \text{ kPa}$, $e = 0.597$, $z_{max} = 20$, $CSR = 0.25$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

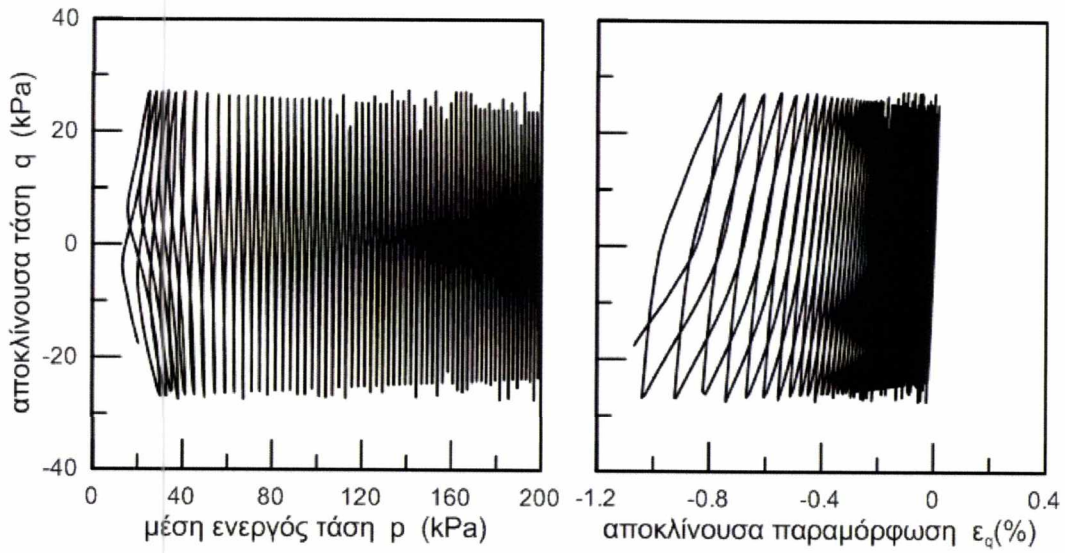


Σχήμα 6.73 $P_{ini}=200\text{kPa}$, $e=0.597$, $z_{max}=20$, $CSR=0.35$

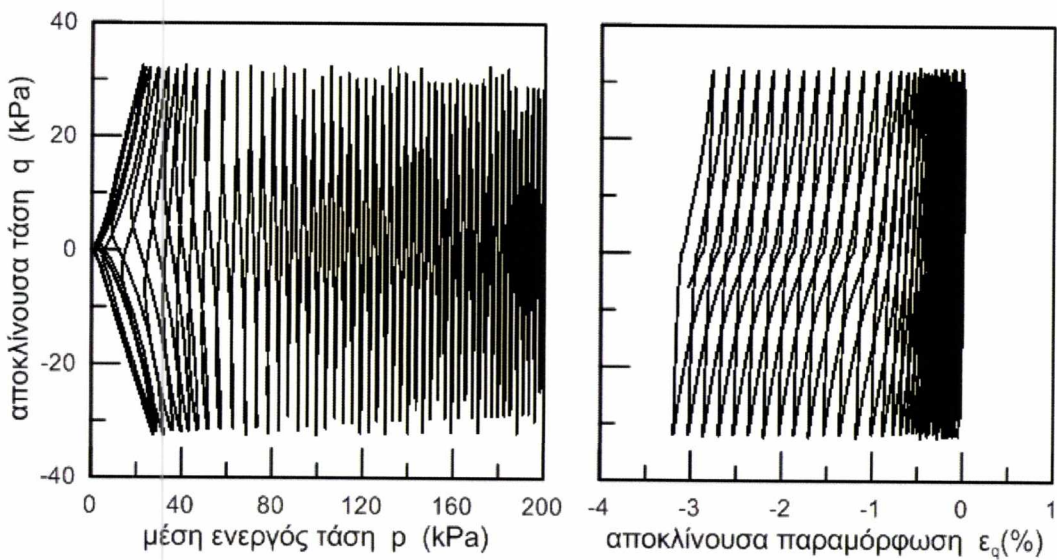


Σχήμα 6.74 $P_{ini}=200\text{kPa}$, $e=0.597$, $z_{max}=20$, $CSR=0.45$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

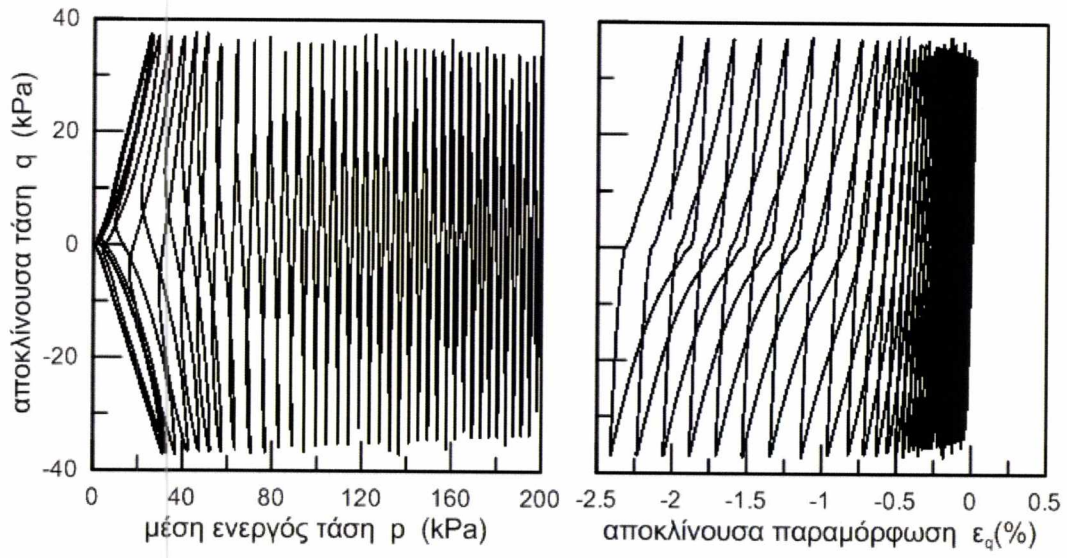


Σχήμα 6.75 $P_{ini}= 200\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 20$, $CSR= 0.55$



Σχήμα 6.76 $P_{ini}= 200\text{kPa}$, $e= 0.597$, $z_{max}= 20$, $CSR= 0.65$

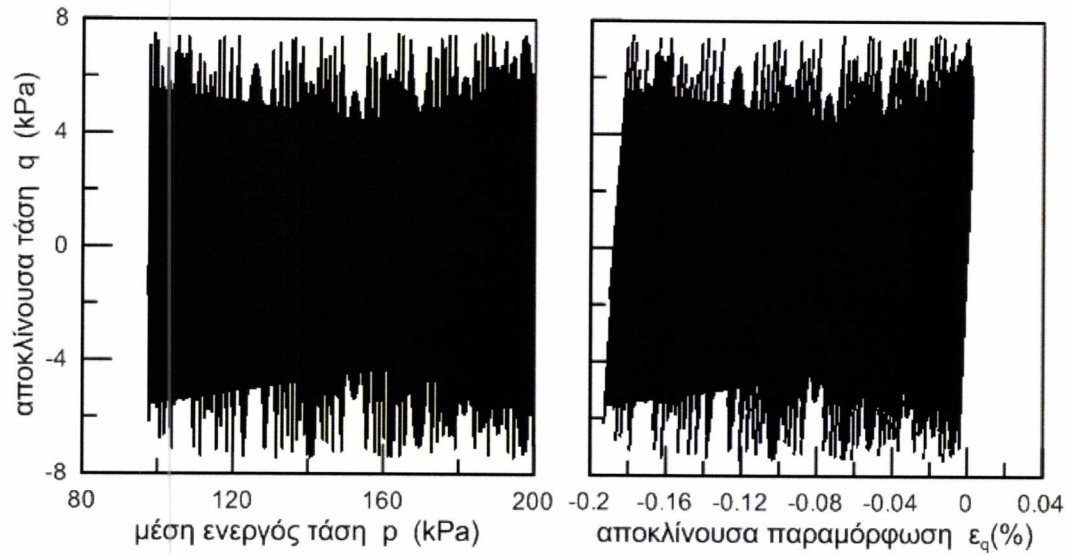
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



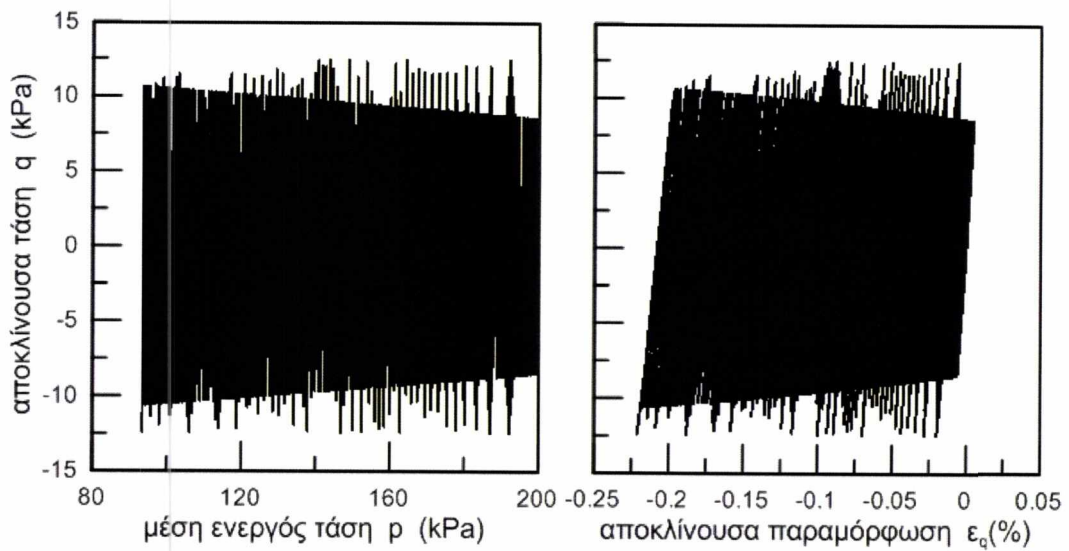
Σχήμα 6.77 $P_{ini}=200\text{kPa}$, $e=0.597$, $z_{max}=20$, $CSR=0.75$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

6.3.2 $E = 0.67$ ΚΑΙ $Z_{MAX} = 12$

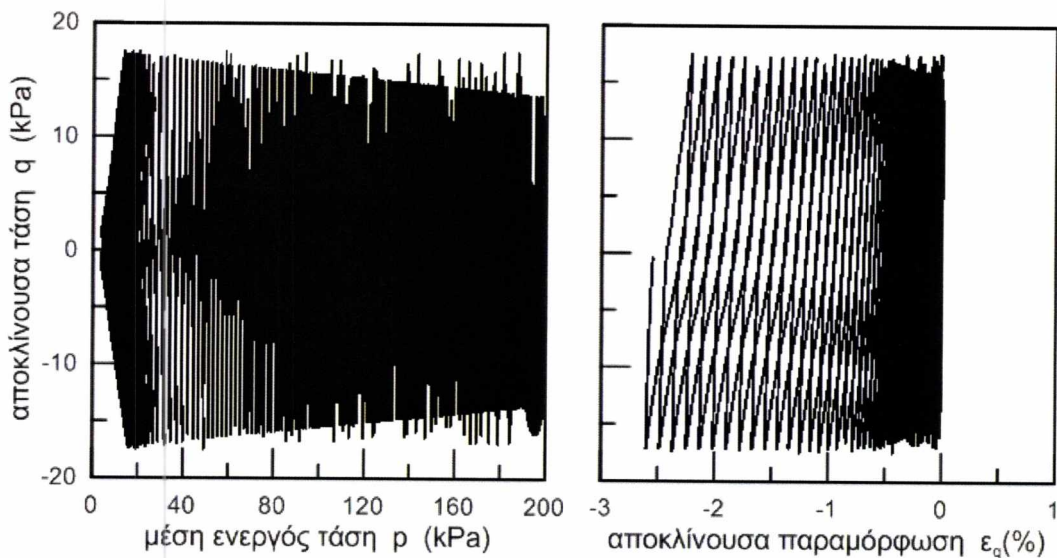


Σχήμα 6.78 $P_{ini} = 200\text{kPa}$, $e = 0.67$, $z_{max} = 12$, $CSR = 0.15$

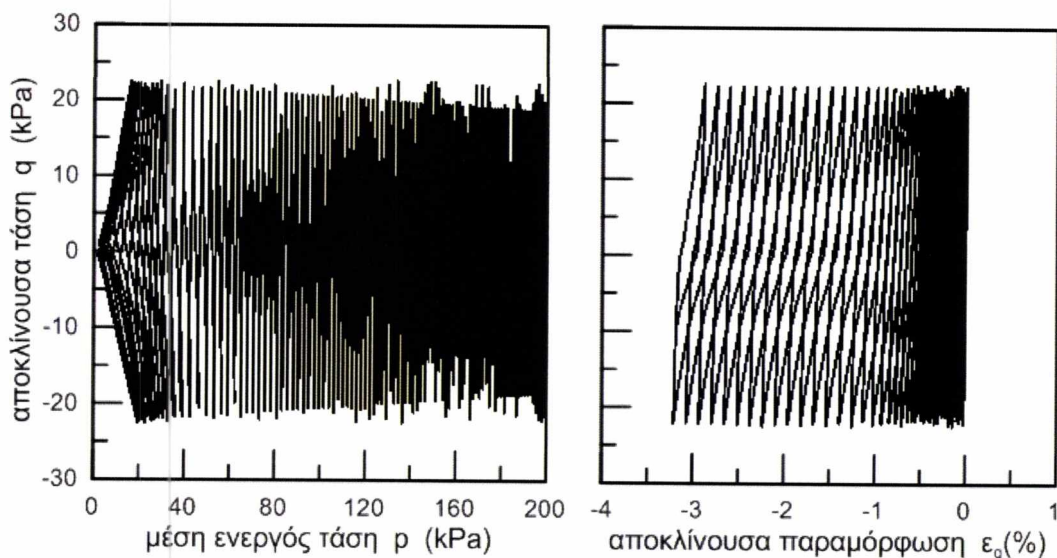


Σχήμα 6.79 $P_{ini} = 200\text{kPa}$, $e = 0.67$, $z_{max} = 12$, $CSR = 0.25$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

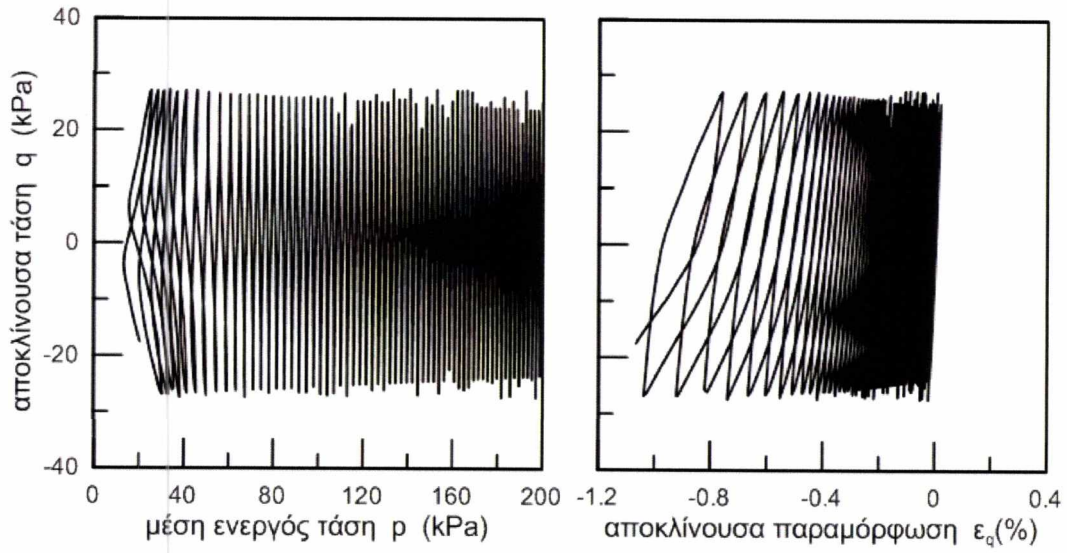


Σχήμα 6.80 $P_{ini}= 200\text{kPa}$, $e= 0.67$, $z_{max}= 12$, $CSR= 0.35$

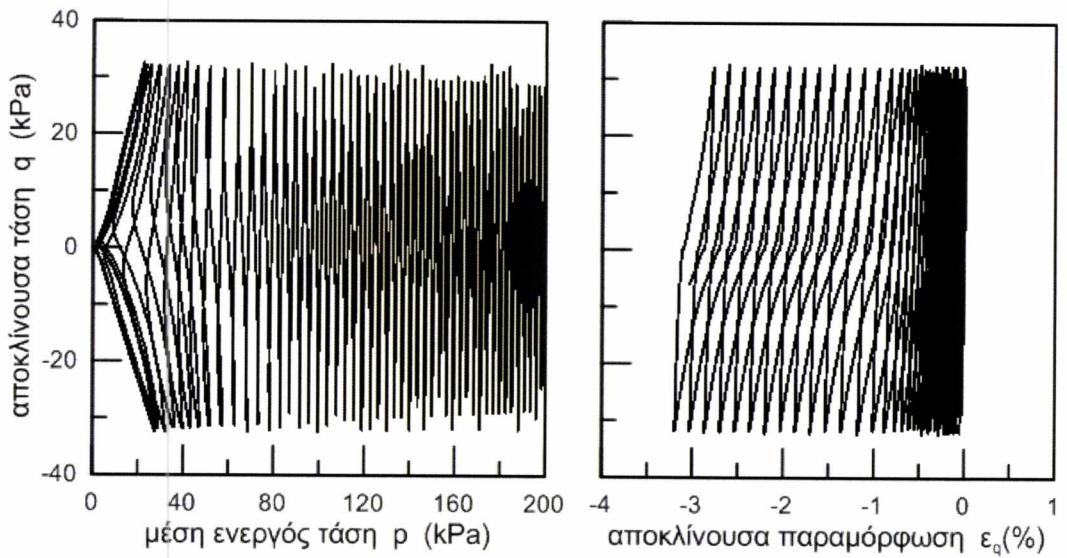


Σχήμα 6.81 $P_{ini}= 200\text{kPa}$, $e= 0.67$, $z_{max}= 12$, $CSR= 0.45$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

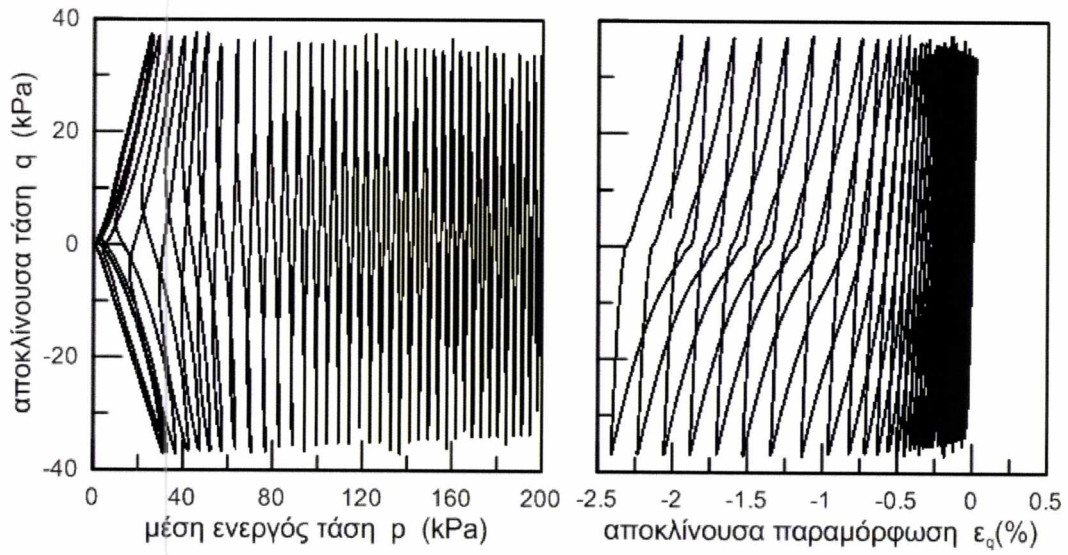


Σχήμα 6.82 $P_{ini}= 200\text{kPa}$, $e= 0.67$, $z_{max}= 12$, $CSR= 0.55$



Σχήμα 6.83 $P_{ini}= 200\text{kPa}$, $e= 0.67$, $z_{max}= 12$, $CSR= 0.65$

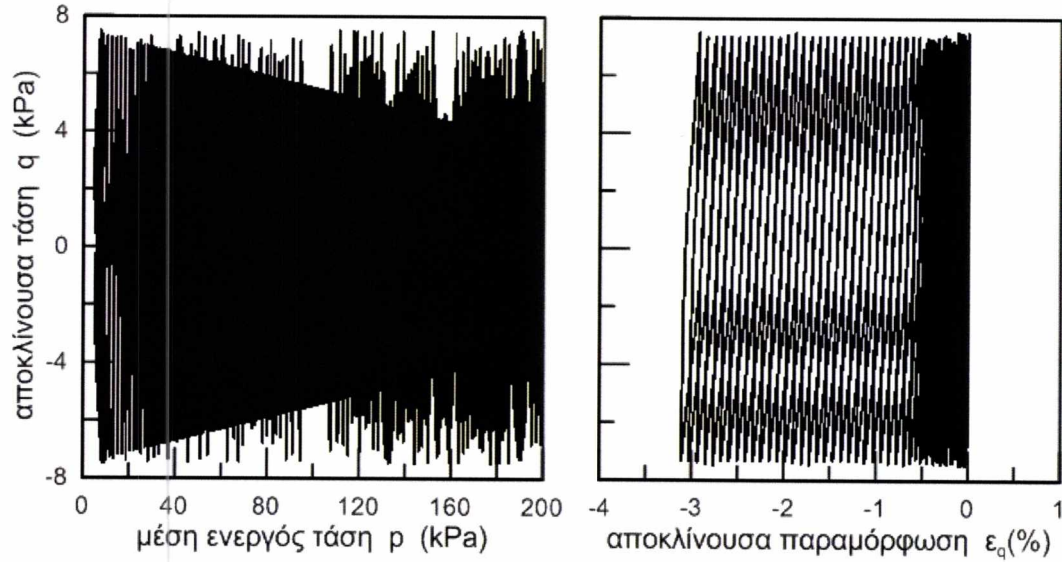
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



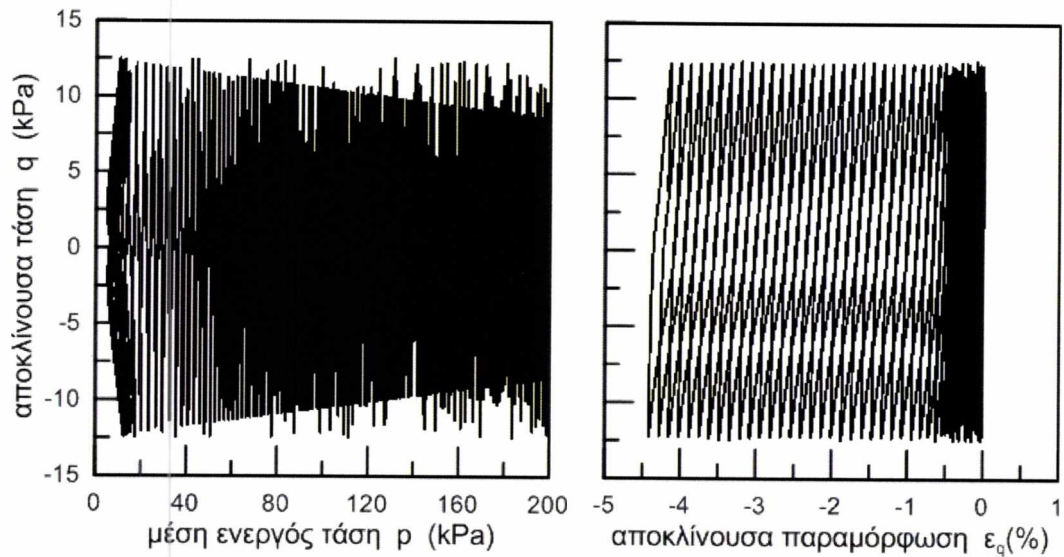
Σχήμα 6.84 $P_{ini} = 200 \text{ kPa}$, $e = 0.67$, $z_{max} = 12$, $CSR = 0.75$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

6.3.3 $E = 0.68$ ΚΑΙ $Z_{MAX} = 11$

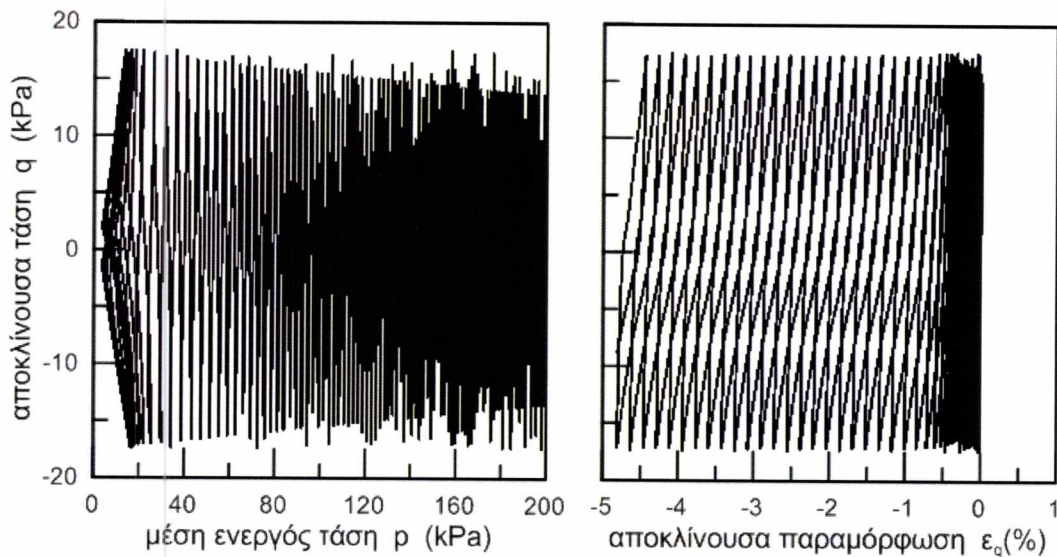


Σχήμα 6.85 $P_{ini} = 200\text{kPa}$, $e = 0.68$, $z_{max} = 11$, $CSR = 0.15$

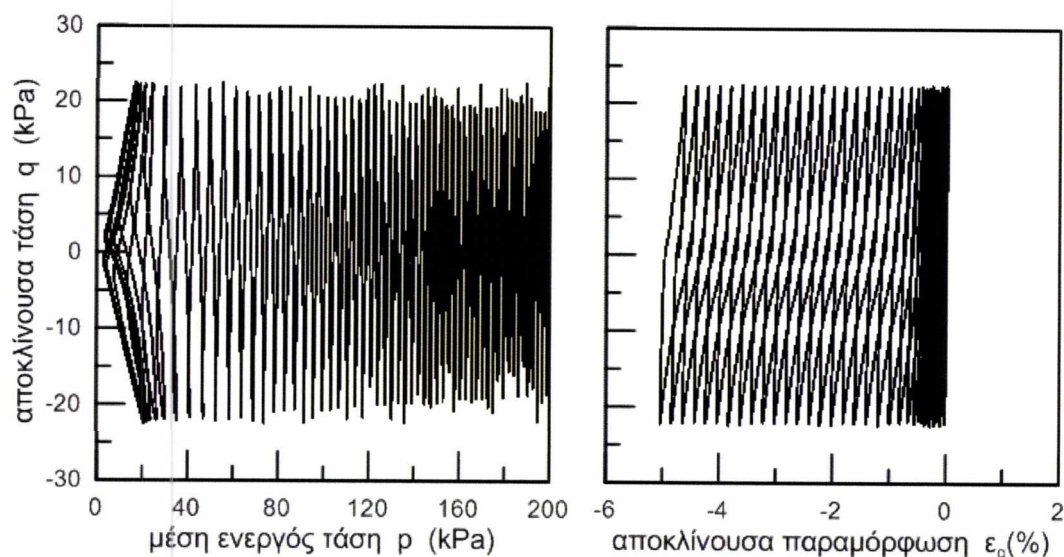


Σχήμα 6.86 $P_{ini} = 200\text{kPa}$, $e = 0.68$, $z_{max} = 11$, $CSR = 0.25$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

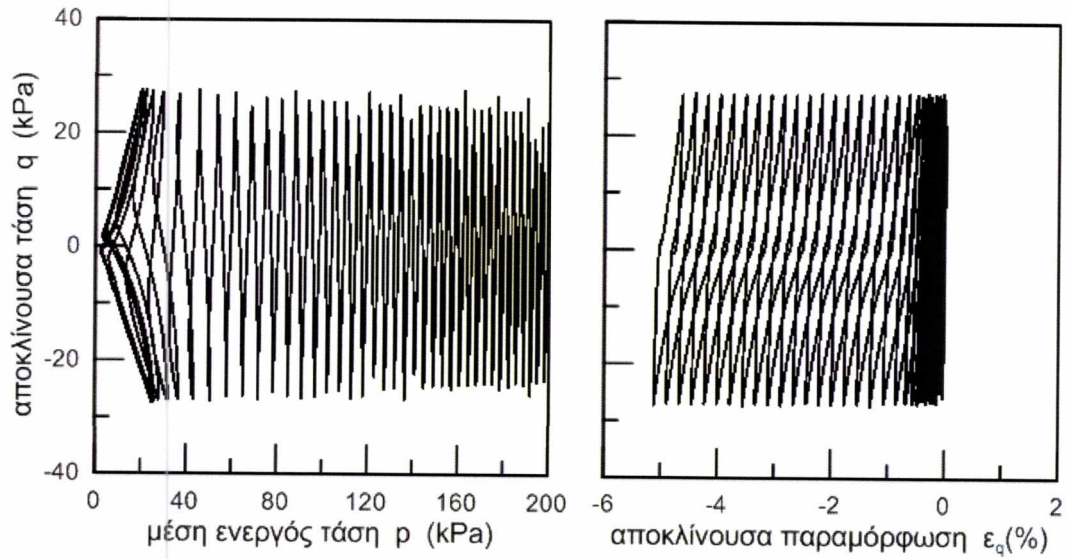


Σχήμα 6.87 $P_{ini}= 200\text{kPa}$, $e= 0.68$, $z_{max}= 11$, $CSR= 0.35$

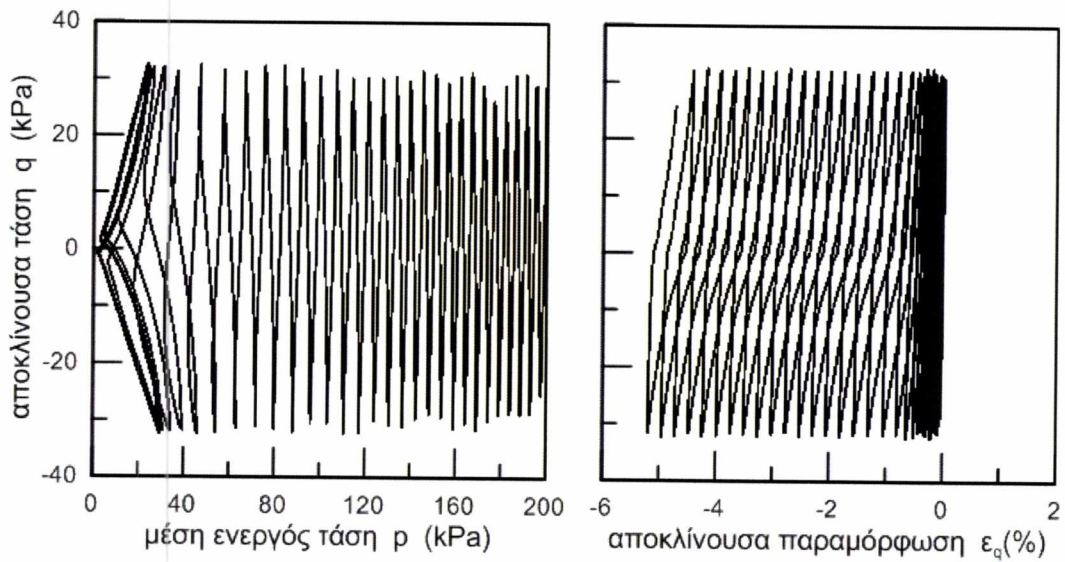


Σχήμα 6.88 $P_{ini}= 200\text{kPa}$, $e= 0.68$, $z_{max}= 11$, $CSR= 0.45$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

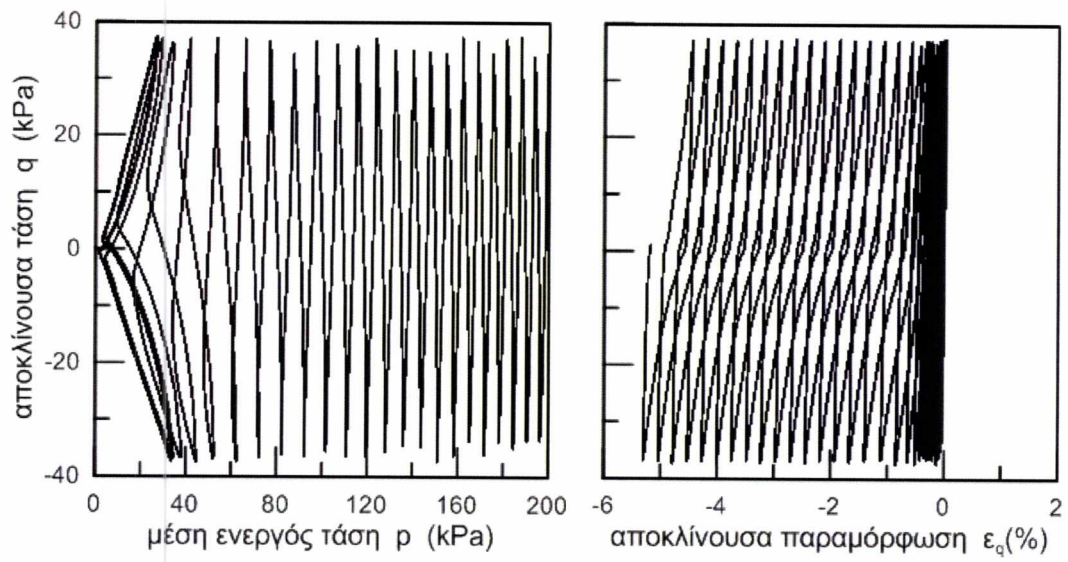


Σχήμα 6.89 $P_{ini}= 200\text{kPa}$, $e= 0.68$, $z_{max}= 11$, $CSR= 0.55$



Σχήμα 6.90 $P_{ini}= 200\text{kPa}$, $e= 0.68$, $z_{max}= 11$, $CSR= 0.65$

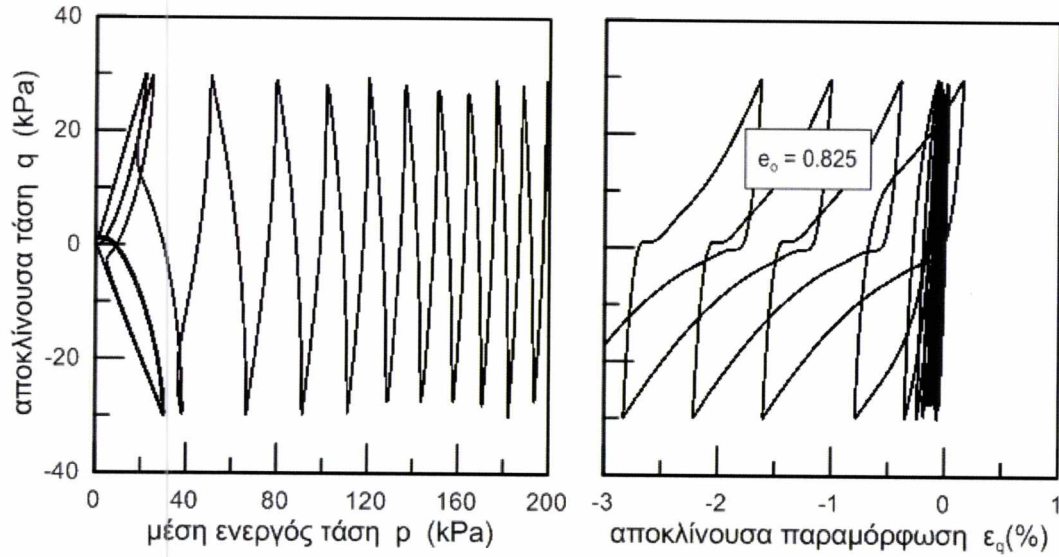
ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



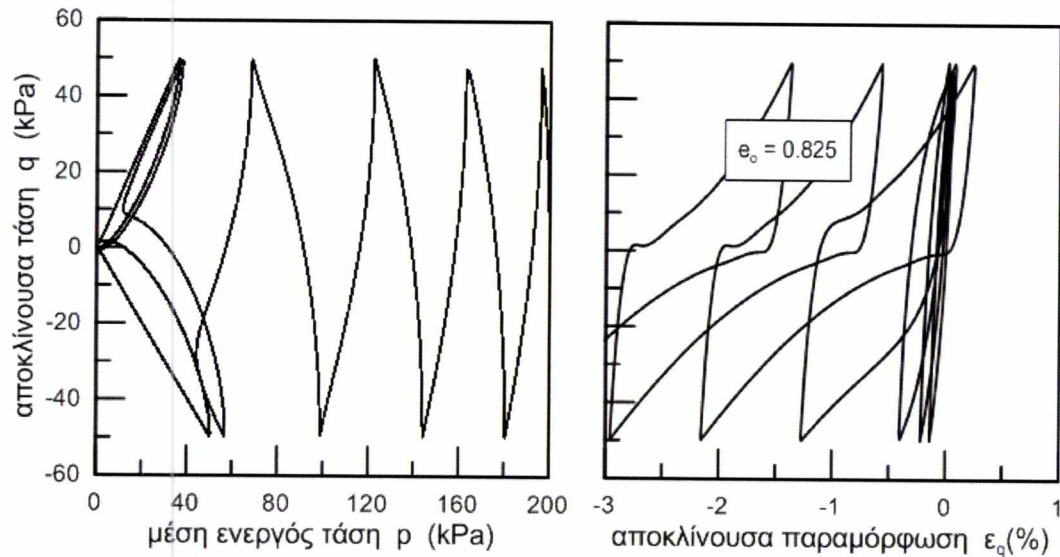
Σχήμα 6.91 $P_{ini} = 200 \text{ kPa}$, $e = 0.68$, $z_{max} = 11$, $CSR = 0.75$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ

6.3.4 $E = 0.825$ ΚΑΙ $Z_{MAX} = 4$

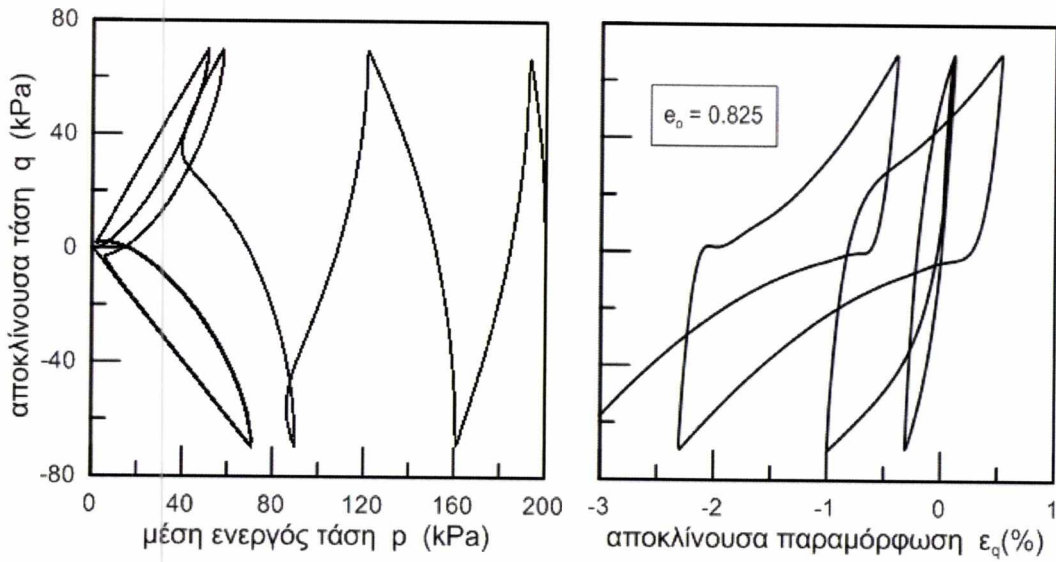


Σχήμα 6.92 $P_{ini} = 200\text{kPa}$, $e = 0.825$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.15$

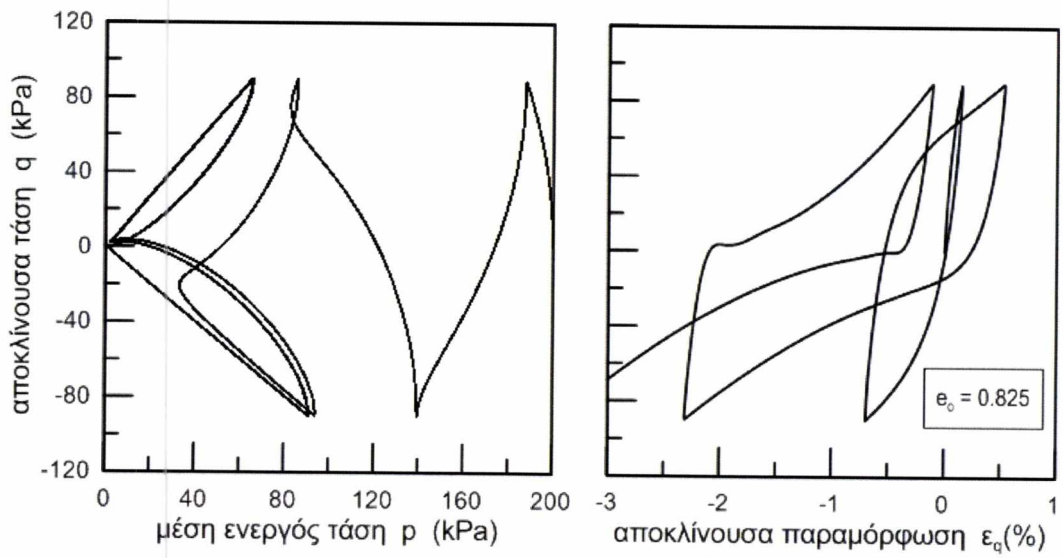


Σχήμα 6.93 $P_{ini} = 200\text{kPa}$, $e = 0.825$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.25$

ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΙΜΩΝ ΕΔΑΦΩΝ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ



Σχήμα 6.94 $P_{ini} = 200\text{kPa}$, $e = 0.825$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.35$



Σχήμα 6.95 $P_{ini} = 200\text{kPa}$, $e = 0.825$, $z_{max} = 4$, $CSR = 0.45$



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000114181