

Επίδραση του Ποσοστού Ιλύος στο Δυναμικό Ρευστοποίησης λόγω Σεισμού: Μια Νέα Προσέγγιση

Effect of Silt Content on Earthquake-Induced Liquefaction: A New Approach

ΑΝΔΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ, Κ. Ι. Πολιτικός Μηχανικός, Υποψήφιος Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.
ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ, Γ. Δ. Πολιτικός Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.
ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ, Α. Γ. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Η επίδραση του ποσοστού ιλύος στο δυναμικό ρευστοποίησης λόγω σεισμού εξετάζεται υπό το πρίσμα-πλαίσιο της θεωρίας Κρίσιμης Κατάστασης εδαφών. Αρχικά εκτιμάται η επίδραση του ποσοστού ιλύος στη θέση της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης μέσω στατιστικής επεξεργασίας δημοσιευμένων δεδομένων από πειράματα μονοτονικής φόρτισης. Ακολούθως, εκτιμάται η αντίστοιχη επίδραση στο δυναμικό ρευστοποίησης με τη βοήθεια ενός κατάλληλου καταστατικού προσομοιώματος που χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας ως δεδομένα. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν επαληθεύονται τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά από δημοσιευμένα αποτελέσματα πειραμάτων ρευστοποίησης υπό ανακυκλική διάτμηση.

ABSTRACT : The effect of silt content on liquefaction potential during earthquakes is examined under the framework of Critical State Soil Mechanics. Firstly, the effect of fines on the Critical State Line is evaluated through statistical analysis of published monotonic test data. In the following, the corresponding effect on cyclic liquefaction potential is determined with the aid of an appropriate constitutive model, which uses the results of the statistical analysis as input. The analytical findings are qualitatively as well as quantitatively verified from published results of cyclic liquefaction tests.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το δυναμικό ρευστοποίησης άμμων με λεπτόκοκκο υλικό (ιλύ) είναι ένα θέμα εξαιρετικά αμφιλεγόμενο στη βιβλιογραφία. Υπενθυμίζεται ότι ως ποσοστό λεπτοκόκκων $f(\%)$ ορίζεται το ποσοστό κατά βάρος του εδαφικού υλικού που διέρχεται από το κόσκινο No. 200 και έχει διάμετρο κόκκων μικρότερη από 0.074mm. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος εκτίμησης του κινδύνου ρευστοποίησης λόγω σεισμού όπως προτάθηκε αρχικά από τους Seed and Idriss (1971) και διαμορφώθηκε σταδιακά με την προσθήκη νέων ιστορικών περιστατικών (Youd & Idriss 1997), θεωρεί ότι αύξηση του ποσοστού λεπτοκόκκων συνεπάγεται αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση.

Επιπρόσθετα, μεγάλος αριθμός ερευνητών έχει μελετήσει την επίδραση του ποσοστού

λεπτοκόκκων στο δυναμικό ρευστοποίησης μη-συνεκτικών εδαφών εκτελώντας κυρίως εργαστηριακές δοκιμές, και τα αποτελέσματα αυτά δεν είναι ξεκάθαρα. Για παράδειγμα οι Troncoso (1990), Koester (1994) και Vaid (1994) παρουσιάζουν αποτελέσματα στα οποία αύξηση του ποσοστού λεπτοκόκκων $f(\%)$ μέχρι 30% προκαλεί σημαντική μείωση της αντοχής σε ρευστοποίηση, ενώ περαιτέρω αύξηση του $f(\%)$ οδηγεί σε αύξηση της. Αντίθετα, τα πειραματικά αποτελέσματα των Yasuda et al. (1994) και Kondoh et al. (1987), μεταξύ άλλων, δείχνουν μονοσήμαντη αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση αυξανόμενου του ποσοστού των λεπτοκόκκων.

Αμφιλεγόμενα είναι επίσης τα αποτελέσματα σχετικά με την επίδραση του δείκτη πλασιμότητας $PI(\%)$ των λεπτόκοκκων. Ερευνητές όπως ο Ishihara (1996) υποστηρίζουν ότι ο δείκτης πλασιμότητας

PI(%) είναι πιο σημαντικό χαρακτηριστικό από το ποσοστό λεπτοκόκκων και ότι αύξησή του πέρα από 10% προκαλεί αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση. Σε αυτό το συμπέρασμα συμφωνούν και οι Prakash et al. (1999) με τη διαφορά ότι τοποθετούν αυτό το όριο στο PI= 5%, ενώ για μικρότερες τιμές η επίδραση του PI(%) αντιστρέφεται. Αντίθετα, ερευνητές όπως ο Koester (1994) υποστηρίζουν ότι το ποσοστό λεπτοκόκκων είναι πιο σημαντικό χαρακτηριστικό του εδάφους από το δείκτη πλασιμότητας.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η επίδραση του ποσοστού λεπτοκόκκων, χωρίς να γίνεται διαχωρισμός μεταξύ λεπτοκόκκων διαστάσεως ιλύος και αργιλικών πλακιδίων. Πιο συγκεκριμένα, η επίδραση του ποσοστού ιλύος f(%) στο δυναμικό ρευστοποίησης λόγω σεισμού εξετάζεται υπό το πρίσμα-πλαίσιο της Εδαφομηχανικής Κρίσιμης Κατάστασης. Μια αντίστοιχη μελέτη για την επίδραση του f(%) στη μονοτονική συμπεριφορά μη συνεκτικών εδαφών παρουσιάζεται από τους Παπαδημητρίου κ.α. (2001β).

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν θεωρούνται αξιόπιστα για άμμους με λεπτόκοκκα διαστάσεων ιλύος με ποσοστό κατά βάρος μικρότερο από 30% και χαμηλό δείκτη πλασιμότητας (PI < 5%).

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Η πλειοψηφία των πειραματικών δεδομένων προέρχεται από τριαξονικές δοκιμές. Για το λόγο αυτό, αλλά και χάριν απλότητας, η ανάλυση που ακολουθεί παρουσιάζεται στο διδιάστατο τριαξονικό χώρο των τάσεων [p'-q], όπου $p' = (\sigma_v' + 2\sigma_h')/3$ και $q = (\sigma_v' - \sigma_h')/2$ είναι η μέση ενεργός και η αποκλίνουσα συνιστώσες των τάσεων. Οι δείκτες ν και h υποδηλώνουν την κατακόρυφη και την οριζόντια συνιστώσα.

Σύμφωνα με την Εδαφομηχανική της Κρίσιμης Κατάστασης, η συμπεριφορά ενός κανονικά προστερεοποιημένου εδάφους υπό μονοτονική διάτμηση αντιστοιχεί σε συνεχή διαρροή μέχρι μια, μοναδική ανά έδαφος, επιφάνεια που ορίζεται στο χώρο p'-q-δείκτη πόρων e. Στην επιφάνεια αυτή το έδαφος βρίσκεται στην Κρίσιμη Κατάσταση, δηλαδή συνεχίζει να συσσωρεύει απεριόριστη διατμητική παραμόρφωση υπό σταθερές ενεργές τάσεις και δείκτη πόρων. Η προβολή της επιφάνειας Κρίσιμης Κατάστασης στους χώρους [e-ln(p')] και [p'-q] ορίζει τις αντίστοιχες Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης (CSL).

Η Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης ενός μη-συνεκτικού εδάφους μπορεί να θεωρηθεί ως μοναδική ευθεία γραμμή (Σχήμα 1) τουλάχιστον για τάσεις που δεν προκαλούν θραύσεις των κόκκων ($p' \leq 1+2 \text{ MPa}$, Been et al. 1991). Η μοναδικότητα της θέσης της CSL αναφέρεται στην ανεξαρτησία της από τις συνθήκες στράγγισης, τη μέθοδο παρασκευής δοκιμίου και το ρυθμό επιβολής της παραμόρφωσης.

Οι Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης στους χώρους [e-ln(p')] και [p'-q] απεικονίζονται γραφικά στο Σχήμα 1 και δίνονται μαθηματικά από τις Εξισώσεις 1 και 2 αντίστοιχα:

$$e_{cs} = \Gamma_{cs} - \lambda \ln(p') \quad (1)$$

$$q = M_{cs} p' \quad (2)$$

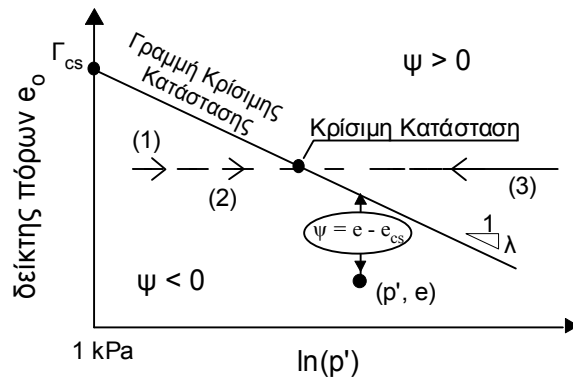
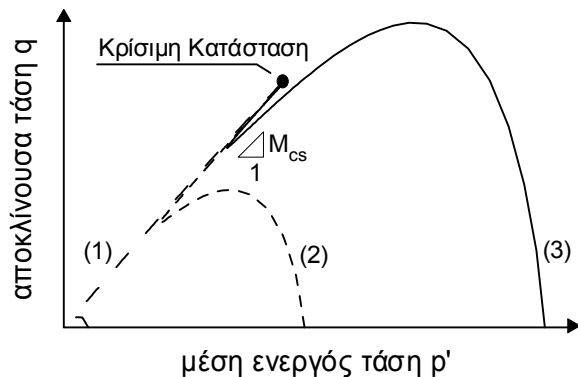
όπου, e_{cs} είναι ο δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση για μέση ενεργό τάση p' . Επιπρόσθετα, στο Σχήμα 1 δίνονται παραδείγματα του πως οι επιδρούν οι αρχικές συνθήκες (e, p') στην αστράγγιστη μονοτονική συμπεριφορά μη συνεκτικών εδαφών. Ενοποιώντας την επίδραση των (e, p') σε μια μόνη παράμετρο, οι Been & Jefferies (1985) υιοθέτησαν την Παράμετρο Κατάστασης ψ , η οποία υπολογίζεται από την Εξίσωση 3:

$$\psi = e - e_{cs} \quad (3)$$

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1, όταν η Παράμετρος Κατάστασης πάρει αρνητικές τιμές ($\psi < 0$) το εδαφικό στοιχείο έχει την τάση να αυξήσει τον όγκο του όταν υποβληθεί σε διάτμηση. Στην αντίθετη περίπτωση ($\psi > 0$) το εδαφικό στοιχείο παρουσιάζει συστολική συμπεριφορά, δηλαδή έχει την τάση να μειώσει τον όγκο του υπό διατμητική παραμόρφωση. Αντίστοιχα, το δυναμικό ρευστοποίησης λόγω σεισμού αυξάνει με αύξηση της τιμής του ψ από αρνητικές σε θετικές τιμές.

3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΙΛΥΟΣ ΣΤΗ ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ ΚΡΙΣΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Στη βιβλιογραφία υπάρχει γενική συμφωνία ότι το ποσοστό ιλύος επηρεάζει σημαντικά τη θέση της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης στο χώρο [e-ln(p')]. Η άποψη που επικρατεί είναι ότι αύξηση της ιλύος αυξάνει την κλίση λ της CSL (Been & Jefferies, 1985, Been et al. 1991), ενώ μερικοί ερευνητές υποστηρίζουν ότι



Σχήμα 1. Επίδραση αρχικών συνθηκών (e , p') στη μονοτονική συμπεριφορά μη συνεκτικών εδαφών υπό αστράγγιστες τριαξονικές συνθήκες φόρτισης.

Figure 1. Effect of initial conditions (e , p') on the monotonic behavior of non cohesive soils under undrained triaxial loading conditions.

ταυτόχρονα προκαλείται και μετάθεσή της προς μικρότερες τάσεις p' .

Η προαναφερθείσα επίδραση παρατηρείται στο Σχήμα 2 όπου παρουσιάζονται οι Γραμμές Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) της άμμου Kogyuk για διάφορα ποσοστά ιλύος (Been & Jefferies, 1985). Προσεγγιστικά θα μπορούσε να υποστηριχθεί ότι αύξηση του ποσοστού λεπτόκοκκων προκαλεί ωρολογιακή στροφή της CSL περί ενός σημείου μεταξύ 10 και 100 kPa. Υπάρχει βέβαια και η άποψη ότι αύξηση του f είτε δεν επηρεάζει σημαντικά την κλίση (Thevanayagam and Mohan, 2000) είτε προκαλεί μείωσή της (Chen & Liao, 1999). Σε ό,τι αφορά την τιμή του M_{cs} , δεν υπάρχουν αντίστοιχου πλήθους μελέτες στη βιβλιογραφία.

Για την ποσοτική ανάλυση της επίδρασης του f πραγματοποιήθηκε στατιστική επεξεργασία ενός μεγάλου όγκου πειραματικών δεδομένων από 529 τριαξονικές δοκιμές σε 45 διαφορετικά μη συνεκτικά εδάφη. Τα αποτελέσματα αυτής της επεξεργασίας παρουσιάζονται συνοπτικά στα Σχήματα 3 και 4. Σημειώνεται ότι εδάφη που αποτελούνται από την ίδια άμμο με διαφορετικά ποσοστά λεπτοκόκκων $f(\%)$ αντιμετωπίστηκαν ως διαφορετικές περιπτώσεις.

Από τα Σχήματα 3α & 3β προκύπτει ότι αύξηση του $f(\%)$ προκαλεί αύξηση των λ και Γ_{cs} , ενώ από το Σχήμα 3γ συμπεραίνεται ότι αύξηση του ποσοστού ιλύος δεν επιδρά σημαντικά στην τιμή του M_{cs} . Για καθαρή άμμο ($f = 0\%$), μια καλή προσέγγιση των Γ_{cs} και λ είναι οι τιμές 0.863 και 0.018 αντίστοιχα, ενώ η τιμή $M_{cs} = 1.26$ θεωρείται ικανοποιητική ανεξαρτήτως ποσοστού ιλύος. Οι εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ Γ_{cs} , λ και f όπως

προέκυψαν από την επεξεργασία εκφράζονται αναλυτικά ως:

$$\lambda = 0.018 + 0.27 f \quad (4)$$

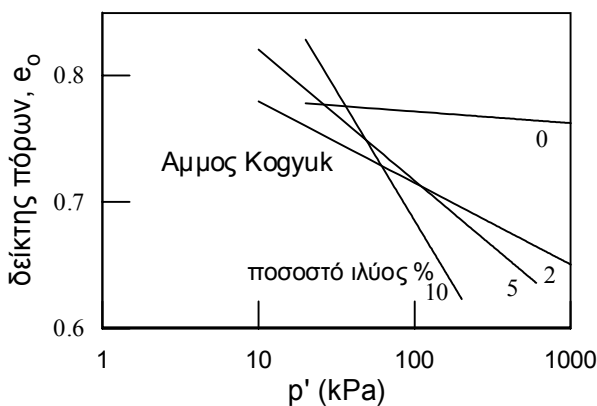
$$\Gamma_{cs} = 0.863 + 1.1 f \quad (5)$$

Αν οι Εξισώσεις 4 και 5 συνδυασθούν, προκύπτει η ακόλουθη άμεση συσχέτιση μεταξύ Γ_{cs} και λ (Σχήμα 5):

$$\Gamma_{cs} = 0.79 + 4.1 \lambda \quad (6)$$

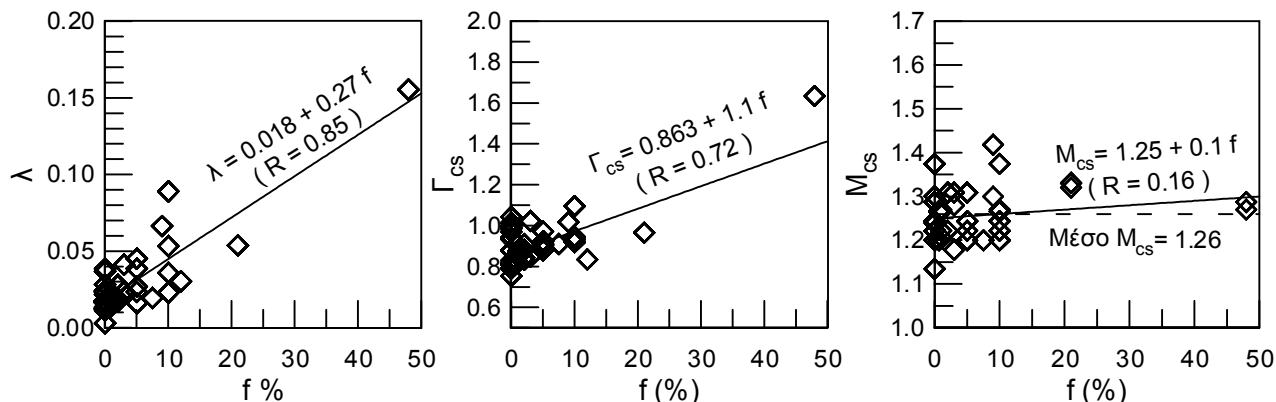
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4, η Εξίσωση 6 έχει υψηλή στατιστική σημαντικότητα ($R=0.83$) και συνεπώς θεωρείται αντιπροσωπευτική για ιλυώδεις άμμους. Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις 6 και 1 προκύπτει ότι:

$$(e_{cs} - 0.79) = \lambda (4.1 - \ln p') \quad (7)$$



Σχήμα 2. Επίδραση του ποσοστού ιλύος στη θέση της CSL για την άμμο Kogyuk

Figure 2. Effect of silt content on the CSL location of Kogyuk sand



Σχήμα 3. Στατιστική επεξεργασία πειραματικών δεδομένων σχετικά με την επίδραση του ποσοστού ιλύος στη θέση της Γραμμής Κρίσιμης Κατάστασης CSL.

Figure 3. Statistical analysis of experimental data regarding the effect of silt content on the location of the Critical State Line (CSL).

Από την Εξίσωση 7 συμπεραίνεται ότι η θέση της CSL μπορεί να θεωρηθεί ως συνάρτηση μόνο της κλίσης λ . Επιπλέον μπορεί να θεωρηθεί προσεγγιστικά ότι οι CSL για διάφορα $f(\%)$ διέρχονται από ένα μοναδικό σημείο στροφής (πivοτ) με συντεταγμένες ($p'_{piv} = 60 \text{ kPa}$, $e_{piv} = 0.79$) ανεξάρτητα από την τιμή του λ . Στο Σχήμα 5 δίνονται παραδείγματα διάφορων CSL όπως αυτές προκύπτουν από τις Εξισώσεις 4 και 7 για διάφορα ποσοστά ιλύος. Πρέπει να τονισθεί ότι η θεώρηση του συγκεκριμένου σημείου στροφής αποτελεί προσέγγιση του φαινομένου και ανταποκρίνεται στα συγκεκριμένα πειραματικά δεδομένα. Υπάρχει βέβαια αρκετή διασπορά στα δεδομένα η οποία αποδίδεται στο γεγονός ότι δεν λαμβάνονται υπόψη το σχήμα και η ορυκτολογική σύσταση των κόκκων καθώς και άλλοι παράγοντες κοκκομετρίας όπως ο συντελεστής ομοιομορφίας C_u κάθε δείγματος.

Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν αν τα δεδομένα κατηγοριοποιηθούν σε διακριτές ομάδες με βάση το ποσοστό ιλύος (Παπαδημητρίου κ.α. 2001β). Συνοπτικά αναφέρεται ότι η θεώρηση αυτή αποτελεί μια πολύ καλή προσέγγιση του φαινομένου, μα δεν μπορεί να υποκαταστήσει την αναγκαιότητα για εκτέλεση πειραματικών δοκιμών.

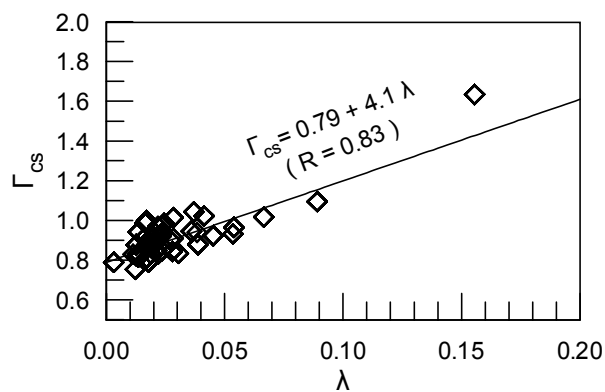
4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΙΛΥΟΣ ΣΤΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Από το Σχήμα 5 συμπεραίνεται ότι δύο δοκίμια μιας καθαρής άμμου στις ίδιες συνθήκες στερεοποίησης (e_o , p_o') αλλά με διαφορετικά ποσοστά ιλύος $f(\%)$ έχουν διαφορετικές τιμές ψ . Για παράδειγμα, ιλυώδης άμμος ($f \neq 0$) με

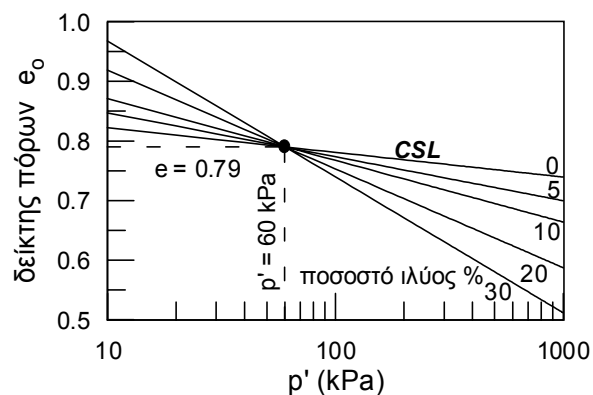
ενεργό τάση στερεοποίησης $p_o' < p'_{piv} (= 60 \text{ kPa})$ και $e_o = 0.70$ αναμένεται να εμφανίζει μεγαλύτερη τάση για διαστολή από μια καθαρή άμμο ($f = 0$) στις ίδιες συνθήκες στερεοποίησης. Έτσι, η καθαρή άμμος αναμένεται να παρουσιάσει και μικρότερη αντοχή σε ρευστοποίηση λόγω σεισμού από την ιλυώδη άμμο. Συνεπώς, σε σχετικά μικρές τάσεις στερεοποίησης ($p_o' < p'_{piv} = 60 \text{ kPa}$), η αύξηση του ποσοστού ιλύος αναμένεται να αυξάνει την αντοχή σε ρευστοποίηση λόγω σεισμού. Αντίθετα, σε σχετικά μεγαλύτερες τάσεις στερεοποίησης ($p_o' > p'_{piv} = 60 \text{ kPa}$), η επίδραση αυτή αντιστρέφεται.

Αποτελέσματα από πειράματα (Σχήμα 6) επαληθεύουν τα παραπάνω συμπεράσματα. Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 6α παρουσιάζονται οι καμπύλες ρευστοποίησης δειγμάτων άμμου με διάφορα ποσοστά λεπτόκοκκων και ενεργό τάση στερεοποίησης $p_o' = 49 \text{ kPa}$, όπου φαίνεται ότι αύξηση του $f(\%)$ προκαλεί αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση. Η αντίθετη επίδραση παρατηρείται στο Σχήμα 6β όπου η ενεργός τάση στερεοποίησης ισούται με $p_o' = 196 \text{ kPa}$. Με αυτό τον τρόπο εξηγείται και η τάση για αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση συναρτήσει του $f(\%)$ που προκύπτει από δεδομένα επιτόπου δοκιμών, αφού τα δεδομένα που έχουν χρησιμοποιηθεί αντιστοιχούν σε βάθη μικρότερα από 13m και σχετικά μικρές μέσες ενεργές τάσεις στερεοποίησης μικρότερες εν γένει από 80 kPa (Seed et al 1971, Stark & Olson 1995).

Πέρα από την ποιοτική αυτή επαλήθευση, τα παραπάνω συμπεράσματα επαληθεύονται και ποσοτικά από παραμετρικές αναλύσεις που έγιναν με ένα πρόσφατα προταθέν καταστατικό προσομοίωμα (Παπαδημητρίου



Σχήμα 4. Άμεση συσχέτιση μεταξύ Γ_{CS} και λ .
Figure 4. Direct correlation between Γ_{CS} and λ .



Σχήμα 5. Επίδραση του ποσοστού ιλύος $f(\%)$ στη θέση της CSL στο χώρο $[e-\ln(p')]$.
Figure 5. Effect of silt content $f(\%)$ on the location of the CSL in the $[e-\ln(p')]$ space.

κ.α., 2001α), το οποίο βασίζεται στη Θεωρία Κρίσιμης Κατάστασης και δέχεται ως παραμέτρους τα Γ_{CS} , λ , M_{CS} . Το εν λόγω προσομοίωμα έχει αποδειχθεί ότι είναι ικανόνα προσομοιώσει ικανοποιητικά δοκιμές ρευστοποίησης τόσο σε απλή διάτμηση όσο και σε τριαξονικές δοκιμές για διάφορες συνθήκες στερεοποίησης (e_0 , p'_0) με την ίδια ομάδα παραμέτρων.

Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής πραγματοποιήθηκαν δύο σειρές παραμετρικών αναλύσεων ρευστοποίησης υπό ανακυκλική τριαξονική διάτμηση, μία για $p'_0 = 50\text{kPa}$ (δηλαδή με $p'_0 < p'_{piv}$) και μια για $p'_0 = 200\text{kPa}$ (δηλαδή με $p'_0 > p'_{piv}$). Χάρην απλότητας, θεωρήθηκε ενιαίος δείκτης πόρων για όλες τις αναλύσεις $e_0 = 0.70$. Οι αναλύσεις αφορούσαν καθαρή άμμο ($f = 0\%$) και άμμο με διάφορα ποσοστά λεπτοκόκκων: $f = 5, 10, 20, 30\%$. Οι τιμές των Γ_{CS} , λ που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές που προκύπτουν από τις Εξισώσεις 4 και 5, ενώ $M_{CS} = 1.26$.

Οι λοιπές παράμετροι του προσομοιώματος παρέμειναν σταθερές για όλες τις αναλύσεις, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται συνοπτικά υπό μορφή καμπυλών ρευστοποίησης στο Σχήμα 7. Συμπεραίνεται, ότι το προσομοίωμα προβλέπει αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση με αύξηση του ποσοστού ιλύος $f(\%)$ όταν $p'_0 < p'_{piv}$, ενώ η επίδραση αυτή αντιστρέφεται όταν $p'_0 > p'_{piv}$. Η ποιοτική συμφωνία με τις μετρήσεις είναι προφανής.

Η επίδραση του ποσοστού ιλύος στο δυναμικό ρευστοποίησης είναι δυνατόν να εκφραστεί ως συνάρτηση της αντοχής του δοκιμίου καθαρής άμμου και ενός διορθωτικού συντελεστή I_f . Ο συντελεστής αυτός ορίζεται ως εξής:

$$I_f = \text{CSR}_{f \neq 0} / \text{CSR}_{f=0} \quad (8)$$

όπου $\text{CSR}_{f=0}$ και $\text{CSR}_{f \neq 0}$ είναι οι λόγοι ανακυκλικών τάσεων που δίνουν ρευστοποίηση υπό τον ίδιο αριθμό κύκλων διάτμησης N για καθαρή και ιλυώδη άμμο με διάφορα ποσοστά ιλύος.

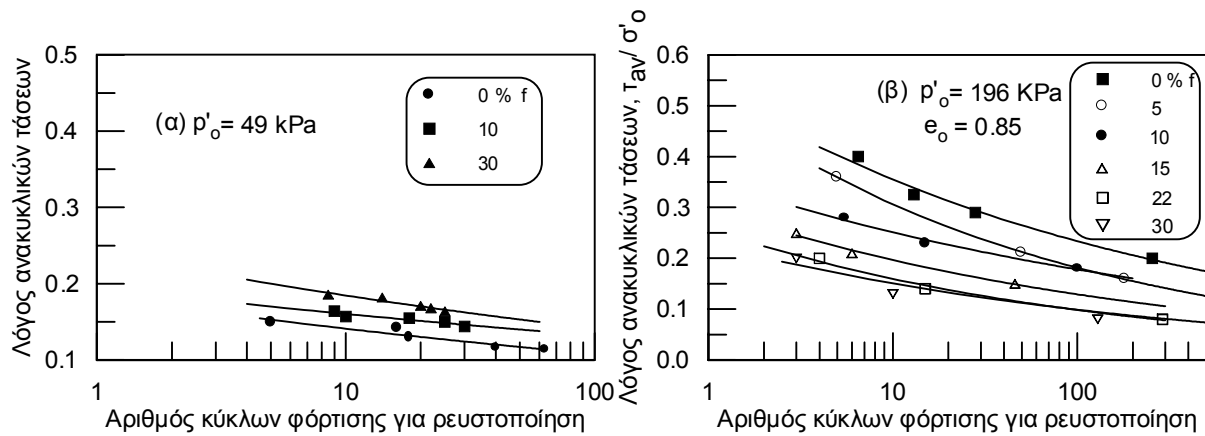
Στο Σχήμα 8 συγκρίνονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα ως προς τον διορθωτικό συντελεστή I_f . Παρατηρείται πολύ ικανοποιητική σύγκριση, ανεξαρτήτως του κύκλου διάτμησης N που επελέγη για να υπολογισθεί η τιμή του I_f . Σημειώνεται ότι, όταν $p'_0 < p'_{piv}$ τότε $I_f > 1$, ενώ όταν $p'_0 > p'_{piv}$ τότε $I_f < 1$. Δεν γίνεται πουθενά αναφορά στην τιμή και την όποια επίδραση του δείκτη πόρων e_0 στη στερεοποίηση στην τιμή του I_f . Ο λόγος είναι ότι έχει αποδειχθεί πως η επίδραση του e_0 είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με την επίδραση του p'_0 (Ανδριανόπουλος, 2001).

Από εκτενή στατιστική επεξεργασία δημοσιευμένων πειραματικών αποτελεσμάτων καθώς και των αναλυτικών προβλέψεων προκύπτει ότι ο διορθωτικός συντελεστής I_f μπορεί να εκφραστεί προσεγγιστικά ως (Σχήμα 9):

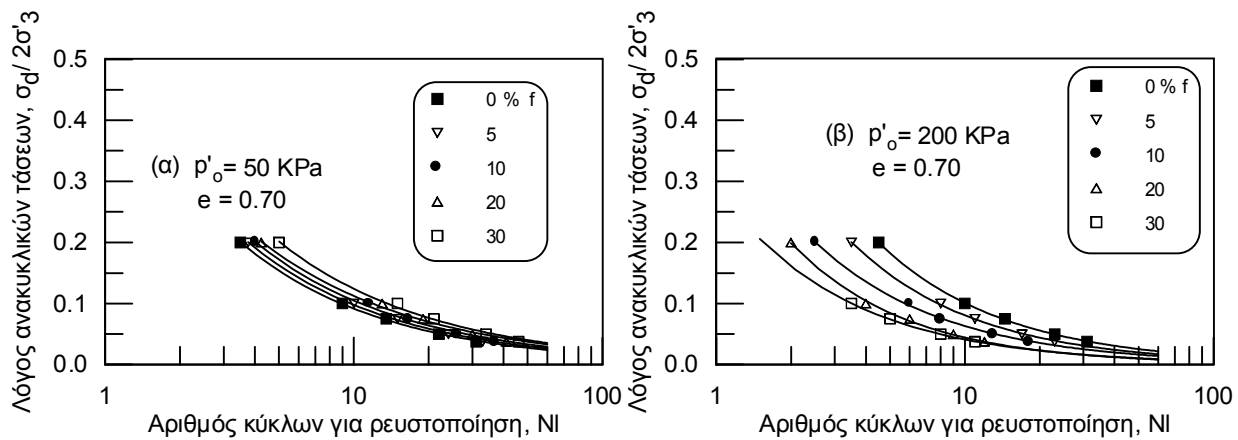
$$I_f = 1 + \alpha_f f \quad (9)$$

όπου α_f ένας συντελεστής που λαμβάνει θετικές τιμές για $p'_0 < p'_{piv}$ και αρνητικές τιμές για $p'_0 > p'_{piv}$.

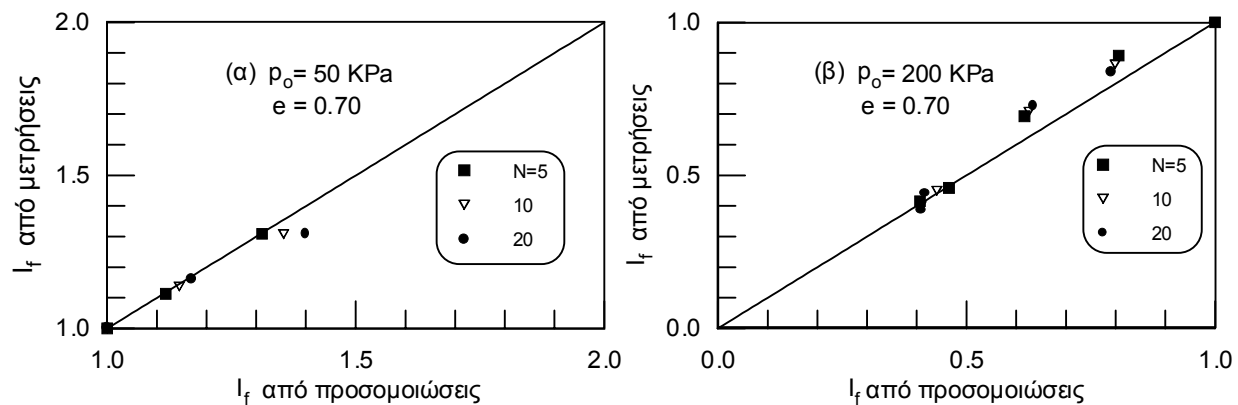
Από πρακτική σκοπιά, χρήσιμη θα ήταν η α priori γνώση της παραμέτρου α_f . Με αυτό το στόχο, έγινε συλλογή και επεξεργασία πρακτικώς όλων των σχετικών δεδομένων από



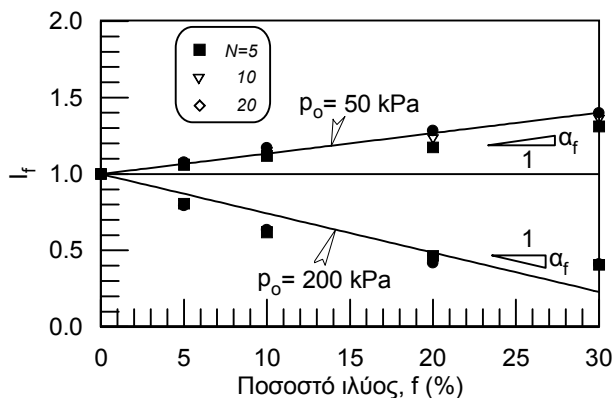
Σχήμα 6. Επίδραση του ποσοστού ιλύος στην αντοχή σε ρευστοποίηση
 (α) από Kondoh et al. (1987) (β) από Troncoso (1990)
 Figure 6. Effect of silt content on cyclic liquefaction resistance
 (α) based on Kondoh et al. (1987) (β) based on Troncoso (1990)



Σχήμα 7. Αποτελέσματα αναλυτικών προβλέψεων για άμμους με διαφορετικό ποσοστό ιλύος
 Figure 7. Results from simulations for sands with different fine content



Σχήμα 8. Σύγκριση αναλυτικών προβλέψεων με πειραματικά αποτελέσματα
 Figure 8. Comparison of analytical simulations with experimental data



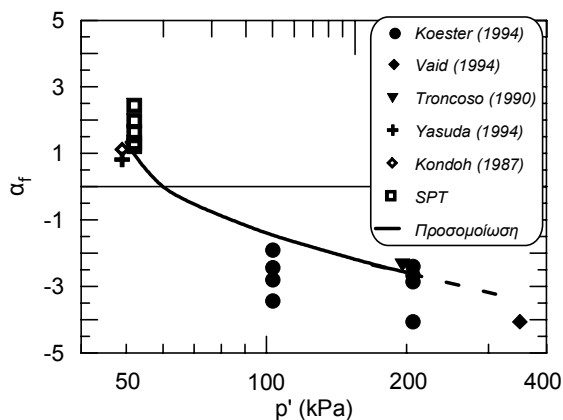
Σχήμα 9. Μεταβολή του I_f για $p'_o=50$ & 200 kPa
Figure 9. Variation of I_f for $p'_o = 50$ & 200 kPa

τη βιβλιογραφία. Έτσι, στο Σχήμα 10 δίνονται, μεταξύ άλλων, οι τιμές της παραμέτρου α_f που προκύπτουν από τις καμπύλες ρευστοποίησης ιλυωδών άμμων από δημοσιευμένες σχετικές εργαστηριακές μελέτες (Koester 1994, Vaid 1994, Troncoso 1990, Yasuda 1994, Kondoh 1987), καθώς και οι τιμές που προκύπτουν από τις πιο πρόσφατες καμπύλες σχεδιασμού έναντι ρευστοποίησης με βάση το N_{SPT} (Youd & Idriss 1997). Επιπλέον, στο ίδιο σχήμα δίνονται και οι τιμές του α_f που προκύπτουν από τις αναλυτικές προσομοιώσεις, οι οποίες βρίσκονται σε αρκετά καλή συμφωνία με τις μετρήσεις. Συνεπώς, η μη μονοσήμαντη επίδραση του ποσοστού ιλύος στην αντοχή σε ρευστοποίηση τεκμηριώνεται τόσο πειραματικά όσο και θεωρητικά. Σύμφωνα με τα υπάρχοντα δεδομένα, για τιμές του $p'_o < p'_{piv}$ η ύπαρξη ιλύος μπορεί να αυξήσει την αντοχή σε ρευστοποίηση μέχρι 40% έως 60%, ενώ για τιμές του $p'_o > p'_{piv}$ η ύπαρξη ιλύος μπορεί να μειώσει την αντοχή μέχρι και 80%. Για τιμές $p'_o \cong p'_{piv}$ η ύπαρξη ιλύος δεν επηρεάζει πρακτικώς την αντοχή σε ρευστοποίηση.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία αυτή είναι τα ακόλουθα:

- Η επίδραση του ποσοστού ιλύος $f(\%)$ στο δυναμικό ρευστοποίησης είναι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο και αμφιλεγόμενο θέμα στη βιβλιογραφία. Αποδεικνύεται όμως ότι η Θεωρία Κρίσιμης Κατάστασης είναι δυνατόν να εξηγήσει τις διάφορες φαινομενικά αντικρουόμενες απόψεις.
- Στατιστική επεξεργασία δεδομένων για τη θέση της CSL στο χώρο $[e-\ln(p')]$ οδηγεί στη θεώρηση ότι αυξανόμενου του $f(\%)$ οι CSL



Σχήμα 10. Μεταβολή α_f συναρτήσει του p'
Figure 10. Variation of α_f with p'

περιστρέφονται ωρολογιακά γύρω από ένα σταθερό κατά προσέγγιση σημείο στροφής με συντεταγμένες $(p'_o, e_o) = (60 \text{ kPa}, 0.79)$.

- Η παραπάνω θεώρηση οδηγεί έμμεσα στο συμπέρασμα ότι για σχετικά μικρές τάσεις στερεοποίησης ($p'_o < 60$ kPa) μια αύξηση του $f(\%)$ προκαλεί αύξηση της αντοχής σε ρευστοποίηση, ενώ για σχετικά μεγάλες τάσεις στερεοποίησης ($p'_o > 60$ kPa) η επίδραση αυτή αντιστρέφεται.
- Η ποσοσιαία μεταβολή της αντοχής σε ρευστοποίηση μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική συνάρτηση του ποσοστού ιλύος $f(\%)$. Η συνάρτηση αυτή ποσοτικοποιείται μέσω επεξεργασίας δεδομένων από εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές.
- Τα συμπεράσματα (γ) και (δ) επαληθεύονται από αναλυτικές προβλέψεις που έγιναν με τη βοήθεια ενός κατάλληλου ελαστοπλαστικού προσομοιώματος Κρίσιμης Κατάστασης, το οποίο λαμβάνει ως δεδομένη τη θέση της CSL στους χώρους $[e-\ln(p')]$ και $[p'-q]$.

Τα συμπεράσματα και οι προκύπτουσες συσχετίσεις θεωρούνται αξιόπιστα για ιλυώδεις άμμους με λεπτόκοκκα ποσοστού $f \leq 20-30\%$.

6. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τον Dr. M. G. Jefferies για την παροχή των πειραματικών δεδομένων που επεξεργάστηκαν στατιστικά. Ο τρόπος επεξεργασίας και τα αποτελέσματα αυτής αποτελούν ευθύνη των συγγραφέων του παρόντος άρθρου. Η έρευνα χρηματοδοτήθηκε από το πρόγραμμα βασικής έρευνας «Αρχιμήδης» του ΕΠΙΣΕΥ.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ανδριανόπουλος Κ. Ι. (2001), "Προσομοίωση ρευστοποίησης ιλυωδών άμμων – Θεωρητική & Πειραματική διερεύνηση", Μεταπτυχιακή εργασία, Τομέας Γεωτεχνικής Ε.Μ.Π.
- Been K., Jefferies M. G. (1985), "A state parameter for sands", *Geotechnique*, 35(2), pp. 99-112
- Been K., Jefferies M. G., Hachey J. (1991), "The critical state of sands", *Geotechnique*, 41(3), pp. 365-381
- Chen Y.C., T. S. Liao (1999), "Studies of the state parameter and liquefaction resistance of sand", *Proc., 2nd Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Engineering*, Lisbon, Portugal, pp. 513-518
- Ishihara K. (1996), "Soil behaviour in earthquake geotechnics", Oxford: Clarendon Press.
- Koester J. P. (1994), "The influence of fines type and content on cyclic strength", in *Ground Failures under Seismic Conditions*, (eds. Prakash S., Dakoulas P.), ASCE Publication No. 44, pp. 17-33
- Kondoh M., Sasaki Y., Matsumoto H. (1987), "Effect of fines contents on soil liquefaction strength (Part 1)", *Proc. of the annual meeting of the JSSMFE*, Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Tsukuba, Japan
- Παπαδημητρίου Α. Γ., Μπουκοβάλας Γ. Δ., Δαφалиάς Ι. Φ. (2001α), "Ελαστοπλαστική προσομοίωση συμπεριφοράς μη συνεκτικών εδαφών υπό ανακυκλική διάτμηση", Πρακτικά, 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής, Αθήνα (υπό εκτύπωση).
- Παπαδημητρίου Α. Γ., Παπαγεωργίου Ε. Ο., Ανδριανόπουλος Κ. Ι. (2001β), "Επίδραση ποσοστού λεπτόκοκκων στη μονοτονική συμπεριφορά μη συνεκτικών εδαφών", Πρακτικά, 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής, Αθήνα (υπό εκτύπωση).
- Prakash S., Guo T. (1999), "Liquefaction of silts and silt-clay mixtures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 125(8), pp. 706-710
- Seed H. B., Idriss I. M. (1971), "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249-1273
- Stark T. D., Olson S. M. (1995), "Liquefaction resistance using CPT and field case histories", *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(12), pp. 856-869
- Thevanayagam S., Mohan S. (2000), "Intergranular state variables and stress-strain behaviour of silty sands", *Geotechnique*, 50(1), pp. 1-23
- Troncoso J. H. (1990), "Failure risks of abandoned tailing dams", *Proc., Int. Sym. on Safety and Rehabilitation of Tailing Dams*, Int. Commission on Large Dams, Paris, pp. 82-89
- Vaid Y.P. (1994), "Liquefaction of silty soils", in *Ground Failures under Seismic Conditions*, (eds. Prakash S., Dakoulas P.), ASCE Publication No. 44, pp. 1-16
- Yasuda S., Wakamatsu K., Nagase H. (1994), "Liquefaction of artificially filled silty sands", in *Ground Failures under Seismic Conditions* (eds. Prakash S., Dakoulas P.), ASCE Publication No. 44, pp. 91-104
- Youd T. L., Idriss I. M., eds. (1997), "Proc. of the NCEER workshop on evaluation of liquefaction resistance of soils", No. NCEER-97-0022/31-12-1997, 276p.