

# Ελαστοπλαστική προσομοίωση συμπεριφοράς μη συνεκτικών εδαφών υπό ανακυκλική διάτμηση

An elastoplastic formulation for non cohesive soil behavior under cyclic shearing

ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ, Α. Γ. Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.  
ΜΠΟΥΚΟΒΑΛΑΣ, Γ. Δ. Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
ΔΑΦΑΛΙΑΣ, Ι. Φ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στην εργασία αυτή προτείνεται ένα νέο ελαστοπλαστικό προσομοίωμα Κρίσιμης Κατάστασης για μη συνεκτικά εδάφη υπό ανακυκλική διάτμηση. Η Οριακή επιφάνεια και ο νόμος ροής εξαρτώνται και από την τιμή της παραμέτρου κατάστασης  $\psi$ . Οι ελαστικές παραμορφώσεις υπολογίζονται βάση μιας σχέσης τύπου Ramberg-Osgood και σταθερό λόγο του Poisson, ενώ οι πλαστικές παραμορφώσεις εξαρτώνται και από την αλλαγή της δομής, η οποία προσομοιώνεται εμπειρικά. Συγκρίσεις με εργαστηριακά δεδομένα υποδεικνύουν ακριβή προσομοίωση της συμπεριφοράς υπό μικρές, μέτριες και μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις με μια ομάδα παραμέτρων, ανεξαρτήτως μέσης ενεργού τάσης και δείκτη πόρων στη στερεοποίηση.

**ABSTRACT:** This study proposes a new Critical State elastoplastic model for non-cohesive soil behavior under cyclic shearing. The Bounding surface and the flow rule depend partly on the value of the state parameter  $\psi$ . Elastic strains are calculated on the basis of a Ramberg-Osgood type formulation and a constant Poisson's ratio. Plastic strains depend, among other issues, on fabric evolution during shearing, which is simulated empirically. Comparisons with experimental data show accurate simulation of behavior for small, medium and large cyclic strains with one set of parameters, independent of the mean effective stress and void ratio at consolidation.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

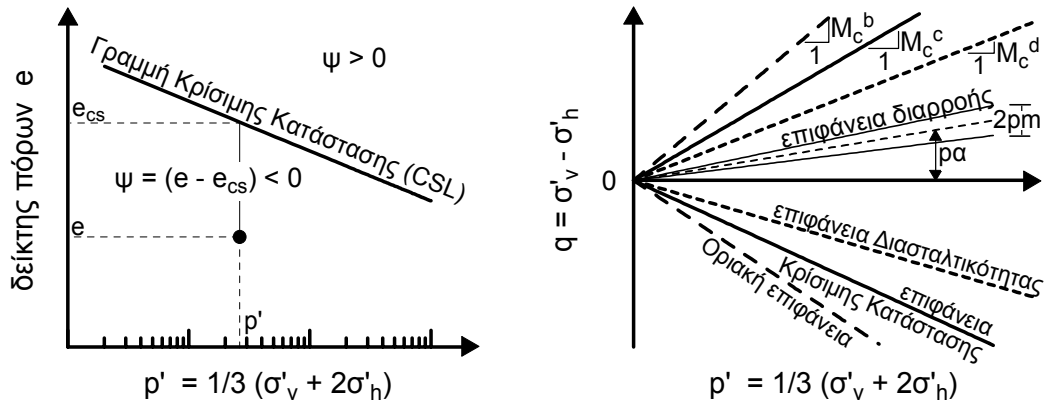
Η αριθμητική προσομοίωση δυναμικών γεωτεχνικών προβλημάτων πραγματοποιείται είτε με αριθμητικούς κώδικες γενικών εφαρμογών (π.χ. FLAC: Itasca 1996) είτε με εξειδικευμένους κώδικες (π.χ. QUAD4M: Hudson et al. 1994).

Μια κριτική επισκόπηση των προσφερόμενων για χρήση καταστατικών προσομοιωμάτων σε αριθμητικούς κώδικες γενικών εφαρμογών αποκαλύπτει ότι, στην μεγάλη τους πλειοψηφία, είναι εντελώς ακατάλληλα για προσομοίωση δυναμικών προβλημάτων με εύρος παραμορφώσεων μεγαλύτερο του  $1e-5$  (Παπαδημητρίου 1999).

Το πρόβλημα είναι λιγότερο έντονο σε εξειδικευμένους κώδικες, καθώς στους περισσότερους δίνεται η δυνατότητα ποιοτικής

έστω προσομοίωσης της ανακυκλικής διάτμησης, ανεξαρτήτως εύρους παραμορφώσεων. Μια κριτική επισκόπηση της αξιοπιστίας τέτοιων κωδίκων για προσομοίωση γεωτεχνικών κατασκευών υπό καθεστώς ρευστοποίησης (Popescu & Prevost 1995) υπέδειξε ότι πρακτικώς όλα τα προσφερόμενα προσομοιώματα που εξετάστηκαν απέτυχαν στατιστικά να προσφέρουν προβλέψεις εντός του εύρους διασποράς των πειραματικών δεδομένων.

Επιπρόσθετα, δεν υπάρχουν ενδείξεις στη βιβλιογραφία για καταστατικά προσομοιώματα που προσφέρουν ποσοτικά ακριβείς προσομοιώσεις με την ίδια ομάδα παραμέτρων, ανεξαρτήτως αρχικών συνθηκών και εύρους ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης.



Σχήμα 1. α) Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης (CSL) και ορισμός παραμέτρου κατάστασης  $\psi$  στο χώρο  $[e-\log(p')]$ , β) Επιφάνειες του προσομοιώματος στον “τριαξονικό” χώρο των τάσεων  $[p'-q]$ .  
Figure 1. a) Critical State Line (CSL) and definition of the state parameter  $\psi$  in the  $[e-\log(p')]$  space, b) Model surfaces in “triaxial” stress space  $[p'-q]$ .

Το προσομοίωμα που προτείνεται στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε με στόχο να καλύψει αυτό το κενό, τουλάχιστον για τα μη συνεκτικά εδάφη. Πρόκειται για ένα ελαστοπλαστικό προσομοίωμα Κρίσιμης Κατάστασης, το οποίο υιοθετεί τη χρήση της παραμέτρου κατάστασης (state parameter)  $\psi$  των Been & Jefferies (1985) στις καταστατικές εξισώσεις (π.χ. Jefferies 1993, Manzari & Dafalias 1997, Gajo & Wood 1999, Li & Dafalias 2000) σε συνδυασμό με δύο καινοτομίες (Παπαδημητρίου 1999):

- α) Τη χρήση ενός προσομοιώματος τύπου Ramberg-Osgood με σταθερό λόγο του Poisson για τις ελαστικές παραμορφώσεις
- β) Την εισαγωγή μιας εμπειρικής σχέσης για την επίδραση της αλλαγής της δομής λόγω διάτμησης στον υπολογισμό των πλαστικών παραμορφώσεων.

Για να κατανοηθεί η πρακτική σημασία των καινοτομιών αυτών, στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται το πλαίσιο μηχανικής συμπεριφοράς μη συνεκτικών εδαφών στο οποίο στηρίζεται το προσομοίωμα.

## 2. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΔΑΦΩΝ ΥΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

Σύμφωνα με τις τρέχουσες αντιλήψεις, η μηχανική συμπεριφορά μη συνεκτικών εδαφών υπό ανακυκλική διάτμηση είναι συνάρτηση κυρίως του ημι-εύρους της ανακυκλικής διατμητικής παραμόρφωσης  $\gamma_c$  (π.χ. Dobry & Vucetic 1987). Συνοπτικά:

- α) Για μικρές ανακυκλικές παραμορφώσεις ( $\gamma_c \leq \gamma_{II}$ ), το τέμνον μέτρο διάτμησης  $G_s$  και ο λόγος υστερητικής απόσβεσης  $\xi$

παραμένουν πρακτικώς ίσα με τις αρχικές τιμές τους,  $G_{max}$  και  $\xi_{min}$ . Συσσώρευση παραμορφώσεων ή ανάπτυξη υπερπίεσεων  $\Delta u$  δεν παρατηρείται, ανεξάρτητα από τον αριθμό κύκλων  $N$  της διάτμησης.

- β) Για μέτριες ανακυκλικές παραμορφώσεις ( $\gamma_{II} < \gamma_c \leq \gamma_{IV}$ ), το τέμνον μέτρο διάτμησης  $G_s$  μειώνεται και η απόσβεση  $\xi$  αυξάνει με αύξηση της  $\gamma_c$  (π.χ. Vucetic & Dobry 1991). Ανάπτυξη υπερπίεσεων  $\Delta u$  ή συσσώρευση παραμορφώσεων είναι δυνατή, υπό την προϋπόθεση ότι ο αριθμός κύκλων  $N$  είναι αρκετά μεγάλος. Για σεισμική φόρτιση, όπου ο αριθμός κύκλων  $N$  είναι σχετικά μικρός, τα φαινόμενα αυτά μπορούν να παραβλεφθούν (Vucetic 1994).
- γ) Για μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις ( $\gamma_c > \gamma_{IV}$ ), το τέμνον μέτρο διάτμησης  $G_s$  είναι πολύ μικρότερο από  $G_{max}$  και η απόσβεση  $\xi$  πολύ μεγαλύτερη από  $\xi_{min}$ , ενώ φαινόμενα συσσώρευσης παραμορφώσεων και ανάπτυξης  $\Delta u$  κυριαρχούν στη συμπεριφορά. Για μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις, ο αριθμός κύκλων  $N$  παίζει μακροσκοπικά καθοριστικό ρόλο στο μέγεθος της αναπτυχθείσας υπερπίεσης  $\Delta u$  και των συσσωρευμένων παραμορφώσεων (Egglezos & Bouckovalas 1999). Από άποψη μικρο-μηχανικής, αντίστοιχα σημαντικό ρόλο παίζει η αλλαγή της δομής του μη συνεκτικού εδάφους (π.χ. Ishibashi et al. 1988).

Οι οριακές τιμές  $\gamma_{II}$  και  $\gamma_{IV}$  αποτελούν συνάρτηση κυρίως του δείκτη πλασιμότητας  $I_p$  και για μη πλάσιμα, μη συνεκτικά εδάφη παίρνουν τιμές  $5e-6$  και  $6.5e-5 \div 2.5e-4$  περίπου (Vucetic 1994).

### 3. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Για να γίνει η εργασία αυτή πιο προσιτή σε γεωτεχνικούς μηχανικούς χωρίς ειδικευση σε καταστατικά προσομοιώματα εδαφικής συμπεριφοράς, οι προτεινόμενες καταστατικές εξισώσεις παρουσιάζονται στον, απλουστευτικά δι-διάστατο, "τριαξονικό" χώρο τάσεων - παραμορφώσεων. Οι "τριαξονικές" συνιστώσες της τάσης είναι η μέση ενεργός τάση  $p' = 1/3 (\sigma_v' + 2\sigma_h')$  και η αποκλίνουσα συνιστώσα  $q = (\sigma_v' - \sigma_h')$ , όπου οι δείκτες  $v$  και  $h$  δηλώνουν την κατακόρυφη και την οριζόντια διεύθυνση αντίστοιχα. Ομοίως, οι "τριαξονικές" συνιστώσες της παραμόρφωσης είναι η ογκομετρική  $\epsilon_p = (\epsilon_v + 2\epsilon_h)$  και η αποκλίνουσα παραμόρφωση  $\epsilon_q = 2/3 (\epsilon_v - \epsilon_h)$ . Για την περαιτέρω απλούστευση της παρουσίασης εισάγεται ένα επιπλέον τασικό μέγεθος, ο αδιάστατος αποκλίνων λόγος των τάσεων  $\eta = q/p'$ .

Στο προσομοίωμα, η Γραμμή Κρίσιμης Κατάστασης είναι γνωστή a priori και έχει μορφή ευθείας στο χώρο  $[e - \log(p')]$ , όπου  $e$  είναι ο δείκτης πόρων. Σύμφωνα με τους Been et al. (1991) αυτή η παραδοχή είναι πρακτικώς σωστή, τουλάχιστον για τάσεις που δεν προκαλούν θραύση των κόκκων. Έτσι η παράμετρος κατάστασης  $\psi$  ορίζεται ως:

$$\psi = e - e_{cs} = e - [\Gamma_{cs} - \lambda_{cs} \log(p')] \quad (1)$$

όπου  $e_{cs}$  είναι ο δείκτης πόρων στην Κρίσιμη Κατάσταση υπό τάση  $p'$  (βλέπε Σχήμα 1α).

Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1β, η επιφάνεια διαρροής του προσομοιώματος έχει σχήμα "ανοικτής σφήνας" στο χώρο  $[p' - q]$  με συνάρτηση διαρροής  $f = 0$ , που δίνεται από:

$$f = |\eta - \alpha| - m = \eta - \alpha - sm = 0 \quad (2)$$

όπου  $m$  και  $\alpha$  είναι εφαιπτόμενες γωνιών που σχετίζονται με το εύρος και τη θέση της διχοτόμου της επιφάνειας διαρροής, αντίστοιχα. Ενώ η τιμή του  $m$  παραμένει σταθερή (και μικρή:  $m = 0.06 \div 0.07$ ), η τιμή του  $\alpha$  μεταβάλλεται για διατμητικές φορτίσεις που προκαλούν πλαστικές παραμορφώσεις. Με άλλα λόγια, το προσομοίωμα δεν χαρακτηρίζεται μόνο από κινηματική κράτνυση με βάση τη μεταβολή της τιμής του  $\alpha$ . Το βαθμωτό μέγεθος  $s$  είναι μια βοηθητική παράμετρος που παίρνει τιμές  $s=+1$  για  $(\eta - \alpha) \geq 0$  (σε τριαξονική θλίψη), και  $s=-1$  στην αντίθετη περίπτωση (σε τριαξονικό εφελκυσμό).

Εκτός της επιφάνειας διαρροής, το προσομοίωμα χρησιμοποιεί τρεις επιπλέον επιφάνειες στο χώρο των τάσεων, την επιφάνεια Κρίσιμης Κατάστασης, την Οριακή επιφάνεια και την επιφάνεια Διασταλτικότητας. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1β, και οι τρεις αυτές επιφάνειες έχουν τη μορφή "ανοικτής σφήνας" στο χώρο  $[p'-q]$ . Οι θέσεις τους για τριαξονική θλίψη καθορίζονται από τις κλίσεις  $M_c^c$ ,  $M_c^b$  και  $M_c^d$  (συνοπτικά  $M_c^{c,b,d}$ ). Ομοίως, οι θέσεις τους για τριαξονικό εφελκυσμό καθορίζονται από τις κλίσεις  $M_e^{c,b,d}$ . Πρακτικά, οι τιμές των  $M_{c,e}^{c,b,d}$  αντιστοιχούν στις τιμές του αποκλίνοντα λόγου των τάσεων  $\eta$  σε τρεις διαφορετικές φάσεις διατμητικής φόρτισης: στην Κρίσιμη Κατάσταση, στη μέγιστη αντοχή και στη Γραμμή Αλλαγής Φάσης (Phase Transformation Line, κατά Ishihara et al. 1975).

Οι κλίσεις  $M_{c,e}^c$  θεωρούνται, στη γενική περίπτωση, ανεξάρτητες σταθερές. Αντιθέτως, οι κλίσεις  $M_{c,e}^{b,d}$  δεν είναι σταθερές και απλοποιώντας την πρόταση των Manzarif & Dafalias (1997) θεωρούνται συνεχείς συναρτήσεις των αντιστοιχών  $M_{c,e}^c$  και της συνεχώς μεταβαλλόμενης τιμής της παραμέτρου κατάστασης  $\psi$  σύμφωνα με τις σχέσεις (Papadimitriou et al. 1999):

$$M_{c,e}^b = M_{c,e}^c + k_{c,e}^b < -\psi > \quad (3\alpha)$$

$$M_{c,e}^d = M_{c,e}^c + k_{c,e}^d \psi \quad (3\beta)$$

$$k_e^{b,d} = k_c^{b,d} (M_e^c / M_c^c) \quad (3\gamma)$$

όπου  $k_c^{b,d}$  είναι δύο, εν γένει ανεξάρτητες θετικές παράμετροι. Τα σύμβολα  $< >$  ονομάζονται αγκύλες Macauley και δίνουν  $<A> = A$  αν  $A > 0$  και  $<A> = 0$  αν  $A \leq 0$ . Σημειώνεται, ότι η σχέση (3α) χωρίς τις αγκύλες Macauley είχε προταθεί πρώτα από τους Wood et al. (1994). Αναφέρεται επίσης, ότι οι σχέσεις (3α) και (3β) υποστηρίζονται από πειραματικά δεδομένα (Παπαδημητρίου 1999, Παπαδημητρίου κ.α. 2001).

Για κάθε επιβαλλόμενη φόρτιση με συνιστώσες  $(dp', dq)$ , οι ελαστικές συνιστώσες της παραμόρφωσης  $d\epsilon_q^e$  και  $d\epsilon_p^e$  δίνονται απ' τις γενικές σχέσεις:

$$d\epsilon_q^e = dq / (3 G_t) \quad (4\alpha)$$

$$d\epsilon_p^e = dp' / K_t \quad (4\beta)$$

όπου  $G_t$  και  $K_t$  είναι τα εφαιπτομενικά μέτρα διάτμησης και υδροστατικής συμπίεσης, αντίστοιχα. Οι πλαστικές συνιστώσες της παραμόρφωσης  $d\epsilon_q^p$  και  $d\epsilon_p^p$  δίνονται απ' τις σχέσεις:

$$d\epsilon_q^p = s \sqrt{2/3} < L > \quad (5\alpha)$$

$$d\epsilon_p^p = D |d\epsilon_q^p| \quad (5\beta)$$

όπου D είναι ο συντελεστής διασταλτικότητας που ορίζει το νόμο ροής του προσομοιώματος. Το βαθμωτό μέγεθος L είναι ο δείκτης φόρτισης που δίνεται απ' τη σχέση:

$$L = s (p' / K_p) d\eta \quad (6)$$

όπου dη είναι η διαφορική μεταβολή στη τιμή του αποκλίνοντα λόγου των τάσεων η και K<sub>p</sub> είναι το μέτρο πλαστικών παραμορφώσεων. Λόγω των αγκυλών Macaulay στη σχέση (5), το πρόσημο του L καθορίζει και τις συνθήκες διάτμησης: L > 0 για φόρτιση (loading), L < 0 για αποφόρτιση (unloading) ενώ L = 0 για ουδέτερη φόρτιση (neutral loading).

Η συνθήκη συμβατότητας df = 0 δίνει την ακόλουθη σχέση για τη διαφορική μεταβολή da της κλίσης της διχοτόμου της επιφάνειας διαρροής σύμφωνα με:

$$da = s (K_p / p') < L > \quad (7)$$

#### 4. ΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

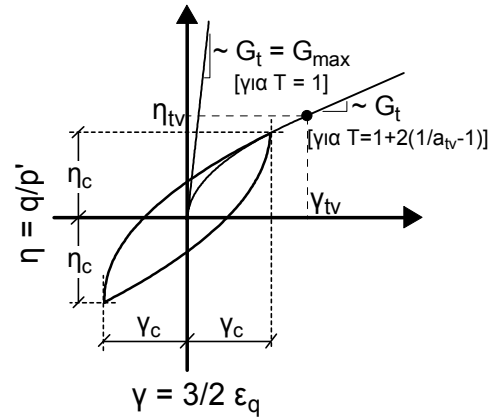
Τα ελαστικά μέτρα παραμόρφωσης K<sub>t</sub> και G<sub>t</sub> αλληλοσυνδέονται αναλυτικά μέσω μιας σταθερής τιμής του ελαστικού λόγου του Poisson ν. Συγκεκριμένα, το G<sub>t</sub> δίνεται από τη σχέση (Παπαδημητρίου 1999):

$$G_t = [B p_a \sqrt{p'/p_a} / (0.3 + 0.7e^2)] / T \quad (8)$$

όπου p<sub>a</sub> είναι η ατμοσφαιρική πίεση (π.χ. p<sub>a</sub> = 98.1 kPa), B θετική παράμετρος, ενώ το βαθμωτό μέγεθος T εξασφαλίζει απομείωση του G<sub>t</sub> σύμφωνα με (Παπαδημητρίου 1999):

$$T = 1 + 2(1/a_{tv} - 1) \frac{|\eta - \eta_{SR}|}{2\eta_{tv}} \leq 1 + 2(1/a_{tv} - 1) \quad (9)$$

όπου η<sub>SR</sub> είναι η τιμή του αποκλίνοντα λόγου των τάσεων στο σημείο αντιστροφής της διάτμησης (Shear Reversal). Ως σημείο αντιστροφής της διάτμησης ορίζεται το σημείο του χώρου των τάσεων όπου αλλάζει πρόσημο η διαφορική μεταβολή της ολικής αποκλίνουσας παραμόρφωσης dε<sub>q</sub>. Προφανώς, G<sub>t</sub> = G<sub>max</sub> για T = 1.



Σχήμα 2. Παράδειγμα σχέσης τάσης - ελαστικής αποκλίνουσας παραμορφώσεων. Figure 2. Example of elastic deviatoric stress - strain relation.

Από τις σχέσεις (4), (8) και (9) συμπεραίνεται, ότι ο υπολογισμός της ελαστικής αποκλίνουσας παραμόρφωσης βασίζεται σε μια γενίκευση του προσομοιώματος των Ramberg & Osgood (1943). Η προβλεπόμενη από τις εξισώσεις αυτές συμπεριφορά υπό μονοτονική και ανακυκλική τριαξονική διάτμηση (υπό σταθερά p' = p<sub>o</sub>' και e = e<sub>o</sub>) παρουσιάζεται στο Σχήμα 2. Συνεπώς, μείωση στην τιμή της παραμέτρου a<sub>tv</sub> αυξάνει το ρυθμό απομείωσης του G<sub>t</sub>, ενώ η τιμή του η<sub>tv</sub> αποτελεί το όριο στο χώρο των τάσεων πέρα από το οποίο η τιμή του G<sub>t</sub> σταματά να απομειώνεται. Στο οριακό αυτό σημείο, η συνεισφορά της ελαστικής συνιστώσας dε<sub>q</sub><sup>e</sup> στην αποκλίνουσα παραμόρφωση dε<sub>q</sub> παύει να είναι σημαντική προς όφελος της πλαστικής συνιστώσας. Στα εργαστηριακά δεδομένα αντίστοιχα, οριακή διατμητική παραμόρφωση πέρα από την οποία αρχίζει η συσσώρευση παραμορφώσεων είναι η γ<sub>tv</sub> (Vucetic 1994). Στο προσομοίωμα η τιμή του η<sub>tv</sub> συσχετίζεται με την γ<sub>tv</sub>, αλλά και τις αρχικές συνθήκες (e<sub>o</sub>, p<sub>o</sub>') σύμφωνα με τη σχέση:

$$\eta_{tv} = 2B a_{tv} \gamma_{tv} \sqrt{p_a/p_o'} / (0.3 + 0.7e_o^2) \quad (10)$$

Σημειώνεται, ότι η επίδραση των p' και e στην τιμή του ελαστικού μέτρου διάτμησης βασίζεται στη σχέση του Hardin (1978) και στοχεύει στην προσομοίωση της συμπεριφοράς σε μικρές ανακυκλικές παραμορφώσεις. Επιπρόσθετα επισημαίνεται ότι η εισαγωγή μιας παραμέτρου T ≠ 1 γίνεται με στόχο την προσομοίωση της συμπεριφοράς σε μέτριες ανακυκλικές παραμορφώσεις.

## 5. ΠΛΑΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

Η τιμή του συντελεστή διασταλτικότητας  $D$  και του μέτρου πλαστικών παραμορφώσεων  $K_p$  καθορίζεται με βάση την "απόσταση" της τρέχουσας τάσης από τις συζυγείς της τάσεις επί των επιφανειών του προσομοιώματος. Στο προτεινόμενο προσομοίωμα, οι συζυγείς τάσεις έχουν συνιστώσα  $p'$  αυτή της τρέχουσας τάσης. Συνεπώς, ενδιαφέρον παρουσιάζουν μόνο οι συζυγείς τιμές του αποκλίνοντα λόγου των τάσεων  $M^{b,d,c}$  στις τρεις επιφάνειες, οι οποίες δίνονται από τη σχέση:

$$M^{b,d,c} = s \left( M_c^{b,d,c} < s > + M_e^{b,d,c} < -s > \right) \quad (11)$$

Οι "αποστάσεις"  $d^{b,d,c}$  μεταξύ της τρέχουσας και των συζυγών τάσεων εκφράζεται σε όρους αποκλίνοντα λόγου τάσεων, σύμφωνα με:

$$d^{b,d,c} = s \left( M^{b,d,c} - \eta \right) \quad (12)$$

Όταν  $d^{b,d,c} > 0$ , τότε η τρέχουσα τάση είναι "εσωτερική" της αντίστοιχης επιφάνειας στο χώρο των τάσεων, και το αντίθετο. Έτσι, ο συντελεστής διασταλτικότητας  $D$  δίδεται από τη σχέση (Manzari & Dafalias 1997):

$$D = A_o d^d \quad (13)$$

όπου  $A_o > 0$  και συνεπώς το πρόσημο του  $D$  (αλλά και της πλαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης  $d\epsilon_p^p$ , σύμφωνα με τη σχέση 5β) γίνεται αποκλειστική συνάρτηση της "απόστασης"  $d^d$ . Έτσι, η επιφάνεια Διασταλτικότητας του προσομοιώματος παίζει το ρόλο της Γραμμής Αλλαγής Φάσης (Phase Transformation Line) των Ishihara et al. (1975). Σημειώνεται, ότι η σχέση (13) βασίζεται σε γενίκευση του νόμου διασταλτικότητας του Rowe (1962).

Το μέτρο πλαστικών παραμορφώσεων  $K_p$  δίνεται από τη σχέση (Παπαδημητρίου 1999):

$$K_p = p' h_f d^b h_o \left| d^b \right| / \left\langle d_{ref}^b - \left| d^b \right| \right\rangle \quad (14)$$

όπου  $h_o$  είναι θετική παράμετρος και  $d_{ref}^b$  δίνεται από τη σχέση:

$$d_{ref}^b = M_c^b + M_e^b - 2m \quad (15)$$

Η συνάρτηση  $h_f$  στη σχέση (14) εκφράζει μακροσκοπικά την επίδραση της αλλαγής της δομής κατά τη διάτμηση επί της τιμής του  $K_p$ .

Είναι γνωστό ότι η δομή ενός εδάφους είναι συνάρτηση της ιστορίας φόρτισης, τόσο σε όρους τάσεων όσο και παραμορφώσεων (π.χ. Ladd et al. 1977). Αντίστοιχα, η συνάρτηση  $h_f$  λαμβάνει υπόψη τάσεις και παραμορφώσεις και δίνεται από τη σχέση:

$$h_f = \frac{1 + F \left\langle \int d\epsilon_p^p (\%) \right\rangle}{1 + F \int_{SR_{-1}}^{SR} \left\langle -d\epsilon_p^p (\%) \right\rangle} \quad (16)$$

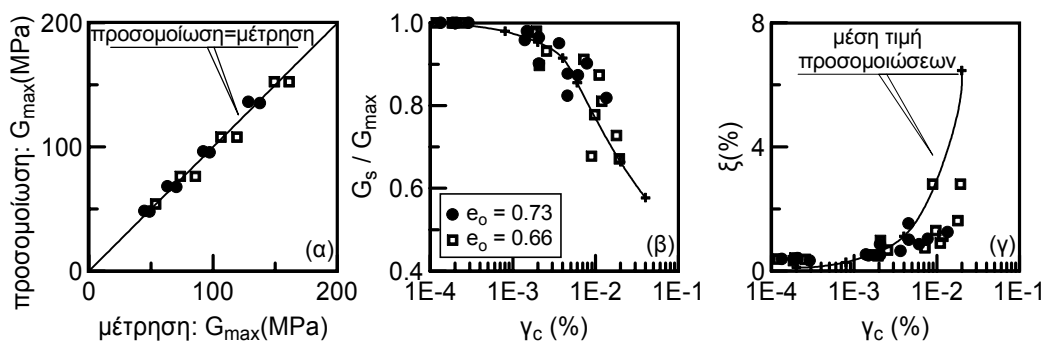
όπου  $F > 0$ . Επισημαίνεται, ο αριθμητής του  $h_f$  αυξάνει διαρκώς κατά τη διάρκεια διάτμησης οποιασδήποτε διεύθυνσης "εντός" της επιφάνειας Διασταλτικότητας ( $d\epsilon_p^p > 0$ ). Έτσι προσομοιώνεται η αναδιάταξη των κόκκων του μη συνεκτικού εδάφους που μαζί με την αλλαγή στην πυκνότητα οδηγεί σε διαρκώς πιο "δύσκαμπτη" συμπεριφορά (π.χ. Ladd et al. 1977, Ishibashi et al. 1988).

Από την άλλη μεριά, ο παρονομαστής του  $h_f$  αλλάζει τιμή μόνο σε κάθε αντιστροφή της διάτμησης (SR). Η τιμή που παίρνει είναι συνάρτηση της αρνητικής πλαστικής ογκομετρικής παραμόρφωσης που συσσωρεύτηκε κατά τη διαδρομή διάτμησης μεταξύ δύο διαδοχικών αντιστροφών διάτμησης: της τελευταίας (SR) και της προτελευταίας (SR<sub>-1</sub>) στην ιστορία φόρτισης του εδάφους. Λόγω των αγκυλών Macaulay που περιέχονται στον παρονομαστή του  $h_f$ , αυτός γίνεται πρακτικώς μεγαλύτερος της μονάδας, μόνο όταν η τελευταία αντιστροφή της διάτμησης έλαβε χώρα "εκτός" της επιφάνειας Διασταλτικότητας. Με τον τρόπο αυτό προσομοιώνεται, ότι σε αντιστροφές της διάτμησης από σημεία "πάνω" από τη Γραμμή Αλλαγής Φάσης, η απόκριση είναι πιο ενδοτική, γεγονός που οδηγεί σε μεγάλες υπερπίεσεις πόρων υπό αστράγγιστες συνθήκες και πιθανώς αρχική ρευστοποίηση (Ishihara et al. 1975).

Αν και το  $F$  στη σχέση (16) μπορεί να θεωρηθεί σταθερό (Papadimitriou et al. 1999), ακριβέστερες προσομοιώσεις προκύπτουν αν συσχετισθεί με τις αρχικές συνθήκες ( $p_o'$ ,  $\psi_o$ ) σύμφωνα με τη σχέση:

$$F = F_o (p_o'/p_a)^{-\zeta} < -\psi_o > \quad (17)$$

Σημειώνεται, ότι η εισαγωγή της συνάρτησης  $h_f$  στοχεύει στην ακριβή προσομοίωση της συμπεριφοράς σε μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις.



Σχήμα 3. Σύγκριση μετρήσεων με προσομοιώσεις δεκαπέντε (15) δοκιμών συντονισμού στήλης.  
Figure 3. Comparison of measurements to simulations of fifteen (15) resonant column tests.

## 6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Μια πλήρης εκτίμηση της ακρίβειας του προτεινόμενου προσομοιώματος για ανακυκλική διάτμηση πρέπει να περιλαμβάνει συγκρίσεις με εργαστηριακές μετρήσεις της συμπεριφοράς υπό μικρές, μέτριες και μεγάλες παραμορφώσεις. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται δεδομένα για την λίγο ιλυώδη άμμο Nevada (Arulmoli et al. 1992). Πρόκειται για δεδομένα από δοκιμές συντονισμού στήλης εδάφους (με  $p_o' = 40 \div 320$  kPa) και ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές ρευστοποίησης (με  $p_o' = 40 \div 160$  kPa), τα οποία μπορούν να διαχωριστούν σε δύο ομάδες: α) με  $e_o \cong 0.66$  και β) με  $e_o \cong 0.73$ .

Πίνακας 1. Τιμές παραμέτρων  
Table 1. Values of model parameters

Παράμετρος	Τιμή	Παράμετρος	Τιμή
$\Gamma_{cs}$	0.91	$\nu$	0.31
$\lambda_{cs}$	0.051	$k_c^b$	1.45
$M_c^c$	1.25	$k_c^d$	0.3
$M_e^c$	1.25	$A_o$	2.1
$B$	520	$h_o$	5000
$a_{tv}$	0.67	$F_o$	10000
$\gamma_{tv}$	$2.5e-4$	$\zeta$	2.2

### 6.1 Μικρές ανακυκλικές παραμορφώσεις

Στο Σχήμα 3α παρουσιάζεται η σύγκριση των μετρημένων με τις αναλυτικώς προκύπτουσες τιμές του  $G_{max}$  σε δεκαπέντε (15) δοκιμές συντονισμού στήλης εδάφους. Συγκεκριμένα, κάθε σύμβολο στο Σχήμα 3α αντιστοιχεί σε διαφορετική δοκιμή και οι συντεταγμένες του προκύπτουν από τη μετρημένη και την αναλυτικώς προκύπτουσα τιμή του  $G_{max}$  στην εν λόγω δοκιμή. Συμπεραίνεται ότι οι τιμές του  $G_{max}$  για την άμμο Nevada προσομοιώνονται με ακρίβεια, ανεξαρτήτως αρχικών συνθηκών.

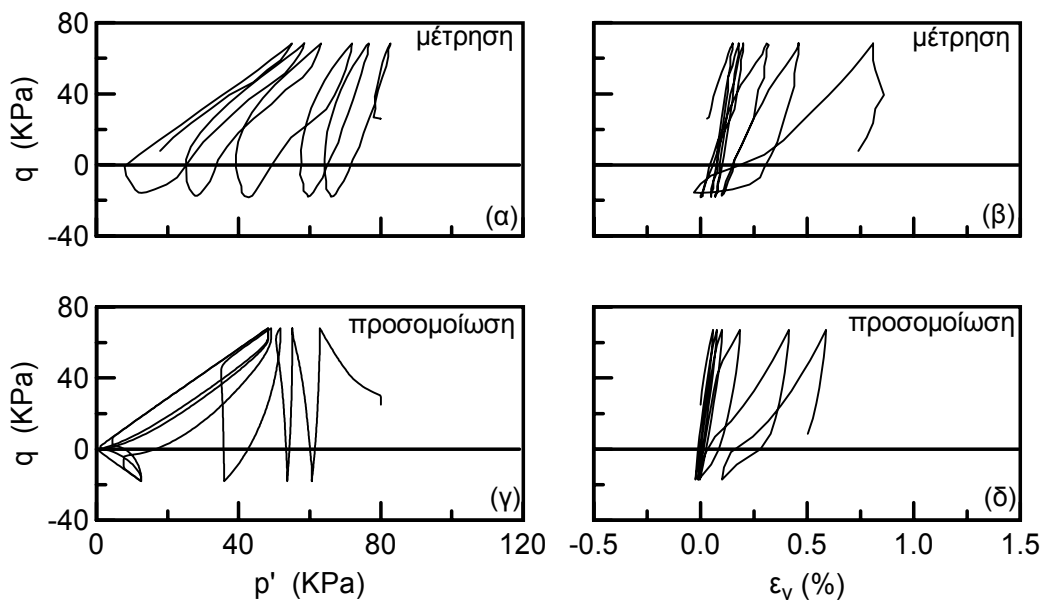
### 6.2 Μέτριες ανακυκλικές παραμορφώσεις

Στα Σχήματα 3β και 3γ παρουσιάζεται μια συνοπτική σύγκριση μετρήσεων - αναλυτικών προσομοιώσεων για τις σχέσεις  $G_s/G_{max}-\gamma_c$  και  $\xi-\gamma_c$  για τις ίδιες δεκαπέντε (15) δοκιμές συντονισμού στήλης εδάφους. Συγκεκριμένα, τα σύμβολα αντιστοιχούν σε μετρήσεις και οι συνεχείς γραμμές στις μέσες σχέσεις  $G_s/G_{max}-\gamma_c$  και  $\xi-\gamma_c$  που προκύπτουν αναλυτικά για τις αρχικές συνθήκες των δοκιμών αυτών. Παρατηρείται ότι, παρά τις έντονα διαφορετικές αρχικές συνθήκες, τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζουν μια πρακτικώς μονοσήμαντη μεταβολή με το  $\gamma_c$ . Συμπεραίνεται ότι η αναλυτικώς προκύπτουσα μέση σχέση  $G_s/G_{max}-\gamma_c$  είναι ακριβής, ενώ η αντίστοιχη σχέση  $\xi-\gamma_c$  είναι λιγότερο ικανοποιητική. Η υπερεκτίμηση του  $\xi$  που παρατηρείται αποδίδεται στο γεγονός ότι οι σχετικές μετρήσεις για την άμμο Nevada είναι ασυνήθιστα χαμηλές σε σύγκριση με αντίστοιχες σχέσεις  $\xi-\gamma_c$  από τη βιβλιογραφία (π.χ. Vucetic & Dobry 1991).

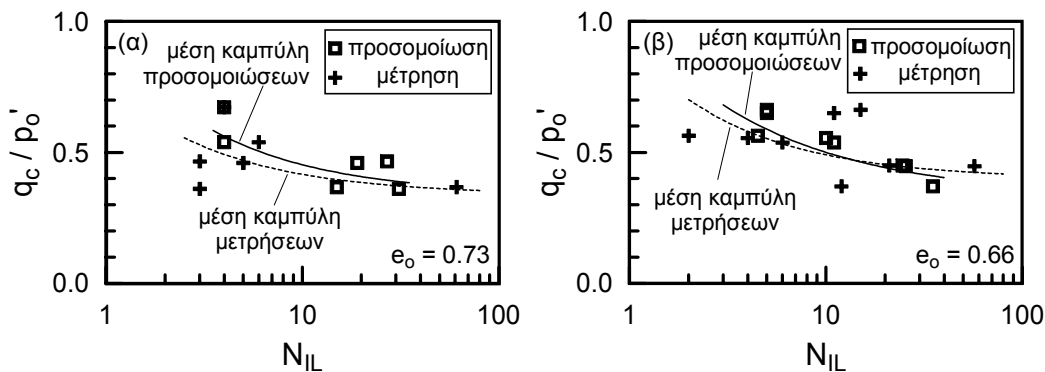
### 6.3 Μεγάλες ανακυκλικές παραμορφώσεις

Στο Σχήμα 4 δίνεται ένα παράδειγμα σύγκρισης μέτρησης - προσομοίωσης για την ενεργό τασική όδευση και τη σχέση αποκλίνοιας - αξονικής παραμόρφωσης για μια ανακυκλική τριαξονική δοκιμή ρευστοποίησης. Συμπεραίνεται ότι η αναλυτική προσομοίωση συγκρίνεται πολύ ικανοποιητικά με τη μέτρηση, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά.

Στο Σχήμα 5 γίνεται συνοπτική σύγκριση μετρήσεων - προσομοιώσεων της αντοχής σε ρευστοποίηση για δεκατέσσερις (14) τριαξονικές δοκιμές ρευστοποίησης στην άμμο Nevada. Η αντοχή σε ρευστοποίηση ποσοτικοποιείται ως προς τον αριθμό κύκλων  $N_{IL}$  μέχρι αρχικής ρευστοποίησης (δηλαδή μέχρι  $p' \cong 0$ ).



Σχήμα 4. Σύγκριση μέτρησης - προσομοίωσης για την ενεργό τασική όδευση και τη σχέση τάσεων – παραμορφώσεων σε μια τριαξονική δοκιμή ρευστοποίησης για την άμμο Nevada.  
 Figure 4. Comparison of measurements to simulation in terms of the effective stress path and the stress strain relation in a triaxial liquefaction test on Nevada sand.



Σχήμα 5. Σύγκριση μετρήσεων - προσομοιώσεων για τις καμπύλες ρευστοποίησης, όπως προκύπτουν από δεκατέσσερις (14) τριαξονικές δοκιμές ρευστοποίησης στην άμμο Nevada.  
 Figure 5. Comparison of measurements to simulations in terms of liquefaction curves, as deduced from fourteen (14) triaxial liquefaction tests on Nevada sand.

Συμπεραίνεται ότι οι καμπύλες ρευστοποίησης που προκύπτουν από το προσομοίωμα συγκρίνονται πολύ ικανοποιητικά με αυτές που βασίζονται σε τριαξονικές δοκιμές.

## 7. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε ένα ελαστοπλαστικό προσομοίωμα Κρίσιμης Κατάστασης που διατυπώθηκε με στόχο την προσομοίωση της ανακυκλικής διάτμησης υπό μικρές, μέτριες και μεγάλες παραμορφώσεις με μια ομάδα παραμέτρων, ανεξαρτήτως αρχικών συνθηκών. Η σύγκριση προσομοιώσεων με

μετρήσεις από 15 δοκιμές συντονισμού στήλης εδάφους και 14 ανακυκλικές τριαξονικές δοκιμές ρευστοποίησης με έντονα διαφορετικές αρχικές συνθήκες τάσεων και δείκτη πόρων αποδεικνύει ότι ο στόχος αυτός είναι πλέον εφικτός στα πλαίσια πρακτικών εφαρμογών.

Στο παρόν άρθρο δεν γίνεται αναφορά στον τρόπο εκτίμησης των παραμέτρων του προσομοιώματος λόγω έλλειψης χώρου. Αναφορά στο θέμα αυτό, περισσότερες λεπτομέρειες για τις καταστατικές εξισώσεις, καθώς και εκτενέστερη παρουσίαση αναλυτικών προβλέψεων παρουσιάζονται από τους Papadimitriou et al. (2001).

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Arulmoli K., Muraleetharan K. K., Hossain M. M., Fruth L. S. (1992), "VELACS: VERification of Liquefaction Analyses by Centrifuge Studies; Laboratory Testing Program - Soil Data Report", Research Report, The Earth Technology Corporation.
- Been K., Jefferies M. G. (1985), "A state parameter for sands", *Geotechnique*, 35(2): 99-112.
- Dobry R., Vucetic M. (1987), "State-of-the-art report: Dynamic properties and response of soft clay deposits", *Proceedings, Intern. Symp. on Geotech. Engineering of Soft Soils, Mexico city*, 2: 51-87.
- Egglezos D. N., Bouckovalas G. D. (1999), "Permanent strain and pore pressure relations for cyclic loading of sand", *Proceedings, 2<sup>nd</sup> Intern. Conf. on Earthq. Geotech. Engineering, Lisbon*, 1: 131-136.
- Gajo A., Wood D. M. (1999), "Severn-Trent: a kinematic-hardening constitutive model: the q-p formulation", *Geotechnique*, 49(5): 595-614.
- Hardin B. O. (1978), "The nature of stress-strain behavior of soils", *State-of-the-art report, Proceedings, ASCE Specialty Conf. on Earthq. Engineering and Soil Dynamics, Pasadena*, 3-90.
- Hudson M., Idriss I. M., Beikae M. (1994), "QUAD4M: A computer program to evaluate the seismic response of soil structures using finite element procedures and incorporating a compliant base", UC Davis.
- Ishibashi I., Chen Y.-C., Jenkins J. T. (1988), "Dynamic shear modulus and fabric. part II: stress reversal", *Geotechnique*, 38(1):33-37.
- Ishihara K., Tatsuoka F., Yasuda S. (1975), "Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses", *Soils and Foundations*, 15(1): 29-44.
- Itasca Consulting Group Inc. (1996), *FLAC Version 3.3*, 708 South 3<sup>rd</sup> Str., Suite 310, Minneapolis, MN 55415, USA.
- Jefferies M. G. (1993), "Nor-Sand: a simple critical state model for sand", *Geotechnique*, 43(1): 91-103.
- Ladd C. C., Foott R., Ishihara K., Schlosser F., Poulos H. G. (1977), "Stress-deformation and strength characteristics", *State-of-the-art report, Proceedings, 9<sup>th</sup> Intern. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo*, 2: 421-494.
- Li X. S., Dafalias Y. F. (2000), "Dilatancy for cohesionless soils", *Geotechnique*, 50(4): 449-460.
- Manzari M. T., Dafalias Y. F. (1997), "A critical state two-surface plasticity model for sands", *Geotechnique*, 47(2): 255-272.
- Παπαδημητρίου Α. Γ. (1999), "Ελαστοπλαστική προσομοίωση της μονοτονικής και δυναμικής συμπεριφοράς εδαφών", *Διακτορική Διατριβή, Τομέας Γεωτεχνικής Ε.Μ.Π.*
- Papadimitriou A. G., Bouckovalas G. D., Dafalias Y.F. (1999), "Use of elastoplasticity to simulate cyclic sand behavior", *Proceedings, 2<sup>nd</sup> Intern. Conf. on Earthq. Geotech. Engineering, Lisbon*, 1: 125-130.
- Papadimitriou A. G., Bouckovalas G. D., Dafalias Y. F. (2001), "A plasticity model for sand under small and large cyclic strains", *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, ASCE*, (υπό εκτύπωση)
- Παπαδημητρίου Α. Γ., Παπαγεωργίου Ε. Ο., Ανδριανόπουλος Κ. Ι. (2001), "Επίδραση του ποσοστού λεπτόκοκκων στη μονοτονική συμπεριφορά μη συνεκτικών εδαφών", *Πρακτικά, 4<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής, Αθήνα* (υπό εκτύπωση).
- Popescu R., Prevost J. H. (1995), "Comparison between VELACS numerical 'Class A' simulations and centrifuge experimental soil test results", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 14(2): 79-92.
- Ramberg W., Osgood W. R. (1943), "Description of stress-strain curve by three parameters", *Technical Note 902, Nat. Advisory Comm. for Aeronautics, Washington D.C.*
- Rowe P. W. (1962), "The stress-dilatancy relation for static equilibrium of an assembly of particles in contact", *Proceedings of the Royal Society, A269*: 500-527.
- Vucetic M. (1994), "Cyclic threshold shear strains in soils", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 120(12): 2208-2228.
- Vucetic M., Dobry R. (1991), "Effect of soil plasticity on cyclic response", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 117(1): 89-107.
- Wood D. M., Belkheir K., Liu D. F. (1994), "Strain softening and state parameter for sand modelling", *Geotechnique*, 44(2): 335-339.