

# Ελαστο-πλαστικό Καταστατικό Προσομοίωμα για Ανισοτροπική Άργιλο

## Elasto-plastic Constitutive Model for Anisotropic Clay

ΝΤΑΚΟΥΛΑΣ, Π.  
YU, S.

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Επίκ. Καθηγητής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας  
Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Taipei, Taiwan

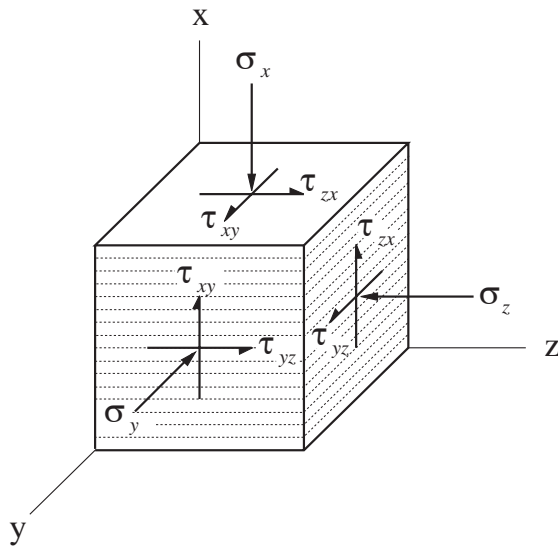
**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Παρουσιάζεται ένα ελαστο-πλαστικό καταστατικό προσομοίωμα για άργιλο με εγκάρσια ισοτροπία. Η ελαστική συμπεριφορά προσομοιώνεται με ένα εγκάρσια ισοτροπικό προσομοίωμα το οποίο λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση των μέτρων ελαστικότητας από την εντατική κατάσταση. Για την πλαστική συμπεριφορά προτείνονται εκφράσεις για τις επιφάνειες αστοχίας, πλαστικού δυναμικού, διαρροής και τον νόμο κράτυνσης. Για ισοτροπικό υλικό, οι εκφράσεις των μέτρων ελαστικότητας μεταπίπτουν σε εκείνες των Lade and Nelson (1987), ενώ το πλαστικό προσομοίωμα μεταπίπτει στο προσομοίωμα των Lade and Kim (1988). Συγκρίσεις των προβλέψεων και των πειραματικών αποτελεσμάτων σε δοκίμια αργίλου δίδουν καλή συμφωνία.

**ABSTRACT:** An elasto-plastic constitutive model for cross-anisotropic clay is presented. The elastic behavior is modeled with a cross-anisotropic model that considers the stress-dependency of elastic moduli based on energy conservation. For the plastic behavior, new expressions for the failure surface, the plastic potential surface, the yielding surface and the hardening law are proposed. For isotropic material, the elastic moduli reduce to those by Lade and Nelson (1987) and the plastic model reduces to the model by Lade and Kim (1988). Comparisons between predictions and experimental results on clay specimens in triaxial compression, triaxial extension and torsional simple shear are in good agreement.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρόλο που πολλά καταστατικά προσομοιώματα αναπτύχθηκαν για ισοτροπικά αργιλικά εδάφη, τα περισσότερα εδάφη στην φυσική τους κατάσταση παρουσιάζουν κάποιο βαθμό ανισοτροπίας. Η ανισοτροπία αυτή είναι δυνατόν να οφείλεται σε διάφορους λόγους, όπως στον τρόπο εναπόθεσης των ιζημάτων που δημιουργεί ένα προτιμώμενο προσανατολισμό της εσωτερικής δομής, σε ανισοτροπική αρχική εντατική κατάσταση στερεοποίησης, και σε πολύπλοκες γεωλογικές διεργασίες που υπέστη ο εδαφικός σχηματισμός στο παρελθόν. Συνήθως τα ανισοτροπικά εδάφη έχουν διαφορετικές ιδιότητες στην κατακόρυφη και οριζόντια κατεύθυνση (δηλαδή παρουσιάζουν εγκάρσια ισοτροπία). Οι σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης και τα χαρακτηριστικά της αντοχής των ανισοτροπικών εδαφών διαφέρουν σημαντικά εκείνων των ισοτροπικών.

Το άρθρο αυτό παρουσιάζει ένα ελαστο-πλαστικό καταστατικό προσομοίωμα για εγκάρσια ισοτροπική άργιλο. Το προσομοίωμα βασίζεται σε μία σειρά πειραματικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης, εφελκυσμού και διάτμησης επί ανισοτροπικά στερεοποιημένων αργιλικών δοκιμίων κυλινδρικού και σωληνοειδούς σχήματος. Οι πειραματικές δοκιμές καταδεικνύουν ότι η άργιλος παρουσιάζει ανισοτροπική συμπεριφορά τόσο στην ελαστική περιοχή όσο και στην πλαστική. Το προτεινόμενο προσομοίωμα είναι επέκταση του ισοτροπικού προσομοιώματος των Lade and Kim (1988). Περιλαμβάνει (α) ένα γενικευμένο ελαστικό προσομοίωμα, το οποίο λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση των μέτρων ελαστικότητας από την εντατική κατάσταση και την κατεύθυνση και (β) ένα ανισοτροπικό πλαστικό προσομοίωμα αποτελείται από το κριτήριο αστοχίας, την επιφάνεια πλαστικού δυναμικού, την επιφάνεια διαρροής και τον νόμο κράτυνσης.



Σχήμα 1. Διεύθυνση της ανισοτροπίας και τάσεις επί κυβικού εδαφικού δοκιμίου.  
Figure 1. Orientation of cross-anisotropy and stresses on a cubical soil Element

## 2. ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Η ελαστική συμπεριφορά εγκάρσια ισοτροπικών υλικών καθορίζεται με 5 παραμέτρους (Wood 1991). Ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας στην οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση,  $n = E_h / E_v$ , είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως ένα μέτρο του βαθμού ανισοτροπίας. Τυπικές τιμές του λόγου  $n$  κυμαίνονται μεταξύ: (α) 0.9-1.35 για κανονικά ή ελαφρά υπερστερεοποιημένες αργίλους (β) 1.35 - 2.4 για ισχυρά υπερστερεοποιημένες αργίλους και (γ) 1.38 - 4.2 για ξηραμένες αργίλους. Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, τα μέτρα ελαστικότητας θεωρούνται συναρτήσεις της εντατικής κατάστασης, ενώ ο λόγος  $n = E_h / E_v$  και οι λόγοι Poisson θεωρούνται σταθεροί.

Στο Σχήμα 1 δίδεται ένα σύστημα συντεταγμένων με κύριους άξονες παράλληλους προς εκείνους του εγκάρσια ισοτροπικού υλικού, το οποίο παρουσιάζει ταυτόσημη συμπεριφορά στις δύο οριζόντιες κατευθύνσεις, και διαφορετική στην κατακόρυφη κατεύθυνση. Η σχέση των παραμορφώσεων  $\Delta \varepsilon_{ij}$  και ενεργών τάσεων  $\Delta \sigma'_{ij}$  δίδεται από τον γενικευμένο νόμο του Hooke ως εξής:

$$\Delta \varepsilon_{ij} = C \Delta \sigma'_{ij} \quad (1)$$

όπου

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \left\{ \Delta \varepsilon_x \quad \Delta \varepsilon_y \quad \Delta \varepsilon_z \quad \Delta \varepsilon_{xy} \quad \Delta \varepsilon_{yz} \quad \Delta \varepsilon_{zx} \right\}^T$$

$$\Delta \sigma = \left\{ \Delta \sigma'_x \quad \Delta \sigma'_y \quad \Delta \sigma'_z \quad \Delta \tau_{xy} \quad \Delta \tau_{yz} \quad \Delta \tau_{zx} \right\}^T$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_v} & \frac{-\nu_{vh}}{E_v} & \frac{-\nu_{vh}}{E_v} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{vh}}{E_v} & \frac{1}{E_h} & \frac{-\nu_{hh}}{E_h} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{vh}}{E_v} & \frac{-\nu_{hh}}{E_h} & \frac{1}{E_h} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{hv}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1+\nu_{hh}}{E_h} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2G_{hv}} \end{bmatrix}$$

$E_v$  = μέτρο Young στην κατεύθυνση  $x$

$E_h$  = μέτρο Young στις κατευθύνσεις  $y$  και  $z$

$G_{hv}$  = μέτρο διάτμησης στα κατακόρυφα επίπεδα

$\nu_{vh}$  = λόγος Poisson παραμόρφωσης στην κατεύθ.  $y$  ( $z$ ) από παραμόρφωση στην  $x$

$\nu_{hh}$  = λόγος Poisson παραμόρφωσης στην κατεύθ.  $y$  ( $z$ ) από παραμόρφωση στην κατεύθ.  $z$  ( $y$ ).

Για ελαστική συμπεριφορά χωρίς απώλειες ενέργειας σε θερμότητα, το καθαρό έργο που αναλώνεται σε ένα κύκλο φόρτισης είναι μηδέν. Κάνοντας χρήση της συνθήκης αυτής, αποδεικνύεται ότι (Dakoulas and Yu 1995)

$$E_v = M p_a.$$

$$\left[ \left( \frac{I_1^*}{p_a} \right)^2 + 6 \frac{1+\nu_{hh}}{1-2\nu_{hh}} \frac{J_2^*}{p_a} + \frac{3(n-m^2)}{1-2\nu_{hh}} \left( \frac{\sigma'_x}{p_a} \right)^2 \right]^\lambda \quad (2)$$

όπου

$$n = E_h / E_v \quad (3)$$

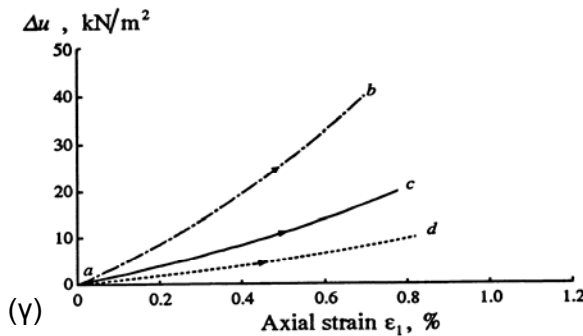
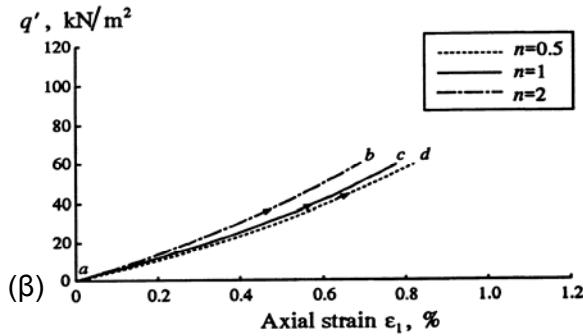
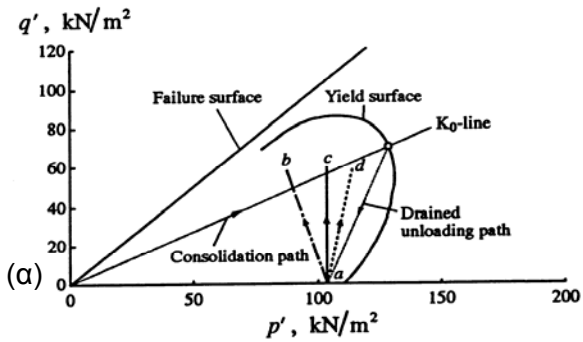
$$m = n \nu_{vh} / \nu_{hh} \quad (4)$$

$$I_1^* = m \sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z \quad (5)$$

$$J_2^* = \frac{1}{2} (m \sigma'_x)^2 + \frac{1}{2} (\sigma'_y)^2 + \frac{1}{2} (\sigma'_z)^2 + (\alpha \tau_{xy})^2 + (\tau_{yz})^2 + (\tau_{zx})^2 \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{E_h}{2(1+\nu_{hh})G_{hv}} \quad (7)$$

και  $\lambda$ ,  $M$  = σταθερές.



Σχήμα 2. Ελαστική επαναφόρτιση σε τριαξονική δοκιμή υπό αστράγγιστες συνθήκες αργίλου με  $n = 0.5, 1$  και  $2$ .

Figure 2. Undrained elastic reloading in triaxial compression of clay with  $n = 0.5, 1$  και  $2$ .

Σημειώνεται ότι για ιστροπικό έδαφος, η (2) μεταπίπτει στην ιστροπική σχέση των Lade and Nelson (1987).

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η επίδραση της ανισοτροπίας για ελαστική συμπεριφορά κατά την επαναφόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες. Το Σχήμα 2α παρουσιάζει την τασική όδευση κατά την στερεοποίηση με συνθήκες  $K_0$ , την αποφόρτιση και επαναφόρτιση. Για  $n = 1$  (ιστροπικό έδαφος) η όδευση είναι κατακόρυφη, για  $n = 0.5$  κατευθύνεται προς δεξιά, ενώ για  $n = 2$  προς αριστερά. Το Σχήμα 2β παρουσιάζει τις σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης, οι οποίες είναι καμπύλες λόγω της εξάρτησης των μέτρων ελαστικότητας από την εντατική κατάσταση. Τέλος, το Σχήμα 2γ δείχνει ότι ο βαθμός ανισοτροπίας  $n$  επηρεάζει σημαντικά την ανάπτυξη υπερπίεσης  $\Delta u$ .

### 3. ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Το ανισοτροπικό πλαστικό προσομοίωμα υποθέτει ότι η συμπεριφορά του υλικού είναι ανεξάρτητη από τον χρόνο.

**Κριτήριο αστοχίας:** Η αστοχία καθορίζεται από την κατάσταση στην οποία ο λόγος των κυρίων ενεργών τάσεων  $\sigma'_1/\sigma'_3$  γίνεται μέγιστος. Ο λόγος αυτός γίνεται μέγιστος για ιστροπικές αργίλους σε αξονική παραμόρφωση 12-15% και για ανισοτροπικές αργίλους σε αξονική παραμόρφωση  $< 12\%$ . Η αποκλίνουσα τάση  $q = \sigma'_1 - \sigma'_3$  λαμβάνει την μέγιστη τιμή αρκετά ενωρίτερα από τον λόγο των τάσεων  $\sigma'_1/\sigma'_3$  και συνεπώς δεν υποδηλώνει την πραγματική αστοχία (Lade and Kim 1988). Η προτεινόμενη επιφάνεια αστοχίας έχει την μορφή

$$\left(\frac{I_1'^3}{I_3'} - N_f\right) \left(\frac{I_1'^3}{27I_3''}\right)^{w_f} \left(\frac{I_1'}{p_a}\right)^{m_f} = \eta_f \quad (8)$$

όπου

$$I_1 = \sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z \quad (9)$$

$$I_1' = k_f \sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z \quad (10)$$

$$I_3' = k_f \sigma'_x \sigma'_y \sigma'_z + 2k_s^2 \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - (k_f \sigma'_x \tau_{yz}^2 + k_s^2 \sigma'_y \tau_{zx} + k_s^2 \sigma'_z \tau_{xy}) \quad (11)$$

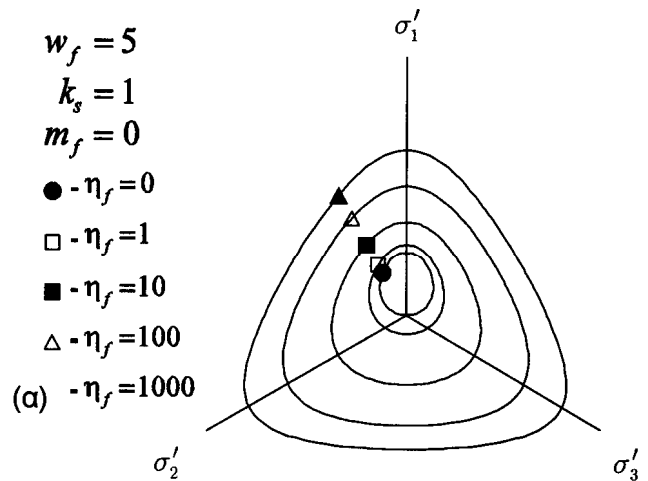
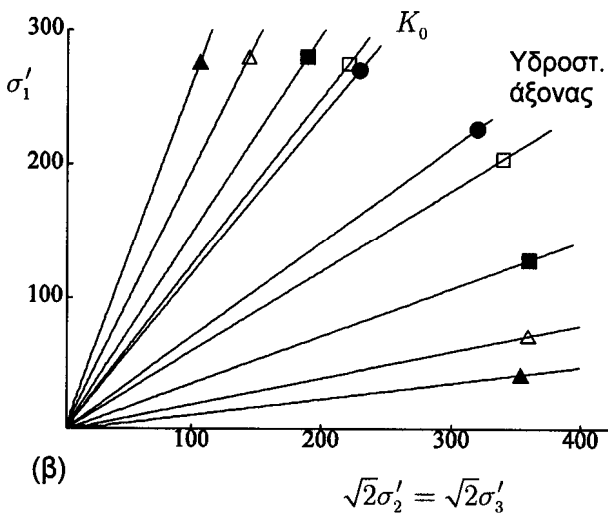
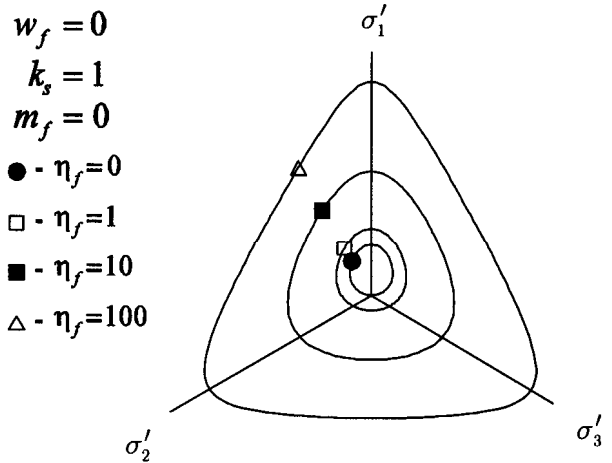
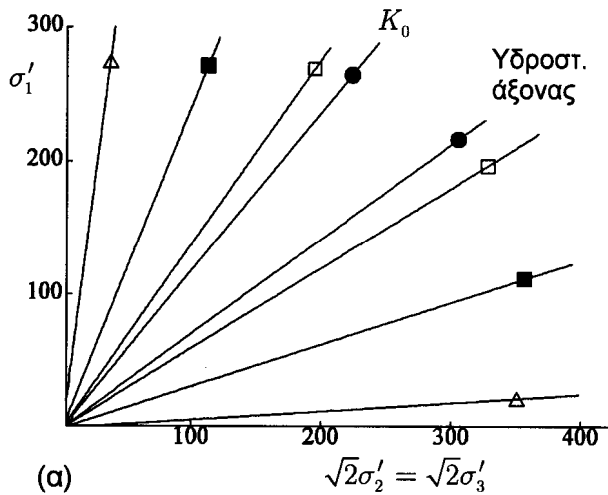
$$I_1'' = \sigma'_x + k_f \sigma'_y + k_f \sigma'_z \quad (12)$$

$$I_3'' = k_f^2 \sigma'_x \sigma'_y \sigma'_z \quad (13)$$

$$k_f = \frac{2(K_0^{2/3} - K_0)}{1 - K_0^{2/3}} \quad (14)$$

$$N_f = (2 + k_f)^3 / k_f \quad (15)$$

και καθορίζεται με 4 παραμέτρους:  $w_f$ ,  $m_f$ ,  $\eta_f$  και  $k_s$ . Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται η επιφάνεια αστοχίας στο τριαξονικό και οκταεδρικό επίπεδο για (α)  $w_f = 0$  και (β)  $w_f = 5$ , και για  $\eta_f = 0, 1, 10, 100$  και  $1000$ . Η τιμή του  $w_f$  καθορίζει την καμπυλότητα του «τριγωνικού» σχήματος στο επίπεδο π. Η επιφάνεια αστοχίας είναι πάντα κυρτή και η καμπυλότητα της αυξάνει με την τιμή του  $m_f$ . Για  $m_f = 0$ , οι γραμμές της επιφάνειας αστοχίας στο τριαξονικό επίπεδο είναι ευθείες. Για ιστροπικό έδαφος το προτεινόμενο κριτήριο αστοχίας μεταπίπτει στο κριτήριο του Lade για  $w_f = 0$  (Lade and Kim 1988).



Σχήμα 3. Επιφάνειες αστοχίας στο τριαξονικό και οκταεδρικό επίπεδο (α)  $w_f = 0$  (β)  $w_f = 5$   
 Figure 3. Failure surfaces in the triaxial and octahedral plane (α)  $w_f = 0$  (β)  $w_f = 5$

**Νόμος πλαστικής ροής:** Η μεταβολή της πλαστικής παραμόρφωσης δίδεται από ένα μη-συζευγμένο νόμο πλαστικής ροής:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma'_{ij}} \quad (16)$$

όπου  $d\lambda$  είναι σταθερά ( $d\lambda > 0$ ) και  $g$  είναι η επιφάνεια πλαστικού δυναμικού. Τα αποτελέσματα πειραματικών ερευνών δείχνουν ότι το σχήμα της επιφάνειας πλαστικού δυναμικού για ιστροπική άργιλο των Kim and Lade (1984) είναι κατάλληλο για ανισοτροπική άργιλο μόνο για τασικές οδεύσεις που λαμβάνουν χώρα εκτός της περιοχής μεταξύ της γραμμής  $K_0$  και του υδροστατικού άξονα. Αυτό επιβεβαιώνεται στο Σχήμα 4 όπου παρουσιάζονται τασικές

οδεύσεις στο τριαξονικό επίπεδο από 6 τριαξονικές δοκιμές για τις οποίες δίδονται τα διανύσματα κατευθύνσεως των πλαστικών παραμορφώσεων  $\Delta\varepsilon^p$ . Παρατηρείται ότι αν γίνει μία μετατόπιση της ιστροπικής επιφάνειας πλαστικού κατά ένα άνυσμα  $d_{ij}$  ώστε ο επιμήκης άξονας να παραμείνει παράλληλος προς τον υδροστατικό, τότε τα διανύσματα κατευθύνσεως των  $\Delta\varepsilon^p$  γίνονται κάθετα στην νέα επιφάνεια  $g$ . Έτσι η επιφάνεια  $g$  λαμβάνει την μορφή

$$g = \left( \Psi_1 \frac{\bar{I}_1^3}{\bar{I}_3} - \frac{\bar{I}_1^2}{\bar{I}_2} + \Psi_2 \right) \left( \frac{\bar{I}_1}{p_a} \right)^\mu \quad (17)$$

όπου  $\bar{I}_1$ ,  $\bar{I}_2$  και  $\bar{I}_3$  είναι οι αναλλοίωτες ενός τροποποιημένου διανύσματος τάσεων με το οποίο η επιφάνεια  $g$  μετατοπίζεται παράλληλα προς τον υδροστατικό άξονα. Στο Σχήμα 5 δίδεται η αρχική επιφάνεια διαρροής, μετά από ανισοτροπική στερεοποίηση στο σημείο A υπό συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης. Εν συνεχεία εκτελείται δοκιμή τριαξονικού εφελκυσμού υπό αστράγγιστες συνθήκες, στην οποία η τάση  $\sigma_x$  μειώνεται ενώ οι τάσεις  $\sigma_y = \sigma_z$  είναι σταθερές. Κατά την όδευση AB η συμπεριφορά είναι καθαρά ελαστική. Από το σημείο B και μετά αρχίζει η πλαστική παραμόρφωση, κατά την οποία η επιφάνεια διαρροής διαστέλλεται. Η προτεινόμενη ανισοτροπική επιφάνεια πλαστικού δυναμικού δημιουργείται από μετατόπιση της επιφάνειας πλαστικού δυναμικού του ιστροπικού προσομοιώματος κατά μία απόσταση ίση προς την απόσταση του σημείου B από τον υδροστατικό άξονα.

**Επιφάνειες διαρροής και κράτυνση:** Οι επιφάνειες διαρροής  $f_p$  αντιστοιχούν σε σταθερή τιμή του πλαστικού έργου  $W_p$  και δίδονται από τη σχέση

$$f_p = f'_p(\sigma'_{ij}) - f''_p(W_p) \quad (18)$$

όπου

$$f''_p = \left(\frac{1}{D}\right)^{1/\rho} \left(\frac{W_p}{p_a}\right)^{1/\rho} \quad (\text{για κράτυνση}) \quad (19)$$

$$f'_p = \left(\Psi_1 \frac{\hat{I}_1^3}{\hat{I}_3} - \frac{\hat{I}_1^2}{\hat{I}_2}\right) \left(\frac{I_1}{p_a}\right)^h e^q \quad (20)$$

$$\hat{I}_1 = k_y \sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z \quad (21)$$

$$\hat{I}_2 = \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 - (k_y \sigma'_x \sigma'_y + \sigma'_y \sigma'_z + k_y \sigma'_z \sigma'_x)$$

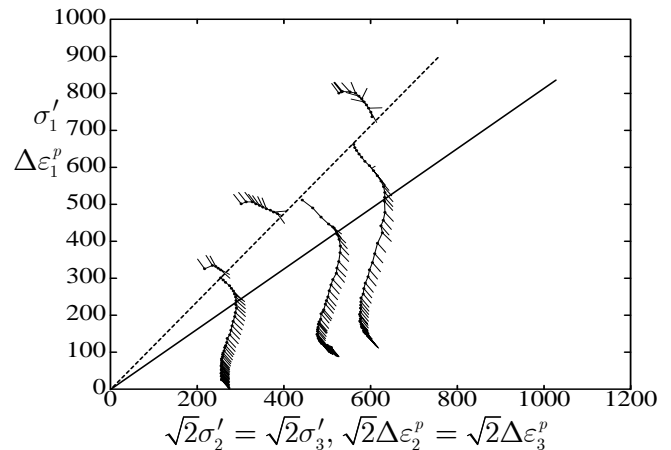
$$\hat{I}_3 = k_y \sigma'_x \sigma'_y \sigma'_z + 2\tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} - (k_y \sigma'_x \tau_{yz}^2 + \sigma'_y \tau_{zx}^2 + \sigma'_z \tau_{xy}^2)$$

$$q = \frac{\alpha S}{1 - (1 - \alpha)S} \quad (22)$$

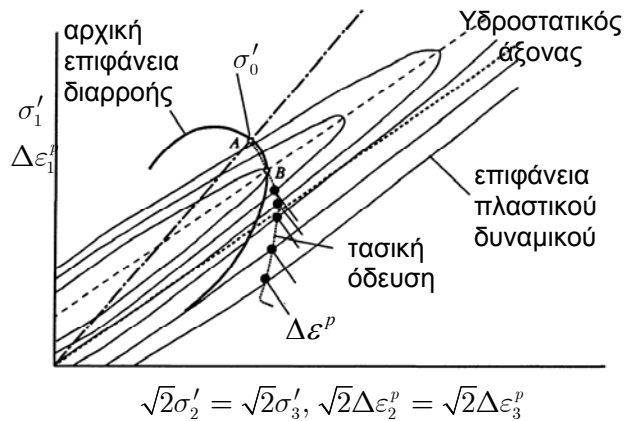
$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 (1 - \cos \theta) / 2 \quad (23)$$

$$S = \frac{1}{\eta_f} \left(\frac{I_1^3}{I_3} - N_f\right) \left(\frac{I_1^3}{27 I_3^2}\right)^{w_f} \left(\frac{I_1}{p_a}\right)^{m_f} \quad (24)$$

και  $D$ ,  $\rho$ ,  $h$ ,  $k_y$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  είναι σταθερές,  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ της τάσης  $\sigma'$  και της κατεύθυνσης της  $\sigma'_1$ , και  $p_a$  είναι η ατμοσφαιρική πίεση. Σε μονοδιάστατη συμπί-



Σχήμα 4. Κατεύθυνση της μεταβολής των πλαστικών παραμορφώσεων  
Figure 4. Direction of plastic deformation increment.



Σχήμα 5. Επιφάνεια πλαστικού δυναμικού  
Figure 5. Plastic potential surface

-εση, το έργο  $W_p$  δίδεται από την σχέση

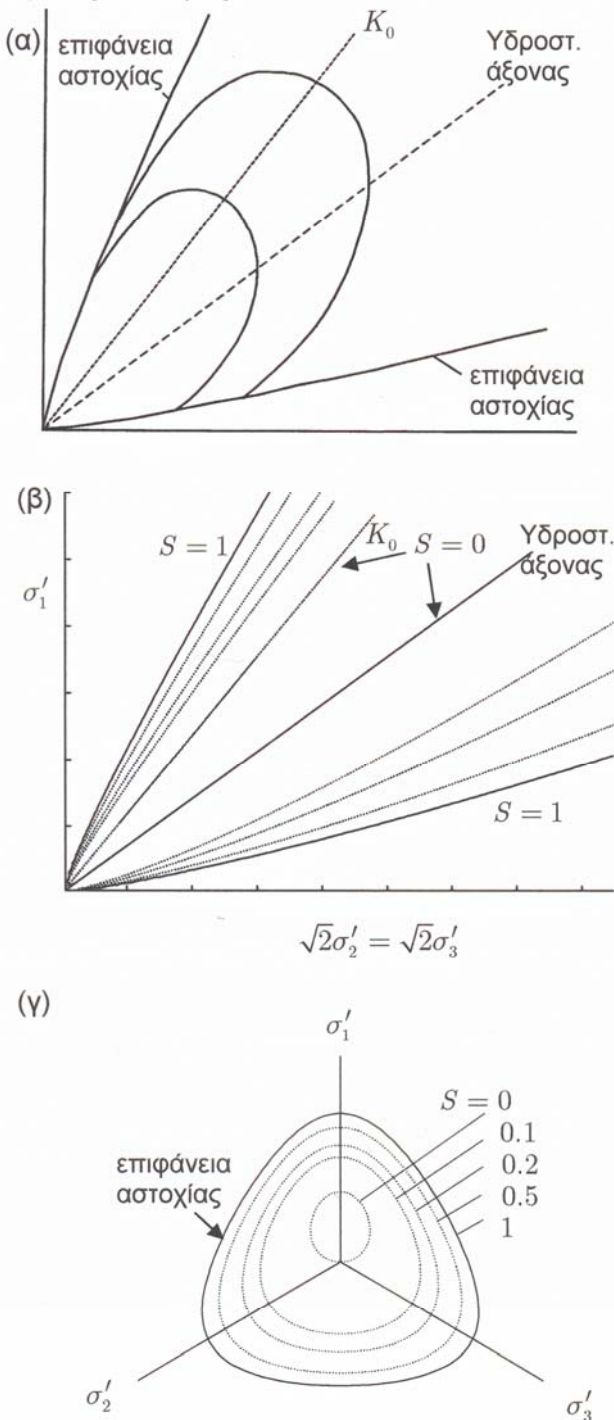
$$W_p = C p_a \left(\frac{I_1}{D}\right)^p \quad (25)$$

Στο Σχήμα 6 δίδονται οι επιφάνειες διαρροής στο τριαξονικό και οκταεδρικό επίπεδο για διάφορες τιμές της παραμέτρου  $S$ . Για  $S=0$ , το δοκίμιο ευρίσκεται στην αρχική επιφάνεια διαρροής, που διέρχεται από την γραμμή  $K_0$  και τον υδροστατικό άξονα. Για  $S=1$ , η επιφάνεια διαρροής εφάπτεται της επιφάνειας αστοχίας.

#### 4. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

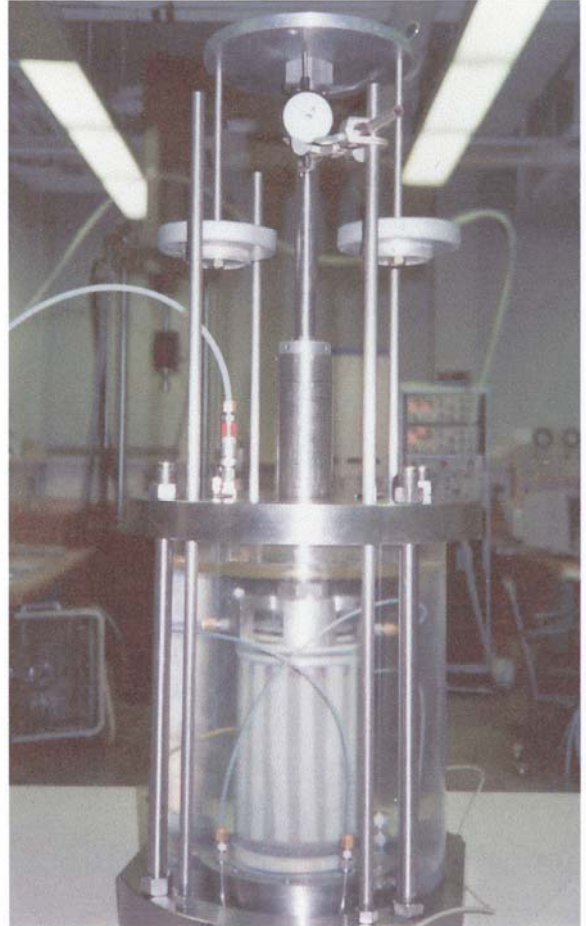
Το πειραματικό πρόγραμμα περιλαμβάνει μία σειρά εργαστηριακών δοκιμών σε ομογενοποιημένα δοκίμια θαλάσσιας αργίλου από τον κόλπο του Μεξικού. Η άργιλος έχει όριο υδαρότητας LL=74%, δείκτη πλασιμότητας PI=44%, ειδική βαρύτητα  $G=2.76$ , γωνία διατμητικής αντοχής  $\phi' = 22^\circ$ , και συντελεστή

ουδέτερης ώθησης  $K_0 = 0.59$ . Το πρόγραμμα περιλαμβάνει δοκιμές προσδιορισμού των λόγων Poisson, δοκιμές μονοδιάστατης συμπίεσης, τριαξονικές δοκιμές φόρτισης και αποφόρτισης υπό συνθήκες στράγγισης, τριαξονικές δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού υπό αστράγγιστες συνθήκες, και δοκιμές στροφικής απλής διάτμησης υπό αστράγγιστες συνθήκες.



Σχήμα 6. Επιφάνειες διαρροής (α),(β) στο τριαξονικό επίπεδο (γ) στο οκταεδρικό επίπεδο  
Figure 6. Yielding surfaces (a),(b) in the triaxial plane (c) in the octahedral plane.

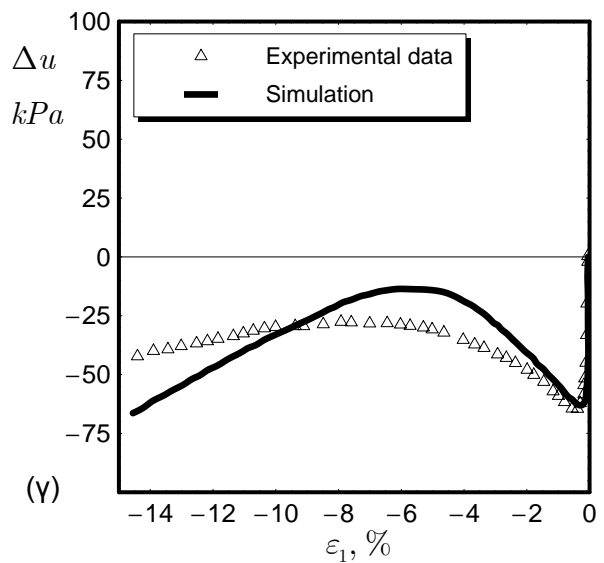
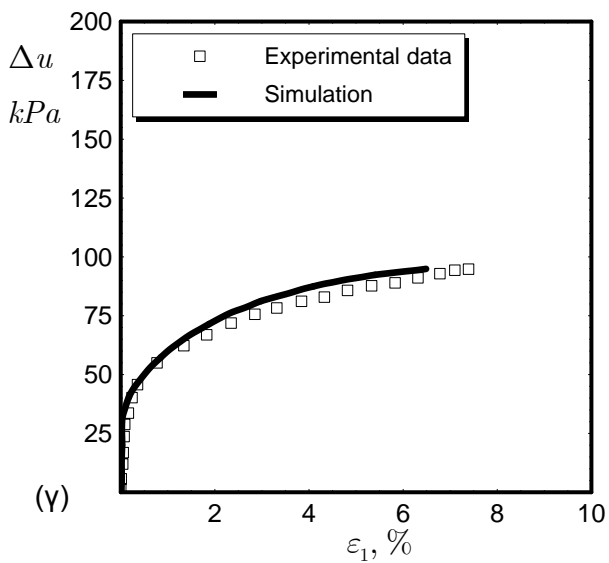
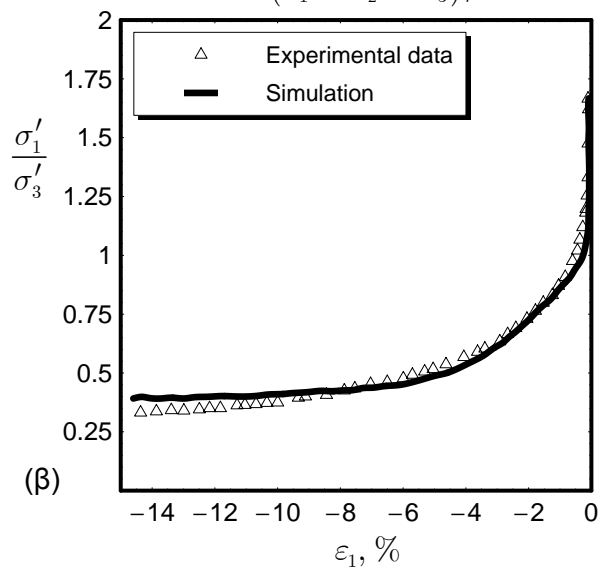
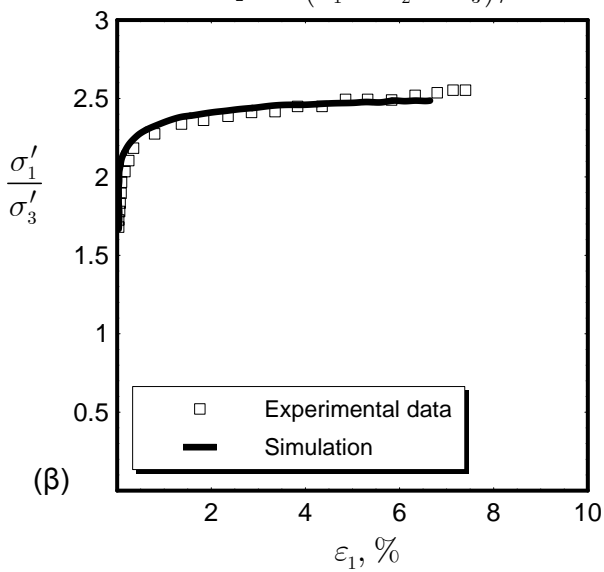
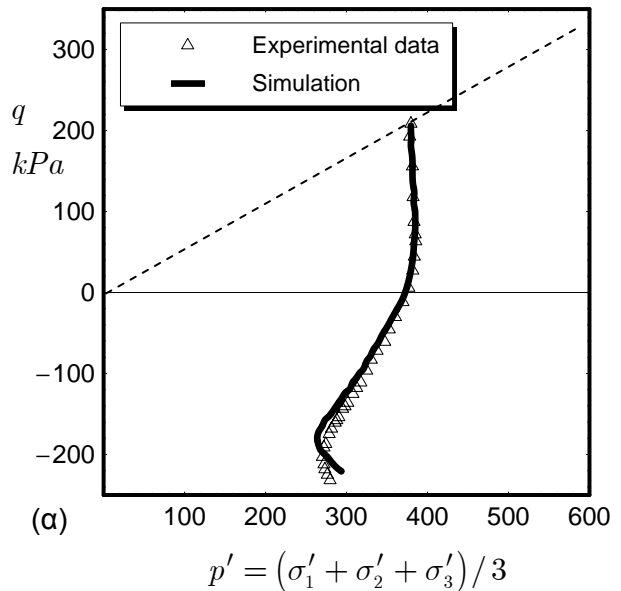
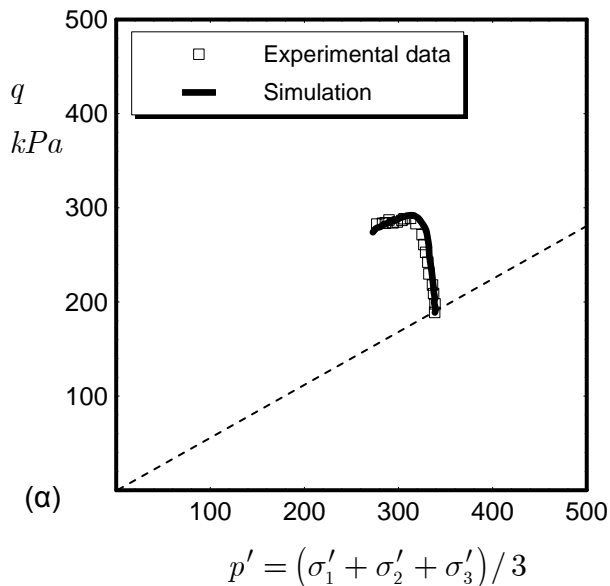
Οι συμβατικές τριαξονικές δοκιμές έγιναν σε κυλινδρικά δοκίμια, ενώ οι δοκιμές απλής διάτμησης σε δοκίμια σωληνοειδούς σχήματος. Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται η κυψέλη της τριαξονικής συσκευής και στην Εικόνα 2 ένα παραμορφωμένο αργιλικό δοκίμιο μετά από δοκιμή στροφικής απλής διάτμησης.



Εικόνα 1. Κυψέλη τριαξονικής συσκευής  
Picture 1. Triaxial cell



Εικόνα 2. Παραμορφωμένο δοκίμιο αργίλου σωληνοειδούς σχήματος  
Picture 2. Deformed hollow cylinder clay specimen



Σχήμα 7. Δοκιμή τριαξονικής θλίψης: (α) τασική όδευση, (β) λόγος τάσεων (γ) υπερπίεση  
 Figure 7. Undrained triaxial compression (a) stress path, (b) stress ratio (c) pore pressure

Σχήμα 8. Δοκιμή τριαξ. εφελκυσμού: (α) τασική όδευση, (β) λόγος τάσεων (γ) υπερπίεση  
 Figure 8. Undrained triaxial extension (a) stress path, (b) stress ratio (c) pore pressure



Πίνακας 1. Παράμετροι του προσομοιώματος  
Table 1. Model parameters

Ελαστική συμπεριφορά	
$M = 3.60$	$m = 1.39$
$\lambda = 1.29$	$n = 1.26$
$\nu_{hh} = 0.18$	$\alpha = 2.39$
Κριτήριο αστοχίας	
$k_s = 1.12$	$m_f = 0.89$
$w_f = 4.1$	$\eta_f = 208$
Επιφάνεια πλαστικού δυναμικού	
$\mu = 2.26$	$\Psi_2 = -3.048$
Επιφάνεια διαρροής	
$k_y = 0.6$	$\alpha_1 = 0.1$
$h = 1.65$	$\alpha_2 = 3.9$
Νόμος κράτυνσης	
$C = 0.023$	$p = 1.19$

Στον Πίνακα 1 δίδονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιώματος που προέκυψαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του πειραματικών δοκιμών. Επιπλέον παράμετροι που αναφέρονται στο άρθρο, προκύπτουν από τις παραμέτρους του Πίνακα 1. Κατά την εφαρμογή του προσομοιώματος στην πράξη, οι ανωτέρω παράμετροι προσδιορίζονται από συμβατικές δοκιμές.

Οι παράμετροι του Πίνακα 1 χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς ανισοτροπικής αργίλου σε μία δοκιμή τριαξονικής θλίψης και μία δοκιμή εφελκυσμού υπό αστράγγιστες συνθήκες. Στά Σχήματα 7 και 8 παρουσιάζονται η τασική όδευση, ο λόγος των τάσεων  $\sigma'_1/\sigma'_3$  και η υπερπίεση  $\Delta u$  ως προς την παραμόρφωση  $\varepsilon_1$  για την δοκιμή τριαξονικής θλίψης και εφελκυσμού αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι οι προβλέψεις του προσομοιώματος είναι σε καλή συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα για τις δύο δοκιμές, με την μέγιστη απόκλιση να εμφανίζεται στην πρόβλεψη της  $\Delta u$  σε μεγάλες παραμορφώσεις της δοκιμής εφελκυσμού. Παρομοίως καλή συμφωνία παρουσιάζεται επίσης και σε άλλες τριαξονικές δοκιμές θλίψης και εφελκυσμού, και σε δοκιμές απλής διάτμησης, για διαφορετικά επίπεδα ενεργού τάσης στερεοποίησης.

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Παραμετρικές αναλύσεις ελαστικής συμπεριφοράς με το προτεινόμενο καταστατικό προσομοίωμα για εγκάρσια ιστροπική άργιλο έδειξαν την μεγάλη επίδραση της ανισοτροπίας στην δημιουργία υπερπίεσης και στην τασική όδευση. Για ιστροπική άργιλο, η σχέση εξάρτησης του ελαστικού μέτρου από την εντατική κατάσταση μεταπίπτει σε εκείνη των Lade and Nelson (1987).

Για την πλαστική συμπεριφορά προτείνονται γενικεύσεις των σχέσεων αστοχίας, πλαστικής ροής, διαρροής και κράτυνσης του ιστροπικού προσομοιώματος των Lade and Kim (1988). Συγκρίσεις μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των αριθμητικών προβλέψεων δοκιμών τριαξονικής θλίψης, εφελκυσμού και απλής διάτμησης δείχνουν καλή συμφωνία. Το ελαστο-πλαστικό προσομοίωμα για ανισοτροπική άργιλο αποτελείται από 18 παραμέτρους, που προσδιορίζονται με συμβατικές δοκιμές.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Dakoulas, P. and Yu, S. (1995), "Stress-Dependency of Elastic Moduli for Cross-Anisotropic Soils", *Geotechnique*, 45(2), 325-332.
- Lade, P. V. and Nelson, R. B. (1987). "Modelling the Elastic Behavior of Granular Materials," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geotechnics*, 11, 521-542.
- Kim, M. K. Lade, and P. V. (1988). "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials - I. Plastic Potential Function," *Computers and Geotechnics* 5, 307-324.
- Lade, P. V. and Kim, M. K. (1988) "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials - II. Yield Criterion and Plastic Work Contours," *Computers and Geotechnics*, 6, 13-29.
- Lade, P. V. and Kim, M. K. (1988). "Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials-III. Comparisons with Experimental Data," *Computers and Geotechnics* 6, 31-47.
- Yu, S. and Dakoulas, P. (1993), "General Stress-Dependent Elastic Moduli for Cross-Anisotropic Soils", *J of Geotechn. Engineering, ASCE*, 119(10), 1568-1586.
- Wood, D. M. (1991). *Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics*. Cambridge University Press.