

## Εργαστηριακή διερεύνηση της διατμητικής αντοχής υπολειμματικών γεωυλικών σε ακόρεστες συνθήκες

Laboratory investigation of the shear strength of residual soils in unsaturated conditions

ΧΑΤΖΗΓΩΓΟΣ, Ν. Π. Τεχνικός Γεωλόγος, MSc-DIC.  
ΜΑΚΕΔΩΝ, Θ. Τεχνικός Γεωλόγος, PhD, Α.Π.Θ.  
ΔΗΜΟΠΟΥΛΟΣ, Γ. Γεωλόγος, Καθηγητής, Α.Π.Θ.  
ΤΣΟΤΣΟΣ, Σ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής, Α.Π.Θ.  
ΧΡΗΣΤΑΡΑΣ, Β. Γεωλόγος, Καθηγητής, Α.Π.Θ.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Οι μηχανισμοί αστοχίας σε τεχνητά πρηνή επηρεάζονται καθοριστικά από την παρουσία υπολειμματικών εδαφών των οποίων η μηχανική συμπεριφορά εξαρτάται από το βαθμό κορεσμού τους. Στην παρούσα εργασία διερευνάται η διατμητική αντοχή σε ακόρεστες συνθήκες ενός υπολειμματικού υλικού από πλήρως αποσασθρωμένα γνευσιακά πετρώματα, η παρουσία των οποίων έχει συνδεθεί με σειρά αστοχιών τεχνητών πρηνών μετά τη διάνοιξή τους. Για το σκοπό αυτό εκτελέστηκε ένα πρόγραμμα τριαξονικών δοκιμών CD με έλεγχο της πίεσης του αέρα ( $u_a$ ) και του νερού ( $u_w$ ) των πόρων στο δοκίμιο, έτσι ώστε να προσομοιώνεται η τιμή της επί τόπου αναπτυσσόμενης μύζησης ( $u_a - u_w$ ) σε ακόρεστες συνθήκες.

**ABSTRACT:** The failure mechanisms in cut slopes are strongly affected by the presence of residual soils, whose mechanical behaviour is strongly depended on their degree of saturation. This paper investigates the shear strength in unsaturated conditions of a residual soil derived from the in situ weathering of gneissous rocks, the presence of which has been linked to a series of cut slope failures. For this purpose a laboratory testing program was performed, that included a series of matric suction controlled consolidated drained triaxial tests.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα υπολειμματικά εδάφη παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον αναφορικά με τη μηχανική τους συμπεριφορά σε περιπτώσεις διερεύνησης της ευστάθειας τεχνητών πρηνών. Ο βασικός λόγος είναι ότι τα εδάφη αυτά εμφανίζουν γενικά αρνητικές τιμές πίεσης πόρων επί τόπου ( $-u_w$ ) (Fredlund & Rahardjo, 1985, 1993) ενώ παράλληλα η μηχανική τους συμπεριφορά κατά τη διάρκεια εργαστηριακών δοκιμών αντοχής, σχετίζεται με μεταβολή της τιμής μύζησης ( $u_a - u_w$ ).

Ο σχεδιασμός τεχνητών πρηνών σε περιπτώσεις παρουσίας υπολειμματικών εδαφών διεξάγεται συνήθως με συμβατική ανάλυση για κορεσμένα υλικά, παρά το γεγονός ότι οι περισσότερες αστοχίες τέτοιων πρηνών έχουν διαπιστωθεί σε ακόρεστες συνθήκες. Κατά συνέπεια η διερεύνηση της

μηχανικής συμπεριφοράς τέτοιων εδαφών σε ακόρεστες συνθήκες είναι κρίσιμη για τον προσδιορισμό των μηχανισμών αστοχίας τεχνητών πρηνών που σχεδιάζονται σε αυτά.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η διατμητική αντοχή υπολειμματικού γεωυλικού, η παρουσία του οποίου έχει συσχετιστεί με διαπιστωμένες αστοχίες τεχνητών πρηνών κατά μήκος της Εγνατίας οδού στην περιοχή της Ασπροβάλτας (Chatzigogos et al., 2007, 2008). Οι αστοχίες αυτές εκδηλώθηκαν σε συνθήκες αποστράγγισης των υπολειμματικών υλικών (δηλαδή σταθερών τιμών μύζησης) και για το λόγο αυτό η διερεύνηση του μηχανισμού τους πραγματοποιήθηκε με εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών CD, οι οποίες επιτρέπουν την καταγραφή της πίεσης του νερού και του αέρα των πόρων στο δείγμα. Ο στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση της μεταβολής των μηχανικών παραμέτρων αντοχής του

εξεταζόμενου υλικού για διαφορετικές τιμές μύζησης (matric suction).

## 2. ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΚΟΡΕΣΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Οι Fredlund et al., (1978) έχουν προτείνει ότι η διατμητική αντοχή ακόρεστων εδαφών μπορεί να περιγραφεί από την «Εξίσωση 1»:

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_n - u_a)_f \epsilon \phi \phi' + (u_a - u_w)_f \epsilon \phi \phi^b \quad (1)$$

όπου  $\tau_{ff}$  είναι η τιμή της διατμητικής αντοχής του ακόρεστου εδάφους, δηλαδή η τιμή της διατμητικής τάσης που αναπτύσσεται στο επίπεδο αστοχίας κατά την αστοχία,  $c'$  είναι η τεταγμένη της τομής της ευθείας Mohr-Coulomb με τον άξονα διατμητικών τάσεων δηλαδή η ενεργός συνοχή (συνοχή σε συνθήκες κορεσμού),  $(\sigma_n - u_a)_f$  είναι η δρώσα ορθή τάση στο επίπεδο αστοχίας κατά την αστοχία,  $u_{af}$  είναι πίεση του αέρα των πόρων κατά την αστοχία,  $\phi'$  είναι η γωνία τριβής που σχετίζεται με τη δρώσα ορθή τάση,  $(u_a - u_w)_f$  είναι η τιμή της μύζησης,  $u_{wf}$  είναι η πίεση του νερού των πόρων κατά την αστοχία και  $\phi^b$  είναι η γωνία που προσδιορίζει το ρυθμό αύξησης της διατμητικής αντοχής σε σχέση με την αύξηση της τιμής της μύζησης.

Η διατμητική αντοχή ενός εδάφους αυξάνεται με την αύξηση της τιμής της μύζησης ή την αύξηση της τιμής του βαθμού κορεσμού. Η αύξηση αυτή θεωρείται ότι ισοδυναμεί με την αύξηση της συνοχής σύμφωνα με την «Εξίσωση 2»:

$$c = c' + (u_a - u_w)_f \epsilon \phi \phi^b \quad (2)$$

Οι τιμές  $c'$ ,  $\phi'$  και  $\phi^b$  θεωρούνται χαρακτηριστικές του υλικού και στην παρούσα εργασία προσδιορίζονται εργαστηριακά με ειδική πειραματική διάταξη ελέγχου των παραμέτρων  $(\sigma_n - u_a)$  και  $(u_a - u_w)$ .

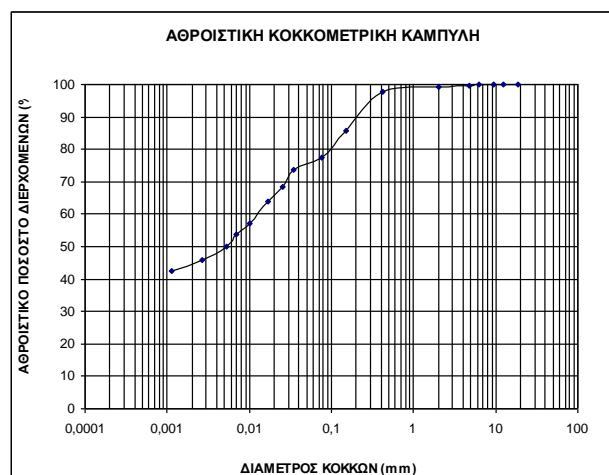
## 2. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΛΙΚΟΥ

Το εξεταζόμενο υλικό είναι προϊόν της αποσάθρωσης γνευσιακών πετρωμάτων της Σερβομακεδονικής μάζας και η ορυκτολογική του σύσταση όπως προέκυψε από δοκιμές XRD δίνεται στον «Πίνακα 1».

Πίνακας 1. Ορυκτολογική σύσταση εξεταζόμενου υλικού.  
Table 1. Mineralogical composition of tested material.

Ορυκτό	%
Χαλαζίας	21
Πλαγιόκλαστο	2
Ασβεστίτης	11
Αργιλικά ορυκτά διογκούμενα (σμεκτίτης)	21
Αργιλικά ορυκτά μη διογκούμενα	45

Από τον «Πίνακα 1» προκύπτει ότι το υλικό έχει σημαντική περιεκτικότητα σε διογκούμενα αργιλικά ορυκτά (>20%). Η κοκκομετρική καμπύλη του υλικού επί τόπου δίνεται στο «Σχήμα 1» και οι φυσικές του ιδιότητες συνοψίζονται στον «Πίνακα 2».



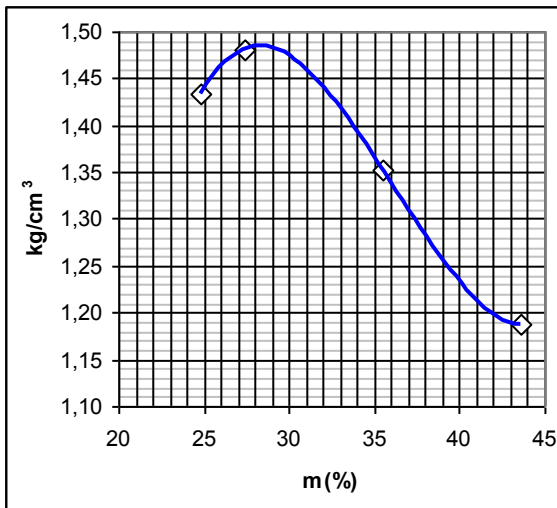
Σχήμα 1. Κοκκομετρική καμπύλη εξεταζόμενου υλικού  
Figure 1. Gradation curve of tested material.

Πίνακας 2. Φυσικές ιδιότητες υλικού επί τόπου.  
Table 2. Index properties of the in situ material.

LL	PI	$\gamma_s$	$\gamma_d$	e	USCS
75	50	2,47	1,36	0,81	CH

kg/cm<sup>3</sup>

Η δοκιμή συμπίκνωσης (Proctor) που εκτελέστηκε στο υλικό έδωσε την καμπύλη που φαίνεται στο «Σχήμα 2».



Σχήμα 2. Καμπύλη Proctor του υλικού.  
Figure 2. Proctor curve of tested material.

Από αυτήν προκύπτει ότι η μέγιστη ξηρή πυκνότητά του είναι  $\gamma_{dmax}=1,49 \text{ kg/cm}^3$  για ποσοστό βέλτιστης υγρασίας  $m_{opt} = 28,5\%$ .

### 3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

#### 3.1 Πρόγραμμα και εκτέλεση δοκιμών

Για την εργαστηριακή διερεύνηση του προβλήματος σχεδιάστηκε πρόγραμμα δοκιμών τριαξονικής αντοχής CD δηλαδή βραδείας δοκιμής σε στερεοποιημένα δοκίμια με αποστράγγιση. Διαμορφώθηκαν 10 κυλινδρικά δοκίμια από αναζυμωμένο υλικό το οποίο είχε προηγουμένως συμπυκνωθεί στην επί τόπου υπολογισμένη ξηρή πυκνότητα ( $\gamma_d = 1,37 \text{ kg/cm}^3$ ). Το ένα δείγμα χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της χαρακτηριστικής καμπύλης νερού εδάφους (soil water characteristic curve). Στα υπόλοιπα 9 εκτελέστηκαν ισάριθμες δοκιμές CD για τρεις διαφορετικές τιμές πλευρικής τάσης  $\sigma_3$ , σε τρεις διαφορετικές τιμές μύζησης, όπως δείχνει ο «Πίνακας 3».

Πίνακας 3. Πρόγραμμα δοκιμών CD  
Table 3. CD test schedule.

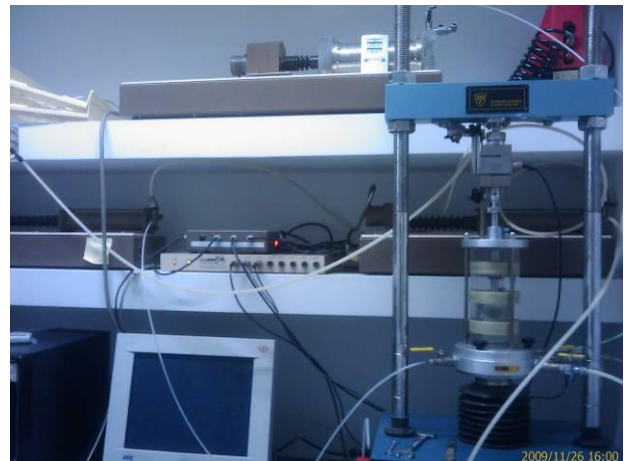
$u_a - u_w$ kPa	$\sigma_3 - u_a$ kPa		
200	50	100	150
400	50	100	150
800	50	100	150

Κατά την εκτέλεση των δοκιμών το δοκίμιο στερεοποιείται σε μια τάση αντιπροσωπευτική της επί τόπου εντατικής κατάστασης. Στις συγκεκριμένες δοκιμές η τάση στερεοποίησης

ήταν  $\sigma_3=70 \text{ kPa}$ . Το έδαφος στερεοποιείται σε ιστροπική πλευρική τάση  $\sigma_3$  ενώ παράλληλα η πίεση του νερού και του αέρα των πόρων διατηρούνται σε θετικές τιμές  $u_a$  και  $u_w$  αντίστοιχα, τέτοιες ώστε να επιτευχθεί εργαστηριακά μια τιμή μύζησης μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική πίεση (101,3 kPa).

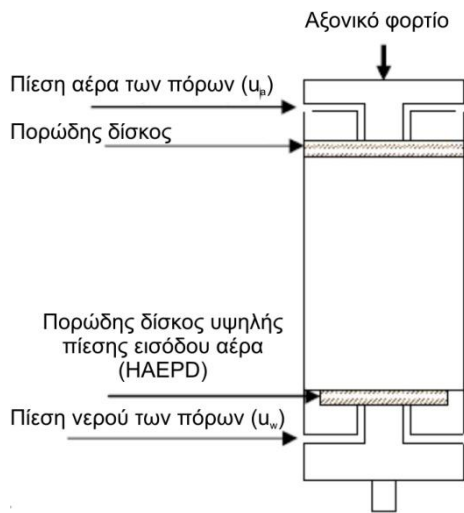
#### 3.2 Πειραματική διάταξη

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Α.Π.Θ. σε συσκευή τριαξονικής δοκιμής GDS με δυνατότητα ελέγχου και μέτρησης πιέσεων του αέρα και του νερού καθώς και της μεταβολής όγκου στο εσωτερικό του δοκιμίου. Η διάταξη περιλαμβάνει έναν ελεγκτή (controller) πίεσης – όγκου για τον έλεγχο της πίεσης και της μεταβολής του όγκου του αέρα στο δοκίμιο. Δύο επιπλέον ελεγκτές χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της αντιπίεσης νερού των πόρων (back pressure) και τη μεταβολή του όγκου του νερού στο δοκίμιο καθώς και για τον έλεγχο της πλευρικής πίεσης στο θάλαμο του δοκιμίου.



Φωτογραφία 1. Η πειραματική διάταξη της τριαξονικής συσκευής.  
Photograph 1. The arrangement of the triaxial testing apparatus.

Το άθροισμα της μεταβολής του όγκου στους ελεγκτές νερού και αέρα δίνει τη συνολική μεταβολή όγκου του δοκιμίου. Επιπλέον ο θάλαμος εισαγωγής του δοκιμίου περιλαμβάνει βάση με πορώδη δίσκο υψηλής πίεσης εισόδου αέρα 15 bar (high air entry porous disk), έτσι ώστε να διασφαλίζεται η εφαρμογή της επιλεγόμενης τιμής μύζησης στο δοκίμιο (Σχήμα 3).



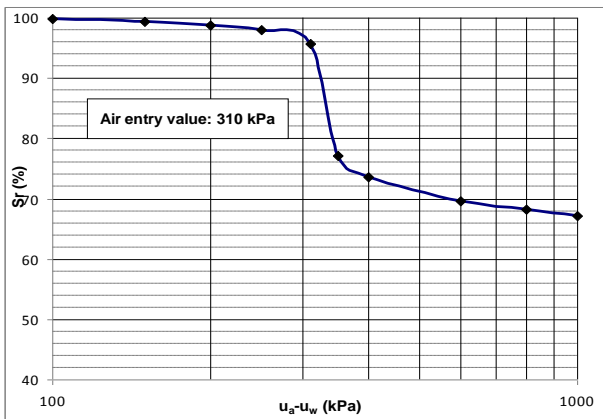
Σχήμα 3. Σχηματική απεικόνιση της διάταξης του δοκιμίου.

Figure 3. Schematic of specimen connections.

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

##### 4.1. Χαρακτηριστική καμπύλη νερού εδάφους

Η χαρακτηριστική καμπύλη νερού εδάφους προέκυψε με αρχική εφαρμογή πίεσης αέρα  $u_a=1010$  kPa, νερού  $u_w=1000$  kPa και σταδιακή μείωση της τιμής της  $u_w$ , όπως φαίνεται στο «Σχήμα 4».



Σχήμα 4. Χαρακτηριστική καμπύλη νερού εδάφους του υλικού.

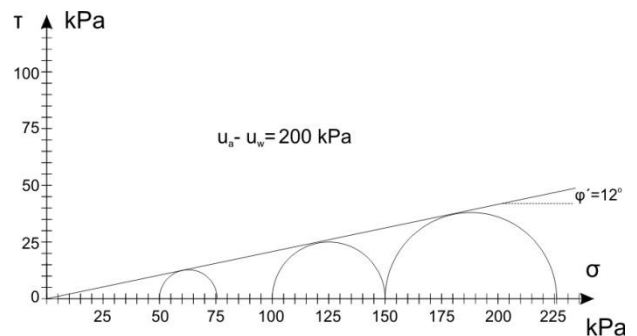
Figure 4. Soil water characteristic curve of material.

Στην καμπύλη αυτή είναι σημειωμένη η τιμή μύζησης για την οποία επέρχεται εισαγωγή αέρα στο δοκίμιο (air entry value) και κατά συνέπεια αρχίζει η μεταβολή του βαθμού κορεσμού  $S_r$ . Για το συγκεκριμένο υλικό η τιμή αυτή είναι 310 kPa. Η σχετικά ψηλή αυτή τιμή αποδίδεται στη φύση του υλικού το οποίο είναι ιδιαίτερα λεπτόκοκκο όπως ήδη περιγράφηκε.

Με βάση τα στοιχεία της καμπύλης καθώς και τις τιμές υγρασίας του υλικού επί τόπου, επιλέχθηκαν οι τρεις τιμές μύζησης που φαίνονται στον «Πίνακα 3». Έτσι κατά την εκτέλεση των δοκιμών θραύσης η τιμή μύζησης  $u_a-u_w=200$  kPa αντιστοιχεί πρακτικά σε συνθήκες κορεσμού (τιμή μικρότερη από 310 kPa), η τιμή μύζησης  $u_a-u_w=400$  kPa βρίσκεται κοντά στην τιμή πίεσης εισόδου αέρα και αντιστοιχεί στον επί τόπου βαθμό κορεσμού που υπολογίστηκε κατά τη φάση εκδήλωσης των αστοχιών, ενώ τέλος η τιμή μύζησης  $u_a-u_w=800$  kPa εισάγεται για να εκτιμηθεί η μεταβολή της διατμητικής αντοχής σε ψηλές τιμές μύζησης.

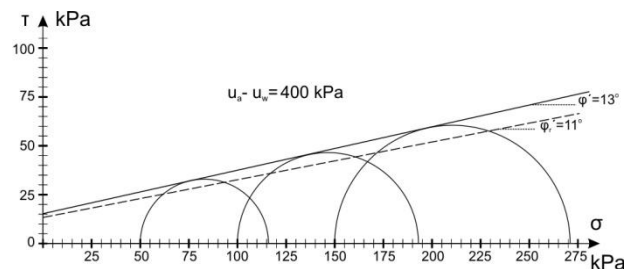
##### 4.2. Αποτελέσματα δοκιμών CD

Τα αποτελέσματα των δοκιμών CD που εκτελέστηκαν με βάση το πρόγραμμα δίνονται με τη μορφή διαγραμμάτων Mohr στα «Σχήματα 5-7» και τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των χαρακτηριστικών αντοχής στον «Πίνακα 4».



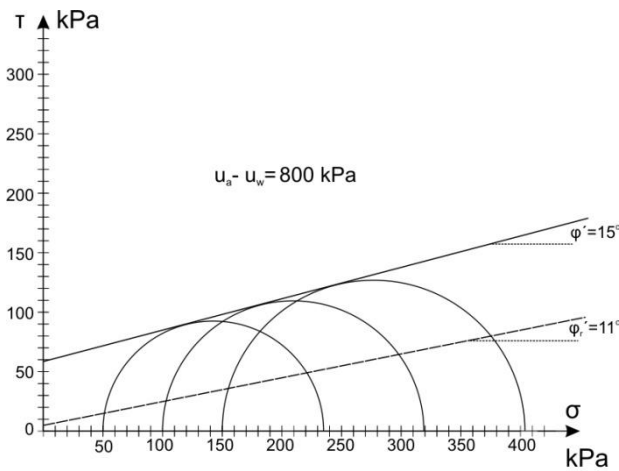
Σχήμα 5. Δοκιμές CD για  $u_a-u_w=200$  kPa

Figure 5. CD tests for  $u_a-u_w=200$  kPa.



Σχήμα 6. Δοκιμές CD για  $u_a-u_w=400$  kPa

Figure 6. CD tests for  $u_a-u_w=400$  kPa



Σχήμα 7. Δοκιμές CD για  $u_a - u_w = 800$  kPa  
Figure 7. CD tests for  $u_a - u_w = 800$  kPa

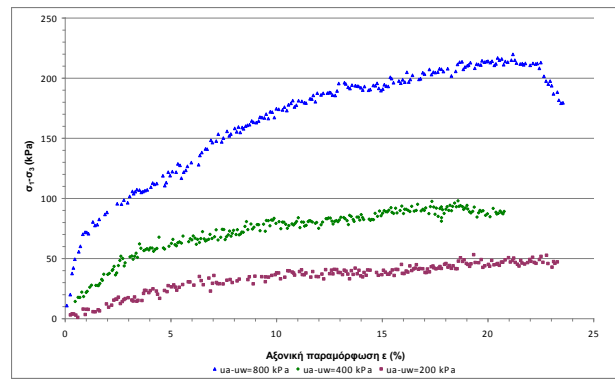
Πίνακας 4. Αποτελέσματα δοκιμών CD  
Table 4. CD test results.

$u_a - u_w$	200	400	800
$\sigma_1 - u_a$ kPa	76	116	235
$\sigma_3 - u_a$ kPa	50	50	50
$c'$ kPa	0	15,28	58,5
$c'_r$ kPa	0	13,31	4,81
$\phi'_r$	12°	13°	15°
$\phi'_b$	12°	11°	11°
$\phi'_b$		8,1°	

Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν ότι οι εργαστηριακές τιμές γωνίας τριβής  $\phi'$  που προέκυψαν μπορεί να θεωρηθούν μικρές και παρατηρείται μικρή αύξησή τους με την αύξηση της μύζησης. Οι τιμές γωνίας τριβής  $\phi'_r$  που αντιστοιχούν στην παραμένουσα αντοχή του υλικού είναι σταθερές και παρουσιάζουν μικρή απόκλιση από τις τιμές  $\phi'$  σε σχέση με τη θεωρητικά αναμενόμενη. Για τιμή μύζησης  $u_a - u_w = 200$  kPa η τιμή της  $\phi'_r$  δεν διαφοροποιείται από την τιμή της  $\phi'$ .

Οι τιμές φαινόμενης συνοχής  $c$  που υπολογίστηκαν, όπως φαίνεται στον «Πίνακα 4», παρουσιάζουν μια γραμμική αύξηση σε σχέση με την τιμή της μύζησης, όπως προβλέπει η «Εξίσωση 2».

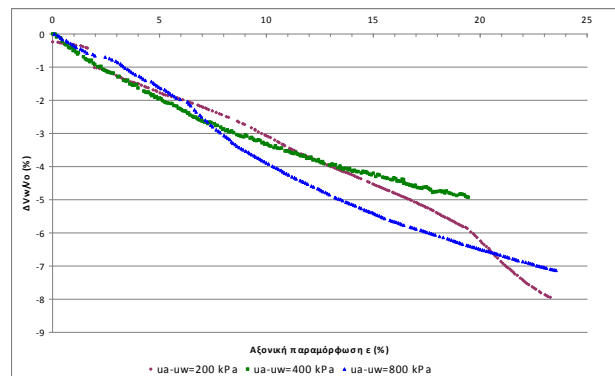
Η μεταβολή της αξονικής παραμόρφωσης  $\epsilon$  (axial strain) με τη μεταβολή της διεκτροπικής τάσης  $\sigma_1 - \sigma_3$  (deviatoric stress) δίνεται στο «Σχήμα 8» για τις διαφορετικές τιμές μύζησης.



Σχήμα 8. Διάγραμμα διεκτροπικής τάσης ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) - αξονικής παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) για  $\sigma_3 - u_a = 100$  kPa και διαφορετικές τιμές μύζησης.  
Figure 8. Deviatoric stress – strain diagram for  $\sigma_3 - u_a = 100$  kPa and different matric suction values.

Σύμφωνα με τους Rahardjo et al., (2004) η αύξηση της μύζησης συνεισφέρει στην αύξηση της στιφρότητας, θραυσιμότητας και διογκωσιμότητας του υλικού, ιδιαίτερα για χαμηλές τιμές πλευρικής τάσης. Όπως φαίνεται και από το «Σχήμα 8» που αναφέρεται σε τιμή  $\sigma_3 - u_a = 100$  kPa, παρατηρείται πράγματι μια αύξηση της στιφρότητας των δοκιμών, η οποία είναι μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η τιμή της μύζησης και φαίνεται από τη μεταβολή της κλίσης των σχετικών καμπυλών. Επίσης από το ίδιο διάγραμμα προκύπτει ότι οι τιμές αξονικής παραμόρφωσης για τις οποίες επέρχεται θραύση των δοκιμών είναι γενικά αυξημένες ( $\epsilon > 20\%$ ) ενώ η αύξηση της μύζησης επιφέρει και εντονότερη θραυσιγενή συμπεριφορά.

Η μεταβολή του όγκου του νερού ( $\Delta V_w / V_0$ ) στο δοκίμιο με την αξονική παραμόρφωση ( $\epsilon$ ) δίνεται στο «Σχήμα 9».

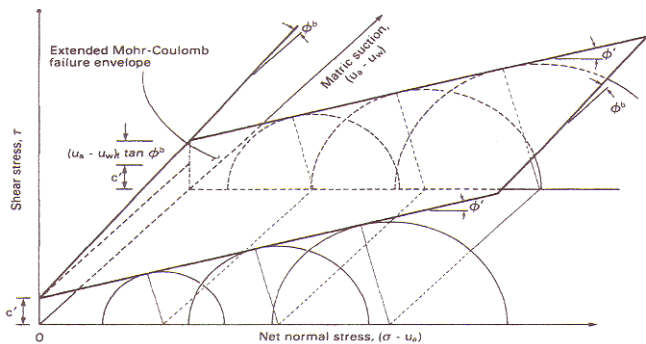


Σχήμα 9. Διάγραμμα μεταβολής όγκου νερού – αξονικής παραμόρφωσης για διαφορετικές τιμές μύζησης.

Figure 9. Volume change – axial strain diagram for different matric suction values.

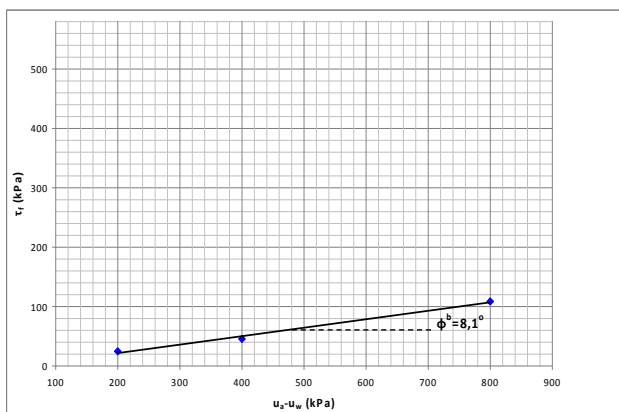


Η μεταβολή της διατμητικής αντοχής του υλικού με τη μεταβολή της μύζησης, φαίνεται στο διάγραμμα του «Σχήματος 10», στο οποίο διακρίνεται η επέκταση του προβλεπόμενου από το κριτήριο Mohr-Coulomb φακέλου αστοχίας για την περίπτωση των ακόρεστων εδαφών (Fredlund & Rahardjo, 1993). Η κλίση της γραμμής τομής που προκύπτει από την τομή του επιπέδου αστοχίας πάνω στο επίπεδο  $\tau - (u_a - u_w)$ , αντιπροσωπεύει τη γωνία  $\phi'_b$ .



Σχήμα 10. Επέκταση του φακέλου αστοχίας Mohr-Coulomb για ακόρεστα εδάφη (από Fredlund & Rahardjo, 1993).  
Figure 10. Extended Mohr-Coulomb failure envelope for unsaturated soils (from Fredlund & Rahardjo, 1993).

Η γωνία αυτή είναι αντιπροσωπευτική του κάθε υλικού και πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι, για μικρές τιμές μύζησης (κορεσμένες συνθήκες) ισούται με την  $\phi'$  ενώ για μεγάλες τιμές μύζησης (πάνω από την τιμή air entry value) παρουσιάζεται σταθερή και πάντα μικρότερη ή ίση με την  $\phi'$  (Gan, 1986). Για το εξεταζόμενο υλικό υπολογίστηκε σε  $\phi'_b=8,1^\circ$  όπως φαίνεται στο «Σχήμα 11».



Σχήμα 11. Πειραματική ευθεία τομής του φακέλου αστοχίας με το επίπεδο  $\tau - (u_a - u_w)$ .

Figure 11. Experimental intersection line between the failure envelope and the  $\tau - (u_a - u_w)$  plane.

## 5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια προσπάθεια πρώτης πειραματικής προσέγγισης του κρίσιμου προβλήματος της μηχανικής συμπεριφοράς υπολειμματικών εδαφών του ελλαδικού χώρου σε ακόρεστες συνθήκες. Το γεωυλικό που εξετάστηκε αποτελεί ένα σχεδόν πλήρως αργιλοποιημένο προϊόν αποσάθρωσης μεταμορφωμένων πετρωμάτων, για το οποίο ή για παρόμοια προέλευσης γεωυλικά τα πειραματικά δεδομένα στη διεθνή βιβλιογραφία είναι ελάχιστα. Η προσέγγιση αυτή έγινε με τη χρήση πειραματικής διάταξης ελέγχου της μύζησης κατά τη διάρκεια δοκιμών βραδείας θλίψης (CD) με στόχο τον προσδιορισμό παραμέτρων διατμητικής αντοχής σε ακόρεστες συνθήκες ( $c'$ ,  $\phi'$ ,  $\phi'_b$ ).

Με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας το συγκεκριμένο γεωυλικό παρουσιάζει ιδιαίτερα χαμηλή τιμή γωνίας τριβής  $\phi'$  ( $\approx 13^\circ$ ) και τιμή της παραμένουσας γωνίας  $\phi'_r$  ( $\approx 11^\circ$ ) η οποία είναι υψηλή σε σχέση με τη  $\phi'$ . Η χαμηλή τιμή της  $\phi'$  μπορεί να αποδοθεί στην ορυκτολογική σύσταση του γεωυλικού και πιο συγκεκριμένα στην παρουσία διογκούμενων αργιλικών ορυκτών που μπορεί να εμφανίζουν μεγάλο πλακοειδές (σμεκτίτες). Σύμφωνα με τους Mesri & Cepeda-Diaz, (1986) η παρουσία τέτοιων ορυκτών δικαιολογεί πολύ μικρές τιμές  $\phi'$  και  $\phi'_r$  οι οποίες μάλιστα παρουσιάζουν μικρή απόκλιση μεταξύ τους.

Οι τιμές  $c'$  και  $\phi'$  για  $u_a - u_w = 400$  kPa που υπολογίστηκαν συμφωνούν απόλυτα με τα αποτελέσματα ανάδρομων αναλύσεων που έγιναν για τις αστοχίες των τεχνητών πρανών στην περιοχή της Ασπροβάλας, στις οποίες συμμετείχαν τα γεωυλικά που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία (Χατζηγώγος & Μακεδών, 2008).

Η τιμή της  $\phi'_b = 8,1^\circ$  που υπολογίστηκε είναι χαρακτηριστική του γεωυλικού που εξετάστηκε και καθορίζει την αύξηση της διατμητικής αντοχής του με την αύξηση της τιμής της μύζησης.

Γενικά η συμπεριφορά του υλικού προσομοιάζει με αυτήν ενός υπερστερεοποιημένου υλικού για υψηλές τιμές μύζησης και ενός κανονικά στερεοποιημένου για χαμηλές τιμές μύζησης.

## 6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Chatzigogos, N. P., Makedon, T. K. and Tsotsos S. (2007), «The mechanical behaviour of gneissous rocks and selection of strength parameters for stability analysis of excavated slopes». Proceedings 1st Sri Lankan Geotechnical Society (SLGS) International Conference on Soil and Rock Engineering, Colombo, paper no 2560
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978), "The shear strength of unsaturated soils". *Can. Geotech. J.*, Vol. 15, No 3, pp. 313-321.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1985), "Theoretical context for understanding unsaturated residual soils behaviour", *Proc. 1st Intern. Conf. Geomechanics in tropical laterite and saprolitic soils. Sao Paulo, Brazil*, pp. 295-306.
- Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), "Soil mechanics for unsaturated soils", John Wiley & Sons Inc., USA, p. 517.
- Gan, J. K. M. (1986). "Direct shear strength testing of unsaturated soils", MSc-thesis, University of Saskatchewan, Canada.
- Mesri, G., and Cepeda-Diaz, A. F. (1986). "Residual shear strength of clays and shales". *Geotéchnique*, Vol. 36, No 2, pp. 269-274.
- Rahardjo, H., Heng, O. B., and Choon, L. E., (2004). "Shear strength of a compacted residual soil from consolidated drained and constant water content triaxial tests", *Can. Geotech. J.*, Vol. 41, pp. 421-436.
- Χατζηγώγος, Ν. και Μακεδών, Θ. (2008). «Η επίδραση της παρουσίας υπολειμματικών υλικών στην ευστάθεια πρανών σε μεταμορφωμένα πετρώματα με έντονη αποσάθρωση και καταπόνηση». Κ.Α. άρθρου 1907, Πρακτικά 3ου Π.Σ.Α.Μ.Η.Τ.Σ., Αθήνα.