

# Εμπειρικός Προσδιορισμός Αστράγγιστης Διατμητικής Αντοχής Συνεκτικών Σχηματισμών από Δοκιμές SPT

## Empirical Determination of the Undrained Shear Strength of Cohesive Soils from SPT Tests

ΠΛΥΤΑΣ, Κ. Πολιτικός Μηχανικός, Dr. Ing., O.T.M. ΤΕΠΕ  
ΜΠΑΛΤΖΟΓΛΟΥ, Α. Πολιτικός Μηχανικός, MSc., O.T.M. ΑΤΕ  
ΧΛΙΜΙΝΤΖΑΣ, Γ. Πολιτικός Μηχανικός, PhD, DIC, O.T.M. ΑΤΕ

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Στο άρθρο αυτό παρουσιάζεται μια απλοποιημένη αναλυτική έκφραση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $c_u$  των συνεκτικών σχηματισμών συναρτήσει του αριθμού κρούσεων  $N$  της δοκιμής πρότυπης διείσδυσης (SPT) και των φυσικών χαρακτηριστικών τους (δείκτης πλαστικότητας  $PI$ , φυσική υγρασία  $w$ ). Η εμπειρική σχέση που προτείνεται προέκυψε από τη στατιστική επεξεργασία σημαντικού πλήθους αποτελεσμάτων τόσο από εργαστηριακές όσο και από επί τόπου δοκιμές σε στιφρούς έως σκληρούς συνεκτικούς σχηματισμούς και αποτελεί προσέγγιση της επίδρασης των φυσικών χαρακτηριστικών στην αντοχή των συνεκτικών σχηματισμών.

**ABSTRACT :** A simplified empirical relationship is presented that expresses the undrained shear strength of cohesive soil formations with respect to the number of blows of the Standard Penetration Test and the characteristic physical properties of the soil (water content, plasticity index). The correlation derives from the statistical processing of a significant amount of lab and field results from tests performed on stiff to hard cohesive soils and constitutes an approach to the influence of the physical properties of cohesive soils on soil strength.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η δοκιμή SPT αποτελεί ίσως την πλέον διαδεδομένη επιτόπου δοκιμή για την εκτίμηση των μηχανικών χαρακτηριστικών για στιφρούς έως σκληρούς συνεκτικούς σχηματισμούς. Συχνά, τα αποτελέσματα δοκιμών SPT, ελλείπει εργαστηριακών δοκιμών, αποτελούν το μοναδικό στοιχείο για την εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής τους.

Συσχετισμοί της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με τον αριθμό των κρούσεων προτάθηκαν στο παρελθόν από διάφορους ερευνητές, όπως οι Terzaghi & Peck (1967), Sowers (1979), Hara et al. (1974), De Mello (1971), Stroud (1974). Εν τούτοις όμως οι παραπάνω προσεγγίσεις ισχύουν συνήθως για περιορισμένο είδος υλικών, συχνά δίνουν αντιφατικά αποτελέσματα μεταξύ τους και αποτελούν μάλλον ποιοτικές προσεγγίσεις για τις πρακτικές εφαρμογές. Η μεγάλη διασπορά που συ-

ναντάται συνήθως σε πρακτικές εφαρμογές, φαίνεται ότι οφείλεται, εκτός των άλλων, και στην ελλιπή γνώση των παραμέτρων που διέπουν το φαινόμενο. Η φυσική υγρασία  $w$  φαίνεται ότι αποτελεί βασική παράμετρο που επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα, όπως φαίνεται στα διαγράμματα που προτάθηκαν από τους Κουταλιά κ.α. (2001). Συνέχεια της εργασίας αυτής αποτελεί το παρόν άρθρο, με βασικό σκοπό τη διατύπωση εμπειρικής αναλυτικής σχέσης της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με τον αριθμό των κρούσεων, βάσει της στατιστικής επεξεργασίας μεγάλου πλήθους αποτελεσμάτων επιτόπου και εργαστηριακών δοκιμών που εκτελέστηκαν στα πλαίσια εκτεταμένων γεωτεχνικών ερευνών, για τις ανάγκες κατασκευής της Αττικής Οδού.

Στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων ελήφθησαν υπόψη ο δείκτης πλαστικότητας  $PI$  και η φυσική υγρασία  $w$  των σχηματισμών.

## 2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ

Τα υλικά που εξετάστηκαν είναι:

α) Αμμώδεις άργιλοι που συναντώνται στο Χαλάνδρι-Μαρούσι. Πρόκειται για σφιχρές έως σκληρές χαμηλής έως μέσης πλαστικότητας και αναλόγως με την περιοχή που συναντώνται διακρίνονται στις καστανέρυθρες έως ερυθρές αμμώδεις αργίλους της Λεωφόρου. Κηφισίας και στις καστανοκίτρινες έως καστανέρυ-

θρες αμμώδεις αργίλους της οδού Δουκίσσης Πλακεντίας.

β) Αργιλικές μάργες της περιοχής Μεσογείων. Πρόκειται για σφιχρές έως σκληρές μέσης έως υψηλής πλαστικότητας, καστανοκίτρινες, καστανοπράσινες έως καστανότεφρες.

Η διακύμανση των κυριότερων φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά Εξετασθέντων Υλικών  
Table 1. Material Properties

Φυσικό ή μηχανικό χαρακτηριστικό	Άργιλος Κηφισίας	Άργιλος Δουκίσσης Πλακεντίας	Αργιλική Μάργα Μεσογείων
Κατάταξη κατά AUSCS	(CL), τοπικά (SC)	(CL), τοπικά (SL)	(CL) ÷ (CH), τοπικά (SC)
Μέσος λόγος υπερστερεοποίησης (OCR)	~2	~2,2	~1,5
Φυσική υγρασία, w (%)	10,5 ÷ 25,5	8,4 ÷ 20,6	15,8 ÷ 46,5
Όριο υδαρότητας, LL (%)	24,5 ÷ 43,5	21,4 ÷ 46,5	33,2 ÷ 86,6
Δείκτης πλαστικότητας, PI (%)	4,2 ÷ 28,8	5,2 ÷ 28,1	11,1 ÷ 54,9
Ξηρό φαινόμενο βάρος, $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	15,5 ÷ 20,6	16,8 ÷ 21,8	11,9 ÷ 17,6
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή, $c_u$ (kPa)	85 ÷ 529	91 ÷ 710	67 ÷ 378
Αριθμός κρούσεων $N_{SPT}$	16 ÷ 65	15 ÷ 60	16 ÷ 52

## 3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Αρχικά προτάθηκε από τους Terzaghi & Peck (1967), η σχέση:  $\frac{c_u}{N} \approx 6,66$ . Αποτελεί έως

σήμερα το μοναδικό κριτήριο διάκρισης των αργίλων βάσει της αντοχής τους από πολύ μαλακές έως σκληρές.

Ο Sowers (1979), προτείνει διαγράμματα εκτίμησης της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής συναρτήσει του αριθμού των κρούσεων λαμβάνοντας υπόψη την πλαστικότητα των υλικών. Ο λόγος  $\frac{c_u}{N}$  αυξάνεται με το δείκτη πλαστικότητας και κυμαίνεται από ~2,5 έως ~17 για υλικά υψηλής πλαστικότητας.

Ο Stroud (1974), προτείνει διάγραμμα μεταβολής του λόγου  $\frac{c_u}{N}$  συναρτήσει του δείκτη

πλαστικότητας. Ο λόγος  $\frac{c_u}{N}$  μειώνεται αυξανόμενου του δείκτη πλαστικότητας, αποτέλεσμα που βρίσκεται σε ασυμφωνία με το διάγραμμα

του Sowers (1979). Στην περίπτωση αυτή ο λόγος  $\frac{c_u}{N}$  κυμαίνεται από ~7 έως ~4 για συνεκτικά υλικά υψηλής πλαστικότητας.

Ο De Mello (1971), βρήκε ότι ο λόγος  $\frac{c_u}{N}$  κυμαίνεται από 0,4 έως 20, εξετάζοντας όμως μεγάλο εύρος υλικών συμπεριλαμβανομένων και μαλακών ευαίσθητων αργίλων.

Σύμφωνα με τον Stroud (1974), για την άργιλο του Λονδίνου (London Clay) βρέθηκε  $\frac{c_u}{N} = 11$  από δεδομένα του Surrey University, Guilford.

Η ευαισθησία της αργίλου επηρεάζει επίσης σημαντικά τα αποτελέσματα. Κατά τον Schmertmann (1979), ο λόγος  $\frac{c_u}{N}$  κυμαίνεται από 5 έως 13,5 για ευαίσθητες αργίλους.

Ο Djoenaidi (1985), συγκέντρωσε τα αποτελέσματα πολλών ερευνητών και τα παρουσία-

σε μορφή  $\frac{c_u}{P_a}$  συναρτήσει του αριθμού των κρούσεων  $N$ , όπου  $P_a$  η ατμοσφαιρική πίεση.

Οι Hara et al (1974), πρότειναν για 25 αργίλους γνωστής γεωλογίας στην Ιαπωνία, τη σχέση  $\frac{c_u}{P_a} = 0,29 \cdot N^{0,72}$ , ανεξαρτήτως της πλαστικότητας των σχηματισμών.

Σύμφωνα με τους διάφορους ερευνητές, όπως Djoenaidi (1985), Clayton (1995), η μεγάλη διασπορά του λόγου  $\frac{c_u}{N}$  οφείλεται σε πολλούς παράγοντες όπως: τρόπος εκτέλεσης δοκιμής πρότυπης διείσδυσης, δοκιμή προσδιορισμού  $c_u$ , διαστάσεις δοκιμίου, ευαισθησία αργίλου, ανισοτροπία, ρηγματώσεις κ.ά. Για τη συνήθη όμως πρακτική, το διάγραμμα του Stroud (1974) αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο προσδιορισμού του  $c_u$  από τις κρούσεις, θεωρώντας σαν βασική παράμετρο του προβλήματος το δείκτη πλαστικότητας.

Όπως αναφέρθηκε όμως στην εισαγωγή, για τα υλικά που περιγράφονται στον Πίνακα 1, φαίνεται ότι και η φυσική υγρασία  $w$  επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα (Κουταλιά κ.α., 2001). Προκύπτει μάλιστα ότι η μείωση της φυσικής υγρασίας αυξάνει το λόγο  $\frac{c_u}{N}$ .

Στη συνέχεια διερευνάται, βάσει στατιστικής επεξεργασίας, η διακύμανση του λόγου  $\frac{c_u}{N}$  συναρτήσει δύο μεταβλητών: του δείκτη πλαστικότητας  $PI$  και της φυσικής υγρασίας.

#### 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΩΝ

Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή  $c_u$ , προσδιορίστηκε από αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές χωρίς στερεοποίηση (UU), λαμβάνοντας υπόψη την ολική τάση των υπερκειμένων γαιών στο βάθος της δοκιμής, σύμφωνα με τη σχέση:

$$c_u = \left[ \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \right] \cdot (c + \sigma_{vo} \cdot \tan \phi) \quad (1)$$

όπου:  $c$  και  $\phi$  αντίστοιχα η φαινόμενη συνοχή και η φαινόμενη γωνία εσωτερικής αντίστασης της περιβάλλουσας αστοχίας, όπως αυτή προέκυψε από τις δοκιμές, και  $\sigma_{vo}$  η ολική γεωστατική τάση στο βάθος που ελήφθη το δείγμα.

Οι δοκιμές SPT εκτελέστηκαν με αυτόματο σύστημα σφύρας  $S$ .

#### 5. ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ

Τα αποτελέσματα των επί τόπου και εργαστηριακών δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό εμπειρικής μαθηματικής συσχέτισης μεταξύ των μεγεθών  $c_u/N$ ,  $PI$  και  $w$ . Η βασική στατιστική επεξεργασία που πραγματοποιήθηκε συνίσταται στην παρεμβολή μιας απλής μαθηματικής επιφάνειας από τα δεδομένα σημεία του χώρου ( $c_u/N$ ,  $PI$ ,  $w$ ). Για το σκοπό αυτό έγινε παραδοχή γενικής γραμμικής παλινδρόμησης του λόγου  $[c_u/N]$  επί των ποσοτήτων  $[\log_{10}PI]$  και  $[w]$  και εφαρμόστηκε η συνήθης μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων για τον προσδιορισμό των γραμμικών συντελεστών εκτίμησης (A, B, C) του  $[c_u/N]$  από τα  $[\log_{10}(PI)]$  και  $[w]$  σε μια συσχέτιση της μορφής:

$$\frac{c_u}{N} = A + B \cdot w + C \cdot \log_{10}(PI) \quad (2)$$

Πίνακας 2. Συντελεστές Εμπειρικών Σχέσεων  
Table 2. Coefficients in Resulting Empirical Relationships

Περιοχή ερευνών	Υλικό	Συντελεστής A (kPa)	Συντελεστής B (kPa)	Συντελεστής C (kPa)	Συντελεστής συσχέτισης r
Κόμβος Κηφισίας (Ενότητα A10)	Ερυθρή Άργιλος	13,9748	-0,203269	-3,17189	0,556838
Κόμβος Δουκίσσης Πλακεντίας Ενότητες A11, A12)	Άργιλος	15,4657	-0,495126	-1,64013	0,557969
Περιοχή Μεσογείων (Ενότητες A14, A15, A19)	Αργιλική Μάργα	11,9424	-0,0977103	-2,01367	0,480960

Είναι φανερό ότι στην παραπάνω σχέση οι συντελεστές (A, B, C) δεν είναι αδιάστατοι και επομένως εξαρτώνται από τις χρησιμοποιούμενες μονάδες. Όταν τα PI, w είναι εκφρασμένα ως ποσοστά επί τοις εκατό ( $\times 100\%$ ) και η εκτίμηση του  $[c_u/N]$  είναι σε KPa, οι συντελεστές που προκύπτουν για τις τρεις ομάδες υλικών καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές συσχέτισης (r) φαίνονται στον Πίνακα 2 που ακολουθεί. Τα αποτελέσματα της παραπάνω συσχέτισης απεικονίζονται στα διαγράμματα των Σχημάτων 1, 2 και 3.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΧΟΛΙΑ

Από της στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι:

α) Ο λόγος  $c_u / N$  είναι φθίνουσα συνάρτηση του δείκτη πλαστικότητας PI, γεγονός που συμφωνεί με το αντίστοιχο διάγραμμα του Stroud (1974) το οποίο και υιοθετείται από τον Clayton (1995) στις οδηγίες του CIRIA για τη χρήση της δοκιμής πρότυπης διείδυσης.

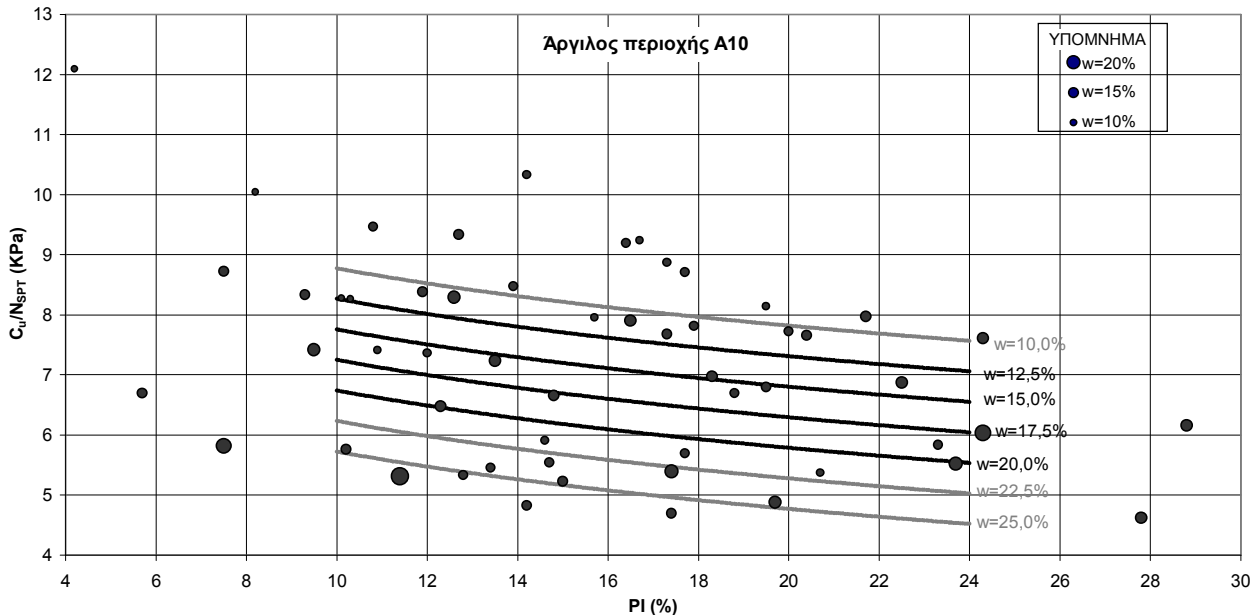
β) Ο λόγος  $c_u / N$  είναι επίσης φθίνουσα συνάρτηση της φυσικής υγρασίας w. Ο ρόλος της, αν και καθοριστικός, έχει αγνοηθεί συστηματικά, σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιο-

γραφία, ενώ οι σημαντικές διασπορές του λόγου  $c_u / N$  ενδέχεται να οφείλονται στην παράλειψή της.

Από τη μορφή των σχέσεων που εξετάστηκαν, φαίνεται ότι δεν υπάρχει ενιαίος νόμος για όλα τα υλικά. Οι παράμετροι A και B διαφέρουν από υλικό σε υλικό και οι διαφορές τους οφείλονται στη διαφορετική προέλευση των σχηματισμών, δηλαδή αποσάθρωση διαφορετικών υλικών με διαφορετικές συνθήκες μεταφοράς και απόθεσης.

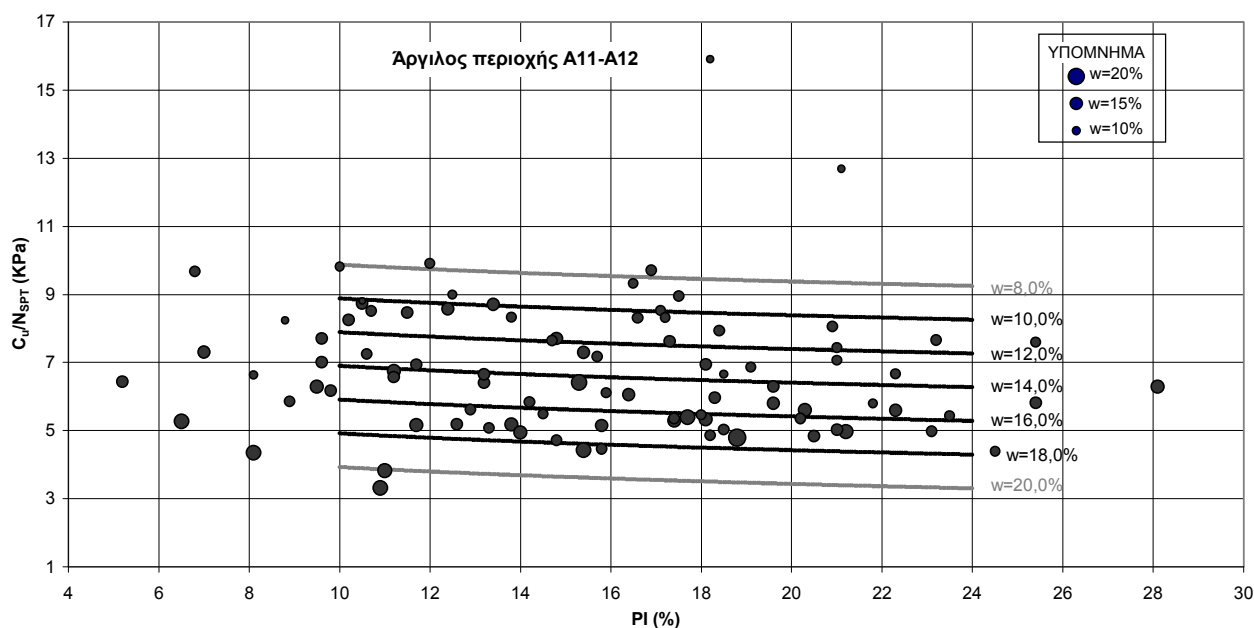
Η σχέση των Terzaghi & Peck (1967), δίδει ικανοποιητική προσέγγιση της μέσης τιμής του λόγου  $\frac{c_u^{(KPa)}}{N} \approx 6,66$  για τους σχηματισμούς

που εξετάστηκαν. Εντούτοις όμως η κατάταξη των συνεκτικών σχηματισμών συναρτήσει του αριθμού των κρούσεων N φαίνεται ότι δεν είναι μονοσήμαντη, διότι στο ίδιο αριθμό κρούσεων N αντιστοιχούν διαφορετικές τιμές αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $c_u$  (και λόγοι  $\frac{c_u}{N}$ ), αναλόγως του δείκτη πλαστικότητας και της φυσικής υγρασίας του δείγματος.

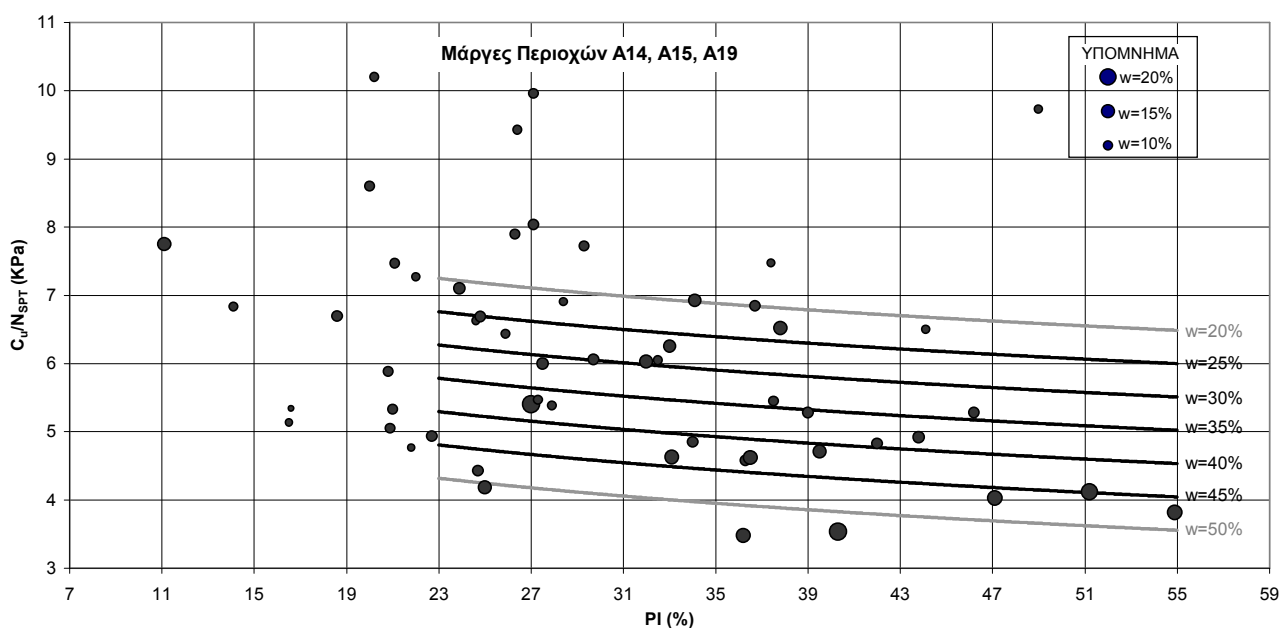


Σχήμα 1. Γραφική παράσταση εμπειρικών συσχετίσεων στις ερυθρές αργίλους της περιοχής Λ. Κηφισίας

Figure 1. Graphical representation of empirical correlation for red clays of Kifissias Av.



Σχήμα 2. Γραφική παράσταση εμπειρικών συσχετίσεων στις αργίλους της Δουκίσσης Πλακεντίας  
Figure 2. Graphical representation of empirical correlation for the Doukissis Plakentias clay



Σχήμα 3. Γραφική παράσταση εμπειρικών συσχετίσεων στις αργλικές μάργες της Λ. Μεσογείων  
Figure 3. Graphical representation of empirical correlation for clayey marls of Messogion Av.

Αν και εκτιμάται ότι τα κύρια φυσικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν το λόγο  $\frac{C_u}{N}$  είναι ο δείκτης πλαστικότητας PI και η φυσική υγρασία, εντούτοις ο λόγος αυτός εμφανίζει σημαντική διασπορά. Η διασπορά στα αποτελέσματα οφείλεται:

α) στη σημαντική μεταβολή των ιδιοτήτων ενός σχηματισμού από θέση σε θέση, π.χ. το εδαφικό στοιχείο όπου γίνεται η δοκιμή SPT

έχει (αν και παραπλήσια) διαφορετικά χαρακτηριστικά από το γειτονικό, όπου έγινε η αστράγγιστη τριαξονική δοκιμή UU.

β) στην αγνόηση πολλών άλλων παραμέτρων που περιγράφουν το φαινόμενο όπως ανισοτροπία, ρηγματώσεις, λόγος προστερεοποίησης OCR κ.ά. Εντούτοις ενδέχεται ο δείκτης πλαστικότητας PI και η φυσική υγρασία  $w$  σε ένα εδαφικό στοιχείο να «κρύβουν» άλλες παραμέτρους όπως για παρά-

δειγμα το OCR. Οι συσχετίσεις βελτιώνονται σημαντικά με την αύξηση του δείκτη πλαστικότητας και της φυσικής υγρασίας.

γ) στο γεγονός ότι ο λόγος  $\frac{c_u}{N}$  είναι πρακτικά μια αυθαίρετη παράμετρος. Ενδέχεται να υπάρχουν σχέσεις μη γραμμικές μεταξύ  $c_u$  και  $N$  που να δίδουν καλύτερες συσχετίσεις. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν και μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ  $c_u$  και  $N$ , π.χ. Hara et al. (1974). Οποσδήποτε το πρόβλημα παραμένει ανοικτό και οι συσχετίσεις θα είναι τόσο πιο αξιόπιστες, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των αξιόπιστων αποτελεσμάτων των εργαστηριακών και επιτόπου δοκιμών στα οποία βασίζονται.

## 7. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

$c_u$  (kPa) : αστράγγιστη διατμητική αντοχή  
 $\gamma_d$  (kN/m<sup>3</sup>) : ξηρό φαινόμενο βάρος  
 $w$  (%) : φυσική υγρασία  
LL (%) : όριο υδαρότητας  
PI (%) : δείκτης πλαστικότητας  
OCR : λόγος υπερστερεοποίησης  
 $N_{SPT}$  : αριθμός κρούσεων πρότυπης δοκιμής διείσδυσης  
 $\varphi$ (°) : γωνία εσωτερικής αντίστασης από τριαξονικές δοκιμές UU  
 $c$  (kPa) : συνοχή από τριαξονικές δοκιμές UU  
 $\sigma_{vo}$  (kPa) : ολική γεωστατική τάση  
 $\sigma'_v$  (kPa) : ενεργός γεωστατική τάση

## 8. ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν το προσωπικό των εργαστηρίων «Γεωέρευνα» ΕΠΕ για την παροχή όλων των απαραίτητων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το άρθρο.

## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Clayton, C.R.I (1995), "The Standard Penetration Test (SPT): Methods and Use", CIRIA REPORT 143, Construction Industry Research Information Association, London, UK.  
De Mello, V.F.B. (1971), "The Standard Penetration Test State-of-the-Art Report" 4<sup>th</sup> Pan-American Conf. on Soil Mechanics Foundation Engineering, Puerto Rico, Vol.1, pp.1-86.

Djoenaidi, W. J. ( 1985), "A Compedium of Soil Properties and Correlations" M. Eng. Sc. Thesis, University of Sydney, Sydney, 836 p.  
Hara, A., Ohta, T., Niwa, M., Tanaha, S., Banno, T. (1974), "Shear Modular and Shear Strength of Cohesive Soils". Soils and Foundations, vol. 14, No. 3, Sept. 1974, pp. 1-12.  
Κουταλιά, Χ., Μπαλτζόγλου, Α., Παχάκης, Μ., Πλυτάς, Κ., Φιλιππάκης, Σ. (2001), «Εκτίμηση της Αστράγγιστης Διατμητικής Αντοχής και του Μέτρου Συμπιέσεως Συνεκτικών Σχηματισμών από Δοκιμές SPT». 4<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Αθήνα.  
Schmertmann, J.H. (1979). "Statics of SPT," Journ. Geot. Div., Proc. ASCE, GT5, May, pp. 655-670.  
Sowers, G. F., (1979). "Introductory Soil Mechanics and Foundation". Macmillan Press.  
Stroud, M. A., (1974). "The Standard Penetration Test in Insensitive Clays and Soft Rocks". Proc. Eur. Symp. On Penetration Testing (ESOPT 1), pp. 367-75.  
Terzaghi, K. & Peck, R.B., (1967). "Soil Mechanics in Engineering Practice". 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley, New York.