



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**Δ.Π.Μ.Σ:** «Σχεδιασμός και Κατασκευή υπογείων έργων»

---

### **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

«Αξιολόγηση εμπειρικών συσχετίσεων εκτίμησης της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής αργιλικών εδαφών με βάση δεδομένα από τον ελλαδικό χώρο.»

Βασιλική Κ. Φαλιάγκα

### **Επιβλέπων**

Μιχάλης Καββαδάς, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

---

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Σκοπός εργασίας.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	3
2.1 Προέλευση του εδάφους.....	3
2.2 Φυσικά χαρακτηριστικά συνεκτικών εδαφών .....	4
2.3 Ταξινόμηση εδαφών με βάση τα όρια Atterberg.....	9
2.4 Διατμητική αντοχή των εδαφών.....	11
2.4.1 Αστράγγιστη διατμητική αντοχή εδαφών.....	11
2.4.1.1 Επιρροή χαρακτηριστικών στην εκτίμηση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής συνεκτικών εδαφών .....	12
2.5 Επίδραση αστράγγιστων και υπό στράγγιση συνθηκών στη διατμητική αντοχή.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕΣΩ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	15
3.1 Επί τόπου έρευνες .....	15
3.2 Πρότυπη δοκιμή διείσδυσης (Standard Penetration Test).....	16
3.3 Εργαστηριακές δοκιμές μέτρησης της διατμητικής αντοχής των εδαφών .....	19
3.3.1 Δοκιμή τριαξονικής φόρτισης .....	19
3.3.2 Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης.....	21
3.3.3 Δοκιμή άμεσης διάτμησης .....	21
3.4 Συσχετίσεις των μηχανικών ιδιοτήτων λεπτόκοκκων εδαφών με τον αριθμό κρούσεων SPT και τα φυσικά χαρακτηριστικά τους.....	22
3.4.1 Βιβλιογραφικές αναφορές .....	22
3.4.1.1 Εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ $S_u/P_a - N_{SPT}$ .....	23
3.4.1.2 Εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ $q_u - N_{SPT}$ και $S_u - N_{SPT}$ .....	23

3.4.1.3 Εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ $S_u/N_{SPT} - PI$ .....	26
3.4.1.4 Εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ $S_u/N_{SPT} - w$ .....	29
3.4.1.5 Εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ $S_u/\sigma'_v - PI$ .....	29
3.4.1.6 Επίδραση ρηγμάτωσης δοκιμίου στο μέγεθος της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής.....	30
3.4.1.7 Σύγκριση / σχολιασμός εμπειρικών συσχετίσεων .....	30
3.4.2 Διασπορά των δεδομένων και σχετικές αβεβαιότητες .....	31
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ</b> .....	<b>34</b>
4.1 Εισαγωγή .....	34
4.2 Προέλευση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν .....	34
4.3 Περιγραφή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη .....	35
4.4 Διαγράμματα - Σχολιασμός .....	39
4.4.1 Συνολικά διαγράμματα αργίλων χαμηλής και υψηλής πλαστικότητας .....	39
4.4.2 Διαγράμματα αργίλων χαμηλής πλαστικότητας.....	53
4.4.3 Διαγράμματα αργίλων υψηλής πλαστικότητας.....	63

## **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ**

Εικόνα 1 Η δομή τριών αργιλικών ορυκτών (K. Arulanandan, 2003) .....	3
Εικόνα 2 Κατάταξη εδαφών σύμφωνα με το ποσοστό του περιεχομένου των λεπτόκοκκων (I. Βαρδουλάκης 2004) .....	4
Εικόνα 3 Τριγωνικό διάγραμμα ταξινόμησης εδαφών (I. Βαρδουλάκης 2004).....	4
Εικόνα 4 Μείωση δείκτη πόρων (στερεοποίηση) εδάφους λόγω μείωσης της περιεκτικότητας σε νερό (I. Βαρδουλάκης 2004) .....	5
Εικόνα 5 Σχηματική διάταξη αργιλικών πλακιδίων με θαλασσινό νερό (Pusch, 1970) .....	6
Εικόνα 6 Σχηματική διάταξη αργιλικών πλακιδίων με καθαρό νερό (Pusch, 1970) .....	6
Εικόνα 7 Μεταβολή του δείκτη πλαστιμότητας με το ποσοστά του αργιλικού υλικού (I. Βαρδουλάκης 2004).....	7
Εικόνα 8 Μεταβολή της συνεκτικότητας και της μηχανικής συμπεριφοράς των αργίλων με το ποσοστό υγρασίας (Καββαδάς 2007) .....	8
Εικόνα 9 Τυπικό διάγραμμα συσχετισμού του δείκτη σχετικής υδαρότητας με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ενός αργιλικού υλικού (I. Βαρδουλάκης 2004).....	8
Εικόνα 10 Χάρτης πλαστιμότητας Casagrande.....	9
Εικόνα 11 Συσχέτιση μεταξύ αριθμού κρούσεων και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για αναισθητες αργίλους (Stroud, 1974) .....	27

## **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ**

Πίνακας 1 Ενιαίο σύστημα ταξινόμησης εδαφών (USCS) .....	10
Πίνακας 2 Συσχετίσεις $q_u$ - $N_{spt}$ για λεπτόκοκκα εδάφη .....	25
Πίνακας 3 Συσχέτιση μεταξύ $q_u$ και $N_{spt}$ (Terzaghi and Peck, 1967) .....	25
Πίνακας 4 Συσχέτιση μεταξύ $S_u$ και $N_{spt}$ .....	28
Πίνακας 5 Σχέσεις μεταξύ SPT-N και $S_u$ για συνεκτικά εδάφη .....	32
Πίνακας 6 Εμπειρικές συσχετίσεις για τον προσδιορισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής.....	33
Πίνακας 7 Αριθμός και τύπος δοκιμής που εκτελέστηκε σε κάθε εδαφικό τύπο.....	35
Πίνακας 8 Διακύμανση ορίων Atterberg για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας (CH – CL).....	36
Πίνακας 9 Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας (CH – CL).....	37

## **ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**

Σχήμα 1 Κατανομή τιμών αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη.....	38
Σχήμα 2 Κατανομή τιμών αστράγγιστης διατμητικής αντοχής από δοκιμές τριαξονικής φόρτισης χωρίς στερεοποίηση και χωρίς στράγγιση.....	38
Σχήμα 3 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής και των δύο τύπων αργίλων με αριθμό κρούσεων – εμπειρικές συσχετίσεις των Sanglerat- Decourt και Nixon .....	40
Σχήμα 4 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής- φυσικής υγρασίας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας .....	41
Σχήμα 5 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ορίου υδαρότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας .....	42
Σχήμα 6 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας .....	43
Σχήμα 7 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής - δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας και εμπειρικές συσχετίσεις των Wroth and Wood και Mitchell.....	44
Σχήμα 8 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με φυσική υγρασία για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας .....	45
Σχήμα 9 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με όριο υδαρότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας.....	46
Σχήμα 10 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας.....	47
Σχήμα 11 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας.....	48
Σχήμα 12 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με φυσική υγρασία για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας.....	49
Σχήμα 13 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής - ενεργού τάσης με όριο υδαρότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας και εμπειρικές συσχετίσεις των Windisch and Yong και Hansbo.....	50
Σχήμα 14 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής - ενεργού τάσης με δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας και εμπειρικές συσχετίσεις των Windisch and Yong, Lambe and Whitman, Skempton, Larsson, Bjerrum and Simons, Wroth and Houlsby .....	51
Σχήμα 15 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής - ενεργού τάσης με δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας και εμπειρική συσχέτιση των Bjerrum and Simons .....	52
Σχήμα 16 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με αριθμό κρούσεων για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας – εμπειρικές συσχετίσεις των Sivrikaya and Toğrol, Stroud, Sowers .....	53
Σχήμα 17 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-φυσικής υγρασίας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας .....	54
Σχήμα 18 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με φυσική υγρασία για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας .....	55
Σχήμα 19 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με φυσική υγρασία για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας.....	55

Σχήμα 20 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ορίου υδαρότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας .....	56
Σχήμα 21 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με όριο υδαρότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας .....	56
Σχήμα 22 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με όριο υδαρότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας .....	57
Σχήμα 23 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας .....	58
Σχήμα 24 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας .....	59
Σχήμα 25 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας .....	60
Σχήμα 26 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας .....	61
Σχήμα 27 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας .....	62
Σχήμα 28 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας .....	62
Σχήμα 29 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με αριθμό κρούσεων για αργίλους υψηλής πλαστικότητας – εμπειρικές συσχετίσεις των Sivrikaya and Togrol, Stroud, Sowers, Schmertmann .....	63
Σχήμα 30 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-φυσικής υγρασίας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας .....	64
Σχήμα 31 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με φυσική υγρασία για αργίλους υψηλής πλαστικότητας .....	64
Σχήμα 32 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με φυσική υγρασία για αργίλους υψηλής πλαστικότητας .....	65
Σχήμα 33 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ορίου υδαρότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας .....	66
Σχήμα 34 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με όριο υδαρότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας .....	66
Σχήμα 35 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με όριο υδαρότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας .....	67
Σχήμα 36 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας .....	68
Σχήμα 37 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας .....	68
Σχήμα 38 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής - ενεργού τάσης με δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας .....	69
Σχήμα 39 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας .....	70
Σχήμα 40 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας .....	71
Σχήμα 41 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής - ενεργού τάσης με δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας .....	71

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## *1.1 Γενικά*

Σε όλα τα προβλήματα που ένας γεωτεχνικός μηχανικός μπορεί να κληθεί να αντιμετωπίσει, συμπεριλαμβανομένης της εκτίμησης ωθήσεων γαιών, της φέρουσας ικανότητας των θεμελίων, ευστάθειας πρανών, το σημαντικότερο συστατικό για μια επιτυχημένη λύση, είναι η σωστή εκτίμηση της διατμητικής αντοχής του εδάφους. Δυστυχώς, η αντίσταση σε διάτμηση αποτελεί ένα σύνθετο φαινόμενο που δεν μπορεί να περιγραφεί από μερικούς απλούς κανόνες ή να εκτιμηθεί από την εκτέλεση μιας σειράς συνηθισμένων και σχετικά απλών και εύκολων δοκιμών. Παρά το γεγονός ότι η συμπεριφορά κάποιων εδαφών υπό ορισμένες συνθήκες μπορεί να προβλεφθεί με αρκετά μεγάλη ακρίβεια στηριζόμενοι σε απλές συνηθισμένες δοκιμές και διαδικασίες, για άλλα εδάφη αυτές μπορεί να μην είναι αρκετές και να απαιτείται γνώση αρκετών σχετικών πληροφοριών και τις πιο εξεζητημένες τεχνικές που υπάρχουν.

Πολλές δυσκολίες προκύπτουν κατά την εκτίμηση των κατάλληλων παραμέτρων του εδάφους εξαιτίας ποικίλων παραγόντων, όπως ο βαθμός διατάραξης του δοκιμίου, οι συνθήκες ξήρανσης και στερεοποίησης και τα επίπεδα της επιβαλλόμενης τάσης κατά τη δοκιμή καθώς επίσης η ποικιλία των εδαφικών τύπων και η συνολική διαδικασία διεξαγωγής της δοκιμής.

Τις τελευταίες δεκαετίες έγιναν εκτενείς έρευνες που στόχευαν στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των εδαφών διαφορετικής γεωλογικής σύστασης και προέλευσης καθώς και βαθμού προφόρτισης καθώς πλησιάζουν και φθάνουν στη διατμητική αστοχία. Η ύπαρξη συσχετίσεων μεταξύ αντοχής εδάφους και διαφόρων ιδιοτήτων του είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς επιτρέπει στους μελετητές να εκτιμήσουν, να συγκρίνουν ή ακόμα να διασταυρώσουν τις εδαφικές παραμέτρους που αποκτήθηκαν από διαφορετικές δοκιμές πεδίου και εργαστηριακές δοκιμές.

## *1.2 Σκοπός εργασίας*

Σκοπός της παρούσας εργασίας, είναι ο έλεγχος αξιοπιστίας των υπάρχοντων εμπειρικών συσχετίσεων μεταξύ της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής αργλικών εδαφών, του αριθμού κρούσεων από τη δοκιμή πρότυπης διείσδυσης (Standard Penetration Test-SPT) και των φυσικών χαρακτηριστικών των εδαφών (όρια

Atterberg, φυσική υγρασία). Η μελέτη αυτή στηρίζεται στη στατιστική επεξεργασία σημαντικού όγκου αποτελεσμάτων από επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια γεωτεχνικών ερευνών στις περιοχές από το Μαλιακό μέχρι το Κλειδί και από την Ηγουμενίτσα μέχρι τα Ιωάννινα.

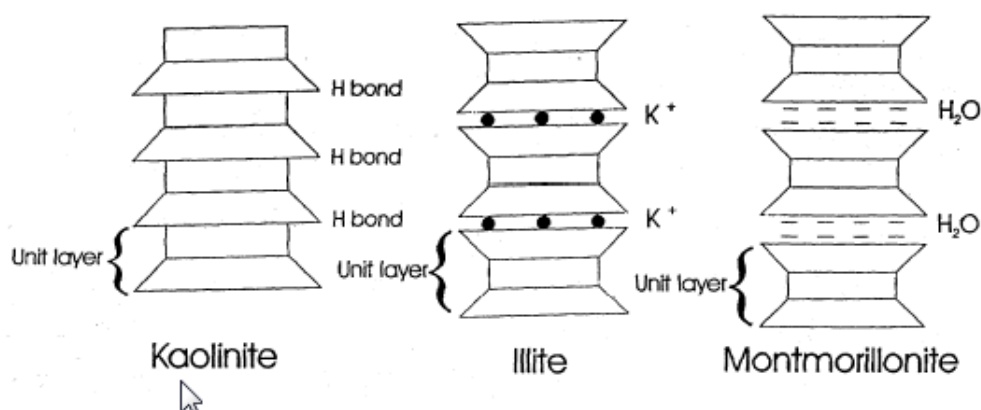
Παράλληλα, εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία εμπειρικές συσχετίσεις, οι οποίες όμως αφορούν κατά βάση αργιλικά υλικά στο εξωτερικό, όπως London Clay, Oxford Clay, Scandinavian Clay. Αντικείμενο της εργασίας, είναι η εξέταση της εφαρμοσιμότητας των εμπειρικών αυτών συσχετίσεων και στις ελληνικές αργίλους, που περιέχουν χάλικες, ενστρώσεις άμμου και ιλύων. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση γενικευμένων συσχετίσεων πρέπει να γίνεται με προσοχή καθώς το έδαφος ποικίλει από περιοχή σε περιοχή και έχει διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά. Την άποψη αυτή εξέφρασαν και οι Phoon και Kulhaway (1999).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

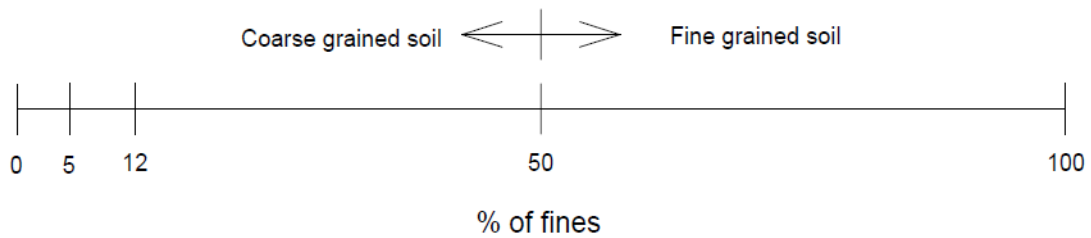
### 2.1 Προέλευση του εδάφους

Το έδαφος είναι ένα μη συμπαγές πολυφασικό υλικό, που αποτελείται από ασύνδετους ή ελαφρά συνδεδεμένους στερεούς κόκκους, τα κενά μεταξύ των οποίων περιέχουν νερό ή αέρα. Τα εδαφικά υλικά είναι αποτέλεσμα της μηχανικής και χημικής αποσάθρωσης. Η μηχανική αποσάθρωση οφείλεται σε παράγοντες όπως ο παγετός, οι συνεχείς θερμοκρασιακές μεταβολές, η διάβρωση από το νερό ή τον αέρα, οι λειτουργίες φυτών, ζώων και του ανθρώπου και οδηγεί σε τεμαχισμό και θρυμματισμό βράχων. Η μηχανική αποσάθρωση οδηγεί κυρίως στη δημιουργία χονδρόκοκκων εδαφών (χαλικών και άμμων). Η χημική αποσάθρωση μέσω της οξείδωσης, ενανθράκωσης, αναγωγής και άλλων χημικών διαδικασιών οδηγεί στην αποσύνθεση των πετρωμάτων και στο σχηματισμό λεπτόκοκκων εδαφών (ιλύων και αργίλων).



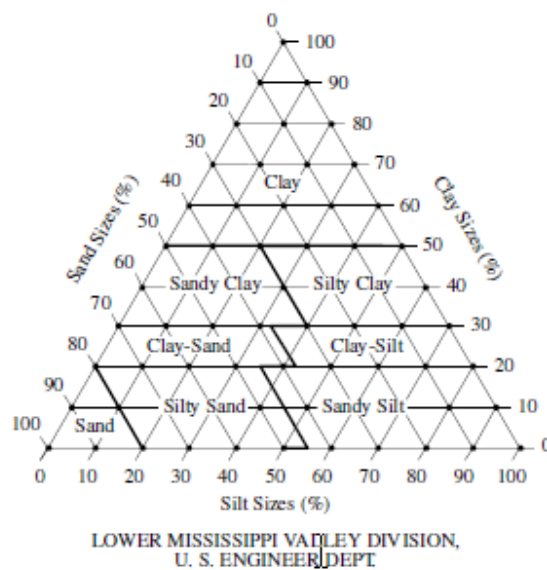
Εικόνα 1 Η δομή τριών αργιλικών ορυκτών (K. Arulanandan, 2003)

Τα χονδρόκοκκα εδάφη διαφέρουν από τα λεπτόκοκκα ως προς το μέγεθος των κόκκων, τον τρόπο δημιουργίας τους και τις μηχανικές τους ιδιότητες. Εδάφη με κόκκους που κυμαίνονται από 0,06 mm έως 2 mm ανήκουν στην κατηγορία των χονδρόκοκκων, ενώ με κόκκους με διάμετρο < 0,06 mm, στην κατηγορία των λεπτόκοκκων. Πιο συγκεκριμένα, οι ιλείς έχουν κόκκους από 0,06 mm έως 0,002 mm και οι άργιλοι έχουν κόκκους με μέγεθος μικρότερο από 0,002 mm. Τα λεπτόκοκκα εδάφη κατηγοριοποιούνται ως συνεκτικά, διότι αναπτύσσουν εφελκυστική αντοχή καθώς και αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, έχουν δηλαδή συνοχή.



**Εικόνα 2** Κατάταξη εδαφών σύμφωνα με το ποσοστό του περιεχομένου των λεπτόκοκκων (Ι. Βαρδουλάκης 2004)

Ένα έδαφος σπανίως θα είναι αμιγώς αργιλικό και σίγουρα θα περιέχει μεγάλο φάσμα διαστάσεων κόκκων. Για το λόγο αυτό, πολλοί προσφεύγουν στη χρήση ενός τριγωνικού διαγράμματος, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, **Εικόνα 3**. Από το παρακάτω διάγραμμα παρατηρούμε ότι ένα έδαφος που περιέχει πάνω από 50% αργιλικές διαστάσεις θα ταξινομηθεί ως άργιλος, ενώ παράλληλα κάθε έδαφος με περιεκτικότητα πάνω από 20% αργιλικών κόκκων θα έχει ιδιότητες αργίλου.



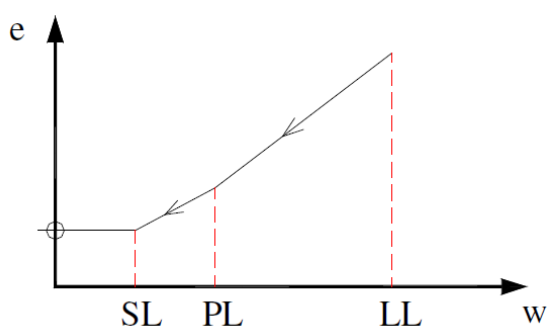
**Εικόνα 3** Τριγωνικό διάγραμμα ταξινόμησης εδαφών (Ι. Βαρδουλάκης 2004)

## 2.2 Φυσικά χαρακτηριστικά συνεκτικών εδαφών

Τα κύρια φυσικά χαρακτηριστικά των λεπτόκοκκων εδαφών είναι το ποσοστό υγρασίας και τα όρια Atterberg. Η παρουσία νερού είναι καθοριστική στα συνεκτικά εδάφη, καθώς επηρεάζει τη μηχανική τους συμπεριφορά. Όσο αυξάνει το ποσοστό υγρασίας τόσο μειώνεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των κόκκων του εδαφικού υλικού και η συμπεριφορά του προσομοιάζει τη συμπεριφορά των ρευστών.

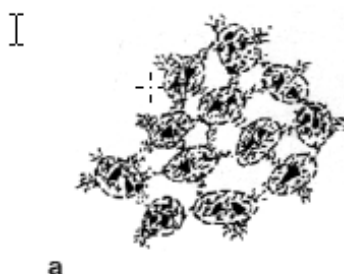
Ανάλογα με το ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας, υπάρχουν τέσσερις καταστάσεις στις οποίες μπορεί να εμφανιστεί ένα συνεκτικό εδαφικό υλικό. Στην κατάσταση που το έδαφος παρουσιάζει μικρές παραμορφώσεις, η θραύση είναι απότομη και ψαθυρή και ονομάζεται εύθρυπτο στερεό. Στην κατάσταση που το έδαφος μπορεί να πλάθεται και να υφίσταται σημαντικές πλαστικές παραμορφώσεις χωρίς ρηγματώσεις και θραύση, ονομάζεται πλάστιμο στερεό. Στην ενδιάμεση κατάσταση, πρόκειται για ημιστερεό με ενδιάμεσα χαρακτηριστικά. Η τελευταία κατάσταση στην οποία μπορεί να εμφανιστεί ένα εδαφικό υλικό είναι ως παχύρευστο υγρό. Δεν μπορεί να αναλάβει διατμητικές τάσεις χωρίς συνεχιζόμενη παραμόρφωση. Σε μικρά ποσοστά υγρασίας το έδαφος παρουσιάζει χαρακτηριστικά ερπυσμού, καθώς όμως αυτό το ποσοστό αυξάνεται πρόκειται για πραγματική ροή.

Για το διαχωρισμό των τεσσάρων καταστάσεων έχουν προσδιοριστεί όρια ποσοστού υγρασίας, γνωστά ως όρια Atterberg. Τα όρια Atterberg αποτελούν χαρακτηριστικές ιδιότητες κάθε συνεκτικού υλικού και προσδιορίζονται με πρότυπες εργαστηριακές δοκιμές. Μεταξύ στερεάς και ημιστερεάς κατάστασης είναι το όριο συρρίκνωσης (SL), μεταξύ ημιστερεάς και πλάστιμης κατάστασης είναι το όριο πλαστικότητας (PL) και μεταξύ πλάστιμης και υδαρούς κατάστασης είναι το όριο υδαρότητας (LL). Η φυσική σημασία των ορίων είναι ότι τα λεπτόκοκκα εδάφη έχουν την ιδιότητα να προσροφούν στην επιφάνεια των αργιλικών τους πλακιδίων νερό, το οποίο συνδέεται ισχυρά με το συγκεκριμένο πλακίδιο χωρίς να μειώνει σημαντικά το βαθμό της ηλεκτροχημικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των πλακιδίων, άρα χωρίς να μειώνει και τη μηχανική τους αντοχή. Βέβαια, δεν είναι απεριόριστη η δυνατότητα προσρόφησης νερού χωρίς σημαντική απώλεια αντοχής. Το μέγιστο ποσοστό υγρασίας που προσροφάται χωρίς να αλλάξει η κατάσταση του εδαφικού υλικού, είναι αυτό που καθορίζει τα όρια Atterberg.

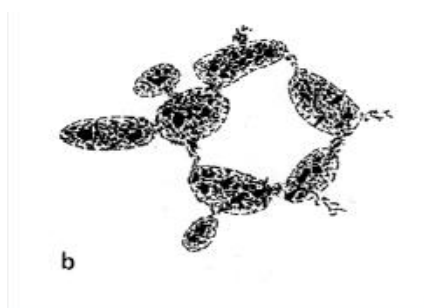


**Εικόνα 4** Μείωση δείκτη πόρων (στερεοποίηση) εδάφους λόγω μείωσης της περιεκτικότητας σε νερό (Ι. Βαρδουλάκης 2004)

Οι φυσικές ιδιότητες των αργιλικών εδαφών διαφοροποιούνται δραστικά, ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε νερό. Η πρώτη περίπτωση είναι η άργιλος να συμπεριφέρεται σαν κανονικό στερεό με μεγάλη αντοχή. Αυτό συμβαίνει εφόσον αφαιρεθεί το σύνολο του νερού των πόρων. Στην κατάσταση αυτή, τα πλακίδια της άργιλου πλησιάζουν πολύ μεταξύ τους και αναπτύσσονται ισχυρές ελκτικές ηλεκτροχημικές δυνάμεις τύπου Van der Waals. Εξαιτίας των ισχυρών δυνάμεων, δεν είναι δυνατή η επιπλέον προσρόφηση νερού στα κενά της άργιλου και η αύξηση του όγκου των κενών (διόγκωση υλικού). Η δεύτερη ακραία κατάσταση, είναι η υδαρής κατάσταση ενός μίγματος νερού και αργιλικού υλικού. Η περιεκτικότητα σε νερό είναι πολύ μεγάλη και η μηχανική συμπεριφορά της δεδομένης άργιλου προσομοιάζει με εκείνη ενός μη - Νευτώνειου παχύρευστου υγρού.



**Εικόνα 5** Σχηματική διάταξη αργιλικών πλακιδίων με θαλασσινό νερό (Pusch, 1970)



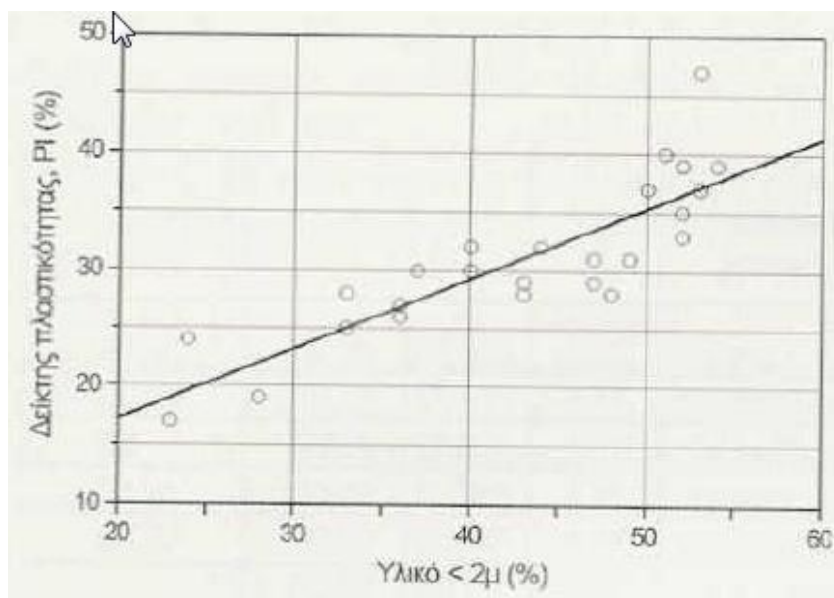
**Εικόνα 6** Σχηματική διάταξη αργιλικών πλακιδίων με καθαρό νερό (Pusch, 1970)

Με βάση τα όρια Atterberg, έχουν προσδιορισθεί οι δείκτες πλαστιμότητας και σχετικής υδαρότητας, γνωστοί ως δείκτες συνεκτικότητας. Δεν έχουν θεμελιώδη ποσοτική έννοια καθώς έχουν προσδιορισθεί εμπειρικά, μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν για την ποιοτική περιγραφή των συνεκτικών υλικών και για την κατάταξή τους σε κατηγορίες.

- Ο δείκτης πλαστιμότητας (PI) δίνεται από τον τύπο:

$$PI = LL - P L$$

Εκφράζει το εύρος της πλάστιμης περιοχής, δηλαδή την περιοχή στην οποία το εδαφικό υλικό συμπεριφέρεται σαν πλάστιμο υλικό. Όσο πιο ενεργά είναι τα αργιλικά πλακίδια, δηλαδή όσο περισσότερο νερό μπορεί να προσροφηθεί στην επιφάνειά τους χωρίς να μειωθεί σημαντικά ο βαθμός της ηλεκτροχημικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των πλακιδίων, τόσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης πλαστιμότητας. Οι τυπικές τιμές είναι  $LL < 100\%$  και  $PL < 40\%$ . Συνήθως, ο δείκτης πλαστιμότητας PI συσχετίζεται με το ποσοστό της αργίλου στο έδαφος, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 7**. Η γνώση του PI σε συνδυασμό με το LL είναι δυνατόν να καθορίσει τη μεταβολή των βασικών χαρακτηριστικών ιδιοτήτων των εδαφών όπως: συμπιεστότητα, διαπερατότητα, μεταβολή όγκου και συνεκτικότητα σε ξηρή κατάσταση.



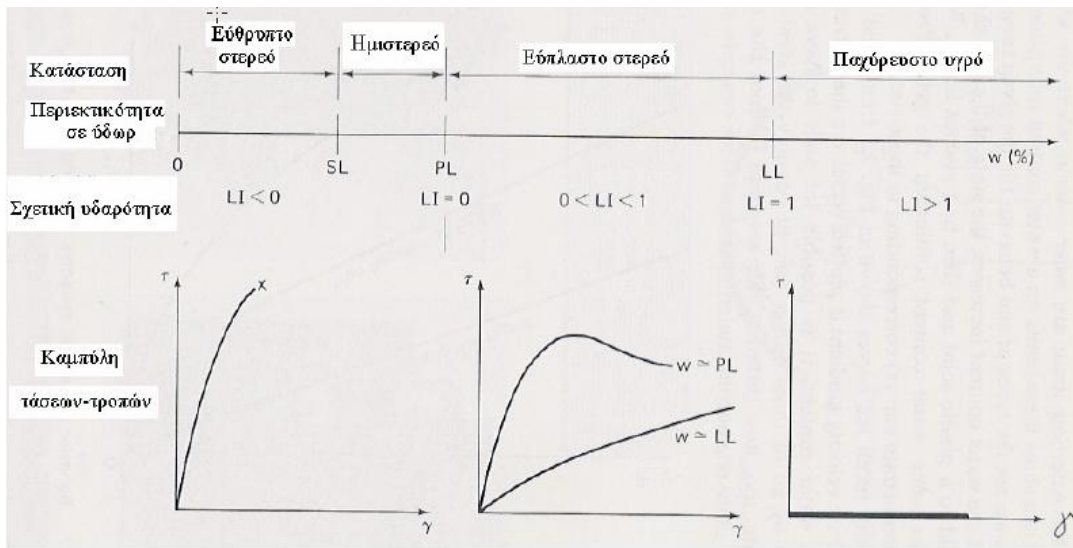
**Εικόνα 7** Μεταβολή του δείκτη πλαστιμότητας με το ποσοστό του αργιλικού υλικού (Ι. Βαρδουλάκης 2004)

- Ο δείκτης σχετικής υδαρότητας (LI) δίνεται από τον τύπο:

$$LI = \frac{w - PL}{LL - PL}$$

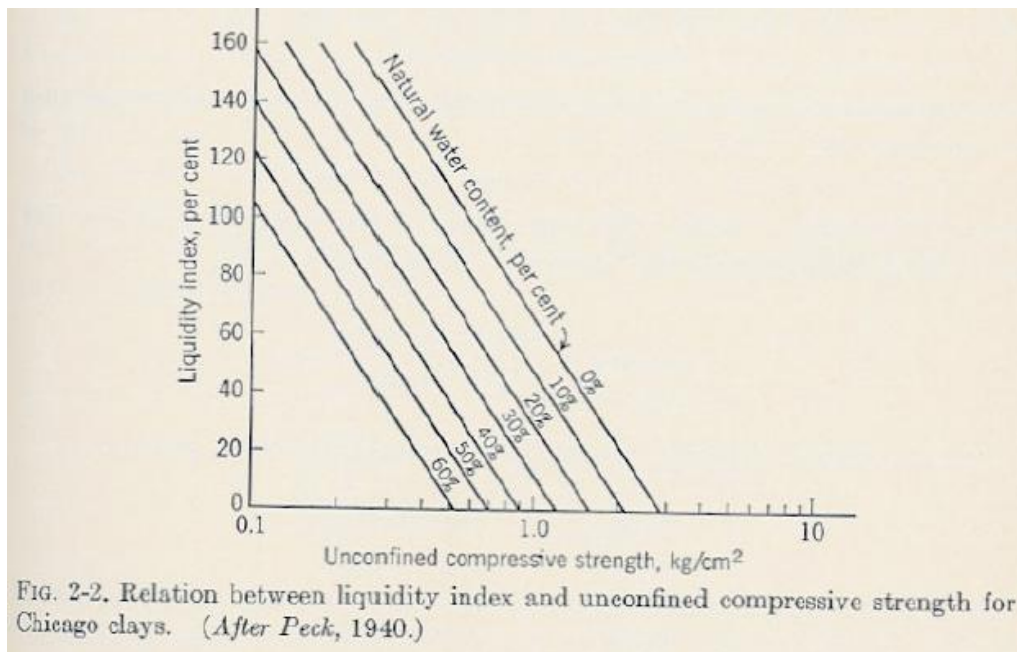
Εκφράζει τη σχέση του πραγματικού ποσοστού υγρασίας ( $w$ ) ως προς το όριο υδαρότητας ( $LL$ ). Οι τιμές του LI μεταξύ 0 και 1 αντιστοιχούν στην πλάστιμη

περιοχή, οι τιμές  $<0$  αντιστοιχούν στην ημιστερεά και στερεά κατάσταση και οι τιμές  $>1$  στην υδαρή κατάσταση.



**Εικόνα 8** Μεταβολή της συνεκτικότητας και της μηχανικής συμπεριφοράς των αργίλων με το ποσοστό υγρασίας (Καββαδάς 2007)

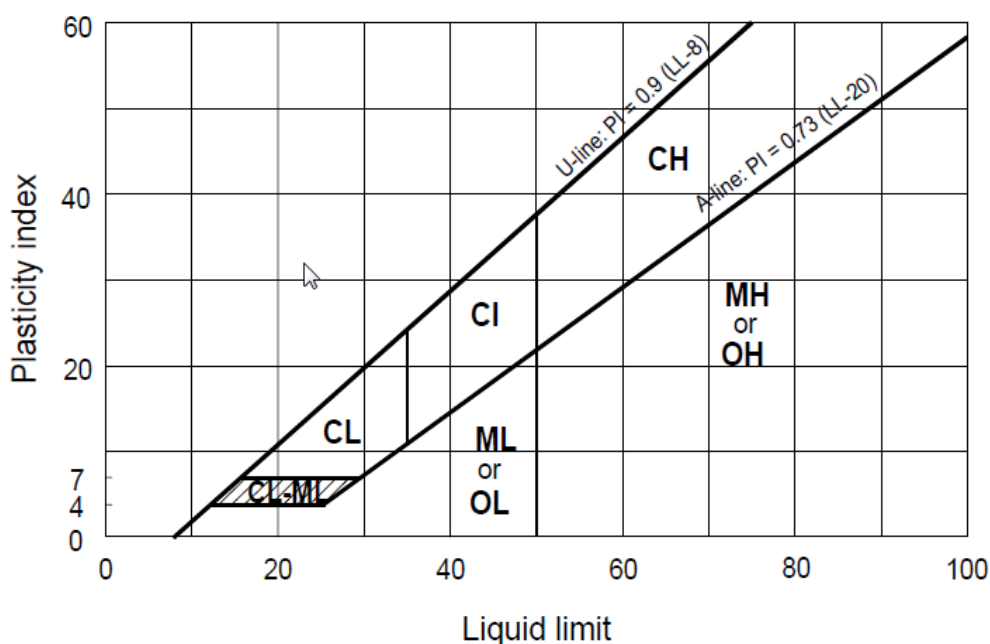
Τα όρια Atterberg χρησιμοποιούνται στην πράξη για την εξαγωγή εμπειρικών συσχετίσεων ανάμεσα σε αυτά και σε άλλες μηχανικές ιδιότητες των αργίλων όπως αντοχή, διαπερατότητα σε νερό κ.α.



**Εικόνα 9** Τυπικό διάγραμμα συσχετισμού του δείκτη σχετικής υδαρότητας με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ενός αργιλικού υλικού (Ι. Βαρδουλάκης 2004)

### 2.3 Ταξινόμηση εδαφών με βάση τα όρια Atterberg

Στην Ελλάδα, η επικρατέστερη μέθοδος κατάταξης εδαφών είναι το Ενοποιημένο Σύστημα Κατάταξης εδαφών ( Unified Soil Classification System-USCS ). Το σύστημα αυτό βασίζεται στα ποσοστά του εδάφους που διέρχονται από το κόσκινο Νο200 και από το κόσκινο Νο4 και στα όρια Atterberg και έχει τη μορφή του χάρτη πλαστιμότητας του Casagrande (**Εικόνα 10**). Στο χάρτη πλαστιμότητας με άξονες το όριο υδαρότητας και το δείκτη πλαστιμότητας, το διάγραμμα χωρίζεται σε τέσσερις περιοχές από τη γραμμή-A και τη γραμμή που αντιστοιχεί σε όριο υδαρότητας 50%. Η γραμμή U που υπάρχει στο διάγραμμα είναι το ανώτερο όριο για τη σχέση PI - LL. Τα συνεκτικά εδάφη που αντιστοιχούν σε σημεία πάνω από τη γραμμή - A ονομάζονται άργιλοι (C), ενώ αυτά που αντιστοιχούν σε σημεία κάτω από τη γραμμή - A ονομάζονται ιλείς (M). Επιπρόσθετα, τα εδάφη που παριστάνονται με σημεία δεξιά της γραμμής με όριο υδαρότητας 50% λέγονται εδάφη υψηλής πλαστιμότητας (H) ενώ τα εδάφη που παριστάνονται με σημεία αριστερά της γραμμής με όριο υδαρότητας 50% λέγονται εδάφη χαμηλής πλαστιμότητας (L). Τα παραπάνω παρουσιάζονται συνοπτικά στον **Πίνακα 1**.



**Εικόνα 10** Χάρτης πλαστιμότητας Casagrande

Η ταξινόμηση των εδαφών σε κατηγορίες με παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες είναι ιδιαίτερα σημαντική και επιτυγχάνεται με απλές, σύντομες δοκιμές μικρού κόστους. Σε προκαταρκτικές εκτιμήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφών, η

κατάταξη ενός εδαφικού σχηματισμού σε μία κατηγορία με την εκτέλεση απλών δοκιμών αρκεί για την αρχική εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων, καθώς τα εδάφη που ανήκουν στην ίδια κατηγορία έχουν παρόμοιες ιδιότητες.

Κατά το παρελθόν έχουν προταθεί πολλές εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ των φυσικών χαρακτηριστικών των εδαφών και των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Οι συσχετίσεις αυτές έχουν προκύψει από δοκιμές που έγιναν σε συγκεκριμένες κατηγορίες εδαφών, συνεπώς η γενικευμένη χρήση τους για κάθε τύπο εδάφους πιθανόν να οδηγήσει σε εσφαλμένες εκτιμήσεις. Ακόμα και αν υπάρχουν εμπειρικές συσχετίσεις για το συγκεκριμένο έδαφος, κρίνεται απαραίτητη η εκτέλεση δοκιμών καθώς οι σχέσεις πρέπει να περιορίζονται στις προκαταρκτικές εκτιμήσεις των μηχανικών ιδιοτήτων.

<b>Λεπτόκοκκα εδάφη: &gt;50% Διέρχεται από το Νο200</b>	<b>Εδάφη ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ LL&lt;50%</b>	<b>ΑΡΓΙΛΟΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ: πάνω από τη γραμμή A</b>	CL
		<b>ΙΛΕΙΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ: κάτω από τη γραμμή A</b>	ML
		<b>ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΙΛΕΙΣ ή ΑΡΓΙΛΟΙ ΧΑΜΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ</b>	OL
	<b>Εδάφη ΥΨΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ LL&gt;50%</b>	<b>ΑΡΓΙΛΟΙ ΥΨΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ: πάνω από τη γραμμή A</b>	CH
		<b>ΙΛΕΙΣ ΥΨΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ: κάτω από τη γραμμή A</b>	MH
		<b>ΟΡΓΑΝΙΚΕΣ ΙΛΕΙΣ ή ΑΡΓΙΛΟΙ ΥΨΗΛΗΣ ΠΛΑΣΤΙΜΟΤΗΤΑΣ</b>	OH

**Πίνακας 1** Ενιαίο σύστημα ταξινόμησης εδαφών (USCS)



## **2.4 Διατμητική αντοχή των εδαφών**

Στα συνεκτικά εδάφη η διατμητική αντοχή οφείλεται στη μηχανική τριβή μεταξύ των πλακιδίων και στην πραγματική συγκόλληση των πλακιδίων. Η συνοχή εμφανίζεται λόγω της σιμέντωσης μεταξύ των πλακιδίων ή λόγω των ηλεκτροχημικών δυνάμεων συνάφειας μεταξύ των προσροφημένων διπλών στρώσεων και των αργιλικών πλακιδίων. Τα αργιλικά εδάφη παρουσιάζουν πραγματική συνοχή, οπότε εμφανίζουν διατμητική αντοχή ακόμα και όταν η ορθή τάση είναι μηδέν.

### **2.4.1 Αστράγγιστη διατμητική αντοχή εδαφών**

Η αντοχή σε διάτμηση υπό αστράγγιστες συνθήκες νοείται όταν έχουμε αστοχία προτού λάβει χώρα σημαντική αποτόνωση των πιέσεων του νερού των πόρων λόγω διάτμησης. Σε κορεσμένα εδάφη, η αστοχία υπό αστράγγιστες συνθήκες είναι ισοδύναμη με την ενεργοποίηση της αντίστασης σε διάτμηση ενώ ο όγκος παραμένει σταθερός, οπότε δε σχετίζεται με κάποια αλλαγή στο ποσοστό του περιεχόμενου νερού. Συνδυασμοί ρυθμών διάτμησης και οριακών συνθηκών στράγγισης που μπορούν να οδηγήσουν σε διατμητική αστοχία, είναι εννοιολογικά τουλάχιστον πιθανό να υπάρχουν σε κάθε έδαφος, δηλαδή από μαλακές έως στιφρές αργίλους και ιλείς, ρωγματωμένες αργίλους και σχιστόλιθους ή ακόμα και σε λεπτόκοκκα έως χονδρόκοκκα εδάφη (π.χ. ρευστοποίηση). Στο πεδίο για παράδειγμα, αστοχία υπό αστράγγιστες συνθήκες μπορεί να προκληθεί σε στιφρή άργιλο, εάν γίνει μια εκσκαφή πολύ γρήγορα ή με τη γρήγορη φόρτιση ενός δοκιμαστικού πασσάλου. Με τον κατάλληλο εργαστηριακό εξοπλισμό, το ρυθμό διάτμησης και τις συνθήκες αποστράγγισης, είναι δυνατή η εκτέλεση δοκιμών υπό αστράγγιστες συνθήκες σε κάθε τύπο εδάφους ή βράχο.

Όμως, κατά τη διάρκεια μιας κατασκευής, αστάθεια υπό αστράγγιστες συνθήκες αναπτύσσεται κυρίως λόγω συστολικής διάτμησης. Αυτή η κατάσταση προσδιορίζεται από τη συμπίεστικότητα και τη διαπερατότητα του εδάφους, καθώς επίσης και από τη θλιπτική δύναμη που επιβάλλεται κατά τη διάτμηση. Κατά τη συστολική διάτμηση, ο μηχανισμός παραμόρφωσης που προσπαθεί να ενεργοποιήσει την αντίσταση σε διάτμηση λόγω τριβής, επίσης προκαλεί συστολική συμπεριφορά της εδαφικής δομής κάτω από την επικρατούσα θλιπτική πίεση. Αυτή η τάση, η οποία δεν είναι αντιληπτή είτε λόγω χαμηλής διαπερατότητας είτε λόγω γρήγορης

διάτμησης, παράγει μεγάλες θετικές υπερπιέσεις και σχετίζεται με τη μείωση της ενεργού τάσης. Συνθήκες συστολικής διάτμησης γενικά υπάρχουν σε μαλακές αργίλους, ιλείς και χαλαρές αποθέσεις καθαρής άμμου, όταν φορτίζονται από επιχώματα, θεμελιώσεις, εκσκαφή σε πρηνή. Μία κατασκευή η οποία τελειώνει σε αρκετούς μήνες (αργός ρυθμός φόρτισης), μπορεί να σχετίζεται με αστοχία υπό αστράγγιστες συνθήκες όταν γίνεται σε μαλακές αργίλους και ιλείς με χαμηλή διαπερατότητα. Σε χαλαρές άμμους με υψηλή διαπερατότητα, αστάθεια υπό αστράγγιστες συνθήκες μπορεί να παρατηρηθεί εφόσον επιβάλλεται κάποια δυναμική φόρτιση, όπως σεισμική διέγερση. Επιπλέον, αν και οι μαλακές άργιλοι, οι ιλείς και οι χαλαρές άμμοι έχουν εγγενώς υψηλή συμπίεστικότητα, απαιτούν μέτρια ως υψηλή θλιπτική πίεση κατά τη διάρκεια της διάτμησης, προκειμένου να αναπτύξουν συνθήκες συστολικής διάτμησης. Τέτοιες θλιπτικές τάσεις γενικά εμφανίζονται κατά την αστοχία επιφανειών που προήλθαν από φόρτιση λόγω επιχωμάτων ή θεμελίωσης ή κατά την αστοχία στη βάση επιφανειών λόγω βαθιάς εκσκαφής υπογείων ή σιράγγων.

Η πιο εκτενής εμπειρία που υπάρχει σχετικά με την αστράγγιστη διατμητική αντοχή που ενεργοποιείται στο πεδίο, αφορά μαλακές αργίλους, ιλείς και δευτερευόντως καθαρές άμμους επειδή για συνηθισμένες κατασκευές, αστάθεια υπό αστράγγιστες συνθήκες αναπτύσσεται μόνο κάτω από συνθήκες συστολικής εδαφικής διάτμησης. Τα παραπάνω δικαιολογούν γιατί η αστράγγιστη διατμητική αντοχή για τα συγκεκριμένα υλικά είναι πρωτεύουσας σημασίας στη γεωτεχνική ανάλυση και το σχεδιασμό.

#### ***2.4.1.1 Επιρροή χαρακτηριστικών στην εκτίμηση αστράγγιστης διατμητικής αντοχής συνεκτικών εδαφών***

Κατά την εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής λεπτόκοκκων εδαφών είναι σημαντική η επίδραση κάποιων χαρακτηριστικών, τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

- Οι διαφορές μεταξύ των εντατικών καταστάσεων επί τόπου και στη δοκιμή, καθώς η αστράγγιστη διατμητική αντοχή εξαρτάται από τις ενεργές τάσεις.
- Η διατάραξη των δειγμάτων, ειδικά για εργαστηριακές δοκιμές σε δείγματα γεωτρήσεων.
- Η ανισοτροπία των δειγμάτων, ειδικά σε αργίλους χαμηλής πλαστικότητας.

- Οι μικρορωγμές ειδικά σε στιφρές αργίλους. Τα αποτελέσματα των δοκιμών μπορούν να αντιπροσωπεύουν την αντοχή είτε των ρωγμών είτε της μη ρωγματωμένης αργίλου και κάθε μία από αυτές τις αντοχές μπορεί να διέπει την επιτόπου συμπεριφορά. Το μέγεθος του δείγματος μπορεί να είναι σημαντικό.
- Οι επιδράσεις της ταχύτητας. Δοκιμές που εκτελούνται πολύ γρήγορα τείνουν να δίνουν υψηλότερες αντοχές.
- Οι επιδράσεις μεγάλων παραμορφώσεων. Οι περισσότερες άργιλοι παρουσιάζουν απώλεια αντοχής σε πολύ μεγάλες παραμορφώσεις και κατά μήκος προυπαρχουσών επιφανειών ολίσθησης.
- Οι χρονικές επιδράσεις. Η περίοδος κατά την οποία το έδαφος θα συμπεριφέρεται ως πρακτικά αστράγγιστο εξαρτάται από τη διαπερατότητά του, την ύπαρξη ελεύθερης επιφάνειας νερού και τη γεωμετρία του προβλήματος.
- Η ανομοιογένεια των δειγμάτων όπως ενστρώσεις χαλίκων ή άμμου μέσα σε αργιλικό δείγμα.
- Ο βαθμός κορεσμού.
- Ο βαθμός εμπιστοσύνης στη θεωρία που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής από τα αποτελέσματα των δοκιμών, ειδικά για τις επιτόπου δοκιμές.

## ***2.5 Επίδραση αστράγγιστων και υπό στράγγιση συνθηκών στη διατμητική αντοχή***

Συνθήκες στράγγισης επικρατούν όταν η υπερπίεση του νερού των πόρων του εδαφικού υλικού που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της επιβαλλόμενης φόρτισης, εκτονώνεται ελεύθερα. Αστράγγιστες συνθήκες δημιουργούνται όταν η υπερπίεση του νερού των πόρων δεν μπορεί να αποστραγγιστεί ή μπορεί να αποστραγγιστεί αλλά με πολύ αργό ρυθμό από το εδαφικό υλικό. Η ύπαρξη αστράγγιστων συνθηκών ή συνθηκών στράγγισης εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους, από τη γεωλογική σύστασή του και από το ρυθμό της φόρτισης.

Ο ρυθμός φόρτισης υπό αστράγγιστες συνθήκες είναι γρηγορότερος από το ρυθμό εκτόνωσης της υπερπίεσης του νερού των πόρων και η τάση για αλλαγή του όγκου του εδάφους καταστέλλεται. Εδάφη που έχουν την τάση να συμπυκνώνονται

κατά τη διάρκεια στραγγιζόμενης φόρτισης, εμφανίζουν αύξηση της υπερπίεσης του νερού των πόρων (θετική υπερπίεση) κάτω από αστράγγιστες συνθήκες, με αποτέλεσμα να μειώνεται η ενεργός τάση. Αντίθετα, εδάφη που έχουν την τάση να διογκώνονται κατά τη διάρκεια στραγγιζόμενης φόρτισης εμφανίζουν μείωση της υπερπίεσης του νερού των πόρων (αρνητική υπερπίεση) κάτω από αστράγγιστες συνθήκες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ενεργός τάση. Αυτές οι αλλαγές στην υπερπίεση του νερού των πόρων οφείλονται στο γεγονός ότι η αναλογία κενών παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της φόρτισης υπό αστράγγιστες συνθήκες, δηλαδή δεν παρατηρείται κάποια αλλαγή στον όγκο του εδάφους.

Με την πάροδο του χρόνου, εκτονώνεται η υπερπίεση του νερού των πόρων που προέκυψε από την επιβολή φορτίου και επικρατούν συνθήκες στράγγισης. Όσον αφορά στις αργίλους, απαιτείται πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα προκειμένου να εκτονωθεί η υπερπίεση και να επικρατήσουν συνθήκες στράγγισης, λόγω της μικρής τους περατότητας. Αντίθετα, η διαπερατότητα των χονδρόκοκκων εδαφών είναι αρκετά μεγάλη ώστε υπό στατική φόρτιση παρατηρείται γρήγορη εκτόνωση των υπερπίεσεων του νερού των πόρων. Συνεπώς, αστράγγιστες συνθήκες υπό στατική φόρτιση αναπτύσσονται μόνο σε λεπτόκοκκα εδάφη ή σε μείγματα λεπτόκοκκων εδαφών που περιέχουν και χάλικες. Σε περίπτωση δυναμικής φόρτισης, η επιβολή του φορτίου γίνεται τόσο γρήγορα, που ακόμα και τα χονδρόκοκκα εδάφη δεν προλαβαίνουν να εκτονώσουν την υπερπίεση του νερού των πόρων, οπότε επικρατούν αστράγγιστες συνθήκες.

Η διατμητική αντοχή λεπτόκοκκου εδάφους υπό αστράγγιστες συνθήκες, ονομάζεται αστράγγιστη διατμητική αντοχή,  $S_u$ . Η διατμητική αντοχή υπό αστράγγιστες συνθήκες εξαρτάται μόνο από τον αρχικό λόγο κενών ή από την αρχική υγρασία. Σε περίπτωση που η αρχική ορθή τάση αυξηθεί, παρατηρείται μείωση του αρχικού λόγου κενών και αύξηση της πίεσης του νερού των πόρων. Συνεπώς, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή δεν αποτελεί θεμελιώδη ιδιότητα του εδάφους, αλλά εξαρτάται από το μέγεθος της θλιπτικής τάσης που ασκείται στο έδαφος. Κατά την εκπόνηση γεωτεχνικών μελετών, όταν πρόκειται για λεπτόκοκκα εδάφη και βραχυπρόθεσμη φόρτιση, είναι απαραίτητη η γνώση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής. Για τον προσδιορισμό αυτής, χρησιμοποιούνται εργαστηριακές δοκιμές και επί τόπου δοκιμές, μερικές από τις οποίες περιγράφονται στη συνέχεια.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕΣΩ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ**

### ***3.1 Επί τόπου έρευνες***

Στα πιο σύνθετα και απαιτητικά έργα, συχνά χρησιμοποιείται συνδυασμός των μεθόδων προκειμένου να αποκτηθούν οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού. Σε πρόσφατες έρευνες που έγιναν για έργα μείζονος σημασίας σε περιοχή με άργιλο Λονδίνου (London clay), για τον προσδιορισμό της αντοχής πραγματοποιήθηκαν και επί τόπου και εργαστηριακές δοκιμές.

Οι δοκιμές προσδιορισμού της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής των αργίλων διεξάγονται αρκετά γρήγορα προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το έδαφος διατηρεί τις αστράγγιστες συνθήκες με υψηλές ταχύτητες φόρτισης. Το γεγονός αυτό είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί με βεβαιότητα, καθώς η ύπαρξη λεπτών αμμωδών ή ιλυωδών ενστρώσεων κατά τη διάρκεια της δοκιμής έχει πολύ μεγάλη επίδραση στην ταχύτητα εκτόνωσης της πίεσης του νερού των πόρων.

Οι επί τόπου δοκιμές αποτελούν πολύ σημαντικά τμήματα μιας γεωτεχνικής μελέτης, καθώς τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών δεν είναι πάντα αξιόπιστα ενώ πιο εξελιγμένες δοκιμές απαιτούν περισσότερο χρόνο και κοστίζουν ακριβά. Όταν πρόκειται για πολύ μαλακές ή ευαίσθητες αργίλους, η διεξαγωγή επί τόπου δοκιμών είναι επιθυμητή έως και απαραίτητη για τον προσδιορισμό των αστράγγιστων παραμέτρων. Αυτό συμβαίνει διότι σε αυτά τα εδάφη είναι δύσκολο να πάρουμε αδιατάρακτα δείγματα καλής ποιότητας. Ακόμα και αν χρησιμοποιηθεί κάποια πιο εξελιγμένη μέθοδος, το κόστος είναι πολύ μεγαλύτερο και απαιτείται περισσότερος χρόνος διεξαγωγής της δειγματοληψίας.

Οι επί τόπου δοκιμές που χρησιμοποιούνται για την έμμεση εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής είναι:

- Η δοκιμή πρότυπης διείσδυσης (Standard Penetration Test - SPT)
- Η δοκιμή διείσδυσης κώνου (Cone penetration test)
- Η δοκιμή πτερυγίου (Field Vane test)

Παρακάτω επικεντρώνουμε στη δοκιμή πρότυπης διείσδυσης, που αφορά τη βάση δεδομένων της παρούσας έρευνας

### **3.2 Πρότυπη δοκιμή διείσδυσης (*Standard Penetration Test*)**

Η δοκιμή πρότυπης διείσδυσης αποτελεί την πιο παλιά και την πιο συνηθισμένη από τις επί τόπου δοκιμές που χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση του υπεδάφους σε διάφορες γεωτεχνικές εφαρμογές και στο σχεδιασμό θεμελιώσεων. Η δοκιμή αυτή είναι πολύ εύκολη να πραγματοποιηθεί και απαιτείται απλός εξοπλισμός. Τα δείγματα που λαμβάνονται, είναι διαταραγμένα, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατάταξη των εδαφικών τύπων. Η δοκιμή μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορους εδαφικούς τύπους που κυμαίνονται από χαλαρές αργίλους και χαλαρές άμμους μέχρι πολύ στιφρές αργίλους και πυκνές άμμους. Αρχικά, η δοκιμή αυτή χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά και μόνο στα χονδρόκοκκα εδάφη, στη συνέχεια εφαρμόστηκε και στα λεπτόκοκκα εδάφη για την έμμεση εκτίμηση των εδαφικών ιδιοτήτων όπως η αστράγγιστη αντοχή σε θλίψη ( $q_u$ ) και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή ( $S_u$ ).

Λόγω της ευκολίας διεξαγωγής της δοκιμής αυτής και το γεγονός ότι επιτρέπει πολλές συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στις γεωτεχνικές μελέτες, είναι η πιο δημοφιλής μεταξύ των δοκιμών διείσδυσης στη νότια Ευρώπη, στη βόρεια και νότια Αμερική, στο Ηνωμένο Βασίλειο, στην Αυστραλία, στην Ινδία, στην Ισπανία, στην Πορτογαλία, στη νότια Αφρική, στην Τουρκία, στο Ισραήλ και στην Ιαπωνία.

Γενικά προτείνεται να γίνονται δύο τουλάχιστον τύποι επί τόπου δοκιμών, έτσι ώστε να είναι δυνατή η συσχέτιση των αποτελεσμάτων και να εκτιμώνται οι απαραίτητες γεωτεχνικές παράμετροι με μεγαλύτερη ακρίβεια. Είναι βέβαια γεγονός, ότι στις περισσότερες γεωτεχνικές μελέτες εκτελείται μόνο ένα είδος δοκιμής καθώς οι διαθέσιμες πληροφορίες είναι συνήθως μόνο από τη δοκιμή SPT, όμως για σημαντικά έργα σε δυσμενείς γεωτεχνικές συνθήκες, είναι δόκιμη η εκτέλεση επιπλέον δοκιμών.

Από τη δοκιμή προκύπτει ο αριθμός των κρούσεων που απαιτούνται για να διεισδύσει ένας δειγματολήπτης 30 cm στο έδαφος. Ο αριθμός των κτύπων που μετρούνται για τα πρώτα 15 cm αγνοείται, καθώς θεωρούμε ότι αντιστοιχούν σε διαταραγμένο έδαφος εξαιτίας της χρήσης του γεωτρύπανου. Ο μέγιστος αριθμός

κτύπων ανά 15 cm είναι 50, συνεπώς ο μέγιστος αριθμός κτύπων κατά τη δοκιμή είναι 100.

Καθώς η δοκιμή δεν είναι εντελώς τυποποιημένη, αλλά διαφέρει π.χ. από χώρα σε χώρα ανάλογα με τον εξοπλισμό, πολλοί μελετητές έχουν προτείνει την κανονικοποίηση των τιμών  $N$  που μετρώνται κατά τη δοκιμή. Πολλοί παράγοντες και μεταβλητές επηρεάζουν την εγκυρότητα και τη χρησιμότητα των αποτελεσμάτων της δοκιμής SPT (Nixon 1982, Broms and Flodin 1988, Coduto 1994). Έτσι, έχουν προκύψει πολλοί διορθωτικοί συντελεστές για τους κτύπους που μετρώνται στο πεδίο, λαμβάνοντας υπόψη τη διάμετρο της γεώτρησης, τον τύπο της σφύρας, τη συχνότητα των κτύπων, την ενέργεια που απελευθερώνεται και την επίδραση της πίεσης των υπερκείμενων γαιών. Δημιουργείται συχνά σύγχυση, καθώς δε γνωρίζουμε εάν στις υπάρχουσες συσχετίσεις έχει ληφθεί υπόψη ο διορθωμένος αριθμός των κρούσεων ή αυτός που έχει προκύψει απευθείας από τη δοκιμή. Η τιμή  $N$  του πεδίου ( $N_{\text{field}}$ ) πρέπει να διορθωθεί και να κανονικοποιηθεί σε  $N_{60}$ , δηλαδή ο αριθμός των κτύπων διορθωμένος στο 60% της θεωρητικής ενέργειας που απελευθερώνεται από τη θεωρητική ελεύθερη πτώση της σφύρας. Η γενική εξίσωση που περιλαμβάνει τις διορθώσεις για τα λεπτόκοκκα εδάφη είναι:

$$N_{60} = (C_B C_C C_E C_R C_S C_A) N_{\text{field}}$$

Ο αριθμός των κρούσεων μπορεί να διαφέρει ακόμα και σε σχεδόν ίδια εδάφη. Όπως είναι γνωστό, η δοκιμή SPT εξαρτάται από πολλούς παράγοντες λόγω της μεγάλης ποικιλίας των εφαρμογών κατά την εκτέλεση της δοκιμής και του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται. Η αξιοπιστία και η χρήση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη δοκιμή SPT, επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες όπως ο τύπος της δοκιμής, οι μέθοδοι διάτρησης, η μέθοδος ανύψωσης, η μάζα του πίπτοντας βάρους, το ύψος πτώσεως, ο εξοπλισμός διάτρησης, το μέγεθος της οπής, η διάμετρος της σωλήνωσης και των στελεχών, ο ρυθμός μέτρησης των κτύπων και ο τύπος της σφύρας, η επιρροή της πίεσης των υπερκείμενων γαιών και η φύση του εδάφους ιδιαίτερα όταν συναντώνται κροκάλες ή χονδρά χαλίκια. Ο συντελεστής  $C_E$ , χρησιμοποιείται για να αντισταθμίσει τη διαφορετική απόδοση από το διαφορετικό εξοπλισμό που μπορεί να χρησιμοποιείται στη δοκιμή, συνεπώς αυξάνει την αξιοπιστία της εκτίμησης που

γίνεται για την αντοχή του εδάφους, που χρησιμοποιείται κατά τη φάση του σχεδιασμού.

Ο αριθμός των κρούσεων χρησιμοποιείται σε πολλές εμπειρικές συσχετίσεις για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων κάθε τύπου εδάφους. Οι σχέσεις μεταξύ των τιμών των διάφορων εδαφικών παραμέτρων που προκύπτουν είτε από επί τόπου είτε από εργαστηριακές δοκιμές, βοηθούν τον εκάστοτε μηχανικό στο προκαταρκτικό στάδιο της μελέτης και στο να ελέγχει τη συνέπεια των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από διάφορες δοκιμές. Οι εμπειρικές συσχετίσεις που συνδέονται άμεσα με τον τύπο του εδάφους, μπορούν σύμφωνα με αρκετούς ερευνητές να χρησιμοποιηθούν και στο στάδιο σχεδιασμού προκειμένου να προσδιοριστούν οι τιμές των μηχανικών παραμέτρων από τα αποτελέσματα των επί τόπου δοκιμών ( Terzaghi and Peck 1967, Sanglerat 1972, Stroud 1974, Sowers 1979, Nixon 1982, Kulhaway and Mayne 1990, Sivrikaya and Togról 2002). Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν πάρα πολλές γνωστές συσχετίσεις στη βιβλιογραφία, δεν είναι ξεκάθαρο για το εάν έχουν συμπεριληφθεί ή όχι οι διορθώσεις στον αριθμό των κτύπων στη δοκιμή SPT και ποιες συσχετίσεις έχουν προκύψει από το  $N_{60}$  και ποιες από το  $N_{field}$ , με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε λανθασμένα αποτελέσματα και σε μεγάλα λάθη κατά το σχεδιασμό.

Οι πληροφορίες σχετικά με τον τύπο των εδαφών και τις συνθήκες που επικρατούν σε αυτά είναι ιδιαίτερα περιορισμένες, λόγω των δυσκολιών που αντιμετωπίζονται κατά τη δειγματοληψία, τη διάρκεια της δοκιμής καθώς και του απαιτούμενου χρόνου και κόστους. Επομένως, κρίνεται σκόπιμο να χρησιμοποιούμε τις συσχετίσεις χρησιμοποιώντας ένα μικρό αριθμό εδαφικών παραμέτρων που μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν. Για τα λεπτόκοκκα εδάφη τέτοιες συσχετίσεις μπορούν να προσδιοριστούν κανονικοποιώντας την αστράγγιστη διατμητική αντοχή με τον αριθμό των κρούσεων της δοκιμής SPT. Οι συσχετίσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφών, κυρίως όταν πρόκειται για έργα με περιορισμένο οικονομικό προϋπολογισμό, όταν ο προϋπολογισμός και ο χρόνος για εργαστηριακές δοκιμές είναι περιορισμένος.

Οι σχέσεις μεταξύ αριθμού κτύπων από τη δοκιμή SPT και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής εξετάζονται από στατιστική άποψη λαμβάνοντας υπόψη τους τύπους δοκιμών που εκτελέστηκαν καθώς και σε ορισμένες περιπτώσεις τις



διορθώσεις για τη δοκιμή SPT. Από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί, φαίνεται ότι η χρήση των διορθωτικών συντελεστών στη δοκιμή SPT.

### ***3.3 Εργαστηριακές δοκιμές μέτρησης της διατμητικής αντοχής των εδαφών***

Οι εργαστηριακές δοκιμές που χρησιμοποιούνται στις γεωτεχνικές έρευνες για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής είναι:

- Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης
- Τριαξονικές δοκιμές
- Απλή διάτμηση
- Απευθείας διάτμηση
- Δακτυλιοειδής διάτμηση

Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά οι δοκιμές που αφορούν στον προσδιορισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής.

#### ***3.3.1 Δοκιμή τριαξονικής φόρτισης***

Η δοκιμή τριαξονικής φόρτισης είναι η πιο αξιόπιστη και ευπροσάρμοστη στις συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο και στον τύπο του προβλήματος. Στη δοκιμή αυτή ένα κυλινδρικό δείγμα εδάφους υπόκειται καταρχήν σε μια ομοιόμορφη, περιμετρική φόρτιση και στη συνέχεια εφαρμόζεται αξονικό φορτίο που αυξάνεται μέχρι την αστοχία. Με τη δοκιμή αυτή, προσδιορίζεται η διατμητική αντοχή κυλινδρικών δοκιμίων συνεκτικών εδαφών, καθώς τα αποτελέσματα που προκύπτουν επιτρέπουν τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών και της σχέσης τάσεως – παραμορφώσεως των εδαφών. Η εφαρμογή του κατακόρυφου φορτίου γίνεται στον άξονα του δοκιμίου και ελέγχεται με τη μέτρηση των παραμορφώσεων του δοκιμίου και των τάσεων που ασκούνται σε αυτό.

Για την εκτέλεση της δοκιμής απαιτείται κυλινδρικό δοκίμιο εδάφους που να περιβάλλεται από ελαστική μεμβράνη και στη συνέχεια από υγρό μέσα σε θάλαμο πίεσεως. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται η επιβολή ομοιόμορφης πίεσης. Στη συνέχεια, το δοκίμιο υποβάλλεται σε κατακόρυφη συμπίεση με ένα αξονικό φορτίο. Η αξονική πίεση που ασκείται είναι ίση με το αξονικό φορτίο διαιρούμενο με την

ανηγμένη επιφάνεια του δοκιμίου. Η μέγιστη κύρια τάση του δοκιμίου ισούται με το άθροισμα της μέγιστης κατακόρυφης πίεσης και της πίεσης του θαλάμου ενώ η ελάχιστη είναι ίση με την πίεση του θαλάμου. Η πρόσθετη αξονική τάση είναι ίση με τη διαφορά της μέγιστης και ελάχιστης κύριας τάσης που ασκούνται στο δοκίμιο.

Η διατμητική αντοχή του εδάφους δεν εξαρτάται μόνο από το μέγεθος της πίεσης που ασκείται σε αυτό και της πίεσης του νερού των πόρων, αλλά και από την εντατική κατάσταση στην οποία βρισκόταν το έδαφος. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί τρεις κατηγορίες τριαξονικών δοκιμών.

- **Δοκιμή χωρίς στερεοποίηση και χωρίς στράγγιση (UU)**

Στη δοκιμή αυτή εκτιμώνται οι τάσεις κατά τη θραύση του δοκιμίου, εφόσον δε λαμβάνει χώρα κατά τη δοκιμή στράγγιση του νερού των πόρων. Πρόκειται για ταχεία δοκιμή κατά την οποία δεν καταγράφεται η πίεση του νερού των πόρων. Εφαρμόζεται κυρίως σε κορεσμένα δοκίμια, δηλαδή αφορά εδάφη που βρίσκονται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

- **Δοκιμή με στερεοποίηση και χωρίς στράγγιση (CUPP)**

Στη δοκιμή αυτή εκτιμώνται οι τάσεις αστοχίας σε ένα προστερεοποιημένο κυλινδρικό δοκίμιο, κατά τη διάρκεια της οποίας δεν επιτρέπεται στράγγιση του νερού των πόρων. Κατά το στάδιο της διατμήσεως η ταχύτητα φορτίσεως θα πρέπει να είναι αρκετά βραδεία, ώστε η πίεση του νερού των πόρων να είναι περίπου ίδια σε όλο το ύψος του δοκιμίου. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής μετράται η πίεση του νερού των πόρων.

- **Δοκιμή με στερεοποίηση και με στράγγιση (CD)**

Στη δοκιμή αυτή εκτιμώνται οι τάσεις αστοχίας σε ένα κυλινδρικό δοκίμιο, που κατά την τριαξονική φόρτιση μετά τη στερεοποίηση λαμβάνει χώρα στράγγιση του νερού των πόρων του δοκιμίου. Κατά τη διάτμηση, η ταχύτητα φόρτισης πρέπει να είναι αρκούντως βραδεία ώστε να μην αναπτύσσεται υπερπίεση του νερού των πόρων.

Από τις παραπάνω δοκιμές υπολογίζεται η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια τάση κατά τη θραύση του δοκιμίου, η διατμητική τάση, η αξονική παραμόρφωση και η πίεση του νερού των πόρων κατά περίπτωση.

### 3.3.2 Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης

Η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης αποτελεί υποπερίπτωση της δοκιμής τριαξονικής φόρτισης, με τη διαφορά ότι δεν επιβάλλεται πλευρική φόρτιση στο δοκίμιο, παρά μόνο αξονικό φορτίο. Η μέθοδος αυτή αφορά στον άμεσο προσδιορισμό της ανεμπόδιστης αντοχής συνεκτικού εδάφους. Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη ορίζεται η τάση στην οποία το δοκίμιο αρχίζει να παρουσιάζει επιφάνεια θραύσεως ή όταν η παραμόρφωση συνεχίζεται χωρίς την αύξηση φορτίου. Σε διαφορετική περίπτωση, σαν αντοχή λαμβάνεται η τάση που αντιστοιχεί σε ανηγμένη παραμόρφωση 20%.

Το δοκίμιο τοποθετείται στη συσκευή θλίψεως στο κέντρο της κάτω πλάκας και παράλληλα η συσκευή ρυθμίζεται ώστε η πάνω πλάκα να βρίσκεται σε επαφή με την πάνω επιφάνεια του δοκιμίου και μηδενίζεται ο μετρητής των παραμορφώσεων. Στο δοκίμιο εφαρμόζεται θλιπτικό αξονικό φορτίο τέτοιο ώστε η παραμόρφωση που θα επιτυγχάνεται να είναι της τάξης του 0,5% έως 2% το λεπτό και γίνεται καταγραφή των τιμών των αξονικών φορτίων και των παραμορφώσεων ανά 30 δευτερόλεπτα. Η επιβολή του αξονικού θλιπτικού φορτίου συνεχίζεται μέχρι να παρατηρηθεί μείωση του φορτίου με αυξανόμενες παραμορφώσεις ή μέχρι να φτάσει η παραμόρφωση την τιμή 20%. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη δοκιμή είναι η αντοχή του συνεκτικού υλικού σε ανεμπόδιστη θλίψη και μέση ανηγμένη παραμόρφωση κατά τη θραύση του δοκιμίου.

### 3.3.3 Δοκιμή άμεσης διάτμησης

Είναι η δοκιμή κατά την οποία μετριέται η μεταβολή της διατμητικής αντοχής του εδάφους με τη μεταβολή της ορθής τάσης που εφαρμόζεται κάθετα στην επιφάνεια διατμήσεως.

Στη δοκιμή άμεσης διάτμησης το εδαφικό δείγμα τοποθετείται σε φορείο αποτελούμενο από δύο μέρη που μπορούν να κινούνται το ένα σε σχέση με το άλλο και αστοχεί επειδή προκαλείται σχετική μετακίνηση μεταξύ των δύο τμημάτων του φορείου. Συνεπώς, το επίπεδο αστοχίας συμπίπτει υποχρεωτικά με την οριζόντια επιφάνεια που διαχωρίζει τα δύο τμήματα του φορείου. Η δοκιμή άμεσης διάτμησης θεωρείται γενικά ότι υστερεί σε σχέση με τη δοκιμή τριαξονικής φόρτισης καθώς η κατανομή των ορθών και διατμητικών τάσεων στην επιφάνεια αστοχίας δεν είναι

ομοιόμορφη. Από κάθε δοκιμή προκύπτει ένα ζεύγος τιμών μέγιστης διατμητικής τάσης και εφαρμοζόμενης ορθής τάσης κατά τη διάτμηση του δοκιμίου.

### **3.4 Συσχετίσεις των μηχανικών ιδιοτήτων λεπτόκοκκων εδαφών με τον αριθμό κρούσεων SPT και τα φυσικά χαρακτηριστικά τους**

#### **3.4.1 Βιβλιογραφικές αναφορές**

Πολλοί ερευνητές ασχολήθηκαν κατά το παρελθόν με συσχετίσεις μεταξύ της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής του αριθμού κρούσεων από τη δοκιμή SPT και των φυσικών χαρακτηριστικών των εδαφών. Οι Terzaghi & Peck (1967), Sowers (1979), Hara et al (1974), De Mello (1971), Stroud (1974) κ.α. κατέληξαν σε σημαντικά συμπεράσματα που μάλλον όμως αποτελούν αδρές προσεγγίσεις και πολλές φορές δίνουν αντιφατικά αποτελέσματα. Η μεγάλη διασπορά των τιμών οφείλεται στις πολλές παραμέτρους που επηρεάζουν το πρόβλημα κάνοντας δύσκολη την εξαγωγή απλών συμπερασμάτων.

Παλαιότερα, πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να συσχετίσουν μηχανικές ιδιότητες των λεπτόκοκκων εδαφών όπως η αστράγγιστη διατμητική αντοχή, στηριζόμενοι στα όρια Atterberg. Αυτό συνέβη διότι το όριο πλαστικότητας (PL) και το όριο υδαρότητας (LL) ενός υλικού (όρια Atterberg), είναι δύο ιδιότητες που μπορούν να προσδιορισθούν εύκολα, με απλές δοκιμές. Τα όρια αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά, καθώς προσδιορίζουν με πολύ απλό τρόπο την αλληλεπίδραση μεταξύ της υγρής και στερεής φάσης των εδαφών και δίνουν τη δυνατότητα να κατατάξουμε τα εδάφη σε κατηγορίες με παρόμοιες μηχανικές ιδιότητες.

Ο πιο αξιόπιστος τρόπος για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής είναι η δειγματοληψία και η επακόλουθη διεξαγωγή εργαστηριακών δοκιμών. Εξαιτίας του περιορισμένου οικονομικού προϋπολογισμού και του περιορισμένου χρόνου, σε αρκετά έργα δε γίνονται όλες οι απαραίτητες εργαστηριακές δοκιμές, τουλάχιστον όχι σε ικανό πλήθος. Σε αρκετές περιπτώσεις, είναι γνωστά ο τύπος του εδάφους, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και ο αριθμός των κτύπων που προκύπτουν από την πρότυπη δοκιμή διείδυσης. Συνεπώς, όταν είναι περιορισμένα τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών, συμπληρώνονται από τα αποτελέσματα εμπειρικών συσχετίσεων για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της διάτμησης.

Πολλοί μελετητές υποστηρίζουν ότι οποιαδήποτε τέτοια εμπειρική συσχέτιση μπορεί να είναι ρεαλιστική μόνο για αργίλους που βρίσκονται στην ίδια περιοχή με παρόμοια δηλαδή γεωλογία.

Στα επόμενα παρουσιάζονται ορισμένες εμπειρικές σχέσεις από τη βιβλιογραφία που τυγχάνουν γενικής αποδοχής και χρησιμοποιούνται στην πράξη.

#### **3.4.1.1 Εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ $S_u/P_a - N_{SPT}$**

Οι **Kulhaway και Mayne** (1990) στηριζόμενοι στις έρευνες των Terzaghi και Peck (1967) για την εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ( $S_u$ ) των αργίλων κατέληξαν στην παρακάτω σχέση:

$$\frac{S_u}{P_a} = 0,06 N_{60}$$

Οι **Hara et al.** (1974) μελετώντας αργίλους διαφορετικής γεωλογίας στην Ιαπωνία, πρότειναν τη σχέση:

$$\frac{S_u}{P_a} = 0,29 (N_{60})^{0,72}$$

όπου  $P_a$  η ατμοσφαιρική πίεση ίση με 100 kPa, ανεξαρτήτως της πλαστικότητας των εδαφικών σχηματισμών.

#### **3.4.1.2 Εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ $q_u - N_{SPT}$ και $S_u - N_{SPT}$**

Το αποτέλεσμα της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης είναι γνωστό ως αστράγγιστη αντοχή σε θλίψη και χρησιμοποιείται σε πολλά γεωτεχνικά προβλήματα. Για το λόγο αυτό, πολλοί είναι οι ερευνητές που έχουν προτείνει συσχετίσεις μεταξύ της αστράγγιστης αντοχής σε θλίψη και τον αριθμό των κρούσεων που προκύπτουν από τη δοκιμή SPT. Εκτός από τις συσχετίσεις μεταξύ αστράγγιστης αντοχής σε θλίψη και αριθμού των κρούσεων από τη δοκιμή SPT, αρκετοί ερευνητές μελέτησαν και τη σχέση μεταξύ αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ( $S_u$ ) και αριθμού των κρούσεων. Θεωρώντας ότι το εδαφικό δοκίμιο που μελετάται είναι πλήρως κορεσμένο κατά την εκτέλεση της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης, μπορεί να θεωρηθεί ότι η περιβάλλουσα αστοχίας είναι παράλληλη στον άξονα  $\sigma_n$ , δηλαδή η γωνία τριβής είναι  $\varphi_u=0$ , άρα η αστράγγιστη διατμητική αντοχή είναι ίση με  $S_u=q_u/2$ .

Πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει σχέσεις μεταξύ του αριθμού των κτύπων από την πρότυπη δοκιμή διείσδυσης και της αστράγγιστης αντοχής σε θλίψη ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των λεπτόκοκκων εδαφών όπως φαίνεται στον

**Πίνακα 2.** Για τις συσχετίσεις που δημοσιεύτηκαν πριν το 1990, δεν υπάρχουν σαφείς πληροφορίες για το αν έχουν γίνει διορθώσεις στον αριθμό των κρούσεων. Όμως, οι MacGregor και Duncan (1998) υποστηρίζουν ότι θεωρείται πιο δόκιμο να χρησιμοποιούνται οι διορθωμένες τιμές των κρούσεων  $N_{60}$ , καθώς ο πιο κοινός τύπος σφύρας που χρησιμοποιείται στις δοκιμές SPT, είναι αυτός που μεταβιβάζει το 60% της θεωρητικής ενέργειας. Οι Sivrikaya and Toğrol (2002), πρόσφατα πρότειναν κάποιες συσχετίσεις σύμφωνα με τον τύπο του εδάφους και τους διορθωτικούς συντελεστές κρούσεων.

Η πιο παλιά συσχέτιση, προτάθηκε από τους Terzaghi και Peck το 1967, οι οποίοι δημοσίευσαν τη σχέση  $q_u=12,5N_{SPT}$ . Κατέληξαν σε κάποιες σχέσεις μεταξύ της συνοχής του εδάφους, τον αριθμό των κρούσεων και της αστράγγιστης αντοχής σε θλίψη, όπως φαίνεται στον **Πίνακα 3**, ενώ η παραπάνω σχέση δεν είναι παρά μία μέση τιμή για τους διάφορους τύπους λεπτόκοκκων εδαφών, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη άλλα χαρακτηριστικά, όπως για παράδειγμα ο δείκτης πλαστικότητας του υλικού.

Σε όλους τους τύπους των εδαφών και στους τύπους των δοκιμών, οι συσχετίσεις με τον αριθμό  $N$  δεν ξεπερνάνε τις τιμές που πρότειναν οι Terzaghi and Peck (1967), καθώς η εξίσωσή τους δίνει πάντα το ανώτερο όριο. Για το λόγο αυτό άλλωστε, υποστηρίζεται ότι η συγκεκριμένη συσχέτιση πρέπει να χρησιμοποιείται εφόσον γίνονται οι απαραίτητες διορθώσεις στη δοκιμή SPT.

	<b>Τύπος εδάφους</b>	<b>qu(kPa)</b>
Terzaghi & Peck (1967)	Λεπτόκοκκα εδάφη	12,5N
Sanglerat (1972)	Άργιλος	25N
	Ιλυώδης άργιλος	20N
Schmertmann (1975)	Άργιλοι με υψηλό δείκτη πλαστικότητας PI	25N
	Άργιλοι με μέσο δείκτη πλαστικότητας PI	15N
	Άργιλοι με χαμηλό δείκτη πλαστικότητας PI	7,5N
Nixon (1982)	Άργιλος	24N
Kulhaway and Mayne (1990)	Λεπτόκοκκα εδάφη	58N <sup>0,72</sup>
Sivrikaya and Togrol (2006)	Άργιλοι υψηλής πλαστικότητας	9,7N <sub>field</sub>
		13,63N <sub>60</sub>
	Άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας	6,7N <sub>field</sub>
		9,86N <sub>60</sub>
	Λεπτόκοκκα εδάφη	8,66N <sub>field</sub>
		12,38N <sub>60</sub>
		8,64N <sub>field</sub>
		12,36N <sub>60</sub>

**Πίνακας 2** Συσχετίσεις qu - N<sub>spt</sub> για λεπτόκοκκα εδάφη

<b>Σκληρότητα</b>	<b>N<sub>spt</sub></b>	<b>qu(kPa)</b>
Πολύ μαλακή	<2	<25
Μαλακή	2-4	25-50
Μέτρια	4-8	50-100
Στιφρή	8-15	100-200
Πολύ στιφρή	15-30	200-400
Σκληρή	>30	>400

**Πίνακας 3** Συσχέτιση μεταξύ qu και N<sub>spt</sub> (Terzaghi and Peck, 1967)

Οι **Terzaghi & Peck** (1967) κατέληξαν στη σχέση  $S_u(kPa)/N=6,66$ . Μέχρι σήμερα αποτελεί το μοναδικό κριτήριο διάκρισης των αργίλων από πολύ μαλακές έως σκληρές με βάση την αντοχή τους.

Ο **De Mello** (1971), εξετάζοντας ένα μεγάλο εύρος δεδομένων που συμπεριελάμβανε κυρίως μαλακές ευαίσθητες αργίλους, πρότεινε ο λόγος  $S_u/N$  να λαμβάνεται από 0,4 έως 20.

Ο **Schmertmann** (1979), θεωρώντας επίσης ότι τα αποτελέσματα επηρεάζονται από την ευαισθησία των αργίλων, κατέληξε στο ότι ο λόγος  $S_u/N$  πρέπει να λαμβάνεται από 5 μέχρι 13,5 για ευαίσθητες αργίλους.

Για πλαστικές αργίλους όπως η Gault Clay, σύμφωνα με τους **Garrettand and Barnes** (1984) προτείνεται  $S_u=4,4N$ .

Οι **Sivrikaya και Togrol** (2006), κάνοντας μια ολοκληρωμένη μελέτη βασιζόμενη σε αποτελέσματα από τριαξονικές δοκιμές χωρίς στερεοποίηση και χωρίς στράγγιση (UU), κατέληξαν σε διάφορες συσχετίσεις  $S_u$  και αριθμό κρούσεων, για διάφορους τύπους λεπτόκοκκων εδαφών (**Πίνακας 4**).

### **3.4.1.3 Εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ $S_u/N_{SPT} - PI$**

Οι πρώτες προσπάθειες που έγιναν προκειμένου να ληφθούν υπόψη στις συσχετίσεις  $q_u - N_{SPT}$  και τα φυσικά χαρακτηριστικά των λεπτόκοκκων υλικών καταγράφονται τη δεκαετία του '70, όταν ο Sanglerat πρότεινε το 1972 διαφορετικές σχέσεις για τις αργίλους και τις ιλύώδεις αργίλους (**Πίνακας 2**). Αργότερα ο Schmertmann (1975) δημοσίευσε έναν πίνακα με συσχετίσεις, από τις οποίες προκύπτει ότι για σταθερό αριθμό κρούσεων, η αστράγγιστη αντοχή σε θλίψη αυξάνεται με το δείκτη πλαστικότητας. Οι Sivrikaya και Togrol (2006) πρότειναν επίσης μία σχέση μεταξύ της αστράγγιστης αντοχής σε θλίψη και του αριθμού των κρούσεων που εξαρτάται από το δείκτη πλαστικότητας. Οι πιο γνωστές συσχετίσεις που έχουν προκύψει, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4**.

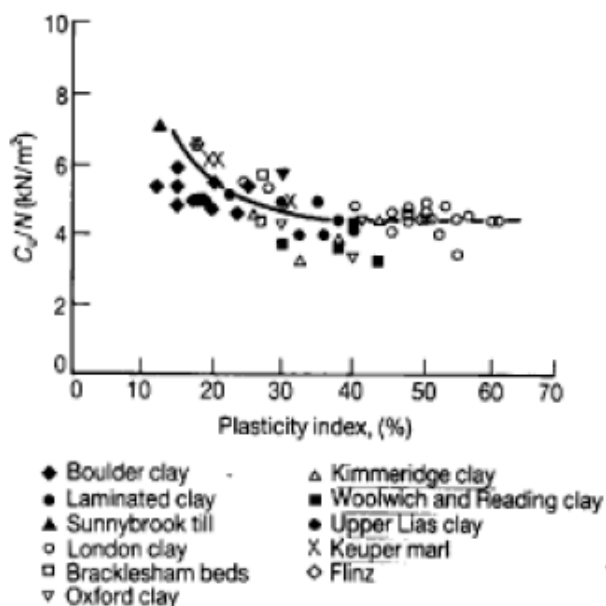
Ο **Sowers** (1979), κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο λόγος  $S_u/N$  αυξάνεται όσο αυξάνεται ο δείκτης πλαστικότητας, όταν πρόκειται για ομοιογενείς αργίλους, και κυμαίνεται από 2,5 έως 17 για υλικά υψηλής πλαστικότητας. Ο ίδιος πρότεινε διαγράμματα εκτίμησης της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής συναρτήσει του αριθμού των κρούσεων λαμβάνοντας υπόψη την πλαστικότητα των υλικών. Και από



τα διαγράμματα, είναι εμφανής η τάση αύξησης του λόγου  $S_u/N$  με την αύξηση του δείκτη πλαστικότητας.

Ο **Stroud** (1974), χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από τριαξονικές δοκιμές (UU) για υπερστερεοποιημένες αναίσθητες αργίλους, πρότεινε ένα διάγραμμα του λόγου  $S_u/N$  με το δείκτη πλαστικότητας. Από το σχετικό διάγραμμα, (**Εικόνα 14**), παρατηρούμε ότι ο λόγος  $S_u/N$  μειώνεται καθώς αυξάνεται ο δείκτης πλαστικότητας. Ο λόγος  $S_u/N$  είναι μία σταθερή παράμετρος που εξαρτάται από το δείκτη πλαστικότητας και ποικίλλει από  $\sim 7$  έως  $\sim 4$  για συνεκτικά υλικά υψηλής πλαστικότητας. Για αργίλους μεσαίας πλαστικότητας προτείνεται η τιμή 4-5, για αργίλους με δείκτη πλαστικότητας  $PI < 20$   $S_u/N = 6 - 7$ , ενώ για αργίλους με δείκτη πλαστικότητας  $PI > 30$ ,  $S_u/N = 4,2$ .

Ειδικά για την άργιλο του Λονδίνου (London Clay), ο Stroud (1974) προτείνει τιμή του λόγου,  $S_u/N=11$ . Η London Clay είναι στιφρή άργιλος, με χρώμα κυανό έως καφέ όταν διαβρωθεί και συχνά περιέχει σιδηροπυρητικούς σβώλους, κρυστάλλους σεληνίτη καθώς και ιζηματογενή. Το διάγραμμα του Stroud (1974), αποτελεί την πιο διαδεδομένη μέθοδο προσδιορισμού της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής  $S_u$  για υπερστερεοποιημένες αναίσθητες αργίλους, κανονικοποιημένης στον αριθμό κρούσεων SPT, θεωρώντας ότι επηρεάζεται κυρίως από το δείκτη πλαστικότητας (βλ. **Εικόνα 14**).



**Εικόνα 11** Συσχέτιση μεταξύ αριθμού κρούσεων και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για αναίσθητες αργίλους (Stroud, 1974)

Ο **Decourt** (1990) διατύπωσε σχέσεις μεταξύ αριθμού κτύπων και αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για αργίλους του S.Paulo, λαμβάνοντας υπόψη και τις διορθώσεις στον αριθμό των κρούσεων. Οι τιμές της αντοχής που προκύπτουν από τη συσχέτιση που πρότεινε ο Decourt, είναι σχεδόν διπλάσιες από αυτές που δίνει ο Stroud (1974). Στον **Πίνακα 4** που ακολουθεί, οι συσχετίσεις που δίνονται αφορούν σε αναίσθητες αργίλους.

Με βάση δεδομένα από τον ελληνικό χώρο, οι **Πλύτας, Μπαλτζόγλου και Χλιμίντζας** (2006) μελέτησαν αμμώδεις αργίλους και αργλικές μάργες στο Χαλάνδρι, στο Μαρούσι και στην περιοχή Μεσογείων. Κατόπιν στατιστικής επεξεργασίας κατέληξαν στην παρακάτω εμπειρική μαθηματική συσχέτιση μεταξύ των μεγεθών, αρκετά πιο σύνθετη από τις υπόλοιπες γνωστές, καθώς περιλαμβάνει τα μεγέθη Su/N, PI και w (ποσοστό υγρασίας):

$$Su/N = A + B w + C \log_{10}(PI)$$

Οι συντελεστές A, B και C ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο του εδάφους.

	<b>Τύπος εδάφους</b>	<b>Su(kPa)</b>
Stroud(1974)	PI<20	6-7N
	20<PI<30	4-5N
	PI>30	4,2N
Decourt(1990)	Άργιλοι	12,5N
	Άργιλοι	15N <sub>60</sub>
Sivrikaya &Togrol(2006)	CL	3,97N <sub>field</sub>
		5,82 N <sub>60</sub>
	CH	5,9N <sub>field</sub>
		8,76N <sub>60</sub>
	Άργιλοι	5,13N <sub>field</sub>
		7,57N <sub>60</sub>
	Λεπτόκοκκα εδάφη	4,68N <sub>field</sub>
		6,97N <sub>60</sub>

**Πίνακας 4** Συσχέτιση μεταξύ Su και N<sub>spt</sub>

#### 3.4.1.4 Εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ $Su/N_{SPT} - w$

Σύμφωνα με τους **Κουταλιά κ.α.**(2001) που μελέτησαν αμμώδεις αργίλους και αργλικές μάργες στο Χαλάνδρι, στο Μαρούσι και στην περιοχή Μεσογείων, η φυσική υγρασία  $w$  επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, ο λόγος  $Su/N$  δείχνει να αυξάνεται με τη μείωση της φυσικής υγρασίας.

Από την έρευνα των **Russell and Parker** (1979) κυρίως πάνω στην άργιλο του Λονδίνου, όπως και τις έρευνες των **Chandler** (1972) και **Horswill and Horton** (1976) πάνω σε Upper Lias Clay, είναι φανερή μια αρνητική συσχέτιση μεταξύ αστράγγιστης διατμητικής αντοχής και περιεχόμενης υγρασίας.

#### 3.4.1.5 Εμπειρικές συσχετίσεις μεταξύ $Su/\sigma'v - PI$

Πολλοί επιστήμονες προτείνουν συσχετίσεις της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ( $Su$ ) που εξαρτώνται από την ενεργό τάση ( $\sigma'v$ ),  $Su/\sigma'v$ . Είναι γνωστό ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή κανονικά στερεοποιημένου συνεκτικού εδάφους, κανονικοποιημένη ως προς την αντίστοιχη ενεργό τάση, είναι μοναδική. Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι εξαρτάται από τις ίδιες ιδιότητες του υλικού, όπως ο δείκτης πλαστικότητας.

Η σχέση που χρησιμοποιείται κυρίως για τον προσδιορισμό του λόγου  $Su/\sigma'v$  και στηρίζεται στο δείκτη πλαστικότητας προτάθηκε από τον **Skempton** (1954) και δίνεται από τον τύπο:

$$Su/\sigma'v = 0,11 + 0,0037 PI$$

Ο Skempton (1954), κατέληξε στο ότι ο λόγος της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής προς την ενεργό τάση, για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους, είναι γραμμική συνάρτηση του δείκτη πλαστικότητας, βασιζόμενος σε αποτελέσματα δοκιμής πτερυγίου.

Στο παρελθόν έγιναν πολλές μελέτες προσπαθώντας να εξετάσουν την ισχύ της παραπάνω σχέσης, με αντικρουόμενα συμπεράσματα. Ο κύριος λόγος για τον οποίο οι ερευνητές οδηγήθηκαν σε αντικρουόμενα συμπεράσματα, θεωρείται ότι είναι το γεγονός ότι αγνόησαν την επιρροή της εδαφικής σύστασης στην περιεχόμενη υγρασία, στα όρια Atterberg, στην αντοχή και στη συμπιεστότητα των εδαφών.

#### **3.4.1.6 Επίδραση ρηγματώσεως δοκιμίου στο μέγεθος της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής**

Ο **Samuels** (1975), μελέτησε την ευαισθησία της προσδιοριζόμενης τιμής της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ως προς τον τρόπο δειγματοληψίας που εφαρμόστηκε και τον προσανατολισμό του δοκιμίου κατά την εκτέλεση της δοκιμής. Η συχνότητα και το μέγεθος των ρηγματώσεων είχαν σημαντική επιρροή στα αποτελέσματα. Όταν η δειγματοληψία δε γίνεται από γεώτρηση αλλά από εκσκαφή πιο μεγάλων τεμαχίων αργίλου, προκαλείται μικρότερη διαταραχή στα δείγματα και εμφανίζουν μεγαλύτερη συνοχή. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από δοκιμές που έγιναν σε δείγματα που ελήφθησαν με προσανατολισμό κάθετο στη διαστρωμάτωση και με προσανατολισμό παράλληλο στη διαστρωμάτωση, προέκυψε ότι οι τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με προσανατολισμό παράλληλο στη διαστρωμάτωση είναι μεγαλύτερες 1,2 φορές σε σχέση με αυτές από δείγματα με προσανατολισμό κάθετο στη διαστρωμάτωση. Η διασπορά των τιμών της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής μπορεί να οφείλεται στην αφαίρεση των υπερκείμενων γαιών. Η συστηματική τάση μείωσης της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής καθώς μειώνεται το βάθος, οφείλεται στην ανάπτυξη των ρωγμών στην επιφάνεια.

Στην περίπτωση της Lower Oxford Clay, οι **Burland et al** (1978) κατέληξαν ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή με προσανατολισμό παράλληλο στη διαστρωμάτωση είναι μεγαλύτερη 1,7 φορές σε σχέση με αυτή από δείγματα με προσανατολισμό κάθετο στη διαστρωμάτωση.

#### **3.4.1.7 Σύγκριση / σχολιασμός εμπειρικών συσχετίσεων**

Ο **Stroud** (1974), αναφέρει ότι για σταθερή τιμή του αριθμού των κρούσεων, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή είναι αντιστρόφως ανάλογη του δείκτη πλαστικότητας. Αντίθετα, ο **Decourt** (1990) και οι **Sivrikaya and Togrol** (2006) αναφέρουν ότι η αστράγγιστη διατμητική αντοχή είναι ανάλογη με το δείκτη πλαστικότητας. Αργότερα αποδείχθηκε ότι η σχέση που πρότεινε ο Stroud υπερεκτιμά αρκετά τα αποτελέσματα. Το αποτέλεσμα βελτιώνεται αρκετά εάν χρησιμοποιηθεί το  $N_{60}$  αντί για το  $N$  που μετράται στο πεδίο. Πιο συγκεκριμένα, οι **McGregor και Duncan** (1998) υποστήριξαν ότι σε όλες τις συσχετίσεις που έχουν δημοσιευθεί πριν το 1990, πρέπει να χρησιμοποιείται το  $N_{60}$ .

Οι **Garrettand and Barnes** (1984), δημοσίευσαν κάποιες τιμές για την αστράγγιστη διατμητική αντοχή οι οποίες δείχνουν να ταιριάζουν καλά με τα αποτελέσματα από τη δοκιμή πρεσιομέτρου, χρησιμοποιώντας τη συσχέτιση με τον αριθμό των κρούσεων από τη δοκιμή πρότυπης διείσδυσης που προτάθηκε από τον Stroud το 1974.

Επίσης, είναι πιθανό η ενεργός τάση λόγω της φόρτισης των υπερκείμενων γαιών να επηρεάζει τα αποτελέσματα της δοκιμής SPT σε συνεκτικά εδάφη. Τέλος, στους **Πίνακες 5 & 6** που ακολουθούν, συνοψίζονται κάποιες πολύ γνωστές σχέσεις από τη βιβλιογραφία για τον προσδιορισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής.

### *3.4.2 Διασπορά των δεδομένων και σχετικές αβεβαιότητες*

Μελετώντας τις προαναφερθείσες σχέσεις, παρατηρούμε μια μεγάλη διασπορά στις προτεινόμενες τιμές του λόγου Su/N. Αυτό μπορεί να οφείλεται στον τρόπο εκτέλεσης της δοκιμής πρότυπης διείσδυσης, στην εργαστηριακή δοκιμή που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του Su, στις διαφορετικές διαστάσεις των δοκιμών, στην ευαισθησία των αργίλων, στην ανισοτροπία, στις ρηγματώσεις κλπ. Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να ευθύνεται για τη μεγάλη διασπορά, είναι η φυσική υγρασία των υλικών η οποία αγνοείται τις περισσότερες φορές. Γενικότερα, η διασπορά οφείλεται:

- Στη σημαντική μεταβολή των ιδιοτήτων ενός σχηματισμού από θέση σε θέση.
- Αγνόηση παραμέτρων όπως ανισοτροπία, ρηγματώσεις, βαθμός προστερεοποίησης OCR.
- Ο λόγος Su/N δεν είναι ουσιαστικά παρά μια παράμετρος κανονικοποίησης, χωρίς άμεση συσχέτιση.

Έτσι, οι παραπάνω σχέσεις σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να θεωρηθούν ότι έχουν γενική ισχύ. Πρόκειται για προσεγγίσεις με περιορισμένη δυνατότητα εφαρμογής τους παρά μόνο σε εδάφη παρόμοιας γεωλογικής προέλευσης. Ακόμα και σε παρόμοιο είδος υλικών, μερικές σχέσεις δίνουν αντιφατικά αποτελέσματα ενισχύοντας την άποψη ότι πρόκειται απλά για ποιοτικές προσεγγίσεις.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για  $PI < 20$ , οι τιμές Su που περιλαμβάνονται στο λόγο Su/N είναι αμφιλεγόμενες λόγω δυσκολιών κατά τη δειγματοληψία και τη διεξαγωγή των δοκιμών σε διαταραγμένα δοκίμια. Γενικά, πρέπει να είναι γνωστή η ακριβής

διαδικασία που ακολουθείται για τη δοκιμή πρότυπης διείσδυσης και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται ώστε να μπορεί να γίνει σωστή και ακριβής αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν. Στο παρελθόν, ο εξοπλισμός άλλαζε από χώρα σε χώρα, καθώς παρότι αποτελούσε την πιο συνηθισμένη δοκιμή στην Αμερική, δεν ήταν επαρκώς τυποποιημένη. Επίσης, διαφορετικός ήταν και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιούνταν στη νότια Αμερική και στην Ευρώπη (Sanglerat, 1972). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι διαφορετικές τιμές κρούσεων που έχουν μετρηθεί για παρόμοια υλικά αντίστοιχης στιφρότητας μπορεί να οφείλονται στις διαφορές μεταξύ των εξοπλισμών και της διαδικασίας που ακολουθείται στην πρότυπη δοκιμή διείσδυσης.

Επιπλέον, αβεβαιότητα στις συσχετίσεις εισάγει η θεώρηση ή μη των διορθωτικών συντελεστών στην τιμή του αριθμού κρούσεων. Σε επόμενο στάδιο, η τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής εξαρτάται και από τον τύπο της εργαστηριακής δοκιμής που έγινε για τη μέτρησή της. Για το λόγο αυτό, θα ήταν σκόπιμο να κάνουμε διαφορετική θεώρηση για τα δεδομένα από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης (UC) και για τα δεδομένα από τριαξονικές δοκιμές χωρίς στερεοποίηση και χωρίς στράγγιση (UU).

Για τους παραπάνω λόγους, είναι ιδιαίτερα σημαντικό οι μελετητές που χρησιμοποιούν εμπειρικές συσχετίσεις για την εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, να έχουν επίγνωση των εγγενών περιορισμών τους.

SPT-N	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ	ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ Su (kPa)		
		Tschbotarioff (1973)	Parcher and Means (1968)	Terzaghi and Peck (1967)
<2	πολύ μαλακό	15	<12	<12,5
2-4	μαλακό	15-30	12-25	12,5-25
4-8	μεσαίο	30-60	25-50	25-50
8-15	στιφρό	60-120	50-100	50-100
15-30	πολύ στιφρό	120	100-200	100-200
>30	σκληρό	>225	>200	>200

**Πίνακας 5** Σχέσεις μεταξύ SPT-N και Su για συνεκτικά εδάφη (O. Sivrikaya, E Toğrol, 2006)

<b>ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ</b>	<b>ΕΡΕΥΝΗΤΗΣ/ΕΣ</b>	<b>ΤΥΠΟΣ ΕΛΑΦΟΥΣ</b>
$S_u=170\exp(-4,6 LI)$	Wroth and Wood 1978	Αναζυμωμένες άργιλοι
$S_u=1/(LI-0,21)^2$	Mitchell 1993	Διάφορες άργιλους (remoulded strength)
$S_u/\sigma'_v=0,11+0,0037*PI$	Skempton 1954, Bowles 1984	Κανονικά στερεοποιημένα εδάφη, $PI > 10\%$
$S_u/\sigma'_v=0,11+0,0037\log PI$	Skempton 1957 (vane test)	Κανονικά στερεοποιημένα εδάφη, $PI < 60\%$
$S_u/\sigma'_v=0,08+0,55*PI$	Larsson 1977	Άργιλοι Σκανδιναβίας
$S_u/\sigma'_v=0,23\pm 0,04$	Larsson 1980	Μαλακές ιζηματογενείς άργιλοι, $PI < 60\%$
$S_u/\sigma'_v=0,33$	Larsson 1980	Ανόργανες άργιλοι
$S_u/\sigma'_v=0,26$	Scherzinger 1991	Λιμναίες μαλακές άργιλοι
$S_u/\sigma'_v=0,45*LL$	Hansbo 1957	Άργιλοι Σκανδιναβίας
$S_u/\sigma'_v=0,30$	Burland 1990	Φυσικές ευαίσθητοι άργιλοι
$S_u/\sigma'_v=0,18*(LI)^{-0,5}$	Bjerrum and Simons 1960	Κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι
$S_u/\sigma'_v=0,45*LL$	Bowles 1984	Κανονικά στερεοποιημένα εδάφη, $LL > 40\%$
$S_u/\sigma'_v = -0,18+0,0072*LL$	Windisch and Yong 1990	Άργιλοι Σκανδιναβίας
$S_u/\sigma'_v = -0,09+0,0092*PI$	Windisch and Yong 1990	Άργιλοι Σκανδιναβίας
$S_u/\sigma'_v = 0,14+0,003*PI$	Lambe and Whitman 1969	Όλοι οι τύποι άργιλων
$S_u/\sigma'_v = 0,45*(PI/100)^{0,5}$	Bjerrum and Simons 1960	Κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι
$S_u/\sigma'_v = 0,129+0,00435*PI$	Wroth and Houlsby 1985	Κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι

**Πίνακας 6** Εμπειρικές συσχετίσεις για τον προσδιορισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

### ***4.1 Εισαγωγή***

Το πιο σημαντικό στοιχείο για τη γεωτεχνική μηχανική και ο σκοπός των επί τόπου και εργαστηριακών δοκιμών, είναι ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων των εδαφικών υλικών. Εξαιτίας της έλλειψης λεπτομερούς θεωρητικής γνώσης για τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων των επί τόπου δοκιμών με τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους, ο μόνος εύλογος τρόπος είναι η εύρεση εμπειρικών συσχετίσεων που βασίζονται κυρίως σε ανάλυση παλινδρόμησης. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια σειρά διαγραμμάτων προκειμένου να επιτευχθεί κάποια σύγκριση της συμπεριφορά των ελληνικών αργίλων με αυτές που εξετάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία, για τις οποίες υπάρχει πληθώρα εμπειρικών συσχετίσεων. Σκοπός είναι να εξαχθούν συμπεράσματα για το κατά πόσο είναι ασφαλές να χρησιμοποιούνται οι συσχετίσεις αυτές για την εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής σε αργίλους ανεξαρτήτως προέλευσης και ορυκτολογικής σύστασης.

### ***4.2 Προέλευση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν***

Από τις εμπειρικές συσχετίσεις που έχουν δημοσιευθεί, ο αριθμός των κρούσεων και ο δείκτης πλαστικότητας, θεωρούνται ανεξάρτητες μεταβλητές ενώ η αστράγγιστη διατμητική αντοχή είναι εξαρτημένη μεταβλητή. Η έρευνα που έγινε στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, περιελάμβανε αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας, χωρίς να ληφθούν υπόψη οι διορθώσεις για τη δοκιμή SPT. Για την κατάταξη των υλικών σε κατηγορίες χρησιμοποιήθηκε το ενοποιημένο σύστημα κατάταξης (USCS). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη μελέτη, συγκρίνονται με συσχετίσεις που βρήκαν διάφοροι μελετητές κατά το παρελθόν. Τα δεδομένα, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, σε αργίλους υψηλής πλαστικότητας (CH), σε αργίλους χαμηλής πλαστικότητας (CL).

Προκειμένου να αξιολογηθούν όσο το δυνατόν καλύτερα τα στοιχεία και να συγκριθεί η συμπεριφορά τους ως προς τα όρια Atterberg με τις υπάρχουσες συσχετίσεις, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από διάφορες περιοχές της Ελλάδας όπου πραγματοποιήθηκαν δοκιμές πρότυπης διείδυσης και πιο συγκεκριμένα από την περιοχή του Μαλιακού μέχρι την περιοχή Κλειδί και από την Ηγουμενίτσα μέχρι τα Ιωάννινα. Αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από 105 διαφορετικές γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια



της κατασκευής δύο μεγάλων τεχνικών έργων στην Ελλάδα. Αρκετά δεδομένα προέρχονται από το έργο ΠΑΘΕ και πιο συγκεκριμένα από το τμήμα Μαλιακός – Κλειδί και παραχωρήθηκαν από την κατασκευάστρια εταιρεία Maliakos Kleidi Construction JV( MKC JV). Τα υπόλοιπα στοιχεία μας παραχωρήθηκαν από την ΕΡΓΟΣΕ Α.Ε., από γεωτεχνικές μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για τη μελέτη χάραξης της νέας σιδηροδρομικής γραμμής Καλαμπάκα – Ιωάννινα - Ηγουμενίτσα και πιο συγκεκριμένα από την περιοχή Ιωάννινα - Ηγουμενίτσα. Αξιολογήθηκε πλήθος δεδομένων, που περιελάμβανε τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης (UC) είτε από τριαξονικές δοκιμές χωρίς στερεοποίηση και χωρίς στράγγιση (UU). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε όσο το δυνατόν λιγότερο διαταραγμένα δείγματα, τα οποία ανακτήθηκαν από βάθη κοντά στα οποία είχαν γίνει δοκιμές SPT. Στον **Πίνακα 7** παρουσιάζονται ο τύπος και το πλήθος των δοκιμών που διεξήχθησαν σε κάθε κατηγορία εδάφους.

Τύπος εδάφους	Τύπος δοκιμής						
	UU	UC	FV	CD	CU	CUPP	
CL	11	126	14	3	-	1	139
CH	23	80	10	7	2	-	105

**Πίνακας 7** Αριθμός και τύπος δοκιμής που εκτελέστηκε σε κάθε εδαφικό τύπο

TXL UU: Ταχεία τριαξονική δοκιμή χωρίς στερεοποίηση χωρίς στράγγιση

UC: Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης

FV: Επιτόπου δοκιμή πτερυγίου

CD: Βραδεία δοκιμή διάτμησης στερεοποιημένου δοκιμίου

CU: Ταχεία δοκιμή απευθείας διάτμησης με στερεοποίηση του δοκιμίου

CUPP: Ταχεία δοκιμή απευθείας διάτμησης με στερεοποίηση του δοκιμίου και μέτρηση της πίεσης του νερού των πόρων.

#### **4.3 Περιγραφή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη**

Ο συνολικός αριθμός των δεδομένων που αντιστοιχούσαν σε λεπτόκοκκα εδάφη και λήφθηκαν υπόψη στη μελέτη ανέρχεται σε 243. Οι περισσότερες περιπτώσεις ανήκουν στην κατηγορία των αργίλων χαμηλής πλαστικότητας. Πιο συγκεκριμένα, από τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη, 103 δείγματα ανήκουν στην κατηγορία αργίλων υψηλής πλαστικότητας CH και 140 δείγματα

ανήκουν στην κατηγορία αργίλων χαμηλής πλαστικότητας CL. Τα όρια υδαρότητας, τα όρια πλαστικότητας, ο δείκτης πλαστιμότητας, ο δείκτης σχετικής υδαρότητας και το ποσοστό φυσικής υγρασίας των δοκιμίων που αξιολογήθηκαν στη μελέτη, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 8**.

	<b>LL (%)</b>	<b>PL (%)</b>	<b>PI (%)</b>	<b>LI</b>	<b>w (%)</b>
<b>CH</b>	50-96 %	15-32%	24-74%	-0,342 ÷ 0,846	13-60%
<b>CL</b>	23-52%	12-27%	7-32%	-0,9 ÷ 1,158	7,8-47,4%

**Πίνακας 8** Διακύμανση ορίων Atterberg για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας (CH – CL)

Για το σκοπό της συγκεκριμένης εργασίας, αρκετά δεδομένα δεν συμπεριλήφθηκαν στην επεξεργασία καθώς θεωρήθηκε ότι κατά την εκτέλεση της δοκιμής πιθανόν να μην τηρήθηκαν οι προδιαγραφές, άρα υπάρχουν αμφιβολίες όσον αφορά στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Σύμφωνα με τον Peters (1988), εξαιτίας του γεγονότος ότι είναι δύσκολο να ληφθούν αδιατάρακτα δείγματα, είναι αναμενόμενο κάποια αποτελέσματα από τις τριαξονικές δοκιμές να δώσουν παραπλανητικές πληροφορίες για τη διατμητική αντοχή των εδαφικών δοκιμίων. Για να μειωθεί αυτός ο κίνδυνος, απορρίφθηκαν οι τιμές εκείνες που η αξονική παραμόρφωση ( $\epsilon$ ) των δοκιμίων μετρήθηκε μικρότερη από 3%, καθώς θεωρήθηκε ότι πρόκειται για ασθενή δείγματα άρα πιο πιθανό και διαταραγμένα. Επίσης, απορρίφθηκαν τα δεδομένα για τα οποία δεν υπήρχε σαφής περιγραφή της ορυκτολογικής τους σύστασης. Στον **Πίνακα 9**, παρουσιάζονται τα ποσοστά λεπτόκοκκων εδαφών, χαλίκων και άμμου για τις αργίλους χαμηλής και υψηλής πλαστικότητας που χρησιμοποιήθηκαν και οι μέσες τιμές τους.

Δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων που περιέχει όλα τα διαθέσιμα αποτελέσματα από τις δοκιμές πρότυπης διείδυσης που ανήκουν στις κατηγορίες CL και CH, σύμφωνα με το ενοποιημένο σύστημα κατάταξης του Casagrande. Επίσης, έχουν συμπεριληφθεί η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, οι ενεργές τάσεις, το όριο πλαστικότητας και υδαρότητας του κάθε δείγματος, ο δείκτης πλαστικότητας, ο δείκτης σχετικής υδαρότητας και το ποσοστό σχετικής υγρασίας. Όσον αφορά στον υπολογισμό των ενεργών τάσεων, θεωρήθηκε ενιαίο ειδικό βάρος εδάφους  $\gamma=20$

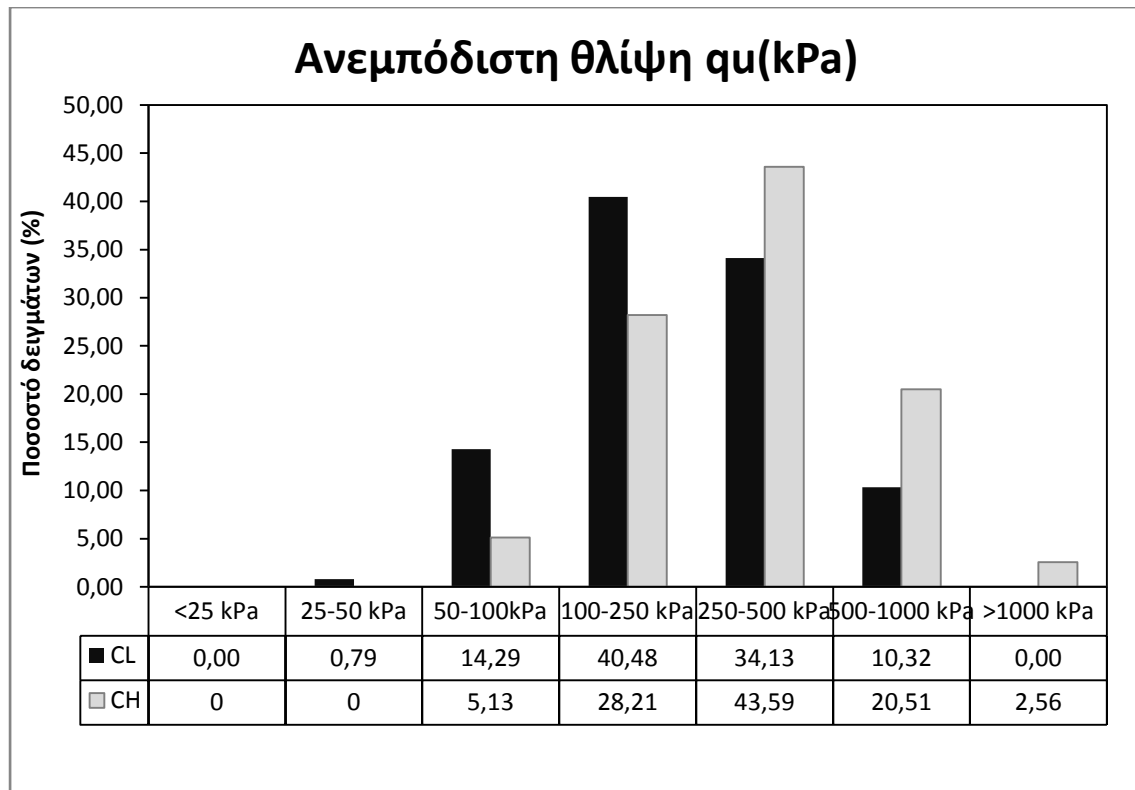
kN/m<sup>3</sup> ενώ σε όσες γεωτρήσεις δεν υπήρχε καταγραφή της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, θεωρήθηκαν στεγνές.

Η φυσική υγρασία επηρεάζει επίσης την επί τόπου διατμητική αντοχή, άρα πιθανό να επηρεάζει τον αριθμό των κρούσεων. Κρίθηκε απαραίτητη η συσχέτιση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής και του δείκτη σχετικής υδαρότητας, καθώς τα αποτελέσματα θα είναι πιο αξιόπιστα από τα αντίστοιχα από συσχετίσεις  $S_u$  - (PL, LL). Αυτό συμβαίνει γιατί ο δείκτης σχετικής υδαρότητας εμπεριέχει και τον όρο της υγρασίας που έχει καθοριστικό ρόλο για την αστράγγιστη διατμητική αντοχή.

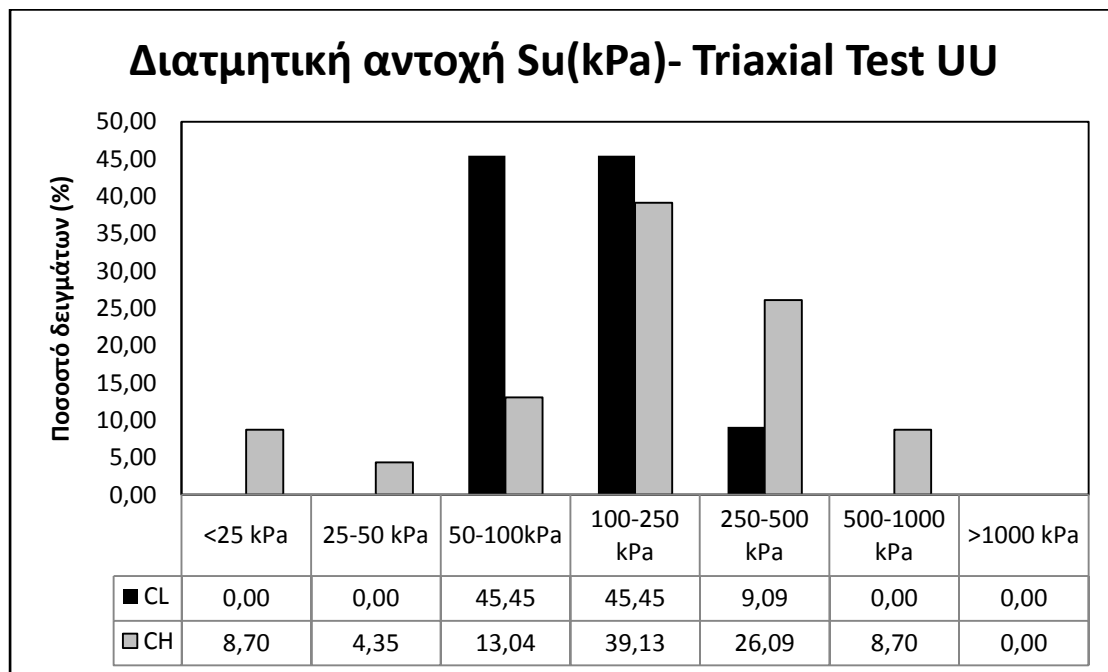
	Λεπτόκοκκα	Χάλικες	Άμμος
<b>CH</b>	33,1-99,1%	0-46,4%	0,9-46%
<b>Μέση τιμή</b>	86,30%	1,70%	11,99%
<b>CL</b>	50-98%	0-26	2-49%
<b>Μέση τιμή</b>	76,65%	1,94%	21,41%

**Πίνακας 9** Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας (CH – CL)

Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή μπορεί να προσδιοριστεί τόσο με την εκτέλεση επί τόπου δοκιμών όσο και με εργαστηριακές δοκιμές. Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, χρησιμοποιούνται κυρίως δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και τριαξονικές δοκιμές χωρίς στράγγιση και χωρίς στερεοποίηση (UU). Για τα κορεσμένα λεπτόκοκκα εδάφη, η αστράγγιστη διατμητική αντοχή μπορεί να θεωρηθεί ότι ισούται με το μισό της αστράγγιστης αντοχής σε θλίψη όπως προκύπτει από τη δοκιμή (UC), δηλαδή  $S_u=(q_u/2)$ . Στα σχήματα που ακολουθούν, παρουσιάζεται η κατανομή των τιμών ανεμπόδιστης θλίψης που προέκυψαν από τη συγκεκριμένη δοκιμή και η κατανομή των τιμών διατμητικής αντοχής από την εκτέλεση τριαξονικών δοκιμών UU.



**Σχήμα 1** Κατανομή τιμών αντοχής σε ανεμπόδιση θλίψη

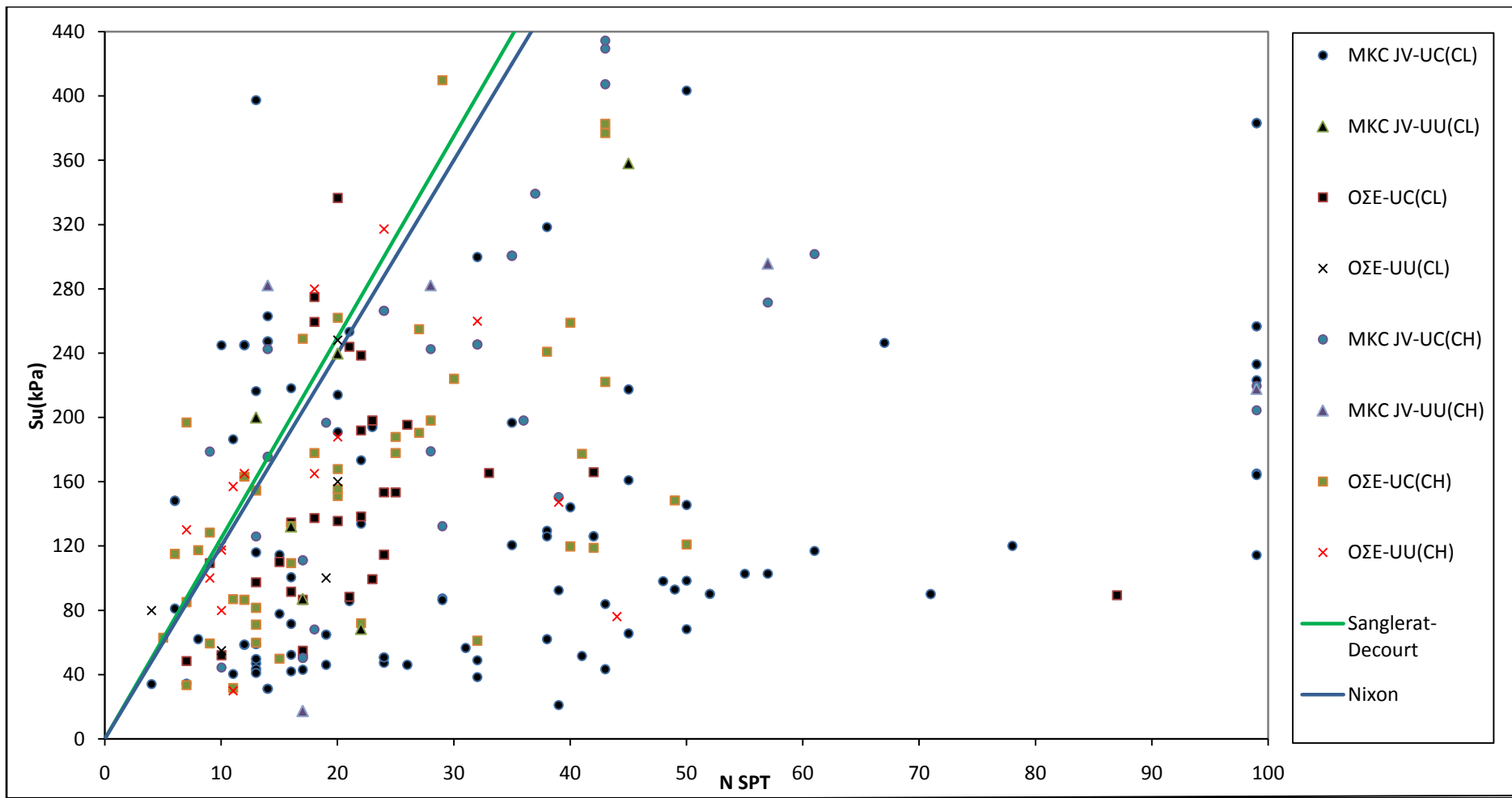


**Σχήμα 2** Κατανομή τιμών αστράγγιστης διατμητικής αντοχής από δοκιμές τριαξονικής φόρτισης χωρίς στερεοποίηση και χωρίς στράγγιση

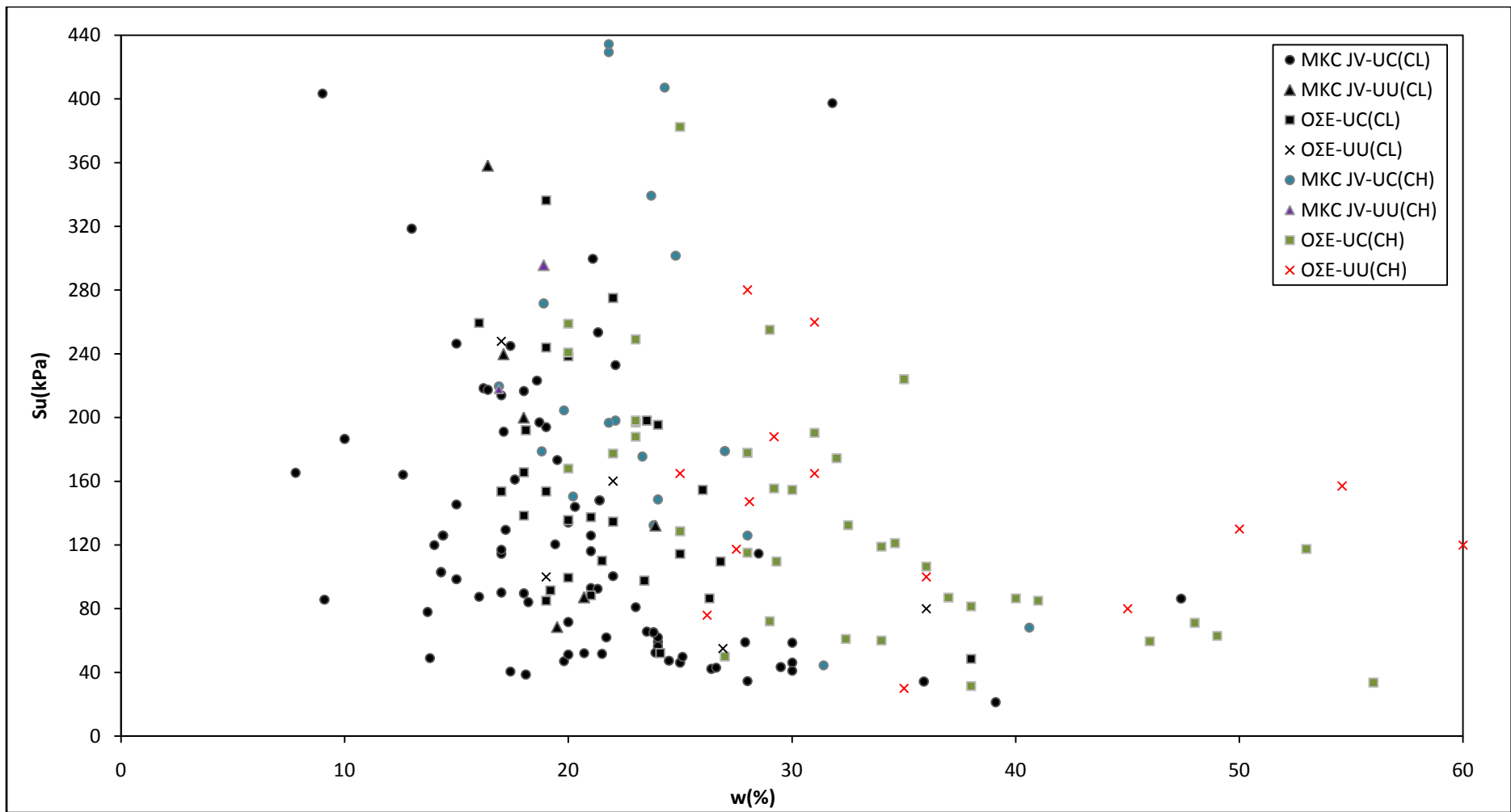
#### **4.4 Διαγράμματα - Σχολιασμός**

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, η άγνοια για τον τύπο της δοκιμής που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε εμπειρική συσχέτιση για τον προσδιορισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής, μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτίμηση ή υποεκτίμηση των παραμέτρων κατά τη φάση του σχεδιασμού. Για το λόγο αυτό, στα διαγράμματα που ακολουθούν για τις τιμές αστράγγιστης διατμητικής αντοχής που προέκυψαν από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης (UC) και από τριαξονικές δοκιμές χωρίς στερεοποίηση και χωρίς στράγγιση (UU), χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά σύμβολα. Αρχικά, παρουσιάζονται τα συνολικά διαγράμματα για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα ίδια διαγράμματα χωριστά για την κάθε κατηγορία χάριν εποπτείας.

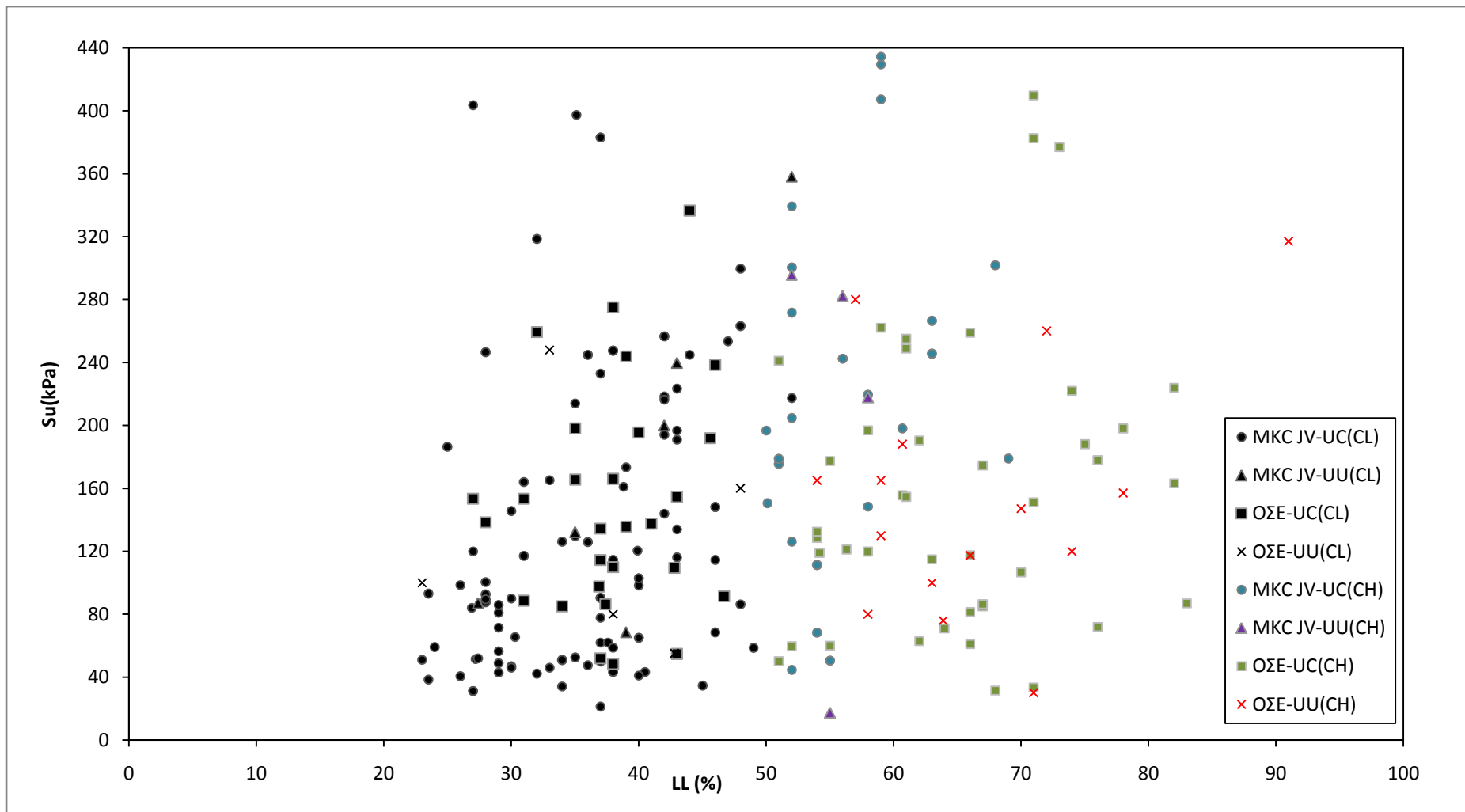
##### *4.4.1 Συνολικά διαγράμματα αργίλων χαμηλής και υψηλής πλαστικότητας*



Σχήμα 3 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής και των δύο τύπων αργίλων με αριθμό κρούσεων – εμπειρικές συσχετίσεις των Sanglerat- Decourt και Nixon

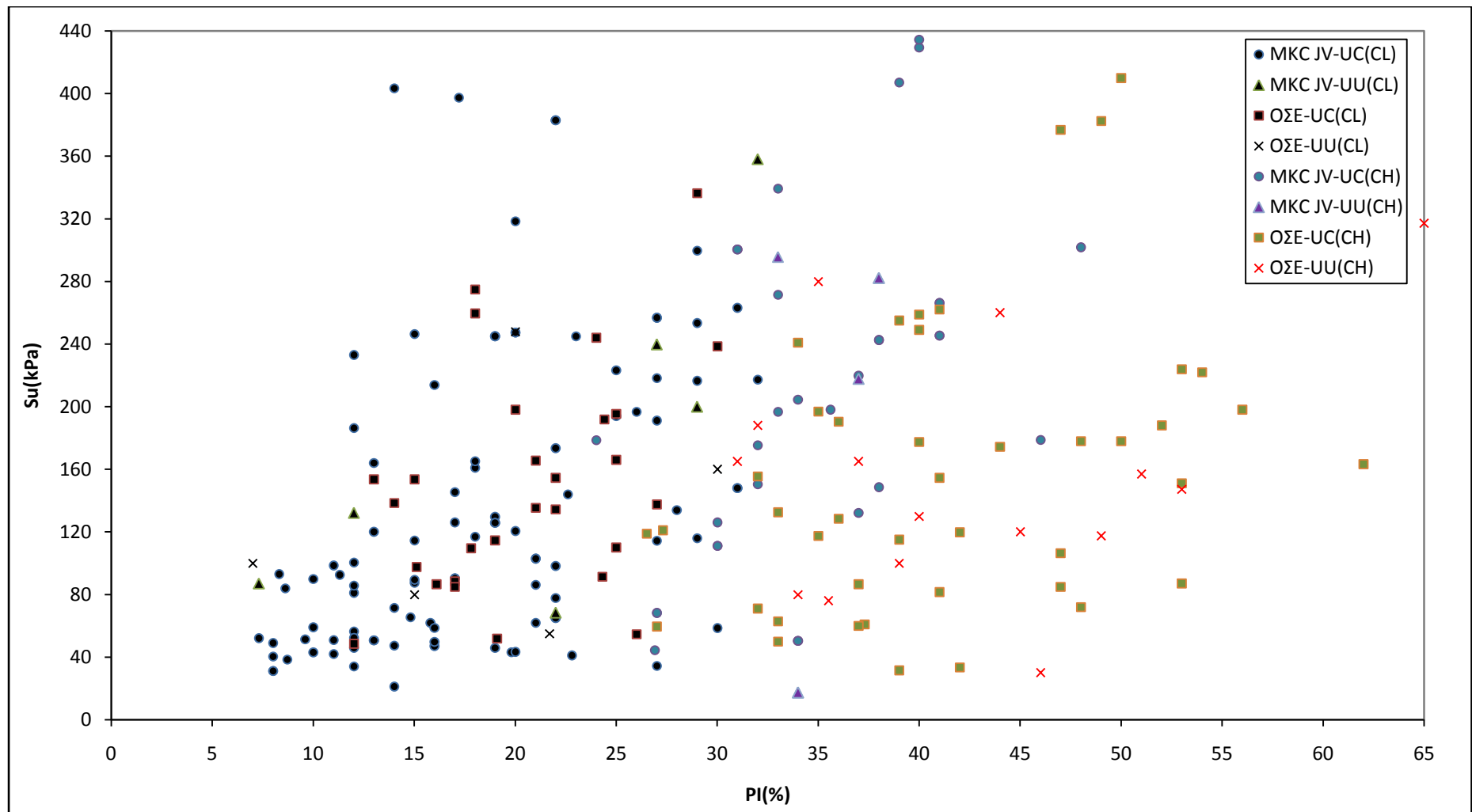


Σχήμα 4 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής- φυσικής υγρασίας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας

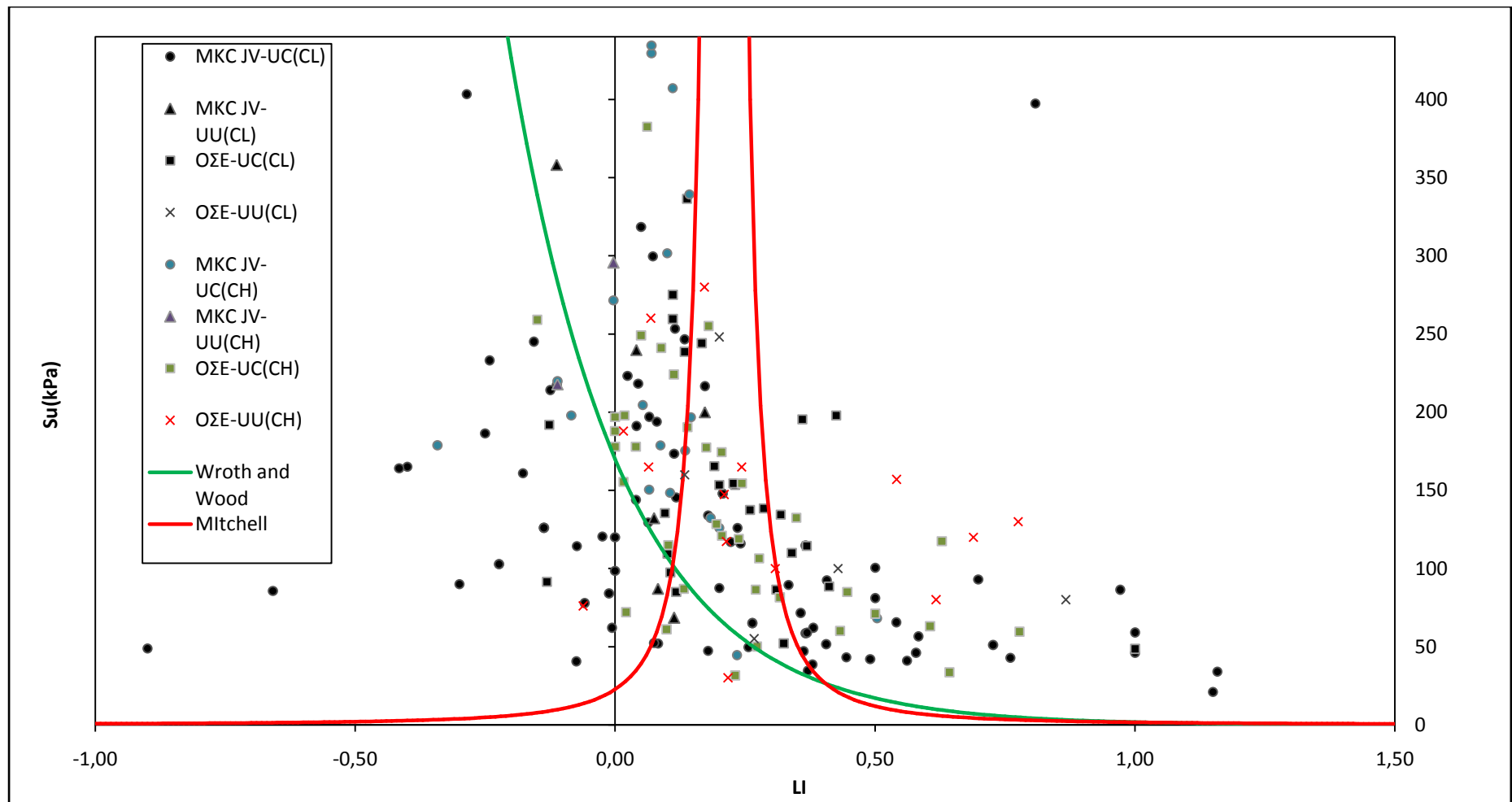


Σχήμα 5 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ορίου υδαρότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας

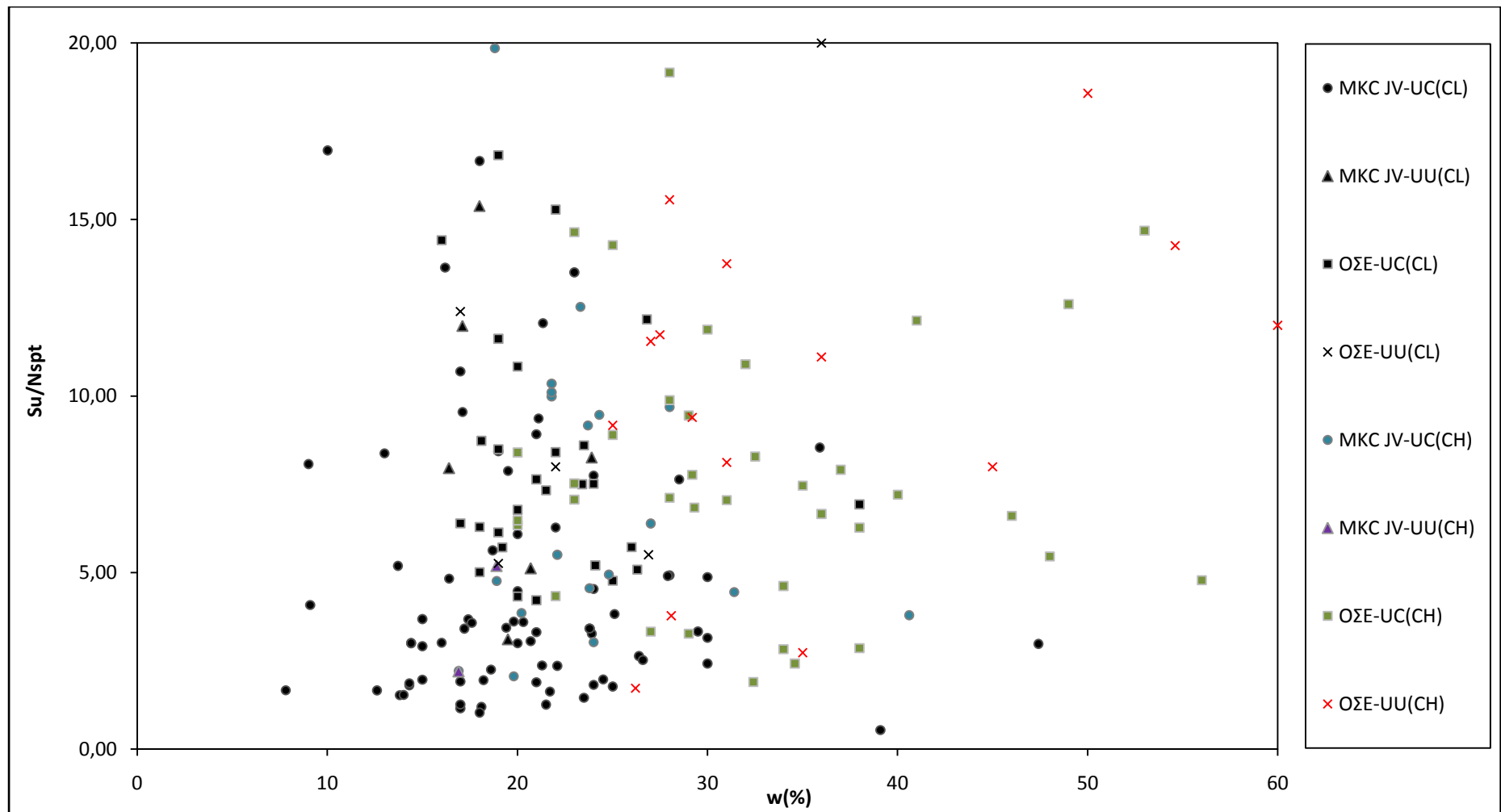




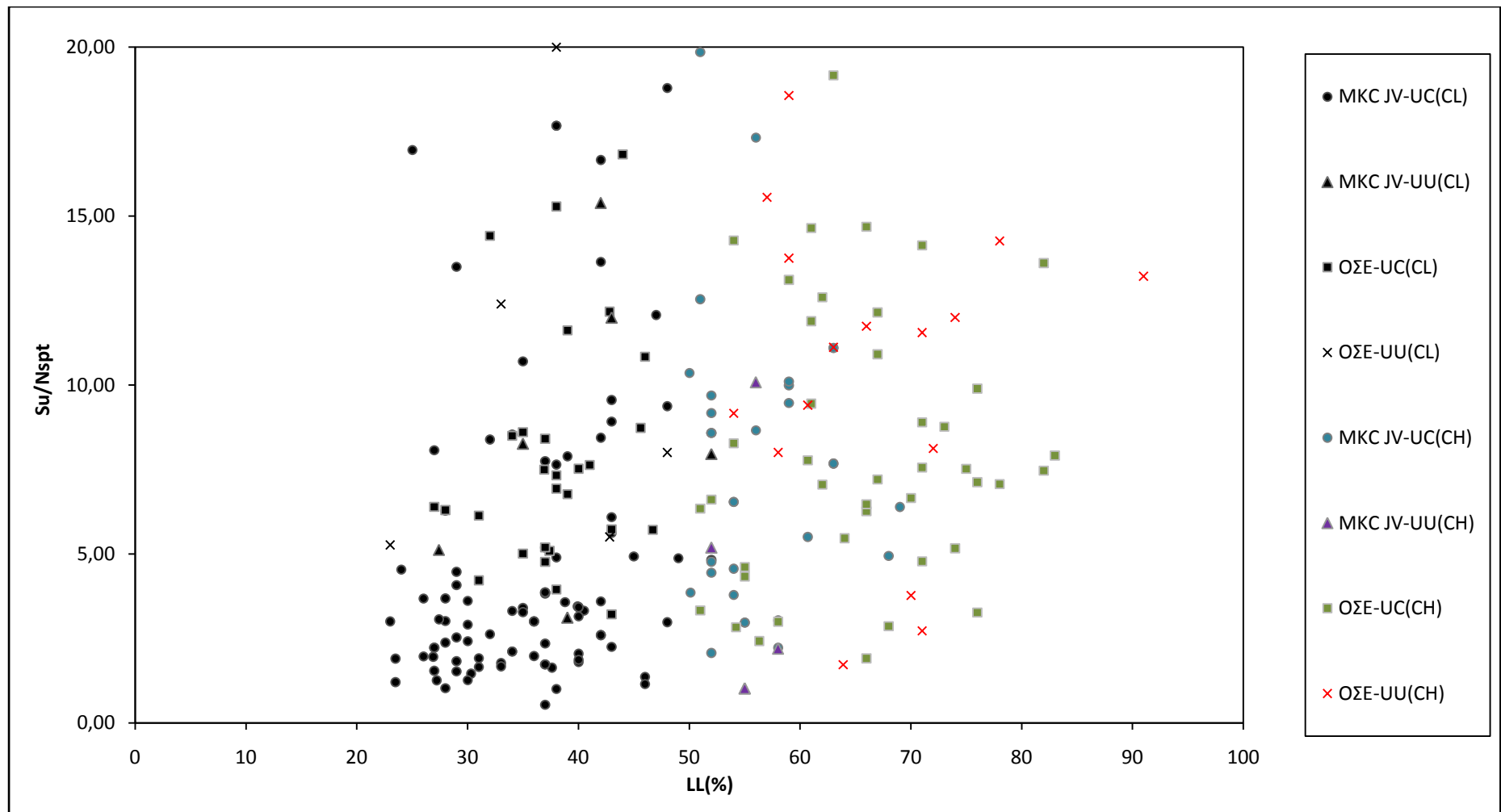
Σχήμα 6 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας



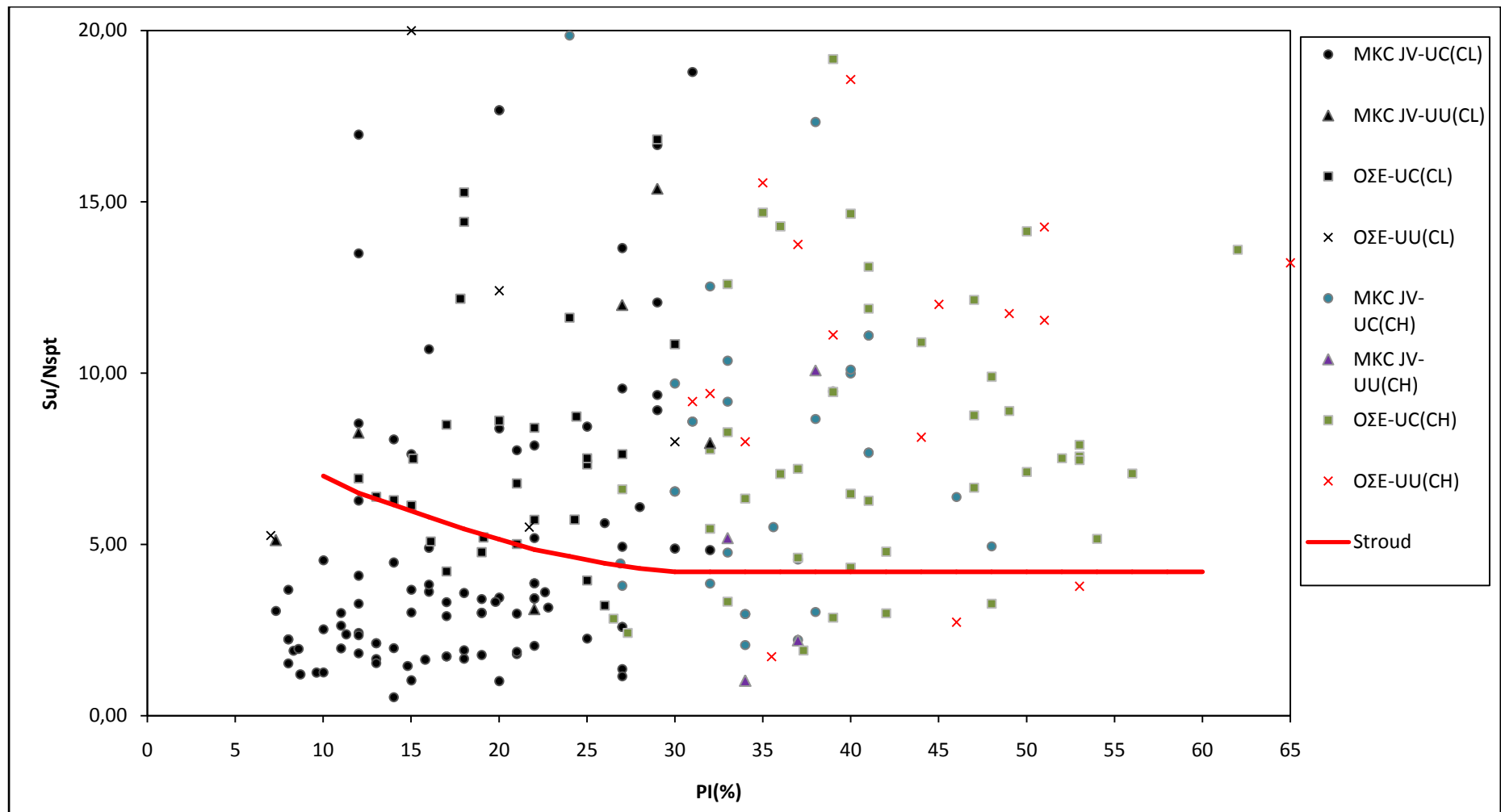
**Σχήμα 7** Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής - δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας και εμπειρικές συσχετίσεις των Wroth and Wood και Mitchell



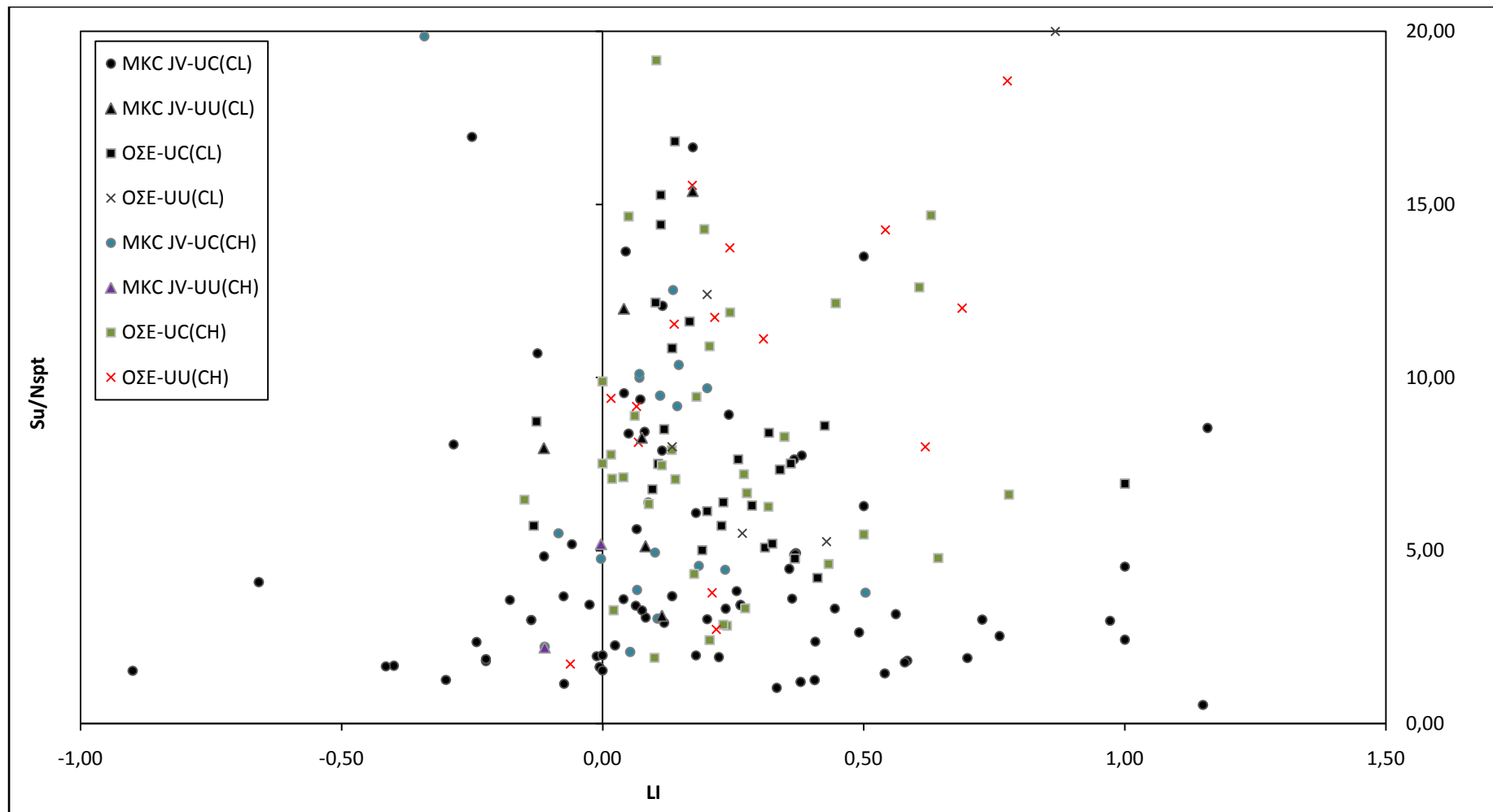
**Σχήμα 8** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με φυσική υγρασία για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας



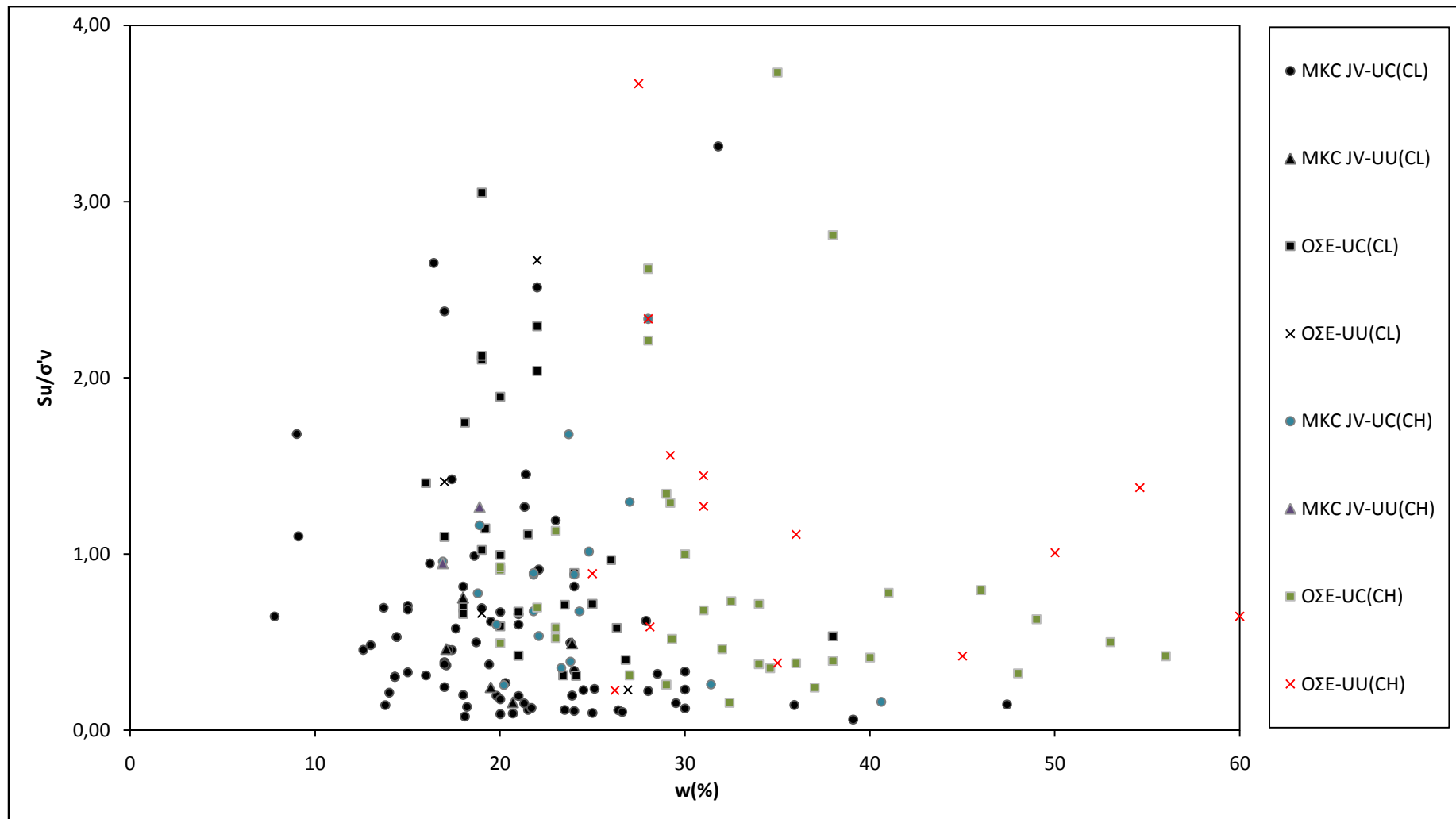
**Σχήμα 9** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με όριο υδαρότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας



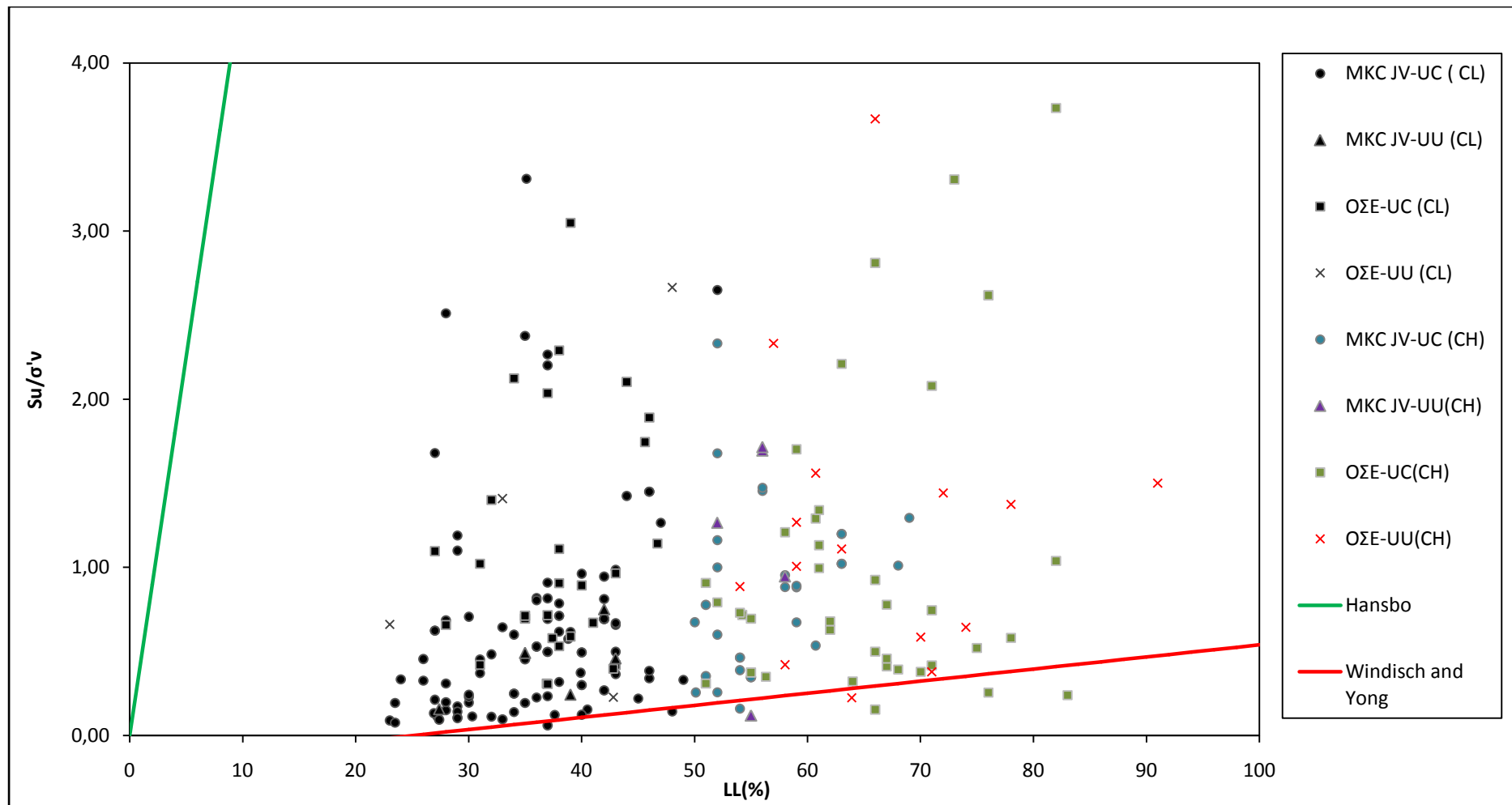
Σχήμα 10 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας



**Σχήμα 11** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας

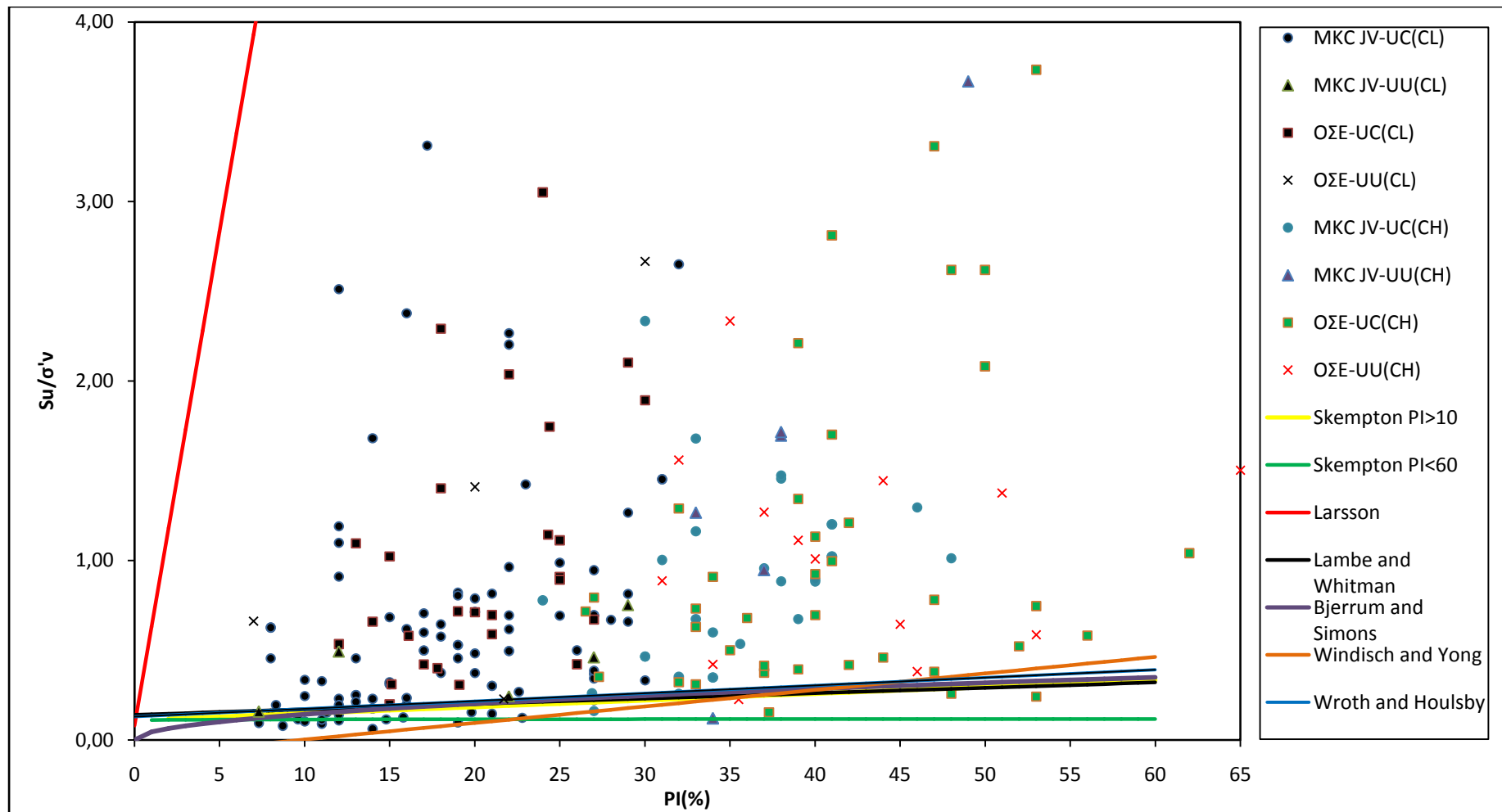


**Σχήμα 12** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με φυσική υγρασία για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας

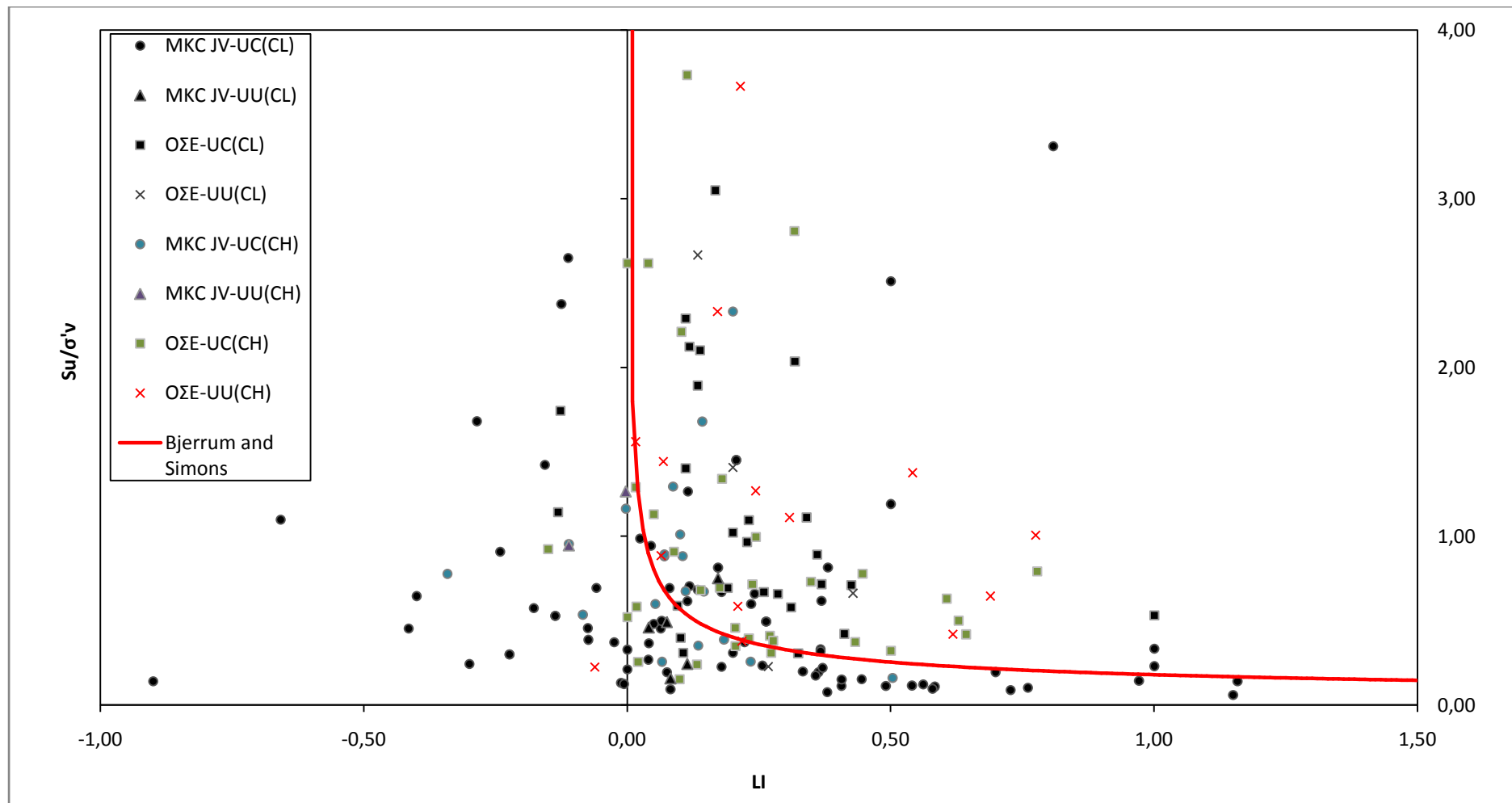


**Σχήμα 13** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής - ενεργού τάσης με όριο υδαρότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας και εμπειρικές συσχετίσεις των Windisch and Yong και Hansbo



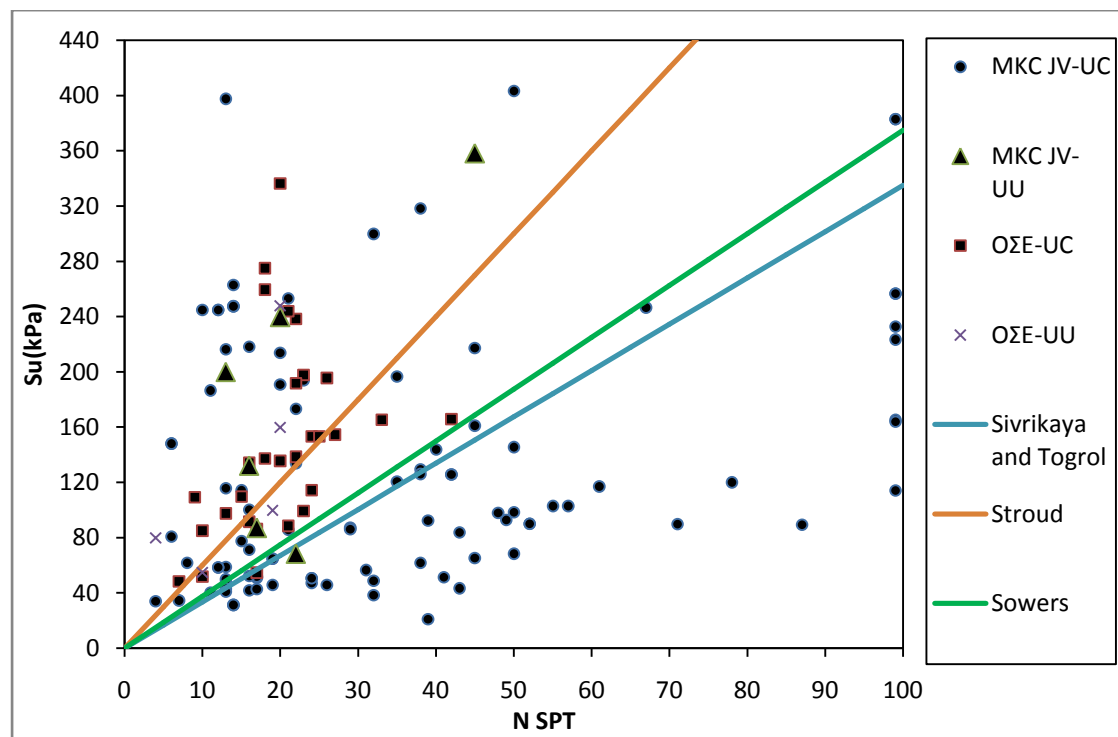


**Σχήμα 14** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής - ενεργού τάσης με δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας και εμπειρικές συσχετίσεις των Windisch and Yong, Lambe and Whitman, Skempton, Larsson, Bjerrum and Simons, Wroth and Houlsby



**Σχήμα 15** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής - ενεργού τάσης με δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους υψηλής και χαμηλής πλαστικότητας και εμπειρική συσχέτιση των Bjerrum and Simons

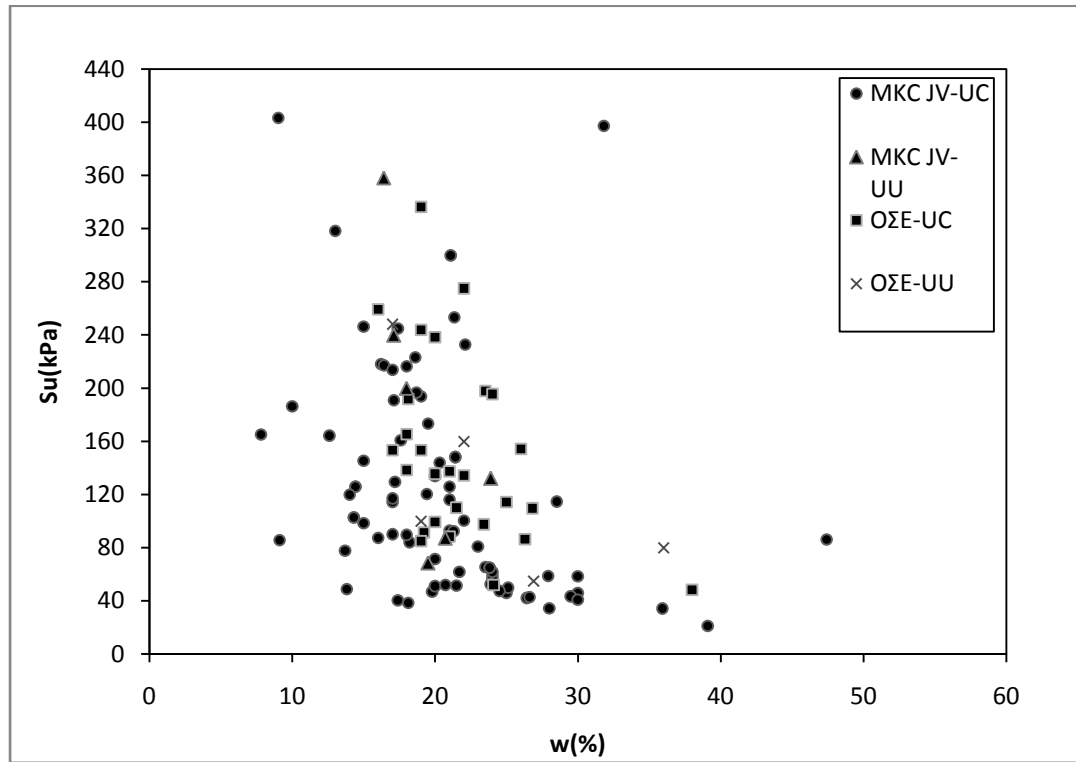
#### 4.4.2 Διαγράμματα αργίλων χαμηλής πλαστικότητας



**Σχήμα 16** Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με αριθμό κρούσεων για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας – εμπειρικές συσχετίσεις των Sivrikaya and Toğrol, Stroud, Sowers

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα, η σχέση του Sowers φαίνεται να προσαρμόζεται καλύτερα στα δεδομένα, χωρίς όμως να είναι ιδιαίτερα αποδεκτή η γραμμική συσχέτιση μεταξύ αστράγγιστης διατμητικής αντοχής και αριθμού κρούσεων. Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή είναι ένα μέγεθος που εξαρτάται από τον αρχικό λόγο κενών και από το αρχικό ποσοστό της φυσικής υγρασίας και σχετίζεται άμεσα με το μέγεθος της θλιπτικής τάσης που εφαρμόζεται στο έδαφος. Χρησιμοποιώντας μόνο τη δοκιμή πρότυπης διείδυσης, οι παραπάνω παράγοντες αγνοούνται. Επιπλέον, η δοκιμή SPT δεν είναι πλήρως τυποποιημένη καθώς εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες όπως έχει προαναφερθεί και δε λαμβάνει υπόψη τις φυσικές ιδιότητες των εδαφών. Συνεπώς, το να προσπαθούμε να προσδιορίσουμε τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής βασιζόμενοι αποκλειστικά στα αποτελέσματα που παίρνουμε από την εκτέλεσή της αποτελεί αδρή προσέγγιση.

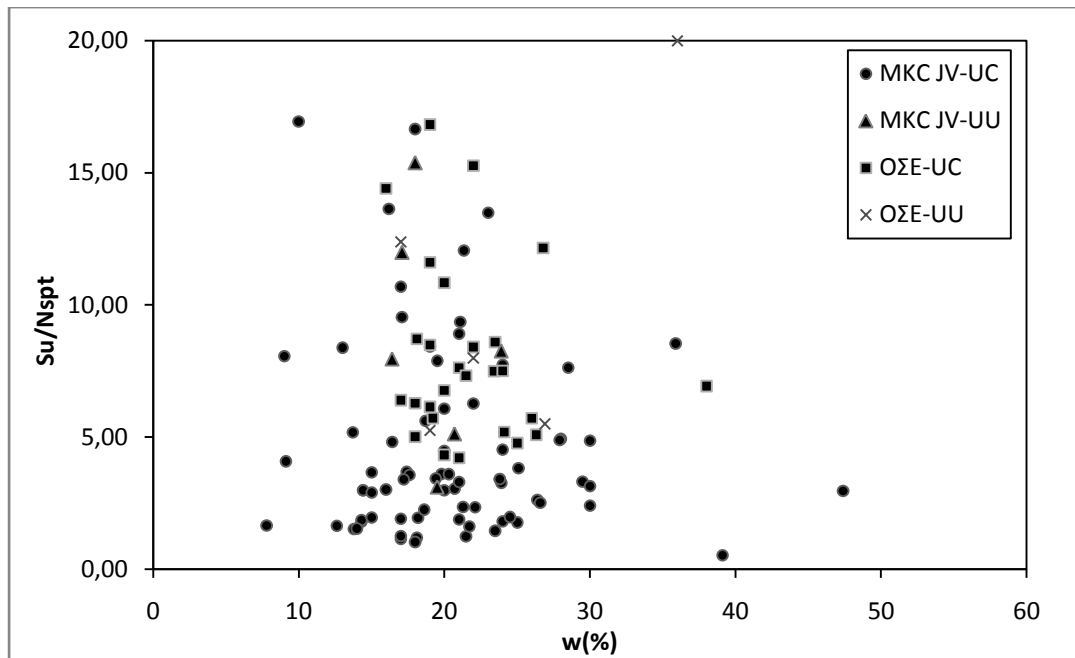
- Διαγράμματα σχέσης φυσικής υγρασίας ( $w$ ) με  $S_u$ ,  $S_u/N$ ,  $S_u/\sigma'_v$



**Σχήμα 17** Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-φυσικής υγρασίας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας

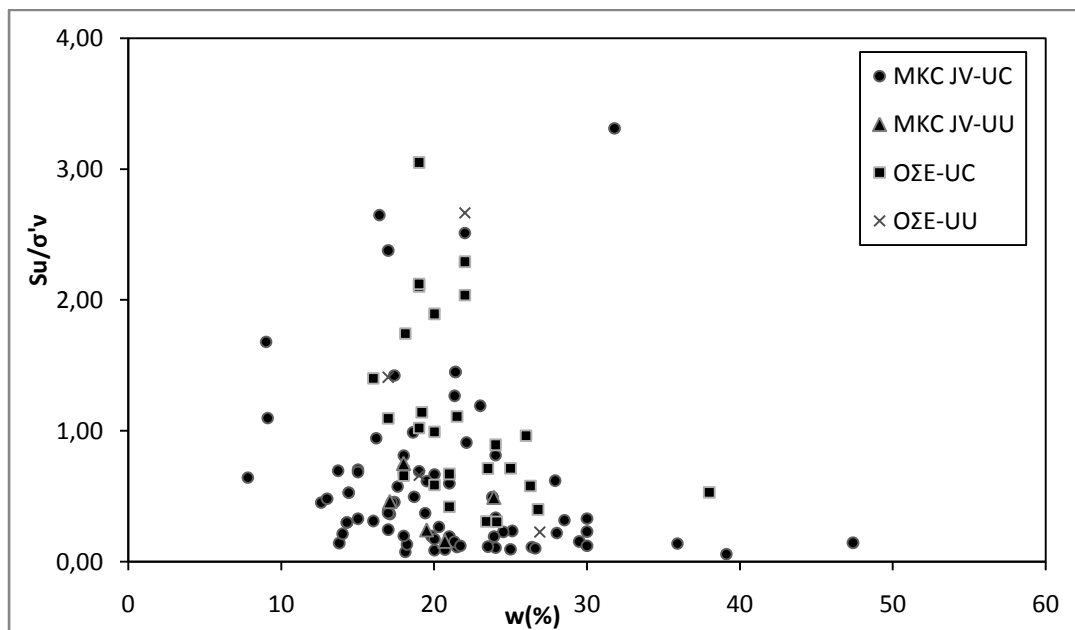
Σχήμα 17: Από τα στοιχεία της MKC JV, για  $w > 20\%$  παρατηρείται μείωση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής.

Τα δεδομένα του ΟΣΕ εμφανίζουν γενικά πτώση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με την αύξηση της υγρασίας χωρίς όμως να ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη τάση.



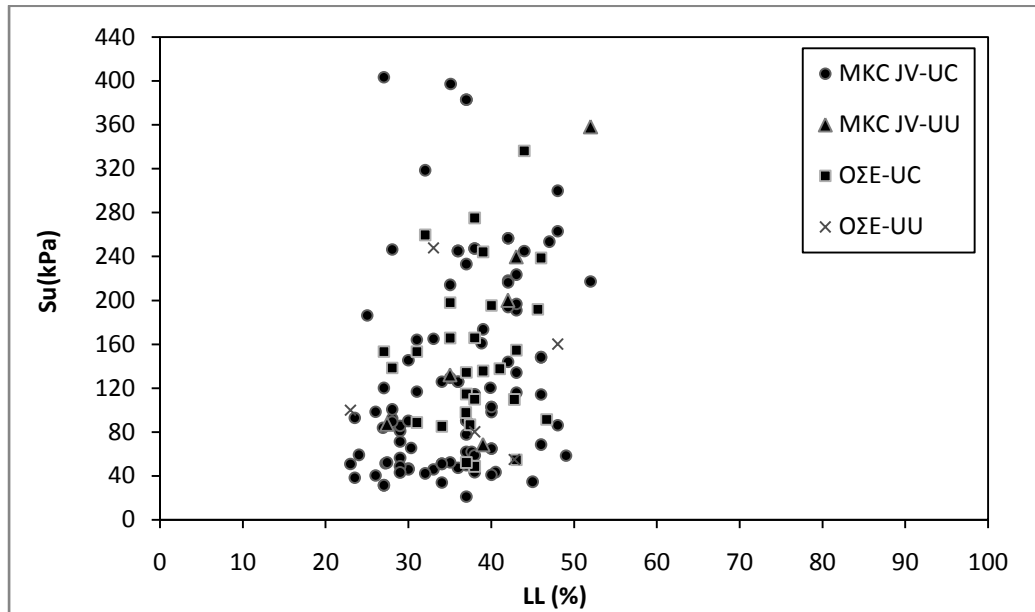
**Σχήμα 18** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με φυσική υγρασία για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας

Σχήμα 18: Δεν παρατηρείται κάποια συσχέτιση του λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT προς τη φυσική υγρασία.



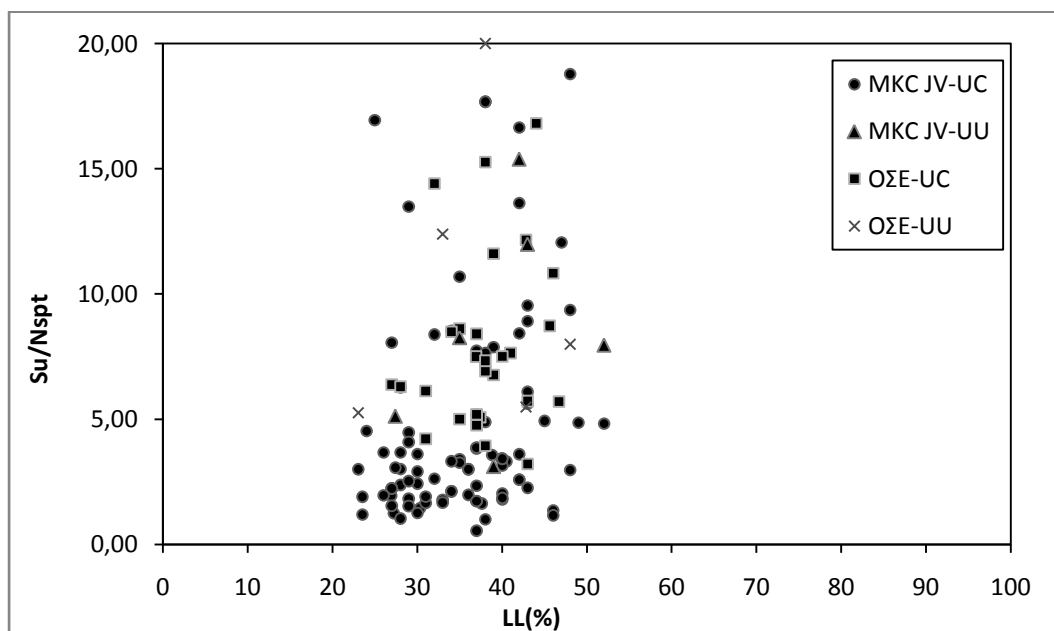
**Σχήμα 19** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με φυσική υγρασία για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας

- Διαγράμματα σχέσης όριο υδαρότητας (LL) με  $S_u$ ,  $S_u/N$ ,  $S_u/\sigma'_v$

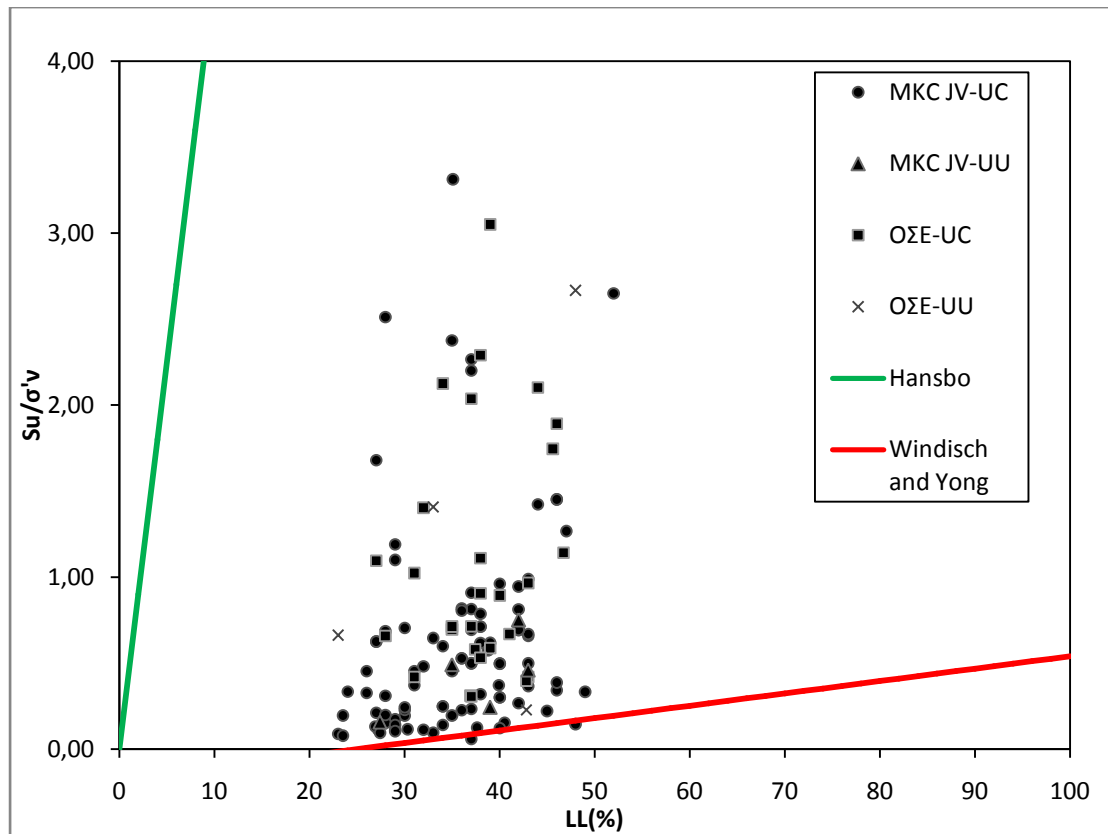


**Σχήμα 20** Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ορίου υδαρότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας

Σχήμα 20: Δεν υπάρχει κάποια σαφής τάση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με την αύξηση του ορίου υδαρότητας (LL). Δε συνίσταται η χρήση του για συσχετίσεις, καθώς τα όρια Atterberg έχουν προσδιορισθεί ποιοτικά και δεν έχουν θεμελιώδη ποσοτική έννοια.



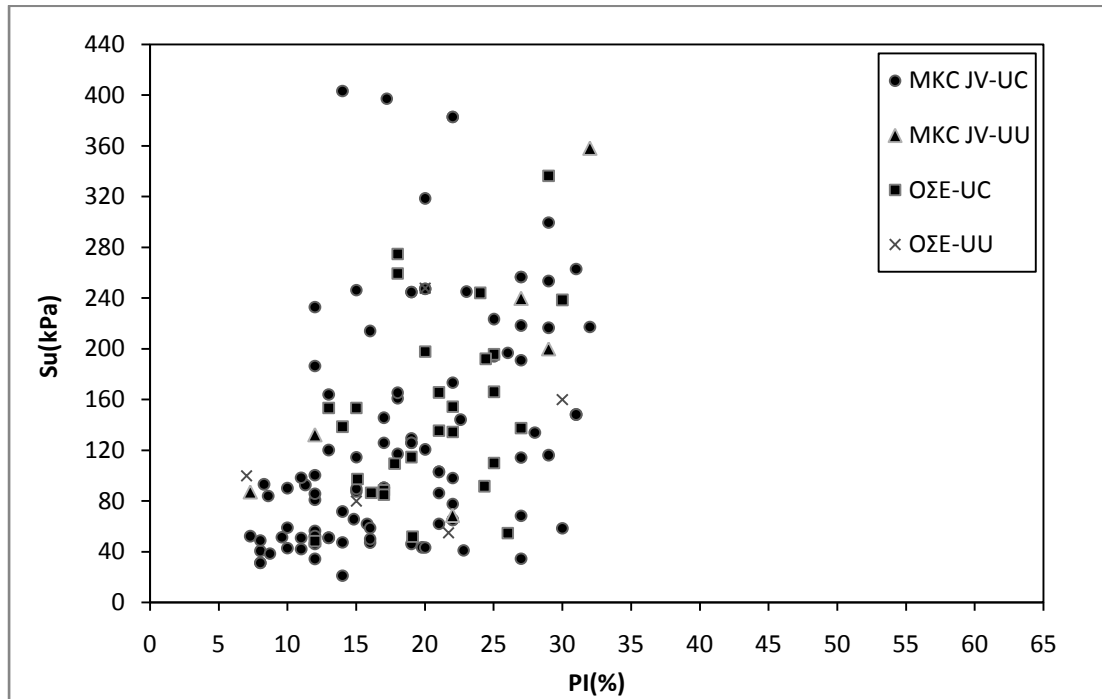
**Σχήμα 21** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με όριο υδαρότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας



**Σχήμα 22** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με όριο υδαρότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας

Σχήμα 22: Οι Hansbo και Bowles έχουν προτείνει την ίδια γραμμική συσχέτιση μεταξύ λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με όριο υδαρότητας, με τη διαφορά ότι ο Bowles θεώρησε ότι ισχύει για  $LL > 40\%$  και κανονικά στερεοποιημένα εδάφη, ενώ ο Hansbo για αργίλους Σκανδιναβίας. Είναι λογικό να μην παρατηρείται κάποια συσχέτιση των δεδομένων με τις υπάρχουσες εμπειρικές συσχετίσεις, καθώς είναι πιθανό ένα ποσοστό των δεδομένων να πρόκειται για υπερστερεοποιημένες και όχι για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους. Από τις δοκιμές που έχουν γίνει, δεν έχει προσδιορισθεί ο λόγος υπερστερεοποίησης (O.C.R.).

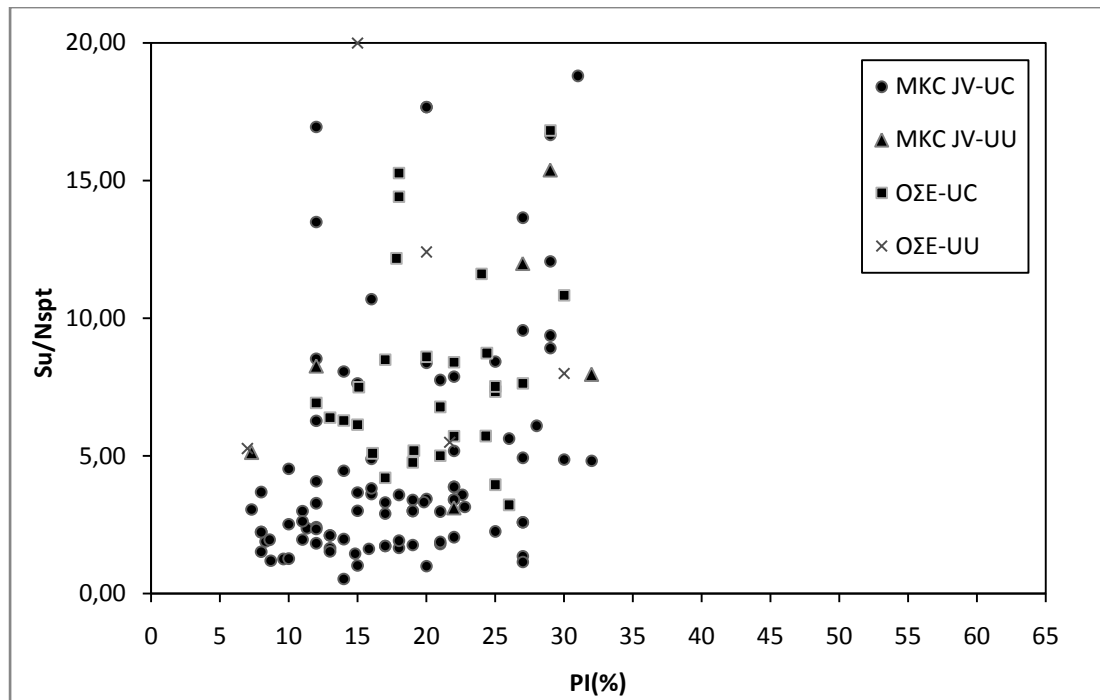
- Διαγράμματα σχέσης δείκτη πλαστιμότητας (PI) με  $S_u$ ,  $S_u/N$ ,  $S_u/\sigma'_v$



**Σχήμα 23** Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας

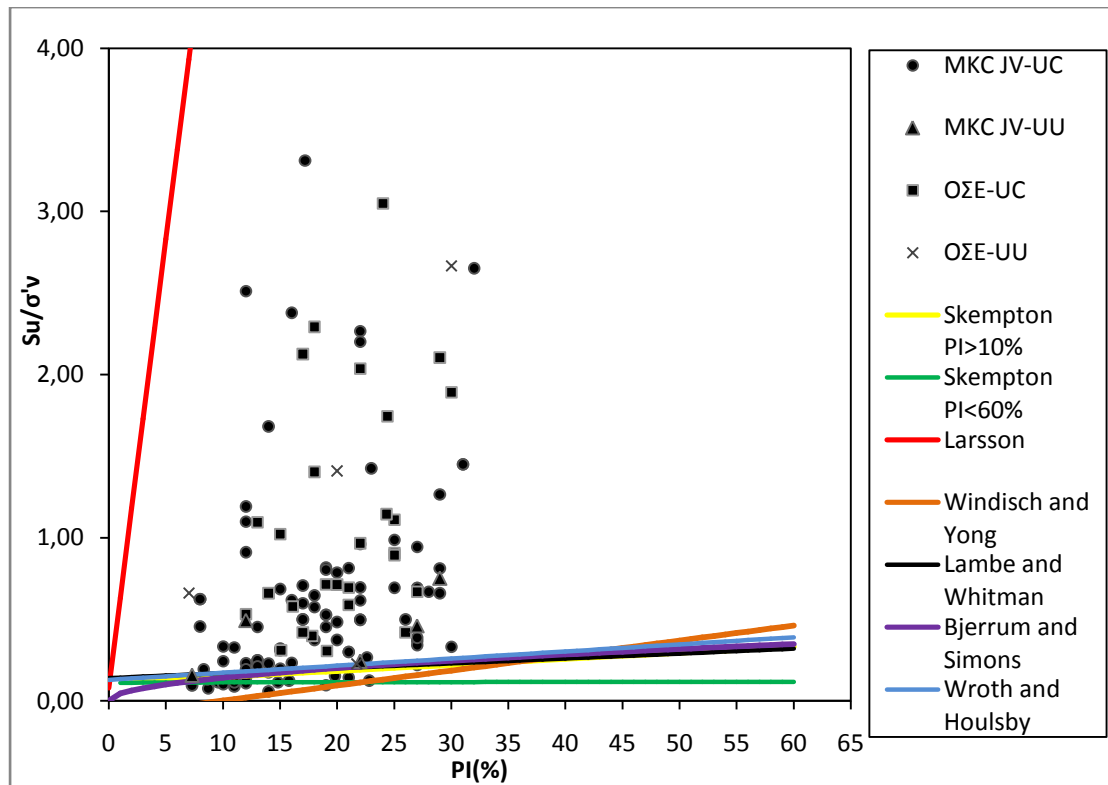
Σχήμα 23: Από το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρούμε μια γενική αυξητική τάση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με την αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό της αργίλου στο εδαφικό δείγμα, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο δείκτης πλαστιμότητας.





**Σχήμα 24** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας

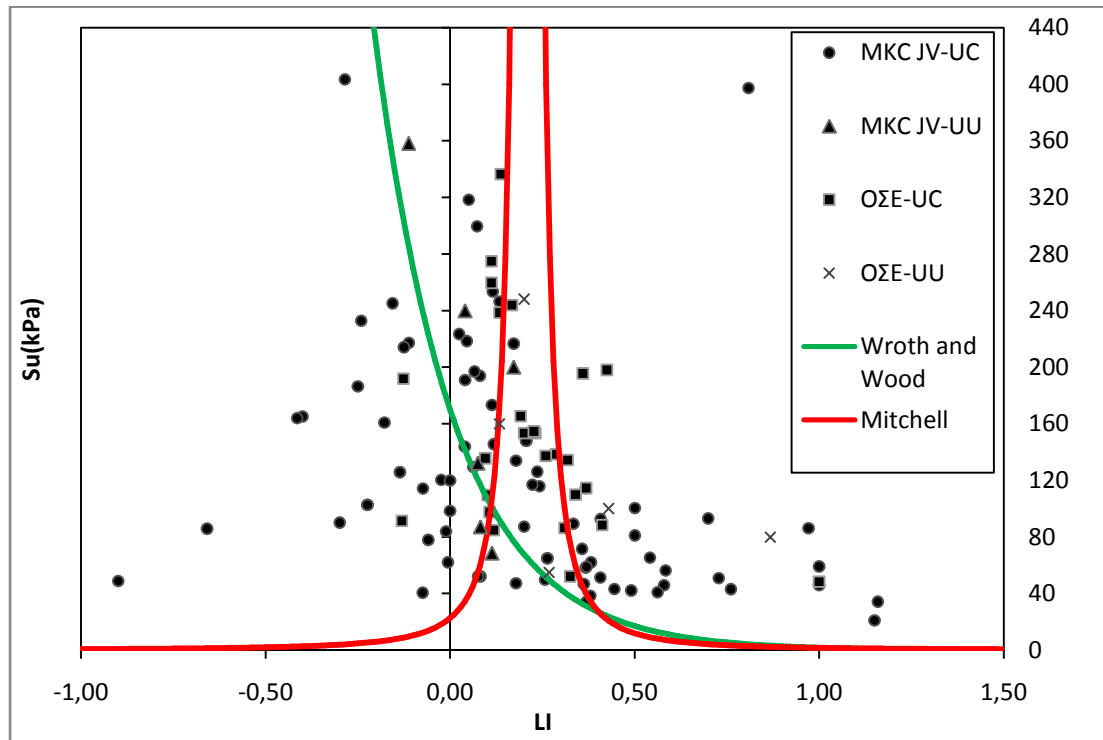
Σχήμα 24: Όσον αφορά στα αποτελέσματα της MKC JV, παρατηρείται αύξηση του λόγου  $S_u/N$  με την αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας.



**Σχήμα 25** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας

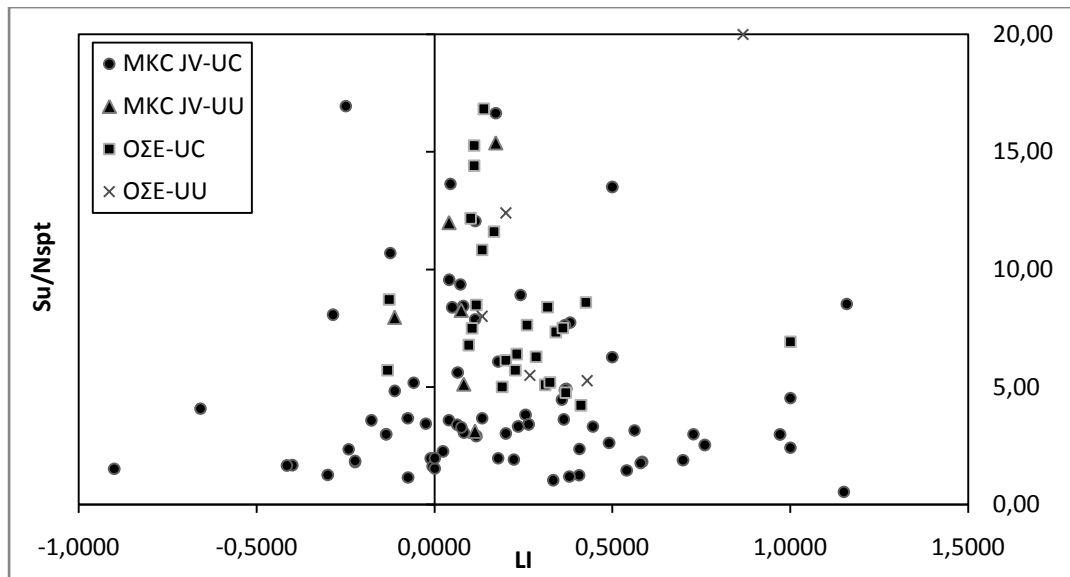
Σχήμα 25: Η σχέση του Larsson που αφορά σε αργίλους της Σκανδιναβίας, αποτελεί το άνω όριο για τις αργίλους χαμηλής πλαστικότητας από τον ελληνικό χώρο. Ο Skempton το 1954 κατέληξε σε μία σχέση για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους με δείκτη πλαστικότητας >10% και το 1957 σε μία σχέση για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους με δείκτη πλαστικότητας <60% στηριζόμενος σε αποτελέσματα από δοκιμές πτερυγίου. Οι σχέσεις που πρότειναν οι Bjerrum and Simons και Wroth and Houlsby αφορούν σε κανονικά στερεοποιημένες αργίλους. Οι Windisch and Yong δημοσίευσαν μία γραμμική συσχέτιση για αργίλους Σκανδιναβίας ενώ οι Lambe and Whitman μία γραμμική σχέση για όλους τους τύπους των αργίλων. Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα, οι ελληνικές άργιλοι εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερες τιμές του λόγου  $S_u/\sigma'_v$  και καμία εμπειρική συσχέτιση δεν μπορεί να προσαρμοστεί στα δεδομένα αυτά. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική ορυκτολογική σύσταση των αργίλων για τις οποίες έχουν προκύψει οι συσχετίσεις, στο διαφορετικό τύπο δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής αλλά και στην ύπαρξη αμφιβολιών για το αν έχουμε κανονικά στερεοποιημένες αργίλους ή υπερστερεοποιημένες καθώς ο OCR δεν είναι γνωστός.

- Διαγράμματα σχέσης δείκτη σχετικής υδαρότητας (LI) με  $S_u$ ,  $S_u/N$ ,  $S_u/\sigma'_v$



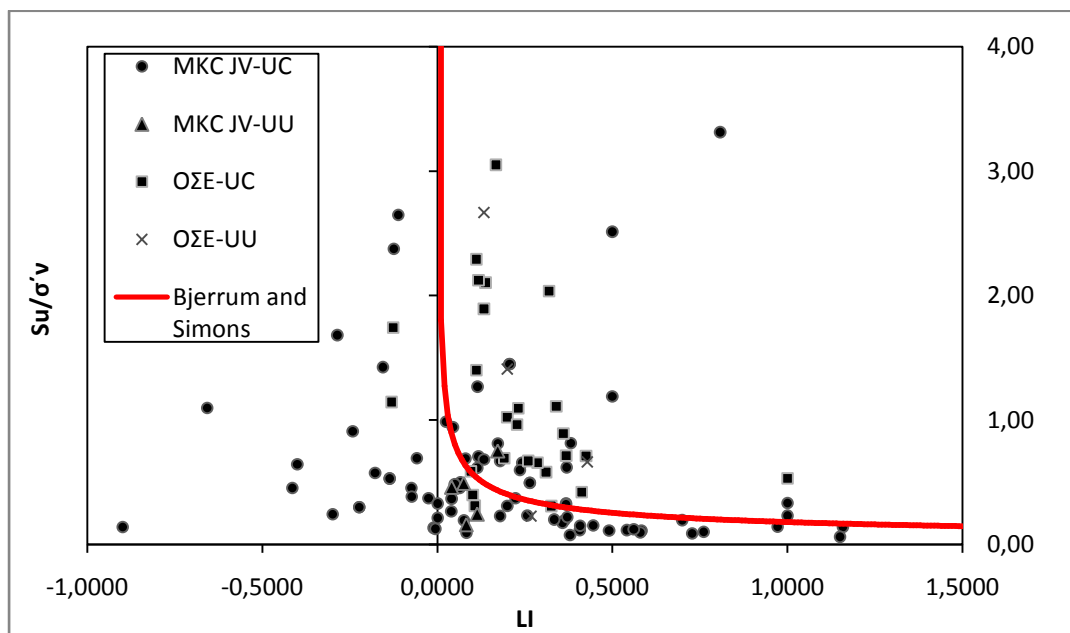
**Σχήμα 26** Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας

Σχήμα 26: Το μεγαλύτερο πλήθος τιμών ανήκει στην περιοχή από 0-1, δηλαδή στην πλάστιμη περιοχή. Με την αύξηση του δείκτη σχετικής υδαρότητας, πλησιάζοντας δηλαδή στην υδαρή κατάσταση, παρατηρείται μείωση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής κυρίως για τα στοιχεία από τη MKC JV. Τα δεδομένα από τον ΟΣΕ παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές του LI και μείωση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με την αύξηση του LI.  $LI < 0$  εμφανίζουν κυρίως άργιλοι από την περιοχή Μαλιακό-Κλειδί, δηλαδή ανήκουν στην ημιστερεή έως στερεή κατάσταση. Παρατηρούμε επίσης ότι όσο πιο στερεό είναι το εδαφικό υλικό τόσο μικρότερη αστράγγιστη διατμητική αντοχή παρουσιάζει. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη των ρωγμών στο δοκίμιο κατά τη στερεοποίηση, που αποτελούν επιφάνειες αστοχίας. Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι οι άργιλοι χαμηλής πλαστικότητας συμβαδίζουν με τη συσχέτιση των Wroth and Wood για αναζυμωμένες αργίλους. Η σχέση των Mitchell θα μπορούσαμε να πούμε ότι θα μπορούσε να αποτελεί καλή συσχέτιση εάν μετατοπιζόταν προς τα αριστερά.



**Σχήμα 27** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας

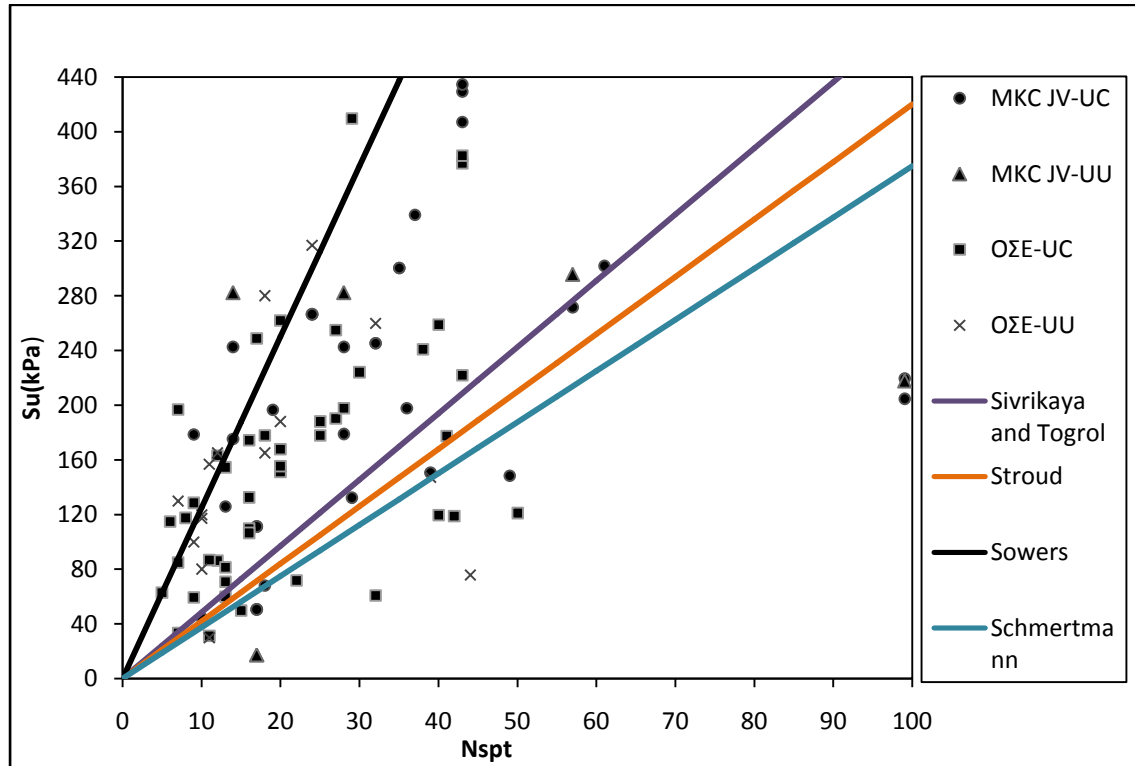
Σχήμα 27: Παρατηρείται μείωση του λόγου  $S_u/N$  με την αύξηση του ορίου σχετικής υδαρότητας.



**Σχήμα 28** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους χαμηλής πλαστικότητας

Σχήμα 28: Η εμπειρική σχέση των Bjerrum and Simons έχει προκύψει για κανονικά στερεοποιημένες αργίλους και φαίνεται να προσαρμόζεται αρκετά καλά στα δεδομένα μας, παρά το γεγονός ότι δε γνωρίζουμε το λόγο υπερστερεοποίησης άρα μπορεί στα δεδομένα μου να περιλαμβάνονται και υπερστερεοποιημένες άργιλοι.

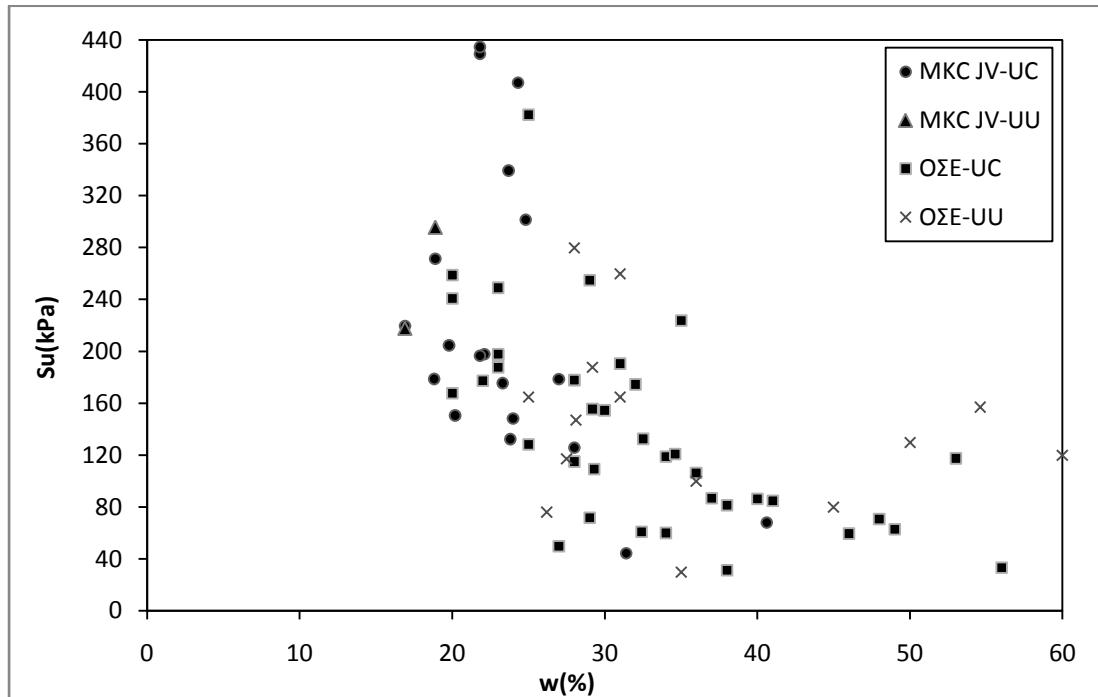
#### 4.4.3 Διαγράμματα αργίλων υψηλής πλαστικότητας



**Σχήμα 29** Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με αριθμό κρούσεων για αργίλους υψηλής πλαστικότητας – εμπειρικές συσχετίσεις των Sivrikaya and Togrol, Stroud, Sowers, Schmertmann

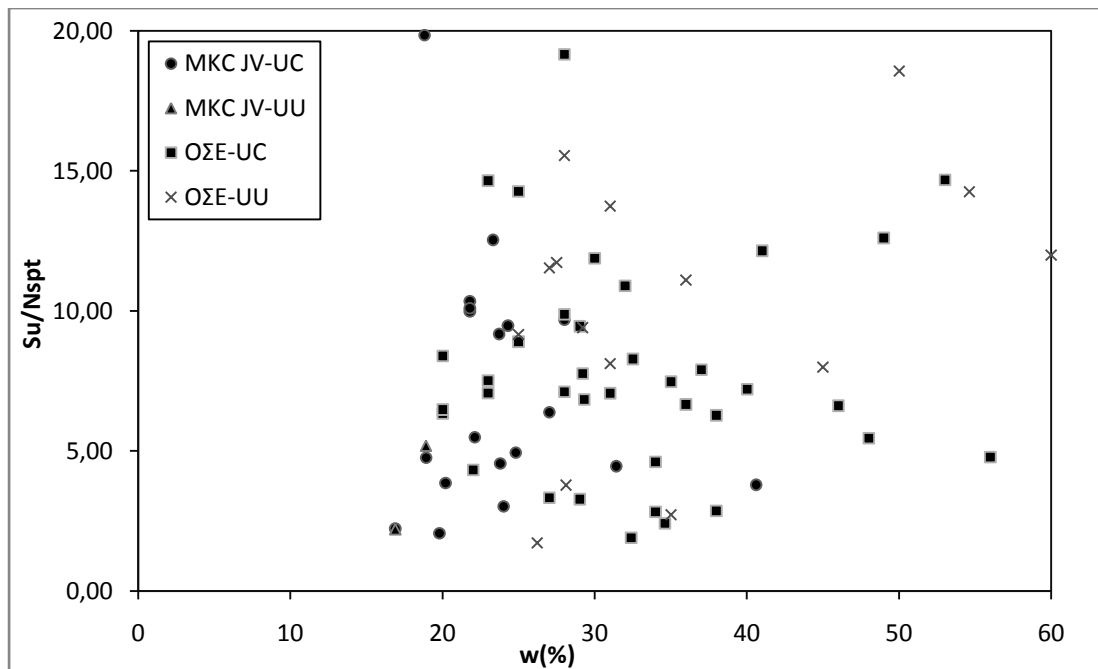
Σχήμα 29: Για τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία δε φαίνεται δυνατή κάποια γραμμική συσχέτιση μεταξύ αστράγγιστης διατμητικής αντοχής και αριθμού κρούσεων. Η σχέση του Sowers αποτελεί το άνω όριο και η σχέση του Schmertmann το κάτω όριο.

- Διαγράμματα σχέσης φυσικής υγρασίας ( $w$ ) με  $S_u$ ,  $S_u/N$ ,  $S_u/\sigma'_v$



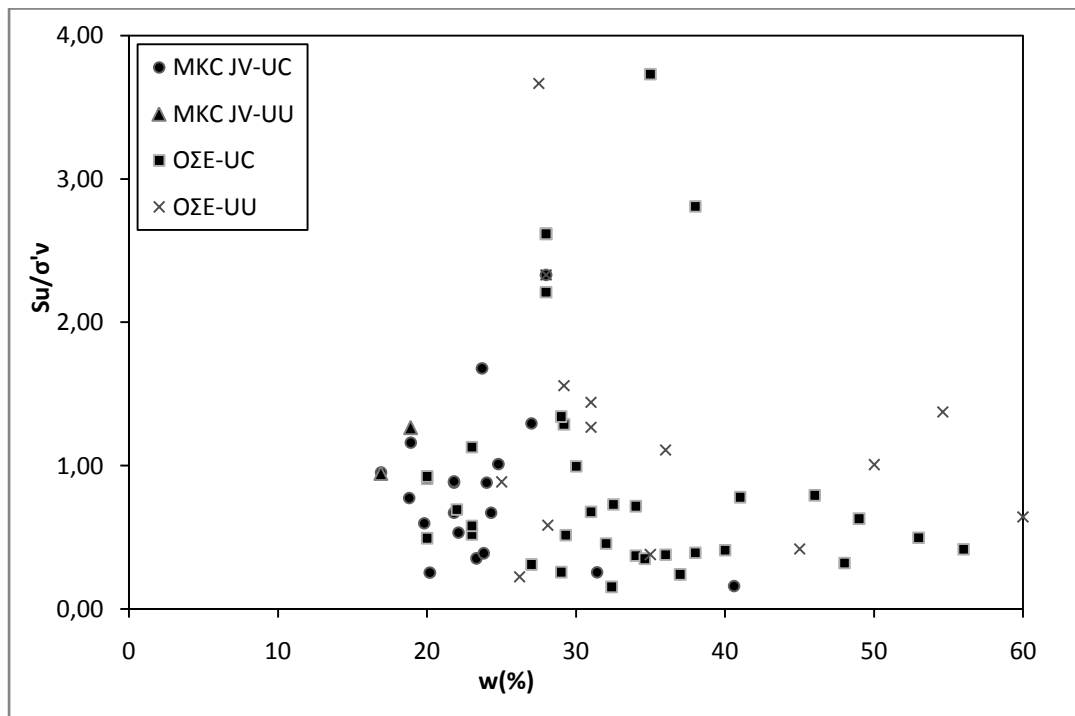
**Σχήμα 30** Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-φυσικής υγρασίας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας

Σχήμα 30: Από το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρούμε μείωση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής εκθετικής μορφής με την αύξηση της υγρασίας.



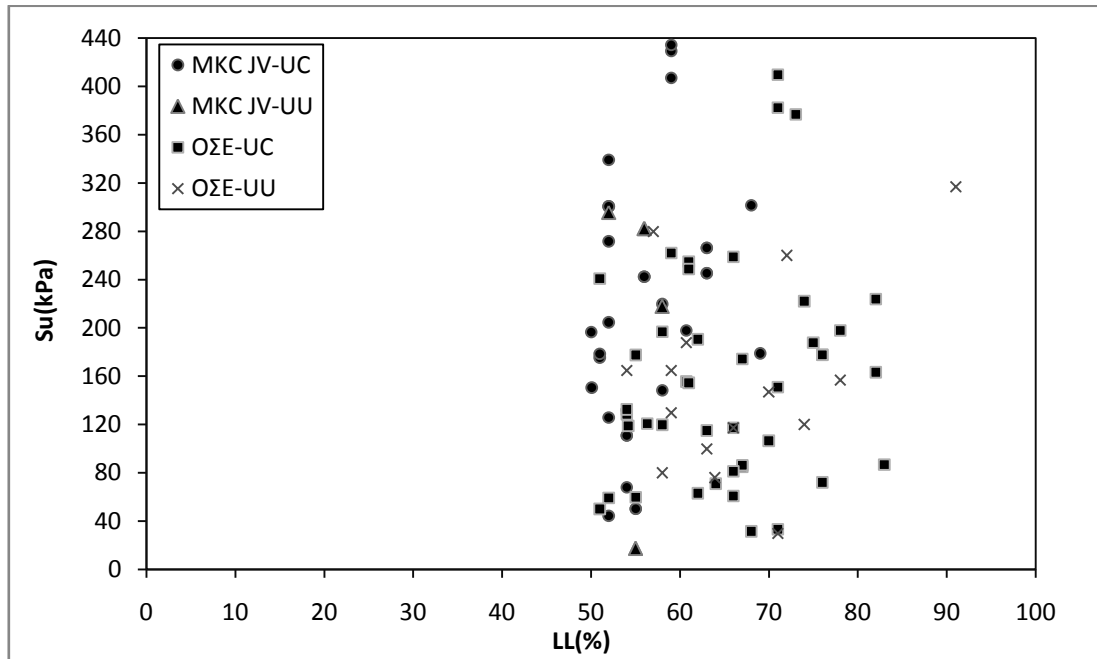
**Σχήμα 31** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με φυσική υγρασία για αργίλους υψηλής πλαστικότητας

Σχήμα 31: Όσον αφορά στα δεδομένα από τη MKC JV, είναι πιο συγκεντρωμένα κυρίως μεταξύ του ποσοστού υγρασίας 20 - 30% και τα αποτελέσματα από τη δοκιμή UU φαίνεται να ταυτίζονται με τα αποτελέσματα από τη δοκιμή UC. Δεν παρατηρείται κάποια εμφανής τάση του λόγου  $S_u/N_{spt}$  με την αύξηση της υγρασίας. Τα δεδομένα του ΟΣΕ εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά, ενώ οι τιμές του λόγου  $S_u/N_{spt}$  από τη δοκιμή UU είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της δοκιμής UC.

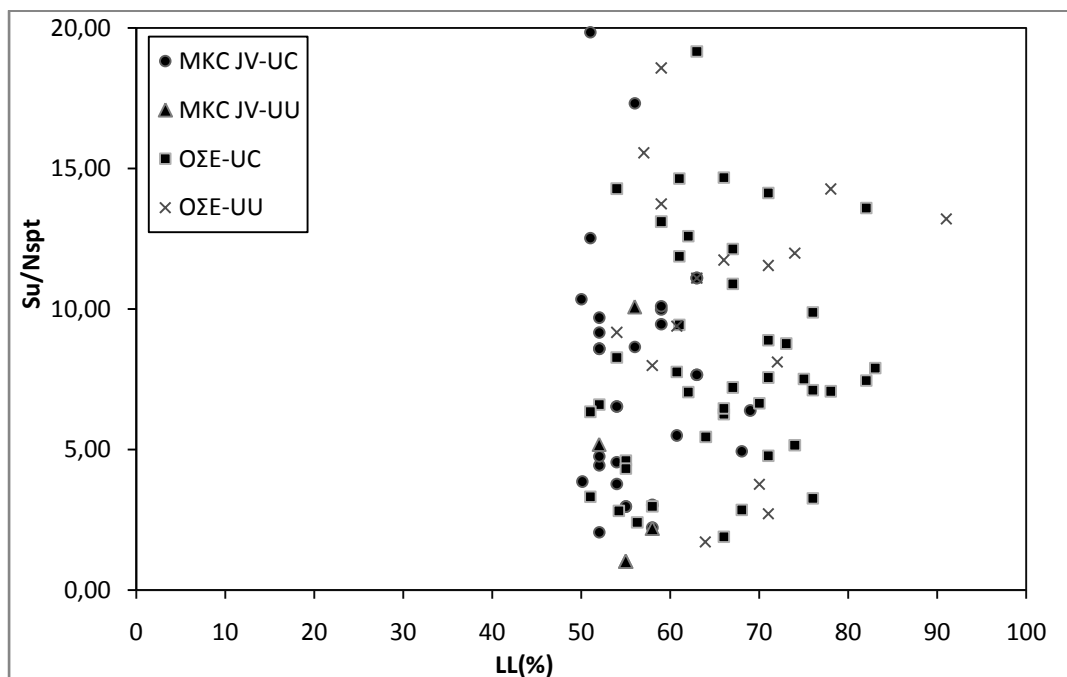


**Σχήμα 32** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με φυσική υγρασία για αργίλους υψηλής πλαστικότητας

- Διαγράμματα σχέσης ορίου υδαρότητας (LL) με  $S_u$ ,  $S_u/N$ ,  $S_u/\sigma'_v$



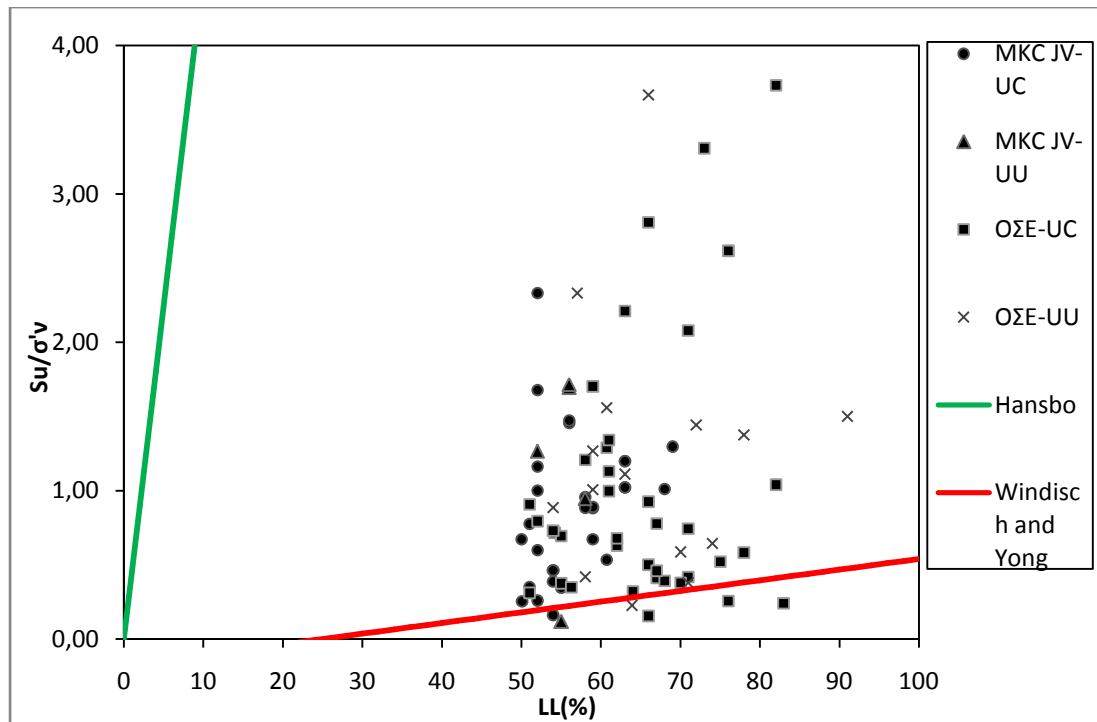
Σχήμα 33 Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ορίου υδαρότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας



Σχήμα 34 Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με όριο υδαρότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας

Σχήμα 34: Δεν παρατηρείται κάποια συγκεκριμένη τάση του λόγου  $S_u/N_{SPT}$  με την αύξηση του ορίου υδαρότητας.

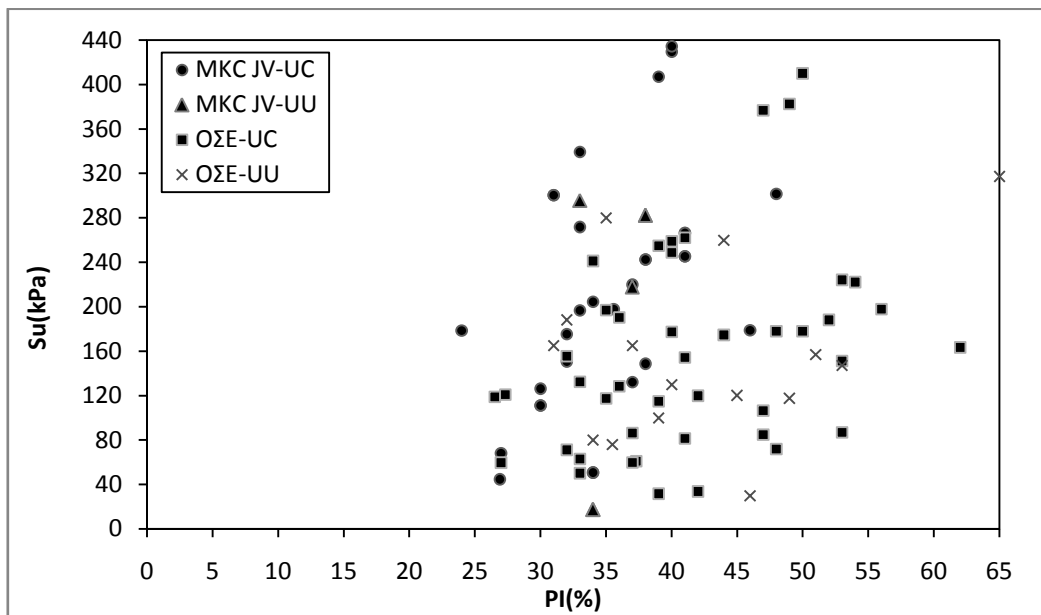




**Σχήμα 35** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με όριο υδαρότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας

Σχήμα 35: Οι Hansbo και Bowles έχουν προτείνει την ίδια γραμμική συσχέτιση μεταξύ λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-ενεργού τάσης με όριο υδαρότητας, με τη διαφορά ότι ο Bowles θεώρησε ότι ισχύει για  $LL > 40\%$  και κανονικά στερεοποιημένα εδάφη, ενώ ο Hansbo για αργίλους Σκανδιναβίας. Είναι λογικό να μην παρατηρείται κάποια συσχέτιση των δεδομένων με τις υπάρχουσες εμπειρικές συσχετίσεις, καθώς θεωρούμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των δεδομένων πρόκειται για υπερστερεοποιημένες αργίλους

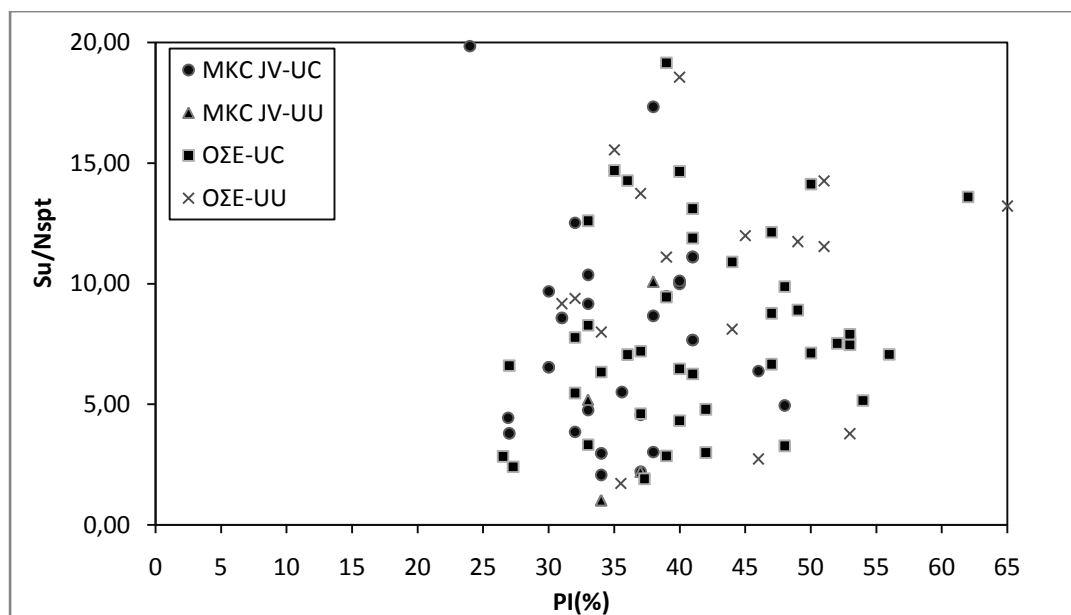
- Διαγράμματα σχέσης δείκτη πλαστιμότητας (PI) με  $S_u$ ,  $S_u/N$ ,  $S_u/\sigma'_v$



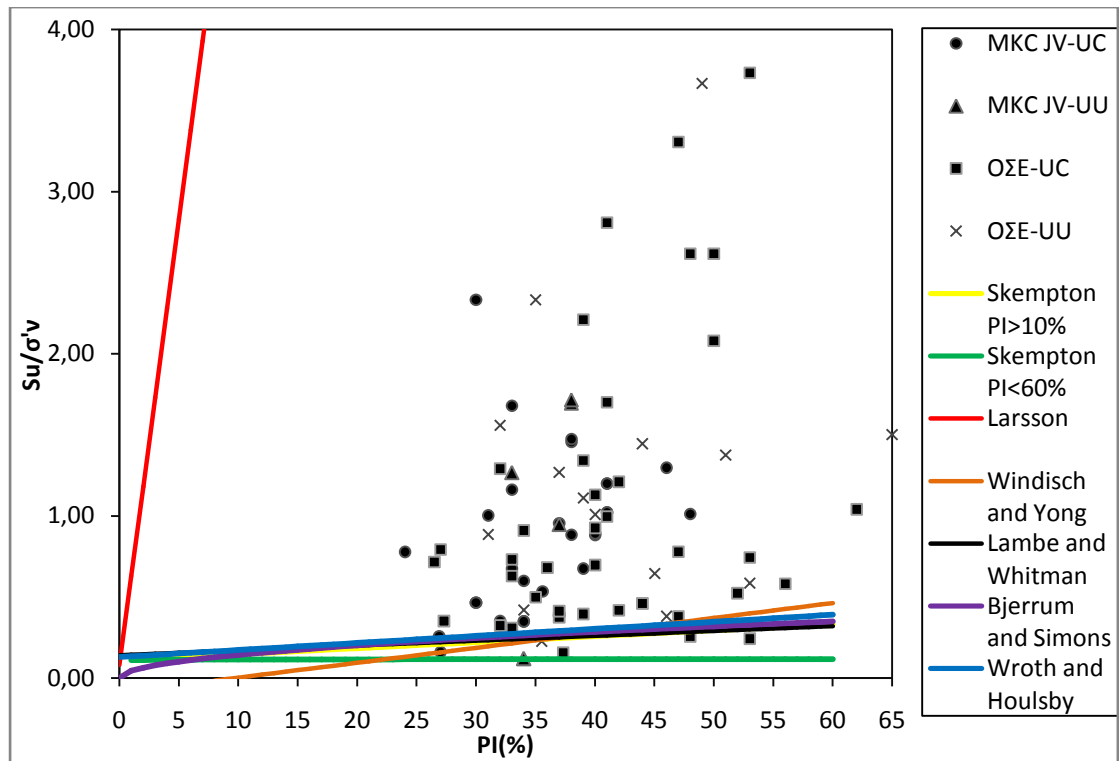
**Σχήμα 36** Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας

Σχήμα 36: Με την αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας δεν παρατηρείται καμιά επίδραση στην τιμή της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής όσον αφορά στα δεδομένα του ΟΣΕ.

Για τα δεδομένα από τη MKC JV, μπορούμε να διακρίνουμε αύξηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής με την αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας.



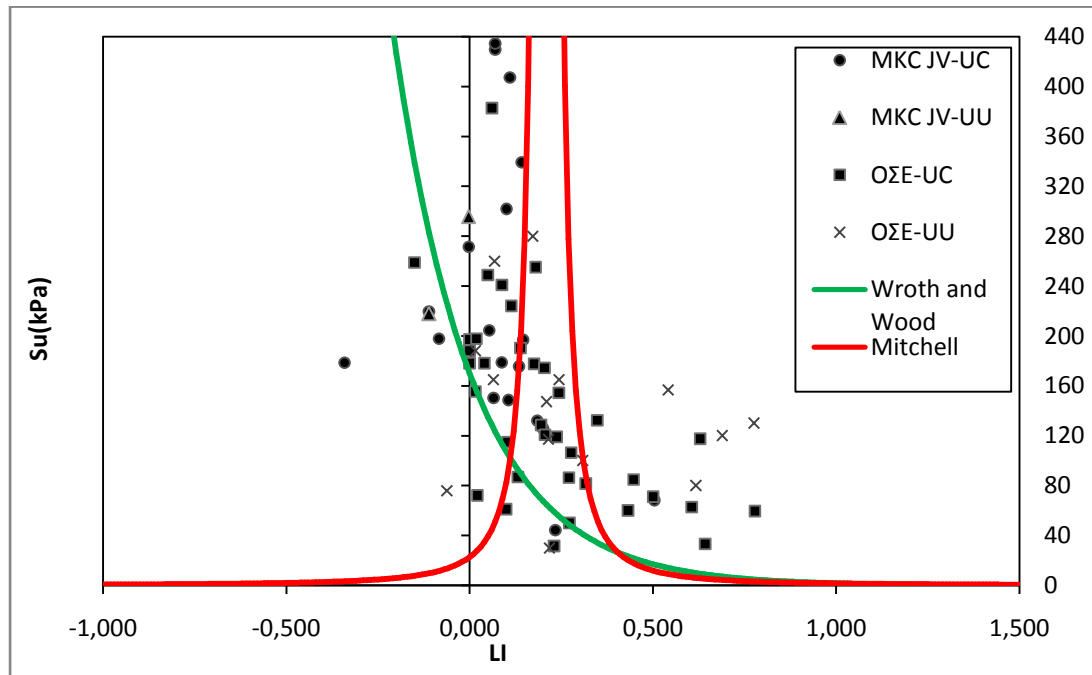
**Σχήμα 37** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας



**Σχήμα 38** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής - ενεργού τάσης με δείκτη πλαστιμότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας

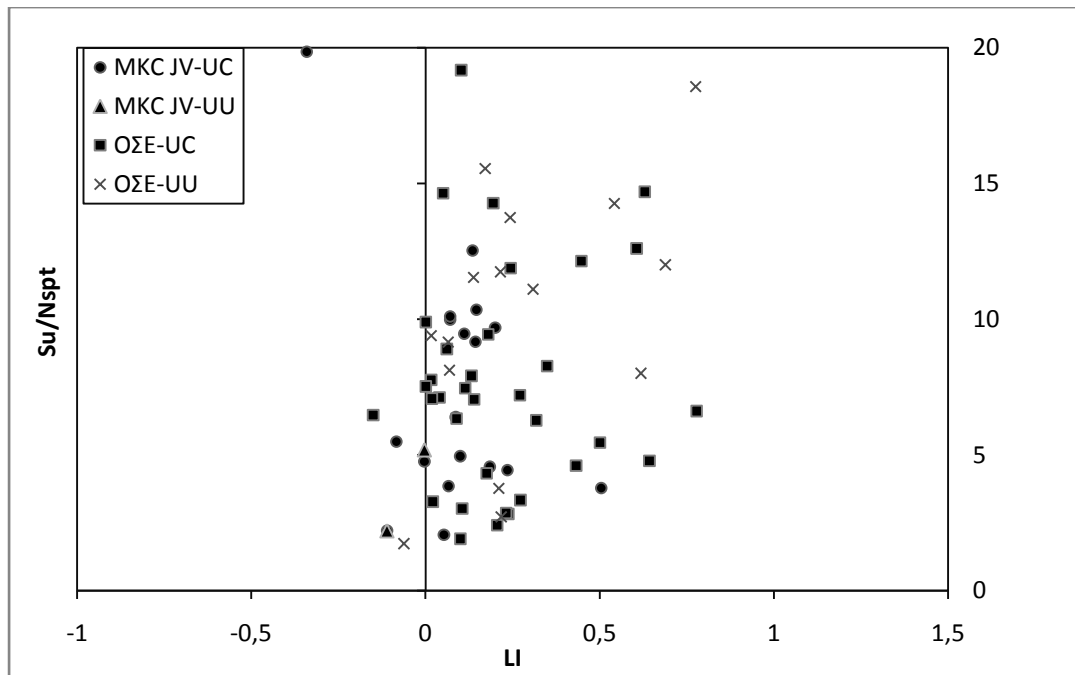
Σχήμα 38: Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα, οι ελληνικές άργιλοι εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερες τιμές του λόγου  $S_u/s'_v$  και καμία γραμμική εμπειρική συσχέτιση δεν μπορεί να προσαρμοστεί στα δεδομένα αυτά. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική ορυκτολογική σύσταση των αργίλων για τις οποίες έχουν προκύψει οι συσχετίσεις, στο διαφορετικό τύπο δοκιμών που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής αλλά και στην ύπαρξη αμφιβολιών για το αν έχουμε κανονικά στερεοποιημένες αργίλους ή υπερστερεοποιημένες καθώς ο OCR δεν είναι γνωστός.

- Διαγράμματα σχέσης δείκτη σχετικής υδαρότητας (LI) με  $S_u$ ,  $S_u/N$ ,  $S_u/\sigma'_v$

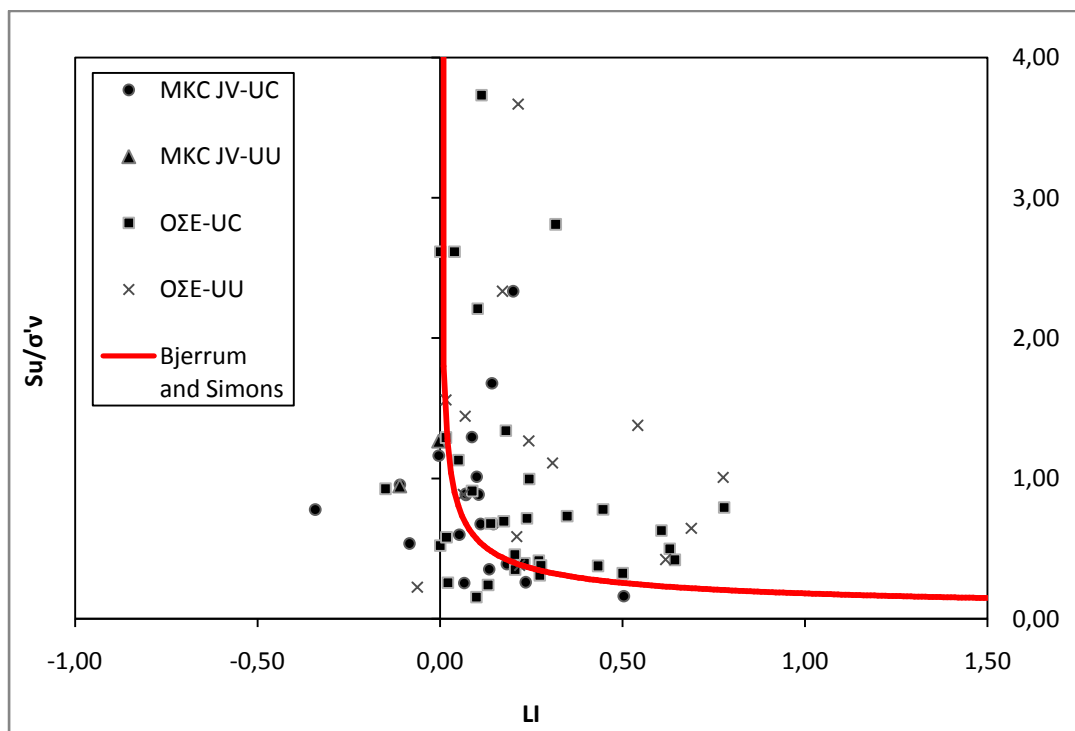


**Σχήμα 39** Διάγραμμα αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας

Σχήμα 39: Με την αύξηση του δείκτη σχετικής υδαρότητας παρατηρούμε μείωση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής για όλα τα δεδομένα. Τα πιο πολλά δεδομένα βρίσκονται κοντά στον άξονα  $y$ , δηλαδή πρόκειται για ημιστερεές έως πλαστικές αργίλους. Από το διάγραμμα παρατηρούμε ότι οι άργιλοι υψηλής πλαστικότητας ακολουθούν τη συσχέτιση των Wroth and Wood με τη διαφορά ότι εμφανίζουν πιο υψηλές τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής. Τα περισσότερα δεδομένα είναι πάνω από την προτεινόμενη καμπύλη, εμφανίζουν όμως την ίδια τάση. Η καμπύλη του Mitchell θα μπορούσε να προσαρμοστεί στα δεδομένα μας εάν μετατοπιζόταν πιο ψηλά και αριστερά.



**Σχήμα 40** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής-αριθμού κρούσεων SPT με δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας



**Σχήμα 41** Διάγραμμα λόγου αστράγγιστης διατμητικής αντοχής - ενεργού τάσης με δείκτη σχετικής υδαρότητας για αργίλους υψηλής πλαστικότητας

Σχήμα 41: Η σχέση των Bjerrum and Simons φαίνεται να προσαρμόζεται αρκετά καλά στα δεδομένα, αν και παρατηρείται σχετικά μεγάλη διασπορά στις τιμές που βρίσκονται πάνω από την καμπύλη.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Βιβλία

Μ. Καββαδάς: «Στοιχεία Εδαφομηχανικής», Έκδοση Ε.Μ. Πολυτεχνείου, Αθήνα 2007.

Ι. Βαρδουλάκης: «Σημειώσεις Εδαφομηχανικής», 2004

Γ. Α. Αθανασόπουλος: «Γεωτεχνική έρευνα και επί-τόπου δοκιμές», Πάτρα 2004.

Γ. Α. Αθανασόπουλος: «Συνοπτική θεωρία και προβλήματα εδαφομηχανικής», Πάτρα 2005.

«Δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης», Προδιαγραφές Εργαστηριακών Δοκιμών Εδαφομηχανικής (Ε 105-86), Φ.Ε.Κ. υπ'αρ. 955/31-12-86

«Τριαξονική δοκιμή σε συνεκτικά εδάφη», Προδιαγραφές Εργαστηριακών Δοκιμών Εδαφομηχανικής (Ε 105-86), Φ.Ε.Κ. υπ'αρ. 955/31-12-86

Karl Terzaghi, Ralph B. Peck, Gholamreza Mesri: «Soil Mechanics in Engineering Practice», John Wiley & Sons, Inc., 1996

K. Arulanandan: «Soil structure: In situ properties and behavior», 2003

### Άρθρα

Κ. Πλυτάς, Α. Μπαλιτζόγλου, Γ. Χλιμίντζας: «Εμπειρικός προσδιορισμός αστράγγιστης διατμητικής αντοχής συνεκτικών σχηματισμών από δοκιμές SPT», 5<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, 2006.

F. Kalantary, H. Ardalan, N. Nouriman-Zadeh: «An investigation on the Su-NSPT correlation using GMDH type neural networks and genetic algorithms», Engineering Geology 104(2009) 144-155.

Hiroshan Hettiarachchi and Timothy Brown: «Use of SPT blow counts to estimate shear strength properties of soils: Energy balance approach», Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering © ASCE/JUNE 2009.

Ilknur Bozbey, Ergun Togrol: «Correlation of standard penetration test and pressometer data: a case study from Instabul, Turkey», Bull Eng Geol Environ doi: 10.1007/s10064-009-0248-4.

Bojana Dolinar: «Predicting the normalized, undrained shear strength of saturated fine-grained soils using plasticity-value correlations», Applied Clay Science 47(2010) 428-432.

O. Sivrikaya, E. Toğrol: «Determination of undrained strength of fine-grained soils by means of SPT and its application in Turkey», Engineering Geology 86 (2006) 52-69.

J. C. Cripps and R. K. Taylor: «Engineering characteristics of British over-consolidated clays and mudrocks, Mesozoic deposits», Engineering Geology 23 (1987) 213-253.

# **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

*ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ*