



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ
ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ**

υπό

ΝΙΚΟΥ ΓΕΩΡΓΑΚΗ

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση του
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού

2017

© 2017 Νίκος Γεωργάκης

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα της διπλωματικής εργασίας μου, Λέκτορα κα. Πολυξένη Καλλιόγλου, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητής κ. Παναγιώτη Ντακούλα και Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Εφραιμίδα για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ ΑΡΓΙΛΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Νίκος Γεωργιάκης

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2017

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Πολυξένη Καλλιόγλου, Λέκτορας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα χαρακτηριστικά συμπίεστούτητας εδαφών ανήκουν στις βασικότερες παραμέτρους σχεδιασμού των έργων του Πολιτικού Μηχανικού. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη μιας φυσικής, θαλάσσιας, ευαίσθητης αργίλου με οργανικά, προερχόμενη από το λιμάνι του Christchurch της Νέας Ζηλανδίας, στη συσκευή μονοδιάστατης στερεοποίησης (οιδήμετρο). Για τον σκοπό, αυτό έγινε εγκατάσταση της συσκευής οιδήμετρου στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, σύνδεση της συσκευής με το καταγραφικό σύστημα και εκτέλεση όλων των απαραίτητων βαθμονομήσεων πριν τη χρήση της. Αρχικά προσδιορίστηκαν τα φυσικά χαρακτηριστικά του εδάφους (φυσική υγρασία, ειδικό βάρος στερεών κόκκων, κοκκομετρία, όρια Atterberg, ποσοστό οργανικών). Στη συνέχεια προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά συμπίεστούτητας του εδάφους και εκτιμήθηκε ο βαθμός ευαισθησίας του, με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση της τάσης στερεοποίησης, της ιστορίας φόρτισης και της δομής του εδάφους στα χαρακτηριστικά αυτά.

Experimental study of compressibility characteristics of clayey soil

Nikos Georgakis

Department of Civil Engineering, University of Thessaly, 2017

Supervisor: Polyxeni Kallioglou, Lecturer

ABSTRACT

Compressibility characteristics of soils forms one of the most important soil parameters in Civil Engineering. The aim of this diploma thesis is the study of a natural, marine, sensitive clay with organic matter, derived from Christchurch New Zealand Port, in one-dimensional consolidation apparatus (oedometer). An odeometer apparatus with a data acquisition system was set up at the Laboratory of Geotechnical Engineering in the University of Thessaly, and calibration of all measuring systems was also performed. The laboratory investigation begin with the determination of the physical characteristics of the above soil (natural moisture, specific gravity, grading, Atterberg limits, organic content). Subsequently, the compressibility characteristics of the soil were determined and the degree of soil sensitivity was evaluated, in order to investigate the influence of consolidation stress, stress history and soil structure on these properties.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	10
Κεφάλαιο 1.....	11
Εισαγωγή.....	11
1.1. Εισαγωγή.....	11
1.2. Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας ανά κεφάλαιο.....	11
Κεφάλαιο 2.....	13
Μελέτη της εδαφικής συμπεριφοράς κατά την μονοδιάστατη συμπίεση.....	13
2.1. Εισαγωγή.....	13
2.2. Μονοδιάστατη συμπίεση εδαφών.....	13
2.3. Στερεοποίηση εδαφών.....	14
2.3.1. Εισαγωγή – Στάδια στερεοποίησης.....	14
2.3.2. Μηχανικό ανάλογο πρωτεύουσας στερεοποίησης.....	17
2.3.3. Στερεοποίηση κορεσμένων εδαφών.....	18
2.3.4. Ορισμοί παραμέτρων συμπιεστότητας – Ιστορικό φόρτισης.....	20
2.3.5. Θεωρία στερεοποίησης κατά Terzaghi – Παραδοχές και περιορισμοί.....	27
2.3.6. Επίλυση της εξίσωσης στερεοποίησης.....	30
2.3.7. Μέθοδοι προσδιορισμού του συντελεστή στερεοποίησης.....	36
2.3.8. Μέθοδοι προσδιορισμού της τάσης προστερεοποίησης.....	39
Κεφάλαιο 3.....	40
Περιγραφή εξοπλισμού και διαδικασίας δοκιμών.....	40
3.1. Δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης (οιδήμετρο).....	40
3.1.1. Περιγραφή συσκευής οιδημέτρου.....	40
3.1.2. Βαθμονομήσεις.....	41
3.1.3. Μετρητικό και καταγραφικό σύστημα.....	42
3.1.4. Προετοιμασία δοκιμίου.....	62
3.1.5. Διαδικασία δοκιμής.....	62
3.1.6. Υπολογισμός και ανάλυση των αποτελεσμάτων της δοκιμής.....	70
3.2. Δοκιμές ταξινόμησης.....	74
3.2.1. Ειδικό βάρος στερεών κόκκων.....	74
3.2.2. Κοκκομετρική ανάλυση.....	74
3.2.3. Όρια Atterberg.....	75
3.2.4. Ποσοστό οργανικών.....	80
Κεφάλαιο 4.....	81
Πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών – Μελετηθέν έδαφος.....	81
4.1. Πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών.....	81
4.2. Μελετηθέν έδαφος.....	81
Κεφάλαιο 5.....	84
Αποτελέσματα δοκιμής οιδημέτρου.....	84
Κεφάλαιο 6.....	106
Συμπεράσματα.....	106
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	107
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	108

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1	Τυπικές τιμές του συντελεστή συμπίεσότητας όγκου για διάφορες αργίλους.....	21
Πίνακας 2.2	Τυπικές τιμές του συντελεστή δευτερεύουσας συμπίεσης C_{sec}	23
Πίνακας 2.3	Χαρακτηριστικές στιγμές της σχέσης $\bar{U} = f(T_v)$	33
Πίνακας 3.1	Έντυπο καταγραφής δεδομένων δοκιμής μονοδιάστατης συμπίεσης (α), (β).....	71
Πίνακας 3.2	Σύγκριση των ιδιοτήτων του μηχανικού μοντέλου και του εδάφους.....	72
Πίνακας 3.3	Έντυπο καταγραφής δεδομένων δοκιμής προσδιορισμού ορίου πλαστιμότητας.....	76
Πίνακας 3.4	Έντυπο καταγραφής δεδομένων δοκιμής προσδιορισμού ορίου υδαρότητας.....	78
Πίνακας 4.1	Πίνακας φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους.....	80

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 Διάγραμμα καθιζήσεων με τον λογάριθμο του χρόνου.....	16
Σχήμα 2.2 Μηχανικό ανάλογο.....	17
Σχήμα 2.3 Μεταβολή του δείκτη πόρων κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, σε λογαριθμική κλίμακα....	18
Σχήμα 2.4 Διάγραμμα δείκτη πόρων με την τάση.....	20
Σχήμα 2.5 Διάγραμμα του δείκτη πόρων με τον λογάριθμο της πίεσης.....	20
Σχήμα 2.6 Διάγραμμα δείκτη πόρων με τον λογάριθμο της τάσης.....	24
Σχήμα 2.7 Διάγραμμα δείκτη πόρων με τον λογάριθμο του χρόνου για υπερστερεοποιημένη άργιλο.....	25
Σχήμα 2.8 Φόρτιση και αποφόρτιση.....	26
Σχήμα 2.9: Μονοδιάστατη στερεοποίηση εδαφών.....	28
Σχήμα 2.10 Λύσεις της εξίσωσης μονοδιάστατης στερεοποίησης.....	32
Σχήμα 2.11 Μέσος βαθμός στερεοποίησης ως προς το χρόνο.....	34
Σχήμα 2.12 Διάγραμμα καθίζησης με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου.....	36
Σχήμα 2.13 Διάγραμμα καθίζησης με τον λογάριθμο του χρόνου.....	37
Σχήμα 2.14 Διάγραμμα υπολογισμού τάσης προστερεοποίησης.....	38
Σχήμα 3.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στην στερεοποίηση.....	73
Σχήμα 4.1 Κοκκομετρική καμπύλη εδάφους.....	81
Σχήμα 5.1 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου στα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου....	83
Σχήμα 5.2 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 1 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=12\text{kPa}$	84
Σχήμα 5.3 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 1 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=12\text{kPa}$	84
Σχήμα 5.4 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 2 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=20\text{kPa}$	85
Σχήμα 5.5 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 2 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=20\text{kPa}$	85
Σχήμα 5.6 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 3 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=36\text{kPa}$	86
Σχήμα 5.7 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 3 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=36\text{kPa}$	86
Σχήμα 5.8 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 4 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=68\text{kPa}$	87
Σχήμα 5.9 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 4 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=68\text{kPa}$	87
Σχήμα 5.10 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 5 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=132\text{kPa}$	88
Σχήμα 5.11 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 5 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=132\text{kPa}$	88
Σχήμα 5.12 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 6 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=259\text{kPa}$	89
Σχήμα 5.13 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 6 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=259\text{kPa}$	89
Σχήμα 5.14 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 7 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=514\text{kPa}$	90
Σχήμα 5.15 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 7 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=514\text{kPa}$	90
Σχήμα 5.16 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 8 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=128\text{kPa}$	91

Σχήμα 5.17 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 8 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=1028\text{kPa}$	91
Σχήμα 5.18 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 9 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=2053\text{kPa}$	92
Σχήμα 5.19 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 9 ^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v=2053\text{kPa}$	92
Σχήμα 5.20 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v= 12 - 2053 \text{ kPa}$	93
Σχήμα 5.21 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v= 12 - 2053 \text{ kPa}$	94
Σχήμα 5.22 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης για όλα τα στάδια αποφόρτισης του δοκιμίου.....	95
Σχήμα 5.23 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια αποφόρτισης του δοκιμίου.....	96
Σχήμα 5.24 Μεταβολή του δείκτη πόρων με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου για τον προσδιορισμό των δεικτών συμπίεσης.....	97
Σχήμα 5.25 Μεταβολή του δείκτη πόρων με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου για τον προσδιορισμό της τάσης προστερεοποίησης.....	98
Σχήμα 5.26 Μεταβολή του εφαπτομενικού μέτρου συμπίεσης με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου	99
Σχήμα 5.27 Μεταβολή του συντελεστή συμπιεστότητας με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου.....	99
Σχήμα 5.28 Μεταβολή του συντελεστή συμπιεστότητας όγκου με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου.....	100
Σχήμα 5.29 Μεταβολή του συντελεστή στερεοποίησης c_{v-90} με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v= 12 - 2053 \text{ kPa}$	101
Σχήμα 5.30 Μεταβολή του συντελεστή στερεοποίησης c_{v-50} με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v= 12 - 2053 \text{ kPa}$	101
Σχήμα 5.31 Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας k_{90} με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v= 12 - 2053 \text{ kPa}$	102
Σχήμα 5.32 Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας k_{50} με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v= 12 - 2053 \text{ kPa}$	102
Σχήμα 5.33 Μεταβολή του τέμνοντος μέτρου συμπίεσης με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου.....	103
Σχήμα 5.34 Μεταβολή του εφαπτομενικού μέτρου συμπίεσης με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v= 12 - 2053 \text{ kPa}$	104
Σχήμα 5.35 Μεταβολή του δείκτη δευτερεύουσας συμπίεσης με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v= 12 - 2053 \text{ kPa}$	104

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3.1 Συσκευή οιδιμέτρου.....	40
Εικόνα 3.2 Πορώδεις δίσκοι και κυψέλη στερεοποίησης.....	64
Εικόνα 3.3 Πλαίσιο ή συσκευή φόρτισης.....	65
Εικόνα 3.4 : Ρύθμιση της δοκού.....	66
Εικόνα 3.5 Τοποθέτηση πρώτου φορτίου φόρτισης.....	67
Εικόνα 3.6 Κατάλληλη τοποθέτηση φορτίων.....	69
Εικόνα 4.1: Φωτογραφία εδαφικού δείγματος.....	82
Εικόνα 4.2: Φωτογραφία εδαφικού δείγματος.....	83

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1. Εισαγωγή

Η κατασκευή τεχνικών έργων στο έδαφος προκαλεί μέσω των φορτίσεων που επιβάλλουν στο τελευταίο παραμορφώσεις. Οι παραμορφώσεις έχουν φορά προς τα κάτω (καθιζήσεις) όταν το φορτίο αυξάνεται (συμπίεση του εδάφους), ή προς τα πάνω όταν το φορτίο μειώνεται (διόγκωση του εδάφους). Βασικό χαρακτηριστικό της καθίζησης του εδάφους είναι η εξάρτησή της από το χρόνο, κυρίως στην περίπτωση αργιλικών εδαφών. Στο σχεδιασμό των κατασκευών ενδιαφέρει τόσο το μέγεθος των καθιζήσεων όσο και ο χρόνος ολοκλήρωσής τους. Μεγάλες καθιζήσεις μπορεί να προκαλέσουν ζημιές σε κατασκευές, οι οποίες μπορεί να θέσουν σε κίνδυνο τη λειτουργικότητά τους ή ακόμη να προκαλέσουν την αστοχία τους.

Για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών συμπεριστασιμότητας των εδαφών πραγματοποιούνται εργαστηριακές και επιτόπου μετρήσεις. Και οι δύο κατηγορίες μετρήσεων βασίζονται σε αναγκαίες παραδοχές που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό των έργων. Οι εργαστηριακές μέθοδοι είναι γενικά οικονομικότερες των επιτόπου δοκιμών και δίνουν τη δυνατότητα παραμετρικής μελέτης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό τη μέτρηση των χαρακτηριστικών συμπεριστασιμότητας μιας φυσικής, θαλάσσιας, ευαίσθητης αργίλου με οργανικά. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Γεωτεχνικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Τα αποτελέσματα επιτρέπουν τον προσδιορισμό του δείκτη συμπίεσης, της τάσης προστερεοποίησης, του συντελεστή στερεοποίησης και διαπερατότητας, του μέτρου συμπίεσης, καθώς επίσης και τη μελέτη της επίδρασης της τάσης στερεοποίησης στις παραμέτρους αυτές.

1.2. Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας ανά κεφάλαιο

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται συνοπτικά το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται το πλαίσιο της εδαφικής συμπεριφοράς κατά τη μονοδιάστατη συμπίεση, περιγράφεται το φαινόμενο της στερεοποίησης και εκφράζεται με την εξίσωση στερεοποίησης, παρουσιάζεται η θεωρία στερεοποίησης του Terzaghi, και τέλος δίνονται οι ορισμοί των παραμέτρων συμπεριστασιμότητας του εδάφους και οι μέθοδοι προσδιορισμού τους.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται και η διαδικασία που ακολουθείται για την εκτέλεση: (α) δοκιμών οιδημέτρου και (β) δοκιμών ταξινόμησης των εδαφών.

Στο Κεφάλαιο 4 γίνεται παρουσίαση των φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους που μελετήθηκε και δίνεται το πρόγραμμα των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκε.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της δοκιμής οιδημέτρου με τη μορφή διαγραμμάτων και μελετάται η επίδραση της δομής και της τάσης στερεοποίησης σε αυτά.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται συγκεντρωμένα τα συμπεράσματα που εξήχθησαν με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα.

Στο Παράστημα παρουσιάζονται όλα τα έντυπα των εργαστηριακών δοκιμών, τα φύλλα του excel με τους υπολογισμούς καθώς και οι βαθμονομήσεις.

Κεφάλαιο 2

Μελέτη της εδαφικής συμπεριφοράς κατά την μονοδιάστατη συμπίεση

2.1. Εισαγωγή

Η ακριβής εκτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς του εδάφους που υποβάλλεται σε μεταβολή της εντατικής του κατάστασης είναι πρακτικά αδύνατο να γίνει με τη χρήση αναλυτικών και εμπειρικών μεθόδων. Στην πραγματικότητα οι μέθοδοι αυτές χρησιμοποιούνται μόνο για τα απλά γεωτεχνικά προβλήματα όπως ο υπολογισμός της φέρουσας ικανότητας και των καθιζήσεων στην περίπτωση συνηθισμένων κτιρίων, ενώ τα γεωτεχνικά προβλήματα που αφορούν σε μεγάλα έργα υποδομής επιλύονται κυρίως με υπολογιστικές μεθόδους, π.χ. πεπερασμένα στοιχεία, πεπερασμένες διαφορές κ.ά.. Ωστόσο, ο υπολογισμός των εδαφικών καθιζήσεων μπορούσε ανέκαθεν να πραγματοποιηθεί και με απλούστερες μεθόδους, όπως:

- Την εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας του εδαφικού σχηματισμού, δείγμα του οποίου μελετάται στην εργαστηριακή συσκευή του οιδημέτρου / συμπιεστομέτρου. Η δοκιμή προσομοιώνει προβλήματα μονοδιάστατης συμπίεσης του εδάφους, υπό σταγγιζόμενες συνθήκες.
- Την εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας υπό αστράγγιστες και στραγγιζόμενες συνθήκες στη συσκευή τριαξονικής φόρτισης και στη συσκευή οιδημέτρου αντίστοιχα.

2.2. Μονοδιάστατη συμπίεση εδαφών

Το φαινόμενο της μονοδιάστατης συμπίεσης των εδαφών λαμβάνει χώρα όταν η επιφάνειά της επιβαλλόμενης φόρτισης είναι συγκριτικά αρκετά μεγαλύτερη του πάχους της συμπίεσης της εδαφικής στρώσης. Αυτός ο τύπος παραμόρφωσης συναντάται με μικρές αποκλίσεις σε επιχώματα μεγάλου πλάτους, κτίρια με θεμελίωση τύπου κοιτόστρωσης, δεξαμενές μεγάλης διαμέτρου κ.ά.. Επίσης, συνοδεύει το φαινόμενο της ιζηματογένεσης, όπου η εναπόθεση των εδαφικών υλικών στους πυθμένες θαλασσών ή λιμνών λαμβάνει χώρα σε οριζόντιες στρώσεις μεγάλης έκτασης, με ταυτόχρονη κατακόρυφη συμπίεση των υποκείμενων στρώσεων.

Στην περίπτωση γραμμικά ισότροπου ελαστικού υλικού ισχύουν οι καταστατικές εξισώσεις:

- Ορθές παραμορφώσεις:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E'} [\delta\sigma'_{xx} - \nu' (\delta\sigma'_{yy} + \delta\sigma'_{zz})] \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E'} [\delta\sigma'_{yy} - \nu' (\delta\sigma'_{xx} + \delta\sigma'_{zz})] \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E'} [\delta\sigma'_{zz} - \nu' (\delta\sigma'_{xx} + \delta\sigma'_{yy})] \quad (2.3)$$

- Γωνίες διατμητικής παραμόρφωσης

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{G} \delta\sigma_{xy} \quad (2.4)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{1}{G} \delta \sigma_{yz} \quad (2.5)$$

$$\gamma_{zx} = \frac{1}{G} \delta \sigma_{zx} \quad (2.6)$$

Στη μονοδιάστατη συμπίεση επιβάλλεται ορθή παραμόρφωση ε_{zz} με παρεμπόδιση των υπόλοιπων ορθών και όλων των διατμητικών παραμορφώσεων. Προκύπτει λοιπόν πως :

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \gamma_{xy} = \gamma_{yz} = \gamma_{zx} = 0 \text{ και συνεπώς}$$

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = 0$$

$$\sigma'_{zz} = \sigma'_v \text{ και } \sigma'_{xx} = \sigma'_{yy} = \sigma'_h$$

$$\text{Οπότε } \sigma'_h = \frac{\nu'}{1-\nu'} \times \sigma'_v \quad (2.7)$$

Από την σχέση αυτή μπορεί να υπολογιστεί η πλευρική (οριζόντια) θλιπτική τάση του εδάφους, το οποίο υποβάλλεται στη θλιπτική κατακόρυφη τάση σ'_v με ταυτόχρονη παρεμπόδιση της οριζόντιας παραμόρφωσής του.

Από εργαστηριακές μετρήσεις προκύπτει της $\sigma'_h = k_0 \times \sigma'_v$ όπου $k_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v}$ είναι ο συντελεστής οριζόντιων ωθήσεων σε ηρεμία που για συγκεκριμένο έδαφος έχει σταθερή τιμή κατά τα στάδια φόρτισης του εδάφους. Κατά τα στάδια φόρτισης του εδάφους, ο συντελεστής k_0 αυξάνεται, καθώς ο ρυθμός μείωσης της οριζόντιας τάσης είναι πολύ μικρότερος του ρυθμού μείωσης της κατακόρυφης τάσης.

$$\text{Η ογκομετρική παραμόρφωση του εδάφους ορίζεται ως } \varepsilon_v = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} \quad (2.8)$$

$$\text{Στη μονοδιάστατη συμπίεση } \varepsilon_v = \varepsilon_{zz} = \frac{1}{E'} \frac{(1+\nu') \times (1-2\nu')}{(1-\nu')} \times \sigma'_{zz} \quad (2.9)$$

$$\text{Η διαφορετικά } \varepsilon_v = \frac{1}{E_s} \times \sigma'_v \quad (2.10)$$

$$\text{Όπου } E_s = \frac{E' \times (1-\nu')}{(1+\nu') \times (1-2\nu')} \text{ μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης}$$

Και προκύπτει από την κλίση του διαγράμματος $\sigma'_v - \varepsilon_{zz}$.

2.3. Στερεοποίηση εδάφους

2.3.1. Εισαγωγή – Στάδια στερεοποίησης

Το φαινόμενο της στερεοποίησης στα εδάφη οφείλεται στην πολυφασικότητά τους. Ως γνωστόν, τα εδάφη αποτελούνται από τους εδαφικούς κόκκους (στερεά φάση) και τα κενά – πόρους μεταξύ αυτών, που μπορεί να είναι γεμάτα με αέρα (αέρια φάση) ή / και νερό (υγρή φάση).

Η ιδιότητα του εδάφους να μειώνει τον όγκο του, εξαιτίας της υποβολής μιας θλιπτικής τάσης, ονομάζεται συμπίεση και οφείλεται σε μια ή και περισσότερες από τις παρακάτω αιτίες:

- (a) Συμπίεση των εδαφικών κόκκων
- (b) Συμπίεση του νερού των πόρων
- (c) Συμπίεση και διαφυγή του αέρα των πόρων
- (d) Διαφυγή του νερού των πόρων

Στα περισσότερα μη οργανικά εδάφη η συμπίεση των κόκκων θεωρείται αμελητέα. Επίσης στα κορεσμένα εδάφη, η συμπίεση του νερού είναι εξαιρετικά μικρή για το εύρος των τάσεων που αναφέρονται σε προβλήματα εδαφομηχανικής και ως εκ τούτου παραλείπεται. Αντίθετα, ο αέρας των πόρων στα ακόρεστα ή ξηρά εδάφη, είναι εξαιρετικά συμπίεσιμος. Η δε συμπίεση του λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα με την επιβολή του φορτίου και προκαλεί σε μεγάλο βαθμό την μείωση του εδαφικού όγκου των εδαφικών σχημάτων. Ασφαλώς, στα πλήρη κορεσμένα εδάφη η επίδραση όλων αυτών των παραμέτρων στις παραμορφώσεις όγκου δε λαμβάνονται υπόψη, εκτός από την διαφυγή του νερού των πόρων. Η θεωρία στερεοποίησης των εδαφών βασίζεται αποκλειστικά στην επίδραση της “διαφυγής του νερού των πόρων”. Η θεωρία αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των καθιζήσεων πλήρως κορεσμένων εδαφών υπό στατική φόρτιση.

Ο μερικός κορεσμός στα εδάφη καθιστά την ανάλυση αρκετά περίπλοκη για πρακτική χρήση και έτσι συνήθως εφαρμόζεται στον υπολογισμό καθιζήσεων η θεωρία στερεοποίησης με την υπόθεση πλήρως κορεσμένων εδαφών.

Η καθίζηση ενός τεχνικού έργου, π.χ. ενός κτιρίου, επηρεάζεται από την κατακόρυφη βύθιση του εδαφικού στρώματος που το στηρίζει ή το περιβάλλει, εξαιτίας της μείωσης των εδαφικών όγκων. Συνεπώς, τα χαρακτηριστικά της στερεοποίησης είναι απαραίτητα στον υπολογισμό του μεγέθους και της χρονικής εξέλιξης των καθιζήσεων των κατασκευών.

Κατά τη στερεοποίηση του εδάφους, δηλαδή την απομάκρυνση του νερού των πόρων, ο εδαφικός όγκος που αποδίδεται στα κενά μεταξύ των εδαφικών κόκκων μειώνεται και συνεπώς οι εδαφικοί κόκκοι αλλάζουν θέση μέσω ολίσθησης ή περιστροφής, καταλήγοντας σε έναν εδαφικό σκελετό περισσότερο συμπαγή. Αυτό ισχύει για το εύρος των τάσεων που αναπτύσσονται στα περισσότερα προβλήματα εδαφομηχανικής. Ωστόσο, στην πραγματικότητα υπάρχει ένα μικρό ποσοστό πρόσθετης μεταβολής του εδαφικού όγκου που αποδίδεται στην κάμψη, παραμόρφωση ή ακόμη και θραύση των εδαφικών κόκκων.

Στάδια στερεοποίησης / συμπίεσης

Η στερεοποίηση του εδάφους αποτελείται από τα ακόλουθα στάδια:

- (a) Άμεση συμπίεση ή στερεοποίηση

Λαμβάνει χώρα στα ακόρεστα εδάφη εξαιτίας της συμπίεσης και της διαφυγής του αέρα των πόρων. Επίσης μια πρόσθετη μείωση του εδαφικού όγκου λαμβάνει χώρα λόγω της συμπίεσης των εδαφικών κόκκων. Το στάδιο αυτό ονομάζεται “αρχική συμπίεση ή στερεοποίηση” καθώς η εδαφική παραμόρφωση λαμβάνει χώρα άμεσα με την επιβολή του φορτίου στο έδαφος. Για τα πλήρως κορεσμένα εδάφη, η άμεση στερεοποίηση αποδίδεται κυρίως στη συμπίεση των κόκκων.

- (b) Πρωτεύουσα στερεοποίηση

Η πρωτεύουσα στερεοποίηση ακολουθεί την αρχική συμπίεση του εδάφους και αποδίδεται στην διαφυγή του νερού των πόρων. Όταν ένα εξωτερικό φορτίο επιβάλλεται σε ένα κορεσμένο έδαφος,

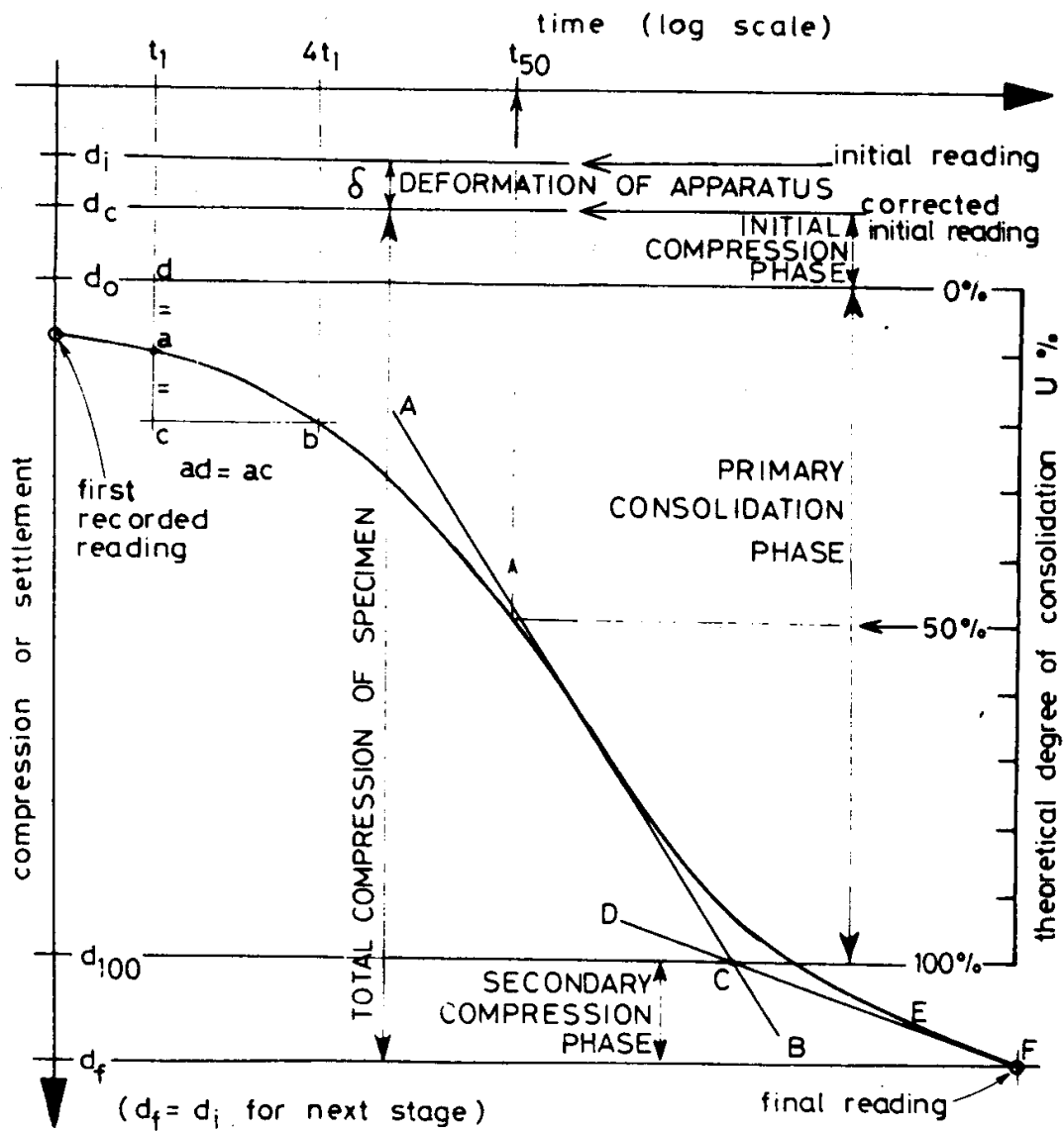
αρχικά ολόκληρο το φορτίο παραλαμβάνεται από το νερό των πόρων ως υπερπίεση πόρων. Εξαιτίας της ανάπτυξης διαφοράς δυναμικού εντός του εδάφους, το νερό θα αρχίσει να απορρέει από τα κενά προς το εξωτερικό περιβάλλον του εδάφους. Κατά τη διαδικασία αυτή παρατηρείται μείωση της πίεσης του νερού των πόρων και ταυτόχρονη αύξηση της ενεργής τάσης του εδάφους, που μεταφράζεται σε σταδιακή μεταφορά του επιβαλλόμενου εξωτερικού φορτίου από το νερό των πόρων στο στερεό σκελετό. Η διαδικασία αυτή εξαρτάται από την υδραυλική αγωγιμότητα (διαπερατότητα) του εδάφους. Στα χονδρόκοκκα εδάφη συντελείται γρήγορα εξαιτίας της μεγάλης διαπερατότητας. Αντίθετα, στα λεπτόκοκκα εδάφη είναι μεγάλης διάρκειας και καλείται πρωτεύουσα στερεοποίηση.

(c) Δευτερεύουσα στερεοποίηση / συμπίεση

Η δευτερεύουσα στερεοποίηση ακολουθεί την πρωτεύουσα στερεοποίηση, η οποία θεωρείται πως έχει ολοκληρωθεί στην πλήρη αποτόνωση της υπερπίεσης της πίεσης του νερού των πόρων. Έτσι λοιπόν, σε συνθήκες σταθερής ενεργής τάσης οι μεταβολές του εδαφικού όγκου που λαμβάνουν χώρα με πολύ βραδύ ρυθμό αποδίδονται στο φαινόμενο της δευτερεύουσας συμπίεσης. Ο εδαφικός μηχανισμός του σταδίου αυτού είναι πολύπλοκος. Αποδίδεται στην συνεχή μετακίνηση των εδαφικών κόκκων και στην αναπροσαρμογή του εδαφικού σκελετού, ώστε να ανταποκριθεί στις νέες συνθήκες ενεργών τάσεων. Η δευτερεύουσα συμπίεση είναι σημαντική μόνο σε υψηλής πλαστικότητας αργίλους και σε οργανικά εδάφη. Στα υπόλοιπα παραλείπεται. Πρέπει τέλος να σημειωθεί πως ο βαθμός της δευτερεύουσας συμπίεσης εξαρτάται από το ρυθμό φόρτισης.

Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται τα παραπάνω στάδια ως προς το λογάριθμο του χρόνου, όπως καταγράφεται κατά την δοκιμή οιδιμέτρου. Ένα τμήμα της αρχικής συμπίεσης οφείλεται στην συμπίεση της συσκευής. Επίσης, μέρος της αρχικής συμπίεσης μπορεί να οφείλεται στην ελαστική συμπίεση, που μπορεί να ανακτηθεί με την απομάκρυνση του φορτίου. Στο στάδιο της πρωτεύουσας στερεοποίησης η ανάκτηση είναι μικρή (φάση διόγκωσης) ενώ η δευτερεύουσα συμπίεση πρακτικά ανύπαρκτη, με εξαίρεση την περίπτωση της τύρφης.

Στην πράξη, για τον υπολογισμό καθιζήσεων στα αργιλικά εδάφη, χρησιμοποιείται μόνο το στάδιο της πρωτεύουσας στερεοποίησης και είναι αυτό που ορίζεται ως "στερεοποίηση". Στην περίπτωση βέβαια οργανικών αργίλων και τύρφεων, το στάδιο της δευτερεύουσας συμπίεσης είναι μεγαλύτερης σημασίας και μπορεί να οδηγήσει σε καθιζήσεις μεγαλύτερες του σταδίου της πρωτεύουσας στερεοποίησης.



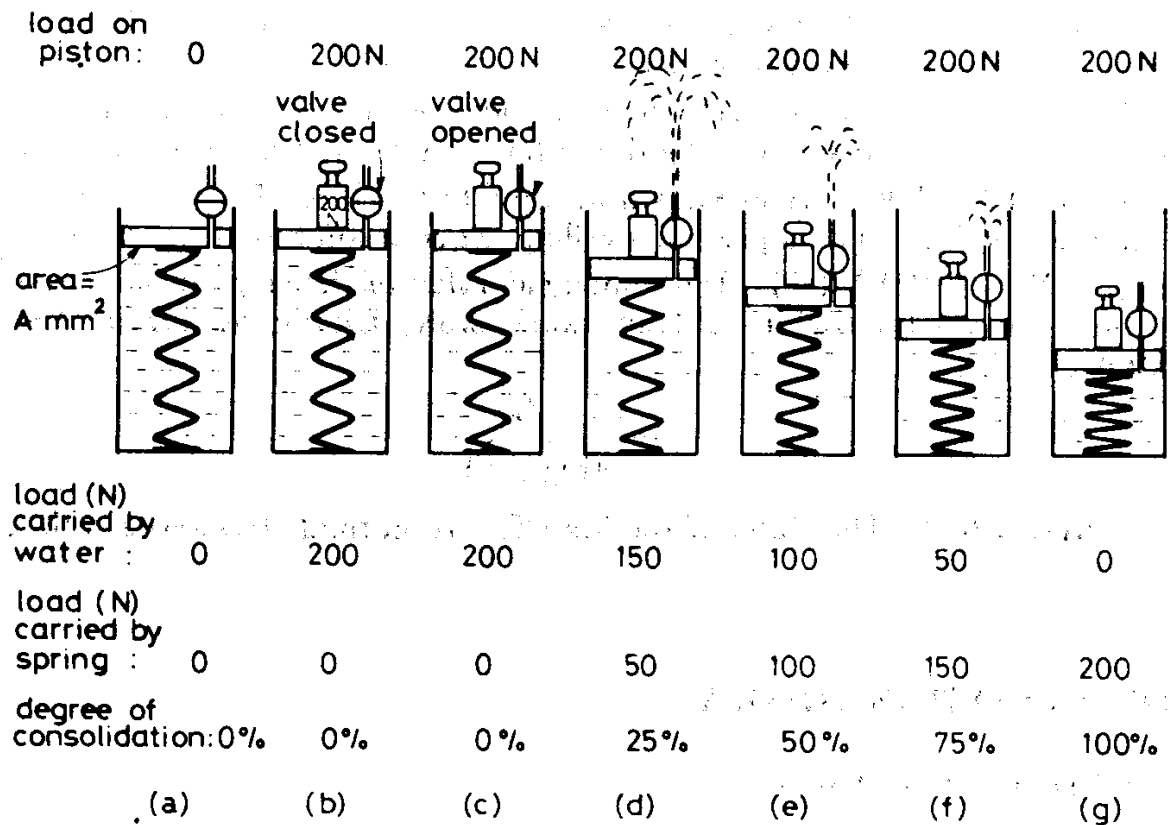
Σχήμα 2.1 Διάγραμμα καθιζήσεων με τον λογάριθμο του χρόνου

2.3.2. Μηχανικό ανάλογο πρωτεύουσας στερεοποίησης

Η διαδικασία της πρωτεύουσας στερεοποίησης μπορεί να γίνει εύκολα κατανοητή με την βοήθεια του μηχανικού αναλόγου του Σχήματος 2.2 που περιγράφεται από τους Terzaghi και Peck (1948) και οι οποίοι το υιοθέτησαν από τον Taylor (1948).

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται ένα στεγανό κυλινδρικό δοχείο, στο οποίο περιέχεται νερό και το οποίο διαθέτει μια βαλβίδα αποστράγγισης, ένα έμβολο και ένα ελατήριο δεδομένης ακαμψίας που συνδέει τις βάσεις του δοχείου. Θεωρείται πως το έμβολο είναι αβαρές, κι έτσι το ελατήριο και το νερό, στην αρχική κατάσταση ισορροπίας, δε δέχονται καμία πίεση.

Στη συνέχεια ένα βάρος 200 N επιβάλλεται στο έμβολο με την βαλβίδα κλειστή. Το έμβολο δεν μετακινείται καθώς το νερό δεν μπορεί να εκτονωθεί και το ελατήριο δεν συμπιέζεται. Όλο το φορτίο αναλαμβάνεται από το νερό (η ακαμψία του ελατηρίου είναι αμελητέα σε σχέση με το νερό). Αν η βαλβίδα ανοίξει, το νερό θα αρχίσει να διαφεύγει από το δοχείο μέσω της οπής της βαλβίδας. Η χρονική διάρκεια της διαδικασίας αυτής εξαρτάται από το μέγεθος της οπής.



Σχήμα 2.2 Μηχανικό ανάλογο

Το έμβολο βυθίζεται αργά και το επιβαλλόμενο φορτίο μεταφέρεται σταδιακά από το νερό στο έμβολο, μέχρις ότου το ελατήριο συμπιεστεί τόσο όσο απαιτείται για να παραλάβει το συνολικό φορτίο και η υπερπίεση του νερού έχει εκτονωθεί μέσω της βαλβίδας. Τότε έχει αποκατασταθεί πάλι η ισορροπία και η κίνηση του εμβόλου έχει ολοκληρωθεί.

Σε αυτό το μοντέλο, ο χρόνος που απαιτείται για να επιτευχθεί ένα δεδομένο ποσοστό συμπίεσης εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες.

1. Μέγεθος της εξόδου αποστράγγισης.
2. Ιξώδες του νερού (το οποίο εξαρτάται από τη θερμοκρασία).
3. Συμπιεστότητα του ελατηρίου.

Τα στοιχεία (1) και (2) δίνουν το ρυθμό με τον οποίο μπορεί να διαφύγει νερό μέσω της εξόδου. Το στοιχείο (3) είναι σημαντικό επειδή ένα ελατήριο μεγαλύτερης συμπιεστότητας θα μειωνόταν περισσότερο κάτω από το φορτίο των 200 N και θα απαιτούσε να διαφύγει περισσότερο νερό, επομένως θα παρέμενε μεγαλύτερος χρόνος πριν επιτευχθεί ισορροπία.

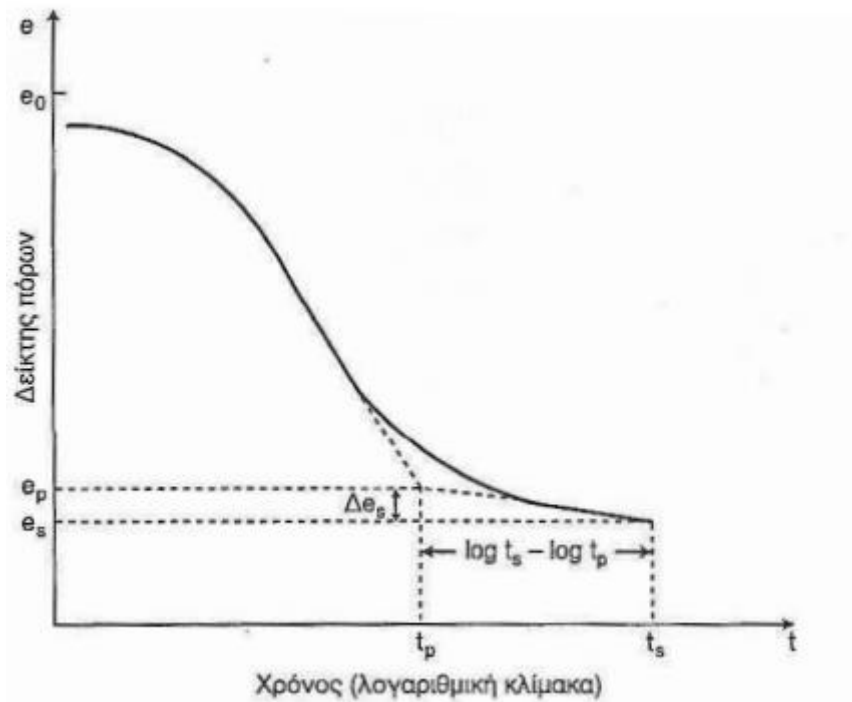
2.3.3. Στερεοποίηση κορεσμένων εδαφών

Η συμπεριφορά του κορεσμένου εδάφους κατά την διάρκεια της στερεοποίησης είναι ανάλογη με αυτήν του μηχανικού αναλόγου της προηγούμενης ενότητας. Οι εδαφικοί κόκκοι προσομοιώνονται από το ελατήριο ενώ το νερό των κόκκων από το νερό του δοχείου. Η διαπερατότητα του εδάφους που καθορίζει τη ροή του νερού και συνεπώς την διάρκεια του φαινομένου στερεοποίησης μπορεί να συνδεθεί με την βαλβίδα του δοχείου. Η υπερπίεση του νερού των πόρων του εδάφους είναι ανάλογη με την πίεση του νερού του δοχείου, και η ενεργή τάση που αναπτύσσεται στο έδαφος είναι ανάλογη της τάσης που αναπτύσσεται στο ελατήριο. Η μείωση του εδαφικού όγκου είναι ανάλογη της ποσότητας του νερού που εξέρχεται από το δοχείο. Βεβαίως στο κορεσμένο έδαφος η

μείωση του εδαφικού όγκου, που ισούται με τη μείωση του όγκου των κενών, ισούται με τη μείωση του όγκου του νερού:

$$\Delta V = \Delta V_v = \Delta V_w \quad \text{για} \quad S_r = 100\% \quad (2.11)$$

Η μείωση του εδαφικού όγκου εκφράζεται μέσω της μείωσης του δείκτη πόρων, e , Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3 Μεταβολή του δείκτη πόρων κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, σε λογαριθμική κλίμακα

Στη δοκιμή της μονοδιάστατης συμπίεσης (οιδημέτρου) η παραμόρφωση του εδαφικού όγκου ισούται με την αξονική παραμόρφωση της δοκιμής.

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{\Delta V_v}{V_0} = \frac{\Delta(e \times V_s)}{V_{v_0} + V_s} = \frac{\Delta e}{e_0 + 1} = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (2.12)$$

Κατά την ολοκλήρωση του φαινομένου της στερεοποίησης ($t=t_p$), οι μεταβολές του εδαφικού όγκου έχουν ολοκληρωθεί και η υπερπίεση του νερού των πόρων έχει εκτονωθεί. Τότε (για $t=t_p$) θεωρείται πως ο βαθμός στερεοποίησης U , που εκφράζει την μεταβολή της πίεσης του νερού των πόρων σε διάφορες χρονικές στιγμές της διαδικασίας στερεοποίησης, είναι 100%.

$$\text{Όπου } U_i = \frac{u_1 - u_i}{u_1 - u_f} \quad (2.13)$$

u_1 = πίεση του νερού των πόρων αμέσως μετά την επιβολή του φορτίου $t=t_0=0$.

u_f = πίεση του νερού των πόρων μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης $t=t_p$.

u_i = πίεση του νερού των πόρων σε χρόνο t από της στερεοποίησης.

Βεβαίως ο βαθμός στερεοποίησης U εκφράζει μια μικρή τιμή, καθώς η πίεση του νερού των πόρων στα σημεία του εδάφους που είναι πλησιέστερα στα διαπερατά όρια εκτονώνεται γρηγορότερα συγκριτικά με τα άλλα σημεία. Έτσι, ο βαθμός στερεοποίησης μπορεί να εκφράζει και το ποσοστό της μεταβολής των εδαφικών παραμορφώσεων.

$$U_i = \frac{\Delta H_i}{\Delta H_f} \quad (2.14)$$

Όπου ΔH_i = η καθίζηση σε χρόνο t

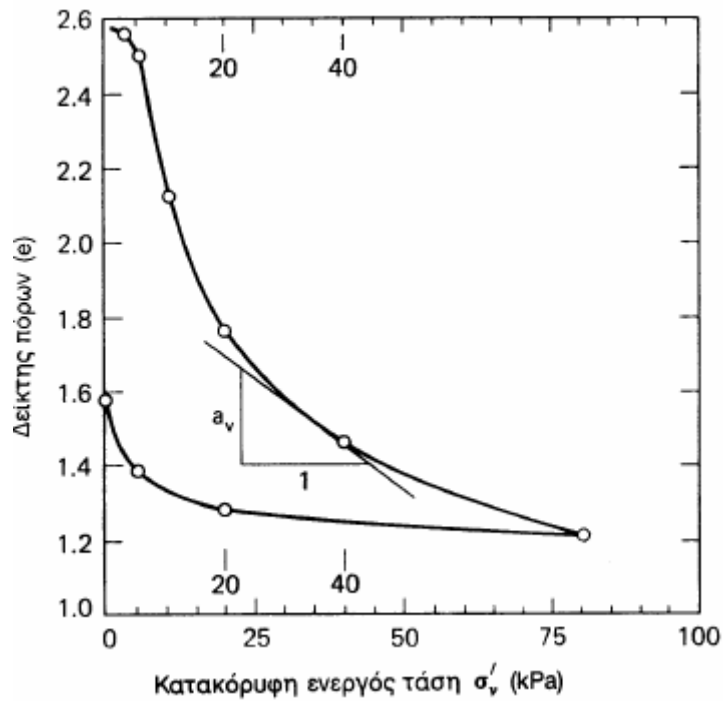
ΔH_f = η καθίζηση σε χρόνο $t=t_f$

Σύμφωνα με τη θεωρία, 100% στερεοποίηση δεν επιτυγχάνεται ποτέ. Ωστόσο, το μέγεθος της τελικής καθίζησης μπορεί να υπολογιστεί και μπορεί να αξιολογηθεί ο χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη οποιουδήποτε ποσοστού στερεοποίησης. Οι χρόνοι στερεοποίησης 50%, 90% και 95% είναι συνήθως σημαντικοί.

Στην πράξη η ροή νερού και οι μετατοπίσεις που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης είναι σχεδόν πάντα τρισδιάστατες. Η ανάλυση των τρισδιάστατων επιδράσεων είναι εξαιρετικά πολύπλοκη και είναι σπάνια εφικτή (Davis and Poulos, 1965). Για τις περισσότερες εφαρμογές, η μονοδιάστατη ανάλυση του Terzaghi παρέχει μια καλή βάση για την εκτίμηση του μεγέθους των καθιζήσεων, αν και ο ρυθμός με τον οποίο αναπτύσσονται πρέπει να ερμηνεύεται με προσοχή. Για περιπτώσεις όπου ένα ευρύ θεμέλιο στηρίζεται σε ένα σχετικά λεπτό στρώμα αργίλου μεταξύ διαπερατών στρωμάτων, το σχέδιο αποστράγγισης είναι πολύ παρόμοιο με τις παραδοχές μονοδιάστατης συμπίεσης.

2.3.4. Ορισμοί παραμέτρων συμπίεστότητας

Στη δοκιμή οιδημέτρου κάθε στάδιο φόρτισης παρουσιάζεται στην καμπύλη στερεοποίησης, που δίνει την τιμή του δείκτη πόρων μετά την ολοκλήρωση της στερεοποίησης στην αντίστοιχη ενεργό τάση στερεοποίησης, Σχήμα 2.4.

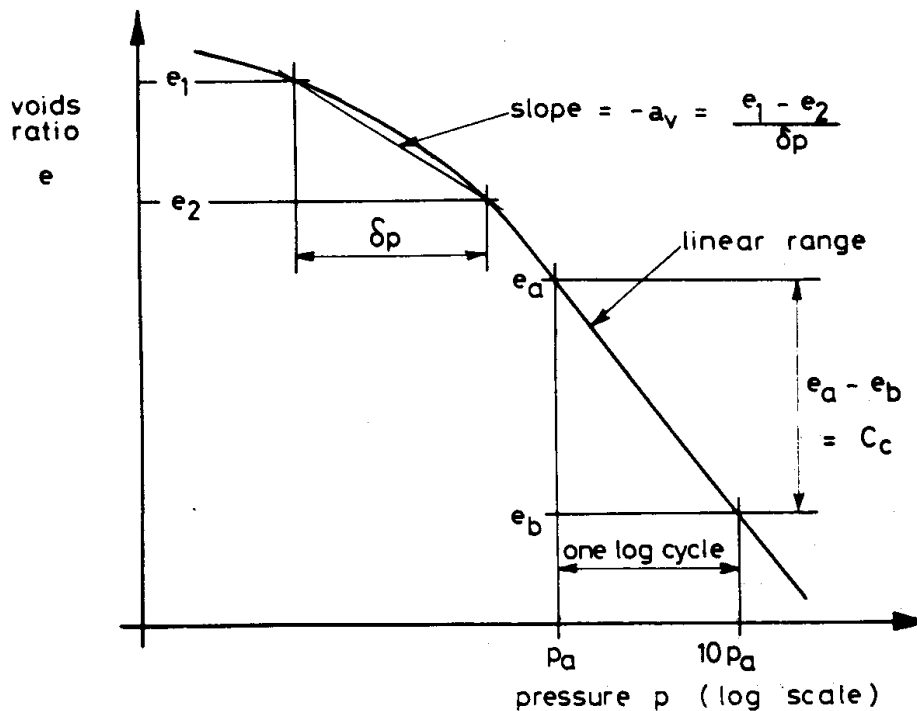


Σχήμα 2.4 Διάγραμμα δείκτη πόρων με την τάση

Ακολουθούν οι ορισμοί παραμέτρων που θεωρούνται βασικές στην περιγραφή του φαινομένου στερεοποίησης:

(a) Συντελεστής συμπίεστότητας, a_v

Ορίζεται ως η μεταβολή του δείκτη πόρων ανά μοναδιαία αύξηση της ενεργής τάσης. Έτσι, ισούται με την κλίση της καμπύλης συμπίεστότητας ($e - \sigma'_v$) σημείο που ενδιαφέρει, Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5 Διάγραμμα του δείκτη πόρων με τον λογάριθμο της πίεσης

$$a_v = -\frac{e_2 - e_1}{\delta p} = -\frac{\delta e}{\delta p} = -\frac{\delta e}{\delta \sigma'_v} \quad (2.15)$$

Όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα, ο συντελεστής συμπίεστικότητας εξαρτάται από την τάση σ'_v και συγκεκριμένα μειώνεται με την αύξηση της σ'_v .

(b) Συντελεστής συμπίεστικότητας όγκου, m_v

Ορίζεται ως ο λόγος των ανοιγμένων ογκομετρικών παραμορφώσεων προς τη μεταβολή της ενεργής τάσης.

$$m_v = \frac{a_v}{1+e_0} = \frac{1}{1+e_0} \left(-\frac{\delta e}{\delta p} \right) \quad (2.16)$$

Όπως και με το συντελεστή συμπίεστικότητας a_v , έτσι και με το συντελεστή συμπίεστικότητας όγκου m_v υπάρχει εξάρτηση από την τάση στερεοποίησης, σ'_v , και συγκεκριμένα παρατηρείται μείωση της m_v με αύξηση της σ'_v .

$$\text{Καθώς } m_v = \frac{-\varepsilon_v}{\sigma_p} \rightarrow m_v = \frac{-\Delta H/H_0}{\Delta \sigma'_v} \quad (2.17)$$

Ο συντελεστής συμπίεστικότητας όγκου χρησιμοποιείται συχνά για τον υπολογισμό καθιζήσεων στερεοποίησης. Ενδεικτικές τιμές του m_v για διάφορες κατηγορίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1 Τυπικές τιμές του συντελεστή συμπίεστικότητας όγκου για διάφορες αργίλους

<i>Description of compressibility</i>	<i>Coefficient of volume compressibility, m_v (m²/MN)</i>	<i>Clay types</i>
Very high	Above 1.5	Very organic alluvial clays and peats
High	0.3–1.5	Normally consolidated alluvial clays (e.g. estuarine clays)
Medium	0.1–0.3	Fluvio-glacial clays Lake clays Upper 'blue' and weathered 'brown' London Clay
Low	0.05–0.1	Boulder clays Very stiff or hard 'blue' London Clay
Very low	Below 0.05	Heavily overconsolidated 'boulder clays' Stiff weathered rocks

(c) Δείκτης συμπίεσης, C_c

Ορίζεται ως η κλίση της καμπύλης συμπίεσης που σχεδιάζεται σε λογαριθμική κλίμακα τάσεων, $e - \log \sigma'_v$. Ισούται με την μεταβολή του δείκτη πόρων σε ένα λογαριθμικό κύκλο τάσεων και είναι αδιάστατος αριθμός,

$$C_c = \frac{-\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma_0 + \Delta\sigma}{\sigma_0}\right)} \quad (2.18)$$

Όπου σ'_0 = η αρχική ενεργός τάση

$\Delta\sigma'$ = η μεταβολή της ενεργής τάσης

Ο δείκτης συμπίεσης χρησιμοποιείται κατά κόρον στην εκτίμηση καθιζήσεων λόγω στερεοποίησης. Πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει σχέσεις που συνδέουν τον δείκτη συμπίεσης C_c με φυσικές παραμέτρους του εδάφους. Ενδεικτικά αναφέρεται:

$$C_c = 0.009(w_L - 10\%) \quad \text{Skempton 1944} \quad (2.19)$$

(d) Δείκτης διόγκωσης, C_s

Ορίζεται ως η αντίστοιχη κλίση της καμπύλης $e - \log \sigma'_v$ στον κλάδο της αποφόρτισης και η τιμή του είναι πολύ μικρότερη του C_c

$$C_s = \frac{\Delta e}{\log\left(\frac{\sigma' + \Delta\sigma'}{\sigma'}\right)} \quad (2.20)$$

(e) Δείκτης επανασυμπίεσης, C_r

Ορίζεται ως η αντίστοιχη κλίση της καμπύλης $e - \log \sigma'_v$ στον κλάδο της επαναφόρτισης, δηλαδή για ένα έδαφος που έχει προηγουμένως φορτιστεί και στη συνέχεια αποφορτιστεί.

(f) Δείκτης δευτερεύουσας συμπίεσης, C_t

Ορίζεται ως η μεταβολή του δείκτη πόρων σε έναν λογαριθμικό κύκλο χρόνου.

$$C_t = \frac{-\Delta e}{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} \quad (2.21)$$

Ισούται με την κλίση της καμπύλης $\Delta H - \log t$ στο στάδιο της δευτερεύουσας στερεοποίησης. Ο δείκτης C_t εξαρτάται από το επίπεδο της σ'_v .

(g) Συντελεστής δευτερεύουσας συμπίεσης, C_{sec}

Ορίζεται ως ο λόγος της ανοιγμένης ογκομετρικής παραμόρφωσης στο στάδιο της δευτερεύουσας συμπίεσης σε ένα λογαριθμικό κύκλο χρόνου

$$C_{sec} = \frac{C_t}{1+e_p} = \frac{\Delta e}{1+e_p} \times \frac{1}{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)} \quad (2.22)$$

Όπου e_p = δείκτης πόρων στο τέλος της πρωτεύουσας στερεοποίησης

Ο συντελεστής C_{sec} χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό καθιζήσεων δευτερεύουσας συμπίεσης σύμφωνα με τον τύπο

$$\Delta H_{sec} = C_{sec} - H \times \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2.23)$$

Ενδεικτικές τιμές του C_{sec} για διάφορες κατηγορίες εδαφών δίνονται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 Τυπικές τιμές του συντελεστής δευτερεύουσας συμπίεσης C_{sec}

<i>Soil type</i>	C_{sec}
Normally consolidated clays	0.005–0.02
Very plastic clays	0.03 or higher
Organic clays	0.03 or higher
Overconsolidated clays (Overconsolidation ratio greater than 2)	Less than 0.001

From Lambe and Whitman (1979)

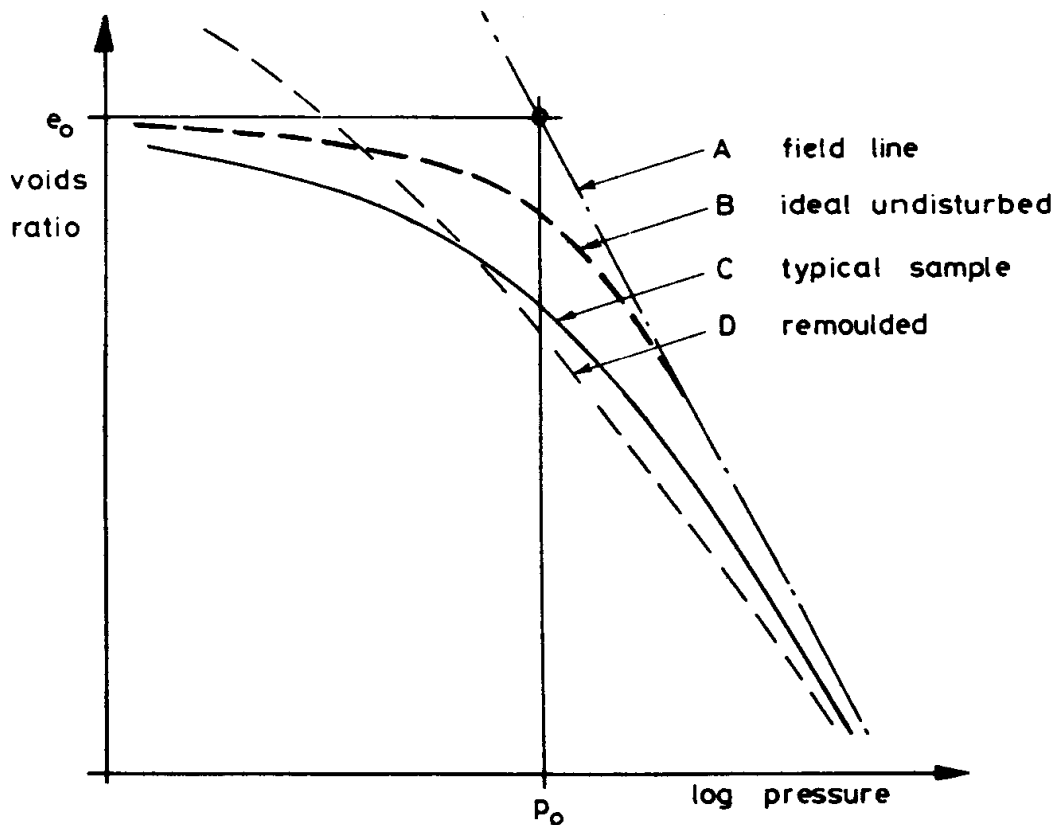
Ιστορία φόρτισης

Εκτός των παραπάνω παραμέτρων, από τη δοκιμή οιδιμέτρου μπορεί να προσδιοριστεί η κατάσταση του εδάφους με βάση την ιστορία φόρτισης:

- Κανονικά στερεοποιημένα εδάφη: είναι τα εδάφη στα οποία δεν επιβάλλονται τάσεις μεγαλύτερες από αυτές που βρίσκονται στην τωρινή κατάσταση. Οι κανονικά στερεοποιημένες άργιλοι είναι ευαίσθητες στις επιδράσεις της διατάραξης δείγματος, οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τη σχέση μεταξύ του δείκτη πόρων και της τάσης που επιβάλλεται σε μια δοκιμή στερεοποίησης. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη για εξαιρετική φροντίδα κατά την παρασκευή δειγμάτων δοκιμής.

Η επίδραση της διατάραξης του δείγματος στην καμπύλη $e / \log p$ απεικονίζεται στο Σχήμα 2.6 , στην οποία η γραμμή A αντιπροσωπεύει την καμπύλη φόρτισης πεδίου (καμπύλη αρχικής συμπίεσης) για το φυσικό έδαφος επί τόπου. Η καμπύλη B περιγράφει τη μορφή της «δανικής» καμπύλης φόρτισης για ένα πραγματικά αδιατάρακτο δείγμα. Η καμπύλη C είναι χαρακτηριστική μιας καμπύλης εργαστηριακής δοκιμής για ένα μη διαταραγμένο δείγμα μέσης ποιότητας. Η καμπύλη αυτή γίνεται γραμμική καθώς συγκλίνει προς τη γραμμή A. Η καμπύλη D αντιπροσωπεύει μια δοκιμή σε μια πλήρως αναζυμωμένη άργιλο. Επειδή υπάρχει διαφορά μεταξύ της καμπύλης πεδίου (A) και μιας τυπικής εργαστηριακής καμπύλης (C), οι τιμές του m_v που υπολογίζονται από μια εργαστηριακή δοκιμή διαφέρουν συνήθως από τις τιμές πεδίου, στις οποίες βασίζονται οι υπολογισμοί καθιζήσεων. Ως εκ τούτου πρέπει να αναφέρονται ως εργαστηριακές τιμές.

Η καμπύλη φόρτισης πεδίου (A) μπορεί να προκύψει από την εργαστηριακή καμπύλη με διάφορες διαδικασίες, για παράδειγμα Schmertmann (1953). Η ανάλυση βασίζεται στην ύπαρξη επαρκών αυξήσεων φορτίου στην εργαστηριακή δοκιμή για την απόκτηση τριών σημείων σε ευθεία γραμμή στην καμπύλη $e - \log p$ και αρκετά σημεία για τον καθορισμό της καμπύλης διόγκωσης (αποφόρτισης). Τα όρια Atterberg πρέπει να προσδιοριστούν ως διασταυρούμενος έλεγχος του δείκτη συμπίεσης C_c .



Σχήμα 2.6 Διάγραμμα δείκτη πόρων με τον λογάριθμο της τάσης

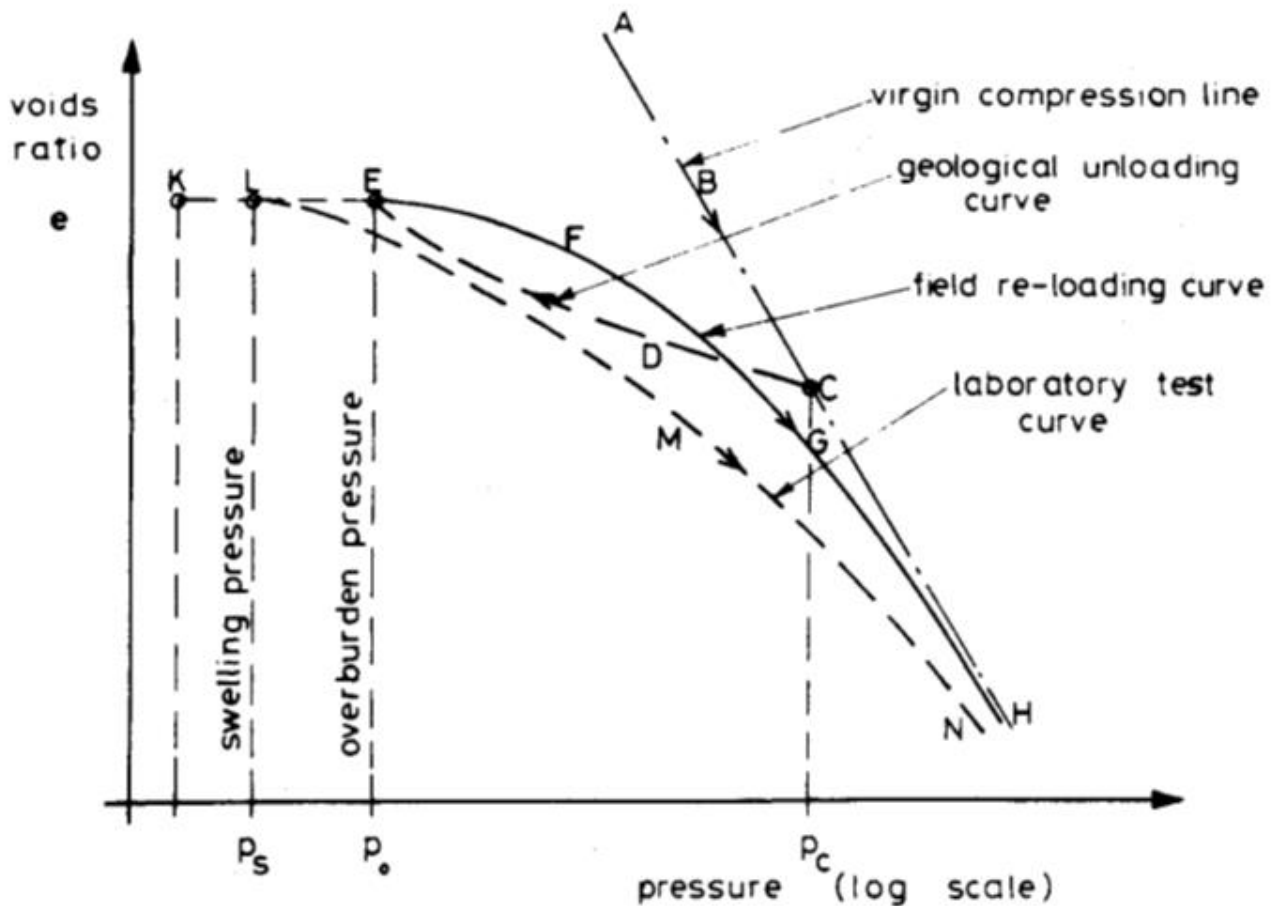
- Υπερστερεοποιημένα εδάφη: είναι τα εδάφη στα οποία κατά το παρελθόν επιβλήθηκαν τάσεις μεγαλύτερες από αυτές που βρίσκονται στην τωρινή κατάσταση. Η μέγιστη ενεργή τάση που επιβλήθηκε στο παρελθόν είναι γνωστή ως τάση προστερεοποίησης, p'_c . Ο λόγος της p'_c ως προς την παρούσα ενεργή τάση p'_0 ονομάζεται λόγος υπερστερεοποίησης

$$OCR = \frac{p'_c}{p'_0} \quad (2.24)$$

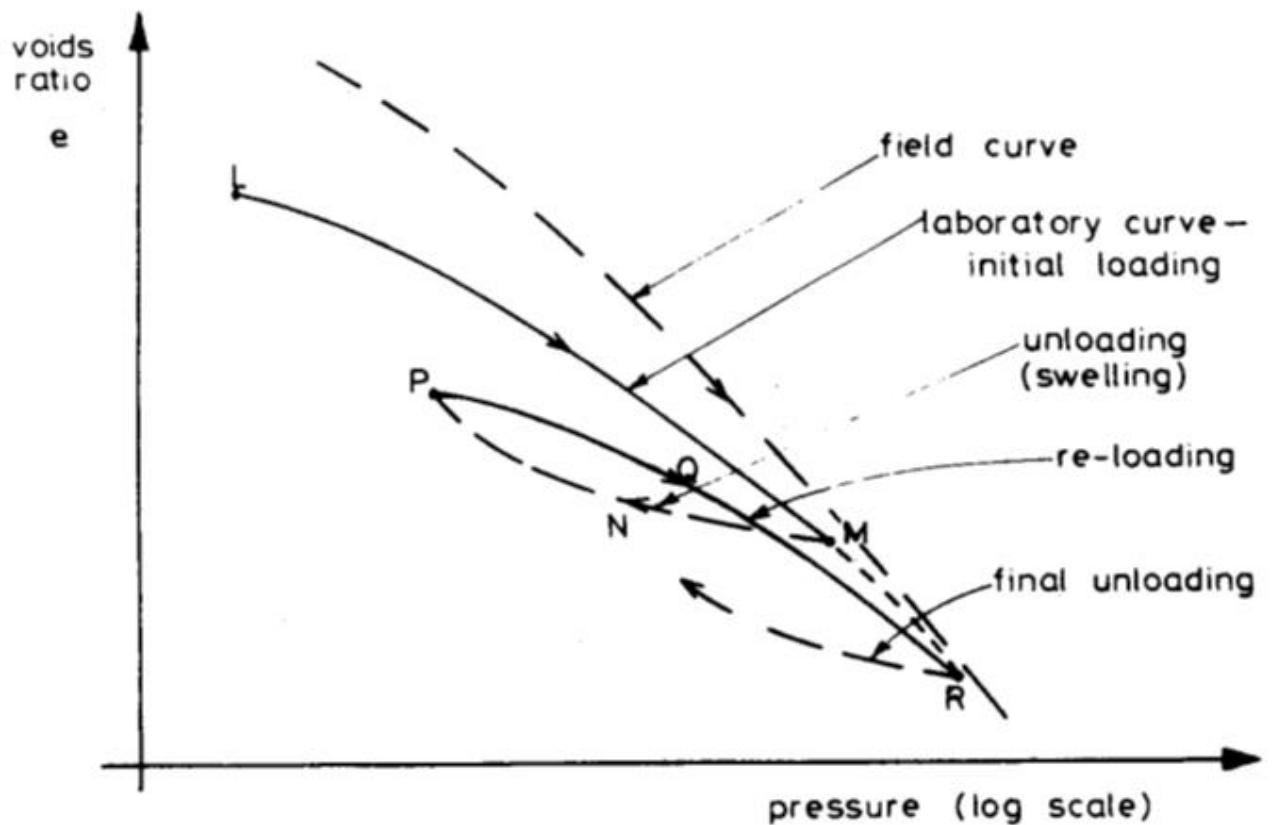
Η διαδικασία της υπερστερεοποίησης μπορεί να απεικονιστεί από τις καμπύλες $e / \log p$ στο Σχήμα 2.7. Η γραμμή ABCHE αντιπροσωπεύει την καμπύλη αρχικής συμπίεσης επί τόπου, καθώς η άργιλος στερεοποιείται υπό την πίεση των υπερκείμενων αποθέσεων. Η μέγιστη τάση που επιβλήθηκε είναι ο p_c , που αντιπροσωπεύεται από το σημείο C. Η διάβρωση μέρους του υπερκείμενου εδάφους ή η απομάκρυνση του πάγου κατά τη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου μείωσε την τάση στο p_0 , την παρούσα τάση υπερκείμενου φορτίου. Διόγκωση συνέβη κατά μήκος της καμπύλης αποφόρτισης CDE στο σημείο E, όπου το OCR είναι ίσο με p_c / p_0 . Αν η άργιλος φορτιστεί ξανά, π.χ. από την επιβολή των φορτίων θεμελίωσης, θα ανασυγκροτηθεί κατά μήκος μιας νέας καμπύλης πεδίου EFG. Αρχικά αυτή η καμπύλη έχει μικρότερη κλίση από την αρχική καμπύλη (δηλαδή η άργιλος έχει τώρα πολύ χαμηλότερη συμπίεστικότητα), αλλά στη συνέχεια γίνεται πολύ πιο απότομη (η άργιλος γίνεται περισσότερο συμπίεστη) αν επιτευχθεί πίεση ίση με p_c και προσεγγίζει τότε την αρχική καμπύλη στο H.

Η αφαίρεση ενός δείγματος από το έδαφος (δειγματοληψία) για την εκτέλεση δοκιμής στερεοποίησης χωρίς πρόσβαση στο νερό αποφορτίζει το δείγμα σε πολύ μικρή τάση που αντιπροσωπεύει το σημείο K, χωρίς μεταβολή του δείκτη πόρων. Η τάση του εδάφους να διογκώνεται όταν προστίθεται νερό στο κελί του οιδημέτρου αντισταθμίζεται εφαρμόζοντας την τάση διόγκωσης ή το φορτίο ισορροπίας, p_s , που υποδηλώνεται από το σημείο L. Μια

δοκιμή εργαστηριακής στερεοποίησης δίνει στη συνέχεια τη διακεκομμένη καμπύλη LMN, αν και σε πολλές περιπτώσεις η δοκιμή τερματίζει σε ένα σημείο M όπου η πίεση είναι αισθητά μικρότερη από το p_c λόγω περιορισμών της χωρητικότητας της συσκευής. Η εργαστηριακή καμπύλη LMN είναι αρκετά διαφορετική σε μορφή από την καμπύλη πεδίου EFG. Ωστόσο, η εργαστηριακή καμπύλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή της τάσης προστερεοποίησης p_c και του λόγου υπερστερεοποίησης, χρησιμοποιώντας τη διαδικασία που επινοήθηκε από την Casagrande (1936). Υπάρχουν επίσης αναγνωρισμένες διαδικασίες, όπως αυτές που οφείλονται στους Schmertmann (1954) και Leonards (1962), μεταξύ των άλλων, που καθιστούν δυνατή την κατασκευή της καμπύλης στερεοποίησης πεδίου.



Σχήμα 2.7 Διάγραμμα δείκτη πόρων με τον λογάριθμο του χρόνου για υπερστερεοποιημένη άργιλο



Σχήμα 2.8 Φόρτιση και αποφόρτιση

- Υποστερεοποιημένα εδάφη: είναι εδάφη στα οποία δεν έχει επέλθει ακόμα ισορροπία λόγω του επιβαλλόμενου φορτίου. Συνήθως αφορούν πρόσφατες αποθέσεις.

2.3.5. Θεωρία στερεοποίησης του Terzaghi – Παραδοχές και Περιορισμοί.

Ο Terzaghi (1925) καθιέρωσε την θεωρία προσδιορισμού του ρυθμού στερεοποίησης μιας κορεσμένης εδαφικής μάζας υπό σταθερό φορτίο. Η θεωρία βασίζεται στις παρακάτω παραδοχές:

1. Το στρώμα του εδάφους που στερεοποιείται είναι οριζόντιο, ομοιογενές και ομοιόμορφου πάχους.
2. Το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο.
3. Οι εδαφικοί κόκκοι και το νερό είναι πρακτικά ασυμπίεστα.
4. Ισχύει ο νόμος του Darcy για τη ροή του νερού μέσω του εδάφους.
5. Ο συντελεστής διαπερατότητας και άλλες ιδιότητες του εδάφους παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια οποιασδήποτε αύξησης της εφαρμοζόμενης τάσης.
6. Η εφαρμοζόμενη τάση είναι ομοιόμορφη κατά μήκος ενός οριζόντιου επιπέδου.
7. Η ροή του νερού λαμβάνει χώρα μόνο στην κατακόρυφη κατεύθυνση, δηλαδή η αποστράγγιση και η συμπίεση είναι μονοδιάστατες και έτσι συντελείται η στερεοποίηση (έδαφος πλευρικά περιορισμένο).
8. Μια αλλαγή στην ενεργή τάση στο έδαφος προκαλεί μια αντίστοιχη αλλαγή στο δείκτη πόρων και η σχέση μεταξύ τους είναι γραμμική κατά τη διάρκεια της αύξησης της τάσης (α_v και m_v σταθερά).

9. Η αρχική πίεση πόρων λόγω της εφαρμογής του φορτίου είναι ομοιόμορφη σε όλο το βάθος του στρώματος της αργίλου.
10. Η χρονική υστέρηση του φαινομένου στερεοποίησης οφείλεται εξ ολοκλήρου στη χαμηλή διαπερατότητα του εδάφους.
11. Ένα ή και τα δύο από τα στρώματα που συνορεύουν με το στρώμα αργίλου είναι απολύτως ελεύθερα στην αποστράγγιση σε σύγκριση με την άργιλο.
12. Το βάρος του ίδιου του εδάφους μπορεί να αγνοηθεί.

Οι παραδοχές της θεωρίας Terzaghi δεν ισχύουν πάντα στα πραγματικά προβλήματα, κι έτσι τα αποτελέσματα είναι προσεγγιστικά. Ωστόσο, συνυπολογίζοντας την πολυπλοκότητα του φαινομένου, η θεωρία παρέχει ικανοποιητικές προσεγγίσεις και λύσεις για την χρονική εξέλιξη των καθιζήσεων των κατασκευών.

Οι πρώτες τρεις παραδοχές για στρώμα ομογενές, ισότροπο, κορεσμένο με ασυμπίεστους εδαφικούς κόκκους και ασυμπίεστο νερό στους πόρους, ισχύουν γενικά για κορεσμένες αργίλους. Ωστόσο, η παρουσία έστω και μικρής ποσότητας αέρα στα εδαφικά κενά διαφοροποιεί το αποτέλεσμα και επηρεάζει την ακρίβεια της μεθόδου.

Οι επόμενες δυο παραδοχές για την ισχύ του νόμου του Darcy και τη σταθερή τιμή του συντελεστή διαπερατότητας δεν ικανοποιούνται, αλλά τα σφάλματα που απορρέουν είναι αρκετά μικρά.

Η έβδομη παραδοχή εισάγει το σημαντικότερο σφάλμα της θεωρίας, καθώς το φαινόμενο της στερεοποίησης είναι τρισδιάστατο.

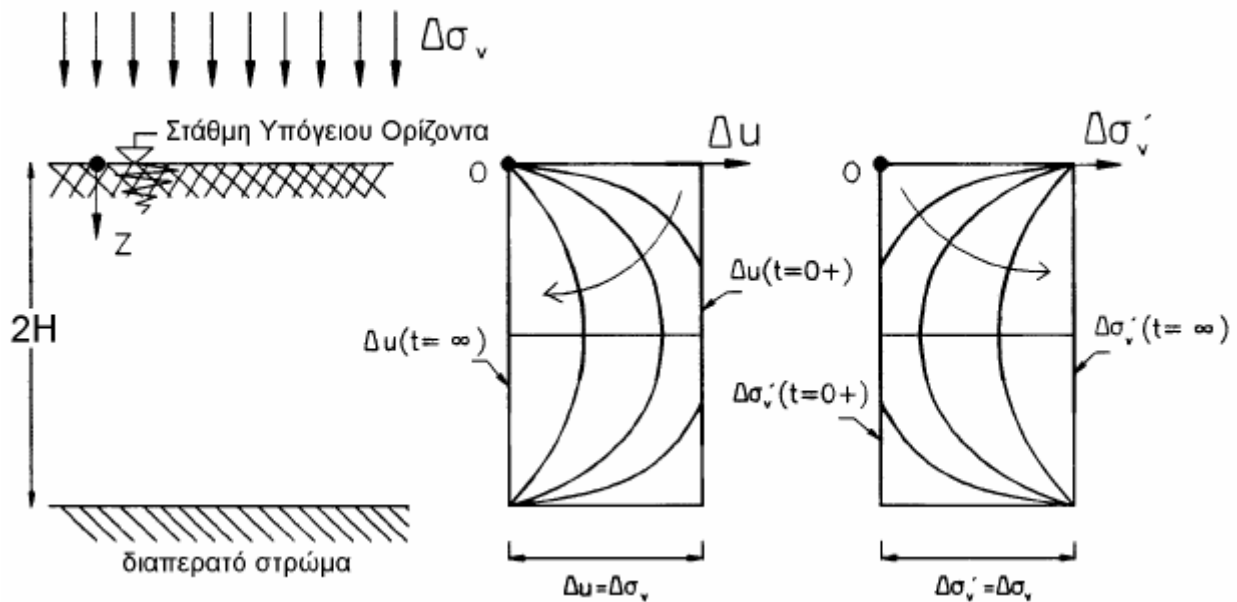
Η όγδοη παραδοχή για τις σταθερές τιμές των α_v και m_v δεν ισχύει, καθώς οι τιμές τους μεταβάλλονται με την σ'_v .

Η ένατη παραδοχή για την ομοιόμορφη ανάπτυξη της πίεσης του νερού των πόρων σε όλο το βάθος του εδάφους δεν ισχύει, καθώς αποτόνωση του νερού είναι γρηγορότερη κοντά στα διαπερατά όρια του στρώματος.

Η δέκατη παραδοχή για την πλήρη εξάρτηση της χρονικής εξέλιξης των καθιζήσεων από την διαπερατότητα του εδάφους δεν ισχύει, καθώς δε λαμβάνει υπόψη τη δευτερεύουσα συμπίεση. Το σφάλμα είναι ασήμαντο για τα μη οργανικά εδάφη.

Για την εξίσωση που περιγράφει την μονοδιάστατη στερεοποίηση του εδάφους, αρχικά θεωρείται κορεσμένο αργιλικό στρώμα πάχους $d=2H$, που βρίσκεται μεταξύ διαπερατών ορίων (άνω και κάτω) και που υποβάλλεται σε ομοιόμορφη τάση $\Delta\sigma_v$ στην άνω επιφάνεια. Η ολική τάση που αναπτύσσεται σε όλα τα σημεία του αργιλικού στρώματος είναι $\Delta\sigma_v$. Αρχικά το σύνολο της τάσης $\Delta\sigma_v$ παραλαμβάνεται από το νερό των πόρων μέσω της ανάπτυξης μιας υπερπίεσης πόρων ύψους $\Delta\sigma_v / \gamma_w$. Τη χρονική στιγμή $t=0$ που αντιστοιχεί στην επιβολή της τάσης $\Delta\sigma_v$, η υπερπίεση του νερού των πόρων σε όλο το πάχος του αργιλικού στρώματος ισούται με $\Delta\sigma_v / \gamma_w$. Στη συνέχεια ($t>0$), το νερό διαφεύγει από τους εδαφικούς πόρους προς τα διαπερατά όρια (άνω και κάτω) του στρώματος με ταυτόχρονη μείωση της υπερπίεσης πόρων. Έτσι, η υπερπίεση στα άκρα (άνω και κάτω) του αργιλικού στρώματος πέφτει στο μηδέν. Σε αντίθεση όμως με την κορυφή και τον πυθμένα της αργιλικής στρώσης, στο μέσο αυτής η υπερπίεση παραμένει υψηλή. Οι καμπύλες που παραστούν την διασπορά της υπερπίεσης πόρων καλούνται ισόχρονες. Ασφαλώς οι ισόχρονες δεν είναι σταθερές αλλά δυναμικές και μεταβάλλονται με το χρόνο στερεοποίησης. Καθώς το

φαινόμενο της στερεοποίησης τείνει να ολοκληρωθεί, τα επίπεδα της υπερπίεσης πόρων στο μέσον του αργιλικού στρώματος μειώνονται διαρκώς, έως ότου στο τέλος της στερεοποίησης ($t=t_p$) το σύνολο της υπερπίεσης πόρων σε όλο το ύψος του στρώματος έχει εξαληφθεί (η ισόχρονη είναι κατακόρυφο ευθύγραμμο τμήμα).



Σχήμα 2.9: Μονοδιάστατη στερεοποίηση εδαφών

Θεωρώντας μια λεπτή λωρίδα πάχους dz του αργιλικού στρώματος στο βάθος z , τη χρονική στιγμή t , η μεταβολή της πίεσης πόρων δίνεται από την σχέση

$$\Delta u = \left(u + \frac{\partial u}{\partial z} \times dz \right) - u = \frac{\partial u}{\partial z} \times dz \quad (2.24)$$

Και το αντίστοιχο υδραυλικό ύψος $\Delta h = \frac{\Delta u}{\gamma_w} = \frac{1}{\gamma_w} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \times dz \right)$ (2.25)

Η υδραυλική κλίση είναι $i = \frac{\Delta h}{dz} = \frac{1}{\gamma_w} \times \frac{\partial u}{\partial z}$ (2.26)

Σύμφωνα με το νόμο του Darcy ισχύει

$$v = k \times i = k \times \frac{1}{\gamma_w} \times \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.27)$$

Η ταχύτητα ροής στον πυθμένα της στρώσης πάχους είναι

$$v + \frac{\partial v}{\partial z} \times dz = v + \frac{\partial \left[\frac{k}{\gamma_w} \times \frac{\partial u}{\partial z} \right]}{\partial z} \times dz \quad (2.28)$$

Οπότε $\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{k}{\gamma_w} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2$ (2.29)

Η εισερχόμενη παροχή στην λωρίδα dz είναι

$$q_{in} = v \times (dx \times dy) \quad (2.30)$$

Όπου dx, dy οι διαστάσεις της λωρίδας του αργιλικού στρώματος στις άλλες διευθύνσεις.

Η εξερχόμενη παροχή είναι

$$q_{out} = \left(v + \frac{\partial v}{\partial z} \times dz \right) \times (dx \times dy) \quad (2.31)$$

Συνεπώς, η καθαρή παροχή που διαφεύγει από το στοιχείο είναι:

$$\Delta q = q_{out} - q_{in} = \frac{\partial v}{\partial z} \times (dx \times dy \times dz) \quad (2.32)$$

Η απομάκρυνση του νερού από τους εδαφικούς πόρους συνεπάγεται ογκομετρική παραμόρφωση

$$\Delta V = -m_v \times V_0 \times \Delta \sigma'_v \quad (2.33)$$

Όπου $V_0 =$ αρχικός όγκος εδαφικής μάζας $= dx \, dy \, dz$

Η μεταβολή του όγκου στην μονάδα του χρόνου είναι

$$\frac{\partial(\Delta V)}{\partial t} = -m_v \times dx \times dy \times dz \times \frac{\partial(\Delta \sigma'_v)}{\partial t} \quad (2.34)$$

$$\text{Σε κορεσμένο έδαφος } \Delta V = \Delta V_v = \Delta V_w = \Delta q \times t \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} (dx \times dy \times dz) = -m_v \times (dx \times dy \times dz) \frac{\partial(\Delta \sigma'_v)}{\partial t} \quad (2.36)$$

$$\text{Οπότε } \frac{\partial v}{\partial z} = -m_v \frac{\partial \Delta \sigma'_v}{\partial t} \quad (2.37)$$

$$\text{Όμως } \Delta \sigma'_v = \Delta \sigma_v - u \quad (2.38)$$

Παραγωγίζοντας προκύπτει $\frac{\partial(\Delta \sigma'_v)}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial t}$ καθώς $\partial \Delta \sigma = 0$ (δεν υπάρχει μεταβολή ολικής τάσης σε κοντινό χρονικά βήμα)

$$\text{Συνεπώς } \frac{\partial v}{\partial z} = m_v \times \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.39)$$

$$\text{Και καθώς } \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{k}{\gamma_w} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (2.40)$$

$$\text{Προκύπτει } \frac{k}{\gamma_w} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 = m_v \times \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = m_v \times \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad (2.42)$$

Η εξίσωση αυτή είναι η διαφορική εξίσωση μονοδιάστατης στερεοποίησης και δίνει την υπερπίεση του νερού των πόρων, u , συναρτήσει του βάθους z , και του χρόνου, t .

$$\text{Όπου } c_v \text{ είναι ο συντελεστής στερεοποίησης : } c_v = \frac{k}{\gamma_w \times m_v} = \frac{k}{g \times \rho_w \times m_v} \quad (2.43)$$

2.3.6. Επίλυση της εξίσωσης στερεοποίησης

Για την επίλυση της εξίσωσης μονοδιάστατης στερεοποίησης χρησιμοποιούνται κατάλληλες αρχικές και συνοριακές συνθήκες. Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος καθορίζουν την τιμή

της υπερπίεσης πόρων στο άνω σύνορο ($z=0$) και στο κάτω σύνορο ($z=2H$) σε όλους τους χρόνους ($t>0$) και είναι :

$$u(0,t)=0 \quad (2.44)$$

$$u(2H,t)=0 \quad (2.45)$$

Οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος ($t=0$), αφορούν στην αρχική κατανομή της υπερπίεσης πόρων κατά την ταχεία επιβολή της κατακόρυφης τάσης $\Delta\sigma_v$. Στην ταχεία επιβολή ισχύουν αστράγγιστες συνθήκες, οπότε $\Delta\sigma'_v=0$ (για $t=0$) και $u= \Delta\sigma_v$. Δηλαδή η αρχική υπερπίεση του νερού των πόρων ισούται με την επιβαλλόμενη κατακόρυφη ολική τάση, η οποία όμως είναι σταθερή σε όλο το πάχος του στρώματος. Άρα και η αρχική υπερπίεση πόρων είναι σταθερή και ίση με τη $\Delta\sigma_v$ σε όλο το πάχος του στρώματος:

$$u(z, t = 0) = \Delta\sigma_v \quad (2.46)$$

Η επίλυση της εξίσωσης της μονοδιάστατης στερεοποίησης με τις παραπάνω αρχικές συνοριακές συνθήκες, συντελείται με τη χρήση σειρών Fourier. Αρχικά η υπερπίεση πόρων εκφράζεται ως γινόμενο συναρτήσεων του βάθους z και του χρόνου t ως εξής:

$$u = f(z) \times g(t) \quad (2.47)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση στερεοποίησης προκύπτει:

$$c_v \times \left[g(t) \times \left(\frac{\partial[f(z)]}{\partial z} \right)^2 \right] = f(z) \times \frac{\partial[g(t)]}{\partial t} \rightarrow \frac{\left(\frac{\partial[f(z)]}{\partial z} \right)^2}{f(z)} = \frac{\frac{\partial[g(t)]}{\partial t}}{c_v \times g(t)} \quad (2.48)$$

Το αριστερό μέρος της εξίσωσης είναι συνάρτηση μόνο του z ενώ το δεξί μόνο του t . Έτσι όταν ο χρόνος t λαμβάνεται ως μεταβλητή, τότε το αριστερό μέρος ισούται με κάποια σταθερά, έστω ($-A^2$). Αυτό σημαίνει πως όταν το βάθος λαμβάνεται ως μεταβλητή, τότε το δεξί μέρος ισούται με την ίδια σταθερά.

Οπότε η λύση της πρώτης διαφορικής εξίσωσης είναι

$$f(z) = c_1 \times \cos Az + c_2 \times \cos Az \quad (2.49)$$

Με σταθερές ολοκλήρωσης c_1 και c_2 .

Η λύση της δεύτερης μερικής διαφορικής εξίσωσης είναι

$$g(t) = c_3 \times e^{-A^2 \times c_v \times t} \quad (2.50)$$

Με σταθερά ολοκλήρωσης c_3 .

Αντικαθιστώντας τις λύσεις αυτές για την υπερπίεση πόρων, προκύπτει:

$$u(z, t) = [c_1 \times \cos Az + c_2 \times \cos Az] \times c_3 \times e^{-A^2 \times c_v \times t} \rightarrow \\ \rightarrow u(z, t) = [c_4 \times \cos Az + c_5 \times \cos Az] \times e^{-A^2 \times c_v \times t} \quad (2.51)$$

Όπου $c_4 = c_1 \times c_3$ και $c_5 = c_2 \times c_3$ οι νέες σταθερές.

Οι σταθερές c_4 , c_5 και A προσδιορίζονται από τις αρχικές και συνοριακές συνθήκες ως εξής:

Η συνοριακή συνθήκη στο άνω όριο $u=0$ (για $z=0$) δίνει $c_4=0$, οπότε

$$u = c_5 \times \sin Az \times e^{-A^2 \times c_v \times t}$$

Εφαρμόζοντας και τη συνοριακή συνθήκη και στο κάτω όριο προκύπτει

$$c_5 \times \sin Az \times e^{-A^2 \times c_v \times t} = 0$$

Η ισότητα αυτή ικανοποιείται μόνο όταν $(Az) = n \times \pi \rightarrow AzH = n \times \pi$ όπου $n=1, 2, 3, \dots$

Αντικαθιστώντας τις σταθερές c_4 και A , προκύπτει για την υπερπίεση πόρων

$$u(z, t) = c_5 \times \sin\left(\frac{n \times \pi \times z}{2 \times H}\right) \left(\frac{-n^2 \times \pi^2 \times c_v \times t}{4 \times H^2}\right) \quad (2.52)$$

Όμως η εξίσωση αυτή δεν ικανοποιεί την αρχική συνθήκη $u(z, 0) = \Delta\sigma_v$

Έτσι αναζητείται λύση της εξίσωσης μονοδιάστατης στερεοποίησης με τη μορφή σειράς από όρους του παραπάνω τύπου, δηλαδή λύση της μορφής:

$$u(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ c_n \times \sin\left(\frac{n \times \pi \times z}{2 \times H}\right) \left(\frac{-n^2 \times \pi^2 \times c_v \times t}{4 \times H^2}\right) \right\} \quad (2.53)$$

Η οποία προφανώς ικανοποιεί τη διαφορική εξίσωση και τις συνοριακές συνθήκες, ενώ η αρχική συνθήκη δίνει

$$u(z, 0) = \Delta\sigma_v(z, 0) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ c_n \times \sin\left(\frac{n \times \pi \times z}{2 \times H}\right) \right\} \quad (2.54)$$

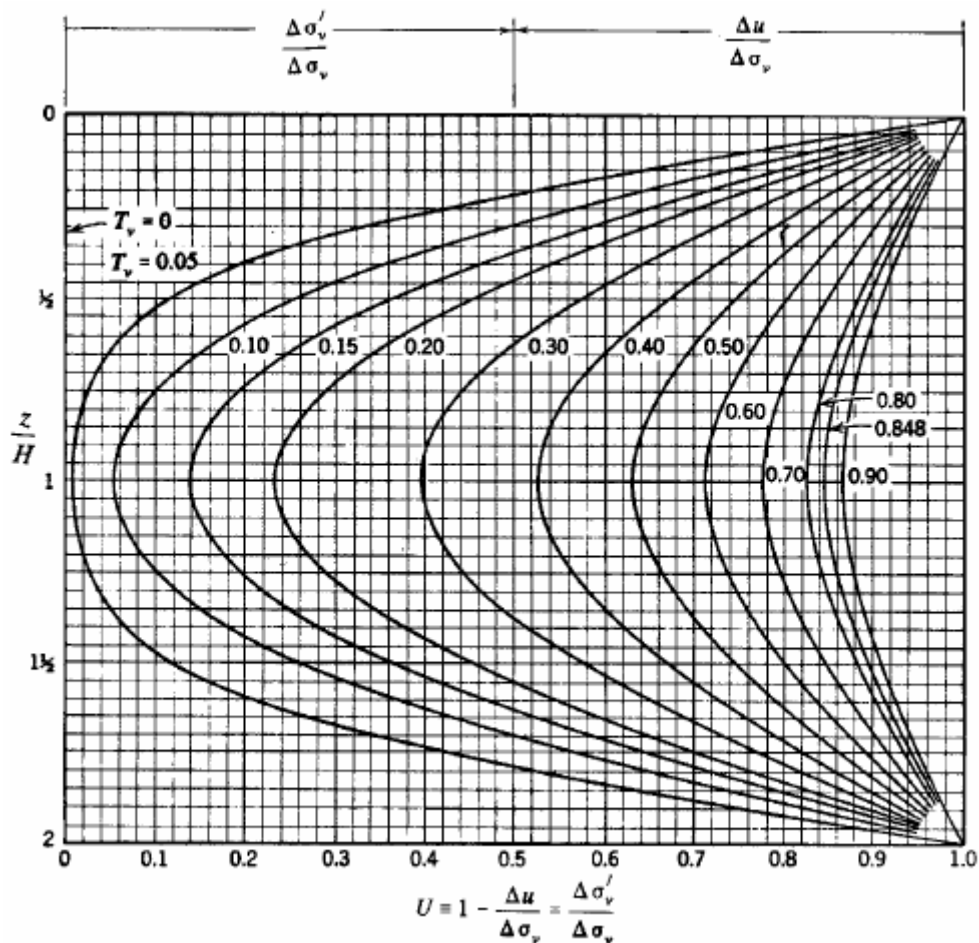
Η παραπάνω εξίσωση είναι μια σειρά Fourier της οποίας οι συντελεστές δίνονται από τη σχέση

$$c_n = \frac{1}{H} \times \int_0^{2 \times H} \Delta\sigma_v \times \sin\left(\frac{n \times \pi \times z}{2 \times H}\right) dz = \frac{2}{\pi \times n} [1 - \cos(\pi \times n)] \times \Delta\sigma_v \quad (2.55)$$

Αντικαθιστώντας στην εξίσωση της υπερπίεσης πόρων

$$u(z, t) = \Delta\sigma_v \times \sum_{m=0}^{\infty} \left\{ \frac{2}{M} \times \sin\left(\frac{M \times z}{H}\right) \left(-M^2 \times T_v\right) \right\} \quad (2.56)$$

Όπου $M = (2 \times m + 1) \times \frac{\pi}{2}$ και $T_v = c_v \times \frac{t}{H^2}$. Ο συντελεστής T_v , που εκφράζει τον χρόνο σε αδιάστατη μορφή, ονομάζεται παράγοντας χρόνου και καθορίζει την χρονική εξέλιξη των καθιζήσεων. Η γραφική παράσταση της λύσης της εξίσωσης στερεοποίησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10 που παρουσιάζει τις ισόχρονες καμπύλες της υπερπίεσης πόρων.



Σχήμα 2.10 Λύσεις της εξίσωσης μονοδιάστατης στερεοποίησης

Αμέσως μετά την επιβολή της φόρτισης ($t = 0 = T_v$), η υπερπίεση πόρων είναι σταθερή και ίση με $u = \Delta\sigma_v$, η δε ισόχρονη καμπύλη είναι κατακόρυφη γραμμή. Ασφαλώς το σχήμα των καμπυλών αυτών εξαρτάται από την αρχική κατανομή της υπερπίεσης πόρων ($t=0$) και από τις συνθήκες στράγγισης από τα άκρα του στρώματος. Ένα παράδειγμα καμπυλών για διαπερατά σύνορα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10. Με την πάροδο του χρόνου (ή ισοδύναμα του αδιάστατου χρόνου T_v), η υπερπίεση μειώνεται σταδιακά και πρακτικά μηδενίζεται όταν $T_v=1$ (θεωρητικά μηδενίζεται σε άπειρο χρόνο $t_p=\infty$).

Η υδραυλική κλίση σε οποιοδήποτε σημείο του εδαφικού στρώματος και σε οποιοδήποτε χρόνο t ισούται με την κλίση της ισόχρονης καμπύλης στο σημείο αυτό. Έτσι η εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης σε οποιοδήποτε σημείο, βασίζεται στην υπερπίεση πόρων του σημείου και εκφράζεται μέσω του βαθμού στερεοποίησης U .

Στην αρχή του φαινομένου στερεοποίησης, δηλαδή για πολύ μικρές τιμές του T_v , οι κλίσεις των ισόχρονων καμπυλών κοντά στα όρια στράγγισης του στρώματος είναι πολύ μεγάλες με συνέπεια οι ταχύτητες ροής στις περιοχές αυτές να είναι επίσης μεγάλες. Αντίθετα κοντά στο μέσο του στρώματος οι κλίσεις είναι μικρές σε όλους τους χρόνους, που σημαίνει ότι στις περιοχές αυτές η ταχύτητα ροής είναι μικρή. Ακριβώς στο μέσο του στρώματος η κλίση είναι μηδενική και η ταχύτητα ροής επίσης μηδενική λόγω συμμετρίας. Στις περιοχές κοντά στα όρια στράγγισης, οι υπερπίεσεις πόρων μειώνονται ραγδαία, ενώ οι ενεργές τάσεις αυξάνονται γρήγορα, και κατά συνέπεια αυτές οι περιοχές συμπίεζονται πρώτες, ενώ κοντά στο μέσον του στρώματος η συμπίεση

είναι μικρή. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη του φαινομένου η συμπίεση του στρώματος γίνεται ομοιόμορφη και ίση με $\varepsilon_v = \frac{\Delta\sigma'_v}{E_s} = \frac{\Delta\sigma_v}{E_s}$. Όπου E_s είναι το μέτρο συμπιεστότητας.

Για τις τιμές του παράγοντα χρόνου $T_v > 0,3$, οι ισόχρονες καμπύλες προσεγγίζουν τις ημιτονοειδείς. Με βάση τη χωρική και χρονική κατανομή των υπερπίεσεων πόρων, υπολογίζεται η υποχώρηση της επιφάνειας του εδαφικού στρώματος από τη σχέση:

$$\Delta H(t) = \int_0^{2 \times H} \frac{1}{E_s} \Delta\sigma'_v(z, t) dz = 2 \times H \times \frac{\Delta\sigma_v}{E_s} - \frac{1}{E_s} \times \int_0^{2 \times H} u(z, t) dz \quad (2.57)$$

Της οποίας η τελική τιμή (δηλαδή μετά την πλήρη εκτόνωση των υπερπίεσεων πόρων) είναι

$$\Delta H(t = \infty) = 2 \times H \times \frac{\Delta\sigma_v}{E_s} \quad (2.58)$$

όπου $2H = z_0$ πάχος της στρώσης

Η χρονική εξέλιξη των υποχωρήσεων της επιφάνειας του στρώματος, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.11 με την αδιάστατη μορφή του μέσου βαθμού στερεοποίησης

$$\bar{U} = \frac{\Delta H(t)}{\Delta H(t=\infty)} \quad (2.59)$$

Ο άξονας του χρόνου στο παραπάνω διάγραμμα έχει τον αδιάστατο παράγοντα χρόνου T_v και παρουσιάζεται σε γραμμική κλίμακα, λογαριθμική κλίμακα και με τη μορφή τετραγωνικής ρίζας. Όπως φαίνεται, ο μέσος βαθμός στερεοποίησης \bar{U} εξαρτάται από τον παράγοντα χρόνου T_v .

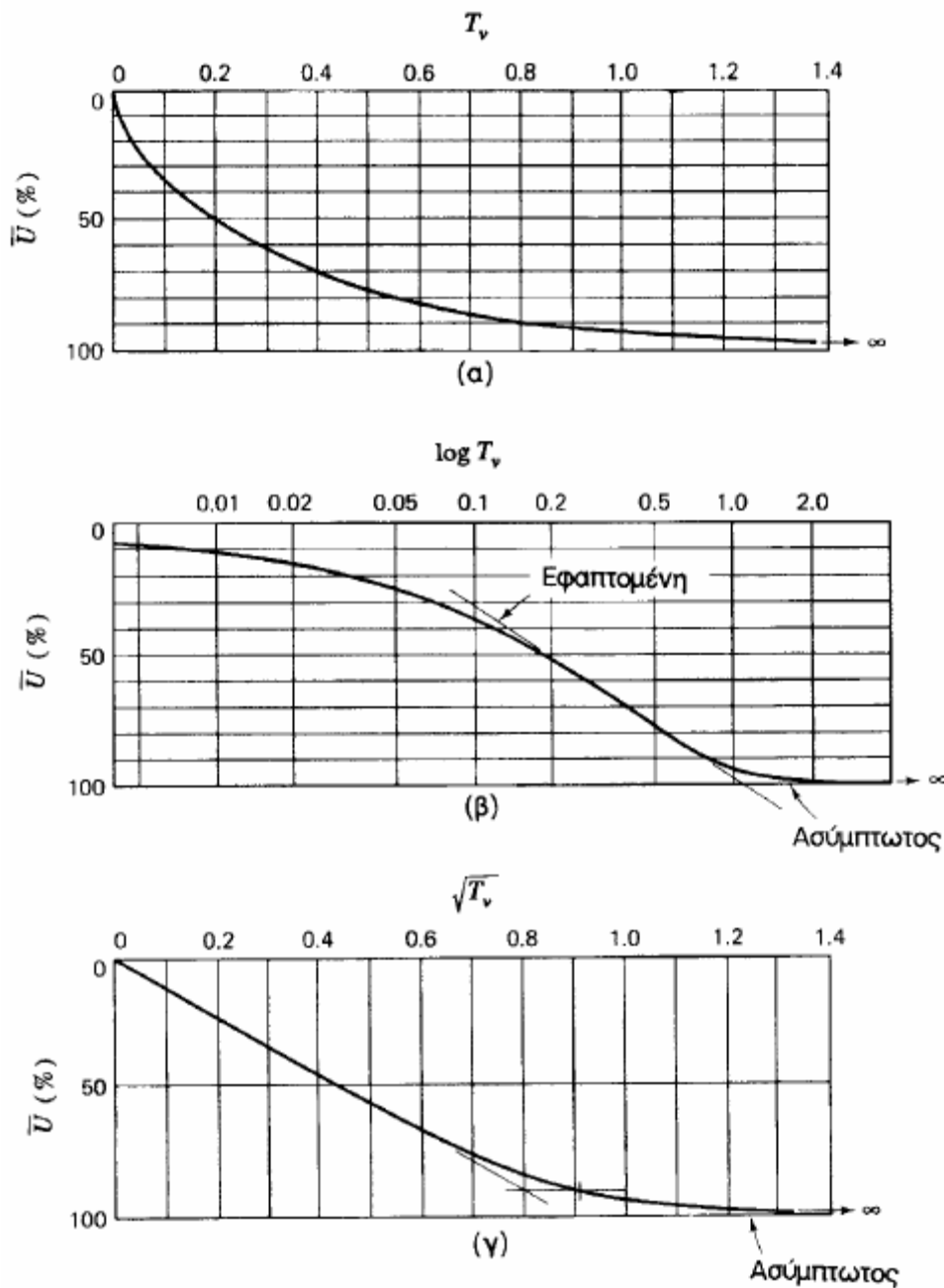
Ο ρυθμός εξέλιξης των καθιζήσεων είναι ταχής στην αρχή της στερεοποίησης (μικρά T_v) και βαθμιαία μειώνεται σε μεγαλύτερους χρόνους. Ο παρακάτω Πίνακας 2.3 παρουσιάζει μερικές χαρακτηριστικές στιγμές της σχέσης $\bar{U} = f(T_v)$.

Πίνακας 2.3 Χαρακτηριστικές στιγμές της σχέσης $\bar{U} = f(T_v)$

Μέσος Βαθμός Στερεοποίησης \bar{U}	Περίπτωση (1) T_v	Περίπτωση (2) T_v	Περίπτωση (3) T_v
0	0	0	0
0,1	0,008	0,003	0,047
0,2	0,031	0,009	0,100
0,3	0,071	0,024	0,158
0,4	0,126	0,048	0,221
0,5	0,196	0,092	0,294
0,6	0,287	0,160	0,383
0,7	0,403	0,270	0,500
0,8	0,567	0,440	0,665
0,9	0,848	0,720	0,940
1,0	∞	∞	∞

Η περίπτωση (1) αναφέρει στις περιπτώσεις που (α) η αρχική κατανομή υπερπίεσης είναι ομοιόμορφη και η στράγγιση γίνεται μέσω ενός ή δυο συνόρων του στρώματος ή (β) η αρχική κατανομή υπερπίεσης πόρων είναι τριγωνική και υπάρχουν δύο όρια στράγγισης.

Η περίπτωση (2) αναφέρεται στην περίπτωση της αρχικής τριγωνικής κατανομής της υπερπίεσης πόρων με ένα όριο στράγγισης, με την προϋπόθεση πως η μέγιστη υπερπίεση είναι στο όριο στράγγισης.



Σχήμα 2.11 Μέσος βαθμός στερεοποίησης ως προς το χρόνο

Η περίπτωση (3) αναφέρεται στην περίπτωση της αρχικής τριγωνικής κατανομής της υπερπίεσης πόρων με ένα όριο στράγγισης, με την προϋπόθεση πως η υπερπίεση πόρων στο όριο στράγγισης είναι μηδενική.

Ο παράγοντας χρόνου T_v εξαρτάται από τον συντελεστή στερεοποίησης, c_v , το χρόνο, t , και το μήκος της διαδρομής στράγγισης, H_d .

$$T_v = \frac{c_v \times t}{H_d^2} = \frac{k \times E_s}{\gamma_w \times H_d^2} \times t \quad (2.60)$$

Η διαδρομή αποστράγγισης, H_d , σε ένα στρώμα πάχους $2H$ με δυο όρια στράγγισης είναι $H_d=H$. Ο συντελεστής στερεοποίησης εκφράζει τη συνδυασμένη επίδραση του συντελεστή διαπερατότητας k και το συντελεστή όγκου $m_v = \frac{1}{E_s}$. Κατά την διάρκεια της στερεοποίησης οι τιμές των παραμέτρων k και m_v μεταβάλλονται και συγκεκριμένα μειώνονται. Η μεταβολή τους είναι τέτοια ώστε ο λόγος k / m_v να μη μεταβάλλεται η τιμή του c_v για ένα σημαντικό εύρος τάσεων.

Η διαφορική εξίσωση στερεοποίησης εισάγει μια σειρά περιορισμών της θεωρίας στερεοποίησης:

- (a) Η τιμή του συντελεστή στερεοποίησης, c_v , λαμβάνεται ως σταθερή, ενώ στην πραγματικότητα μεταβάλλεται με την αλλαγή της τάσης στερεοποίησης.
- (b) Η διαδρομή αποστράγγισης H_d δεν μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια στη φύση.
- (c) Πολλές φορές είναι δύσκολος ο προσδιορισμός του ορίου στράγγισης.
- (d) Η εξίσωση περιγράφει τη μονοδιάστατη στερεοποίηση. Στη φύση η πλευρική στράγγιση μπορεί να είναι σημαντική.
- (e) Η άμεση και η δευτερεύουσα συμπίεση δε λαμβάνονται υπόψη.
- (f) Στη φύση η στερεοποίηση σπάνια επιβάλλεται ακαριαία.
- (g) Στη φύση η κατανομή των αρχικών υπερπίεσεων είναι σπάνια γραμμική ή ομοιόμορφη.

2.3.7. Μέθοδοι προσδιορισμού του συντελεστή στερεοποίησης

Ο προσδιορισμός του c_v γίνεται με την εργαστηριακή μέθοδο οιδημέτρου. Η καμπύλη που παριστά τη μεταβολή της καθίζησης με το χρόνο σε κάθε στάδιο φόρτισης του οιδημέτρου είναι παρόμοια της καμπύλης $\bar{U} - T_v$ της θεωρίας στερεοποίησης. Αυτή η ομοιότητα χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό του c_v μέσω των δύο ακόλουθων μεθόδων:

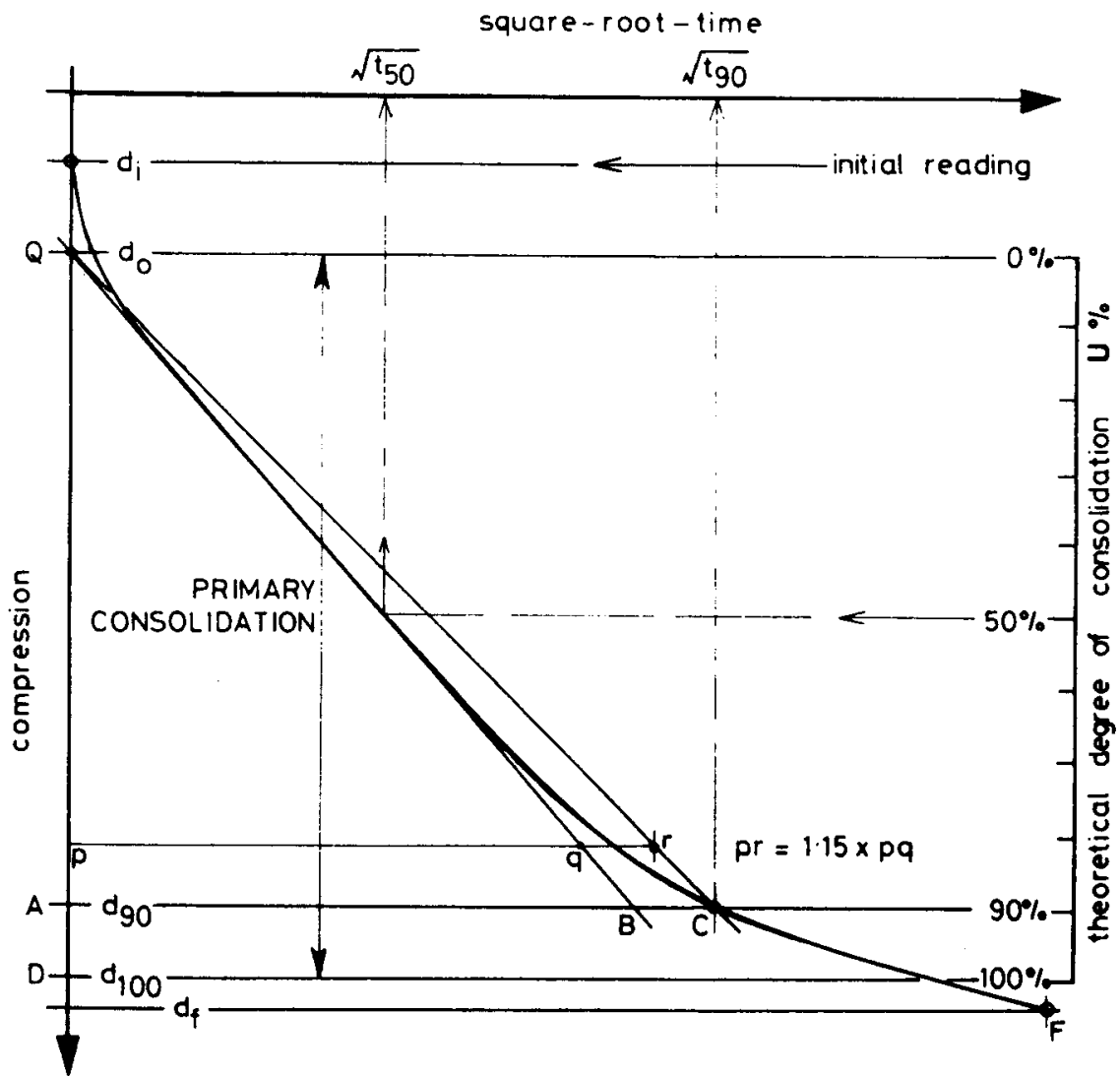
(a) Μέθοδος τετραγωνικής ρίζας του χρόνου

Είναι γνωστή και ως μέθοδος Taylor (1942) και χρησιμοποιεί τη θεωρητική σχέση $\bar{U} - \sqrt{T_v}$. Σύμφωνα με αυτήν, τα δύο μεγέθη συνδέονται γραμμικά $T_v = \frac{\pi}{4} \times U^2$ μέχρι το $\bar{U} = 60\%$. Επίσης για $\bar{U} = 90\%$ το $\sqrt{T_v} = 115\%$, τιμή που προκύπτει από το αρχικό ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης. Στο Σχήμα 2.12 φαίνεται η εφαρμογή της μεθόδου στην καμπύλη καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου σε ένα στάδιο φόρτισης.

$$c_v = \frac{T_v \times H_d^2}{t} = \frac{0.848 \times H_d^2}{t_{90}} \quad (2.61)$$

(b) Μέθοδος του λογάριθμου του χρόνου

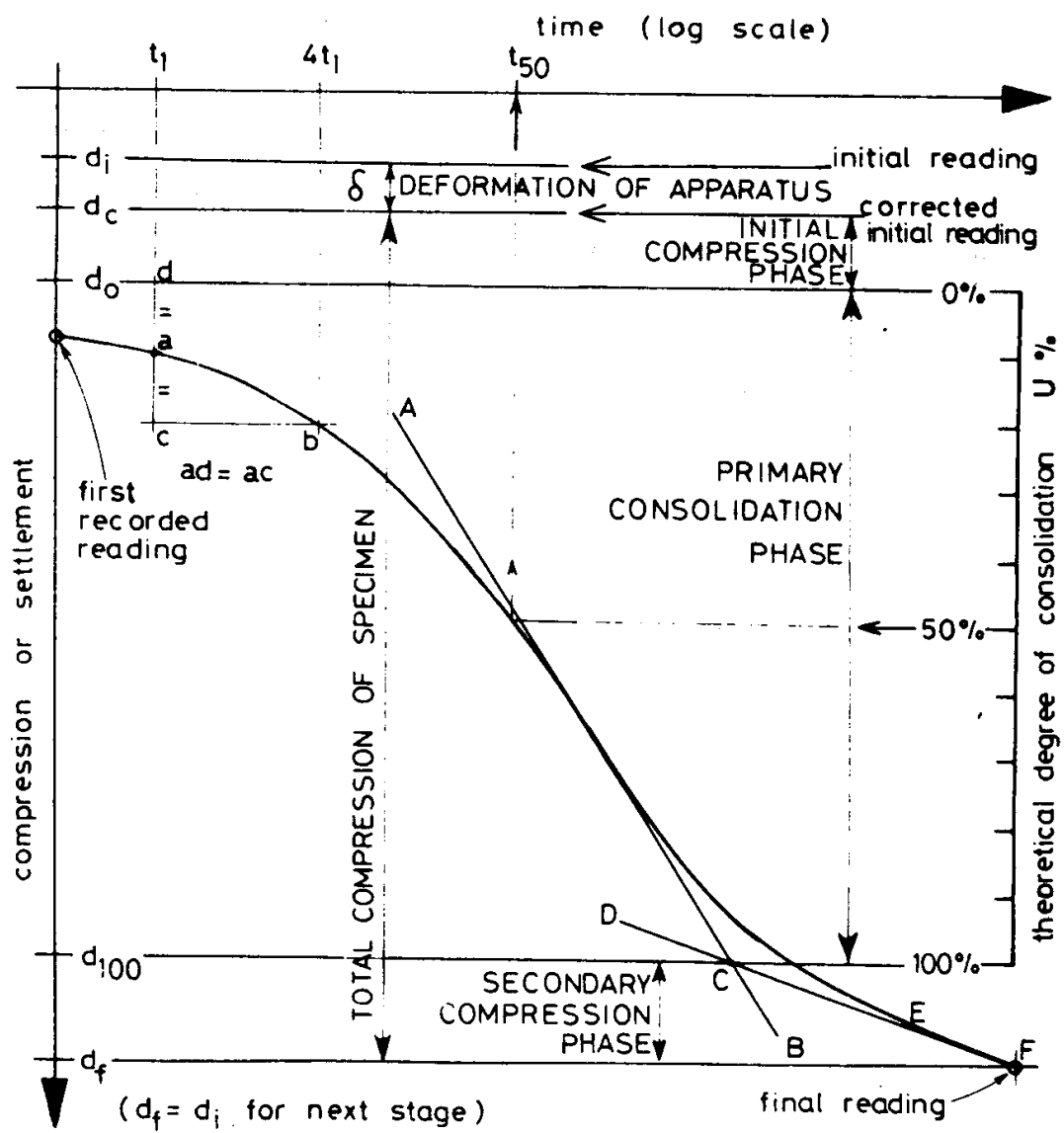
Είναι γνωστή και ως μέθοδος Casagrande και χρησιμοποιεί τη ξεχωριστή σχέση $\bar{U} - \log T_v$. Η εργαστηριακή καμπύλη καθίζησης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.13 για ένα στάδιο φόρτισης, και αποτελείται από τρία χαρακτηριστικά τμημάτων: Ένα αρχικό τμήμα παραβολικής μορφής, ένα ενδιάμεσο ευθύγραμμο, και τελικό ασυμπτωτικό προς τον οριζόντιο άξονα. Στην καμπύλη αυτή το σημείο με $\bar{U} = 100\%$ ορίζεται ως το σημείο τομής των προεκτάσεων των δύο τελευταίων τμημάτων της καμπύλης. Το σημείο της καμπύλης με $\bar{U} = 0$ προσδιορίζεται από το τέλος της άμεσης καθίζησης.



Σχήμα 2.12 Διάγραμμα καθίζησης με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου

Στη συνέχεια από το μέσο των καθιζήσεων που αντιστοιχεί σε $\bar{U} = 0$ και $U = 100\%$ βρίσκεται το σημείο με $\bar{U} = 50\%$ και ο αντίστοιχος χρόνος t_{50}

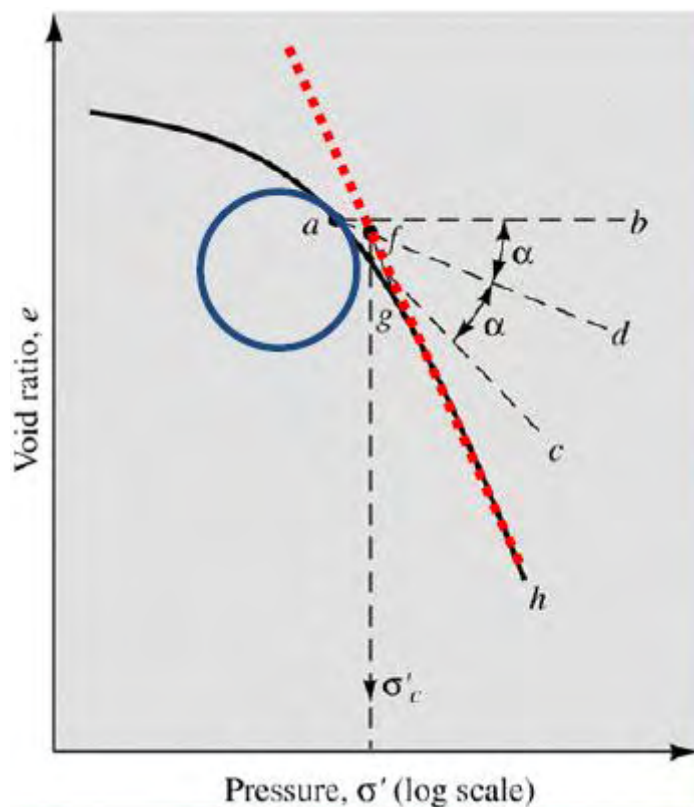
$$c_v = \frac{T_v \times H_d^2}{t_{50}} = \frac{0,196 \times H_d^2}{t_{50}} \quad (2.62)$$



Σχήμα 2.13 Διάγραμμα καθίζησης με τον λογάριθμο του χρόνου

2.3.8. Μέθοδος προσδιορισμού της τάσης προστερεοποίησης

Για τον προσδιορισμό της τάσης προστερεοποίησης p_c' χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος που πρότεινε ο Casagrande (1936), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.14 . Αρχικά βρίσκεται το σημείο a που έχει την μέγιστη καμπυλότητα της καμπύλης. Από το σημείο a , σχεδιάζονται μια οριζόντια γραμμή (γραμμή $a-b$) και η εφαπτόμενη (γραμμή $a-c$) στην εργαστηριακή καμπύλη. Στη συνέχεια σχεδιάστηκε η διχοτόμος της γωνίας που σχηματίζουν οι δυο ευθείες (γραμμή $a-d$). Έπειτα ο κατώτερος κλάδος της γραμμής φόρτισης προεκτείνεται (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα) προς τα πάνω μέχρι να τμήσει την διχοτόμο. Το σημείο τομής τους σημείο f , μας δίνει και την τιμή της τάσης προστερεοποίησης.



Σχήμα 2.14 Διάγραμμα υπολογισμού τάσης προστερεοποίησης

Κεφάλαιο 3

Περιγραφή εξοπλισμού και διαδικασίας δοκιμών

3.1. Δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης (οιδήμετρο)

3.1.1. Περιγραφή συσκευής οιδημέτρου

Η δοκιμή οιδημέτρου που παρουσιάζονται στη διπλωματική αυτή εργασία πραγματοποιήθηκαν στη συσκευή του Εργαστηρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Π.Θ., Σχήμα 3.1.



Εικόνα 3.1 Συσκευή οιδημέτρου

Η συσκευή μονοδιάστατης συμπίεσης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1 αποτελείται από τα εξής:

1. Ακαμπτη μεταλλική βάση που φέρει υποδοχές για την τοποθέτηση της συσκευής στερεοποίησης.
2. Συσκευή στερεοποίησης η οποία αποτελείται από τα εξής:
 - i) Δακτύλιο κοπής στον οποίο διαμορφώνεται και εσωκλείεται το δοκίμιο. Συνήθως κατασκευάζεται από ανοξείδωτο χάλυβα ή ορείχαλκο, έχει λεία εσωτερική επιφάνεια και το ένα του άκρο είναι αιχμηρό. Έχει εσωτερική διάμετρο 63,44 mm και ύψος 19,99 mm.
 - ii) Μεταλλική βάση ανθεκτική στην διάβρωση υλικού και υδατοστεγής η οποία συνδέεται εγκάρσια με έναν δακτύλιο συγκράτησης. Ο δακτύλιος συγκράτησης έχει ίδια εσωτερική διάμετρο με τον δακτύλιο του δείγματος και τοποθετείται ακριβώς από πάνω του. Για την ευθυγράμμιση αυτή, χρησιμοποιούνται τρεις κοχλίες οι οποίοι είναι αντιδιαμετρικά τοποθετημένοι και ενσωματωμένοι στην μεταλλική βάση.

- iii) Δυο πορώδεις δίσκοι από κεραμικά υλικά που επιτρέπουν την αποστράγγιση και έχουν επίπεδη άνω και κάτω επιφάνεια. Πρέπει να είναι σε θέση να αντέχουν τη μέγιστη κάθετη πίεση που ασκείται στο δείγμα. Ο άνω δίσκος θα πρέπει να έχει 0,5 mm μικρότερη διάμετρο από την εσωτερική διάμετρο του δακτυλίου, και να είναι λοξότμητος για την πρόληψη παρεμβολών. Ο κάτω δίσκος θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος για να υποστηρίξει τον δακτύλιο του δείγματος.
 - iv) Μεταλλικό καπάκι το οποίο τοποθετείται στην κορυφή και διαθέτει μια οπή στο πάνω μέρος έτσι ώστε να μπορέσει να τοποθετηθεί το στέλεχος φόρτισης.
3. Στέλεχος επιβολής του κατακόρυφου φορτίου στο δοκίμιο
 4. Μοχλοβραχίονας με λόγο μεταβίβασης 1:9, 1:10 και 1:11 στον οποίο τοποθετούνται τα νεκρά φορτία για την επιβολή της κατακόρυφης τάσης.
 5. Ρυθμιζόμενο αντίβαρο στην ακτίνα της δοκού.
 6. Βίδα υποστήριξης που βοηθάει στην εξισορρόπηση της δοκού.
 7. Κρεμάστρα βάρους για διάφορα βάρη, η οποία έχει δύο κυκλικές βάσεις. Στην πάνω βάση τοποθετούνται τα μικρά βάρη και στην κάτω τα μεγαλύτερα.
 8. Βαθμονομημένες μάζες, το ακριβές βάρος των οποίων θα πρέπει να είναι γνωστό με ακρίβεια. Όταν δεν είναι σε χρήση, φυλάσσονται προσεκτικά σε ράφι.
 9. Πλαίσιο στήριξης, στον οποίο πρέπει να βιδωθεί η συσκευή οιδημέτρου. Ο πάγκος τοποθετείται σε στερεό δάπεδο στο επίπεδο του εδάφους.
 10. Σταθερό υποστήριγμα στο άκρο της συσκευής που φέρει ειδική προσαρμογή για το μηκυσιόμετρο.
 11. Ψηφιακό μηκυσιόμετρο διαδρομής 12,5 mm και ακρίβειας 0,001 mm για τη μέτρηση της κατακόρυφης μετακίνησης της άνω πλάκας φόρτισης υποστηριζόμενης υπό ειδική ράβδο.

Τη συσκευή υποστηρίζει το καταγραφικό όργανο MPX3000 της VJTech, το οποίο είναι συνδεδεμένο με το μηκυσιόμετρο. Επίσης, είναι συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή και μέσω του προγράμματος Clisp Studio της VJTech ελέγχεται η λειτουργία της συσκευής και γίνεται η καταγραφή των μετρήσεων του μηκυσιόμετρου.

3.1.2. Βαθμονόμηση στη συσκευή οιδημέτρου

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι διαδικασίες και τα αποτελέσματα των βαθμονομήσεων του μηκυσιομέτρου και της συμπιεστότητας του συστήματος.

Συμπιεστότητα συστήματος

Η διαδικασία έχει σκοπό τον προσδιορισμό της συμπιεστότητας του συστήματος της συσκευής (πορώδεις δίσκοι, φίλτρα, καπάκι, μεταλλική βάση), ώστε να λαμβάνεται υπόψη σε κάθε δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης μόνο η πραγματική συμπίεση του εδαφικού δοκιμίου και να προσδιοριστεί το πραγματικό ύψος του.

Για τις ανάγκες των δοκιμών η διαδικασία της βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε δύο φορές. Αρχικά, μετρήθηκε η συμπιεστότητα της συσκευής πριν την εκτέλεση δοκιμών. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε δεύτερη βαθμονόμηση.

Καθαρίζεται επιμελώς ο δακτύλιος στερεοποίησης και μετράται το ύψος του με ακρίβεια 0,05 mm σε 4 αντιδιαμετρικά σημεία, η εσωτερική διάμετρος του σε δυο κάθετες διευθύνσεις με ακρίβεια 0,1 mm, και υπολογίζονται οι μέσοι όροι. Στη συνέχεια, η εσωτερική επιφάνεια του δακτυλίου καλύπτεται με μια στρώση από λάδι σιλικόνης και τοποθετείται στην κυψέλη στερεοποίησης. Η συσκευή συναρμολογείται όπως στην περίπτωση μελέτης εδαφών, με τους ίδιους πορώδεις δίσκους και τα ίδια φίλτρα, με τη διαφορά πως στη θέση του εδαφικού δοκιμίου τοποθετείται μεταλλικός (ανοξειδωτός) συμπαγής κύλινδρος ίδιων διαστάσεων. Στην κυψέλη δεν

τοποθετείται νερό. Εφαρμόζονται τα βήματα φόρτισης και αποφόρτισης (παρόμοια με τη δοκιμή σε εδάφη) μέχρι το μέγιστο φορτίο της συσκευής. Κάθε βαθμίδα φόρτισης και αποφόρτισης παραμένει σταθερή όσο χρόνο απαιτείται για την καταγραφή της ένδειξης της συμπίεσης στο μηκυνσιόμετρο. Οι παραμορφώσεις αφαιρούνται από τις παραμορφώσεις του εδάφους στις αντίστοιχες βαθμίδες φόρτισης-αποφόρτισης.

Βαθμονόμηση μηκυνσιόμετρου

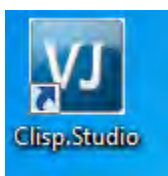
Για την βαθμονόμηση του μηκυνσιόμετρου της συσκευής χρησιμοποιούνται πρότυπα πλακίδια με γνωστό πάχος. Γίνεται σύγκριση της ένδειξης του μηκυνσιόμετρου με το ονομαστικό πάχος των πλακιδίων.

3.1.3. Μετρητικό και καταγραφικό σύστημα

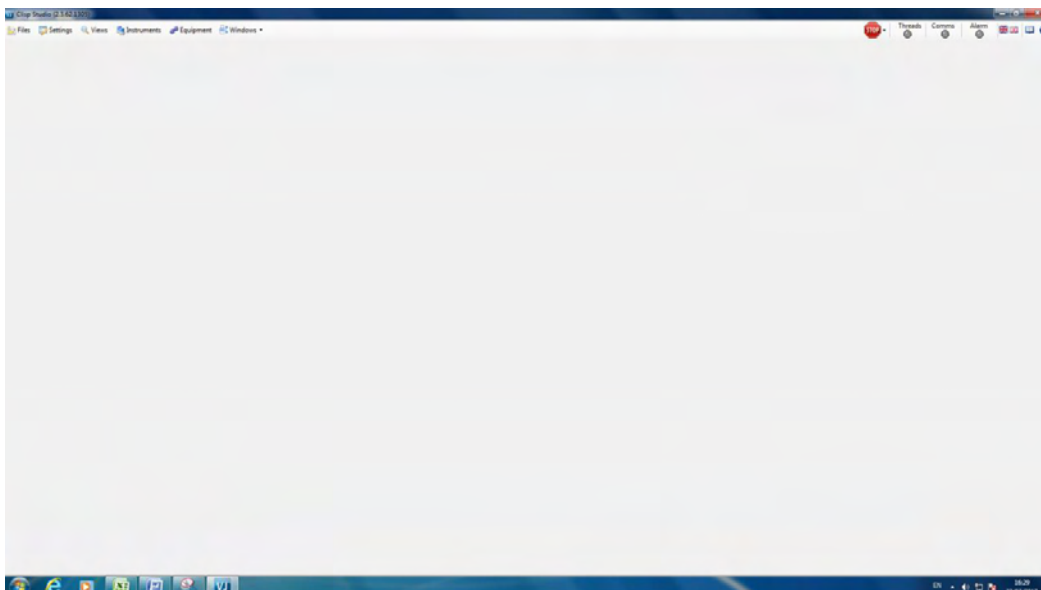
Για τη μέτρηση της κατακόρυφης μετακίνησης της άνω πλάκα φόρτισης του δοκιμίου χρησιμοποιείται ψηφιακό μηκυνσιόμετρο. Η καταγραφή των μετρήσεων γίνεται με το ειδικό καταγραφικό όργανο MPX3000 της VJTech. Το MPX3000 κατόπιν σύνδεσης του με τον ηλεκτρικό υπολογιστή (PC) παρέχει τη δυνατότητα συνεχής καταγραφής με το χρόνο έως 32 αναλογικών καναλιών και επιπλέον 32 αναλογικών ή και ψηφιακών καναλιών. Οι μετρήσεις γίνονται στο καταγραφικό και στη συνέχεια μεταφέρονται στον υπολογιστή με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού του Clisp Studio της VJTech. Η επεξεργασία των μετρήσεων γίνεται με την βοήθεια ειδικού προγράμματος λογισμικού επεξεργασίας τύπου Excel.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής και αφορά στην καταγραφή του μηκυνσιόμετρου, που είναι συνδεδεμένο στο κανάλι CH44 του MPX3000, σε κάθε στάδιο φόρτισης της συσκευής.

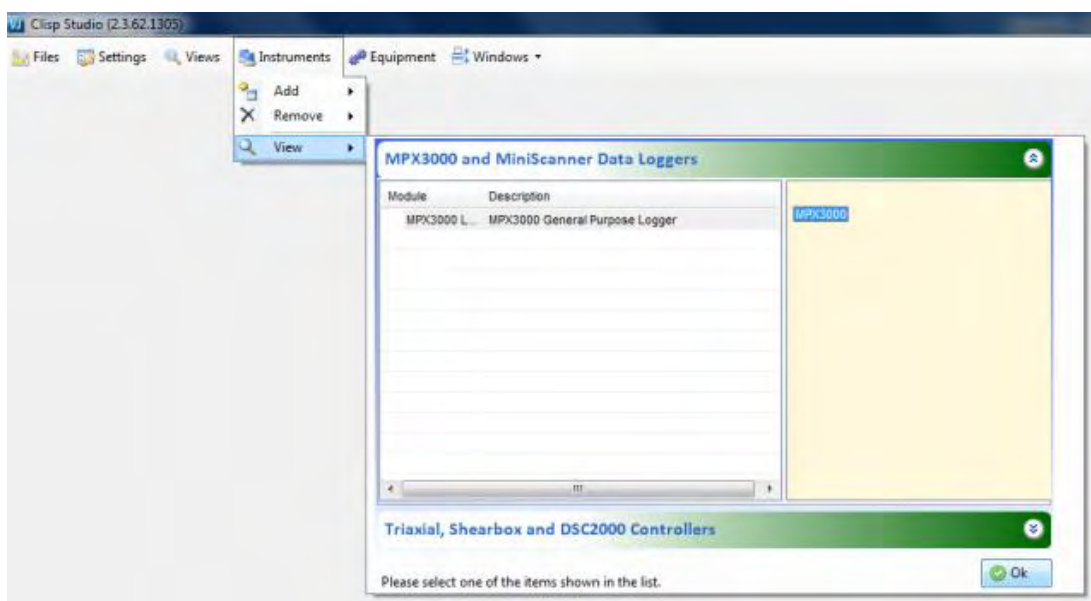
Για την εκκίνηση του προγράμματος επιλέγουμε το παρακάτω εικονίδιο που βρίσκεται στην επιφάνεια εργασίας.



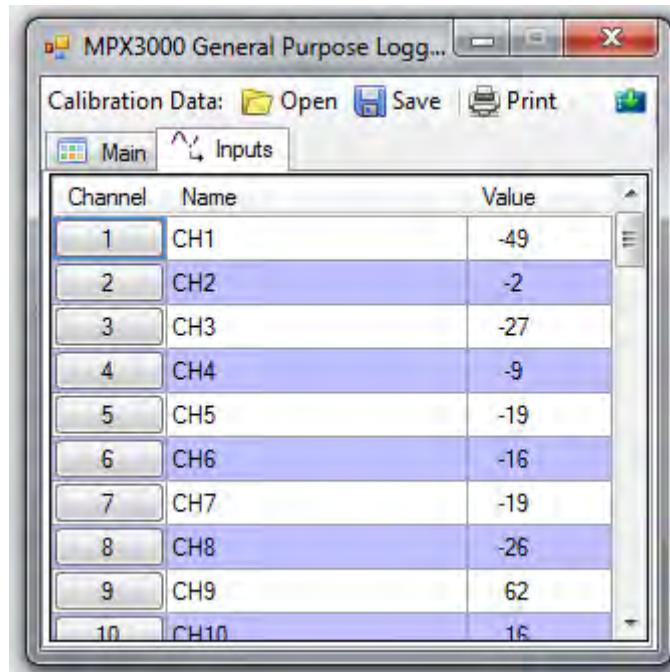
Στη συνέχεια ανοίγει το παρακάτω παράθυρο.



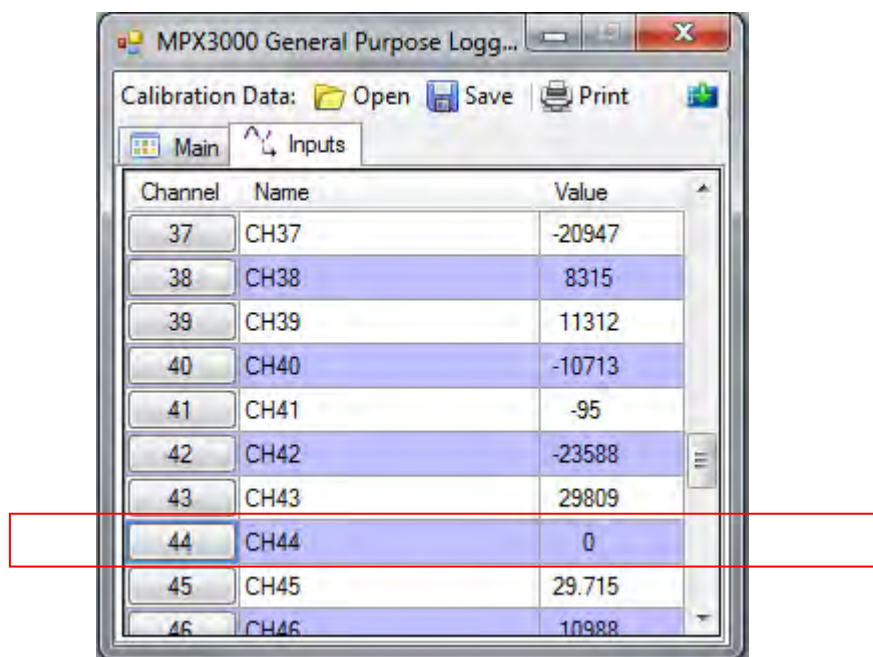
Ακολουθεί το άνοιγμα του καταγραφικού (μέσω της επιλογής Instruments→View) το οποίο έχει εισαχθεί από άλλη δοκιμή.



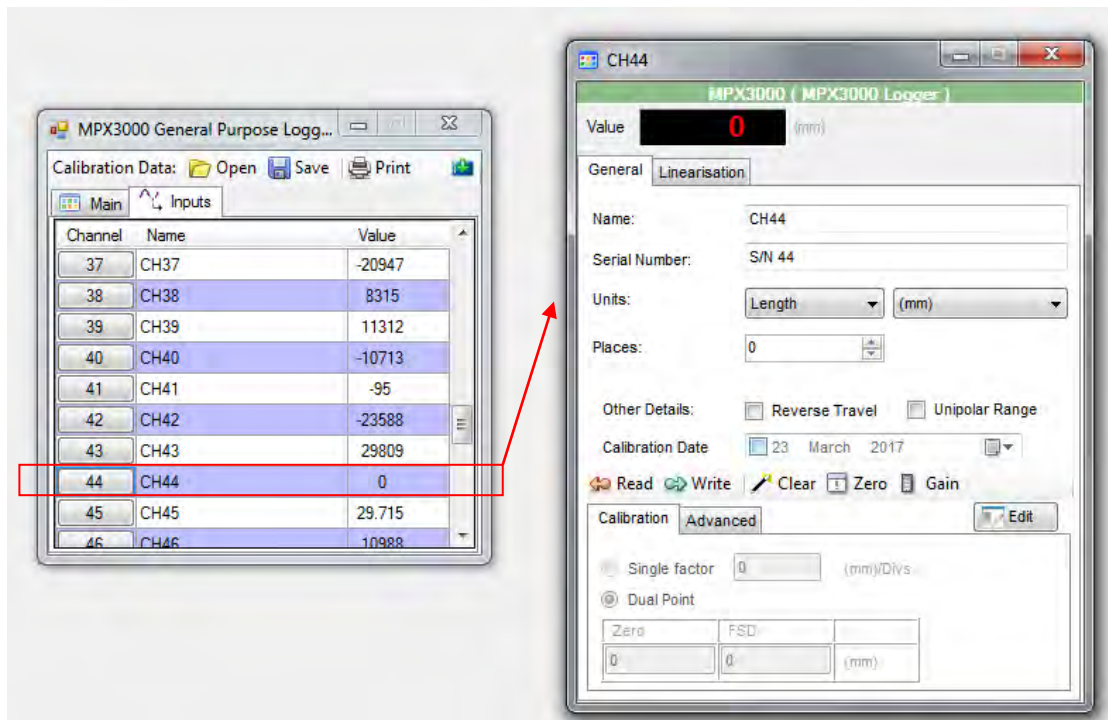
Με την εισαγωγή του καταγραφικού ανοίγει το αντίστοιχο παράθυρο.



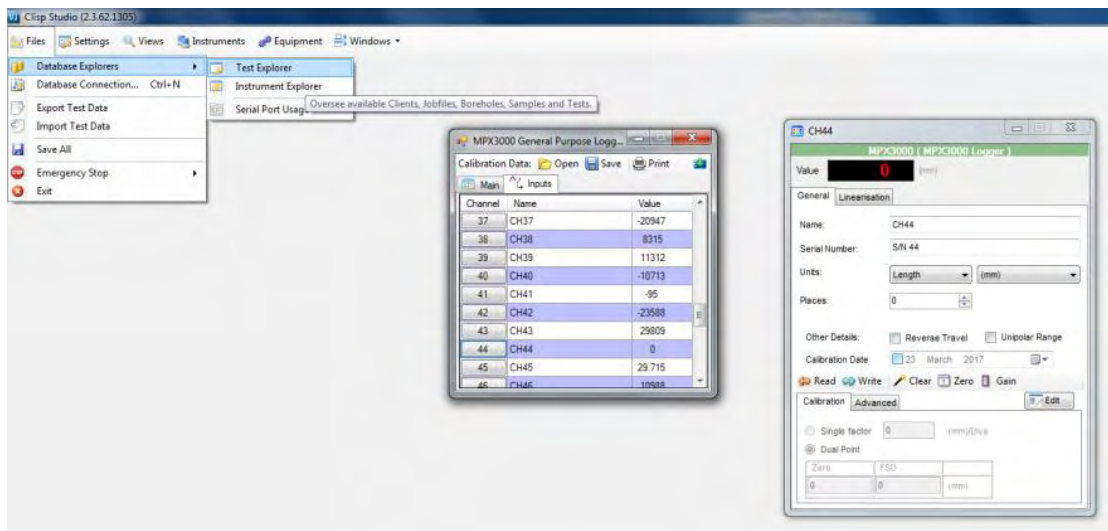
Από το παράθυρο του καταγραφικού (επιλογή Inputs) επιλέγεται το κανάλι που χρησιμοποιείται , το νούμερο 44.



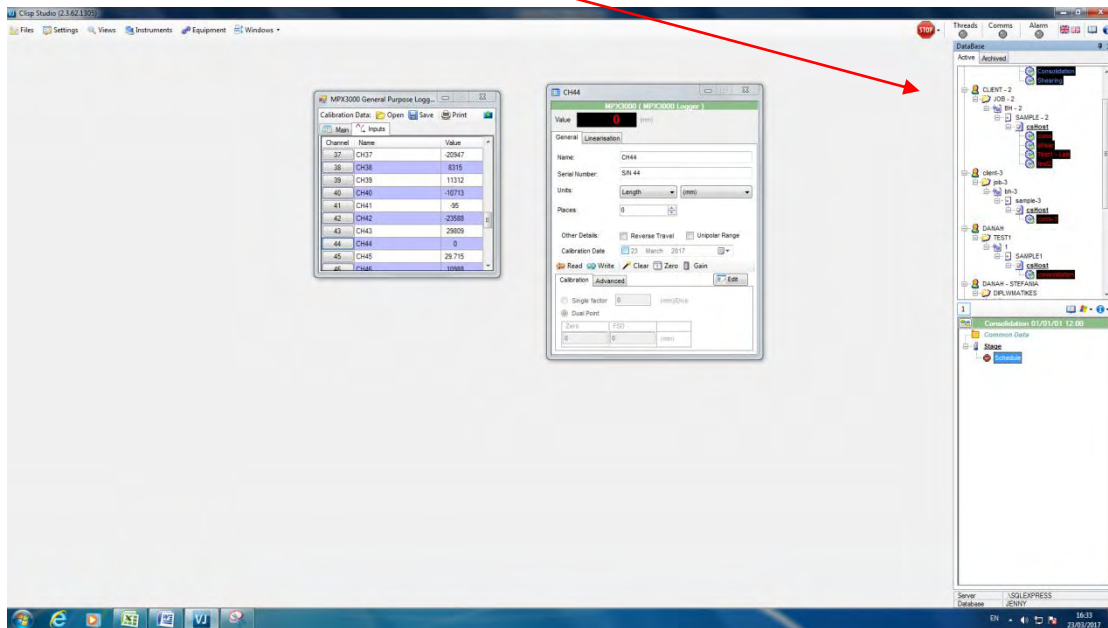
Έπειτα ανοίγει ένα παράθυρο στο οποίο παρουσιάζονται οι παράμετροι του καναλιού επιλογής.



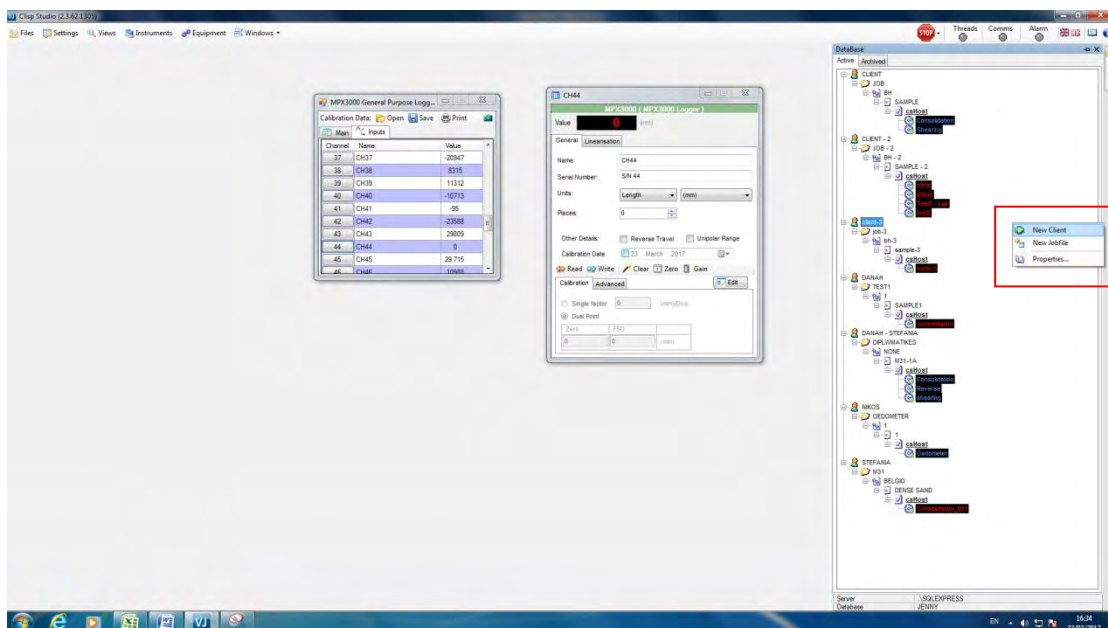
Για την δημιουργία ενός test, δηλαδή μιας δοκιμής, γίνονται τα ακόλουθα.(Files→ Database Explorers→ Test Explorer).



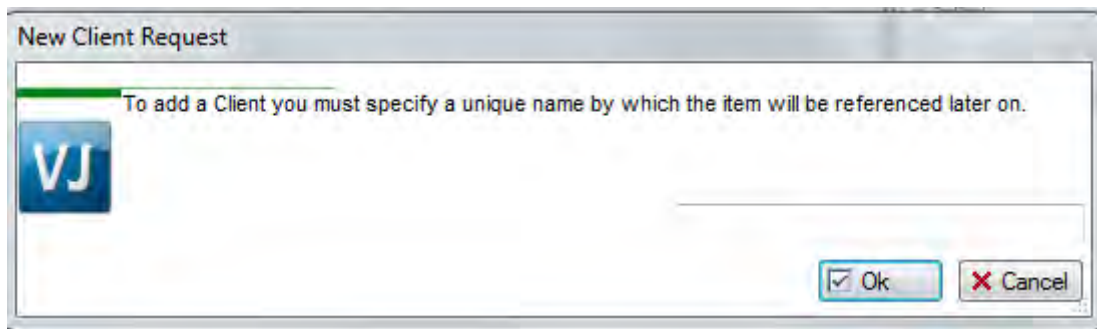
Ως αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας ανοίγουν τα παράθυρα δεξιά της οθόνης που παρουσιάζουν τα test που ήδη υπάρχουν.



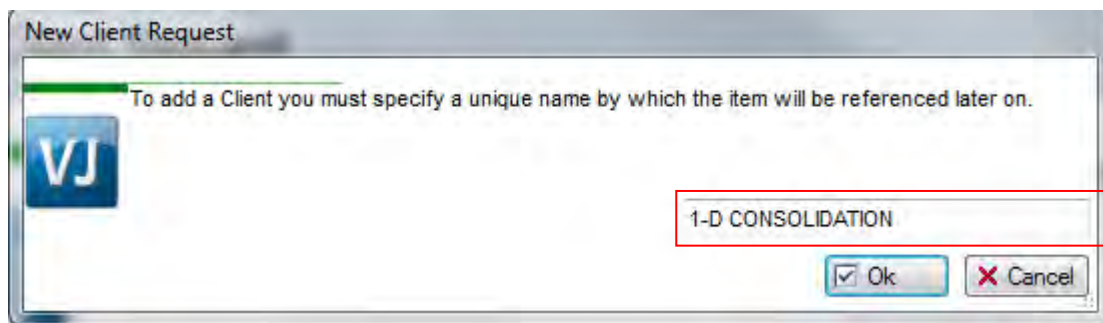
Για την δημιουργία ενός νέου test κάνουμε δεξί κλικ στην περιοχή active και εμφανίζεται η επιλογή New Client.



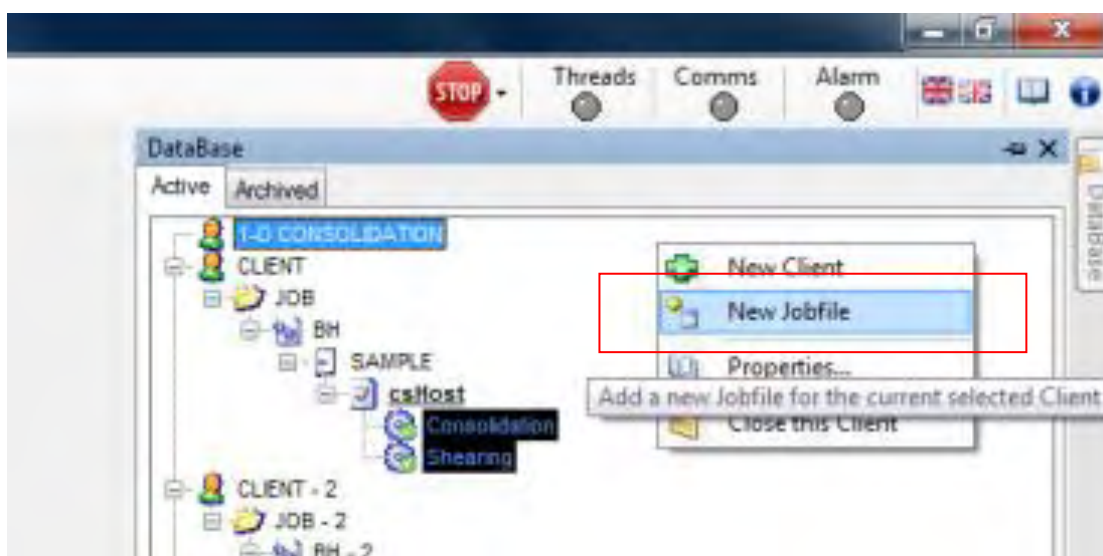
Εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο στο οποίο ζητά τα στοιχεία του πελάτη για τον οποίο γίνεται η δοκιμή.



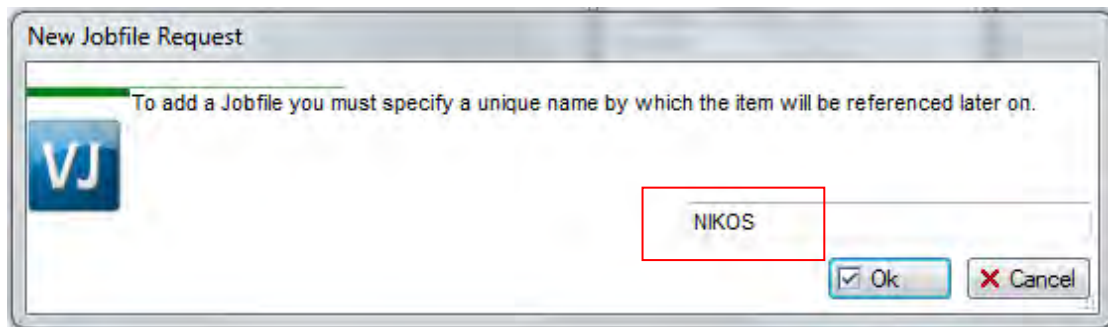
Εισάγεται ως όνομα 1-D CONSOLIDATION.



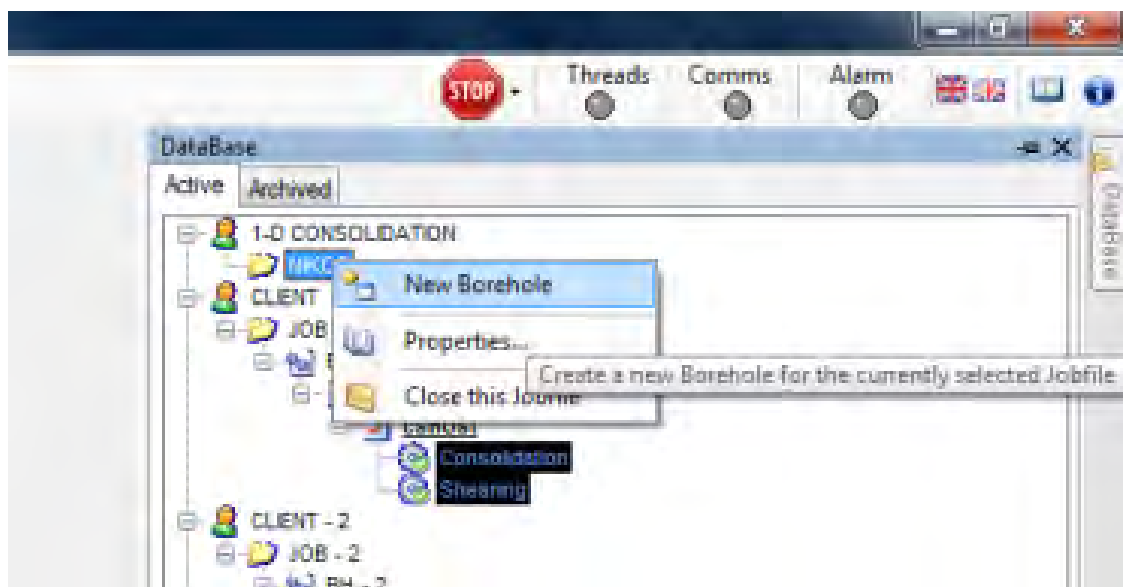
Το επόμενο βήμα είναι ο τίτλος του έργου. Με δεξί κλικ πάνω στο 1-D CONSOLIDATION που μόλις δημιουργήθηκε εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο από όπου και επιλέγετε το New Jobfile.



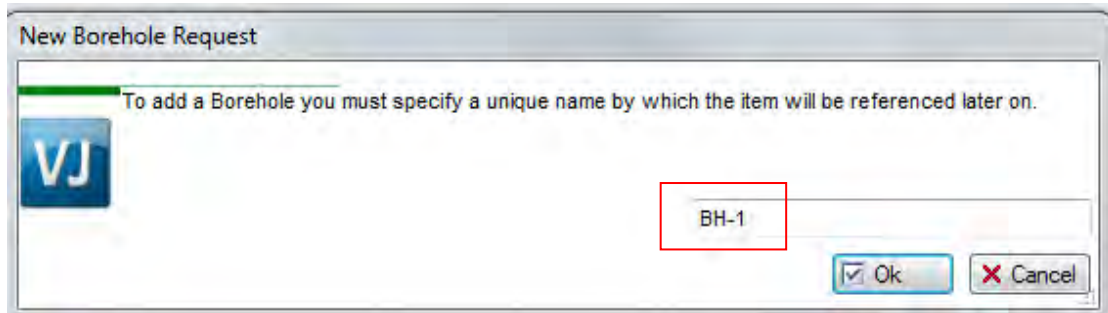
Εισάγεται το όνομα του έργου.



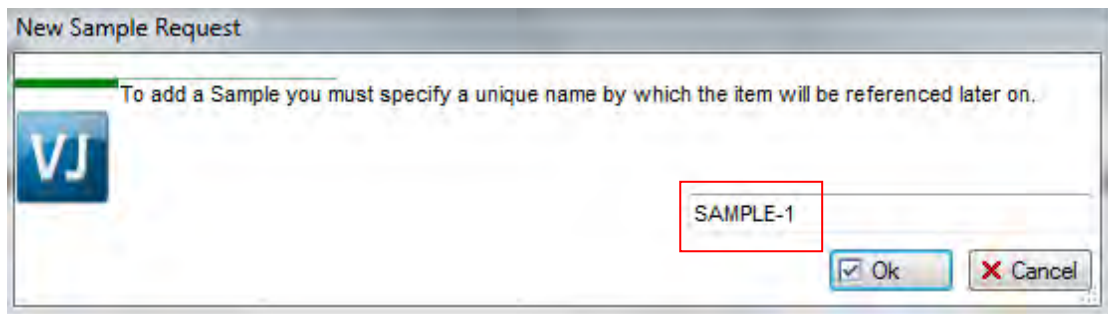
Στην περιοχή Active και κάτω από τον πελάτη εμφανίζεται το έργο που εισήχθη. Έπειτα εισάγονται τα στοιχεία της γεώτρησης από την οποία προήλθε το δείγμα το οποίο θα γίνει η δοκιμή. Με δεξί κλικ πάνω στον Job που μόλις δημιουργήθηκε εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο από όπου και επιλέγετε το New Borehole.



Δίνεται το όνομα της γεώτρησης.

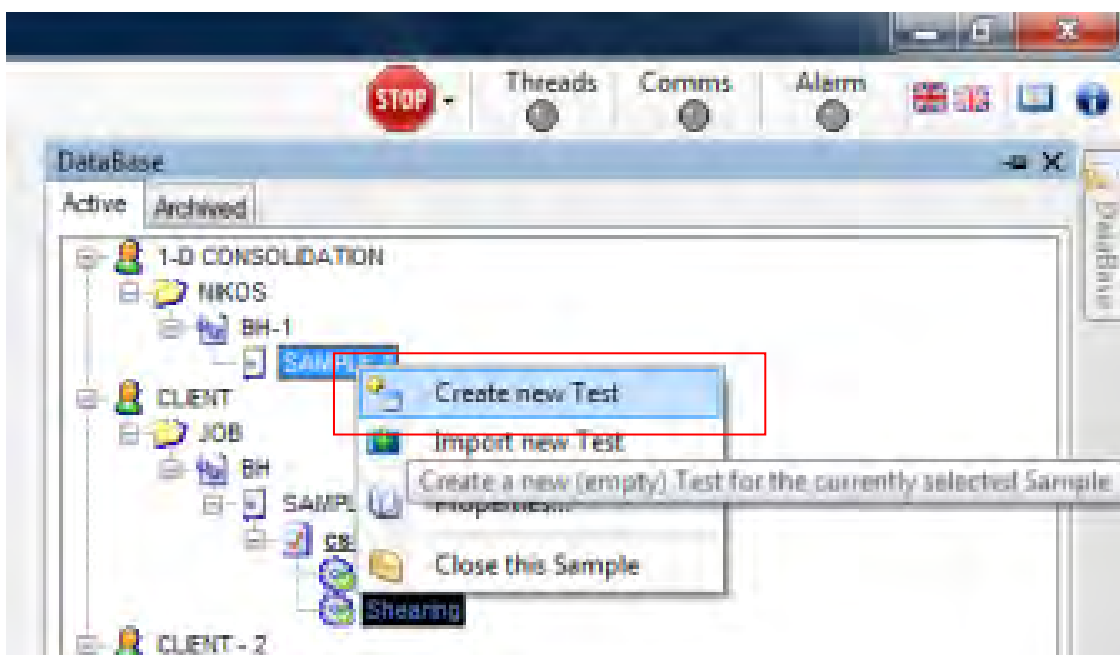


Στην περιοχή Active και κάτω από το έργο εμφανίζεται η γεώτρηση που δημιουργήθηκε. Με δεξί κλικ πάνω στην Borehole εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο από όπου και επιλέγεται το New Sample. Εδώ εισάγεται το όνομα και τα στοιχεία του δείγματος στο οποίο θα γίνει η δοκιμή.

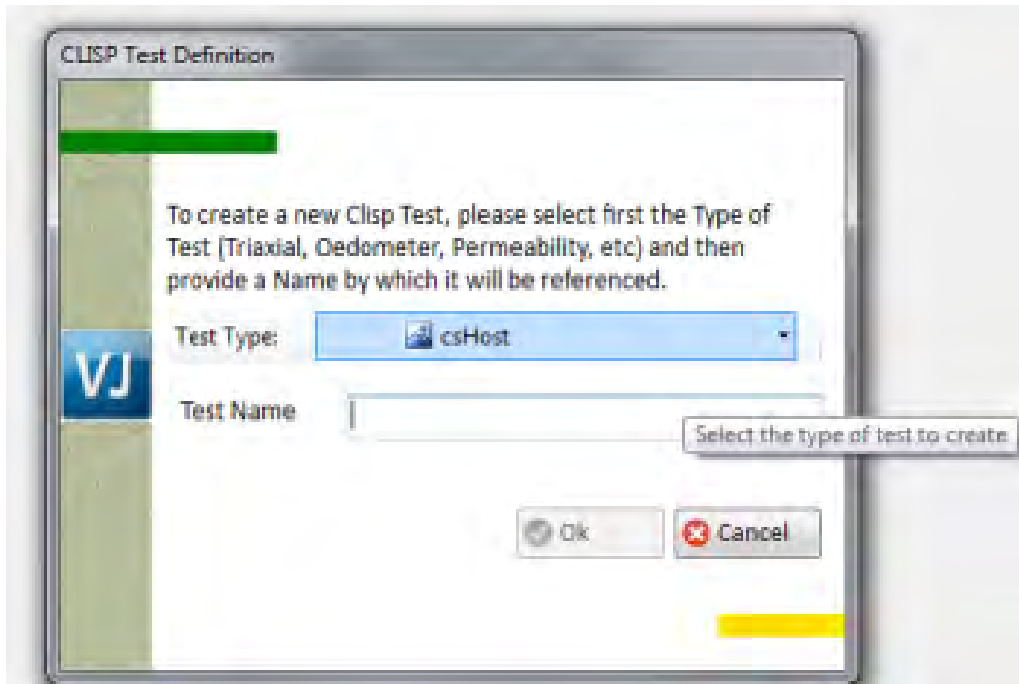


Με δεξί κλικ πάνω στο Sample που μόλις δημιουργήσαμε εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο από όπου και επιλέγουμε το Create New Test.

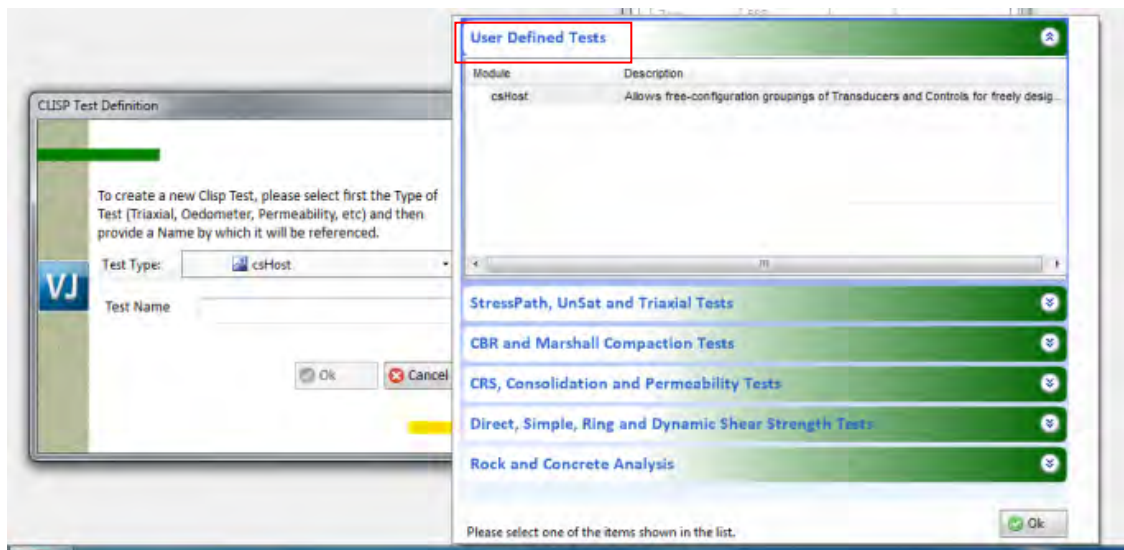
ΠΡΟΣΟΧΗ στο όνομα του test. Σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να είναι ίδιο με κάποιο όνομα ενός άλλου test ακόμη και αν βρίσκεται σε άλλο client.



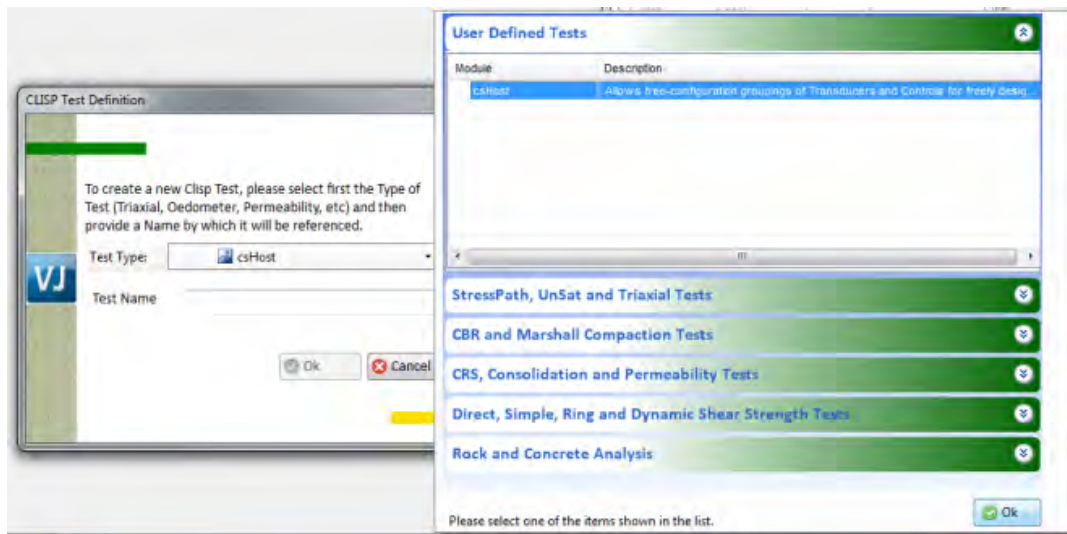
Εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο.



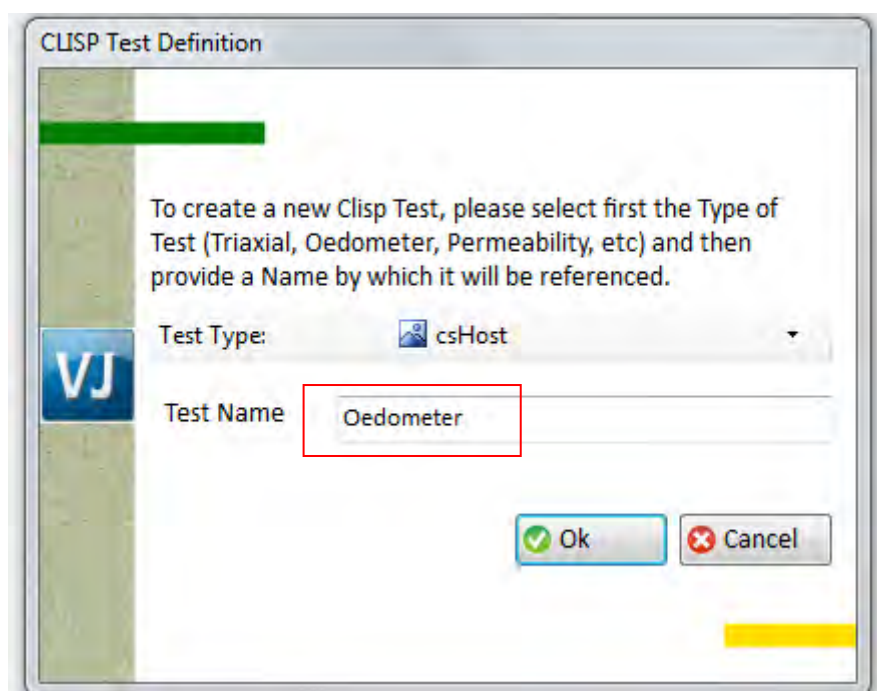
Στην επιλογή Test Type επιλέγεται το User Defined Tests.



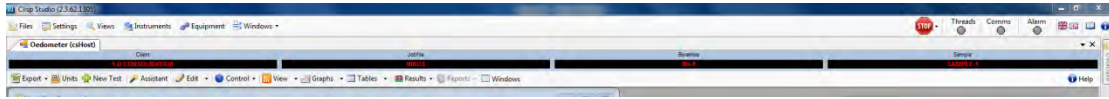
Από εκεί επιλέγεται το csHost.



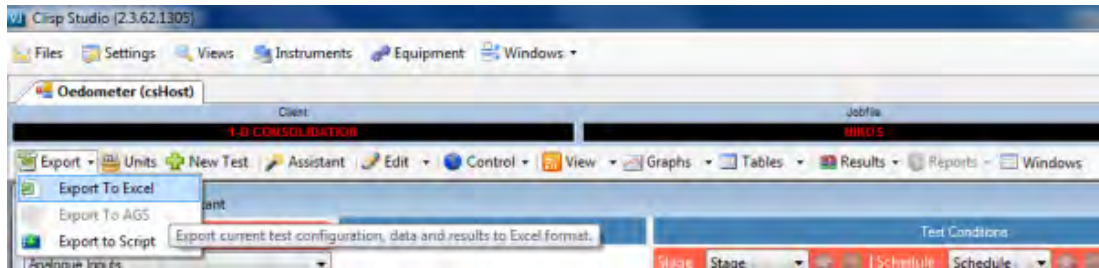
Μετά δίνεται το όνομα της δοκιμής.



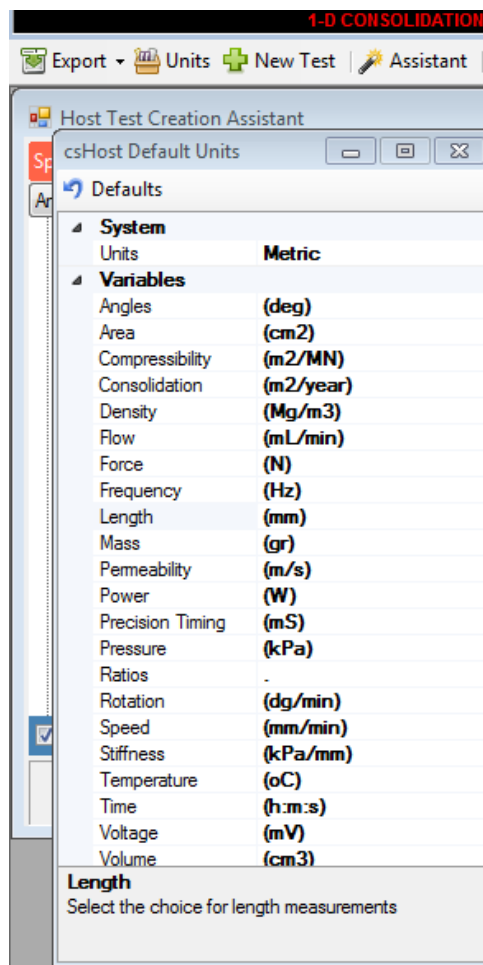
Εμφανίζεται η παρακάτω οθόνη.



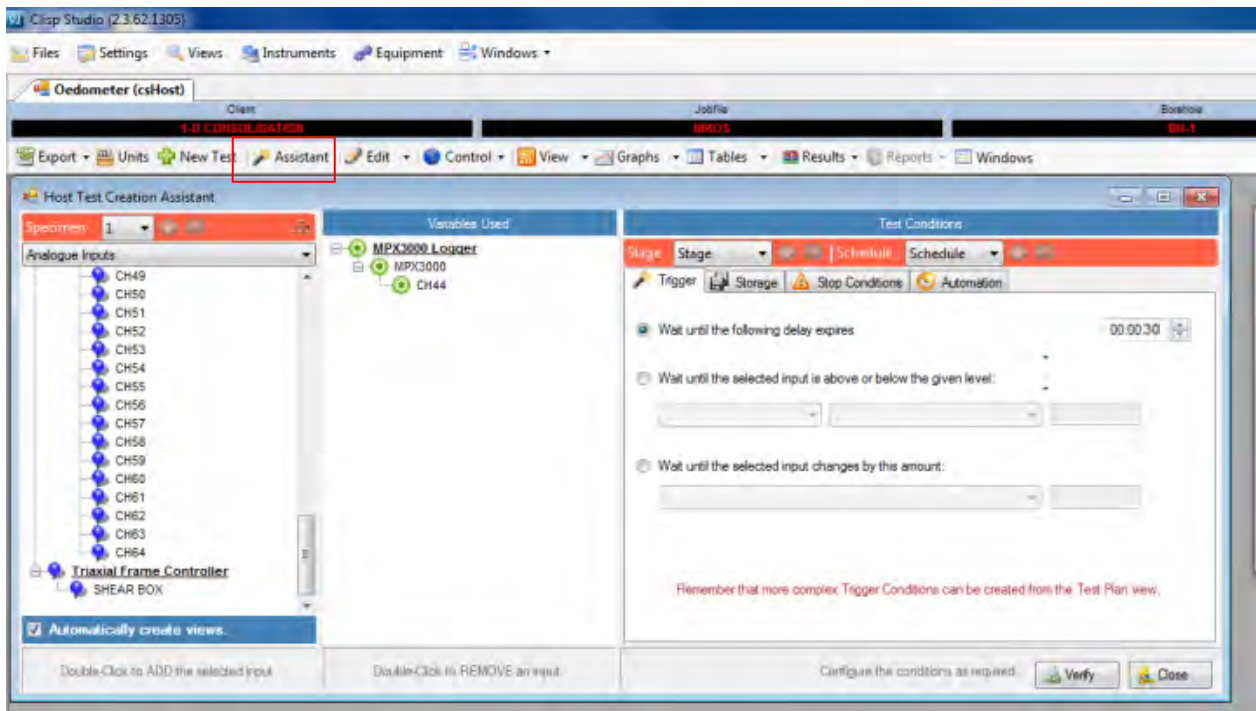
Στο παράθυρο αυτό η επιλογή Export δίνει τη δυνατότητα εξαγωγής των καταγραφών σε αρχείο excel. (Export→ Export To Excel).



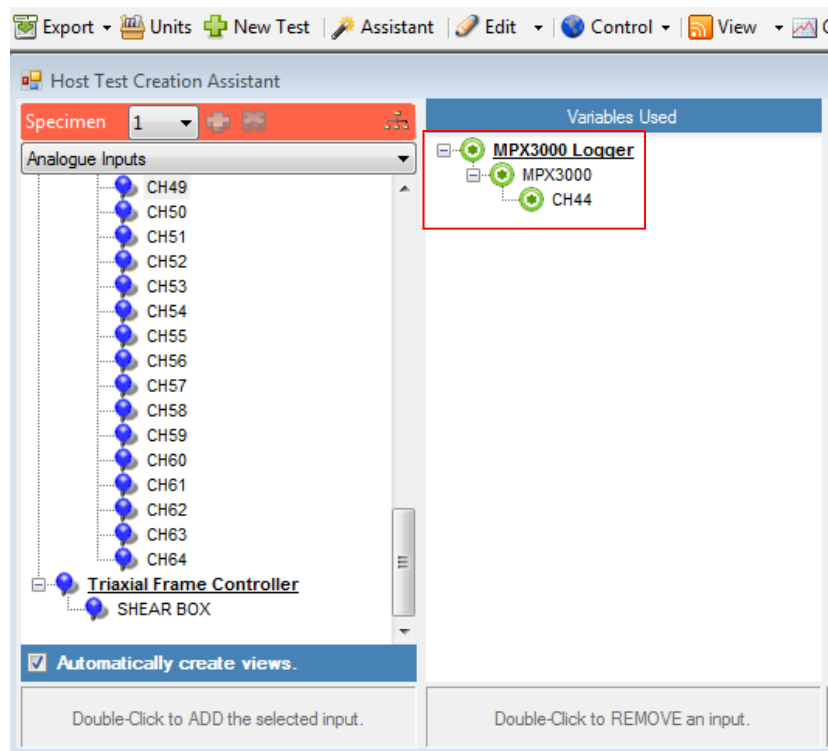
Η επιλογή Units καθορίζει τις μονάδες των μετρήσεων. Επιλέγεται length.



Με την επιλογή Assistant εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο.

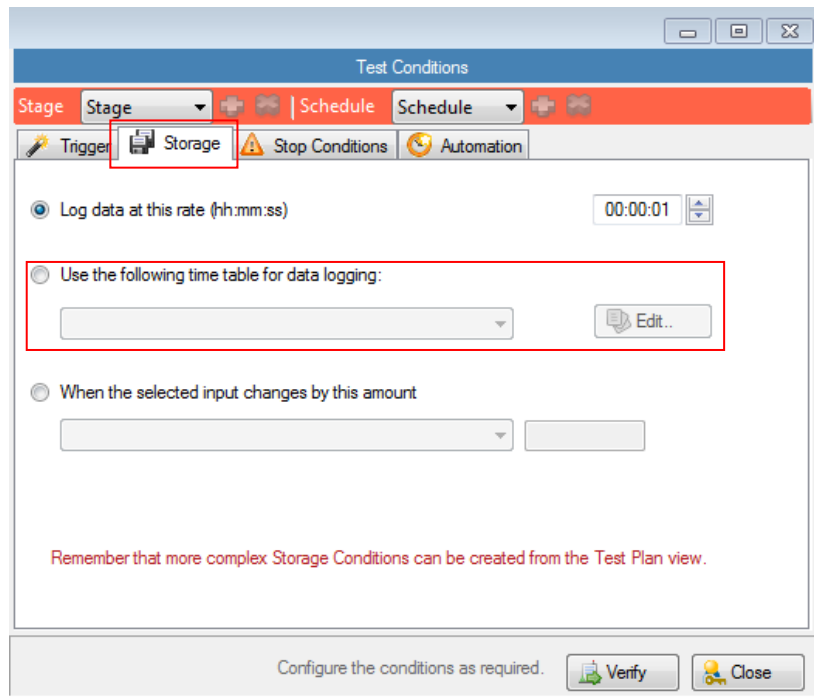


Στο αριστερό μέρος της οθόνης με διπλό κλικ πάνω στο κανάλι του αισθητήρα μήκους της δοκιμής οιδημέτρου, δηλαδή το CH44, εισάγεται το κανάλι στο δεξιό παράθυρο για την καταγραφή των μετρήσεων.

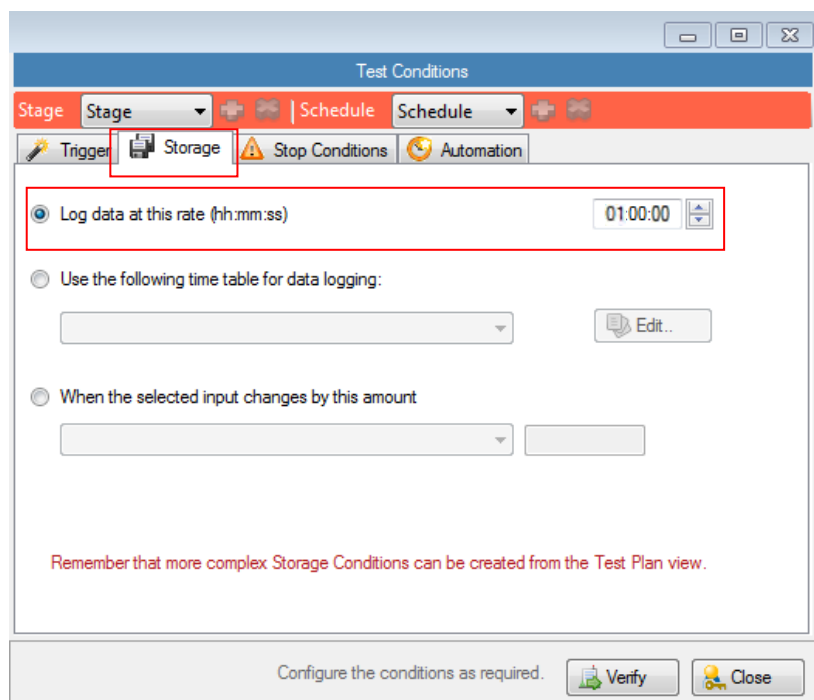


Επιλέγεται το Trigger, δηλαδή η καθυστέρηση μεταξύ της εντολής Run και της έναρξης της καταγραφής του αισθητήρα. Εδώ επιλέγεται καθυστέρηση 30 δευτερολέπτων, χρόνος επαρκής για την ενεργοποίηση της εντολής Run και την τοποθέτηση του φορτίου στερεοποίησης στο δοκίμιο.

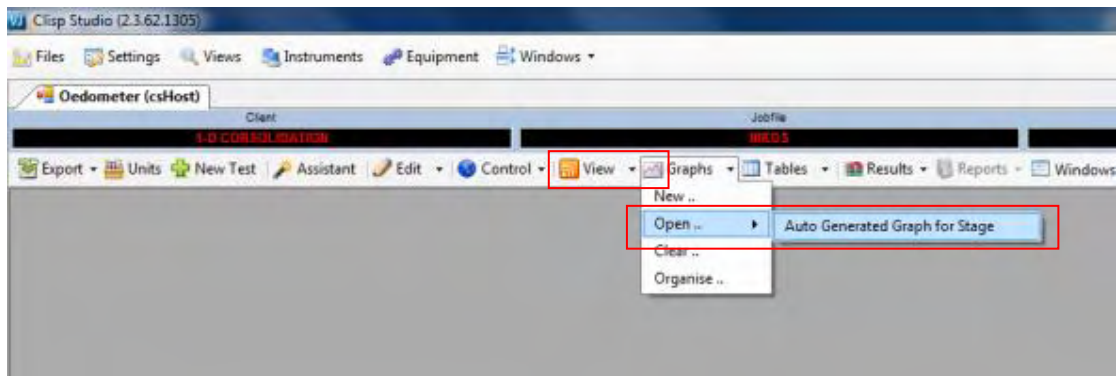
Ορίζεται η συχνότητα λήψης δεδομένων. Με την επιλογή Edit ορίζουμε την εξής συχνότητα: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 750, 900, 1050, 1200, 1500, 1800, 2400, 3000, 3600 sec.



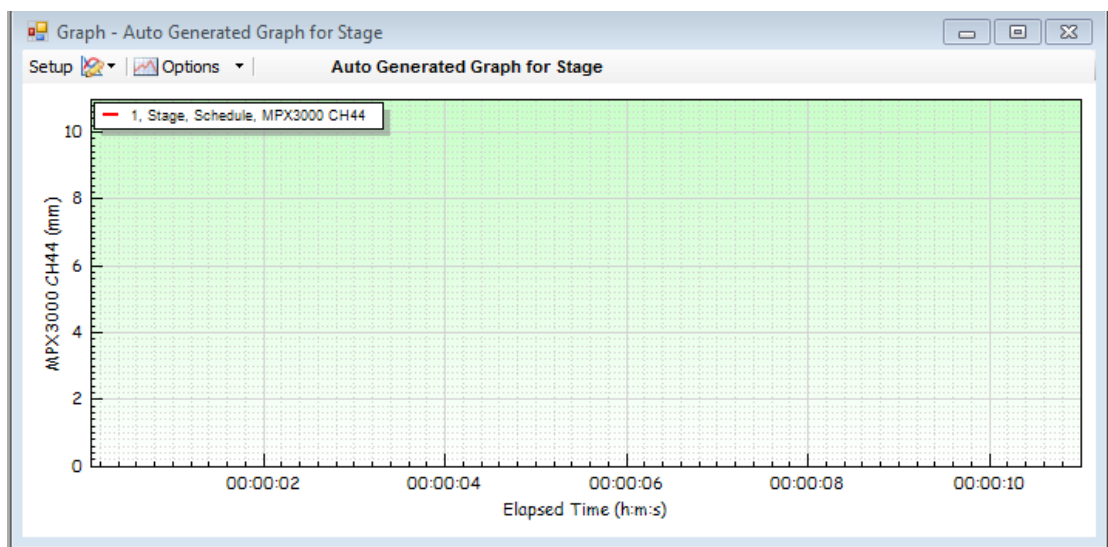
Μετά την ολοκλήρωση λήψης δεδομένων στη μια ώρα ορίζεται νέα συχνότητα λήψης δεδομένων, ανά 1 ώρα, με την επιλογή Log data at this rate.



Για την παρουσίαση γραφημάτων των δεδομένων των καταγραφών ενός test επιλέγεται η παρακάτω διαδικασία

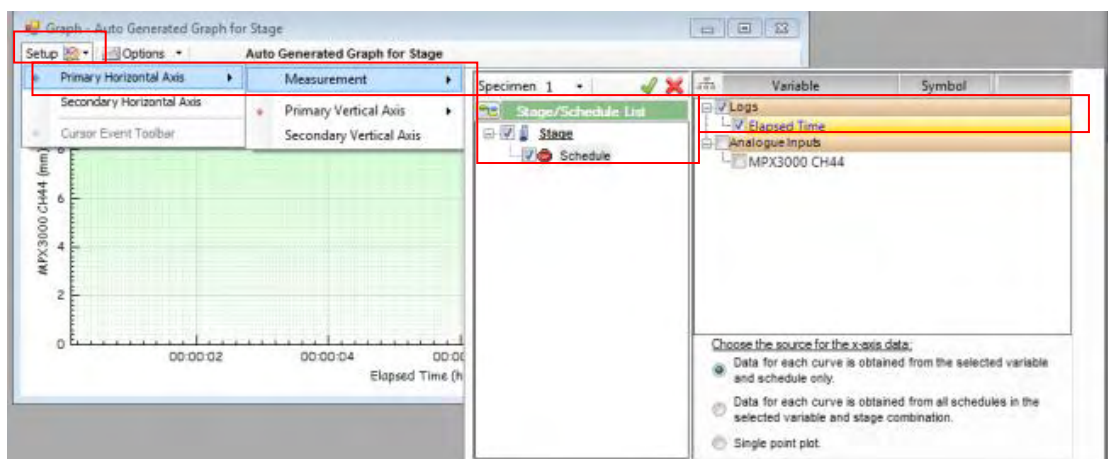


Και έτσι ανοίγει το παρακάτω γράφημα.

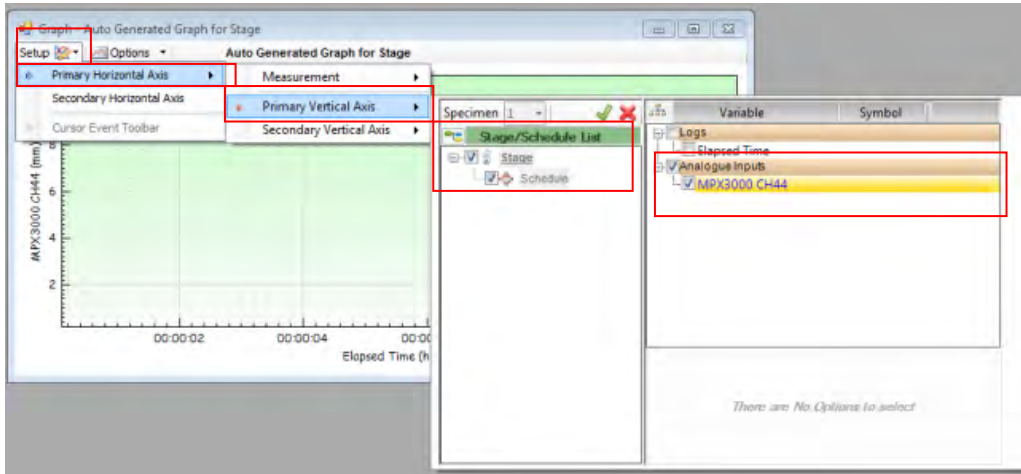


Για την τροποποίηση των αξόνων του γραφήματος και τον καθορισμό των αισθητήρων των οποίων τα δεδομένα θα παρουσιαστούν ακολουθούνται τα εξής βήματα:

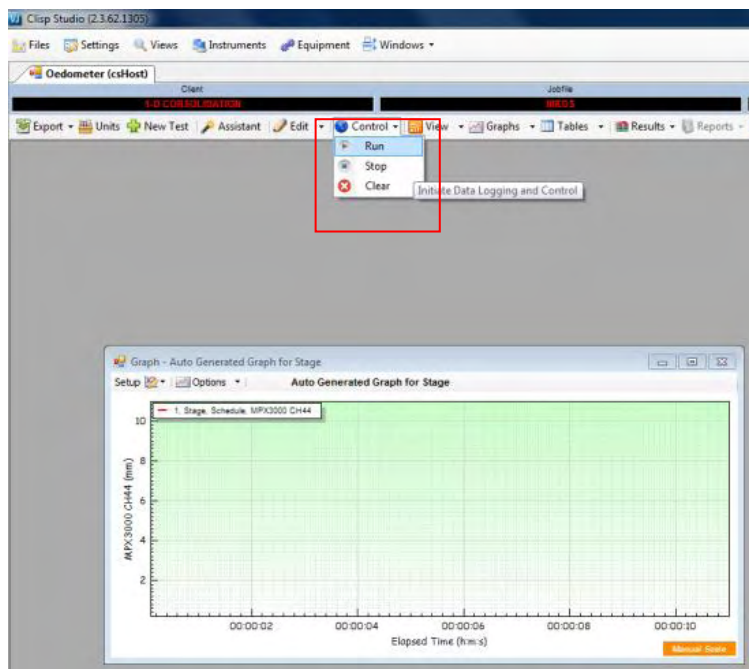
Για τον οριζόντιο άξονα



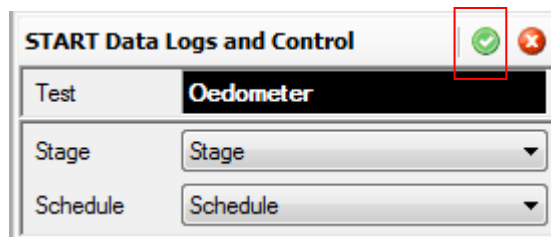
Για τον κατακόρυφο άξονα



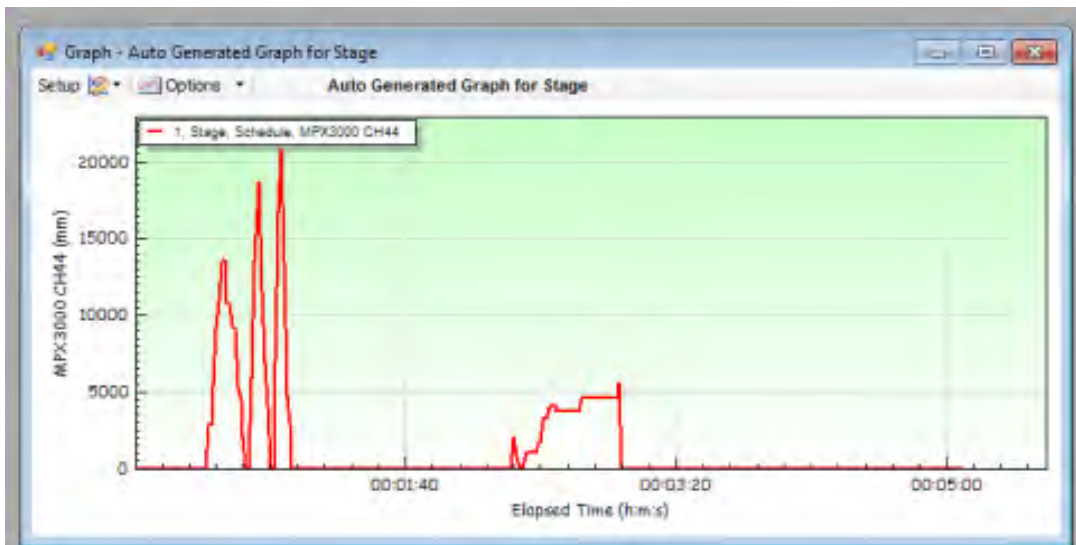
Για την έναρξη της καταγραφής της στερεοποίησης του δοκιμίου επιλέγουμε Control→Run.



ΠΡΟΣΟΧΗ! Επιλέγεται το τικ για να ξεκινήσει η καταγραφή.



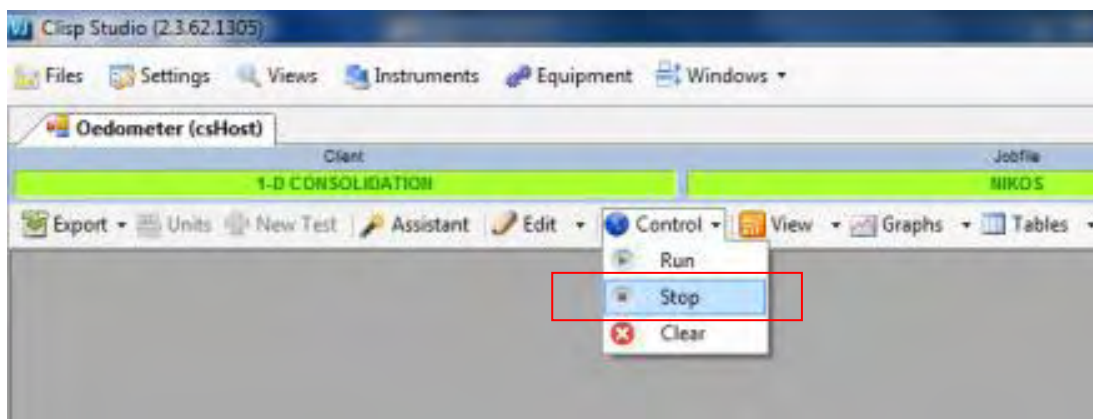
Προσοχή , η καταγραφή θα ξεκινήσει 30 sec μετά την επιλογή Run. Στο διάγραμμα που επιλέχθηκε προηγουμένως παρουσιάζονται οι καταγραφές του αισθητήρα CH44 με το χρόνο.



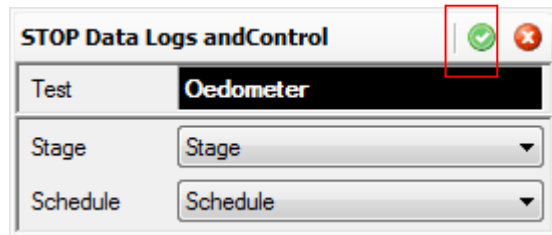
ΠΡΟΣΟΧΗ!!!

Σε όλο το διάστημα της καταγραφής ο υπολογιστής και η οθόνη θα είναι ανοιχτά. Επίσης, ανοιχτή θα είναι και η εφαρμογή Test conditions: storage.

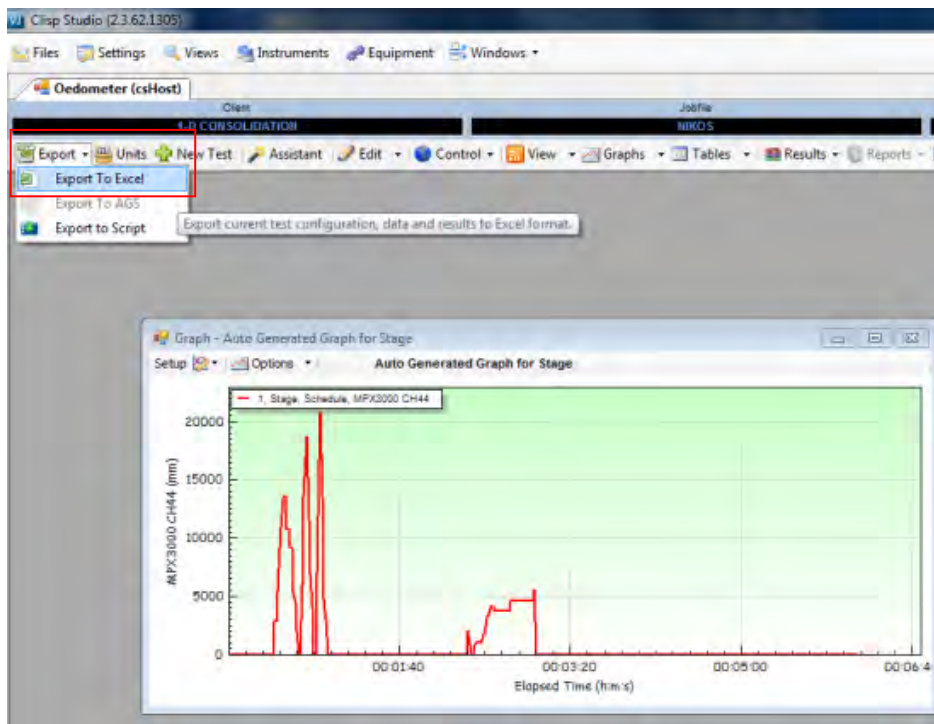
Στη συνέχεια επιλέγεται η παύση της καταγραφής μέσω της επιλογής Control→Stop.



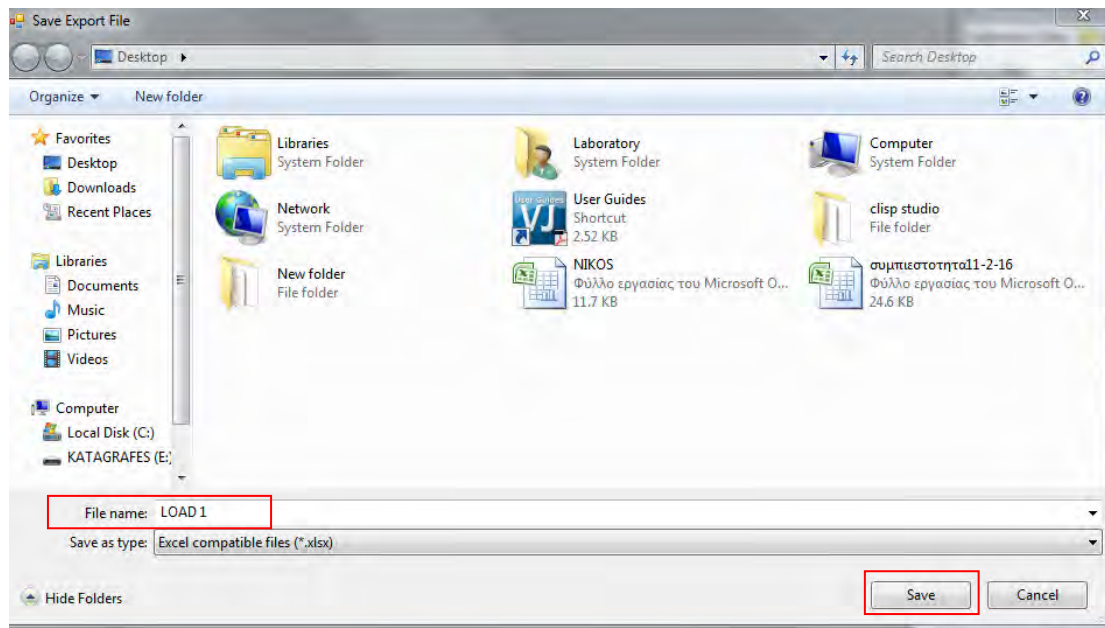
ΠΡΟΣΟΧΗ! Επιλέγεται το τικ για να σταματήσει η καταγραφή.



Η αποθήκευση των δεδομένων γίνεται ως εξής:



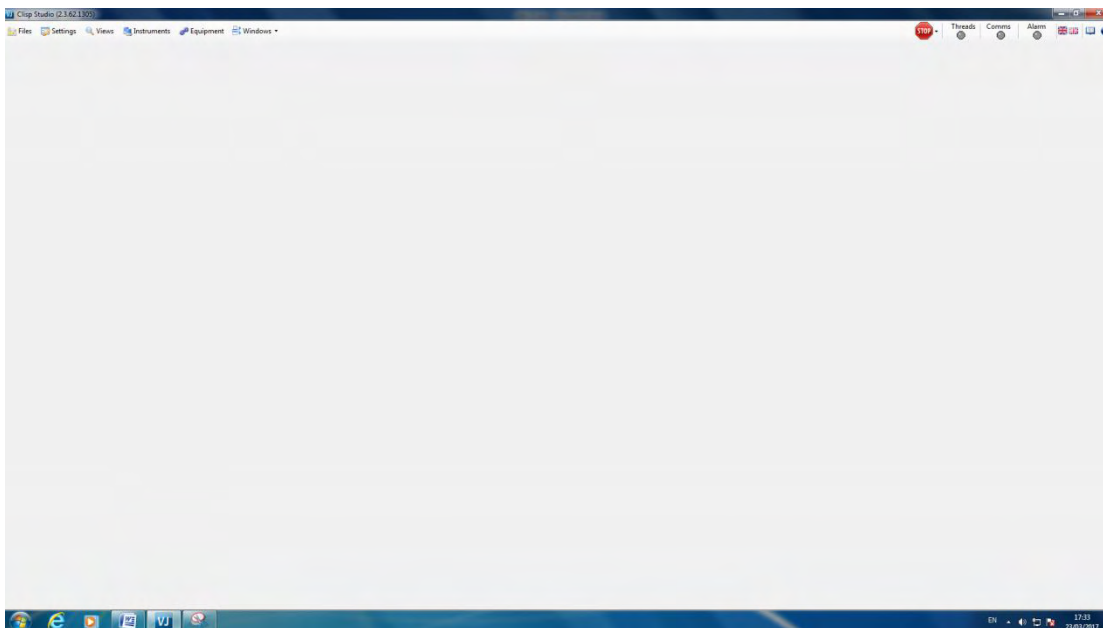
Αποθηκεύονται σε ένα αρχείο του excel. Δίνεται το όνομα του αρχείου.



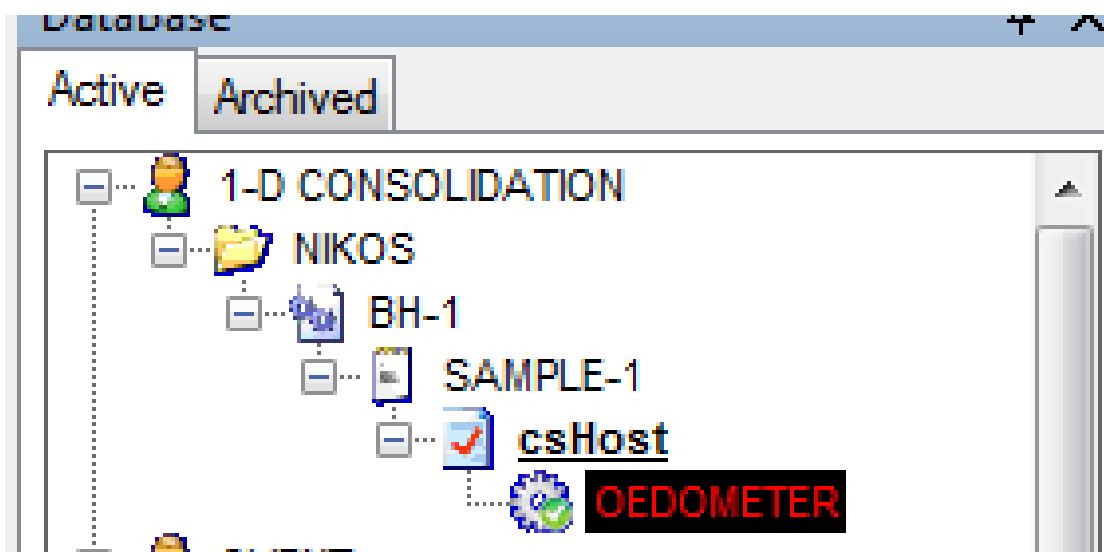
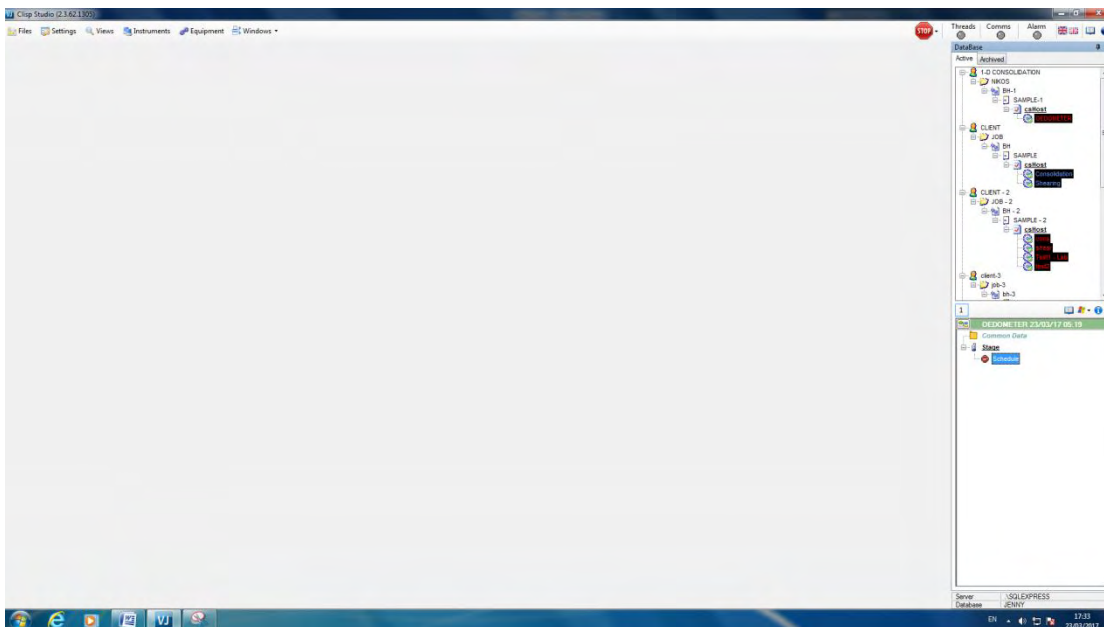
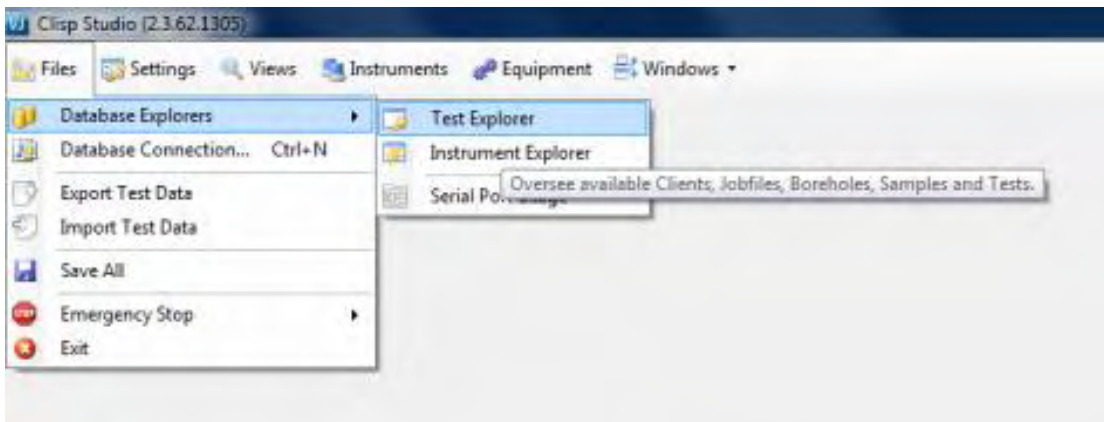
Γίνεται έλεγχος στο αρχείο που σώθηκε αν έχει γίνει σωστή καταγραφή δεδομένων.

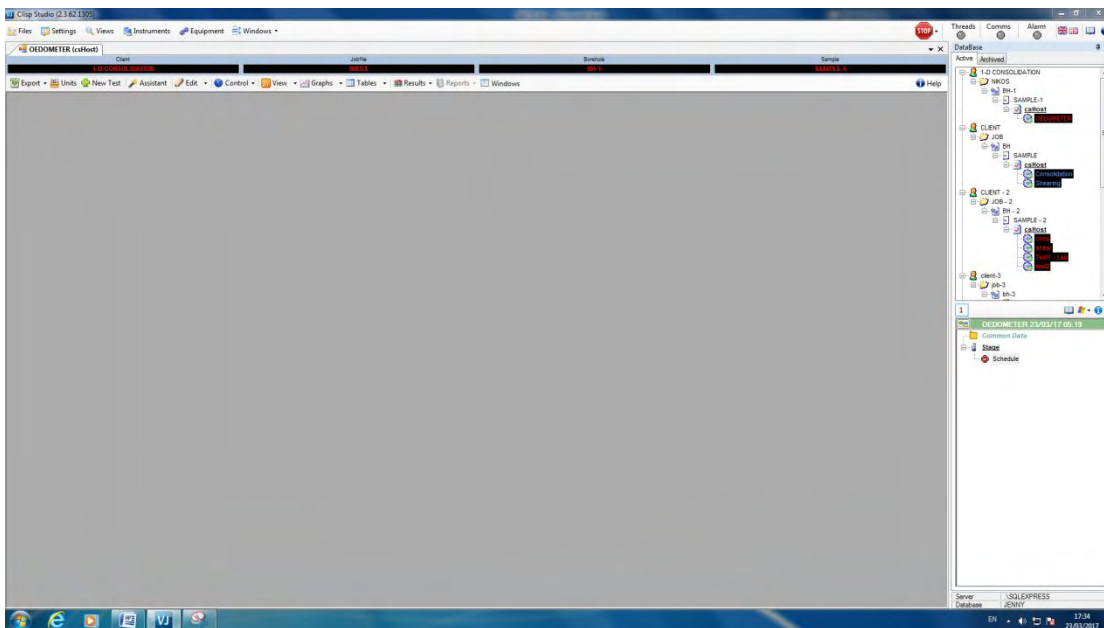
Σε κάθε επόμενη βαθμίδα φόρτισης ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Ανοίγει το πρόγραμμα.

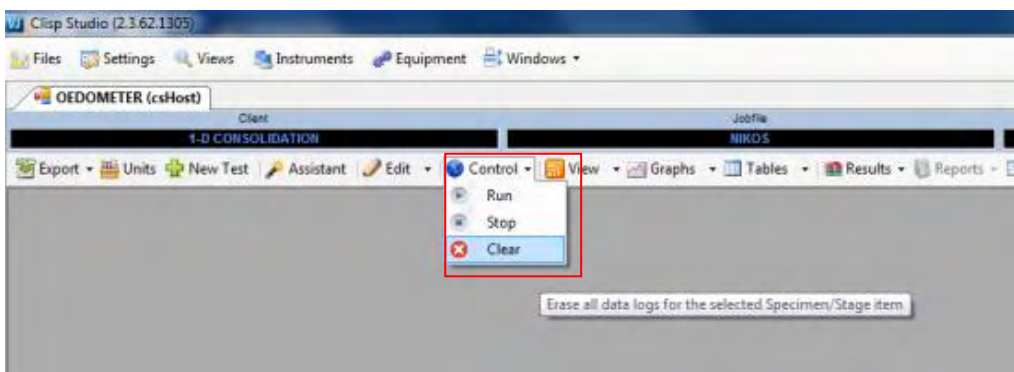


- Ανοίγει το test.

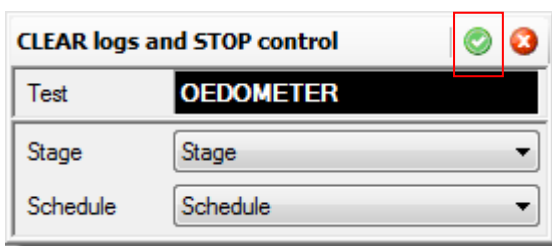




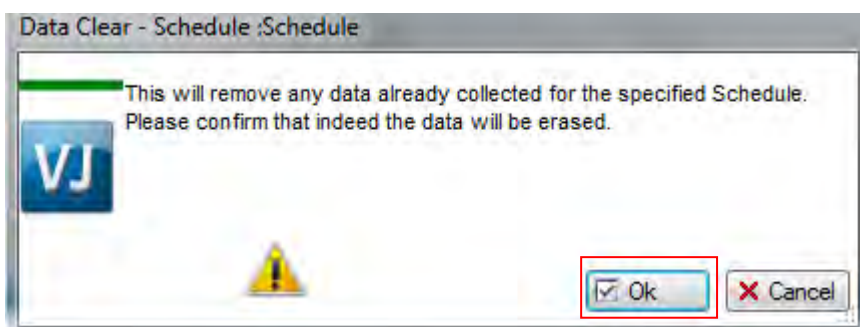
- Γίνεται εκκαθάριση των δεδομένων μέσω της επιλογής Control→Clear.



- Επιλέγεται το tick για να γίνει η εκκαθάριση.



- Επιλέγεται το Ok.



- Τέλος γίνεται η έναρξη της καταγραφής.

3.1.4. Προετοιμασία δοκιμίου

Το μέγεθος των δειγματοληπτικών σωλήνων του εδάφους καθορίζει και το μέγεθος του δακτυλίου στερεοποίησης που χρησιμοποιείται. Η εσωτερική διάμετρος του δακτυλίου στην περίπτωση λεπτόκοκκων ιλύων και αργιλικών εδαφών πρέπει να είναι τουλάχιστον 6mm μικρότερη του αδιατάρακτου εδαφικού σωλήνα ώστε να υπάρχει περιθώριο 3mm περιμετρικά του δείγματος.

Γενικά η εσωτερική διάμετρος του δακτυλίου πρέπει να κυμαίνεται μεταξύ 50mm και 105mm, και το ύψος του να μην είναι της τάξης των 18mm και μεγαλύτερο από 0,4 φορές την εσωτερική του διάμετρο ώστε το δείγμα να είναι αντιπροσωπευτικό του εδάφους αλλά συγχρόνως να περιορίζεται η επίδραση της πλευρικής τριβής στα τοιχώματα του δακτυλίου κατά την δοκιμή. Μια τυπική διάσταση δακτυλίου είναι αυτή με εσωτερική διάμετρο 75mm και ύψος 20mm.

Το εδαφικό δοκίμιο έχει συμπαγές κυλινδρικό σχήμα που το προσδίδει ο δακτύλιος κοπής. Η μέση διάμετρος του μεγαλύτερου εδαφικού κόκκου του δείγματος δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1/5 του ύψους του δακτυλίου. Ο προσανατολισμός του δακτυλίου πρέπει να είναι ίδιος με αυτόν που θα έχει το εδαφικό στρώμα από το οποίο προέρχεται στο πεδίο, κατά την επιβολή της φόρτισης.

Η διαδικασία προετοιμασίας του δοκιμίου πρέπει να γίνει σε υγρή ατμόσφαιρα ώστε να μην υπάρχει απώλεια της υγρασίας του εδάφους.

Επίσης τα εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να είναι κατάλληλα με τη φύση του εδάφους.

Μετρήσεις δοκιμίου

- Μετράται το ύψος του δοκιμίου μέσα στο δοκίμιο με ακρίβεια 0,05 mm (H_0). Διαφορετικά χρησιμοποιείται το ύψος του δακτυλίου.
- Ζυγίζεται ο δακτύλιος κοπής μαζί με το δοκίμιο με ακρίβεια 0,1 gr. Προσδιορίζεται η αρχική μάζα του δοκιμίου (m_0).
- Η διάμετρος του δοκιμίου θεωρείται αυτή του δακτυλίου (D_0).
- Χρησιμοποιείται ένα δεύτερο εδαφικό δοκίμιο παρόμοιο με αυτό που θα χρησιμοποιηθεί στην δοκιμή οιδημέτρου για τον προσδιορισμό υγρασίας, της πυκνότητας καθώς και του αρχικού δείκτη πόρων (πριν τον προσδιορισμό της μάζας του δοκιμίου του οιδημέτρου, όταν αυτό είναι εφικτό).

3.1.5. Διαδικασία δοκιμών

Οι δοκιμές οιδημέτρου της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με τη διαδικασία όπως αυτή περιγράφεται στους αμερικάνικους κανονισμούς ASTM D2435, τους βρετανικούς BS 1377:Part 5:1990:3 και από τον K.H Head (Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 2, 2nd Edition).

Εφαρμόζεται η ακόλουθη διαδικασία:

1. Προετοιμασία συσκευής

i) Πορώδεις δίσκοι

Η διάμετρος του άνω πορώδους δίσκου πρέπει να είναι περίπου 0,5 mm μικρότερη του δακτυλίου στερεοποίησης του δοκιμίου. Η διάμετρος του κάτω πορώδους δίσκου πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη ώστε να αποτελεί τη σταθερή βάση του δακτυλίου και κατά συνέπεια του δοκιμίου.

Το πάχος των πορωδών δίσκων πρέπει να είναι επαρκές ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος αστοχίας από τα επιβαλλόμενα φορτία αλλά και η συμπιεστότητα των δίσκων να είναι αμελητέα. Έχει διαπιστωθεί πως πλάκα βωξίτη ή χαλκού πάχους 6 – 13 mm είναι επαρκής.

Οι βάσεις των δίσκων πρέπει να είναι καθαρές, επίπεδες και χωρίς φθορές.

Τα διάκενα (clearanes) των βάσεων των πορωδών δίσκων από το δακτύλιο κοπής πρέπει να είναι 0,25 mm ως 0,75 mm, διαφορετικά εδαφικό υλικό εισέρχεται στο χώρο αυτό.

Οι επιφάνειες των πορωδών δίσκων καθαρίζονται με πλαστική βούρτσα.

Διασφαλίζεται πως οι πόροι των δίσκων δεν έχουν γεμίσει με αργιλικό υλικό και πως οι δίσκοι είναι διαπερατοί στο νερό. Συνήθως για την απομάκρυνση των λεπτόκοκκων από τους πόρους των δίσκων χρησιμοποιείται συσκευή υπερήχων.

Γίνεται κορεσμός των πορωδών δίσκων με βρασμό σε απεσταγμένο νερό για τουλάχιστον 20 min, όπου και παραμένουν μέχρι τη χρήση.

ii) Κυψέλη στερεοποίησης

Η κυψέλη στερεοποίησης η οποία είναι κατασκευασμένη, από ανθεκτικά και μη – διαβρώσιμα υλικά, είναι το κιβώτιο μέσα στο οποίο τοποθετείται το εδαφικό δοκίμιο εντός του δακτυλίου στερεοποίησης μαζί με τους πορώδεις δίσκους. Αποτελείται από τον κορμό και τη βάση της καμπύλης τα οποία είναι υδατοστεγή, το δακτύλιο εγκιβώτισης του δοκιμίου με τους κοχλίες και την πλάκα φόρτισης.

Το δείγμα με το δακτύλιο στερεοποίησης και τον άνω πορώδη δίσκο τοποθετείται κεντρικά εντός του δακτυλίου εγκιβωτισμού και πάνω στον κάτω πορώδη δίσκο. Το κοπτικό άκρο του δακτυλίου κοπής βλέπει προς τα κάτω. Στις συγκεκριμένες δοκιμές, μεταξύ των πορωδών δίσκων και του δοκιμίου τοποθετείται διηθητικό χαρτί μεγάλης διαπερατότητας (φίλτρο Whatman No 54), το οποίο αποτρέπει τη διείσδυση εδαφικού υλικού μέσα στους πόρους των πορωδών δίσκων και το φράξιμό της, κάτι το οποίο θα εμπόδιζε την ελεύθερη αποστράγγιση του νερού. Μετά τη συναρμολόγηση της κυψέλης στερεοποίησης ακολουθεί η τοποθέτηση της πλάκας φόρτισης πάνω στον άνω πορώδη λίθο.



Εικόνα 3.2 Πορώδεις δίσκοι και κυψέλη στερεοποίησης

iii) Πλαίσιο ή συσκευή φόρτισης

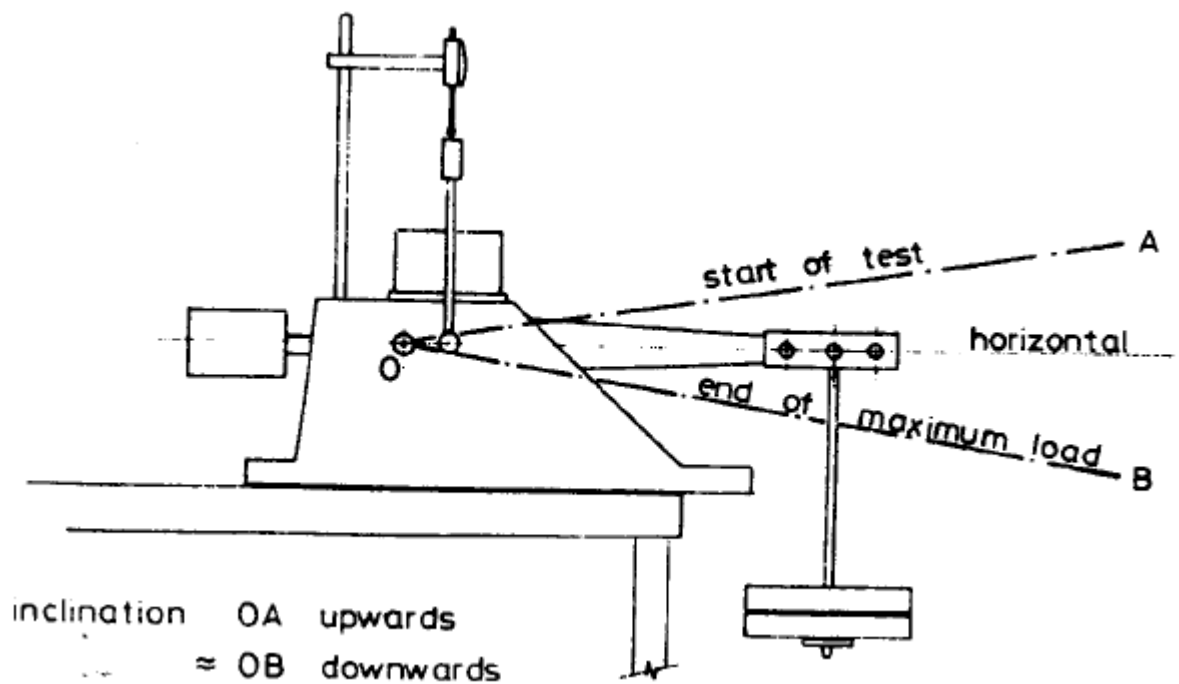
Το πλαίσιο φόρτισης αποτελείται από : έναν άκαμπτο μοχλοβραχίονα (rigid beam) με λόγο μεταβίβασης 1:9, 1:10, 1:11, ένα αντίβαρο (adjustable counterbalanced weight on beam), στέλεχος επιβολής κατακόρυφου φορτίου (loading yoke) μέσω μιας σφαιρικής υποδοχής στην άνω πλάκα φόρτισης, γρύλος υποστήριξης του μοχλοβραχίονα (screw – jack support for beam), άκαμπτη βάση (rigid bed) υποστήριξης του κιβωτίου στερεοποίησης, άκαμπτο υποστήριγμα για το ψηφιακό μηχανοστάσιο μέτρησης της καθίζησης (rigid support and mounting for compression gauge), στέλεχος ανάρτησης φορτίου (weight hanger for slotted weights), άκαμπτος πάγκος ή βάση (rigid stand or bench) στήριξης της συσκευής, φορτία επιβολής (dead weights).

Στο πλαίσιο της συσκευής πρέπει να υπάρχει δυνατότητα κατακόρυφης κίνησης κατά την συμπίεση του δοκιμίου τουλάχιστον 15 mm.



Εικόνα 3.3 Πλαίσιο ή συσκευή φόρτισης

2. Προσδιορισμός της υγρασίας του δοκιμίου.
Τα τρίμματα που απομένουν από την μόρφωση του δείγματος στον δακτύλιο τοποθετούνται σε ένα δοχείο και με τον συνήθη τρόπο προσδιορίζεται η υγρασία.
3. Ζυγίζεται το δείγμα που τοποθετήθηκε στον δακτύλιο.
Ζυγίζεται το δοκίμιο με τον δακτύλιο με ακρίβεια 0,01 g (m_1).
4. Τοποθέτηση του δείγματος στην συσκευή στερεοποίησης.
5. Προσαρμογή του συστήματος φόρτισης στην συσκευή στερεοποίησης.
Αρχικά τοποθετείται η συσκευή στερεοποίησης στην βάση της. Στην συνέχεια γίνεται ανύψωση της δοκού ακριβώς πάνω από την οριζόντια θέση και με την υποστήριξη της βίδας συγκρατείται σε εκείνο το σημείο. Ένα μικρό βάρος (10 g) τοποθετείται στην πάνω βάση της κρεμάστρας το οποίο θα πρέπει να είναι αρκετό για να αποτρέψει την δοκό από αστάθεια.
6. Ρύθμιση του μοχλού φόρτισης.
Γίνεται ανύψωση του άκρου της δοκού ώστε να επιτραπεί στο ζυγό φόρτισης να ανυψωθεί στην κάθετη θέση και μετά ρυθμίζεται το στέλεχος φόρτισης βιδώνοντας προς τα κάτω μέχρι να ακουμπήσει στην εσοχή στο επάνω μέρος από το καπάκι φόρτισης, ως να ασκεί πίεση στο δοκίμιο. Τέλος ρυθμίζεται το παξιμάδι κλειδώματος στο στέλεχος φόρτισης.
7. Ρύθμιση της δοκού.
Η ιδανική θέση (Σχήμα 3.2) για την ακτίνα είναι αρχικά να είναι κεκλιμένη πάνω από την οριζόντια θέση σε περίπου την ίδια γωνία που θα έχει κάτω από το οριζόντιο στο τέλος της μέγιστης αύξησης του φορτίου. Η ακριβής θέση δεν είναι κρίσιμη, ειδικά για δύσκαμπτα εδάφη για τις οποίες η ποσότητα της συμπίεσης είναι μικρή, και μπορεί να εκτιμηθεί από την εμπειρία. Για την ρύθμιση κλίσης απαιτεί μόνο μια μικρή περιστροφή του στελέχους φόρτωσης. Αν μια μεγάλη κατάπτωση της δοκού συμβαίνει κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής σε ένα μαλακό έδαφος, η δέσμη μπορεί να αυξηθεί στο τέλος μιας αύξησης φόρτωσης με τη ρύθμιση του στελέχους φόρτισης. Μετά την προσαρμογή σφίγγουμε το παξιμάδι ασφάλισης επί του στελέχους και ελέγχουμε ότι η επαφή με το καπάκι εξακολουθεί να διατηρείται.



Εικόνα 3.4 : Ρύθμιση της δοκού

8. Ρύθμιση του μηκυσιόμετρου.

Γίνεται η σύνδεση του μηκυσιόμετρου στο βραχίονα έτσι ώστε να βρίσκεται στο κέντρο της κεφαλής της βίδας του ζυγού φόρτισης. Έπειτα ρυθμίζεται το ύψος του μετρητή, και στη συνέχεια προσαρμόζεται και σταθεροποιείται το μηκυσιόμετρο σφίγγοντας την βίδα.

9. Προσθήκη της πρώτης αύξησης φορτίων.

Γίνεται η προσθήκη των μαζών προσεκτικά στην κρεμάστρα έτσι ώστε να δώσουν την απαιτούμενη αρχική πίεση. Θα πρέπει να υποδεικνύεται ελάχιστη ή καμία παραμόρφωση από το μετρητή συμπίεσης, επειδή το πρόσθετο φορτίο συγκρατείται από την βίδα υποστήριξης. Οι μάζες θα πρέπει να τοποθετούνται στην κρεμάστρα συστηματικά. Η μεγαλύτερη (κάτω) βάση προορίζεται για τις μεγαλύτερες μάζες (8 kg) και η μικρότερη (πάνω) βάση για τις μικρότερες μάζες (4, 2 και 1 kg). Ένα αρχικό φορτίο των $5 \text{ kN} / \text{m}^2$ εφαρμόζεται στο δείγμα εκτός και αν είναι ένα πολύ μαλακό έδαφος, στην οποία περίπτωση εφαρμόζεται φορτίο 2 ή $3 \text{ kN} / \text{m}^2$. Πρότυπες πιέσεις φόρτισης είναι οι ακόλουθες.

$5 \text{ kN} / \text{m}^2$

12

25

50

100

200, κλπ

Μικρότερες αυξήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολύ μαλακά εδάφη.



Εικόνα 3.5 Τοποθέτηση πρώτου φορτίου φόρτισης

10. Εφαρμογή του φορτίου στο δείγμα.
Αφού πραγματοποιηθεί χαλάρωση της υποστήριξης της δοκού, της βίδας δηλαδή, την ίδια στιγμή ξεκινάει να τρέχει το ρολόι. Το μηκυνσιόμετρο θα πρέπει να δείχνει μια άμεση κίνηση προς τα κάτω.
11. Προσθήκη νερού στη συσκευή στερεοποίησης.
Προστίθεται νερό σε θερμοκρασία δωματίου χωρίς καθυστέρηση, έτσι ώστε το δείγμα και ο άνω πορώδης δίσκος είναι πλήρως βυθισμένοι. Αν υπάρξει διόγκωση, τότε εκτελείται αύξηση του φορτίου στις επόμενες υψηλότερες πιέσεις.
12. Καταγραφή των μετρήσεων.
Στο πρόγραμμα Clisp Studio ενεργοποιείται η εντολή για την καταγραφή της στερεοποίησης. Σημειώνεται στο έντυπο η ώρα έναρξης της καταγραφής και η ένδειξη του μηκυνσιόμετρου. Ορίζεται καθυστέρηση 30 δευτερολέπτων από την ενεργοποίηση της εντολής (Run) μέχρι την έναρξη της καταγραφής. Η καθυστέρηση αυτή είναι επιβεβλημένη για την επιβολή του κατακόρυφου φορτίου στο δοκίμιο. Το φορτίο επιβάλλεται ξεβιδώνοντας την βίδα που συγκρατεί το σύστημα φόρτισης και ξεκινά η στερεοποίηση.
13. Σχεδιασμός των μετρήσεων.

- Σχεδιάζουμε τις ενδείξεις του μηκυνιόμετρου σε σχέση με τον χρόνο σε μια λογαριθμική κλίμακα. Η χάραξη θα πρέπει να ξεκινήσει το συντομότερο δυνατό μετά την εφαρμογή του φορτίου και στη συνέχεια να ενημερώνεται όσο προχωρεί η δοκιμή.
14. Μετά τη χάραξη της ανάγνωσης σε 24 ώρες, θα πρέπει να ληφθεί η απόφαση για το αν πρέπει ή όχι να εφαρμοστεί η επόμενη αύξηση του φορτίου. Αν το γράφημα δείχνει μια αποστροφή από το απότομο τμήμα της καμπύλης σε μια ευθεία γραμμή η οποία είναι μικρότερης κλίσης τότε φαίνεται ότι η φάση πρωτεύουσας στερεοποίησης είναι ολοκληρωμένη και ότι η επόμενη αύξηση του φορτίου μπορεί να εφαρμοστεί. Ωστόσο, αν δεν έχει ακόμη καθοριστεί η κεκλιμένη ευθεία γραμμή που περιγράφει τη δευτερεύουσα συμπίεση, το φορτίο θα πρέπει να παραμείνει αμετάβλητο για άλλες 24 ώρες. Οι μόνες πρόσθετες αναγνώσεις είναι αναγκαίες σε περίπου 28, 32 και 48 ώρες από την έναρξη της αύξησης, δηλαδή δύο κατά τη διάρκεια της ημέρας και μία την επόμενη ημέρα. Είναι σπάνια αναγκαίο να επεκταθεί σε ένα στάδιο φόρτισης περαιτέρω, εκτός αν απαιτούνται δεδομένα για δευτερεύουσα συμπίεση, οπότε μπορεί να χρειαστεί μία εβδομάδα (περίπου 10.000 min) ή περισσότερο. Η διάρκεια της κάθε προσαύξησης φορτίου καθ' όλη τη δοκιμή θα πρέπει να είναι η ίδια. Κανονικά αυτό θα είναι 24 ώρες για λόγους ευκολίας. Αν δεν μπορεί να αποφευχθεί ένα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από το κανονικό στο πλαίσιο ενός φορτίου (π.χ. πάνω από μια εβδομάδα), και αξιόλογη δευτερογενή στερεοποίηση συμβαίνει κατά τη διάρκεια αυτού του επιπλέον χρόνου, αυτό θα πρέπει να επιτρέπεται για τον υπολογισμό των δεδομένων για το γράφημα μεταβολής του δείκτη πόρων. Αν είναι προφανές ότι η φάση πρωτογενούς στερεοποίησης έχει ολοκληρωθεί εντός της ημέρας, η επόμενη αύξηση του φορτίου μπορεί να εφαρμοστεί αμέσως.
 15. Εφαρμογή της επόμενης αύξησης φορτίων.
Όταν έχει διαπιστωθεί ότι το στάδιο φόρτισης ολοκληρώνεται τότε μπορεί να εφαρμοστεί η επόμενη αύξηση του φορτίου. Ρυθμίζεται ξανά το χρονόμετρο στο μηδέν. Ενώ δεν ρυθμίζεται εκ νέου το μηκυνσιόμετρο. Τοποθετούνται επιπλέον βάρη στην κρεμάστρα για να ασκηθεί η νέα απαιτούμενη τάση.
 16. Περαιτέρω στάδια φόρτωσης.
Επαναλαμβάνονται τα στάδια (17), (14) και (15) για κάθε διαδοχική αύξηση του φορτίου, αφού πρώτα γίνει συμμόρφωση με τις συστάσεις του σταδίου (16). Ο αριθμός των σταδίων φόρτισης εξαρτάται από το σκοπό της δοκιμής. Όταν έχει φτάσει στο τέλος της πρωτογενούς στερεοποίησης, όπως υποδεικνύεται από την αρχή της γραμμής της δευτερεύουσας στερεοποίησης, το δείγμα θεωρείται ότι είναι πλήρως φορτισμένο.
 17. Αποφόρτιση.
Η αποφόρτιση θα πρέπει να λαμβάνει χώρα σταδιακά. Συνήθης πρακτική είναι αποφόρτιση να επιτρέψει τη διόγκωση σε περίπου το ήμισυ του αριθμού των σταδίων που εφαρμόστηκαν κατά την φόρτιση, με όχι λιγότερο από δύο στάδια αποφόρτισης.
 18. Σχεδιασμός των μετρήσεων.
Σχεδιάζονται τις ενδείξεις του μηκυνσιόμετρου σε λογαριθμική κλίμακα όπως και για τα στάδια φόρτισης. Οι καμπύλες διόγκωσης θα τέμνουν τις καμπύλες στερεοποίησης, αλλά θα είναι εύκολα διακριτές. Η ολοκλήρωση της διόγκωσης υποδεικνύεται κάτω από ένα συγκεκριμένο φορτίο από μια μείωση της κλίσης της γραφικής παράστασης. Αν αυτό δεν είναι εμφανές μετά από 24 ώρες, αφήνεται να διογκωθεί για περαιτέρω 24 ώρες πριν από την αφαίρεση του επόμενου σταδίου της φόρτωσης.
 19. Αποστράγγιση της συσκευής στερεοποίησης.
Όταν επιτευχθεί ισορροπία, πραγματοποιείται η απομάκρυνση του νερού από την συσκευή στερεοποίησης, είτε με αποστράγγιση εάν υπάρχει μια κατάλληλη σύνδεση ή με σιφονισμό. Αφήνεται να σταθεί για 15 έως 30 λεπτά, έτσι ώστε οι πορώδεις δίσκοι να μπορούν να στραγγίζονται.



Εικόνα 3.6 Κατάλληλη τοποθέτηση φορτίων

20. Αφαίρεση του δείγματος.

Μετακινείται το μηκυσιόμετρο προς μία άλλη πλευρά, και αφαιρείται το στέλεχος φόρτισης, έτσι ώστε να μπορεί να αφαιρεθεί η κυψέλη στερεοποίησης. Γίνεται αποσυναρμολόγηση της συσκευής και αφαιρείται ο δακτύλιος ενοποίησης και το δείγμα. Αφαιρούνται προσεκτικά οι πορώδεις δίσκοι. Τέλος σκουπίζεται το εξωτερικό του ξηρού δακτυλίου.

21. Ζύγιση του δείγματος.

Τοποθετείται το δείγμα και ο δακτύλιος στην ζυγαριά, και ζυγίζεται με ακρίβεια 0,01 g (m2). Υπολογίζεται η τελική μάζα του δείγματος (m1).

22. Ξήρανση και ζύγιση.

Τοποθετείται το δείγμα και ο δακτύλιος στο φούρνο όλη τη νύχτα ή αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα για να εξασφαλιστεί ότι το δείγμα έχει ξηρανθεί μέχρι σταθερής μάζας. Αφήνεται να ψυχθεί σε ξηραντήρα και ζυγίζεται (m3). Υπολογίζεται η συνολική ξηρή μάζα (md). Η ξηρή μάζα είναι η ίδια στο τέλος της δοκιμής, όπως και στην αρχή εάν δεν έχει χαθεί υλικό.

3.1.6. Υπολογισμοί και ανάλυση των αποτελεσμάτων

Υπολογισμός της περιεκτικότητας σε υγρασία του δείγματος. Η υπολογιζόμενη αρχική w_1 περιεκτικότητα υγρασίας δίνεται από την εξίσωση

$$w_i = \frac{m - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (3.1)$$

η οποία παρέχει έναν έλεγχο κατά την w_0 περιεκτικότητα σε υγρασία που λαμβάνονται από τα περισσεύματα (Στάδιο (4)).

Το τελικό περιεχόμενο σε υγρασία (w_1) υπολογίζεται από την εξίσωση

$$w_f = \frac{m_f - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (3.2)$$

Υπολογισμός των τιμών του e , m_v , c_v .

Αρχικό δοκίμιο

$$\text{Εμβαδό του δείγματος: } A = \frac{\pi D^2}{4} \text{ mm}^2 \quad (3.3)$$

$$\text{Αρχικός όγκος: } V_0 = \frac{A \times H_0}{1000} \text{ cm}^3 \quad (3.4)$$

Αρχική μάζα: m_0

Ξηρή μάζα (παραμένει σταθερή): m_d

$$\text{Περιεκτικότητα σε υγρασία: } w_0 = \frac{m_0 - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (3.5)$$

$$\text{Πυκνότητα: } \rho = \frac{m_0}{V_0} \text{ Mg/m}^3 \quad (3.6)$$

$$\text{Ξηρή πυκνότητα: } \rho_D = \rho \times \frac{100}{100 + w_0} \text{ Mg/m}^3 \quad (3.7)$$

$$\text{Δείκτης πόρων: } e_0 = \frac{\rho_s}{\rho_D} - 1 \quad (3.8)$$

$$\text{Βαθμός κορεσμού: } S_0 = \frac{w_0 \times \rho_s}{e_0} \% \quad (3.9)$$

$$\text{Ισοδύναμο ύψος στερεών: } H_s = \frac{H_0}{1 + e_0} \text{ mm} \quad (3.10)$$

Τελικό δοκίμιο

Μάζα: m_f

$$\text{Περιεκτικότητα σε υγρασία: } w_f = \frac{m_f - m_d}{m_d} \times 100\% \quad (3.11)$$

$$\text{Ύψος δοκιμίου: } H_f = H_0 - (\Delta H)_f \text{ mm} \quad (3.12)$$

$$\text{Πυκνότητα: } \rho_f = \frac{m_f}{A \times H_f} \times 1000 \text{ Mg/m}^3 \quad (3.13)$$

$$\text{Ξηρή πυκνότητα: } \rho_{Df} = \rho_f \times \frac{100}{100+w_f} \text{ Mg/m}^3 \quad (3.14)$$

$$\text{Δείκτης πόρων: } e_f = \frac{\rho_s}{\rho_{Df}} - 1 \quad (3.15)$$

$$\text{ή } e_f = e_0 - (\Delta e)_f \quad (3.16)$$

$$\text{Βαθμός κορεσμού: } S_f = \frac{w_f \times \rho_s}{e_f} \% \quad (3.17)$$

Μετά από κάθε παραμόρφωση λόγω φόρτισης

Μεταβολή δείκτη πόρων:

$$\Delta e = \frac{\Delta H}{H_s} \quad (3.18)$$

Δείκτης πόρων μετά από μία αύξηση φόρτισης:

$$e = e_0 - \Delta e \quad (3.19)$$

Μεταβολή δείκτη πόρων κατά την διάρκεια μίας αύξησης τάσης Δp :

$$\delta e = e_1 - e_2 \quad (3.20)$$

Συντελεστής συμπιεστότητας όγκου για μια αύξηση τάσης Δp :

$$m_v = \frac{\delta e}{\delta p} \times \frac{1000}{1+e_1} \text{ m}^2/\text{MN} \quad (3.21)$$

Συντελεστής στερεοποίησης κατά την διάρκεια μιας αύξησης τάσης Δp :

$$c_v = \frac{0.026 \times H^2}{t_{50}} \text{ m}^2/\text{year} \quad (3.22)$$

Συντελεστής διαπερατότητας κατά την διάρκεια μιας αύξησης τάσης Δp :

$$k = c_v \times m_v \times 0.31 \times 10^{-9} \text{ m/s} \quad (3.23)$$

Συντελεστής δευτερεύουσας συμπίεση κατά τη διάρκεια του σταδίου δευτερογενούς συμπίεση μιας αύξησης τάσης Δp :

$$C_{sec} = \frac{(\Delta H)_s}{H_0} \quad (3.24)$$

Δίνεται παρακάτω το έντυπο της δοκιμής οιδημέτρου.

Πίνακας 3.1 Έντυπο καταγραφής δεδομένων δοκιμής μονοδιάστατης συμπίεσης (α), (β)



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τίτλος: Έντυπο Καταγραφής Δεδομένων Δοκιμής	Δοκιμή Μονοδιάστατης Συμπίεσης
---	--------------------------------

Δεδομένα Εδαφικού Δείγματος

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΡΓΟΥ:	Γεώτρηση:
Αριθμός Δείγματος:	Βάθος (m):
Περιγραφή Εδάφους:	Ημερομηνία:
Προετοιμασία Δοκιμίου:	Πρότυπα Αναφοράς:
Όνομαστική Διάμετρος Μεγαλύτερου Κόκκου, D_{max} (mm) =	G _s =

Δεδομένα Δοκιμίου

Αρχικό Δοκίμιο	Χρήση φίλτρου: ναι <input type="checkbox"/> όχι <input type="checkbox"/> Λάδωμα δακτυλίου: ναι <input type="checkbox"/> όχι <input type="checkbox"/>	Τελικό Δοκίμιο
Υγρασία δείγματος	Μάζα Δοκιμίου	Υγρασία Δοκιμίου
Αρ. Υποδοχέα	Μάζα Δακτυλίου (g)	Αρ. Υποδοχέα
Μάζα Υποδοχέα (g)	Δακτ. + Υγρό Δοκ. (g)	Μάζα Υποδοχέα (g)
Υποδ. + Υγρό Δείγμα (g)	Υγρό Δοκίμιο (g)	Μάζα Υποδ. + Δακτ. + Υγρό Έδαφος (g)
Υποδ. + Ξηρό Δείγμα (g)	Ξηρό Δοκίμιο (g)	Μάζα Υποδ. + Υγρό Έδαφος (g)
Μάζα νερού (g)	Διάμετρος Δοκιμίου (mm)	Υγρό Έδαφος (g)
Μάζα Ξηρού Δείγματος (g)	Ύψος Δοκιμίου	Μάζα Υποδ. + Ξηρό Έδαφος (g)
Αρχική Υγρασία (%)	Δείκτης πόρων	Ξηρό Έδαφος (g)
	Βαθμός κορεσμού (%)	Τελική Υγρασία Δοκιμίου (%)
	Ειδικό βάρος (kN/m ³)	Καθαρισμός κιβωτίου φόρτισης
		Αρ. Υποδοχέα
	Ξηρό δοκίμιο (g)	Μάζα Υποδοχέα (g)
	Αρχική Υγρασία Δοκ. (%)	Μάζα Υποδ. + Ξηρό Έδαφος (g)
		Ξηρό Έδαφος (g)
		Ξηρό δοκίμιο (g)

(α)



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Δεδομένα Στερεοποίησης

Λόγος μοχλού	1:10	Αρχικό Φορτίο: Υγρό φίλτρο + Κορεσμένος Πωρόλιθος + άνω βάση (top cup) (kg)				1.08304
Βαθμίδα Φόρτισης	Ημερομηνία	Ώρα	Συνολικό βάρος στον μοχλό (kg)	Ένδειξη Μηκυνσιόμετρου		Αρχείο Καταχώρισης
				Αρχή	Τέλος	

Πίνακας παρατηρήσεων

--

Υπεύθυνος Δοκιμής: _____

Ημερομηνία Δοκιμής: _____

(β)

Ο ρυθμός στερεοποίησης της αργίλου εξαρτάται από τη συμπιεστότητά του και τη διαπερατότητα του. Το τελευταίο σχετίζεται όχι μόνο με το μέγεθος των πόρων αλλά και με το ιξώδες του νερού στους χώρους των πόρων (Πίνακας 3.1). Το ιξώδες εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το ιξώδες του νερού στους 35 ° C είναι περίπου το μισό από αυτό στους 5 ° C. Ο συντελεστής στερεοποίησης, από τον οποίο αξιολογείται ο ρυθμός στερεοποίησης, εξαρτάται ως εκ τούτου από τη θερμοκρασία.

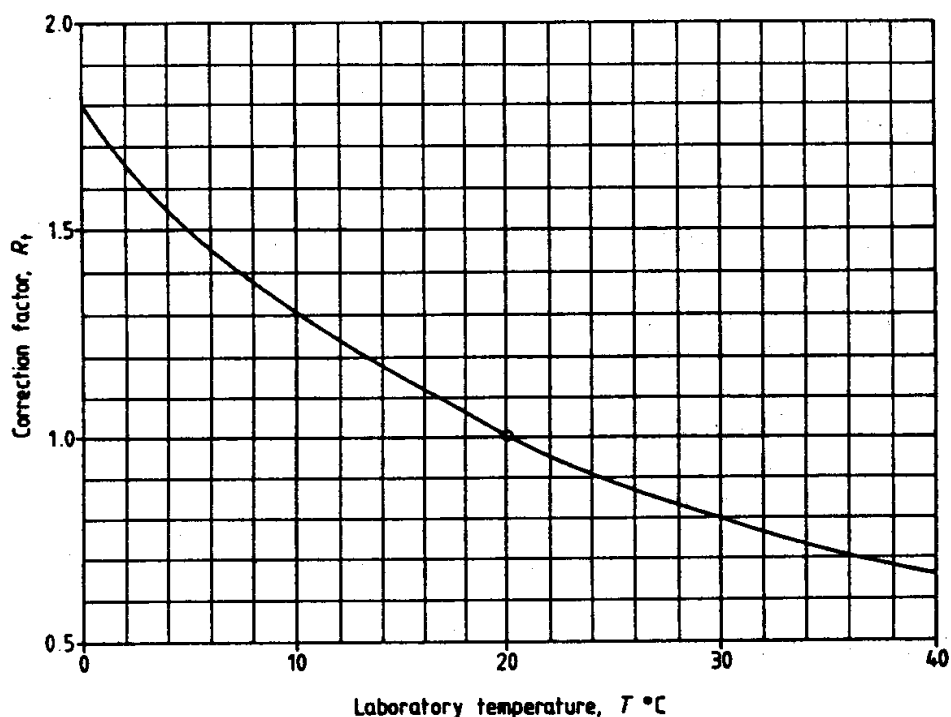
Πίνακας 3.2 Σύγκριση των ιδιοτήτων του μηχανικού μοντέλου και του εδάφους

<i>Item</i>	<i>Mechanical model</i>	<i>Soil</i>
(1)	Rate at which water can escape depends on:	Rate of drainage depends on:
(a)	Size of outlet	Size of pore spaces (i.e. permeability)
(b)	Viscosity of water	Viscosity of pore water (depends on temperature)
(c)	Length of outlet tube	Length of drainage path
(2)	Compressibility of spring controls:	Compressibility of soil structure determines:
(a)	Amount of compression	Amount of consolidation settlement
(b)	Time to reach equilibrium	Time to achieve 100% consolidation
(3)	Initial pressure in water	Initial excess pore water pressure u_0
(4)	Pressure in water at any time t	Average excess pore water pressure u
(5)	Load in spring	Stress carried by soil skeleton
(6)	Percentage of final compression	Percentage consolidation

Οι δοκιμές στερεοποίησης διεξάγονται συνήθως σε εργαστηριακή θερμοκρασία περιβάλλοντος 20-25 ° C. Το γράφημα διορθωτικού παράγοντα που δίνεται στο Σχήμα 3.2 παρέχει ένα εύκολο τρόπο για να γίνει διόρθωση θερμοκρασίας. Αυτή η καμπύλη μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τη μετατροπή των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών σε τυπικές τιμές 20 ° C, όταν η εργαστηριακή δοκιμή έχει διεξαχθεί σε σημαντικά διαφορετική θερμοκρασία.

Αν και η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει τον ρυθμό στερεοποίησης, δεν επηρεάζει το μέγεθος της στερεοποίησης κατά την αρχική φάση, αλλά μπορεί να αυξήσει τη δευτερογενή συμπίεση. Αυτό είναι μάλλον αμελητέο για τα ανόργανα εδάφη, αλλά μπορεί να είναι σημαντικότερο για τα οργανικά εδάφη, ιδιαίτερα την τύρφη.

Για τους παραπάνω λόγους, είναι καλή πρακτική η διατήρηση συνεχούς καταγραφής της εργαστηριακής θερμοκρασίας δίπλα σε συσκευές των οιδημέτρων καθ 'όλη τη διάρκεια των δοκιμών στερεοποίησης. Ωστόσο, οι διορθώσεις για τη θερμοκρασία συνήθως γίνονται περισσότερο για την τυποποίηση των αποτελεσμάτων παρά για την προφανή αύξηση της ακρίβειας των τιμών c_v , οι οποίες σε κάθε περίπτωση είναι λίγο περισσότερο από μια ένδειξη μιας τάξης μεγέθους.



Σχήμα 3.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στην στερεοποίηση

3.2. Δοκιμές ταξινόμησης

3.2.1. Ειδικό βάρος στερεών κόκκων

Εφαρμόστηκε η μέθοδος BS 1377: part2: 1990 για την μέτρηση της πυκνότητας των εδαφικών κόκκων με μέγιστη διάμετρο 2 mm.

Σε τρεις καθαρές και προζυγισμένες ληκύθους χωρητικότητας 50 ml και μάζας m_1 τοποθετείται ποσότητα 8 gr ξηρού εδάφους στη κάθε μια και επαναζυγίζονται (m_2). Στη συνέχεια προστίθεται απεσταγμένο νερό ώστε να καλυφθεί το έδαφος και μέχρι το 1/2 του όγκου της ληκύθου περίπου. Μετά την ανακίνηση του μίγματος εντός των ληκύθων, οι λήκυθοι τοποθετούνται σε θάλαμο κενού, όπου και παραμένουν για τουλάχιστον 8 ώρες. Συχνά η διαδικασία ανακόπτεται για την ανακίνηση των ληκύθων. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας, οι λήκυθοι γεμίζουν με νερό και επαναζυγίζονται (m_3). Στη συνέχεια καθαρίζονται και αφού γεμίζονται μόνο με απεσταγμένο νερό και ξαναζυγίζονται (m_4). Αναλυτικά η διαδικασία της δοκιμής και η περιγραφή του εξοπλισμού δίνεται από την Τύρη (2016).

Ο υπολογισμός του ειδικού βάρους των στερεών κόκκων βασίζεται στην αρχή του Αρχιμήδη και δίνεται από τον τύπο

$$\rho_s = \frac{\rho_w \times (m_2 - m_1)}{(m_4 - m_1) - (m_3 - m_2)} \quad (3.25)$$

3.2.2. Κοκκομετρική ανάλυση

Εφαρμόστηκε η υγρή μέθοδος με την χρήση κοσκίνων και αραιομέτρου κατά BS 1377: part2: 1990.

Σε ξηρή ποσότητα αντιπροσωπευτικού εδαφικού δείγματος προστίθενται 125 ml αντιθρομβωτικού διαλύματος (εξαμεταφωσφορικού νατρίου) κανονικότητας 1N. Αφού παραμένει το μίγμα κατά τη διάρκεια της νύχτας, την επομένη μεταφέρεται στον αναδευτήρα, όπου και γίνεται ανάδευση ενός λεπτού. Στη συνέχεια το μίγμα μεταφέρεται στη στήλη των κοσκίνων, όπου με τη χρήση απεσταγμένου νερού γίνεται ο διαχωρισμός ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων. Το συγκρατούμενο εδαφικό υλικό σε κάθε κόσκινο μεταφέρεται σε υποδοχέα και στη συνέχεια στον κλίβανο για τον προσδιορισμό της ξηρής ποσότητας που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο και συνεπώς αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη διάμετρο κόκκων.

Το εδαφικό υλικό που συγκεντρώνεται στο συλλέκτη, μεταφέρεται σε γυάλινο ογκομετρικό κύλινδρο χωρητικότητας 1 λίτρου. Στο διάλυμα προστίθεται απιονισμένο νερό ώστε ο τελικός όγκος του εδαφικού διαλύματος να είναι ακριβώς 1 λίτρο. Μετά την ανακίνηση του κυλίνδρου για 1 λεπτό, ο κύλινδρος τοποθετείται σε επίπεδη επιφάνεια και γίνονται μετρήσεις της πυκνότητας του διαλύματος με τη χρήση αραιομέτρου, αλλά και της θερμοκρασίας του ταυτόχρονα ανά τακτά χρονικά διαστήματα και μέχρι την ολοκλήρωση 24 ωρών από την έναρξη. Ο υπολογισμός της κοκκομετρικής καμπύλης γίνεται συνδυαστικά από τα αποτελέσματα της μεθόδου κοσκίνων για τους κόκκους άμμου και τα χαλίκια και της μεθόδου αραιομέτρου για τους κόκκους ιλύος και αργίλου.

Αναλυτικά η διαδικασία της δοκιμής, η περιγραφή του εξοπλισμού και η ανάλυση των αποτελεσμάτων δίνεται από Κουλαουζίδου (2016).

3.2.3. Όρια Atterberg

Οι δοκιμές περιλαμβάνουν τη μέθοδο του ορίου πλαστικότητας και τη μέθοδο του κώνου διεύθυνσης για τον προσδιορισμό του ορίου υδαρότητας, σύμφωνα με το BS 1377: part2: 1990.

Και για τις δυο δοκιμές ακολουθείται κοινή διαδικασία για την προετοιμασία του εδαφικού δοκιμίου, η οποία περιγράφεται παρακάτω.

Προετοιμασία δοκιμίου

Αρχικά προσδιορίζεται η φυσική υγρασία του δείγματος.

- (a) Προτείνεται όταν είναι εφικτό, η χρήση του εδαφικού δείγματος στη φυσική του κατάσταση. Όταν υπάρχουν εδαφικοί κόκκοι με διάμετρο μεγαλύτερη των 0,425 mm αυτοί μπορούν να αφαιρεθούν με το χέρι. Στην περίπτωση αυτή, επιλέγεται αντιπροσωπευτικό δείγμα περίπου 200 gr, το οποίο κόβεται με τη βοήθεια μαχαιριού σε μικρά κομμάτια για την αφαίρεση των κόκκων με διάμετρο μεγαλύτερη των 0,425 mm, όταν αυτοί υπάρχουν. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η μάζα των κόκκων. Έπειτα το δείγμα απαλλαγμένο από τους μεγάλους κόκκους, μεταφέρεται σε υποδοχέα και είτε προστίθεται απεσταγμένο νερό όταν το δείγμα είναι ξηρό, είτε αφήνεται να ξηραθεί στην ατμόσφαιρα. Όταν το δείγμα είναι αρκετά υγρό. Το δείγμα αφήνεται να ωριμάσει για το διάστημα των 24 ωρών αφού καλυφθεί με μεμβράνη για να προστατευθεί από τη σκόνη.
- (b) Όταν δεν είναι εφικτός ο διαχωρισμός των μεγάλων κόκκων από το δείγμα με το χέρι, τότε εφαρμόζεται η υγρή κοκκομετρία με την ακόλουθη διαδικασία.
- (c) Επιλέγεται αντιπροσωπευτικό δείγμα τέτοιας ποσότητας ώστε να προκύψει μάζα τουλάχιστον 300 gr που διέρχεται από το κόσκινο No 40.

- (d) Ζυγίζεται το δείγμα με ακρίβεια 0,01 gr. Το δείγμα τοποθετείται σε υποδοχέα και καλύπτεται με απεσταγμένο νερό (χωρίς να προστεθεί καθόλου αντιθρομβωτικό). Με τη βοήθεια ράβδου το δείγμα αναμιγνύεται.
- (e) Στη συνέχεια το μίγμα ρίχνεται στο κόσκινο Νο 40 και συλλέγεται όλη η μάζα που διέρχεται από αυτό. Αν απαιτηθεί η χρήση νερού, τότε χρησιμοποιείται μόνο απεσταγμένο. Η μάζα που συγκρατήθηκε στο κόσκινο τοποθετείται σε υποδοχέα και στη συνέχεια στον κλίβανο στους 105 – 110°C προς ξήρανση. Στη συνέχεια ζυγίζεται με ακρίβεια 0,01 gr. Η μάζα που διέρχεται από το κόσκινο, συλλέγεται σε υποδοχέα και αφήνεται προς ξήρανση στην ατμόσφαιρα. Αν υπάρχει καθαρό νερό στην επιφάνεια, μπορεί αυτό να αφαιρεθεί με προσοχή, ώστε να επιτευχθεί η διαδικασία ξήρανσης. Σε κάθε περίπτωση το δείγμα προστατεύεται από τη σκόνη.

Όριο πλαστικότητας

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για τη δοκιμή είναι:

- Κλίβανος
- Υποδοχείς με καπάκι (αεροστεγείς και μη – διαβρώσιμοι)
- Σπάτουλα
- Γυάλινη επίπεδη τετράγωνη επιφάνεια (πάχους 10 mm και πλευράς 300 mm)
- Κόσκινο Νο 40
- Ξηραντήρας
- Απεσταγμένο νερό
- Ράβδος μήκους περίπου 100 mm και διαμέτρου 3 mm
- Ζυγός ακρίβειας 0,01 gr

Σε εδαφικό δείγμα το οποίο διέρχεται από το κόσκινο Νο 40, προστίθεται απεσταγμένο νερό και σχηματίζονται με την βοήθεια των χεριών δύο εύπλαστες σφαίρες βάρους περίπου 10 gr η κάθε μια. Κάθε σφαίρα χωρίζεται σε 4 μικρότερες, στις οποίες αντιστοιχεί ένας υποδοχέας με καπάκι. Η δοκιμή πραγματοποιείται για κάθε σφαίρα χωριστά. Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας επαναλαμβανόμενες παλινδρομικές κινήσεις της σφαίρας πάνω σε γυάλινη λεία (ή ελαφρώς αμμοβαλμένη) επιφάνεια, προσδίδεται στις σφαίρες κυλινδρικό σχήμα. Η κίνηση των χεριών δεν περιλαμβάνει καμία πίεση ασκούμενη στις εδαφικές ράβδους. Εξαιτίας της κίνησης, οι εδαφικές ράβδοι εμφανίζουν ρωγμές, οι οποίες οδηγούν σε θραύση της ράβδου σε μικρότερα τμήματα, όταν η ράβδος αποκτήσει διάμετρο 3 mm. Στο σημείο αυτό, γίνεται συλλογή των τμημάτων που έσπασαν σε υποδοχέα με καπάκι. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου αστοχήσουν όλες οι εδαφικές ράβδοι. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία και τα τμήματα της ράβδου έχουν όλα τοποθετηθεί στους υποδοχείς, οι τελευταίοι τοποθετούνται στον κλίβανο στους 105 – 110°C για τον προσδιορισμό της υγρασίας (μέθοδος BS 1377: part2: 1990).

Όταν το εδαφικό δείγμα έχει υγρασία μικρότερη του ορίου πλαστικότητας, τότε οι εδαφικές ράβδοι ρηγματώνονται σε μεγαλύτερη των 3 mm διάμετρο. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου το εδαφικό δείγμα έχει υγρασία μεγαλύτερη του ορίου υδαρότητας, οι εδαφικές ράβδοι ρηγματώνονται σε μικρότερη των 3 mm διάμετρο.

Προσδιορίζονται δύο τιμές υγρασίας, οι οποίες είναι αποδεκτές όταν η διαφορά τους είναι μικρότερη του 0,5%. Τότε υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών αυτών με ακρίβεια 1%, ο οποίος αποτελεί το όριο πλαστικότητας.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το έντυπο της δοκιμής του ορίου πλαστικότητας.

Πίνακας 3.3 Έντυπο καταγραφής δεδομένων δοκιμής προσδιορισμού ορίου πλαστικότητας



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τίτλος: Έντυπο καταγραφής δεδομένων δοκιμής		Δοκιμή Προσδιορισμού Ορίου Πλαστικότητας, WP	
ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΡΓΟΥ:		Γεώτρηση:	
Αριθμός Δείγματος:		Βάθος (m):	
Περιγραφή Εδάφους:		Πρότυπα αναφοράς:	
Όνομαστική Διάμετρος Μέγιστου Κόκκου (mm):		Προετοιμασία Εδάφους:	
Αριθμός Δοκιμής		1	2
Όνομα Υποδοχέα			
Μάζα Υποδοχέα (gr)	M_1		
Μάζα Υγρού Δείγματος + Υποδοχέα (gr)	M_2		
Μάζα Ξηρού Δείγματος + Υποδοχέα (gr)	M_3		
Μάζα περιεχόμενου ύδατος (gr)	$M_w = (M_2 - M_3)$		
Μάζα Ξηρού Δείγματος (gr)	$M_d = (M_3 - M_1)$		
Υγρασία Δείγματος – Όριο πλαστικότητας (%)	$w_i = (M_2 - M_3) / (M_3 - M_1) \times 100$		
Όριο Πλαστικότητας, WP (%)			

Όριο υδαρότητας

Ο προσδιορισμός του ορίου υδαρότητας γίνεται με δύο μεθόδους: (α) τη μέθοδο του πενετρόμετρου ή κώνου διείσδυσης και (β) τη μέθοδο Casagrande. Η πρώτη μέθοδος θεωρείται πιο εύκολη και αξιόπιστη, καθώς είναι μια στατική μέθοδος που συνδέεται με την διατμητική αντοχή. Η δεύτερη μέθοδος είναι η αρχαιότερη και έχει χρησιμοποιηθεί κατά κόρων για την κατάταξη εδαφών σε συνδυασμό με τις μηχανικές του ιδιότητες. Είναι μια δυναμική μέθοδος αρκετά επιρρεπής στην εφαρμογή από διαφορετικούς χρήστες. Συνήθως για τιμές του WL < 100% οι διαφορές των δύο μεθόδων είναι μικρές. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του κώνου διείσδυσης. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός είναι:

- Κλίβανος
- Ξηραντήρας
- Ζυγός ακρίβειας 0,01 gr
- Κόσκινο No 40
- Κόσκινο No 10
- Απεσταγμένο νερό
- Υδροβολέας

- Γυάλινο δοχείο 500 ml (ποτήρι)
- Γυάλινη ράβδος ανάμιξης
- Ανοξείδωτοι υποδοχείς
- Σπάτουλες
- Συσκευή πενετρομέτρου

Διαδικασία

Για την δοκιμή απαιτείται ποσότητα περίπου 300 gr που έχει προκύψει ως εξής:

Γίνεται η προετοιμασία του δείγματος είτε (α) στη φυσική του κατάσταση σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω, και αφού προστεθεί απεσταγμένο νερό, το μείγμα ακολουθεί μια περίοδο ωρίμανσης 24 ώρες πριν τη δοκιμή, είτε (β) αφού προηγηθεί η υγρή μέθοδος του κοσκινίσματος από το κόσκινο Νο 40. Σε κάθε περίπτωση, το δείγμα θεωρείται κατάλληλο για την πρώτη δοκιμή πενετρομέτρου, όταν το αποτέλεσμα της δοκιμής δεν είναι μεγαλύτερο από 15 mm διείσδυση.

Γίνεται η ανάμιξη του εδάφους με απεσταγμένο νερό με τη χρήση σπάτουλας εντός υποδοχέα για τουλάχιστον 10 min. Για μερικές κατηγορίες εδαφών (εδάφη υψηλής πλαστικότητας) ο χρόνος αυτός μπορεί να είναι μεγαλύτερος (έως και 40 min), προκειμένου να προκύπτουν επαναλαμβανόμενα αποτελέσματα. Το δείγμα είναι έτοιμο όταν η ένδειξη του πενετρομέτρου είναι περίπου 15 mm. Πιθανά να απαιτείται προσθήκη επιπλέον νερού, για αυτό πριν την εκτέλεσή της δοκιμής γίνεται έλεγχος της συσκευής του κώνου. Τα κύρια σημεία για να ελεγχτούν είναι τα εξής:

- i) Ο κώνος είναι κατάλληλος για εδαφικές δοκιμές.
- ii) Η μάζα του κώνου και του στελέχους του να είναι $80 \pm 0,1$ gr, το στέλεχος να είναι κοίλο.
- iii) Έλεγχος αν το σημείο του κώνου εισχωρεί στο υλικό.
- iv) Ο κώνος πρέπει να πέφτει ελεύθερα όταν πατάμε το κουμπί και ο συρόμενος άξονας πρέπει να είναι στεγνός και καθαρός.
- v) Ο μετρητής πρέπει να βαθμονομηθεί.
- vi) Η συσκευή πρέπει να στηθεί σε έναν επίπεδο πάγκο

Μέρος του δείγματος τοποθετείται με χρήση σπάτουλας στον ειδικό υποδοχέα με προσοχή ώστε να μην παγιδευτεί αέρας στο εσωτερικό. Ο υποδοχέας γεμίζει και με τη βοήθεια της σπάτουλας η επιφάνεια του δείγματος γίνεται οριζόντια και λεία.

Με τον κώνο σταθερό και ανασηκωμένο σε θέση που μόλις έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια του δοκιμίου, ο υποδοχέας κεντράρεται. Το μηκυσιόμετρο έρχεται σε επαφή με τον άξονα του κώνου και καταγράφεται η αρχική τιμή με ακρίβεια 0,1 mm.

Απελευθερώνεται ο κώνος για διάστημα 5 ± 1 sec και εισέρχεται στο δοκίμιο.

Το μηκυσιόμετρο έρχεται ξανά σε επαφή με την νέα θέση του άξονα του κώνου και μετράται η ένδειξη με ακρίβεια 0,1 mm.

Ο κώνος ανυψώνεται και καθαρίζεται προσεκτικά.

Προστίθεται μίγμα στον υποδοχέα και ανακατεύεται ώστε να μην παγιδευτεί αέρας. Η επιφάνεια του δοκιμίου γίνεται επίπεδη και λεία και επαναλαμβάνεται η δοκιμή. Εάν η διαφορά μεταξύ της

πρώτης και της δεύτερης ανάγνωσης είναι μικρότερη του 0,5 mm τότε υπολογίζεται ο μέσος όρος και προσδιορίζεται η υγρασία του δείγματος, χρησιμοποιώντας ποσότητα περίπου 10 gr από την περιοχή της διείσδυσης. Εάν η διαφορά των δύο αναγνώσεων είναι μεταξύ 0,5mm και 1 mm, πραγματοποιείται και τρίτη δοκιμή και εάν η διαφορά παραμένει μικρότερη του 1 mm, υπολογίζεται ο μέσος όρος.

Εάν η διαφορά είναι μεγαλύτερη του 1 mm, αφαιρείται όλο το δείγμα από τον υποδοχέα, ανακατεύεται με το υπόλοιπο υλικό και επαναλαμβάνεται η δοκιμή έως ότου να συμφωνήσουν τα αποτελέσματα της δοκιμής στο πρώτο στάδιο. Τότε προσδιορίζεται η υγρασία του εδάφους.

Το στάδιο αυτό επαναλαμβάνεται τουλάχιστον άλλες τρεις φορές, χρησιμοποιώντας το ίδιο εδαφικό δείγμα αλλά προσθέτοντας απεσταγμένο νερό σε κάθε νέο στάδιο για την αύξηση της υγρασίας του εδάφους. Η ποσότητα του νερού που προστίθεται πρέπει να είναι τέτοια ώστε να οδηγεί σε τιμές διείσδυσης μεταξύ 15 mm και 25 mm σε όλα τα στάδια. Κάθε φορά που το δείγμα αφαιρείται από τον υποδοχέα αυτός καθαρίζεται επιμελώς πριν την τοποθέτηση του νέου δείγματος (σε διαφορετική υγρασία).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το έντυπο της δοκιμής ορίου υδαρότητας.

Πίνακας 3.4 Έντυπο καταγραφής δεδομένων δοκιμής προσδιορισμού ορίου υδαρότητας



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τίτλος: Έντυπο καταγραφής δεδομένων δοκιμής	Δοκιμή Προσδιορισμού Ορίου Υδαρότητας, WL (Μέθοδος κώνου διείσδυσης)
---	---

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΡΓΟΥ:	Γεώτρηση:
Αριθμός Δείγματος:	Βάθος (m):
Περιγραφή Εδάφους:	Πρότυπα αναφοράς:
Ονομαστική Διάμετρος Μέγιστου Κόκκου (mm):	Προετοιμασία Εδάφους:

Αριθμός Δοκιμής		1	2	3	4
Διεισδύσεις					
Μέσος όρος διεισδύσεων					
Όνομα Υποδοχέα					
Μάζα Υποδοχέα (gr)	M_1				
Μάζα Υγρού Δείγματος + Υποδοχέα (gr)	M_2				
Μάζα Ξηρού Δείγματος + Υποδοχέα (gr)	M_3				
Μάζα περιεχόμενου ύδατος (gr)	$M_w = (M_2 - M_3)$				
Μάζα Ξηρού Δείγματος (gr)	$M_d = (M_3 - M_1)$				
Υγρασία Δείγματος (%)	$w_i = (M_2 - M_3) / (M_3 - M_1) \times 100$				
Όριο υδαρότητας, WL (%)					

Υπεύθυνος Δοκιμής: _____

Ημερομηνία έναρξης δοκιμής: _____

Υπολογίζονται οι τιμές της υγρασίας και οι μέσοι όροι των διεισδύσεων που την αντιστοιχούν με ακρίβεια 0,1 mm. Σχεδιάζεται σε γραμμικό διάγραμμα η σχέση υγρασίας – διείσδυσης, από την οποία προσδιορίζεται η τιμή της υγρασίας που αντιστοιχεί σε 20 mm διείσδυση. Η υγρασία αυτή αναφέρεται σε ακέραια μορφή και αποτελεί το όριο υδαρότητας του εδάφους, WL.

3.2.4. Ποσοστό οργανικών

Εφαρμόστηκε η μέθοδος BS 1377: part2: 1990 με τη χρήση υπεροξειδίου του υδρογόνου (H₂O₂) για τον προσδιορισμό της οργανικής ύλης στο έδαφος.

Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για την εκτέλεση της δοκιμής είναι:

- Ηλεκτρικός φούρνος με ελεγχόμενη θερμοκρασία στους 60°C και στους 105 – 110°C.
- Ζυγός ακρίβειας 0,001 gr.
- Ξηραντήρας
- Θερμόμετρο
- Ηλεκτρική εστία
- Πυρίμαχοι γυάλινοι κωνικοί υποδοχείς με ανοιχτό στόμιο και καπάκι
- Γυάλινη ράβδος
- Υπεροξείδιο του υδρογόνου (H₂O₂)
- Μάσκα προσώπου
- Μαχαίρι
- Σπάτουλα
- Κόσκινο 2 mm

Διαδικασία

1. Επιλογή αντιπροσωπευτικού δείγματος 30 gr (ξηραμένου σε φούρνο με θερμοκρασία 60°C), το οποίο να διέρχεται από κόσκινο 2mm
2. Ζύγιση γυάλινου ψηλού υποδοχέα με ακρίβεια 0.001gr (m₁)
3. Τοποθέτηση του δείγματος στον υποδοχέα και ζύγιση (m₂)
4. Σταδιακή προσθήκη 150ml H₂O₂ στο δείγμα και ανακάτεμα με γυάλινη ράβδο
5. Κάλυψη του υποδοχέα με καπάκι για όλο το βράδυ (συνέχιση της αντίδρασης)
6. Αφαίρεση της κάλυψης και θέρμανση του μείγματος στους 60°C (έλεγχος με θερμόμετρο) για την μείωση του όγκου του περιπού στα 50ml
7. Επανάληψη των βημάτων (4) και (5) μέχρι το σημείο όπου δεν αντιδρά το H₂O₂ με το έδαφος
8. Τοποθέτηση του υποδοχέα με το εδαφικό δείγμα στον φούρνο σε θερμοκρασία 105-110°C
9. Ζύγιση του υποδοχέα με το εδαφικό δείγμα μετά την έξοδό του από τον κλίβανο και την τοποθέτησή του στον ξηραντήρα (m₃)

Υπολογισμοί

$$OC = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100(\%) \quad (3.26)$$

Τα αποτελέσματα των τιμών ποσοστού των οργανικών συστατικών δίνονται με ακρίβεια 0,1%.

Κεφάλαιο 4

Πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών και μελετηθέν έδαφος

4.1. Πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών

Το πρόγραμμα των εργαστηριακών δοκιμών που εκτελέστηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας περιελάμβανε:

- (a) Δοκιμή οιδημέτρου για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών συμπιεστότητας ενός αργιλικού δείγματος.
- (b) Δοκιμή προσδιορισμού του ειδικού βάρους στερεών κόκκων, G_s .
- (c) Δοκιμές προσδιορισμού της κοκκομετρίας του εδάφους, με τη μέθοδο της υγρής κοκκομετρίας και τη μέθοδο του αραιομέτρου.
- (d) Δοκιμές προσδιορισμού των ορίων Atterberg και συγκεκριμένα του ορίου πλαστικότητας, WP, και του ορίου υδαρότητας, WL, με την μέθοδο του κώνου διείδυσης.
- (e) Δοκιμή προσδιορισμού της οργανικής ύλης με τη μέθοδο του υπεροξειδίου του υδρογόνου, H_2O_2 .
- (f) Δοκιμή του κώνου διείδυσης για την εκτίμηση της ευαισθησίας του εδάφους, S_i .

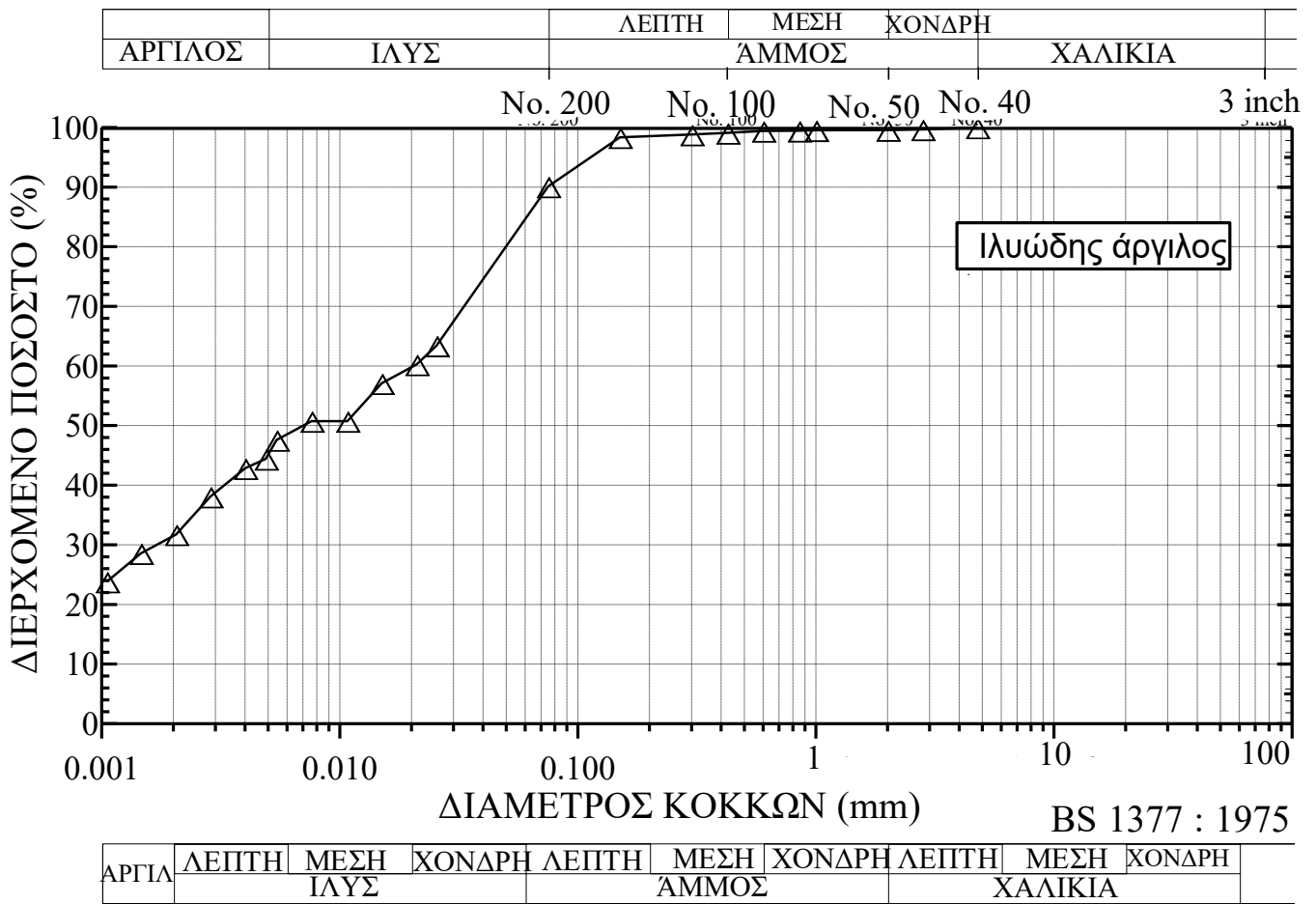
Σημειώνεται πως λόγω της ύπαρξης οργανικών στο έδαφος η λειτουργία του κλιβάνου ήταν αυστηρά στους $60^\circ C$.

4.2. Μελετηθέν έδαφος

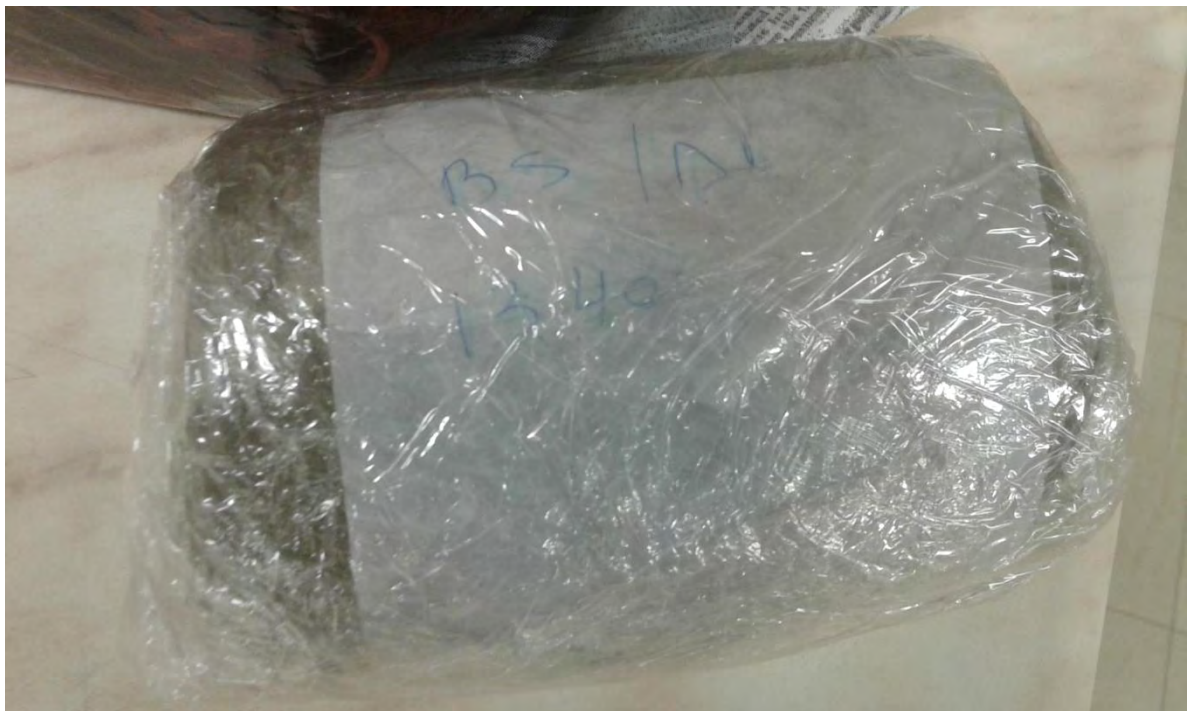
Το πρόγραμμα των εργαστηριακών δοκιμών εκτελέστηκε σε φυσικό αργιλικό δείγμα προερχόμενο από το λιμάνι Christchurch της Νέας Ζηλανδίας και συγκεκριμένα από βάθος 13,4 μέτρων. Όπως φαίνεται από την κοκκομετρική καμπύλη στο Σχήμα 4.1 και τις τιμές των ορίων Atterberg, το έδαφος χαρακτηρίζεται ως ιλυώδης άργιλος μικρής πλαστικότητας, CL κατά USCS.

Πίνακας 4.1 Πίνακας φυσικών ιδιοτήτων του εδάφους

G_s	$w_n(\%)$	WL(%)	WP(%)	PI(%)	CF(%)	LI(%)	OCR
2.706	39.4	36.5	22.1	14.4	32	0.202	1.12



Σχήμα 4.1 Κοκκομετρική καμπύλη εδάφους



Εικόνα 4.1: Φωτογραφία εδαφικού δείγματος



Εικόνα 4.2: Φωτογραφία εδαφικού δείγματος

Με βάση τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών ταξινόμησης και τις φωτογραφίες του μελετηθέντος εδάφους, το έδαφος περιγράφεται ως :

« πολύ μαλακή, σκουρότερη, ιλυώδης άργιλος μικρής πλαστικότητας με μικρό ποσοστό οργανικών (4%) και λίγα θραύσματα οστράκων».

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών διείσδυσης σε αναζυμωμένο δείγμα και αδιατάρακτο δείγμα στην ίδια υγρασία ($w = w_n = 39.4\%$), εκτιμήθηκε η ευαισθησία του εδάφους

$$S_t = \frac{H_{\text{αναζυμωμένο}}^2}{H_{\text{αδιατάρακτο}}^2} = \frac{31.29^2}{8.2^2} = 14.56 \quad (3.27)$$

Όπου H = βάθος διείσδυσης σε (mm)

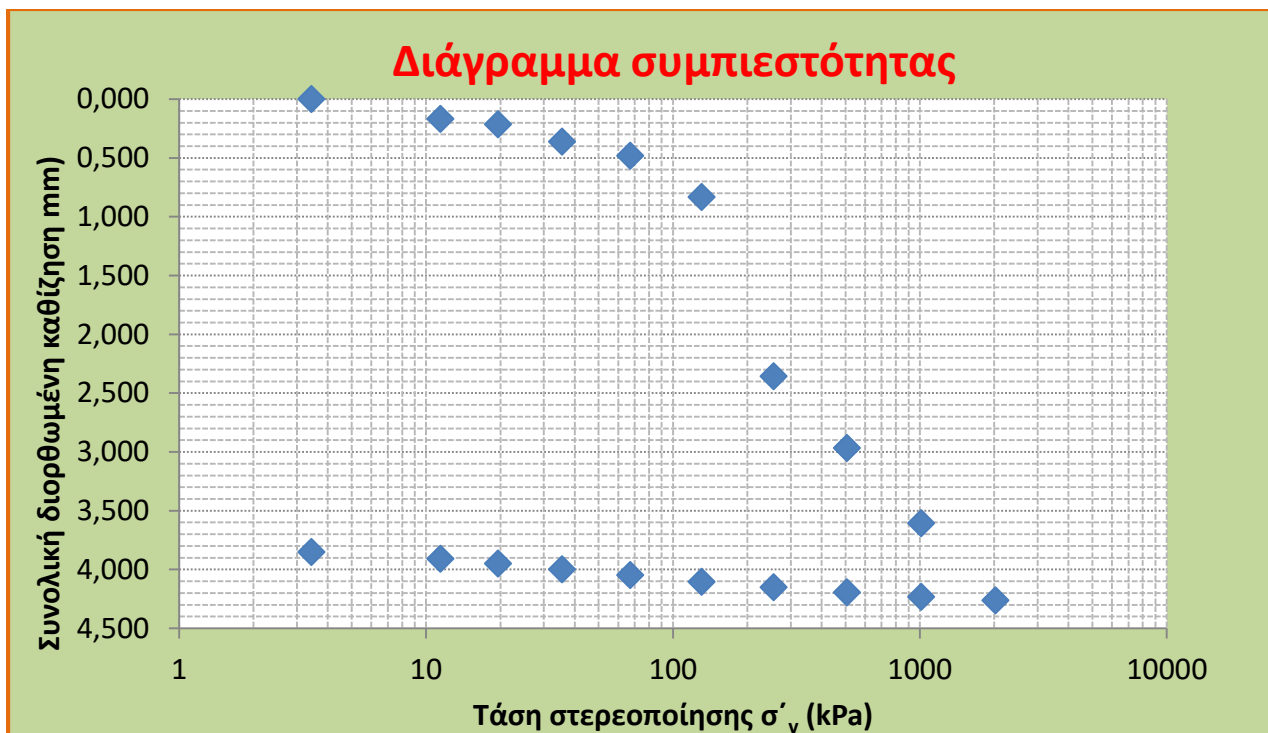
Σύμφωνα με την αμερικάνικη κατάταξη το έδαφος χαρακτηρίζεται ως άργιλος υψηλής ευαισθησίας ($8 < S_t < 16$), ενώ σύμφωνα με τη σουηδική ως μέσης ευαισθησίας ($10 < S_t < 30$).

Κεφάλαιο 5

Αποτελέσματα δοκιμής οιδημέτρου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής οιδημέτρου με την μορφή διαγραμμάτων.

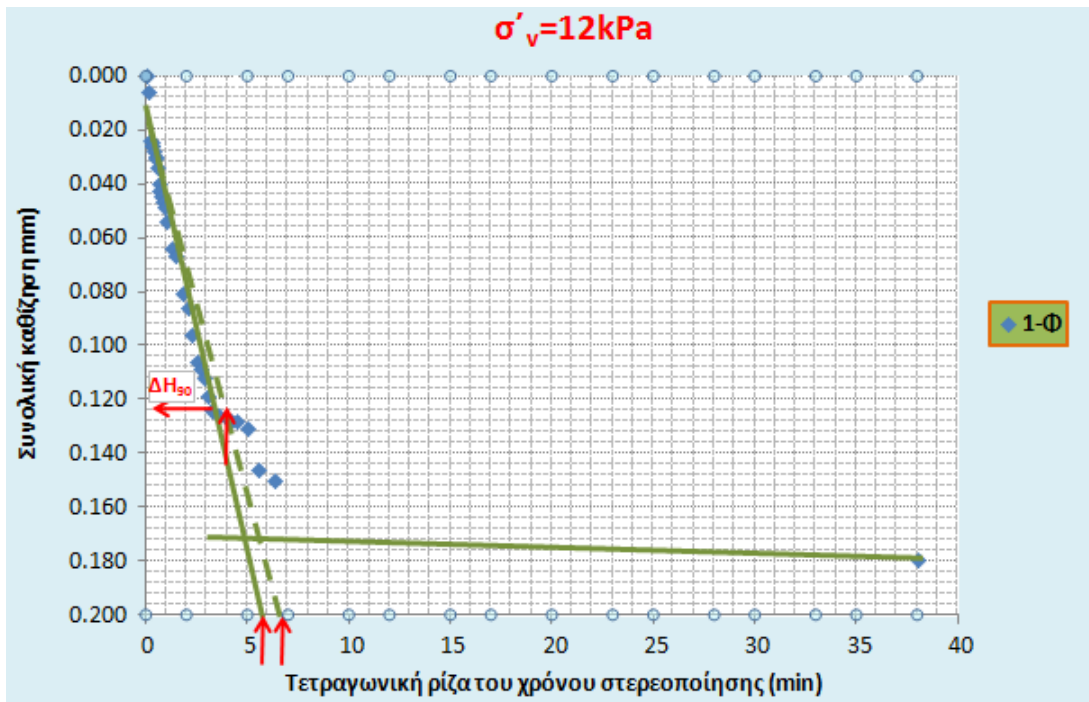
Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται η μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου σε όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης της δοκιμής, δηλαδή σε διάφορα επίπεδα της ενεργής κατακόρυφης τάσης, σ'_v . Όπως παρατηρείται στο ημιλογαριθμικό αυτό διάγραμμα, κατά την φόρτιση του δοκιμίου αρχικά η κλίση της καμπύλης που περιγράφει την μεταβολή της καθίζησης με την σ'_v είναι μικρή ενώ στην συνέχεια αυξάνεται σημαντικά. Αντιθέτως στον κλάδο της αποφόρτισης η κλίση είναι πολύ μικρή και ανεξάρτητη της σ'_v .



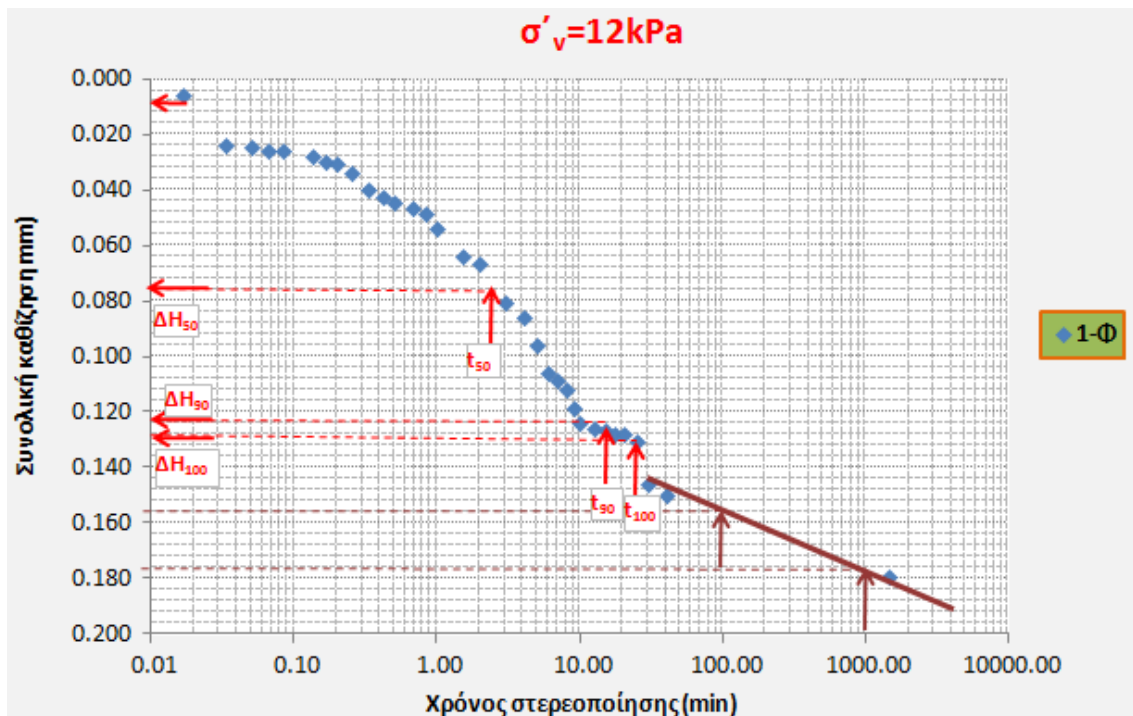
Σχήμα 5.1 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου στα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου

Στα Σχήματα 5.2 και 5.3 παρουσιάζεται η μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης, και με το χρόνο στερεοποίησης σε λογαριθμική κλίμακα, για το πρώτο στάδιο φόρτισης της δοκιμής οιδημέτρου με $\sigma'_v = 12$ kPa. Από το Σχήμα 5.2 προσδιορίζεται ο χρόνος στερεοποίησης t_{90} και η καθίζηση του δοκιμίου ΔH_{90} που αντιστοιχούν σε βαθμό στερεοποίησης $U=90\%$. Από το Σχήμα 5.3 προσδιορίζεται ο χρόνος στερεοποίησης t_{50} και η καθίζηση του δοκιμίου ΔH_{50} που αντιστοιχούν σε βαθμό στερεοποίησης $U=50\%$. Οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του συντελεστή στερεοποίησης, c_v , και του συντελεστή διαπερατότητας, k , για το επίπεδο της τάσης που μετρήθηκε, δηλαδή $\sigma'_v = 12$ kPa. Από το Σχήμα 5.3 προσδιορίζεται επίσης ο συντελεστής δευτερεύουσας συμπίεσης, C_{sec} .

Όπως φαίνεται η κλίση της καμπύλης της δευτερεύουσας συμπίεσης είναι σημαντική στο διάστημα του χρόνου που μελετήθηκε ($t < 24h$) και για $\sigma'_v = 12 \text{ kPa}$.

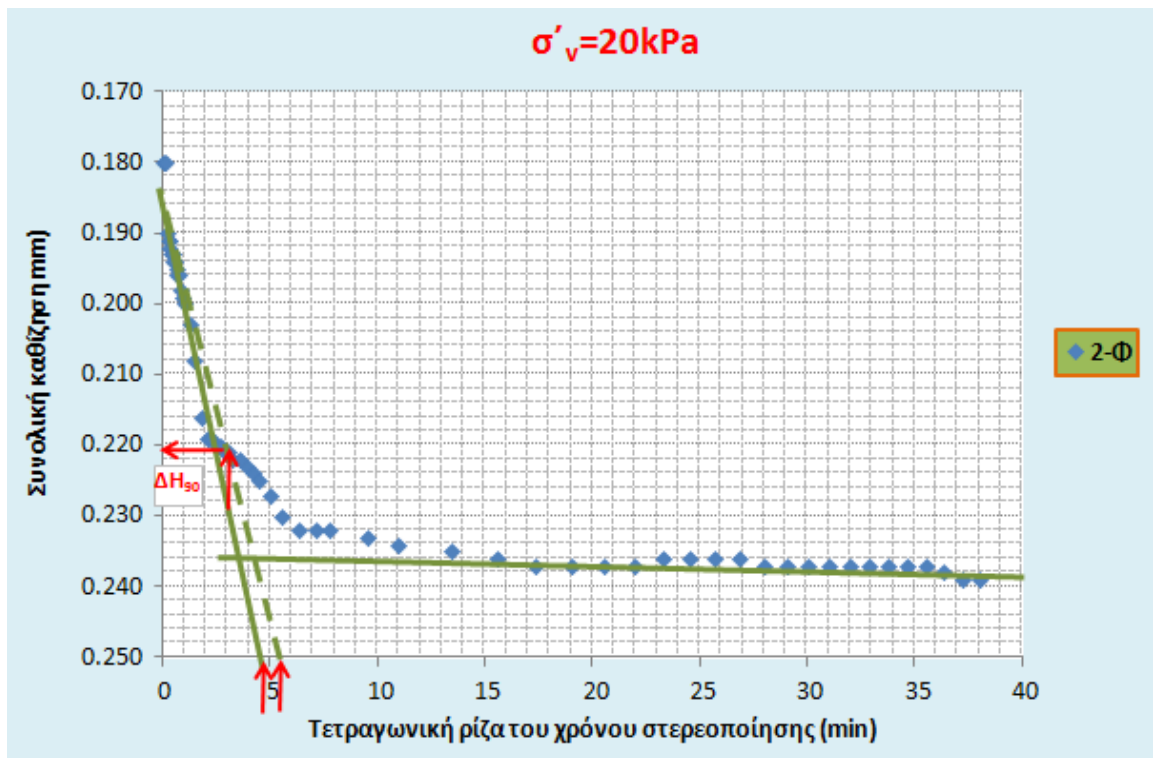


Σχήμα 5.2 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 1^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 12 \text{ kPa}$

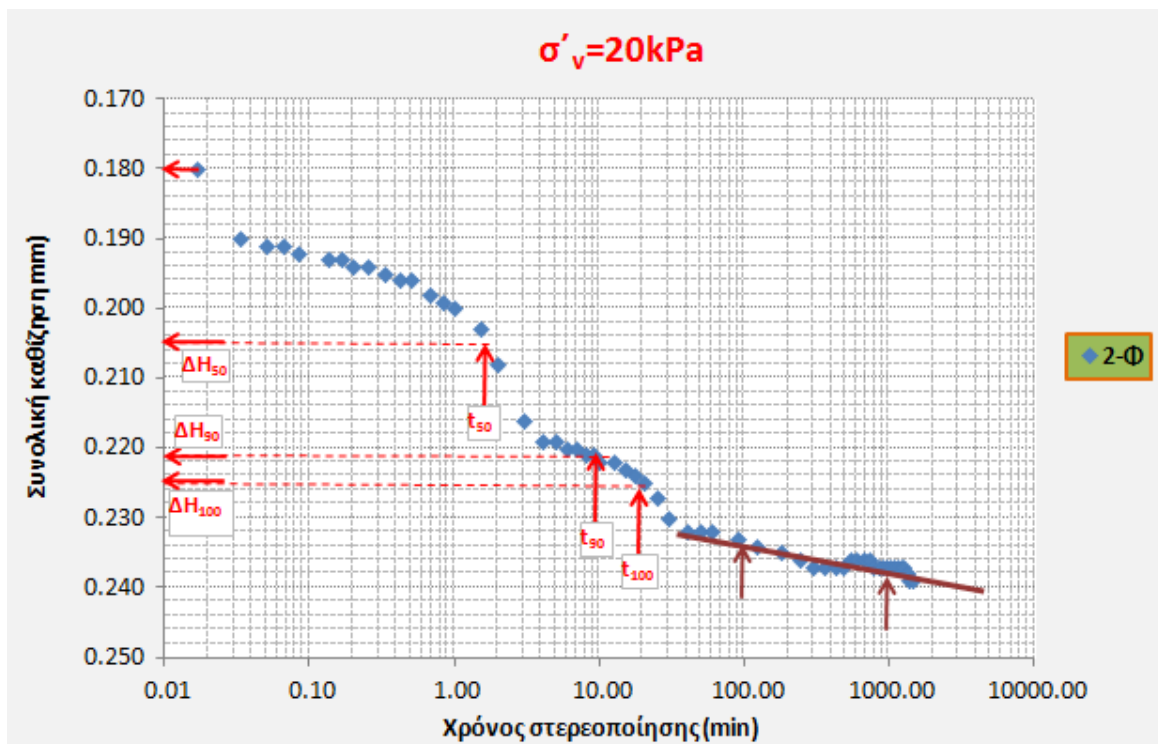


Σχήμα 5.3 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 1^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 12 \text{ kPa}$

Στα Σχήματα 5.4 και 5.5 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το δεύτερο στάδιο φόρτισης της δοκιμής οιδημέτρου με $\sigma'_v = 20 \text{ kPa}$.

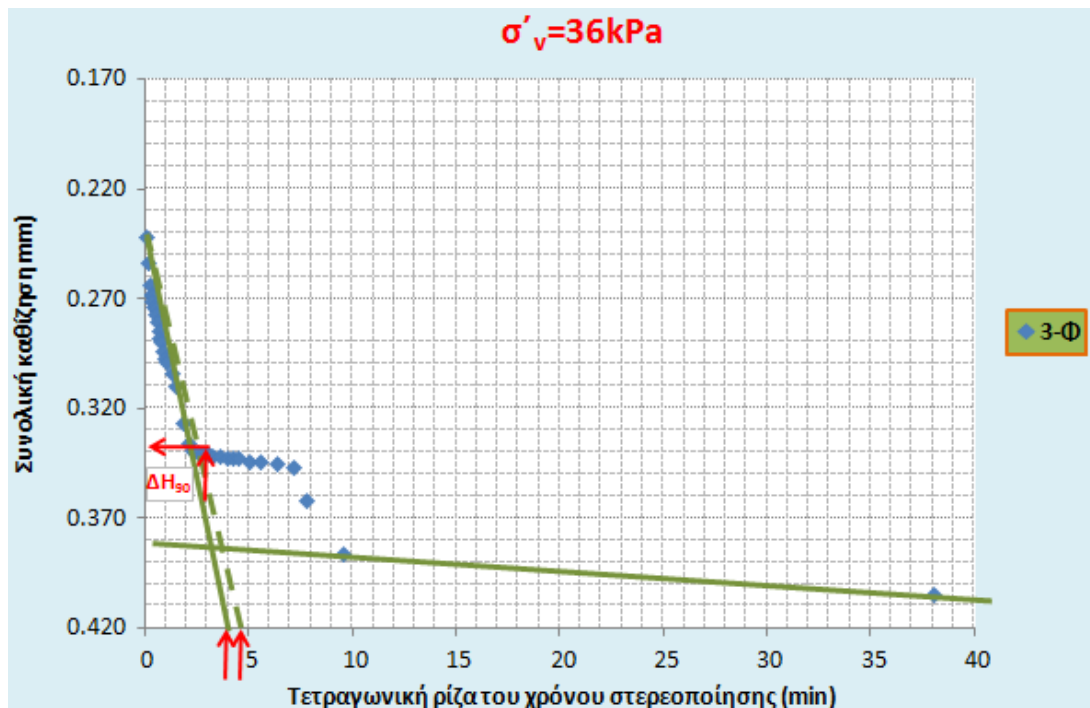


Σχήμα 5.4 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 2^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 20 \text{ kPa}$

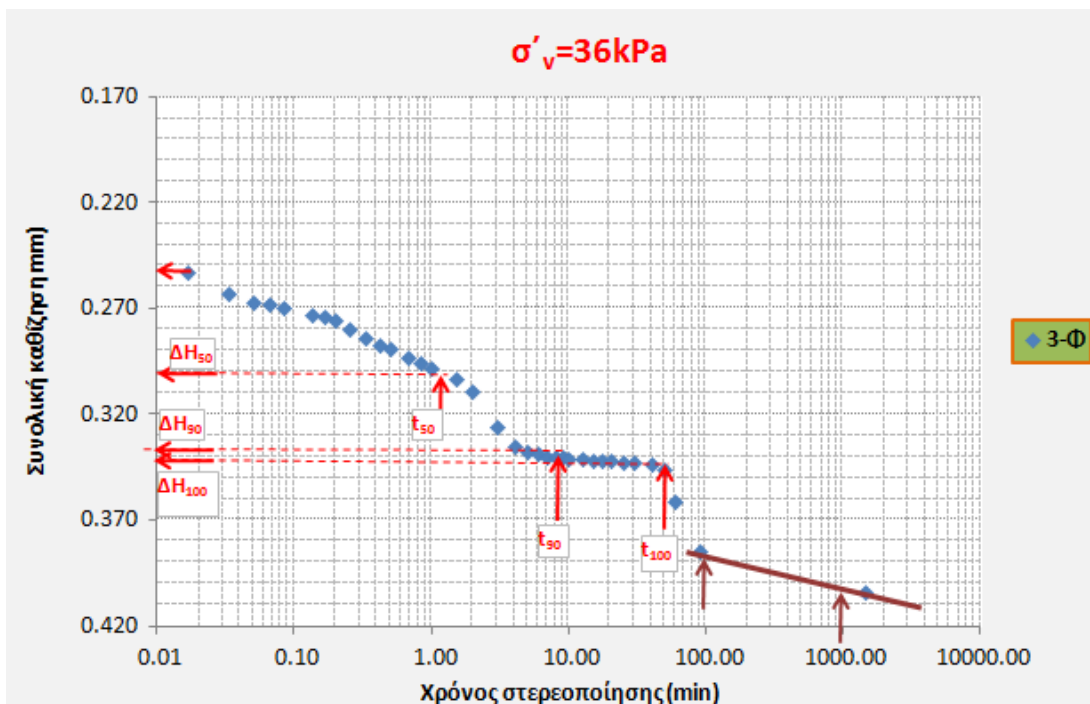


Σχήμα 5.5 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 2^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 20 \text{ kPa}$

Στα Σχήματα 5.6 και 5.7 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το τρίτο στάδιο φόρτισης της δοκιμής οιδημέτρου με $\sigma'_v = 36 \text{ kPa}$.

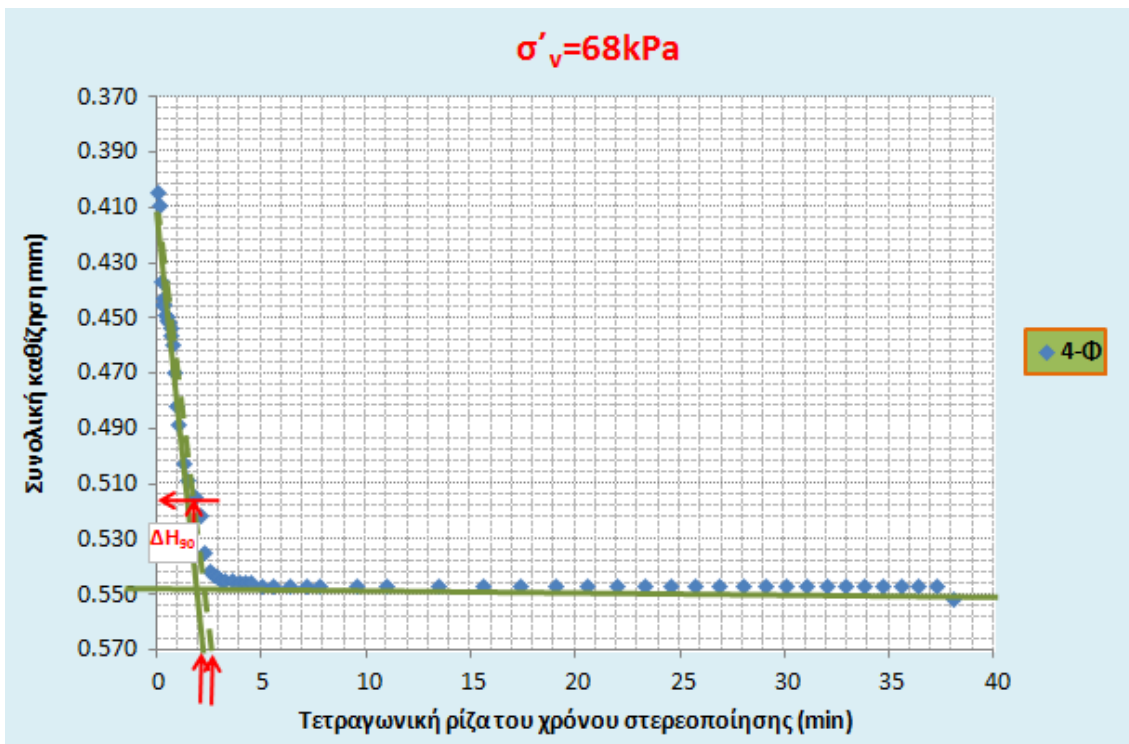


Σχήμα 5.6 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 3^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_{v}=36\text{kPa}$

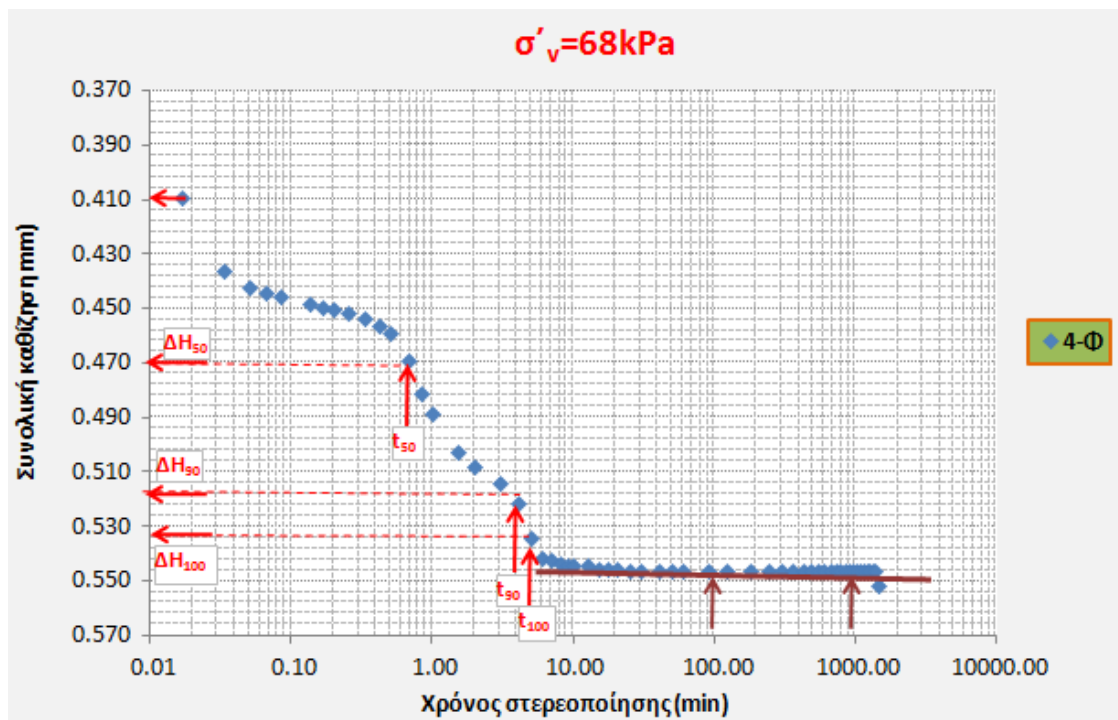


Σχήμα 5.7 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 3^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_{v}=36\text{kPa}$

Στα Σχήματα 5.8 και 5.9 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το τέταρτο στάδιο φόρτισης της δοκιμής οιδημέτρου με $\sigma'_{v} = 68 \text{ kPa}$.

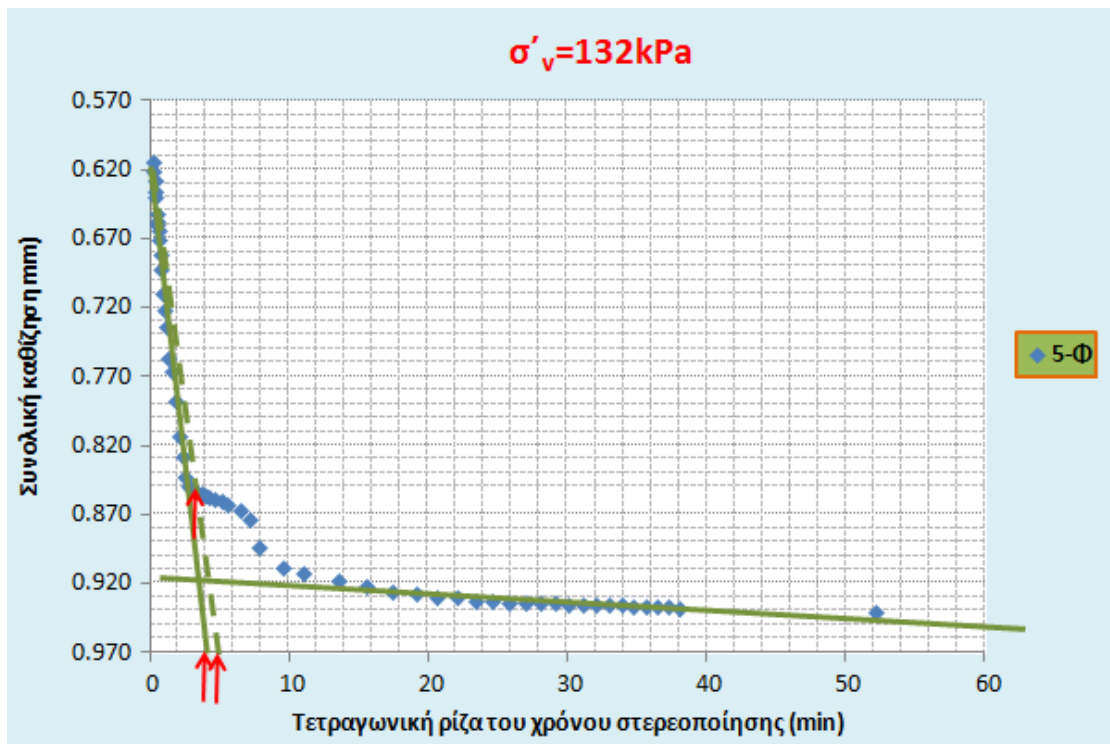


Σχήμα 5.8 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 4^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 68 \text{ kPa}$

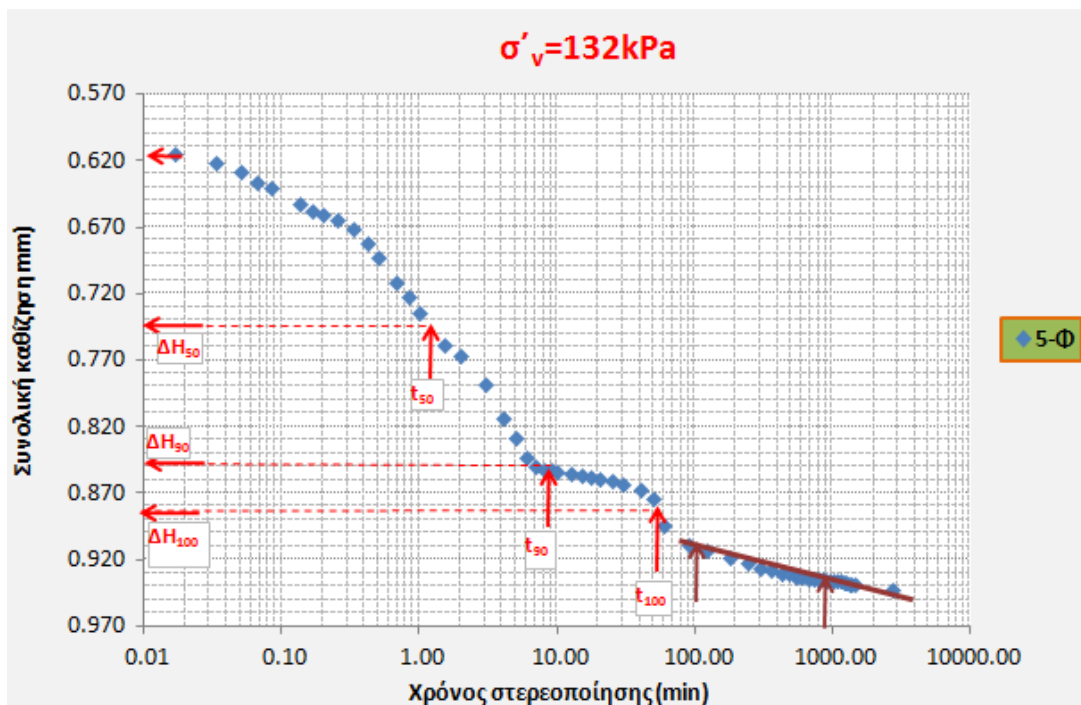


Σχήμα 5.9 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 4^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 68 \text{ kPa}$

Στα Σχήματα 5.10 και 5.11 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το πέμπτο στάδιο φόρτισης της δοκιμής οιδημέτρου με $\sigma'_v = 132 \text{ kPa}$.

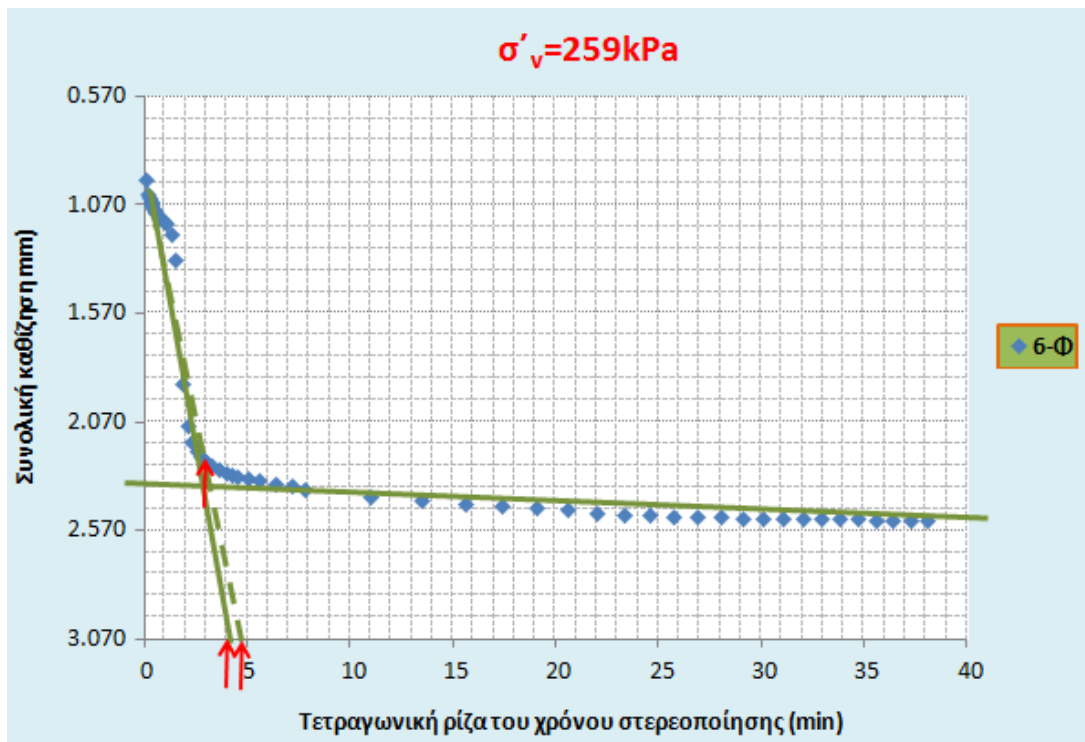


Σχήμα 5.10 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 5^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_{v}=132\text{kPa}$

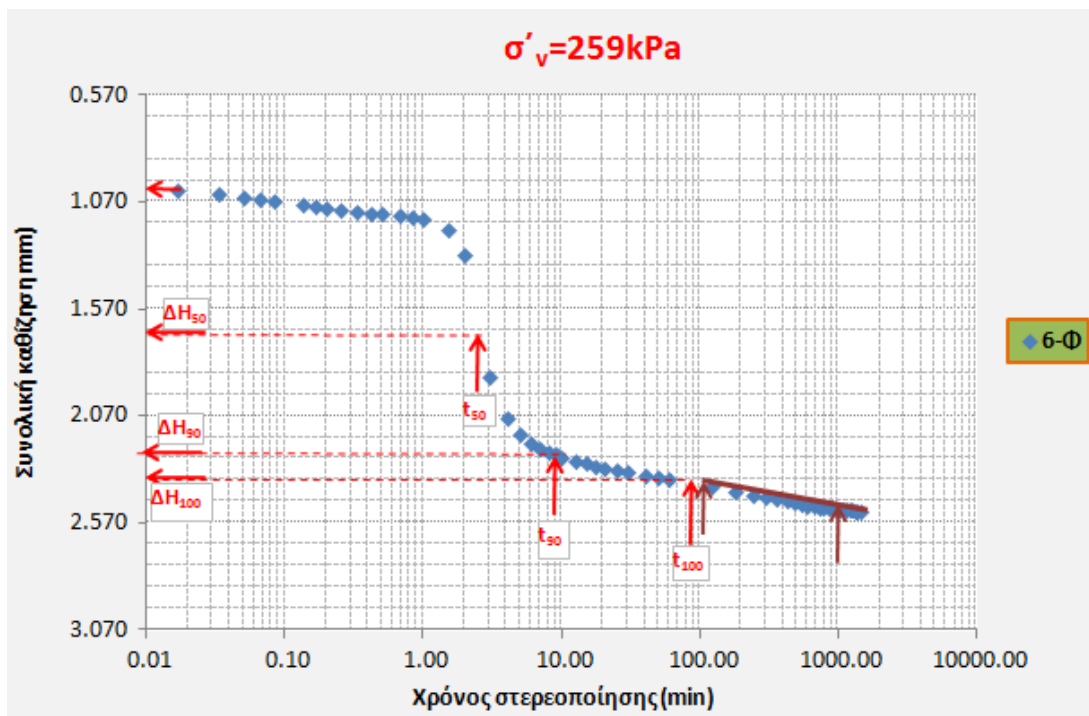


Σχήμα 5.11 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 5^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_{v}=132\text{kPa}$

Στα Σχήματα 5.12 και 5.13 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το έκτο στάδιο φόρτισης της δοκιμής οιδημέτρου με $\sigma'_{v} = 259 \text{ kPa}$.

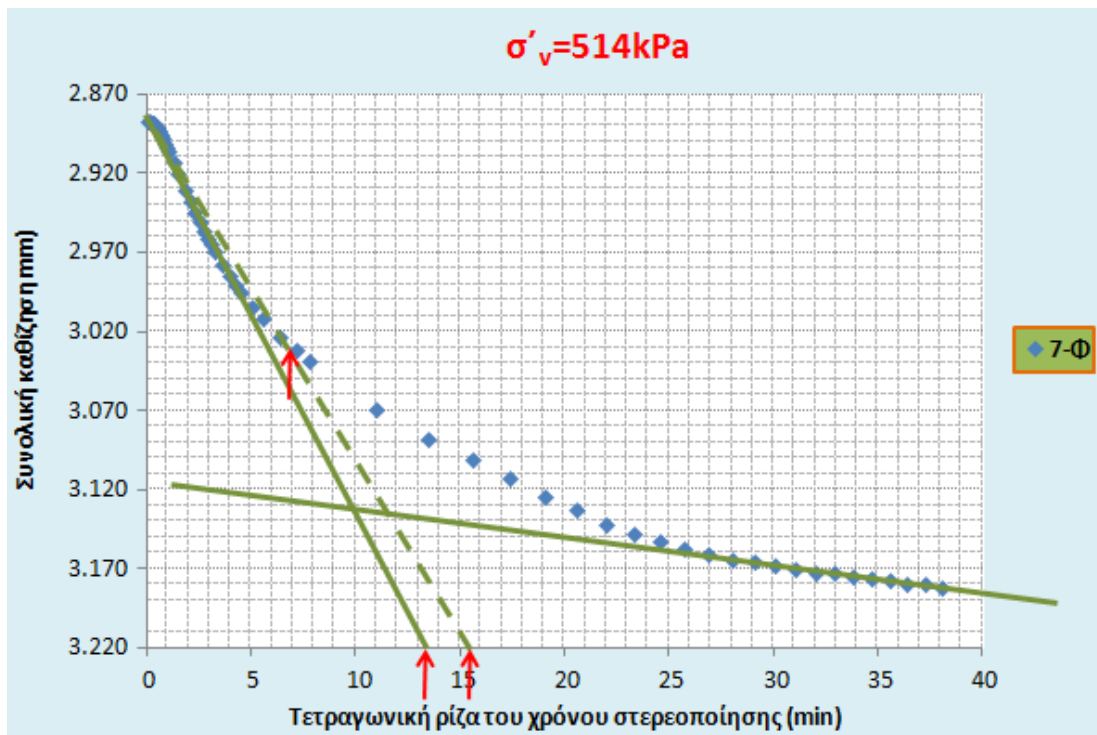


Σχήμα 5.12 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 6^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_{v}=259\text{kPa}$

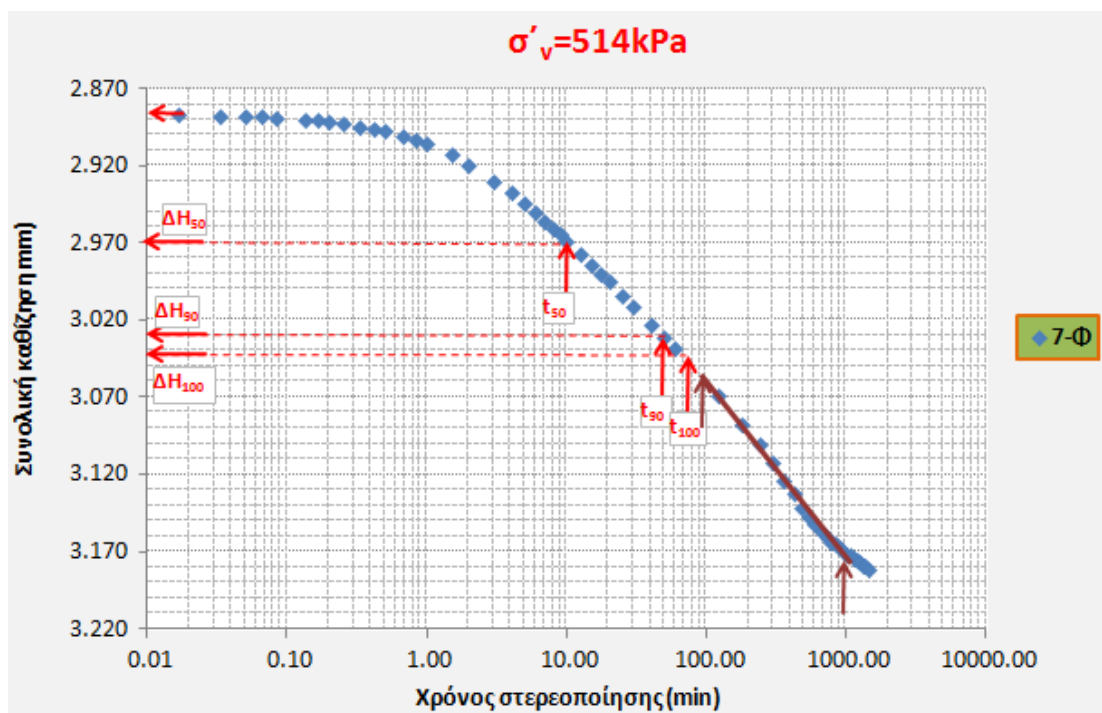


Σχήμα 5.13 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 6^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_{v}=259\text{kPa}$

Στα Σχήματα 5.14 και 5.15 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το έβδομο στάδιο φόρτισης της δοκιμής οιδημέτρου με $\sigma'_{v} = 514 \text{ kPa}$.

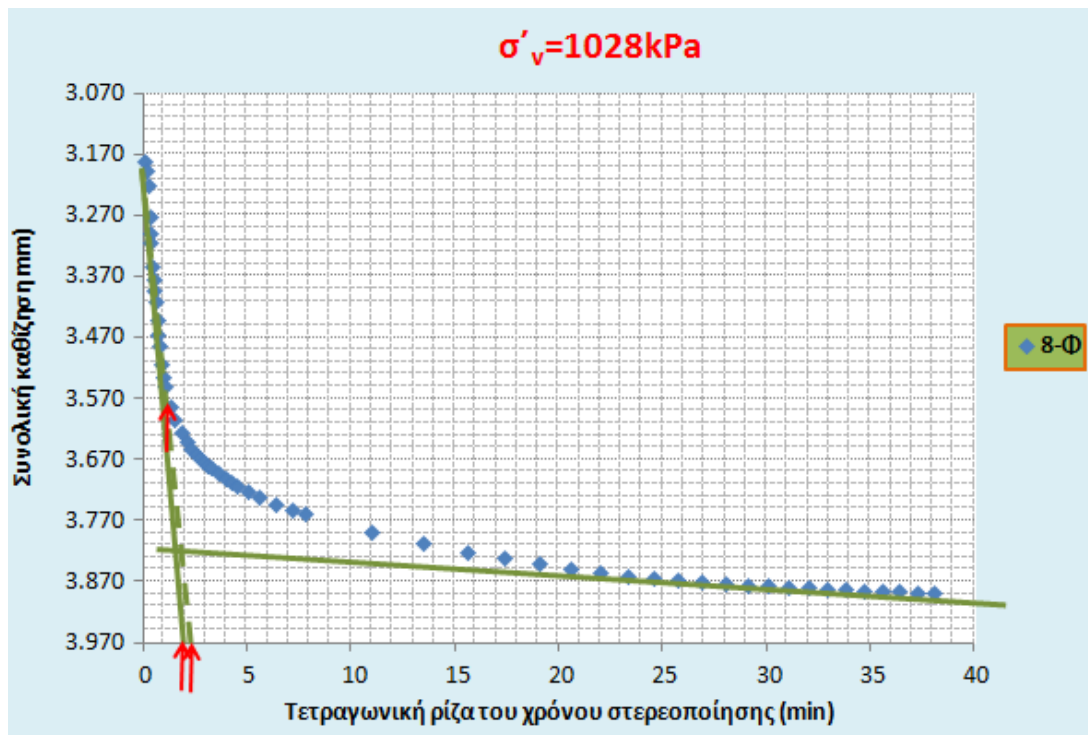


Σχήμα 5.14 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 7^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_{v}=514\text{kPa}$

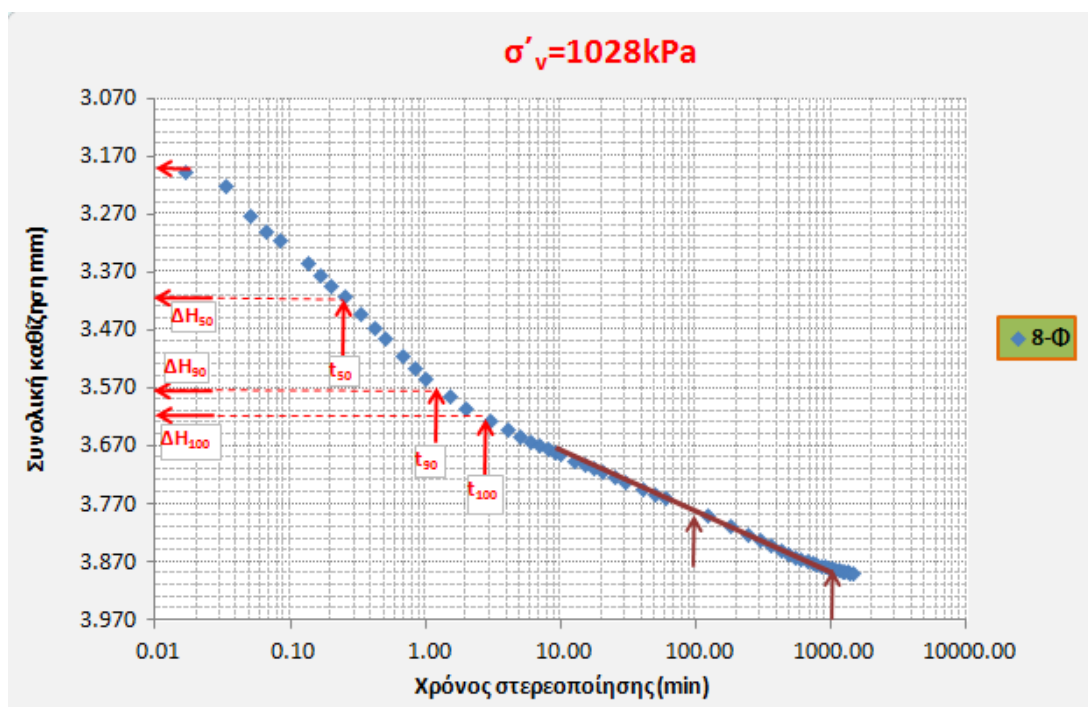


Σχήμα 5.15 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 7^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_{v}=514\text{kPa}$

Στα Σχήματα 5.16 και 5.17 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το όγδοο στάδιο φόρτισης της δοκιμής οιδημέτρου με $\sigma'_{v} = 1028 \text{ kPa}$.

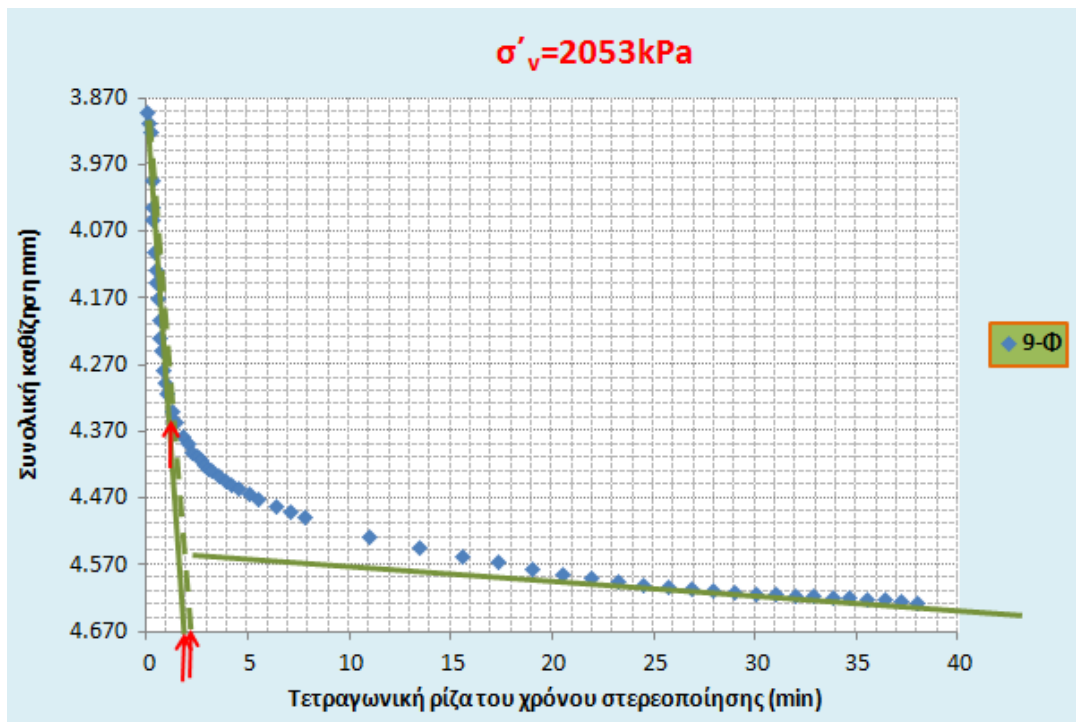


Σχήμα 5.16 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 8^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 1028 \text{ kPa}$

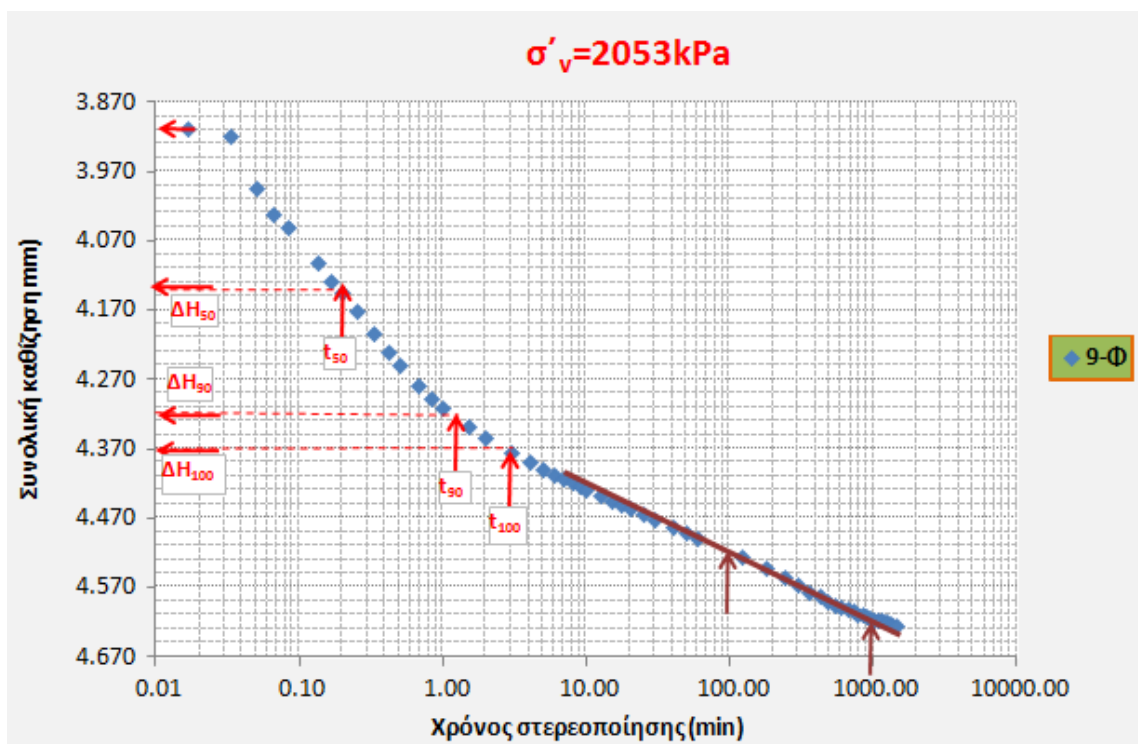


Σχήμα 5.17 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 8^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 1028 \text{ kPa}$

Στα Σχήματα 5.18 και 5.19 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το ένατο στάδιο φόρτισης της δοκιμής οιδημέτρου με $\sigma'_v = 2053 \text{ kPa}$.

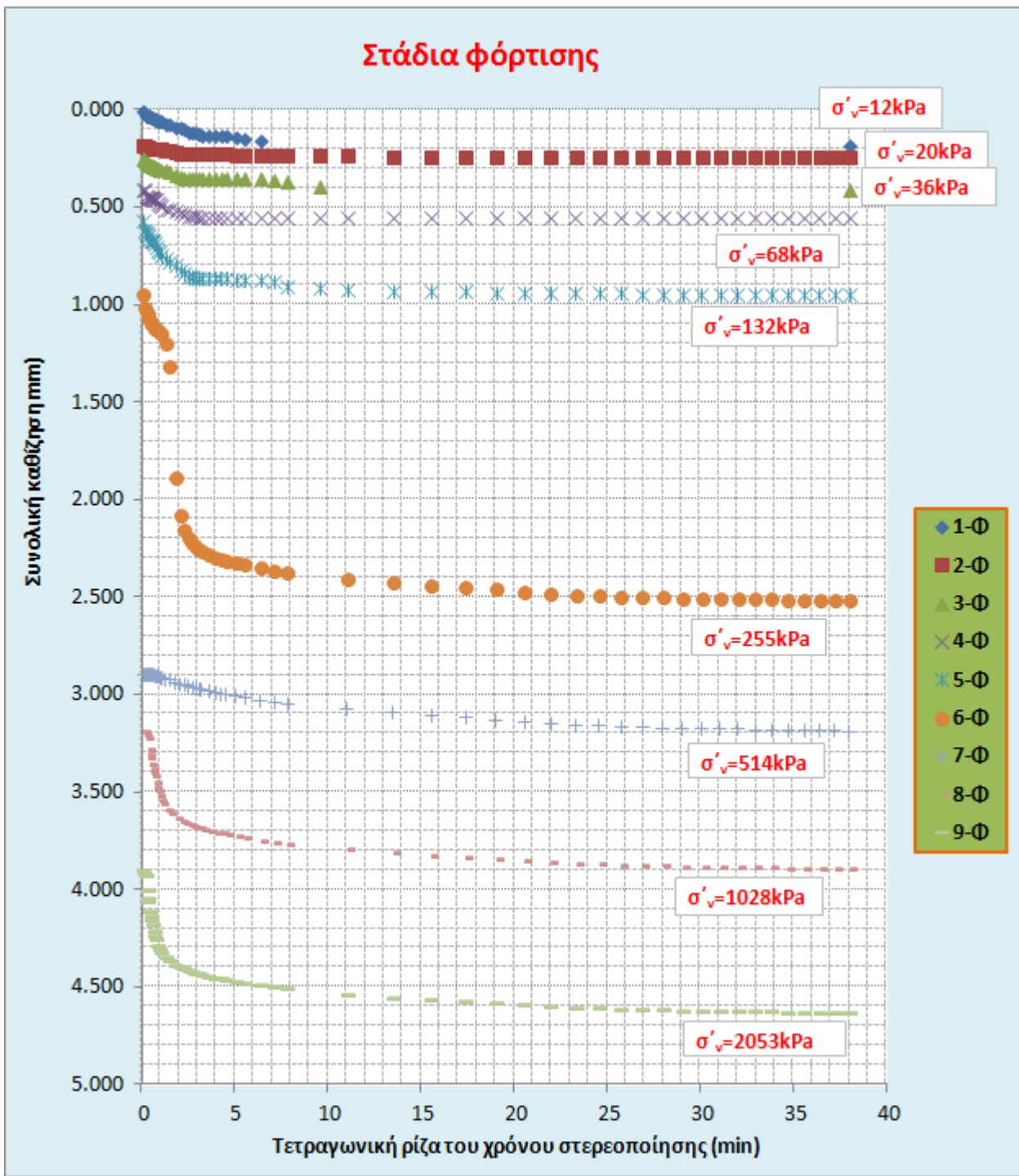


Σχήμα 5.18 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης στο 9^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 2053 \text{ kPa}$

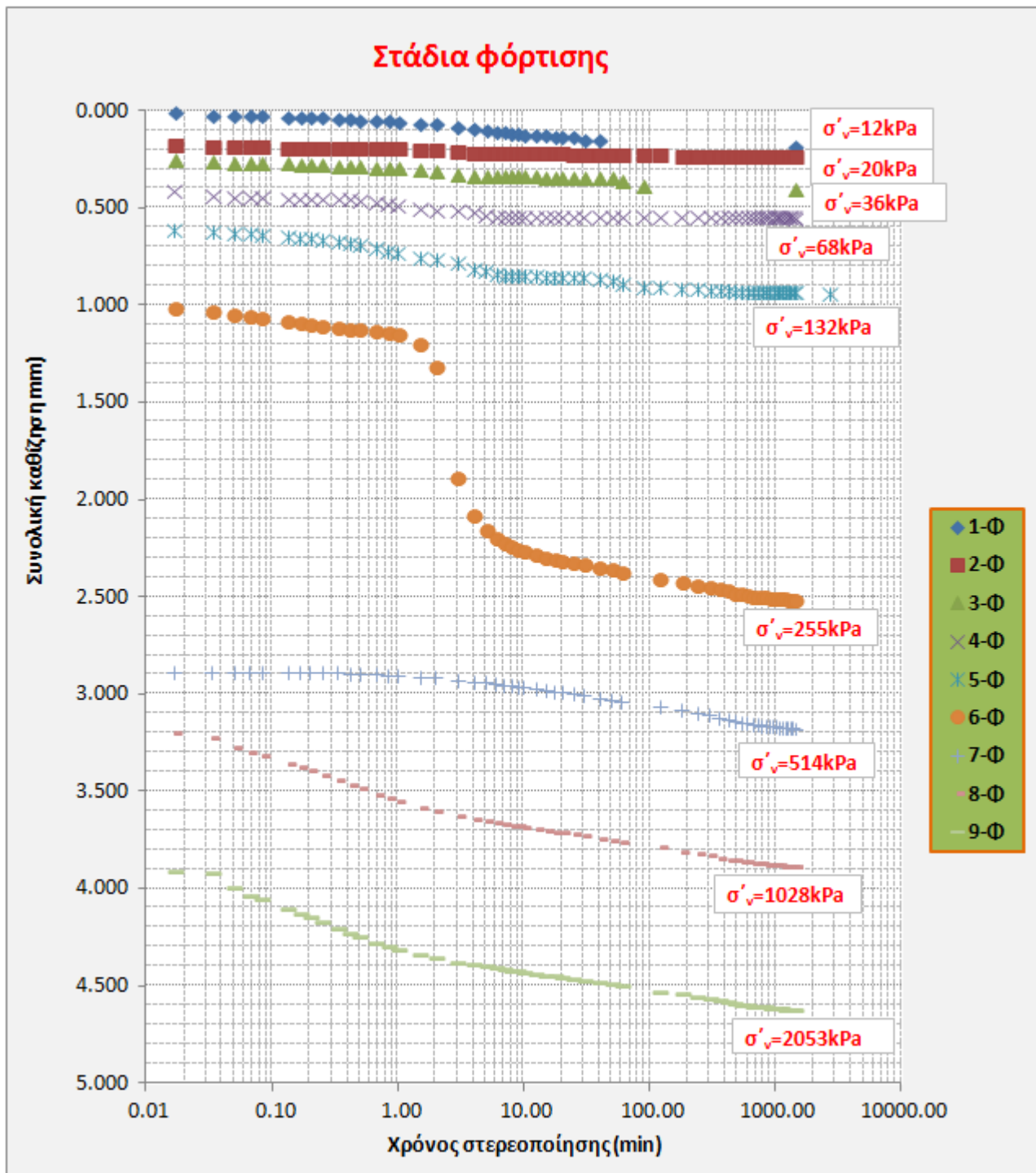


Σχήμα 5.19 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) στο 9^ο στάδιο φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 2053 \text{ kPa}$

Στα Σχήματα 5.20 και 5.21 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για όλα τα στάδια φόρτισης της δοκιμής οιδημέτρου με $\sigma'_v = 12 - 2053 \text{ kPa}$. Όπως φαίνεται στο σχήμα μεγαλύτερες καθιζήσεις παρατηρούνται για τάσεις $\sigma'_v > 259 \text{ kPa}$.

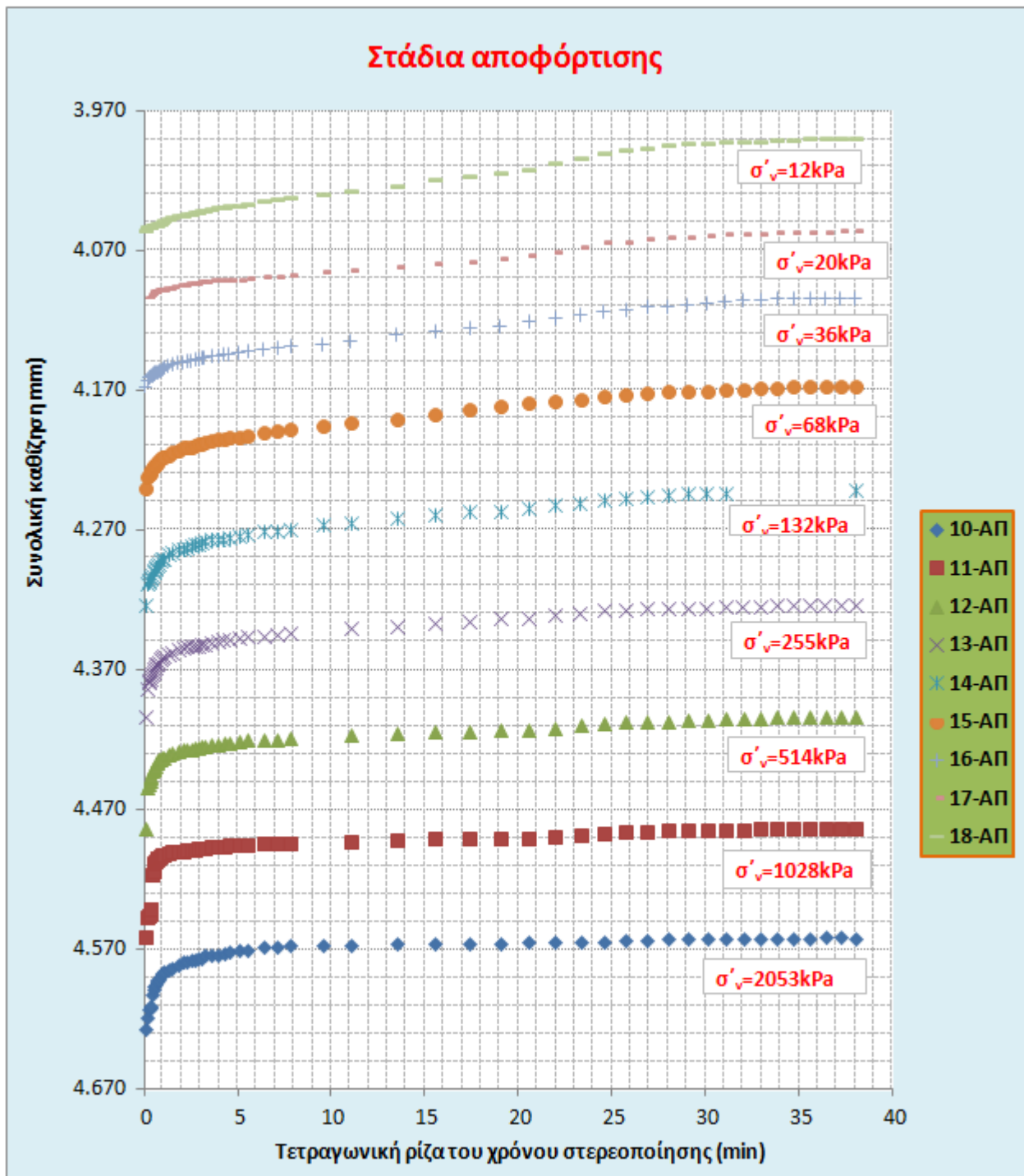


Σχήμα 5.20 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 12 - 2053 \text{ kPa}$

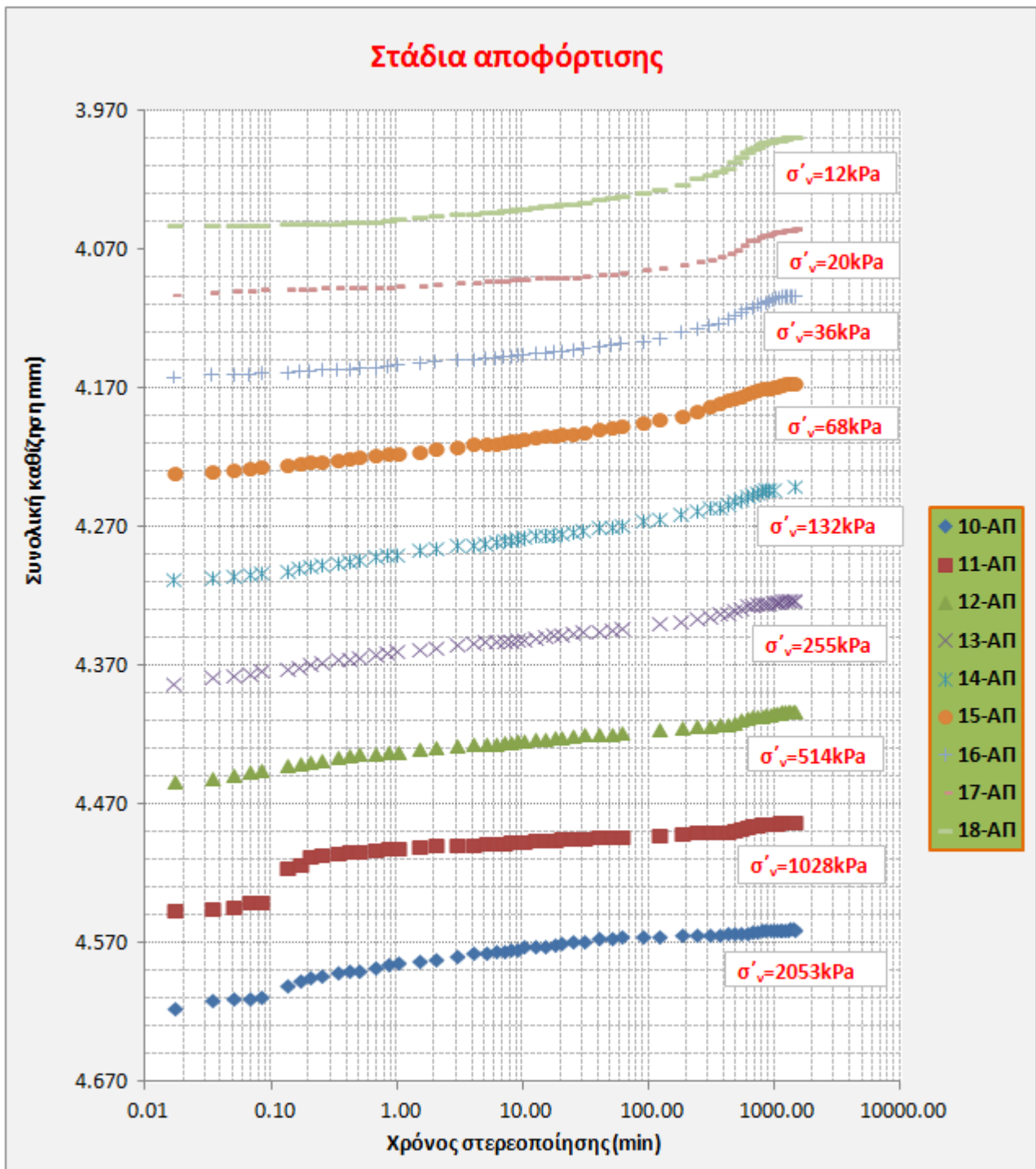


Σχήμα 5.21 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_{v}= 12 - 2053 \text{ kPa}$

Στα Σχήματα 5.22 και 5.23 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για όλα τα στάδια αποφόρτισης της δοκιμής οιδημέτρου.



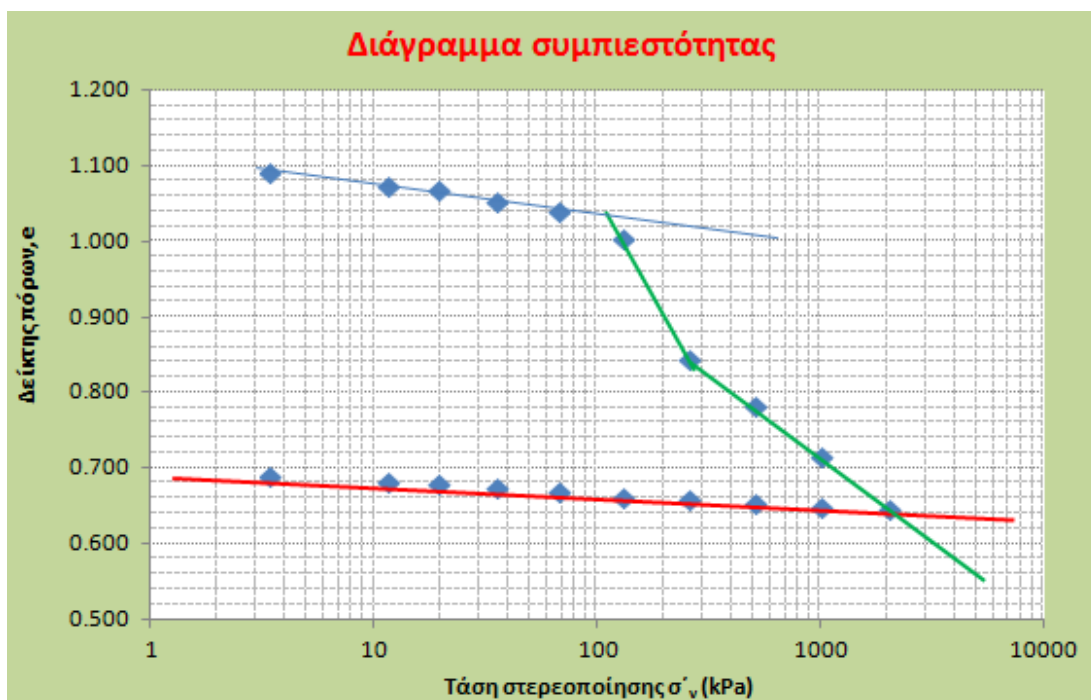
Σχήμα 5.22 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου στερεοποίησης για όλα τα στάδια αποφόρτισης του δοκιμίου



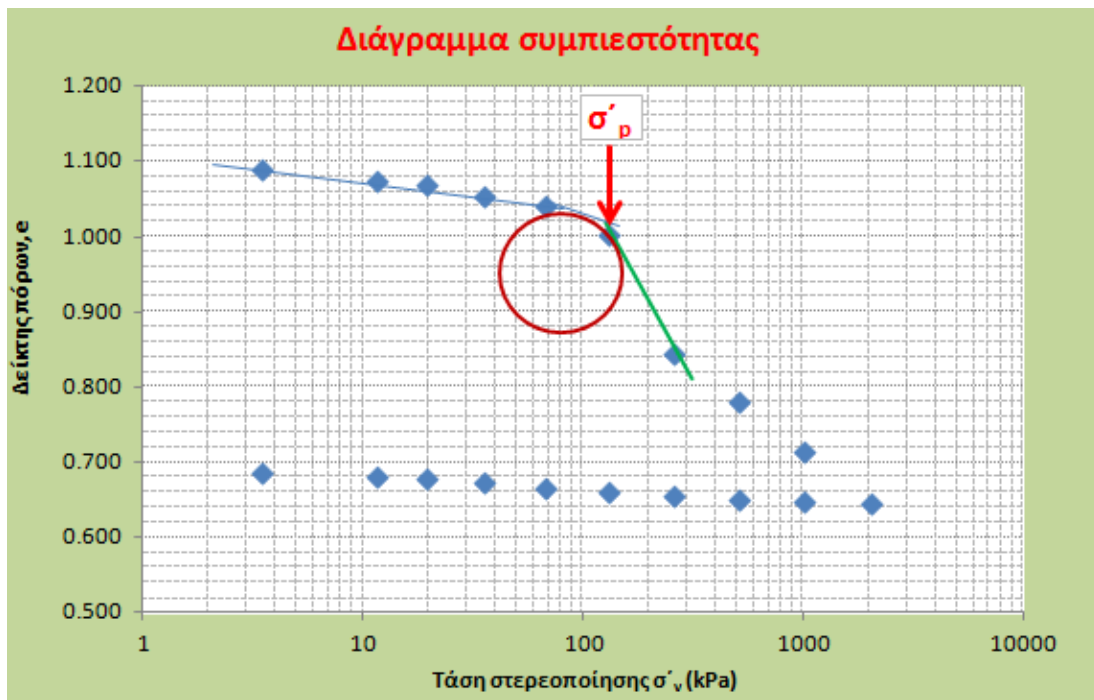
Σχήμα 5.23 Μεταβολή της καθίζησης του δοκιμίου με το χρόνο στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια αποφόρτισης του δοκιμίου

Στο Σχήμα 5.24 παρουσιάζεται η μεταβολή του δείκτη πόρων σε όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης της δοκιμής, δηλαδή σε διάφορα επίπεδα της ενεργής κατακόρυφης τάσης σ'_v . Όπως παρατηρείται, το ημιλογαριθμικό αυτό διάγραμμα έχει την ίδια μορφή με το διάγραμμα του Σχήματος 5.1. Παρατηρείται ακόμη πως κατά τα στάδια φόρτισης η σχέση $e - \log \sigma'_v$ περιγράφεται με τρία ευθύγραμμα τμήματα: το πρώτο έχει τη μικρότερη κλίση και ισχύει για τάσεις $\sigma'_v < 110$ kPa περίπου, το δεύτερο έχει την μεγαλύτερη κλίση και ισχύει για τάσεις $110 \text{ kPa} < \sigma'_v < 255$ kPa και το τρίτο έχει μεγαλύτερη κλίση από το πρώτο τμήμα και μικρότερη από το δεύτερο και ισχύει

για τάσεις $255 \text{ kPa} < \sigma'_v < 2053 \text{ kPa}$. Για τη φάση της αποφόρτισης η κλίση $e - \log \sigma'_v$ είναι μικρή, ενιαία, ανεξάρτητη της σ'_v , και παρόμοια της $e - \log \sigma'_v$ της φόρτισης του δοκιμίου για $\sigma'_v < 110 \text{ kPa}$. Καθώς η τάση πεδίου του εδάφους έχει εκτιμηθεί περίπου ίση με $\sigma'_v = 116 \text{ kPa}$, και το Σχήμα 5.25 προκύπτει πως η τάση προστερεοποίησης του δοκιμίου είναι περίπου ίση με $\sigma'_p = 130 \text{ kPa}$, συμπεραίνεται πως το έδαφος είναι κανονικά στερεοποιημένο, $\text{OCR} = 1,1$. Παρατηρώντας πάλι το Σχήμα 5.24, προκύπτει πως όταν το έδαφος βρίσκεται στην υπερστερεοποιημένη κατάσταση ο δείκτης συμπίεσης έχει την μικρότερη τιμή του που είναι $C_r = 0.015$. Όταν το έδαφος είναι στην κανονικά στερεοποιημένη κατάσταση ο δείκτης συμπίεσης δεν είναι σταθερός αλλά εξαρτάται από το επίπεδο της σ'_v . Συγκεκριμένα για τάσεις $\sigma'_v < 255 \text{ kPa}$ και για τάσεις $255 \text{ kPa} < \sigma'_v < 2053 \text{ kPa}$ ο δείκτης συμπίεσης C_c είναι αντίστοιχα ίσος με 0,548 και 0,222. Αυτή η καμπύλη $e - \log \sigma'_v$ προσομοιώνεται με καμπύλη τύπου S και είναι χαρακτηριστική των ευαίσθητων αργίλων και γίνεται εντονότερη με την αύξηση του βαθμού ευαισθησίας του εδάφους. Σύμφωνα με τους Terzaghi και Peck (1948), άργιλοι με ευαισθησία $S_t \geq 4$ παρουσιάζει καμπύλη στερεοποίησης τύπου S. Το σημείο μεταβολής της καμπύλης στο τμήμα με τη μικρότερη κλίση θεωρείται ως σημείο μετάβασης σε μια κατάσταση όπου το έδαφος αποκτά μια περισσότερο σταθερή δομή. Η εκτίμηση της ευαισθησίας του μελετηθέντος εδάφους είναι $S_t = 14,6$ και το σημείο μετάβασης στην περισσότερο σταθερή δομή αντιστοιχεί σε τάση $\sigma'_v = 255 \text{ kPa}$.

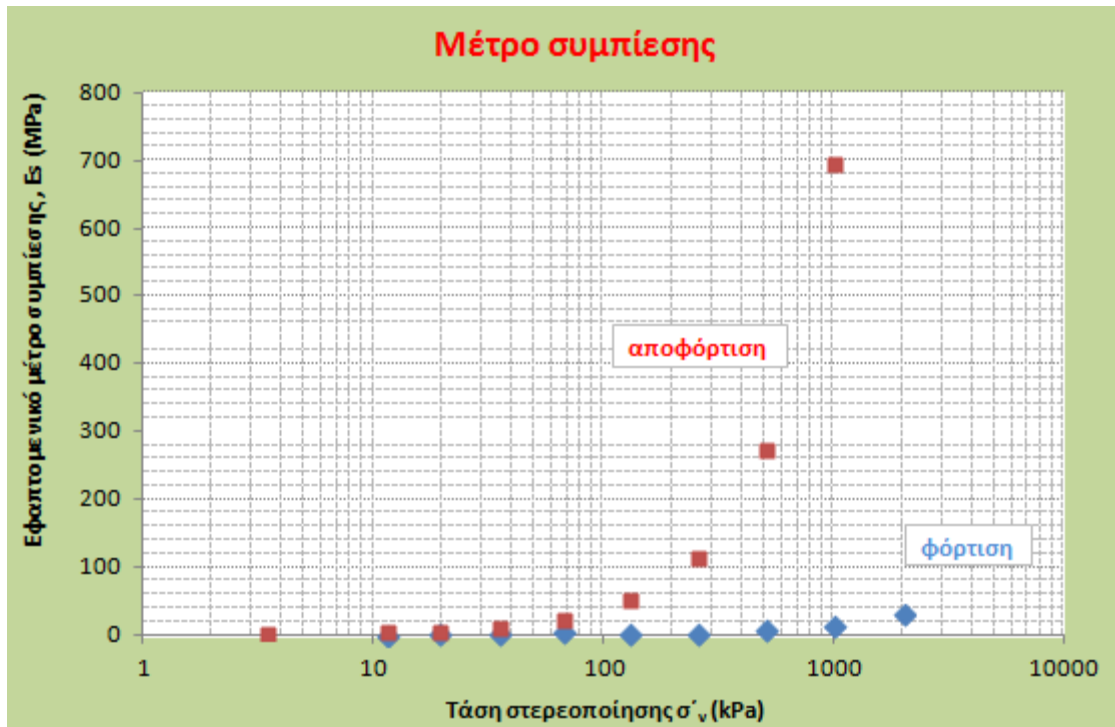


Σχήμα 5.24 Μεταβολή του δείκτη πόρων με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου για τον προσδιορισμό των δεικτών συμπίεσης

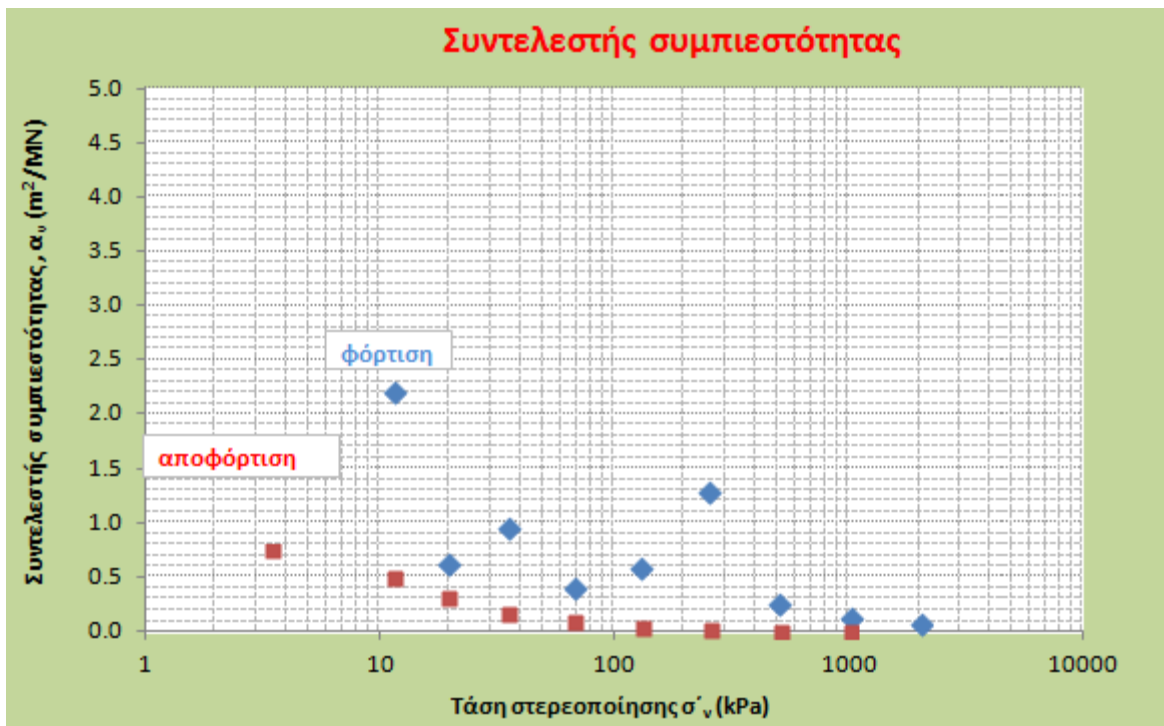


Σχήμα 5.25 Μεταβολή του δείκτη πόρων με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου για τον προσδιορισμό της τάσης προστερεοποίησης

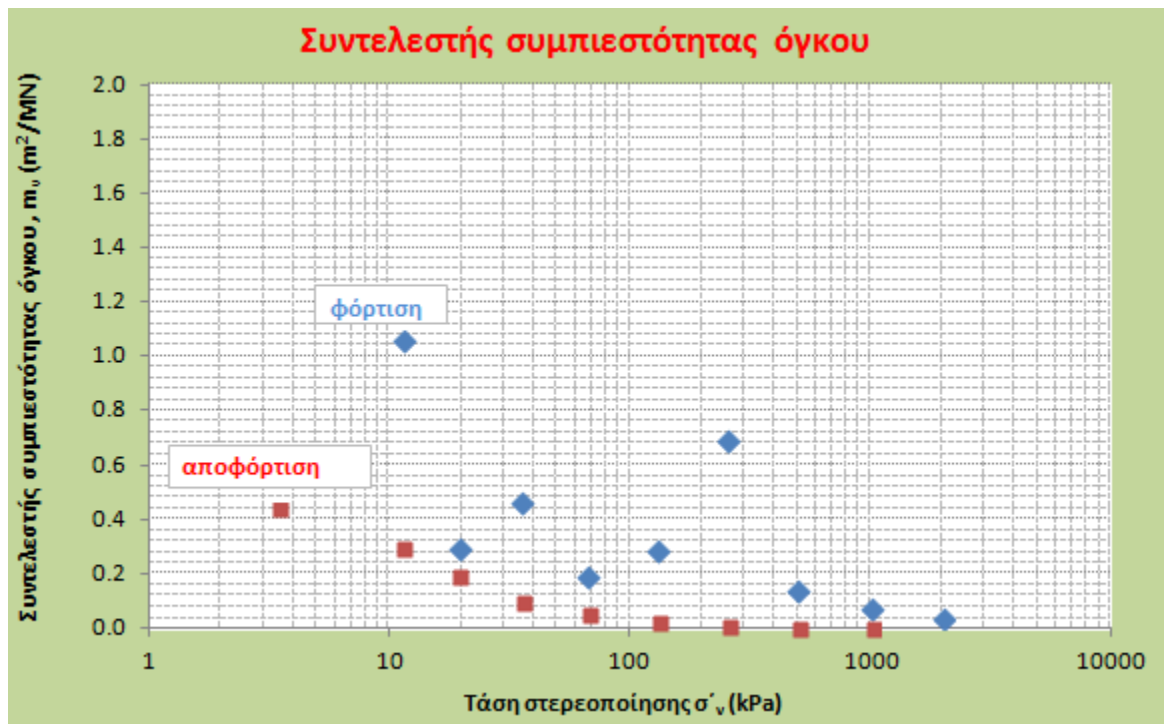
Οι τιμές του διαγράμματος $e - \log \sigma'_v$ του Σχήματος 5.24 χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του εφαπτομενικού μέτρου συμπίεσης, E_s , του συντελεστή συμπίεσότητας, α_v , και του συντελεστή συμπίεσότητας όγκου, m_v , σε όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου, δηλαδή σε διάφορα επίπεδα της σ'_v , Σχήματα 5.26, 5.27 και 5.28 αντίστοιχα. Παρατηρείται πως και οι τρεις δεν είναι σταθερές με την σ'_v , όπως ισχύει για την θεωρία Terzaghi, αλλά για τα α_v και m_v παρατηρείται γενικά μια μείωση των τιμών τους με την αύξηση της σ'_v , και ότι οι τιμές τους είναι μεγαλύτερες κατά την φάση της φόρτισης από ότι τη φάση της αποφόρτισης. Η ομαλότητα στην μείωση των τιμών της α_v και m_v με την σ'_v διαταράσσεται για την τάση των 255 kPa, όπου αποτελεί το όριο της μεταβολής του εδάφους σε μια περισσότερο σταθερή δομή και αποδίδεται στην ευαισθησία του εδάφους.



Σχήμα 5.26 Μεταβολή του εφαπτομενικού μέτρου συμπίεσης με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου

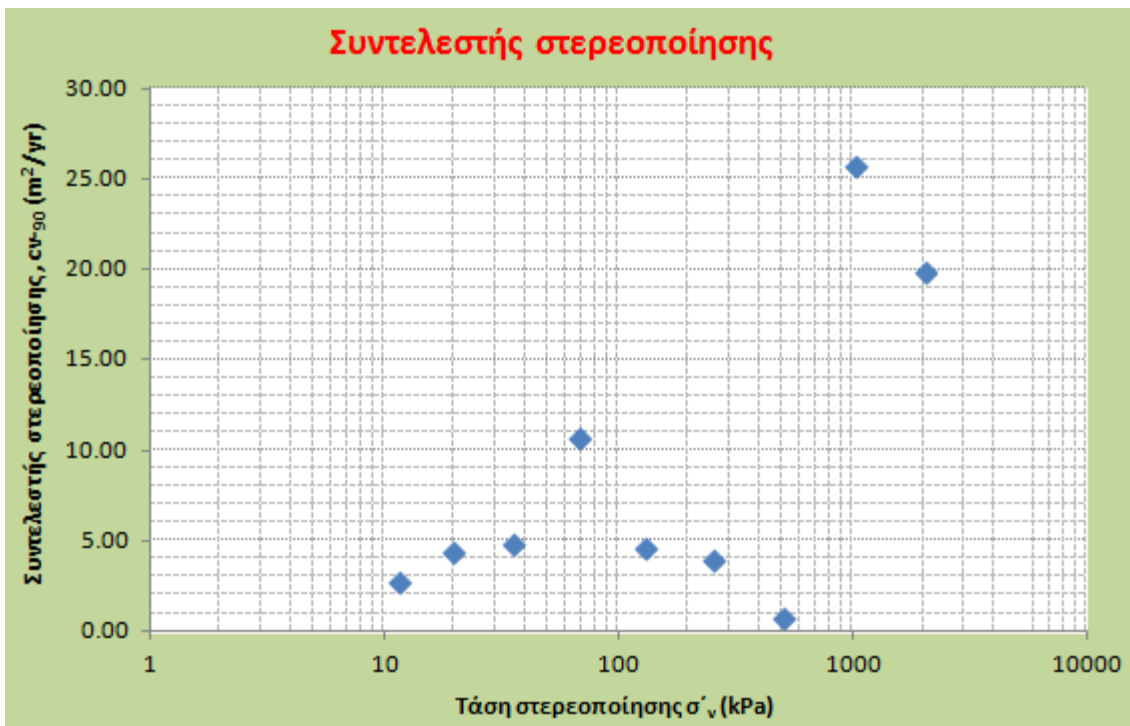


Σχήμα 5.27 Μεταβολή του συντελεστή συμπιεστότητας με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου

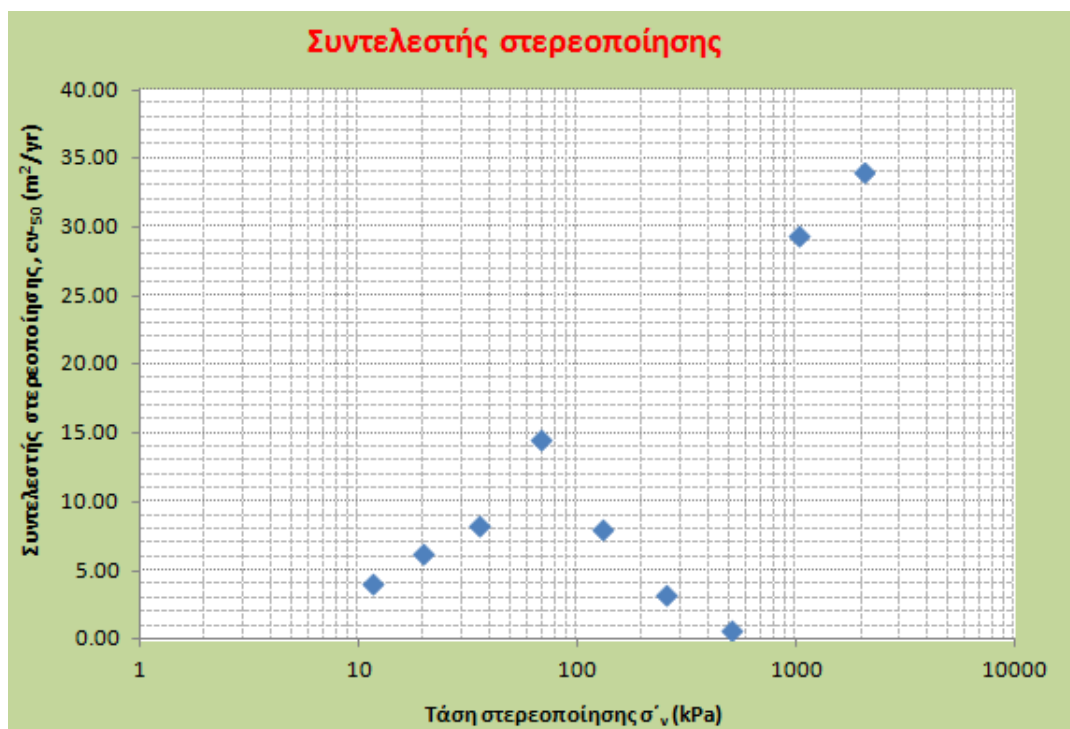


Σχήμα 5.28 Μεταβολή του συντελεστή συμπίεστικότητας όγκου με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου

Στα Σχήματα 5.29 και 5.30 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή στερεοποίησης με την τάση στερεοποίησης, σε διάφορα στάδια του δοκιμίου, όπως αυτά υπολογίστηκαν από τις καμπύλες στερεοποίησης για $U=90\%$ και $U=50\%$ αντίστοιχα. Παρατηρείται πως οι τιμές του c_v για $U=90\%$ είναι λίγο μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές για $U=50\%$. Επίσης ο συντελεστής στερεοποίησης δεν είναι σταθερός και ανεξάρτητος της σ'_v , όπως θεωρεί η θεωρία Terzaghi, αλλά παρατηρείται μια τάση αύξησης του c_v για τις μεγαλύτερες τάσεις.



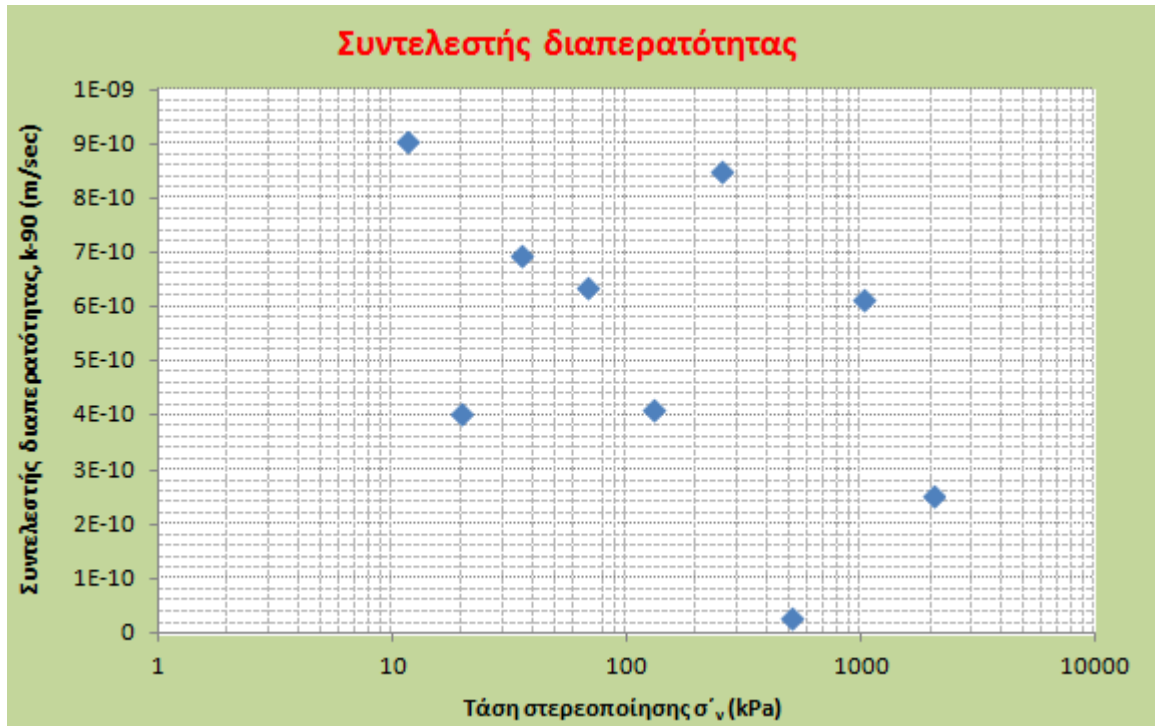
Σχήμα 5.29 Μεταβολή του συντελεστή στερεοποίησης c_{v-90} με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 12 - 2053$ kPa



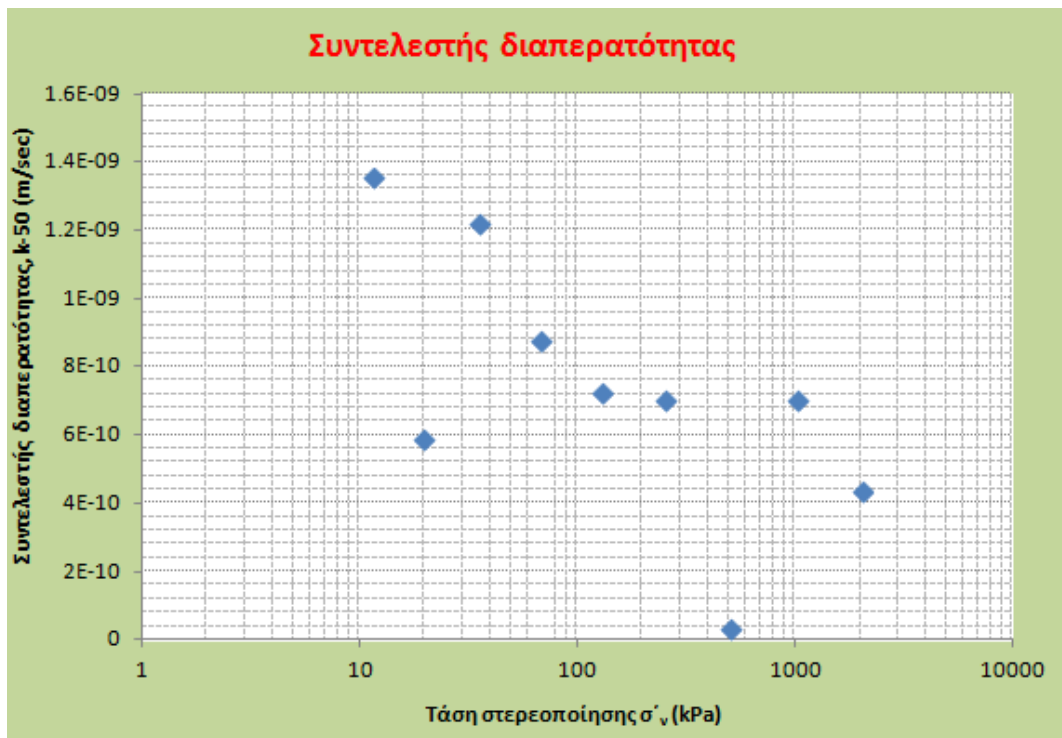
Σχήμα 5.30 Μεταβολή του συντελεστή στερεοποίησης c_{v-50} με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 12 - 2053$ kPa

Στα Σχήματα 5.31 και 5.32 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας με την τάση στερεοποίησης, σε διάφορα στάδια φόρτισης του δοκιμίου, όπως αυτά υπολογίστηκαν για $U=90\%$ και $U=50\%$ αντίστοιχα. Παρατηρείται πως οι τιμές του k για $U=90\%$ είναι λίγο μικρότερες από τις

αντίστοιχες για $U=50\%$. Επίσης ο συντελεστής διαπερατότητας δεν είναι σταθερός και ανεξάρτητος της σ'_v , όπως ισχύει στη θεωρία Terzaghi, αλλά παρατηρείται μια τάση μείωσης του k με την αύξηση της σ'_v .

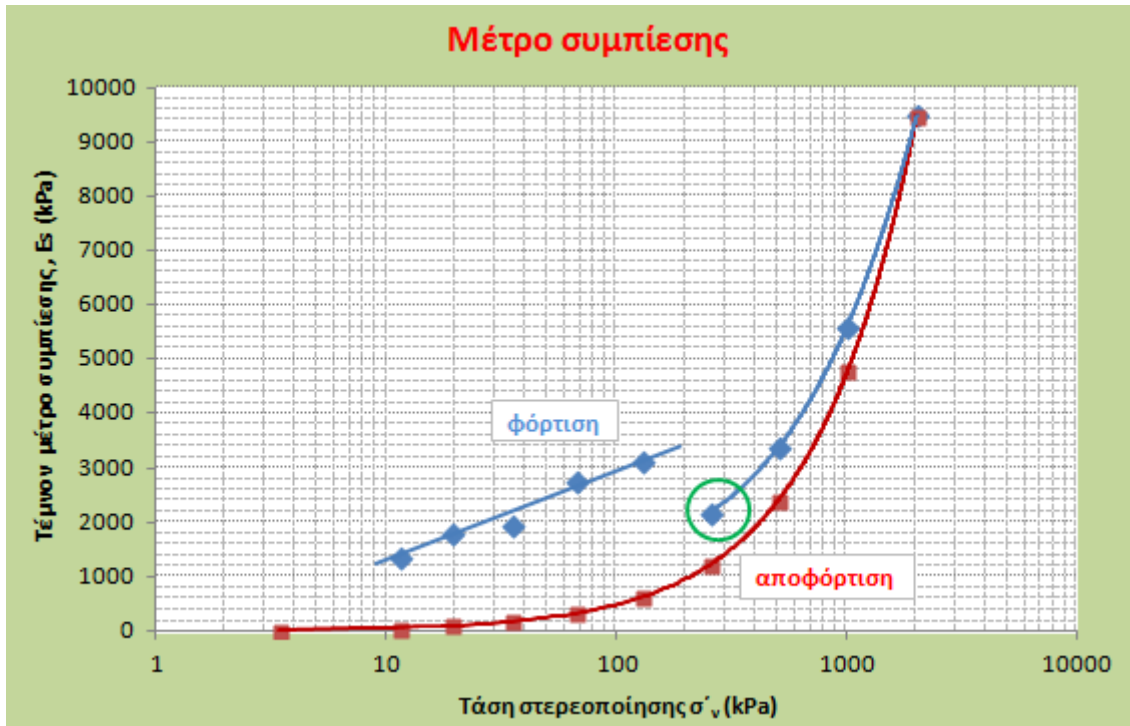


Σχήμα 5.31 Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας k_{90} με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 12 - 2053$ kPa

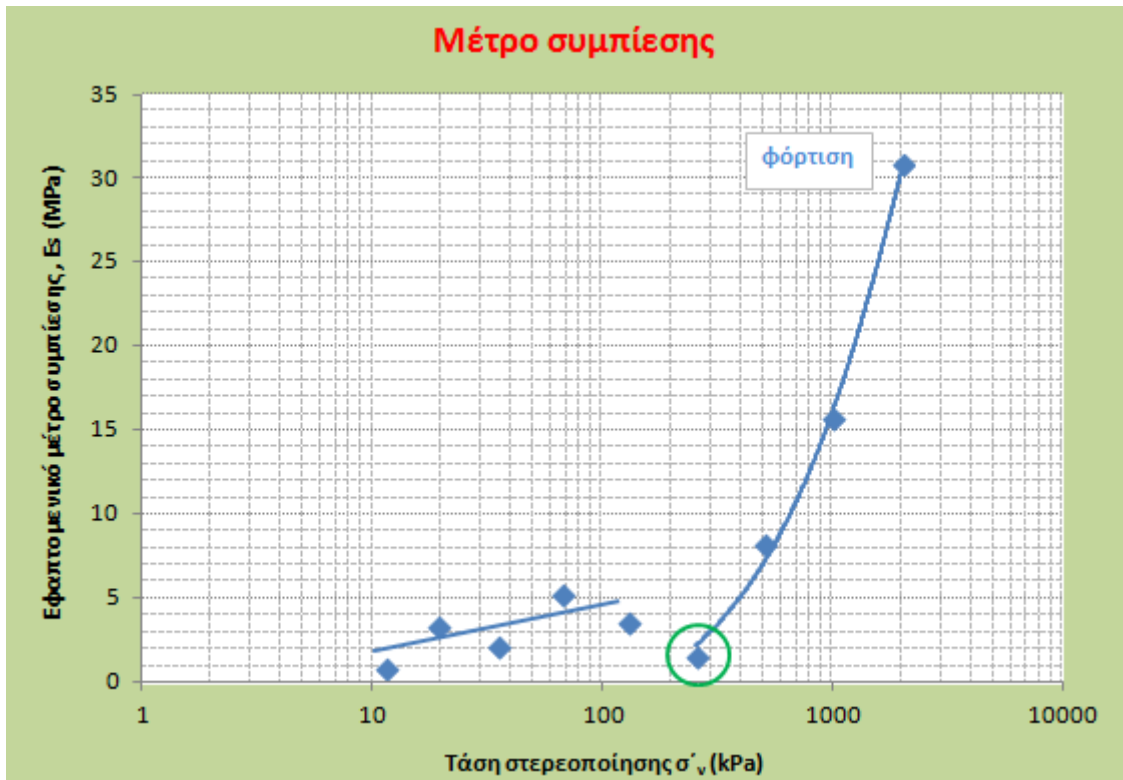


Σχήμα 5.32 Μεταβολή του συντελεστή διαπερατότητας k_{50} με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 12 - 2053$ kPa

Στο Σχήμα 5.33 παρουσιάζεται το τέμνον μέτρο συμπίεσης του δοκιμίου σε όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης της δοκιμής οιδημέτρου. Παρατηρείται πως το μέτρο συμπίεσης έχει μεγαλύτερες τιμές κατά τη φάση της φόρτισης συγκριτικά για την φάση της αποφόρτισης, και πως αυξάνεται με την αύξηση της σ'_v . Ειδικά για την φάση της φόρτισης, παρατηρείται μια μεταβολή στη συμπεριφορά του εδάφους, που εκφράζεται με την αύξηση της δυσκαμνιάς του εδάφους για $\sigma'_v \geq 255$ kPa και αύξηση της επιρροής της σ'_v στις τιμές του E_s . Το ίδιο παρατηρείται και για το εφαπτομενικό μέτρο συμπίεσης, Σχήμα 5.34, για το ίδιο επίπεδο τάσης.

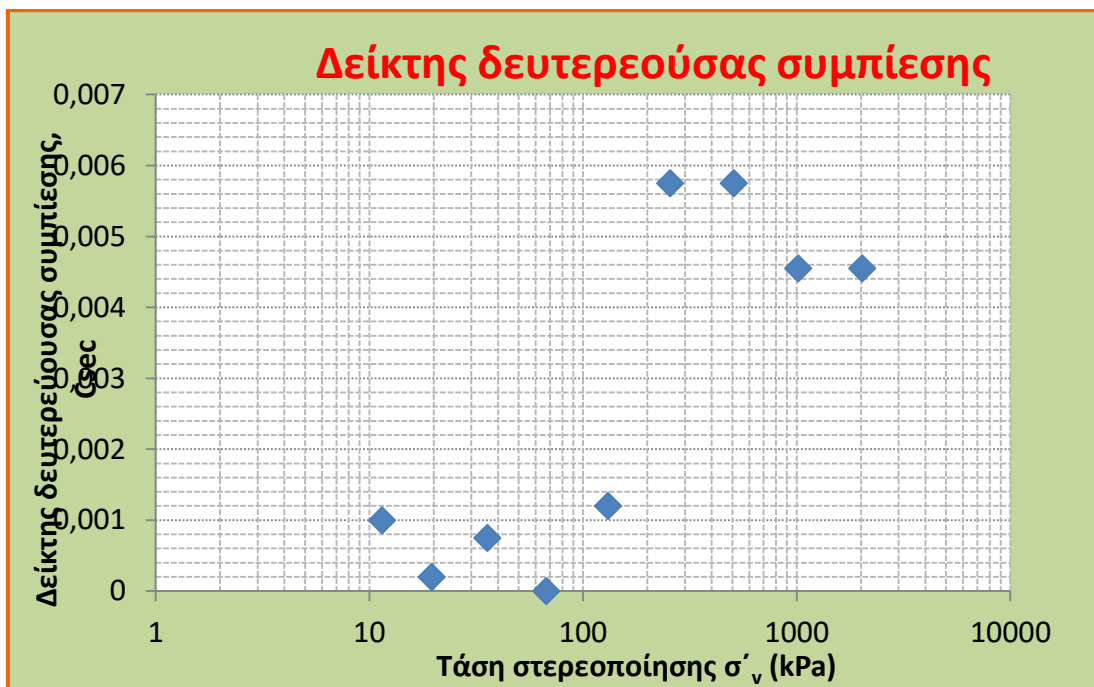


Σχήμα 5.33 Μεταβολή του τέμνοντος μέτρου συμπίεσης με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης του δοκιμίου



Σχήμα 5.34 Μεταβολή του εφαπτομενικού μέτρου συμπίεσης με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 12 - 2053$ kPa

Στο Σχήμα 5.35 παρουσιάζεται ο δείκτης δευτερεύουσας συμπίεσης του δοκιμίου σε όλα τα στάδια φόρτισης για $\sigma'_v = 12 - 2053$ kPa. Παρατηρείται πως για τάσεις μικρότερες της τάσης μετάβασης $\sigma'_v = 255$ kPa οι τιμές του C_{sec} είναι μικρότερες και έχουν εύρος 0,0002 – 0,0012 , ενώ για τάσεις $\sigma'_v \geq 255$ kPa οι τιμές του C_{sec} είναι μεγαλύτερες και έχουν εύρος 0,0046 – 0,0058.



Σχήμα 5.35 Μεταβολή του δείκτη δευτερεύουσας συμπίεσης με την τάση στερεοποίησης (λογαριθμική κλίμακα) για όλα τα στάδια φόρτισης του δοκιμίου με $\sigma'_v = 12 - 2053$ kPa

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα

Από την εργαστηριακή μελέτη μιας πολύ μαλακής και ευαίσθητης, ιλυώδους αργίλου, μικρής πλαστικότητας, με μικρή παρουσία οργανικής ύλης και θραύσματα οστράκων προέκυψαν οι ακόλουθες παρατηρήσεις σε ό,τι αφορά τη συμπεριφορά της στη μονοδιάστατη συμπίεση :

- Η καμπύλη συμπίεσης $e - \log \sigma'_v$ έχει μορφή τύπου S που είναι χαρακτηριστική των ευαίσθητων αργίλων. Ο δείκτης συμπίεσης, C_c , για την κανονικά στερεοποιημένη κατάσταση έχει αρχικά και μέχρι ένα επίπεδο τάσης υψηλότερη τιμή, που υποδηλώνει τη μεγάλη κλίση της καμπύλης $e - \log \sigma'_v$. Πέραν αυτού του επιπέδου τάσης, η κλίση της καμπύλης μειώνεται και μαζί και η τιμή του δείκτη συμπίεσης. Η οριακή τιμή της σ'_v που δηλώνει την αλλαγή στην εδαφική συμπεριφορά για το συγκεκριμένο έδαφος είναι $\sigma'_v = 255$ kPa και οι τιμές του C_c για $\sigma'_v < 255$ kPa και $\sigma'_v > 255$ kPa είναι αντίστοιχα 0,548 και 0,222. Αυτή η οριακή τιμή της σ'_v θεωρείται ως σημείο μετάβασης σε μια κατάσταση όπου το έδαφος αποκτά μια περισσότερο σταθερή δομή.
- Ο δείκτης συμπίεσης στη φάση της αποφόρτισης, C_r , έχει σημαντικά μικρότερη τιμή από,τι στη φάση της φόρτισης, $C_r=0,015$ και περιγράφει τη συμπεριφορά του εδάφους στην κατάσταση υπερστερεοποίησης.
- Σε αντίθεση με τις παραδοχές της θεωρίας στερεοποίησης του Terzaghi, ο συντελεστής συμπιεστότητας, α_v , ο συντελεστής συμπιεστότητας όγκου, m_v και κατά συνέπεια το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης E_s δεν είναι σταθερά στο εύρος των τάσεων σ'_v που μετρήθηκε. Ειδικότερα για το E_s παρατηρείται μια αύξηση των τιμών του με την αύξηση της σ'_v . Η αύξηση αυτή γίνεται εντονότερη μετά την οριακή τιμή της τάσης για τη μετάβαση του εδάφους σε μια περισσότερο σταθερή δομή ($\sigma'_v = 255$ kPa).
- Οι τιμές του συντελεστή στερεοποίησης, c_v , και του συντελεστή διαπερατότητας, k , που προσδιορίστηκαν για βαθμό στερεοποίησης $U=90\%$ είναι λίγο μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές για $U=50\%$. Επίσης, και οι δύο συντελεστές δεν είναι σταθεροί στα επίπεδα τάσης σ'_v που μελετήθηκαν, σε αντίθεση με τις παραδοχές της θεωρίας του Terzaghi.
- Ο δείκτης δευτερεύουσας συμπίεσης, C_{sec} , έχει γενικά μικρές τιμές. Ωστόσο για τάσεις $\sigma'_v < 255$ kPa ο C_{sec} έχει τις χαμηλότερες τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 0,0002 και 0,0012 , ενώ για $\sigma'_v > 255$ kPa έχει μεγαλύτερες τιμές που κυμαίνεται μεταξύ 0,0047 και 0,0058.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ASTM Designation D2435-90. Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils.
- [2] ASTM Designation D 4546-90. Standard Test Method for One Dimensional Swell or Settlement Potential of Cohesive Soil.
- [3] ASTM Designation D4829-88. Standard Test Method for Expansion Index of Soils.
- [4] ASTM Designation D4318-10. Standard Test Method for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils.
- [5] ASTM Designation D2435/D2435M-11. Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of soils Using Incremental Loading.
- [6] Μ.ΚΑΒΒΑΔΑΣ, ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
- [7] BS 1377:Part 5:1990:3
- [8] K. H. Head and R. J. Epps, Manual of Soil Laboratory Testing Volume II: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests.
- [9] G E BARNES ‘ΕΛΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ: ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ’
- [10] Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*, Wiley, New York.
- [11] Davis, E. H. and Poulos, H. (1965). 'The analysis of settlement under three-dimensional conditions'. *Symp. on Soft Ground Eng.*, Inst. Eng. Australia, Brisbane.
- [12] Skempton, A. W. (1944). 'Notes on the compressibility of clays'. *Q. J. Geol. Soc.*, London, Vol. C.
- [13] Schmertmann, J. H. (1953). 'Estimating the true consolidation behaviour of clay from laboratory test results'. *Proc. ASCE*, Vol. 79, Separate No. 3111.
- [14] Hansbo S.[1957], ‘A new approach to the determination of the strength of clay by the Fall Cone test’ Proceedings, No.14, Royal Swedish Geotechnical Institute, Stockholm.
- [15] Casagrande, A. (1936). 'The determination of the pre-consolidation load and its practical significance'. *Proc. 1st Int. Conf. Soil Mech.*, Cambridge, Mass., Vol. 3.
- [16] Schmertmann, J. H. (1954). 'The undisturbed consolidation behaviour of clay'. *Trans. ASCE*, Vol. 120, Paper 2775.
- [17] Leonards, G. A. (ed.) (1962). *Foundation Engineering*, Chapter 2. McGraw-Hill, New York.
- [18] Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*. Deuticke, Wien.
- [19] Terzaghi, K. and Peck (1948). SETTLEMENT OF SHALLOW FOUNDATIONS ON GRANULAR SOILS.
- [20] Taylor, D. W. (1942). 'Research on consolidation clays'. M.I.T., Dept. of Civ. and Sanit. Eng., No. 82
- [21] Τύρη (2016). ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΑΜΜΩΔΩΝ ΕΛΑΦΩΝ ΣΤΗΝ ΑΜΕΣΗ ΔΙΑΤΜΗΣΗ, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- [22] Κουλαουζίδου (2016). Η Επίδραση των Λεπτοκόκκων στη Διατμητική Αντοχή Άμμου, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας