



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

"Εργαστηριακή εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας εδαφών και υπολογισμός της  
αναθόλωσης του δαπέδου της εκσκαφής του Τομέα 6  
(Λιγνιτωρυχεία Πτολεμαΐδας)"

*ΚΑΛΟΓΗΡΟΥ ΕΙΡΗΝΗ*

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΜΟΝΟΠΩΛΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ-ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ  
ΖΑΧΑΡΙΑΣ ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΕΞΑΔΑΚΤΥΛΟΣ, ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΑΝΙΑ, 2000

*Στη μνήμη του  
πατέρα μου*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εργαστηριακή εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας εδαφών και η συσχέτισή τους με τις μετρούμενες μετακινήσεις στο πεδίο, σε ανοιχτή εκσκαφή μεγάλου βάθους (Λιγνιτωρυχεία Πτολεμαΐδας). Συγκεκριμένα εξετάστηκαν μαργαϊκά υλικά από την περιοχή του λιγνιτωρυχείου του Τομέα 6 της υπαίθριας εκμετάλλευσης της Δ.Ε.Η. στην Πτολεμαΐδα.

Για την εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και δοκιμές στερεοποίησης στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με την καθοδήγηση του Εμμ. Στειακάκη στα πλαίσια της ερευνητικής του εργασίας σε δείγματα μάργας που είχε συγκεντρώσει για το σκοπό αυτό.

Ο προσδιορισμός της αναθόλωσης του εδάφους λόγω της εκσκαφής, έγινε με τη βοήθεια μιας τομής αυτής, η οποία κατασκευάστηκε με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα (κοιτασματολογικές και γεωτεχνικές γεωτρήσεις, τεκτονικός και τοπογραφικός χάρτης κ.α.). Έπειτα θεωρήθηκε μια απλουστευμένη τομή της εκσκαφής, για τη διευκόλυνση της εκτίμησης της παραμορφωσιμότητας. Οι παράμετροι που υπολογίστηκαν με βάση τις παραπάνω δοκιμές, αλλά και δεδομένα που προέκυψαν από παλαιότερες μελέτες, χρησιμοποιήθηκαν για τον τελικό υπολογισμό της αναθόλωσης του εδάφους, λόγω της εκσκαφής.

Παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών καθώς και τα συμπεράσματα από την εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Για την ολοκλήρωση της διπλωματικής αυτής εργασίας είχα τη βοήθεια και συμπαράσταση ορισμένων προσώπων του ιδρύματος, τα οποία και θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Τον Επιβλέποντα της παρούσας εργασίας, Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Διονύσιο Μονόπωλη, για τη συμβολή και συνεργασία του σε όλα τα στάδια εκπόνησής της.

Τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Ζαχαρία Αγιουτάντη καθώς και τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Γεώργιο Εξαδάκτυλο για τη συμμετοχή τους στην αξιολόγηση της εργασίας αυτής.

Τον επιστημονικό συνεργάτη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Εμμ. Στειακάκη για την συμβολή και συνεργασία του κατά την πραγματοποίηση των δοκιμών και των αναλύσεων των αποτελεσμάτων.

Το επιστημονικό προσωπικό του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης και ιδιαίτερα τον κ. Διονύσιο Βαβαδάκη.

Τον συμφοιτητή μου Στεϊκάκη Στέφανο και την συμφοιτήτριά μου Παπαγιάννη Αφροδίτη για την πολύτιμη βοήθεια και υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου Χρυσάνθη και τον αδερφό μου Βασίλη καθώς και όλους εκείνους που με στήριξαν ψυχολογικά καθ' όλη τη διάρκεια φοίτησής μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
2	ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ .....	4
2.1	ΛΙΓΝΙΤΟΦΟΡΟΣ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ ΠΤΟΛΕΜΑΙΔΑΣ .....	4
2.1.1	Γεωλογία - Σχηματισμός .....	4
2.1.2	Στρωματογραφία .....	5
2.2	ΤΟΜΕΑΣ 6 .....	7
3	ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ .....	9
3.1	ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ .....	9
3.2	ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	10
3.2.1	Γενικά .....	10
3.2.2	Για την δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης .....	11
3.2.3	Για τη δοκιμή στερεοποίησης .....	13
3.3	ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ .....	15
4	ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ .....	16
4.1	ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΝΤΟΧΗΣ .....	16
4.1.1	Ορισμοί .....	16
4.1.2	Κριτήριο θραύσης κατά MOHR .....	18
4.2	ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ .....	21
4.2.1	Αρχή της δοκιμής .....	21
4.2.2	Διαστάσεις δοκιμίων .....	23
4.2.3	Ρυθμός φόρτισης .....	24
4.2.4	Κριτήρια αστοχίας .....	24
4.2.5	Τύποι αστοχίας .....	25
4.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	25
4.3.1	Γενικά .....	25
4.3.2	Συντελεστής μετατροπής του δακτυλίου φόρτισης .....	27
4.4	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ .....	28
4.4.1	Γενικά .....	28
4.4.2	Πειραματική διαδικασία .....	29
4.4.3	Περιγραφή σπασμένων δοκιμίων .....	30
4.5	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΝΤΑΙ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥΣ .....	30
4.5.1	Φυσική υγρασία του υλικού ( $w_0$ ) .....	30
4.5.2	Επιβαλλόμενο φορτίο ( $q$ ) .....	31
4.5.3	Ανηγμένη παραμόρφωση ( $\varepsilon$ ) .....	31
4.5.4	Διορθωμένο εμβαδόν επιφάνειας δοκιμίου ( $A$ ) .....	31
4.5.5	Αξονική τάση ( $q_u$ ) .....	33
4.5.6	Αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη .....	33
4.5.7	Καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης .....	34
4.5.8	Μέτρο ελαστικότητας ( $E_{initial}$ και $E_{50}$ ) .....	35
5	ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΟΙΔΗΜΕΤΡΟΥ .....	37
5.1	ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ .....	37
5.1.1	Ορισμοί .....	37
5.1.2	Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπίεστικότητα .....	38
5.2	ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΟΙΔΗΜΕΤΡΟΥ .....	39
5.2.1	Αρχή της δοκιμής .....	39
5.2.2	Περιγραφή της δοκιμής .....	41
5.3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ .....	42

5.4	ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	44
5.4.1	Γενικά .....	44
5.4.2	Προσδιορισμός τάσης υπερκειμένων $P_c$ .....	45
5.4.3	Προσδιορισμός ειδικού βάρους των κόκκων του δείγματος $G_s$ .....	48
5.4.4	Πειραματική διαδικασία .....	50
5.5	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΝΤΑΙ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥΣ.....	52
5.5.1	Αρχική και τελική υγρασία του δοκιμίου .....	52
5.5.2	Ισοδύναμο ύψος εδαφικών κόκκων ( $H_s$ ) .....	53
5.5.3	Λόγος κενών ( $e$ ).....	53
5.5.4	Φαινόμενο βάρος εδάφους ( $\gamma$ ) .....	54
5.5.5	Αρχικός και τελικός βαθμός κορεσμού .....	54
5.5.6	Τάση φόρτισης ( $P$ ).....	55
5.5.7	Ανηγμένη παραμόρφωση ( $\epsilon$ ) .....	55
5.5.8	Μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ).....	56
5.5.9	Δείκτης συμπίεσης ( $C_c$ ) και δείκτης διόγκωσης ( $C_r$ ).....	57
5.5.10	Συμπιεστότητα ( $a_v$ ) .....	58
5.5.11	Συντελεστής μείωσης του όγκου ( $m_v$ ) .....	58
5.5.12	Τάση προφόρτισης ( $P_c$ ).....	59
5.5.13	Λόγος προστερεοποίησης ( $OCR$ ) .....	60
5.5.14	Συντελεστής συμπιεστότητας ( $C_v$ ).....	60
5.5.15	Συντελεστής διαπερατότητας ( $k$ ).....	62
6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	64
6.1	ΓΕΝΙΚΑ .....	64
6.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΑΛΪΨΗΣ .....	64
6.2.1	Αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη $q_u$ .....	64
6.2.2	Αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση $\epsilon$ .....	65
6.2.3	Υγρασία % .....	65
6.2.4	Μέτρο ελαστικότητας .....	65
6.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ.....	68
6.3.1	Αρχική και τελική υγρασία.....	68
6.3.2	Αρχικός και τελικός λόγος κενών.....	68
6.3.3	Αρχικός και τελικός βαθμός κορεσμού .....	69
6.3.4	Φαινόμενο βάρος του εδάφους $\gamma$ .....	70
6.3.5	Δείκτης διόγκωσης $C_r$ και δείκτης συμπίεσης $C_c$ .....	70
6.3.6	Συμπιεστότητα $a_v$ .....	71
6.3.7	Συντελεστής μείωσης του όγκου $m_v$ .....	71
6.3.8	Μέτρο ελαστικότητας $E$ .....	71
6.3.9	Τάση προφόρτισης $P_c$ και λόγος προστερεοποίησης $OCR$ .....	72
6.3.10	Συντελεστής συμπιεστότητας $C_v$ .....	72
6.3.11	Συντελεστής διαπερατότητας $k$ .....	73
7	ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΛΙΓΝΙΤΗ ΤΗΣ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ.....	75
7.1	ΓΕΝΙΚΑ .....	75
7.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΛΙΓΝΙΤΗ.....	76
7.2.1	Γενικά .....	76
7.2.2	Φυσικά χαρακτηριστικά .....	76
7.3	ΕΔΑΦΟΤΕΧΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΛΙΓΝΙΤΗ.....	77
7.3.1	Τάση προφόρτισης $P_c$ .....	77
7.3.2	Συντελεστής στερεοποίησης $C_v$ .....	77
7.3.3	Μέτρο ελαστικότητας $E$ και ανισοτροπία .....	78

7.3.4	Γωνία εσωτερικής τριβής $\phi$ και συνοχή $c$ .....	79
8	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΑΘΟΛΩΣΗΣ.....	80
8.1	ΓΕΝΙΚΑ .....	80
8.2	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	83
8.2.1	Υπολογισμός του φορτίου $q$ .....	83
8.2.2	Μετάδοση των τάσεων σε βάθος $z$ . ....	84
8.2.3	Υπολογισμός των γωνιών $\alpha, \beta$ .....	88
8.2.4	Υπολογισμός της ανηγμένης παραμόρφωσης $\epsilon$ με τη φόρτιση.....	89
8.2.5	Υπολογισμός της αναθόλωσης .....	90
8.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΑΝΑΘΟΛΩΣΗΣ.....	90
9	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	101
9.1	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ .....	101
9.2	ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ .....	102
9.3	ΤΑΣΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ .....	102
9.4	ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ.....	103
9.5	ΑΝΑΘΟΛΩΣΗ.....	103
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	105
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	155

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναφέρεται στην εργαστηριακή εκτίμηση της παραμορφωσιμότητας εδαφών και σύγκριση με τις επί τόπου παρατηρούμενες μετρήσεις στο πεδίο (Λιγνιτωρυχεία Πτολεμαΐδας). Τα υλικά που εξετάστηκαν προέρχονται από την περιοχή του ορυχείου του Τομέα 6 της υπαίθριας εκμετάλλευσης της Δ.Ε.Η. στην Πτολεμαΐδα. Ο Τομέας 6 αποτελεί τμήμα του Νοτίου Πεδίου, και ακολουθεί γενικά τη στρωματογραφική ακολουθία αυτού.

Η εκσκαφή στο ορυχείο του Τομέα 6 έχει ήδη προχωρήσει σε αρκετά μεγάλο βάθος ( $\approx 150\text{m}$ ). Το γεγονός αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να παρατηρούνται κάποιες παραμορφώσεις του εδάφους οι οποίες οφείλονται στην αποφόρτιση-ανακούφιση αυτού, λόγω απομάκρυνσης των υπερκειμένων. Συνέπεια αυτού ήταν και η παρουσίαση αναθόλωσης στην περιοχή του ορυχείου που είχε σαν αποτέλεσμα την καταστροφή ενός από τους ταινιόδρους που το εξυπηρετούσαν. Τέτοιου είδους καταστροφές έχουν μεγάλο κόστος και καθυστερούν αρκετά την παραγωγή, επομένως η μελέτη τους είναι γι' αυτό το λόγο αναγκαία.

Αντικείμενο λοιπόν της παρούσας εργασίας είναι ο προσδιορισμός της αναθόλωσης που προκαλείται από την εκσκαφή μέσω παραμέτρων που προκύπτουν από δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης και δοκιμές στερεοποίησης. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης με την καθοδήγηση του κ. Εμμ. Στειακάκη στα πλαίσια της ερευνητικής του εργασίας σε δείγματα μάργας που είχε συγκεντρώσει για το σκοπό αυτό.

Οι δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης πραγματοποιήθηκαν σε αδιατάρακτα δοκίμια τα οποία διαμορφώθηκαν στις επιθυμητές διαστάσεις (125mm ύψος και 50mm διάμετρο), με βάση τις προδιαγραφές της ASTM. Αντίστοιχα και για τις δοκιμές στερεοποίησης διαμορφώθηκαν αδιατάρακτα δοκίμια στις διαστάσεις των δακτυλίων της συσκευής στερεοποίησης του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας (50mm διάμετρος και 20mm ύψος).



Με βάση τα δεδομένα που προέκυψαν από τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης έγινε εκτίμηση της ανισοτροπίας των επιμέρους δειγμάτων κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Η εκτίμηση αυτή έγινε με βάση τα πηλικά των  $E_{\text{initial}}$  και  $E_{50}$  των καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης για τα παράλληλα και κάθετα στη στρώση δοκίμια όπως προτείνουν οι Shogaki & Moro (1995).

Με βάση δε τα μέτρα ελαστικότητας που προέκυψαν από τις παραπάνω δοκιμές, αλλά και τις ιδιότητες των υπολοίπων υλικών που εμπεριέχονται στην εκσκαφή όπως υπολογίστηκαν από παλαιότερους μελετητές, έγινε ο προσδιορισμός της αναθόλωσης του εδάφους, λόγω «ανακούφισης». Με τον όρο «μέτρο ελαστικότητας», θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι δεν εννοείται αυτό που θεωρεί η κλασσική μηχανική ως μέτρο ελαστικότητας, αλλά το μέτρο παραμορφωσιμότητας ή δυστροπίας του υλικού όπως μπορεί να προκύψει από τις συμβατικές δοκιμές της εδαφομηχανικής. Το μέτρο ελαστικότητας λοιπόν του εδάφους που αναφέρεται στην εργασία αυτή αντιστοιχεί ουσιαστικά στο μέτρο παραμορφωσιμότητας του υλικού.

Για τον ίδιο σκοπό κατασκευάστηκε μια τομή της εκσκαφής με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα (κοιτασματολογικές και γεωτεχνικές γεωτρήσεις, τεκτονικός και τοπογραφικός χάρτης κ.α.). Έπειτα θεωρήθηκε μια απλουστευμένη τομή της, για τη διευκόλυνση της εκτίμησης της αναθόλωσης, για την κατασκευή της οποίας έγιναν αρκετές παραδοχές. Οι παραδοχές αυτές επηρεάζουν όπως είναι φυσικό την τελική εκτίμηση της αναθόλωσης αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό.

Η αναθόλωση εκτιμήθηκε με τη βοήθεια της θεωρίας του Boussinesq, με βάση την οποία υπολογίστηκαν οι τάσεις που ασκούν τα εδαφικά στρώματα σε δεδομένο βάθος. Ο Boussinesq θεωρεί ότι το μέσο μεταφοράς της τάσης σε δεδομένο βάθος είναι συνεχές, ομογενές και ελαστικό και ότι ο λόγος του Poisson γι' αυτό είναι ίσος με το μηδέν.

Το πηλίκο των τάσεων που υπολογίζονται με βάση τα παραπάνω προς το μέτρο ελαστικότητας  $E$  των υλικών στα οποία ασκούνται, μας δίνει την ανηγμένη παραμόρφωσή τους η οποία προκαλείται από αυτή την τάση. Δεδομένης της ανηγμένης παραμόρφωσης και του πάχους των επιμέρους στρωμάτων στα οποία αντιστοιχεί,

υπολογίζεται η αναθόλωση καθενός από αυτά αλλά και η συνολική αναθόλωση που αναμένεται να παρουσιάσει η εκσκαφή.

Η εκτίμηση της αναθόλωσης πραγματοποιήθηκε με τέσσερις διαφορετικούς συνδυασμούς μέτρων ελαστικότητας των επιμέρους υλικών, και τα αποτελέσματα αυτής παρατίθενται στο Κεφάλαιο 8. Στο παράρτημα της παρούσας εργασίας, παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών ανεμπόδιστης θλίψης και των δοκιμών στερεοποίησης με τη χρήση οιδημέτρου με βάση τα οποία έγιναν οι παραπάνω υπολογισμοί.

## 2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

### 2.1 ΛΙΓΝΙΤΟΦΟΡΟΣ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ

Στη λεκάνη της Πτολεμαΐδας, που αποτελεί τμήμα της μεγάλης τεκτονικής τάφρου που εκτείνεται από το Μοναστήρι της Γιουγκοσλαβίας από το βορρά, μέχρι την κοίτη του ποταμού Αλιάκμονα στα νότια, με κατεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ, αποτέθηκαν λιγνιτικά κοιτάσματα τα οποία αποτελούν μια από τις κυριότερες ενεργειακές πηγές της Ελλάδας. Το ελληνικό τμήμα της τάφρου περιορίζεται μεταξύ των ορέων Βόρα, Βερμίου, Βαρουδα, Βέρνα, Σινιάτσικου, Βούρινου, Καρρουνια και Φλάμπουρα (Anagnostopoulos et al., 1988).

#### 2.1.1 Γεωλογία - Σχηματισμός

Η μεγάλη αυτή τεκτονική τάφρος, σχηματίστηκε στο τέλος της τριτογενούς περιόδου σαν συνέπεια διαρρήξεων ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης (Αναστόπουλος και Κούκουζας, 1972). Οι διαρρήξεις αυτές αποτελούν μια ζώνη επιμέρους ταφροειδών βυθισμάτων που συνιστούν τις λιγνιτοφόρες λεκάνες Φλώρινας-Αμυνταίου-Πτολεμαΐδας και Κοζάνης-Σερβίων.



**Εικόνα 2.1:** Γεωλογική τομή λιγνιτοφόρου λεκάνης Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου.

Μέσω ηπειρωτικών κινήσεων του τεταρτογενούς, οι προαναφερθείσες λεκάνες κατατεμαχίστηκαν και κατά τον τρόπο αυτό η λεκάνη της Πτολεμαΐδας διαχωρίστηκε, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.1 σε μικρότερα ταφροειδή βυθίσματα (Πτολεμαΐδας-Έλους Σαριγκιόλ κ.λ.π.) καθώς και σε ρηξιγενή εξάρματα (Αγ. Χριστόφορου, Κομάνου κ.α.).

### **2.1.2 Στρωματογραφία**

Με την ιζηματογένεση που έλαβε χώρα στην περιοχή, αποτέθηκαν ιζήματα που περιλαμβάνουν τους λιγνιτοφόρους και μη σχηματισμούς του Νεογενούς και τις τεταρτογενείς αποθέσεις.

Οι τεταρτογενείς αποθέσεις που καλύπτουν εξ' ολοκλήρου τα προγενέστερα ιζήματα περιλαμβάνουν:

1. Αλουβιακούς σχηματισμούς (πρόσφατες ποταμοχειμάρριες αποθέσεις, πλευρικά κορήματα, ελογενή ιζήματα της περιοχής Σαριγκιόλ).
2. Σχηματισμούς του Διλουβίου (εναλλασσόμενα στρώματα κροκαλοπαγών, ψαμμιτών, ερυθρών αργίλων και κώνων κροκαλο-λατυποπαγούς ποταμοχειμάρρειας προέλευσης υπό μορφή ριπιδοειδών σχηματισμών).

Οι υποκείμενοι σχηματισμοί του Νεογενούς περιλαμβάνουν τρεις σειρές: την ανώτερη (υπερκείμενη της λιγνιτοφόρας), την λιγνιτοφόρα και την κατώτερη (υποκείμενη της λιγνιτοφόρας).

#### **Ανώτερη σειρά**

Η ανώτερη σειρά περιλαμβάνει κιτρινόφαια κλαστικά ιζήματα (με εναλλασσόμενες ενστρώσεις άμμου, αργίλων, αμμούχων μαργών, χαλαρών κροκαλοπαγών και φακοειδών διαστρώσεων ψαμμιτών, ψηφιδοπαγών και μαργαϊκών ασβεστόλιθων), και πρασινότεφρες άργιλο-μαργαϊκές αποθέσεις (αποτελούμενες από αμμούχους αργίλους και ιλυομιγείς αργιλούχες μάργες). Το μέγιστο πάχος της σειράς αυτής ανέρχεται στα 100m.

**Λιγνιτοφόρος σειρά**

Η λιγνιτοφόρος σειρά περιλαμβάνει:

1. Την *ανώτερη λιγνιτοφόρο στιβάδα* με μέγιστο πάχος 40m η οποία συνίσταται από 9-10 λιγνιτικά στρώματα πάχους μερικών εκατοστών μέχρι και ενός έως τριών λεπτότερων στρωμάτων ξυλίτη στην οροφή της στιβάδας μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται στείρες ενστρώσεις αργίλου, μαργών και λιμναίας κρητίδος.
2. Την *ενδιάμεση στιβάδα* των στείων ιζημάτων, μέγιστου πάχους 14m όπου επικρατούν οι ανοιχτόχρωμες μάργες με φακοειδείς ενστρώσεις λιμναίας κρητίδος.
3. Την *κατώτερη λιγνιτοφόρο στιβάδα* με μέγιστο πάχος 80m, η οποία αποτελείται από εναλλασσόμενα στρώματα λιγνίτη, μαργών, αργίλων με μεταβαλλόμενο πάχος και από δύο χαρακτηριστικές ενστρώσεις άμμου και λιμναίας κρητίδος.

Στη λιγνιτοφόρο στιβάδα συναντώνται επίσης οι δύο παρακάτω καθοδηγητικοί ορίζοντες:

✓ Ορίζοντας NERITINA (H<sub>2</sub>)

Παλαιοντολογικός ορίζοντας του απολιθώματος NERITINA, κυμαινόμενου πάχους 20-50cm. Φιλοξενείται στο μεσαίο τμήμα της λιγνιτοφόρου στιβάδας σε σχηματισμό γκριζοκίτρινης μάργας.

✓ Ορίζοντας Χαρακτηριστικής Άμμου (ΧΑ)

Πετρογραφικός ορίζοντας μικρού πάχους (10-20cm), που τοποθετείται στο τέλος της λιγνιτοφόρου στιβάδας και συγκεκριμένα 5-12m πάνω από το γεωλογικό δάπεδο του κοιτάσματος.

**Κατώτερη σειρά**

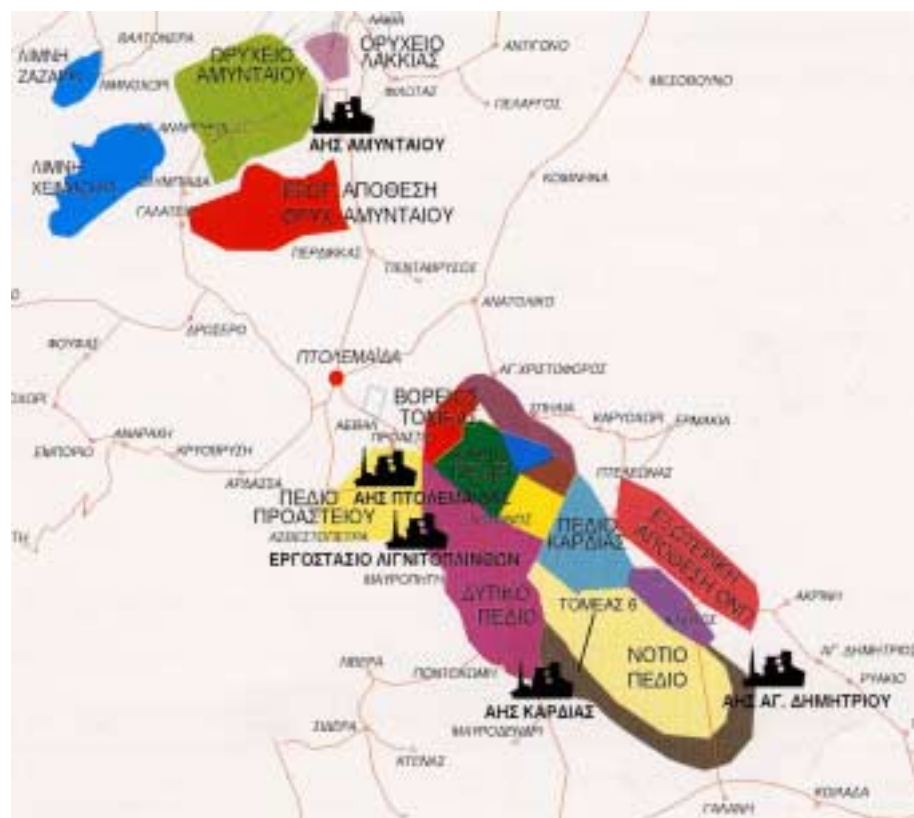
Η κατώτερη σειρά περιλαμβάνει τους *ανώτερους ορίζοντες* (με συνολικό πάχος 40m), που αποτελούνται από τεφρές αργιλούχες μάργες, κατά τόπους αμμούχες, με φακοειδείς ενστρώσεις μαργαϊκού ασβεστόλιθου και κορυφαία ένστρωση λιμναίας κρητίδος, και

τους κατώτερους ορίζοντες που αποτελούνται από τεφρές αμμούχες αργίλους με αραιές ενστρώσεις αργιούχων μαργών.

## 2.2 ΤΟΜΕΑΣ 6

Στο Λιγνιτικό Κέντρο Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου (Εικόνα 2.2) λειτουργούν σήμερα 4 ορυχεία:

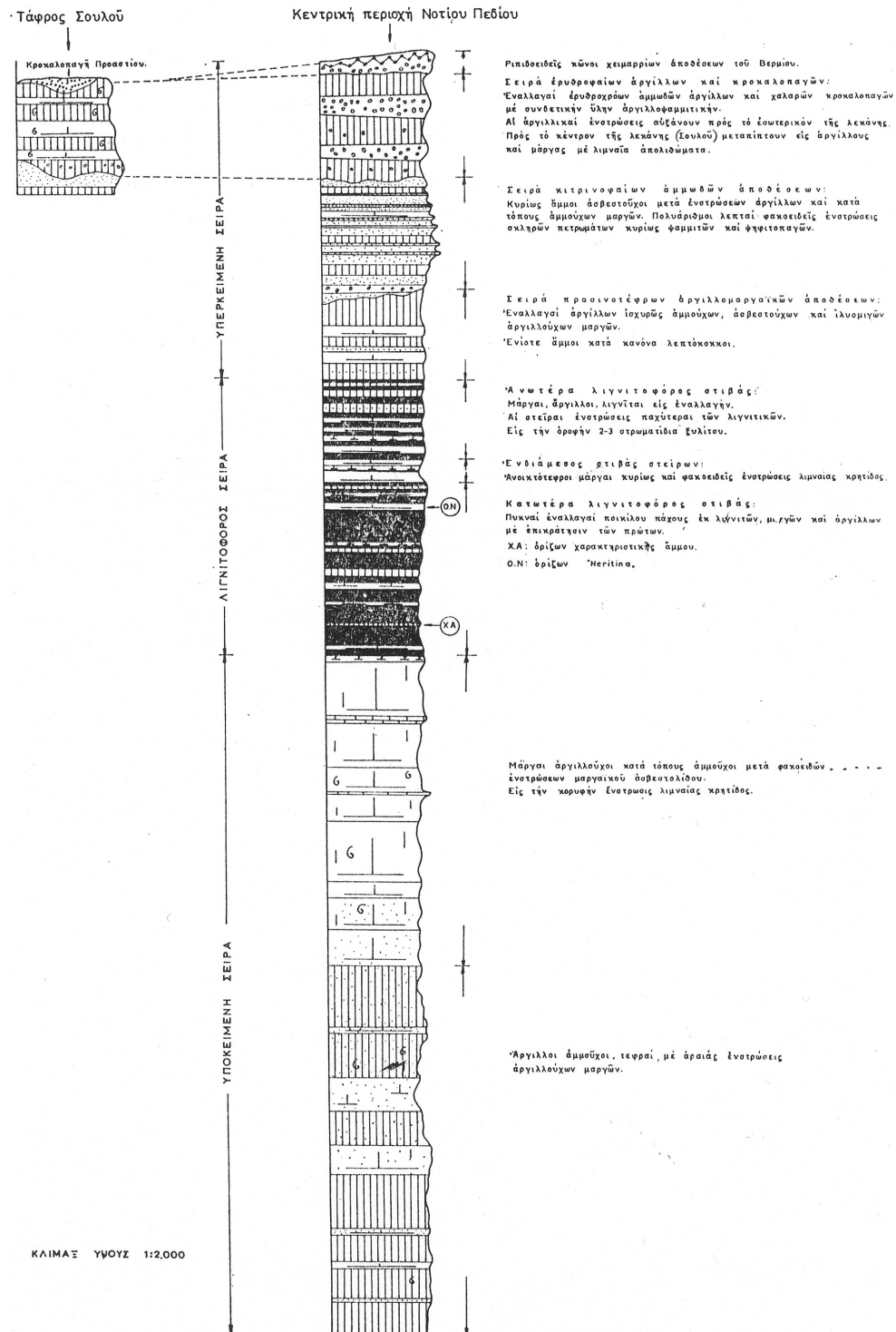
1. Κύριο Πεδίο
2. Πεδίο Καρδιάς
3. Νότιο Πεδίο
4. Ορυχείο Αμυνταίου



**Εικόνα 2.2:** Χάρτης λιγνιτικού κέντρου Πτολεμαΐδας – Αμυνταίου.

Το ορυχείο ανοιχτής εκσκαφής του "Τομέα 6" αποτελεί τμήμα του Νοτίου Πεδίου και η συμμετοχή του στην συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντική. Ακολουθεί κατά το πλείστον τη γενικότερη γεωλογική και στρωματογραφική ακολουθία της περιοχής. Στο Σχήμα 2.1 δίνεται η στρωματογραφική στήλη στην οποία

φαίνονται οι ορίζοντες που περιγράφηκαν λεπτομερέστερα παραπάνω, και η οποία αναφέρεται στο Νότιο Πεδίο, επομένως και στον Τομέα 6.



Σχήμα 2.1: Στρωματογραφική ακολουθία Νοτίου Πεδίου.

### 3 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης και στερεοποίησης με τη χρήση οιδημέτρου, χρησιμοποιούνται αδιατάρακτα δοκίμια αφού εξετάζονται κάποιες από τις ιδιότητες που έχει το έδαφος σε φυσικές συνθήκες. Για το λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικός ο προσεκτικός τρόπος δειγματοληψίας, ώστε το έδαφος να διαταραχτεί όσο το δυνατόν λιγότερο.

#### 3.1 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ

Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε από τον κ. Εμμ. Στειακάκη στα πλαίσια της ερευνητικής του εργασίας. Τα δείγματα που πάρθηκαν, κόπηκαν από το μέτωπο των βαθμίδων της εκσκαφής και οι ακριβείς συντεταγμένες των θέσεων δειγματοληψίας καθώς και τα βάθη δειγματοληψίας φαίνονται στον Πίνακα 3.1.

**Πίνακας 3.1:** Συντεταγμένες των θέσεων δειγματοληψίας.

Τομέας	Θέση	X	Y	Z
6	A	-15725,53	21710,57	596,27
	B	-15406,90	21564,73	561,72
	Γ	-15289,15	22203,66	613,97

Με τη βοήθεια μικρού εκσκαπτικού μηχανήματος, αποκόπηκαν οκτώ μεγάλοι όγκοι εδαφικού δείγματος από τρεις διαφορετικές θέσεις, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.2.

**Πίνακας 3.2:** Διαθέσιμα δείγματα για την πραγματοποίηση των δοκιμών από κάθε θέση δειγματοληψίας.

Τομέας	Θέση	Δείγμα
6	A	1
		2
		3
	B	1
		2
		3
	Γ	1
		2
		3



Οι όγκοι αυτοί διαμορφώθηκαν έπειτα με προσοχή σε μικρότερους (διαστάσεων περίπου ίσων ή και μικρότερων των 0,5m). Η επιφάνειά τους καλύφθηκε αμέσως με πλαστικό χρώμα και οι όγκοι συσκευάστηκαν σε πλαστικές σακούλες, για την κατά το δυνατό καλύτερη διατήρηση της φυσικής τους υγρασίας. Για την ασφαλή μεταφορά τους τοποθετήθηκαν σε ξύλινα κιβώτια, ώστε να αποφευχθεί η διατάραξή τους (θραύση).

## 3.2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

### 3.2.1 Γενικά

Τα εδαφικά δείγματα διατηρήθηκαν συσκευασμένα όπως περιγράφηκε παραπάνω στο Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, μέχρις ότου ξεκίνησαν οι πρώτες δοκιμές. Για την πραγματοποίηση των δοκιμών, κάθε φορά αποσυσκευάζεται ένα μόνο δείγμα.



**Εικόνα 3.1:** Κοπή τμήματος του αδιατάρακτου τεμάχους για τη διαμόρφωση δοκιμίου.

Λόγω της μεγάλης του συνεκτικότητας, ο εδαφικός όγκος δύσκολα τεμαχίζεται σε μικρότερα τμήματα. Για το λόγο αυτό, για την αποκοπή ενός αδιατάρακτου τμήματος

από τον κυρίως εδαφικό όγκο και τη διαμόρφωση δοκιμίων από αυτόν, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρικός κόφτης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.1.

Μετά την αποκοπή ενός μικρότερου όγκου για την τελική διαμόρφωση των δοκιμίων που απαιτούνται για κάθε μια από τις δοκιμές, ο αρχικός όγκος επανασυσκευάζεται. Η εκτεθειμένη επιφάνεια που προκλήθηκε από την κοπή, καλύπτεται με φύλλο αλουμινίου και έπειτα με κερί, ώστε να μην υπάρξουν απώλειες υγρασίας μέχρι την επόμενη χρήση του δείγματος. Η επιφάνεια κοπής δεν καλύπτεται εξ' ολοκλήρου με κερί για το λόγο ότι αυτό εισέρχεται στους πόρους του δείγματος και καταστρέφει έτσι μέρος αυτού.

Κατά την διαμόρφωση των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν και στις δύο δοκιμές, το εξωτερικό υλικό του τεμάχους αφαιρείται ως άχρηστο (1-2cm σε πάχος), για το λόγο του ότι είναι καλυμμένο με χρώμα το οποίο έχει πιθανόν διεισδύσει μεταξύ των κόκκων. Είναι επίσης πιθανό μέρος της υγρασίας του υλικού σε αυτή την περιοχή να έχει διαφύγει, με αποτέλεσμα τα δοκίμια που διαμορφώνονται να μην έχουν την πραγματική ποσότητα περιεχομένου νερού μεταξύ των κόκκων τους.

Τα τρίμματα του υλικού που προέκυψαν κατά τη διαμόρφωση των δοκιμίων, φυλάσσονται σε αεροστεγείς πλαστικές σακούλες και χρησιμοποιούνται για την πραγματοποίηση άλλων δοκιμών, όπως για παράδειγμα για τον προσδιορισμό του ειδικού βάρους των κόκκων του εδαφικού δείγματος. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται ο τρόπος διαμόρφωσης των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν στα δύο είδη δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν.

### 3.2.2 Για την δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης

Για την δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν, διαμορφώθηκαν κατά το δυνατόν σε ένα από τα δύο ζεύγη διαστάσεων:

**Πίνακας 3.3.:** Διαστάσεις δοκιμίων για την δοκιμή της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη.

	Ύψος (mm)	Διάμετρος (mm)
1.	125,00	50,00
2.	95,00	38,00

Αναφέρονται δύο ζεύγη διαστάσεων, για το λόγο του ότι ενώ η επιδίωξη ήταν για τη διαμόρφωση δοκιμίων όσο το δυνατόν μεγαλύτερων διαστάσεων, αυτό δεν ήταν πάντα εφικτό. Έτσι, στις περιπτώσεις όπου το εδαφικό τέμαχος παρουσίαζε επιφάνειες ασυνεχειών ή επιφάνειες μικρής συνεκτικότητας, δεν ήταν δυνατή η αποφυγή θραύσης του υλικού κατ' αυτή τη διεύθυνση, με αποτέλεσμα - για εξοικονόμηση του δείγματος - να διαμορφώνονται τελικά δοκίμια μικρότερων διαστάσεων αλλά ίδιων αναλογιών ύψους και διαμέτρου, για να προκύπτουν συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Για την διαμόρφωση των δοκιμίων, το εδαφικό τέμαχος τοποθετείται όρθιο κατά την μεγαλύτερή του διάσταση, η οποία αποτελεί και τον άξονα του κυλινδρικού δοκιμίου που πρόκειται να κατασκευαστεί. Στην πάνω επιφάνεια του τεμάχους, χαράσσεται ένας κύκλος, με τη βοήθεια ενός δειγματολήπτη των επιθυμητών διαστάσεων. Με οδηγό τον κύκλο αυτό και με τη χρήση ενός κοπτικού εργαλείου (συνήθως μαχαίρι), το τέμαχος αποφλοιώνεται σταδιακά και περιμετρικά όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2.



**Εικόνα 3.2:** Διαμόρφωση δοκιμίου για τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης.

Στο επόμενο στάδιο της διαμόρφωσής του, το δοκίμιο τοποθετείται σε μία ειδική περιστροφική συσκευή που διαθέτει μικρό κοπτικό εργαλείο. Στο στάδιο αυτό, και καθώς το δοκίμιο περιστρέφεται, επιδιώκεται η τελική διαμόρφωση της διαμέτρου του

κατά τέτοιο τρόπο ώστε το κυλινδρικό δοκίμιο να έχει ομοιόμορφη διάμετρο καθ' όλο το ύψος του.

Τέλος, διαμορφώνονται οι δύο επιφάνειες έδρασης του δοκιμίου, έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατό πιο επίπεδες, και η επιβολή της φόρτισης σε αυτό να είναι ομοιόμορφη. Δίνεται επίσης ιδιαίτερη προσοχή στην κατακορυφότητα του δοκιμίου, αφού κατά την τοποθέτησή του στην συσκευή φόρτισης, οι πλάκες φόρτισης πρέπει να είναι παράλληλες με τον άξονά του.

### 3.2.3 Για τη δοκιμή στερεοποίησης

Για την δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν, διαμορφώθηκαν στους ειδικούς δακτυλίους της συσκευής στερεοποίησης, οι οποίοι έχουν τις παρακάτω διαστάσεις:

**Πίνακας 3.4:** Διαστάσεις δοκιμίων για την δοκιμή στερεοποίησης

Ύψος (mm)	Διάμετρος (mm)
20,00	50,00

Το εδαφικό τέμαχος τοποθετείται όρθιο κατά τη διεύθυνση του άξονα του κυλινδρικού δοκιμίου που πρόκειται να κατασκευαστεί. Η πάνω επιφάνεια του τεμάχους, επιπεδώνεται κατά το δυνατόν με τη βοήθεια κοπτικού εργαλείου.

Ο δακτύλιος-δειγματολήπτης λιπαίνεται εσωτερικά για ελάττωση των τριβών και τοποθετείται πάνω στην επιφάνεια, με το κοπτικό άκρο του να εφάπτεται σε αυτή (προς τα κάτω). Με οδηγό τον δακτύλιο αυτό και με τη χρήση του κοπτικού εργαλείου, το τέμαχος αποφλοιώνεται σταδιακά και περιμετρικά όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.3.



**Εικόνα 3.3:** Διαμόρφωση δοκιμίου για τη δοκιμή της στερεοποίησης.

Μόλις η αποφλοίωση φτάσει σε μια ακτίνα λίγο μεγαλύτερη αυτής του δακτυλίου, γίνεται προσπάθεια κατακόρυφης εισπιάσής του στο έδαφος ώστε αυτό να καλύψει όλη την εσωτερική του διάμετρο, να εφαρμόσει δηλαδή στο εσωτερικό του δακτυλίου. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου τελικά ο δακτύλιος πληρωθεί καθ' όλο το ύψος του από το εδαφικό δοκίμιο, αλλά και λίγο περισσότερο, για να υπάρχει η δυνατότητα διαμόρφωσης των επιφανειών του.

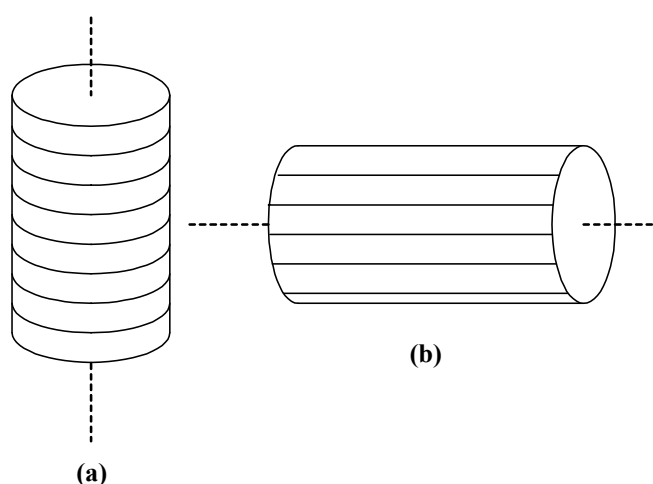


**Εικόνα 3.4:** Προσανατολισμένα δοκίμια για τη δοκιμή στερεοποίησης.

Οι δύο ελεύθερες επιφάνειες έδρασης του δοκιμίου, διαμορφώνονται και πάλι με τη βοήθεια του δακτυλίου έτσι ώστε να είναι όσο το δυνατό πιο επίπεδες, και η επιβολή της φόρτισης σε αυτό να είναι ομοιόμορφη. Δύο τελικά διαμορφωμένα δοκίμια για τη δοκιμή της συμπιεστότητας φαίνονται στην Εικόνα 3.4.

### 3.3 ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για την πραγματοποίηση των δοκιμών της ανεμπόδιστης θλίψης και της στερεοποίησης χρησιμοποιήθηκαν προσανατολισμένα δοκίμια με σκοπό την εξέταση της ανισοτροπίας του εδάφους κατά την οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση. Ουσιαστικά με τον όρο κατακόρυφο περιγράφεται το δοκίμιο που διαμορφώθηκε με τον άξονά του κάθετο στη στρώση του στρώματος του εδάφους και οριζόντιο είναι αυτό που έχει κοπεί με τον άξονά του παράλληλο στη στρώση. Στο Σχήμα 3.1 περιγράφονται οι παραπάνω όροι γραφικά.



**Σχήμα 3.1:** Δοκίμιο (a) κάθετο στη στρώση, (b) παράλληλο στη στρώση.

Η εκτέλεση των δοκιμών για δύο προσανατολισμένα δοκίμια από κάθε δείγμα έγινε κυρίως για την εξέταση των ιδιοτήτων του εδάφους κατά τις δύο αυτές διευθύνσεις. Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της ανισοτροπίας ή όχι του εδαφικού υλικού. Η εκτίμηση αυτή γίνεται στο ανάλογο κεφάλαιο όπου παρατίθενται τα αποτελέσματα των δοκιμών.

## 4 ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

### 4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΑΝΤΟΧΗΣ

Για την κατανόηση του φαινομένου της θραύσης, δίνονται παρακάτω οι ορισμοί κάποιων βασικών εννοιών που θα χρησιμοποιηθούν στην πορεία.

#### 4.1.1 Ορισμοί

##### Κύρια επίπεδα

Σε κάθε σημείο της μάζας υπάρχουν τρία κάθετα μεταξύ τους επίπεδα στα οποία εφαρμόζονται μόνο ορθές τάσεις και οι διατμητικές τάσεις είναι μηδενικές. Τα επίπεδα αυτά καλούνται **κύρια επίπεδα**.

##### Κύριες τάσεις

Ονομάζονται έτσι οι τάσεις που ενεργούν στα κύρια επίπεδα και στις οποίες αναλύεται οποιαδήποτε τάση εφαρμόζεται σε κάποιο σημείο της εδαφικής μάζας.

Κατά σειρά μεγέθους οι **κύριες τάσεις** είναι οι εξής:

- ✓ **Μέγιστη κύρια τάση ( $\sigma_1$ )**
- ✓ **Μέση κύρια τάση ( $\sigma_2$ )**
- ✓ **Ελάχιστη κύρια τάση ( $\sigma_3$ )**

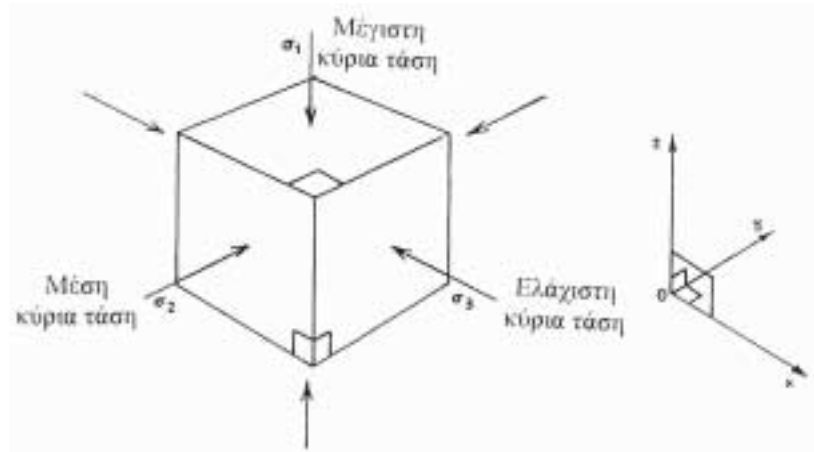
Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζεται ένας τυπικός κύβος, στις έδρες του οποίου (κύρια επίπεδα) ενεργούν οι κύριες τάσεις.

##### Ανεμπόδιστη θλίψη, μονοαξονική θλίψη:

Αξονική συμπίεση ενός δοκιμίου το οποίο δεν υφίσταται πλευρικές τάσεις ή υποστήριξη.

Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη  $q_u$ :

Η μέγιστη αξονική τάση που μπορεί να υποστεί το έδαφος χωρίς να παρουσιάσει θραύση, ενώ δεν υποστηρίζεται πλευρικά. Εξαρτάται από τις εδαφικές παραμέτρους της συνοχής ( $c$ ) και της γωνίας εσωτερικής τριβής ( $\phi$ ).



**Σχήμα 4.1:** Κύρια επίπεδα και κύριες τάσεις.

Κύκλος του MOHR:

Η γραφική απεικόνιση της κατάστασης των τάσεων (κατακόρυφης και διατμητικής) σε οποιοδήποτε επίπεδο του εδαφικού δοκιμίου.

Φάκελος αστοχίας του MOHR:

Η καμπύλη, η οποία είναι εφαπτόμενη στους κύκλους του MOHR που προκύπτουν από φόρτιση εδαφικών δοκιμίων με διαφορετικό συνδυασμό τάσεων φόρτισης ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ ). Η περιβάλλουσα των κύκλων αυτών είναι μια καμπύλη χαρακτηριστική του υλικού.

Επίπεδο αστοχίας:

Το επίπεδο πάνω στο οποίο μετακινείται ο άξονας της μέγιστης αντοχής του δοκιμίου, όταν αυτό αστοχεί.

Επίπεδο ή επιφάνεια θραύσης:

Το επίπεδο ή η επιφάνεια πάνω στο οποίο το ένα τμήμα του δοκιμίου ολισθαίνει σε σχέση με το άλλο. Μπορεί να εμφανίζεται με την ίδια γωνία ως προς την οριζόντιο με το επίπεδο αστοχίας.



Μέτρο ελαστικότητας  $E$ :

Το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους εκφράζει την τάση που πρέπει να ασκηθεί σε αυτό για την παραμόρφωσή του κατά μια μονάδα μήκους. Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού ισούται με την κλίση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης που σχεδιάζεται από τις μετρήσεις της δοκιμής σε ανεμπόδιστη θλίψη. Είναι δηλαδή:

$$E = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \quad [4.1]$$

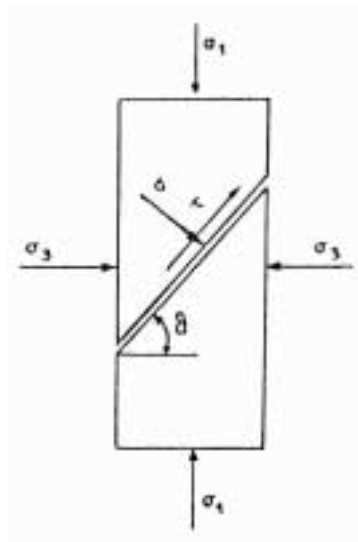
Το έδαφος χαρακτηρίζεται ελαστικό όταν έχει την ιδιότητα να μην παραμορφώνεται μόνιμα με την επιβολή εξωτερικών τάσεων, αλλά να επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση μετά την απομάκρυνση των τάσεων. Ουσιαστικά το έδαφος παρουσιάζει ελαστικότητα σε πολύ μικρό εύρος τάσεων και επομένως και παραμορφώσεων. Πέραν αυτών η συμπεριφορά του παύει να είναι ελαστική και γίνεται πλαστική.

**4.1.2 Κριτήριο θραύσης κατά MOHR**

Σε πολλές περιπτώσεις η μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_1$  ενεργεί κατά την κατακόρυφη διεύθυνση ενώ η μέση  $\sigma_2$  και η ελάχιστη κύρια τάση  $\sigma_3$  κατά την οριζόντια (σε κάθετες μεταξύ τους γωνίες).

Καταστάσεις θραύσης εμφανίζονται σε επίπεδα κάθετα στο ενδιάμεσο κύριο επίπεδο. Έτσι, η ενδιάμεση τάση  $\sigma_2$  είναι δευτερεύουσας σημασίας όσο αφορά την επίδρασή της στην παραμόρφωση και την αντοχή της μάζας (Σχήμα 4.2). Πολλά από τα γεωτεχνικά προβλήματα εξετάζονται στις δύο διαστάσεις και λαμβάνονται υπόψη μόνο η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια τάση  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$ .

Σε μια δοκιμή συμπίεσης, ένα εδαφικό δοκίμιο υφίσταται δυνάμεις θλίψης που ενεργούν σε τρεις διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους και στα τρία κύρια επίπεδα. Θραύση όμως εκδηλώνεται σε οποιοδήποτε επίπεδο στο οποίο η διατμητική τάση  $\tau$  λαμβάνει οριακή τιμή. Το μέγεθος της διατμητικής τάσης  $\tau$  εξαρτάται από την ορθή (κάθετη σε αυτό το επίπεδο) τάση  $\sigma_n$ , σύμφωνα με μια συνάρτηση του τύπου  $\tau = f(\sigma_n)$ , η οποία είναι χαρακτηριστική για κάθε υλικό.



**Σχήμα 4.2:** Επίπεδη εντατική κατάσταση (Λοΐζος, 1977).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι για να εκτιμήσουμε την πιθανότητα αστοχίας σε ένα οποιοδήποτε επίπεδο της εδαφικής μάζας, είναι απαραίτητος ο καθορισμός της ορθής  $\sigma_n$  και της διατμητικής τάσης  $\tau$  που ενεργούν σε αυτό.

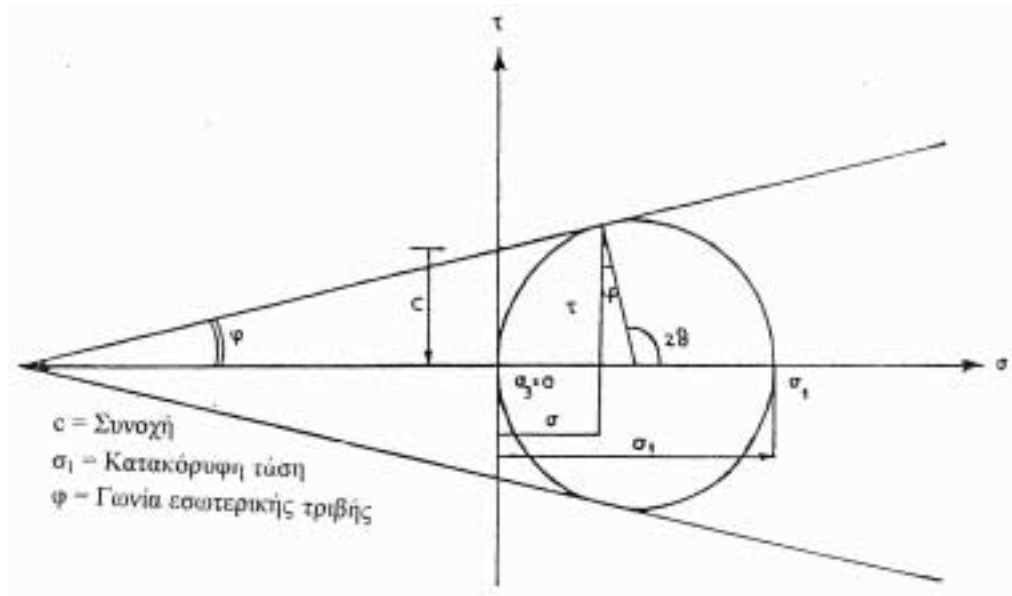
Οι τάσεις  $\tau$  και  $\sigma_n$  σε μια επίπεδη εντατική κατάσταση με κύριες τάσεις  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$ , δίνονται από τις σχέσεις:

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \eta \mu 2\theta, \quad [4.2]$$

$$\sigma_n = \sigma_3 + (\sigma_1 - \sigma_3) \sigma \nu \eta^2 \theta \quad \text{ή} \quad \sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sigma \nu \eta 2\theta \quad [4.3]$$

όπου  $\theta$  η γωνία που σχηματίζει το πιθανό επίπεδο αστοχίας με αυτό της μέγιστης κύριας τάσης που στην περίπτωση της μονοαξονικής και τριαξονικής θλίψης ταυτίζεται με το οριζόντιο (Σχήμα 4.2).

Οι συνθήκες τάσεων για όλα τα επίπεδα που διέρχονται από ένα σημείο της εδαφικής μάζας παρίστανται από τα σημεία ενός κύκλου που καλείται κύκλος του MOHR (Σχήμα 4.3). Ο κύκλος του MOHR συσχετίζει τη διατμητική  $\tau$  και την ορθή τάση  $\sigma_n$  σ' ένα τυχαίο επίπεδο, με τις κύριες τάσεις  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  που τις προκαλούν.



**Σχήμα 4.3:** Εντατική κατάσταση κατά Mohr στη δοκιμή ανεμπόδισης θλίψης (Λοΐζος, 1977).

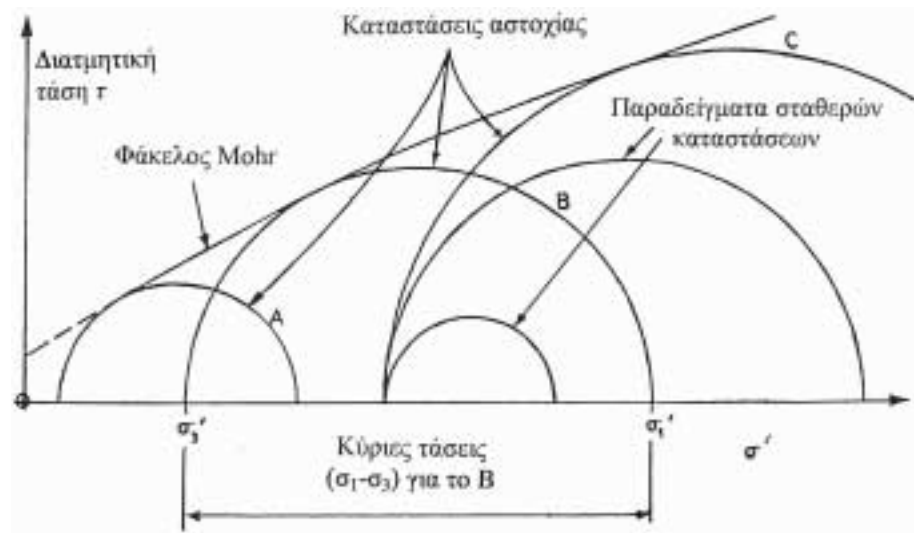
Για την κατασκευή του κύκλου του MOHR σχεδιάζεται ένα ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων με άξονες  $\tau$  ( $yy'$ ) και  $\sigma_n$  ( $xx'$ ). Το κέντρο του κύκλου τοποθετείται στον άξονα  $\sigma_n$  και συγκεκριμένα στην τετμημένη  $\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$ , ενώ η ακτίνα του κύκλου ισούται με  $\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ . Με τη βοήθεια του κύκλου του MOHR μπορεί να βρεθεί γραφικά η ορθή  $\sigma_n$  και η διατμητική τάση  $\tau$  που εφαρμόζονται σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο το οποίο σχηματίζει γωνία  $\theta$  ως προς το κάθετο επίπεδο στην μέγιστη κύρια τάση. Έτσι οι συντεταγμένες του σημείου της περιφέρειας του κύκλου που βρίσκεται σε ακτίνα που σχηματίζει γωνία  $2\theta$  με τον θετικό άξονα των κυρίων τάσεων  $\sigma_n$  δίνουν τις παραπάνω τάσεις (Σχήμα 4.3).

Αστοχία εκδηλώνεται σε εκείνο το επίπεδο στο οποίο ελαχιστοποιείται η διαφορά της διατμητικής τάσης που εφαρμόζεται και της διατμητικής αντοχής κατά COULOMB. Η διαφορά αυτή εξαρτάται από τη γωνία  $\theta$  και η ελάχιστη τιμή της παρουσιάζεται όταν:

$$\theta = 45^\circ + \varphi/2 \quad [4.4]$$

όπου  $\varphi$  η γωνία εσωτερικής τριβής του υλικού.

Κατά την επανάληψη της δοκιμής κάτω από διαφορετικό συνδυασμό τάσεων φόρτισης  $\sigma_1, \sigma_3$  προκύπτουν διαφορετικοί κύκλοι του MOHR. Η περιβάλλουσα των κύκλων αυτών παριστάνει το γεωμετρικό τόπο των σημείων που αντιστοιχούν στο συνδυασμό των τάσεων  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$  οι οποίες προκαλούν θραύση του δείγματος (Σχήμα 4.4). Αν οι τιμές  $\tau, \sigma_n$  που περιγράφουν την εντατική κατάσταση εδαφικού υλικού βρίσκονται κάτω από το φάκελο αστοχίας του MOHR, τότε οι συνθήκες θραύσης δεν πληρούνται και επομένως το υλικό δεν πρόκειται να αστοχήσει. Με βάση τα παραπάνω, ένα εδαφικό υλικό πρόκειται να υποστεί θραύση μόνο όταν η καμπύλη  $f(\sigma)$  εφάπτεται ή τέμνει τον κύκλο του MOHR που κατασκευάζεται για μια δεδομένη εντατική κατάσταση.



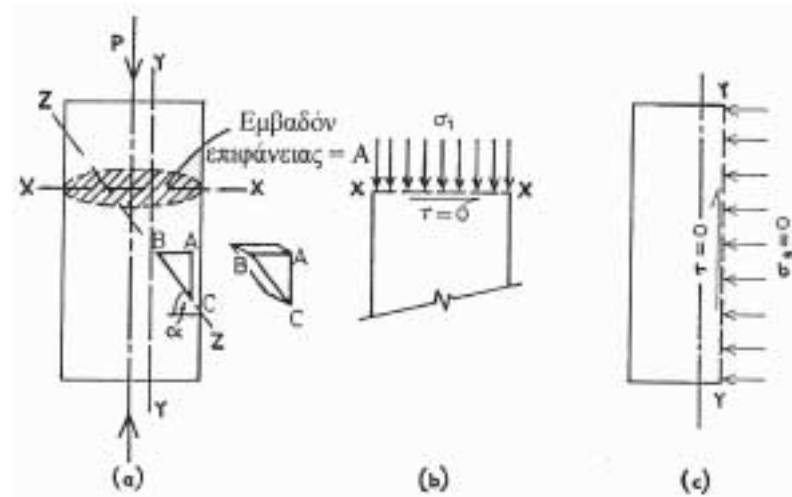
Σχήμα 4.4: Κύκλοι του Mohr και φάκελος αστοχίας του Mohr (Head, 1992).

## 4.2 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ

### 4.2.1 Αρχή της δοκιμής

Στο Σχήμα 4.5(α) φαίνεται ένα κυλινδρικό εδαφικό δοκίμιο, το οποίο υπόκειται σε μια κατακόρυφη θλιπτική δύναμη  $P$  και δεν ασκείται πάνω του καμία άλλη δύναμη. Αν το εμβαδόν του δοκιμίου σε μια κάθετη στη δύναμη επιφάνεια είναι  $A$ , σε οποιοδήποτε οριζόντιο επίπεδο  $XX$ , η κατακόρυφη τάση θα είναι ίση με  $P/A$  και η τάση διάτμησης μηδενική αφού δεν υπάρχουν πλευρικές δυνάμεις. Σε αυτή την απλή περίπτωση, η κατακόρυφη τάση στο επίπεδο  $XX$ , είναι η μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_1$  (Σχήμα 4.5(b)).

Σε ένα κατακόρυφο επίπεδο  $YY$  (Σχήμα 4.5(c)) η κάθετη σε αυτό τάση (που είναι η ελάχιστη κύρια τάση) είναι μηδέν γιατί δεν υπάρχουν οριζόντιες δυνάμεις. Η τάση διάτμησης είναι επίσης μηδέν διότι η μέγιστη κύρια τάση  $\sigma_I$  δεν τείνει να μετακινήσει κατακόρυφα το ένα τμήμα του δοκιμίου ως προς το άλλο.

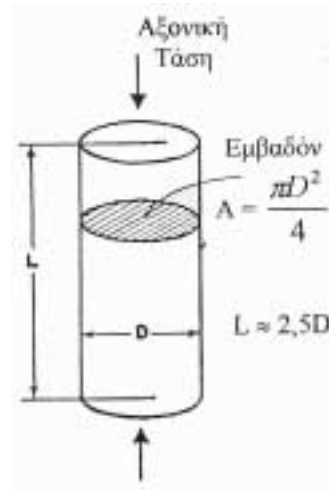


**Σχήμα 4.5.:** Τάσεις σε κυλινδρικό δοκίμιο που υπόκειται σε μονοαξονική συμπίεση:  
 (α) εξωτερικές δυνάμεις και επίπεδα, (b) τάσεις στο επίπεδο  $XX$ :  $\sigma_1 = P/A$  και  $\tau = 0$ ,  
 (c) τάσεις στο επίπεδο  $YY$ :  $\sigma_3 = 0$  και  $\tau = 0$  (Head, 1992).

Κατά την πραγματοποίηση της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης, ένα κυλινδρικό δοκίμιο εδάφους, υπόκειται σε σταδιακά αυξανόμενο αξονικό φορτίο, μέχρι θραύσης του. Στη δοκιμή αυτή, το κατακόρυφο φορτίο αποτελεί τη μόνη δύναμη που εφαρμόζεται στο δοκίμιο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.6.

Η δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης εφαρμόζεται μόνο σε συνεκτικά εδάφη (αφού από ένα μη συνεκτικό έδαφος δεν είναι δυνατόν να μορφοποιηθεί δοκίμιο) και πλεονεκτεί έναντι της δοκιμής άμεσης διάτμησης εξαιτίας των πλέον ομοιόμορφων τάσεων και παραμορφώσεων που εφαρμόζονται στο δοκίμιο.

Η επιφάνεια θραύσης τείνει να εμφανιστεί στην ασθενέστερη ζώνη του δοκιμίου, σε αντίθεση με τη δοκιμή άμεσης διάτμησης όπου το δοκίμιο εξαναγκάζεται σε θραύση κατά μια επιφάνεια προκαθορισμένη, η οποία δεν είναι απαραίτητα και η ασθενέστερη.



**Σχήμα 4.6:** Αρχή δοκιμής μονοαξονικής (ανεμπόδισης) θλίψης (Head, 1992).

Επίσης θα πρέπει να αναφερθεί ότι η δοκιμή ανεμπόδισης θλίψης είναι μια δοκιμή σε συνθήκες φυσικής υγρασίας. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής δεν επιτρέπεται η αποστράγγιση του νερού των πόρων από το δοκίμιο (συχνά καλείται U test). Έτσι δεν πραγματοποιείται καμία αλλαγή στο ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας του εδαφικού δοκιμίου.

#### 4.2.2 Διαστάσεις δοκιμίων

Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται έχουν συνήθως αναλογία ύψους προς διαμέτρου 2:1 με βάση τα βρετανικά πρότυπα και 2:1 με 2,5:1 με βάση τα πρότυπα κατά ASTM. Αν η αναλογία είναι μικρότερη του 2:1, τότε τα αποτελέσματα που αφορούν την αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη είναι μεγαλύτερα από τα πραγματικά. Αν η αναλογία είναι μεγαλύτερη από 2,5:1 μπορεί να εμφανιστεί αστάθεια και το δοκίμιο να λυγίσει, μη αστοχώντας κάτω από το πραγματικό μέγιστο φορτίο που μπορεί να αντέξει το έδαφος αλλά κάτω από κάποιο μικρότερο.

Η μέτρηση των διαστάσεων των δοκιμίων έγινε με διαστημόμετρο τύπου Vernier με ακρίβεια 0,05mm. Οι διαστάσεις των δοκιμίων που κυρίως χρησιμοποιήθηκαν κατά την πραγματοποίηση των δοκιμών ήταν της τάξης των 50mm σε διάμετρο και 125mm σε ύψος. Σε ορισμένες δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν και δοκίμια διαστάσεων 38mm σε διάμετρο και 95mm σε ύψος, λόγω της ευθρυπτότητας του υλικού, που δεν επέτρεπε τη διαμόρφωση μεγαλύτερων δοκιμίων.

### 4.2.3 Ρυθμός φόρτισης

Η φόρτιση του εδαφικού δοκιμίου πραγματοποιείται με σταθερό ρυθμό, που αντιστοιχεί συνήθως σε έως και 2% ανηγμένη παραμόρφωση αυτού ανά λεπτό. Επίσης ο ρυθμός φόρτισης αλλά και η ίδια η τάση θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε το δοκίμιο να αστοχήσει μέσα σε 5 με 10 λεπτά από την έναρξη της δοκιμής. Για να πληρούν την παραπάνω προϋπόθεση, εδάφη μικρής αντοχής απαιτούν μικρότερο ρυθμό φόρτισης και επιβαλλόμενη τάση από εδάφη που παρουσιάζουν πλαστική συμπεριφορά.

Ανάλογα με τη διάμετρο του υπό θραύση δοκιμίου ο ιδανικός ρυθμός φόρτισης διαφέρει. Κάποιες ενδεικτικές τιμές αναφέρονται στον Πίνακα 4.1:

**Πίνακας 4.1:** Σχέση διαμέτρου δοκιμίου με την ταχύτητα φόρτισης αυτού.

Διάμετρος δοκιμίου (mm)	Ταχύτητα φόρτισης (mm/min)
38	1,5
50	2
75	3
100	4

Όπως προαναφέρθηκε η διάμετρος των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης ήταν 50mm και σε ορισμένα από τα δοκίμια 38mm, επομένως η ταχύτητα φόρτισης ήταν 2mm/min και 1,5mm/min, αντίστοιχα.

### 4.2.4 Κριτήρια αστοχίας

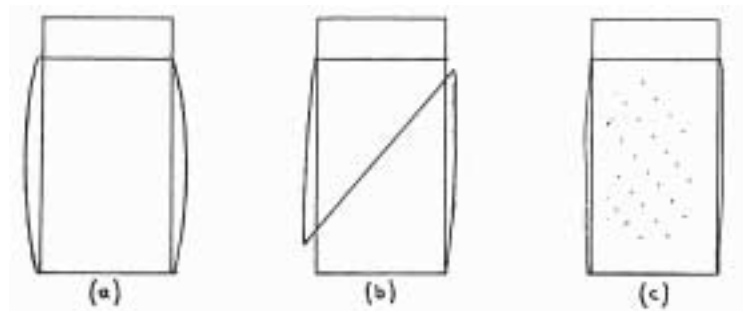
Αστοχία ονομάζεται η κατάσταση κατά την οποία το εδαφικό δοκίμιο δεν μπορεί να αντέξει την περαιτέρω αύξηση της τάσης. Είναι δηλαδή εκείνο το σημείο στο οποίο το δοκίμιο παρουσιάζει την μέγιστη αντίσταση στην παραμόρφωση. Πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη σαν κριτήριο αστοχίας και το φαινόμενο της διόγκωσης ή "βαρελοποίησης" του δοκιμίου κατά τη συμπίεση.

Σε πολύ πλαστικά εδάφη στα οποία η κατακόρυφη τάση δεν παίρνει άμεσα μια μέγιστη τιμή, αστοχία θεωρείται ότι έχει εμφανιστεί όταν έχει επιτευχθεί μια συγκεκριμένη αξονική παραμόρφωση (συνήθως 20%).

#### 4.2.5 Τύποι αστοχίας

Διακρίνονται τρεις κύριες κατηγορίες αστοχιών:

- Πλαστική αστοχία κατά την οποία το δοκίμιο διογκώνεται πλευρικά παίρνοντας το σχήμα βαρελιού, χωρίς όμως να εμφανίζει κάποιο επίπεδο αστοχίας (Σχήμα 4.7(α)).
- Αστοχία θραύσης κατά την οποία το δοκίμιο διατμείται κατά μήκος ενός ή περισσότερων ευδιάκριτων επιφανειών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.7(b).
- Συνδυασμός των δύο παραπάνω τύπων αστοχίας (Σχήμα 4.7(c)).



**Σχήμα 4.7.:** Τύποι αστοχίας σε δοκίμια που υπέστησαν τη δοκιμή ανεμπόδισης θλίψης: (α) πλαστική αστοχία (βαρελοποίηση), (b) θραύση (εμφανές επίπεδο αστοχίας), (c) συνδυασμός των δύο τύπων (Head, 1992).

Ο τύπος της αστοχίας είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για την περιγραφή των ιδιοτήτων του εδάφους.

### 4.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

#### 4.3.1 Γενικά

Η συσκευή του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της δοκιμής ανεμπόδισης θλίψης, φαίνεται στην Εικόνα 4.1.





**Εικόνα 4.1:** Εργαστηριακή συσκευή δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης.

Η συσκευή αυτή είναι χειροκίνητη, και αποτελείται από τα εξής κύρια τμήματα:

- ✓ Το δακτύλιο φόρτισης, μέσω του οποίου η τάση που εφαρμόζεται κατά τη φόρτιση στο δοκίμιο μεταφράζεται σε μήκος.
- ✓ Ένα μηκυνσιόμετρο για τη μέτρηση της εφαρμοζόμενης τάσης στο δοκίμιο.
- ✓ Τις πλάκες φόρτισης μεταξύ των οποίων τοποθετείται το εδαφικό δοκίμιο για την πραγματοποίηση της δοκιμής.
- ✓ Ένα μηκυνσιόμετρο για τη μέτρηση της αξονικής παραμόρφωσης.
- ✓ Το στρόφαλο περιστροφής για την επιβολή της φόρτισης.

Η καταγραφή των ενδείξεων του μετρητή παραμορφώσεων και εφαρμοζόμενης τάσης, γίνεται μέσω ειδικού καταγραφικού μηχανήματος και του προγράμματος MPX 32 Data Logger (Version 1.3) της εταιρείας Wykeham Farrance Engineering.

### 4.3.2 Συντελεστής μετατροπής του δακτυλίου φόρτισης

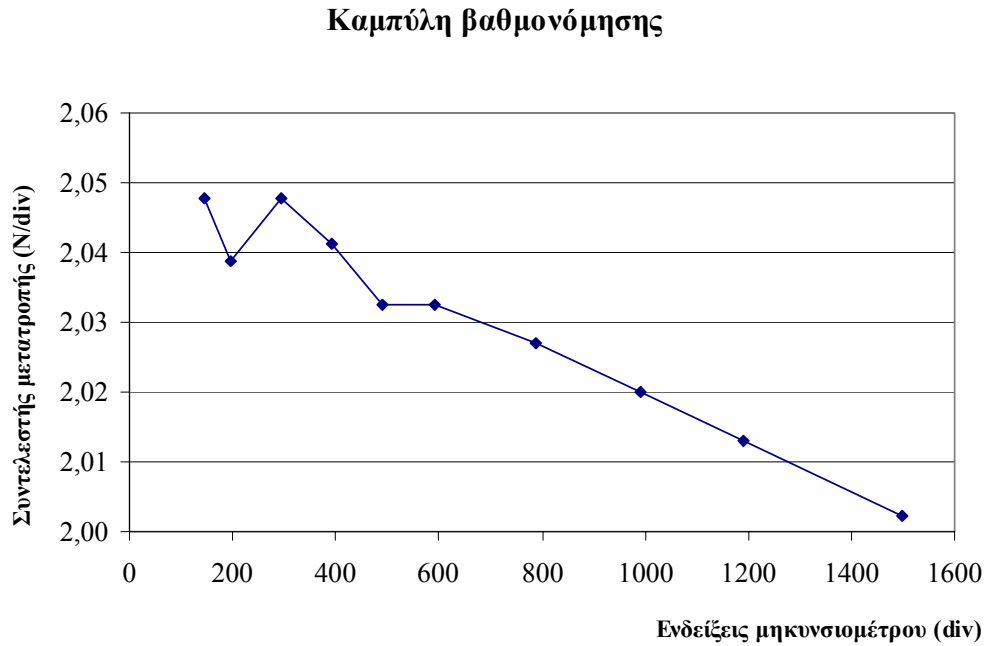
Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, βασικό εξάρτημα της συσκευής φόρτισης αποτελεί ο δακτύλιος φόρτισης. Για υλικά με διαφορετικές ιδιότητες, χρησιμοποιούνται και διαφορετικοί δακτύλιοι φόρτισης, με διαφορετική δηλαδή ικανότητα φόρτισης. Ο δακτύλιος που χρησιμοποιήθηκε για τα συγκεκριμένα δείγματα ήταν αυτός με κωδικό: WF 1155-11-12232.

Από τον κατασκευαστή δίνονται κάποιες ενδεικτικές τιμές που προέκυψαν κατά τη βαθμονόμηση, όσο αφορά την ένδειξη του μηχανομύδρου (gauge reading) και το επιβαλλόμενο φορτίο (load N). Από κάθε ζεύγος τιμών και συγκεκριμένα με διαίρεση του φορτίου με την ένδειξη του μηχανομύδρου προκύπτει μια τρίτη, που είναι ο συντελεστής μετατροπής του δακτυλίου. Ο συντελεστής αυτός ανάγει την ένδειξη του μηχανομύδρου σε δύναμη, για τον υπολογισμό του φορτίου που επιβάλλεται κάθε φορά στο υπό εξέταση δοκίμιο.

Τα ζεύγη τιμών που δίνει ο κατασκευαστής για το συγκεκριμένο δακτύλιο φαίνονται στον Πίνακα 4.2 που ακολουθεί, ενώ έχει υπολογιστεί και η μέση τιμή των συντελεστών μετατροπής του δακτυλίου που προέκυψαν για το κάθε στάδιο, 2,030N/div., η οποία χρησιμοποιήθηκε τελικά για τον υπολογισμό του φορτίου. Ακολουθεί η καμπύλη βαθμονόμησης (Σχήμα 4.8) με βάση τις τιμές του πίνακα.

**Πίνακας 4.2:** Στοιχεία για τον υπολογισμό του συντελεστή μετατροπής του δακτυλίου φόρτισης.

Ένδειξη Μηχανομύδρου (divisions)	Φορτίο (N)	Συντελεστής μετατροπής (N/div.)
146,5	300	2,048
196,2	400	2,039
293,0	600	2,048
391,9	800	2,041
492,0	1000	2,033
590,4	1200	2,033
789,3	1600	2,027
990,1	2000	2,020
1192,2	2400	2,013
1498,4	3000	2,002
<b>Μέση τιμή</b>	<b>-</b>	<b>2,030</b>



**Σχήμα 4.8:** Καμπύλη βαθμονόμησης για το δακτύλιο φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης.

#### 4.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

##### 4.4.1 Γενικά

Για κάθε ένα από τα δείγματα που μελετήθηκαν, κατασκευάστηκαν δύο δοκίμια με διαφορετικό προσανατολισμό: ένα κάθετο στη στρώση του αδιατάρακτου τεμάχους και ένα παράλληλο σε αυτή, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο. Σκοπός της ενέργειας αυτής είναι η εξέταση της ανισοτροπίας του υλικού κατά τις δύο αυτές διευθύνσεις με βάση το μέτρο ελαστικότητας που προκύπτει για καθεμία από αυτές.

**Πίνακας 4.3:** Δείγματα που υποβλήθηκαν στη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης.

Αριθμός δοκιμίων	Τομέας	Θέση	Δείγμα
2	6	A	2
2	6	Γ	1
2	6	Γ	3

Συνολικά 3 ζεύγη δοκιμίων (κάθετο και οριζόντιο) υποβλήθηκαν στην δοκιμή της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη. Η προέλευση των δοκιμίων αυτών φαίνεται στον Πίνακα 4.3.

#### 4.4.2 Πειραματική διαδικασία

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- ✓ Το εδαφικό δοκίμιο τοποθετείται στη συσκευή έτσι ώστε ο άξονάς του να περνά από το κέντρο της πλάκας φόρτισης.
- ✓ Η συσκευή ρυθμίζεται έτσι ώστε η πάνω πλάκα αυτής να εφάπτεται με την πάνω επιφάνεια του δοκίμιου (Εικόνα 4.2).
- ✓ Μηδενίζονται οι μετρητές παραμορφώσεων και φορτίου.



**Εικόνα 4.2:** Συσκευή φόρτισης με εδαφικό δοκίμιο πριν την έναρξη της δοκιμής.

- ✓ Στο δοκίμιο εφαρμόζεται θλιπτικό φορτίο με σταθερό ρυθμό φόρτισης που αντιστοιχεί σε αξονική παραμόρφωση 1,5 ή 2mm/min (ανάλογα με τη διάμετρό του).
- ✓ Με την έναρξη επιβολής του φορτίου ξεκινά και η καταγραφή των μετρήσεων από το αυτόματο καταγραφικό μηχάνημα.

#### 4.4.3 Περιγραφή σπασμένων δοκιμίων

Τα σπασμένα δοκίμια απομακρύνονται προσεκτικά από τη συσκευή και γίνεται περιγραφή του τρόπου αστοχίας τους. Στις περιπτώσεις θραύσης του δοκιμίου όπου η επιφάνεια θραύσης είναι σαφής, μετράται η γωνία αυτής με την οριζόντιο.

Στο παράρτημα παρατίθενται κάποιες ενδεικτικές φωτογραφίες σπασμένων δοκιμίων του δείγματος 3 από τη θέση Γ, καθώς και σύντομη περιγραφή του τρόπου αστοχίας τους.

### 4.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΝΤΑΙ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥΣ

Στις επόμενες παραγράφους θα γίνει αναφορά στις παραμέτρους που υπολογίστηκαν από τις μετρήσεις που έγιναν για την αντοχή σε ανεμπόδιση θλίψη καθώς και στον τρόπο που αυτές υπολογίστηκαν.

#### 4.5.1 Φυσική υγρασία του υλικού ( $w_o$ )

Με τον όρο φυσική υγρασία εννοούμε το ποσοστό % της μάζας του νερού που περιέχεται στο υλικό μας προς την ξηρή μάζα του υλικού. Για τον προσδιορισμό της φυσικής υγρασίας του εδαφικού υλικού ένα μέρος αυτού ζυγίζεται ως έχει και η μάζα αυτή καταγράφεται ως  $m_v$ . Το υλικό αυτό τοποθετείται στον ειδικό φούρνο του εργαστηρίου για ξήρανση στους 60 °C μέχρι σταθερής μάζας. Η μάζα του ξηρού δείγματος είναι  $m_\xi$  και η υγρασία του υλικού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$w_o = \frac{m_v - m_\xi}{m_\xi} * 100\% \quad [4.5]$$

Σημειώνεται ότι η ξήρανση του υλικού γίνεται σε αυτή τη θερμοκρασία (60 °C) και όχι στη συνήθη (105 – 110 °C) για την αποφυγή απώλειας οργανικού υλικού που ίσως περιέχεται σε μικρά ποσοστά στο υπό μελέτη έδαφος, δεδομένης της προέλευσής του. Η απώλεια αυτή θα έδινε μικρότερη μάζα ξηρού δείγματος από την πραγματική και θα οδηγούσε σε λανθασμένο υπολογισμό της φυσικής υγρασίας.

#### 4.5.2 Επιβαλλόμενο φορτίο ( $q$ )

Η δύναμη που επιβάλλεται κάθε στιγμή στο εδαφικό δοκίμιο κατά τη διαδικασία της φόρτισης προκύπτει ως το γινόμενο της ένδειξης του μηκυνσιομέτρου του δακτυλίου με τον συντελεστή μετατροπής του δακτυλίου. Ο συντελεστής αυτός για το δακτύλιο που χρησιμοποιήθηκε είναι ίσος, όπως έχει προαναφερθεί, με: 2,030 N/div.

#### 4.5.3 Ανηγμένη παραμόρφωση ( $\varepsilon$ )

Όταν ένα κυλινδρικό εδαφικό δοκίμιο συμπίεζεται κάτω από αξονική φόρτιση, το ύψος του μειώνεται και ο λόγος της μεταβολής του ύψους  $\Delta L$ , με βάση τις ενδείξεις του μετρητή παραμορφώσεων, προς το αρχικό ύψος του δοκιμίου  $L_o$  σε οποιοδήποτε στάδιο είναι η ανηγμένη παραμόρφωση  $\varepsilon$ . Δηλαδή είναι:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \quad [4.6]$$

Η ανηγμένη παραμόρφωση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διορθωμένης επιφάνειας του δοκιμίου και της αξονικής τάσης που υφίσταται αυτό λόγω του επιβαλλόμενου φορτίου.

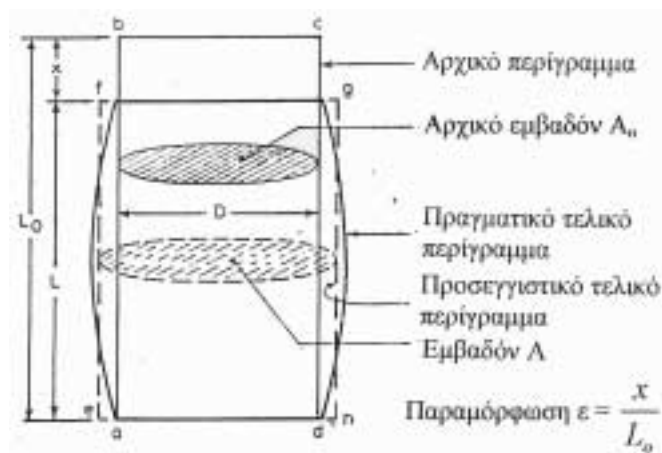
#### 4.5.4 Διορθωμένο εμβαδόν επιφάνειας δοκιμίου ( $A$ )

Σε μια δοκιμή όπως αυτή της ανεμπόδισης θλίψης όπου δεν επιτρέπεται η στράγγιση του νερού από το δοκίμιο, αν το έδαφος είναι κορεσμένο και θεωρηθεί ότι το νερό και οι εδαφικοί κόκκοι είναι ασυμπίεστοι, ο όγκος του δοκιμίου παραμένει αμετάβλητος. Άρα η μείωση του ύψους του δοκιμίου θα πρέπει να εμφανιστεί ως αύξηση της

διαμέτρου του. Αυτός είναι και ο λόγος που παρουσιάζεται το φαινόμενο της βαρελοποίησης.

Αύξηση της διαμέτρου συνεπάγεται και αύξηση του εμβαδού της κάθετης στην δύναμη  $P$  επιφάνειας επομένως αντίστοιχη μείωση της κατακόρυφης τάσης. Έτσι απαιτείται να γίνει διόρθωση του εμβαδού ώστε να υπολογίζεται η σωστή κάθε φορά τάση που ασκείται στο δοκίμιο.

Κάτω από την επίδραση μιας θλιπτικής δύναμης  $P$  το δοκίμιο αλλάζει σχήμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9. Έτσι, ενώ το αρχικό του περίγραμμα είναι το  $abcd$  μετά από την εφαρμογή της φόρτισης, γίνεται όπως φαίνεται με την έντονη μαύρη γραμμή.



**Σχήμα 4.9:** Παραμόρφωση δοκιμίου λόγω βαρελοποίησης (Head, 1992).

Στην ανάλυση αυτή θεωρείται ότι αυτός ο μετασχηματισμός που υφίσταται το δοκίμιο, ισοδυναμεί με το ιδανικό περίγραμμα  $efgh$  που έχει ενιαία διάμετρο αλλά και τον ίδιο όγκο με το βαρελοποιημένο δοκίμιο. Το εμβαδόν της επιφάνειας του  $efgh$  είναι το  $A$  και το αρχικό εμβαδόν του δοκιμίου το  $A_0$ , όπου:

$$A_0 = \frac{\pi D^2}{4} \quad [4.7]$$

Αφού οι όγκοι των δύο κυλίνδρων είναι ίσοι, θα είναι:

$$A_0 L_0 = A L = A (L_0 - \Delta L) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow A = \frac{A_o L_o}{L_o - \Delta L} = \frac{A_o}{1 - \frac{\Delta L}{L_o}} \quad [4.8]$$

Αλλά γνωρίζουμε ότι το  $\frac{\Delta L}{L_o}$  είναι η ανηγμένη παραμόρφωση  $\varepsilon$ , οπότε η παραπάνω σχέση θα γίνει:

$$A = \frac{A_o}{1 - \varepsilon} \quad [4.9]$$

Η τιμή του  $A$  που προκύπτει από την παραπάνω σχέση, είναι αυτή που δίνει την μέση εγκάρσια επιφάνεια του δείγματος ( $\text{mm}^2$ ) που αντιστοιχεί στο φορτίο  $P$ .

#### 4.5.5 Αξονική τάση ( $q_u$ )

Η αξονική τάση που υφίσταται το δοκίμιο λόγω του φορτίου  $P$  είναι ίση με  $P/A$ , δηλαδή:

$$q_u = (\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{P}{A} = \frac{P(1 - \varepsilon)}{A_o} \quad [4.10]$$

ενώ αν το  $\varepsilon$  εκφράζεται σαν ποσοστό επί τοις εκατό θα είναι:

$$q_u = \frac{P}{A_o} \left( \frac{100 - \varepsilon\%}{100} \right) \quad [4.11]$$

Έτσι η κατακόρυφη τάση που υπολογίζεται στην αρχή της δοκιμής μειώνεται σε κάθε στάδιο αυτής κατά τον παράγοντα  $(100 - \varepsilon\%)/100$  λόγω της επίδρασης του φαινομένου της βαρελοποίησης.

#### 4.5.6 Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη

Όπως έχει προαναφερθεί η αντοχή σε ανεμπόδιστη (μονοαξονική) θλίψη ορίζεται ως η μέγιστη αντοχή ( $q_u$ ) που παρουσιάζει ένα εδαφικό δοκίμιο (αμέσως πριν τη θραύση),



ενώ υφίσταται συμπίεση. Στον Πίνακα 4.4 δίνονται ενδεικτικές τιμές της αντοχής σε μονοαξονική θλίψη αργιλικών εδαφών συναρτήσει της συνεκτικότητας.

**Πίνακας 4.4:** Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη αργιλικών εδαφών συναρτήσει της συνεκτικότητας (Hunt, 1986).

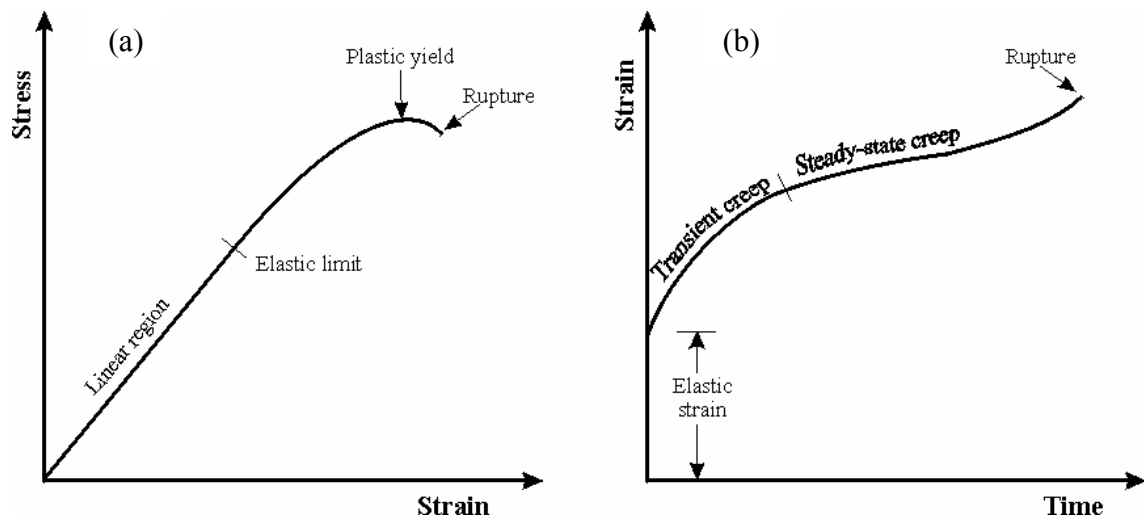
ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ	
	(kg/cm <sup>2</sup> )	(kPa)
Πολύ χαλαρή	< 0,25	< 25
Χαλαρή	0,25 - 0,50	25 - 50
Μέση	0,50 - 1,00	50 - 100
Στιφρή	1,00 - 2,00	100 - 200
Πολύ στιφρή	2,00 - 4,00	200 - 400
Σκληρή	> 4,00	> 400

Η τιμή της αντοχής ισούται με τη μέγιστη αξονική τάση από αυτές που έχουν υπολογιστεί στα επιμέρους στάδια της δοκιμής. Οι ενδείξεις του φορτίου λαμβάνονταν ανά 0,1mm της αξονικής παραμόρφωσης ή αντίστοιχα ανά 3 ή 4sec (ανάλογα με τη διάμετρο του δοκιμίου και επομένως και το ρυθμό φόρτισης αυτού).

#### 4.5.7 Καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης

Για κάθε 3 ή 4sec καταγράφονται μετρήσεις για το φορτίο που επιβάλλεται στο δοκίμιο τη δεδομένη χρονική στιγμή και υπολογίζεται η ανηγμένη παραμόρφωση που αυτό έχει υποστεί. Με βάση τις μετρήσεις αυτές κατασκευάζεται η καμπύλη της επιβαλλόμενης τάσης συναρτήσει της ανηγμένης παραμόρφωσης, που περιγράφει το συγκεκριμένο εδαφικό δείγμα (Σχήμα 4.10(a)).

Από την καμπύλη αυτή φαίνεται και γραφικά η μέγιστη αντοχή που παρουσίασε το υλικό κατά τη διάρκεια της δοκιμής καθώς και η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση που αυτό είχε υποστεί τη δεδομένη στιγμή. Κυρίως όμως προκύπτουν χρήσιμες πληροφορίες όσο αφορά το μέτρο δυστροπίας του υλικού με βάση την κλίση της καμπύλης σε δύο διαφορετικά σημεία όπως περιγράφεται παρακάτω.



**Σχήμα 4.10:** Σχέσεις τάσης, παραμόρφωσης και χρόνου. (a) Τάση συναρτήσει της παραμόρφωσης, (b) Παραμόρφωση συναρτήσει του χρόνου (Sheriff and Geldart, 1995).

#### 4.5.8 Μέτρο ελαστικότητας ( $E_{initial}$ και $E_{50}$ )

Ένα έδαφος το οποίο έχει υποστεί γεωλογικές τάσεις, έχει διαφορετική αντοχή στις τρεις διαστάσεις και παρουσιάζει ανισοτροπία λόγω μεταμόρφωσης (Mikasa, et al., 1987). Οι Shogaki & Moro (1997) πρότειναν έναν νέο τρόπο υπολογισμού της ανισοτροπίας εδαφών με βάση τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης.

Στην πράξη λοιπόν, χρησιμοποιούνται διάφορα χαρακτηριστικά της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης προκειμένου να εκφραστεί η ανισοτροπία του εδάφους. Αυτά είναι:

1. Η κλίση του αρχικού τμήματος της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης (ή αλλιώς  $E_{initial}$ ).
2. Η κλίση μιας ευθείας γραμμής που ξεκινά από την αρχή των αξόνων και φθάνει ως εκείνο το σημείο της καμπύλης, στο οποίο η τάση φόρτισης αντιστοιχεί στο 1/2 της οριακής αντοχής  $q_u$ . Η κλίση αυτή συμβολίζεται με  $E_{50}$ .

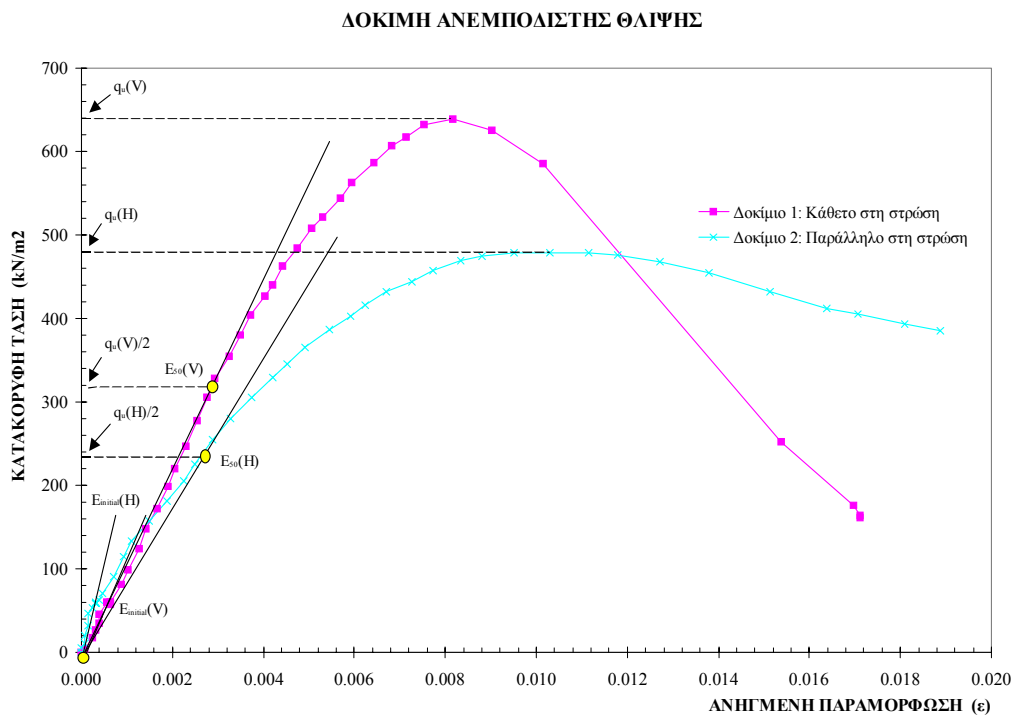
Με βάση τα παραπάνω, και δεδομένου ότι οι δοκιμές για κάθε δείγμα γίνονται για δοκίμια με προσανατολισμό παράλληλο και κάθετο στη στρώση, υπολογίζεται η ανισοτροπία του υλικού από το λόγο των αντίστοιχων  $E_{initial}$  και  $E_{50}$ .

Συμβολίζονται με  $E_{initial}(H)$  και  $E_{50}(H)$  οι κλίσεις της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης για το παράλληλο στη στρώση δοκίμιο στις δύο περιοχές που προαναφέρθηκαν, και  $E_{initial}(V)$  και  $E_{50}(V)$  οι αντίστοιχες κλίσεις για το κάθετο (Σχήμα 4.11), οπότε θα είναι:

$$\checkmark \quad \text{Αν } \frac{E_{initial}(H)}{E_{initial}(V)} \neq 1 \text{ ή } \frac{E_{50}(H)}{E_{50}(V)} \neq 1 \text{ τότε το υλικό είναι ανισότροπο.}$$

$$\checkmark \quad \text{Αν } \frac{E_{initial}(H)}{E_{initial}(V)} = 1 \text{ ή } \frac{E_{50}(H)}{E_{50}(V)} = 1 \text{ τότε το υλικό είναι ισότροπο.}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι υπολογίζονται και οι δύο λόγοι, τόσο για επιβεβαίωση της ανισοτροπίας (εφόσον αυτή υπάρχει), όσο και για την αποφυγή σφάλματος κατά τον προσδιορισμό αυτής. Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά του λόγου από τη μονάδα τόσο μεγαλύτερη είναι και η αντίστοιχη ένδειξη ανισοτροπίας.



**Σχήμα 4.11:** Καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης για τον προσδιορισμό της ανισοτροπίας.

## 5 ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΟΙΔΗΜΕΤΡΟΥ

### 5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ

Για την κατανόηση του φαινομένου της συμπιεστότητας, δίνονται παρακάτω κάποιοι ορισμοί βασικών εννοιών που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.

#### 5.1.1 Ορισμοί

##### Συμπιεστότητα

Συμπιεστότητα καλείται η παραμόρφωση των εδαφών που προκαλείται από την επιβολή θλιπτικής φόρτισης και οφείλεται κυρίως στη μείωση του όγκου των κενών που υπάρχουν μεταξύ των κόκκων.

##### Στερεοποίηση

Στερεοποίηση καλείται η ιδιότητα των εδαφών να αποβάλλουν το περιεχόμενο νερό όταν συμπιεστούν με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται ο όγκος τους ανάλογα με το ρυθμό αποβολής του νερού.

##### Λόγος κενών ( $e$ )

Είναι ο λόγος του όγκου των κενών μεταξύ των κόκκων (που πληρούνται είτε με νερό ή με αέρα), προς τον όγκο των στερεών κόκκων του εδάφους.

##### Βαθμός κορεσμού ( $S_r$ )

Είναι ο όγκος του νερού που περιέχεται στα κενά μεταξύ των κόκκων, εκφρασμένος σαν ποσοστό επί τοις εκατό επί του συνολικού όγκου των κενών.

##### Πίεση του νερού των πόρων ( $u$ )

Είναι η πίεση του νερού που βρίσκεται στους πόρους, μεταξύ των εδαφικών σωματιδίων. Αναφέρεται επίσης και ως πίεση πόρων.

### Ολική τάση ( $\sigma_v$ )

Είναι η τάση σε μια εδαφική μάζα, που προκαλείται από την εφαρμογή μίας εξωτερικής δύναμης ή τάσης.

### Ενεργή τάση ( $\sigma_v'$ )

Ενεργή τάση καλείται η τάση που φέρει ο εδαφικός σκελετός. Η ενεργή τάση σε ένα σημείο του εδάφους κάτω από τη στάθμη του υπόγειου νερού, είναι ίση με τη διαφορά της ολικής τάσης  $\sigma_v$  (όπως θα υπολογιζόταν αν δεν υπήρχε νερό), και της πίεσης του νερού των πόρων  $u$  (Βαλαλάς, 1985).

### Πρωτεύουσα συμπίεση

Ο βαθμός της συμπίεσης που παρατηρείται σε μια εργαστηριακή δοκιμή από τη στιγμή της εφαρμογής του φορτίου μέχρι την έναρξη της φάσης της πρωτεύουσας στερεοποίησης, ονομάζεται πρωτεύουσα συμπίεση.

### Πρωτεύουσα στερεοποίηση

Είναι εκείνο το τμήμα της ολικής συμπίεσης του εδάφους κάτω από φόρτιση, για το οποίο εφαρμόζεται η θεωρία στερεοποίησης του Terzaghi. Είναι δηλαδή η φάση κατά την οποία εμφανίζεται η αποστράγγιση και η εκτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων.

### Δευτερεύουσα συμπίεση

Ονομάζεται έτσι η συμπίεση που παρατηρείται όταν η πρωτεύουσα στερεοποίηση έχει ουσιαστικά ολοκληρωθεί και η οποία εξαρτάται από το χρόνο.

## **5.1.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπιεστότητα**

Η συμπιεστότητα των εδαφών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, οι κυριότεροι των οποίων είναι:

Το είδος του εδαφικού υλικού

Όπως είναι κατανοητό, όλα τα εδάφη δεν παρουσιάζουν τον ίδιο βαθμό στερεοποίησης. Αυτό οφείλεται κυρίως στο είδος και μέγεθος των κόκκων οι οποίοι τα αποτελούν. Έτσι, αργιλικά εδάφη παρουσιάζουν μεγάλη συμπιεστότητα σε

αντίθεση με τα αμμώδη εδάφη στα οποία η συμπιεστότητα είναι από ελάχιστη έως μηδενική.

Η τάση που εφαρμόζεται

Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση που εφαρμόζεται σε ένα εδαφικό υλικό, τόσο μεγαλύτερη αντίστοιχα είναι και η συμπιεστότητα που αυτό υφίσταται.

Ο χρόνος εφαρμογής της τάσης

Όταν το φορτίο που εφαρμόζεται σε ένα έδαφος είναι προσωρινό, τότε ο χρόνος εφαρμογής της τάσης είναι καθοριστικός για το μέγεθος της συμπιεστότητας που θα παρουσιαστεί. Συνήθως μεγαλύτερος χρόνος εφαρμογής αντιστοιχεί και σε μεγαλύτερης κλίμακας συμπίεση.

Ο λόγος κενών του εδάφους

Ο λόγος κενών του εδάφους είναι συνάρτηση του ενεργού φορτίου. Υψηλές τιμές του λόγου κενών δηλώνουν χαλαρό έδαφος και μεγάλες παραμορφώσεις του εδάφους κατά τη φόρτιση, ενώ μικρές τιμές του λόγου κενών δηλώνουν συμπαγές έδαφος και μικρές παραμορφώσεις κατά τη φόρτιση.

## **5.2 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΟΙΔΗΜΕΤΡΟΥ**

### **5.2.1 Αρχή της δοκιμής**

Το έδαφος αποτελείται από στερεά σωματίδια μεταξύ των οποίων υπάρχουν διαστήματα (κενά) τα οποία μπορεί να πληρούνται από ένα αέριο (συνήθως αέρα), ένα υγρό (συνήθως νερό), ή από ένα συνδυασμό των δύο. Τα κενά σε πλήρως κορεσμένα εδάφη πληρούνται μόνο από νερό.

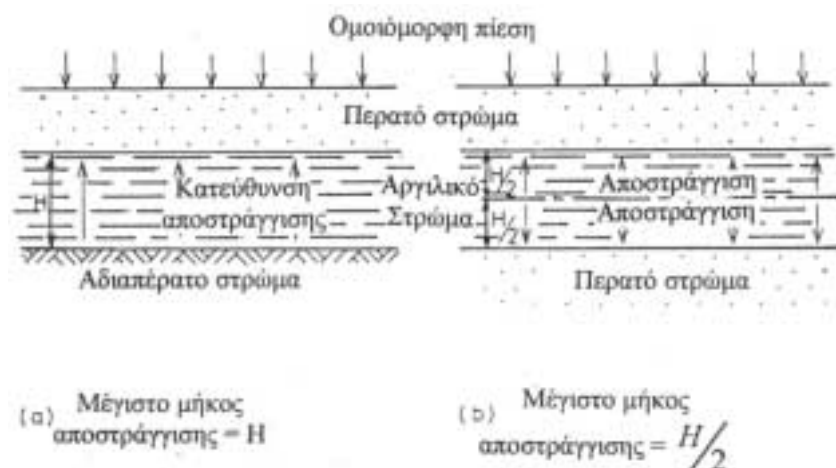
Όταν ένα έδαφος υπόκειται σε μια θλιπτική τάση, ο όγκος του τείνει να ελαττωθεί, πράγμα που σε ένα κορεσμένο έδαφος μπορεί να γίνει με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

1. Συμπίεση των στερεών κόκκων.
2. Συμπίεση του νερού των πόρων.
3. Αποστράγγιση του νερού των πόρων.

Στα περισσότερα ανόργανα εδάφη, η συμπίεση των στερεών κόκκων θεωρείται μηδαμινή και δεν λαμβάνεται υπόψη στη θεωρία της στερεοποίησης. Για οργανικά εδάφη, και ειδικότερα για την τύρφη, η συμπιεστότητα του στερεού υλικού μπορεί να είναι αξιοσημείωτη.

Επίσης, η συμπιεστότητα του νερού είναι αμελητέα οπότε και ο δεύτερος παράγοντας μπορεί να αγνοηθεί. Τα περισσότερα κοιτάσματα αργιλικών ιζημάτων είναι πλήρως κορεσμένα και η διαδικασία της στερεοποίησης σε αυτά τα εδάφη είναι πολύ σημαντική. Η παρουσία του αέρα στους πόρους δεν υπολογίζεται γιατί αυτό θα έκανε την ανάλυση για πρακτικούς σκοπούς πολύ πιο σύνθετη. Έτσι, η θεωρία της στερεοποίησης βασίζεται στον παράγοντα (3), την διαφυγή του νερού από τους πόρους μεταξύ του σκελετού των στερεών κόκκων.

Όταν ένα εξωτερικό φορτίο εφαρμόζεται σε ένα κορεσμένο αργιλικό έδαφος, αυτό φέρεται αρχικά από νερό των πόρων αυξάνοντας την πίεσή του κατά μια ποσότητα ίση με την ολική εφαρμοζόμενη πίεση. Αν το στρώμα της αργίλου περιορίζεται από επιφάνειες από τις οποίες το νερό μπορεί να διαφύγει (όπως για παράδειγμα γειτονικά



**Σχήμα 5.1:** Στρώμα αργίλου κάτω από στερεοποίηση: (α) απλή αποστράγγιση, (β) διπλή αποστράγγιση (Head, 1992).

στρώματα άμμου (Σχήμα 5.1), τότε η επιπλέον πίεση θα αναγκάσει το νερό να ρεύσει μέσα στα γειτονικά στρώματα.

Αυτό συμβαίνει αργά, λόγω της χαμηλής διαπερατότητας της αργίλου, αλλά καθώς το νερό αποστραγγίζεται, ένα διαρκώς αυξανόμενο ποσοστό του φορτίου μεταφέρεται στους κόκκους του εδαφικού σκελετού και η πίεση των πόρων αντίστοιχα πέφτει. Η διαφορά μεταξύ της ολικής τάσης και της πίεσης του νερού των πόρων οποιαδήποτε στιγμή είναι η ενεργή τάση, και είναι περίπου ίση με την τάση που υφίσταται ο εδαφικός σκελετός. Έκφραση της παραπάνω πρότασης αποτελεί η εξίσωση:

$$\sigma_v' = \sigma_v - u \quad [5.1]$$

που είναι μια από τις θεμελιώδεις εξισώσεις στον τομέα της εδαφομηχανικής (Terzaghi & Peck, 1968). Ουσιαστικά, η διαδικασία της στερεοποίησης αποτελείται από τη σταδιακή μεταφορά της τάσης από το νερό των πόρων στον εδαφικό σκελετό. Όσο δηλαδή μειώνεται η πίεση των πόρων, τόσο αυξάνεται η ενεργή τάση.

### 5.2.2 Περιγραφή της δοκιμής

Η δοκιμή συμπιεστότητας με τη χρήση οιδημέτρου, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών ιδιοτήτων στερεοποίησης εδαφών που παρουσιάζουν χαμηλή διαπερατότητα.

Η δοκιμή πραγματοποιείται στο οιδήμετρο (συμπιεσόμετρο), με σταδιακή εφαρμογή διαφόρων βαρών σε ένα πλευρικά περιορισμένο δοκίμιο. Το φορτίο που εφαρμόζεται σε κάθε στάδιο είναι διπλάσιο του προηγούμενου και η επιλογή του αρχικού φορτίου γίνεται έτσι ώστε αυτό να μην ξεπερνά την αντίστοιχη τάση υπερκειμένων του εδάφους στη φυσική του θέση.

Η αξονική παραμόρφωση που παρατηρείται σε κάθε στάδιο φόρτισης, καταγράφεται για ένα χρονικό διάστημα συνήθως 24 ωρών οπότε και θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί η πρωτεύουσα στερεοποίηση.



Τα δοκίμια διαμορφώνονται σε ειδικούς δακτυλίους, που δεν επιτρέπουν την πλευρική παραμόρφωσή τους προκαλώντας έτσι μονοδιάστατη στερεοποίηση. Οι διαστάσεις των δακτυλίων είναι τέτοιες ώστε η αναλογία ύψους - εσωτερικής διαμέτρου να είναι 1:2,5. Ειδικότερα οι διαστάσεις των δακτυλίων της συσκευής στερεοποίησης του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή είναι: 50mm σε διάμετρο και 20mm σε ύψος.

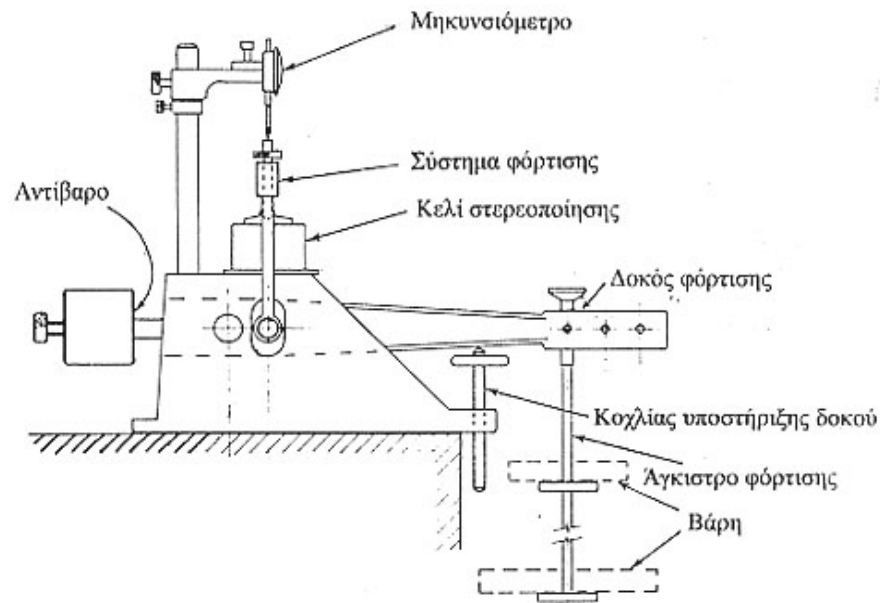
Το σύστημα δακτυλίου - εδαφικού δοκιμίου βρίσκεται μέσα σε μια κυψέλη με νερό για να παραμένει κατ' αυτό τον τρόπο διαρκώς κορεσμένο το δοκίμιο. Έτσι προσομοιάζεται καλύτερα η κατάσταση στη φύση αφού θεωρείται ότι το έδαφος κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της στερεοποίησης τροφοδοτείται συνεχώς με νερό από τα γύρω στρώματα και έτσι παραμένει κορεσμένο.

### 5.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΟΡΓΑΝΟΥ

Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζεται η γενική διάταξη του οιδημέτρου (ή αλλιώς συμπίεσομέτρου). Τα κύρια μέρη από τα οποία απαρτίζεται η συσκευή είναι:

- ✓ Το κελί στερεοποίησης που περιέχει το προς μελέτη εδαφικό δοκίμιο.
- ✓ Το σύστημα φόρτισης που εφαρμόζεται στην κορυφή του καλύμματος του κελιού στερεοποίησης.
- ✓ Η δοκός φόρτισης που μέσω ειδικού συστήματος δεκαπλασιάζει το βάρος που αναρτείται στο άγκιστρο φόρτισης και το επιβάλλει στο εδαφικό δοκίμιο.
- ✓ Ο κοχλίας υποστήριξης της δοκού, που χρησιμοποιείται κυρίως μεταξύ των σταδίων φόρτισης για την σταθεροποίηση της δοκού φόρτισης.
- ✓ Το μηκυνσιόμετρο που μετρά την αξονική παραμόρφωση του εδαφικού δοκιμίου.

Όπως και στην ανεμπόδιστη θλίψη, η καταγραφή των ενδείξεων του μετρητή παραμορφώσεων, γίνεται μέσω ειδικού καταγραφικού μηχανήματος και του προγράμματος MPX 32 Data Logger (Version 1.3) της εταιρείας Wykeham Farrance Engineering.



**Σχήμα 5.2:** Σχηματική παράσταση της διάταξης του οιδημέτρου.

Στην Εικόνα 5.1(α) φαίνονται οι δύο συσκευές φόρτισης του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας που χρησιμοποιήθηκαν για την πραγματοποίηση των δοκιμών συμπιεστότητας, ενώ στην Εικόνα 5.1(β) οι συσκευές είναι σε λειτουργία και στα εδαφικά δοκίμια εφαρμόζεται φορτίο 20kg (το επιβαλλόμενο στο άγκιστρο φορτίο είναι 2kg).



(α)



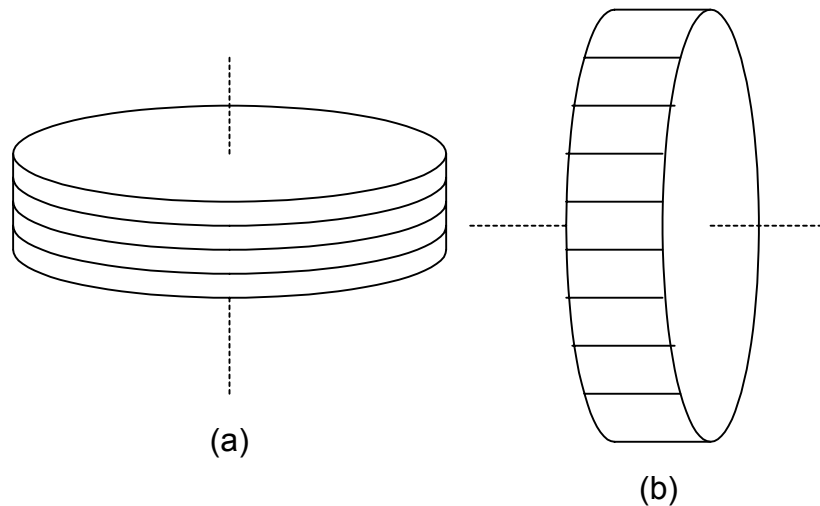
(β)

**Εικόνα 5.1:** Συσκευές φόρτισης: (α) πριν τη δοκιμή (β) σε λειτουργία.

## 5.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

### 5.4.1 Γενικά

Όπως και για την ανεμπόδιστη θλίψη για κάθε ένα από τα δείγματα που μελετήθηκαν, κατασκευάστηκαν δύο δοκίμια με διαφορετικό προσανατολισμό: ένα κάθετο στη στρώση του αδιατάρακτου τεμάχους και ένα παράλληλο σε αυτή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Σκοπός της ενέργειας αυτής είναι η εξέταση του συνόλου των ιδιοτήτων συμπιεστότητας του υλικού κατά τις δύο αυτές διευθύνσεις για λόγους σύγκρισης και επιβεβαίωσης της τυχόν ανισοτροπίας.



**Σχήμα 5.3:** Δοκίμιο: (a) κάθετο στη στρώση, (b) παράλληλο στη στρώση.

Δοκιμή συμπιεστότητας με τη χρήση οιδημέτρου έγινε συνολικά σε 5 ζεύγη δοκιμίων (κάθετο και οριζόντιο). Τα δοκίμια αυτά προέρχονταν από τα εξής δείγματα:

**Πίνακας 5.1.:** Δείγματα που υποβλήθηκαν στη δοκιμή συμπιεστότητας.

Τομέας	Θέση	Δείγμα	Αριθμός δοκιμίων
6	A	1	2
6	B	1	2
6	Γ	1	2
6	Γ	2	2
6	Γ	3	2

Οι διαστάσεις των δοκιμών στην περίπτωση της δοκιμής στερεοποίησης καθορίζονται από αυτές των δακτυλίων μέσα στους οποίους διαμορφώνονται. Έτσι το ύψος τους είναι της τάξης των 20mm ενώ η διάμετρός τους είναι της τάξης των 50mm.

Τα στάδια φόρτισης για κάθε δοκιμή ήταν πέντε, έτσι ώστε τα στάδια αποφόρτισης (που πρέπει να είναι γύρω στα μισά από αυτά της φόρτισης) να μην είναι λιγότερα των τριών. Το φορτίο που ασκήθηκε στα δείγματα στο πρώτο στάδιο φόρτισης επιλέχτηκε να είναι μικρό, για να μην ξεπερνά την ενεργή τάση των υπερκειμένων στη φυσική θέση του δείγματος. Τα φορτία (επιβαλλόμενο στο άγκιστρο φόρτισης και στο δοκίμιο), που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε στάδιο φόρτισης ή αποφόρτισης για καθένα από τα δείγματα, φαίνονται στον Πίνακα 5.2:

Στάδιο	Φόρτιση ή Αποφόρτιση	Επιβαλλόμενο φορτίο στο άγκιστρο (kg)	Επιβαλλόμενο φορτίο στο δοκίμιο (kg)
1.	(Φ)	2	20
2.	(Φ)	4	40
3.	(Φ)	8	80
4.	(Φ)	16	160
5.	(Φ)	32	320
6.	(Α)	16	160
7.	(Α)	8	80
8.	(Α)	2	20

**Πίνακας 5.2:** Στάδια φόρτισης και αντίστοιχα επιβαλλόμενα φορτία.

Η διάρκεια κάθε σταδίου φόρτισης είναι 24 ώρες, κατά τη διάρκεια των οποίων θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί η πρωτεύουσα στερεοποίηση. Οι μετρήσεις της αξονικής παραμόρφωσης που παρατηρείται σε κάθε στάδιο ξεκινούν από το πρώτο δευτερόλεπτο μετά την έναρξη της διαδικασίας της φόρτισης (ή αποφόρτισης), και καταγράφονται σε επιλεγμένα χρονικά διαστήματα, τα οποία αντιστοιχούν σε περίπου ίσα διαστήματα λογαριθμικής κλίμακας.

#### 5.4.2 Προσδιορισμός τάσης υπερκειμένων $P_c$

Το πρόγραμμα των δοκιμών καθορίστηκε κυρίως από την τάση υπερκειμένων, βάση της οποίας ορίστηκαν το αρχικό και το τελικό στάδιο φόρτισης. Τα τρία δείγματα της

μάργας που μελετήθηκαν, προέρχονται μεν από τον ίδιο ορίζοντα της περιοχής του Τομέα 6 των λιγνιτωρυχείων της Πτολεμαΐδας, αλλά από διαφορετικά σημεία της εκσκαφής. Για τη δοκιμή της στερεοποίησης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, απαιτείται ο υπολογισμός της υπάρχουσας ενεργής τάσης  $P_e$  που δεχόταν ο κάθε όγκος δείγματος λόγω των υπερκειμένων στο βάθος όπου βρισκόταν πριν την έναρξη της εκσκαφής.

Στον υπολογισμό της ενεργής τάσης που δέχεται το δείγμα μας και μεταφέρεται μέσω του εδαφικού σκελετού, εκτός από το βάρος του υπερκείμενου στρώματος (ή συνδυασμού στρωμάτων), συνυπολογίζεται και η παρουσία του νερού, εφόσον το έδαφος είναι κορεσμένο (κάτω από το επίπεδο του υδροφόρου ορίζοντα).

Για τον υπολογισμό της ενεργής τάσης χρησιμοποιήθηκε η θεωρία του Terzaghi. Έτσι λοιπόν, η ενεργή τάση  $\sigma_v'$  που ασκείται σε ένα σημείο του εδάφους που βρίσκεται σε ένα συγκεκριμένο βάθος, είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς της πίεσης του νερού των πόρων  $u$  (με βάση την υδροστατική πίεση), από την ολική τάση  $\sigma_v$  που ασκεί το βάρος των υπερκείμενων μαζών στο σημείο αυτό.

Δεδομένου του φαινομένου ειδικού βάρους του κάθε στρώματος στις περιπτώσεις που αυτό βρίσκεται πάνω και κάτω από την πιεζομετρική επιφάνεια (ακόρεστο και κορεσμένο σε νερό αντίστοιχα), καθώς και του πάχους του καθενός από τα στρώματα που υπέρκεινται του σημείου δειγματοληψίας, υπολογίζεται η ολική τάση που ασκεί καθένα από αυτά στο δείγμα. Το ειδικό βάρος του νερού είναι γνωστό και επομένως χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πίεσης του νερού των πόρων στα διάφορα βάθη.

Η ολική τάση  $\sigma_v$  (kN/m<sup>2</sup>) που ασκεί το βάρος ενός στρώματος στις υποκείμενες μάζες του είναι το γινόμενο του πάχους  $d$  (m) του στρώματος αυτού, επί το φαινόμενο βάρος του  $\gamma$  (kN/m<sup>3</sup>). Είναι δηλαδή:

$$\sigma_v = d * \gamma \quad [5.2]$$

Η πίεση του νερού των πόρων  $u$  (kN/m<sup>2</sup>), υπολογίζεται με βάση το ύψος  $h$  (m) της υπερκείμενης υδροστατικής στήλης και είναι το γινόμενο αυτής επί το ειδικό βάρος του νερού  $\gamma_w$  (kN/m<sup>3</sup>).

$$u = h * \gamma_w \quad [5.3]$$

Έτσι με βάση την εξίσωση [5.1], η ενεργή τάση που υφίσταται ένα στρώμα σε βάθος  $d$  λόγω του υπερκειμένου του θα είναι ίση με:

$$\sigma_v' = \sigma_v - u = (d * \gamma) - (h * \gamma_w) \quad [5.4]$$

Στην περίπτωση που τα υπερκείμενα στρώματα είναι περισσότερα του ενός (που είναι και η συνήθης), η ενεργή τάση  $\sigma_v'_{(ολ.)}$  που υφίσταται το υποκείμενο, προκύπτει σαν η διαφορά της πίεσης του νερού των πόρων ολόκληρης της υδροστατικής στήλης από το άθροισμα των ολικών τάσεων που ασκούν τα επιμέρους στρώματα. Είναι δηλαδή:

$$\sigma_v'_{(ολ.)} = \sum_{i=1}^n (d_i * \gamma_i) - \gamma_w * h_{(ολ.)} \quad [5.5]$$

όπου:  $\sigma_v'_{(ολ.)}$  = η ενεργή τάση που προκύπτει από περισσότερα του ενός υπερκείμενα στρώματα σε  $\text{kN/m}^2$ .

$n$  = ο αριθμός των υπερκείμενων στρωμάτων.

$d_i$  = το πάχος των επιμέρους υπερκείμενων στρωμάτων σε m.

$\gamma_i$  = το φαινόμενο βάρος των επιμέρους υπερκείμενων στρωμάτων σε  $\text{kN/m}^3$ .

$\gamma_w$  = το ειδικό βάρος του νερού σε  $\text{kN/m}^3$ .

$h_{(ολ.)}$  = το συνολικό ύψος την υπερκείμενης υδροστατικής στήλης.

Με βάση την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, υπολογίζονται οι ενεργές τάσεις για τα τρία δείγματα στα βάθη των αντίστοιχων σημείων δειγματοληψίας. Στους πίνακες που ακολουθούν, δίνονται τα χαρακτηριστικά των υπερκείμενων στρωμάτων κάθε δείγματος και υπολογίζονται τα  $\sigma_v$ ,  $u$  και  $\sigma_v'$  για κάθε διεπιφάνεια μέχρι το επιθυμητό βάθος. Ειδικά για τα φαινόμενα βάρη, θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτά προέκυψαν από παλαιότερες μελέτες που έγιναν σε υλικά της περιοχής. Τα πάχη των επιμέρους στρωμάτων υπολογίστηκαν με βάση την τομή που κατασκευάστηκε, για την οποία γίνεται αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο.

**Πίνακας 5.3:** Υπολογισμός της ενεργής τάσης για τα δείγματα της θέσης Α.

Θέση Α							
Στρώμα	Πάχος (m)	Βάθος (m)	Φαιν. Βάρος (kN/m <sup>3</sup> )	Βάθος (m) υδροφόρου	$\sigma_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	u (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma'_v$ (kN/m <sup>2</sup> )
Ακόρεστες προσχώσεις	21,0	21	19,0	21	399,00	0,00	399,00
Κορεσμένες προσχώσεις	15,8	36,8	21,0		730,80	154,84	575,96
Κορεσμένη μάργα	10,5	47,3	15,5		893,55	257,74	635,81
Κορεσμένα ενδιάμεσα	10,5	57,8	13,7		1037,40	360,64	676,76
Κορεσμένη μάργα	17,5	75,3	15,5		1308,65	532,14	776,51

**Πίνακας 5.4:** Υπολογισμός της ενεργής τάσης για τα δείγματα της θέσης Β.

Θέση Β							
Στρώμα	Πάχος (m)	Βάθος (m)	Φαιν. Βάρος (kN/m <sup>3</sup> )	Βάθος (m) υδροφόρου	$\sigma_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	u (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma'_v$ (kN/m <sup>2</sup> )
Ακόρεστες προσχώσεις	21,0	21	19,0	21	399,00	0,00	399,00
Κορεσμένες προσχώσεις	3,5	24,5	21,0		472,50	34,30	438,20
Κορεσμένη μάργα	7,0	31,5	15,5		581,00	102,90	478,10
Κορεσμένα ενδιάμεσα	17,2	48,7	13,7		816,64	271,46	545,18
Κορεσμένη μάργα	28,0	76,7	15,5		1250,64	545,86	704,78
Κορεσμένα ενδιάμεσα	7,0	83,7	13,7		1346,54	614,46	732,08
Κορεσμένος λιγνίτης	14,0	97,7	12,0		1514,54	751,66	762,88

**Πίνακας 5.5:** Υπολογισμός της ενεργής τάσης για τα δείγματα της θέσης Γ.

Θέση Γ							
Στρώμα	Πάχος (m)	Βάθος (m)	Φαιν. Βάρος kN/m <sup>3</sup>	Βάθος (m) υδροφόρου	$\sigma_v$ kN/m <sup>2</sup>	u kN/m <sup>2</sup>	$\sigma'_v$ kN/m <sup>2</sup>
Ακόρεστες προσχώσεις	15,8	15,8	19,0	21,1	300,20	-51,94	352,14
Ακόρεστα ενδιάμεσα	5,3	21,1	11,5		361,15	0,00	361,15
Κορεσμένα ενδιάμεσα	29,8	50,9	13,7		769,41	292,04	477,37
Κορεσμένη μάργα	28,0	78,9	15,5		1203,41	566,44	636,97
Κορεσμένα ενδιάμεσα	7,0	85,9	13,7		1299,31	635,04	664,27
Κορεσμένος λιγνίτης	59,6	145,5	12,0		2014,51	1219,12	795,39

#### 5.4.3 Προσδιορισμός ειδικού βάρους των κόκκων του δείγματος $G_s$

Μια σημαντική ιδιότητα του εδάφους που απαιτείται για τον υπολογισμό των παραμέτρων που προκύπτουν από τη δοκιμή συμπίεστικότητας είναι το ειδικό βάρος των

κόκκων του. Αυτό ορίζεται ως το βάρος  $W_s$  ορισμένου όγκου εδαφικών κόκκων προς τον όγκο τους  $V_s$ . Δηλαδή:

$$G_s = \frac{W_s}{V_s} \quad [5.6]$$

Ουσιαστικά το ειδικό βάρος των κόκκων εκφράζει το λόγο του βάρους ορισμένου όγκου εδαφικών κόκκων προς το βάρος ίσου όγκου νερού και είναι μέγεθος αδιάστατο. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό του, και η οποία προηγήθηκε της δοκιμής στερεοποίησης, έχει ως εξής:

- ✓ Ζύγιση μιας ογκομετρικής φιάλης των 500ml η οποία πληρούται με κηροζίνη μέχρι τη χαραγή ( $m_{\phi\kappa}$ ).
- ✓ Κένωση της φιάλης.
- ✓ Ζύγιση περίπου 50g δείγματος εδαφικού υλικού ( $m_\delta$ ) με μέγεθος κόκκων  $< 4,75\text{mm}$  και τοποθέτηση του στη προηγούμενη φιάλη.
- ✓ Πλήρωση της φιάλης με κηροζίνη και πάλι ως τη χαραγή.
- ✓ Ζύγιση ( $m_{\phi\kappa\delta}$ ) και μέτρηση της θερμοκρασίας της κηροζίνης.

Με βάση τα παραπάνω βάρη και την πυκνότητα της κηροζίνης στους  $20^\circ\text{C}$  ( $\rho_\kappa(20)$ ) και στη θερμοκρασία που μετρήσαμε ( $\rho_\kappa(\theta)$ ), υπολογίζεται το ειδικό βάρος του δείγματος από τη σχέση:

$$G_s = \frac{m_\delta}{m_\delta + m_{\phi\kappa} - m_{\phi\kappa\delta}} * \frac{\rho_\kappa(\theta)}{\rho_\kappa(20)} * 0,796 \quad [5.7]$$

Στον Πίνακα 5.6 συνοψίζονται οι μετρήσεις και τα αποτελέσματά τους για τα τρία δείγματα που μελετήθηκαν:

**Πίνακας 5.6.:** Υπολογισμός του ειδικού βάρους των τριών δειγμάτων.

Δείγμα	$m_\delta$ (g)	$m_{\phi\kappa}$ (g)	$m_{\phi\kappa\delta}$ (g)	$\rho_\kappa(20)$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_\kappa(27,9)$ (g/cm <sup>3</sup> )	$G_s$
A	50,00	551,86	586,50	0,7891	0,7820	2,57
B	50,01	554,23	588,56	"	"	2,52
Γ	49,99	548,35	582,90	"	"	2,55

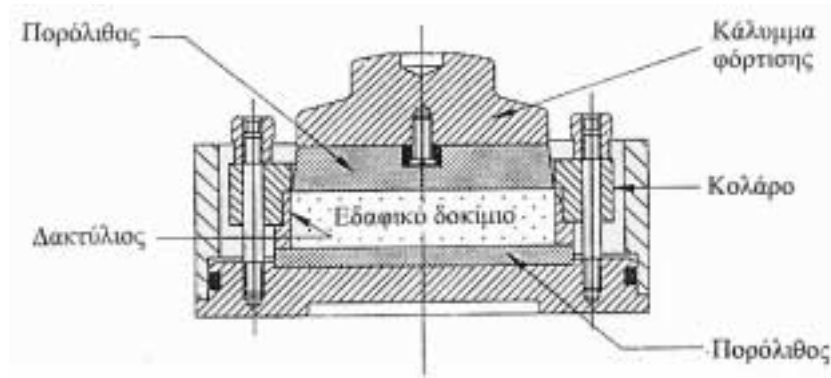


Αξίζει να σημειωθεί ότι η κλασσική διαδικασία προσδιορισμού του ειδικού βάρους χρησιμοποιεί νερό αντί κηροζίνης. Το νερό όμως, περιέχει μεγάλα ποσοστά διαλελυμένου αέρα στη μάζα του και απαιτεί απαέρωση, μια διαδικασία αρκετά επίπονη και χρονοβόρα. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι η διαδικασία του προσδιορισμού του ειδικού βάρους πραγματοποιήθηκε πριν την ορυκτολογική διερεύνηση των δειγμάτων. Έτσι, δεν ήταν εξ αρχής γνωστό αν το υλικό περιείχε ορυκτά που μπορεί να διογκώνονται με το νερό (μοντμοριλλονίτη, κ.τ.λ.). Η κηροζίνη λοιπόν χρησιμοποιήθηκε αντί του νερού για το λόγο ότι περιέχει ελάχιστα ποσοστά διαλελυμένου αέρα στη μάζα της, και δεν προκαλεί καμία διόγκωση στα παραπάνω ορυκτά.

#### 5.4.4 Πειραματική διαδικασία

Για την πραγματοποίηση της δοκιμής ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- ✓ Το εδαφικό δοκίμιο διαμορφώνεται μέσα στο δακτύλιο φόρτισης, τα τοιχώματα του οποίου λιπαίνονται για ελάττωση των τριβών μεταξύ δοκιμίου-δακτυλίου.
- ✓ Ο δακτύλιος ζυγίζεται με ακρίβεια 0,01g ενώ η εσωτερική διάμετρος και το ύψος του μετρώνται με ακρίβεια 0,05mm.
- ✓ Δακτύλιος και εδαφικό δοκίμιο ζυγίζονται ακριβώς πριν την τοποθέτησή τους στη συσκευή στερεοποίησης.
- ✓ Ο δακτύλιος με το δοκίμιο τοποθετείται στο κέντρο της βάσης του κελιού μεταξύ δύο κορεσμένων πορολίθων, ώστε να επιτρέπεται η κατακόρυφη αποστράγγιση του δοκιμίου.
- ✓ Πάνω από τον δεύτερο πορόλιθο τοποθετείται το κάλυμμα και το κολάρο βιδώνεται στη βάση του κελιού. Η γραφική απεικόνιση της τομής του κελιού στερεοποίησης φαίνεται στο Σχήμα 5.5, ενώ στην Εικόνα 5.2 φαίνεται το κελί με το δακτύλιο που περιέχει το εδαφικό δείγμα, καθώς και το συναρμολογημένο κελί φόρτισης.
- ✓ Ο ζυγός φόρτισης τοποθετείται έτσι ώστε να εφάπτεται στην κορυφή του καλύμματος. Η αρχική θέση της δοκού θα πρέπει να είναι υπό γωνία πάνω από την οριζόντιο περίπου ίδια με τη γωνία που η δοκός θα κλίνει κάτω της οριζοντίου με το τέλος του τελευταίου σταδίου φόρτισης.



**Σχήμα 5.4:** Γραφική απεικόνιση ενός τυπικού κελιού στερεοποίησης.

- ✓ Ο κοχλίας υποστήριξης της δοκού του συμπιεσομέτρου ρυθμίζεται έτσι ώστε να εφάπτεται με τη δοκό.
- ✓ Το πρώτο βάρος τοποθετείται στο άγκιστρο του συμπιεσομέτρου, ενώ το μηκυνσιόμετρο τοποθετείται σε επαφή με την πάνω επιφάνεια του ζυγού φόρτισης.
- ✓ Η καταγραφή της αξονικής παραμόρφωσης και του χρόνου ξεκινά με ταυτόχρονη περιστροφή του κοχλία υποστήριξης ώστε η δοκός να μεταφέρει το φορτίο στο εδαφικό δοκίμιο. Στο κελί προστίθεται νερό μέχρι πλήρους εμποτισμού του δοκιμίου σε αυτό.



**Εικόνα 5.2:** Κελιά φόρτισης της συσκευής στερεοποίησης.

- ✓ Ακολουθούνται τα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο (§ 5.4.1.), με διάρκεια κάθε σταδίου τις 24 ώρες.

- ✓ Μετά το τέλος της δοκιμής, το τελικό βάρος απομακρύνεται από το άγκιστρο φόρτισης και ο δακτύλιος με το δοκίμιο από τη συσκευή και ζυγίζονται.
- ✓ Το σύστημα δακτυλίου - δοκιμίου τοποθετείται στο ξηραντήριο στους 60°C μέχρι σταθερής μάζας για τον υπολογισμό της ξηρής μάζας του δοκιμίου.

## 5.5 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΖΟΝΤΑΙ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥΣ

Στις παραγράφους που ακολουθούν, γίνεται αναφορά στις παραμέτρους που υπολογίστηκαν με βάση τις μετρήσεις που έγιναν από την δοκιμή στερεοποίησης, καθώς και στον τρόπο υπολογισμού τους.

### 5.5.1 Αρχική και τελική υγρασία του δοκιμίου

Όπως και στην ανεμπόδιστη θλίψη, μέρος των θρυμμάτων του εδαφικού υλικού που προέκυψαν από τη διαμόρφωση των δοκιμίων χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αρχικής (φυσικής) υγρασίας του δείγματος, η οποία όπως έχει προαναφερθεί προκύπτει από τη σχέση:

$$w_i = \frac{m_o - m_d}{m_d} * 100\% \quad [5.8]$$

όπου:  $m_o$  = η αρχική υγρή μάζα σε g του δείγματος.

$m_d$  = η μάζα σε g του ξηρού δείγματος, που προέκυψε από ξήρανσή του στους 60°C μέχρι σταθερής μάζας.

Η τελική υγρασία του δοκιμίου αναφέρεται στο ποσοστό του νερού που αυτό περιέχει μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής στερεοποίησης. Αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$w_f = \frac{m_f - m_d}{m_d} * 100\% \quad [5.9]$$

όπου:  $m_f$  = η τελική υγρή μάζα σε g του δείγματος.

$m_d$  = η μάζα σε g του ξηρού δείγματος, που προέκυψε από ξήρανσή του στους 60°C μέχρι σταθερής μάζας.

### 5.5.2 Ισοδύναμο ύψος εδαφικών κόκκων ( $H_s$ )

Η έννοια του ισοδύναμου ύψους των εδαφικών κόκκων εισάγεται για τον υπολογισμό του αρχικού λόγου κενών του δοκιμίου. Είναι ένα μέγεθος που εξαρτάται από τις αρχικές συνθήκες του δοκιμίου και παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Για τον προσδιορισμό του χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$H_s = \frac{m_d * 1000}{G_s * \rho_w * A} \quad [5.10]$$

όπου:  $H_s$  = το ισοδύναμο ύψος των εδαφικών κόκκων σε mm.

$m_d$  = η μάζα σε g του ξηρού δείγματος, που προέκυψε από ξήρανσή του στους 60°C μέχρι σταθερής μάζας.

$G_s$  = το ειδικό βάρος του εδαφικού δείγματος.

$\rho_w$  = η πυκνότητα του νερού σε Mg/m<sup>3</sup>.

$A$  = η επιφάνεια του δοκιμίου σε mm<sup>2</sup>.

### 5.5.3 Λόγος κενών ( $e$ )

Λόγος κενών  $e$  καλείται το πηλίκο του όγκου των κενών μεταξύ των κόκκων, προς τον όγκο των στερεών κόκκων στη μάζα του εδάφους και είναι μέγεθος αδιάστατο. Ο αρχικός λόγος κενών  $e_o$  υπολογίζεται από το αρχικό ύψος του δοκιμίου, πριν αυτό υποβληθεί σε οποιοδήποτε φορτίο. Η σχέση που δίνει το  $e_o$  είναι η ακόλουθη:

$$e_o = \frac{H_o - H_s}{H_s} \quad [5.11]$$

όπου:  $H_o$  = το αρχικό ύψος του δοκιμίου σε mm.

$H_s$  = το ισοδύναμο ύψος εδαφικών κόκκων σε mm.

Ο λόγος κενών  $e$  υπολογίζεται όχι μόνο στην αρχή της δοκιμής, αλλά και μετά από την ολοκλήρωση κάθε σταδίου φόρτισης, σαν συνάρτηση του αρχικού λόγου κενών  $e_o$  και της μεταβολής  $\Delta H$  του ύψους του δοκιμίου. Είναι δηλαδή:

$$e = e_o - \frac{\Delta H}{H_s} \quad [5.12]$$

#### 5.5.4 Φαινόμενο βάρος εδάφους ( $\gamma$ )

Φαινόμενο βάρος  $\gamma$  του εδάφους ορίζεται ο λόγος του ολικού βάρους  $W$  προς τον ολικό όγκο  $V$  του εδάφους και εκφράζει το βάρος της μονάδας του όγκου της στερεάς μάζας του εδάφους μαζί με τα ρευστά που πληρούν τα κενά ανάμεσα στους κόκκους. Συνήθεις μονάδες μέτρησης του φαινομένου βάρους είναι τα  $\text{g/cm}^3$  ή  $\text{kN/m}^3$ .

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad [5.13]$$

Το φαινόμενο βάρος  $\gamma$  μερικώς κορεσμένου εδάφους υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση όπου  $\gamma_w$  είναι το ειδικό βάρος του νερού και ισούται με  $1 \text{ g/cm}^3$  στους  $4^\circ\text{C}$ ,  $G_s$  είναι το ειδικό βάρος των εδαφικών κόκκων και  $S_r$  είναι ο βαθμός κορεσμού του εδάφους:

$$\gamma = \gamma_w * \frac{G_s + eS_r}{1 + e} \quad [5.14]$$

Για τον υπολογισμό του φαινομένου βάρους ξηρού εδάφους ( $\gamma_d$ ) ο βαθμός κορεσμού θεωρείται ίσος με μηδέν, ενώ για τον υπολογισμό του φαινομένου βάρους πλήρως κορεσμένου εδάφους ( $\gamma_{sat}$ ) ο βαθμός κορεσμού θεωρείται ίσος με τη μονάδα.

#### 5.5.5 Αρχικός και τελικός βαθμός κορεσμού

Για τον υπολογισμό του φαινομένου βάρους του εδάφους από τη δοκιμή στερεοποίησης, χρησιμοποιείται και ο βαθμός κορεσμού αυτού. Ως βαθμός κορεσμού του εδάφους ορίζεται το ποσοστό (%) του όγκου των πόρων αυτού, που καταλαμβάνεται από νερό.

Ο βαθμός κορεσμού του εδαφικού δοκιμίου προσδιορίζεται για δύο διαφορετικές στιγμές: την έναρξη και το τέλος της δοκιμής. Αν λοιπόν  $S_i$  και  $S_f$  είναι ο αρχικός και ο τελικός βαθμός κορεσμού αντίστοιχα, τότε αυτοί θα δίνονται από τις σχέσεις:

$$S_i = \frac{w_i * G_s}{e_o} \% \quad [5.15] \quad \text{και} \quad S_f = \frac{w_f * G_s}{e_o} \% \quad [5.16]$$

όπου:  $w_i$ ,  $w_f$  = το αρχικό και τελικό ποσοστό % υγρασίας του δοκιμίου.

$G_s$  = το ειδικό βάρος των εδαφικών κόκκων.

$e_o$  = ο αρχικός λόγος κενών.

### 5.5.6 Τάση φόρτισης ( $P$ )

Με τον όρο τάση, ορίζεται η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας. Στη δοκιμή συμπίεστότητας η επιφάνεια του πλευρικά περιορισμένου δοκιμίου παραμένει σταθερή. Δεδομένου όμως του ότι για κάθε στάδιο αυτής το φορτίο αλλάζει, μεταβάλλεται και η τάση φόρτισης. Έτσι, η τάση φόρτισης  $P$  υπολογίζεται για κάθε στάδιο από τη σχέση:

$$P = \frac{F}{A} \quad [5.17]$$

όπου:  $P$  = η τάση φόρτισης σε kPa.

$F$  = το φορτίο που εφαρμόζεται σε κάθε στάδιο σε kN.

$A$  = η επιφάνεια του δοκιμίου σε  $m^2$ .

### 5.5.7 Ανηγγμένη παραμόρφωση ( $\varepsilon$ )

Η ανηγμένη παραμόρφωση  $\varepsilon$  χρησιμοποιείται όπως και στην ανεμπόδιστη θλίψη για την κατασκευή του διαγράμματος τάσης - παραμόρφωσης, από όπου υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας  $E$  του εδαφικού δοκιμίου.

Κατά τη συμπίεση του κυλινδρικού εδαφικού δοκιμίου κάτω από αξονική φόρτιση, το αρχικό του ύψος μειώνεται. Ο λόγος της μεταβολής του ύψους του δοκιμίου προς το

αρχικό του ύψος σε οποιοδήποτε στάδιο, είναι η ανηγμένη παραμόρφωση  $\varepsilon$ . Δηλαδή είναι:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \quad [5.18]$$

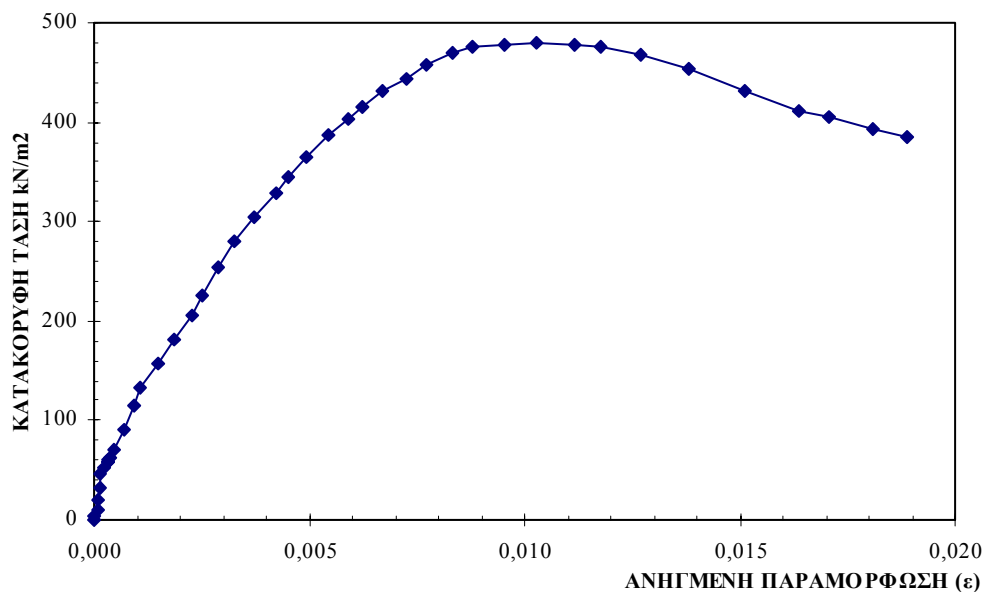
όπου:  $L_o$  = το αρχικό ύψος του δοκιμίου σε mm.

$\Delta L$  = η μεταβολή του ύψους του δοκιμίου σε κάθε στάδιο σε mm.

### 5.5.8 Μέτρο ελαστικότητας ( $E$ )

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για κάθε στάδιο φόρτισης καταγράφεται η αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου σε τακτά χρονικά διαστήματα. Με βάση λοιπόν την τελική μέτρηση κάθε σταδίου υπολογίζεται η ανηγμένη παραμόρφωση του δοκιμίου για το στάδιο αυτό. Έτσι, κατασκευάζεται η καμπύλη της επιβαλλόμενης τάσης συναρτήσει της αντίστοιχης ανηγμένης παραμόρφωσης που περιγράφει το συγκεκριμένο εδαφικό δείγμα, για τα στάδια της φόρτισης αλλά και της αποφόρτισης του δοκιμίου.

Με βάση την καμπύλη τάσης - παραμόρφωσης (Σχήμα 5.6), υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας  $E$  του εδαφικού δοκιμίου.



**Σχήμα 5.6:** Καμπύλη κατακόρυφης τάσης P (kN/m<sup>2</sup>) - ανηγμένης παραμόρφωσης  $\varepsilon$ .

Το μέτρο ελαστικότητας  $E$  προκύπτει σαν μέσος όρος των λόγων της μεταβολής της επιβαλλόμενης τάσης στο δοκίμιο, προς την μεταβολή της ανηγμένης παραμόρφωσης αυτού, για κάθε στάδιο της δοκιμής. Είναι δηλαδή η μέση τιμή των επιμέρους  $E_i$  που προκύπτουν για δύο διαδοχικά στάδια φόρτισης ή αποφόρτισης. Ειδικότερα:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{d\sigma_i}{d\varepsilon_i}}{n} \quad [5.19]$$

όπου:  $d\sigma_i$  = η μεταβολή της τάσης μεταξύ δύο σταδίων φόρτισης σε kPa.

$d\varepsilon_i$  = η μεταβολή της ανηγμένης παραμόρφωσης του δοκιμίου μεταξύ δύο σταδίων.

$n$  = ο αριθμός των επιμέρους διαδοχικών τμημάτων μεταξύ των σταδίων φόρτισης ή αποφόρτισης.

$E$  = το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους σε kN/m<sup>2</sup>.

#### 5.5.9 Δείκτης συμπίεσης ( $C_c$ ) και δείκτης διόγκωσης ( $C_r$ )

Ο δείκτης συμπίεσης  $C_c$  είναι η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης λόγου κενών  $e$  συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης  $\log P$  για τη διαδικασία της φόρτισης και είναι μέγεθος αδιάστατο. Για δύο οποιαδήποτε σημεία του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης είναι:

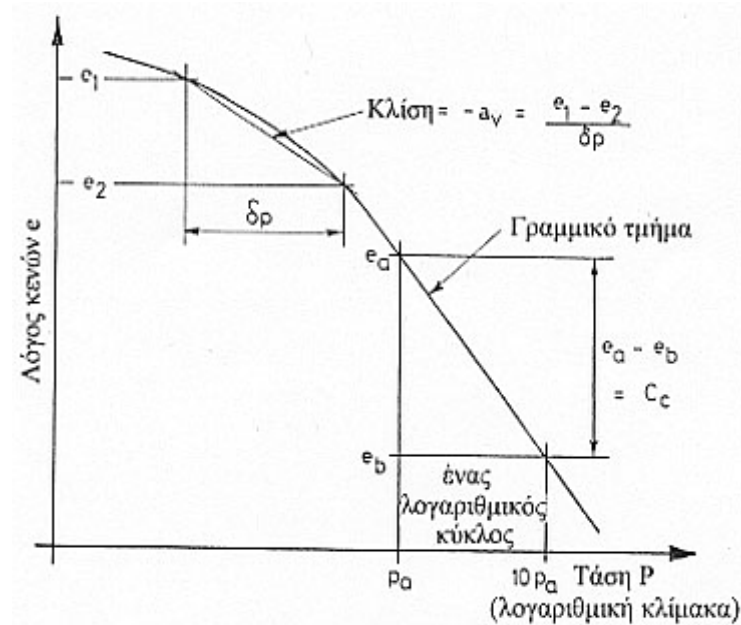
$$C_c = \frac{e_o - e_1}{\log(\sigma'_1 / \sigma'_o)} \quad [5.20]$$

Αριθμητικά, ο δείκτης συμπίεσης είναι ίσος με τη μεταβολή του λόγου κενών για έναν λογαριθμικό κύκλο μεταβολής της τάσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.7.

Το τμήμα του διαγράμματος του λόγου κενών  $e$  συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης  $\log P$  που αντιστοιχεί στη διαδικασία της αποφόρτισης, μπορεί να προσεγγιστεί με μια ευθεία, η κλίση της οποίας αναφέρεται σαν δείκτης διόγκωσης  $C_r$ , κατ' αντιστοιχία με το δείκτη συμπίεσης.



Η σημασία προσδιορισμού των παραπάνω παραμέτρων είναι μεγάλη αφού υποδεικνύουν την ικανότητα συμπίεσης ή διόγκωσης του εδάφους αντίστοιχα, με την επιβολή ή απομάκρυνση φορτίου από την επιφάνειά του.



**Σχήμα 5.7:** Καμπύλη λόγου κενών συναρτήσει του λογαρίθμου της τάσης ( $e$ - $\log P$ ) (Terzaghi & Peck, 1968).

#### 5.5.10 Συμπιεστότητα ( $a_v$ )

Η συμπιεστότητα ορίζεται ως η κλίση της καμπύλης του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης  **$\log P$**  συναρτήσει του λόγου κενών  $e$ . Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.7, η συμπιεστότητα  $a_v$  δίνεται από τον τύπο:

$$a_v = - \frac{e_1 - e_2}{p_2 - p_1} \quad [5.21]$$

#### 5.5.11 Συντελεστής μείωσης του όγκου ( $m_v$ )

Ως συντελεστής μείωσης του όγκου  $m_v$  ( $m^2/MN$ ) ορίζεται η μεταβολή του όγκου του δοκιμίου ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα μείωσης της ενεργής τάσης. Η μεταβολή αυτή μπορεί να εκφράζεται είτε σε μεταβολή του λόγου κενών ή σε μεταβολή του πάχους του δοκιμίου.

Ειδικότερα ο  $m_v$  είναι το πηλίκο της συμπίεστικότητας  $a_v$  δια του όγκου του δοκιμίου  $1+e_o$ , υπολογίζεται για κάθε στάδιο φόρτισης και η μέση τιμή λαμβάνεται σαν αντιπροσωπευτική τιμή του υλικού.

$$m_v = \frac{\alpha_v}{1+e_o} = \frac{1}{1+e_o} \left( \frac{e_o - e_1}{\sigma_1' - \sigma_o'} \right) = \frac{1}{H_o} \left( \frac{H_o - H_1}{\sigma_1' - \sigma_o'} \right) \quad [5.22]$$

όπου:  $d\sigma_i$  = η μεταβολή της τάσης μεταξύ δύο σταδίων φόρτισης σε kPa.

$d\epsilon_i$  = η μεταβολή της ανηγμένης παραμόρφωσης του δοκιμίου μεταξύ δύο σταδίων.

$n$  = ο αριθμός των επιμέρους διαδοχικών τμημάτων μεταξύ των σταδίων φόρτισης ή αποφόρτισης.

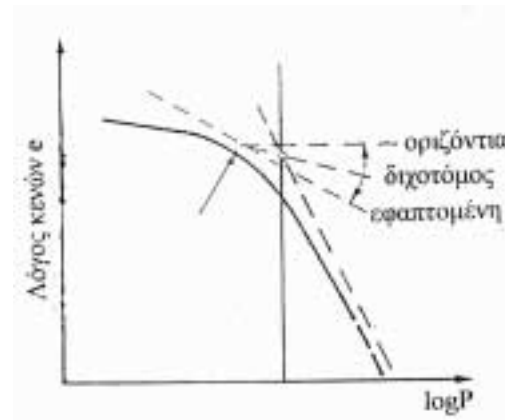
$E$  = το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους σε kN/m<sup>2</sup>.

### 5.5.12 Τάση προφόρτισης ( $P_c$ )

Από το διάγραμμα του λόγου κενών  $e$  συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης  $\log P$  εκτιμάται η τάση προφόρτισης  $P_c$  (kN/m<sup>2</sup>) του υλικού, η μέγιστη ενεργή τάση δηλαδή στην οποία είχε υποβληθεί στο παρελθόν το αργιλικό έδαφος.

Για το γραφικό προσδιορισμό της τάσης προφόρτισης ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία (Σχήμα 5.8):

- ✓ Προσδιορίζεται το σημείο μέγιστης καμπυλότητας της καμπύλης  $e - \log P$ .
- ✓ Στο σημείο αυτό σχεδιάζεται μια εφαπτόμενη της καμπύλης και μια παράλληλη στον οριζόντιο άξονα.
- ✓ Η διχοτόμος της γωνίας που σχηματίζουν οι δύο ευθείες προεκτείνεται ώστε να τέμνει το ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης  $e - \log P$  που αντιστοιχεί στις υψηλότερες πιέσεις.
- ✓ Η μέγιστη τάση προστερεοποίησης είναι προσεγγιστικά η πίεση που αντιστοιχεί στο σημείο τομής.



Σχήμα 5.8: Προσδιορισμός τάσης προφόρτισης  $P_c$ .

### 5.5.13 Λόγος προστερεοποίησης ( $OCR$ )

Ο λόγος της τάσης προστερεοποίησης  $P_c$  προς την υπάρχουσα ενεργή τάση  $P_o$  είναι γνωστός σαν λόγος προστερεοποίησης  $OCR$ . Ο λόγος προστερεοποίησης είναι μέγεθος αδιάστατο και εκφράζει το αν το έδαφος έχει υποστεί στο παρελθόν υψηλότερες τάσεις από αυτές που υπόκειται τώρα. Είναι:

$$OCR = \frac{P_c}{P_o} \quad [5.23]$$

όπου:  $OCR$  = ο λόγος προστερεοποίησης.

$P_c$  = η τάση προστερεοποίησης σε  $\text{kN/m}^2$ .

$P_o$  = η υπάρχουσα ενεργή τάση σε  $\text{kN/m}^2$ .

### 5.5.14 Συντελεστής συμπιεστότητας ( $C_v$ )

Ο συντελεστής συμπιεστότητας  $C_v$  ( $\text{m}^2/\text{year}$ ), υποδεικνύει το ρυθμό συμπίεσης κατά τη φόρτιση. Δύο είναι οι διαθέσιμες εμπειρικές μέθοδοι προσδιορισμού του συντελεστή συμπιεστότητας: η μέθοδος του λογαρίθμου του χρόνου (κατά Casagrande) και η μέθοδος της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου (κατά Taylor). Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη, για το λόγο του ότι η μέθοδος του λογαρίθμου του χρόνου δεν έδινε καμπύλες με τυπική μορφή, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η ερμηνεία τους.

Ο συντελεστής συμπιεστότητας  $C_v$  προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$C_v = \frac{0.212H^2}{t_{90}} = \frac{0.848d^2}{t_{90}} \quad [5.24]$$

όπου:  $C_v$  = ο συντελεστής συμπιεστότητας σε  $\text{mm}^2/\text{min}$ .

$H$  = το μέσο ύψος του δοκιμίου σε κάθε στάδιο φόρτισης σε  $\text{mm}^2$ .

$d$  = το ήμισυ του μέσου ύψους του δοκιμίου σε κάθε στάδιο φόρτισης σε  $\text{mm}^2$ .

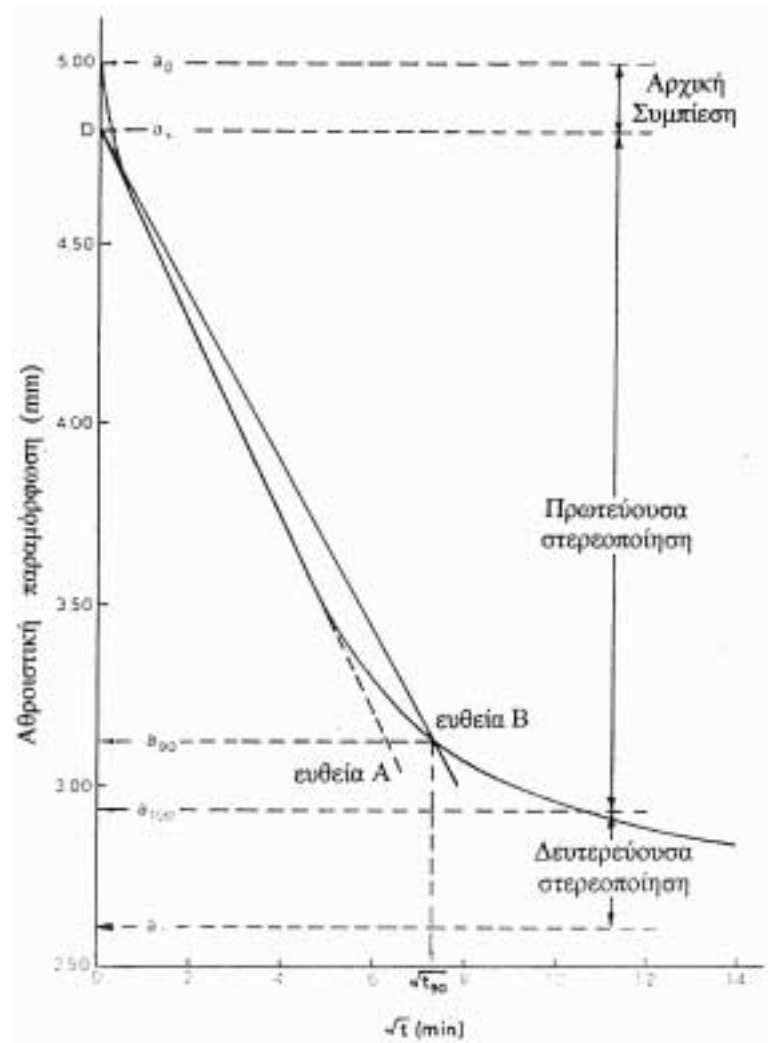
$t_{90}$  = ο χρόνος που απαιτείται για 90% πρωτεύουσα στερεοποίηση σε min.

Στην πράξη χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη μορφή του τύπου που περιέχει το ήμισυ του μέσου ύψους του δοκιμίου για κάθε στάδιο φόρτισης, για το λόγο του ότι η αποστράγγιση του νερού των πόρων γίνεται και προς τις δύο διευθύνσεις κατά τον άξονα του δοκιμίου.

Δεδομένου ότι το  $d$  σε κάθε στάδιο φόρτισης, προσδιορίζεται εύκολα με βάση το αρχικό του ύψος του δοκιμίου και τη συνολική παραμόρφωση που αυτό έχει υποστεί κάτω από το συγκεκριμένο φορτίο, μένει να υπολογιστεί και ο χρόνος  $t_{90}$  για τον προσδιορισμό του  $C_v$ .

Στο Σχήμα 5.9 φαίνεται μια τυπική καμπύλη αθροιστικής παραμόρφωσης σε mm συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου σε min. Καμπύλες αυτού του είδους σχεδιάζονται για κάθε στάδιο φόρτισης και αποφόρτισης με βάση τις ενδείξεις του μετρητή παραμορφώσεων για τις καθορισμένες χρονικές στιγμές και προσδιορίζεται ο χρόνος  $t_{90}$  που αντιστοιχεί σε 90% πρωτεύουσας στερεοποίησης.

Το αρχικό τμήμα των καμπυλών αυτών (εξαιρουμένων των πρώτων μετρήσεων), προσεγγίζεται με μια ευθεία γραμμή. Η γραμμή αυτή προεκτείνεται μέχρι να τμήσει τον άξονα της αθροιστικής παραμόρφωσης, προσδιορίζοντας έτσι το διορθωμένο μηδενικό σημείο (την παραμόρφωση δηλαδή που αντιστοιχεί σε 0% στερεοποίηση) (ευθεία Α). Έπειτα σχεδιάζεται μια δεύτερη ευθεία (ευθεία Β) η οποία ξεκινά από το διορθωμένο μηδενικό σημείο και έχει τετμημένη 1,15 φορές μεγαλύτερη από αυτή της ευθείας Α.



**Σχήμα 5.9:** Μέθοδος της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου για τον υπολογισμό του  $t_{90}$  (Head, 1992).

Η τομή της ευθείας B με την καμπύλη των αποτελεσμάτων αντιστοιχεί στο 90% της πρωτεύουσας στερεοποίησης και μας δίνει το  $\sqrt{t_{90}}$  που είναι και το ζητούμενο.

#### 5.5.15 Συντελεστής διαπερατότητας ( $k$ )

Με βάση τα αποτελέσματα της δοκιμής συμπιεστότητας για κάθε στάδιο φόρτισης (ή αποφόρτισης), υπολογίζεται και ο συντελεστής διαπερατότητας  $k$  του εδάφους, που εκφράζει τη δυνατότητα του εδάφους να επιτρέπει τη ροή του νερού μέσα από τη μάζα του. Η μέση τιμή του συντελεστή διαπερατότητας που προκύπτει για κάθε στάδιο, λαμβάνεται σαν αντιπροσωπευτική του υλικού. Ο συντελεστής διαπερατότητας  $k$  για κάθε στάδιο φόρτισης δίνεται από τη σχέση:

$$k = C_v * m_v * \gamma_w * 1000 = \frac{C_v * \alpha_v * \gamma_w}{1 + e_o} \quad [5.25]$$

όπου:  $k$  = ο συντελεστής διαπερατότητας του εδάφους σε m/sec.

$C_v$  = ο συντελεστής συμπιεστότητας σε m<sup>2</sup>/sec.

$m_v$  = ο συντελεστής μείωσης όγκου σε m<sup>2</sup>/MN.

$\gamma_w$  = το ειδικό βάρος του νερού σε kN/m<sup>3</sup>.

$\alpha_v$  = η συμπιεστότητα του εδάφους σε m<sup>2</sup>/kN.

$e_o$  = ο λόγος κενών του εδαφικού δοκιμίου.

## 6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

### 6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όσο αφορά τη σύσταση, από δοκιμές διαλυτοποίησης που έγιναν σε δείγματα και από τις τρεις θέσεις δειγματοληψίας, προέκυψε ότι αυτά αποτελούνται κατά 92% περίπου από  $\text{CaCO}_3$ , πράγμα που τα κατατάσσει περισσότερο στην κατηγορία της κρητίδος από ότι σε αυτή της μάργας. Αξιοσημείωτο είναι ότι από όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν για τη σύστασή τους τα Β1 και Γ3, προέκυψε ότι ήταν τα πιο αργιλικά.

### 6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Με βάση τη διαδικασία που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4 υπολογίστηκαν οι παράμετροι που προκύπτουν από τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης. Στον Πίνακα 6.1, παρατίθενται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης στα δείγματα Α2, Γ1, Γ3. Όπως είναι φανερό, τα τρία αυτά δείγματα παρουσιάζουν αρκετές διαφορές στις ιδιότητές τους, παρ' όλη την ομοιότητα της σύστασής τους.

#### 6.2.1 Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη $q_u$

Ξεκινώντας τη σύγκριση από την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, το δείγμα Γ1 είναι αυτό που παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές και προς τους δύο προσανατολισμούς, ενώ ακολουθούν τα Α2 και Γ3. Επίσης, και στα τρία δείγματα είναι χαρακτηριστική η διαφορά που παρουσιάζουν οι τιμές της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη μεταξύ των δύο δοκιμών του ίδιου δείγματος. Έτσι, τα κάθετα στη στρώση προσανατολισμένα δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή από ότι τα παράλληλα. Η μέση τιμή της αντοχής σε ανεμπόδιστη θλίψη για όλα τα δοκίμια είναι ίση με  $657,171 \text{ kN/m}^2$ .

Ειδικότερα για την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη των καθέτων στη στρώση δοκιμών των τριών δειγμάτων, παρατηρούμε ότι αυτή κυμαίνεται μεταξύ  $640$  και  $970 \text{ kN/m}^2$ , ενώ οι αντίστοιχες τιμές των παράλληλων στη στρώση δοκιμών βρίσκονται μεταξύ  $480$  και  $585 \text{ kN/m}^2$ . Το δείγμα Γ3 παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές και για τους δύο

προσανατολισμούς, γεγονός που δικαιολογείται από τη σύστασή του, που παρουσιάζεται περισσότερο αργλική από αυτή των υπολοίπων.

### 6.2.2 Αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση $\varepsilon$

Η τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης που αντιστοιχεί στην μέγιστη τάση στις περιπτώσεις των δειγμάτων Γ1 και Γ3, είναι μεγαλύτερη για τα παράλληλα στη στρώση δοκίμια από ότι για τα κάθετα σε αυτή. Αυτό σημαίνει ότι για τα παραπάνω δείγματα, η θραύση των παράλληλων δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σε μεγαλύτερη μεταβολή του ύψους τους (σε σχέση με το αρχικό τους ύψος) από αυτή των αντίστοιχων κάθετων δοκιμίων τους.

Αντίθετα για τα δοκίμια του δείγματος Α2 συμβαίνει το αντίστροφο, η ανηγμένη παραμόρφωση δηλαδή που αντιστοιχεί στο κάθετο στη στρώση δοκίμιο είναι μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί στο παράλληλο, δηλαδή το κάθετο δοκίμιο αστοχεί, έχοντας υποστεί μεγαλύτερη μεταβολή στο ύψος από ότι το παράλληλο. Η τιμή της ανηγμένης παραμόρφωσης κυμαίνεται από 0,611 έως 1,687% με μέση τιμή την 1,033%.

### 6.2.3 Υγρασία %

Η υγρασία του δείγματος Γ3 είναι μεγαλύτερη από αυτή των άλλων δύο κατά 10% περίπου. Ακολουθούν τα δείγματα Α2 και Γ1 με φθίνουσα σειρά. Ειδικότερα για το Γ3, η διαφορά αυτή στην υγρασία των δοκιμίων του από τα άλλα εξηγεί και την αντίστοιχη διαφορά τους στην αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το δείγμα αυτό είναι πιο αργλικό από τα υπόλοιπα. Η μέση τιμή της υγρασίας των δειγμάτων είναι 41,41%.

### 6.2.4 Μέτρο ελαστικότητας

Τέλος, με βάση το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμίων ως προς τις δύο διευθύνσεις προσανατολισμού τους, τα αποτελέσματα που προέκυψαν αναλύονται παρακάτω.



**(α)  $E_{initial}$** 

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 6.1., για το μέτρο ελαστικότητας που υπολογίζεται από την κλίση του αρχικού τμήματος της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης ( $E_{initial}$ ), τα παράλληλα στη στρώση δοκίμια των δειγμάτων φαίνεται να παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές από ότι τα αντίστοιχα κάθετα. Το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά πιο έντονο για τα δείγματα A2 και Γ1, ενώ είναι πολύ ήπιο για το δείγμα Γ3. Μια μέση τιμή του  $E_{initial}$  είναι τα 111MPa.

**(β)  $E_{50}$** 

Το μέτρο ελαστικότητας των δοκιμών υπολογίστηκε επίσης και με βάση την κλίση της ευθείας που ξεκινά από την αρχή των αξόνων και φθάνει ως εκείνο το σημείο της καμπύλης, στο οποίο η τάση φόρτισης αντιστοιχεί στο 1/2 της οριακής αντοχής  $q_u$ . Η κλίση αυτή ( $E_{50}$ ), φαίνεται να δίνει διαφορετικά αποτελέσματα από αυτά που προέκυψαν με βάση το  $E_{initial}$  με μια μέση τιμή που ανέρχεται στα 89MPa περίπου.

Συγκεκριμένα για τα δείγματα Γ1 και Γ3 οι τιμές του  $E_{50}$  για τα κάθετα στη στρώση δοκίμια, είναι μεγαλύτερες από αυτές για τα αντίστοιχα παράλληλα (αρκετά μεγαλύτερες για το δείγμα Γ3 και λιγότερο για το Γ1). Αντίθετα για τα δοκίμια του δείγματος A2, το παράλληλο στη στρώση φαίνεται να έχει μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από το κάθετο.

Συνολικά από τις δύο μεθόδους προσδιορισμού του μέτρου ελαστικότητας για τα τρία δείγματα, προέκυψαν κάποιες μέσες τιμές αυτού για καθένα από τα προσανατολισμένα δοκίμια. Συγκεκριμένα για τα δείγματα A2 και Γ1 το μέτρο ελαστικότητας του κάθετου στη στρώση δοκίμιου είναι μικρότερο από αυτό του παράλληλου, σε αντίθεση με το δείγμα Γ3 για το οποίο συμβαίνει το αντίστροφο. Γενικότερα το δείγμα Γ3 εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές του μέτρου ελαστικότητας και κατά φθίνουσα σειρά ακολουθούν τα Γ1 και A2.

Όσο αφορά την ανισοτροπία του υλικού αυτή εξετάστηκε για τις δύο διευθύνσεις (κάθετη και παράλληλη στη στρώση) με βάση τις τιμές των  $E_{initial}$  και  $E_{50}$  που προέκυψαν για τα δοκίμια κάθε δείγματος. Τα συμπεράσματα που εξάγονται με βάση τα παραπάνω, αναφέρονται στο Κεφάλαιο 9.

**Πίνακας 6.1:** Πίνακας αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης.

	Δείγμα Α2		Δείγμα Γ1		Δείγμα Γ3		Μέση τιμή
	Κάθετο	Παράλληλο	Κάθετο	Παράλληλο	Κάθετο	Παράλληλο	
<b>Αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη <math>q_u</math> (kN/m<sup>2</sup>)</b>	784,288	489,797	967,382	583,924	638,462	479,171	657,171
<b>Αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωση (%)</b>	1,078	0,611	0,978	1,687	0,816	1,029	1,033
<b>Υγρασία (%)</b>	36,72	43,15	36,97	37,67	46,26	47,67	41,41
<b><math>E_{initial}</math> (kN/m<sup>2</sup>)</b>	53520,833	85510,000	60709,375	118382,609	174091,667	174532,258	111124,457
<b><math>E_{50}</math> (kN/m<sup>2</sup>)</b>	55000,000	85000,000	85230,178	108694,068	106370,213	97537,143	89638,600
<b><math>E_{(average)}</math> (kN/m<sup>2</sup>)</b>	54260,417	85255	72969,7765	113538,339	140230,94	136034,701	100381,529
<b><math>A = \frac{E_{initial}(H)}{E_{initial}(V)}</math></b>	1,598		1,950		1,002		
<b><math>B = \frac{E_{50}(H)}{E_{50}(V)}</math></b>	1,545		1,275		0,917		

### 6.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ

Στο Κεφάλαιο 5 περιγράφεται ο τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων που προκύπτουν από τη δοκιμή συμπίεστος. Στον Πίνακα 6.2 φαίνονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα αυτά, για καθένα από τα δοκίμια που εξετάστηκαν. Όπως και στην ανεμπόδιστη θλίψη για κάθε δείγμα μελετήθηκαν οι ιδιότητες του ως προς την παράλληλη και κατακόρυφη διεύθυνση. Τα δείγματα που εξετάστηκαν ήταν τα: A1, B1, Γ1, Γ2 και Γ3.

#### 6.3.1 Αρχική και τελική υγρασία

Ξεκινώντας από την αρχική υγρασία των δειγμάτων, φαίνεται ότι αυτή κυμαίνεται σε σχετικά υψηλά επίπεδα για τα δείγματα A1, B1 και Γ2 (περίπου 50-60%), ενώ είναι σημαντικά χαμηλότερη για το δείγμα Γ1 το οποίο ήταν το ξηρότερο από όσα εξετάστηκαν ( $w_i \approx 37\%$ ), πράγμα που πιθανότατα οφείλεται σε απώλεια υγρασίας λόγω κακής συσκευασίας του. Το δείγμα Γ3 παρουσιάζει ενδιάμεσες τιμές υγρασίας (40-47%), ενώ είναι αξιοσημείωτη η διαφορά μεταξύ της υγρασίας των δύο προσανατολισμένων δοκιμίων του δείγματος αυτού αλλά και του A1, η οποία ξεπερνά το 7%.

Όσο αφορά την τελική τους υγρασία  $w_f$ , στα δείγματα A1, B1 και Γ2 παρουσιάζεται μια αύξηση σε σχέση με την αρχική  $w_i$  της τάξης του 1-3%. Για το δείγμα Γ3 υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των δύο δοκιμίων. Έτσι, ενώ στο κάθετο στη στρώση δοκίμιο παρουσιάζεται μία αύξηση στην υγρασία του μετά το τέλος της δοκιμής γύρω στο 1%, αντίθετα στο παράλληλο, λόγω της αποστράγγισης που προκλήθηκε από τη στερεοποίηση, η υγρασία μειώθηκε κατά 4% περίπου. Τέλος για το δείγμα Γ1 που όπως προαναφέρθηκε ήταν το ξηρότερο όλων, η αύξηση της υγρασίας του κατά τη διάρκεια της δοκιμής ήταν αρκετά μεγάλη και άγγιξε το 18%.

#### 6.3.2 Αρχικός και τελικός λόγος κενών

Ο αρχικός λόγος κενών  $e_o$  παρουσιάζει παρόμοιες τιμές για τα δείγματα A1, B1 και Γ1, κυμαινόμενος μεταξύ 1,55 και 1,67. Με φθίνουσα διάταξη ακολουθούν τα δείγματα Γ2

και Γ3. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι ενώ για τα δοκίμια των δειγμάτων Α1 και Β1 ο αρχικός λόγος κενών του κάθετου στη στρώση δοκιμίου είναι μεγαλύτερος από αυτόν του παράλληλου, στα δείγματα Γ1, Γ2 και Γ3 συμβαίνει ακριβώς το αντίστροφο. Ιδιαίτερως μεγάλη είναι η διαφορά μεταξύ των τιμών των δοκιμίων του δείγματος Γ3.

Ο τελικός λόγος κενών  $e$  όπως ήταν αναμενόμενο, είναι για όλα τα δείγματα μικρότερος του αρχικού και για τα κάθετα αλλά και για τα παράλληλα στη στρώση δοκίμια, πράγμα που οφείλεται φυσικά στην μείωση του όγκου των πόρων, λόγω της επιβολής των φορτίων κατά την εκτέλεση της δοκιμής. Σε όλα τα δείγματα επίσης παρουσιάζεται μεγαλύτερη μεταβολή του λόγου κενών στα παράλληλα στη στρώση δοκίμια από ότι στα κάθετα (εκτός από το Γ2 στο οποίο η μεταβολή αυτή είναι σχεδόν ίδια και για τα δύο δοκίμια). Η εντονότερη μεταβολή είναι αυτή του παράλληλου στη στρώση δοκιμίου του δείγματος Γ3, στην οποία προφανώς οφείλεται και η μείωση της υγρασίας του κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Οι μέσες τιμές του αρχικού και τελικού λόγου κενών της μάργας όπως προσδιορίστηκαν από τις δοκιμές στερεοποίησης που πραγματοποιήθηκαν στα παραπάνω δείγματα (0,88-1,67) φαίνεται να προσεγγίζουν αρκετά εκείνες που είχαν εκτιμηθεί από παλαιότερες εργασίες για την ίδια περιοχή (0,93-1,70).

### 6.3.3 Αρχικός και τελικός βαθμός κορεσμού

Για όλα τα δοκίμια των δειγμάτων Α1, Β1, Γ2 και Γ3, ο αρχικός βαθμός κορεσμού είναι πολύ υψηλός, με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 92 και 99%. Για το δείγμα Γ1 το οποίο παρουσίαζε και το μικρότερο ποσοστό αρχικής υγρασίας παρ' όλο που ο λόγος κενών του είναι αρκετά μεγάλος, ο αρχικός βαθμός κορεσμού είναι αρκετά μικρότερος των υπολοίπων (60%).

Όλα τα δείγματα αύξησαν τον βαθμό κορεσμού τους κατά τη διάρκεια της δοκιμής αντίστοιχα με την αύξηση του ποσοστού της υγρασίας τους. Ειδικότερα ο βαθμός κορεσμού του δείγματος Γ1 παρουσίασε τεράστια αύξηση, η οποία άγγιξε το 30%. Αυτό δεν συνέβη όμως και για το παράλληλο στη στρώση δοκίμιο του δείγματος Γ3, το οποίο μείωσε το βαθμό κορεσμού του κατά 8% περίπου, αντίστοιχα με τη μεγάλη μείωση του λόγου κενών του.

#### 6.3.4 Φαινόμενο βάρος του εδάφους $\gamma$

Υπολογίστηκε το φαινόμενο βάρος του εδάφους ως έχει  $\gamma$  καθώς και το κορεσμένο φαινόμενο βάρος  $\gamma_{sat}$ .

Το φαινόμενο βάρος του εδάφους ως έχει, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 15,2 και 17,1kN/m<sup>3</sup> για τα δείγματα A1, B1, Γ2 και Γ3, ενώ είναι μικρότερο (της τάξης των 13,2kN/m<sup>3</sup>) για το δείγμα Γ1, λόγω του μικρού ποσοστού αρχικής περιεχόμενης υγρασίας αυτού.

Το κορεσμένο φαινόμενο βάρος των δειγμάτων είναι σχεδόν το ίδιο για όλα τα δοκίμια, με τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 15,4 και 17,2kN/m<sup>3</sup>. Η μέση τιμή που προέκυψε για το κορεσμένο φαινόμενο βάρος του υλικού είναι περίπου 16,0kN/m<sup>3</sup> η οποία προσεγγίζει αρκετά την αντίστοιχη μέση τιμή (16,44kN/m<sup>3</sup>) που έχει προκύψει από προηγούμενη μελέτη του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας για τη μάργα της περιοχής.

#### 6.3.5 Δείκτης διόγκωσης $C_r$ και δείκτης συμπίεσης $C_c$

Για το δείκτη συμπίεσης  $C_c$  αυτό που παρατηρείται είναι ότι για τα δείγματα A1, B1, Γ1 και Γ2, οι τιμές του είναι μεγαλύτερες για τα παράλληλα στη στρώση δοκίμια από ότι για τα κάθετα. Αντίθετα για το δείγμα Γ3, το παράλληλο στη στρώση δοκίμιο είναι αυτό που παρουσιάζει μεγαλύτερο δείκτη συμπίεσης από το κάθετο. Η τάξη μεγέθους των τιμών αυτών είναι μικρή και περίπου ίδια, γι αυτό και δεν μπορεί να γίνει περαιτέρω σύγκριση.

Όσο αφορά το δείκτη διόγκωσης, για τα δείγματα A1 και B1 είναι μεγαλύτερος για τα κάθετα από ότι για τα παράλληλα στη στρώση δοκίμια. Στα δείγματα Γ1, Γ2 και Γ3 όμως, τα παράλληλα στη στρώση δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές από ότι τα κάθετα. Όπως και στην περίπτωση του δείκτη συμπίεσης περαιτέρω σύγκριση δεν είναι εφικτή, λόγω της μικρής τάξης μεγέθους των τιμών.

### 6.3.6 Συμπιεστότητα $\alpha_v$

Η συμπιεστότητα των δοκιμών των δειγμάτων A1 και B1, είναι όχι μόνο της ίδιας τάξης μεγέθους αλλά και της ίδιας σχεδόν τιμής, πολύ κοντά στη μέση τιμή που προκύπτει για όλα τα δείγματα ( $8,32 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{kN}$ ). Το δείγμα Γ2 καθώς και τα κάθετα μόνο δοκίμια των δειγμάτων Γ1 και Γ3, παρουσιάζουν λίγο πιο μικρές τιμές, διαφορά όμως που δεν θεωρείται αισθητή αφού η τάξη μεγέθους των τιμών είναι από μόνη της πολύ μικρή.

Αξιοσημείωτη είναι όμως η διαφορά στη συμπιεστότητα που παρουσιάζουν τα παράλληλα στη στρώση δοκίμια των δειγμάτων Γ1 και Γ3 με τα υπόλοιπα, η οποία είναι μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη. Ειδικά για το παράλληλο στη στρώση δοκίμιο του δείγματος Γ3 αυτό συμβαδίζει με την διαφορά στην τιμή του δείκτη συμπίεσης, ο οποίος όπως αναφέρθηκε είναι αρκετά μεγαλύτερος των δοκιμών των υπολοίπων δειγμάτων.

### 6.3.7 Συντελεστής μείωσης του όγκου $m_v$

Ανάλογα με τη συμπιεστότητα, με βάση την οποία εξάλλου προκύπτει, ο συντελεστής μείωσης του όγκου για τα δείγματα A1 και B1 είναι σχεδόν ίδιος και πολύ κοντά στη μέση τιμή που προκύπτει από όλα τα δοκίμια. Γενικότερα για όλα τα δοκίμια κυμαίνεται μεταξύ 0,024 και 0,033, εκτός από τα παράλληλα στη στρώση των δειγμάτων Γ1 και Γ3. Γι' αυτά, όπως είναι αναμενόμενο, η τιμή του συντελεστή μείωσης όγκου είναι αρκετά υψηλότερη σε σχέση με τις υπόλοιπες πράγμα που συμβαδίζει με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων.

### 6.3.8 Μέτρο ελαστικότητας $E$

Στη δοκιμή συμπιεστότητας, το μέτρο ελαστικότητας που υπολογίζεται αποτελεί ουσιαστικά μια διαφορετική παράμετρο από αυτή που προκύπτει από τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης. Αυτό είναι φυσικό, και οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιούνται οι δοκιμές αυτές. Έτσι, ενώ στη δοκιμή συμπιεστότητας το δοκίμιο παραμένει κορεσμένο καθ' όλη τη διάρκειά της και δεν επιτρέπεται πλευρική παραμόρφωση αυτού, στη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης το

δοκίμιο μπορεί να παραμορφωθεί αφού δεν είναι πλευρικά περιορισμένο, αλλά και η διάρκεια της δοκιμής είναι τέτοια που δεν επιτρέπει την αποστράγγισή του.

Τα μέτρα ελαστικότητας που προέκυψαν για τα δοκίμια των δειγμάτων από τη δοκιμή συμπίεστικότητας, είναι λοιπόν αναμενόμενο να παρουσιάζουν διαφορές από αυτά που προέκυψαν για τα αντίστοιχα δοκίμια των δειγμάτων που εξετάστηκαν και με τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης. Οι τιμές τους από τη δοκιμή συμπίεστικότητας είναι της τάξης των δεκάδων χιλιάδων με μικρότερη αυτή του παράλληλου δοκιμίου του δείγματος Γ3 που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόκλιση από τη μέση τιμή αφού το δείγμα αυτό είναι και το πιο αργλικό. Η μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας όπως προέκυψε από τη δοκιμή στερεοποίησης είναι περίπου ίση με 115MPa.

### 6.3.9 Τάση προφόρτισης $P_c$ και λόγος προστερεοποίησης $OCR$

Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 6.2, η τιμή της τάσης προφόρτισης  $P_c$  είναι σχεδόν η ίδια για όλα τα δοκίμια, και πολύ κοντά στην ενεργή τάση  $P_o$  στην οποία υπόκειται κάθε δείγμα λόγω των υπερκειμένων, όπως υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 5. Έτσι, η τάση προφόρτισης κυμαίνεται μεταξύ 763,850 και 785,194 kN/m<sup>2</sup>, με μια μέση τιμή που ανέρχεται στα 785,972 kN/m<sup>2</sup>.

Δεδομένου ότι η τάση υπερκειμένων έχει μια τιμή μεταξύ 762,88 και 795,39 kN/m<sup>2</sup> για τις τρεις θέσεις δειγματοληψίας, ο λόγος προστερεοποίησης είναι πολύ κοντά στη μονάδα για καθένα από τα δείγματα που εξετάστηκαν. Επομένως εύκολα εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα υλικά που μελετήθηκαν δεν είναι προστερεοποιημένα, δεν έχουν υποβληθεί δηλαδή στο παρελθόν σε ενεργή τάση μεγαλύτερη από την παρούσα.

### 6.3.10 Συντελεστής συμπίεστικότητας $C_v$

Ο συντελεστής συμπίεστικότητας που αναφέρεται στον Πίνακα 6.2 για κάθε δοκίμιο, είναι η μέση τιμή των επιμέρους συντελεστών που προέκυψαν για κάθε στάδιο φόρτισης. Υποδεικνύει, όπως έχει προαναφερθεί, το ρυθμό συμπίεσης του εδάφους κατά τη φόρτιση. Στον Πίνακα 6.2, έχει υπολογιστεί σε cm<sup>2</sup>/sec και είναι της τάξης του 10<sup>-2</sup> για τα δοκίμια των δειγμάτων Α1, Β1, Γ1 και Γ2, ενώ για τα δοκίμια του Γ3 παρουσιάζεται μια τάξη μικρότερος (10<sup>-3</sup>).

### 6.3.11 Συντελεστής διαπερατότητας $k$

Ο συντελεστής διαπερατότητας  $k$  του εδάφους προέκυψε επίσης σαν η μέση τιμή των επιμέρους συντελεστών που υπολογίστηκαν για κάθε στάδιο φόρτισης που εφαρμόστηκε στα δοκίμια των δειγμάτων. Η τιμή του είναι της τάξης του  $10^{-10}$  (μετρούμενος σε m/sec), δεν διαφέρει σημαντικά για τα επιμέρους δοκίμια και είναι αναμενόμενη για δείγματα αυτής της κοκκομετρίας.



**Πίνακας 6.2:** Πίνακας αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την δοκιμή στερεοποίησης.

	Δείγμα A1		Δείγμα B1		Δείγμα Γ1		Δείγμα Γ2		Δείγμα Γ3		Μέση τιμή
	Κάθετο	Παράλληλο	Κάθετο	Παράλληλο	Κάθετο	Παράλληλο	Κάθετο	Παράλληλο	Κάθετο	Παράλληλο	
$e_o$	1.66531	1.54712	1.65638	1.59587	1.61093	1.6174	1.34334	1.37588	1.05137	1.22597	<b>1.46896</b>
$e$	1.55683	1.37419	1.58335	1.49022	1.52728	1.30823	1.24798	1.27470	0.93185	0.87668	<b>1.317136</b>
$w_i$ (%)	63.471	56.624	61.406	58.396	37.386	37.951	51.153	49.595	39.864	47.55	<b>50.34</b>
$w_f$ (%)	63.814	57.15	62.33	60.287	55.799	55.745	52.02	52.881	41.021	43.56	<b>54.46</b>
$S_i$ (%)	96.05	92.23	95.28	94.04	59.18	59.83	97.1	91.92	96.69	98.90	<b>88.12</b>
$S_f$ (%)	96.56	93.09	96.71	97.09	88.33	87.89	98.75	98.01	99.49	90.60	<b>94.65</b>
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.1623	15.2012	15.3191	15.3838	13.1631	13.1845	16.1355	15.7508	17.0558	16.5817	<b>15.2938</b>
$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	15.4046	15.6641	15.608	15.7432	15.6338	15.6194	16.2988	16.2099	17.2224	16.641	<b>16.005</b>
$G_s$	2.52	2.52	2.57	2.57	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	<b>2.55</b>
$C_c$	0.14131	0.30738	0.12612	0.15005	0.12082	0.21436	0.06274	0.10837	0.17856	0.63203	<b>0.20417</b>
$C_r$	0.02252	0.01932	0.01752	0.0138	0.0151	0.02238	0.00929	0.01414	0.01623	0.03385	<b>0.01841</b>
$a_v$ (m <sup>2</sup> /kN)	8.49E-05	8.46E-05	8.26E-05	8.19E-05	5.53E-05	1.46E-04	5.69E-05	6.71E-05	4.95E-05	1.23E-04	<b>8.32E-05</b>
$m_v$ (m <sup>2</sup> /MN)	0.0319	0.0332	0.0311	0.0315	0.0212	0.0557	0.0243	0.0282	0.0241	0.0553	<b>0.0337</b>
$E$ (kN/m <sup>2</sup> )	159446.656	91343.543	99692.312	116840.126	155281.82	91326.897	170273.955	121312.678	91142.914	55951.281	<b>115261.218</b>
$P_c$ (kN/m <sup>2</sup> )	783.64	783.64	785.194	763.85	783.64	785.194	783.64	783.64	783.64	783.64	<b>781.97</b>
$P_o$ (kN/m <sup>2</sup> )	776.51	776.51	762.88	762.88	795.39	795.39	795.39	795.39	795.39	795.39	<b>785.11</b>
<b>OCR</b>	1.00918	1.00918	1.02925	0.9837	0.98523	1.03398	0.98523	0.98523	0.98523	0.98523	<b>0.99914</b>
$C_v$ (cm <sup>2</sup> /sec)	1.65E-02	1.67E-02	1.52E-02	1.68E-02	1.45E-02	2.39E-02	2.60E-02	1.48E-02	8.79E-03	7,902E-03	<b>0.01701</b>
$k$ (m/sec)	5.15E-10	2.86E-10	3.63E-10	2.97E-10	2.35E-10	1.00E-09	5.97E-10	1.10E-10	1.75E-10	2,963E-10	<b>3.973E-10</b>

## 7 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΛΙΓΝΙΤΗ ΤΗΣ ΠΤΟΛΕΜΑΪΔΑΣ

### 7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Παρ' όλο που οι συνέπειες μιας πιθανής αστοχίας σε ανοιχτές εκσκαφές είναι πολύ μεγάλες, μέχρι πρόσφατα δεν γινόταν λεπτομερής έλεγχος της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών που αυτή συμπεριέλαβε. Σήμερα αυξάνεται συνεχώς η σημασία της λύσης των προβλημάτων σταθερότητας αφού η ασφάλεια των εργατών και του εξοπλισμού είναι υψίστης σημασίας. Έτσι δεν αποτελεί πλέον πολυτέλεια, αλλά ανάγκη, η εξέταση της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών που περιέχονται σε μια εκσκαφή.

Η παρούσα εργασία ασχολείται με την εξέταση των μηχανικών ιδιοτήτων της μάργας μέσω διαφόρων εργαστηριακών δοκιμών, και την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την συμπεριφορά του εδάφους κατά την εκσκαφή στο Λ.Κ.Π-Α. Στο δεύτερο σκέλος της εργασίας χρησιμοποιούνται για τους απαραίτητους υπολογισμούς όχι μόνο οι ιδιότητες της μάργας αλλά και αυτές του λιγνίτη, των υπερκειμένων προσχώσεων και των ενδιάμεσων στρωμάτων, όπως έχουν εκτιμηθεί από προγενέστερους ερευνητές.

Ειδικότερα για τα ενδιάμεσα στρώματα, οι τιμές των ιδιοτήτων τους θεωρήθηκε ότι ανταποκρίνονται σε μια μέση τιμή των αντίστοιχων της μάργας και του λιγνίτη. Από τις ιδιότητες των προσχώσεων, ενδιαφέρει κυρίως το φαινόμενο βάρος τους (υπολογισμός ενεργής τάσης), το οποίο θεωρήθηκε γνωστό από προηγούμενες μελέτες.

Όσο αφορά το λιγνίτη, κρίνεται απαραίτητη μια εκτενέστερη αναφορά στις ιδιοτητές του, όπως αυτές έχουν προκύψει από έρευνες διαφόρων μελετητών, για πιθανή σύγκρισή τους με αυτές τις μάργας.

## 7.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΛΙΓΝΙΤΗ

### 7.2.1 Γενικά

Ο λιγνίτης, συχνά αποκαλούμενος και ως "φαιάνθρακας" είναι ένα ενδιάμεσο υλικό μεταξύ τύρφης και λιθάνθρακα με χαμηλή θερμιδική αξία συγκρινόμενος με τον καθαρό άνθρακα.

Ο λιγνίτης της Πτολεμαΐδας χαρακτηρίζεται ως μαλακό, υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία εδαφικό υλικό, με εμφανή στρωσιγένεια, παράλληλη με τη διεύθυνση του επιπέδου της στρώσης του. Το χρώμα του είναι σκούρο καστανό, το οποίο μετά την εκσκαφή μεταβάλλεται με γοργούς ρυθμούς σε μαύρο, λόγω οξείδωσης. Στη μάζα του περιέχει διάφορα ποσοστά αδρανών υλικών, αργίλου και μάργας, καθώς και κελύφη (Anagnostopoulos et al., 1988).

### 7.2.2 Φυσικά χαρακτηριστικά

#### Ποσοστό οργανικού υλικού

Με βάση σχετική μελέτη των Anagnostopoulos et al., 1988 η μέση ποσοστιαία περιεκτικότητα του λιγνίτη σε οργανικό υλικό προσδιορίστηκε σε 75% του ξηρού βάρους του με καύση του στους 550°C. Η κατώτερη θερμιδική του αξία είναι 1850 kcal/kg.

#### Ποσοστό φυσικής υγρασίας

Κατά την ξήρανση του υλικού στους 60°C μέχρι σταθερής μάζας, το ποσοστό της φυσικής υγρασίας του λιγνίτη βρέθηκε να έχει μια μέση τιμή 142%. Για ξήρανση στους 105°C το ποσοστό αυτό αυξάνεται στο 152%.

#### Φαινόμενο βάρος και ειδικό βάρος των κόκκων

Η μέση τιμή του φαινόμενου βάρους του υλικού υπολογίστηκε στα 1,16g/cm<sup>3</sup> (11,6kN/m<sup>3</sup>) (Anagnostopoulos et al., 1988). Το ειδικό βάρος των κόκκων είναι 1,58 (Kavvadas et al., 1993).

### Αρχικός λόγος κενών και βαθμός κορεσμού

Η τιμή του αρχικού λόγου κενών όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, εξαρτάται άμεσα από το βάθος από το οποίο προέρχεται το εδαφικό δείγμα. Έτσι για δείγματα που αντιστοιχούν σε μεγαλύτερα βάθη, οι τιμές του λόγου κενών του υλικού είναι μικρότερες αυτών που αντιστοιχούν σε μικρότερα βάθη. Για το λιγνίτη της περιοχής, η τιμή του λόγου κενών κυμαίνεται μεταξύ 1,50 και 2,30 (Anagnostopoulos et al., 1988), τεκμηριώνοντας έτσι το μεγάλο ποσοστό φυσικής υγρασίας, αφού ο βαθμός κορεσμού του υλικού ανέρχεται στο 95% του όγκου των πόρων του (Kavvas et al., 1993).

## **7.3 ΕΛΑΦΟΤΕΧΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΛΙΓΝΙΤΗ**

### **7.3.1 Τάση προφόρτισης $P_c$**

Με βάση τα υπάρχοντα γεωλογικά δεδομένα μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι ο λιγνίτης της Πτολεμαΐδας είναι κανονικά στερεοποιημένος, και η τάση προφόρτισής του κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 1000 - 2000kPa κατά μήκος το κοιτάσματος. Με βάση όμως τις καμπύλες συμπίεσης του αδιατάρακτου λιγνίτη, όπως προέκυψαν από τη δοκιμή στερεοποίησης, φαίνεται ότι το εδαφικό υλικό είναι σε μεγάλο βαθμό υπερστερεοποιημένο (Kavvas et al., 1993).

### **7.3.2 Συντελεστής στερεοποίησης $C_v$**

Ο συντελεστής στερεοποίησης του λιγνίτη υπολογίστηκε από τη δοκιμή στερεοποίησης με τη χρήση οιδημέτρου και την ισοτροπική δοκιμή στερεοποίησης. Οι τιμές που προσδιορίστηκαν κυμαίνονται μεταξύ 2 και 8 m<sup>2</sup>/year, με τις χαμηλότερες από αυτές να αντιστοιχούν στις υψηλές τάσεις στερεοποίησης, ενώ οι αντίστοιχες τιμές που προέκυψαν για τη μάργα είναι αρκετά υψηλότερες, με μια μέση τιμή αυτή των 53,64 m<sup>2</sup>/year. Τα δείγματα του λιγνίτη δεν εξετάστηκαν για τυχόν ερπυσμό (Kavvas et al., 1993).

### 7.3.3 Μέτρο ελαστικότητας $E$ και ανισοτροπία

Το μέτρο ελαστικότητας  $E$  του λιγνίτη προσδιορίστηκε με βάση τις καμπύλες τάσης - παραμόρφωσης που προέκυψαν από τις τριαξονικές δοκιμές που έγιναν σε διάφορα δείγματα. Η κλίση των αρχικών (γραμμικών) τμημάτων των καμπυλών, δίνει το μέτρο ελαστικότητας του υλικού το οποίο φαίνεται να είναι το ίδιο, για όλες τις περιπτώσεις τάσεων στερεοποίησης που μπορεί να έχουν εφαρμοστεί σε αυτό κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Η τριαξονική δοκιμή πραγματοποιήθηκε με δύο τρόπους:

- ✓ Με στερεοποίηση και αποστράγγιση.
- ✓ Με στερεοποίηση αλλά χωρίς αποστράγγιση.

Για κάθε μια από τις παραπάνω δοκιμές προέκυψε και ένα διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας, το οποίο για την πρώτη περίπτωση είναι  $E_1 = 90\text{MPa}$  και για τη δεύτερη είναι  $E_2 = 70\text{MPa}$ .

Το αντίστοιχο μέτρο ελαστικότητας  $E$  της μάργας, υπολογίστηκε από τη δοκιμή της στερεοποίησης με τη χρήση οιδημέτρου με τη μέση τιμή αυτού ανέρχεται στα 115MPa περίπου. Με βάση τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, το μέτρο ελαστικότητας της μάργας προσδιορίστηκε με δύο μεθόδους όπως αναφέρθηκε και στο σχετικό κεφάλαιο. Η μέση τιμή του  $E_{initial}$  είναι 109MPa, ενώ η μέση τιμή που προέκυψε για το  $E_{50}$  είναι ίση με: 88MPa.

Το φαινόμενο της ασυμφωνίας των δύο τιμών, εξηγείται με τη λογική ότι η τιμή  $E_1$  που προέκυψε έπειτα από στερεοποίηση και αποστράγγιση του δοκιμίου αντιστοιχεί στην κατακόρυφη διεύθυνση (του άξονα του δοκιμίου), ενώ η τιμή  $E_2$  που προέκυψε έπειτα από στερεοποίηση του δοκιμίου χωρίς αποστράγγιση, αντιστοιχεί στην τιμή της ιδιότητας κατά την παράλληλη με το οριζόντιο επίπεδο διεύθυνση (Kavvadas et al., 1993).

Με βάση το λόγο των δύο μέτρων ελαστικότητας που προσδιορίστηκαν γίνεται και μια εκτίμηση της ανισοτροπίας του λιγνίτη κατά τις δύο αυτές διευθύνσεις. Είναι λοιπόν  $E_1/E_2 = 1,30$ , δηλαδή ο λιγνίτης παρουσιάζεται ανισότροπος.

#### 7.3.4 Γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi$ και συνοχή $c$

Οι παράμετροι αυτοί υπολογίστηκαν με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών άμεσης διάτμησης που πραγματοποιήθηκαν σε δοκίμια με ποσοστό φυσικής υγρασίας  $120\pm 4\%$ , στη συσκευή άμεσης διάτμησης. Η γωνία εσωτερικής τριβής του λιγνίτη λοιπόν είναι ίση με  $\varphi=35^\circ$ , ενώ η συνοχή είναι ίση με  $c=300kPa$ .

## 8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΝΑΘΟΛΩΣΗΣ

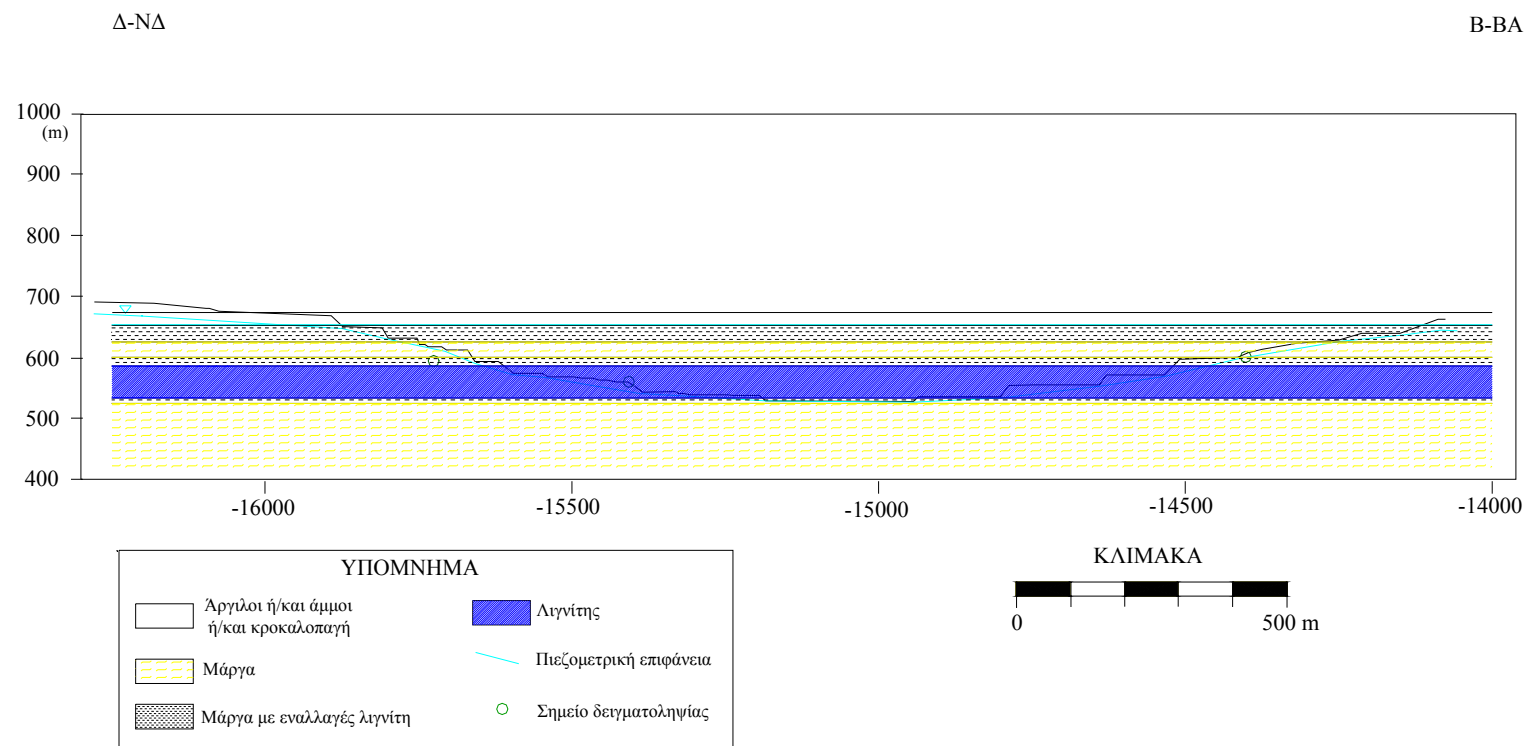
### 8.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όπως έχει προαναφερθεί, ένας από τους στόχους της παρούσας εργασίας είναι ο υπολογισμός της αναθόλωσης του εδάφους που προκαλείται από την εκσκαφή, λόγω της «ανακούφισης» (αποφόρτισης) αυτού. Για τον υπολογισμό της αναθόλωσης αυτής, έγιναν διάφορες θεωρήσεις, με σκοπό τη διευκόλυνση των υπολογισμών.

Αρχικά, θεωρήθηκε μια απλουστευμένη τομή της εκσκαφής Σχήμα 8.1 όπου οι διαστάσεις των διαδοχικών στρωμάτων που αποκόπτονται (πάχος και πλάτος), θεωρούνται σταθερές. Ειδικότερα για το πλάτος των στρωμάτων χρησιμοποιήθηκε μια μέση τιμή αυτού, με βάση την πραγματική τομή του Σχήματος 8.2. Επίσης, θεωρήθηκε ότι τα στρώματα είναι απόλυτα οριζόντια και καθένα από αυτά αποτελείται από ένα μόνο είδος υλικού, είναι δηλαδή ομογενούς σύστασης, συνεχή και ελαστικά, με λόγο Poisson ίσο με το μηδέν. Τέλος, θεωρήθηκε ότι το φορτίο των υπερκειμένων εφαρμόζεται ομοιόμορφα στο υποκείμενο έδαφος όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8.3.

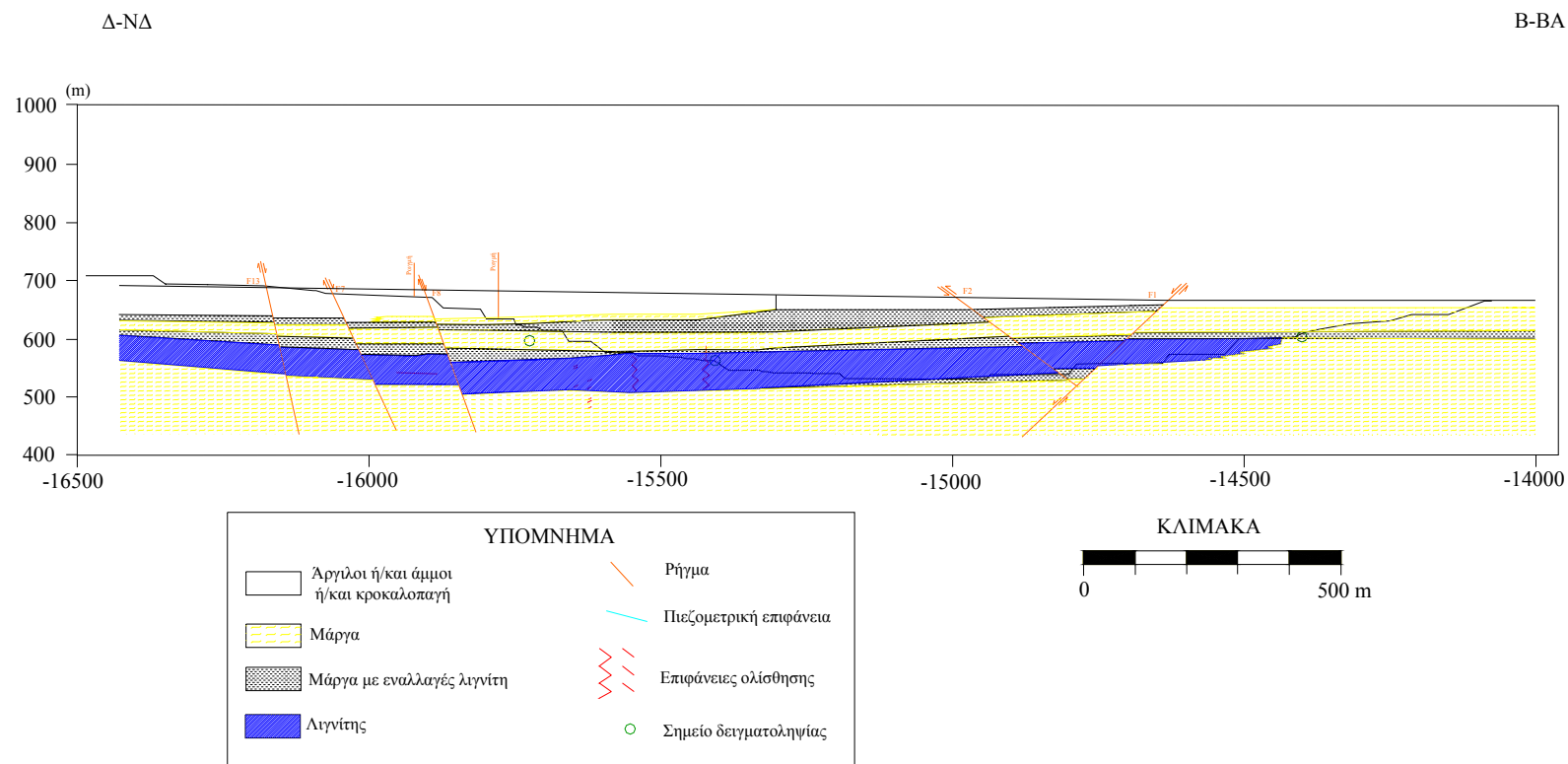
Μια ακόμη υπόθεση που έγινε κατά τους υπολογισμούς είναι ότι το φορτίο του καθενός από τα στρώματα που διαδοχικά παίρνουν τη θέση των υπερκειμένων, απομακρύνεται ακαριαία, πράγμα που δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα. Επίσης, το πάχος της υποκείμενης μάργας θεωρείται αρκετά μεγάλο, χωρίς όμως να έχουμε στοιχεία γι' αυτό από την τομή. Είναι λοιπόν πολύ πιθανό η αναθόλωση που υπολογίζεται παρακάτω να είναι κατά τι μεγαλύτερη της πραγματικής, αφού θεωρείται ότι συμβάλλει σε αυτή στρώμα μάργας μεγαλύτερου πάχους από το πραγματικό.

Η γενική μεθοδολογία υπολογισμού της αναθόλωσης, χρησιμοποιεί τα μέτρα ελαστικότητας των επιμέρους στρωμάτων. Για τις υπερκείμενες προσχώσεις, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας θεωρήθηκε αρκετά χαμηλότερη από αυτή των υπολοίπων υλικών, δεδομένου ότι πρόκειται για αμμώδεις σχηματισμούς. Το μέτρο ελαστικότητας του λιγνίτη εκτιμήθηκε από τους Kanvadas et al., (1993) σε σχετική μελέτη για τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του. Η τιμή που χρησιμοποιήθηκε είναι η μέση τιμή των μετρήσεων που είχαν πραγματοποιήσει, όπως αναφέρεται και στο



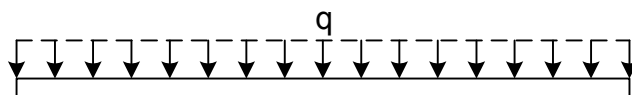
**Σχήμα 8.1:** Απλουστευμένη τομή του ορυχείου Τομέα 6 για τον υπολογισμό της αναθόλωσης.





**Σχήμα 8.2:** Τομή της εκσκαφής του ορυχείου Τομέα 6 κατά την περίοδο του Δεκεμβρίου 1998.

Κεφάλαιο 7. Τέλος, για τα ενδιάμεσα στρώματα θεωρήθηκε ότι το μέτρο ελαστικότητάς τους προκύπτει σαν η μέση τιμή των αντίστοιχων μέτρων του λιγνίτη και της μάργας. Για τη μάργα, όπως αναλύεται σε επόμενη παράγραφο, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα διαφορετικά μέτρα ελαστικότητας, όπως προέκυψαν από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.



**Σχήμα 8.3:** Ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου σε εδαφικό στρώμα.

## 8.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Για τον υπολογισμό της αναθόλωσης, εκτός από το μέτρο ελαστικότητας και το πάχος των εδαφικών στρωμάτων που εκσκάπτονται, είναι απαραίτητη και η γνώση της έκτασης της επηρεαζόμενης σε σχέση με το βάθος ζώνης. Η γενική μεθοδολογία υπολογισμού της τάσης που μεταφέρεται από μια φόρτιση σε ένα βάθος  $z$  από την επιφάνεια, δίνεται παρακάτω. Αφού πρώτα υπολογίστηκε το φορτίο  $q$  που ασκεί καθένα από τα στρώματα στην επιφάνεια του υποκειμένου του θεωρώντας ανύπαρκτα τα υπερκείμενα, εκτιμήθηκε η μεταβολή του επιβαλλόμενου φορτίου με το βάθος μέσα στα υποκείμενα.

### 8.2.1 Υπολογισμός του φορτίου $q$

Ο υπολογισμός του ενεργού φορτίου που επιβάλλει ένα εδαφικό στρώμα στην επιφάνεια του υποκειμένου του γίνεται με την ίδια λογική που υπολογίστηκε η τάση υπερκειμένων για τα σημεία δειγματοληψίας στο Κεφάλαιο 5. Για τον υπολογισμό αυτό, αρκεί η γνώση του πάχους του στρώματος καθώς και το κορεσμένο φαινόμενο βάρος του.

Το φορτίο  $q$  που επιβάλλεται από καθένα από τα στρώματα στην επιφάνεια του υποκειμένου του, με βάση τα νέα πάχη που προέκυψαν από την απλουστευμένη τομή, φαίνεται στον Πίνακα 8.1. Η ενεργή τάση η οποία αναγράφεται στην τελευταία στήλη του Πίνακα 8.1 αντιστοιχεί μόνο στο φορτίο του αμέσως υπερκειμένου στρώματος

αφού όλα τα προηγούμενα στρώματα έχουν αφαιρεθεί. Όλα τα στρώματα, εκτός από τις προσχώσεις, θεωρούνται κορεσμένα σε νερό, το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα δηλαδή θεωρήθηκε σε βάθος 21m από την επιφάνεια του εδάφους. Το φορτίο που ασκεί η τελική μάργα στο υποκείμενό της στρώμα ουσιαστικά δεν ενδιαφέρει αφού αυτό δεν αναθολώνεται (ασβεστόλιθος).

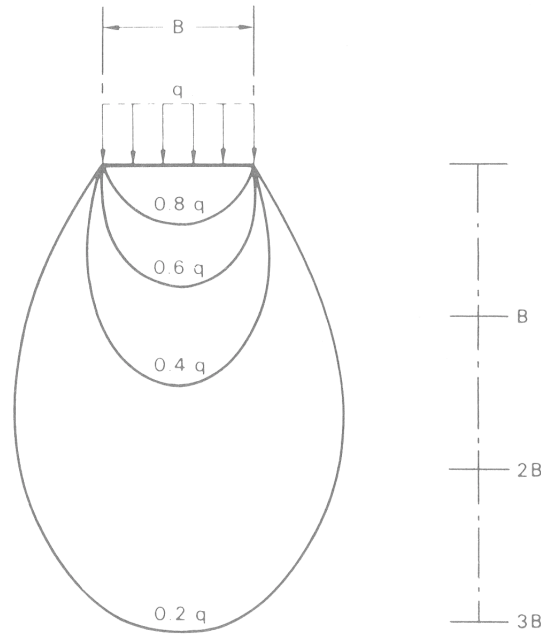
**Πίνακας 8.1:** Υπολογισμός της ενεργής τάσης που ασκεί κάθε εδαφικό στρώμα στη διεπιφάνεια μεταξύ του ιδίου και του υποκειμένου του.

Στρώμα	Πάχος (m)	Φαιν. Βάρος (kN/m <sup>3</sup> )	Ολική τάση $\sigma_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	Πίεση του νερού των πόρων $u$ (kN/m <sup>2</sup> )	Ενεργή τάση $\sigma_v'$ (kN/m <sup>2</sup> )
Προσχώσεις	21	<b>18,5</b>	399,00	0,00	388,50
Ενδιάμεσα	27	<b>16,8</b>	453,60	264,60	189,00
Μάργα	25	<b>18,0</b>	450,00	245,00	205,00
Ενδιάμεσα	14	<b>16,8</b>	235,20	137,20	98,00
Λιγνίτης	52	<b>15,6</b>	811,20	509,60	301,60
Ενδιάμεσα	9	<b>16,8</b>	151,20	88,20	63,00
Μάργα (υποκείμενη)	200	<b>18,0</b>	3600,00	1960,00	1640,00

### 8.2.2 Μετάδοση των τάσεων σε βάθος $z$ .

Η γραφική μέθοδος για τον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης και του βάθους επίδρασής της κατά Boussinesq δηλαδή το διάγραμμα των σημείων ίσης κατακόρυφης τάσης, από την ομοιόμορφη επιφανειακή φόρτιση, συναρτήσει του βάθους, δίνεται στο Σχήμα 8.4.

Το διάγραμμα αυτό που είναι γνωστό σαν "βολβοί πίεσης", δίνει το ποσοστό της κατακόρυφης τάσης σε σχέση με το βάθος, συναρτήσει του πλάτους  $B$  της επιβαλλόμενης φόρτισης. Από τις ισοτασικές καμπύλες φαίνεται ότι σε βάθος  $2B$  κάτω από το επίπεδο φόρτισης, ασκούνται σημαντικές τάσεις, ενώ για βάθος  $4B$  κάτω από το επίπεδο αυτό η τάση ισούται μόνο με το 15% του επιβαλλόμενου φορτίου (Craig, 1992).

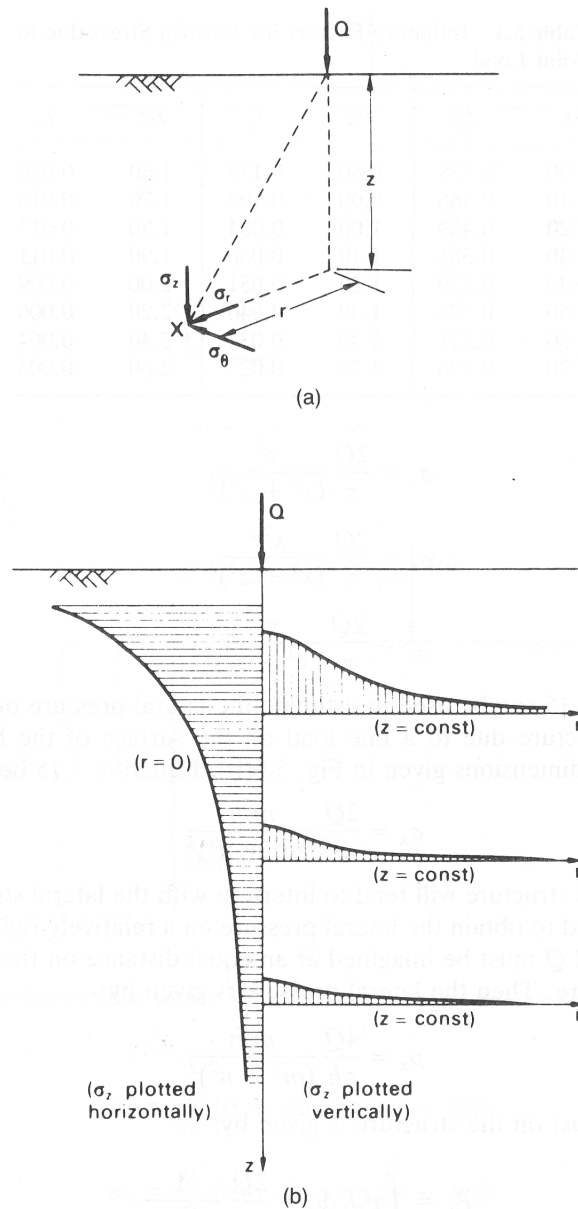


**Σχήμα 8.4:** Ισοτασικές καμπύλες (Craig, 1992)

Υπολογιστικά, οι σχέσεις που δίνουν τις τάσεις που μεταφέρονται διαμέσου ενός συνεχούς, ομογενούς και ελαστικού μέσου λόγω κατακόρυφης σημειακής φόρτισης, προσδιορίστηκαν από τον Boussinesq το 1885. Έτσι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 8.5(α) σε ένα σημείο  $X$ , το οποίο βρίσκεται σε βάθος  $z$  και ακτινική απόσταση  $r$  από το σημείο εφαρμογής του φορτίου  $Q$ , η ορθή τάση  $\sigma_z$  θα δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_z = \frac{3Q}{2\pi z^2} \left\{ \frac{1}{1 + (r/z)^2} \right\}^{5/2} \quad [8.1]$$

Στο Σχήμα 8.5(b) φαίνεται η σταδιακή μείωση της τάσης που προκαλείται από το σημειακό φορτίο συναρτήσει του βάθους και της ακτινικής απόστασης.



**Σχήμα 8.5:** (a) Τάσεις λόγω σημειακής φόρτισης (b) Μεταβολή της κατακόρυφης τάσης συναρτήσει του βάθους και της ακτινικής απόστασης (Craig, 1992).

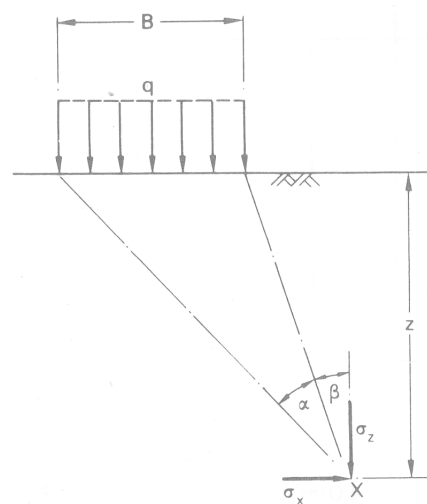
Οι τάσεις λόγω ομοιόμορφης επιφανειακής φόρτισης που εφαρμόζονται σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια (Σχήμα 8.6), μπορούν να προκύψουν με ολοκλήρωση των εξισώσεων που αναφέρονται στη σημειακή φόρτιση, θεωρώντας τα φορτία σε στοιχειώδη τμήματα της επιφάνειας σημειακά. Η κατακόρυφη τάση σε ένα σημείο  $X$  που βρίσκεται σε βάθος  $z$  που ενδιαφέρει στην περίπτωση που μελετάμε θα δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma_z = \frac{q}{\pi} \{a + \sin a \cos(\alpha + 2\beta)\} \quad [8.2]$$

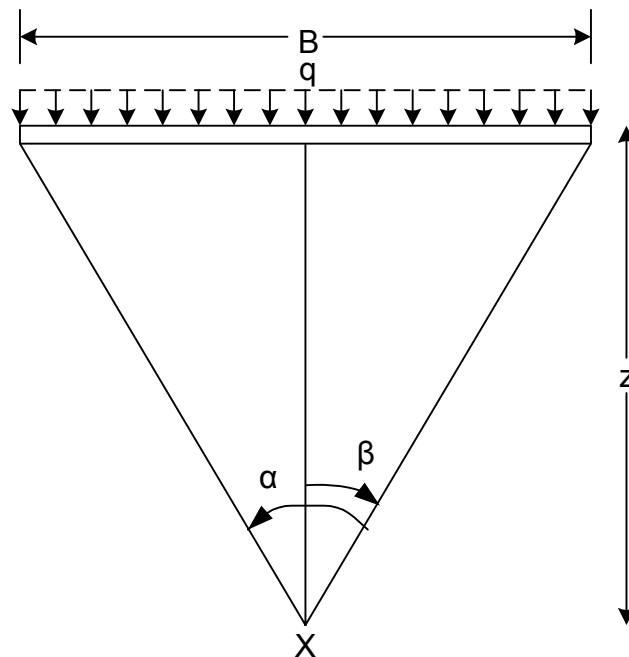
όπου:  $q$  = το φορτίο που εφαρμόζεται στην επιφάνεια του εδάφους.

$\alpha$  = η γωνία που σχηματίζεται από τις ευθείες που ενώνουν τα ακραία σημεία του πλάτους της φόρτισης, με το σημείο  $X$  (Σχήμα 8.6).

$\beta$  = η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία που ενώνει το ακραίο σημείο του πλάτους της φόρτισης που βρίσκεται προς την πλευρά του σημείου  $X$  με το  $X$  και την κατακόρυφο (Σχήμα 8.6).



Σχήμα 8.6: Τάση λόγω ομοιόμορφης πίεσης (Craig, 1992).



Σχήμα 8.7: Γραφική απεικόνιση των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της τάσης  $\sigma_z$ .

Ουσιαστικά, για την υπό εξέταση περίπτωση, ενδιαφέρει η εκτίμηση της κατακόρυφης τάσης που βρίσκεται στη μεσοκάθετο του πλάτους της φόρτισης και στο μέσο του πάχους του καθενός από τα επιμέρους στρώματα (σημείο *X*). Με βάση τα παραπάνω υπολογίζεται η μέση τάση που ασκείται σε αυτό λόγω του υπερκειμένου του. Το Σχήμα 8.6 επομένως (που αναφέρεται στη γενικότερη περίπτωση), μετασχηματίζεται στο Σχήμα 8.7 για το οποίο είναι:

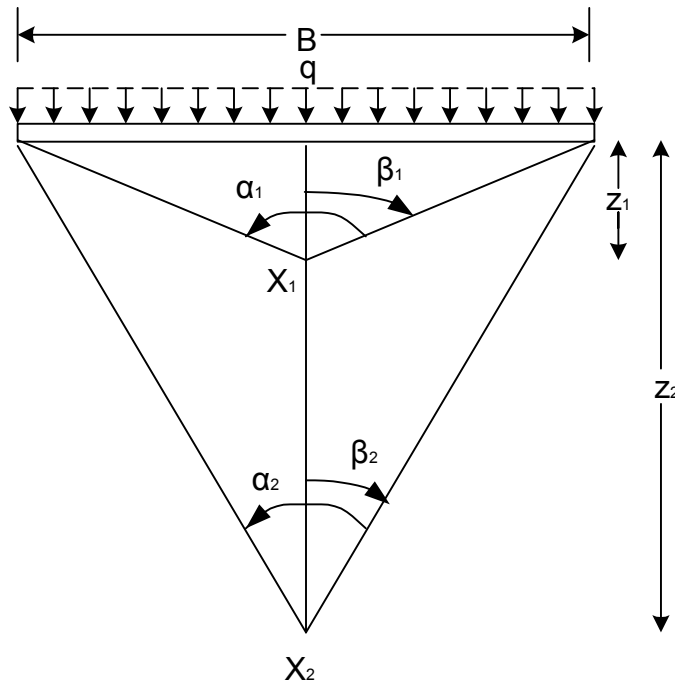
$$\beta = -\frac{\alpha}{2} \quad [8.3]$$

Από σύγκριση που έγινε μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη γραφική και την υπολογιστική μέθοδο προσδιορισμού της τάσης που ασκεί εδαφικό στρώμα σε βάθος *z* φάνηκε να υπάρχει μικρή διαφοροποίηση.

### 8.2.3 Υπολογισμός των γωνιών $\alpha$ , $\beta$

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, οι γωνίες  $\alpha$ ,  $\beta$  που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της κατακόρυφης τάσης σε ένα ορισμένο βάθος προκύπτουν γραφικά. Ειδικότερα, προσδιορίζονται για όλα το μέσο βάθος όλων των στρωμάτων, έτσι ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της αναθόλωσης καθενός από αυτά ξεχωριστά.

Στο Σχήμα 8.8 φαίνονται οι γωνίες αυτές για δύο διαδοχικές διεπιφάνειες μεταξύ των επιμέρους στρωμάτων.



Σχήμα 8.8: Γωνίες  $\alpha$ ,  $\beta$  για δύο διαδοχικά σημεία  $X_1$  και  $X_2$ .

#### 8.2.4 Υπολογισμός της ανηγμένης παραμόρφωσης $\varepsilon$ με τη φόρτιση

Η μεθοδολογία υπολογισμού του Boussinesq θεωρεί ένα τέλεια ελαστικό ομογενές και ισότροπο υλικό και την κατακόρυφη τάση ανεξάρτητη του λόγου του Poisson. Η αναθόλωση μπορεί να εκτιμηθεί μέσω μίας επαναληπτικής διαδικασίας που βασίζεται στην γενική έκφραση της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης:

$$\varepsilon_I = \frac{1}{E} [\sigma_I - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)] \quad [8.4]$$

όπου:  $\varepsilon_I$  = η ανηγμένη παραμόρφωση για κάθε στρώμα κατά τη διεύθυνση της κατακόρυφου.

$\sigma_I$  = η μεταβολή στην κατακόρυφη τάση για κάθε στρώμα σε  $\text{kN/m}^2$ .

$\sigma_2, \sigma_3$  = οι μεταβολές στις οριζόντιες τάσεις κάθε στρώματος σε  $\text{kN/m}^2$ .

$\nu$  = λόγος του Poisson για τα επιμέρους στρώματα.

$E$  = το μέτρο ελαστικότητας καθενός από τα στρώματα σε  $\text{kN/m}^2$ .

Σημειώνεται ότι για τον υπολογισμό της ανηγμένης παραμόρφωσης απαιτείται η χρήση του λόγου του Poisson. Επίσης, οι τάσεις  $\sigma_2$  και  $\sigma_3$  δεν προσδιορίζονται εύκολα



πρακτικά, όντας συνάρτηση των  $\sigma_I$  και  $\mu$ . Παρ' όλα αυτά αν  $\nu = 0$  η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_1}{E} \quad [8.5]$$

από την οποία υπολογίζεται η μέγιστη ανηγμένη παραμόρφωση για καθένα από τα επιμέρους στρώματα. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η σχέση [8.5] για τον υπολογισμό της αναθόλωσης λόγω απομάκρυνσης των υπερκειμένων.

### 8.2.5 Υπολογισμός της αναθόλωσης

Η αναθόλωση των επιμέρους εδαφικών στρωμάτων για κάθε στάδιο αποφόρτισης εκτιμάται με βάση την ανηγμένη παραμόρφωση (θεωρώντας αρνητικό φορτίο φόρτισης) όπως προέκυψε από την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης, και του πάχους του καθενός από τα υποκείμενα. Η παραμόρφωση δηλαδή, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\delta = \varepsilon \cdot h \quad [8.6]$$

όπου:  $\delta$  = η αναθόλωση κάθε στρώματος σε m.

$\varepsilon$  = η ανηγμένη παραμόρφωση.

$h$  = το πάχος του στρώματος σε m.

## 8.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΑΝΑΘΟΛΩΣΗΣ

Στους Πίνακες 8.3 - 8.6 παρατίθενται τα αποτελέσματα των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της αναθόλωσης των υποκείμενων στρωμάτων μετά από την εκσκαφή - απομάκρυνση καθενός από τα επιμέρους υπερκείμενα. Δεδομένης της περιορισμένης αξιοπιστίας των θεωρούμενων τιμών, έγινε μια παραμετρική ανάλυση κατά την επίλυση και θεωρήθηκαν τέσσερα σενάρια, με διαφορετικούς συνδυασμούς μέτρων ελαστικότητας για τη μάργα και τα ενδιάμεσα (αφού αυτό του λιγνίτη είναι δεδομένο από προηγούμενους ερευνητές και ίσο με 80MPa (Kavvas et al., 1993)). Για καθένα από τα παραπάνω στρώματα υπολογίστηκε

η ολική αναθόλωση που παρατηρήθηκε κατά την απομάκρυνση των υπερκειμένων. Στον Πίνακα 8.2 φαίνονται αυτοί οι συνδυασμοί των μέτρων ελαστικότητας. Η εκσκαφή θεωρείται ότι πραγματοποιήθηκε σε έξι στάδια, τα οποία θεωρήσαμε ότι συμπίπτουν με τους στρωματογραφικούς ορίζοντες της απλουστευμένης τομής του Σχήματος 8.1.

Ειδικότερα για τη μάργα, το μέτρο ελαστικότητας  $E_{\mu}$  του Σεναρίου 1 είναι αυτό που προέκυψε σαν μέση τιμή από όλα τα δείγματα που υποβλήθηκαν στη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, ενώ αυτό του Σεναρίου 2 προέκυψε από το σύνολο των σταδίων φόρτισης και αποφόρτισης των δοκιμών συμπίεστότητας. Στο Σενάριο 3 χρησιμοποιήθηκε μόνο το μέτρο ελαστικότητας που προέκυψε για όλα τα δείγματα κατά τη διαδικασία της αποφόρτισης στις δοκιμές στερεοποίησης και τέλος στο Σενάριο 4 χρησιμοποιήθηκε μια μέση τιμή όλων των παραπάνω. Για τα ενδιάμεσα, το μέτρο ελαστικότητάς τους  $E_{\varepsilon}$  σε καθένα από τα σενάρια προέκυψε ως η μέση τιμή αυτού της μάργας και του μέτρου ελαστικότητας  $E_{\lambda}$  του λιγνίτη.

**Πίνακας 8.2:** Σενάρια υπολογισμού της αναθόλωσης και αντίστοιχα μέτρα ελαστικότητας.

	Μέτρο ελαστικότητας μάργας $E_{\mu}$ (kN/m <sup>2</sup> )	Μέτρο ελαστικότητας λιγνίτη $E_{\lambda}$ (kN/m <sup>2</sup> )	Μέτρο ελαστικότητας ενδιαμέσων $E_{\varepsilon}$ (kN/m <sup>2</sup> )
ΣΕΝΑΡΙΟ 1.	100.000	80.000	90.000
ΣΕΝΑΡΙΟ 2.	115.000	80.000	97.500
ΣΕΝΑΡΙΟ 3.	225.000	80.000	152.500
ΣΕΝΑΡΙΟ 4.	147.000	80.000	113.500

Στα επιμέρους σενάρια, καθένας από τους πίνακες αντιστοιχεί στην απομάκρυνση ενός από τα διαδοχικά στρώματα και έχουν προσδιοριστεί τόσο η αναθόλωση καθενός από τα στρώματα ξεχωριστά, όσο και η ολική αναθόλωση των υποκειμένων για κάθε αποφόρτιση.

Πίνακας 8.3: Αναθόλωση για τα επιμέρους στρώματα κατά το ΣΕΝΑΠΙΟ 1.

ΑΦΑΙΡΕΣΗ 1 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ (ΠΛΑΤΟΣ B=1790m)									
Τάση $\sigma_v$ που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία $\beta$ (rad)	Γωνία $\alpha$ (rad)	$\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγμένη παραμόρφωση $\epsilon$ κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
388,50	Ενδιάμεσα	27	13,5	-1.56	3.11	-388.50	90000	-4.317E-03	-0.1165
	Μάργα	25	39,5	-1.53	3.05	-388.49	100000	-3.885E-03	-0.0971
	Ενδιάμεσα	14	59	-1.50	3.01	-388.45	90000	-4.316E-03	-0.0604
	Λιγνίτης	52	92	-1.47	2.94	-388.32	80000	-4.854E-03	-0.2524
	Ενδιάμεσα	9	122,5	-1.43	2.87	-388.09	90000	-4.312E-03	-0.0388
	Μάργα (υποκ/νη)	200	227	-1.32	2.64	-386.00	100000	-3.860E-03	-0.7720
Απόλυτο υψόμετρο +649m 1 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-1.3373
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 2 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=1640m)									
Τάση $\sigma_v$ που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία $\beta$ (rad)	Γωνία $\alpha$ (rad)	$\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγμένη παραμόρφωση $\epsilon$ κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
189,00	Μάργα	25	12,5	-1.56	3.11	-189.00	100000	-1.890E-03	-0.0472
	Ενδιάμεσα	14	32	-1.53	3.06	-189.00	90000	-2.100E-03	-0.0294
	Λιγνίτης	52	65	-1.49	2.98	-188.96	80000	-2.362E-03	-0.1228
	Ενδιάμεσα	9	95,5	-1.45	2.91	-188.88	90000	-2.099E-03	-0.0189
	Μάργα (υποκ/νη)	200	200	-1.33	2.66	-187.91	100000	-1.879E-03	-0.3758
Απόλυτο υψόμετρο: +622m 2 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.5942
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 3 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΜΑΡΓΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=1350m)									
Τάση $\sigma_v$ που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία $\beta$ (rad)	Γωνία $\alpha$ (rad)	$\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγμένη παραμόρφωση $\epsilon$ κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
205,00	Ενδιάμεσα	14	7	-1.56	3.12	-205.00	90000	-2.278E-03	-0.0319
	Λιγνίτης	52	40	-1.51	3.02	-204.98	80000	-2.562E-03	-0.1332
	Ενδιάμεσα	9	70,5	-1.47	2.93	-204.90	90000	-2.277E-03	-0.0205
	Μάργα (υποκ/νη)	200	175	-1.32	2.63	-203.60	100000	-2.036E-03	-0.4072
Απόλυτο υψόμετρο: +597m 3 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.5928

ΑΦΑΙΡΕΣΗ 4 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=1120m)									
Τάση $\sigma_v$ που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία $\beta$ (rad)	Γωνία $\alpha$ (rad)	$\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγμένη παραμόρφωση $\epsilon$ κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
98,00	Λιγνίτης	52	26	-1.52	3.05	-98.00	80000	-1.225E-03	-0.0637
	Ενδιάμεσα	9	56,5	-1.47	2.94	-97.96	90000	-1.088E-03	-0.0098
	Μάργα (υποκ/νη)	200	161	-1.29	2.58	-97.10	100000	-9.710E-04	-0.1942
Απόλυτο υψόμετρο: +583m 4 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.2677
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 5 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΛΙΓΝΙΤΗΣ (ΠΛΑΤΟΣ B=690m)									
Τάση $\sigma_v$ που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία $\beta$ (rad)	Γωνία $\alpha$ (rad)	$\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγμένη παραμόρφωση $\epsilon$ κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
301,60	Ενδιάμεσα	9	4,5	-1.56	3.12	-301.60	90000	-3.351E-03	-0.0302
	Μάργα (υποκ/νη)	200	109	-1.26	2.53	-298.00	100000	-2.980E-03	-0.5960
Απόλυτο υψόμετρο: +531m 5 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.6262
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 6 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=245m)									
Τάση $\sigma_v$ που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία $\beta$ (rad)	Γωνία $\alpha$ (rad)	$\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγμένη παραμόρφωση $\epsilon$	Αναθόλωση για κάθε στρώμα (m)
63,00	Μάργα (υποκ/νη)	200	100	-0.89	1.77	-55.19	100000	-5.519E-04	-0.1104
Απόλυτο υψόμετρο: +522m 6 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0,1104

Πίνακας 8.4: Αναθόλωση για τα επιμέρους στρώματα κατά το ΣΕΝΑΠΙΟ 2.

ΑΦΑΙΡΕΣΗ 1 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ (ΠΛΑΤΟΣ B=1790m)									
Τάση σ <sub>v</sub> ' που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία β (rad)	Γωνία α (rad)	σ <sub>z</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγεμένη παραμόρφωση ε κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
388,50	Ενδιάμεσα	27	13,5	-1.56	3.11	-388.50	97500	-3.985E-03	-0.1076
	Μάργα	25	39,5	-1.53	3.05	-388.49	115000	-3.378E-03	-0.0845
	Ενδιάμεσα	14	59	-1.50	3.01	-388.45	97500	-3.984E-03	-0.0558
	Λιγνίτης	52	92	-1.47	2.94	-388.32	80000	-4.854E-03	-0.2524
	Ενδιάμεσα	9	122,5	-1.43	2.87	-388.09	97500	-3.980E-03	-0.0358
	Μάργα (υποκ/νη)	200	227	-1.32	2.64	-386.00	115000	-3.357E-03	-0.6713
Απόλυτο υψόμετρο +649m 1 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-1.2074
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 2 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=1640m)									
Τάση σ <sub>v</sub> ' που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία β (rad)	Γωνία α (rad)	σ <sub>z</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγεμένη παραμόρφωση ε κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
189,00	Μάργα	25	12,5	-1.56	3.11	-189.00	115000	-1.643E-03	-0.0411
	Ενδιάμεσα	14	32	-1.53	3.06	-189.00	97500	-1.938E-03	-0.0271
	Λιγνίτης	52	65	-1.49	2.98	-188.96	80000	-2.362E-03	-0.1228
	Ενδιάμεσα	9	95,5	-1.45	2.91	-188.88	97500	-1.937E-03	-0.0174
	Μάργα (υποκ/νη)	200	200	-1.33	2.66	-187.91	115000	-1.634E-03	-0.3268
Απόλυτο υψόμετρο: +622m 2 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.5353
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 3 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΜΑΡΓΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=1350m)									
Τάση σ <sub>v</sub> ' που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία β (rad)	Γωνία α (rad)	σ <sub>z</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγεμένη παραμόρφωση ε κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
205,00	Ενδιάμεσα	14	7	-1.56	3.12	-205.00	97500	-2.103E-03	-0.0294
	Λιγνίτης	52	40	-1.51	3.02	-204.98	80000	-2.562E-03	-0.1332
	Ενδιάμεσα	9	70,5	-1.47	2.93	-204.90	97500	-2.102E-03	-0.0189
	Μάργα (υποκ/νη)	200	175	-1.32	2.63	-203.60	115000	-1.770E-03	-0.3541
Απόλυτο υψόμετρο: +597m 3 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.5357

ΑΦΑΙΡΕΣΗ 4 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=1120m)									
Τάση $\sigma_v$ που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία $\beta$ (rad)	Γωνία $\alpha$ (rad)	$\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγμένη παραμόρφωση $\epsilon$ κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
98,00	Λιγνίτης	52	26	-1.52	3.05	-98.00	80000	-1.225E-03	-0.0637
	Ενδιάμεσα	9	56,5	-1.47	2.94	-97.96	97500	-1.005E-03	-0.0090
	Μάργα (υποκ/νη)	200	161	-1.29	2.58	-97.10	115000	-8.444E-04	-0.1689
Απόλυτο υψόμετρο: +583m 4 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.2416
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 5 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΛΙΓΝΙΤΗΣ (ΠΛΑΤΟΣ B=690m)									
Τάση $\sigma_v$ που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία $\beta$ (rad)	Γωνία $\alpha$ (rad)	$\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγμένη παραμόρφωση $\epsilon$ κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
301,60	Ενδιάμεσα	9	4,5	-1.56	3.12	-301.60	97500	-3.093E-03	-0.0278
	Μάργα (υποκ/νη)	200	109	-1.26	2.53	-298.00	115000	-2.591E-03	-0.5183
Απόλυτο υψόμετρο: +531m 5 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.5461
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 6 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=245m)									
Τάση $\sigma_v$ που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία $\beta$ (rad)	Γωνία $\alpha$ (rad)	$\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγμένη παραμόρφωση $\epsilon$ κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
63,00	Μάργα (υποκ/νη)	200	100	-0.89	1.77	-55.19	115000	-4.799E-04	-0.0960
Απόλυτο υψόμετρο: +522m 6 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0,0960

Πίνακας 8.5: Αναθόλωση για τα επιμέρους στρώματα κατά το ΣΕΝΑΠΙΟ 3.

ΑΦΑΙΡΕΣΗ 1 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ (ΠΛΑΤΟΣ B=1790m)									
Τάση σ <sub>v</sub> ' που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία β (rad)	Γωνία α (rad)	σ <sub>z</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγμένη παραμόρφωση ε κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
388,50	Ενδιάμεσα	27	13,5	-1.56	3.11	-388.50	152500	-2.548E-03	-0.0688
	Μάργα	25	39,5	-1.53	3.05	-388.49	225000	-1.727E-03	-0.0432
	Ενδιάμεσα	14	59	-1.50	3.01	-388.45	152500	-2.547E-03	-0.0357
	Λιγνίτης	52	92	-1.47	2.94	-388.32	80000	-4.854E-03	-0.2524
	Ενδιάμεσα	9	122,5	-1.43	2.87	-388.09	152500	-2.545E-03	-0.0229
	Μάργα (υποκ/νη)	200	227	-1.32	2.64	-386.00	225000	-1.716E-03	-0.3431
Απόλυτο υψόμετρο +649m 1 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.7660
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 2 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=1640m)									
Τάση σ <sub>v</sub> ' που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία β (rad)	Γωνία α (rad)	σ <sub>z</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγμένη παραμόρφωση ε κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
189,00	Μάργα	25	12,5	-1.56	3.11	-189.00	225000	-8.400E-04	-0.0210
	Ενδιάμεσα	14	32	-1.53	3.06	-189.00	152500	-1.239E-03	-0.0174
	Λιγνίτης	52	65	-1.49	2.98	-188.96	80000	-2.362E-03	-0.1228
	Ενδιάμεσα	9	95,5	-1.45	2.91	-188.88	152500	-1.239E-03	-0.0111
	Μάργα (υποκ/νη)	200	200	-1.33	2.66	-187.91	225000	-8.352E-04	-0.1670
Απόλυτο υψόμετρο: +622m 2 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.3394
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 3 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΜΑΡΓΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=1350m)									
Τάση σ <sub>v</sub> ' που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία β (rad)	Γωνία α (rad)	σ <sub>z</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγμένη παραμόρφωση ε κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
205,00	Ενδιάμεσα	14	7	-1.56	3.12	-205.00	152500	-1.344E-03	-0.0188
	Λιγνίτης	52	40	-1.51	3.02	-204.98	80000	-2.562E-03	-0.1332
	Ενδιάμεσα	9	70,5	-1.47	2.93	-204.90	152500	-1.344E-03	-0.0121
	Μάργα (υποκ/νη)	200	175	-1.32	2.63	-203.60	225000	-9.049E-04	-0.1810
Απόλυτο υψόμετρο: +597m 3 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.3451

ΑΦΑΙΡΕΣΗ 4 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=1120m)									
Τάση $\sigma_v$ που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία $\beta$ (rad)	Γωνία $\alpha$ (rad)	$\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγμένη παραμόρφωση $\epsilon$ κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
98,00	Λιγνίτης	52	26	-1.52	3.05	-98.00	80000	-1.225E-03	-0.0637
	Ενδιάμεσα	9	56,5	-1.47	2.94	-97.96	152500	-6.423E-04	-0.0058
	Μάργα (υποκ/νη)	200	161	-1.29	2.58	-97.10	225000	-4.316E-04	-0.0863
Απόλυτο υψόμετρο: +583m 4 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.1558
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 5 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΛΙΓΝΙΤΗΣ (ΠΛΑΤΟΣ B=690m)									
Τάση $\sigma_v$ που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία $\beta$ (rad)	Γωνία $\alpha$ (rad)	$\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγμένη παραμόρφωση $\epsilon$ κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
301,60	Ενδιάμεσα	9	4,5	-1.56	3.12	-301.60	152500	-1.978E-03	-0.0178
	Μάργα (υποκ/νη)	200	109	-1.26	2.53	-298.00	225000	-1.324E-03	-0.2649
Απόλυτο υψόμετρο: +531m 5 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.2827
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 6 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=245m)									
Τάση $\sigma_v$ που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία $\beta$ (rad)	Γωνία $\alpha$ (rad)	$\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγμένη παραμόρφωση $\epsilon$ κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
63,00	Μάργα (υποκ/νη)	200	100	-0.89	1.77	-55.19	225000	-2.453E-04	-0.0491
Απόλυτο υψόμετρο: +522m 6 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.0491



Πίνακας 8.6: Αναθόλωση για τα επιμέρους στρώματα κατά το ΣΕΝΑΠΙΟ 4.

ΑΦΑΙΡΕΣΗ 1 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΠΡΟΣΧΩΣΕΙΣ (ΠΛΑΤΟΣ B=1790m)									
Τάση σ <sub>v</sub> ' που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία β (rad)	Γωνία α (rad)	σ <sub>z</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγεμένη παραμόρφωση ε κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
388,50	Ενδιάμεσα	27	13,5	-1.56	3.11	-388.50	113500	-3.423E-03	-0.0924
	Μάργα	25	39,5	-1.53	3.05	-388.49	147000	-2.643E-03	-0.0661
	Ενδιάμεσα	14	59	-1.50	3.01	-388.45	113500	-3.422E-03	-0.0479
	Λιγνίτης	52	92	-1.47	2.94	-388.32	80000	-4.854E-03	-0.2524
	Ενδιάμεσα	9	122,5	-1.43	2.87	-388.09	113500	-3.419E-03	-0.0308
	Μάργα (υποκ/νη)	200	227	-1.32	2.64	-386.00	147000	-2.626E-03	-0.5252
Απόλυτο υψόμετρο +649m 1 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-1.0148
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 2 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=1640m)									
Τάση σ <sub>v</sub> ' που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία β (rad)	Γωνία α (rad)	σ <sub>z</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγεμένη παραμόρφωση ε κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
189,00	Μάργα	25	12,5	-1.56	3.11	-189.00	147000	-1.286E-03	-0.0321
	Ενδιάμεσα	14	32	-1.53	3.06	-189.00	113500	-1.665E-03	-0.0233
	Λιγνίτης	52	65	-1.49	2.98	-188.96	80000	-2.362E-03	-0.1228
	Ενδιάμεσα	9	95,5	-1.45	2.91	-188.88	113500	-1.664E-03	-0.0150
	Μάργα (υποκ/νη)	200	200	-1.33	2.66	-187.91	147000	-1.278E-03	-0.2557
Απόλυτο υψόμετρο: +622m 2 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.4489
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 3 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΜΑΡΓΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=1350m)									
Τάση σ <sub>v</sub> ' που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία β (rad)	Γωνία α (rad)	σ <sub>z</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγγεμένη παραμόρφωση ε κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
205,00	Ενδιάμεσα	14	7	-1.56	3.12	-205.00	113500	-1.806E-03	-0.0253
	Λιγνίτης	52	40	-1.51	3.02	-204.98	80000	-2.562E-03	-0.1332
	Ενδιάμεσα	9	70,5	-1.47	2.93	-204.90	113500	-1.805E-03	-0.0162
	Μάργα (υποκ/νη)	200	175	-1.32	2.63	-203.60	147000	-1.385E-03	-0.2770
Απόλυτο υψόμετρο: +597m 3 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.4518

ΑΦΑΙΡΕΣΗ 4 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=1120m)									
Τάση $\sigma_v$ που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία $\beta$ (rad)	Γωνία $\alpha$ (rad)	$\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγμένη παραμόρφωση $\epsilon$ κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
98,00	Λιγνίτης	52	26	-1.52	3.05	-98.00	80000	-1.225E-03	-0.0637
	Ενδιάμεσα	9	56,5	-1.47	2.94	-97.96	113500	-8.631E-04	-0.0078
	Μάργα (υποκ/νη)	200	161	-1.29	2.58	-97.10	147000	-6.606E-04	-0.1321
Απόλυτο υψόμετρο: +583m 4 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.2036
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 5 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΛΙΓΝΙΤΗΣ (ΠΛΑΤΟΣ B=690m)									
Τάση $\sigma_v$ που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία $\beta$ (rad)	Γωνία $\alpha$ (rad)	$\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγμένη παραμόρφωση $\epsilon$ κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
301,60	Ενδιάμεσα	9	4,5	-1.56	3.12	-301.60	113500	-2.657E-03	-0.0239
	Μάργα (υποκ/νη)	200	109	-1.26	2.53	-298.00	147000	-2.027E-03	-0.4054
Απόλυτο υψόμετρο: +531m 5 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0.4294
ΑΦΑΙΡΕΣΗ 6 <sup>ου</sup> ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ: ΕΝΔΙΑΜΕΣΑ (ΠΛΑΤΟΣ B=245m)									
Τάση $\sigma_v$ που ασκεί στην επιφάνεια του υποκείμενου (kN/m <sup>2</sup> )	Στρώματα που επηρεάζονται	Πάχος d (m)	Βάθος επίδρασης (m)	Γωνία $\beta$ (rad)	Γωνία $\alpha$ (rad)	$\sigma_z$ (kN/m <sup>2</sup> )	E (kN/m <sup>2</sup> )	Ανηγμένη παραμόρφωση $\epsilon$ κάθε στρώματος	Αναθόλωση κάθε στρώματος με την αποφόρτιση (m)
63,00	Μάργα (υποκ/νη)	200	100	-0.89	1.77	-55.19	147000	-3.754E-04	-0.0751
Απόλυτο υψόμετρο: +522m 6 <sup>ης</sup> βαθμίδας θεωρούμενης εκσκαφής								Σύνολο	-0,0751

Η αναθόλωση που παρατηρήθηκε σε κάθε στάδιο της εκσκαφής, για καθένα από τα σενάρια, φαίνεται στον Πίνακα 8.7.

**Πίνακας 8.7:** Αναθόλωση σε κάθε στάδιο εκσκαφής (αφαίρεση επιμέρους στρώματος) για κάθε σενάριο, και άθροισμα των αναθολώσεων που αναφέρονται στην υποκείμενη μάργα με την αφαίρεση όλων των στρωμάτων.

ΣΕΝΑΡΙΟ	ΣΤΑΔΙΟ ΕΚΣΚΑΦΗΣ	ΑΠΟΛΥΤΟ ΥΨΟΜΕΤΡΟ ΣΤΑΔΙΟΥ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m)	ΑΝΑΘΟΛΩΣΗ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΣΤΑΔΙΟ ΕΚΣΚΑΦΗΣ (m)	ΑΘΡΟΙΣΜΑ ΑΝΑΘΟΛΩΣΕΩΝ ΥΠΟΚΕΙΜΕΝΗΣ ΜΑΡΓΑΣ (m)
1.	1	+649	-1,3373	-2,4556
	2	+622	-0,5942	
	3	+597	-0,5928	
	4	+583	-0,2677	
	5	+531	-0,6262	
	6	+522	-0,1104	
2.	1	+649	-1,2074	-2,1354
	2	+622	-0,5353	
	3	+597	-0,5357	
	4	+583	-0,2416	
	5	+531	-0,5461	
	6	+522	-0,0960	
3.	1	+649	-0,7660	-1,0914
	2	+622	-0,3394	
	3	+597	-0,3451	
	4	+583	-0,1558	
	5	+531	-0,2827	
	6	+522	-0,0491	
4.	1	+649	-1,0148	-1,6705
	2	+622	-0,4489	
	3	+597	-0,4518	
	4	+583	-0,2036	
	5	+531	-0,4294	
	6	+522	-0,0751	

## 9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 9.1 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Το μέτρο ελαστικότητας της μάργας, υπολογίστηκε και από τις δύο δοκιμές που εφαρμόστηκαν σε δείγματα αυτής. Η διαφοροποίηση μεταξύ των τιμών που προέκυψαν είναι εμφανής, γεγονός που οφείλεται κυρίως στη διαφορά στη φύση μεταξύ της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης και στερεοποίησης αφού η δεύτερη, σε αντίθεση με την πρώτη πραγματοποιείται σε συνθήκες αποστράγγισης. Για το λόγο αυτό υποστηρίζεται ότι ουσιαστικά πρόκειται για διαφορετικές παραμέτρους και ότι το  $E$  που υπολογίζεται με βάση τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης αντιστοιχεί στο μέτρο δυστροπίας του υλικού και όχι στο μέτρο ελαστικότητας αυτού.

Για τον ακριβή προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας του υλικού, εξετάζεται η συμπεριφορά του σε διαδοχικές φορτίσεις-αποφορτίσεις. Η διαδικασία όμως που ακολουθήθηκε κατά την εκτέλεση των δοκιμών της στερεοποίησης στην παρούσα εργασία, περιελάμβανε μόνο μια αποφόρτιση του δοκιμίου χωρίς να ακολουθήσουν άλλα στάδια φόρτισης και αποφόρτισης αυτού. Έτσι, τα μέτρα ελαστικότητας που προέκυψαν εμπεριέχουν ένα σφάλμα το οποίο αφορά τη συγκεκριμένη μέθοδο προσδιορισμού τους, είναι όμως της αναμενόμενης τάξης μεγέθους οπότε δεν διαφοροποιούν κατά πολύ το αποτέλεσμα της αναθόλωσης, στον υπολογισμό του οποίου υπεισέρχονται.

Το εδαφικό δοκίμιο στη δοκιμή συμπιεστότητας προσομοιώνει καλύτερα τις φυσικές συνθήκες κατά τη διαδικασία της αποφόρτισης παρά κατά τη φόρτιση. Έτσι, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας που υπολογίστηκε με βάση το σύνολο των σταδίων αποφόρτισης και η οποία ανέρχεται στα 225MPa, θεωρείται και η πιο αποδεκτή. Η τιμή αυτή είναι αρκετά υψηλότερη αυτής που προέκυψε από τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης όμως ουσιαστικά δεν τίθεται θέμα σύγκρισης αφού όπως προαναφέρθηκε, οι δύο δοκιμές υπολογίζουν διαφορετικές παραμέτρους.

Από τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης και με βάση τη θεωρία ότι το δοκίμιο κινείται στην ελαστική περιοχή για πολύ μικρές τιμές της παραμόρφωσης, επομένως και μικρό

εύρος τάσεων φόρτισης, το  $E_{initial}$  προσεγγίζει καλύτερα το μέτρο ελαστικότητας της μάργας. Η μέση τιμή του προέκυψε με βάση τις επιμέρους καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης που αντιστοιχούν σε καθένα από τα δοκίμια που υποβλήθηκαν στη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης, ανέρχεται στα 111MPa.

## 9.2 ΑΝΙΣΟΤΡΟΠΙΑ

Όπως προκύπτει από το συγκεντρωτικό πίνακα των αποτελεσμάτων της δοκιμής ανεμπόδιστης θλίψης (Κεφάλαιο 6), τα δείγματα που εξετάστηκαν παρουσιάζουν διαφορές όσο αφορά την ανισοτροπία. Οι τιμές της ανισοτροπίας εξετάστηκαν με βάση τα πηλίκια των  $E_{50}$  και  $E_{initial}$  για τα κάθετα και παράλληλα στη στρώση δοκίμια όπως υποδεικνύουν οι Shogaki & Moro, (1997).

Ειδικότερα το δείγμα Γ3 προκύπτει ότι είναι ισότροπο με μέση τιμή των δύο πηλίκων 0,96, ενώ τα άλλα δύο (Α2 και Γ1) εμφανίζονται ανισότροπα με μέση τιμή 1,57 και 1,61 αντίστοιχα. Παρουσιάζεται λοιπόν μια ανομοιογένεια όσο αφορά την ανισοτροπία του υλικού για τα δείγματα που προέρχονται από διαφορετικές μεταξύ τους θέσεις.

## 9.3 ΤΑΣΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ

Για τα δείγματα της μάργας που χρησιμοποιήθηκαν στις διάφορες δοκιμές, υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 4 η ενεργή τάση  $P_0$  στην οποία αυτά υποβάλλονταν στις θέσεις από όπου προέρχονται, πριν την έναρξη της εκσκαφής. Με βάση τη δοκιμή συμπίεστότητας υπολογίστηκαν και οι τάσεις προφόρτισης  $P_c$  των δειγμάτων αυτών. Ο λόγος προστερεοποίησης **OCR** που προέκυψε για τα επιμέρους δείγματα της μάργας είναι γενικά πολύ κοντά στη μονάδα με μέση τιμή την 0,999, γεγονός που αποδεικνύει ότι η μάργα της περιοχής του ορυχείου του Τομέα 6 δεν είναι προστερεοποιημένη.

Σε παλαιότερη έρευνα του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας για τις μάργες της περιοχής του Τομέα 6 δεν είχε καταστεί δυνατός ο προσδιορισμός της τάσης προστερεοποίησης, λόγω κακών συνθηκών αποθήκευσης-διατήρησης των δειγμάτων. Για το λόγο αυτό δεν υφίσταται θέμα σύγκρισης, επομένως τα αποτελέσματα παρατίθενται με κάθε επιφύλαξη.

#### 9.4 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ

Ο συντελεστής συμπίεστότητας της μάργας, παρουσιάζεται αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν του λιγνίτη, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 7. Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι η μάργα αναμένεται να συμπιέζεται με πολύ μεγαλύτερο ρυθμό κάτω από την επιβολή φόρτισης από ότι ο λιγνίτης. Η μέση τιμή του συντελεστή συμπίεστότητας της μάργας είναι  $53,64 \text{ m}^2/\text{year}$ , ενώ αυτή του λιγνίτη είναι μια τάξη μεγέθους μικρότερη με μέση τιμή τα  $5 \text{ m}^2/\text{year}$ .

#### 9.5 ΑΝΑΘΩΛΩΣΗ

Η αναθώλωση που είναι πιθανό να παρουσιαστεί στο ορυχείο του Τομέα 6 λόγω της ανακούφισης του εδάφους από την απομάκρυνση των υπερκειμένων, υπολογίστηκε στο Κεφάλαιο 8. Οι υπολογισμοί έγιναν για ένα απλουστευμένο μοντέλο εκσκαφής, από το οποίο όμως μπορούν να προκύψουν κάποια συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του εδάφους.

Από την παραμετρική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε (Σενάρια 1-4) με διαφορετικούς συνδυασμούς μέτρων ελαστικότητας για καθεμία από τις περιπτώσεις, η πιο αποδεκτή λύση είναι αυτή που προέκυψε από το Σενάριο 3. Στο σενάριο αυτό, το μέτρο ελαστικότητας της μάργας που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της αναθώλωσης, είναι αυτό που προέκυψε μόνο από τα στάδια της αποφόρτισης που πραγματοποιήθηκαν κατά τη δοκιμή στερεοποίησης. Το μέτρο ελαστικότητας που προκύπτει από αυτή τη διαδικασία, είναι αυτό που προσεγγίζει καλύτερα την πραγματικότητα, αφού όπως προαναφέρθηκε το εδαφικό δοκίμιο στη δοκιμή συμπίεστότητας κινείται στην ελαστική περιοχή και προσομοιώνει καλύτερα τις φυσικές συνθήκες κατά τη διαδικασία της αποφόρτισης παρά κατά τη φόρτιση. Η αναθώλωση που υπολογίστηκε με βάση αυτό το μέτρο ελαστικότητας ανέρχεται στα 1,1m.

Θεωρείται ότι η συνολική αναθώλωση που υπολογίστηκε, αντιστοιχεί στο κέντρο της εκσκαφής και αναμένεται να μειώνεται προς την περιφέρεια αυτής. Με βάση λοιπόν τα αποτελέσματα των παραπάνω υπολογισμών, αναμένεται μια διόγκωση του εδάφους λόγω αποφόρτισης που κυμαίνεται μεταξύ 1,1 και 2,5m περίπου. Το γεγονός αυτό

αποδεικνύει ότι η εμφάνιση αναθολώσεων που προβληματίζει τους υπεύθυνους του ορυχείου, οφείλεται στην ανακούφιση του εδάφους λόγω αποφόρτισής του, αφού το βάθος της εκσκαφής, επομένως και ο όγκος των υπερκειμένων που απομακρύνεται είναι αρκετά μεγάλα.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**



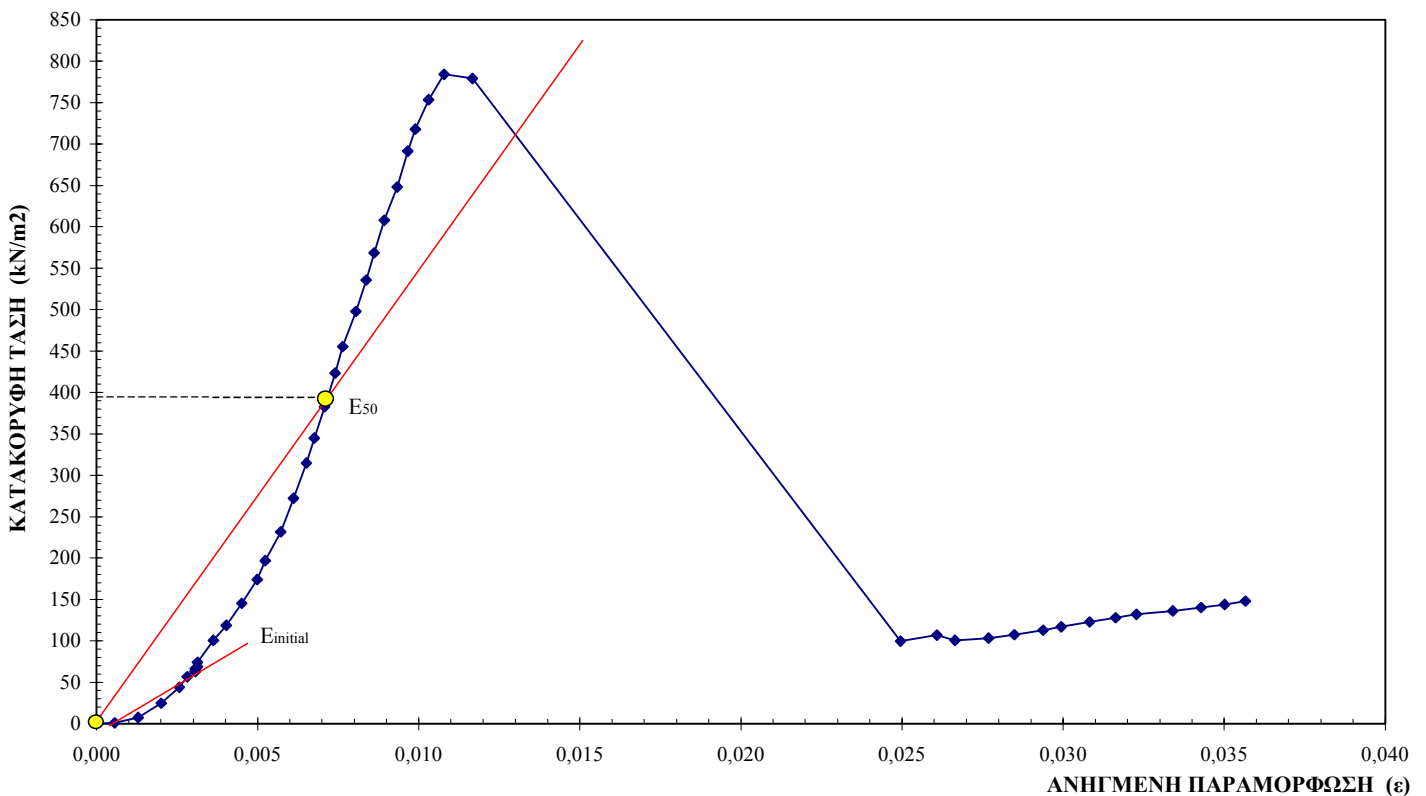
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Τομέας:	6
Θέση:	A
Δείγμα:	2
Ημερομηνία δειγματοληψίας:	6/8/1999
<b>Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση</b>	
Υψος δοκιμίου ( $L_0$ , mm):	124,25
Διάμετρος δοκιμίου (D, mm):	49,05
Αρχική επιφάνεια δοκιμίου ( $A_0$ , mm <sup>2</sup> ):	1889,5914
Συντελεστής μετατροπής δακτυλίου: 2,030 N/div	
Ταχύτητα φόρτισης: 1,5 mm/min	
Βάρος υγρού δείγμ. και υποδοχέα (gr):	64,51
Βάρος ξηρού δείγμ. και υποδοχέα (gr):	59,70
Βάρος υποδοχέα (gr):	46,60
Υγρασία (%):	36,72%
$q_u$ (kN/m <sup>2</sup> ):	784,288
$\varepsilon$ (%) κατά τη θραύση:	1,078

## ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Τομέας 6, Θέση A, Δείγμα 2

Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση

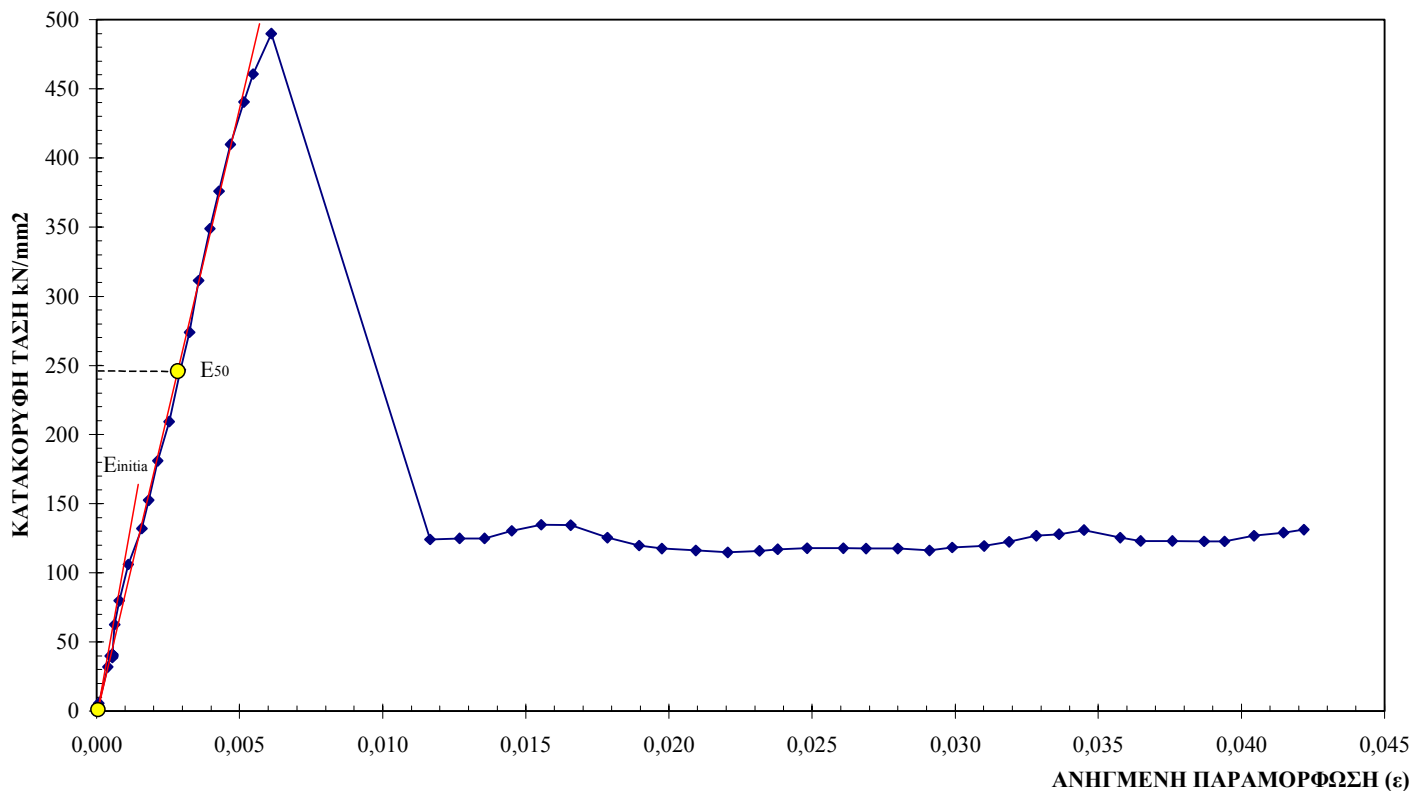


Τομέας:	6
Θέση:	A
Δείγμα:	2
Ημερομηνία δειγματοληψίας:	6/8/1999
<b>Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση</b>	
Υψος δοκιμίου ( $L_0$ , mm):	126,10
Διάμετρος δοκιμίου ( $D$ , mm):	47,60
Αρχική επιφάνεια δοκιμίου ( $A_0$ , mm <sup>2</sup> ):	1779,5237
Συντελεστής μετατροπής δακτυλίου: 2,030 N/div	
Ταχύτητα φόρτισης: 1,5 mm/min	
Βάρος υγρού δείγμ. και υποδοχέα (gr):	63,18
Βάρος ξηρού δείγμ. και υποδοχέα (gr):	58,14
Βάρος υποδοχέα (gr):	46,46
Υγρασία (%):	43,15%
$q_u$ (kN/m <sup>2</sup> ):	489,797
$\varepsilon$ (%) κατά τη θραύση:	0,611

## ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

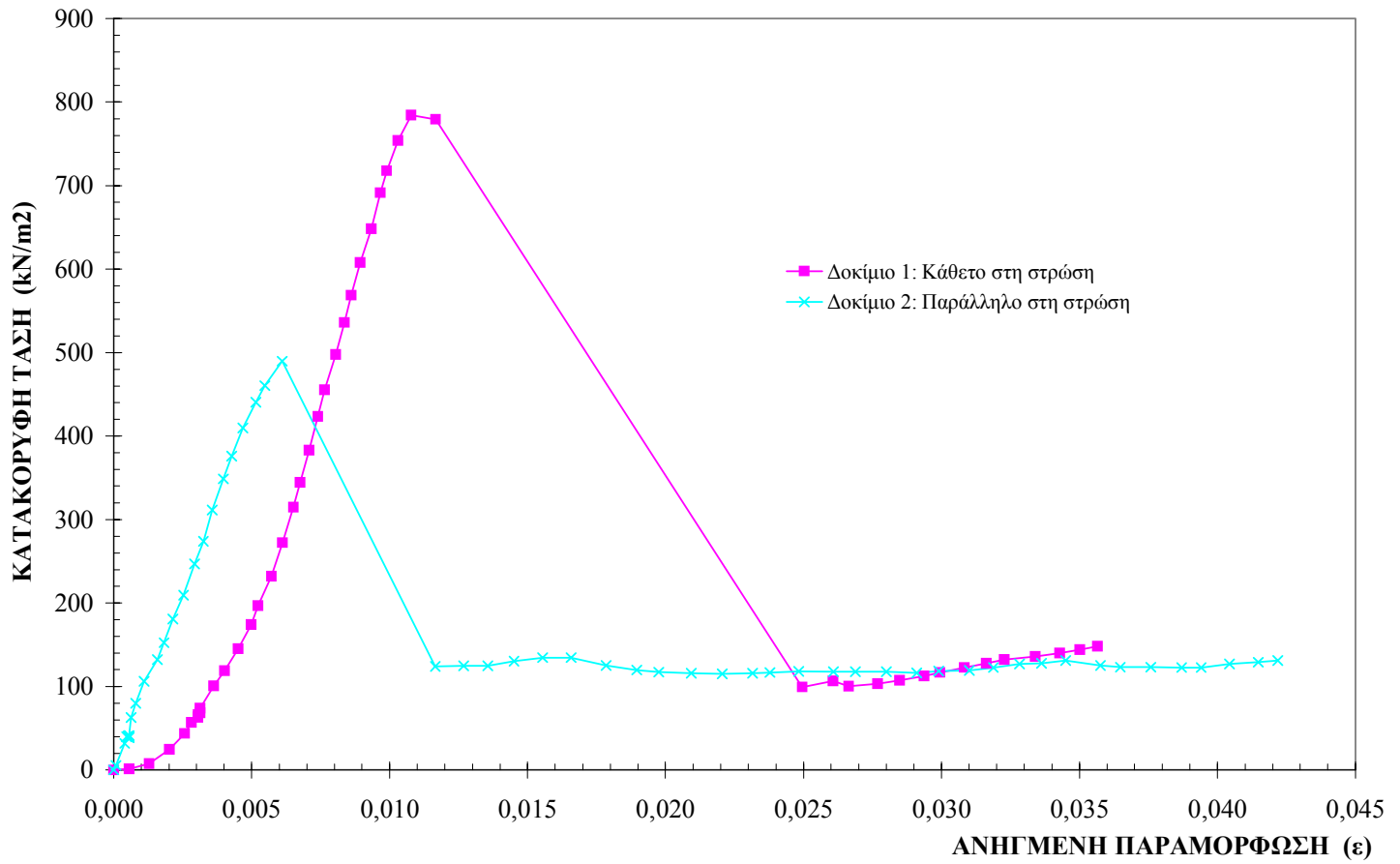
Τομέας 6, Θέση A, Δείγμα 2

Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση



## ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Τομέας 6, Θέση Α, Δείγμα 2



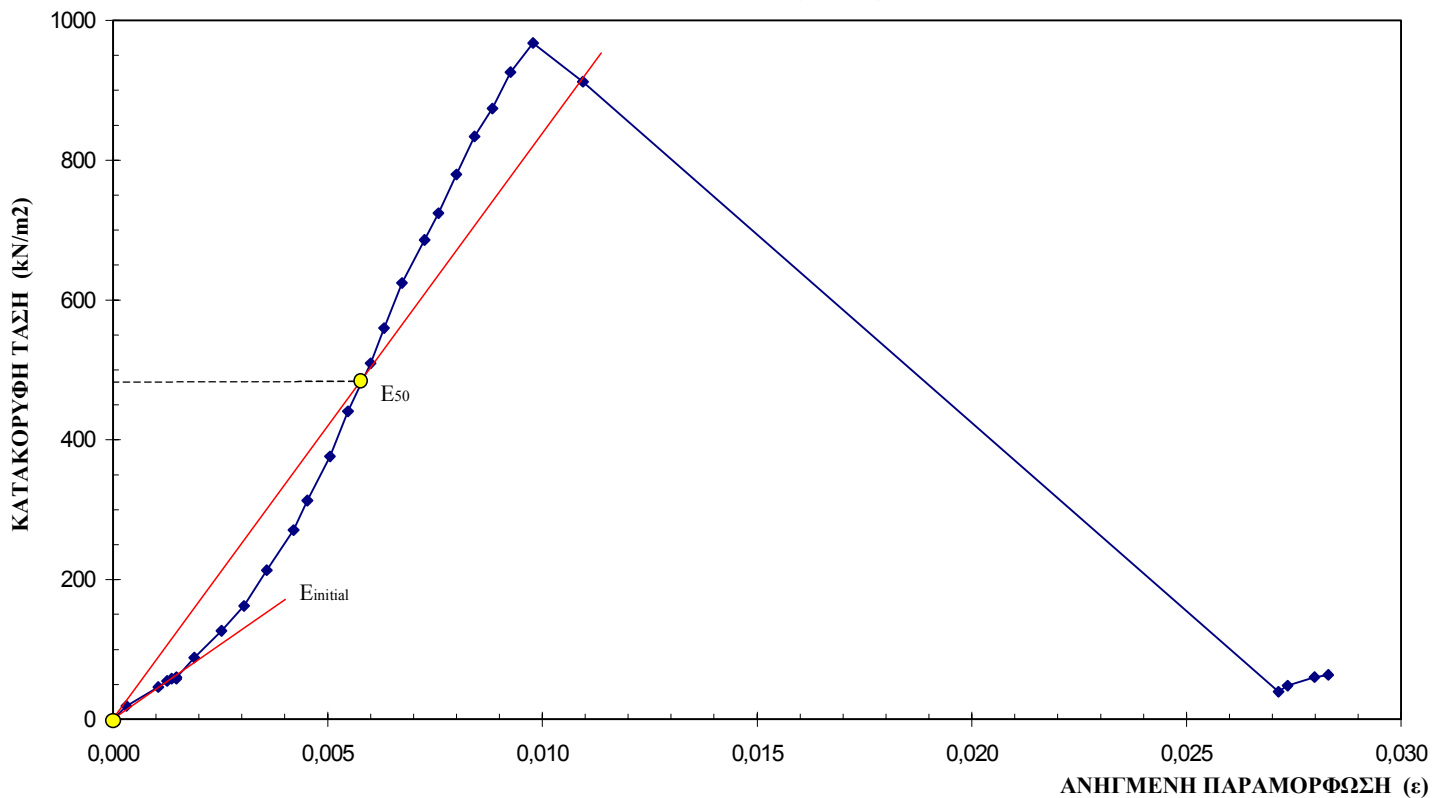
$E_{initial}(V) = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{56,778 - 43,933}{0,00282 - 0,00258} = 53520,833$	$E_{50}(V) = \frac{dy}{dx} = \frac{275 - 0}{0,005 - 0} = 55000$
$E_{initial}(H) = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{39,907 - 5,703}{0,00048 - 0,00008} = 85510,000$	$E_{50}(H) = \frac{dy}{dx} = \frac{170 - 0}{0,002 - 0} = 85000$
$A = \frac{E_{initial}(H)}{E_{initial}(V)} = \frac{85510,000}{53520,833} = 1,598$	$B = \frac{E_{50}(H)}{E_{50}(V)} = \frac{85000}{55000} = 1,545$

Τομέας:	<b>6</b>	
Θέση:	<b>Γ</b>	
Δείγμα:	<b>1</b>	
Ημερομηνία δειγματοληψίας:	<b>6/8/1999</b>	
<b>Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση</b>		
Υψος δοκιμίου ( $L_0$ , mm):	<b>95,05</b>	
Διάμετρος δοκιμίου ( $D$ , mm):	<b>38,25</b>	
Αρχική επιφάνεια δοκιμίου ( $A_0$ , mm <sup>2</sup> ):	<b>1149,0866</b>	
Συντελεστής μετατροπής δακτυλίου: 2,030 N/div		
Ταχύτητα φόρτισης: 1,5 mm/min		
Βάρος υγρού δείγμ. και υποδοχέα (gr):	<b>48,42</b>	
Βάρος ξηρού δείγμ. και υποδοχέα (gr):	<b>46,49</b>	
Βάρος υποδοχέα (gr):	<b>41,27</b>	
Υγρασία (%):	<b>36,97%</b>	
$q_u$ (kN/m <sup>2</sup> ):	<b>967,382</b>	
$\varepsilon$ (%) κατά τη θραύση:	<b>0,978</b>	

## ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΑΛΙΨΗΣ

Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 1

Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση

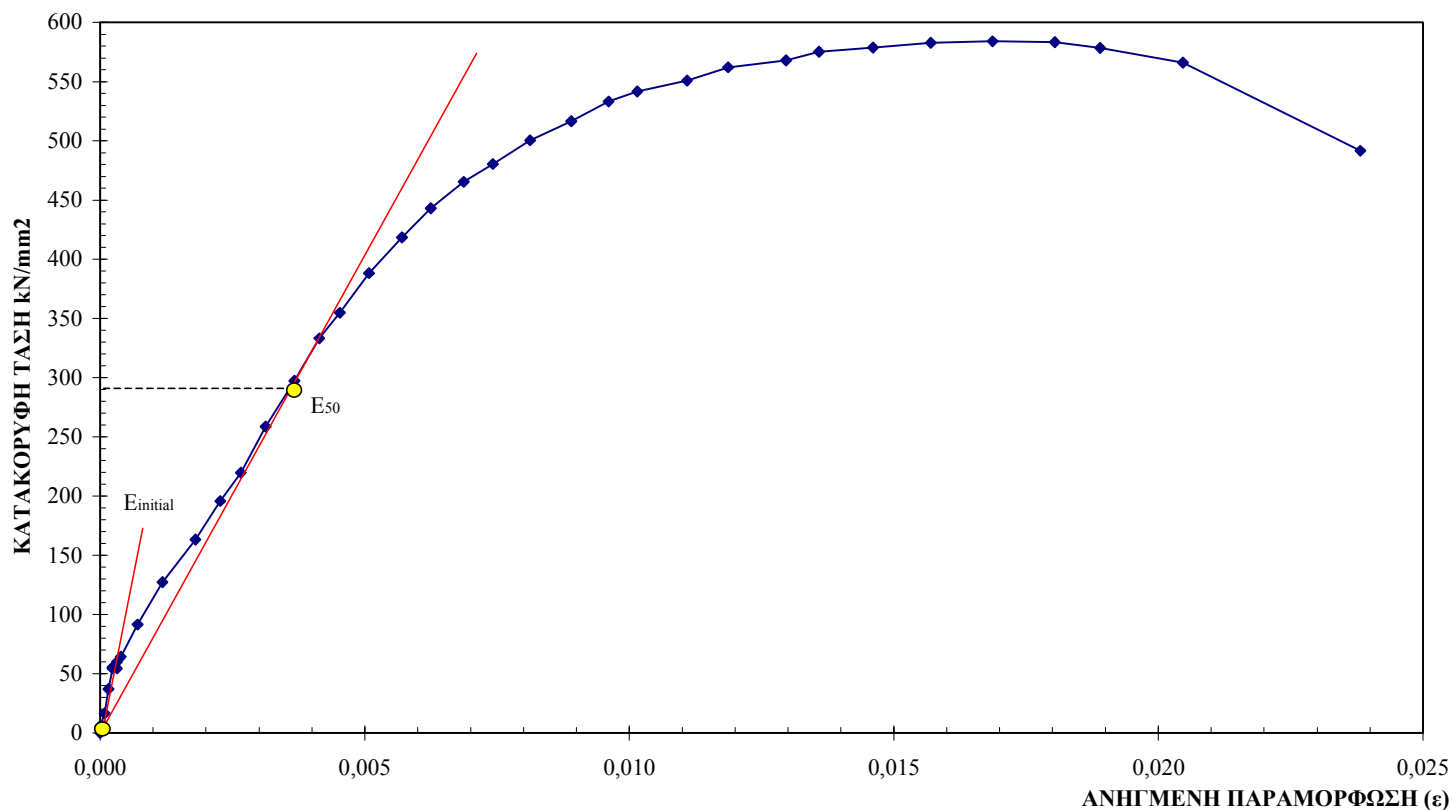


Τομέας:	6
Θέση:	Γ
Δείγμα:	1
Ημερομηνία δειγματοληψίας:	6/8/1999
Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση	
Υψος δοκιμίου (L <sub>0</sub> , mm):	128,05
Διάμετρος δοκιμίου (D, mm):	48,70
Αρχική επιφάνεια δοκιμίου (A <sub>0</sub> , mm <sup>2</sup> ):	1862,721
Συντελεστής μετατροπής δακτυλίου: 2,030 N/div	
Ταχύτητα φόρτισης: 2 mm/min	
Βάρος υγρού δείγμ. και υποδοχέα (gr):	60,97
Βάρος ξηρού δείγμ. και υποδοχέα (gr):	57,29
Βάρος υποδοχέα (gr):	47,52
Υγρασία (%):	37,67%
q <sub>u</sub> (kN/m <sup>2</sup> ):	583,924
ε (%) κατά τη θραύση:	1,687

## ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

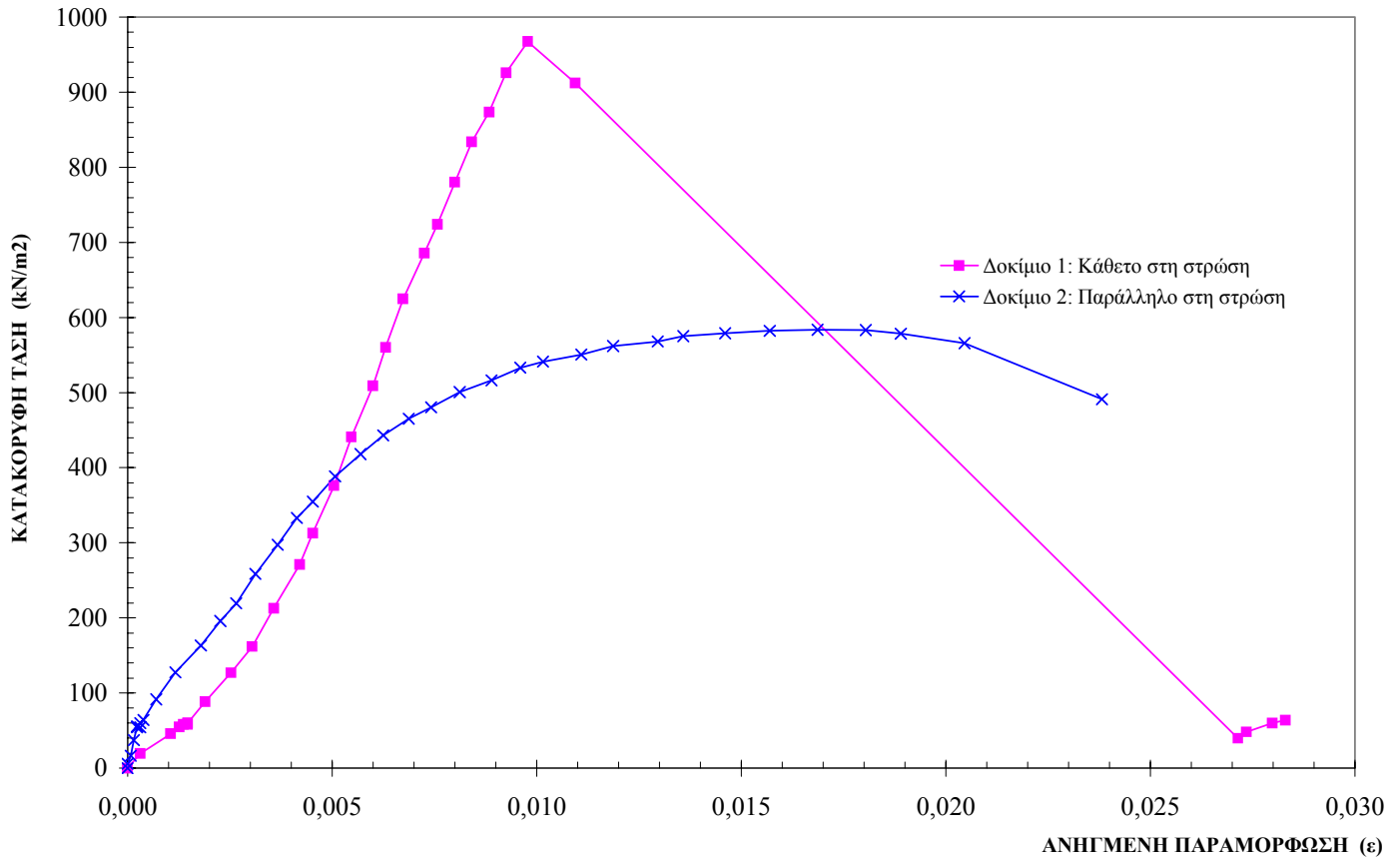
Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 1

Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση



## ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 1



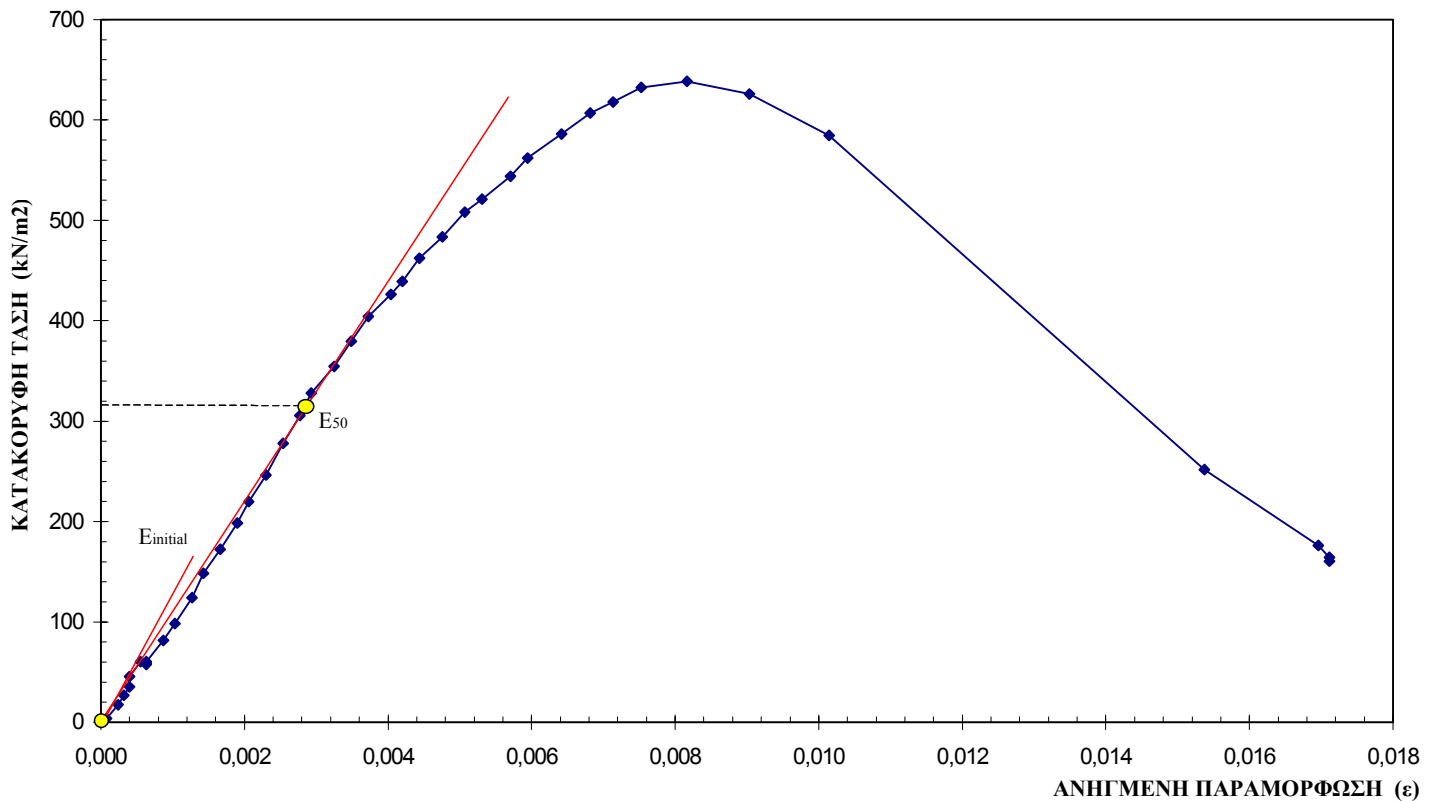
$E_{initial}(V) = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{54,696 - 0,000}{0,00126 - 0,000} = 43409,524$	$E_{50}(V) = \frac{dy}{dx} = \frac{313,036 - 88,164}{0,00452 - 0,00189} = 85502,662$
$E_{initial}(H) = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{64,273 - 0,000}{0,00039 - 0,000} = 164802,564$	$E_{50}(H) = \frac{dy}{dx} = \frac{258,563 - 219,556}{0,00312 - 0,00266} = 84797,826$
$A = \frac{E_{initial}(H)}{E_{initial}(V)} = \frac{164802,564}{43409,524} = 3,796$	$B = \frac{E_{50}(H)}{E_{50}(V)} = \frac{84797,826}{85502,662} = 0,991$

Τομέας:	6	
Θέση:	Γ	
Δείγμα:	3	
Ημερομηνία δειγματοληψίας:	6/8/1999	
Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση		
Υψος δοκιμίου (L <sub>0</sub> , mm):	126,20	
Διάμετρος δοκιμίου (D, mm):	52,75	
Αρχική επιφάνεια δοκιμίου (A <sub>0</sub> , mm <sup>2</sup> ):	2185,4195	
Συντελεστής μετατροπής δακτυλίου: 2,030 N/div		
Ταχύτητα φόρτισης: 1,5 mm/min		
Βάρος υγρού δείγμ. και υποδοχέα (gr):	50,12	
Βάρος ξηρού δείγμ. και υποδοχέα (gr):	46,84	
Βάρος υποδοχέα (gr):	39,75	
Υγρασία (%):	46,26%	
q <sub>u</sub> (kN/m <sup>2</sup> ):	638,462	
ε (%) κατά τη θραύση:	0,816	

## ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 3

Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση

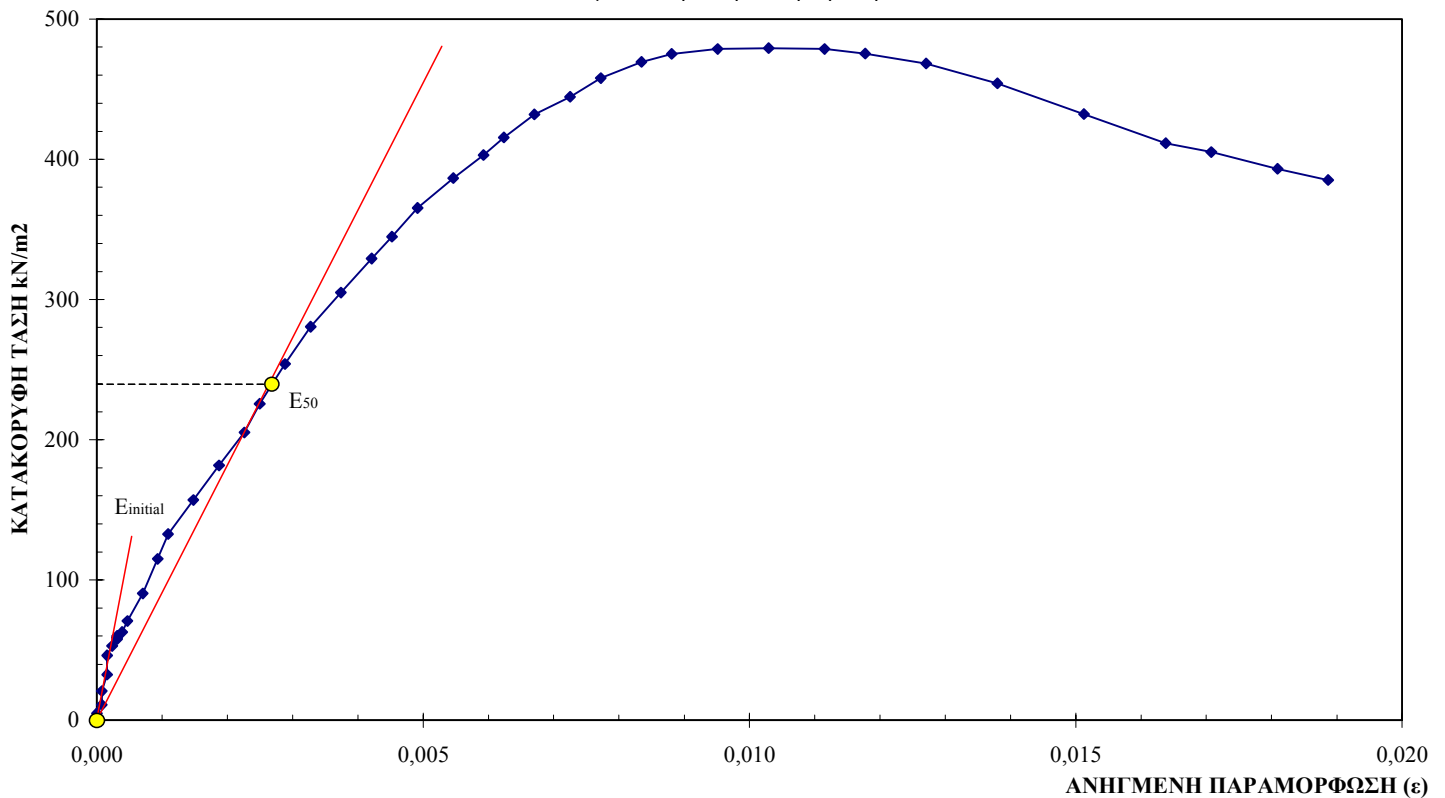


Τομέας:	6	
Θέση:	Γ	
Δείγμα:	3	
Ημερομηνία δειγματοληψίας:	6/8/1999	
Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση		
Υψος δοκιμίου (L <sub>0</sub> , mm):	128,25	
Διάμετρος δοκιμίου (D, mm):	51,25	
Αρχική επιφάνεια δοκιμίου (A <sub>0</sub> , mm <sup>2</sup> ):	2062,8974	
Συντελεστής μετατροπής δακτυλίου: 2,030 N/div		
Ταχύτητα φόρτισης: 2 mm/min		
Βάρος υγρού δείγμ. και υποδοχέα (gr):	74,52	
Βάρος ξηρού δείγμ. και υποδοχέα (gr):	65,43	
Βάρος υποδοχέα (gr):	46,36	
Υγρασία (%):	47,67%	
q <sub>u</sub> (kN/m <sup>2</sup> ):	479,171	
ε (%) κατά τη θραύση:	1,029	

## ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

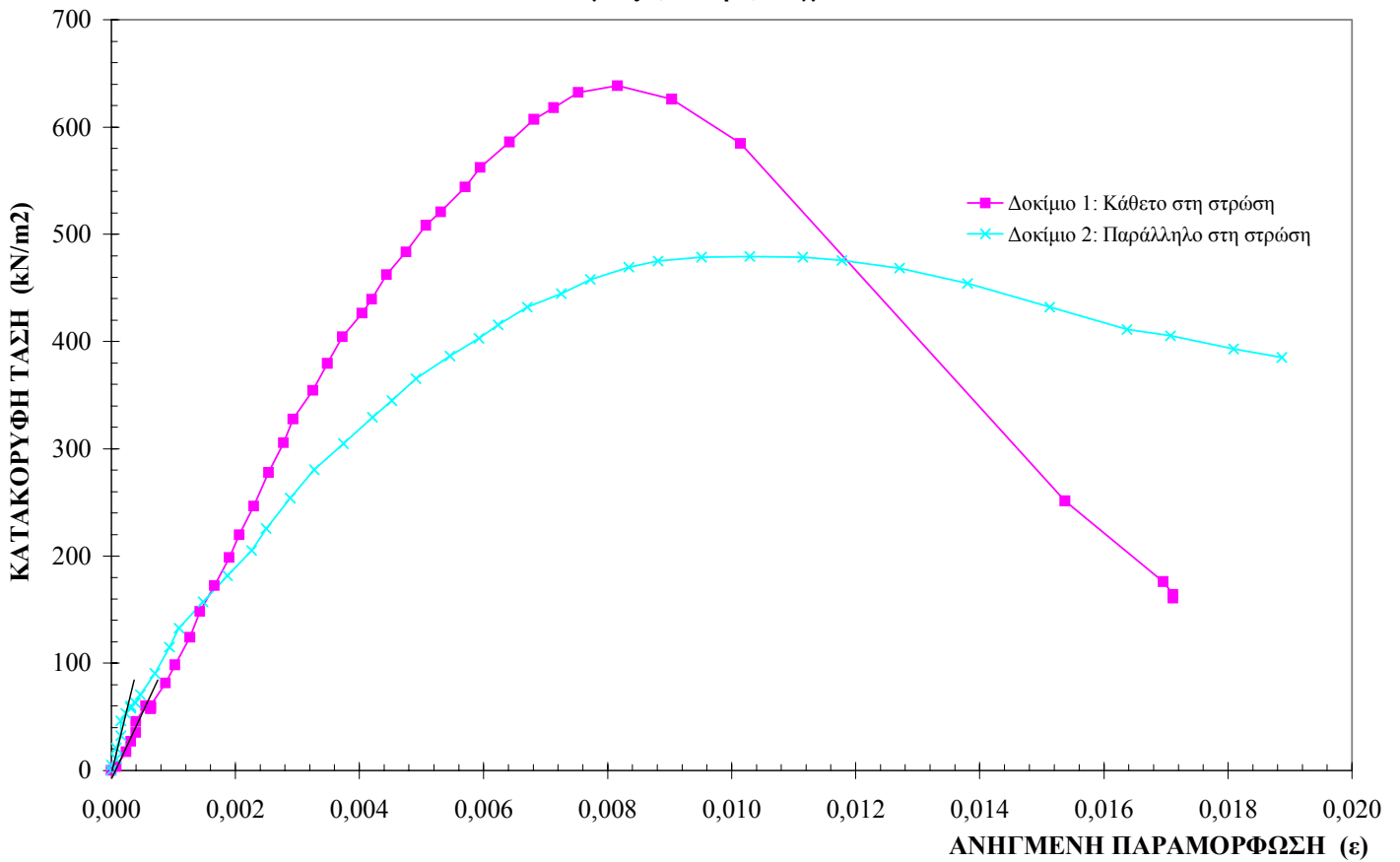
Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 3

Δοκίμιο 2: Παράλληλο στη στρώση





**ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ**  
**Τομέας 6, Θέση Γ, Δείγμα 3**



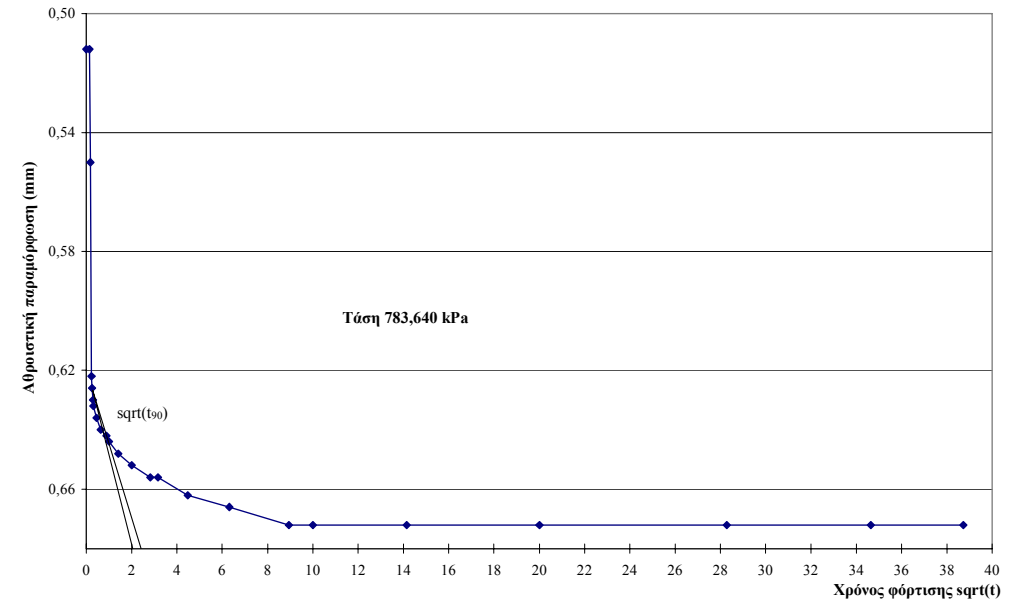
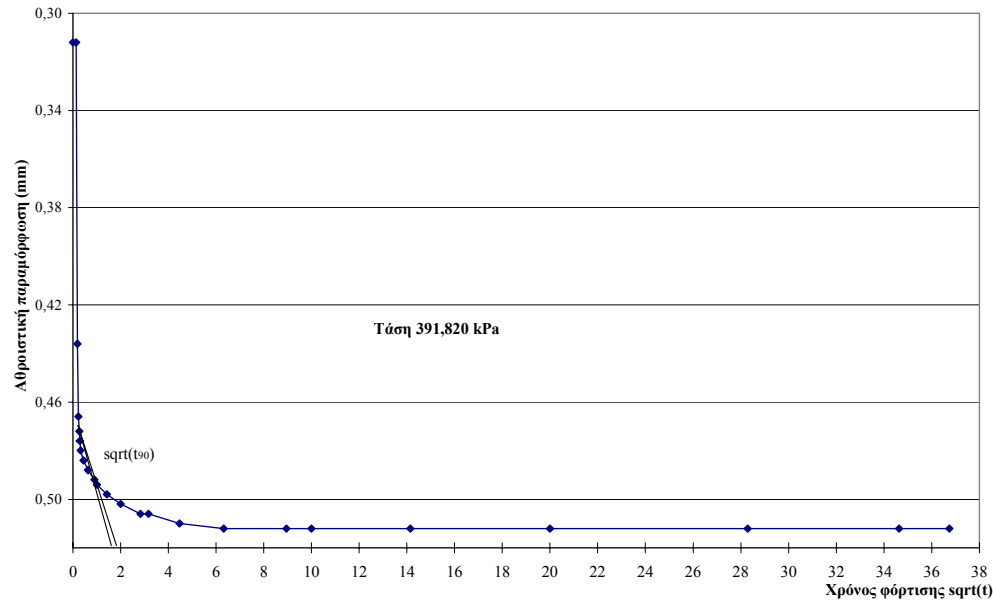
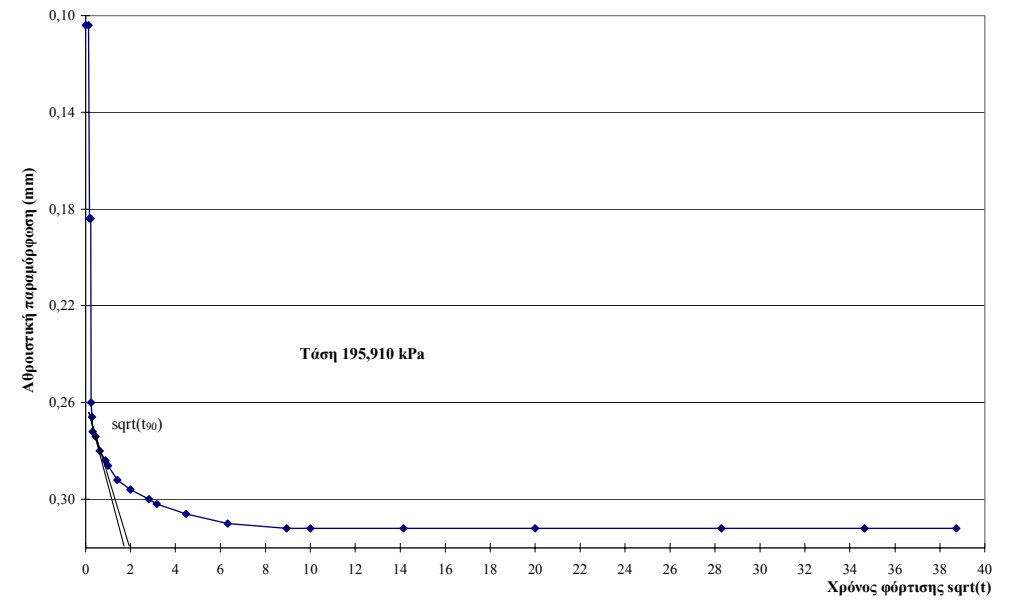
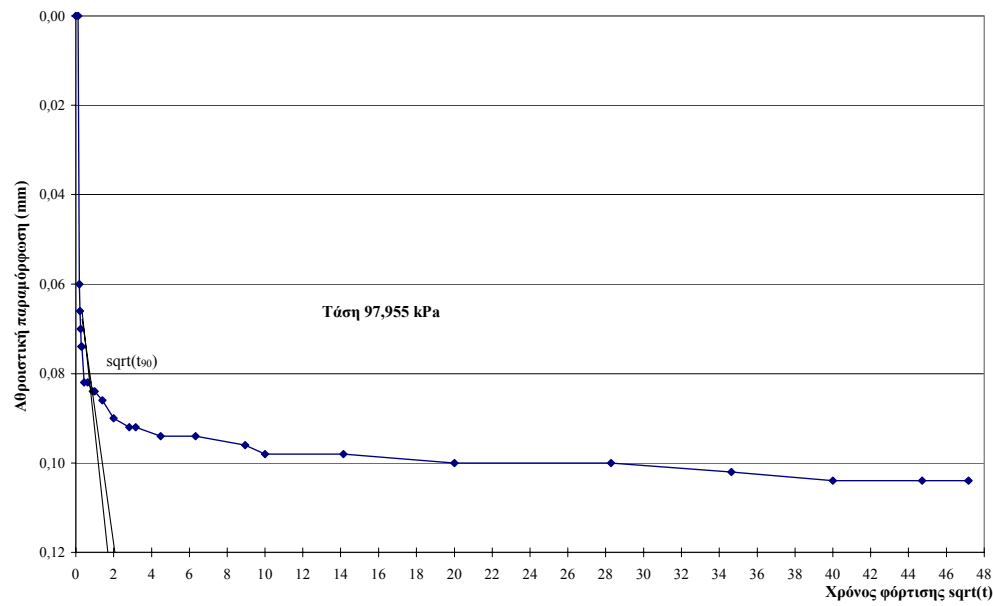
$E_{initial}(V) = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{45,497 - 3,715}{0,00040 - 0,00016} = 174091,667$	$E_{50}(V) = \frac{dy}{dx} = \frac{198,403 - 148,409}{0,00190 - 0,00143} = 106370,213$
$E_{initial}(H) = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \frac{59,025 - 4,920}{0,00031 - 0,00000} = 174532,258$	$E_{50}(H) = \frac{dy}{dx} = \frac{181,709 - 20,663}{0,00187 - 0,00008} = 89969,832$
$A = \frac{E_{initial}(H)}{E_{initial}(V)} = \frac{174532,258}{174091,667} = 1,002$	$B = \frac{E_{50}(H)}{E_{50}(V)} = \frac{89969,832}{106370,213} = 0,846$

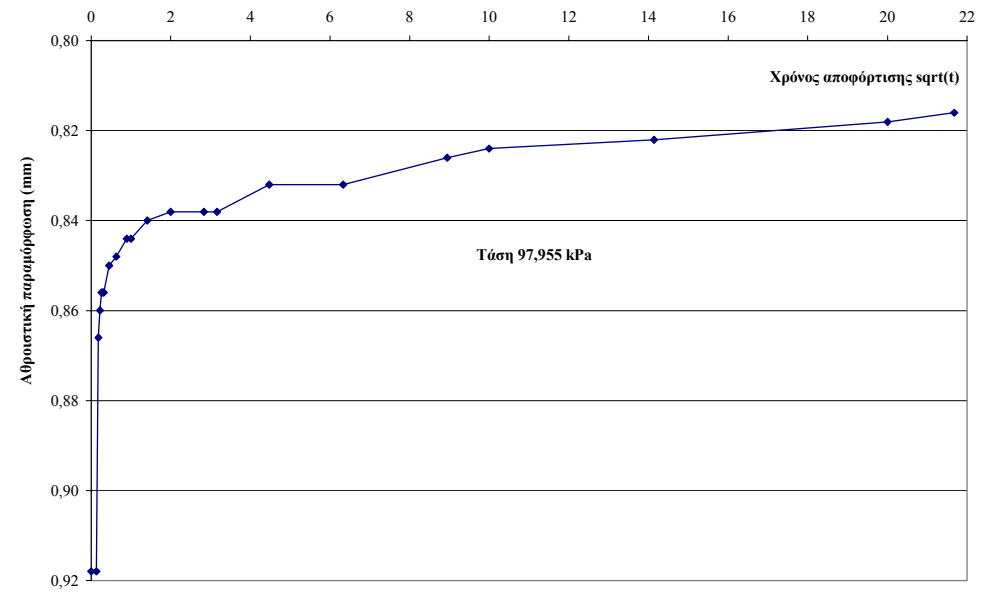
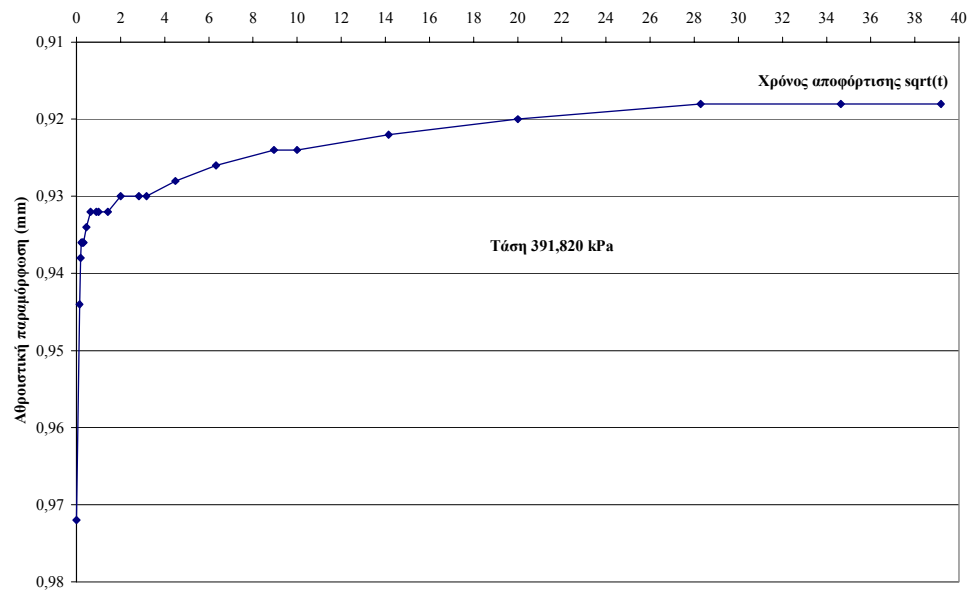
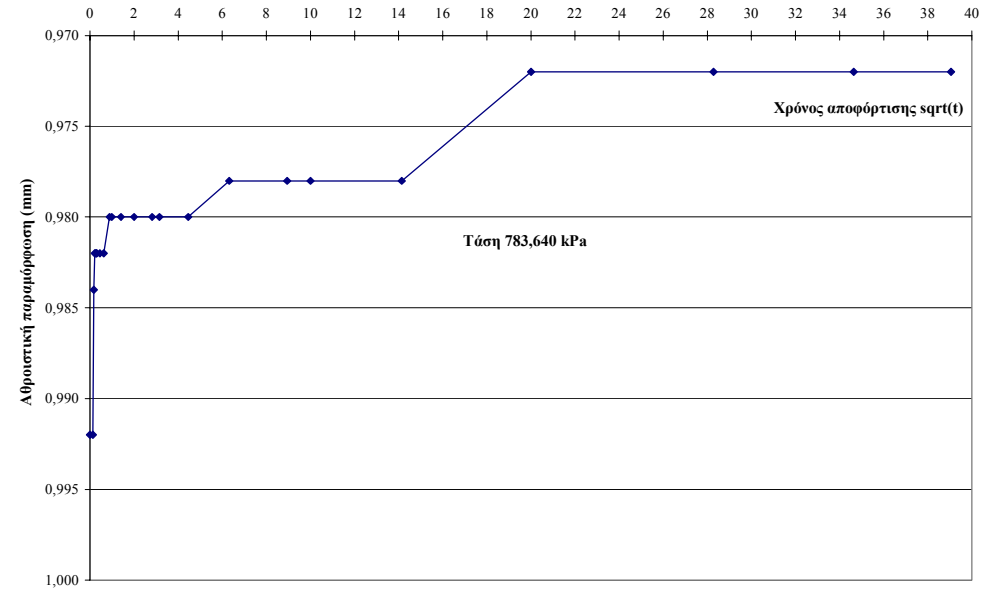
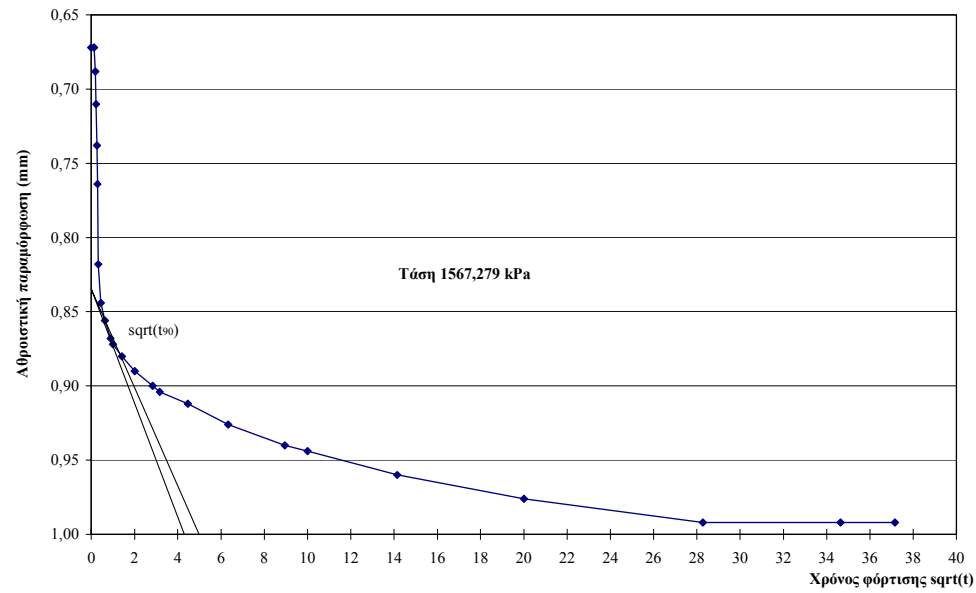
## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

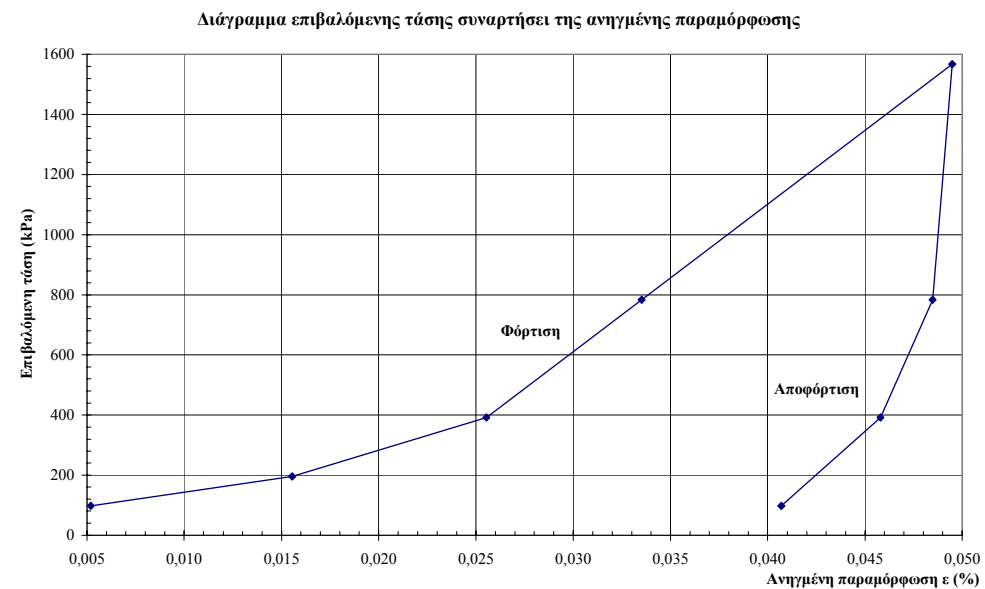
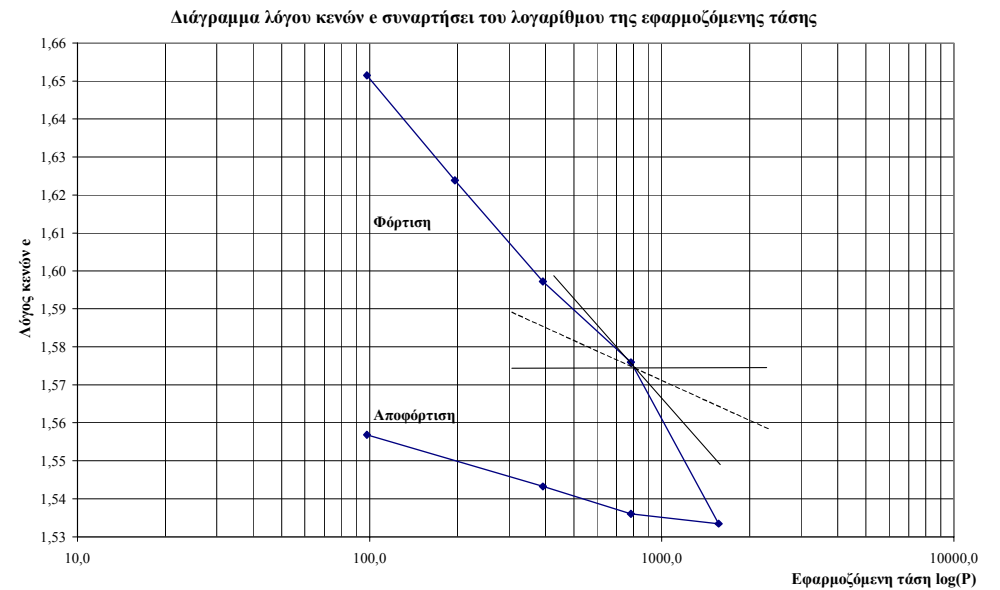
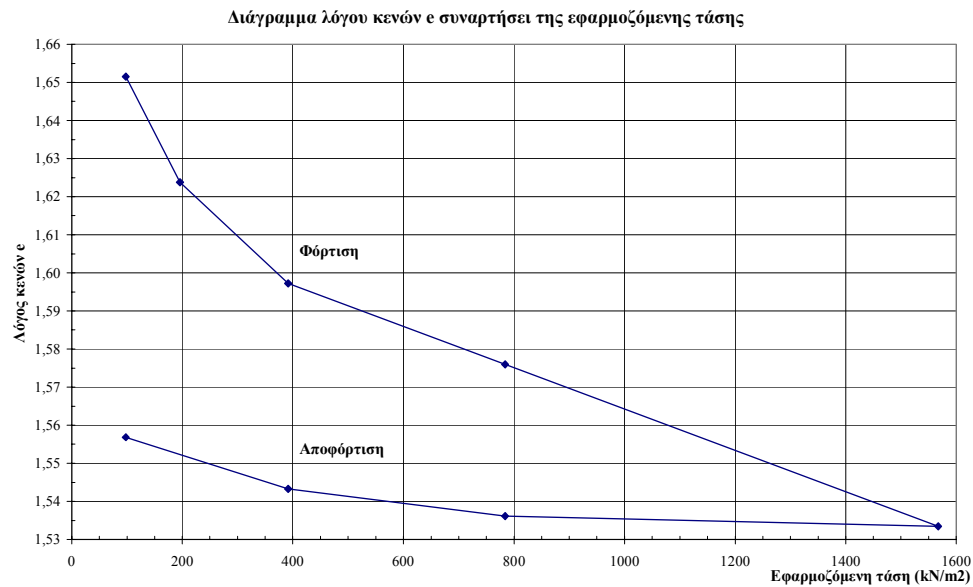
**Πίνακας 1:** Αποτελέσματα δοκιμής στερεοποίησης για το κάθετο στη στρώση δοκίμιο του δείγματος Α1.

<b>ΤΟΜΕΑΣ:</b>	<b>6</b>	<b>Τάση P (kPa)</b>	<b>ΔH (mm)</b>	<b>Δe=ΔH/H<sub>s</sub></b>	<b>e=e<sub>0</sub>-Δe</b>	<b>ε</b>	<b>Δε</b>	<b>ΔP (kPa)</b>	<b>E (kN/m<sup>2</sup>)</b>
<b>ΘΕΣΗ:</b>	<b>A</b>	97,955	0,104	0,01383	1,65148	0,00519	-	-	-
<b>ΔΕΙΓΜΑ:</b>	<b>1</b>	195,910	0,312	0,04148	1,62383	0,01556	0,0104	97,955	9442,29
<b>Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση</b>		391,820	0,512	0,06806	1,59724	0,02554	0,0100	195,910	19639,97
<b>Διάμ. δοκιμ. D (mm):</b>	50,50	783,640	0,672	0,08933	1,57597	0,03352	0,0080	391,820	49099,92
<b>Υψος δοκιμίου H<sub>0</sub> (mm):</b>	20,05	1567,279	0,992	0,13187	1,53344	0,04948	0,0160	783,640	49099,92
<b>Επιφ. δοκιμίου A (mm<sup>2</sup>):</b>	2002,96	783,640	0,972	0,12921	1,53609	0,04848	-0,0010	-783,640	785598,66
<b>Όγκος δοκιμίου (mm<sup>3</sup>):</b>	40159,38	391,820	0,918	0,12203	1,54327	0,04579	-0,0027	-391,820	145481,23
<b>Ισοδ. ύψος εδαφ. κόκκων H<sub>s</sub> (mm):</b>	7,5226	97,955	0,816	0,10847	1,55683	0,04070	-0,0051	-293,865	57764,61
<b>Αρχική υγρασία w<sub>i</sub> (%):</b>	63,47								<b>159446,66</b>
<b>Τελική υγρασία w<sub>f</sub> (%):</b>	63,81								
<b>Πυκν. νερού ρ<sub>w</sub> (Mg/m<sup>3</sup>):</b>	1,000	<b>C<sub>c</sub></b>	<b>α<sub>v</sub> (m<sup>2</sup>/kN)</b>	<b>m<sub>v</sub> (m<sup>2</sup>/MN)</b>	<b>P<sub>c</sub></b>	<b>d</b>	<b>t<sub>90</sub></b>	<b>C<sub>v</sub> (m<sup>2</sup>/year)</b>	<b>k (m/sec)</b>
<b>Αρχικός λόγος κενών e<sub>0</sub>:</b>	1,66531	-	-	-	783,64	9,999	0,56	79,221	-
<b>Φαιν. βάρος εδάφους γ (kN/m<sup>3</sup>):</b>	15,16	0,0919	2,82E-04	0,1059		9,947	0,72	61,038	2,01E-09
<b>Κορ. φαιν. βάρ. εδάφους γ<sub>sat</sub> (kN/m<sup>3</sup>):</b>	15,40	0,0883	1,36E-04	0,0509	<b>P<sub>0</sub></b>	9,897	1,00	43,657	6,91E-10
<b>Αρχ. μάζα δοκιμίου m<sub>0</sub> (gr):</b>	62,07	0,0707	5,43E-05	0,0204	776,51	9,857	1,00	43,305	2,74E-10
<b>Τελ. μάζα δοκιμίου m<sub>f</sub> (gr):</b>	62,20	0,1413	5,43E-05	0,0204		9,777	2,25	18,936	1,20E-10
<b>Ξηρή μάζα δοκιμίου m<sub>d</sub> (gr):</b>	37,97	0,0088	3,39E-06	0,0013	<b>OCR</b>	9,782			
<b>Ειδ. βάρ. κόκκων G<sub>s</sub> (gr/cm<sup>3</sup>):</b>	2,52	0,0238	1,83E-05	0,0069	1,01	9,796			
<b>Αρχ. βαθμ. κορεσμού S<sub>i</sub> (%):</b>	96,05%	0,0225	4,61E-05	0,0173		9,821			
<b>Τελ. βαθμ. κορεσμού S<sub>f</sub> (%):</b>	96,56%	<b>0,0639</b>	<b>8,49E-05</b>	<b>0,0319</b>					

Διαγράμματα αξονικής ανηγμ. παραμόρφωσης  $\varepsilon$  - τετραγωνικής ρίζας του χρόνου  $t$  για κάθε στάδιο φόρτισης-αποφόρτισης (Δείγμα A1, κάθετο στη στρώση)



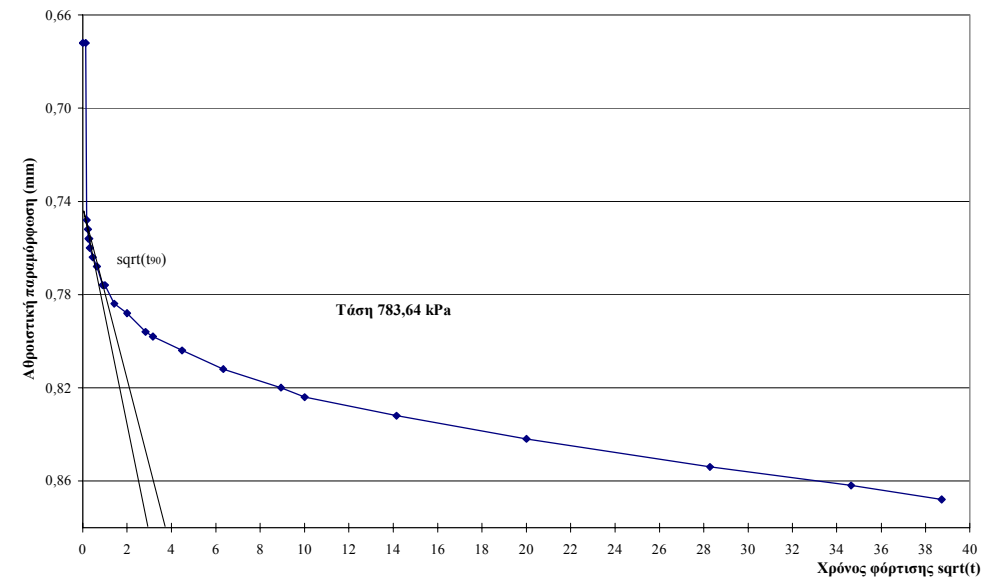
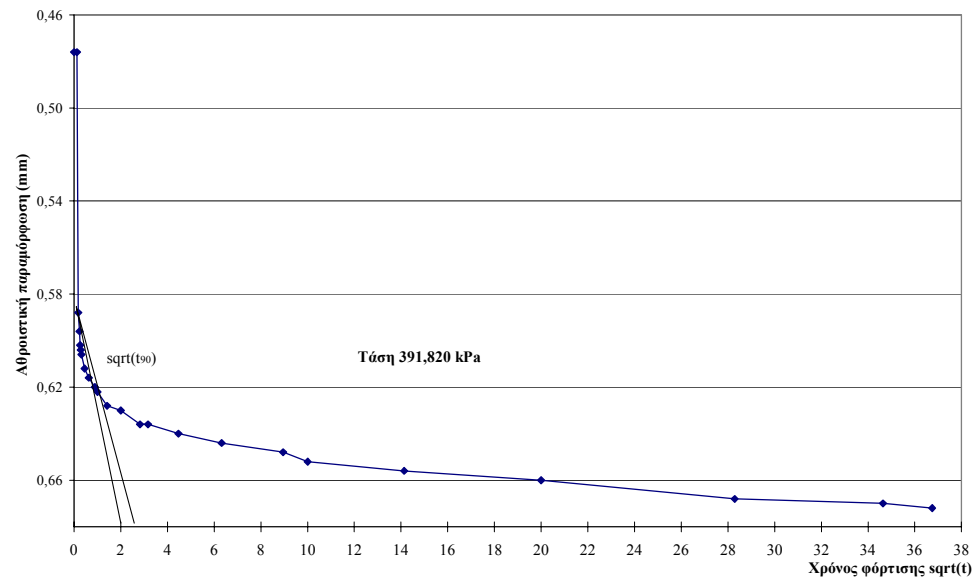
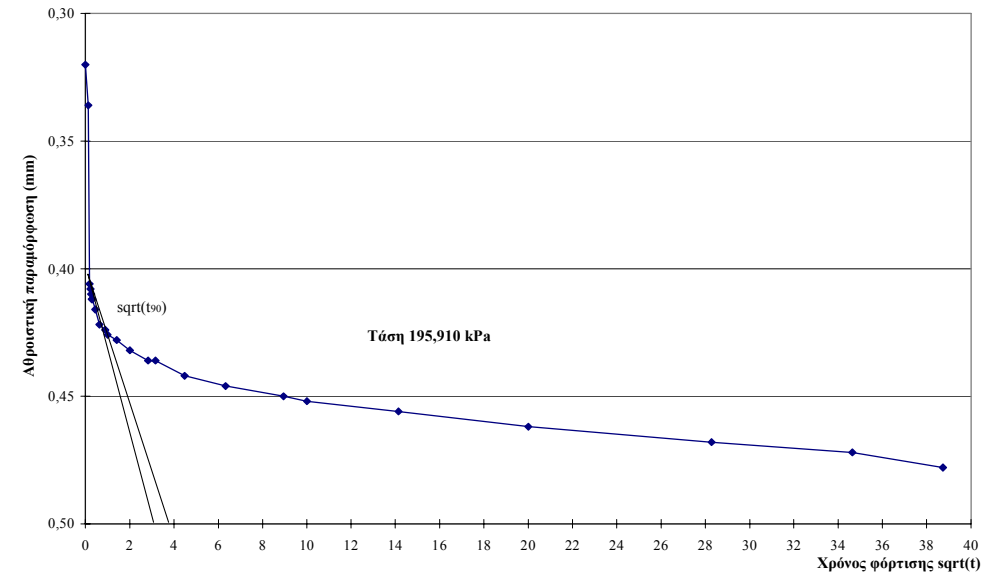
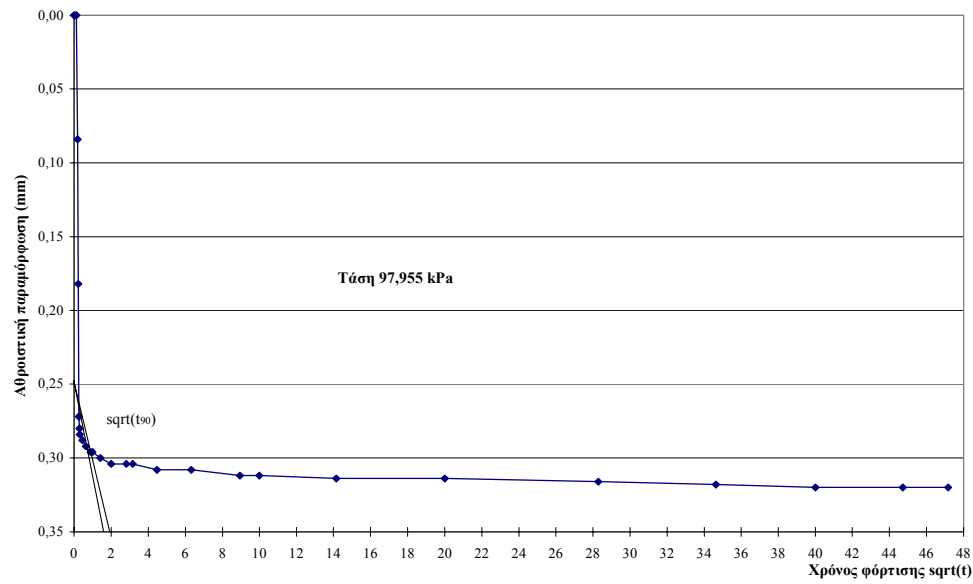


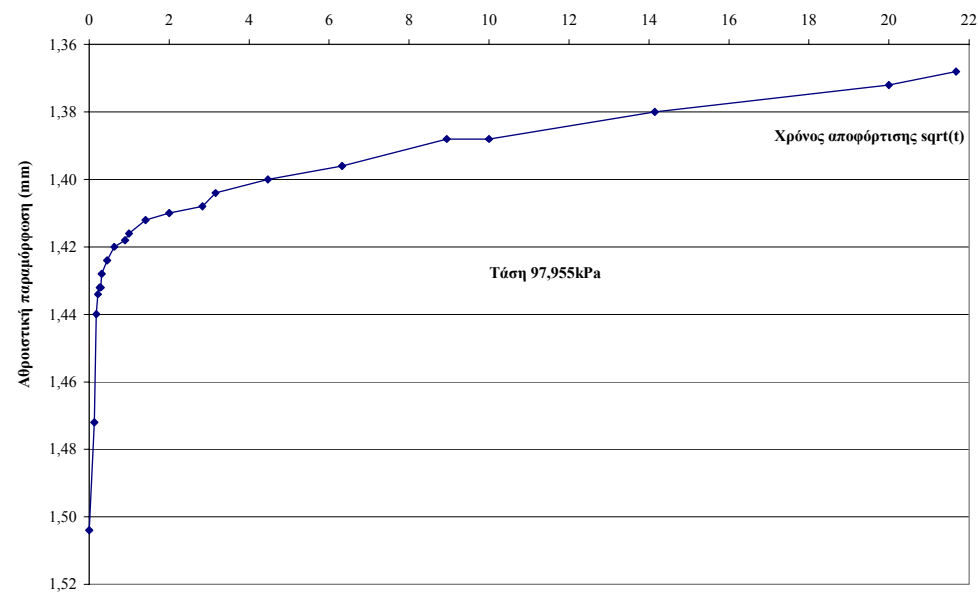
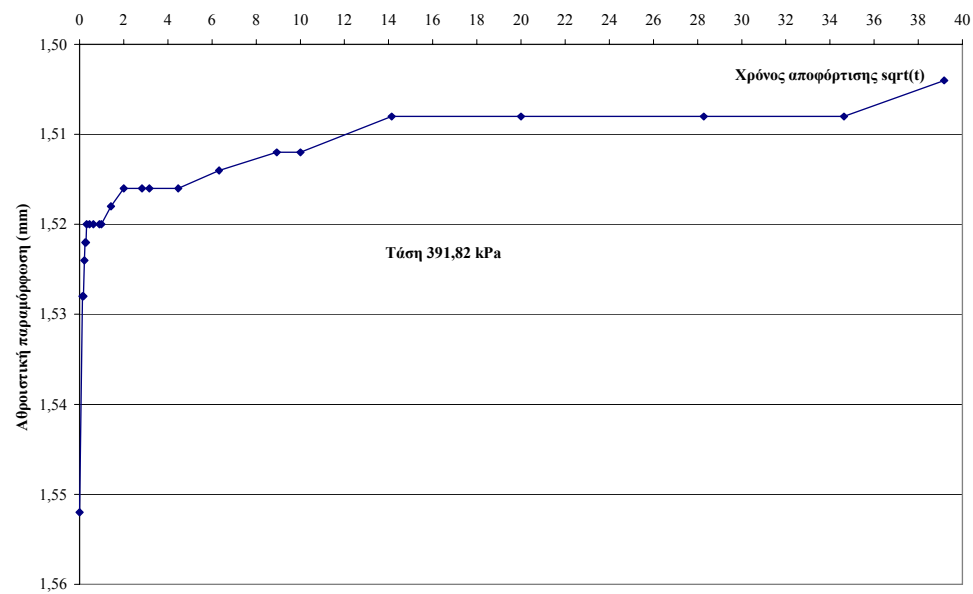
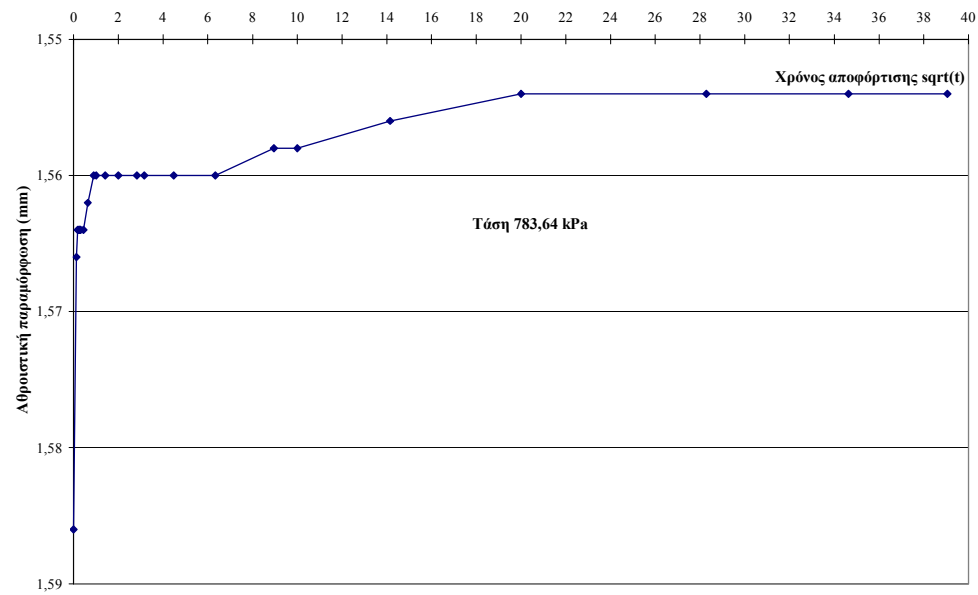
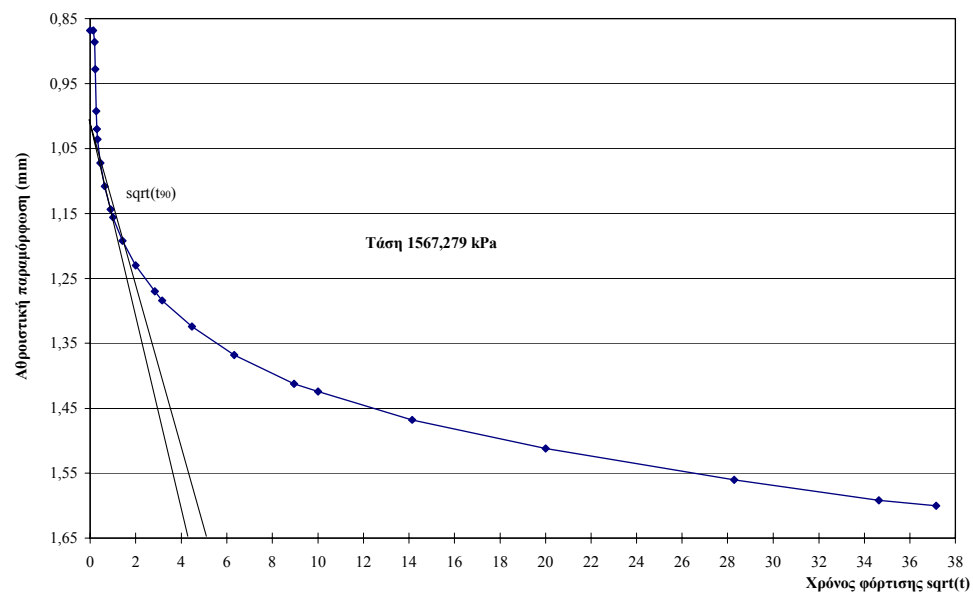


Πίνακας 2: Αποτελέσματα δοκιμής στερεοποίησης για το παράλληλο στη στρώση δοκίμιο του δείγματος Α1.

<b>ΤΟΜΕΑΣ:</b>	<b>6</b>	<b>Τάση P (kPa)</b>	<b><math>\Delta H</math> (mm)</b>	<b><math>\Delta e = \Delta H/H_s</math></b>	<b><math>e = e_o - \Delta e</math></b>	<b><math>\varepsilon</math></b>	<b><math>\Delta e</math></b>	<b><math>\Delta P</math> (kPa)</b>	<b><math>E</math> (kN/m<sup>2</sup>)</b>
<b>ΘΕΣΗ:</b>	<b>A</b>	97,955	0,320	0,040450	1,50667	0,016	-	-	-
<b>ΔΕΙΓΜΑ:</b>	<b>1</b>	195,910	0,478	0,060423	1,48669	0,024	0,008	97,955	12492,355
<b>Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση</b>		391,820	0,672	0,084946	1,46217	0,033	0,010	195,910	20348,373
<b>Διάμ. δοκίμ. D (mm):</b>	50,50	783,640	0,868	0,109722	1,43740	0,043	0,010	391,820	40281,472
<b>Υψος δοκιμίου <math>H_o</math> (mm):</b>	20,15	1567,279	1,600	0,202252	1,34486	0,079	0,036	783,640	21571,499
<b>Επιφ. δοκιμίου A (mm<sup>2</sup>):</b>	2002,96	783,640	1,554	0,196438	1,35068	0,077	-0,002	-783,640	343268,199
<b>Όγκος δοκιμίου (mm<sup>3</sup>):</b>	40359,68	391,820	1,504	0,190117	1,35700	0,075	-0,002	-391,820	157903,371
<b>Ισοδ. ύψος εδαφ. κόκκων <math>H_s</math> (mm):</b>	7,9109	97,955	1,368	0,172926	1,37419	0,068	-0,007	-293,865	43539,533
<b>Αρχική υγρασία <math>w_i</math> (%):</b>	56,62								<b>91343,543</b>
<b>Τελική υγρασία <math>w_f</math> (%):</b>	57,15								
<b>Πυκν. νερού <math>\rho_w</math> (Mg/m<sup>3</sup>):</b>	1,000	<b><math>C_c</math></b>	<b><math>\alpha_v</math> (m<sup>2</sup>/kN)</b>	<b><math>m_v</math> (m<sup>2</sup>/MN)</b>	<b><math>P_c</math></b>	<b>d</b>	<b><math>t_{90}</math></b>	<b><math>C_v</math> (m<sup>2</sup>/year)</b>	<b>k (m/sec)</b>
<b>Αρχικός λόγος κενών <math>e_o</math>:</b>	1,54712	-	-	-	763,850	9,995	-	-	-
<b>Φαιν. βάρος εδάφους <math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>):</b>	15,20	0,06635	2,04E-04	0,0800		9,956	1,690	26,1391	6,51E-10
<b>Κορ. φαιν. βάρ. εδάφους <math>\gamma_{sat}</math> (kN/m<sup>3</sup>):</b>	15,66	0,08146	1,25E-04	0,0491	<b><math>P_o</math></b>	9,907	1,960	22,3192	3,41E-10
<b>Αρχ. μάζα δοκιμίου <math>m_o</math> (gr):</b>	62,54	0,08230	6,32E-05	0,0248	776,510	9,858	1,960	22,0990	1,71E-10
<b>Τελ. μάζα δοκιμίου <math>m_f</math> (gr):</b>	62,75	0,30738	1,18E-04	0,0464		9,675	3,240	12,8768	1,86E-10
<b>Ξηρή μάζα δοκιμίου <math>m_d</math> (gr):</b>	39,93	0,01932	7,42E-06	0,0029	<b>OCR</b>	9,687			
<b>Ειδ. βάρ. κόκκων <math>G_s</math> (gr/cm<sup>3</sup>):</b>	2,52	0,02100	1,61E-05	0,0063	0,984	9,699			
<b>Αρχ. βαθμ. κορεσμού <math>S_i</math> (%):</b>	92,23%	0,02855	5,85E-05	0,0230		9,733			
<b>Τελ. βαθμ. κορεσμού <math>S_f</math> (%):</b>	93,09%	<b>0,08662</b>	<b>8,46E-05</b>	<b>0,0332</b>					

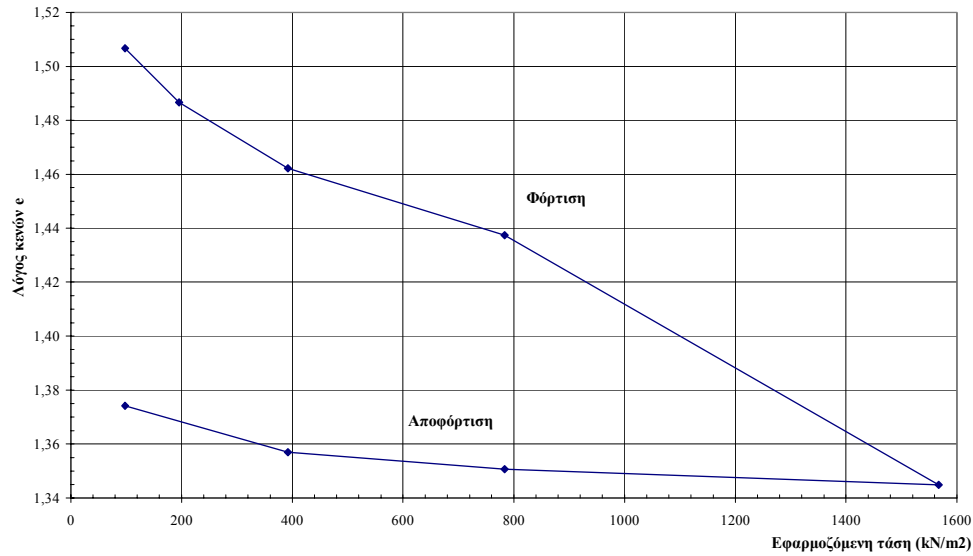
Διαγράμματα αξονικής ανηγμ. παραμόρφωσης  $\varepsilon$  - τετραγωνικής ρίζας του χρόνου  $t$  για κάθε στάδιο φόρτισης-αποφόρτισης (Δείγμα Α1, παρ/λο στη στρώση)



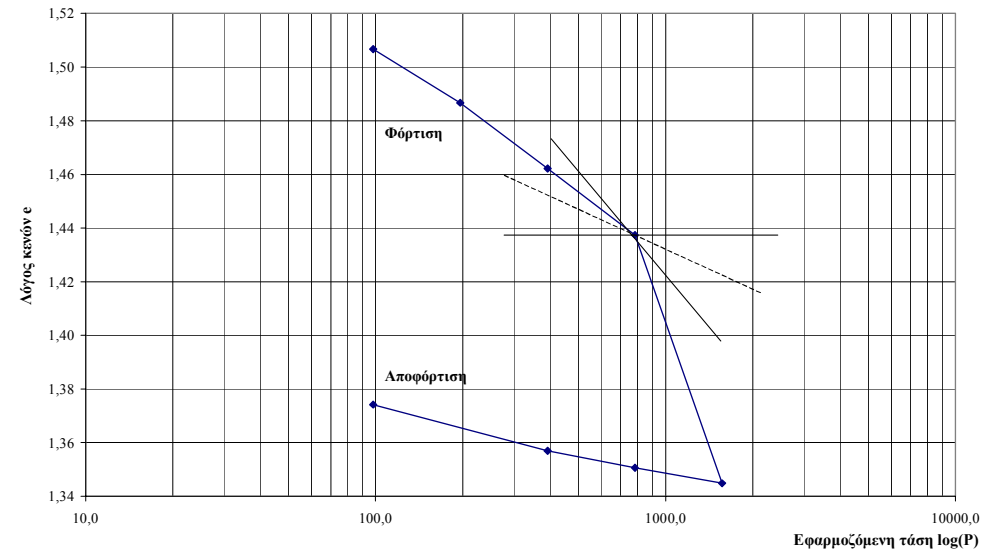




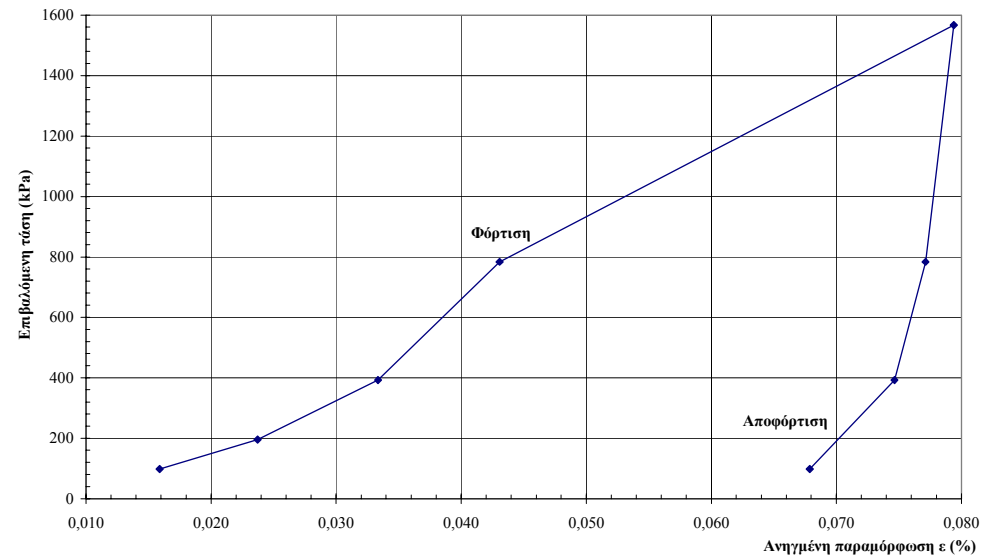
Διάγραμμα λόγου κενών  $e$  συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης



Διάγραμμα λόγου κενών  $e$  συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης



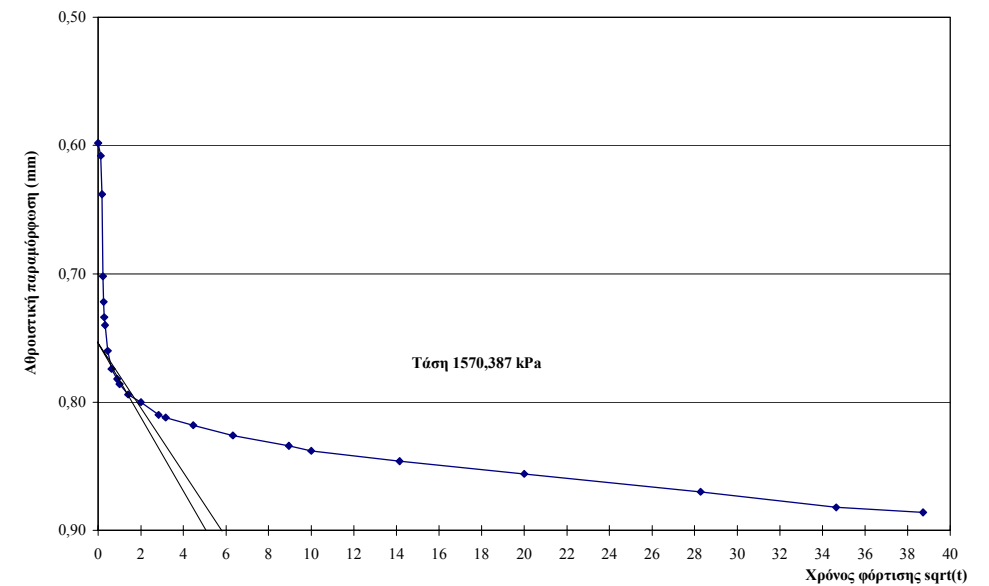
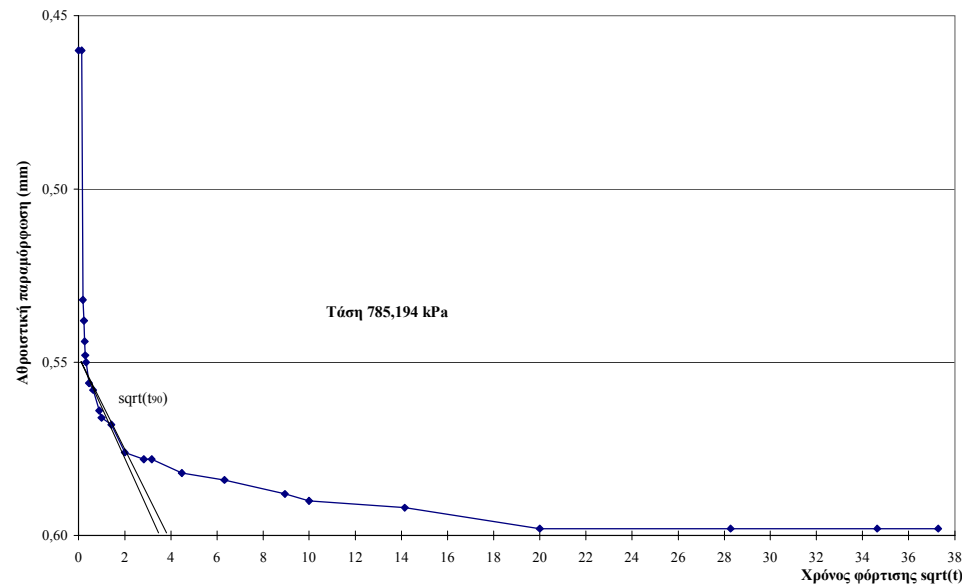
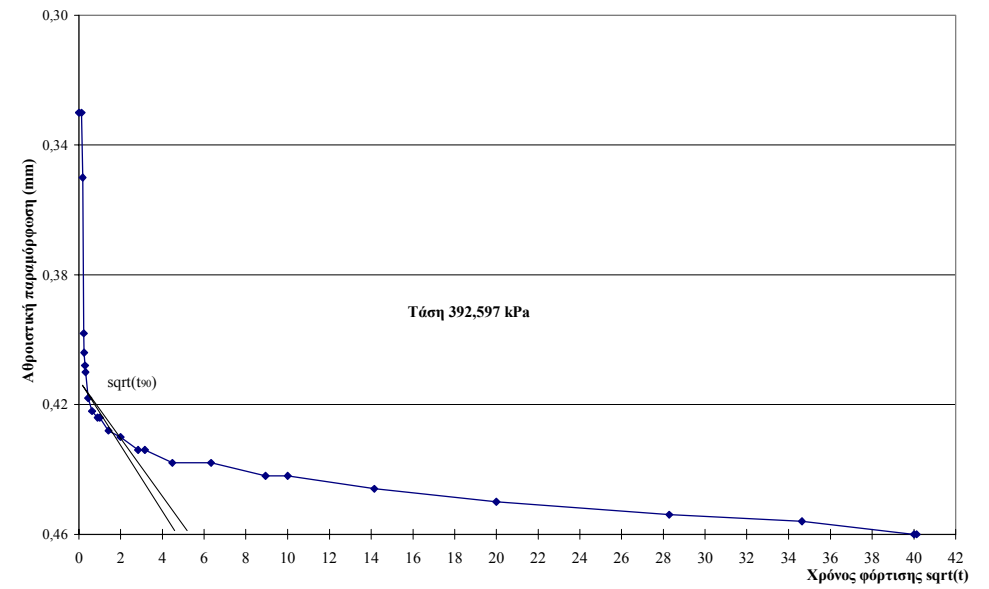
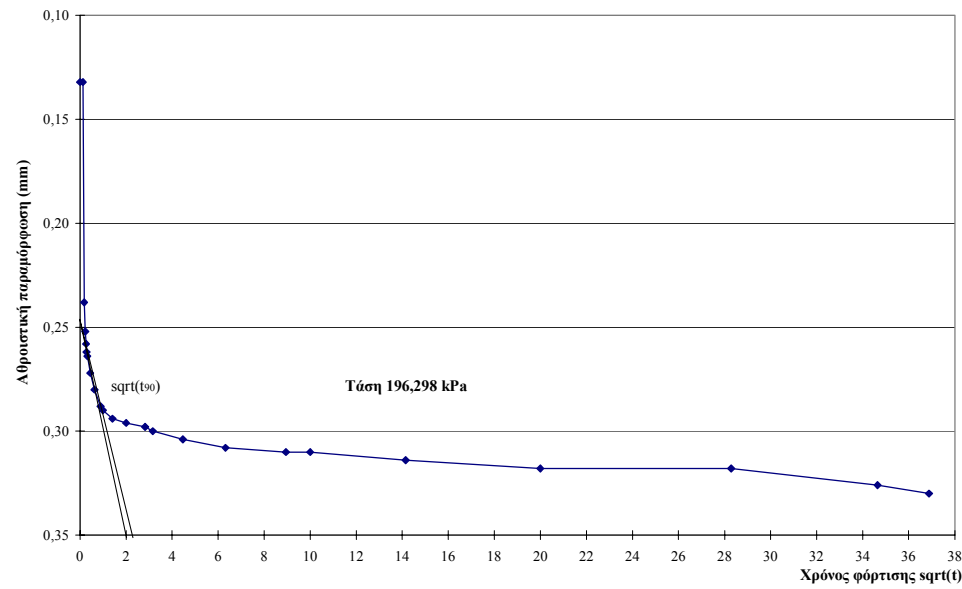
Διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης συναρτήσει της ανηγμένης παραμόρφωσης

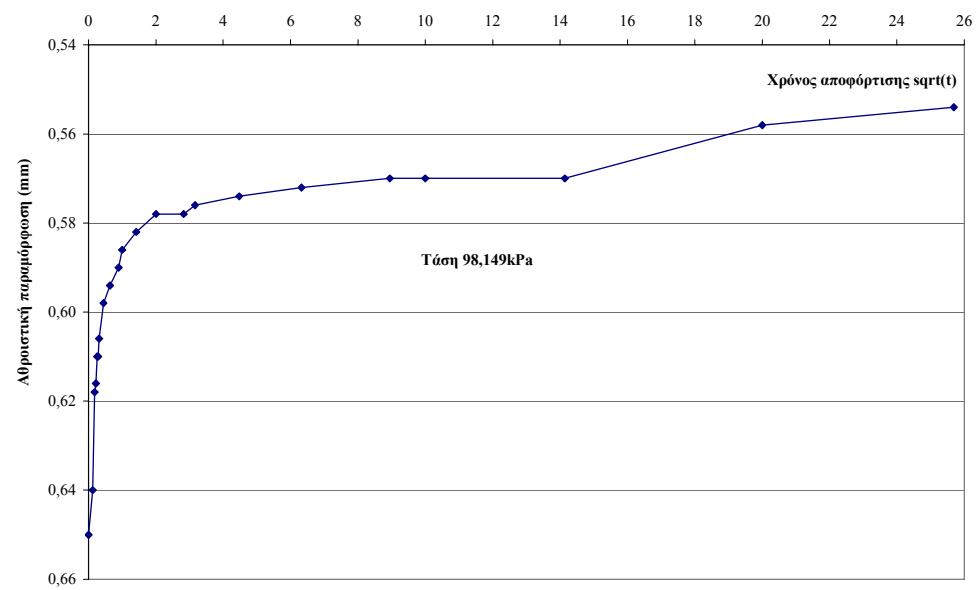
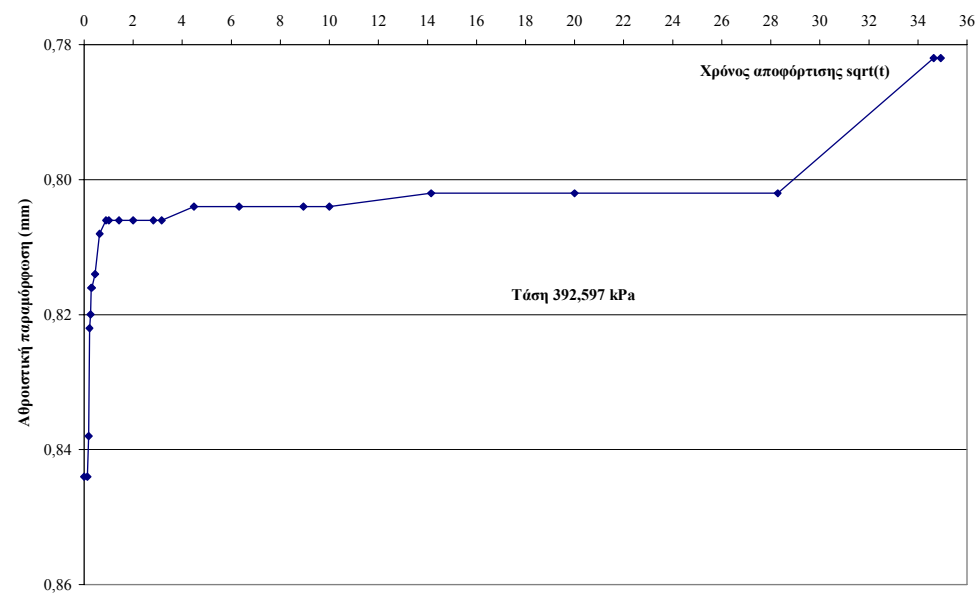
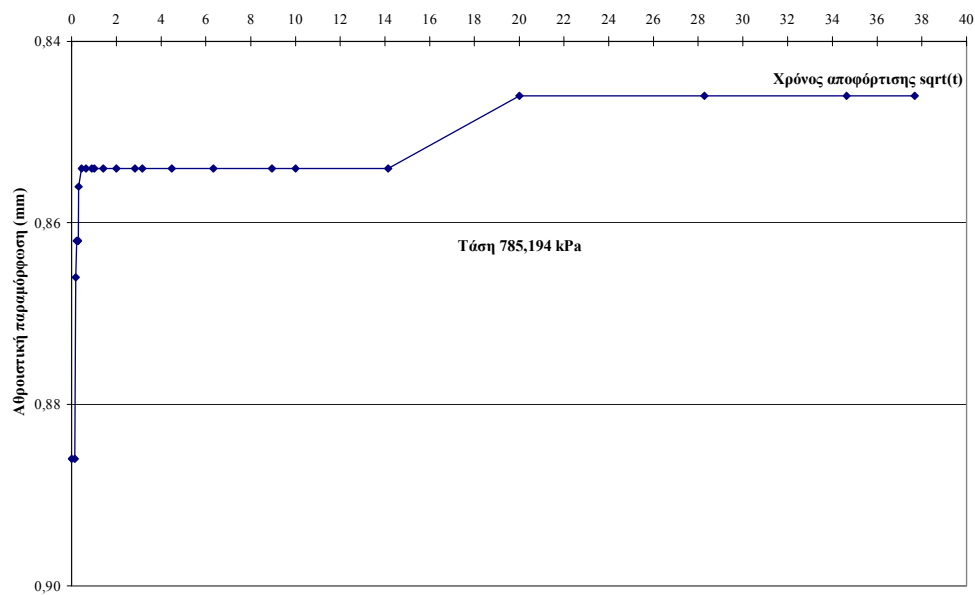


**Πίνακας 3:** Αποτελέσματα δοκιμής στερεοποίησης για το κάθετο στη στρώση δοκίμιο του δείγματος B1.

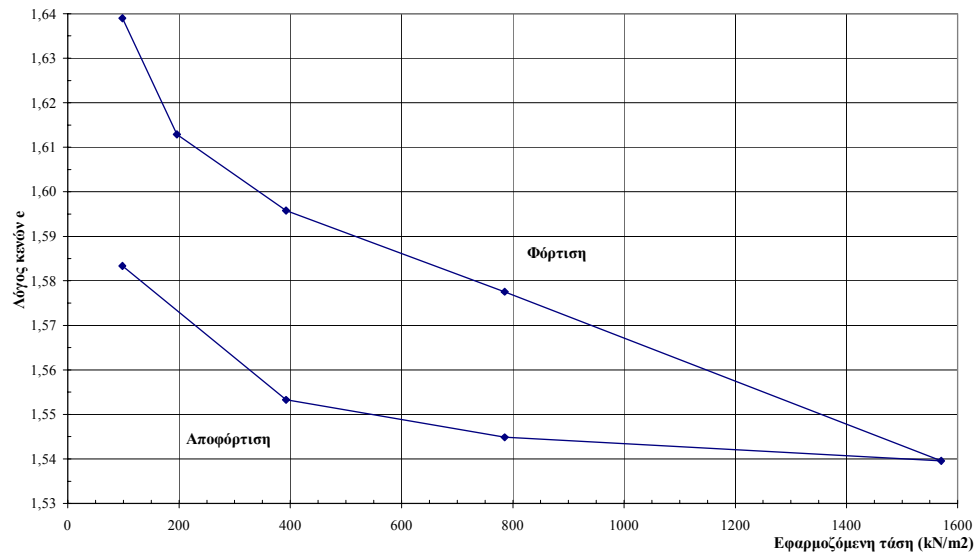
<b>ΤΟΜΕΑΣ:</b>	<b>6</b>	<b>Τάση P (kPa)</b>	<b>ΔΗ (mm)</b>	<b>Δe=ΔH/H<sub>s</sub></b>	<b>e=e<sub>o</sub>-Δe</b>	<b>ε</b>	<b>Δε</b>	<b>ΔP (kPa)</b>	<b>E (kN/m<sup>2</sup>)</b>
<b>ΘΕΣΗ:</b>	<b>B</b>	98,149	0,132	0,01740	1,63898	0,007	-	-	-
<b>ΔΕΙΓΜΑ:</b>	<b>1</b>	196,298	0,33	0,04350	1,61287	0,016	0,010	98,14920372	9988,416
<b>Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση</b>		392,597	0,46	0,06064	1,59574	0,023	0,006	196,2984074	30426,253
<b>Διάμ. δοκιμ. D (mm):</b>	50,45	785,194	0,598	0,07883	1,57754	0,030	0,007	392,5968149	57324,825
<b>Υψος δοκιμίου H<sub>o</sub> (mm):</b>	20,15	1570,387	0,886	0,11680	1,53958	0,044	0,014	785,1936297	54936,290
<b>Επιφ. δοκιμίου A (mm<sup>2</sup>):</b>	1999,00	785,194	0,846	0,11153	1,54485	0,042	-0,002	-785,1936297	395541,291
<b>Όγκος δοκιμίου (mm<sup>3</sup>):</b>	40279,80	392,597	0,782	0,10309	1,55329	0,039	-0,003	-392,5968149	123606,653
<b>Ισοδ. ύψος εδαφ. κόκκων H<sub>s</sub> (mm):</b>	7,58551	98,149	0,554	0,07303	1,58334	0,027	-0,011	-294,4476112	26022,453
<b>Αρχική υγρασία w<sub>i</sub> (%):</b>	61,41								<b>99692,312</b>
<b>Τελική υγρασία w<sub>f</sub> (%):</b>	62,33								
<b>Πυκν. νερού ρ<sub>w</sub> (Mg/m<sup>3</sup>):</b>	1,000	<b>C<sub>c</sub></b>	<b>α<sub>v</sub> (m<sup>2</sup>/kN)</b>	<b>m<sub>v</sub> (m<sup>2</sup>/MN)</b>	<b>P<sub>c</sub></b>	<b>d</b>	<b>t<sub>90</sub></b>	<b>C<sub>v</sub> (m<sup>2</sup>/year)</b>	<b>k (m/sec)</b>
<b>Αρχικός λόγος κενών e<sub>o</sub>:</b>	1,65638	-	-	-	785,194	10,042	-	-	-
<b>Φαιν. βάρος εδάφους γ (kN/m<sup>3</sup>):</b>	15,32	0,0867	2,66E-04	0,1001		9,993	1,000	44,5040	1,39E-09
<b>Κορ. φαιν. βάρ. εδάφους γ<sub>sat</sub> (kN/m<sup>3</sup>):</b>	15,61	0,0569	8,73E-05	0,0329	<b>P<sub>o</sub></b>	9,960	1,210	36,5413	3,74E-10
<b>Αρχ. μάζα δοκιμίου m<sub>o</sub> (gr):</b>	62,90	0,0604	4,63E-05	0,0174	762,880	9,926	1,563	28,1019	1,52E-10
<b>Τελ. μάζα δοκιμίου m<sub>f</sub> (gr):</b>	63,26	0,1261	4,84E-05	0,0182		9,854	3,240	13,3563	7,56E-11
<b>Ξηρή μάζα δοκιμίου m<sub>d</sub> (gr):</b>	38,97	0,0175	6,72E-06	0,0025	<b>OCR</b>	9,864			
<b>Ειδ. βάρ. κόκκων G<sub>s</sub> (gr/cm<sup>3</sup>):</b>	2,57	0,0280	2,15E-05	0,0081	1,029	9,880			
<b>Αρχ. βαθμ. κορεσμού S<sub>i</sub> (%):</b>	95,28%	0,0499	1,02E-04	0,0384		9,937			
<b>Τελ. βαθμ. κορεσμού S<sub>f</sub> (%):</b>	96,71%	<b>0,0608</b>	<b>8,26E-05</b>	<b>0,0311</b>					

Διαγράμματα αξονικής ανηγμ. παραμόρφωσης  $\varepsilon$  - τετραγωνικής ρίζας του χρόνου  $t$  για κάθε στάδιο φόρτισης-αποφόρτισης (Δείγμα B1, κάθετο στη στρώση)

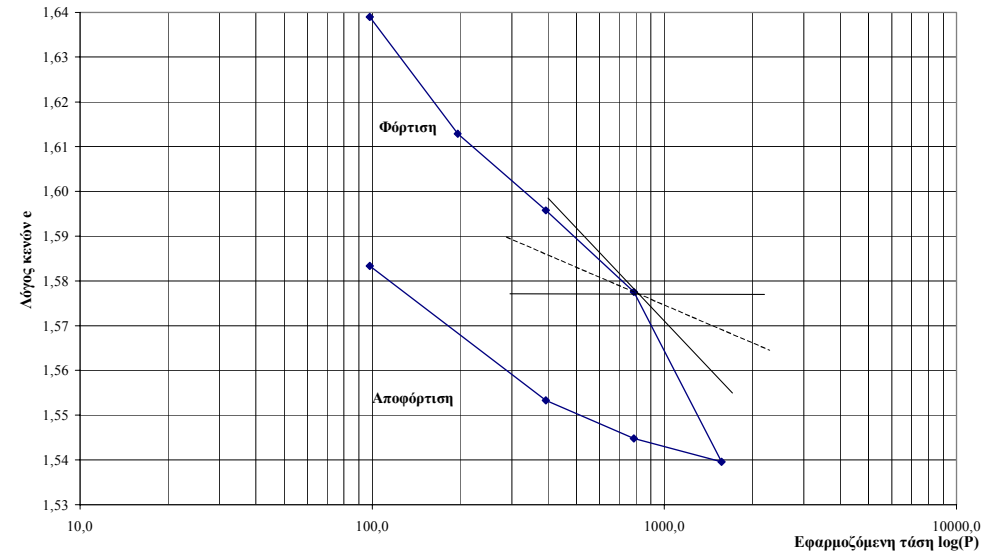




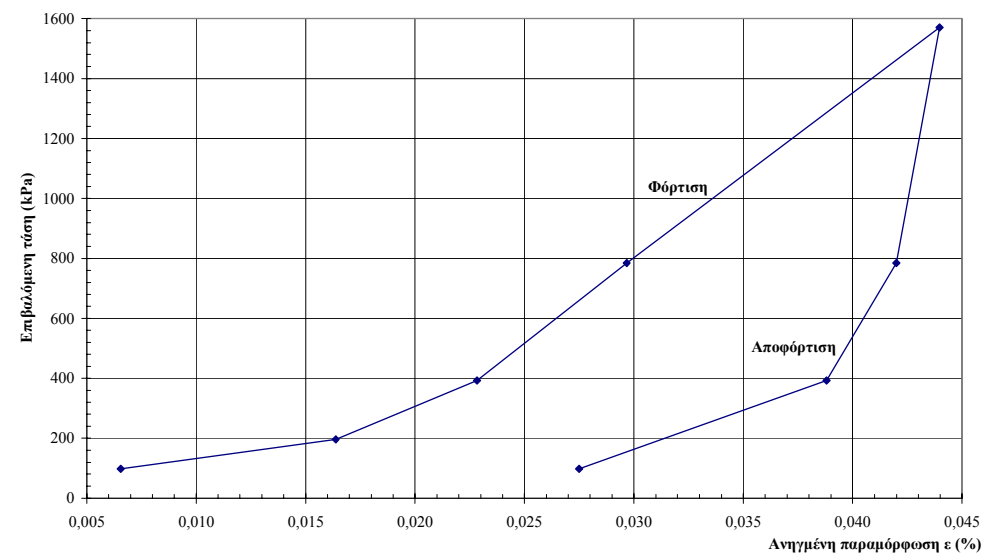
Διάγραμμα λόγου κενών  $e$  συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης



Διάγραμμα λόγου κενών  $e$  συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης



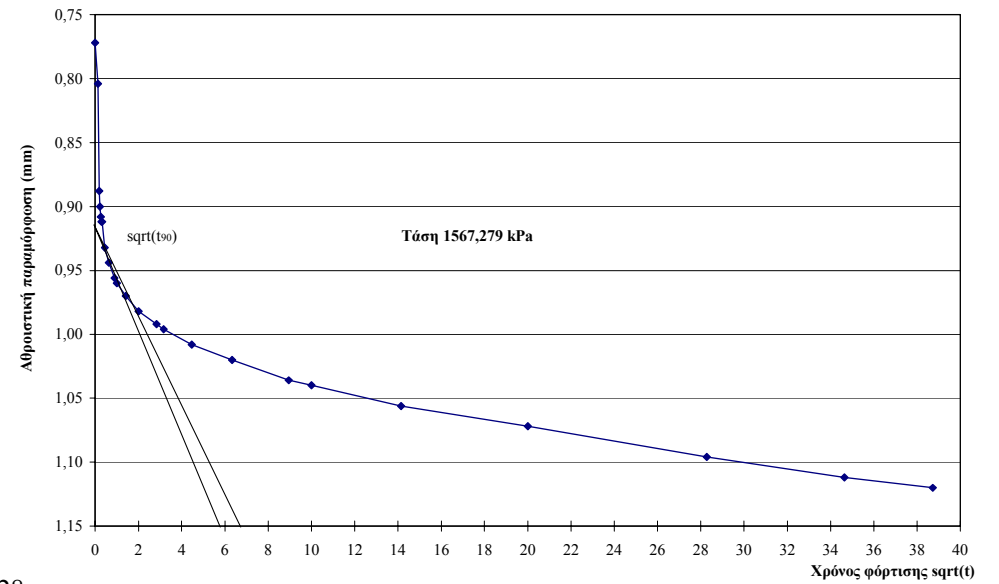
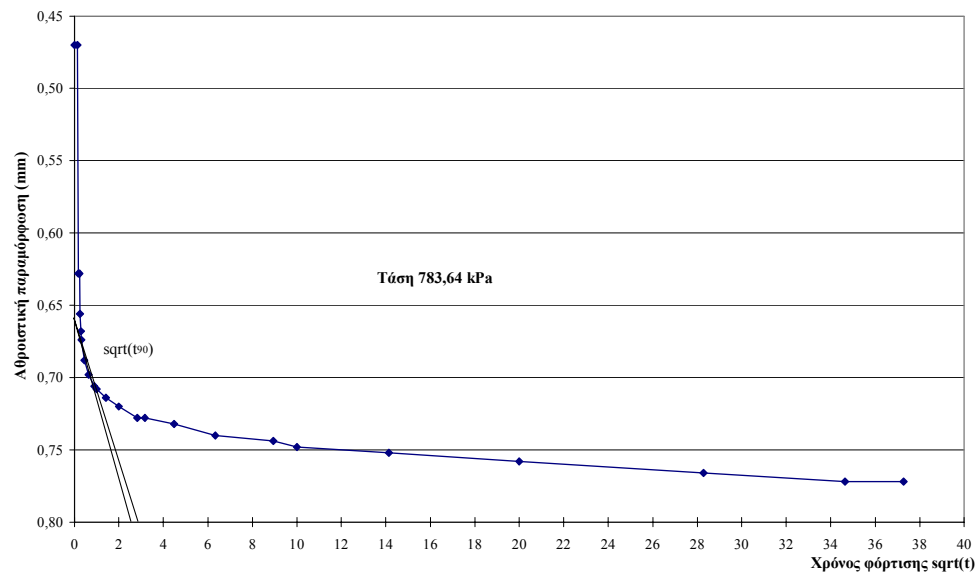
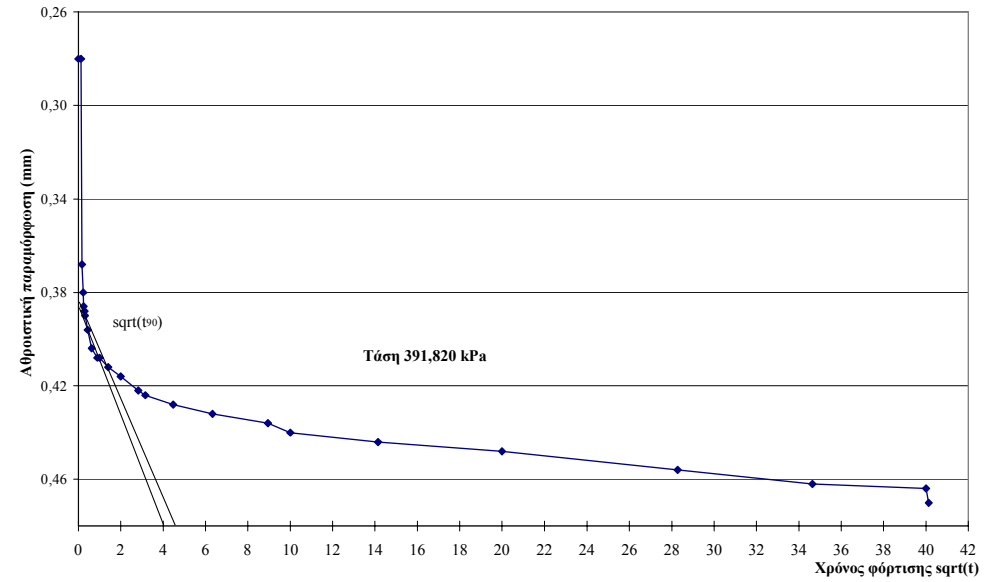
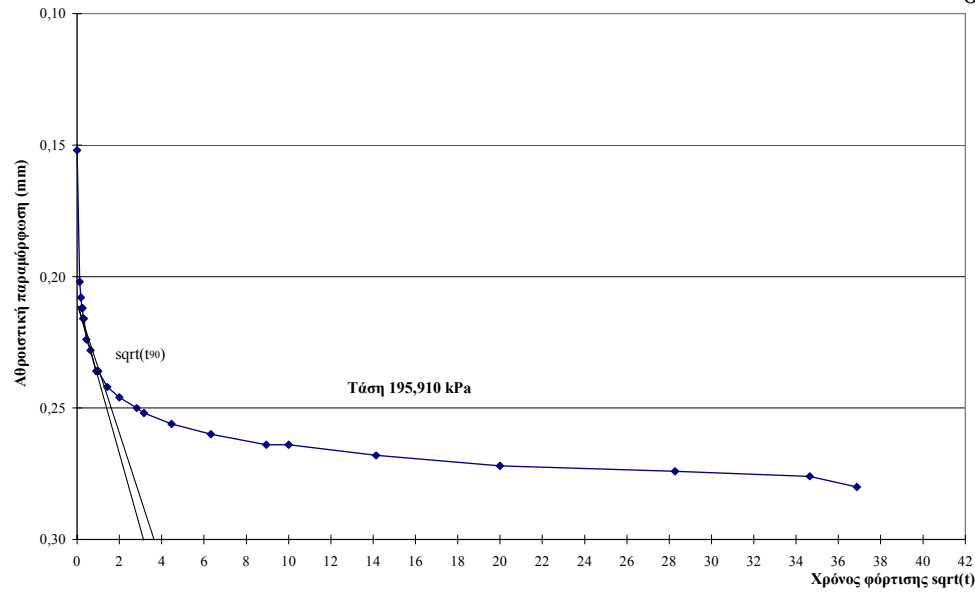
Διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης συναρτήσει της ανηγμένης παραμόρφωσης

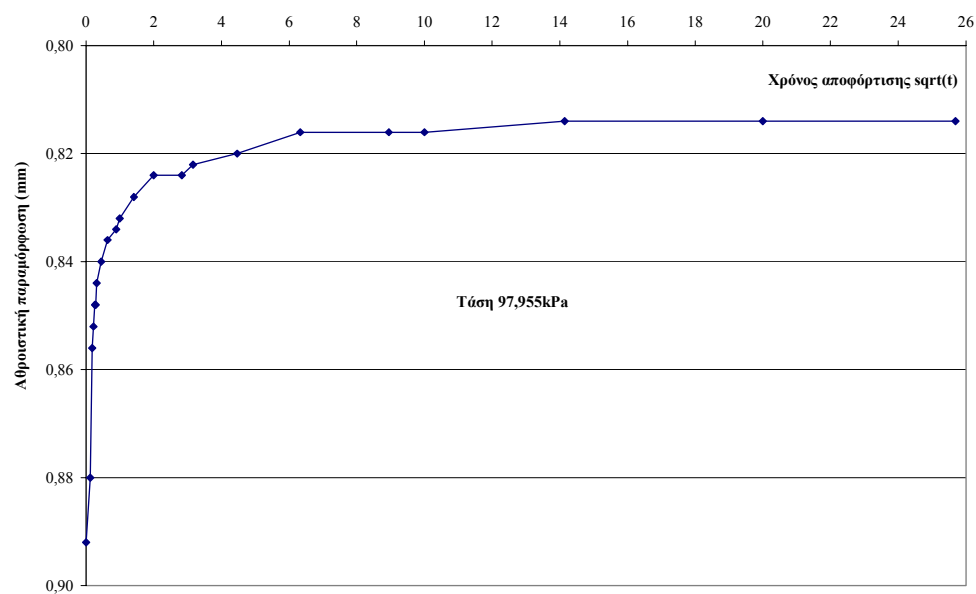
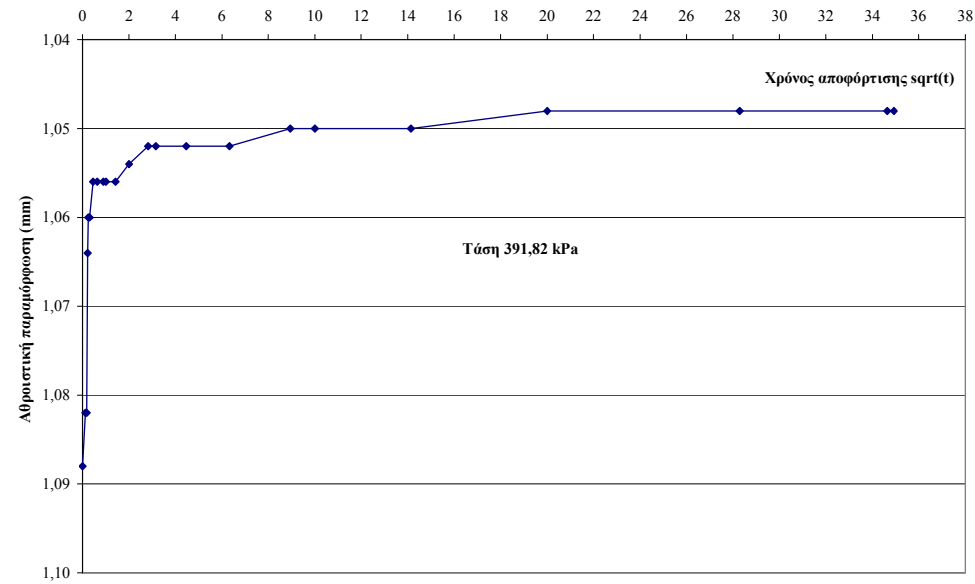
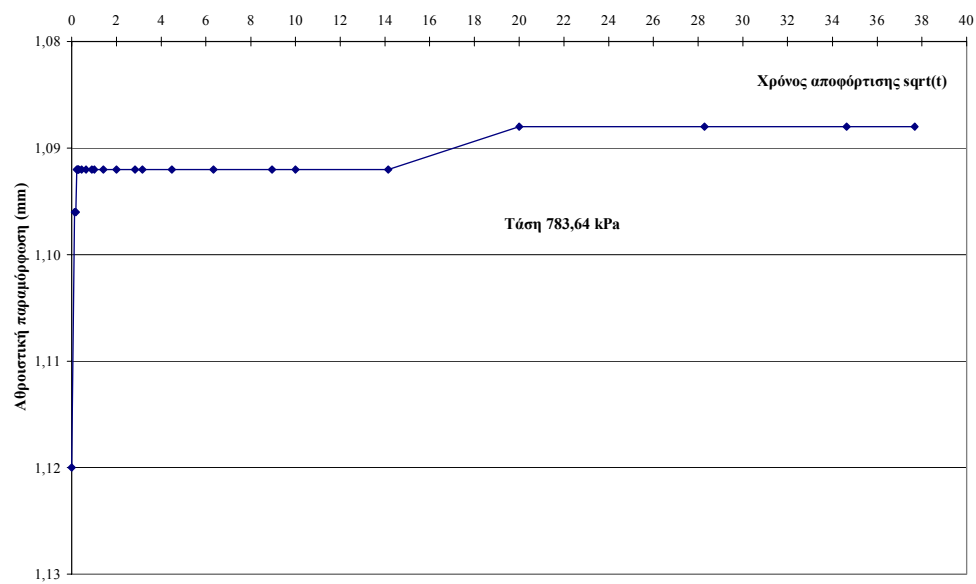


**Πίνακας 4:** Αποτελέσματα δοκιμής στερεοποίησης για το παράλληλο στη στρώση δοκίμιο του δείγματος B1.

<b>TOMEΑΣ:</b>	<b>6</b>	<b>Τάση P (kPa)</b>	<b><math>\Delta H</math> (mm)</b>	<b><math>\Delta e = \Delta H/H_s</math></b>	<b><math>e = e_0 - \Delta e</math></b>	<b><math>\varepsilon</math></b>	<b><math>\Delta \varepsilon</math></b>	<b><math>\Delta P</math> (kPa)</b>	<b><math>E</math> (kN/m<sup>2</sup>)</b>
<b>ΘΕΣΗ:</b>	<b>B</b>	97,955	0,152	0,01973	1,57614	0,008	-	-	-
<b>ΔΕΙΓΜΑ:</b>	<b>1</b>	195,910	0,280	0,03634	1,55953	0,014	0,006	97,955	15305,460
<b>Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση</b>		391,820	0,464	0,06022	1,53565	0,023	0,009	195,910	21294,553
<b>Διάμ. δοκίμ. D (mm):</b>	50,50	783,640	0,772	0,10020	1,49567	0,039	0,015	391,820	25442,843
<b>Υψος δοκιμίου <math>H_0</math> (mm):</b>	20,00	1567,279	1,120	0,14537	1,4505	0,056	0,017	783,640	45036,756
<b>Επιφ. δοκιμίου A (mm<sup>2</sup>):</b>	2002,96	783,640	1,088	0,14122	1,45466	0,054	-0,002	-783,640	489774,725
<b>Όγκος δοκιμίου (mm<sup>3</sup>):</b>	40059,23	391,820	1,048	0,13602	1,45985	0,052	-0,002	-391,820	195909,890
<b>Ισοδ. ύψος εδαφ. κόκκων <math>H_s</math> (mm):</b>	7,70454	97,955	0,814	0,10565	1,49022	0,041	-0,012	-293,865	25116,653
<b>Αρχική υγρασία <math>w_i</math> (%):</b>	58,40								<b>116840,126</b>
<b>Τελική υγρασία <math>w_f</math> (%):</b>	60,29								
<b>Πυκν. νερού <math>\rho_w</math> (Mg/m<sup>3</sup>):</b>	1,000	<b><math>C_c</math></b>	<b><math>\alpha_v</math> (m<sup>2</sup>/kN)</b>	<b><math>m_v</math> (m<sup>2</sup>/MN)</b>	<b><math>P_c</math></b>	<b>d</b>	<b><math>t_{90}</math></b>	<b><math>C_v</math> (m<sup>2</sup>/year)</b>	<b>k (m/sec)</b>
<b>Αρχικός λόγος κενών <math>e_0</math>:</b>	1,59587	-	-	-	763,850	9,962	-	-	-
<b>Φαιν. βάρος εδάφους <math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>):</b>	15,38	0,0552	1,70E-04	0,0653		9,930	1,69	26,0054	5,29E-10
<b>Κορ. φαιν. βάρ. εδάφους <math>\gamma_{sat}</math> (kN/m<sup>3</sup>):</b>	15,74	0,0793	1,22E-04	0,0470	<b><math>P_0</math></b>	9,884	1,96	22,2157	3,25E-10
<b>Αρχ. μάζα δοκιμίου <math>m_0</math> (gr):</b>	62,82	0,1328	1,02E-04	0,0393	776,510	9,807	1,96	21,8709	2,67E-10
<b>Τελ. μάζα δοκιμίου <math>m_f</math> (gr):</b>	63,57	0,1500	5,76E-05	0,0222		9,720	3,24	12,9969	8,98E-11
<b>Ξηρή μάζα δοκιμίου <math>m_d</math> (gr):</b>	39,66	0,0138	5,30E-06	0,0020	<b>OCR</b>	9,728			
<b>Ειδ. βάρ. κόκκων <math>G_s</math> (gr/cm<sup>3</sup>):</b>	2,57	0,0172	1,33E-05	0,0051	0,984	9,738			
<b>Αρχ. βαθμ. κορεσμού <math>S_i</math> (%):</b>	94,04%	0,0504	1,03E-04	0,0398		9,797			
<b>Τελ. βαθμ. κορεσμού <math>S_f</math> (%):</b>	97,09%	0,0713	8,19E-05	0,0315					

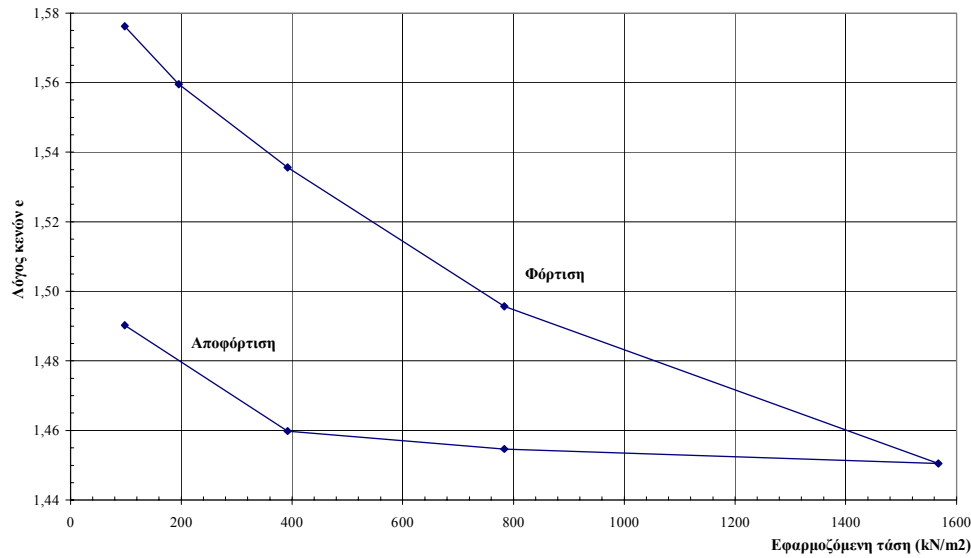
Διαγράμματα αξονικής ανηγμ. παραμόρφωσης  $\epsilon$  - τετραγωνικής ρίζας του χρόνου  $t$  για κάθε στάδιο φόρτισης-αποφόρτισης (Δείγμα B1, παράλληλο στη στρώση).



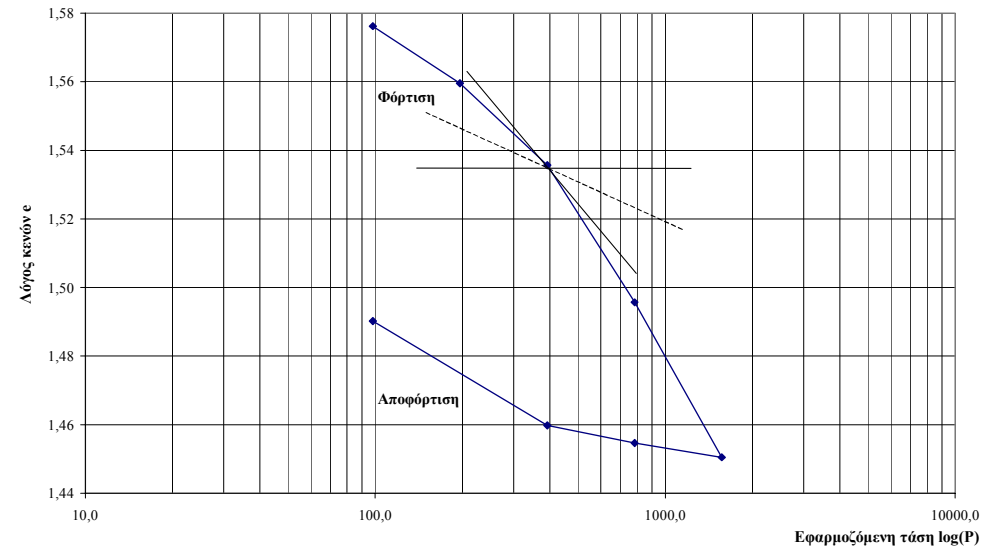




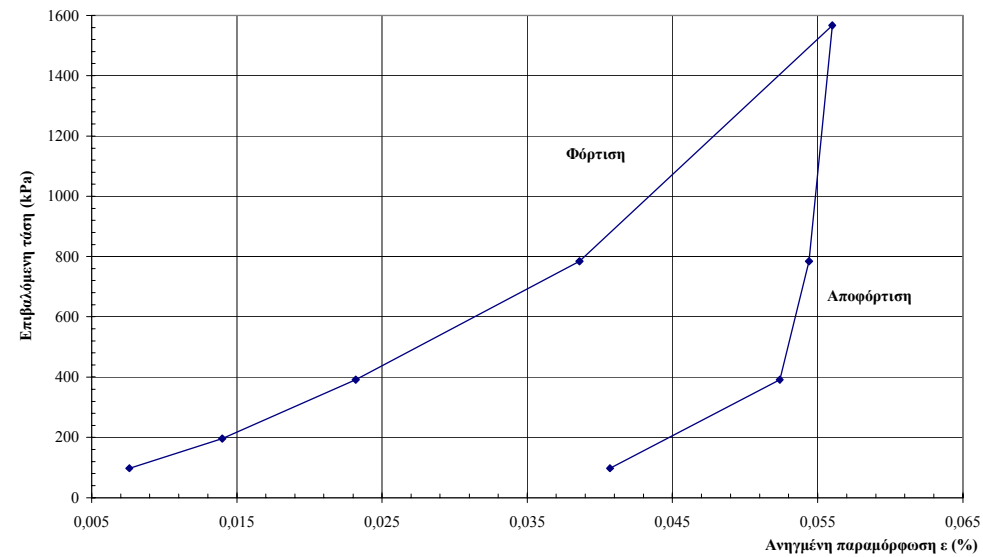
Διάγραμμα λόγου κενών  $\epsilon$  συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης



Διάγραμμα λόγου κενών  $\epsilon$  συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης



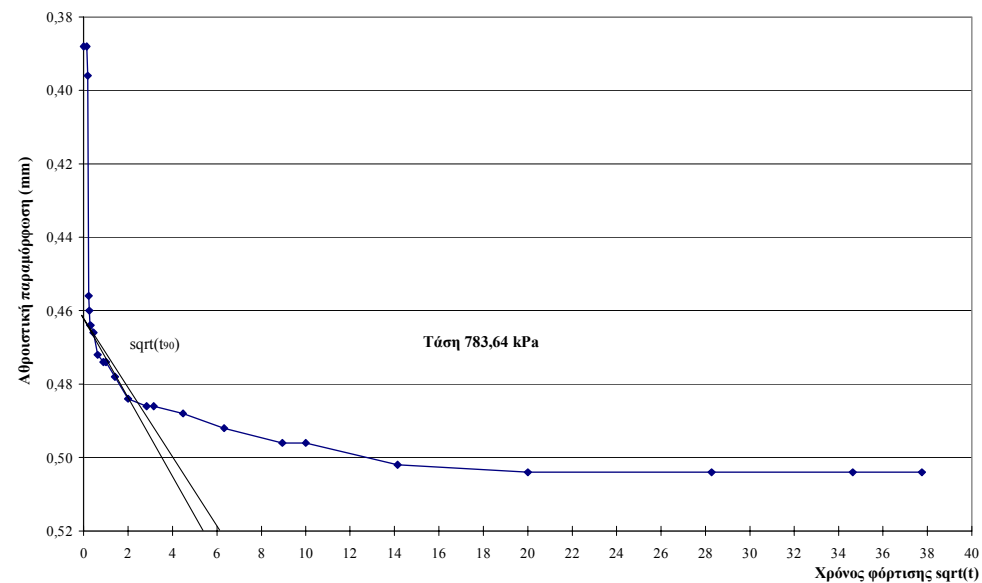
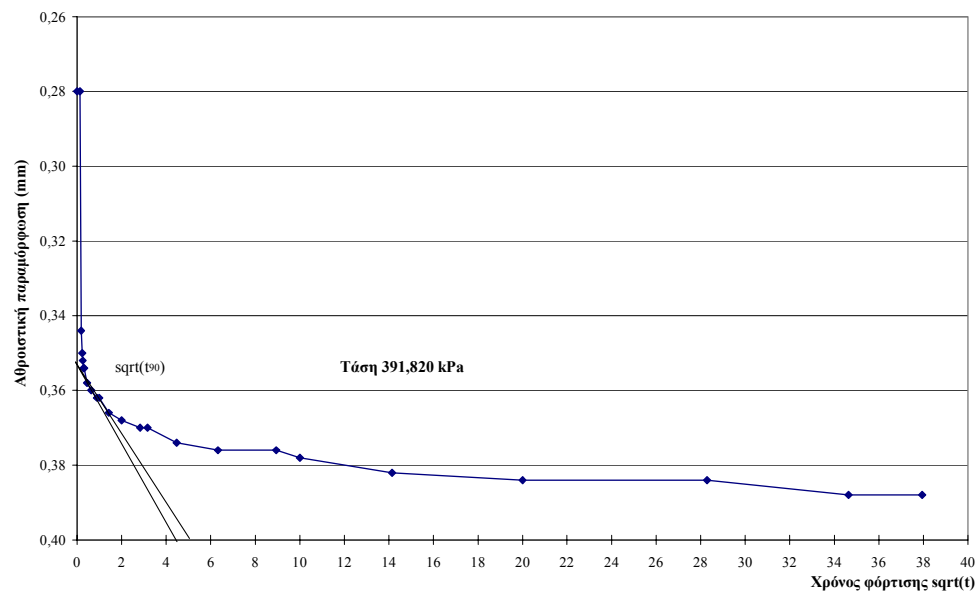
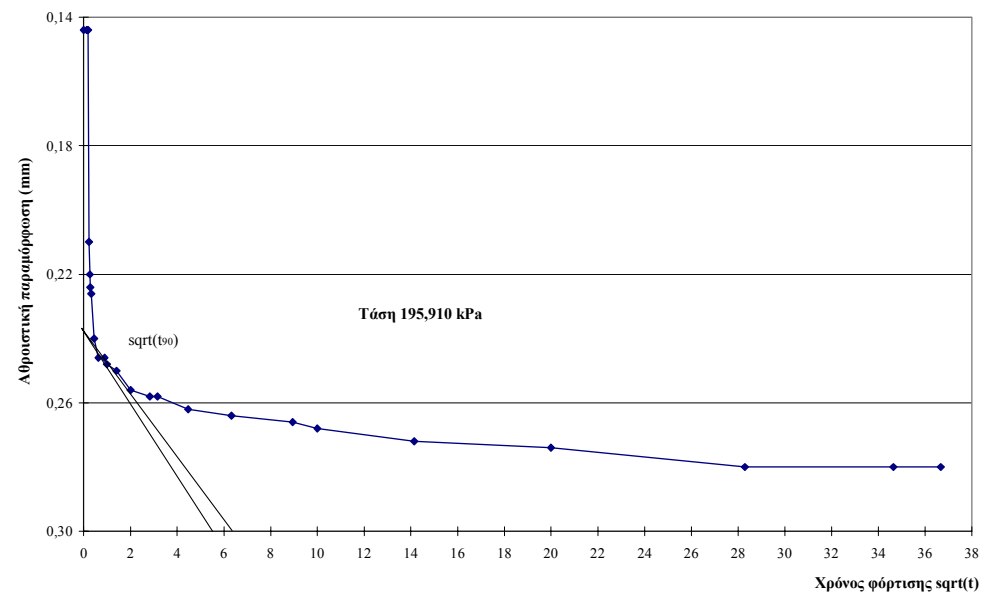
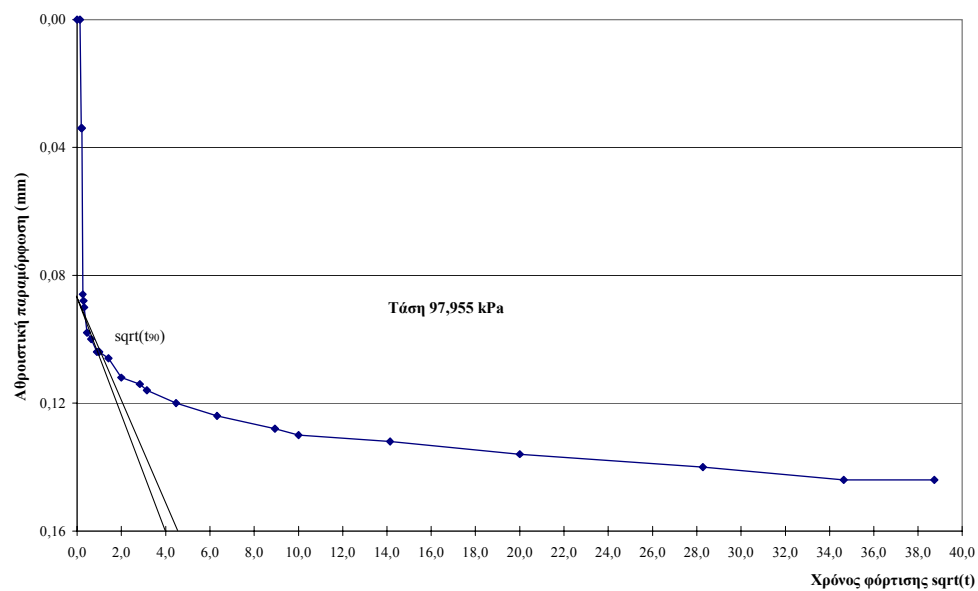
Διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης συναρτήσει της ανηγμένης παραμόρφωσης

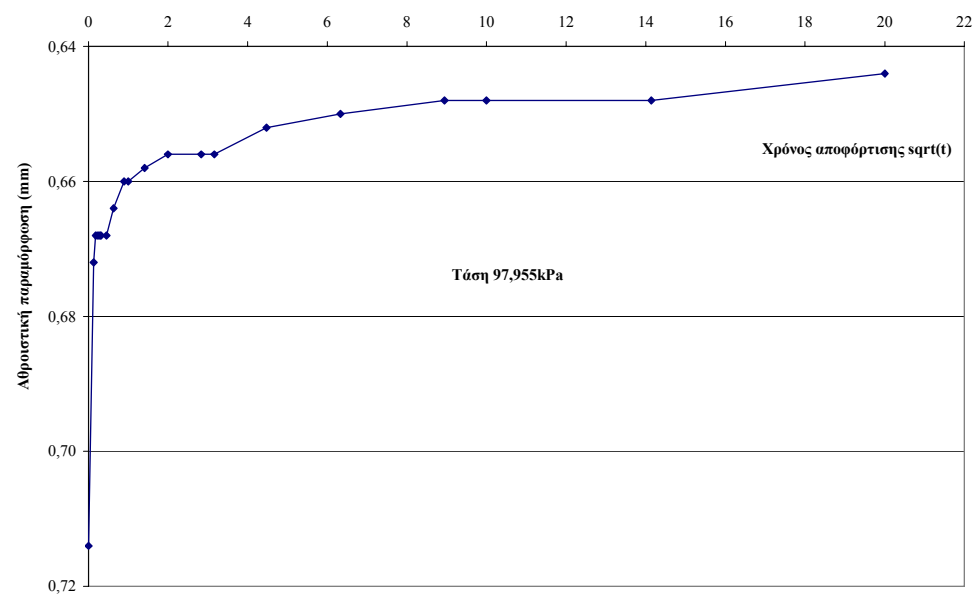
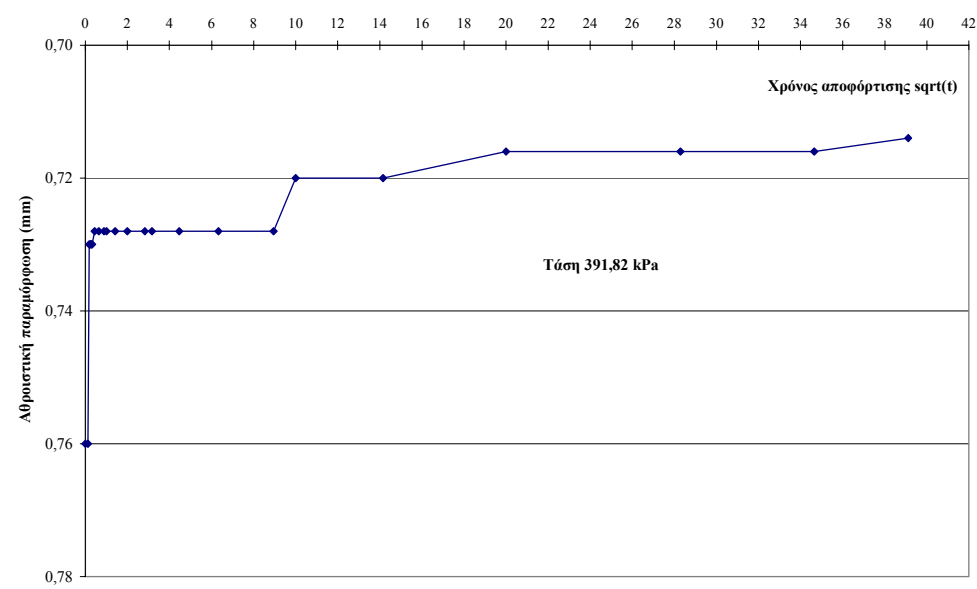
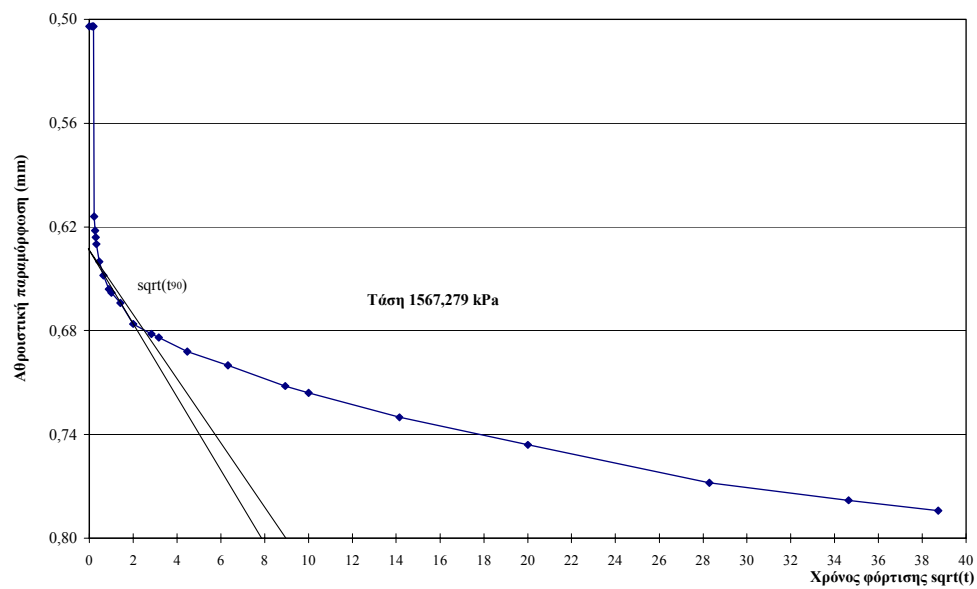


Πίνακας 5: Αποτελέσματα δοκιμής στερεοποίησης για το κάθετο στη στρώση δοκίμιο του δείγματος Γ1.

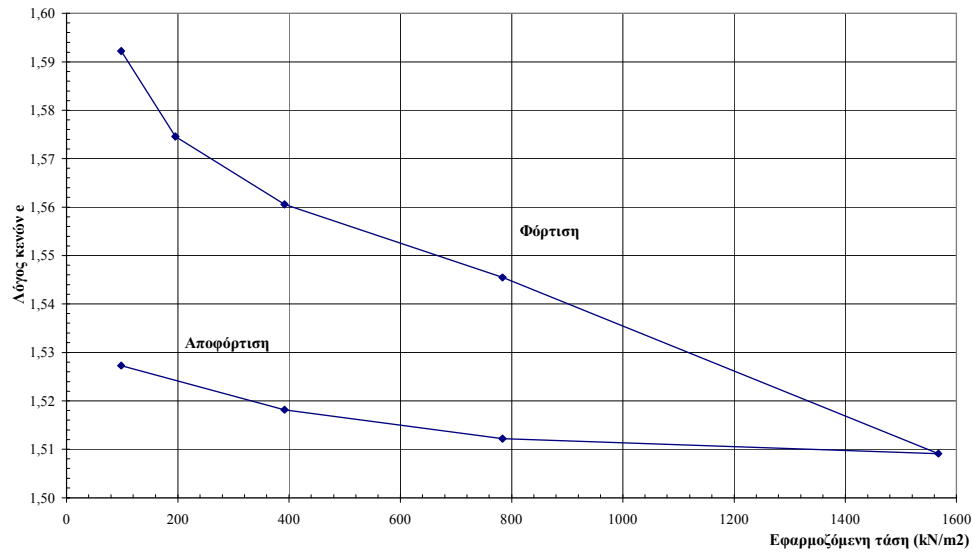
<b>ΤΟΜΕΑΣ:</b>	<b>6</b>	<b>Τάση P (kPa)</b>	<b><math>\Delta H</math> (mm)</b>	<b><math>\Delta e = \Delta H/H_s</math></b>	<b><math>e = e_o - \Delta e</math></b>	<b><math>\varepsilon</math></b>	<b><math>\Delta \varepsilon</math></b>	<b><math>\Delta P</math> (kPa)</b>	<b><math>E</math> (kN/m<sup>2</sup>)</b>
<b>ΘΕΣΗ:</b>	<b>Γ</b>	97,955	0,144	0,01871	1,59223	0,007	-	-	-
<b>ΔΕΙΓΜΑ:</b>	<b>1</b>	195,910	0,280	0,03637	1,57456	0,014	0,007	97,955	14477,165
<b>Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση</b>		391,820	0,388	0,05040	1,56053	0,019	0,005	195,910	36461,007
<b>Διάμ. δοκίμ. D (mm):</b>	50,50	783,640	0,504	0,06547	1,54546	0,025	0,006	391,820	67892,910
<b>Υψος δοκιμίου <math>H_o</math> (mm):</b>	20,10	1567,279	0,784	0,10184	1,50909	0,039	0,014	783,640	56254,126
<b>Επιφ. δοκιμίου A (mm<sup>2</sup>):</b>	2002,96	783,640	0,760	0,09872	1,51221	0,038	-0,001	-783,640	656298,132
<b>Όγκος δοκιμίου (mm<sup>3</sup>):</b>	40259,53	391,820	0,714	0,09275	1,51818	0,036	-0,002	-391,820	171208,208
<b>Ισοδ. ύψος εδαφ. κόκκων <math>H_s</math> (mm):</b>	7,69840	97,955	0,644	0,08365	1,52728	0,032	-0,003	-293,865	84381,188
<b>Αρχική υγρασία <math>w_i</math> (%):</b>	37,39								<b>155281,820</b>
<b>Τελική υγρασία <math>w_f</math> (%):</b>	55,80								
<b>Πυκν. νερού <math>\rho_w</math> (Mg/m<sup>3</sup>):</b>	1,000	<b><math>C_c</math></b>	<b><math>\alpha_v</math> (m<sup>2</sup>/kN)</b>	<b><math>m_v</math> (m<sup>2</sup>/MN)</b>	<b><math>P_c</math></b>	<b>d</b>	<b><math>t_{90}</math></b>	<b><math>C_v</math> (m<sup>2</sup>/year)</b>	<b>k (m/sec)</b>
<b>Αρχικός λόγος κενών <math>e_o</math>:</b>	1,61093	-	-	-	783,640	10,014	1,00	44,6958	-
<b>Φαιν. βάρος εδάφους <math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>):</b>	13,16	0,0587	1,80E-04	0,0691		9,980	1,32	33,5673	7,21E-10
<b>Κορ. φαιν. βάρ. εδάφους <math>\gamma_{sat}</math> (kN/m<sup>3</sup>):</b>	15,63	0,0466	7,16E-05	0,0274	<b><math>P_o</math></b>	9,953	2,19	20,1575	1,72E-10
<b>Αρχ. μάζα δοκιμίου <math>m_o</math> (gr):</b>	54,02	0,0501	3,85E-05	0,0147	795,390	9,924	4,84	9,0694	4,16E-11
<b>Τελ. μάζα δοκιμίου <math>m_f</math> (gr):</b>	61,26	0,1208	4,64E-05	0,0178		9,854	5,06	8,5489	4,73E-11
<b>Ξηρή μάζα δοκιμίου <math>m_d</math> (gr):</b>	39,32	0,0104	3,98E-06	0,0015	<b>OCR</b>	9,860			
<b>Ειδ. βάρ. κόκκων <math>G_s</math> (gr/cm<sup>3</sup>):</b>	2,55	0,0198	1,53E-05	0,0058	0,985	9,872			
<b>Αρχ. βαθμ. κορεσμού <math>S_i</math> (%):</b>	59,18%	0,0151	3,09E-05	0,0119		9,889			
<b>Τελ. βαθμ. κορεσμού <math>S_f</math> (%):</b>	88,33%	<b>0,0459</b>	<b>5,53E-05</b>	<b>0,0212</b>					

Διαγράμματα αξονικής ανηγμ. παραμόρφωσης  $\varepsilon$  - τετραγωνικής ρίζας του χρόνου  $t$  για κάθε στάδιο φόρτισης-αποφόρτισης (Δείγμα Γ1, κάθετο στη στρώση).

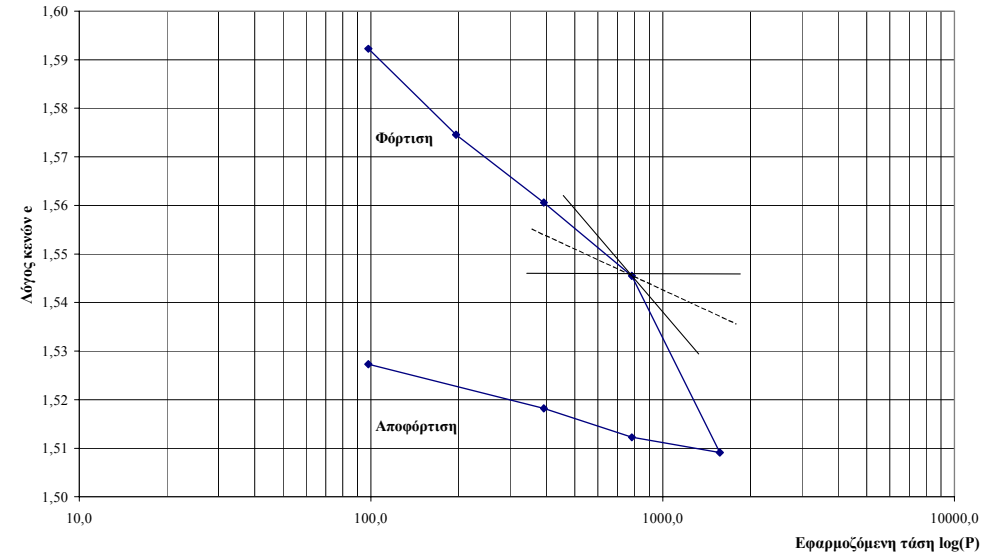




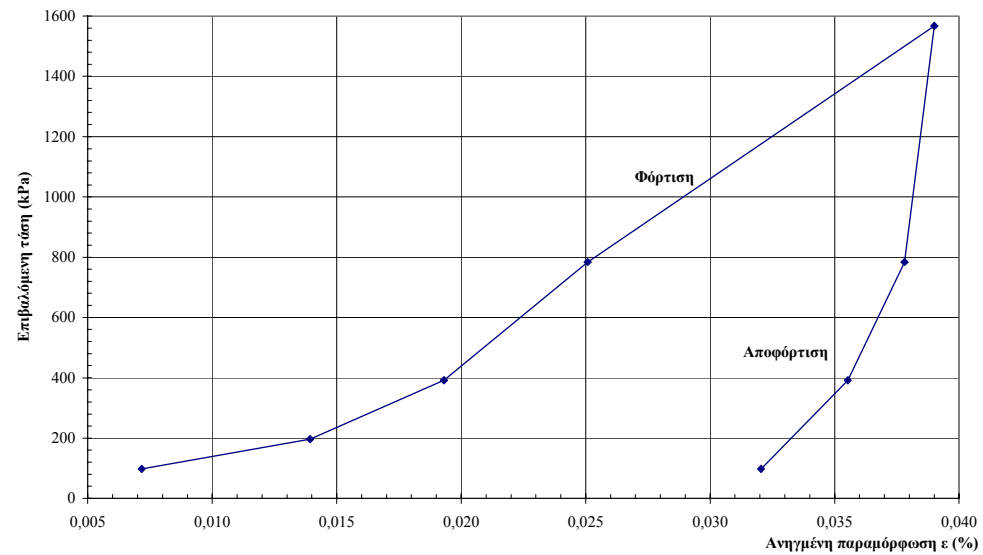
Διάγραμμα λόγου κενόν  $e$  συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης



Διάγραμμα λόγου κενόν  $e$  συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης



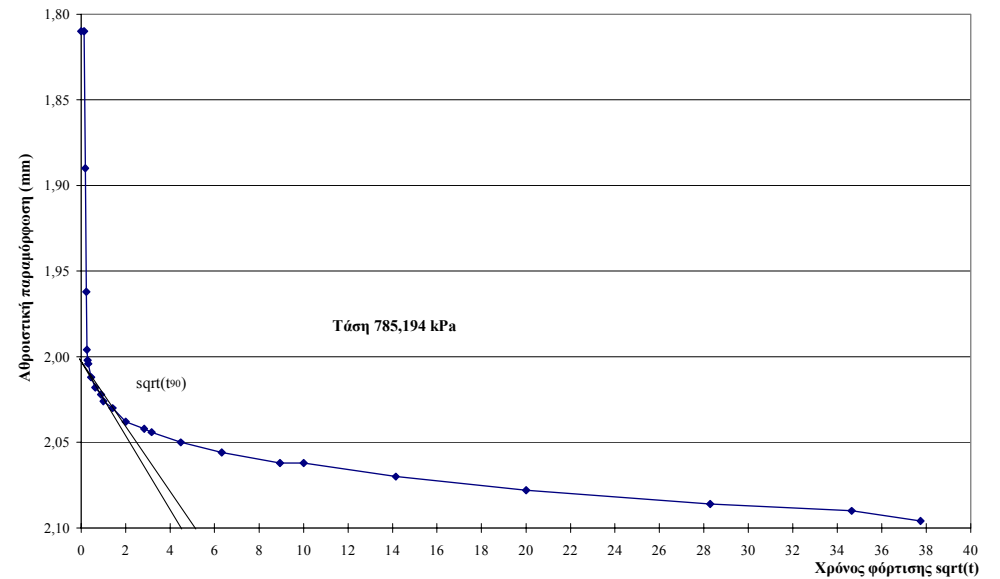
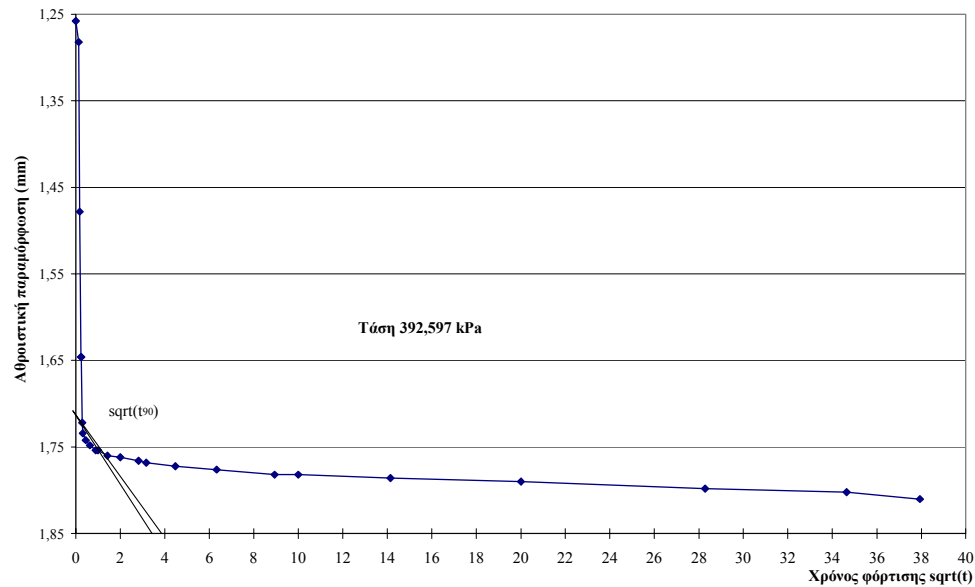
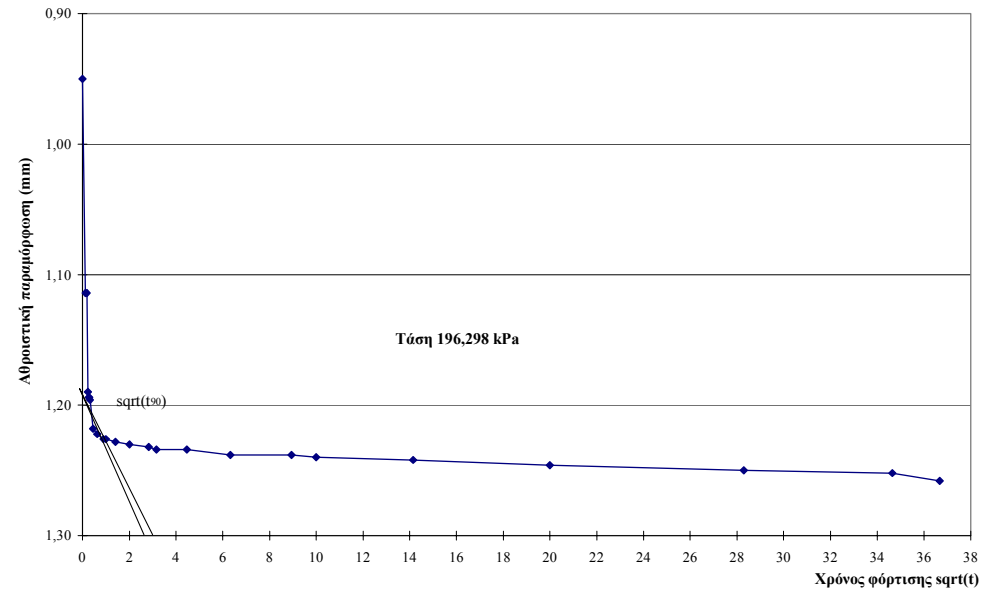
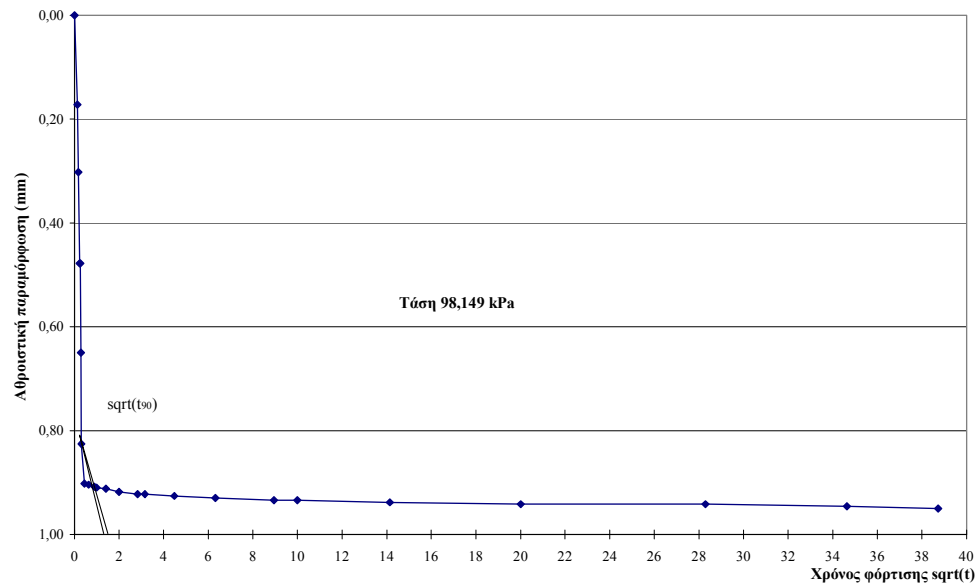
Διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης συναρτήσει της ανηγμένης παραμόρφωσης

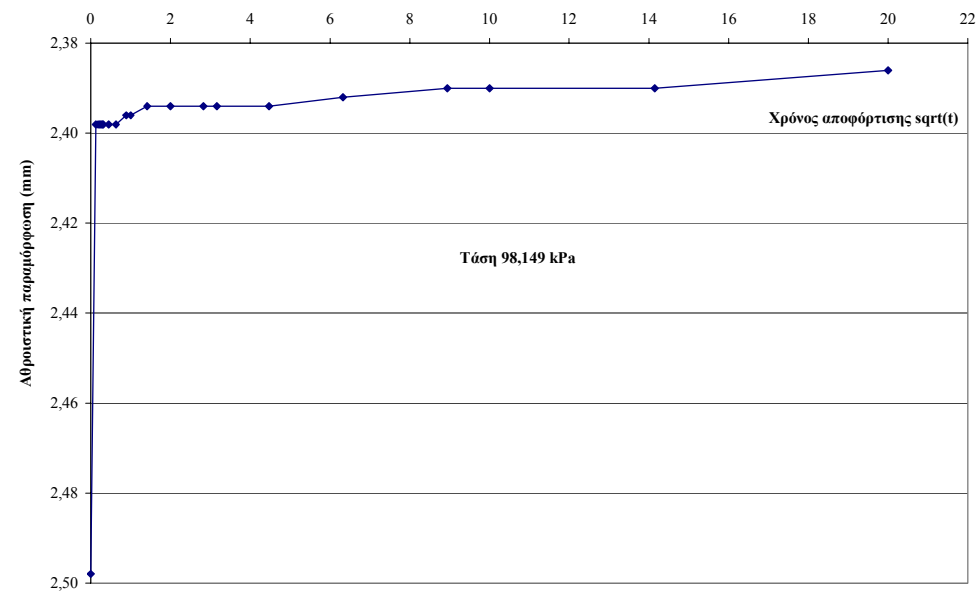
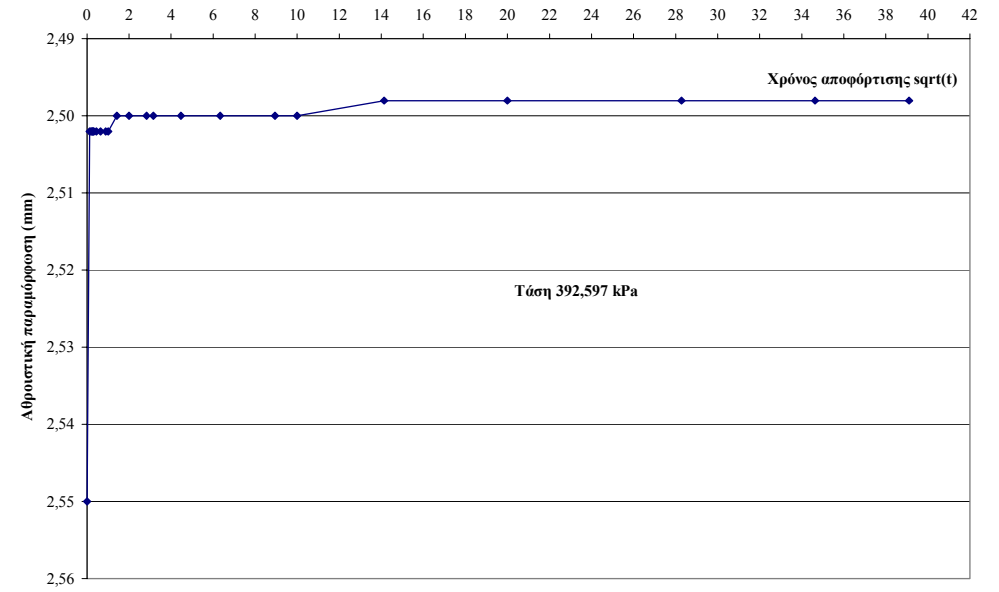
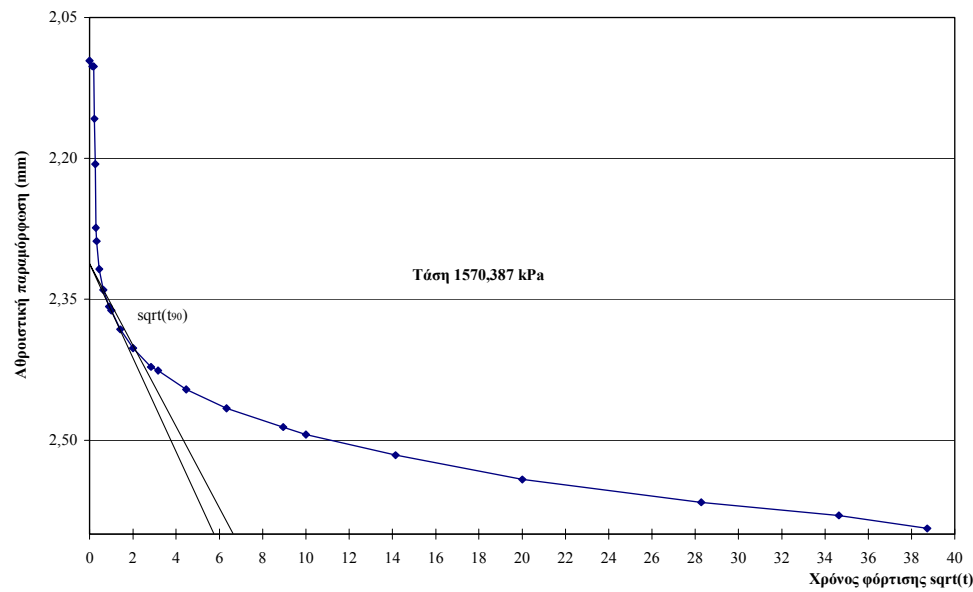


Πίνακας 6: Αποτελέσματα δοκιμής στερεοποίησης για το παράλληλο στη στρώση δοκίμιο του δείγματος Γ1.

TOMEΑΣ:	6	Τάση P (kPa)	$\Delta H$ (mm)	$\Delta e = \Delta H/H_s$	$e = e_o - \Delta e$	$\varepsilon$	$\Delta \varepsilon$	$\Delta P$ (kPa)	E (kN/m <sup>2</sup> )
ΘΕΣΗ:	Γ	98,149	0,950	0,12310	1,49430	0,047	-	-	-
ΔΕΙΓΜΑ:	1	196,298	1,258	0,16300	1,45439	0,062	0,015	98,149	6437,058
Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση		392,597	1,810	0,23453	1,38287	0,090	0,027	196,298	7183,384
Διάμ. δοκίμ. D (mm):	50,45	785,194	2,096	0,27159	1,34581	0,104	0,014	392,597	27728,866
Υψος δοκιμίου H <sub>o</sub> (mm):	20,20	1570,387	2,594	0,33612	1,28128	0,128	0,025	785,194	31849,220
Επιφ. δοκιμίου A (mm <sup>2</sup> ):	1999,00	785,194	2,550	0,33041	1,28698	0,126	-0,002	-785,194	360475,257
Όγκος δοκιμίου (mm <sup>3</sup> ):	40379,75	392,597	2,498	0,32368	1,29372	0,124	-0,003	-392,597	152508,763
Ισοδ. ύψος εδαφ. κόκκων H <sub>s</sub> (mm):	7,7176	98,149	2,386	0,30916	1,30823	0,118	-0,006	-294,448	53105,730
Αρχική υγρασία w <sub>i</sub> (%):	37,95								91326,897
Τελική υγρασία w <sub>f</sub> (%):	55,74								
Πυκν. νερού ρ <sub>w</sub> (Mg/m <sup>3</sup> ):	1,000	C <sub>c</sub>	$\alpha_v$ (m <sup>2</sup> /kN)	m <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> /MN)	P <sub>c</sub>	d	t <sub>90</sub>	C <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> /year)	k (m/sec)
Αρχικός λόγος κενών e <sub>o</sub> :	1,61740	-	-	-	785,194	9,863	0,25	173,4144	-
Φαιν. βάρος εδάφους γ (kN/m <sup>3</sup> ):	13,18	0,1326	4,07E-04	0,1554		9,786	0,64	66,6864	3,22E-09
Κορ. φαιν. βάρ. εδάφους γ <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> ):	15,62	0,2376	3,64E-04	0,1392	P <sub>o</sub>	9,648	1,00	41,4840	1,80E-09
Αρχ. μάζα δοκιμίου m <sub>o</sub> (gr):	54,27	0,1231	9,44E-05	0,0361	759,390	9,576	1,96	20,8528	2,34E-10
Τελ. μάζα δοκιμίου m <sub>f</sub> (gr):	61,27	0,2144	8,22E-05	0,0314		9,452	4,20	9,4743	9,25E-11
Ξηρή μάζα δοκιμίου m <sub>d</sub> (gr):	39,34	0,0189	7,26E-06	0,0028	OCR	9,463			
Ειδ. βάρ. κόκκων G <sub>s</sub> (gr/cm <sup>3</sup> ):	2,55	0,0224	1,72E-05	0,0066	1,034	9,476			
Αρχ. βαθμ. κορεσμού S <sub>i</sub> (%):	59,83%	0,0241	4,93E-05	0,0188		9,504			
Τελ. βαθμ. κορεσμού S <sub>f</sub> (%):	87,89%	0,1104	1,46E-04	0,0557					

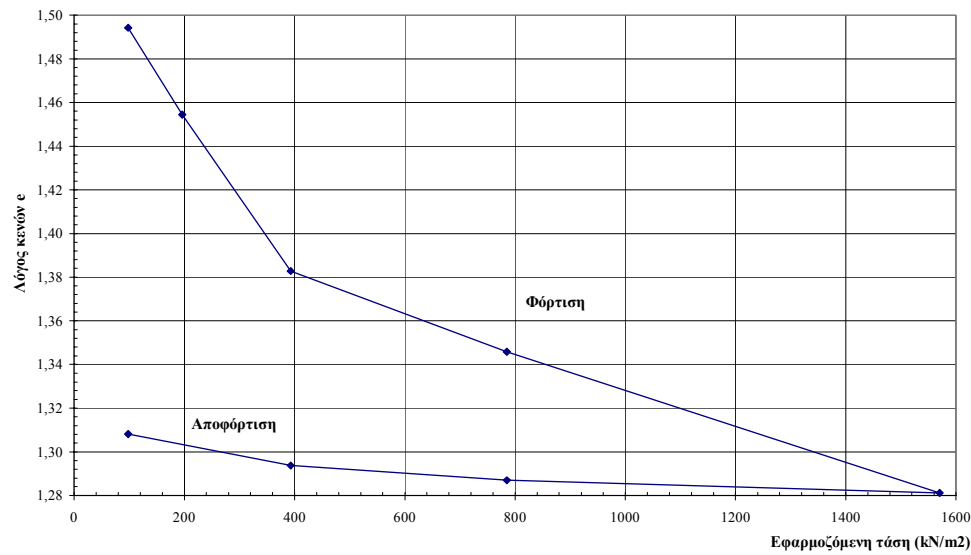
Διαγράμματα αξονικής ανηγμ. παραμόρφωσης  $\varepsilon$  - τετραγωνικής ρίζας του χρόνου  $t$  για κάθε στάδιο φόρτισης-αποφόρτισης (Δείγμα Γ1, παρ/λο στη στρώση).



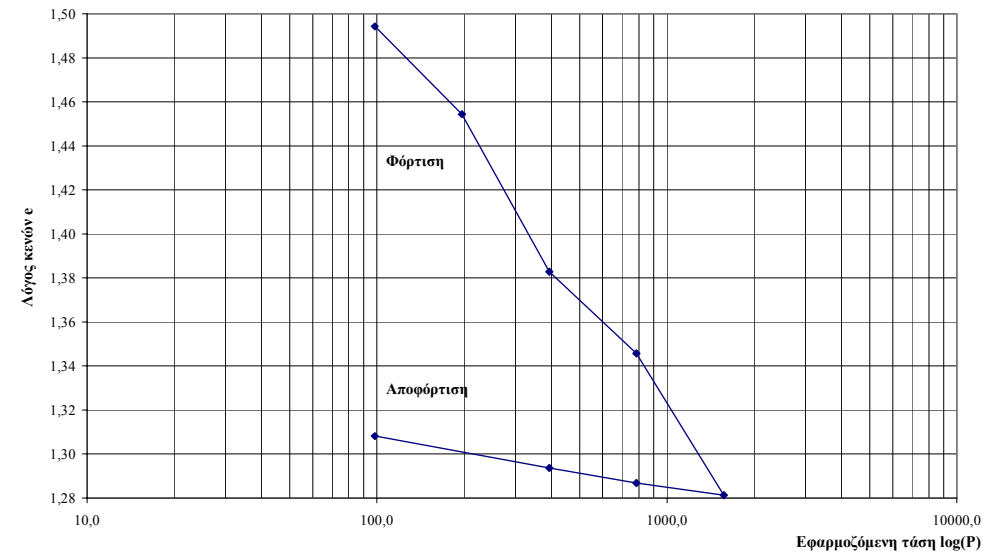




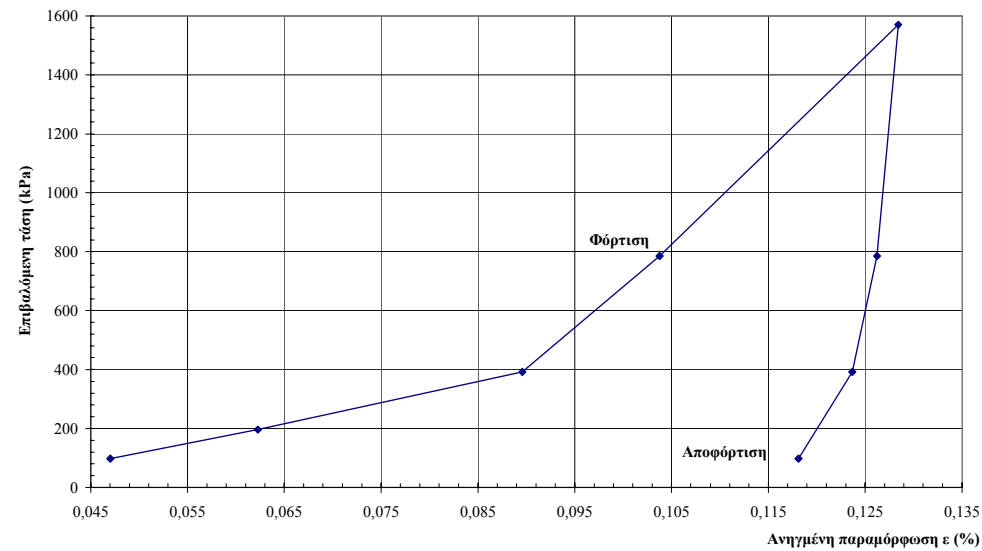
Διάγραμμα λόγου κενών  $e$  συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης



Διάγραμμα λόγου κενών  $e$  συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης



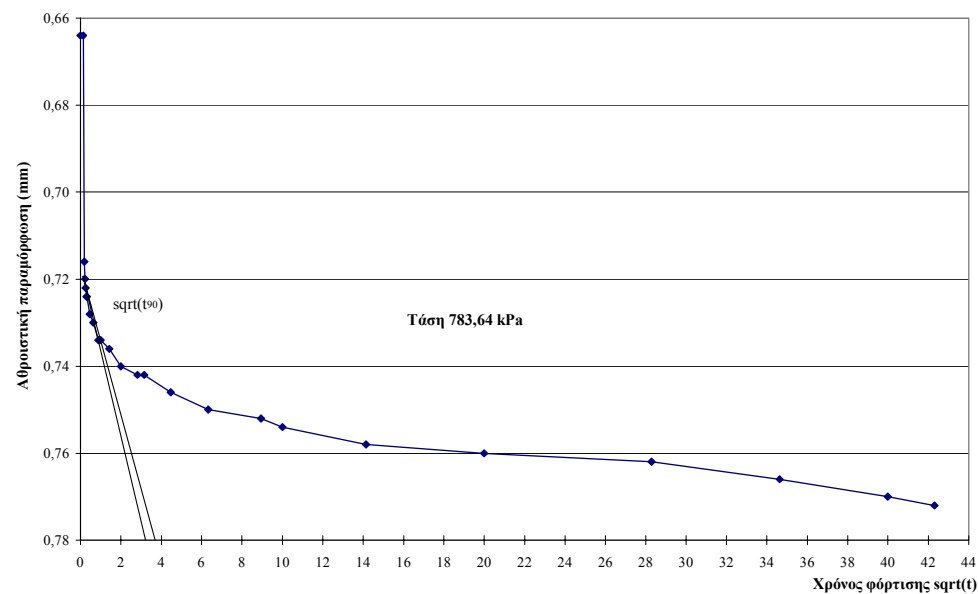
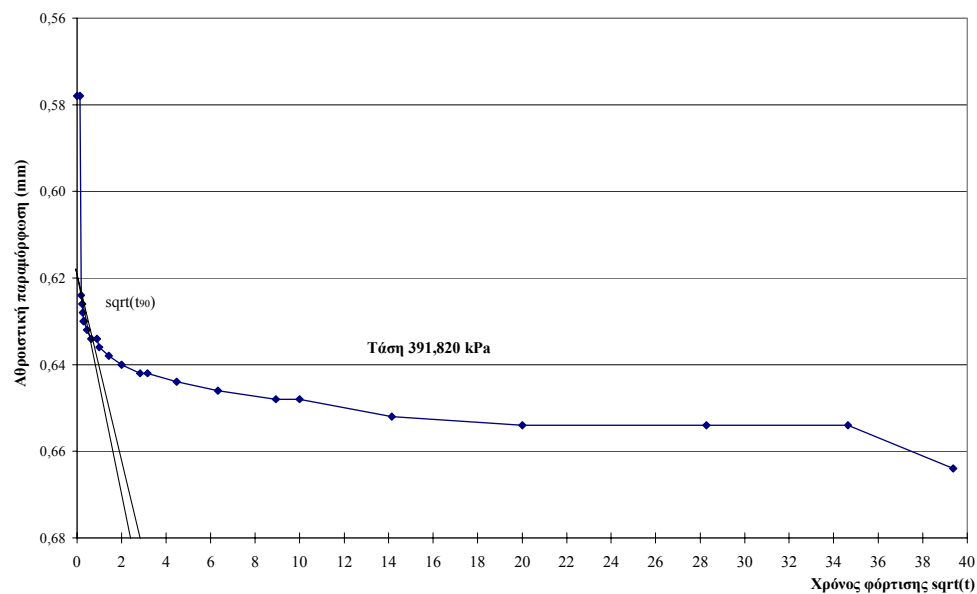
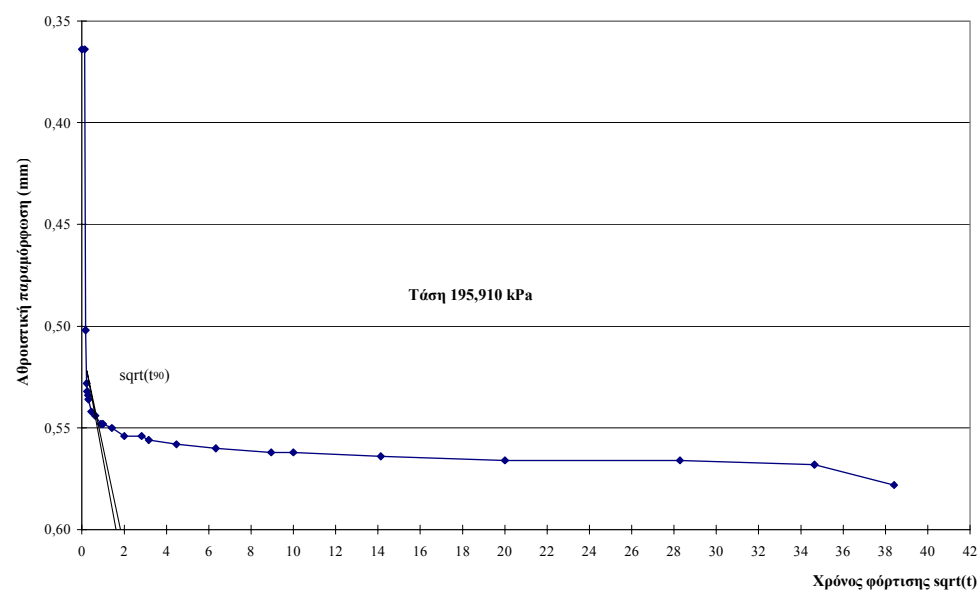
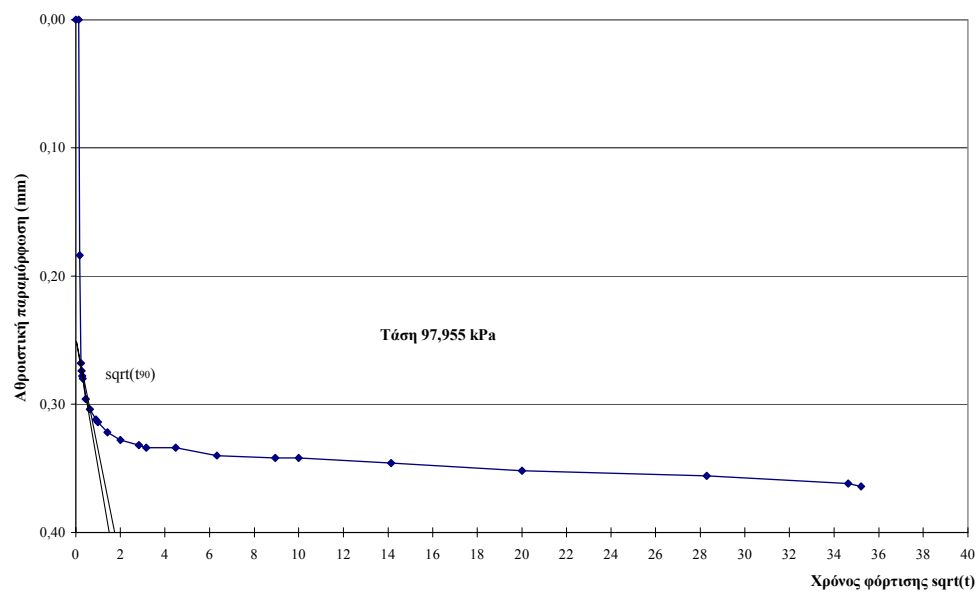
Διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης συναρτήσει της ανηγμένης παραμόρφωσης

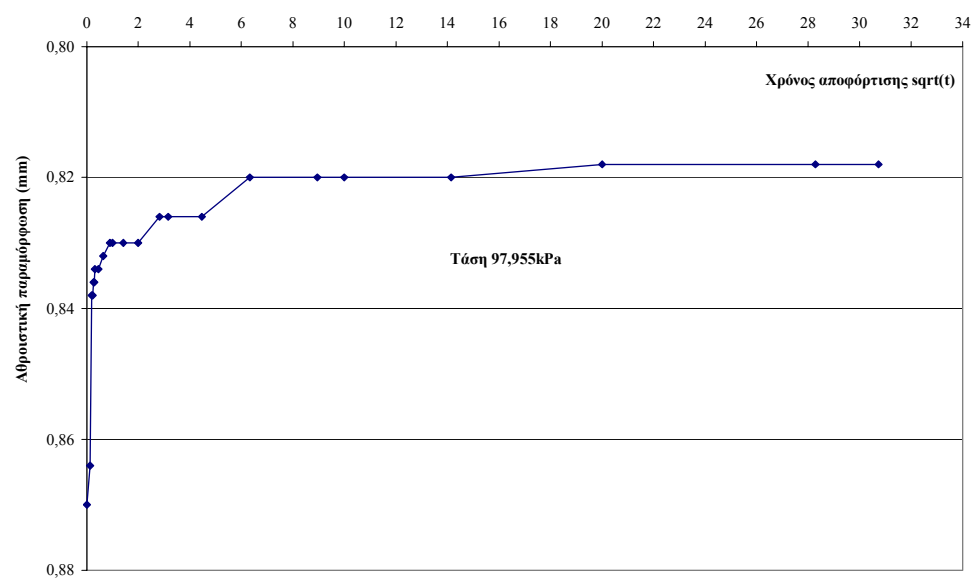
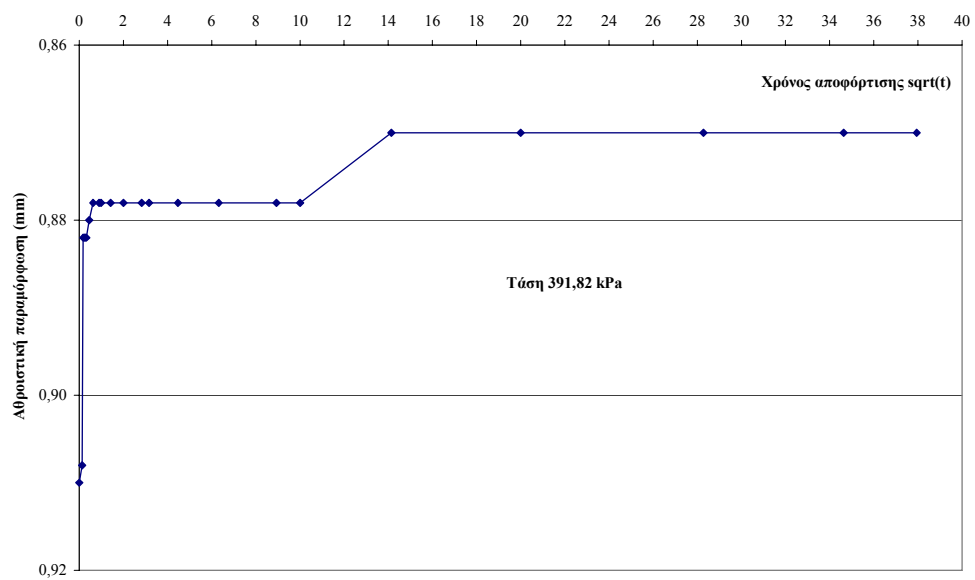
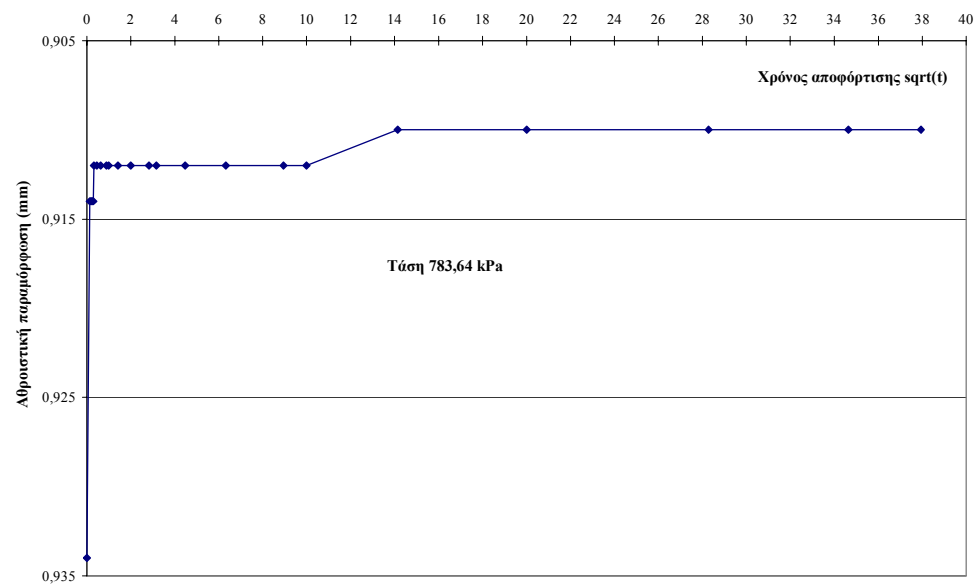
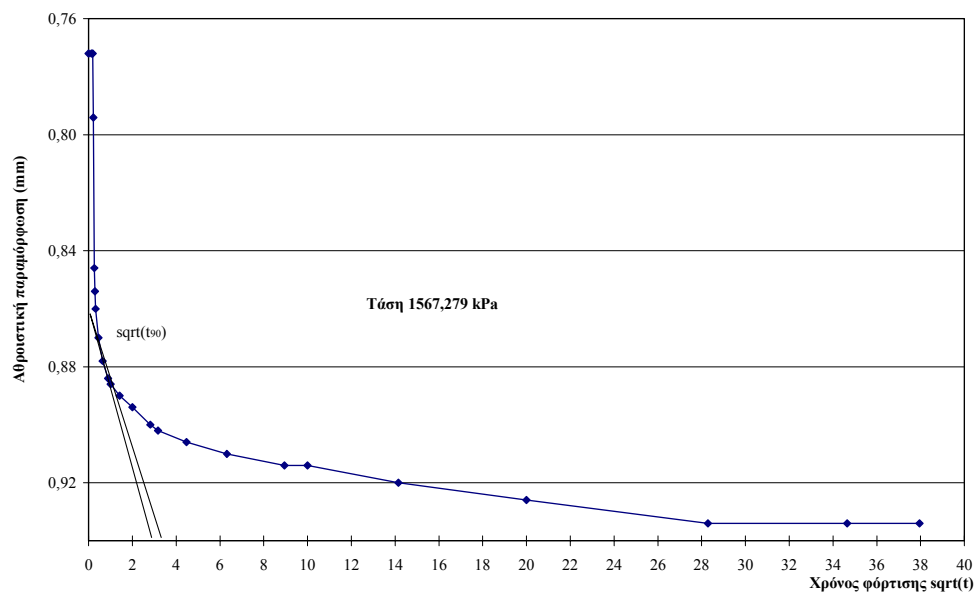


Πίνακας 7: Αποτελέσματα δοκιμής στερεοποίησης για το κάθετο στη στρώση δοκίμιο του δείγματος Γ2.

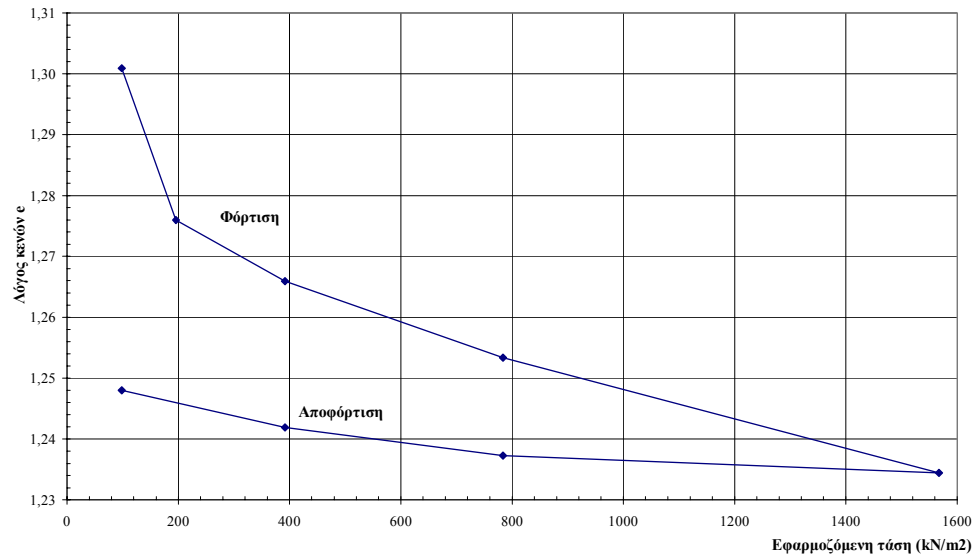
ΤΟΜΕΑΣ:	6	Τάση P (kPa)	$\Delta H$ (mm)	$\Delta e = \Delta H/H_s$	$e = e_o - \Delta e$	$\varepsilon$	$\Delta \varepsilon$	$\Delta P$ (kPa)	$E$ (kN/m <sup>2</sup> )
ΘΕΣΗ:	Γ	97,955	0,364	0,04244	1,30091	0,018	-	-	-
ΔΕΙΓΜΑ:	2	195,910	0,578	0,06739	1,27596	0,029	0,011	97,955	9200,441
Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση		391,820	0,664	0,07741	1,26593	0,033	0,004	195,910	45788,242
Διάμ. δοκίμ. D (mm):	50,50	783,640	0,772	0,09000	1,25334	0,038	0,005	391,820	72922,015
Ύψος δοκιμίου $H_o$ (mm):	20,10	1567,279	0,934	0,10889	1,23445	0,046	0,008	783,640	97229,353
Επιφ. δοκιμίου A (mm <sup>2</sup> ):	2002,96	783,640	0,910	0,10609	1,23725	0,045	-0,001	-783,640	656298,132
Όγκος δοκιμίου (mm <sup>3</sup> ):	40259,53	391,820	0,870	0,10143	1,24191	0,043	-0,002	-391,820	196889,440
Ισοδ. ύψος εδαφ. κόκκων $H_s$ (mm):	8,5775	97,955	0,818	0,09537	1,24798	0,041	-0,003	-293,865	113590,061
Αρχική υγρασία $w_i$ (%):	51,15								170273,955
Τελική υγρασία $w_f$ (%):	52,02								
Πυκν. νερού $\rho_w$ (Mg/m <sup>3</sup> ):	1,000	$C_c$	$\alpha_v$ (m <sup>2</sup> /kN)	$m_v$ (m <sup>2</sup> /MN)	$P_c$	d	$t_{90}$	$C_v$ (m <sup>2</sup> /year)	k (m/sec)
Αρχικός λόγος κενών $e_o$ :	1,34334	-	-	-	783,640	9,959	0,42	104,6299	-
Φαιν. βάρος εδάφους $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> ):	16,14	0,0829	2,55E-04	0,1087		9,906	0,49	89,2499	3,02E-09
Κορ. φαιν. βάρ. εδάφους $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ):	16,30	0,0333	5,12E-05	0,0218	$P_o$	9,884	0,56	77,4095	5,26E-10
Αρχ. μάζα δοκιμίου $m_o$ (gr):	66,22	0,0418	3,21E-05	0,0137	795,390	9,857	1,56	27,7154	1,18E-10
Τελ. μάζα δοκιμίου $m_f$ (gr):	66,60	0,0627	2,41E-05	0,0103		9,817	1,96	21,9133	7,01E-11
Ξηρή μάζα δοκιμίου $m_d$ (gr):	43,81	0,0093	3,57E-06	0,0015	OCR				
Ειδ. βάρ. κόκκων $G_s$ (gr/cm <sup>3</sup> ):	2,55	0,0155	1,19E-05	0,0051	0,985				
Αρχ. βαθμ. κορεσμού $S_i$ (%):	97,10%	0,0101	2,06E-05	0,0088					
Τελ. βαθμ. κορεσμού $S_f$ (%):	98,75%	0,0365	5,69E-05	0,0243					

Διαγράμματα αξονικής ανηγμ. παραμόρφωσης  $\varepsilon$  - τετραγωνικής ρίζας του χρόνου  $t$  για κάθε στάδιο φόρτισης-αποφόρτισης (Δείγμα Γ2, κάθετο στη στρώση).

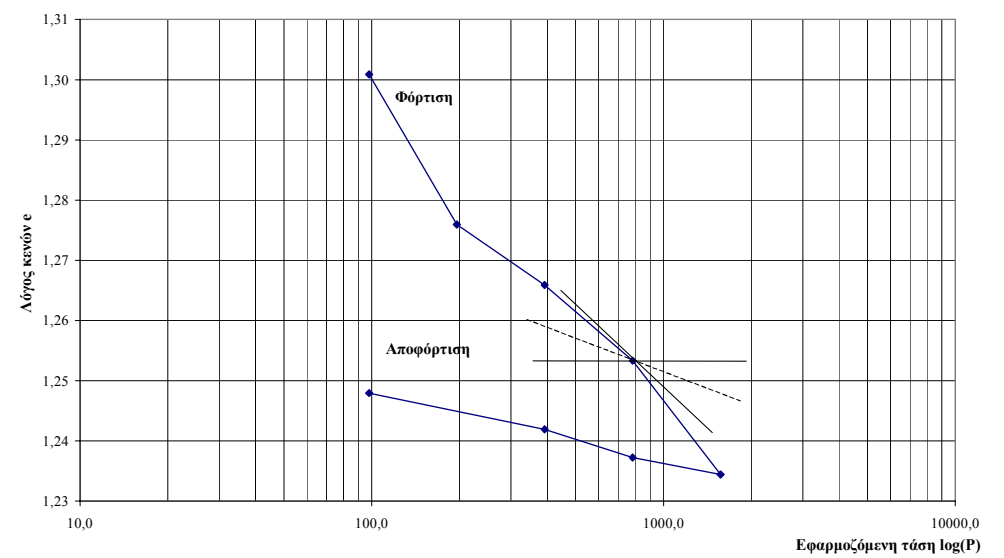




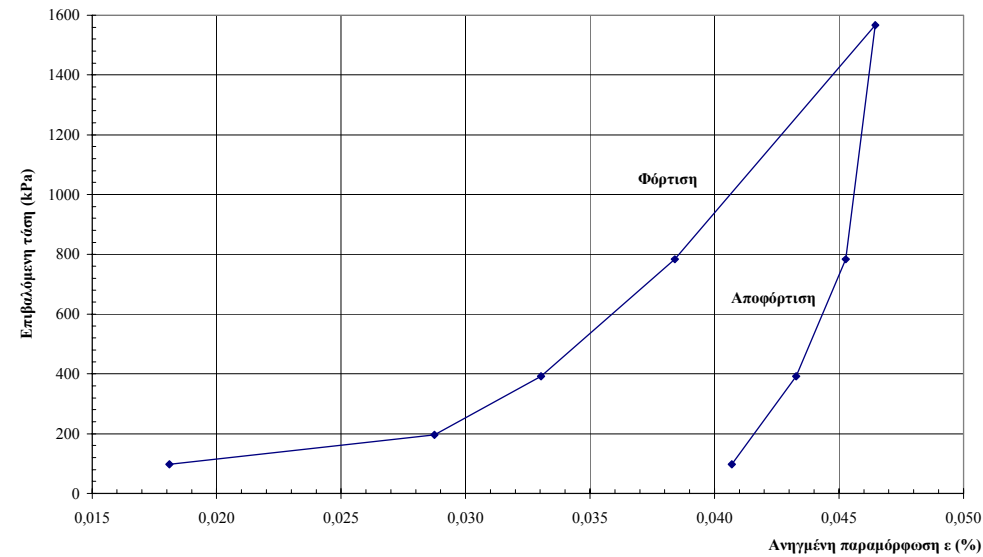
Διάγραμμα λόγου κενών  $e$  συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης



Διάγραμμα λόγου κενών  $e$  συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης



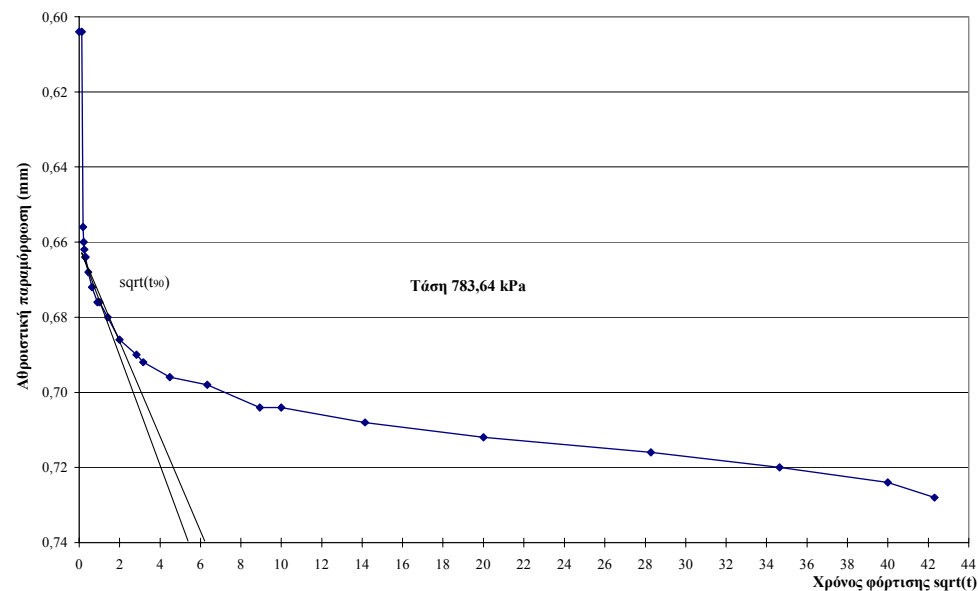
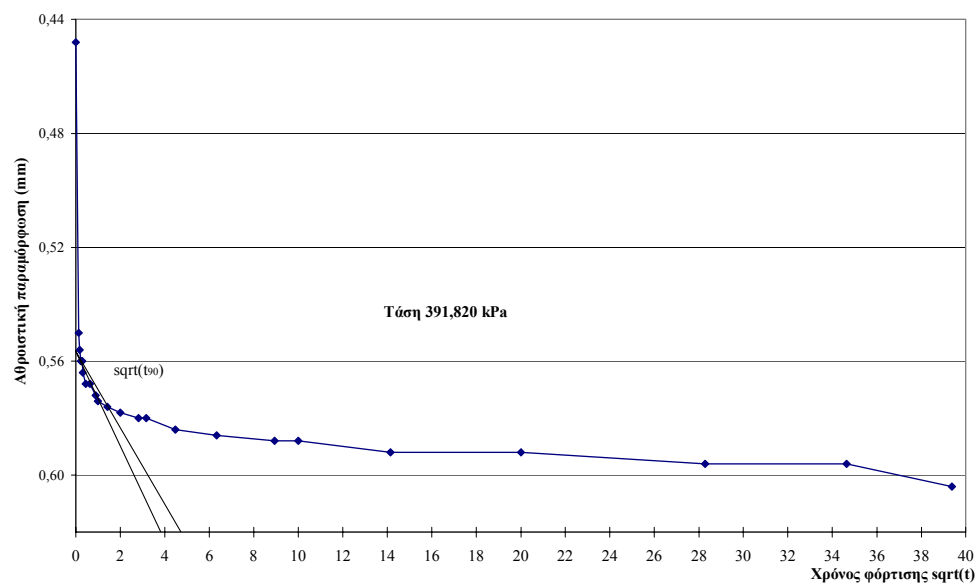
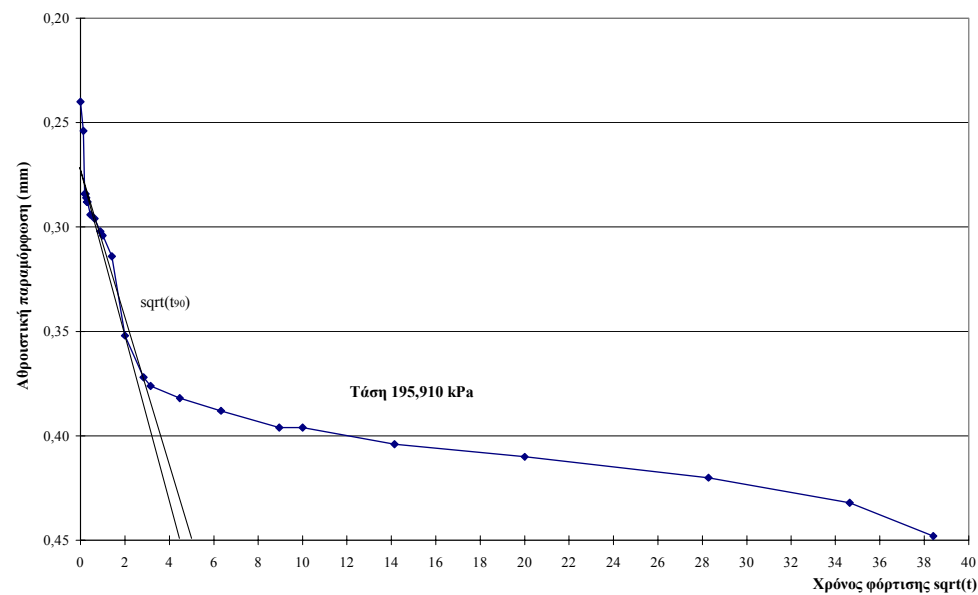
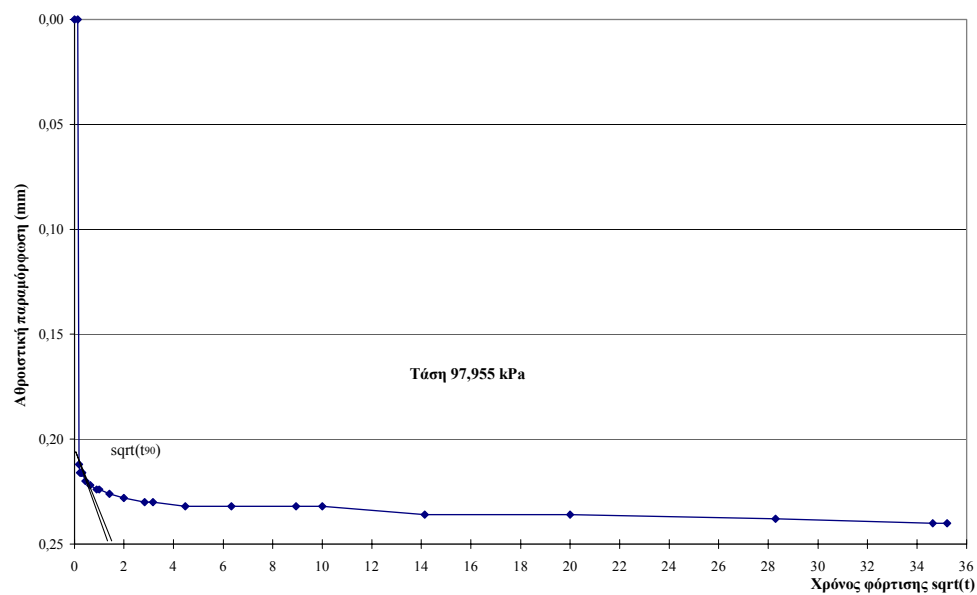
Διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης συναρτήσει της ανηγμένης παραμόρφωσης

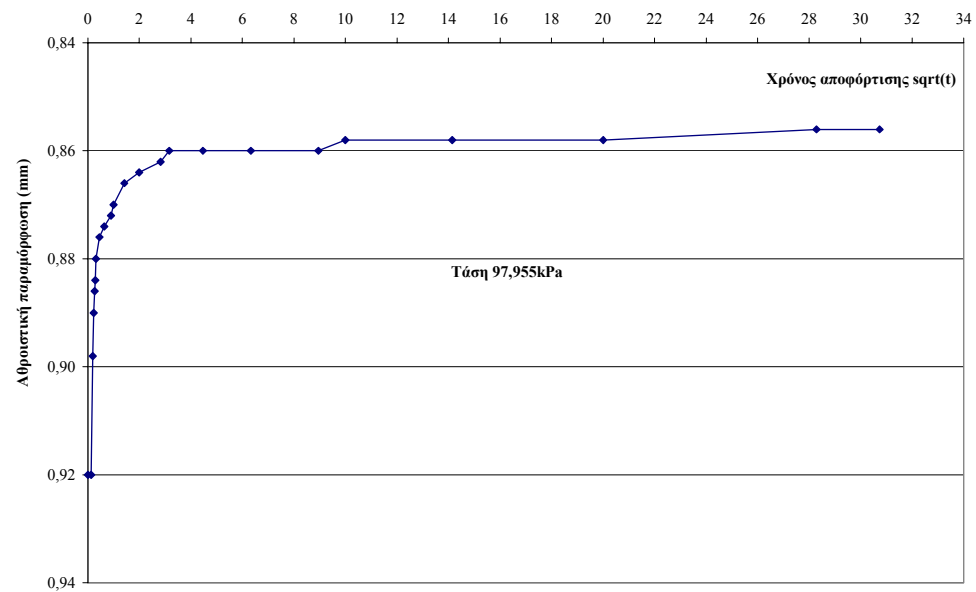
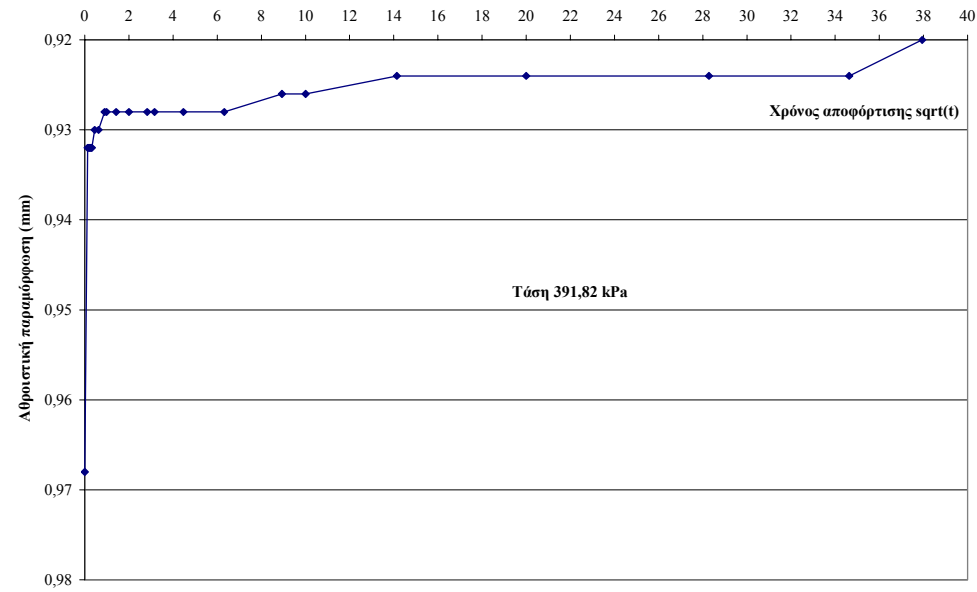
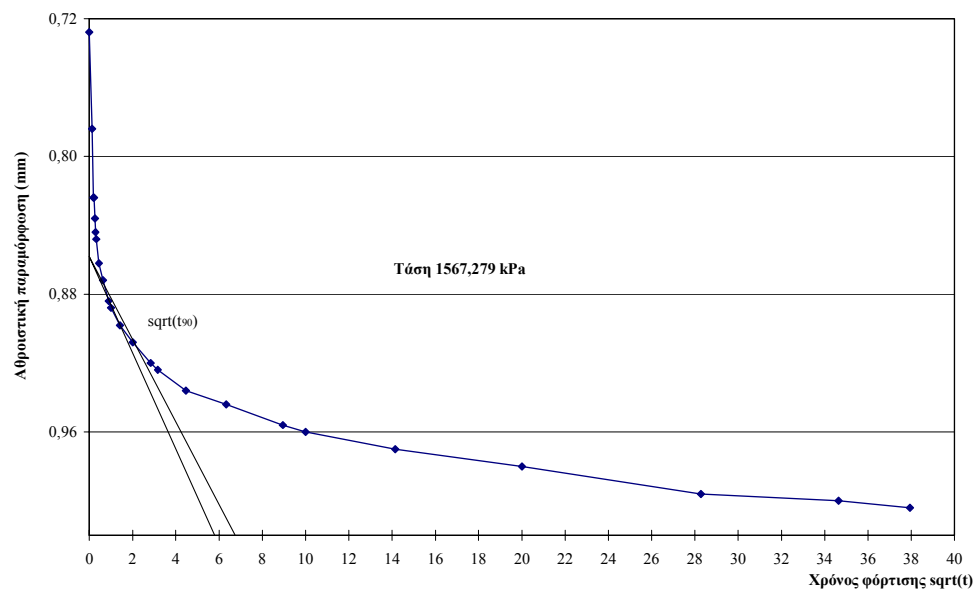


Πίνακας 8: Αποτελέσματα δοκιμής στερεοποίησης για το παράλληλο στη στρώση δοκίμιο του δείγματος Γ2.

ΤΟΜΕΑΣ:	6	Τάση P (kPa)	$\Delta H$ (mm)	$\Delta e = \Delta H/H_s$	$e = e_0 - \Delta e$	$\varepsilon$	$\Delta \varepsilon$	$\Delta P$ (kPa)	E (kN/m <sup>2</sup> )
ΘΕΣΗ:	Γ	97,955	0,240	0,02837	1,34751	0,012	-	-	-
ΔΕΙΓΜΑ:	2	195,910	0,448	0,05295	1,32293	0,022	0,010	97,955	9465,838
Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση		391,820	0,604	0,07139	1,30449	0,030	0,008	195,910	25242,236
Διάμ. δοκίμ. D (mm):	50,50	783,640	0,728	0,08605	1,28983	0,036	0,006	391,820	63512,722
Ύψος δοκιμίου H <sub>0</sub> (mm):	20,10	1567,279	1,004	0,11868	1,25720	0,050	0,014	783,640	57069,403
Επιφ. δοκιμίου A (mm <sup>2</sup> ):	2002,96	783,640	0,968	0,11442	1,26146	0,048	-0,002	-783,640	437532,088
Όγκος δοκιμίου (mm <sup>3</sup> ):	40259,53	391,820	0,920	0,10875	1,26713	0,046	-0,002	-391,820	164074,533
Ισοδ. ύψος εδαφ. κόκκων H <sub>s</sub> (mm):	8,4600	97,955	0,856	0,10118	1,27470	0,043	-0,003	-293,865	92291,925
Αρχική υγρασία w <sub>i</sub> (%):	49,60								121312,678
Τελική υγρασία w <sub>f</sub> (%):	52,88								
Πυκν. νερού ρ <sub>w</sub> (Mg/m <sup>3</sup> ):	1,000	C <sub>c</sub>	$\alpha_v$ (m <sup>2</sup> /kN)	$m_v$ (m <sup>2</sup> /MN)	P <sub>c</sub>	d	t <sub>90</sub>	C <sub>v</sub> (m <sup>2</sup> /year)	k (m/sec)
Αρχικός λόγος κενών e <sub>0</sub> :	1,37588	-	-	-	783,640	9,990	0,30	147,0472	-
Φαιν. βάρος εδάφους γ (kN/m <sup>3</sup> ):	15,75	0,0817	2,51E-04	0,1056		9,938	8,41	5,2342	1,72E-10
Κορ. φαιν. βάρ. εδάφους γ <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> ):	16,21	0,0613	9,41E-05	0,0396	P <sub>0</sub>	9,899	1,99	21,9683	2,71E-10
Αρχ. μάζα δοκιμίου m <sub>0</sub> (gr):	64,64	0,0487	3,74E-05	0,0157	795,390	9,868	4,00	10,8505	5,31E-11
Τελ. μάζα δοκιμίου m <sub>f</sub> (gr):	66,06	0,1084	4,16E-05	0,0175		9,799	4,84	8,8424	4,82E-11
Ξηρή μάζα δοκιμίου m <sub>d</sub> (gr):	43,21	0,0141	5,43E-06	0,0023	OCR				
Ειδ. βάρ. κόκκων G <sub>s</sub> (gr/cm <sup>3</sup> ):	2,55	0,0188	1,45E-05	0,0061	0,985				
Αρχ. βαθμ. κορεσμού S <sub>i</sub> (%):	91,92%	0,0126	2,57E-05	0,0108					
Τελ. βαθμ. κορεσμού S <sub>f</sub> (%):	98,01%	0,0494	6,71E-05	0,0282					

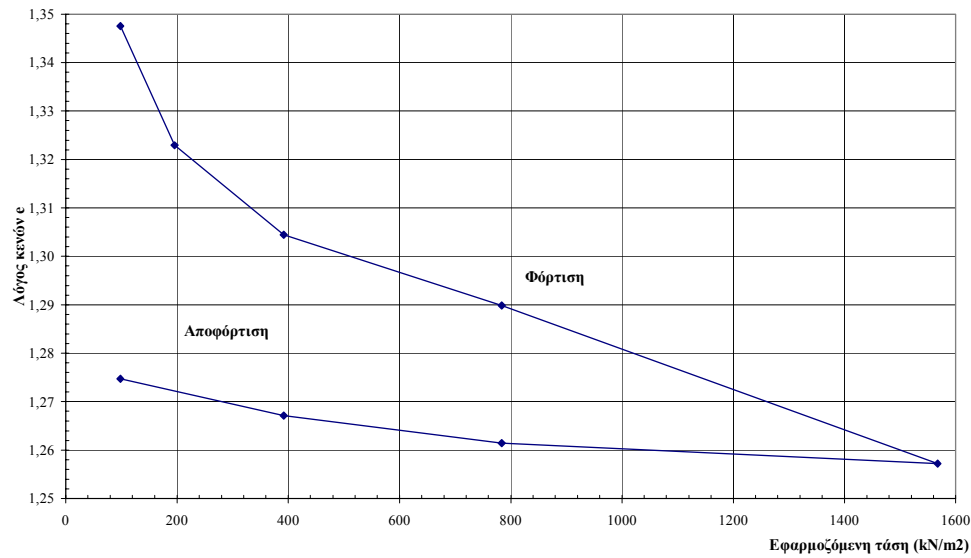
Διαγράμματα αξονικής ανηγμ. παραμόρφωσης  $\varepsilon$  - τετραγωνικής ρίζας του χρόνου  $t$  για κάθε στάδιο φόρτισης-αποφόρτισης (Δείγμα Γ2, παρ/λο στη στρώση).



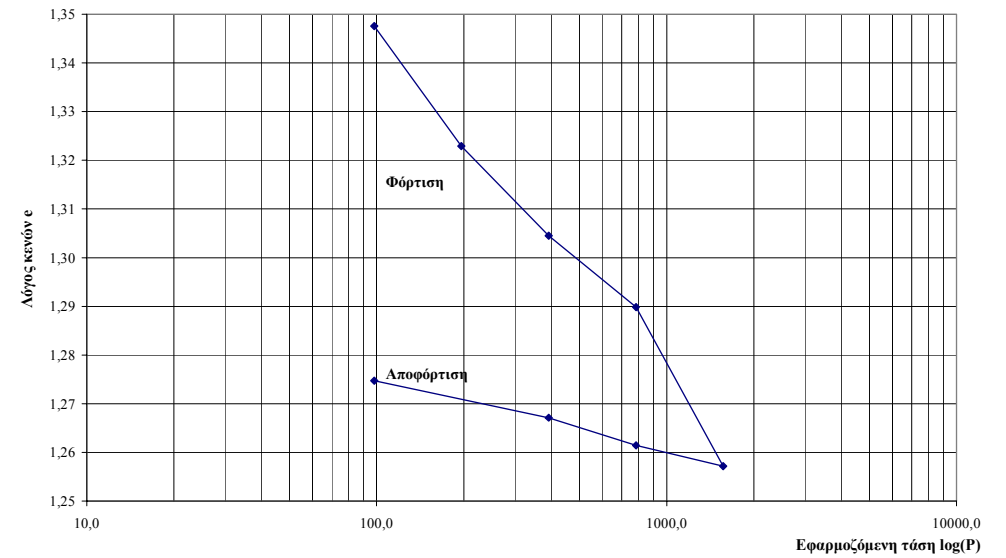




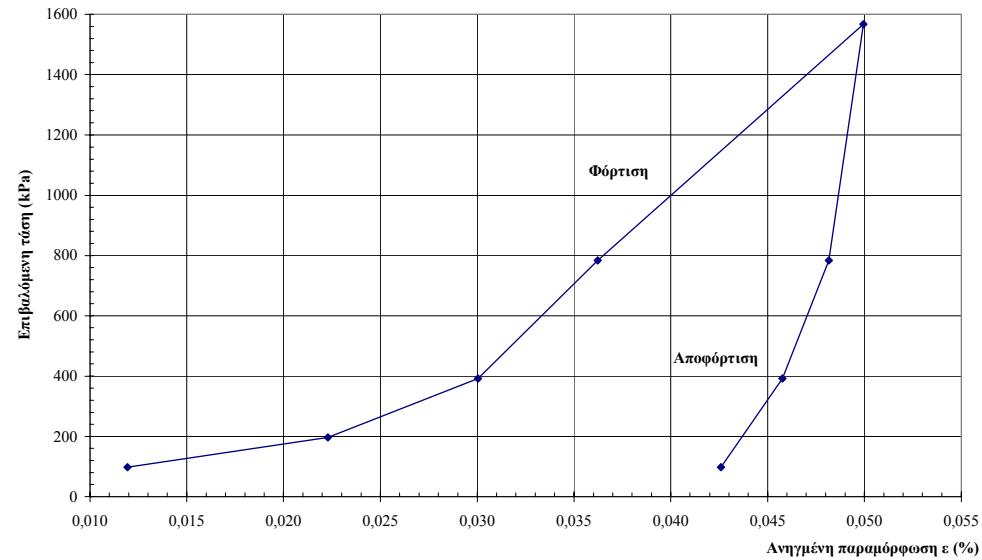
Διάγραμμα λόγου κενών  $e$  συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης



Διάγραμμα λόγου κενών  $e$  συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης



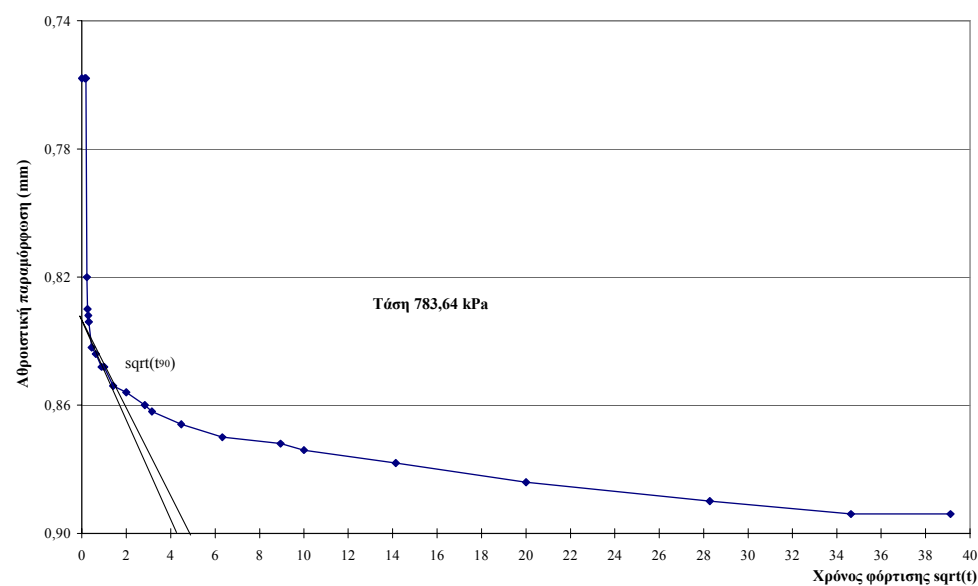
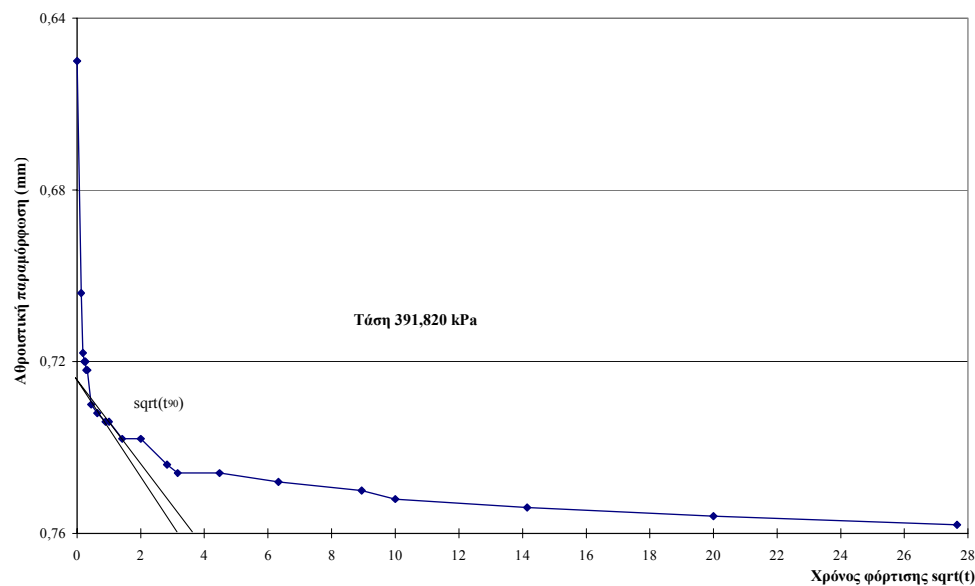
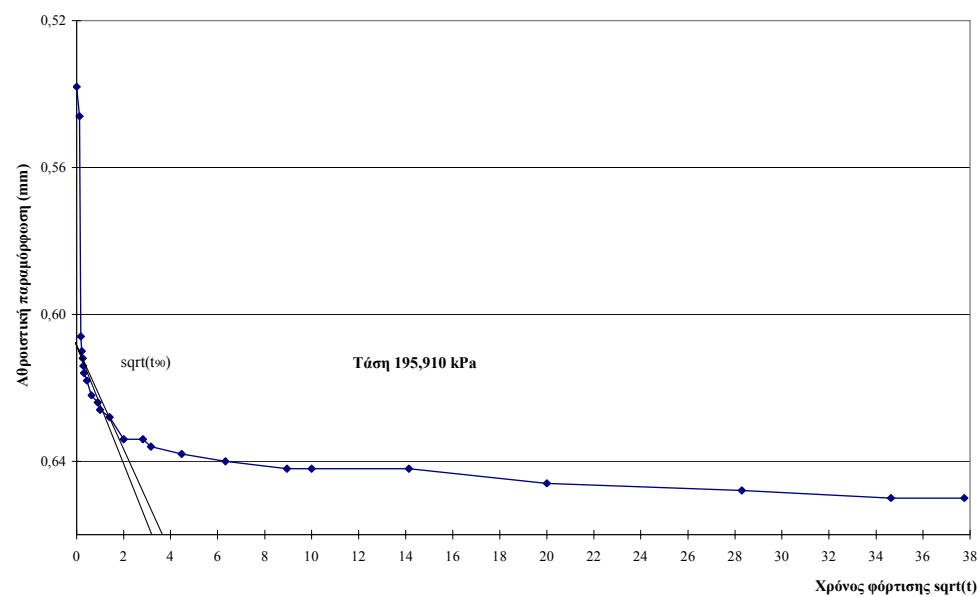
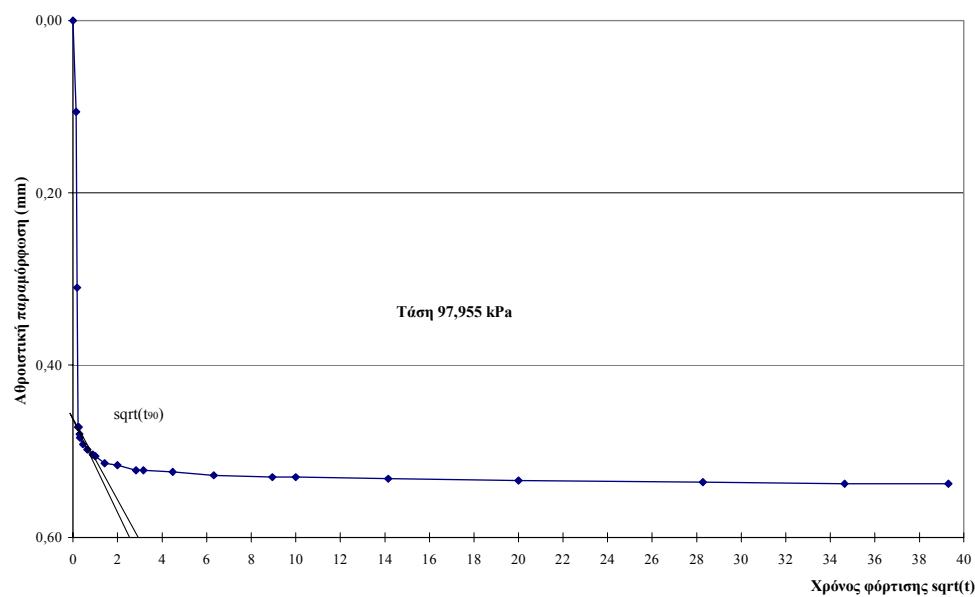
Διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης συναρτήσει της ανηγμένης παραμόρφωσης

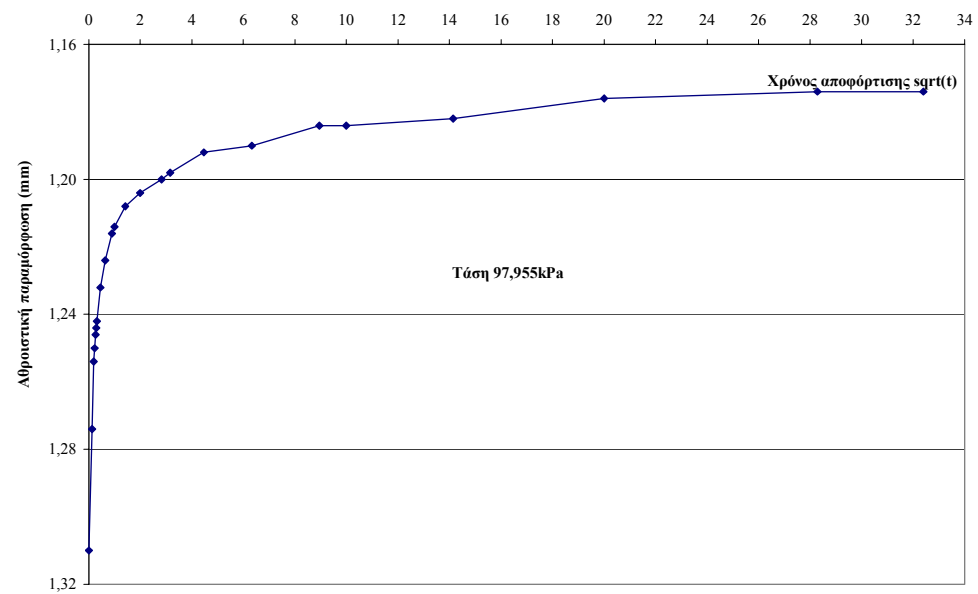
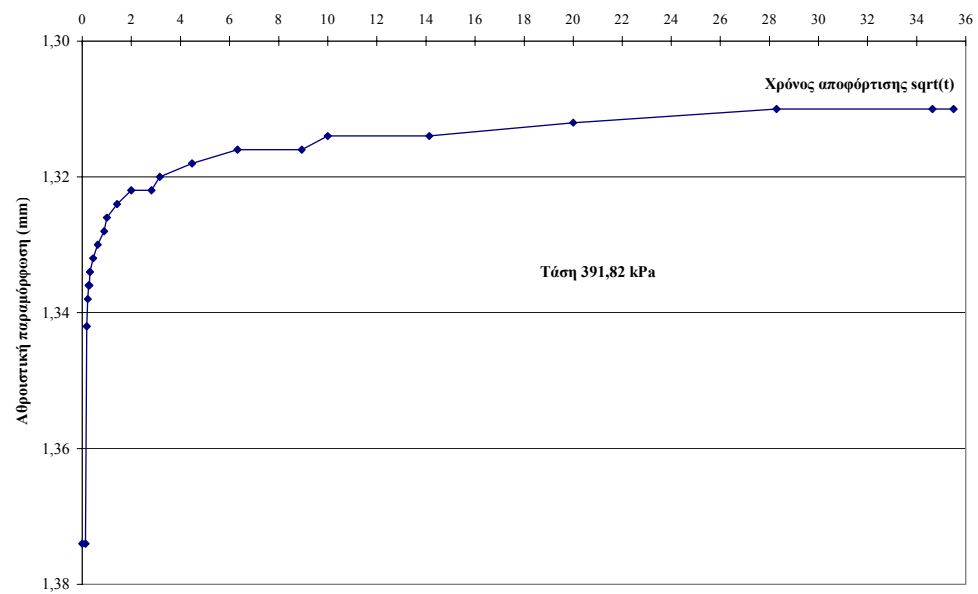
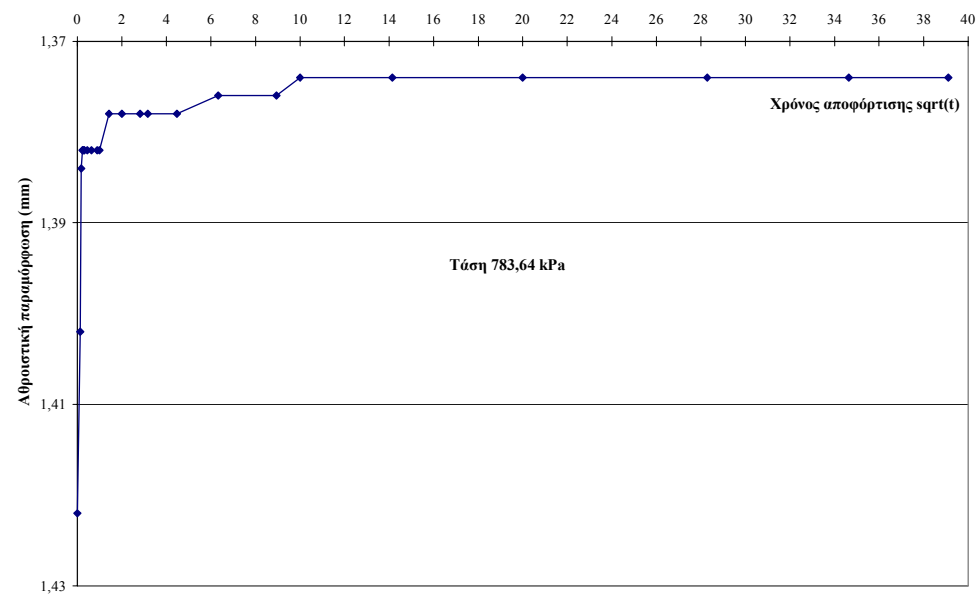
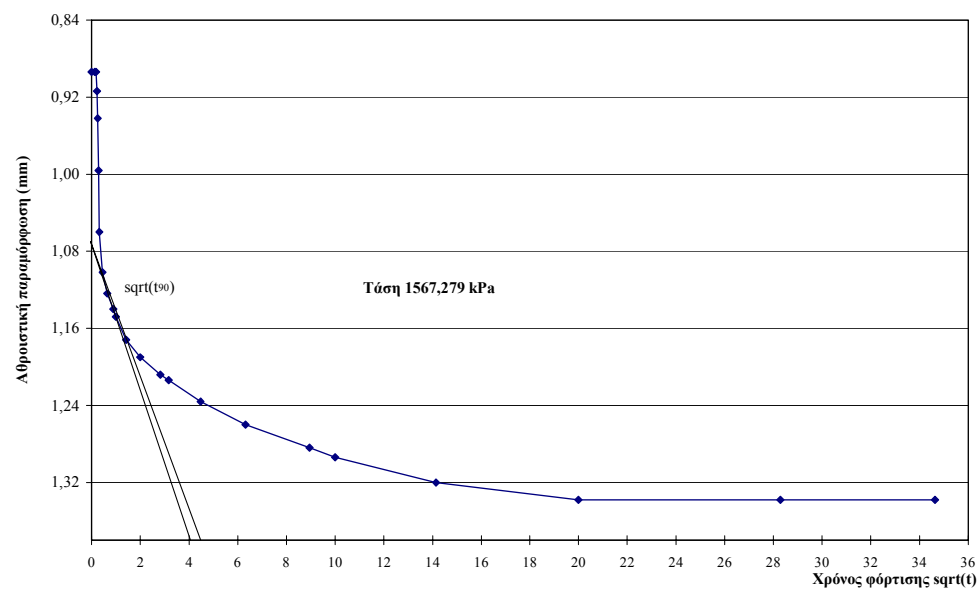


Πίνακας 9: Αποτελέσματα δοκιμής στερεοποίησης για το κάθετο στη στρώση δοκίμιο του δείγματος Γ3.

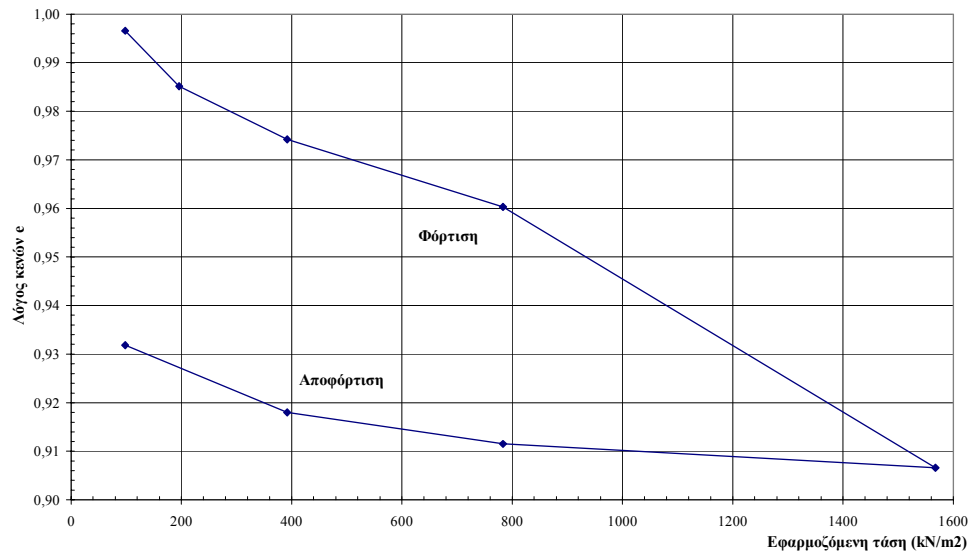
<b>ΤΟΜΕΑΣ:</b>	<b>6</b>	<b>Τάση P (kPa)</b>	<b><math>\Delta H</math> (mm)</b>	<b><math>\Delta e = \Delta H/H_s</math></b>	<b><math>e = e_o - \Delta e</math></b>	<b><math>\varepsilon</math></b>	<b><math>\Delta \varepsilon</math></b>	<b><math>\Delta P</math> (kPa)</b>	<b><math>E</math> (kN/m<sup>2</sup>)</b>
<b>ΘΕΣΗ:</b>	<b>Γ</b>	97,955	0,538	0,05477	0,99660	0,027	-	-	-
<b>ΔΕΙΓΜΑ:</b>	<b>3</b>	195,910	0,650	0,06617	0,98520	0,032	0,006	97,955	17623,144
<b>Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση</b>		391,820	0,758	0,07717	0,97420	0,038	0,005	195,910	36551,706
<b>Διάμ. δοκίμ. D (mm):</b>	50,50	783,640	0,894	0,09101	0,96036	0,044	0,007	391,820	58052,710
<b>Υψος δοκιμίου <math>H_o</math> (mm):</b>	20,15	1567,279	1,422	0,14477	0,90660	0,071	0,026	783,640	29905,942
<b>Επιφ. δοκιμίου A (mm<sup>2</sup>):</b>	2002,96	783,640	1,374	0,13988	0,91149	0,068	-0,002	-783,640	328965,357
<b>Όγκος δοκιμίου (mm<sup>3</sup>):</b>	40359,68	391,820	1,310	0,13336	0,91800	0,065	-0,003	-391,820	123362,009
<b>Ισοδ. ύψος εδαφ. κόκκων <math>H_s</math> (mm):</b>	9,8227	97,955	1,174	0,11952	0,93185	0,058	-0,007	-293,865	43539,533
<b>Αρχική υγρασία <math>w_i</math> (%):</b>	39,86								<b>91142,914</b>
<b>Τελική υγρασία <math>w_f</math> (%):</b>	41,02								
<b>Πυκν. νερού <math>\rho_w</math> (Mg/m<sup>3</sup>):</b>	1,000	<b><math>C_c</math></b>	<b><math>\alpha_v</math> (m<sup>2</sup>/kN)</b>	<b><math>m_v</math> (m<sup>2</sup>/MN)</b>	<b><math>P_c</math></b>	<b>d</b>	<b><math>t_{90}</math></b>	<b><math>C_v</math> (m<sup>2</sup>/year)</b>	<b>k (m/sec)</b>
<b>Αρχικός λόγος κενών <math>e_o</math>:</b>	1,05137	-	-	-	783,640	9,941	0,56	78,2970	-
<b>Φαιν. βάρος εδάφους <math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>):</b>	17,06	0,0379	1,16E-04	0,0567		9,913	1,44	30,4127	5,37E-10
<b>Κορ. φαιν. βάρ. εδάφους <math>\gamma_{sat}</math> (kN/m<sup>3</sup>):</b>	17,22	0,0365	5,61E-05	0,0274	<b><math>P_o</math></b>	9,886	2,10	20,7163	1,76E-10
<b>Αρχ. μάζα δοκιμίου <math>m_o</math> (gr):</b>	70,17	0,0460	3,53E-05	0,0172	795,390	9,852	2,56	16,8972	9,05E-11
<b>Τελ. μάζα δοκιμίου <math>m_f</math> (gr):</b>	70,75	<b>0,1786</b>	6,86E-05	0,0334		9,720	2,89	14,5694	1,52E-10
<b>Ξηρή μάζα δοκιμίου <math>m_d</math> (gr):</b>	50,17	<b>0,0162</b>	6,24E-06	0,0030	<b>OCR</b>				
<b>Ειδ. βάρ. κόκκων <math>G_s</math> (gr/cm<sup>3</sup>):</b>	2,55	0,0216	1,66E-05	0,0081	0,985				
<b>Αρχ. βαθμ. κορεσμού <math>S_i</math> (%):</b>	96,69%	0,0230	4,71E-05	0,0230					
<b>Τελ. βαθμ. κορεσμού <math>S_f</math> (%):</b>	99,49%	<b>0,0514</b>	<b>4,95E-05</b>	<b>0,0241</b>					

Διαγράμματα αξονικής ανηγμ. παραμόρφωσης  $\varepsilon$  - τετραγωνικής ρίζας του χρόνου  $t$  για κάθε στάδιο φόρτισης-αποφόρτισης (Δείγμα Γ3, κάθετο στη στρώση).

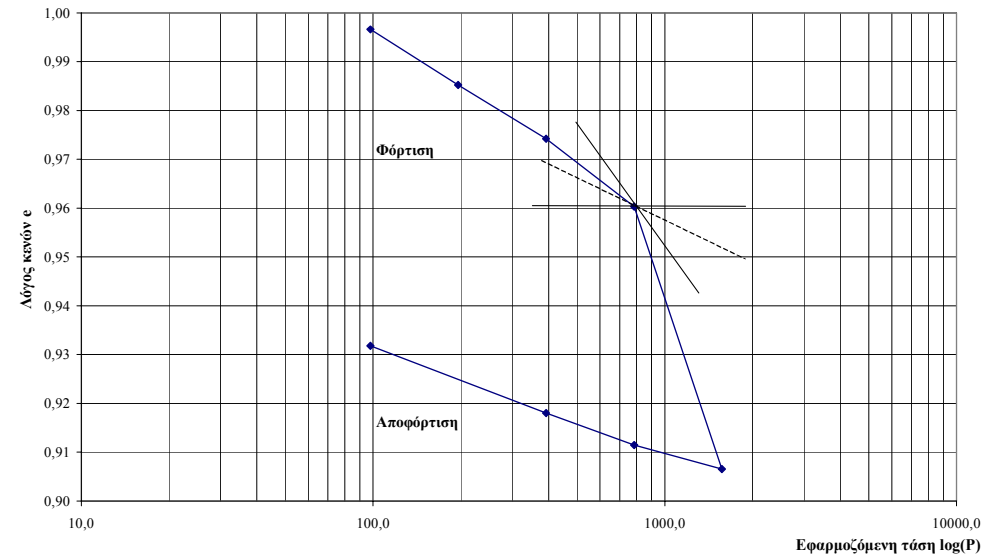




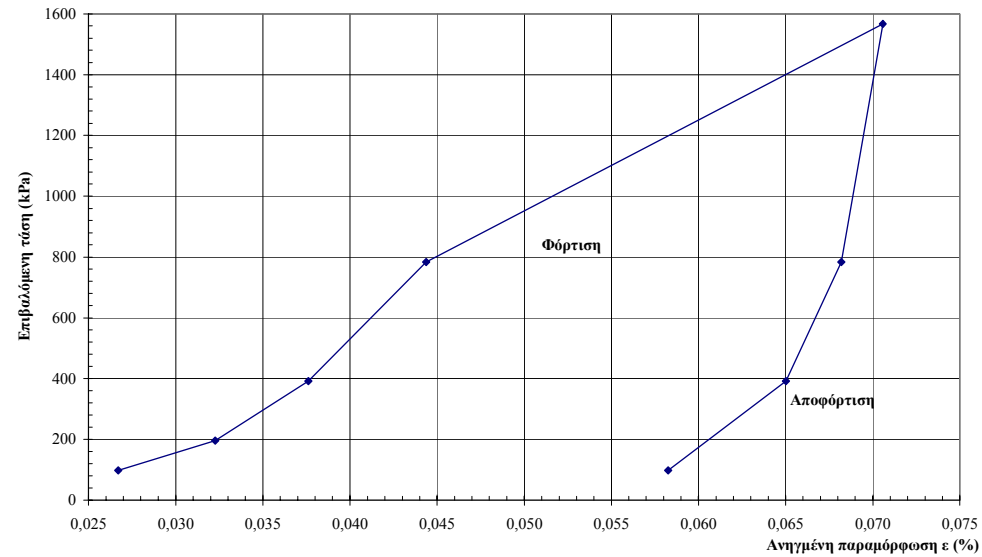
Διάγραμμα λόγου κενών  $e$  συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης



Διάγραμμα λόγου κενών  $e$  συναρτήσει του λογαρίθμου της εφαρμοζόμενης τάσης



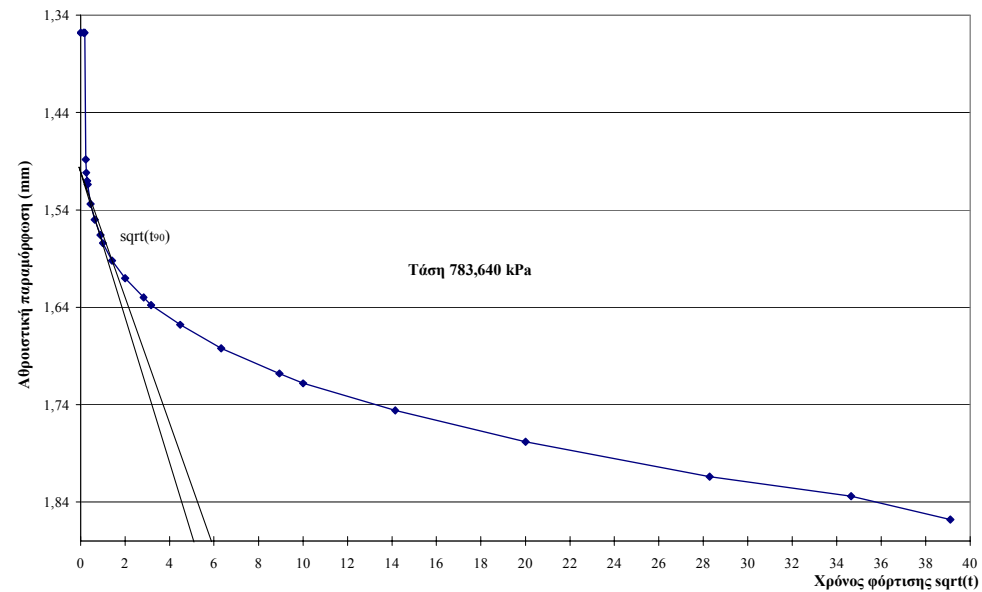
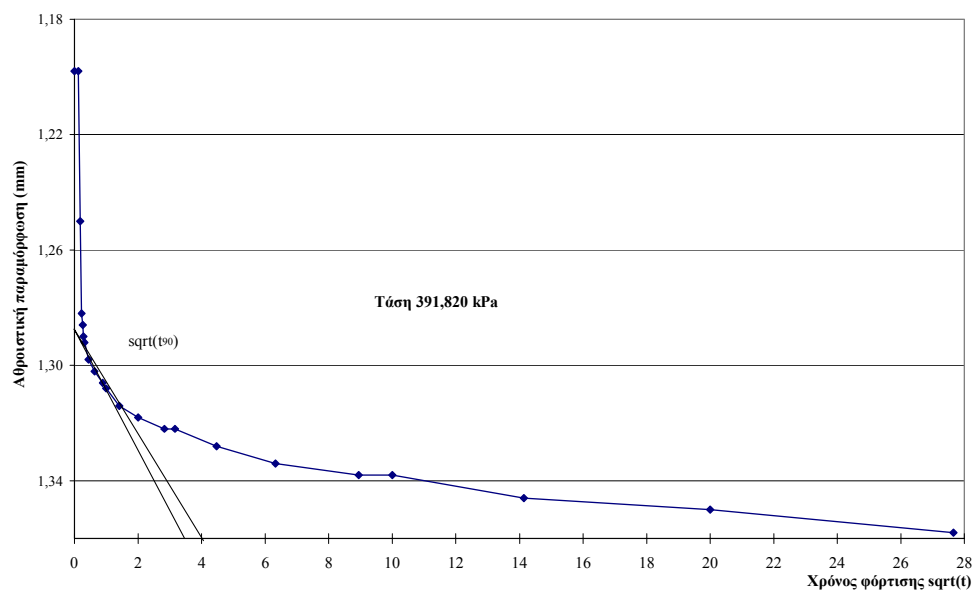
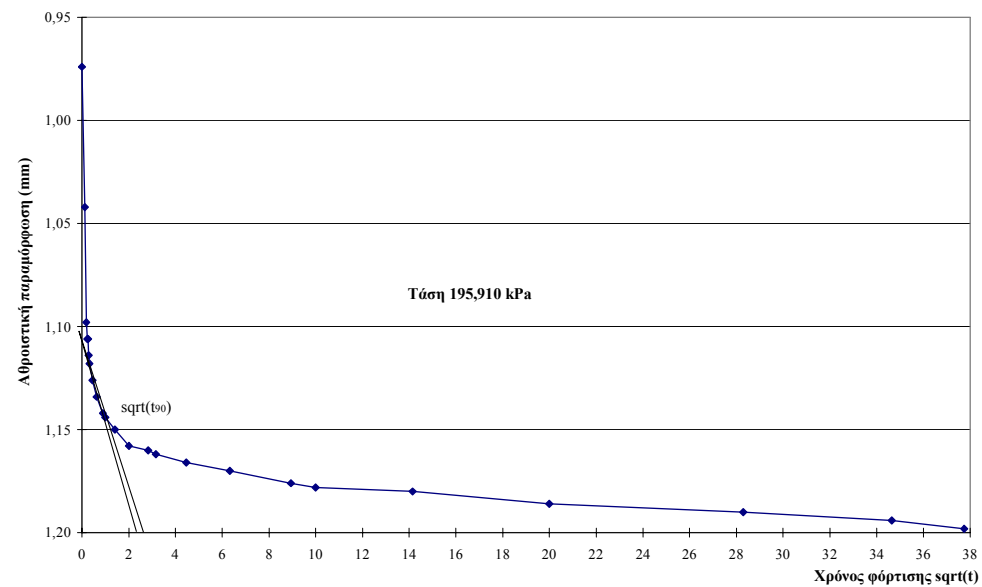
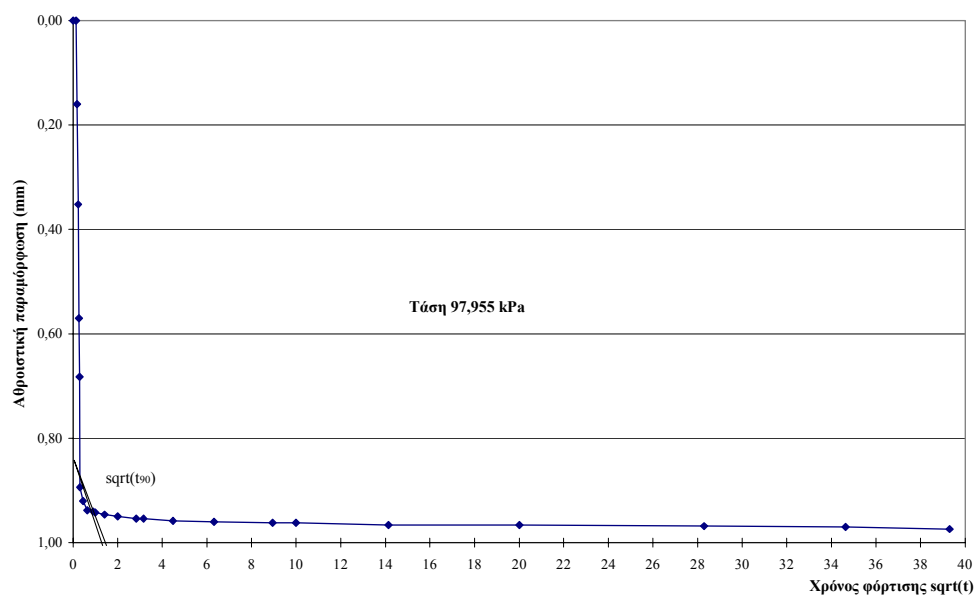
Διάγραμμα επιβαλλόμενης τάσης συναρτήσει της ανηγμένης παραμόρφωσης

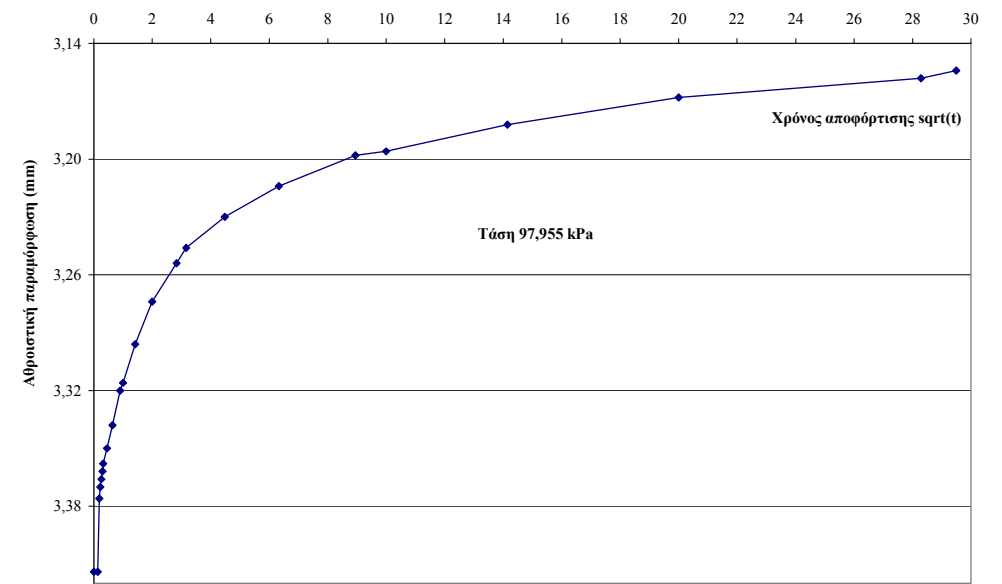
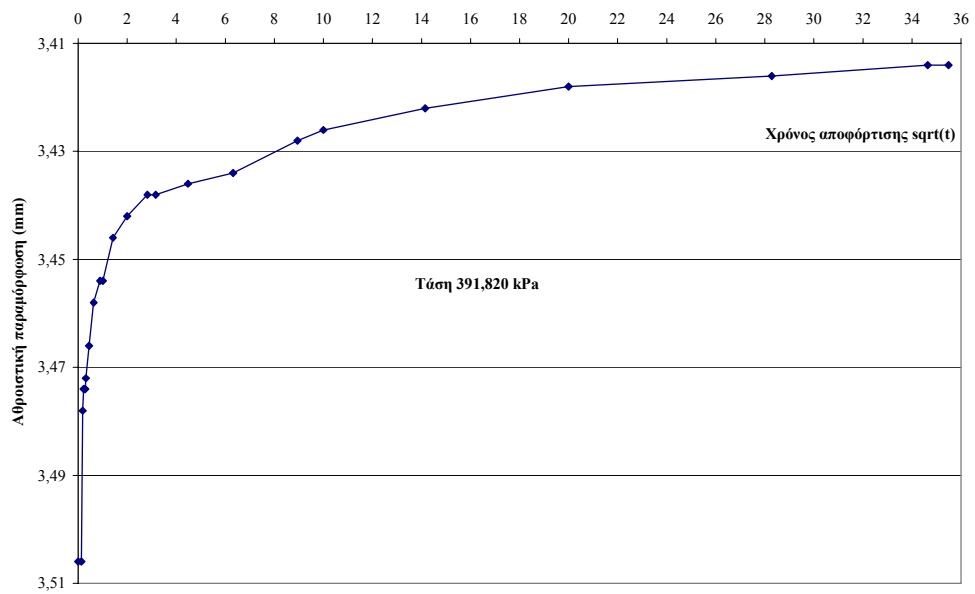
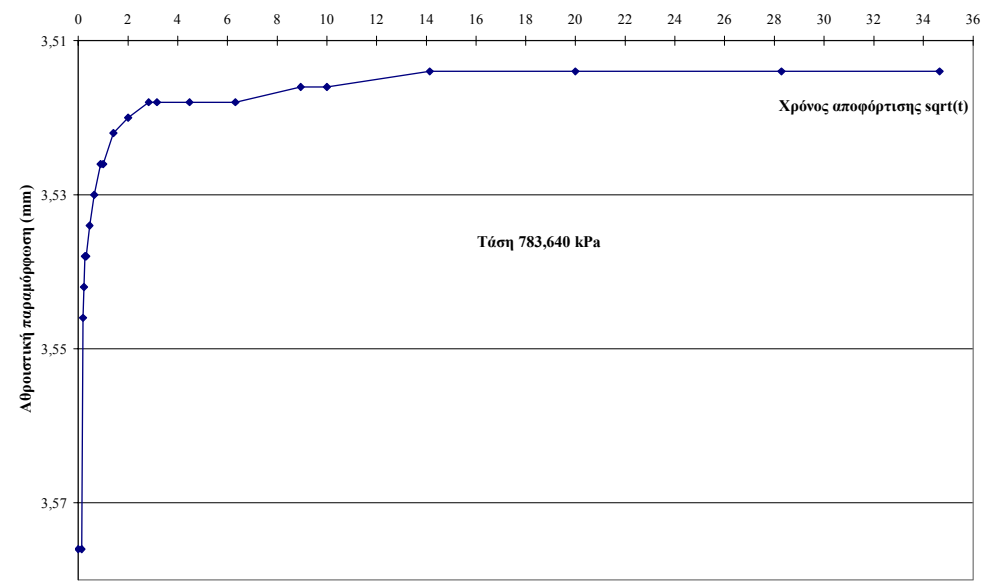
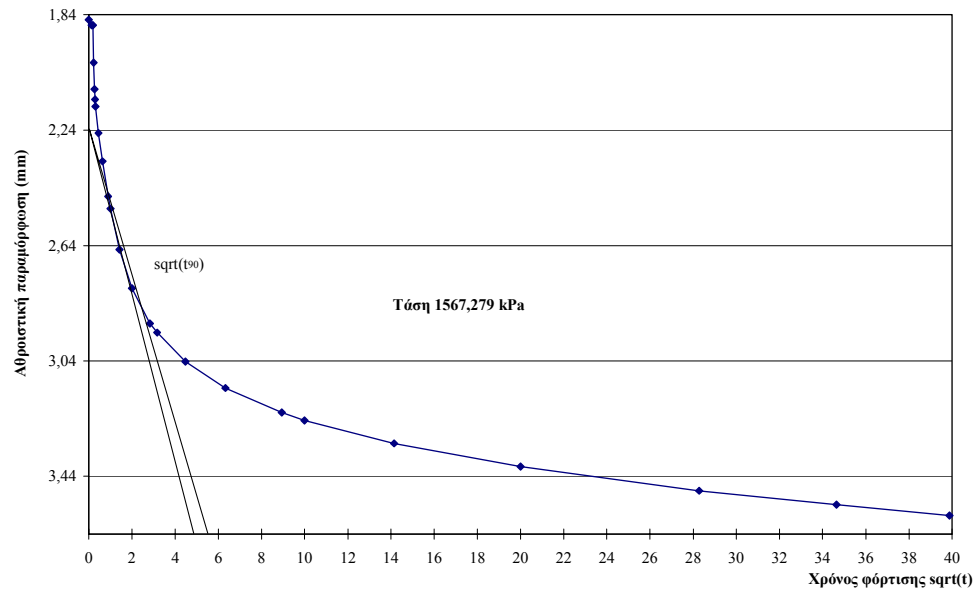


**Πίνακας 10:** Αποτελέσματα δοκιμής στερεοποίησης για το παράλληλο στη στρώση δοκίμιο του δείγματος Γ3.

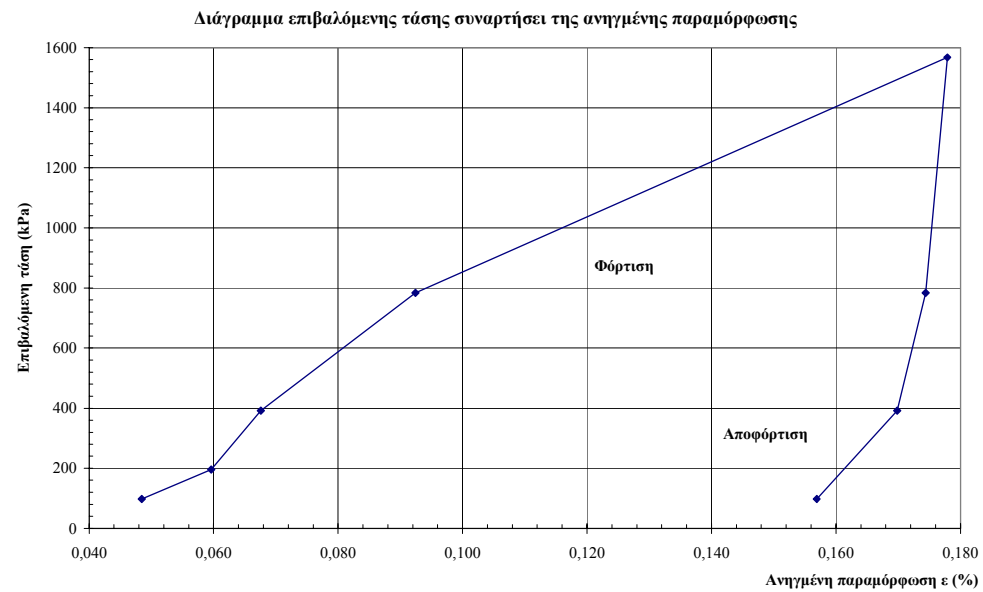
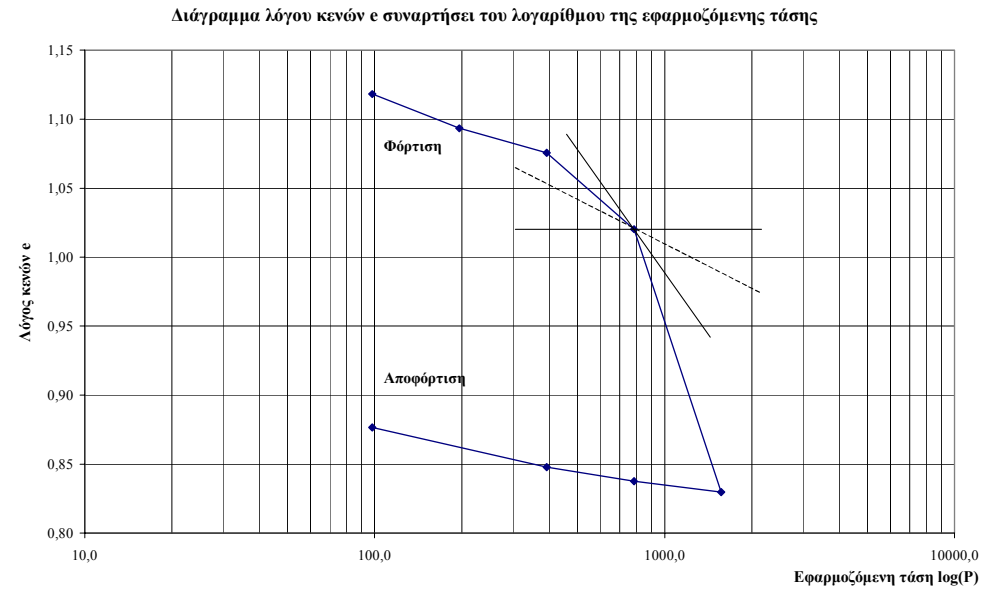
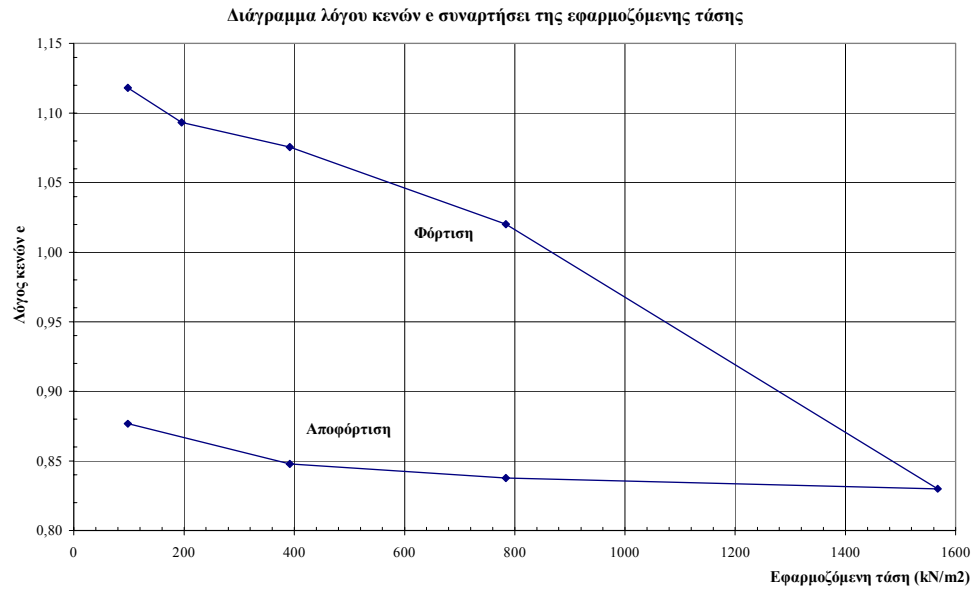
<b>ΤΟΜΕΑΣ:</b>	<b>6</b>	<b>Τάση P (kPa)</b>	<b><math>\Delta H</math> (mm)</b>	<b><math>\Delta e = \Delta H / H_s</math></b>	<b><math>e = e_0 - \Delta e</math></b>	<b><math>\varepsilon</math></b>	<b><math>\Delta \varepsilon</math></b>	<b><math>\Delta P</math> (kPa)</b>	<b><math>E</math> (kN/m<sup>2</sup>)</b>
<b>ΘΕΣΗ:</b>	<b>Γ</b>	97,955	0,974	0,10787	1,11811	0,048	-	-	-
<b>ΔΕΙΓΜΑ:</b>	<b>3</b>	195,910	1,198	0,13267	1,09330	0,060	0,011	97,955	8789,707
<b>Δοκίμιο 1: Κάθετο στη στρώση</b>		391,820	1,358	0,15039	1,07558	0,068	0,008	195,910	24611,180
<b>Διάμ. δοκιμ. D (mm):</b>	50,50	783,640	1,858	0,20576	1,02021	0,092	0,025	391,820	15751,155
<b>Υψος δοκιμίου <math>H_0</math> (mm):</b>	20,10	1567,279	3,576	0,39602	0,82995	0,178	0,085	783,640	9168,309
<b>Επιφ. δοκιμίου A (mm<sup>2</sup>):</b>	2002,96	783,640	3,506	0,38827	0,83770	0,174	-0,003	-783,640	225016,502
<b>Όγκος δοκιμίου (mm<sup>3</sup>):</b>	40259,53	391,820	3,414	0,37808	0,84789	0,170	-0,005	-391,820	85604,104
<b>Ισοδ. ύψος εδαφ. κόκκων <math>H_s</math> (mm):</b>	9,0298	97,955	3,154	0,34929	0,87668	0,157	-0,013	-293,865	22718,012
<b>Αρχική υγρασία <math>w_i</math> (%):</b>	47,55								<b>55951,281</b>
<b>Τελική υγρασία <math>w_f</math> (%):</b>	43,56								
<b>Πυκν. νερού <math>\rho_w</math> (Mg/m<sup>3</sup>):</b>	1,000	<b><math>C_c</math></b>	<b><math>\alpha_v</math> (m<sup>2</sup>/kN)</b>	<b><math>m_v</math> (m<sup>2</sup>/MN)</b>	<b><math>P_c</math></b>	<b>d</b>	<b><math>t_{90}</math></b>	<b><math>C_v</math> (m<sup>2</sup>/year)</b>	<b>k (m/sec)</b>
<b>Αρχικός λόγος κενών <math>e_0</math>:</b>	1,22597	-	-	-	783,640	9,807	0,42	101,4501	-
<b>Φαιν. βάρος εδάφους <math>\gamma</math> (kN/m<sup>3</sup>):</b>	16,58	0,0824	2,53E-04	0,1138		9,751	1,32	32,0412	1,13E-09
<b>Κορ. φαιν. βάρ. εδάφους <math>\gamma_{sat}</math> (kN/m<sup>3</sup>):</b>	16,64	0,0589	9,04E-05	0,0406	<b><math>P_0</math></b>	9,711	1,96	21,4426	2,71E-10
<b>Αρχ. μάζα δοκιμίου <math>m_0</math> (gr):</b>	68,05	0,1839	1,41E-04	0,0635	795,390	9,586	2,25	18,2011	3,59E-10
<b>Τελ. μάζα δοκιμίου <math>m_f</math> (gr):</b>	66,21	<b>0,6320</b>	2,43E-04	0,1091		9,156	6,25	5,9784	2,03E-10
<b>Ξηρή μάζα δοκιμίου <math>m_d</math> (gr):</b>	46,12	0,0258	9,89E-06	0,0044	<b>OCR</b>				
<b>Ειδ. βάρ. κόκκων <math>G_s</math> (gr/cm<sup>3</sup>):</b>	2,55	<b>0,0338</b>	2,60E-05	0,0117	0,985				
<b>Αρχ. βαθμ. κορεσμού <math>S_i</math> (%):</b>	98,90%	0,0478	9,80E-05	0,0440					
<b>Τελ. βαθμ. κορεσμού <math>S_f</math> (%):</b>	90,60%	<b>0,1521</b>	<b>1,23E-04</b>	<b>0,0553</b>					

Διαγράμματα αξονικής ανηγμ. παραμόρφωσης  $\varepsilon$  - τετραγωνικής ρίζας του χρόνου  $t$  για κάθε στάδιο φόρτισης-αποφόρτισης (Δείγμα Γ3, παρ/λο στη στρώση).









## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

1. Anagnostopoulos, A., Papadopoulos, B., Sideris, A. and Kamariotis, A., (1988). "The compressibility of Ptolemais lignite". Bulletin of the Greek Public Works Research Center. Volume 15, 3-4, pp. 87-98.
2. Bowles, J.E., (1986). "Engineering Properties of Soils and their Measurement", Mc Craw-Hill, Singapore.
3. Craig, R.F., (1992). "Soil Mechanics", Department of Civil Engineering, University of Dundee.
4. Forsyth, R.A., Smith, R.E., Cortright, D.J., 1975. "Rebound at a Deep Shale Cut" Cal. Dep., Transportation Rep.
5. Head, K.H., (1992). "Manual of Soil Laboratory Testing". Volume 2: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests, Second Editions, London.
6. Kavvas, M., Papadopoulos, B. and Kalteziotis, N., (1993). "Geotechnical Properties of the Ptolemais Lignite", September 1993.
7. Khalili, N., Valliappan, S. and Wann, C.F., (1999). "Consolidation of Fissured Clays". Geotechnique 49, No. 1, pp. 75-89.
8. Mikasa, M., Takada, N., and Oshima, A., (1987). "In Situ Strength Anisotropy of Clay by Direct Shear Stress". Proc. 8<sup>th</sup> Asian Regional Conf., Vol.1, Kyoto, pp. 61-64.
9. Smith, G.N., (1990). "Elements of Soil Mechanics", 6<sup>th</sup> Edition. BSP Professional Books. Oxford, England.
10. Shogaki, T. and Moro, H., (1997). "Undrained Strength Anisotropy of Soils which have suffered Geological Stress Histories". National Defense Academy. Yokosuka, Japan.

11. Terzaghi, K. and Peck, R.B., (1968). “Εφαρμοσμένη Εδαφομηχανική”. Μετάφραση της 2<sup>ης</sup> εκδόσεως.
12. Αλπαντάκη, Κ., (1996). “Γεωτεχνική Έρευνα της Ευστάθειας Ζώνης Θεμελίωσης του Αρχαιολογικού Μουσείου Χανίων”. Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης. Χανιά.
13. Αναστόπουλος, Ι., Κούκουζας, Κ., (1972). “Γεωλογική και Κοιτασματολογική μελέτη Νοτίου Τμήματος λιγνιτοφόρου λεκάνης Πτολεμαΐδας”. ΙΓΕΥ, Αθήνα.
14. Βαλαλάς, Δ.Θ., (1985). “Εδαφομηχανική”. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
15. ΔΕΗ – ΛΚΠ-Α, Τεκτονικός χάρτης (κλίμακα 1:2000). “Δυτικά πρανή του Τομέα 6”. Σεπτέμβριος 1995.
16. ΔΕΗ – ΛΚΠ-Α, Τομές κοιτασματολογικών γεωτρήσεων ορυχείου Τομέα 6 (κλίμακα 1:2000), Ζώνη επιρροής 70m.
17. ΔΕΗ – ΛΚΠ-Α, Τοπογραφικό ορυχείου Καρδιάς (κλίμακα 1:50000). “Στάθμη εργασιών εκσκαφής ορυχείου Τομέας 6”. Δεκέμβριος 1998.
18. ΔΕΗ, Κλιμάκιο εκτελέσεως γεωερευνητικών γεωτρήσεων έργων Πτολεμαΐδας-Φλώρινας, “Δελτία περιγραφής γεωτρήσεων ΓΤ6-1/95, ΓΤ6-2/95, ΓΤ6-3/95, ορυχείου Τομέα 6”.
19. Καλλέργης, Γ., Κούκης, Γ., (1985). Τεχνική Γεωλογία. Πανεπιστήμιο Πάτρας.
20. Λοΐζος, Α., (1977). “Εδαφομηχανική-Θεμελιώσεις”. Το Έδαφος Θεμελιώσεων, Μέρος Α, Αθήνα.
21. Μονόπωλης, Δ., (1995). “Εφαρμοσμένη Γεωλογία”, Πολυτεχνείο Κρήτης.
22. Πολυτεχνείο Κρήτης, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, Εργαστήριο Μηχανικής Πετρωμάτων, (1997). “Ερευνητικό έργο: Προσδιορισμός Γεωτεχνικών Παραμέτρων και

Ανάλυση Ευστάθειας Πρανών σε Μέτωπα Εξόρυξης του Τομέα 6, (Πτολεμαΐδα), Τελική Έκθεση”.

23. Στειακάκης, Μ., (1996). “Εργαστηριακές Ασκήσεις Τεχνικής Γεωλογίας-Εδαφομηχανικής”, Πολυτεχνείο Κρήτης.
24. Τσιαμπάος, Γ., (1998). “Τεχνογεωολογικοί Χαρακτήρες των Μαργών Ηρακλείου Κρήτης”. Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πάτρας.