



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

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΥΜΠΙΕΣΤΟΤΗΤΑΣ**  
**ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΜΜΟΥ**



**ΚΑΣΣΙΑΝΗ ΤΣΟΥΒΑΛΑ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

**Γ. ΕΞΑΛΑΚΤΥΛΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Π.Κ (Επιβλέπων)**

**Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Π.Κ.**

**Δρ. Ε. ΣΤΕΙΑΚΑΚΗΣ.**

**ΧΑΝΙΑ**

**Οκτώβριος 2007**



## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά τα έτη 2006 – 2007 υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Γ. Εξαδάκτυλου στον οποίο οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ για την καθοδήγηση και συμπαράστασή του καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης και συγγραφής της. Ευχαριστώ επίσης τον Δόκτορα κ. Ε. Στειακάκη για την πολύτιμη βοήθειά και καθοδήγηση που μου προσέφερε για τη διεξαγωγή του πειραματικού μέρους της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης τον Καθηγητή κ. Ζ. Αγιουτάντη και τον Δόκτορα κ. Ε. Στειακάκη για τις σημαντικές τους παρατηρήσεις και το χρόνο που διέθεσαν στη διόρθωση αυτής της εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ τον κ. Π. Λιόλιο διδακτορικό φοιτητή του Εργαστηρίου Μελέτης και Σχεδιασμού Εκμεταλλεύσεων για τη βοήθεια που μου παρείχε και τον κ. Δ. Βαβαδάκη για τη βοήθειά του στα πειράματα οιδημέτρου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία ερευνώνται οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες ξηρού αμμώδους εδαφικού υλικού, το οποίο λήφθηκε από την περιοχή του Καλαθά Χανίων, με τη βοήθεια πειραμάτων που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Πολυτεχνείου Κρήτης. Καταρχήν γίνεται περιγραφή των ιδιοτήτων του προς εξέταση γεωυλικού και των πειραματικών διαδικασιών με τις οποίες αυτές εκτιμήθηκαν. Στη συνέχεια περιγράφονται η δοκιμή συμπίεσομέτρου (οιδημέτρου), η οποία έγινε με σκοπό την εκτίμηση του μέτρου ελαστικότητας και η δοκιμή τριαξονικής θλίψης, με την οποία υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας ώστε εν συνεχεία να συγκριθεί η τιμή αυτού με την αντίστοιχη τιμή του οιδημέτρου. Κατόπιν περιγράφεται η μέθοδος επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων και δίνονται τα αποτελέσματα. Τέλος, παρουσιάζονται τα προκύπτοντα συμπεράσματα.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

### **Κεφάλαιο 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

### **Κεφάλαιο 2 : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΑΜΜΟΥ**

<b>2.1 Κατάταξη άμμου .....</b>	<b>2</b>
<b>2.2 Γεωτεχνική ταξινόμηση.....</b>	<b>3</b>
2.2.1 Ποιοτικός χαρακτηρισμός εδάφους.....	3
2.2.2 Ποσοτικός χαρακτηρισμός παραμέτρων εδαφικού υλικού.....	7

### **Κεφάλαιο 3 : ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ**

<b>3.1 Σκοπός .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2 Θεωρία .....</b>	<b>12</b>
3.2.1 Στερεοποίηση – Συμπαγοποίηση .....	12
3.2.2 Συμπιεστότητα .....	12
3.2.3 Μονοδιάστατη συμπίεση εδαφών .....	13
3.2.4 Συμπιεσόμετρο. ....	14
<b>3.3 Περιγραφή συσκευής .....</b>	<b>17</b>
<b>3.4 Πειραματική διαδικασία .....</b>	<b>20</b>
<b>3.5 Επεξεργασία μετρήσεων οιδημέτρου.....</b>	<b>23</b>

### **Κεφάλαιο 4 : ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ**

<b>4.1 Σκοπός .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2 Θεωρία .....</b>	<b>27</b>

4.2.1 Γενικά .....	28
4.2.2 Κατάσταση τάσεων σε δοκίμιο κλασικής τριαξονικής δοκιμής .....	29
<b>4.3 Περιγραφή συσκευής.....</b>	<b>31</b>
<b>4.4 Μειονεκτήματα - Προτερήματα τριαξονικής δοκιμής.....</b>	<b>34</b>
<b>4.5 Πειραματική διαδικασία .....</b>	<b>35</b>
<b>4.6 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής .....</b>	<b>43</b>
4.6.1 Πρώτη τριαξονική δοκιμή με ασκούμενη πλευρική πίεση 150 kPa.....	43
4.6.2 Δεύτερη τριαξονική δοκιμή με ασκούμενη πλευρική πίεση 350 kPa.....	46
4.6.3 Τρίτη τριαξονική δοκιμή με ασκούμενη πλευρική πίεση 550 kPa .....	48
4.6.4 Τέταρτη τριαξονική δοκιμή με ασκούμενη πλευρική πίεση 750 kPa .....	50
4.6.5 Κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb .....	54
4.7.5 Αξιολόγηση.....	56
 <b>Κεφάλαιο 5 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>61</b>
 <b>Προτάσεις.....</b>	<b>62</b>
 <b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>63</b>

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πριν τη σχεδίαση οποιουδήποτε τεχνικού έργου είναι αναγκαία η γνώση των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους στο οποίο θα εδραστεί η κατασκευή. Στις φυσικομηχανικές ιδιότητες του εδάφους περιλαμβάνονται το πορώδες, το μέγεθος, το σχήμα και το μοναδιαίο βάρος, η παραμορφωσιμότητα, η συνοχή, η γωνία εσωτερικής τριβής, η γωνία διαστολής κ.λπ.

Η γνώση αυτών των ιδιοτήτων χρησιμεύει στον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας και του μέγιστου φορτίου που μπορεί να επιβληθεί χωρίς να επέλθει αστοχία του εδάφους θεμελίωσης. Επίσης μπορούν να υπολογιστούν οι παραμορφώσεις που αυτό θα αποκτήσει κατά τη φόρτιση. Συνεπώς με τον υπολογισμό της τάσης αστοχίας, του μέτρου ελαστικότητας και των παραμορφώσεων υπάρχει η δυνατότητα να αποφευχθεί η δημιουργία ρωγματώσεων σε κατασκευές λόγω φόρτισης του εδάφους με τάση μεγαλύτερη από την τάση αστοχίας αυτού.

Στην παρούσα εργασία η πειραματική έρευνα του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής του εδάφους διεξήχθη μέσω της δοκιμής συμπίεσομέτρου και της δοκιμής τριαξονικής θλίψης.





## **2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΑΜΜΟΥ**

### **2.1 Κατάταξη άμμου**

Τα γεωυλικά χωρίζονται, σε δυο κατηγορίες δηλαδή σε πετρώματα και εδάφη. Τα πετρώματα είναι φυσικές συγκεντρώσεις ορυκτών μεταξύ των οποίων δρουν μεγάλες και μόνιμες δυνάμεις συνοχής. Απ' την άλλη πλευρά, τα εδάφη είναι φυσικές συγκεντρώσεις ορυκτών που έχουν προέλθει από την αποσάθρωση πετρωμάτων τα οποία μπορούν και υφίστανται διαχωρισμό με εφαρμογή απλών μηχανικών μέσων, όπως λ.χ. τη δράση του ύδατος.

Όσον αφορά τα εδάφη, αυτά διακρίνονται σε μη-συνεκτικά (συνήθως είναι χονδρόκοκκα γεωυλικά) και σε συνεκτικά (συνήθως λεπτόκοκκά γεωυλικά με αρκετό ποσοστό αργιλικών ορυκτών που τους προσδίδουν συνοχή).

Επιπλέον, τα εδάφη αποτελούνται από μίγμα κόκκων διαφόρων μεγεθών και ορυκτολογικής σύστασης. Λόγω της σύνθεσης αυτής είναι ασυνεχή και παρουσιάζουν ανομοιογενή μορφή διότι στα κενά τους περικλείεται ύδωρ ή αέρας ή άλλο ρευστό. Όταν το έδαφος είναι κορεσμένο σε ύδωρ τότε αυτό αποτελεί σύστημα δύο φάσεων (στερεά και υγρή). Όταν μόνο ένα μέρος των πόρων είναι πλήρες από ύδωρ τότε καλείται σύστημα τριών φάσεων (στερεά, υγρή και αέρια). Το τελείως ξηρό έδαφος καλείται σύστημα μιας φάσης.

Τα αμμώδη εδάφη ανήκουν στα μη-συνεκτικά εδάφη, προέρχονται από αποσάθρωση πετρωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, η άμμος που μελετάται στην παρούσα εργασία, βρίσκεται σε ξηρή μορφή και συνεπώς αποτελεί σύστημα μιας φάσης.

## **2.2 Γεωτεχνική ταξινόμηση**

Τα εδάφη μπορούν να έχουν ποιοτικές και ποσοτικές διαφορές. Ποιοτικώς, μπορούν να διαφέρουν σε υφή, δομή και συνεκτικότητα. Ποσοτικώς, μπορεί να υπάρχει μεταξύ τους διαφορά στο πορώδες, στη σχετική πυκνότητα, στο ποσοστό εμπεριεχόμενης υγρασίας και αερίου αλλά επίσης και στη συνεκτικότητα (Terzaghi & Peck, 1969).

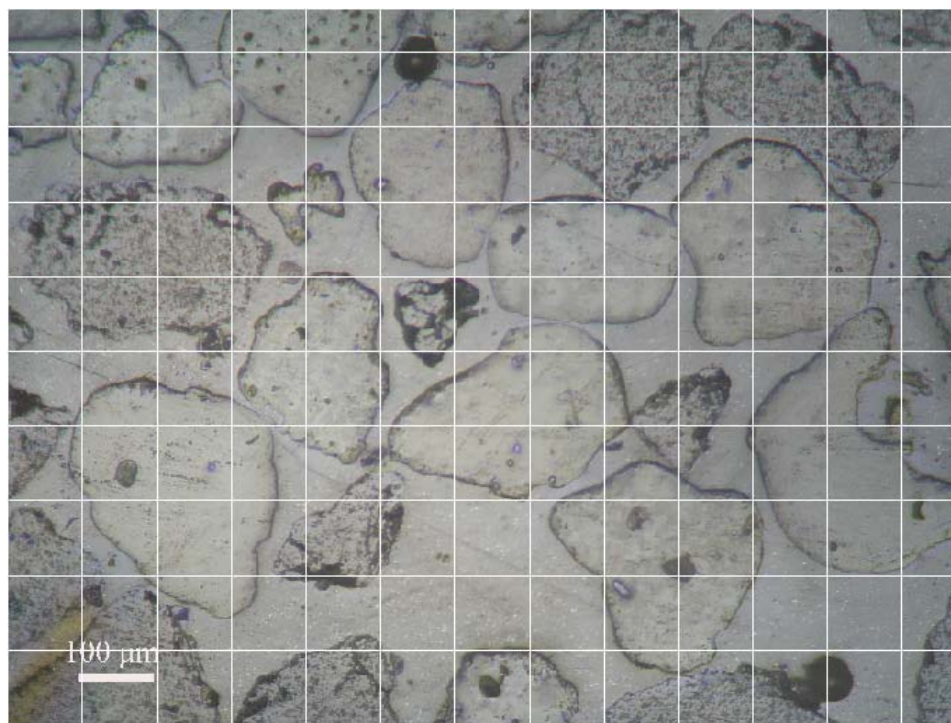
Οι πληροφορίες σχετικά με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του εδάφους, αποκτώνται στην ύπαιθρο με απλή μακροσκοπική ή μικροσκοπική παρατήρηση. Οι ποσοτικές πληροφορίες αποκτώνται με εργαστηριακές μετρήσεις. Δίχως τις πληροφορίες αυτές η περιγραφή οποιουδήποτε εδάφους είναι ανεπαρκής.

### **2.2.1 Ποιοτικά χαρακτηριστικά εδάφους**

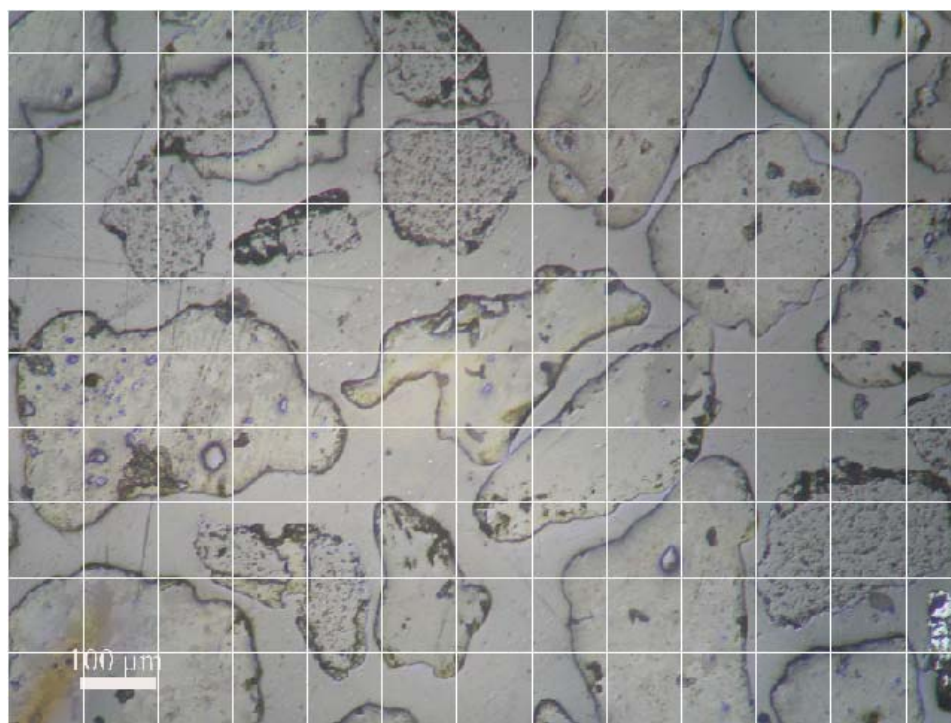
#### **α) Υφή - Δομή**

Ο όρος *υφή* αναφέρεται στο μέγεθος των κόκκων και στην ομοιομορφία του εδάφους. Για την περιγραφή της υφής χρησιμοποιούνται οι ορισμοί αλευρώδης, λεία, κοκκώδης ή ανώμαλη, η οποία καθορίζεται από την αίσθηση που προκαλεί το υλικό, τρίβοντας το μεταξύ των δακτύλων (Terzaghi & Peck, 1969).

Για τον προσδιορισμό του σχήματος των κόκκων της άμμου, δημιουργήθηκε στιλπνή τομή του προς εξέταση αμμώδους εδαφικού υλικού και τραβήχτηκαν 10 συνολικά φωτογραφίες (Σχ. 2.1) με οπτικό μικροσκόπιο ανακλώμενου φωτός. Στη συνέχεια, σε κάθε φωτογραφία σχεδιάστηκε κάρναβος για σύγκριση του εμβαδού μεταξύ των κόκκων.



(α)



(β)

Σχ. 2.1(α,β). Φωτογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου, από στυλνή τομή δείγματος άμμου.

Με κριτήριο το γενικό σχήμα των κόκκων (B.S.812, part 1,1975) και Παρατηρώντας τις φωτογραφίες του μικροσκοπίου (Σχ. 2.1), οι προς εξέταση άμμου αποτελείται από ακανόνιστους και γωνιώδεις κόκκους.

Με τον όρο *δομή* του εδάφους εννοείται τη διάταξη κατά την οποία οι κόκκοι του εδάφους έχουν εναποτεθεί (Terzaghi & Peck, 1969) και εξαρτάται από το μέγεθος των κόκκων, την ιζηματογένεση και την διεύθυνση των ασυνεχειών . Το σύμπλεγμα δε των κόκκων αποτελεί τον εδαφικό ιστό. Αναλόγως, λοιπόν, του μεγέθους των κόκκων και των συνθηκών εναπόθεσης διαμορφώνεται η δομή του εδάφους, ούτως ώστε διακρίνονται τρία είδη δομής κοκκώδης, κυψελοειδής ή αλυσσοειδής και θρομβοειδής.

Το αμμόδες εδαφικό υλικό που μελετάται στην παρούσα εργασία είναι διαταραγμένο.

### **β) Ορυκτολογική και Κοκκομετρική Ανάλυση**

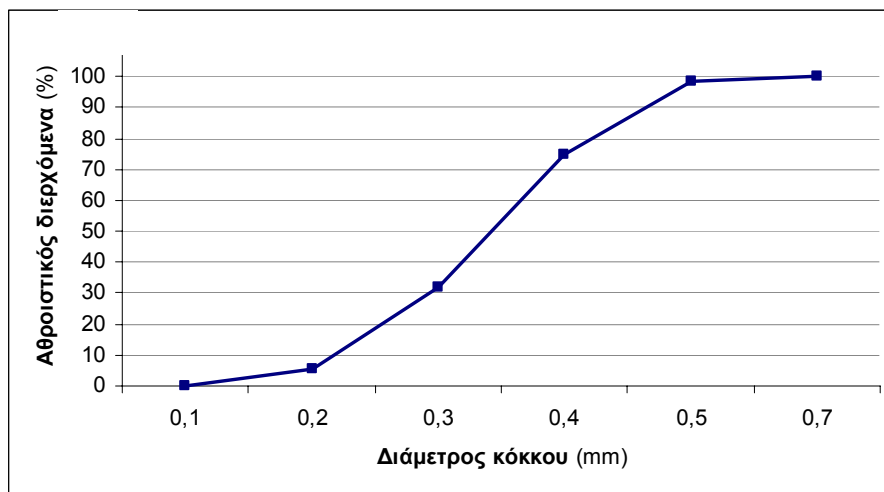
Για τον προσδιορισμό της ορυκτολογικής σύστασης της προς μελέτη άμμου, έγινε ακτυνοδιάγραμμα. Τα αποτελέσματα του ακτυνοδιαγράμματος κατέδειξαν την σύσταση που παρουσιάζεται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Ορυκτολογική σύσταση άμμου

<b>Ορυκτό</b>	<b>Χημικός Τύπος</b>	<b>Περιεκτικότητα (%)</b>
Χαλαζίας	SiO <sub>2</sub>	50.1
Ασβεστίτης	CaCO <sub>3</sub>	38.8
Μαγνησιούχος ασβεστίτης	(Mg <sub>129</sub> Ca <sub>871</sub> ) (CO <sub>3</sub> )	8.9
Δολομίτης	CaMg (CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	2.3

Για την κοκκομετρική ανάλυση αμμόδους εδαφικού υλικού αναφέρεται ότι σωματίδια μεγέθους μικρότερου των 3 mm χαρακτηρίζονται ως άμμος. Συγκεκριμένα η άμμος, σύμφωνα με το μέγεθος των κόκκων, ορίζεται ως χονδρή για εύρος διαμέτρου κόκκων D = 4,75 έως 2 mm, ως μέση για D = 2 έως 0,425 mm και ως λεπτή για D = 0,425 έως 0,075 mm.

Σύμφωνα με κοκκομετρική ανάλυση που διεξήχθη στα πλαίσια προηγούμενης διπλωματικής εργασίας (Σαμαρτζή, 2007) στο ίδιο διάγραμμα σε ξηρή μορφή, προέκυψε η κοκκομετρική καμπύλη του Σχήματος 2.2. Με βάση την κοκκόμετρική αυτή καμπύλη προκύπτει ότι το εδαφικό υλικό που μελετάται έχει εύρος διαμέτρου κόκκων  $D = 0,7$  έως  $0,1$  mm και συνεπώς χαρακτηρίζεται ως λεπτόκοκκο.



Σχ. 2.2. Κοκκομετρική καμπύλη αμμόδους εδαφικού υλικού.

Για τον χαρακτηρισμό της διαβάθμιση εδαφών αναφέρεται ότι μία κοκκομετρική κατανομή θα χαρακτηριστεί ως κανονική, όταν δεν ελλείπουν μεγέθη από το φάσμα κόκκων που περιέχει (Βαρδουλάκης, 2003). Μία κανονική κοκκομετρική καμπύλη μπορεί να αποδοθεί από δυο καλώς επιλεγμένα σημεία της. Ο Allen Hazen προτείνει τα σημεία που αντιστοιχούν στις διαμέτρους  $D_{10}$  και  $D_{60}$ .

Με την πληροφορία αυτή υπολογίζεται ο συντελεστής ομοιομορφίας  $C_u = D_{60}/D_{10}$ . Με βάση τον συντελεστή  $C_u$  τα εδάφη για τα οποία  $C_u$  μικρότερο του 4 ή 5 καλούνται ομοιόμορφα ενώ εδάφη με τιμές  $C_u$  μεγαλύτερες του 10 χαρακτηρίζονται σαν καλά διαβαθμισμένα (Στειακάκης, 2005).

Συγκεκριμένα για το αμμώδες εδαφικό υλικό που μελετάται ο συντελεστής ομοιομορφία όπως προκύπτει από το Σχ. 2.2 είναι  $C_u = 1,42$  και συνεπώς το υλικό χαρακτηρίζεται σαν ομοιόμορφο έδαφος.

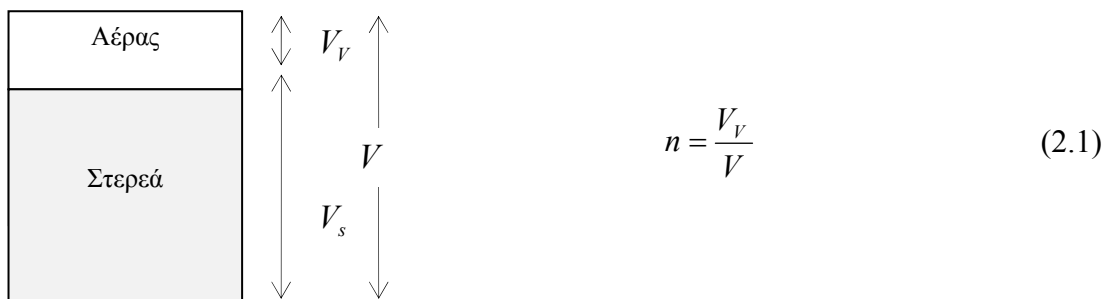
### γ) Συνεκτικότητα

Ο όρος *συνεκτικότητα* ή *συνοχή* αναφέρεται στο βαθμό πρόσφυσης και συγκόλλησης των εδαφικών σωματιδίων μεταξύ τους, καθώς και στην αντοχή του εδάφους ενάντια στις δυνάμεις που τείνουν να παραμορφώσουν ή να διασπάσουν τη δομή του (Terzaghi & Peck, 1969). Ως προς τη συνεκτικότητα, τα εδάφη χαρακτηρίζονται σκληρά, στιφρά, εύθρυπτα, κολλώδη, πλαστικά και μαλακά. Τα αμμώδη εδάφη όπως και η υπόψιν εξεταζόμενη άμμος δεν έχουν συνοχή.

## 2.2.2 Ποσοτικός χαρακτηρισμός παραμέτρων εδαφικού υλικού

### α) Πορώδες

Το *πορώδες*  $n$  (Σχ. 2.3) είναι ο λόγος του όγκου των κενών προς τον ολικό όγκο εδαφικού δείγματος (Terzaghi & Peck, 1969). Ο όρος όγκος κενών αναφέρεται στο τμήμα του συνολικού εδαφικού όγκου που δεν καταλαμβάνεται από ορυκτούς κόκκους.



Σχ. 2.3. Απεικόνιση της εξίσωσης του πορώδους.

Το πορώδες σταθερής μάζας με ομοιόμορφους κόκκους ως προς το σχήμα και το μέγεθος, δίχως συνοχή, εξαρτάται από τον τρόπο διάταξης των κόκκων στον χώρο. Για την πυκνότερη δυνατή διάταξη το πορώδες ισούται με 0,26, ενώ για τη χαλαρότερη ισούται με 0,47.

Πειράματα για την εύρεση του πορώδους δεν διεξήχθησαν, αλλά γενικά οι φυσικές άμμοι συναντούνται με πορώδες μεταξύ 0,25 και 0,50 (Terzaghi & Peck, 1969). Το πορώδες μίας φυσικής απόθεσης άμμου εξαρτάται από το σχήμα των κόκκων, την ομοιομορφία του μεγέθους αυτών, τις συνθήκες ιζηματογένεσης.

### **β) Λόγος Κενών**

Ο *λόγος κενών*  $e$  ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών προς τον όγκο των στερεών ( $V_s$ ) συστατικών εδαφικού δείγματος.

$$e = \frac{V_v}{V - V_v} \quad (2.2)$$

Η σχέση μεταξύ λόγου κενών και πορώδους εκφράζεται από την εξίσωση:

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (2.3)$$

### γ) Σχετική Πυκνότητα

Η *σχετική πυκνότητα* για μη συνεκτικά εδάφη όπως οι άμμοι, είναι η σημαντικότερη ιδιότητα αυτών (Terzaghi & Peck, 1969). Η σχετική πυκνότητα της άμμου είναι σαφώς καθορισμένη επειδή η τιμή της είναι πρακτικώς ανεξάρτητη από την στατική πίεση στην οποία υποβάλλεται η άμμος. Άρα, η σχετική πυκνότητα εξαρτάται κυρίως από τη διαδικασία τοποθέτησης και συμπίκνωσης της άμμου (Terzaghi & Peck, 1969).

Ο βαθμός συμπίκνωσης ενός αμμόδους εδάφους αποδίδεται από τη σχετική πυκνότητα  $D_r$ , η οποία ορίζεται από τη σχέση:

$$D_r = \frac{(e_o - e)}{(e_o - e_{\min})} \quad (2.4)$$

όπου:

$e_o$  = λόγος κενών του εδάφους στην ελάχιστη συμβατική πυκνότητά του

$e_{\min}$  = λόγος κενών του εδάφους στην μέγιστη συμβατική πυκνότητά του, ο οποίος μπορεί να αποκτηθεί από εργαστηριακές μετρήσεις.

$e$  = λόγος κενών του εδάφους στο πεδίο.

### δ) Βαθμός Κορεσμού

Η *περιεκτικότητα σε ύδωρ*  $w$  (%) ενός εδάφους ορίζεται ως ο λόγος του βάρους του περιεχομένου ύδατος προς το ξηρό βάρος αυτού και συνήθως εκφράζεται ως ποσοστό επί της εκατό (Terzaghi & Peck, 1969). Στις άμμους στις οποίες ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται κάτω από αυτές, μέρος των κενών καταλαμβάνεται από αέρα. Εάν ως  $e_w$  συμβολίζεται ο καταλαμβανόμενος όγκος από ύδωρ για κάθε μονάδα όγκου στερεού υλικού και ως  $e$  ο συνολικός όγκος των πόρων μιας μονάδας στερεού υλικού, ο λόγος

$$S_r (\%) = \frac{100e_w}{e} \quad (2.5)$$



αποδίδει τον *βαθμό κορεσμού* του εδάφους. Στον πίνακα 2.2 δίνεται ο ορισμός της άμμου και των αμμώδη εδαφών αντίστοιχα με το βαθμό κορεσμού.

Πίνακας 2.2: Βαθμός κορεσμού σε άμμο ή σε αμμώδη εδάφη

Χαρακτηρισμός άμμου	Βαθμός κορεσμού (%)
Ξηρή	0
Ύφυγρη	1-25
Υγρή	26-50
Αρκετά υγρή	51-75
Διάβροχη	76-99
Κορεσμένη	100

Το αμμώδες εδαφικό υλικό, το οποίο χρησιμοποιείται στην διεξαγωγή των πειραμάτων, που θα παρουσιαστούν αργότερα, βρίσκεται σε ξηρή μορφή.

### 3. ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ

#### 3.1 Σκοπός

Σκοπός της δοκιμής του συμπίεσομέτρου (οιδημέτρου) είναι η εκτίμηση του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης ( $D$ ) ξηρού αμμώδους εδάφους σε χαλαρή μορφή και μέσω αυτού να εκτιμηθεί το μέτρο ελαστικότητας  $E$ . Εργαστηριακά η έρευνα αυτή διεξάγεται με τη βοήθεια ειδικού οργάνου που καλείται συμπίεσόμετρο. Το επιβαλλόμενο φορτίο ασκείται κατακόρυφα σε πλευρικά περιορισμένο κυλινδρικό δοκίμιο. Η μονοδιάστατη συμπίεση αντιπροσωπεύει τις συνθήκες που επικρατούν στην φύση. Στο πεδίο η πρόσφυση και η τριβή κατά μήκος των επιφανειών των στρωμάτων σε πλευρικά εμποδιζόμενες αμμώδεις στρώσεις με τα γειτονικά εδάφη, περιορίζουν σημαντικά τη διαστολή τους κατά την οριζόντια διεύθυνση.

Για παράδειγμα, απόθεση των εδαφικών υλικών στους πυθμένες των θαλασσών γίνεται σε οριζόντιες στρώσεις μεγάλης έκτασης, οπότε με τη συνεχιζόμενη απόθεση των υπερκείμενων ιζημάτων οι υποκείμενες εδαφικές αποθέσεις συμπιέζονται στην κατακόρυφη διεύθυνση. Επιπλέον, λόγω της μεγάλης έκτασης των αποθέσεων αυτών η παραμόρφωση στο οριζόντιο επίπεδο παρεμποδίζεται. Ο τύπος αυτός της τροπής είναι αρκετά συνήθης και στα τεχνικά έργα, επειδή κατακόρυφες φορτίσεις μεγάλης έκτασης σε οριζόντιες εδαφικές στρώσεις οδηγούν σε μονοδιάστατη συμπίεση, όπως π.χ. επιχώματα οδοποιίας μεγάλου πλάτους, δεξαμενές υγρών καυσίμων μεγάλης διαμέτρου, κτίρια με μεγάλη επιφάνεια κάτοψης εδραζόμενα σε πλάκα θεμελίωσης.

Συνεπώς, θέλοντας να επιτευχθούν στο εργαστήριο συνθήκες υπαίθρου, ώστε να αποκτηθούν οι απαιτούμενες πληροφορίες για τον υπολογισμό της συμπίεστότητας κατά τη συμπίεση οριοθετημένου στρώματος άμμου, διεξάγονται δοκιμές θλίψης σε κυλινδρικό δείγμα με μηδενική ακτινική τροπή.

## 3.2 Θεωρία

### 3.2.1 Στερεοποίηση - Συμπαγοποίηση

Σε κορεσμένα εδάφη, το φορτίο αρχικά φέρεται από το εμπεριεχόμενο ύδωρ και σταδιακά με την εκτόνωση της πίεσης, το φορτίο λαμβάνεται από τον εδαφικό σκελετό. Το φαινόμενο αυτό καλείται στερεοποίηση του εδάφους. Στο παρόν όμως πείραμα, όπου το προς μελέτη έδαφος είναι σε ξηρή μορφή και το φορτίο μεταφέρεται απευθείας στον εδαφικό σκελετό, το φαινόμενο που αναπτύσσεται καλείται συμπαγοποίηση.

### 3.2.2 Συμπιεστότητα

Κάθε τροπή του εδαφικού σκελετού συνοδεύεται από αντίστοιχη μεταβολή των φορτίων που αναλαμβάνονται από τον εδαφικό σκελετό.

Η εφαπτομενική συμπιεστότητα ενός υλικού ορίζεται από το λόγο της μεταβολής της ισότροπης τάσης (πίεσης), που προκαλεί ορισμένη ογκομετρική παραμόρφωση, προς την μεταβολή της παραμόρφωσης αυτής και εκφράζεται με το Μέτρο Ισότροπης Συμπίεσης.

$$K = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon_{Vol}} \quad (3.1)$$

όπου:

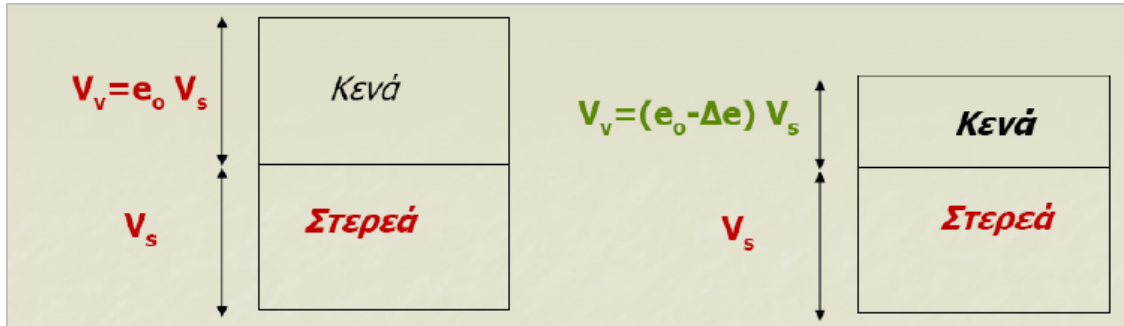
$\Delta \sigma$  = μεταβολή αξονικής τάσης

$\Delta \varepsilon_{Vol}$  = μεταβολή της ογκομετρικής τροπής

Κατά την επιβολή ενός εξωτερικού φορτίου (π.χ. μιας ισότροπης τάσης) σε ένα ισότροπο εδαφικό υλικό, σε ξηρή μορφή, το συνολικό εξωτερικώς επιβεβλημένο φορτίο θα αναληφθεί από τον εδαφικό σκελετό  $\Delta \sigma = \Delta \sigma'$  που θα παραμορφωθεί σύμφωνα με το μέτρο ισότροπης συμπίεσής του.

Δηλαδή, το εδαφικό υλικό στο συμπιεσόμετρο θα υποστεί ογκομετρική παραμόρφωση (Σχ. 3.1) ίση με:

$$\Delta \varepsilon_{Vol} = \frac{\Delta h}{h_o} = \frac{\Delta V}{V_o} = -\frac{\Delta e}{1 + e_o} \quad (3.2)$$



Σχ. 3.1. Ογκομετρική παραμόρφωση ισότροπου εδαφικού υλικού, σε ξηρή μορφή κατά την επιβολή ενός εξωτερικού φορτίου (Σταυροπούλου, 2007).

Η μείωση του όγκου του εδάφους θα προέλθει από ισόποση μείωση του όγκου των κενών, δηλαδή από την αναδιάταξη των κόκκων του εδάφους σε πιο πυκνή δομή (με λιγότερα κενά). Τούτο οφείλεται στο γεγονός ότι το μέτρο ισότροπης συμπίεσης του υλικού των κόκκων είναι πολύ μεγαλύτερη σε σχέση με αυτό του εδαφικού σκελετού και, έτσι, η πραγματική μείωση του όγκου των κόκκων είναι αμελητέα σε σχέση με τη μείωση του όγκου των κενών.

### 3.2.3 Μονοδιάστατη συμπίεση εδαφών

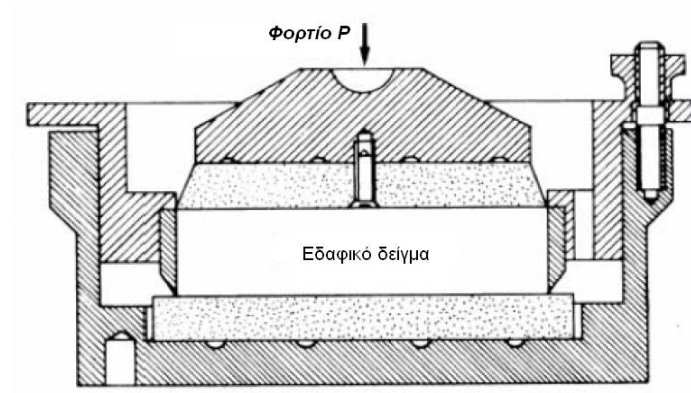
Μονοδιάστατη συμπίεση είναι η φόρτιση ενός εδαφικού στοιχείου κατά την οποία επιβάλλεται ορθή τάση στον κατακόρυφο άξονα  $Oz$  με ταυτόχρονη παρεμπόδιση των ορθών τροπών κατά την έννοια των αξόνων  $Ox$ ,  $Oy$  στο επίπεδο καθώς και όλων των διατμητικών τροπών, δηλαδή

$$\varepsilon_{zz} \neq 0 ; \varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \gamma_{xy} = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \quad (3.3)$$

Η μονοδιάστατη συμπίεση είναι συνήθης τρόπος τροπής των εδαφικών υλικών, επειδή συμβαίνει λ.χ. κατά την ιζηματογένεση.

### 3.2.4 Συμπιεσόμετρο

Για να διευκολυνθεί η κατανόηση της θεωρίας του συμπιεσομέτρου παρουσιάζεται κατακόρυφη τομή αυτού στο Σχήμα 3.2.



Σχ. 3.2.Κατακόρυφη τομή συμπιεσομέτρου το οποίο εμπεριέχει το εδαφικό δείγμα (Σταυροπούλου, 2007).

Στην παρούσα εργασία το προς εξέταση αμμόδες υλικό είναι σε ξηρή μορφή και δεν εμπεριέχει υγρασία. Συνεπώς οι ακόλουθες σχέσεις αναπτύσσονται για πίεση πόρων  $u = 0$ .

Από τη θεωρία ελαστικότητας του Timoshenko (Timoshenko & Goodier, 1951)

για ομογενές και ισότροπο σώμα (Σχ. 3.3) ισχύουν οι σχέσεις:

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{xx})] \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})] \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{yy})] \quad (3.6)$$

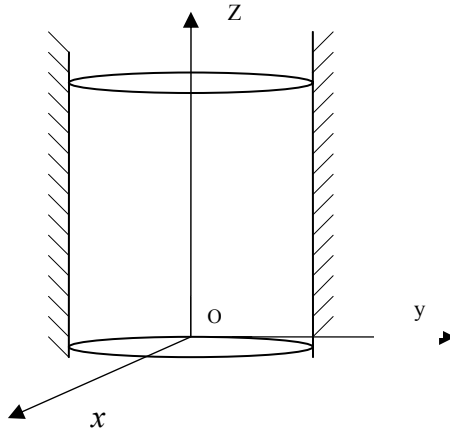
Για τη μονοδιάστατη συμπίεση  $\varepsilon_{yy} = 0$  και  $\sigma_{xx} = \sigma_{yy}$ , επομένως για την εξίσωση (3.6) έχουμε:

$$0 = \frac{1}{E} [\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{zz} + \sigma_{xx})]$$

$$0 = \sigma_x - \nu\sigma_x - \nu\sigma_z$$

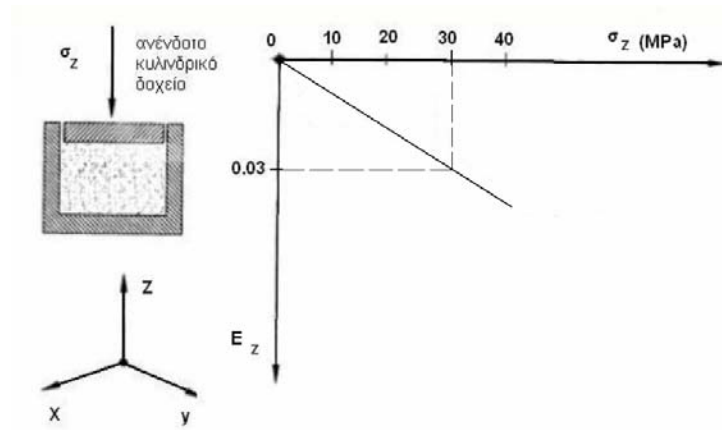
Λύνοντας ως προς  $\sigma_z$  καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$\sigma_x = \sigma_z \left( \frac{\nu}{1-\nu} \right) \quad (3.7)$$



Σχ. 3.3. Ομογενές και ισότροπο σώμα σε μονοδιάστατη συμπίεση.

Εάν θεωρηθεί ότι το έδαφος είναι ομογενές, ισότροπο και έχει γραμμική συμπεριφορά (Σχ. 3.4) η εφαρμογή των σχέσεων ελαστικότητας (3.4), (3.5), (3.6) και της σχέσης (3.7), οδηγεί στους ακόλουθους τύπους για τη μονοδιάστατη συμπίεση.



Σχ. 3.4. Τυπικό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης γραμμικό εδαφικό υλικό (Σταυροπούλου, 2007) .

Το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης  $D$  υπολογίζεται:

$$D = \frac{\Delta \sigma_{zz}}{\Delta \varepsilon_{zz}} \Rightarrow \quad (3.8)$$

$$D = \frac{\sigma_{zz}}{\frac{1}{E} [\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{xx})]}$$

όπου  $\Delta \sigma_{zz}$  = μεταβολή της τάσης κατά τον κατακόρυφο άξονα  $Oz$ ,

$\Delta \varepsilon_{zz}$  = μεταβολή της τροπής κατά τον κατακόρυφο άξονα  $Oz$

$E$  = μέτρο ελαστικότητας

Αντικαθιστώντας ως  $\sigma_{xx}$  και  $\sigma_{yy}$  την εξίσωση (3.7) που τις συνδέει με την  $\sigma_{zz}$

προκύπτει:

$$D = \frac{E \cdot \sigma_{zz}}{\sigma_{zz} - \nu \left( \sigma_{zz} \frac{\nu}{1-\nu} + \sigma_{zz} \frac{\nu}{1-\nu} \right)} \Rightarrow$$

$$D = \frac{E \cdot (1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} \quad (3.9)$$

Στη μονοδιάστατη συμπίεση δεν αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις.

$$\Delta \sigma'_{xy} = \Delta \sigma'_{yz} = \Delta \sigma'_{zx} = 0 \quad (3.10)$$

Επίσης, στη μονοδιάστατη συμπίεση η μεταβολή της ογκομετρική τροπή  $\Delta\varepsilon_{vol}$  είναι ουσιαστικά ίση με την μεταβολή της αξονική τροπή  $\Delta\varepsilon_{zz}$ .

$$\Delta\varepsilon_{vol} = \Delta\varepsilon_{zz} \quad (3.11)$$

### 3.3 Περιγραφή συσκευής

Για δοκιμές θλίψης σε πλευρικώς περιορισμένο δείγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί το συμβατικό (Σχ. 3.5α) ή το υδραυλικό οιδήμετρο (Σχ. 3.5β). Το συμβατικό οιδήμετρο είναι παλαιότερη συσκευή στην οποία η επιβολή τάσης γίνεται χειροκίνητα με προσθήκη βαρών στο άγκιστρο του συμπιεσομέτρου και τα δεδομένα πρέπει να καταγράφονται σε πρότυπο φύλλο εργασίας. Στο υδραυλικό οιδήμετρο η επιβολή τάσης γίνεται αυτοματοποιημένα με σύστημα εισπίεσης ύδατος, ενώ τα δεδομένα καταγράφονται σε Η/Υ. Η βασικότερη όμως διαφορά των δυο τύπων συμπιεσομέτρων είναι το μέγεθος του φορτίου που μπορεί να ασκηθεί, το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο για το συμβατικό συμπιεσόμετρο.



(α)



(β)

Σχ.3.5.Συμπιεσόμετρα (οιδήμετρα): (α) συμβατικό οιδήμετρο (β) υδραυλικό οιδήμετρο GDS που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκε υδραυλικό οιδήμετρο και συγκεκριμένα το σύστημα δοκιμής στερεοποίησης GDS (Global Digital System) το οποίο παρέχει, μέσω H/Y, αυτοματισμό του ελέγχου της δοκιμής, της καταγραφής δεδομένων, της αναγωγής δεδομένων σε μονάδες διεθνούς συστήματος (S.I.), γραφικές παραστάσεις σε οθόνη απευθείας μετάδοσης και παρουσίαση των καταχωρημένων δεδομένων σε πίνακα ή μέσω έγχρωμου εκτυπωτή γραφικών. Το υδραυλικό οιδήμετρο GDS έχει μέγιστη δυνατή φόρτιση 1700 kPa.

Το σύστημα με την βοήθεια H/Y, παρέχει τη δυνατότητα εκτέλεσης πειραμάτων με αυτόματο έλεγχο φόρτισης με σταθερό βήμα, σταθερού ρυθμού τροπής, σταθερού ρυθμού φόρτισης, ελεγχόμενης υδραυλικής κλίσης, πίεσης διόγκωσης και κυκλικής φόρτισης (σταθερός ρυθμός παραμόρφωσης, σταθερός ρυθμός φόρτισης, ελεγχόμενης υδραυλικής κλίσης).

Το σύστημα GDS αποτελείται από τα εξής τμήματα:

- *Σύστημα διαμόρφωσης:* η κυψέλη δοκιμής συνδέεται με τον H/Y μέσω δύο GDS ψηφιακών ελεγκτών 200cc / 2MPa (Σχ. 3.6). Ο ένας από τους ψηφιακούς ελεγκτές χρησιμεύει για την αξονική τάση και ο άλλος για την αντίστροφη πίεση. Επίσης υπάρχει και ένα GDS ψηφιακό interface πίεσης για τον υπολογισμό της πίεσης των πόρων.



Σχ. 3.6. GDS ψηφιακοί ελεγκτές 200cc/ 2MPa

- *Υδραυλική κυψέλη στερεοποίησης*: είναι τύπου Rowe & Barden και έχει ενσωματωμένο τον καινούριο δακτύλιο των Bishop και Skinner, ο οποίος επιτρέπει στη μεμβράνη αξονικής τάσης να ακολουθήσει την καθίζηση.

Η κυψέλη έχει διάμετρο  $D = 69,65 \text{ mm}$ . Η αντιπίεση εφαρμόζεται στον άνω σωλήνα της κυψέλης έτσι ώστε οι υδραυλικές κλίσεις πεδίου να μπορούν να εφαρμόζονται. Ο κάτω σωλήνας έχει μια οπή για ένα μετατροπέα πίεσης.

- *Ηλεκτρονικό μηχανοσκόπετρο*: Μετράει την κατακόρυφη μετατόπιση και έχει ακρίβεια τρίτου δεκαδικού ψηφίου του χιλιοστού (mm).

Ο υπολογισμός της μέσης τιμής αξονικής τάσης γίνεται κι αυτός αυτόματα από την πίεση που εφαρμόζεται στην άνω μεμβράνη μέσω του ελεγκτή αξονικής τάσης. Αυτή η τάση διορθώνεται αυτόματα για την περιοχή του άνω σωλήνα αποστράγγισης μέσω της κορυφής της κυψέλης.

Επίσης, εφικτός είναι ο υπολογισμός της αξονικής τροπής από τη μεταβολή του όγκου του ελεγκτή της αντιπίεσης ή εναλλακτικά από τη διορθωμένη μεταβολή του όγκου του ελεγκτή αξονικής τάσης. Αλλιώς, η αξονική τροπή μπορεί να υπολογιστεί απευθείας από έναν GDS ψηφιακό δείκτη.

Το σύστημα είναι εύκολο στη χρήση του με συμβουλές, ερωτήσεις και πληροφορίες που εμφανίζονται αυτόματα στην οθόνη του H/Y για να καθοδηγήσουν στη διαδικασία τοποθέτησης. Η δοκιμή εκτελείται αυτόματα. Οι δοκιμές επιλέγονται από το menu της δοκιμής που εμφανίζεται στην οθόνη.

Το σύστημα έχει την δυνατότητα να πραγματοποιήσει οποιοδήποτε αριθμό και συνδυασμό δοκιμών (συμπεριλαμβανομένων και των επαναληπτικών δοκιμών) σε ακολουθία στο ίδιο εδαφικό δείγμα. Οι τρέχουσες διαστάσεις του δοκιμίου μεταφέρονται από το τέλος της μίας δοκιμής στην αρχή της επόμενης. Δοκιμές μπορούν να γίνουν

χωρίς να παρακολουθούνται και χωρίς καμία διακοπή για οποιοδήποτε χρονικό διάστημα.

### 3.4 Πειραματική διαδικασία

Στο πείραμα που παρουσιάζεται στη συνέχεια γίνεται ένας κύκλος. Δηλαδή, στο δοκίμιο ασκείται αρχικά φόρτιση έως τα 100 kPa με ρυθμό 100 kPa/min, ακολουθεί αποφόρτιση έως τα 10 kPa με ρυθμό 10 kPa/min και τέλος επιβάλλεται ξανά τάση έως τα 100 kPa με ρυθμό 10 kPa/20sec.

Προτού αρχίσει η διαμόρφωση του δοκιμίου λήφθηκαν μετρήσεις τις εσωτερικής διαμέτρου του δακτυλίου, με ακρίβεια 0,01mm σε δυο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις και καταγράφηκε η μέση διάμετρος  $D = 69,65mm$ . Επιπλέον, μετρήθηκε το ύψος του δακτυλίου σε διάφορες θέσεις με ακρίβεια 0,05 mm. Η μέση τιμή καταγράφηκε ως το αρχικό ύψος του δοκιμίου  $H_o = 17,33mm$ . Το δείγμα ζυγίστηκε πριν ( $m_1 = 740,26g$ ) και μετά ( $m_2 = 638,35g$ ) τη διαμόρφωση του δοκιμίου, στο πλησιέστερο 0,01g, ώστε με εύρεση της διαφοράς των μαζών να υπολογιστεί η μάζα του δοκιμίου ( $m_o = 101,91g$ ).

Από τις μετρήσεις αυτές υπολογίζεται η επιφάνεια της άνω κυκλικής πλευράς του κυλινδρικού δοκιμίου  $A$  από τον τύπο

$$A = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 0,0038m^2 = 3810,06mm^2 \quad (3.12)$$

και ο όγκος  $V$  του δοκιμίου από τον τύπο

$$V = A \cdot H_o = 0,00007m^3 = 66cm^3 \quad (3.13)$$

Στη συνέχεια ακολουθούν οι υπολογισμοί του ξηρού μοναδιαίου βάρους  $\gamma_b$

$$\gamma_b = \frac{m \cdot g}{V} = \frac{\left( g \cdot \frac{m}{\text{sec}^2} \right)}{\text{cm}^3} = 15,141 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad (3.14)$$

Και του αρχικού λόγου κενών  $e_o$

$$e_o = \frac{G_s \cdot \gamma_w - \gamma_b}{\gamma_b} = 0,73 \quad (3.15)$$

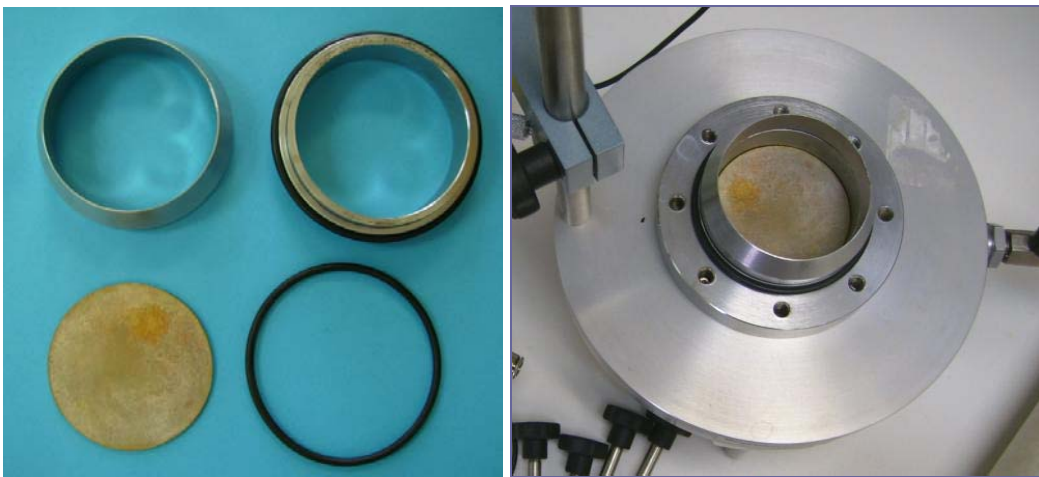
όπου:

$G_s \approx 2,67$  το ειδικό βάρος των κόκκων (Στειακάκης, 2005),

$\gamma_b$  = το υγρό φαινόμενο βάρος,

$\gamma_w = 9,81 \text{ kN} / \text{m}^3$  το μοναδιαίο βάρος του νερού.

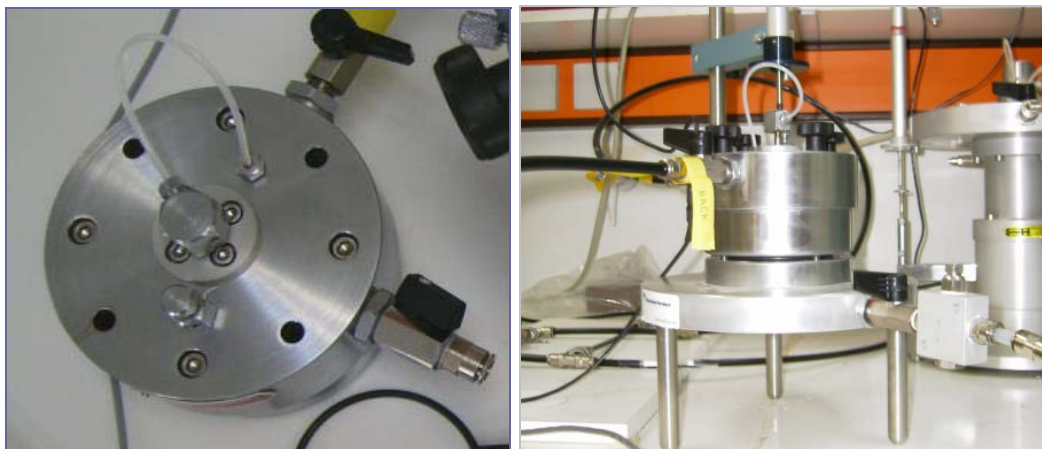
Αφού ληφθούν οι απαραίτητες μετρήσεις, πληρώνεται η βάση του οιδημέτρου με ύδωρ ώστε αυτό να είναι απαλλαγμένο από αέρα. Στη συνέχεια τοποθετείται ο κάτω πορόλιθος (Σχ. 3.7α). Ένα μέρος του ύδατος θα εκτοπιστεί και το περισσευούμενο αποκρίνεται με κάποιο απορροφητικό μέσο όπως σφουγγάρι. Ακολούθως τοποθετείται ο δακτύλιος του δείγματος (Σχ. 3.7α, β), με το κοπτικό άκρο προς τα πάνω και διαμορφώνεται το δείγμα, με απλή ροή της άμμου.



(α)

(β)

Σχ. 3.7: (α) πορόλιθος και δακτύλιος συσκευής, (β) ο κάτω πορόλιθος και ο δακτύλιος τοποθετημένα στη βάση της συσκευής.



(α)

(β)

Σχ. 3.8: (α) ανώτερο μέρος του κελιού (β) οι τέσσερις σύνδεσμοι τοποθετημένοι.

Ο δεύτερος πορόλιθος μπαίνει πάνω στο δείγμα δίχως να το συμπιέσει και τοποθετείται το ανώτερο μέρος του κελιού στη βάση (Σχ. 3.8γ) και βιδώνονται ομοιόμορφα οι τέσσερις σύνδεσμοι (Σχ. 3.8δ). Ελέγχεται η βαλβίδα αέρα ώστε να είναι ανοιχτή και με αργό ρυθμό γεμίζεται το κελί με ύδωρ (απαλλαγμένο από αέρα). Όταν το κελί γεμίσει, κλείνει η βαλβίδα του αέρα.

Τέλος, ρυθμίζεται το έμβολο φόρτισης ώστε να είναι σε επαφή με την άνω επιφάνεια του δοκιμίου και κλειδώνεται στη θέση αυτή.

Μετά την ολοκλήρωση της πρώτης φόρτισης έως τα 100 kPa, το δείγμα αποφορτίζεται έως τα 10 kPa και επαναφορτίζεται μέχρι τα 100 kPa. Η διαδικασία της αποφόρτισης ακολουθεί την ίδια μεθοδολογία με αυτή που περιγράφεται παραπάνω απλά με αντίθετη φορά. Επιπλέον, η πίεση στο διάφραγμα μειώνεται και μπορεί να ακολουθείται από ένα στάδιο διόγκωσης όπου παρατηρείται μια ανοδική μετατόπιση και αύξηση του όγκου. Οι τιμές αυτές λαμβάνονται με τον ίδιο τρόπο με τη συμύκνωση.

### 3.5 Επεξεργασία μετρήσεων οιδημέτρου

Το δοκίμιο που υποβλήθηκε σε μονοδιάστατη συμπίεση ήταν από ξηρό αμμόδες υλικό, στο οποίο δεν εμπεριέχονταν υγρασία.

Με βάση τα αποτελέσματα που καταγράψαν από τον  $H/Y$  (χρόνος  $t$  (sec), αξονική τάση  $\sigma_{ax}$  (kPa) και μετατόπιση  $\Delta H$  (mm)) έγιναν οι ακόλουθοι υπολογισμοί:

Ο λόγος κενών  $e$  αποδίδεται απ' τον τύπο

$$e_i = e_o - \Delta e_i \quad (3.16)$$

Ο λόγος κενών μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής και ο υπολογισμός αυτού προκύπτει από τις εξισώσεις 3.16 και 3.17.

Μεταβολή του λόγου κενών  $\Delta e$

$$\Delta e_i = \frac{1 + e_o}{H_o} \cdot \Delta H = \frac{\Delta H}{H_s} = 0,0086 \quad (3.17)$$

όπου  $\Delta H = 0,086mm$  η τελική μετατόπιση που καταγράφηκε από τη συσκευή και

$e_o$  = αρχικός λόγος κενών

Ισοδύναμο ύψος εδαφικών κόκκων  $H_s$

$$H_s = \frac{H_o}{1 + e_o} = 10,02mm \quad (3.18)$$

Το ισοδύναμο ύψος εδαφικών κόκκων εξαρτάται μόνο από τις αρχικές συνθήκες του δοκιμίου και παραμένει σταθερό κατά τη δοκιμή.

Η αξονική τροπή  $\varepsilon_a$  υπολογίζεται από τον τύπο

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta H}{H_o} \quad (3.19)$$

Συμειώνεται ότι η αξονική τροπή αλλάζει κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της αποφόρτισης.

Για την εκτίμηση του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας  $E_t$  χρησιμοποιήθηκε ο τύπος (3.9), ο οποίος ισχύει για μονοδιάστατη συμπίεση όπως αποδείχτηκε παραπάνω.

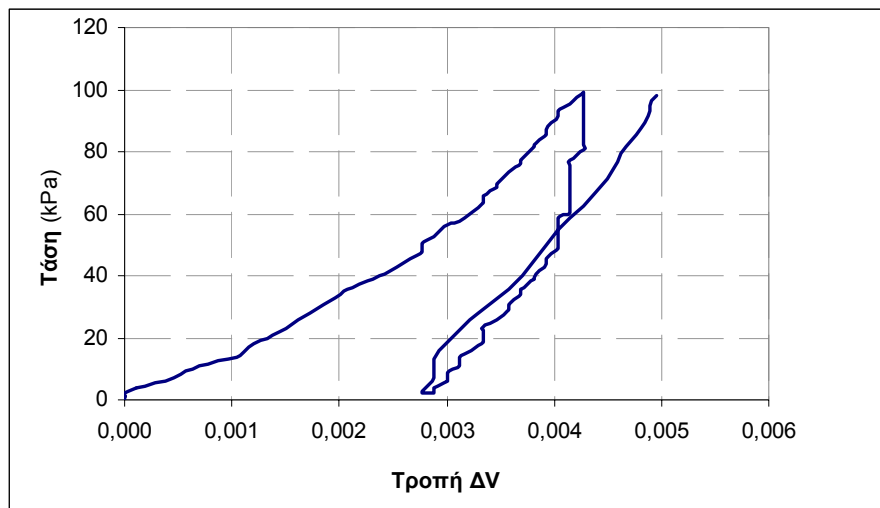
$$D = \frac{E_t \cdot (1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}$$

Λύνοντας ως προς το μέτρο ελαστικότητας  $E$  προκύπτει:

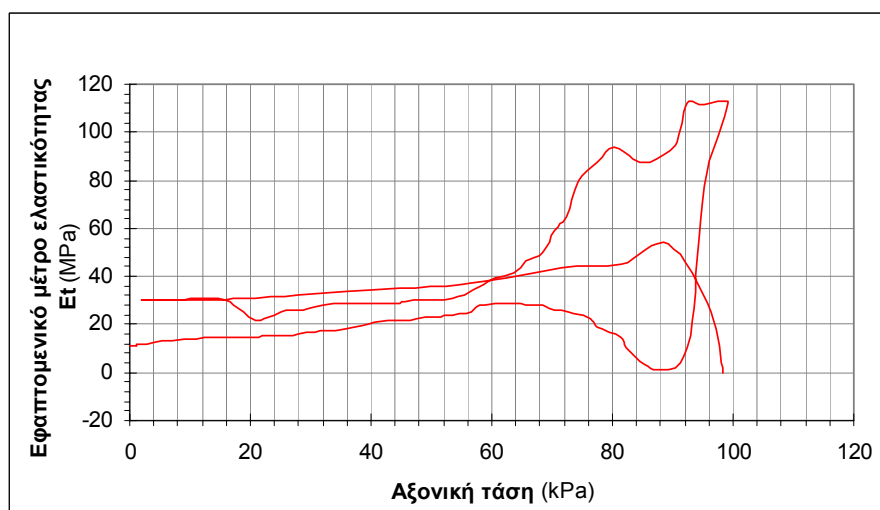
$$E_t = \frac{D \cdot [(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)]}{(1 - \nu)} \quad (3.20)$$

Από τα δεδομένα που πήραμε από τον H/Y, τα οποία είναι ο χρόνος  $t$  (sec), η αξονική τάση  $\sigma_{zz}$  και η μετατόπιση κατά τον κατακόρυφο άξονα (Oz)  $H_i$ , υπολογίστηκε η μεταβολή της αξονική μετατόπιση  $\Delta\sigma_{zz}$  και μεταβολή της αξονική τροπή  $\Delta\epsilon_{zz}$ . Από τους υπολογισμούς αυτούς δημιουργήθηκε το διάγραμμα του Σχ. 3.9.

Στη συνέχεια μέσω του τύπου (3.8) υπολογίστηκε το  $D$  για κάθε μέτρηση του H/Y. Έχοντας υπολογίσει το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης και θεωρώντας για άμμους λόγο Poisson  $\nu \approx 0,33$  (Terzaghi & Peck ,1969) μέσω της εξίσωσης (3.20) υπολογίστηκε το μέσο μέτρο ελαστικότητας  $E_t$  και έγινε το διάγραμμα του Σχ.3.10.



Σχ. 3.9. Διάγραμμα τάσης συναρτήσει της τροπής  $\Delta V$ .

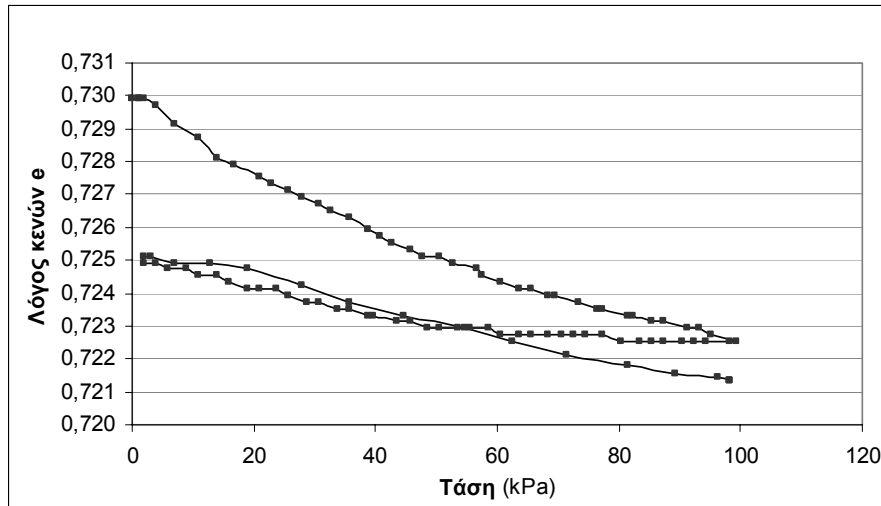


Σχ. 3.10. Διάγραμμα εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας (MPa) συναρτήσει της αξονικής τάσης (kPa).

Με βάση το διάγραμμα του Σχ. 3.10 του εφαπτομενικού μέτρου ελαστικότητας  $E_t$  (MPa) συναρτήσει της αξονικής τάσης (kPa), προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή του πρώτου κυμαίνεται γύρω στα 100 MPa.



Οι γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων και των τριών σταδίων φόρτισης (φόρτιση - αποφόρτιση - φόρτιση) παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.10 και 3.11.



Σχ. 3.11. Διάγραμμα του λόγου κενών  $e$  συναρτήσει της τάσης (kPa).

Αναφερόμενοι στο διάγραμμα τάσης (kPa) συναρτήσει του λόγου κενών  $e$  (Σχ. 3.13) επισημαίνεται ότι για άμμους το ενδιαμέσο τμήμα είναι ευθεία για πίεση από 1 με 10 MPa περίπου. Μετά την πίεση αυτή οι κόκκοι αρχίζουν να θραύονται (Terzaghi & Peck, 1969).

## 4. ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

### 4.1 Σκοπός

Η τριαξονική δοκιμή έχει ως σκοπό τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών αντοχής, παραμορφωσιμότητας και ελαστικότητας εδαφών σε δεδομένες συνθήκες αποστράγγισης. Οι σχέσεις των τάσεων και των τροπών του εδάφους προσδιορίζουν το μέγεθος της καθίζησης των εδραζόμενων σε αυτό θεμελιώσεων, καθώς και τις μεταβολές της ώθησης του εδάφους λόγω μικρής μετακίνησης τοίχων αντιστήριξης ή άλλων παρόμοιων κατασκευών. Στη συγκεκριμένη εργασία σκοπός είναι η διερεύνηση της παραμορφωσιμότητας/ελαστικότητας, της αντοχής και της γωνίας εσωτερικής τριβής  $\phi$  ξηρού, αμμώδους εδάφους.

### 4.2 Θεωρία

#### 4.2.1 Γενικά

Θεωρητικά το εδαφικό δοκίμιο υποβάλλεται σε κατάσταση τάσεων ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , με τις θλιπτικές τάσεις και συστολικές τροπές να είναι θετικοί αριθμοί) ενώ την ίδια χρονική στιγμή μετρούνται οι τροπές, και οι πιέσεις νερού πόρων ή οι μεταβολές του όγκου του δοκιμίου. Στην πράξη, τα δοκίμια είναι συνήθως κυλινδρικά και υποβάλλονται σε κατάσταση τάσεων  $\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3$  όπου  $\sigma_1$  είναι η αξονική τάση και  $\sigma_2 = \sigma_3$  είναι η πλευρική τάση. Το κυλινδρικό δοκίμιο περιβάλλεται από μια υδατοστεγή ελαστική μεμβράνη και τοποθετείται στην κυψέλη όπου περιβάλλεται με νερό και υποβάλλεται σε υδροστατική πίεση. Κατόπιν φορτίζεται αξονικά μέχρι την θραύση του με κατάσταση τάσεων  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ . Κατά τη διάρκεια της δοκιμής ( $\sigma_1, \sigma_2 = \sigma_3$ ), όπως αναφέρθηκε,

μετρούνται οι αξονικές και ακτινικές παραμορφώσεις καθώς και οι μεταβολές όγκου και οι πιέσεις νερού των πόρων μετρούνται.

Η δοκιμή τριαξονικής θλίψης διεξάγεται κρατώντας σταθερή πάντα την πίεση της κυψέλης και αυξάνοντας σταδιακά την αξονική τάση. Για να καθοριστεί εντελώς η δοκιμή πρέπει είναι γνωστές οι αρχικές εφαρμοζόμενες τάσεις καθώς επίσης και οι συνθήκες αποστράγγισης κατά τη διάρκεια της.

Ανάλογα με τις συνθήκες αποστράγγισης διακρίνονται οι ακόλουθοι, τρεις βασικοί τύποι τριαξονικών δοκιμών.

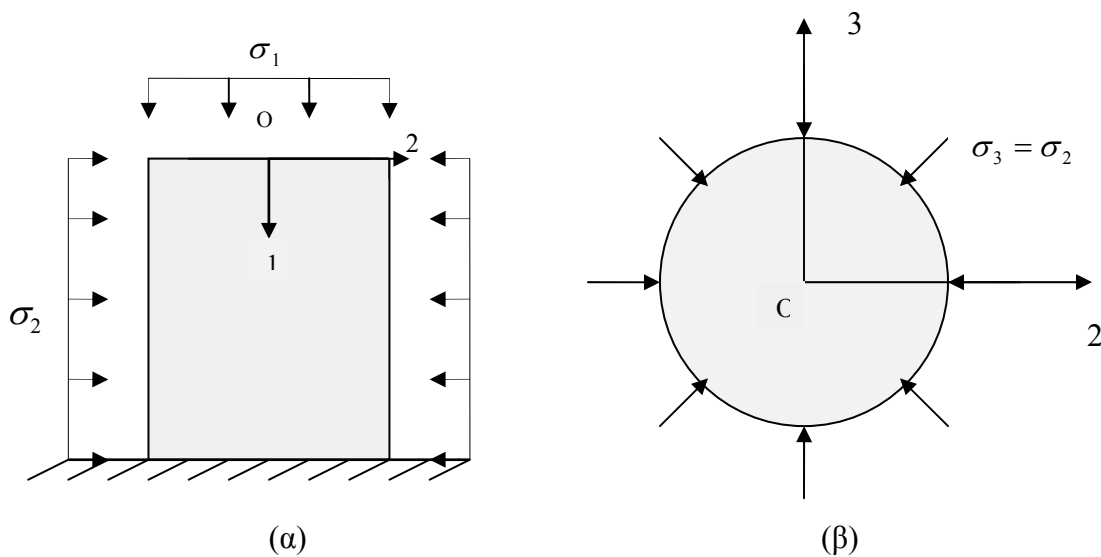
Η *δοκιμή χωρίς στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση (Unconsolidated-Undrained)* κατά την οποία το δείγμα οδηγείται στη θραύση χωρίς να επιτραπεί η αποστράγγιση του. Αποκαλείται και γρήγορη δοκιμή.

Η *δοκιμή με στερεοποίηση – χωρίς αποστράγγιση (Consolidated-Undrained)* όπου αρχικά η βαλβίδα αποστράγγισης είναι ανοιχτή για να επιτρέπεται στην πίεση νερού των πόρων να διαχυθεί μέχρι να μηδενιστεί και ύστερα κλείνει ώστε το δείγμα να οδηγηθεί στη θραύση χωρίς αποστράγγιση.

Η *δοκιμή με στερεοποίηση – με στράγγιση (Consolidated-Drained)* στην οποία το δοκίμιο φορτίζεται τριαξονικά και διατέμνεται με μικρή ταχύτητα (συνάρτηση της διαπερατότητας του υλικού) με ανοικτή τη βαλβίδα αποστράγγισης.

#### 4.2.2 Κατάσταση τάσεων σε δοκίμιο κλασικής τριαξονικής δοκιμής

Ένα κυλινδρικό δοκίμιο ισότροπου εδάφους καθορίζεται γεωμετρικά από τον κατακόρυφο άξονα (διεύθυνση 1) και την εγκάρσια διατομή του (διεύθυνση 2 και 3, κάθετες μεταξύ τους) (Σχ. 4.1). Στην περίπτωση της συμμετρίας περί άξονα, ο τανυστής των κυρίων τάσεων εξαρτάται μόνο από τις ανεξάρτητες παραμέτρους, με τιμή θετική στη θλίψη.



Σχ. 4.1: (α) πλάγια όψη δοκιμίου (β) κάτοψη δοκιμίου.

Με ασκούμενη πίεση των πόρων  $p_w$ , ισχύει σύμφωνα με τον τύπο του Terzaghi:

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - p_w \quad (4.1)$$

όπου  $\sigma'_3$  = ενεργή πλευρική τάση

Αν δεν υπάρχει υδροστατική πίεση  $p = 0$ , τότε

$$\sigma'_3 = \sigma_3 \quad (4.2)$$

Επίσης, για τον τανυστή των τροπών, αναφερόμενο σε κύριους άξονες, έχουμε:

$$\varepsilon_1 \text{ και } \varepsilon_2 = \varepsilon_3 \quad (4.3)$$

Ο διαχωρισμός των σφαιρικών και αποκλινουσών συνιστωσών των τανυστών των τάσεων και τροπών, των οποίων οι φυσικές συνέπειες είναι διαφορετικές, μας οδηγεί στις παρακάτω παραμέτρους:

Κατά τη θλίψη προστίθεται στην πίεση της κυψέλης ως εξωτερική δύναμη η μέση ενεργή τάση  $p$  από την κίνηση του εμβόλου της συσκευής.

$$p = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3} \quad (4.4)$$

Η εξασκούμενη πλευρική πίεση του νερού της κυψέλης επί του δοκιμίου  $\sigma_3$  είναι ένα μέρος της μέγιστης κύριας τάσης  $\sigma_1$ .

Έτσι προκύπτει:

$$\sigma_1 = \frac{F_i}{A} + \sigma_3 \Rightarrow \frac{F_i}{A} = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (4.5)$$

όπου  $\frac{F_i}{A}$  είναι η αξονικά εφαρμοζόμενη τάση.

Η  $q = \sigma_1 - \sigma_3$  ορίζεται ως αποκλίνουσα τάση. Με το φορτίο αυτό εμφανίζονται διατμητικές τάσεις.

Στη μέση υδροστατική τάση  $p$  και την αποκλίνουσα τάση  $q$  αντιστοιχούν οι τροπές:

$$\text{ογκομετρική τροπή } \varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (4.6)$$

$$\text{διατμητική τροπή } \varepsilon_s = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \quad (4.7)$$

Τα δοκίμια της τριαξονικής δοκιμής έχουν κυλινδρική μορφή μόνο πριν από την έναρξη της διάτμησης. Κατά την διάρκεια επιβολής του φορτίου τα εδαφικά δοκίμια συνήθως παίρνουν βαρελοειδή μορφή και η κατανομή των τάσεων στο ύψος του δοκιμίου δεν είναι ομοιόμορφη. Συνεπώς η διατομή του δοκιμίου δεν είναι σταθερή.

Πρακτικά μόνο η διατμητική δύναμη, σαν άθροισμα των επιμέρους διατμητικών δυνάμεων στην επιφάνεια της ολίσθησης του δοκιμίου, μπορεί να μετρηθεί. Για τον λόγο αυτό πρέπει να προσδιορισθεί η μέση επιφάνεια του δοκιμίου για τον υπολογισμό της εκάστοτε διατμητικής τάσης.

Με ακριβή εκτέλεση της δοκιμής και στην περίπτωση όπου η μέτρηση της μεταβολής του όγκου κατά τη διάρκεια της δοκιμής θα ήταν εφικτή, το ύψος  $H$  και ο όγκος  $V$  του δοκιμίου θα ήταν πάντα γνωστά, οπότε θα μπορούσε να υπολογισθεί η μέση διατομή του δοκιμίου  $A$ .

$$A = \frac{V}{H} = \frac{V_o - V_i}{H_o - H_i} \quad (4.8)$$

### 4.3 Περιγραφή συσκευής

Σε αυτή την παράγραφο θα γίνει περιγραφή της συσκευής τριαξονικής θλίψης αναφέροντας τα μέρη από τα οποία αποτελείτε και δίνοντας τα βασικά χαρακτηριστικά για καθένα από αυτά. Για την καλύτερη όμως κατανόηση της διάταξης της συσκευής δίνεται φωτογραφία αυτής στο Σχ. 4.2.



Σχ. 4.2. Συσκευή τριαξονικής θλίψης του Εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του πολυτεχνείου Κρήτης.

Για τη διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε το σύστημα τριαξονικής θλίψης GDS (Global Digital System, 2000). Οι μονάδες του συστήματος τριαξονικής φόρτισης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών (Στειακάκης, 2003) είναι τα ακόλουθα:

- *Κυψέλη*: Είναι υδραυλική κυψέλη τασικών διαδρομών, κυλινδρικού σχήματος και κατασκευασμένη από plexiglas. Η μέγιστη πίεση κυψέλης φτάνει τα 1700 kPa με μέγιστο αξονικό φορτίο 2 kN και μέγιστη αξονική μετατόπιση 25 mm.
- *Κελί φόρτισης*: Είναι εσωτερικό καταδυόμενο κελί λαδιού με αισθητήρες τύπου ημιαγωγών και μπορεί να μετρήσει μέγιστη δύναμη 2 kN . Παρουσιάζει σφάλμα λόγω μη γραμμικής απόκρισης και υστέρησης 0,1% του εύρους μέτρησης και επιπλέον έχει απόκριση σε μεταβολές της πίεσης του κελιού μικρότερη από 2%/MPa .
- *Μετρητές παραμόρφωσης (εξωτερικά της κυψέλης)*: τύπου LVDT με εύρος μέτρησης 25 mm ο οποίος παρουσιάζει σφάλμα λόγω μη γραμμικής απόκρισης και υστέρησης  $\pm 0,25\%$  του εύρους μέτρησης.
- *Αισθητήρας πίεσης πόρων*: Είναι τύπου ημιαγωγών, σ' ένα σχεδιασμό γέφυρας Wheatstone. Μετατρέπει την πίεση που επιβάλλεται από παραμόρφωση ενός εσωτερικού διαφράγματος, σ' ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο της επιβαλλόμενης πίεσης. Το εύρος μέτρησης είναι 2000 kPa και έχει σφάλμα λόγω μη γραμμικής απόκρισης και υστέρησης 0,1% του εύρους μέτρησης.

Για τη διαμόρφωση του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκαν τα εξής εργαλεία – βοηθήματα:

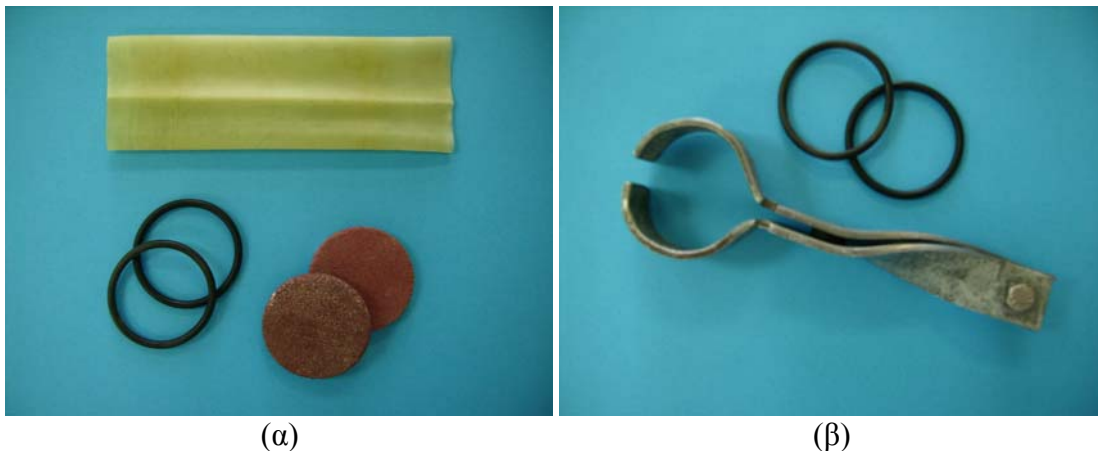
- *Μορφοποιητής δείγματος*: είναι ένας μεταλλικός κύλινδρος ο οποίος συνθέτεται από ίσα μέρη (Σχ. 4.3) που συγκρατούνται με τη βοήθεια μεταλλικού δακτυλίου. Ο μορφοποιητής χρησιμεύει στη μορφοποίηση και παρεμπόδιση του δοκιμίου να καταρρεύσει.



Σχ. 4.3. Ο μορφοποιητής δοκιμίου και ο μεταλλικός δακτύλιος που τον συγκρατεί.

- *Πορόλιθοι:* στη βάση κάθε κεφαλής του δοκιμίου τοποθετούνται πορώδεις λίθοι (Σχ. 4.4α), που έχουν ακριβώς τη διάμετρο του δοκιμίου. Οι πορόλιθοι έχουν πυκνές αλλά μικρές οπές έτσι ώστε να επιτρέπεται η ροή του νερού μέσω των λίθων αλλά να μην είναι δυνατή η διέλευση μέσω αυτών των λεπτών εδαφικών κόκκων.
- *Ελαστική μεμβράνη:* Γύρω από το δοκίμιο τοποθετείται μια λεπτή, αδιαπέρατη ελαστική μεμβράνη με πάχος περίπου 0,5 mm που συγκρατιέται από ελαστικούς δακτυλίους (Σχ. 4.4α).
- *Βοηθητικά εξαρτήματα:* σε αυτά ανήκουν ο εξολκέας (Σχ. 4.4β) για την τοποθέτηση των ελαστικών δακτυλίων (O-rings) στο δοκίμιο, η χοάνη για ομοιόμορφη ροή της άμμου, το ειδικό ταψί με οπή στο κέντρο για να εξυπηρετεί στο μάζεμα της άμμου κατά τη διαμόρφωση του δοκιμίου, το παχύμετρο για τη μέτρηση των διαστάσεων του δοκιμίου, το πουάρ για άσκηση υποπίεσης στο δοκίμιο ώστε να μην καταρρεύσει όταν απομακρυνθεί ο μορφοποιητής και μικρή σπάτουλα για επίπεδη διαμόρφωση της άνω επιφάνια του δοκιμίου.





Σχ. 4.4: (α) Ελαστική μεμβράνη, ελαστικοί δακτύλιοι και πορόλιθοι, (β) εξολκέας.

#### 4.4 Μειονεκτήματα – Προτερήματα τριαξονικής δοκιμής

Η δοκιμή τριαξονικής θλίψης χρησιμοποιείται ευρύτατα και θεωρείται ως το βασικό πείραμα για την διερεύνηση της εντατικής κατάστασης του εδάφους κατά τη διάτμηση. Υστερεί έναντι των άλλων δοκιμών διάτμησης και μονοαξονικής θλίψης γιατί είναι πιο πολύπλοκη.

Σε αντιδιαστολή με τις τεχνικές δυσκολίες που παρουσιάζει, έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

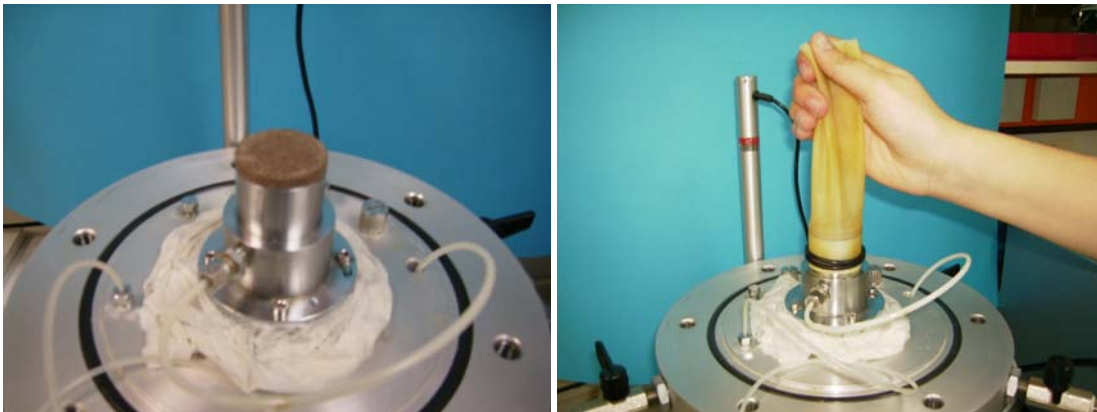
- α) Υπάρχει σαφής εικόνα της εντατικής κατάστασης του δοκιμίου γιατί υπάρχει η δυνατότητα να μετρηθούν όχι μόνο οι επιβαλλόμενες τάσεις, αλλά και η πίεση του νερού των πόρων.
- β) Η μέτρηση της μεταβολής του όγκου του δοκιμίου κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι ακριβής και επιτρέπει με ακρίβεια τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου και το λόγο Poisson.
- γ) Το δοκίμιο δέχεται ομοιόμορφα κατανεμημένες τάσεις και αποφεύγεται η επίδραση άλλων παραγόντων.
- δ) Η συσκευή προσαρμόζεται εύκολα σε ειδικές απαιτήσεις κάθε πειράματος και διευκολύνεται πολύ η έρευνα.

Σε αντίθεση με την συσκευή άμεσης διάτμησης, που χρησιμοποιείται πλέον κύρια για τον υπολογισμό της γωνίας τριβής και της γωνίας διαστολής των αμμοδών υλικών, η τριαξονική δοκιμή θλίψης χρησιμοποιείται για εδάφη όλων των τύπων και όλων των ειδών των δοκιμών.

#### 4.5 Πειραματική διαδικασία

Αρχικά ζυγίζεται η απαιτούμενη ποσότητα άμμου για τη διαμόρφωση του δοκιμίου. Η απαραίτητη ποσότητα, έπειτα από πολλές δοκιμές, είναι γνωστή για το υλικό που εξετάζεται και έχει βάρος  $B = 126,94 \text{ g}$ .

Ως πρώτο βήμα για τη διαμόρφωση του δοκιμίου τοποθετείται ο ένας πορόλιθος στη βάση της συσκευής (Σχ. 4.5α) και κατόπιν εφαρμόζεται η ελαστική μεμβράνη, γύρω από τη βάση έτσι ώστε να προεξέχει προς τα επάνω.



Σχ. 4.5: (α) ο πορόλιθος τοποθετημένος στη βάση της συσκευής, (β) η ελαστική μεμβράνη συγκρατείται από δύο ελαστικούς δακτυλίους και γίνεται έλεγχος με το χέρι.

Η μεμβράνη σφίγγεται με δύο ελαστικούς δακτυλίους (O-rings). Ένας θα ήταν αρκετός αλλά τοποθετείται και δεύτερος ως εφεδρικός. Ακολουθεί έλεγχος εάν η μεμβράνη συγκρατείται σφιχτά από τους ελαστικούς δακτυλίους (Σχ. 4.5β).

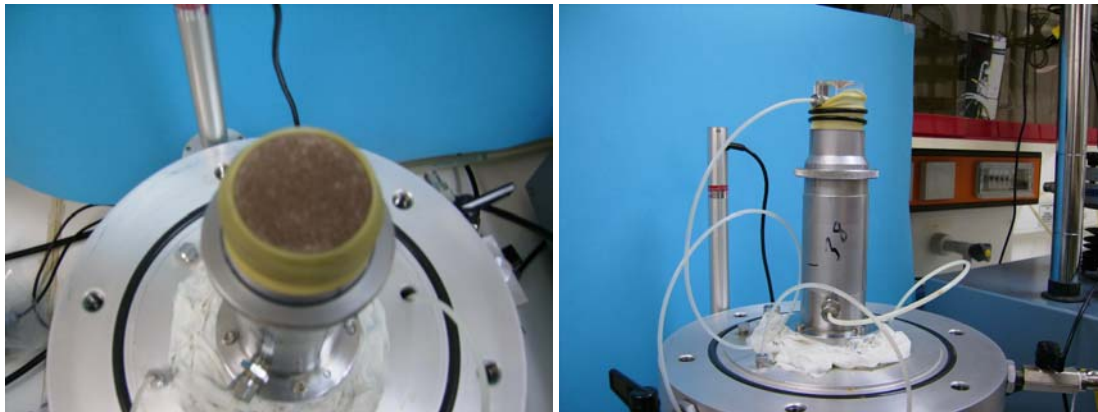
Στη συνέχεια ο μορφοποιητής συναρμολογείται ώστε να περικλείει την ελαστική μεμβράνη και στη συνέχεια δύο ακόμη ελαστικοί δακτύλιοι τοποθετούνται στην κορυφή αυτού (Σχ. 4.6α). Η ελαστική μεμβράνη διπλώνεται γύρω από το άνω μέρος του μορφοποιητή ώστε να εφάπτεται στο εσωτερικό του. Πρέπει να τεντωθεί καλά ώστε να έχει τέλειο κυλινδρικό σχήμα, δίχως πτυχές στο εσωτερικό της επιφανείας του καλούπιού. Ένα ταψί με κυκλικό άνοιγμα στο κέντρο του (Σχ. 4.6β) τοποθετείται στην άκρη του καλούπιού, ώστε η άμμος που θα τοποθετηθεί στο καλούπι να μη πέφτει στην εσοχή γύρω από τη βάση της έδρασης του δοκιμίου.



Σχ. 4.6: (α) δύο ελαστικοί δακτύλιοι τοποθετούνται με τη χρήση του εξολκέα στην κορυφή του μορφοποιητή, (β) το ειδικό ταψί έχει περαστεί στο μορφοποιητή και με χοάνη αφήνεται να ρεύσει η άμμος στο καλούπι.

Στο επόμενο βήμα γίνεται η απόθεση της άμμου στο καλούπι που δημιουργήθηκε. Στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε χοάνη η οποία πληρώθηκε εφάπαξ με άμμο η ποσότητα της οποίας είχε ζυγιστεί ώστε μετά το γέμισμα του καλούπιού να μη δημιουργηθεί σωρός άμμου στην ανώτερη επιφάνεια αυτού. Στη συνέχεια η άμμος αφέθηκε να ρεύσει εντός του καλούπιού διατηρώντας το ύψος ροής σταθερό. Με αυτό τον τρόπο γεμίσματος

επιτυγχάνεται δημιουργία χαλαρού δείγματος άμμου. Το καλούπι δεν πληρώθηκε έως το χείλος αλλά αφέθηκε ύψος απλήρωτο ίσο με το πάχος πορολίθου, ώστε αυτός να τοποθετηθεί και να μην προεξέχει από το καλούπι.



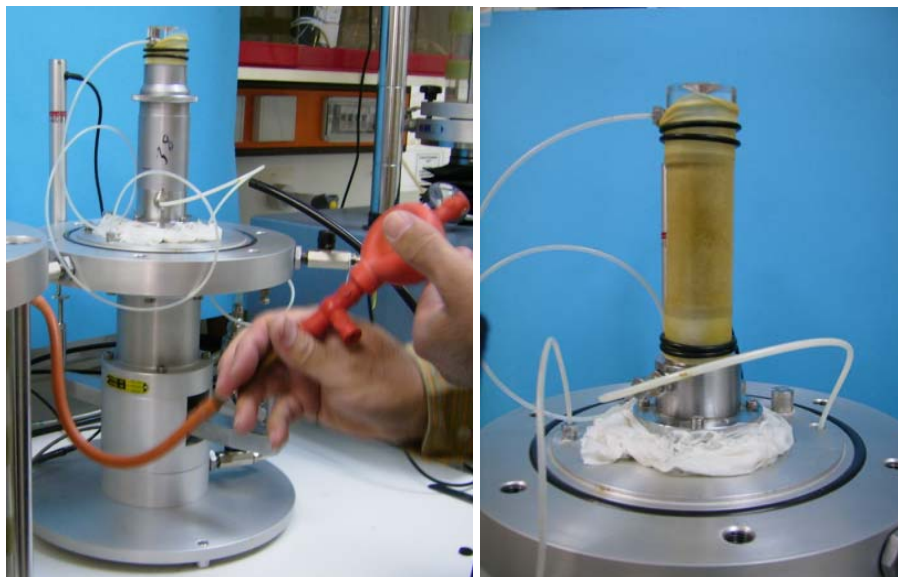
(α)

(β)

Σχ. 4.7: (α) ο δεύτερος πορόλιθος στην κορυφή του δοκιμίου, (β) το καπάκι πάνω από τον άνω πορόλιθο και η μεμβράνη σφισμένη με τους ελαστικούς δακτυλίους γύρω από αυτό.

Στη συνέχεια τοποθετείται ο δεύτερος πορόλιθος (Σχ 4.7α) και πάνω σε αυτόν το καπάκι. Η ελαστική μεμβράνη, που έως τώρα ήταν διπλωμένη γύρω από τον μορφοποιητή, ξεδιπλώνεται ώστε να εφάπτεται στο πάνω καπάκι και εφαρμόζονται δύο ελαστικοί δακτύλιοι γύρω από αυτήν (Σχ 4.7β).

Το δοκίμιο έχει πάρει το σχήμα του και ο μορφοποιητής πρέπει να απομακρυνθεί. Προτού όμως τον απομακρύνουμε συνδέουμε στον αγωγό αποστράγγισης στον πυθμένα του δοκιμίου ένα πουάρ (Σχ. 4.8α) και ασκείται αρνητική πίεσης (κενό) στο δοκίμιο ώστε να μην καταρρεύσει όταν απομακρυνθεί ο μορφοποιητής. Η ασκούμενη αρνητική πίεση δεν πρέπει να είναι μεγάλη γιατί θα συμπιέσει το δείγμα με συνέπεια την αύξηση της πυκνότητάς του. Από εμπειρία προκύπτει ότι με εφαρμογή της μισής αρνητικής πίεσης που μπορεί να ασκήσει το πουάρ (ενδεικτική τιμή είναι τα 10 kPa (Georgopoulos & Vardoulakis, 2005) για ένα μεγάλο εύρος δοκιμών για χαλαρή και συμπαγής άμμο) το δείγμα δεν καταρρέει και παράλληλα δεν συμπιέζεται.

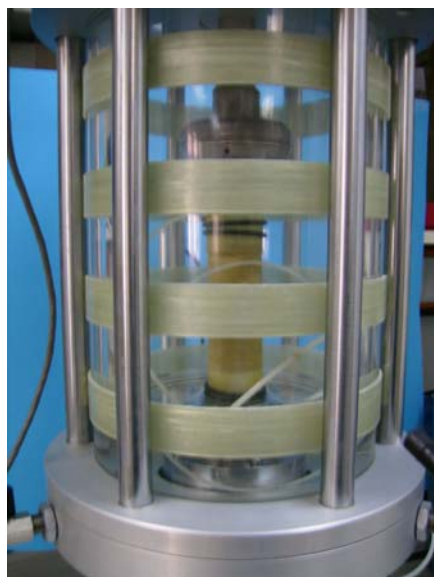


(α)

(β)

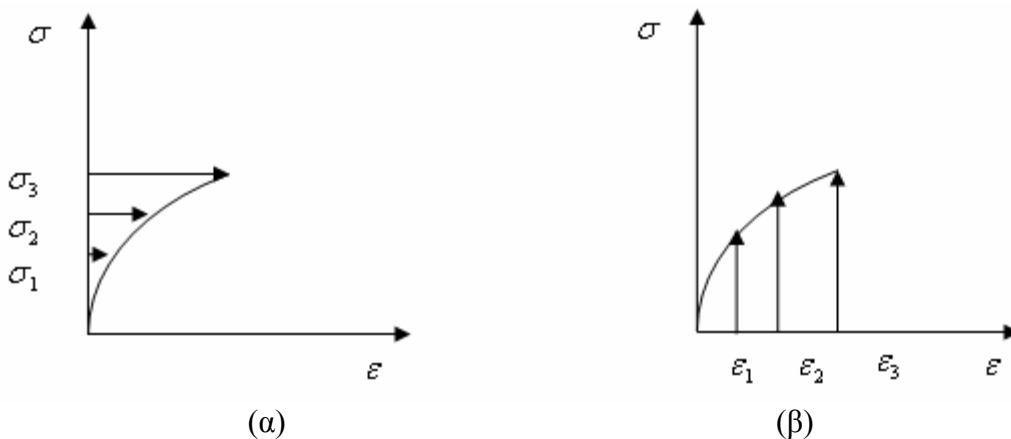
Σχ. 4.8: (α) άσκηση αρνητικής πίεσης με πουάρ, (β) το τελικό δοκίμιο μετά την απομάκρυνση του μορφοποιητή.

Το δοκίμιο τώρα παραμένει στη βάση (Σχ. 4.8β), έχοντας την δυνατότητα να στηρίξει το βάρος του. Αφού μετρηθούν το ύψος και η διάμετρος του δοκιμίου, με χρήση παχυμέτρου, τοποθετείται η κυψέλη, βιδώνονται οι σφικτήρες και γεμίζεται η κυψέλη με νερό (Σχ. 4.9).



Σχ. 4.9. Η κυψέλη τριαξονικής δοκιμής εμπεριέχει το δοκίμιο και γεμίζεται με νερό.

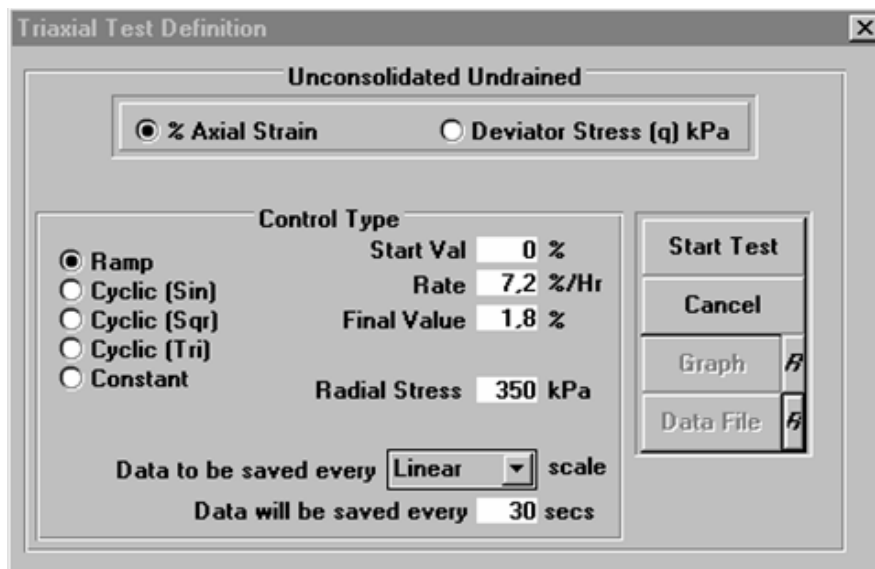
Στην τριαξονική δοκιμή υπάρχει η δυνατότητα να γίνουν δοκιμές ελεγχόμενης παραμόρφωσης ή ελεγχόμενης τάσης (Σχ. 4.10), αυτόματα μέσω H/Y. Τα πειράματα που ακολουθούν έχουν γίνει με δοκιμή ελεγχόμενης παραμόρφωσης και εφόσον κάθε δοκίμιο άμμου βρίσκεται σε ξηρή μορφή, επιλέχτηκε η δοκιμή να πραγματοποιηθεί χωρίς στερεοποίηση – χωρίς στράγγιση (UU).



Σχ. 4.10: (α) δοκιμή ελεγχόμενης τάσης, (β) δοκιμή ελεγχόμενης τροπής.

Επειδή, όπως έχει ήδη αναφερθεί, σκοπός είναι η διερεύνηση του μέτρου ελαστικότητας της συγκεκριμένης άμμου, απαραίτητη είναι η δημιουργία κύκλων (loops) φόρτισης – αποφόρτισης σε κάθε δοκιμή. Ο ορισμός των παραμέτρων για την επαναλαμβανόμενη φόρτιση – αποφόρτιση γινόταν με τη λήξη του προηγούμενου σταδίου.

Πριν από κάθε φόρτιση και αποφόρτιση, λογισμικό ελέγχου της δοκιμής εμφανίζει το παράθυρο που φαίνεται στο Σχ. 4.11 για την εισαγωγή των δεδομένων. Σε όλα τα πειράματα ο ρυθμός φόρτισης και αποφόρτισης είναι ο ίδιος αφού εξαρτάται από το προς μελέτη υλικό και συγκεκριμένα για άμμους απαιτείται χαμηλός ρυθμός φόρτισης  $0.1mm/min$  (Georgopoulos & Vardoulakis, 2005). Θέτοντας λοιπόν προσεγγιστικά το ύψος του δοκιμίου  $H_o \approx 80mm$ , υπολογίζεται ρυθμός φόρτισης  $7,2\%/Hr$ .



Σχ. 4.11. Παράθυρο λογισμικού τριαξονικής δοκιμής για την εισαγωγή δεδομένων.

Στο παράθυρο του Σχ. 4.12 ως ‘Start Val’ και ‘Final Val’ ζητάτε η επί της εκατό αξονική παραμόρφωση στην αρχή και στο τέλος της δοκιμής αντίστοιχα.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής υπάρχει η δυνατότητα να παρακολουθηθούν οι μεταβολές των τιμών από παράθυρο που εμφανίζεται (Σχ. 4.12). Στις τιμές αυτές συμπεριλαμβάνεται και η επί της εκατό αξονική παραμόρφωση η οποία στο τέλος κάθε φόρτισης ή αποφόρτισης πρέπει να καταγράφεται ώστε να χρησιμεύσει ως δεδομένο στο επόμενο στάδιο της δοκιμής.



Live Test Data					
	Press	Vol	Axial Stress	1345,26	
L C	696,0	25302,0	Eff Axial Stress	1341,26	
Cell	332,0	88492,5	Ax Defn	4,804	
Back	-3,0	0,0	% Axial Strain	6,005	
Axial Force	1,037		Av Diam Change	1,1	
Pore Water	4,0		Av Stress[S]	838,63	
Av Rad Strain	3,14		Max Shr Strs	506,6	
Deviator Stress	1013,26		Shear Strain	6,1	
Stress Ratio	4,05		Av Eff	834,6	
Spec Area	1023,58		Camb p	669,8	
	01:20:35		Camb p'	665,8	

Σχ. 4.12. Παράθυρο που παρουσιάζεται κατά τη διάρκεια της δοκιμής για την παράλληλη παρακολούθηση των μεταβαλλόμενων τιμών.

Σε κάθε δοκιμή καταγράφονται, ανά 10 sec, αποτελέσματα της αξονικής μετατόπισης  $u_a$  και της αξονικής δύναμης  $F_a$ . Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμεύουν της ακόλουθους υπολογισμούς.

Για τον υπολογισμό της μέσης διατομής του δοκιμίου  $A$  πρέπει να καταγράφονται μετρήσεις της μεταβολής του όγκου κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Στην περίπτωση της η απόκτηση των μετρήσεων αυτών δεν ήταν εφικτή δεδομένου ότι τα δοκίμια της δεν εμπεριείχαν υγρασία, ώστε να υπολογίζεται η μεταβολή του όγκου του δοκιμίου σύμφωνα με την αποβαλλόμενη ποσότητα του υγρού κατά τη φόρτιση.

Για τον υπολογισμό της μέσης διατομής του δοκιμίου  $A$ , έχοντας πάντα γνωστό το ύψος του δοκιμίου  $H_i$ , χρησιμοποιήθηκε ο τύπος 4.10 με την εξής μορφή:

$$A = \frac{\left( \pi \cdot (D_o / 2)^2 \cdot H_o + V_i \right)}{H_o - H_i} = \frac{A_o}{1 - \varepsilon_a} \quad (4.10)$$



όπου θεωρείται η μεταβολή του όγκου  $V_i = 0$ ,

$H_o$  = αρχικό ύψος δοκιμίου,

$H_i$  = μετρούμενο από το ψηφιακό μηκινσιόμετρο ύψος του δοκιμίου,

$D_o$  = διάμετρος του δοκιμίου,

$A_o$  = αρχική επιφάνια δοκιμίου,

$\varepsilon_\alpha$  = αξονική τροπή.

Για τον υπολογισμό της αξονικής τάσης  $\sigma_\alpha$  εφαρμόστηκε ο τύπος

$$\sigma_1 = \frac{F_i}{A} + \sigma_3 \quad (4.11)$$

Η αποκλίνουσα τάση  $q$  υπολογίστηκε από τον τύπο

$$q = \frac{F_i}{A} \quad (4.12)$$

Ενώ για την εύρεση της αξονικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_a$  χρησιμοποιήθηκε ο τύπος

$$\varepsilon_a = \frac{u_a}{H_o} \cdot 100 \quad (4.13)$$

#### 4.6 Αποτελέσματα τριαξονικής δοκιμής

Η εντατική κατάσταση εντός των δοκιμίων κατά την αστοχία τους για διάφορους συνδυασμούς κυρίων τάσεων ( $\sigma_1, \sigma_3$ ), αποδίδονται με τους κύκλους του Mohr. Για τη σχεδίαση της περιβάλλουσας αστοχίας είναι απαραίτητα τα αποτελέσματα τουλάχιστον τριών δοκιμών με διαφορετικές πλευρικές πιέσεις για επίλυση με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.

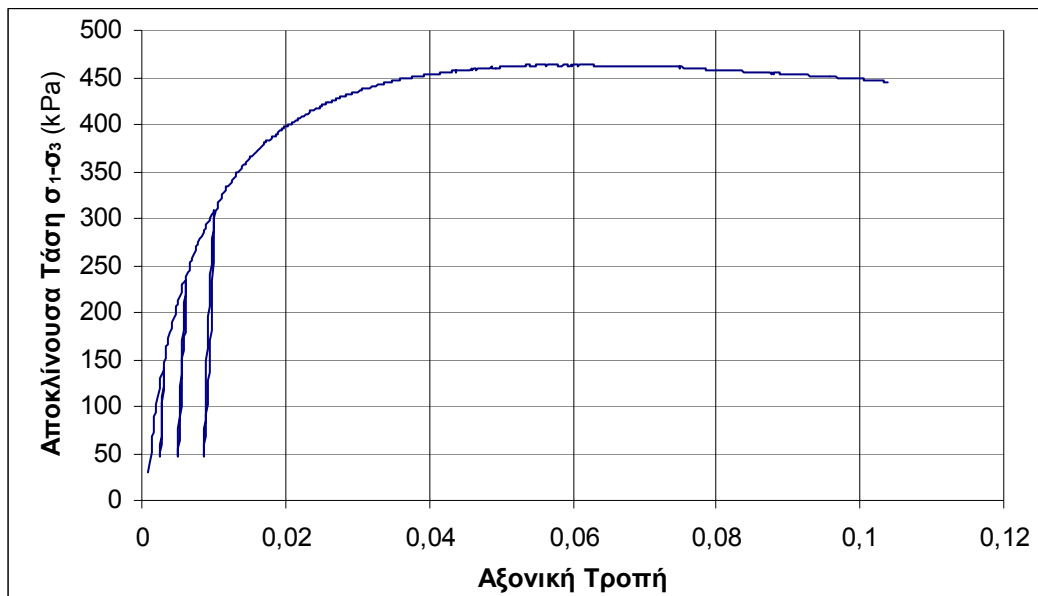
##### 4.6.1 Τριαξονική δοκιμή ασκούμενης πλευρικής πίεσης 150 kPa

Στην πρώτη δοκιμή το ύψος του δοκιμίου μετρήθηκε  $H_o = 76,53mm$  και η διάμετρος  $D = 36,89mm$ . Η ασκούμενη πλευρική πίεση τέθηκε ίση με  $\sigma_3 = 150kPa$  και έγιναν τρεις κύκλοι φόρτισης – αποφόρτισης (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1: Κύκλοι φόρτισης – αποφόρτισης, δοκιμής ελεγχόμενης τροπής ( $\varepsilon_a$ ) με  $\sigma_3 = 150kPa$

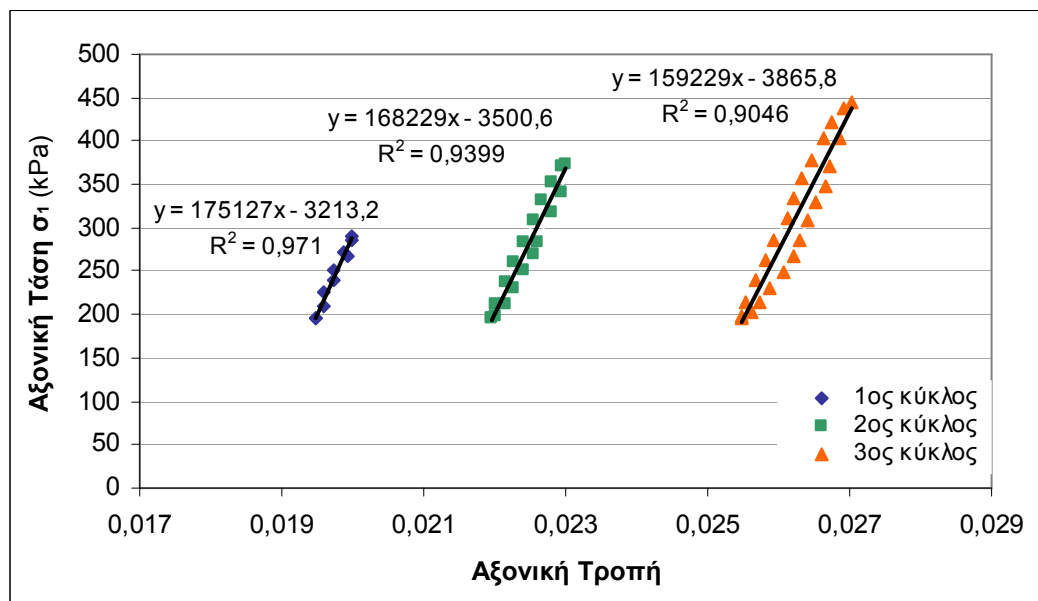
	Αξονική τροπή (%)	Αποκλίνουσα τάση (kPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
1 <sup>η</sup> Φόρτιση	0 - 1,98	0 - 150,25	175,13
1 <sup>η</sup> Αποφόρτιση	2 - 1,94	150,25 - 49,74	
2 <sup>η</sup> Φόρτιση	1,94 - 2,28	49,74 - 245,32	168,23
2 <sup>η</sup> Αποφόρτιση	2,28 - 2,19	245,32 - 49,32	
3 <sup>η</sup> Φόρτιση	2,19 - 2,68	49,32 - 320,27	159,23
3 <sup>η</sup> Αποφόρτιση	2,68 - 2,53	320,27 - 49,21	
4 <sup>η</sup> Φόρτιση	2,53 - 12	49,21 - 463	

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψαν τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στα Σχ. 4.13, 4.14 και 4.15.



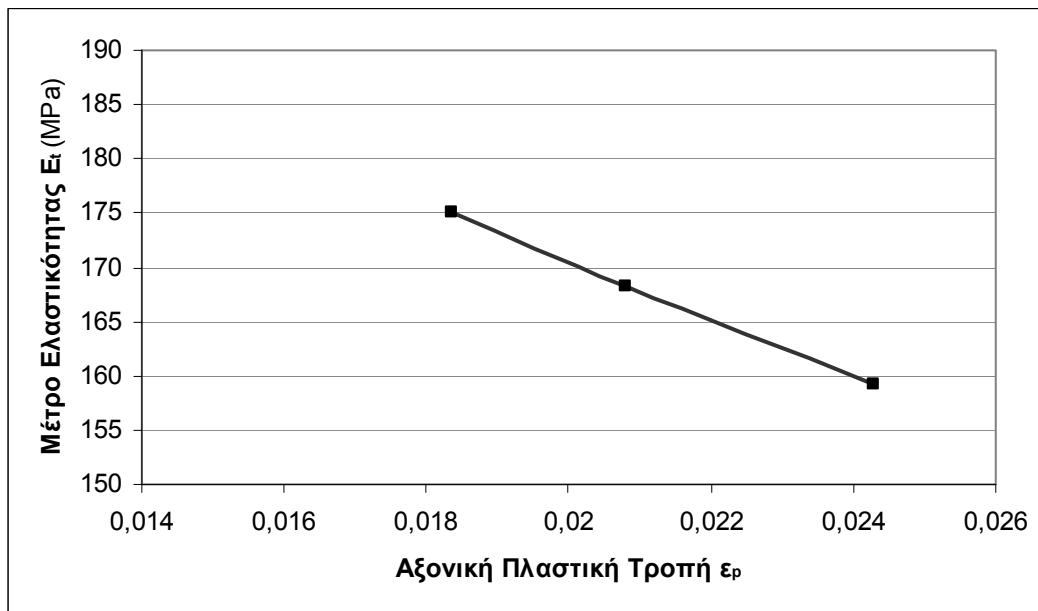
Σχ. 4.13. Διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης  $q$  (kPa) συναρτήσει της αξονικής τροπής ( $\varepsilon_a$ ) για  $\sigma_3 = 150 \text{ kPa}$ .

Με βάση το Σχ. 4.13 το δοκίμιο αστόχησε για αξονική τάση  $\sigma_1 \approx 463,45 \text{ kPa}$  και σε αξονική τροπή  $\varepsilon_a \approx 5,7\%$ .



Σχ. 4.14. Διάγραμμα κύκλων φόρτισης – αποφόρτισης για  $\sigma_3 = 150 \text{ kPa}$ .

Στο διάγραμμα του Σχ. 4.14 χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της αποφόρτισης - επαναφόρτισης κάθε κύκλου και με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων εκτιμήθηκε το μέσο μέτρο ελαστικής παραμόρφωση το οποίο ισούται με την κλίση της ευθείας (των ελαχίστων τετραγώνων) για κάθε κύκλο. Για το πείραμα αυτό, από το Σχ. 4.14 παρατηρείται ότι το μέσο μέτρο ελαστικότητας μειώνεται με την αύξηση της αξονικής τροπής.



Σχ. 4.15. Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας  $E(MPa)$  συναρτήσει της αξονικής πλαστικής τροπής  $\epsilon_p$  για  $\sigma_3 = 150kPa$ .

Για τη δημιουργία του διαγράμματος του Σχ. 4.15, υπολογίστηκε η αξονική πλαστική τροπή κάθε κύκλου από το Σχ. 4.14 λύνοντας τις εξισώσεις των ελαχίστων τετραγώνων ως προς  $x$ , θέτοντας το  $y = 0$ .

Από το Σχ. 4.15 παρατηρείται ότι το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται με την αύξηση της αξονικής πλαστικής τροπής.

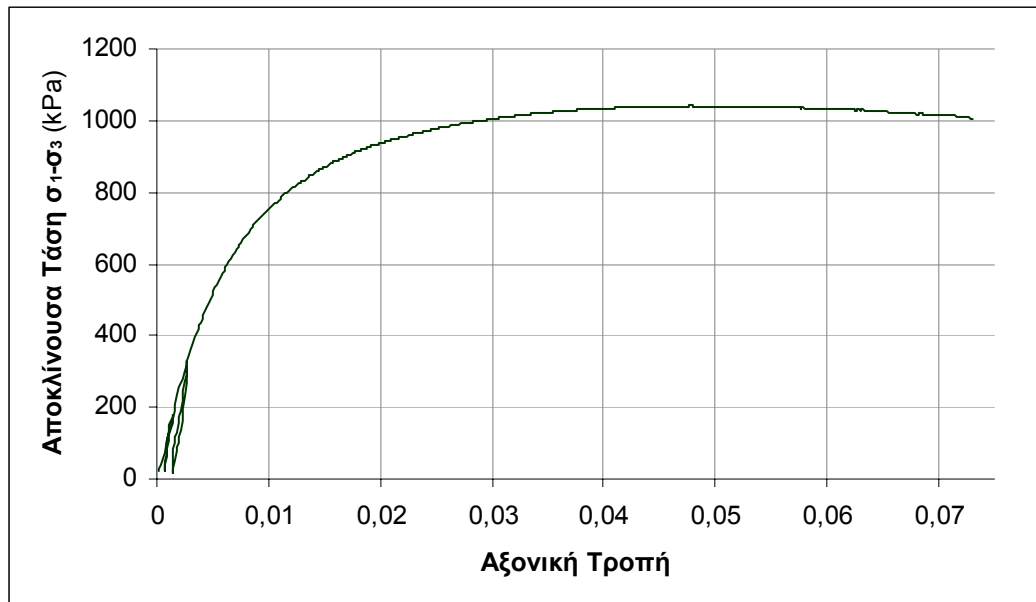
#### 4.6.2 Τριαξονική δοκιμή ασκούμενης πλευρικής πίεσης 350 kPa

Στην δοκιμή αυτή το ύψος του δοκιμίου μετρήθηκε  $H_o = 77,82mm$  και η διάμετρος  $D = 37,34mm$ . Η ασκούμενη πλευρική πίεση τέθηκε ίση με  $\sigma_3 = 350kPa$  και έγιναν δύο κύκλοι φόρτισης – αποφόρτισης (Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.2: Κύκλοι φόρτισης – αποφόρτισης, δοκιμής ελεγχόμενης τροπής ( $\varepsilon_a$ ) με  $\sigma_3 = 350kPa$ .

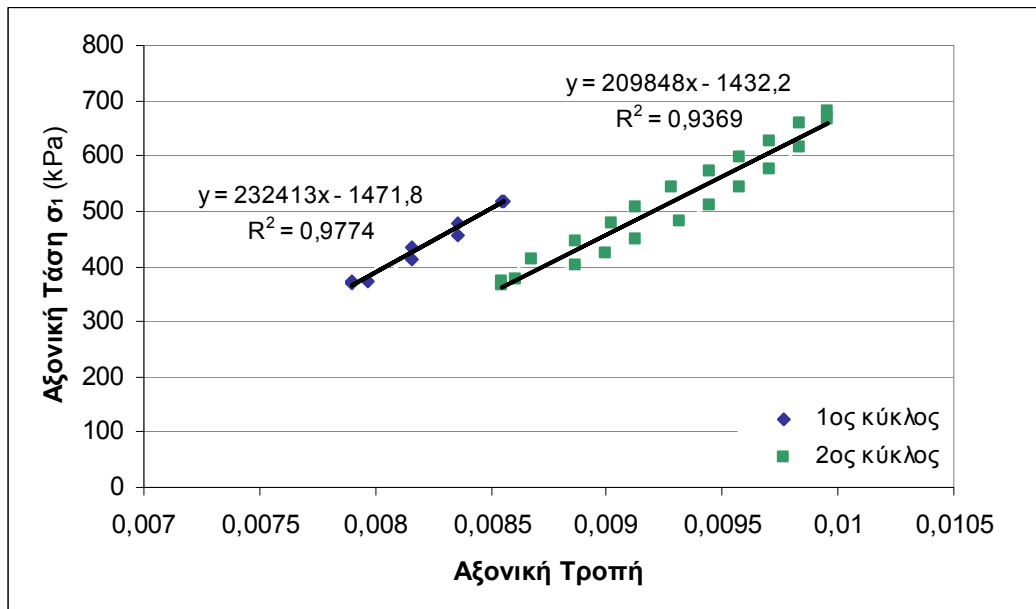
	Αξονική τροπή (%)	Αποκλίνουσα τάση (kPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
1 <sup>η</sup> Φόρτιση	0 - 0,82	0 - 172,19	232,413
1 <sup>η</sup> Αποφόρτιση	0,82 - 0,78	172,19 - 20,12	
2 <sup>η</sup> Φόρτιση	0,78 - 0,99	20,12 - 316,19	209,648
2 <sup>η</sup> Αποφόρτιση	0,99 - 0,85	316,19 - 18	
3 <sup>η</sup> Φόρτιση	0,85 - 8	18 - 976,21	

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψαν τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στα Σχ. 4.16, 4.17 και 4.18.

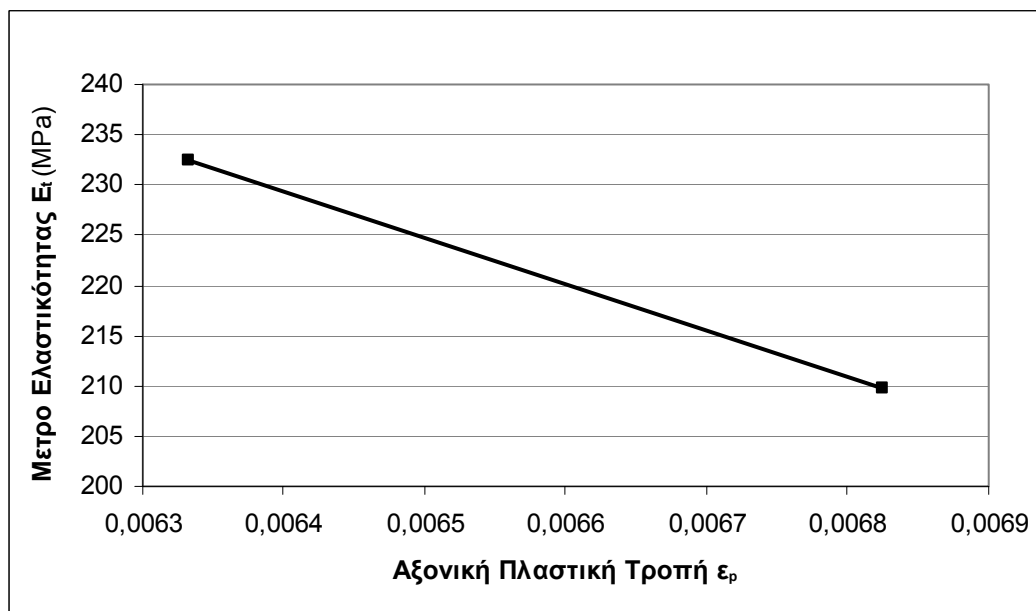


Σχ. 4.16. Διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης  $q$  (KPa) συναρτήσει της αξονικής τροπής ( $\varepsilon_a$ ) για  $\sigma_3 = 350kPa$ .

Με βάση το Σχ. 4.16 το δοκίμιο αστόχησε για αξονική τάση  $\sigma_1 \approx 1041 \text{ kPa}$  και αξονική τροπή  $\varepsilon_a \approx 4,8\%$ .



Σχ. 4.17. Διάγραμμα κύκλων φόρτισης – αποφόρτισης για  $\sigma_3 = 350 \text{ kPa}$ .



Σχ. 4.18. Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας  $E$  (MPa) συναρτήσει της αξονικής πλαστικής τροπής  $\varepsilon_p$  για

$$\sigma_3 = 350 \text{ kPa}.$$

Από το Σχ. 4.17 για πλευρική πίεση 350 kPa παρατηρείται ότι το μέσο μέτρο ελαστικότητας μειώνεται με την αύξηση της αξονικής τροπής.

Από το Σχ. 4.18 παρατηρείται ότι το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται με την αύξηση της αξονικής πλαστικής τροπής.

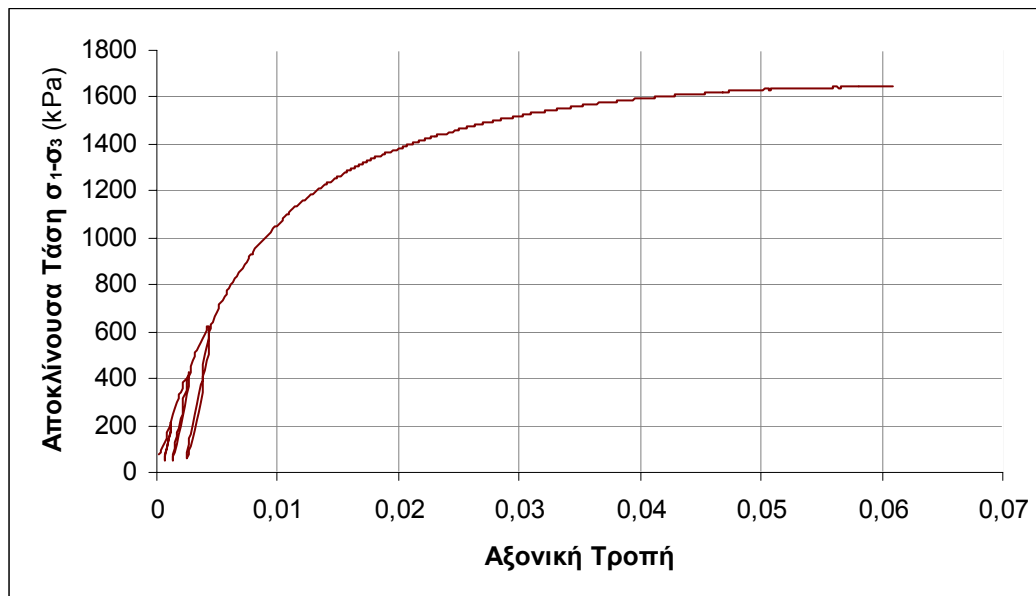
#### 4.6.3 Τριαξονική δοκιμή ασκούμενης πλευρικής πίεσης 550 kPa

Στην Τρίτη δοκιμή το ύψος του δοκιμίου μετρήθηκε  $H_o = 80mm$  και η διάμετρος  $D = 38mm$ . Η ασκούμενη πλευρική πίεση τέθηκε ίση με  $\sigma_3 = 550kPa$  και έγιναν τρεις κύκλοι φόρτισης – αποφόρτισης (Πίνακας 4.3).

Πίνακας 4.3: Κύκλοι φόρτισης – αποφόρτισης, δοκιμής ελεγχόμενης τροπής ( $\varepsilon_a$ ) με  $\sigma_3 = 550kPa$

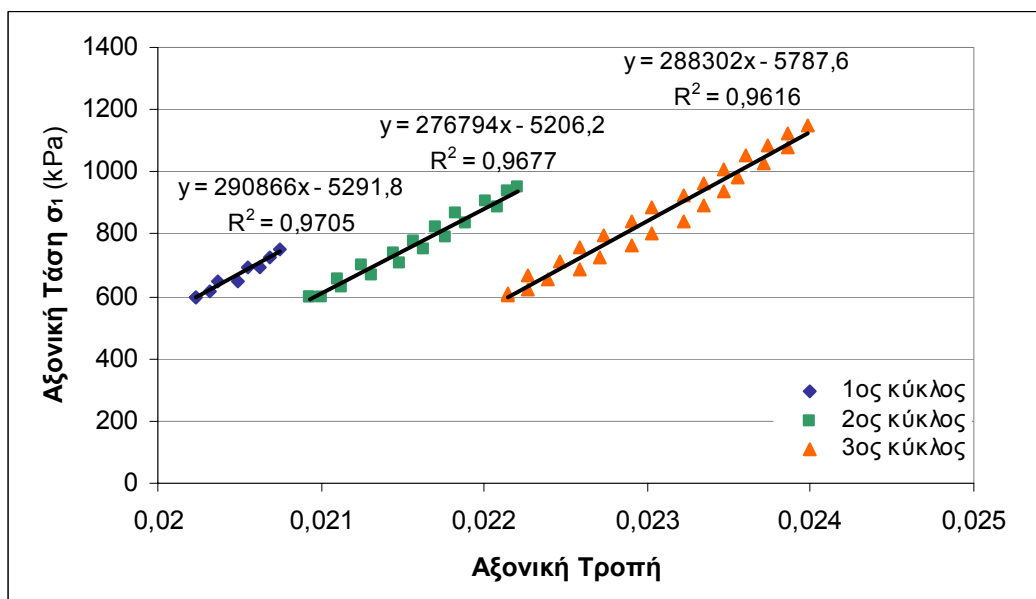
	Αξονική τροπή (%)	Αποκλίνουσα τάση (kPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
1 <sup>η</sup> Φόρτιση	0 – 2,05	0 – 201,68	290,866
1 <sup>η</sup> Αποφόρτιση	2,05 – 2	201,68 – 47,55	
2 <sup>η</sup> Φόρτιση	2 – 2,28	47,55 – 400,56	
2 <sup>η</sup> Αποφόρτιση	2,28 – 2,19	400,56 – 46,98	276,794
3 <sup>η</sup> Φόρτιση	2,19 – 2,68	46,98 – 600,06	
3 <sup>η</sup> Αποφόρτιση	2,68 – 2,53	600,06 – 50,3	288,322
4 <sup>η</sup> Φόρτιση	2,53 – 12	50,3 – 1649	

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψαν τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στα Σχ. 4.19, 4.20 και 4.21.



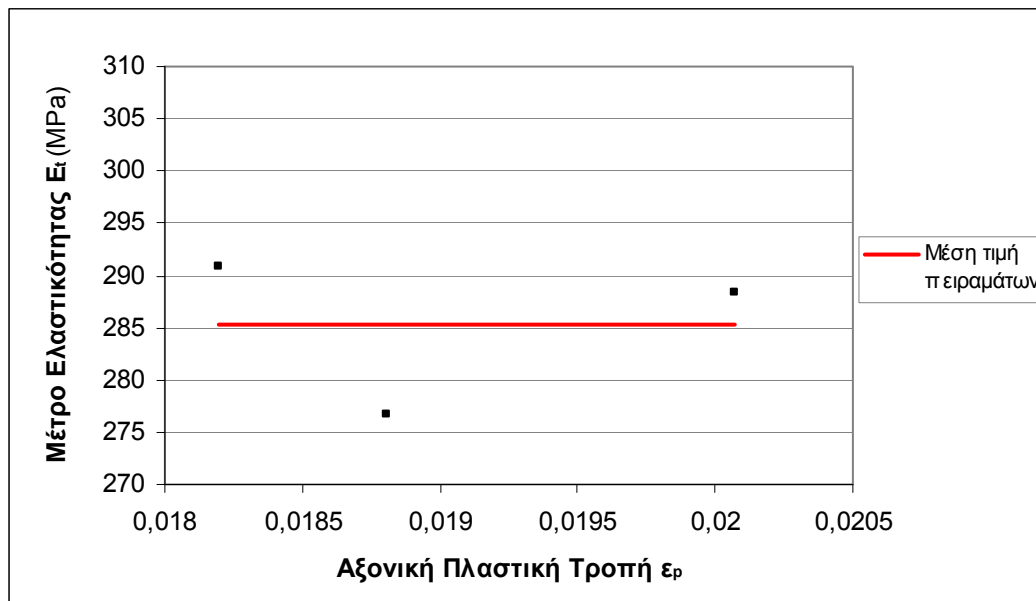
Σχ. 4.19. Διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης  $q$  (KPa) συναρτήσει της αξονικής τροπής ( $\varepsilon_a$ ) για  $\sigma_3 = 550 \text{ kPa}$ .

Με βάση Σχ. 4.19 το δοκίμιο αστόχησε για αξονική τάση  $\sigma_1 \approx 1650 \text{ kPa}$  και αξονική τροπή  $\varepsilon_a \approx 6,1\%$ .



Σχ. 4.20. Διάγραμμα κύκλων φόρτισης – αποφόρτισης για  $\sigma_3 = 550 \text{ kPa}$ .





Σχ. 4.21. Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας  $E$  (MPa) συναρτήσει της αξονικής πλαστικής τροπή  $\varepsilon_p$  για

$$\sigma_3 = 550 \text{ kPa}.$$

Από το Σχ. 4.21 παρατηρείται ότι το μέτρο ελαστικότητας έχει την τάση να μένει σταθερό με την αύξηση της αξονικής πλαστικής τροπής.

#### 4.6.4 Τριαξονική δοκιμή ασκούμενης πλευρικής πίεσης 750 kPa

Στην τέταρτη δοκιμή το ύψος του δοκιμίου μετρήθηκε  $H_o = 82 \text{ mm}$  και η διάμετρος  $D = 36,5 \text{ mm}$ . Η ασκούμενη πλευρική πίεση τέθηκε ίση με  $\sigma_3 = 750 \text{ kPa}$  και έγιναν τρεις κύκλοι φόρτισης – αποφόρτισης (Πίνακας 4.4).

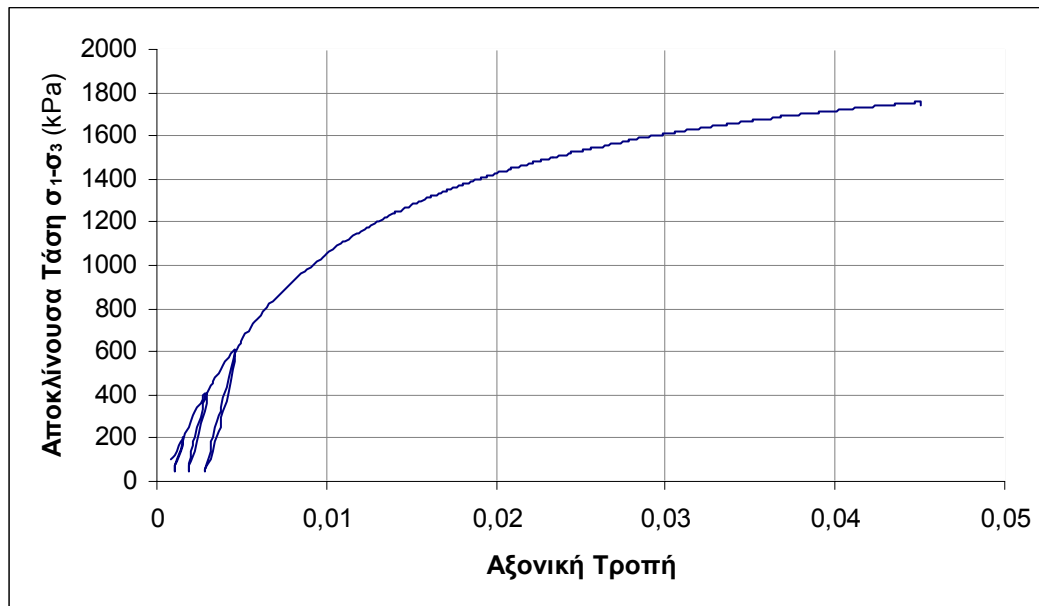
Πρέπει να διευκρινιστεί ότι η δοκιμή αυτή εξελίχτηκε ομαλά όμως διακόπηκε εσκεμμένα προτού αναπτυχθεί η απαιτούμενη αξονική τάση για την αστοχία του δοκιμίου. Επιλέχθηκε η διακοπή της δοκιμής επειδή το έμβολο που ασκεί την αξονική τάση έχει από τις προδιαγραφές ως όριο μέγιστης ασκούμενης πίεσης τα  $1900 \text{ kPa}$  και κατά τη

δοκιμή το όριο αυτό προσεγγίστηκε αρκετά ( $1742kPa$ ) με κίνδυνο την καταστροφή του κελιού μέτρησης του φορτίου. Τα δεδομένα όμως που αποκτήθηκαν από τη δοκιμή αυτή χρησίμευσαν για τη δημιουργία του διαγράμματος του Σχ. 14.22 και συνεπώς τον υπολογισμό της παραμορφωσιμότητας για πλευρική πίεση  $\sigma_3 = 750kPa$ .

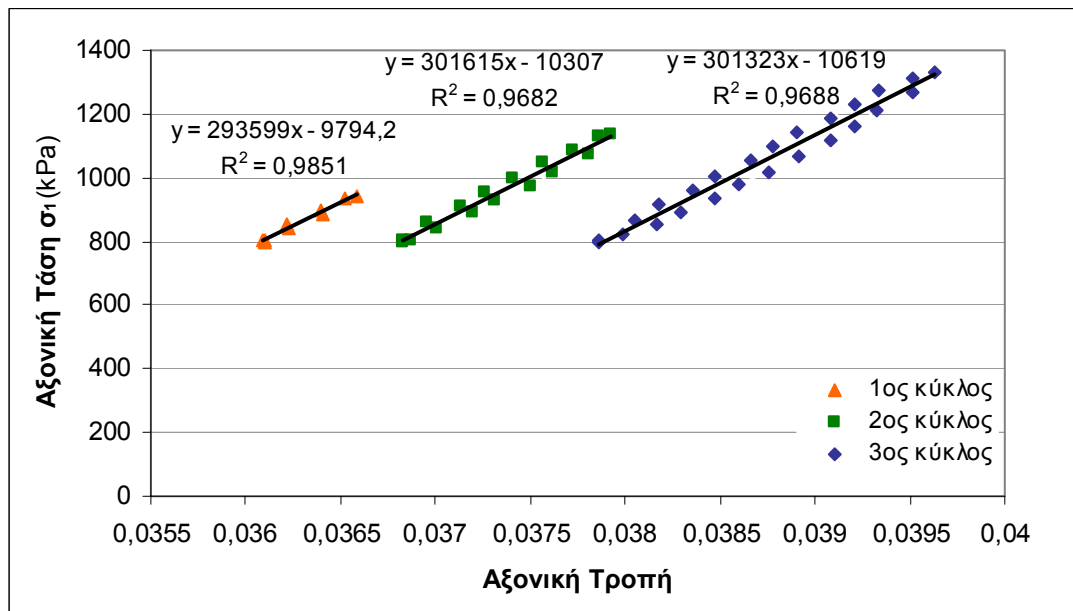
Πίνακας 4.4: Κύκλοι φόρτισης – αποφόρτισης, δοκιμής ελεγχόμενης τροπής ( $\varepsilon_a$ ) με  $\sigma_3 = 750kPa$

	Αξονική τροπή (%)	Αποκλίνουσα τάση (kPa)	Μέτρο ελαστικότητας (MPa)
1 <sup>η</sup> Φόρτιση	0 – 3,65	0 – 202	293,639
1 <sup>η</sup> Αποφόρτιση	3,65 – 3,61	202 – 53	
2 <sup>η</sup> Φόρτιση	3,61 – 3,79	53 – 403	301,615
2 <sup>η</sup> Αποφόρτιση	3,79 – 3,68	403 – 49	
3 <sup>η</sup> Φόρτιση	3,68 – 3,96	49 – 601	301,323
3 <sup>η</sup> Αποφόρτιση	3,96 – 3,79	601 – 54,81	
4 <sup>η</sup> Φόρτιση	3,79 – 8	54,81 – 1742	

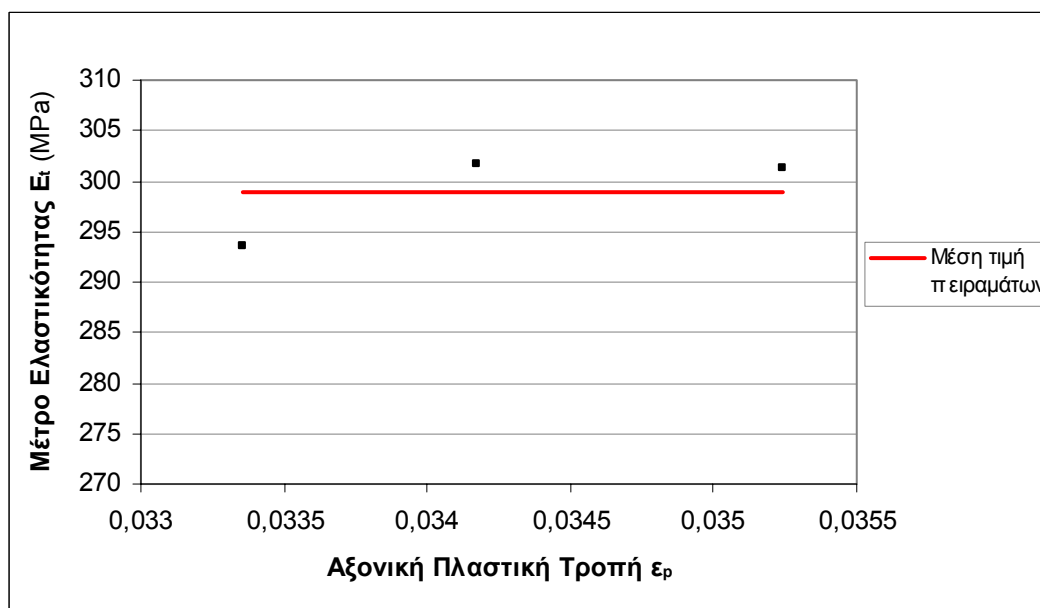
Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων προέκυψαν τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στα Σχ. 4.22 και 4.23.



Σχ. 4.22. Διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης  $q$  (kPa) συναρτήσει της αξονικής τροπής ( $\varepsilon_a$ ) για  $\sigma_3 = 750kPa$ .



Σχ. 4.23. Διάγραμμα κύκλων φόρτισης – αποφόρτισης για  $\sigma_3 = 750kPa$ .

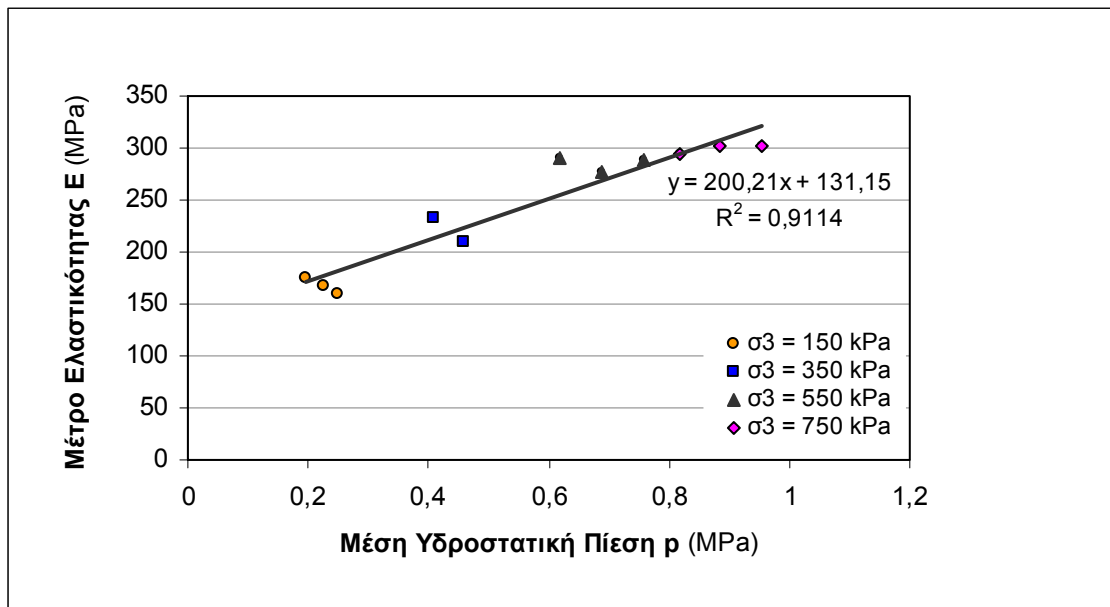


Σχ. 4.24. Διάγραμμα μέτρου ελαστικότητας  $E(MPa)$  συναρτήσει της αξονικής πλαστικής τροπής  $\varepsilon_p$  για  $\sigma_3 = 750kPa$ .

Από το Σχ. 4.24 παρατηρείται ότι το μέτρο ελαστικότητας έχει την τάση να μένει σταθερό με την αύξηση της αξονικής πλαστικής τροπής.

Συμπερασματικά και από τις τέσσερις δοκιμές τριαξονικής θλίψης στις οποίες υποβλήθηκε δεδομένο αμμώδες εδαφικό δείγμα, όσο η πλευρική τάση  $\sigma_3$  αυξάνει τόσο αυξάνει και η αντοχή του δοκιμίου.

Στο Σχήμα 4.25 παριστάνεται γραφικά η εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας  $E$  από την υδροστατική πίεση  $p$  (που αντιστοιχεί στην αξονική τάση στην οποία γίνεται αποφόρτιση), όπως αυτή προέκυψε από τα τέσσερα πειράματα των τριαξονικών δοκιμών. Από αυτό το σχήμα μπορεί να παρατηρηθεί ότι το μέτρο ελαστικότητας της υπόψιν άμμου αυξάνει με την αύξηση της μέσης υδροστατικής πίεσης.



Σχ. 4.25. Εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας  $E$  της άμμου (MPa) από την μέση υδροστατική πίεση  $p$  (MPa).

#### 4.6.5 Κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb

Το κριτήριο αστοχίας Mohr – Coulomb διατυπώνεται με την εξής σχέση:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2 \cdot c \cdot \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin \phi$$

Για άμμους  $c = 0$  MPa

Επομένως ,

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin \phi$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} = \sin \phi$$

$$\text{Έστω } B = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$$

Άρα

$$\phi = a \sin B$$

Με βάση τις παραπάνω εξισώσεις για την 1<sup>η</sup> δοκιμή προέκυψε η παρακάτω τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής της άμμου.

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_3 = 150kPa \\ \sigma_1 = 614,45kPa \end{array} \right\} B = 0,605 \Rightarrow \phi_1 = 37,2^\circ$$

για τη 2<sup>η</sup> δοκιμή

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_3 = 350kPa \\ \sigma_1 = 1392kPa \end{array} \right\} B = 0,597 \Rightarrow \phi_2 = 36,7^\circ$$

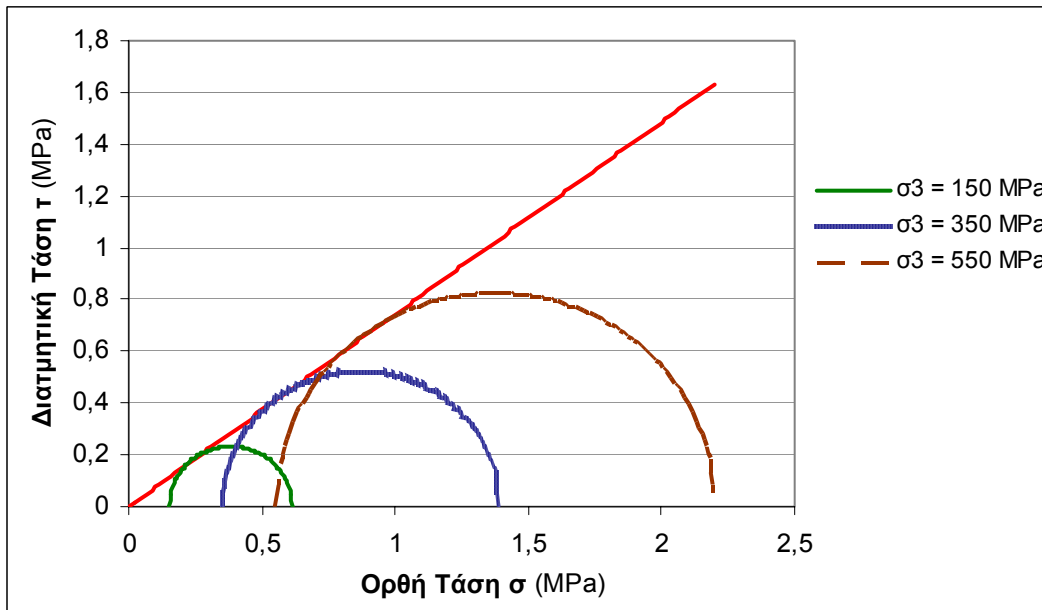
και για την 3<sup>η</sup> δοκιμή

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_3 = 550 \text{ kPa} \\ \sigma_1 = 2201 \text{ kPa} \end{array} \right\} B = 0,6 \Rightarrow \phi_3 = 35,9^\circ$$

Επομένως υπολογίζεται η γωνία τριβής  $\phi$  της υπόψιν άμμου ως ο μέσος όρος:

$$\phi = \frac{\sum \phi_i}{3} \Rightarrow \phi = 36,6^\circ$$

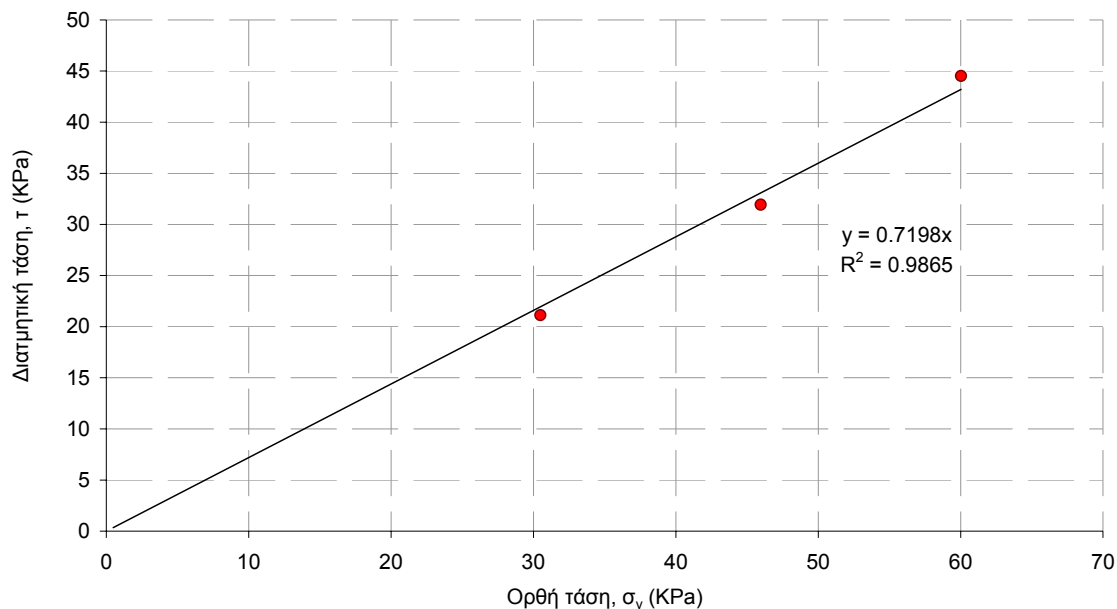
Παριστάνοντας γραφικά το κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb και τους κύκλους του Mohr προκύπτει το Σχ. 4.26.



Σχ. 4.26. Κριτήριο αστοχίας Mohr - Coulomb και κύκλοι Mohr.

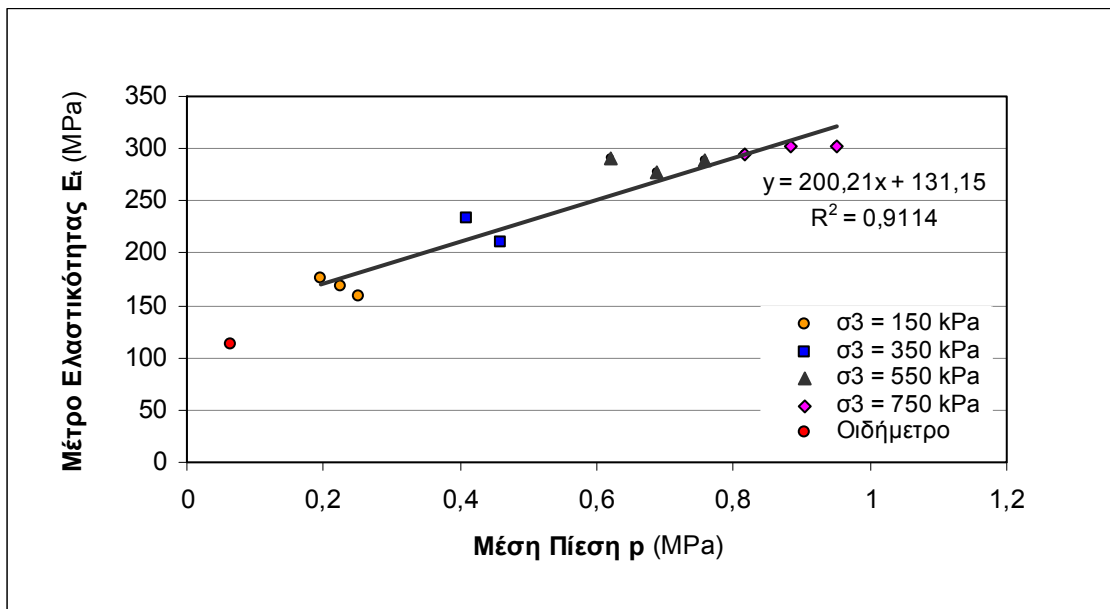
#### 4.7 Αξιολόγηση

Η τιμή της γωνίας τριβής της άμμου που υπολογίστηκε παραπάνω, μπορεί να συγκριθεί με την αντίστοιχη τιμή  $\phi = 35,8^\circ$  που βρέθηκε από πειράματα άμεσης διάτμησης (Σαμαρτζή, 2007) για το ίδιο εδαφικό υλικό.



Σχ.4.27. Πειραματικά αποτελέσματα διατμητικής τάσης – ορθής τάσης που προέκυψαν από πειράματα άμεσης διάτμησης και καλύτερη γραμμική παρεμβολή (Σαμαρτζή, 2007).

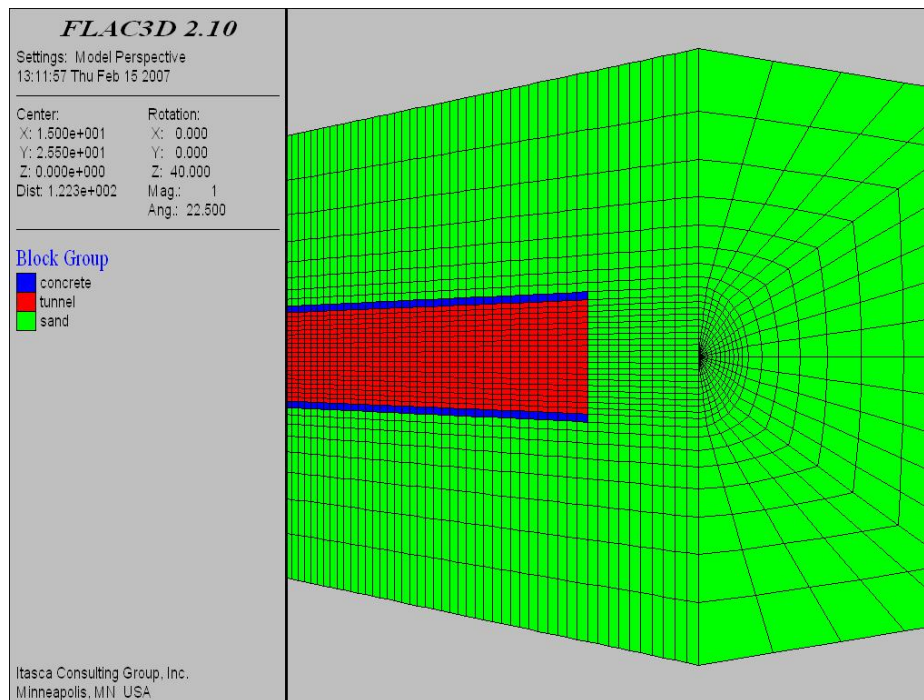
Επίσης το μέτρο ελαστικότητας που προέκυψε από την δοκιμή του συμπίεσομέτρου ( $E_t \approx 100 \text{ MPa}$ ) με την παραδοχή σταθερής τιμής του λόγου Poisson της άμμου είναι της τάξης μεγέθους του  $E$  που υπολογίστηκε κατευθείαν από τις τριαξονικές δοκιμές. Η σχέση τους είναι σχεδόν γραμμική.



Σχ. 4.28. Εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας  $E$  της άμμου (MPa) από την μέση υδροστατική πίεση  $p$  (MPa) για πειράματα τριαξονικής θλίψης και οιδήμετρου.

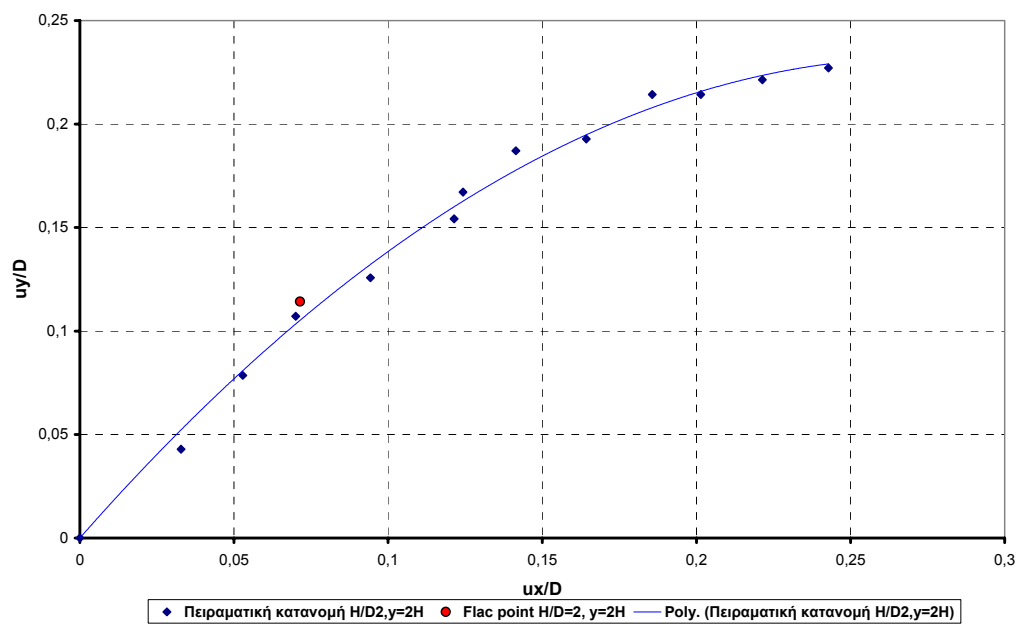
Το μέτρο ελαστικότητας της άμμου που εκτιμήθηκε στην παρούσα εργασία έρχεται σε πλήρη επίσης συμφωνία με το μέτρο ελαστικότητας  $E = 120$  MPa που βρέθηκε από ανάδρομη ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων αναλογικού μοντέλου μελέτης των καθιζήσεων που προκαλούνται κατά την σταδιακή αστοχία μετώπου αβαθών σιράγγων με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων διαφορών FLAC3D (βλ. Σχ.4.29) (Βαρδουλάκης, 2007).





Σχ. 4.29: Προσομοίωμα στο Flac3D για λόγο  $H/D=2$  ( $H$ =βάθος σήραγγας και  $D$  = διάμετρος της κυλινδρικής σήραγγας) (Βαρδουλάκης, 2007).

Η συγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων του μοντέλου αβαθούς σήραγγας με τα πειραματικά αποτελέσματα για  $H/D=2$  φαίνονται στο Σχ. 4.30. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό το σημείο που ληφθηκε από το Flac3D, είχε το ίδιο απόλυτο ύψος με την  $U_{y7}$  (στέψη της σήραγγας) και παρουσιάζει τιμή κοντά στη γραμμή τάσης αυτής. Από τα παραπάνω φαίνεται σε πρώτη φάση ότι η αριθμητική και η πειραματική λύση βρίσκονται σε συμφωνία.



Σχ. 4.30: Σύγκριση πειραματικών μετρήσεων, για δεδομένο ύψος  $y$  και λόγο  $H/D$ , με την τιμή που έδωσε το Flac3D για δεδομένη αδιάστατη μέση οριζόντια μετατόπιση  $u_x/D$  του μετώπου (Βαρδουλάκης, 2007).

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκαν οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες αμμώδους εδαφικού υλικού, το οποίο λήφθηκε από την περιοχή του Καλαθά Χανίων, με τη βοήθεια πειραμάτων που διεξήχθησαν στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στόχος της εργασίας αυτής ήταν η εκτίμηση όχι μόνον της αντοχής της ξηρής άμμου αλλά και της παραμορφωσιμότητας της. Τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία αυτή είναι τα εξής:

- Η τιμή της γωνίας εσωτερικής τριβής της άμμου που προέκυψε από τις τριαξονικές δοκιμές μπορεί να συγκριθεί με την αντίστοιχη τιμή  $\phi = 35,8^\circ$  που βρέθηκε από πειράματα άμεσης διάτμησης (Σαμαρτζή, 2007) στο ίδιο δείγμα.
- Το μέτρο ελαστικότητας της υπόψιν άμμου τείνει να μειωθεί με την αύξηση της αξονικής πλαστικής τροπής για μικρή μέση πίεση ενώ έχει την τάση να μένει σταθερό για μεγαλύτερες μέσες τάσεις.
- Το μέτρο ελαστικότητας της υπόψιν άμμου αυξάνει με την αύξηση της μέσης υδροστατικής πίεσης.
- Επίσης μπορεί να σημειωθεί εδώ ότι το μέτρο ελαστικότητας που προέκυψε από την δοκιμή του συμπιεσομέτρου με την παραδοχή σταθερής τιμής του λόγου Poisson της άμμου είναι της τάξης μεγέθους του  $E$  που υπολογίσθηκε κατευθείαν από τις τριαξονικές δοκιμές.
- Το μέτρο ελαστικότητας της άμμου που εκτιμήθηκε στην παρούσα εργασία έρχεται σε πλήρη επίσης συμφωνία με το μέτρο ελαστικότητας  $E = 120 \text{ MPa}$  που βρέθηκε από ανάδρομη ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων αναλογικού μοντέλου μελέτης των καθιζήσεων που προκαλούνται κατά την σταδιακή αστοχία μετώπου αβαθών σηράγγων με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων διαφορών FLAC3D (βλ. Σχ. 4.28) (Βαρδουλάκης, 2007).

## **Προτάσεις**

- Μέτρηση του λόγου Poisson.
- Μελέτη συμπεριφοράς του μέτρου ελαστικότητας με την εισαγωγή υγρασίας.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ελληνική Βιβλιογραφία**

1. Βαρδουλάκης Π., (2007), Μελέτη Ευστάθειας Αβαθών Σηράγγων με την βοήθεια Αναλογικής Συσκευής και Αναλυτικών Μεθόδων, Διπλωματική Εργασία.
2. Σαμαρτζή Μ., (2007), Προσωπική Επαφή.
3. Σταυροπούλου Μ., (2007), Προσωπική Επαφή.
4. Στειακάκης Ε.Κ., (2003), Συμπεριφορά Ανοικτών Εκσκαφών Μεγάλου Βάθους, Έρευνα Γεωτεχνικών Παραμέτρων και Κινητικότητα Εδαφών στο Λιγνιτικό Πεδίο Πτολεμαΐδας-Αμυνταίου, Διδακτορική Εργασία.
5. Στειακάκης Ε., (2005), Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας-Εδαφομηχανικής, Χανιά.

### **Ξένη Βιβλιογραφία**

1. Georgopoulos I. O. and I. Vardoulakis, (2005), An Experimental Study of Hostum S<sub>28</sub> Sand.
2. Georgopoulos I. O. and J. Desrues, (2005), Axisymmetric Triaxial Compression Test.
3. Terzaghi K. and R. B. Peck, Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, second edition.
4. Timoshenko S. and Goodier J. K., (1951), Theory of Elasticity, McGraw-Hill book Company, New York, Toronto, London.