

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης του τρόπου φόρτισης στην τριαξονική συσκευή, κατά την διεξαγωγή πειραμάτων σε δοκίμια αμμωδών υλικών υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Επίσης, εξετάζονται και άλλοι παράγοντες που επιδρούν στα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών, όπως η πλευρική τάση, ο δείκτης πόρων και το σχήμα των κόκκων. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην Τριαξονική Συσκευή Χαμηλών Πιέσεων, στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν 19 πειράματα σε τέσσερις διαφορετικές άμμους (M31, Fontainebleau, Ham River Sand, Longstone). Τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν σε τρεις διαφορετικές πλευρικές τάσεις (100, 200 και 300kPa), παρουσιάζουν αποκλίσεις στις τιμές του δείκτη πόρων και εκτελέστηκαν με δύο διαφορετικές μεθόδους επιβολής φορτίου (έλεγχος των παραμορφώσεων, έλεγχος των τάσεων).

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από δύο μέρη. Τα δύο πρώτα κεφάλαια του Α' μέρους αναφέρονται κυρίως στη μηχανική συμπεριφορά μη-συνεκτικών εδαφών (κυρίως άμμων). Το τρίτο κεφάλαιο αφιερώνεται στην περιγραφή και κατανόηση της λειτουργίας της τριαξονικής συσκευής. Στο τέταρτο κεφάλαιο περιλαμβάνονται δημοσιεύσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας με διάφορες αναφορές στους παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα των τριαξονικών δοκιμών. Στη συνέχεια ακολουθεί το μέρος Β' το οποίο αναφέρεται εξ' ολοκλήρου στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο. Εδώ περιέχονται τα χαρακτηριστικά των άμμων που χρησιμοποιήθηκαν, η περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας καθώς επίσης και η παράθεση και ανάλυση των αποτελεσμάτων και των συγκριτικών διαγραμμάτων. Τέλος ακολουθούν τα συμπεράσματα σύμφωνα με τα οποία ο τρόπος φόρτισης, χωρίς να επηρεάζει τόσο τη γενική μορφή απόκρισης των άμμων (ψαθυρή ή μη συμπεριφορά), έχει σημαντική επίδραση στην απόκριση αυτών που εμφανίζουν ασταθή συμπεριφορά και τα δοκίμια που φορτίστηκαν με έλεγχο των παραμορφώσεων δείχνουν μικρότερη τάση για συστολή από τα αντίστοιχα που φορτίστηκαν με έλεγχο των τάσεων.

## **ABSTRACT**

The purpose of this diploma thesis is to study the effect of loading mode on the undrained response of sands in the triaxial apparatus by carrying out experiments on specimens of four sands. Other factors affecting the results of triaxial tests are also investigated, such as the effect of lateral stress, the effect of porosity and the effect of the shape of grains. The experiments were carried out in Triaxial Stress Path Cells of the Soil Mechanics Laboratory at NTUA. Nineteen experiments were carried out in total on four different sands (M31, Fontainebleau, Ham River Sand, Longstone). The samples were consolidated at three different effective stress levels (100, 200 and 300kPa), in a loose and dense state and were subjected to shear loading by two different methods of imposing load: strain control and load control.

This diploma thesis consists of two parts. The first two chapters of Part A', mainly refer to the description of the mechanical behavior of non-cohesive soils (mainly sands). The third chapter is devoted to describing and understanding the operation of the triaxial apparatus and the fourth chapter contains important geotechnical publications in the literature on factors affecting the results of triaxial tests. Part B', deals entirely with the results of the experiments conducted in the laboratory. The characteristics of the used sands, the description of the experimental procedure, as well as the presentation and analysis of results and comparative charts are included herein. Finally, Part B' contains the conclusions of the thesis, according to which, although the loading mode does not seem to affect the general form of the response of sands (stable or unstable behavior), for the sands with the unstable response, the tests which were conducted under strain control mode show less tendency to contact than those which were conducted under load control mode.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### **ΜΕΡΟΣ Α΄ : ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ**

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

1.1 Ορισμός, προέλευση και φύση του εδάφους .....	σελ. 10
1.2 Παραμόρφωση του εδάφους .....	σελ. 12
1.3 Ο ρόλος της υγρής φάσης .....	σελ. 16
1.4 Φυσικά χαρακτηριστικά μη-συνεκτικών εδαφών (Άμμοι) .....	σελ. 19

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : ΣΧΕΣΕΙΣ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ

2.1 Εισαγωγή .....	σελ. 26
2.2 Μη-Γραμμικές σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων .....	σελ. 28
2.3 Διαδρομές των τάσεων (Stress paths) .....	σελ. 30
2.4 Η διατμητική αντοχή στα κοκκώδη εδαφικά υλικά .....	σελ. 32
2.5 Νόμοι αστοχίας στα κοκκώδη εδαφικά υλικά (Mohr – Coulomb Failure Law) .....	σελ. 34
2.6 Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων κατά τη διάρκεια της τριαξονικής δοκιμής .....	σελ. 36
2.7 Συμπεριφορά κατά την τριαξονική δοκιμή (Συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης) ....	σελ. 40

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : ΣΥΣΚΕΥΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

3.1 Εισαγωγή .....	σελ. 46
3.2 Εφαρμογές της τριαξονικής δοκιμής .....	σελ. 47
3.3 Περιγραφή της τριαξονικής δοκιμής .....	σελ. 48
3.4 Μετρήσεις κατά την τριαξονική δοκιμή .....	σελ. 53
3.5 Μέτρηση εδαφικής δυσμψίας (ακαμψίας) .....	σελ. 54

3.6 Υπολογισμοί και εξαγόμενα διαγράμματα .....	σελ. 58
3.7 Καταγραφικό σύστημα .....	σελ. 62

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

4.1 Εισαγωγή .....	σελ. 66
4.2 Η επίδραση του τρόπου φόρτισης στην τριαξονική συσκευή .....	σελ. 67
4.3 Η επίδραση του αρχικού δείκτη πόρων και της αρχικής πυκνότητας του δοκιμίου.....	σελ. 78
4.4 Επίδραση της πλευρικής τάσης του δοκιμίου .....	σελ. 83
4.5 Επίδραση του μεγέθους και του σχήματος των κόκκων .....	σελ. 86

### ΜΕΡΟΣ Β' : ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> : ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

6.1 Εισαγωγή .....	σελ. 100
6.2 Περιγραφή υλικών που χρησιμοποιήθηκαν .....	σελ. 103

#### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup> : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

7.1 Εισαγωγή .....	σελ. 108
7.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας σε βήματα .....	σελ. 109

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup> : ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ**

8.1 Εισαγωγή .....	σελ. 118
8.2 Επεξεργασία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δοκιμών .....	σελ. 120
8.3 Επεξεργασία των μετρήσεων και παρουσίαση των αποτελεσμάτων .....	σελ. 122

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup> : ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

9.1 Συγκριτικές αναλύσεις ως προς το είδος της άμμου .....	σελ. 124
9.2 Συγκριτικές αναλύσεις ως προς την πλευρική τάση .....	σελ. 128
9.3 Συγκριτικές αναλύσεις ως προς την τιμή του δείκτη πόρων .....	σελ. 142
9.4 Συγκριτικές αναλύσεις ως προς τη μέθοδο επιβολής της φόρτισης .....	σελ. 148
9.5 Διερεύνηση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων .....	σελ. 157
9.6 Συνοπτικά συμπεράσματα .....	σελ. 166

<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	σελ. 169
---------------------------	----------

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α' : ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ</b> .....	σελ. 173
---	----------

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β' : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΝΕΑΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ TRI-SCAN 50</b> .....	σελ. 193
---	----------



# ΜΕΡΟΣ Α΄

---

## ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ



# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

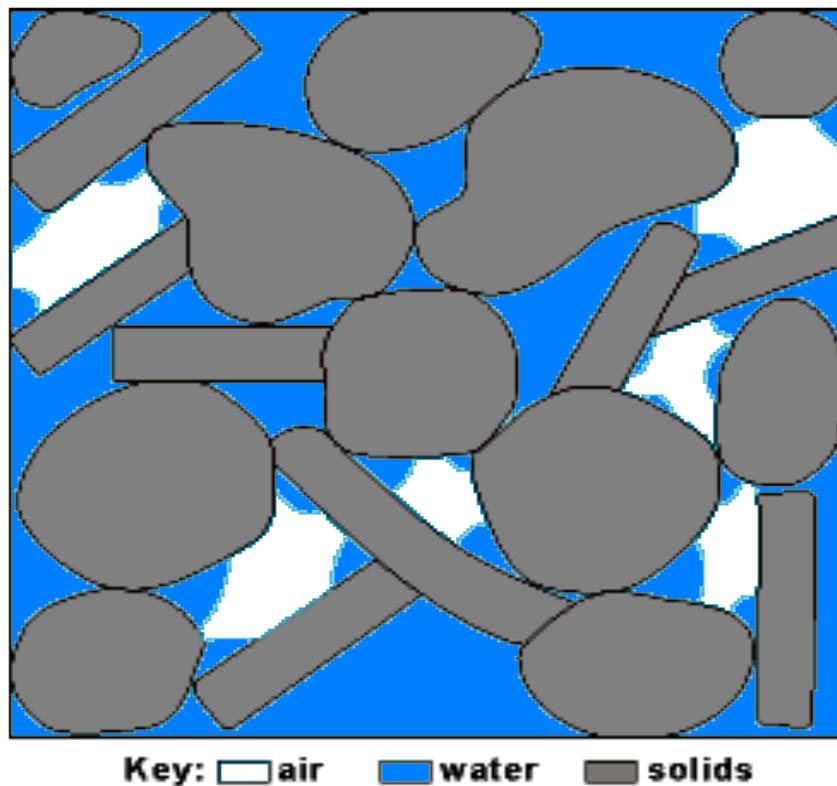
---

## Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

## 1. Η ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

### 1.1 Ορισμός, προέλευση και φύση του εδάφους

Το έδαφος είναι ένα μη-συμπαγές πολυφασικό υλικό, που αποτελείται από ασύνδετους ή ελαφρά συνδεδεμένους στερεούς κόκκους, τα κενά μεταξύ των οποίων (πόροι) περιέχουν υγρά (συνήθως νερό) ή/και αέρια (συνήθως αέρα) (Σχήμα 1.1).



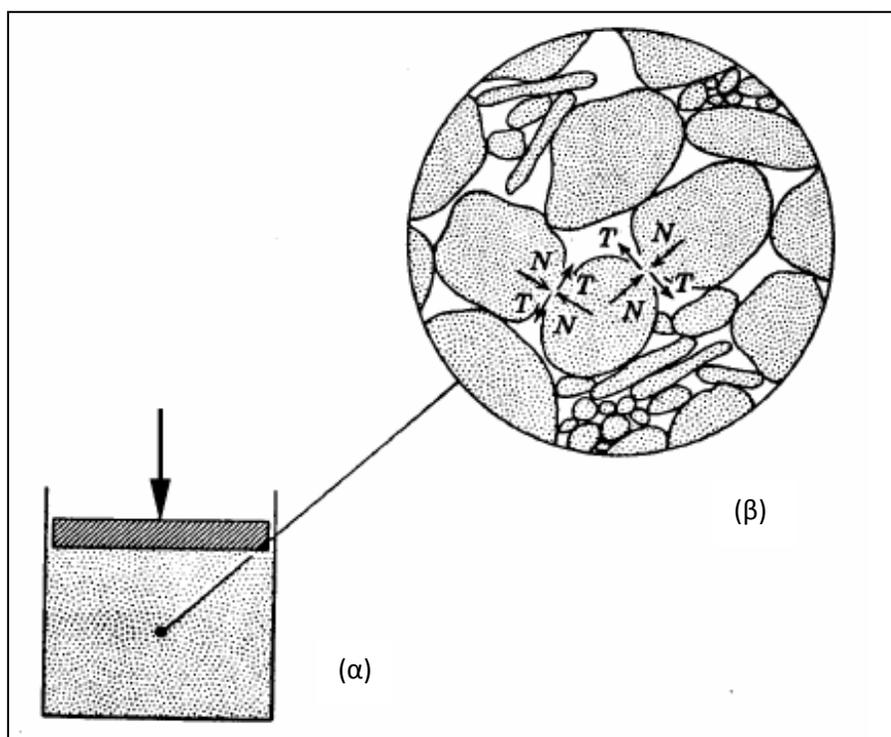
Σχ. 1.1 : Η φύση του εδάφους

Τα εδαφικά υλικά προέρχονται από τη μηχανική ή/και χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων. Η μηχανική αποσάθρωση οφείλεται σε παράγοντες, όπως ο παγετός, οι συνεχείς θερμοκρασιακές μεταβολές, η διάβρωση από το νερό και τον αέρα, οι λειτουργίες φυτών, ζώων και του ανθρώπου, και οδηγεί σε κατατεμαχισμό και θρυμματισμό των βράχων. Αντίστοιχα, η χημική αποσάθρωση προκαλεί την αποσύνθεση των πετρωμάτων λόγω οξείδωσης, ενανθράκωσης, αναγωγής και άλλων χημικών διαδικασιών. Γενικά, η χημική αποσάθρωση είναι ο κυριότερος παράγων γένεσης λεπτόκοκκων εδαφικών σχηματισμών (ιλύων και αργίλων), ενώ η μηχανική αποσάθρωση συντελεί κυρίως στη δημιουργία των χονδρόκοκκων εδαφών (χαλίκων και άμμων).

Αν εξετάσουμε μια χούφτα άμμου από μια παραλία μπορούμε να διαπιστώσουμε με γυμνό μάτι ότι η άμμος απαρτίζεται από ξεχωριστά σωματίδια. Το ίδιο μπορεί να ειπωθεί για όλα τα εδάφη, μολοντί πολλά σωματίδια εδάφους είναι τόσο μικρά που χρειάζονται εξελιγμένες μικροσκοπικές τεχνικές για να γίνουν ορατά. Τα διακριτά σωματίδια που απαρτίζουν το έδαφος δεν είναι συγκολλημένα μεταξύ τους -όπως για παράδειγμα οι κρύσταλλοι ενός μετάλλου- και γι' αυτό το λόγο είναι σχετικά ελεύθερα να κινούνται το ένα σε σχέση με το άλλο. Επιπλέον τα εδαφικά σωματίδια είναι ακλόνητα και δεν μπορούν να κινούνται το ένα σχετικά με το άλλο τόσο εύκολα όσο τα σωματίδια ενός υγρού. Συνεπώς το έδαφος είναι ένα σύστημα από διακριτά σωματίδια. Αυτός είναι και ο βασικός παράγοντας που κάνει την εδαφομηχανική να διαφέρει από την μηχανική των στερεών σωμάτων και από την μηχανική των ρευστών.

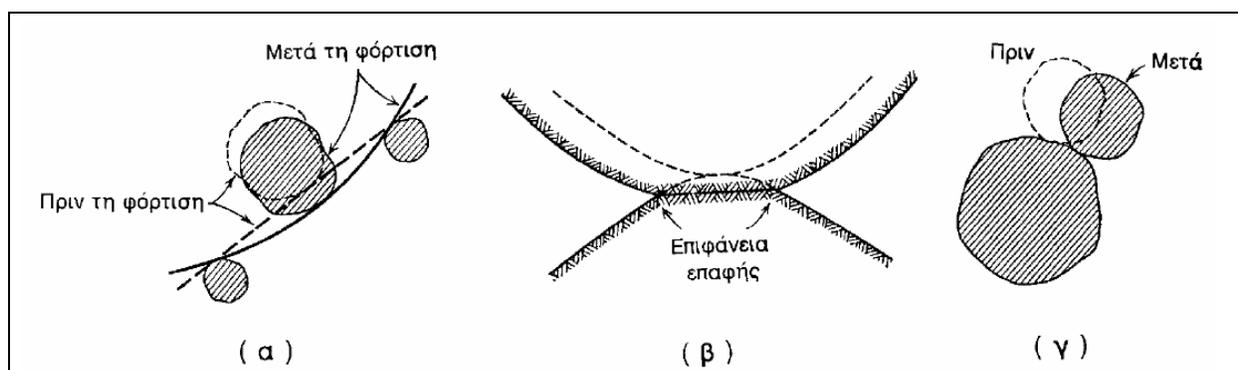
## 1.2 Παραμόρφωση του εδάφους

Στο Σχήμα 1.2 παρατηρούμε ένα δοχείο με άμμο στο πάνω μέρος του οποίου έχει τοποθετηθεί ένα έμβολο για την επιβολή κατακόρυφου φορτίου. Μεγεθύνοντας ένα σημείο του εδάφους και διακρίνοντας τα ξεχωριστά σωματίδια του είμαστε σε θέση να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο το κατακόρυφο φορτίο μεταδίδεται στον εδαφικό σκελετό. Αυτό πραγματοποιείται μέσω δυνάμεων επαφής που αναπτύσσονται μεταξύ των γειτονικών σωματιδίων. Για ευκολία, καθεμία από αυτές τις δυνάμεις επαφής αναλύεται σε μία κάθετη (**N**) και σε μια εφαπτόμενη (**T**) συνιστώσα στην επιφάνεια επαφής. Διαφορετικά θα λέγαμε ότι η επαφή μεταξύ δύο κόκκων μπορεί να μεταδώσει μία ορθή (θλιπτική) και μία διατμητική δύναμη, με σημείο εφαρμογής το σημείο επαφής των κόκκων. Η μηχανική επαφή αποτελεί τον κύριο τρόπο μετάδοσης δυνάμεων στο εσωτερικό των κοκκωδών (μη - συνεκτικών) εδαφών.



Σχ. 1.2 : (α) Δοχείο με άμμο και κατακόρυφο έμβολο. (β) Μεγέθυνση εδαφικού στοιχείου

Τα ξεχωριστά σωματίδια του εδάφους, παραμορφώνονται φυσικά, σαν αποτέλεσμα των δυνάμεων επαφής. Η πιο συνηθισμένη μορφή παραμόρφωσης είναι η ελαστική ή πλαστική παραμόρφωση των σημείων επαφής. Αυτές οι παραμορφώσεις οδηγούν στην διαπλάτυνση των περιοχών επαφής μεταξύ των εδαφικών κόκκων, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3α, γεγονός που επιτρέπει στα κέντρα των σωματιδίων να έρθουν πιο κοντά. Επίσης εάν υπάρχουν σωματίδια με μορφή πλακιδίων θα λυγίσουν, όπως στο Σχήμα 1.3β, με αποτέλεσμα να επιτρέπονται οι σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των γειτονικών εδαφικών κόκκων. Επιπλέον, όταν η φόρτιση σε μια επαφή ξεπερνά την αντίσταση, προκαλείται σχετική ολίσθηση μεταξύ των κόκκων (Σχ. 1.3γ). Η συνολική παραμόρφωση μιας εδαφικής μάζας είναι συνδυασμός της παραμόρφωσης των μεμονωμένων σωματιδίων και της σχετικής ολίσθησης μεταξύ τους. Παρόλα αυτά η εμπειρία έχει δείξει ότι η σχετική ολίσθηση που οδηγεί στην αναδιάταξη των κόκκων, γενικά, παίζει τον σημαντικότερο ρόλο στην συνολική παραμόρφωση του εδάφους.



Σχ. 1.3 : Παραμόρφωση κοκκωδών εδαφών

### Μηχανισμοί παραμόρφωσης των κοκκωδών (αμμωδών) εδαφών

Σε συνέχεια των παραπάνω ακολουθούν οι κυριότεροι μηχανισμοί στους οποίους οφείλονται οι παραμορφώσεις των κοκκωδών εδαφών :

Η **ελαστική παραμόρφωση** των κόκκων λόγω των αναπτυσσόμενων τάσεων. Η παραμόρφωση αυτή είναι εξ' ορισμού αντιστρεπτή, δηλαδή αναιρείται με την αναίρεση των αιτίων που την προκάλεσαν (δηλαδή των εξωτερικώς επιβεβλημένων φορτίων).

Η **ανελαστική (πλαστική) παραμόρφωση** των κόκκων. Οι τάσεις που αναπτύσσονται στις επαφές μεταξύ των κόκκων είναι πολύ μεγαλύτερες από τις μέσες τάσεις (ολικές και ενεργές) που ορίζονται μακροσκοπικά και συνεπώς μπορούν να οδηγήσουν σε ανελαστικές παραμορφώσεις ή ακόμα και σε θρυμματισμό των κόκκων στα σημεία επαφής τους. Η παραμόρφωση αυτή είναι εξ' ορισμού μη-αντιστρεπτή, δηλαδή δεν αναιρείται με την αποφόρτιση.

Η **σχετική ολίσθηση** μεταξύ των κόκκων. Όπως είναι γνωστό, μεταξύ των κόκκων αναπτύσσονται ορθές δυνάμεις ( $N$ ) και διατμητικές δυνάμεις ( $T$ ). Όταν ο λόγος  $T / N$  υπερβεί το στατικό συντελεστή τριβής του υλικού, οι κόκκοι ολισθαίνουν και μετακινούνται μεταβάλλοντας τη μεταξύ τους θέση και διάταξη. Η ολίσθηση συχνά συνοδεύεται και από την κύλιση ενός κόκκου επί άλλου. Η ολίσθηση και η κύλιση μεταξύ των κόκκων οφείλονται στην ύπαρξη των πόρων στα εδαφικά υλικά και γενικά οδηγούν **σε μεταβολή του συνολικού όγκου των κενών**, δηλαδή σε μεταβολή του όγκου του εδαφικού υλικού. Οι μηχανισμοί της ολίσθησης και κύλισης είναι μη-αντιστρεπτοί στο μεγαλύτερό τους ποσοστό.

Το μέγεθος της παραμόρφωσης των κοκκωδών εδαφών εξαρτάται βέβαια από την ένταση και τον τύπο της επιβαλλόμενης φόρτισης (ισότροπη ή διατμητική), εξαρτάται όμως και από άλλους παράγοντες, οι οποίοι αναλύονται παρακάτω και είναι :

1. Το σχήμα των κόκκων
2. Η κοκκομετρική διαβάθμιση
3. Η σχετική πυκνότητα

Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει το πρώτο επακόλουθο της ασυνεχούς φύσης του εδάφους: *Η παραμόρφωση του εδάφους οφείλεται στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κόκκων και ειδικότερα στην μεταξύ τους ολίσθηση*. Επειδή η ολίσθηση είναι μη-γραμμική και μη-αναστρέψιμη παραμόρφωση, θα πρέπει να περιμένουμε έντονα μη-γραμμικές σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων κατά την συμπεριφορά των εδαφών που στη προκειμένη περίπτωση μιλάμε για άμμους. Εάν μιλάμε για συνεκτικά εδάφη (άργιλοι, ιλεις), σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά τους παίζουν και φαινόμενα όπως η συγκόλληση μεταξύ των γειτονικών σωματιδίων (π.χ. αργιλικών πλακιδίων).

Φυσικά υπάρχει ένας τεράστιος αριθμός από σημεία επαφής μέσα σε ένα κομμάτι εδάφους. Για παράδειγμα, πρέπει να υπάρχουν πάνω από 5 εκατομμύρια σημεία επαφής σε  $1 \text{ cm}^3$  λεπτόκοκκης άμμου. Για αυτό το λόγο είναι αδύνατο να κατασκευάσουμε ένα νόμο τάσης-παραμόρφωσης για οποιοδήποτε έδαφος λαμβάνοντας υπόψη τη συμπεριφορά σε κάθε σημείο επαφής ακόμα και αν μπορούσαμε να περιγράψουμε ακριβώς τι συμβαίνει σε κάθε επαφή. Αντιθέτως είναι απαραίτητο να βασιστούμε σε απευθείας πειραματικές μετρήσεις των χαρακτηριστικών ενός εδαφικού συστήματος που να περιλαμβάνει ένα μεγάλο αριθμό σωματιδίων. Παρόλα αυτά η διερεύνηση της συμπεριφοράς σε ορισμένα σημεία επαφής των κόκκων βοηθάει στην καλύτερη κατανόηση και διασαφήνιση των πειραματικών μετρήσεων.

### 1.3 Ο ρόλος της υγρής φάσης

Τα κενά μεταξύ των εδαφικών κόκκων ονομάζονται διαφορετικά και πόροι. Οι πόροι αυτοί συνήθως πληρούνται με αέρα ή/και με νερό (περιέχοντας ή όχι διαλυμένες ουσίες). Η σημασία της παρουσίας νερού στους πόρους των εδαφικών υλικών είναι πολύ μεγάλη και σε αυτήν οφείλονται φαινόμενα όπως η στερεοποίηση και η ρευστοποίηση. Η επιρροή του νερού των πόρων έχει καθοριστική σημασία στα συνεκτικά υλικά, αλλά είναι σημαντική ακόμη και στα κοκκώδη (άμμοι). Ο ρόλος της υγρής φάσης στα εδαφικά υλικά παίζει γενικά τριπλό ρόλο:

- Χημική αλληλεπίδραση
- Φυσική αλληλεπίδραση
- Μηχανική αλληλεπίδραση

Οι συνιστώσες της υγρής φάσης επιδρούν στη φύση των επιφανειών των στερεών κόκκων στην περίπτωση που το εδαφικό υλικό απαρτίζεται από πολύ μικρούς κόκκους (άργιλοι). Κατά συνέπεια το νερό των πόρων καθορίζει τον τρόπο μετάδοσης των δυνάμεων αλλά και τους μηχανισμούς ανάπτυξης των παραμορφώσεων μεταξύ των επαφών των κόκκων. Αυτή η αλληλεπίδραση μεταξύ στερεής και υγρής φάσης που στα κοκκώδη υλικά (άμμοι) είναι αμελητέα έως ανύπαρκτη ονομάζεται **χημική αλληλεπίδραση**.

Έστω ότι το νερό κινείται διαμέσου των πόρων του εδαφικού υλικού, αλληλεπιδρώντας με τους στερεούς κόκκους και ασκώντας επ' αυτών δυνάμεις διήθησης. Εάν αυξηθούν αρκετά οι δυνάμεις αυτές το έδαφος καταλαμβάνει περισσότερο όγκο και φτάνει σε μια κατάσταση όπου η διατμητική του αντοχή είναι σημαντικά λιγότερη από ότι αρχικά. Έχει παρατηρηθεί ότι αλλαγές στον όγκο και στην διατμητική αντοχή προκαλούν αλλαγές και στις δυνάμεις επαφής μεταξύ των κόκκων (ενεργές τάσεις). Οι μεταβολές στις ενεργές τάσεις είναι άμεσα συνδεδεμένες με την διαφορά που παρατηρείται μεταξύ των ολικών τάσεων και της πίεσης πόρων. Συμπερασματικά το νερό μπορεί να ρέει διαμέσου του εδάφους και να αλληλεπιδρά

με τον εδαφικό σκελετό, μεταβάλλοντας το μέγεθος των δυνάμεων επαφής μεταξύ των κόκκων και επηρεάζοντας την αντοχή του εδάφους. Η αλληλεπίδραση αυτή, που οδηγεί υπό προϋποθέσεις στο φαινόμενο της ρευστοποίησης ονομάζεται **φυσική αλληλεπίδραση**.



**Σχ. 1.4 : Ρευστοποίηση του εδάφους κατά τον σεισμό της Niigata (1964)**

Τέλος η τρίτη και τελευταία αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο φάσεων αφορά τη συμμετοχή του νερού στην ανάληψη των επιβεβλημένων φορτίων. Επειδή το έδαφος είναι ένα πολυφασικό υλικό, τα φορτία που επιβάλλονται σε ένα κορεσμένο εδαφικό υλικό αναλαμβάνονται από τον εδαφικό σκελετό (με τη μορφή ενεργών τάσεων) και από το νερό των πόρων (με τη μορφή υδατικών πιέσεων). Έτσι λοιπόν η ενεργός τάση εκφράζει μακροσκοπικά τις δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των στερεών κόκκων, δηλαδή το ποσοστό του εξωτερικώς επιβεβλημένου φορτίου που αναλαμβάνεται από τον εδαφικό σκελετό, ενώ το

υπόλοιπο φορτίο αναλαμβάνεται από την υγρή φάση με τη μορφή υδατικών πιέσεων. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των κόκκων οδηγούν σε παραμόρφωση του εδαφικού σκελετού. Με την εξαίρεση ορισμένων ειδικών περιπτώσεων παραμόρφωσης χωρίς μεταβολή του εξωτερικώς επιβεβλημένου φορτίου (όπως η ξήρανση, απορρόφηση νερού, μεταβολή του pH του υγρού των πόρων, θερμοκρασιακές μεταβολές κλπ), κάθε παραμόρφωση του εδαφικού σκελετού συνοδεύεται από αντίστοιχη μεταβολή των φορτίων που αναλαμβάνονται από τον εδαφικό σκελετό, δηλαδή από μεταβολή των ενεργών τάσεων. Η επιρροή της υγρής φάσης στην ανάληψη των επιβεβλημένων φορτίων εκφράζεται με τον όρο "**Αρχή των Ενεργών Τάσεων**" και η αλληλεπίδραση της με την στερεά φάση ονομάζεται **μηχανική αλληλεπίδραση**.

Κατά την επιβολή ενός εξωτερικού φορτίου σε ένα πλήρως κορεσμένο (το σύνολο δηλαδή των πόρων του καταλαμβάνεται από νερό) αμμώδες εδαφικό υλικό, το νερό διαφεύγει ελεύθερα από τους πόρους του και το φορτίο αναλαμβάνεται πλήρως από τον εδαφικό σκελετό, που παραμορφώνεται με ανάλογη μείωση του όγκου του εδάφους. 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 μεγάλο 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. Επειδή, όμως, τα κενά καταλαμβάνονται πλήρως από νερό, η μείωση του όγκου των κενών θα συνοδευθεί από εκροή ίσου όγκου νερού από τους πόρους του εδαφικού υλικού.

## 1.4 Φυσικά χαρακτηριστικά μη-συνεκτικών εδαφών (Άμμοι)

### Μέγεθος και σχήμα κόκκων

Τα εδαφικά υλικά, στο σύνολο τους σχεδόν, διακρίνονται σε χονδρόκοκκα (χάλικες και άμμοι) και λεπτόκοκκα (ιλείς και άργιλοι). Το μέγεθος των κόκκων τους διαφέρει σημαντικά : εδάφη με κόκκους μεγαλύτερους από 2 mm ανήκουν στην κατηγορία των χαλίκων ενώ οι άργιλοι έχουν κόκκους με μέγεθος μικρότερο από 0.002 mm (Σχ. 1.5).

Άργιλοι	Ιλείς			Άμμοι			Χάλικες			Κροκάλες						
	Λεπτές	Μέσες	Χονδρές	Λεπτές	Μέσες	Χονδρές	Λεπτές	Μέσες	Χονδρές							
0.001	0.002	0.006	0.01	0.02	0.06	0.1	0.2	0.6	1	2	6	10	20	60	100	200

Διαστάσεις κόκκων (mm)

Σχ. 1.5 : Όρια μεγεθών κόκκων εδαφικών υλικών

Οι άμμοι, που αποτελούν αντικείμενο μελέτης στην παρούσα διατριβή, έχουν κόκκους με διαστάσεις από 2mm έως 0.06 mm (η διάσταση αυτή είναι περίπου ίση με το μικρότερο μέγεθος κόκκου που είναι ορατός δια γυμνού οφθαλμού). Οι κόκκοι των άμμων είναι γενικά σφαιροειδείς, με την έννοια ότι η μέγιστη και η ελάχιστη διάσταση του κόκκου δεν διαφέρουν σημαντικά: ακόμη και στην περίπτωση πολύ πεπλατυσμένων κόκκων, ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη διάσταση δεν υπερβαίνει συνήθως το πέντε (5). Η μορφή της επιφάνειας των κόκκων ποικίλλει και κυμαίνεται μεταξύ λείας (στην περίπτωση εδαφών που η επιφάνεια των κόκκων τους έχει λειανθεί από τη διάβρωση) και γωνιώδους (στην περίπτωση πρόσφατων κλαστικών ιζημάτων). Η διάταξη των κόκκων των κοκκωδών εδαφών καθορίζεται από το βάρος, τις διαστάσεις, τη μορφή της επιφάνειας και τις μηχανικές δυνάμεις επαφής που ασκούνται μεταξύ των κόκκων. Η μηχανική αυτή διάταξη των κόκκων δημιουργεί μια δομή

(εδαφικός σκελετός) με πυκνότητα που κυμαίνεται μεταξύ μιας ελάχιστης τιμής (πολύ χαλαρή δομή) και μιας μέγιστης τιμής (πολύ πυκνή δομή). Πάντως, η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης πυκνότητας δεν είναι σημαντική, επειδή σε όλες τις περιπτώσεις οι κόκκοι βρίσκονται σε επαφή.

### Σχετική πυκνότητα

Ένα συγκεκριμένο μη-συνεκτικό εδαφικό υλικό μπορεί να εμφανισθεί στη φύση με διάφορες τιμές του δείκτη πόρων ( $e$ ), που εξαρτώνται από την εκάστοτε διάταξη (δομή) των κόκκων του. Η πλέον χαλαρή διάταξη των κόκκων με το μέγιστο ποσοστό κενών αντιστοιχεί στην ελάχιστη πυκνότητα. Η πυκνότητα αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά τη βραδεία απόθεση μιας άμμου μέσα στο νερό με συνθήκες αντίστοιχες με αυτές της ιζηματογένεσης. Κατά συνέπεια, πρόσφατες αποθέσεις άμμων τείνουν να έχουν πυκνότητες που προσεγγίζουν την ελάχιστη πυκνότητα. Η πλέον πυκνή διάταξη των κόκκων με το ελάχιστο ποσοστό κενών αντιστοιχεί στη μέγιστη πυκνότητα. Η πυκνότητα αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με παρατεταμένη και έντονη δόνηση της άμμου, που προκαλεί συμπύκνωση με την αναδιάταξη των κόκκων της σε πυκνότερη δομή. Είναι σαφές ότι τόσο η ελάχιστη όσο και η μέγιστη πυκνότητα είναι συμβατικά μεγέθη και αναφέρονται σε πρότυπες εργαστηριακές δοκιμές (π.χ. συγκεκριμένος τρόπος απόθεσης ή συγκεκριμένος τρόπος δόνησης μιας άμμου). Κατά συνέπεια, είναι δυνατόν μια άμμος να υπάρξει στη φύση σε κατάσταση με πυκνότητα μικρότερη από την ελάχιστη ή μεγαλύτερη από τη μέγιστη συμβατική.

Ένα χρήσιμο μέγεθος για το χαρακτηρισμό της κατάστασης μιας άμμου σε σχέση με την ελάχιστη και τη μέγιστη πυκνότητα είναι η λεγόμενη σχετική πυκνότητα ( $D_r$ ), η οποία ορίζεται ως εξής:

$$D_r \equiv \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (\%)$$

όπου:

- $e$  είναι ο πραγματικός δείκτης πόρων της άμμου,
- $e_{max}$  είναι ο δείκτης πόρων που αντιστοιχεί στην ελάχιστη συμβατική πυκνότητα (μέγιστη τιμή του δείκτη πόρων) και
- $e_{min}$  είναι ο δείκτης πόρων που αντιστοιχεί στη μέγιστη συμβατική πυκνότητα (ελάχιστη τιμή του δείκτη πόρων).

Οι τιμές της μέγιστης και ελάχιστης πυκνότητας μιας άμμου εξαρτώνται από το σχήμα και την ποικιλία των μεγεθών της. Έτσι, όσο μεγαλύτερη είναι η ποικιλία μεγεθών των κόκκων και όσο πιο σφαιρικοί είναι οι κόκκοι σε ένα αμμώδη εδαφικό σχηματισμό, τόσο η ελάχιστη και η μέγιστη πυκνότητα είναι μεγαλύτερες.

Η κατάταξη των αμμωδών εδαφών με βάση τη σχετική τους πυκνότητα γίνεται σύμφωνα με τον ακόλουθο Πίνακα :

Σχετική πυκνότητα (%)	Περιγραφή μή-συνεκτικού εδάφους
0 - 15	Πολύ χαλαρό
15 - 35	Χαλαρό
35 - 65	Μέσης πυκνότητας
65 - 85	Πυκνό
85 - 100	Πολύ πυκνό

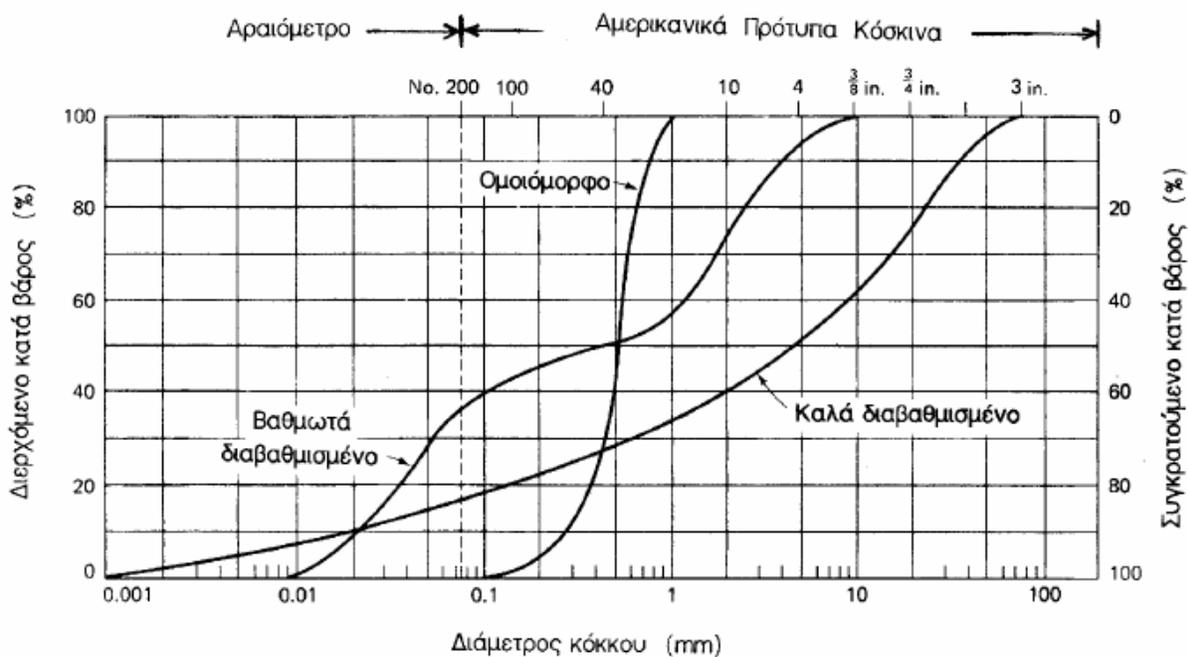
Σχ. 1.6 : Κατάταξη αμμωδών εδαφών με βάση τη σχετική τους πυκνότητα

### Κοκκομετρική διαβάθμιση

Το μέγεθος των κόκκων και η ποικιλία (κατανομή) τους σε ένα δείγμα εδαφικού υλικού επηρεάζουν τη μηχανική συμπεριφορά των μη-συνεκτικών εδαφών και για το λόγο αυτό μελετώνται στα πλαίσια των φυσικών τους χαρακτηριστικών.

Ο προσδιορισμός της κατανομής των μεγεθών κόκκων των αμμωδών εδαφικών υλικών (κοκκομετρική διαβάθμιση) γίνεται με τη λεγόμενη "κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα". Η ανάλυση με κόσκινα γίνεται με τη μηχανική δόνηση δείγματος του εδαφικού υλικού διαμέσου σειράς κοσκίνων με βαθμιαία μικρότερη διάσταση οπής και τη μέτρηση του βάρους του υλικού που συγκρατείται σε κάθε κόσκινο. Τα πρότυπα μεγέθη (διαστάσεις οπής) των κοσκίνων ποικίλουν. Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κόσκινα που ακολουθούν είτε την Αμερικανική Προδιαγραφή ASTM D422-1980 είτε την Αγγλική BS3770-1975.

Η κατανομή του μεγέθους των κόκκων ενός εδαφικού υλικού, όπως προκύπτει από την κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα, παρουσιάζεται συνήθως σε ένα διάγραμμα αθροιστικής συχνότητας εμφάνισης ως προς το μέγεθος του κόκκου (σε λογαριθμική κλίμακα). Από διαγράμματα αυτού του τύπου μπορούν να προσδιορισθούν ποσοτικά μεγέθη ιδιαίτερου ενδιαφέροντος, όπως το εύρος των διαμέτρων των κόκκων ενός εδαφικού υλικού και το ποσοστό (κατά βάρος) του υλικού που είναι μικρότερο από κάποια συγκεκριμένη διάμετρο. Επιπλέον, συνήθως υπολογίζονται η διάμετρος  $D_{10}$  (δηλαδή το μέγεθος κόκκου από τον οποίο 10% του υλικού έχει μικρότερο μέγεθος) και η διάμετρος  $D_{60}$  (δηλαδή το μέγεθος κόκκου από τον οποίο 60% του υλικού έχει μικρότερο μέγεθος).



Σχ. 1.7 : Διάγραμμα κοκκομετρικής διαβάθμισης εδαφών

Με βάση τα ανωτέρω, ορίζεται και ο συντελεστής ανομοιομορφίας:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

που εκφράζει συνοπτικά την κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού. Έτσι, ένα υλικό με ομοιόμορφους κόκκους έχει  $C_u = 1$ . Ένα υλικό με μεγάλη ποικιλία μεγεθών κόκκων, το οποίο έχει  $C_u > 5$ , λέγεται καλά διαβαθμισμένο. Αντίθετα, ένα υλικό με σχετικά ομοιόμορφους κόκκους, το οποίο έχει  $C_u < 5$ , λέγεται κακά διαβαθμισμένο. Γενικά, όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής ανομοιομορφίας, τόσο μεγαλύτερη ποικιλία κόκκων περιέχει το εδαφικό υλικό και τόσο καλύτερη είναι η κοκκομετρική του διαβάθμιση.



## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

---

ΣΧΕΣΕΙΣ ΤΑΣΕΩΝ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ  
ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ

## 2. ΣΧΕΣΕΙΣ ΤΑΣΕΩΝ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΣΤΟΧΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ

### 2.1 Εισαγωγή

Η μηχανική συμπεριφορά των υλικών εκφράζεται ποσοτικά με τους καταστατικούς νόμους συμπεριφοράς, οι οποίοι καθορίζουν τις σχέσεις τάσεων- παραμορφώσεων, δηλαδή τα μεγέθη των τάσεων που αναπτύσσονται κατά την παραμόρφωση του υλικού. Οι καταστατικοί νόμοι δεν είναι φυσικοί νόμοι, δεν έχουν δηλαδή τη γενική εφαρμογή των φυσικών νόμων, αλλά είναι συσχετίσεις που βασίζονται είτε στα θερμοδυναμικά αξιώματα (με κάποιες πρόσθετες παραδοχές), όπως π.χ. ο νόμος της γραμμικής ελαστικότητας, είτε σε φαινομενολογικές θεωρήσεις που προκύπτουν από πειραματικές κυρίως μετρήσεις της συμπεριφοράς των υλικών.

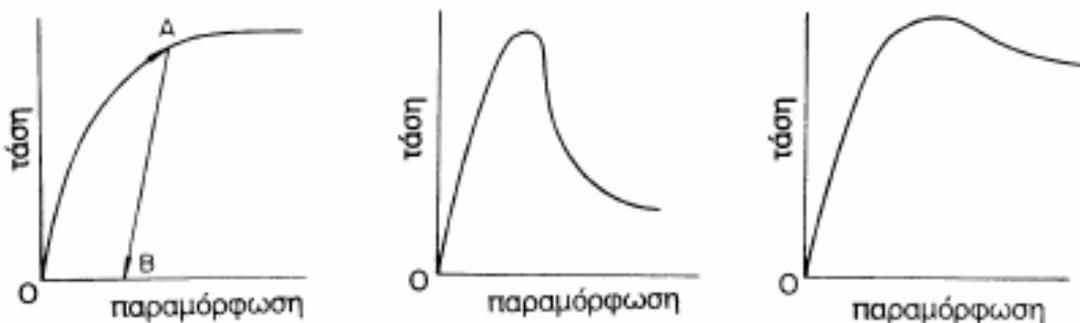
Στα εδαφικά υλικά οι καταστατικοί νόμοι θα έπρεπε να προκύψουν από τη μικροσκοπική θεώρηση των μηχανισμών παραμόρφωσης (ελαστικές και ανελαστικές παραμορφώσεις κόκκων, ολίσθηση και κύλιση μεταξύ των κόκκων κλπ.) και από τη μελέτη του τρόπου μετάδοσης των δυνάμεων μεταξύ των κόκκων. Η μέθοδος αυτή, όμως, υπερβαίνει τις σημερινές υπολογιστικές δυνατότητες, λόγω κυρίως του τεράστιου αριθμού επαφών μεταξύ των κόκκων. Κατά συνέπεια, στην περίπτωση των εδαφικών υλικών οι σχέσεις τάσεων- παραμορφώσεων που συνήθως χρησιμοποιούνται είτε είναι όμοιες με αυτές που εφαρμόζονται σε άλλα τεχνικά υλικά (π.χ. ο νόμος της γραμμικής ελαστικότητας) είτε προκύπτουν από γενικεύσεις των αποτελεσμάτων πειραματικών μετρήσεων σε δείγματα εδαφικών υλικών (άμμων, αργίλων κλπ).

Λόγω της πολυφασικότητας των εδαφικών υλικών και κυρίως λόγω της παρουσίας νερού στους πόρους το οποίο αλληλεπιδρά με τον εδαφικό σκελετό (όπως π.χ. κατά τη στερεοποίηση), οι καταστατικές σχέσεις των εδαφικών υλικών αναφέρονται στον εδαφικό σκελετό, δηλαδή συσχετίζουν τις παραμορφώσεις του εδαφικού σκελετού (που, όμως, ταυτίζονται με τις μακροσκοπικές παραμορφώσεις του εδάφους) με τις ενεργές τάσεις, τις τάσεις δηλαδή που αναλαμβάνονται από τον εδαφικό σκελετό.

Σε μια τυπική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων (βλέπε Σχ. 2.1), το αρχικό τμήμα της είναι πρακτικά ευθύγραμμο με μέτρο ελαστικότητας  $E_0$ , ενώ στη συνέχεια η τάση αυξάνει με βαθμιαία μειούμενο ρυθμό, οπότε το μέτρο ελαστικότητας  $E$  μικραίνει. Με περαιτέρω αύξηση της παραμόρφωσης, το υλικό φθάνει σε μία κατάσταση στην οποία η παραμόρφωση δεν συνοδεύεται πλέον από αντίστοιχη αύξηση της τάσης, αλλά είτε η τάση παραμένει σταθερή είτε βαθμιαία μειώνεται. Η κατάσταση αυτή ονομάζεται **κατάσταση αστοχίας** και αντιστοιχεί στη μέγιστη φόρτιση που μπορεί να αναληφθεί από το υλικό. Η κατάσταση αστοχίας του εδάφους έχει καταστροφικές συνέπειες στα έργα Πολιτικού Μηχανικού, επειδή συνοδεύεται από σημαντικές παραμορφώσεις που υπερβαίνουν τις ανοχές των συνήθων κατασκευών.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι για κάθε (εδαφικό) υλικό υπάρχουν ορισμένοι συνδυασμοί τάσεων που οδηγούν σε απεριόριστες παραμορφώσεις. Οι συνδυασμοί αυτοί ονομάζονται **εντατικές καταστάσεις αστοχίας**. Το σύνολο των εντατικών καταστάσεων αστοχίας σχηματίζει μία "επιφάνεια" που ονομάζεται περιβάλλουσα των καταστάσεων αστοχίας ή, απλά, **περιβάλλουσα αστοχίας**. Είναι προφανές ότι, εφόσον οι καταστάσεις αστοχίας συνδέονται με την παραμόρφωση του εδάφους, πρέπει να εκφράζονται ως προς τις ενεργές τάσεις.

## 2.2 Μη – Γραμμικές σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων



Σχ. 2.1 : Τυπικές μορφές καμπύλων τάσεων – παραμορφώσεων

Εκτεταμένες μετρήσεις της μηχανικής συμπεριφοράς εδαφικών σχηματισμών στο εργαστήριο, αλλά και σε φυσική κλίμακα, αποδεικνύουν ότι η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων των εδαφικών υλικών είναι έντονα μη-γραμμική. Επιπλέον, ένα σημαντικό τμήμα της παραμόρφωσης είναι ανελαστικό, δηλαδή δεν αναιρείται με την αφαίρεση του φορτίου. Τυπικές μορφές των καμπύλων τάσεων-παραμορφώσεων εδαφικών υλικών φαίνονται στο Σχήμα 2.1 και δείχνουν την πολυπλοκότητα της μηχανικής συμπεριφοράς των υλικών αυτών.

Λόγω της πολυπλοκότητας της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών, η επιτυχία γενικών καταστατικών νόμων στην ποσοτική πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους είναι περιορισμένη. Έτσι, η μελέτη της συμπεριφοράς των εδαφών βασίζεται συχνά σε πειραματικές μετρήσεις που γίνονται στο εργαστήριο. Επειδή, όμως, η παραμόρφωση των εδαφών εξαρτάται από το μέγεθος και τον τρόπο της μεταβολής των τάσεων, θα πρέπει να επιβληθούν στο εργαστήριο οι ίδιες μεταβολές τάσεων που εκτιμάται ότι θα επιβληθούν και στη φύση

κατά τη φόρτιση του εδάφους. Η παραπάνω απαίτηση εισάγει πρόσθετες (και πολλές φορές ανυπέρβλητες) δυσκολίες στην ήδη πολύπλοκη μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των εδαφών. Ειδικότερα:

1. Οι μεταβολές των τάσεων που θα επιβληθούν στη φύση, γενικά, δεν είναι γνωστές. Πράγματι, ενώ τα εξωτερικώς επιβεβλημένα φορτία (π.χ. το φορτίο ενός υποστυλώματος) είναι συνήθως γνωστά, οι τάσεις που τα φορτία αυτά προκαλούν σε ένα εδαφικό στοιχείο στο εσωτερικό του εδάφους δεν είναι επακριβώς γνωστές. Ακόμη, όμως, και στην περίπτωση που οι αναπτυσσόμενες τάσεις είναι γνωστές, τα εδαφικά στοιχεία είναι άπειρα και αναγκαστικά θα πρέπει να γίνει επιλογή των εδαφικών στοιχείων που θα δοκιμασθούν στο εργαστήριο.

2. Οι δυνατότητες επιβολής τάσεων στις εργαστηριακές διατάξεις είναι περιορισμένες. Έτσι, είναι πρακτικά αδύνατον να επιβληθούν στο εργαστήριο οι γενικές τριαξονικές εντατικές καταστάσεις που θα συμβούν στη φύση και συνεπώς θα πρέπει να απλουστευθούν ώστε να μπορούν να επιβληθούν από τις διαθέσιμες εργαστηριακές διατάξεις.

3. Αν στα παραπάνω προστεθούν οι δυσκολίες λόγω της ανομοιομορφίας του εδάφους, της διατάραξης των δειγμάτων κατά τη δειγματοληψία και της αδυναμίας, πολλές φορές, λήψης δειγμάτων από τις θέσεις που είναι επιθυμητό, το πρόβλημα της μελέτης των μηχανικών ιδιοτήτων του εδάφους καθίσταται ιδιαίτερα πολύπλοκο.

## 2.3 Διαδρομές των τάσεων (Stress paths)

### Διαγράμματα (s – t)

Σε πολλά προβλήματα είναι επιθυμητό να απεικονίσουμε, σε ένα μόνο διάγραμμα, πολλές διαδοχικές εντατικές καταστάσεις για ένα δοσμένο εδαφικό δοκίμιο. Σε άλλα προβλήματα, πολλές διαδοχικές εντατικές καταστάσεις για περισσότερα από ένα διαφορετικά δοκίμια πρέπει να παρουσιαστούν σε ένα μεμονωμένο διάγραμμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι εξαιρετικά δύσκολο να χαραχθούν οι κύκλοι του Mohr και ακόμα πιο δύσκολο να διακρίνουμε τι απεικονίζουν τα διαγράμματα μετά την χάραξη τους.

Μια εναλλακτική λύση για την απεικόνιση των διαδοχικών καταστάσεων έντασης, είναι η χάραξη ενός μόνο σημείου. Οι συντεταγμένες του σημείου αυτού σε χώρο (s,t) είναι :

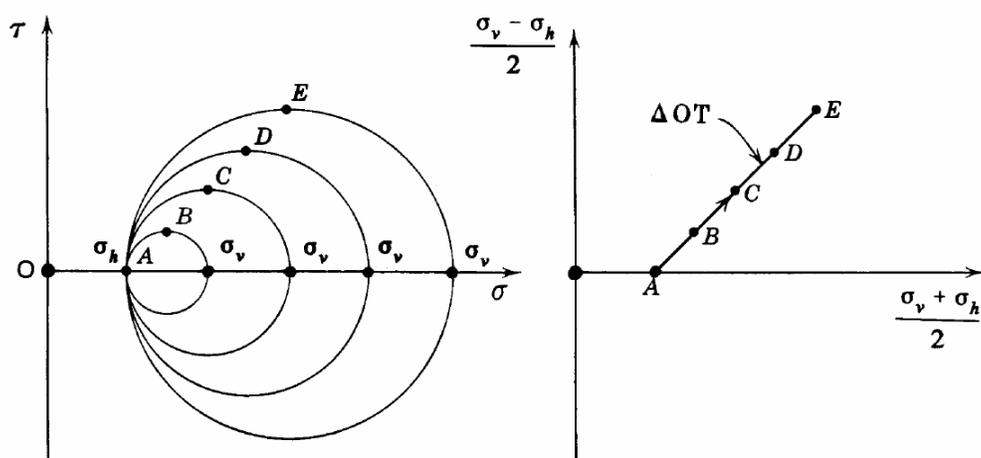
$$s = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2}$$

$$t = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2}$$

Η παράσταση της εντατικής κατάστασης με ένα σημείο είναι ισοδύναμη με την χάραξη ενός σημείου του κύκλου του Mohr : του ανώτερου σημείου αν το t είναι θετικό και του κατώτερου σημείου αν το t είναι αρνητικό. Αριθμητικά το t ισούται με το μισό της αποκλίνουσας τάσης ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) κατά την τριαξονική φόρτιση. Γνωρίζοντας τις τιμές των s και t για κάποια χρονική στιγμή, έχει κανείς όλες τις πληροφορίες που χρειάζεται για την χάραξη του αντίστοιχου κύκλου Mohr. Παρόλα αυτά η χρήση του διαγράμματος (s - t) δεν αντικαθιστά τη χρήση του κύκλου Mohr στον προσδιορισμό των κυρίων τάσεων μιας συγκεκριμένης εντατικής κατάστασης.

### Η έννοια της Διαδρομής των Τάσεων

Ένας γραφικός τρόπος για την περιγραφή της αλληλουχίας των επιβεβλημένων τάσεων είναι η διαδρομή των τάσεων. Η απεικόνιση του σημείου που προαναφέρθηκε παριστάνει την κατάσταση των ολικών τάσεων του εδαφικού στοιχείου ή την αντίστοιχη κατάσταση των ενεργών τάσεων. Αν οι τάσεις που ασκούνται στο εδαφικό στοιχείο μεταβληθούν, τότε το σημείο μετακινείται διαγράφοντας μια τροχιά (διαδρομή) που περιγράφει την αλληλουχία των εντατικών καταστάσεων στις οποίες υποβάλλεται το εδαφικό στοιχείο μεταξύ της αρχικής και της τελικής εντατικής κατάστασης. Η διαδρομή που διαγράφεται από το σημείο των ολικών τάσεων ονομάζεται **διαδρομή ολικών τάσεων (ΔΟΤ)**, ενώ η διαδρομή που διαγράφεται από το σημείο των ενεργών τάσεων ονομάζεται **διαδρομή ενεργών τάσεων (ΔΕΤ)**. Το Σχήμα 2.2 παριστάνει μια τυπική διαδρομή ολικών τάσεων που ξεκινάει από την κατάσταση  $\sigma_v = \sigma_h$ . Αυτή είναι μια συνηθισμένη αρχική κατάσταση σε πολλές εργαστηριακές δοκιμές συμπεριλαμβανομένης και της τριαξονικής φόρτισης. Από αυτή την αρχική κατάσταση είτε μεταβάλλουμε ισόποσα το  $\sigma_v$  και το  $\sigma_h$ , είτε μεταβάλλουμε την μια κύρια τάση ενώ κρατάμε σταθερή την άλλη. Εννοείται πως και άλλες διαδρομές τάσεων είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν.



Σχ. 2.2 : Διαδρομή ολικών τάσεων

## 2.4 Η Διατμητική αντοχή στα κοκκώδη εδαφικά υλικά

Τα εξωτερικώς επιβαλλόμενα φορτία αναλαμβάνονται από τον εδαφικό σκελετό με την ανάπτυξη ορθών και διατμητικών δυνάμεων μεταξύ των κόκκων και οδηγούν σε παραμορφώσεις που κυρίως οφείλονται σε ολισθήσεις και κυλίσεις μεταξύ των κόκκων. Είναι προφανές ότι η τριβή μεταξύ των κόκκων επηρεάζει σημαντικά την παραμόρφωση των εδαφικών υλικών. Στα αμμώδη εδαφικά υλικά η τριβή αποτελεί τον κύριο παράγοντα παραμορφώσεων.

Ο θεμελιώδης νόμος της μηχανικής τριβής καθορίζει ότι για κάθε τιμή της ορθής δύναμης (N) ορίζεται η **διατμητική αντοχή ( $T_u$ )** της επαφής μεταξύ των κόκκων από τη σχέση:

$$T_u = N \cdot \tan\phi_\mu$$

έτσι ώστε, αν η πραγματική διατμητική δύναμη (T) είναι μικρότερη από τη διατμητική αντοχή ( $T_u$ ), η επαφή μεταξύ των κόκκων είναι ευσταθής, ενώ, αν  $T = T_u$ , παρατηρείται ολίσθηση μεταξύ των κόκκων (υπέρβαση της διατμητικής αντοχής) και αναδιάταξή τους σε μία νέα δομή στην οποία η διατμητική δύναμη είναι μικρότερη από τη διατμητική αντοχή. Ο συντελεστής ( $\tan\phi_\mu$ ) είναι σταθερά, χαρακτηριστική του υλικού των κόκκων, η οποία εξαρτάται από τον τύπο και την ομαλότητα της επιφάνειας επαφής μεταξύ των κόκκων αλλά και τη διάταξή τους και η γωνία  $\phi_\mu$  ονομάζεται **πραγματική γωνία διατμητικής αντοχής του υλικού των κόκκων**.

Εάν η εξωτερικώς επιβεβλημένη δύναμη είναι αρκετά μεγάλη, τότε κάποιες από τις διατμητικές δυνάμεις μεταξύ των κόκκων θα υπερβούν τη διατμητική αντοχή της επαφής μεταξύ των κόκκων. Κατά συνέπεια, το ποσοστό των επαφών μεταξύ των κόκκων στις οποίες η διατμητική δύναμη υπερβαίνει τη διατμητική αντοχή της επαφής αυξάνει, όσο αυξάνει ο λόγος T/N. Με την αύξηση του λόγου T/N, το ποσοστό των επαφών των κόκκων που

ολισθαίνουν αυξάνει και η παραμόρφωση του εδάφους μακροσκοπικά παρουσιάζει μία ισότροπη συνιστώσα (συμπίεση) και μία διατμητική συνιστώσα (στρέβλωση), η συμμετοχή της οποίας διαρκώς αυξάνεται. Τελικά, για κάποια τιμή του λόγου  $T/N$  ολισθαίνει ένα σημαντικό ποσοστό των επαφών μεταξύ των κόκκων, ώστε η μακροσκοπική παραμόρφωση του υλικού να εμφανίζεται σαν μια γενικευμένη ολίσθηση (απεριόριστη διατμητική παραμόρφωση). Στην κατάσταση αυτή το δοκίμιο δεν μπορεί να αναλάβει μεγαλύτερη διατμητική δύναμη, έχει δηλαδή αστοχήσει μακροσκοπικά. Η εξωτερικώς επιβεβλημένη διατμητική δύναμη ( $T_u$ ) στην κατάσταση αστοχίας ονομάζεται **διατμητική αντοχή του υλικού** και εξαρτάται από την ορθή δύναμη ( $N$ ). Πειραματικές μετρήσεις δείχνουν ότι ο λόγος  $T_u/N$  κατά την αστοχία είναι σταθερός και μπορεί να γραφεί με τη μορφή:

$$T_u = N \cdot \tan\phi$$

όπου η γωνία  $\phi$  ονομάζεται (μακροσκοπική) **γωνία διατμητικής αντοχής του εδαφικού υλικού**. Η γωνία διατμητικής αντοχής εξαρτάται και από την πραγματική γωνία τριβής του υλικού των κόκκων ( $\phi_\mu$ ) αλλά και από την επιτόπου κατάσταση του υλικού.

## 2.5 Νόμοι αστοχίας στα κοκκώδη εδαφικά υλικά (Mohr – Coulomb Failure Law)

Στα κοκκώδη εδάφη η αστοχία συμβαίνει με γενικευμένη ολίσθηση μεταξύ των κόκκων και μακροσκοπικά εμφανίζεται σαν σχετική ολίσθηση (κίνηση) σε κάποιο επίπεδο, το οποίο ονομάζεται επίπεδο αστοχίας. Εάν ( $\sigma'$ ) είναι η ενεργός ορθή τάση στο επίπεδο αστοχίας και ( $\tau$ ) η αντίστοιχη διατμητική τάση, μπορεί να γραφεί ο ακόλουθος **νόμος αστοχίας (νόμος Coulomb)**, που καθορίζει τους κρίσιμους συνδυασμούς αστοχίας των ενεργών τάσεων :

$$\tau = \sigma' \cdot \tan \phi$$

όπου  $\phi$  είναι η γωνία διατμητικής αντοχής του εδαφικού υλικού. Αν σε κάποιο επίπεδο του εδαφικού στοιχείου ισχύει ο νόμος Coulomb, το εδαφικό στοιχείο αστοχεί και μάλιστα η αστοχία (γενικευμένη ολίσθηση) συμβαίνει στο επίπεδο αυτό.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι, κατά το νόμο του Coulomb για τα κοκκώδη εδάφη, το έδαφος δεν αστοχεί κατά μήκος του επιπέδου στο οποίο αναπτύσσεται η μέγιστη διατμητική τάση (όπως ίσως θα αναμενόταν) αλλά κατά μήκος ενός επιπέδου στο οποίο ο λόγος της διατμητικής τάσης ( $\tau$ ) προς την ορθή τάση ( $\sigma'$ ) έχει μια ορισμένη τιμή (είναι ίσος με  $\tan \phi$ ). Μία άλλη συνέπεια του νόμου του Coulomb για τα κοκκώδη εδάφη είναι ότι η διατμητική τους αντοχή μηδενίζεται όταν μηδενισθεί η ορθή τάση. Κατά τη ρευστοποίηση των κοκκωδών εδαφών οι ενεργές τάσεις μηδενίζονται οπότε μηδενίζεται και η διατμητική τους αντοχή και συνεπώς τα ρευστοποιημένα εδάφη συμπεριφέρονται σαν ρευστά (δεν μπορούν να αναλάβουν διατμητικές τάσεις).

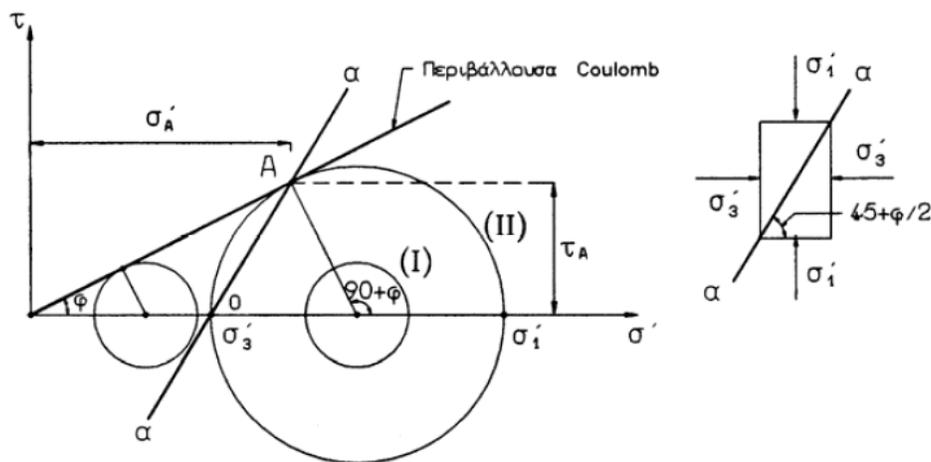
Η γραφική παράσταση του νόμου αστοχίας του Coulomb φαίνεται στο Σχήμα 2.3, είναι ευθεία με κλίση ( $\phi$ ) και ονομάζεται **περιβάλλουσα Coulomb** ή περιβάλλουσα αστοχίας. Όταν ο κύκλος Mohr που παριστάνει την εντατική κατάσταση σε ένα σημείο του εδάφους εφάπτεται στην περιβάλλουσα αστοχίας (όπως ο κύκλος II), τότε η εντατική κατάσταση στο σημείο αυτό

είναι κατάσταση αστοχίας. Πράγματι, το επίπεδο που αντιστοιχεί στο σημείο A του κύκλου Mohr έχει ορθές ( $\sigma'_A$ ) και διατμητικές τάσεις ( $\tau_A$ ) τέτοιες ώστε να ικανοποιούν το νόμο αστοχίας του Coulomb. Η διατμητική τάση ( $\tau_A$ ) στο επίπεδο αστοχίας κατά την αστοχία του εδαφικού στοιχείου ονομάζεται διατμητική αντοχή στο επίπεδο αστοχίας. Γενικότερα, η περιβάλλουσα Coulomb έχει τις εξής ιδιότητες:

1. Όταν η εντατική κατάσταση σε ένα σημείο του εδάφους (εδαφικό στοιχείο) παριστάνεται με κύκλο Mohr που δεν τέμνει την περιβάλλουσα αστοχίας (όπως π.χ. ο κύκλος I), τότε η κατάσταση του εδαφικού στοιχείου είναι ευσταθής.

2. Όταν η εντατική κατάσταση σε ένα σημείο του εδάφους παριστάνεται με κύκλο Mohr που εφάπτεται στην περιβάλλουσα αστοχίας (όπως ο κύκλος II), τότε το εδαφικό στοιχείο αστοχεί και μάλιστα η ολίσθηση συμβαίνει κατά μήκος ενός επιπέδου ( $\alpha\alpha$ ) που παριστάνεται στον κύκλο Mohr με το σημείο (A), το σημείο επαφής του κύκλου με την περιβάλλουσα αστοχίας.

3. Εντατική κατάσταση κατά την οποία ο κύκλος Mohr τέμνει την περιβάλλουσα είναι ανέφικτη, επειδή αντιστοιχεί σε διατμητικές τάσεις μεγαλύτερες από τη διατμητική αντοχή του εδάφους στα επίπεδα που παριστάνονται με σημεία του κύκλου Mohr πάνω από την περιβάλλουσα.

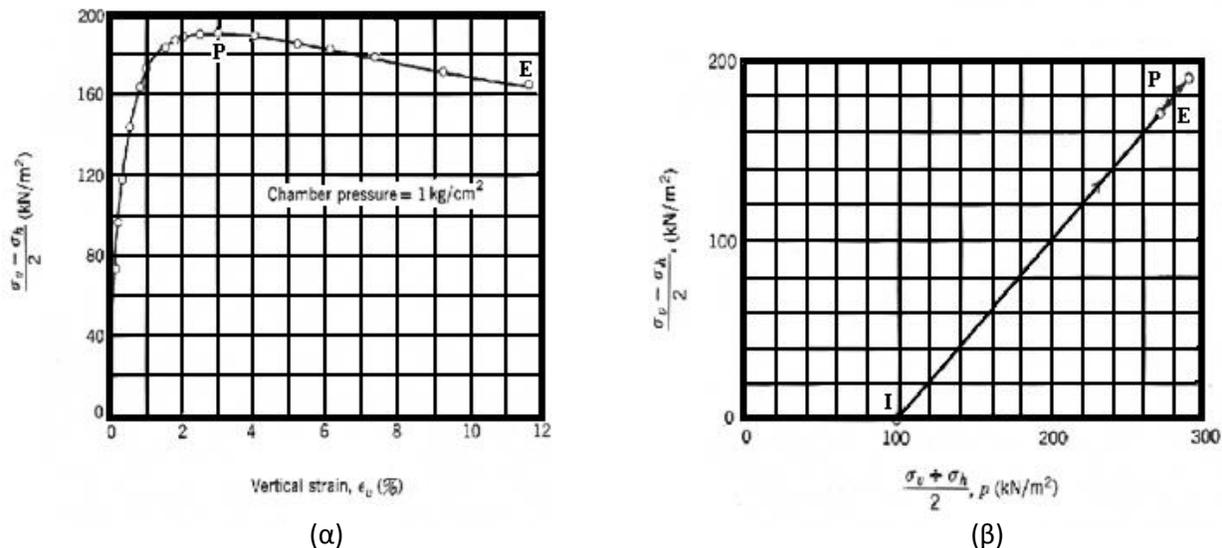


Σχ. 2.3 : Περιβάλλουσα αστοχίας Coulomb σε άμμους

## 2.6 Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων κατά την διάρκεια της τριαξονικής δοκιμής

Στο Σχήμα 2.4α παριστάνεται ένα σύνολο δεδομένων από μια τριαξονική δοκιμή σε άμμο. Η γραφική παράσταση του σχήματος είναι συνάρτηση της αξονικής παραμόρφωσης ( $\epsilon\%$ ) με το μισό της αποκλίνουσας τάσης ( $q/2$ ). Η αντίστοιχη διαδρομή των ολικών τάσεων παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4β σε διάγραμμα ( $s-t$ ). Σε αυτό το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης η μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται για παραμόρφωση της τάξης του 3%. Στη συνέχεια η αντίσταση του εδάφους μειώνεται σταδιακά και το πείραμα διακόπτεται αυθαίρετα όταν η παραμόρφωση φτάσει το 11.6%. Για περεταίρω ανάλυση της σχέσης τάσεων – παραμορφώσεων είναι χρήσιμο να περιγραφούν τρία στάδια κατά την διαδικασία της παραμόρφωσης :

1. Ένα αρχικό στάδιο κατά τη διάρκεια του οποίου οι παραμορφώσεις είναι πολύ μικρές. Για το δοκίμιο του Σχήματος 2.4α αυτό το στάδιο εκτείνεται μέχρι το σημείο όπου η παραμόρφωση αγγίζει το 1/4%.
2. Το στάδιο που ξεκινάει όταν το δοκίμιο αρχίζει να υποχωρεί και που περιλαμβάνει την αιχμή της καμπύλης καθώς επίσης και την βαθμιαία μείωση της αντοχής μετά την αιχμή. Για το συγκεκριμένο δοκίμιο το στάδιο αυτό εκτείνεται από το 1/4% παραμόρφωση μέχρι το τέλος του πειράματος.
3. Τέλος το στάδιο κατά την διάρκεια του οποίου η αντίσταση του δοκιμίου παραμένει σταθερή με περεταίρω παραμόρφωση. Το στάδιο αυτό ονομάζεται «κρίσιμη κατάσταση» και δεν εμφανίζεται πάντα όπως για παράδειγμα στο Σχήμα 2.4α.



Σχ. 2.4 : α) Καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης β) Διαδρομή ολικών τάσεων

### 1. Συμπεριφορά κατά τη διάρκεια του αρχικού σταδίου

Κατά τη διάρκεια του αρχικού σταδίου ο όγκος του δοκιμίου μειώνεται. Αυτή είναι ακριβώς η συμπεριφορά που αναμένεται όταν οι θλιπτικές τάσεις αυξάνονται. Σε αυτό το στάδιο οι κόκκοι του εδαφικού υλικού συμπιέζονται για να δημιουργήσουν μια πιο πυκνή δομή. Σε γενικές γραμμές αυτή είναι η συμπεριφορά που παρατηρείται και κατά τη διάρκεια της ισότροπης θλίψης.

### 2. Συμπεριφορά κοντά και πάνω στην αιχμή

Σε αυτό το στάδιο το εδαφικό δοκίμιο αστοχεί. Η αποκλίνουσα τάση στο σημείο της αιχμής της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης ονομάζεται θλιπτική αντοχή του εδάφους και η τιμή του  $q$  στην αιχμή σχετίζεται με την διατμητική αντοχή του εδάφους. Η συμπεριφορά του δοκιμίου σε αυτό το στάδιο είναι διαφορετική από ότι στο αρχικό και μπορεί να εξηγηθεί μελετώντας την μετακίνηση των κόκκων καθώς αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Όπως προαναφέρθηκε, στο αρχικό στάδιο το εδαφικό υλικό συμπιέζεται και δημιουργεί μια πιο

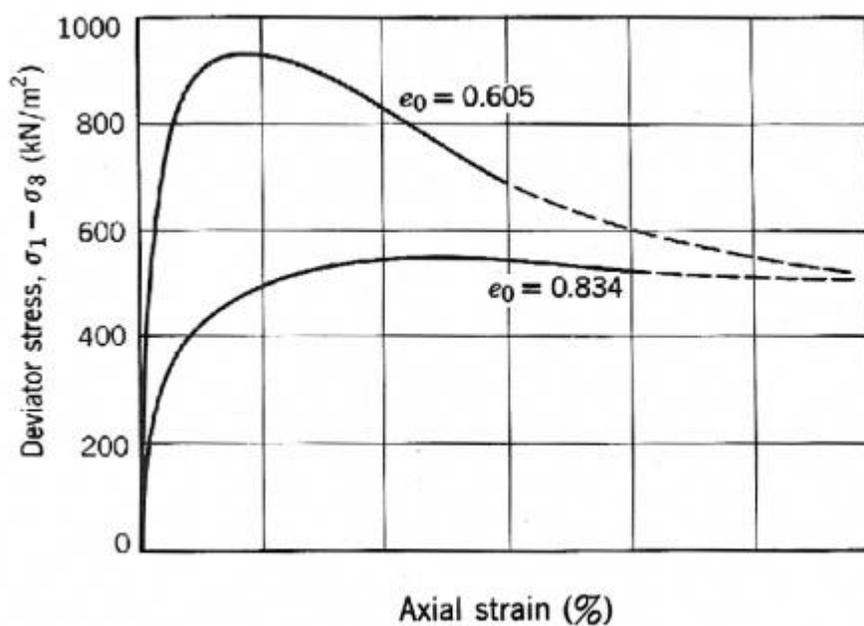
πυκνή δομή. Όταν αυτή η δομή συνεχίσει να δέχεται κατακόρυφη τάση, οι παραμορφώσεις μπορούν να συνεχιστούν μόνο αν κάποιοι κόκκοι μετατοπιστούν πλευρικά. Αυτός ο μηχανισμός πρέπει να συνοδευτεί με ανάλογη αύξηση του όγκου της διάταξης. Είναι αξιοσημείωτο, ότι μια γενικά πυκνή άμμος, όταν συμπιέζεται προς μια κατεύθυνση, οδηγεί σε ταυτόχρονη αύξηση του όγκου της. Το γεγονός αυτό παρατηρήθηκε και διερευνήθηκε πρώτα από τον *Osbourne Reynolds* το 1885. Για αυτό το φαινόμενο αύξησης του όγκου ο *Reynolds* χρησιμοποίησε τον όρο «διόγκωση».

Η μελέτη των κόκκων του εδαφικού υλικού μπορεί να δώσει απαντήσεις και για τις συνθήκες που επικρατούν στην αιχμή της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης και να εξηγήσει τη μείωση της αντοχής μετά την αιχμή (*Rowe, 1962*). Παρόλα αυτά η συμπεριφορά του δοκιμίου σε αυτή τη φάση γίνεται πιο κατανοητή αναλύοντας την έννοια της αλληλοεμπλοκής των κόκκων (*interlocking*).

Οι κόκκοι του εδάφους βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους και τα επίπεδα ανάμεσα στα σημεία επαφής παρεκκλίνουν σε σχέση με την οριζόντιο. Για να προκύψει αστοχία κατά την διάτμηση είναι απαραίτητο όχι μόνο να υπερνικηθεί η αντίσταση της τριβής  $T$ , αλλά επίσης να μετακινηθούν οι κόκκοι έτσι ώστε να βρεθεί ο ένας πάνω από τον άλλον. Συνεπώς η διατμητική αντοχή ενός εδαφικού υλικού εξαρτάται από δύο παράγοντες : α) από τη γωνία τριβής  $\phi$  του εκάστοτε υλικού και β) από τη γωνία εμπλοκής. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία αυτή, τόσο μεγαλύτερη είναι και η διατμητική αντοχή του εδαφικού υλικού. Βέβαια όσο προχωράει η διάτμηση του εδαφικού υλικού η γωνία εμπλοκής μειώνεται, με αποτέλεσμα να έχουμε αντίστοιχη μείωση της αποκλίνουσας τάσης που ευθύνεται για τον μηχανισμό της διάτμησης.

Αν οι προηγούμενες υποθέσεις όσον αφορά τη διόγκωση και την εμπλοκή είναι σωστές, τότε ο αρχικός δείκτης πόρων ( $e$ ) πρέπει να έχει τεράστια επιρροή στις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης κατά την τριαξονική φόρτιση. Τα αποτελέσματα του Σχήματος 2.5 το

αποδεικνύουν. Για το πυκνό δοκίμιο άμμου ( $e_0 = 0,605$ ), η απεικόνιση της κατακόρυφης τάσης συναρτήσει της αξονικής παραμόρφωσης δείχνει μια έντονη αιχμή και μείωση της τάσης μετά την αιχμή. Από την άλλη πλευρά, η αντίστοιχη απεικόνιση για το χαλαρό δοκίμιο ( $e_0 = 0,834$ ) δεν παρουσιάζει αιχμή και δείχνει ότι μετά την αστοχία (η αποκλίνουσα τάση γίνεται ίση με την θλιπτική αντοχή του εδαφικού υλικού) η αποκλίνουσα τάση παραμένει σταθερή καθώς η αξονική παραμόρφωση συνεχίζεται.



Σχ. 2.5 : Καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων χαλαρού και πυκνού δοκιμίου άμμου

### 3. Κρίσιμη κατάσταση

Στο στάδιο αυτό, η εμπλοκή (interlocking) μεταξύ των κόκκων του εδαφικού υλικού έχει μειωθεί σε σημείο ώστε η παραμόρφωση μπορεί να συνεχίζεται χωρίς περαιτέρω αλλαγή στον όγκο του δοκιμίου. Ο δείκτης πόρων σε αυτό το στάδιο είναι ανεξάρτητος από τον αρχικό δείκτη πόρων πριν την έναρξη της διαδικασίας της διάτμησης και η εντατική κατάσταση του δοκιμίου χαρακτηρίζεται ως «κρίσιμη».

## 2.7 Συμπεριφορά κατά την τριαξονική δοκιμή (Συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης)

### Αξονική φόρτιση

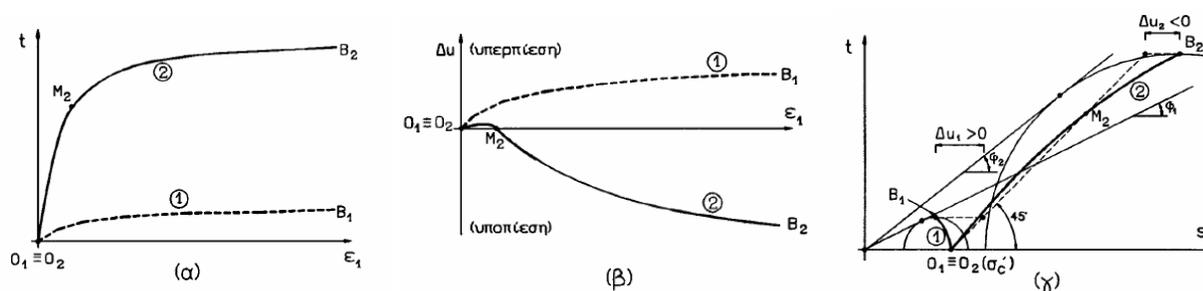
Στην κλασική τριαξονική δοκιμή, το εδαφικό δοκίμιο αστοχεί αυξάνοντας την αξονική τάση καθώς διατηρείται σταθερή η πλευρική τάση. Η αξονική τάση ασκείται στο έμβολο φόρτισης είτε μέσω βαριδιών ποικίλου βάρους (load controlled test), είτε μέσω μηχανικής ή υδραυλικής πρέσας φόρτισης (strain controlled test). Όταν εξετάζουμε ξηρά εδάφη η ταχύτητα φόρτισης καθορίζεται μόνο από τον χρόνο που χρειάζεται για να παρατηρηθούν και να καταγραφούν τα αποτελέσματα. Συνήθως χρειάζονται 5 – 30 λεπτά από τη στιγμή που επιβάλλεται το αξονικό φορτίο μέχρι το δοκίμιο να φτάσει στην μέγιστη τιμή της αντοχής του.

### Τριαξονική φόρτιση χαλαρής και πυκνής άμμου

Κατά την αστράγγιστη κυλινδρική τριαξονική φόρτιση, η βαλβίδα στράγγισης του δοκιμίου είναι κλειστή, οπότε ο όγκος του δοκιμίου δεν μεταβάλλεται ( $\Delta \epsilon_{vol} = 0$ ). Συνεπώς, αν το δοκίμιο (υπό στραγγιζόμενες συνθήκες) έχει τάση για μείωση του όγκου, κατά τη φόρτιση υπό αστράγγιστες συνθήκες θα αναπτυχθούν υπερπίεσεις πόρων επειδή παρεμποδίζεται η μείωση του όγκου. Κατ' επέκταση, αν η φόρτιση ενός δοκιμίου υπό στραγγιζόμενες συνθήκες προκαλεί αύξηση του όγκου (διαστολικότητα), θα προκαλέσει συγχρόνως και την ανάπτυξη υποπιέσεων πόρων, δηλαδή τη μείωση της πίεσης πόρων του δοκιμίου.

Για την περίπτωση της αστράγγιστης φόρτισης των κοκκωδών εδαφών, το Σχήμα 2.6 παρουσιάζει τα διαγράμματα κυλινδρικής τριαξονικής φόρτισης μιας χαλαρής άμμου (1) και μιας πυκνής άμμου (2) μετά από ισότροπη στερεοποίηση στην ίδια τάση ( $\sigma'_c$ ). Το Σχήμα 2.6β παρουσιάζει τις μεταβολές της πίεσης πόρων στα δύο δοκίμια. Η χαλαρή άμμος (που έχει τάση

για μείωση του όγκου) αναπτύσσει υπερπιέσεις πόρων, ενώ η πυκνή άμμος (που έχει τάση για αύξηση του όγκου) αναπτύσσει υποπιέσεις πόρων. Στο Σχήμα 2.6γ παρουσιάζονται και οι διαδρομές ενεργών τάσεων. Η ΔΕΤ της χαλαρής άμμου κινείται προς τα αριστερά και ο κύκλος αστοχίας εφάπτεται στην περιβάλλουσα με γωνία διατμητικής αντοχής ( $\phi_1$ ). Αντίθετα, η ΔΕΤ της πυκνής άμμου κινείται προς τα δεξιά και ο κύκλος αστοχίας εφάπτεται στην περιβάλλουσα με γωνία διατμητικής αντοχής ( $\phi_2$ ). Τέλος στην περίπτωση της αστράγγιστης φόρτισης της πυκνής άμμου, η διατμητική τάση μετά την αστοχία δεν μειώνεται (Σχήμα 2.6α), πράγμα το οποίο έχει παρατηρηθεί κατά τη φόρτιση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Η διαφορά αυτή εξηγείται, επειδή κατά τη φόρτιση υπό στραγγιζόμενες συνθήκες ο δείκτης πόρων της πυκνής άμμου αυξάνει, οπότε η δομή της γίνεται χαλαρότερη και η γωνία διατμητικής αντοχής μειώνεται. Αντίθετα, κατά την αστράγγιστη φόρτιση ο δείκτης πόρων παραμένει σταθερός και συνεπώς, η γωνία διατμητικής αντοχής δεν μεταβάλλεται.

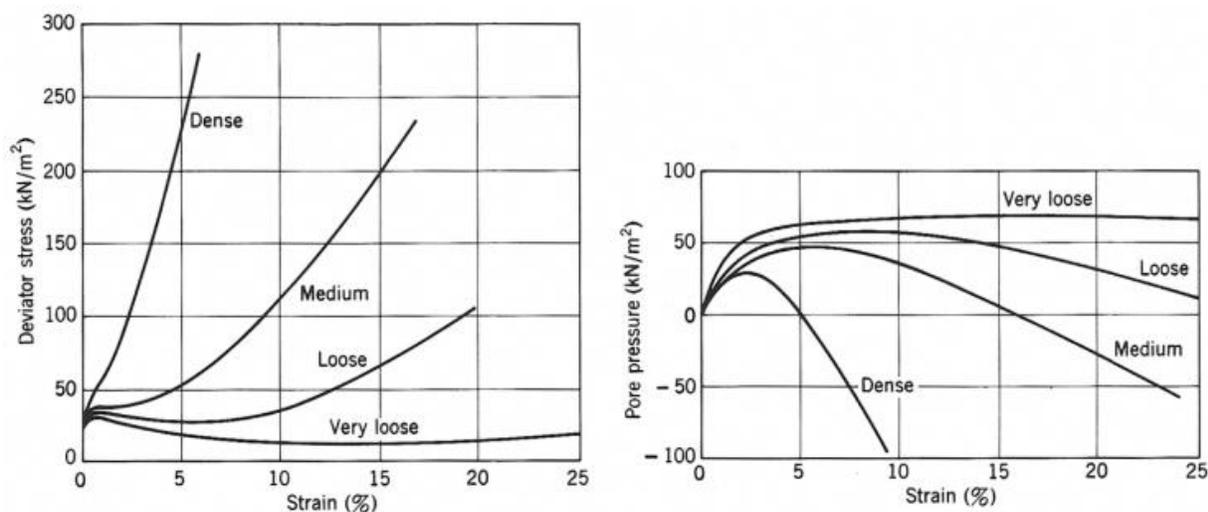


Σχ. 2.6 : Αστράγγιστη τριαξονική φόρτιση – Κοκκώδη εδάφη (Άμμοι)

### Η επιρροή του αρχικού δείκτη πόρων

Η ενέργεια που μεταφέρεται στο έδαφος από τα εξωτερικώς επιβαλλόμενα φορτία απορροφάται με δυο τρόπους : με την υπερνίκηση της αντίστασης τριβής μεταξύ των σημείων επαφής των κόκκων και με την διόγκωση του εδαφικού υλικού ανάλογα με την πλευρική τάση. Όσο πιο πυκνή είναι η άμμος, τόσο μεγαλύτερη είναι η διόγκωση που αναμένεται κατά την διάτμηση του δοκιμίου. Συνεπώς χρειάζεται περισσότερη ενέργεια να δαπανηθεί για την αστοχία του. Στο Σχήμα 2.7 φαίνεται η επίδραση του δείκτη πόρων στην αστράγγιστη διατμητική αντοχή μιας άμμου.

Έστω ότι διεξάγεται μια τριαξονική δοκιμή και κατά την διάρκεια της φόρτισης ο όγκος του δοκιμίου παραμένει σταθερός. Η πλευρική τάση είναι ρυθμισμένη ώστε να συμβαίνει αυτό. Αν η άμμος είναι πυκνή, είναι απαραίτητο να αυξηθεί η πλευρική τάση κατά μια υπολογίσιμη ποσότητα. Αυτό φυσικά σημαίνει ότι ένα πυκνό δοκίμιο το οποίο διατηρείται υπό σταθερό όγκο, μπορεί να δεχτεί πολύ μεγαλύτερη αξονική φόρτιση από ένα αντίστοιχο δοκίμιο το οποίο παραμένει υπό σταθερή πλευρική τάση και αστοχεί κατά τη διάρκεια της διάτμησης. Αν ένα πολύ χαλαρό δοκίμιο διατηρείται υπό σταθερό όγκο, μπορεί να χρειαστεί να μειωθεί η πλευρική τάση όσο το πείραμα προχωράει και κατά συνέπεια να μειωθεί η θλιπτική του αντοχή.



Σχ. 2.7 : Αξονική παραμόρφωση σε συνάρτηση με την αποκλίνουσα τάση και την υπερπίεση πόρων για διάφορες τιμές του αρχικού δείκτη πόρων

### Η επιρροή της πλευρικής τάσης ( $\sigma_3$ )

Μια σειρά από τριαξονικές δοκιμές αποδεικνύει την επιρροή της πλευρικής τάσης στην αντοχή του εδαφικού υλικού. Οι δοκιμές περιλαμβάνουν τα εξής βήματα : (α) τη δημιουργία δύο ή περισσότερων κυλινδρικών δοκιμών από το ίδιο εδαφικό υλικό και με τον ίδιο αρχικό δείκτη πόρων, (β) την τοποθέτηση των δοκιμών στην τριαξονική κυψέλη και την υποβολή κάθε δοκιμίου σε διαφορετική πλευρική τάση και (γ) την αξονική φόρτιση κάθε δοκιμίου, καταγράφοντας τις συνακόλουθες διατμητικές παραμορφώσεις και ογκομετρικές αλλαγές. Τα αποτελέσματα των δοκιμών οδηγούν στα εξής συμπεράσματα :

Καταρχήν τα κοκκώδη εδάφη έχουν χαρακτηριστική τραχύτητα. Η αντίσταση στην ολίσθηση σε κάθε σημείο επαφής είναι ανάλογη με την ορθή τάση στην επαφή και γι' αυτό το λόγο η ολική αντίσταση αυξάνεται όσο αυξάνεται η πλευρική τάση.

Δεύτερον, το φαινόμενο της εμπλοκής συμβάλλει στην συνολική αντίσταση. Η φύση και η σπουδαιότητα του φαινομένου συζητήθηκαν προηγουμένως (Παράγραφος 2.6). Η εμπλοκή μεταξύ των κόκκων μειώνεται όσο αυξάνεται η πλευρική τάση, επειδή οι κόκκοι γίνονται επίπεδοι στα σημεία επαφής, οι μυτερές γωνίες θρυμματίζονται και κάποιοι από αυτούς σπάνε. Παρόλο που αυτοί οι μηχανισμοί οδηγούν το δοκίμιο σε μια πιο πυκνή δομή, δημιουργούν παράλληλα τις συνθήκες ώστε οι διατμητικές παραμορφώσεις να επέλθουν ευκολότερα.

Συνεπώς τα κοκκώδη εδάφη είναι υλικά στα οποία η τριβή παίζει καθοριστικό ρόλο, αλλά η συμπεριφορά τους δεν εξαρτάται αποκλειστικά από αυτή, εξαιτίας της επίδρασης της πλευρικής τάσης στο μέγεθος της εμπλοκής (interlocking) μεταξύ των κόκκων.

Σε επόμενο κεφάλαιο θα γίνει διεξοδική αναφορά στην επιρροή του αρχικού δείκτη πόρων και στην επιρροή της πλευρικής τάσης του δοκιμίου με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

---

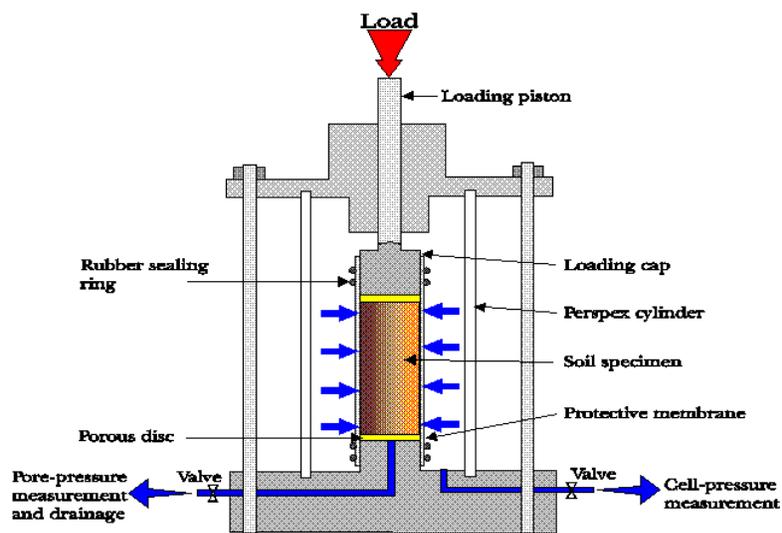
ΣΥΣΚΕΥΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

### 3. ΣΥΣΚΕΥΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

#### 3.1 Εισαγωγή

Η εκτέλεση πειραμάτων στο εργαστήριο αποτελεί το συνηθέστερο τρόπο μελέτης της απόκρισης ενός εδαφικού δοκιμίου στις μεταβολές των φορτίσεων και των παραμορφώσεων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν σε συνδυασμό με επιτόπου δοκιμές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση της συμπεριφοράς των εδαφών κατά τη διάρκεια κατασκευής και λειτουργίας γεωτεχνικών έργων.

Η τριαξονική δοκιμή είναι μια από τις πιο συχνές δοκιμές στο εργαστήριο καθώς και μια από τις πιο αξιόπιστες και χρήσιμες εργαστηριακές δοκιμές για την κατανόηση των χαρακτηριστικών του εδάφους. Είναι πιο αξιόπιστη από τη δοκιμή ανεμπόδιστης θλίψης και τη δοκιμή απευθείας διάτμησης και είναι ικανή να μας δώσει χρήσιμες πληροφορίες για τις τιμές τάσεων-παραμορφώσεων του εδάφους καθώς και για την αντοχή του. Προσδιορίζοντας τις διάφορες εδαφικές παραμέτρους, μπορεί να επιτευχθεί η προσομοίωση του εδάφους με τη χρήση αναλυτικών μοντέλων.



Σχ. 3.1 : Τομή τριαξονικής συσκευής

### 3.2 Εφαρμογές της τριαξονικής δοκιμής

Με την τριαξονική συσκευή μπορούμε να επιβάλλουμε αξονοσυμμετρική εντατική κατάσταση στο δοκίμιο ελέγχοντας τις κύριες τάσεις του όπως επίσης και να μεταβάλλουμε τις συνθήκες στράγγισης και την πίεση του νερού των πόρων στο εσωτερικό του. Με αυτόν τον τρόπο είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε τις τιμές τάσεων-παραμορφώσεων, καθώς και να ελέγξουμε την αντοχή εδαφικών κυλινδρικών δοκιμίων.

Η τριαξονική συσκευή μας δίνει τη δυνατότητα να προσομοιώσουμε στο εργαστήριο διάφορες εντατικές καταστάσεις που επιβάλλονται στο εδαφικό στοιχείο στο πεδίο όπως για παράδειγμα την εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται πίσω από τοίχο αντιστήριξης (παρουσιάζεται ελάττωση πλευρικής πίεσης) ή μπροστά από πλάκα αγκύρωσης (παρουσιάζεται αύξηση πλευρικής πίεσης). Επιπρόσθετα παρέχει τη δυνατότητα επιλογής θλιπτικού ή εφελκυστικού πεδίου τάσεων, όταν η μέγιστη κύρια τάση είναι κατακόρυφη και όταν η μέγιστη κύρια τάση είναι οριζόντια αντίστοιχα. Αντιθέτως στην τριαξονική συσκευή δεν καθίσταται δυνατή η προσομοίωση της γενικευμένης περίπτωσης μιας εντατικής κατάστασης όταν οι κύριες τάσεις εφαρμόζονται σε διαφορετικά επίπεδα από το κατακόρυφο και το οριζόντιο.

### 3.3 Περιγραφή της τριαξονικής δοκιμής

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη της τριαξονικής συσκευής καθώς και η περιγραφή εκτέλεσης μιας τυπικής δοκιμής. Το κυλινδρικό εδαφικό δοκίμιο περιβάλλεται από αδιαπέραστη ελαστική μεμβράνη. Στο άνω και κάτω άκρο του δοκιμίου τοποθετούνται πορώδεις δίσκοι (πορόλιθοι) ,οι οποίοι επιτρέπουν μεν την διαφυγή του νερού από τους πόρους του εδαφικού δοκιμίου αλλά όχι και των στερεών κόκκων, και συνδέονται με το σύστημα στράγγισης του δοκιμίου. Η αξονική τάση επιβάλλεται στο δοκίμιο μέσω του κατακόρυφου εμβόλου φόρτισης. Τα άκρα της συσκευής είναι άκαμπτα ώστε να επιβάλλουν ένα ομοιόμορφο πεδίο παραμορφώσεων. Ακόμη υπάρχει αγωγός που συνδέει τον πωρόλιθο της βάσης του δοκιμίου, διαμέσου της βάσης της κυψέλης, με τον εξωτερικό χώρο και καλείται αγωγός στράγγισης του δοκιμίου. Συνδέοντάς τον με σύστημα επιβολής πίεσης και μέτρησης της ποσότητας του νερού που εισέρχεται ή εξέρχεται του δοκιμίου μπορούμε να ελέγχουμε την πίεση των πόρων αλλά και την μεταβολή του όγκου του δοκιμίου κάθε στιγμή.

Οι τάσεις στο οριζόντιο επίπεδο  $\sigma_2 = \sigma_3$  είναι ίσες με την πίεση που επικρατεί εντός της κυψέλης την οποία μετράμε με τον μετρητή πίεσης που φαίνεται στο σχήμα. Γι' αυτό και η τριαξονική δοκιμή χαρακτηρίζεται ως αξονοσυμμετρική. Για να μπορεί να είναι και η εντατική κατάσταση του δοκιμίου ομοιόμορφη και αξονοσυμμετρική πρέπει να ισχύουν οι παρακάτω προϋποθέσεις. Έτσι λοιπόν πρέπει το δοκίμιο να είναι κατακόρυφο, το αξονικό φορτίο να εφαρμόζεται κεντρικά και αργά, η τριβή μεταξύ του δοκιμίου και των πορόλιθων να είναι όσο το δυνατόν περιορισμένη και οι κύριοι άξονες ανισοτροπίας του δείγματος να είναι παράλληλοι με τους άξονες του δοκιμίου.

Χρησιμοποιώντας κατάλληλους αισθητήρες που προσαρτώνται πάνω στο δοκίμιο (ινκλινόμετρα) και συγκεκριμένα στερεώνονται πάνω στη μεμβράνη, μπορούμε να μετρήσουμε τόσο τη σχετική μετακίνηση των άκαμπτων άκρων του όσο και του ίδιου του δοκιμίου και να προσδιορίσουμε επακριβώς τις παραμορφώσεις που δέχεται. Οι

συγκεκριμένοι αισθητήρες είναι απαραίτητοι για τον υπολογισμό πολύ μικρών παραμορφώσεων του δοκιμίου στην εκκίνηση της διάτμησης όταν αυτό αρχίζει να παραλαμβάνει τις πρώτες παραμορφώσεις. Ακόμη μας δίνουν την δυνατότητα εντοπισμού διαφορικών μετακινήσεων που μπορεί να υπάρξουν μεταξύ των απέναντι παρειών του δοκιμίου εξ' αιτίας ατελειών του και επιφέρουν την έκκεντρη φόρτισή του. Τέτοιες ατέλειες είναι η ανομοιομορφία του εδαφικού δοκιμίου καθώς επίσης η κλίση που μπορεί να έχει λάβει ο άξονας του δοκιμίου σε σχέση με την κατακόρυφο ή η άνω παρειά του σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.

Όταν οι βαλβίδες στράγγισης παραμένουν ανοιχτές κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της δοκιμής τότε η τριαξονική δοκιμή πραγματοποιείται υπό στραγγιζόμενες συνθήκες. Καταυτόν τον τρόπο το νερό των πόρων του δοκιμίου έχει τη δυνατότητα να μετακινηθεί από το δοκίμιο προς το σύστημα στράγγισης, όπου υπάρχει και όργανο μέτρησης του διακινούμενου νερού, η αντίστροφα από το σύστημα προς το δοκίμιο. Κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης μετακίνησης η πίεση πόρων του δοκιμίου παραμένει σταθερή σε προκαθορισμένη τιμή. Αναλυτικότερα, αν κατά τη φόρτιση του δοκιμίου το εδαφικό υλικό τείνει να συμπιεσθεί εφόσον το δοκίμιο είναι κορεσμένο, ο όγκος του θα μειωθεί και το νερό των πόρων του θα διαφύγει στον εξωτερικό χώρο μέσω του αγωγού στράγγισης. Αντίθετα αν το εδαφικό υλικό τείνει να διογκωθεί, ο όγκος του δοκιμίου θα αυξηθεί και το δοκίμιο θα απορροφήσει νερό από τον εξωτερικό χώρο μέσω του αγωγού στράγγισης. Η ταχύτητα με την οποία επιβάλλεται η φόρτιση θα πρέπει να είναι αρκετά μικρή ώστε να προλαβαίνουν να εκτονώνονται οι υπερπίεσεις πόρων που τείνουν να αναπτυχθούν κατά τη διάρκεια μεταβολής του όγκου.

Αντιθέτως αν κλείσουμε τις βαλβίδες στράγγισης τότε δεν επιτρέπεται η μετακίνηση του νερού των πόρων του δοκιμίου, το δοκίμιο φορτίζεται υπό σταθερό όγκο και η δοκιμή πραγματοποιείται υπό αστράγγιστες συνθήκες. Σ' αυτή την περίπτωση οι ολικές και ενεργές τάσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι διαφορετικές ( $\sigma' = \sigma - \Delta u$ ). Αν το δοκίμιο έχει την τάση να συμπιεστεί και να μειώσει τον όγκο του, τότε αναπτύσσονται θετικές υπερπίεσεις

πόρων και οι ενεργές τάσεις μειώνονται ( $\Delta\sigma' < 0$ ). Αντιθέτως αν το δοκίμιο έχει την τάση να διογκωθεί αναπτύσσονται υποπιέσεις πόρων και οι ενεργές τάσεις αυξάνονται ( $\Delta\sigma' > 0$ ). Επίσης η ταχύτητα της αξονικής παραμόρφωσης στην αστράγγιστη φόρτιση πρέπει να είναι αρκετά μικρή ώστε η κατανομή των υπερπιέσεων πόρων να είναι ομοιόμορφη. Τέλος ο αγωγός στράγγισης συνδέεται με σύστημα καταγραφής της υδατικής πίεσης (pore pressure transducer-ηλεκτρική κυψέλη), το οποίο μετρά τη μεταβαλλόμενη υδατική πίεση στο εσωτερικό του δοκιμίου.

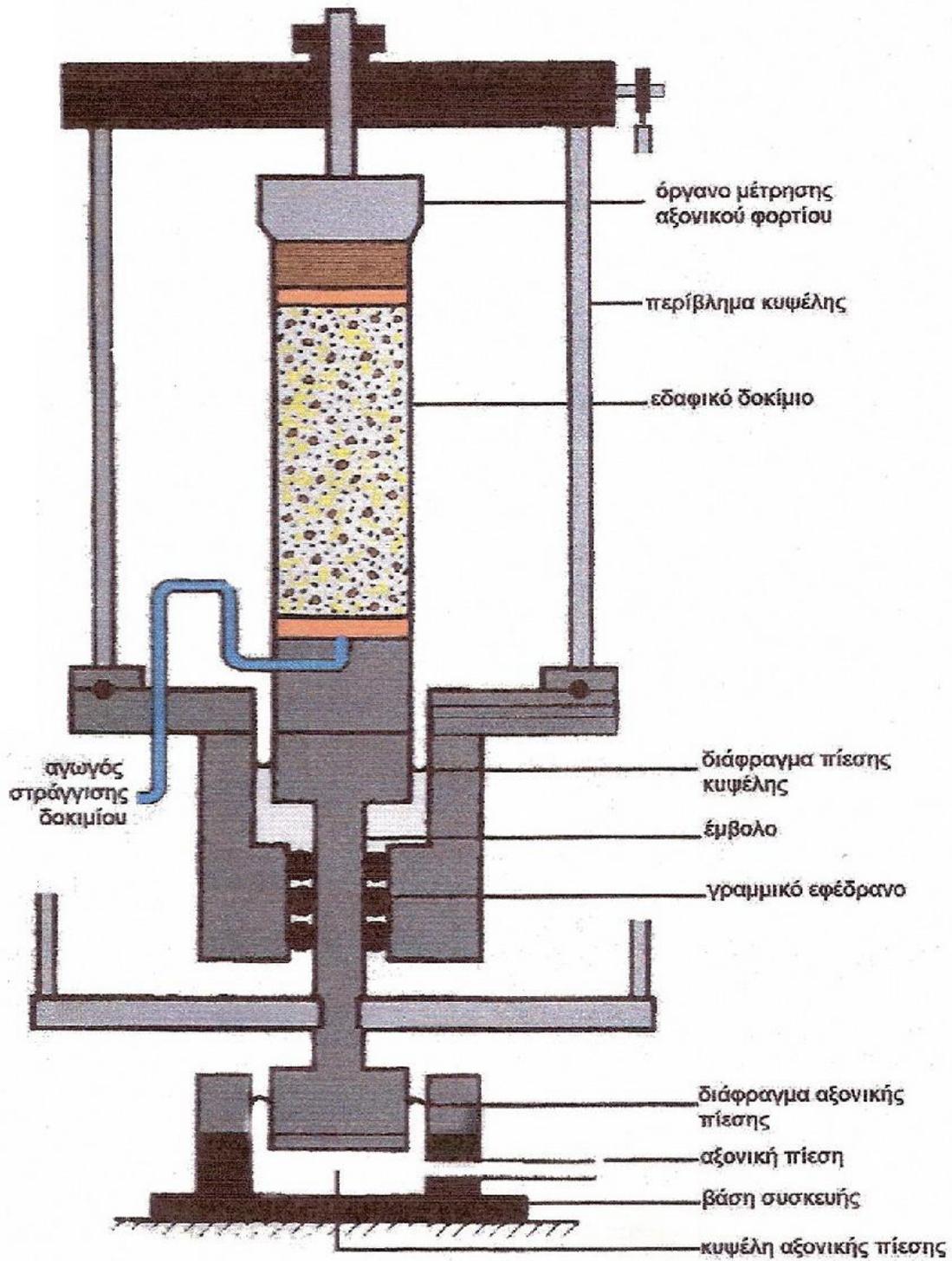
Σε μια τριαξονική δοκιμή το εδαφικό υλικό του δοκιμίου, πριν την επιβολή του αξονικού φορτίου μπορεί να είναι στερεοποιημένο ή μη στερεοποιημένο. Κατά τη διάρκεια της φάσης της στερεοποίησης οι τάσεις αυξάνονται σταδιακά μέχρι να φτάσουν σε τέτοιο επίπεδο ώστε να αναπαριστούν τις τάσεις που επιβάλλονται στο δοκίμιο αν αυτό βρισκόταν στο φυσικό περιβάλλον. Η στερεοποίηση του δοκιμίου μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε ισότροπα ( $\sigma_1 = \sigma_3$ ) είτε ανισότροπα ( $K_0 = \sigma'_3 / \sigma'_1$ ).

Ανάλογα με τις συνθήκες που υπάρχουν στη φάση της στερεοποίησης και στη φάση της φόρτισης, οι τριαξονικές δοκιμές χωρίζονται σε αντίστοιχες κατηγορίες και χαρακτηρίζονται από δυο λατινικούς χαρακτήρες. Ο πρώτος από τους δύο αφορά τη στερεοποίηση ή μη του δοκιμίου και αντίστοιχα χρησιμοποιούνται οι χαρακτήρες C ή U (consolidated ή unconsolidated). Ο δεύτερος χαρακτήρας αναφέρεται στον τρόπο φόρτισης και πιο συγκεκριμένα αν η δοκιμή γίνεται υπό στραγγισμένες συνθήκες χρησιμοποιείται ο χαρακτήρας D (drained), ενώ αν η δοκιμή γίνεται υπό αστράγγιστες συνθήκες χρησιμοποιείται U (undrained).

Η τριαξονική συσκευή Bishop&Wesley (1975) μας δίνει τη δυνατότητα να επιβάλλουμε πλήθος διαδρομών τάσεων. Δυο είναι οι τρόποι με τους οποίους μπορούμε να διεξάγουμε μια τριαξονική δοκιμή. Κατά τον πρώτο τρόπο επιβάλλουμε το αξονικό φορτίο στο δοκίμιο με μετακίνηση δεδομένου, σταθερού ρυθμού του κάτω άκρου του δοκιμίου. Έτσι γίνεται έλεγχος

της επιβαλλόμενης παραμόρφωσης και καταγράφουμε την αναπτυσσόμενη αξονική τάση  $\sigma_1$  (strain control). Κατά το δεύτερο τρόπο επιβάλλουμε απευθείας την επιθυμητή μεταβολή ή το ρυθμό μεταβολής της αξονικής τάσης  $\sigma_1$  και καταγράφουμε την αντίστοιχη πραγματοποιούμενη αξονική παραμόρφωση (stress control).

Η επιβολή των τάσεων και των παραμορφώσεων που περιγράφηκε παραπάνω επιτυγχάνεται μέσω της κυψέλης αξονικής πίεσης που βρίσκεται στη βάση έδρασης του δοκιμίου. Όταν η πίεση σε αυτή υπερβεί την πίεση της κυψέλης των πλευρικών τάσεων, του βάρους του δοκιμίου και της βάσης του, τότε το δοκίμιο μαζί με τη βάση έδρασης ανυψώνεται. Στην οροφή της κυψέλης υπάρχει αναρτημένο κατακόρυφο σταθερό έμβολο που μόλις έρθει σε επαφή με το δοκίμιο δέχεται αξονική δύναμη που μετράται από τον αισθητήρα του εμβόλου. Κατά την αύξηση της πίεσης στην κυψέλη αξονικών τάσεων αντιστοίχως αυξάνεται και η επιβαλλόμενη αξονική δύναμη στο δοκίμιο, το οποίο από μια τιμή της αξονικής τάσης και μετά παραμορφώνεται. Η παραμόρφωση αυτή του δοκιμίου μετράται από τα μηκυνσιόμετρα (inclinometers) που είναι προσαρτημένα πάνω στη μεμβράνη του δοκιμίου και από τον εξωτερικό αισθητήρα που μετρά τη μετατόπιση της βάσης έδρασης του δοκιμίου.



Σχ. 3.2 : Τυπική διάταξη τριαξονικής συσκευής

### 3.4 Μετρήσεις κατά την τριαξονική δοκιμή

Η πραγματοποίηση μιας τριαξονικής δοκιμής και οι αντίστοιχες μετρήσεις κατά τη διάρκειά της έχουν σαν αποτέλεσμα την εξαγωγή των παρακάτω διαγραμμάτων:

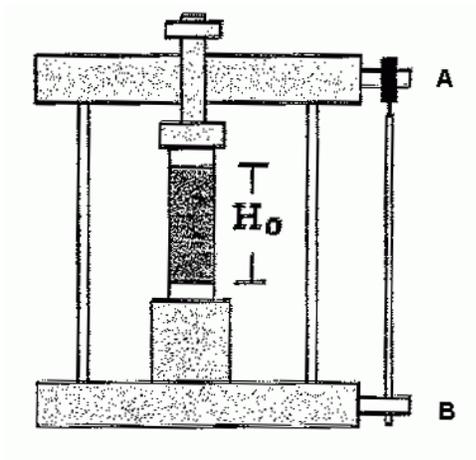
- Διατμητική (αποκλίνουσα) τάση ( $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ) ως προς την αξονική παραμόρφωση  $\epsilon$ .
- Υπερπίεση πόρων ( $\Delta u$ ) ως προς την αξονική παραμόρφωση  $\epsilon$ , για την περίπτωση της αστράγγιστης φόρτισης, ή ογκομετρική παραμόρφωση ( $\Delta \epsilon_{vol}$ ) ως προς την αξονική παραμόρφωση  $\epsilon$  για την περίπτωση της φόρτισης με επιτρεπόμενη στράγγιση του δοκιμίου.
- Διάγραμμα τάσεων  $q = \sigma_1 - \sigma_3$  ως προς  $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$  το οποίο μας δίνει μια σχηματική περιγραφή της διαδρομής των τάσεων που ακολούθησε το δοκίμιο κατά τη διάτμησή του.

Η σωστή καταγραφή ακόμα και των μικρότερων μετακινήσεων είναι απαραίτητη επειδή ένα μικρό λάθος σε μια τέτοια μέτρηση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποεκτίμηση της ακαμψίας του εδάφους (Γεωργιάννου, Ειδ. Θέματα Γεωτεχνικής). Γι' αυτό το λόγο τα μηκυσιόμετρα (inclinometers) που χρησιμοποιούμε για την καταγραφή χρησιμοποιούν ηλεκτρολυτικό αισθητήρα. Ο ηλεκτρολυτικός αισθητήρας αποτελείται από γυάλινη κάψα και ηλεκτρολυτικό υγρό. Η κάψα κατασκευάζεται με ειδική τεχνική σε κενό αέρος. Τρία ανεξάρτητα ηλεκτρόδια τοποθετούνται μέσα στην κάψα και καλύπτονται μερικώς από ηλεκτρολυτικό υγρό. Η αντίσταση μεταξύ του μεσαίου ηλεκτροδίου και των ακραίων είναι ανάλογη με την κλίση της κάψας. Η αρχή λειτουργίας του μηκυσιόμετρου βασίζεται στην μετατροπή της μεταβολής του ύψους του δοκιμίου σε μεταβολή κλίσης της κάψας με το ηλεκτρολυτικό υγρό.

### 3.5 Μέτρηση εδαφικής δυσστησίας (ακαμψίας)

Η εδαφική δυσστησία  $E_u = \Delta q / \epsilon$  (όπου  $\Delta q$  είναι η μεταβολή της διαφοράς των κυρίων τάσεων  $q$ , και  $\epsilon$  είναι η τιμή της αξονικής παραμόρφωσης που αντιστοιχεί σε αυτή τη μεταβολή), υπό αστράγγιστες συνθήκες, μπορεί να προσδιοριστεί με τη χρήση της τριαξονικής συσκευής. Τα πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων είναι έντονα μη γραμμικές για ευρύ φάσμα εδαφικών υλικών. (π.χ. σκληρά προφορτισμένα εδάφη ή μαλακοί βράχοι). Οι εργαστηριακές δοκιμές δείχνουν ότι η ακαμψία αυτών των εδαφικών υλικών μειώνεται σημαντικά (τουλάχιστον κατά 10 φορές) στην περιοχή των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται στις πρακτικές εφαρμογές. Η έντονα μη γραμμική απόκριση του εδάφους επηρεάζει τελικά και την επιλογή της κατάλληλης δοκιμής. Τα εργαστηριακά πειράματα στα οποία οι τάσεις και οι παραμορφώσεις κατανέμονται ομοιόμορφα στο εδαφικό υλικό είναι οι μόνες δοκιμές που μπορούν να προσδιορίσουν τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά των εδαφικών υλικών.

Οι παραμορφώσεις του δοκιμίου που μας οδηγούν και στον υπολογισμό της ακαμψίας του προσδιορίζονται με τη βοήθεια των οργάνων μέτρησης που βρίσκονται είτε μέσα είτε έξω από την τριαξονική κυψέλη. Συνήθως μετράται η μεταβολή του μήκους του δοκιμίου, έξω από την τριαξονική κυψέλη, με τη χρήση μετρητή της σχετικής μετακίνησης των άκαμπτων άκρων του δοκιμίου όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 3.3 : Μέτρηση αξονικής παραμόρφωσης έξω από την τριαξονική κυψέλη

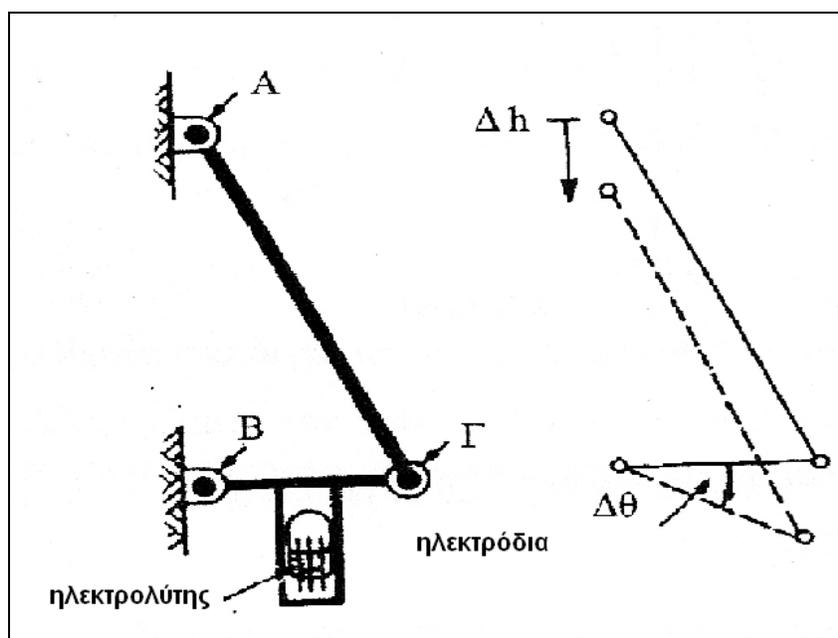
Η ακρίβεια αυτών των μετρήσεων είναι περιορισμένη λόγω των ακόλουθων προβλημάτων:

- Μεταβολή της απόστασης AB λόγω παραμορφωσιμότητας της συσκευής π.χ. συμπίεση της μονάδας μέτρησης φορτίου, της κυψέλης, του υλικού των άκρων του δοκιμίου, του εμβόλου κ.λπ.
- Κλίση του δοκιμίου
- Ατελής επαφή δοκιμίου και άκρων
- Ανομοιόμορφη κατανομή παραμορφώσεων λόγω των συνοριακών συνθηκών που επιβάλλουν τα άκαμπτα και τραχέα άκρα
- Δημιουργία επιφάνειας αστοχίας στο δοκίμιο.

Για τους ανωτέρω λόγους είναι βασικό να μετράται η παραμόρφωση μέσα στην κυψέλη, επί του δοκιμίου και στο κεντρικό τμήμα του το οποίο είναι σχετικά απαλλαγμένο από την επιρροή των άκρων. Ο όρος επί του δοκιμίου εξ' ορισμού αναφέρεται στην τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης σε ένα συγκεκριμένο μήκος του δοκιμίου με στόχο τον περιορισμό των ανωτέρω λαθών κατά την μέτρηση της παραμόρφωσής του.

### Εργαστηριακή μέτρηση της εδαφικής δυστημσίας

Η ακριβής μέτρηση της εδαφικής δυστημσίας προϋποθέτει λεπτομέρεια στη μέτρηση των παραμορφώσεων. Αρχικά μικροσκοπικοί μετρητές μετακίνησης χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της σχετικής μετακίνησης μεταξύ δύο σημείων αναφοράς επί του δοκιμίου (Costa Filho & Vaughan, 1980). Οι Burland & Symes, 1982 και Jardine et al, 1984, πέτυχαν τη μέτρηση αξονικής παραμόρφωσης δοκιμίων για εύρος μεταξύ  $10^{-3}$  % και 10%. Οι μετρητές χρησιμοποιούν ηλεκτρολυτικό αισθητήρα. Η αρχή λειτουργίας των οργάνων αυτών βασίζεται στη μετατροπή της μεταβολής του ύψους  $\Delta h$  σε μεταβολή κλίσης  $\Delta \theta$  όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Με τα όργανα αυτά επιτυγχάνεται διακριτότητα της τάξης του  $1\mu\text{m}$  για μετακίνηση έως και 15mm.



Σχ. 3.4 : Αρχή λειτουργίας ηλεκτρολυτικού αισθητήρα (Burland & Symes, 1982)

Στα τέλη της δεκαετίας του 90 (Clayton et al, 1989), κατασκευάστηκε ένα όργανο που βασίζει τη λειτουργία του στη χρήση ημιαγωγών και μαγνητικού πεδίου. Όταν ο ημιαγωγός, τον οποίο διαπερνά ηλεκτρικό ρεύμα, τοποθετηθεί σε μαγνητικό πεδίο δημιουργείται διαφορά δυναμικού η οποία μεταβάλλεται γραμμικά με την ένταση του μαγνητικού πεδίου. Το 1962, οι Bishop & Henkel σχεδίασαν έναν δακτύλιο για τη μέτρηση της ακτινικής παραμόρφωσης του δοκιμίου. Αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία (Goto et al, 1991) μετρητής τοπικών παραμορφώσεων ο οποίος καλύπτει εύρος παραμορφώσεων από  $10^{-4}\%$  έως 1%. Η λειτουργία του βασίζεται στη χρήση τεσσάρων μετρητών παραμόρφωσης, δύο σε κάθε πλευρά του δοκιμίου, οι οποίοι επικολλώνται στο κέντρο μιας μεταλλικής λωρίδας η οποία τοποθετείται σε μόνιμες υποδοχές. Ο μετρητής υπολογίζει τη μεταβολή της απόστασης μεταξύ των υποδοχών, όταν το δοκίμιο παραμορφώνεται.

Ας σημειωθεί ότι, ενώ συμβατικά η παραμόρφωση του δοκιμίου ορίζεται σαν  $\varepsilon_z = \Delta H/H_0$  όπου  $\Delta H$  είναι μετακίνηση που μετράται με τον μετρητή έξω από την κυψέλη και  $H_0$  είναι το αρχικό ύψος του δοκιμίου, η επί του δοκιμίου μετρούμενη παραμόρφωση ορίζεται σαν  $\varepsilon'_z = \Delta H'/H'_0$  όπου  $\Delta H'$  είναι η τοπικά μετρούμενη μετακίνηση και  $H'_0$  είναι το αρχικό μήκος του οργάνου που τοποθετείται στο δοκίμιο.

### 3.6 Υπολογισμοί και εξαγόμενα διαγράμματα

Η αξονική παραμόρφωση του εδαφικού δοκιμίου  $\epsilon$  δίνεται από την σχέση:

$$\epsilon = \Delta H / H_0$$

- $H_0$  = Αρχικό ύψος του εδαφικού δοκιμίου
- $\Delta H$  = Μεταβολή του ύψους του δοκιμίου

Η αποκλίνουσα τάση  $q = \sigma_1 - \sigma_3$  είναι ίση με τη διαφορά της μέγιστης και της ελάχιστης κύριας τάσης, όπου οι κύριες τάσεις μπορεί να είναι είτε οι ολικές  $\sigma_1, \sigma_3$  είτε οι ενεργές  $\sigma'_1, \sigma'_3$ .

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_1 - \sigma'_3 = P/A$$

- $P$  = Αξονικό φορτίο που εξασκεί το έμβολο φόρτισης
- $A$  = Διατομή του δοκιμίου στο αντίστοιχο αξονικό φορτίο

Η διατομή  $A$  του εδαφικού δοκιμίου αλλάζει κατά τη διάρκεια του πειράματος σύμφωνα με τη σχέση:

$$A = (V_0 - \Delta V) / (H_0 - \Delta H) A_0$$

- $V_0$  = Αρχικός όγκος του δοκιμίου
- $\Delta V$  = Μεταβολή του όγκου κατά τη διάρκεια της δοκιμής
- $H_0$  = Αρχικό ύψος του δοκιμίου
- $\Delta H$  = Μεταβολή του ύψους κατά τη διάρκεια της δοκιμής

Στην αστράγγιστη τριαξονική δοκιμή ο όγκος παραμένει σταθερός και η διατομή του εδαφικού δοκιμίου μεταβάλλεται σε συνάρτηση μόνο με την μεταβολή του ύψους του δοκιμίου.

Συνεπώς η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$A = V_0 / (H_0 - \Delta H) A_0$$

Σε μια δοκιμή με ελεύθερη στράγγιση η υπερπίεση του νερού των πόρων είναι ίση με μηδέν και ο λόγος  $\sigma'_1 / \sigma'_3$  υπολογίζεται από τις σχέσεις :

$$\sigma'_1 / \sigma'_3 = [(P/A) + \sigma'_3] / \sigma'_3 = [(P/A) + \sigma_c] / \sigma_c$$

- $\sigma_c$  = Πίεση κυψέλης

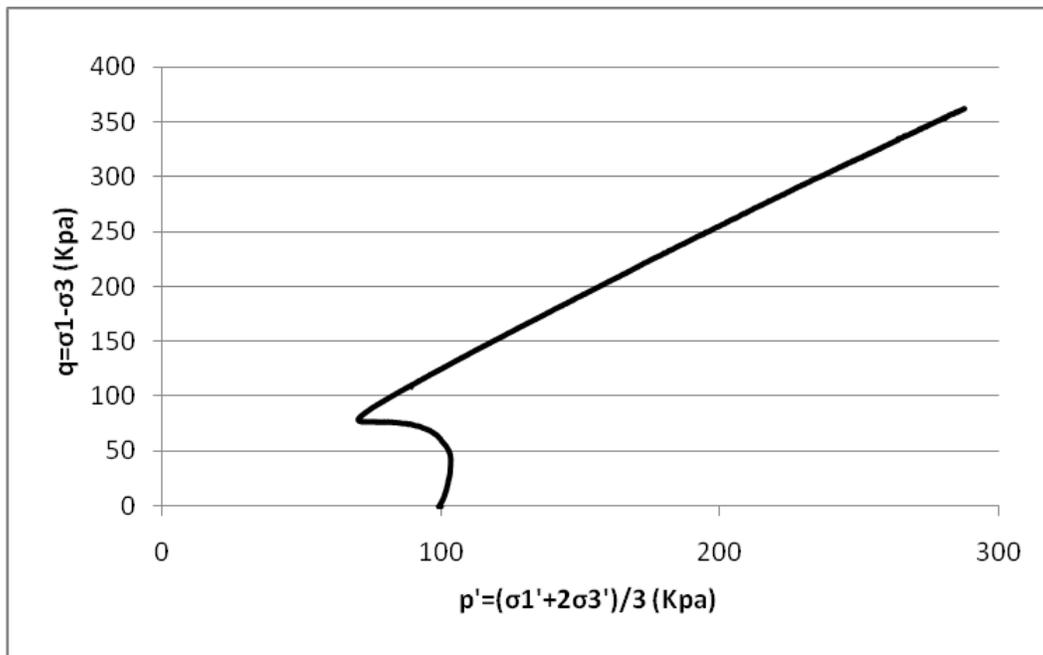
Σε μια αστράγγιστη δοκιμή η υπερπίεση του νερού των πόρων είναι διάφορη του μηδενός και ο λόγος  $\sigma'_1 / \sigma'_3$  υπολογίζεται από τις σχέσεις :

$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u = \sigma_c - u$$

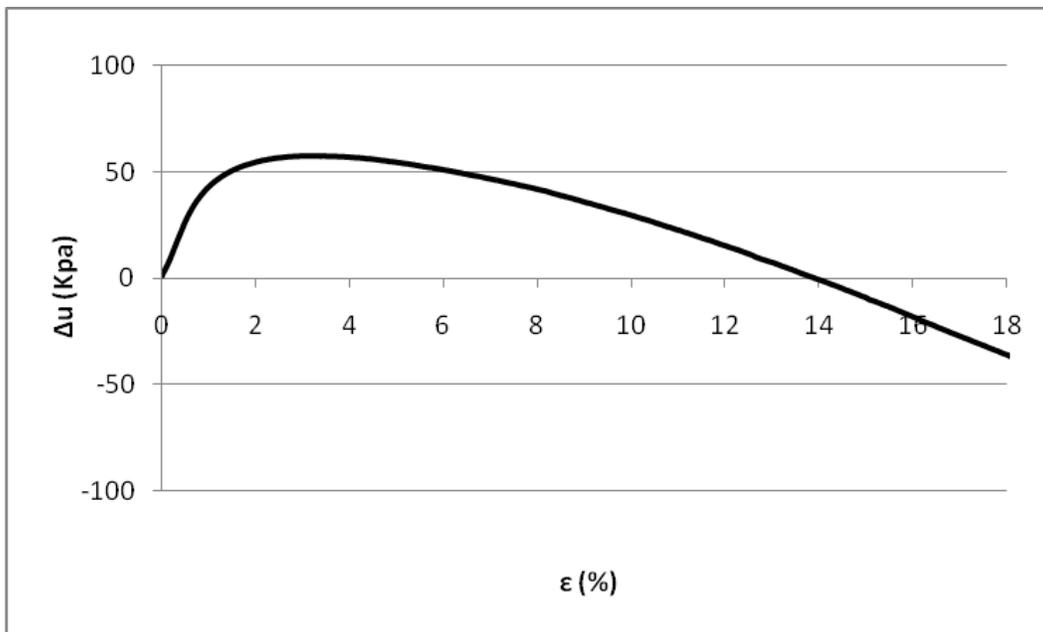
$$\sigma'_1 = (\sigma_1 - \sigma_3) + \sigma'_3 = (P/A) + \sigma'_3$$

- $u$  = Πίεση του νερού των πόρων

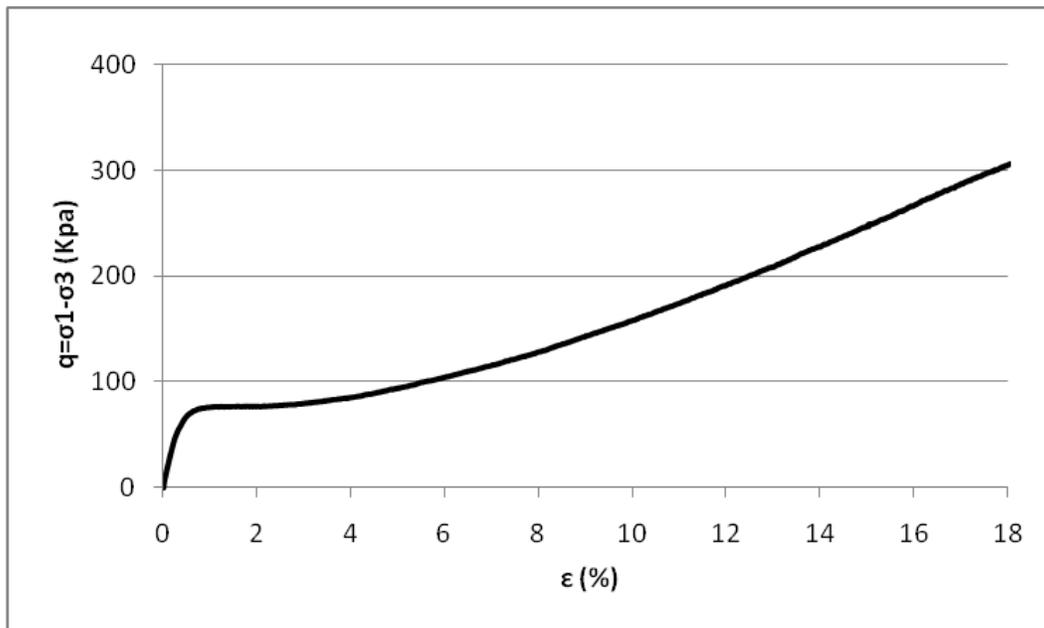
Τα διαγράμματα που κατασκευάζουμε ύστερα από την εκτέλεση μιας τριαξονικής δοκιμής και χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των διαφόρων συμπερασμάτων είναι τα ακόλουθα:



Σχ. 3.5 : Διαδρομή των ενεργών τάσεων σε συντεταγμένες ( $p', q'$ )



Σχ. 3.6 : Μεταβολή της υπερπίεσης των πόρων σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση

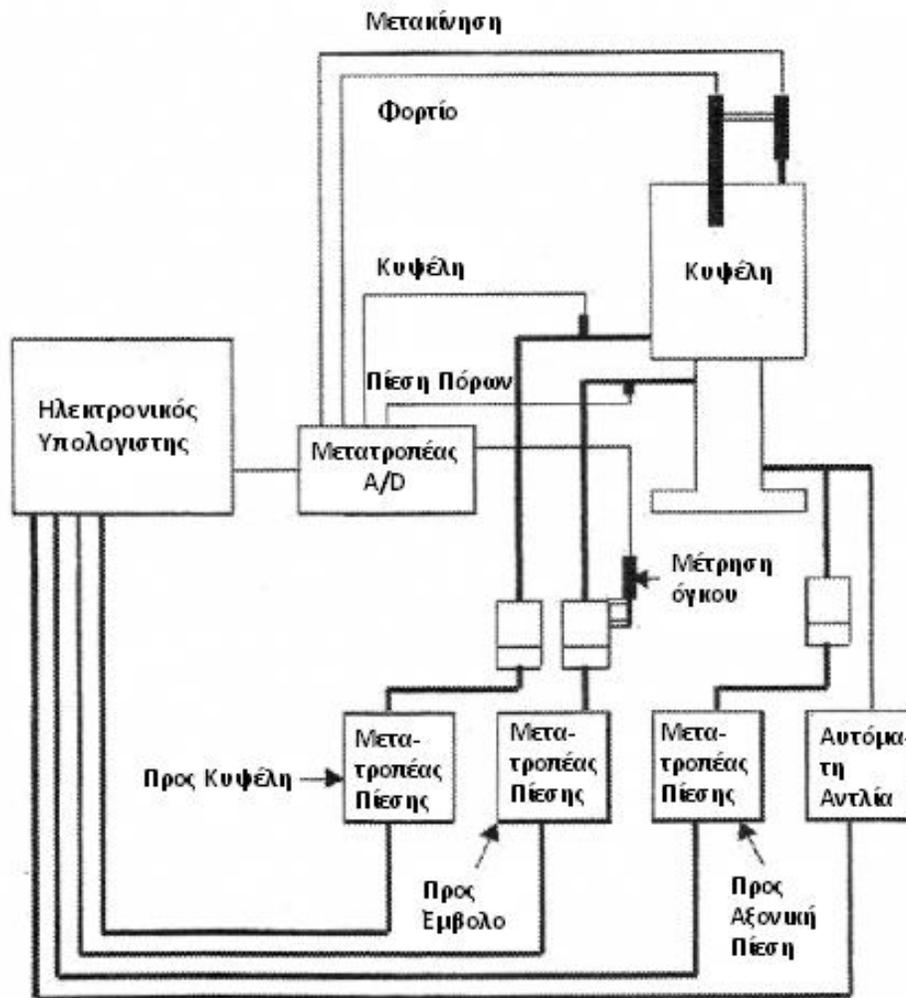


Σχ. 3.7 : Μεταβολή της αποκλίνουσας τάσης σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση

### 3.7 Καταγραφικό σύστημα

Η τριαξονική συσκευή είναι μονίμως συνδεδεμένη με ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη χρήση του οποίου και με τη βοήθεια κατάλληλου υπολογιστικού προγράμματος μπορούμε οποιαδήποτε στιγμή να ελέγξουμε πλήρως τις πιέσεις στην κυψέλη, τις πιέσεις των πόρων αλλά και να καταγράψουμε σε ηλεκτρονική μορφή τις μετρήσεις του πειράματος μας. Αναλυτικότερα μπορούμε να μετρήσουμε το θλιπτικό ή εφελκυστικό φορτίο που επιβάλλει το έμβολο φόρτισης στο δοκίμιο, την πίεση της κυψέλης, την πίεση των πόρων, τη μεταβολή του όγκου του δοκιμίου και τη σχετική μετακίνηση των άκρων του δοκιμίου. Για να πάρουμε τις μετρήσεις στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή, πριν από αυτόν παρεμβάλλουμε ένα μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ο οποίος αναλαμβάνει να μετατρέψει σε ηλεκτρονική μορφή τις αναλογικές μετρήσεις των μετρητών φορτίου, πιέσεων και μετακινήσεων.

Η επιβολή της πίεσης γίνεται υδραυλικά μετατρέποντας την πίεση του αέρα σε πίεση νερού. Αυτό επιτυγχάνεται με τον εξής τρόπο: Δίνοντας εντολή με τη βοήθεια του υπολογιστή μεταβάλλεται η πίεση του αέρα μέσω στρόφιγγας η οποία δέχεται ηλεκτρικά σήματα και μεταβάλλει, αναλόγως του σήματος που δέχεται από τον υπολογιστή, την παροχή του αέρα. Ο αέρας με τη σειρά του διοχετεύεται σε αεροστεγές δοχείο το οποίο μετατρέπει την πίεση του αέρα σε πίεση νερού. Το αεροστεγές δοχείο χωρίζεται με μεμβράνη σε δυο τμήματα αυτό του αέρα και αυτό του νερού. Από το τμήμα του νερού ξεκινά σωλήνας ο οποίος καταλήγει σε σημείο ελέγχου πίεσης (π.χ. κυψέλη πλευρικών τάσεων ή κυψέλη αξονικών τάσεων). Σε κάθε σημείο ελέγχου αντιστοιχεί και ένα δοχείο μετατροπής πίεσης αέρα-νερού. Κλείνοντας τις κατάλληλες βαλβίδες το νερό δεν έχει τη δυνατότητα διαφυγής, επομένως όταν η μεμβράνη αυξομειώσει τον όγκο της λόγω του παρεχόμενου αέρα μεταβάλλει αντίστοιχα και την πίεση του νερού η οποία μεταφέρεται μέσω του σωλήνα στο σημείο ελέγχου.



Σχ. 3.8 : Σχηματική περιγραφή συστήματος ελέγχου τριαξονικής συσκευής



## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

---

ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ  
ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

## 4. ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ ΣΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

### 4.1 Εισαγωγή

Η εκτέλεση πειραμάτων σε εδαφικά δοκίμια στο εργαστήριο αποτελεί θεμελιακό στοιχείο κάθε γεωτεχνικής μελέτης. Η τριαξονική δοκιμή είναι μια από τις πιο διαδεδομένες εργαστηριακές δοκιμές και τα αποτελέσματά της χρησιμοποιούνται για την μελέτη των χαρακτηριστικών τάσεων – παραμορφώσεων και αντοχής του εδάφους. Τα αποτελέσματα από μια τέτοια εργαστηριακή δοκιμή εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες. Η μελέτη και η κατανόηση τους παίζει καθοριστικό ρόλο στην εγκυρότητα των αποτελεσμάτων και στην αποφυγή λανθασμένων συμπερασμάτων που μπορούν να οδηγήσουν σε κακή εκτίμηση για την εδαφική απόκριση.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά στο αν και πόσο επιδρά ο τρόπος φόρτισης στα αποτελέσματα, σε μια τριαξονική δοκιμή. Η φόρτιση του δοκιμίου σε μια τριαξονική συσκευή μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους: α) είτε αυξάνοντας με σταθερό ρυθμό την παραμόρφωση (strain control) και β) είτε αυξάνοντας με σταθερό ρυθμό την κατακόρυφη τάση (stress control). Επίσης θα αναφερθούν και άλλοι παράγοντες όπως ο αρχικός δείκτης πόρων (initial void ratio) και η αρχική πυκνότητα (initial density) του δοκιμίου, το μέγεθος της πλευρικής τάσης (confining stress), το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων (διαφορετικές ποιότητες άμμων).

Όλα τα στοιχεία που αναλύονται παρακάτω προκύπτουν από πλήθος μελετών (papers, PhDs) διάφορων γεωτεχνικών οι οποίοι ύστερα από την επεξεργασία πειραματικών δεδομένων αποφάνθηκαν για τους παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών.

## 4.2 Η επίδραση του τρόπου φόρτισης στην τριαξονική συσκευή

Τα πειράματα τριαξονικής θλίψης μπορούν να πραγματοποιηθούν επιβάλλοντας τάσεις με ελεγχόμενο και σταθερό ρυθμό. Οι συσκευές τριαξονικής δοκιμής είναι εξοπλισμένες με ένα σύστημα ελέγχου το οποίο είναι προγραμματισμένο να επιβάλλει αξονική φόρτιση στο δοκίμιο, οδηγώντας το στην αστοχία είτε αυξάνοντας με σταθερό ρυθμό την παραμόρφωση, είτε αυξάνοντας με σταθερό ρυθμό την επιβαλλόμενη τάση. Στην πρώτη περίπτωση μιλάμε για δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων (deformation-controlled test) και στη δεύτερη για δοκιμή με έλεγχο των τάσεων (load-controlled test).

### Έλεγχος των παραμορφώσεων (deformation-controlled test)

Όταν διεξάγεται ένα πείραμα τριαξονικής δοκιμής με έλεγχο των παραμορφώσεων (DC), παρατηρείται το φαινόμενο της σταδιακής απομείωσης της αντοχής του δοκιμίου (strain softening). Η διατμητική αντοχή του εδαφικού στοιχείου, αφού φτάσει στη μέγιστη τιμή της και με την διαδικασία της διάτμησης να συνεχίζεται, παρουσιάζει μια σταδιακή μείωση με ταυτόχρονη αύξηση της παραμόρφωσης. Ανάλογα με την πυκνότητα του δοκιμίου το φαινόμενο μπορεί να διαφοροποιείται (βλέπε παράγραφο 4.3).

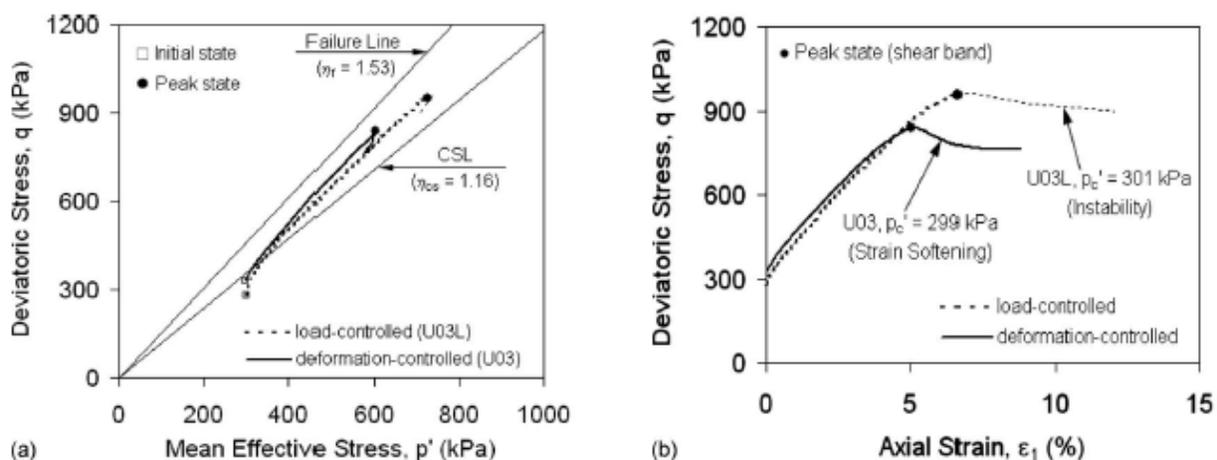
### Έλεγχος των τάσεων (load-controlled test)

Αντίθετα όταν το πείραμα διεξάγεται με έλεγχο των τάσεων (LC), το φαινόμενο που λαμβάνει τη θέση της σταδιακής απομείωσης της αντοχής, είναι η αστάθεια του εδαφικού στοιχείου (instability). Με τον όρο αστάθεια ορίζεται η συμπεριφορά του δοκιμίου κατά την οποία προκαλούνται ακαριαία μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις εξαιτίας της ανικανότητας του εδαφικού στοιχείου να παραλάβει το επιβαλλόμενο φορτίο ή τάση. Αυτό συμβαίνει όταν η επιβαλλόμενη τάση περάσει την μέγιστη τιμή της διατμητικής αντοχής του δοκιμίου. Στα

πειράματα που πραγματοποιούνται με έλεγχο των τάσεων, η τάση αυξάνεται είτε με μικρές αυξήσεις φορτίων (load increments) είτε με σταθερό ρυθμό (constant rate).

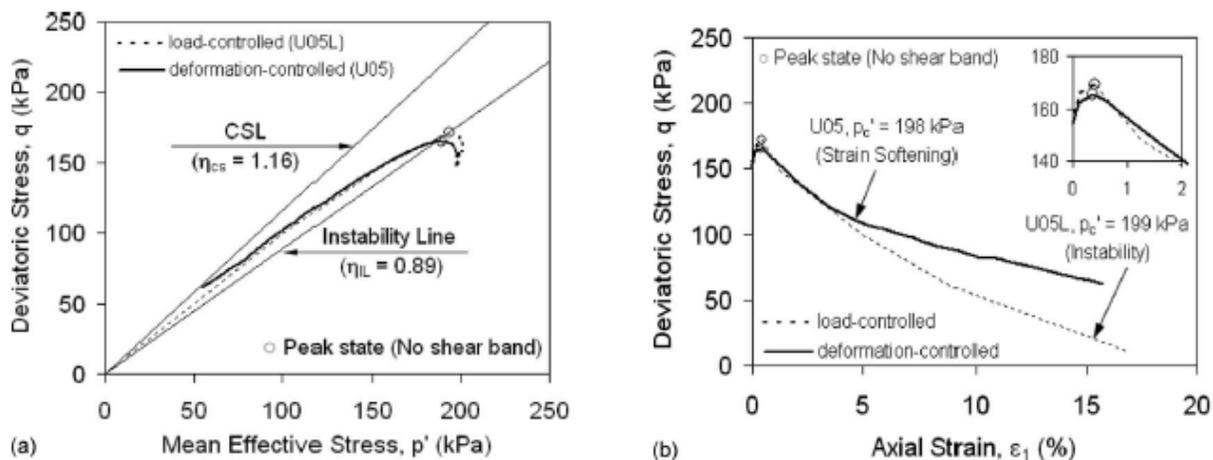
Από προηγούμενες μελέτες έχει διαπιστωθεί ότι, κάτω από αξονοσυμμετρικές συνθήκες, ο τρόπος φόρτισης που υιοθετείται κατά την διεξαγωγή του πειράματος, μπορεί να επηρεάσει τις σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων και πιο συγκεκριμένα τη συμπεριφορά του δοκιμίου μετά την αστοχία (Hird and Hassona, 1990; Yamamuro and Lade, 1998; Chu and Leong, 2001; J. Chu and D. Wanatowski, 2009).

Τα αποτελέσματα των J. Chu και D. Wanatowski, το 2009, έδειξαν ότι ο τρόπος φόρτισης επηρεάζει τη συμπεριφορά του δοκιμίου μετά την αστοχία και οδηγεί είτε στην σταδιακή απομείωση της αντοχής του είτε στην αστάθεια του, μετά τη μέγιστη αντοχή. Επιπλέον απέδειξαν ότι η γραμμή αστοχίας (failure line) και η γραμμή της κρίσιμης κατάστασης (critical state line, CSL), δεν επηρεάζονται από τον τρόπο φόρτισης. Μετά από μια σειρά αστράγγιστων δοκιμών σε χαλαρές και μέσης πυκνότητας άμμους, διαπίστωσαν ότι οι διαδρομές των τάσεων καταλήγουν σε διαφορετικές τάσεις παρόλο που μοιάζουν σε μεγάλο βαθμό. Οι σχέσεις τάσεων-παραμορφώσεων στην περιοχή πριν την μέγιστη αντοχή είναι παρόμοιες όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1(b). Παρόλα αυτά η μέγιστη αντοχή καθώς και οι αντίστοιχες παραμορφώσεις παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές.



Σχ. 4.1 : Σύγκριση αστράγγιστων δοκιμών σε μέσης πυκνότητας άμμο με διαφορετικό τρόπο φόρτισης: (α) διαδρομές ενεργών τάσεων, (β) καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων (Chu and Wanatowski, 2009)

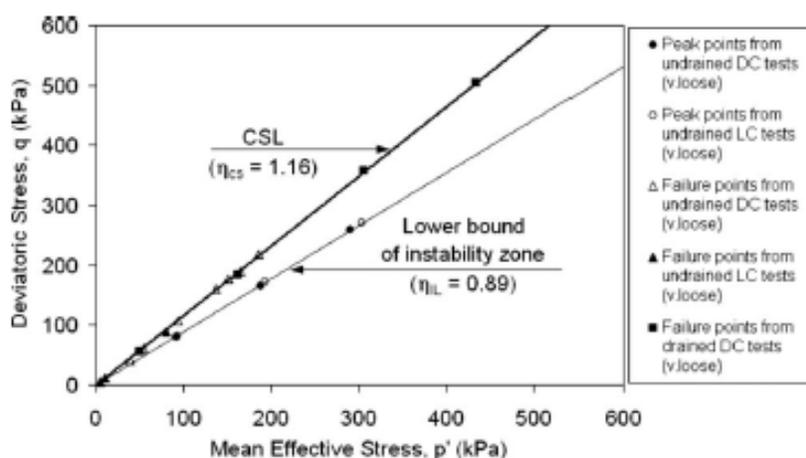
Στο Σχήμα 4.2(a) παρατηρείται ότι οι διαδρομές των ενεργών τάσεων για τις χαλαρές άμμους με διαφορετικό τρόπο φόρτισης, είναι παρόμοιες και πλησιάζουν την γραμμή της κρίσιμης κατάστασης (CSL). Η γραμμή CSL προκύπτει από τα σημεία αστοχίας των διαδρομών των ενεργών τάσεων. Παρόλα αυτά πρέπει να σημειωθεί ότι τα δύο πειράματα καταλήγουν σε διαφορετικές τιμές τάσεων πάνω στην CSL. Αυτό συνεπάγεται ότι η παραμένουσα αντοχή που προκύπτει από τα δυο πειράματα είναι διαφορετική. Από το Σχήμα 4.2(b) συμπεραίνουμε ότι και στις δύο μεθόδους έχουμε παρόμοια συμπεριφορά πριν τη μέγιστη διατμητική αντοχή. Η ανώτατη τιμή της επιβαλλόμενης τάσης ( $q$ ) εμφανίζεται για αξονική παραμόρφωση της τάξης του 0.4% και στα δύο δοκίμια. Παρόλα αυτά οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων μετά την μέγιστη διατμητική αντοχή διαφέρουν. Στην δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων (DC) παρατηρείται το φαινόμενο της σταδιακής απομείωσης της αντοχής του δοκιμίου, ενώ στη δοκιμή με έλεγχο των τάσεων (LC) παρατηρείται το φαινόμενο της αστάθειας του δοκιμίου (instability).



Σχ. 4.2 : Σύγκριση αστράγγιστων δοκιμών σε χαλαρή άμμο με διαφορετικό τρόπο φόρτισης: (a) διαδρομές ενεργών τάσεων, (b) καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων (Chu and Wanatowski, 2009)

Παρόμοια με την γραμμή της κρίσιμης κατάστασης, από τα σημεία μέγιστης αντοχής των διαδρομών των ενεργών τάσεων των αστράγγιστων δοκιμών, προκύπτει η γραμμή αστάθειας (instability line). Η γραμμή αστάθειας δεν είναι μοναδική αλλά εξαρτάται από τον δείκτη πόρων και το μέγεθος της ασκούμενης τάσης (Chu et al, 2003). Η ζώνη μεταξύ γραμμής αστάθειας και γραμμής κρίσιμης κατάστασης ονομάζεται ζώνη αστάθειας μέσα στην οποία οι χαλαρές άμμοι γίνονται ασταθείς κάτω από αστράγγιστες συνθήκες (Lade και Pradel, 1990; Lade, 1992; Leong et al., 2000). Στο Σχήμα 4.3 η γραμμή κρίσιμης κατάστασης είναι το πάνω όριο της γραμμής αστάθειας και η αχνή γραμμή παριστάνει το κάτω όριο. Μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί ότι και οι δυο γραμμές δεν επηρεάζονται από τον τρόπο φόρτισης του δοκιμίου.

Συμπερασματικά, η γραμμή αστάθειας αντιπροσωπεύει την αρχική κατάσταση και για το φαινόμενο της σταδιακής απομείωσης της αντοχής του δοκιμίου αλλά και για το φαινόμενο της αστάθειας του. Αυτό συνεπάγεται ότι οι μηχανισμοί που δημιουργούν τα δύο φαινόμενα είναι οι ίδιοι και ότι η συμπεριφορά που παρουσιάζει το εδαφικό δοκίμιο στη μία και στην άλλη περίπτωση ίσως είναι μια διαφορετική όψη των ίδιων μηχανισμών κάτω από διαφορετικές συνθήκες φόρτισης (Chu και Leong, 2001).

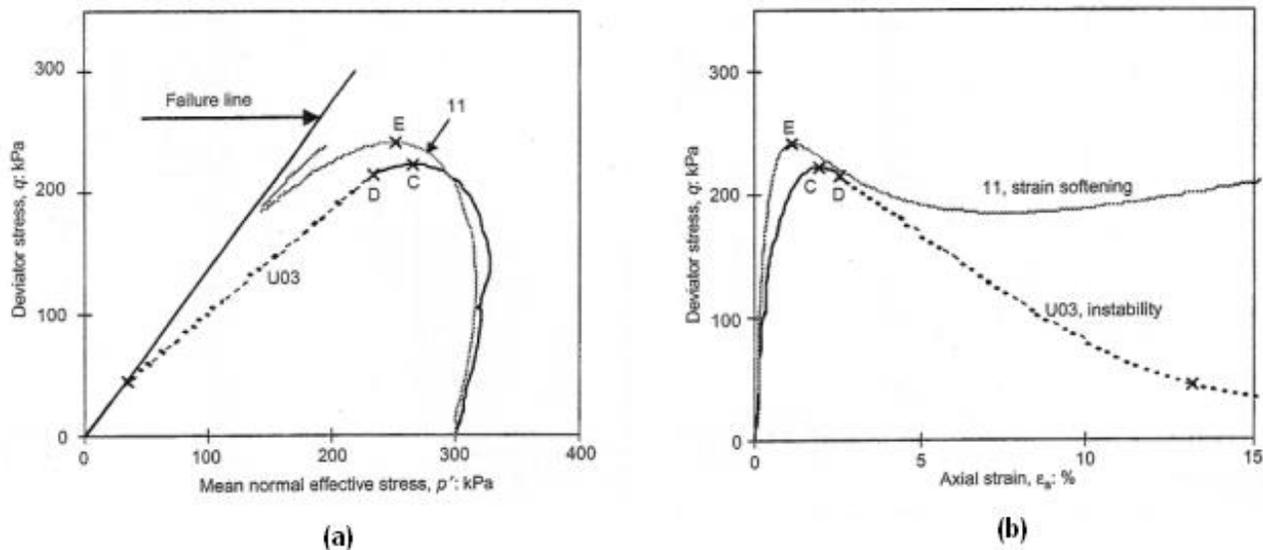


Σχ. 4.3 : Γραμμή κρίσιμης κατάστασης (CSL) και γραμμή αστάθειας (instability line) από δεδομένα δοκιμών με διαφορετικό τρόπο φόρτισης (Chu and Wanatowski, 2009)

Οι Chu και Leong απέδειξαν το 2001 ότι όταν δύο πειράματα πραγματοποιούνται κάτω από πανομοιότυπες συνθήκες εκτός από τον τρόπο φόρτισης η συμπεριφορά των δοκιμών είναι διαφορετική τόσο ως προς την μέγιστη διατμητική αντοχή όσο και για περιοχή της αντοχής μετά την αστοχία. Για μια δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων έχουμε το φαινόμενο της σταδιακής απομείωσης της αντοχής του δοκιμίου ενώ για μια δοκιμή με έλεγχο των τάσεων προκύπτει το φαινόμενο της αστάθειας του εδαφικού στοιχείου.

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται δύο αστράγγιστες δοκιμές των Chu και Leong ύστερα από ισότροπη στερεοποίηση σε τάση  $\sigma_3'=300$  KPa. Το πείραμα 11 διεξήχθη με έλεγχο των παραμορφώσεων, και η απομείωση της αντοχής του δοκιμίου εμφανίζεται αφού η επιβαλλόμενη τάση φτάσει στη μέγιστη τιμή της αντοχής του δοκιμίου, δηλαδή στο σημείο E του σχήματος. Αντίθετα το πείραμα U03 πραγματοποιήθηκε με έλεγχο επιβαλλόμενου φορτίου. Το δοκίμιο εμφανίζει σταθερή απόκριση μέχρις ότου η επιβαλλόμενη τάση φτάσει στη μέγιστη τιμή της (σημείο C), και η αστάθεια εμφανίζεται μετά το σημείο D, όπως φαίνεται στο σχήμα.

Συμπερασματικά και τα δύο φαινόμενα προκύπτουν αφού η αξονική φόρτιση φτάσει στην ανώτατη τιμή της. Παρόλα αυτά οι διαδρομές των ενεργών τάσεων και οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων των δύο δοκιμών δεν είναι ίδιες. Η διαφορά στην συμπεριφορά, στη μέγιστη αντοχή, οφείλεται στην απόκλιση των τιμών του δείκτη πόρων των δύο δοκιμών ( $e_{11}=0,803$  και  $e_{U03}=0,850$ ). Η διαφορά όμως στη συμπεριφορά μετά τη μέγιστη αντοχή, οφείλεται κυρίως στην διαφορετική απόκριση των δοκιμών εξαιτίας του διαφορετικού τρόπου φόρτισης.



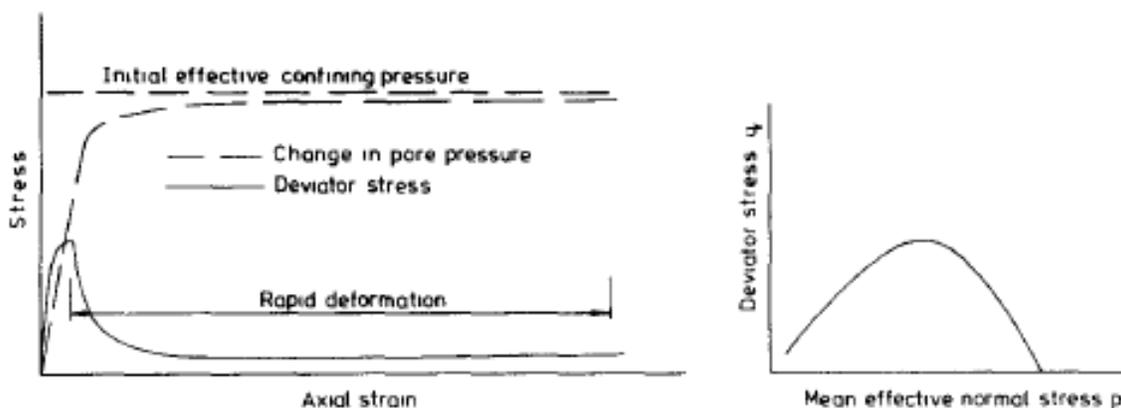
Σχ. 4.4 : Σύγκριση αστράγγιστων δοκιμών σε χαλαρή άμμο με διαφορετικό τρόπο φόρτισης: (α) διαδρομές ενεργών τάσεων, (β) καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων (Chu and Leong, 2001)

Συνοψίζοντας:

- Αν και η συμπεριφορά του δοκιμίου μετά τη μέγιστη αντοχή επηρεάζεται από τον τρόπο φόρτισης, η θέση της γραμμής αστοχίας (failure line) φαίνεται να παραμένει ανεπηρέαστη όποια μέθοδος κι αν χρησιμοποιηθεί, όπως διατυπώθηκε και από άλλους μελετητές (π.χ. DeGregorio, 1990).
- Παρόλο που η μέθοδος φόρτισης που οδηγεί στην σταδιακή απομείωση της αντοχής του δοκιμίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξακρίβωση καταστάσεων αστάθειας ή ρευστοποίησης, η μετά την αιχμή ασταθής συμπεριφορά μπορεί να μελετηθεί μόνο με δοκιμές όπου η φόρτιση επιβάλλεται με έλεγχο των τάσεων.
- Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι επειδή το φαινόμενο της αστάθειας συμβαίνει ακαριαία τα δεδομένα που καταγράφονται μετά από αυτό ίσως να μην είναι αντιπροσωπευτικά (Chu, 1990).

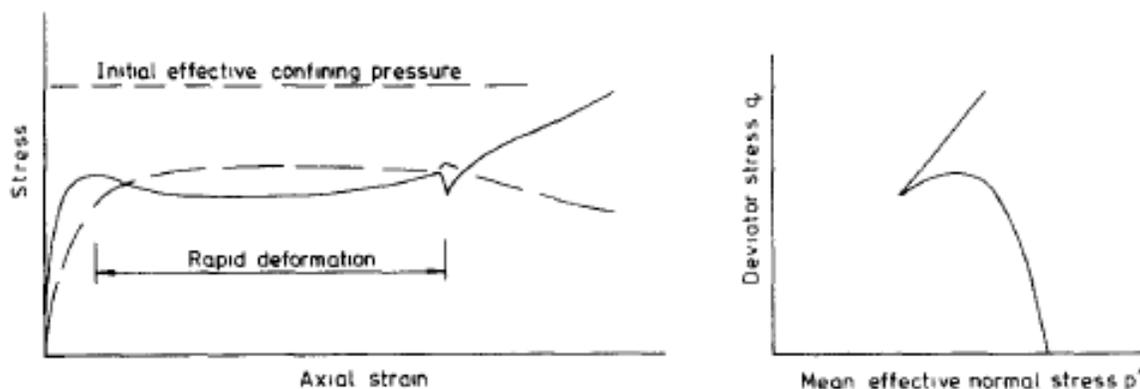
Εξετάζοντας την ρευστοποίηση κορεσμένων δοκιμίων άμμου κάτω από μονοτονική φόρτιση οι Hird και Hassona, το 1990, πραγματοποίησαν αστράγγιστες δοκιμές με έλεγχο των τάσεων (load-controlled tests) σε χαλαρά δοκίμια άμμου η χαρακτηριστική απόκριση των οποίων φαίνεται στα Σχήματα 4.5 και 4.6.

Τα πολύ χαλαρά δοκίμια, αφού επιτύχουν μια μέγιστη αντοχή, καταρρέουν γρήγορα μέχρις ότου φτάσουν σε μια σχεδόν σταθερή κατάσταση (steady state). Ως σταθερή κατάσταση ορίζεται η κατάσταση κατά την οποία το έδαφος συνεχίζει να παραμορφώνεται με σταθερό ρυθμό, σταθερή ταχύτητα και χωρίς μεταβολή της πλευρικής και της αξονικής τάσης (Poulos, 1981).



Σχ. 4.5 : Χαρακτηριστική απόκριση χαλαρής άμμου σε τριαξονική δοκιμή με έλεγχο των τάσεων (ρευστοποίηση), (Hird and Hassona, 1990)

Ένα κατά κάποιον τρόπο πιο πυκνό δοκίμιο άμμου, κάτω από τις ίδιες συνθήκες, ακολουθεί την συμπεριφορά του Σχήματος 4.6. Κατά παρόμοιο τρόπο μια μέγιστη αντοχή επιτυγχάνεται. Η σταθερά αυξανόμενη παραμόρφωση προκύπτει και πάλι με τη μόνη διαφορά ότι μετά το όριο παραμόρφωσης του δοκιμίου στη συσκευή, το δοκίμιο μπορεί να παραλάβει περαιτέρω φορτίο. Ο Castro όρισε αυτό τον τρόπο απόκρισης ως «περιορισμένη ρευστοποίηση» (limited liquefaction).



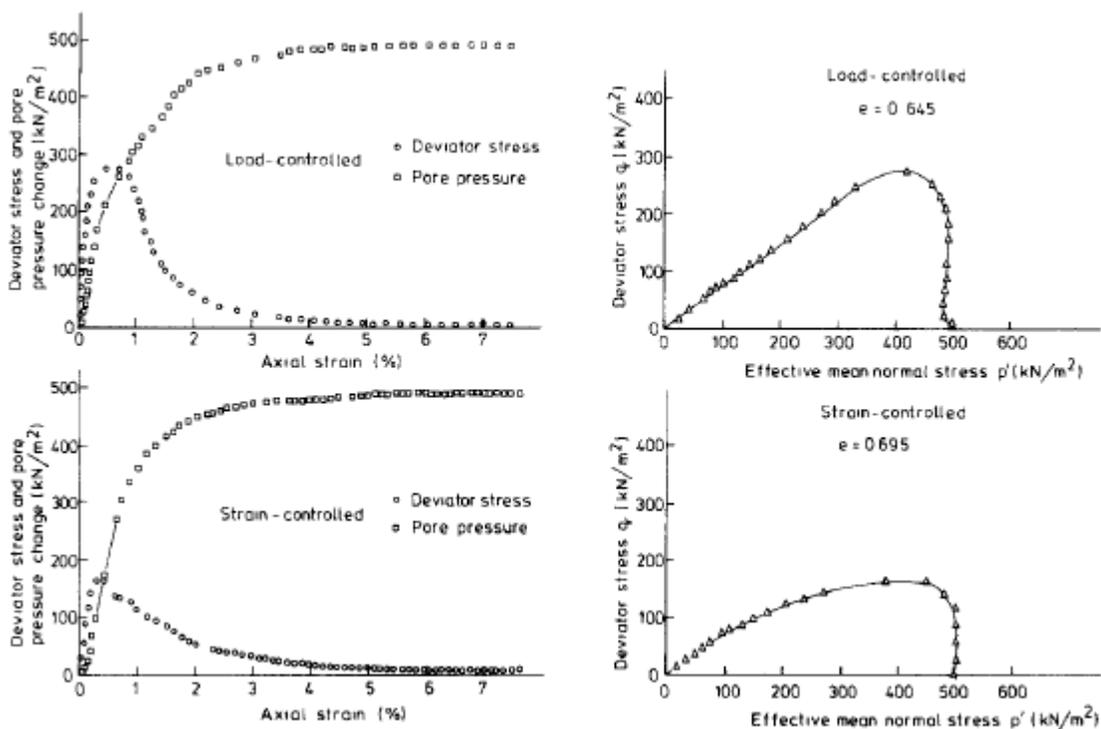
**Σχ. 4.6 : Χαρακτηριστική απόκριση χαλαρής άμμου σε τριαξονική δοκιμή με έλεγχο των τάσεων (περιορισμένη ρευστοποίηση), (Hird and Hassona, 1990)**

Παρόλο που η συμπεριφορά κατά την ρευστοποίηση διερευνάται χρησιμοποιώντας δοκιμές με έλεγχο των τάσεων (load-controlled tests), παρόμοιες συμπεριφορές μπορεί να παρατηρηθούν και σε δοκιμές με έλεγχο των παραμορφώσεων (deformation-controlled tests). Τυπικά αποτελέσματα για την άμμο Leighton Buzzard παρατίθενται στο Σχήμα 4.7.

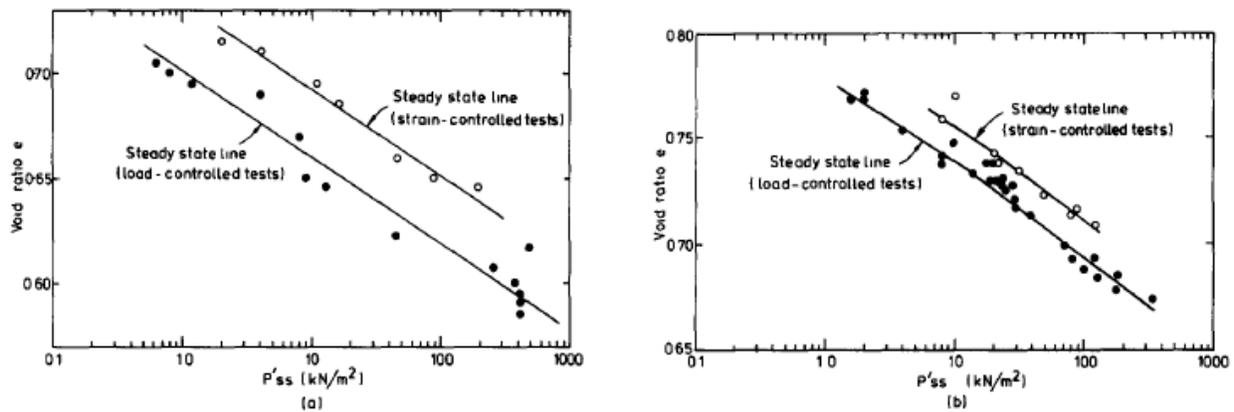
Ο Casagrande το 1971 απέδειξε ότι οι γραμμές σταθερής κατάστασης (steady state lines SSL), που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους φόρτισης, δεν συμπίπτουν. Το ίδιο επιβεβαίωσαν οι Hird και Hassona με τα πειράματα που πραγματοποίησαν το 1990 (Σχήμα 4.8). Η διαφορά μεταξύ των γραμμών σταθερής κατάστασης κάτω από φόρτιση με έλεγχο των παραμορφώσεων και έλεγχο των τάσεων αντίστοιχα, αποδίδεται, σύμφωνα με τον Casagrande, στη μεγάλη διαφορά που παρουσιάζει η ταχύτητα της παραμόρφωσης. Για

μεγάλες ταχύτητες παραμόρφωσης παρατηρείται μια ρευστή δομή στο υλικό, κατάσταση κατά την οποία οι δοκιμές με έλεγχο των τάσεων έχουν αποδειχθεί πιο αξιόπιστες για την απεικόνιση των συνθηκών του υλικού σε εκείνο το σημείο. Περεταίρω στοιχεία που αποδεικνύουν την εξάρτηση της γραμμής σταθερής κατάστασης από τον ρυθμό παραμόρφωσης αντλούνται από τις δοκιμές με έλεγχο των τάσεων στις οποίες παρατηρείται το φαινόμενο της περιορισμένης ρευστοποίησης. Ακολουθώντας τη διαδρομή της γρήγορης παραμόρφωσης, συνήθως το δοκίμιο, παρουσιάζει μια διαστολική συμπεριφορά και μπορεί να παραλάβει υπολογίσιμο επιπλέον φορτίο.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η γραμμή σταθερής κατάστασης (SSL) για έλεγχο των παραμορφώσεων, είναι ταυτόσημη με την γραμμή κρίσιμης κατάστασης (CSL) σύμφωνα με τους (Hird και Hassona, 1986).



Σχ. 4.7 : Αποτελέσματα δοκιμών με έλεγχο των τάσεων και των παραμορφώσεων αντίστοιχα (Hird and Hassona, 1990)



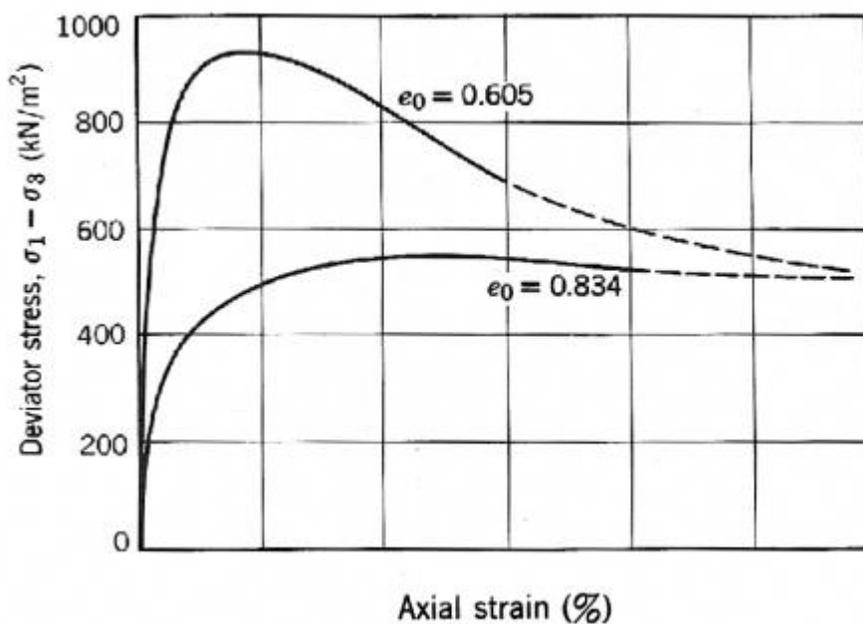
Σχ. 4.8 : Σύγκριση γραμμών σταθερής κατάστασης από δοκιμές με διαφορετικό τρόπο φόρτισης : (a) Leighton Buzzard sand (Hird and Hassona, 1990); (b) Banding sand (Casagrande, 1971)

Παρόλα αυτά, τα δεδομένα άλλων μελετητών (Poulos, 1985; DeGregorio, 1990; Been, 1991) υποδηλώνουν ότι στην ουσία προκύπτει η ίδια γραμμή σταθερής κατάστασης (SSL), άσχετα με το αν η δοκιμή πραγματοποιείται με έλεγχο των παραμορφώσεων ή με έλεγχο των τάσεων. Τέλος ο Sladen το 1985, ισχυρίστηκε ότι η εξάρτηση της γραμμής σταθερής κατάστασης από την ταχύτητα παραμόρφωσης ίσως και να μην είναι σπουδαία, ισχυρισμός που έρχεται σε αντίθεση με τα όσα απεικονίζονται στο Σχήμα 4.8.

### 4.3 Η επίδραση του αρχικού δείκτη πόρων ( $e_0$ ) και της αρχικής πυκνότητας ( $D_0$ ) του δοκιμίου

Ο αρχικός δείκτης πόρων ενός εδαφικού δοκιμίου είναι άρρηκτα συνδεδεμένος με την αρχική πυκνότητα του. Τα δύο μεγέθη είναι αντιστρόφως ανάλογα αφού όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των κενών στο εδαφικό στοιχείο, άρα και ο δείκτης πόρων, τόσο μικρότερη είναι η πυκνότητα του. Αρχική πυκνότητα και αρχικός δείκτης πόρων έχουν τεράστια επιρροή στις καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης κατά την τριαξονική φόρτιση.

Συγκρίνοντας ένα πυκνό δοκίμιο άμμου ( $e_0 = 0,605$ ) με ένα αντίστοιχο χαλαρό ( $e_0 = 0,834$ ), παρατηρούμε για το μεν πυκνό μια μέγιστη αντοχή και μείωση της τάσης μετά την αιχμή, για το δε χαλαρό δεν παρουσιάζεται αιχμή και φαίνεται ότι μετά, η αντοχή του υλικού παραμένει σταθερή καθώς η αξονική παραμόρφωση συνεχίζεται (Σχήμα 4.9).

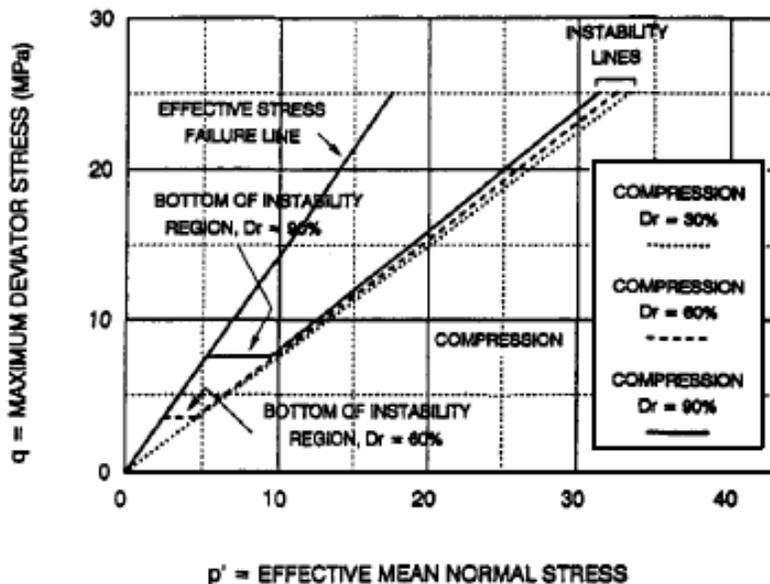


Σχ. 4.9 : Καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων χαλαρού και πυκνού δοκιμίου άμμου

Οι διαφορές που παρουσιάζουν οι καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων οφείλονται στο φαινόμενο της διόγκωσης του εδαφικού δοκιμίου λόγω της αναδιάταξης των κόκκων (όσο πιο πυκνό το δοκίμιο τόσο μεγαλύτερη διόγκωση), φαινόμενο που συνδέεται με την έννοια της εμπλοκής (interlocking) όπως καταλήξαμε στο Κεφάλαιο 2. Οι καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων δείχνουν καθαρά ότι τα πιο πυκνά δοκίμια μπορούν να παραλάβουν μεγαλύτερα φορτία καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερη αξονική τάση ( $\sigma$ ). Με άλλα λόγια χρειάζεται μεγαλύτερη προσπάθεια για να αλληλοεμπλακούν οι κόκκοι ο ένας με τον άλλον (interlocking) και να καταλήξει το δοκίμιο σε μια ασταθή συμπεριφορά που μπορεί να οδηγήσει και σε ρευστοποίηση.

Εκτός από την επιρροή στις καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων, η αρχική πυκνότητα του δοκιμίου επηρεάζει και την κλίση της γραμμής αστάθειας (instability line), με την κλίση να παρουσιάζει μείωση όσο η αρχική πυκνότητα ελαττώνεται. Οι Borp και Lade, το 1997, πραγματοποίησαν πειράματα σε εδαφικά δοκίμια με σχετικές πυκνότητες 30% και 60% και σύγκριναν τα αποτελέσματα τους με προγενέστερα των Yamamuro και Lade από δοκίμια με σχετική πυκνότητα 90%.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.10, η κλίση της γραμμής αστάθειας μειώνεται ελαφρά με την μείωση της αρχικής πυκνότητας. Αυτό υποδηλώνει ότι για σταθερή ενεργό πλευρική τάση, τα χαλαρά δοκίμια άμμου, μπορεί να παρουσιάσουν αστάθεια σε χαμηλότερα επίπεδα αξονικής τάσης από ότι τα πυκνά. Η αρχική σχετική πυκνότητα επηρεάζει επίσης τη θέση του κάτω άκρου της ζώνης αστάθειας (instability region). Οι Yamamuro και Lade το 1997, υπολόγισαν, για ένα δοκίμιο άμμου με αρχική σχετική πυκνότητα 90%, ως κατώτερο όριο της ζώνης αστάθειας, αξονική τάση της τάξης των 7.5 MPa. Αυτή η τιμή μειώνεται περίπου στα 3.5 MPa για δοκίμιο με αρχική σχετική πυκνότητα 60%. Αυτό το αποτέλεσμα αναμενόταν αφού η τάση για συμπύκνωση στις πιο χαλαρές άμμους επικρατεί σε χαμηλές πλευρικές τάσεις και γι' αυτό το λόγο το κατώτερο όριο της ζώνης αστάθειας ελαττώνεται με μείωση της αρχικής πυκνότητας.



Σχ. 4.10 : Σύγκριση γραμμών αστάθειας από αστράγγιστες τριαξονικές δοκιμές σε άμμο με αρχική σχετική πυκνότητα 30%, 60% και 90% αντίστοιχα (Bopp and Lade, 1997)

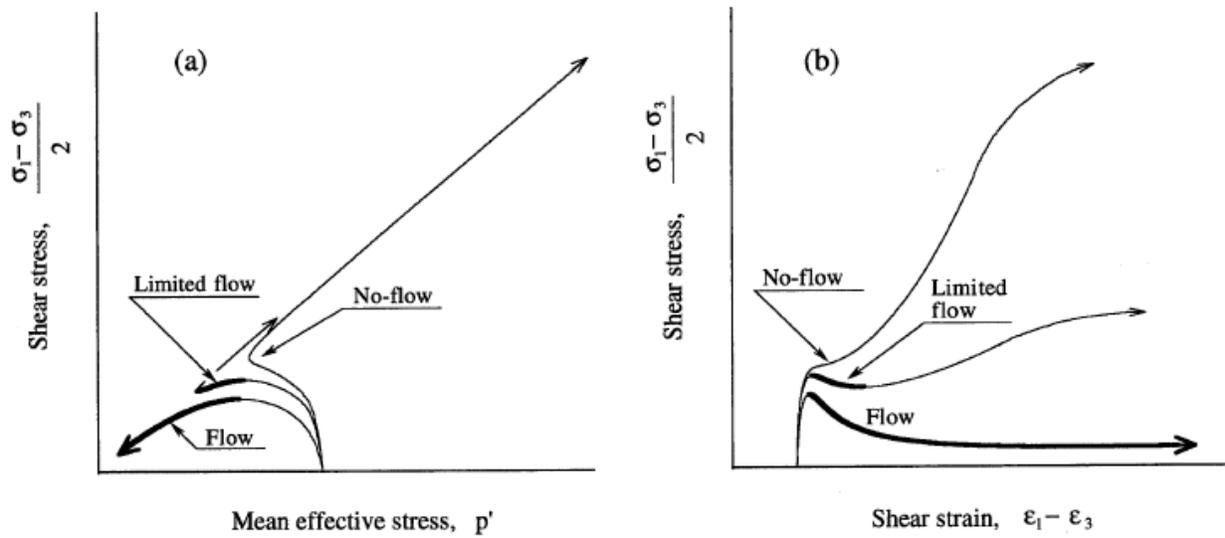
Το πώς επηρεάζει η αρχική πυκνότητα την κλίση της γραμμής αστάθειας θεωρείται ότι είναι συνάρτηση της διαφορετικότητας στη διαβάθμιση του υλικού που ακολουθεί μια ισότροπη συμπίεση. Άμμοι με χαμηλή αρχική πυκνότητα υφίστανται περισσότερο θρυμματισμό των ατελειών των κόκκων κατά τη διάρκεια της ισότροπης συμπίεσης και αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι τα χαλαρά δοκίμια είναι καλύτερα διαβαθμισμένα μετά την φόρτιση. Επίσης όσο αυξάνεται η πυκνότητα του δοκιμίου, μεγαλύτερος αριθμός σωματιδίων περιβάλλει κάθε κόκκο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα μικρότερη ποσότητα θραυσμάτων και τελικά ένα πιο ομοιογενές δοκίμιο κατά την φόρτιση. Στην περίπτωση λοιπόν των αστράγγιστων δοκιμών, όπου η μέγιστη αξονική τάση επιτυγχάνεται για πολύ μικρές παραμορφώσεις, αυτή η μικρή διαφοροποίηση στο μέγεθος των κόκκων στο αρχικό στάδιο της διάτμησης, διαφοροποιεί τις σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων και επηρεάζει την κλίση της γραμμής αστάθειας (instability line).

Οι Cubrinovski και Ishihara, το 2000, στην προσπάθειά τους να εντοπίσουν τα ενδεχόμενα ασταθούς συμπεριφοράς σε αμμώδη εδάφη, κατέληξαν σε τρεις τύπους απόκρισης, κατά την διάρκεια μονοτονικών αστράγγιστων διατμητικών δοκιμών. Στο Σχήμα 4.11 διακρίνονται οι διαφορετικές αποκρίσεις, ανάλογα με την πυκνότητα των εδαφικών στοιχείων.

Οι πολύ χαλαρές άμμοι, δείχνουν έναν καθαρά συστολικό τύπο συμπεριφοράς και παρουσιάζουν το φαινόμενο της μείωσης της αντοχής του δοκιμίου (strain softening) όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 4.2. Όταν η διάτμηση της άμμου ξεπερνάει τη μέγιστη διατμητική αντοχή, η άμμος χάνει την αντοχή της, η οποία μειώνεται σταδιακά μέχρις ότου φτάσουμε στην φάση της σταθερής κατάστασης (steady state). Η φάση αυτή συνεχίζεται και για μεγάλες παραμορφώσεις και ονομάζεται παραμόρφωση με συνθήκες ροής (flow deformation).

Σε περίπτωση που η πυκνότητα της άμμου, είναι κατά κάποιον τρόπο υψηλότερη, η φάση της σταδιακής χαλάρωσης του δοκιμίου, ακολουθείται από μια σταδιακή σκλήρυνση (strain hardening), κατά τη οποία η άμμος επανακτά την αντοχή της και αποκαθιστά την ευστάθεια της. Αυτός ο τύπος απόκρισης ονομάζεται παραμόρφωση με συνθήκες περιορισμένης ροής (limited flow deformation).

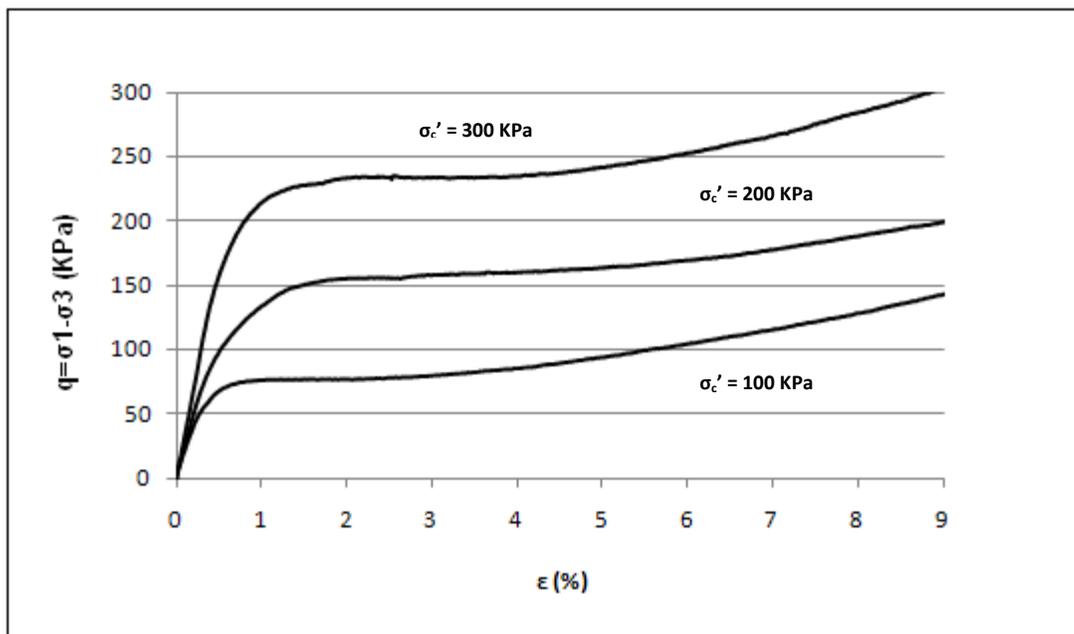
Τέλος, στην περίπτωση των μέτρια πυκνών και πυκνών άμμων, παρατηρείται κατευθείαν το φαινόμενο της σκλήρυνσης του δοκιμίου (με ταυτόχρονη αύξηση της αντοχής). Σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται συνεχόμενη αύξηση της διατμητικής τάσης για να προκληθούν διατμητικές παραμορφώσεις και τελικά να επιτευχθεί η φάση της σταθερής κατάστασης.



Σχ. 4.11 : Τύποι αστράγγιστης παραμόρφωσης αμμωδών εδαφών : a) Διαδρομές ενεργών τάσεων, b) Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων (Cubrinovski and Ishihara, 2000)

#### 4.4 Επίδραση της πλευρικής τάσης ( $\sigma'_c$ ) του δοκιμίου

Η πλευρική τάση που επιβάλλεται στο δοκίμιο κατά την δοκιμή της τριαξονικής θλίψης παίζει καθοριστικό ρόλο στο μέγεθος της αντίστασης που προβάλλει το εδαφικό στοιχείο κατά την αξονική φόρτιση. Τα κοκκώδη εδάφη έχουν χαρακτηριστική τραχύτητα. Η αντίσταση στην ολίσθηση σε κάθε σημείο επαφής είναι ανάλογη με την ορθή τάση στην επαφή και γι' αυτό το λόγο η ολική αντίσταση αυξάνεται όσο αυξάνεται η πλευρική τάση. Σε ένα απλό διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης (Σχήμα 4.12) μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε πως, όσο μεγαλώνει η πλευρική τάση, τόσο μεγαλώνει η αντοχή του δοκιμίου. Με άλλα λόγια για μεγάλες τιμές πλευρικής τάσης το δοκίμιο αναλαμβάνει μεγαλύτερες τιμές επιβαλλόμενης τάσης ( $q$ ).

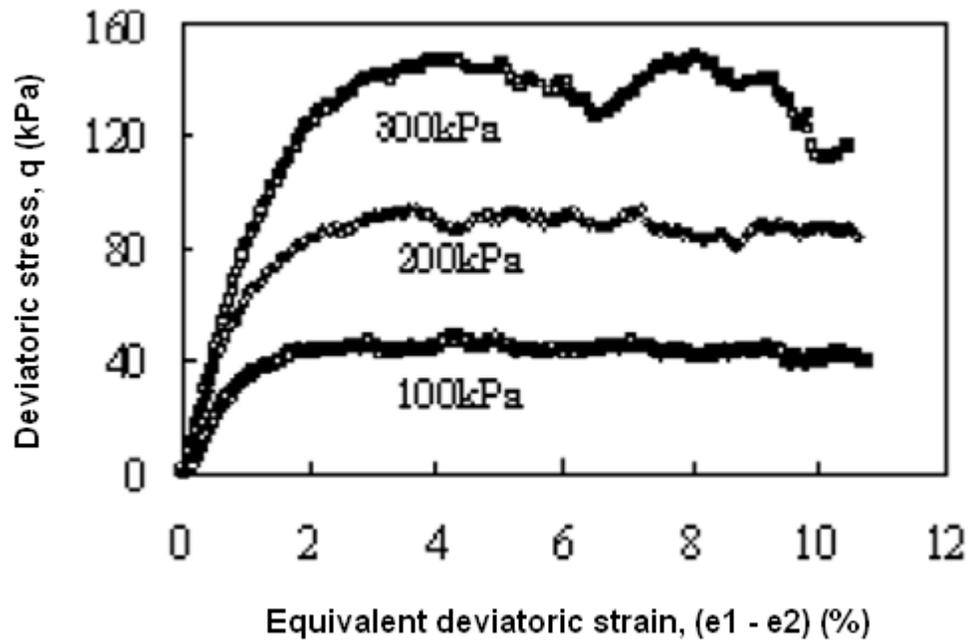


Σχ. 4.12 : Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων για διαφορετικές τιμές πλευρικής τάσης

Τα πειράματα αριθμητικής προσομοίωσης των Alim, Suzuki και Iwashita, το 2006, με την μέθοδο DEM (Discrete Element Method), προκειμένου να διερευνηθεί η απόκριση των κοκκωδών εδαφών δίνοντας έμφαση στην επιρροή της πλευρικής τάσης, καταλήγουν σε συμπεράσματα παρόμοια με αυτά που προαναφέρθηκαν. Σε ανάλογα συμπεράσματα για την επίδραση της πλευρικής τάσης κατέληξε και ο Sitharam το 1999 παρόλο που δεν έλαβε υπόψη λεπτομερώς την διαστολική συμπεριφορά των κοκκωδών εδαφών.

Στο Σχήμα 4.13 απεικονίζονται οι καμπύλες αξονικής τάσης και αξονικής παραμόρφωσης από τα αριθμητικά δεδομένα τριών προσομοιωμάτων δοκιμίου με διαφορετικές πλευρικές τάσεις (100 KPa 200 KPa και 300 KPa αντίστοιχα). Οι καμπύλες δείχνουν ξεκάθαρα ότι με αύξηση της πλευρικής τάσης, αυξάνεται και η τάση αστοχίας, ενώ η διόγκωση περιορίζεται. Επιπλέον ο μέγιστος βαθμός διόγκωσης προκύπτει στα επίπεδα μέγιστης διατμητικής τάσης. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι οι μέγιστες τάσεις καταγράφηκαν, σε όλες τις περιπτώσεις, σε μικρότερες παραμορφώσεις από αυτές που παρατηρούνται στα εργαστηριακά αποτελέσματα.

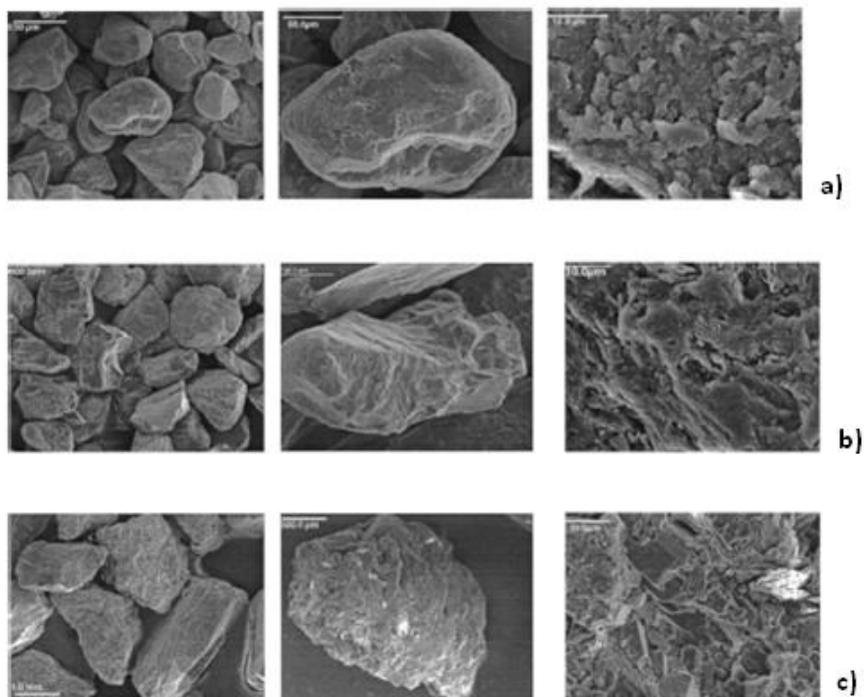
Παρόλα αυτά οι σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων που προκύπτουν, παρουσιάζουν εξαιρετική ομοιότητα με τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών σε πραγματικά δοκίμια, γεγονός που ισχυροποιεί τις υποθέσεις για την εδαφική απόκριση λόγω της επιρροής της πλευρικής τάσης.



Σχ. 4.13 : Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων για διαφορετικές τιμές πλευρικής τάσης (Alim, Suzuki and Iwashita, 2006)

#### 4.5 Επίδραση του μεγέθους και του σχήματος των κόκκων

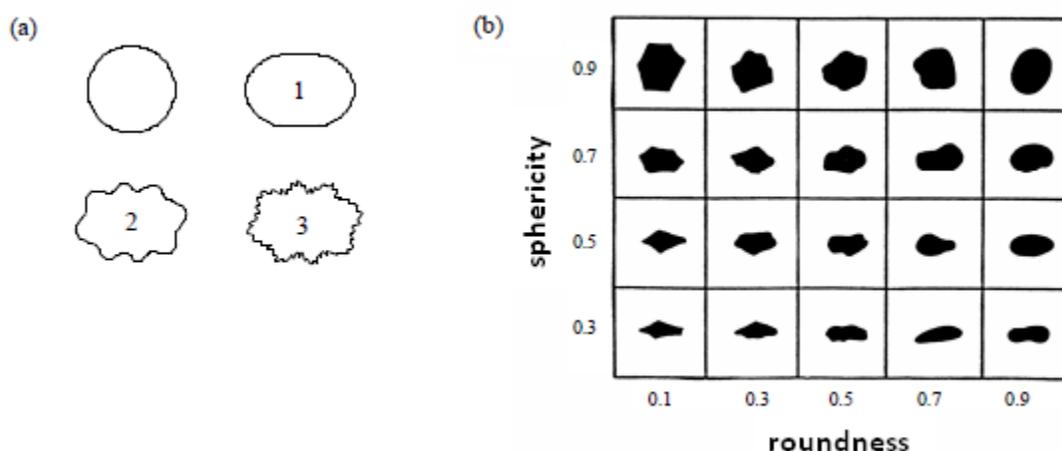
Τα εδάφη αποτελούνται από στερεούς κόκκους οι οποίοι προέρχονται από την μηχανική ή την χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων. Το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων, των μη-συνεκτικών εδαφών, ποικίλει και επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες που επικρατούν κατά την σταθεροποίηση των αντίστοιχων πυριγενών πετρωμάτων (Smalley, 1966). Επίσης από την στιγμή που ένας κόκκος απελευθερώνεται από το πέτρωμα το μέγεθος και το σχήμα του επιδέχεται αλλαγές λόγω μηχανικών και χημικών επιδράσεων. Οι άμμοι συγκεκριμένα (όπως περιγράψαμε στην παράγραφο 1.4) αποτελούνται από κόκκους με διαστάσεις από 2mm έως 0.06 mm. Το σχήμα τους είναι γενικά σφαιροειδές, με την έννοια ότι η μέγιστη και η ελάχιστη διάσταση του κόκκου δεν διαφέρουν σημαντικά. Η μορφή της επιφάνειας των κόκκων ποικίλλει και κυμαίνεται μεταξύ λείας (στην περίπτωση εδαφών που η επιφάνεια των κόκκων τους έχει λειανθεί από τη διάβρωση) και γωνιώδους (στην περίπτωση πρόσφατων κλαστικών ιζημάτων).



Σχ. 4.14 : Φωτογραφίες 3ων άμμων σε διαφορετικά επίπεδα μεγέθυνσης (Alshibli and Alsaleh, 2004)

Η ποικιλία μεγεθών και σχημάτων των κόκκων, σύμφωνα με τους Santamarina και Cho, αποτυπώνεται σε τρεις κύριες κλίμακες :

- Στη σφαιρικότητα (sphericity) σε αντίθεση με την ελλειπτικότητα (ellipticity), η οποία ποσοτικοποιείται ως ο λόγος μεταξύ της διαμέτρου της μεγαλύτερης εγγεγραμμένης σφαίρας και της διαμέτρου της μικρότερης περιγεγραμμένης σφαίρας.
- Στη στρογγυλότητα (roundness) σε αντίθεση με την γωνιότητα (angularity), η οποία ποσοτικοποιείται ως η μέση ακτίνα καμπυλότητας των επιφανειακών προεξοχών συγκριτικά με την ακτίνα της μεγαλύτερης σφαίρας που μπορεί να περικλειστεί σε έναν κόκκο.
- Τέλος στην λείανση (smoothness) σε αντίθεση με την τραχύτητα (roughness). Η τραχύτητα αναφέρεται στις επιφανειακές προεξοχές που είναι πολύ μικρότερες από την διάμετρο του κόκκου.

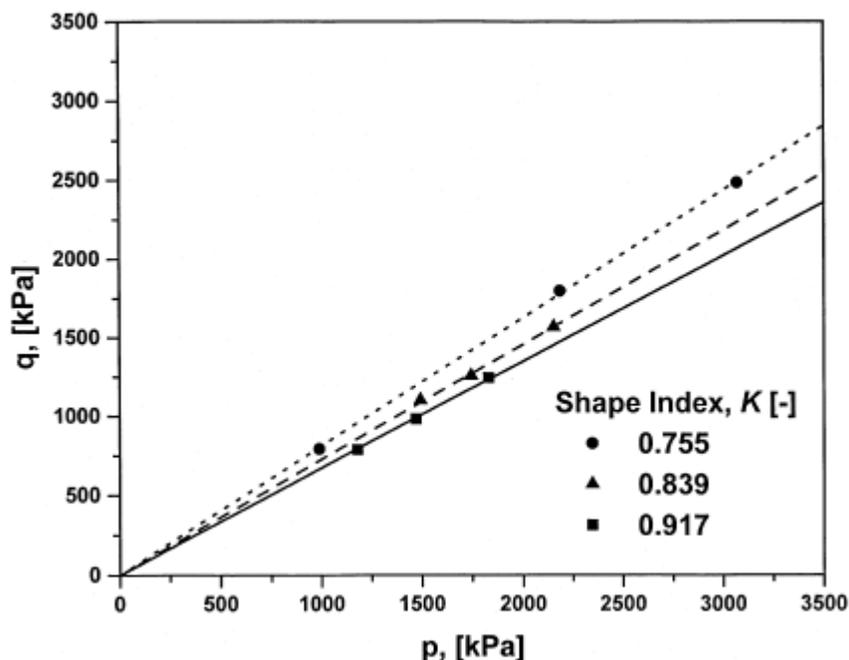


Σχ. 4.15 : Κλίμακες διαφοροποίησης για το σχήμα των κόκκων : a) 1. σφαιρικότητα ή ελλειπτικότητα, 2. στρογγυλότητα ή γωνιότητα, 3. λείανση ή τραχύτητα

Η κατανομή μεγέθους των κόκκων παίζει σπουδαίο ρόλο στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς του εδάφους. Παρόλα αυτά, το σχήμα των κόκκων διαφαίνεται να είναι μια βαρυσήμαντη παράμετρος και πρέπει να θεωρείται μέρος κάθε μελέτης χαρακτηρισμού του εδάφους. Τα τρία βασικά χαρακτηριστικά του σχήματος των κόκκων (σφαιρικότητα, γωνιότητα και τραχύτητα) επιδρούν στη συμπεριφορά του εδάφους. Οι διάφορες αποκλίσεις από το στρογγυλό και σφαιρικό σχήμα δικαιολογούν τη μεγάλη ποικιλία δομών, που καθορίζονται από τη μεγάλη ποικιλία στις τιμές του δείκτη πόρων. Η ελλειπτικότητα συμβάλλει θετικά στην δομική ανισοτροπία και επηρεάζει την εξέλιξη της ανισοτροπίας λόγω επιβολής τάσης. Η δομική ανισοτροπία με τη σειρά της επηρεάζει όλες τις ιδιότητες των εδαφών (παραμόρφωση, αντοχή, αγωγιμότητα, διάχυση). Τέλος η γωνιότητα και η τραχύτητα προκαλούν μείωση στη δυσμησία σε μικρές παραμορφώσεις και αύξηση της αντοχής σε μεγάλες.

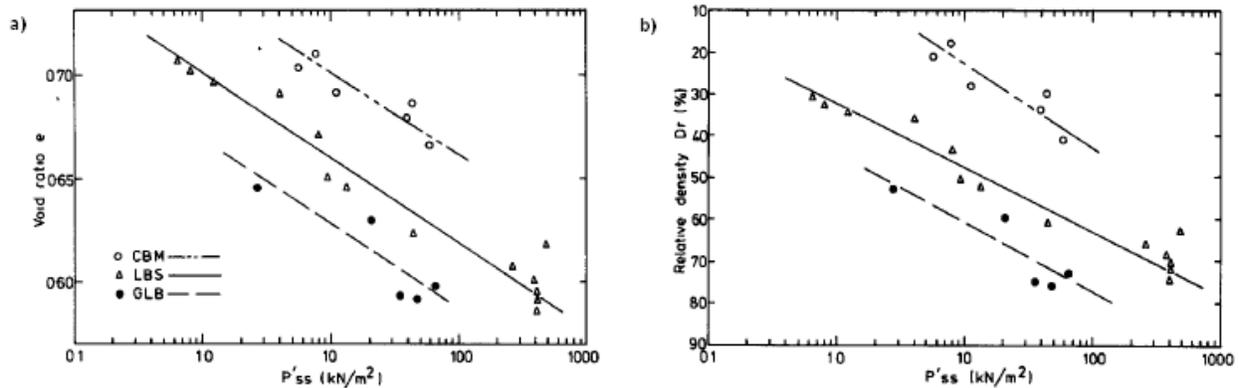
Οι Shinozaki, Oida και Golman, το 1999, εξέτασαν διάφορα δείγματα άμμου και τα ταξινόμησαν με βάση την γωνιότητα των κόκκων τους. Σκοπός τους ήταν η αναζήτηση της επίδρασης του σχήματος των κόκκων στην γωνία εσωτερικής τριβής κατά την τριαξονική φόρτιση. Κατά τη διάρκεια της μελέτης τους χρησιμοποίησαν έναν δείκτη  $K$  για να ταξινομήσουν τις άμμους με βάση το σχήμα τους. Μια άμμος με κόκκους ιδιαίτερα γωνιώδεις αντιστοιχεί σε μικρές τιμές του δείκτη  $K$ . Αντίθετα οι άμμοι με σχετικά σφαιρικούς κόκκους αντιστοιχούν σε μεγάλες τιμές του  $K$ . Στο Σχήμα 4.16 απεικονίζονται σε άξονες  $p - q$  οι γωνίες εσωτερικής τριβής δοκιμών άμμου ίδιου δείκτη πόρων και διαφορετικού δείκτη  $K$ .

Συμπερασματικά, η γωνία εσωτερικής τριβής έδειξε να αυξάνεται με την αύξηση της γωνιότητας (angularity) των κόκκων δηλαδή με τη μείωση του δείκτη  $K$ .



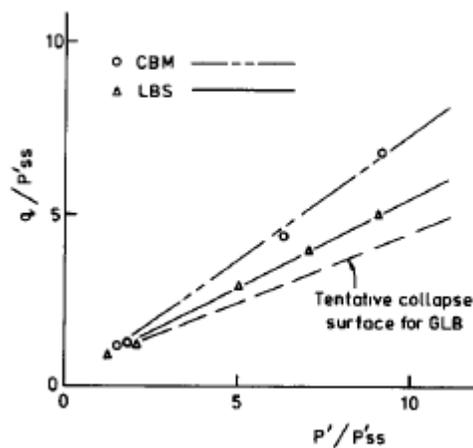
Σχ. 4.16 : Διάγραμμα  $p - q$  για διαφορετικά σχήματα κόκκων (Shinozawa, Oida and Golman, 1999)

Πειράματα με σκοπό την αναζήτηση της επιρροής του σχήματος των κόκκων, πραγματοποιήθηκαν από τους Hird και Hassona, το 1990, σε τρία υλικά (με αυξανόμενη γωνιότητα: Glass beads, Buzzard sand, Carborundum). Στο Σχήμα 4.17 αποτυπώνονται οι γραμμές σταθερής κατάστασης (SSL), σε άξονες  $e - \log p'$  και  $D_r - \log p'$ , όπου  $D_r$  η σχετική πυκνότητα. Το σχήμα δείχνει πειστικά ότι, για δοσμένη πλευρική ενεργό τάση, ο δείκτης πόρων που απαιτείται για να δημιουργηθούν συνθήκες σταθερής κατάστασης αυξάνεται με μείωση της σφαιρικότητας. Επειδή τα γωνιώδη στοιχεία είναι πιο επιρρεπή στο φαινόμενο της εμπλοκής (interlocking) από ότι τα σφαιρικά, κατά την διάρκεια της ρευστοποίησης, περισσότερος χώρος απαιτείται ώστε ένας κόκκος να γλιστρήσει πάνω από έναν άλλον και να καταλήξει το δοκίμιο σε μια πιο ρευστή δομή. Σύμφωνα με τα παραπάνω άμμοι με σχετικά σφαιρικούς κόκκους είναι περισσότερο επιρρεπείς στην ρευστοποίηση σε σχέση με άμμους που οι κόκκοι τους είναι κατά βάση γωνιώδεις.



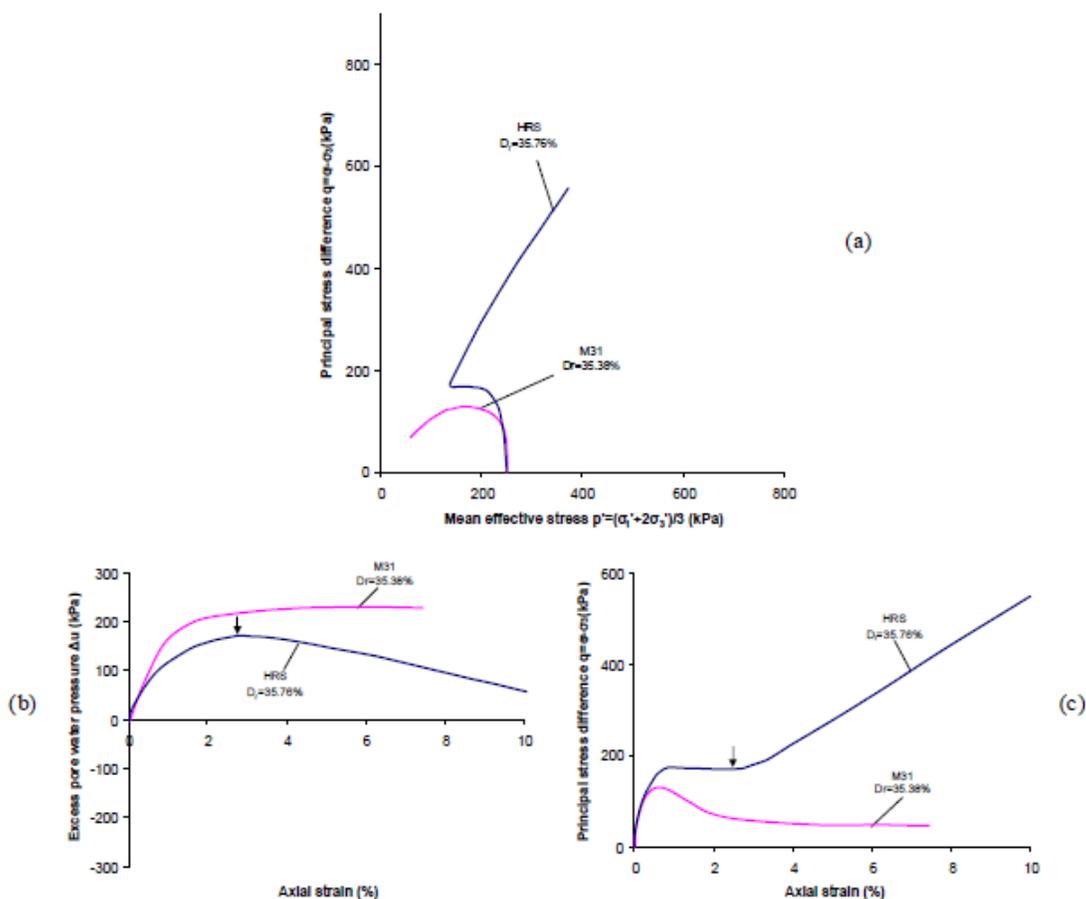
Σχ. 4.17 : Γραμμές σταθερής κατάστασης για υλικά με διαφορετικά σχήματα κόκκων (Hird and Hassona, 1990)

Στο ίδιο μήκος κύματος κινούνται και τα συμπεράσματα των Cubrinovski και Ishihara όσον αφορά την επιρροή του σχήματος των κόκκων στην γραμμή σταθερής κατάστασης. Η θέση της καθορίζεται κυρίως από το σχήμα των κόκκων με τους σφαιροειδείς να αποδίδουν μια πιο μικρή κλίση σε σχέση με τους γωνιώδεις. Τέλος στο Σχήμα 4.18 φαίνονται οι επιφάνειες κατάρρευσης (collapse surfaces) για δύο υλικά (Buzzard sand, LBS και Caborundum, CBM) σύμφωνα με τον Sladen et al. (1985). Η κλίση της επιφάνειας κατάρρευσης φαίνεται να εξαρτάται σημαντικά από το σχήμα των κόκκων.



Σχ. 4.18 : Επιφάνειες κατάρρευσης για υλικά με διαφορετικά σχήματα κόκκων (Hird and Hassona, 1990)

Οι Tsomokos και Georgiannou το 2009, με σκοπό να εξακριβώσουν την επιρροή του σχήματος και της γωνιότητας των κόκκων στην απόκριση δοκιμών άμμου κάτω από συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης, πραγματοποίησαν αστράγγιστες δοκιμές τριαξονικής θλίψης σε δοκίμια άμμου M31 και HRS. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν ότι για δύο άμμους με την ίδια κοκκομετρική διαβάθμιση, εκείνη με σφαιρικούς κόκκους (άμμος M31) δείχνει ασταθή συμπεριφορά με μείωση της διατμητικής της αντοχής μετά από μια μέγιστη τιμή, ενώ η άμμος με γωνιώδεις κόκκους (άμμος HRS) εμφανίζει συνεχή αύξηση της διατμητικής αντοχής της με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης (Σχ. 4.19)



Σχ. 4.19 : Σύγκριση της απόκρισης της άμμου HRS με την απόκριση της άμμου M31 κάτω από τριαξονική θλίψη με συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης (Tsomokos and Georgiannou, 2009)



## ΜΕΡΟΣ Β΄

---

### ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ



## Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

---

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 5. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εκτέλεση πειραμάτων στο εργαστήριο έχει ως στόχο την ακριβή καταγραφή της απόκρισης του εδαφικού στοιχείου σε μεταβολές τάσεων, παραμορφώσεων και πίεσης πόρων. Με την εκτέλεση πειραμάτων σε εδαφικά στοιχεία στο εργαστήριο επιτυγχάνεται:

- η λεπτομερής ανάλυση της συμπεριφοράς αντιπροσωπευτικών δοκιμίων
- η γενίκευση της αλήθειας των αποτελεσμάτων με την πρόσθετη εκτέλεση επί τόπου δοκιμών και πειραμάτων προσδιορισμού εδαφικών παραμέτρων
- η προσομοίωση στο εργαστήριο με κάθε δυνατή ακρίβεια των επί τόπου εδαφικών συνθηκών όπως:
  - αρχική εντατική κατάσταση
  - επιβαλλόμενες τασικές μεταβολές
  - στάδια και ρυθμός μεταβολής του τασικού πεδίου
  - συνθήκες στράγγισης

Όλα τα παραπάνω στοιχεία οδηγούν σε κρίσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά των εδαφών, συμπεράσματα απαραίτητα για κάθε γεωτεχνική μελέτη.

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε, στην τριαξονική συσκευή, μια σειρά από πειράματα σε τέσσερις διαφορετικές εργαστηριακές άμμους (M31, Ham River Sand, Long Stone, Fontainebleau). Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν θα βοηθήσουν στη μελέτη και κατανόηση κάποιων παραγόντων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά τους. Μεταξύ των παραγόντων που εξετάστηκαν είναι ο τρόπος φόρτισης, η πυκνότητα των δοκιμίων και το μέγεθος της πλευρικής τάσης.

### Περίληψη κεφαλαίων

Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα αναφερθούν τα γενικά χαρακτηριστικά των άμμων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και κάποιες από τις ιδιότητες τους και θα γίνει η ταξινόμηση τους. Στη συνέχεια θα γίνει περιγραφή του τρόπου παρασκευής των δοκιμών και θα παρουσιαστούν τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Επιπρόσθετα θα γίνει παράθεση και διερεύνηση όλων των αποτελεσμάτων και των εξαγόμενων διαγραμμάτων και θα διατυπωθούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις διάφορες αναλύσεις. Τέλος τα συμπεράσματα αυτά θα συγκριθούν με όσα προαναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4 του μέρους Α' σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν τα πειραματικά αποτελέσματα όπως αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία.



## Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>

---

ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

## 6. ΥΛΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

### 6.1 Εισαγωγή

Κατά την εκτέλεση πειραμάτων στο εργαστήριο συνήθως χρησιμοποιούνται εργαστηριακές άμμοι και όχι άμμοι που θα μπορούσαμε να συλλέξουμε από το φυσικό περιβάλλον. Οι εργαστηριακές άμμοι είναι κατάλληλα επεξεργασμένες ώστε να είναι καθαρές (χωρίς προσμίξεις και άλλα υλικά), σχετικά ομοιογενείς, κατάλληλα διαβαθμισμένες και να περιέχουν κόκκους με χαρακτηριστικό μέγεθος και σχήμα. Η χρησιμοποίηση τέτοιων άμμων οδηγεί σε ακριβή συμπεράσματα για την εδαφική απόκριση καθώς είναι γνωστά όλα τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες τους.

Οι άμμοι μπορούν να διαφέρουν μεταξύ τους σε διάφορα χαρακτηριστικά :

- Το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων τους είναι από τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν μεγάλες ανομοιότητες καθώς συναντάμε άμμους με κόκκους από 0.06 έως 2mm και άμμους με κόκκους είτε πολύ σφαιρικούς είτε εξαιρετικά γωνιώδεις. Στο Σχήμα 6.1 παρατηρούμε με τη βοήθεια ηλεκτρονικού μικροσκοπίου εικόνες των κόκκων των άμμων που χρησιμοποιήθηκαν.
- Η ποικιλία μεγεθών κόκκων σε έναν εδαφικό σχηματισμό είναι ένα άλλο χαρακτηριστικό που διαφέρει από άμμο σε άμμο. Με άλλα λόγια κάθε άμμος έχει την δικιά της χαρακτηριστική κοκκομετρική διαβάθμιση. Στο Σχήμα 6.2 φαίνονται σε ένα διάγραμμα οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις των άμμων που χρησιμοποιήθηκαν.
- Επιπλέον κάθε άμμος μπορεί να εμφανιστεί με διάφορες τιμές του δείκτη πόρων ( $e$ ), που εξαρτώνται από την εκάστοτε διάταξη (δομή) των κόκκων της. Οι τιμές του δείκτη

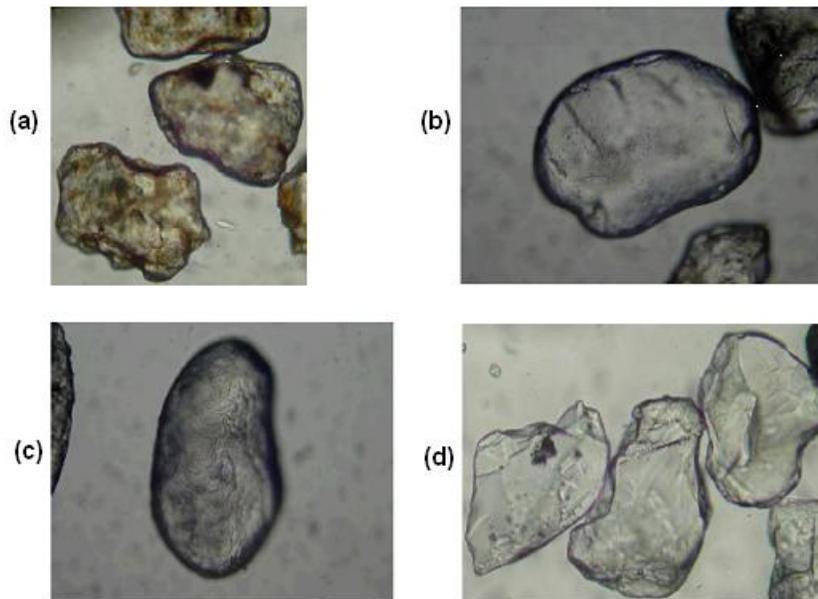
πόρων κυμαίνονται μεταξύ μιας ελάχιστης ( $e_{min}$ ) και μιας μέγιστης τιμής ( $e_{max}$ ), όρια τα οποία διαφέρουν από άμμο σε άμμο και εξαρτώνται από το σχήμα και την ποικιλία των μεγεθών της. Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του δείκτη πόρων χρησιμεύει στον προσδιορισμό της σχετικής πυκνότητας ( $D_r$ ), χρήσιμο μέγεθος για το χαρακτηρισμό της κατάστασης μιας άμμου.

- Το ανηγμένο ειδικό βάρος των στερεών κόκκων ( $G_s$ ) αποτελεί επίσης χαρακτηριστικό μιας άμμου και οι τιμές του κυμαίνονται, για όλους τους τύπους εδαφών (πλην οργανικών), από 2.50 έως 2.80.
- Τέλος η γωνία διατμητικής αντοχής ( $\phi_{cs}$ ) διαφέρει από άμμο σε άμμο και αποτελεί σημαντικό στοιχείο κατά την μελέτη της αστοχίας μιας άμμου.

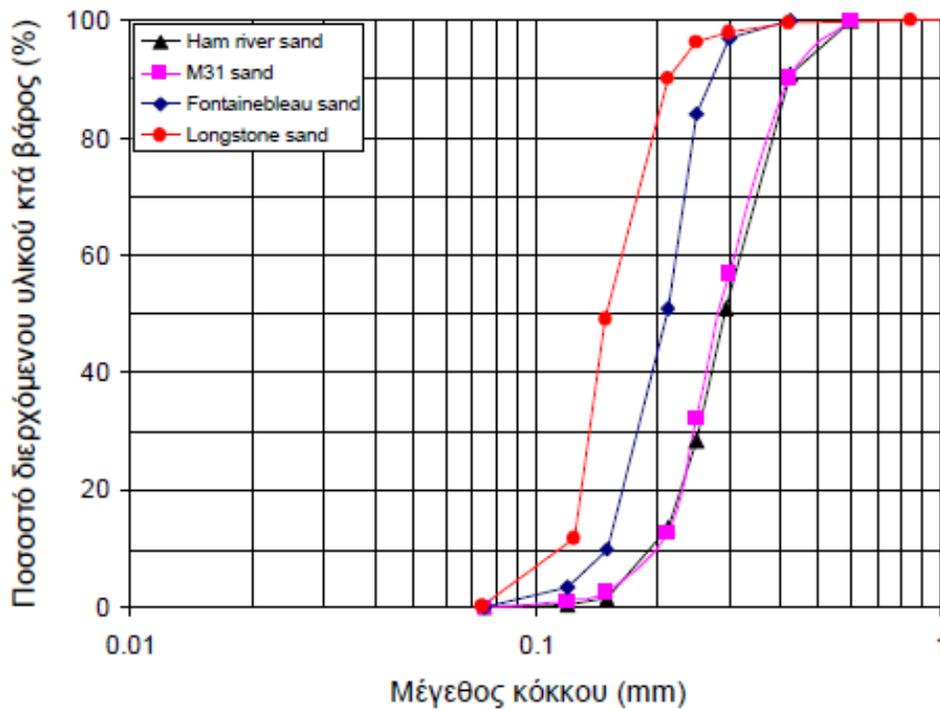
Επιγραμματικά οι άμμοι που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής είναι :

- Άμμος M31
- Ham River Sand (HRS)
- Άμμος Longstone (M34)
- Άμμος Fontainebleau

Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά και οι ιδιότητες της κάθε άμμου καθώς και οι αντίστοιχες καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης.



Σχ. 6.1 : Απεικόνιση κόκκων των άμμων που χρησιμοποιήθηκαν, (a) Ham River Sand, (b) Fontainebleau, (c) M31 και (d) Longstone

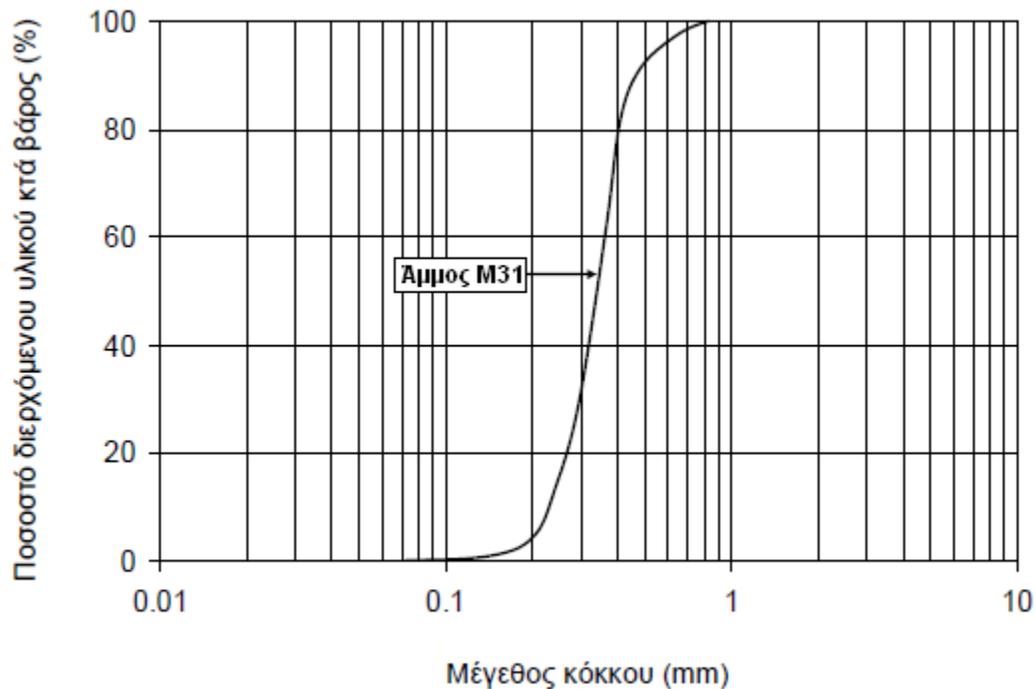


Σχ. 6.2 : Κοκκομετρικές διαβαθμίσεις των άμμων που χρησιμοποιήθηκαν

## 6.2 Περιγραφή υλικών που χρησιμοποιήθηκαν

### Άμμος M31

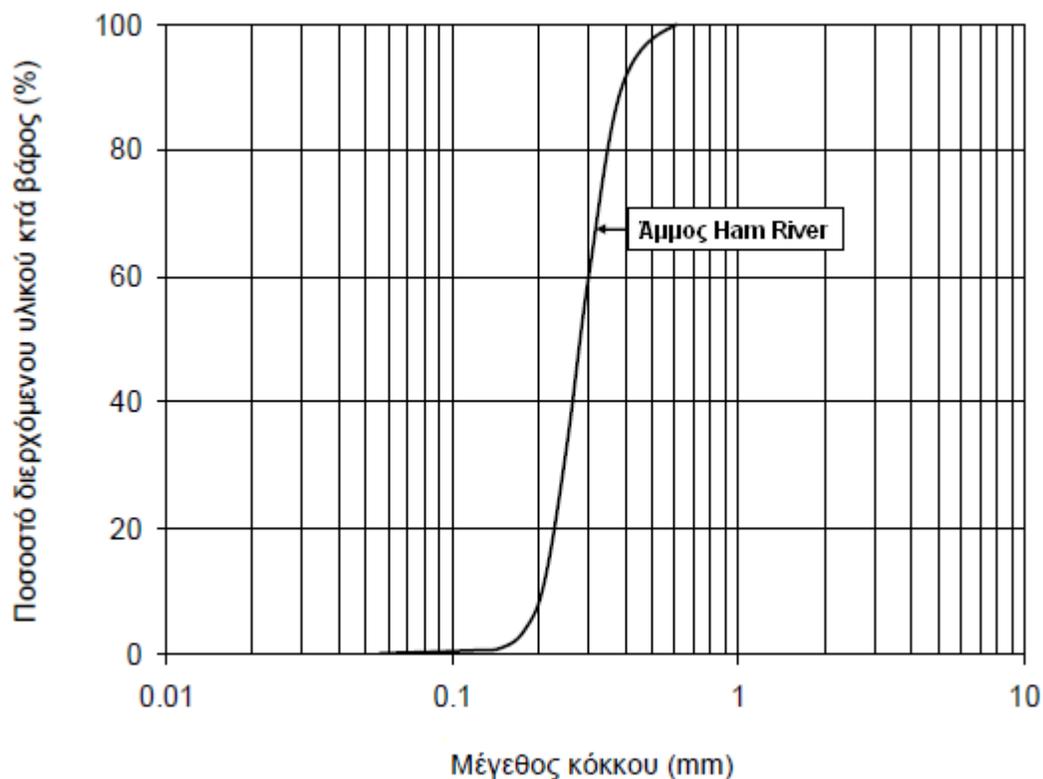
Η άμμος M31, είναι μια άμμος μέσης διαβάθμισης και αποτελείται από σφαιρικούς κόκκους (βλέπε Σχ.6.1), με ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών κόκκων  $G_s = 2.65$ . Ο ελάχιστος και ο μέγιστος δείκτης πόρων (ή λόγος κενών) της άμμου είναι ίσος με  $e_{min} = 0.528$  και  $e_{max} = 0.870$  αντίστοιχα, ενώ η κοκκομετρική της διαβάθμιση διακρίνεται στο Σχήμα 6.3.



Σχ. 6.3 : Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου M31

### Άμμος Ham River

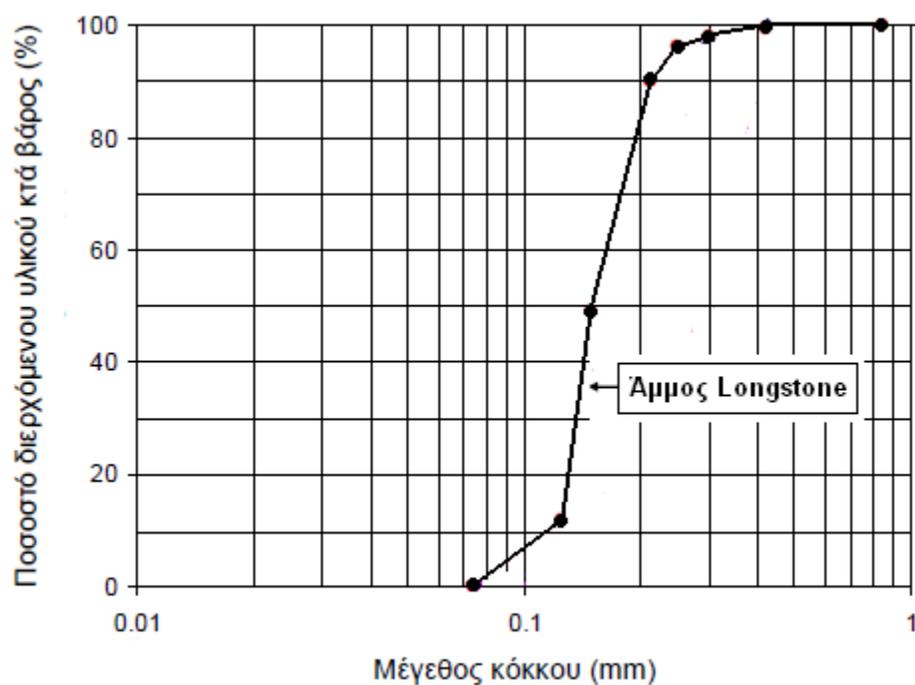
Η άμμος HRS, είναι μια άμμος επίσης μέσης διαβάθμισης, η οποία είναι χαλαζιακή και αποτελείται από κόκκους υπογωνιώδεις έως γωνιώδεις (βλέπε Σχ.6.1) με ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών κόκκων  $G_s = 2.66$ . Ο ελάχιστος και ο μέγιστος δείκτης πόρων (ή λόγος κενών) της άμμου είναι ίσος με  $e_{min}=0.526$  και  $e_{max}=0.860$  αντίστοιχα, ενώ η κοκκομετρική της διαβάθμιση διακρίνεται στο Σχήμα 6.4.



Σχ. 6.4 : Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου Ham River (HRS)

### Άμμος Longstone (M34)

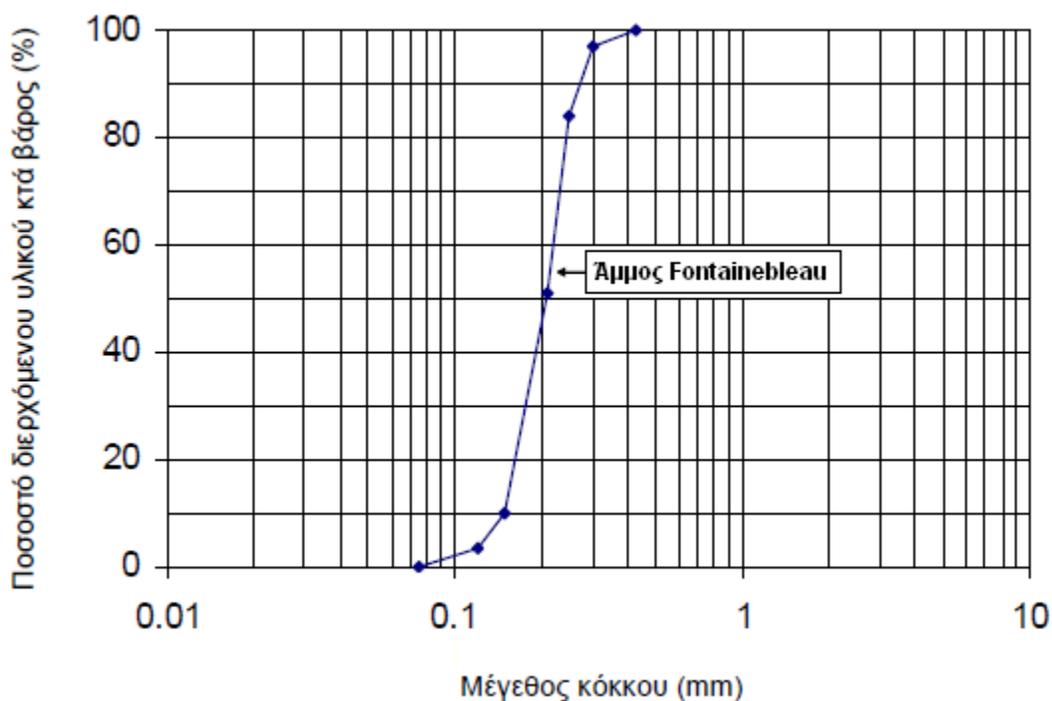
Η άμμος Longstone, είναι φουρνισμένη χαλαζιακή άμμος, της οποίας η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης φαίνεται στο Σχήμα 6.5. Πρόκειται για ιδιαιτέρως ομοιόμορφη λεπτόκοκκη άμμο η οποία αποτελείται από γωνιώδεις κόκκους (βλέπε Σχ.6.1) με μέση διαμέτρου κόκκου  $d_{50} = 0.16\text{mm}$  και με ανηγμένο ειδικό βάρος στερεών κόκκων  $G_s = 2.64$ . Ο ελάχιστος και ο μέγιστος δείκτης πόρων (ή λόγος κενών) της άμμου είναι ίσος με  $e_{\min} = 0.614$  και  $e_{\max} = 0.995$  αντίστοιχα.



Σχ. 6.5 : Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου Longstone (M34)

### Άμμος Fontainebleau

Η άμμος Fontainebleau, είναι μια ομοιόμορφη, λεπτόκοκκη άμμος με ανηγμένο ειδικό βάρος στερεάς φάσης  $G_s = 2.64$ . Αποτελείται από σφαιρικούς κόκκους (βλέπε Σχ.6.1), ο ελάχιστος και ο μέγιστος δείκτης πόρων (ή λόγος κενών) της άμμου είναι ίσος με  $e_{\min} = 0.540$  και  $e_{\max} = 0.865$  αντίστοιχα, ενώ η κοκκομετρική της διαβάθμιση διακρίνεται στο Σχήμα 6.6.



Σχ. 6.6 : Κοκκομετρική διαβάθμιση άμμου Fontainebleau

## Κεφάλαιο 7<sup>ο</sup>

---

### ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

## 7. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

### 7.1 Εισαγωγή

Η μελέτη και η κατανόηση των παραγόντων που επιδρούν στα αποτελέσματα μιας τριαξονικής δοκιμής προϋποθέτουν την εκτέλεση σειράς πειραμάτων σε τριαξονική συσκευή. Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκε η αυτοματοποιημένη συσκευή τριαξονικής δοκιμής ελεγχόμενων διαδρομών τάσεων του Εργαστηρίου Εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η ανωτέρω τριαξονική συσκευή παρέχει διακριτότητα στις μετρήσεις των παραμορφώσεων της τάξης των 0.001% ενώ στον έλεγχο των τάσεων της τάξης των 0.07 KPa .



Σχ. 7.1 : Συσκευή Τριαξονικής Δοκιμής ελεγχόμενων διαδρομών τάσεων ΕΜΠ

## 7.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας σε βήματα

Στη συνέχεια περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο εργαστήριο για την διεξαγωγή κάθε πειράματος. Παράλληλα με την περιγραφή παρατίθενται και εικόνες από τις διάφορες φάσεις των πειραμάτων.

- Αυστηρή προϋπόθεση για την διεξαγωγή κάθε πειράματος είναι ο καθαρισμός της τριαξονικής συσκευής από προηγούμενες δοκιμές. Εισάγουμε νερό ή αέρα στους σωλήνες παροχής πίεσης της κυψέλης και της πίεσης πόρων ώστε να απομακρυνθούν κόκκοι άμμου από προηγούμενη δοκιμή από το σύστημα και να μην επηρεάζονται οι μετρήσεις του πειράματος.
- Ξεκινώντας την παρασκευή του δοκιμίου τοποθετούμε στη βάση του έναν ημιπερατό πωρόλιθο ο οποίος εμποδίζει τη διαφυγή των στερεών κόκκων αλλά επιτρέπει τη ροή του νερού.
- Στη συνέχεια τοποθετούμε γύρω από τη βάση του δοκιμίου αδιαπέρατη ελαστική μεμβράνη η οποία στερεώνεται με τη χρήση ελαστικού δακτυλίου(o-ring) έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η στεγανότητα του δοκιμίου. Η μεμβράνη έχει σχήμα κυλινδρικό με διάμετρο ελάχιστα μικρότερη από τη βάση του δοκιμίου και μήκος λίγο μεγαλύτερο από αυτό, περίπου 85 mm.
- Στη βάση του δοκιμίου στερεώνεται επίσης μεταλλικό κέλυφος έτσι ώστε να περικλείει την ελαστική μεμβράνη και με σκοπό να προσδώσει στο δοκίμιο κυλινδρική μορφή. Το κέλυφος χωρίζεται σε τρία όμοια τμήματα τα οποία στερεώνονται μεταξύ τους με τη βοήθεια ενός μεταλλικού δακτυλίου, ο οποίος σφίγγει γύρω από το κέλυφος και το κρατάει κατακόρυφο και ακλόνητο.

- Ύστερα από την τοποθέτηση του μεταλλικού κελύφους, νέες μεμβράνες καλύπτουν όλη την επιφάνειά του εξωτερικά, με σκοπό την απομόνωση του αεροστεγώς, εμποδίζοντας τη διαφυγή του αέρα και της πίεσης από τα σημεία επαφής μεταξύ των τριών τμημάτων του κελύφους, κατά την επιβολή υποπίεσης όπως περιγράφεται στο επόμενο βήμα. Για τον ίδιο σκοπό, το τμήμα της εσωτερικής μεμβράνης που εξέχει από το κέλυφος, εφαρμόζεται στα εξωτερικά χείλη του.
  
- Η επιβολή υποπίεσης στο κέλυφος, προκαλεί την εφαρμογή της εσωτερικής μεμβράνης στα τοιχώματα του. Η υποπίεση επιτυγχάνεται με αναρρόφηση αέρα από το χώρο μεταξύ εσωτερικής μεμβράνης και κελύφους και εξασφαλίζεται από εξωτερική αντλία αέρα. Αυτή συνδέεται μέσω εύκαμπτου σωλήνα με το κέλυφος, το οποίο φέρει χαρακτηριστική οπή, πάνω στην οποία βιδώνεται ο σωλήνας.
  
- Μετά την επιβολή της υποπίεσης και αφού σιγουρευτούμε ότι δεν διαφεύγει αέρας από πουθενά (απώλεια πίεσης ισοδυναμεί με πιθανή τρύπα σε κάποια από τις μεμβράνες), είναι δυνατή η εισαγωγή της εξεταζόμενης άμμου στο εσωτερικό του κελύφους. Το δοκίμιο παρασκευάζεται με την μέθοδο της καθίζησης της άμμου στο νερό (water sedimentation). Αφού πληρωθεί το κέλυφος με αποσταγμένο νερό, εισάγεται η άμμος με τη βοήθεια ενός χωνιού. Η άμμος εξέρχεται σε μικρή ποσότητα και από ελάχιστο ύψος έτσι ώστε οι κόκκοι να επικάθονται ομοιόμορφα.
  
- Αφού γεμίσει το μεταλλικό κέλυφος με υλικό, τοποθετείται ένας νέος πωρόλιθος στο πάνω άκρο του δοκιμίου με προσοχή ώστε να μην το συμπιέσει, ενώ στη κορυφή του κελύφους τοποθετείται μεταλλικός δακτύλιος πάνω στον οποίο εφαρμόζεται ελαστικός δακτύλιος (o-ring).

- Στην άνω επιφάνεια του πωρόλιθου, τοποθετείται ειδική κεφαλή (top cap) στην οποία καταλήγει εύκαμπτος σωλήνας μέσω του οποίου είναι δυνατή η ρύθμιση της πίεσης των πόρων (back pressure) εντός του δοκιμίου. Η κεφαλή συγκρατείται προσωρινά σε οριζόντια θέση και σταθερό ύψος μέσω μεταλλικού βραχίονα. Ο βραχίονας με τη σειρά του στερεώνεται σε κατακόρυφη ράβδο που τοποθετείται σε κατάλληλη υποδοχή της τριαξονικής συσκευής.
- Στη συνέχεια, το τμήμα της εσωτερικής μεμβράνης που εξείχε από το κέλυφος, ανασηκώνεται ώστε να εφαρμόσει πλέον στην κεφαλή και στον πωρόλιθο. Κατόπιν, πάνω στην κυλινδρική επιφάνεια της κεφαλής αφήνεται να εφαρμόσει ο ελαστικός δακτύλιος, που βρίσκεται πάνω στον αντίστοιχο μεταλλικό, που τοποθετήθηκε προηγουμένως στην κορυφή του κελύφους. Αυτό γίνεται ώστε να απομονωθεί το δοκίμιο μέσα στην ελαστική μεμβράνη.
- Έπειτα, μέσω της ειδικής κεφαλής (top cap) επιβάλλεται στο δοκίμιο, η ίδια υποπίεση που επιβαλλόταν μέχρι εκείνη τη στιγμή στο κέλυφος ώστε να διατηρεί τεντωμένη την επιφάνεια της εσωτερικής μεμβράνης. Το δοκίμιο πλέον, χάρη στους ελαστικούς δακτυλίους και τη μεμβράνη είναι απομονωμένο και χάρη στην υποπίεση στέκει κατακόρυφο. Στο σημείο αυτό αφαιρείται το μεταλλικό κέλυφος.
- Το επόμενο βήμα είναι η μέτρηση και η καταγραφή του ύψους και της διαμέτρου του δοκιμίου. Λαμβάνονται τρεις μετρήσεις του ύψους σε διαφορετικά σημεία γύρω από την περιφέρεια του δοκιμίου και τρεις μετρήσεις της διαμέτρου σε διαφορετικές διατομές και από αυτές εξάγεται η μέση τιμή για κάθε μέγεθος.

- Στην επιφάνεια του δοκιμίου και συγκεκριμένα πάνω στην ελαστική μεμβράνη που το περιβάλλει, τοποθετούνται δύο ινκλινόμετρα, αισθητήρες οι οποίοι μετρούν την παραμόρφωση του δοκιμίου με ιδιαίτερη ακρίβεια ( αναφορά γίνεται στο Μέρος Α', Κεφ. 3).
- Πλέον είναι δυνατή η τοποθέτηση της κυλινδρικής κυψέλης από plexi-glass και η πλήρωση της με νερό. Το νερό φυλάσσεται σε κατάλληλο δοχείο το οποίο βρίσκεται σε υπερυψωμένο σημείο και έχει προηγουμένως υποστεί τη διαδικασία της απαέρωσης, ώστε στο δίκτυο των λεπτών σωλήνων που χρησιμοποιούνται κατά τη διαδικασία του πειράματος, να κυκλοφορεί απαερωμένο νερό.
- Μετά την πλήρωση της κυψέλης μπορεί πλέον να επιβληθεί πλευρική πίεση στο δοκίμιο καθώς και να δοθεί συγκεκριμένη τιμή στην πίεση των πόρων εντός της ελαστικής μεμβράνης όπου βρίσκεται αυτό. Σε αυτό το σημείο σκοπός είναι να αναπτυχθούν μεγάλες πιέσεις πόρων της τάξης των 500 – 600 KPa. Στις πιέσεις αυτές ο αέρας έχει μεγαλύτερη διαλυτότητα στο νερό και επομένως επιτυγχάνεται μεγαλύτερος βαθμός κορεσμού καθώς οι φυσαλίδες οι οποίες έχουν τυχόν εγκλωβιστεί στο δοκίμιο διαλύονται με την αύξηση των πιέσεων. Κατά την αύξηση των πιέσεων όμως, για να ισχύουν ισότροπες συνθήκες, πρέπει η ενεργός τάση που ασκείται στο δοκίμιο (διαφορά μεταξύ της πίεσης της κυψέλης και της πίεσης πόρων), να διατηρείται κατά το δυνατόν σταθερή και να μην υπερβεί την τελική τιμή στην οποία θα στερεοποιηθεί τελικά το δοκίμιο. Για το λόγο αυτό, η αύξηση της πίεσης γίνεται σταδιακά σε μικρές ποσότητες της τάξης των 30 KPa. Η διαφορά πίεσης, πλευρικής και πόρων, εισάγεται στην κυψέλη και στο δοκίμιο αντίστοιχα, με την βοήθεια ενός δικτύου μικρών σωληνώσεων και δοχείων και με τη βοήθεια ηλεκτρονικών αισθητήρων πάνω στην πειραματική διάταξη, οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή είναι δυνατή, τόσο η μέτρηση όσο και η ρύθμιση των πιέσεων στο δοκίμιο ανά πάσα

στιγμή. Επιπλέον με τη χρήση βαλβίδων είναι δυνατή η διαμόρφωση και ο έλεγχος της επιθυμητής τιμής της πίεσης, πριν την επιβολή της.

- Το βήμα κατά το οποίο επιτυγχάνεται η σταδιακή αύξηση των πιέσεων ονομάζεται **στάδιο κορεσμού**. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα υπολογίζεται ο βαθμός κορεσμού. Αυτός είναι ίσος με τη μεταβολή της πίεσης των πόρων υπό αστράγγιστες συνθήκες προς την αντίστοιχη μεταβολή της πίεσης της κυψέλης. Σε ένα πλήρως κορεσμένο δοκίμιο ο λόγος B (Skempton, A.W., 1954. The pore-pressure coefficients A and B, *Geotechnique*, 4, 143-147) θα ήταν ίσος με τη μονάδα. Επειδή αυτό είναι εξαιρετικά δύσκολο και χρονοβόρο για την πραγματοποίηση των πειραμάτων θεωρείται κορεσμένο ένα δοκίμιο με βαθμό κορεσμού 95% τουλάχιστον.
- Αφού επέλθει και ο κορεσμός, η πειραματική διαδικασία περνάει στη **φάση της στερεοποίησης**. Στη φάση αυτή διαμορφώνεται αρχικά στο δοκίμιο η τελική ενεργός τάση, με ρύθμιση της διαφοράς μεταξύ πίεσης της κυψέλης και πίεσης των πόρων. Στη συνέχεια αφήνεται το δοκίμιο σε κατάσταση ελεύθερης στράγγισης για περίπου μια ώρα. Στο διάστημα αυτό ο όγκος του δοκιμίου μειώνεται, γεγονός που επιβεβαιώνεται από την εκροή αντίστοιχης ποσότητας ύδατος. Το νερό που εκρέει καταλήγει σε δοχείο, η στάθμη του οποίου μετράται με ακρίβεια (μέτρηση cc). Η μέτρηση των cc εξυπηρετεί στον υπολογισμό της ογκομετρικής μεταβολής του δοκιμίου, η οποία με τη σειρά της βοηθάει στον υπολογισμό της τελικής τιμής του δείκτη πόρων.
- Με το πέρας της φάσης της στερεοποίησης είναι πλέον δυνατή η έναρξη της διάτμησης του δοκιμίου. Η βάση πάνω στην οποία έχει τοποθετηθεί το δοκίμιο μπορεί να κινείται κατακόρυφα με τη βοήθεια ενός εμβόλου, η πίεση του οποίου ρυθμίζεται μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Η ειδική κεφαλή (top cap) που έχει τοποθετηθεί πάνω στο δοκίμιο προορίζεται ώστε να ακουμπά σε ακλόνητο σημείο στην οροφή της κυψέλης, το οποίο διαθέτει αισθητήρα φορτίου. Σαν πρώτη κίνηση διαμορφώνεται στο δοχείο

των αξονικών πιέσεων πίεση ίση με εκείνη της κυψέλης. Στη συνέχεια αυτή αυξάνεται σε πολύ μικρά βήματα. Μόλις υπερβεί επαρκώς την πίεση της κυψέλης, το έμβολο ανυψώνει τη βάση στην οποία εδράζεται το δοκίμιο και εφόσον η ειδική κεφαλή έρθει σε επαφή με το ακλόνητο σημείο, το δοκίμιο δέχεται δύναμη περίπου 2-3N η οποία μετράται από τον αισθητήρα φορτίου.

- Στο σημείο αυτό το έμβολο συνδέεται με αυτόματη υδραυλική αντλία. Αυτή με τη βοήθεια του ηλεκτρονικού υπολογιστή, έχει τη δυνατότητα να επιβάλλει σταθερό ρυθμό αξονικής παραμόρφωσης στο δοκίμιο, με έλεγχο των παραμορφώσεων (deformation-control), είτε σταθερό ρυθμό αύξησης των τάσεων, με έλεγχο των τάσεων (stress-control). Το ηλεκτρονικό σύστημα υπολογίζει και ρυθμίζει την επιβαλλόμενη μεταβολή έτσι ώστε, είτε ο ρυθμός παραμόρφωσης είτε ο ρυθμός επιβαλλόμενης τάσης να παραμένει σταθερός και ίσος με την τιμή που έχει οριστεί για εκείνον.
- Με την έναρξη της λειτουργίας της αυτόματης αντλίας η βαλβίδα στράγγισης του νερού των πόρων κλείνει ώστε η δοκιμή να είναι αστράγγιστη ενώ αφήνεται ανοικτή εκείνη της πίεσης της κυψέλης. Έτσι καθώς το νερό της κυψέλης είναι ελεύθερο να εξέλθει, η ανυψούμενη βάση του δοκιμίου μπορεί να κινηθεί προς τα πάνω χωρίς να μεταβάλλεται η πλευρική τάση ( $\sigma_3'$ ).

- Κατά την εξέλιξη του πειράματος, καταγράφονται με την βοήθεια ηλεκτρονικών αισθητήρων, σε τακτά χρονικά διαστήματα, οι μετρήσεις των διαφόρων μεγεθών που θα χρησιμοποιηθούν αργότερα για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την απόκριση του δοκιμίου. Τα μεγέθη που μας ενδιαφέρουν είναι:
- Η επιβαλλόμενη αξονική τάση  $\sigma_1 - \sigma_3$  στο δοκίμιο (load σε N)
  - Η πλευρική τάση  $\sigma_3$  (πίεση της κυψέλης η οποία παραμένει σταθερή)
  - Η πίεση του νερού των πόρων  $u$  στο εσωτερικό του δοκιμίου
  - Η αυξομείωση της ποσότητας του νερού των πόρων  $cc$  (μηδενική για συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης)
  - Οι μεταβολές της αξονικής παραμόρφωσης του δοκιμίου από τα δύο ινκλινόμετρα
  - Η μεταβολή της αξονικής παραμόρφωσης από το μηκυνσιόμετρο επί της βάσης του δοκιμίου και εξωτερικά της κυψέλης.
- Το πείραμα συνεχίζεται μέχρι να επέλθει η αστοχία και για ένα διάστημα μετά από αυτή. Συνήθως η όλη διαδικασία της διάτμησης διαρκεί 4 ώρες.
- Μετά το πέρας του πειράματος αφαιρείται προσεκτικά η ποσότητα της άμμου που χρησιμοποιήθηκε και τοποθετείται σε κλίβανο ώστε να αποβάλλει την υγρασία της. Στον κλίβανο αφήνεται μια μέρα και στη συνέχεια ζυγίζεται για να υπολογιστεί το ξηρό βάρος του δοκιμίου.

Από επεξεργασία των δεδομένων του δοκιμίου (ύψος, βάρος, διάμετρος) και των καταγεγραμμένων μετρήσεων με τη βοήθεια κατάλληλου προγράμματος (Microsoft Excel), προκύπτουν τα απαραίτητα στοιχεία για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς της δοκιμαζόμενης άμμου ( $e$ ,  $D_r$ ) καθώς και τα ζητούμενα διαγράμματα.



## Κεφάλαιο 8<sup>ο</sup>

---

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΟ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

## 8. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΔΟΚΙΜΩΝ ΠΟΥ ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

### 8.1 Εισαγωγή

Στο εργαστήριο εδαφομηχανικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και συγκεκριμένα στην αυτοματοποιημένη συσκευή τριαξονικής δοκιμής ελεγχόμενων διαδρομών τάσεων, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 23 πειράματα, υπό συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης. Από αυτά, τα 19 στέφθηκαν με επιτυχία και χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των κρίσιμων συμπερασμάτων που θα δούμε παρακάτω (Κεφ. 9). Οι τριαξονικές δοκιμές διεξήχθησαν, όπως προαναφέρθηκε, σε τέσσερις διαφορετικές άμμους, σε διαφορετικές τιμές πλευρικής τάσης (100, 200 και 300 KPa) και σε κυρίως μέσης πυκνότητας δοκίμια. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι φόρτισης : η δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων (deformation-control test) και η δοκιμή με έλεγχο των τάσεων (stress-control test).

- ✓ Στην άμμο M31, πραγματοποιήθηκαν έξι δοκιμές με έλεγχο των παραμορφώσεων, από τις οποίες δύο σε χαλαρά δοκίμια, τρεις σε δοκίμια μέσης πυκνότητας και μία σε πυκνό δοκίμιο. Επίσης δύο από αυτές είχαν τιμή πλευρικής τάσης 100 KPa, μία είχε 200 KPa και τρεις είχαν 300 KPa. Στη συγκεκριμένη άμμο διεξήχθησαν ακόμα δύο δοκιμές, αυτή τη φορά με έλεγχο των τάσεων και σε δοκίμια μέσης πυκνότητας. Η μία έγινε στα 100 KPa και η άλλη στα 200.
- ✓ Στην άμμο HRS, πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές με έλεγχο των παραμορφώσεων, σε χαλαρά έως μέσης πυκνότητας δοκίμια, σε τιμές πλευρικής τάσης 100, 200 και 300 KPa αντίστοιχα. Επίσης διεξήχθησαν ακόμα δύο δοκιμές, αυτή τη φορά με έλεγχο των τάσεων και σε δοκίμια παρόμοια με τα παραπάνω. Η μία έγινε στα 100 KPa και η άλλη στα 200.

- ✓ Στην άμμο Longstone, πραγματοποιήθηκαν τρεις δοκιμές, μόνο με έλεγχο των παραμορφώσεων, καθώς η συμπεριφορά της συγκεκριμένης άμμου πλησιάζει αυτή της Ham River Sand. Οι δοκιμές των 100 και των 300 KPa πραγματοποιήθηκαν σε μέσης πυκνότητας δοκίμια ενώ αυτή των 200 KPa σε σχετικά πυκνό δοκίμιο.
- ✓ Στην άμμο Fontainebleau, πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές με έλεγχο των παραμορφώσεων, στα 200 KPa πλευρική τάση. Η μία σε δοκίμιο μέσης πυκνότητας και η άλλη σε δοκίμιο σχετικά πυκνής δομής. Σε αυτή την άμμο διεξήχθη ακόμη μία δοκιμή στα 200 KPa, με έλεγχο των τάσεων αυτή τη φορά και σε δοκίμιο μέσης πυκνότητας.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα 19 πειράματα με βάση τις συνθήκες υπό τις οποίες εκτελέστηκαν :

A/A	Άμμος	$\sigma_3'$ (KPa)	Πυκνότητα	Μέθοδος Φόρτισης
4.3.1	M31	100	Χαλαρή	DC
4.3.2	M31	100	Μεσ. Πυκνότητας	DC
4.3.3	M31	200	Μεσ. Πυκνότητας	DC
4.3.4	M31	300	Χαλαρή	DC
4.3.5	M31	300	Μεσ. Πυκνότητας	DC
4.3.6	M31	300	Πυκνή	DC
4.3.7	M31	100	Μεσ. Πυκνότητας	LC
4.3.8	M31	200	Μεσ. Πυκνότητας	LC
4.3.9	Ham River Sand	100	Μεσ. Πυκνότητας	DC
4.3.10	Ham River Sand	200	Μεσ. Πυκνότητας	DC
4.3.11	Ham River Sand	300	Μεσ. Πυκνότητας	DC
4.3.12	Ham River Sand	100	Μεσ. Πυκνότητας	LC
4.3.13	Ham River Sand	200	Μεσ. Πυκνότητας	LC
4.3.14	Longstone	100	Μεσ. Πυκνότητας	DC
4.3.15	Longstone	200	Πυκνή	DC
4.3.16	Longstone	300	Μεσ. Πυκνότητας	DC
4.3.17	Fontainebleau	200	Μεσ. Πυκνότητας	DC
4.3.18	Fontainebleau	200	Πυκνή	DC
4.3.19	Fontainebleau	200	Μεσ. Πυκνότητας	LC

Σχ. 8.1 : Οι δοκιμές με βάση τις συνθήκες υπό τις οποίες εκτελέστηκαν

## 8.2 Επεξεργασία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δοκιμών

### Αρχικοί δείκτες πόρων και αρχικές σχετικές πυκνότητες

Πριν από την εκτέλεση του κάθε πειράματος, καταγράφονται το ύψος και η διάμετρος του δοκιμίου, η διάμετρος της ελαστικής μεμβράνης και μετά το πέρας της πειραματικής διαδικασίας καταγράφεται το καθαρό βάρος της χρησιμοποιούμενης άμμου. Αυτά τα στοιχεία μαζί με τα γενικά χαρακτηριστικά της κάθε άμμου ( $G_s$ ,  $e_{min}$ ,  $e_{max}$ ), οδηγούν στον υπολογισμό του αρχικού δείκτη πόρων ( $e_0$ ) και της αρχικής σχετικής πυκνότητας ( $D_r$ ) του κάθε δοκιμίου. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αυτά τα μεγέθη τα οποία είναι πολύ σημαντικά για τις μετέπειτα αναλύσεις.

A/A	Άμμος	$D_m$ (mm)	$D$ (mm)	$H$ (mm)	$M_s$ (gr)	$V_0$ ( $m^3$ )	$G_s$ ( $Mg/m^3$ )	$e_{min}$ (-)	$e_{max}$ (-)	$V_s$ ( $m^3$ )	$V_v$ ( $m^3$ )	$e$ (-)	$D_r$ (%)
4.3.1	M31100DC	0,62	37,83	80,50	132,22	0,000090	2,65	0,528	0,870	0,000050	0,000041	0,813	16,8
4.3.2	M31100DC	0,63	37,51	82,96	138,58	0,000092	2,65	0,528	0,870	0,000052	0,000039	0,752	34,5
4.3.3	M31200DC	0,62	37,59	80,30	134,57	0,000089	2,65	0,528	0,870	0,000051	0,000038	0,754	33,9
4.3.4	M31300DC	0,53	37,77	81,00	132,84	0,000091	2,65	0,528	0,870	0,000050	0,000041	0,810	17,7
4.3.5	M31300DC	0,98	37,46	82,91	138,64	0,000091	2,65	0,528	0,870	0,000052	0,000039	0,746	36,3
4.3.6	M31300DC	1,06	37,49	82,67	145,76	0,000091	2,65	0,528	0,870	0,000055	0,000036	0,658	61,9
4.3.7	M31100LC	0,56	37,58	82,80	138,29	0,000092	2,65	0,528	0,870	0,000052	0,000040	0,759	32,5
4.3.8	M31200LC	0,54	37,42	82,00	136,00	0,000090	2,65	0,528	0,870	0,000051	0,000039	0,756	33,2
4.3.9	HRS100DC	1,11	37,22	83,50	137,61	0,000091	2,66	0,526	0,860	0,000052	0,000039	0,755	31,4
4.3.10	HRS200DC	0,70	37,68	80,64	138,09	0,000090	2,66	0,526	0,860	0,000052	0,000038	0,731	38,5
4.3.11	HRS300DC	1,14	37,25	83,00	138,03	0,000090	2,66	0,526	0,860	0,000052	0,000039	0,742	35,3
4.3.12	HRS100LC	1,05	37,37	82,22	136,49	0,000090	2,66	0,526	0,860	0,000051	0,000039	0,757	31,0
4.3.13	HRS200LC	0,92	37,46	83,07	138,59	0,000092	2,66	0,526	0,860	0,000052	0,000039	0,756	31,0
4.3.14	LS100DC	1,04	37,45	82,68	129,17	0,000091	2,64	0,614	0,995	0,000049	0,000042	0,860	35,3
4.3.15	LS200DC	1,00	37,60	79,79	131,80	0,000089	2,64	0,614	0,995	0,000050	0,000039	0,774	58,1
4.3.16	LS300DC	1,14	37,31	83,91	129,12	0,000092	2,64	0,614	0,995	0,000049	0,000043	0,875	31,6
4.3.17	FD200DC	0,71	37,58	83,27	139,34	0,000092	2,64	0,540	0,865	0,000053	0,000040	0,749	35,7
4.3.18	FD200DC	0,63	37,76	83,00	145,22	0,000093	2,64	0,540	0,865	0,000055	0,000038	0,689	54,2
4.3.19	FD200LC	0,51	37,82	82,17	139,92	0,000092	2,64	0,540	0,865	0,000053	0,000039	0,741	38,2

Σχ. 8.2 : Δείκτες πόρων και σχετικές πυκνότητες των δοκιμών πριν την στερεοποίηση

**Δείκτες πόρων και σχετικές πυκνότητες μετά την στερεοποίηση**

Μετά τη διαδικασία της στερεοποίησης και αφού μετρήθηκε και καταγράφηκε ο όγκος του νερού που εξήλθε από το εσωτερικό του δοκιμίου (ποσότητα cc), όγκος που ισοδυναμεί με την ογκομετρική μεταβολή του ( $V_0 - V_c$ ), υπολογίζεται ο καινούργιος όγκος του δοκιμίου  $V_c$  καθώς και ο καινούργιος όγκος των κενών  $V_v'$ . Με τα καινούργια δεδομένα καταλήγουμε στον τελικό δείκτη πόρων και στην τελική σχετική πυκνότητα του δοκιμίου. Οι δείκτες πόρων και οι σχετικές πυκνότητες μετά την στερεοποίηση φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

A/A	Άμμος	cc (cm <sup>3</sup> )	$V_c$	$V_v'$	$e_c$	$D_r'$
4.3.1	M31100DC	0,000000320	0,0000901153	0,0000402210	0,806	18,7
4.3.2	M31100DC	0,000000640	0,0000909889	0,0000386946	0,740	38,0
4.3.3	M31200DC	0,000001140	0,0000879297	0,0000371485	0,732	40,5
4.3.4	M31300DC	0,000001002	0,0000897066	0,0000395783	0,790	23,5
4.3.5	M31300DC	0,000001502	0,0000898277	0,0000375107	0,717	44,7
4.3.6	M31300DC	0,000001400	0,0000898113	0,0000348075	0,633	69,4
4.3.7	M31100LC	0,000000490	0,0000913038	0,0000391189	0,750	35,2
4.3.8	M31200LC	0,000002806	0,0000873285	0,0000360077	0,702	49,2
4.3.9	HRS100DC	0,000001230	0,0000895748	0,0000378417	0,731	38,5
4.3.10	HRS200DC	0,000001840	0,0000880356	0,0000361221	0,696	49,2
4.3.11	HRS300DC	0,000001050	0,0000893566	0,0000374657	0,722	41,3
4.3.12	HRS100LC	0,000000960	0,0000891750	0,0000378629	0,738	36,6
4.3.13	HRS200LC	0,000001540	0,0000899660	0,0000378645	0,727	39,9
4.3.14	LS100DC	0,000000415	0,0000906127	0,0000416847	0,852	37,5
4.3.15	LS200DC	0,000000795	0,0000877561	0,0000378318	0,758	62,3
4.3.16	LS300DC	0,000001010	0,0000906825	0,0000417734	0,854	37,0
4.3.17	FD200DC	0,000001040	0,0000912749	0,0000384946	0,729	41,7
4.3.18	FD200DC	0,000001080	0,0000918191	0,0000368116	0,669	60,2
4.3.19	FD200LC	0,000001050	0,0000912127	0,0000382127	0,721	44,3

Σχ. 8.3 : Δείκτες πόρων και σχετικές πυκνότητες των δοκιμίων μετά την στερεοποίηση

### 8.3 Επεξεργασία των μετρήσεων και παρουσίαση των αποτελεσμάτων

Στο Κεφάλαιο 7, έγινε αναφορά στα επτά μεγέθη που καταγράφονται κατά την διάρκεια της διάτμησης του δοκιμίου στην τριαξονική συσκευή. Ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του δοκιμίου (ύψος, όγκος, εμβαδόν διατομής), υπολογίζονται τα εξής μεγέθη :

- Αποκλίνουσα τάση  $q = (\sigma_1' - \sigma_3')/2$
- Μέση κύρια τάση  $p = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$
- Ανηγγμένη αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου  $\varepsilon = \Delta H/H_0$
- Μεταβολή της υπερπίεσης των πόρων στο δοκίμιο  $\Delta U$

Από τα μεγέθη αυτά, προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα (όπως προαναφέρθηκε στο Κεφ. 3, Μερ. Α'), τα οποία είναι απαραίτητα για την μελέτη και την κατανόηση της συμπεριφοράς των δοκιμίων της άμμου :

- ❖ Η αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτηθεί της μέσης κύριας τάσης  $p$ .
- ❖ Η αποκλίνουσα τάση  $q$  συναρτηθεί της ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης του δοκιμίου  $\varepsilon$ .
- ❖ Η υπερπίεση των πόρων ( $\Delta U$ ) συναρτηθεί της ανηγμένης αξονικής παραμόρφωσης του δοκιμίου  $\varepsilon$ .

Στο παράρτημα (Α) παρουσιάζονται τα διαγράμματα για κάθε δοκιμή που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο.

## Κεφάλαιο 9<sup>ο</sup>

---

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

## 9. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

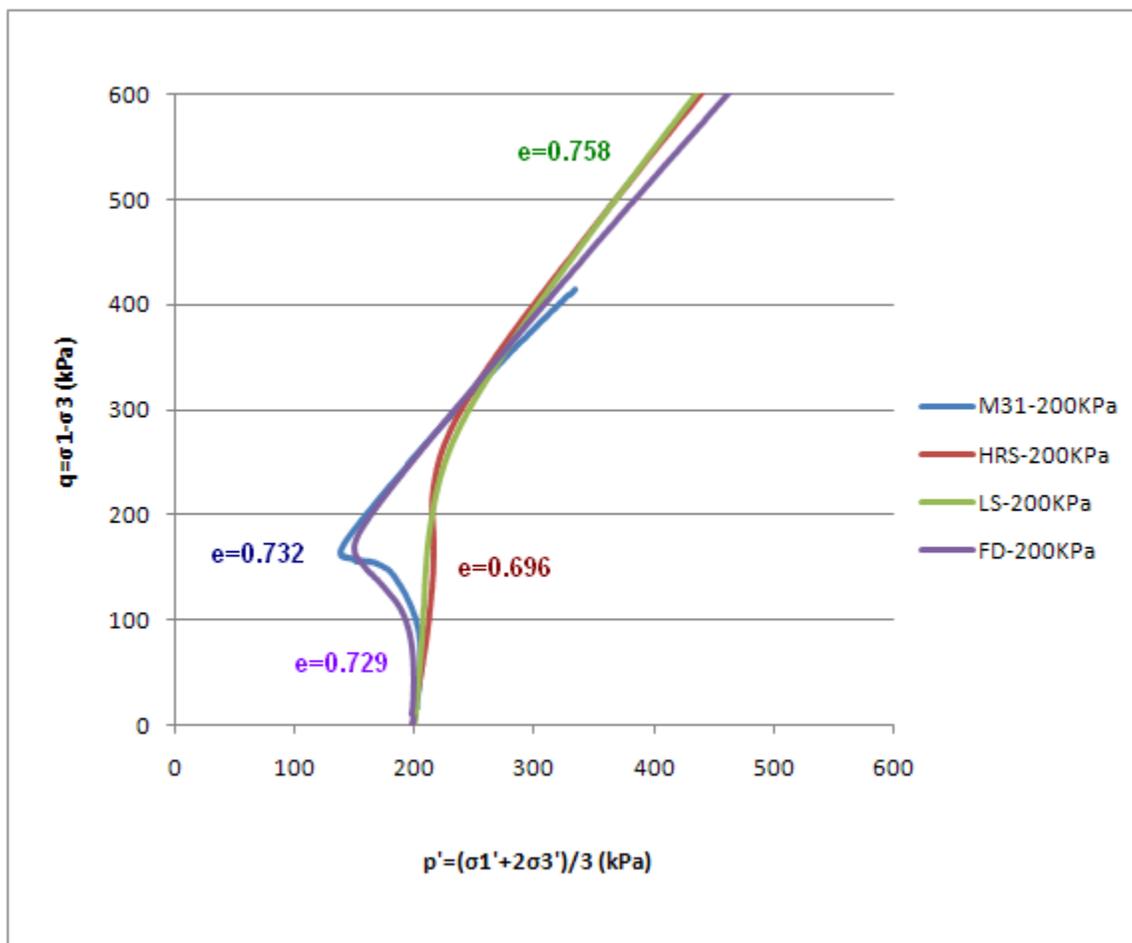
### 9.1 Συγκριτικές αναλύσεις ως προς το είδος της άμμου

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τέσσερις δοκιμές οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε τέσσερις διαφορετικές άμμους (M31, Ham River Sand, Longstone, Fontainebleau) και όσο είναι δυνατόν κάτω από τις ίδιες συνθήκες. Συγκεκριμένα όλα τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν σε ενεργό τάση 200KPa, χαρακτηρίζονται ως μέσης πυκνότητας και υποβλήθηκαν σε διάτμηση με την μέθοδο ελεγχόμενης παραμόρφωσης (strain control). Οι δείκτες πόρων των δοκιμών είναι παρόμοιοι για τις άμμους M31 και Fontainebleau, ενώ οι άμμοι Longstone και HRS έχουν λίγο μεγαλύτερο και λίγο μικρότερο δείκτη αντίστοιχα. Στο διάγραμμα του Σχήματος 9.1 φαίνονται οι διαδρομές των ενεργών τάσεων που ακολουθήθηκαν από τα τέσσερα δοκίμια κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Είναι φανερό πως η απόκριση των άμμων M31 και Fontainebleau διαφέρει αισθητά από την απόκριση των άμμων HRS και Longstone.

Τα δοκίμια M31 και Fontainebleau, μετά την επιβολή του αξονικού φορτίου, παρουσιάζουν έντονα συστολική συμπεριφορά, ο όγκος τους δηλαδή μειώνεται και το επιβαλλόμενο εξωτερικό φορτίο αναλαμβάνεται μερικώς από την υγρή φάση. Κατά συνέπεια αυξάνεται η πίεση των πόρων, μειώνεται η ενεργός τάση και επομένως και η διατμητική αντοχή των δοκιμών. Στο δοκίμιο άμμου Fontainebleau η συστολική συμπεριφορά συνεχίζεται μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης ενώ στο δοκίμιο άμμου M31, μετά το σημείο αιχμής της αποκλίνουσας τάσης και μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης, εμφανίζεται το φαινόμενο της σταδιακής απομείωσης της αντοχής του δοκιμίου, κατά το οποίο η τάση δεν αυξάνεται ή αυξάνεται ελάχιστα με ταυτόχρονη αύξηση της παραμόρφωσης. Μετά το σημείο αλλαγής φάσης και στα δύο δοκίμια ο όγκος πλέον αυξάνεται, η πίεση των πόρων ελαττώνεται, η

ενεργός τάση και η διατμητική αντοχή αυξάνονται με ίδιο και σταθερό ρυθμό, καθώς το δοκίμιο ακολουθεί την περιβάλλουσα αστοχίας.

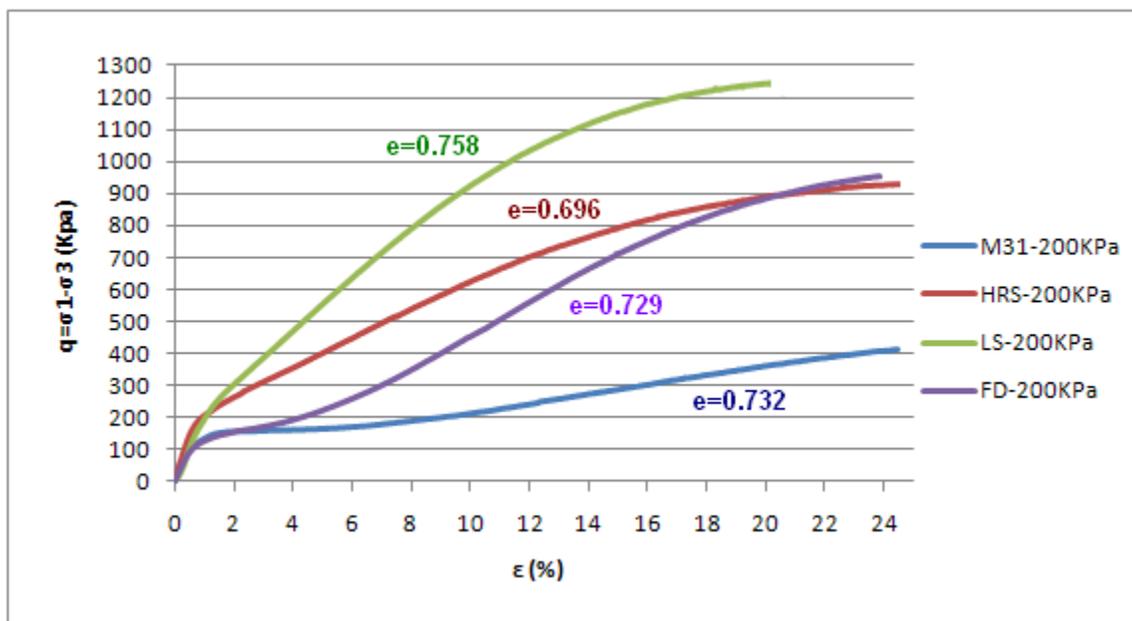
Τα δοκίμια HRS και Longstone, μετά την επιβολή του αξονικού φορτίου, εκδηλώνουν ελάχιστα συστολική συμπεριφορά. Το επιβαλλόμενο εξωτερικό φορτίο αναλαμβάνεται και πάλι μερικώς από την υγρή φάση, αυξάνοντας την πίεση των πόρων, αλλά η ενεργός τάση τους μειώνεται μηδαμινά ή καθόλου για τις αρχικές μικρές παραμορφώσεις και μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης. Μετά το σημείο αυτό, τα δοκίμια παρουσιάζουν διαστολική συμπεριφορά και αποκρίνονται όμοια με τα δύο προηγούμενα.



Σχ. 9.1 : Διάγραμμα  $q - p'$  από δοκίμια διαφορετικών άμμων μέσης πυκνότητας στα 200 KPa

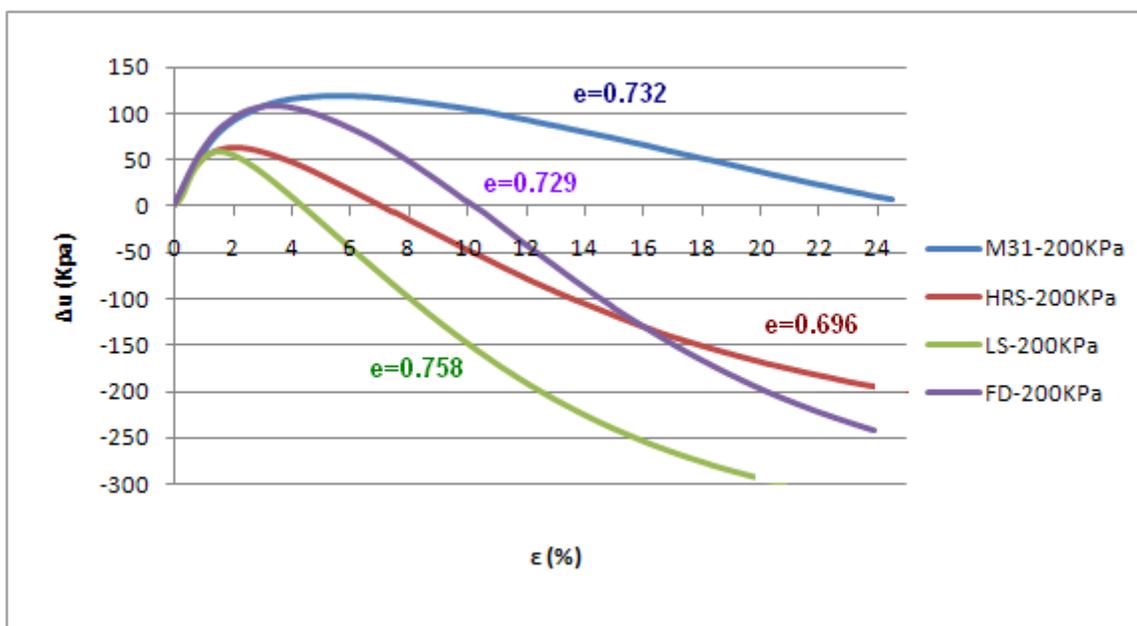
Τελικά και τα τέσσερα δοκίμια καταλήγουν σε κατάσταση σταθερού λόγου τάσεων με κοινό ρυθμό μεταβολής της αποκλίνουσας τάσης  $q$  σε συνάρτηση με τη μέση ενεργό τάση  $p$  και μάλιστα τα γραφήματα τους ταυτίζονται (Σχ. 9.1).

Στο διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης του Σχήματος 9.2, όλα τα δοκίμια, εκτός αυτού της άμμου M31, παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Μετά από μία μικρή απότομη αύξηση, η διατμητική αντοχή τους, αυξάνεται με σταθερό περίπου ρυθμό σε συνάρτηση με την παραμόρφωση. Ειδικά μετά το σημείο αλλαγής φάσης, για τις ίδιες τιμές αξονικής παραμόρφωσης, μεγαλύτερη διατμητική αντοχή εμφανίζει το δοκίμιο της άμμου Longstone, ακολουθεί το δοκίμιο της άμμου HRS και τελευταίο έρχεται αυτό της άμμου Fontainebleau. Το δοκίμιο της άμμου M31 εμφανίζει το φαινόμενο της ψευδο-σταθερής κατάστασης (η τάση δεν αυξάνεται ή αυξάνεται ελάχιστα με ταυτόχρονη αύξηση της παραμόρφωσης) και μετά το σημείο αλλαγής φάσης, η διατμητική αντοχή του αυξάνεται με πιο αργό ρυθμό σε σχέση με τα άλλα τρία δοκίμια.



Σχ. 9.2 : Διάγραμμα  $q - \epsilon$  από δοκίμια διαφορετικών άμμων μέσης πυκνότητας στα 200 KPa

Παρόμοια συμπεράσματα βγαίνουν και από το διάγραμμα πίεσης πόρων – ανηγμένης παραμόρφωσης του Σχήματος 9.3. Όλα τα δοκίμια παρουσιάζουν μια γρήγορη αύξηση της πίεσης των πόρων και μετά το σημείο αλλαγής φάσης συμπεριφέρονται διαστολικά αυξάνοντας τον όγκο τους, μειώνοντας την πίεση των πόρων και αυξάνοντας παράλληλα την ενεργό τους τάση. Τα δοκίμια των άμμων Longstone και HRS, στα σημεία αλλαγής φάσης εμφανίζουν μικρότερες τιμές πίεσης των πόρων από τα αντίστοιχα των άμμων M31 και Fontainebleau. Επίσης ο ρυθμός μείωσης της πίεσης των πόρων και κατά συνέπεια ο ρυθμός αύξησης της διατμητικής αντοχής, εμφανίζεται μεγαλύτερος στις άμμους Longstone και Fontainebleau.



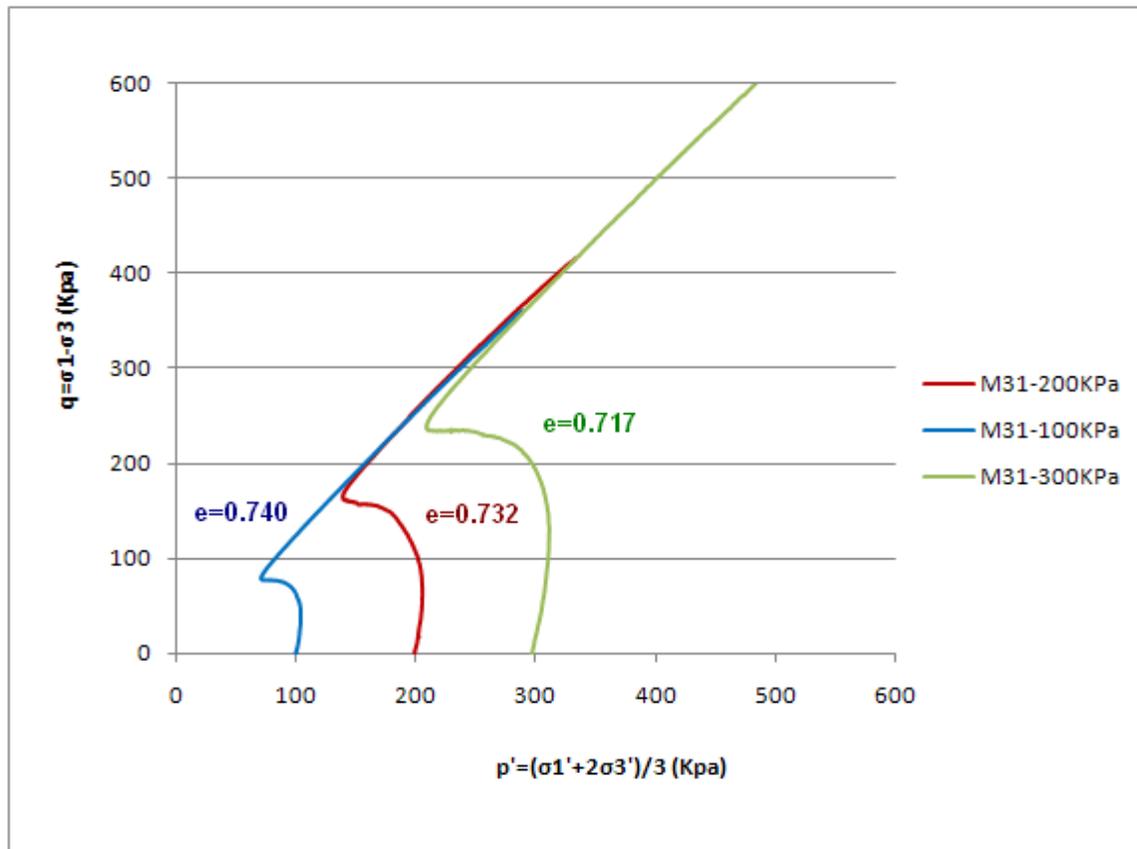
Σχ. 9.3 : Διάγραμμα  $\Delta u - \varepsilon$  από δοκίμια διαφορετικών άμμων μέσης πυκνότητας στα 200 KPa

## 9.2 Συγκριτικές αναλύσεις ως προς την πλευρική τάση

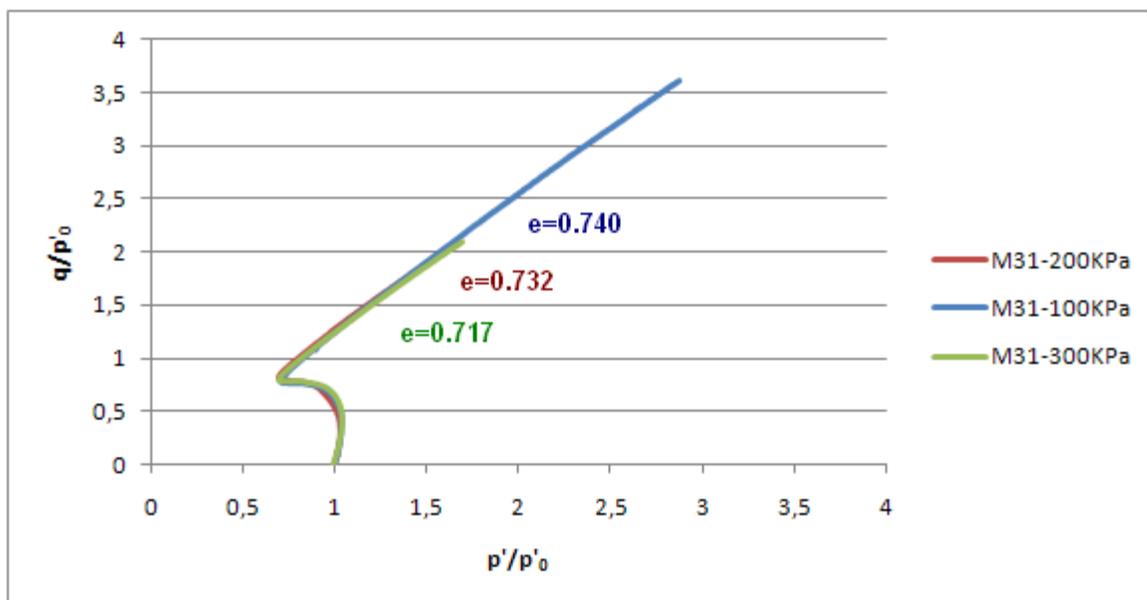
### Δοκίμια άμμου M31

Στο Σχήμα 9.4 διακρίνονται σε διάγραμμα  $q - p'$  τρεις δοκιμές σε μέσης πυκνότητας δοκίμια άμμου M31. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικές τιμές πλευρικής τάσης (100, 200 και 300 KPa) και διαπιστώνεται η τυπική συμπεριφορά της άμμου. Αρχικά με την επιβολή του αξονικού φορτίου τα δοκίμια παρουσιάζουν συστολική συμπεριφορά, ο όγκος τους δηλαδή τείνει να μειωθεί και το επιβαλλόμενο εξωτερικό φορτίο αναλαμβάνεται μερικώς από το νερό των πόρων. Κατά συνέπεια αυξάνεται η πίεση των πόρων, μειώνεται η ενεργός τάση και επομένως και η διατμητική αντοχή των δοκιμίων. Από το σημείο όμως της αλλαγής φάσης και έπειτα το φαινόμενο αντιστρέφεται: ο όγκος των δοκιμίων πλέον τείνει να αυξηθεί, η πίεση των πόρων ελαττώνεται, η ενεργός τάση και η διατμητική αντοχή αυξάνονται με ίδιο και σταθερό ρυθμό, καθώς το δοκίμιο ακολουθεί την περιβάλλουσα αστοχίας.

Συγκρίνοντας τις διαδρομές τάσεων των τριών δοκιμών παρατηρείται μια αναλογία στη μορφή. Όσο μεγαλύτερη είναι η πλευρική τάση στην οποία είχαν στερεοποιηθεί τόσο μεγαλύτερη είναι και η διατμητική αντοχή που αναπτύσσουν πριν φτάσουν στο σημείο αλλαγής της φάσης. Η διαπίστωση αυτή συμβαδίζει με τα όσα αναφέρθηκαν στα κεφάλαια 2 και 4 του μέρους Α σχετικά με την επιρροή της πλευρικής τάσης. Τελικά όλα τα δοκίμια καταλήγουν σε κατάσταση σταθερού λόγου τάσεων με κοινό ρυθμό μεταβολής της αποκλίνουσας τάσης  $q$  σε συνάρτηση με τη μέση ενεργό τάση  $p$ , υποδεικνύοντας πως η γωνία διατμητικής αντοχής δεν επηρεάζεται από την πλευρική τάση. Η παρατηρούμενη συμπεριφορά μπορεί να αποδοθεί στη διαφορετική πλευρική τάση, με δεδομένο ότι τα δοκίμια έχουν παρόμοιο δείκτη πόρων (δοκίμια μέσης πυκνότητας). Στο κανονικοποιημένο διάγραμμα  $q - p'$  του Σχήματος 9.5 φαίνεται ότι τα δοκίμια δεν εμφανίζουν διαφορές.



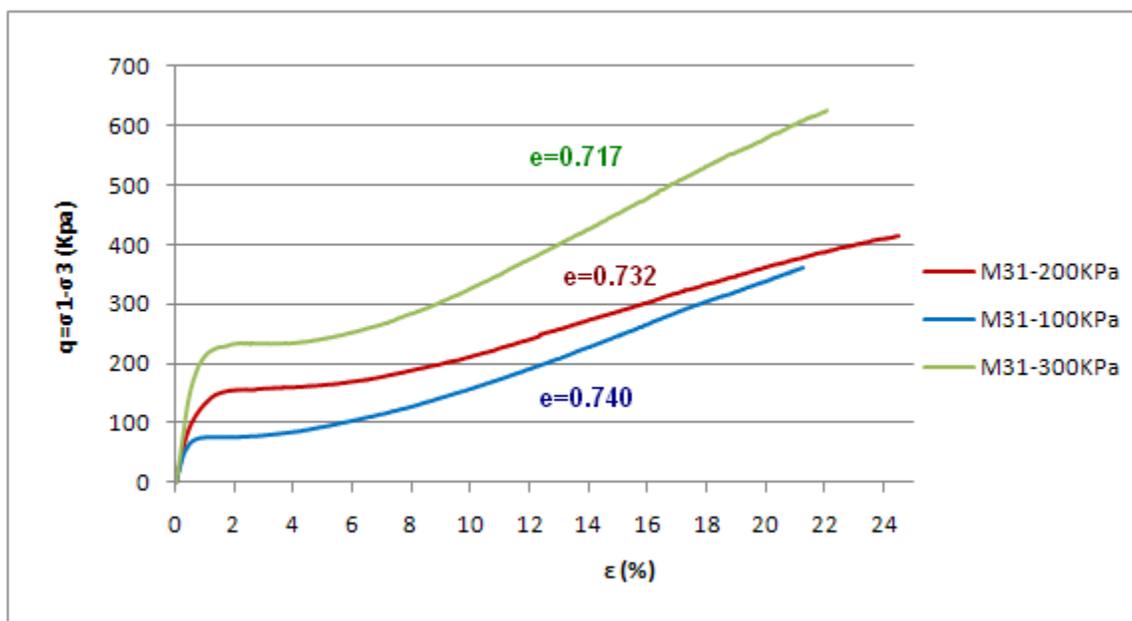
Σχ. 9.4 : Διάγραμμα  $q - p'$  από δοκίμια άμμου M31 μέσης πυκνότητας



Σχ. 9.5 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα  $q - p'$  από δοκίμια άμμου M31 μέσης πυκνότητας

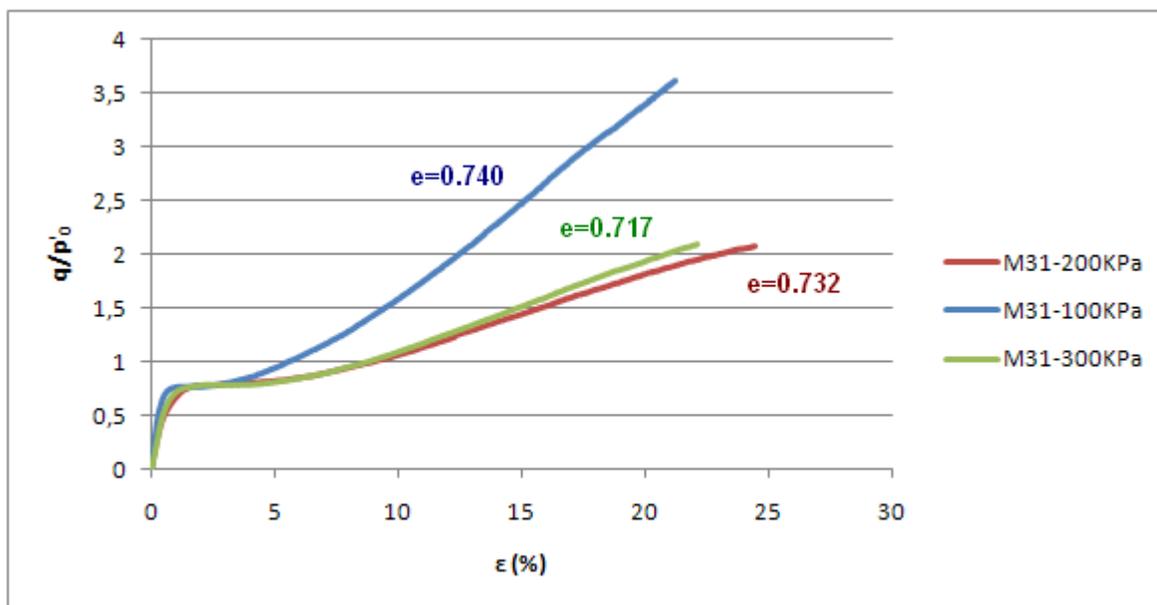
Στις καμπύλες αποκλίνουσας τάσης – παραμόρφωσης του Σχήματος 9.6 διακρίνονται ομοίως κάποια κοινά χαρακτηριστικά και στα τρία δοκίμια. Αρχικά για μικρές παραμορφώσεις αυξάνεται απότομα η τάση  $q$ . Στη συνέχεια, παρατηρείται το στάδιο της ψευδο-σταθερής κατάστασης, κατά το οποίο η τάση δεν αυξάνεται ή αυξάνεται ελάχιστα με ταυτόχρονη αύξηση της παραμόρφωσης. Σε τρίτη φάση η αποκλίνουσα τάση αυξάνεται και πάλι, με σταθερό ρυθμό σε συνάρτηση με την παραμόρφωση, μικρότερο όμως του αρχικού.

Μεταξύ των τριών δοκιμών τις μεγαλύτερες τάσεις αρχικά μέχρι το σημείο αστοχίας του δοκιμίου αναπτύσσει το δοκίμιο το οποίο στερεοποιήθηκε στην μεγαλύτερη πλευρική τάση (300 KPa) ακολουθεί το δοκίμιο των 200 KPa και μετά το δοκίμιο των 100 KPa. Μετά το σημείο αλλαγής φάσης τα δοκίμια παρουσιάζουν μια μικρή διαφορά στο ρυθμό αύξησης της διατμητικής αντοχής. Το δοκίμιο με ενεργό τάση στερεοποίησης τα 100KPa παρουσιάζει περισσότερο απότομο ρυθμό αύξησης της διατμητικής του αντοχής από εκείνα των 200KPa και 300KPa.



Σχ. 9.6 : Διάγραμμα  $q - \epsilon$  από δοκίμια άμμου M31 μέσης πυκνότητας

Στο κανονικοποιημένο διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης – παραμόρφωσης του Σχήματος 9.7 είναι περισσότερο εμφανής η απόκλιση στη συμπεριφορά του δοκιμίου το οποίο στερεοποιήθηκε στα 100KPa από τα δοκίμια τα οποία στερεοποιήθηκαν σε ενεργές τάσεις των 200KPa και 300KPa αντίστοιχα.

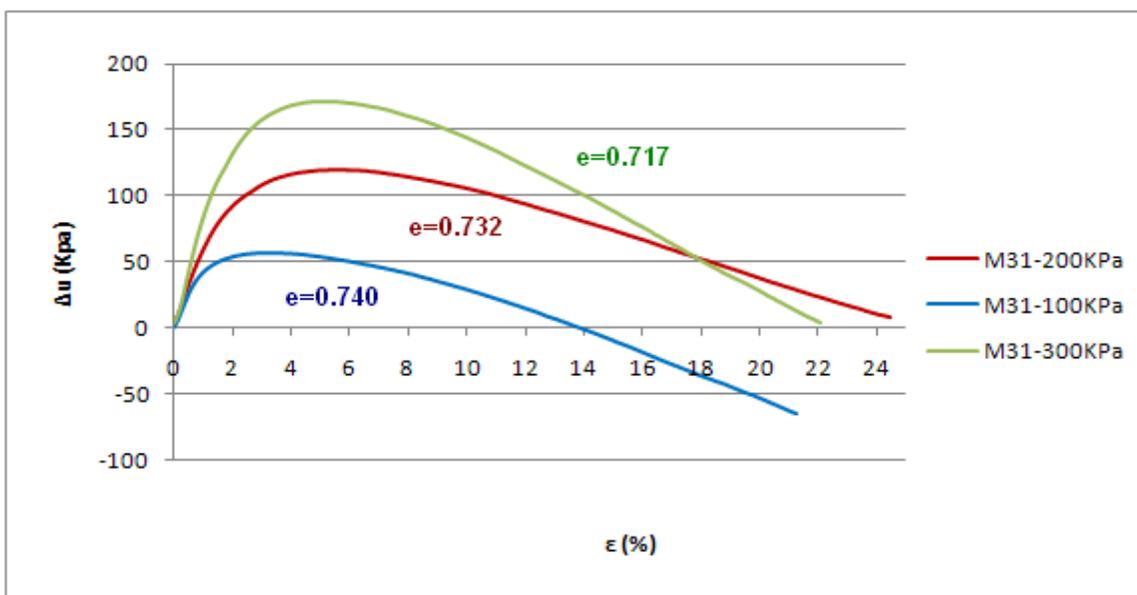


Σχ. 9.7 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα  $q - \epsilon$  από δοκίμια άμμου M31 μέσης πυκνότητας

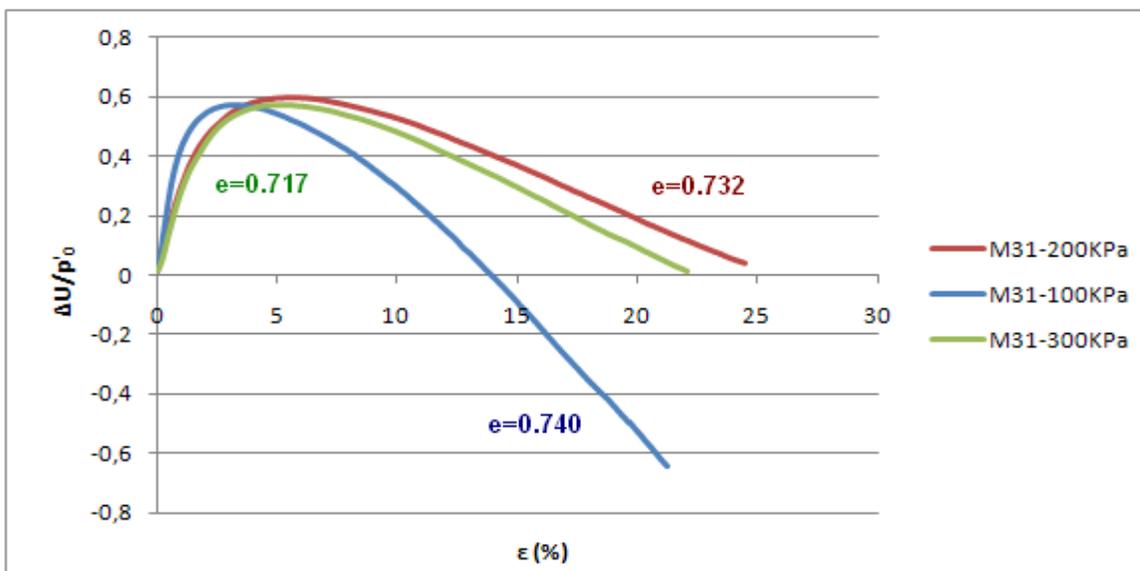
Στο διάγραμμα  $\Delta u - \epsilon$ , οι καμπύλες των δοκιμών παρουσιάζουν παρόμοια μορφή. Μετά από μια αρχική αύξηση έως το σημείο αλλαγής της φάσης, η πίεση των πόρων συνέχεια μειώνεται καθώς αυξάνεται η παραμόρφωση. Όσο μεγαλύτερη είναι η πλευρική τάση του κάθε δοκιμίου τόσο μεγαλύτερη είναι και η πίεση πόρων που αναπτύσσει για δεδομένη παραμόρφωση. Στο δοκίμιο μάλιστα με πλευρική τάση 100 KPa, η πίεση πόρων είναι μικρότερη από την αρχική για παραμόρφωση άνω του 14% (Σχ. 9.8).

Στο κανονικοποιημένο διάγραμμα τάσης πόρων και παραμόρφωσης του Σχήματος 9.9 φαίνεται και πάλι η διαφοροποίηση της άμμου που στερεοποιήθηκε στα 100KPa. Η απόκριση της είναι περισσότερο διαστολική μετά το σημείο αλλαγής φάσης από τα άλλα δύο δοκίμια. Η

πίεση των πόρων στο δοκίμιο των 100KPa, μειώνεται πιο απότομα (σχεδόν μηδενίζεται για παραμόρφωση 14%), πράγμα που συνεπάγεται την αύξηση της ενεργού τάσης και κατά συνέπεια της διατμητικής αντοχής του δοκιμίου.



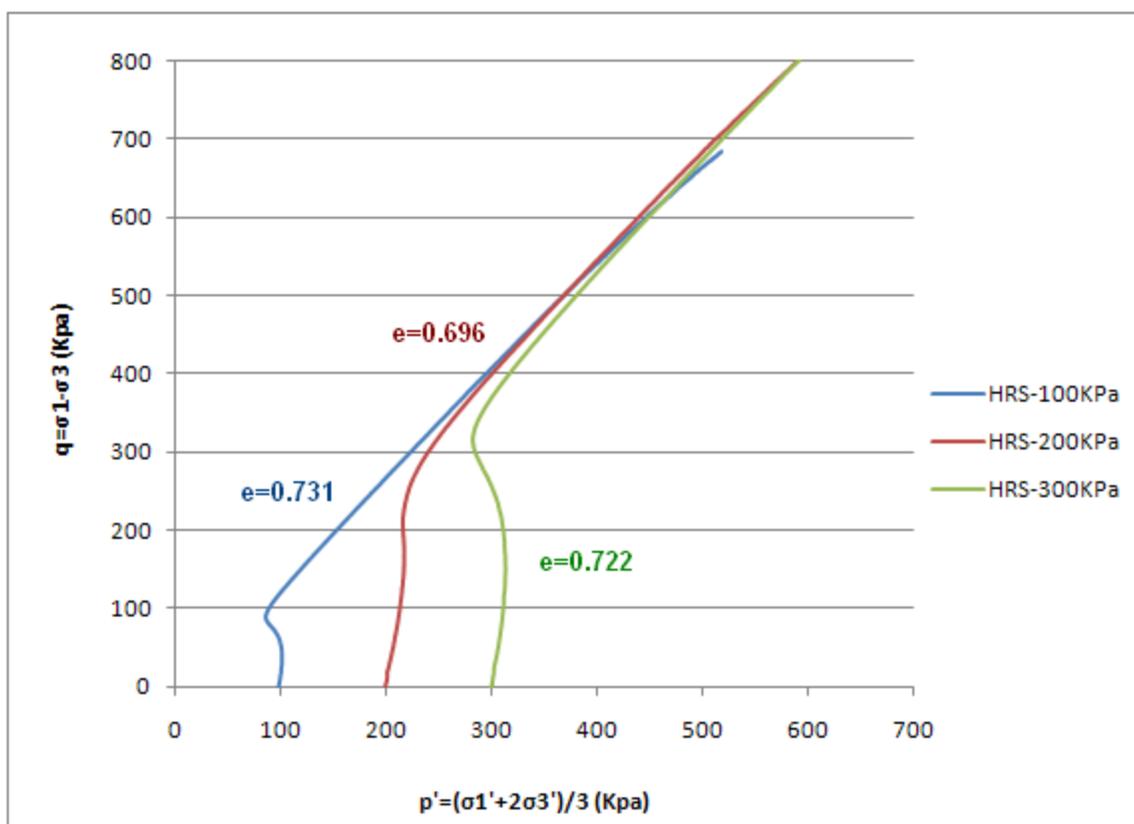
Σχ. 9.8 : Διάγραμμα  $\Delta u - \epsilon$  από δοκίμια άμμου M31 μέσης πυκνότητας



Σχ. 9.9 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα  $\Delta u - \epsilon$  από δοκίμια άμμου M31 μέσης πυκνότητας

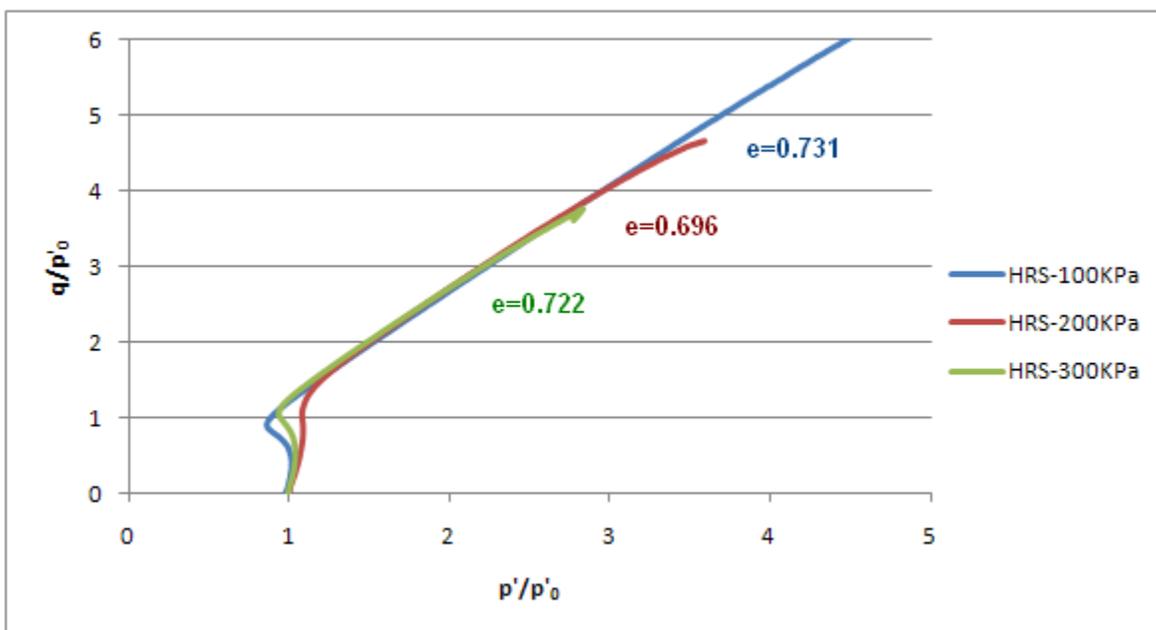
## Δοκίμια άμμου HRS

Στο Σχήμα 9.10 παριστάνονται σε άξονες  $q - p'$  τρία δοκίμια άμμου HRS μέσης πυκνότητας σε διαφορετικές πλευρικές τάσεις. Τα δοκίμια αυτά παρουσιάζουν συστολική συμπεριφορά αλλά σε μικρότερο βαθμό από τα αντίστοιχα της άμμου M31. Ειδικά το δοκίμιο με πλευρική τάση 200 KPa, δεν εκδηλώνει καθόλου συστολική συμπεριφορά και η μέση ενεργός τάση του μεταβάλλεται ελάχιστα όσο διαρκεί η αύξηση της πίεσης των πόρων. Ας σημειωθεί ότι ο δείκτης πόρων του δοκιμίου αυτού είναι χαμηλότερος από τα άλλα δύο δοκίμια. Από το σημείο της αλλαγής φάσης και έπειτα τα δοκίμια συμπεριφέρονται όπως αυτά της άμμου M31.



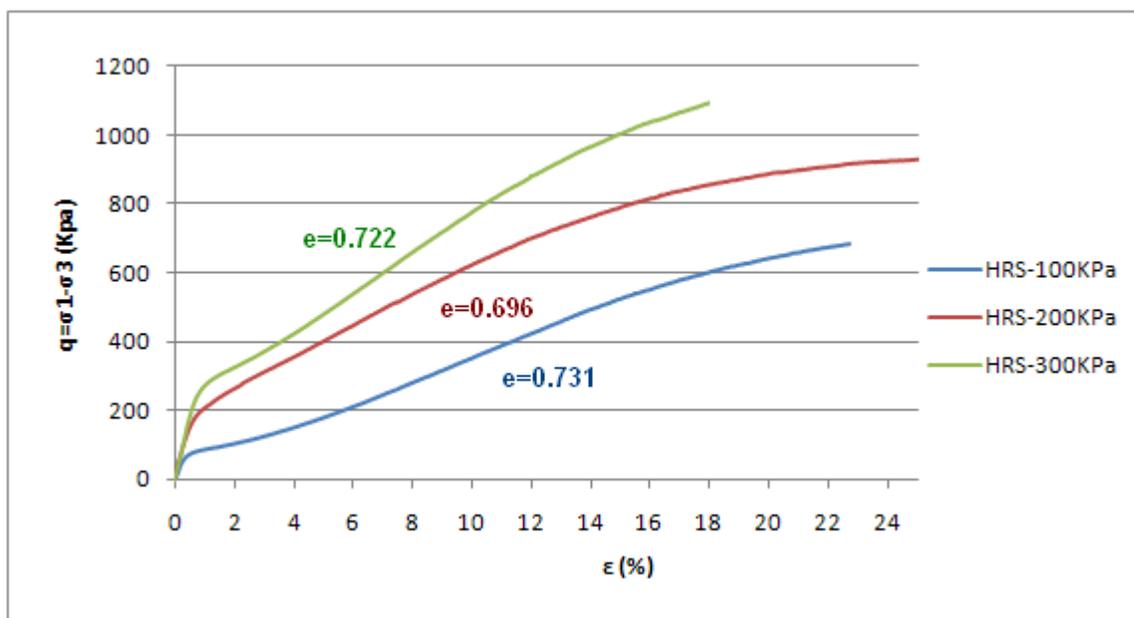
Σχ. 9.10 : Διάγραμμα  $q - p'$  από δοκίμια άμμου HRS μέσης πυκνότητας

Οι διαφορές που παρουσιάζουν τα τρία δοκίμια της άμμου HRS οφείλονται στην τιμή της πλευρικής τάσης. Όσο μεγαλύτερη είναι η πλευρική τάση στην οποία είχαν στερεοποιηθεί τόσο μεγαλύτερη είναι και η διατμητική αντοχή που αναπτύσσουν πριν φτάσουν στο σημείο αλλαγής της φάσης. Τελικά όλα τα δοκίμια καταλήγουν σε κατάσταση σταθερού λόγου τάσεων με κοινό ρυθμό μεταβολής της αποκλίνουσας τάσης  $q$  σε συνάρτηση με τη μέση ενεργό τάση  $p$ , υποδεικνύοντας πως η γωνία διατμητικής αντοχής δεν επηρεάζεται από την πλευρική τάση.

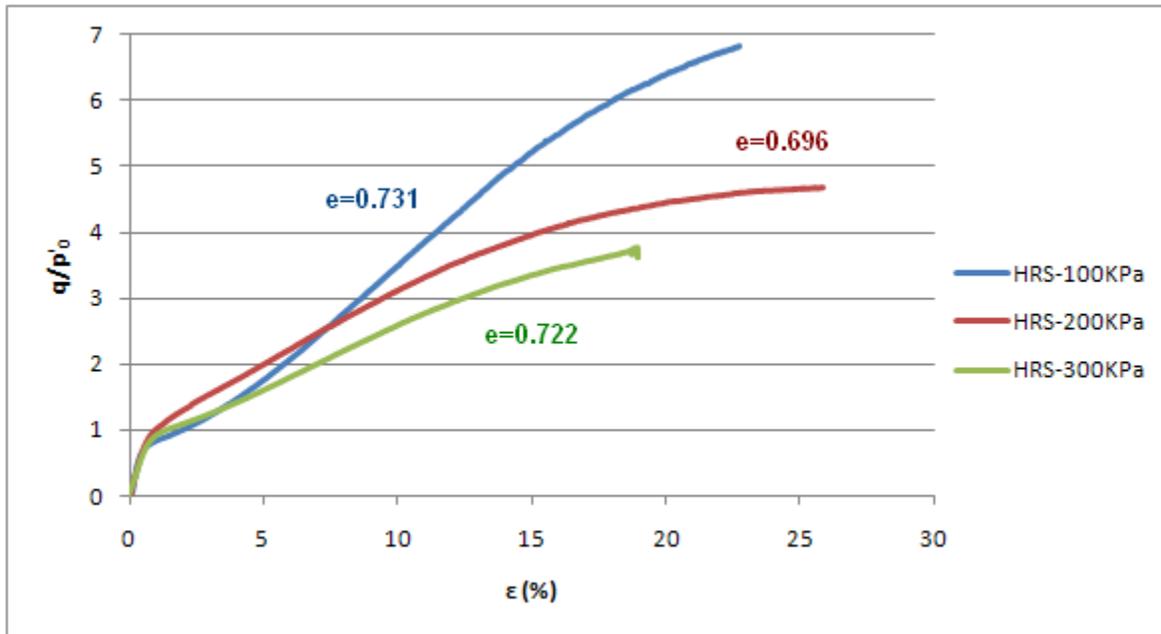


Σχ. 9.11 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα  $q - p'$  από δοκίμια άμμου HRS μέσης πυκνότητας

Στο διάγραμμα αποκλίνουσας τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης (Σχ. 9.12) κανένα από τα τρία δοκίμια δεν παρουσιάζει την ψευδο-σταθερή κατάσταση. Αντίθετα μετά από μία απότομη αύξηση, η διατμητική αντοχή όλων των δοκιμίων συνεχίζει να αυξάνεται με σταθερό περίπου ρυθμό σε συνάρτηση με την παραμόρφωση. Ενώ η μορφή τους είναι ίδια παρατηρείται και εδώ ότι όσο μεγαλώνει η πλευρική τάση, τόσο μεγαλώνει η τάση αστοχίας του δοκιμίου και γενικά αναπτύσσονται μεγαλύτερες διατμητικές τάσεις.



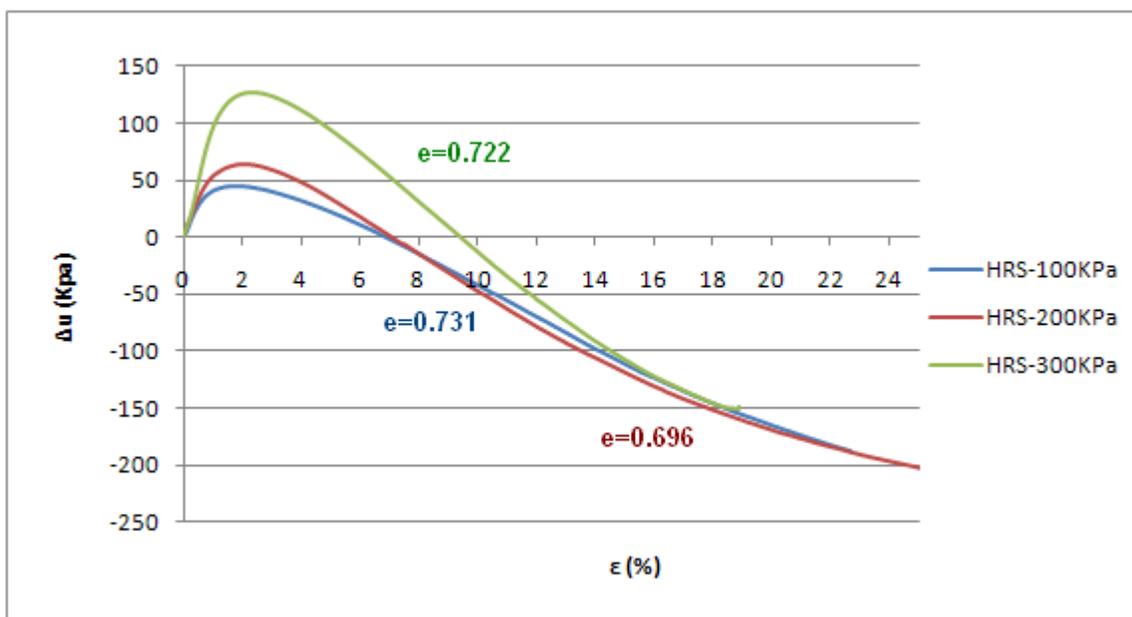
Σχ. 9.12 : Διάγραμμα  $q - \epsilon$  από δοκίμια άμμου HRS μέσης πυκνότητας



Σχ. 9.13 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα  $q - \epsilon$  από δοκίμια άμμου HRS μέσης πυκνότητας

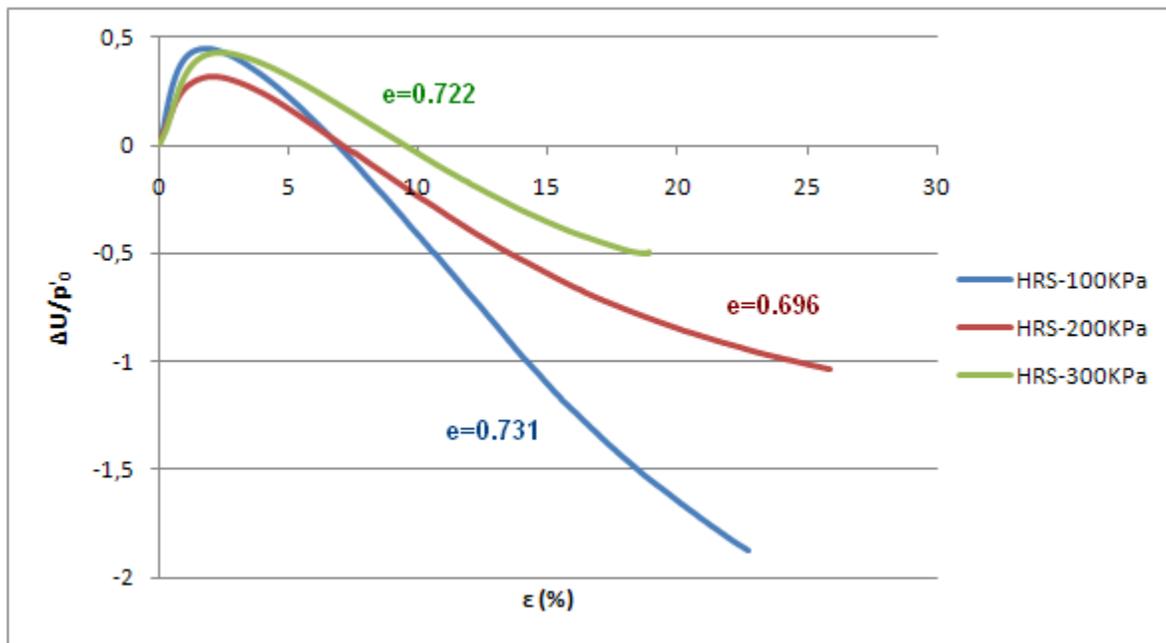
Στο κανονικοποιημένο διάγραμμα  $q - \epsilon$  του Σχήματος 9.13, παρατηρείται ότι το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε σε ενεργό τάση 100KPa, μετά το σημείο αλλαγής φάσης και πιο συγκεκριμένα μετά το σημείο όπου εμφανίζεται παραμόρφωση περίπου 7.5%, αναπτύσσει αποκλίνουσα τάση μεγαλύτερη από τα δοκίμια των 200KPa και 300KPa. Η διαφορά μεταξύ των τελευταίων οφείλεται στη διαφορά των δεικτών πόρων τους.

Όσον αφορά το διάγραμμα  $\Delta u - \epsilon$ , για μικρές παραμορφώσεις, έως 2% περίπου, τα δοκίμια παρουσιάζουν συστολική συμπεριφορά με την πίεση των πόρων να αυξάνεται. Η επιρροή της πλευρικής τάσης είναι ξεκάθαρη και εδώ. Όσο μεγαλύτερη είναι η πλευρική τάση του κάθε δοκιμίου, τόσο μεγαλύτερη είναι και η μέγιστη πίεση των πόρων που αναπτύσσεται σε αυτά. Στη συνέχεια η πίεση των πόρων και των τριών δοκιμίων μειώνεται απότομα εκδηλώνοντας διαστολική συμπεριφορά και αρνητικές τάσεις πόρων. Το δοκίμιο με πλευρική τάση 300 KPa παρουσιάζει σχεδόν μηδενική πίεση πόρων για παραμόρφωση μεγαλύτερη από 9,5% ενώ τα άλλα δύο δοκίμια για παραμόρφωση μεγαλύτερη από 7%.



Σχ. 9.14 : Διάγραμμα  $\Delta u - \epsilon$  από δοκίμια άμμου HRS μέσης πυκνότητας

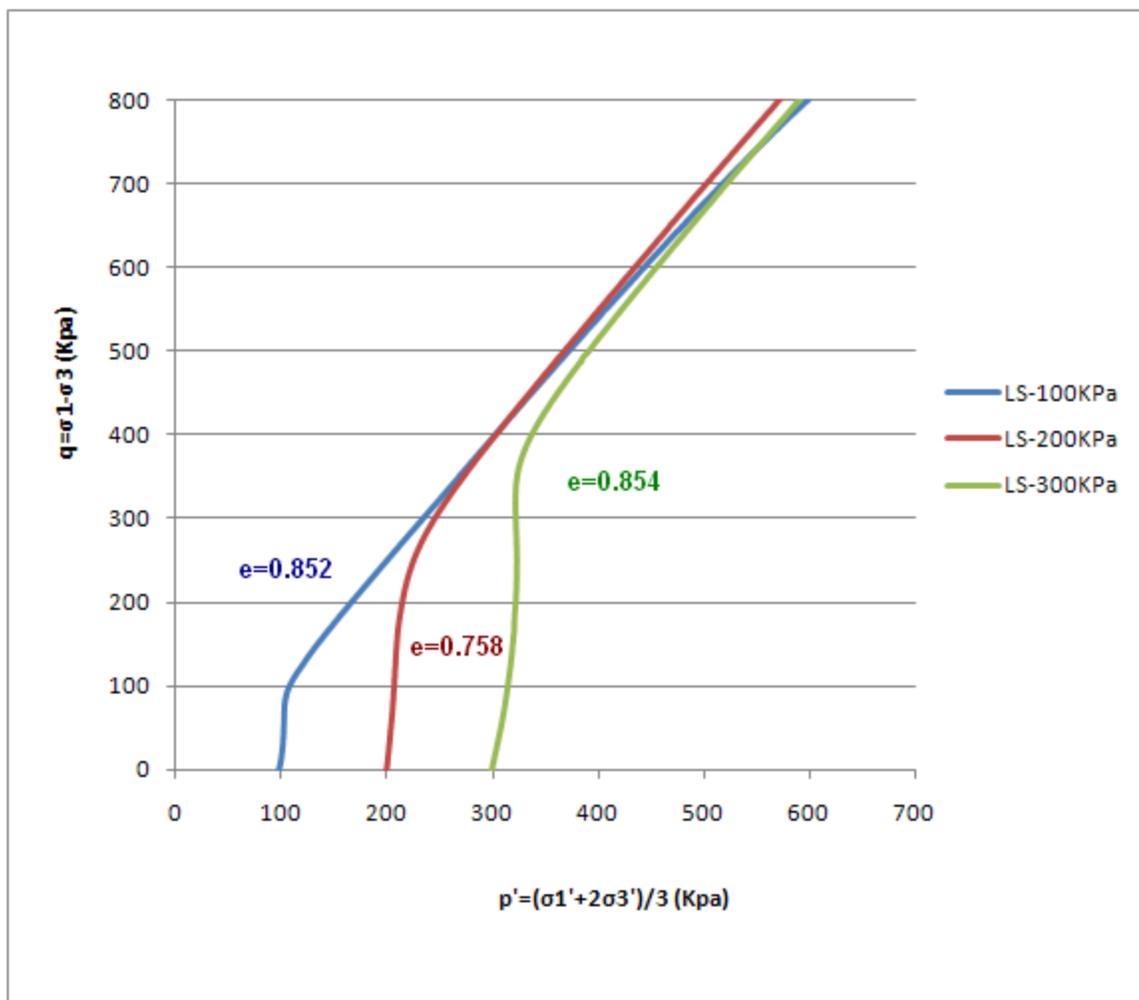
Στο κανονικοποιημένο διάγραμμα πίεσης πόρων - παραμόρφωσης του Σχήματος 9.15 φαίνεται ότι η μείωση της πίεσης των πόρων είναι πιο απότομη για το δοκίμιο που στερεοποιήθηκε στα 100KPa. Αυτό οδηγεί και πάλι στο συμπέρασμα ότι η απόκριση του συγκεκριμένου δοκιμίου είναι περισσότερο διαστολική, μετά το σημείο αλλαγής φάσης, σε σχέση με τα άλλα δύο.



Σχ. 9.15 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα  $\Delta u - \epsilon$  από δοκίμια άμμου HRS μέσης πυκνότητας

### Δοκίμια άμμου Longstone

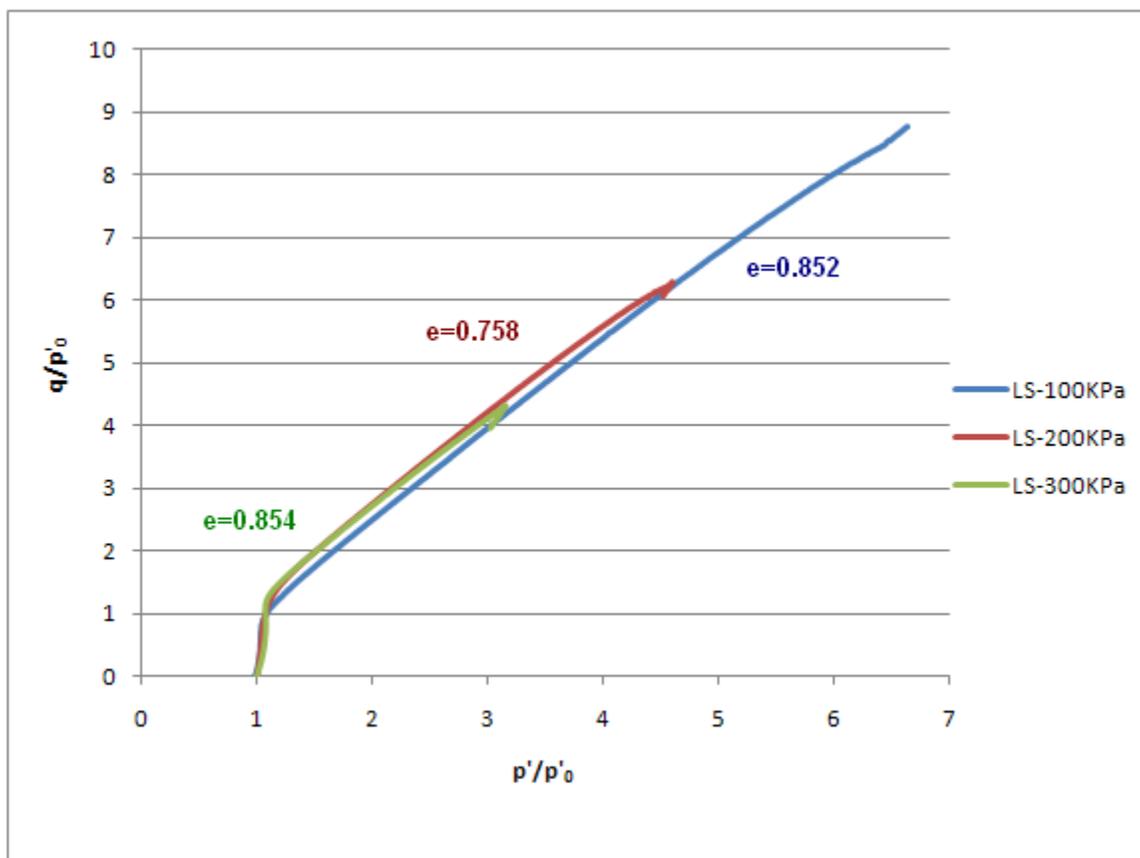
Τα δοκίμια της άμμου Longstone, όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα, παρουσιάζουν την λιγότερο συστολική συμπεριφορά καθώς η συγκεκριμένη άμμος είναι εξαιρετικά λεπτόκοκκη με μέση διάμετρο κόκκου  $d_{50} = 0.16\text{mm}$ . Μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης, το εξωτερικό φορτίο παραλαμβάνεται από την πίεση των πόρων, χωρίς ιδιαίτερη μείωση στον όγκο των δοκιμίων. Στη συνέχεια, ακολουθώντας την τυπική συμπεριφορά μιας άμμου, η πίεση των πόρων μειώνεται και η διατμητική αντοχή αυξάνεται με σταθερό ρυθμό καθώς και τα τρία δοκίμια ακολουθούν την περιβάλλουσα αστοχίας.



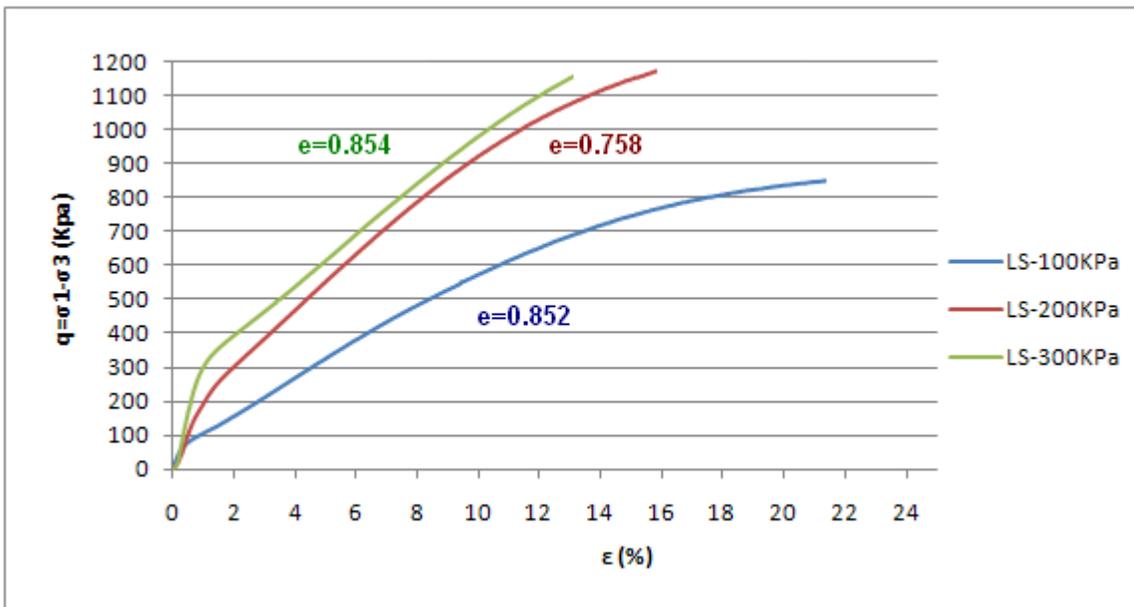
Σχ. 9.16 : Διάγραμμα  $q - p'$  από δοκίμια άμμου Longstone μέσης πυκνότητας

Όσον αφορά την επιρροή της πλευρικής τάσης, η συμπεριφορά της άμμου Longstone δεν διαφέρει σε τίποτα από αυτές της M31 και της Ham River Sand. Όσο μεγαλύτερη είναι η πλευρική τάση στην οποία είχαν στερεοποιηθεί τόσο μεγαλύτερη είναι και η διατμητική αντοχή που αναπτύσσουν πριν φτάσουν στο σημείο αλλαγής της φάσης.

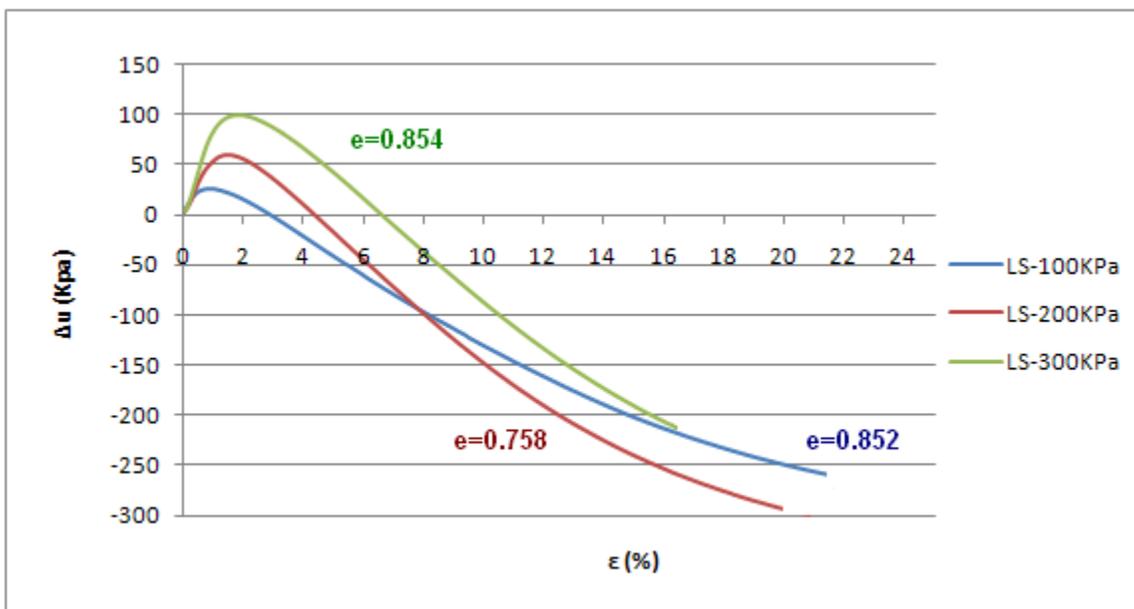
Να σημειωθεί ότι τα δοκίμια με πλευρική τάση 100 και 300 KPa είναι μέσης πυκνότητας δοκίμια, ενώ αυτό που στερεοποιήθηκε σε πλευρική τάση 200 KPa είναι πυκνότερο. Η ελαφρώς διαφορετική εικόνα που παρουσιάζουν οι καμπύλες του δοκιμίου των 200 KPa στο διάγραμμα  $q - p'$  του Σχήματος 9.16 οφείλεται πιθανά στην πυκνότερη δομή του. Το κανονικοποιημένο διάγραμμα  $q - p'$  (Σχ. 9.17) δεν εμφανίζει ιδιαίτερες διαφορές.



Σχ. 9.17 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα  $q - p'$  από δοκίμια άμμου Longstone μέσης πυκνότητας



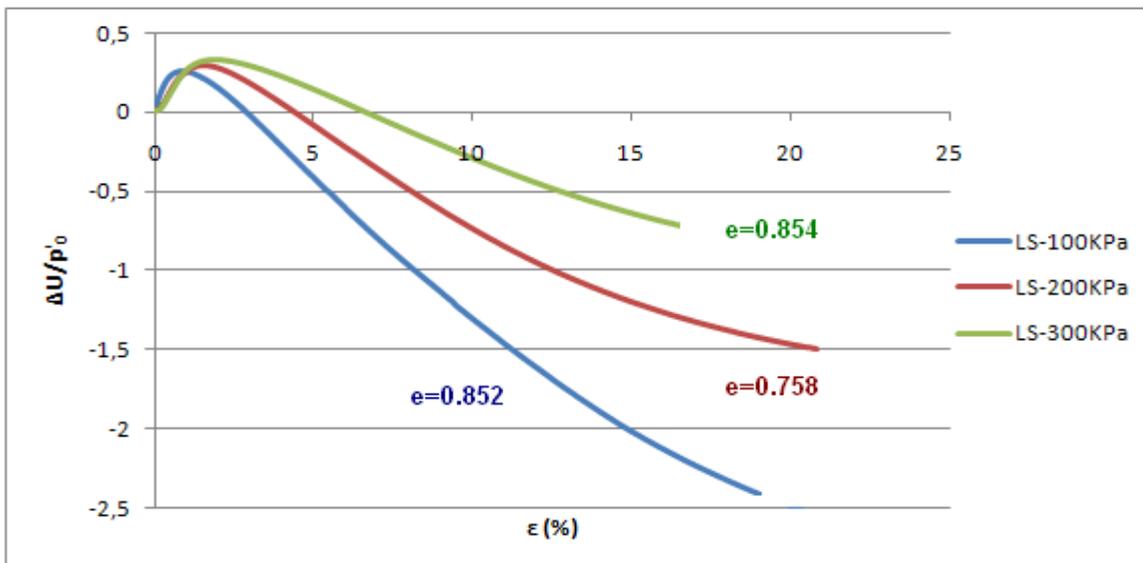
Σχ. 9.18 : Διάγραμμα  $q - \epsilon$  από δοκίμια άμμου Longstone μέσης πυκνότητας



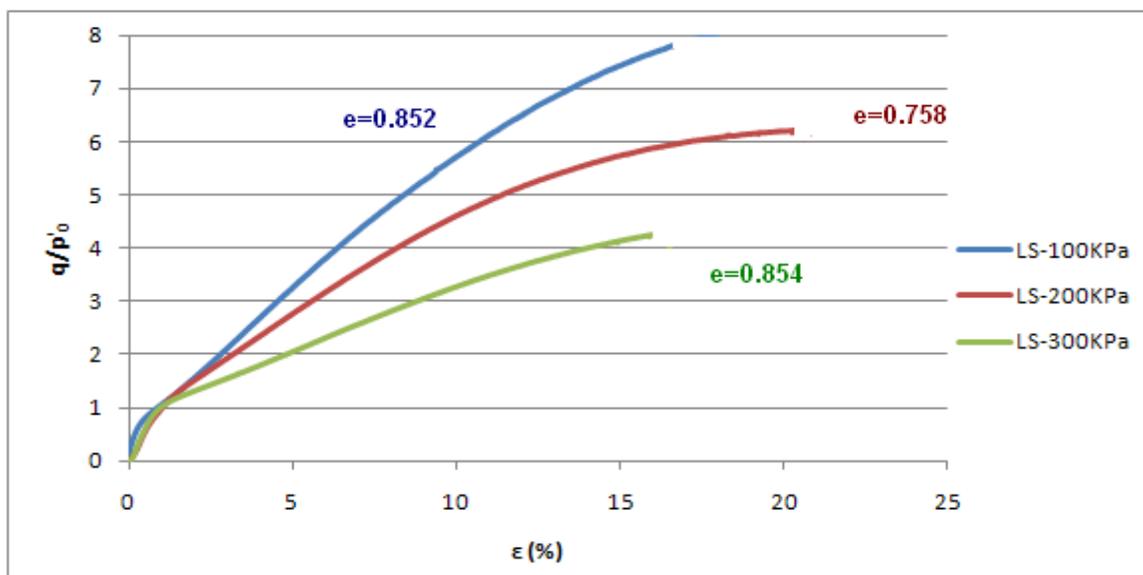
Σχ. 9.19 : Διάγραμμα  $\Delta u - \epsilon$  από δοκίμια άμμου Longstone μέσης πυκνότητας

Τα κανονικοποιημένα διαγράμματα των Σχημάτων 9.20 και 9.21 δείχνουν καθαρά τη διαφοροποίηση των δοκιμών όσον αφορά την απόκριση τους μετά το σημείο αλλαγής φάσης.

Συγκεκριμένα όσο μικρότερη είναι η ενεργός τάση στην οποία στερεοποιήθηκαν τα δοκίμια τόσο περισσότερο διαστολική εμφανίζεται η συμπεριφορά τους. Η πίεση των πόρων μειώνεται πολύ πιο απότομα (Σχ. 9.20) και η αύξηση της ενεργού τάσης γίνεται με μεγαλύτερο ρυθμό (Σχ. 9.21).



Σχ. 9.20 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα  $\Delta u - \epsilon$  από δοκίμια άμμου Longstone μέσης πυκνότητας



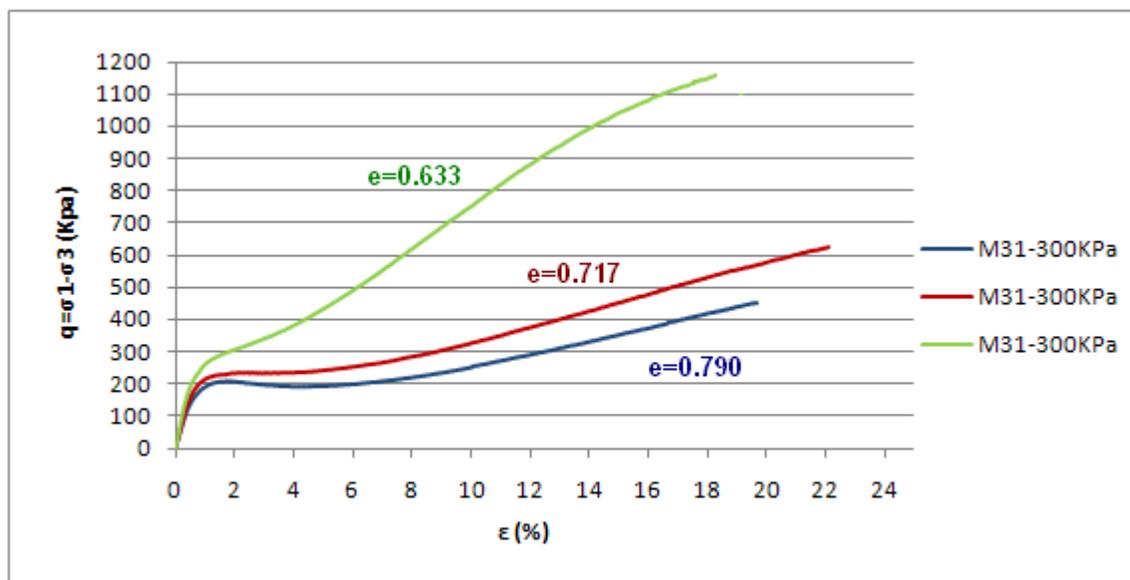
Σχ. 9.21 : Κανονικοποιημένο διάγραμμα  $q - \epsilon$  από δοκίμια άμμου Longstone μέσης πυκνότητας

### 9.3 Συγκριτικές αναλύσεις ως προς την τιμή του δείκτη πόρων

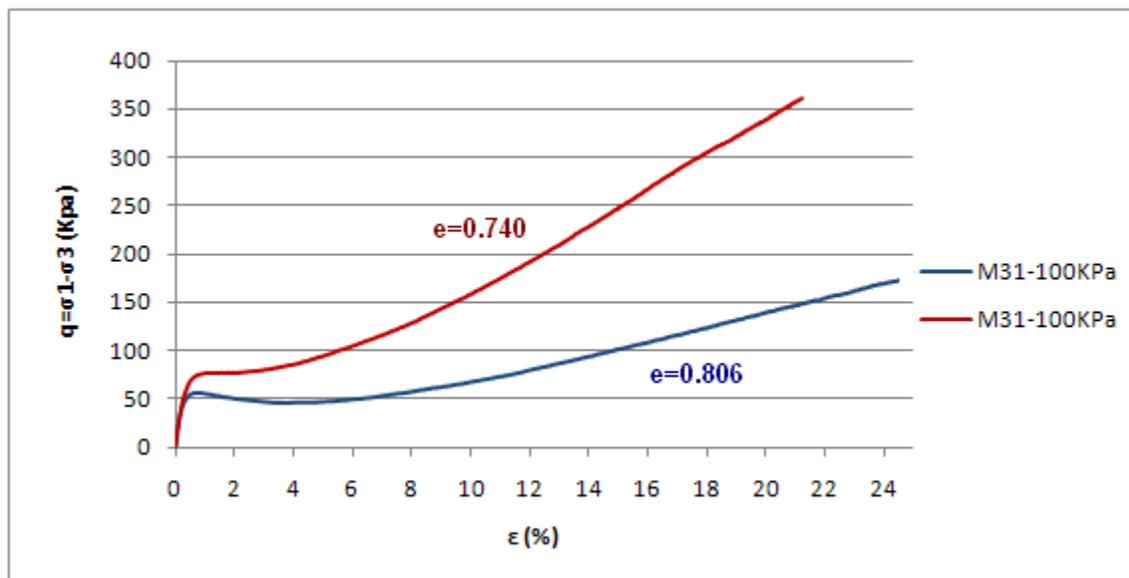
#### Δοκίμια άμμου M31

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται πέντε δοκιμές από τις οποίες δύο διεξήχθησαν σε χαλαρά δοκίμια, δύο σε μέσης πυκνότητας και ένα σε πυκνό δοκίμιο άμμου M31. Τα αποτελέσματα συμπίπτουν με το περιεχόμενο της παραγράφου 4.3 του μέρους Α', όπου περιγράφεται η επίδραση του δείκτη πόρων στην απόκριση μιας άμμου κατά την τριαξονική θλίψη.

Παρατηρώντας τις καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων των σχημάτων 9.22 και 9.23 φαίνεται ξεκάθαρα ότι τα πιο πυκνά δοκίμια μπορούν να παραλάβουν μεγαλύτερα φορτία καθώς η αιχμή τους παρουσιάζεται για μεγαλύτερη αξονική τάση ( $q$ ). Επίσης για τις ίδιες τιμές αξονικής παραμόρφωσης, η διατμητική αντοχή αυξάνει όσο μειώνεται ο δείκτης πόρων. Είναι εμφανές λοιπόν ότι μείωση της τιμής του δείκτη πόρων (αύξηση πυκνότητας), οδηγεί σε καλύτερη συμπεριφορά της άμμου.

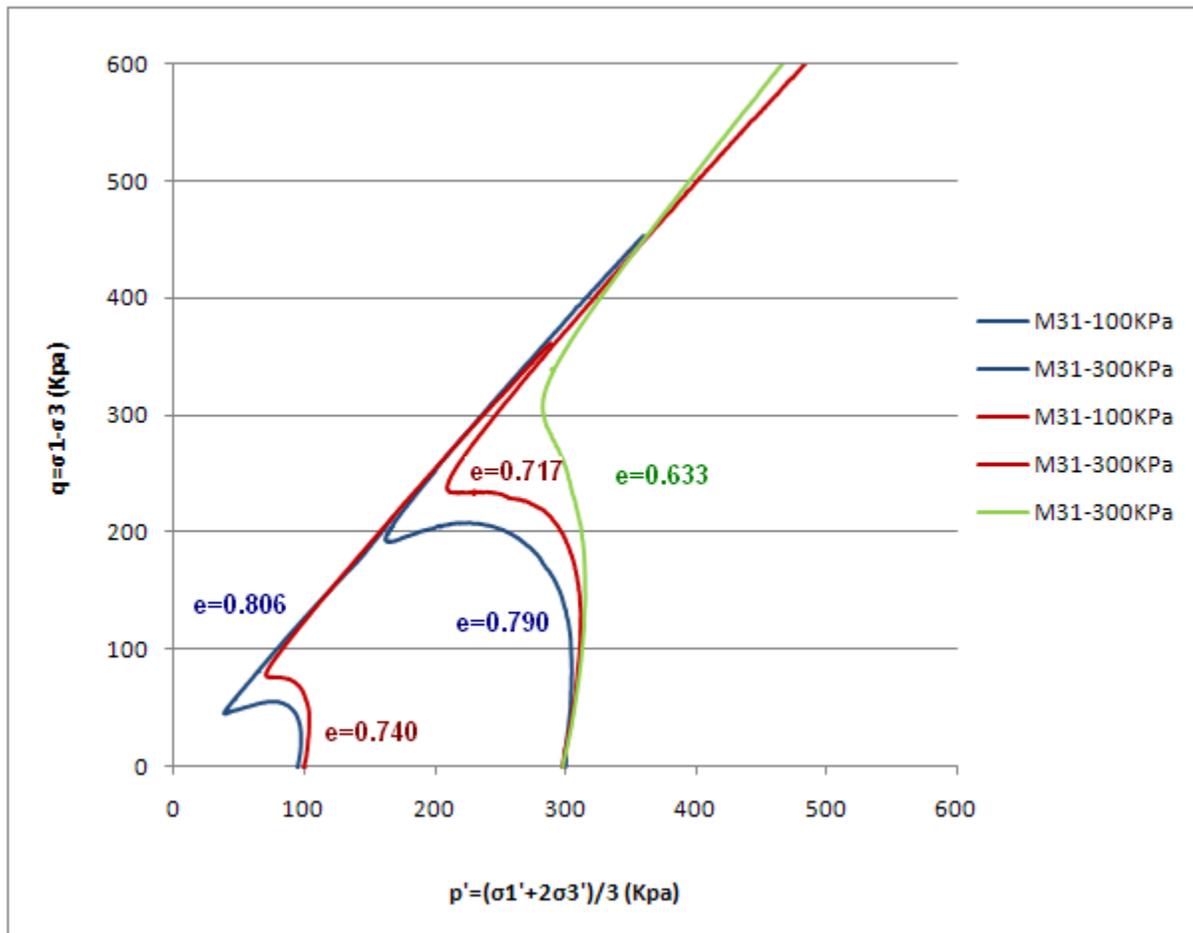


Σχ. 9.22 : Διάγραμμα  $q - \epsilon$  από δοκίμια άμμου M31 στα 300KPa με διαφορετικούς δείκτες πόρων



Σχ. 9.23 : Διάγραμμα  $q - \epsilon$  από δοκίμια άμμου M31 στα 100KPa με διαφορετικούς δείκτες πόρων

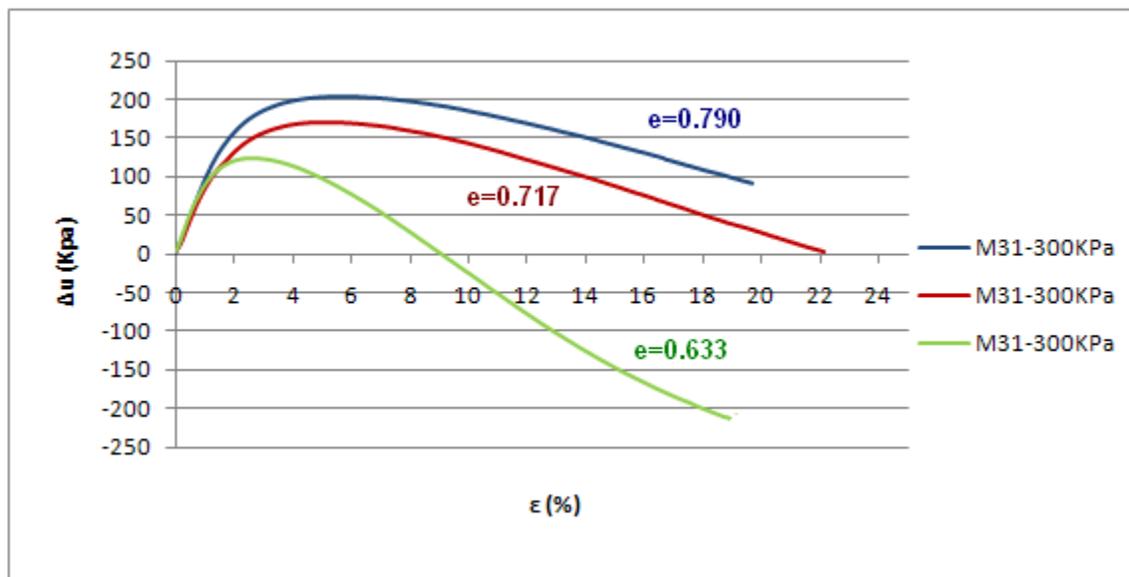
Είναι γνωστό ότι όσο πιο χαλαρή είναι μια άμμος τόσο μεγαλύτερη τάση για συστολή θα παρουσιάσει και συνεπώς θα αναπτύξει μεγαλύτερες υπερπιέσεις πόρων από μια πυκνότερη άμμο. Στο διάγραμμα του Σχήματος 9.24 και σε άξονες  $p - q$  φαίνεται ξεκάθαρα η διαφορετική συμπεριφορά που παρουσιάζουν τα δοκίμια όσον αφορά την συστολικότητα. Μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης, σε όλα τα δοκίμια εμφανίζεται τάση για μείωση του όγκου και κατά συνέπεια μείωση της ενεργού τάσης με πιο έντονο το φαινόμενο στα δοκίμια με υψηλούς δείκτες πόρων. Μετά το σημείο αλλαγής της φάσης, με τη συνέχιση της διάτμησης, τα δοκίμια παρουσιάζουν μια τάση για αύξηση του όγκου τους (διόγκωση) και αναπτύσσουν υποπιέσεις πόρων (μείωση της πίεσης των πόρων). Στα Σχήματα 9.25 και 9.26 φαίνεται ότι η μείωση των υπερπιέσεων είναι πιο απότομη στα δοκίμια άμμου με μικρότερο δείκτη πόρων (πυκνότερα) από ότι στα δοκίμια με μεγαλύτερο δείκτη (χαλαρότερα). Αυτό οφείλεται στο ότι τα πυκνότερα δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερη τάση για διόγκωση και συνεπώς μεγαλύτερη μείωση πιέσεων των πόρων.



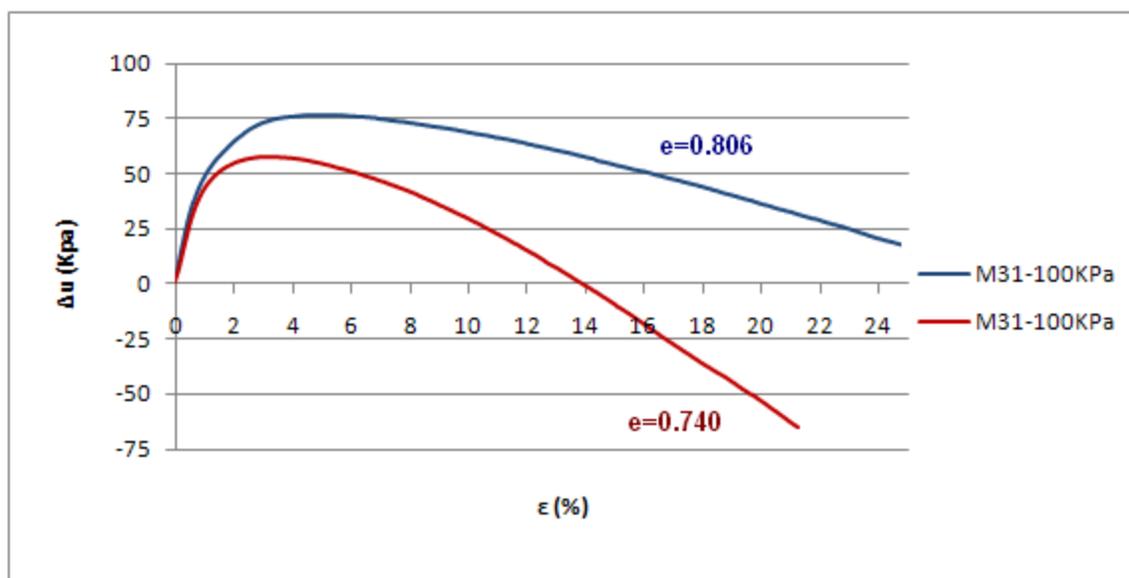
Σχ. 9.24 : Διάγραμμα  $q - p'$  από δοκίμια άμμου M31 στα 100 και 300KPa με διαφορετικούς δείκτες πόρων

Αξίζει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τη θεωρία των Cubrinovski and Ishihara, 2000 (βλέπε σελ. 81-82), τα χαλαρά και μέσης πυκνότητας δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν, παραμορφώθηκαν με συνθήκες περιορισμένης ροής (limited flow deformation). Αφού η διάτμηση της άμμου ξεπέρασε την τάση αιχμής, τα δοκίμια άμμου έχασαν την αντοχή τους, πέρασαν στη φάση της σταδιακής χαλάρωσης του δοκιμίου (strain softening) και μετά το σημείο αλλαγής φάσης, στη φάση της σταδιακής σκλήρυνσης (strain hardening), κατά τη οποία η άμμος επανακτά την αντοχή της και αποκαθιστά την ευστάθεια της. Αντίθετα στο πυκνό

δοκίμιο (πράσινες καμπύλες), παρατηρήθηκε κατευθείαν το φαινόμενο της σκλήρυνσης του δοκιμίου (με ταυτόχρονη αύξηση της αντοχής).

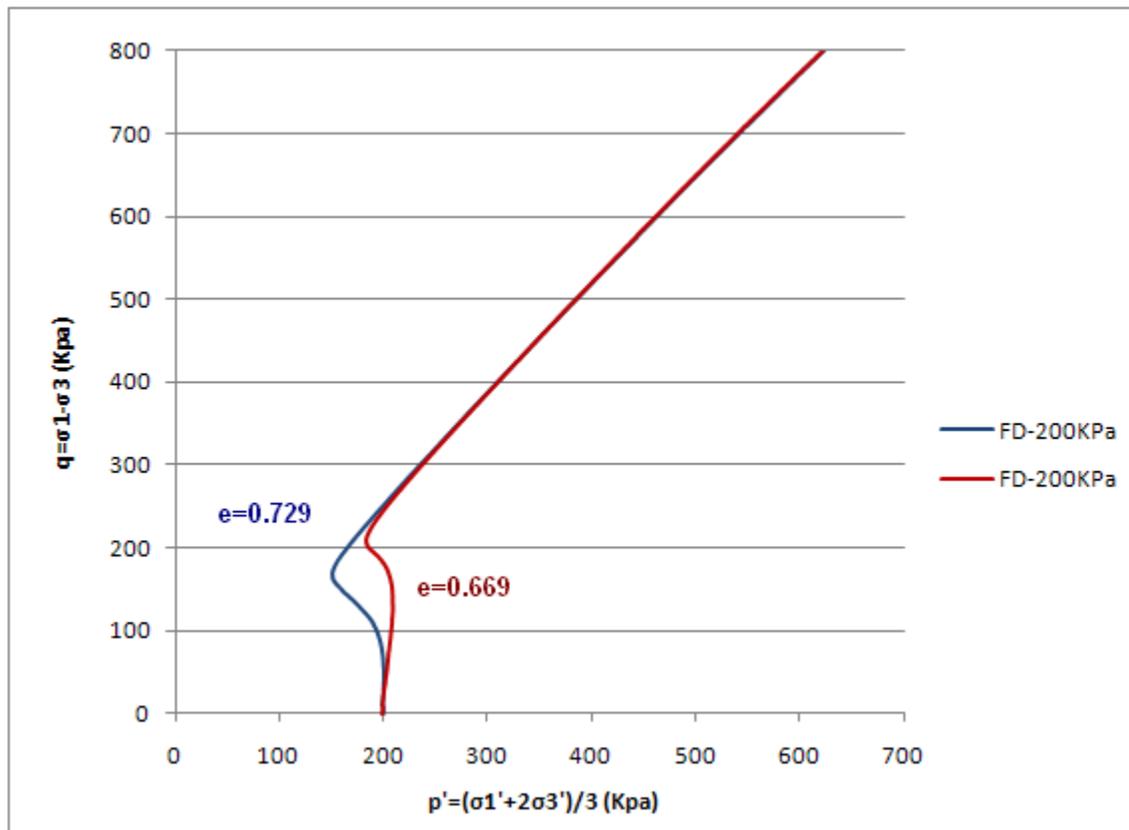


Σχ. 9.25 : Διάγραμμα  $\Delta u$  -  $\epsilon$  από δοκίμια άμμου M31 στα 300KPa με διαφορετικούς δείκτες πόρων



Σχ. 9.26 : Διάγραμμα  $\Delta u$  -  $\epsilon$  από δοκίμια άμμου M31 στα 100KPa με διαφορετικούς δείκτες πόρων

## Δοκίμια άμμου Fontainebleau

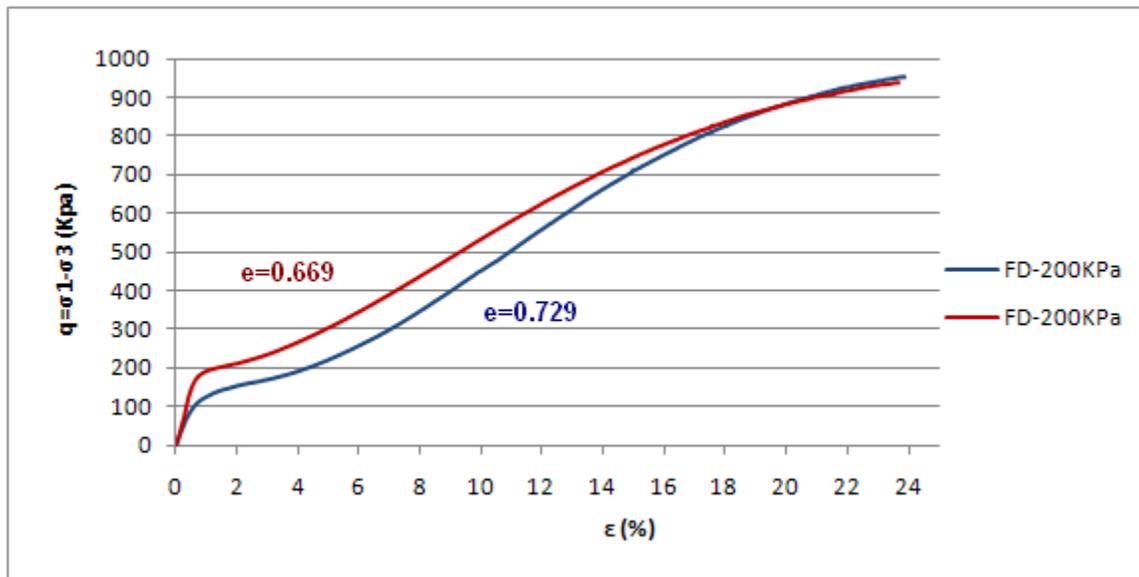


Σχ. 9.27 : Διάγραμμα  $q - p'$  από δοκίμια άμμου Fontainebleau στα 200KPa με διαφορετικούς δείκτες πόρων

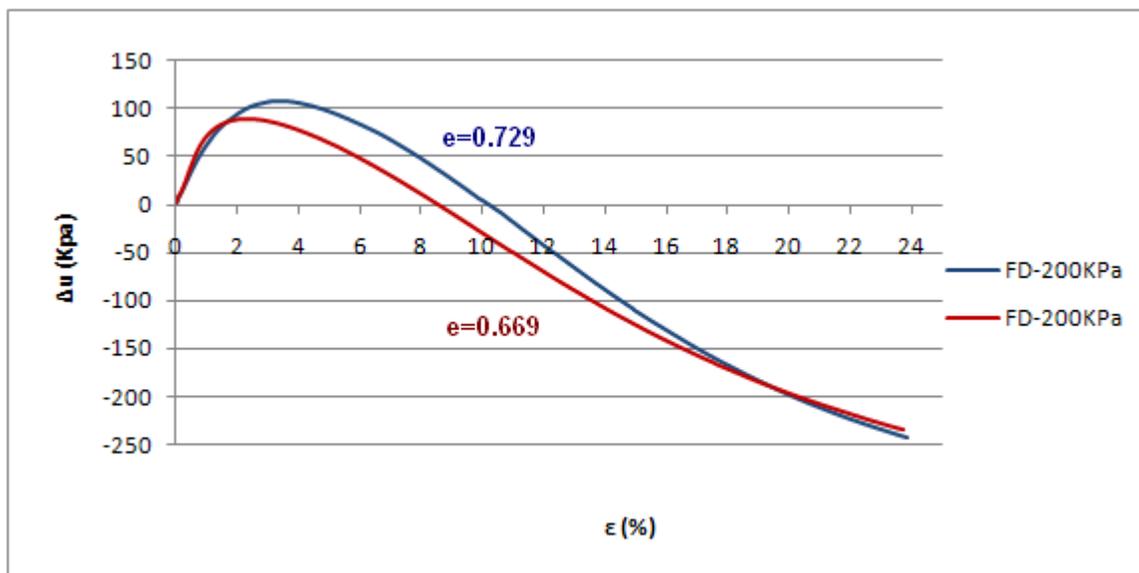
Τα δοκίμια της άμμου Fontainebleau στερεοποιήθηκαν σε ενεργό πλευρική τάση 200KPa. Παρά το γεγονός ότι παρουσιάζουν ελαφρώς λιγότερο συστολική συμπεριφορά από τα δοκίμια της άμμου M31, η επιρροή του δείκτη πόρων οδηγεί ακριβώς στα ίδια συμπεράσματα:

1. Τα πυκνότερα δοκίμια μπορούν να παραλάβουν μεγαλύτερα φορτία και για τις ίδιες τιμές αξονικής παραμόρφωσης, η διατμητική αντοχή αυξάνει όσο μειώνεται ο δείκτης πόρων.
2. Όσο πιο χαλαρή είναι μια άμμος τόσο μεγαλύτερη τάση για συστολή θα παρουσιάσει και συνεπώς θα αναπτύξει μεγαλύτερες υπερπιέσεις πόρων από μια πυκνότερη άμμο.

3. Η μείωση των υπερπιέσεων είναι πιο απότομη στα δοκίμια άμμου με μικρότερο δείκτη πόρων (πυκνότερα) από ότι στα δοκίμια με μεγαλύτερο δείκτη (χαλαρότερα).



Σχ. 9.28 : Διάγραμμα  $q - \epsilon$  από δοκίμια άμμου Fontainebleau στα 200KPa με διαφορετικούς δείκτες πόρων

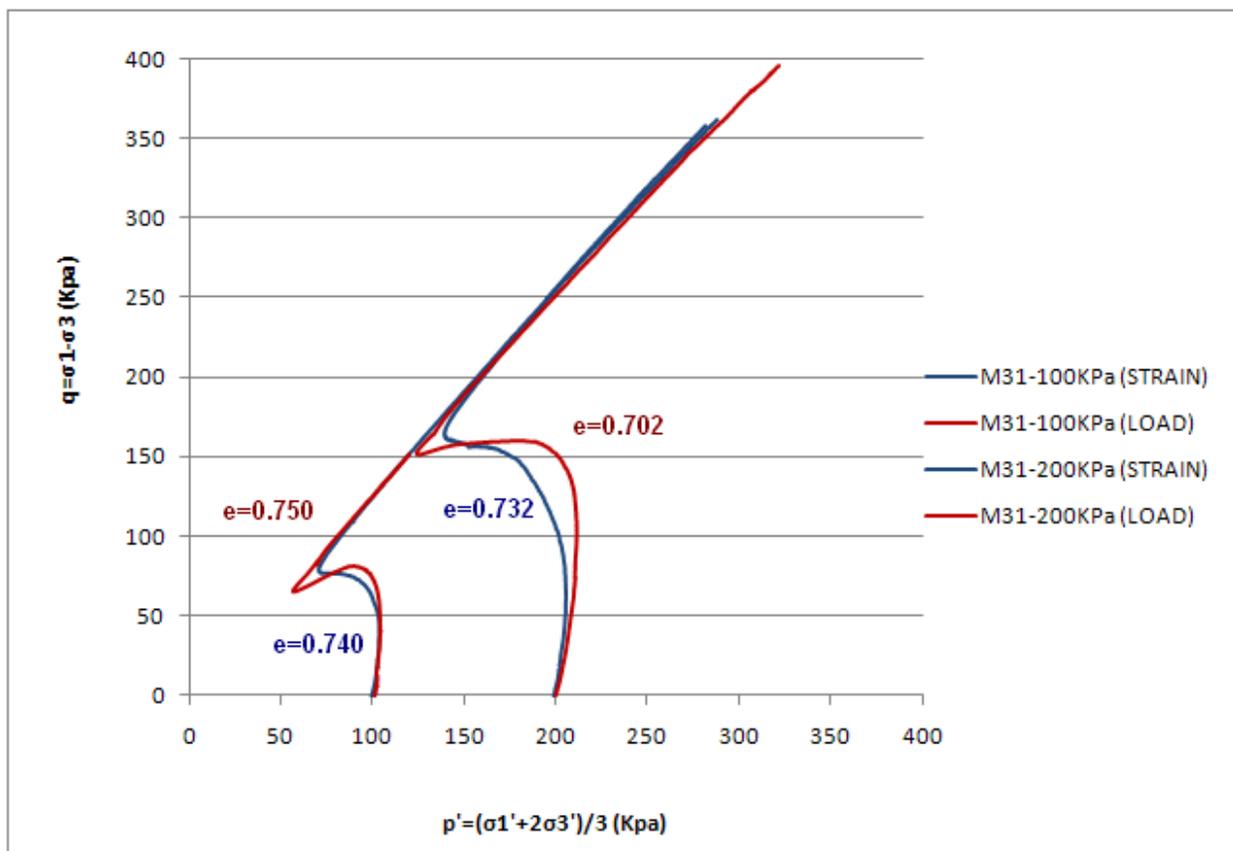


Σχ. 9.29 : Διάγραμμα  $\Delta u - \epsilon$  από δοκίμια άμμου Fontainebleau στα 200KPa με διαφορετικούς δείκτες πόρων

## 9.4 Συγκριτικές αναλύσεις ως προς τη μέθοδο επιβολής της φόρτισης

### Δοκίμια άμμου M31

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τέσσερις δοκιμές σε άμμο M31 εκ των οποίων οι δυο πραγματοποιήθηκαν υπό συνθήκες ελεγχόμενης των παραμόρφωσης (strain control) και οι δυο υπό συνθήκες ελεγχόμενου φορτίου (stress control). Τα πειράματα διεξήχθησαν σε ενεργές τάσεις των 100KPa και 200KPa αντίστοιχα. Επίσης όλα τα δοκίμια χαρακτηρίζονται ως μέσης πυκνότητας και παρουσιάζουν παρεμφερείς δείκτες πόρων. Οι διαφορές που προκύπτουν οφείλονται κατά κύριο λόγο στη διαφορετική μέθοδο επιβολής της φόρτισης.

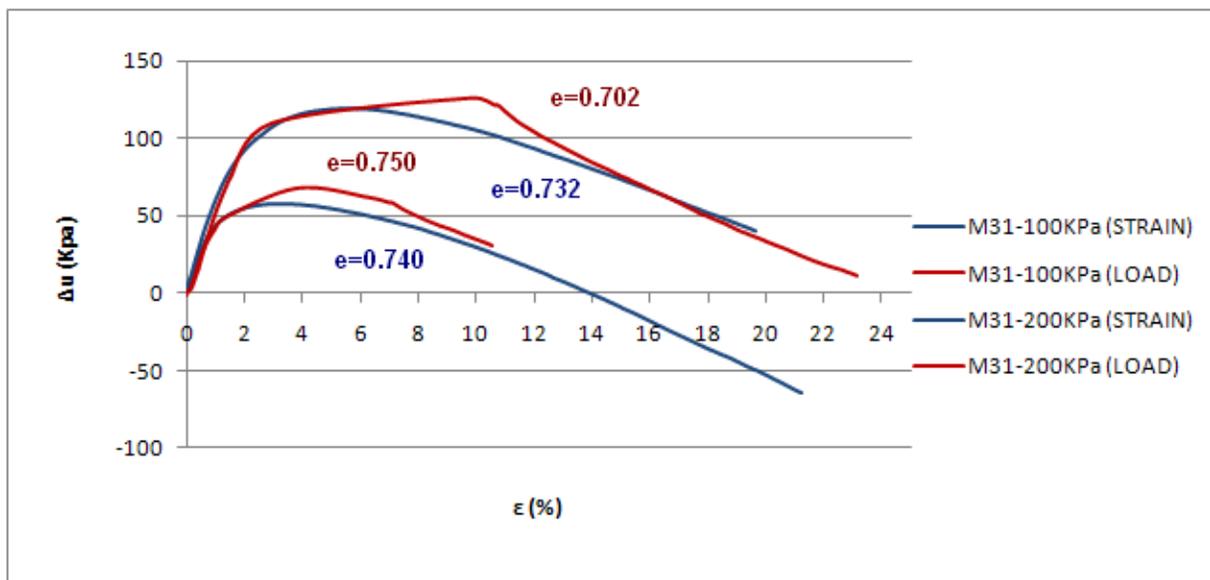


Σχ. 9.30 : Διάγραμμα q-p' από δοκίμια άμμου M31 (100 και 200KPa) με διαφορετικό τρόπο φόρτισης

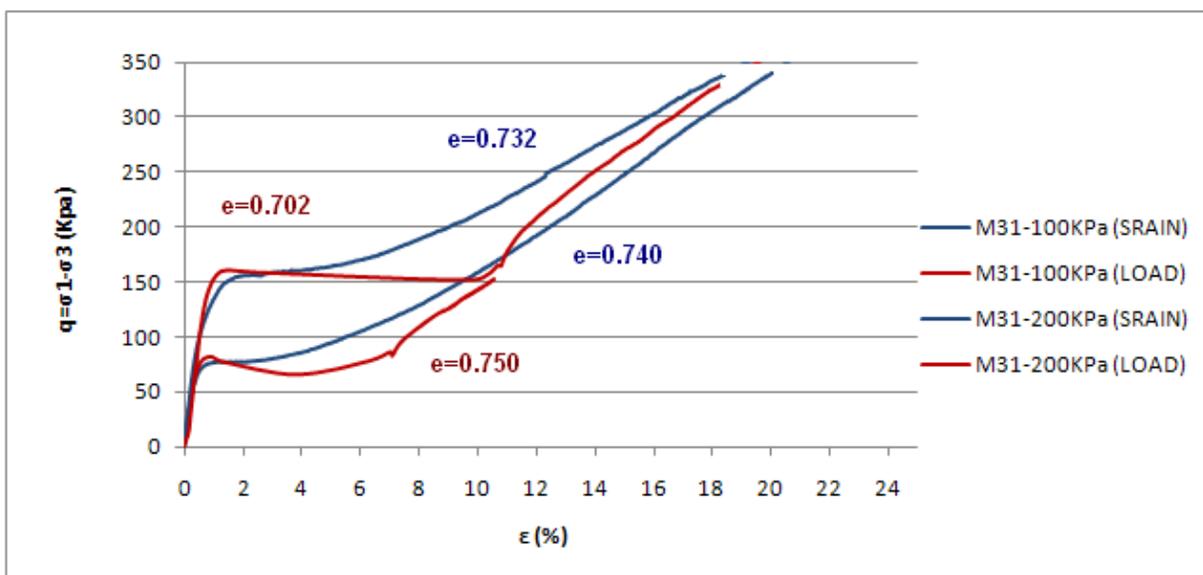
Από τα διαγράμματα διαδρομών ενεργών τάσεων του Σχήματος 9.30 προκύπτει ότι, για τις αρχικές μικρές παραμορφώσεις και πριν το σημείο ανάπτυξης της μέγιστης διατμητικής αντοχής, όλα τα δοκίμια συμπεριφέρονται με παρόμοιο τρόπο. Η αύξηση της αποκλίνουσας τάσης, οδηγεί σε αύξηση της πίεσης των πόρων με ταυτόχρονη μείωση της ενεργού τάσης και κατά συνέπεια της διατμητικής αντοχής του δοκιμίου. Μέχρι το σημείο μέγιστης διατμητικής αντοχής, τα δοκίμια που φορτίστηκαν με έλεγχο των παραμορφώσεων (μπλε καμπύλες) παρουσιάζουν ελαφρώς πιο συστολική συμπεριφορά έναντι των δοκιμίων που φορτίστηκαν υπό συνθήκες ελεγχόμενου φορτίου (κόκκινες καμπύλες), τόσο στα 100KPa όσο και στα 200 KPa. Σύμφωνα με τους Chu και Leong, 2001 (βλέπε σελ. 72-73) η διαφορά στην συμπεριφορά πριν τη μέγιστη τιμή οφείλεται στην απόκλιση των τιμών του δείκτη πόρων των δοκιμίων. Αυτό δεν φαίνεται να ισχύει τουλάχιστον για ενεργό τάση 100kPa.

Μετά το σημείο μέγιστης διατμητικής αντοχής, όπως φαίνεται και στα διαγράμματα των Σχημάτων 9.31 και 9.32, τα δοκίμια που φορτίστηκαν με έλεγχο των παραμορφώσεων περνούν στη φάση της σταδιακής χαλάρωσης της αντοχής του δοκιμίου (strain softening), ή αλλιώς στο στάδιο της ψευδό-σταθερής κατάστασης, κατά το οποίο η τάση δεν αυξάνεται ή αυξάνεται ελάχιστα με ταυτόχρονη αύξηση της παραμόρφωσης. Μετά το σημείο αλλαγής φάσης και για παραμόρφωση περίπου 2% για το δοκίμιο των 100KPa και περίπου 4% για το δοκίμιο των 200KPa, η άμμος επανακτά την αντοχή της και αποκαθιστά την ευστάθεια της με ταυτόχρονη μείωση του δείκτη πόρων. Αντίθετα, τα δοκίμια που φορτίστηκαν με έλεγχο των τάσεων, μετά το σημείο αιχμής, εμφανίζουν το φαινόμενο της αστάθειας (instability), κατά το οποίο προκαλούνται ακαριαία μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις εξαιτίας της ανικανότητας του εδαφικού στοιχείου να παραλάβει το επιβαλλόμενο φορτίο. Εδώ η άμμος επανακτά την αντοχή της και μπορεί να παραλάβει περαιτέρω φορτίο, με ταυτόχρονη μείωση της πίεσης πόρων, πολύ αργότερα. Συγκεκριμένα για το δοκίμιο των 100KPa η αστάθεια σταματάει για αξονική παραμόρφωση περίπου 7% και για το δοκίμιο των 200KPa για αξονική παραμόρφωση περίπου 11%. Από το σημείο αλλαγής φάσης (Phase Transformation Point - PTP) και μετά τα δοκίμια παρουσιάζουν παρεμφερή συμπεριφορά ακολουθώντας στα διαγράμματα διαδρομών

ενεργών τάσεων την ίδια γραμμή αστοχίας. Το ίδιο συμπέρασμα βγαίνει και από τα διαγράμματα  $q - \epsilon$  του Σχήματος 9.32 όπου η αποκλίνουσα τάση  $q$ , για όλα τα δοκίμια, αυξάνεται ανάλογα (παρόμοια κλίση) με την αξονική παραμόρφωση.



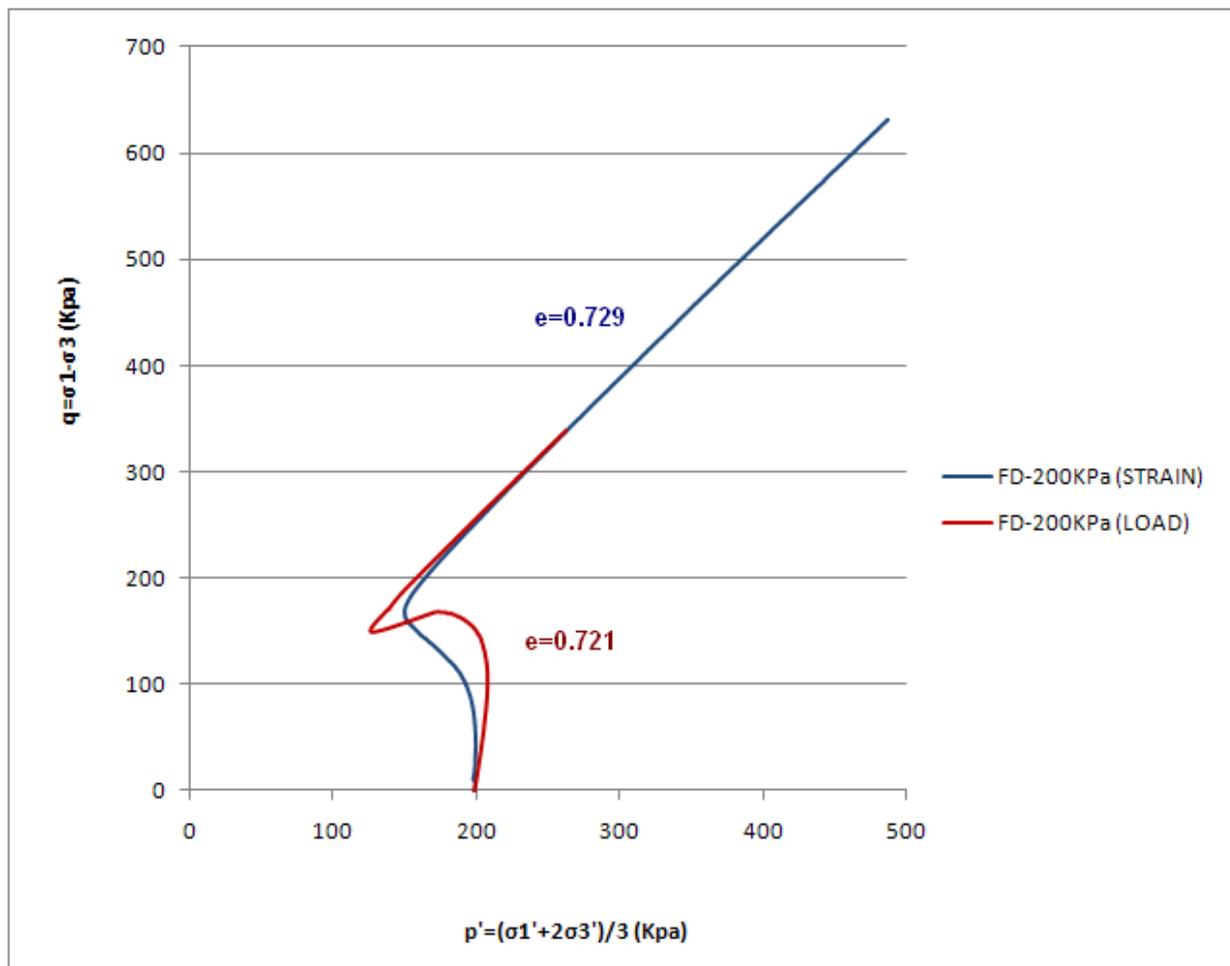
Σχ. 9.31 : Διάγραμμα  $\Delta u - \epsilon$  από δοκίμια άμμου M31 (100, 200KPa) με διαφορετικό τρόπο φόρτισης



Σχ. 9.32 : Διάγραμμα  $q - \epsilon$  από δοκίμια άμμου M31 (100 και 200KPa) με διαφορετικό τρόπο φόρτισης

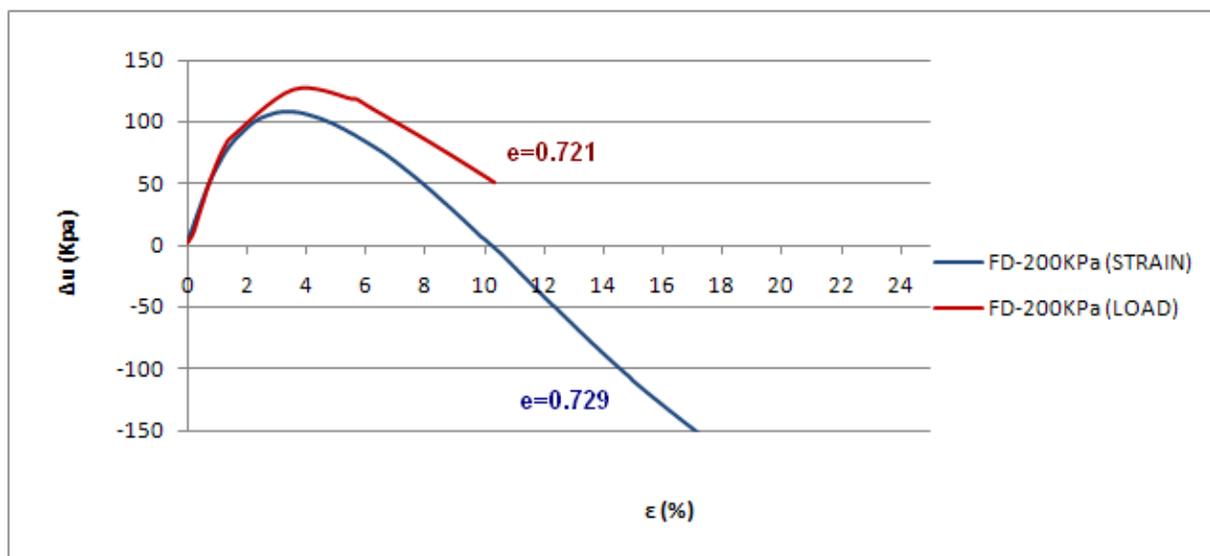
### Δοκίμια άμμου Fontainebleau

Παρόμοια συμπεριφορά με την άμμο M31 εμφανίζει η άμμος Fontainebleau στην οποία πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές σε πλευρική τάση 200KPa, σε δοκίμια μέσης πυκνότητας και με διαφορετικές μεθόδους επιβολής φορτίου (strain και stress control).



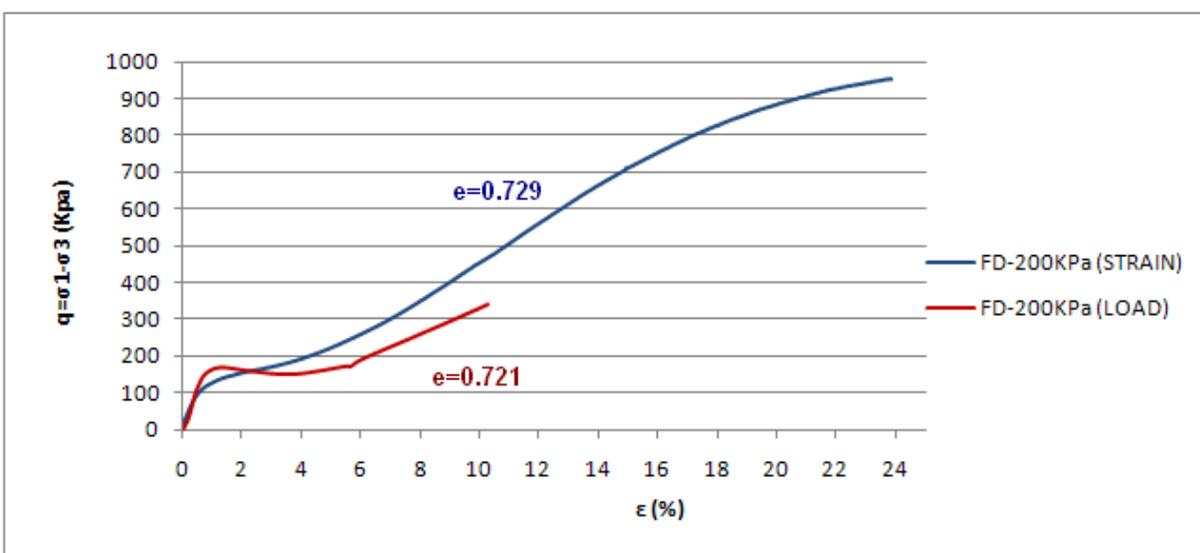
Σχ. 9.33 : Διάγραμμα q – p' από δοκίμια άμμου Fontainebleau στα 200KPa με διαφορετικό τρόπο φόρτισης

Οι διαδρομές των ενεργών τάσεων του Σχήματος 9.33 φανερώνουν την διαφορετική απόκριση των δύο δοκιμίων. Για τις αρχικές μικρές παραμορφώσεις, το δοκίμιο που φορτίστηκε με έλεγχο των παραμορφώσεων (μπλε καμπύλες) παρουσιάζει πιο συστολική συμπεριφορά από το δοκίμιο που φορτίστηκε με έλεγχο των τάσεων (κόκκινες καμπύλες). Στη συνέχεια και μέχρι τα σημεία αλλαγής φάσης των δύο δοκιμίων η συμπεριφορά τους εξακολουθεί να παρουσιάζει σημαντικές διαφορές. Το δοκίμιο που φορτίστηκε με έλεγχο των παραμορφώσεων συνεχίζει τη συστολική συμπεριφορά μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης όπου η άμμος επανακτά την αντοχή της. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το δοκίμιο δεν εμφανίζει σταδιακή χαλάρωση της αντοχής του (strain softening), ή αλλιώς το φαινόμενο κατά το οποίο η τάση δεν αυξάνεται ή αυξάνεται ελάχιστα με ταυτόχρονη αύξηση της παραμόρφωσης. Αντίθετα το δοκίμιο που φορτίστηκε με έλεγχο των τάσεων, μετά το σημείο μέγιστης διατμητικής αντοχής (παραμόρφωση περίπου 1%) και μέχρι η παραμόρφωση να αγγίξει το 6% περίπου, εμφανίζει το φαινόμενο της αστάθειας (instability). Από εκεί και έπειτα, το δοκίμιο επανακτά την αντοχή του και παραλαμβάνει περαιτέρω φορτίο.



Σχ. 9.34 : Διάγραμμα  $\Delta u$  -  $\epsilon$  από δοκίμια άμμου Fontainebleau στα 200KPa με διαφορετικό τρόπο φόρτισης

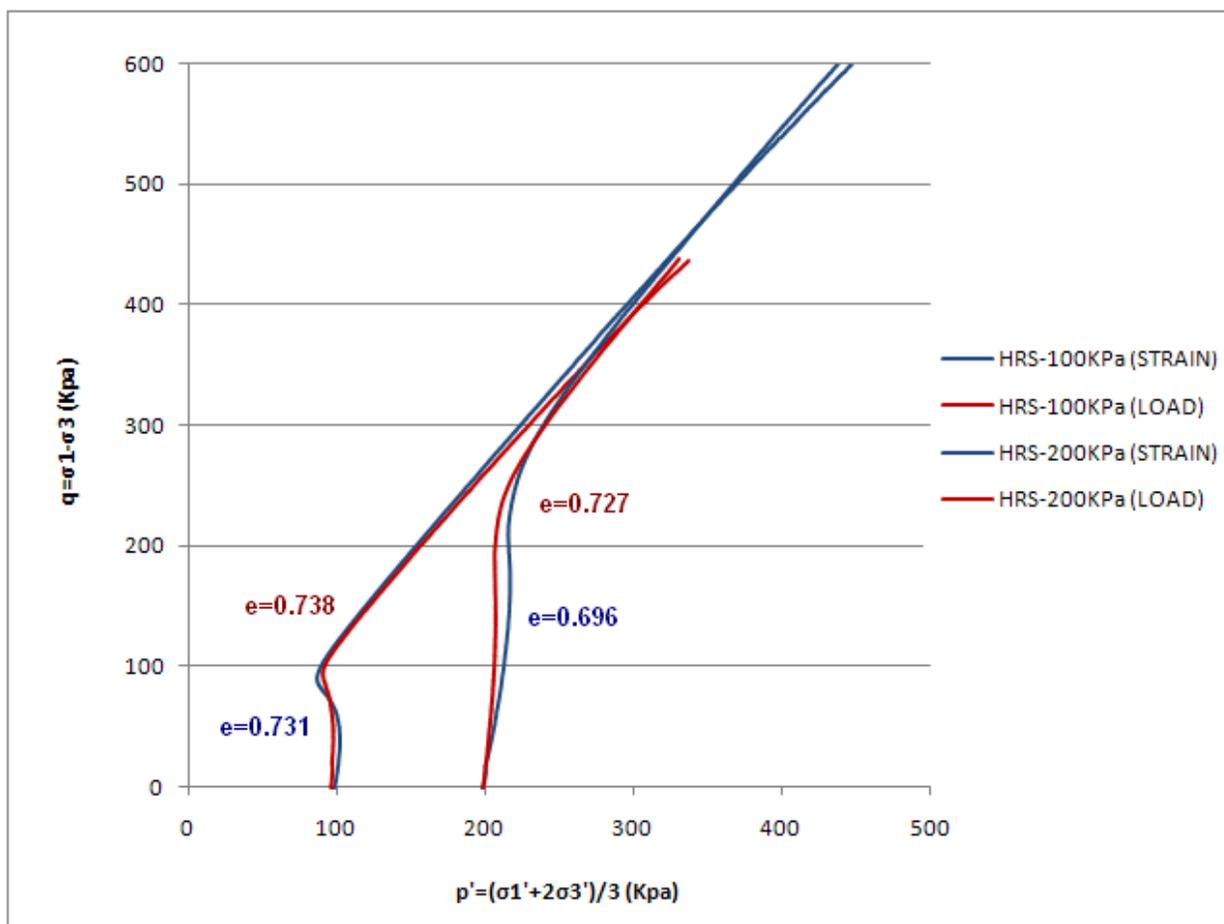
Η συμπεριφορά των δοκιμών που περιγράφηκε παραπάνω φαίνεται και στα διαγράμματα των Σχημάτων 9.34 και 9.35. Το δοκίμιο που φορτίστηκε με έλεγχο των παραμορφώσεων συμπεριφέρεται συστολικά μέχρι η παραμόρφωση να αγγίξει το 3%. Μέχρι εκείνο το σημείο έχουμε αύξηση της πίεσης των πόρων με ταυτόχρονη μείωση της μέσης ενεργής τάσης. Στη συνέχεια οι πιέσεις των πόρων εκτονώνονται και το δοκίμιο επανακτά την αντοχή του. Το δοκίμιο που φορτίστηκε με έλεγχο των τάσεων, παρουσιάζει περεταίρω αύξηση της πίεσης των πόρων και φτάνει αργότερα στην αλλαγή φάσης του (μετά το 4%). Στο διάγραμμα  $q - \varepsilon$  του Σχήματος 9.35 διακρίνεται η αιχμή της αποκλίνουσας τάσης (παραμόρφωση περίπου 1%) και η σταθερά αυξανόμενη παραμόρφωση (χωρίς αύξηση του φορτίου) που την ακολουθεί μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης (παραμόρφωση περίπου 6%).



Σχ. 9.35 : Διάγραμμα  $q - \varepsilon$  από δοκίμια άμμου Fontainebleau στα 200KPa με διαφορετικό τρόπο φόρτισης

**Δοκίμια άμμου HRS**

Τα δοκίμια άμμου HRS χαρακτηρίζονται επίσης ως μέσης πυκνότητας και φαίνεται να αποκρίνονται με λιγότερο συστολική συμπεριφορά από τα αντίστοιχα της άμμου M31 και της άμμου Fontainebleau. Όμοια με την άμμο M31 πραγματοποιήθηκαν δύο πειράματα υπό συνθήκες ελέγχου των παραμορφώσεων (strain control) και δυο υπό συνθήκες ελεγχόμενου φορτίου (stress control), σε ενεργές τάσεις των 100KPa και 200KPa αντίστοιχα.

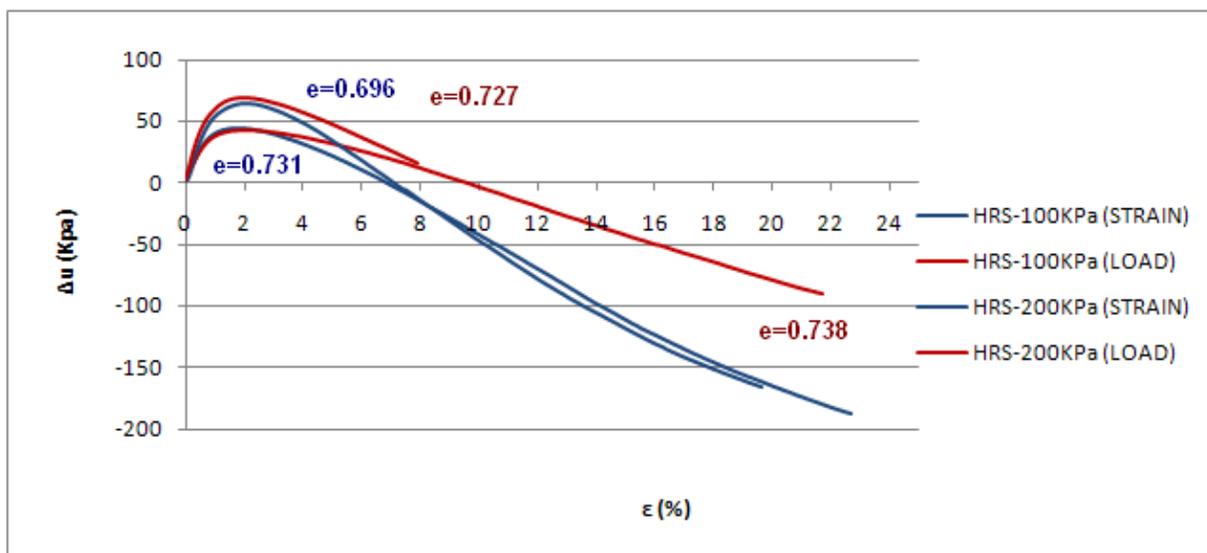


**Σχ. 9.36 : Διάγραμμα q - p' από δοκίμια άμμου HRS στα 100 και 200KPa με διαφορετικό τρόπο φόρτισης**

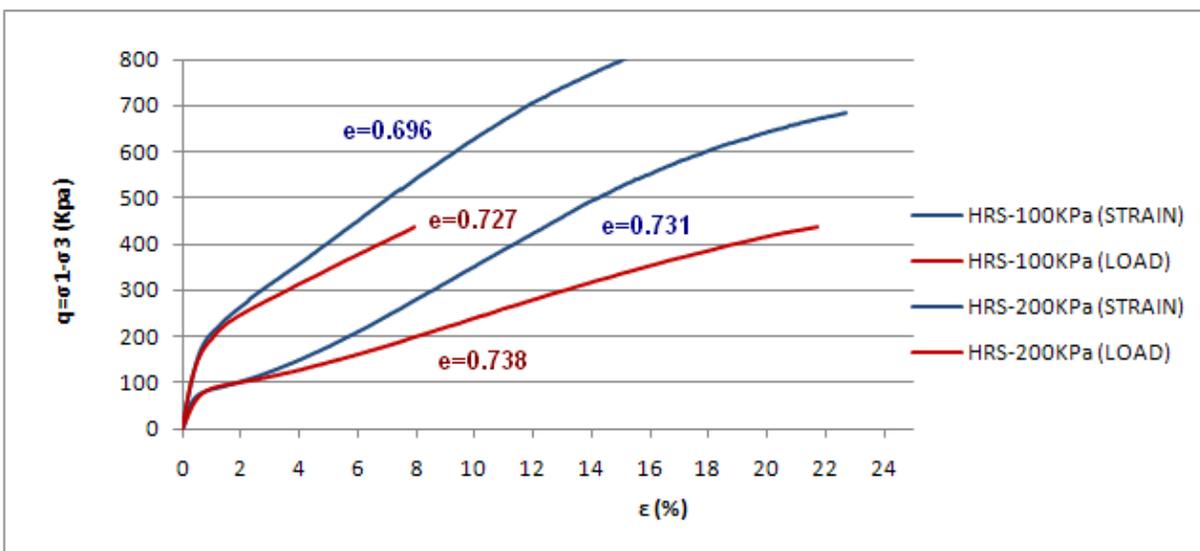
Τα δοκίμια της άμμου HRS που στερεοποιήθηκαν σε ενεργό τάση 100KPa δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης. Η συμπεριφορά τους μοιάζει πολύ με αυτή του δοκιμίου της άμμου Fontainebleau που φορτίστηκε υπό συνθήκες ελεγχόμενης παραμόρφωσης. Συγκεκριμένα και τα δύο δοκίμια παρουσιάζουν συστολική συμπεριφορά, χωρίς να εμφανίσουν, είτε το φαινόμενο της σταδιακής χαλάρωσης της αντοχής (strain softening) όπου η τάση δεν αυξάνεται ή αυξάνεται ελάχιστα με ταυτόχρονη αύξηση της παραμόρφωσης, είτε το φαινόμενο της αστάθειας (instability) κατά το οποίο προκαλούνται ακαριαία μεγάλες πλαστικές παραμορφώσεις εξαιτίας της ανικανότητας του εδαφικού στοιχείου να παραλάβει το επιβαλλόμενο φορτίο. Μετά το σημείο αλλαγής της φάσης (παραμόρφωση περίπου 2%), με τη συνέχιση της διάτμησης, τα δοκίμια παρουσιάζουν μια τάση για αύξηση του όγκου τους και αναπτύσσουν υποπιέσεις πόρων αυξάνοντας διαρκώς την αντοχή τους.

Τα δοκίμια της άμμου HRS που στερεοποιήθηκαν σε ενεργό τάση 200KPa παρουσιάζουν λιγότερο συστολική συμπεριφορά με την μέση ενεργό τάση να μεταβάλλεται ελάχιστα όσο διαρκεί η αύξηση της πίεσης των πόρων λόγω του χαμηλότερου δείκτη πόρων τους. Η διαφορά που παρατηρείται στα δύο δοκίμια πριν την αλλαγή φάσης ίσως να οφείλεται στους μεταξύ τους διαφορετικούς δείκτες πόρων. Μετά το σημείο αλλαγής φάσης (παραμόρφωση περίπου 2%), τα δοκίμια παρουσιάζουν και εδώ τάση για διαστολική συμπεριφορά και ανάπτυξη υποπιέσεων πόρων.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα των Σχημάτων 9.37 και 9.38, τόσο τα δοκίμια των 100KPa όσο και τα δοκίμια των 200KPa παρουσιάζουν τις ίδιες διαφορές μετά τα σημεία αλλαγής φάσης. Για τις ίδιες τιμές αξονικής παραμόρφωσης, η διατμητική αντοχή εμφανίζεται μεγαλύτερη στα δοκίμια που φορτίστηκαν με έλεγχο των παραμορφώσεων από ότι στα δοκίμια που φορτίστηκαν με έλεγχο των τάσεων. Επίσης στα δοκίμια ελέγχου των παραμορφώσεων φαίνεται ότι η μείωση των υπερπιέσεων των πόρων είναι πιο απότομη από ότι στα δοκίμια ελέγχου των τάσεων.



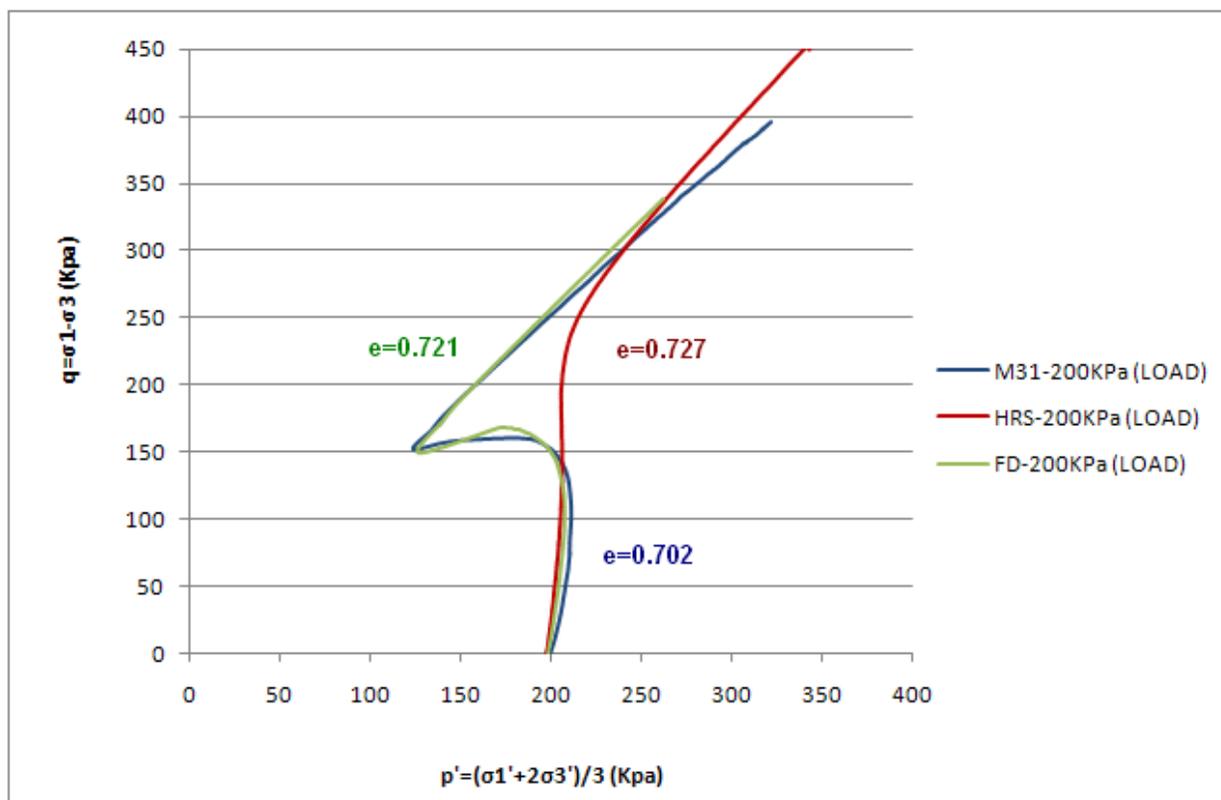
Σχ. 9.37 : Διάγραμμα  $\Delta u - \epsilon$  από δοκίμια άμμου HRS στα 100 και 200KPa με διαφορετικό τρόπο φόρτισης



Σχ. 9.38 : Διάγραμμα  $q - \epsilon$  από δοκίμια άμμου HRS στα 100 και 200KPa με διαφορετικό τρόπο φόρτισης

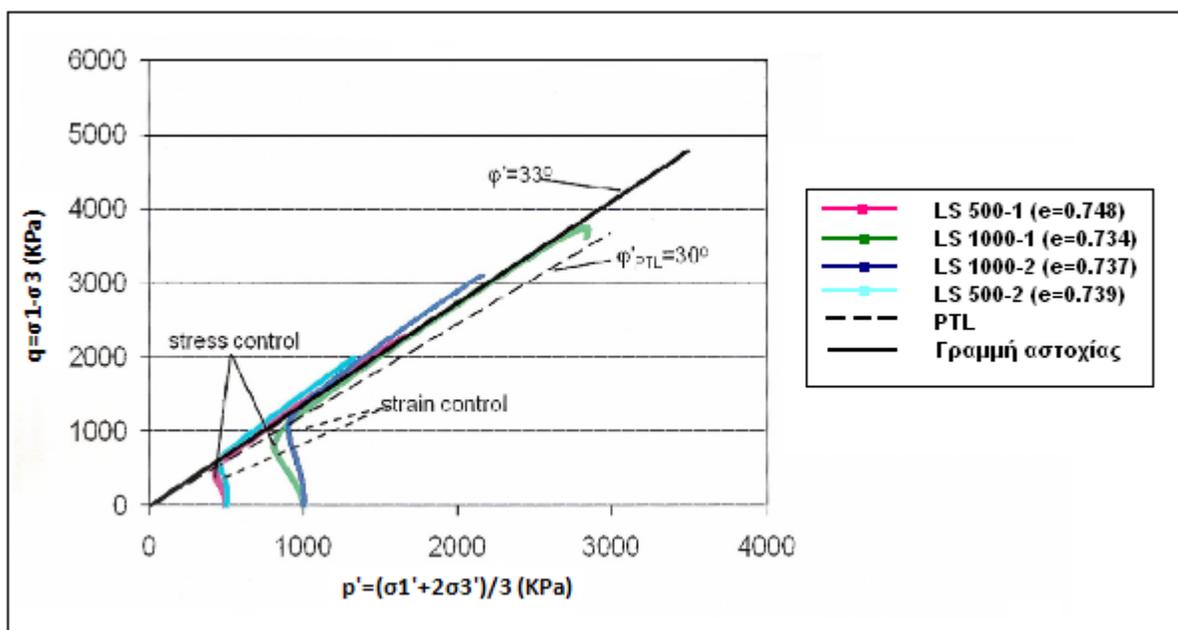
## 9.5 Διερεύνηση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Στο Σχήμα 9.1 (σελ. 125) φαίνεται η ασταθής συμπεριφορά που παρουσιάζουν τα δοκίμια των άμμων M31 και Fontainebleau, μετά το σημείο μέγιστης διατμητικής αντοχής, σε σχέση με τα δοκίμια των άμμων HRS και Longstone τα οποία εμφανίζουν συνεχή αύξηση της διατμητικής αντοχής τους. Τα πειράματα του Σχ. 9.1 έγιναν με έλεγχο του επιβαλλόμενου ρυθμού παραμόρφωσης. Παρόμοιες διαφορές εμφανίζουν και τα δοκίμια των άμμων M31 και Fontainebleau σε σχέση με αυτό της άμμου HRS του Σχήματος 9.39 που φορτίστηκαν αυτή τη φορά με τη μέθοδο ελεγχόμενου φορτίου. Μια πρώτη εκτίμηση είναι ότι ο τρόπος φόρτισης δεν επηρεάζει τη γενική μορφή απόκρισης των άμμων, δηλαδή η άμμος HRS εξακολουθεί να δείχνει συνεχή αύξηση της διατμητικής αντοχής της, ανεξάρτητα από τον τρόπο φόρτισης.



Σχ. 9.39 : Διάγραμμα  $q - p'$  από δοκίμια διαφορετικών άμμων μέσης πυκνότητας στα 200 KPa

Η παραπάνω εκτίμηση ενισχύεται αν παρατηρήσουμε τις διαδρομές ενεργών τάσεων σε δοκίμια άμμου Longstone, του Σχήματος 9.40, οι οποίες προέκυψαν ύστερα από την πραγματοποίηση τριαξονικών δοκιμών σε συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης, σε υψηλές πιέσεις και με τις δύο μεθόδους επιβολής φορτίου (Konstantinou, 2010). Οι καμπύλες και για τις δύο μεθόδους επιβολής φορτίου ακολουθούν σε γενικές γραμμές την ίδια πορεία, η οποία είναι όμοια με την διαδρομή ενεργών τάσεων της άμμου Longstone που παριστάνεται στο Σχήμα 9.1 της σελίδας 125. Ας σημειωθεί ότι τα πειράματα του Σχ. 9.40 έγιναν σε διαφορετική συσκευή (υψηλών πιέσεων) από την συσκευή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία και παρατηρείται ομοιότητα στις διαδρομές τάσεων.



Σχ. 9.40 : Διάγραμμα  $q - p'$  από δοκίμια άμμου Longstone, 500 και 1000kPa (Konstantinou, 2010)

Στο Σχήμα 6.2 (σελ. 102) φαίνονται οι κοκκομετρικές διαβαθμίσεις όλων των άμμων που χρησιμοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα η άμμος M31 και η άμμος HRS, παρά το γεγονός ότι έχουν την ίδια περίπου κοκκομετρική διαβάθμιση, εμφανίζουν τελείως διαφορετική απόκριση, ανεξάρτητα από τη μέθοδο επιβολής φορτίου. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ούτε η κοκκομετρία των άμμων ευθύνεται για τις αλλαγές που εμφανίζουν τα δοκίμια στην απόκρισή τους.

Ένα άλλο στοιχείο το οποίο πρέπει να εξετασθεί είναι το σχήμα των κόκκων. Στο Σχήμα 6.1 της σελίδας 102 έχουμε μια εικόνα των κόκκων των άμμων που χρησιμοποιήθηκαν. Οι άμμοι M31 και Fontainebleau, αποτελούνται από κόκκους με σχετικά λεία επιφάνεια ενώ οι άμμοι HRS και Longstone από υπογωνιώδεις και γωνιώδεις κόκκους αντίστοιχα. Σύμφωνα με τη μελέτη των Tsomokos & Georgiannou, 2009, πάνω σε δοκίμια των άμμων M31 και HRS (Σχ. 4.19, σελ. 91), αλλά και με αυτές άλλων μελετητών (Hird και Hassona, 1990, Oida και Golman, 1999) παλαιότερα, άμμοι με κόκκους με λεία επιφάνεια δείχνουν ασταθή συμπεριφορά με μείωση της διατμητικής τους αντοχής μετά από μια μέγιστη τιμή, ενώ άμμοι με γωνιώδεις κόκκους εμφανίζουν συνεχή αύξηση της διατμητικής αντοχής τους με την αύξηση της διατμητικής παραμόρφωσης.

Συμπερασματικά, η μεγάλη διαφορά που παρουσιάζουν στην απόκριση τους, τα δοκίμια των άμμων που χρησιμοποιήθηκαν, οφείλεται στις γωνιώδεις απολήξεις της επιφάνειας των κόκκων τους οι οποίες όσο είναι εντονότερες προσδίδουν στην άμμο μεγαλύτερη αντοχή και σταθερότητα.

### **Σχόλια σχετικά με την πλευρική τάση**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικά είδη άμμου αλλά και σε διαφορετικές πλευρικές τάσεις εκτός της άμμου Fontainebleau όπου τα δοκίμια στερεοποιήθηκαν μόνο σε ενεργό τάση των 200kPa. Από τις τρεις υπόλοιπες άμμους και για τις ίδιες περίπου τιμές του δείκτη πόρων, διαπιστώθηκε ότι η πλευρική τάση δεν επηρεάζει την μορφή της απόκρισης τουλάχιστον μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης. Στο κανονικοποιημένο διάγραμμα του Σχήματος 9.5 (σελ 129) για την άμμο M31 αυτό φαίνεται ξεκάθαρα. Τα κανονικοποιημένα διαγράμματα των ενεργών τάσεων των άμμων HRS (Σχ. 9.11, σελ. 134) και Longstone (Σχ. 9.17, σελ. 139) παρουσιάζουν κάποιες διαφορές οι οποίες οφείλονται πιθανά στην απόκλιση μεταξύ των τιμών του δείκτη πόρων.

Όμως, μετά το σημείο αλλαγής φάσης, τα δοκίμια των άμμων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζουν διαφορές στην συμπεριφορά τους λόγω της διαφορετικής πλευρικής τάσης. Συγκεκριμένα, για την άμμο M31, στο κανονικοποιημένο διάγραμμα του Σχήματος 9.7 (σελ. 131) το δοκίμιο με ενεργό τάση στερεοποίησης 100kPa παρουσιάζει μεγαλύτερη διαστολικότητα και ρυθμό αύξησης της διατμητικής του αντοχής από εκείνα των 200kPa και 300kPa τα οποία κανονικοποιούνται. Το ίδιο παρατηρείται και για τις άμμους HRS και Longstone στα Σχήματα 9.13 (σελ. 135) και 9.21 (σελ. 141) με τη μόνη διαφορά ότι τα δοκίμια των 200 και 300kPa δεν κανονικοποιούνται πιθανά λόγω της διαφοράς του δείκτη πόρων (τα δοκίμια των 200kPa εμφανίζονται πυκνότερα από αυτά των 300kPa).

Συμπερασματικά η πλευρική τάση δεν επηρεάζει την γενική μορφή απόκρισης των δοκιμών μέχρι το σημείο αλλαγής φάσης σε αντίθεση με το τι συμβαίνει μετά από αυτό. Επίσης, διαπιστώθηκε πως όσο μεγαλώνει η πλευρική τάση, τόσο μεγαλώνει η αντοχή του δοκιμίου πράγμα αναμενόμενο σύμφωνα με την ανάλυση που έγινε στην παράγραφο 4.4 του Μέρους Α' (σελ. 83).

### **Σχόλια σχετικά με τον δείκτη πόρων**

Αντίθετα με την πλευρική τάση, η πυκνότητα του δοκιμίου η οποία εκφράζεται μέσω της σχετικής πυκνότητας ( $D_r$ ) ή της τιμής του δείκτη πόρων ( $e$ ) παίζει σημαντικό ρόλο στη γενική μορφή απόκρισης των δοκιμών. Οι διαδρομές των ενεργών τάσεων της άμμου M31, του Σχήματος 9.24 (σελ. 144) είναι κατατοπιστικές και έρχονται να επαληθεύσουν τους ισχυρισμούς των Cubrinovski και Ishihara, 2000 για τους τρεις τύπους απόκρισης, κατά την διάρκεια μονοτονικών αστράγγιστων διατμητικών δοκιμών. Τα χαλαρά δοκίμια παρουσιάζουν ασταθή συμπεριφορά με έντονο το φαινόμενο της σταδιακής απομείωσης της αντοχής τους σε αντίθεση με τα πυκνά τα οποία παρόλο που αποτελούνται από λείους κόκκους παρουσιάζουν πιο σταθερή συμπεριφορά αυξάνοντας συνεχώς την διατμητική τους αντοχή. Τα δοκίμια της

άμμου Fontainebleau (Σχ. 9.27, σελ. 146), που έχουν επίσης λείους κόκκους, παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά.

Τα διαγράμματα  $q - \varepsilon$  και  $\Delta u - \varepsilon$  (Σχ. 9.22, 9.23, 9.25, 9.26, 9.28, 9.29) και για τα δύο είδη άμμου αποδεικνύουν ότι τα πιο πυκνά δοκίμια μπορούν να παραλάβουν μεγαλύτερα φορτία καθώς αυξάνεται η μέγιστη διατμητική αντοχή τους. Με άλλα λόγια η μείωση της τιμής του δείκτη πόρων (αύξηση πυκνότητας), οδηγεί σε καλύτερη συμπεριφορά της άμμου.

### Σχόλια σχετικά με τη μέθοδο επιβολής της φόρτισης

Τα δοκίμια μέσης πυκνότητας των άμμων M31 και Fontainebleau, ανεξάρτητα από τη μέθοδο επιβολής φορτίου, παρουσιάζουν ιδιαίτερα ασταθή συμπεριφορά (το οποίο οφείλεται στη λεία επιφάνεια των κόκκων τους) σε αντίθεση με τα αντίστοιχα των άμμων HRS και Longstone (αποτελούνται από υπογωνιώδεις και γωνιώδεις κόκκους αντίστοιχα) τα οποία εμφανίζονται πιο σταθερά και γενικά συμπεριφέρονται καλύτερα αυξάνοντας συνεχώς την διατμητική τους αντοχή.

Τα δοκίμια των άμμων M31, HRS και Fontainebleau που φορτίστηκαν με τη μέθοδο ελέγχου των παραμορφώσεων και που παρουσιάζονται στην παράγραφο 9.4 (σελ. 148-156), μετά το σημείο αλλαγής φάσης, εμφανίζουν μεγαλύτερη τάση για διαστολικότητα και για τις ίδιες τιμές αξονικής παραμόρφωσης παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές αποκλίνουσας τάσης από αυτά που φορτίστηκαν με τη μέθοδο ελεγχόμενου φορτίου. Συνεπώς και για τις άμμους που εμφανίζουν, αλλά και για αυτές που δεν εμφανίζουν ασταθή συμπεριφορά, η φόρτιση υπό συνθήκες ελεγχόμενου φορτίου είναι δυσμενέστερη, σε σχέση με σταθερή επιβαλλόμενη παραμόρφωση, διότι εμφανίζουν μικρότερη τάση για διαστολή μετά την αλλαγή φάσης.

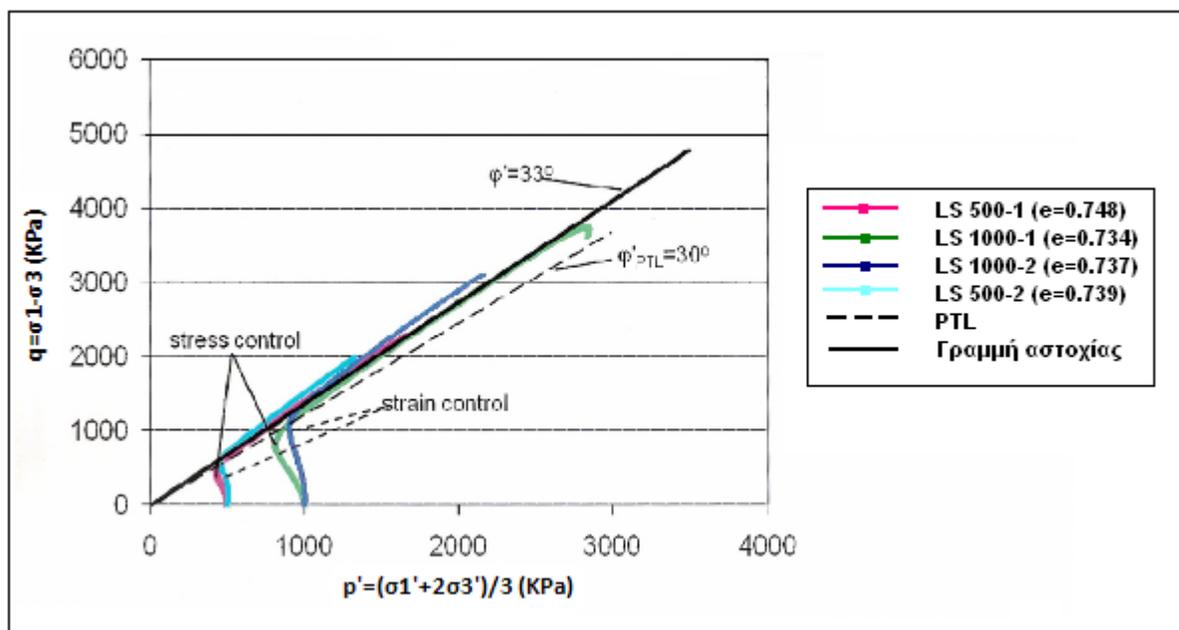
Τα δοκίμια της άμμου M31 εμφανίζουν την πιο συστολική συμπεριφορά και συνεπώς την μεγαλύτερη αστάθεια. Τα Σχήματα 9.30, 9.31 και 9.32 (σελ. 148-150) δείχνουν πως υπάρχουν διαφορές που οφείλονται στον τρόπο φόρτισης και πριν τα σημεία αλλαγής φάσης. Συγκεκριμένα τα δοκίμια ελέγχου των παραμορφώσεων, για τις αρχικές μικρές παραμορφώσεις συμπεριφέρονται ελαφρώς πιο συστολικά, αλλά επανακτούν πιο γρήγορα την αντοχή τους καθώς τα δοκίμια ελεγχόμενου φορτίου συνεχίζουν για μεγαλύτερο διάστημα να παρουσιάζουν αστάθεια.

Ανάλογες παρατηρήσεις προκύπτουν και για την άμμο Fontainebleau από τα Σχήματα 9.33, 9.34 και 9.35 (σελ. 151-153). Αξίζει να σημειωθεί ότι το δοκίμιο που φορτίστηκε με έλεγχο των παραμορφώσεων δεν εμφανίζει το φαινόμενο της ψευδό-σταθερής κατάστασης κατά το οποίο η αποκλίνουσα τάση δεν αυξάνεται ή αυξάνεται ελάχιστα με ταυτόχρονη αύξηση της παραμόρφωσης (όπως παρατηρήθηκε στην άμμο M31 στα Σχήματα 9.30, 9.31, 9.32). Όμως το δοκίμιο που φορτίστηκε με έλεγχο των τάσεων παρουσιάζει ασταθή συμπεριφορά και επανακτά την αντοχή του πολύ αργότερα, για παραμορφώσεις μεγαλύτερες του 4%.

Αντίθετα τα δοκίμια της άμμου HRS που παρουσιάζονται στα Σχήματα 9.36, 9.37 και 9.38 (σελ. 154-156) δεν εμφανίζουν ιδιαίτερες διαφορές μέχρι τα σημεία αλλαγής φάσης. Η συμπεριφορά τους είναι γενικά καλή χωρίς φαινόμενα αστάθειας. Για τις αρχικές μικρές παραμορφώσεις έχουμε αύξηση των πιέσεων των πόρων οι οποίες γρήγορα εκτονώνονται και τα δοκίμια συνεχώς αυξάνουν την αντοχή τους.

Η συμπεριφορά της άμμου HRS και στις δύο μεθόδους επιβολής φορτίου μοιάζει με αυτή της άμμου Longstone. Ας σημειωθεί ότι και οι δύο άμμοι αποτελούνται από υπογωνιώδεις ή γωνιώδεις κόκκους. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών σε συνθήκες εμποδιζόμενης στράγγισης σε δοκίμια άμμου Longstone για τάσεις

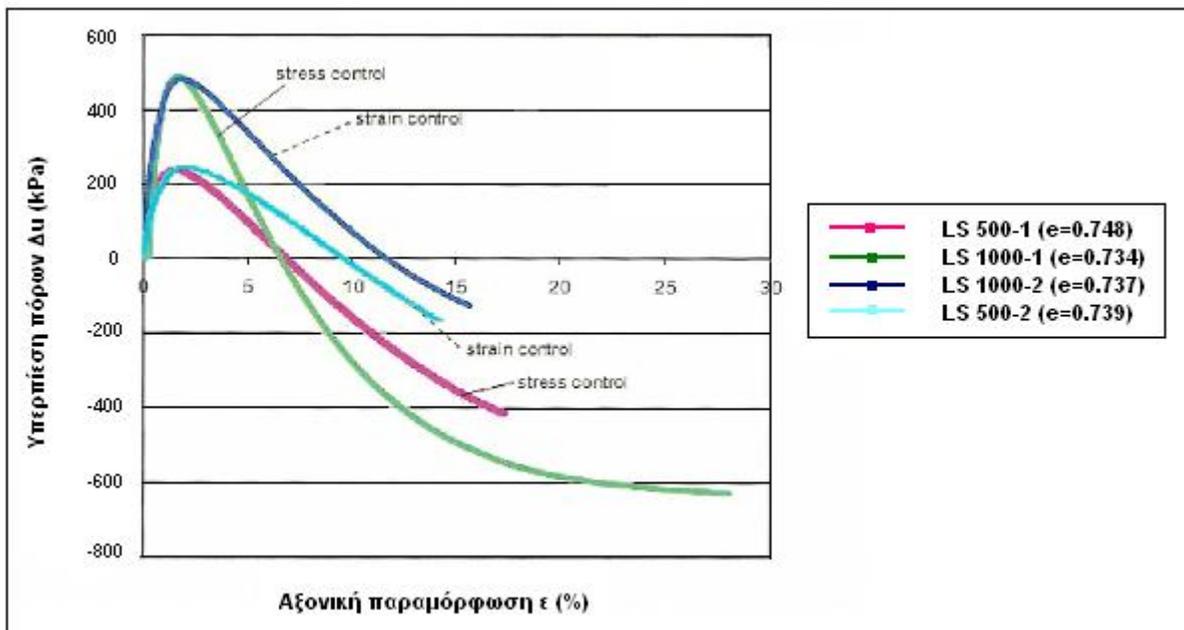
500kPa και 1000kPa οι οποίες είναι υψηλότερες από εκείνες της παρούσας εργασίας. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν και με τις δύο μεθόδους επιβολής φορτίου (Konstantinou, 2010).



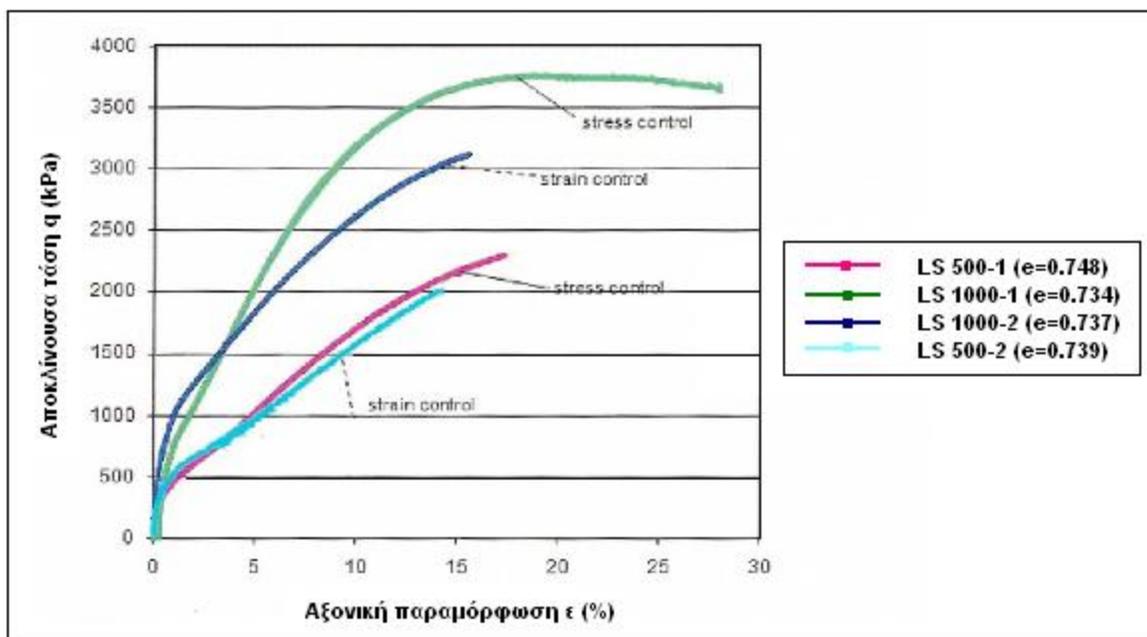
Σχ. 9.41 : Διάγραμμα  $p - q$  από δοκιμαία άμμου Longstone, 500 και 1000kPa (Konstantinou, 2010)

Μέχρι τα σημεία αλλαγής φάσης τα δοκίμια και για τις δύο άμμους παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Οι διαφορές είναι μικρές από τη μια μέθοδο στην άλλη, ιδίως στην τάση των 500kPa και πιθανά οφείλονται στις αποκλίσεις του δείκτη πόρων. Μετά τα σημεία αλλαγής φάσης όμως, η εικόνα διαφοροποιείται. Τα μεν δοκίμια της άμμου HRS εμφανίζουν μεγαλύτερη τάση για διαστολικότητα με τη μέθοδο ελεγχόμενης παραμόρφωσης από ότι με τη μέθοδο ελεγχόμενου φορτίου (Σχ. 9.37 και 9.38) ενώ τα δε δοκίμια της άμμου Longstone εμφανίζουν ακριβώς το αντίθετο (Σχ. 9.42 και 9.43). Το γεγονός αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι τα δοκίμια της άμμου Longstone στερεοποιήθηκαν σε υψηλές σχετικά πιέσεις.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.42, η διαφορά στο ρυθμό μείωσης της υπερπίεσης πόρων είναι έντονη για τάση 1000kPa όπου οι καμπύλες των υπερπίεσεων πόρων διαχωρίζονται μετά το σημείο αλλαγής φάσης, ενώ στην τάση των 500kPa παραμένουν παράλληλες. Συνεπώς, φαίνεται ότι η αρχική τάση στερεοποίησης επηρεάζει την απόκριση της άμμου, ανάλογα με τη μέθοδο φόρτισης, χωρίς όμως να αλλάζουν τα χαρακτηριστικά της συμπεριφοράς της. Για παράδειγμα μια άμμος που αποκρίνεται με συνεχή αύξηση της αποκλίνουσας τάσης, κατά τη διάρκεια της φόρτισης, μπορεί να δείχνει μείωση της αντοχής της λόγω τρόπου επιβολής φόρτισης (έλεγχος παραμόρφωσης ή έλεγχος φορτίου) ή λόγω αύξησης της αρχικής τάσης στερεοποίησης.



Σχ. 9.42 : Διάγραμμα  $\Delta u - \epsilon$  από δοκίμια άμμου Longstone, 500 και 1000kPa (Konstantinou, 2010)



Σχ. 9.43 : Διάγραμμα  $q - \epsilon$  από δοκίμια άμμου Longstone, 500 και 1000kPa (Konstantinou, 2010)

## 9.6 Συνοπτικά συμπεράσματα

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, στο Εργαστήριο Εδαφομηχανικής, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, οδήγησαν στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Τα δοκίμια της άμμου M31 και Fontainebleau, για παρόμοιες τιμές του δείκτη πόρων, παρουσιάζουν μεγαλύτερη τάση για συστολή, πριν τα σημεία αλλαγής φάσης, από τα αντίστοιχα δοκίμια των άμμων HRS και Longstone. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι άμμοι M31 και Fontainebleau αποτελούνται από σφαιρικούς κόκκους, σε αντίθεση με τις άλλες δύο οι οποίες αποτελούνται από γωνιώδεις έως υπογωνιώδεις κόκκους.
- Όσο μεγαλύτερη είναι η αρχική τάση στερεοποίησης των δοκιμίων, τόσο μεγαλύτερη είναι και η διατμητική αντοχή που αναπτύσσουν πριν φτάσουν στα σημεία αλλαγής φάσης.
- Η τάση στερεοποίησης δεν επηρεάζει την γενική μορφή απόκρισης της κάθε άμμου για παρόμοιες τιμές του δείκτη πόρων και μέχρι τα σημεία αλλαγής φάσης (όπως φαίνεται και από τα κανονικοποιημένα διαγράμματα  $q - p'$ ) για το εύρος τάσεων που μελετήθηκε (100kPa – 300kPa).
- Μετά τα σημεία αλλαγής φάσης, τα δοκίμια που στερεοποιήθηκαν στα 100kPa συμπεριφέρονται περισσότερο διαστολικά από τα αντίστοιχα που στερεοποιήθηκαν σε μεγαλύτερες τάσεις και επιδεικνύουν απότομη τάση διόγκωσης και πτώση της πίεσης πόρων.
- Η μείωση της τιμής του δείκτη πόρων (αύξηση πυκνότητας), οδηγεί σε καλύτερη συμπεριφορά της άμμου αποδίδοντας μεγαλύτερες τιμές διατμητικής αντοχής για ίδιες τιμές αξονικής παραμόρφωσης.

- Τα πιο χαλαρά δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερη τάση για συστολή και ορισμένες φορές εμφανίζουν απομείωση της διατμητικής τους αντοχής, ύστερα από μια μέγιστη τιμή, σε αντίθεση με τα πυκνότερα δοκίμια τα οποία παρουσιάζουν λιγότερο συστολική συμπεριφορά και αυξάνουν συνεχώς την αντοχή τους.
- Η μέθοδος επιβολής της φόρτισης δεν επηρεάζει τόσο την γενική μορφή απόκρισης των δοκιμίων, όσο η γωνιότητα των κόκκων και οι διαφορετικές τιμές του δείκτη πόρων.
- Όλα τα δοκίμια, είτε φορτίστηκαν με έλεγχο των παραμορφώσεων είτε φορτίστηκαν με έλεγχο των τάσεων, δεν καταρρέουν και δεν παρουσιάζουν ρευστοποίηση, αλλά μετά το σημείο αλλαγής φάσης αυξάνουν και πάλι την διατμητική τους αντοχή.
- Τα δοκίμια που παρουσιάζουν από τη φύση τους έντονη τάση για συστολή (M31, Fontainebleau), όταν φορτίζονται με έλεγχο των παραμορφώσεων παρουσιάζουν το φαινόμενο της ψευδό-σταθερής κατάστασης, ενώ όταν φορτίζονται με έλεγχο των τάσεων παρουσιάζουν αστάθεια για μεγαλύτερο εύρος παραμορφώσεων και απομείωση της αντοχής τους ύστερα από μια μέγιστη τιμή (ψαθυρότητα). Αντίθετα τα δοκίμια των άμμων HRS και Longstone, τα οποία εμφανίζουν διαρκή αύξηση της διατμητικής τους αντοχής, μπορεί να ειπωθεί ότι δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές λόγω του τρόπου φόρτισης μέχρι τα σημεία αλλαγής φάσης.
- Μετά το σημείο αλλαγής φάσης, όλα τα δοκίμια εμφανίζουν μεγαλύτερη τάση για διαστολή (μεγαλύτερη διατμητική αντοχή για τις ίδιες τιμές παραμόρφωσης και απότομη πτώση της πίεσης πόρων) και γενικά συμπεριφέρονται καλύτερα, όταν φορτίζονται με τη μέθοδο ελέγχου των παραμορφώσεων από ότι όταν φορτίζονται με τη μέθοδο ελεγχόμενου φορτίου.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Alim M. A., Suzuki K. and Iwashita K. (2006), *“Effect of confining pressure on the strength behavior of granular material simulated by the discrete element method”*, The Geological Society of London, Paper number 372.
2. Alshibli K. A. and Alsaleh M. I. (2004), *“Characterizing surface roughness and shape of sands using digital microscopy”*, Journal of Computing in Civil Engineering, 18(1), 36-45.
3. Been K., Jefferies M. G. and Hachey J. E. (1991), *“The critical state of sands”*, Geotechnique, 35(2), 99-112.
4. Bopp P. A. and Lade P.V. (1997), *“Effects of initial density on soil instability at high pressures”*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No 7, 671-677.
5. Casagrande A. (1971), *“On liquefaction phenomena”*, Geotechnique, 21(3), 197-202.
6. Chu J., Leroueil S. and Leong W. K. (2003), *“Unstable behavior of sand and its implication for slope stability”*, Can. Geotech. J., 40, 873-885.
7. Chu J. and Wanatowski D. (2009), *“Effect of Loading Mode on Strain Softening and Instability Behavior of Sands in Plane-Strain Tests”*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 135, No 1, 108-120.
8. Chu J. And Leong W. K. (2001), *“Pre-failure strain softening and pre-failure instability of sand: a comparative study”*, Geotechnique, 51(4), 311-321.
9. Cubrinovski M. and Ishihara K. (2000), *“Flow potential of sandy soils with different grain compositions”*, Japanese Geotechnical Society, 40(4), 103-119.
10. De Gregorio V. B. (1990), *“Loading systems, sample preparation and liquefaction”*, J. Geotech. Engrg, ASCE 116, No. 5, 805-821.
11. Hird C. C. And Hassona F. A. K. (1990), *“Some factors affecting the liquefaction and flow of saturated sands in laboratory tests”*, Eng. Geol. (Amsterdam), 28, 149-170.

12. Lade P. V. And Pradel D. (1990), *"Instability and flow of granular materials. I: Experimental observations"*, J. Eng. Mech., 116(11), 2532-2550.
13. Lade P. V. (1992), *"Static instability and liquefaction of loose fine sandy slopes"*, J. Geotech. Engineering, 118(1), 51-71.
14. Lambe T. W. and Whitman R. V., *"Soil Mechanics"*, J. Wiley and Sons, 1969.
15. Leong W. K., Chu J. and Teh C. I. (2000), *"Liquefaction and instability of a granular fill material"*, Geotech. Test J., 23(2), 178-192.
16. Poulos S. J. (1981), *"The steady state of deformation"*, J. Geotech. Engrg Div., ASCE, 107(5), 533-562.
17. Poulos S. J., Castro G. and France J. W. (1985), *"Liquefaction potential evaluation"*, J. Geotech. Engrg, ASCE, 3(6), 772-792.
18. Santamarina J. C. and Cho G. C. (2004), *"Soil behavior: The role of particle shape"*, Proc. Skempton Conf., London.
19. Shinohara K., Oida M. and Golman B. (1999), *"Effect of particle shape on angle of internal friction by triaxial compression test"*, Powder Technology, 107, 131-136.
20. Sitharam T. G. (1999), *"Micromechanics modeling of granular materials: Effect of confining pressure on mechanical behavior"*, Mechanics of Materials, 33, 653-665.
21. Smalley I. J. (1966), *"Formation of quartz sand"*, Nature 211, 173-174.
22. Tsomokos A. and Georgiannou V. N. (2009), *"The effect of grain shape and angularity on the undrained response of fine sands"*, NTUA, Cv Engrg Department, Soil Mechanics Section.
23. Yamamuro J. A. and Lade P. V. (1997), *"Instability of granular materials at high pressures"*, Soils and Found, 37(1).
24. Γεωργιάννου Β. Ν. (2006), *"Ειδικά Θέματα Εδαφομηχανικής"*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
25. Καββαδάς Μ. (Έκδοση 12, Σεπτέμβριος 2005), *"Στοιχεία Εδαφομηχανικής"*, Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
26. Κωνσταντίνου Μ. (2010), *"Απόκριση λεπτόκοκκων άμμων στις υψηλές πιέσεις"*, Μεταπτυχιακή εργασία Ε.Μ.Π.

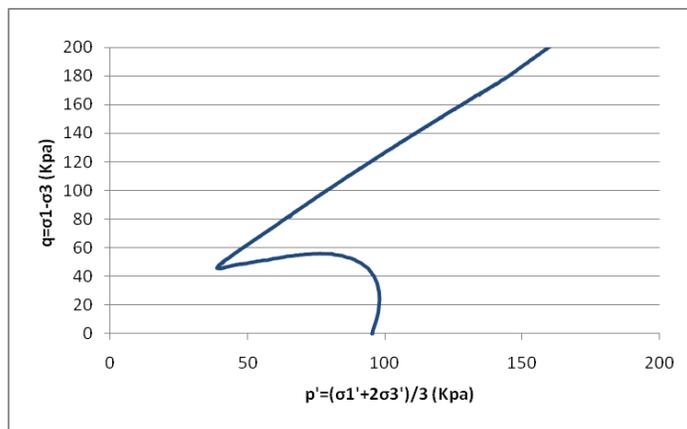


# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α'

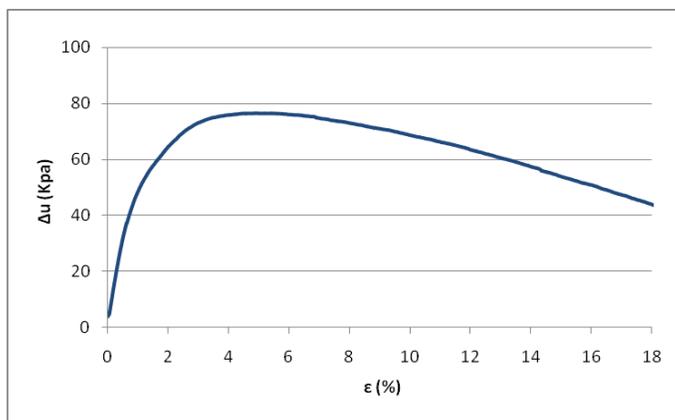
---

## ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

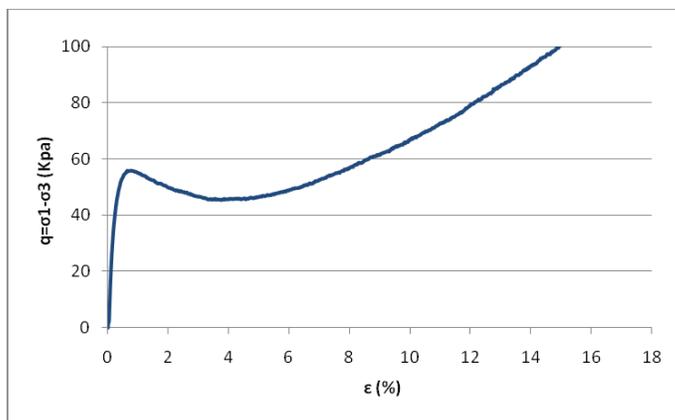
4.3.1 Δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων σε χαλαρό δοκίμιο άμμου M31 στα 100 KPa



Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q

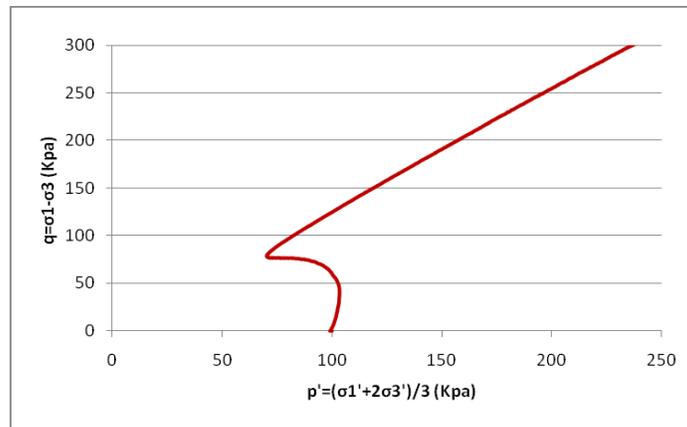


Αξονική παραμόρφωση συναρτήσεϊ της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu

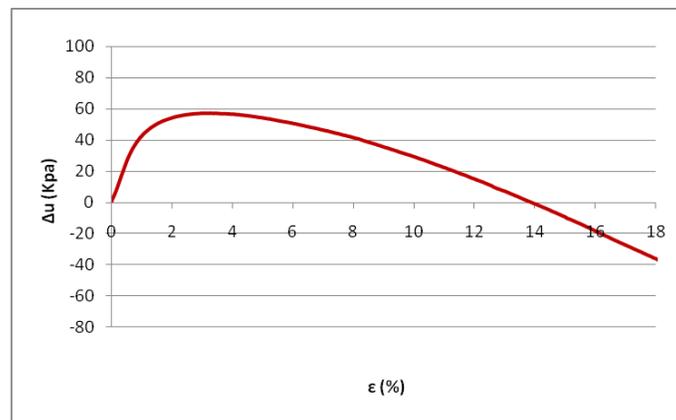


Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q

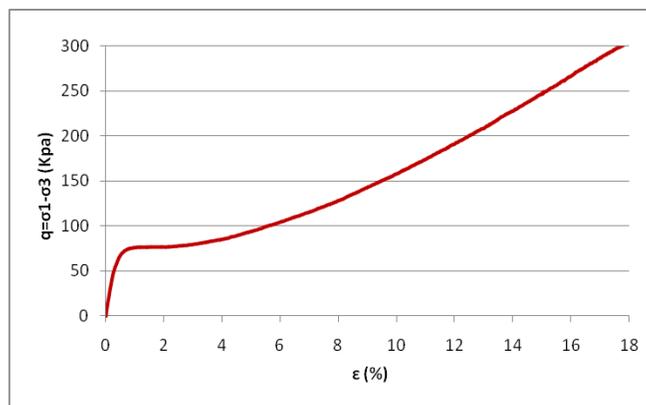
**4.3.2 Δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων σε μέσης πυκνότητας δοκίμιο άμμου M31 στα 100 KPa**



**Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q**

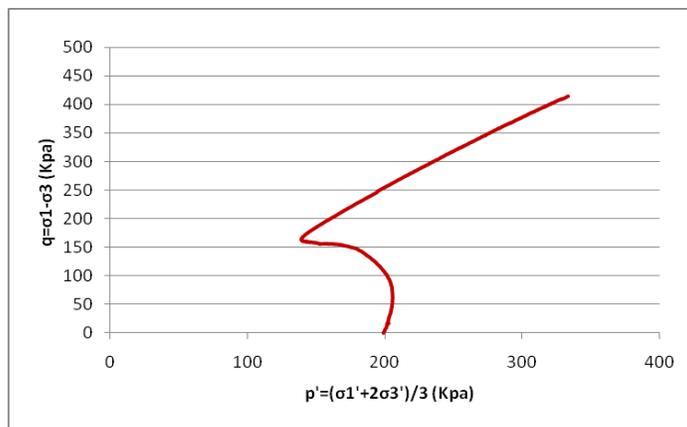


**Αξονική παραμόρφωση συναρτήσει της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu**

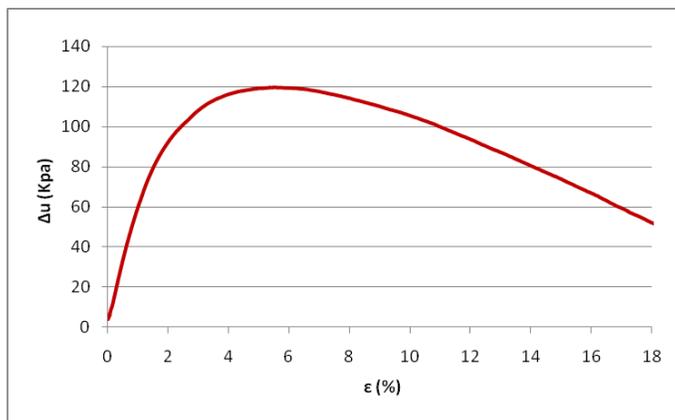


**Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q**

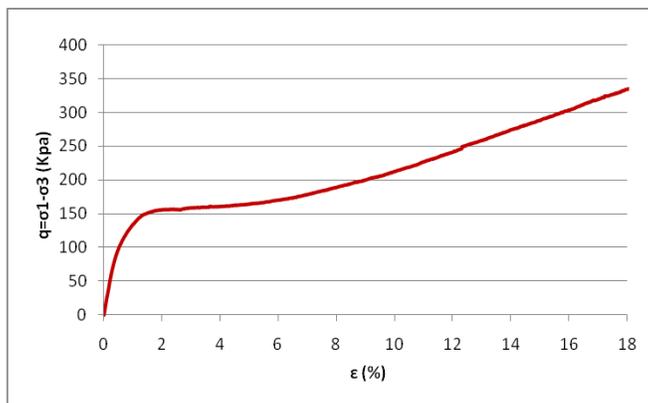
4.3.3 Δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων σε μέσης πυκνότητας δοκίμιο άμμου M31 στα 200 KPa



Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q

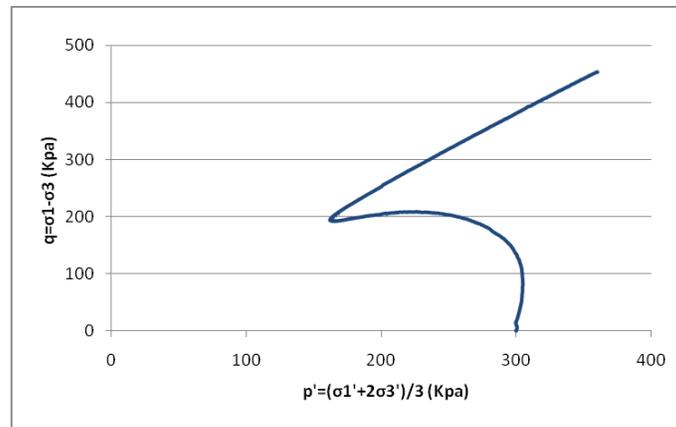


Αξονική παραμόρφωση συναρτήσει της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu

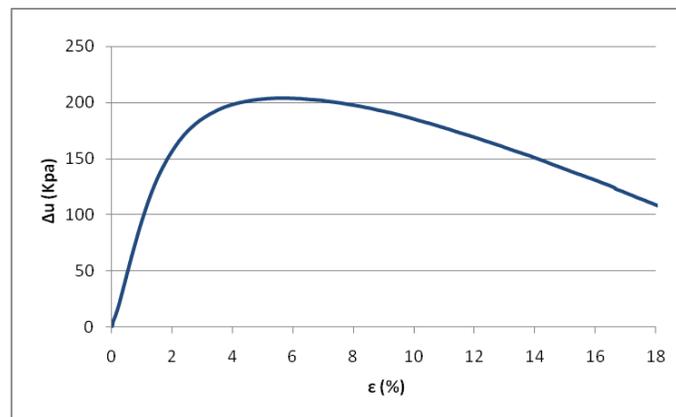


Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q

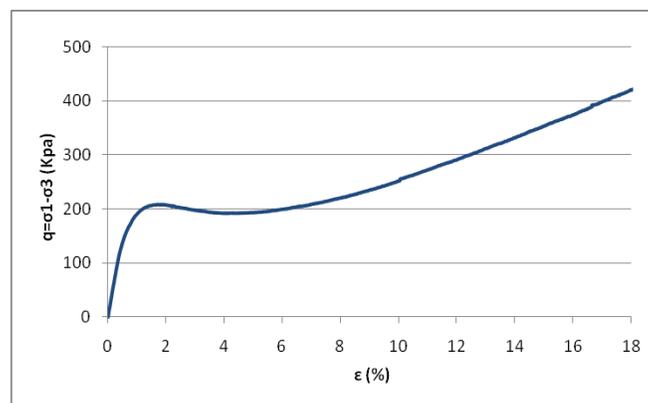
**4.3.4 Δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων σε χαλαρό δοκίμιο άμμου Μ31 στα 300 ΚΡα**



**Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q**

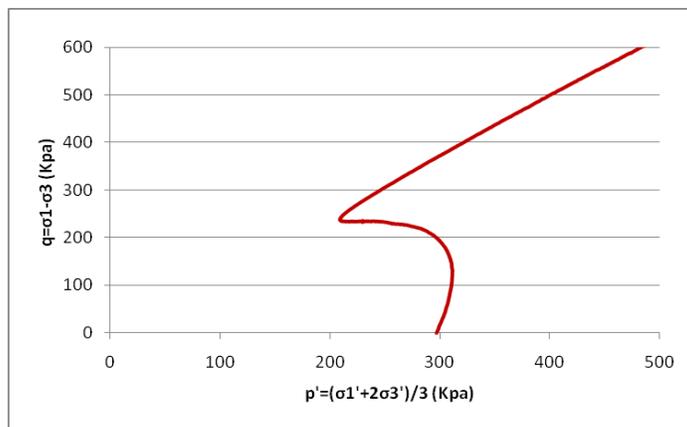


**Αξονική παραμόρφωση συναρτήσει της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu**

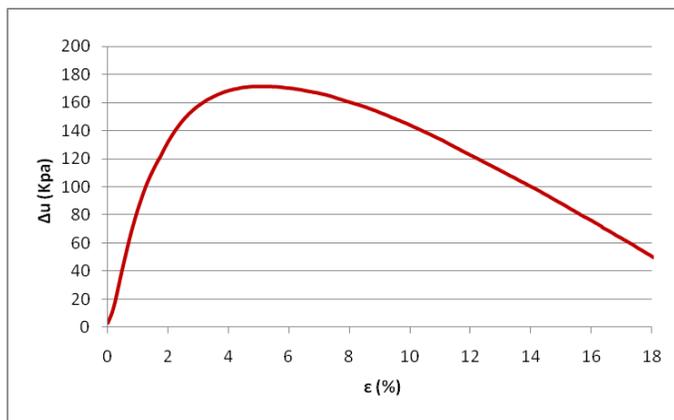


**Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q**

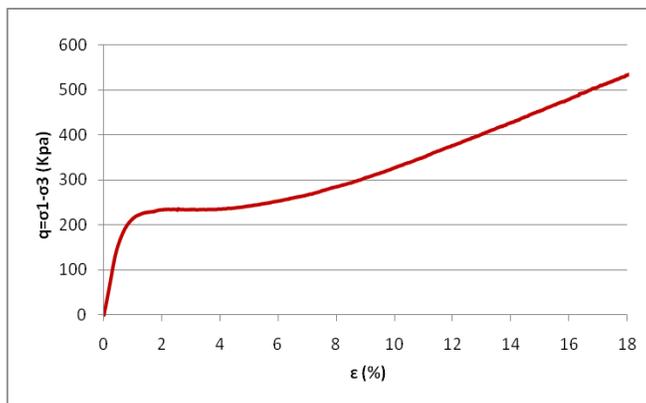
4.3.5 Δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων σε μέσης πυκνότητας δοκίμιο άμμου M31 στα 300 KPa



Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q

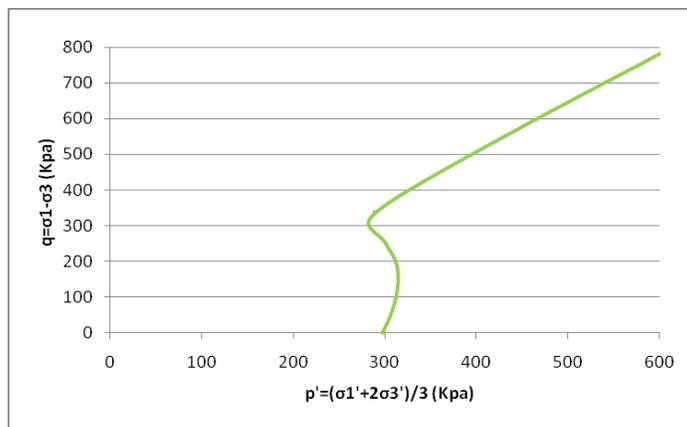


Αξονική παραμόρφωση συναρτήσει της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu

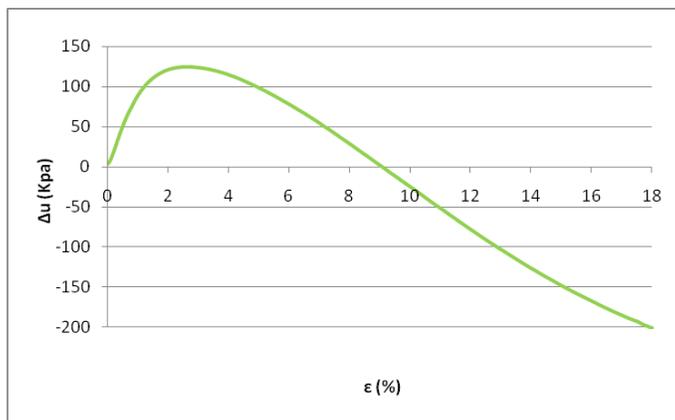


Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q

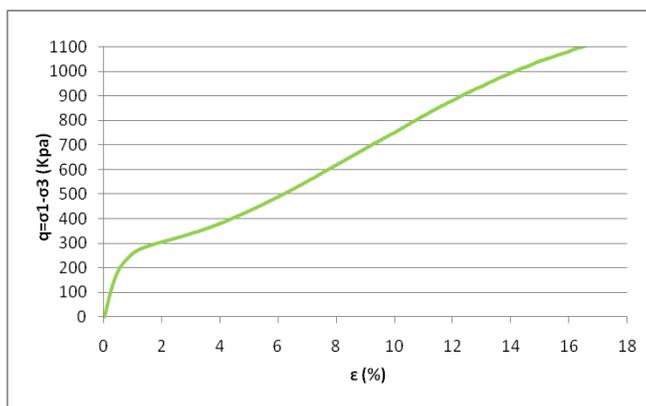
**4.3.6 Δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων σε πυκνό δοκίμιο άμμου M31 στα 300 ΚΡα**



**Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q**

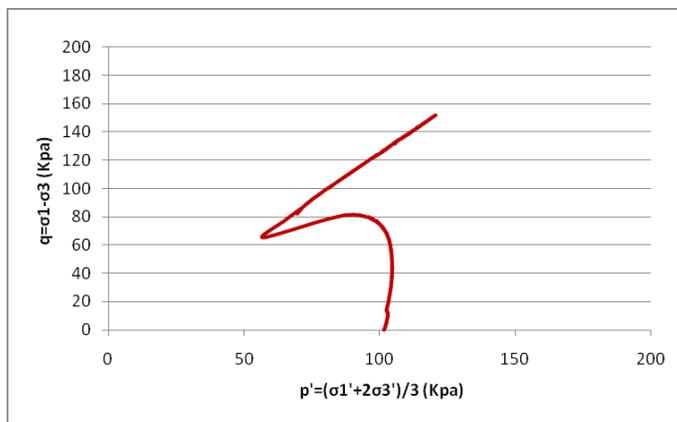


**Αξονική παραμόρφωση συναρτήσει της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu**

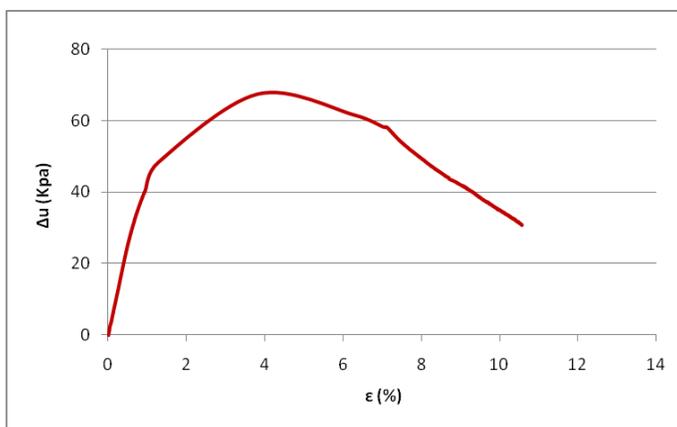


**Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q**

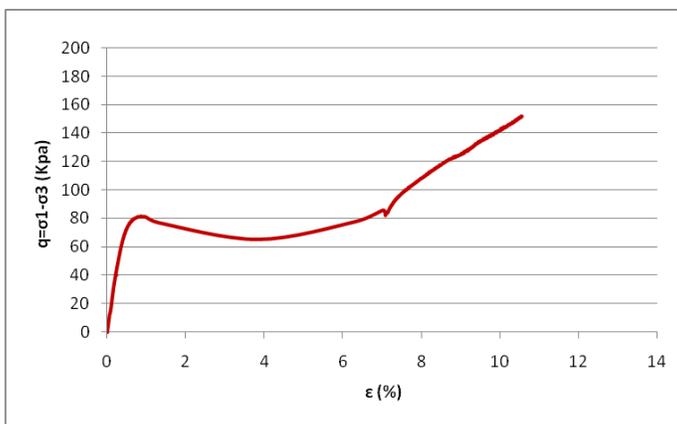
4.3.7 Δοκιμή με έλεγχο των τάσεων σε μέσης πυκνότητας δοκίμιο άμμου M31 στα 100 KPa



Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q

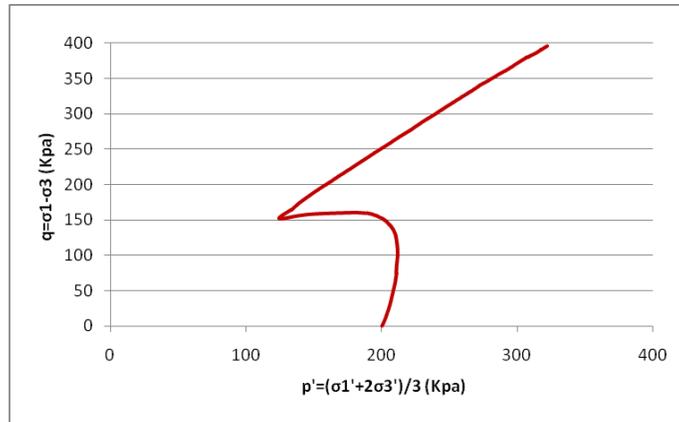


Αξονική παραμόρφωση συναρτήσεως της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu

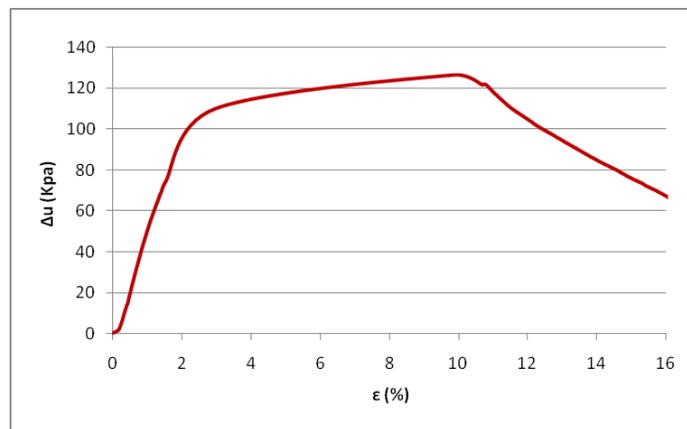


Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q

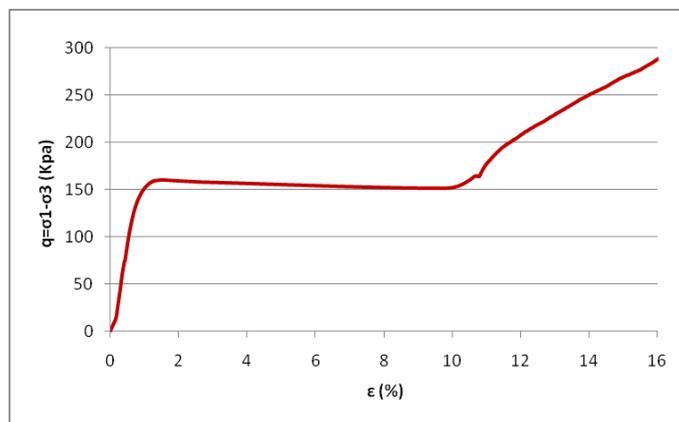
**4.3.8 Δοκιμή με έλεγχο των τάσεων σε μέσης πυκνότητας δοκίμιο άμμου M31 στα 200 KPa**



**Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q**

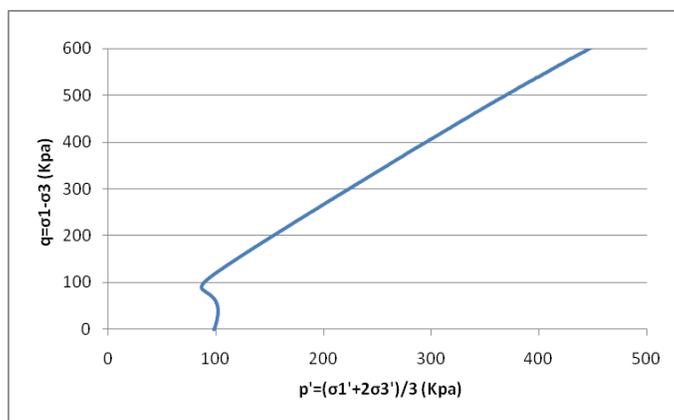


**Αξονική παραμόρφωση συναρτήσεως της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu**

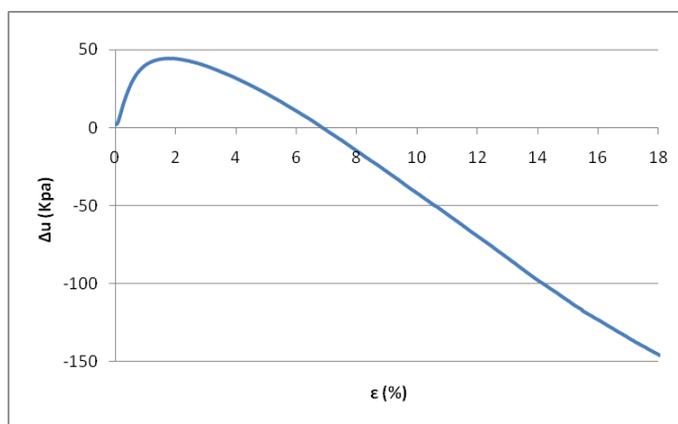


**Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q**

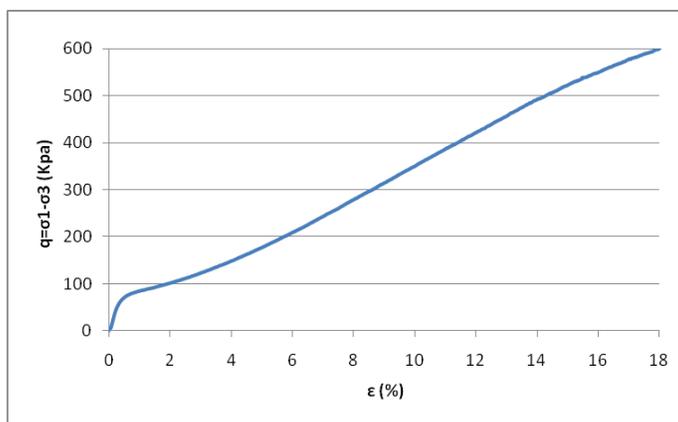
4.3.9 Δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων σε μέσης πυκνότητας δοκίμιο άμμου HRS στα 100 KPa



Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q

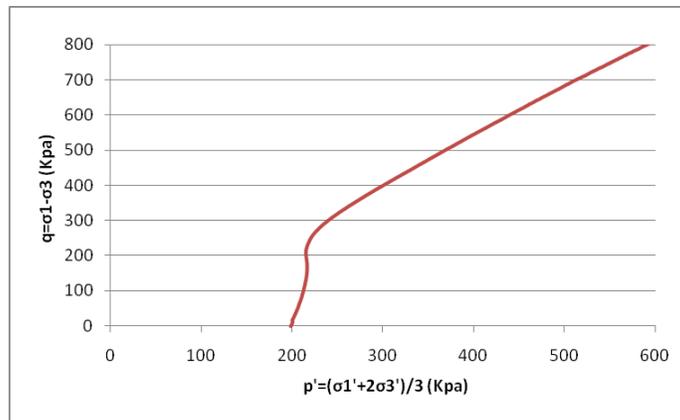


Αξονική παραμόρφωση συναρτήσσει της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu

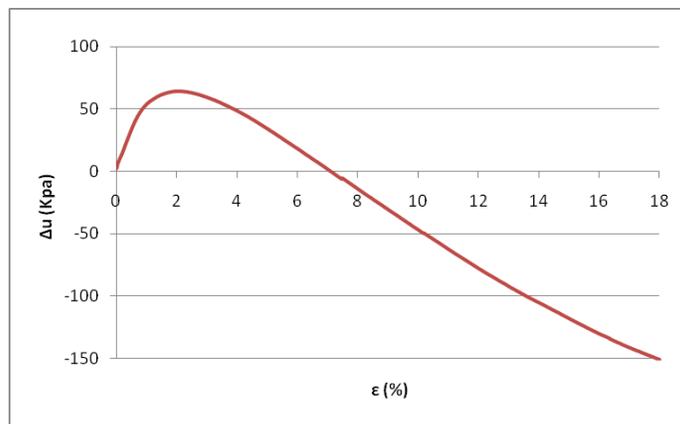


Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q

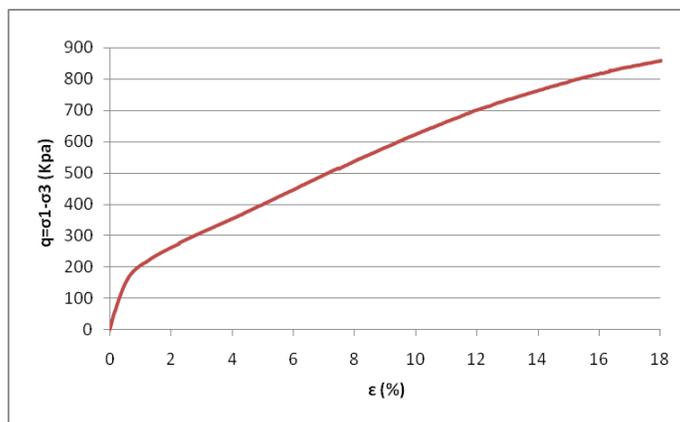
**4.3.10 Δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων σε μέσης πυκνότητας δοκίμιο άμμου HRS στα 200 KPa**



**Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q**

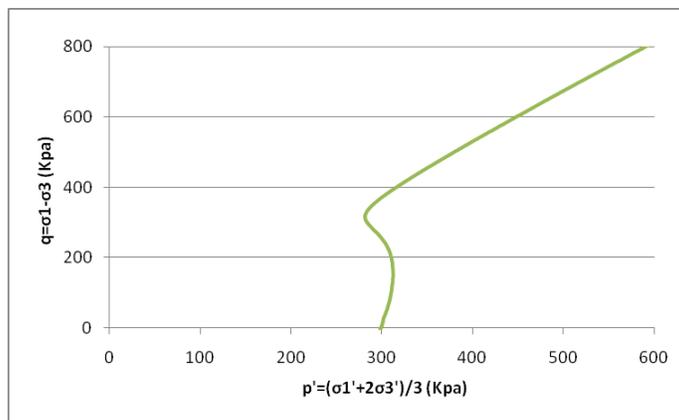


**Αξονική παραμόρφωση συναρτήσει της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu**

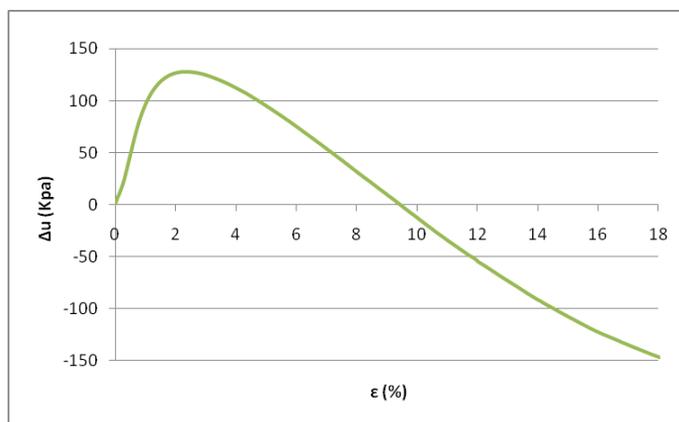


**Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q**

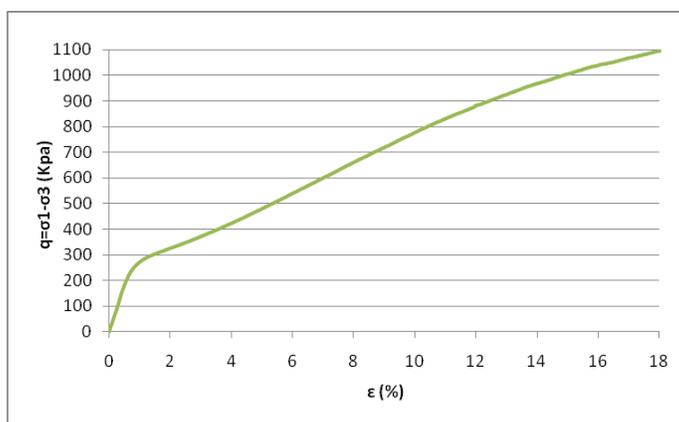
**4.3.11 Δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων σε μέσης πυκνότητας δοκίμιο άμμου HRS στα 300 KPa**



**Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q**

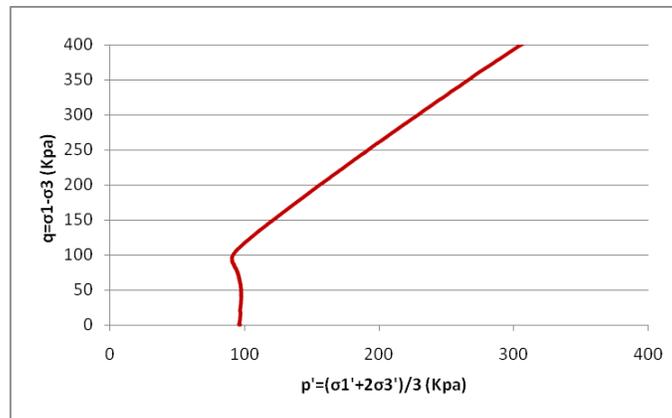


**Αξονική παραμόρφωση συναρτήσει της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu**

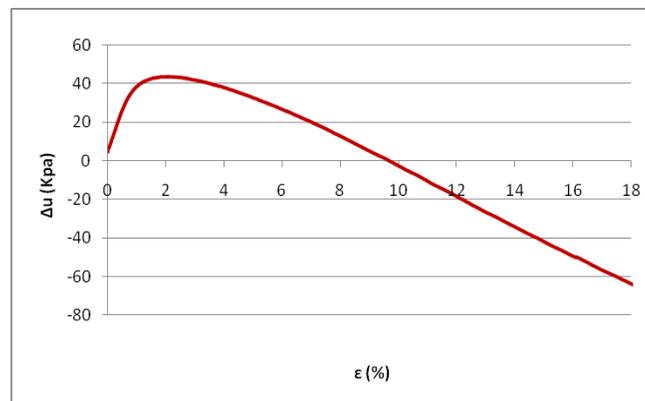


**Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q**

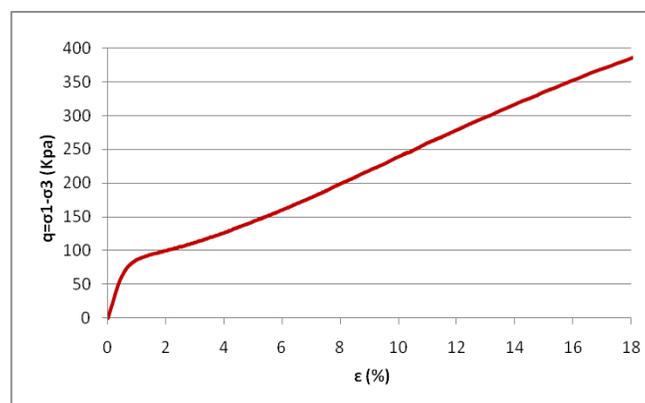
**4.3.12 Δοκιμή με έλεγχο των τάσεων σε μέσης πυκνότητας δοκίμιο άμμου HRS στα 100 ΚΡα**



**Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q**

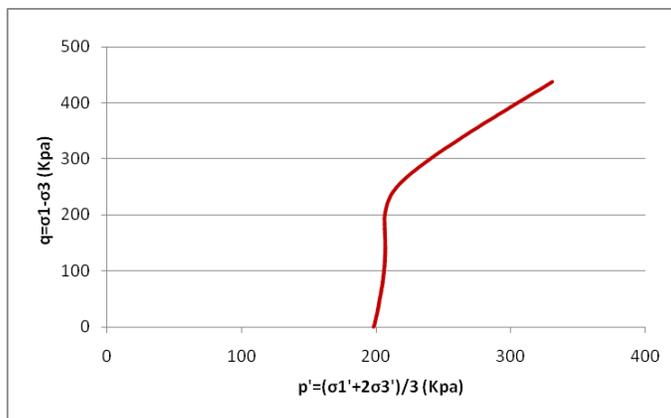


**Αξονική παραμόρφωση συναρτήσεϊ της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu**

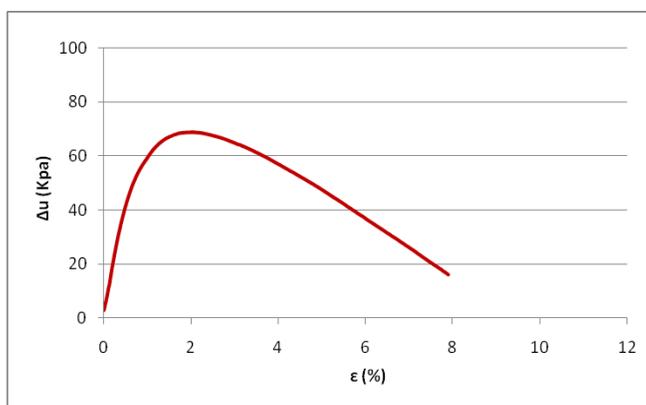


**Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q**

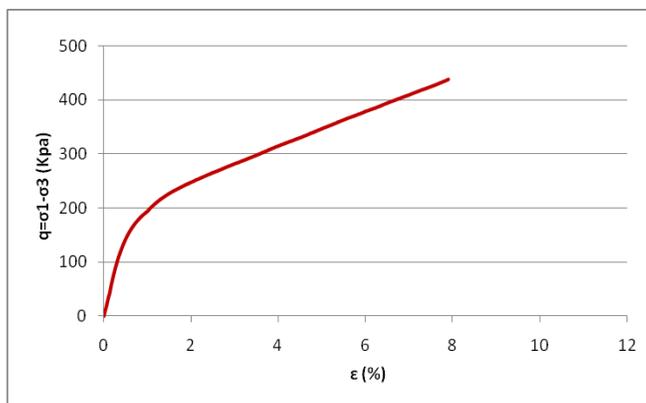
4.3.13 Δοκιμή με έλεγχο των τάσεων σε μέσης πυκνότητας δοκίμιο άμμου HRS στα 200 KPa



Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q

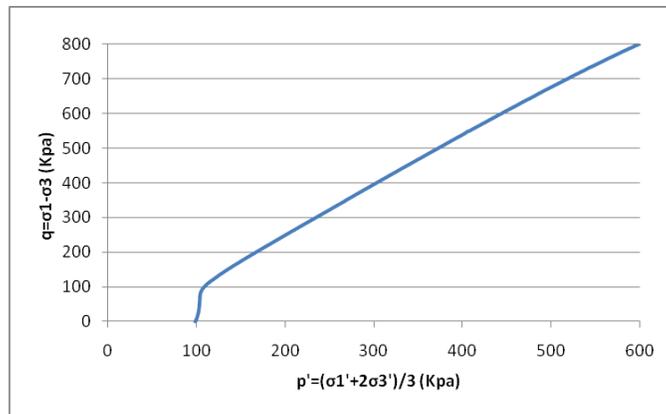


Αξονική παραμόρφωση συναρτήσεϊ της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu

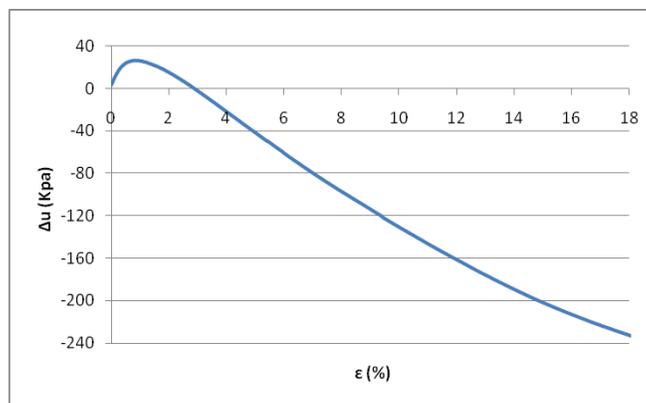


Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q

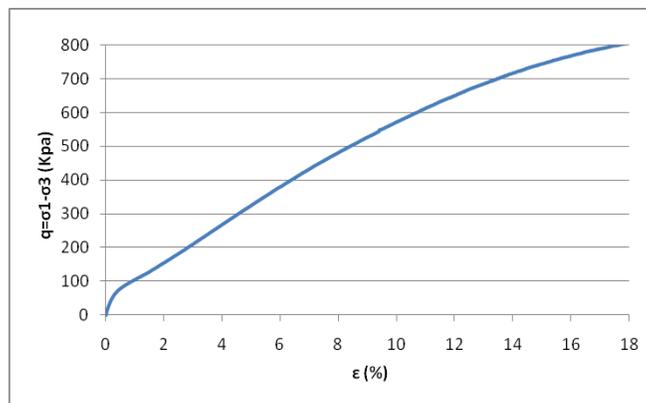
**4.3.14 Δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων σε μέσης πυκνότητας δοκίμιο άμμου LS στα 100 KPa**



**Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q**

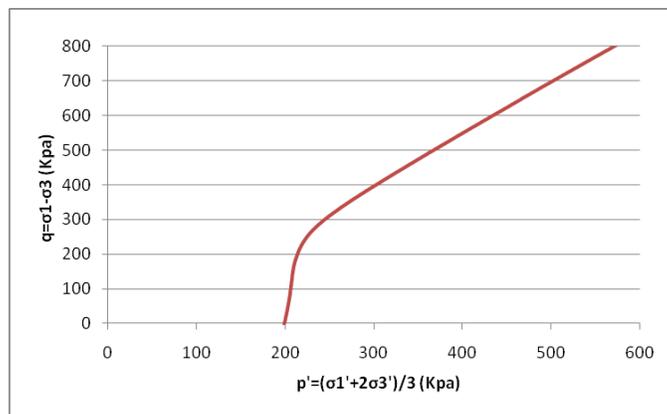


**Αξονική παραμόρφωση συναρτήσει της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu**

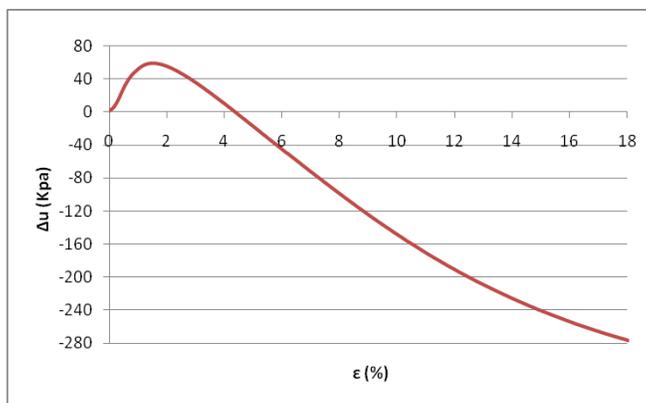


**Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q**

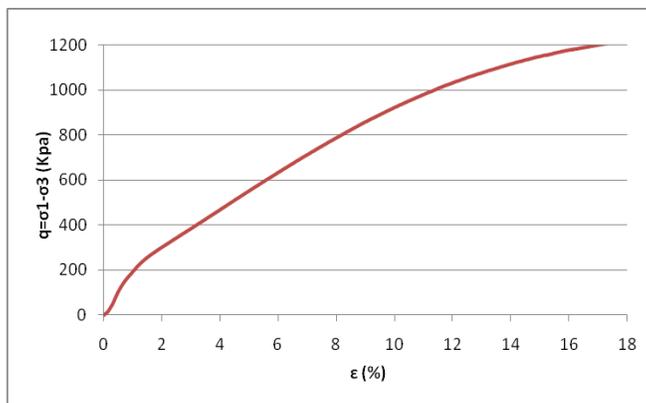
4.3.15 Δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων σε πυκνό δοκίμιο άμμου LS στα 200 ΚΡα



Διαδρομές των τάσεων σε άξονες  $p - q$

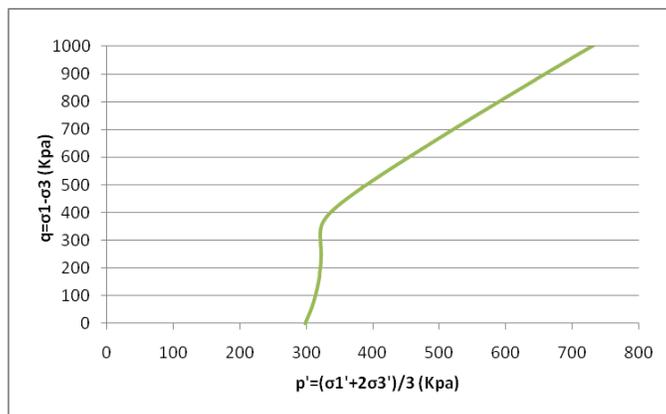


Αξονική παραμόρφωση συναρτήσει της μεταβολής της πίεσης των πόρων  $\epsilon - \Delta u$

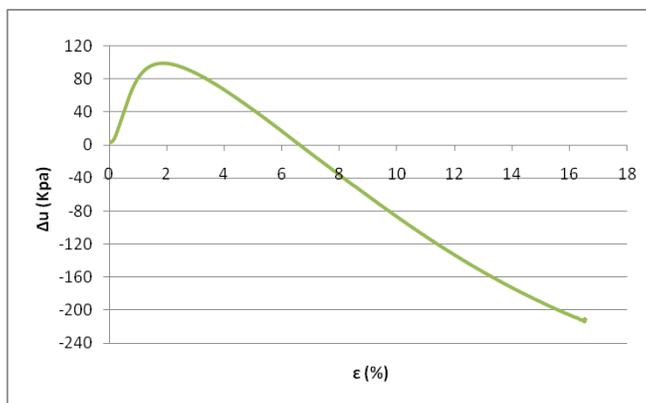


Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες  $\epsilon - q$

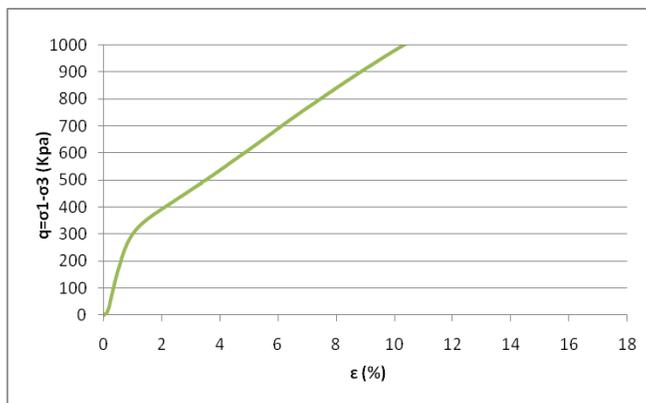
**4.3.16 Δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων σε μέσης πυκνότητας δοκίμιο άμμου LS στα 300 KPa**



**Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q**

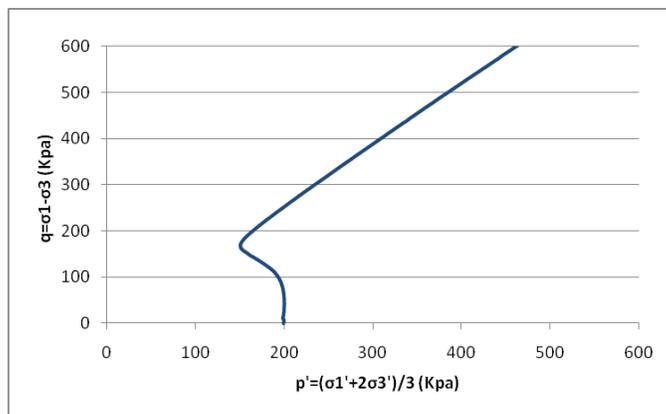


**Αξονική παραμόρφωση συναρτήσει της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu**

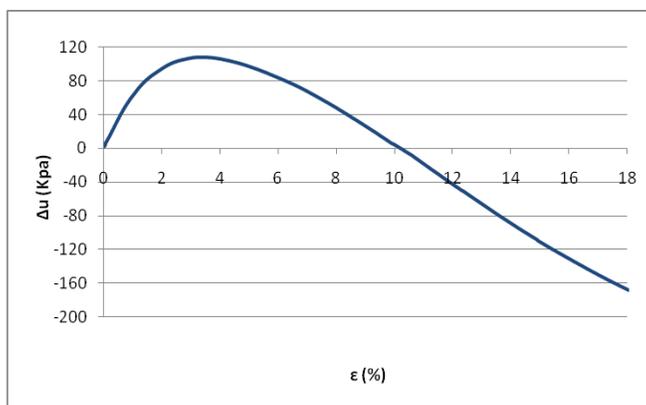


**Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q**

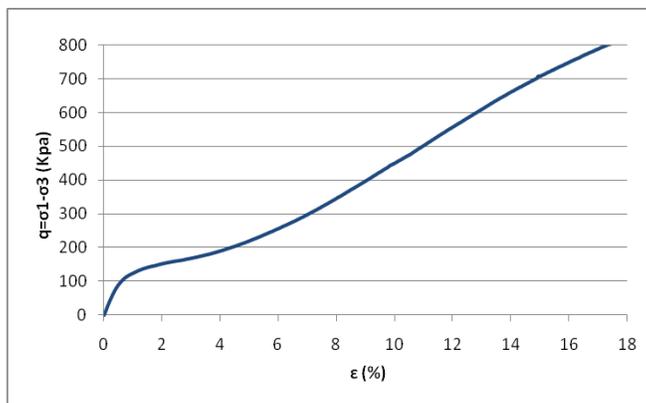
**4.3.17 Δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων σε μέσης πυκνότητας δοκίμιο άμμου FNB στα 200 KPa**



**Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q**

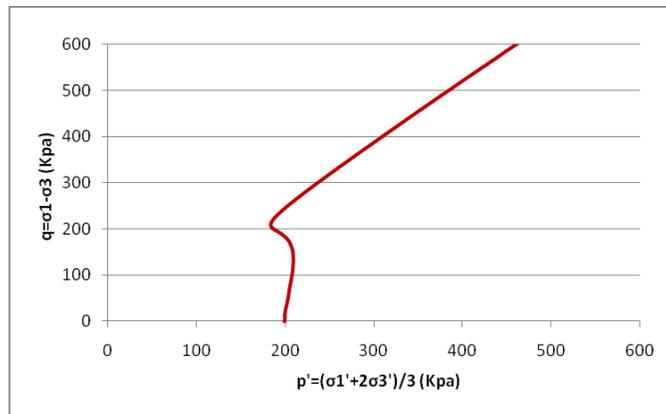


**Αξονική παραμόρφωση συναρτήσει της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu**

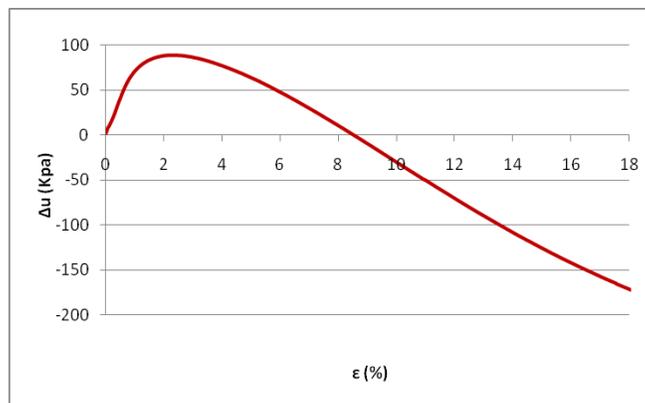


**Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q**

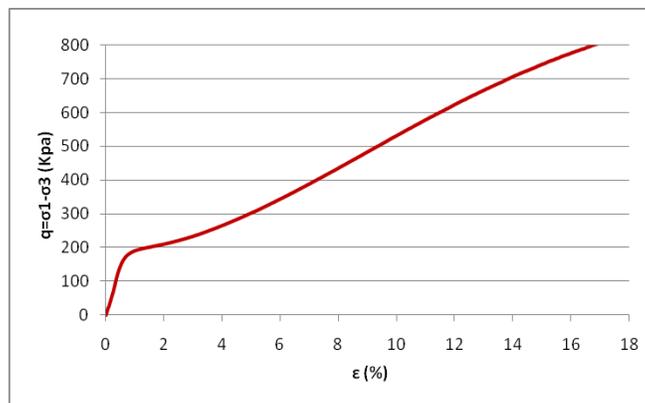
**4.3.18 Δοκιμή με έλεγχο των παραμορφώσεων σε πυκνό δοκίμιο άμμου FNB στα 200 KPa**



**Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q**

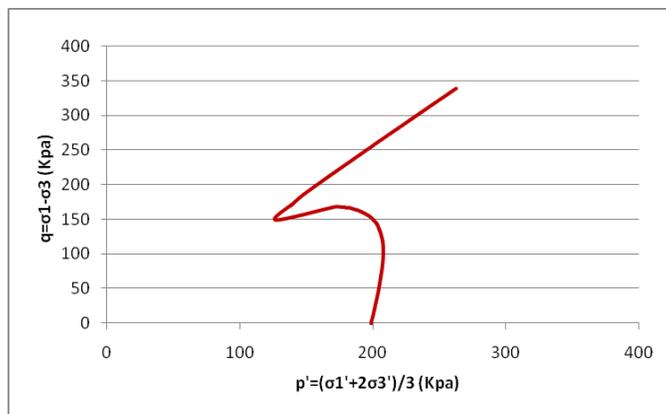


**Αξονική παραμόρφωση συναρτήσει της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu**

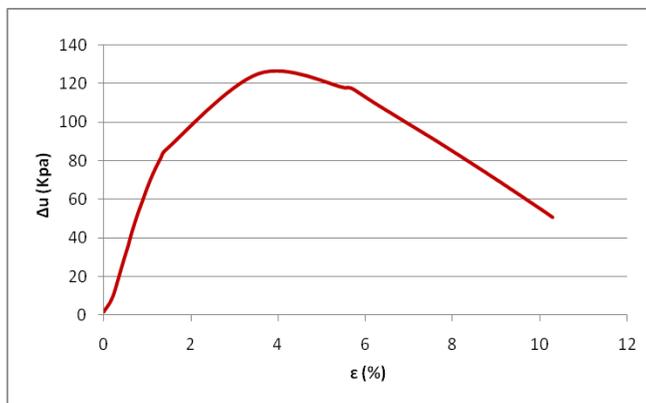


**Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε - q**

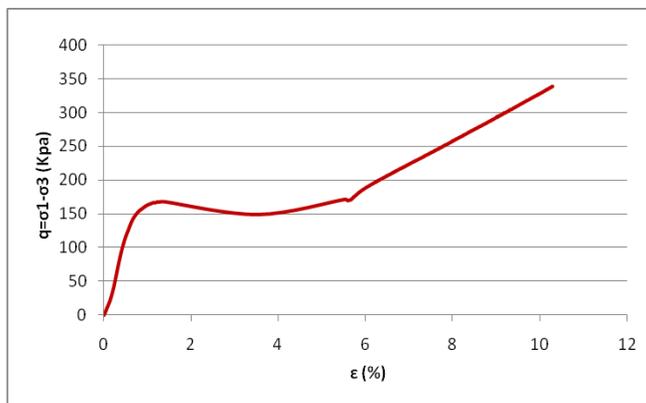
4.3.19 Δοκιμή με έλεγχο των τάσεων σε μέσης πυκνότητας δοκίμιο άμμου FNB στα 200 ΚΡα



Διαδρομές των τάσεων σε άξονες p – q



Αξονική παραμόρφωση συναρτήσει της μεταβολής της πίεσης των πόρων ε – Δu



Σχέσεις τάσεων – παραμορφώσεων σε άξονες ε – q

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β΄

---

ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ

TRI-SCAN 50

## ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΝΕΑΣ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ TRI-SCAN 50

### 1. Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μας εργασίας ευτυχής συγκυρία ήταν η απόκτηση της νέας τριαξονικής συσκευής από το Εργαστήριο της Εδαφομηχανικής. Εργαζόμενοι στον χώρο αυτό μας δόθηκε η ευκαιρία να γνωρίσουμε τη συσκευή που χρησιμοποιήσαμε στα πειράματά μας κομμάτι κομμάτι και να βοηθήσουμε τους υπεύθυνους του εργαστηρίου στη συναρμολόγησή της. Με αυτόν τον τρόπο παραθέτουμε παρακάτω όλα τα συστατικά στοιχεία που αποτελούν την τριαξονική συσκευή καθώς και αναλυτικά την πορεία που ακολουθήθηκε για να τεθεί η συσκευή σε λειτουργία.

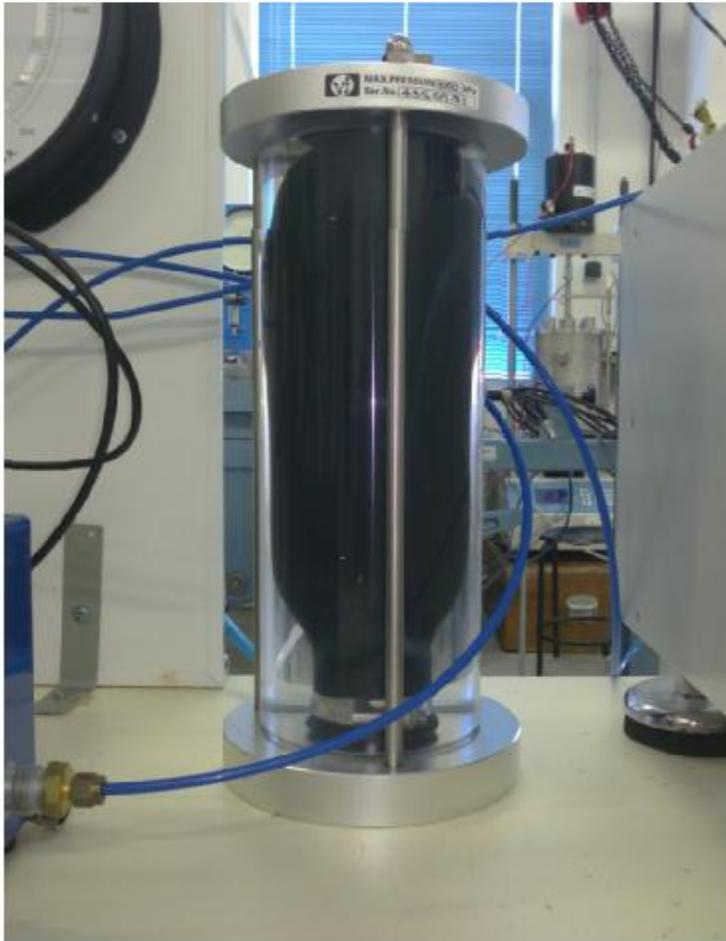


## 2. Εξαρτήματα τριαξονικής συσκευής TRI-SCAN 50

### Control panel (Air-Water):

Είναι ένα πλαίσιο ελέγχου κατασκευασμένο από ξύλο και έχει διαστάσεις 100cm x 70cm. Πάνω του βρίσκονται τοποθετημένοι δυο ρυθμιστές (μειωτήρες) ανοξειδωτής κατασκευής εφοδιασμένοι με κατάλληλες στρόφιγγες (βάνες) ώστε να ρυθμίζουν τις πιέσεις που θα επιβάλλονται στο δοκίμιο. Ο ένας ρυθμιστής αφορά την πίεση πόρων που επιβάλλεται στο εδαφικό δοκίμιο, ενώ ο δεύτερος ελέγχει την πλευρική πίεση που ασκείται ολόπλευρα στο δοκίμιο (πλευρική πίεση). Επίσης πάνω στο πλαίσιο ελέγχου βρίσκεται τοποθετημένο και το καντράν μέτρησης της πίεσης αέρα-νερού (test gauge).



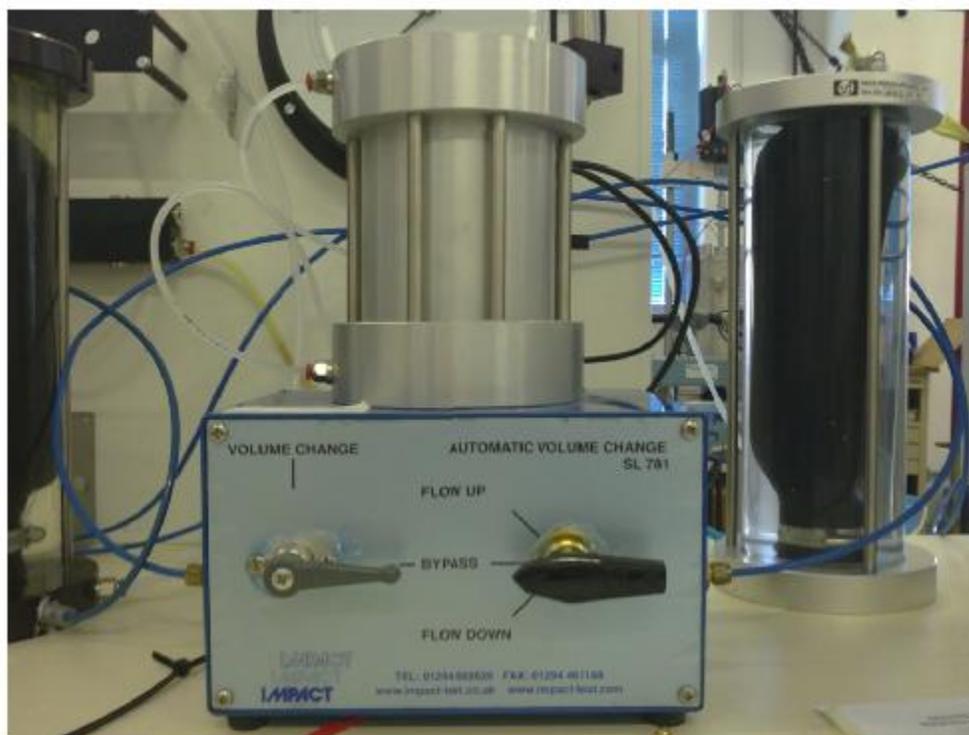
**Interface (Air-Water):**

Είναι μετατροπέας της πίεσης του αέρα σε πίεση του νερού. Αποτελείται από έναν κύλινδρο κατασκευασμένο από plexy glass ο οποίος πληρώνεται με νερό. Στο εσωτερικό του κυλίνδρου βρίσκεται πλαστικό μπαλόνι που περιέχει αέρα και επικοινωνεί από τη βάση του μετατροπέα με αντλία αέρα. Έτσι αυξομειώνοντας την πίεση του αέρα εντός του μπαλονιού μεταφέρουμε την επιθυμητή πίεση στο νερό εντός της κυψέλης του μετατροπέα. Αφού έχουμε επιτύχει την επιθυμητή πίεση αυτή διοχετεύεται μέσω του

νερού από την έξοδο στο πάνω μέρος του μετατροπέα είτε για να αλλάξουμε την πίεση πόρων του δοκιμίου είτε για να αλλάξουμε την πλευρική πίεση εντός της κυψέλης. Η συσκευή περιλαμβάνει δυο μετατροπείς (interfaces). Ένας αφορά την πίεση πόρων εντός του δοκιμίου και ένας την πλευρική πίεση εξωτερικά του δοκιμίου.

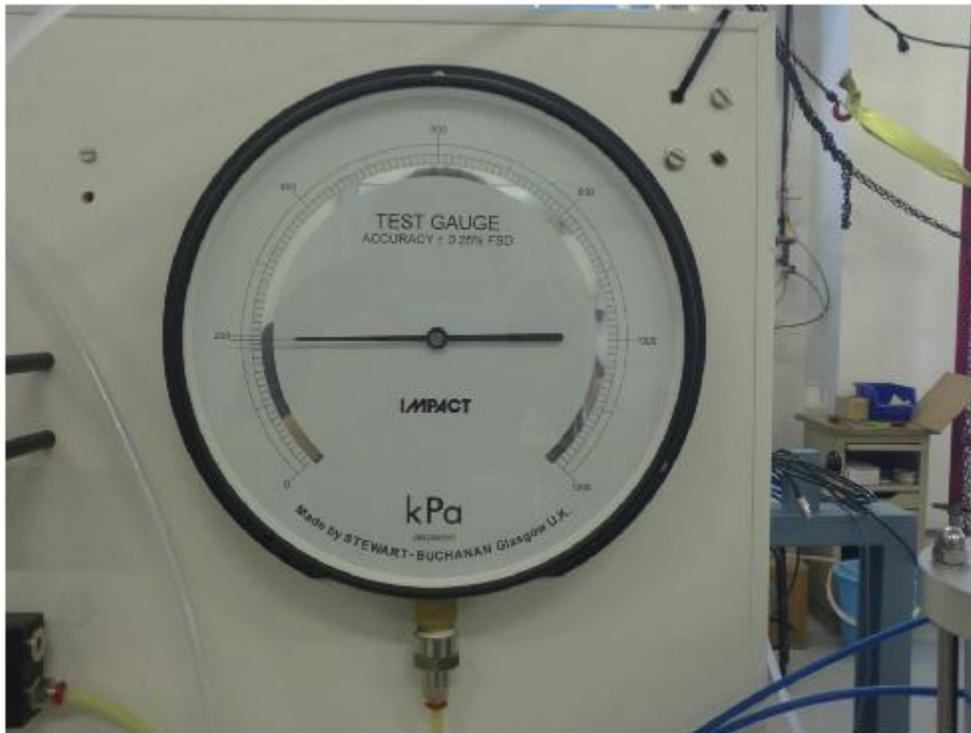
**Volume change box:**

Είναι συσκευή μέτρησης του ακριβούς όγκου του νερού που διοχετεύεται ή αντιστοίχως μπορεί να αφαιρεθεί από το εσωτερικό του δοκιμίου. Αποτελείται από έναν μεταλλικό κύλινδρο κατασκευασμένο από ανοξείδωτο υλικό μέσα στον οποίο γίνεται η ακριβής καταγραφή της ποσότητας του νερού που εισέρχεται ή εξέρχεται από το δοκίμιο. Ο κύλινδρος αυτός βρίσκεται πάνω σε έναν ρυθμιστή ορθογώνιου σχήματος ο οποίος περιλαμβάνει την στρόφιγγα που επιτρέπει την μετακίνηση του νερού καθώς και έναν επιλογέα που μπορεί είτε να καταγράφει την ποσότητα του νερού που μετακινείται (flow up – flow down) είτε να επιτρέπει την ελεύθερη πλήρωση του κυλίνδρου με νερό (by pass). Όλες οι μετρήσεις που προαναφέραμε γίνονται σε κυβικά εκατοστά (cc).



**Test gauge:**

Είναι το καντράν που μετρά την πίεση είτε του αέρα είτε του νερού ανάλογα με ποιο κελί είναι συνδεδεμένο την κάθε φορά. Με το σύστημα των σωληνώσεων και των στροφίγγων μπορούμε να συνδέουμε και διαφορετικό κομμάτι της συσκευής με τον μετρητή και να διαβάζουμε σε αυτόν την ακριβή πίεση που επικρατεί εκεί. Το σχήμα του είναι στρογγυλό και οι ενδείξεις του κυμαίνονται από 0 έως 1200 KPa. Τέλος βρίσκεται τοποθετημένο πάνω στο πλαίσιο ελέγχου (control panel).



**Frame box:**

Είναι το κεντρικό στοιχείο της τριαξονικής συσκευής. Αποτελείται από τον επεξεργαστή μέσω του οποίου δίνονται όλες οι εντολές κατά τη διάρκεια του πειράματος, την κυψέλη μέσα στην οποία τοποθετείται το εδαφικό δοκίμιο και το χαλύβδινο πλαίσιο μέσω οποίου ασκείται η απαιτούμενη πίεση στο δοκίμιο.

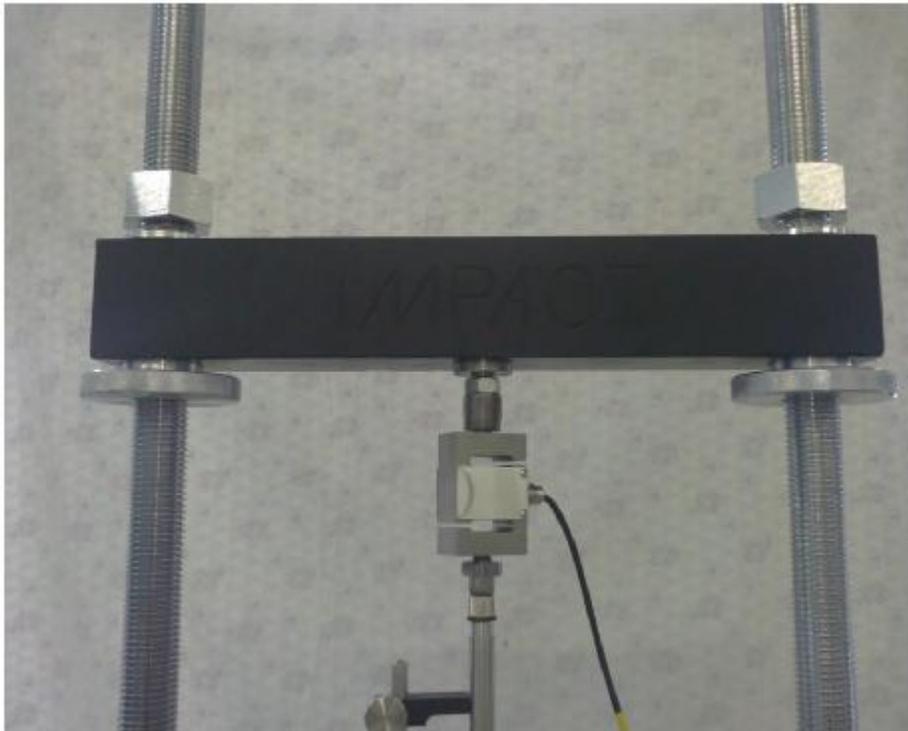
Α) Ο επεξεργαστής αποτελεί και τη βάση πάνω στην οποία βρίσκεται η κυψέλη. Έχει οθόνη όπου εμφανίζονται οι εντολές που δίνουμε όπως και τα αποτελέσματά τους, αριθμολόγιο για την αλλαγή των πιέσεων και την εφαρμογή των μετακινήσεων και πλήκτρα εκκίνησης και τέλους όλων των ενεργειών που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια του πειράματος. Ακόμα στο πίσω μέρος του υπάρχουν υποδοχές που επιτρέπουν την σύνδεσή του με ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίον καταγράφονται όλες οι μετρήσεις κατά τη διάρκεια του πειράματος.



Β) Την κυψέλη την αποτελούν η βάση της και το κυλινδρικό μέρος της (cell) που τοποθετείται πάνω στη βάση μετά την τοποθέτηση του εδαφικού δοκιμίου. Η βάση βρίσκεται πάνω στον επεξεργαστή και συγκεκριμένα συνδέεται με ένα έμβολο μετακίνησης. Αυτό το έμβολο μετακινούμενο προς τα επάνω σε συνδυασμό με την αμετακίνητη μπάρα πάνω από την κυψέλη επιβάλλει και την επιθυμητή φόρτιση στο εδαφικό μας δοκίμιο. Επίσης έχει οπές μέσω των οποίων γίνεται η πλήρωση της κυψέλης με νερό, οι διάφορες μετακινήσεις νερού στο δοκίμιο μέσω top cup και η λειτουργία της απαέρωσης (vacuum). Το κυλινδρικό κομμάτι (cell) είναι κατασκευασμένο από plexy glass και το καπάκι του από ανοξείδωτο χάλυβα (inox). Τοποθετείται πάνω στη βάση της κυψέλης, στερεώνεται σε αυτή με τρεις βίδες και στεγανοποιείται χρησιμοποιώντας ειδικά λάστιχα (o-rings). Το άνω μέρος της κυψέλης έχει και έμβολο-μηκυσιόμετρο για να καταγράφει τις μετακινήσεις που πραγματοποιούνται στο εδαφικό δοκίμιο. Οι μετρήσεις αυτές είναι της τάξεως του χιλιοστού (mm). Όλα τα παραπάνω στοιχεία είναι κατασκευασμένα να αντέχουν πιέσεις μέχρι και 10KN.



Γ) Το χαλύβδινο πλαίσιο αποτελείται από δυο μπάρες στήριξης εκατέρωθεν της κυψέλης κοχλιωτής κατασκευής. Με τη χρήση κατάλληλων παξιμαδιών πάνω τους στερεώνεται η κεντρική μπάρα από το κέντρο της οποίας κρέμεται ειδική συσκευή μέτρησης πίεσης (load cell). Η συσκευή αυτή έρχεται σε επαφή με το έμβολο στην κορυφή του δοκίμιου και σε συνεργασία με το έμβολο μετακίνησης επιβάλλει το επιθυμητό φορτίο στο δοκίμιο και καταγράφει το μέγεθός του. Ο τρόπος σύνδεσης της κεντρικής μπάρας με τις μπάρες στήριξης δίνουν τη δυνατότητα μετακίνησης της μπάρας στο επιθυμητό ύψος. Όλα τα παραπάνω στοιχεία του χαλύβδινου πλαισίου είναι κατασκευασμένα να αντέχουν πίεση έως και 10 KN.



### Top cup:



Είναι το καπάκι του δοκιμίου που τοποθετείται στην κορυφή του μετά την πλήρωση της μεμβράνης με το προς εξέταση εδαφικό υλικό. Έχει κυλινδρικό σχήμα με τη διάμετρο του δοκιμίου αλλά πολύ μικρότερο ύψος από το δοκίμιο. Είναι κατασκευασμένο από plexy glass και διαθέτει ένα σωληνάκι με το οποίο επιτρέπει στο δοκίμιο να επικοινωνεί με το volume change box και το αντίστοιχο interface και να ανταλλάσει την αναγκαία ποσότητα νερού.

### Transducers:

Είναι ειδικοί μετρητές της πίεσης που τοποθετούνται σε σημεία σύνδεσης και μέσω του test gauge μας ενημερώνουν για την πίεση είτε αέρα είτε νερού που πρόκειται να επιβάλλουμε σε κάποιο κομμάτι της τριαξονικής συσκευής. Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται γίνονται σε KPa.



**Σωληνάκια (νερού - αέρα):**

Η μεταφορά είτε του νερού είτε του αέρα που βρίσκονται σε συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης γίνεται μέσω ειδικών πλαστικών σωλήνων. Συγκεκριμένα για το νερό χρησιμοποιούνται σωληνάκια χρώματος μπλε και διαστάσεων 4,75 mm εξωτερικής διαμέτρου και 2,75 mm εσωτερικής διαμέτρου. Για τον αέρα χρησιμοποιούνται σωληνάκια χρώματος λευκού και διαστάσεων 6 mm εξωτερικής διαμέτρου και 4 mm εσωτερικής διαμέτρου. Τα σωληνάκια συνδέονται με τα διάφορα μέρη της τριαξονικής συσκευής χρησιμοποιώντας μεταλλικά rakor.



### 3. Περιγραφή της πορείας συναρμολόγησης της τριαξονικής συσκευής

Για την ευκολότερη περιγραφή της πορείας συναρμολόγησης σημειώνουμε πως οι σωληνώσεις που αφορούν την κυκλοφορία αέρα-νερού είναι σωληνάκια (6mm x 4mm) και (4,75mm x 2,75mm) εξωτερικής και εσωτερικής διαμέτρου αντίστοιχα και σε όλη την περιγραφή θα αναφέρονται ως σωληνάκια ή καλώδια αέρα και νερού. Επίσης σε όλες τις συνδέσεις των διάφορων εξαρτημάτων της συσκευής έχει γίνει χρήση μονωτικού υλικού (Teflon) με το οποίο τυλίξαμε εσωτερικά όλες τις συνδέσεις ώστε να αποφευχθούν διαρροές είτε αέρα είτε νερού.

Ξεκινώντας την συναρμολόγηση της συσκευής το πρώτο μας βήμα ήταν η σωστή συναρμολόγηση των γραμμών τροφοδοσίας αέρα/νερού. Στην μπάρα με τους δυο μειωτήρες συνδέθηκαν με τον κατάλληλο τρόπο οι ανοξείδωτες μεταλλικές βάνες ώστε να δημιουργηθούν οι γραμμές τροφοδοσίας. Έτσι δημιουργήθηκαν οι παρακάτω απολήξεις στο σύστημα: είσοδος αέρα, είσοδος νερού, έξοδος αέρα προς interface back pressure, έξοδος αέρα προς interface cell pressure, έξοδος νερού προς interface back pressure, έξοδος νερού προς interface cell pressure και υποδοχή σύνδεσης με το μετρητή πίεσης. Ακόμη τοποθετήθηκαν δυο βαλβίδες μελλοντικής σύνδεσης για μεγαλύτερο αριθμό μειωτήρων. Ολόκληρο το σύστημα των γραμμών τροφοδοσίας τοποθετήθηκε στον πίνακα ελέγχου (control panel) και συγκεκριμένα στο αριστερό τμήμα του. Παράλληλα στο δεξί τμήμα και ψηλά βιδώθηκε ο μετρητής πίεσης (test gauge) ο οποίος συνδέθηκε στη γραμμή τροφοδοσίας με βάνα και κατάλληλο σωλήνα.

Στο πίσω μέρος του πίνακα ελέγχου τοποθετήθηκε μειωτήρας αέρα με σκοπό να ελέγχει την πίεση του αέρα που εισέρχεται στο σύστημα από τον αεροσυμπιεστή που διαθέτει το δίκτυο αέρος του εργαστηρίου. Αφού όλα όσα περιγράφηκαν παραπάνω τοποθετήθηκαν και εξασφαλίστηκαν πάνω στον πίνακα ελέγχου με βίδες κατάλληλης αντοχής, ολόκληρος ο

πίνακας ελέγχου στερεώθηκε κάθετα στο τραπέζι της τριαξονικής συσκευής με δυο μεταλλικές συνδέσεις σε σχήμα γάμα τύπου dexion.

Αφού ολοκληρώσαμε την τοποθέτηση του πίνακα ελέγχου σειρά είχαν οι σωστές συνδεσμολογίες των σωληνώσεων του συστήματος. Χρησιμοποιώντας σωληνάκι αέρα συνδέσαμε τον αεροσυμπιεστή του εργαστηρίου με το μειωτήρα του πίνακα ελέγχου. Στη συνέχεια με σωληνάκι του ίδιου τύπου συνδέσαμε το μειωτήρα με τη βάνα στη γραμμή τροφοδοσίας που εισάγει τον αέρα στο σύστημα και το οδηγεί στους μειωτήρες που ελέγχουν την πίεση της κυψέλης και του δοκιμίου. Επίσης συνδέθηκαν με σωληνάκια αέρα οι δυο μειωτήρες με τους δυο μετατροπείς αέρα-νερού (interface) και προσαρμόστηκαν στις εξόδους νερού των μετατροπέων σωληνάκια νερού όπου συνδέθηκαν με την συσκευή για μετάδοση νερού τόσο στο σύστημα πλευρικής πίεσης όσο και στο σύστημα πίεσης πόρων (μέσω συσκευή καταμέτρησης όγκου). Ακόμη συνδέθηκε με σωληνάκι ώστε να λαμβάνονται οι μετρήσεις του και ο καταμετρητής πίεσης (test gauge).

Μεταξύ του μετατροπέα αέρα-νερού και του συστήματος πίεσης πόρων συνδέθηκε ειδική συσκευή καταμέτρησης όγκου του νερού ώστε να μπορεί να καταγραφεί με απόλυτη ακρίβεια η οποιαδήποτε αυξομείωση νερού στους πόρους του δοκιμίου. Ο καταγραφέας όγκου (volume change) συνδέθηκε τόσο με τον μετατροπέα αέρα-νερού όσο και με το σύστημα πίεσης πόρων με σωληνάκια νερού. Στον καταγραφέα για την ακρίβεια στις μετρήσεις προσαρμόστηκε ηλεκτρομηκυσιόμετρο των 25mm συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή για την άμεση καταγραφή των μετρήσεων. Προτιμήθηκε από τα ηλεκτρομηκυσιόμετρα των 10 mm ώστε να προσφέρει μεγαλύτερο εύρος στις μετρήσεις.

Αφού ολοκληρώθηκε η σύνδεση όλων των οργάνων της συσκευής με τον κατάλληλο τρόπο τελευταία συνδέθηκαν τα όργανα που είναι υπεύθυνα για την καταγραφή και αποθήκευση των μετρήσεων των πειραμάτων. Έτσι στη βάση που τοποθετούνται τα δοκίμια συνδέθηκε καλώδιο το οποίο οδηγεί σε καταγραφέα πίεσης (transducer) και αυτός με τη σειρά

του συνδέθηκε με ηλεκτρονικό υπολογιστή για την καταγραφή και αποθήκευση των μετρήσεων της πίεσης των πόρων. Από την κυψέλη επίσης καταγράφονται οι πιέσεις πάλι μέσω καταγραφών (transducers) οι οποίοι επίσης συνδέονται με το καταγραφικό σύστημα του ηλεκτρονικού υπολογιστή μέσω ειδικών καλωδίων. Ακόμη στην κυψέλη είναι προσαρμοσμένος ειδικός σωλήνας μέσω του οποίου αδειάζει το νερό μετά το τέλος του πειράματος. Στο σύστημα καταγραφής των δεδομένων του πειράματος (data scan) συνδέεται με καλώδιο και η μπάρα του αξονικού φορτίου (load cell). Τέλος με το καταγραφικό σύστημα του ηλεκτρονικού υπολογιστή συνδέεται και η βάση της συσκευής (control system).