



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΗΡΩΩΝ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟΥ 9  
15780 ΖΩΓΡΑΦΟΥ ΑΘΗΝΑ

## ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗ & ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΩΝ

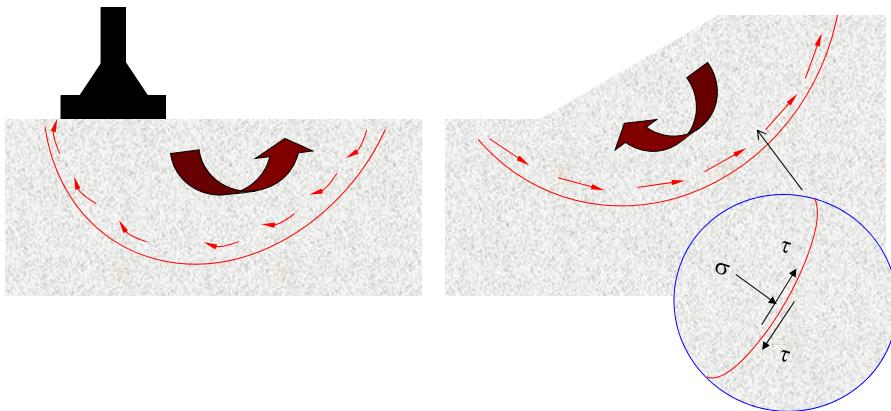
### Διδάσκων:

Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ  
Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών

## ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΕΔΑΦΟΥΣ

## ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η διατμητική αντοχή του εδάφους καθορίζει την ευστάθεια των πρανών, τις ωθήσεις γκαϊών, την αντοχή θεμελίωσης σε θραύση και γενικότερα τη μηχανική συμπεριφορά του εδάφους.

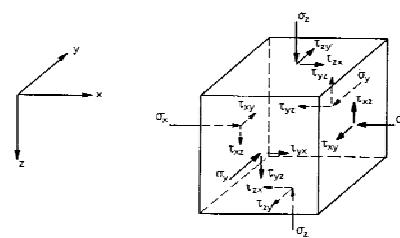


## ΠΡΟΣΗΜΑΝΣΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΗ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

Στη Γεωτεχνική Μηχανική το **είδος των τάσεων που κυριαρχεί** είναι οι θλιπτικές τάσεις. Για να μην προκύπτουν αρνητικά προσημασμένες τάσεις ορίζονται ως θετικές οι ορθές τάσεις που είναι θλιπτικές. Η προσήμανση των διατμητικών τάσεων προσαρμόζεται ανάλογα.

Προκύπτει λοιπόν, ως κανόνας προσήμανσης, ότι:

- ~ **Στη Γεωτεχνική Μηχανική οι τάσεις που ενεργούν στις θετικές δόρες του κύβου έχουν φορά αντίθετη της θετικής φοράς των αντίστοιχων αξόνων του ``συστήματος αναφοράς``.**



## ΚΥΚΛΟΙ MOHR

Ο γερμανός Otto Mohr μέσω των ομώνυμων κύκλων έδωσε τη δυνατότητα γραφικής απεικόνισης των τάσεων.

Μέσω των κύκλων Mohr δίνεται η δυνατότητα να προσδιοριστούν οι τάσεις που αναπτύσσονται σε ένα επίπεδο οποιουδήποτε συστήματος αναφοράς όταν οι ασκούμενες εξωτερικές τάσεις ανήκουν σε διαφορετικό σύστημα.

## ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΥΚΛΩΝ MOHR

$$\text{Κέντρο κύκλου Mohr} \quad K \quad \left( \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}, 0 \right)$$

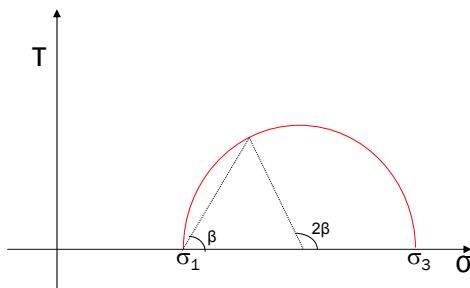
$$\text{Ακτίνα κύκλου Mohr} \quad R = \sqrt{\left[ \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right]^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\text{Κύριες τάσεις} \quad \sigma_{1,3} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left[ \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right]^2 + \tau_{xy}^2}$$

Στροφή επιβαλλόμενου τασικού πεδίου

$$\tan 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

- Με τη χάραξη του κύκλου προσδιορίζονται τα σημεία τομής του κύκλου και του άξονα των  $\sigma$ . Τα δύο σημεία τομής παριστούν τις δύο κύριες τάσεις,  $\sigma_1$  και  $\sigma_3$ , δηλαδή τις ορθές τάσεις στις διευθύνσεις των οποίων οι διατμητικές τάσεις είναι ίσες με 0.
- Οι επίκεντρες γωνίες που ορίζονται μεταξύ διαμέτρων του κύκλου Mohr είναι διπλάσιες των γωνιών που σχηματίζονται μεταξύ των διευθύνσεων στις οποίες αντιστοιχούν.



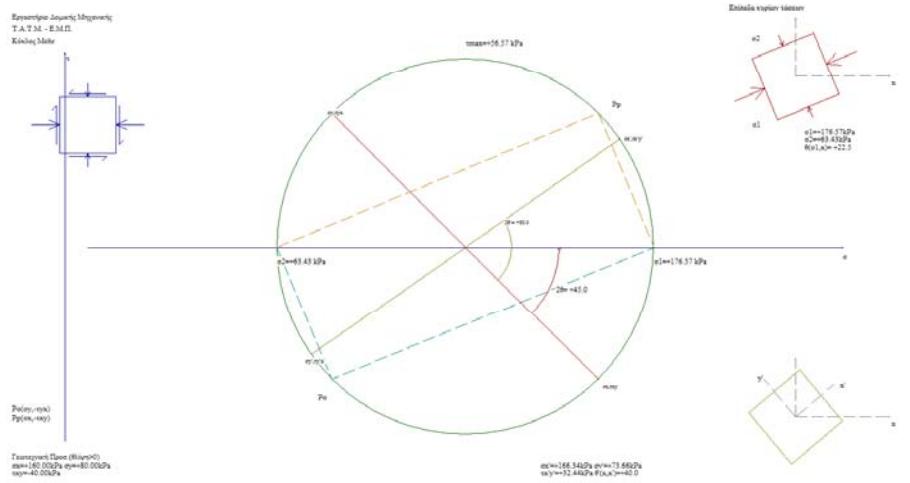
## ΣΤΡΟΦΗ ΑΞΟΝΩΝ

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta$$

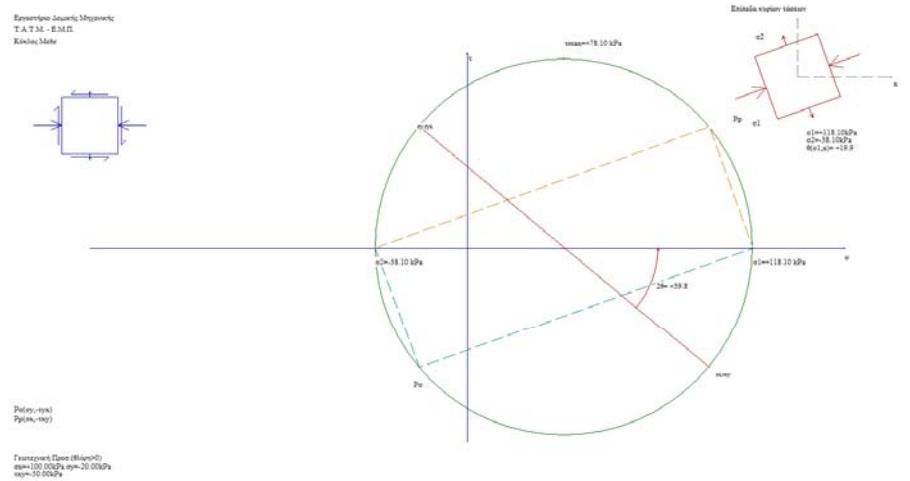
$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta$$

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ I

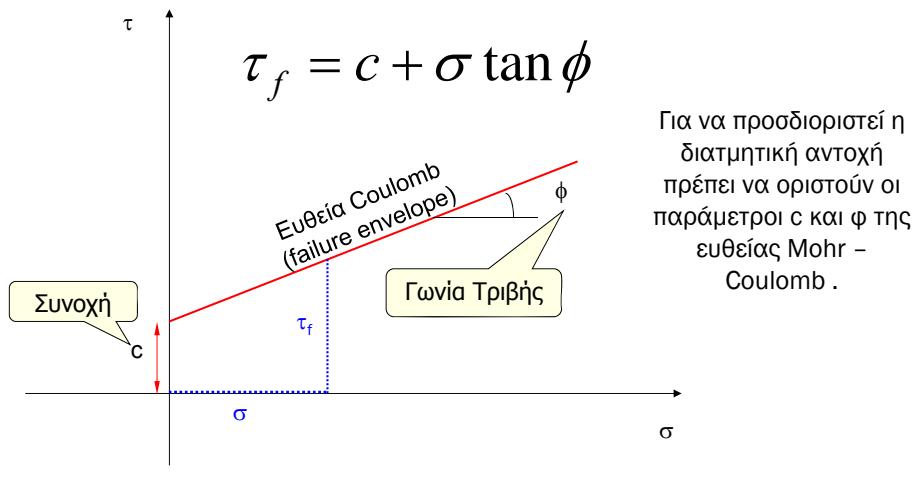


## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ II

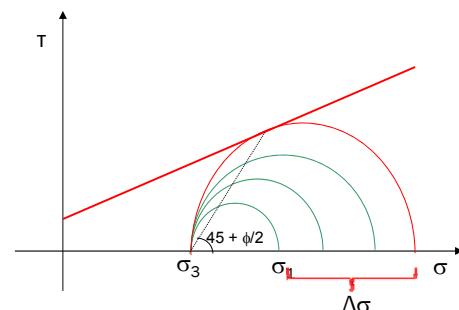
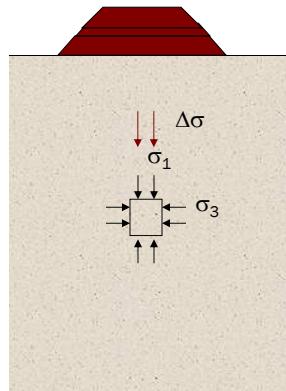


## ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΑΣΤΟΧΙΑΣ MOHR-COULOMB

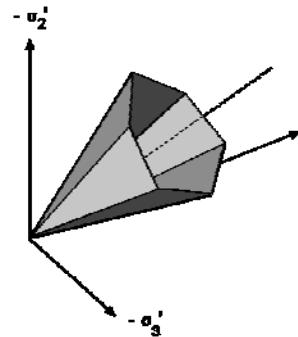
Σύμφωνα με το κριτήριο αστοχίας M-C αστοχία επέρχεται όταν ικανοποιηθεί η εξίσωση της ευθείας Mohr – Coulomb .



- Η σταδιακή φόρτιση περιγράφεται με την αύξηση της ακτίνας του κύκλου Mohr.
- Η αστοχία επέρχεται όταν ο κύκλος ακουμπήσει την ευθεία Mohr – Coulomb .
- Η γωνία κλίσης της επιφάνειας αστοχίας,  $\beta$ , προσδιορίζεται από τη γωνία που σχηματίζει ο άξονας  $\chi$  με την ευθεία μεταξύ του σημείου  $\sigma_3$  και του σημείου τομής και ισούται με  $\beta = 45 + (\phi/2)$

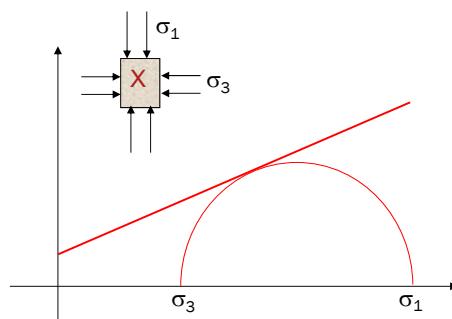


### ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΜΟΗΡ – COULOMB ΣΤΟ ΤΡΙΔΙΑΣΤΑΤΟ ΧΩΡΟ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ



Η επιφάνεια του κριτηρίου αστοχίας Mohr – Coulomb απεικονίζεται στο χώρο των κύριων τάσεων με τη μορφή μη κανονικής εξαγωνικής πυραμίδας.

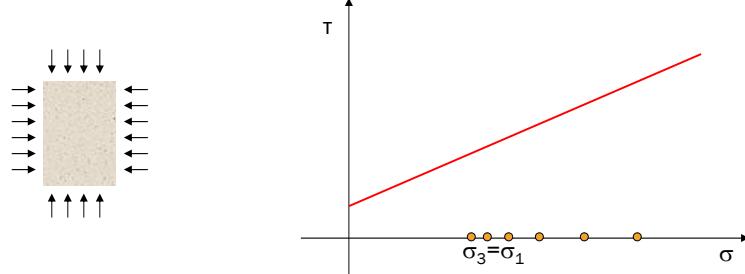
### Η ΣΧΕΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΣΤΟΧΙΑ



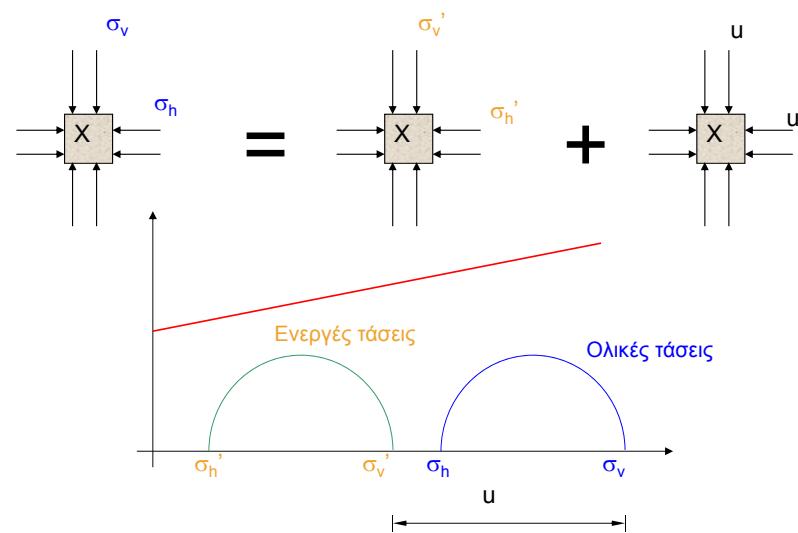
$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2(45 + \phi/2) + 2c \tan(45 + \phi/2)$$

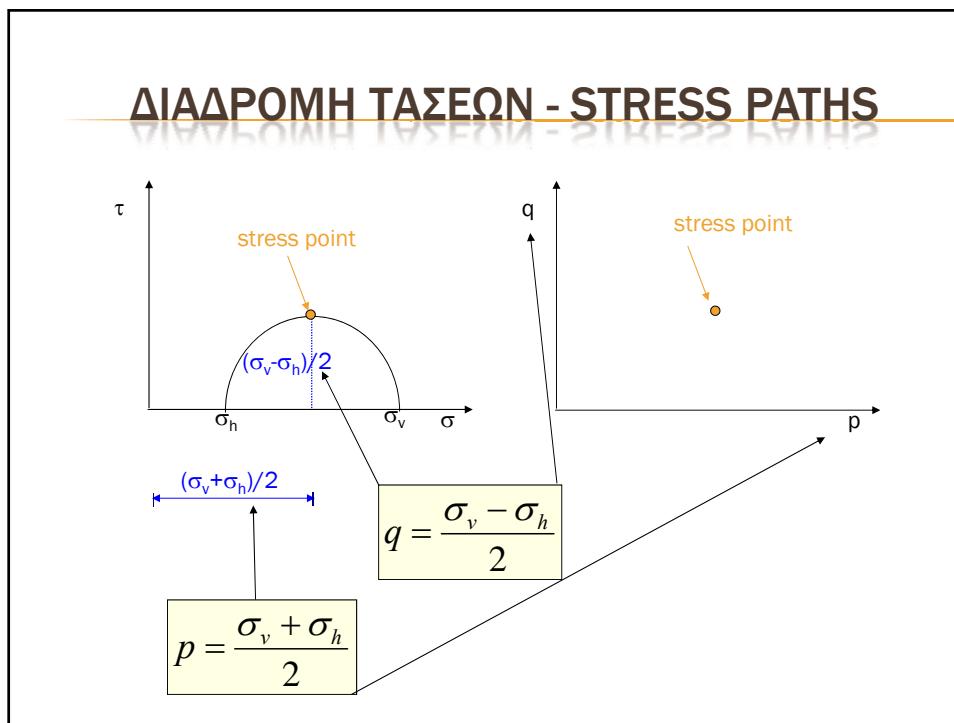
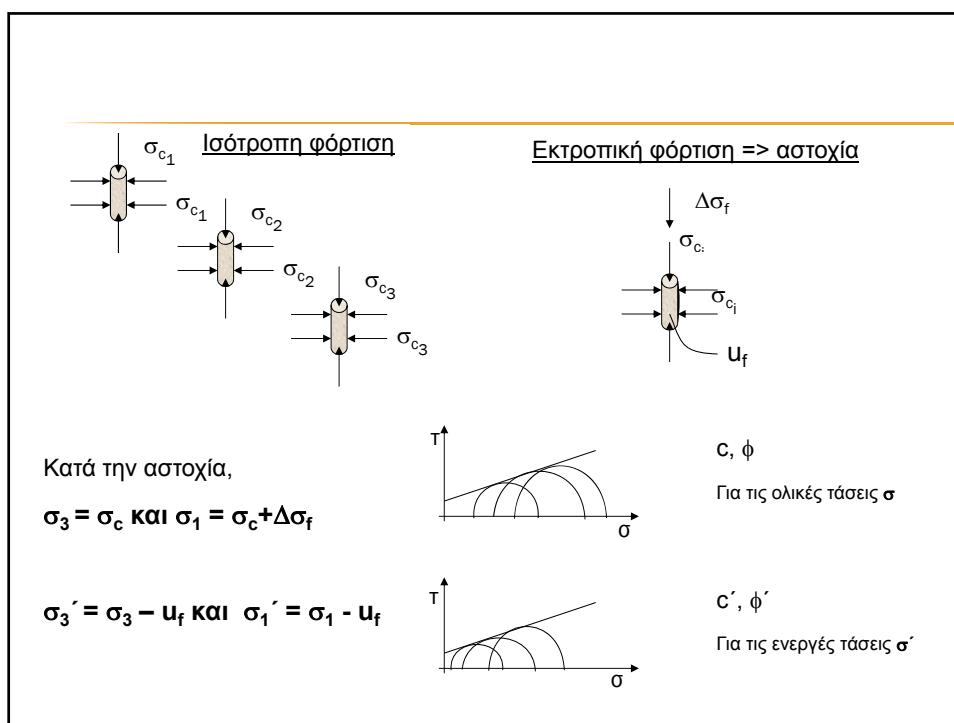
$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2(45 - \phi/2) - 2c \tan(45 - \phi/2)$$

➢ Η ισότροπη φόρτιση δεν οδηγεί σε αστοχία καθώς ο συνδυασμός των τάσεων δεν είναι δυνατόν να ικανοποιήσει την εξίσωση αστοχίας της ευθείας Coulomb.

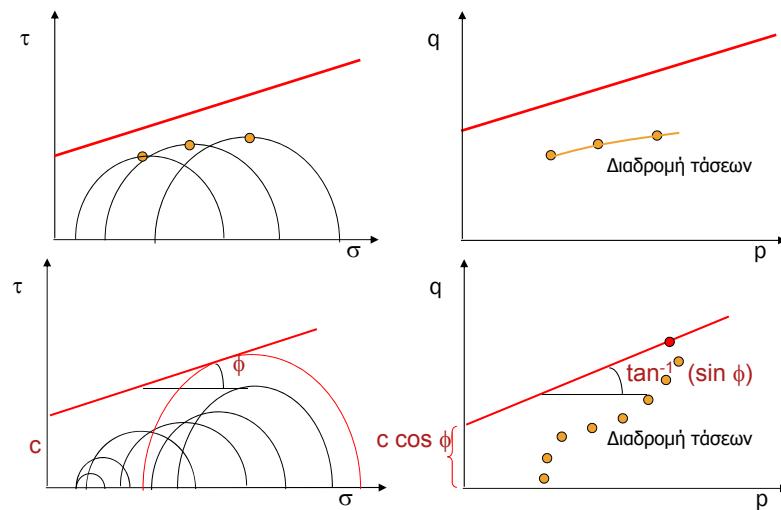


### ΟΛΙΚΕΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ Ο ΚΥΚΛΟΣ MOHR





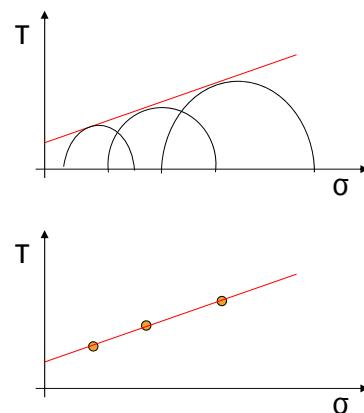
Η διαδρομή των τάσεων επιτρέπει την παρακολούθηση της φόρτισης έως την ικανοποίηση της εξίσωσης αστοχίας χωρίς να είναι απαραίτητη η συνεχής σχεδίαση των κύκλων Mohr.



### ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ COULOMB

Οι συνήθεις δοκιμές προσδιορισμού της διατμητικής αντοχής των εδαφών είναι οι εξής:

- Δοκιμή άμεσης διάτμησης
- Δοκιμή τριαξονικής φόρτισης
- Δοκιμή δακτυλιοειδούς διάτμησης συνεκτικών εδαφών



## ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΗΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ

Η Δοκιμή Άμεσης Διάτμησης αναφέρεται στη βαθμιαία επιβολή διατμητικών μετακινήσεων σε εδαφικό δοκίμιο, προσάρμοσμένο εντός υποδοχέα διάτμησης, μέχρι τη θραύση του κατά μήκος προδιαγεγραμμένης επιφάνειας.

**Διαστάσεις δοκιμίου:** Ελάχιστη επιθυμητή διάμετρος κυκλικού δοκιμίου ή πλάτος ορθογωνικής διατομής τετραγωνικού δοκιμίου 50 mm. Ελάχιστο πάχος δοκιμίου 25 mm. Ελάχιστος λόγος διαμέτρου προς πάχος 2:1. Οι μεγιστες διαστάσεις των κόκκων δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 1/6 του πάχους.

**Προπαρασκευή δοκιμίου:** Η κοπή του αδιατάραχτου δείγματος ή η μορφοποίηση του αναζυμωμένου δείγματος πρέπει να πραγματοποιείται με ιδιαίτερη προσοχή προκειμένου να αποφευχθεί η απώλεια υγρασίας. Το τελικό δοκίμιο θα πρέπει να μη φέρει ανωμαλίες ή κενά και θα πρέπει να έχει παράλληλες και επίπεδες έδρες.



**Πορεία δοκιμής:** Συναρμολόγηση συσκευής → Προσεκτική τοποθέτηση δοκιμίου → Σύνδεση μηχανισμών φόρτισης, τοποθέτηση μηκυνσιομέτρων.

Ανάλογα με τον τύπο της δοκιμής ακολουθείται διαφορετικός τρόπος φόρτισης και θραύσης του δοκιμίου:

### **1. Ταχεία δοκιμή χωρίς προηγούμενη στερεοποίηση του δοκιμίου**

Επιβολή ορθής τάσης → Θραύση δοκιμίου (ταχύτητα παραμόρφωσης: 0.5 - 2% της διαμέτρου / min, Διάρκεια δοκιμής 15 - 20 min)

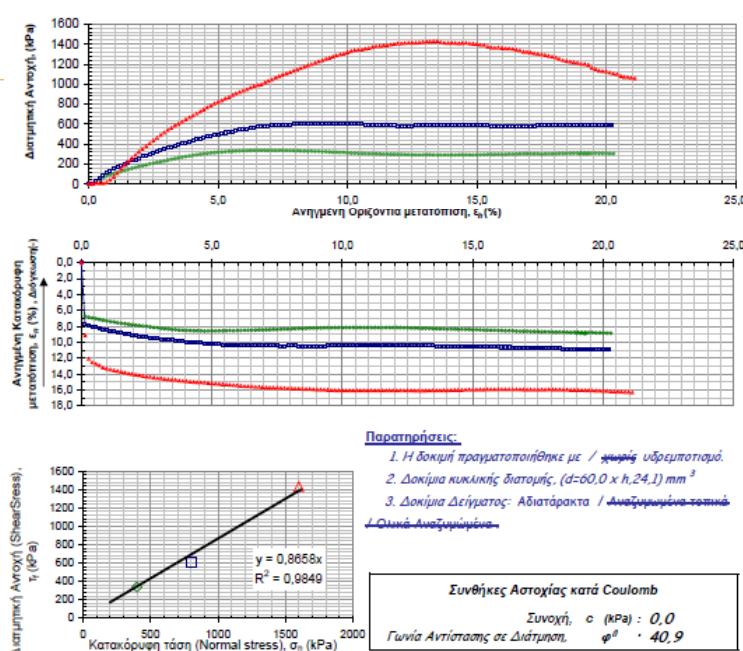
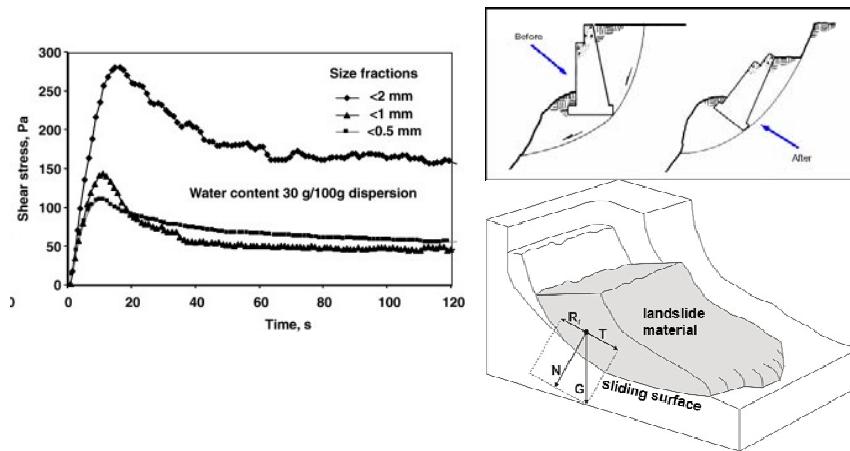
### **2. Ταχεία δοκιμή με προηγούμενη στερεοποίηση του δοκιμίου**

Στερεοποίηση του δοκιμίου μέχρι τη λήξη της πρωτεύουσας στερεοποίησης υπό πίεση ίση με την ορθή τάση που θα εφαρμόζεται κατά τη διάτμηση → Θραύση δοκιμίου (ταχύτητα παραμόρφωσης: 0.5 - 2% της διαμέτρου / min, Διάρκεια δοκιμής 15 - 20 min).

### **3. Βραδεία δοκιμή με προηγούμενη στερεοποίηση του δοκιμίου (Αποστραγγιζόμενες συνθήκες)**

Στερεοποίηση του δοκιμίου μέχρι τη λήξη της πρωτεύουσας στερεοποίησης υπό πίεση ίση με την ορθή τάση που εφαρμόζεται κατά τη διάτμηση → Θραύση δοκιμίου. Ταχύτητα παραμόρφωσης: χρόνος θραύσης ( $T=50 \pm 50$ )/ εκτιμώμενη διατμητική παραμόρφωση). Η επιβολή του φορτίου συνεχίζεται μέχρι τη θραύση του δοκιμίου (μείωση του φορτίου με αυξανόμενες παραμορφώσεις) ή μέχρι η παραμόρφωση να φθάσει στο 10% της αρχικής διαμέτρου του δοκιμίου.

Εκτελούνται το ελάχιστο τρεις δοκιμές με διαφορετική ορθή τάση ανά δείγμα και υπολογίζεται η σχέση της διατμητικής αντοχής ( $\tau$ ) με την ορθή τάση ( $\sigma$ ).



## ΔΟΚΙΜΗ ΤΡΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Η τριαξονική δοκιμή καλύπτει τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων, αδιατάρακτων ή αναζυμωμένων, συνεκτικών εδαφών. Κατά τη δοκιμή ελέγχεται η αντοχή και γενικότερα η σχέση τάσης - παραμόρφωσης ενός δείγματος εδάφους σε οποιεσδήποτε συνθήκες φόρτισης και αποστράγγισης. Ανάλογα με τις συνθήκες αποστράγγισης υπάρχουν τρεις (3) τύποι τριαξονικών δοκιμών:

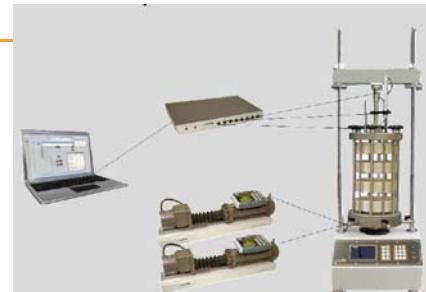
**Δοκιμή ΣU:** Ταχεία δοκιμή χωρίς στερεοποίηση και χωρίς αποστράγγιση.

**Δοκιμή CU ή CUPP:** Δοκιμή με στερεοποίηση, χωρίς αποστράγγιση, με ή χωρίς μέτρηση της τίεσης πόρων.

**Δοκιμή CD:** Αργή δοκιμή με στερεοποίηση και αποστράγγιση.

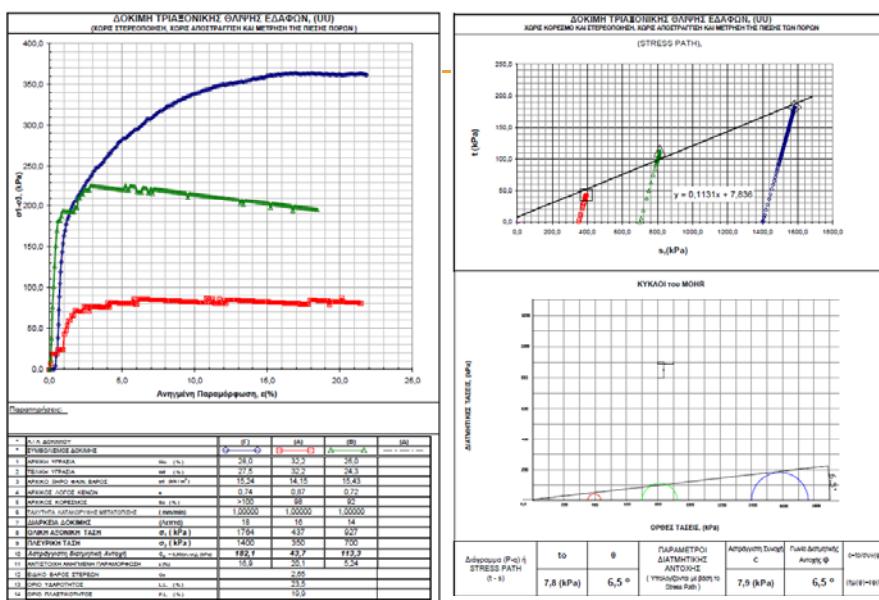
**Διαστάσεις δοκιμίου:** Η σχέση διαμέτρου προς ύψος πρέπει να είναι 1:2 έως 1:3 με ελάχιστη διάμετρο 33mm. Τα επικρατέστερα δοκίμια είναι αυτά με ύψος 72mm και διάμετρο 35mm και ύψος 165mm και διάμετρο 71mm.

**Προπαρασκευή δοκιμίου:** Η κοπή του αδιατάραχτου δείγματος ή η μορφοποίηση του αναζυμωμένου δείγματος πρέπει να πραγματοποιείται με ιδιαίτερη προσοχή προκειμένου να αποφευχθεί η απώλεια υγρασίας. Το δοκίμιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής περιβάλλεται από ελαστική μεμβράνη που το απομονώνει από το νερό της κυψέλης.



**ΔΟΚΙΜΗ ΧΩΡΙΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ, ΧΩΡΙΣ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗ - UU**

- Εκτελείται συνήθως σε κορεσμένα δείγματα.
  - Η ισότροπη πίεση της κυψέλης πρέπει να ισούται με τις οριζόντιες γεωστατικές τάσεις στο βάθος δειγματοληψίας.
  - Ο ρυθμός της επιβαλλόμενης αξονικής παραμόρφωσης είναι 0,5 - 1%/min. Η δοκιμή διαρκεί 15 - 20min. Όταν επιλέγεται να μετρηθούν οι πιέσεις του νερού των πόρων UUPP η παραμόρφωση είναι 0,05%/min και η δοκιμή διαρκεί 4-6hr.
  - Κατά τη διάρκεια της δοκιμής λαμβάνονται συνεχείς μετρήσεις τάσης παραμόρφωσης. Η πίεση της κυψέλης πρέπει να διατηρείται σταθερή.
  - Η δοκιμή συνεχίζεται μέχρι η θλιππική δύναμη να σταθεροποιηθεί ή μέχρι το δοκίμιο να παραμορφωθεί περίπου 20%.
  - Με τη δοκιμή αυτή υπολογίζονται οι ολικές παράμετροι διατμητικής αντοχής c και φ.



### **ΔΟΚΙΜΗ ΜΕ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ, ΧΩΡΙΣ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗ - CUPP**

- Εκτελείται σε προστερεοποιημένο κυλινδρικό δοκίμιο χωρίς την αποστράγγιση του νερού των πόρων. Για τον υπολογισμό των ενεργών τάσεων κατά τη διάρκεια της δοκιμής μετριέται η πίεση του νερού των πόρων.
- Αν το δοκίμιο δεν είναι κορεσμένο εφαρμόζεται η διαδικασία της αντίστροφης πίεσης των πόρων (back pressure) μέχρι τον πλήρη κορεσμό του.
- Μετά τον κορεσμό του το δοκίμιο αφήνεται να στερεοποιηθεί με την ισότροπη πίεση της κυψέλης, σ3', ανοίγοντας τις βαλβίδες αποστράγγισης. Μετά την στερεοποίηση το δοκίμιο οδηγείται σε θραύση.
- Ο ρυθμός της επιβαλλόμενης αξονικής παραμόρφωσης είναι 0,05%/min και η δοκιμή διαρκεί 4-6hr.
- Κατά τη διάρκεια της δοκιμής λαμβάνονται συνεχείς μετρήσεις τάσης παραμόρφωσης και πίεσης του νερού των πόρων. Η πίεση της κυψέλης πρέπει να διατηρείται σταθερή.
- Η δοκιμή συνεχίζεται μέχρι η θλιππική δύναμη να σταθεροποιηθεί ή μέχρι το δοκίμιο να παραμορφωθεί περίπου 20%.
- Με τη δοκιμή αυτή υπολογίζονται οι ενεργές παράμετροι διατμητικής αντοχής c' και φ' .

### **ΔΟΚΙΜΗ ΜΕ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ, ΜΕ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗ - CD**

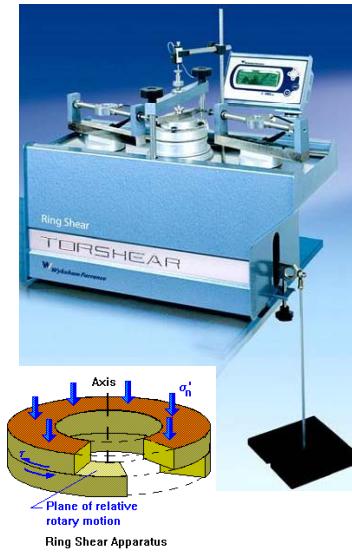
- Εκτελείται σε προστερεοποιημένο κυλινδρικό δοκίμιο με την αποστράγγιση του νερού των πόρων.
- Αν το δοκίμιο δεν είναι κορεσμένο εφαρμόζεται η διαδικασία της αντίστροφης πίεσης των πόρων (back pressure) μέχρι τον πλήρη κορεσμό του.
- Μετά τον κορεσμό του το δοκίμιο αφήνεται να στερεοποιηθεί με την ισότροπη πίεση της κυψέλης, σ3', ανοίγοντας τις βαλβίδες αποστράγγισης. Μετά την στερεοποίηση το δοκίμιο οδηγείται σε θραύση.
- Ο ρυθμός της επιβαλλόμενης αξονικής παραμόρφωσης είναι 0,2%/hr και η δοκιμή διαρκεί 4-6days.
- Κατά τη διάρκεια της δοκιμής λαμβάνονται συνεχείς μετρήσεις τάσης παραμόρφωσης. Η πίεση της κυψέλης πρέπει να διατηρείται σταθερή.
- Η δοκιμή συνεχίζεται μέχρι η θλιππική δύναμη να σταθεροποιηθεί ή μέχρι το δοκίμιο να παραμορφωθεί περίπου 20%.
- Με τη δοκιμή αυτή υπολογίζονται οι ενεργές παράμετροι διατμητικής αντοχής c' και φ' .
- Λόγω της μεγάλης της διάρκειας συνήθως επιλέγεται η εκτέλεση της δοκιμής CUPP.

## ΔΟΚΙΜΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Η Δοκιμή Δακτυλιοειδούς Διάτμησης συνίσταται στην επιβολή διατμητικών μετακινήσεων σε δακτυλιοειδές εδαφικό δοκίμιο, μέσω περιστροφής, με απώτερο σκοπό τον προσδιορισμό της παραμένουσας διατμητικής αντοχής του υλικού.

**Διαστάσεις δακτυλιοειδούς δοκιμίου:** Εσωτερική - εξωτερική διάμετρος δοκιμίου 70 και 100mm, αντίστοιχα και πάχος 5 mm.

**Προπαρασκευή δοκιμίου:** Λεπτομερές κλάσμα ξηρού εδαφικού υλικού (περίπου 100gr), συνήθως διερχόμενου από το κόδικο No 200, διαβρέχεται μέχρι να καταστεί πλαστικό. Το υλικό διαστρώνεται εντός της δακτυλιοειδούς μήτρας και επιπεδώνεται με τη χρήση σπάτουλας.



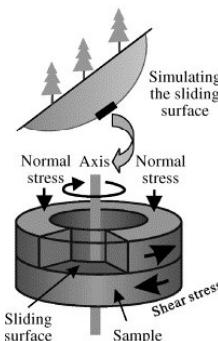
### Πορεία δοκιμής:

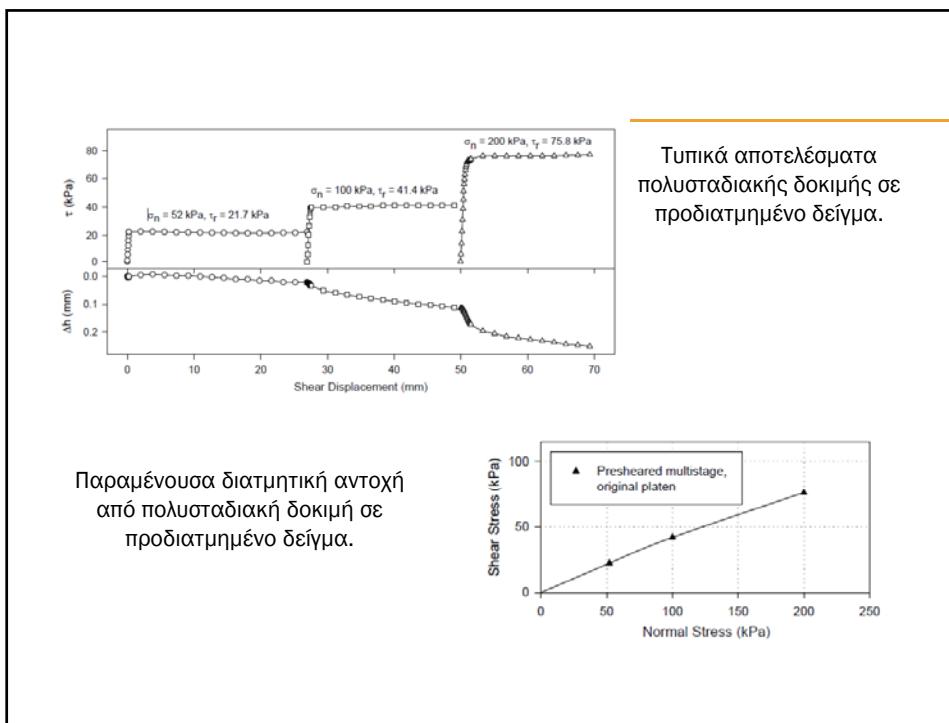
**Στερεοποίηση:** Στερεοποίηση του δοκιμίου μέχρι τη λήξη της πρωτεύουσας στερεοποίησης, υπό πίεση ίση με την ορθή τάση που θα εφαρμόζεται κατά τη διάτμηση. Λόγω των μικρών διαστάσεων του δείγματος τα αρχικά φορτία πρέπει να είναι μικρά, ενώ ο χρόνος που διαρκεί η στερεοποίηση είναι της τάξης των λίγων ωρών. **Μετά την στερεοποίηση του δείγματος περιστρέφοντας τη βάση της δακτυλιοειδούς μήτρας** το δείγμα διατμείται διαμορφώνοντας μια επιφάνεια ολίσθησης και επαναστερεοποιείται προκειμένου να εκτονωθούν οι πιέσεις του νερού των πόρων.

**Διάτμηση:** Η διάτμηση πραγματοποιείται με χαμηλή ταχύτητα προκειμένου να μην αναπτυχθούν πιέσεις του νερού των πόρων ( $0,048^{\circ}/min$  ή  $0,036 mm/min$ ). Η διάτμηση υπό το πρώτο ορθό φορτίο διαρκεί περίπου 24 ώρες.

Μετά το πέρας του πρώτου κύκλου διάτμησης **το δοκίμιο στερεοποιείται με μεγαλύτερα ορθά φορτία και επαναδιατυπώνεται**. Απαιτούνται 2 έως 3 νέοι κύκλοι διάτμησης για την ολοκλήρωση της δοκιμής. Οι επόμενοι κύκλοι διάτμησης μπορούν να εκτελεστούν με μεγαλύτερες ταχύτητες από αυτή του πρώτου.

**Υπολογιζόμενες μηχανικές παράμετροι:** Παραμένουσα γωνία τριβής  $\phi'$ .





## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γραμματικόπουλος Γ., Μάνου - Ανδρεάδου Ν., Χατζηγώγος Θ. (1998), Εδαφομηχανική - ασκήσεις και προβλήματα, Εκδόσεις Αφοί Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.
- Καββαδάς Μ. (2009) Στοιχεία Εδαφομηχανικής, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα.
- Παπαδόπουλος Β. (2003), Στοιχεία Γεωτεχνικής, Σημειώσεις ΕΜΠ.
- Παπαχαρίσης Ν., Μάνου-Ανδρεάδη Ν., Γραμματικόπουλος Ι., (1999) Γεωτεχνική Μηχανική, Εκδόσεις Αφοί Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.
- Τσότος Στ. (1991), Εδαφομηχανική - Θεωρία Μέθοδοι Εφαρμογές, Εκδόσεις Φ. Βερβερίδης & Π. Πολυχρονίδης α.ε., Θεσσαλονίκη.