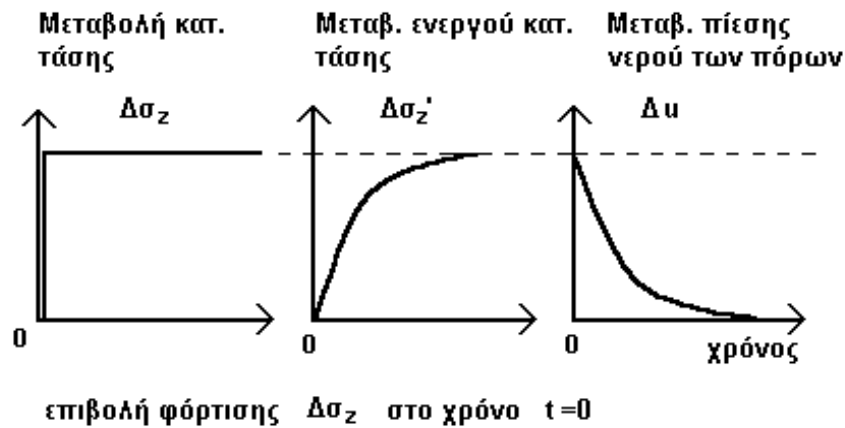


# ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗ ΕΔΑΦΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

## ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

Η παρουσία του νερού μέσα στο έδαφος επηρεάζει τον τρόπο που διατάσσονται οι κόκκοι και το μέγεθος των φορτίων που παραλαμβάνονται από τον εδαφικό ιστό. Όταν φορτίο εφαρμόζεται σε ξηρό έδαφος οι κόκκοι μετακινούνται υποχρεωτικά σε θέσεις πλησιέστερες μεταξύ τους. Αντίθετα όταν το έδαφος είναι κορεσμένο οι κόκκοι δεν μπορούν να μετακινηθούν αφού οι μεταξύ τους θέσεις είναι γεμάτες με νερό και το νερό είναι ασυμπίεστο υλικό. Το φορτίο παραλαμβάνεται αρχικά από το νερό με αποτέλεσμα την εκδήλωση υπερπίεσης πόρων.

Η υπερπίεση του νερού των πόρων έχει σαν αποτέλεσμα τη ροή του νερού από τους πόρους προς τις περιοχές του εδάφους όπου η πίεση είναι χαμηλότερη. Η ροή του νερού σε περιοχές χαμηλότερης πίεσης διαρκεί έως ότου να μηδενιστεί η αρχική υπερπίεση. Καθώς το νερό απομακρύνεται από τους πόρους, οι κόκκοι δύνανται πλέον να μετακινηθούν σε πλησιέστερες θέσεις, ο όγκος που καταλαμβάνει ο εδαφικός ιστός μειώνεται, με αποτέλεσμα την καθίζηση του εδάφους. Ταυτόχρονα καθώς η υπερπίεση του νερού των πόρων διαρκώς μειώνεται το εξωτερικό φορτίο μεταφέρεται σταδιακά στον εδαφικό ιστό υπό τη μορφή ενεργού τάσης. Όταν η υπερπίεση του νερού των πόρων μηδενιστεί όλο το εξωτερικό φορτίο έχει μεταφερθεί στον εδαφικό ιστό. Το φαινόμενο της σταδιακής διαφυγής του νερού των πόρων με ταυτόχρονη μεταφορά της ολικής τάσης σε ενεργό τάση και μείωση της υπερπίεσης του νερού των πόρων ονομάζεται στερεοποίηση και περιγράφεται στο ακόλουθο Σχήμα.



Η θεωρία της ελαστικότητας (για υλικό με γραμμική, ισότροπη συμπεριφορά) προβλέπει ότι μεταβολή της ενεργού τάσης πρέπει να συνοδεύεται με μεταβολή του όγκου του υλικού δηλαδή με αναδιάταξη των κόκκων.

$E$  = μέτρο ελαστικότητας

$\nu$  = λόγος Poisson

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \left( \sigma'_x - \nu(\sigma'_y + \sigma'_z) \right)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \left( \sigma'_y - \nu(\sigma'_z + \sigma'_x) \right)$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \left( \sigma'_z - \nu(\sigma'_x + \sigma'_y) \right)$$

Με άθροιση κατά μέλη

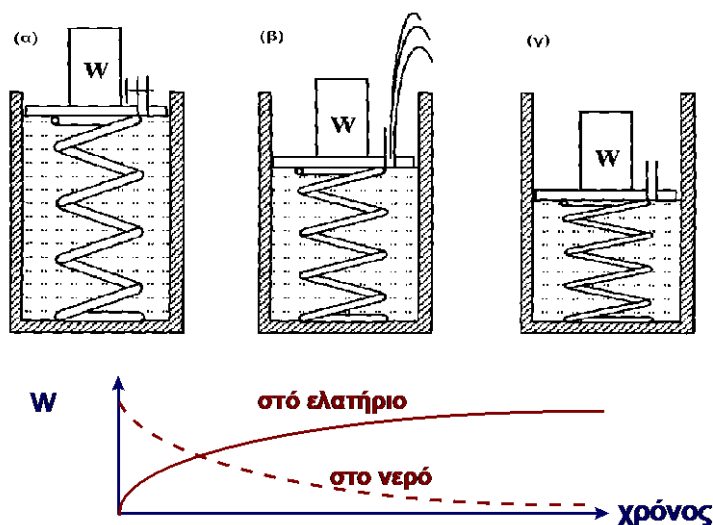
$$\varepsilon_v = \frac{1}{K} \left( \frac{\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z}{3} \right)$$

όπου 
$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

Επομένως 
$$p' = K \cdot \varepsilon_v$$

Στον εδαφικό ιστό τα κενά των πόρων επικοινωνούν μεταξύ τους και το νερό κινείται μέσα σε αλληλοσυνδεόμενους πόρους. Η ταχύτητα ροής του νερού διαμέσου των πόρων εξαρτάται από το μέγεθος και τη διάταξη τους με αποτέλεσμα η διαπερατότητα των διαφόρων εδαφικών υλικών να ποικίλλει.

### Υδρομηχανικό ανάλογο στερεοποίησης εδαφών



Το υδρομηχανικό ανάλογο του φαινομένου της στερεοποίησης περιγράφεται στο Σχήμα. Αρχικά το εξωτερικό φορτίο παραλαμβάνεται από το νερό (α) καθώς εμποδίζεται η συμπίεση του ελατηρίου λόγω του ασυμπίεστου νερού. Μόνον όταν ανοίξει η βαλβίδα διέλευσης του νερού (β) είναι δυνατή η συμπίεση του ελατηρίου και η μεταφορά φορτίου από το νερό στο ελατήριο. Όταν σταματήσει η διαφυγή νερού (γ) όλο το φορτίο έχει παραληφθεί από το ελατήριο.

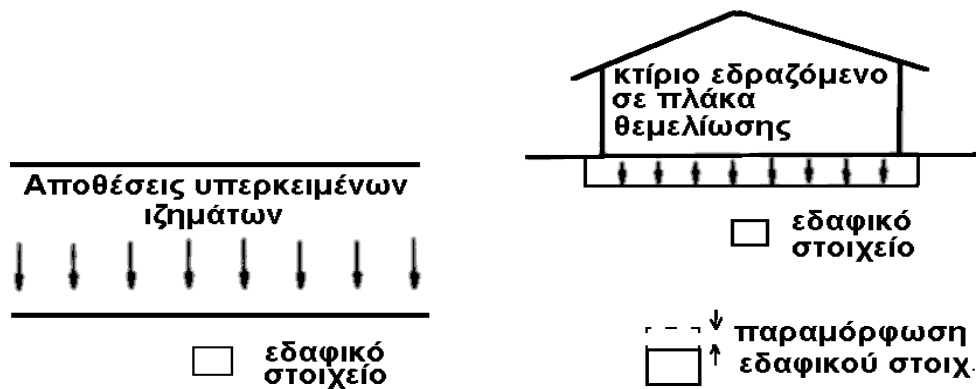
Ο ρυθμός μείωσης της υπερπίεσης του νερού των πόρων εξαρτάται από την διαπερατότητα του εδάφους. Σε κοκκώδη υλικά η στερεοποίηση είναι άμεση. Σε υλικά μικρής διαπερατότητας όπως οι άργιλοι η στερεοποίηση μπορεί να διαρκέσει μήνες ή χρόνια.

Το φαινόμενο της στερεοποίησης συνδέεται με διάφορες κατασκευαστικές εργασίες π.χ. την κατασκευή επιχωμάτων. Στην περίπτωση της κατασκευής επιχωμάτων αρχικά

προσδιορίζεται η αντοχή του υποκείμενου εδάφους. Σειρά πιεζομέτρων εγκαθίστανται για την συνεχή παρακολούθηση της πίεσης του νερού των πόρων σε διάφορες αποστάσεις από τις περιοχές στράγγισης. Στη συνέχεια τοποθετείται η πρώτη στρώση του επιχώματος. Ακολουθεί στερεοποίηση του εδάφους συνεπώς αύξηση της ενεργού τάσης και της αντοχής του. Με τα πιεζόμετρα προσδιορίζεται ο βαθμός στερεοποίησης. Η αυξημένη αντοχή του εδάφους επιτρέπει την προσθήκη της επόμενης στρώσης του επιχώματος.

## ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΗΣ

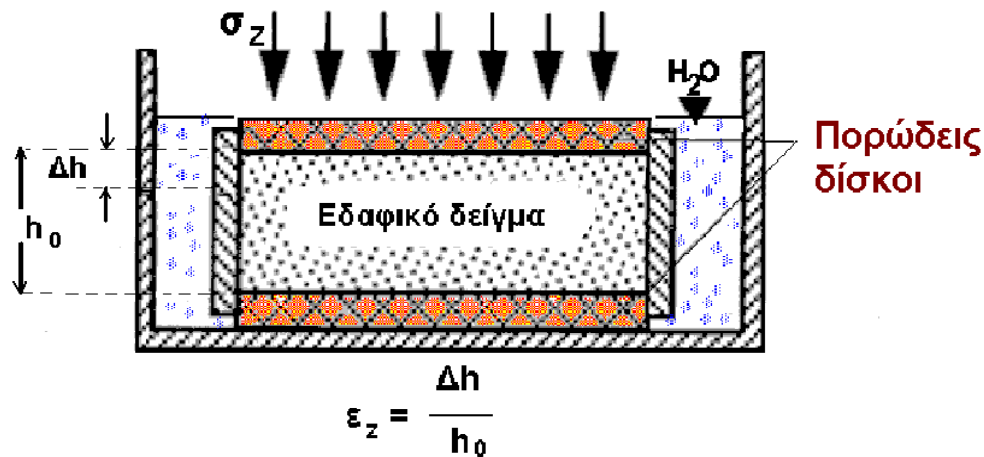
Το φαινόμενο της μονοδιάστατης συμπίεσης / διόγκωσης εδαφικού υλικού παρατηρείται λόγω φυσικών φαινομένων όπως η απόθεση εδαφικών υλικών στους πυθμένες των θαλασσών, η απομάκρυνση των παγετώνων ή λόγω της κατασκευής έργων όπως η κατασκευή δεξαμενών υγρών καυσίμων μεγάλης διαμέτρου όπως φαίνεται στο Σχήμα.



Λόγω της μεγάλης έκτασης φορτιζόμενης επιφάνειας η παραμόρφωση του εδαφικού στοιχείου κάτω από την επιφάνεια περιορίζεται στον κατακόρυφο άξονα. Για την προσομοίωση του φαινομένου της μονοδιάστατης συμπίεσης απαιτείται η επιβολή ορθής παραμόρφωσης στον κατακόρυφο άξονα με ταυτόχρονη παρεμπόδιση ορθών παραμορφώσεων στο οριζόντιο επίπεδο και όλων των διατμητικών παραμορφώσεων.

## Κλασσική Δοκιμή Συμπιεσομέτρου

Η συσκευή προσομοίωσης του φαινομένου της μονοδιάστατης στερεοποίησης αναπτύχθηκε στη Γαλλία από τον J. Frontard περί το 1910. Ο Terzaghi διατύπωσε την αρχή της ενεργού τάσης βασιζόμενος σε αποτελέσματα πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην παραπάνω συσκευή περί το 1920. Η συσκευή ονομάστηκε οιδήμετρο (oedometer) από την Ελληνική λέξη 'οίδημα'.



Σκοπός του πειράματος είναι η μελέτη της σχέσης τάσεων παραμορφώσεων υλικών με σχετικά μικρή διαπερατότητα όπως άργιλοι και ιλείς. Τα μετρούμενα μεγέθη κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι η επιβαλλόμενη τάση, η παραμόρφωση του δοκιμίου και ο χρόνος. Το δοκίμιο είναι κυλινδρικό διαμέτρου 75mm και ύψους 20mm, τοποθετείται σε μεταλλικό δακτύλιο και καλύπτεται με νερό. Με την επιβολή της τάσης  $\sigma_z$ , το δοκίμιο αρχικού ύψους  $h_0$  παραμορφώνεται στον κατακόρυφο άξονα με το χρόνο. Η συνολική μεταβολή του ύψους του είναι  $\Delta h$  και αντιστοιχεί στο μηδενισμό της υπερπίεσης πόρων, δηλ. όταν η ενεργός τάση γίνει ίση με την εξωτερικά επιβαλλόμενη τάση. Η αντίστοιχη αξονική παραμόρφωση είναι  $\varepsilon_z = \Delta h / h_0$ . Η διαφυγή του νερού των πόρων γίνεται μέσω των πορωδών δίσκων του ανωτέρω Σχήματος.

Σχέση ορθής παραμόρφωσης  $\varepsilon_z$  και δείκτη πόρων  $e$

Επειδή ο άκαμπτος δακτύλιος παρεμποδίζει την ανάπτυξη των ορθών παραμορφώσεων στο οριζόντιο επίπεδο  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$ , η παραμόρφωση του όγκου του δοκιμίου  $\varepsilon_v$  είναι ίση με την κατακόρυφη ορθή παραμόρφωση.

$$\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_z = \frac{\Delta h}{h_0}$$

Επίσης

$$\varepsilon_v = \frac{V_0 - V}{V_0} = \frac{V_0/V_s - V/V_s}{V_0/V_s} = \frac{e_0 - e}{1 + e_0}$$

όπου  $e, e_0$  είναι η αρχική και η παρούσα τιμή του δείκτη πόρων

$V, V_0$  είναι η αρχική και η παρούσα τιμή του όγκου του δοκιμίου

και  $V_s$  είναι ο όγκος της στερεάς φάσης του δοκιμίου

Επομένως συνεπάγεται ότι :

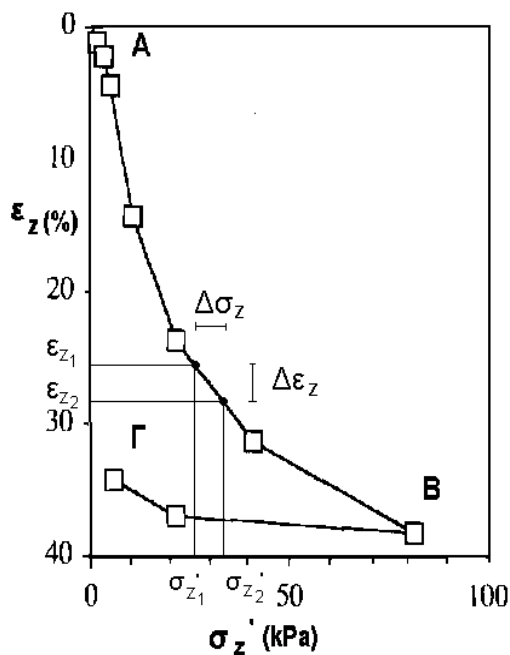
$$e = e_0 - \varepsilon_v (1 + e_0) = e_0 - \frac{\Delta h}{h_0} (1 + e_0)$$

Ενώ η κατακόρυφη παραμόρφωση είναι η μόνη μη μηδενική συνιστώσα της παραμόρφωσης όσον αφορά στις τάσεις, εκτός από την κατακόρυφη τάση, αναπτύσσονται και οριζόντιες τάσεις κάθετες στην επιφάνεια του δακτυλίου. Με τη συμπίεση στην κατακόρυφη διεύθυνση, το έδαφος τείνει να διογκωθεί πλευρικά και επειδή παρεμποδίζεται αναπτύσσονται θλιπτικές τάσεις  $\sigma_h$  οι οποίες αυξάνουν με την αύξηση της κατακόρυφης τάσης  $\sigma_v$  ή  $\sigma_z$ . Εργαστηριακές μετρήσεις δείχνουν ότι κατά τη διάρκεια της μονοδιάστατης συμπίεσης ο λόγος  $\sigma_h/\sigma_v = K_0$  παραμένει σταθερός (~0.4 έως 0.6). Ο λόγος  $K_0$  καλείται συντελεστής οριζόντιας ώθησης με παρεμπόδιση της πλευρικής παραμόρφωσης. Κατά την αποφόρτιση η οριζόντια τάση μειώνεται με ρυθμό πολύ βραδύτερο από τη μείωση της κατακόρυφης τάσης διότι κατά την αποφόρτιση οι ολισθήσεις και οι κυλίσεις που είναι συνυφασμένες με την ανάπτυξη των οριζόντιων τάσεων είναι μη αντιστρεπτές, και επομένως ο λόγος  $K_0$  αυξάνει.

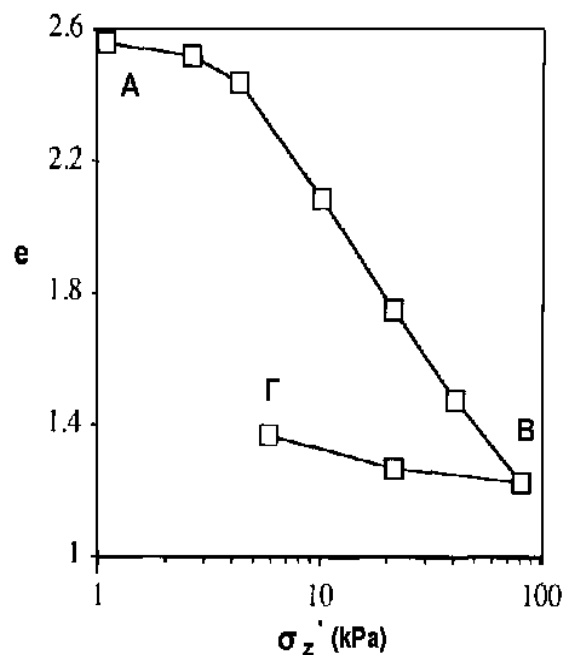
## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΣΥΜΠΙΕΣΟΜΕΤΡΟΥ

Με τη βοήθεια της δοκιμής συμπίεσομέτρου μπορούμε να υπολογίσουμε τα ακόλουθα μεγέθη :

1. Για κάθε επιβαλλόμενο φορτίο από το διάγραμμα της κατακόρυφης παραμόρφωσης προς το χρόνο μπορούμε να εκτιμήσουμε το χρόνο που θα χρειασθεί για να ολοκληρωθεί η ανάπτυξη των παραμορφώσεων (π.χ. καθιζήσεων) όταν το έδαφος υποβάλλεται σε αύξηση φορτίου.
2. Με τη βοήθεια των καταγραφών συνολικής παραμόρφωσης για διάφορα στάδια φόρτισης (ή αποφόρτισης) μπορούμε να προσδιορίσουμε τη σχέση ενεργών τάσεων-παραμορφώσεων εδαφικού υλικού καταπονούμενου σε μονοδιάστατη συμπίεση (ή διόγκωση) και κατ' επέκταση το μέγεθος των καθιζήσεων στη φύση. Όμως δεν γνωρίζουμε το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ολοκλήρωση των καθιζήσεων.



(α)



(β)

Η συνολική παραμόρφωση (από την έναρξη του πειράματος) για αρκετά στάδια φόρτισης ή αποφόρτισης δοκιμής συμπίεσομέτρου μπορεί να σχεδιαστεί σαν καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων όπως φαίνεται στο Σχήμα. Η καμπύλη του Σχήματος αντιστοιχεί σε δοκίμιο πολύ μαλακής αργίλου όπως υποδεικνύει η σχεδόν μηδενική αρχική ενεργός τάση. Η κλίμακα του άξονα των τάσεων στο γράφημα (α) του Σχήματος είναι γραμμική, ενώ στο γράφημα (β) είναι λογαριθμική.

## Υπολογισμός Καθιζήσεων

Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του Σχήματος (α) είναι μη γραμμική και μη αναστρέψιμη όπως φαίνεται από τη σύγκριση των κλάδων φόρτισης (ΑΒ) και αποφόρτισης (ΒΓ). Εάν θεωρήσουμε μικρές μεταβολές τάσης  $\Delta\sigma_z' = \sigma_{z2}' - \sigma_{z1}'$  στην καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων, ο συντελεστής μονοδιάστατης συμπίεσης  $m_v$  δίνεται από τη σχέση:

$$m_v = \frac{\varepsilon_{z2} - \varepsilon_{z1}}{\sigma_{z2}' - \sigma_{z1}'} = \frac{1}{D}$$

$$m_v = \frac{e_1 - e_2}{1 + e_1} * \frac{1}{\sigma_{z2}' - \sigma_{z1}'}, \text{ για } \rightarrow (\varepsilon_z = \varepsilon_v)$$

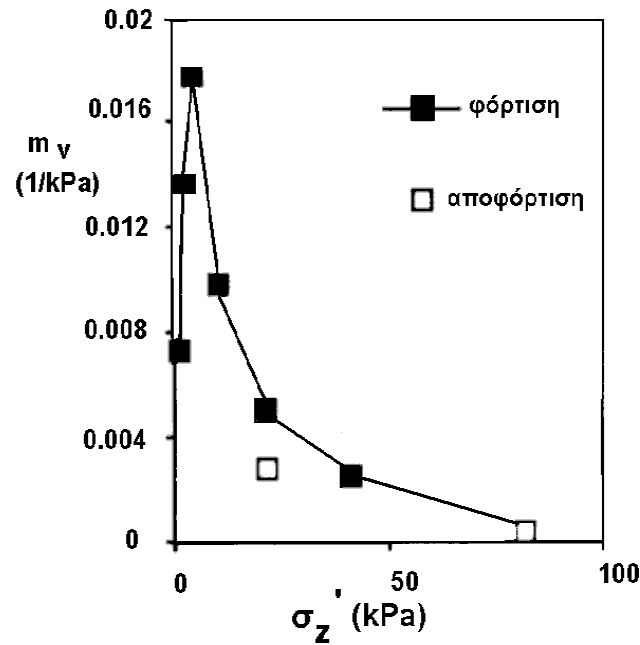
Όπου  $D = \frac{\Delta\sigma_z'}{\Delta\varepsilon_z}$  είναι το μέτρο μονοδιάστατης συμπίεσης

και για την περίπτωση γραμμικών, ελαστικών υλικών δίνεται από τη σχέση :

$$D = [E(1-\nu)] / [(1+\nu)(1-2\nu)]$$

Ο συντελεστής  $m_v$  εξαρτάται τόσο από τη μεταβολή των τάσεων όσο και από την κατεύθυνση της φόρτισης όπως φαίνεται στο Σχήμα όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα πειράματος σε μαλακή άργιλο.





Ο συντελεστής  $m_v$  χρησιμοποιείται στον υπολογισμό των καθιζήσεων  $\delta$  που απορρέουν από την αύξηση της επιβαλλόμενης κατακόρυφης τάσης σε εδαφική στρώση αρχικού ύψους  $h_0$ , με την προϋπόθεση ότι το έδαφος στο εργαστήριο και τη φύση υποβάλλεται σε παρόμοια τάση, μεταβολή τάσης και κατεύθυνση φόρτισης.

$$\delta = m_v * h_0 * \Delta\sigma'_z = \frac{1}{D} * h_0 * \Delta\sigma'_z$$

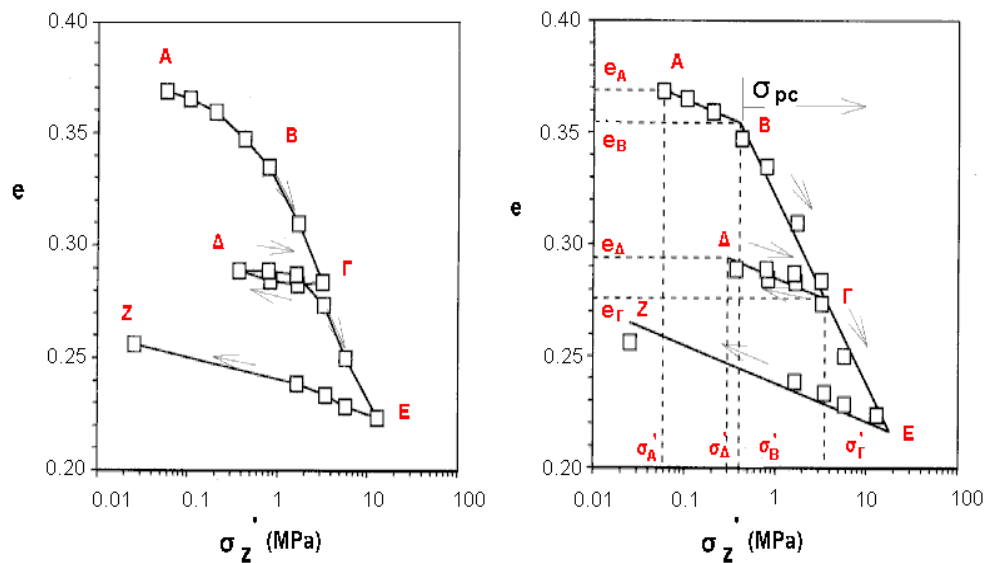
Όταν η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων του προηγούμενου Σχήματος (β) σχεδιασθεί σαν συνάρτηση του δείκτη πόρων  $e$  και της ενεργού τάσης  $\sigma'_z$  σε ημιλογαριθμική κλίμακα, ο δείκτης  $e$  μεταβάλλεται γραμμικά με το λογάριθμο της τάσης  $\sigma'_z$  σε μερικά τμήματα της καμπύλης. Συνεπώς η χρησιμοποίηση του δείκτη  $e$  είναι προτιμότερη από την παραμόρφωση  $e_z$  για τη γραφική παράσταση των αποτελεσμάτων της δοκιμής συμπίεσομέτρου.

## Χαρακτηριστικά Δοκιμής Συμπιεσομέτρου

### Δείκτες Στερεοποίησης

Αποτελέσματα δοκιμής συμπίεσομέτρου σε στιφρές αργίλους όπου η πειραματική καμπύλη προσομοιώνεται με ευθύγραμμα τμήματα απεικονίζονται στο επόμενο Σχήμα. Στα επιμέρους τμήματα η μεταβολή του δείκτη πόρων,  $e$ , ως προς το

λογάριθμο της ενεργού τάσης,  $\log \sigma'$ , είναι γραμμική και επομένως είναι δυνατός ο προσδιορισμός των ακόλουθων χαρακτηριστικών της δοκιμής συμπίεσομέτρου.

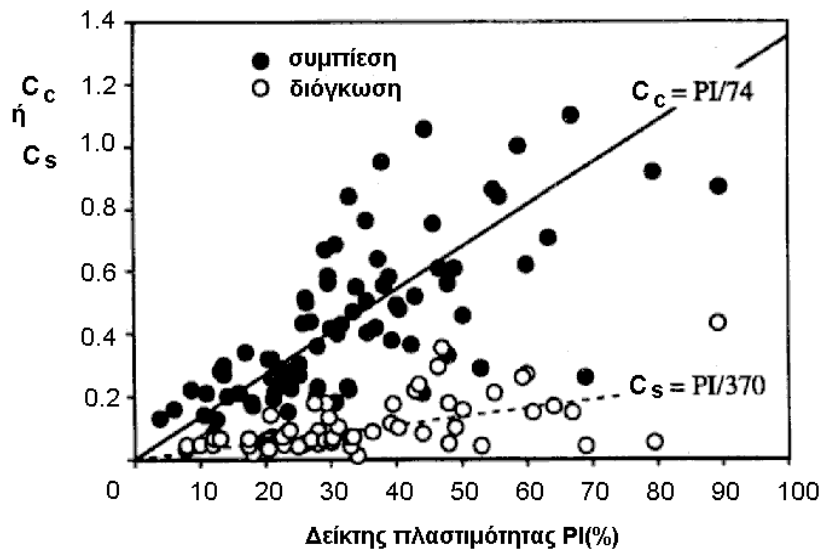


Στον κλάδο ΒΓΕ η καμπύλη  $e-\sigma_z'$  παρουσιάζει τη μέγιστη κλίση της. Η κλίση του κλάδου ΒΓΕ αντιστοιχεί στο δείκτη συμπίεσης,  $C_c$ . Κατά την αποφόρτιση ο κλάδος ΓΔ είναι παράλληλος στους κλάδους ΑΒ και ΕΖ. Η κλίση του κλάδου ΓΔ αντιστοιχεί στο δείκτη διόγκωσης,  $C_s$ ,

$$\text{όπου : } C_c = \frac{e_B - e_\Gamma}{\log(\sigma_\Gamma' / \sigma_B')} \quad \text{και} \quad C_s = \frac{e_\Delta - e_\Gamma}{\log(\sigma_\Gamma' / \sigma_\Delta')}$$

Κατά την επαναφόρτιση από το σημείο Δ η καμπύλη  $e-\sigma_z'$  ακολουθεί τον κλάδο ΔΓ έως το σημείο Γ και στη συνέχεια κινείται επί της ΓΕ προς το σημείο Ε. Περαιτέρω αποφόρτιση ακολουθεί στον κλάδο ΕΖ. Η γραμμή ΒΓΕ καλείται γραμμή στερεοποίησης (virgin consolidation line, VCL) ενώ οι γραμμές ΑΒ, ΓΔ και ΕΖ ονομάζονται γραμμές διόγκωσης (swelling lines).

Είναι προφανές ότι οι δείκτες  $C_c$  και  $C_s$  αντιπροσωπεύουν τις κλίσεις των γραμμών στερεοποίησης και διόγκωσης αντίστοιχα. Στο Σχήμα έχουν σχεδιασθεί διάφορες τιμές των ανωτέρω δεικτών ως προς τον δείκτη πλασιμότητας που μετρήθηκαν πειραματικά για μεγάλο εύρος αργίλων. Οι τιμές του δείκτη στερεοποίησης είναι περίπου πενταπλάσιες των αντίστοιχων τιμών του δείκτη διόγκωσης.



### Τάση Προστερεοποίησης

Η συμπεριφορά του εδαφικού υλικού χαρακτηρίζεται επίσης από την τάση προστερεοποίησης (προφόρτισης) που είναι η μέγιστη ενεργός τάση  $\sigma'_{pc}$  υπό την οποία έχει υποβληθεί το υλικό σε συμπίεση. Όταν η επιβαλλόμενη τάση στο υλικό είναι μικρότερη της  $\sigma'_{pc}$  η συμπεριφορά του υλικού περιγράφεται από τον κλάδο διόγκωσης. Όταν η επιβαλλόμενη τάση είναι ίση με  $\sigma'_{pc}$  το υλικό ακολουθεί τη γραμμή στερεοποίησης κατά τη φόρτιση και μία γραμμή διόγκωσης κατά την αποφόρτιση. Η τάση προστερεοποίησης  $\sigma'_{pc}$  δύναται να αυξηθεί ή να παραμείνει σταθερή. Φυσικά η τάση προστερεοποίησης δεν είναι δυνατόν να μειωθεί. Στον κλάδο ΑΒΓ του Σχήματος η  $\sigma'_{pc}$  είναι ίση διαδοχικά με τη  $\sigma'_B$  και τη  $\sigma'_\Gamma$ , στον κλάδο ΓΔ, ΔΓ παραμένει σταθερή και στη συνέχεια αυξάνεται στην τιμή  $\sigma'_E$  κατά τη φόρτιση στον κλάδο ΓΕ.

Η συσχέτιση της παρούσας εντατικής κατάστασης του υλικού ( $e, \sigma'$ ) με την τάση προστερεοποίησης  $\sigma'_{pc}$  περιγράφεται από το λόγο προστερεοποίησης OCR, όπου

$$OCR = \frac{\sigma'_{pc}}{\sigma'}$$

Με βάση το λόγο προστερεοποίησης τα εδάφη διακρίνονται σε κανονικώς στερεοποιημένα (όταν δεν έχουν υποβληθεί σε εντατική κατάσταση μεγαλύτερη της παρούσας,  $OCR=1$ ) και υπερστερεοποιημένα ή (προφορτισμένα)

(όταν έχουν υποβληθεί στο παρελθόν σε ενεργό τάση μεγαλύτερη της παρούσας,  $OCR > 1$ ).

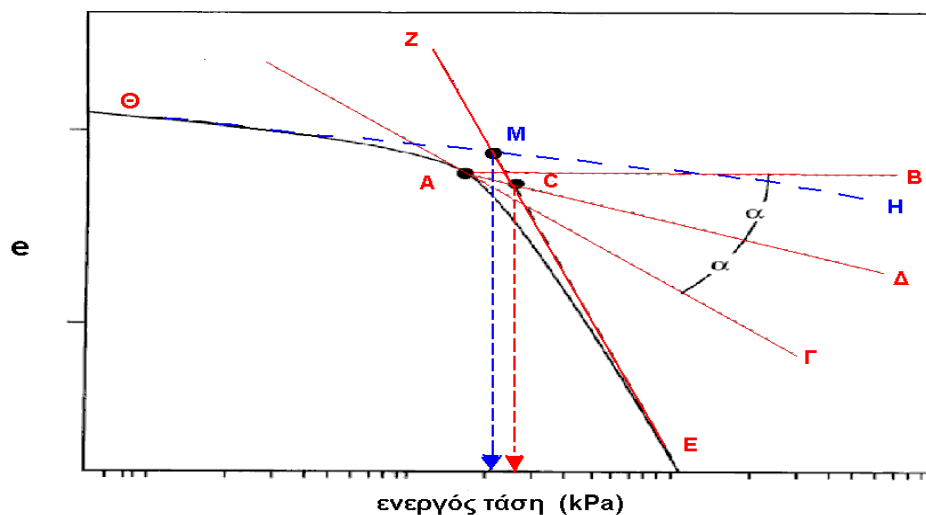
### Μέθοδοι Υπολογισμού της Τάσης Προστερεοποίησης

Η τάση προστερεοποίησης, δηλ. η μέγιστη ενεργός τάση στερεοποίησης που έχει επιβληθεί στο δοκίμιο από γεννέσεώς του, υπολογίζεται με δύο μεθόδους. Και οι δύο μέθοδοι βασίζονται στον προσδιορισμό της  $\sigma_{pc}$  από τις καμπύλες  $e$ - $\log \sigma'$ .

Τα βήματα υπολογισμού της τάσης προστερεοποίησης κατά Casagrande είναι τα ακόλουθα:

- Προσδιορισμός του σημείου ελάχιστης καμπυλότητας της καμπύλης στερεοποίησης (σημείο A του Σχήματος)
- Χάραξη της οριζόντιας AB
- Χάραξη της εφαπτόμενης ΑΓ της καμπύλης στο A
- Χάραξη της διχοτόμου της γωνίας ΒΑΔ
- Προέκταση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης στερεοποίησης, EZ

Η τάση προστερεοποίησης είναι η τάση που αντιστοιχεί στο σημείο τομής C των ευθειών EZ και ΑΔ



Τα βήματα υπολογισμού της τάσης προστερεοποίησης της δεύτερης μεθόδου είναι:

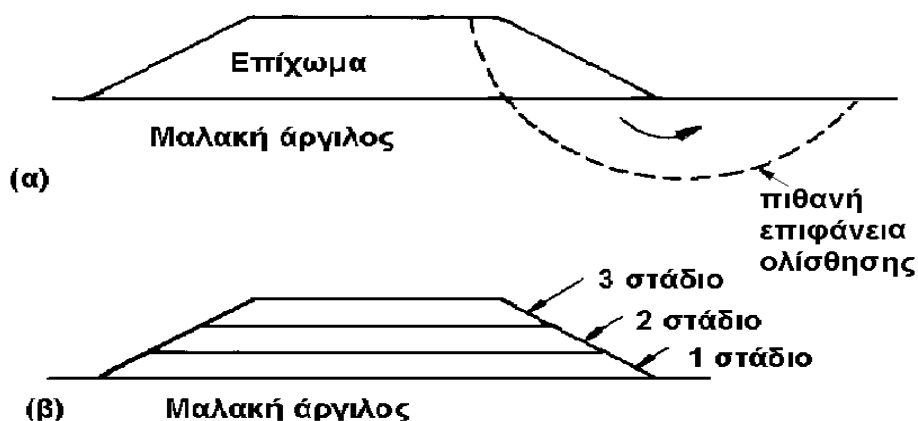
- Χάραξη της προέκτασης του ευθυγράμμου τμήματος της καμπύλης στερεοποίησης EZ
- Χάραξη της προέκτασης του αρχικού τμήματος φόρτισης ΘΗ

Η τομή των ευθειών EZ και ΘΗ στο σημείο M, προσδιορίζει την τάση προφόρτισης.

Διάφορες άλλες μέθοδοι χρησιμοποιούνται ανάλογα με τη φύση του εδαφικού υλικού όπως η χρήση λογαριθμικής κλίμακας και για τους δύο άξονες στην περίπτωση στιφρών αργίλων.

#### *Χρονική εξέλιξη καθιζήσεων*

Ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση των καθιζήσεων είναι κρίσιμος για διάφορες κατασκευές όπως η κατασκευή του επιχώματος του Σχήματος σε μαλακή άργιλο. Η σταδιακή κατασκευή του επιχώματος με εξωτερική φόρτιση ακολουθούμενη από μία περίοδο στερεοποίησης της αργίλου, κατά την οποία ο δείκτης πόρων της αργίλου μειώνεται και η αστράγγιστη διατμητική αντοχή που καθορίζει τις συνθήκες αστοχίας της αυξάνεται, απομακρύνει τον κίνδυνο αστοχίας (Σχήμα (α)). Ο χρόνος στερεοποίησης μεταξύ των σταδίων κατασκευής μπορεί να είναι αρκετοί μήνες και είναι καθοριστικός παράγοντας για την πρόοδο των εργασιών κατασκευής.



Αν και η συμπεριφορά μιάς μεγάλης εδαφικής μάζας δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια από ένα πείραμα στη δοκιμή συμπίεσομέτρου, οι παράμετροι στερεοποίησης που χρησιμοποιούνται στις αναλύσεις προσδιορίζονται από διαγράμματα καθίζησης προς χρόνο για το κατάλληλο στάδιο φόρτισης της δοκιμής συμπίεσομέτρου.

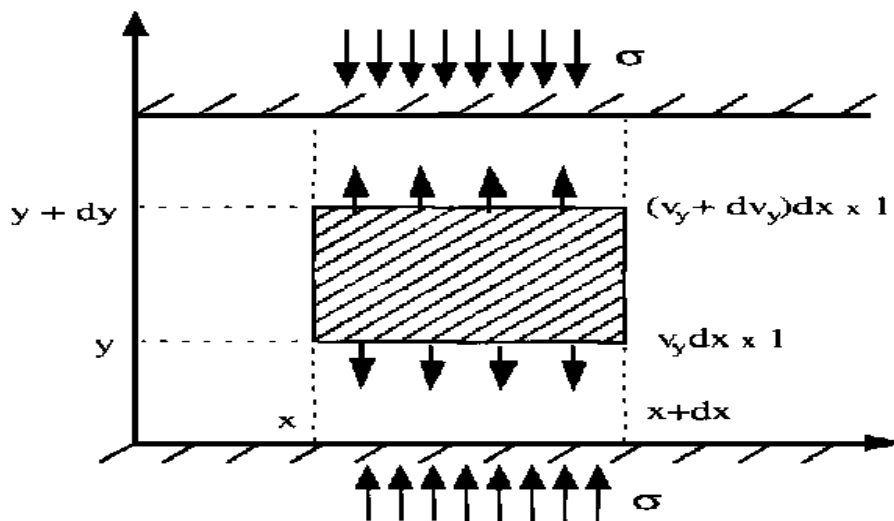
Η δραστική μείωση του χρόνου που απαιτείται για να συντελεστεί η στερεοποίηση με τη μείωση του εύρους της φορτιζόμενης επιφάνειας οφείλεται στην ενεργοποίηση του

μηχανισμού της στράγγισης στην οριζόντια διεύθυνση εκτός από τη γνωστή στράγγιση στην κατακόρυφη διεύθυνση.

## ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

*Παραδοχές φαινομένου μονοδιάστατης στερεοποίησης*

- Το εδαφικό υλικό είναι πλήρως κορεσμένο.
- Οι κόκκοι και το νερό των πόρων είναι ασυμπίεστα.
- Το εδαφικό υλικό είναι ομοιογενές και συμπεριφέρεται ελαστικά.
- Η πλευρική παραμόρφωση του υλικού εμποδίζεται.
- Η υδατική ροή διά μέσου των πόρων είναι μονοδιάστατη και διέπεται από το νόμο του Darcy για ισότροπη και σταθερή διαπερατότητα.



- Νόμος Darcy

$$\text{Ταχύτητα ροής : } v_y = -k \frac{\partial h}{\partial y}$$

- Εξίσωση συνέχειας

εκροή - εισροή = μεταβολή όγκου στη χρονική μονάδα

$$\frac{dV_w}{dt} = \left( v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot dy \right) \cdot dx \cdot 1 - v_y \cdot dx \cdot 1$$

$$= \frac{\partial u_y}{\partial y} \cdot dy \cdot dx = -k \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \cdot dx \cdot dy$$

$$h = h_{\gamma_{\epsilon\omega\mu}} + \frac{1}{\gamma_w} \cdot (u_0 + u) \Rightarrow \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{1}{\gamma_w} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

Επομένως

$$\frac{dV_w}{dt} = -\frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \cdot dx \cdot dy \quad \dots\dots(1)$$

- Για συνθήκες ελαστικότητας :

$$\frac{de}{1 + e_0} = m_v \cdot d\sigma'$$

$$\frac{de}{1 + e_0} = \frac{d(V_v - V_s)}{V_0} = \frac{dV_v}{V_0} = \frac{dV_v}{dx \cdot dy \cdot 1}$$

όπου  $V_0$  αρχικός όγκος  
 $V_s$  όγκος στερεών  
 $V_v$  όγκος πόρων

Επομένως

$$\frac{dV_v}{dt} = m_v \cdot \frac{\partial \sigma'}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \quad \dots\dots(2)$$

- Για σταθερή ολική τάση  $\sigma$  :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial \sigma'}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial t} = 0$$

$$\frac{\partial \sigma'}{\partial t} = -\frac{\partial u}{\partial t} \quad \dots\dots(3)$$

όπου  $u$  υπερπίεση του νερού των πόρων

Απο (2) και (3) συνεπάγεται :

$$\frac{dV_v}{dt} = -m_v \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \cdot dx \cdot dy \quad \dots\dots(4)$$

- Για κορεσμένο υλικό :

$$\frac{dV_v}{dt} = \frac{dV_w}{dt}$$

Επομένως απο (1) και (4) :

$$\frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = m_v \cdot \frac{\partial u}{\partial t}$$

## ΕΞΙΣΩΣΗ ΜΟΝΟΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΣΤΕΡΕΟΠΟΙΗΣΗΣ

$$\boxed{c_v \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{\partial u}{\partial t}}$$

όπου  $c_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w}$  , συντελεστής στερεοποίησης

$k =$  διαπερατότητα εδάφους

$u =$  υπερπίεση του νερού των πόρων

$m_v =$  συντελεστής μονοδιάστατης συμπίεσης

Η επίλυση της εξίσωσης της στερεοποίησης οφείλει να ικανοποιεί τόσο τις συνοριακές όσο και τις αρχικές συνθήκες των προβλημάτων. Στην περίπτωση μονοδιάστατης στερεοποίησης στράγγιση είναι στο ένα ή και τα δύο άκρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα. Για την περίπτωση διπλής στάγγισης οι συνθήκες είναι:

*Αρχικές συνθήκες*

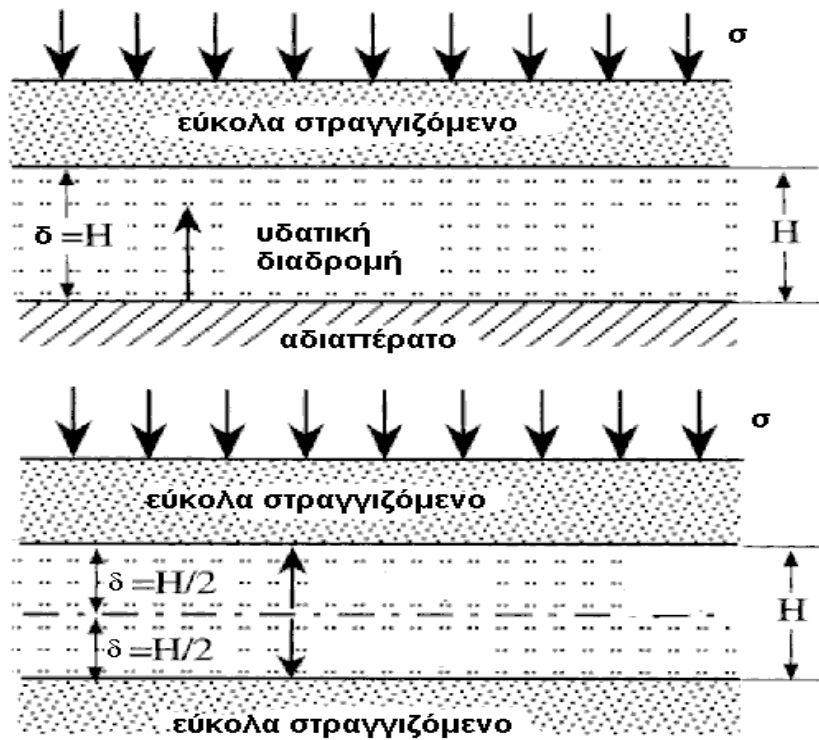
$$u(y,0) = u_{αρχ} = \Delta \sigma_v \quad \text{γιά} \quad 0 < y < H$$

*Συνοριακές συνθήκες*

$$u(0,t) = u(H,t) = 0 \quad \text{γιά} \quad t > 0$$

όπου  $\delta =$  μήκος μέγιστης υδατικής διαδρομής





Η λύση της εξίσωσης της στερεοποίησης για τις ανωτέρω αρχικές συνθήκες είναι:

$$u(y,t) = u_i \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)\pi} \sin \left[ (2n+1)\pi \frac{y}{H} \right] e^{-(2n+1)^2 \pi^2 T_v / 4}$$

όπου  $T_v = \frac{c_v * t}{\delta^2}$  είναι αδιάστατος χρονικός παράγοντας και  $\delta=H/2$  είναι το μήκος μέγιστης υδατικής διαδρομής για συνθήκες διπλής στράγγισης όπως στη δοκιμή του συμπιεσομέτρου.

### Βαθμός Στερεοποίησης U - Χρονικός Παράγοντας $T_v$

Η εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης στη θέση y και στο χρόνο t περιγράφεται και από τον βαθμό στερεοποίησης  $U_y$  ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$\text{Αρχή στερεοποίησης} \quad \Delta \sigma'(y,t) = 0 \quad \text{και} \quad u(y,t) = u_{\text{αρχ}}$$

Τέλος στερεοποίησης  $\Delta\sigma'(y,t) = \Delta\sigma$  και  $u(y,t) = 0$

Βαθμός στερεοποίησης  $U_y = \frac{u_{αρχ} - u(y,t)}{u_{αρχ}} = \frac{\Delta\sigma'(y,t)}{\Delta\sigma}$

όπου  $U_y = 0$  στην αρχή της στερεοποίησης

και  $U_y = 1$  στο τέλος της στερεοποίησης

Η λύση της εξίσωσης της στερεοποίησης για συνθήκες μονοδιάστατης συμπίεσης εκφράζεται μέσω των παραμέτρων  $U$  και  $T_v$  ως εξής:

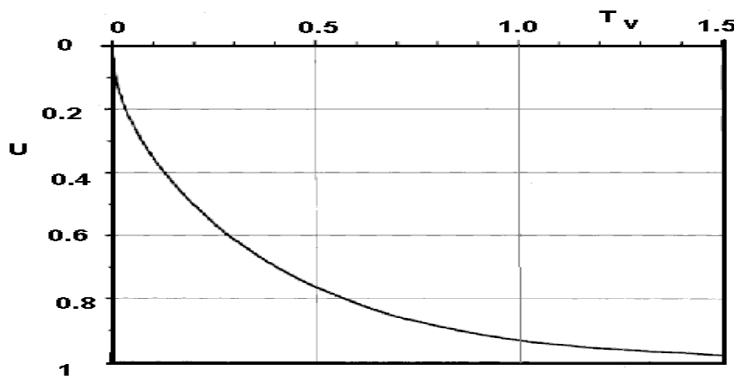
$$U = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{e^{-m^2 \pi^2 T_v / 4}}{m^2}$$

όπου  $U$  είναι ο μέσος βαθμός στερεοποίησης :  $U = \frac{1}{H} \int_0^y U_y dy$

Όπως δηλώνει η ανωτέρω εξίσωση, η σχέση μεταξύ του μέσου βαθμού

στερεοποίησης  $U$  και του χρονικού παράγοντα  $T_v = \frac{c_v * t}{\delta^2}$  είναι εκθετική και

περιγράφεται από το ακόλουθο Σχήμα.



Θεωρητική καμπύλη  $U(T_v)$

Ο μέσος βαθμός στερεοποίησης  $U$  είναι μηδενικός στην αρχή της στερεοποίησης ( $T_v=0$ ) και τείνει προς τη μονάδα κατά την ολοκλήρωση του φαινομένου ( $T_v \rightarrow \infty$ ).

Η σχέση μεταξύ  $U$  και  $T_v$  δύναται να προσομοιωθεί αριθμητικά από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$T_{v1}(U) = \pi * U^2 / 4 \quad U < 0.6$$

$$T_{v2}(U) = -0.085 - 0.933 \log(1 - U) \quad U \geq 0.6$$

Οι μέθοδοι υπολογισμού του συντελεστή στερεοποίησης από πειραματικά αποτελέσματα βασίζονται στις ανωτέρω εξισώσεις και θα παρουσιασθούν αναλυτικά στη συνέχεια.

### Χρόνος Στερεοποίησης

Γενικά ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση του 90% της στερεοποίησης καλείται χρόνος στερεοποίησης  $t_c$ .

$$\text{Για } U = 0.92 \quad T_v \sim 1 \quad \text{και} \quad t_c \cong \frac{\delta^2}{c_v} = \gamma_w \frac{m_v \cdot \delta^2}{k}$$

Επομένως ο χρόνος στερεοποίησης :

- αυξάνει όσο μεγαλώνει η συμπιεστότητα,  $m_v$
- αυξάνει ανάλογα με το τετράγωνο του μήκους της μέγιστης υδατικής διαδρομής,  $\delta^2$
- μειώνεται όσο μεγαλώνει η διαπερατότητα,  $k$
- είναι ανεξάρτητος της επιβαλλόμενης μεταβολής τάσης,  $\Delta\sigma_v$

### Αρχική, Πρωτεύουσα και Δευτερεύουσα Στερεοποίηση

Η εξίσωση της στερεοποίησης που περιγράφηκε προηγουμένως αναφέρεται στην παραμόρφωση που απορρέει από την αποτόνωση της υπερπίεσης πόρων. Η φάση αυτή του φαινομένου ονομάζεται *πρωτεύουσα στερεοποίηση* σε αντιδιαστολή με την *δευτερεύουσα στερεοποίηση* ή ερπυσμό που ακολουθεί και είναι αποτέλεσμα των

μετακινήσεων των κόκκων υπό σταθερά ενεργό τάση και αφού η υπερπίεση των πόρων έχει μηδενισθεί.

Κατά τη διάρκεια του πειράματος η ένδειξη του μετρητή μετατοπίσεων στο χρόνο  $t=0$  είναι διαφορετική από την ένδειξη στην αρχή της πρωτεύουσας στερεοποίησης. Αυτή η *αρχική στερεοποίηση* προηγείται της πρωτεύουσας στερεοποίησης, λαμβάνει χώρα σχεδόν ταυτόχρονα με την επιβολή του φορτίου και οφείλεται κατά ένα μέρος στη συμπίεση μικρών θυλάκων αέρα μέσα στους πόρους και κατά ένα μέρος σε ελαστική συμπίεση του εδαφικού ιστού.

Η παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της δευτερεύουσας στερεοποίησης δίδεται από τη σχέση:

$$\epsilon_s = c_{ae} * \log_{10} (t / t_s)$$

όπου  $t_s$  ο χρόνος έναρξης της δευτερεύουσας στερεοποίησης

$t$  ο χρόνος υπολογισμού των συνολικών παραμορφώσεων

$c_{ae}$  συντελεστής δευτερεύουσας στερεοποίησης

Για ένα μεγάλο αριθμό αργίλων τα πειραματικά αποτελέσματα υποδεικνύουν την σχέση:

$$c_{ae} = 0.0001 * w$$

όπου  $w$  το φυσικό ποσοστό υγρασίας του εδαφικού υλικού.

## Μέθοδοι Υπολογισμού του Συντελεστή Στερεοποίησης

### Λογαριθμική Μέθοδος

Η θεωρητική καμπύλη  $U - T_v$  σχεδιάζεται για λογαριθμική κλίμακα του  $T_v$ . Η μέθοδος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συντελεστή στερεοποίησης  $c_v$ , και των μετατοπίσεων στην αρχή και το τέλος της πρωτεύουσας στερεοποίησης  $\delta_0$  και  $\delta_{100}$  αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα. Αυτό επιτυγχάνεται θεωρώντας ότι έχει επιτευχθεί σύμπτωση της *θεωρητικής* και *πειραματικής* καμπύλης στερεοποίησης.

Στην περίπτωση αυτή για δύο σημεία A και B της πειραματικής καμπύλης τα οποία στη θεωρητική καμπύλη ανήκουν στο τμήμα για το οποίο  $U < 0.6$ , ισχύει:

$$\frac{t_B}{t_A} = \frac{T_v^B}{T_v^A} = \frac{U_B^2}{U_A^2} = \frac{(\delta_B - \delta_0)^2}{(\delta_A - \delta_0)^2}$$

$$\Rightarrow \delta_0 = \frac{\delta_A * \sqrt{t_B} - \delta_B * \sqrt{t_A}}{\sqrt{t_B} - \sqrt{t_A}}$$

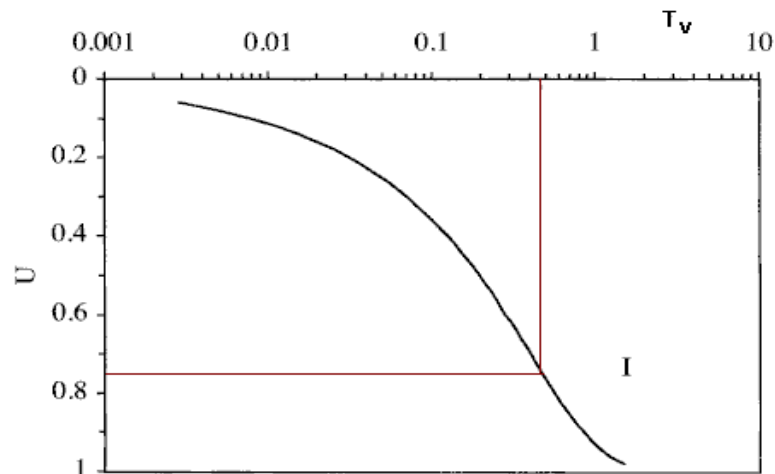
Συνήθως επιλέγεται ο χρόνος  $t_A = 1$  min και  $t_B = 4$  min έτσι ώστε

$$\delta_0 = 2 * \delta_A - \delta_B$$

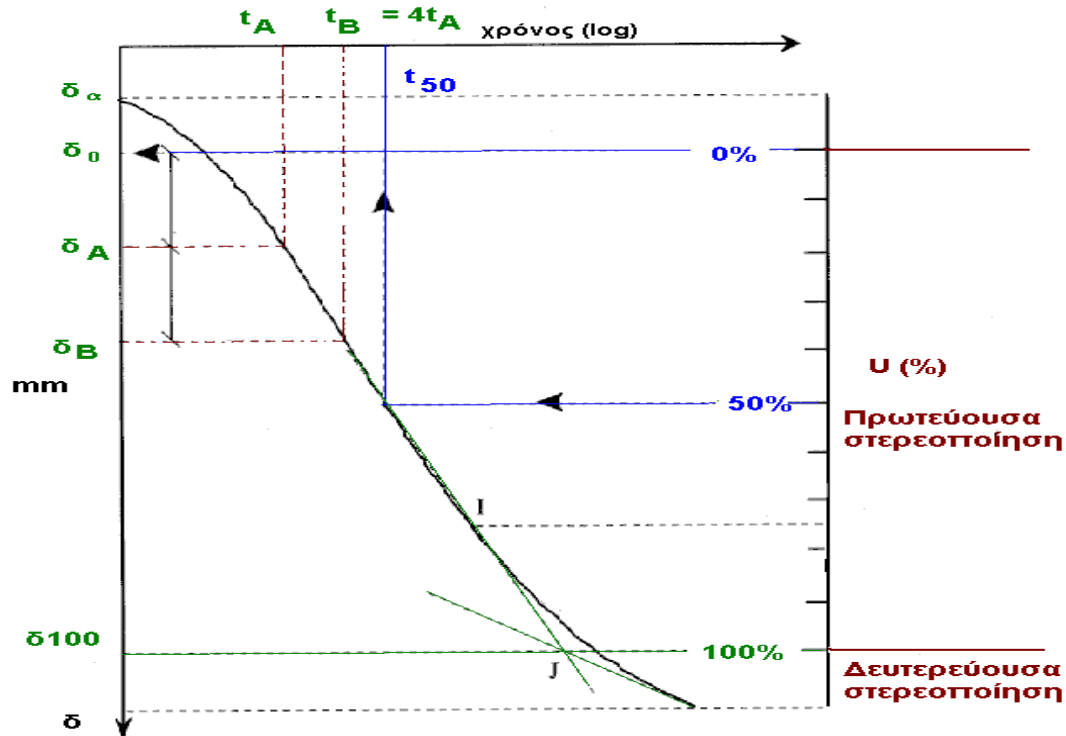
όπου  $\delta_A$  μέτρηση μηκυσιομέτρου στο σημείο A στο χρόνο  $t_A$

$T_v^A$  χρονικός παράγοντας στο σημείο A

$U_A$  βαθμός στερεοποίησης στο σημείο A



Θεωρητική καμπύλη  $U(T_v)$  με λογαριθμική κλίμακα για  $T_v$



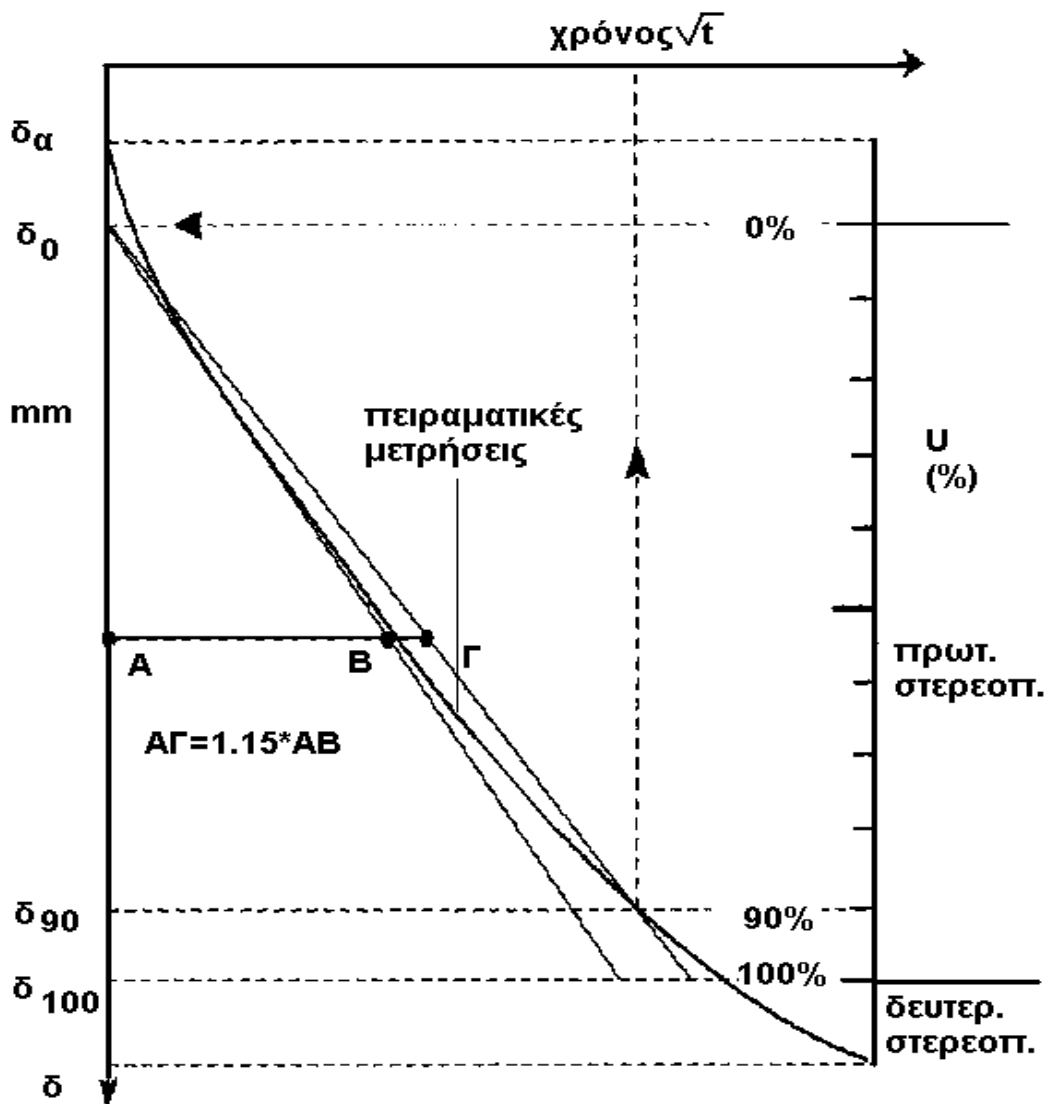
Στο σημείο I και για  $U \sim 75\%$  η θεωρητική καμπύλη αλλάζει καμπυλότητα και παρουσιάζει μέγιστη κλίση. Στην πειραματική καμπύλη η τομή της εφαπτόμενης στο I με την προέκταση της καμπύλης δευτερεύουσας στερεοποίησης προσδιορίζουν το σημείο όπου  $U=100\%$ .

Συνεπώς  $\delta_{50} = 1/2(\delta_0 + \delta_{100})$  που αντιστοιχεί σε  $U=50\%$ . Από τη θεωρητική καμπύλη και για χρόνο  $t_{50}$ ,  $T_v = 0.197$ . Έχοντας προσδιορίσει το  $t_{50}$  στην πειραματική καμπύλη μπορούμε να προσδιορίσουμε το συντελεστή στερεοποίησης  $c_v$  από τη σχέση :

$$c_v = 0.197 * (\delta)^2 / t_{50}$$

όπου  $\delta$  είναι το μήκος της υδατικής διαδρομής στράγγισης. Για συνθήκες διπλής στράγγισης (δοκίμιο μεταξύ δύο πορωδών δίσκων στο συμπιεσόμετρο)  $\delta = h/2$  όπου  $h$  είναι το μέσο πάχος του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης. Για στράγγιση στο ένα μόνο άκρο  $\delta = h$ .

*Μέθοδος της Τετραγωνικής Ρίζας του Χρόνου*



Η θεωρητική και η πειραματική καμπύλη σχεδιάζονται ως προς τετραγωνική ρίζα του χρόνου  $T_v$  και  $t$  αντίστοιχα. Η μετατόπιση  $\delta_0$  προσδιορίζεται από την τομή του ευθύγραμμου τμήματος της πειραματικής καμπύλης με τον άξονα των μετρήσεων του μηκυνσιομέτρου. Στη συνέχεια προσδιορίζονται τα μεγέθη  $t_{90}$  και  $\delta_{90}$  που αντιστοιχούν στο 90% του βαθμού στερεοποίησης  $U(90)$ .

$$\sqrt{\frac{t_2}{t_1}} = \sqrt{\frac{T_2^v}{T_1^v}} = \frac{2}{U\sqrt{\pi}} \sqrt{-0.085 - 0.933 \log_{10}(1-U)} = 1.15 \quad \text{για } U=0.90$$

Ο χρόνος που αντιστοιχεί σε  $U=90\%$  βρίσκεται χαράζοντας μία ευθεία γραμμή έτσι ώστε  $AG=1.15*AB$ . Το σημείο τομής της ευθείας με την πειραματική καμπύλη προσδιορίζει τα  $U_{90}$  και  $t_{90}$ . Για την περίπτωση αυτή :

$$c_v=0.848(\delta)^2/t_{90}$$

όπου  $\delta$  είναι το μήκος της υδατικής διαδρομής στράγγισης. Για συνθήκες διπλής στράγγισης όπως στη δοκιμή συμπίεσομέτρου και μέσο πάχος εδαφικού δοκιμίου ίσο με  $h$  το μήκος της υδατικής διαδρομής στράγγισης  $\delta=h/2$ .

Οι μετατοπίσεις που αντιστοιχούν σε διάφορους βαθμούς στερεοποίησης συνδέονται με τη σχέση:

$$\delta_{100}=\delta_0+10(\delta_{90}-\delta_0)/9$$