



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

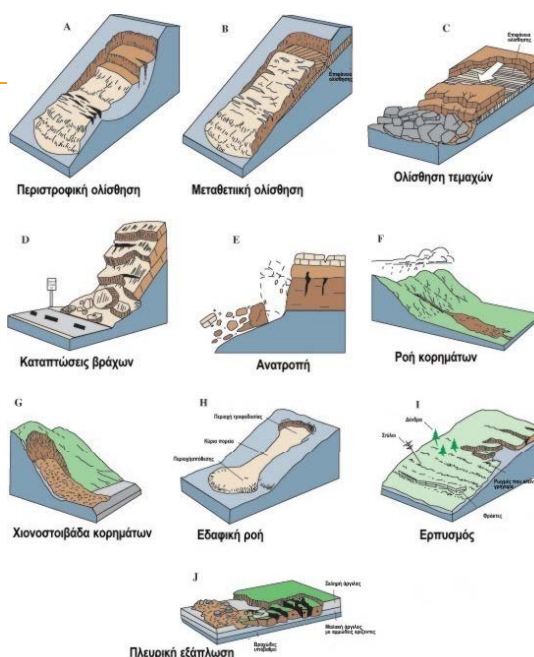
Τομέας Γεωλογικών Επιστημών, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών

## ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΠΡΑΝΩΝ

## ΒΗΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ

- Αναγνώριση των γεωμετρικών, γεωλογικών και μορφολογικών χαρακτηριστικών της αστοχίας. Δηλαδή, αναγνώριση του μηχανισμού εκδήλωσης της αστοχίας.
- Προσδιορισμός των φυσικομηχανικών παραμέτρων των σχηματισμών.
- Επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ανάλυσης ευστάθειας.
- Συσχέτιση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με τα δεδομένα των επιτόπου παρατηρήσεων. Έλεγχος αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της επίλυσης.

## ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ





- Υπολογισμός **άμεσης ευστάθειας (short term stability)** με τη χρήση παραμέτρων διατμητικής αντοχής υπολογισμένων υπό αστράγγιστες συνθήκες (δοκιμές άμεσης διάτμησης, δοκιμές ανεμπόδιστης θλίψης). Παραβλέποντας τις μεταβολές στην πίεση του νερού των πόρων.
- Υπολογισμός **μακροχρόνιας ευστάθειας (long term stability)** με τη χρήση παραμέτρων διατμητικής αντοχής υπολογισμένων υπό στραγγιζόμενων συνθηκών ή υπό συνθηκών αστράγγιστων στις οποίες όμως γίνεται καταγραφή των πιέσεων του νερού των πόρων (βραδείες δοκιμές διάτμησης, Τριαξονικές- CUPP).

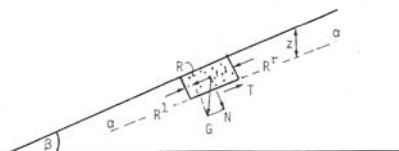
## ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΜΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

**Απουσία συνοχής, η επιφάνεια ολίσθησης διαμορφώνεται επίπεδη.**

Η ανάλυση της ευστάθειας των συγκεκριμένων πρανών μπορεί ουσιαστικά να πραγματοποιηθεί με τη **χρήση ενός απλού δυναμοπολύγωνου.**

Η ίδια λογική αναλύσεων (χρήση δυναμοπολυγώνου) εφαρμόζεται και για την ανάλυση ευστάθειας **εδαφικών πρανών συνεκτικών εδαφών στα οποία, λόγω της γεωλογικής δομής, καταγράφονται μεταθετικές ολισθήσεις** καθώς και για την ανάλυση ευστάθειας **βραχωδών πρανών στα οποία καταγράφονται επίπεδες ολισθήσεις.**

## ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΟΥΣ ΞΗΡΟΥ - ΜΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ



$$SF = \frac{\epsilon\varphi\varphi}{\epsilon\varphi\beta}$$

Ο συντελεστής ασφάλειας είναι **ανεξάρτητος του φαινόμενου βάρους** του εδαφικού υλικού καθώς και **ανεξάρτητος του βάθους της επιφάνειας ολίσθησης**.

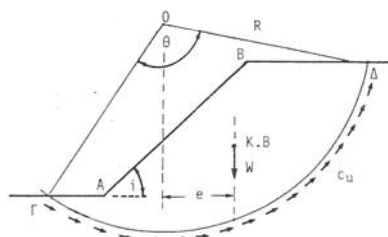
## ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΣΥΝΕΚΤΙΚΩΝ ΕΔΑΦΩΝ

Τα πρανή συνεκτικών εδαφών κατολισθαίνουν κατά καμπύλες επιφάνειες (τόξο κύκλου).

Οι συνήθεις μέθοδοι ανάλυσης ευστάθειας βασίζονται στις ακόλουθες παραδοχές:

- Θεώρηση συνθηκών οριακής ισορροπίας κατά την αστοχία.
- Ολίσθηση κατά μήκος κυλινδρικής επιφάνειας.
- Διατήρηση σχήματος κατολισθαίνουσας μάζας - αλλαγή θέσης κέντρου βάρους.
- Κατά την ολίσθηση ενεργοποιείται η διατμητική αντοχή σύμφωνα με το νόμο Mohr-Coulomb.

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΟΛΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ**  
**ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΑΣΤΡΑΓΓΙΣΤΗ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗ**  
**ΑΝΤΟΧΗ  $c_u$  ( $\Phi_u=0$ )**



$$SF = \frac{c_u \cdot l \cdot R}{w \cdot e}$$

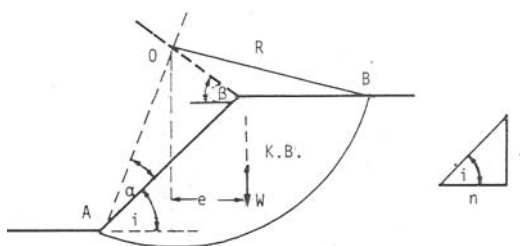
$$l = \frac{\pi \cdot R \cdot \theta^\circ}{180^\circ}$$

Ο SF υπολογίζεται από το λόγο των ροπών των δυνάμεων συγκράτησης προς τις ροπές των δυνάμεων ολίσθησης.

Όπου:  
 l: το μήκος του τόξου,  
 w: το βάρος του ολισθαίνοντος τεμαχίου,  
 e: η εκτροπή του διανύσματος του βάρους.

Γενική περίπτωση στην οποία δεν είναι γνωστός ο τύπος της κυκλικής ολίσθησης. Ο ελάχιστος SF υπολογίζεται με αλληπάλληλες δοκιμές.

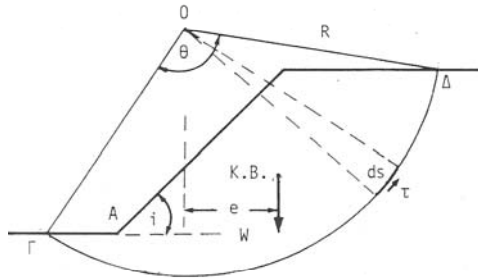
**ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΡΙΣΙΜΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΠΟΔΟΣ ΚΑΤΑ FELLENIUS**  
**ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ**



Κλίση 1:n	Γωνία Κλίσης i	$\alpha^\circ$	$\beta^\circ$
1:1	45°	28°	38°
1:1,5	33,7°	26°	38°
1:2	26,6°	25°	35°
1:5	11,3°	25°	37°

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΟΛΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΟΠΟΥ $\Phi \neq 0$

Η διατμητική αντοχή  $\tau$  που ενεργοποιείται κατά Mohr - Coulomb στο στοιχειώδες μήκος  $ds$  περιλαμβάνει και τη συμβολή των ορθών τάσεων  $\sigma_n$  επί του στοιχειώδους τμήματος.



$$dT = (c + \sigma_n \epsilon \phi) \cdot ds$$

Ο SF υπολογίζεται από το λόγο των ροπών των δυνάμεων συγκράτησης προς τις ροπές των δυνάμεων ολίσθησης.

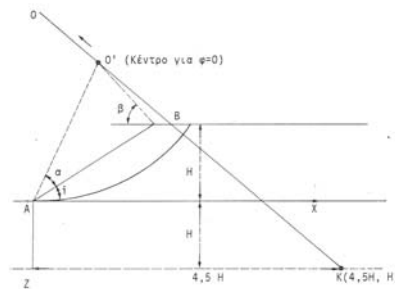
$$SF = \frac{R \cdot \int_{\Gamma}^{\Delta} (c + \sigma_n \epsilon \phi) \cdot ds}{W \cdot e}$$

$$SF = \frac{c \cdot l \cdot R}{W \cdot e} + \frac{R \cdot \epsilon \phi \phi \cdot \int_{\Gamma}^{\Delta} \sigma_n \cdot ds}{W \cdot e}$$

Όπου:  
 l: το μήκος του τόξου,  
 w: το βάρος του ολισθαίνοντος τεμαχίου,  
 e: η εκτροπή του διανύσματος του βάρους.

Γενική περίπτωση στην οποία δεν είναι γνωστός ο τύπος της κυκλικής ολίσθησης. Ο ελάχιστος SF υπολογίζεται με αλληπάλληλες δοκιμές.

### ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΚΡΙΣΙΜΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΠΟΔΟΣ ΚΑΤΑ FELLENIUS ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΑΝΟΥΣ



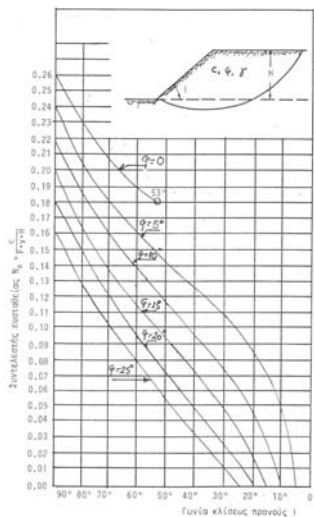
Ο γεωμετρικός τόπος των κέντρων είναι η ευθεία  $KO'$ .

Γίνονται δοκιμές για κέντρα επί της ευθείας

Κλίση 1:n	Γωνία Κλίσης i	$\alpha^\circ$	$\beta^\circ$
1:1	45°	28°	38°
1:1,5	33,7°	26°	38°
1:2	26,6°	25°	35°
1:5	11,3°	25°	37°

## ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ TAYLOR

Κατά τον Taylor πρανή ορισμένης γωνίας κλίσεως  $i$ , ανεξαρτήτως ύψους, σε εδάφη ορισμένης γωνίας εσωτερικής τριβής  $\phi$ , κατολισθαίνουν κατά επιφάνειες ολίσθησης γεωμετρικών ανάλογες.

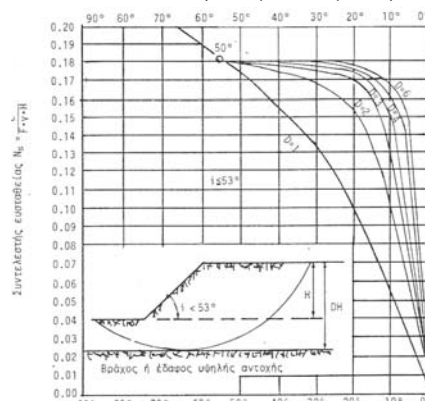


Συντελεστής ευστάθειας  $N_s$   
 για κύκλους ποδός

Συντελεστής  
 ευστάθειας

$$N_s = \frac{c}{F \cdot \gamma \cdot H}$$

Συντελεστής ευστάθειας  $N_s$  για  
 βαθείς κύκλους και  $\phi=0$



## ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΛΩΡΙΔΩΝ

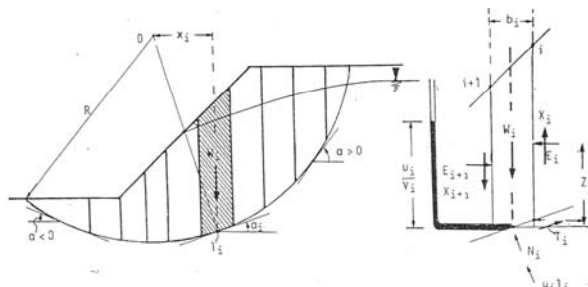
Κατά την εφαρμογή της Μεθόδου των Λωρίδων γίνεται **διαχωρισμός της αναλυόμενης τομής σε λωρίδες**, ίσου ή μεταβαλλόμενου πλάτους και εξετάζεται η **ισορροπία της κάθε λωρίδας** χωριστά.

Οι επιπρόσθετες δυνατότητες της μεθόδου των λωρίδων διαμορφώνονται ως εξής:

- Μπορεί να προσεγγίσει τη μεταβολή των υδραυλικών συνθηκών κατά μήκος της τομής.
- Μπορεί να προσεγγίσει τη μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών των γεωλογικών σχηματισμών.
- Μπορεί να εφαρμοστεί σε πρανή στα οποία η μορφολογία της επιφάνειας δεν είναι επίπεδη ή σε πρανή με κλιμακωτή ανάπτυξη.
- Μπορεί να αναλύσει αστοχίες στις οποίες η γεωλογική δομή οδηγεί στην ανάπτυξη μη κυκλικής επιφάνειας αστοχίας.



## ΕΝΕΡΓΩΣΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΑΝΑ ΛΩΡΙΔΑ



- $W_i$  : Το ίδιο βάρος συμπεριλαμβανομένου και των εξωτερικών φορτίων.
- $E_i, X_i$  : Οι εσωτερικές δυνάμεις διεπιφάνειας.
- $N_i$  : Η ορθή δύναμη επί της επιφάνειας ολίσθησης.
- $U_i$  : Η πίεση του νερού των πόρων.
- $T_i$  : Η τριβή προερχόμενη από την ενεργοποιημένη διατμητική αντοχή.

## ΜΕΘΟΔΟΣ ΛΩΡΙΔΩΝ ΚΑΤΑ FELLENIUS

Παραδοχές μεθόδου λωρίδων κατά Fellenius:

- Αγνοεί και ως εκ τούτου αμελεί τις εσωτερικές δυνάμεις διεπιφάνειας.
- Ως θέση εφαρμογής των δυνάμεων θεωρείται το σημείο τομής της κατακόρυφης από το Κ.Β. με τη βάση της λωρίδας.
- Η γωνία κλίσης  $\alpha$  της βάσης της λωρίδας είναι προσημασμένη. Περιορισμός ροπών ανατροπής.
- Ο όρος  $N$  δεν μπορεί να έχει αρνητικές τιμές. Δεν επιτρέπεται η εκδήλωση φαινομένων υδραυλικής ανύψωσης.

Ο SF προκύπτει ως λόγος των ροπών ευστάθειας προς τις ροπές ανατροπής.

$$SF = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \cdot l_i + \sum_{i=1}^n (W_i \cdot \sigma_{\alpha i} - u_i l_i) \epsilon \phi \phi_i}{\sum_{i=1}^n (W_i \cdot \eta \mu \alpha_i)}$$

Η συγκεκριμένη μέθοδος δίνει τιμές αυξημένες προς τη μεριά της ασφάλειας κατά 10 έως 15%. Δεν ενδείκνυται για περιπτώσεις με βαθείς κύκλους ολίσθησης και για μεγάλες τιμές υπερπίεσεως των υδάτων των πόρων.

## ΑΛΛΕΣ ΠΑΡΕΜΦΕΡΕΙΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

- Ακριβής Μέθοδος Λωρίδων Κατά Bishop
- Απλοποιημένη Μέθοδος Λωρίδων Κατά Bishop
- Μέθοδος Λωρίδων Κατά Krey
- Μέθοδος Λωρίδων Κατά Janbu  
(αστοχία με μεταφορική μετακίνηση – η επιφάνεια ολίσθησης μπορεί να είναι τεθλασμένη γραμμή)

## ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΣΕ ΠΡΑΝΕΣ – ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΦΕΡΟΥΣΑΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΜΕΥΕΡΗΦ

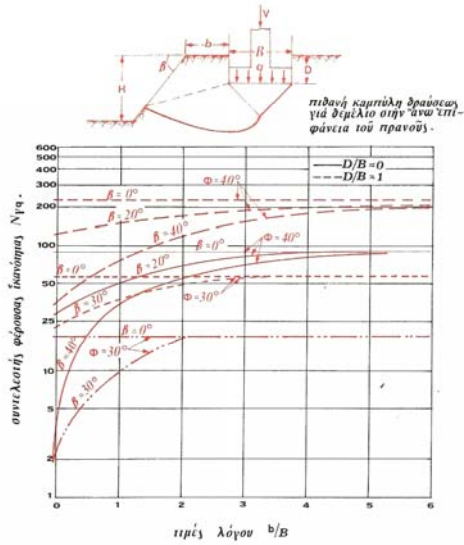
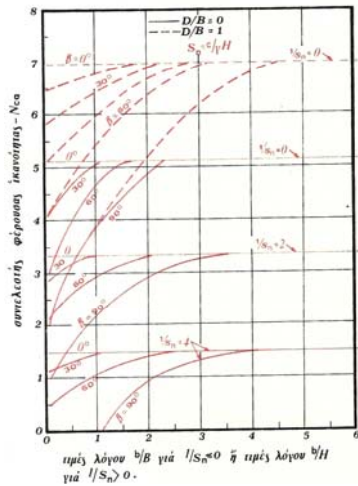
Ο Meyerhof διατύπωσε νομογραφήματα με τα οποία υπολογίζεται η φέρουσα ικανότητα για θεμελίωση στην άνω οριζόντια επιφάνεια του πρανούς αλλά και στην κεκλιμένη επιφάνεια του πρανούς.

Η φέρουσα ικανότητα υπολογίζεται από τον τύπο:

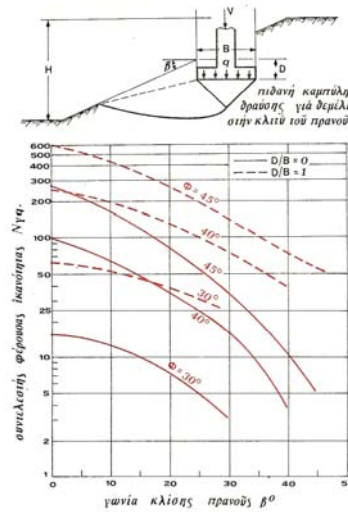
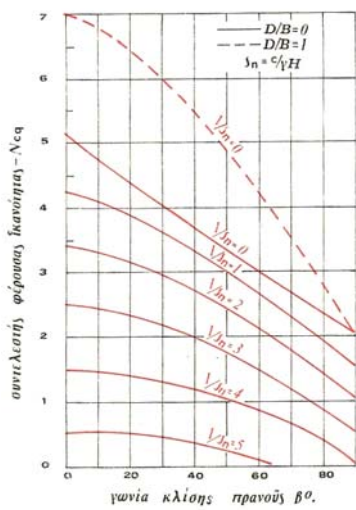
$$q = cN_{cq}J_c + \frac{1}{2}\gamma BN_{\gamma q}J_\gamma$$

Όπου  $N_{cq}$  και  $N_{\gamma q}$  υπολογίζονται από διαγράμματα και οι συντελεστές σχήματος  $J_c$  και  $J_\gamma$ , για συνεχή θεμέλια, παίρνουν τιμή ίση με 1.

Νομογραφήματα για θεμελίωση στην άνω επιφάνεια του πρανούς



Νομογραφήματα για θεμελίωση στην κλιτύ του πρανούς



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Γραμματικόπουλος Γ., Μάνου - Ανδρεάδου Ν., Χατζηγώγος Θ. (1998), Εδαφομηχανική - ασκήσεις και προβλήματα, Εκδόσεις Αφοί Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.
- Παπαδόπουλος Β. (2003), Στοιχεία Γεωτεχνικής, Σημειώσεις ΕΜΠ.
- Smith G.N., Smith I.G.N., (1988) Elements of soil mechanics, Blackwell Science LTD.
- Τσότης Στ. (1991), Εδαφομηχανική - Θεωρία Μέθοδοι Εφαρμογές, Εκδόσεις Φ. Βερβερίδης & Π. Πολυχρονίδης α.ε., Θεσσαλονίκη.