

Ελληνική Επιτροπή Σηράγγων και Υπογείων Έργων (Ε.Ε.Σ.Υ.Ε.)
Μέλος της International Tunneling Association (I.T.A.)

www.eesy.gr

Αθήνα - 30 Ιανουαρίου 2012

Πρόσφατες Εξελίξεις στον Σχεδιασμό Συγκοινωνιακών Σηράγγων

Μ. ΚΑΒΒΑΔΑΣ

Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ – ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ

Πρόσφατες Εξελίξεις στον Σχεδιασμό Συγκοινωνιακών Σηράγγων

ΘΕΜΑΤΟΛΟΓΙΟ

A. Μέτωπο Εκσκαφής :

Ανάλυση Συμπεριφοράς & Μέθοδοι Ενίσχυσης

B. Τελική Επένδυση :

Φορτία Σχεδιασμού & Χρήση Άοπλων Επενδύσεων

Το υλικό της παρουσίασης βασίζεται στις εξής Διδακτορικές Διατριβές, αρκετές Διπλωματικές Εργασίες και την υπό εξέλιξη έρευνα στο ΕΜΠ :

- **Ι. Σπυρόπουλος** (2007) : «Διερεύνηση του Μετώπου Εκσκαφής Σηράγγων Μεγάλου Βάθους»
- **Γ. Προυντζόπουλος** (υπό περάτωση) : «Διερεύνηση της Ευστάθειας Μετώπου Εκσκαφής Αβαθών Σηράγγων»
- **Π. Φορτσάκης** (2012) : «Διερεύνηση της στατικής αλληλεπίδρασης του περιβάλλοντος εδάφους/βράχου και της τελικής επένδυσης σηράγγων»

A. Μέτωπο Εκσκαφής :

Ανάλυση Συμπεριφοράς & Μέθοδοι Ενίσχυσης

B. Τελική Επένδυση :

Φορτία Σχεδιασμού & Χρήση Άοπλων Επενδύσεων



Συμπεριφορά Μετώπου Εκσκαφής - Μέθοδοι Ενίσχυσης

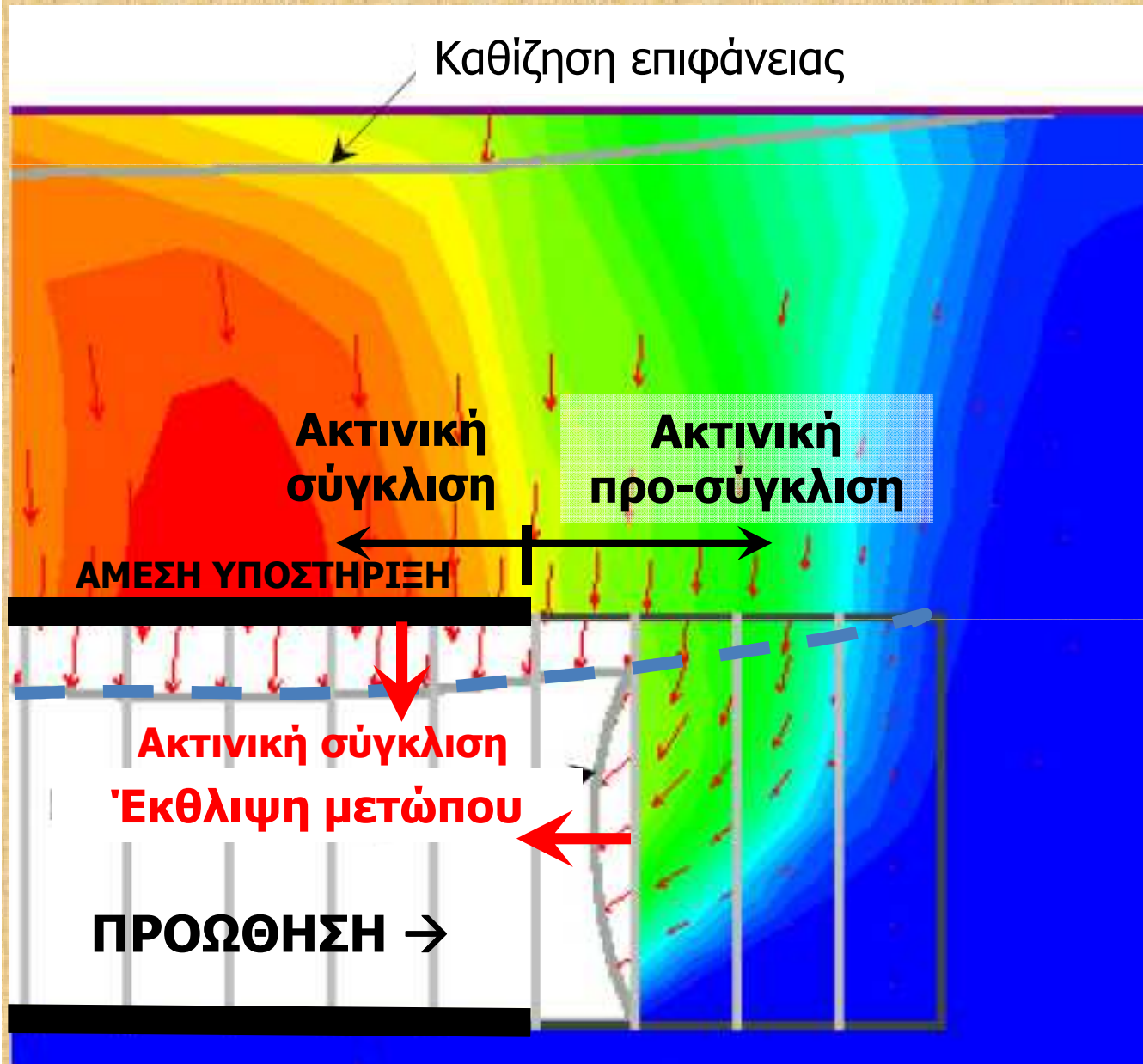
Σημασία του μετώπου εκσκαφής :

- Οι περισσότερες αστοχίες σηράγγων οφείλονται σε αστάθεια του μετώπου εκσκαφής (βαθείς και αβαθείς σήραγγες)
- Το σύνολο σχεδόν των καθιζήσεων στην επιφάνεια οφείλονται σε έκθλιψη του μετώπου (αβαθείς σήραγγες)
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην αξιόπιστη πρόβλεψη των επερχόμενων γεωτεχνικών συνθηκών (και συνεπώς στον σχεδιασμό της διάνοιξης & άμεσης υποστήριξης)

Η σημασία του μετώπου εκσκαφής είναι υποβαθμισμένη :

- Η ανάλυση του μετώπου εκσκαφής είναι δυσχερής (3-Δ) ενώ η ανάλυση εν-διατομή είναι ευχερέστερη (2-Δ)

Σύγκριση αναλύσεων εν-διατομή και μετώπου εκσκαφής



Ανάλυση εν-διατομή (ακτινική σύγκλιση) :

- Μετράται μικρό ποσοστό της συνολικής σύγκλισης (5-15%)
- Επηρεάζεται από τα μέτρα υποστήριξης
- Δυσχερώς μετρήσιμη (κοντά στο μέτωπο)

Έκθλιψη μετώπου (αξονική σύγκλιση) :

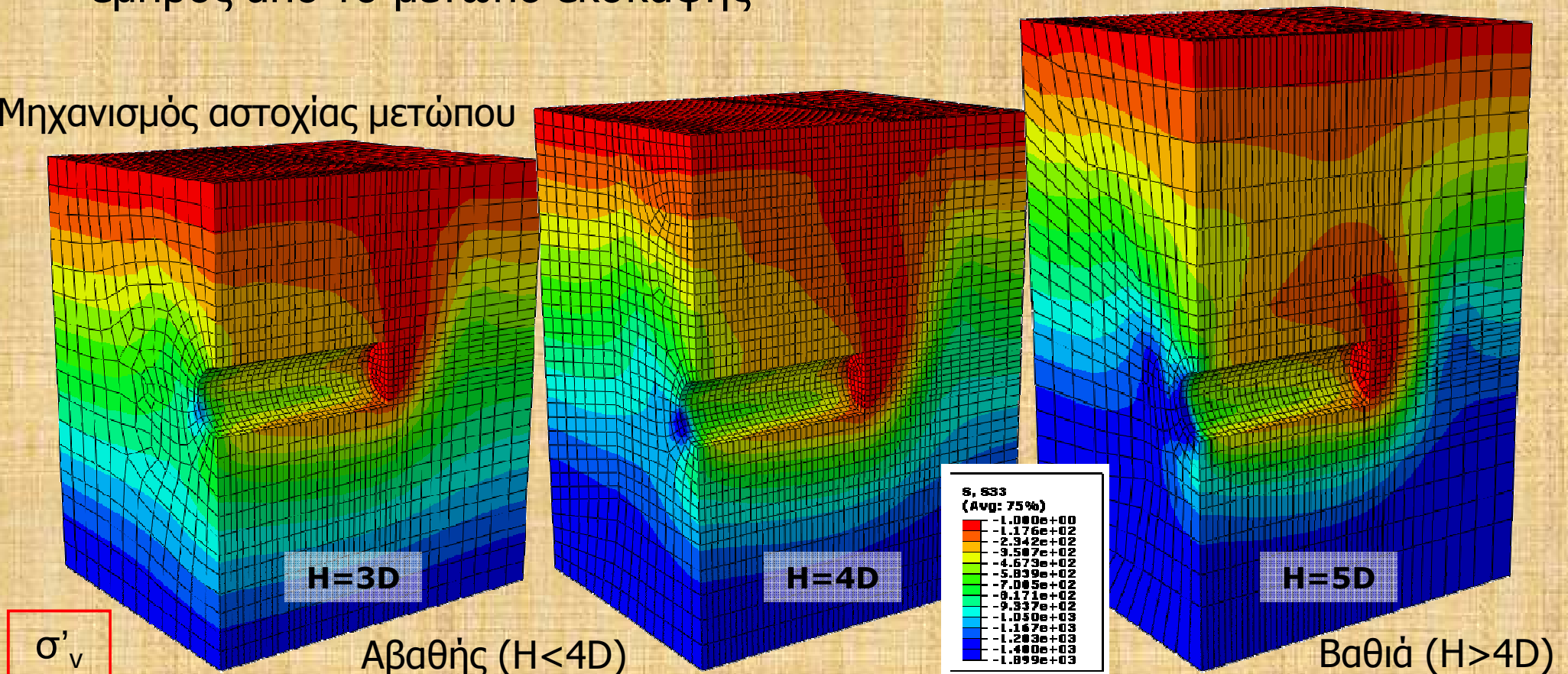
- Μέτρο ελέγχου της ευστάθειας του μετώπου
- Δεν επηρεάζεται από τα μέτρα υποστήριξης
- Μετρήσιμη ποσότητα στο σύνολό της

Ανάλυση Ευστάθειας του Μετώπου Εκσκαφής

Σκοπός :

1. Μηχανισμός αστοχίας μετώπου εκσκαφής (αβαθείς / βαθιές σήραγγες)
2. Υπολογισμός της οριακής πίεσης αστοχίας του μετώπου (p_f)
3. Υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας (FS) ελεύθερου και ενισχυμένου μετώπου
4. Χρήση της έκθλιψης (U) για την εκτίμηση των γεωτεχνικών συνθηκών εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής

Μηχανισμός αστοχίας μετώπου



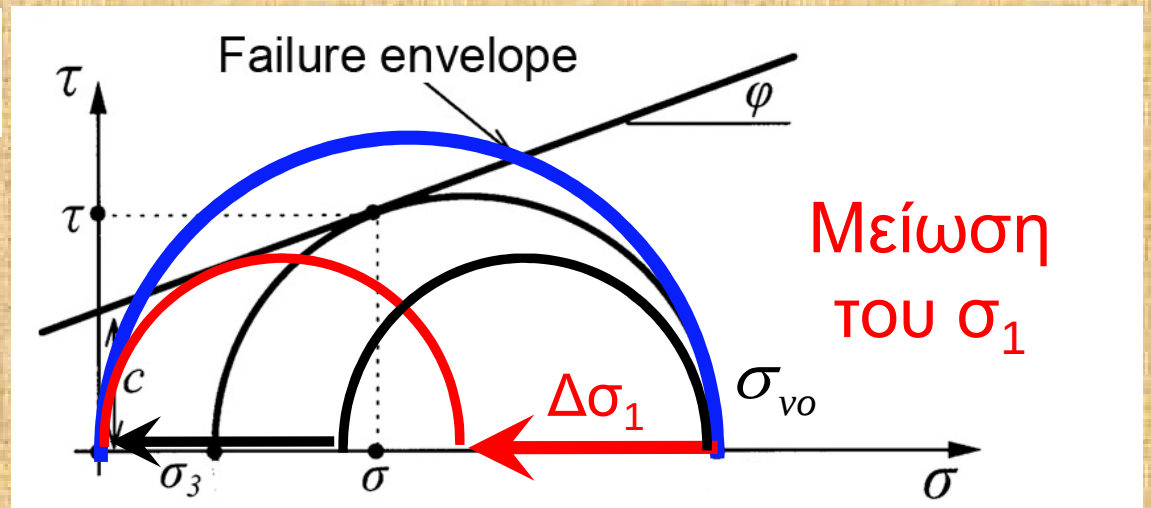
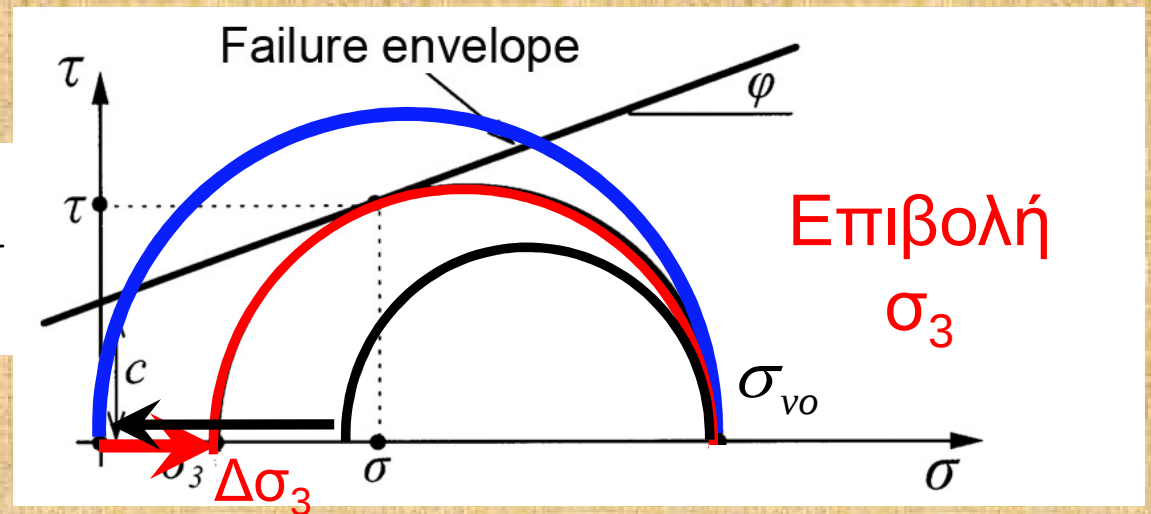
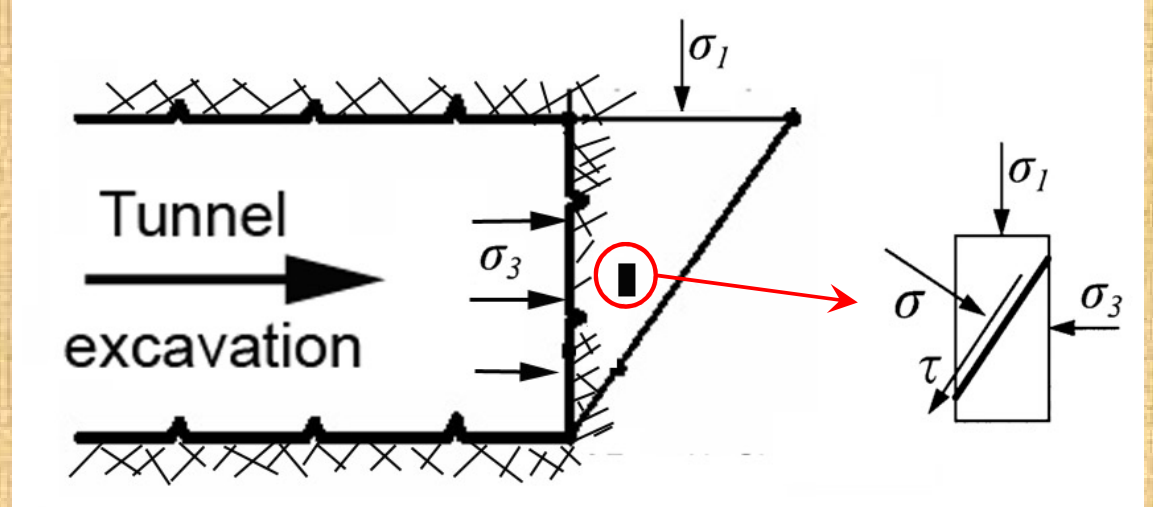
Ευστάθεια του Μετώπου Εκσκαφής

Εκτίμηση οριακής πίεσης μετώπου (p_f)

$$p_f = \Delta\sigma_3 = \frac{\sigma_{vo} - 2c \tan(45 + \phi/2)}{\tan^2(45 + \phi/2)}$$

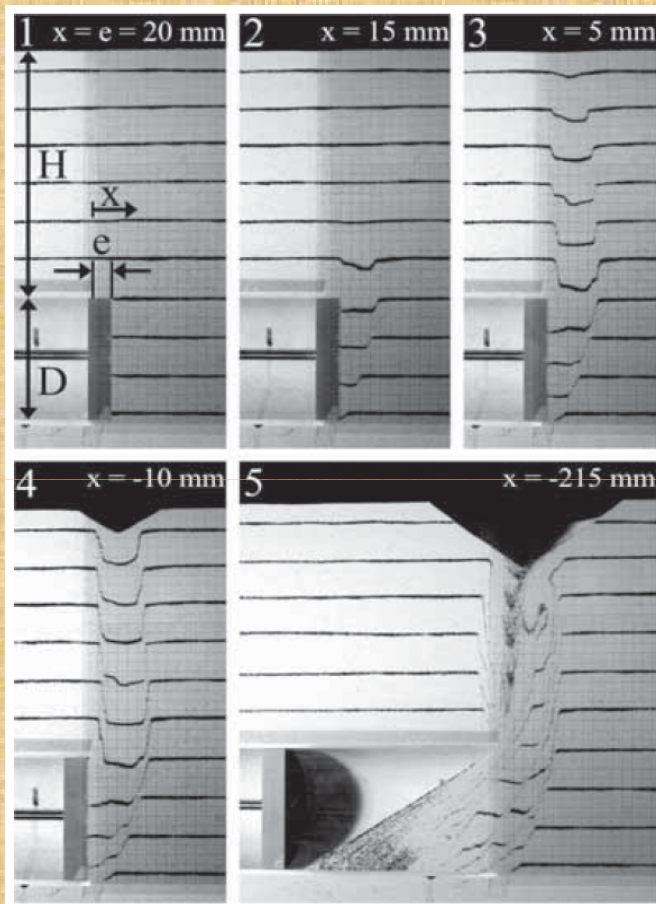
$$\Delta\sigma_1 = \sigma_{vo} - 2c \tan(45 + \phi/2)$$

Για την ίδια βελτίωση ευστάθειας
απαιτείται πολλαπλάσια μείωση
του σ_1 απ' ότι αύξηση του σ_3
 $\Delta\sigma_1 \approx 4 \Delta\sigma_3$

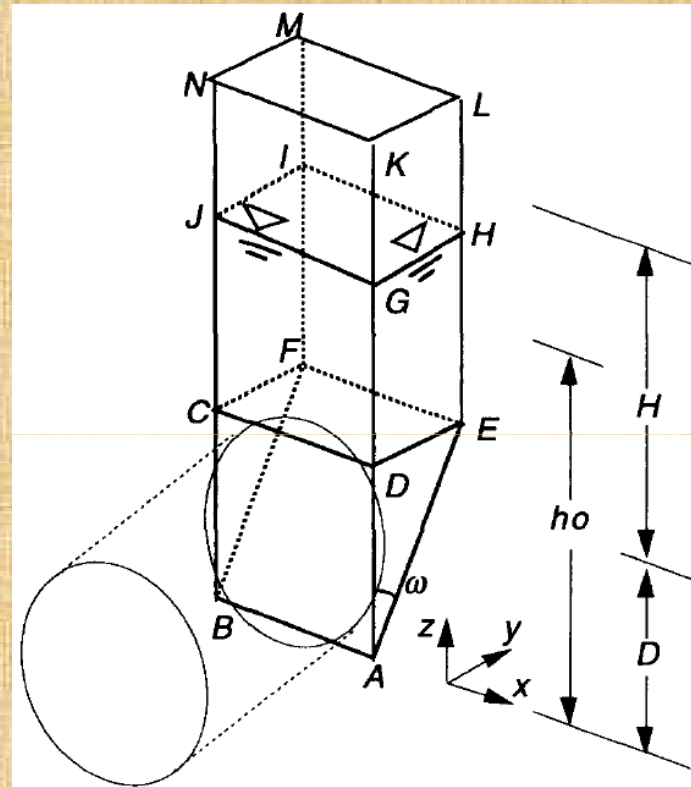


Μέθοδοι ανάλυσης της ευστάθειας του μετώπου

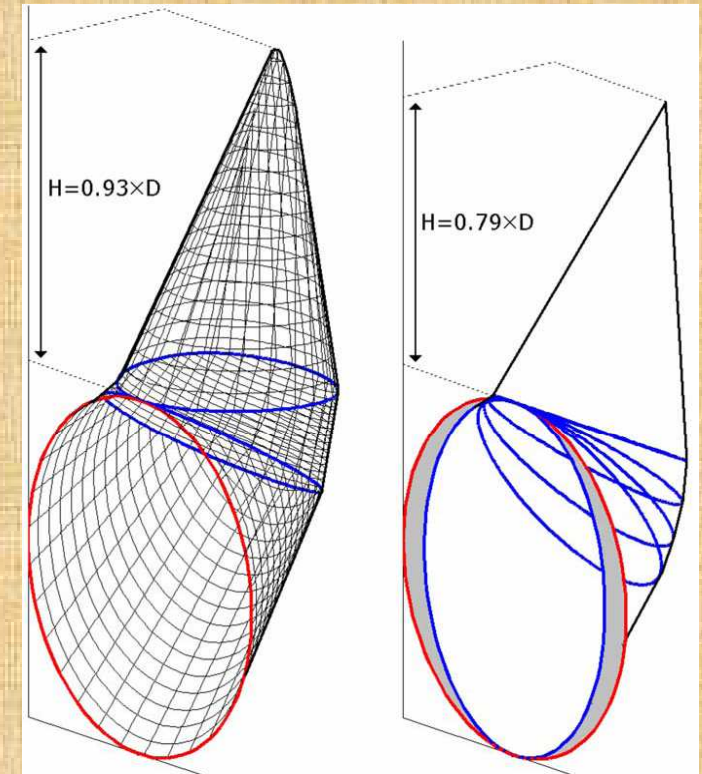
- Πειραματικές (φυσικά μοντέλα, υπό κλίμακα, σε φυγοκεντριστή)
- Αναλυτικές οριακής ισορροπίας (κινηματικώς-UB ή στατικώς-LB αποδεκτές)
- **Αριθμητικές (πεπερασμένα στοιχεία, πεπερασμένες διαφορές, κλπ)**



Messerli et al (2010)



Horn (1961)
Anagnostou & Kovari (1996)



Mollon et al. (2009, 2010)

Ανάλυση της ευστάθειας του μετώπου με πεπερασμένα στοιχεία

Παράμετρος	Εύρος Τιμών	Πλήθος Τιμών
Διάμετρος Σήραγγας, D (m)	7m & 10m	2
Βάθος / Διάμετρος Σήραγγας, H/D	1 ÷ 10	7
Συντελεστής Οριζοντίων Τάσεων, K	0.5 & 1	2
Γωνία Τριβής, φ(°)	20° ÷ 35°	4
Συνοχή, c (kPa)	5 ÷ 90	Αναλόγως H, φ

$\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$
 Διαστολικότητα $\delta = \phi/6$
 $A = 1/3$

≈ 400 αναλύσεις

**Προυντζόπουλος
(2012)**

Μέτρο ελαστικότητας (E) :

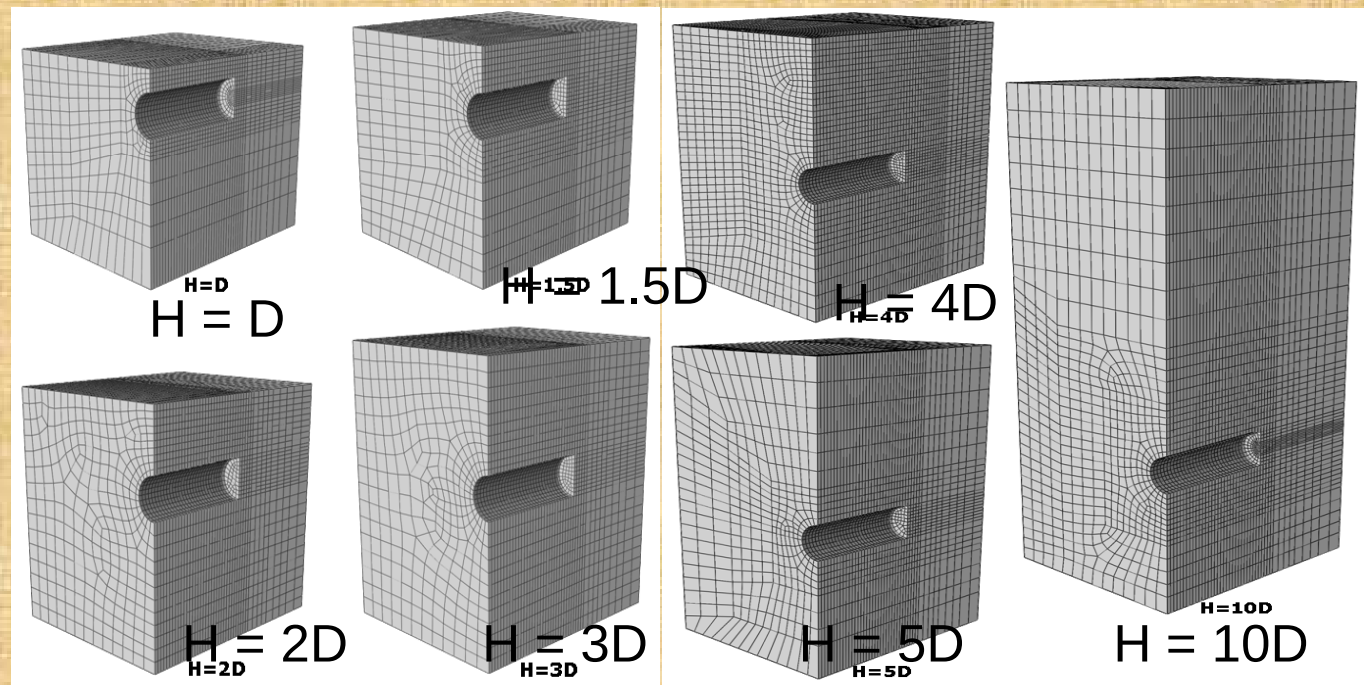
$$(\sigma'_{vo}, K) + (c, \phi) + (A) \rightarrow c_u = \left[\frac{\sqrt{N_\phi}}{1 + A(N_\phi - 1)} \right] c + \frac{1}{2} \left[(1 - K) + \frac{K N_\phi - 1}{1 + A(N_\phi - 1)} \right] \sigma'_{vo}$$

$$N_\phi = \tan^2(45 + \phi / 2)$$

c_u = αστράγγιστη διατμητική αντοχή

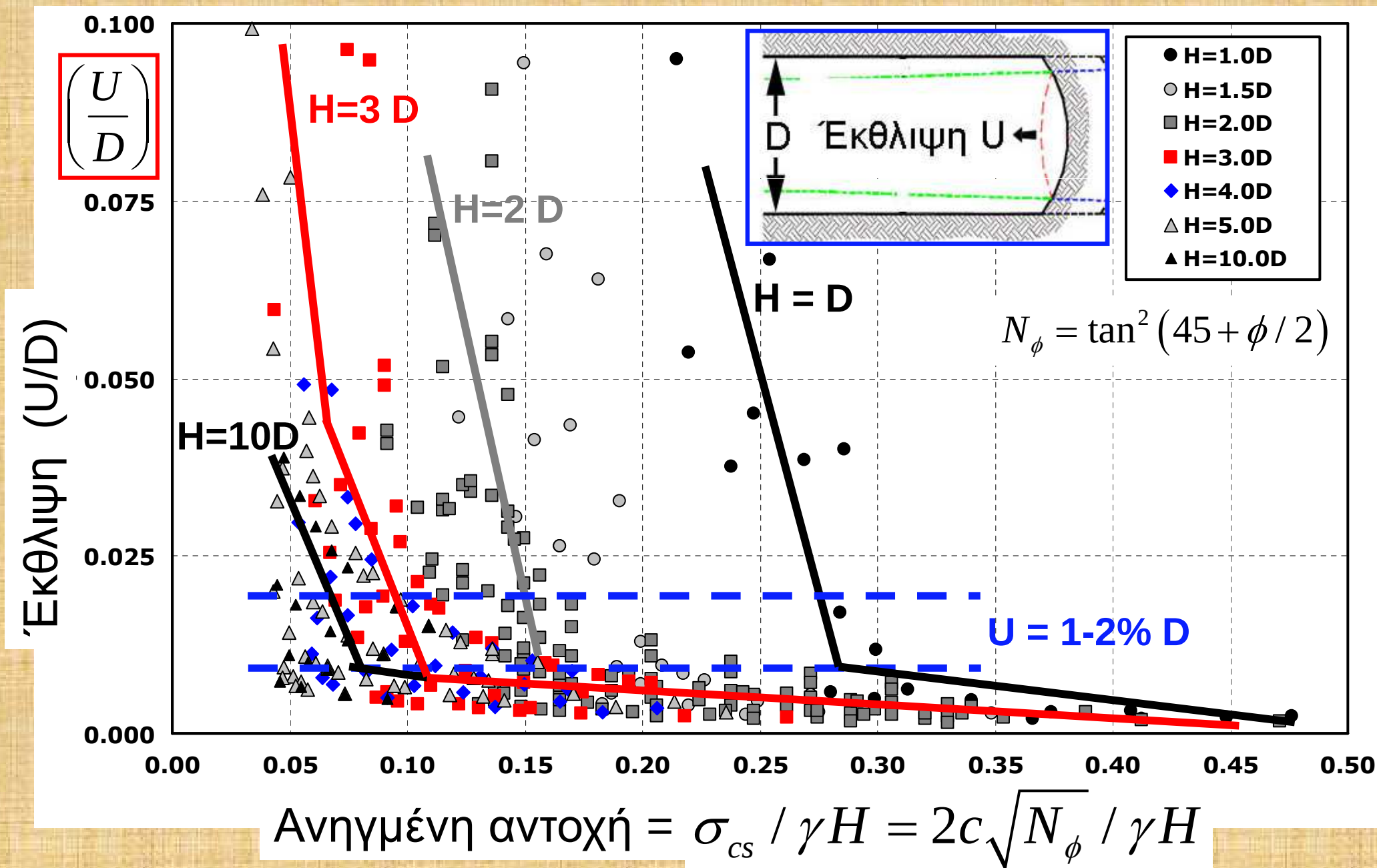
$$E = 500 c_u$$

$$(E = 300 c_u \div 800 c_u)$$



Ανάλυση της ευστάθειας του μετώπου εκσκαφής με πεπερασμένα στοιχεία

Ανυποστήρικτο Μέτωπο - αποτελέσματα περίπου 400 αναλύσεων



Συμπεριφορά Ανυποστήρικτου Μετώπου Εκσκαφής

Ω_f = Ανηγμένη Έκθλιψη Μετώπου

U : Μέση Οριζόντια Μετακίνηση του μετώπου εκσκαφής (Έκθλιψη) , $U \approx 2/3 U_{\max}$

D : Διάμετρος σήραγγας

E : Μέτρο ελαστικότητας εδάφους

p_0 : Μέση γεωστατική τάση

$$p_0 = \frac{1}{2} (1+K) \gamma H$$

H = βάθος σήραγγας

K = συντελεστής οριζόντιας τάσης

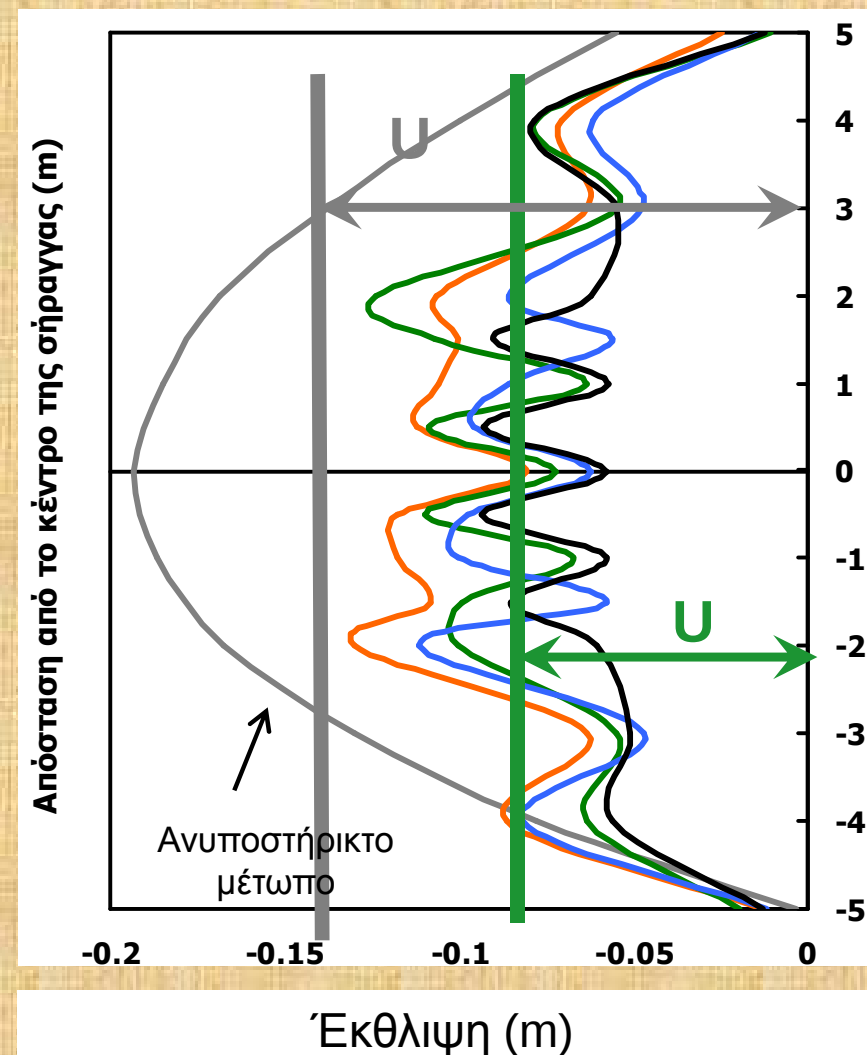
Λ_f = Συντελεστής Ευστάθειας Μετώπου

$$\Lambda_f = \frac{5.25 c (N_\phi)^a}{\gamma (H)^{1-b} (D)^b}$$

$$a = 0.16(H/D) + 0.59 \approx 0.75 \div 1.35$$

$$b = (H/D)^{-0.37} \approx 1.0 \div 0.6$$

$$\Omega_f = \left(\frac{U}{D} \right) \left(\frac{E}{p_0} \right)$$



19 Nails 26 Nails 33 Nails 45 Nails

Συμπεριφορά Ανυποστήρικτου Μετώπου Εκσκαφής ($H/D < 5$)

$$\Omega_f = \left(\frac{U}{D} \right) \left(\frac{E}{p_o} \right)$$

$$N_\phi = \tan^2 \left(45 + \phi / 2 \right)$$

- $H=1.0D$
- $H=1.5D$
- $H=2.0D$
- $H=3.0D$
- ◆ $H=4.0D$
- △ $H=5.0D$

Ανηγμένη έκθλιψη Ω_f

$$a = 0.16(H/D) + 0.59 \approx 0.75 \div 1.35$$

$$b = (H/D)^{-0.37} \approx 1.0 \div 0.6$$

Αστοχία Μετώπου $\rightarrow \Lambda_f = 1$

$$\Lambda_f = \frac{5.25c(N_\phi)^a}{\gamma(H)^{1-b}(D)^b}$$

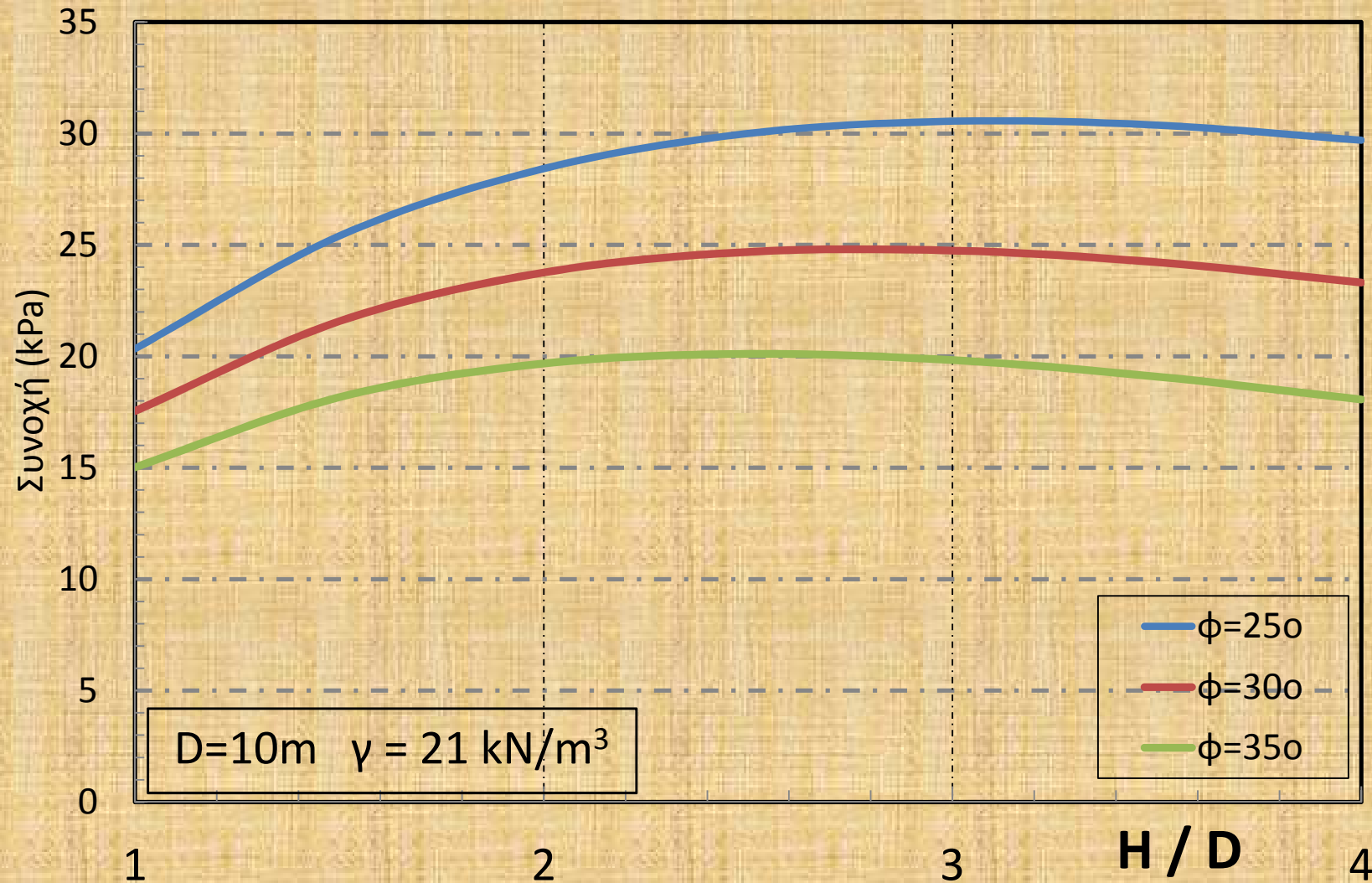
αύξουσα δυσχέρεια

0.00 0.25 0.50 0.75 1.00 1.25 1.50 1.75 2.00 2.25 2.50

Ανηγμένη αντοχή Λ_f

Συμπεριφορά Ανυποστήρικτου Μετώπου Εκσκαφής ($H/D < 5$)

Καταστάσεις αστοχίας μετώπου : $\Lambda_f = 1$



$$\Lambda_f = \frac{5.25c(N_\phi)^a}{\gamma(H)^{1-b}(D)^b}$$

$$N_\phi = \tan^2(45 + \phi/2)$$

$$a = 0.16(H/D) + 0.59$$

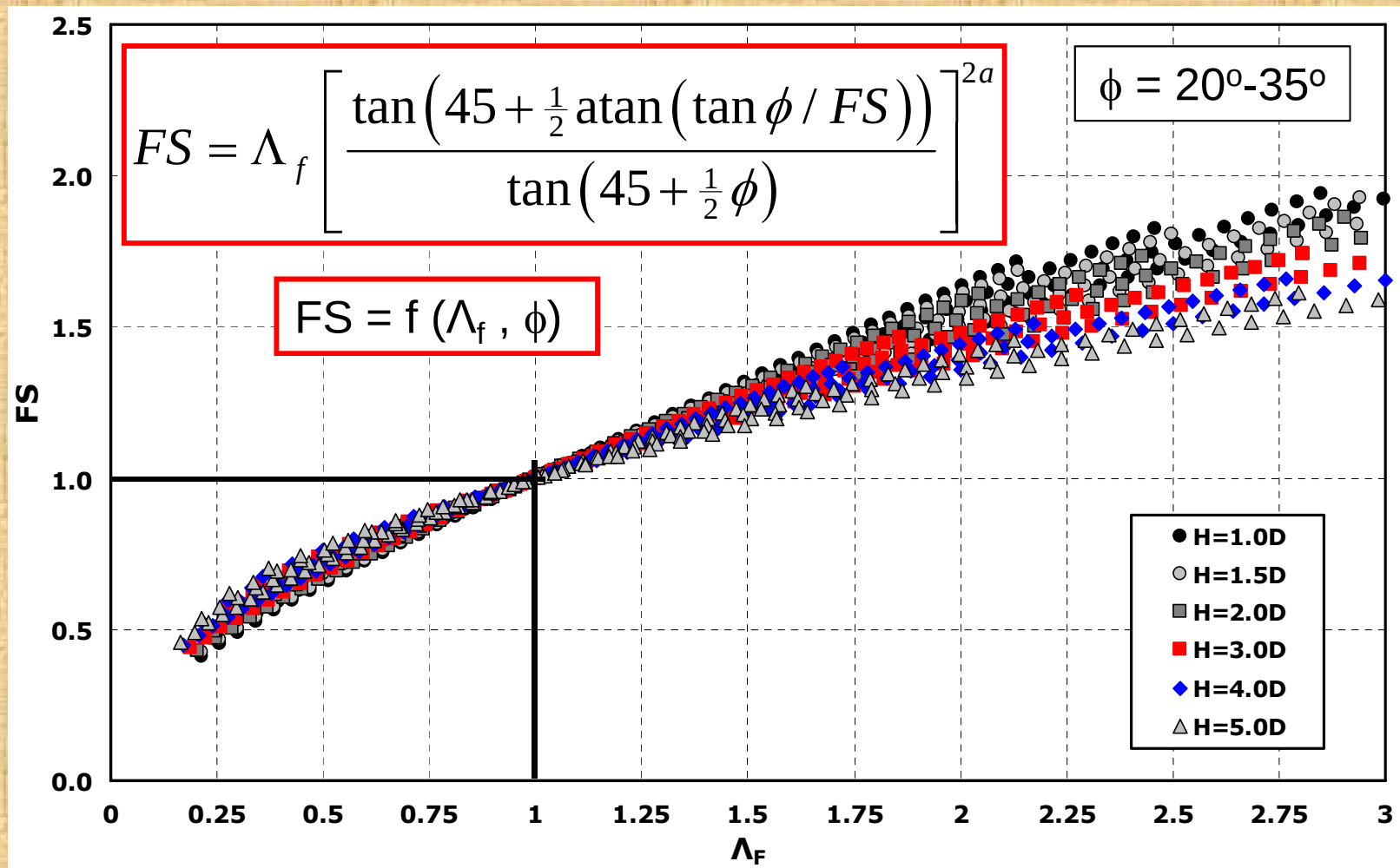
$$b = (H/D)^{-0.37}$$

Συμπεριφορά Ανυποστήρικτου Μετώπου Εκσκαφής ($H/D < 5$)

Υπολογισμός του Συντελεστή Ασφαλείας (FS) του μετώπου εκσκαφής

$$\Lambda_f = \frac{5.25 c (N_\phi)^a}{\gamma (H)^{1-b} (D)^b} \Rightarrow 1 = \frac{5.25 c_f (N_{\phi,f})^a}{\gamma (H)^{1-b} (D)^b}$$

$$c_f = \frac{c}{FS}, \quad \phi_f = \text{atan}\left(\frac{\tan \phi}{FS}\right)$$



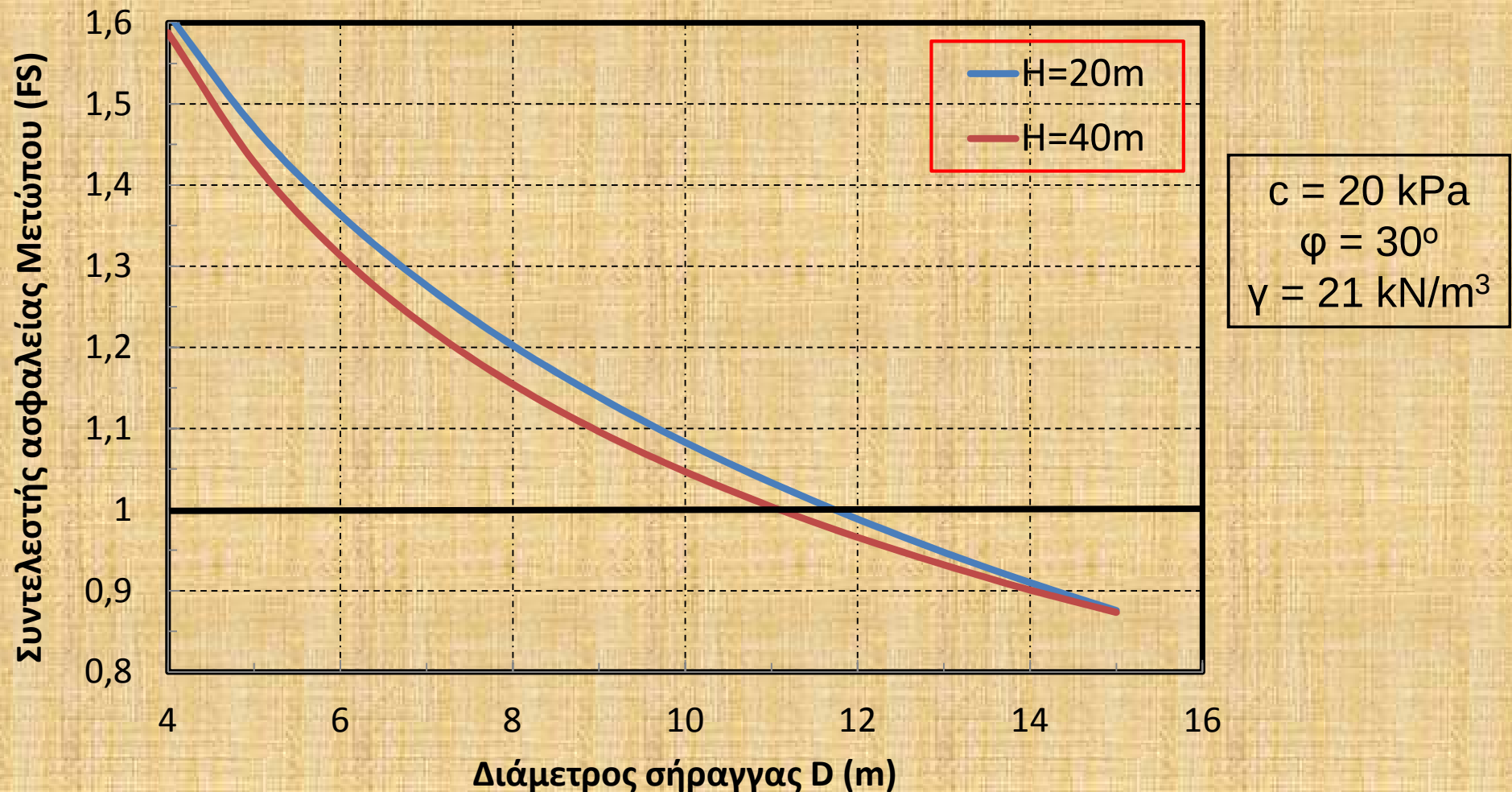
Συμπεριφορά Ανυποστήρικτου Μετώπου Εκσκαφής ($H/D < 5$)

Υπολογισμός του Συντελεστή Ασφαλείας (FS) του μετώπου εκσκαφής

Μέθοδος : (H/D), c , ϕ , $\gamma \Rightarrow \Lambda_f$. Εάν $\Lambda_f < 1 \rightarrow$ αστάθεια. Εάν $\Lambda_f > 1 \rightarrow$ **FS = f (Λ_f , ϕ)**

$$\Lambda_f = \frac{5.25c(N_\phi)^a}{\gamma(H)^{1-b}(D)^b}$$

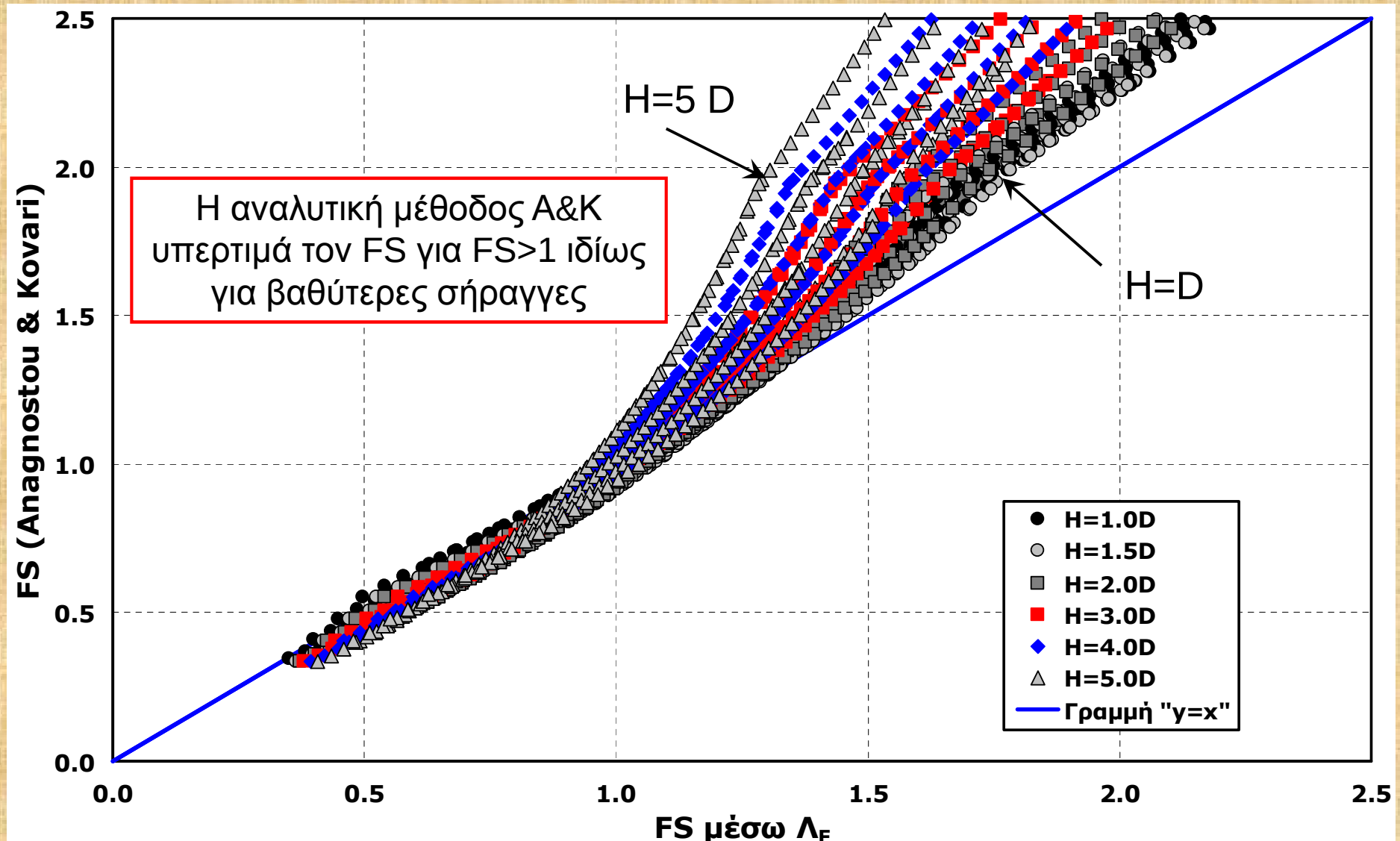
$$FS = \Lambda_f \left[\frac{\tan\left(45 + \frac{1}{2} \operatorname{atan}\left(\tan \phi / FS\right)\right)}{\tan\left(45 + \frac{1}{2} \phi\right)} \right]^{2a}$$



Συμπεριφορά Ανυποστήρικτου Μετώπου Εκσκαφής

Υπολογισμός του Συντελεστή Ασφαλείας (FS) του μετώπου εκσκαφής

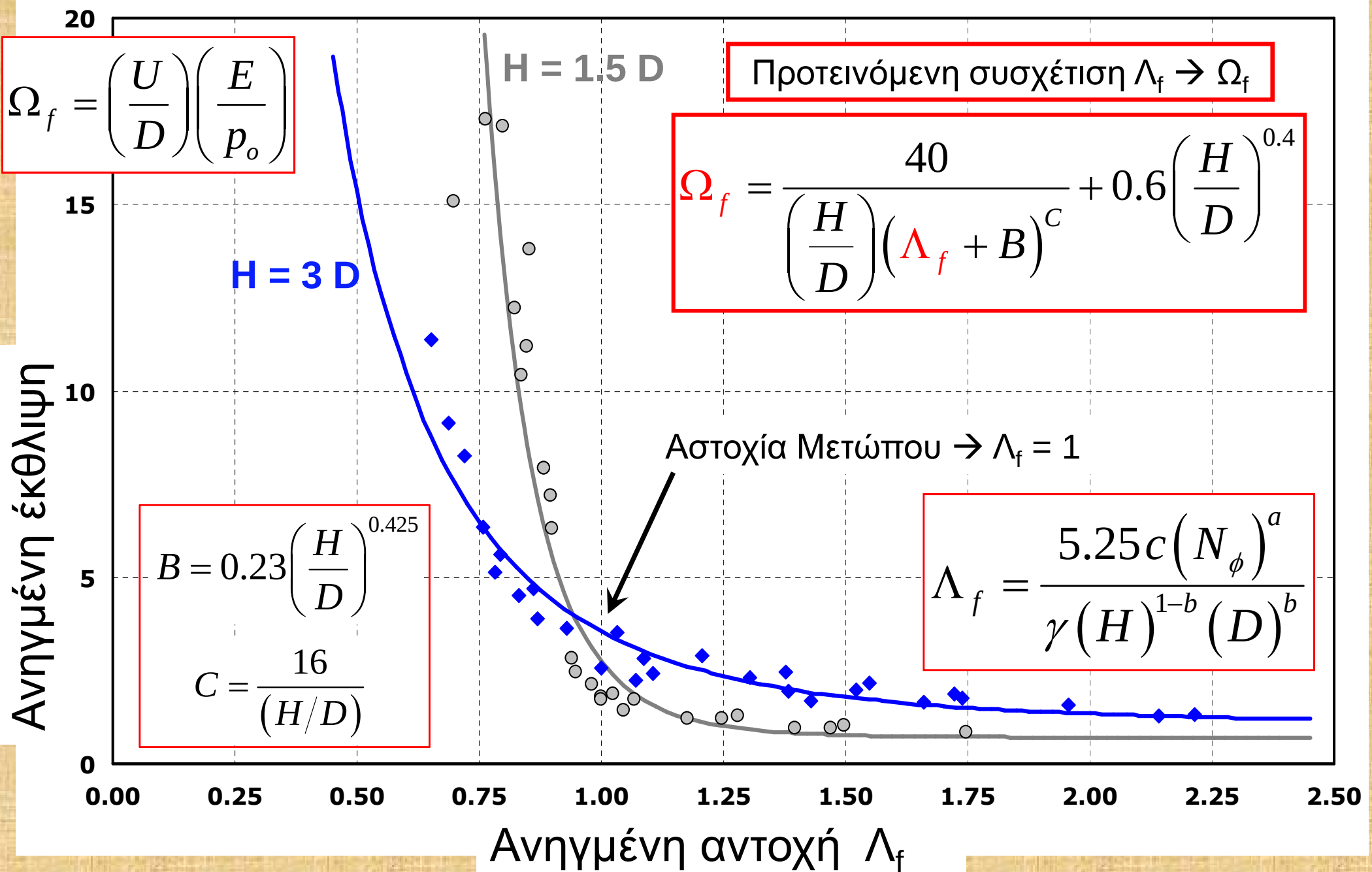
Σύγκριση με αναλυτική μέθοδο (Anagnostou & Kovari, 1996)



Anagnostou, G. and Kovári, K., 1996. "Face Stability Conditions with Earth-Pressure-Balanced Shields". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11, pp. 165-174.

Συμπεριφορά Ανυποστήρικτου Μετώπου Εκσκαφής ($H/D < 5$)

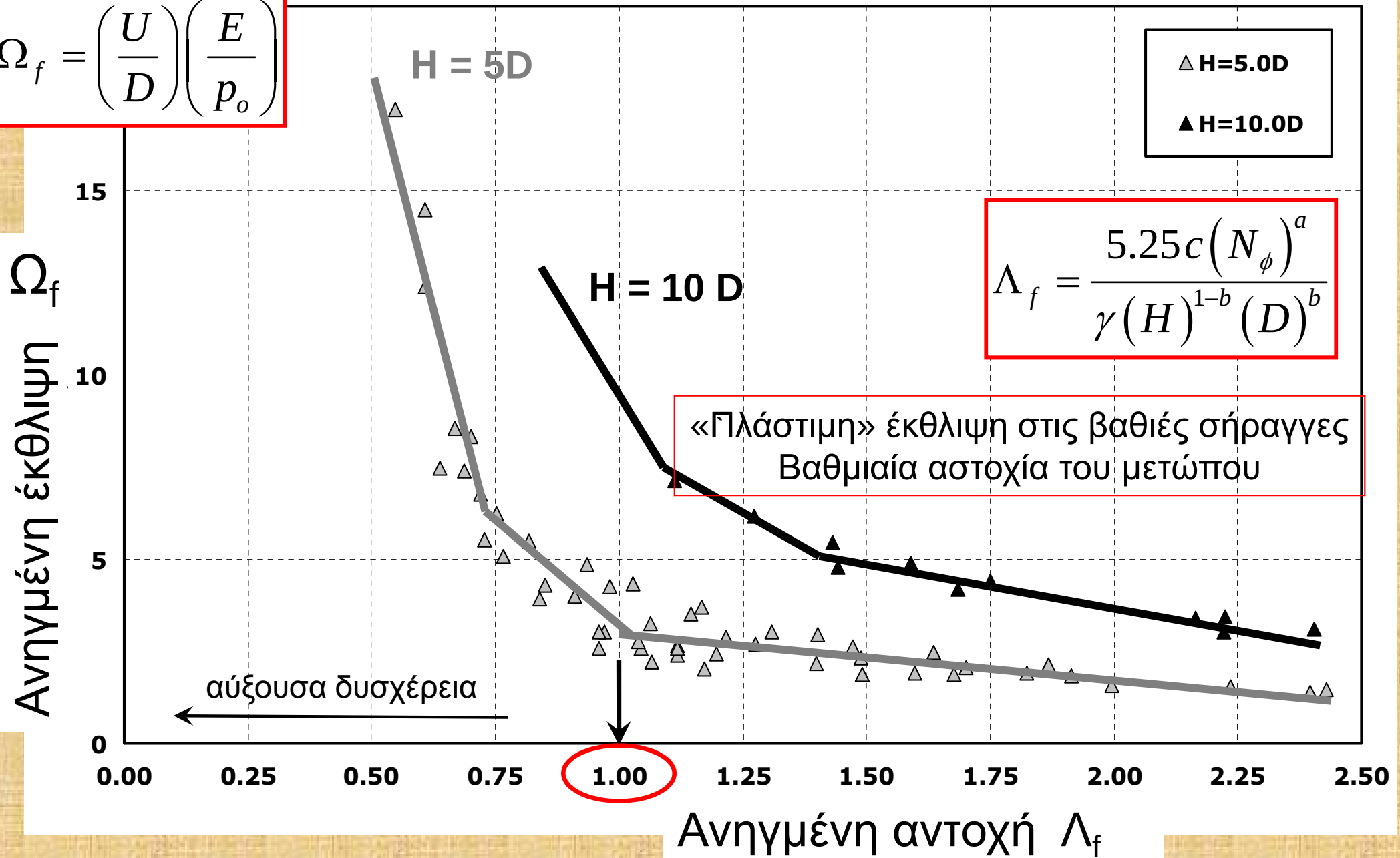
Συσχέτιση $\Lambda_f \rightarrow \Omega_f$ και σύγκριση με αριθμητικές αναλύσεις



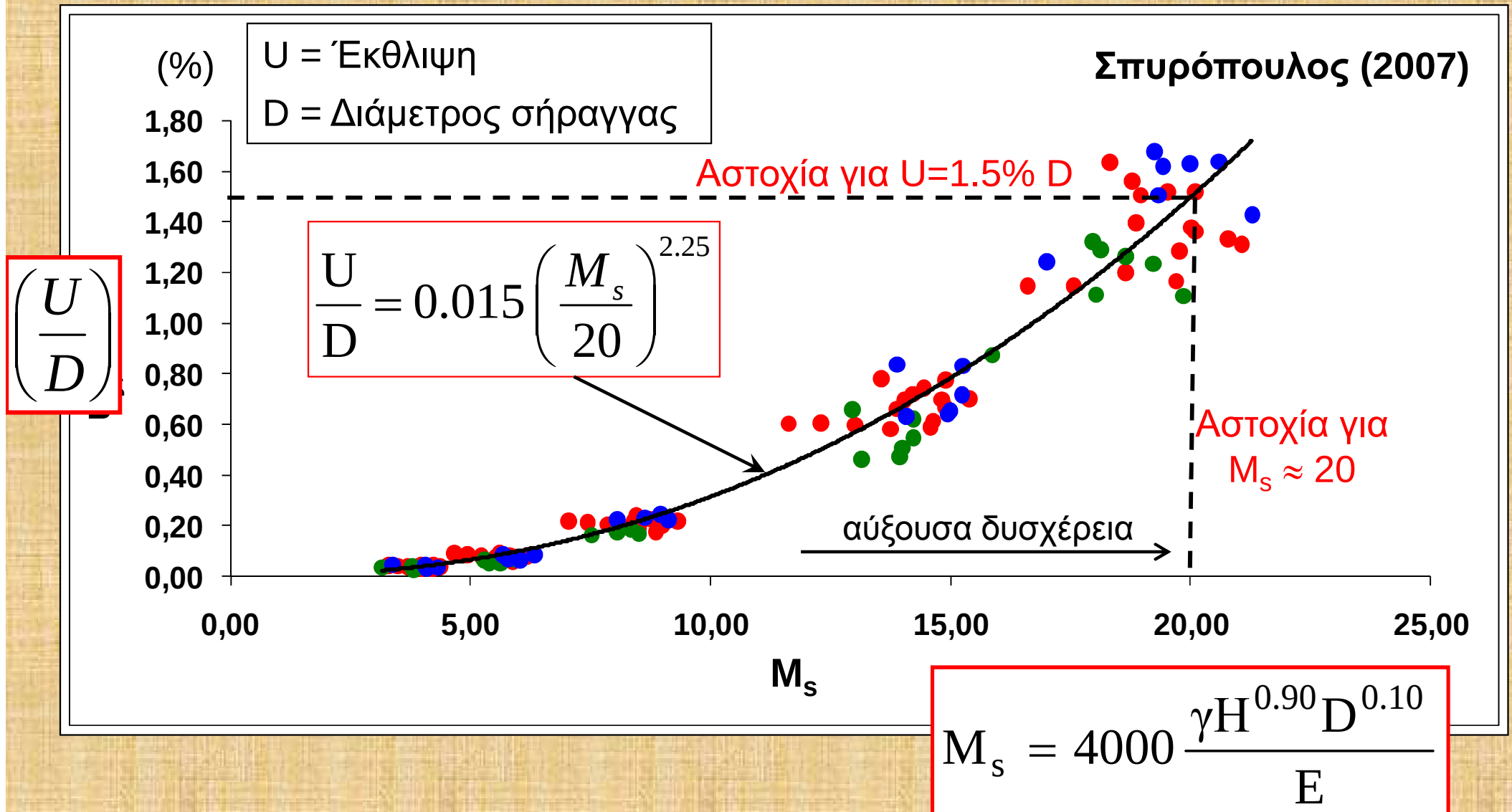
Συμπεριφορά Ανυποστήρικτου Μετώπου Εκσκαφής

Σύγκριση αβαθούς ($H/D < 5$) και βαθιάς σήραγγας ($H/D = 10$)

$$\Omega_f = \left(\frac{U}{D} \right) \left(\frac{E}{p_o} \right)$$



Συμπεριφορά Ανυποστήρικτου Μετώπου Εκσκαφής Βαθείς σήραγγες ($H/D > 5$)



Συμπεριφορά Ανυποστήρικτου Μετώπου Εκσκαφής

Χρήση μετρήσεων της έκθλιψης (U) για την πρόβλεψη των γεωτεχνικών συνθηκών εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής

1. Βαθείς σήραγγες (H/D>5) :

(U/D) → M_s → E → παράμετροι αντοχής

$$\frac{U}{D} = 0.015 \left(\frac{M_s}{20} \right)^{2.25} \quad M_s = 4000 \frac{\gamma H^{0.90} D^{0.10}}{E}$$

Η μέθοδος έχει εφαρμοσθεί σε τρείς σήραγγες (Kavvas & Spyropoulos, 2011)

2. Αβαθείς σήραγγες (H/D<5) :

(U/D) → Ω_f → Λ_f → (E , παράμετροι αντοχής)

$$\Omega_f = \left(\frac{U}{D} \right) \left(\frac{E}{p_o} \right) \quad \Omega_f = \frac{40}{\left(\frac{H}{D} \right) (\Lambda_f + B)^c} + 0.6 \left(\frac{H}{D} \right)^{0.4} \quad \Lambda_f = \frac{5.25c (N_\phi)^a}{\gamma (H)^{1-b} (D)^b}$$

$$a = 0.16(H/D) + 0.59$$

$$b = (H/D)^{-0.37}$$

$$N_\phi = \tan^2 (45 + \phi / 2)$$

Συμπεριφορά Ανυποστήρικτου Μετώπου Εκσκαφής

Χρήση μετρήσεων της έκθλιψης (U) για την πρόβλεψη των γεωτεχνικών συνθηκών εμπρός από το μέτωπο εκσκαφής

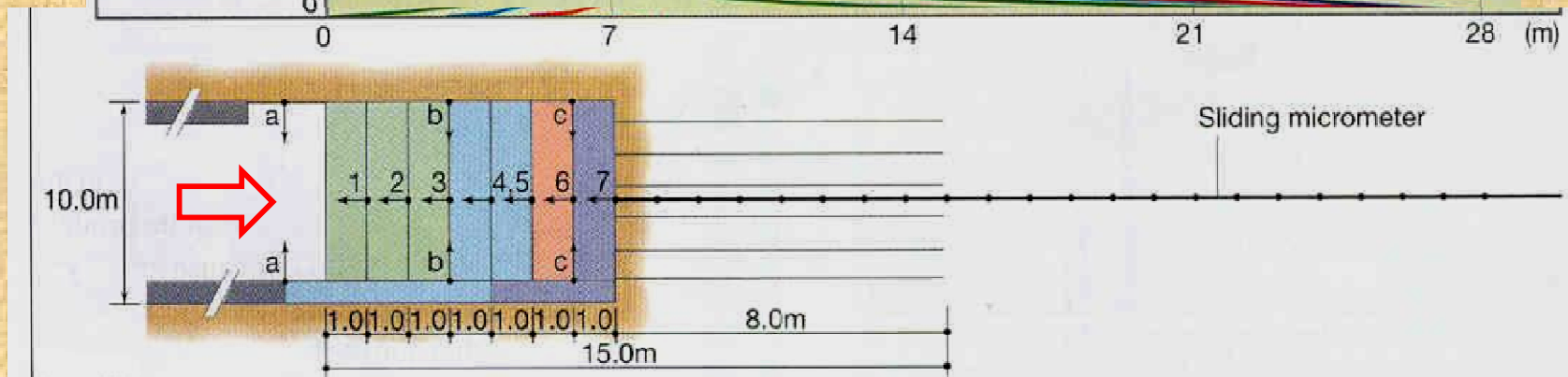
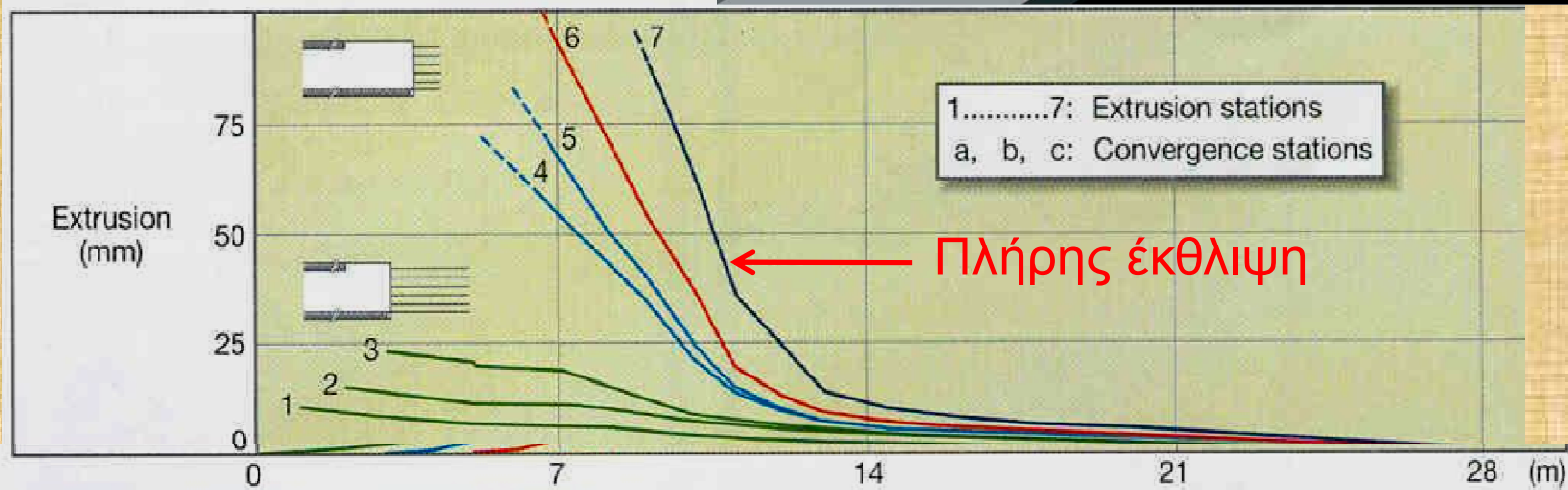
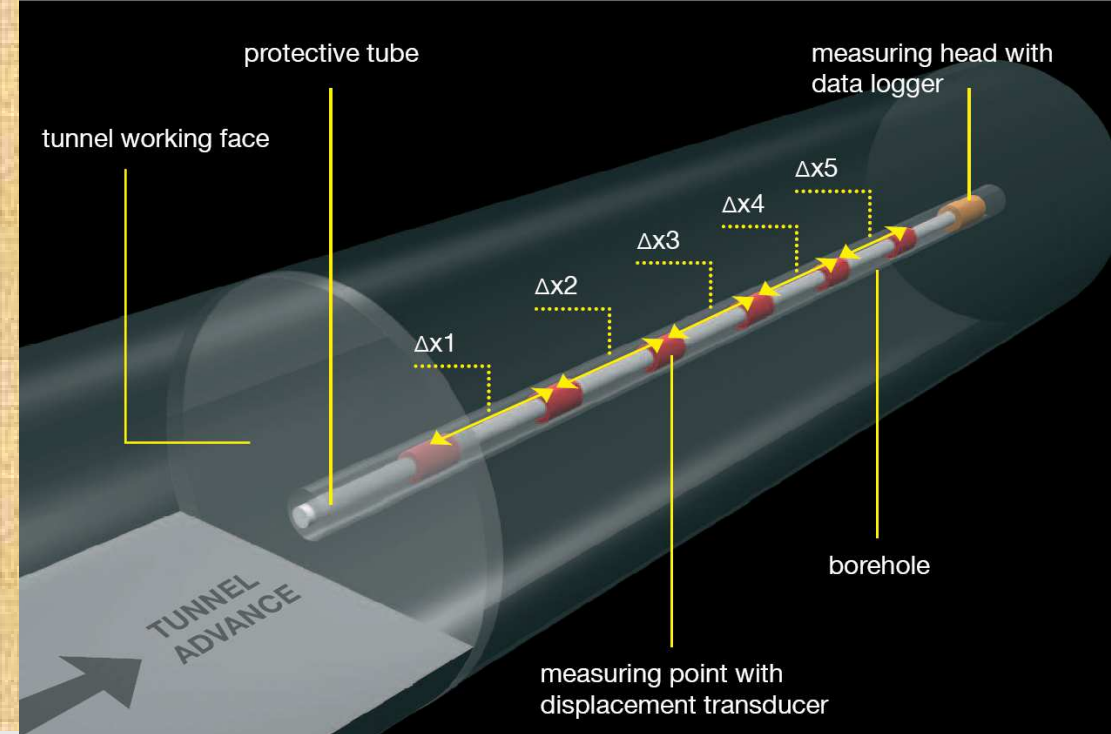
Παράδειγμα εφαρμογής σε αβαθή σήραγγα ($H/D = 3$) :

$$D = 10\text{m}, H = 30\text{m}, \gamma = 23 \text{ kN/m}^3, K = 0.60, \varphi = 35^\circ, E / \sigma_{cm} = 200$$

U (cm)	U/D	Λ_f	FS	C (kPa)	σ_{cm} (kPa)	E (MPa)
1	0,001	38		742	2570	514
2	0,002			371	1285	257
3	0,003			247	857	171
5	0,005			148	514	103
7	0,007			106	368	74
9	0,009			83	287	57
10	0,01			75	259	52
15	0,015			51	178	36
20	0,02			41	143	29
30	0,03	1,67	1,33	33	113	23
40	0,04	1,47	1,23	29	100	20
50	0,05	1,36	1,18	26	92	18
70	0,07	1,21	1,10	24	82	16
100	0,10	1,09	1,04	21	74	15
140	0,14	1,00	1,00	20	68	14

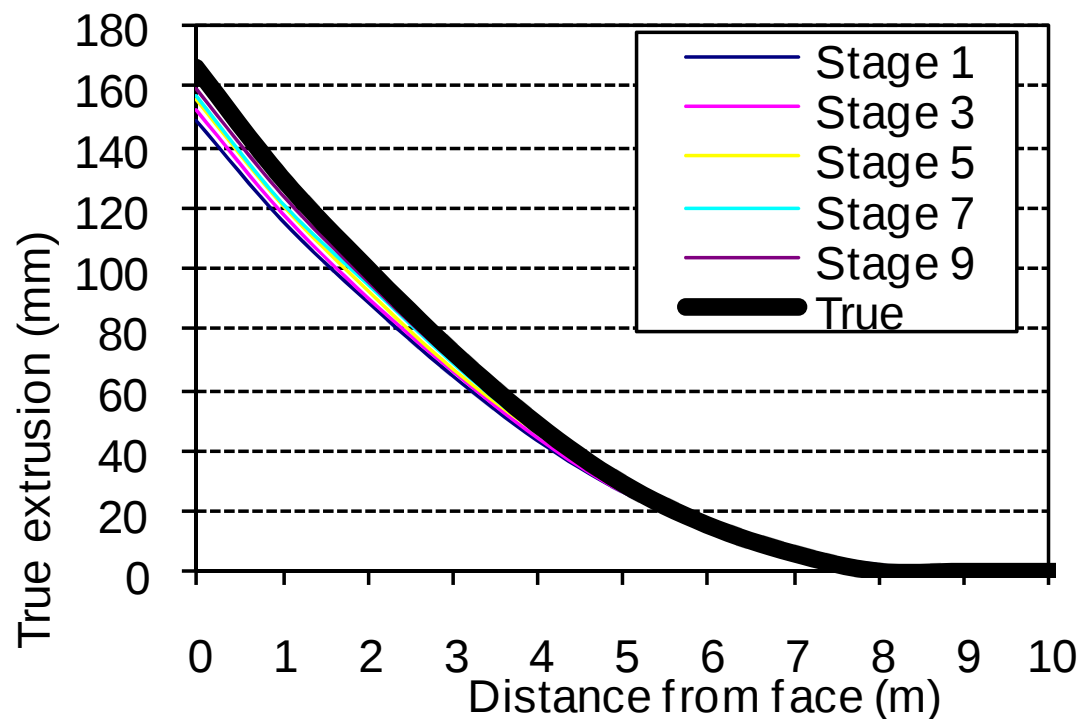
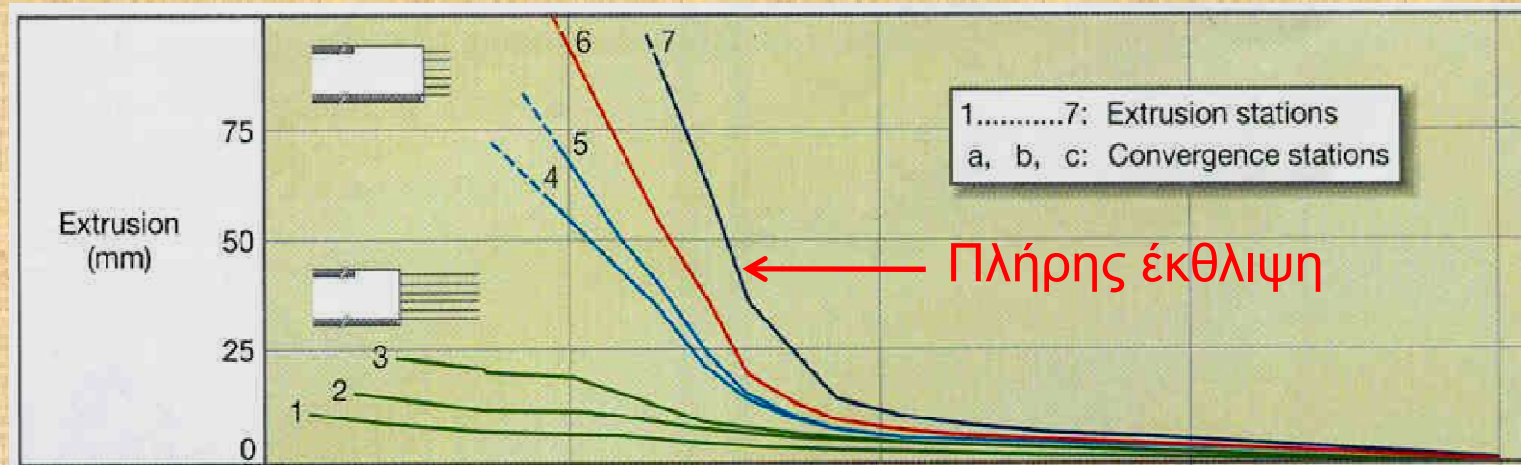
Μέτρηση της έκθλιψης του μετώπου

Τοποθέτηση «μικρομέτρου ολίσθησης»
σε γεώτρηση στον άξονα της σήραγγας



Μέτρηση της έκθλιψης του μετώπου

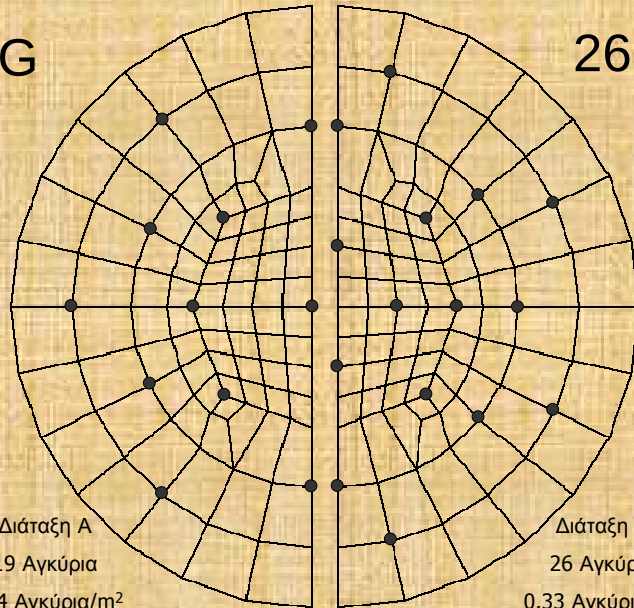
Υπολογισμός της πλήρους έκθλιψης (U) από τις μετρήσεις των πρώτων βημάτων



M. Kavvadas & I. Spyropoulos (2011)
"Use of face extrusion measurements in
assessing ground properties during
tunnel construction", Proc. 15th ECSMGE,
Athens

Ενίσχυση του Μετώπου Εκσκαφής με αγκύρια FG

19 FG



26 FG

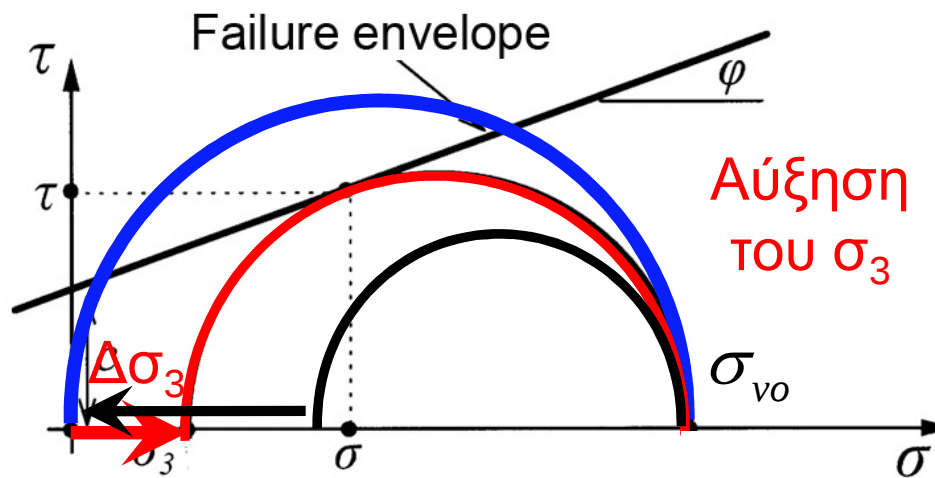
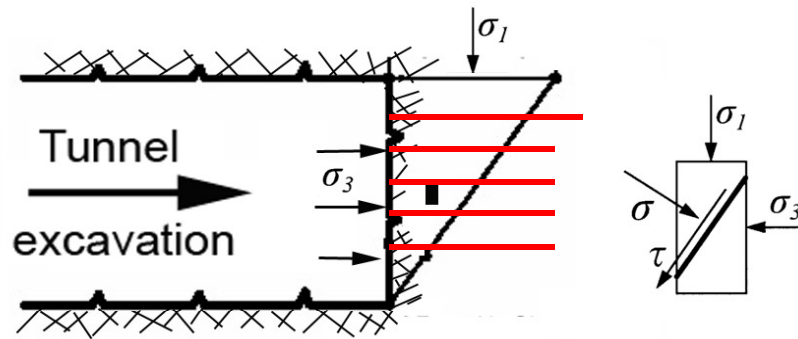
Διάταξη Β
26 Αγκύρια
0.33 Αγκύρια/m²

33 FG

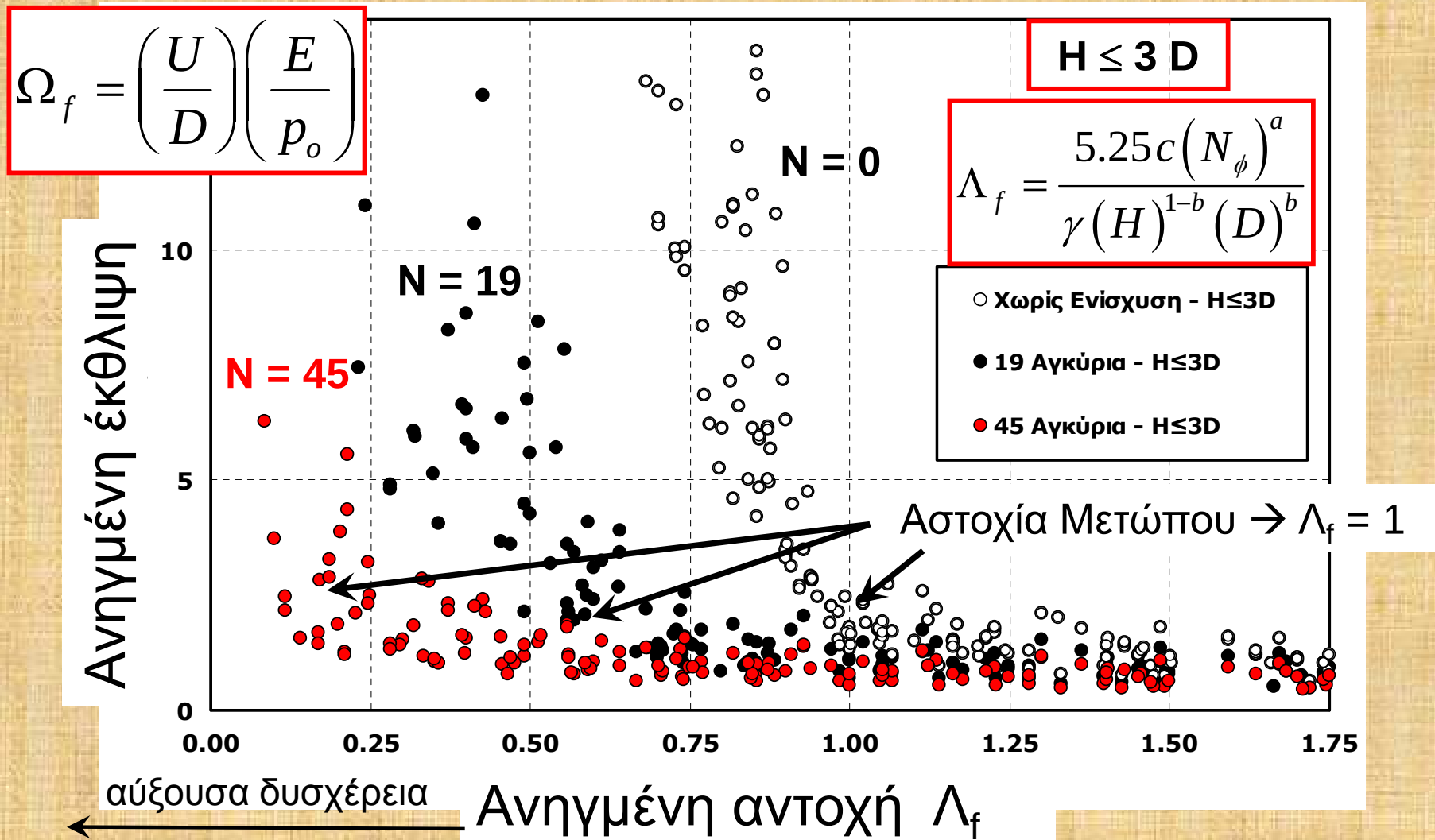
Διάταξη Γ
33 Αγκύρια
0.42 Αγκύρια/m²

45 FG

Διάταξη Δ
45 Αγκύρια
0.57 Αγκύρια/m²



Ενίσχυση του Μετώπου Εκσκαφής με αγκύρια FG



Έρευνα σε εξέλιξη (Προυντζόπουλος 2012) :

- Συσχέτιση της Έκθλιψης (U) και της «αστοχίας» με τον Συντελεστή Αντοχής (Λ_f), την πυκνότητα του κανάβου και το μήκος των αγκυρίων
- Υπολογισμός του συντελεστή ασφαλείας (FS) του μετώπου για συγκεκριμένο κάναβο και μήκος αγκυρίων

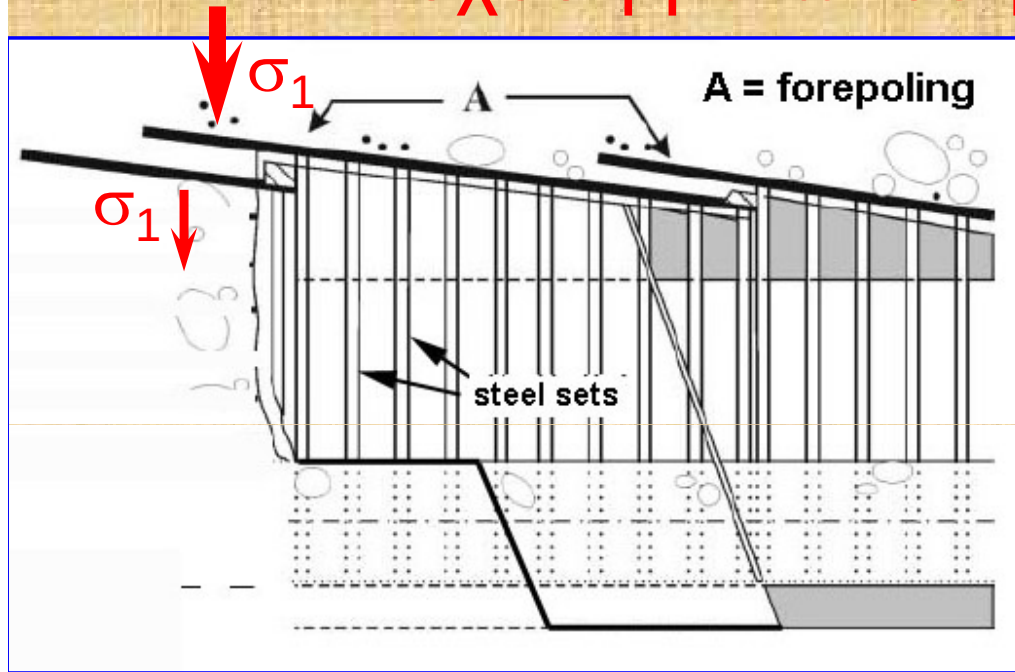
Ενίσχυση μετώπου με δοκούς προπορείας

Δοκοί
προπορείας

Χαλύβδινα
πλαίσια



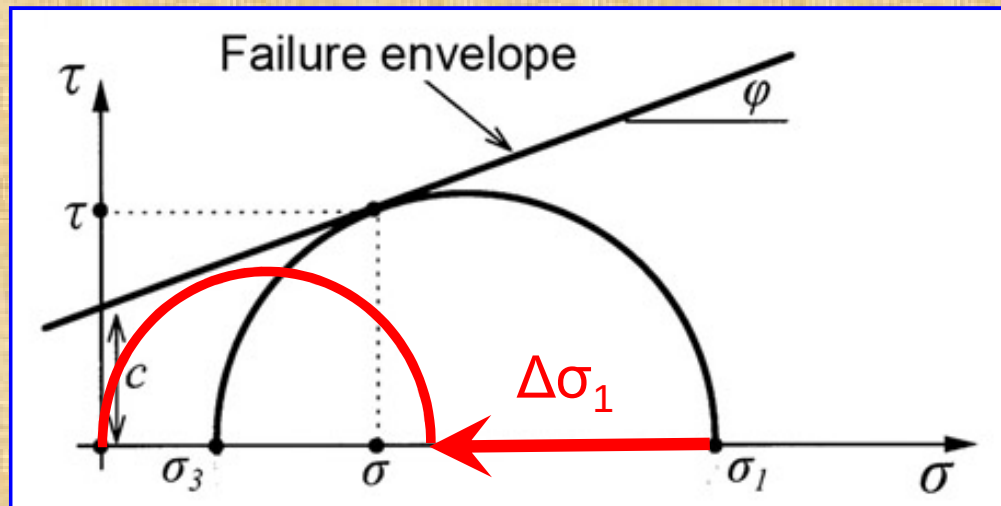
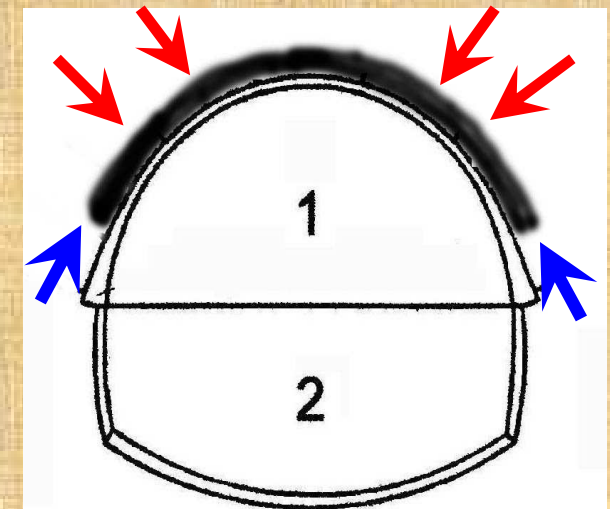
Ενίσχυση μετώπου με δοκούς προπορείας



Μείωση της σ_1 εμπρός από το μέτωπο

1. Απαιτείται επαρκής διείσδυση εμπρός
2. Απαιτούνται ισχυρά πλαίσια με καλή έδραση πίσω
3. Κάθε δοκός λειτουργεί ανεξάρτητα σε κάμψη

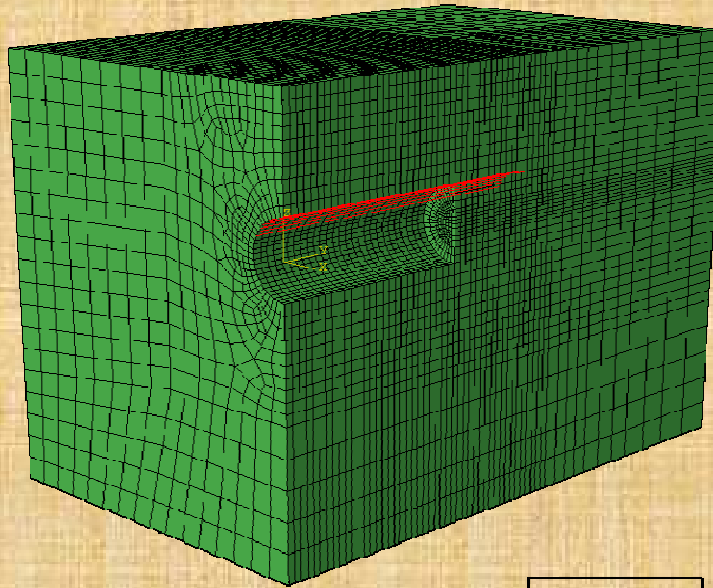
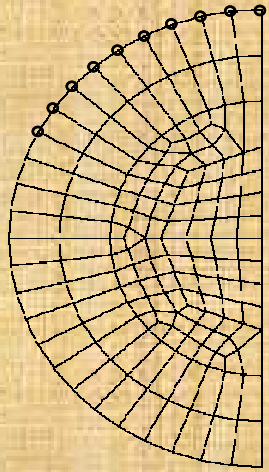
Εσφαλμένος μηχανισμός λειτουργίας των δοκών προπορείας



Για την ίδια βελτίωση ευστάθειας απαιτείται πολλαπλάσια μείωση του σ_1 (δοκοί προπορείας) απ' ότι αύξηση του σ_3 (αγκύρια FG)

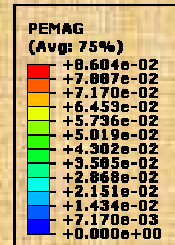
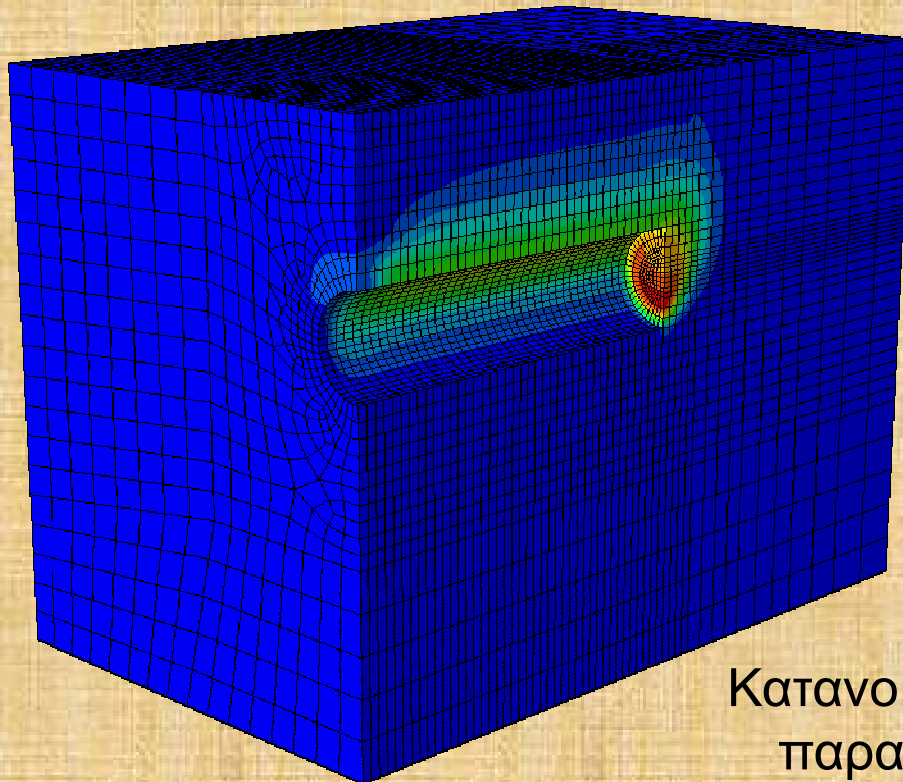
$$\Delta\sigma_1 \approx 4 \Delta\sigma_3$$

Ενίσχυση μετώπου με δοκούς προπορείας

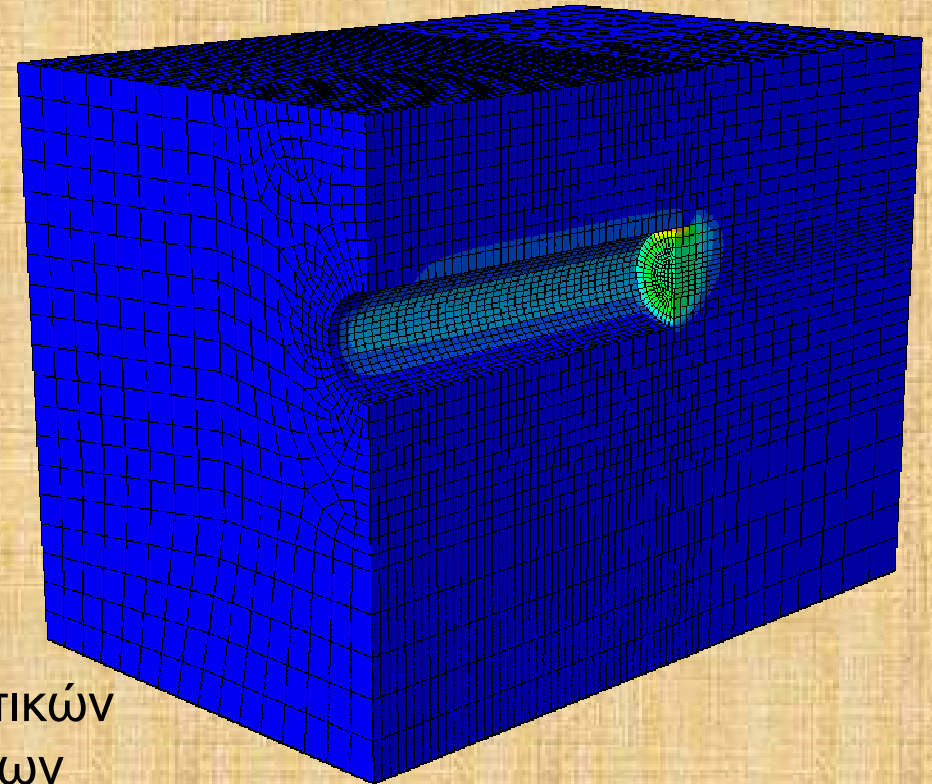


Αναλύσεις με
πεπερασμένα στοιχεία

(Προυντζόπουλος 2012)



Κατανομές πλαστικών
παραμορφώσεων



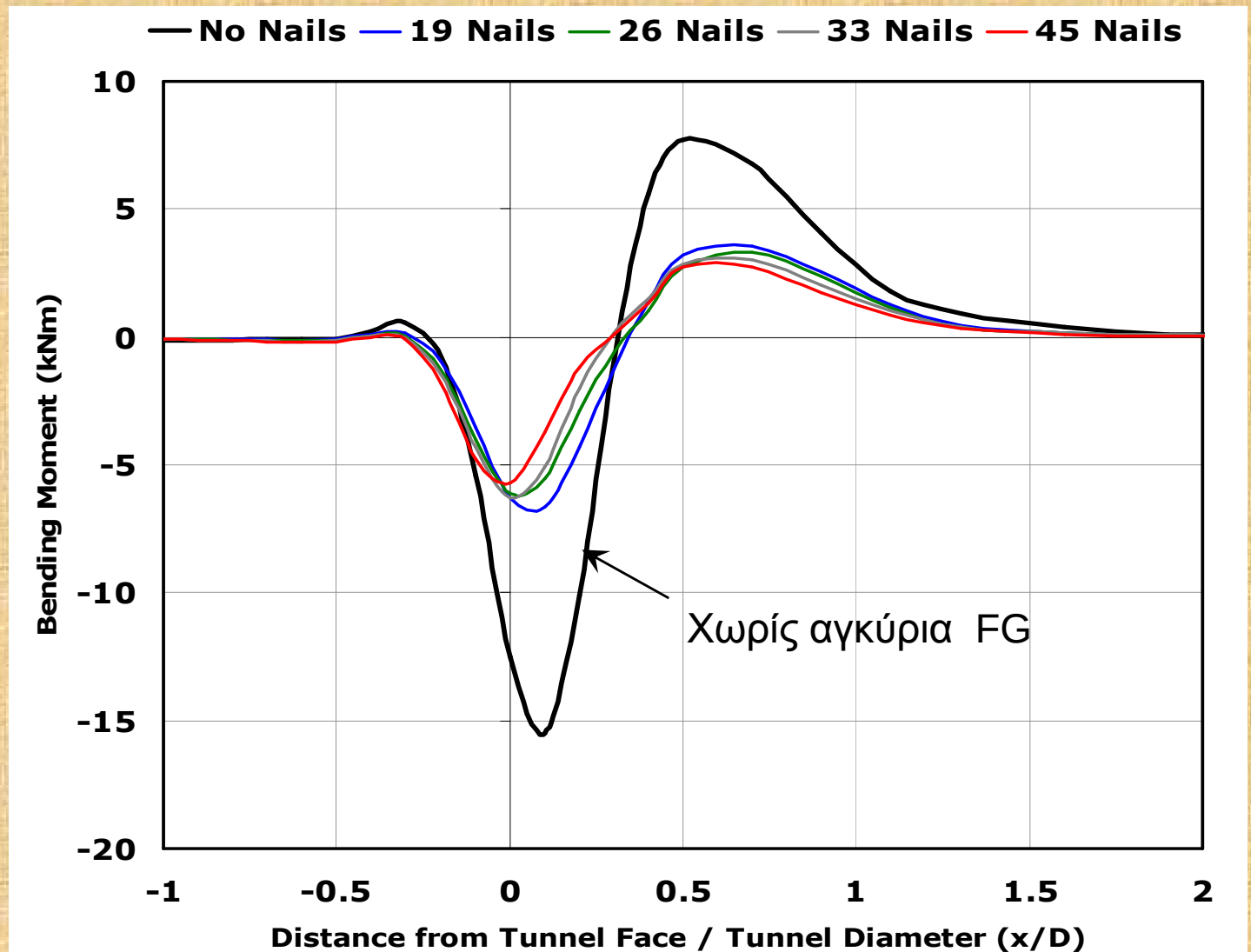
Ανυποστήρικτο Μέτωπο

Ενίσχυση με δοκούς προπορείας

Ενίσχυση μετώπου με δοκούς προπορείας

Αρχικά Συμπεράσματα :

- Απαίτηση μεγάλης καμπτικής ακαμψίας των δοκών (υπάρχουν μεγάλα M)
- Σχετικώς μικρή βελτίωση της ευστάθειας (σε σύγκριση με τα αγκύρια μετώπου)
- Σημαντική μείωση των καμπτικών ροπών στις δοκούς εάν συνδυασθούν και με αγκύρια μετώπου



Πρόσφατες εξελίξεις στον Σχεδιασμό Συγκοινωνιακών Σηράγγων

ΘΕΜΑΤΟΛΟΓΙΟ

A. Μέτωπο Εκσκαφής :

Ανάλυση Συμπεριφοράς & Μέθοδοι Ενίσχυσης

B. Τελική Επένδυση :

Φορτία Σχεδιασμού & Χρήση Άοπλων Επενδύσεων

Το υλικό βασίζεται στην Διδακτορική Διατριβή στο ΕΜΠ :

- **Π. Φορτσάκης** (2012) : «Διερεύνηση της στατικής αλληλεπίδρασης του περιβάλλοντος εδάφους/βράχου και της τελικής επένδυσης σηράγγων»

B. Τελική Επένδυση : Φορτία Σχεδιασμού & Χρήση Άοπλων Επενδύσεων

1. Φορτία Σχεδιασμού :

❑ **Μόνιμα φορτία**

- ✓ **Φορτία από το περιβάλλον γεω-υλικό**
- ✓ Υδροστατικές πιέσεις (Σήραγγα κάτω από Υ.Ο. χωρίς αποστράγγιση)
- ✓ Ίδια βάρη
- ✓ Φορτία από υπόγειες ή υπέργειες κατασκευές

❑ **Μεταβλητά φορτία**

- ✓ Φορτία οχημάτων ή συρμών
- ✓ Εσωτερικές υδατικές πιέσεις υδραυλικών σηράγγων

❑ **Τυχηματικά φορτία**

- ✓ Φορτία πρόσκρουσης
- ✓ Φορτία έκρηξης
- ✓ Φορτία πυρκαγιάς

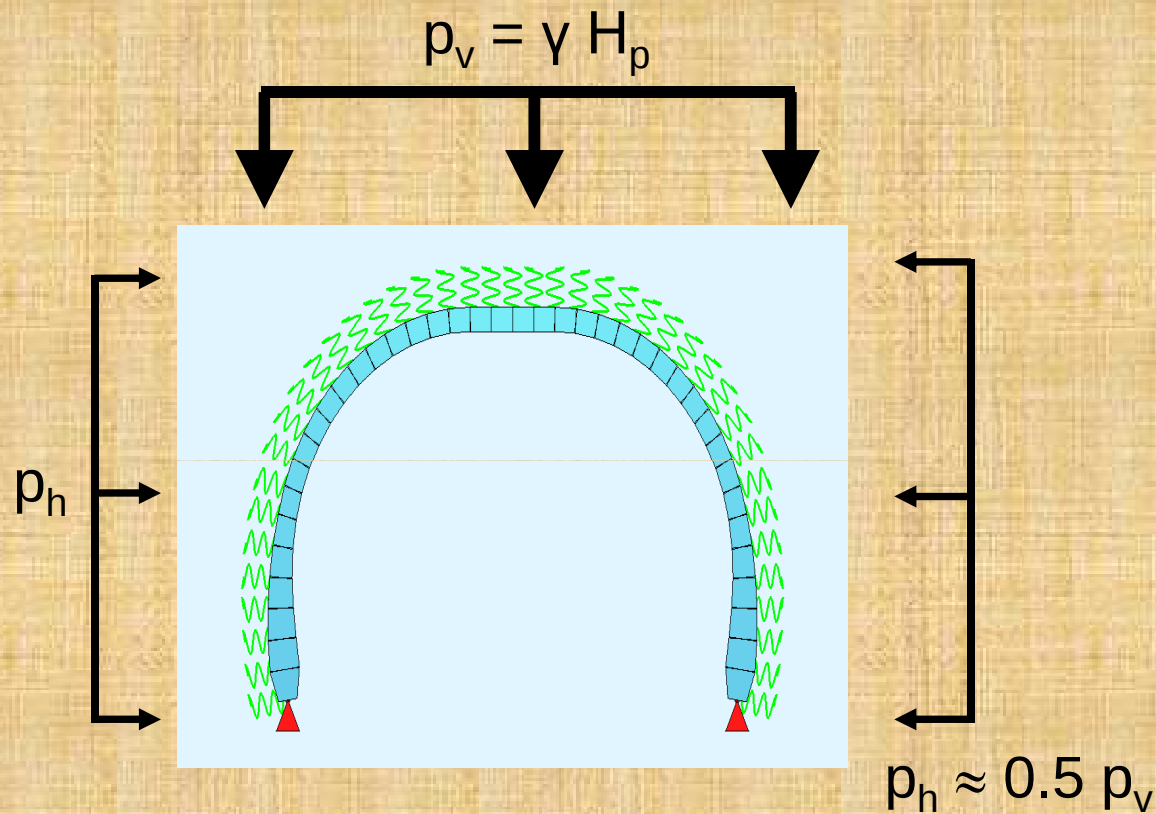
❑ **Σεισμικά φορτία**

Τελική Επένδυση : Φορτία Σχεδιασμού

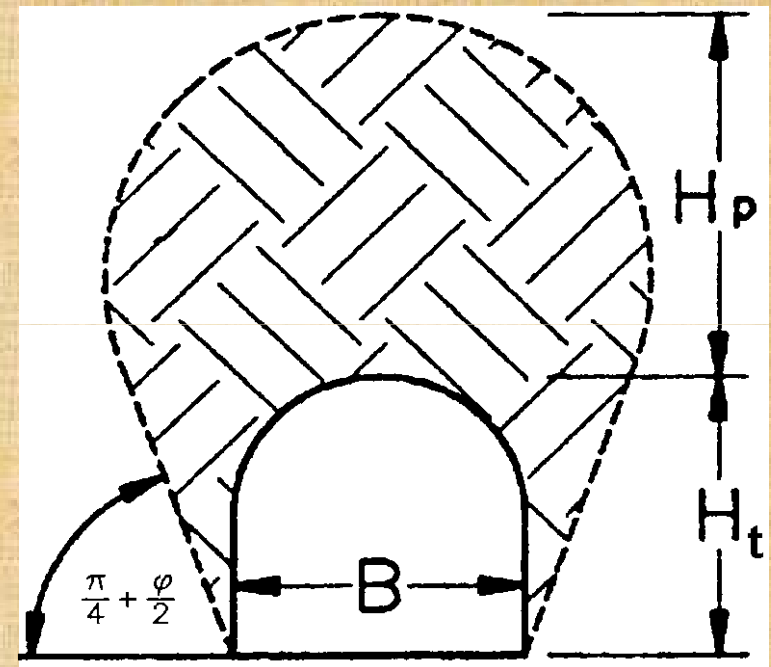
Φορτία από το περιβάλλον γεω-υλικό

Πρόκειται για αποτέλεσμα «αλληλεπίδρασης»

Τελικής επένδυσης – Άμεσης υποστήριξης – Εδάφους
και όχι για φορτία γνωστά εκ των προτέρων



Η πραγματικότητα συνήθως
είναι αντίστροφη ($p_h > p_v$)



Τελική Επένδυση : Φορτία Σχεδιασμού

Φορτία από το περιβάλλον γεω-υλικό

Οι πιθανές τιμές έχουν πολύ μεγάλο εύρος διακύμανσης :

- **Άνω όριο** : Αποκατάσταση γεωστατικών φορτίων ($p = \gamma H$)
π.χ. σήραγγα σε βάθος 200m : $p = 24 \text{ kN/m}^3 \times 200\text{m} = 4.8 \text{ MPa}$

$$\sigma = p R / t = 4.8 \times 5 / 0.5 = 48 \text{ MPa}$$

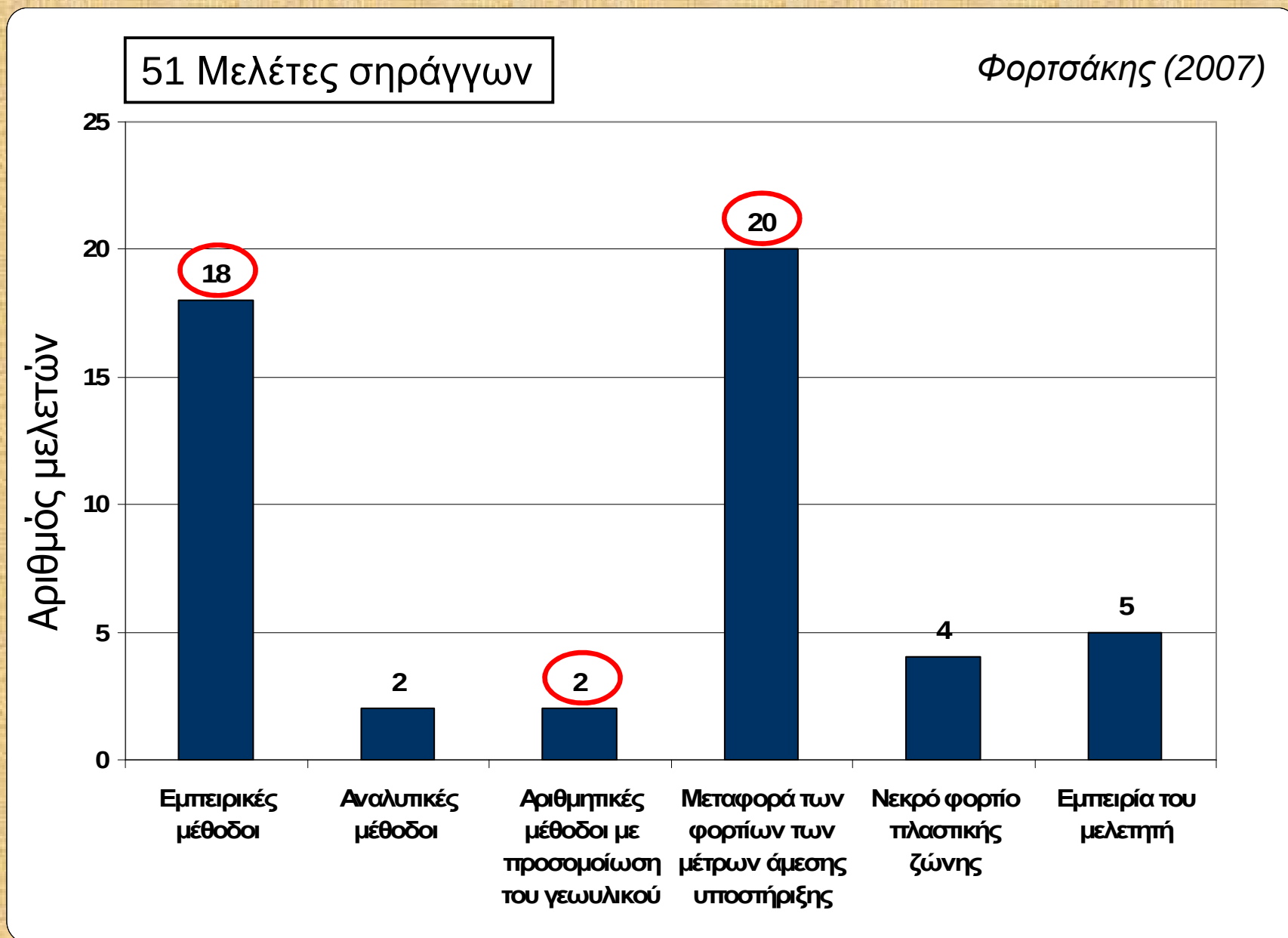
- **Κάτω όριο** : Μηδέν ($p = 0$)
Κατασκευή της μόνιμης επένδυσης μετά την εξισορρόπηση των φορτίων του εδάφους από την άμεση υποστήριξη
- **Πραγματικότητα** : Κάπου ανάμεσα (με μεγάλη αβεβαιότητα)
Το μέγεθος των φορτίων εξαρτάται από το έδαφος, τον τρόπο διάνοιξης, τον χρόνο εφαρμογής της άμεσης, την μακροχρόνια συμπεριφορά της άμεσης, τον χρόνο εφαρμογής της τελικής επένδυσης, την ακαμψία της, κλπ

Υπάρχουν ποικίλες μέθοδοι (που αγνοούν την αλληλεπίδραση) για την «εκτίμηση» των φορτίων στην τελική επένδυση με μεγάλες διαφορές μεταξύ τους

Τελική Επένδυση : Φορτία Σχεδιασμού

Φορτία από το περιβάλλον γεω-υλικό

Σχεδιασμός τελικών επενδύσεων των σηράγγων της ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ

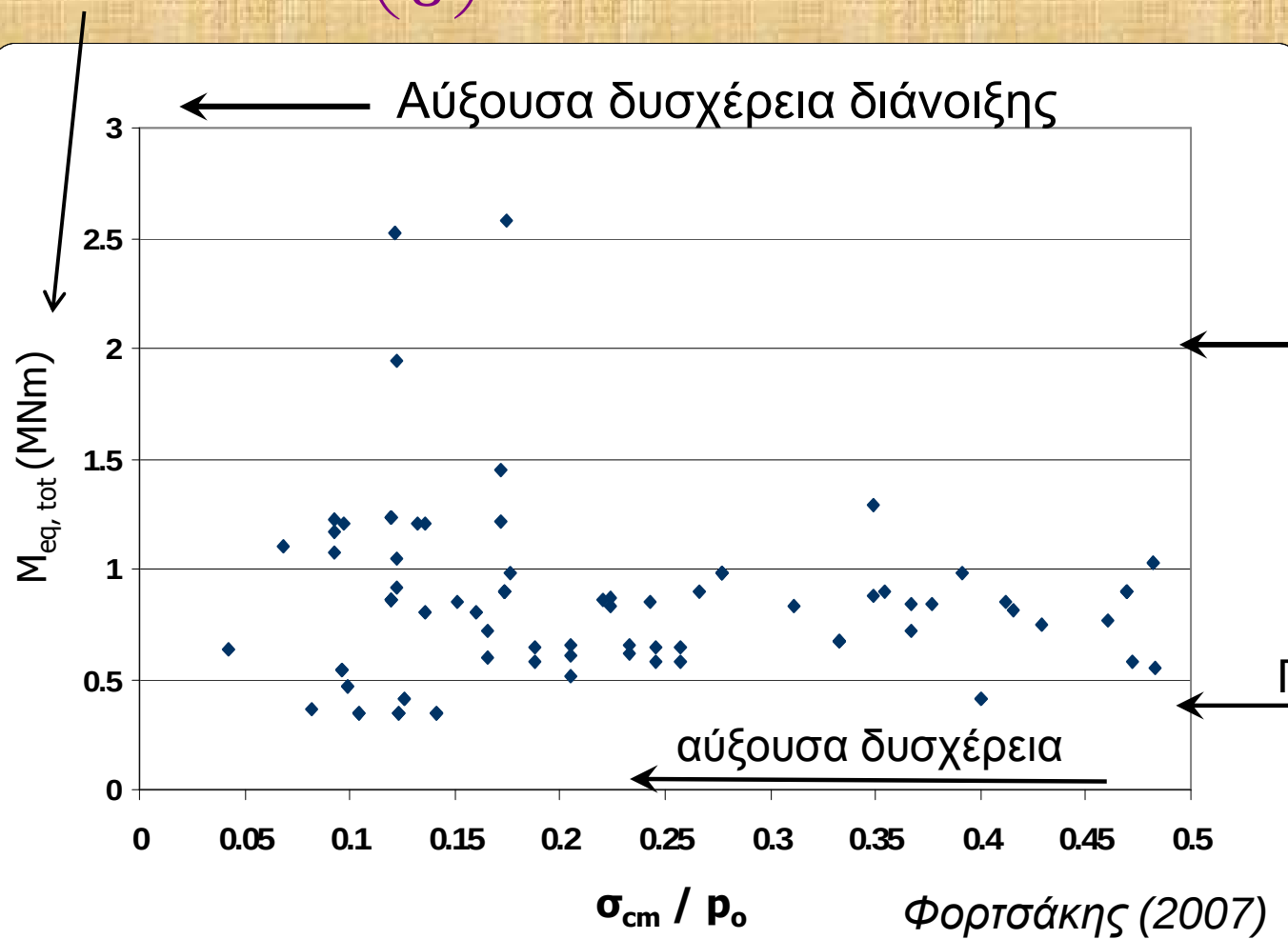


Τελική Επένδυση : Φορτία Σχεδιασμού

Φορτία από το περιβάλλον γεω-υλικό

Σχεδιασμός τελικών επενδύσεων των σηράγγων της ΕΓΝΑΤΙΑ ΟΔΟΣ

$$M_{eq,tot} = N_{eq} \left(\frac{h}{8} \right) + M_{eq} \quad (\text{ισοδύναμη καμπτική αντοχή της επένδυσης})$$



Πάχος τελικής επένδυσης : 60 cm
Οπλισμός : 3700 kg / m

Πάχος τελικής επένδυσης : 30 cm
Οπλισμός : 590 kg / m

Τελική Επένδυση : Φορτία Σχεδιασμού

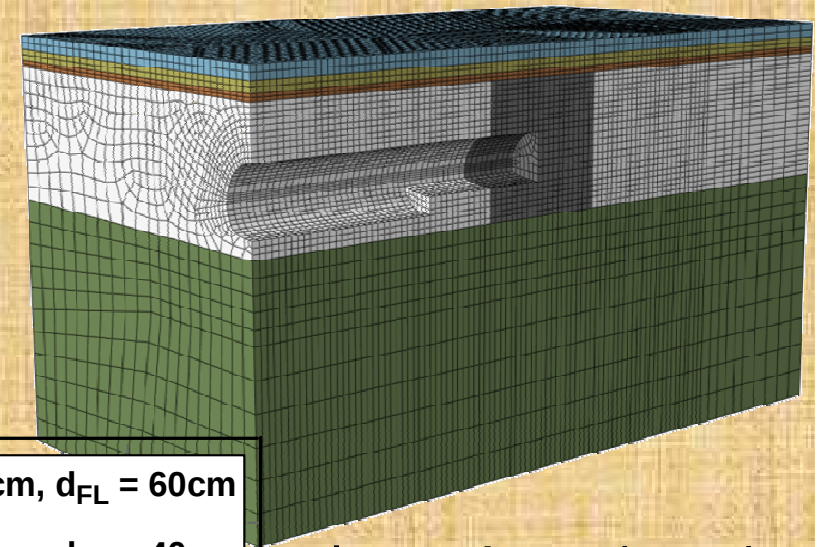
Εκτίμηση φορτίων από το περιβάλλον γεω-υλικό
(με αλληλεπίδραση)

Κατάσταση	Φορτία περιβάλλοντος γεω-υλικού	
	Στην άμεση υποστήριξη	Στην τελική επένδυση
Αρχική (πριν τη διάνοιξη)	---	---
Αμέσως μετά τη διάνοιξη	Βραχυχρόνια φορτία	---
Αμέσως μετά την κατασκευή της τελικής επένδυσης	Βραχυχρόνια φορτία	---
Μακροχρονίως	Μειωμένα φορτία, λόγω “απαξίωσης” (?) της άμεσης υποστήριξης	• Μέρος των φορτίων της άμεσης υποστήριξης (αγκύρια, εκτοξ. σκυρόδεμα) • Ερπυστικά φορτία εδάφους

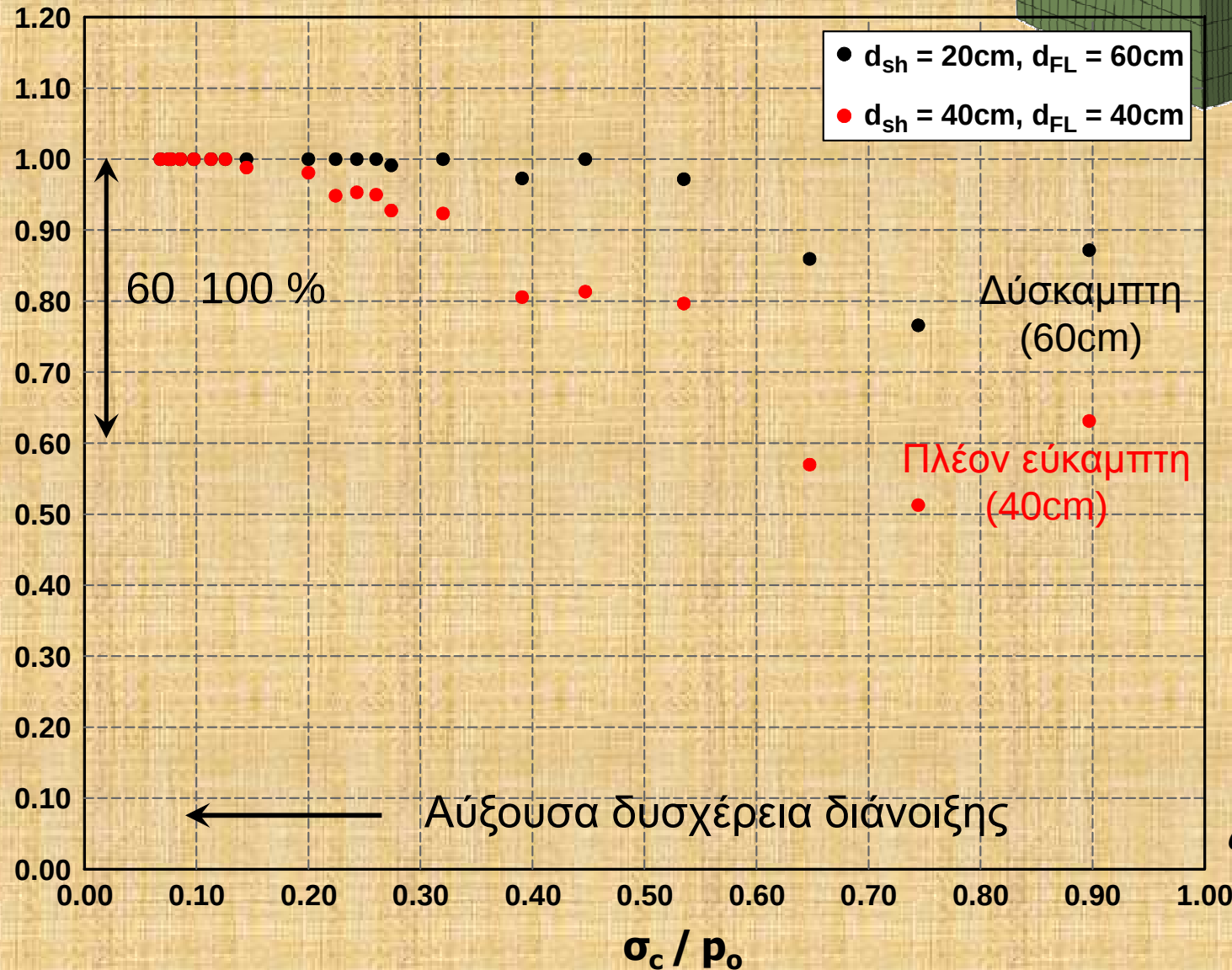
Τελική Επένδυση : Φορτία Σχεδιασμού

1. Λόγω απαξίωσης του εκτοξ. σκυροδέματος

$$\frac{\text{Φορτίο τελικής επένδυσης}}{\text{Φορτίο άμεσης υποστήριξης}} = \frac{p_{FL}}{p_{sh}}$$



Φορτσάκης (2012)



Αντίστοιχα αποτελέσματα ισχύουν και για την μεταφορά του φορτίου των αγκυρίων

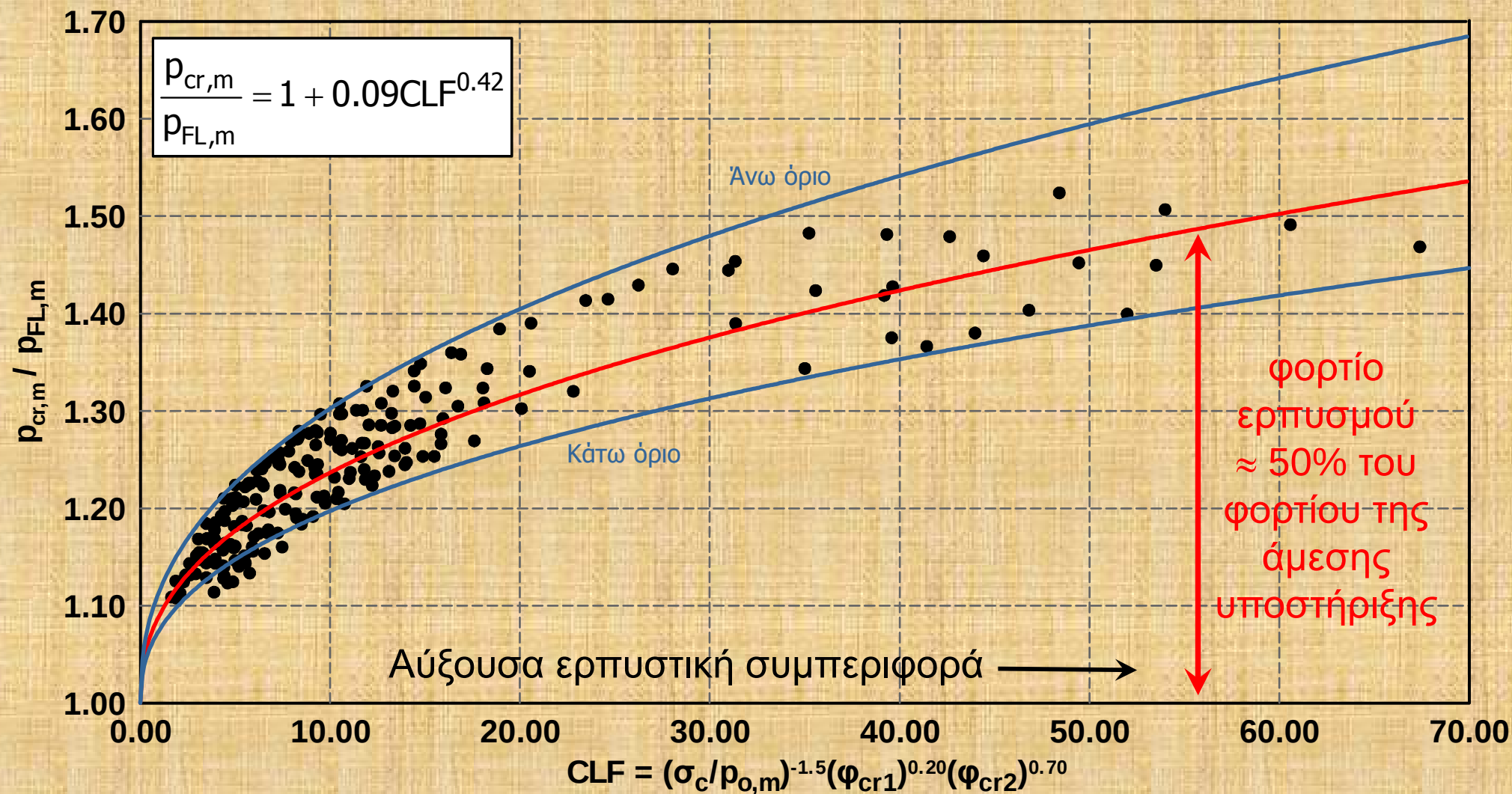
$$\sigma_c = 2 \cdot c \cdot \tan(45 + \phi/2)$$

$$p_o = 0.5(1+K)\gamma H$$

Τελική Επένδυση : Φορτία Σχεδιασμού

2. Λόγω ερπυσμού του γεω-υλικού

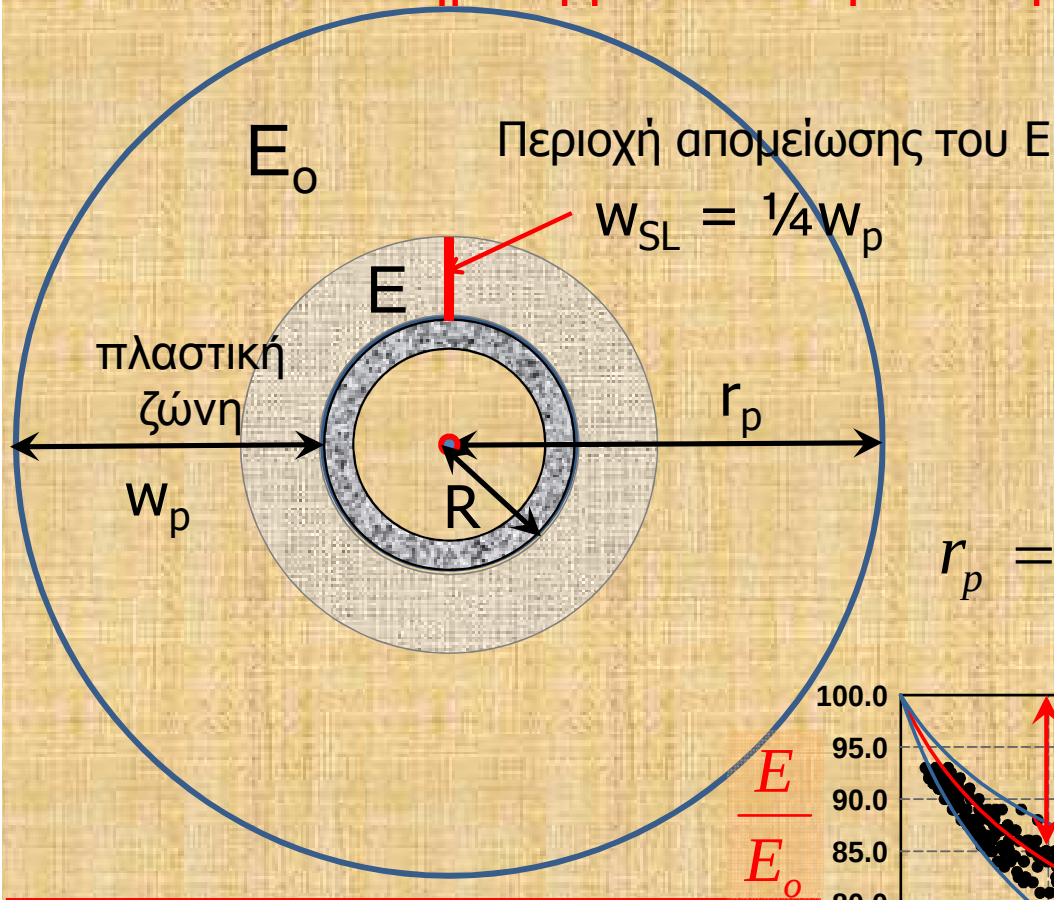
Μακροχρόνια πίεση στην Τ.Ε. (p_{cr}) / βραχυχρόνια πίεση στην Α.Υ. ($p_{FL} \approx p_{sh+an}$)



Μακροχρόνια πίεση τελικής επένδυσης = $100 \div 150\%$ x (πίεση άμεσης υποστήριξης)
ΕΦΟΣΟΝ απαξιωθούν τα μέτρα άμεσης υποστήριξης και υπάρχει ερπυσμός

Τελική Επένδυση : Φορτία Σχεδιασμού λόγω ερπυσμού του γεω-υλικού

Απλοποιημένη μεθοδολογία εκτίμησης φορτίων λόγω ερπυσμού



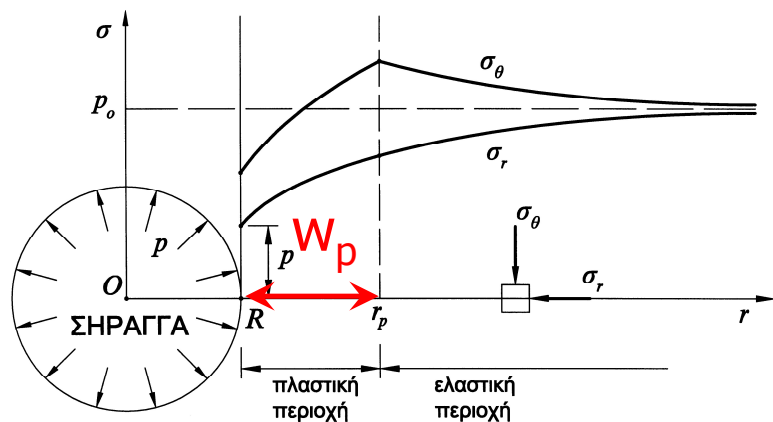
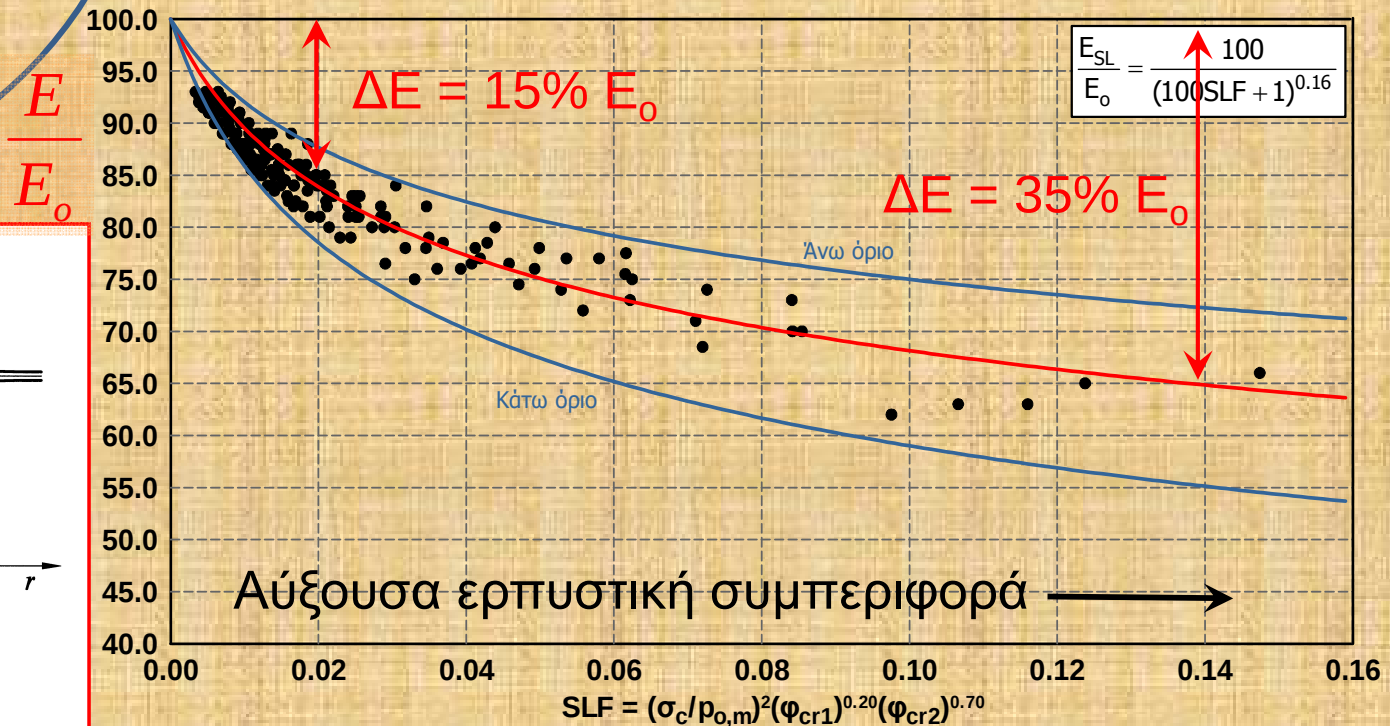
R : ακτίνα σήραγγας

w_p : εύρος πλαστικής ζώνης

w_{SL} : εύρος περιοχής απομείωσης του μέτρου ελαστικότητας (E) του γεω-υλικού

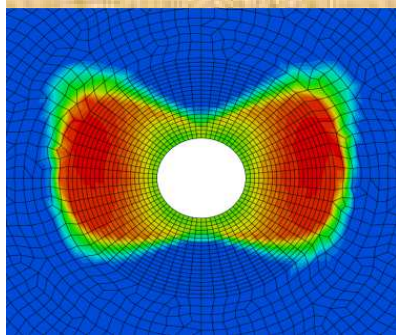
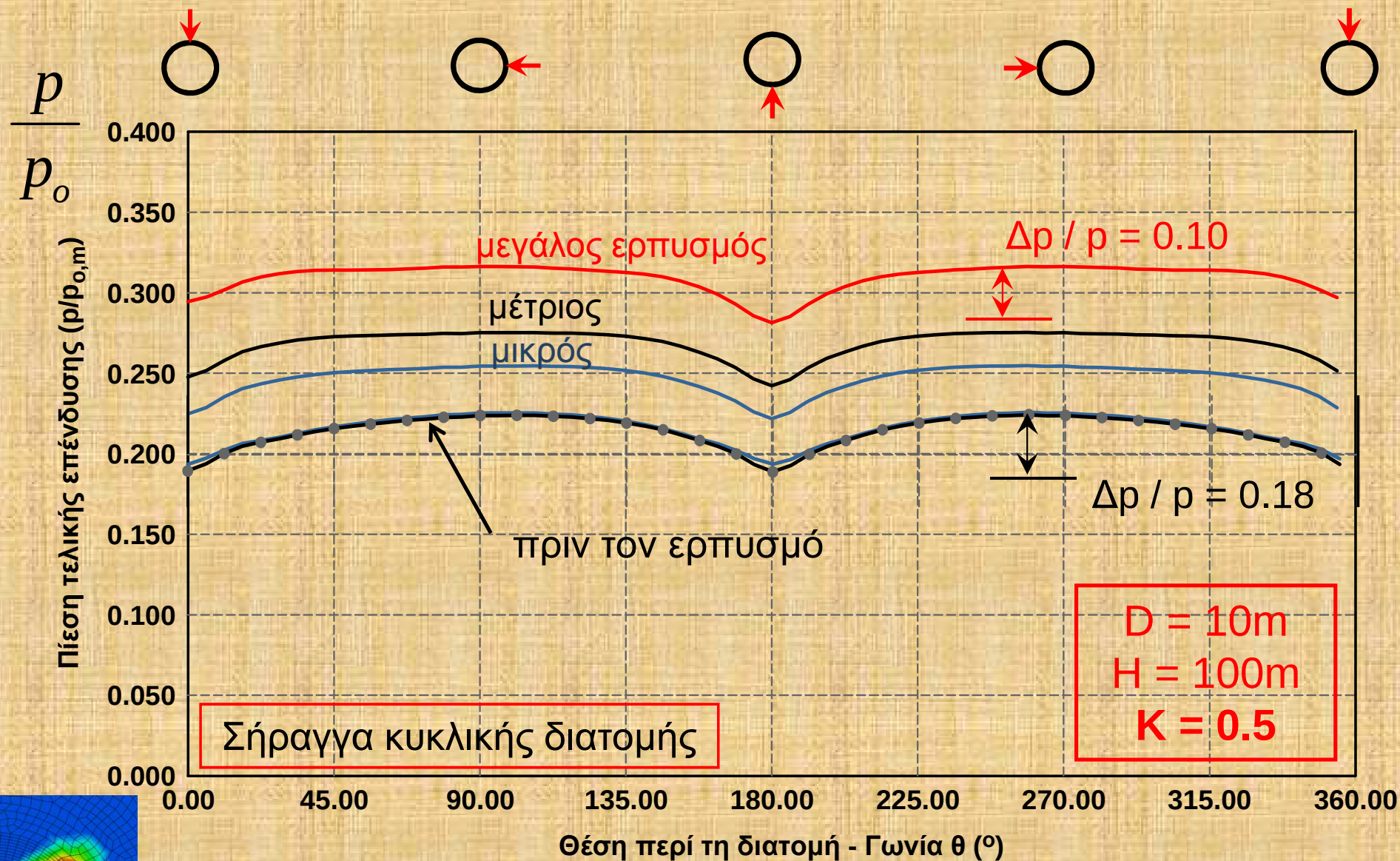
r_p : ακτίνα πλαστικής ζώνης (εξαρτάται από το σ_{cm} και το βάθος H)

$$r_p = R \left\{ \left(\frac{1}{N_\phi + 1} \right) \left[2 + \frac{2p_o}{\sigma_{cm}} (N_\phi - 1) \right] \right\}^{\frac{1}{N_\phi - 1}}$$



Τελική Επένδυση : Φορτία Σχεδιασμού

Λόγω ερπυσμού, τα φορτία στην τελική επένδυση τείνουν να «ομοιογενοποιηθούν»

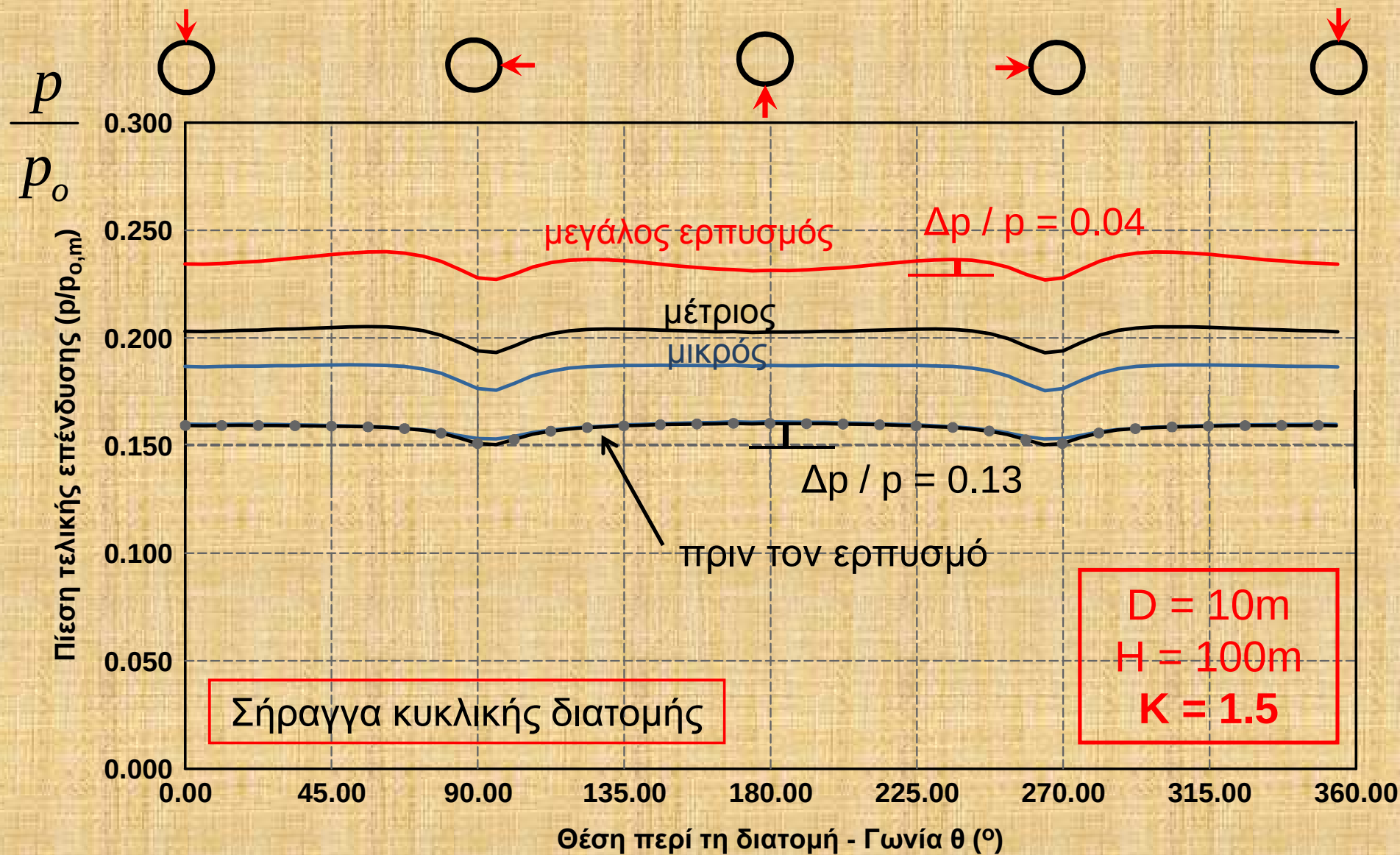


$K = 0.50$:
Ερπυστικές
παραμορφώσεις

- $\varphi_{cr1} = 0.20, \varphi_{cr2} = 0.25$
- $\varphi_{cr1} = 0.40, \varphi_{cr2} = 0.60$
- $\varphi_{cr1} = 2.00, \varphi_{cr2} = 3.00$

Τελική Επένδυση : Φορτία Σχεδιασμού

Λόγω ερπυσμού, τα φορτία στην τελική επένδυση τείνουν να «ομοιογενοποιηθούν»

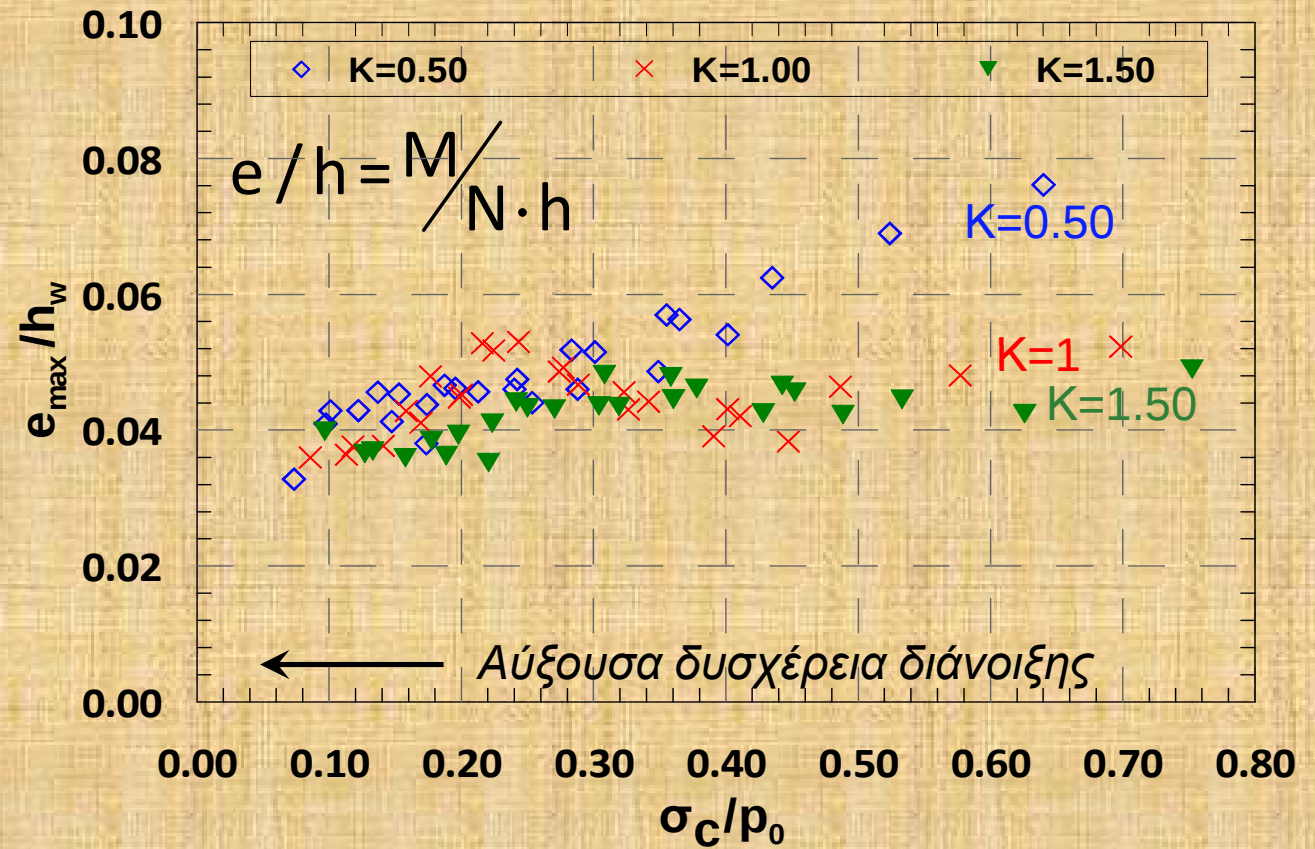
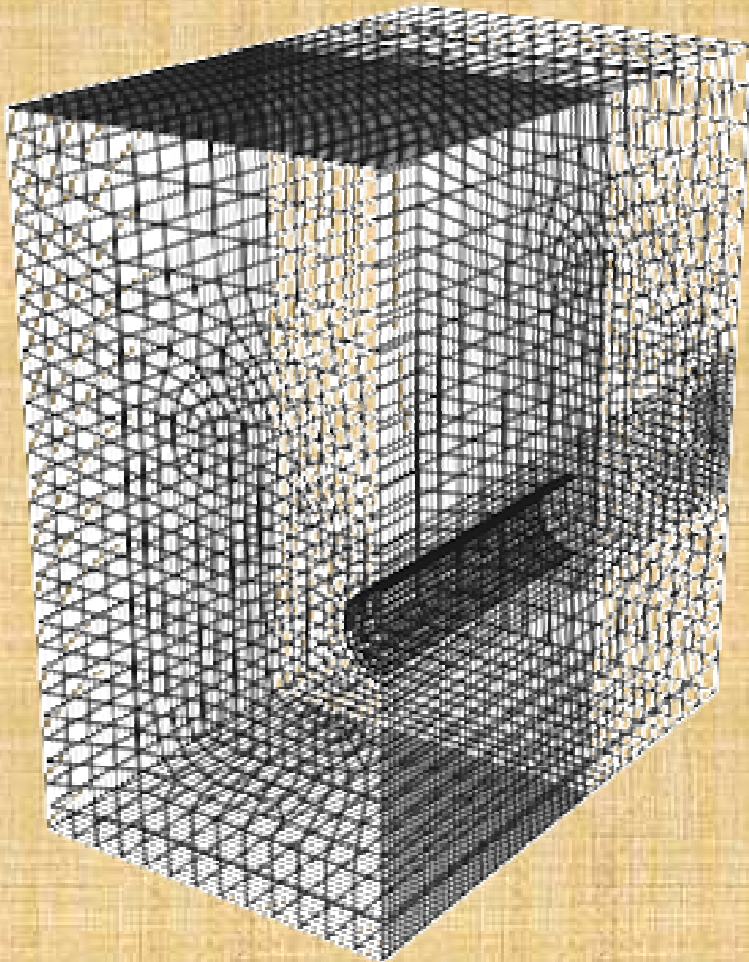


- $\varphi_{cr1} = 0.20, \varphi_{cr2} = 0.25$
- $\varphi_{cr1} = 0.40, \varphi_{cr2} = 0.60$
- $\varphi_{cr1} = 2.00, \varphi_{cr2} = 3.00$

Ομοιογενοποίηση
→ Καθαρή θλίψη

Εκκεντρότητα φορτίου τελικής επένδυσης

Αποτελέσματα αναλύσεων
πεπερασμένων στοιχείων
για διάφορες κυκλικές σήραγγες
(D=10m, H=50m, GSI =10-40)



Η εκκεντρότητα της φόρτισης της τελικής επένδυσης
σηράγγων περίπου κυκλικής διατομής είναι μικρή :

$$e / h = M / (Nh)$$

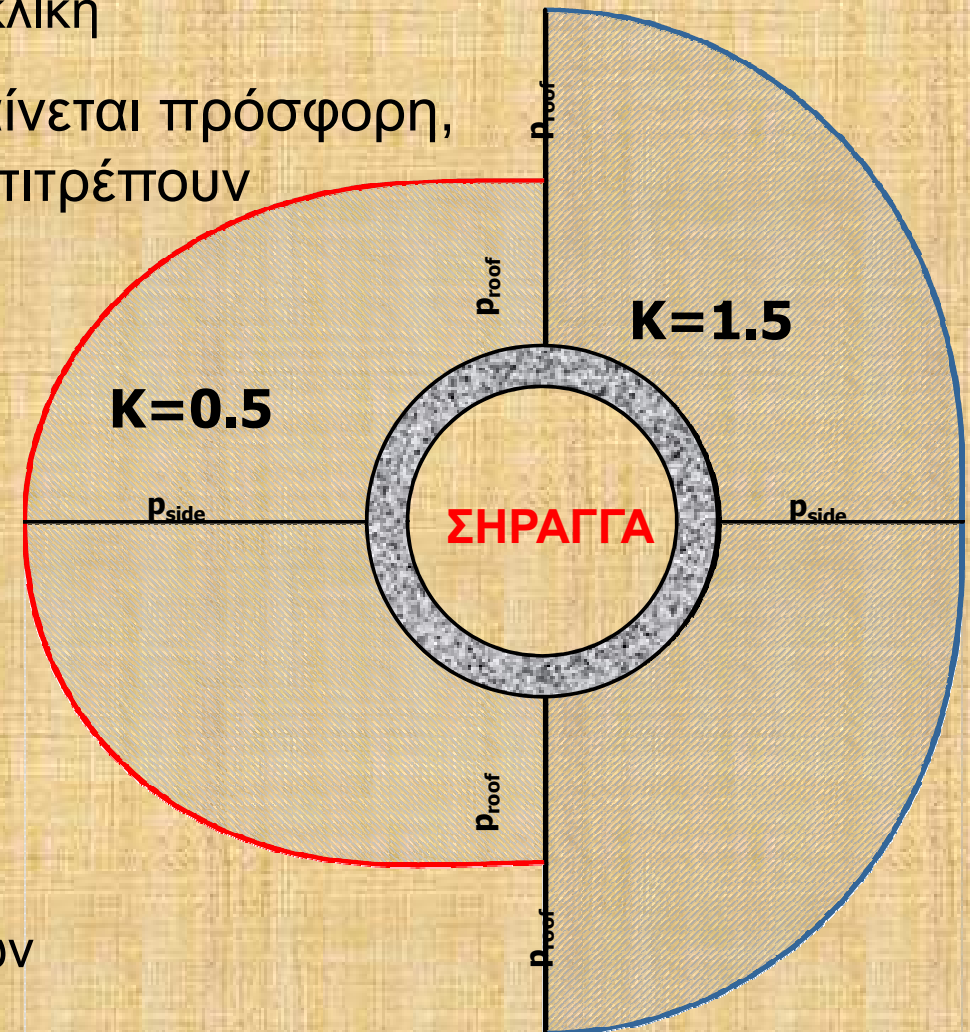
$$e_{\max} / h = 0,04 \quad 0,08$$

Τελική Επένδυση : Χρήση οπλισμένων/άοπλων επενδύσεων

Η ένταση (M, Q, N) στην τελική επένδυση είναι :

- **Μικρή**, σε καλή βραχομάζα / μικρά βάθη
- **Μεγαλύτερη**, σε πτωχά εδάφη / μεγάλα βάθη, αλλά κυρίως θλιπτική ($M, Q \approx 0$) εφόσον βέβαια η διατομή είναι περίπου κυκλική

Συνεπώς, η χρήση άοπλης επένδυσης φαίνεται πρόσφορη, εφόσον τα εντατικά μεγέθη (M, Q, N) το επιτρέπουν



Θέμα προς διερεύνηση :

Η αβεβαιότητα των θλιπτικών φορτίων (N) της τελικής επένδυσης είναι πολύ μεγαλύτερη από την αβεβαιότητα των μόνιμων φορτίων των συνήθων δομικών έργων

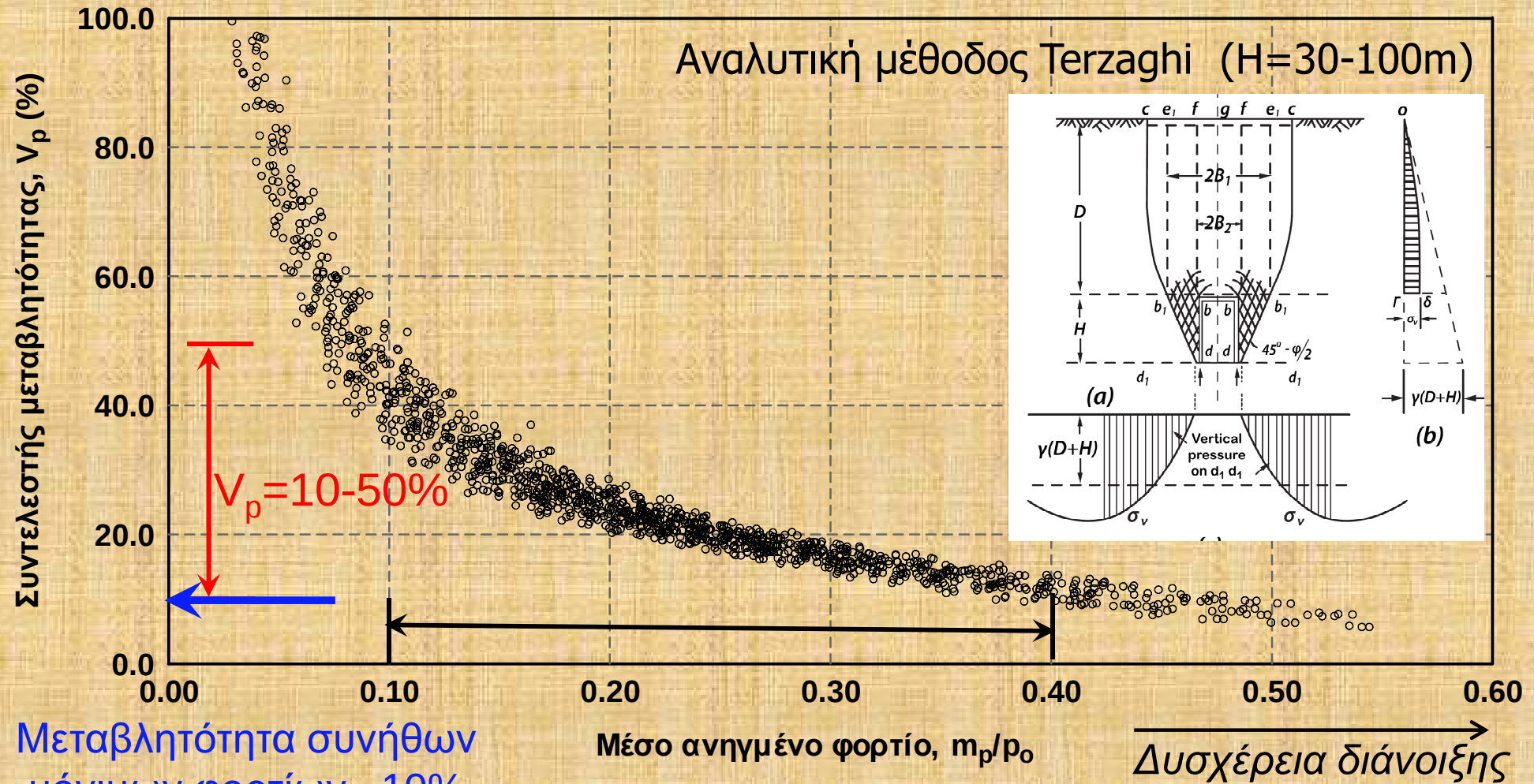
Συνεπώς, απαιτείται μεγαλύτερος επιμέρους συντελεστής δράσεων ($\gamma_F > 1.35$)

Τελική Επένδυση : Χρήση οπλισμένων/άοπλων επενδύσεων

Υπολογισμός μεταβλητότητας (αβεβαιότητας) των φορτίων της τελικής επένδυσης

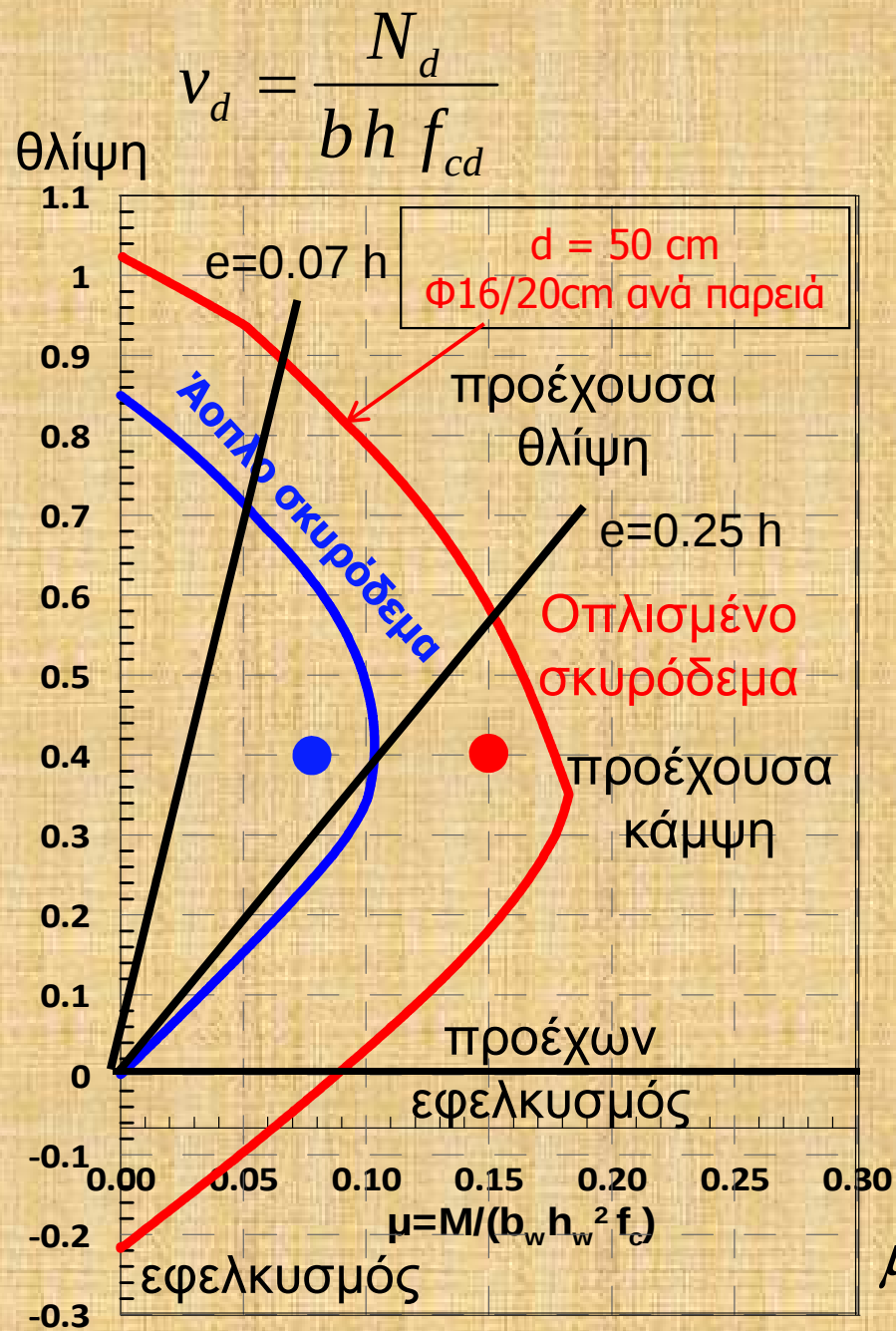
$(GSI, \sigma_{ci}, m_i) \rightarrow (c, \phi) \rightarrow p = \text{φορτίο της τελικής επένδυσης}$

$\rightarrow$ Μέση τιμή m_p , τυπική απόκλιση $\sigma_p \rightarrow$ **Μεταβλητότητα φορτίου** $V_p = \sigma_p / m_p$



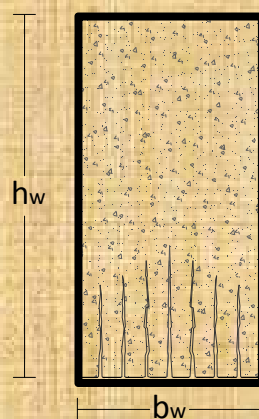
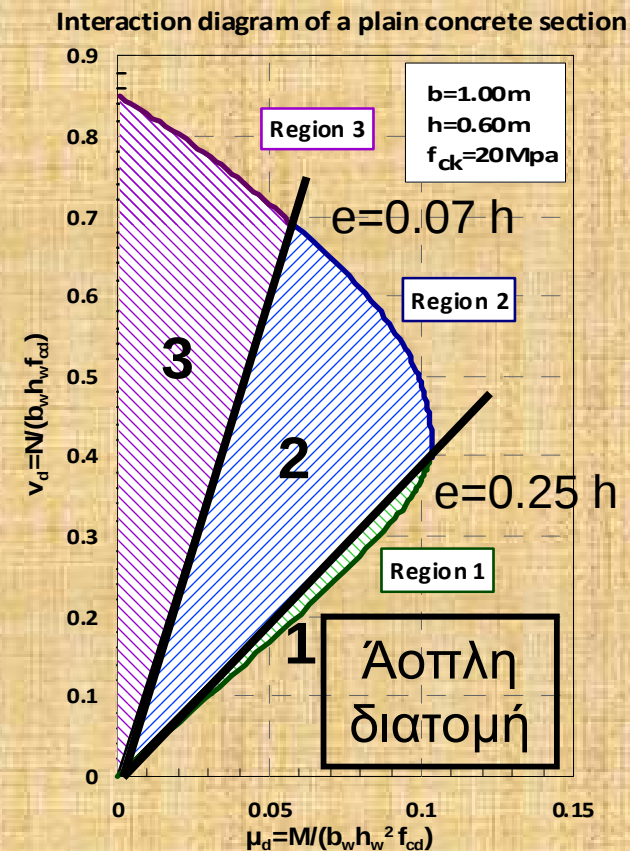
Αντίστοιχη είναι η μεταβλητότητα των φορτίων και με τις άλλες μεθόδους

Διαγράμματα Αλληλεπίδρασης M-N (οπλισμένες και άοπλες επενδύσεις)

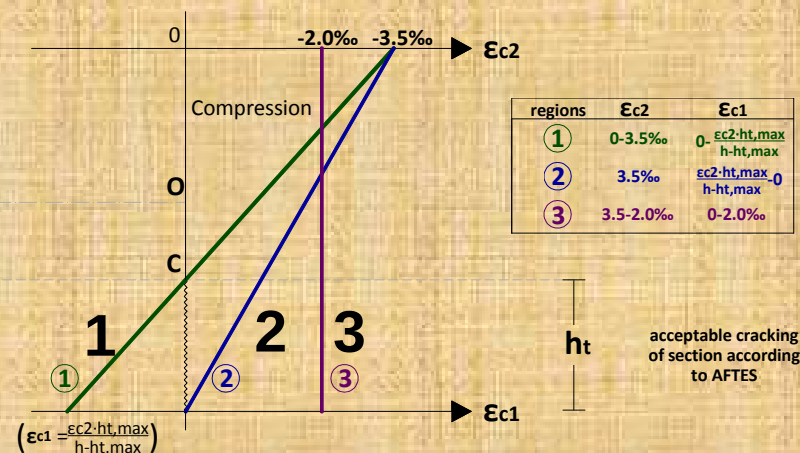


Εκκεντρότητα :

$$e = \frac{M}{N} = \left(\frac{\mu}{v} \right) h$$



Cross section of plain concrete



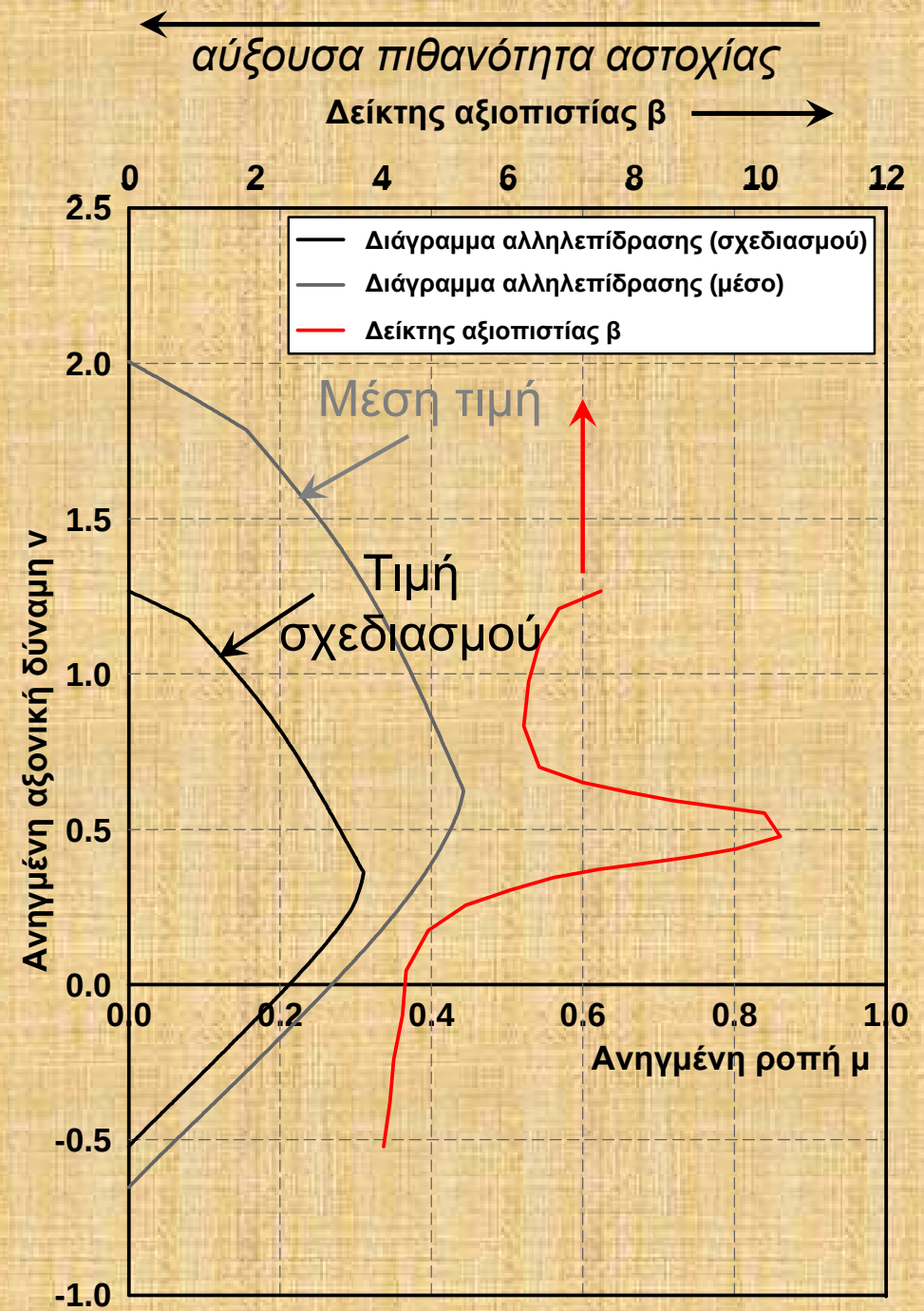
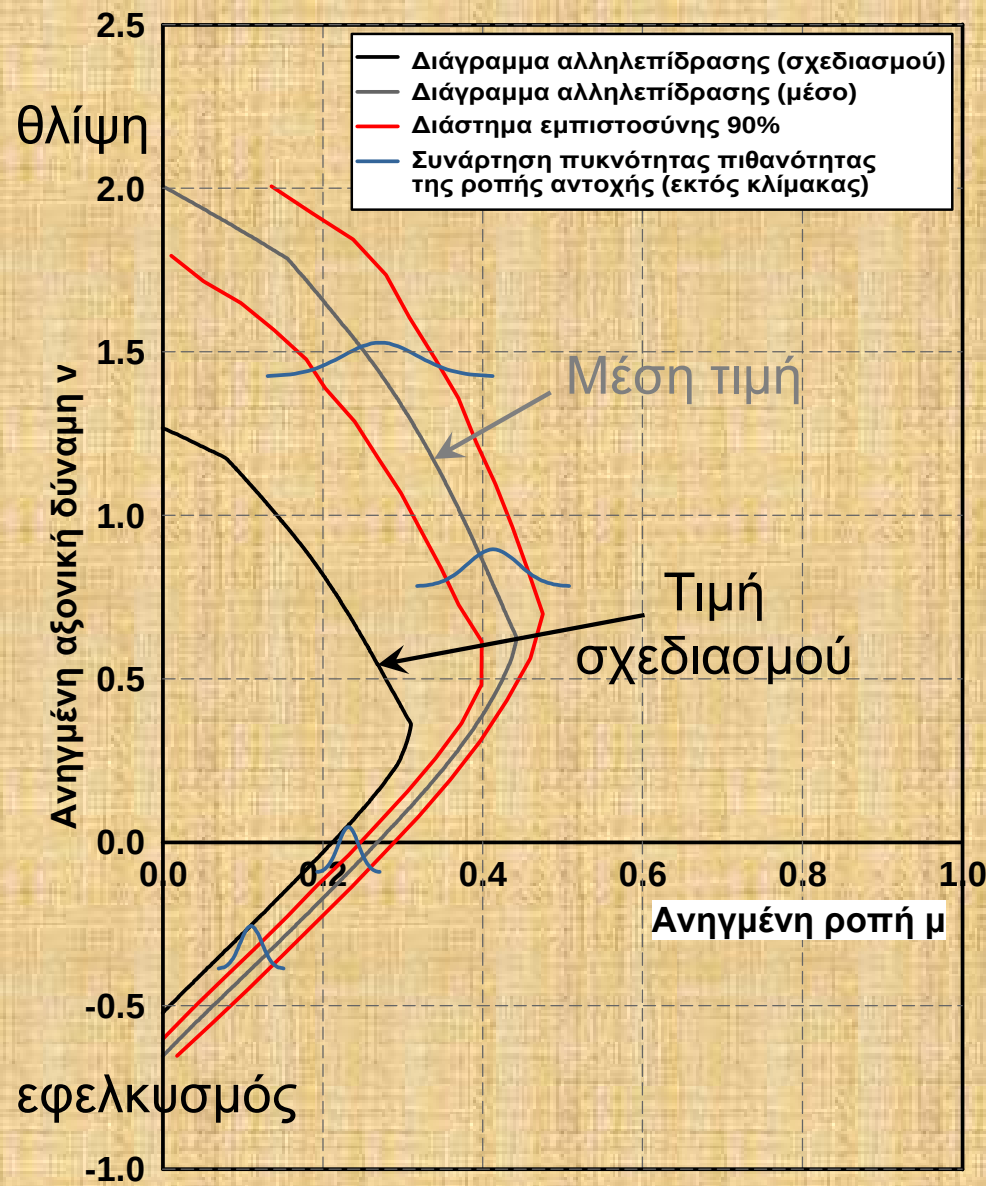
Regions of Section Deformation

$$\mu_d = \frac{M_d}{b h^2 f_{cd}}$$

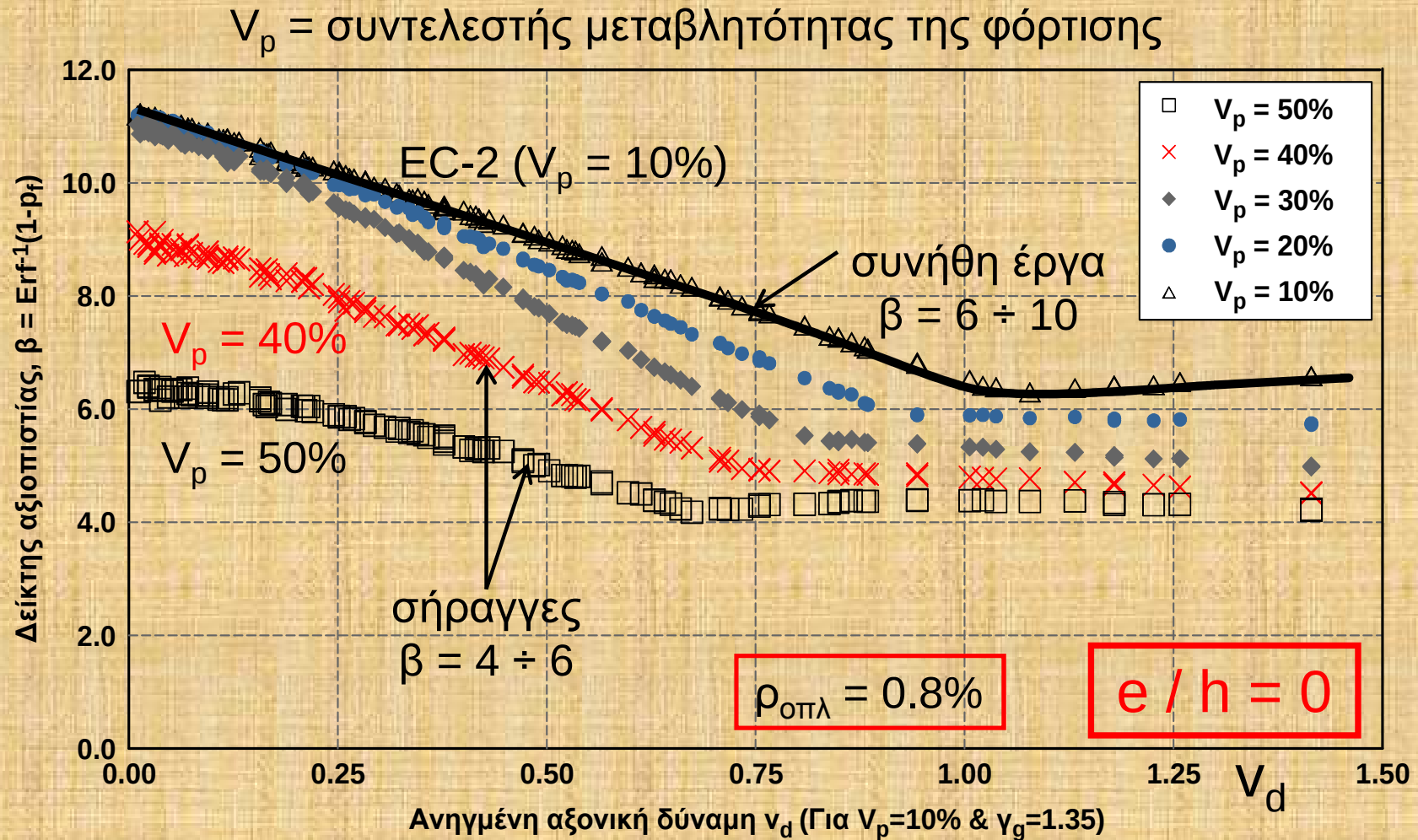
Πιθανοτικός σχεδιασμός της τελικής επένδυσης

Δείκτης αξιοπιστίας :

$$\beta = \frac{1}{\text{erf}(1 - p_f)}$$



Τελική επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα



Δείκτης αξιοπιστίας οπλισμένων τελικών επενδύσεων υπό καθαρή θλίψη ($e/h=0$)
Σχεδιασμός κατά τον Ευρωκώδικα 2 ($\gamma_F = 1.35$, $\gamma_c=1.50$, $\gamma_s=1.15$)

Οι σήραγγες έχουν αρκετά μικρότερη αξιοπιστία (εάν σχεδιασθούν συμβατικά)

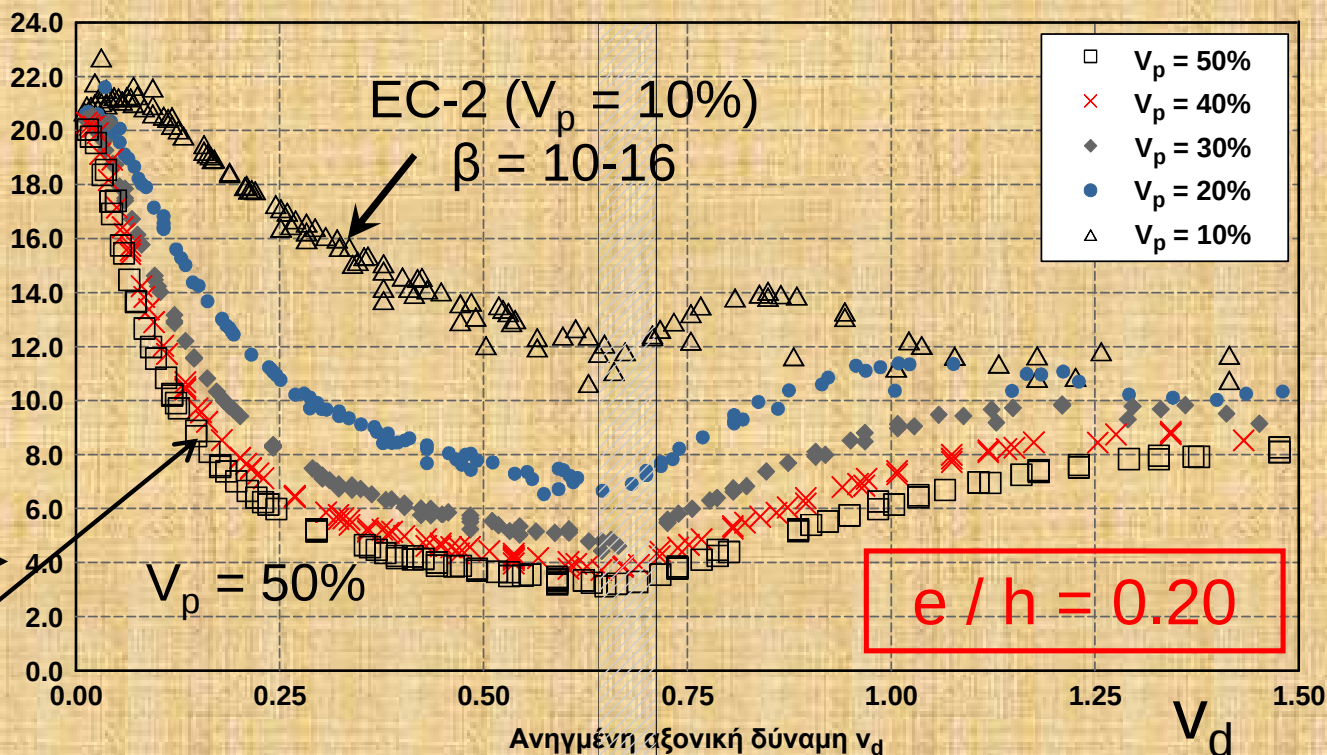
Δείκτης αξιοπιστίας
οπλισμένων τελικών
επενδύσεων με
εκκεντρότητα $e/h=0.2$
Σχεδιασμός κατά τον
Ευρωκώδικα 2
($\gamma_F = 1.35, \gamma_c=1.50, \gamma_s=1.15$)

β - Δείκτης
αξιοπιστίας

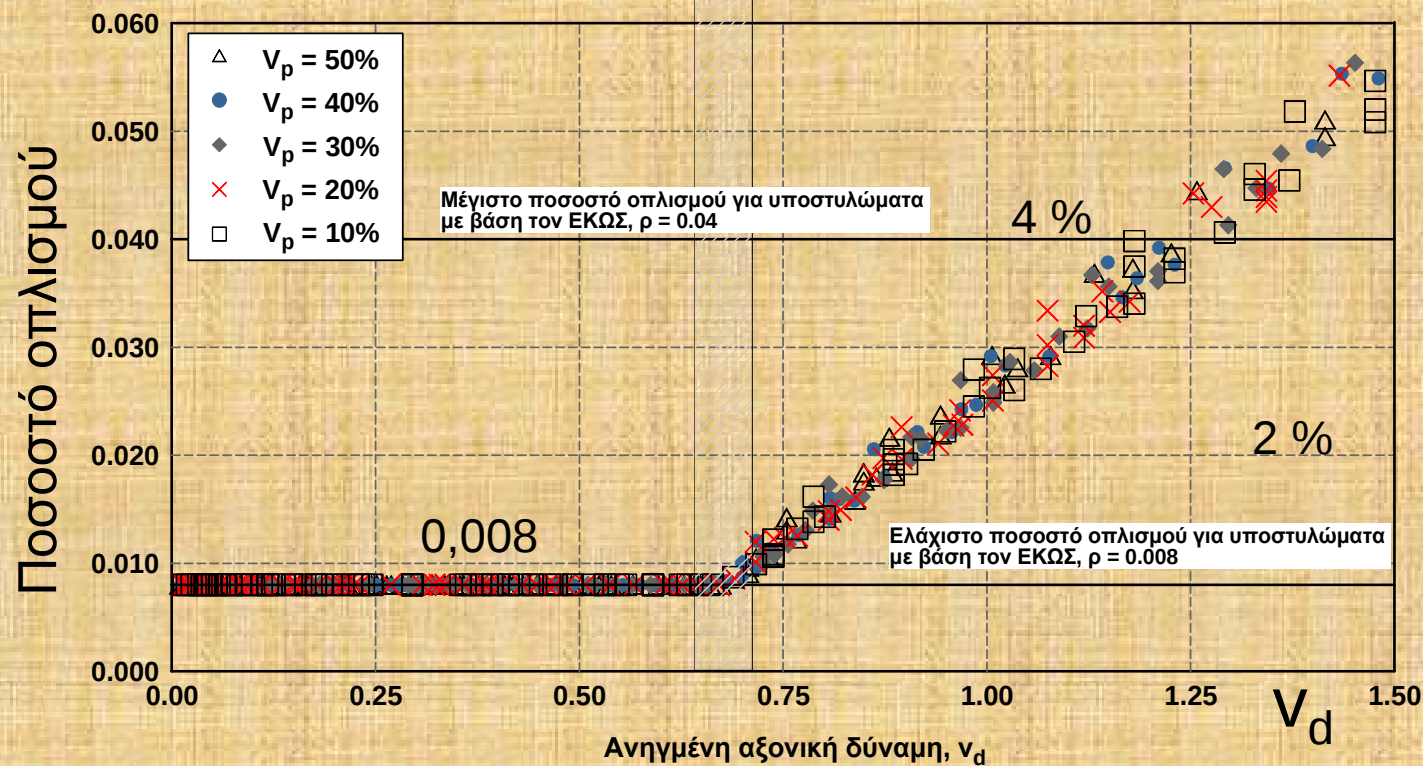
$\beta = 12$

$\beta = 4$

σήραγγες
 $\beta = 3 \div 8$

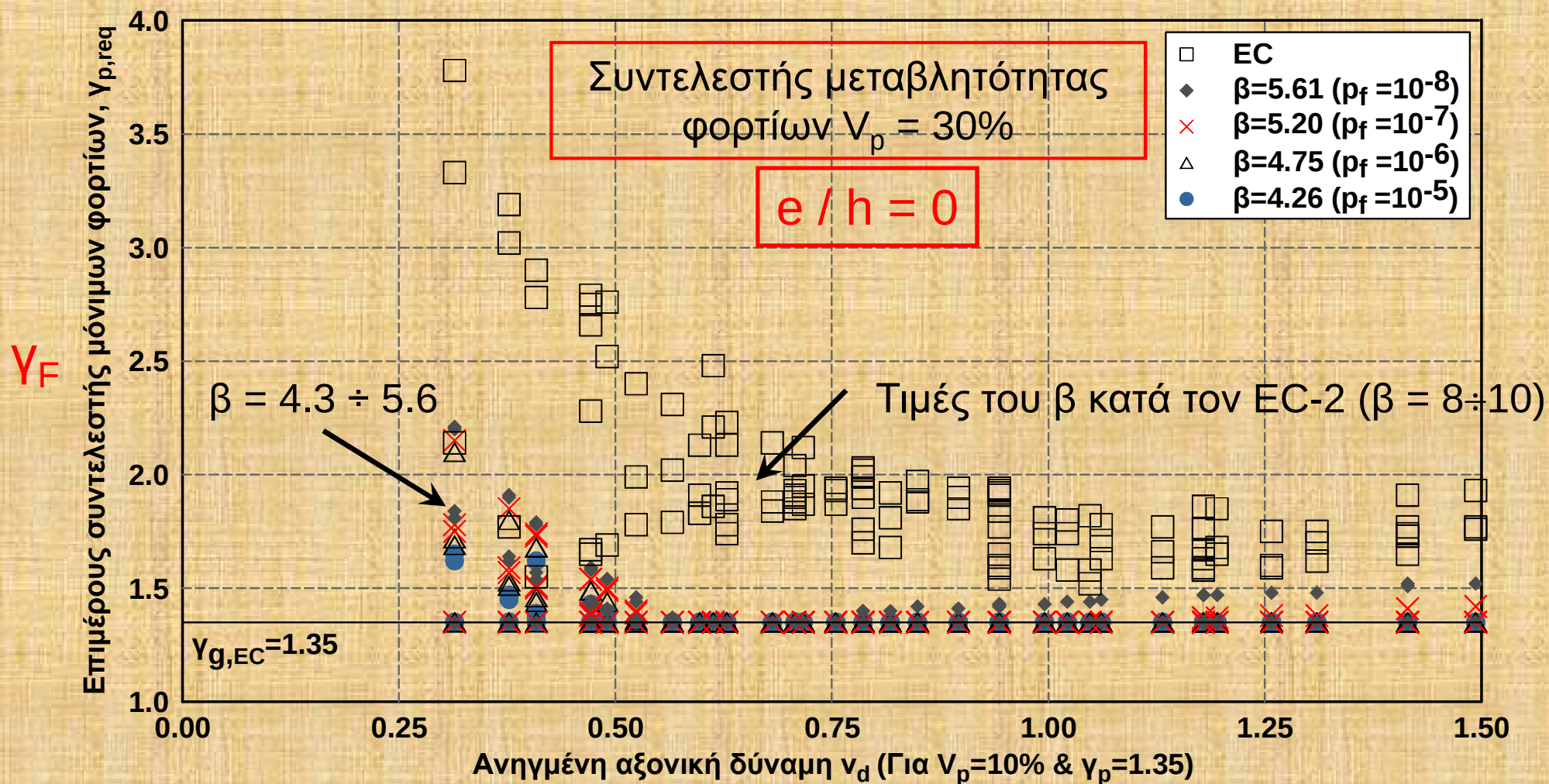


Τελική
επένδυση από
οπλισμένο
σκυρόδεμα



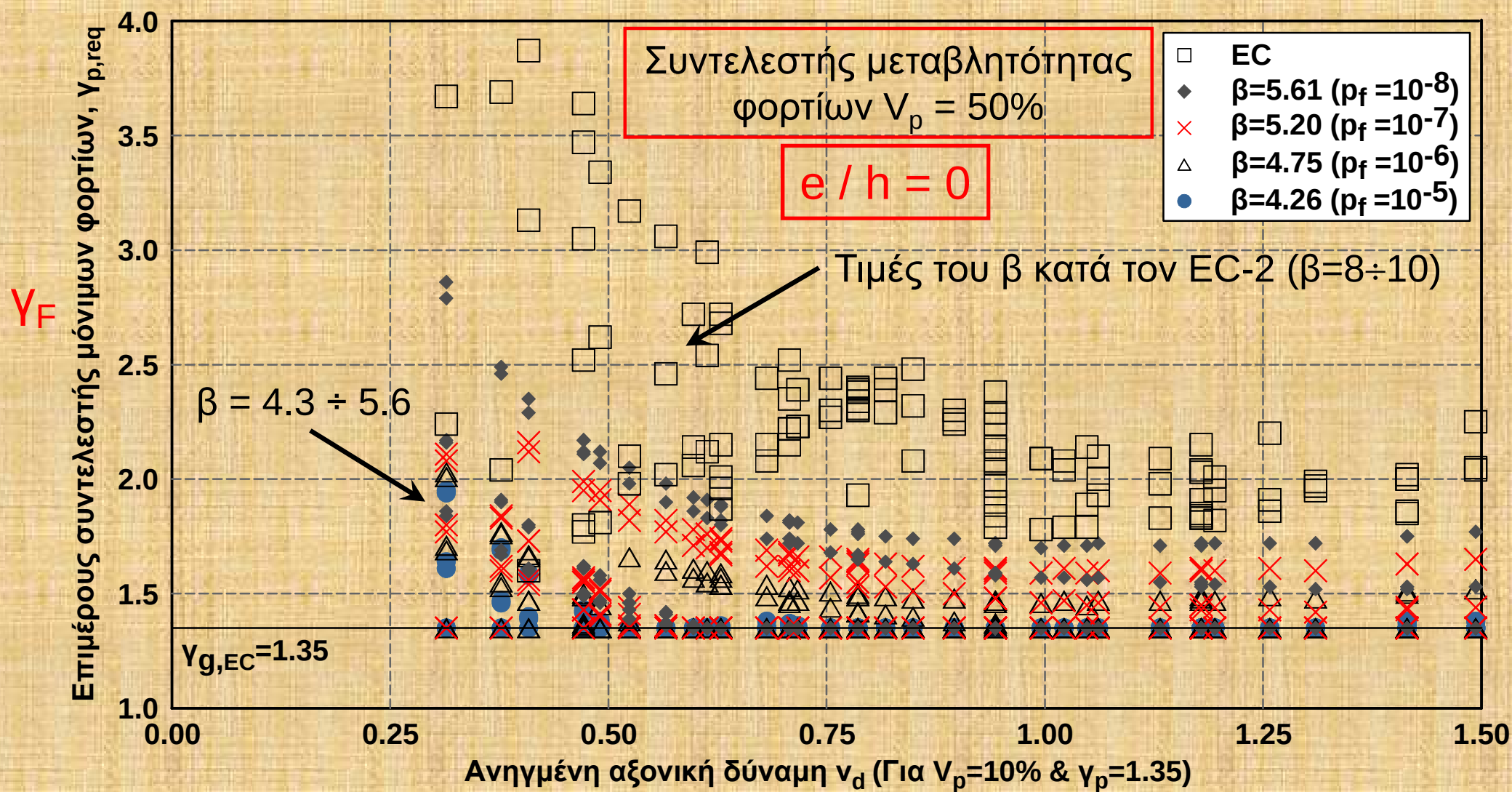
Τελική επένδυση από σπλισμένο σκυρόδεμα

Απαιτούμενες τιμές του επιμέρους συντελεστή δράσεων (γ_F) που δίνει διάφορες τιμές του δείκτη αξιοπιστίας (β)



Τελική επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα

Απαιτούμενες τιμές του επιμέρους συντελεστή δράσεων (γ_F) που δίνει διάφορες τιμές του δείκτη αξιοπιστίας (β)



Τελική επένδυση από οπλισμένο σκυρόδεμα

Επιμέρους συντελεστές φορτίων (γ_F) από το γεωυλικό ($e/h = 0$)

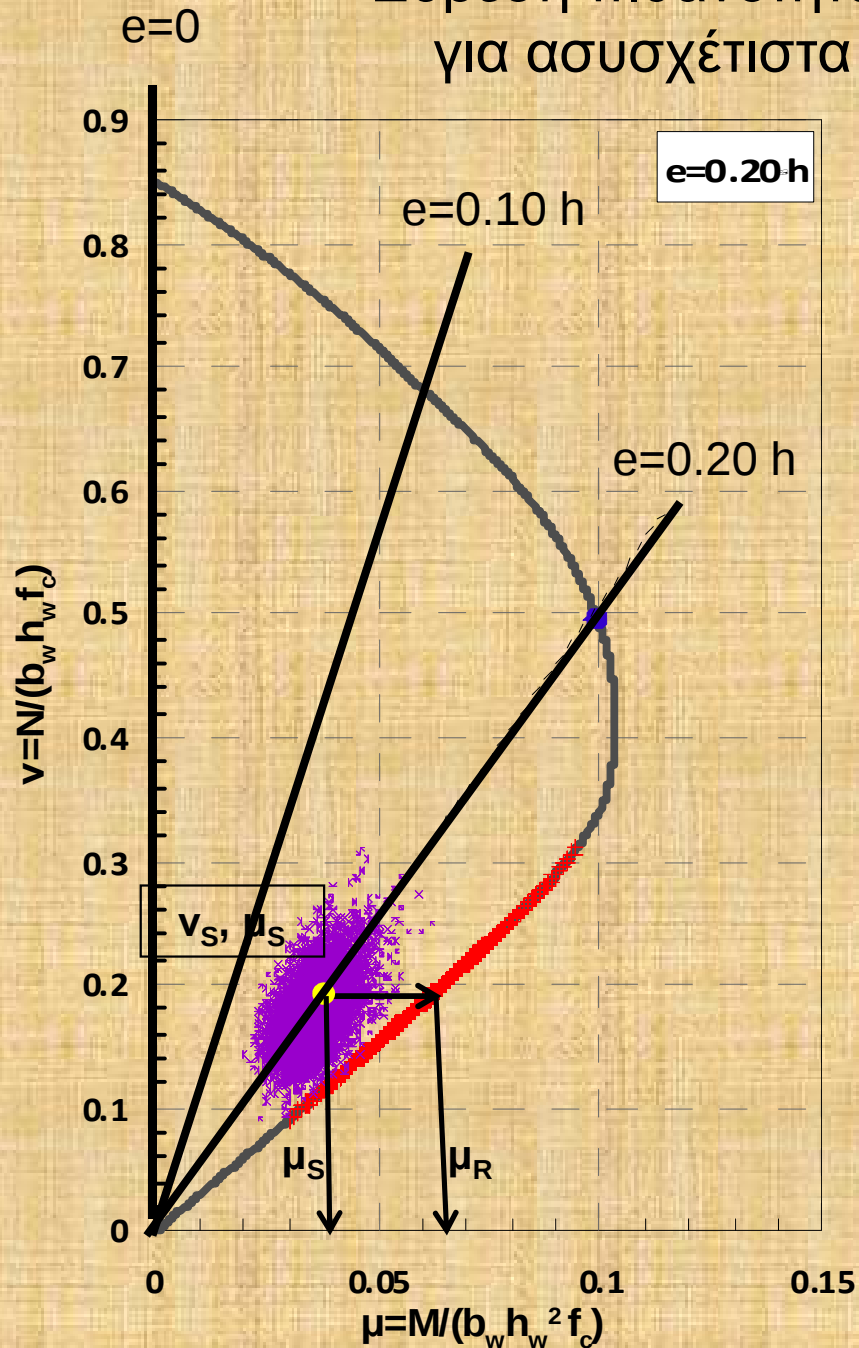
Συντελεστής μεταβλητότητας φορτίων	Επίπεδο αξιοπιστίας			
	$\beta=4.26$ ($p_f=10^{-5}$)	$\beta=4.75$ ($p_f=10^{-6}$)	$\beta=5.20$ ($p_f=10^{-7}$)	$\beta=5.61$ ($p_f=10^{-8}$)
$V_p = 20\%$	1.35	1.35	1.40	1.40
$V_p = 30\%$	1.40	1.40	1.45	1.50
$V_p = 40\%$	1.45	1.50	1.55	1.70
$V_p = 50\%$	1.50	1.60	1.70	1.90

Προτεινόμενες τιμές : $\gamma_F = 1.40 \div 1.60$

ΠΡΟΣΟΧΗ : Συχνά, τα φορτία της τελικής επένδυσης είναι υπερτιμημένα, οπότε ο επιμέρους συντελεστής $\gamma_F = 1.35$ μπορεί να είναι επαρκής

Τελική επένδυση από άοπλο σκυρόδεμα

Εύρεση πιθανότητας αστοχίας και δείκτη αξιοπιστίας
για ασυσχέτιστα δρώντα εντατικά μεγέθη (M , N)



Οι μέσες τιμές είναι
συσχετισμένες : $M/N = e = \text{σταθερό}$

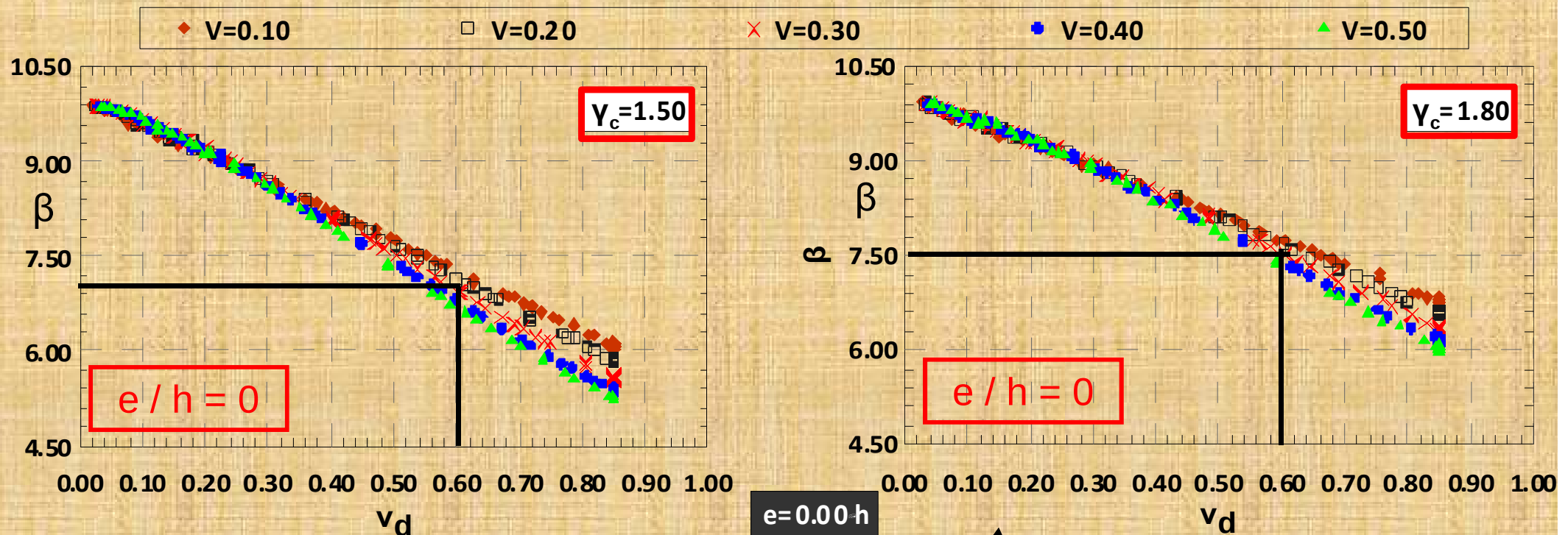
$$p_f = P(\sum(\mu_r - \mu_s) < 0)$$

$$\beta = \frac{1}{\text{erf}(1 - p_f)}$$

Τελική επένδυση από άοπλο σκυρόδεμα

Φόρτιση χωρίς εκκεντρότητα ($e / h = 0$)

Σχεδιασμός με τον επιμέρους συντελεστή μόνιμων δράσεων του EC-2 ($\gamma_F=1.35$)



ανηγμένη αξονική δύναμη

ανηγμένη αξονική δύναμη

$$\beta = 5.5 - 7.3$$

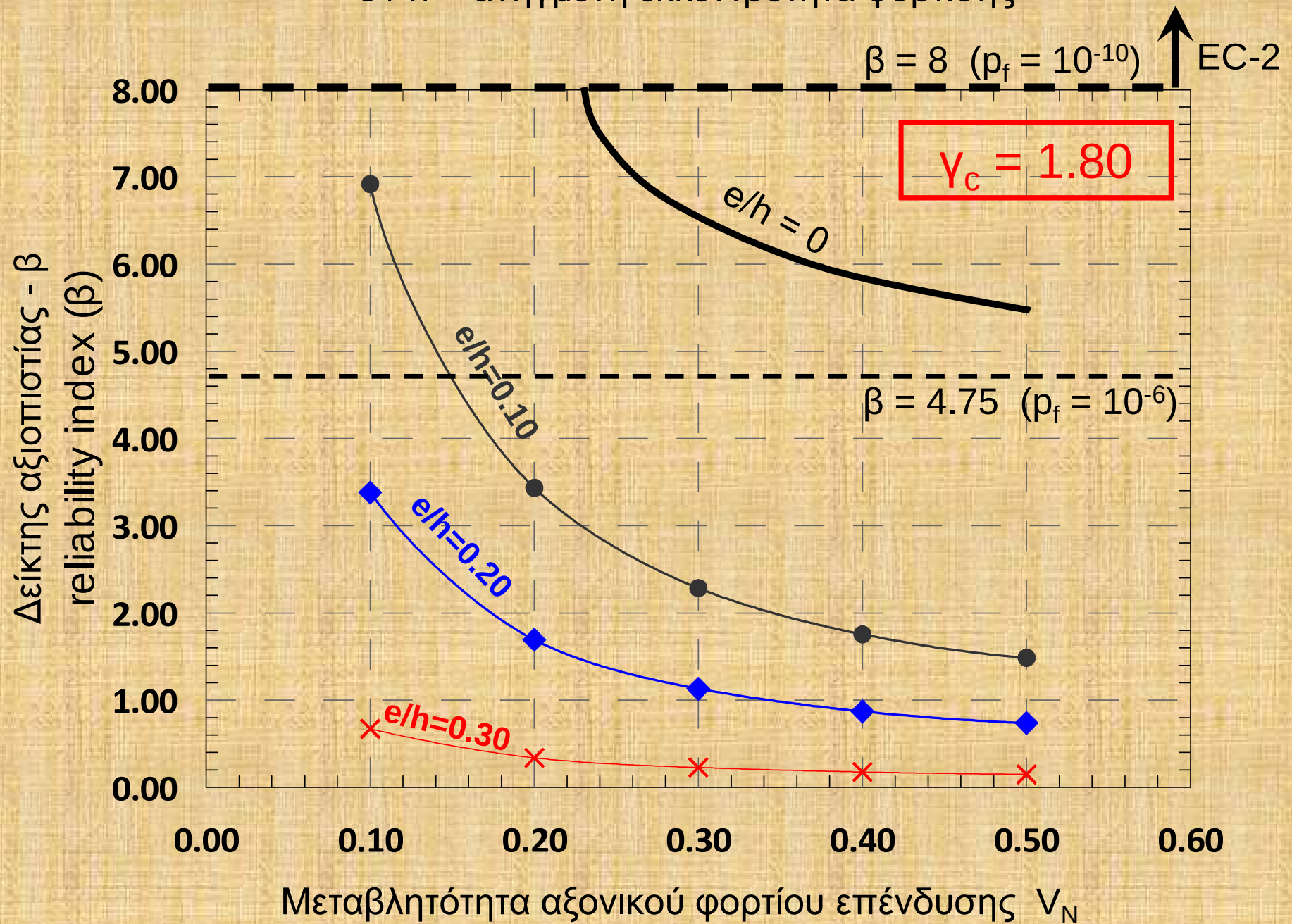
$$\beta = 6.2 - 7.5$$

$$\text{EC-2} \\ \beta = 8 \div 10$$

Για συνήθεις τιμές της θλίψης ($\nu_d = 0.6 - 0.8$)

Τελική επένδυση από άοπλο σκυρόδεμα

Σχεδιασμός με τον επιμέρους συντελεστή μόνιμων δράσεων του EC-2 ($\gamma_F=1.35$)
 e/h = ανηγμένη εκκεντρότητα φόρτισης



Τελική επένδυση από άοπλο σκυρόδεμα

Συμπεράσματα :

- Από την άποψη της στατικής επάρκειας μπορούν να χρησιμοποιούνται άοπλες τελικές επενδύσεις για ανηγμένη εκκεντρότητα (e/h) έως 0.10. Για μεγαλύτερες τιμές της εκκεντρότητας, ο σχεδιασμός είναι «αντιοικονομικός»
- Απαιτείται χρήση επιμέρους συντελεστή υλικού $\gamma_c = 1.80$ (κατά τον EC-2) και αυξημένος συντελεστής φορτίου (γ_F) :
$$e/h = 0 \rightarrow \gamma_F = 1.40 \div 1.70 \quad (\text{για αξιοπιστία } \beta = 5 \div 8)$$
$$e/h = 0.10 \rightarrow \gamma_F = 1.60 \div 2.10 \quad (\text{για αξιοπιστία } \beta = 5 \div 8) \quad (\text{EC-2 : } \beta > 8)$$
- Τα ανωτέρω ισχύουν για «ορθώς» εκτιμημένα φορτία στην τελική επένδυση. Εάν τα φορτία είναι υπερτιμημένα κατά 20-50%, ο συντελεστής $\gamma_F = 1.35$ αρκεί.
- Η επιλογή άοπλων τελικών επενδύσεων πρέπει να λάβει υπόψη και άλλα θέματα, όπως ρηγμάτωση λόγω συστολής ξηράνσεως, αποφυγή κατάρρευσης σε περίπτωση πυρκαγιάς, λοιπές φορτίσεις της τελικής επένδυσης, κλπ