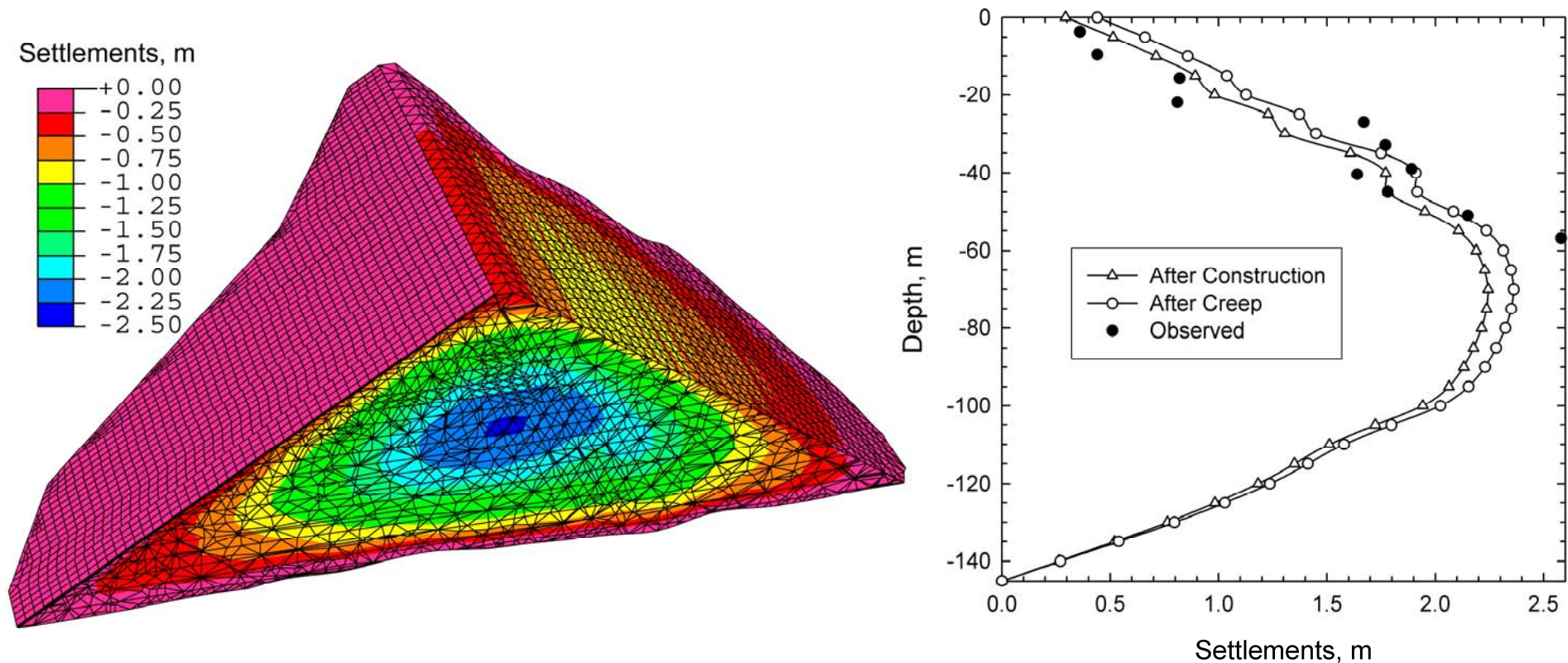


Μη-Γραμμική 3Δ Ανάλυση της Κατασκευής, Πλήρωσης και Σεισμικής Απόκρισης Φραγμάτων Λιθορριπής (CFRD)- Σημαντικές Παράμετροι

Π. Ντακούλας, Αν. Καθηγητής
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος



Θέματα

- Φράγματα λιθορριπής με ανάντη πλάκα σκυροδέματος
- Καταστατικά Προσομοιώματα για στατική και δυναμική ανάλυση λιθορριπής και σκυροδέματος

- **Στατική ανάλυση**

Επίδραση της δυσκαμψίας του εδαφικού υλικού

Επίδραση της 3Δ γεωμετρίας

- **Δυναμική ανάλυση**

Απόκριση σε διέγερση στην ανάντη – κατόντη κατεύθυνση

Επίδραση της δυναμικής συνίζησης

Επίδραση της δυσκαμψίας της λιθορριπής

Απόκριση σε διέγερση κατά μήκος του φράγματος

Επίδραση της δυσκαμψίας και στενότητας της κοιλάδας

Πλεονεκτήματα των CFRDs

- Υψηλές κλίσεις πρανών λόγω μεγάλης γωνίας διατμητικής αντοχής και απουσίας νερού από τη λιθορριπή
- Το βάρος του νερού αυξάνει τη δυσκαμψία και αντοχή της λιθορριπής
- Η συμπύκνωση της λιθορριπής υπό βροχή αποδεκτή ή επιθυμητή
- Οικονομία υλικών λόγω μεγάλης κλίσης πρανών
- Λιγότερα υλικά από μακρινά λατομεία
- Ταχύτερη κατασκευή
- Ασφαλέστερη λειτουργία
- Ευκολότερη συντήρηση



Φράγμα Μεσοχώρας

Αρχείο ΔΕΗ



Φράγμα Μεσοχώρας

Αρχείο ΔΕΗ



Φράγμα Μεσοχώρας

Αρχείο ΔΕΗ

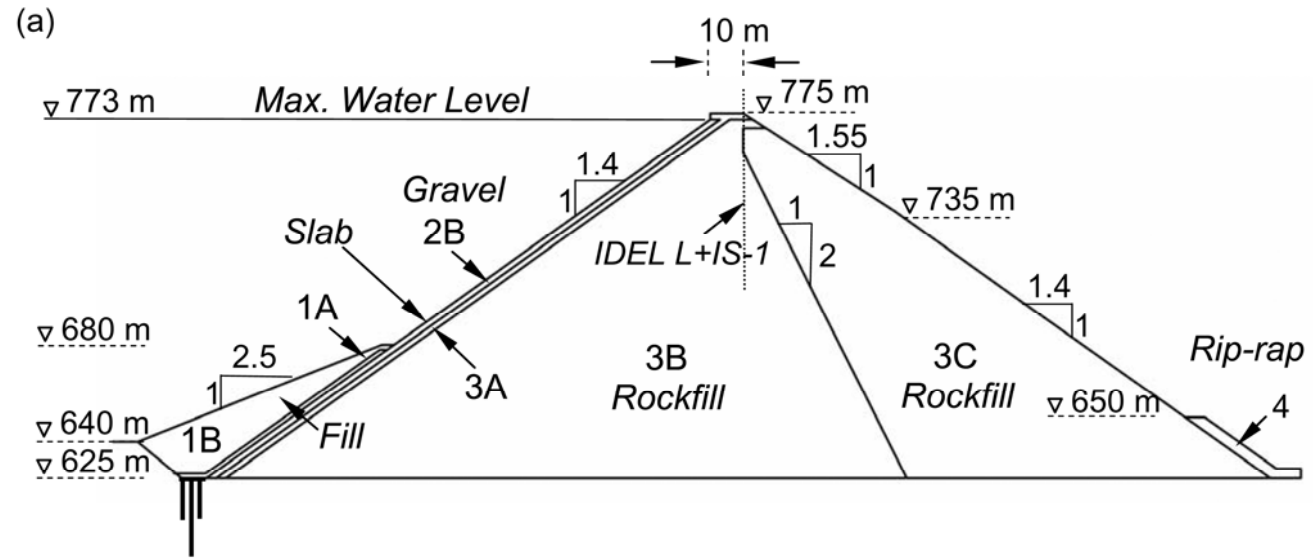


Φράγμα Μεσοχώρας

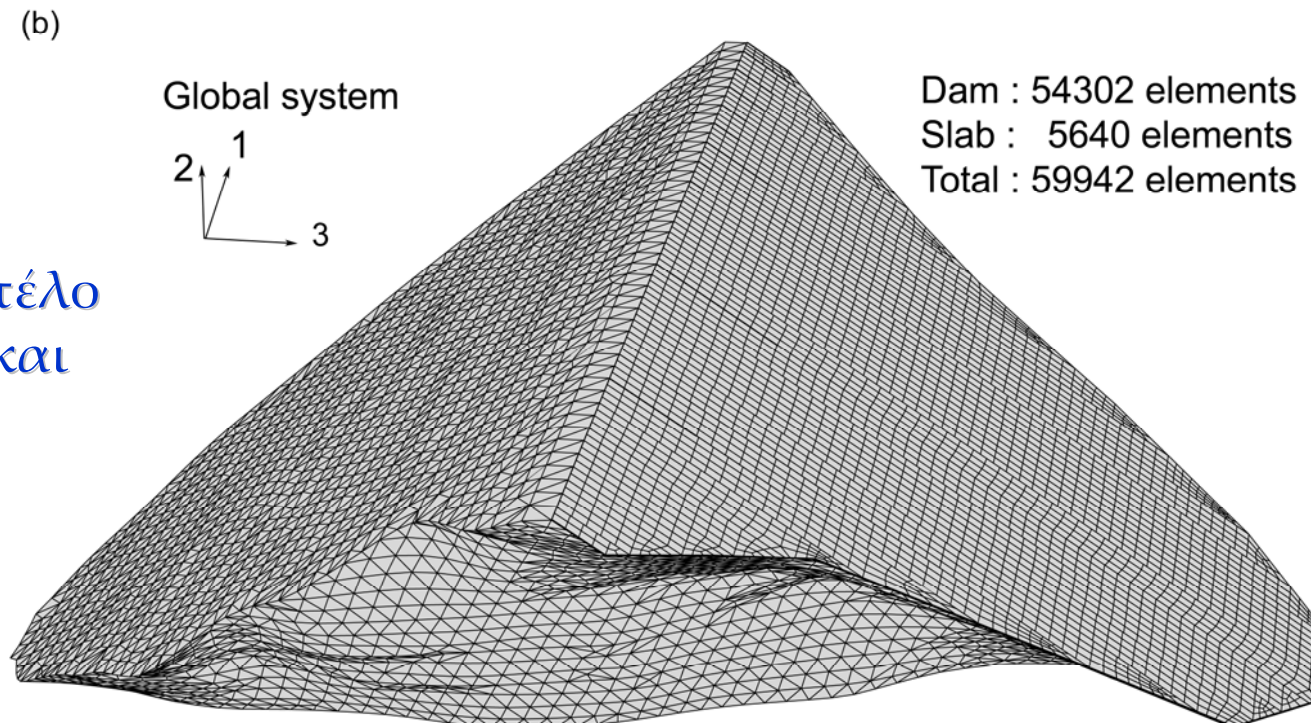


Φράγμα Μεσοχώρας

Γεωμετρία και
ζώνες υλικών



Αριθμητικό μοντέλο
του φράγματος και
των 23 πλακών



Καταστατικά προσομοιώματα εδάφους και λιθορριπής: Απαιτούμενα χαρακτηριστικά

Στατική ανάλυση

- Μη γραμμική σχέση τάσης - παραμόρφωσης
- Εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας από

$$\sigma_3 \quad \eta \quad p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$$

- Εξάρτηση του μέτρου ελαστικότητας από $\sigma_1 - \sigma_3$
- Αύξηση της δυσκαμψίας κατά την αποφόρτιση/επαναφόρτιση
- Κριτήριο αστοχίας

Στατική Ανάλυση: Duncan and Chang

Εφαπτομενικό μέτρο Young για φόρτιση :

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \phi)}{2\sigma_3 \sin \phi + 2c \cos \phi} \right]^2$$

Γωνία διατμητικής αντοχής :

$$\phi = \phi_o - \Delta\phi \log \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)$$

Εφαπτομενικό μέτρο Young για αποφόρτιση :

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n$$

Μέτρο διόγκωσης :

$$B = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m$$

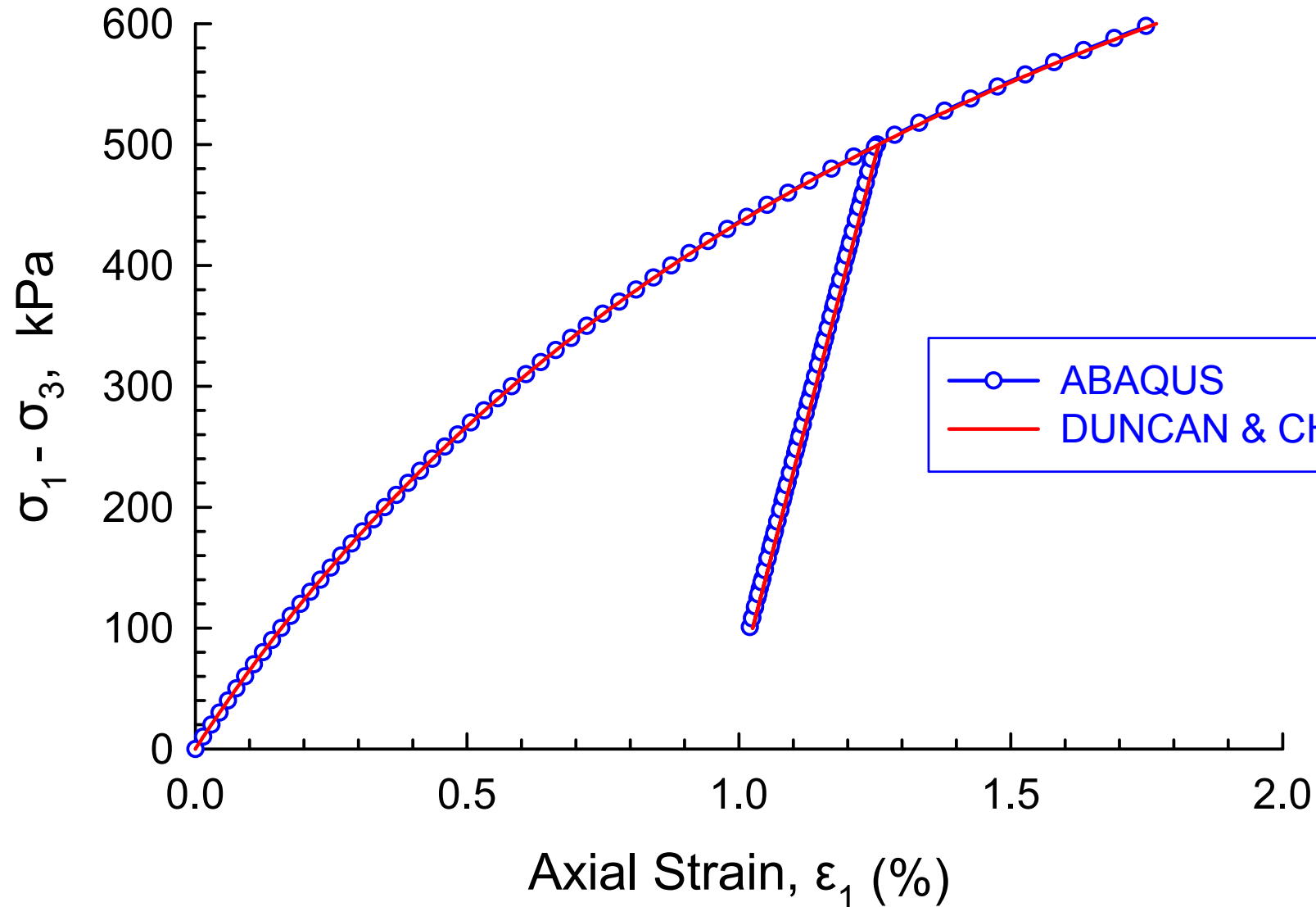
Κριτήριο φόρτισης/αποφόρτισης :

$$S \geq S_{\max} \longrightarrow \text{φόρτιση} \quad S = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_{1f} - \sigma_{3f}} \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{1/4}$$
$$S < S_{\max} \longrightarrow \text{αποφόρτιση}$$

Παράμετροι προσομοιώματος : $K, K_{ur}, K_b, R_f, n, m, \phi_0, \Delta\phi$

ABAQUS Model – Στατική ανάλυση:

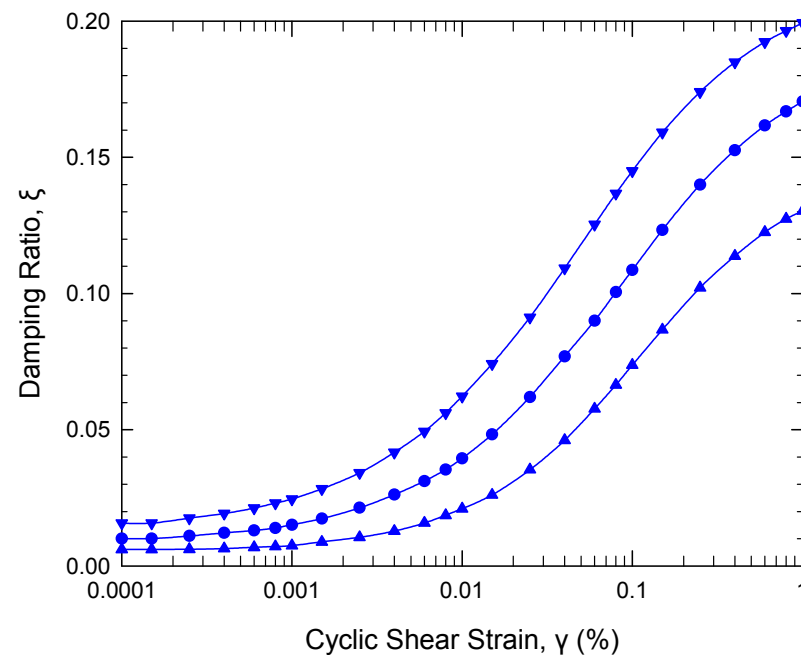
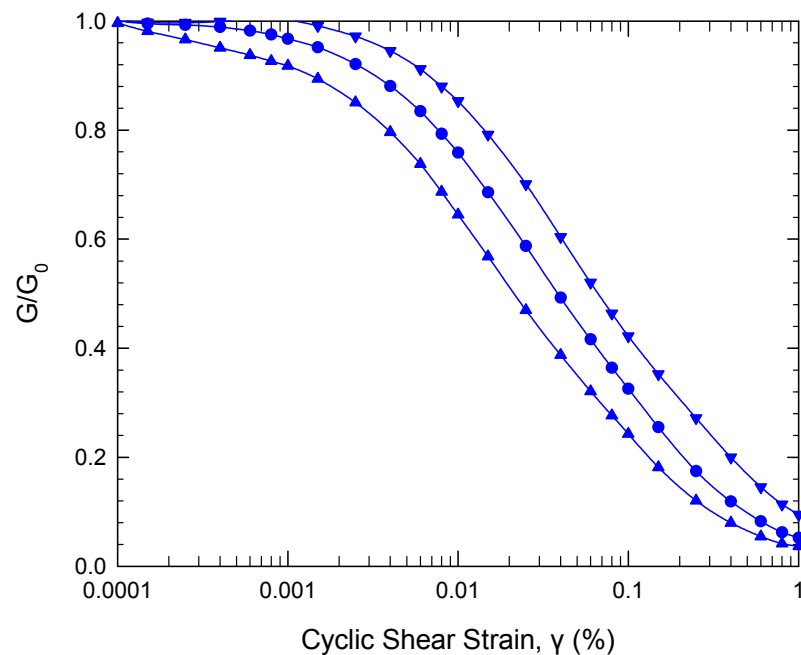
Προσομοίωση τριαξονικής θλίψης με φόρτιση / αποφόρτιση



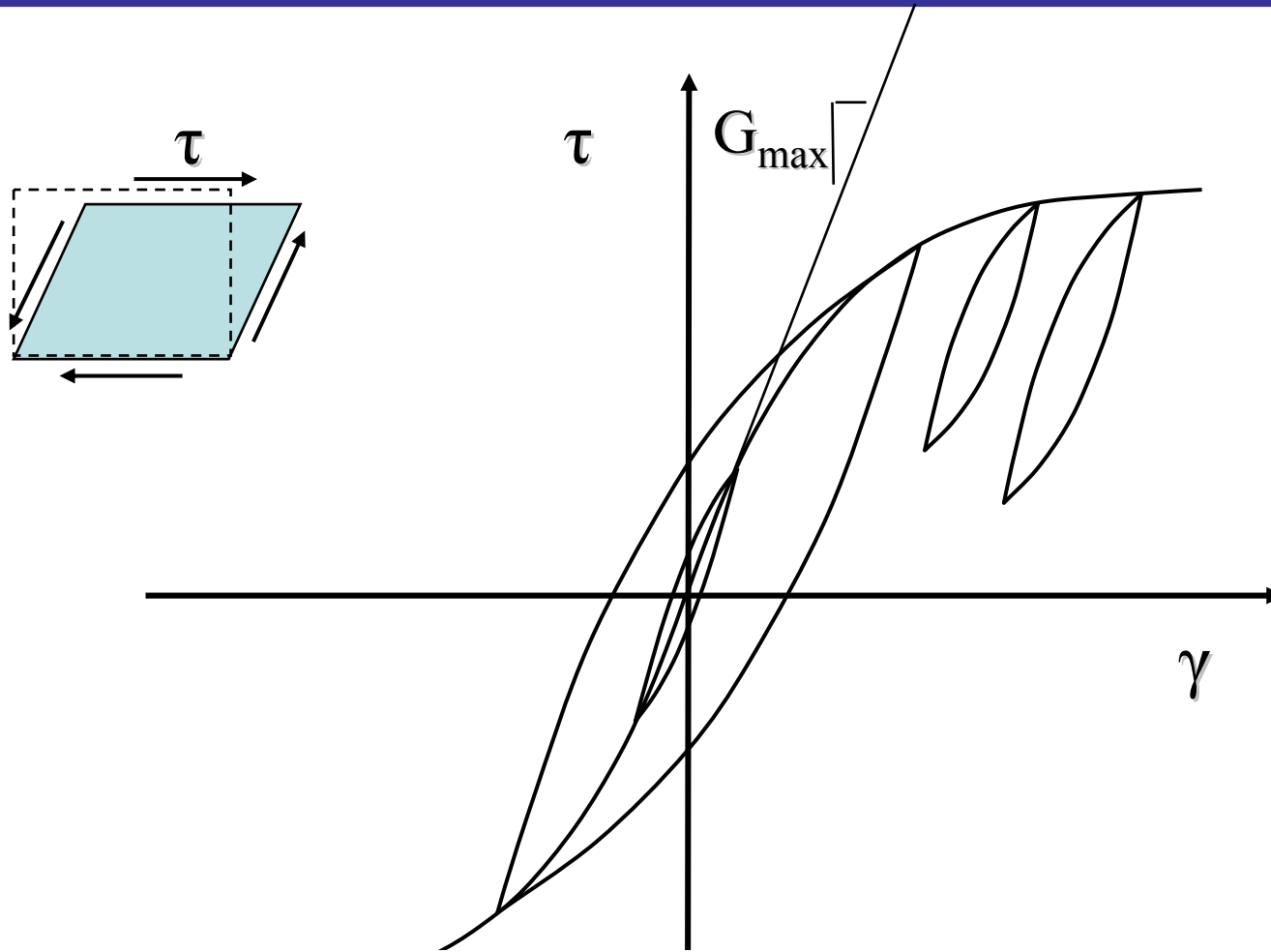
Καταστατικά προσομοιώματα εδάφους και λιθορριπής: Απαιτούμενα χαρακτηριστικά

Δυναμική ανάλυση

- Αρχική δυναμική δυσκαμψία του υλικού
- Μεταβολή της δυσκαμψίας και λόγου υστερητικής απόσβεσης με το πλάτος παραμόρφωσης σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα



Μη-γραμμική ανελαστική συμπεριφορά εδάφους & λιθορριπής



Μη γραμμική ελαστική συμπεριφορά

$$10^{-5} < \gamma < 10^{-4}$$

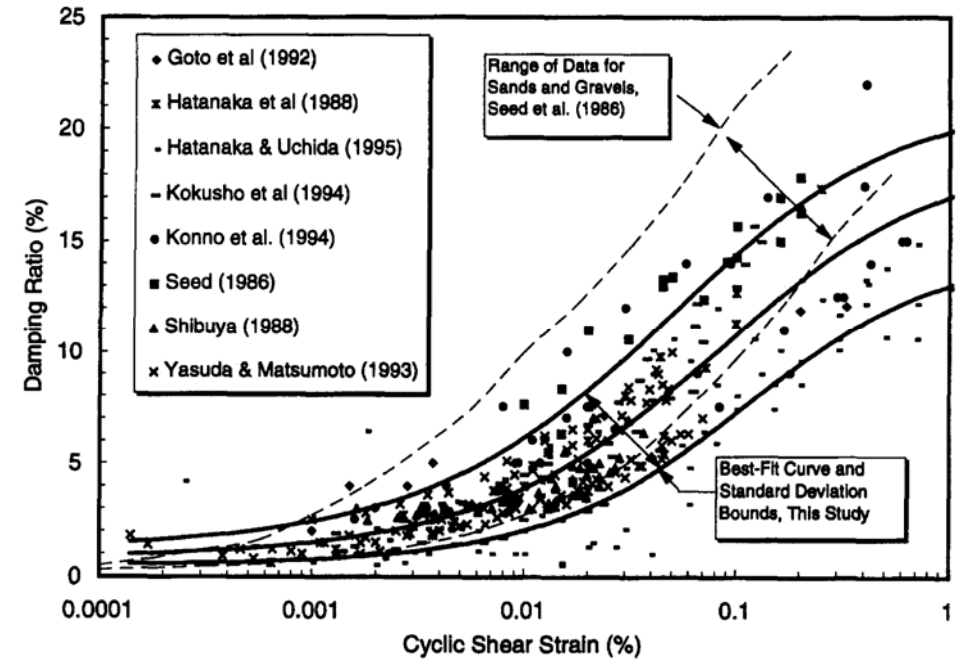
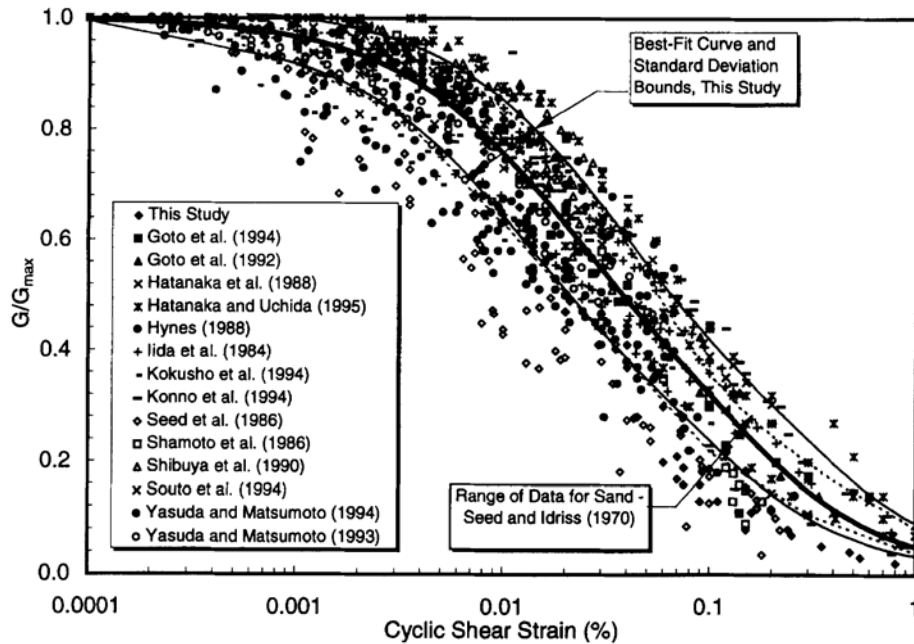
Ανελαστική συμπεριφορά

$$10^{-4} < \gamma < 10^{-5}$$

Έντονα ανελαστική συμπεριφορά

$$\gamma > 10^{-3}$$

Τέμνον μέτρο διάτμησης και λόγος απόσβεσης χαλίκων



Μη γραμμική ελαστική συμπεριφορά

Ανελαστική συμπεριφορά

Έντονα ανελαστική συμπεριφορά

$$10^{-5} < \gamma < 10^{-4}$$

$$10^{-4} < \gamma < 10^{-5}$$

$$\gamma > 10^{-3}$$

(Rollins et al. 1998)

Δυναμική Ανάλυση: Υστερητικό προσομοίωμα

Εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης για μονοτονική φόρτιση :

$$G_t / G_0 = \frac{a}{1 + \exp(-(\log \gamma_e - c)/b)} + \frac{a \exp(-(\log \gamma_e - c)/b)}{b (1 + \exp(-(\log \gamma_e - c)/b))^2 \ln 10}$$

Εφαπτομενικό μέτρο διάτμησης για αποφόρτιση/επαναφόρτιση
(*Masing criterion*) :

$$G_t / G_0 = \frac{a}{1 + \exp(-(\log(|\gamma - \gamma_{ref}|/2) - c)/b)} + \frac{a \exp(-(\log(|\gamma - \gamma_{ref}|/2) - c)/b)}{b (1 + \exp(-(\log(|\gamma - \gamma_{ref}|/2) - c)/b))^2 \ln 10}$$

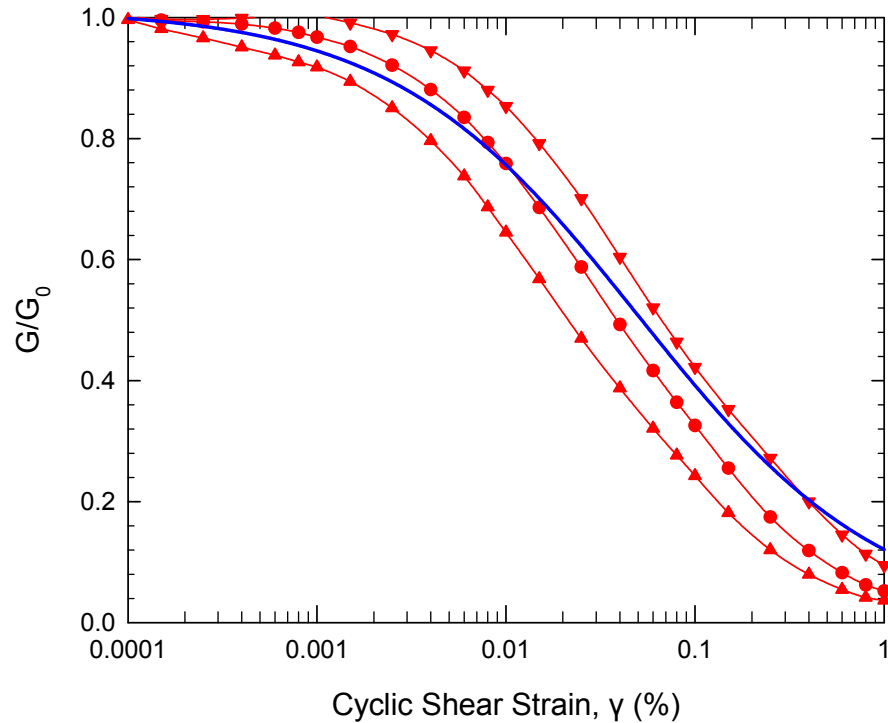
Ισοδύναμη σεισμική διατμητική παραμόρφωση :

$$\gamma_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})^2 + (\varepsilon_{22} - \varepsilon_{33})^2 + (\varepsilon_{33} - \varepsilon_{11})^2 + 3(\gamma_{12}^2 + \gamma_{23}^2 + \gamma_{31}^2)/2}$$

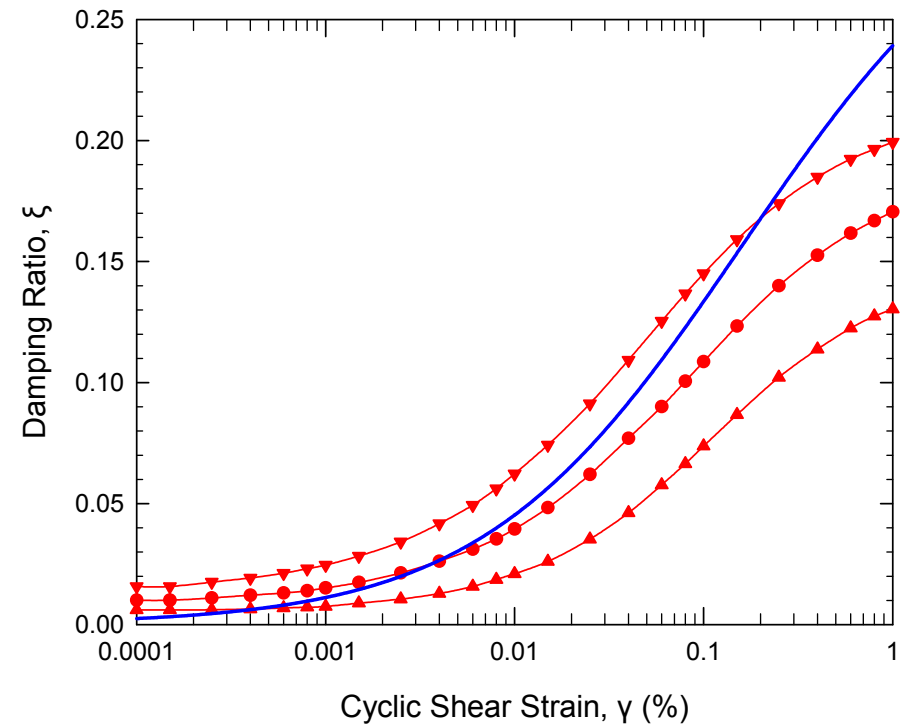
όπου a, b, c είναι παράμετροι και γ_{ref} παραμόρφωση αναφοράς.

Δυναμική ανάλυση: Υστερητικό προσομοίωμα

Τέμνον μέτρο διάτμησης, G/G_0



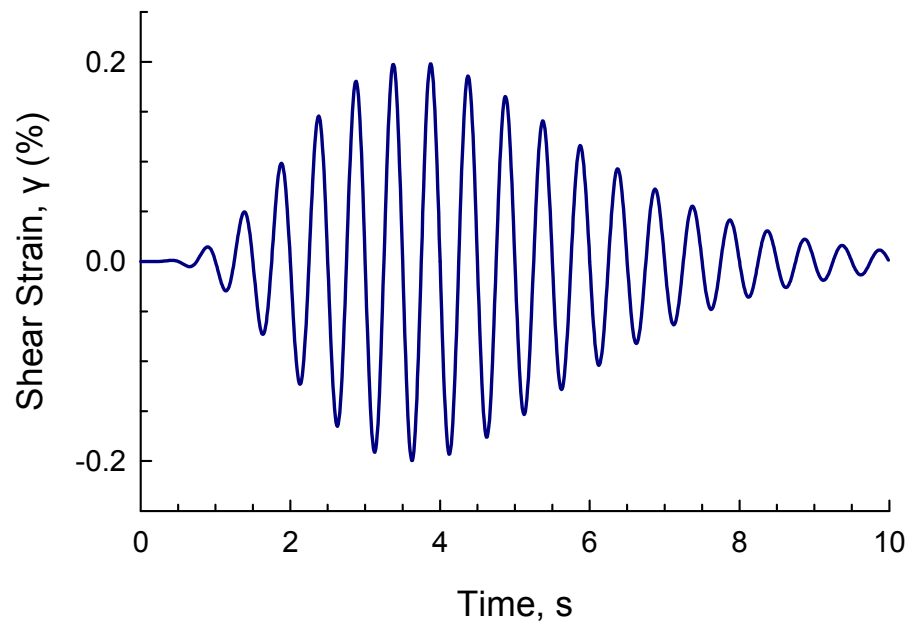
Λόγος κρίσιμης απόσβεσης, ξ



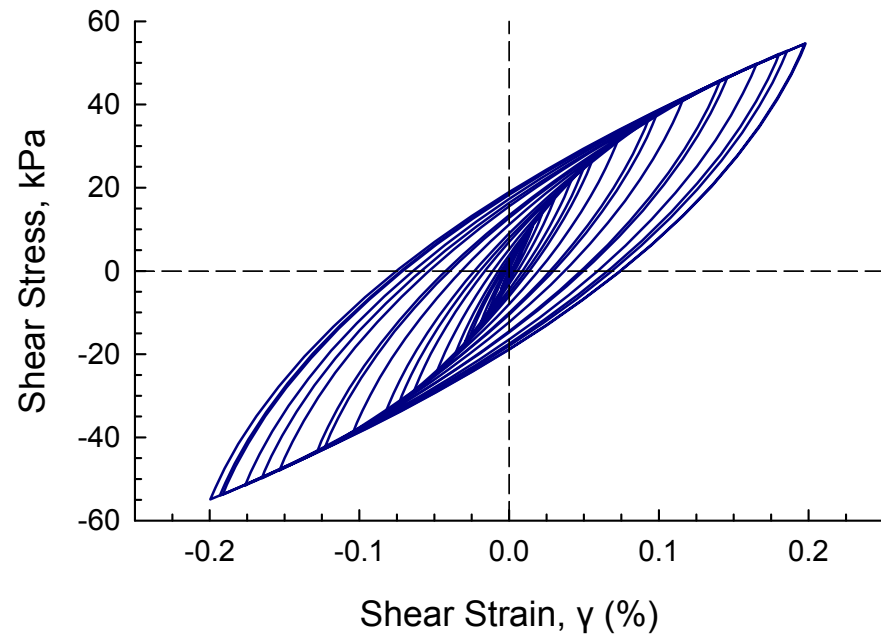
- μ_ξ (Rollins et al. 1998)
- ▼ $\mu_\xi + \sigma_\xi$, ditto
- ▲ $\mu_\xi - \sigma_\xi$, ditto
- Hysteretic Model

ABAQUS Model – Δυναμική ανάλυση: Προσομοίωση ανακυκλικής δοκιμής απλής διάτμησης

Επιβαλλόμενη χρονοϊστορία
διατμητικής παραμόρφωσης

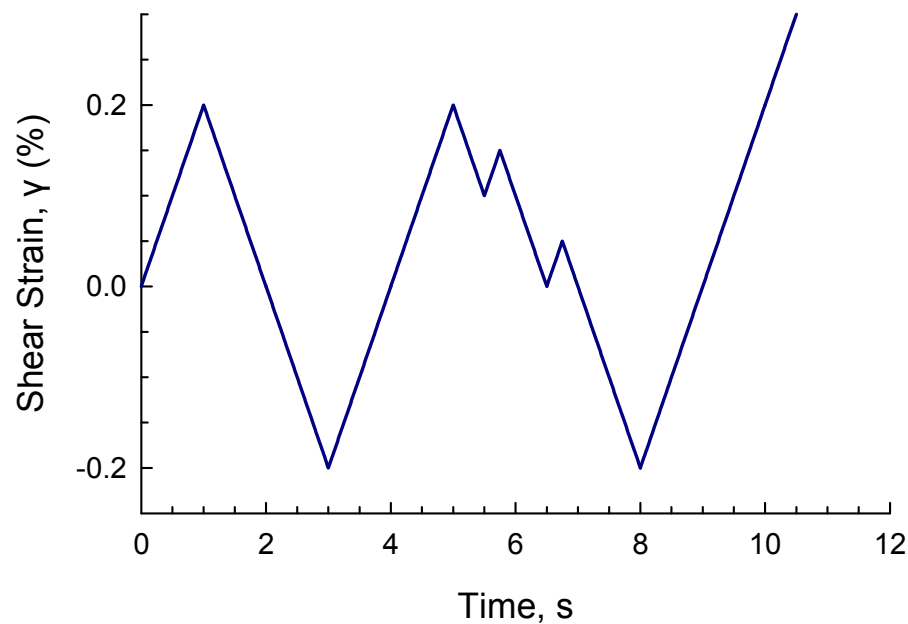


Σχέση τάσης - παραμόρφωσης

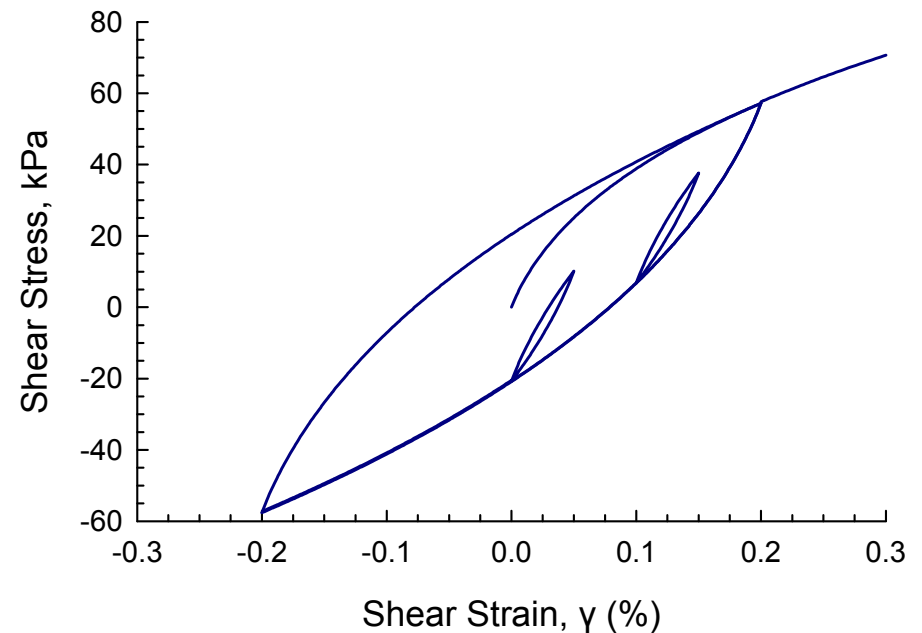


ABAQUS Model – Δυναμική ανάλυση: Προσομοίωση ανακυκλικής δοκιμής απλής διάτμησης

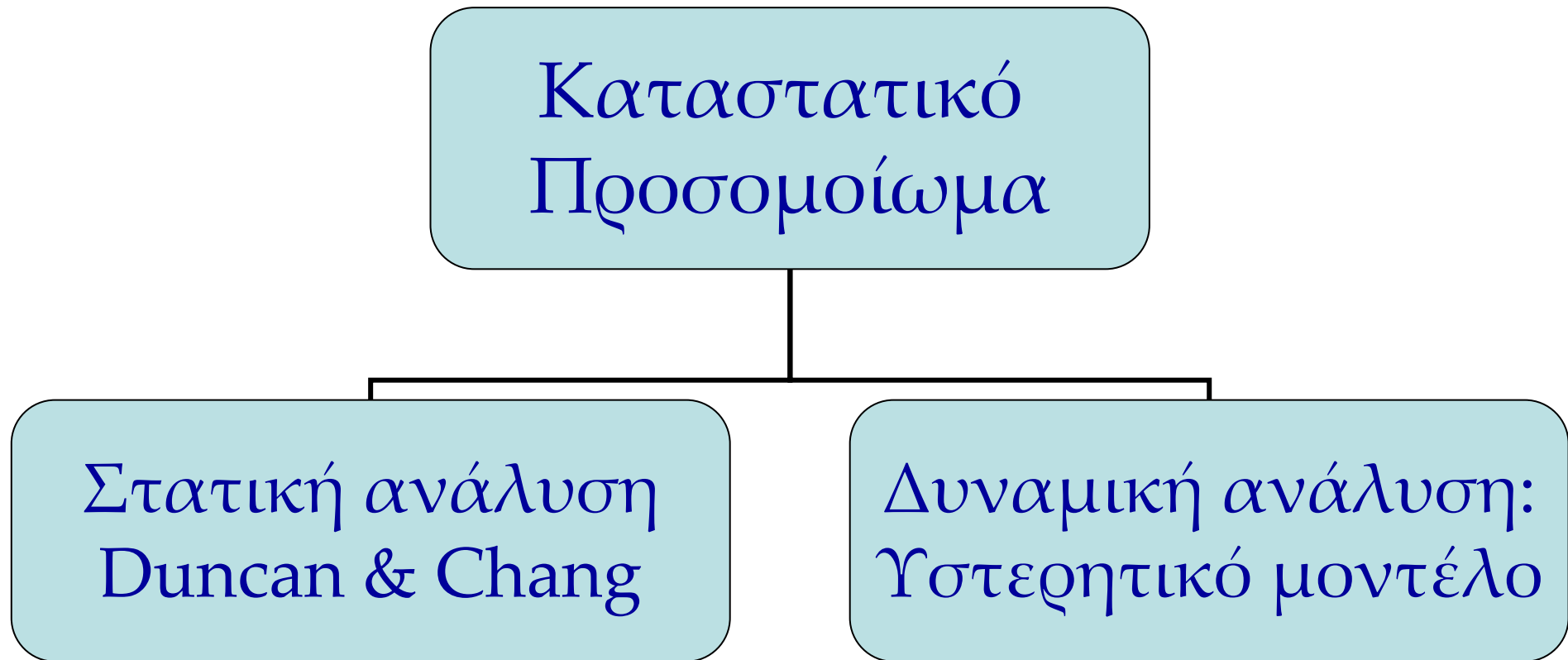
Επιβαλλόμενη χρονοϊστορία
διατμητικής παραμόρφωσης



Σχέση τάσης - παραμόρφωσης



Καταστατικό προσομοίωμα για λιθορριπή και χαλίκι

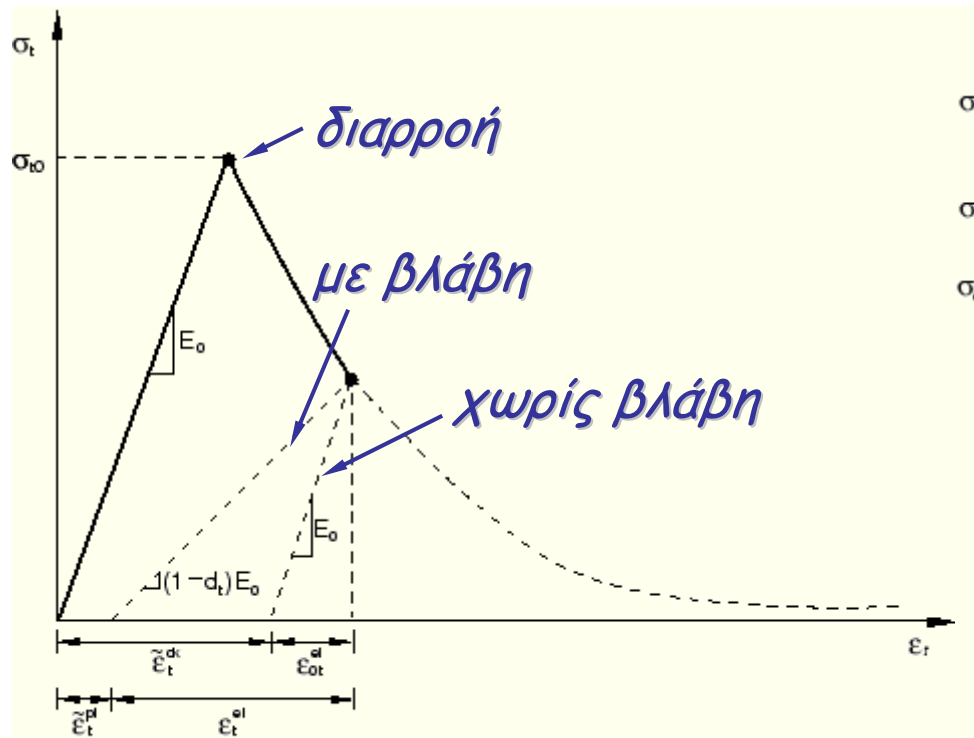


Το ενοποιημένο προσομοίωμα ενσωματώθηκε
στο πρόγραμμα *ABAQUS*

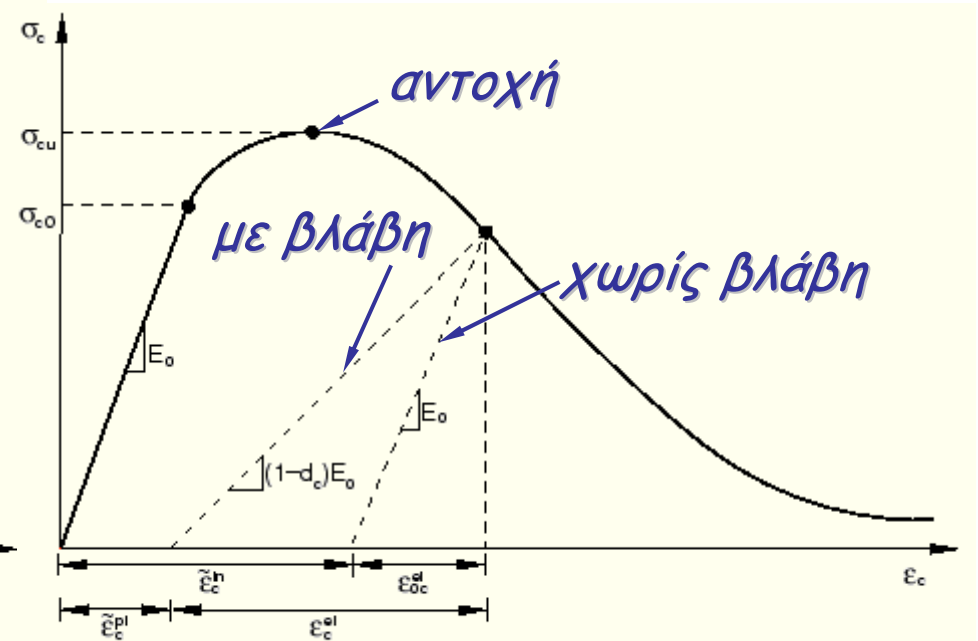
Καταστατικό προσομοίωμα σκυροδέματος

Concrete damaged plasticity model (with rebar)

Εφελκυσμός

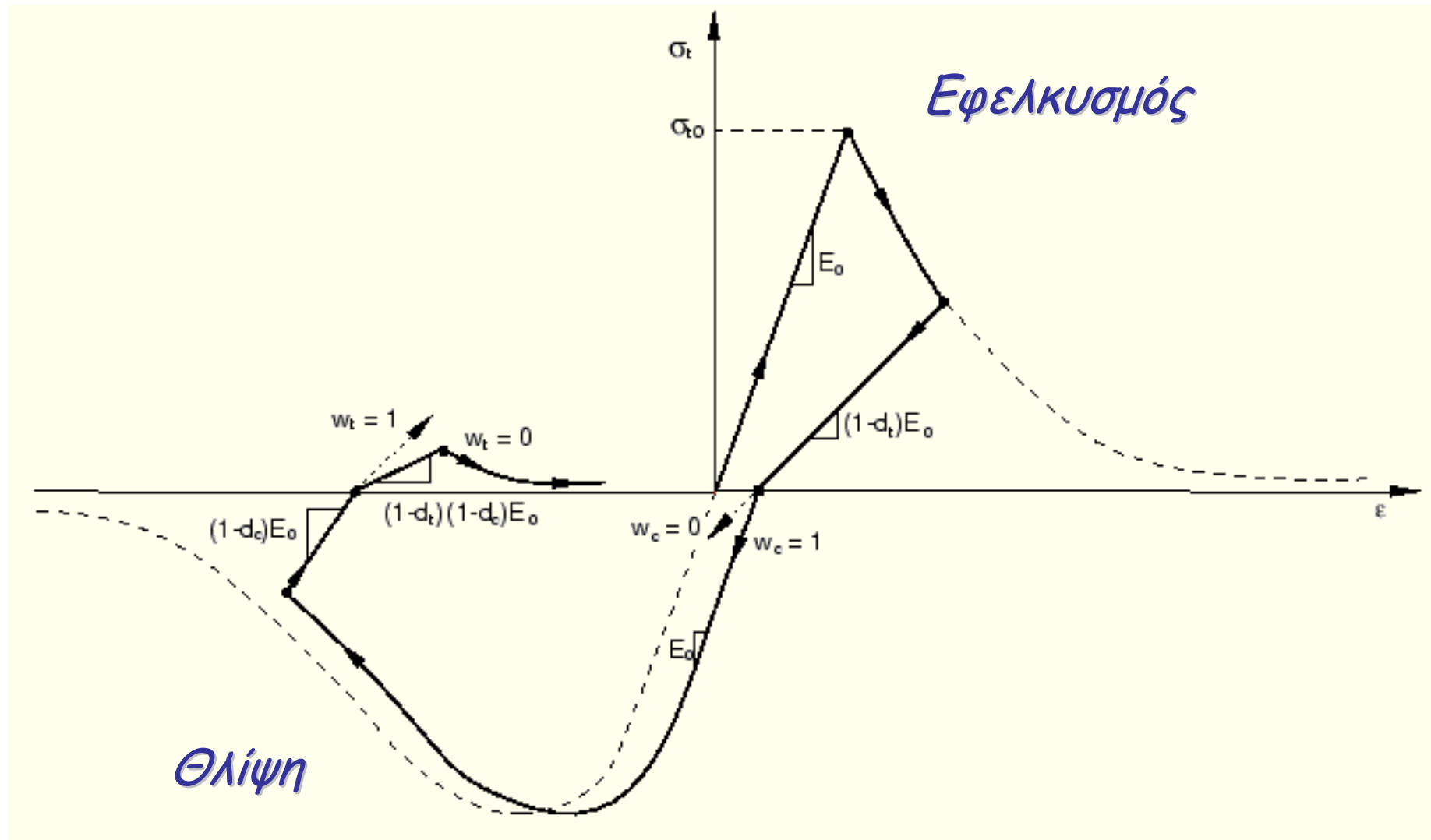


Θλίψη



Καταστατικό προσομοίωμα σκυροδέματος

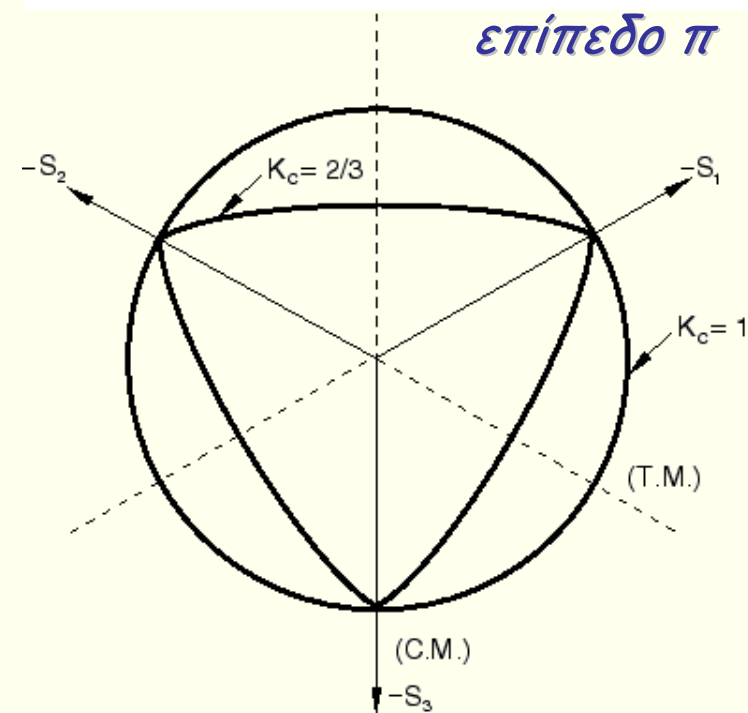
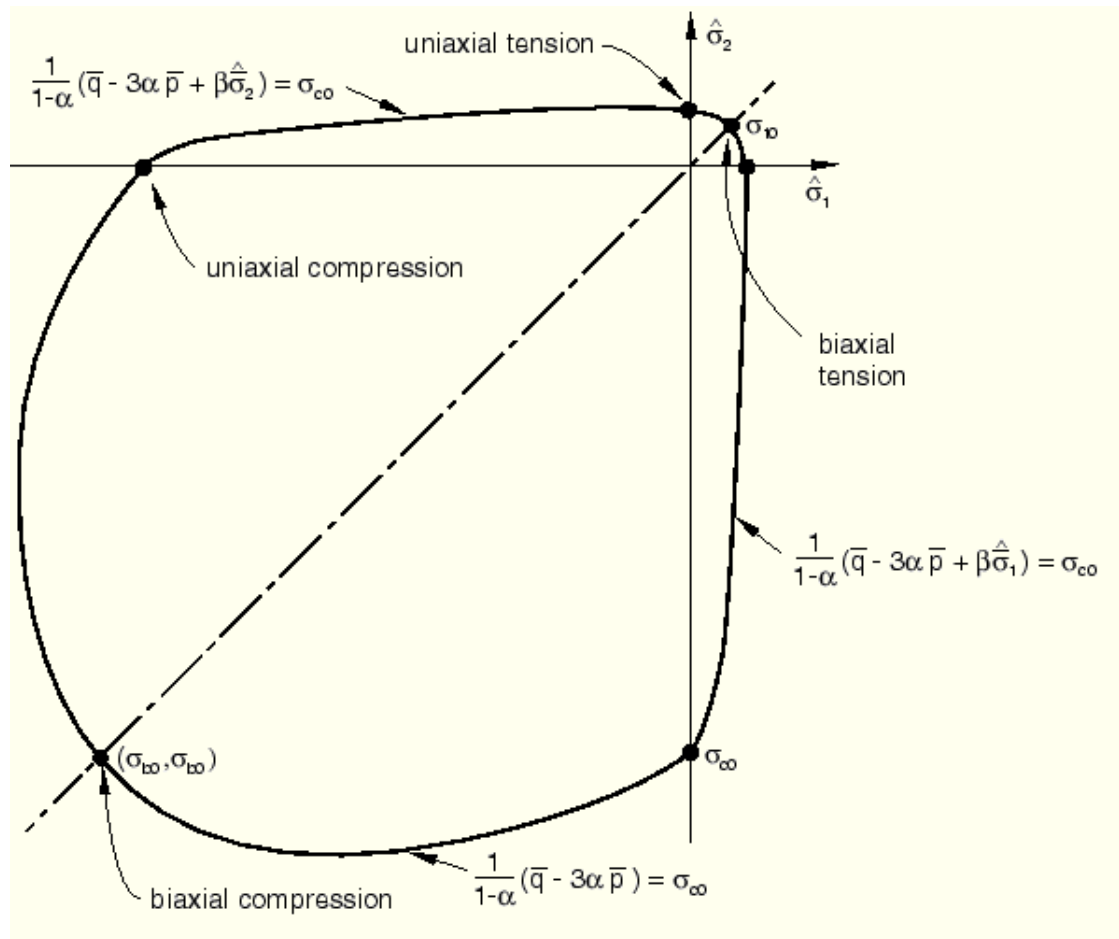
Concrete damaged plasticity model (with rebar)



Καταστατικό προσομοίωμα σκυροδέματος

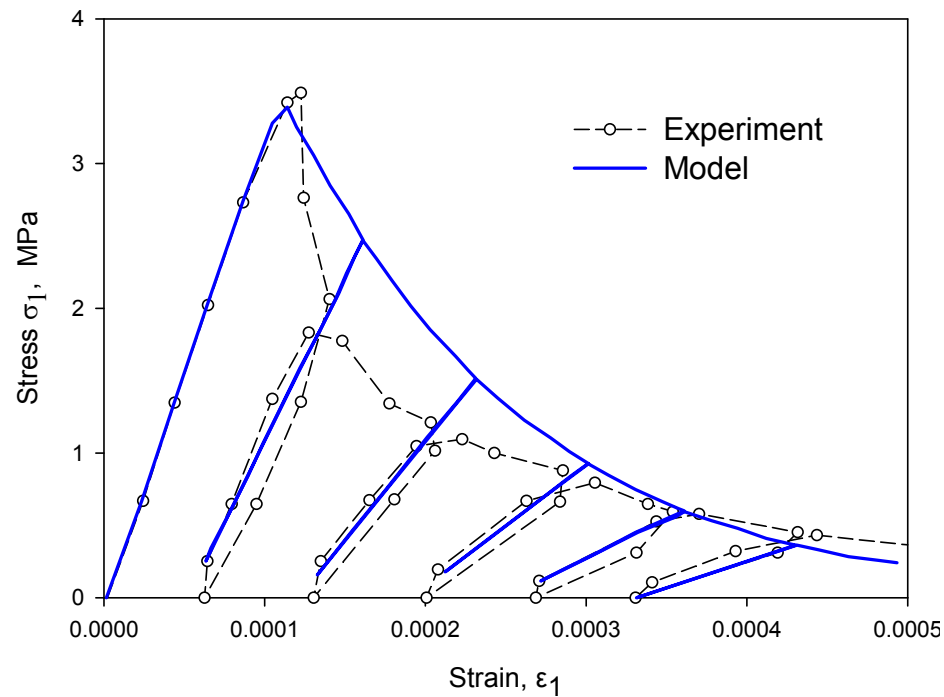
Concrete damaged plasticity model (with rebar)

Επιφάνεια διαρροής

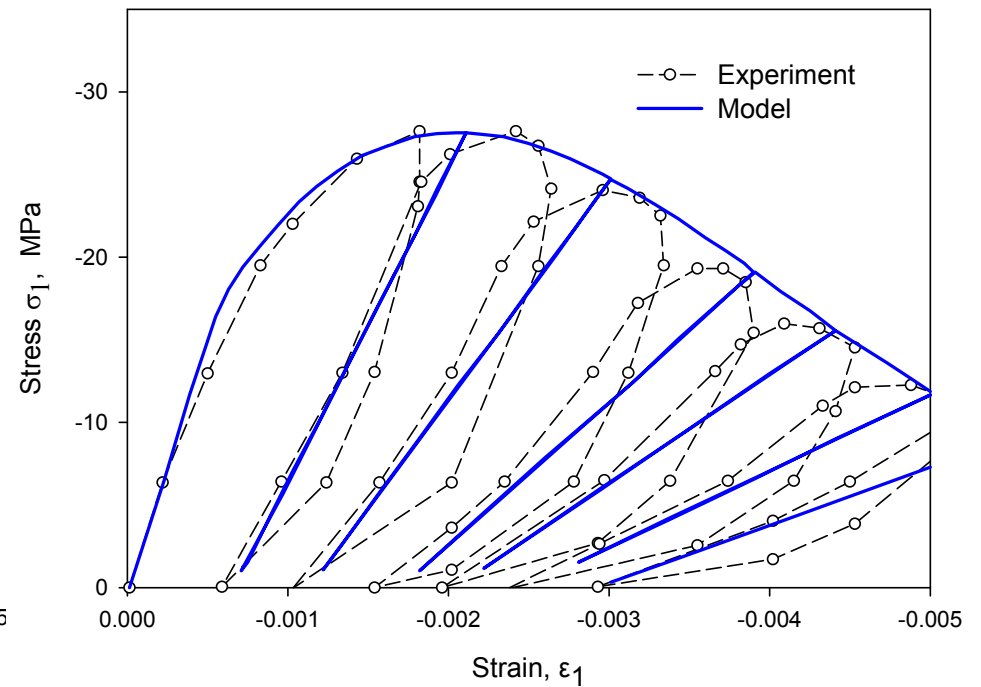


Επιβεβαίωση με πειραματικά δεδομένα

Εφελκυσμός



Θλίψη



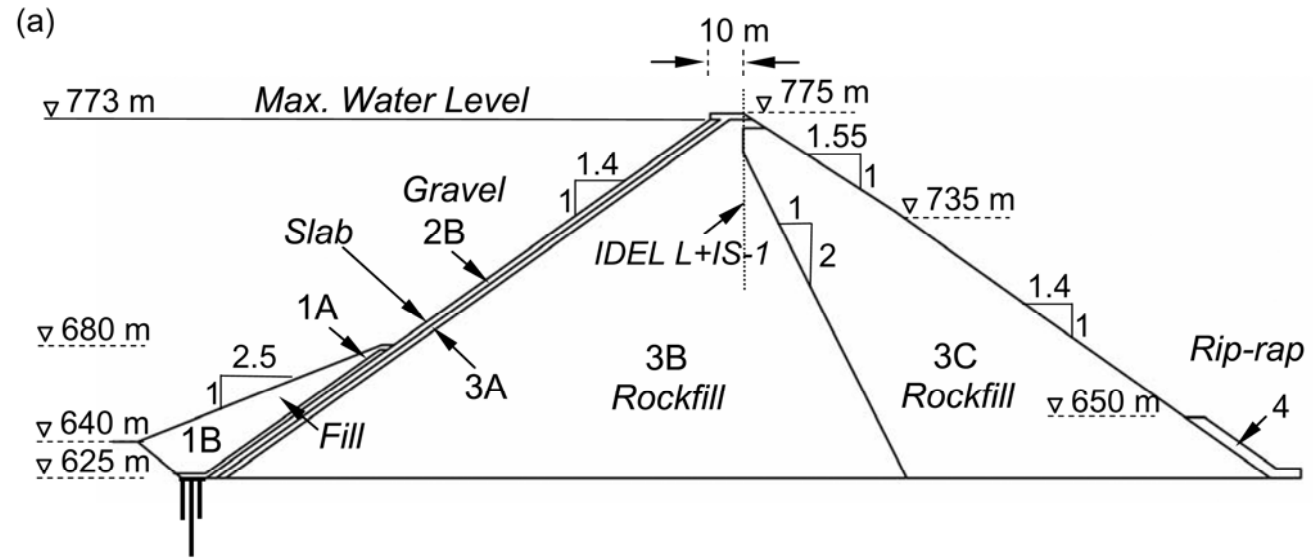
Lee and Fenves (1998)

Σταδιακή κατασκευή & πλήρωση λεκάνης

Στατική Ανάλυση CFRD

Φράγμα Μεσοχώρας

Γεωμετρία και
ζώνες υλικών



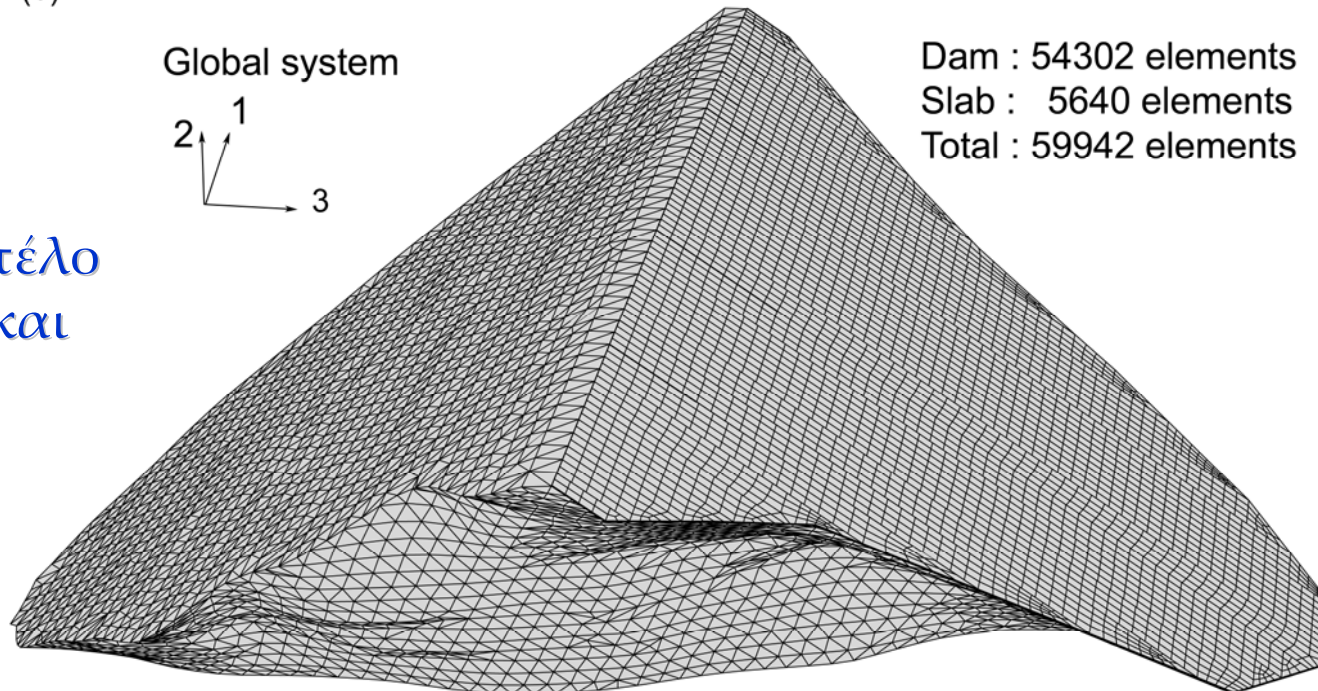
(b)

Global system



Dam : 54302 elements
Slab : 5640 elements
Total : 59942 elements

Αριθμητικό μοντέλο
του φράγματος και
των 23 πλακών



Διακριτοποίηση της 3D γεωμετρίας

Φράγμα με ανάντη
πλάκα σκυροδέματος

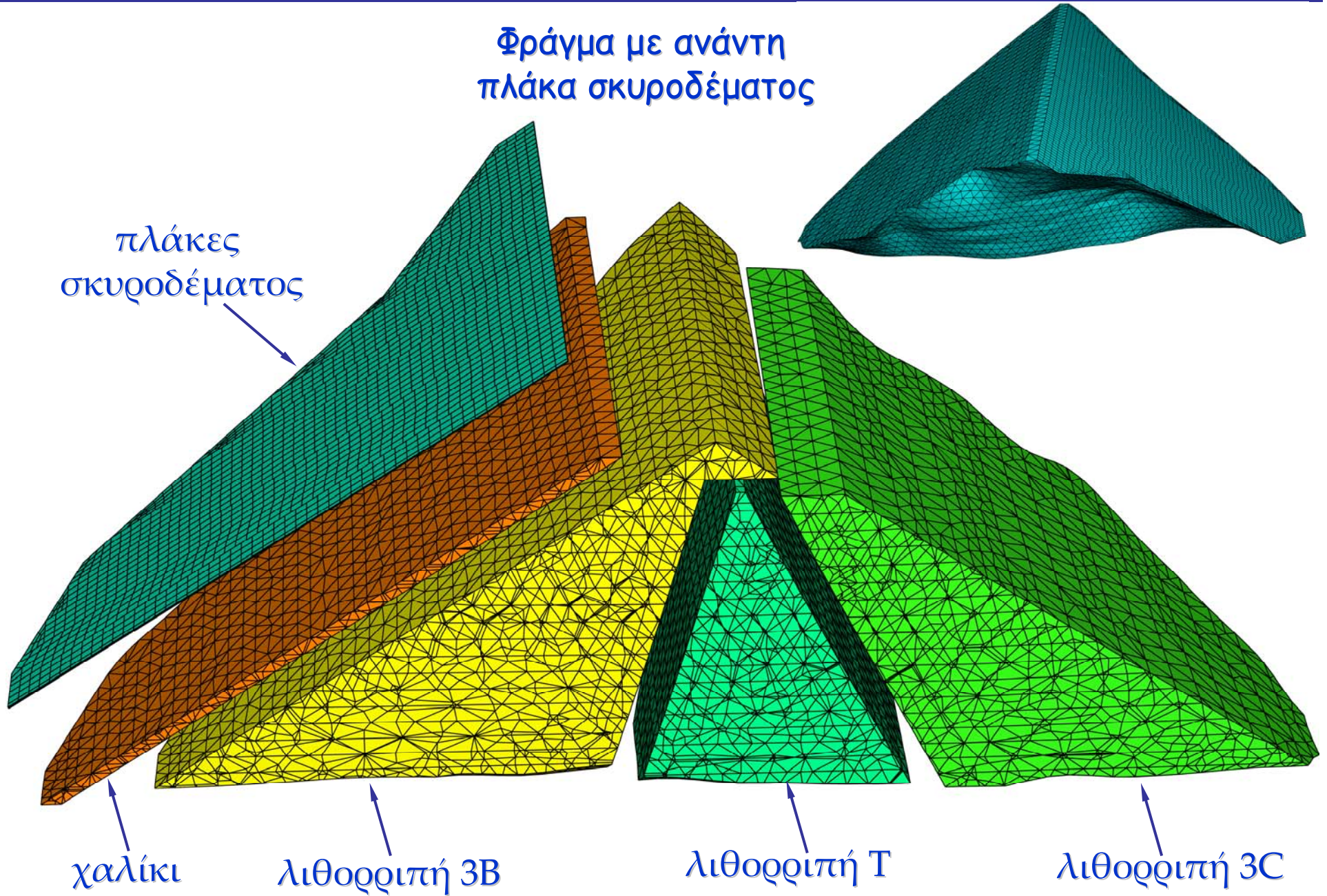
πλάκες
σκυροδέματος

χαλίκι

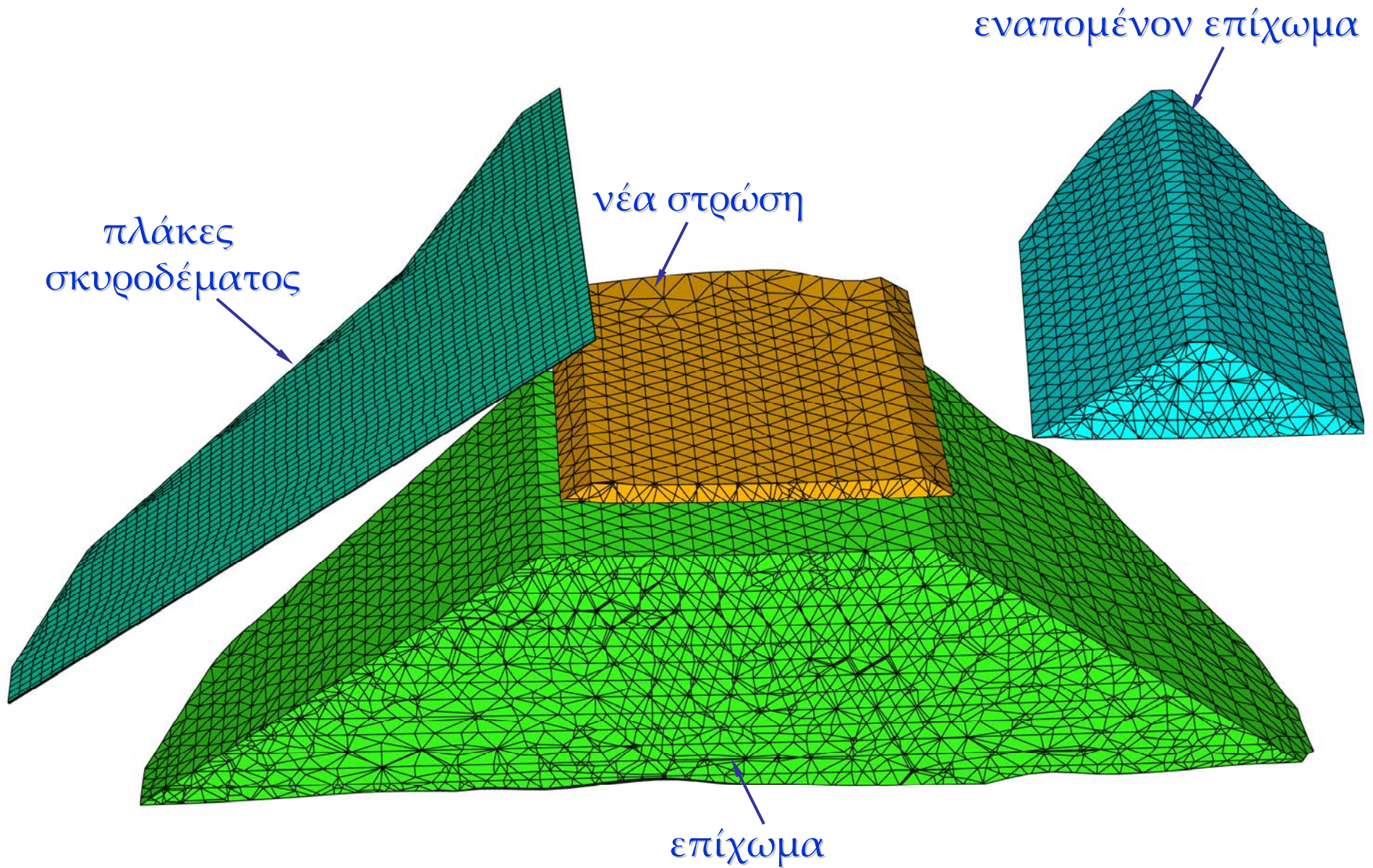
λιθορριπή 3B

λιθορριπή T

λιθορριπή 3C

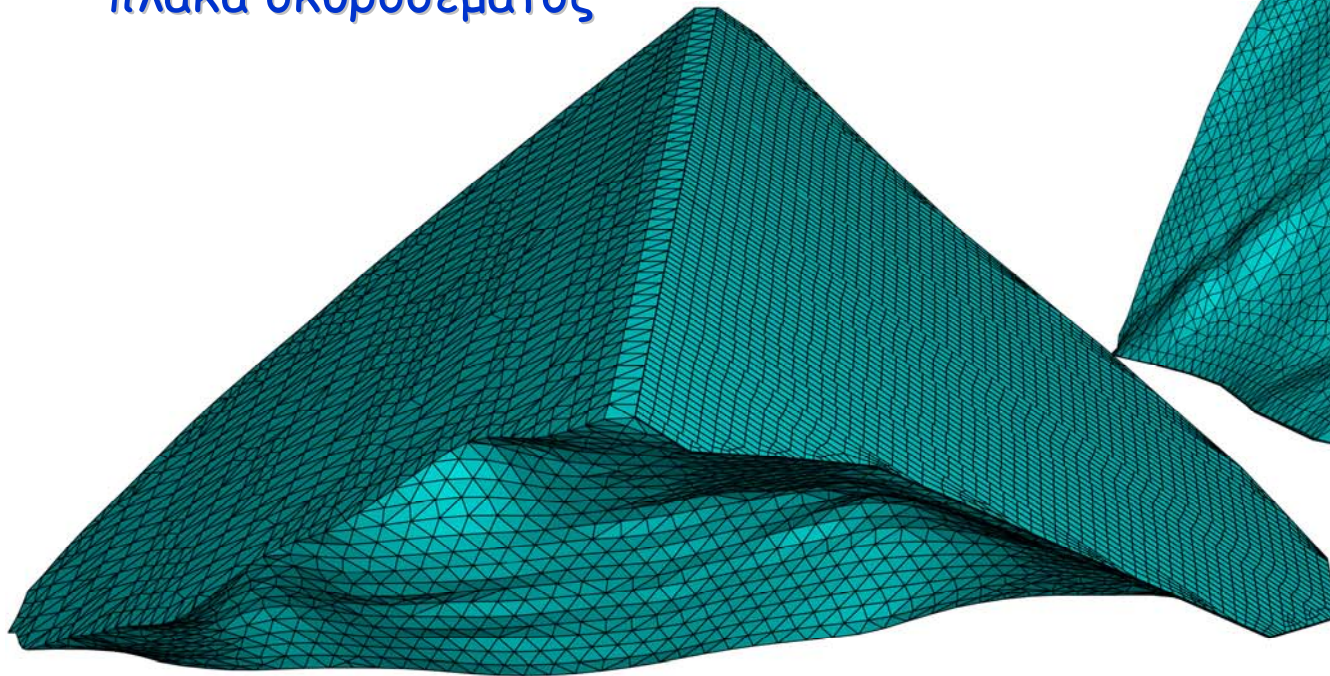


Προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής

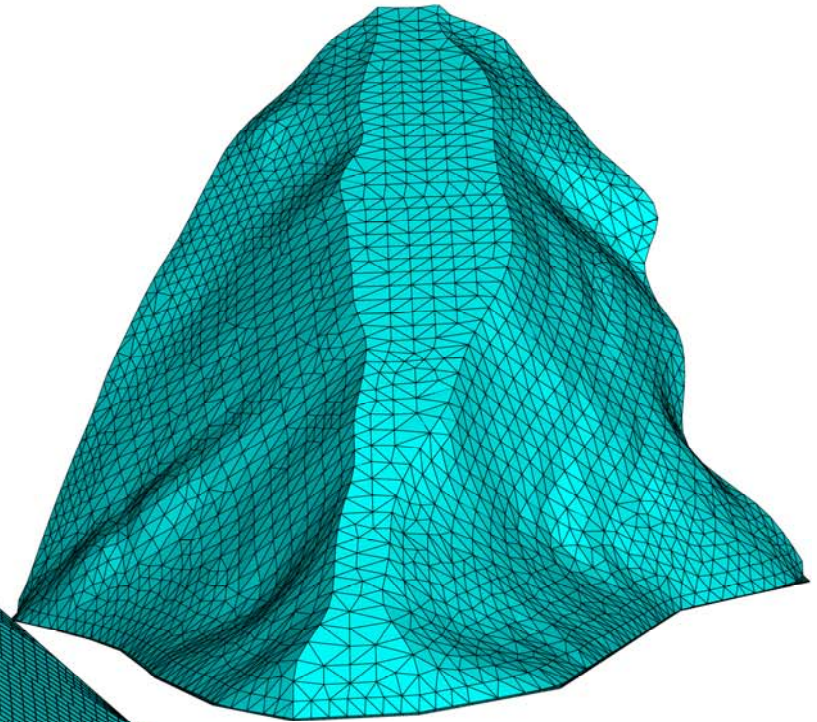


Λεπτομερής διαμόρφωση 3D γεωμετρίας

Φράγμα με ανάντη
πλάκα σκυροδέματος



Βάση του φράγματος



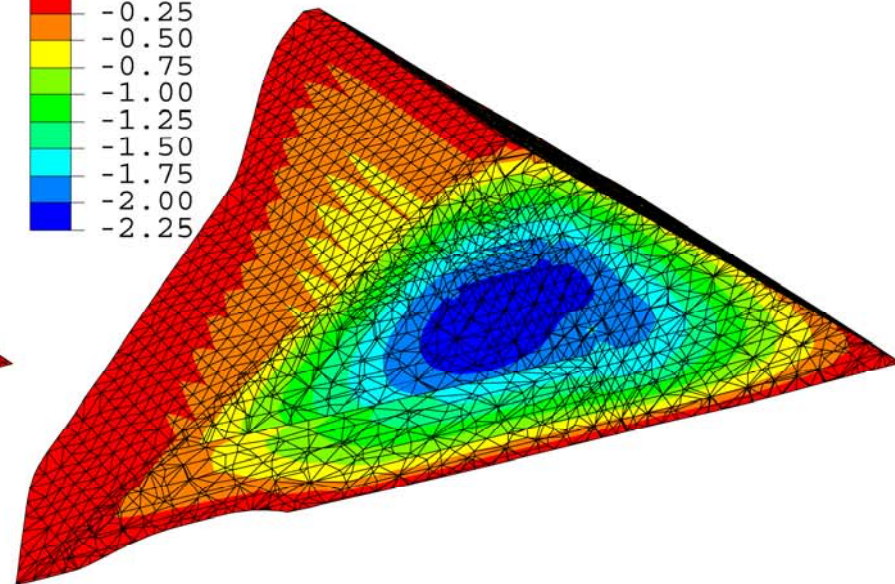
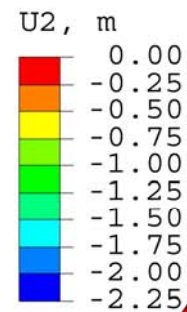
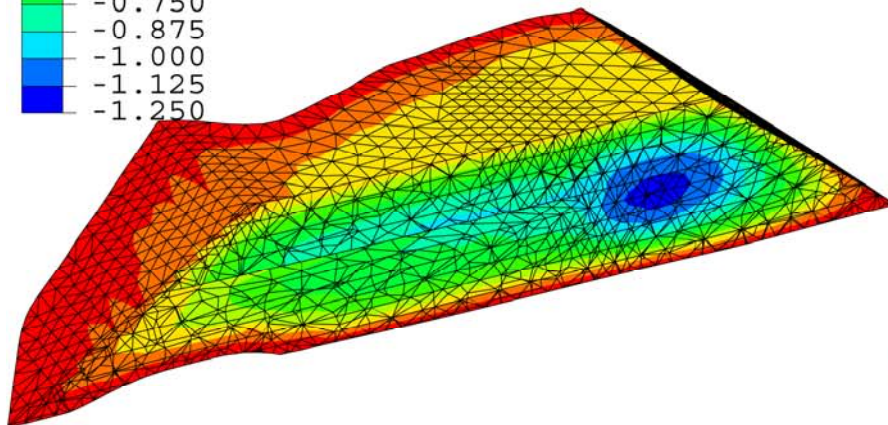
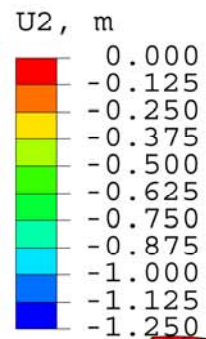
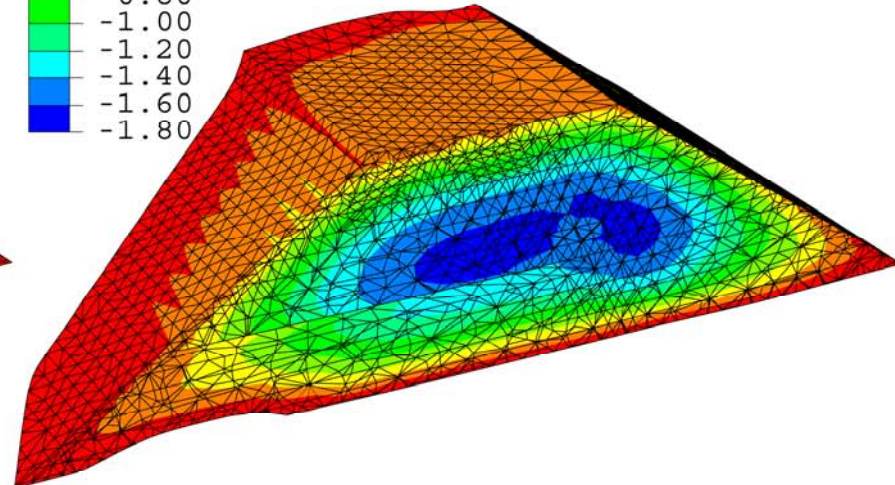
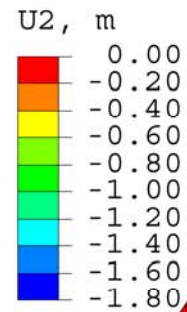
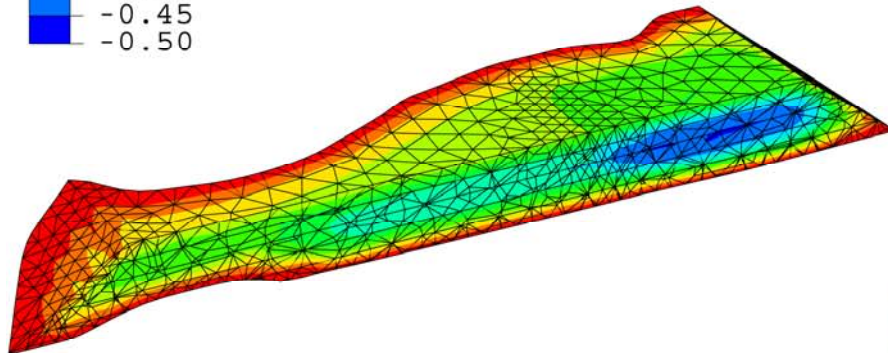
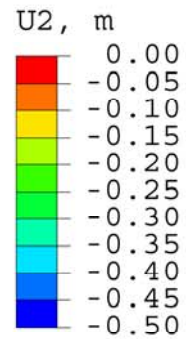
Παράμετροι του προσομοιώματος *Duncan & Chang*

<u>Παράμετρος</u>	<u>Ζώνη 3B</u>	<u>Ζώνη 3C</u>	<u>Ζώνη 2B</u>
K	600	450	1200
K_{ur}	1500	1125	3000
K_b	150	112.5	300
n	0.45	0.45	0.45
m	0.22	0.22	0.22
R_f	0.59	0.59	0.59
ϕ_0	51°	51°	51°
$\Delta\phi$	9°	9°	9°

Συντελεστής τριβής σκυροδέματος – εδάφους = 0.7

Συντελεστής τριβής σκυροδέματος – σκυροδέματος = 0.5

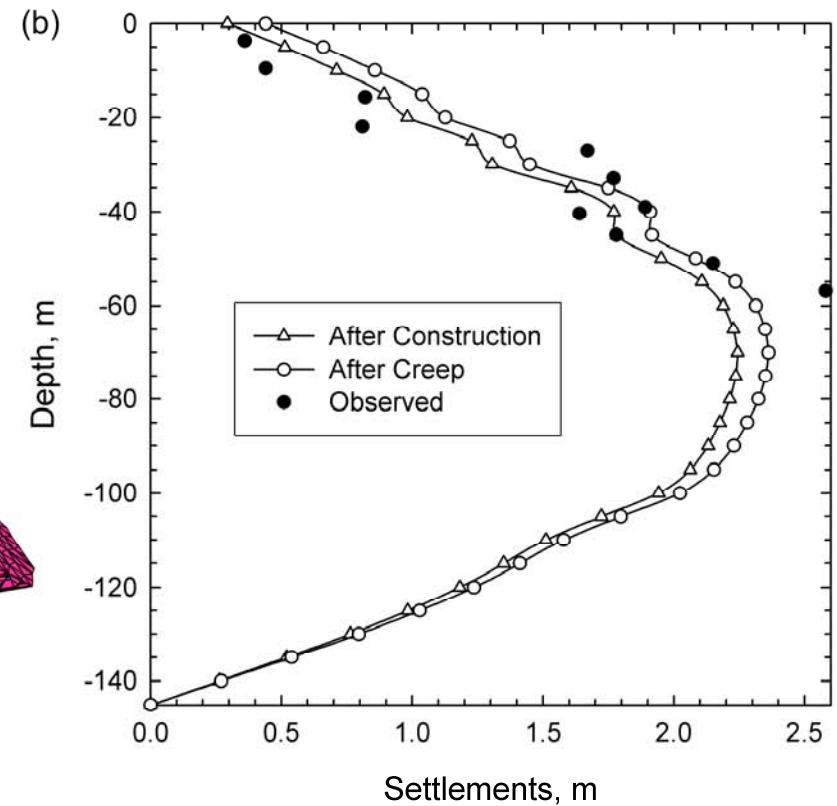
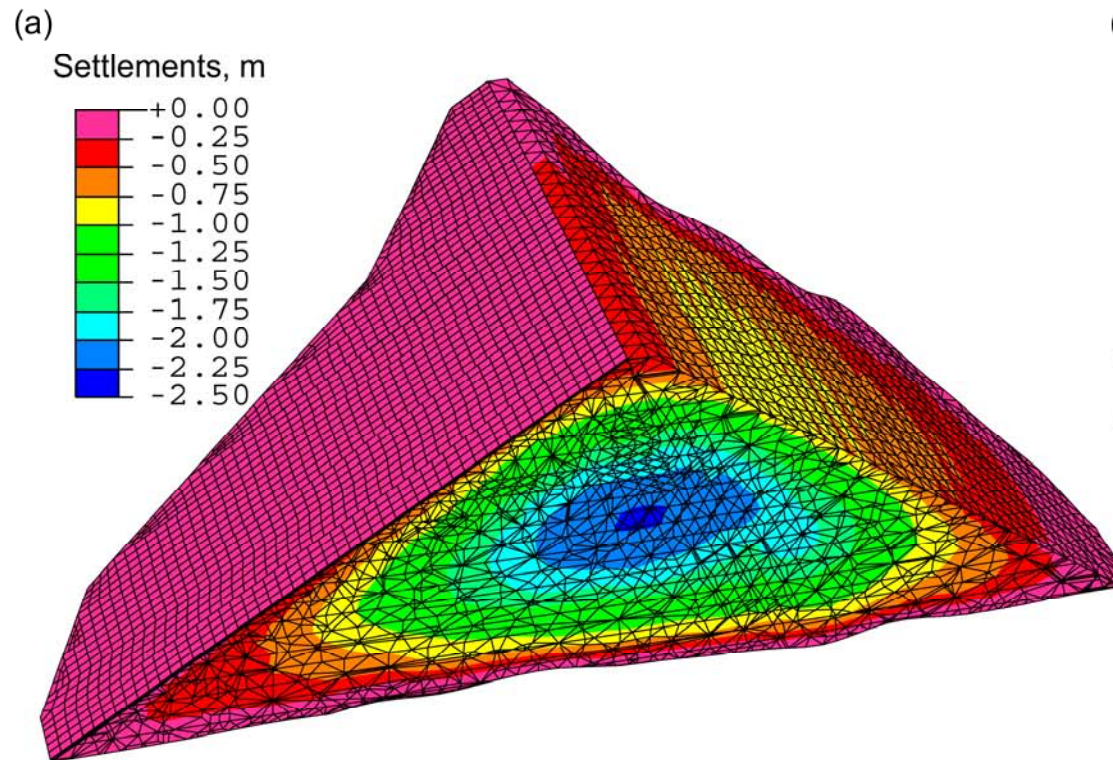
Σταδιακή κατασκευή του επιχώματος



Προβλεπόμενες καθιζήσεις κατασκευής & ερπυσμού

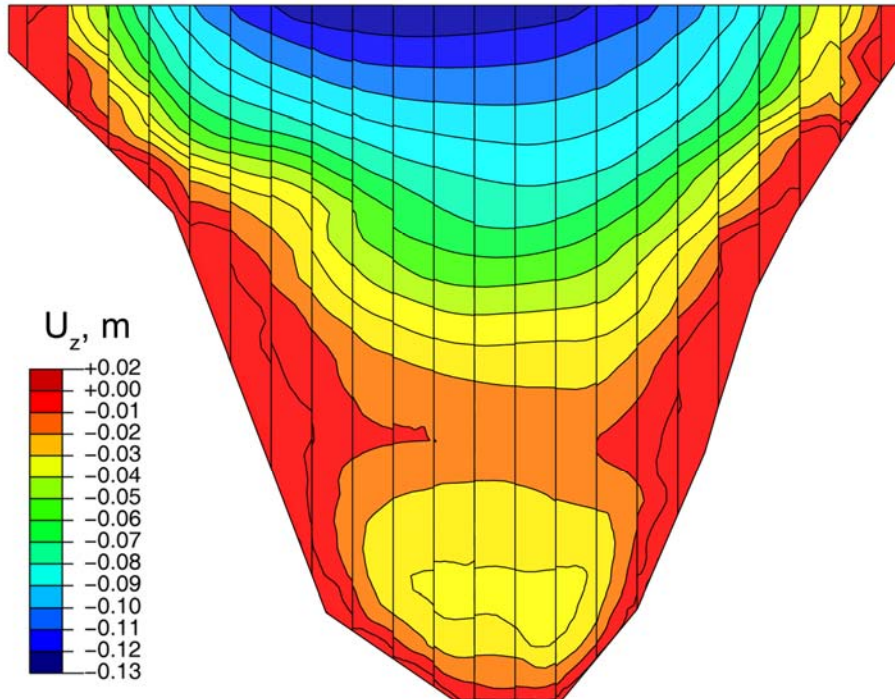
Καθιζήσεις κατά το τέλος του ερπυσμού

Σύγκριση καθιζήσεων στην κεντρική διατομή

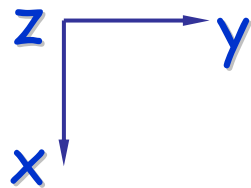
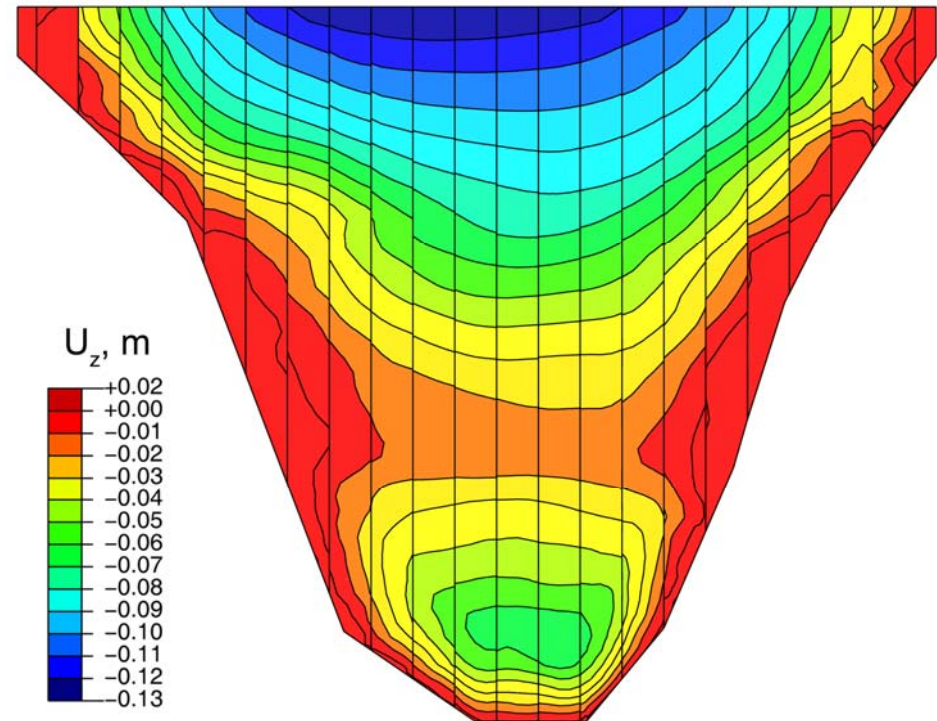


Βύθιση πλάκας σκυροδέματος

Ερπυσμός λιθορριπής



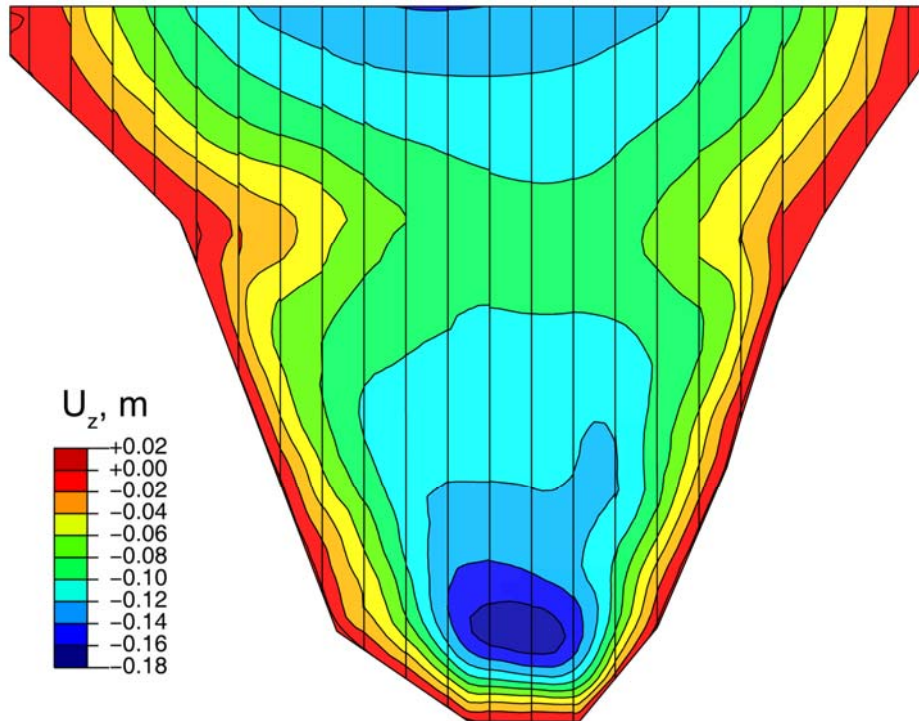
Ανύψωση νερού στα 55 m



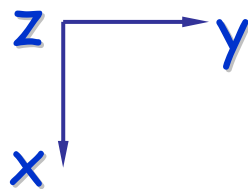
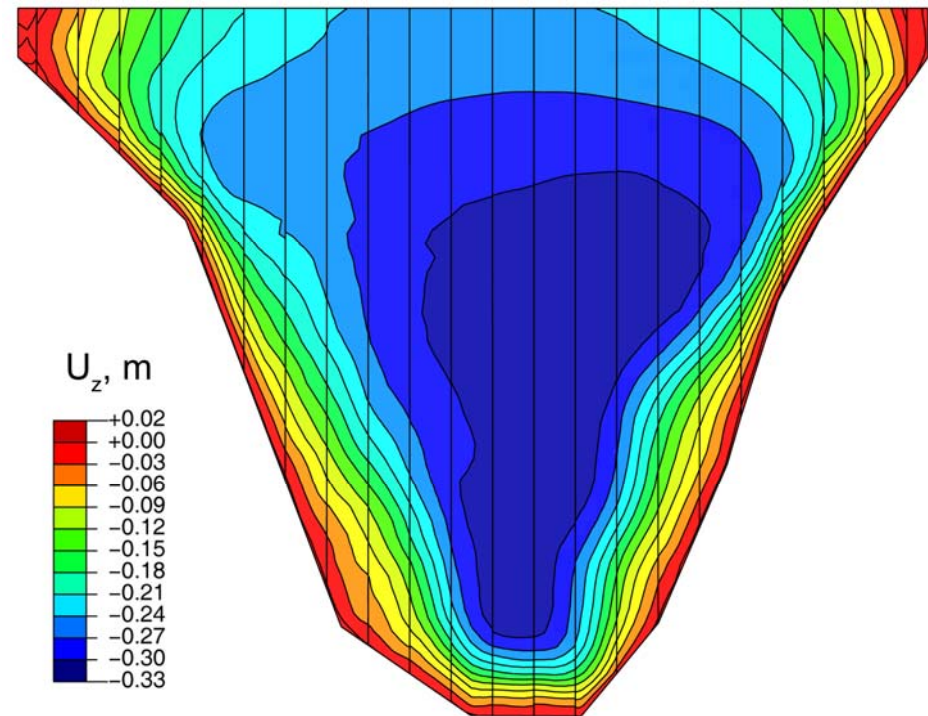
Σκυρόδεμα:	C 20/25
Αντοχή σε θλίψη:	25 MPa
Αντοχή σε εφελκυσμό:	3 MPa
Μέτρο Young:	29 GPa
Λόγος Poisson	0.3

Βύθιση πλάκας σκυροδέματος

Ανύψωση νερού στα 100 m



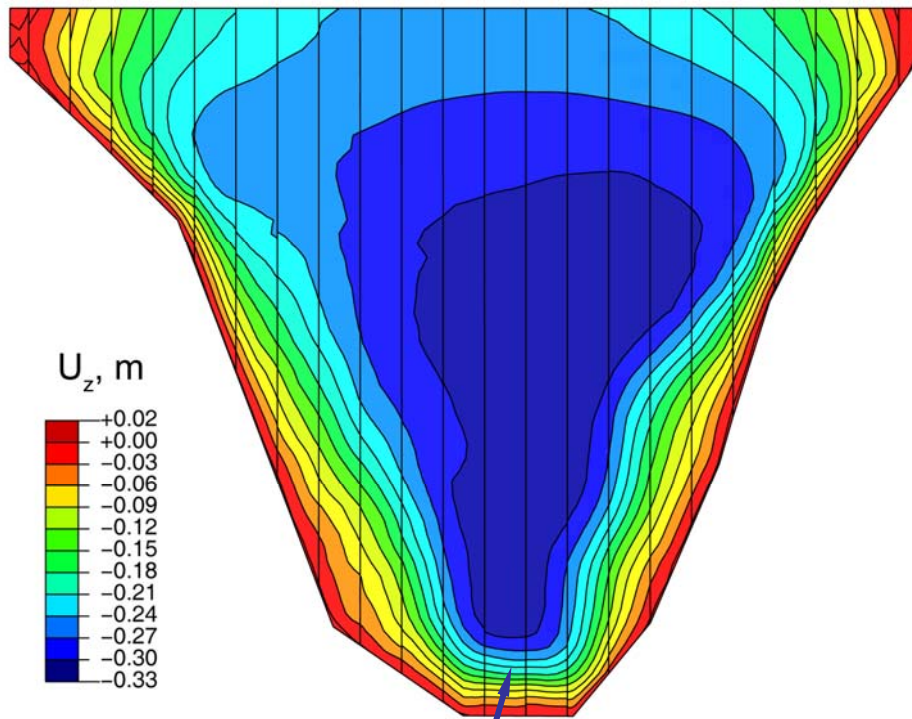
Ανύψωση νερού στα 148 m



Σκυρόδεμα:	C 20/25
Αντοχή σε θλίψη:	25 MPa
Αντοχή σε εφελκυσμό:	3 MPa
Μέτρο Young:	29 GPa
Λόγος Poisson	0.3

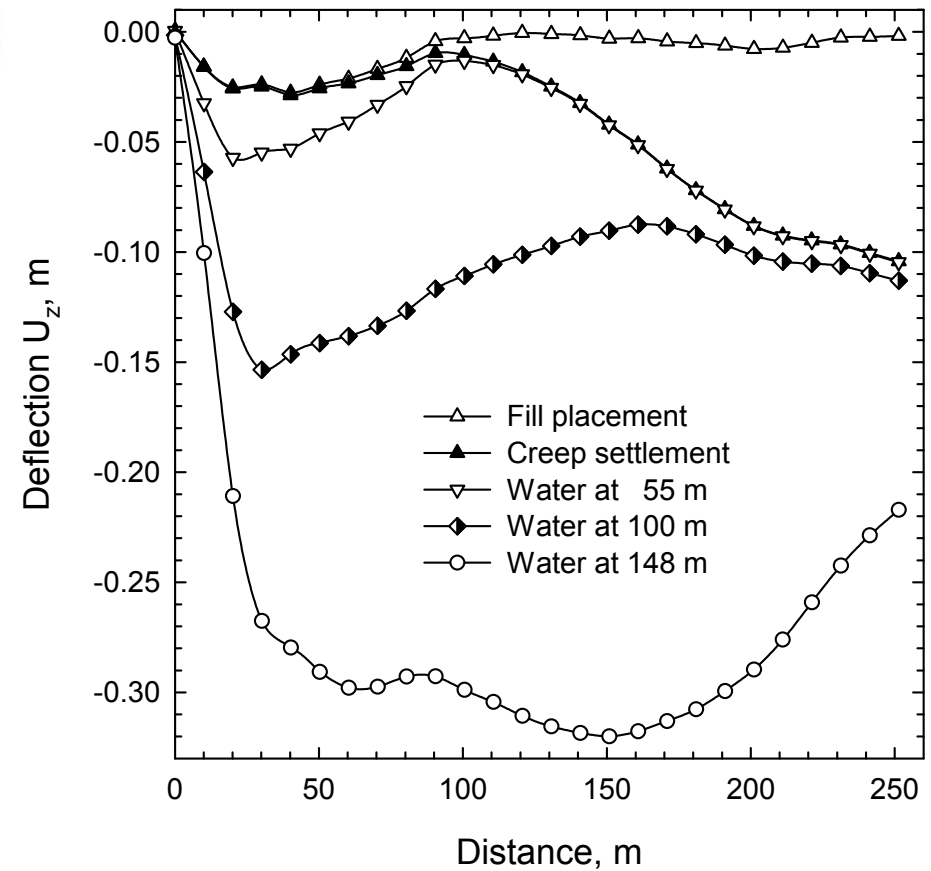
Βύθιση πλάκας σκυροδέματος

Ανύψωση νερού στα 148 m



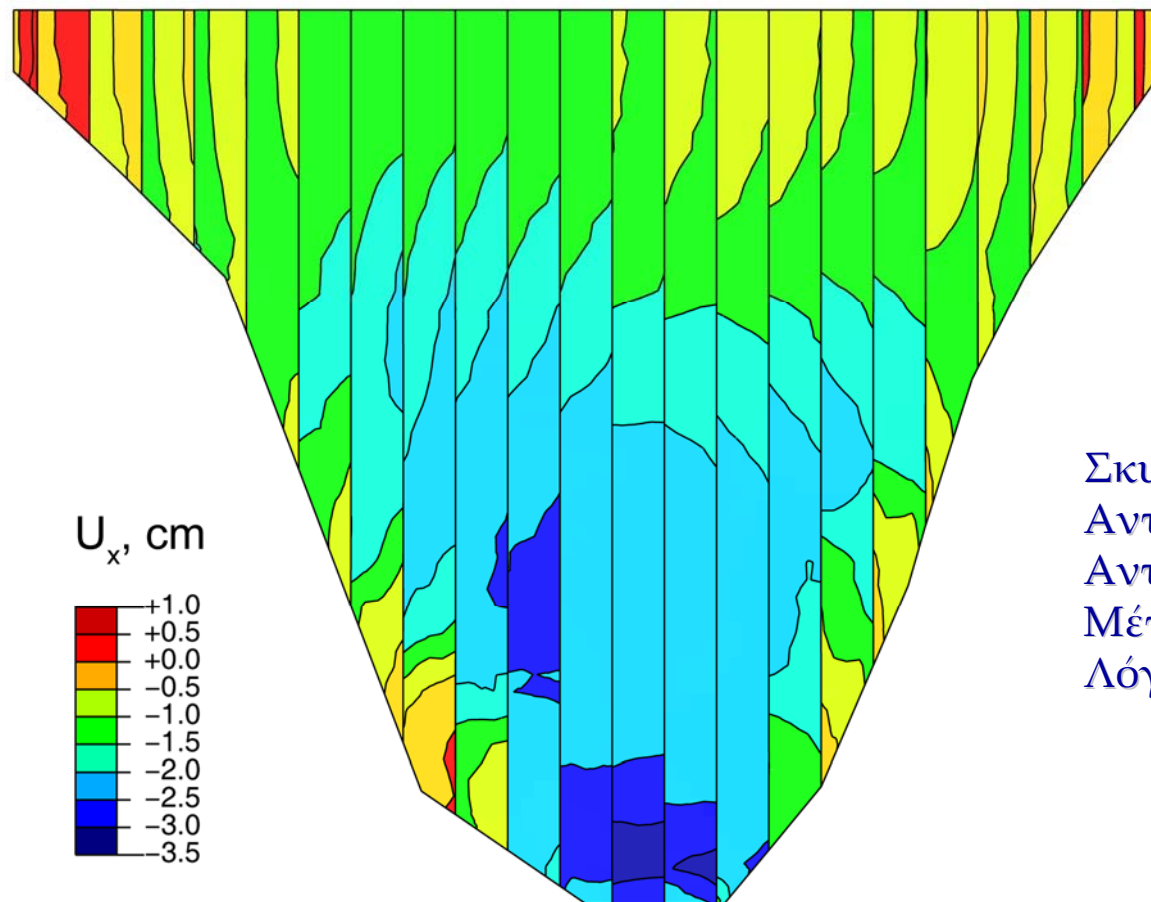
πλάκα 13

Εξέλιξη βύθισης στην πλάκα 13

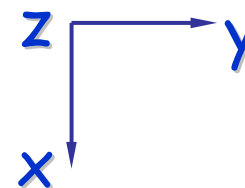


Μετατόπιση της πλάκας κατά X μετά την πλήρωση

Μετατόπιση U_x

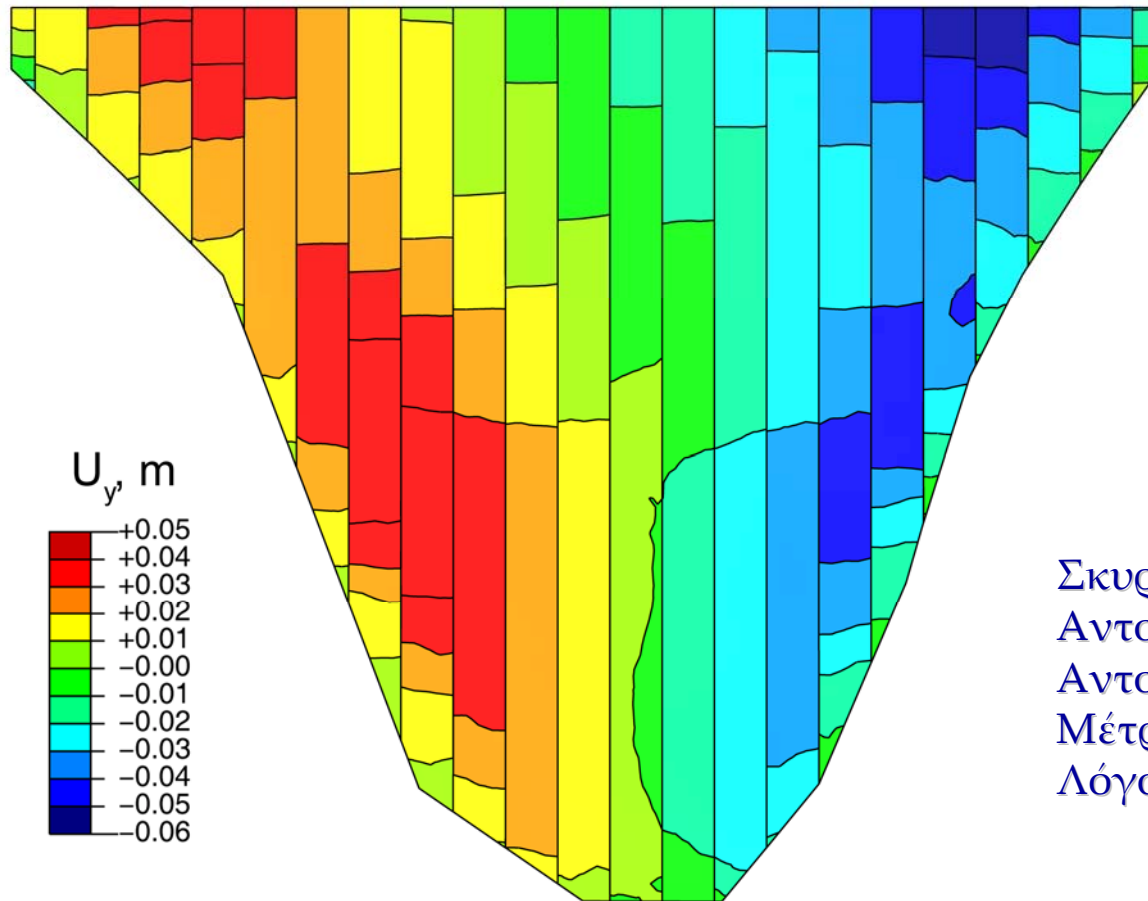


Σκυρόδεμα: C20/25
Αντοχή σε θλίψη: 25 MPa
Αντοχή σε εφελκυσμό: 3 MPa
Μέτρο Young: 29 GPa
Λόγος Poisson: 0.3

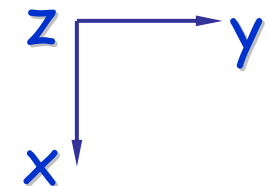


Μετατόπιση της πλάκας κατά Y μετά την πλήρωση

Μετατόπιση U_y

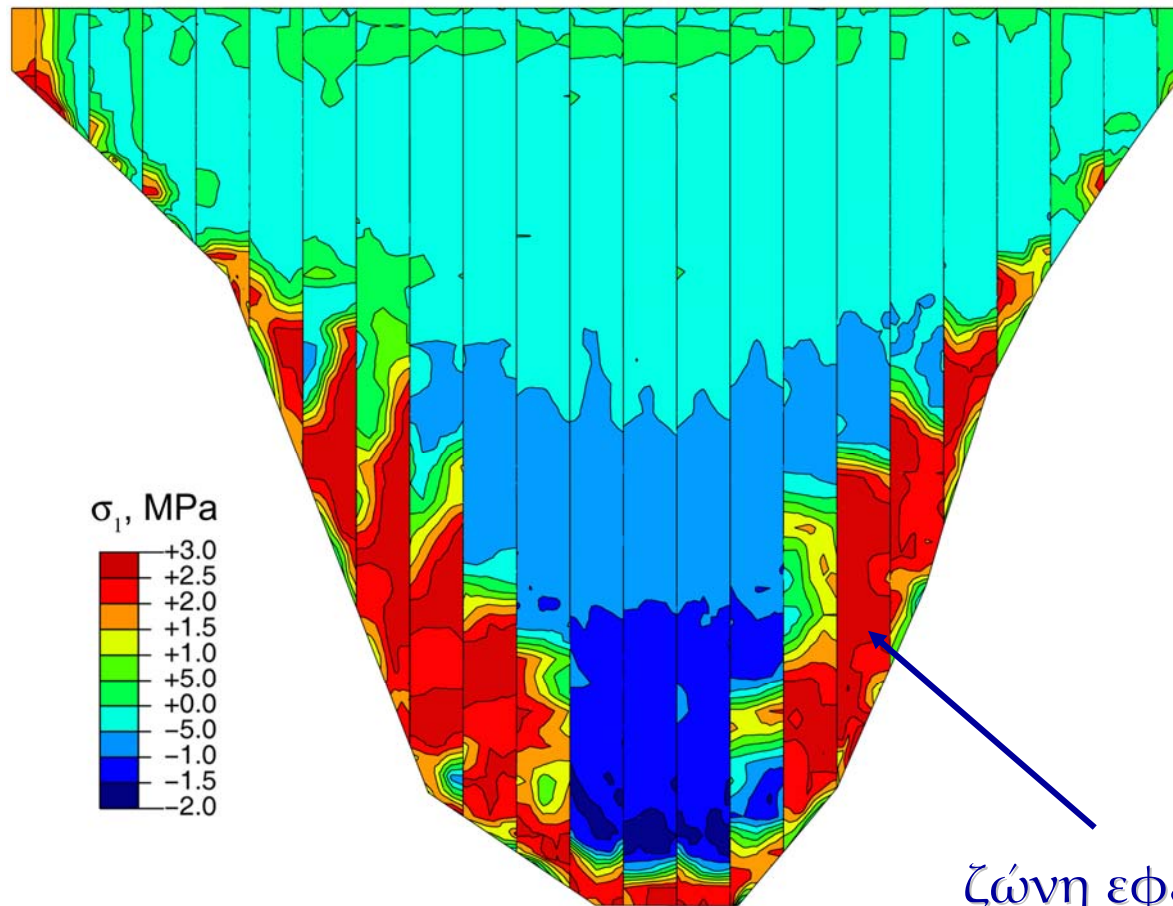


Σκυρόδεμα: C 20/25
Αντοχή σε θλίψη: 25 MPa
Αντοχή σε εφελκυσμό: 3 MPa
Μέτρο Young: 29 GPa
Λόγος Poisson: 0.3



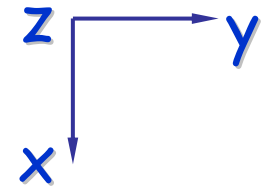
Ελαστο-πλαστικό σκυρόδεμα με οπλισμό: Μέγιστη κύρια τάση μετά την πλήρωση της λεκάνης

Μέγιστος εφελκυσμός



σ_1 , MPa

Dark Red	+3.0
Red	+2.5
Orange	+2.0
Yellow	+1.5
Light Green	+1.0
Green	+0.5
Cyan	+0.0
Light Blue	-0.5
Blue	-1.0
Dark Blue	-1.5
Very Dark Blue	-2.0

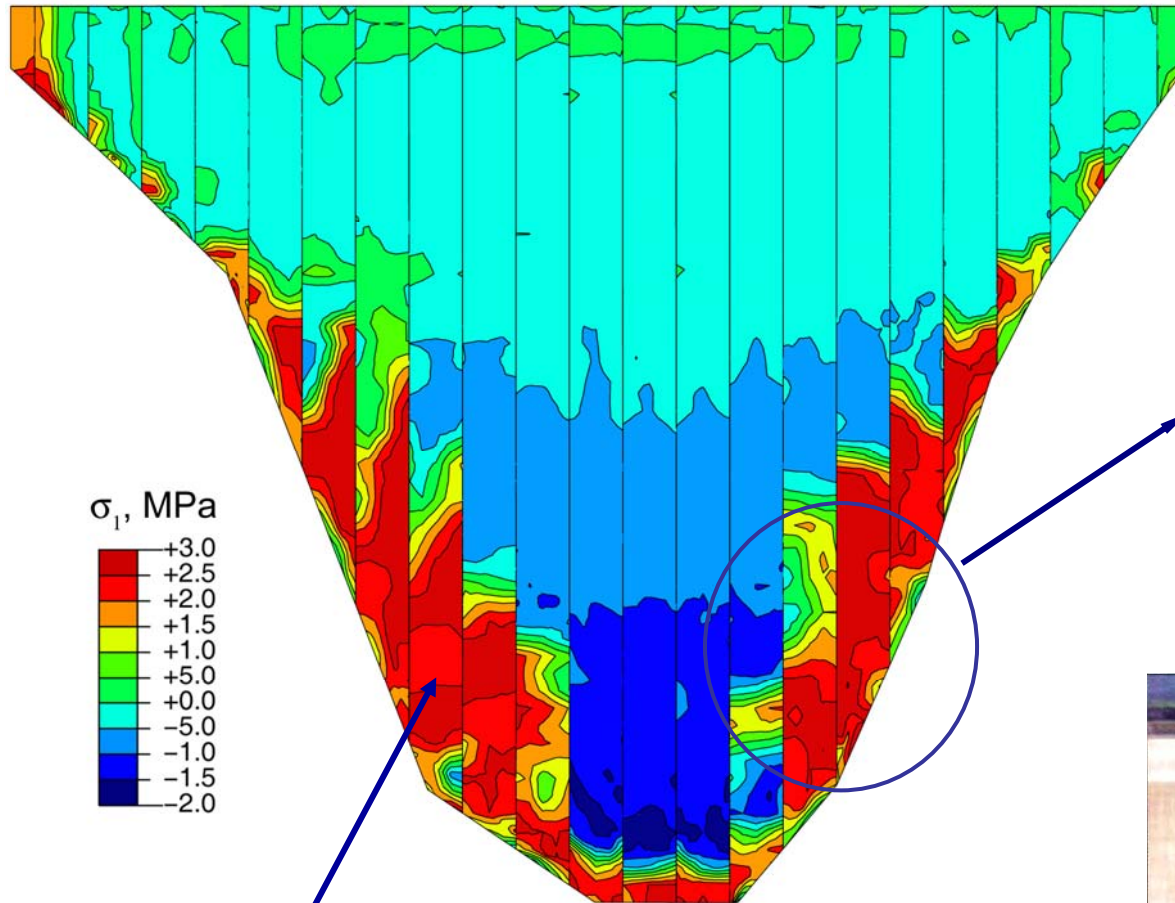


Σκυρόδεμα:	C20/25
Αντοχή σε θλίψη:	25 MPa
Αντοχή σε εφελκυσμό:	3 MPa
Μέτρο Young:	29 GPa
Λόγος Poisson	0.3

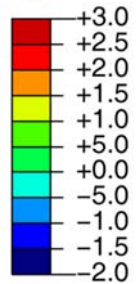
ζώνη εφελκυσμού

Μέγιστη κύρια τάση μετά την πλήρωση της λεκάνης

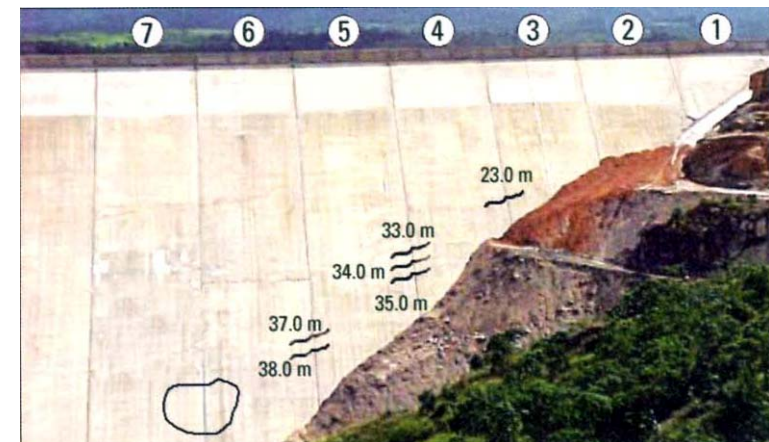
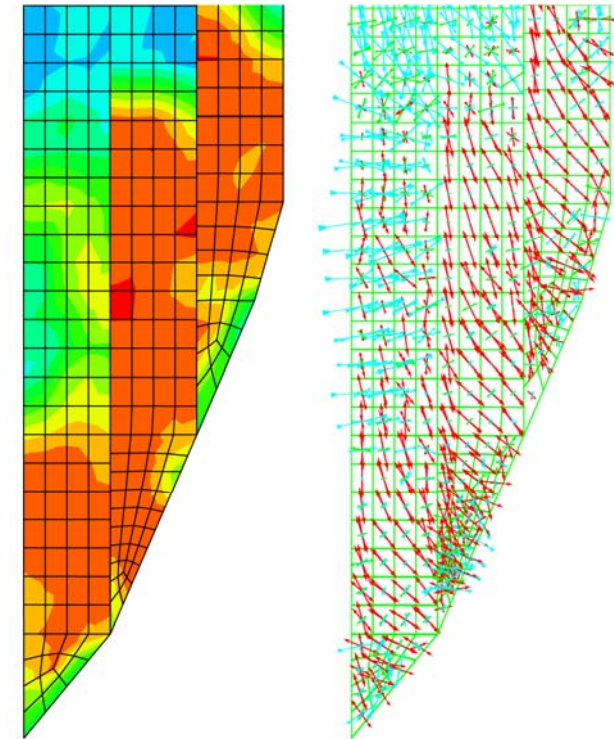
Μέγιστη κύρια τάση



σ_1 , MPa

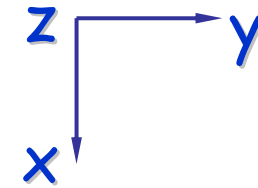
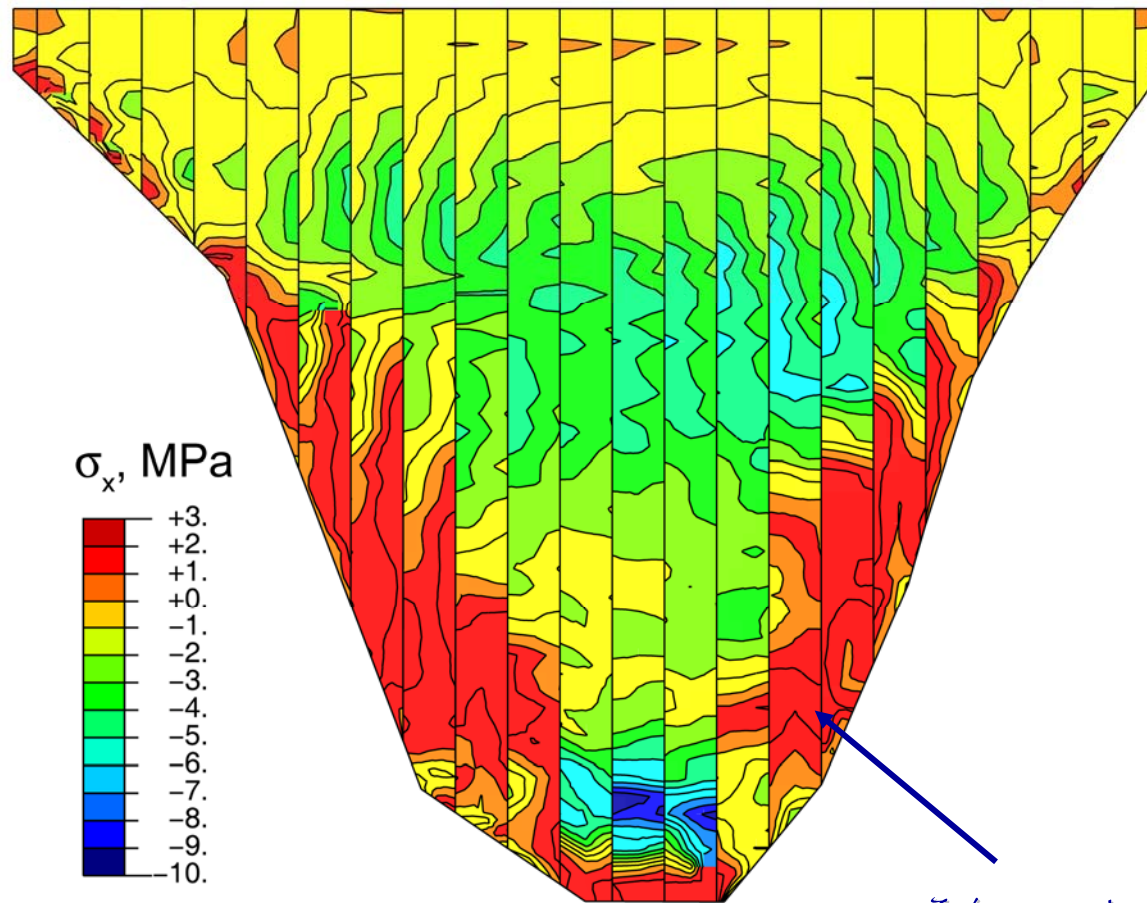


ζώνη εφελκυσμού



Φράγμα Itaipubi

Ελαστο-πλαστικό σκυρόδεμα με οπλισμό: Τάση σ_x μετά την πλήρωση της λεκάνης



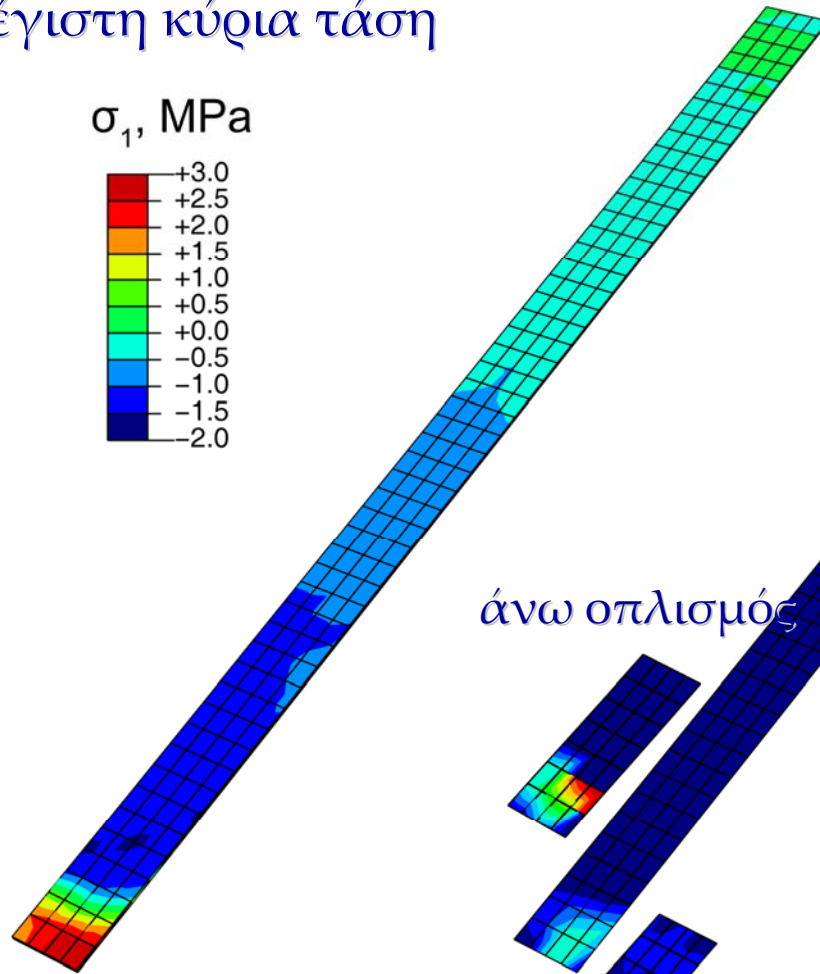
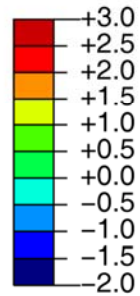
Σκυρόδεμα: C20/25
Αντοχή σε θλίψη: 25 MPa
Αντοχή σε εφελκυσμό: 3 MPa
Μέτρο Young: 29 GPa
Λόγος Poisson: 0.3

ζώνη εφελκυσμού

Μέγιστη κύρια τάση στην κεντρική πλάκα (No 13)

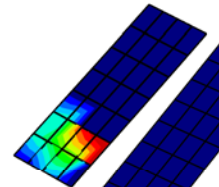
Μέγιστη κύρια τάση

σ_1 , MPa

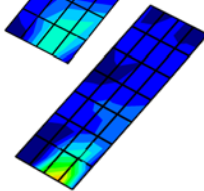


ζώνη εφελκυσμού

άνω οπλισμός

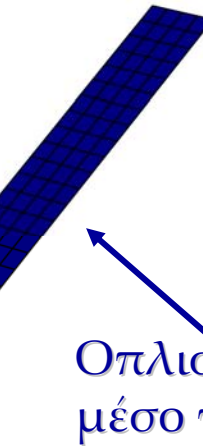
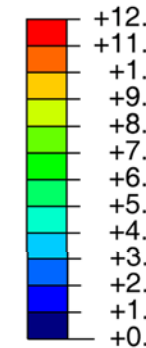


κάτω οπλισμός



Οπλισμός στο μέσο της πλάκας

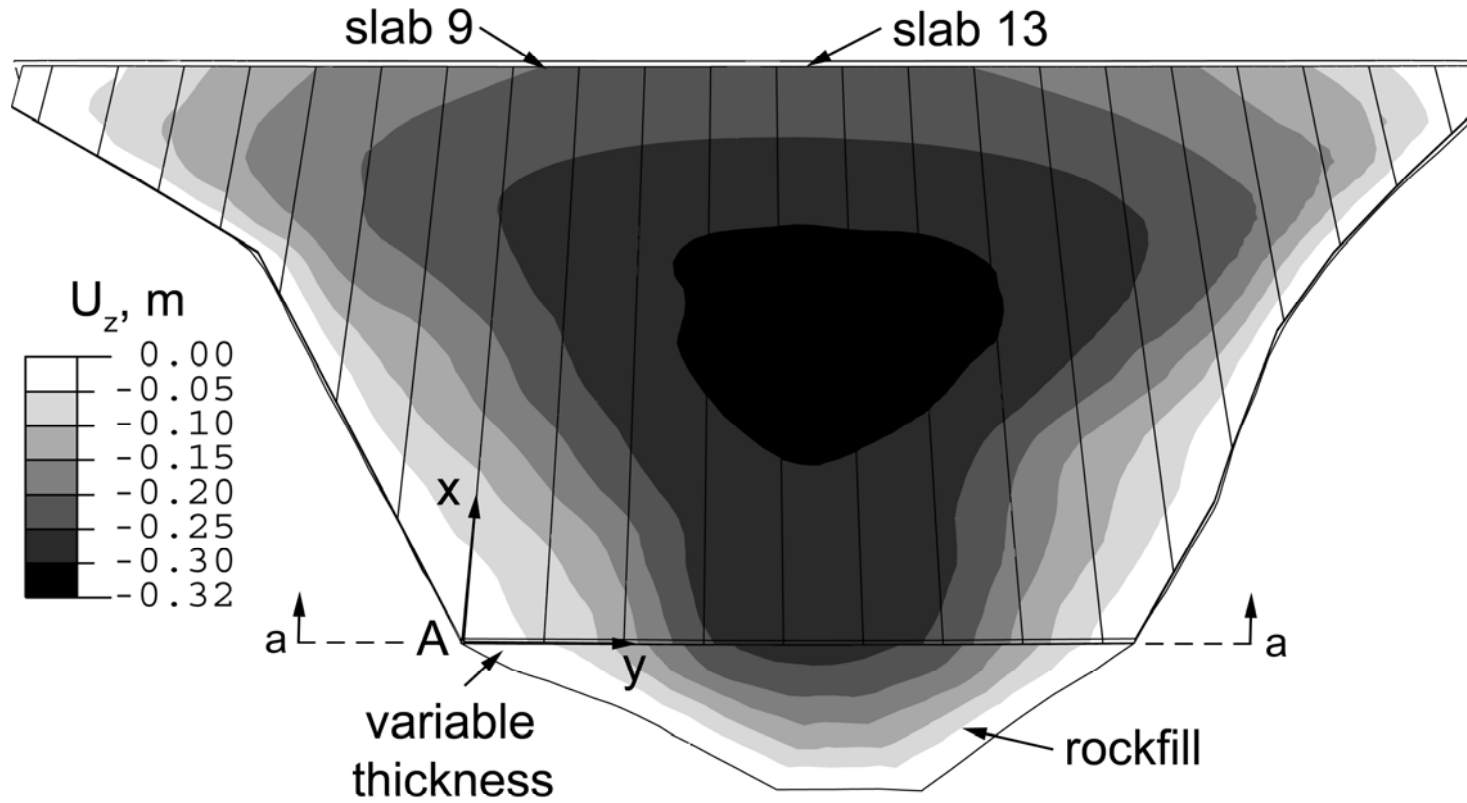
ε_1 , 10^{-4}



Οπλισμός:

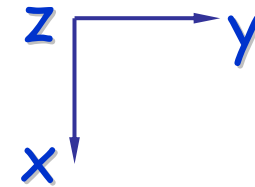
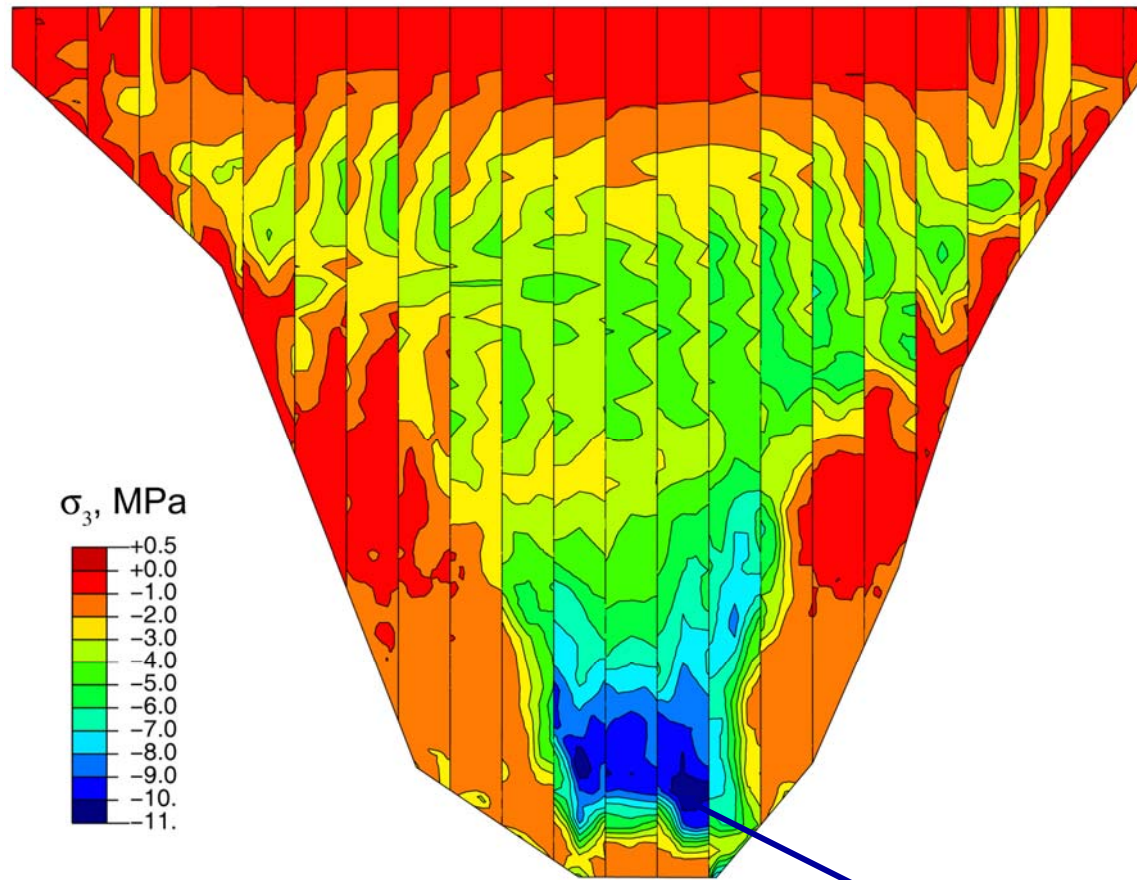
Φ25 ανά 15 cm στις
διευθύνσεις x και y

Ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων σε ζώνη παράλληλη της πλίνθου



Ελαστο-πλαστικό σκυρόδεμα με οπλισμό: Ελάχιστη κύρια τάση μετά την πλήρωση της λεκάνης

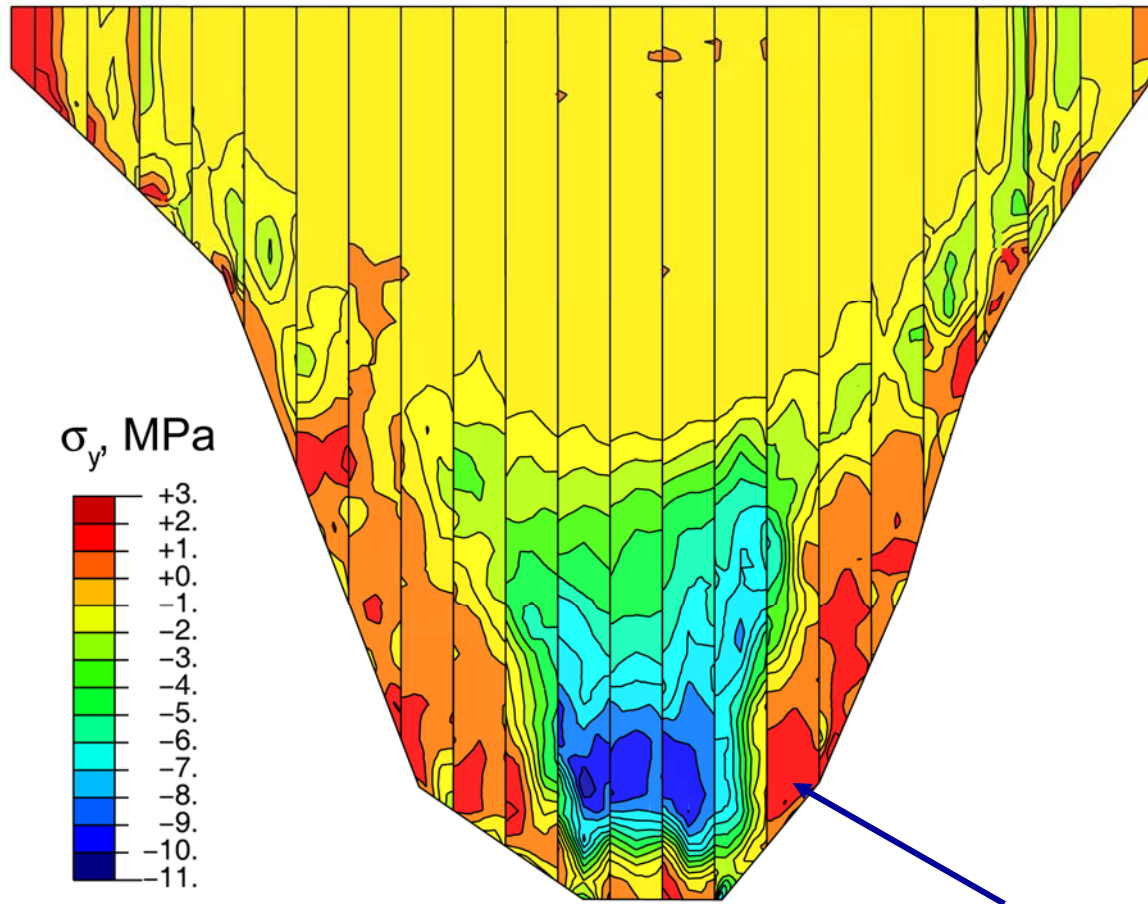
Μέγιστη θλίψη



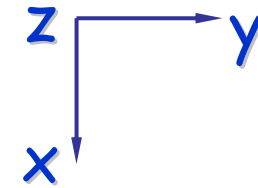
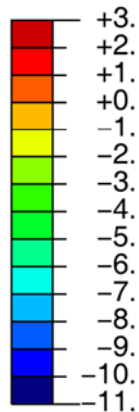
Σκυρόδεμα: C20/25
Αντοχή σε θλίψη: 25 MPa
Αντοχή σε εφελκυσμό: 3 MPa
Μέτρο Young: 29 GPa
Λόγος Poisson: 0.3

μέγιστη θλίψη

Ελαστο-πλαστικό σκυρόδεμα με οπλισμό: Τάση σ_y μετά την πλήρωση της λεκάνης



σ_y , MPa

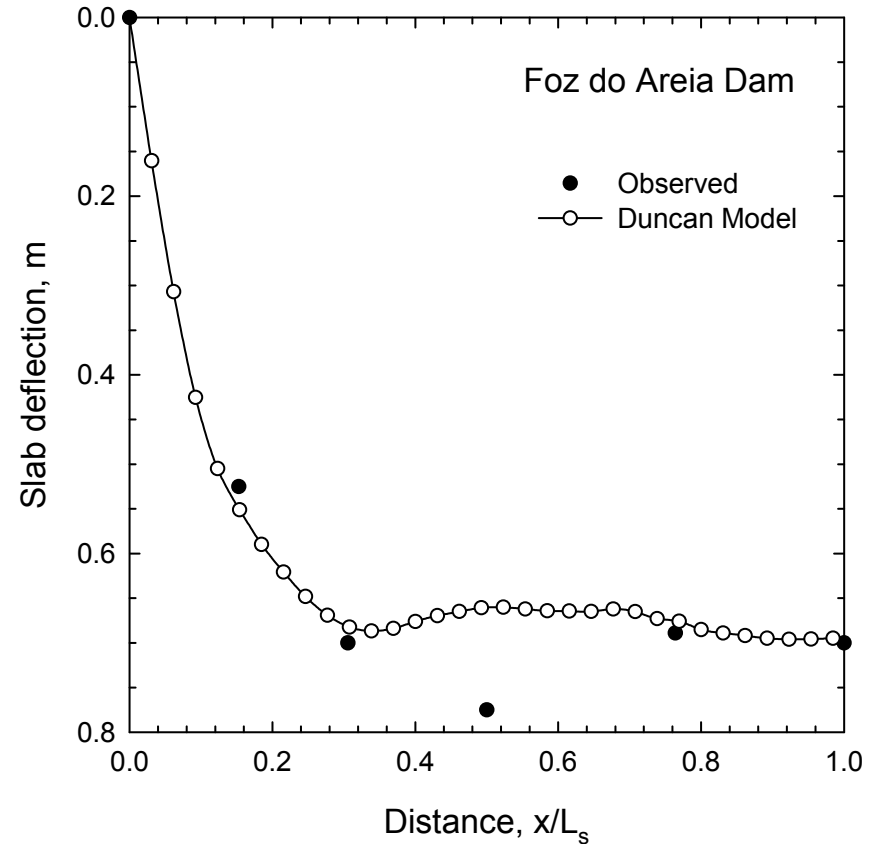
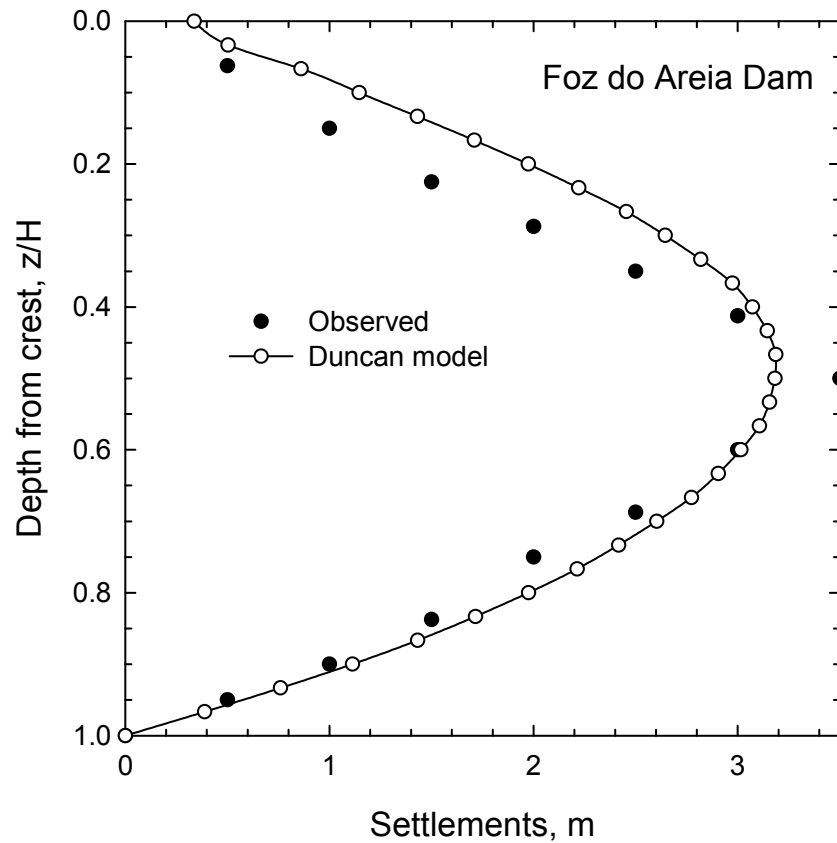


Σκυρόδεμα: C20/25
Αντοχή σε θλίψη: 25 MPa
Αντοχή σε εφελκυσμό: 3 MPa
Μέτρο Young: 29 GPa
Λόγος Poisson: 0.3

ζώνη εφελκυσμού

Εφαρμογή: Foz Do Areia CFRD (Βραζιλία)

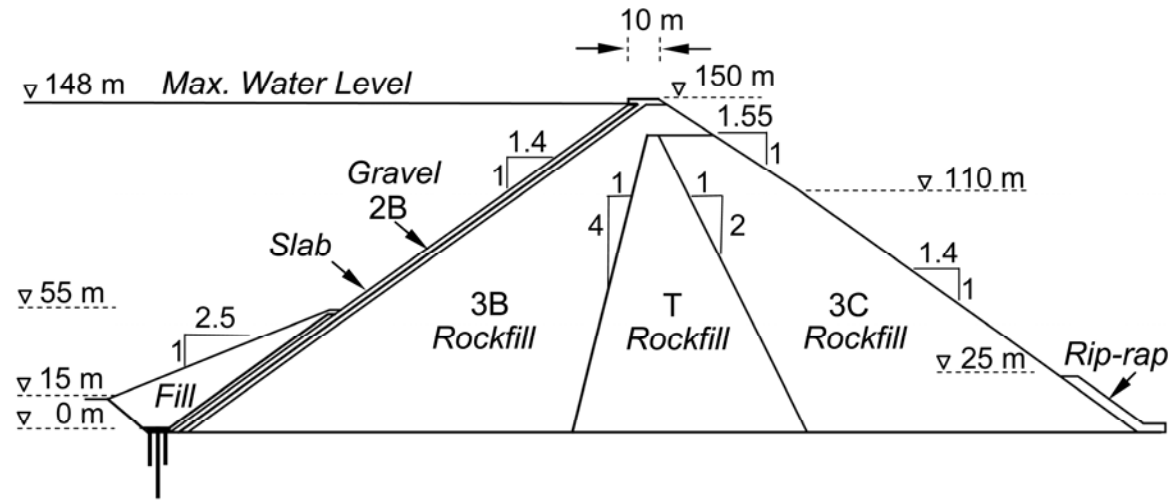
Ύψος $H = 160$ m
Λόγος $L/H = 5.2$



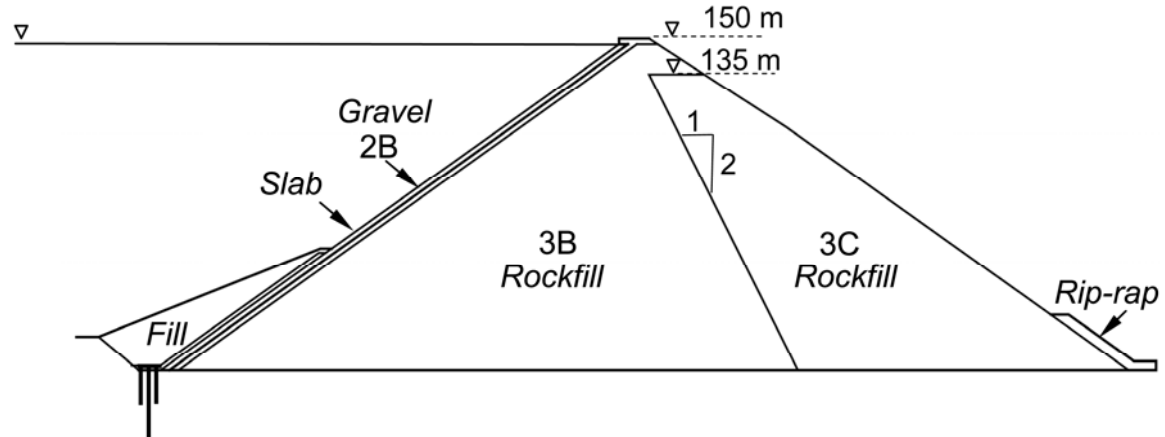
Σταδιακή κατασκευή & πλήρωση λεκάνης

*Επίδραση της δυσκαμψίας της λιθορριπής
στην πλάκα σκυροδέματος*

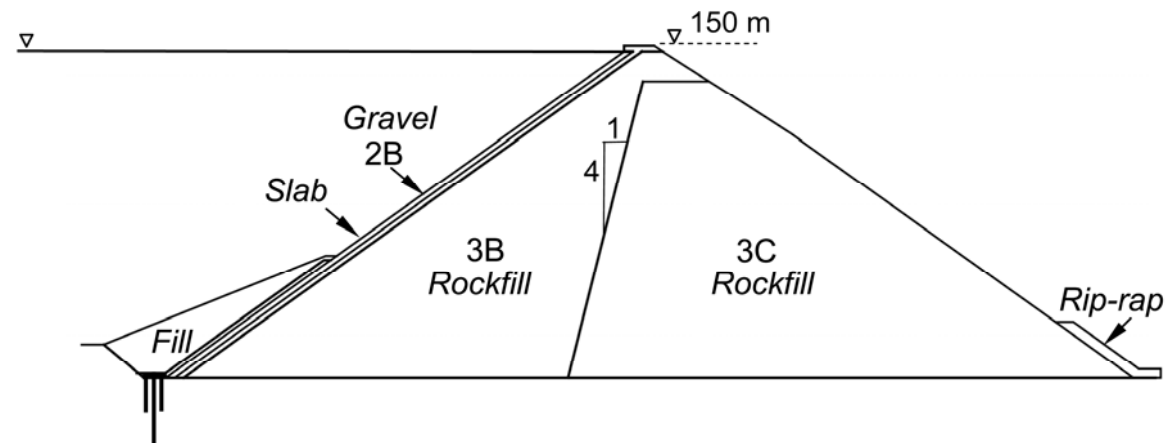
Φράγμα Α



Φράγμα Β

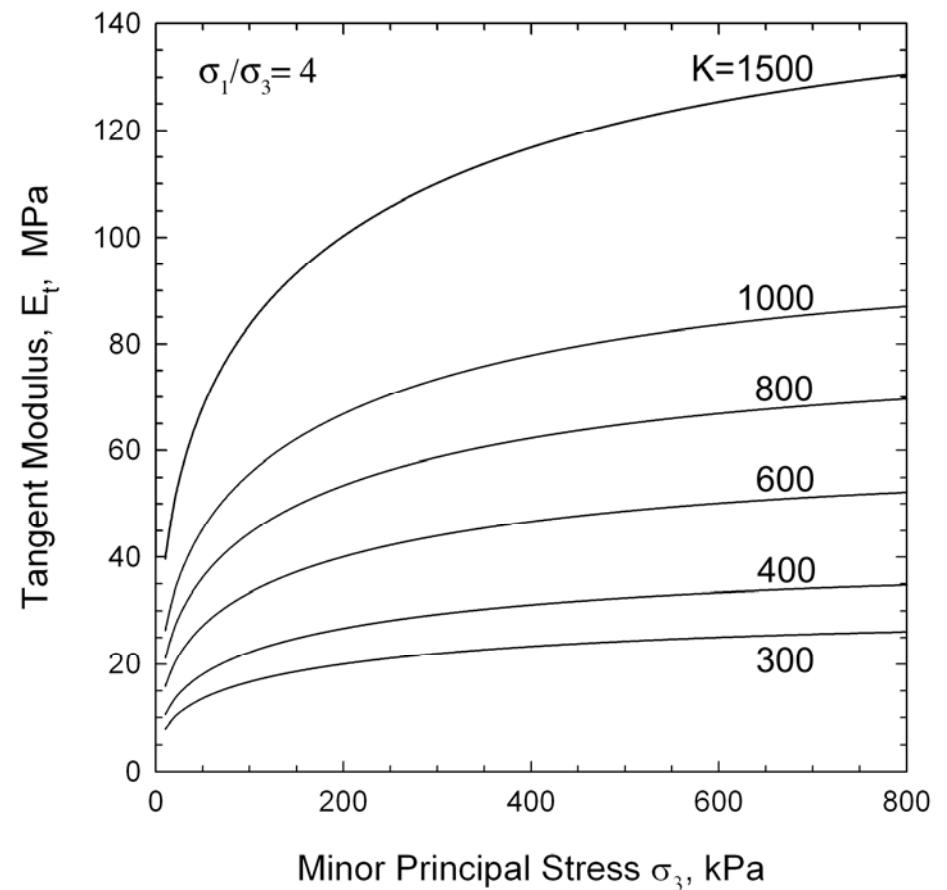
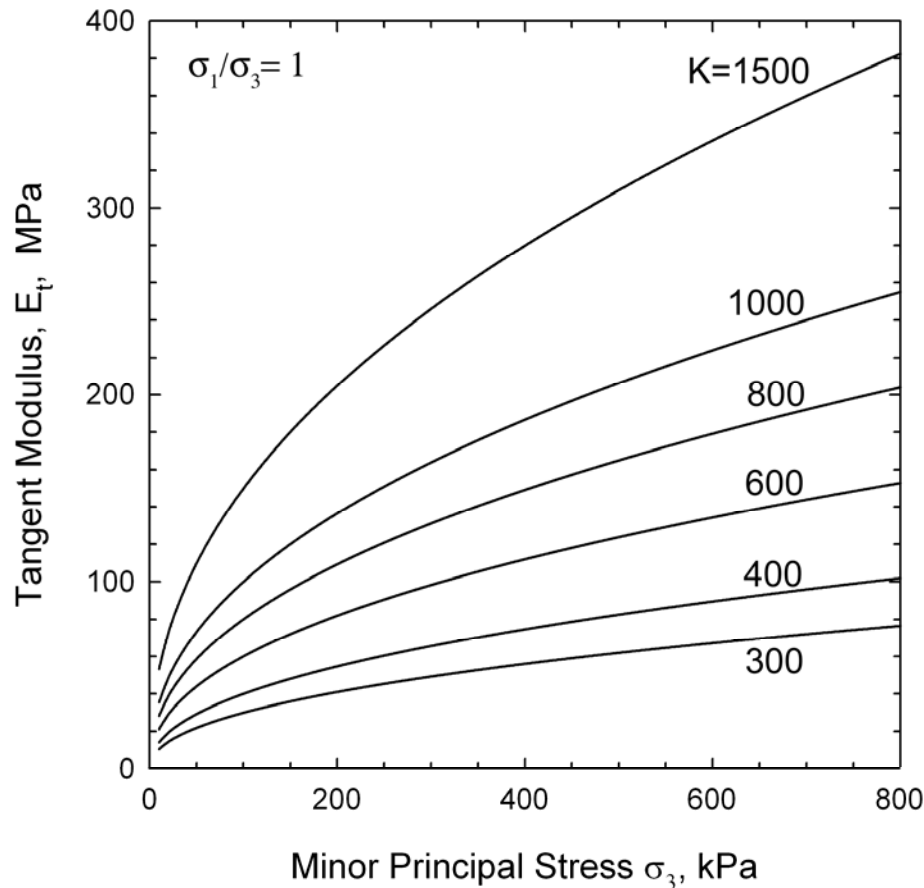


Φράγμα C



Επίδραση της δυσκαμψίας της λιθορριπής

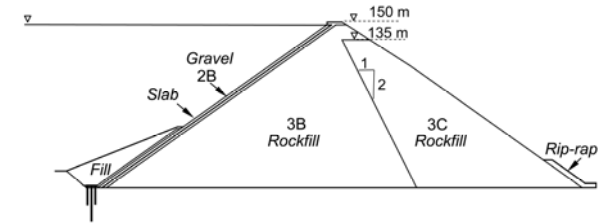
$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3)(1 - \sin \phi)}{2\sigma_3 \sin \phi + 2c \cos \phi} \right]^2$$



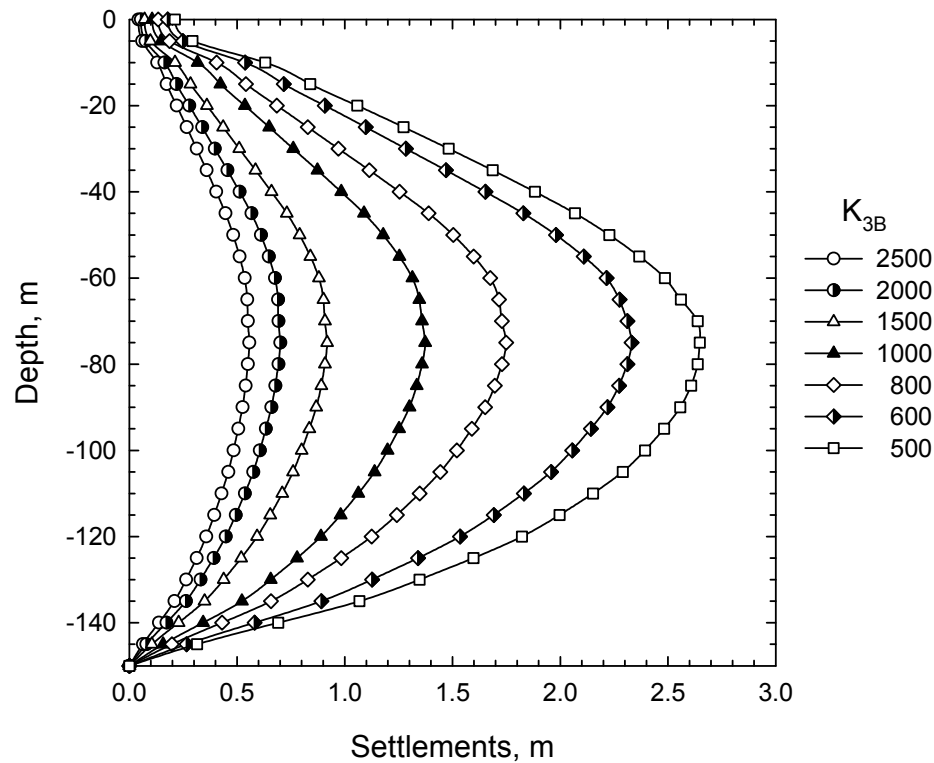
Επίδραση της δυσκαμψίας της λιθορριπής

Φράγμα Β

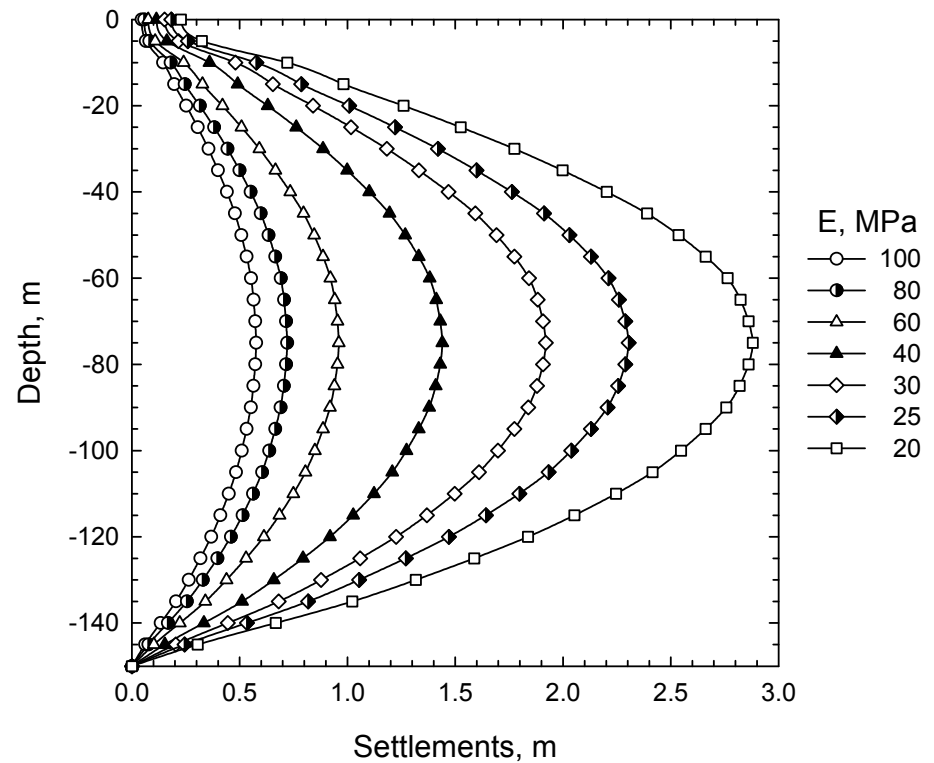
Καθίζηση στην
κεντρική διατομή



Μοντέλο Duncan

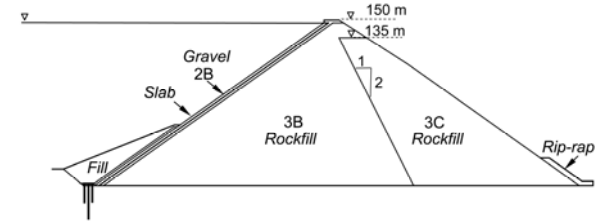
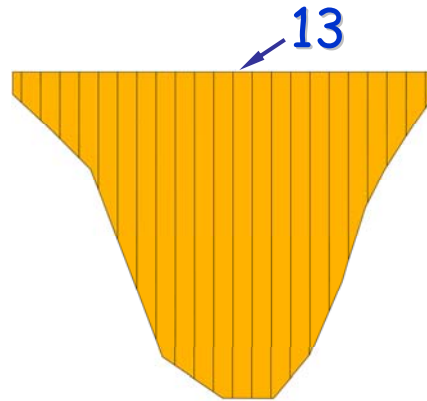


Ελαστικό υλικό

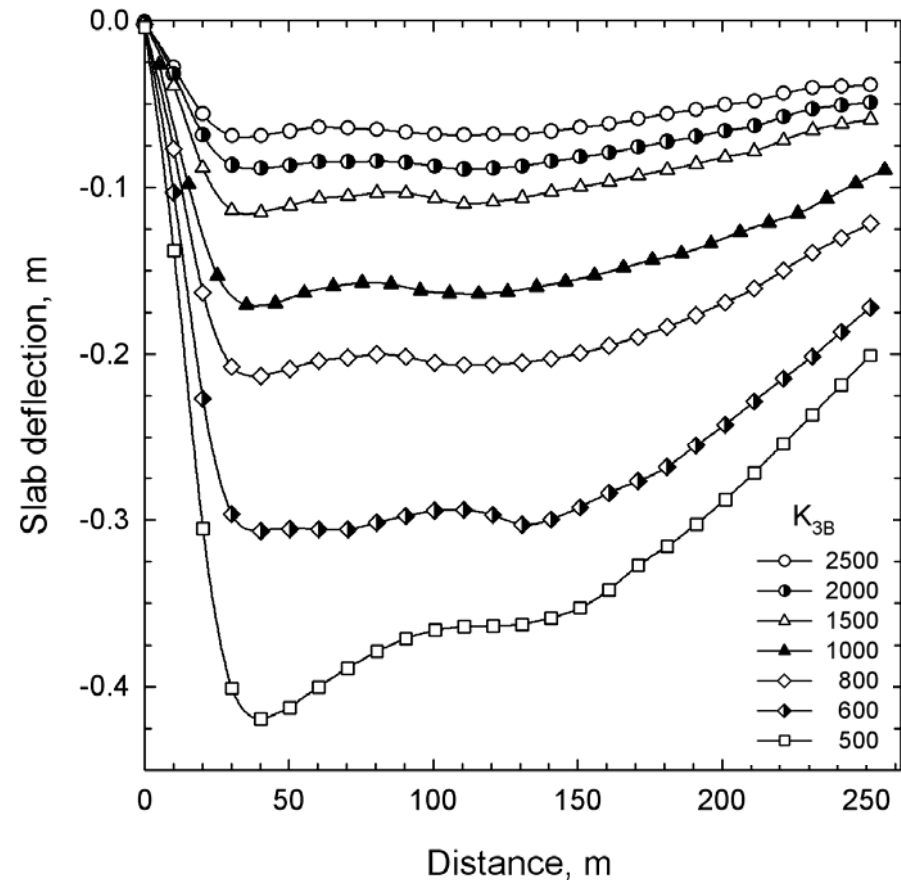
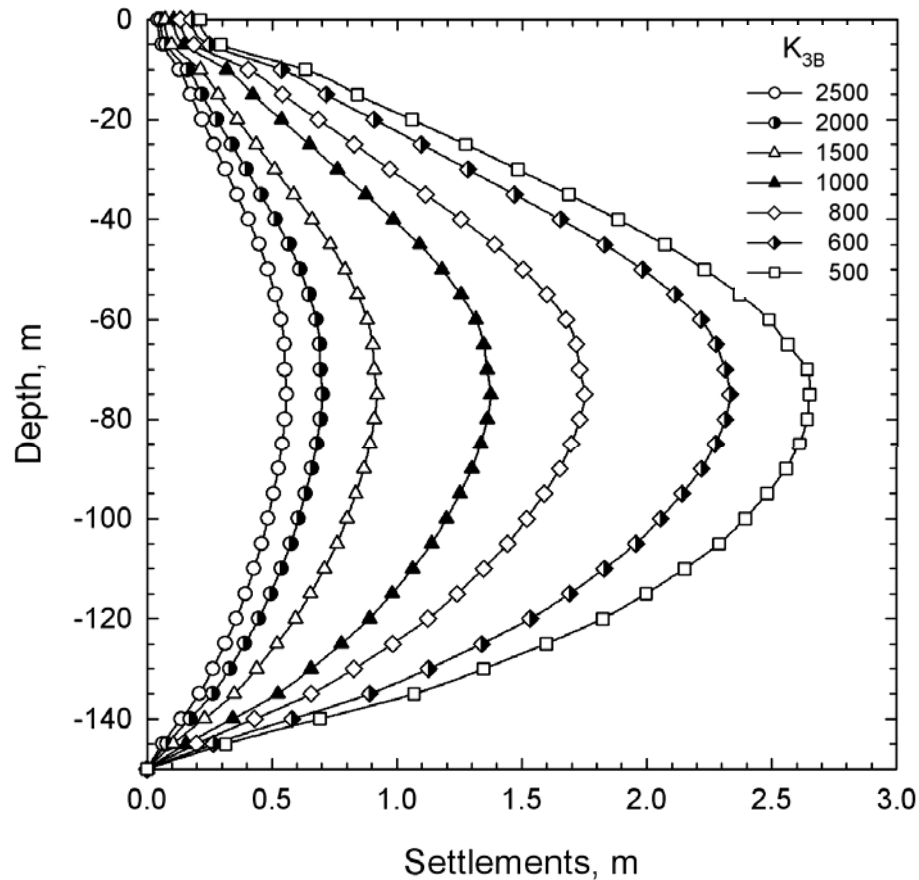


Επίδραση της δυσκαμψίας της λιθορριπής

Φράγμα Β

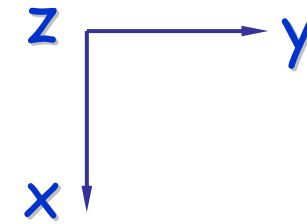
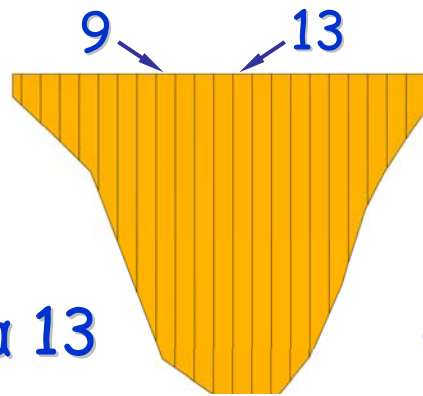


Βύθιση της κεντρικής πλάκας 13



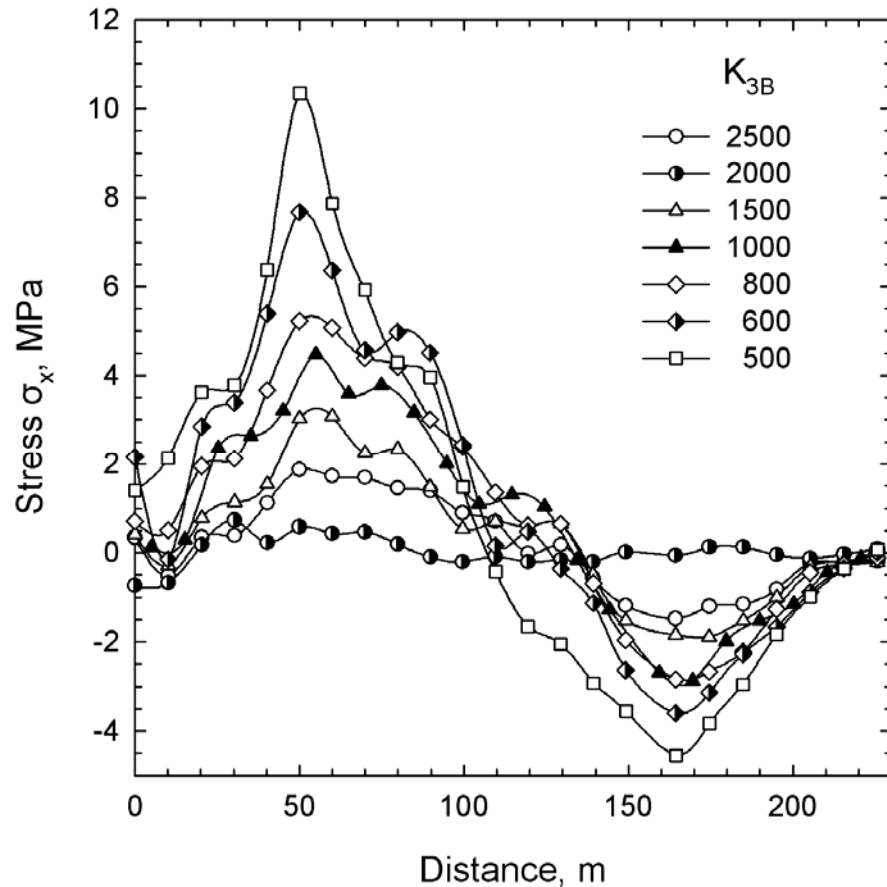
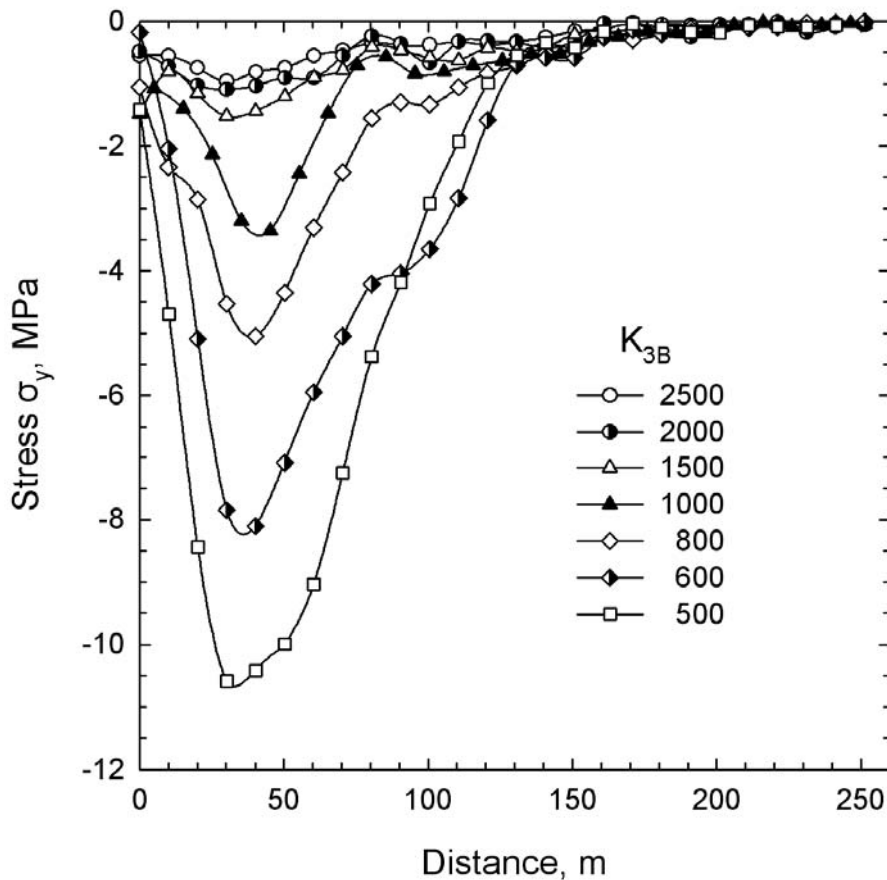
Επίδραση της δυσκαμψίας της λιθορριπής

Φράγμα Β



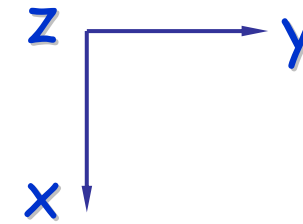
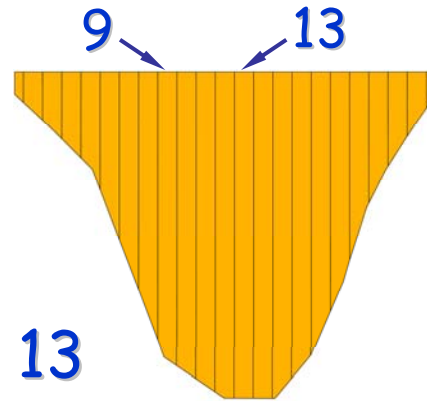
Ορθή τάση σ_y πλάκα 13

Ορθή τάση σ_x πλάκα 9



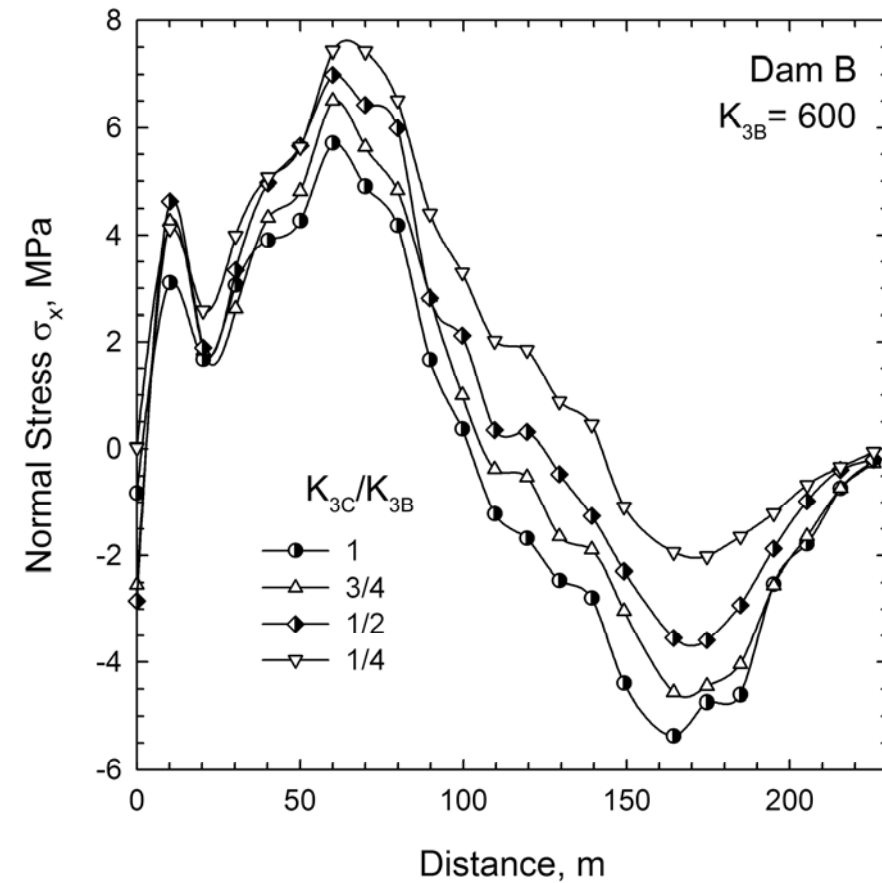
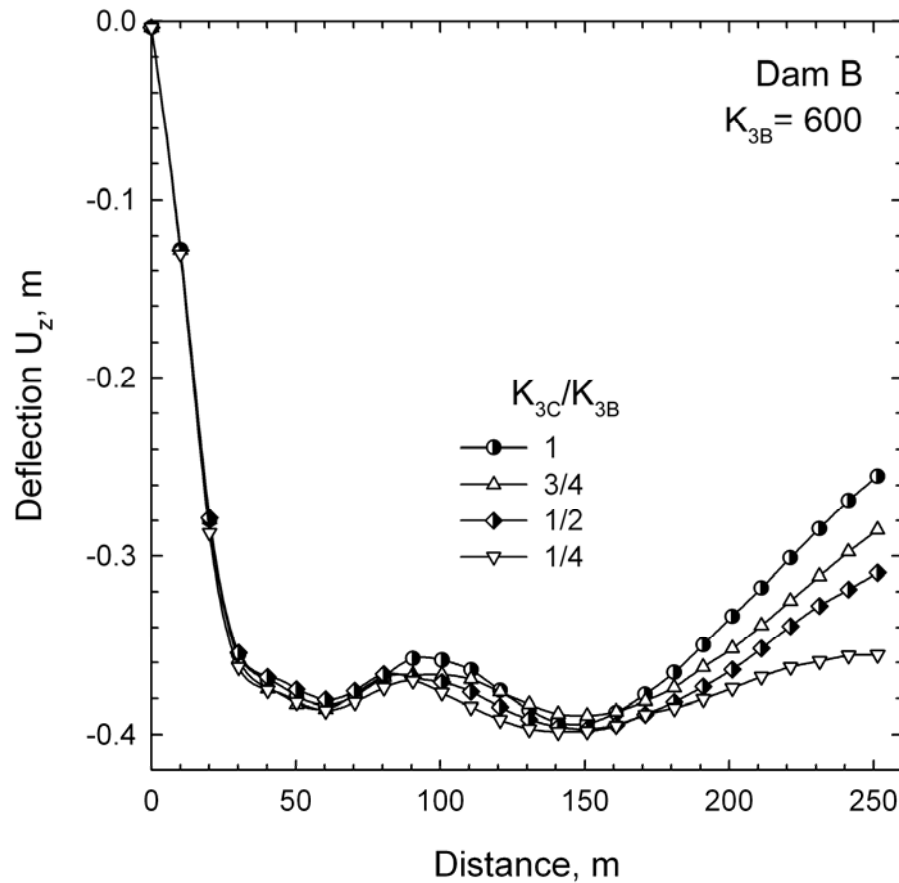
Επίδραση της κατάντη δυσκαμψίας

Φράγμα Β



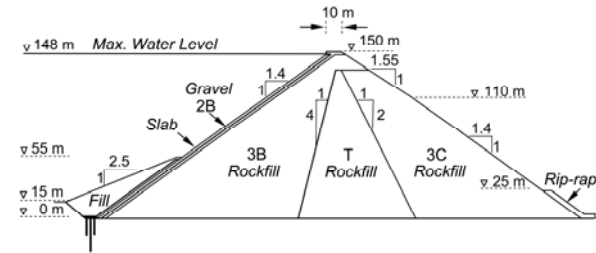
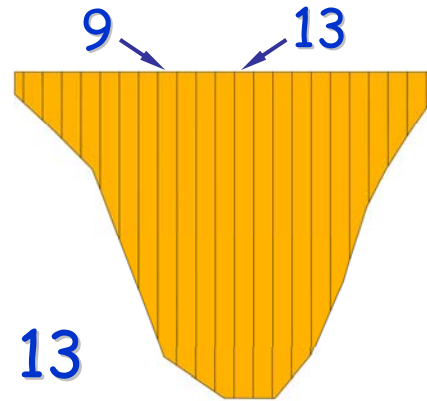
Βύθιση της πλάκας 13

Ορθή τάση σ_x πλάκα 9



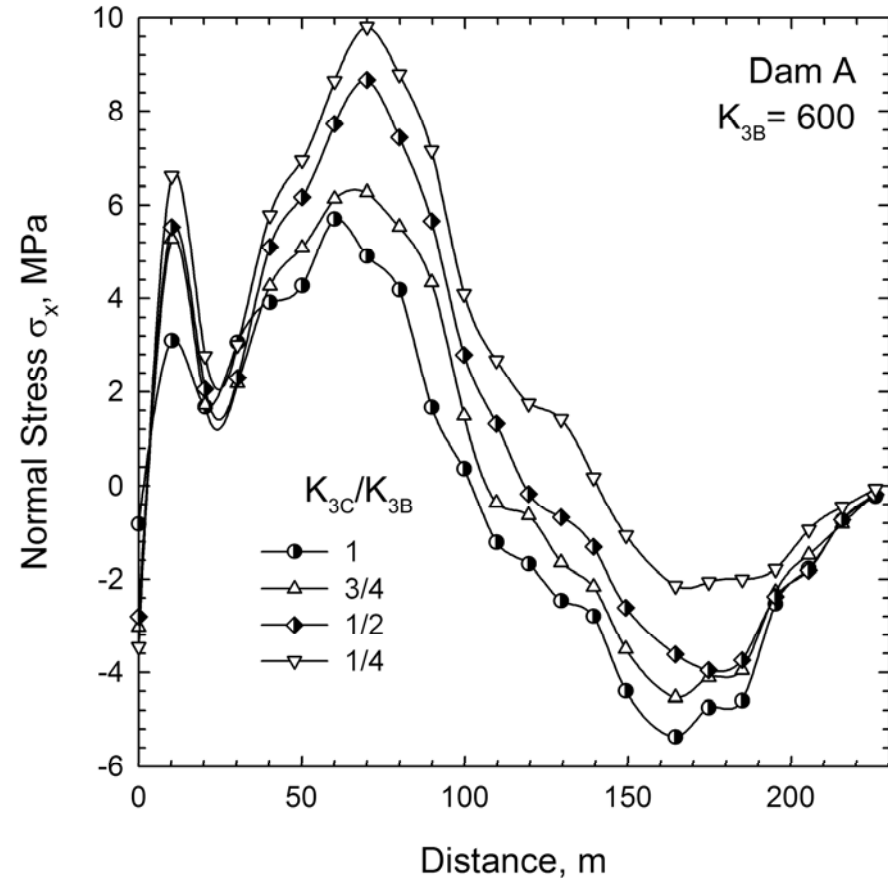
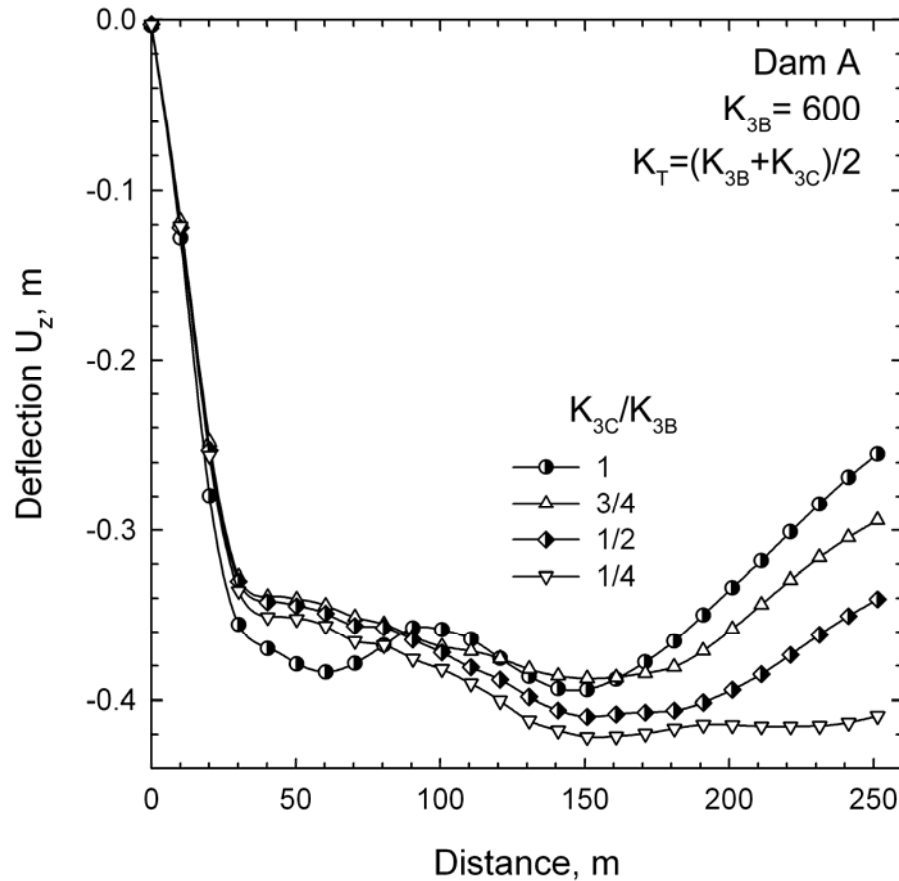
Επίδραση της κατάντη δυσκαμψίας

Φράγμα Α



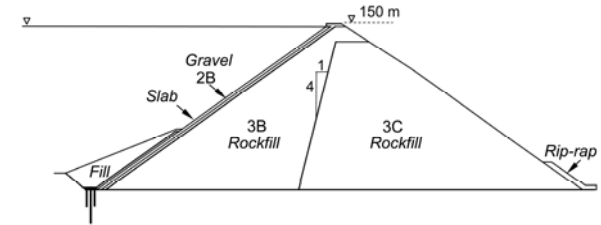
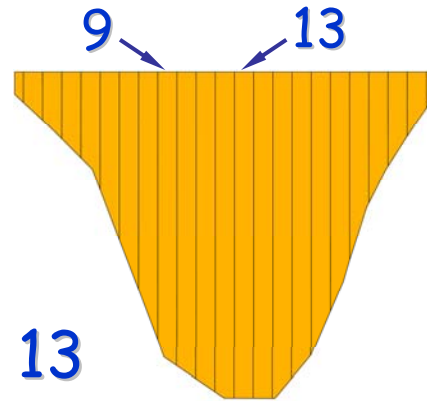
Βύθιση της πλάκας 13

Ορθή τάση σ_x πλάκα 9



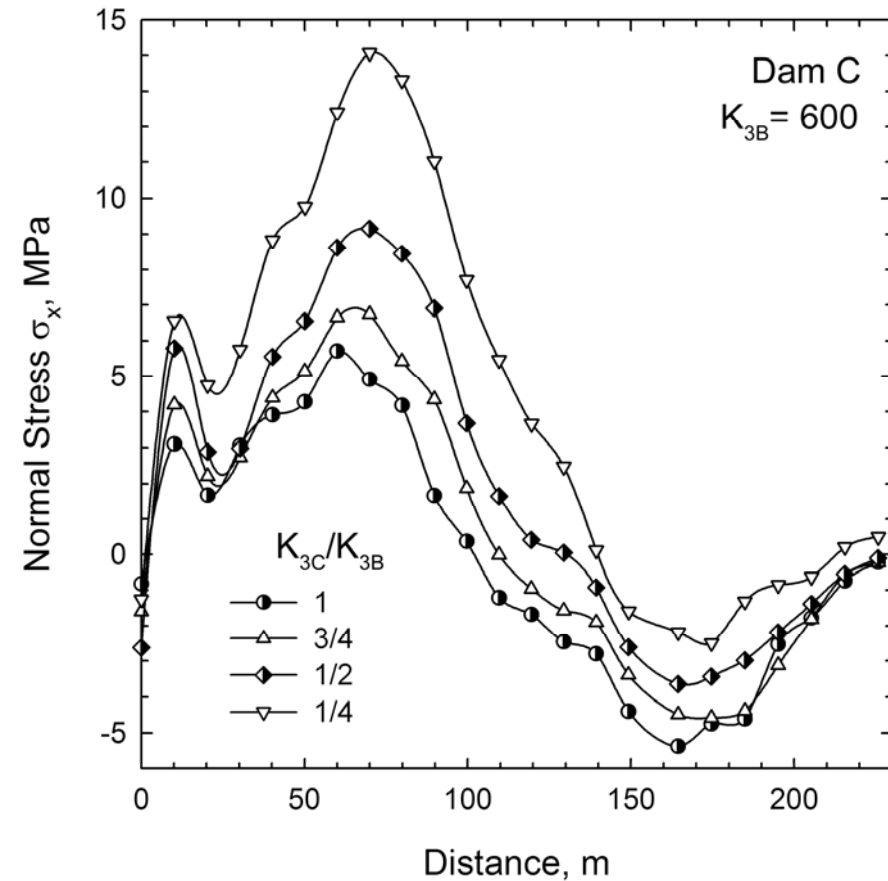
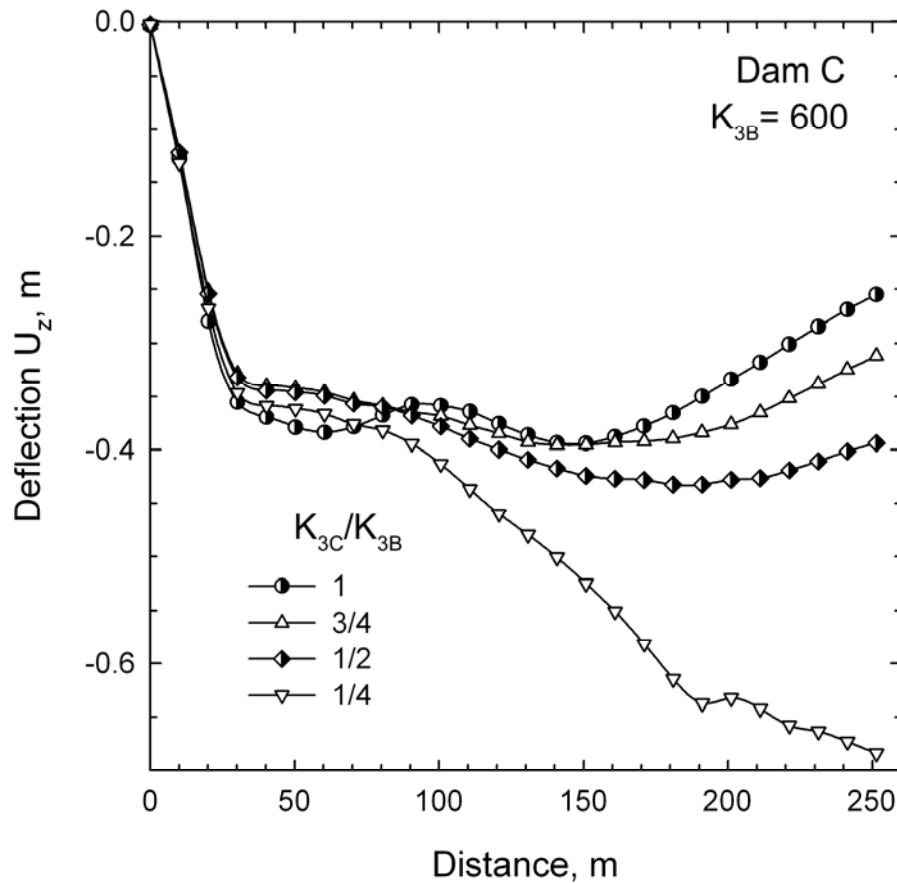
Επίδραση της κατάντη δυσκαμψίας

Φράγμα C



Βύθιση της πλάκας 13

Ορθή τάση σ_x πλάκα 9

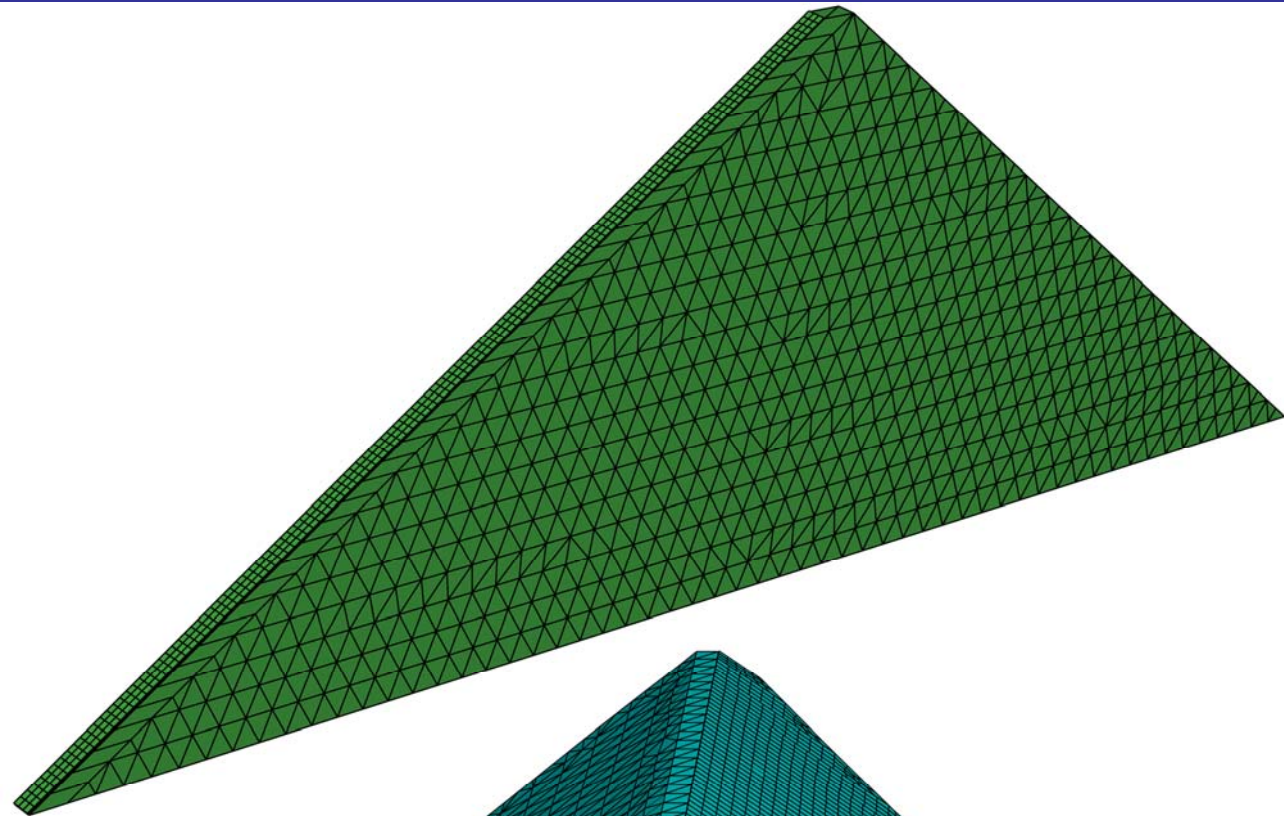


Σταδιακή κατασκευή & πλήρωση λεκάνης

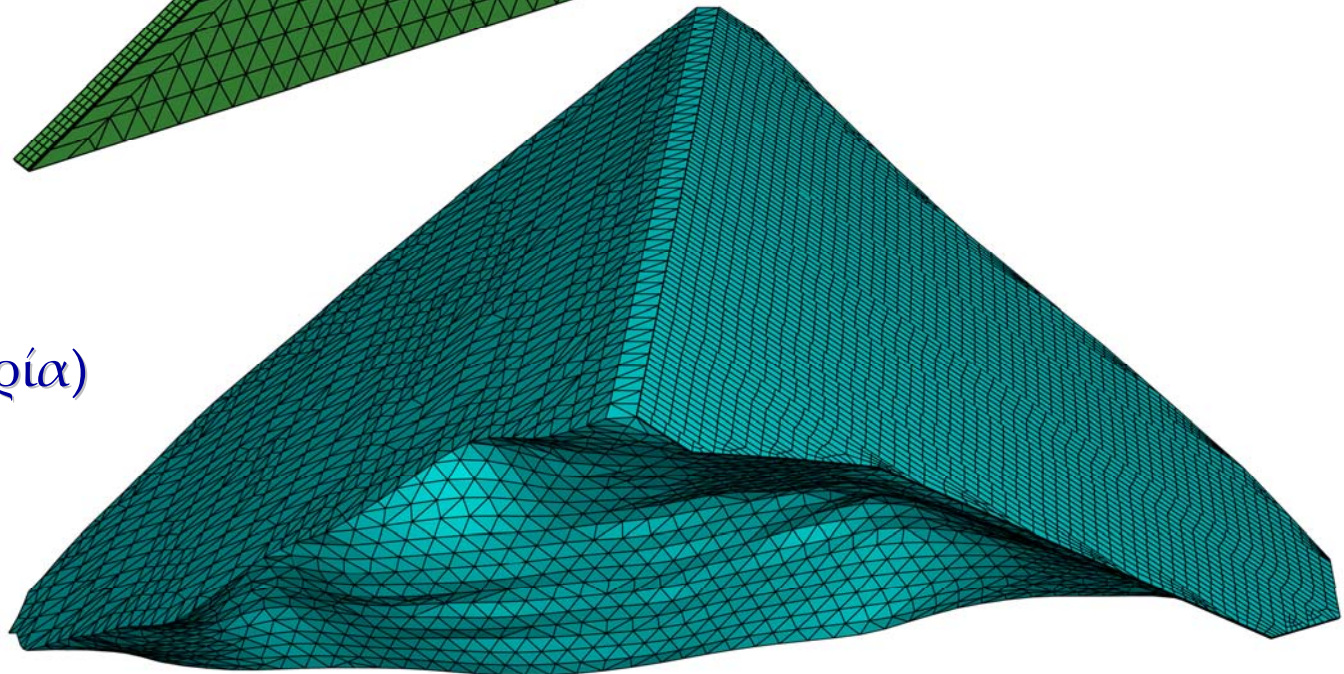
Επίδραση της 3Δ γεωμετρίας

Επίδραση της 3Δ γεωμετρίας της κοιλάδας

2Δ ανάλυση
(κεντρική διατομή)



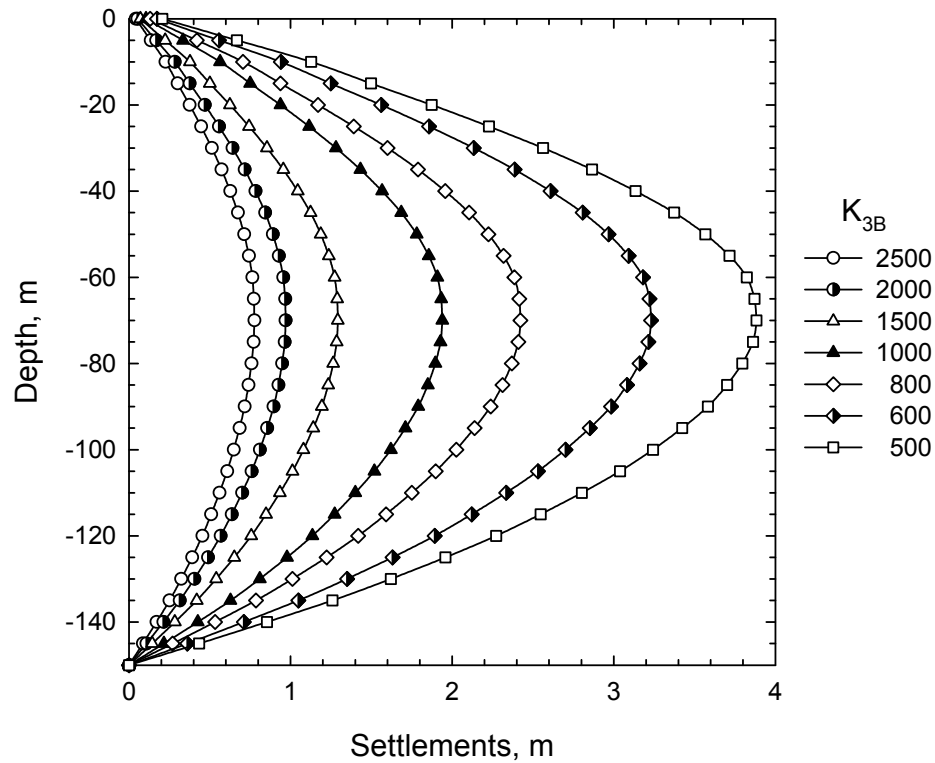
3Δ ανάλυση
(πραγματική γεωμετρία)



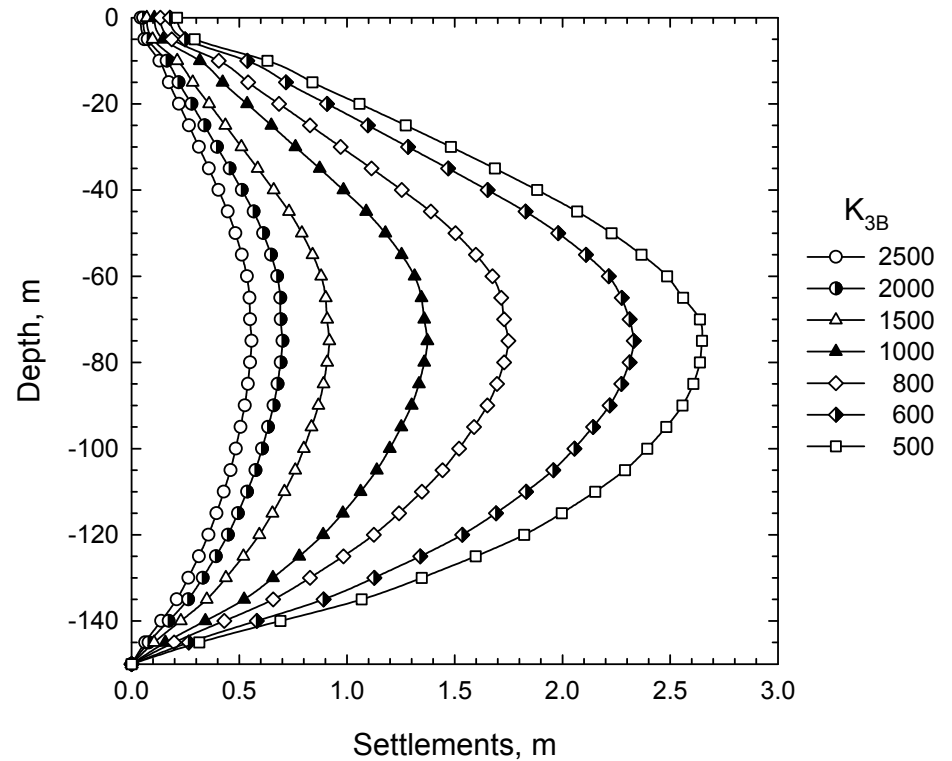
Καθίζηση στη κεντρική διατομή από 2Δ & 3Δ ανάλυση

Προσομοίωμα Duncan-Chang

2Δ ανάλυση



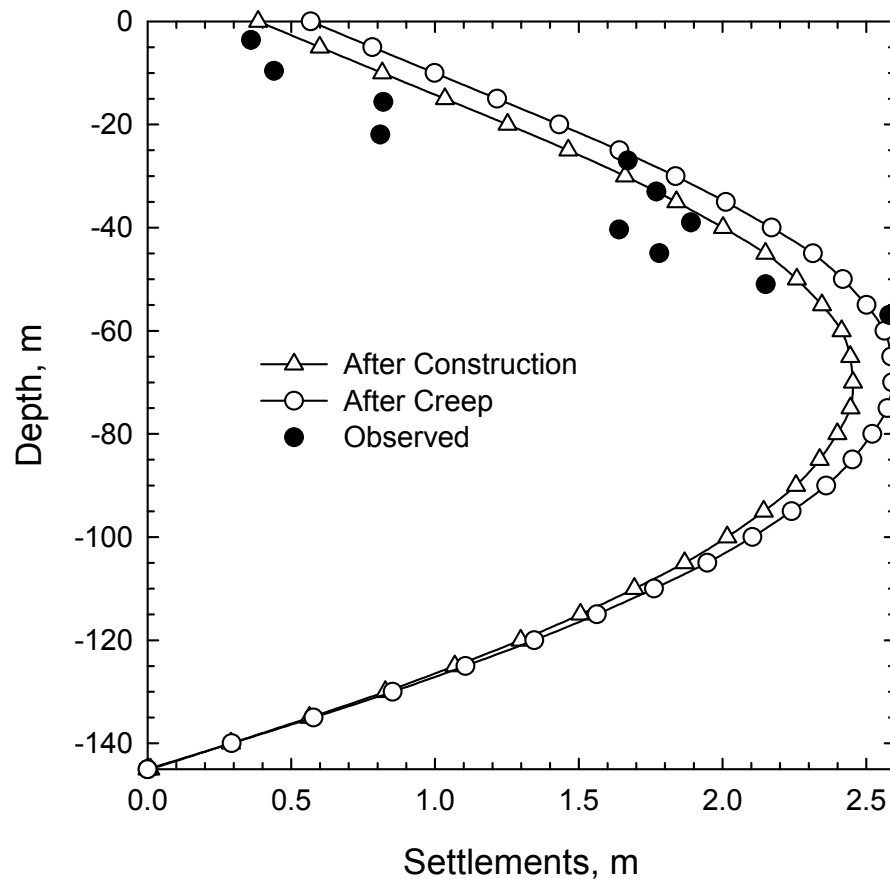
3Δ ανάλυση



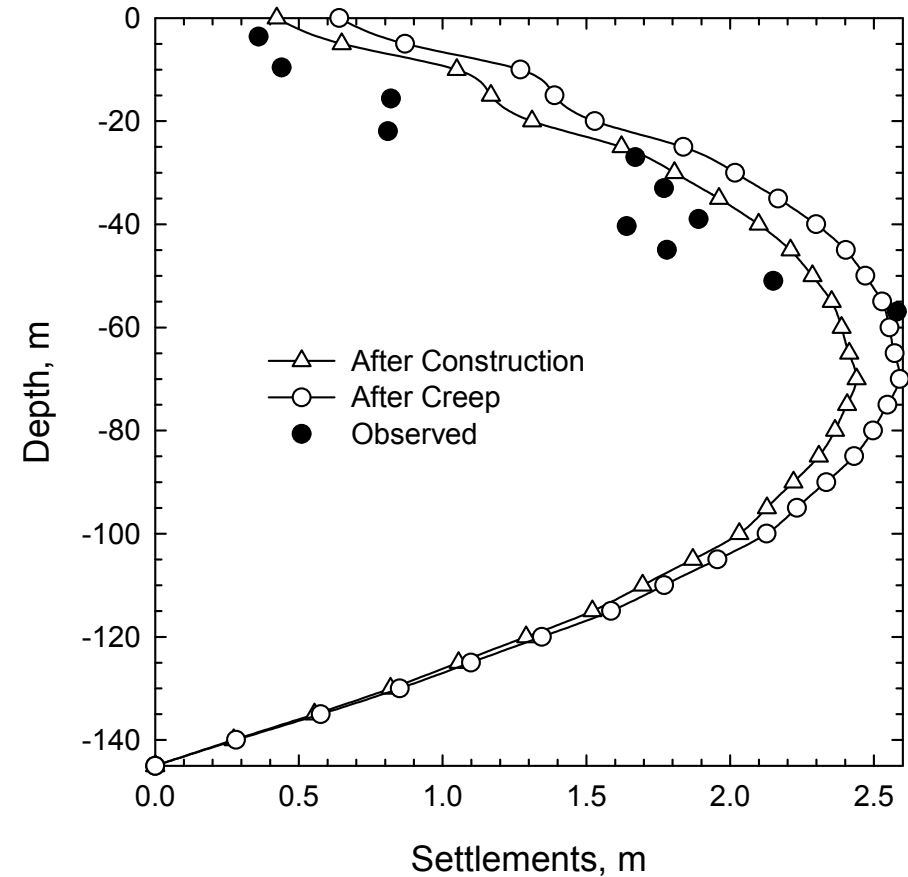
Καθίζηση στη κεντρική διατομή από 2Δ & 3Δ ανάλυση

- Γραμμικά ελαστική συμπεριφορά
- Ομογενές υλικό

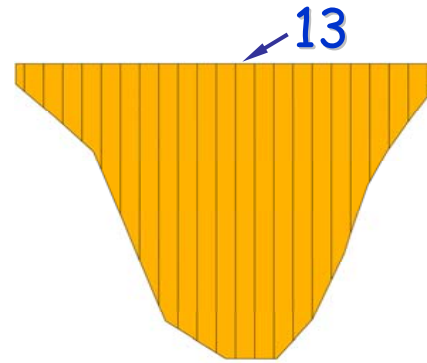
2Δ ανάλυση - $E = 30 \text{ MPa}$



3Δ ανάλυση - $E = 25 \text{ MPa}$

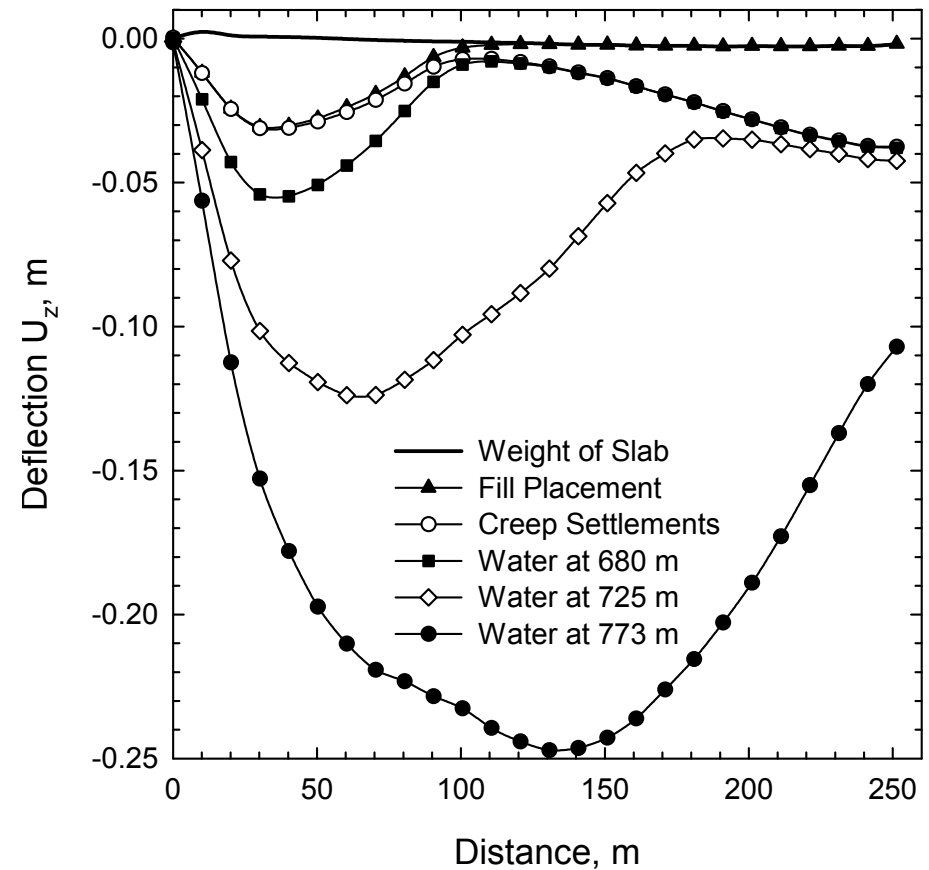
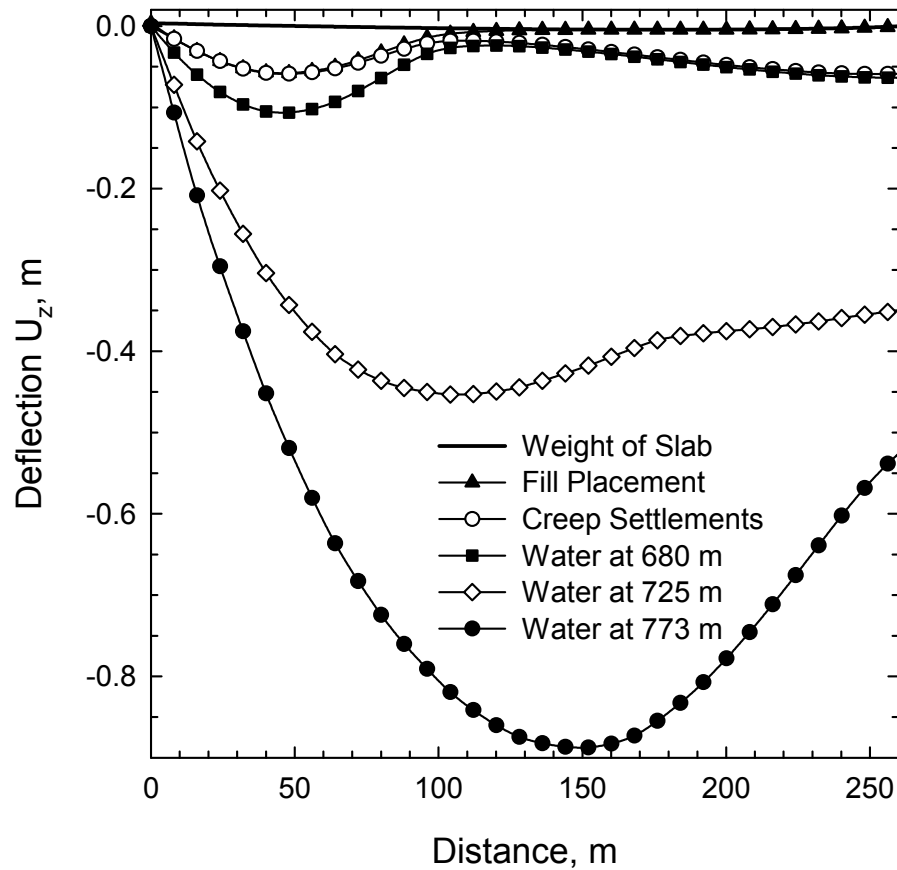


Βύθιση της κεντρικής πλάκας από 2Δ και 3Δ ανάλυση



2Δ ανάλυση

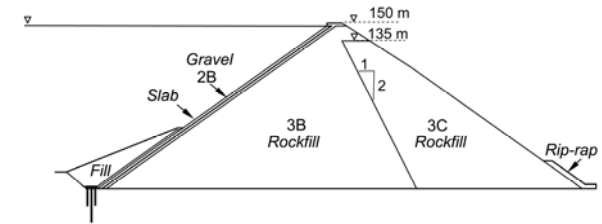
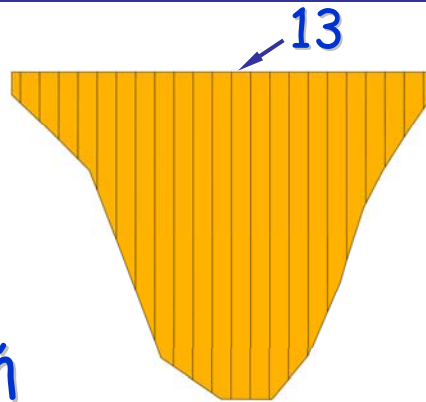
3Δ ανάλυση



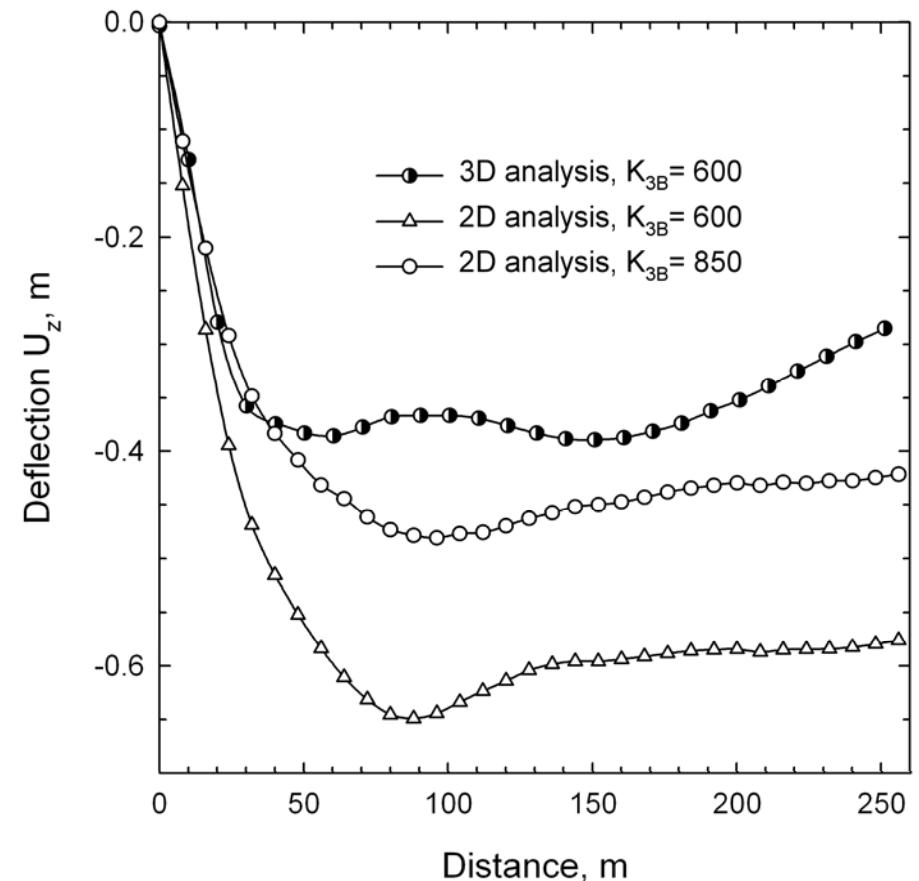
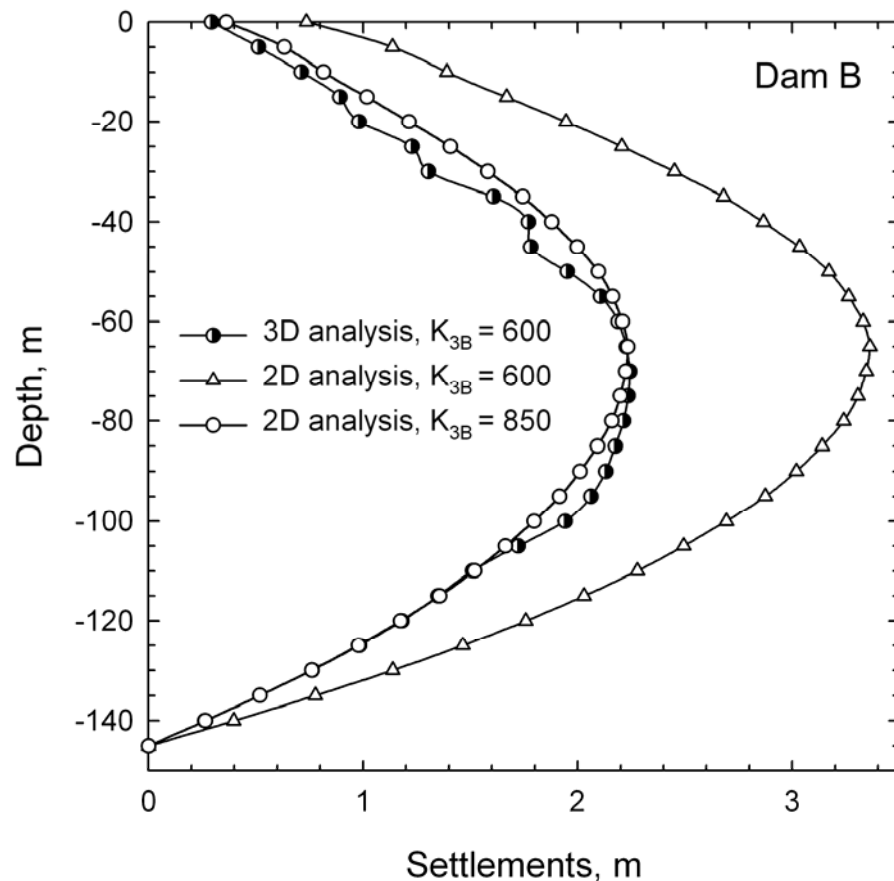
Επίδραση της 3Δ γεωμετρίας της κοιλάδας

Φράγμα Β

Καθίζηση στην
κεντρική διατομή

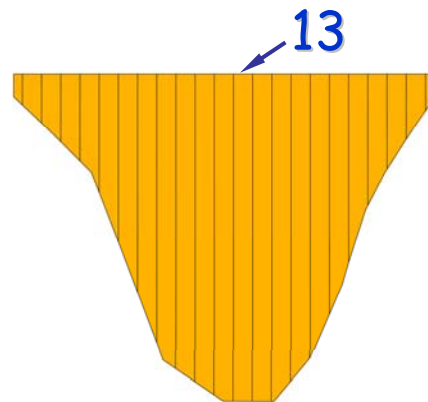


Βύθιση της κεντρικής
πλάκας 13

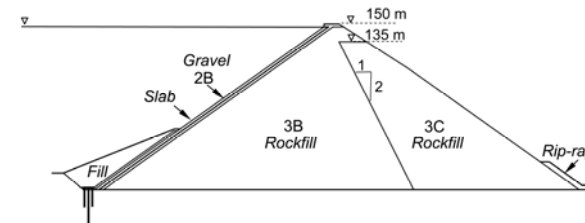


Επίδραση της 3Δ γεωμετρίας της κοιλάδας

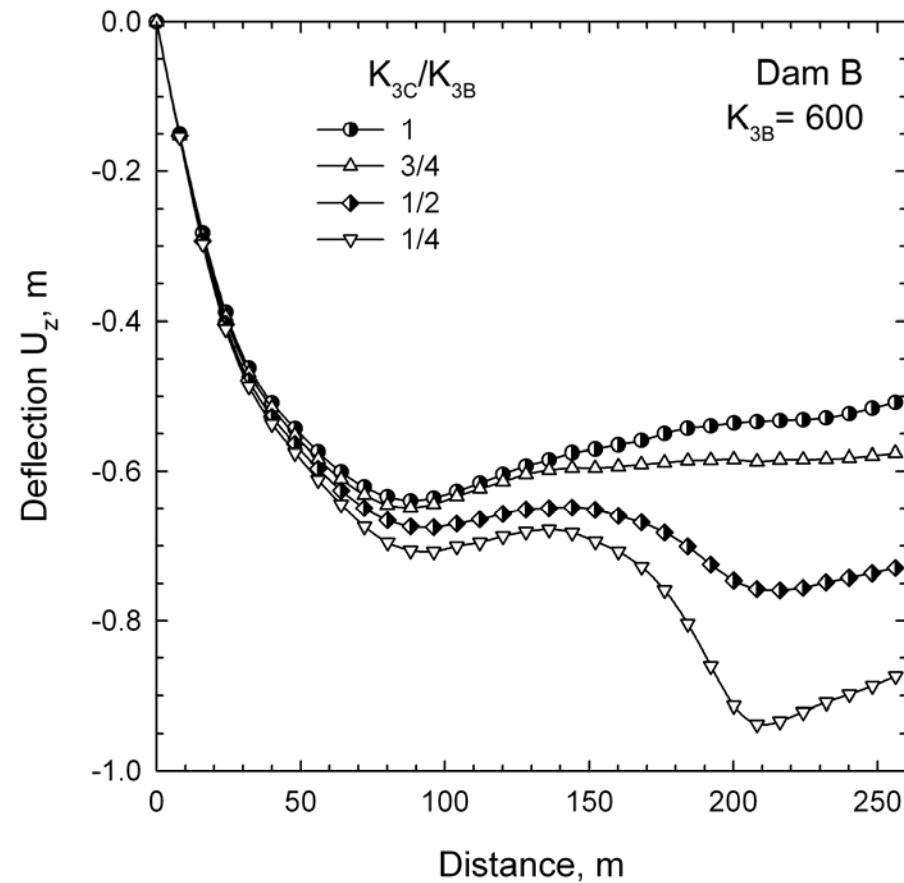
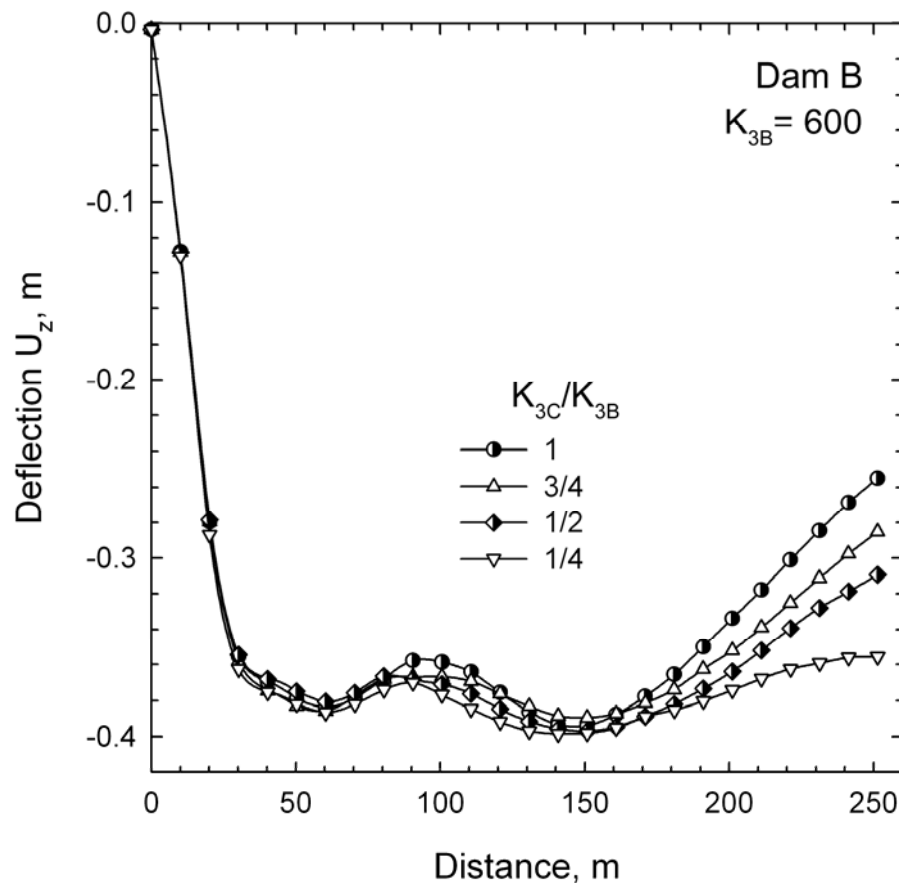
Φράγμα Β



3Δ ανάλυση

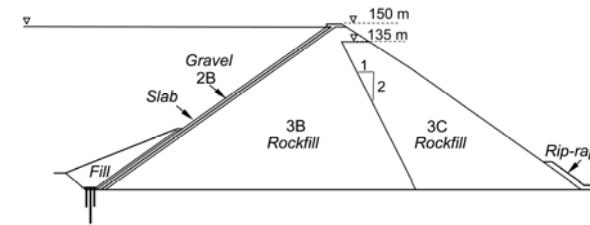


2Δ ανάλυση

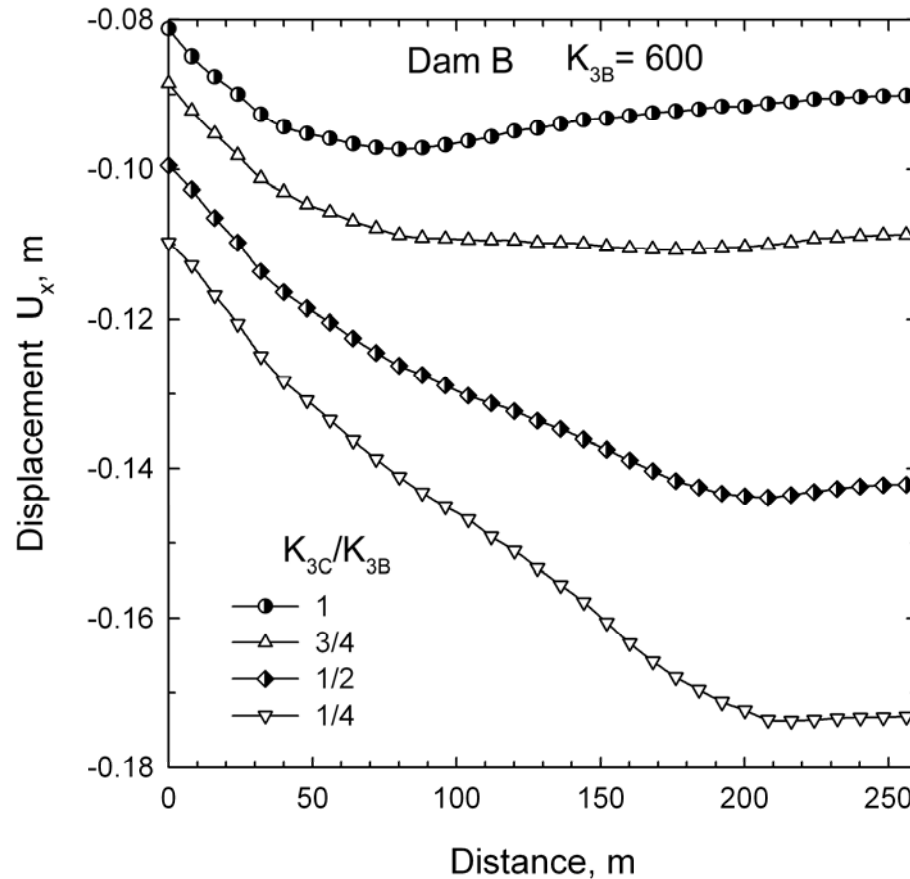


Επίδραση της 3Δ γεωμετρίας της κοιλάδας

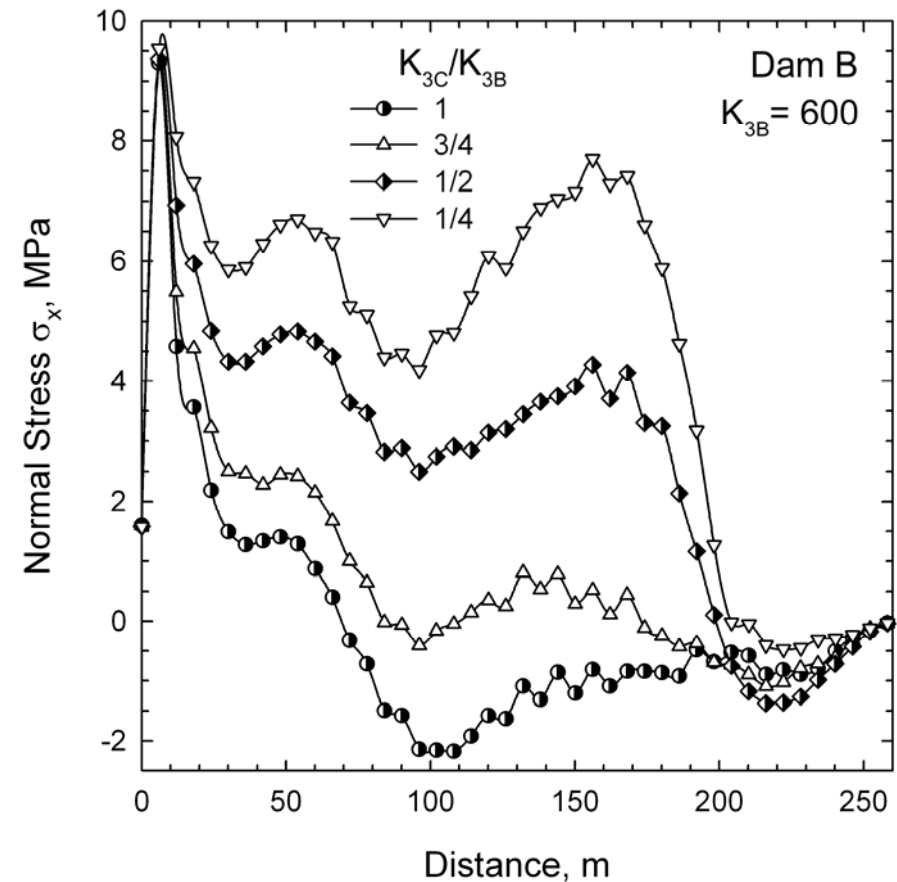
Φράγμα Β - 2Δ ανάλυση



Μετατόπιση U_x , m



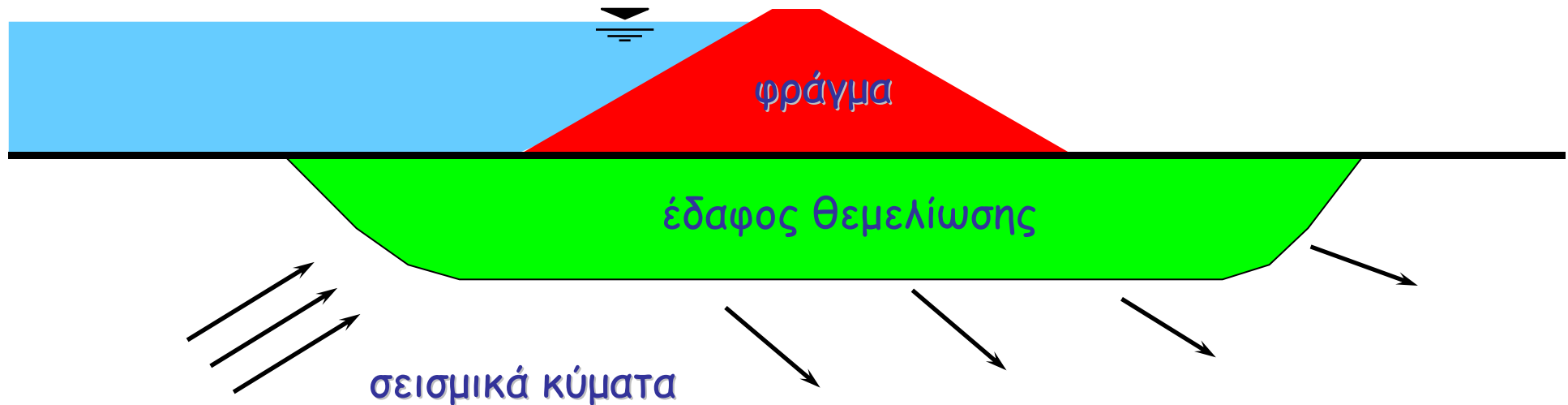
Τάση σ_x , kPa



Σημαντικές Παράμετροι Ανάλυσης & Συμπεριφοράς

Σεισμική Συμπεριφορά -
Δυναμική Ανάλυση CFRD

Σεισμικός σχεδιασμός



- ◆ Σεισμική απόκριση του φράγματος
- ◆ Πρόβλεψη των μόνιμων παραμορφώσεων και των συνεπειών τους στην λειτουργία του έργου
- ◆ Σχεδιασμός του φράγματος με βάση τις αναμενόμενες μόνιμες παραμορφώσεις

Σεισμικός Κίνδυνος

Από:

- Μόνιμες μετατοπίσεις και βλάβες του φράγματος κατά την σεισμική απόκριση
- Μετατοπίσεις ενεργών ρηγμάτων στη βάση του φράγματος

Επίσης:

- Μετατοπίσεις ρηγμάτων στη λεκάνη
- Κατολισθήσεις πρανών στη λεκάνη (δημιουργία κυμάτων)

Συμπεριφορά CFRDs σε σεισμό

- Τα **CFRD** θεωρούνται το "state-of-the-art" στην κατασκευή φραγμάτων (με σημαντικά πλεονεκτήματα)
- Θεωρούνται ότι συμπεριφέρονται καλύτερα των ECRD σε σεισμό
- Ελάχιστα από αυτά έχουν εκτεθεί σε πολύ ισχυρές δονήσεις και κανένα σε μετατόπιση ρήγματος στη βάση
- Σε περίπτωση ενεργού ρήγματος με σημαντική μετατόπιση, τα φράγματα σκυροδέματος δεν συνιστώνται (**ICOLD**)
- Για ρήγμα στην βάση θα πρέπει να διερευνηθεί η καταλληλότητα:
 - Earth Core Rockfill Dams ★ ★ ★
 - Concrete Face Rockfill Dams ★ ★ ? (απαιτείται έρευνα)

Φράγμα Zipingpu, σεισμός Wenchuan 12/5/2008



Φράγμα Zipingpu, σεισμός Wenchuan 12/5/2008

Τοπική θραύση σκυροδέματος κατά μήκος των κατακόρυφων αρμών



(Wieland 2008)

Φράγμα Zipingpu, σεισμός Wenchuan 12/5/2008

Θραύση σκυροδέματος κατά μήκος της στέψης του φράγματος



(Wieland 2008)

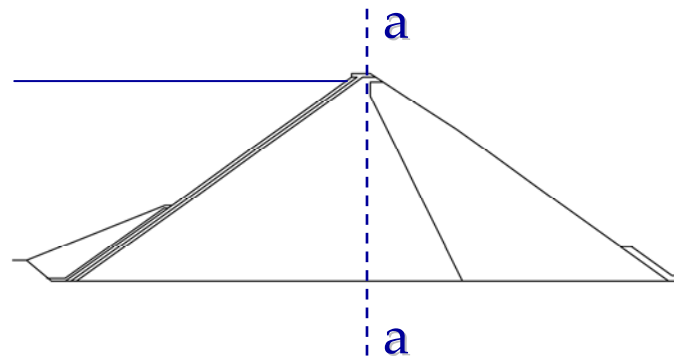
Φράγμα Zipingpu, σεισμός Wenchuan 12/5/2008

Άνοιγμα αρμού κατά μήκος της στέψης του φράγματος

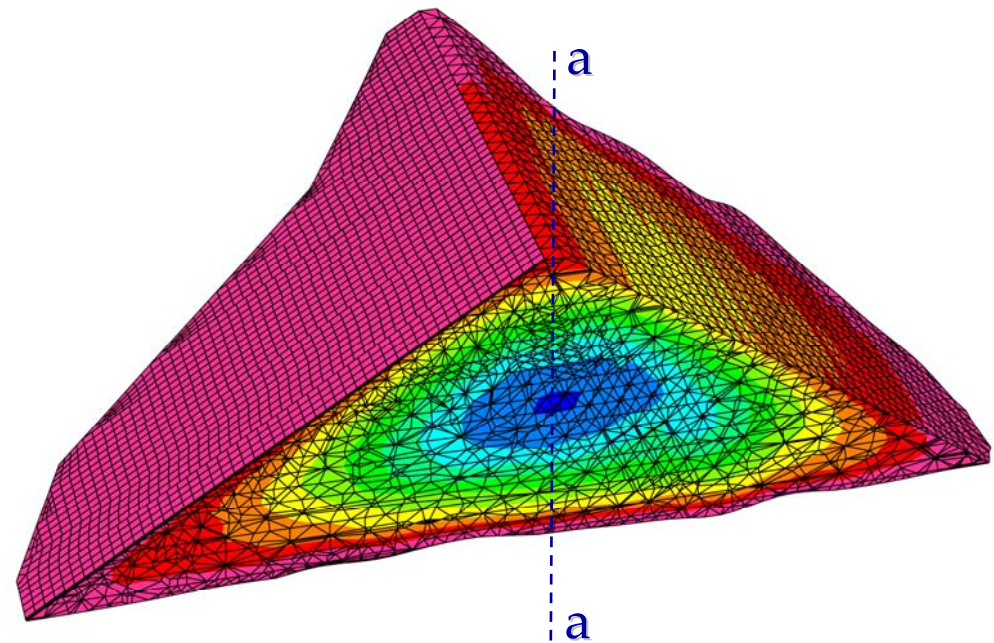
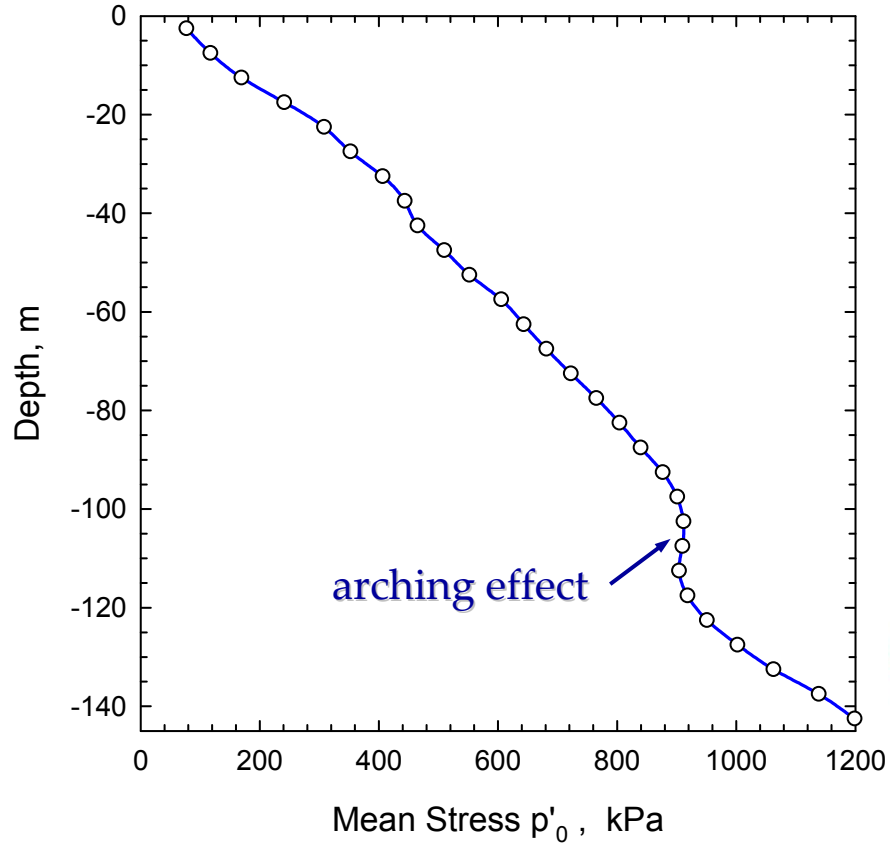


(Wieland 2008)

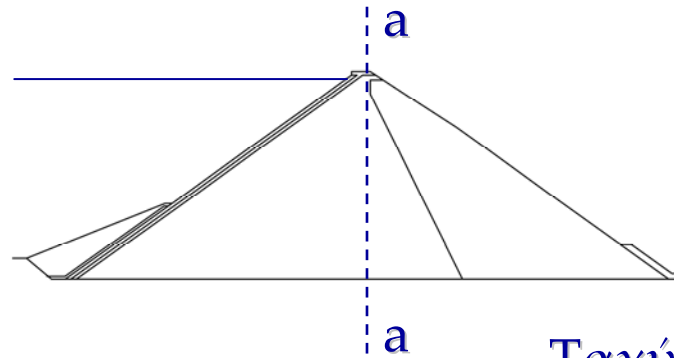
Κατανομή της μέσης τάση p_0 στην κεντρική διατομή



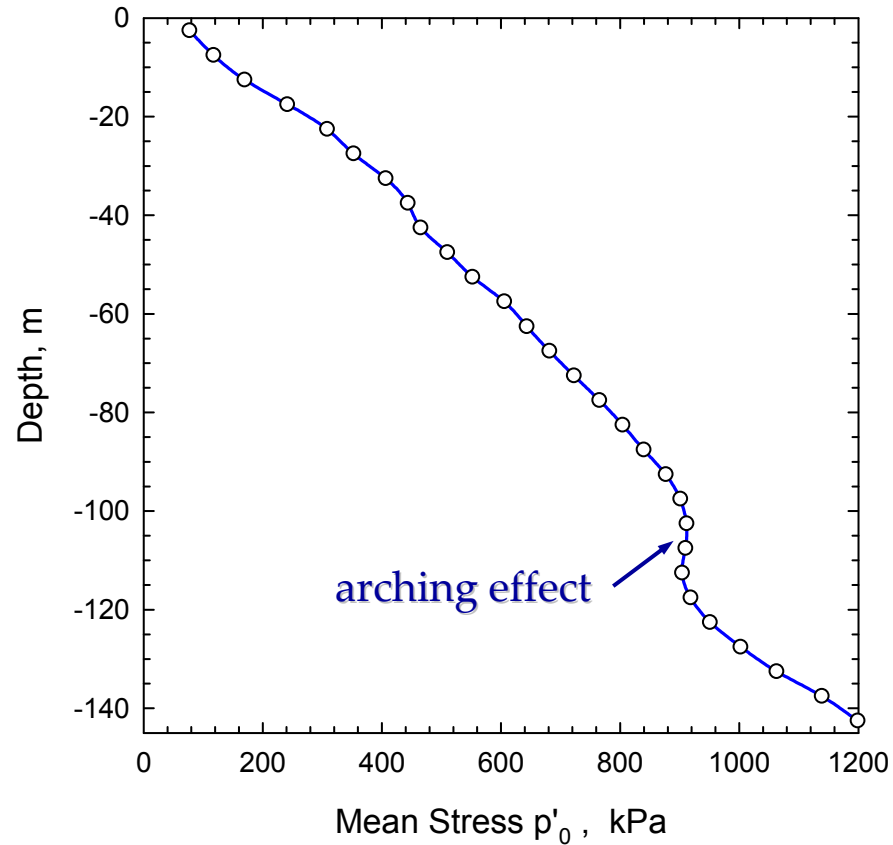
Μέση τάση p_0



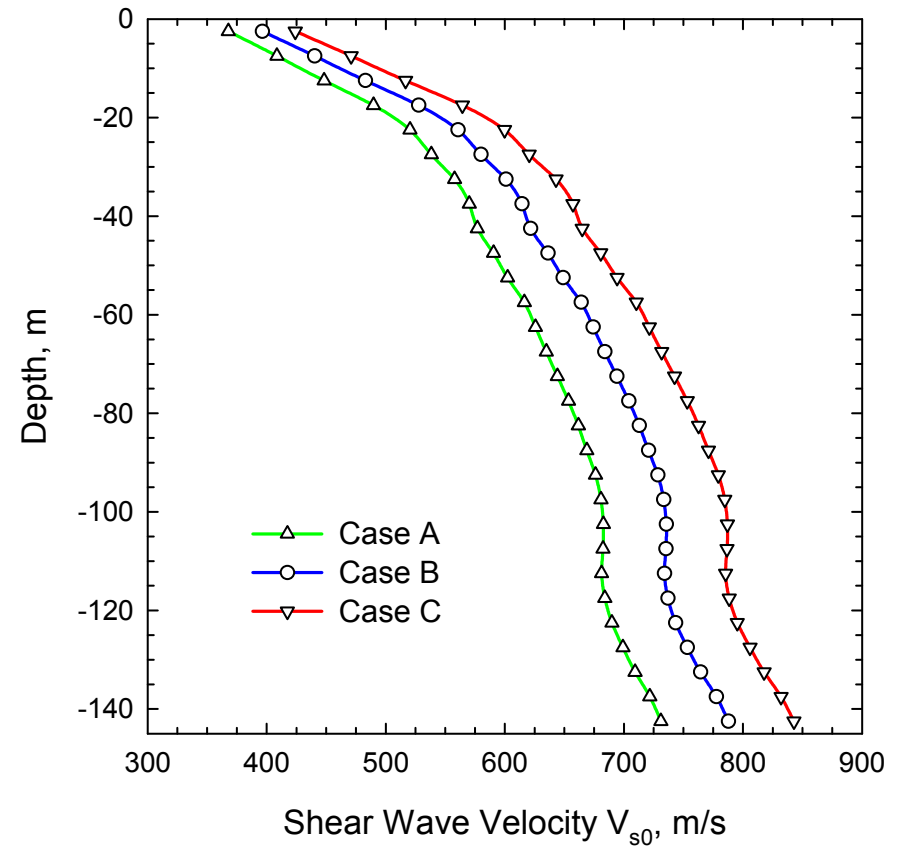
Αρχική ταχύτητα διατμητικών κυμάτων V_{s0} (ζώνη 3B)



Μέση τάση p_0

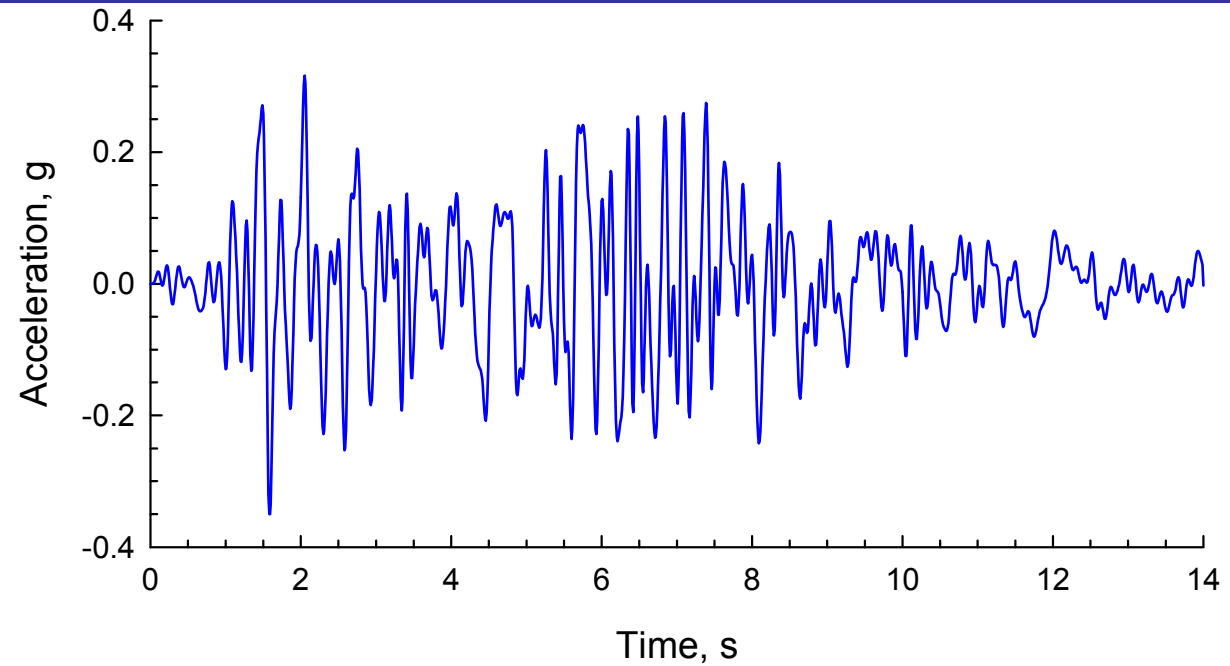


Ταχύτητα διατμ. κυμάτων V_{s0}

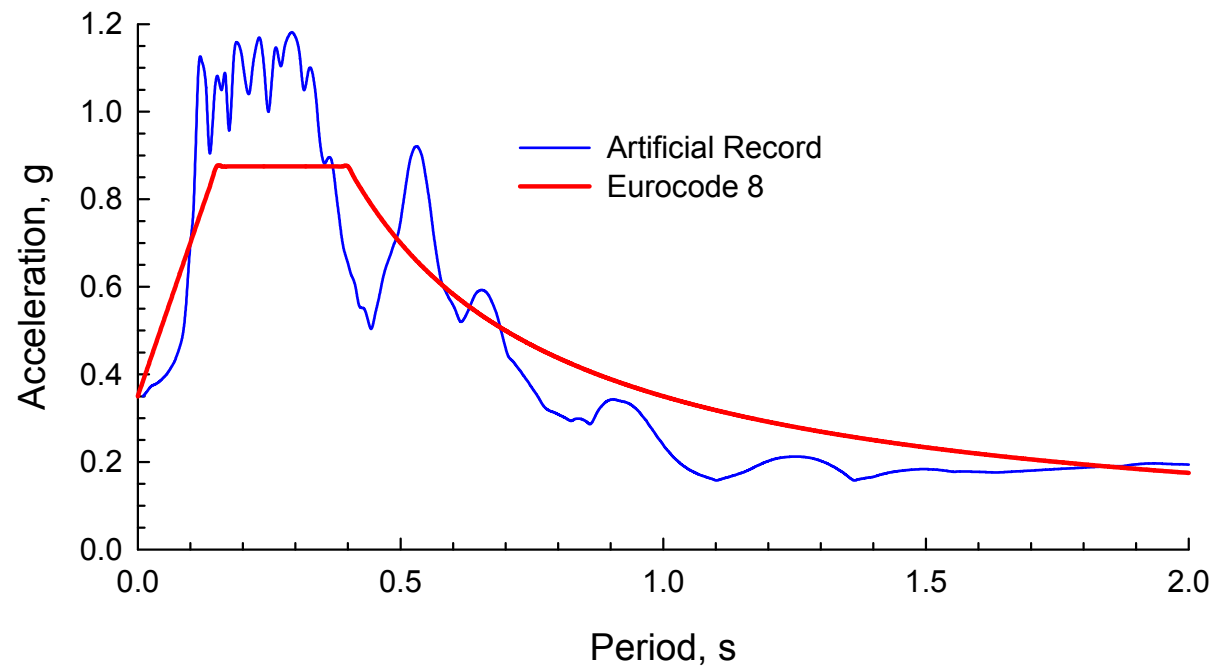


Σεισμική διέγερση ($M=6.5$, $a_{\max} = 0.35g$)

Επιτάχυνση



Φάσμα απόκρισης

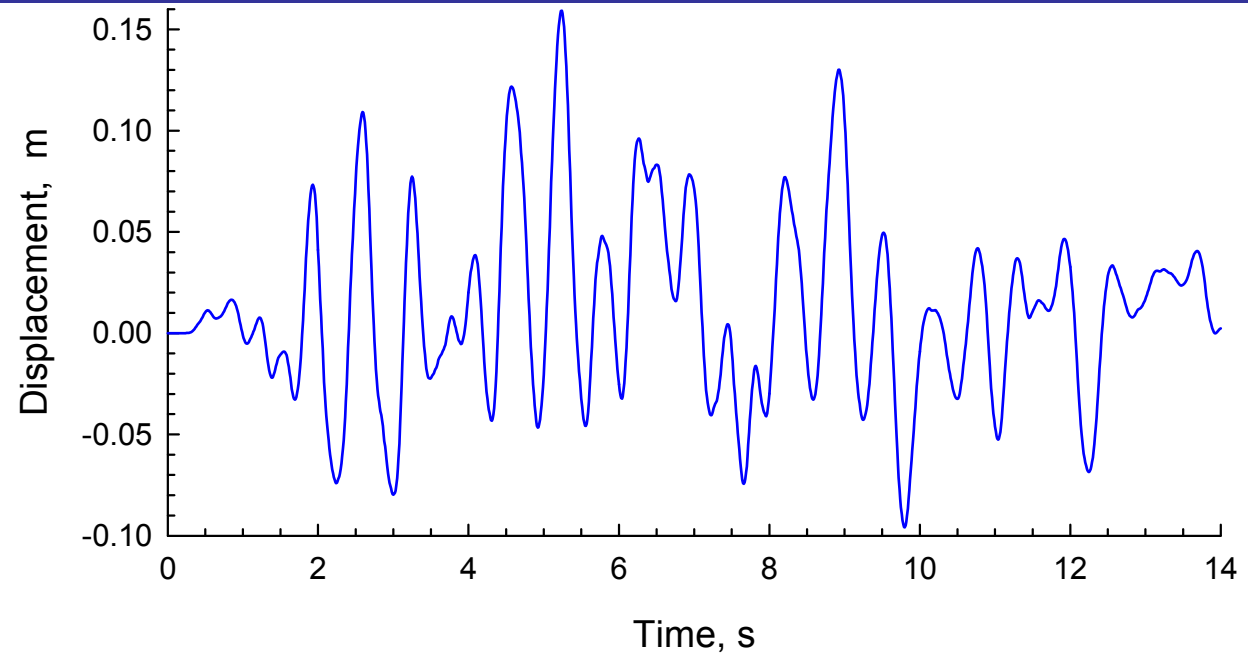


Σενάριο Β: Απόκριση στην στέψη της κεντρικής διατομής

Ανάντη – κατάντη

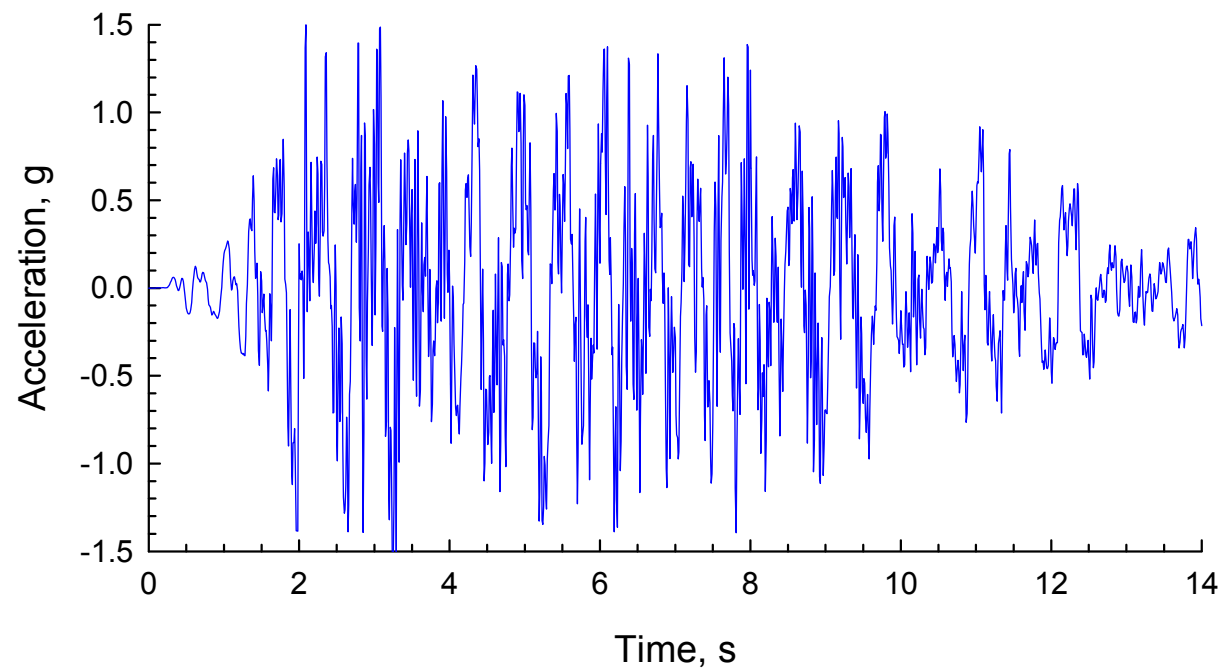
Μετατόπιση

$$u_{\max} \approx 16 \text{ cm}$$



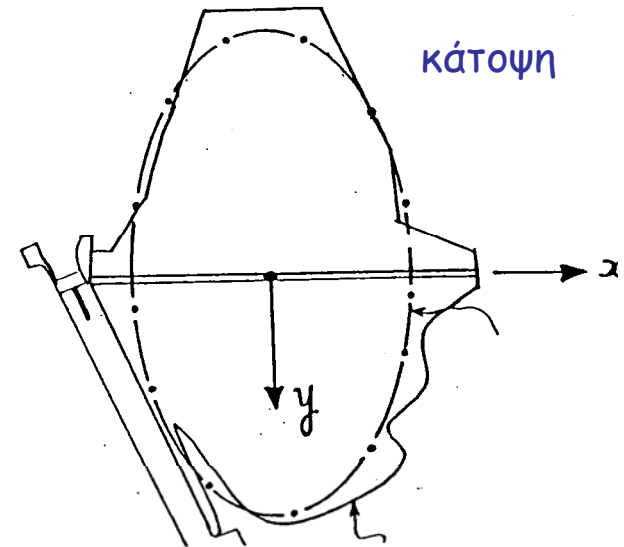
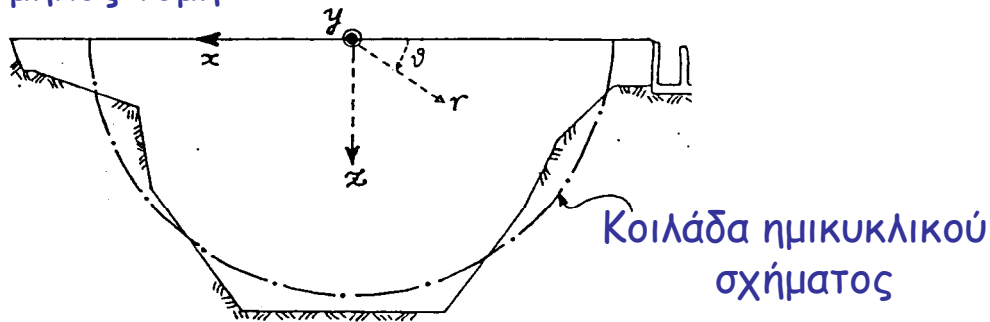
Επιτάχυνση

$$a_{\max} \approx 1.5 \text{ g}$$

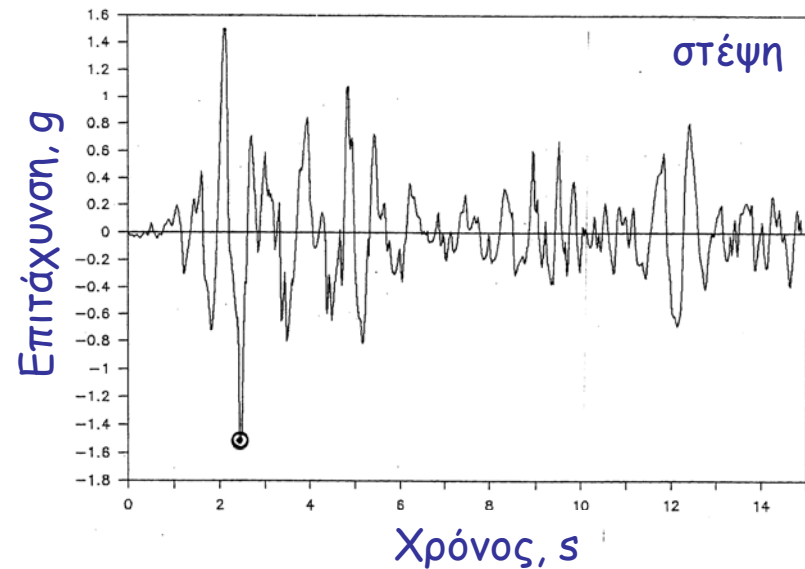
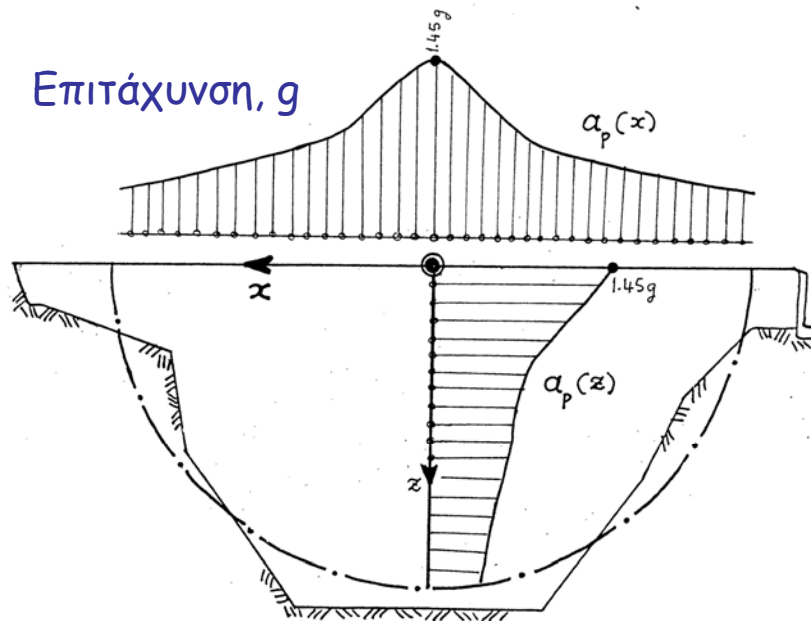


Απλουστευμένη μαθηματική λύση για φράγμα σε ημι-κυκλική κοιλάδα (Dakoulas & Gazetas 1986)

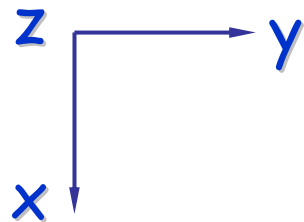
Κατά μήκος τομή



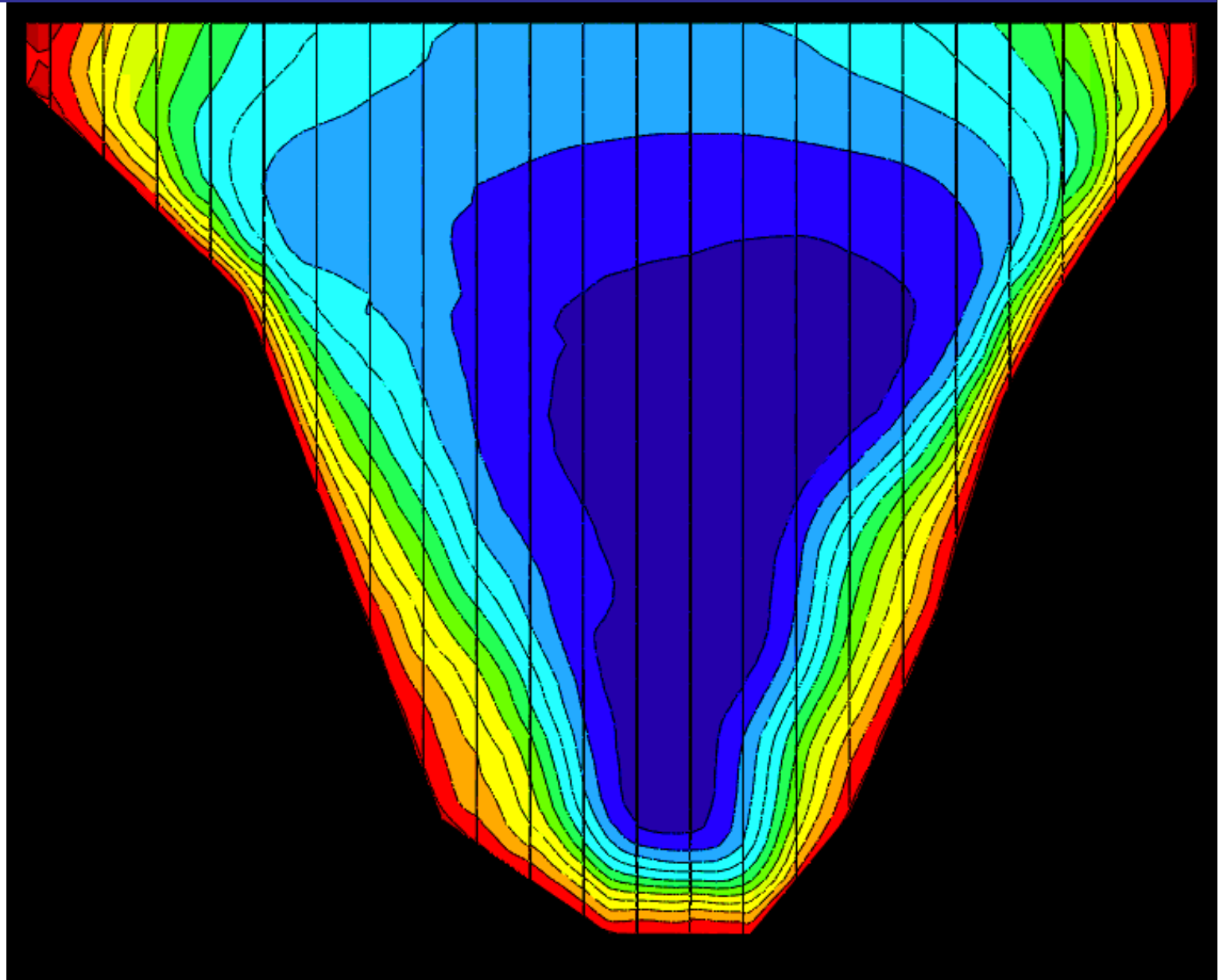
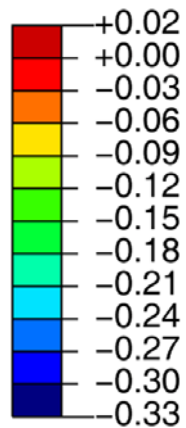
Επιτάχυνση, g



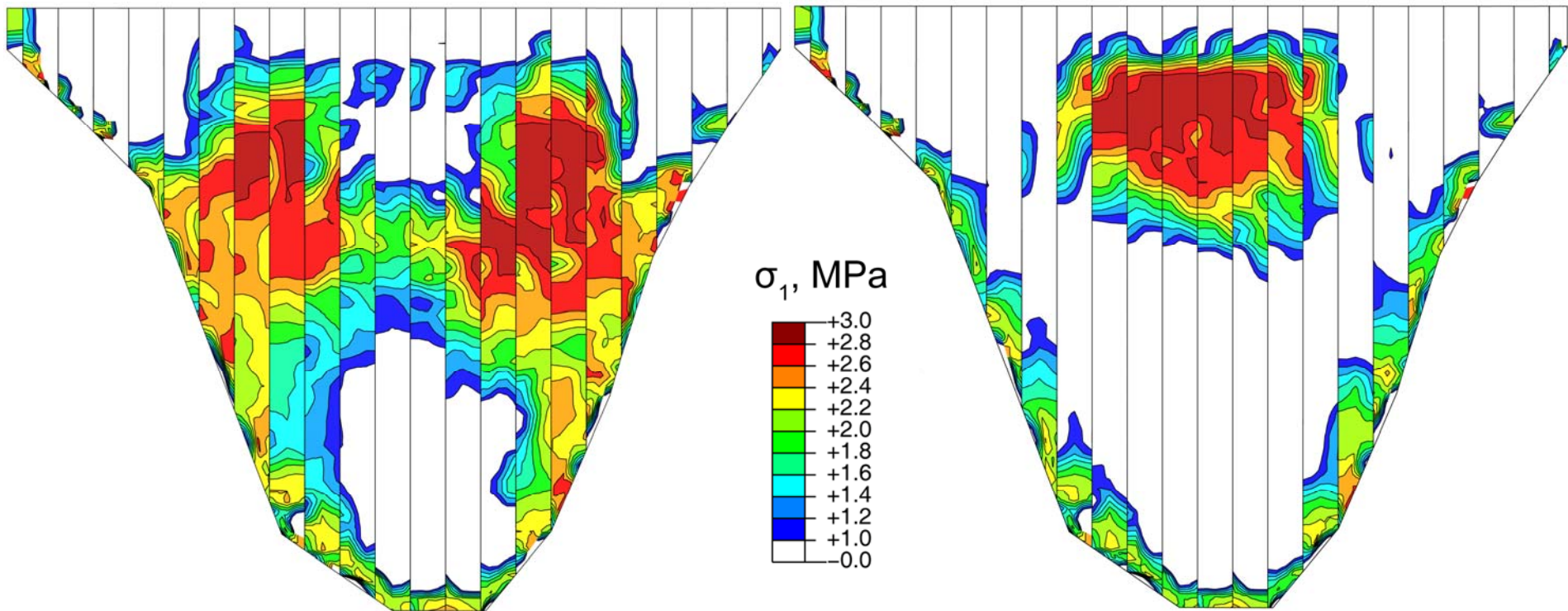
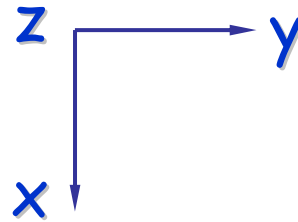
Δυναμική Ανάλυση CFRD: Χρονική εξέλιξη της βύθισης της πλάκας



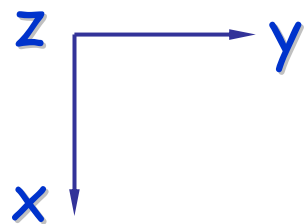
U_z, m



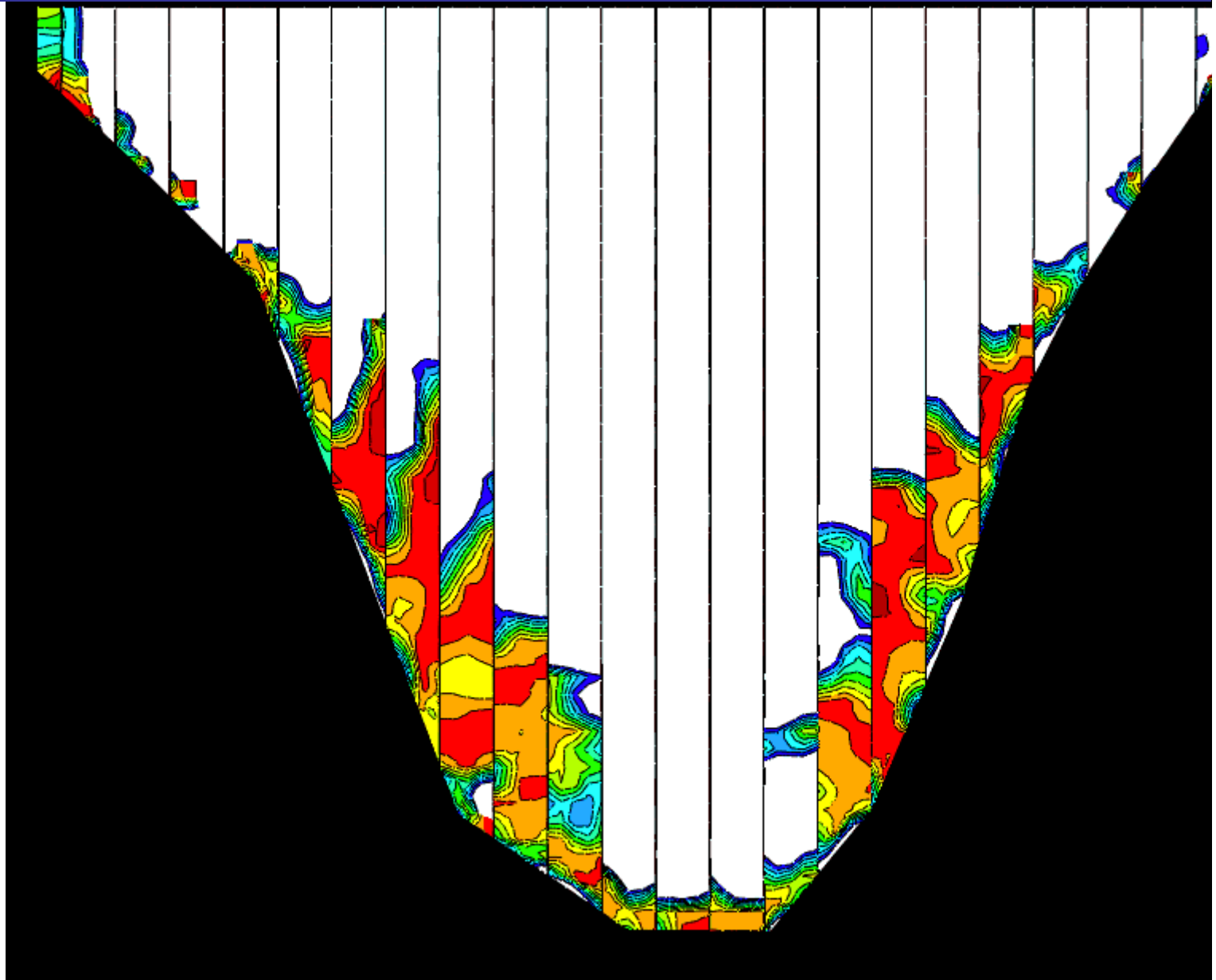
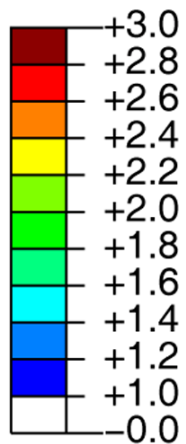
Δυναμική Ανάλυση CFRD: Μέγιστη κύρια τάση σ_1 της πλάκας



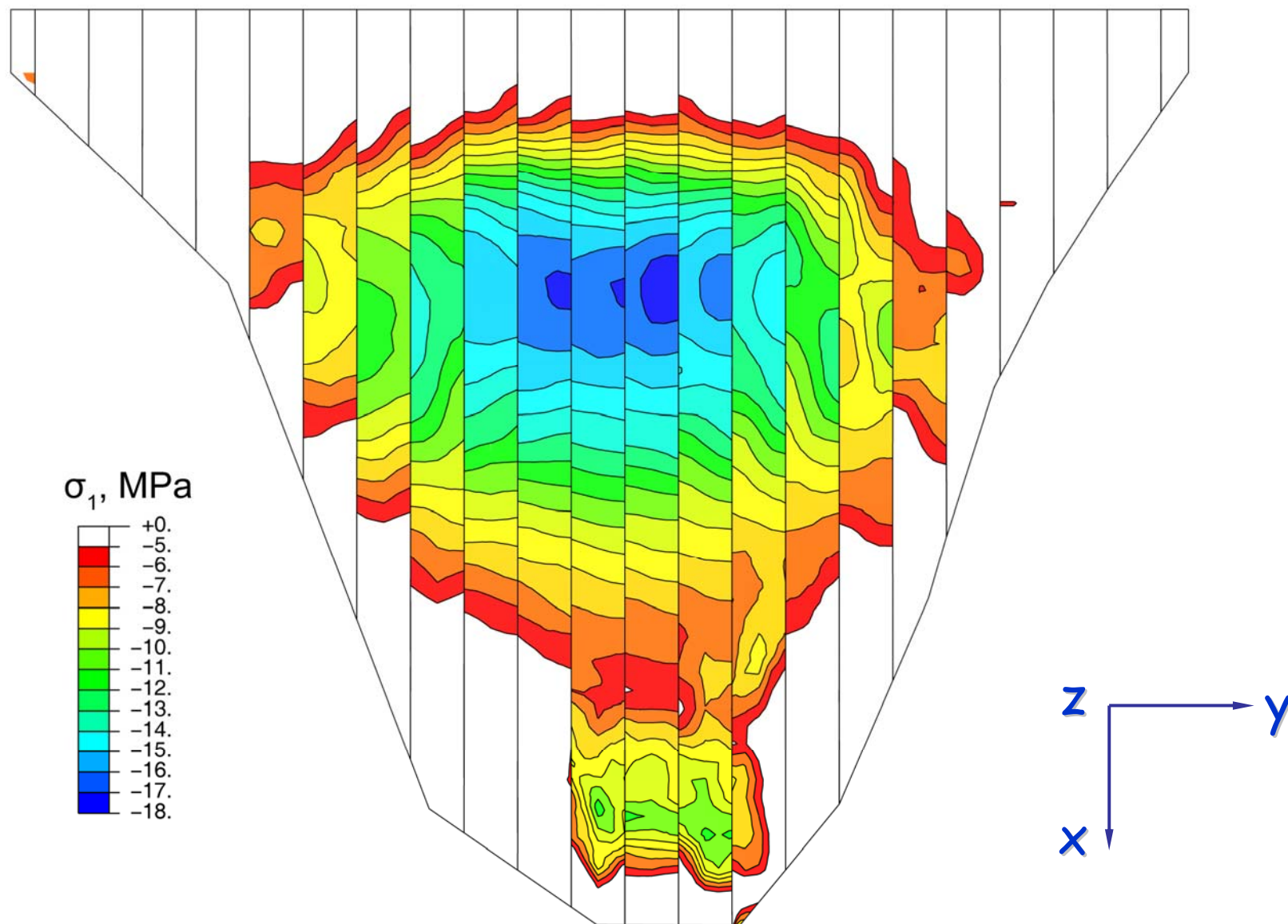
Δυναμική Ανάλυση CFRD: Ελάχιστη κύρια τάση σ_1 της πλάκας



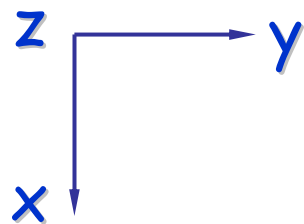
σ_1 , MPa



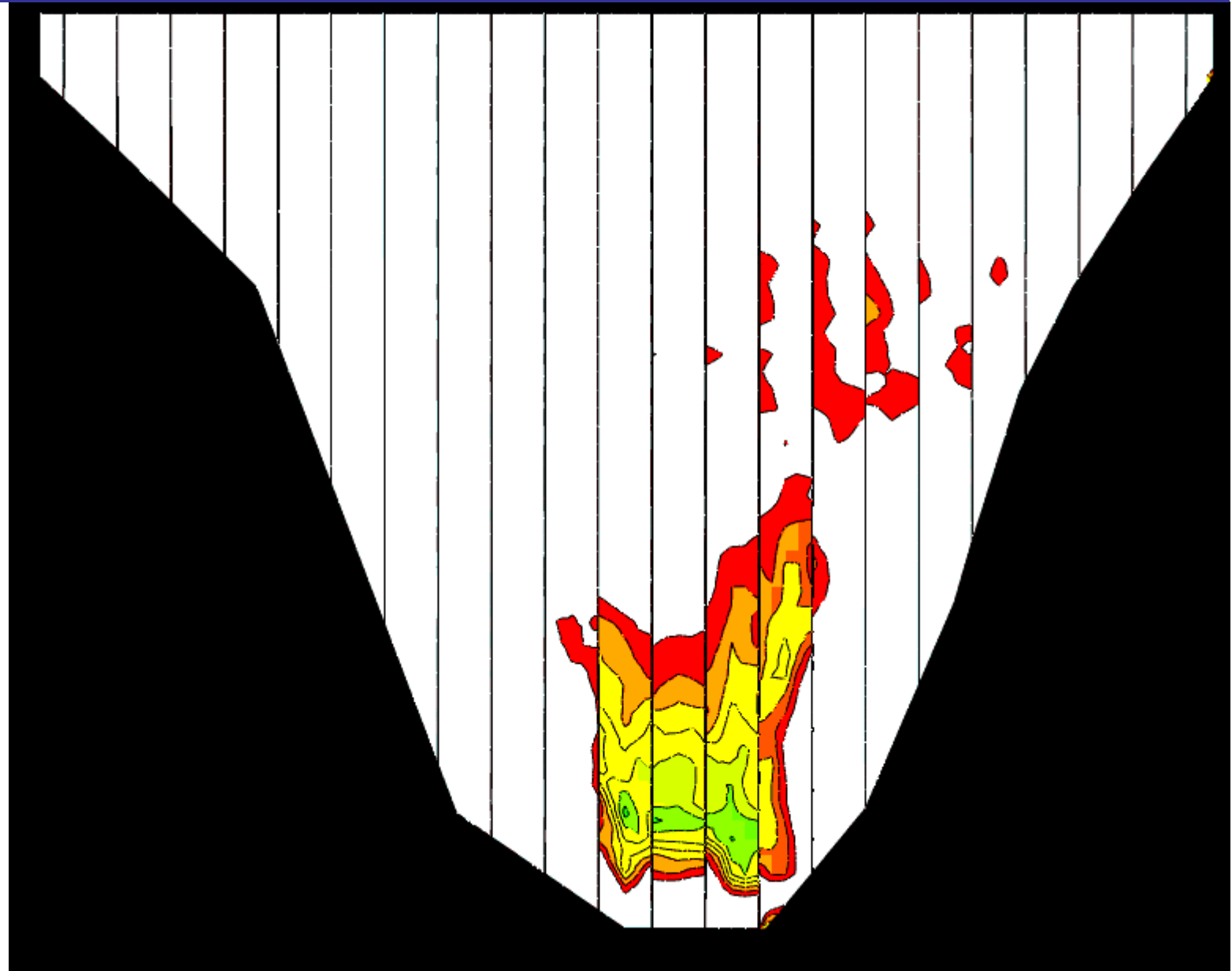
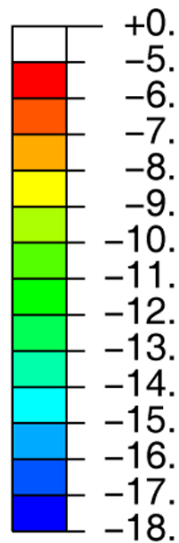
Δυναμική Ανάλυση CFRD: Ελάχιστη κύρια τάση σ_3 της πλάκας



Δυναμική Ανάλυση CFRD: Ελάχιστη κύρια τάση σ_3 της πλάκας



σ_3 , MPa

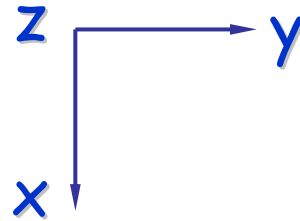


Δυναμική συνίζηση λιθορριπής: συνέπειες

- Αύξηση βύθισης στην πλάκα
- Αύξηση θλιπτικών τάσεων των κατακόρυφων αρμών
- Άνοιγμα κατακόρυφων αρμών στα άκρα
- Άνοιγμα αρμών στην στέψη
- Καταπόνηση ή ρηγμάτωση σκυροδέματος στην στέψη

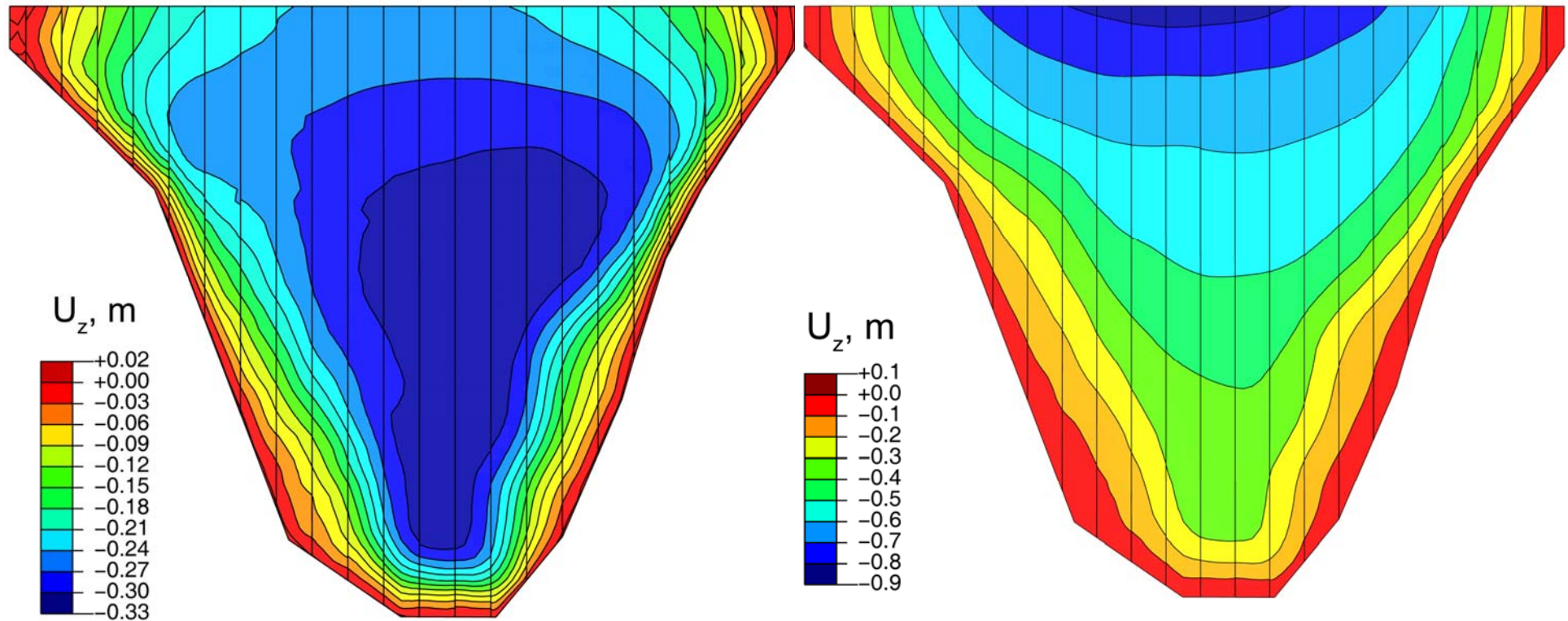
Δυναμική συνίζηση λιθορριπής: βύθιση πλάκας

Για μεγάλα CFRD η μέγιστη συνίζηση εκτιμάται μεταξύ 50-100 cm

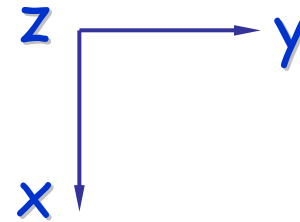


συνίζηση = 0 cm

συνίζηση = 50 cm

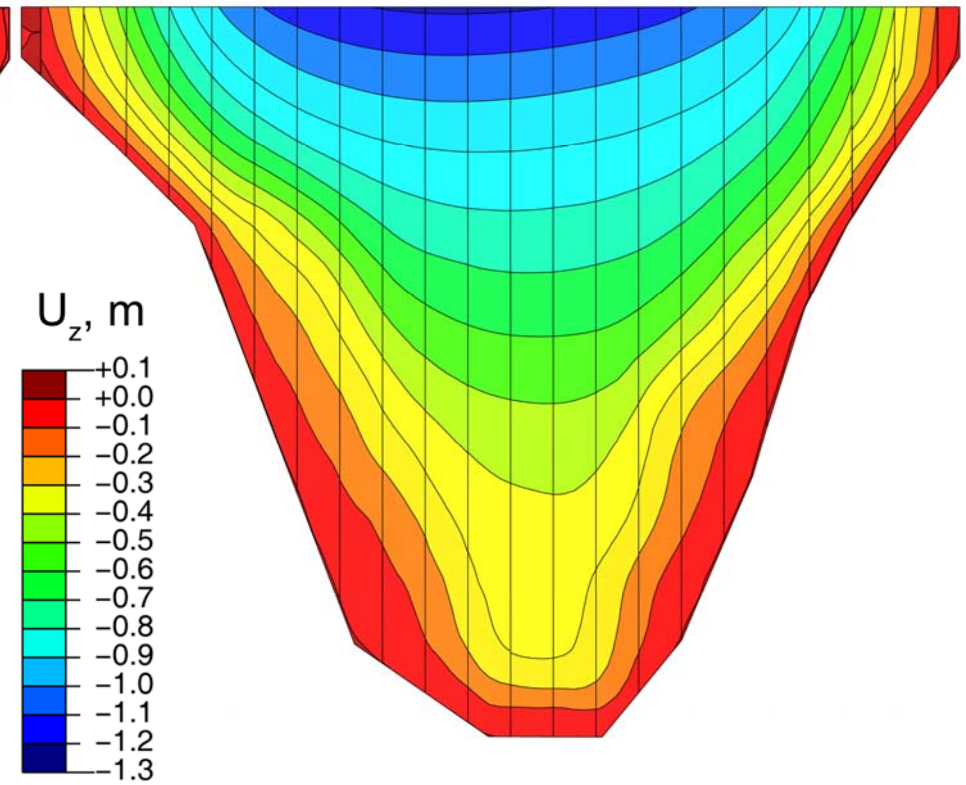
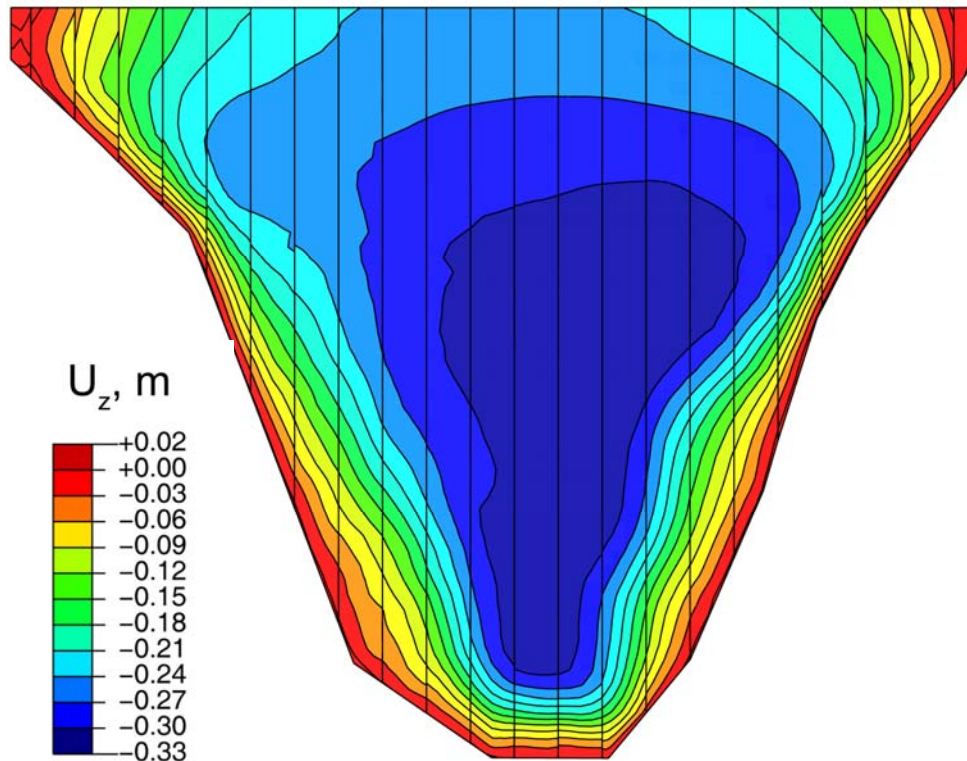


Δυναμική συνίζηση λιθορριπής: βύθιση πλάκας

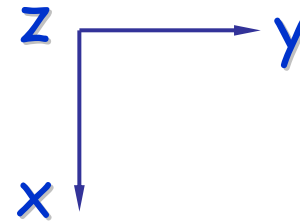


συνίζηση = 0 cm

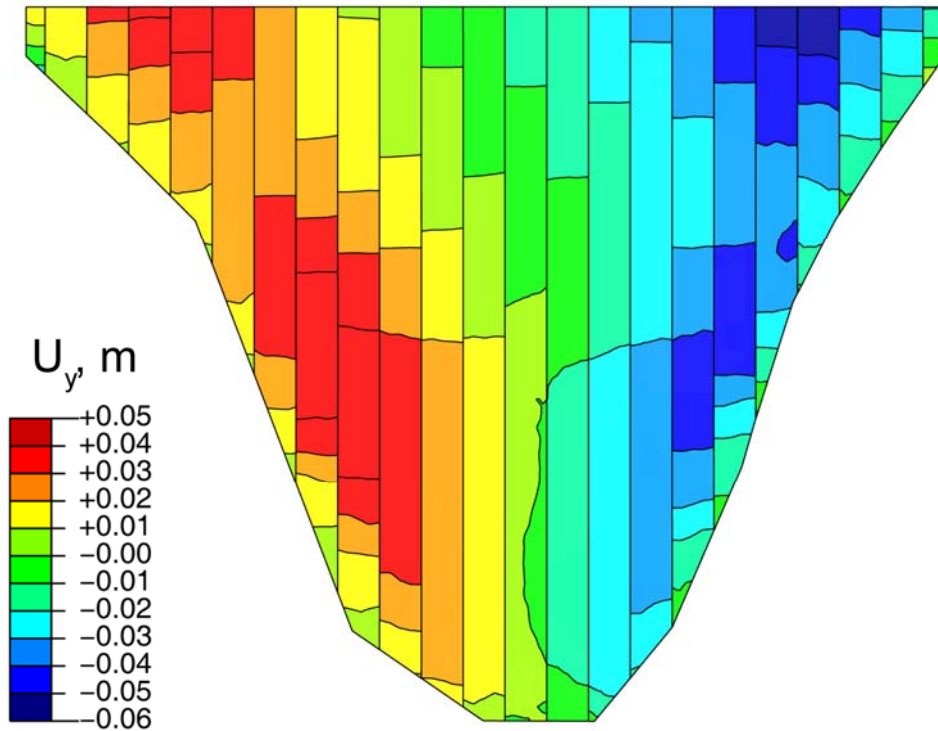
συνίζηση = 100 cm



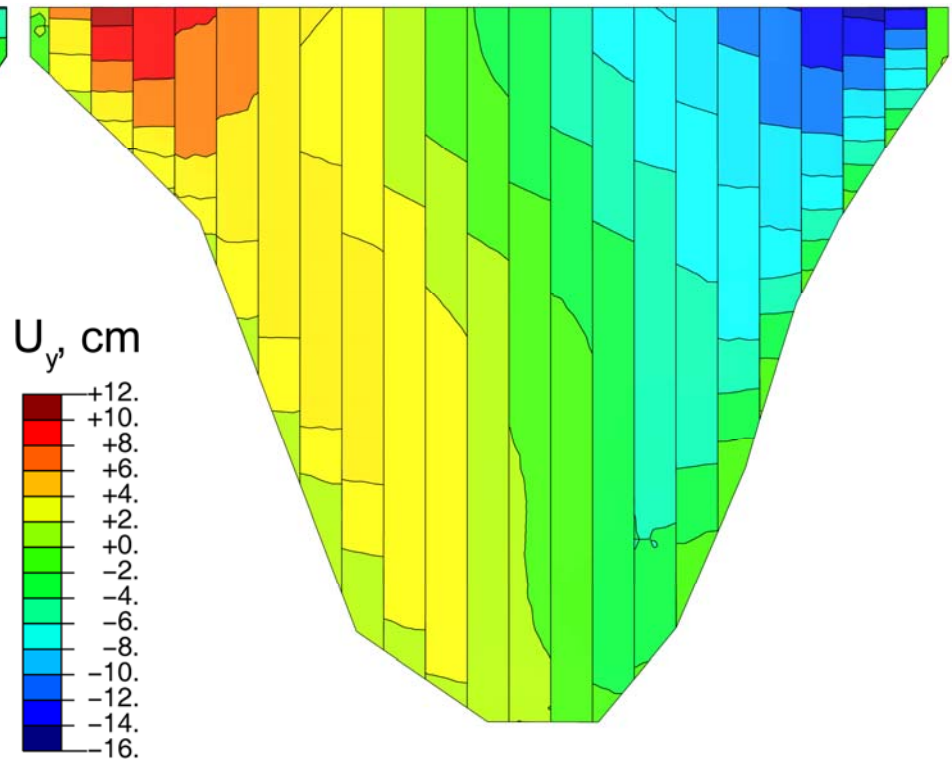
Δυναμική συνίζηση λιθορριπής: μετατόπιση U_y



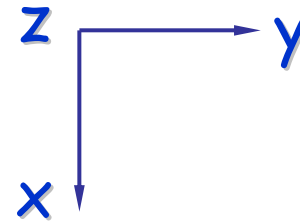
συνίζηση = 0 cm



συνίζηση = 50 cm

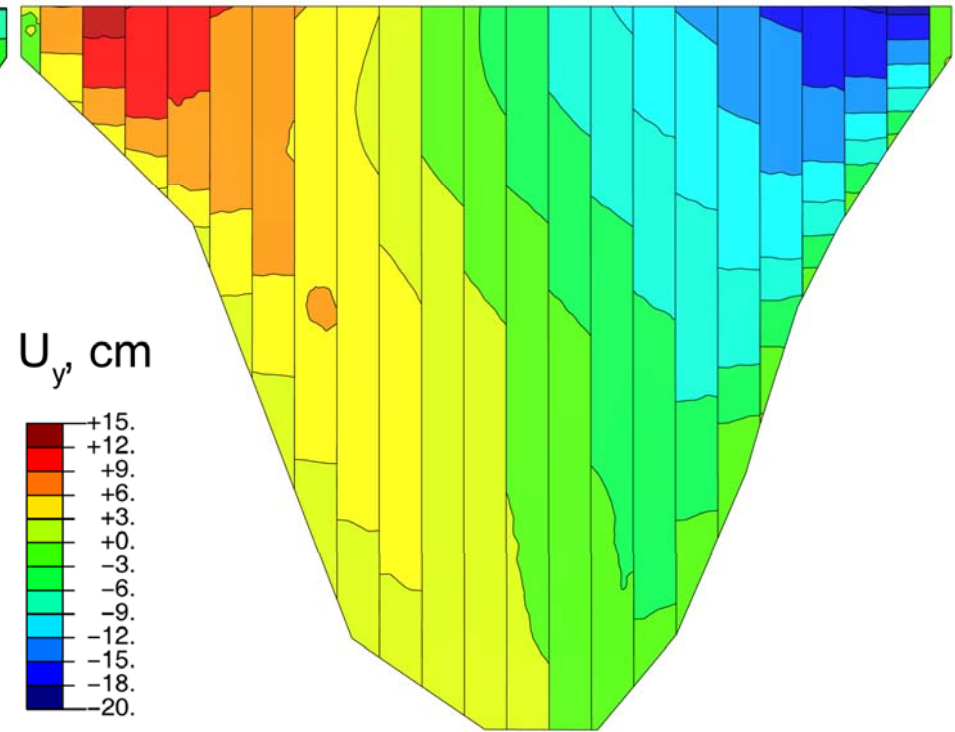
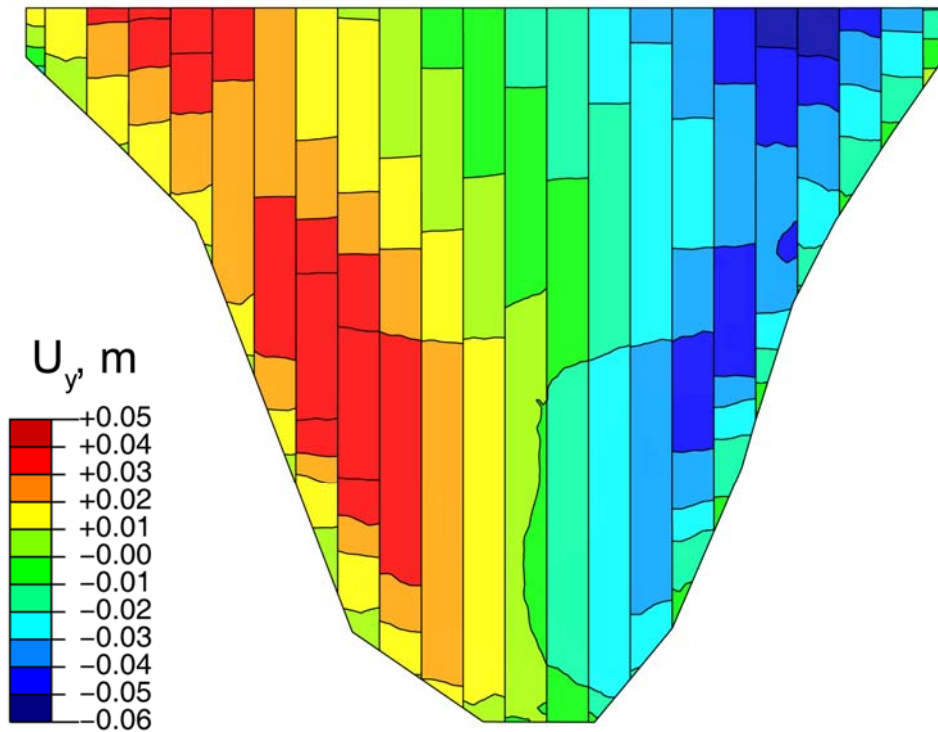


Δυναμική συνίζηση λιθορριπής: μετατόπιση U_y

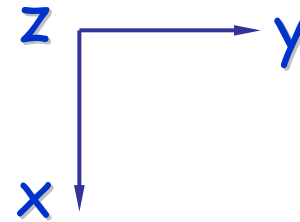


συνίζηση = 0 cm

συνίζηση = 100 cm

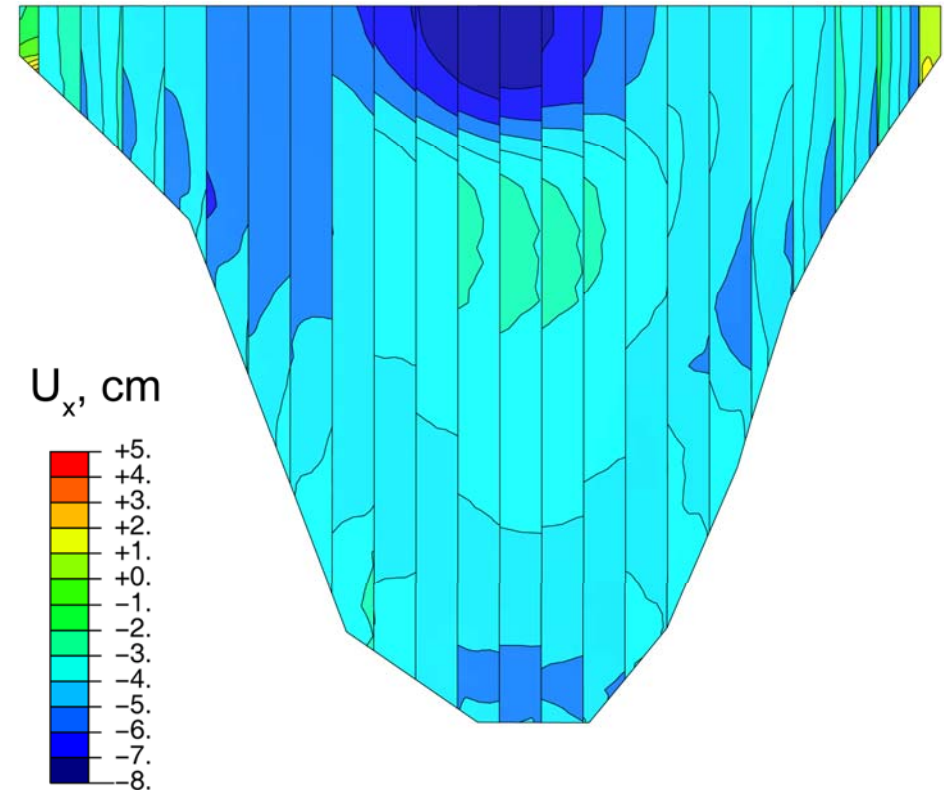
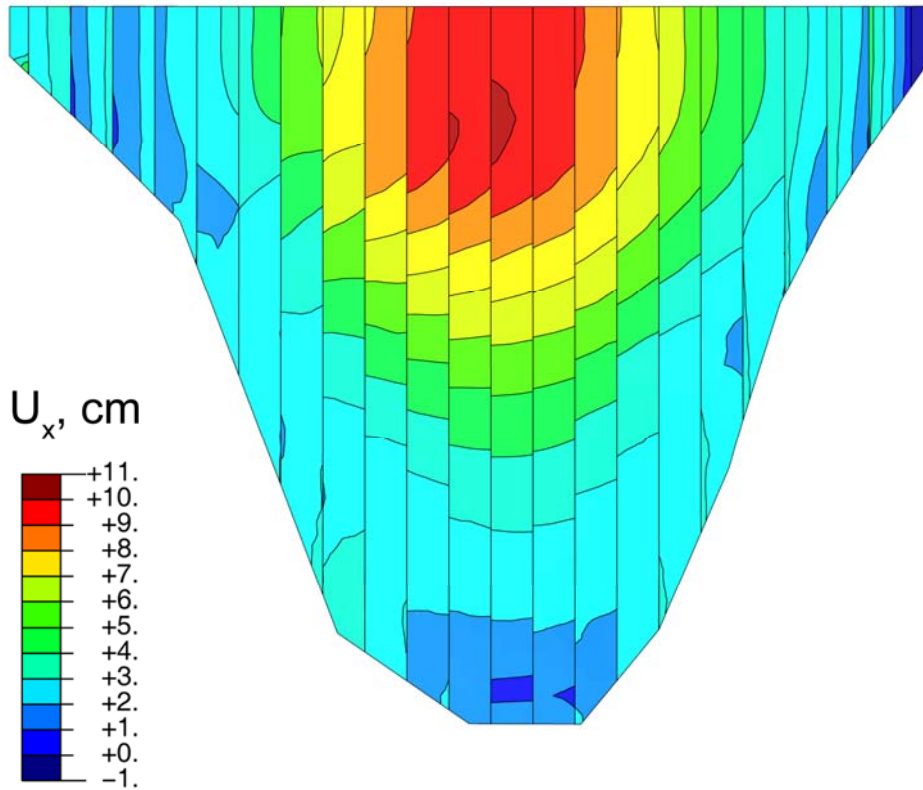


Δυναμική συνίζηση λιθορριπής: μετατόπιση U_x

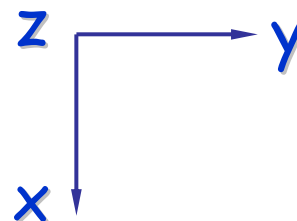


συνίζηση = 50 cm

συνίζηση = 50 cm

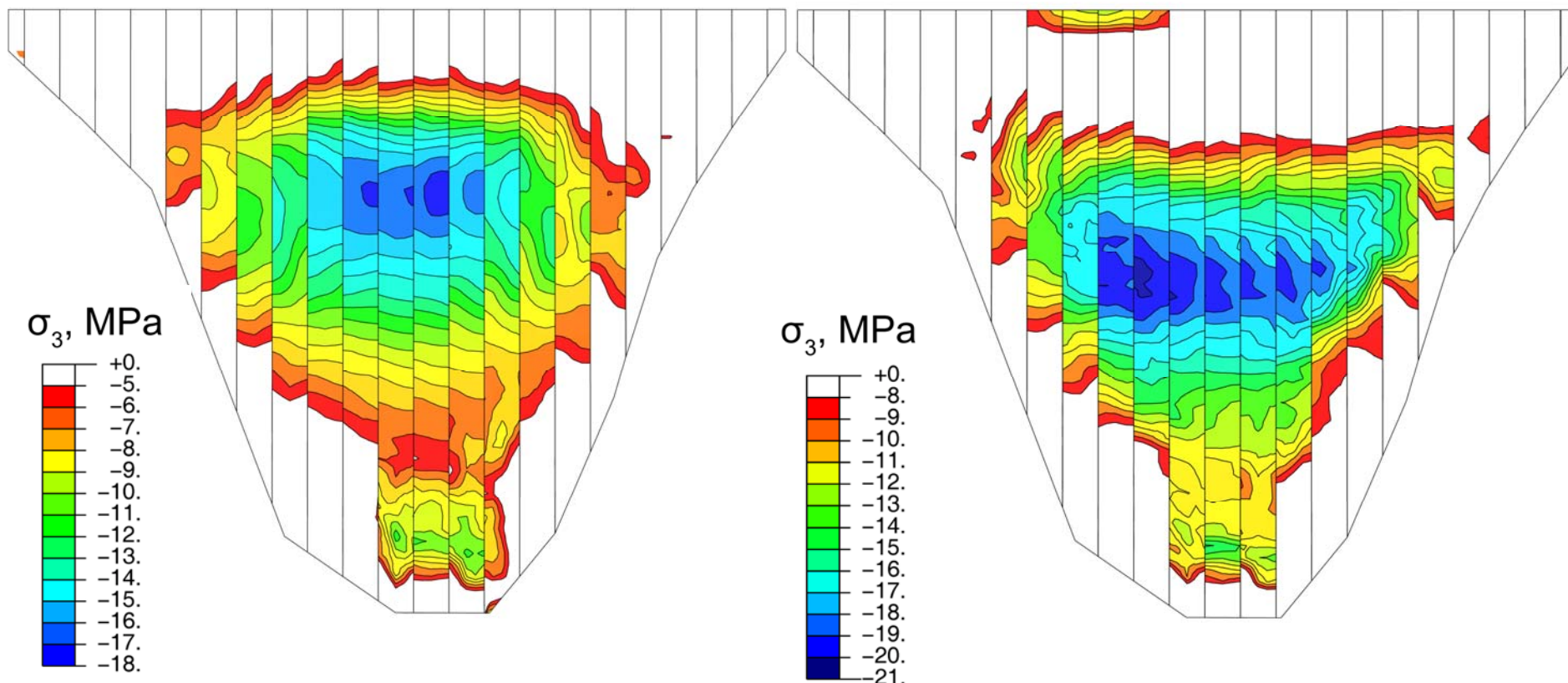


Δυναμική συνίζηση λιθορριπής: μέγιστη θλίψη

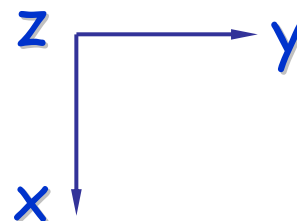


συνίζηση = 0 cm

συνίζηση = 50 cm

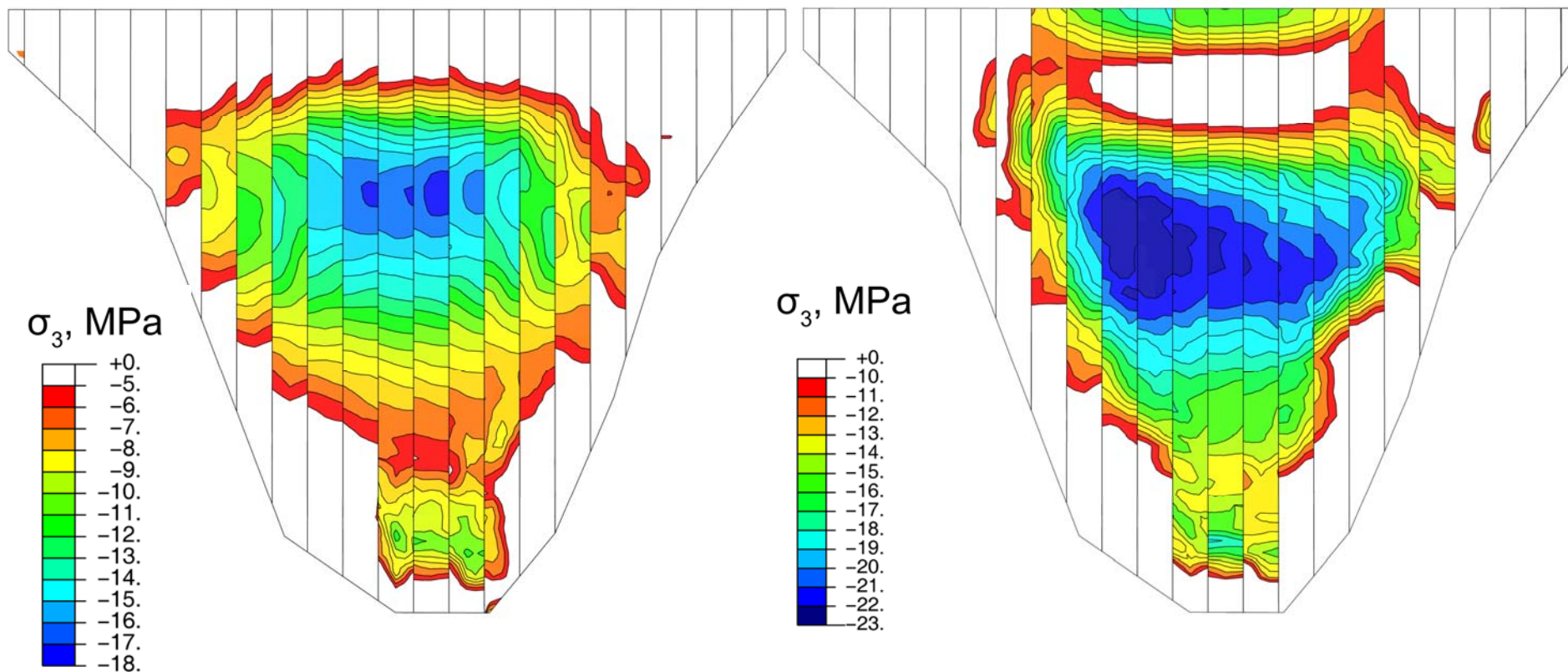


Δυναμική συνίζηση λιθορριπής: μέγιστη θλίψη

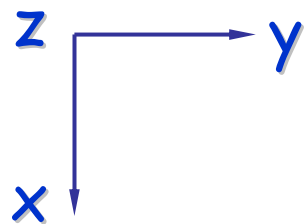


συνίζηση = 0 cm

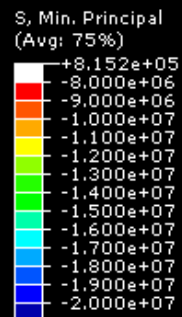
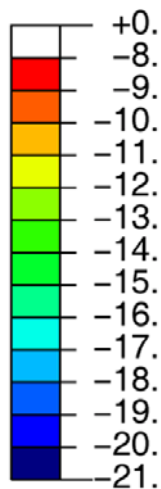
συνίζηση = 100 cm



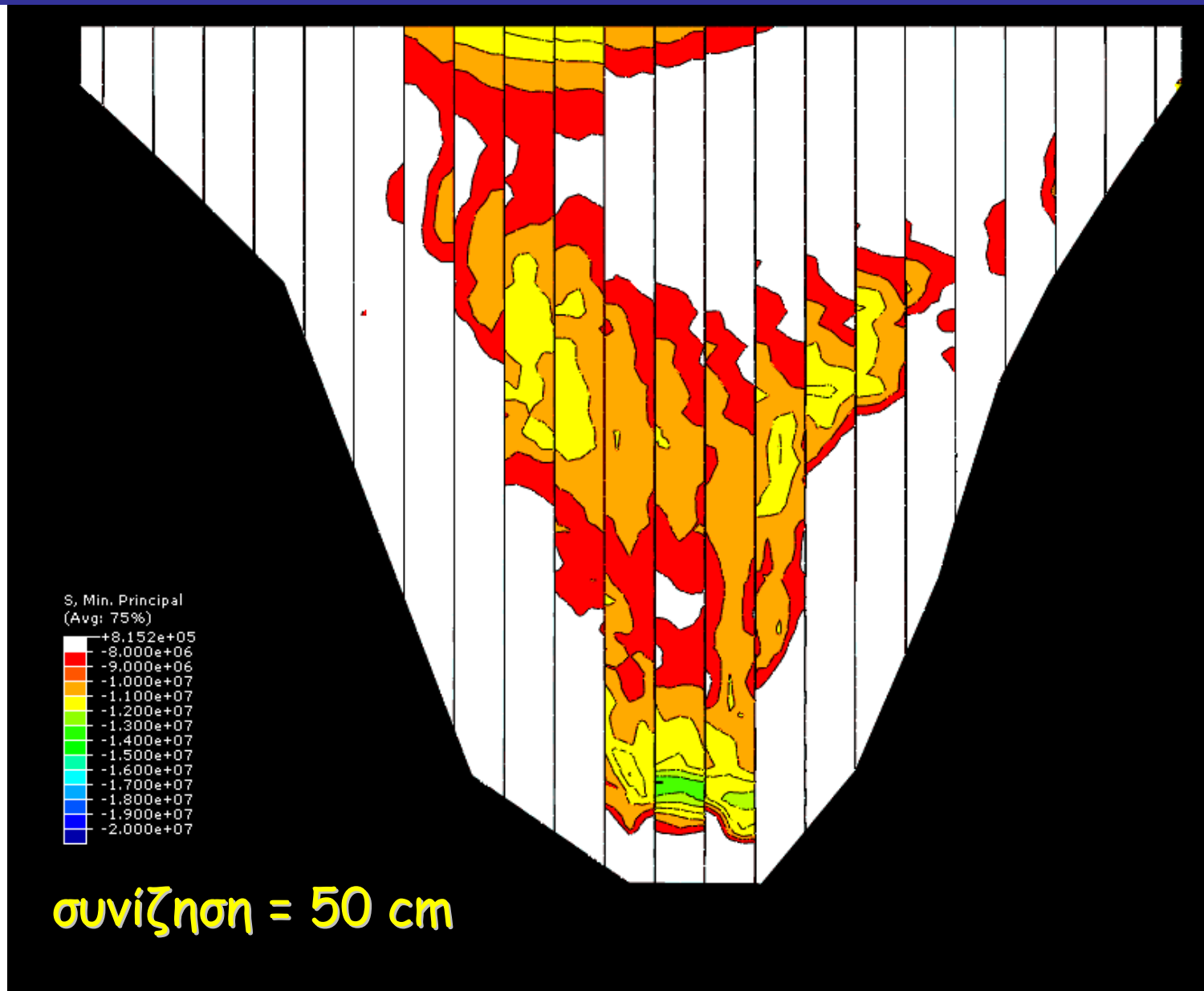
Δυναμική Ανάλυση CFRD: Ελάχιστη κύρια τάση σ_3 της πλάκας



σ_3 , MPa



συνίζηση = 50 cm

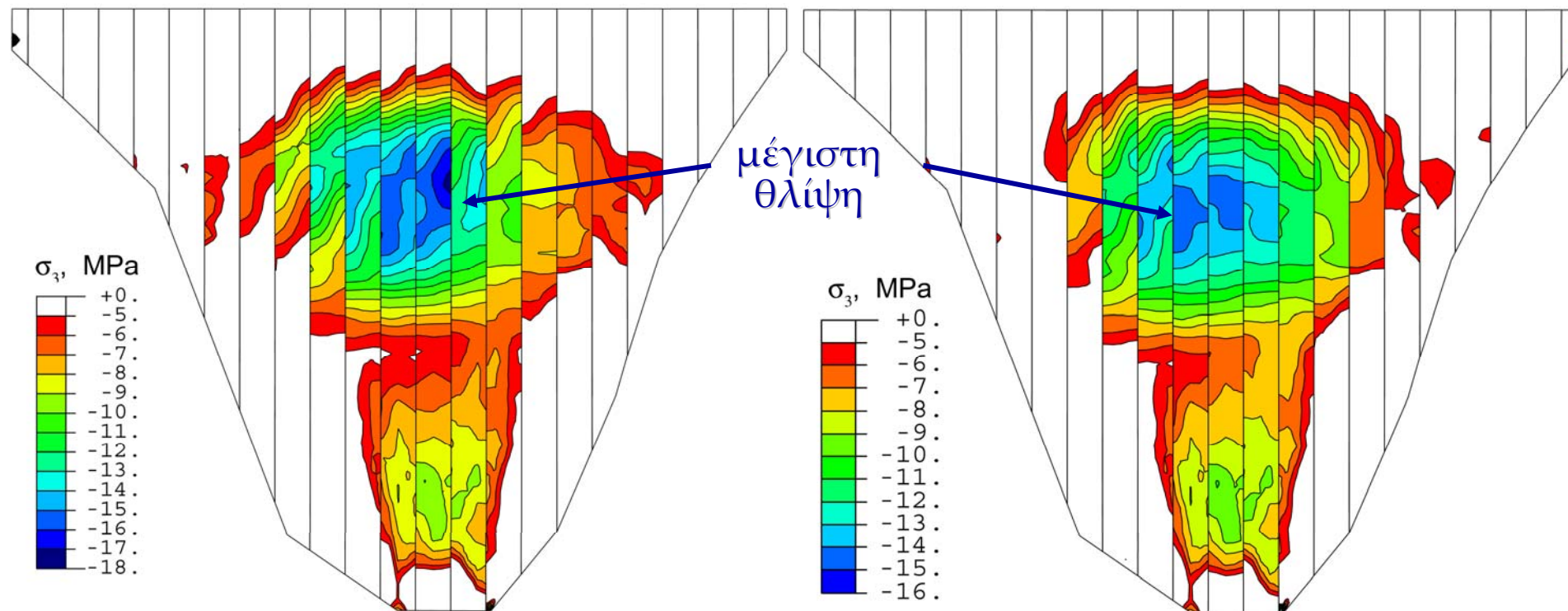


Επίδραση της δυσκαμψίας: Μέγιστες τιμές θλίψης

$$V_{sA} < V_{sB}$$

Σενάριο A

Σενάριο B

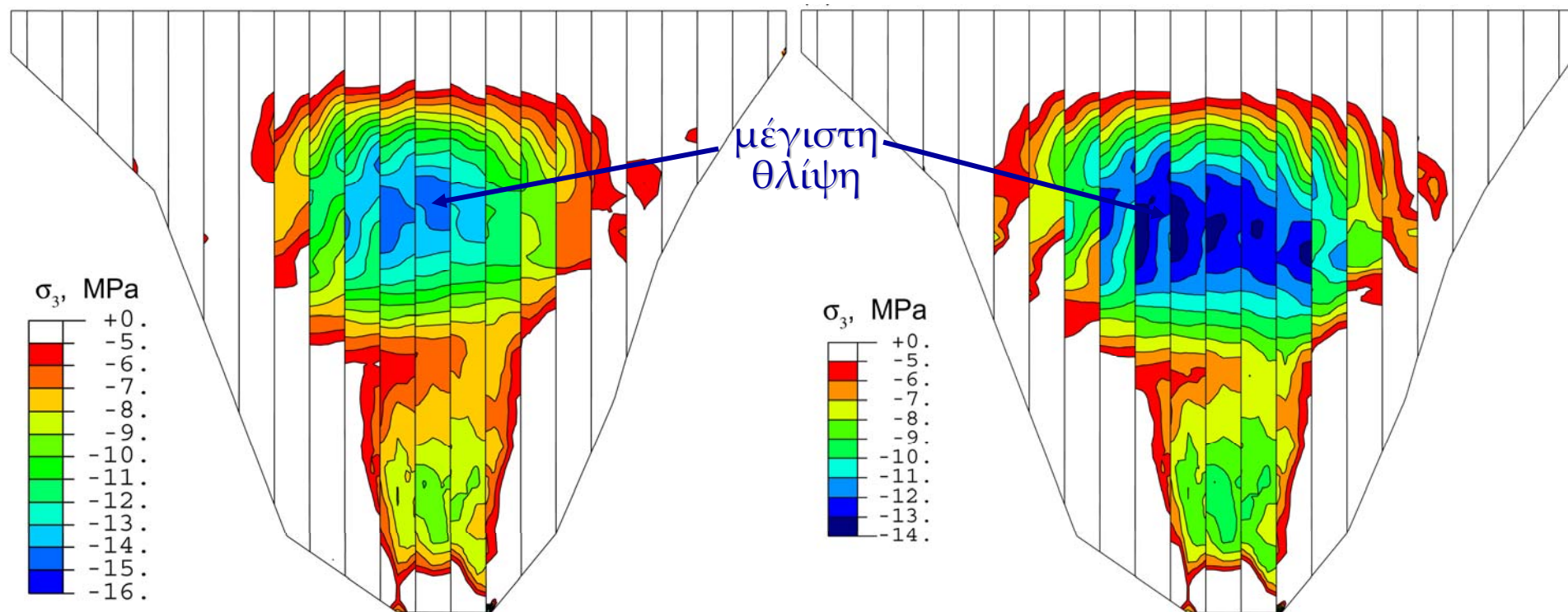


Επίδραση της δυσκαμψίας: Μέγιστες τιμές θλίψης

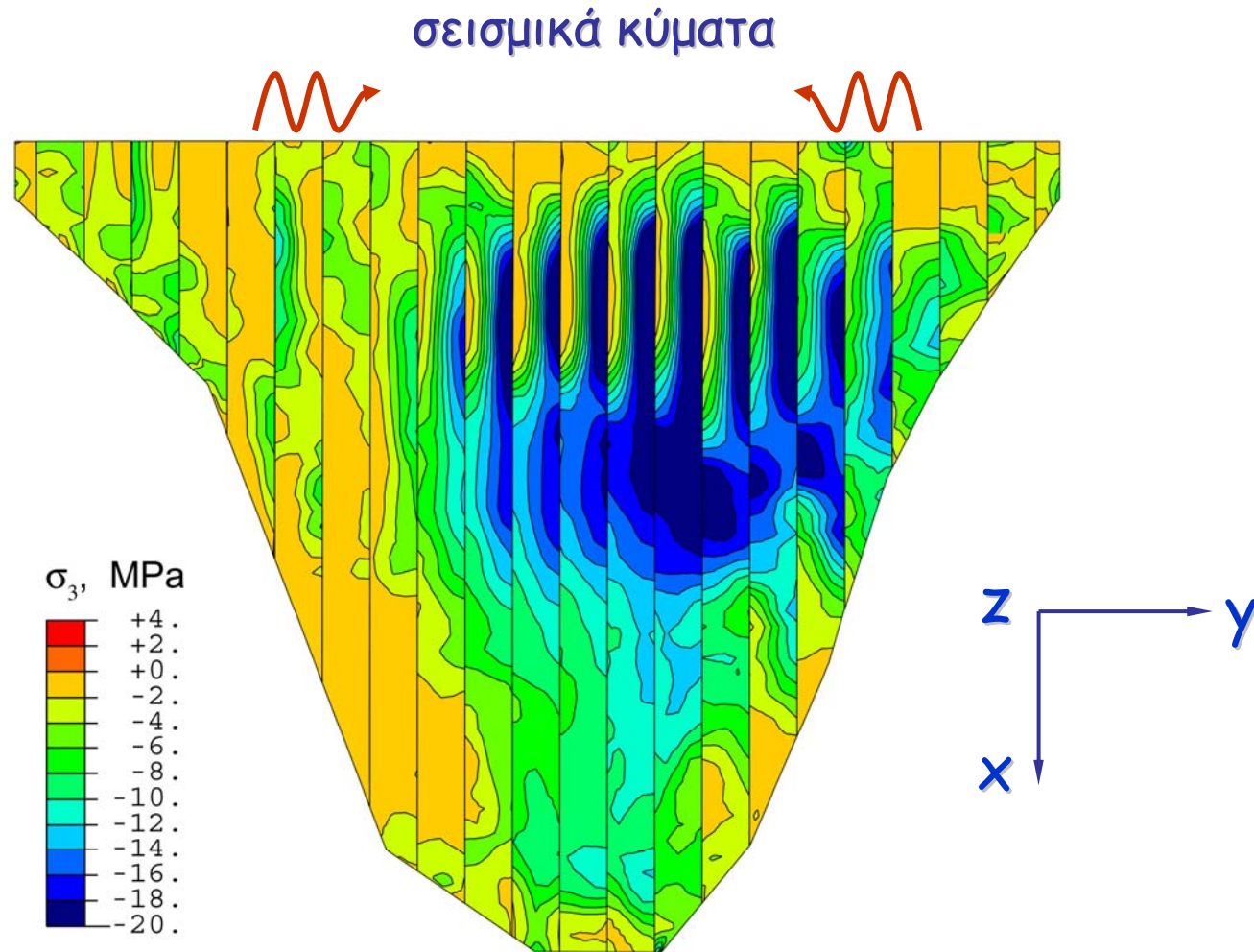
$$V_{sB} < V_{sC}$$

Σενάριο Β

Σενάριο C

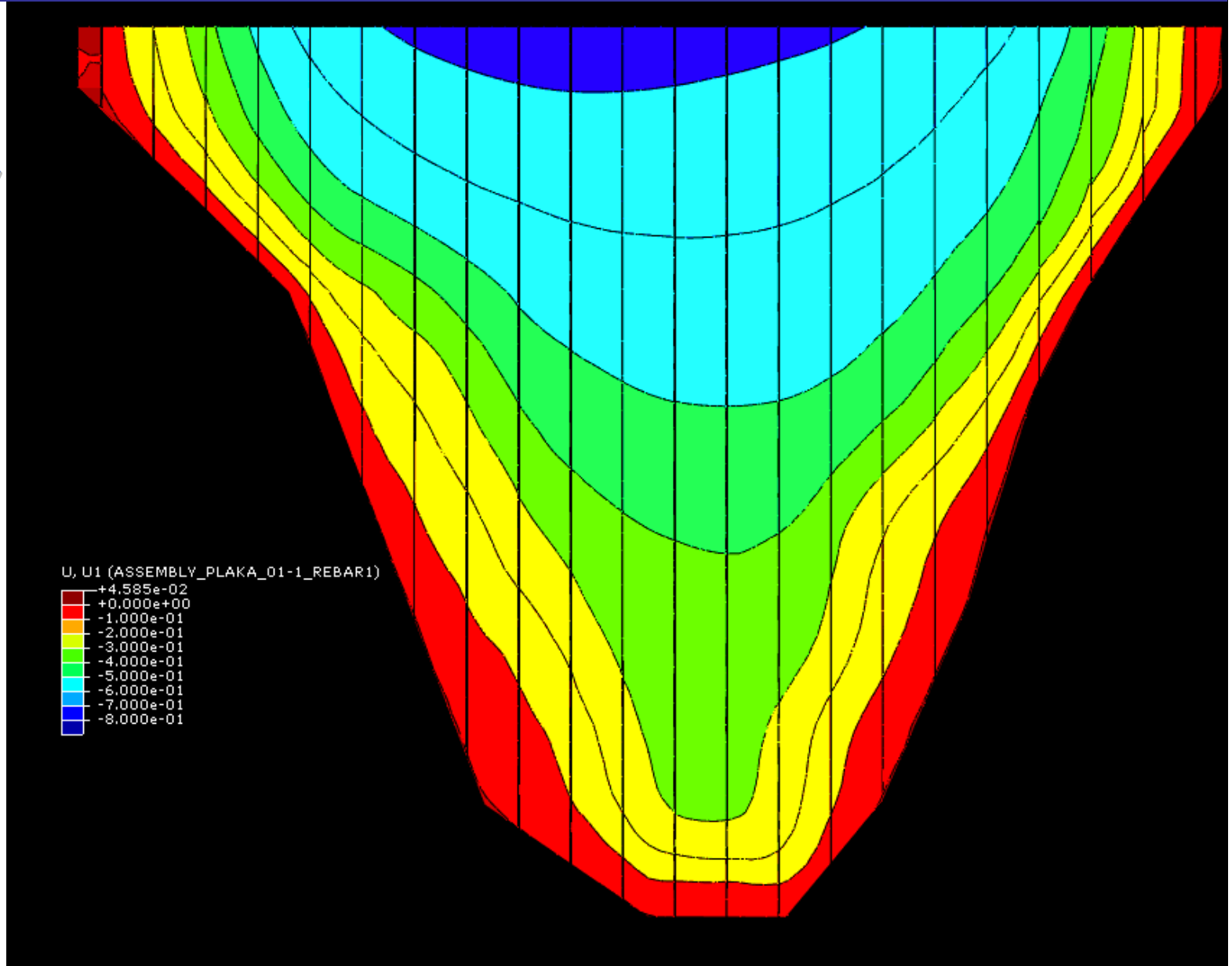
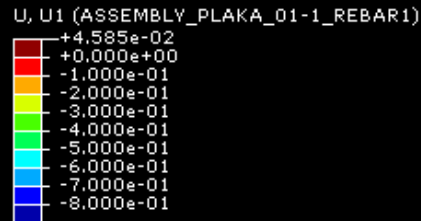
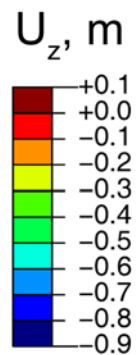
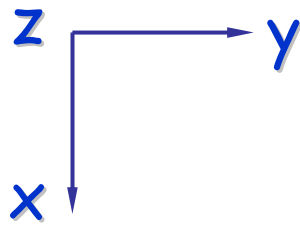


Δυναμική Ανάλυση CFRD: Σεισμική δόνηση κατά μήκος του φράγματος



Η κατά μήκος συνιστώσα είναι δυνατόν να αυξήσει την θλίψη μεταξύ πλακών

Σεισμική δόνηση κατά μήκος του φράγματος: Βύθιση της πλάκας

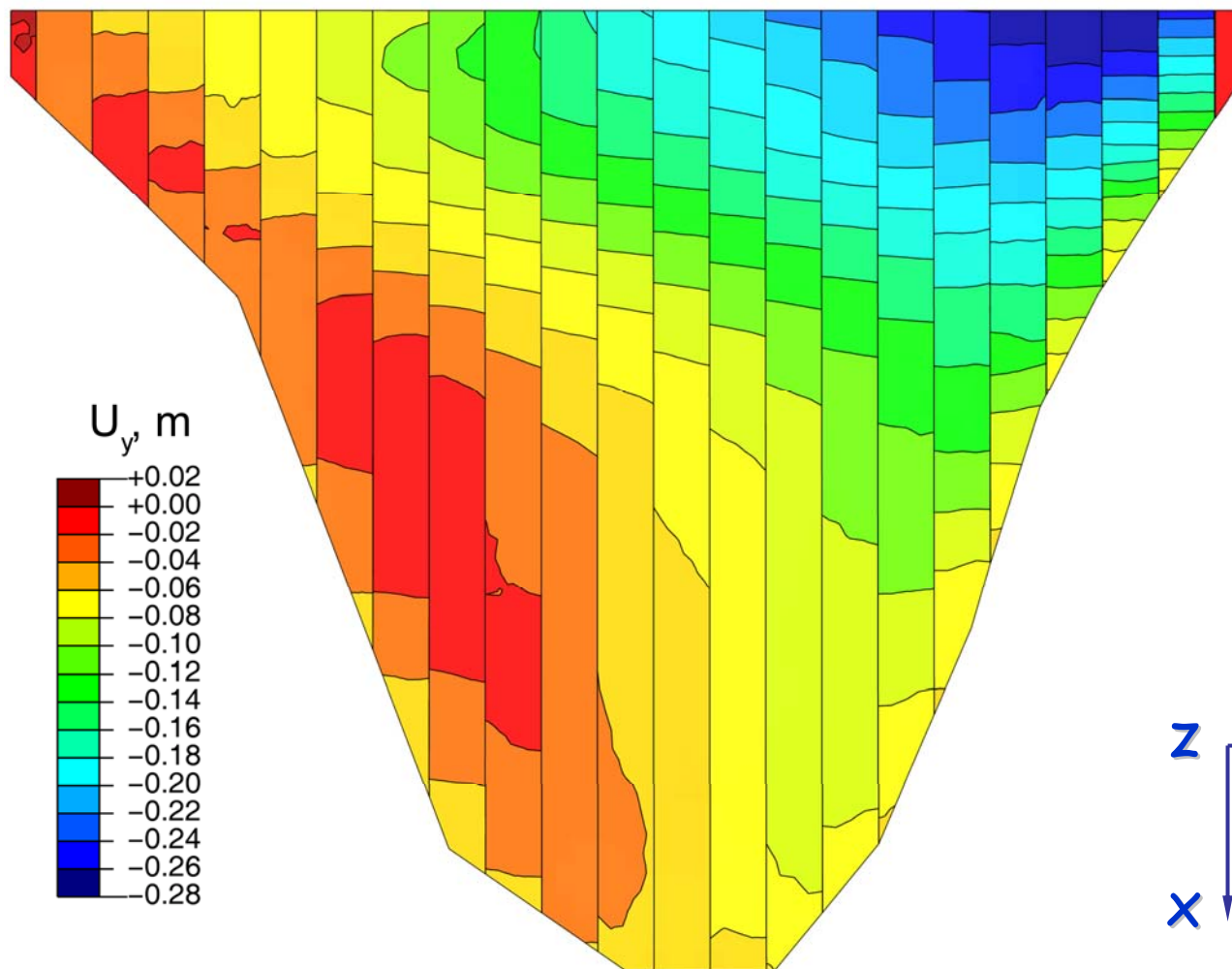


Σεισμική δόνηση κατά μήκος του φράγματος: Μετατόπιση U_y

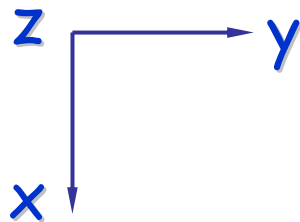
συνίζηση = 50 cm



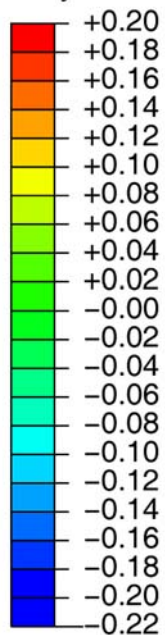
σεισμικά κύματα



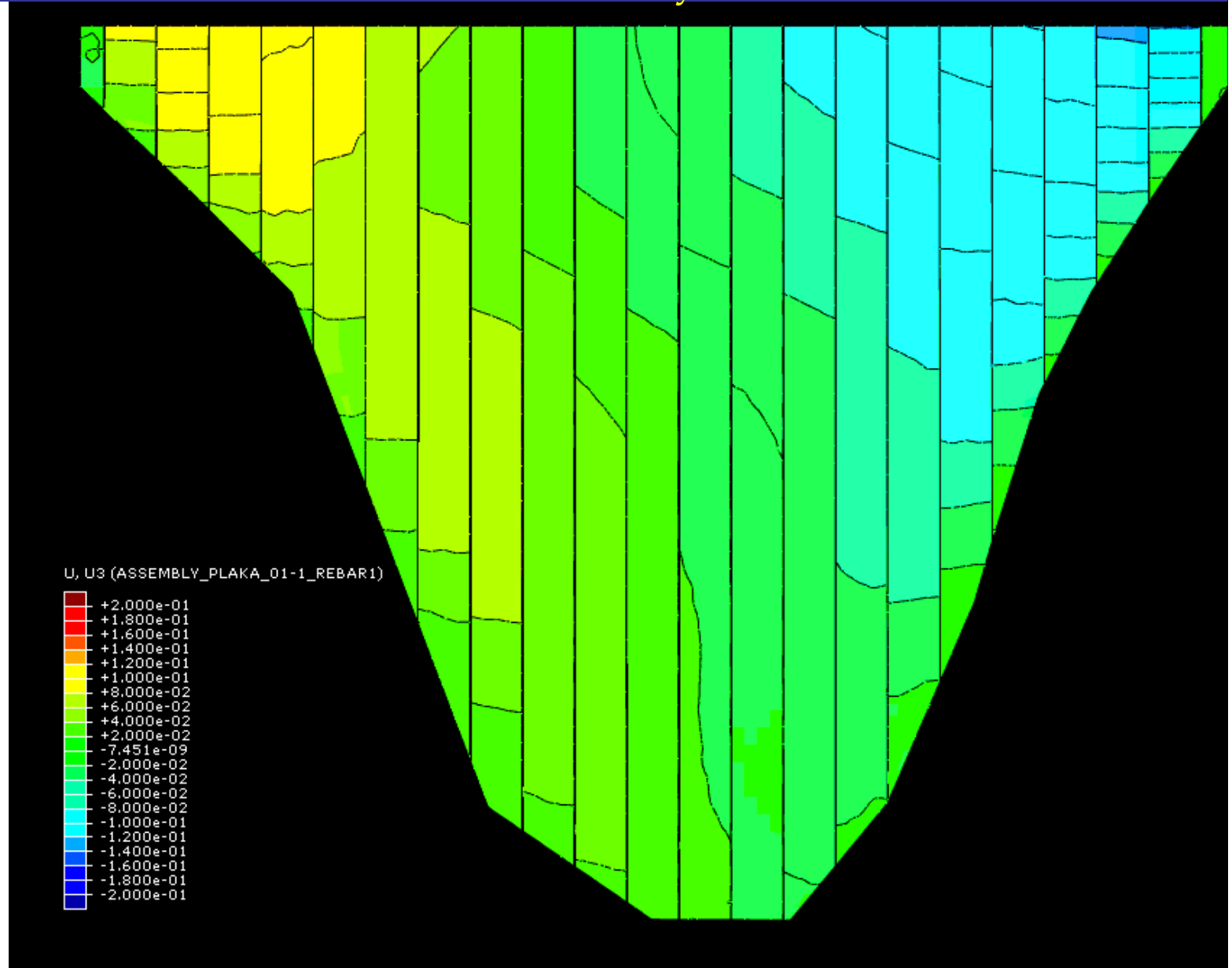
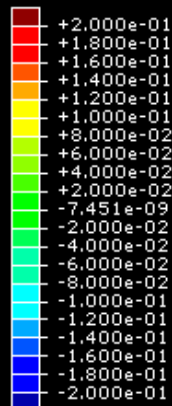
Σεισμική δόνηση κατά μήκος του φράγματος: Μετατόπιση U_y



U_y , m

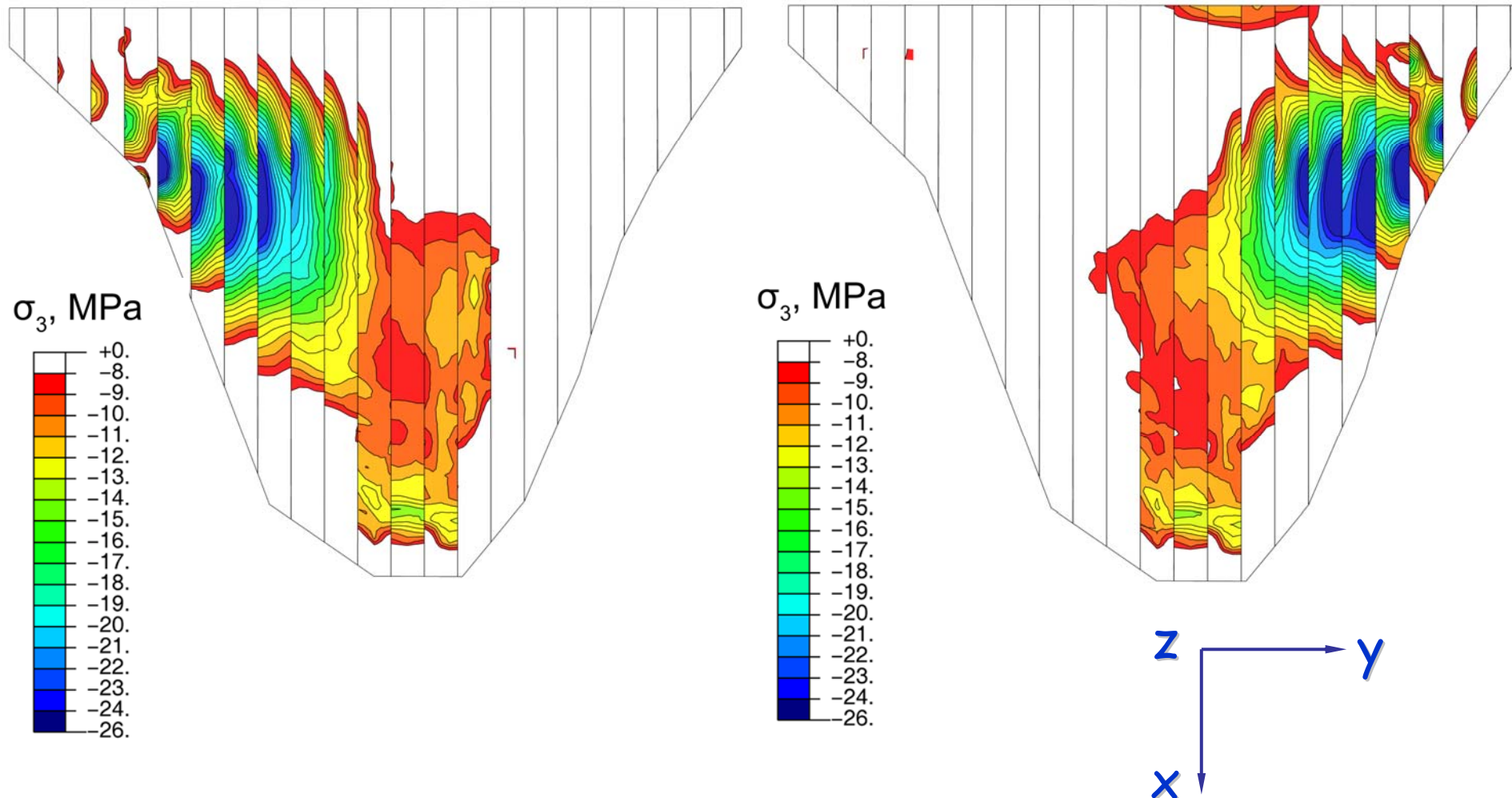


U, U3 (ASSEMBLY_PLAKA_01-1_REBAR1)

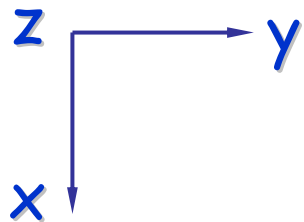


Σεισμική δόνηση κατά μήκος του φράγματος: Ελάχιστη κύρια τάση σ_3

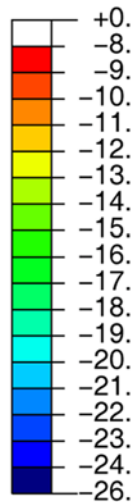
συνίζηση = 50 cm



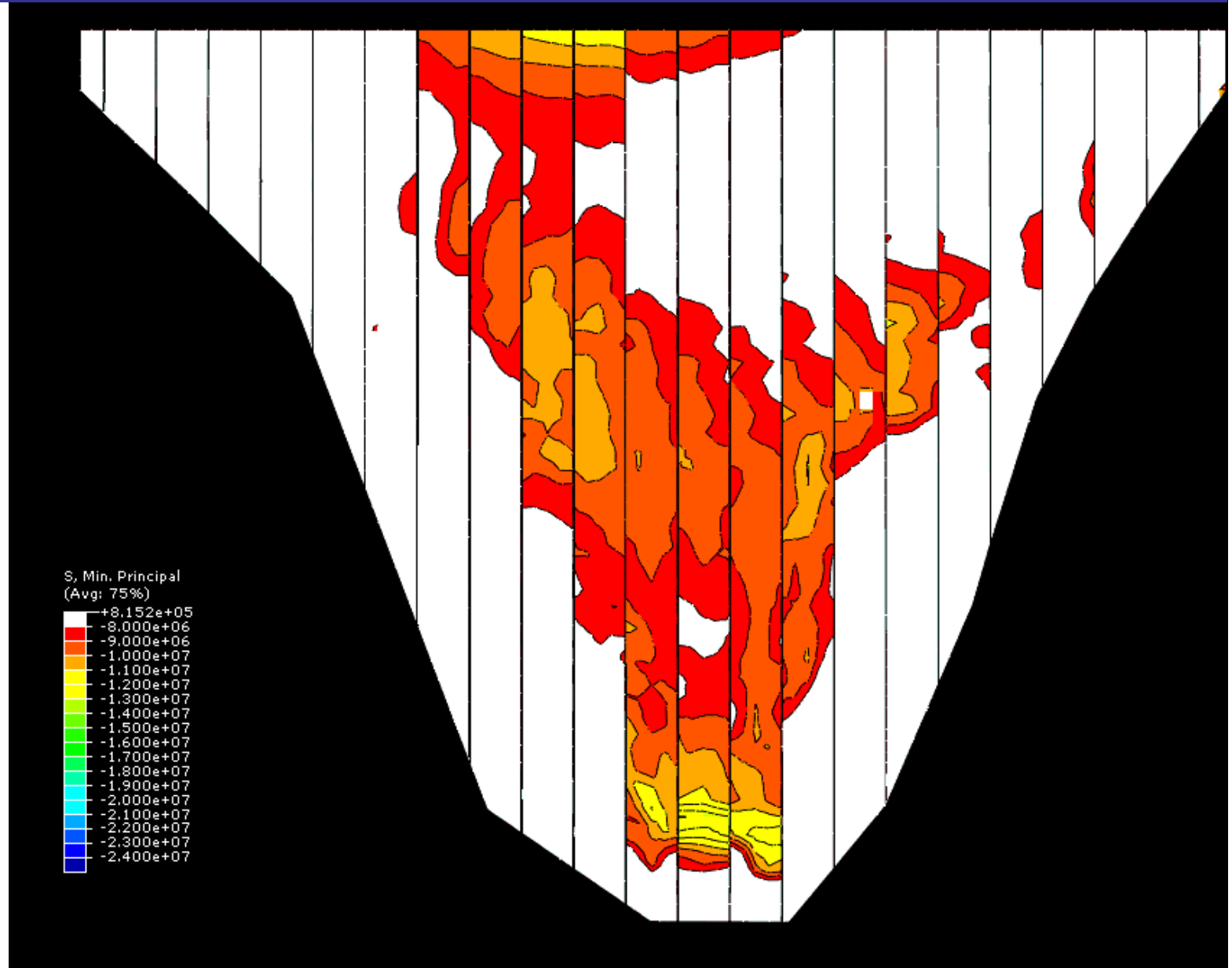
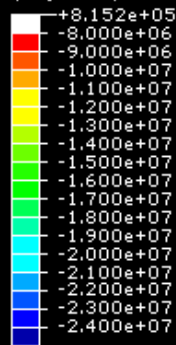
Σεισμική δόνηση κατά μήκος του φράγματος: Μέγιστη θλίψη (σ_3)



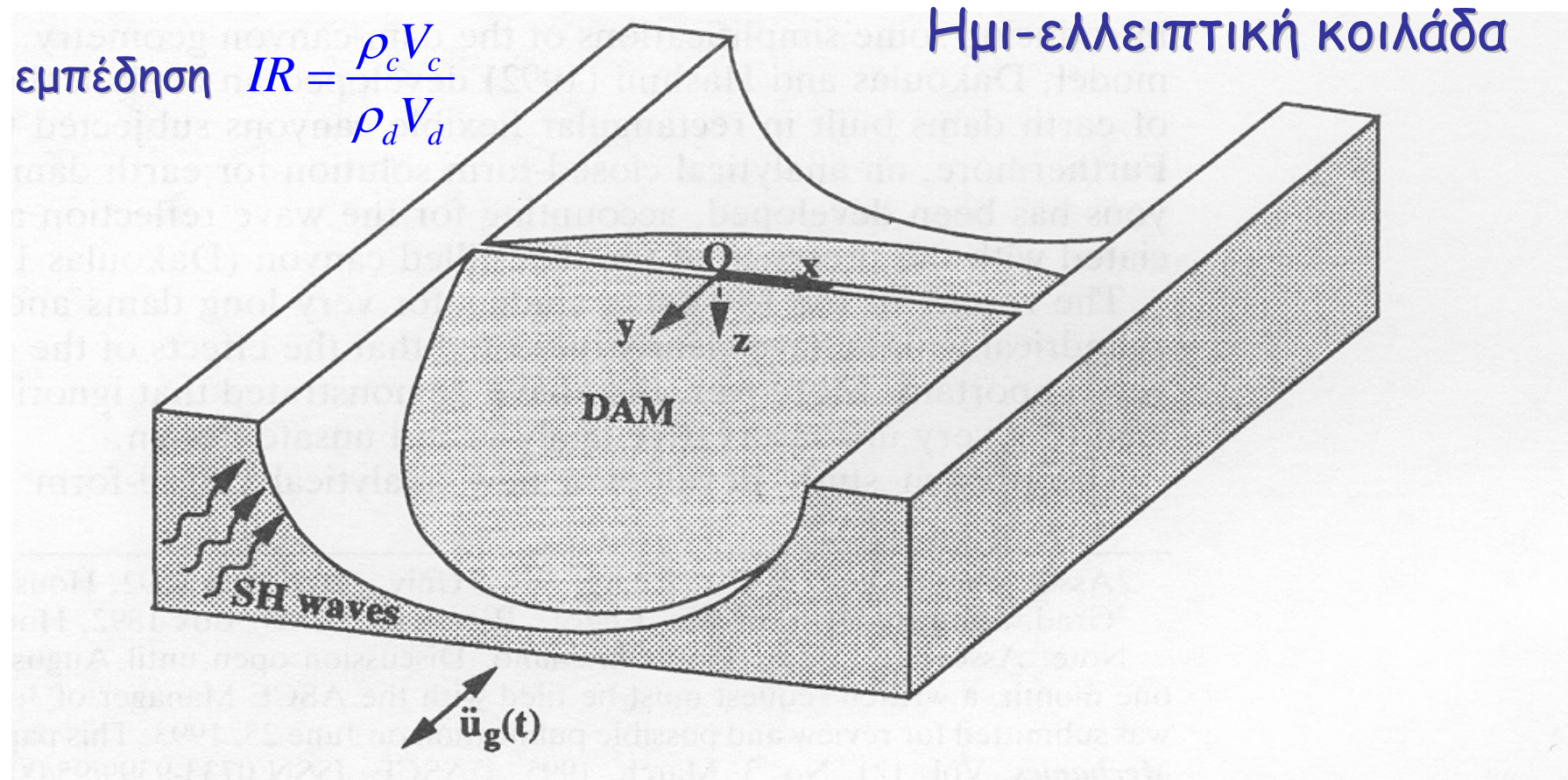
σ_3 , MPa



S, Min. Principal
(Avg: 75%)



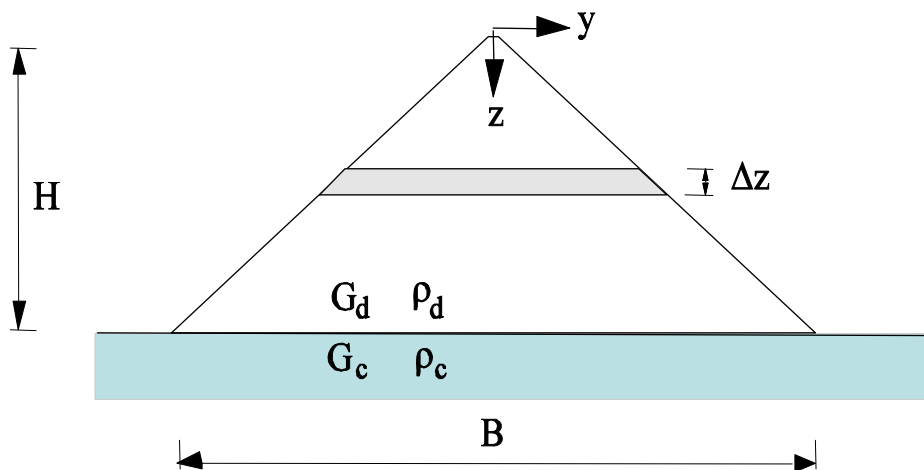
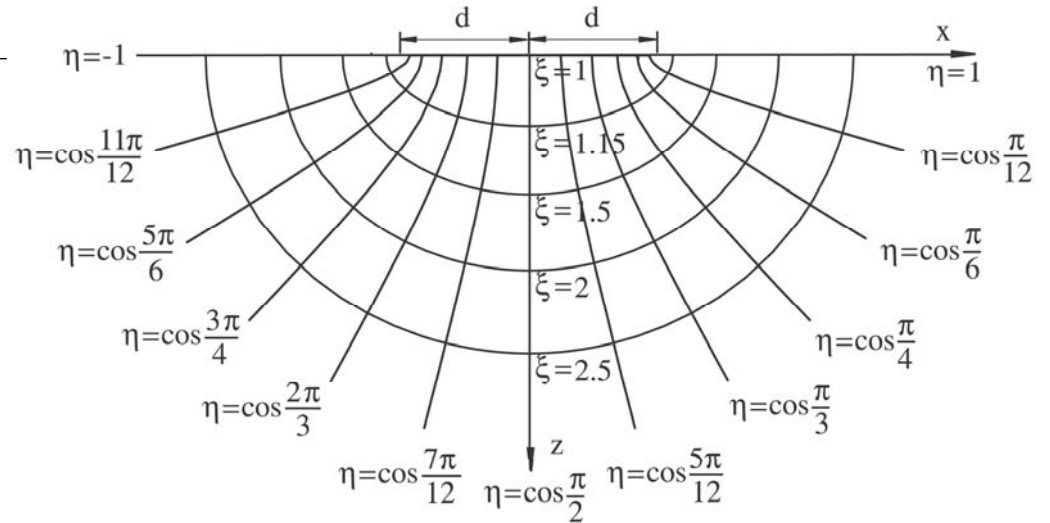
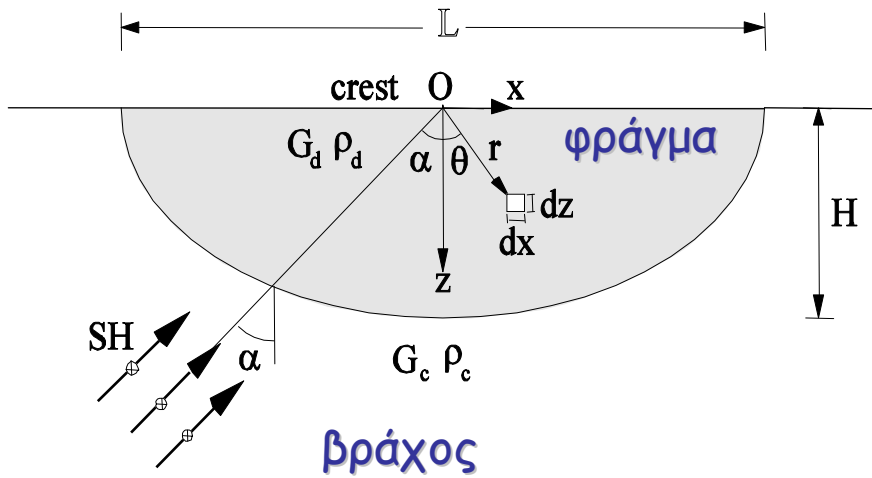
Επίδραση της γεωμετρίας της κοιλάδας και της δυσκαμψίας του βράχου



$$u_i = U_1 \exp\left[i\omega\left(t - \frac{x \sin \alpha}{V_c} + \frac{z \cos \alpha}{V_c}\right)\right]$$

(Dakoulas et al. 1995)

Σεισμική απόκριση φράγματος σε ημι-ελλειπτική κοιλάδα ελαστικού βράχου



$$u_i = U_1 \exp\left[i\omega\left(t - \frac{x \sin \alpha}{V_c} + \frac{z \cos \alpha}{V_c}\right)\right]$$

εμπέδηση $IR = \frac{\rho_c V_c}{\rho_d V_d}$

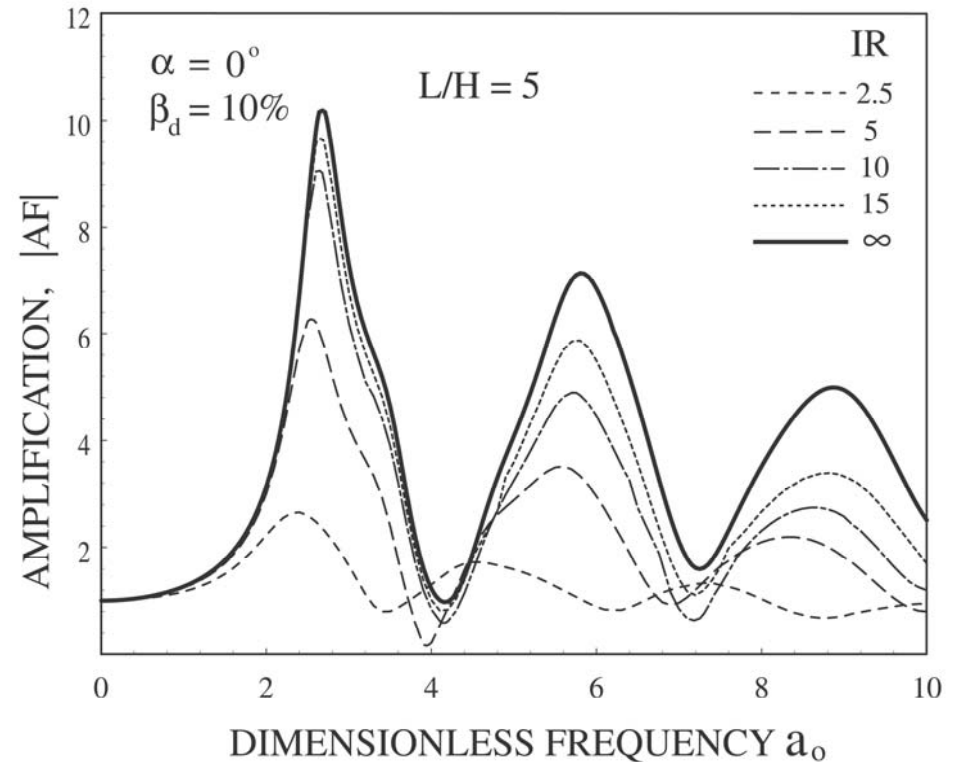
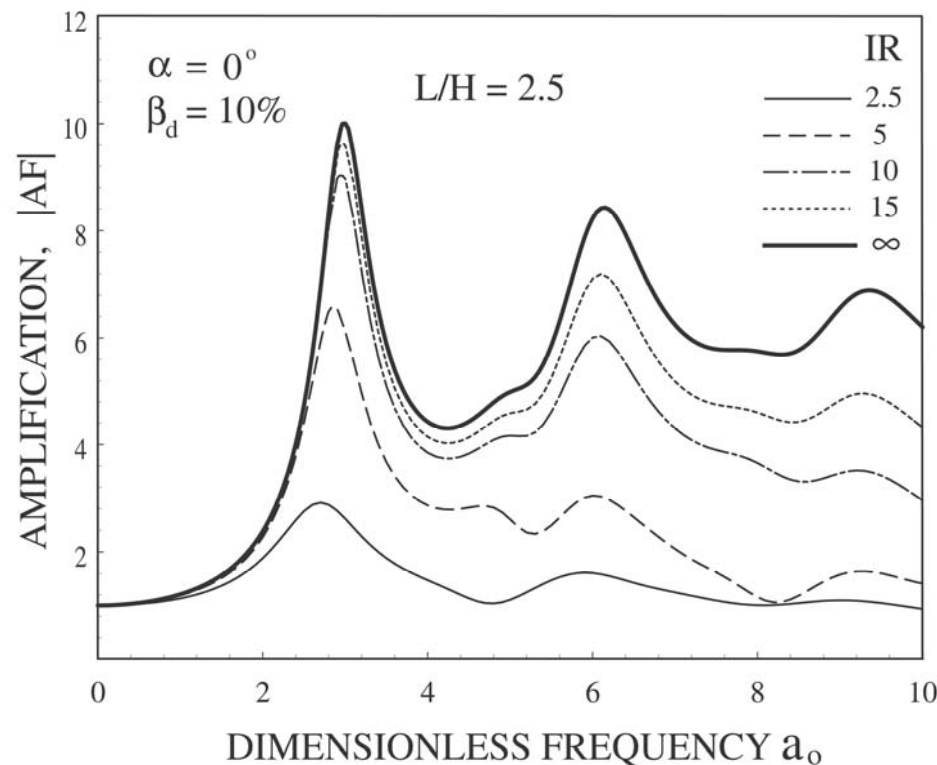
(Dakoulas et al. 1995)

Σεισμική απόκριση φράγματος σε εύκαμπτη ημι-ελλειπτική κοιλάδα

Επίδραση της εμπέδησης IR και της στενότητας της κοιλάδας L/H

$$IR = \frac{\rho_c V_c}{\rho_d V_d}$$

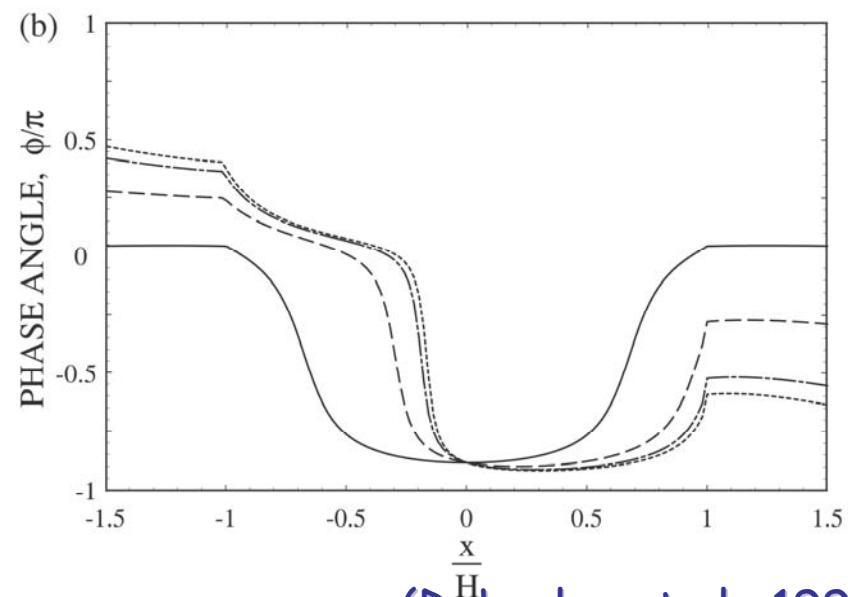
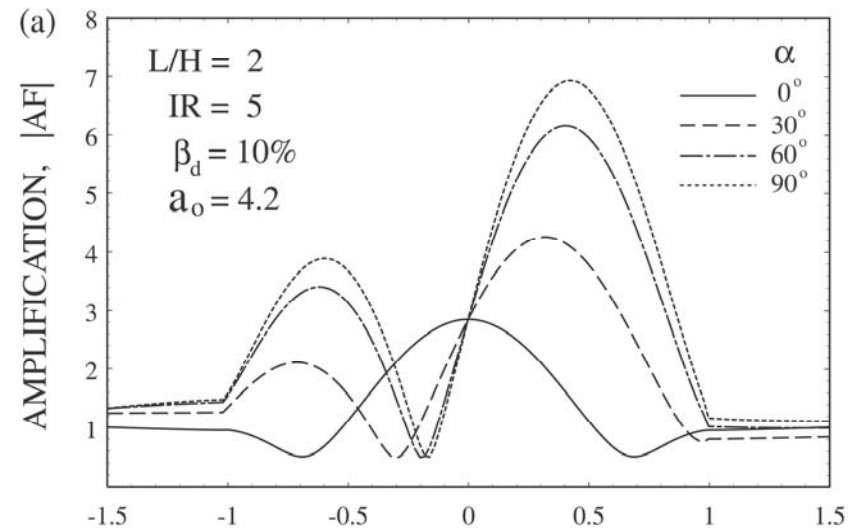
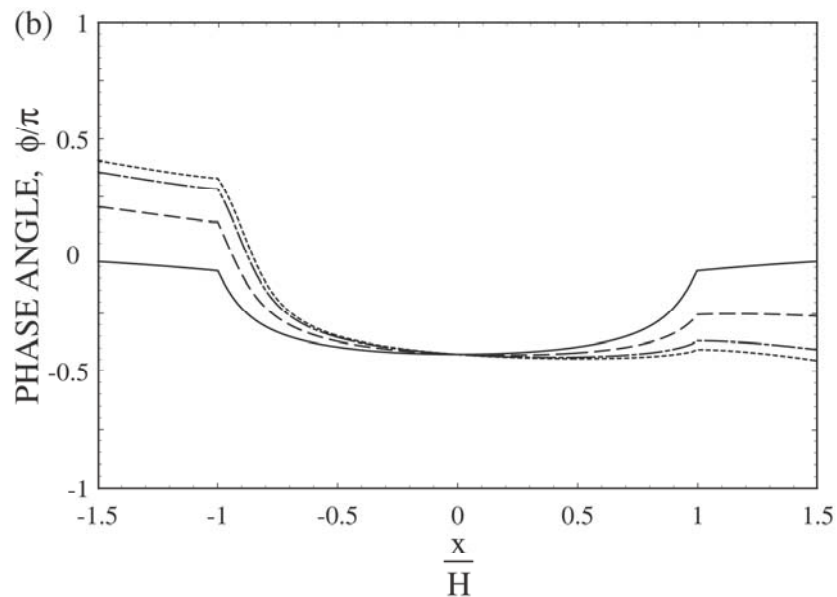
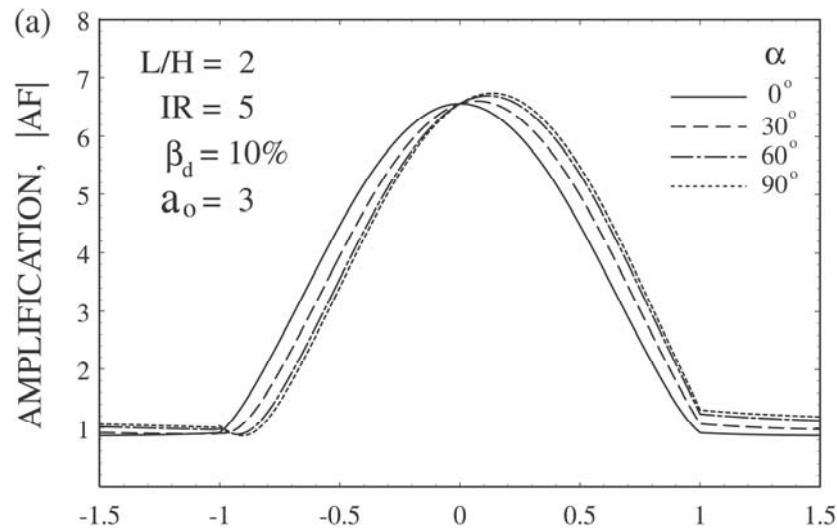
$$a_0 = \frac{\omega H}{V_d}$$



(Dakoulas et al. 1995)

Σεισμική απόκριση φράγματος σε εύκαμπτη ημι-ελλειπτική κοιλάδα

Επίδραση της χωρικής μεταβλητότητας του σεισμικού κύματος



(Dakoulas et al. 1995)

Συμπεράσματα - Στατική Ανάλυση

Δυσκαμψία:

- Αύξηση της δυσκαμψίας της λιθορριπής μέσω ισχυρής συμπύκνωσης οδηγεί σε μεγάλη μείωση εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων στην πλάκα

3Δ γεωμετρία:

- Η στενότητα της κοιλάδας οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της φαινόμενης δυσκαμψίας και βελτίωση της συμπεριφοράς της πλάκας
- Για πολύ στενές κοιλάδες ($L/H \approx 2 - 3$), η χρήση δυσδιάστατης ανάλυσης οδηγεί σε σημαντικά σφάλματα για την συμπεριφορά της πλάκας και σε εσφαλμένο σχεδιασμό.

Συμπεράσματα – Δυναμική ανάλυση

Σεισμική απόκριση:

- Οι εφελκυστικές τάσεις επεκτείνονται στο άνω μέρος της πλάκας και αυξάνεται η ρηγμάτωση
- Μεγάλες θλιπτικές τάσεις αναπτύσσονται στην κεντρική περιοχή της πλάκας

Δυσκαμψία:

- Αύξηση της δυσκαμψίας της λιθορριπής οδηγεί σε μείωση τάσεων

Δυναμική συνίζηση:

- Οι θλιπτικές τάσεις αυξάνουν σημαντικά στην κεντρική περιοχή της πλάκας, ενώ οι εφελκυστικές τάσεις μειώνονται.
- Η μέγιστη μετατόπιση κατά μήκος του φράγματος αυξάνει σημαντικά
- Η μέγιστη βύθιση της πλάκας αυξάνει σημαντικά.

Συμπεράσματα – Δυναμική ανάλυση

Δονήσεις κατά μήκος του φράγματος:

- Οι θλιπτικές τάσεις μεταξύ των πλακών αυξάνουν σημαντικά στο άνω μέρος της πλάκας
- Για την πλάκα η καταπόνηση αυτή μπορεί να είναι δυσμενέστερη από την καταπόνηση σε ανάντη-κατάντη δόνηση

3Δ γεωμετρία:

- Για CFRD σε στενές κοιλάδες, η απόκριση από 2Δ αναλύσεις διαφέρει σημαντικά από εκείνη των 3Δ αναλύσεων και συνεπώς οι 2Δ αναλύσεις είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα.

Βελτίωση σχεδιασμού:

Οι εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις κατά την σεισμική φόρτιση είναι δυνατόν να περιορισθούν σημαντικά με αύξηση της δυσκαμψίας της λιθορριπής, ενίσχυση της πλάκας, διαμόρφωση της εκσκαφής, χρήση οριζόντιων αρμών, κλπ

Συμπεράσματα

- Οι σύγχρονες μέθοδοι ανάλυσης επιτρέπουν μία εύρωστη αριθμητική προσομοίωση της σταδιακής κατασκευής, πλήρωσης της λεκάνης, καθιζήσεων ερπυσμού, σεισμικής απόκρισης και δυναμικής συνίζησης.
- Με την βοήθεια λεπτομερούς προσομοίωσης είναι δυνατή η καλύτερη κατανόηση της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων και η βελτίωση του σχεδιασμού

Σας ευχαριστώ ...