



**Σεισμική απόκριση και φάσματα σχεδιασμού
για ρευστοποιήσιμα εδάφη
(κατηγορίας Χ κατά ΕΑΚ και S2 κατά EC-8)**

Γ. Μπουκοβάλας
Ι. Τσιάπας



Σεπτέμβριος 2019

Υφιστάμενοι Αντισεισμικοί Κανονισμοί

ΕΑΚ

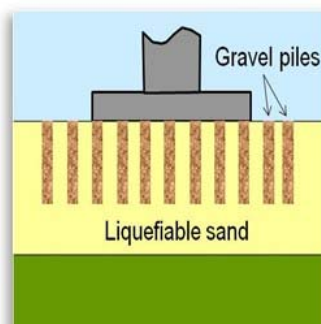
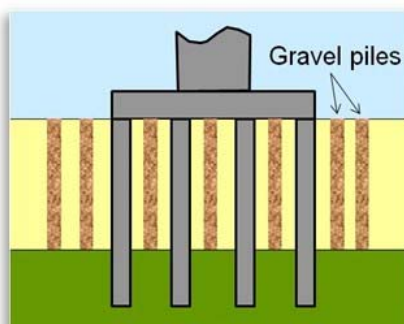
Χαλαρά λεπτόκοκκα αμμοϊλιώδη εδάφη υπό τον υδάτινο ορίζοντα, που ενδέχεται να ρευστοποιηθούν (εκτός αν ειδική μελέτη αποκλείει τέτοιο κίνδυνο, ή γίνει βελτίωση των μηχανικών τους ιδιοτήτων)

Eurocode 8 - Part 5

(12)P If soils are found to be susceptible to liquefaction and the ensuing effects are deemed capable of affecting the load bearing capacity or the stability of the foundations, measures, such as ground improvement and piling (to transfer loads to layers not susceptible to liquefaction), shall be taken to ensure foundation stability.

(13) Ground improvement against liquefaction should either compact the soil to increase its penetration resistance beyond the dangerous range, or use drainage to reduce the excess pore-water pressure generated by ground shaking.

Υφιστάμενοι Αντισεισμικοί Κανονισμοί



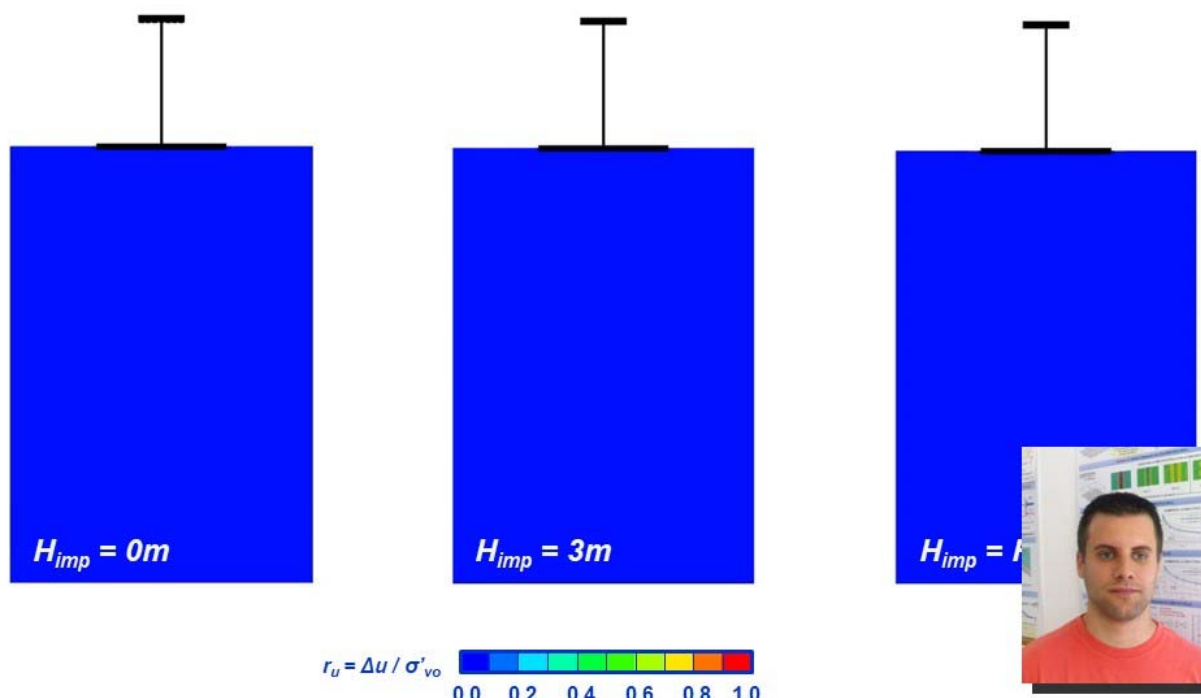
Eurocode 8 - Part 5

(12)P If soils are found to be susceptible to liquefaction and the ensuing effects are deemed capable of affecting the load bearing capacity or the stability of the foundations, measures, such as ground improvement and piling (to transfer loads to layers not susceptible to liquefaction), shall be taken to ensure foundation stability.

(13) Ground improvement against liquefaction should either compact the soil to increase its penetration resistance beyond the dangerous range, or use drainage to reduce the excess pore-water pressure generated by ground shaking.

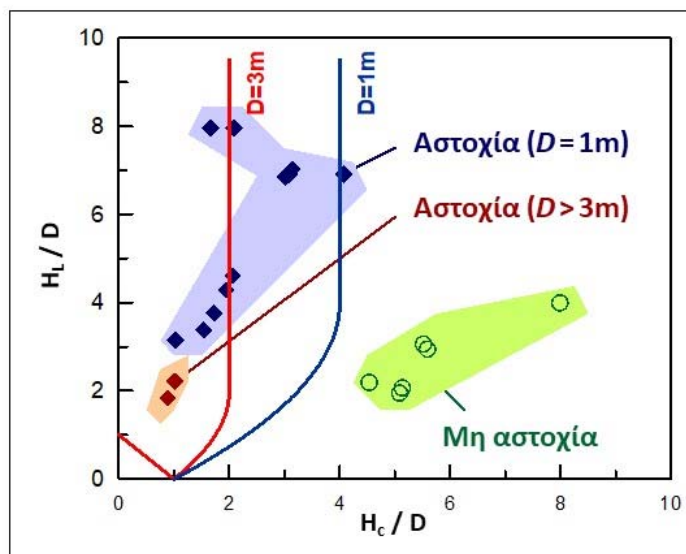
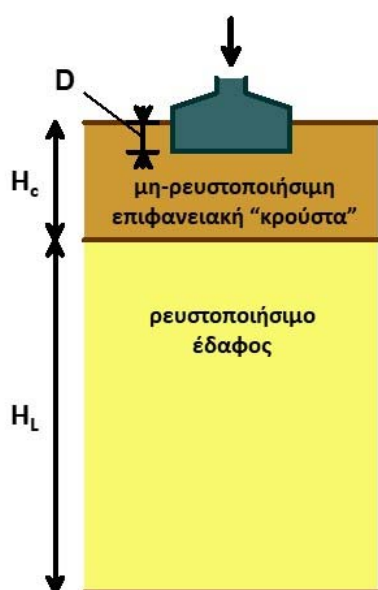
Επιφανειακή Θεμελίωση σε περιοχές με Ρευστοποίηση

Αριθμητική Προσομοίωση (VIDEO)



Επιφανειακή Θεμελίωση σε περιοχές με Ρευστοποίηση

Παρατηρήσεις Πεδίου

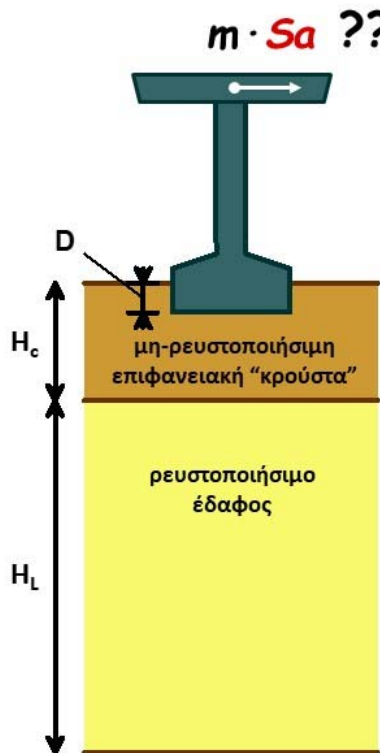


Acacio et al (2001)

Δεδομένα από το Σεισμό Dagupan (1990)
Τροποποιημένες καμπύλες του Ishihara (1985)

Επιφανειακή Θεμελίωση σε περιοχές με Ρευστοποίηση

Βασικές Παράμετροι Σχεδιασμού



Φέρουσα Ικανότητα
& Καθιζήσεις



- *Karamitros et al. (2013)*
- *Dimitriadi et al. (2017)*
- *Bray & Macedo (2017)*
- *Bullock et al. (2018)*
-

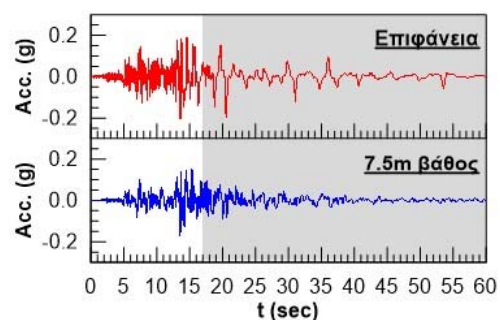
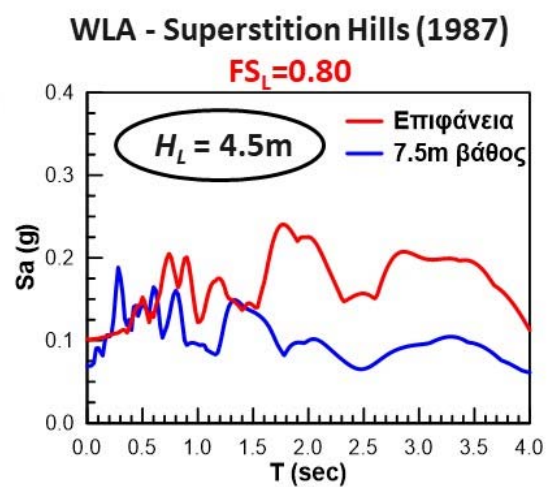
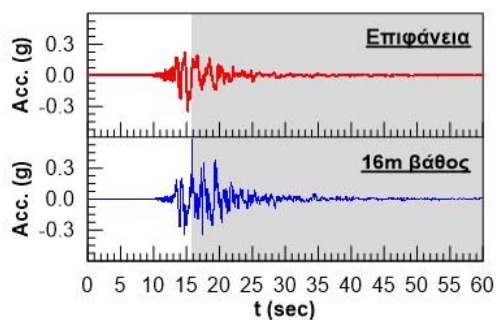
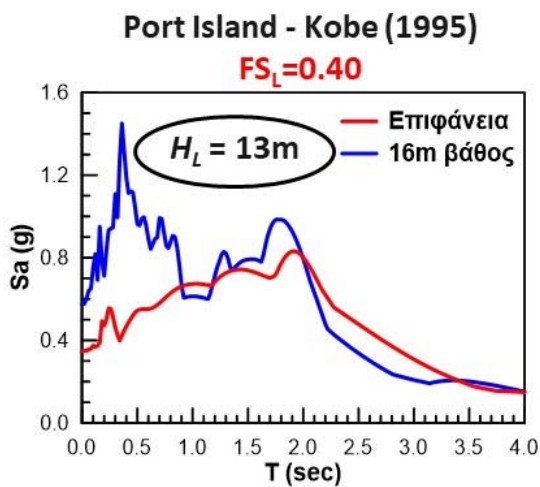
Σεισμική απόκριση
ρευστοποιήσιμου εδάφους

???

Περιεχόμενα

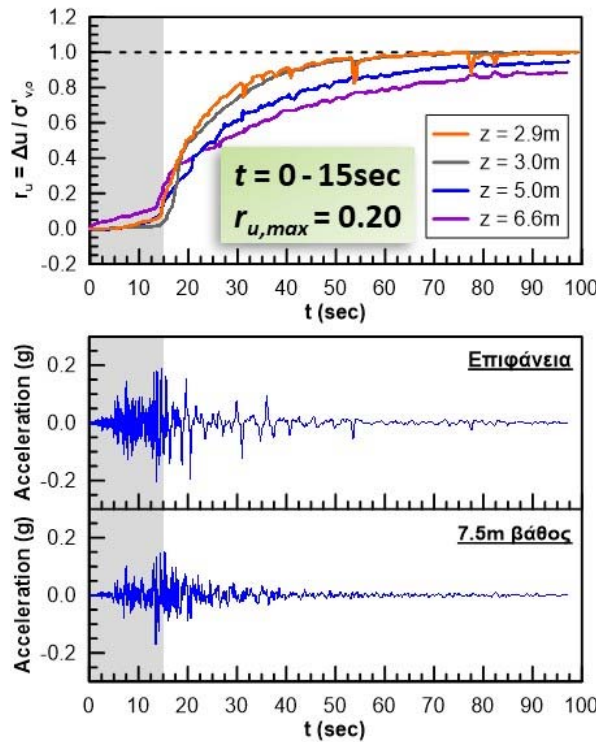
- ✚ Θεμελίωση σε περιοχές με Ρευστοποίηση
- ✚ Σεισμική απόκριση Ρευστοποιήσιμου Εδάφους
- ✚ Μέθοδος Φασματικής Περιβάλλουσας
- ✚ Μέθοδος Φασματικής Παρεμβολής
- ✚ Εισαγωγή σε Αντισεισμικούς Κανονισμούς
- ✚ Τελικές Παρατηρήσεις

Σεισμική απόκριση Ρευστοποιήσιμου εδάφους



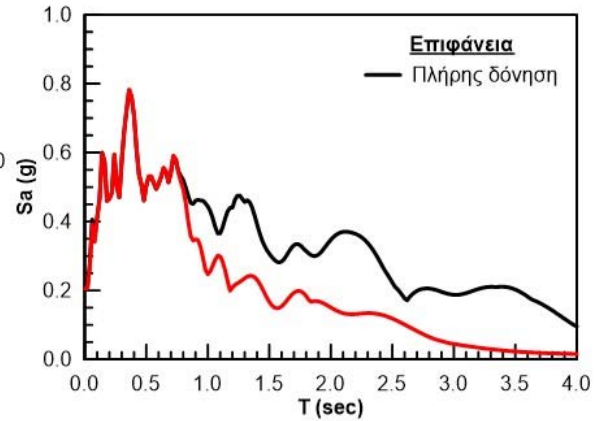
Σεισμική απόκριση Ρευστοποιήσιμου εδάφους

Youd & Carter (2005): Επίδραση τμήματος της δόνησης πριν τη ρευστοποίηση



WLA – Superstition Hills (1987)

$FS_L = 0.80$

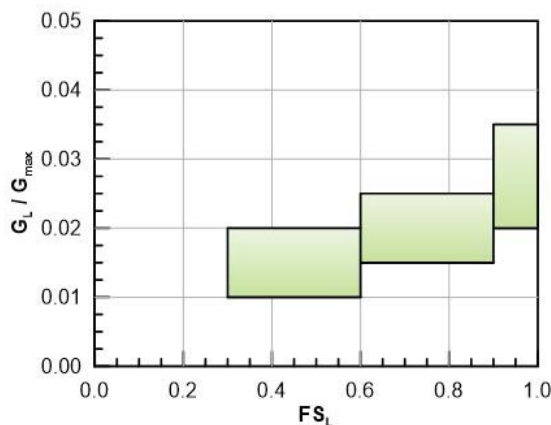


Σεισμική απόκριση Ρευστοποιήσιμου εδάφους

Miwa & Ikeda (2006):

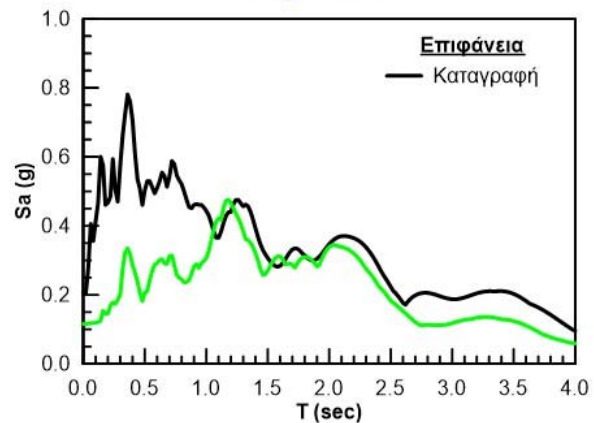
Προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης μετά την ρευστοποίηση

- Απομείωση G_{max} σε G_L
- Θεώρηση σταθερού G/G_L vs. γ
- Εκτίμηση G_L με βάση τα G_{max} & FS_L



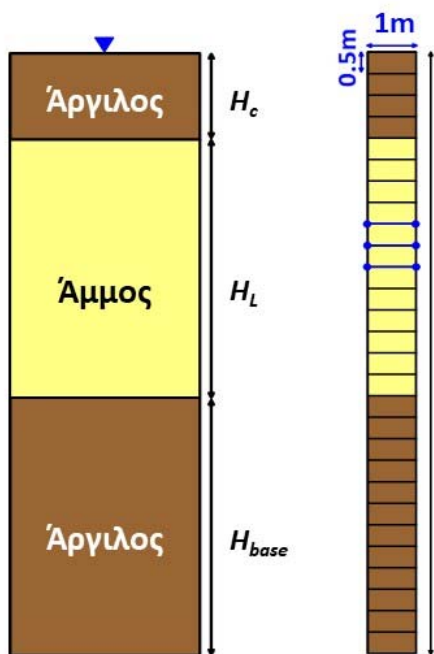
WLA – Superstition Hills (1987)

$FS_L = 0.80$



Σεισμική απόκριση Ρευστοποιήσιμου εδάφους

Αριθμητική Προσομοίωση



Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών **FLAC**

Στήλη εδάφους

Συνοριακές Συνθήκες:

—•— **Συζευγμένοι Κόμβοι (Tied Nodes)**
(οριζόντια & κατακόρυφα)

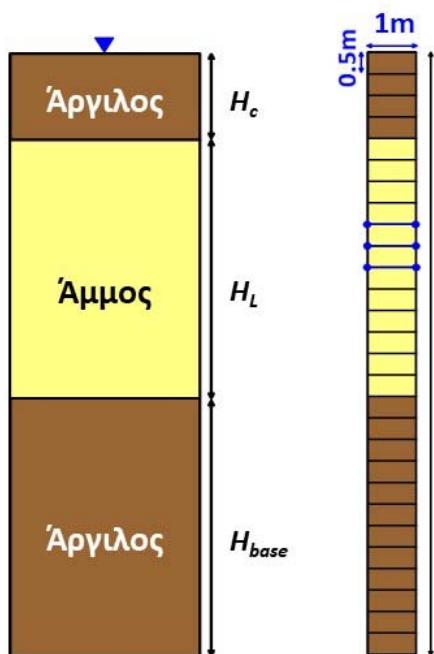
Καταστατικά
Προσομοιώματα:

■ Ramberg-Osgood

■ NTUA-SAND

Σεισμική απόκριση Ρευστοποιήσιμου εδάφους

Αριθμητική Προσομοίωση

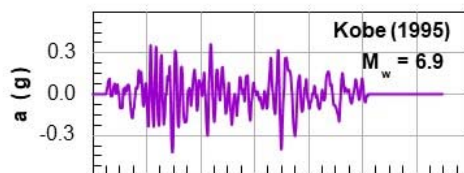


Κώδικας Πεπερασμένων Διαφορών **FLAC**

Στήλη εδάφους

Συνοριακές Συνθήκες:

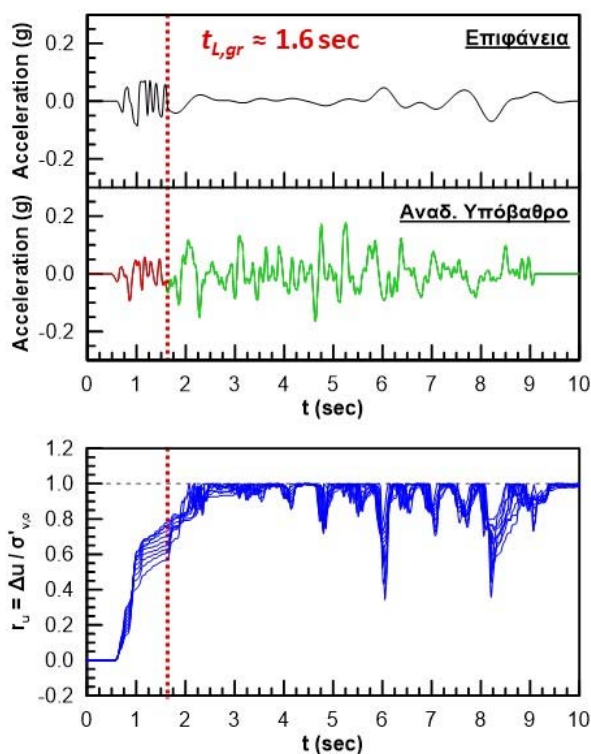
—•— **Συζευγμένοι Κόμβοι (Tied Nodes)**
(οριζόντια & κατακόρυφα)



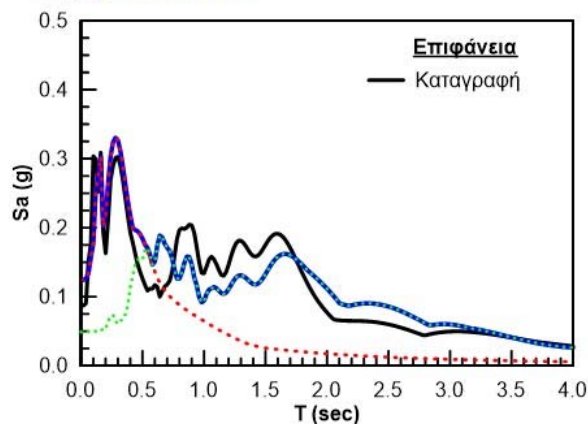
Περιεχόμενα

- ✚ Θεμελίωση σε περιοχές με Ρευστοποίηση
- ✚ Σεισμική απόκριση Ρευστοποιήσιμου Εδάφους
- ✚ Μέθοδος Φασματικής Περιβάλλουσας
- ✚ Μέθοδος Φασματικής Παρεμβολής
- ✚ Εισαγωγή σε Αντισεισμικούς Κανονισμούς
- ✚ Τελικές Παρατηρήσεις

Μέθοδος “Φασματικής Περιβάλλουσας”

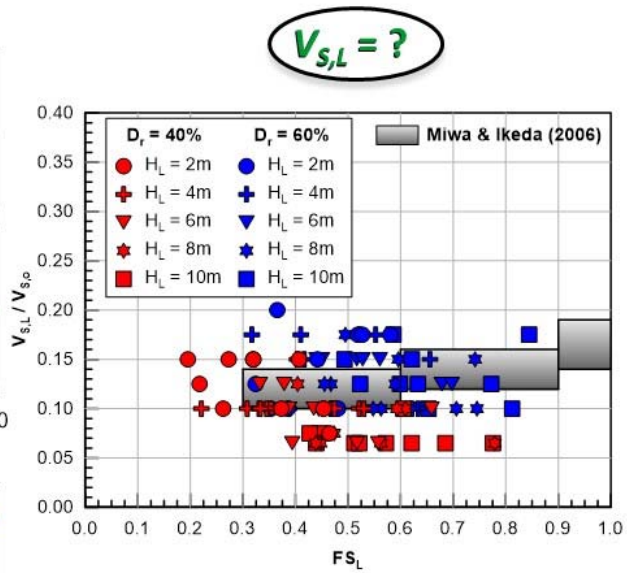
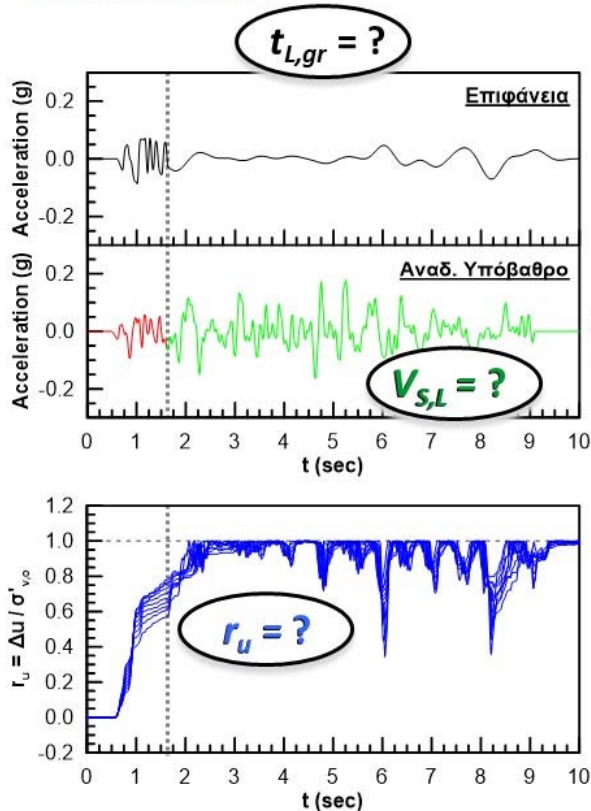


1. Καθορισμός του χρόνου **Επιφανειακής Εκδήλωσης** της Ρευστοποίησης
2. Ανάλυση του **Αρχικού Τμήματος** με ιδιότητες **φυσικού** εδάφους (π.χ. τύπου SHAKE)
3. Ανάλυση του **Δεύτερου Τμήματος** με ιδιότητες **ρευστοποιημένου** εδάφους (π.χ. Miwa & Ikeda)
4. **Περιβάλλουσα**



Μέθοδος "Φασματικής Περιβάλλουσας"

Βαθμονόμηση.....

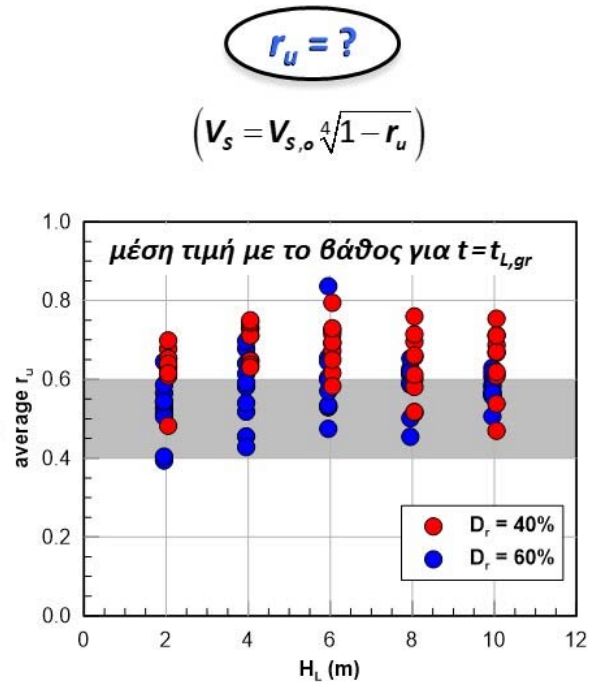
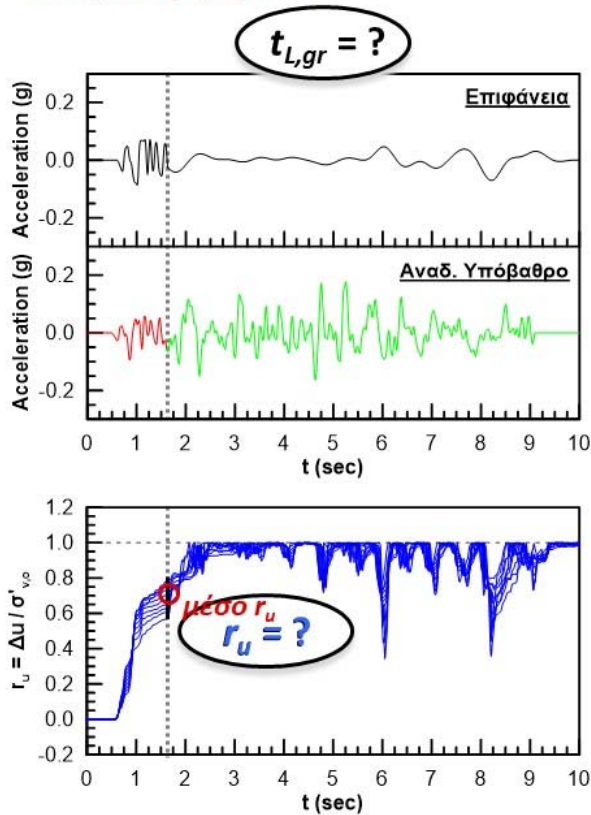


$D_r > 50\% \rightarrow$ μέση τιμή M & I

$D_r \leq 50\% \rightarrow$ κάτω όριο M & I

Μέθοδος "Φασματικής Περιβάλλουσας"

Βαθμονόμηση.....



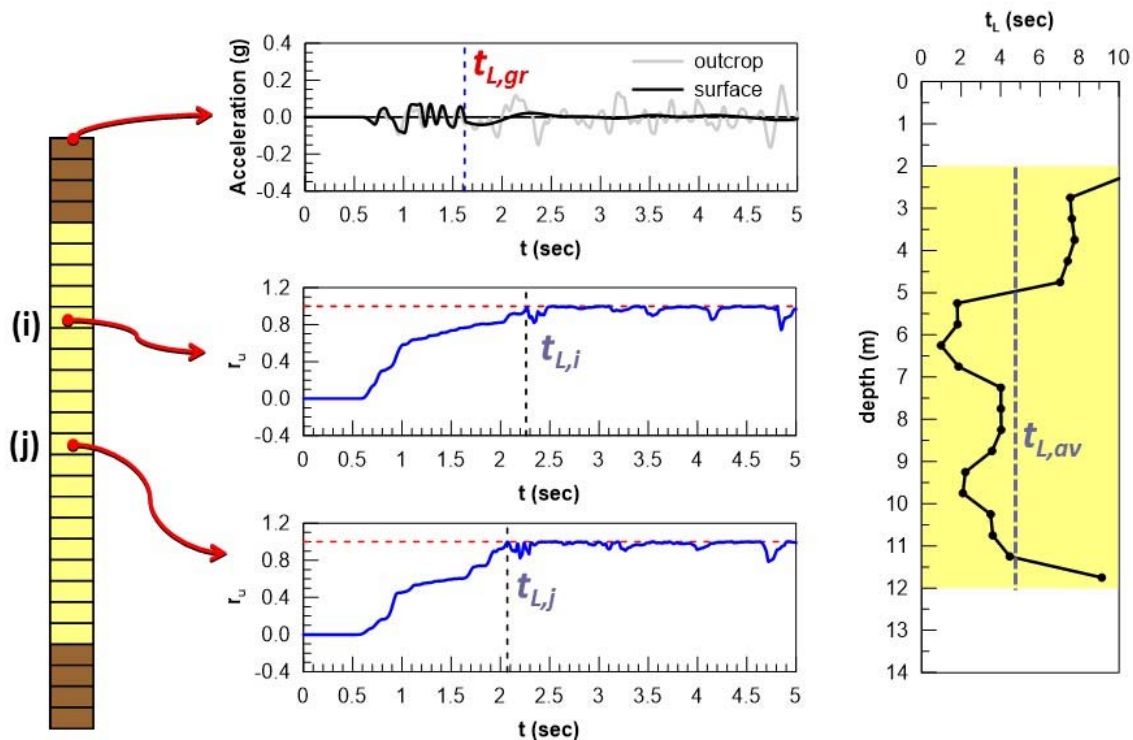
$r_u = 0.40 - 0.60$

Μέθοδος "Φασματικής Περιβάλλουσας"

Βαθμονόμηση.....

Εκδήλωση Ρευστοποίησης (στην επιφάνεια):

$$t_{L,gr} = f(t_{L,av})?$$

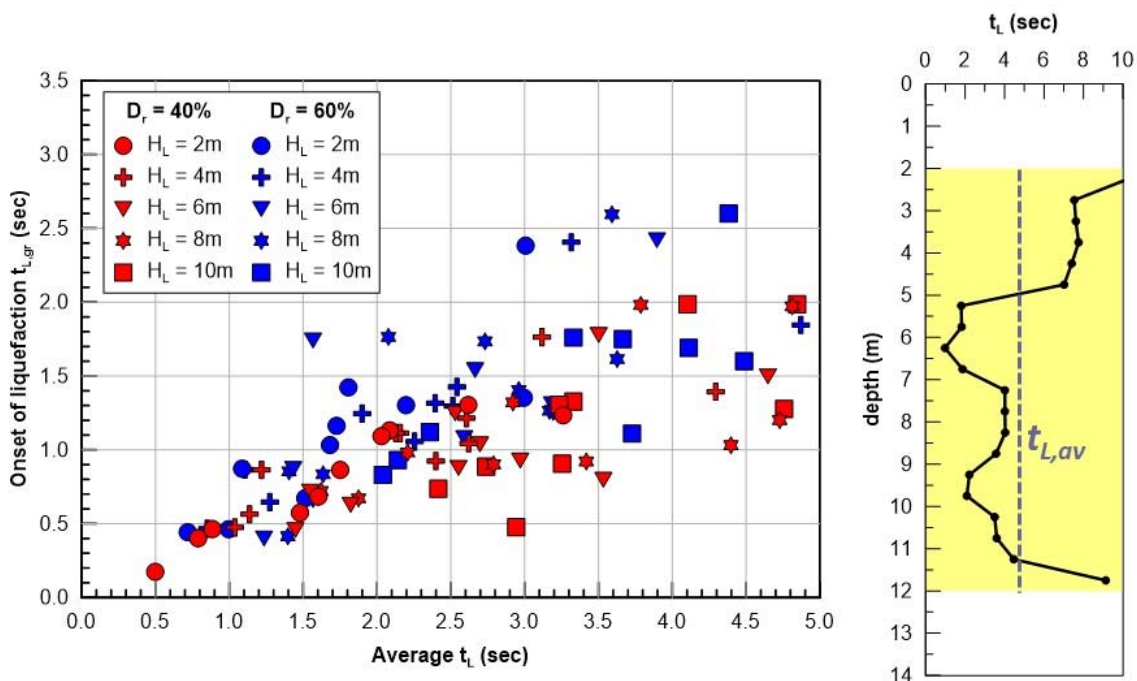


Μέθοδος "Φασματικής Περιβάλλουσας"

Βαθμονόμηση.....

Εκδήλωση Ρευστοποίησης (στην επιφάνεια):

$$t_{L,gr} = f(t_{L,av})?$$

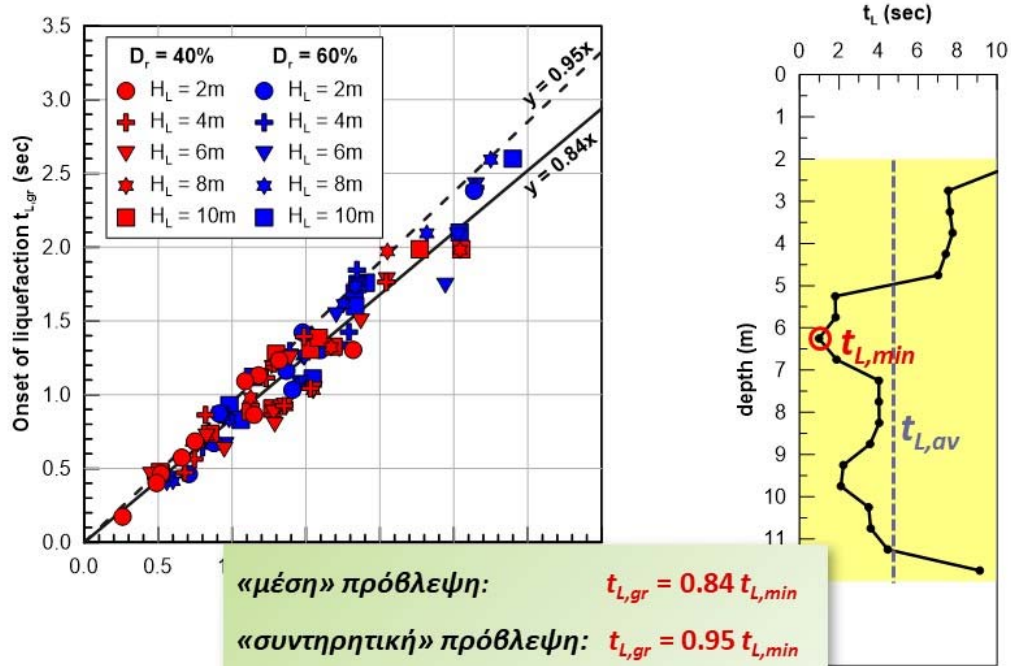


Μέθοδος "Φασματικής Περιβάλλουσας"

Βαθμονόμηση.....

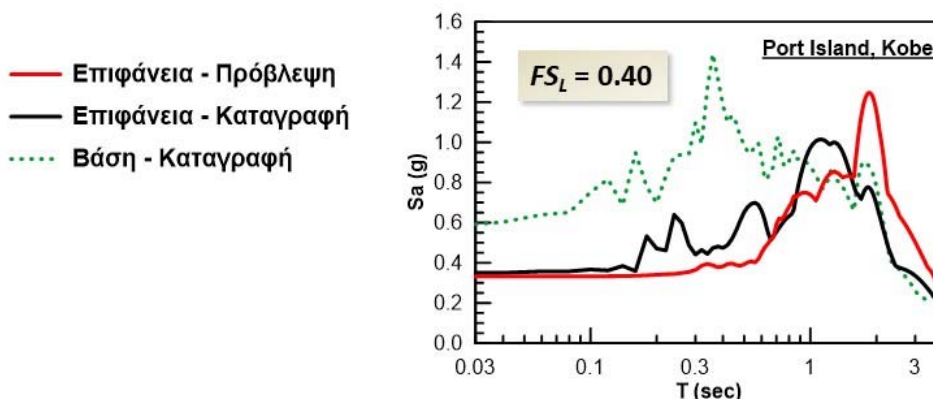
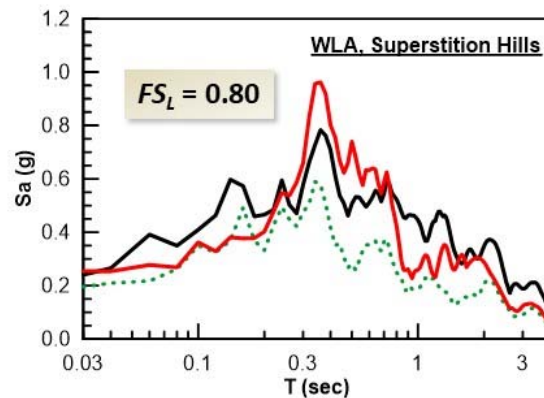
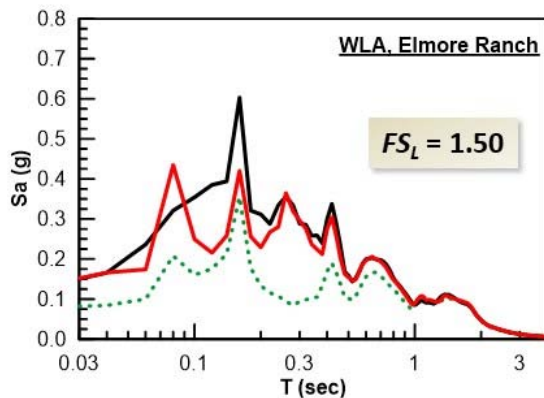
Εκδήλωση Ρευστοποίησης (στην επιφάνεια):

$$t_{L,gr} = f(t_{L,min})?$$



Μέθοδος "Φασματικής Περιβάλλουσας"

Σύγκριση με Ιστορικά Περιστατικά

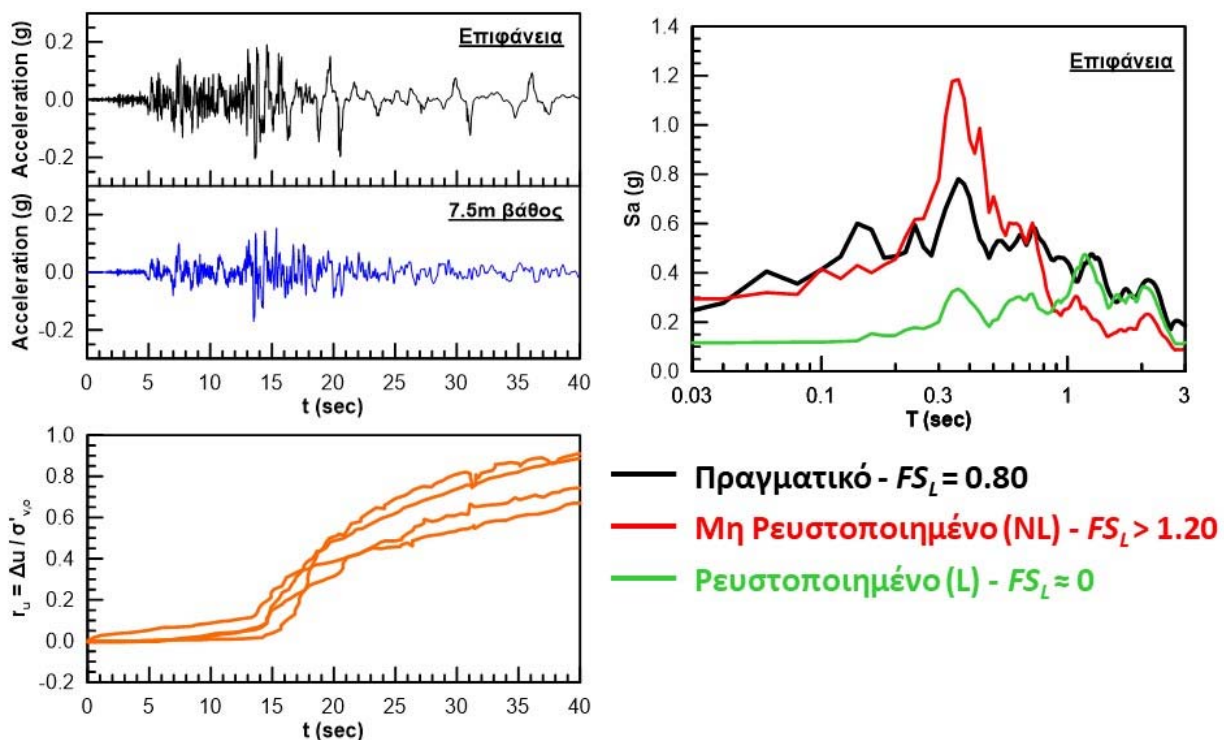


Περιεχόμενα

- ✚ Θεμελίωση σε περιοχές με Ρευστοποίηση
- ✚ Σεισμική απόκριση Ρευστοποιήσιμου Εδάφους
- ✚ Μέθοδος Φασματικής Περιβάλλουσας
- ✚ Μέθοδος Φασματικής Παρεμβολής
- ✚ Εισαγωγή σε Αντισεισμικούς Κανονισμούς
- ✚ Τελικές Παρατηρήσεις

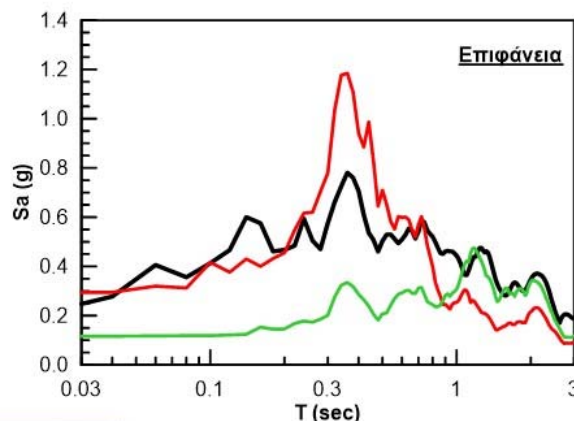
Μέθοδος “Φασματικής Παρεμβολής”

WLA – Superstition Hills (1987)



Μέθοδος "Φασματικής Παρεμβολής"

1. Εκτέλεση «ισοδύναμης γραμμικής» ανάλυσης για **μη-ρυστοποιημένο** έδαφος (Sa_{NL})
2. Εκτέλεση «ισοδύναμης γραμμικής» ανάλυσης για **ρυστοποιημένο** έδαφος (Sa_L)
(κατά Miwa & Ikeda, 2006)
3. Παρεμβολή μεταξύ **A** και **B**:



$$Sa_{REAL}(T) = Sa_{NL}(T) - \alpha(T)[Sa_{NL}(T) - Sa_L(T)]$$

Συντελεστής Συσχέτισης α :

$$\alpha(T) = \frac{Sa_{NL}(T) - Sa_{REAL}(T)}{Sa_{NL}(T) - Sa_L(T)}$$

$$\alpha=0 \rightarrow Sa_{REAL} = Sa_{NL} (FS_L > 1)$$

$$\alpha=1 \rightarrow Sa_{REAL} = Sa_L (FS_L \rightarrow 0)$$

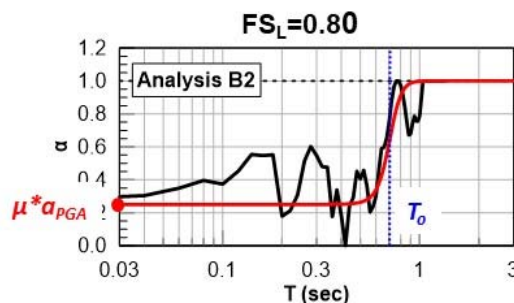
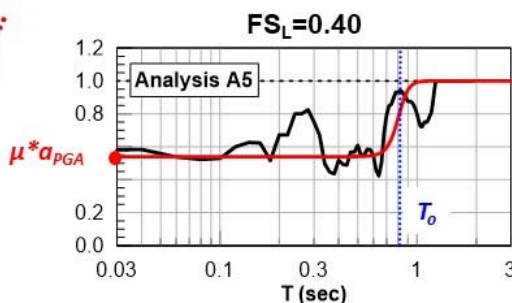
Μέθοδος "Φασματικής Παρεμβολής"

$$\alpha_{PGA} = ?$$

$$\mu = ?$$

$$T_o = ?$$

Βαθμονόμηση.....



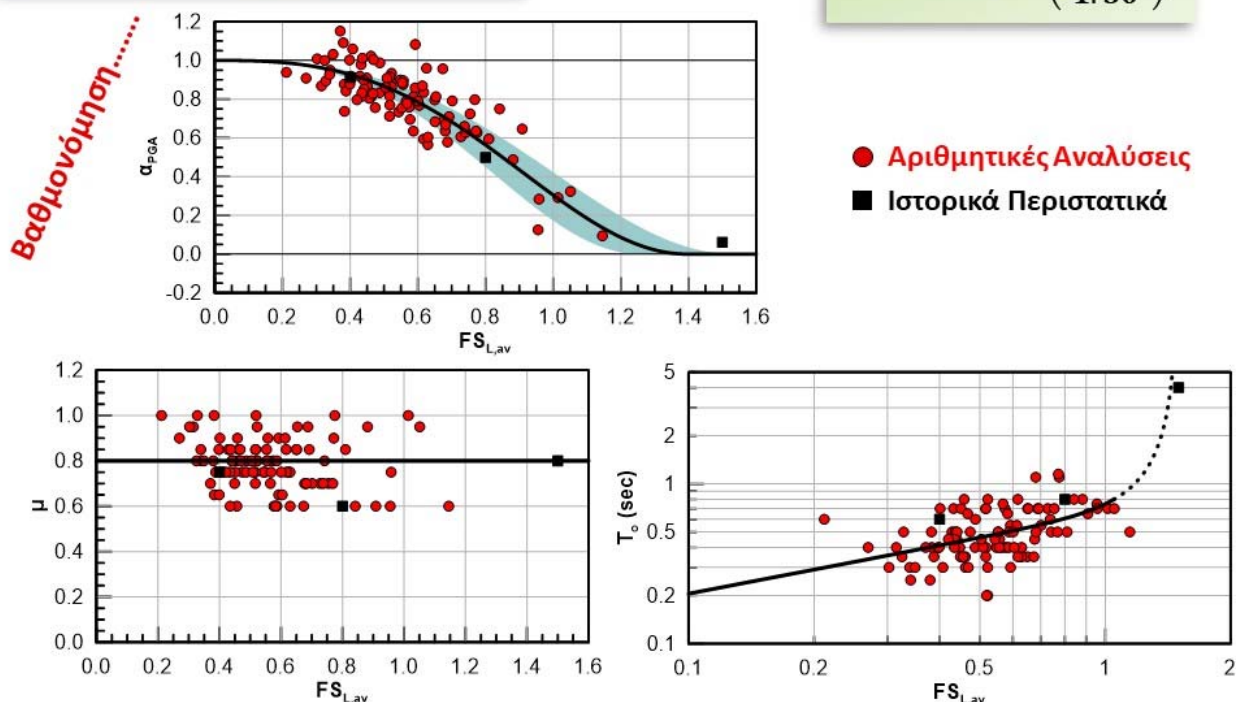
$$\alpha(T) = \left(\frac{1 + \mu \cdot \alpha_{PGA}}{2} \right) + \left(\frac{1 - \mu \cdot \alpha_{PGA}}{2} \right) \tanh[10(T - T_o)]$$

Μέθοδος "Φασματικής Παρεμβολής"

$$a_{PGA} = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{FS_{L,av}}{0.85} \right)^{1.40} \right] \right\}$$

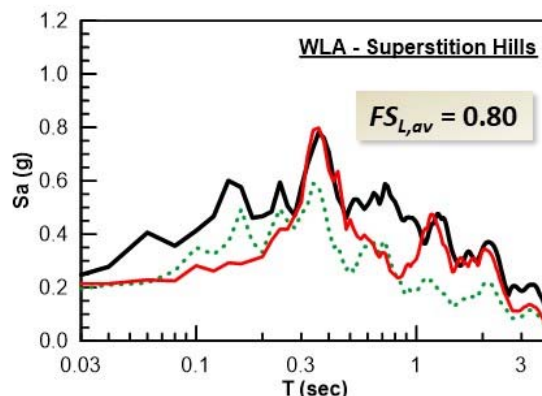
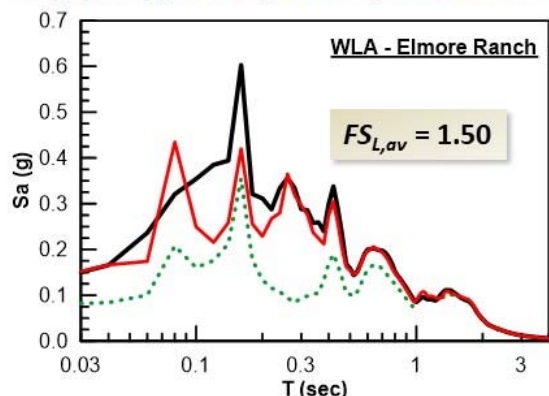
$$\mu = 0.80$$

$$T_o = 0.65 \frac{\sqrt{FS_{L,av}}}{1 - \left(\frac{FS_{L,av}}{1.50} \right)^5}$$

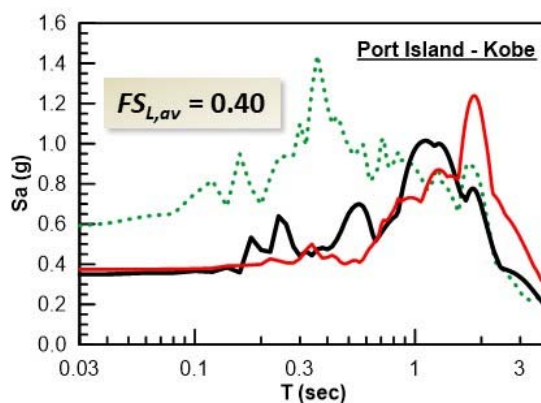


Μέθοδος "Φασματικής Παρεμβολής"

Σύγκριση με Ιστορικά Περιστατικά



— Επιφάνεια - Πρόβλεψη
— Επιφάνεια - Καταγραφή
... Βάση - Καταγραφή



Περιεχόμενα

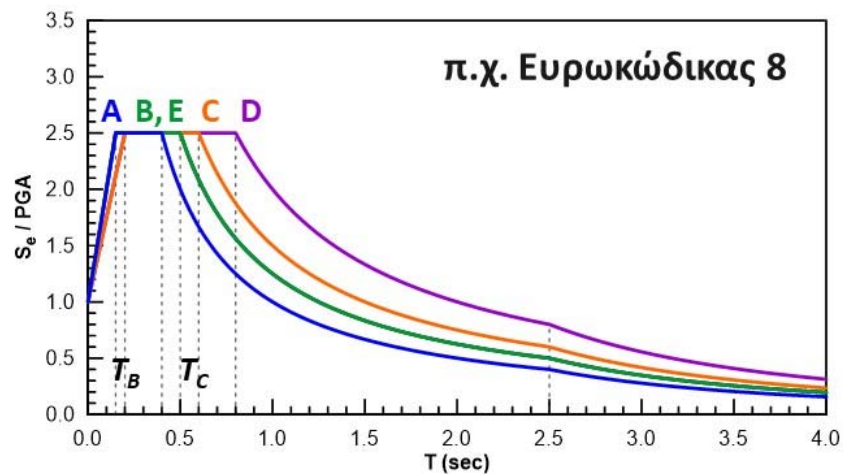
- ✚ Θεμελίωση σε περιοχές με Ρευστοποίηση
- ✚ Σεισμική απόκριση Ρευστοποιήσιμου Εδάφους
- ✚ Μέθοδος Φασματικής Περιβάλλουσας
- ✚ Μέθοδος Φασματικής Παρεμβολής
- ✚ Εισαγωγή σε Αντισεισμικούς Κανονισμούς (???)
- ✚ Τελικές Παρατηρήσεις

Εισαγωγή σε **Αντισεισμικούς Κανονισμούς** (π.χ. EC-8) **????**

..... με την μέθοδο της “**Φασματικής Παρεμβολής**”

Εισαγωγή σε Αντισεισμικούς Κανονισμούς (π.χ. EC-8) ????

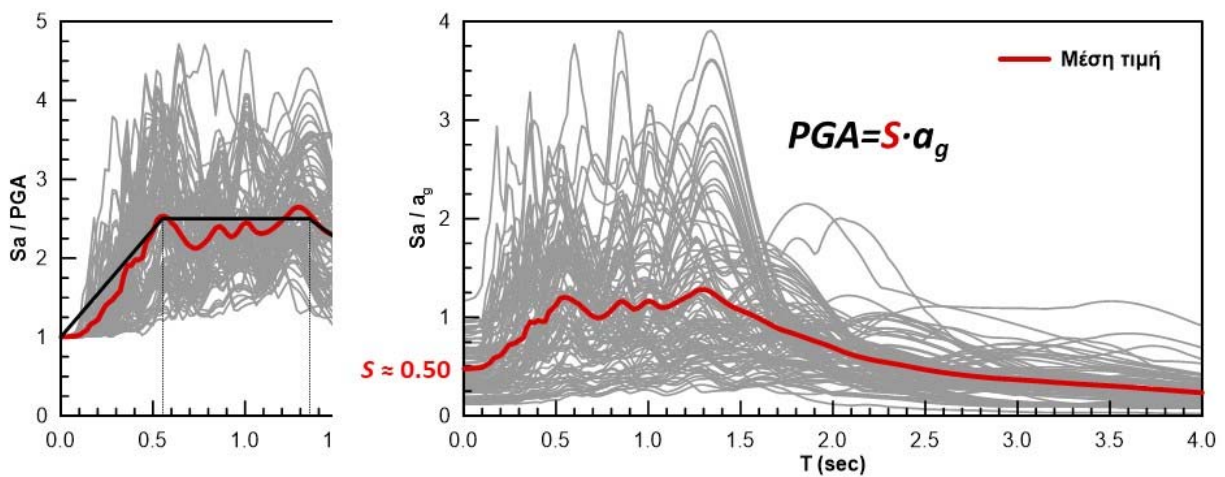
Φάσματα σχεδιασμού χωρίς ρευστοποίηση



	Κατ. A	Κατ. B	Κατ. C	Κατ. D	Κατ. E
T_B (sec)	0.15	0.15	0.20	0.20	0.15
T_C (sec)	0.40	0.50	0.60	0.80	0.50
S	1.00	1.20	1.15	1.35	1.40

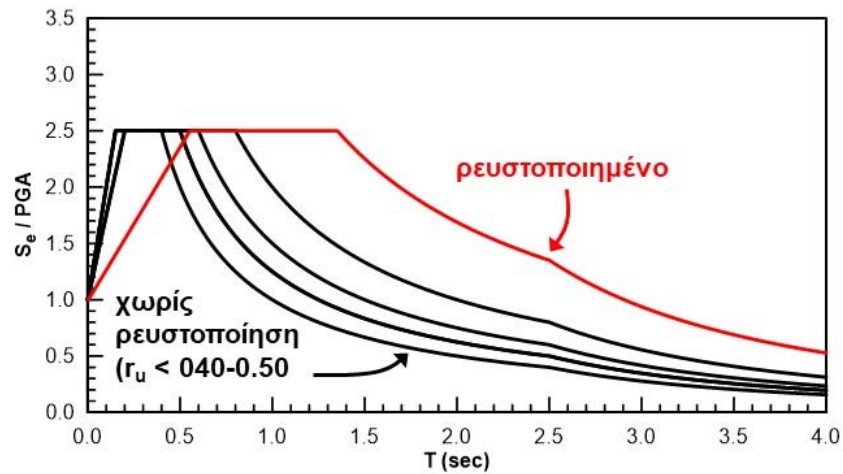
Εισαγωγή σε Αντισεισμικούς Κανονισμούς (π.χ. EC-8) ????

Φάσματα σχεδιασμού για ρευστοποιημένα εδάφη.....



	Κατ. A	Κατ. B	Κατ. C	Κατ. D	Κατ. E	Ρευστοποιημένο
T_B (sec)	0.15	0.15	0.20	0.20	0.15	0.55
T_C (sec)	0.40	0.50	0.60	0.80	0.50	1.35
S	1.00	1.20	1.15	1.35	1.40	0.50

Εισαγωγή σε Αντισεισμικούς Κανονισμούς (π.χ. EC-8) ????



	Κατ. A	Κατ. B	Κατ. C	Κατ. D	Κατ. E	Ρευστοποιημένο
T_B (sec)	0.15	0.15	0.20	0.20	0.15	0.55
T_C (sec)	0.40	0.50	0.60	0.80	0.50	1.35
S	1.00	1.20	1.15	1.35	1.40	0.50

Εισαγωγή σε Αντισεισμικούς Κανονισμούς (π.χ. EC-8) ????

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Επιτάχυνση σχεδιασμού:

$$a_g = 0.25g$$

Χωρίς ρευστοποίηση:

Κατηγορία εδάφους B

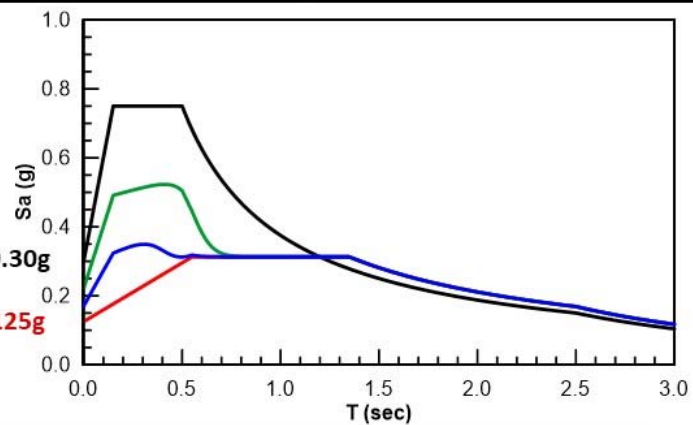
$$1.20 \cdot 0.25g = 0.30g$$

Ρευστοποιημένο:

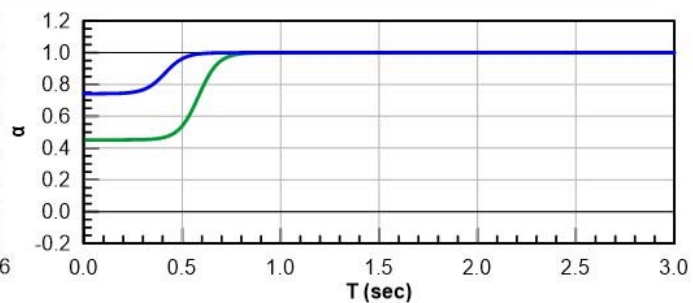
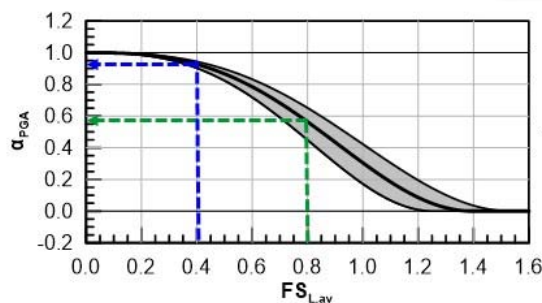
$$0.5 \cdot 0.25g = 0.125g$$

$$FS_{L,av} = 0.40 \quad (a_{PGA} = 0.93, T_0 = 0.41s)$$

$$FS_{L,av} = 0.80 \quad (a_{PGA} = 0.56, T_0 = 0.58s)$$



$$Sa_{PRED}(T) = Sa_{NL}(T) - a(T)[Sa_{NL}(T) - Sa_L(T)]$$



Τελικές Παρατηρήσεις

- Σημαντική επίδραση του τμήματος της δόνησης πριν τη ρευστοποίηση
- Χρόνος εκδήλωσης ρευστοποίησης ↔ ελάχιστο FS_L
- Εφικτή η χρήση απλοποιημένων υπολογιστικών μεθόδων (“Φασματικής Περβάλλουσας” & “Φασματικής Παρεμβολής”)
- Εφικτή (?) η διατύπωση φασμάτων σχεδιασμού Αντισεισμικών Κανονισμών για ρευστοποιήσιμα εδάφη

Σας ευχαριστούμε !