

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Στοιχεία Θεωρίας ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ στο Έδαφος

1. Συνήθεις Κυματομορφές
2. Κυματική Εξίσωση για Ελαστικά Κύματα P & S
3. Ταχύτητα Διάδοσης Κυμάτων P & S
  - ✚ Εμπειρικές σχέσεις
  - ✚ Μέτρηση επιτόπου
  - ✚ Μέτρηση στο εργαστήριο
4. Ασκήσεις

## Πρόσθετη βιβλιογραφία

### ✚ Steven Kramer:

Κεφάλαιο 2 (για μια γενική ενημέρωση σχετικά με σεισμικά κύματα, ρήγματα και άλλες βασικές έννοιες της Τεχνικής Σεισμολογίας)

&

Κεφάλαιο 5 (παράγραφοι 5.1 & 5.2)

&

Κεφάλαιο 6 (παράγραφος 6.3, για εκτίμηση-μέτρηση της ταχύτητας σεισμικών κυμάτων)

### ✚ Γιώργος Γκαζέτας:

Κεφάλαιο 4 (για κύματα)

&

Κεφάλαιο 3 (για εκτίμηση-μέτρηση της ταχύτητας σεισμικών κυμάτων)

### ✚ Άλλη βιβλιογραφία σχετική με «Θεωρία Διάδοσης Κυμάτων» ή / και «Τεχνική Σεισμολογία»

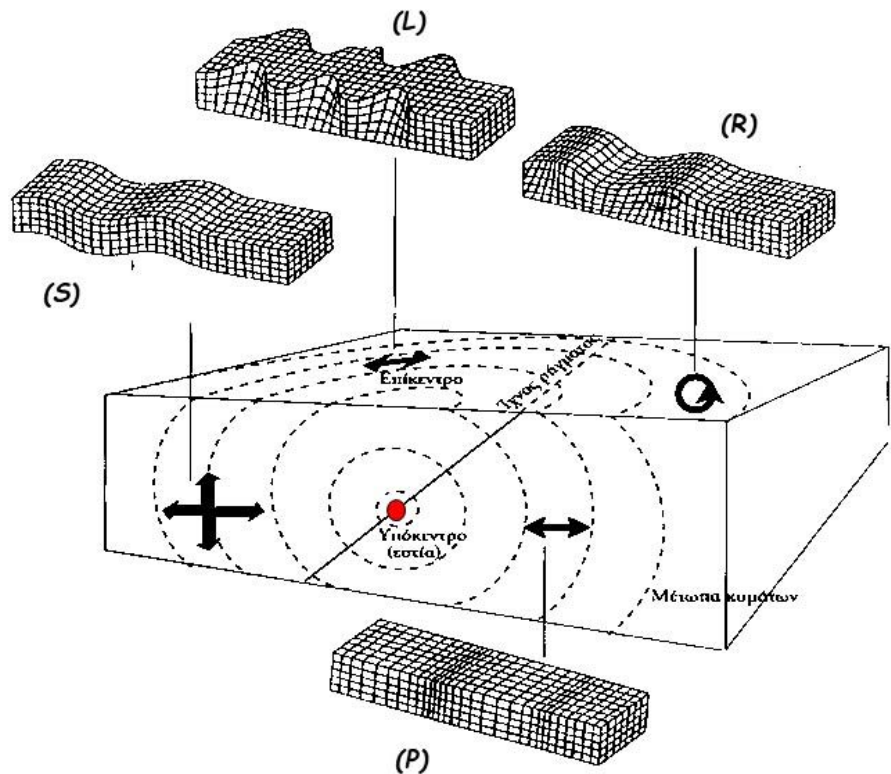


## 3.1 ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΕΣ

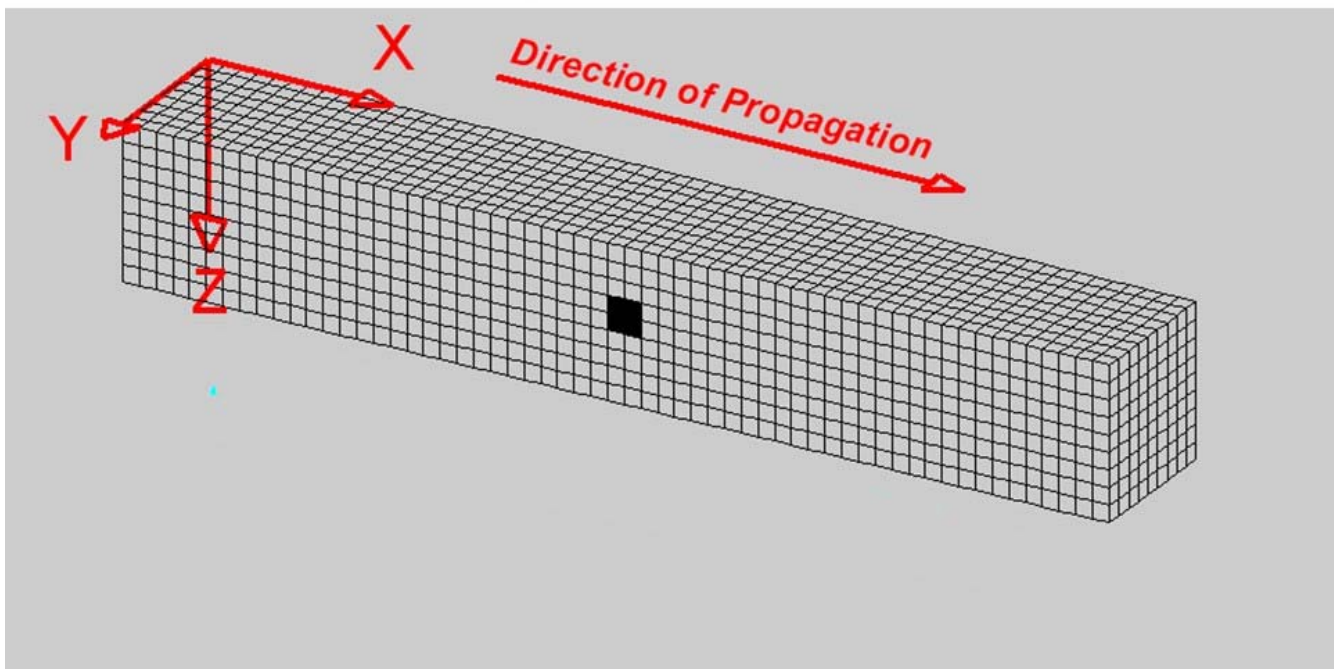
Τόσο οι **σεισμικές** δονήσεις όσο και οι δονήσεις του εδάφους λόγω **εκρήξεων**, **ταλαντώσεων θεμελίων**, κλπ. .... προκαλούν την διάδοση κυμάτων .....

- Πίεσης (P),
- Διάτμησης (S),
- Rayleigh (R) και
- Love (L)

... που διαδίδονται μέσω του εδάφους και του βραχώδους υποβάθρου..

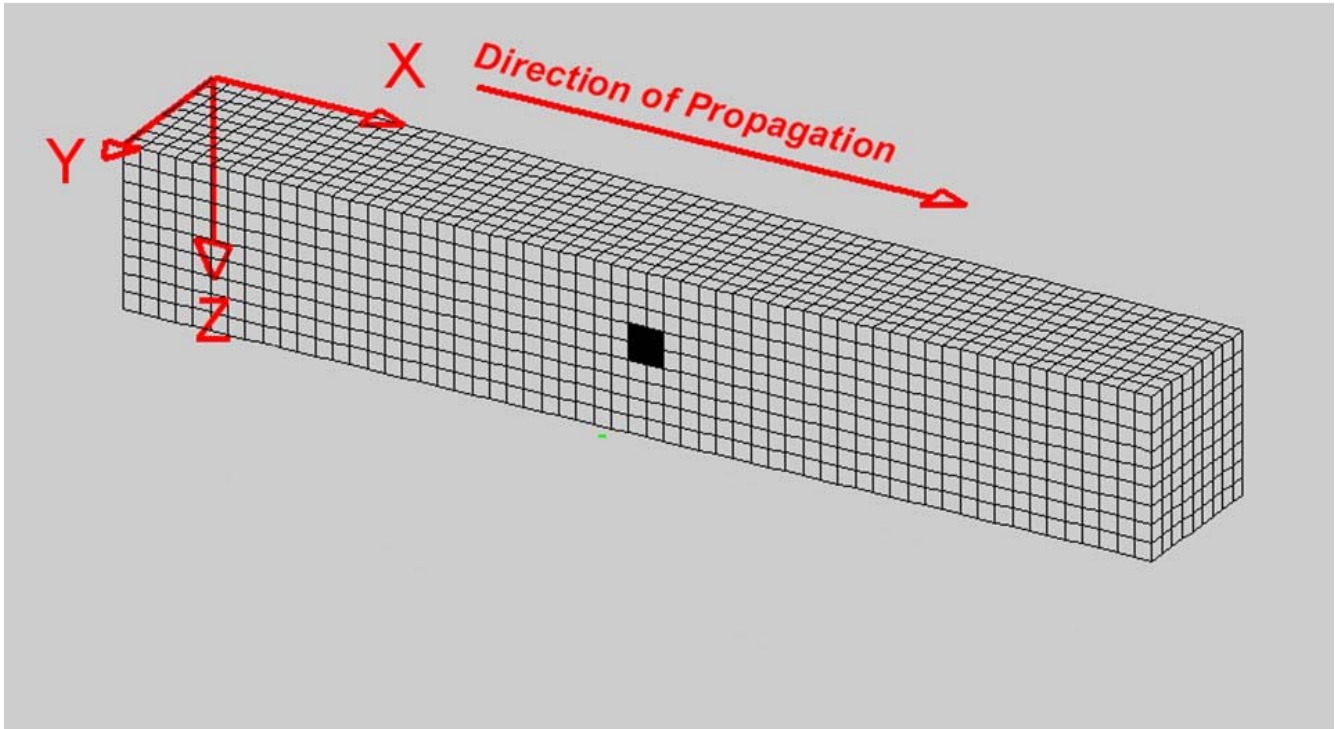


### Κύμα Πίεσης (P-Wave, Animation)



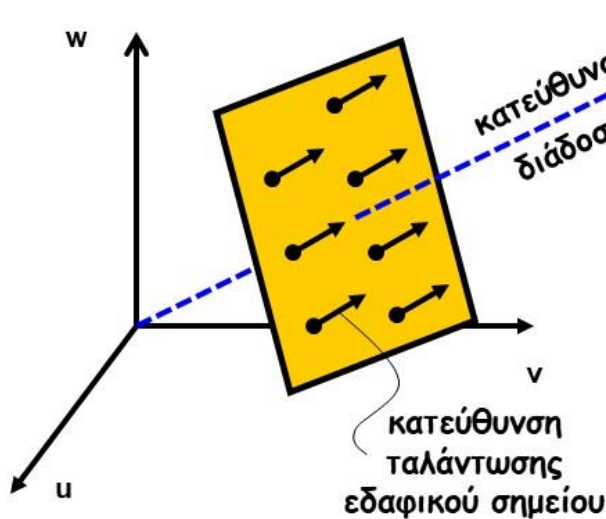
Η κίνηση των εδαφικών σημείων είναι παράλληλη προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος και η παραμόρφωση του εδαφικού στοιχείου συνίσταται από εναλλαγές **1- $\Delta$  συμπίεσης και εφελκυσμού**.

## Κύμα Διάτμησης (S-Wave, Animation)

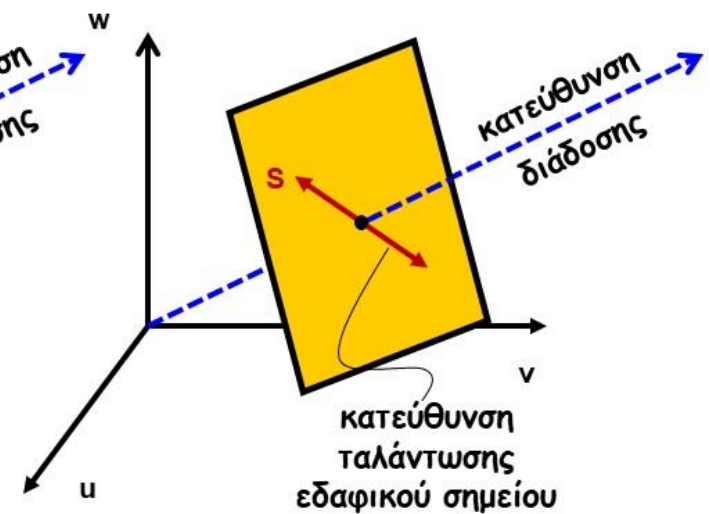


Η κίνηση των εδαφικών σημείων είναι εγκάρσια προς την διεύθυνση διάδοσης του κύματος και η παραμόρφωση του εδαφικού στοιχείου συνίσταται από κύκλους (φόρτιση-αποφόρτιση-επαναφόρτιση) **απλής διάτμησης**.

Κύμα P  
με επίπεδο «μέτωπο»  
διάδοσης

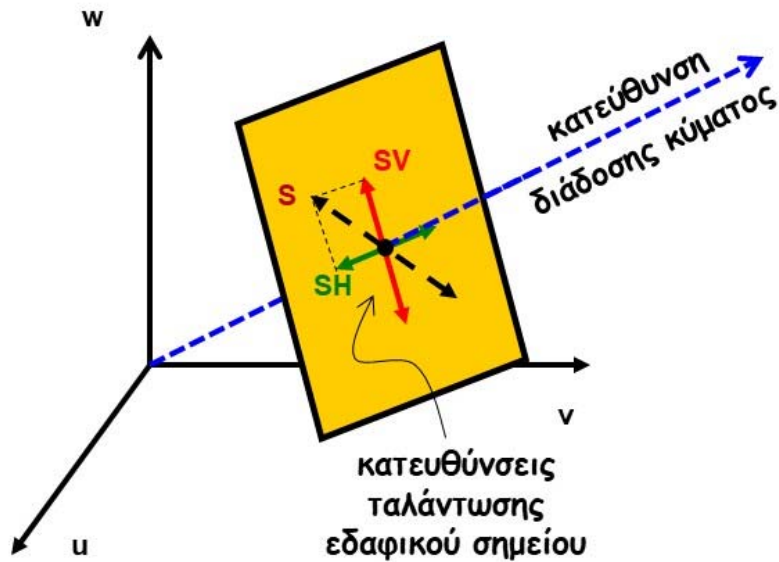


Κύμα S με επίπεδο  
«μέτωπο» διάδοσης

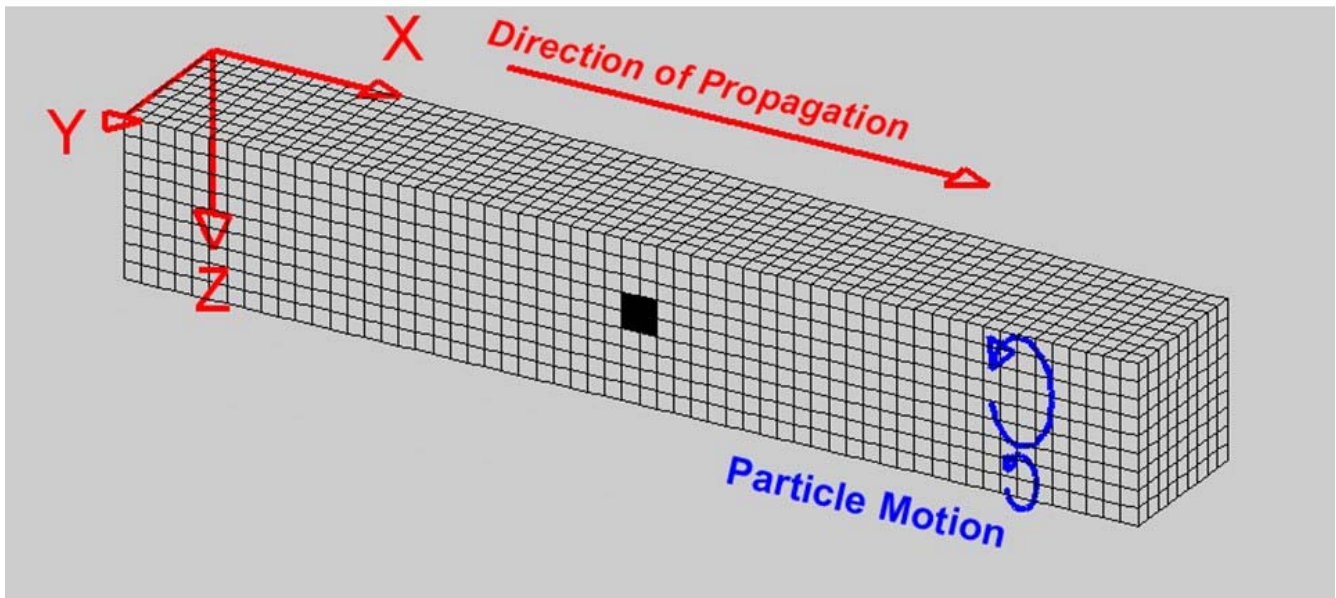


Τα κύματα  $S$  αναλύονται συνήθως σε κύματα .....

- ⊕  $SH$  (ταλάντωση σε οριζόντιο επίπεδο) &
- ⊕  $SV$  (ταλάντωση σε κατακόρυφο επίπεδο)

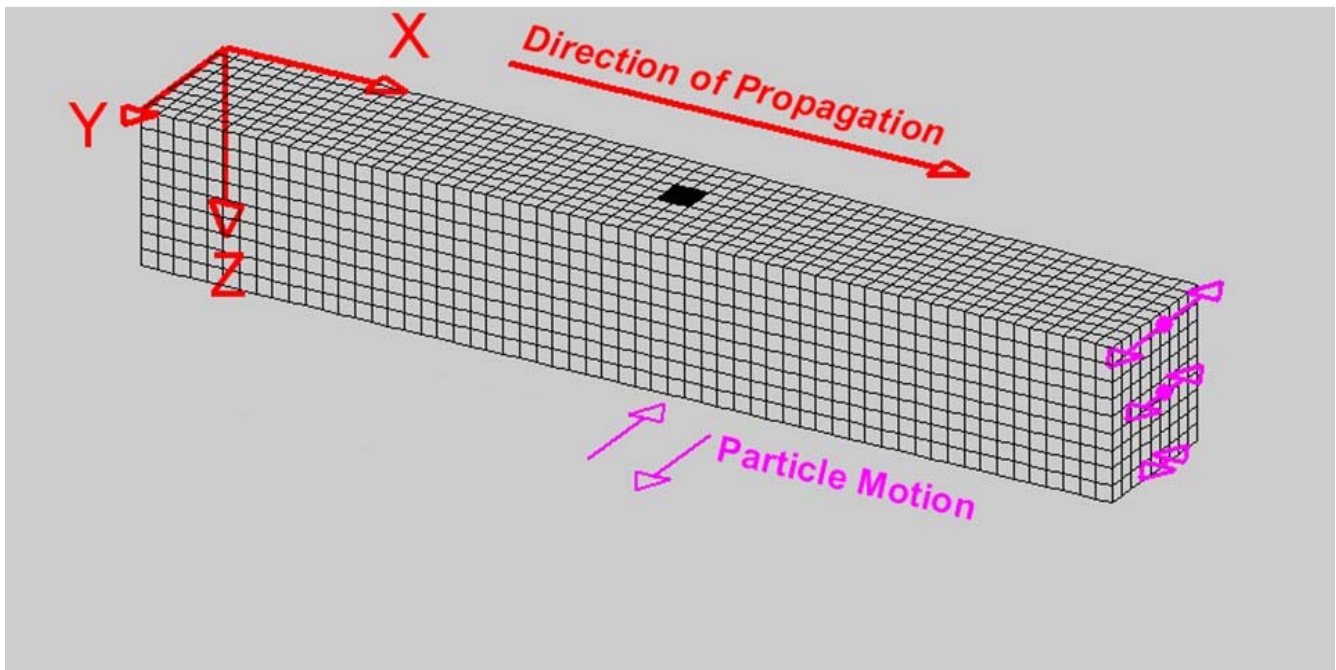


### Κύμα Rayleigh (R-Wave, Animation)



Η κίνηση του εδαφικού σημείου αποτελεί αριστερόστροφη έλλειψη σε κατακόρυφο επίπεδο, παράλληλο προς την διεύθυνση του κύματος. Η παραμόρφωση του εδαφικού σημείου συνίσταται από συνδυασμένη (εκτός φάσης) 1- $\Delta$  συμπίεση και απλή διάτμηση. Το εύρος της ταλάντωσης μειώνεται με το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους.

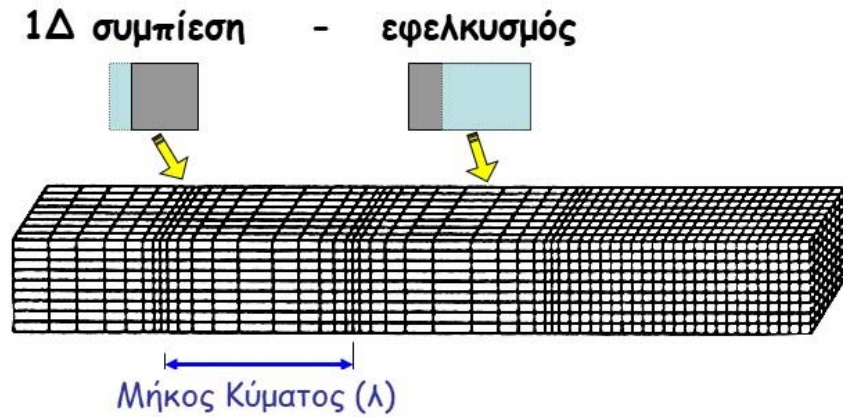
## Κύματα Love (L-Wave, Animation)



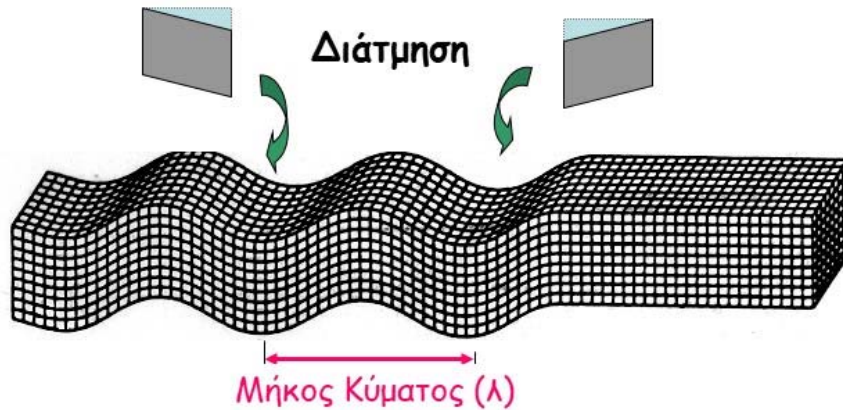
Η κίνηση του εδαφικού σημείου είναι οριζόντια, εγκάρσια προς την κατεύθυνση διάδοσης του κύματος. Η παραμόρφωση του εδαφικού στοιχείου συνίσταται από εναλλασσόμενη απλή διάτμηση σε οριζόντιο επίπεδο. Το εύρος της ταλάντωσης μειώνεται με το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους.

## 3.2 ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ για Ελαστικά Κύματα P & S

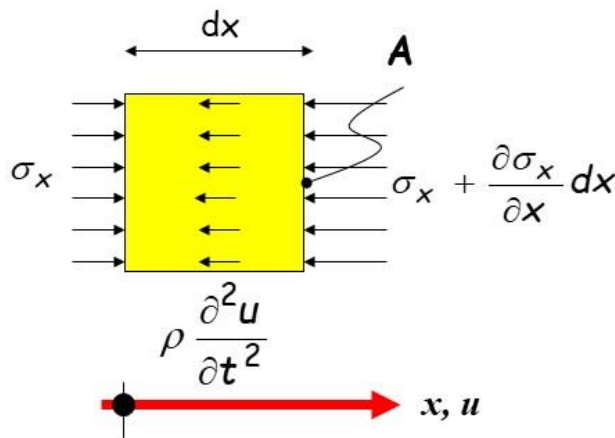
**Κύμα P**  
(Pressure  
ή Primary)



**Κύμα S**  
(Shear  
ή Secondary)



**Κυματική εξίσωση (ενδεικτικά για κύμα P) .....**



$$\sigma_x A = \left( \sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) A + \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dV$$

$$\dots \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = -\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\text{Όμως } \sigma_x = D \varepsilon_x = -D \frac{\partial u}{\partial x}$$

$$\text{και } \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = -D \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left( C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)$$

οπου  $C = \sqrt{D/\rho}$

Γενική λύση.....

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \left( C^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \Rightarrow u = f(Ct \pm x)$$

**Ερώτηση 3.1**: Μπορείτε να αποδείξετε γιατί ;



## Φυσικό νόημα...

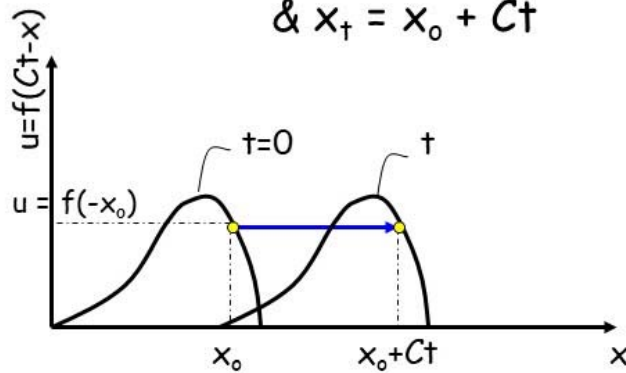
Οι μεταβλητές του προβλήματος ΔΕΝ είναι δύο ανεξάρτητες ('x' και 't') αλλά μία σύνθετη:  $Y = Ct \pm x$

όταν  $Y = Ct - x$

τότε, για  $t=0 \Rightarrow Y = -x_0$

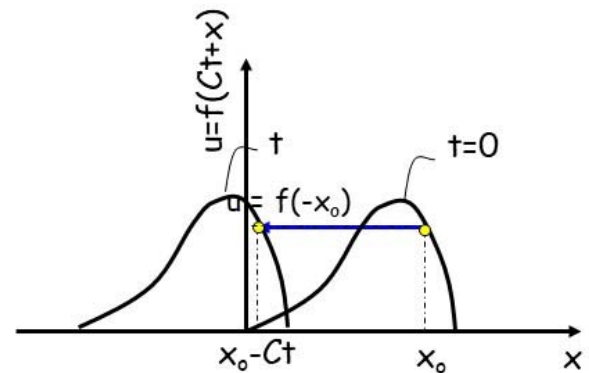
για  $t \neq 0 \Rightarrow Y = Ct - x_t = -x_0$

&  $x_t = x_0 + Ct$



όταν  $Y = Ct + x$

τότε, για  $t=0 \Rightarrow Y = x_0$



## ΣΥΝΟΠΤΙΚά.....

- ✚ Η γενική λύση υποδηλώνει ένα κύμα που διαδίδεται κατά μήκος του άξονα  $x$  με ταχύτητα  $C$
- ✚ Η λύση  $f(Ct - x)$  αντιστοιχεί σε κύμα που διαδίδεται προς τα **θετικά**  $x$
- ✚ Η λύση  $f(Ct + x)$  αντιστοιχεί σε κύμα που διαδίδεται προς τα **αρνητικά**  $x$



### 3.3 ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ P & S

#### 3.3.1 Ορισμοί και συνήθεις τιμές .....

**Κύματα S:**  $C_s = \sqrt{G_o / \rho}$ ,  $G_o = \frac{E_o}{2(1+\nu)}$

**Κύματα P:**  $C_p = \sqrt{D_o / \rho}$ ,  $D_o = \frac{E_o(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \frac{2G_o(1-\nu)}{1-2\nu}$

Αντίστροφα, όταν είναι γνωστές οι ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων P & S, μπορούμε να υπολογίσουμε τις «ελαστικές σταθερές» του εδάφους .....

**Ελαστικό Μέτρο Διάτμησης:**  $G_o = \rho \cdot C_s^2$

**Ελαστικό Μέτρο 1-Δ Συμπίεσης:**  $D_o = \rho \cdot C_p^2$

**Λόγος Poisson:**  $\nu_o = \frac{1-2\alpha}{2(1-\alpha)}$ , όπου  $\alpha = (C_s / C_p)^2$

#### Συνήθεις τιμές για εδάφη και βραχώδεις σχηματισμούς ....

	$C_s$ (m/s)	$C_p$ (m/s)	
		Ξηρό	Κορεσμένο
πρόσφατες (χαλαρές, μαλακές) ΕΔΑΦΙΚΕΣ αποθέσεις	≤ 400	≤ 800	≈ 1500
σκληρά ή πυκνά ΕΔΑΦΗ - μαλακοί ΒΡΑΧΟΙ	400-800	800-1600	1500-2000
Σκληροί ΒΡΑΧΟΙ	≥ 1600	≥ 3200	

ή σε km/h .....

	$C_s$ (km/h)	$C_p$ (km/h)	
		Ξηρό	Κορεσμένο
πρόσφατες (χαλαρές, μαλακές) ΕΔΑΦΙΚΕΣ αποθέσεις	≤ 1400	≤ 3600	≈ 5400
σκληρά ή πυκνά ΕΔΑΦΗ - μαλακοί ΒΡΑΧΟΙ	1400- 2800	3600- 7200	5400- 7200
Σκληροί ΒΡΑΧΟΙ	≥ 5800	≥ 11500	

### Ερώτηση 3.2:

- ✚ Πόσος χρόνος χρειάζεται για να γίνει αισθητή μια σεισμική δόνηση με εστιακή απόσταση  $R \approx 10\text{km}$  (π.χ. σεισμός Αθήνας 1999) ή  $R \approx 400\text{km}$  (π.χ. σεισμός Mexico 2018) ?
- ✚ Τι χρόνο αντίδρασης προσφέρει στις ανωτέρω περιπτώσεις ένα σύστημα "έγκαιρης προειδοποίησης" (early warning system) που βασίζεται στην ανίχνευση των ταχύτερα διαδιδόμενων, αλλά σχετικά ήπιων κυμάτων P ?

### Ερώτηση 3.3:

Τι σχέση έχει η ταχύτητα διάδοσης του κύματος με την ταχύτητα ταλάντωσης του εδαφικού σημείου? Ποια είναι μεγαλύτερη και πόσο;

## Ελαστικό Μέτρο 1-Δ Συμπίεσης $D_o (= \rho \cdot C_p^2)$ για κορεσμένο έδαφος

Από την θεωρία ελαστικότητας ισχύει  $C_p = \sqrt{D_o / \rho} = \dots = C_s \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}$


και επομένως, για κορεσμένο έδαφος ( $Sr=100\%$  με  $\nu=0.50$  θα έπρεπε  
 $C_p, D_o = \infty$

Έχουμε πει όμως ότι για  $Sr=100\%$ ,  $C_p \approx 1500 \text{ m/s}$ .

**Τι συμβαίνει ???**

$$\frac{1}{D_o} = \left( \frac{e}{1+e} \right) \frac{1}{B_w} + \left( \frac{1}{1+e} \right) \frac{1}{B_s} \quad (\text{Wood, 1930})$$

$B_s$  = Μέτρο ογκομετρικής παραμόρφωσης στερεών κόκκων  
( $\approx 10^4 - 10^5 \text{ MPa}$ )

$B_w$  = Μέτρο ογκομετρικής παραμόρφωσης του νερού των πόρων  
με διαλυμένο (φυσσαλίδες) αέρα [ $\leq B_{wo} \approx 2 \cdot 10^6 \text{ kPa}$ ] 

**Προσοχή:** Η τιμή του  $B_w$  είναι πολύ ευαίσθητη στην ύπαρξη διαλυμένου αέρα, ακόμη και σε πολύ μικρές ποσότητες που μειώνουν ανεπαίσθητα τον βαθμό κορεσμού (π.χ. ακόμη και σε 99.5-99.9%)

Σε αυτή την περίπτωση ισχύει προσεγγιστικά (Richart, Wood & Hall, 1970) .....

$$B_w = \frac{B_{wo}}{Sr + (1 - Sr) (B_{wo} / B_a)} \ll B_{wo}$$

$B_{wo}$  = Μέτρο ογκομετρικής παραμόρφωσης του καθαρού νερού των πόρων  
( $\approx 2 \cdot 10^6 \text{ kPa}$ )

$B_a$  = Μέτρο ογκομετρικής παραμόρφωσης του αέρα ( $\approx 10^2 \text{ kPa}$ )

$Sr$  = Βαθμός Κορεσμού

(βλ. Άσκηση 3.2)



### 3.3.2 Εμπειρικές Σχέσεις Υπολογισμού της Ταχύτητας $C_s$ για εδαφικούς σχηματισμούς.....

Η ταχύτητα  $C_p$  υπολογίζεται ακολούθως έμμεσα, ως.....

$$C_p = C_s [2(1-\nu)/(1-2\nu)]^{1/2} \text{ και } \nu \approx 1/4 \text{ για ξηρά ή μερικώς κορεσμένα εδάφη,}$$

και ως  $C_p \approx 1500 \text{ m/s}$  για κορεσμένα εδάφη (με  $S_r > 99.8\%$ )

#### $C_s - N_{SPT}$

Η γενική μορφή αυτών των εμπειρικών σχέσεων είναι .....

$$C_s \text{ (m/s)} = A \cdot (N_{SPT} \cdot C_N \cdot C_E)^B D^C$$

$$C_N = \text{διόρθωση βάθους} = \left( \sigma'_{VO} / p_a \right)^{-0.50} \leq 1.70$$

$p_a$  = ατμοσφαιρική πίεση ( ίδιες μονάδες με το  $\sigma'_{VO}$  )

$C_E$  = διόρθωση ενέργειας κρούσης

( εξαρτάται από την Χώρα προέλευσης της σχέσης , βλ.Πίνακα )

$D$  = βάθος μέτρησης (σε m)

$A, B, C$  = σταθερές που εξαρτώνται από τον τύπο του εδάφους ( βλ.Πίνακα )

$$C_s \text{ (m/s)} = A \cdot (N_{SPT} \cdot C_N \cdot C_E)^B D^C$$

	A	B	C	έδαφος
Ohta & Goto, 1976 (Japan) $C_E = 1.15 - 1.30$	79	0.17	0.25	Άργιλοι
	86	0.17	0.25	Άμμοι
	91	0.17	0.25	Χονδρόκοκκες Άμμοι & Αμμοχάλικα
	115	0.17	0.25	Χάλικες
Imai & Tonuchi, 1981 (Japan) $C_N = 1.0$ $C_E = 1.15 - 1.30$	118	0.266	-	Άργιλοι & Μάργες
	99	0.284	-	Άμμοι & Αμμοχάλικα
Tsiambaos & Sabatakakis, 2011(Ελλάδα) $C_E = 1.00$	112	0.324	-	Αργιλώδες
	89	0.370	-	Ιλυώδες
	80	0.365	-	Αμμώδες

$C_S - q_{CPT}$ 

Η γενική μορφή αυτών των εμπειρικών σχέσεων είναι .....

$$C_S (m/s) = A \cdot (q_{CPT})^B (\sigma'_{VO})^C$$

$q_{CPT}$  = αντίσταση αιχμής κώνου (σε MPa)

$\sigma'_{VO}$  = κατακόρυφη ενεργός γεωστατική τάση (σε kPa)

$A, B, C$  = σταθερές που εξαρτώνται από τον τύπο του εδάφους ( βλ.Πίνακα )

	A	B	C	έδαφος
Rix & Stokoe, 1991	72	0.125	0.188	Χαλαζιακή Άμμος
Mayne & Rix, 1993	94	0.388	0.00	Άργιλος
Tsiambaos & Sabatakakis, 2011	194	0.258	0.00	Άμμος
	176	0.557	0.00	Άργιλος



## Ελαστικό Μέτρο Διάτμησης $G_o (= \rho \cdot C_s^2)$

✚ Για όλα τα εδάφη .....

$$G_o = 625 \cdot p_a \cdot F(e) \cdot OCR^k \cdot \left( \frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^n$$

$p_a$  = ατμοσφαιρική πίεση (1 kgr/cm<sup>2</sup>, 10 t/m<sup>2</sup> ή 100 kPa)

$$\sigma'_m = \text{μέση ενεργός γεωστατική τάση} = \frac{1 + 2k_o}{3} \sigma'_{vo}$$

$$F(e) = \frac{1}{0.3 + 0.7e^2} \approx \frac{1}{e^{1.3}}$$

$$n \approx 0.50 (0.40 - 0.60)$$

$$OCR = \text{λόγος προφόρτισης} = \sigma'_{v,max} / \sigma'_{v,o} (\geq 1.0)$$

Δείκτης Πλασιμότητας PI (%)	0	20	40	60	80	≥ 100
εκθέτης k	0.00	0.18	0.30	0.41	0.48	0.50

(Hardin & Drnevich 1972, Hardin 1978, Jamiolkowski et al. 1991)

✚ Για κορεσμένα αργιλικά εδάφη .....  
(Larsson & Mulabdic, 1991)

$$G_o = \left( 250 + \frac{20000}{PI} \right) S_u$$

$S_u$  = αστράγγιστη διατμητική αντοχή

$PI$  = δείκτης πλασιμότητας (%)



### 3.3.3 Μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης $C_S$ και $C_P$ Επιτόπου (στο πεδίο) .....

Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες **επιτόπου** δοκιμές είναι .....

ΜΕΘΟΔΟΣ	C	ΣΧΟΛΙΑ
Crosshole	$C_S, C_P$	Είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη και πλέον ακριβής, ανεξαρτήτως βάθους. Απαιτεί 2-3 γεωτρήσεις (1 για την πηγή και 1-2 για την λήψη των κυμάτων). Η ερμηνεία των μετρήσεων είναι άμεση.
Downhole	$C_S, C_P$	Είναι επίσης αρκετά συνηθισμένη, αλλά όχι τόσο ακριβής όσο η δοκιμή Crosshole (ειδικά για βάθη πάνω από 20m). Απαιτεί μία μόνον γεώτρηση για την λήψη των κυμάτων. Η ερμηνεία των μετρήσεων απαιτεί απλό υπολογιστικό αλγόριθμο.
Σεισμοκώνος (Seismic CPT)	$C_S, C_P$	Αποτελεί παραλλαγή της συμβατικής δοκιμής Downhole. Δεν απαιτεί γεώτρηση, αλλά εξοπλισμό Στατικής Πενετρομέτρησης (CPT). Εφαρμόζεται μόνον σε μαλακά-χαλαρά εδάφη.

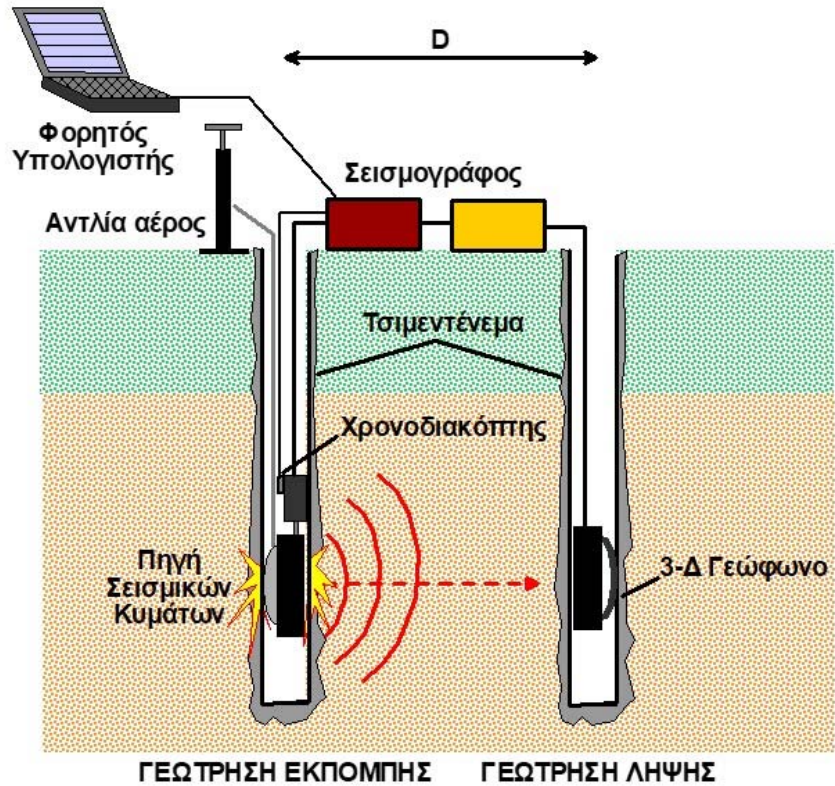
(συνέχεια.....)

ΜΕΘΟΔΟΣ	C	ΣΧΟΛΙΑ
Φασματική Ανάλυση Επιφανειακών Κυμάτων (SASW)	$C_S$	Είναι η πλέον οικονομική μέθοδος που χρησιμοποιείται σήμερα στην χώρα μας, δεδομένου ότι δεν απαιτεί γεωτρήσεις ή εξειδικευμένο εξοπλισμό (π.χ. CPT). Είναι αρκετά αξιόπιστη αλλά όχι τόσο ακριβής όσο η δοκιμή Downhole (ειδικά για βάθη πάνω από 20-25m). Η ερμηνεία των μετρήσεων απαιτεί ειδικό υπολογιστικό αλγόριθμο.
Τομογραφία Crosshole (Crosshole Tomography)	$C_S, C_P$	Εφαρμόζεται για την διερεύνηση μεγάλων σχετικά περιοχών και όχι συγκεκριμένων θέσεων όπως όλες οι προηγούμενες μέθοδοι. Απαιτεί σημαντικό αριθμό γεωτρήσεων, εμπειρία και εξειδικευμένο υπολογιστικό αλγόριθμο. Θα πρέπει πάντοτε να ελέγχεται με μια από τις προηγούμενες μεθόδους.

Από τις ανωτέρω μεθόδους, θα παρουσιασθούν συνοπτικά ακολούθως οι δοκιμές **Crosshole**, **Downhole** και **Σεισμοκώνου** που εφαρμόζονται συνηθέστερα στην Χώρα μας....

# Η δοκιμή CROSS-HOLE .....

Διάταξη δοκιμής Cross-hole με δύο γεωτρήσεις



Σεισμογράφος ES-3000  
(Geometrics Inc.)

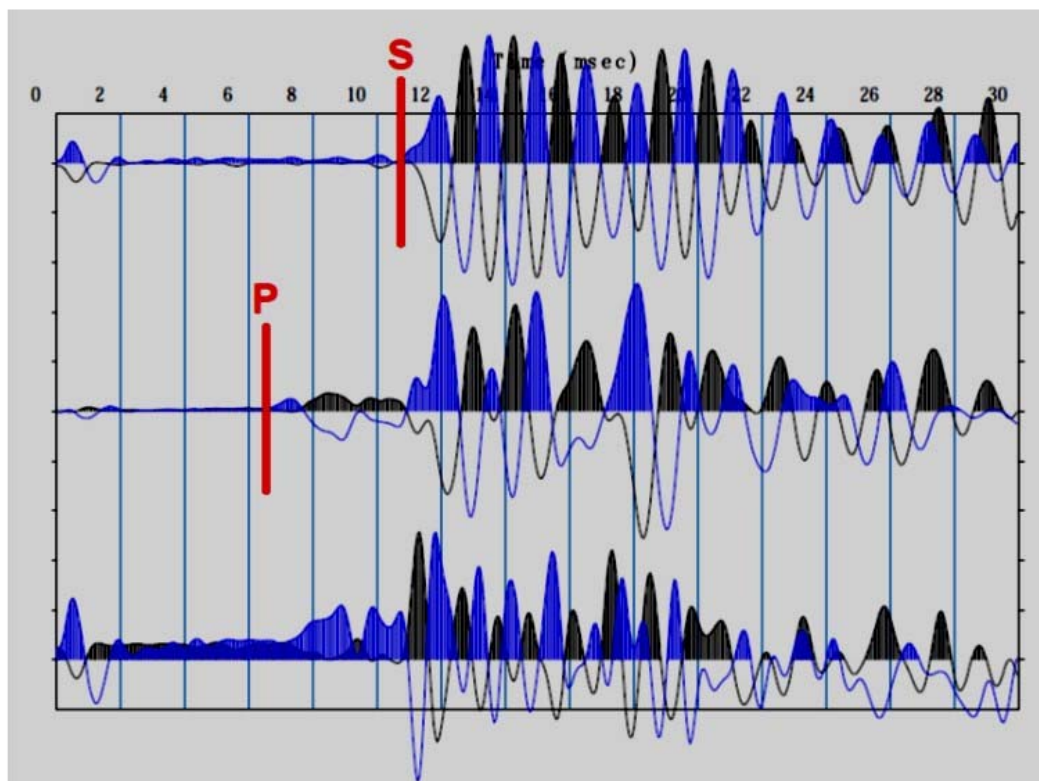


Γεώφωνο 3 καναλιών  
τύπου BHG-2  
(Geostuff Inc.)



Πηγή σεισμικών κυμάτων S (& P)  
(Soils Engineering and Geophysics Inc.)

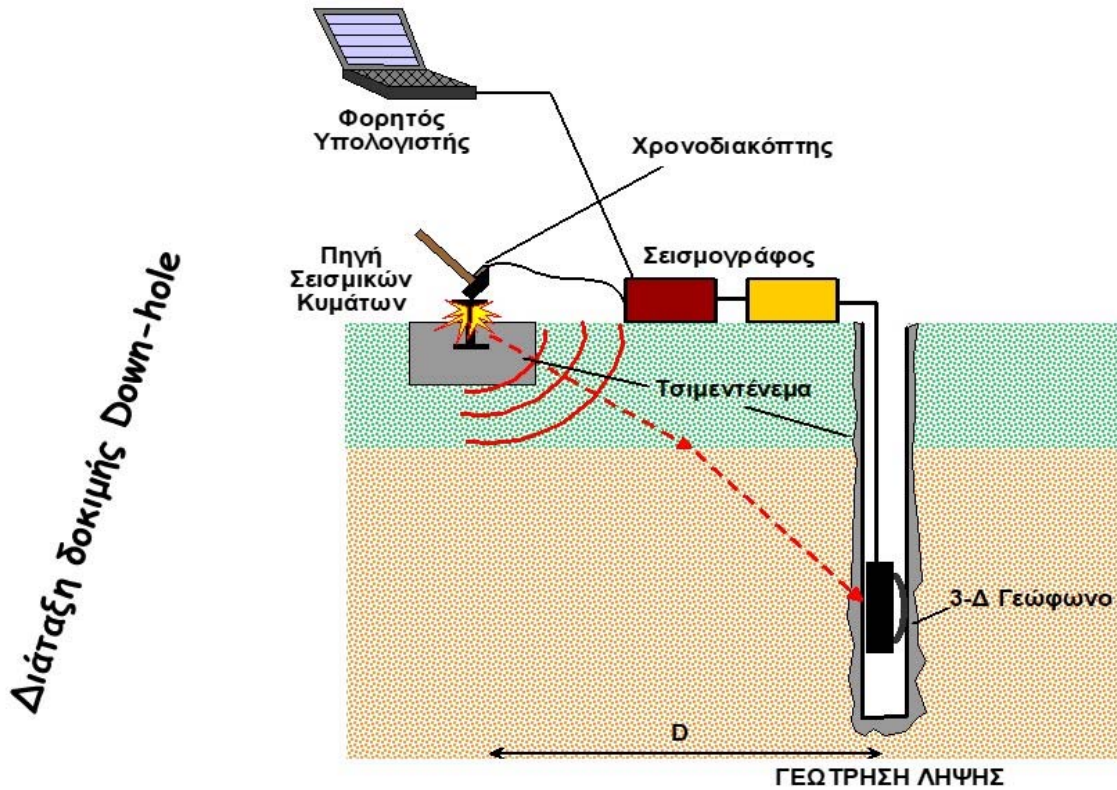
Τυπική Καταγραφή από δοκιμή Cross-hole  
(αλλά και Down-hole ή Σεισμοκώννου με κατακόρυφη κρούση στην Πηγή)



## ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....

- ✦ Είναι η **πλέον αξιόπιστη** (σήμερα) **μέθοδος** μέτρησης της ταχύτητας διάδοσης σεισμικών κυμάτων P & S.
- ✦ Οι διαθέσιμες (μηχανικές ή ηλεκτρικές) πηγές σεισμικών κυμάτων παράγουν **κυρίως την μία από τις δύο κυματομορφές (P ή S)** και δευτερευόντως την άλλη κυματομορφή (S ή P). Εξαίρεση αποτελεί η χρήση ως πηγής του δειγματολήπτη Terzaghi (της δοκιμής SPT)
- ✦ Για μεγαλύτερη ακρίβεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν **2 γεωτρήσεις λήψης**, «εν σειρά» προς την γεώτρηση εκπομπής, ειδικά όταν ως πηγή χρησιμοποιείται ο δειγματολήπτης Terzaghi (γιατί;)
- ✦ Για μεγάλα βάθη γεωτρήσεων (π.χ πάνω από 20-30m), λάθη στις μετρήσεις μπορούν να προκύψουν από την **απόκλιση** των γεωτρήσεων εκπομπής και λήψης **από την κατακορυφότητα**. Ο σχετικός έλεγχος απαιτεί ειδικό εξοπλισμό και οδηγεί σε ακριβή μέτρηση της απόστασης μεταξύ των γεωτρήσεων σε όλα τα βάθη μέτρησης.

## Η δοκιμή DOWN-HOLE .....



Προσάρτηση Χρονοδιακόπτη (trigger) στο σφυρί Παραγωγής σεισμικών κυμάτων P & S

**ΥΠΕΡ:** Απαιτεί μόνο μια γεώτρηση (λήψης) και επομένως είναι ταχύτερη και λιγότερο δαπανηρή από την δοκιμή Cross-hole.

**ΚΑΤΑ:** Η ακρίβεια των μετρήσεων είναι σχετικά μειωμένη για δύο κυρίως λόγους:

(α) Λόγω της μικρής σχετικά διαφοράς στο μήκος των κυματικών διαδρομών (~ 2m) δύο διαδοχικών μετρήσεων το οποίο απαιτεί μεγάλη ακρίβεια στους χρόνους άφιξης των κυμάτων (ιδίως των κυμάτων P)

(β) Η ένταση των κυμάτων απομειώνεται γρήγορα με το βάθος. Έτσι η αναγνώριση της άφιξης των κυμάτων γίνεται αμφίβολη για βάθη άνω το 20-25m

## Η δοκιμή Σεισμοκώνου .....

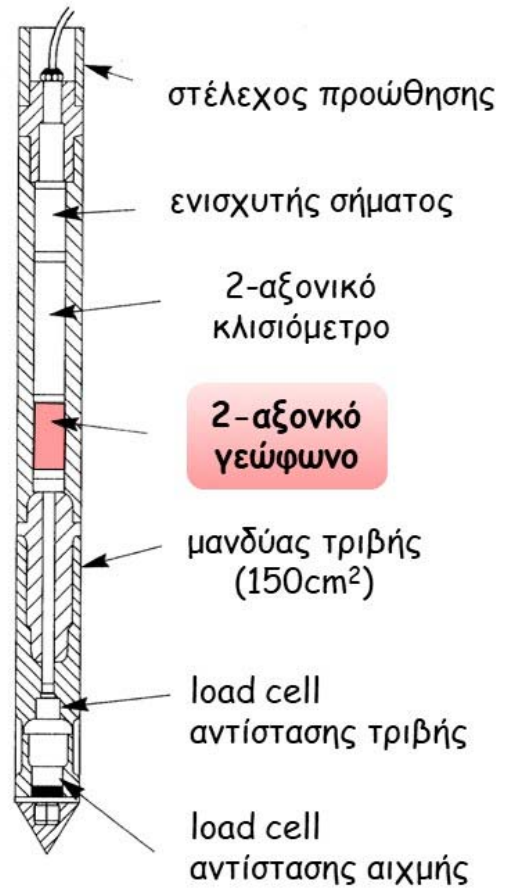
Αποτελεί ουσιαστικά παραλλαγή της κλασσικής δοκιμής Down-hole.

Η μόνη διαφορά είναι ότι η γεώτρηση λήψης έχει αντικατασταθεί από το στέλεχος της επιτόπου δοκιμής CPT, στην αιχμή του οποίου έχει τοποθετηθεί ένα 2-αξονικό (κατακόρυφο, οριζόντιο) γεώφωνο λήψης.

**ΥΠΕΡ:** ταχεία και χαμηλού κόστους εκτέλεση, συνεχές πρακτικά προφίλ μετρήσεων

**ΚΑΤΑ:** μόνον για μαλακά-χαλαρά εδάφη και βάθη έως 20m περίπου

**Στέλεχος Σεισμοκώνου  
(Seismic CPT)**





### 3.3.4 Μέτρηση της ταχύτητας διάδοσης $C_S$ και $C_P$ στο Εργαστήριο .....

Οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες εργαστηριακές δοκιμές είναι .....

ΜΕΘΟΔΟΣ	C	ΣΧΟΛΙΑ
Δοκιμή Συντονισμού στήλης εδάφους (Resonant Column Test)	$C_S$	Είναι η συνηθέστερα χρησιμοποιούμενη για <u>εδάφη</u> , και εφαρμόζεται τόσο για την μέτρηση του $C_S$ όσο και για την εκτίμηση των σχέσεων $G/G_{max}$ - $\gamma$ και $\xi$ - $\gamma$ (βλ. Κεφ. 5).
Δοκιμή Πιεζο-κρυστάλλων (Piezo-electric Bender Element Test)	$C_S$	Χρησιμοποιείται επίσης για <u>εδάφη</u> . Το βασικό της πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να συνδυασθεί με τις κλασσικές δοκιμές της Εδαφομηχανικής (Τριαξονική, Απλή Διάτμηση, κλπ.)
Δοκιμή Υπερηχητικού Παλμού (Ultrasonic Pulse Test)	$C_P$	Χρησιμοποιείται μόνο σε βραχύδη δοκίμια

### Προσοχή !

Ένας σημαντικός περιορισμός των εργαστηριακών μετρήσεων της ταχύτητας μετάδοσης κυμάτων σε εδάφη είναι η **διαταραχή των δοκιμίων** (κατά την εξόρυξη και την μεταφορά στο εργαστήριο), η οποία μπορεί να αλλοιώσει σημαντικά τα αποτελέσματα.

Για τον λόγο αυτό, στην πράξη, η μέτρηση των  $C_S$  και  $C_P$  γίνεται κατά προτεραιότητα με επιτόπου γεωφυσικές δοκιμές, όπως αυτές που περιγράφονται συνοπτικά στα ακόλουθα.



## 3.4 ΑΣΚΗΣΕΙΣ

### Άσκηση 3.1:

Το ελεύθερο άκρο απειρομήκους ράβδου μετατοπίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση ( $U$  σε cm &  $t$  σε sec):

$$\begin{array}{lll} U=0 & \text{για} & t \leq 0 \\ U=t & \text{για} & 0 \leq t \leq 0.1s \\ U=0.2-t & \text{για} & 0.1s \leq t \leq 0.2s \\ U=0 & \text{για} & 0.2s \leq t \end{array}$$

Να υπολογίσετε την μετατόπιση κατά μήκος της ράβδου στην χρονική στιγμή  $t=0.3s$ , εάν η ταχύτητα διαδόσης του κύματος είναι  $300m/s$ .

(από «Σημειώσεις Εδαφοδυναμικής» Γ. Γκαζέτα)

### Άσκηση 3.2:

(α) Να υπολογισθεί και να σχεδιασθεί η μεταβολή της ταχύτητας  $C_s$  με τον βαθμό κορεσμού  $S_r$  ( $=0-100\%$ ) σε δοκίμιο άμμου με δείκτη πόρων  $e=0.70$  και ιστροπική στερεοποίηση υπό  $\sigma'_{vo}=\sigma'_{ho} = 100kPa$ .

(β) Να γίνει το ίδιο και για την ταχύτητα  $C_p$

### Άσκηση 3.3:

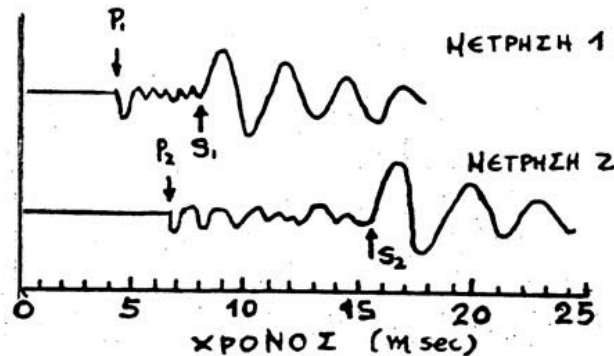
Να υπολογισθεί και να σχεδιασθεί η μεταβολή με το βάθος των ταχυτήτων  $C_s$  και  $C_p$ , εντός στρώματος πυκνής άμμου με δείκτη πόρων  $e=0.65$  και ειδικό βάρος στερεών κόκκων  $\gamma_{στ}=27kN/m^3$ .

Το πάχος του στρώματος της άμμου είναι  $20m$  και η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα εντοπίσθηκε σε βάθος  $5m$  από την ελεύθερη επιφάνεια.

### Άσκηση 3.4:

Κατά την εκτέλεση δοκιμής Cross-hole με δύο γεωτρήσεις λήψεως έγιναν οι καταγραφές του σχήματος. Εάν η απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων λήψεως είναι 5.70m...

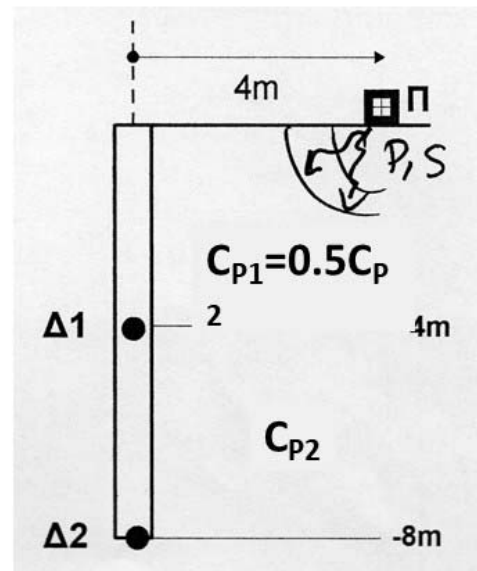
- (α) Να υπολογισθούν οι ταχύτητες  $C_p$  και  $C_s$
- (β) Να υπολογισθεί ο λόγος του Poisson  $\nu$
- (γ) Είναι το έδαφος κορεσμένο ή ακόρεστο;



### Άσκηση 3.5:

Κατά την εκτέλεση δοκιμής Downhole εκπέμπονται κύματα P και S από πηγή (Π) στην επιφάνεια του εδάφους και μετρείται ο χρόνος που απαιτείται για να φθάσουν σε δύο δέκτες:  $\Delta 1$  σε βάθος 4m και  $\Delta 2$  σε βάθος 8m.

- (α) Να σχεδιασθεί η διαδρομή διάδοσης των κυμάτων P, από την Πηγή στους δυο Δέκτες, εάν είναι γνωστό ότι η μέση ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων αυτών στο άνω στρώμα είναι η μισή από ότι στο κάτω.
- (β) Να υπολογισθεί ο χρόνος άφιξης των κυμάτων P στον δέκτη  $\Delta 2$  εάν ο αντίστοιχος χρόνος άφιξης στον δέκτη  $\Delta 1$  είναι 15msec.
- (γ) Να υπολογισθούν οι χρόνοι διάδοσης κυμάτων S στους δέκτες  $\Delta 1$  και  $\Delta 2$  εάν είναι επιπλέον γνωστό ότι το έδαφος είναι σχεδόν κορεσμένο.



**Υπόδειξη:** Θα χρειαστείτε τον Νόμο του Snell (βλ. επόμενο Κεφάλαιο) για την διάθλαση των κυματικών διαδρομών στην δι-επιφάνεια των εδαφικών στρώσεων

### Άσκηση 3.6:

Η ερμηνεία των μετρήσεων της δοκιμής Down-hole δεν είναι άμεση, όπως στην περίπτωση της δοκιμής Cross-hole, αλλά απαιτεί ένα επαναληπτικό αλγόριθμο επίλυσης. Μπορείτε να τον διατυπώσετε και να τον προγραμματίσετε (π.χ. σε περιβάλλον Excel)?

**Εφαρμογή:** Δοκιμή Downhole με απόσταση πηγής από γεώτρηση  $\delta=4\text{m}$  και λήψη μετρήσεων των χρόνων «πρώτης άφιξης» κυμάτων  $S$  ανά δύο μέτρα βάθους:

$Z$ (m)	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00
$t_S$ (msec)	29.8	37.8	43.51	51.51	56.51

Να υπολογισθεί η κατανομή της ταχύτητας  $C_S$  με το βάθος και να σχεδιασθούν οι αντίστοιχες κυματικές διαδρομές.

**Υπόδειξη:** Και σε αυτή την άσκηση, θα χρειαστείτε τον Νόμο του Snell (βλ. επόμενο Κεφάλαιο) για την διάθλαση των κυματικών διαδρομών στην δι-επιφάνεια των εδαφικών στρώσεων

### Άσκηση 3.7:

Με μεθοδολογία ανάλογη με εκείνη που αναπτύχθηκε στο μάθημα για τα κύματα  $P$ , να δειχθούν οι τάσεις που ασκούνται σε στοιχείου συνεχούς μέσου κατά την διάδοση διατμητικού κύματος  $S$ , να διατυπωθεί η αντίστοιχη κυματική εξίσωση και να αποδειχθεί ότι η ταχύτητα διάδοσης κύματος  $S$  δίνεται από την σχέση  $C_S = (G/\rho)^{1/2}$ .  
[Νοέμβριος 2018]

### Άσκηση 3.8:

Για την εδαφική τομή του σχήματος, να σχεδιασθεί η μεταβολή με το βάθος (ανά 2m) της ταχύτητας  $C_S$  και (κατά προσέγγιση) της ταχύτητας  $C_P$ .  
[Νοέμβριος 2018]

