

# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση



**Απόκριση Θεμελιώσεων με Πασσάλους  
υπό Οριζόντια Φόρτιση**

---

Αιμίλιος Κωμοδρόμος, Καθηγητής, Εργαστήριο Υ.Γ.Μ.  
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας | Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

## Απόκριση Πασσάλων υπό Οριζόντια Φόρτιση

Μενονωμένος Πάσσαλος      Ομάδα Πασσάλων

### Φέρουσα Ικανότητα

Μέθοδος Broms

### Υπολογισμός Καμπύλης Απόκρισης

Μέθοδος  $\rho$ - $\gamma$

3D ανάλυση

## Απόκριση Πασσάλων υπό Οριζόντια Φόρτιση

Μενονωμένος Πάσσαλος      Ομάδα Πασσάλων

☰ Φέρουσα Ικανότητα

Μέθοδος Broms

☰ Υπολογισμός Καμπύλης Απόκρισης

Μέθοδος  $\rho$ - $\gamma$

3D ανάλυση

Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

---

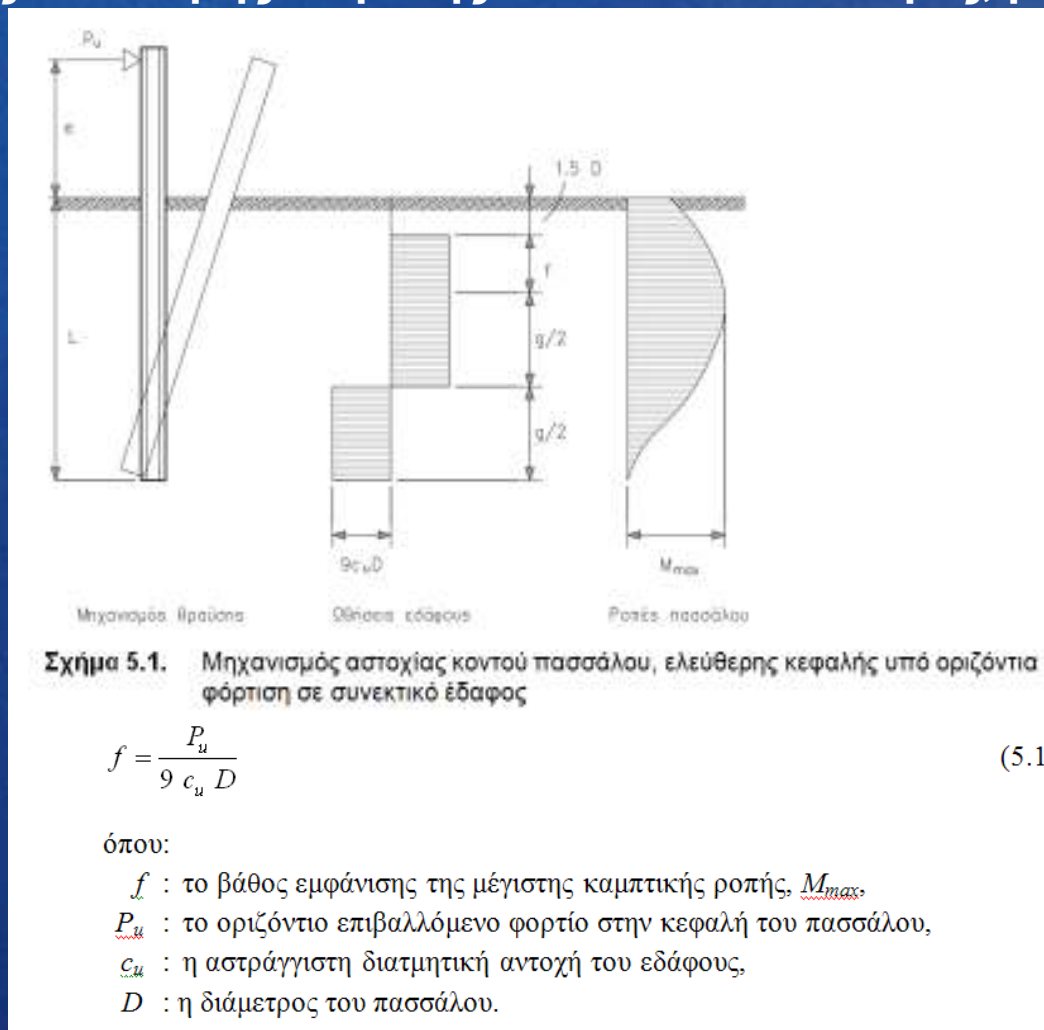
Φέρουσα Ικανότητα Πασσάλου σε Οριζόντια Φόρτιση  
Μέθοδος Broms

Εμπειρική μέθοδος με  
εξ αρχής θεώρηση μηχανισμών αστοχίας

# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Φέρουσα Ικανότητα Πασσάλου σε Οριζόντια Φόρτιση Μέθοδος Broms

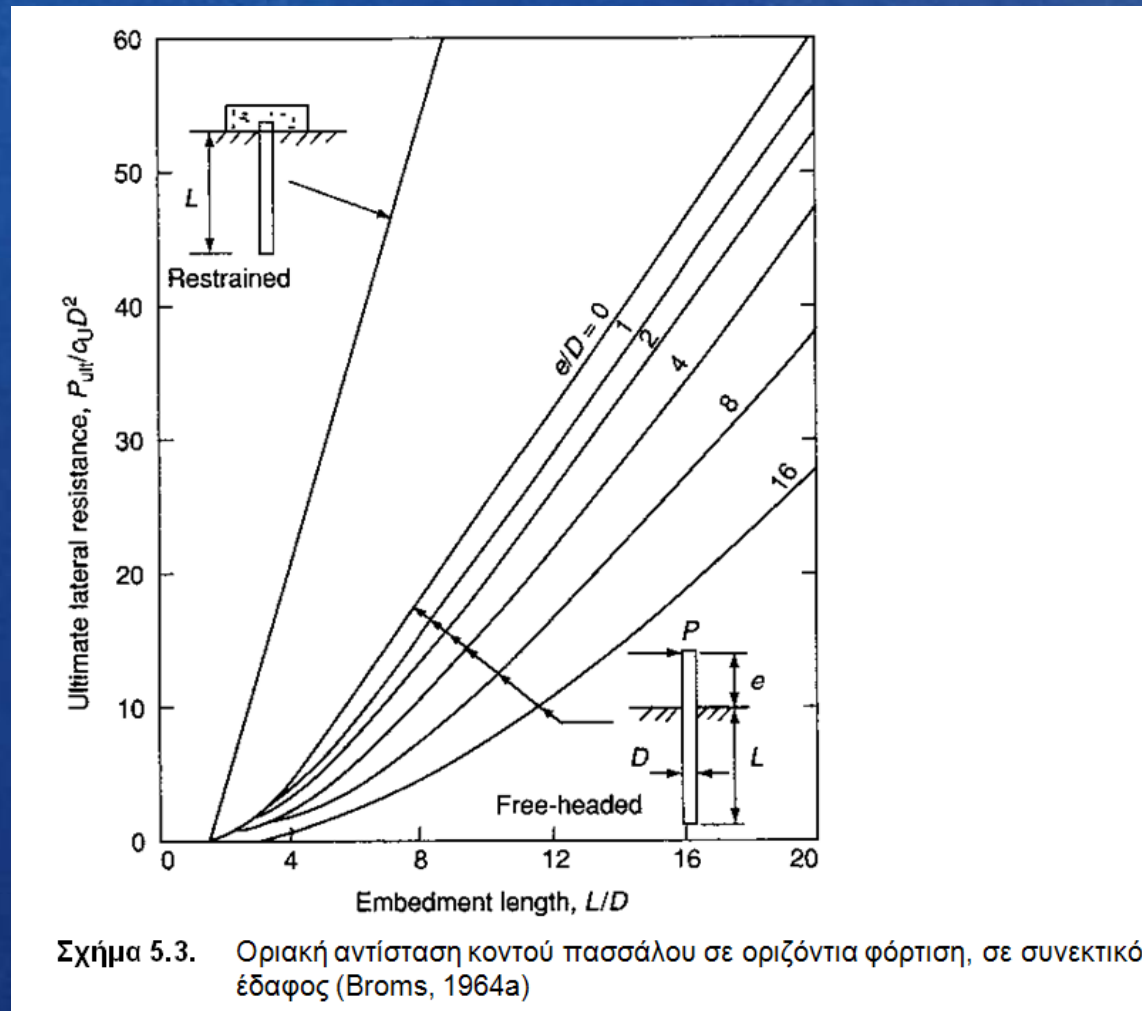
Πάσσαλος Ελεύθερης Κεφαλής σε συνεκτικό έδαφος, μικρού μήκους



# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Φέρουσα Ικανότητα Πασσάλου σε Οριζόντια Φόρτιση Μέθοδος Broms

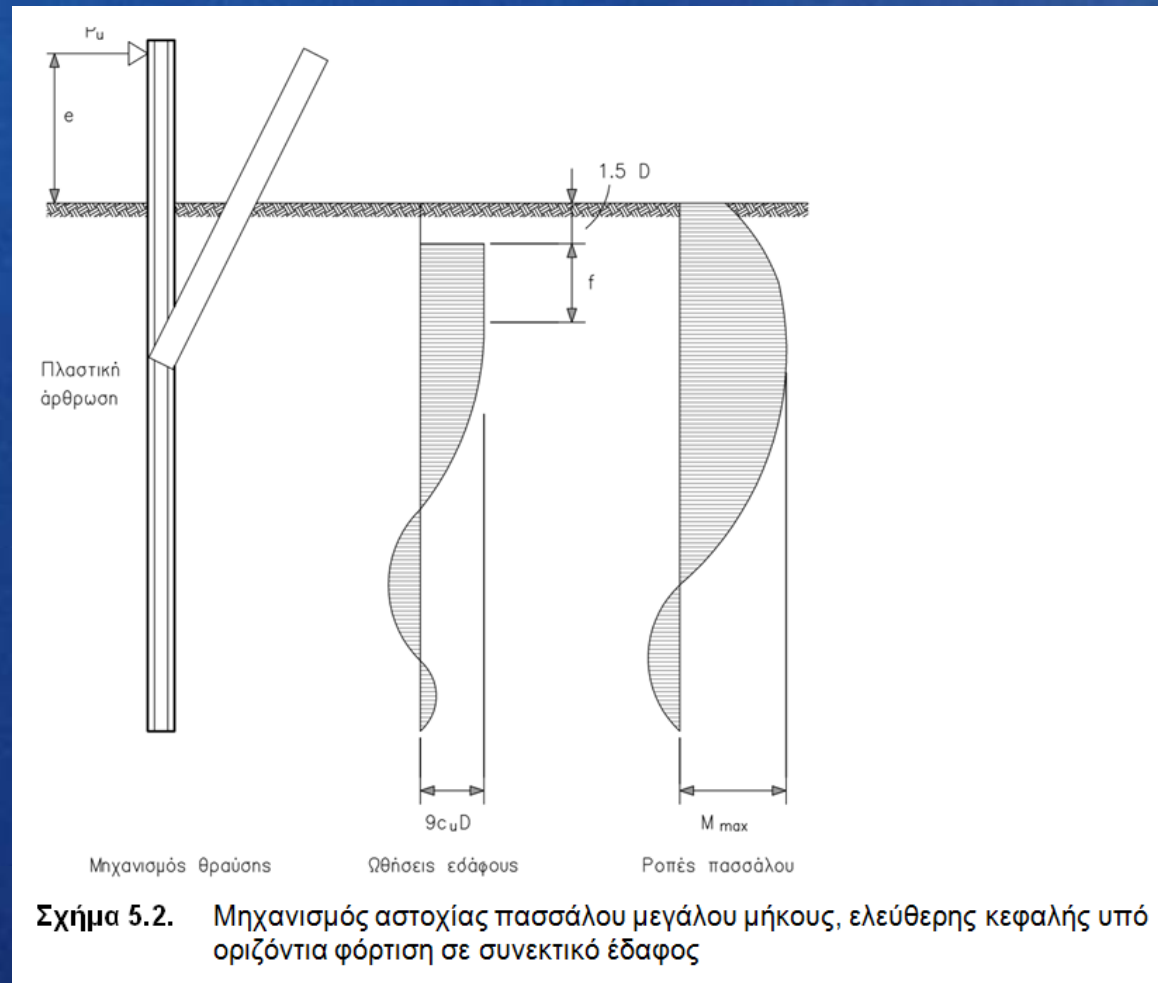
Πάσσαλος Ελεύθερης Κεφαλής σε συνεκτικό έδαφος, μικρού μήκους



# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Φέρουσα Ικανότητα Πασσάλου σε Οριζόντια Φόρτιση Μέθοδος Broms

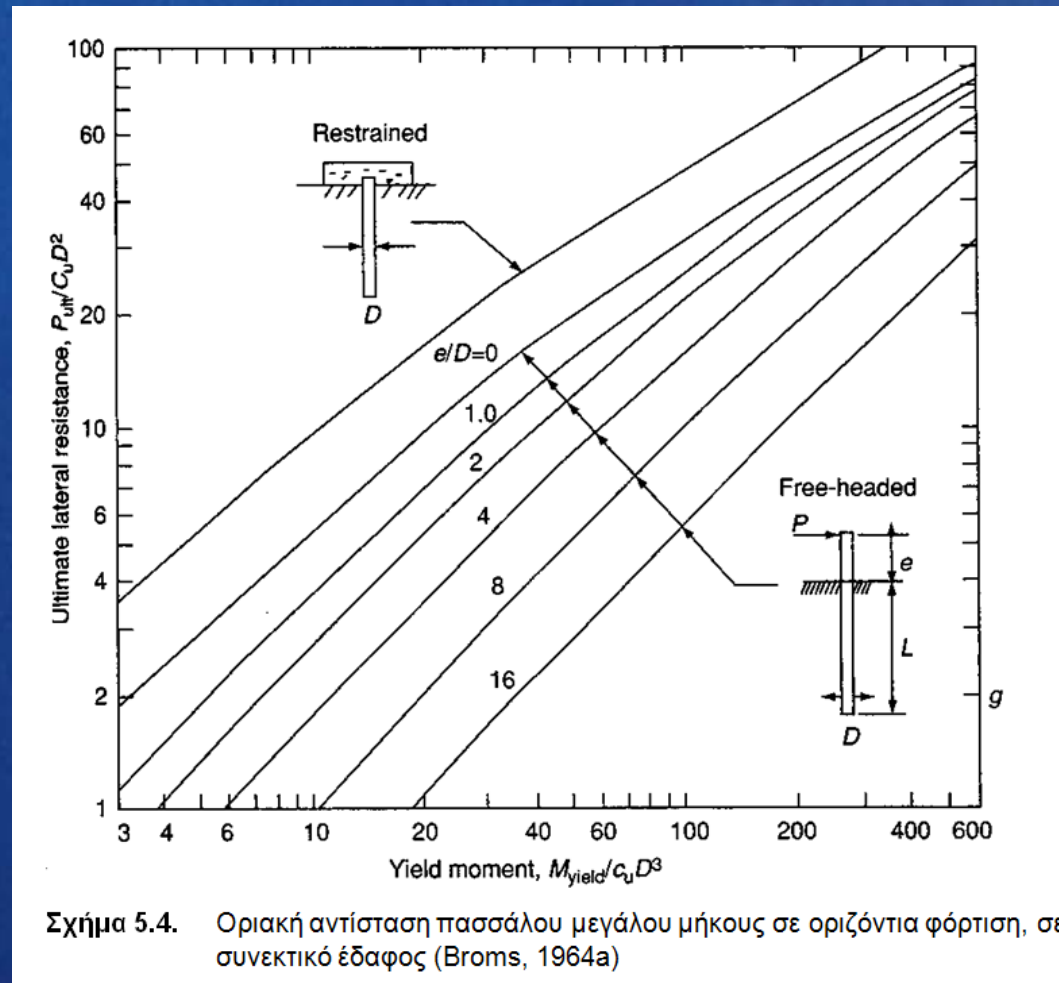
Πάσσαλος Ελεύθερης Κεφαλής σε συνεκτικό έδαφος, μεγάλου μήκους



# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Φέρουσα Ικανότητα Πασσάλου σε Οριζόντια Φόρτιση Μέθοδος Broms

Πάσσαλος Ελεύθερης Κεφαλής σε συνεκτικό έδαφος, μεγάλου μήκους

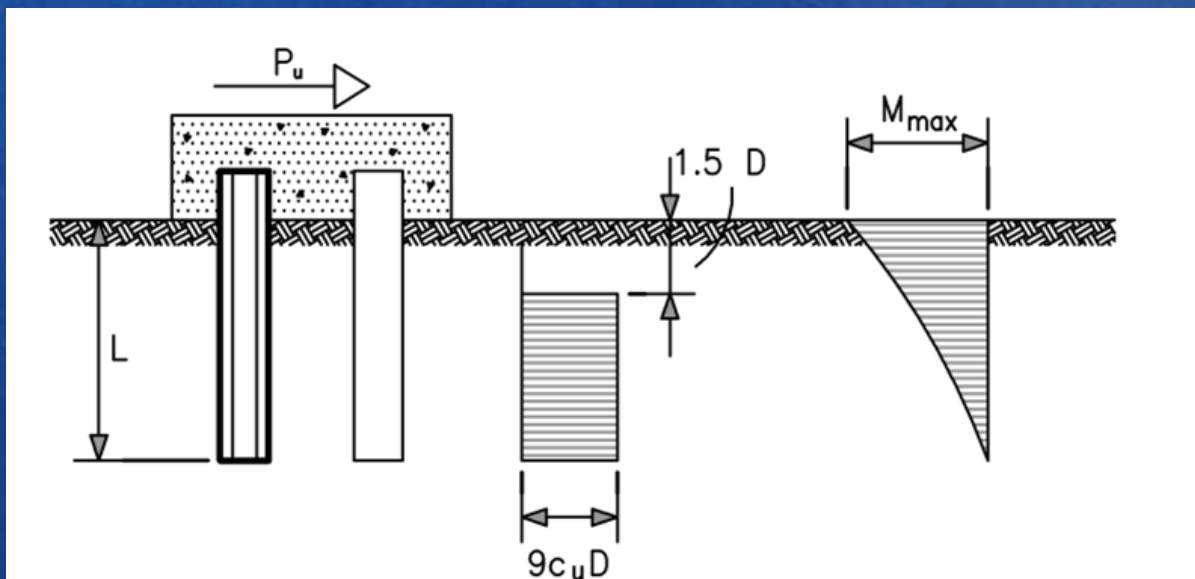




# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Φέρουσα Ικανότητα Πασσάλου σε Οριζόντια Φόρτιση Μέθοδος Broms

Πάσσαλος Πακτωμένης Κεφαλής σε συνεκτικό έδαφος, μικρού μήκους



Μηχανισμός θραύσης

Ωθήσεις εδάφους

Ροπές πασσάλου

Σχήμα 5.5. Μηχανισμός αστοχίας κοντού πασσάλου πακτωμένης κεφαλής υπό οριζόντια φόρτιση σε συνεκτικό έδαφος

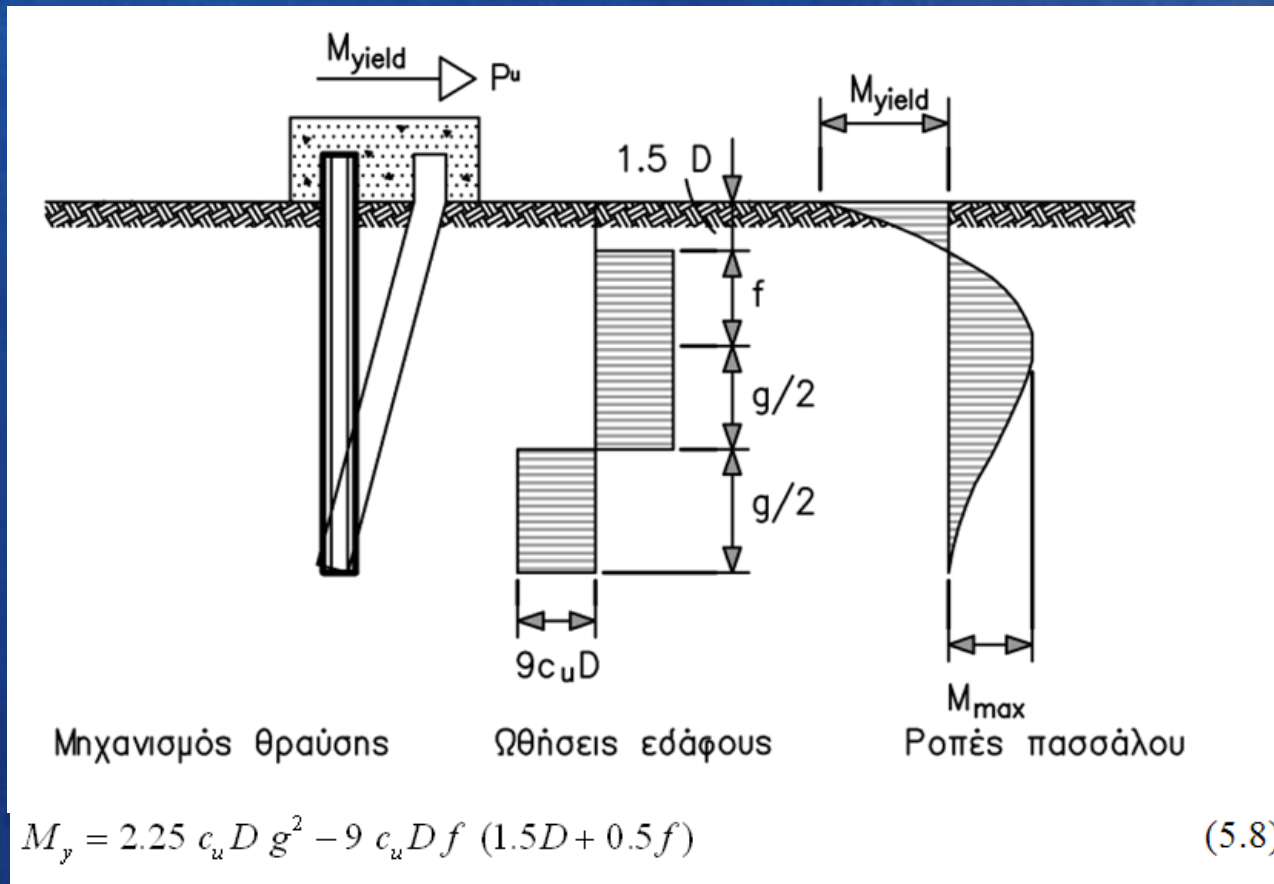
$$P_u = 9c_u D(L - 1.5D) \quad (5.5)$$

$$M_{\max} = P_u(0.5L + 0.75D) \quad (5.6)$$

# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Φέρουσα Ικανότητα Πασσάλου σε Οριζόντια Φόρτιση Μέθοδος Broms

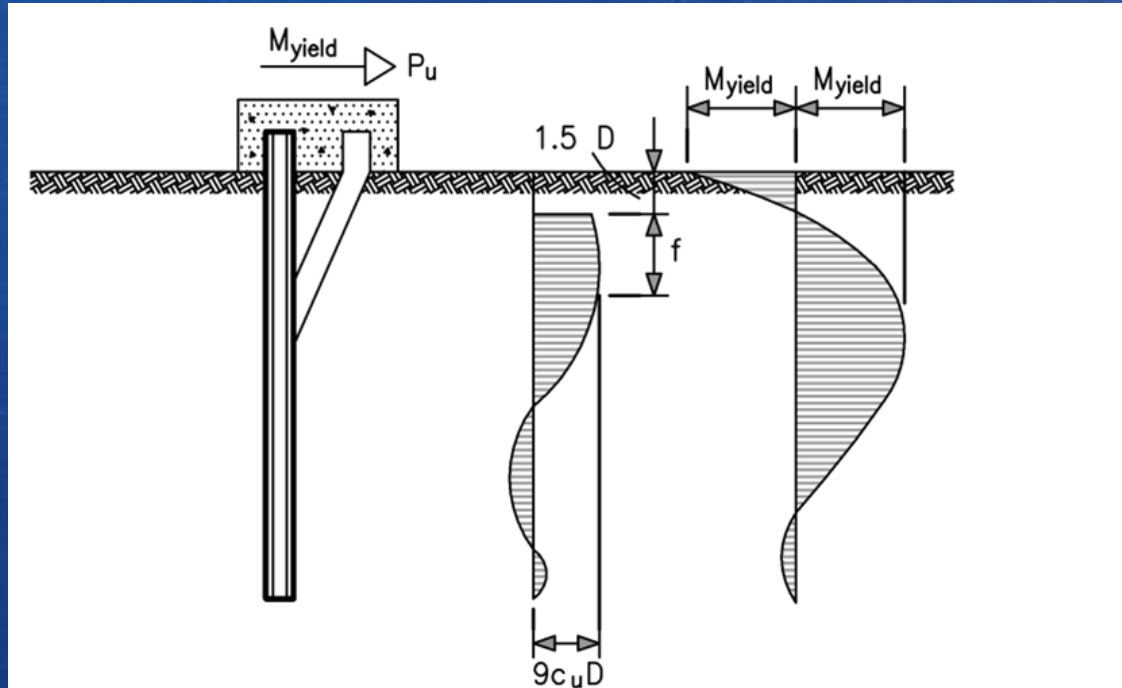
Πάσσαλος Πακτωμένης Κεφαλής σε συνεκτικό έδαφος, ενδιάμεσου μήκους



# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Φέρουσα Ικανότητα Πασσάλου σε Οριζόντια Φόρτιση Μέθοδος Broms

Πάσσαλος Πακτωμένης Κεφαλής σε συνεκτικό έδαφος, μεγάλου μήκους



Μηχανισμός θραύσης

Ωθήσεις εδάφους

Ροπές πασσάλου

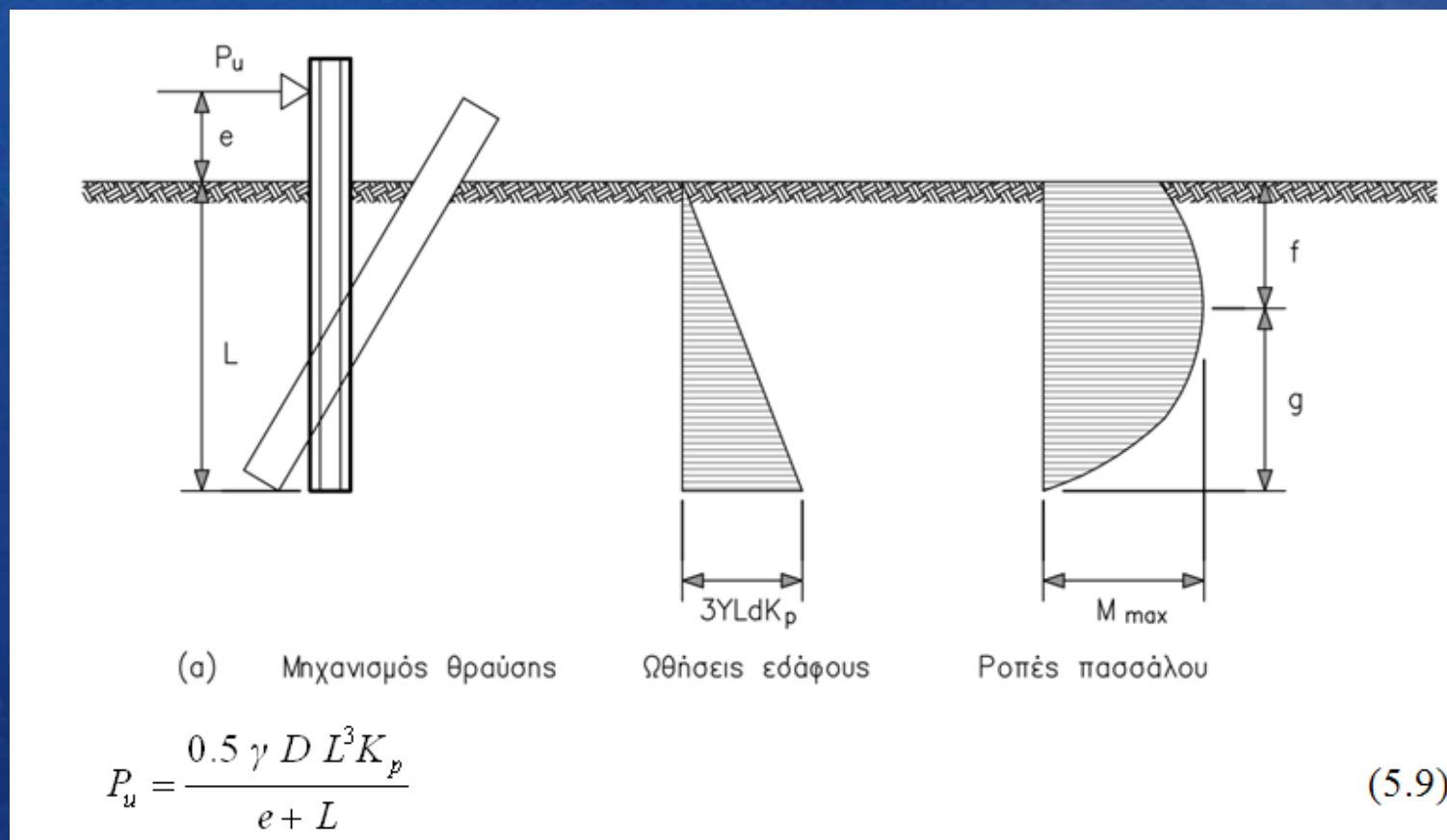
**Σχήμα 5.7.** Μηχανισμός αστοχίας πασσάλου πακτωμένης κεφαλής, μεγάλου μήκους, υπό οριζόντια φόρτιση σε συνεκτικό έδαφος

$$P_u = \frac{2M_y}{1.5D + 0.5f} \quad (5.7)$$

# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Φέρουσα Ικανότητα Πασσάλου σε Οριζόντια Φόρτιση Μέθοδος Broms

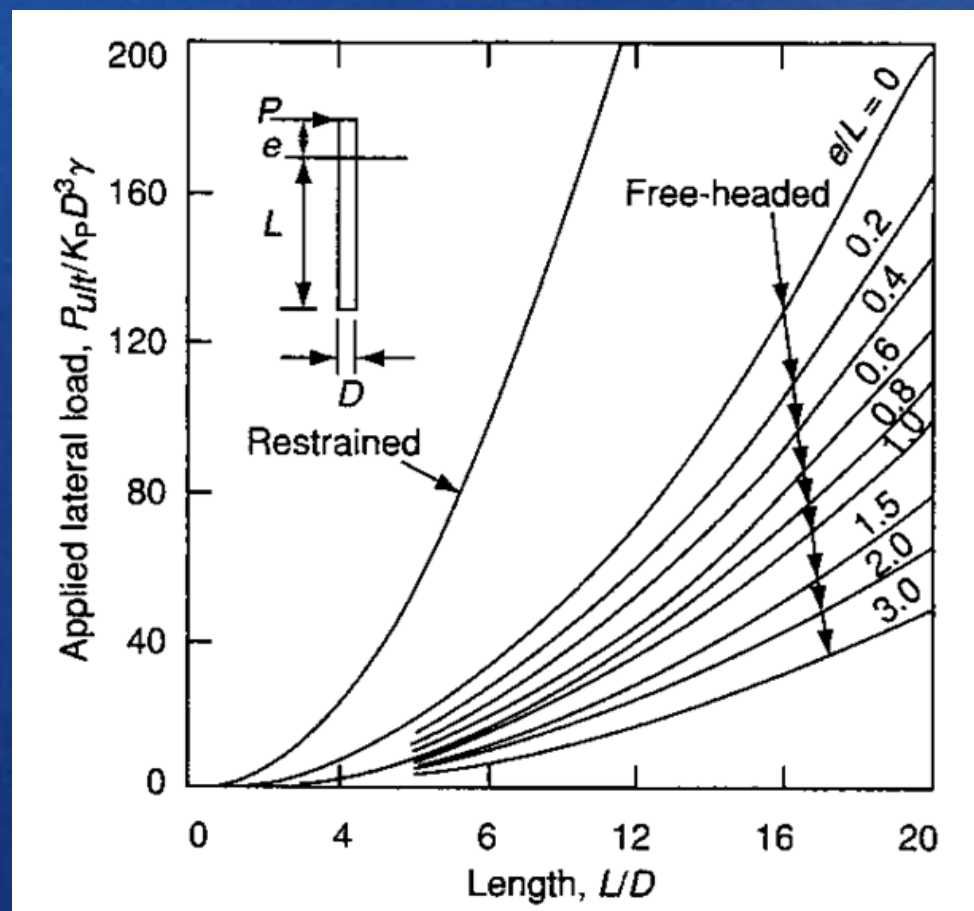
Πάσσαλος Ελεύθερης Κεφαλής σε μη συνεκτικό έδαφος, μικρού μήκους



# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Φέρουσα Ικανότητα Πασσάλου σε Οριζόντια Φόρτιση Μέθοδος Broms

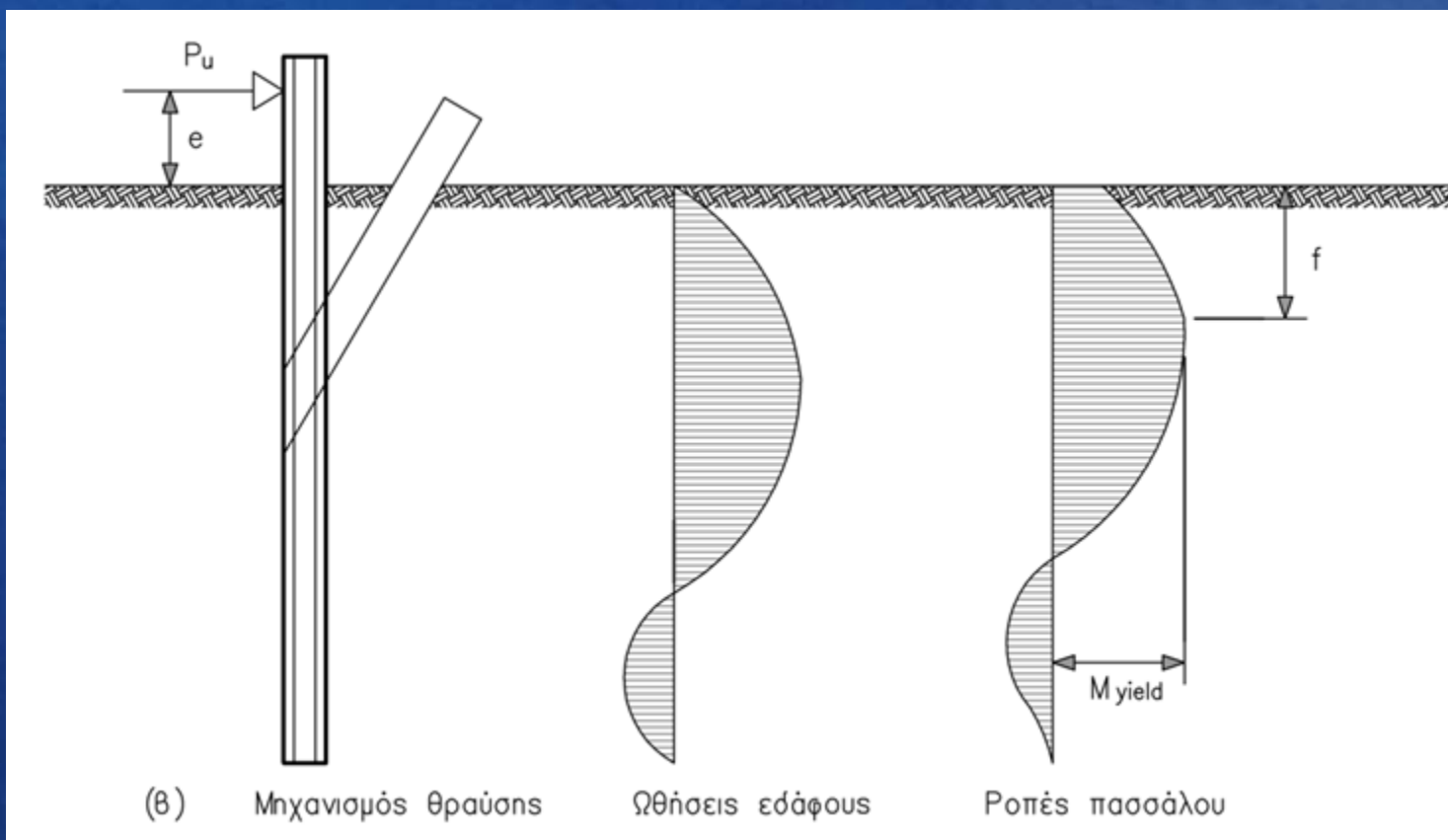
Πάσσαλος Ελεύθερης Κεφαλής σε μη συνεκτικό έδαφος, μικρού μήκους



# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Φέρουσα Ικανότητα Πασσάλου σε Οριζόντια Φόρτιση Μέθοδος Broms

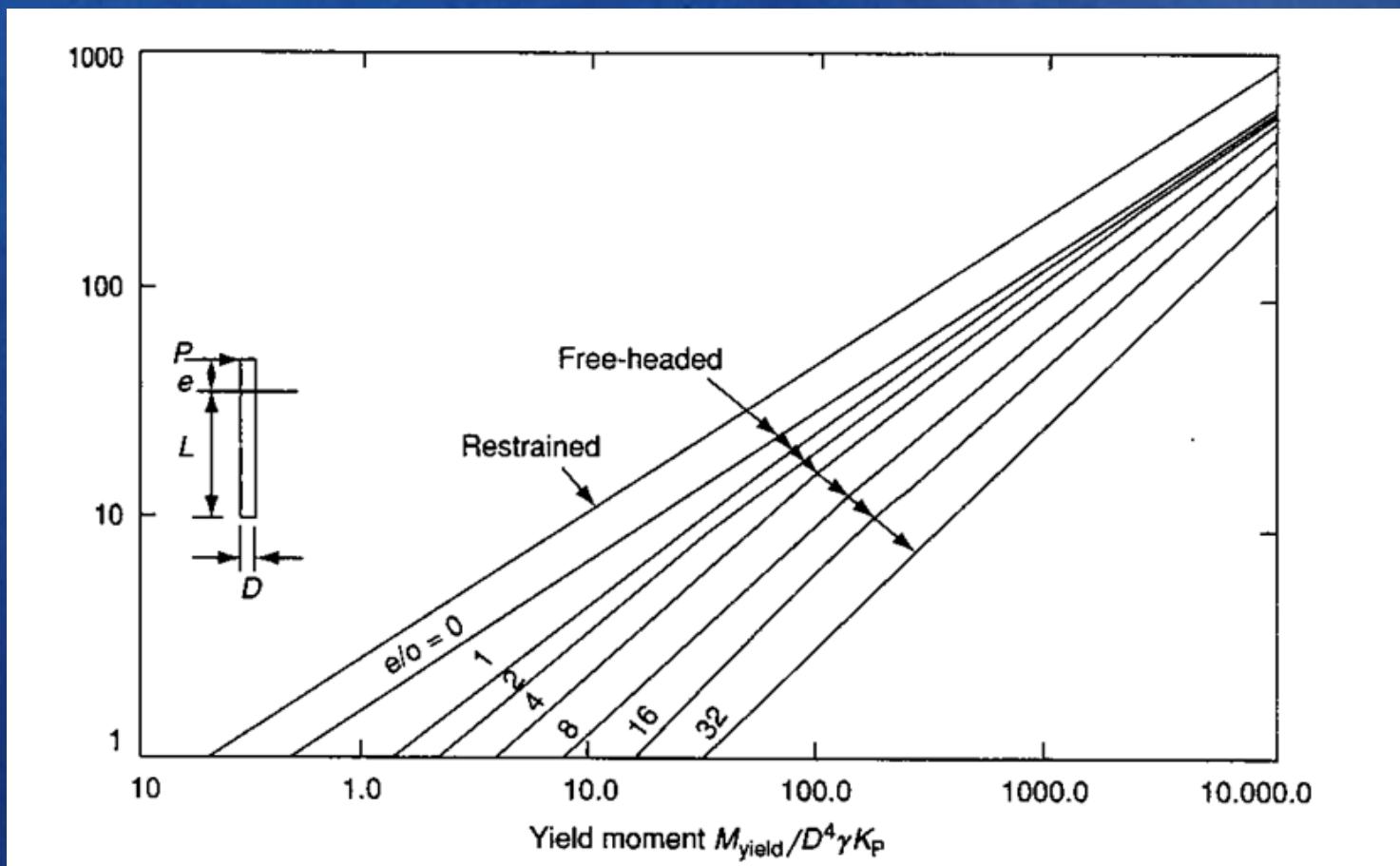
Πάσσαλος Ελεύθερης Κεφαλής σε μη συνεκτικό έδαφος, μεγάλου μήκους



# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Φέρουσα Ικανότητα Πασσάλου σε Οριζόντια Φόρτιση Μέθοδος Broms

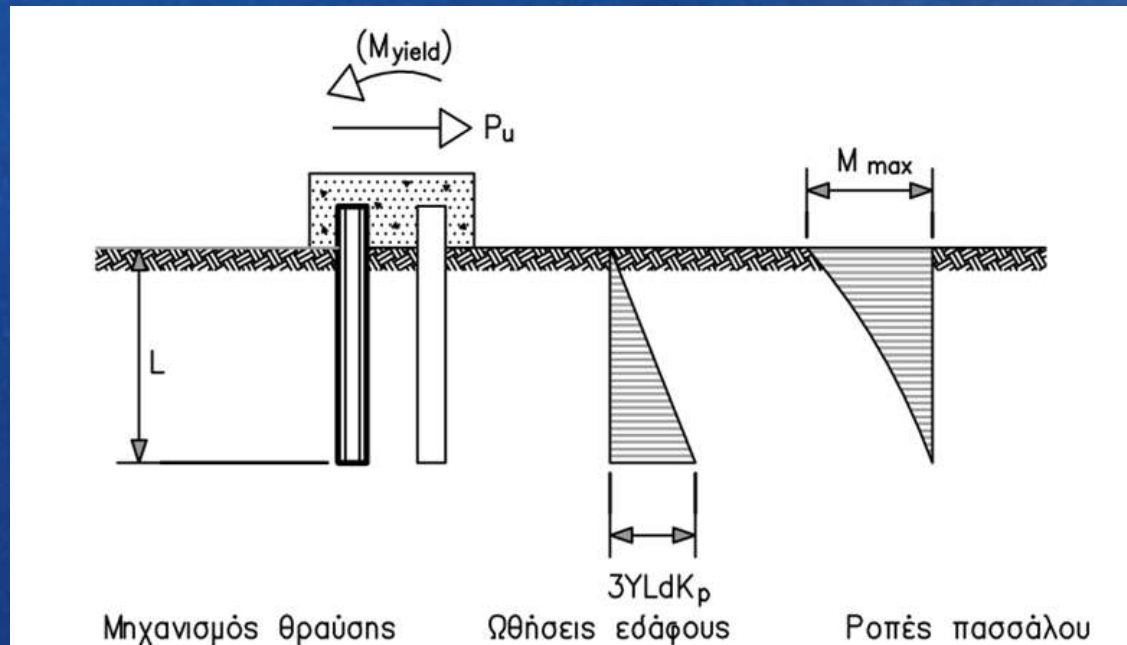
Πάσσαλος Ελεύθερης Κεφαλής σε μη συνεκτικό έδαφος, μεγάλου μήκους



# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Φέρουσα Ικανότητα Πασσάλου σε Οριζόντια Φόρτιση Μέθοδος Broms

Πάσσαλος Πακτωμένης Κεφαλής σε μη συνεκτικό έδαφος, μικρού μήκους



**Σχήμα 5.11.** Μηχανισμός αστοχίας κοντού πασσάλου πακτωμένης κεφαλής υπό οριζόντια φόρτιση σε μη συνεκτικό έδαφος

$$P_u = 1.5 \gamma L^2 D K_p \quad (5.13)$$

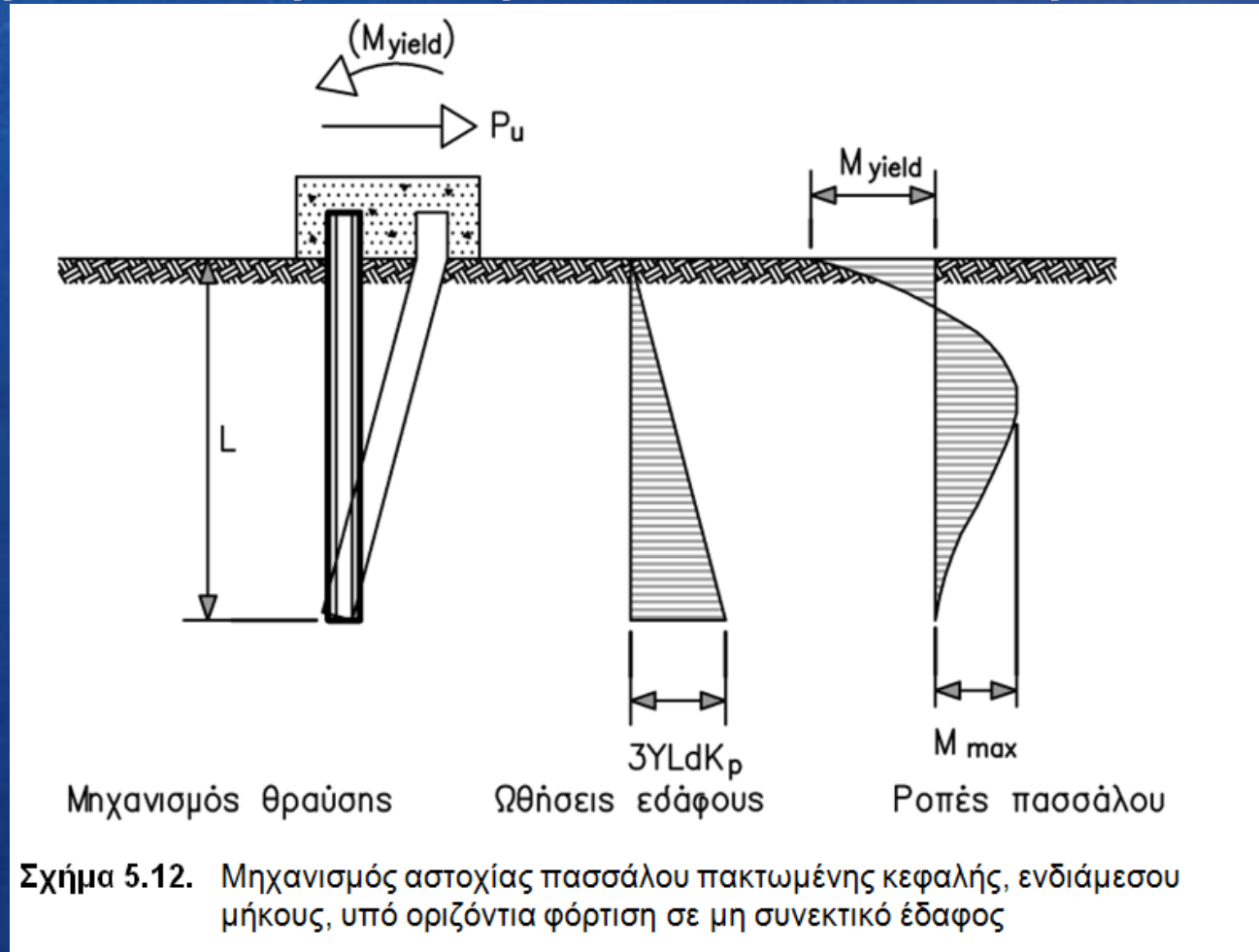
$$M_{max} = \frac{2}{3} P_u L \quad (5.14)$$



# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Φέρουσα Ικανότητα Πασσάλου σε Οριζόντια Φόρτιση Μέθοδος Broms

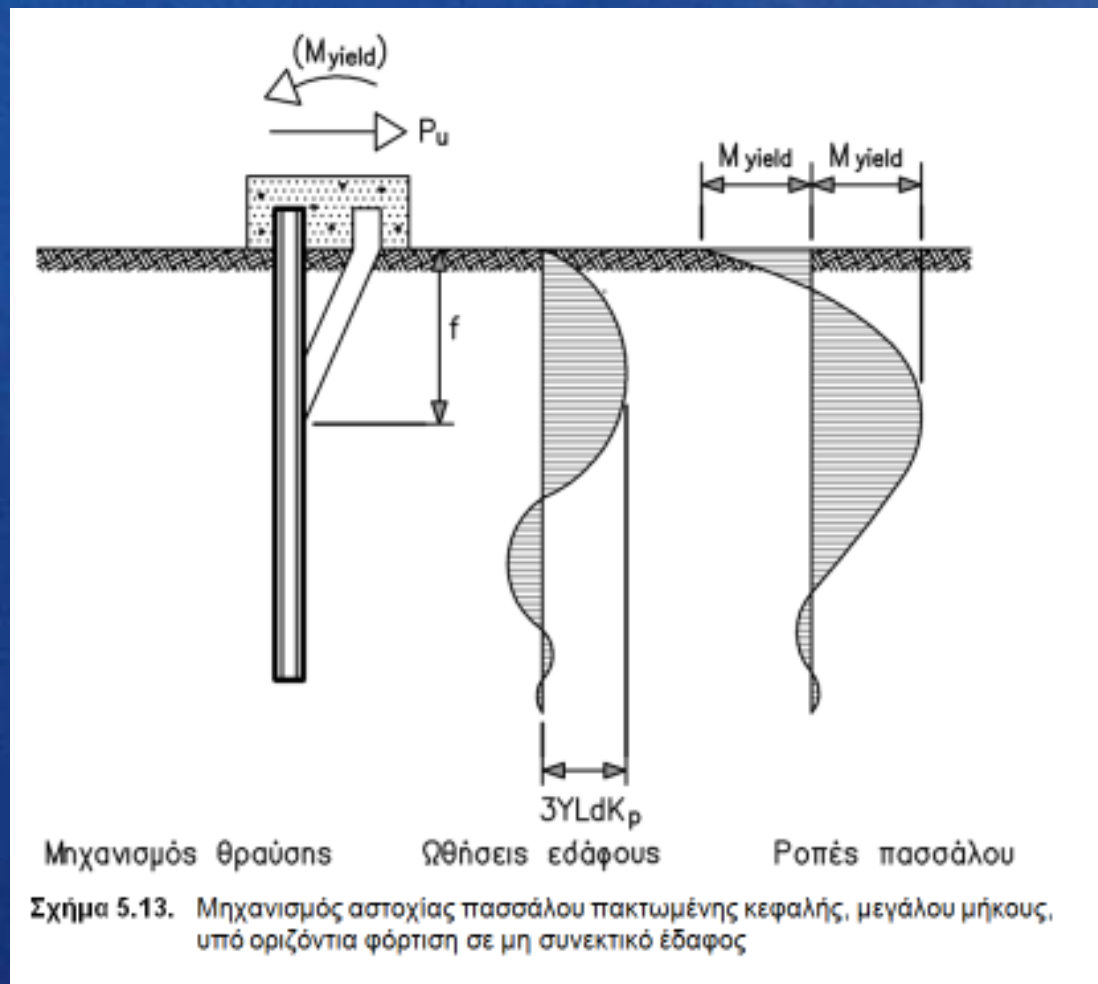
Πάσσαλος Πακτωμένης Κεφαλής σε μη συνεκτικό έδαφος, ενδιάμεσου μήκους



# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Φέρουσα Ικανότητα Πασσάλου σε Οριζόντια Φόρτιση Μέθοδος Broms

Πάσσαλος Ελεύθερης Κεφαλής σε συνεκτικό έδαφος, μεγάλου μήκους



## Απόκριση Πασσάλων υπό Οριζόντια Φόρτιση

Μενονωμένος Πάσσαλος      Ομάδα Πασσάλων

### Φέρουσα Ικανότητα

Μέθοδος Broms

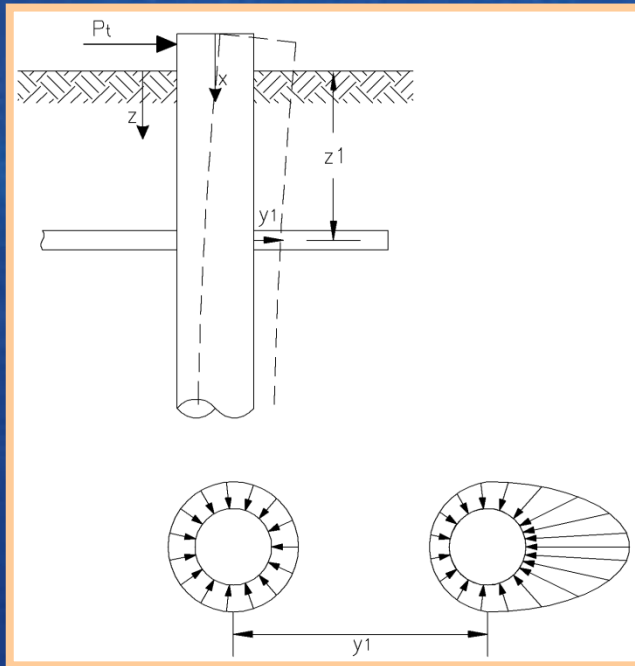
### Υπολογισμός Καμπύλης Απόκρισης

Μέθοδος  $p$ - $y$

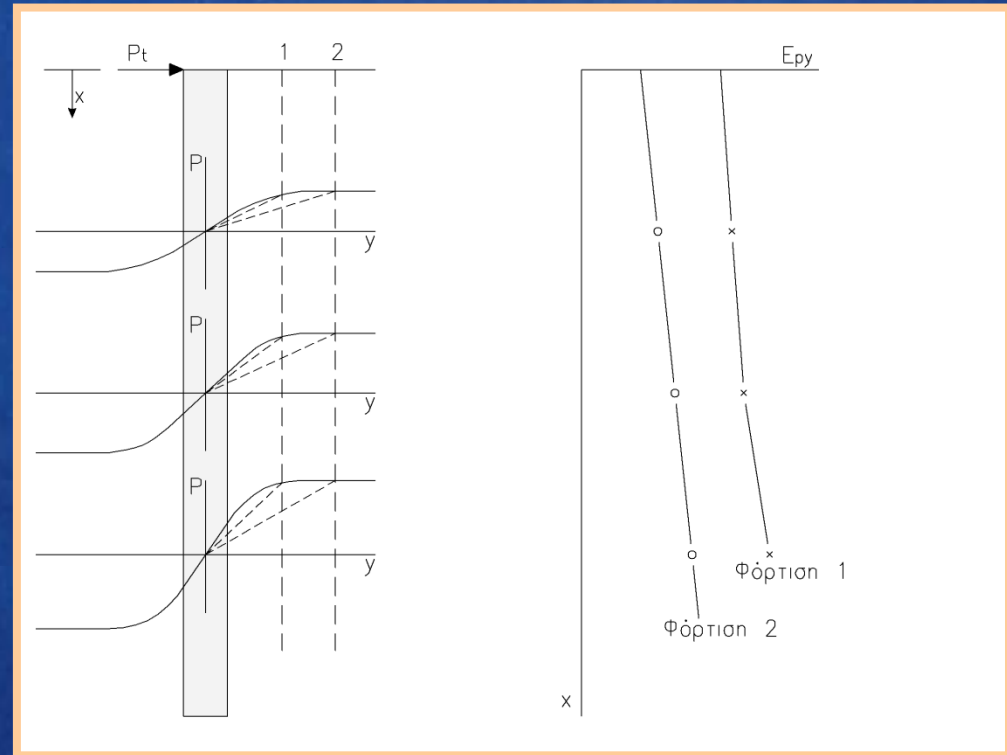
3D ανάλυση

# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Υπολογισμός Καμπύλης Απόκρισης Πασσάλου υπό οριζόντια φόρτιση με τη μέθοδο $p$ - $y$



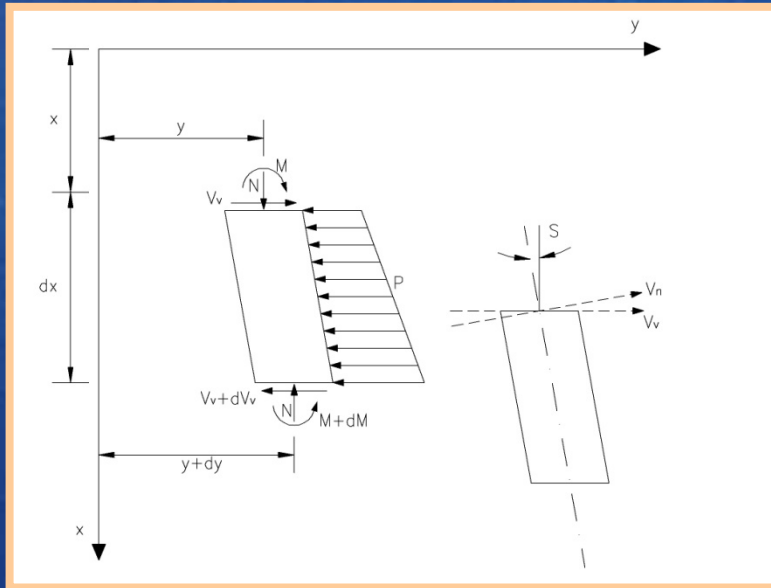
$$E_{py} = p/y$$



- $E_{py}$  : Μέτρο αντίδρασης πασσάλου υπό οριζόντια φόρτιση ( $F/L^2$ )  
 $p$  : Αντίδραση εδάφους ( $F/L$ )  
 $y$  : Οριζόντια μετακίνηση πασσάλου ( $L$ )

# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Κατάστρωση εξίσωσης δοκού



(Hetenyi 1946)

$$(M+dM) - M + N \cdot dy - V_v \cdot dx = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{dM}{dx} + N \frac{dy}{dx} - V_v = 0 \Rightarrow \frac{d^2M}{dx^2} + N \frac{d^2y}{dx^2} - \frac{dV_v}{dx} = 0$$

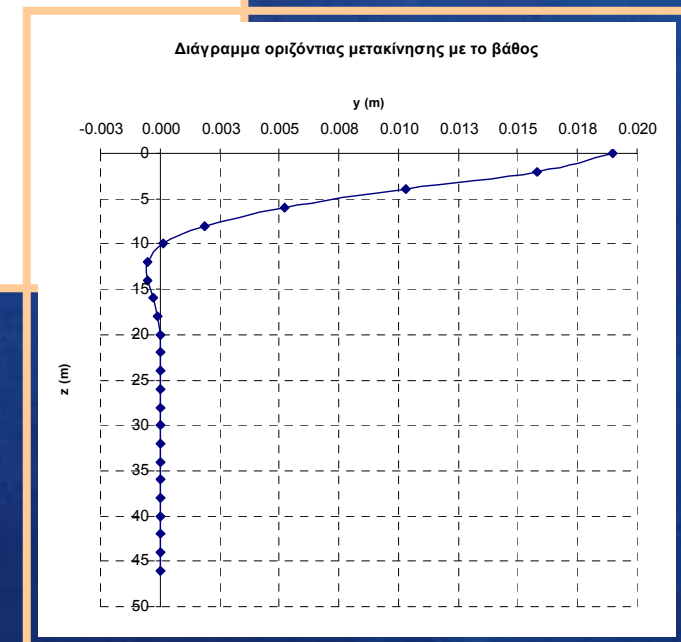
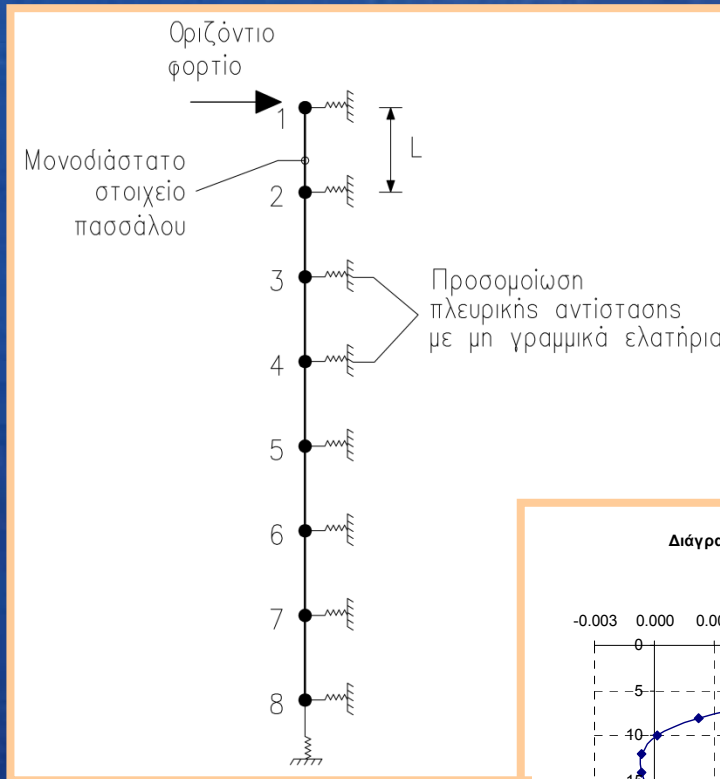
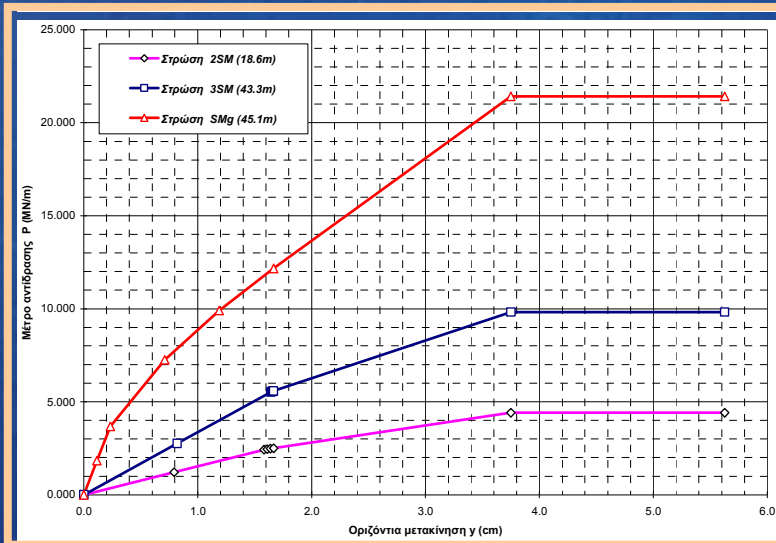
$$M = E_p I_p \frac{d^2y}{dx^2} \Rightarrow \frac{d^2M}{dx^2} = E_p I_p \frac{d^4y}{dx^4}$$

$$p = \frac{dV_v}{dx},$$

$$E_{py} = p/y \Rightarrow p = E_{py} \cdot y$$

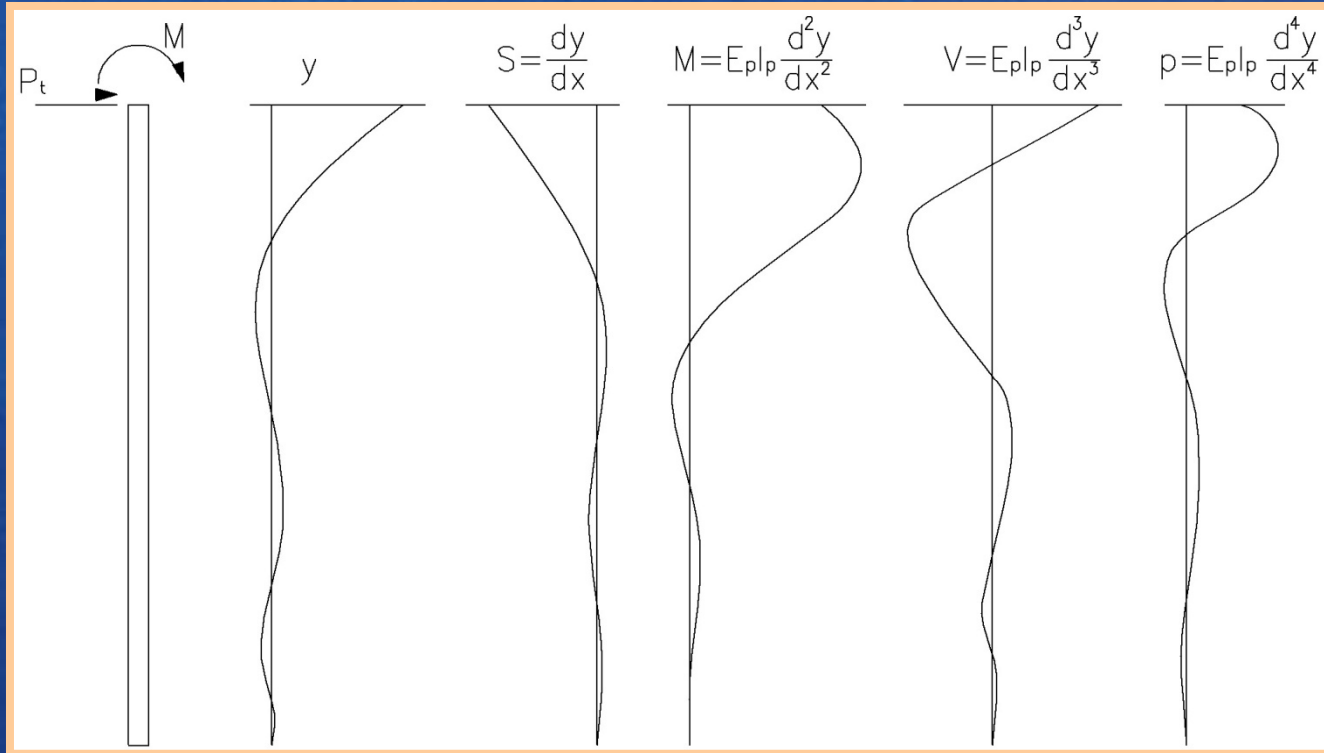
$$E_p I_p \frac{d^4y}{dx^4} + N \frac{d^2y}{dx^2} + E_{py} \cdot y = 0$$

# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση



# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Επίλυση εξίσωσης δοκού



$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dx^4} + N \frac{d^2 y}{dx^2} + E_{py} \cdot y = 0$$

## Προσδιορισμός καμπυλών $p-y$

### ✚ Μαλακή Άργιλος

- Στατική φόρτιση
- Ανακυκλιζόμενη φόρτιση



### ✚ Σκληρή Άργιλος

- Στατική φόρτιση
- Ανακυκλιζόμενη φόρτιση



### ✚ Άμμος

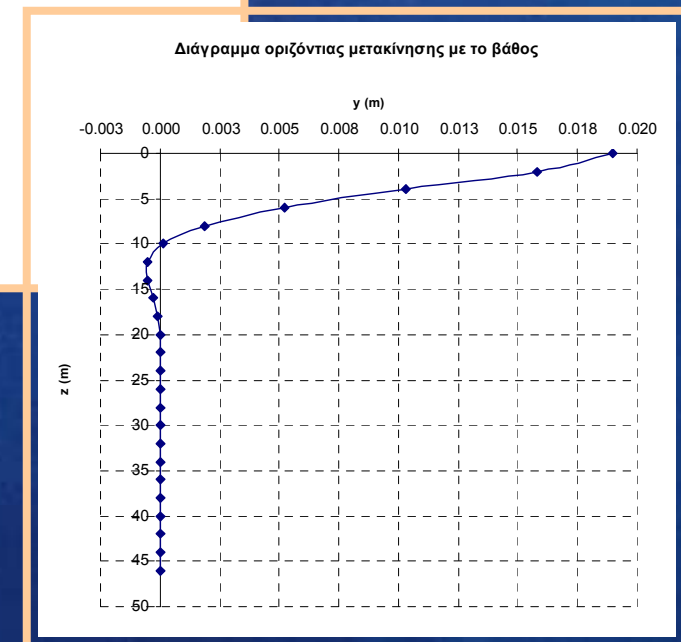
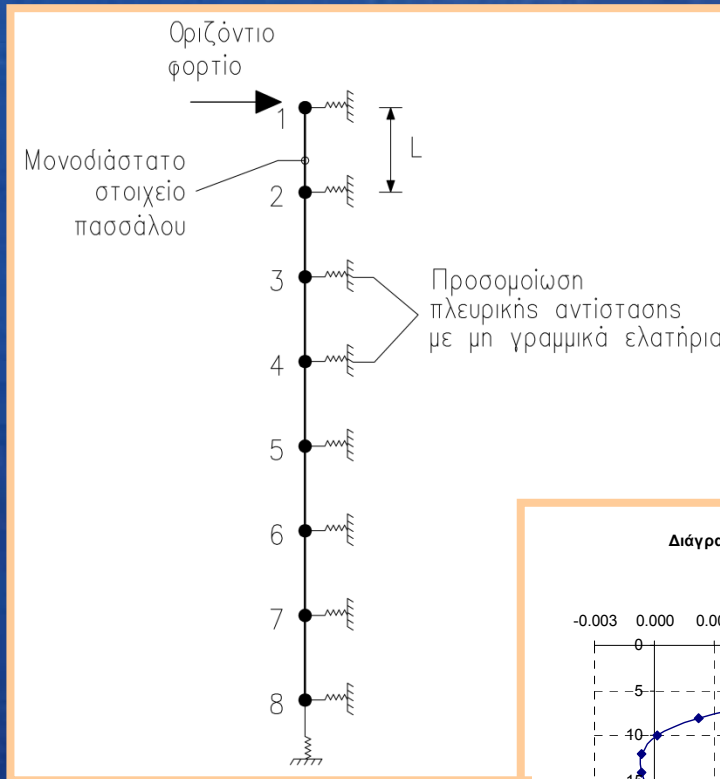
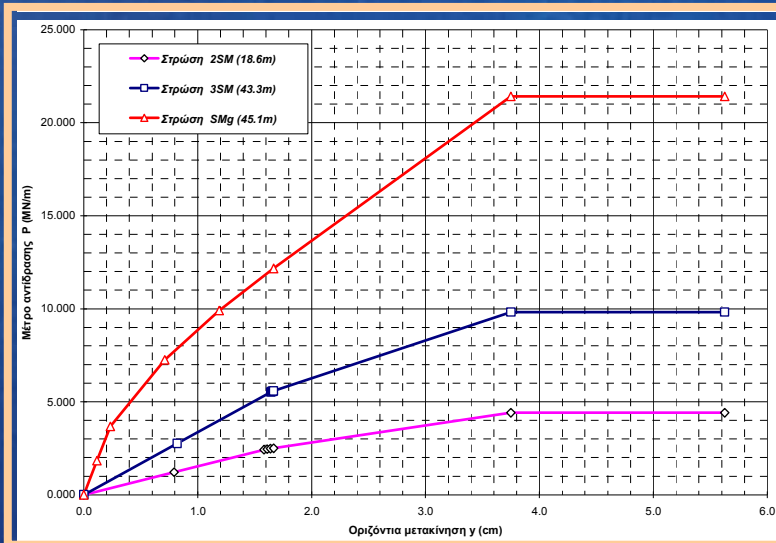


### ✚ Μαλακός βράχος





# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση



## Προσδιορισμός καμπυλών $p$ - $y$

### ✚ Μαλακή Άργιλος

- Στατική φόρτιση
- Ανακυκλιζόμενη φόρτιση

### ✚ Σκληρή Άργιλος

- Στατική φόρτιση
- Ανακυκλιζόμενη φόρτιση

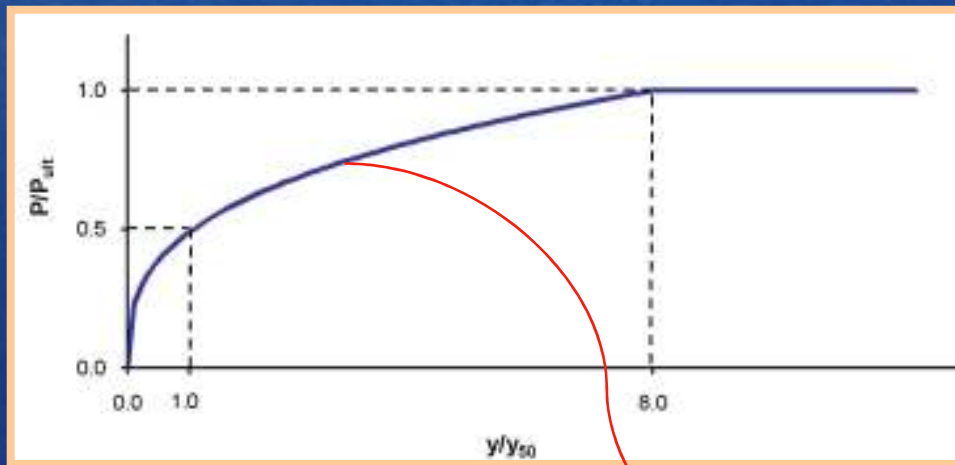
### ✚ Άμμος

### ✚ Μαλακός βράχος

# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Καμπύλες p-y για Μαλακή Άργιλο

### Στατική φόρτιση



- Οριακή πλευρική αντίσταση:  
 $p_{ult} = \min(p_{ut}, p_{ud})$

$$p_{ut} = \left[ 3 + \frac{\gamma'}{c_u} x + J \frac{x}{D} \right] c_u \cdot D, \quad J = 0.25 \div 0.50$$

$$p_{ud} = 9 \cdot c_u \cdot D$$

- Εξίσωση Καμπύλης :

$$p/p_{ult} = 0.5(y/y_{50})^{1/3}, \quad p \leq p_{ult}$$

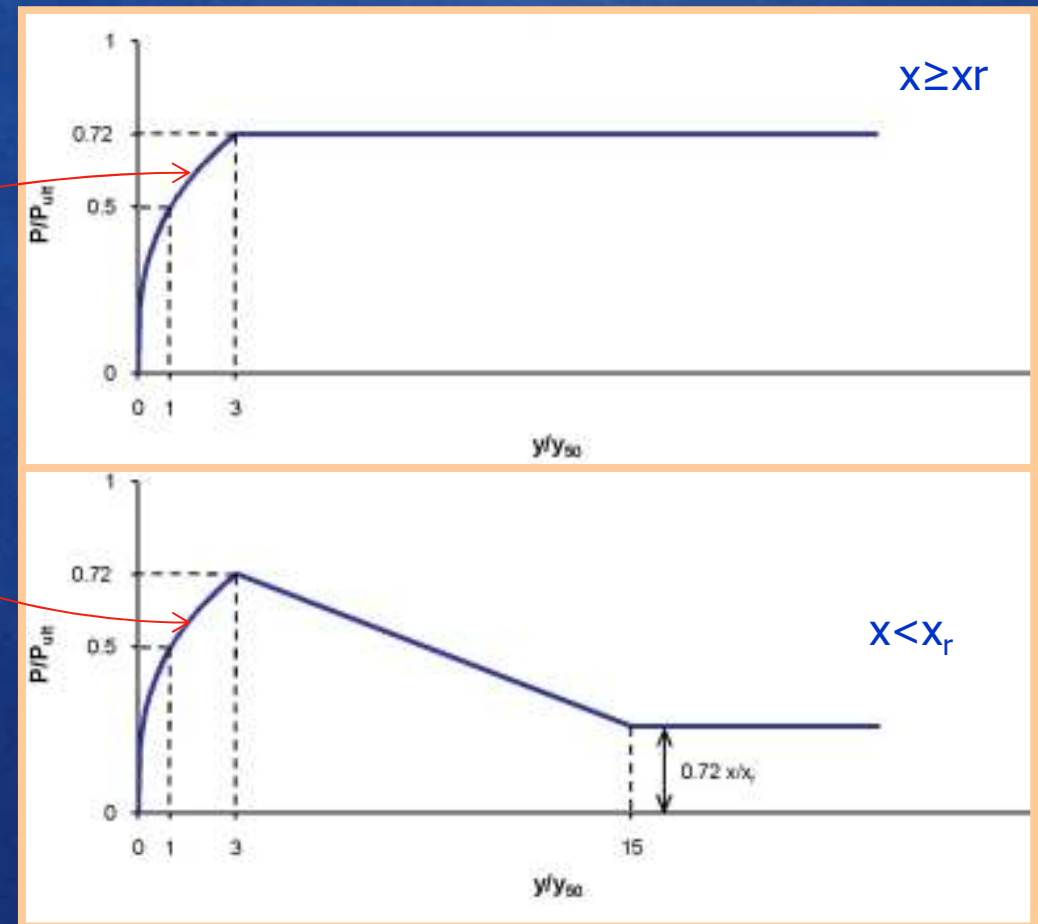
$$y_{50} = 2.5 \cdot \varepsilon_{50} \cdot D, \quad \varepsilon_{50} = 0,005 \div 0,02$$

	$\varepsilon_{50}$
Μαλακή Άργιλος	0.020
Μέσης Συνεκτικ.	0.010
Στιφρή Άργιλος	0.005

## Καμπύλες $p$ - $y$ για Μαλακή Άργιλο

### Ανακυκλιζόμενη φόρτιση

- Υπολογισμός του κρίσιμου βάθους  $x_r$  (όταν  $p_{ud} = p_{ut}$ )
- Εξίσωση Καμπύλης :
  - για  $p \leq 0.72p_{ult}$  και  $y \leq 3y_{50}$  :  
$$p/p_{ult} = 0.5(y/y_{50})^{1/3}$$
  - για  $x \geq x_r$  και  $y > 3y_{50}$  :  
$$p = 0.72p_{ult}$$
  - για  $x < x_r$  και  $3y_{50} \leq y \leq 15y_{50}$  :  
Ευθύγραμμο τμήμα που ορίζεται από τα σημεία  $[3y_{50}, 0.72p_{ult}]$  και  $[15y_{50}, 0.72p_{ult}(x/x_r)]$
  - για  $x < x_r$  και  $y > 15y_{50}$  :  
$$p = 0.72p_{ult}(x/x_r)$$



## Υπολογισμός καμπυλών P-γ σε μαλακή άργιλο

( L. Reese, 1997 & D. Wyllie, 1999 After Reese, Cox and Koop, NUMERICAL METHODS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, C.S. Desai and J.T. Christian)

### ΔΕΔΟΜΕΝΑ - INPUT DATA

Διατμητική αντοχή $S_u$ (kN/m <sup>2</sup> ) :	70
Διάμετρος πασσάλου $b$ (m)	0.80
Βάθος από την επιφάνεια του εδάφους $x$ (m)	3.00
Βυθισμένο φαινόμενο βάρος $\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.50
Παραμόρφωση $\epsilon_{50}$ (Μαλακή άργιλος: 0,020, Μέσης συνεκτικότητας: 0,010, Στιφρή: 0,005)	0.005
Συνθήκες φόρτισης (στατική/ανακυκλιζόμενη)	static

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ - CALCULATIONS

Οριακή πλευρική αντοχή $p_{ult}$ (kN/m)	319.80
Πλευρική μετατόπιση για $P=P_{ult}/2$ $y_{50}$ (m)	1.00E-02
Βάθος για $P_{ut}=P_{ud}$ $x_r$ (m)	6.640

### ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ - EQUATIONS

#### -Στατικές συνθήκες φόρτισης

Η οριακή πλευρική αντοχή της αργίλου υπολογίζεται:

$p_{ult} = \min(p_{ut}, p_{ud})$  όπου:

$p_{ut} = (3 + (\gamma'/S_u) \cdot x + (0,5/b) \cdot x) \cdot S_u \cdot b$  και  $p_{ud} = 9 \cdot S_u \cdot b$

$\gamma'$ : βυθισμένο φαινόμενο βάρος (kN/m<sup>3</sup>)

$S_u$ : διατμητική αντοχή αργίλου (kN/m<sup>2</sup>)

$b$ : διάμετρος πασσάλου (m)

$x$ : βάθος κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους (m)

Υπολογισμός της καμπύλης P-γ (2 διακριτά τμήματα):

α) Καμπύλο τμήμα:  $p = 0,5 \cdot p_{ult} \cdot (y/y_{50})^{1/3}$ ,  $y_{50} = 2,5 \cdot \epsilon_{50} \cdot b$  για  $p \leq p_{ult}$  και

β) το οριζόντιο τμήμα  $p = p_{ult}$

#### -Συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης

Υπολογισμός του βάθους όπου  $p_{ud} = p_{ut}$

$x_r = 6 \cdot S_u \cdot b / (\gamma' \cdot b + 0,5 \cdot S_u)$

Υπολογισμός της καμπύλης P-γ:

α) Καμπύλο τμήμα:  $p = 0,5 \cdot p_{ult} \cdot (y/y_{50})^{1/3}$ , για  $p \leq 0,72 \cdot p_{ult}$  και  $y < 3 \cdot y_{50}$

β) Για  $x \leq x_r$ : Οριζόντιο τμήμα:  $p = 0,72 \cdot p_{ult}$  για  $y > 3 \cdot y_{50}$

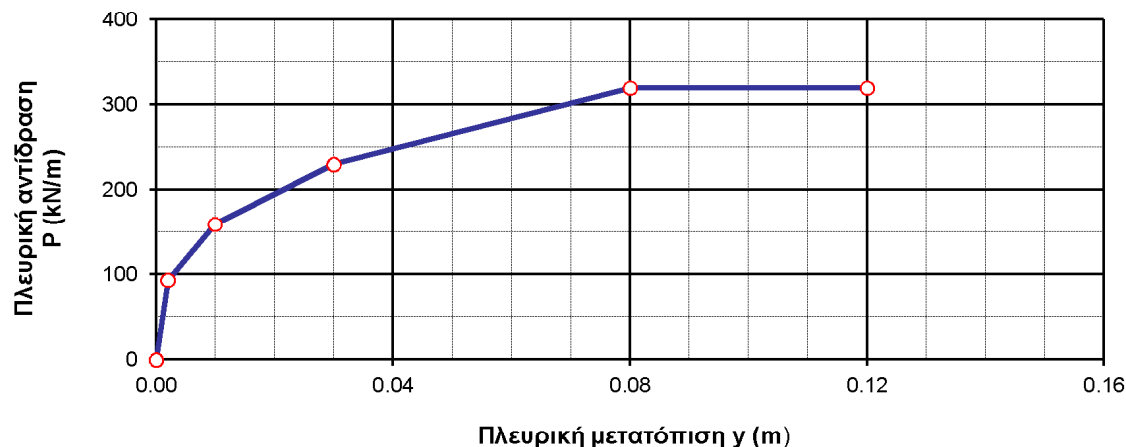
Για  $x < x_r$ : Ευθύγραμμο τμήμα για  $3 \cdot y_{50} \leq y \leq 15 \cdot y_{50}$  που ορίζεται από τα

σημεία  $(3 \cdot y_{50}, 0,72 \cdot p_{ult})$  και  $(15 \cdot y_{50}, 0,72 \cdot p_{ult} \cdot (x/x_r))$  και

οριζόντιο τμήμα:  $p = 0,72 \cdot p_{ult} \cdot (x/x_r)$  για  $y > 15 \cdot y_{50}$

Η πλευρική μετατόπιση  $y_{50}$  προσδιορίζεται ως εξής:  $y_{50} = 2,5 \cdot \epsilon_{50} \cdot b$

### Καμπύλες P-γ σε μαλακή άργιλο



### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

α/α	P (kN/m)	y (m)	K (MN/m <sup>3</sup> )	Παρατηρήσεις
1	0.00	0.00		-
2	93.51	2.00E-03	46.8	-
3	159.90	1.00E-02	16.0	$y=y_{50}$
4	230.62	3.00E-02	7.7	$y=3 \cdot y_{50}$
5	319.80	8.00E-02	4.0	$p_{ult}$
6	319.80	1.20E-01	2.7	$p_{ult}$

## Υπολογισμός καμπυλών P-γ σε μαλακή άργιλο

(L. Reese, 1997 & D. Wyllie, 1999 After Reese, Cox and Koop, NUMERICAL METHODS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, C.S. Desai and J.T. Christian)

### ΔΕΔΟΜΕΝΑ - INPUT DATA

Διατμητική αντοχή $S_u$ (kN/m <sup>2</sup> ) :	70
Διάμετρος πασσάλου $b$ (m)	0.80
Βάθος από την επιφάνεια του εδάφους $x$ (m)	3.00
Βυθισμένο φαινόμενο βάρος $\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.50
Παραμόρφωση $\epsilon_{50}$ (Μαλακή άργιλος: 0,020, Μέσης συνεκτικότητας: 0,010, Στιφρή: 0,005)	0.005
Συνθήκες φόρτισης (στατική/ανακυκλιζόμενη)	cyclic

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ - CALCULATIONS

Οριακή πλευρική αντοχή $p_{ult}$ (kN/m)	319.80
Πλευρική μετατόπιση για $P=P_{ult}/2$ $y_{50}$ (m)	1.00E-02
Βάθος για $P_{ult}=P_{ud}$ $x_r$ (m)	6.640

### ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ - EQUATIONS

#### -Στατικές συνθήκες φόρτισης

Η οριακή πλευρική αντοχή της αργίλου υπολογίζεται:

$p_{ult} = \min(p_{ut}, p_{ud})$  όπου:

$p_{ut} = (3 + (\gamma'/S_u) \cdot x + (0,5/b) \cdot x) \cdot S_u \cdot b$  και  $p_{ud} = 9 \cdot S_u \cdot b$

$\gamma'$ : βυθισμένο φαινόμενο βάρος (kN/m<sup>3</sup>)

$S_u$ : διατμητική αντοχή αργίλου (kN/m<sup>2</sup>)

$b$ : διάμετρος πασσάλου (m)

$x$ : βάθος κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους (m)

Υπολογισμός της καμπύλης P-γ (2 διακριτά τμήματα):

α) Καμπύλο τμήμα:  $p = 0,5 \cdot p_{ult} \cdot (y/y_{50})^{1/3}$ ,  $y_{50} = 2,5 \cdot \epsilon_{50} \cdot b$  για  $p \leq p_{ult}$  και

β) το οριζόντιο τμήμα  $p = p_{ult}$

#### -Συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης

Υπολογισμός του βάθους όπου  $p_{ud} = p_{ut}$

$x_r = 6 \cdot S_u \cdot b / (\gamma' \cdot b + 0,5 \cdot S_u)$

Υπολογισμός της καμπύλης P-γ:

α) Καμπύλο τμήμα:  $p = 0,5 \cdot p_{ult} \cdot (y/y_{50})^{1/3}$ , για  $p \leq 0,72 \cdot p_{ult}$  και  $y < 3 \cdot y_{50}$

β) Για  $x \leq x_r$ : Οριζόντιο τμήμα:  $p = 0,72 \cdot p_{ult}$  για  $y > 3 \cdot y_{50}$

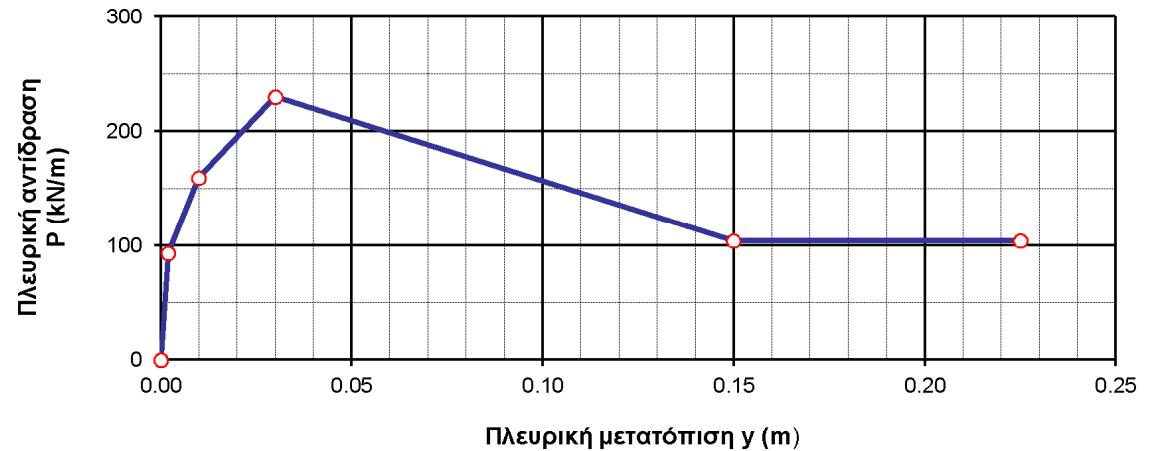
Για  $x < x_r$ : Ευθύγραμμο τμήμα για  $3 \cdot y_{50} \leq y \leq 15 \cdot y_{50}$  που ορίζεται από τα

σημεία  $(3 \cdot y_{50}, 0,72 \cdot p_{ult})$  και  $(15 \cdot y_{50}, 0,72 \cdot p_{ult} \cdot (x/x_r))$  και

οριζόντιο τμήμα:  $p = 0,72 \cdot p_{ult} \cdot (x/x_r)$  για  $y > 15 \cdot y_{50}$

Η πλευρική μετατόπιση  $y_{50}$  προσδιορίζεται ως εξής:  $y_{50} = 2,5 \cdot \epsilon_{50} \cdot b$

### Καμπύλες P-γ σε μαλακή άργιλο



### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

α/α	P (kN/m)	y (m)	K (MN/m <sup>3</sup> )	Παρατηρήσεις
1	0.00	0.00		-
2	93.51	2.00E-03	46.8	-
3	159.90	1.00E-02	16.0	$y=y_{50}$
4	230.62	3.00E-02	7.7	$y=3 \cdot y_{50}$
5	104.19	1.50E-01	0.7	$y=15 \cdot y_{50}$
6	104.19	2.25E-01	0.5	$p=0,72 \cdot p_{ult} \cdot (x/x_r)$

## Υπολογισμός καμπυλών P-γ σε μαλακή άργιλο

( L. Reese, 1997 & D. Wyllie, 1999 After Reese, Cox and Koop, NUMERICAL METHODS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, C.S. Desai and J.T. Christian)

### ΔΕΔΟΜΕΝΑ - INPUT DATA

Διατμητική αντοχή $S_u$ (kN/m <sup>2</sup> ) :	70
Διάμετρος πασσάλου $b$ (m)	0.80
Βάθος από την επιφάνεια του εδάφους $x$ (m)	7.00
Βυθισμένο φαινόμενο βάρος $\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.50
Παραμόρφωση $\epsilon_{50}$	0.005
(Μαλακή άργιλος: 0,020, Μέσης συνεκτικότητας: 0,010, Στιφρή: 0,005)	
Συνθήκες φόρτισης (στατική/ανακυκλιζόμενη)	cyclic

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ - CALCULATIONS

Οριακή πλευρική αντοχή $p_{ult}$ (kN/m)	504.00
Πλευρική μετατόπιση για $P=P_{ult}/2$ $y_{50}$ (m)	1.00E-02
Βάθος για $P_{ult}=P_{ud}$ $x_r$ (m)	6.640

### ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ - EQUATIONS

#### -Στατικές συνθήκες φόρτισης

Η οριακή πλευρική αντοχή της αργίλου υπολογίζεται:

$p_{ult} = \min(p_{ut}, p_{ud})$  όπου:

$p_{ut} = (3 + (\gamma'/S_u) \cdot x + (0,5/b) \cdot x) \cdot S_u \cdot b$  και  $p_{ud} = 9 \cdot S_u \cdot b$

$\gamma'$ : βυθισμένο φαινόμενο βάρος (kN/m<sup>3</sup>)

$S_u$ : διατμητική αντοχή αργίλου (kN/m<sup>2</sup>)

$b$ : διάμετρος πασσάλου (m)

$x$ : βάθος κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους (m)

Υπολογισμός της καμπύλης P- γ ( 2 διακριτά τμήματα):

α) Καμπύλο τμήμα:  $p = 0,5 \cdot p_{ult} \cdot (y/y_{50})^{1/3}$ ,  $y_{50} = 2,5 \cdot \epsilon_{50} \cdot b$  για  $p \leq p_{ult}$  και

β) το οριζόντιο τμήμα  $p=p_{ult}$

#### -Συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης

Υπολογισμός του βάθους όπου  $p_{ud} = p_{ut}$

$x_r = 6 \cdot S_u \cdot b / (\gamma' \cdot b + 0,5 \cdot S_u)$

Υπολογισμός της καμπύλης P- γ:

α) Καμπύλο τμήμα:  $p = 0,5 \cdot p_{ult} \cdot (y/y_{50})^{1/3}$ , για  $p \leq 0,72 \cdot p_{ult}$  και  $y < 3 \cdot y_{50}$

β) Για  $x \leq x_r$ : Οριζόντιο τμήμα:  $p = 0,72 \cdot p_{ult}$  για  $y > 3 \cdot y_{50}$

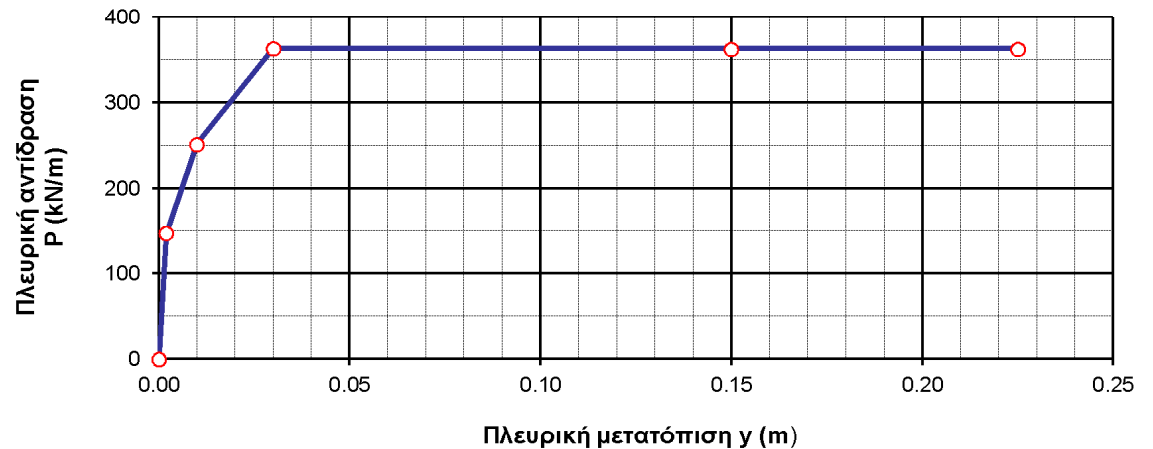
Για  $x < x_r$ : Ευθύγραμμο τμήμα για  $3 \cdot y_{50} \leq y \leq 15 \cdot y_{50}$  που ορίζεται από τα

σημεία  $(3 \cdot y_{50}, 0,72 \cdot p_{ult})$  και  $(15 \cdot y_{50}, 0,72 \cdot p_{ult} \cdot (x/x_r))$  και

οριζόντιο τμήμα:  $p = 0,72 \cdot p_{ult} \cdot (x/x_r)$  για  $y > 15 \cdot y_{50}$

Η πλευρική μετατόπιση  $y_{50}$  προσδιορίζεται ως εξής:  $y_{50} = 2,5 \cdot \epsilon_{50} \cdot b$

### Καμπύλες P-γ σε μαλακή άργιλο



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ				
$\alpha/\alpha$	$P$ (kN/m)	$y$ (m)	$K$ (MN/m <sup>3</sup> )	Παρατηρήσεις
1	0.00	0.00		-
2	147.37	2.00E-03	73.7	-
3	252.00	1.00E-02	25.2	$y=y_{50}$
4	363.45	3.00E-02	12.1	$y=3 \cdot y_{50}$
5	362.88	1.50E-01	2.4	$y=15 \cdot y_{50}$
6	362.88	2.25E-01	1.6	$p=0,72 \cdot p_{ult}$

## Προσδιορισμός καμπυλών $p-y$

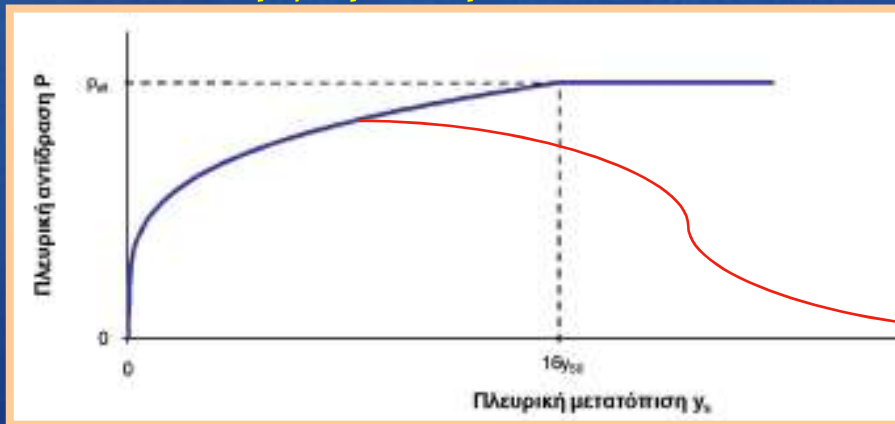
- ✚ Μαλακή Άργιλος
  - Στατική φόρτιση
  - Ανακυκλιζόμενη φόρτιση
- ✚ Σκληρή Άργιλος
  - Στατική φόρτιση
  - Ανακυκλιζόμενη φόρτιση
- ✚ Άμμος
- ✚ Μαλακός βράχος



# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Καμπύλες p-y για Σκληρή Άργιλο

### Στατική φόρτιση



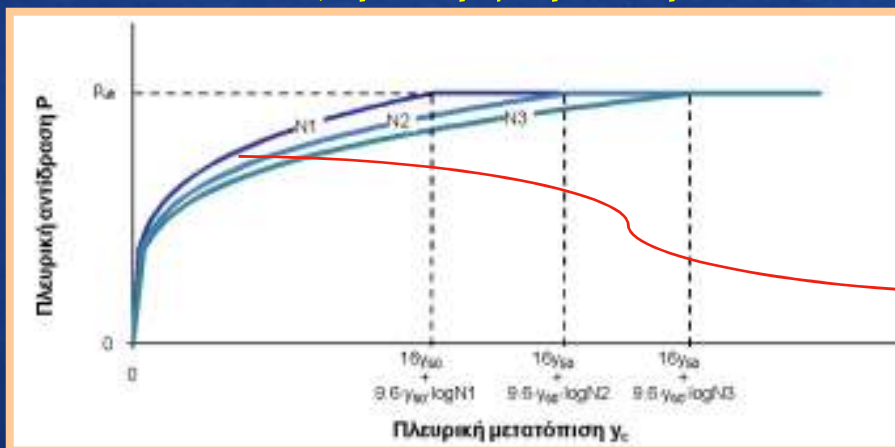
- Οριακή πλευρική αντίσταση:  
 $p_{ult} = \min(p_{ut}, p_{ud})$

- Εξίσωση Καμπύλης:

$$p/p_{ult} = 0.5(y/y_{50})^{1/4}, \quad y \leq 16y_{50}$$

$$y_{50} = 2.5 \cdot \varepsilon_{50} \cdot D, \quad \varepsilon_{50} = 0,005 \div 0,02$$

### Ανακυκλιζόμενη φόρτιση



- Εξίσωση Καμπύλης:

$$y_c = y_s + y_{50} \cdot C \cdot \log N, \quad y \leq 16y_{50} + 9.6y_{50} \log N$$

$$C = 9.6 \cdot p / p_{ult}$$

## Υπολογισμός καμπυλών P-y σε σκληρή άργιλο

( After Reese, Cox and Koop, NUMERICAL METHODS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, C.S. Desai and J.T. Christian)

### ΔΕΔΟΜΕΝΑ - INPUT DATA

Διατμητική αντοχή $S_u$ (kN/m <sup>2</sup> ):	160.00
Διάμετρος πασσάλου $b$ (m)	1.00
Βάθος από την επιφάνεια του εδάφους $x$ (m)	10.00
Βυθισμένο φαινόμενο βάρος $\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.00
Παραμόρφωση $\epsilon_{50}$ (Μαλακή άργιλος: 0,020, Μέσης συνεκτικότητας: 0,010, Στιφρή: 0,005)	0.005
Συνθήκες φόρτισης (στατική/ανακυκλιζόμενη)	static
Αριθμός κύκλων φόρτισης $N$ (ανακυκλ. φόρτιση)	5

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ - CALCULATIONS

Οριακή πλευρική αντοχή $p_{ult}$ (kN/m)	1440.00
Πλευρική μετατόπιση για $P=P_{ult}/2$ $y_{50}$ (m)	0.013

### ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ - EQUATIONS

#### -Στατικές συνθήκες φόρτισης

Η οριακή πλευρική αντοχή της αργίλου υπολογίζεται:

$p_{ult} = \min(p_{ut}, p_{ud})$  όπου:

$p_{ut} = (3 + (\gamma'/S_u) \cdot x + (0,5/b) \cdot x) \cdot S_u \cdot b$  και  $p_{ud} = 9 \cdot S_u \cdot b$

$\gamma'$ : βυθισμένο φαινόμενο βάρος (kN/m<sup>3</sup>)

$S_u$ : διατμητική αντοχή αργίλου (kN/m<sup>2</sup>)

$b$ : διάμετρος πασσάλου (m)

$x$ : βάθος κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους (m)

Υπολογισμός της καμπύλης P- y ( 2 διακριτά τμήματα) :

α) Καμπύλο τμήμα:  $p = 0,5 \cdot p_{ult} \cdot (y/y_{50})^{1/4}$ ,  $y_{50} = 2,5 \cdot \epsilon_{50} \cdot b$  για  $y \leq 16 \cdot y_{50}$  και

β) το οριζόντιο τμήμα  $p=p_{ult}$

#### -Συνθήκες ανακυκλιζόμενης φόρτισης

Υπολογισμός της καμπύλης P- y :

α) Καμπύλο τμήμα p-y<sub>c</sub>:  $p = 0,5 \cdot p_{ult} \cdot (y/y_{50})^{1/4}$  για  $y \leq 16 \cdot y_{50}$

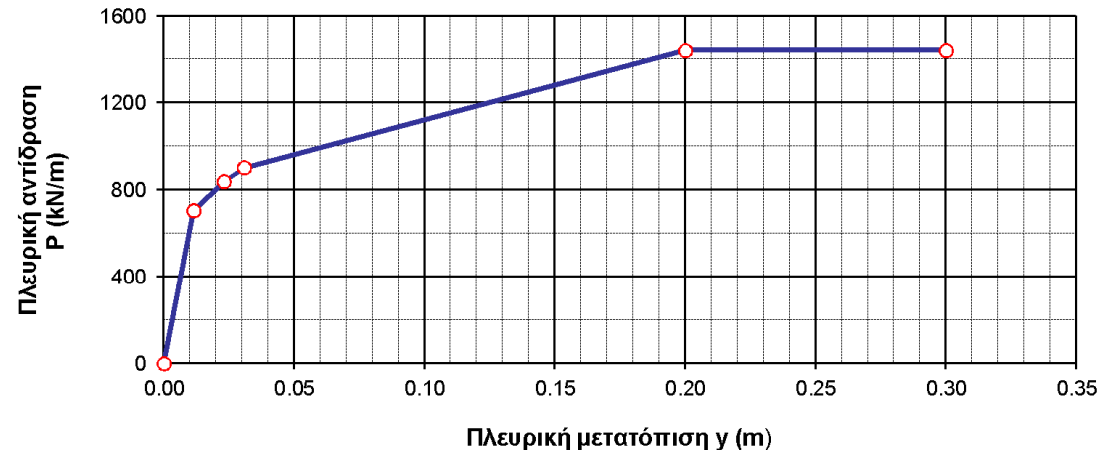
$y_c = y_s + y_{50} \cdot C \cdot \log N$ ,  $C = 9,6 \cdot (p/p_u)^4$

$y_s$ : πλευρική μετατόπιση υπό στατική φόρτιση

$y_c$ : πλευρική μετατόπιση υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση για  $N$  κύκλους φόρτισης

β) το οριζόντιο τμήμα  $p=p_{ult}$

Καμπύλες P-y σε σκληρή άργιλο



### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

a/a	P (kN/m)	y (m)	K (MN/m <sup>3</sup> )	Παρατηρήσεις
1	0.0	0.00		-
2	705.1	1.15E-02	61.3	-
3	838.6	2.30E-02	36.5	-
4	901.7	3.08E-02	29.3	-
5	1,440.0	2.00E-01	7.2	$p=p_{ult}$ , $y=16 \cdot y_{50}$
6	1,440.0	3.00E-01	4.8	$p_{ult}$

Σχήμα: Στρώση C2 (10m)

## Υπολογισμός καμπύλων P-γ σε σκληρή άργιλο

( After Reese, Cox and Koop, NUMERICAL METHODS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, C.S. Desai and J.T. Christian)

### ΔΕΔΟΜΕΝΑ - INPUT DATA

Διατμητική αντοχή $S_u$ (kN/m <sup>2</sup> ):	160.00
Διάμετρος πασσάλου $b$ (m)	1.00
Βάθος από την επιφάνεια του εδάφους $x$ (m)	10.00
Βυθισμένο φαινόμενο βάρος $\gamma'$ (kN/m <sup>3</sup> )	19.00
Παραμόρφωση $\epsilon_{50}$ (Μαλακή άργιλος: 0,020, Μέσης συνεκτικότητας: 0,010, Στιφρή: 0,005)	0.005
Συνθήκες φόρτισης (στατική/ανακυκλιζόμενη)	cyclic
Αριθμός κύκλων φόρτισης $N$ (ανακυκλ. φόρτιση)	6

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ - CALCULATIONS

Οριακή πλευρική αντοχή $p_{ult}$ (kN/m)	1440.00
Πλευρική μετατόπιση για $P=p_{ult}/2$ $y_{50}$ (m)	0.013

### ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ - EQUATIONS

#### -Στατικές συνθήκες φόρτισης

Η οριακή πλευρική αντοχή της αργίλου υπολογίζεται:

$p_{ult} = \min(p_{ut}, p_{ud})$  όπου:

$p_{ut} = (3 + (\gamma'/S_u) \cdot x + (0,5/b) \cdot x) \cdot S_u \cdot b$  και  $p_{ud} = 9 \cdot S_u \cdot b$

$\gamma'$ : βυθισμένο φαινόμενο βάρος (kN/m<sup>3</sup>)

$S_u$ : διατμητική αντοχή αργίλου (kN/m<sup>2</sup>)

$b$ : διάμετρος πασσάλου (m)

$x$ : βάθος κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους (m)

Υπολογισμός της καμπύλης P- γ ( 2 διακριτά τμήματα):

α) Καμπύλο τμήμα:  $p = 0,5 \cdot p_{ult} \cdot (y/y_{50})^{1/4}$ ,  $y_{50} = 2,5 \cdot \epsilon_{50} \cdot b$  για  $y \leq 16 \cdot y_{50}$  και

β) το οριζόντιο τμήμα  $p=p_{ult}$

#### -Συνθήκες ανακυκλιζόμενηςφόρτισης

Υπολογισμός της καμπύλης P- γ:

α) Καμπύλο τμήμα  $p-y_c$ :  $p = 0,5 \cdot p_{ult} \cdot (y/y_{50})^{1/4}$  για  $y \leq 16 \cdot y_{50}$

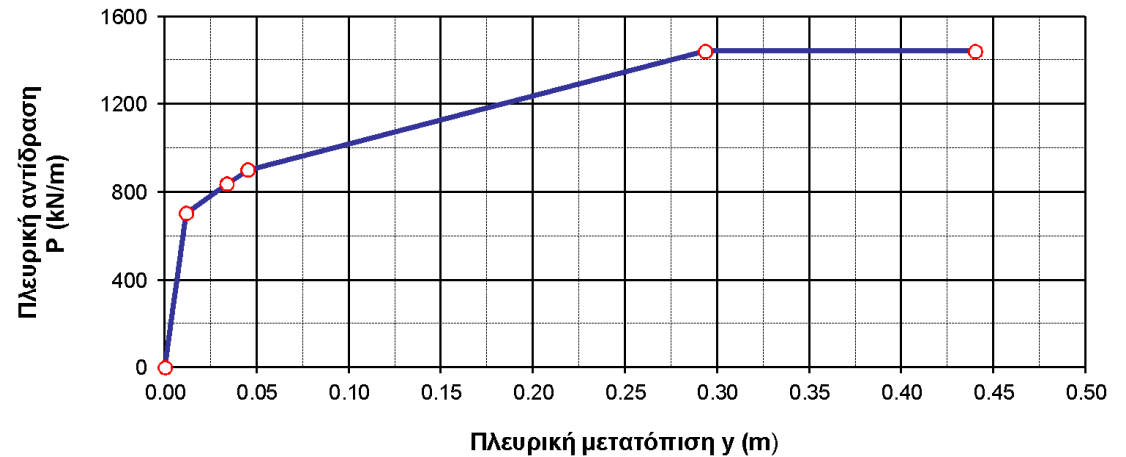
$y_c = y_s + y_{50} \cdot C \cdot \log N$ ,  $C = 9,6 \cdot (p/p_u)^4$

$y_s$ : πλευρική μετατόπιση υπό στατική φόρτιση

$y_c$ : πλευρική μετατόπιση υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση για  $N$  κύκλους φόρτισης

β) το οριζόντιο τμήμα  $p=p_{ult}$

**Καμπύλες P-γ σε σκληρή άργιλο**



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ				
α/α	P (kN/m)	y (m)	K (MN/m <sup>3</sup> )	Παρατηρήσεις
1	0.0	0.00		-
2	705.1	1.15E-02	61.3	-
3	838.6	3.37E-02	24.9	-
4	901.7	4.51E-02	20.0	-
5	1,440.0	2.93E-01	4.9	$p=p_{ult}, y=16 \cdot y_{50}$
6	1,440.0	4.40E-01	3.3	$p_{ult}$

Σχήμα: Στρώση C2 (10m)

## Προσδιορισμός καμπυλών $p-y$

- ✚ Μαλακή Άργιλος
  - Στατική φόρτιση
  - Ανακυκλιζόμενη φόρτιση
- ✚ Σκληρή Άργιλος
  - Στατική φόρτιση
  - Ανακυκλιζόμενη φόρτιση
- ✚ Άμμος
- ✚ Μαλακός βράχος

# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Καμπύλες p-y για Άμμο

- Οριακή πλευρική αντίσταση:

$$p_{ult} = A_s \cdot p_c \quad \text{ή} \quad p_{ult} = A_c \cdot p_c$$

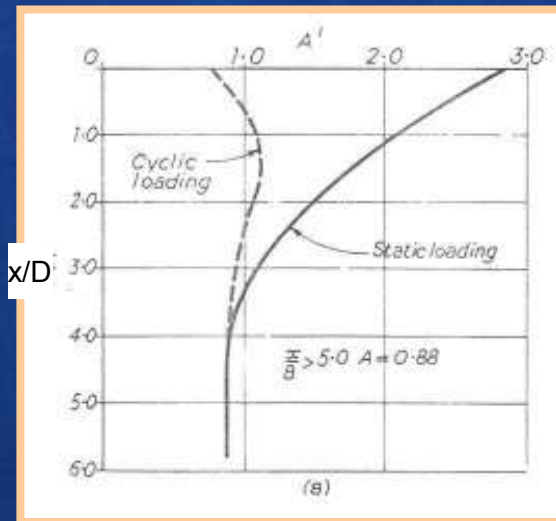
- Για  $x < x_t$ :

$$p_{ct} = \gamma \cdot x \left[ \frac{K_o \cdot x \cdot \tan \phi \cdot \tan \beta}{\tan(\beta - \phi) \cdot \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} (D + x \cdot \tan \beta \cdot \tan \alpha) + K_o \cdot x \cdot \tan \beta (\tan \phi \cdot \tan \beta - \tan \alpha) - K_\alpha \cdot D \right]$$

- Για  $x \geq x_t$ :

$$p_{cd} = K_\alpha \cdot D \cdot \gamma \cdot x \cdot (\tan^8 \beta - 1) + K_o \cdot D \cdot \gamma \cdot x \cdot \tan \phi \cdot \tan^4 \beta$$

- Συντελεστές  $A_s, A_c$ :



$\alpha$	$\phi/2$
$\beta$	$45 + \phi/2$

# Βαθείς Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Καμπύλες p-y για Άμμο

• Εξίσωση Καμπύλης :

- για  $y \geq y_u = 3D/80$  :

$$p = p_{ult} = A \cdot p_c$$

- για  $y_u > y \geq y_m = D/60$  :

Ευθύγραμμο τμήμα κλίσης  $m$  που ορίζεται από τα σημεία  $(y_m, p_c)$  και  $(y_u, p_{ult})$

- για  $y_m > y \geq y_k = (C/k x)^{n/(n-1)}$  :

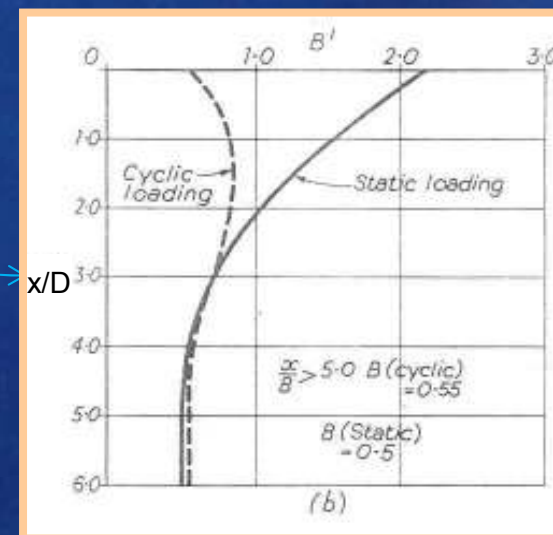
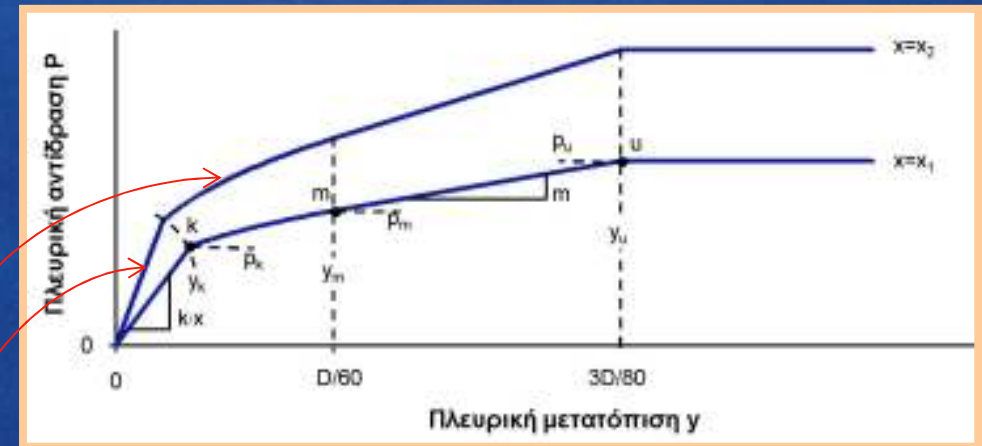
$$p = C \cdot y^{1/n}$$

$$n = \frac{p_m}{m \cdot y_m}, \quad C = \frac{p_m}{y_m^{1/n}}$$

- για  $y < y_k$  :

$$p = k \cdot x \cdot y$$

Σχετική Πυκνότητα	k (kN/m <sup>3</sup> )
Χαλαρή Άμμος	5500
Μέσης Πυκνότητας	16000
Πυκνή	34000



## Υπολογισμός καμπυλών P-γ σε άμμο

(L. Reese, 1997 & D. Wyllie, 1999 After Reese, Cox and Koop, NUMERICAL METHODS IN GEOTECHNICAL ENGINEERING, C.S. Desai and J.T. Christian)

### ΔΕΔΟΜΕΝΑ - INPUT DATA

Γωνία τριβής φ (°) :	30.00
Διάμετρος πασσάλου b (m)	1.00
Βάθος από την επιφάνεια του εδάφους x (m)	4.00
Βυθισμένο φαινόμενο βάρος γ' (kN/m <sup>3</sup> )	9.50
Βάθος για P <sub>ct</sub> =P <sub>ucd</sub> x <sub>r</sub> (m)	11.82
Συντελεστής k	17000
Συνθήκες φόρτισης (στατική/ανακυκλιζόμενη)	Static

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ - CALCULATIONS

α=φ/2	15.00
β=45+φ/2	60.00
K <sub>o</sub> =1-sinφ	0.50
K <sub>a</sub> =tan <sup>2</sup> (45-φ/2)	0.33
Οριακή πλευρική αντοχή p <sub>c</sub> (kN/m)	544.89
Αδιάστατος συντελεστής A' για αποτίμηση της οριακής πλευρικής αντοχής με το βάθος	0.88
Αδιάστατος συντελεστής B' για αποτίμηση της πλευρικής αντοχής με το βάθος	0.57
Πλευρική μετατόπιση για p=p <sub>u</sub> y <sub>u</sub> (m)	0.0375

### ΕΙΣΙΩΣΕΙΣ - EQUATIONS

Η οριακή πλευρική αντοχή της αργίλου υπολογίζεται:

Οριακή πλευρική αντοχή κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (x<x<sub>r</sub>):

$$P_{ct} = \gamma H \left[ \frac{K_o H \tan \phi \sin \beta}{\tan \beta - \phi \cos \alpha} + \frac{\tan \beta}{\tan \beta - \phi} (b + H \tan \beta \tan \alpha) + K_o H \tan \beta (\tan \phi \sin \beta - \tan \alpha) - K_o \phi \right]$$

Οριακή πλευρική αντοχή σε μεγάλο βάθος (x>x<sub>r</sub>):

$$P_{cd} = K_a b \gamma H (\tan^2 \beta - 1) + K_o b \gamma H \tan \phi \tan^4 \beta$$

Οριακή πλευρική αντοχή μετά από την αποτίμηση με το βάθος: p<sub>u</sub>=A' \* p<sub>c</sub>

Υπολογισμός της καμπύλης P- γ ( 4 διακριτά τμήματα) :

α) Ευθύγραμμο τμήμα: p = k\*x\*y, y ≤ y<sub>k</sub> όπου y<sub>k</sub>=(C/kx)<sup>n(n-1)</sup>

$$C = p_m / y_m^{1/n}$$

$$p_m = B' * p_c \quad \left. \begin{array}{l} n = (p_u - p_m) / (y_u - y_m) \\ = p_m / (m * y_m) \end{array} \right\}$$

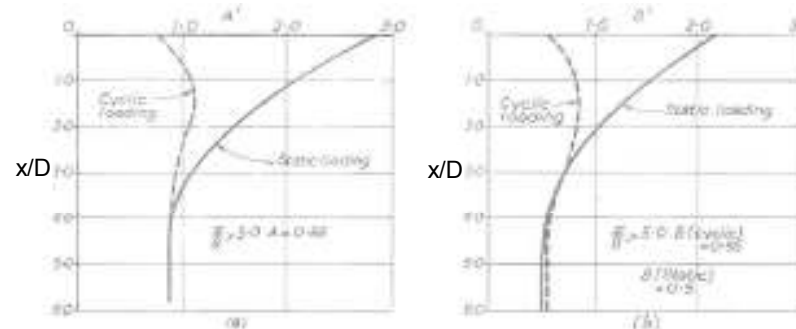
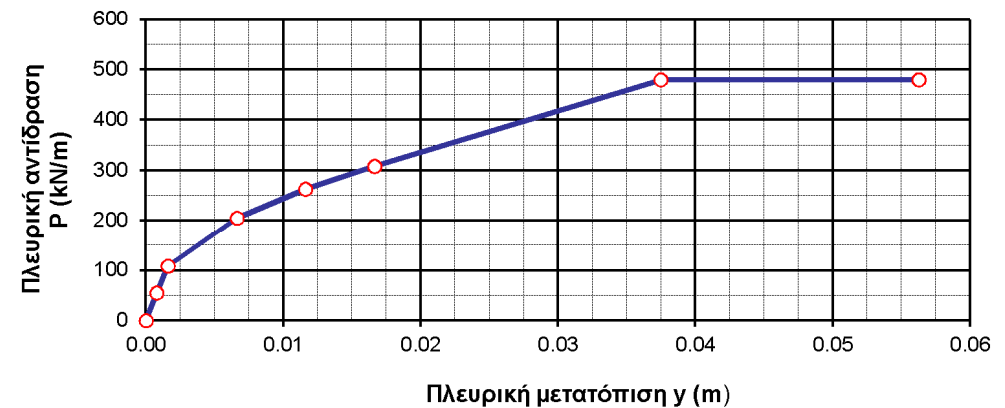
χαλαρή άμμος: k=5500 kN/m<sup>3</sup>, μέσης πυκνότητας: k=17000 kN/m<sup>3</sup>, πυκνή: k=35000 kN/m<sup>3</sup>

β) Παραβολικό τμήμα: p = C\*y<sup>1/n</sup>, y<sub>k</sub> ≤ y ≤ y<sub>m</sub>

γ) Ευθύγραμμο τμήμα κλίσης m για y<sub>m</sub> ≤ y ≤ y<sub>u</sub>

δ) Οριζόντιο τμήμα p<sub>u</sub>=A' \* p<sub>c</sub>, y ≥ y<sub>u</sub>

### Καμπύλες P-γ σε άμμο



Αδιάστατοι συντελεστές A' και B' για την αποτίμηση της πλευρικής αντοχής με το βάθος

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ				
α/α	P (kN/m)	γ (m)	K (MN/m <sup>3</sup> )	Παρατηρήσεις
1	0.00	0.00		-
2	54.58	8.03E-04	68.0	-
3	109.16	1.61E-03	68.0	y=y <sub>k</sub>
4	204.80	6.63E-03	30.9	-
5	263.05	1.16E-02	22.6	-
6	308.41	1.67E-02	18.5	y <sub>m</sub>
7	479.50	3.75E-02	12.8	y <sub>u</sub>
8	479.50	5.63E-02	8.5	-

Σχήμα: Στρώση S2 (4m)

## Προσδιορισμός καμπυλών $p-y$

- ✚ Μαλακή Άργιλος
  - Στατική φόρτιση
  - Ανακυκλιζόμενη φόρτιση
- ✚ Σκληρή Άργιλος
  - Στατική φόρτιση
  - Ανακυκλιζόμενη φόρτιση
- ✚ Άμμος
- ✚ Μαλακός βράχος



# Βαθιές Θεμελιώσεις | Πάσσαλοι υπό Οριζόντια Φόρτιση

## Καμπύλες p-y για Μαλακό Βράχο

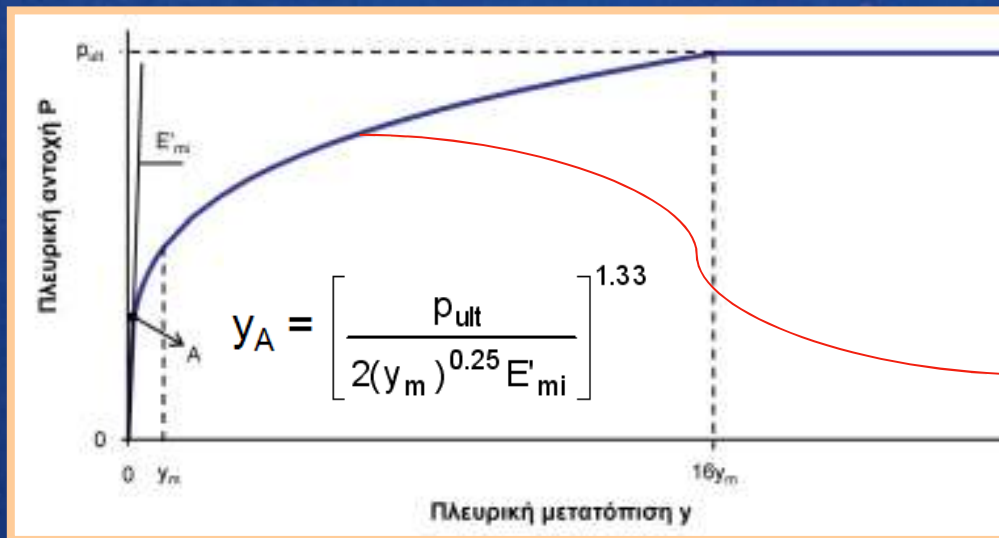
- Οριακή πλευρική αντίσταση:

- Για  $0 \leq x_r \leq 3D$  :

$$p_{ult} = \alpha_r \cdot \sigma_c \cdot D \left( 1 + 1.4 \frac{x_r}{D} \right)$$

- Για  $x_r > 3D$  :

$$p_{ult} = 5.2 \cdot \alpha_r \cdot \sigma_c \cdot D \quad \alpha_r = 1/3 \div 1 \text{ για } RQD = 0 \div 100$$



- Κλίση του αρχικού τμήματος της καμπύλης P- y:

$$E'_{mi} = k_i \cdot E_{mi}$$

- Για  $0 \leq x_r \leq 3D$  :

$$k_i = \left( 100 + \frac{400 \cdot x_r}{3 \cdot D} \right)$$

- Για  $0 \leq x_r \leq 3D$  :

$$k_i = 500$$

- Εξίσωση Καμπύλης :

- για  $y < y_A$  :  $p = E'_{mi} \cdot y$

- για  $y \geq y_A$  και  $p \leq p_{ult}$  :  $p = (p_{ult}/2) \cdot (y/y_m)^{0.25}$

$$y_m = k_m \cdot D, \quad k_m = 5 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-4}$$

-  $p = p_{ult}$

## Υπολογισμός καμπυλών P-γ σε βραχομάζα

(L. Reese, 1997 & D. Wyllie, 1999)

### ΔΕΔΟΜΕΝΑ - INPUT DATA

Μονοαξονική θλιπτική αντοχή βράχου $\sigma_c$ (MPa) :	65
RQD (%)	45
Διάμετρος πασσάλου D (m)	0.80
Βάθος από την επιφάνεια του βράχου $x_r$ (m)	4.0
Αρχικό Μέτρο Ελαστικότητας Βραχομάζας $E_m$ (MPa)	2,000
Σταθερά $k_m$ ( $5 \times 10^{-5} \div 5 \times 10^{-4}$ )	0.0005

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ - CALCULATIONS

Οριακή πλευρική αντοχή βραχομάζας $P_{ult}$ (kN/m)	188,874
Μειωτικός συντελεστής αποτίμησης της ρωγμάτωσης $a_r$	0.70
Αδιάστατη Σταθερά $k_i$	500
Μεταβλητό Μέτρο Ελαστικότητας $E'_{mi}$ (κPa)	1,000,000
Πλευρική μετατόπιση $y_m$ (m) για τιμές $\gamma > \gamma_A$ & $P < P_{ult}$	0.0004
Πλευρική μετατόπιση στο τέλος του αρχικού γραμμικού τμήματος της καμπύλης (Σημείο $\gamma_A$ (m))	5.85E-05

### ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ - EQUATIONS

Η οριακή πλευρική αντοχή της βραχομάζας υπολογίζεται:

$$P_{ult} = a_r \cdot \sigma_c \cdot D \cdot (1 + 1.4x_r/D) \quad \text{για } 0 \leq x_r \leq 3D, \quad \text{και}$$

$$P_{ult} = 5.2 \cdot a_r \cdot \sigma_c \cdot D \quad \text{για } x_r \geq 3D$$

$a_r$ : μειωτικός συντελεστής αποτίμησης βαθμού ρωγμάτωσης

$\sigma_c$ : μονοαξονική θλιπτική αντοχή βράχου (MPa)

D: διάμετρος πασσάλου

$x_r$ : βάθος κάτω από την επιφάνεια του βράχου

Κλίση του αρχικού τμήματος της καμπύλης P-γ σε βράχο:  $E'_{mi} = k_i \cdot xE_m$

$k_i = [100 + (400 \cdot x_r / 3D)]$  για  $0 \leq x_r \leq 3D$  ή  $k_i = 500$  για  $x_r > 3D$

όπου,  $k_i$  = αδιάστατη σταθερά

Υπολογισμός της καμπύλης P-γ σε βράχο (3 διακριτά τμήματα):

α) Αρχικό ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης:  $p = E'_{mi} \cdot \gamma$ , για  $\gamma < \gamma_A$

β) Καμπύλο τμήμα:  $p = p_{ult} / 2 \cdot (\gamma / \gamma_m)^{0.25}$  για  $\gamma \geq \gamma_A$  και  $p \leq p_{ult}$  και

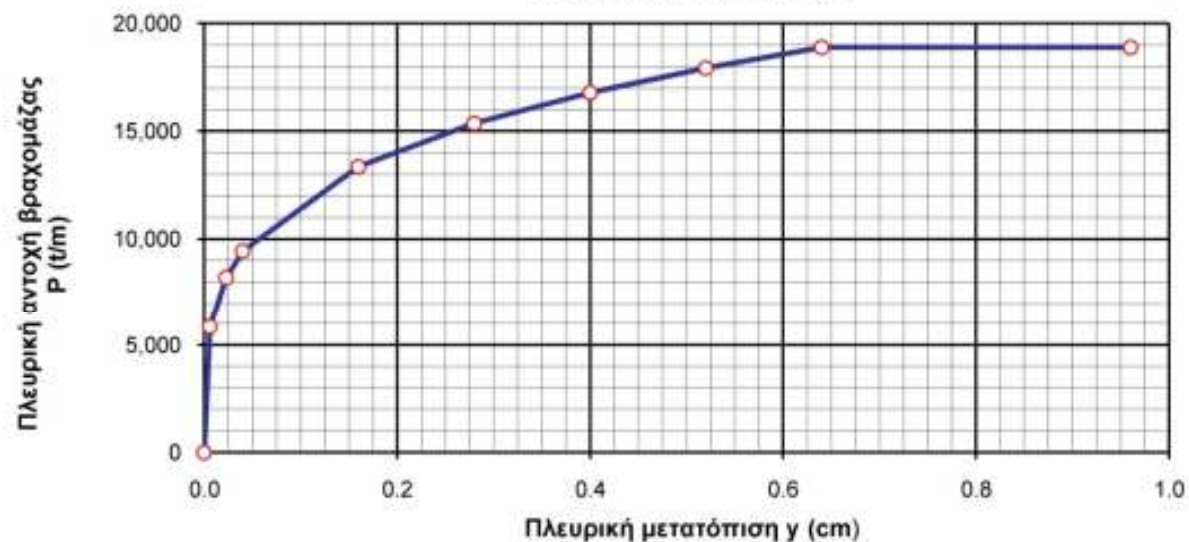
γ) το οριζόντιο τμήμα  $p = p_{ult}$ , όπου:  $\gamma_m = k_m \cdot D$

( $k_m$ : σταθερά κυμαινόμενη από  $5 \cdot 10^{-5}$  έως  $5 \cdot 10^{-4}$ )

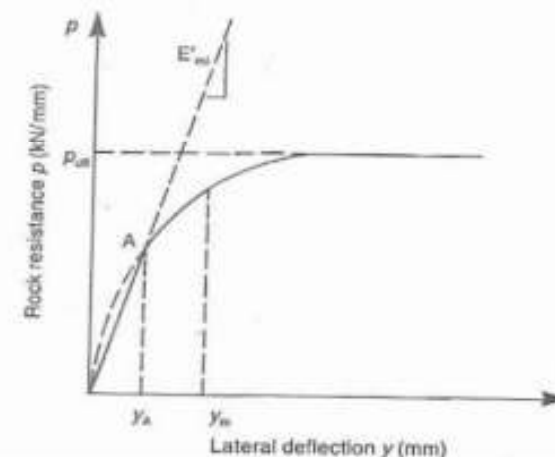
Το σημείο καμψής που καθορίζει το όριο του αρχικού γραμμικού τμήματος και

του καμπύλου τμήματος που ακολουθεί, προσδιορίζεται ως εξής:  $\gamma_A = \left[ \frac{P_{ult}}{2(\gamma_m)^{0.25} E'_{mi}} \right]^{1.33}$

Καμπύλες P-γ σε βράχο



ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΤΑΤΙΚΗΣ & ΑΝΑΚΥΚΛΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ			
a/a	P (t/m)	γ (cm)	Παρατηρήσεις
1	0	0.000	-
2	5,851	0.006	-
3	8,217	0.023	$v = v_1 + (v_2 - v_1) \cdot \sqrt{2}$
4	9,444	0.040	-
5	13,355	0.160	-
6	15,361	0.280	-
7	16,794	0.400	-
8	17,932	0.520	-
9	18,887	0.640	$P_{ult}$
10	18,887	0.960	$P_{ult}$



Σχήμα: Στρώση Δ (4m)