# ΔΙΑΛΕΞΕΙΣ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ
# « ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ »
7ο Εξ. ΠΟΛ-ΜΗΧ. ΕΜΠ - Ακαδ. Ετος 2005 - 06

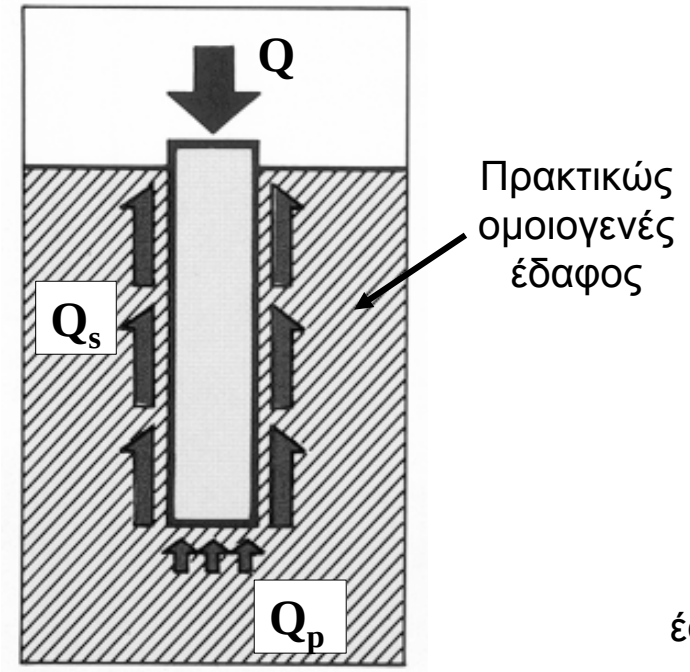
## ΔΙΑΛΕΞΗ 8β
## Θεμελιώσεις με πασσάλους :
## Αξονική φέρουσα ικανότητα εμπηγνυόμενων πασσάλων με στατικούς τύπους

25.12.2005

## ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ ΜΕ ΠΑΣΣΑΛΟΥΣ

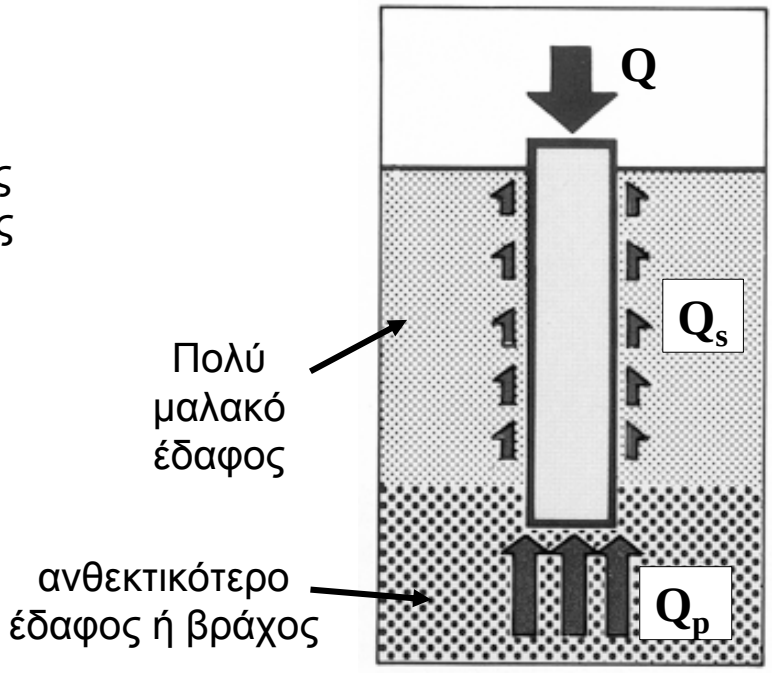
1. Κατηγορίες πασσάλων
   - 1.1 Εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι μεγάλης εκτοπίσεως (πλήρους διατομής)
   - 1.2 Εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι μικρής εκτοπίσεως (ανοικτοί σωλήνες)
   - 1.3 Εγχυτοι πάσσαλοι μεγάλης διαμέτρου (φρεατοπάσσαλοι)
2. Αξονική φέρουσα ικανότητα μεμονωμένου πασσάλου
   - 2.1 Εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι (πάσσαλοι εκτοπίσεως)
   - 2.2 Εγχυτοι πάσσαλοι (φρεατοπάσσαλοι)
   - 2.3 Ανάλυση πασσάλων κατά τον Ευρωκώδικα 7
3. Καθιζήσεις μεμονωμένου πασσάλου
4. Ομάδες πασσάλων
   - 4.1 Φέρουσα ικανότητα ομάδας
   - 4.2 Καθιζήσεις ομάδας
5. Εγκάρσια φόρτιση πασσάλων

# Ανάληψη φορτίων από τους πασσάλους




Πάσσαλος τριβής

$$Q = Q_s + Q_p$$

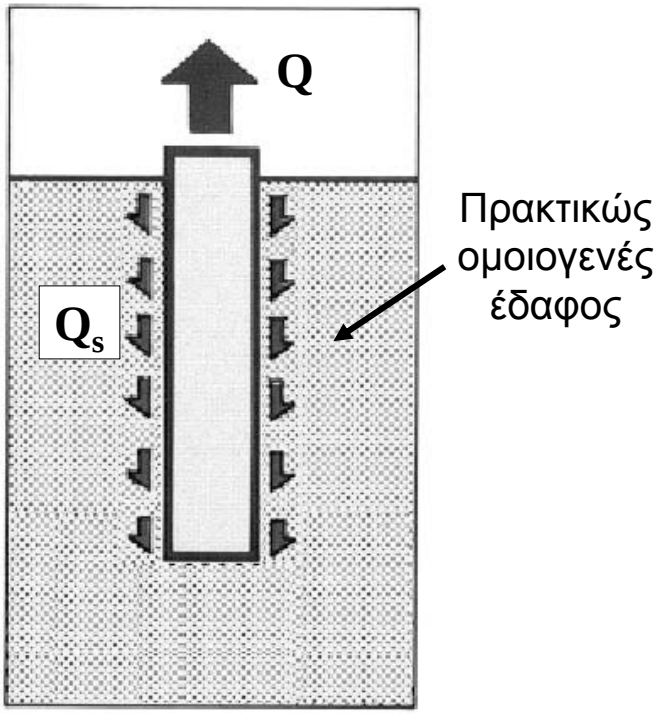



Πάσσαλος αιχμής

$$Q = Q_s + Q_p$$

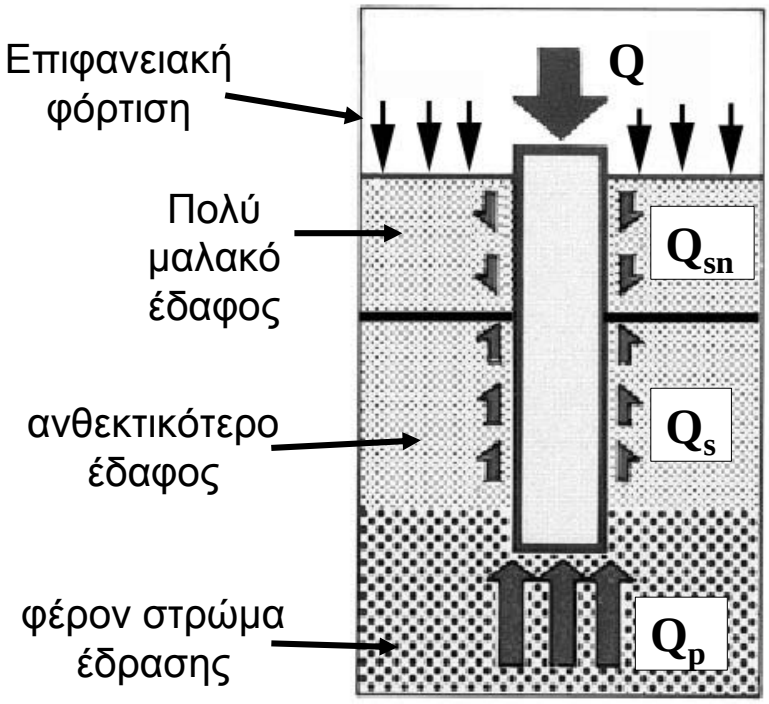
Συνήθως, οι πάσσαλοι αναλαμβάνουν φορτία μέσω τριβής ΚΑΙ αιχμής

# Ανάληψη φορτίων από τους πασσάλους




Εφελκυόμενος πάσσαλος

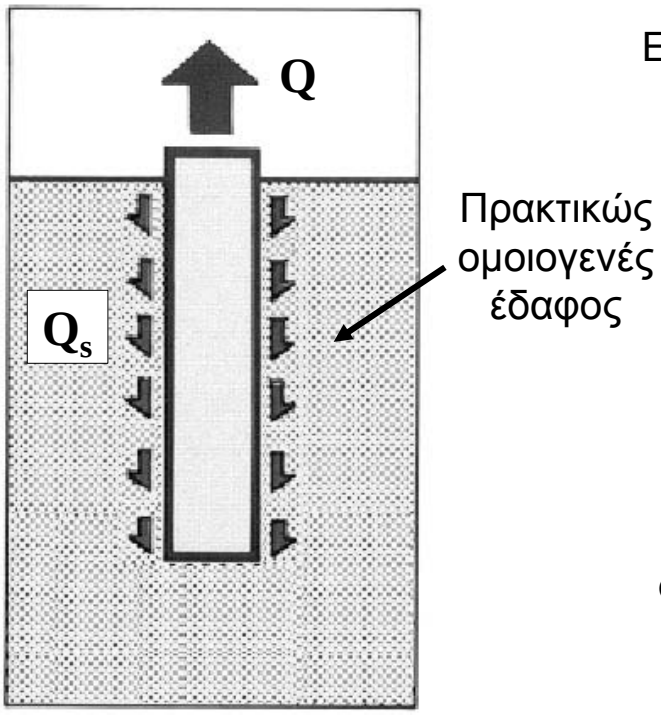
(συνεισφορά μόνον της πλευρικής τριβής)




Θλιβόμενος πάσσαλος με αρνητικές τριβές στο ανώτερο τμήμα του (λόγω συμπίεσης του πολύ μαλακού εδάφους)

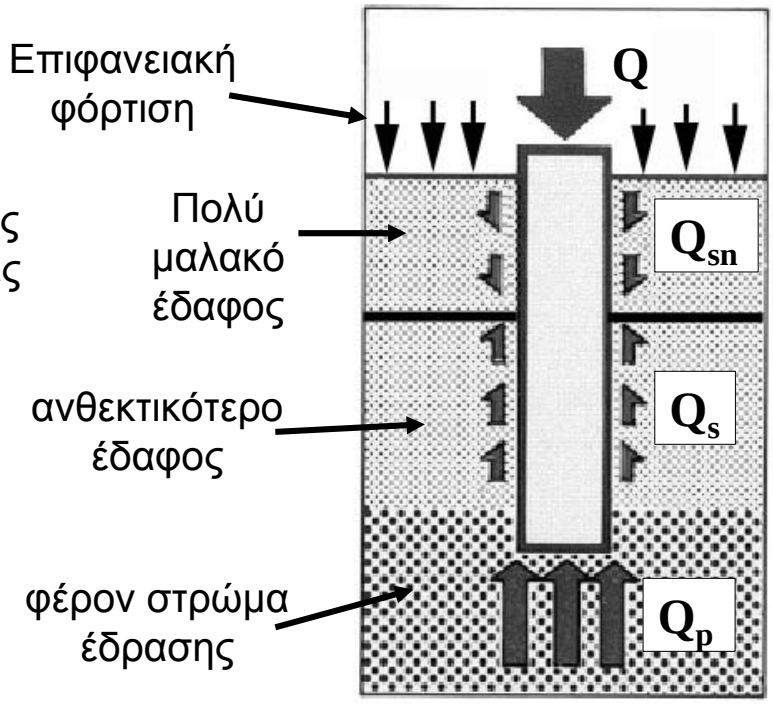
## Εφελκυόμενοι πάσσαλοι και πάσσαλοι με αρνητικές τριβές

Εφελκυόμενος πάσσαλος



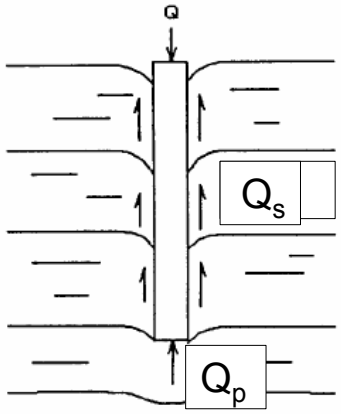

$$Q = Q_s$$

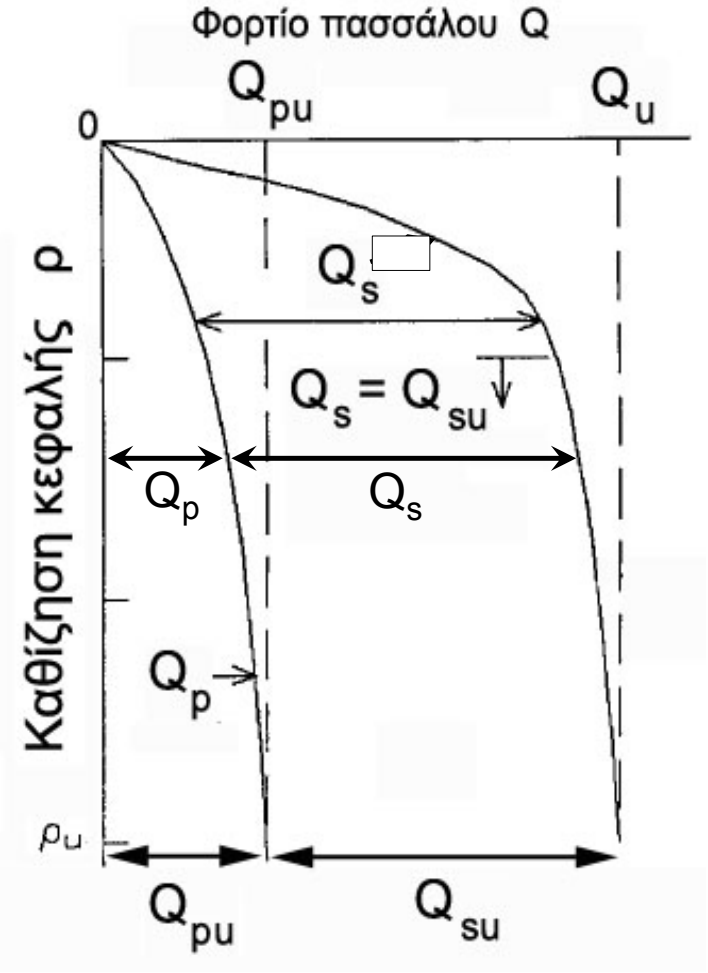
Πάσσαλος με αρνητικές τριβές στο ανώτερο τμήμα του




$$Q + Q_{sn} = Q_s + Q_p$$

## Ανάληψη φορτίων από θλιβόμενους πασσάλους




Q = φορτίο κεφαλής πασσάλου

$Q_s$ = αντίσταση πλευρικής τριβής (s = skin)

$Q_p$ = αντίσταση αιχμής (p = point)

$$Q = Q_s + Q_p$$

$Q_u$ = οριακό φορτίο κεφαλής πασσάλου

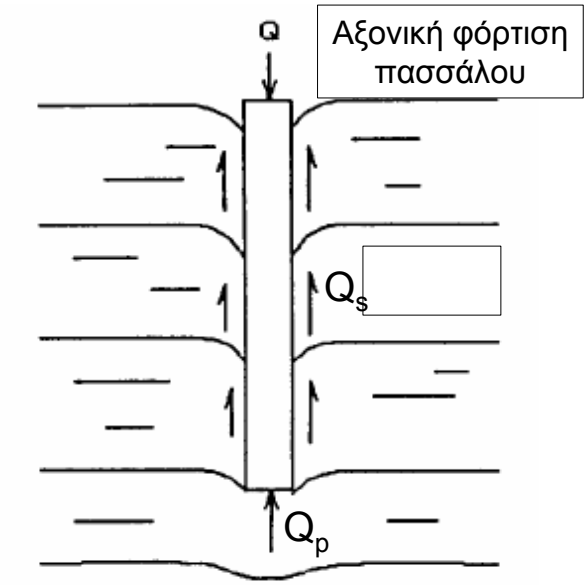
$Q_{su}$ = οριακή αντίσταση πλευρικής τριβής

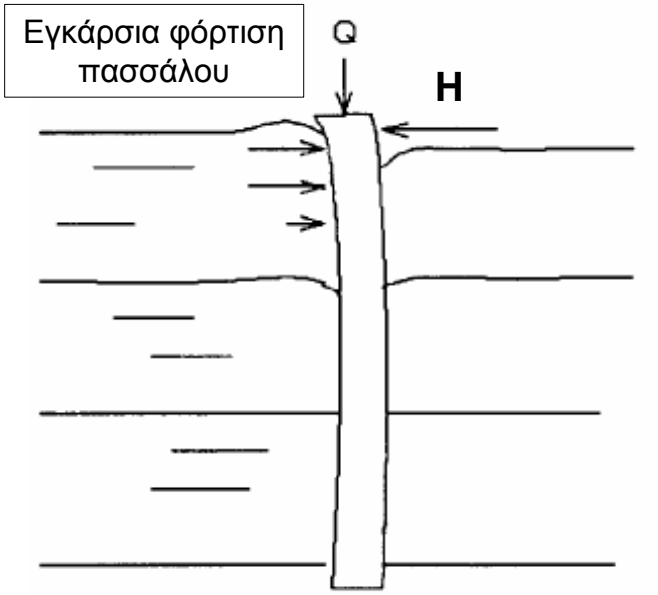
$Q_{pu}$ = οριακή αντίσταση αιχμής

$$Q_u = Q_{su} + Q_{pu}$$

Κριτήρια Σχεδιασμού Πασσάλων :

1. Ελεγχος έναντι υπέρβασης της αξονικής φέρουσας ικανότητας
2. Ελεγχος έναντι υπέρβασης των αποδεκτών καθιζήσεων
3. Ελεγχος έναντι υπέρβασης της αντοχής του πασσάλου (ως δομικού στοιχείου)
4. Ελεγχος έναντι υπέρβασης της εγκάρσιας φέρουσας ικανότητας και των αποδεκτών εγκάρσιων μετακινήσεων



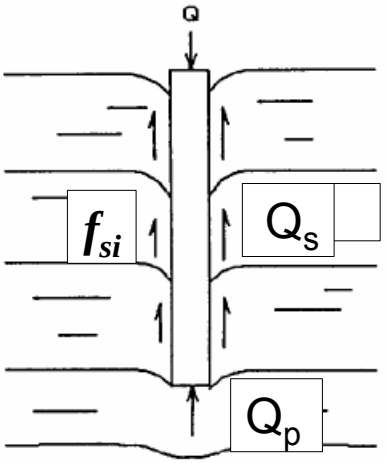




# Ανάληψη φορτίων από θλιβόμενους πασσάλους

$$Q = Q_s + Q_p$$

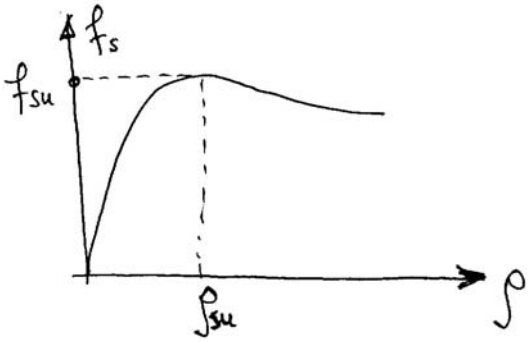
Αντίσταση πλευρικής τριβής :

$$Q_s = \int_0^L p\, f_s\, dz = \pi D \int_0^L f_s\, dz = \pi D \sum_i f_{si}\, \Delta z_i$$




Οριακή αντίσταση πλευρικής τριβής :

$$Q_{su} = \int_0^L p\, f_{su}\, dz = \pi D \int_0^L f_{su}\, dz = \pi D \sum_i f_{sui}\, \Delta z_i$$




$p$ = περίμετρος διατομής πασσάλου

$f_s$ = πλευρική τριβή

$f_{su}$ = οριακή πλευρική τριβή

D = διάμετρος κυλινδρικού πασσάλου

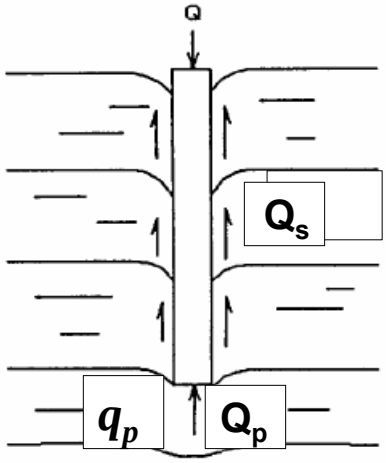
$f_{si}$ = πλευρική τριβή i-οστής στρώσης (πάχους $\Delta z_i$)

$f_{sui}$ = οριακή πλευρική τριβή i-οστής στρώσης (πάχους $\Delta z_i$)

# Ανάληψη φορτίων από θλιβόμενους πασσάλους

Αντίσταση αιχμής : $Q_p = A_p\, q_p$

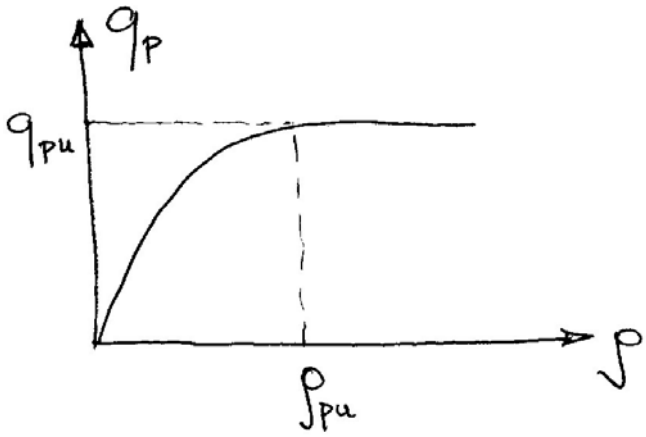
Οριακή αντίσταση αιχμής : $Q_{pu} = A_p\, q_{pu}$



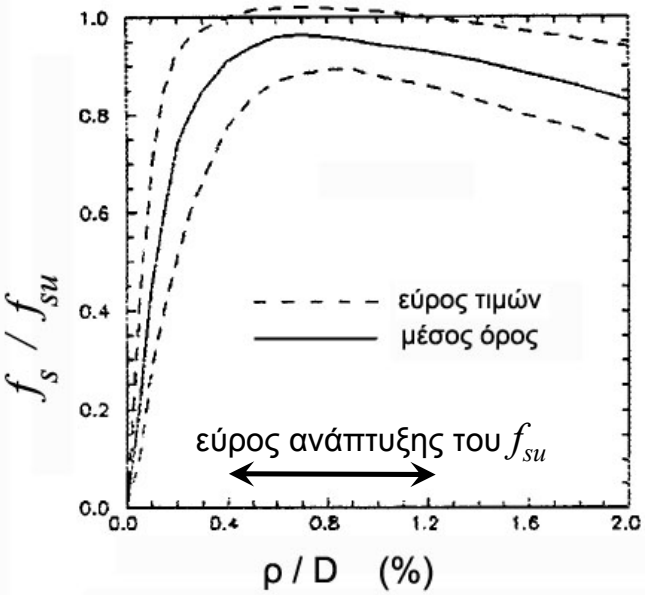

$q_p$ = μοναδιαία αντίσταση αιχμής

$q_{pu}$ = οριακή μοναδιαία αντίσταση αιχμής

$A_p$ = εμβαδόν αιχμής πασσάλου




# Ανάληψη φορτίων από θλιβόμενους πασσάλους

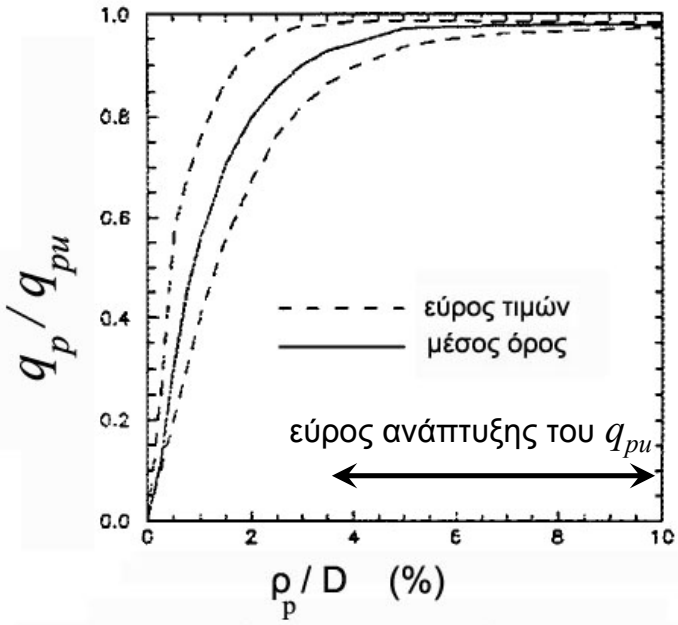



ρ = σχετική ολίσθηση πασσάλου - εδάφους

D = διάμετρος πασσάλου

Ανάπτυξη πλευρικής τριβής ($f_s$) στην παράπλευρη επιφάνεια του πασσάλου, μέσω της σχετικής ολίσθησης (βύθισης) του πασσάλου ως προς το περιβάλλον έδαφος

ρ = (0.4% - 1.2%) D = 4 – 15 mm




$\rho_p$ = βύθιση βάσης πασσάλου

D = διάμετρος πασσάλου

Ανάπτυξη αντίστασης αιχμής ($q_p$) στην βάση του πασσάλου, μέσω της βύθισης (καθίζησης) της βάσης του πασσάλου

ρ = (4% - 10%) D = 30 - 100 mm

# Έγχυτοι πάσσαλοι σε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη

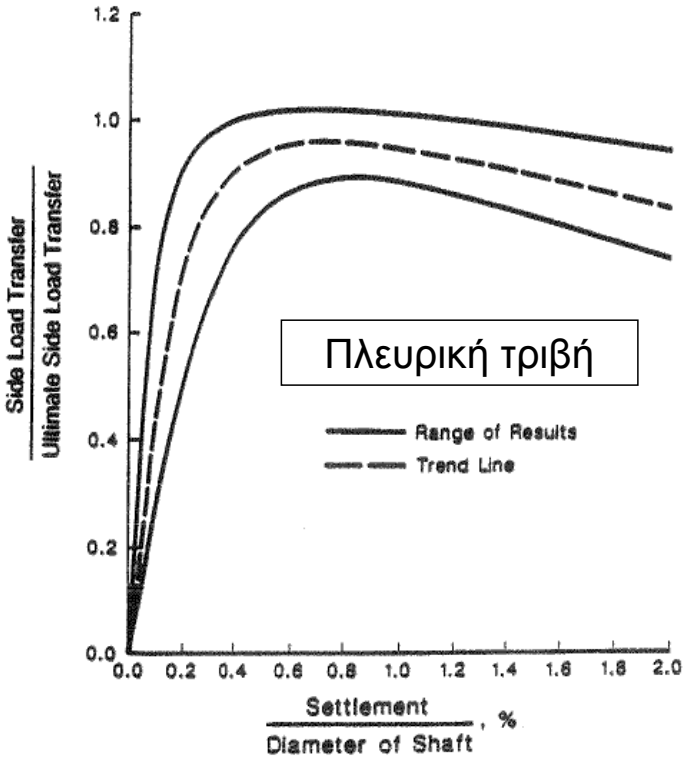



FIGURE 4.6.5.5.1.1A Load Transfer in Side Resistance Versus Settlement Drilled Shafts in Cohesive Soil
After Reese and O'Neill (1988)

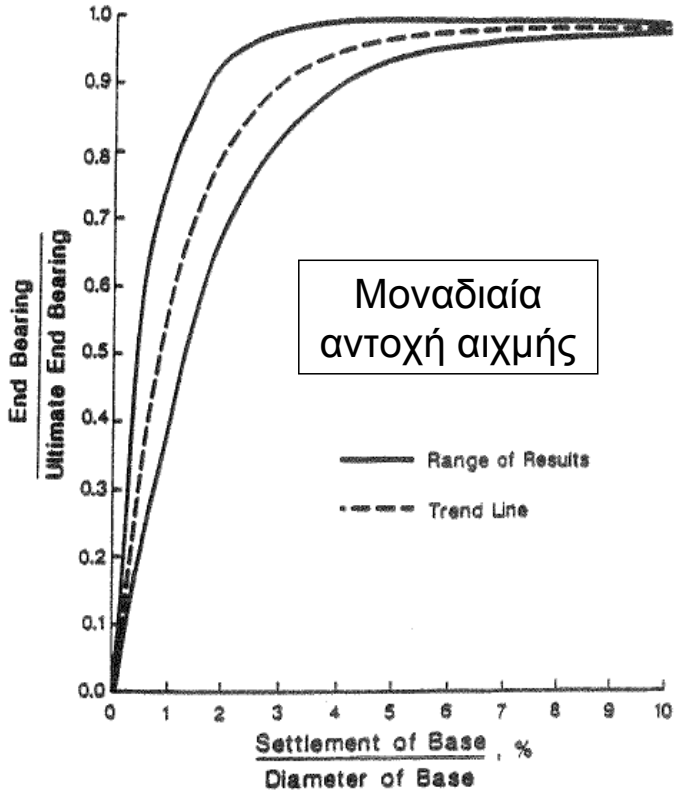



FIGURE 4.6.5.5.1.1B Load Transfer in Tip Bearing Settlement Drilled Shafts in Cohesive Soil
After Reese and O'Neill (1988)

# Έγχυτοι πάσσαλοι σε μή-συνεκτικά (αμμώδη) εδάφη

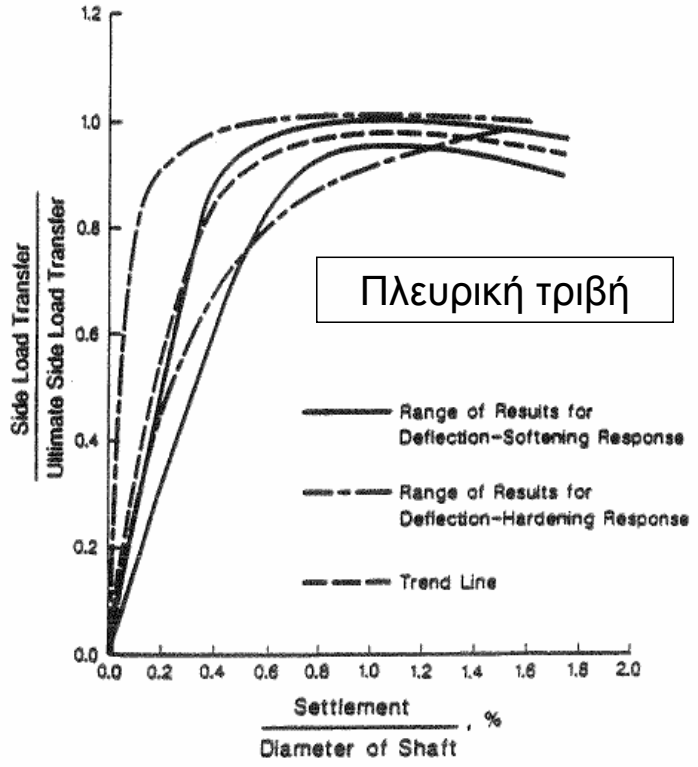



FIGURE 4.6.5.5.1.2A Load Transfer in Side Resistance Versus Settlement Drilled Shafts in Cohesionless Soil
After Reese and O'Neill (1988)

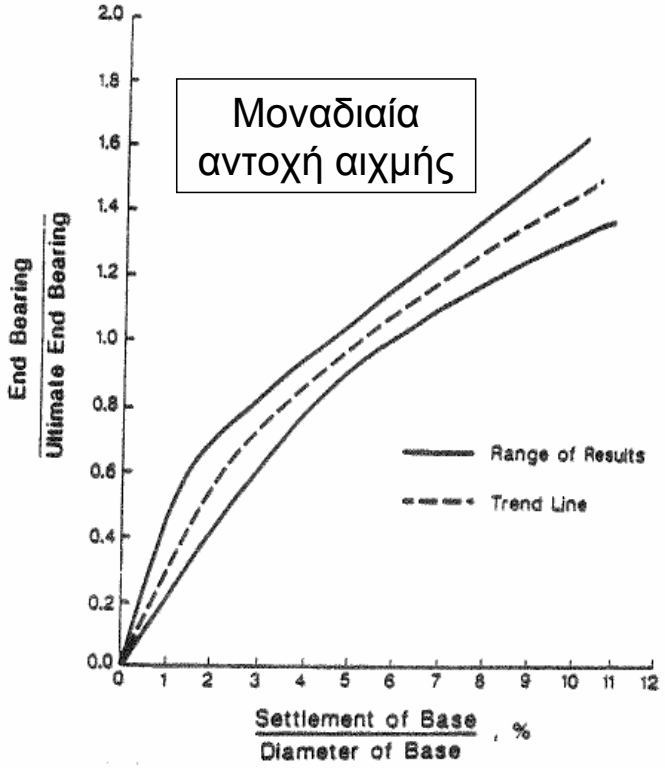
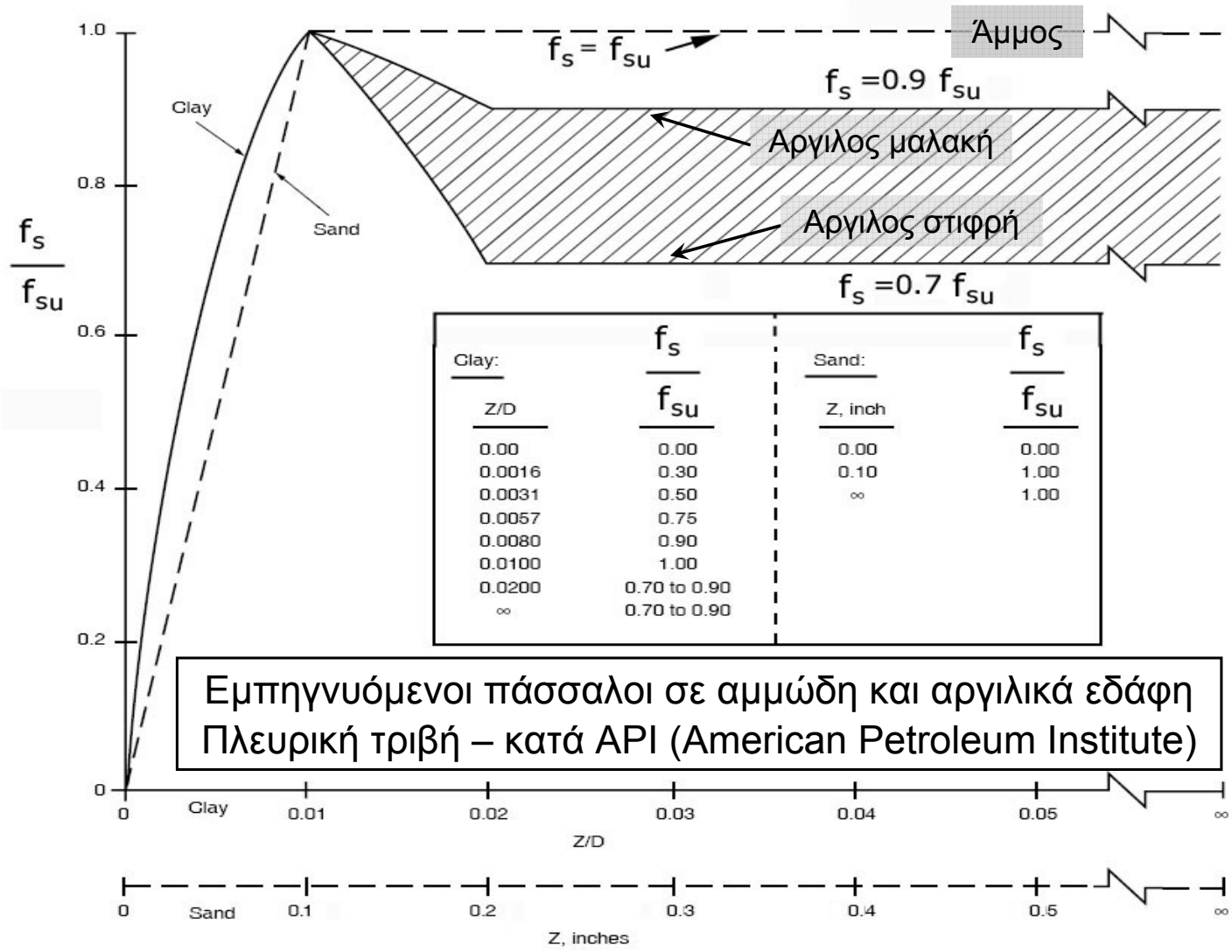



FIGURE 4.6.5.5.1.2B Load Transfer in Tip Bearing Versus Settlement Drilled Shafts in Cohesionless Soil
After Reese and O'Neill (1988)

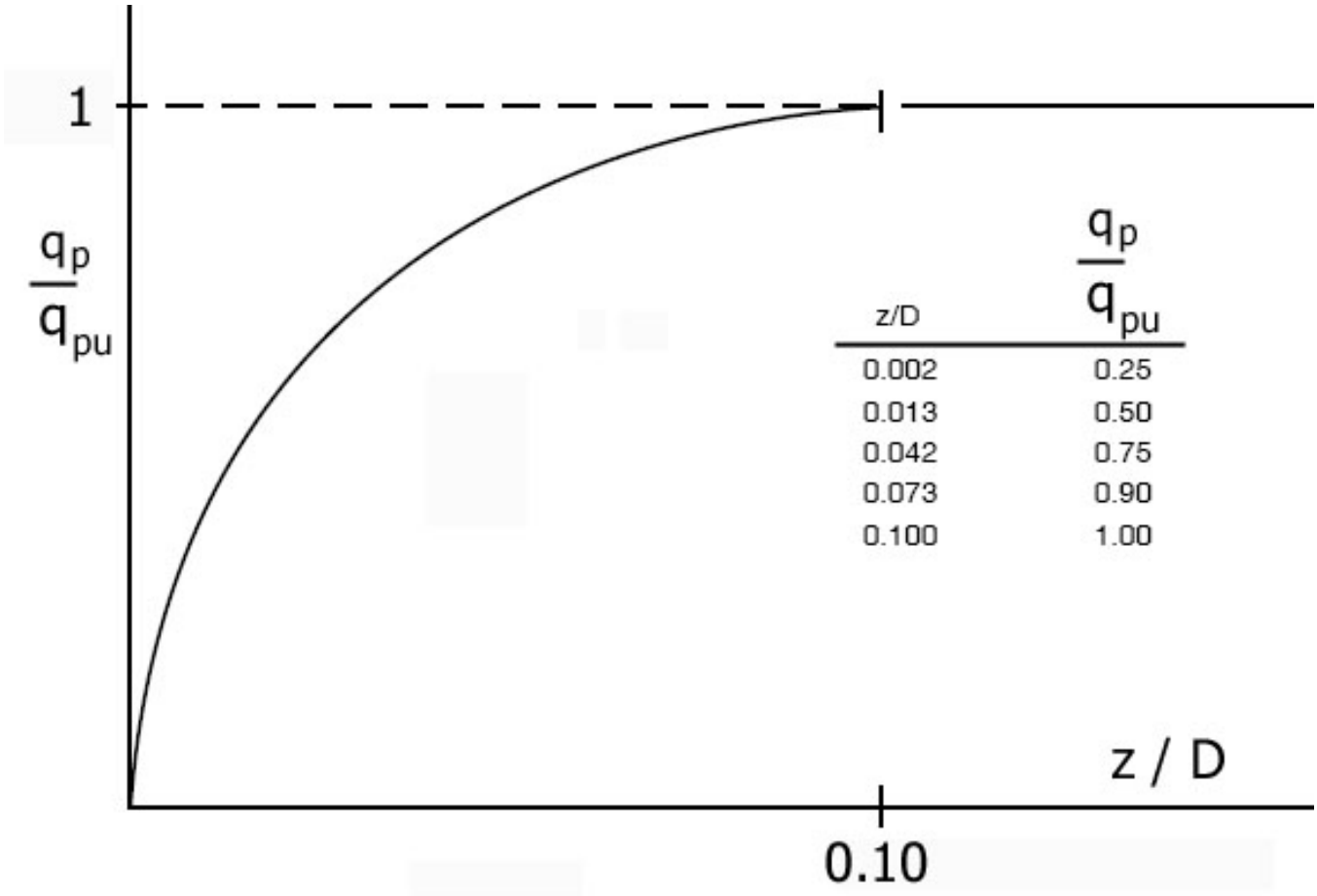



| Clay: Z/D | $\frac{f_s}{f_{su}}$ |
|---|---|
| 0.00 | 0.00 |
| 0.0016 | 0.30 |
| 0.0031 | 0.50 |
| 0.0057 | 0.75 |
| 0.0080 | 0.90 |
| 0.0100 | 1.00 |
| 0.0200 | 0.70 to 0.90 |
| ∞ | 0.70 to 0.90 |

| Sand: Z, inch | $\frac{f_s}{f_{su}}$ |
|---|---|
| 0.00 | 0.00 |
| 0.10 | 1.00 |
| ∞ | 1.00 |

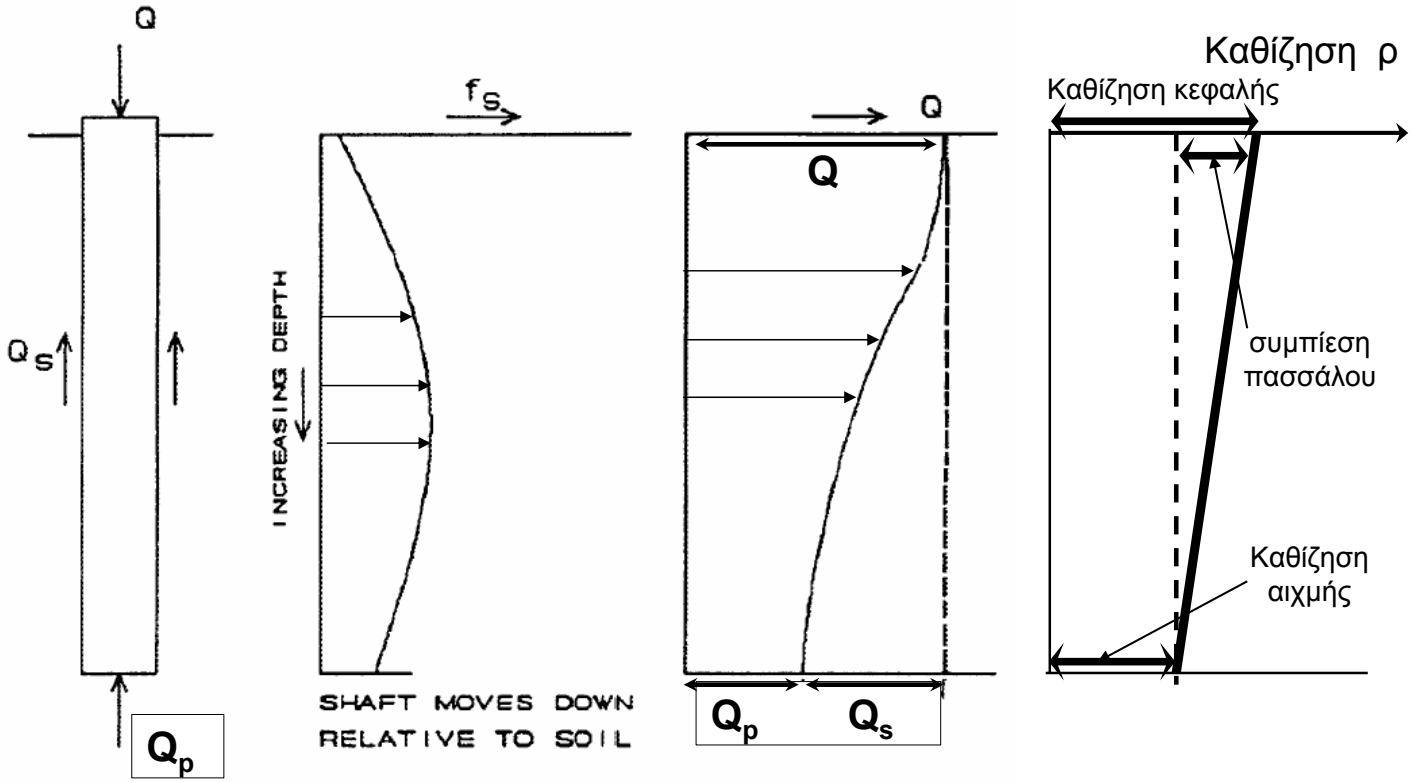
Εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι σε αμμώδη και αργιλικά εδάφη
Πλευρική τριβή – κατά API (American Petroleum Institute)

Εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι σε αμμώδη και αργιλικά εδάφη
Μοναδιαία αντοχή αιχμής




| z/D | $\frac{q_p}{q_{pu}}$ |
|---|---|
| 0.002 | 0.25 |
| 0.013 | 0.50 |
| 0.042 | 0.75 |
| 0.073 | 0.90 |
| 0.100 | 1.00 |

# Ανάληψη φορτίων από θλιβόμενους πασσάλους




$$Q = Q_s + Q_p$$

Κατανομή της πλευρικής τριβής στον πάσσαλο : Η αρχική αύξηση του $f_s$ με το βάθος οφείλεται στην βελτίωση των ιδιοτήτων του εδάφους. Σε μεγαλύτερα βάθη, το $f_s$ μειώνεται λόγω μείωσης της σχετικής μετακίνησης πασσάλου-εδάφους.

# Ανάληψη φορτίων από θλιβόμενους πασσάλους

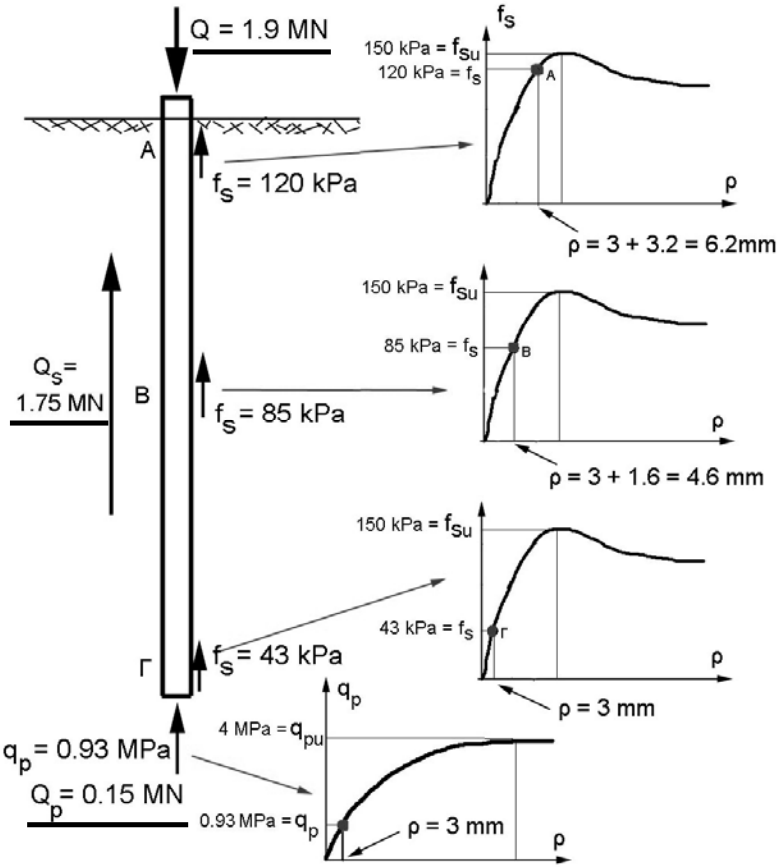
## Παράδειγμα κατανομής της πλευρικής τριβής κατά μήκος εμπηγνυόμενου πασσάλου

Πάσσαλος : μήκος L=15m, διάμετρος B = 0.45m $\Rightarrow A_p = 0.159\ m^2$
Φορτίο λειτουργίας πασσάλου : Q = 1.9 MN

Εδαφος : αμμώδης σχηματισμός
οριακή πλευρική τριβή $f_{su}$ = 150 kPa
οριακή μοναδ. αντίστ. αιχμής $q_{pu}$ = 4 MPa

Οριακό φορτίο πασσάλου :
$Q_{su} = \pi\ B\ L\ f_{su} = 3.14 \times 0.45 \times 15 \times 0.150$
$= 3.18$ MN
$Q_{pu} = A_p\ q_{pu} = 0.159 \times 4 = 0.64$ MN
$Q_u = Q_{su} + Q_{pu} = 3.18 + 0.64 = 3.82$ MN

Συντελεστής ασφαλείας πασσάλου :
$FS = Q_u / Q = 3.82 / 1.9 = 2$



# Ανάληψη φορτίων από θλιβόμενους πασσάλους

## Παράδειγμα κατανομής της πλευρικής τριβής κατά μήκος εμπηγνυόμενου πασσάλου

Καθίζηση αιχμής : 3 mm
Μοναδ. αντίσταση αιχμής: $q_p$ = 0.93 MPa
Αντίσταση αιχμής : $Q_p$ = 0.15 MN
Στοιχεία αιχμής πασσάλου :
$\sigma = Q_p / A_p = 0.15 / 0.159 = 0.93$ MPa
$\varepsilon = \sigma / E_b = 0.93 / 30000 = 0.000031$

Μέσο φορτίο κατά μήκος του πασσάλου :
$Q_m = 0.5 \times (1.9 + 0.15) = 1.025$ MN

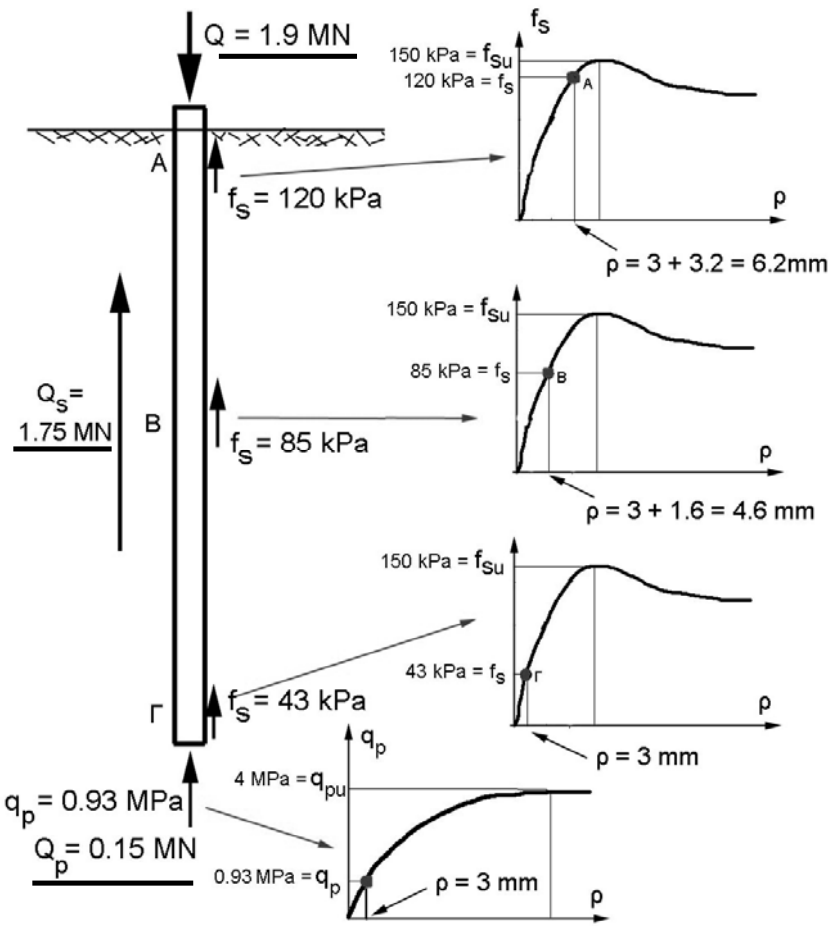
Μέση τάση στον πάσσαλο :
$\sigma_m = Q_m / A_p = 1.025 / 0.159 = 6.45$ MPa

Μέση παραμόρφωση πασσάλου :
$\varepsilon = \sigma_m / E_b = 6.45 / 30000 = 0.00021$

Συμπίεση του πασσάλου :
$\Delta\rho = \varepsilon L = 0.00021 \times 1500$ cm = 3.2 mm

Καθίζηση κεφαλής : 3 + 3.2 = 6.2 mm

Κεφαλή πασσάλου :
$\sigma = Q / A_p = 11.9$ MPa
$\varepsilon = \sigma / E_b = 11.9 / 30000 = 0.0004$




# 2.1 Αξονική φέρουσα ικανότητα πασσάλων εκτοπίσεως

## (εμπηγνυόμενοι πάσσαλοι – πλήρους διατομής και ανοικτοί σωλήνες)

Μέθοδοι εκτίμησης της αξονικής φέρουσας ικανότητας :

1. Με υπολογισμούς (στατικοί τύποι)
2. Μέσω των αποτελεσμάτων επιτόπου δοκιμών (SPT, CPT, PMT)
3. Με αξιοποίηση των χαρακτηριστικών της έμπηξης (δυσχέρεια προχώρησης)
   3.1 Δυναμικοί τύποι (Dynamic Formulae)
   3.2 Κυματική ανάλυση (Wave equation analysis)
4. Με δοκιμαστικές φορτίσεις

Εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας πασσάλων εκτοπίσεως με υπολογισμούς

$$Q_u = Q_{su} + Q_{pu} \quad \begin{cases} Q_{su} = \int_0^L p\, f_{su}\, dz = \pi D \int_0^L f_{su}\, dz = \pi D \sum_i f_{sui}\, \Delta z_i \\ Q_{pu} = A_p\, q_{pu} \end{cases}$$

$q_{pu}$ = οριακή μοναδιαία αντίσταση αιχμής

$f_{su}$ = οριακή πλευρική τριβή

Παρατηρήσεις :

1. Σε αμμώδεις και αμμοχαλικώδεις σχηματισμούς, η φέρουσα ικανότητα πασσάλων εκτοπίσεως αυξάνει σημαντικά με τον χρόνο μετά την έμπηξη, λόγω ανάπτυξης θιξοτροπικών δεσμών μεταξύ των κόκκων της άμμου (ageing). Σε μεταλλικούς πασσάλους, η αύξηση είναι ακόμη μεγαλύτερη λόγω αύξησης της πρόσφυσης με τον χρόνο (ανάπτυξη επιφανειακής σκωρίας στο τοίχωμα του πασσάλου).
2. Σε αργιλικούς σχηματισμούς (κυρίως μαλακές έως στιφρές αργίλους), η φέρουσα ικανότητα πασσάλων εκτοπίσεως αυξάνει με τον χρόνο μετά την έμπηξη λόγω στερεοποιήσεως της αργίλου (αύξηση των οριζόντιων ενεργών τάσεων). Σε σκληρές αργίλους, η αύξηση είναι μικρή έως μηδενική (και ενίοτε αρνητική).

Συνεπώς, κρίσιμη φέρουσα ικανότητα πασσάλων σε αργίλους είναι η βραχυχρόνια (ανάλυση υπό αστράγγιστες συνθήκες : φ = 0, c = $c_u$ και ολικές τάσεις)

Εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας πασσάλων εκτοπίσεως με υπολογισμούς

## 1. Εκτίμηση της οριακής μοναδιαίας αντίστασης αιχμής ($q_{pu}$)

$$Q_{pu} = A_p\, q_{pu}$$

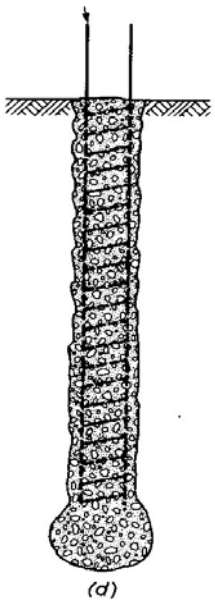
$q_{pu}$ = οριακή μοναδιαία αντίσταση αιχμής

$A_p$ = εμβαδόν αιχμής πασσάλου

Συνήθως εφαρμόζονται τύποι φέρουσας ικανότητας ανάλογοι με αυτούς που χρησιμοποιούνται για τις επιφανειακές θεμελιώσεις :

$$q_{pu} = c\, N_c\, s_c + \sigma'_v\, N_q\, s_q + \frac{1}{2} \gamma\, B\, N_\gamma\, s_\gamma$$

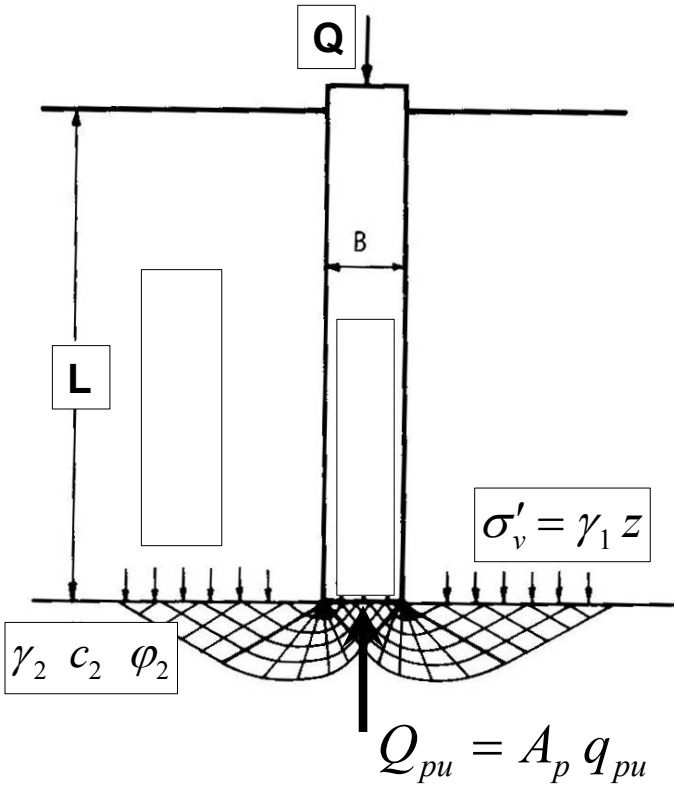
- $\sigma'_v$ = κατακόρυφη ενεργός τάση στην αιχμή του πασσάλου
- Συντελεστές φέρουσας ικανότητας $N_c$ , $N_q$ , $N_\gamma$
- Συντελεστές σχήματος : $s_c$ , $s_q$ , $s_\gamma$
- Ο όρος πλάτους ($0.5\, \gamma\, B\, N_\gamma\, s_\gamma$) συνήθως αμελείται, επειδή το εύρος (B) της αιχμής του πασσάλου είναι μικρό. Εξαίρεση αποτελούν πάσσαλοι διευρυμένης αιχμής (π.χ. πάσσαλοι Franki), όπου ο όρος πλάτους μπορεί να είναι σημαντικός →



## 1. Εκτίμηση οριακής μοναδιαίας αντίστασης αιχμής ($q_{pu}$)

1.1 Μέθοδος Terzaghi :

$$q_{pu} = 1.3\, c_2\, N_c + \sigma'_v\, N_q + \underbrace{0.3\, \gamma_2\, B\, N_\gamma}_{\text{ο όρος αυτός συνήθως είναι αμελητέος}}$$




Μηχανισμός θραύσεως στην αιχμή πασσάλου κατά Terzaghi :

Δεν περιλαμβάνει την διατμητική αντοχή του εδάφους πάνω από τη στάθμη της αιχμής του πασσάλου. Το έδαφος αυτό θεωρείται μόνον ως επιφόρτιση (βάρος)

## 1. Εκτίμηση οριακής μοναδιαίας αντίστασης αιχμής ($q_{pu}$)

1.1 Μέθοδος Terzaghi :

$$q_{pu} = 1.3\, c\, N_c + \sigma'_v\, N_q + 0.3\, \gamma\, B\, N_\gamma$$

$$N_q = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi}\exp(\pi\tan\phi) \qquad N_c = (N_q - 1)\frac{1}{\tan\phi} \qquad N_\gamma = 2(N_q - 1)\tan\phi$$

Ειδική περίπτωση για ταχεία (αστράγγιστη) φόρτιση πασσάλου σε άργιλο (φ=0) :

$$q_{pu} = 6.68\, c_u + \sigma_v$$

όπου :

$c_u$ = αστράγγιστη διατμητική αντοχή αργίλου

$\sigma_v$ = ολική κατακόρυφη τάση στην αιχμή του πασσάλου

Παρατήρηση : Συνήθως, η αντοχή πασσάλων σε αργίλους αυξάνει με την πάροδο του χρόνου. Αρα, δυσμενέστερη είναι η αστράγγιστη (ταχεία) φόρτιση των πασσάλων.

| $\phi$ | $N_c$ | $N_q$ | $N_\gamma$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 5.142 | 1.000 | 0.000 |
| 1 | 5.379 | 1.094 | 0.003 |
| 2 | 5.632 | 1.197 | 0.014 |
| 3 | 5.900 | 1.309 | 0.032 |
| 4 | 6.185 | 1.433 | 0.060 |
| 5 | 6.489 | 1.568 | 0.099 |
| 6 | 6.813 | 1.716 | 0.151 |
| 7 | 7.158 | 1.879 | 0.216 |
| 8 | 7.527 | 2.058 | 0.297 |
| 9 | 7.922 | 2.255 | 0.397 |
| 10 | 8.345 | 2.471 | 0.519 |
| 11 | 8.798 | 2.710 | 0.665 |
| 12 | 9.285 | 2.974 | 0.839 |
| 13 | 9.807 | 3.264 | 1.045 |
| 14 | 10.370 | 3.586 | 1.289 |
| 15 | 10.977 | 3.941 | 1.576 |
| 16 | 11.631 | 4.335 | 1.913 |
| 17 | 12.338 | 4.772 | 2.307 |
| 18 | 13.104 | 5.258 | 2.767 |
| 19 | 13.934 | 5.798 | 3.304 |
| 20 | 14.835 | 6.399 | 3.930 |

| $\phi$ | $N_c$ | $N_q$ | $N_\gamma$ |
|---|---|---|---|
| 20 | 14.835 | 6.399 | 3.930 |
| 21 | 15.815 | 7.071 | 4.661 |
| 22 | 16.833 | 7.821 | 5.512 |
| 23 | 18.049 | 8.661 | 6.504 |
| 24 | 19.324 | 9.603 | 7.661 |
| 25 | 20.721 | 10.662 | 9.011 |
| 26 | 22.254 | 11.854 | 10.558 |
| 27 | 23.942 | 13.199 | 12.432 |
| 28 | 25.803 | 14.720 | 14.590 |
| 29 | 27.860 | 16.443 | 17.121 |
| 30 | 30.140 | 18.401 | 20.093 |
| 31 | 32.671 | 20.631 | 23.591 |
| 32 | 35.490 | 23.177 | 27.715 |
| 33 | 38.638 | 26.092 | 32.590 |
| 34 | 42.164 | 29.440 | 38.366 |
| 35 | 46.124 | 33.296 | 45.228 |
| 36 | 50.586 | 37.753 | 53.404 |
| 37 | 55.630 | 42.920 | 63.178 |
| 38 | 61.352 | 48.933 | 74.899 |
| 39 | 67.867 | 55.957 | 89.007 |
| 40 | 75.313 | 64.195 | 106.054 |

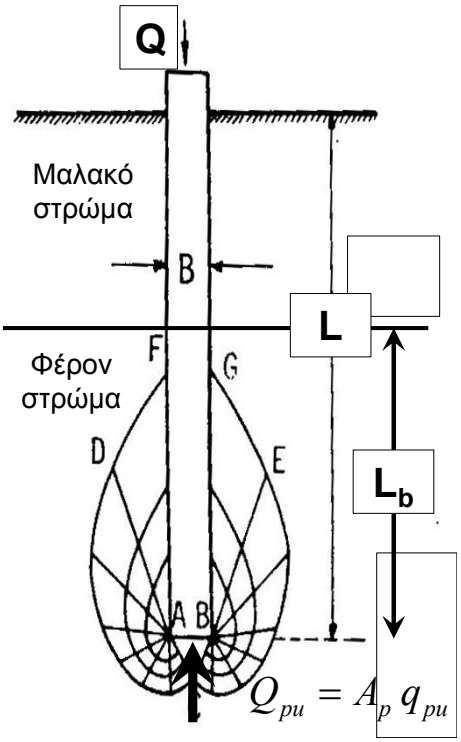
## 1. Εκτίμηση οριακής μοναδιαίας αντίστασης αιχμής ($q_{pu}$)

### 1.2 Μέθοδος Meyerhof (1976) :

1. Για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε εδάφη με φ ≠ 0, δηλαδή :
   (α) άμμοι και αμμοχάλικα
   (β) άργιλοι υπό στραγγισμένες συνθήκες (μακροχρόνια φέρουσα ικανότητα)

$$q_{pu} = c\,N'_c + \sigma'_v\,N'_q$$

Σημείωση : Η επιρροή του εύρους B της αιχμής ($0.5\,\gamma\,B\,N_\gamma\,s_\gamma$) έχει παραληφθεί ως αμελητέα




---

2. Για αστράγγιστη (ταχεία) φόρτιση κορεσμένων αργίλων :

Για φ=0 $\Rightarrow$ $N'_c = 6 \div 9$ , $N'_q = 1$

$$q_{pu} = (6 \div 9)\,c_u + \sigma_v$$

(6÷9) : αναλόγως του βάθους έμπηξης ($L_b$) στο φέρον στρώμα.
6 : για $L_b$ / B = 0 , 9 : για $L_b$ / B > 4 , γραμ. παρεμβολή ενδιαμέσως.

$c_u$ = αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου

$\sigma_v$ = κατακόρυφη ολική τάση στην αιχμή του πασσάλου

Μηχανισμός θραύσεως στην αιχμή πασσάλου κατά Meyerhof :

---

## 1. Εκτίμηση οριακής μοναδιαίας αντίστασης αιχμής ($q_{pu}$)

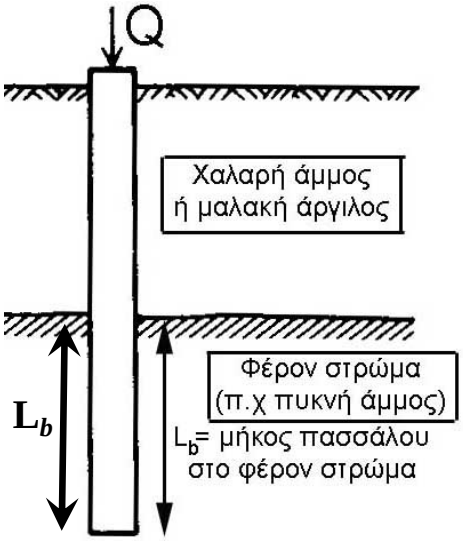
*Παρατήρηση : Συνήθως, η αντοχή πασσάλων σε αργίλους αυξάνει με την πάροδο του χρόνου. Αρα, δυσμενέστερη είναι η αστράγγιστη (ταχεία) φόρτιση πασσάλων σε αργίλους, σε σύγκριση με την αντίστοιχη ανάλυση μέσω ενεργών τάσεων (φ ≠ 0).*

### 1.2 Μέθοδος Meyerhof (για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε εδάφη με φ ≠ 0) :

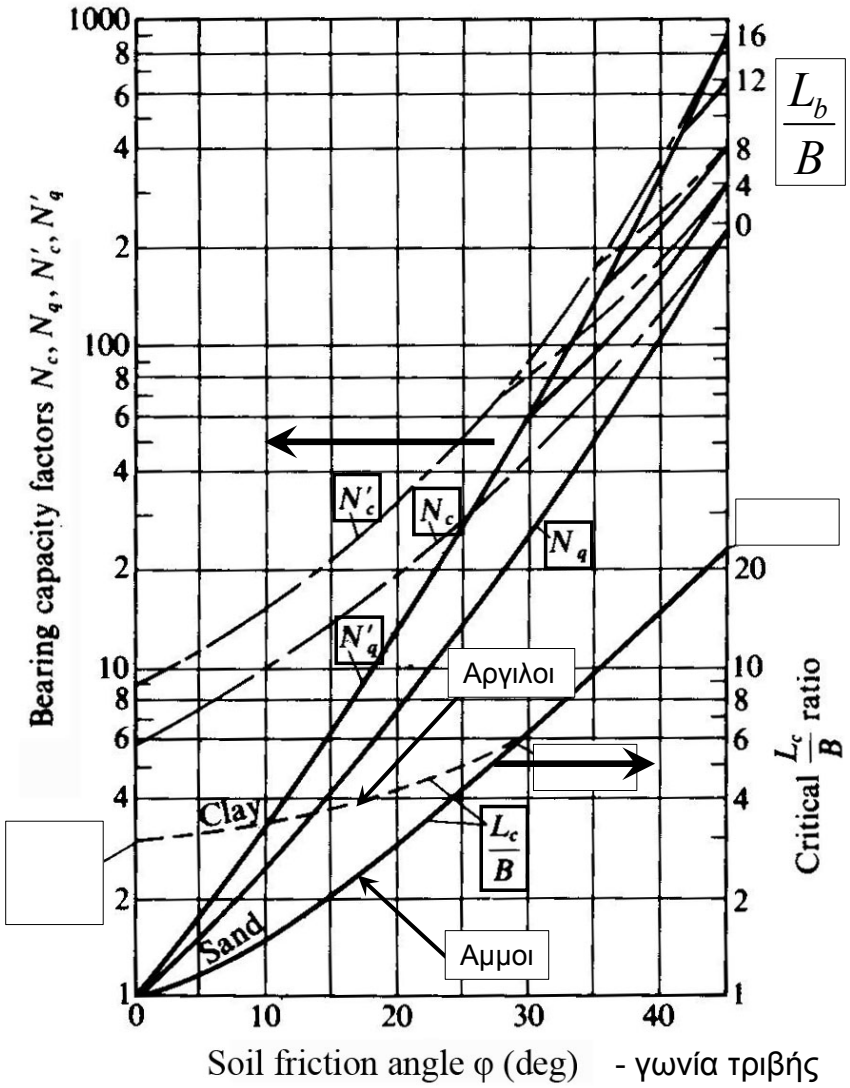
$$q_{pu} = c\,N'_c + \sigma'_v\,N'_q$$

$N'_c$ , $N'_q$ = συντελεστές φέρουσας ικανότητας

Εξαρτώνται από την γωνία τριβής του εδάφους (φ) και το βάθος έμπηξης ($L_b$) στο φέρον στρώμα. Οι τιμές των συντελεστών φέρουσας ικανότητας φαίνονται στο σχήμα της επόμενης σελίδας. Στο ίδιο σχήμα φαίνονται και οι τιμές του κρίσιμου βάθους έμπηξης στο φέρον στρώμα ( $L_c$ ), πέραν του οποίου η τιμή του $q_{pu}$ δεν αυξάνει άλλο.




$\sigma'_v$ = κατακόρυφη ενεργός τάση στην αιχμή του πασσάλου ή στο κρίσιμο βάθος έμπηξης $L_c$ (όποιο είναι μικρότερο), δηλαδή : $\sigma'_v = min\,\{\,\gamma'\,L\,,\,\gamma'\,L_c\,\}$




## 1.2 Μέθοδος Meyerhof :

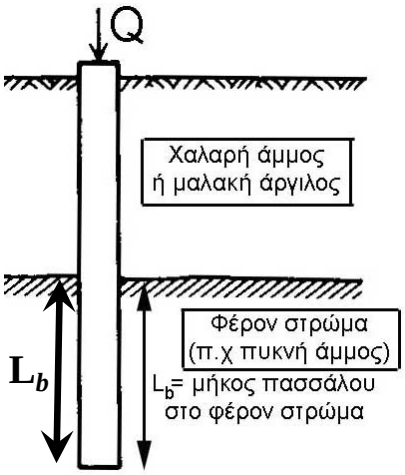
$$q_{pu} = c\,N'_c + \sigma'_v\,N'_q$$

$N'_c$ , $N'_q$ = συντελεστές φέρουσας ικανότητας

B = πλάτος ή διάμετρος πασσάλου

$L_b$ = μήκος έμπηξης του πασσάλου στο φέρον στρώμα

$L_c$ = κρίσιμο μήκος έμπηξης του πασσάλου στο φέρον στρώμα




## 1.2 Μέθοδος Meyerhof για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε εδάφη με φ ≠ 0 :

Υπολογισμός των συντελεστών $N'_c$ , $N'_q$ : $$q_{pu} = c\,N'_c + \sigma'_v\,N'_q$$

1. Για $L_b$ / B = 0 (μηδενική διείσδυση στο φέρον στρώμα) : Οι τιμές των $N'_c$ , $N'_q$ λαμβάνονται από τις κατώτερες καμπύλες του σχήματος (καμπύλες $N_c$ και $N_q$).
2. Για $L_b$ / B ≥ 4 : Οι τιμές των $N'_c$ , $N'_q$ λαμβάνονται από τις ανώτερες καμπύλες του σχήματος (καμπύλες $N'_c$ και $N'_q$). Για φ > 30$^o$, οι τιμές των $N'_c$ , $N'_q$ εξαρτώνται και από την τιμή του $L_b$ / B (καμπύλες για 4,8,12,16 στο άνω δεξιά άκρο του σχήματος).
3. Για 0 < $L_b$ / B < 4 : Οι τιμές των $N'_c$ , $N'_q$ λαμβάνονται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των ανώτερων καμπύλων (N΄) και των κατώτερων καμπύλων (N).

$L_b$ = μήκος έμπηξης του πασσάλου στο φέρον στρώμα

B = πλάτος ή διάμετρος πασσάλου

---

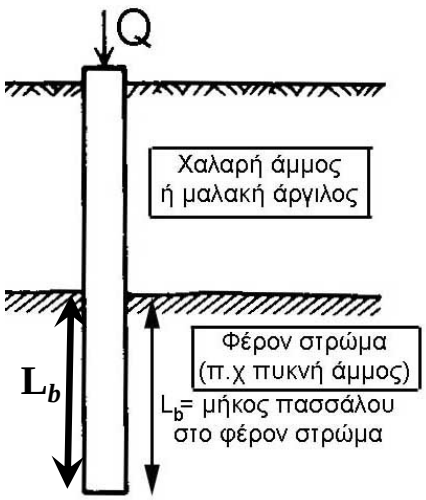
Παρατήρηση : Για αστράγγιστη φόρτιση αργίλων (φ = 0) :

Για $L_b$ / B = 0 ⇒ N΄$_c$ = 6

Για $L_b$ / B ≥ 4 ⇒ N΄$_c$ = 9

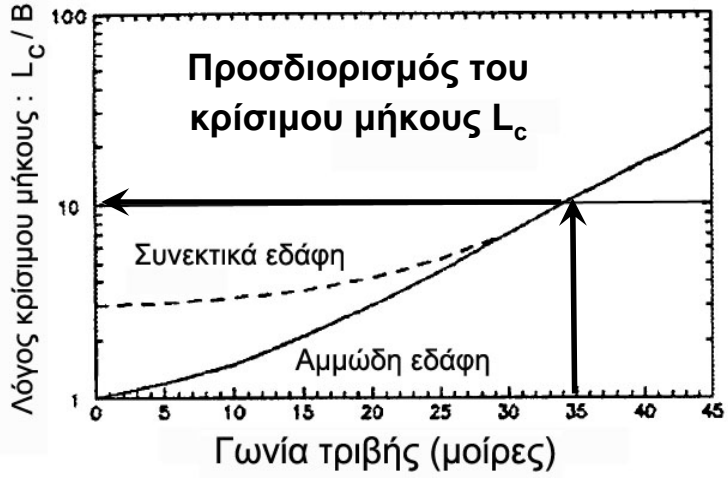
Για 0 < $L_b$ / B < 4 ⇒ N΄$_c$ = 6 ÷ 9

Συνεπώς :



## 1.2 Μέθοδος Meyerhof για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε εδάφη με φ ≠ 0 : Μέγιστες τιμές της οριακής μοναδιαίας αντίστασης αιχμής ($q_{pu}$) σε άμμους

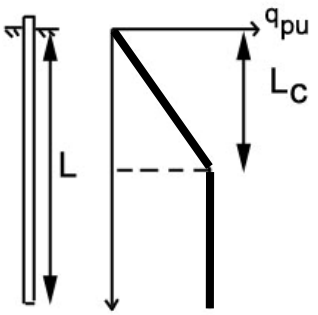
1. Περιορισμός της τιμής του $q_{pu}$ σε περίπτωση μήκους διείσδυσης στο φέρον στρώμα ($L_b$) μεγαλύτερου από το κρίσιμο μήκος διείσδυσης ($L_c$), δηλαδή για :

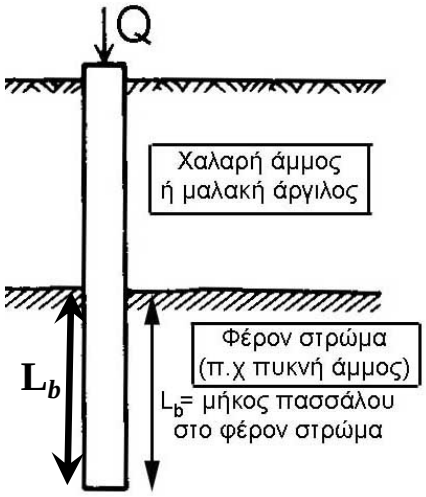



$L_b > L_c$ αλλά και $L_b > 10$ B

$$q_{pu} = \sigma'_v N'_q \le (\gamma' L_c) N'_q \equiv q_{Lc}$$

κατακόρυφη ενεργός τάση ($\sigma'_v$) σε βάθος $L_c$

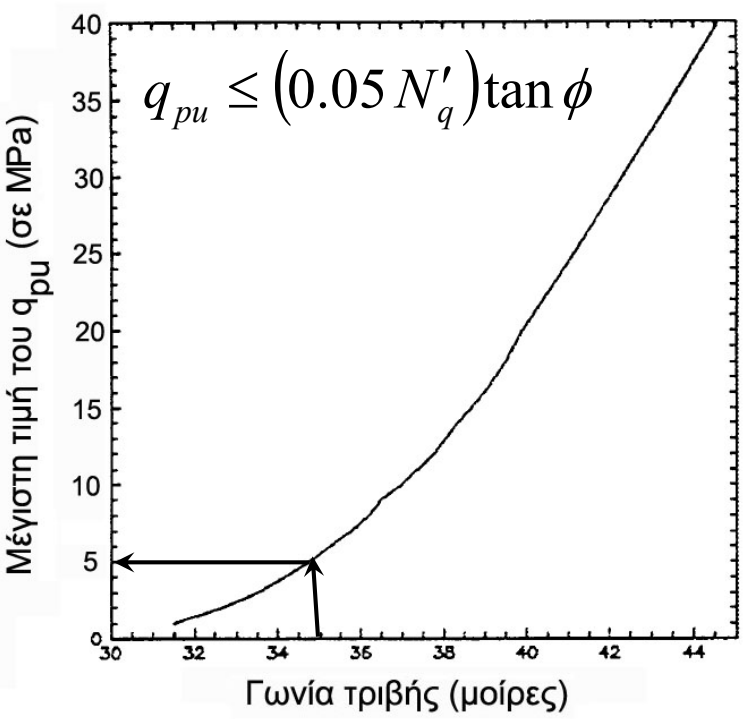



## 1.2 Μέθοδος Meyerhof για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε εδάφη με φ ≠ 0 : Μέγιστες τιμές της οριακής μοναδιαίας αντίστασης αιχμής ($q_{pu}$) σε άμμους

2. Περιορισμός της τιμής του $q_{pu}$ σε περίπτωση μήκους διείσδυσης στο φέρον στρώμα ($L_b$) μικρότερου από το κρίσιμο μήκος διείσδυσης ($L_c$), αλλά τουλάχιστον 10 B, δηλαδή για : 10 B < $L_b$ < $L_c$ :

$$q_{pu} = \sigma'_v N'_q \le \underbrace{\left(0.05\, N'_q\right)\tan\phi}_{\text{(σε MPa)}} \equiv q_{10B}$$




Παράδειγμα : φ = 35° ⇒ $N'_q$=140

max $q_{pu}$ = $q_{10B}$ = 0.05 x 140 x tan35° ⇒

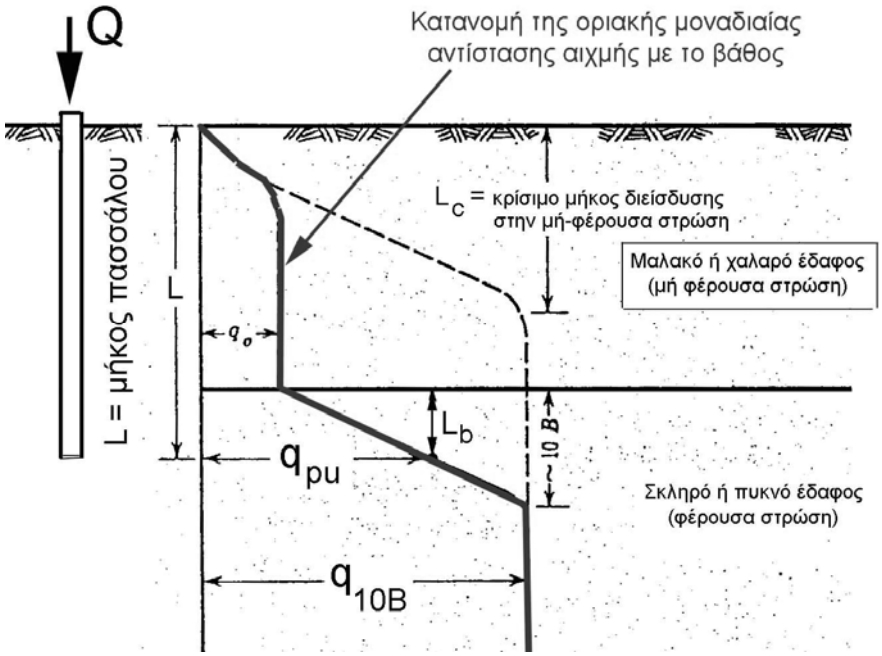
$q_{10B}$ = 4.9 MPa

## 1.2 Μέθοδος Meyerhof για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε εδάφη με φ ≠ 0 :

## Μέγιστες τιμές της οριακής μοναδιαίας αντίστασης αιχμής ($q_{pu}$) σε άμμους

3. Περιορισμός της τιμής του $q_{pu}$ σε περίπτωση μήκους διείσδυσης στο φέρον στρώμα ($L_b$) μικρότερου από το κρίσιμο μήκος διείσδυσης ($L_c$), αλλά λιγότερο από 10 B, δηλαδή για : $L_b < L_c$ και $L_b < 10$ B :

$$q_{pu} \le \frac{L_b}{10\,B}\, q_{10B} \equiv q_{Lb} \quad \text{δηλαδή :} \quad q_{pu} \le \frac{L_b}{B}(0.005\,N'_q)\tan\phi \quad \text{(σε MPa)}$$




Ενίοτε, στην ανωτέρω μέγιστη τιμή του $q_{pu}$, προστίθεται και η τιμή του $q_{pu} = q_o$ που αντιστοιχεί στην ανώτερη (μή φέρουσα) εδαφική στρώση :

$$q_{pu} \le q_o + \frac{L_b}{10B}\left(q_{10B} - q_o\right)$$

ή συντηρητικά :

$$q_{pu} \le \frac{L_b}{10\,B}\, q_{10B} \equiv q_{Lb}$$

## 1.2 Μέθοδος Meyerhof για εμπηγνυόμενους πασσάλους :

## Σύνοψη μεθόδου υπολογισμού του $q_{pu}$ :

1. Υπολογισμός των συντελεστών $N'_c$ , $N'_q$ από το νομογράφημα, συναρτήσει της γωνίας τριβής (φ) του εδάφους (στην περιοχή της αιχμής) και του βάθους έμπηξης ($L_b$) στο φέρον στρώμα.

2. Υπολογισμός του ($q_{pu}$) από τη σχέση :

$$q_{pu} = c\,N'_c + \sigma'_v\,N'_q \quad \text{(για φ ≠ 0)} \quad \text{ή :} \quad q_{pu} = c_u\,N'_c + \sigma_v \quad \text{(για φ = 0)}$$

3. Για πασσάλους σε άμμο : Ελεγχος έναντι υπέρβασης των μέγιστων οριακών τιμών της μοναδιαίας αντίστασης αιχμής ($q_{pu}$) : $q_{pu} \le \left\{ q_{Lc}\ ,\ q_{10B}\ ,\ q_{Lb} \right\}$

Σημείωση :

(1) Για πασσάλους σε αργίλους υπό αστράγγιστες συνθήκες (φ = 0), δεν απαιτείται έλεγχος έναντι υπέρβασης των μέγιστων οριακών τιμών του $q_{pu}$.

(2) Για πασσάλους σε αργίλους υπό στραγγισμένες συνθήκες (φ ≠ 0), συχνά γίνεται έλεγχος έναντι υπέρβασης των μέγιστων οριακών τιμών του $q_{pu}$ κατά τα ανωτέρω, με προσθήκη και του όρου ( $c\,N'_c$ ) στην οριακή τιμή. Π.χ. ο έλεγχος έναντι υπέρβασης του κρίσιμου μήκους ($L_c$) δίνει :

$$q_{pu} = c\,N'_c + \sigma'_v\,N'_q \le c\,N'_c + \left(\gamma'\,L_c\right)N'_q \equiv q_{Lc}$$

1.2 Μέθοδος Meyerhof : $$q_{pu} = c\,N'_c + \sigma'_v\,N'_q$$

Παράδειγμα εφαρμογής :

Προκατασκευασμένος πάσσαλος από οπλισμένο σκυρόδεμα, τετραγωνικής διατομής πλάτους B = 0.46m (18 in) και μήκους έμπηξης L=15m σε άμμο με φ=35$^o$.

Για φ = 35$^o$ $\Rightarrow$ $L_c$ / B = 10 $\Rightarrow$ $L_c$ = 10 x 0.46 = 4.6m $\Rightarrow$ max $\sigma'_v$ = 4.6 x 20 = 92 kPa

Επειδή L = $L_b$ = 15m $\Rightarrow$ $L_b$ / B = 15 / 0.46 = 32.6 > 16, οι τιμές των συντελεστών $N'_c$ , $N'_q$ λαμβάνονται από τις «ανώτερες» καμπύλες (καμπύλες $N'_c$ , $N'_q$ ) :

$N'_c$ = 180 , $N'_q$ = 140.

Αρα : $q_{pu} = c\,N'_c + \sigma'_v\,N'_q = 0 \times 180 + 92 \times 140 = 12880\,kPa = 12.9\ MPa$

Για αμμώδη εδάφη, η τιμή του $q_{pu}$ δεν μπορεί να υπερβεί τη μέγιστη τιμή (σε MPa) :

max $q_{pu} \le q_{Lc}$ = ($\gamma'$ $L_c$) x $N'_q$ = 0.020 x 4.6 x 140 = 12.9 MPa

Αρα : $q_{pu}$ = 12.9 MPa

Γενικότερα : Από την επιφάνεια μέχρι το βάθος z = 1.76m, γραμμική αύξηση του $q_{pu}$ από μηδέν έως 4.9 MPa. Για z = 1.76m ÷ 4.6m $\Rightarrow$ $q_{pu}$ = 4.9 ÷ 12.9 MPa

---

Παράδειγμα 2 : Πάσσαλος (ως άνω) σε αργιλικό έδαφος με c = 100 kPa και φ=20$^o$.

Για φ = 20$^o$ $\Rightarrow$ $L_c$ / B = 4.1 $\Rightarrow$ $L_c$ = 4.1 x 0.46 = 1.9m $\Rightarrow$ max $\sigma'_v$ = 1.9 x 20 = 38 kPa

$L_b$ = 15m $\Rightarrow$ $L_b$ / B = 15 / 0.46 = 32.6 > 16. Αρα : $N'_c$ = 32, $N'_q$ = 14

Αρα : $q_{pu}$ = 100 x 32 + 38 x 14 = 3732 kPa = 3.7 MPa

1. Εκτίμηση οριακής μοναδιαίας αντίστασης αιχμής ($q_{pu}$)

1.3 Μέθοδος American Petroleum Institute (API) :

για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε αμμώδη εδάφη :

$$q_{pu} = \sigma'_v\,N_q \le q_{pu,\max}$$

| Είδος αμμώδους εδάφους | Συνιστώμενη τιμή του $N_q$ | Μέγιστη οριακή μοναδιαία αντίσταση αιχμής $q_{pu,max}$ (MPa) |
|---|---|---|
| Πολύ χαλαρή άμμος – Χαλαρή αμμώδης ιλύς | 8 | 1.9 |
| Χαλαρή άμμος – Μέσης πυκνότητας αμμώδης ιλύς | 12 | 2.9 |
| Αμμος μέσης πυκνότητας – Πυκνή αμμώδης ιλύς | 20 | 4.8 |
| Πυκνή άμμος – Πολύ πυκνή αμμώδης ιλύς | 40 | 9.6 |
| Πολύ πυκνή άμμος – Πυκνό αμμοχάλικο | 50 | 12 |

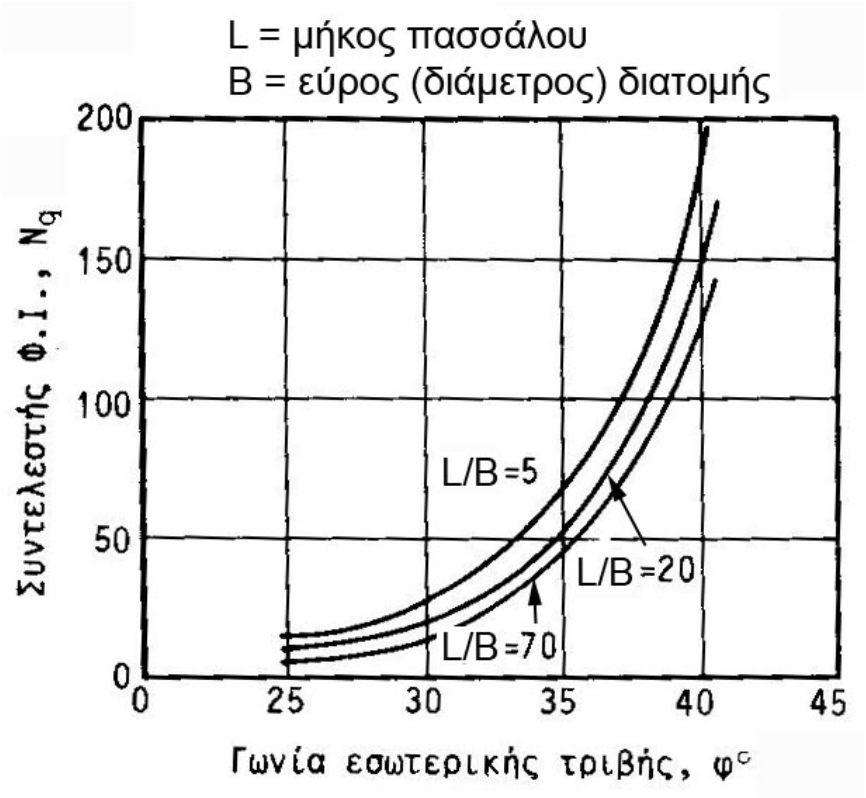
$\sigma'_v$ = κατακόρυφη ενεργός τάση στην αιχμή του πασσάλου

1. Εκτίμηση οριακής μοναδιαίας αντίστασης αιχμής ($q_{pu}$)

1.4 Μέθοδος Berezantsev για εμπηγνυόμενους πασσάλους σε αμμώδεις σχηματισμούς :

$$q_{pu} = \sigma'_v N_q$$

σ'$_v$ = ενεργός κατακόρυφη τάση στην αιχμή του πασσάλου




Τιμές του συντελεστή φέρουσας ικανότητας $N_q$ κατά Berezantsev

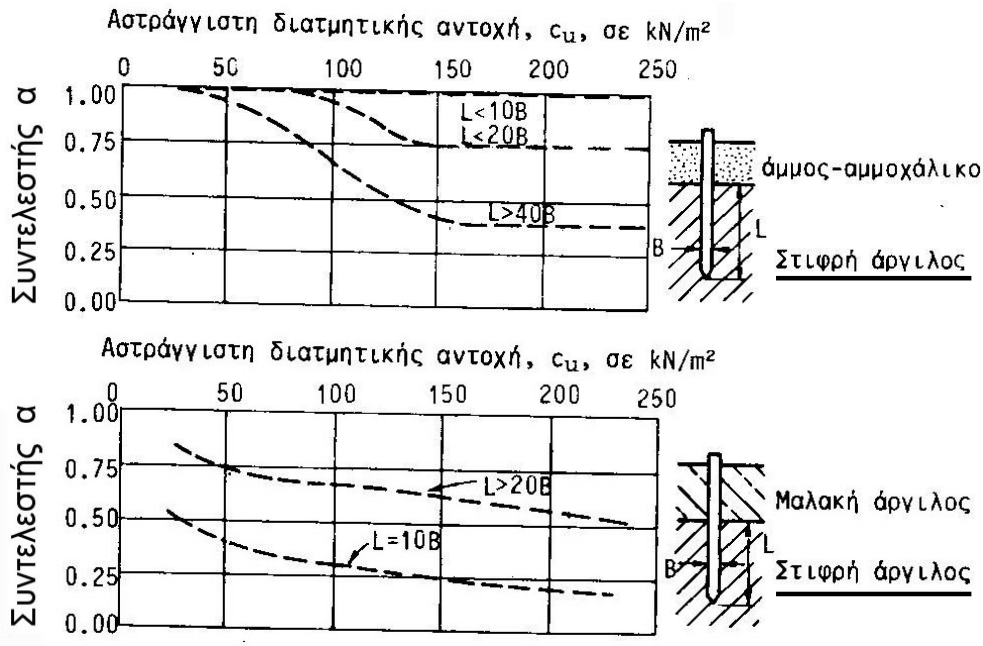
Εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας πασσάλων εκτοπίσεως με υπολογισμούς

2. Εκτίμηση οριακής πλευρικής τριβής ($f_{su}$) – Μέθοδος Tomlinson

Οριακή πλευρική τριβή σε συνεκτικά εδάφη (ταχεία φόρτιση – φ=0) : $f_{su} = \alpha\, c_u$

$c_u$ = αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου στην περιοχή του $f_{su}$

Παρατήρηση : Συνήθως, η αντοχή πασσάλων σε αργίλους αυξάνει με την πάροδο του χρόνου. Αρα, δυσμενέστερη είναι η αστράγγιστη (ταχεία) φόρτιση (ανάλυση με φ=0).




Τιμές του συντελεστή φέρουσας ικανότητας «α» με φέρον στρώμα στιφρή άργιλο (κατά Tomlinson).

L = μήκος διείσδυσης στη στιφρή άργιλο.

Δίνονται οι τιμές του «α» στη στιφρή άργιλο.

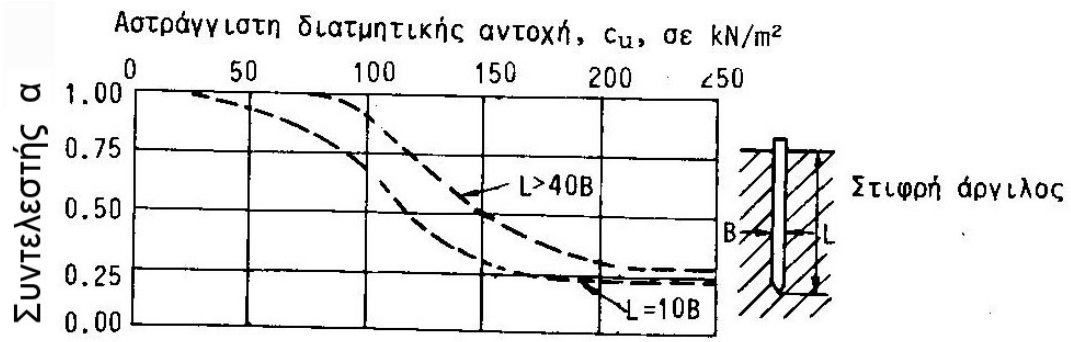
Εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας πασσάλων εκτοπίσεως με υπολογισμούς

2. Εκτίμηση οριακής πλευρικής τριβής ($f_{su}$) – Μέθοδος Tomlinson

Οριακή πλευρική τριβή σε συνεκτικά εδάφη (ταχεία φόρτιση – φ=0) : $f_{su} = \alpha c_u$

$c_u$ = αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου στην περιοχή του $f_{su}$

Τιμές του συντελεστή φέρουσας ικανότητας «α» στη στιφρή άργιλο κατά Tomlinson



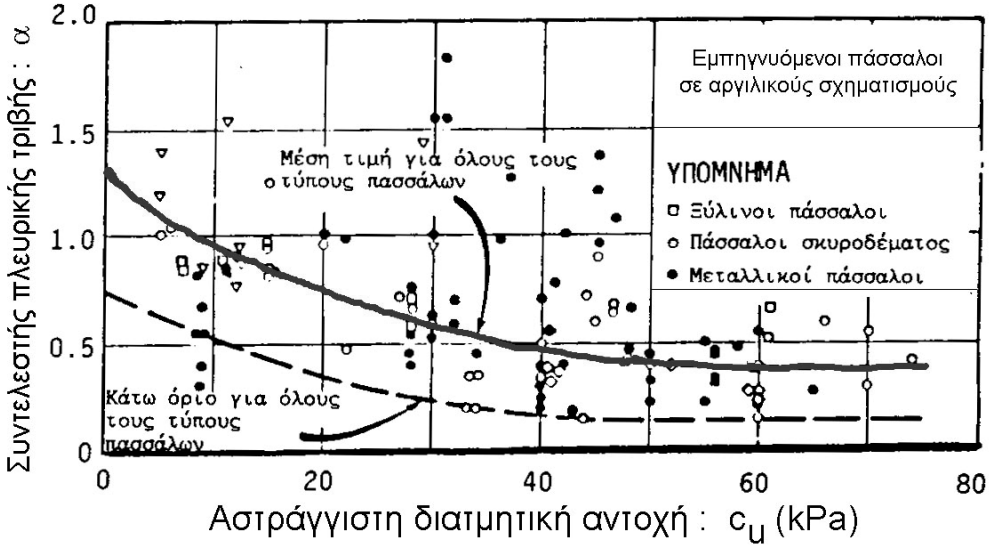

Εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας πασσάλων εκτοπίσεως με υπολογισμούς

2. Εκτίμηση οριακής πλευρικής τριβής ($f_{su}$) – Μέθοδος Tomlinson

Οριακή πλευρική τριβή σε συνεκτικά εδάφη (ταχεία φόρτιση – φ=0) : $f_{su} = \alpha c_u$

$c_u$ = αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου στην περιοχή του $f_{su}$

Τιμές του συντελεστή φέρουσας ικανότητας «α» κατά Tomlinson με βάση αποτελέσματα δοκιμαστικών φορτίσεων σε εμπηγνυόμενους πασσάλους



Εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας πασσάλων εκτοπίσεως με υπολογισμούς

2. Εκτίμηση οριακής πλευρικής τριβής ($f_{su}$) – Βραχυχρόνια φόρτιση (φ=0)

Μέθοδος του API (American Petroleum Institute) :

2.1 Οριακή πλευρική τριβή σε συνεκτικά εδάφη (ταχεία φόρτιση) : $f_{su} = \alpha\, c_u$

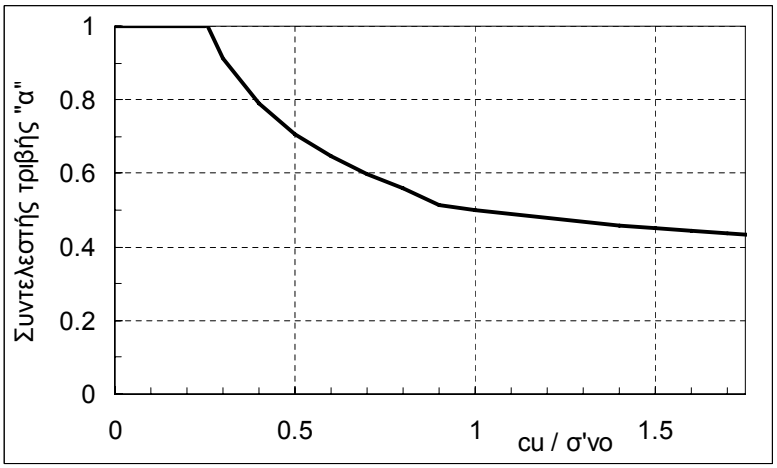
$c_u$ = αστράγγιστη διατμητική αντοχή της αργίλου στην περιοχή του $f_{su}$

Για : $\left(\dfrac{c_u}{\sigma'_{vo}}\right) \le 1 \quad \Rightarrow \quad \alpha = \min\left\{0.5\left(\dfrac{c_u}{\sigma'_{vo}}\right)^{-0.50} \;,\; 1.0\right\}$

Για : $\left(\dfrac{c_u}{\sigma'_{vo}}\right) > 1 \quad \Rightarrow \quad \alpha = \min\left\{0.5\left(\dfrac{c_u}{\sigma'_{vo}}\right)^{-0.25} \;,\; 1.0\right\}$

όπου :

$$\frac{c_u}{\sigma'_{vo}} = (0.2 \div 0.3)(OCR)^{0.78}$$




Παρατήρηση : Συνήθως, η αντοχή πασσάλων σε αργίλους αυξάνει με την πάροδο του χρόνου. Αρα, δυσμενέστερη είναι η αστράγγιστη (ταχεία) φόρτιση (φ=0).

Τιμές της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ($c_u$) προς την κατακόρυφη ενεργό τάση ($\sigma'_{vo}$) σε υπερ-στερεοποιημένες αργίλους (OCR = λόγος υπερ-στερεοποίησης)

Αποτελέσματα από δοκιμές απλής διάτμησης

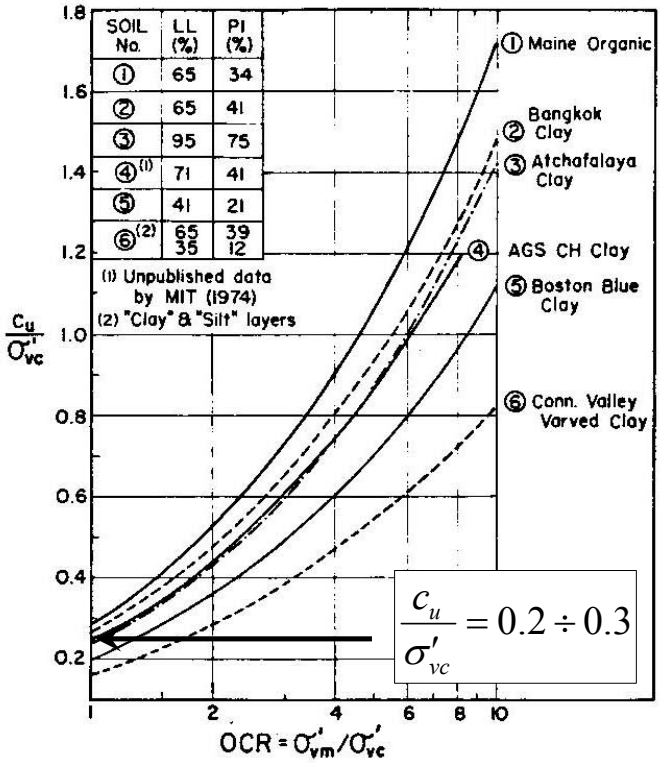
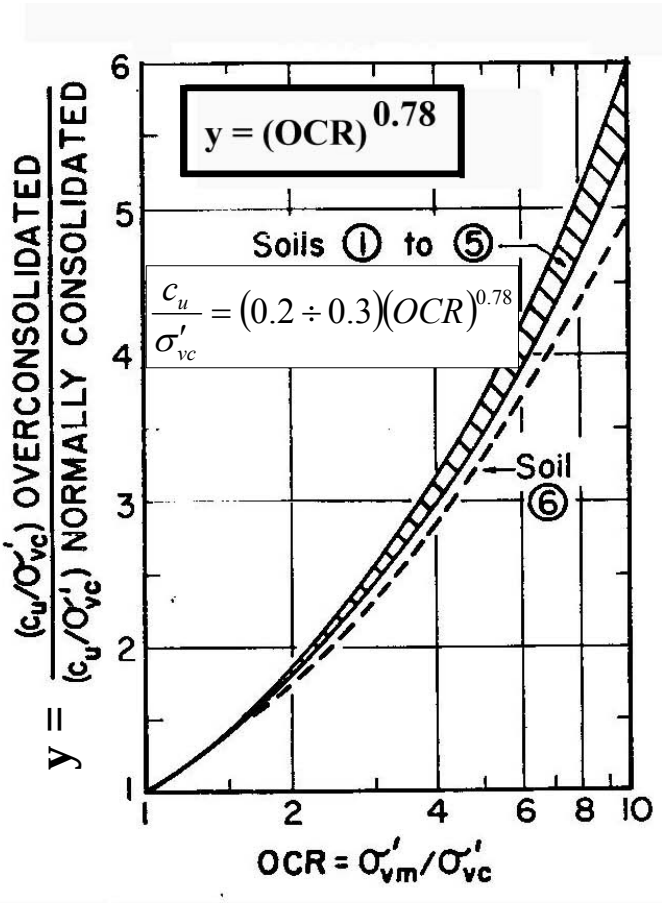


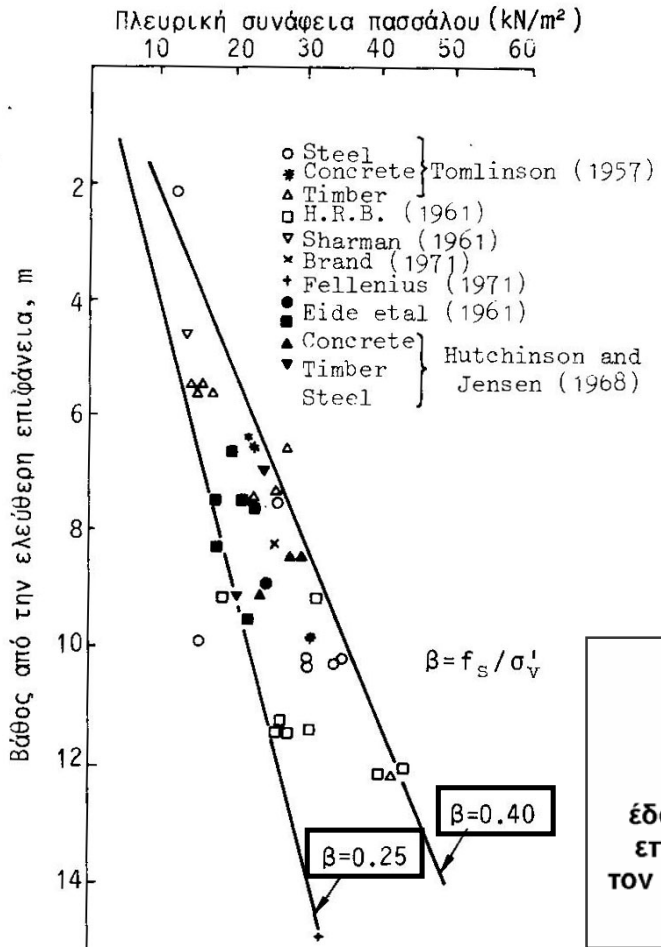

Fig 25 - Results CKUDSS Tests

after Ladd et al, 1977



## 2. Εκτίμηση οριακής πλευρικής τριβής ($f_{su}$) – Μακροχρόνια φόρτιση (φ≠0)

Οριακή πλευρική τριβή σε αργιλικά εδάφη υπό στραγγισμένες συνθήκες (φ ≠ 0) :




$$f_{su} = \beta\,\sigma'_v$$

Σε κανονικά στερεοποιημένες αργίλους :

$$\beta = 0.25 \div 0.40$$

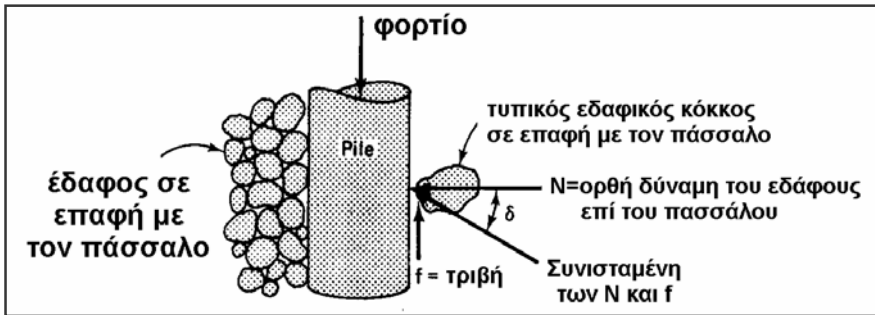
Σε υπερ-στερεοποιημένες αργίλους (OCR>1):

$$\beta = (0.25 \div 0.40)\sqrt{OCR}$$

$\sigma'_v$ = κατακόρυφη ενεργός τάση στο βάθος υπολογισμού του $f_{su}$

$$f_{su} = \sigma'_h \tan\delta = (K\,\sigma'_v)\tan\delta \Rightarrow$$

$$f_{su} = (K\tan\delta)\,\sigma'_v = \beta\,\sigma'_v$$




## 2. Εκτίμηση οριακής πλευρικής τριβής ($f_{su}$)

Μέθοδος του API (American Petroleum Institute) :

2.2 Οριακή πλευρική τριβή σε μή-συνεκτικά (αμμώδη) εδάφη και σε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη υπό στραγγισμένες συνθήκες :

$$f_{su} = K\,\sigma'_v \tan\delta$$

$\sigma'_v$ = κατακόρυφη ενεργός τάση στο βάθος υπολογισμού του $f_{su}$

δ = γωνία τριβής στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους.

K = συντελεστής οριζόντιας πίεσης γαιών.

Αργιλοι : $K = 1.5\,K_o = 1.5\,(1-\sin\varphi)\,(OCR)^{0.5}$ ($K_o$ = συντελ. ουδέτερης ώθησης)

Χαλαρές άμμοι : K = 0.5 – 0.8.

Μέσης πυκνότητας άμμοι :

K=0.8 για πασσάλους μικρής εκτόπισης (π.χ. ανοικτοί σωλήνες)

K=1 για πασσάλους μεγάλης εκτόπισης (πλήρους διατομής )

Πυκνές άμμοι : K = 1.2 – 1.75

Αλλες προτάσεις για τον συντελεστή K σε αμμώδη εδάφη (Broms, 1975) :

| Είδος πασσάλου | Σχετική πυκνότητα $D_r$ < 35% | Σχετική πυκνότητα $D_r$ > 65% |
|---|---|---|
| Μεγάλης εκτοπίσεως (εμπηγυόμενοι) | K = 1.0 | K = 2.0 |
| Μικρής εκτοπίσεως (π.χ. σωλήνες) | K = 0.5 | K = 1.0 |

## 2. Εκτίμηση οριακής πλευρικής τριβής ($f_{su}$)

Μέθοδος του API (American Petroleum Institute) :

2.2 Οριακή πλευρική τριβή σε μή-συνεκτικά (αμμώδη) εδάφη και σε συνεκτικά (αργιλικά) εδάφη υπό στραγγισμένες συνθήκες :

$$f_{su} = K\,\sigma'_v\,\tan\delta$$

δ = γωνία τριβής στη διεπιφάνεια χαλύβδινου πασσάλου εδάφους.

Σε αργίλους : δ = 15° - 20°

Σε άμμους :

| Είδος αμμώδους εδάφους | Συνιστώμενη τιμή του δ (°) | Μέγιστη οριακή πλευρική τριβή $f_{su,max}$ (kPa) |
|---|---|---|
| Πολύ χαλαρή άμμος – Χαλαρή αμμώδης ιλύς | 15 | 47.8 |
| Χαλαρή άμμος – Μέσης πυκνότητας αμμώδης ιλύς | 20 | 67.0 |
| Αμμος μέσης πυκνότητας – Πυκνή αμμώδης ιλύς | 25 | 81.3 |
| Πυκνή άμμος – Πολύ πυκνή αμμώδης ιλύς | 30 | 95.7 |
| Πολύ πυκνή άμμος – πυκνό αμμοχάλικο | 35 | 114.8 |

## 2. Εκτίμηση οριακής πλευρικής τριβής ($f_{su}$)

2.3 Οριακή πλευρική τριβή σε εδάφη με συνοχή και τριβή (συνεκτικά εδάφη υπό στραγγισμένες συνθήκες – φ ≠ 0 ) :

Μέθοδος Tomlinson : $$f_{su} = \alpha\,c' + K\,\sigma'_v\,\tan\delta$$

α = συντελεστής συνοχής

Μαλακές άργιλοι : α =1

Μέσης συνεκτικότητας άργιλοι : α = 0.75

Στιφρές και σκληρές άργιλοι : α = 0.50

c' = ενεργός συνοχή (συνήθως αμελείται λόγω διατάραξης της αργίλου στην περιφέρεια του πασσάλου)

K = συντελεστής οριζόντιας πίεσης γαιών

Μαλακές άργιλοι : K =0.50

Μέσης συνεκτικότητας άργιλοι : K = 0.75

Στιφρές και σκληρές άργιλοι : K = 1.00

$\sigma'_v$ = κατακόρυφη ενεργός τάση στο βάθος υπολογισμού του $f_{su}$

δ = γωνία τριβής στη διεπιφάνεια πασσάλου εδάφους.

Συνήθεις τιμές (φ = γωνία τριβής του εδάφους) :

Χαλύβδινοι πάσσαλοι : δ = 20° (άμμοι), δ = 15-20° (άργιλοι),

Προκατασκευασμένοι πάσσαλοι από σκυρόδεμα : δ = 0.5 φ